creative commons

COMMONS DEED

저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:

저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.

비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.

변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 이용허락규약(Legal Code)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

Disclaimer

dCollection

도시계획학박사학위논문

개별 차량 궤적 자료를 활용한 동적 운전 피로 및 과속 위험도 융합 분석

2021년 8월

서울대학교 대학원

환경계획학과

강 태 석

개별 차량 궤적 자료를 활용한 동적 운전 피로 및 과속 위험도 융합 분석

지도교수 이 영 인

이 논문을 도시계획학박사 학위논문으로 제출함
2021년 4월

서울대학교 대학원
환경계획학과
강 태 석

강태석의 박사 학위논문을 인준함
2021년 7월

위 원 장 _____

부위원장 _____

위 원 _____

위 원 _____

위 원 _____

국문초록

졸음운전과 과속은 고속도로 교통사고의 주요 발생원인이다. 특히, 두 요인에 의한 교통사고는 일반적인 사고보다 치사율이 2배에서 5배 높기 때문에 위험요소를 줄이기 위한 실질적인 대책이 필요하다. 교통안전 전문가들은 사고의 원인을 규명하고 예측력을 높이기 위한 모형개발 연구를 지속적으로 수행하고 있으며 괄목할 만한 성과를 보이고 있다. 또한 고속도로 운영자는 수십 년에 걸친 도로선형 개량, 기하구조 개선, 안전시설물 확대구축 등의 노력으로 현재 국내 고속도로망은 설계규정을 준수하는 안전한 교통체계를 갖추게 되었다. 그러나 지속적인 연구와 노력에도 불구하고 고속도로 사고건수는 최근 10년 동안 감소하지 않고 있으며, 자동차 1만 대당 사망자수는 OECD 국가 중 두 번째로 높은 수준이다. 그 원인은 교통사고의 주요 발생원인이 운전자 요인에 있기 때문이며 위험운전에 대한 사고예방 대책이 미흡하다는 반증이다. 효과적인 사고예방 대책을 마련하기 위해서는 피로한 운전자가 어느 도로구간에 많이 분포하는지, 실제 도로구간의 동적 과속행태는 어떠한지, 그리고 시간대에 따라서 사고위험성이 어떻게 달라지는지 등에 대한 상세한 정보가 필요하지만, 이를 체계적으로 분석할 수 있는 방법론은 아직까지 보고되지 않았다.

이러한 문제점에 착안하여, 본 연구는 실제 고속도로를 주행한 차량들의 GPS 궤적 자료를 기반으로 동적 운전 피로와 과속행태를 시·공간적으로 분석하고, 사고위험성을 평가할 수 있는 방법론을 개발하여 제안하였다. 또한 사고 자료와 통행행태의 관계를 분석하여 어느 시간대에 몇 시간 이상 주행할 때 운전자가 피로해지면서 위험운전을 하는지, 주행속도가 몇 km/시 이상일 때 사고위

험성이 높아지는지 등과 같은 실제 도로주행 환경의 안전정보를 도출하였다. 동적 운전 피로 및 과속행태에 대한 미시분석 접근방식은 지금까지 시도되지 않은 새로운 방법이며, 사고예방 대책 수립을 위한 의사결정에 활용할 수 있다.

운전 피로 및 과속 분석의 목적은 사고예방을 위한 도로구간의 위험도 평가이기 때문에 각 분석지표는 실제 사고를 잘 설명할 수 있어야 한다. 이에 서해안고속도로를 대상으로 분석지표들을 산정하고, 실제 사고에 대한 설명력을 분석하여 지표의 성능을 검증하였다. 또한 도로구간의 사고위험성을 평가할 수 있는 분석지표 활용방안을 다음과 같이 세 가지로 제시하였다. 첫째, 운전 피로와 과속 분석지표를 설명변수로 하는 사고예측 모형을 구축하여 도로구간의 사고위험성을 거시적인 측면에서 분석하였다. 각 분석지표별로 구축한 사고예측 모형들은 83.3%에서 85.6%으로 우수한 설명력을 가지는 것으로 나타났다. 이는 운전 피로나 과속 등의 미시적인 운전자 특성을 반영하지 않았던 선행연구들의 고속도로 사고예측 설명력이 60%를 넘지 못한다는 점을 고려할 때 상당히 높은 수준이다. 이 결과는 교통사고의 주요 발생원인이 운전 피로와 과속이라는 전문가들의 의견과 일치한다. 또한 운전자요인에 의한 사고가 70% 이상인 고속도로 교통사고를 더 잘 이해할 수 있는 계기를 제공하는 것이며, 적절한 대비책을 마련하기 위한 정책방향을 제시해줄 수 있는 결과이다.

둘째, 분석지표를 활용한 시·공간 위험노출맵을 작성하여 도로구간별 사고위험성을 더욱 정밀하게 평가할 수 있는 방안을 제시하였다. 본 연구에서는 1km 및 15분 단위로 세분화하여 위험노출맵을 작성하였으며, 도로운영자의 요구에 맞춰 단위를 조정할 수 있다. 피로 지표와 과속 지표로 작성한 위험노출맵을 살펴보면, 두 위험요인의 시·공간적 패턴이 다르게 나타난다. 이러한 위험패턴의

차이는 국가적인 토지이용와 통행활동에 밀접한 관련이 있다. 따라서 운전 피로와 과속에 의한 고속도로 교통사고는 전국 고속도로망과 토지이용에 기반하여 분석할 필요가 있다. 시·공간적 위험노출맵을 활용하여 개인 통신장치(스마트폰, 내비게이션 등)나 가변안내표지판(VMS) 등을 통해 고속도로 구간의 교통사고 위험도 정보를 효과적으로 제공할 수 있다.

마지막으로 개별 차량의 실시간 궤적을 이용하여 운전자의 피로도와 속도에 따른 사고위험성을 분석하는 방안을 제시하였다. 이 방안을 통해 도로를 주행하고 있는 위험차량을 실시간으로 탐지하여 위험정보를 직접적으로 제공할 수 있다. 일반적으로 운전자들은 자신의 피로수준을 무시하고 낮게 평가하는 경향이 있기 때문에 객관적인 위험정보를 안내하는 것이 중요하다. 또한 본 연구에서 제시한 동적 위험도 모니터링 방법은 도로의 유형에 관계없이 활용할 수 있다. 위험운전자에게는 내비게이션을 통해 본인의 객관적인 피로상태와 과속위험성을 안내하여 스스로 안전운전을 하도록 지원하며, 위험차량의 주변에서 통행 중인 운전자들에게도 전방에 설치된 VMS와 내비게이션을 통해서 해당 도로구간에 졸음운전을 하거나 과속 중인 차량이 있음을 안내하여 방어운전을 유도할 수 있다.

본 연구는 대용량의 개별 차량 궤적 자료를 이용하여 운전 피로와 과속을 시·공간적으로 모니터링할 수 있는 방법론을 개발하여 제시하였다. 본 연구의 괄목할 만한 분석결과는 고속도로 교통사고의 연구방향이 거시적인 주행여건(도로 기하구조, 교통상황, 날씨조건 등) 중심에서 미시적인 운전행태(운전 피로, 과속 등)로 변화되어야 함을 시사한다. 본 연구의 방법론을 통해 산정한 운전 피로와 과속 지표의 사고 설명력이 상당히 우수한 것으로 분석되었지만, 더욱 발전된 모빌리티 자료(자율주행차량 궤적 자료, 스마

트 모빌리티 궤적 자료, 차량-시설물 간 통신 궤적자료 등)를 연구에 활용하기 위한 다양한 시도가 필요하며, 동적 운전 피로와 과속행태를 미시적인 관점에서 모니터링하기 위한 고도화된 방법론이 계속해서 연구되어야 한다.

주요어 : 모빌리티 빅데이터, 개별 차량 궤적, 생리적 운전 피로, 동적 과속행태, 피로 및 과속 융합 분석, 교통사고 위험도, 실시간 모니터링
학 번 : 2015-30677

목 차

제1장 서론 ····· 1
제1절 연구의 배경 및 목적 ····· 1
1. 연구의 배경 ····· 1
2. 연구의 목적 ····· 4
제2절 연구의 범위 ····· 5
제3절 연구의 수행체계 ····· 6

제2장 이론 및 선행연구 고찰 ····· 8
제1절 사고예측 이론 및 연구 고찰 ····· 8
1. 사고예측 연구동향 ····· 8
2. 사고 자료의 특성 및 전통적 통계모형 ····· 9
3. 자료기반 기법 ····· 10
4. 사고요인 및 설명변수 ····· 11
5. 사고예측 연구의 문제점 및 시사점 ····· 13
제2절 운전 피로 관련 연구 고찰 ····· 14
1. 운전 피로의 정의 ····· 14
2. 피로의 요인 및 측정방법 ····· 15
3. 운전 피로 구성요소 ····· 17
4. 피로 관련 연구의 한계 및 문제점 ····· 20
5. 피로 관련 연구 고찰 시사점 ····· 21
제3절 과속 관련 연구 고찰 ····· 22
1. 개요 ····· 22
2. 집계 속도자료를 활용한 연구 ····· 23
3. 비집계 속도자료를 활용한 연구 ····· 24

4. 과속행태 분석 연구 ····· 25
5. 과속 관련 연구의 한계 및 문제점 ····· 27
6. 과속 관련 연구 고찰 시사점 ····· 28
제4절 본 연구의 차별성 및 기여도 ····· 31
1. 연구의 차별성 ····· 31
2. 연구의 기여도 ····· 33

제3장 분석자료 구축 및 특성 분석 ····· 35
제1절 자료 구축 개요 ····· 35
1. 분석 활용자료 선정 ····· 35
2. 자료의 내용 및 범위 ····· 36
제2절 차량 GPS 궤적 자료 구축 ····· 37
제3절 생리적 운전 피로 자료 구축 ····· 41
1. 운전 피로 측정모형 선정 ····· 41
2. 생리적 운전 피로 자료 구축 방법 ····· 43
제4절 교통량 및 사고 자료 구축 ····· 48
제5절 분석 제외구간 설정 ····· 52
1. 과속단속지점 상·하류부의 변속 영향구간 분석 ····· 52
2. 휴게소 및 졸음쉼터 영향구간 설정 ····· 56
제6절 수집자료 특성 분석 ····· 57
1. 개별 차량의 시·공간 속도 특성 ····· 57
2. 개별 차량의 속도분포 특성 ····· 60
3. 시간대별 속도분포 특성 ····· 61
4. 생리적 운전 피로 특성 ····· 62
5. 피로도와 속도의 관계 분석 ····· 64
6. 평일 및 주말의 통행특성 분석 ····· 67

제4장 운전 피로 및 과속 분석 방법론 개발 ····· 68

제1절 운전 피로 분석 방법론 ····· 68
1. 운전 피로 분석 방법 정립 ····· 68
2. 운전 피로 분석 대상구간 및 입·출력 변수 정의 ····· 74
3. 시간적 피로 분석 방법론 ····· 77
4. 공간적 피로 분석 방법론 ····· 81
제2절 미시적 차량 궤적 기반 과속 분석 방법론 ····· 84
1. 과속 분석 방법 정립 ····· 84
2. 과속 분석 대상구간 및 입·출력 변수 정의 ····· 89
3. 시간적 과속 분석 방법론 ····· 92
4. 공간적 과속 분석 방법론 ····· 95
제3절 운전 피로·과속 융합 분석 방법론 ····· 98
1. 융합 분석 의의 ····· 98
2. 융합 분석 접근법 ····· 100
3. 시·공간적 피로과속교집합 노출도(TIE, SIE) 산정방법 ····· 101
4. 시·공간적 피로과속합집합 노출도(TUE, SUE) 산정방법 ··· 104
5. 피로과속 조합 노출도 산정 방법론 ····· 107
제4절 운전 피로 및 과속 분석 알고리즘 ····· 110

제5장 방법론 적용 및 교통사고 위험도 분석 ····· 112
제1절 적용 및 분석 개요 ····· 112
제2절 적용방법 설계 ····· 113
1. 분석지표 및 파라미터 설정 ····· 113
2. 평가지표 설정 ····· 114
제3절 안전한계피로도 및 안전한계속도 추정 ····· 115
1. 파라미터 추정 방법 ····· 115
2. 파라미터 추정 결과 ····· 117
3. 피로, 과속 사고위험 비중 분석결과 ····· 130
제4절 분석지표 산정 및 성능평가 ····· 132

1. 분석지표 산정 결과 ····· 132
2. 분석지표 성능평가 ····· 136
제5절 교통사고 위험도 분석 ····· 139
1. 교통사고 위험도 분석 개요 ····· 139
2. 위험도 분석 (1) 운전자 행태 기반 사고예측 모형 구축 ···· 140
3. 위험도 분석 (2) 시·공간 위험노출맵 ····· 149
4. 위험도 분석 (3) 개별 차량의 실시간 위험정보 ····· 162

제6장 결론 및 향후 연구 ····· 167
제1절 결론 ····· 167
제2절 향후 연구 ····· 169

참 고 문 헌 ····· 171

표 목 차

<표 2-1> 전통적 통계모형 및 자료기반 기법의 설명변수별 사용빈도 ····· 12
<표 2-2> 속도-사고 관계분석 연구 ····· 26

<표 3-1> 차량 GPS 궤적 자료 수집현황 ····· 39
<표 3-2> 피로도와 KSS 간 변환표 ····· 42
<표 3-3> 생체리듬 피로도 측정모형의 상수값 ····· 44
<표 3-4> 도로구간별 교통량 및 사고 자료(평일) ····· 50
<표 3-5> 도로구간별 교통량 및 사고 자료(주말) ····· 51
<표 3-6> 생리적 운전 피로 측정 시나리오 ····· 62
<표 3-7> 개별 차량의 운전지속시간과 속도의 상관분석 ····· 65

<표 4-1> 조합분석 유형 설계 ····· 109

<표 5-1> 피로도 지수에 따른 운전자 상태 분류 ····· 120
<표 5-2> 시·공간적 피로 노출도 및 과속 노출도 지표 산정결과 ····· 132
<표 5-3> 시·공간적 피로과속 융합 분석지표 산정결과 ····· 134
<표 5-4> 전체 분석지표의 사고 설명력 평가결과 ····· 136
<표 5-5> 사고예측 모형 변수 선정 ····· 141
<표 5-6> 사고예측 모형 변수 기술통계 ····· 142
<표 5-7> 사고예측 설명변수들의 상관분석 결과 ····· 142
<표 5-8> 모형 구축 단계별 변수 추정치 및 적합도(시간적 지표) ····· 144
<표 5-9> 모형 구축 단계별 변수 추정치 및 적합도(공간적 지표) ····· 145
<표 5-10> 시·공간적 피로과속 개별 분석지표 활용 모형 구축결과 ····· 146
<표 5-11> 시·공간적 피로과속 융합 분석지표 활용 모형 구축결과 ····· 147

그 림 목 차

<그림 1-1> 연구의 수행체계 ····· 7

<그림 2-1> 생체리듬에 따른 시간대별 안전운행능력 변화 ····· 18
<그림 2-2> 도로구간의 속도 빈도분포 : 평균속도 및 과속차량 ····· 29

<그림 3-1> 본 연구의 분석대상 구간 ····· 36
<그림 3-2> 차량 GPS 궤적과 도로선형 매칭 ····· 37
<그림 3-3> 분석용 차량 GPS 궤적 자료 예시 ····· 38
<그림 3-4> 차량 GPS 궤적 시점별 속성정보 정의 ····· 40
<그림 3-5> 생체리듬에 따른 피로도 지수 ····· 45
<그림 3-6> 운전지속시간에 따른 피로도 지수 ····· 46
<그림 3-7> 휴식시간에 따른 회복 피로도 지수 ····· 47
<그림 3-8> 도로구간별 교통량 대비 사고율 변화 ····· 49
<그림 3-9> 과속단속지점 상류부 2km 구간의 개별 차량 속도 변화 ····· 53
<그림 3-10> 과속단속지점 하류부 2km 구간의 개별 차량 속도 변화 ····· 54
<그림 3-11> 과속단속지점 상·하류부 영향구간 분석 ····· 55
<그림 3-12> 휴게소 및 졸음쉼터 영향구간 ····· 56
<그림 3-13> 순간속도의 시·공간 변동(일반 유형) ····· 57
<그림 3-14> 순간속도의 시·공간 변동(과속 유형) ····· 58
<그림 3-15> 순간속도의 시·공간 변동(저속 유형) ····· 59
<그림 3-16> 개별 차량 속도분포 그래프 ····· 60
<그림 3-17> 시간대별 속도분포 그래프 ····· 61
<그림 3-18> 시나리오별 생리적 운전 피로 측정결과 ····· 62
<그림 3-19> 차량 GPS 궤적 피로도 빈도분포 ····· 63
<그림 3-20> 차량별 운전지속시간과 속도의 상관관계 빈도분포 ····· 65
<그림 3-21> 운전지속시간과 속도의 관계 ····· 66
<그림 3-22> 평일 및 주말의 통행시간과 통행거리 분포 ····· 67

<그림 4-1> 도로구간별 운전지속시간 분포 다양성 ····· 69
<그림 4-2> 시간대별 졸음운전사고 및 생체리듬 피로도 비교 ····· 70
<그림 4-3> 안전한계피로도에 따른 피로 노출도 ····· 72
<그림 4-4> 시·공간 관점에 따른 피로 노출도 차이 ····· 73
<그림 4-5> 피로 분석 대상구간 정의 및 개념도 ····· 74
<그림 4-6> 피로 분석 입·출력 변수 정의 ····· 76
<그림 4-7> 차량별 피로 운전시간 산정 개념도 ····· 78
<그림 4-8> 시간대별 집계 가중치 산정 개념 ····· 79
<그림 4-9> 차량별 피로 운전거리 산정 개념도 ····· 82
<그림 4-10> 속도의 동적 변화(roller coaster) 특성 ····· 85
<그림 4-11> 안전한계속도에 따른 과속 노출도 ····· 86
<그림 4-12> 시·공간 관점에 따른 과속 노출도 차이 ····· 88
<그림 4-13> 과속 분석 대상구간 정의 및 개념도 ····· 89
<그림 4-14> 과속 분석 입·출력 변수 정의 ····· 91
<그림 4-15> 차량별 과속 통행시간 산정 개념도 ····· 92
<그림 4-16> 차량별 과속 통행거리 산정 개념도 ····· 95
<그림 4-17> 차량속도에 따른 피로 노출도 변화 ····· 99
<그림 4-18> 시·공간적 피로과속교집합 노출도 산정 개념도 ····· 101
<그림 4-19> 시·공간적 피로과속합집합 노출도 산정 개념도 ····· 104
<그림 4-20> 피로과속 조합 노출도의 개념 ····· 107
<그림 4-21> 조합비율 변화에 따른 피로 및 과속 노출도 비중 변화 ····· 108
<그림 4-22> 운전 피로 및 과속 분석 알고리즘 ····· 111

<그림 5-1> 방법론 적용 및 교통사고 위험도 분석 과정 ····· 112
<그림 5-2> 분석지표 및 파라미터 설정 ····· 113
<그림 5-3> 피로 분석 파라미터 추정결과 ····· 117
<그림 5-4> 안전한계피로도에 따른 SFE 지표의 설명력 변화 ····· 118
<그림 5-5> SFE 지표와 사고율(peak 1) ····· 118
<그림 5-6> SFE 지표와 사고율(peak 2) ····· 119
<그림 5-7> SFE 지표와 사고율(peak 3) ····· 119
<그림 5-8> 과속 분석 파라미터 추정결과 ····· 121

<그림 5-9> 피로과속 교집합분석 파라미터 추정결과 ····· 123
<그림 5-10> 파라미터를 이용한 운전 피로단계 정의 ····· 125
<그림 5-11> 피로과속 합집합분석 파라미터 추정결과 ····· 127
<그림 5-12> 분석지표별 파라미터 추정결과 ····· 129
<그림 5-13> 피로·과속 사고위험 비중 분석결과 ····· 130
<그림 5-14> 피로·과속 사고위험 비중의 시·공간적 비교 ····· 131
<그림 5-15> 개별 분석지표 성능평가 결과 ····· 137
<그림 5-16> 융합 분석지표 성능평가 결과 ····· 138
<그림 5-17> 교통사고 위험도 분석 개요 ····· 139
<그림 5-18> 운전 피로 위험노출맵(평일) ····· 150
<그림 5-19> 운전 피로 위험노출맵(주말) ····· 151
<그림 5-20> 과속 위험노출맵(평일) ····· 153
<그림 5-21> 과속 위험노출맵(주말) ····· 154
<그림 5-22> 피로 및 과속 위험노출맵(평일) ····· 156
<그림 5-23> 피로 및 과속 위험노출맵(주말) ····· 157
<그림 5-24> 피로 또는 과속 위험노출맵(평일) ····· 159
<그림 5-25> 피로 또는 과속 위험노출맵(주말) ····· 160
<그림 5-26> 위험노출도에 따른 위험정보 제공 대상 ····· 162
<그림 5-27> 개별 차량 실시간 위험상태 정의 ····· 163
<그림 5-28> 개별 차량 실시간 위험도 (1) 안전운전 사례 ····· 164
<그림 5-29> 개별 차량 실시간 위험도 (2) 과속사고위험 사례 ····· 165
<그림 5-30> 개별 차량 실시간 위험도 (3) 졸음사고위험 사례 ····· 165
<그림 5-31> 개별 차량 실시간 위험도 (4) 졸음 및 과속사고위험 사례 ···· 166

제1장 서론

제1절 연구의 배경 및 목적

1. 연구의 배경

교통은 '편리한 이동권'을 제공하지만, 반대급부로 '교통사고'를 동반한다. 2019년의 교통사고 사망자 수는 3,349명에 달한다. 과거 2010년의 사망자 수가 5,505명이었던 것과 비교하면 10년 동안 약 60.8% 수준으로 감소하였지만, 자동차 1만 대당 사망자 수는 여전히 OECD 국가 중 두 번째로 높은 수준이다. 더욱이 2020년 사망인구가 출생인구보다 많아 실질적인 인구 감소 문제에 직면한 국내 상황에서 교통안전은 중요하게 고려되어야 할 요소이다. 2019년 전국에서 발생된 1,292,864건의 사고 중 고속도로 사고건수는 14,605건으로 전체의 1.1% 수준이다. 그러나 사망자수는 전국 3,349명 중 206명으로 전체의 6.2%를 차지한다. 이처럼 고속도로 사고는 치사율이 높기 때문에 고속도로의 교통안전을 확보하는 것이 더욱 중요한 이슈이다.

교통은 기본적으로 사람과 차량, 도로환경의 3요소로 구성되며, 교통사고의 원인도 인적요인과 차량요인, 도로환경요인이 개별적 또는 유기적으로 결합되면서 발생한다. 우리나라는 1999년 8월 '도로의 구조·시설 기준에 관한 규칙[국토교통부령 제206호]'을 제정하였다. 그 이후로 도로설계요소별 기준에 따라 지속적으로 기하구조 개선(선형개량 등)과 안전시설물을 설치하면서 고속도로 설계구조를 획일화하였다. 또한 자동차 제조 및 정비기술이 발달하면서 차량의 구조적 결함이나 정비불량에 기인한 사고가 획기적으로 줄어들었다. 도로환경 개선과 차량기술의 발전에 따라 고속도로 사고 발생건수는 1999년 7,598건에서 2007년 3,661건으로 절반 이상 감소하였다(도로교통공단, 교통사고 통계분석, 각 연도). 그러나 2007년 이후로 사고는 더이상 감소하지 않고 있으며, 오히려 2019년 4,223건으로 다소 증

가하였다. 특히, 2015년부터 2019년까지의 고속도로 사고통계를 살펴보면 인적요인에 의한 사고가 전체 중에서 73.7%를 차지하는 것으로 나타났다. 따라서 앞으로 고속도로 교통사고를 실질적으로 감소시키기 위해서는 인적요인에 의한 사고를 어떻게 예방할 것인가에 초점을 맞춰야 할 것이다.

고속도로 교통사고는 대부분 운전자의 생리적 상태(졸음)와 운전습관(과속 및 전방주시태만)에 의해 발생한다. 고속도로 사고통계(2015-2019)의 사고원인별 발생건수 기준으로는 전방주시태만이 24.0%로 가장 높고, 과속이 23.2%, 졸음이 12.8% 순으로 나타났다. 사망자수 기준으로는 전방주시태만과 졸음운전으로 인한 사망자수가 각각 34.5% 및 33.1%, 그리고 과속이 11.9%로 나타났다. 여기서, 전방주시태만은 기기조작(내비게이션, 스마트폰 등) 뿐만 아니라 피로로 인해 긴장이 풀린 상태로 운전하면서 주변 상황을 제대로 인지하지 못한 상태에서 발생된 사고를 포함하므로 결국 피로와 과속을 사고의 주요 원인으로 볼 수 있다.

졸음운전 사고는 운전을 지속하면서 피로가 누적되고(task-related fatigue), 이에 따라 집중력과 반응속도가 저하되면서 발생된다. 특히 피로가 심한 경우에는 마이크로수면(microsleep) 상태(깨어있던 상태에서 1-30초간의 순간적 수면상태)가 되면서 더욱 위험한 사고로 이어질 수 있다. 게다가 고속도로와 같이 주행속도가 높고 도로의 선형변화가 적은 단조로운 구간에서 운전할 때에는 반복적인 청각의 자극과 운전의 지루함으로 인해 피로가 더 빠르게 누적된다(Royal et al., 2003). 피로한 운전자는 목적지까지 빨리 도착하기 위해 속도를 다소 높이는 경향이 있으며(Ranney et al., 1999), 속도의 제어능력이 떨어지면서 브레이크를 자주 밟고 속도변동폭이 증가하여 사고위험성을 높인다. 한국도로공사는 고속도로 졸음사고를 예방하기 위해 휴게소 간 간격이 큰 구간을 중심으로 졸음쉼터를 설치하고, 전광판과 현수막 등 다양한 방법으로 운전자의 경각심을 일깨우기 위한 문구를 홍보하고 있다. 그 결과, 졸음사고 건수와 사망자수가 각각 9%, 33% 감소되는 긍정적인 효과가 나타났다. 한편, 도로운영자의 입장에서 실제 도로이용자들의 피로수준에 대한 정보는 매우 부족한 상황이다. 진출입영업소 정보를 이용하여 대략적인 통행거리와 통행시간은 유추할 수 있지만 고속도로망 내로 한정되며, 피로한 상태의 운

전자가 어느 도로구간에 얼마나 분포하는지 알 수 있는 방법이 없다. 즉, 실질적인 사고예방대책을 마련하기 위한 정보가 부족한 실정이다.

과속은 일반적으로 개인의 운전성향과 습관에 따르기 때문에 운영자가 이를 제어하기 어렵다. 따라서 사고위험성이 높은 지점에 과속단속카메라를 설치하여 법적으로 과속을 저지하고 있다. 지점단속시스템은 해당 지점에서 속도를 낮추는 성과를 보였지만, 그 주변에서만 잠시 속도를 낮추는 일명 캥거루 운전이 일상적으로 이뤄지고 있다. 그 결과, 단속지점에 접근하면서 급감속하는 차량에 의해 사고가 발생될 가능성도 존재한다. 이러한 지점단속의 한계를 극복하기 위해 구간단속시스템을 확대하는 방향으로 나아가고 있다. 구간단속은 정해진 구간 내에서 제한속도 수준으로 정속주행하도록 강제하기 때문에 과속과 속도편차를 모두 감소시킬 수 있어 안전측면에서 긍정적인 효과를 기대할 수 있다. 그러나 이러한 강제력은 운전자에게 심리적인 압박감을 줄 수 있으며 구간단속을 무분별하게 확대할 경우 사회적 반향을 불러올 수 있다. 따라서 실제 도로구간의 과속행태를 기반으로 사고위험성을 평가하여 적정한 위치를 선정해야 한다.

국내에 ITS가 도입된 이후로 교통정보를 자동으로 수집할 수 있는 차량검지기(루프검지기, 레이더검지기 등)가 전국적으로 설치되었다. 이에 따라 교통안전분야에서도 교통정보를 활용한 연구가 활발히 진행되고 있다. 그러나 ITS 자료는 검지기가 설치된 지점을 통과한 차량들의 속도를 집계하여 수집하기 때문에 개별 차량 단위의 미시분석이 불가능하다는 한계가 있었다. 최근 GPS 기술이 발달하면서 차량 GPS 보급률이 꾸준히 증가하고 있어 신뢰할 만한 수준의 모빌리티 궤적정보를 수집할 수 있게 되었다. 특히 첨단 GPS 기술로 인해 차량이 주행한 궤적을 1초 단위로 더욱 정교하게 수집할 수 있게 되면서 속도를 시·공간적으로 상세하게 분석할 수 있는 기반이 조성되었다. 또한 내비게이션 기반의 모빌리티 자료는 차량의 기종점 간 궤적을 포함하고 있어 차량의 운전지속시간을 추출할 수 있다. 이러한 정보는 기존 교통정보수집체계에서는 수집하지 못한 것이며 교통연구 분야를 확장시킬 수 있는 기회를 제공해 주었다.

2. 연구의 목적

운전자의 피로와 과속은 고속도로 사고를 유발하는 주요 위험요소(hazard)이다. 본 연구는 첨단의 차량 GPS 궤적 자료를 이용하여 고속도로에 노출되어 있는 위험요소(피로 및 과속)를 도로구간별로 측정하고, 사고위험성을 평가할 수 있는 방법론을 개발하는 것을 주목적으로 한다. 연구의 주목적을 달성하기 위해서 과속 및 피로를 분석할 수 있는 세부 방법론을 개발하고자 하며, 이에 대한 세부 목적은 다음과 같이 네 가지로 정리된다.

첫째, 교통의 기본 요소 중 하나인 속도와 사고의 관계를 실질적인 사고위험성을 가진 과속의 관점에서 분석한다. 이를 통해 지금까지 의견이 분분한 속도-사고의 관계에 대한 새로운 시사점을 도출한다.

둘째, 대용량의 모빌리티 궤적 자료를 이용하여 인간의 생리를 기반으로 하는 피로도를 측정함으로써 그동안 운전지속시간만으로는 설명하지 못했던 졸음운전사고(새벽시간대와 이른 오후시간대에 높게 나타나는 현상)를 설명할 수 있는 분석 방법론을 개발한다.

셋째, 모빌리티 궤적의 장점(1초 단위 위치, 지점속도, 운전지속시간 등의 정보를 포함)을 활용하여 개별 차량 단위로 피로도와 과속을 동시에 측정하고 분석하여 지표화하는 방법론을 개발한다. 그리고 두 위험요소의 융합(피로한 상태에서 과속하는 경우, 피로하거나 또는 과속하는 경우 등)에 따른 사고위험성을 복합적으로 분석한다. 이 과정에서 사고위험성이 높아지는 피로도와 속도의 임계값(안전한계피로도, 안전한계속도)을 추정한다.

마지막으로, 피로·과속 분석지표를 시간과 공간의 관점으로 구분하여 산정한다. 차량의 이동은 기본적으로 시간과 거리로 표현되며, 지표의 활용목적에 따라 위험구간에 대한 정보가 필요하거나 위험에 노출되는 시간에 대한 정보가 필요할 수 있다. 분석지표 산정값은 두 관점에 따라 상반된 결과가 도출될 수 있기 때문에 더욱 정확한 안전진단을 하기 위해서는 시간과 공간의 관점을 모두 고려하는 것이 권장된다.

제2절 연구의 범위

본 연구의 시간적 범위는 2017년 10월 10일에서 11월 11일까지의 33일 동안의 기간으로 설정하였으며, 모빌리티 궤적 자료의 수집 및 가공은 1초 단위를 기준으로 하였다. 해당 기간은 평일(24일간) 및 주말(9일간)을 모두 포함하며, 공휴일이나 휴가철과 같은 특수한 날이 포함되지 않는 기간으로 선정하였다. 이는 본 연구에서 특수한 교통상황에 따른 교통류의 변동 영향을 최소화하고 일상적인 교통류 상황에서 분석지표를 개발·평가하기 위함이다.

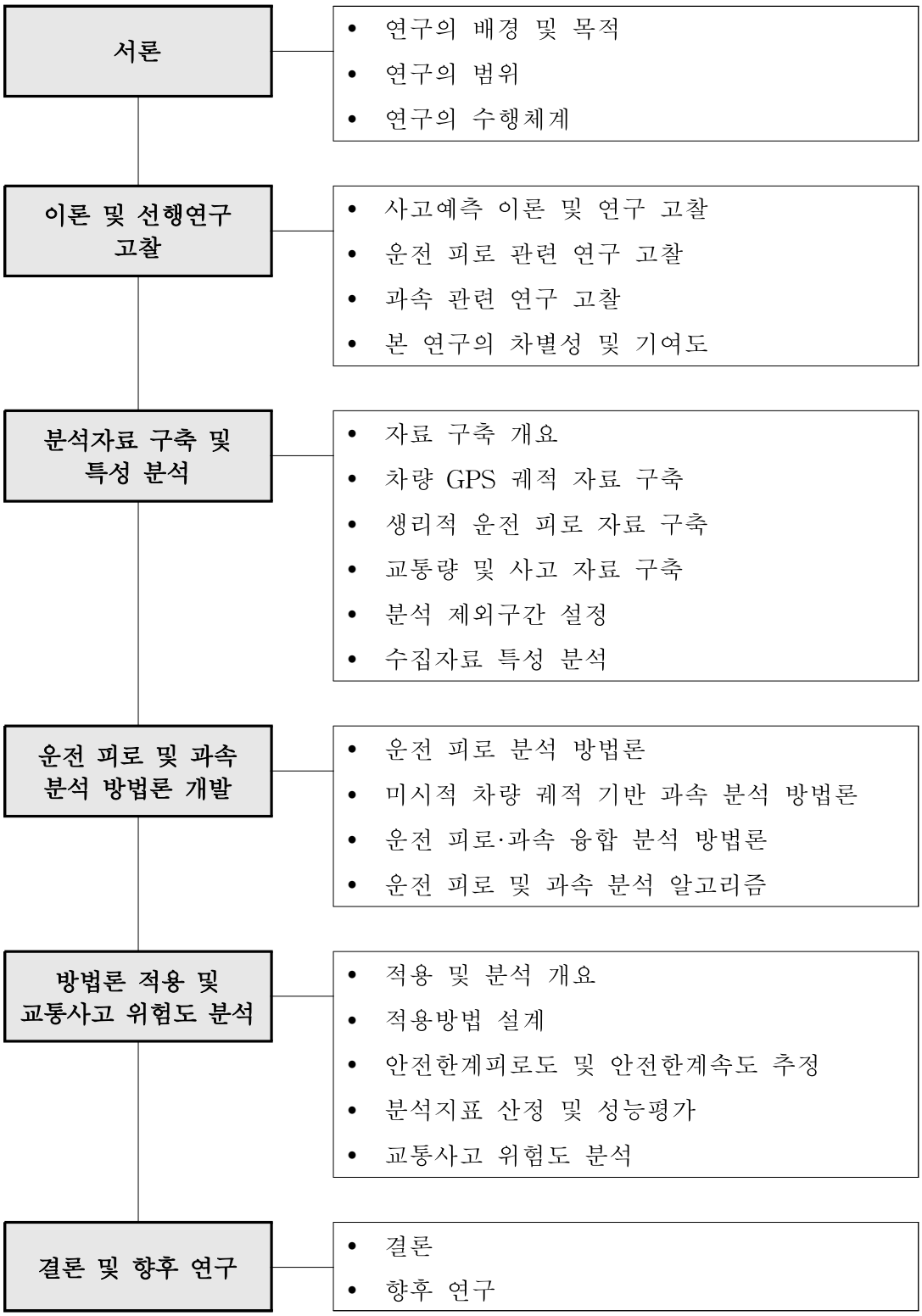
공간적 범위는 서해안고속도로 전체 구간인 금천 나들목(Interchange, 이하 IC)에서 죽림 분기점(Junction, 이하 JC)까지의 총 336.6km 구간으로 선정하였다. 구간 선정은 다음과 같은 세 가지 조건을 고려하였다. 첫째, 운전 피로도 지표는 운전지속시간을 주요 변수로 하기 때문에 연구 과정에서 운전지속시간에 따른 시·공간적 속도 변화를 분석할 수 있도록 장거리 통행이 다수 존재하는 구간을 선정한다. 둘째, 본 연구는 과속행태 분석이 주요 목표 중 하나이므로 상습정체가 적고 통행이 비교적 원활한 구간을 선정한다. 마지막으로 다른 고속도로와의 연계 및 대안 도로가 적은 구간을 선정한다. 이는 기종점에 따른 통행특성이 비교적 유사한 차량들을 기준으로 시·공간적 속도 특성을 분석하기 위함이다.

서해안고속도로 구간은 연평균일교통량(Annual Average Daily Traffic, 이하 AADT)이 1만 대에서 6만 대로 서울 근교의 일부 구간을 제외하면 상습정체가 발생하지 않는다. 또한 한반도의 서해안선을 따라 구축된 서해안고속도로의 지리적 특성상 도로 이용차량의 기종점은 비교적 단조롭다. 다시 말해, 서울에서 목포를 연결하는 서해안고속도로를 이용하는 차량은 대부분 서울 및 인천 등 수도권과 목포까지의 경로 내에 기종점이 존재할 가능성이 크다. 또한 대안 도로가 적기 때문에 장거리 통행자의 경우 중간에 다른 도로로 진출하지 않고 해당 구간을 이용할 확률이 크며, 따라서 운전지속시간에 따른 통행특성을 분석하기에 적합한 것으로 판단하였다.

제3절 연구의 수행체계

본 연구는 서론, 이론 및 선행연구 고찰, 분석자료 구축 및 특성 분석, 운전 피로 및 과속 분석 방법론 개발, 방법론 적용 및 교통사고 위험도 분석, 결론 및 향후 연구의 순서로 수행되며, 전체 수행체계는 <그림 1-1>과 같다.

제2장(이론 및 선행연구 고찰)에서 사고예측 이론과 선행연구 고찰을 통해 과거부터 이어지는 사고예측 연구의 흐름을 파악하고 연구자들이 지적하고 있는 문제점과 한계를 인지하여 현 시점에서 필요한 연구방향을 설정한다. 또한 최근 고속도로 사고의 주요 원인으로 알려진 졸음운전과 과속에 대한 선행연구를 고찰하여 연구동향을 파악하고, 시사점을 도출한다. 제3장(분석자료 구축 및 특성 분석)에서 비집계 기반의 피로·과속 분석을 위한 속성정보를 정의하고 DB 구조를 설계한다. 차량 GPS 궤적 자료와 생리적 운전 피로 자료를 구축하고 도로구간별 객관적 평가를 위한 분석지표를 산정할 수 있도록 분석구간을 정의한다. 또한 지표의 성능평가를 위한 사고 자료와 교통량 자료를 구축하며, 분석 방법론의 접근개념을 설정하기 위해 수집자료의 특성을 분석한다. 제4장(운전 피로 및 과속 분석 방법론 개발)은 본 연구의 핵심적인 부분으로서 실제 도로 이용차량들의 궤적 자료를 이용하여 운전자의 피로와 과속행태를 분석하고, 도로구간의 사고위험성 노출도 지표를 산정하는 방법론을 개발한다. 제5장(방법론 적용 및 교통사고 위험도 분석)에서 분석 방법론을 적용하고 평가할 수 있는 방법을 설계하고, 실제 사고위험성을 고려한 안전한계피로도 및 안전한계속도를 추정하여 피로 및 과속 분석지표를 산정한다. 그리고 각 분석지표의 산정 결과를 실제 사고율과 비교분석하여 사고 설명력을 검증한다. 마지막으로 거시적인 측면(도로구간별, 시간대별 분석)에서 미시적인 측면(개별 차량 실시간 분석)까지 실제 도로구간의 교통사고 위험도를 분석할 수 있는 분석지표의 활용방안을 제시한다. 제6장(결론 및 향후 연구)에서 현 시점에서 피로 및 과속에 대한 미시분석의 필요성과 본 연구에서 제시한 전반적인 방법론의 흐름을 정리하며, 향후 연구방향에 대해 논한다.



<그림 1-1> 연구의 수행체계

제2장 이론 및 선행연구 고찰

제1절 사고예측 이론 및 연구 고찰

1. 사고예측 연구동향

교통사고를 감축하고 안전을 확보하기 위하여 사고의 발생원인을 탐구하는 연구가 꾸준히 수행되고 있다. 사고 발생원인의 규명은 사고감축을 위한 정책의 대상을 명확히 하여 실질적인 효과를 내기 위한 선행조건이다. 모델링을 통한 사고예측은 교통안전 분야에서 중요하게 다뤄지고 있는 주제이며, 도로구간의 사고위험성을 나타내는 지표로 널리 사용되고 있다. 그러나 통계모형을 개발하고 적용하는 과정에서 고려해야 할 자료의 특성과 방법론적 문제가 존재한다. 모형을 추정할 때 나타나는 가장 일반적인 자료의 문제는 과대산포 및 과소산포, 낮은 표본평균 및 작은 표본크기, 누락된 사고정보 등이며 이로 인해 사고확률을 결정하는 요인과 관련하여 잘못된 예측으로 이어질 수 있다. 따라서 사고 자료의 특성을 면밀히 분석하고 적절한 통계모형을 선택하는 것이 중요하다.

한편, 그동안 사고발생 확률과 관련하여 인과관계를 더 명확히 분석할 수 있는 상세한 주행자료(가속도, 제동 및 조향정보, 운전자 반응 등)와 사고 자료(예를 들어, 블랙박스의 내용)는 수집이 불가능하였다. 결과적으로 연구자들은 특정 기간(주, 월, 연도 등) 동안 일부 지리적 공간(도로구간 또는 교차로)에서 발생된 사고의 다양한 영향요인을 찾아내기 위한 모델링에 초점을 맞춰왔고, 우수한 적합성 및 예측능력을 갖춘 모형이 개발되고 있다. 그러나 이러한 모델링의 혁신적인 발전에도 불구하고, 집계자료의 근본적 문제로 인해 개발될 수 있는 통계적 방법론에는 한계가 있었다(Lord and Mannering, 2010). 이 상황에서 상세한 비집계자료를 활용할 수 있게 되면 교통사고의 근본적인 인과관계에 대한 새로운 통찰력을 제공하여 새로운 연구방향이 제시될 수 있다.

2. 사고 자료의 특성 및 전통적 통계모형

일반적으로 알려진 사고 자료의 대표특성은 과대산포 및 과소산포, 낮은 표본평균과 작은 표본크기, 경미한 사고의 보고 누락 등으로 볼 수 있다. 사고예측 모형은 이들 특성을 해결하기 위한 방향으로 지속적으로 연구되었지만, 모든 모형에는 각각의 장단점이 존재한다.

사고 자료의 가장 보편적인 특징은 분산이 사고건수의 평균을 초과한다는 것이다. 이는 가장 기초적인 접근법인 포아송 회귀모형의 속성이 평균과 분산을 동등하게 제한하기 때문에 문제가 발생된다. 과도하게 분산된 데이터가 있을 때, 일반적인 포아송 모형으로 추정하면 편향되고 일관성 없는 매개변수를 추정하게 되며, 결국 사고발생 확률을 결정하는 요인에 대한 잘못된 추론으로 이어질 수 있다(Maycock and Hall, 1984; Miaou, 1994; Maher and Summersgill, 1996; Park and Lord, 2007).

사고 모델링에서 과대산포 문제를 극복하기 위하여 포아송 회귀모형은 음이항(포아송-감마) 모형으로 발전되었다(Lord et al., 2005). 이 모형은 매개변수가 감마분포를 따른다고 가정한다. 음이항 모형은 사고건수 모델링에서 가장 널리 사용되는 모형이지만, 여전히 과소산포된 자료를 처리할 수 없다는 한계를 가지고 있다(Lord, 2006). 사고건수의 평균값이 매우 낮은 경우에 평균이 분산보다 클 수 있으며, 이를 사고 자료의 과소산포 특징이라고 한다. 몇몇 연구결과로부터 과소산포된 자료의 경우에 전통적인 모형들(포아송, 음이항, 포아송-감마, 포아송-로그노멀, 음다항 모형)이 잘못된 매개변수를 추정한다는 것을 보여주었다(Oh et al., 2006; Lord et al., 2010).

자료수집은 상당한 비용을 필요로 하는 과정이기 때문에 사고 자료는 적은 수의 관측으로 수집되는 경우가 많다. 또한 사고가 거의 발생되지 않는 도로구간은 0건으로 기록될 수 있다. 이와 같은 작은 표본크기와 낮은 표본평균을 가진 사고 자료는 전통적인 모형에서 추정문제를 일으킬 수 있다. 즉, 사고건수의 분포가 0으로 과도하게 편향되어 매개변수가 잘못 추정될 수 있다(Lord and Mannering, 2010).

또한 경미한 사고는 사고 당사자들 간에 자체적으로 사고를 처리함으로써 경찰이나 보험사 등에 보고되지 않아 사고 자료에 기록되지 않을 가능성이 있으며, 잠재적으로 심각한 모델링 오류를 일으킬 수 있다(Elvik and Mysen, 1999). 사고의 심각성에 따라 누락되는 비율 또한 알려지지 않았으며, 이러한 사고의 과소보고로 인해 모형추정 과정에서 편향된 결과가 산정될 수 있음이 증명되었다(Kumara and Chin, 2005).

3. 자료기반 기법

전통적인 통계모형은 모형의 구조와 추정절차상 빅데이터를 처리하는데 어려움이 있다. 이에 최근에는 빅데이터를 이용하여 더 정확한 사고예측 모형을 개발하기 위하여 다양한 비회귀 자료기반 기법(non-regression data-driven method)이 적용되고 있다. 비회귀 기법의 종류는 사례기반(instance-based) 알고리즘(K-nearest neighbor, suppor vector machines), 정규화 알고리즘(the least absolute shrinkage and selection operator), 의사결정트리 알고리즘(classification and regression trees), 베이지안 네트워크, 클러스터링(K-means, expectations-maximization), 연관규칙 알고리즘, 인공신경망, 딥러닝, 차원감소 알고리즘, 결합 알고리즘, 특징선택 알고리즘, 강화학습, 자연어처리 등으로 상당히 많다.

사고분석에서 자료기반 기법을 사용한 사례를 살펴보면, 사고빈도와 심각한 사고를 예측하기 위해 서포트벡터머신이 사용된 바 있다(Li et al., 2008). 그리고 실시간 사고위험을 평가하기 위해 인공신경망(Abdelwahab and Abdel-Aty, 2001; Abdel-Aty and Pande, 2005; Chang, 2005; Delen et al., 2006), 서포트벡터머신(Yu and Abdel-Aty, 2013; Li et al., 2008), 베이지안 네트워크(Hossain and Muromachi, 2012; Sun and Sun, 2015), 분류 및 회귀트리와 계층트리기반 회귀(Karlaftis and Golias, 2002), 베이지안신경망(Riviere et al., 2006; Xie et al., 2007), 심층신뢰망(Pan et al., 2017) 등 다양한 종류의 자료기반 기법이 사용되고 있다.

이와 같은 자료기반 기법은 예측의 정확성 측면에서 뛰어난 장점이 있지만, 중간 과정에 대한 정보를 알 수 없기 때문에 특정 요소가 예측에 어떠한 영향을 미치는지 인과관계를 밝히고 실질적으로 추론하지 못한다는 점이 한계점으로 알려져 있다(Mannering et al., 2020).

4. 사고요인 및 설명변수

교통사고는 운전자 특성, 도로 기하구조, 교통량, 차량 및 환경과 관련된 수많은 요인들의 복합적인 작용에 의해 발생된다. 이러한 변수가 사고발생에 미치는 영향의 비중은 사례마다 모두 다르지만, 일반적으로 운전자의 실수와 관련된 행동요인과 도로 기하구조, 교통류 상태, 차량 및 환경과 관련된 비행동요인 모두 교통사고에 중대한 영향을 미친다(Caliendo et al., 2007). 연구에 따르면 교통사고 발생에 영향을 미치는 위험요소는 일반적으로 다음과 같이 6개의 주요 그룹으로 나눌 수 있다(Greibe, 2003; Abdulhafedh, 2016). 그리고 사고예측을 위해 개발된 전통적 통계모형과 자료기반 기법에서 사용된 변수는 <표 2-1>과 같이 요약되며, 특히 운전자 특성 중 운전 피로(졸음) 및 과속과 관련된 설명변수를 사용한 연구는 전무한 것으로 나타났다.

1) 도로특성 : 도로연장, 평면선형 및 종단선형, 길어깨폭, 차로폭, 차로수, 경사, 시거, 중앙분리대 유무, 교차로 유무, 노면상태
2) 교통류 : 교통량(AADT, 단위시간 교통량 등), 중차량비율, 밀도, 차량속도(지점평균속도, 개별 차량속도 등), 제한속도
3) 환경요인: 기상조건, 조도(밝기)
4) 시간요인 : 연중 계절, 연중 월, 요일, 시
5) 차량요소 : 차량유형, 차량성능에 대한 안전설계기준
6) 운전자 행동 : 음주 및 약물 사용, 무분별한 운전(과속 및 차로이탈 등), 안전벨트 미착용, 휴대폰이나 문자 사용, 피로 및 졸음

<표 2-1> 전통적 통계모형 및 자료기반 기법의 설명변수별 사용빈도

(단위 : 회)

그룹	요소	전통적 통계모형	자료기반 기법	전체 모형
도로특성	도로연장	10	5	15
	평면선형	9	5	14
	종단선형	6	2	8
	길어깨폭	7	5	12
	차로폭	5	4	9
	차로수	4	4	8
	경사	5	1	6
	노면상태	2	3	5
	시거	5	0	5
	중앙분리대 유무	4	1	5
	교차로 유무	3	1	4
교통류	교통량 (AADT 포함)	15	8	23
	중차량비율	3	3	6
	밀도	3	4	7
	차량속도 (평균속도 포함)	2	6	8
	제한속도	5	0	5
환경	기상조건	4	4	8
	조도(밝기)	1	3	4
시간요인	시(hour)	2	1	3
차량요소	차량유형	0	3	3
운전자 특성	음주	0	1	1
	운전실수	0	1	1
	피로, 과속	0	0	0

주) 전통적 통계모형(모형의 종류 무관)을 사용한 17개의 연구 및 자료기반 기법을 사용한 14개의 연구에서 고려한 설명변수들의 사용빈도임

5. 사고예측 연구의 문제점 및 시사점

지금까지 수행된 연구들은 주로 사고예측 정확도를 높이기 위한 새로운 모형 개발에 초점을 맞춰왔다. 그러나 연구마다 사용한 사고 자료의 범위와 특성이 다르고, 통계모형별 특징에 따라 예측의 정확도가 달라지며, 시·공간 범위에 따라 적합도가 달라질 수 있다. 또한 모형이 발전할수록 모형의 구조가 복잡하기 때문에 적용이 어려워진다(Mannering et al., 2016). 전통적인 사고예측 모형은 적용하기 쉬운 장점을 가지고 있지만, 예측 정확도가 비교적 낮고 인과관계에 대한 통찰력이 다소 부족한 한계가 있다. 반면, 자료기반기법은 예측력이 높지만 결과의 해석과 적용에 있어 인과관계를 확인하기 어려운 근본적인 한계가 치명적으로 작용한다. 따라서 여러 분석 방법들의 장점과 한계를 명확히 파악하고, 연구의 목적과 자료의 수준에 부합하는 방법을 선택해야 한다.

선행연구 고찰결과, 그동안의 사고예측 연구들은 주로 도로특성, 교통량, 평균속도 등을 설명변수로 사용하였으며 운전자 특성은 고려하지 못하였다. 운전자 특성을 설명변수로 사용하기 위해서는 개별 차량 단위의 동적 주행자료를 수집하거나 별도의 조사가 필요하기 때문에 도로구간의 사고확률을 예측하는 거시분석에서 운전자 특성을 반영하기 어려웠다.

사고예측의 정확도를 높일 수 있는 가장 효과적인 방법은 인과관계가 높은 설명변수를 발굴해내는 것이다. 교통안전 분야에서 '가장 이상적인 모형'은 인과관계를 밝혀내고 탁월한 예측능력을 가지며 빅데이터로 확장가능한 모형이다(Mannering et al., 2020). 현대의 교통사고는 인적요인(운전자 특성)에 의한 사고가 가장 큰 비중을 차지한다. 따라서 인적요인을 설명할 수 있는 변수가 반영되지 않는 이상 최신의 고도화된 모형을 적용하더라도 사고예측의 정확성에는 한계가 존재한다(Caliendo et al., 2007). 차량 GPS 궤적은 개별 차량의 속도와 가속도, 통행시간과 운전지속시간 등 동적 주행특성을 포함하는 자료이므로 사고예측 연구에서 그동안 고려하지 못했던 운전자 특성(즉, 과속 및 피로)을 설명변수로 반영할 수 있는 기회를 제공한다(Mannering and Bhat, 2014).

제2절 운전 피로 관련 연구 고찰

1. 운전 피로의 정의

운전자의 피로는 고속도로 사고의 주요 발생원인 중 하나이다(Dinges, 1995; Horne and Reyner, 1995). '피로'는 추상적인 개념이기 때문에 관점에 따라 조금씩 다른 의미로 해석되기도 한다. 먼저 사전적 정의는 '연속 및 반복되는 정신적, 육체적 작업에 수반해서 발생하는 심신기능의 저하상태'를 의미한다(두산백과). 즉 지속적인 업무에 의한 인체기능의 저하로 볼 수 있다. 그리고 개인의 주관적 입장에서 피로는 '피곤하거나 졸리거나 지치는 것을 느끼는 상태', '신체 및 인지 기능 저하와 관련된 피곤함'을 의미하며(Brown, 1995), 활동의 관점에서는 '업무 능력의 감소와 주의력, 지각, 의사결정 및 기술수행의 감소 가능성'과 같이 표현된다(Gawron et al., 2000). 관점에 따라 강조하는 부분은 다르지만 공통적인 맥락은 사전적 정의에 함축되어 있다.

교통과 관련해서 운전 피로의 정의를 다시 정리해보면, '연속적인 운전에 수반해서 발생하는 안전운행능력의 저하상태'와 같다(Phillips, 2015). 여기서 안전운행능력이란 맑은 정신으로 안전운전을 할 수 있는 능력을 의미한다. 즉, 안전운행능력이 저하된다는 것은 위험운전행태(잦은 감가속, 차로이탈, 속도 증가 등)와 생체적인 피로(눈의 깜빡임, 고개 끄덕임 등), 그리고 두뇌의 피로(인지 및 반응시간 증가)로 인해 사고위험성이 높아짐을 뜻한다. 여기서 중요한 점은 생체적인 피로는 스트레칭이나 짧은 운동을 통해 잠시나마 회복이 가능한 반면, 두뇌의 피로는 수면을 통해서만 회복할 수 있다는 점이다(Horne and Reyner, 2001). 고속도로 운전은 특히, 고속주행을 하기 때문에 고도의 집중력을 필요로 하면서도 단조로운 주행환경으로 인해 피로(task-related fatigue)가 더욱 빠르게 누적된다(Kaduk et al., 2020; Ting et al., 2008). 그리고 누적된 피로로 인한 안전운행능력의 저하는 인지능력과 반응속도의 감소로 이어

져 사고가 발생될 수 있으므로 피로를 제어하는 것은 매우 중요하다.

인간의 일상생활에서 피로수준은 크게 '피로하지 않은 정상상태(alert state)'와 '피로한 상태(fatigued state)', 그리고 '졸음상태(drowsy state)'로 구분하여 일련의 단계적 변화를 설명할 수 있다(Borghini et al., 2014). 이 단계적 변화는 운전 중에도 동일하게 적용될 수 있다. 숙면을 취한 후 운전을 하면 맑은 정신의 정상상태로 운전을 한다. 그리고 얼마간 운전을 지속하면서 점차 피로함을 느끼게 되고, 눈꺼풀이 무거워지는 졸음상태까지 단계적으로 변화한다. 이와 같은 피로수준의 변화는 고속도로 시뮬레이션 주행실험에서도 증명되었다(Guo et al., 2016). 실험에서 운전지속시간의 증가에 따른 알파파와 베타파 등 뇌파의 변화를 측정한 결과, 개인마다 시간적 차이는 있지만 정상상태-피로상태-졸음상태의 단계적 변화가 관찰되었다. 구체적인 결과를 보면, 약 140분간 주행했을 때 일순간 급격한 피로를 느끼면서 졸음을 깨기 위한 노력을 하면서 잠시 안정을 되찾았다. 그러나 3시간 이상 주행하면서 뇌파가 급격한 변화를 보이며 더이상 운전하기 어려운 졸음상태에 도달했다.

피로가 누적됨에 따라 운전의 위험성은 다음과 같이 변화한다. 피로상태가 되면 인지능력과 반응속도가 점차 감소되면서 부주의 또는 전방주시태만으로 인한 사고의 위험성이 증가한다. 이후 졸음상태에 이르면 모든 회피기동이 불가능해지면서 극도로 위험한 상태가 된다. 특히 마이크로수면(깨어있는 상태에서 1-30초 동안 깜빡 잠드는 것)의 경우 본인이 잠든 것조차 알아차리지 못하며, 계속해서 깨어있었거나 혹은 일시적으로 초점을 잃었다고 생각한다. 고속도로 주행 중에 마이크로수면을 경험할 경우 치명적인 사고로 이어질 가능성이 매우 높다.

2. 피로의 요인 및 측정방법

인간의 피로를 설명하기 위한 가장 중요한 요소는 수면이며, 과거부터 수면시간에 따른 피로 변화를 측정하기 위한 연구가 이뤄져 왔다. 수면모형의 기초는 2과정 모형(two-process model)이며, 최초의 연구는 쥐의

수면조절을 설명하기 위해 수립되었고(Borbely, 1980), 이후 인간의 수면에 적용되었다(Borbely, 1982). 이 수면모형은 전주기과정(homeostatic process)과 생체주기과정(circadian process)으로 구성되며, 두 과정이 상호작용하면서 피로도를 추정한다. 기본개념을 살펴보면, 전주기과정은 깨어있는 동안 상승하고 자는 동안 감소하는 피로도이며 사람마다 수면패턴이 달라 계속된 연구를 통해 발전하고 있다. 생체주기과정은 생체리듬으로 표현되며 24시간 일주기에 따른 순환과정을 의미한다. 두 과정의 상호작용은 빛의 노출시간이나 불면증과 같은 다양한 요인을 고려하면서 더욱 복잡해진다(Åkerstedt and Folkard, 1997; Klerman et al., 1996). 그러나 모형은 특정한 상태에서 수집한 자료를 기반으로 하므로 하나의 모형이 모든 상황을 다룰 수 없는 한계가 있다(Åkerstedt and Folkard, 1996; Kandelaars et al., 2006). 따라서 연구자는 요구되는 정보의 종류와 양을 고려하여 모형을 선택해야 한다(Klerman and St. Hilaire, 2007). 실생활에서 피로에 영향을 주는 요인은 기본적으로 내적요인과 외적요인으로 구분할 수 있다(Thiffault and Bergeron, 2003a). 내적요인은 신체기관으로부터 기인하며 생리적 상태에 따라 변화하는 특징을 가진다. 반면에, 외적요인은 수행업무 특성에 기반하는 피로이며 정신적, 신체적 활동을 지속하면서 누적되고 휴식(특히 수면)을 통해 회복할 수 있다(Philip et al., 2005).

피로도를 측정하는 방법은 크게 설문조사법과 생체신호측정법으로 구분할 수 있다. 설문조사법은 대표적으로 Karolinska Sleepiness Scale (이하, KSS)가 있으며, 조사자가 스스로 느끼는 피로수준을 판단하여 9점 척도로 기록하는 방법이다. 여기서 1점은 전혀 피로하지 않은 상태이고 9점은 가장 피로한 상태이며 중간 지수들은 단계적으로 피로가 누적되는 상태이다. KSS 지수는 다시 정상상태(1-5점), 정상/피로경계(6점), 피로상태(7-9점)과 같이 세 단계로 구분할 수 있다(Wang et al., 2018). 그리고 생체신호측정법 중 운전자를 대상으로 많이 사용되는 장비는 뇌파(EEG), 심전도(ECG), 근전도(EMG), 호흡 측정장치와 안구추적기 등이 있으며, 새로운 장비가 계속해서 개발되고 있다(Fu et al., 2016). 일

반적으로 운전 중 뇌의 피로를 측정하기는 어렵기 때문에 KSS 설문조사나 안구추적, 위험운전행태 등을 통해 운전자의 피로도를 대체측정하고 있다. 또한 피로도를 측정하기 위해서는 운전자의 생체신호를 측정할 수 있는 고가의 장비를 필요로 하기 때문에 시뮬레이션 주행이나 현장주행조사를 통한 소규모의 표본자료에 기반한다는 한계가 있다.

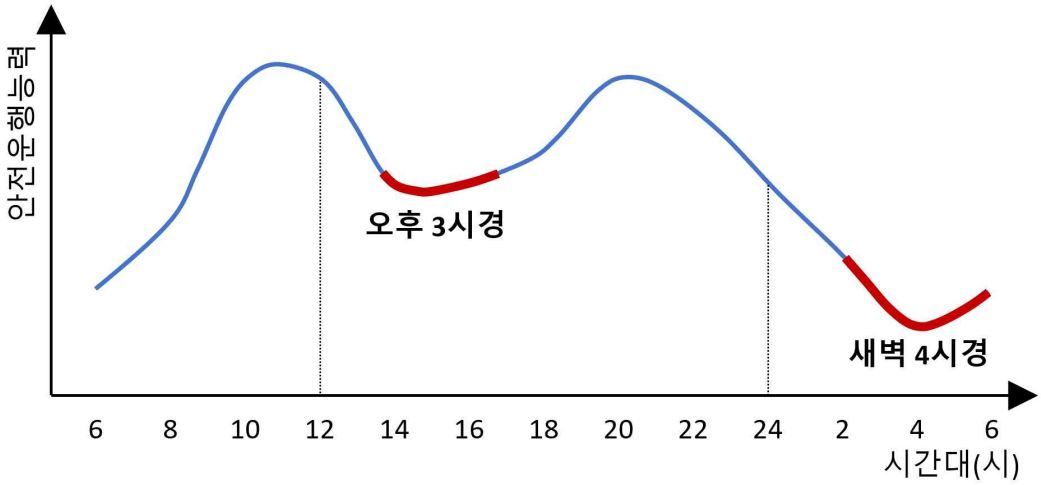
3. 운전 피로 구성요소

운전자의 피로를 구성하는 기본요소는 시간대별 생체리듬, 운전피로, 운전 중 휴식, 수면패턴(수면시작시각, 수면시간, 수면의 질 등) 등의 네 가지로 볼 수 있다. 이들 중 수면패턴을 확인하기 위해서는 개인에 대해 별도의 조사가 필요하며, 조사가 어려울 경우에는 평균적인 패턴을 가정하여 피로도를 추정할 수 있다(Riedy et al., 2020).

1) 시간대별 피로도(생체리듬)

생체리듬이 운전자의 피로에 큰 영향을 미친다는 사실은 수십 년 동안의 연구를 통해 입증되었다. 즉, 운전자의 경계심과 운전능력은 생체리듬에 따라 달라진다(Minkel and Dinges, 2009). 경찰 사고보고서의 통계분석 결과 늦은 밤부터 새벽 시간대에 사고가 많이 발생한다는 것이 발견되었다(Williams 1985). 특히 위험한 시기는 새벽 2시에서 5시 사이(Mitler et al., 1988) 또는 새벽 4시에서 6시 사이(Åkerstedt et al., 2001)인 것으로 확인되었다. 사고가 많이 발생하는 또다른 시간대는 정오 이후에 식곤증을 느끼는 시간대(오후 2시에서 5시 사이)로 관측되었다(Horne and Reyner, 1995; Mitler et al. 1988). 이와 같이 여러 선행연구들에서 보고된 시간대별 사고위험성을 반영하면 시간대에 따른 안전운행능력의 변화는 <그림 2-1>과 같이 표현된다(Kaduk et al., 2020). 그림에서 오전 2-5시, 오후 1-4시 시간대에는 생리적 피로에 의한 반응속도 저하 등으

로 안전운행능력이 악화되며, 이 시간대에 졸음운전으로 인한 사고가 더 높은 것으로 나타났다(Chipman and Jin, 2009; Horne and Reyner, 1995; Minkel and Dinges, 2009; Phillips, 2015; Sahayadhas et al., 2013).



자료: Kaduk et al. (2020)

<그림 2-1> 생체리듬에 따른 시간대별 안전운행능력 변화

2) 운전피로도

운전피로도는 운전자행동과 차량기동, 운행환경 등 다양한 측정을 기반으로 하는 복잡한 수학적 추정알고리즘이 제안되었다(Yang et al., 2010; Balkin et al., 2011; McDonald et al., 2018; Ji et al., 2006). Jovanis et al. (2012)는 운행일지를 분석해 4시간 동안 휴식을 취하지 않고 운전하면 운전자들이 피로해지고 사고 위험이 높아지는 것으로 분석했다. Jing et al. (2013) 또한 운전자 4명에 대한 생리정보를 기록한 뒤 6시간의 모의주행실험을 한 결과 235분(약 4시간)이 연속주행시간의 임계값이 되어야 한다고 보고했다. Lin et al. (1994)은 1,924건의 운전 이벤트를 분석한 결과 첫 4시간 동안 사고 위험이 낮은 것으로 나타났다. 그러나 그 위험은 다음 3시간 동안 50% 이상 증가하였고, 7시간 이상 운전시 80~130% 증가하였다. Chang and Yoon (2020)은 GPS 궤적을 이용하여 운전지속시간

이 특정 기준 이상인 경우 피로한 상태로 구분하고, 피로운전자의 비율이 높을수록 사고율이 높은 관계를 밝혔다. 이 때, 피로한 상태를 구분하기 위한 경계시간은 사고율을 가장 잘 설명할 수 있는 최적값(125분)으로 결정하였다. 이외에도 연구들마다 정도의 차이는 있지만 장시간 운전할수록 사고율이 증가하는 관계가 나타났다(Gastaldi et al., 2014; Ingre et al., 2006; Phillip et al., 1999; Powell et al., 2007; Wang and Pei, 2014).

속도의 측면에서, 운전을 지속할수록 평균속도가 점진적으로 증가하는 것으로 확인되었으며, 이는 더 피곤해지기 전에 목적지까지 가능한 빨리 가기 위한 행동일 수 있다(Ranney et al., 1999). 운수종사자의 경우 운전 지속시간에 따른 KSS 지수가 일반운전자보다 낮은 경향이 있으나, 실제로는 더 빠른 속도로 주행하고 눈의 깜빡임이 더 잦은 것으로 나타났다. 운수종사자들은 피로한 상태로 운전한 경험이 많기 때문에 피로를 자각하지 못하고 본인이 위험운전을 하고 있는지 인지하지 못할 수 있다(Anund et al., 2018). 이처럼 피로가 누적되는 정도는 개인차가 있지만 운전자가 참을 수 있는 피로수준은 사람마다 크게 다르지 않다(Nilsson et al., 1997).

3) 운전 중 휴식(피로 회복)

운전 중 피로를 회복할 수 있는 다양한 방법과 그 효과에 대한 연구도 활발하게 수행되었다. Horne and Reyner (2001)는 피로한 운전자에게 에너지드링크가 주는 효과를 분석한 결과 500ml의 에너지드링크를 마신 후 30-60분 사이에서만 피로감을 느끼지 않았다고 하였다. 또한 피로한 상태로 운전을 하다가 잠시 쉬면서 걷고, 스트레칭과 같은 간단한 운동을 하는 것은 피로회복에 효과가 없으며 시간낭비에 가까웠다(Horne and Foster, 1995). 운동은 신체에 누적된 피로가 잠시 회복되는 느낌을 주지만 뇌의 피로를 회복시키지 못하기 때문에 10분만 지나면 사라지는 효과에 불과하다(Horne and Reyner, 2001). 피로를 회복하기 위한 가장 좋은 방법은 최소 10분에서 15분 동안 짧게라도 수면을 취하는 것이다(Horne and Reyner, 1996; Reyner and Horne, 1997).

4. 피로 관련 연구의 한계 및 문제점

운전자의 피로가 교통사고를 유발하는 주요 요인으로 인식되면서 피로의 근본이 되는 요소를 파악하고 요소별로 구분하여 피로수준을 측정하기 위한 많은 연구가 수행되었다. 또한 졸음운전을 예방하기 위해 피로를 회복할 수 있는 방법에 대해서도 연구가 진행되고 있다. 그러나 실제 도로를 주행하는 운전자들의 피로도를 측정하는 관점에서 다음과 같은 세 가지의 한계가 발견되었다.

첫째, 연구모형과 방법론이 실험에 참여한 조사자에 한정되어 있으며 시·공간적 전이성에 대한 검토가 부족하다. 대부분의 연구들은 운전자 설문(KSS)으로 조사자의 주관적 피로도를 조사함과 동시에 생체상태와 차량의 이상기동(차로이탈, 급정거 등)을 측정하여 그 관계를 통해 피로도를 더 정확히 측정하기 위해 노력하였다. 이 연구들은 확률 또는 통계모형 및 특정 지표를 기반으로 새로운 알고리즘을 처리하고 있으며, 데이터마이닝을 통해 운전피로를 감지하거나 측정하는 모형을 개발함으로써 운전피로를 감지할 수 있고 측정가능하다는 것을 입증하였다. 이러한 알고리즘의 발전으로 피로측정의 정확도는 80-90%에 달하지만, 자료를 처리하고 매개변수를 최적화하는데 긴 시간이 필요하다. 또한 추가적인 생체 데이터를 수집하기가 어려우며, 새로운 표본을 대입할 경우 정확도가 현저히 낮아진다(Zhang et al., 2020). 이러한 알고리즘은 주행시간에 따른 보편적인 피로도 변화를 분석하기보다는 개인의 운전과정에서 미묘하게 나타나는 피로상태를 측정하는데 특화되어 있다.

둘째, 그동안 교통안전과 관련된 대부분의 연구들이 운전지속시간에 따른 피로만을 고려하였다. 일부 연구에서 시간대에 따른 사고율의 변화를 분석하여 생체리듬이 사고와 관계된다는 것을 입증하였지만, 두 가지 요소를 동시에 고려한 피로도 추정연구는 찾아보기 어렵다(Zhang et al., 2014).

마지막으로 실제 교통상황에서 적용한 사례가 부족하다(Hu and Lodewijks, 2020). 피로도를 측정하기 위해서는 KSS 설문과 생체신호측정을 필요로 하기 때문에 거의 모든 연구들이 시뮬레이션 또는 도로에서

의 실험주행조사 방법을 선택하였으며, 실제 도로를 주행하는 일반 운전자를 대상으로 피로도를 측정한 연구는 부족한 상황이다.

5. 피로 관련 연구 고찰 시사점

운전 피로와 관련된 연구를 고찰한 결과 도출된 시사점은 앞에서 정리한 문제점과 연결하여 세 가지로 정리할 수 있다.

첫째, 시·공간적 전이성을 갖춘 피로도 추정모형 연구가 필요하다. 그동안의 노력에 의한 결실로 운전피로를 80-90%까지 정확하게 감지하고 측정할 수 있게 되면서 운전자의 피로가 어떤 영향에 의해 증감되는지 이해할 수 있게 되었다. 그러나 피로도는 개인마다, 그리고 상황에 따라 계속해서 변하기 때문에 그 당시의 피로도를 정확히 측정하는 것은 큰 의미를 갖기 어렵다. 이제는 그동안 축적된 지식을 기반으로 현장에서 적용할 수 있는 일반화된 피로도 추정모형을 개발할 필요가 있다.

둘째, 실제 운전자의 피로도를 추정하기 위해서는 피로의 구성요소를 최대한 고려해야 한다. 피로의 주요 구성요소는 생체리듬과 운전지속시간, 휴식시간, 그리고 수면패턴으로 볼 수 있다. 이들 중, 수면패턴과 같이 현장에서 무작위 다수를 대상으로 수집하기 어려운 경우에는 보편적인 사람들의 패턴을 적용할 수 있다(Riedy et al., 2020). 중요한 점은, 운전지속시간이 길어질수록 운전자의 피로도가 높아지는 것은 명백하지만, 생체리듬에 따른 시간대별 피로도 차이도 함께 고려해야 한다는 것이다.

마지막으로 현장에서 수집한 교통자료를 기반으로 피로도를 추정하는 연구가 필요하다. 모의실험을 통해 측정된 피로도는 실제 도로에서 측정하는 피로도와 동일하지 않다(Phillip et al., 2005). 따라서 모의실험조사를 기반으로 구축한 모형을 일반운전자에 적용하여 모형의 현장적용성을 높여야 한다. 이 때, 차량 GPS 궤적 자료를 활용하면 피로도 산정시 중요한 변수인 시간정보(지점별 시각 및 운전지속시간)를 수많은 표본을 대상으로 수집할 수 있으므로 시간 기반의 피로도 추정모형을 고도화하여 운전 피로를 더욱 정확히 추정할 수 있도록 해야 한다.

제3절 과속 관련 연구 고찰

1. 개요

속도는 사고와 연관되는 주요 요인 중 하나이다(Elvik, 2009; Kong et al., 2020; Pei et al., 2012; Richards and Cuerden, 2009). 교통사고는 근본적으로 차량의 이동에 따라 발생된다. 특히 속도는 차량의 이동을 나타내는 기본적인 개념이므로 속도와 사고는 불가분의 관계에 있다. 이에 따라 속도와 사고의 관계를 규명하기 위한 연구는 교통안전분야에서 지속적으로 관심을 받고 있는 주제이며, 아직까지도 논쟁이 이어지고 있어 새로운 접근법이 필요한 시점이다. 속도와 사고의 상관관계 분석에서 보편적으로 사용되는 속도지표는 평균속도와 속도 표준편차이다. 따라서 여기서는 두 지표를 중점적으로 고찰하고자 한다. 더불어 개별 차량에 대한 미시적인 통행자료를 사용하여 과속에 대해 분석한 연구를 추가로 검토한다.

속도와 사고의 관계를 분석한 연구는 시대의 흐름에 따라 ITS 기반의 속도자료를 활용한 연구와 차량 GPS 자료를 활용한 연구로 분류할 수 있다. 이와 같이 분류할 수 있는 가장 큰 차이는 자료의 특성에 있다. 먼저 ITS 속도자료는 기본적으로 집계기반 자료로서 속도수집장치(루프검지기, 영상검지기 등)가 설치된 지점을 일정 시간(예시. 5분) 동안 통과한 차량들의 평균속도를 수집한다. 반면에 차량 GPS 자료는 개별 차량의 위치(좌표)를 최소 1초 간격으로 수집하는 비집계기반 속도자료이다. 두 분류그룹에 해당하는 연구는 분석자료가 집계방식과 비집계방식으로 서로 다르기 때문에 분석 방법론과 결과 또한 다를 수 있다. 따라서 두 그룹의 차이를 고려하면서 선행연구 고찰을 하는 것이 적절하다.

2. 집계 속도자료를 활용한 연구

먼저 ITS 기반의 속도자료를 활용한 연구를 살펴보면, 평균속도와 사고의 관계를 분석한 연구들은 그 관계가 양의 관계인 경우도 있고, 반대로 음의 관계인 경우도 있다. 게다가 통계적 유의성조차 확보되지 못하는 경우도 보고되었다(Garber and Ehrhart, 2000; Quddus, 2013). 반면에 속도 표준편차와 사고의 관계를 분석한 연구결과는 모든 연구에서 동일하게 양의 관계가 있음을 밝혔다.

Taylor et al. (2002)는 영국 전역 지방의 편도도로에서 총 174개 도로구간을 대상으로 평균속도와 사고의 관계를 분석하였다. 그 결과, 평균속도와 사고는 양의 관계가 있음을 발견하였다. 구체적으로는 평균속도가 1% 감소할 때 사고는 4.5%에서 7.5% 가량 감소한 것으로 보고하였다. Yu et al. (2013)은 고속도로에서 레이더검지기로 수집한 속도자료(5분단위 집계)를 이용하여 사고발생시 속도변화를 분석하였다. 그 결과 사고시각 5분 전에 평균속도가 감소하는 것으로 나타났으며, 사고위험성과 음의 관계가 있다고 보고하였다. Quddus (2013)는 검지기자료로 수집한 속도자료로 속도 표준편차가 고속도로 사고에 미치는 영향을 분석하였다. 그 결과, 속도편차가 1% 증가할때 사고율이 0.3% 증가하는 양의 관계가 있다고 제시하였다. 그러나 집계된 속도자료로 구한 속도편차이므로 특정 시점의 지점에 대한 개별 차량의 속도편차가 아니며, 첨두시 속도가 낮고, 비첨두시 속도가 높은 교통류 상태에서 어느 정도의 속도가 더 위험한지에 대해서는 명확하지 않다고 언급하였다.

속도와 사고의 관계에 대해서 Chipman et al. (1992)은 더 빠른 속도로 주행하는 차량은 주어진 구간에서 노출되는 시간이 짧기 때문에 사고발생 가능성이 과소평가될 수 있으며, 공간적 노출도를 통제할 때 관찰되는 속도와 사고발생 간 음의 관계가 속도의 영향을 왜곡시킬 수 있다고 주장하였다. 그러나 과거에는 시·공간적 사고 분석이 가능한 미시적인 통행시간 및 속도자료가 없었기 때문에 이와 같은 관점의 문제는 중요하게 연구되지 못하였다.

3. 비집계 속도자료를 활용한 연구

GPS 위치기반 서비스를 기반으로 하는 차량 모빌리티 서비스의 대중화로 대용량 차량 GPS 궤적 자료가 수집되고 있다. 차량 GPS 궤적 자료는 교통사고와 밀접히 관련된 차량의 미시적인 운행행태 및 운전자 정보를 포함하고 있다. 이러한 차량 GPS 궤적 자료의 잠재력에도 불구하고, 이를 이용한 교통사고 연구는 초기단계에 머물고 있는 실정이다.

Wang et al. (2018)은 차량 GPS 기반의 시·공간적 속도자료를 이용하여 평균속도와 속도 표준편차가 사고에 미치는 영향을 분석하였다. 집계자료로는 불가능했던 차량 간 속도편차와 개별 차량의 속도변화를 모두 고려하였으며, 실제 교통상황을 반영한 속도의 편차와 사고의 관계를 분석한 결과 속도편차가 1% 증가할 때 사고는 0.74% 증가하는 양의 관계가 있음을 밝혔다. 그리고 평균속도의 경우, 지수곡선의 형태로 양의 관계가 있으며, 평균속도가 1% 증가할때 사고는 0.7% 증가하는 것으로 나타났다.

이와 관련하여, Yu et al. (2018)은 상하이 도시고속도로에서 속도와 사고율의 관계를 도로구간 기반(집계방식)과 시나리오 기반(비집계방식)으로 각각 분석하였다. 집계방식에서 일반적으로 적용되던 도로구간 기반으로 분석한 결과 속도와 사고율은 음의 관계가 나타난 반면, 시나리오 기반 분석결과 저속 및 고속의 조건일때 사고율이 높은 U자형 곡선 관계가 도출되었다. 즉, 속도가 낮은 상황에서, 그리고 속도가 높은 상황에서 사고위험성이 높다는 결과이다.

Pei et al. (2012)는 Chipman et al.(1992)의 주장을 검증하기 위해 택시 GPS 자료를 이용하여 시·공간적 노출도(spatio-temporal exposure) 측면에서 속도와 사고의 관계를 연구하였다. 그 결과, 고속도로의 시간적 노출도를 통제하였을 때 평균속도와 사고는 양의 관계가 있음을 밝혔으며, 반대로 공간적 노출도를 통제하였을 때 반대의 결과가 나타났다. 이는 Chipman et al. (1992)의 주장을 뒷받침할 수 있는 결과이며, 주어진 도로구간에서 더 빠르게 주행한 경우 오히려 안전할 수 있다는 의미이다. 이 연구는 동일한 자료로 분석함에도 불구하고 시·공간적 분석관점

에 따라 다른 결과가 도출될 수 있음을 최초로 증명하였으며, 속도와 사고의 관계를 분석할 때 시·공간적 관점을 모두 고려할 필요가 있음을 시사한다.

4. 과속행태 분석 연구

차량 GPS 궤적 자료는 차량이 이동하는 동안 GPS의 수집시간 간격마다 속도를 수집하기 때문에 초 단위의 과속행태를 분석하기에 적합하다. 이에 따라 평균속도와 사고의 관계를 분석하는 연구보다 실제 사고위험을 가진 과속행태를 분석하기 위한 연구가 더 활발히 진행되고 있다.

과속행태를 분석하는 연구들은 가장 먼저 과속의 기준을 정의한다. 과속기준은 연구의 목적에 따라 가장 적합하다고 판단되는 기준을 선택하여 사용하였다. 대표적인 과속기준은 제한속도이며, 제한속도를 초과할 경우 과속으로 판단하는 연구가 가장 많다(Ambros et al., 2020; Kong et al., 2020; Zhao and Wu, 2013). 그리고 제한속도보다 일정속도 이상을 초과할 경우 과속으로 판단하기도 하며(Richard et al., 2013), 실제 법적으로 단속하는 속도를 과속기준으로 정하기도 하였다(Bellis et al., 2018; Familar et al., 2011). 이처럼 연구마다 과속을 정의하는 기준이 다르기 때문에 여러 연구결과를 동일선상에서 비교하는 것은 무리가 있다.

과속행태를 분석하기 위한 지표 또한 아직까지 정립되지 않은 상태이며 연구마다 모두 다른 지표를 개발하여 산정하고 있다. Familar et al. (2011)는 차량 GPS 자료를 이용하여 도로별 제한속도(스쿨존, 50km/시, 110km/시 등)에 따른 과속행태(과속주행거리비율)를 분석하였다. 제한속도 90km/시 이하에서는 과속주행거리 비율이 15-20% 수준이었으나, 100km/시에서 40%에 가깝게 나타나 고속도로에서 과속이 많이 이뤄지는 것으로 분석되었다. Kong et al. (2020)은 차량 GPS 궤적 자료를 기반으로 과속행태를 이해하기 위한 원인분석 연구를 수행하였다. 논문에서 과속은 제한속도보다 1-5mph 초과한 상태와 5mph 이상 초과한 상태로 구분하였으며, 과속주행연속시간(speeding duration, how long the speeding

event lasts)과 과속주행속도(how much does this speeding event exceed the speed limit)를 과속지표로 산정하였다. 여기서 과속주행연속시간은 30초에서 2분 사이, 그리고 2분 이상으로 구분하였다. 그리고 이처럼 과속주행시간을 구분한 이유는 과속의 원인과 행태를 이해하기 위한 목적이며, 지금까지 과속주행시간을 분석한 연구는 매우 드물다고 언급하였다. Richard et al. (2013)는 실험운전자를 대상으로 한 설문과 차량 GPS 궤적 자료를 기반으로 운전자특성에 따른 과속행태를 분석하였다. 분석에 사용된 과속지표는 전체 통행에 대한 과속주행시간의 비율이며, 이 지표는 개별 통행당 과속으로 주행한 시간의 비율(과속주행시간/분석구간통행시간)을 평균하여 계산하였다. 그리고 이 과속지표는 도로구간에서 과속에 노출되는 수준을 판단하기 위한 것임을 명시하면서 도로구간별로 지표를 산정할때 일관성을 가질수 있어야 한다고 강조하였다.

속도와 사고의 관계를 분석한 연구를 속도자료의 유형과 속도지표에 따라 정리하면 <표 2-2>와 같다.

<표 2-2> 속도-사고 관계분석 연구

저자	자료유형	속도지표	사고와 관계
Taylor et al. (2000)	검지기	평균속도	양의 관계 (10% 증가 → 사고 21% 증가)
		과속차량속도	양의 관계 (1mph 증가 → 사고 19% 증가)
		과속차량비율	양의 관계 (2배 → 사고 10% 증가)
Garber and Ehrhart (2000)	검지기	평균속도	통계적으로 유의하지 않음
		속도 표준편차	양의 관계 (지수형태로 증가)
Quddus (2013)	검지기	평균속도	통계적으로 유의하지 않음
		속도 표준편차	양의 관계 (1% 증가 → 사고 0.3% 증가)
Yu et al. (2013)	검지기	평균속도	음의 관계
Yu et al. (2018)	검지기	평균속도	도로구간 기반 집계방식은 음의 관계, 시나리오 기반 비집계방식은 U-곡선 (속도가 낮거나 높을때 사고율 높음)
Pei et al. (2012)	GPS	평균속도 (과속)	(공간적) 과속주행거리는 음의 관계 (시간적) 과속주행시간은 양의 관계
Wang et al. (2018)	GPS	평균속도	양의 관계 (1% 증가 → 사고 0.7% 증가)
		속도 표준편차	양의 관계 (1% 증가 → 사고 0.74% 증가)

5. 과속 관련 연구의 한계 및 문제점

속도와 사고의 관계를 분석한 연구들은 그 분석결과가 서로 일치하지 않는 경우가 보고되고 있다. 따라서 선행연구를 고찰하면서 지금까지 명확한 관계를 규명할 수 없었던 원인에 대해 중점적으로 검토하였다. 선행연구에 기반한 속도-사고 관계 분석의 한계와 문제점은 다음과 같이 네 가지로 정리할 수 있다.

첫 번째로 가장 주요한 원인은, 사고는 복합적인 요인들(운전자 행동, 차량설계, 도로기하구조, 교통 및 환경조건 등)이 서로 복잡하게 상호작용한 결과 발생되는 돌발상황이기 때문이다(Elvik et al., 2004). 따라서 속도와 같은 단 하나의 요인만으로 사고를 완벽하게 규명하기에는 한계가 있다. 이와 같은 문제는 현실세계를 탐구하는 모든 분야의 연구에서 나타나는 공통적인 한계일 수 있으며, 그럼에도 불구하고 현상을 설명하기 위해서 더 발전된 연구를 설계하고 수행해야 한다.

둘째, 과거 대부분의 연구에서 사용한 집계기반의 속도자료는 사고 분석에 적절하지 않을 수 있다(Quddus, 2013). 기존 연구에서 사용한 속도자료는 대부분 루프검지기나 영상검지기를 이용하여 수집한 자료이다. 검지기로 수집한 속도자료는 일반적으로 특정 지점에서 일정 시간 동안(5분 이상) 통행한 차량들의 지점평균속도이며, 개별 차량의 통행특성을 분석할 수 없기 때문에 도로구간의 동적 교통류를 분석할 수 없다(Li et al., 2020). 이처럼 집계된 자료로 속도와 사고의 관계를 분석할 경우 전반적인 교통류 상태에 따라 편이(bias)가 발생될 수 있음에도 불구하고, 수집가능한 집계자료의 범위 내에서 연구를 수행하였기 때문에 다수의 연구들이 일관적이지 못한 결론을 도출하였을 것으로 예상된다. 속도편차와 사고의 관계를 분석한 연구들도 마찬가지로 집계자료를 사용하였다. 따라서 차량별 속도의 변화를 분석할 수 없었으며 집계(5-60분)된 평균속도의 표준편차를 분석하였다(Quddus, 2013). 이는 시간대에 따른 평균속도의 편차이므로 속도와 사고의 관계를 제대로 이해하기 위해서는 비집계 속도자료를 사용해야 한다(Aarts and van Schagen, 2006).

셋째, 실제 사고에 영향을 주는 과속행태 분석을 위한 적정 지표의 선정과 방법론 개발에 대한 연구가 미흡하다(Kong et al., 2020). 최근 차량 GPS의 보급률이 상승함에 따라 차량 궤적을 이용하여 속도자료를 수집할 수 있게 되었으나, 아직까지는 자료의 활용가능성을 검토하는 연구 초기단계이며 사고위험의 측면에서 과속실태를 반영할 수 있는 미시분석 방법론이 정립되지 않았다.

마지막으로 시·공간적 관점에 따른 접근방식의 차이이다. 높은 속도로 주행할 경우 같은 도로구간을 통행하는데 걸리는 시간은 감소하며, 위험에 노출되는 시간이 줄어 사고가 감소할 수 있다(Chipman et al., 1992). 그러나 이 주장은 과속의 위험성이 존재하지 않을 경우에 가능한 것이며, 실제 속도가 빠를수록 사고위험성이 더 높아진다면 노출시간의 감소가 반드시 사고의 감소로 이어지지 않을 수 있다. 즉, 속도의 증가에 따른 사고위험성 증가와 노출시간 감소에 의한 사고위험성 감소 중 어떤 값이 더 큰지에 대해서는 연구된 바가 없으며, 비집계 자료 활용의 어려움으로 인해 연구의 시도조차 불가능하였으므로 그동안 연구자들의 관심을 받지 못하였다.

6. 과속 관련 연구 고찰 시사점

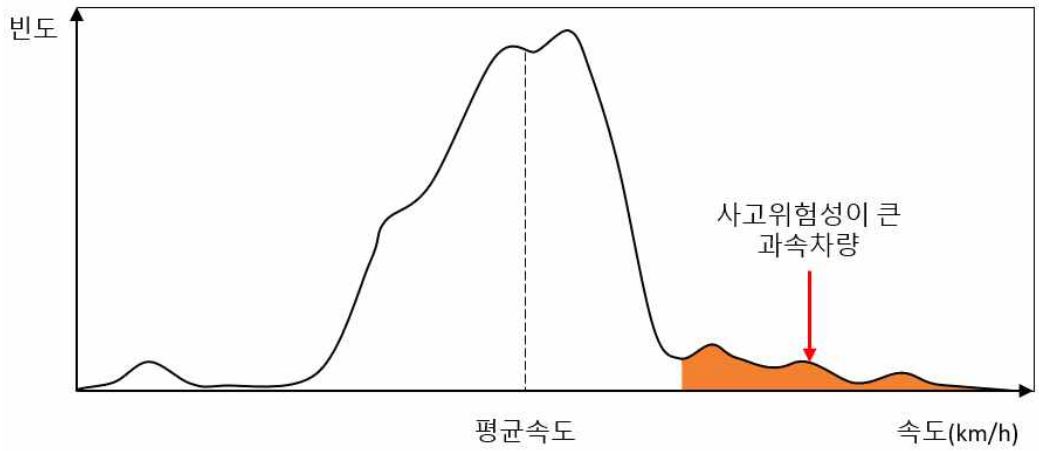
선행연구를 고찰한 결과, 속도와 사고의 관계를 분석할 때 가장 많이 사용되는 지표는 평균속도와 속도의 표준편차로 요약된다. 그 중에서도 속도의 편차는 사고발생 확률과 양의 상관관계가 있다는 일관적인 연구결과가 보고되었으며, 이를 부정하는 연구는 찾아보기 어렵다. 경험적으로도 저속차량과 과속차량이 동시에 도로구간을 주행할 때 위험한 상황이 많이 발생하기 때문에 차량 간 속도편차가 클수록 사고위험성이 높아진다는 연구결과는 상식에 부합한다.

반면에, 평균속도와 사고의 관계는 여전히 의견이 분분한 상황이다. 연구에 사용한 자료와 접근방식, 방법론(적용 모형)에 따라 상관관계는 양 또는 음의 관계가 나타나거나 심지어 평균속도 변수 자체가 유의하지 않

은 경우도 보고되고 있다. 그 원인으로 사고발생 원인의 복합성을 들 수 있지만 그럼에도 불구하고 속도의 영향이 존재할 가능성이 높기 때문에 설명력은 다소 낮더라도 일관된 결과가 도출되어야 한다. 따라서 연구자료와 방법론의 문제를 제기해볼 수 있다. 특히 자료의 경우 대부분 검지기 기반의 집계자료를 이용하였으며, 이는 특정 지점을 통과한 차량들의 평균속도이다(Bar-Gera, 2007). 당연하게도 집계자료로 개별 차량들의 동적 속도특성을 분석할 수 없으며, 특히 발생확률이 매우 낮은 사고를 설명하기에 적합하지 않다는 것이 정설이다. 실제로, 동일한 자료를 이용하여 집계방식과 비집계방식으로 속도와 사고의 관계를 분석한 결과 서로 다른 결과가 도출되었다는 연구결과도 있다(Yu et al., 2018).

도로구간의 길이는 정해져 있기 때문에 차량의 속도가 높을수록 해당 구간에 대한 시간적 노출도는 감소하게 되며, 이에 따라 오히려 사고위험성은 감소할 수 있다. 과거에는 시·공간적 사고 분석이 가능한 속도자료가 없었기 때문에 이와 같은 관점의 문제는 중요하게 연구되지 못하였다. 그러나 최근의 차량 GPS 궤적은 개별 차량 기반의 실시간에 가까운 속도를 분석할 수 있기 때문에 속도와 사고의 관계를 시·공간적으로 분석할 수 있는 연구환경이 조성되었다.

고속도로 구간을 통행한 개별 차량들의 속도를 빈도그래프로 나타내면 <그림 2-2>와 같다. 대부분의 차량들이 제한속도를 기준으로 ±10-20km/시



<그림 2-2> 도로구간의 속도 빈도분포 : 평균속도 및 과속차량

이내에서 주행하며, 평균속도는 그 범위 내에서 산정된다. 그러나 실제 사고위험성이 높은 차량은 매우 높은 속도로 주행하는 소수의 과속차량일 가능성이 높으며, 이들은 빈도그래프에서 우측꼬리에 해당하기 때문에 평균속도를 산정할 때 큰 영향을 주지 못하고 무시된다. 이와 같은 이유로 집계자료로는 사고를 유발하는 과속행태 확인이 불가능하며, 이미 많은 연구자들이 속도와 사고의 관계를 더 잘 이해하려면 비집계 자료를 시·공간적으로 구분하여 분석해야 한다고 주장하고 있다(Aarts and van Schagen, 2006; Pei et al., 2012; Quddus, 2013). 비집계자료의 활용은 아직까지 시작단계에 있으므로 속도와 사고의 관계를 더 잘 설명할 수 있는 과속지표의 개발과 분석 방법론에 대한 다양한 시도가 필요하다.

제4절 본 연구의 차별성 및 기여도

1. 연구의 차별성

전통적인 통계모형뿐만 아니라 자료기반 기법을 이용한 기존의 사고예측 연구들은 가용자료 내에서 다양한 설명변수를 고려하면서 사고의 발생요인을 찾아내고 그 연관성을 찾기 위해 꾸준히 노력하였으며, 또한 모형이 가진 한계를 극복하고 설명력을 높이기 위해 계속해서 새로운 모형과 방법론을 개발하였다. 그 결과, 주된 사고요인이 무엇인지, 그리고 사고와 어떤 관계가 있는지에 대해서 개략적으로 이해할 수 있게 되었다. 다만, 과거에 활용가능했던 자료는 대부분 집계자료로 한정되었기 때문에 개별 차량의 통행특성이나 운전자의 행태를 반영하기 어려웠다.

본 연구는 최근 고속도로 교통사고의 주요 요인으로 알려져 있는 피로(졸음)와 과속을 대상으로, 고속도로 구간별로 실제 도로이용자들의 피로수준과 과속실태를 분석할 수 있는 방법론을 개발한다. 또한 피로와 과속 지표를 이용하여 사고를 예측함으로써 각 지표의 사고 설명력을 검증하고, 두 위험요소의 개별적, 또는 조합에 따른 사고연관성을 분석한다. 본 연구에서 방법론의 개발과 적용을 위해 고려한 사항은 다음과 같다.

첫째, 정교화된 차량 GPS 궤적 자료를 활용하여 실제 도로구간을 주행한 차량들의 통행특성을 1초 단위로 분석한다. 차량 GPS 궤적 자료는 차량의 GPS 위치(point)를 도로위 지점(point)과 매칭하는 사전 정교화 과정을 통해 GPS 오차를 보정한 자료이며, 실제 1초 단위로 이동한 지점자료를 이용하여 보다 정확한 속도자료를 구축할 수 있다. 이 자료는 교통안전 분야에서 새로운 접근방식을 시도할 수 있는 기회를 제공한다.

둘째, 개별 차량의 동적(시·공간적) 속도 변화를 분석한다. 기존의 집계된 평균속도 자료로는 사고위험성이 높은 과속차량에 대한 분석이 불가능하였다. 반면, 차량 GPS 궤적 자료는 1초 단위 시점별 속도를 이용하여 과속행태를 분석해낼 수 있다. 이 장점을 활용하여 도로구간 내에

서 차량들이 과속으로 주행하는 시간과 거리를 분석하고, 그 비중을 나타내는 시·공간적 과속 노출도 지표를 산정한다.

셋째, 실제 고속도로 통행차량들의 운전지속시간과 통행시각 정보를 이용하여 시간대의 영향을 고려한 생체리듬 기반의 피로도를 측정한다. 이는 그동안의 피로 관련 연구와 달리 시간대의 영향을 고려하여 현실성을 반영할 수 있는 접근방법이며, 실제 통행자료를 이용하여 피로도를 추정하는 최초의 시도이다.

넷째, 도로구간을 이용하는 차량들의 피로운전실태를 나타내는 피로 노출도 지표를 산정한다. 피로 노출도 지표는 도로구간 내에서 피로한 상태로 운전하는 차량들이 시간 및 공간적으로 노출되는 비중이며, 이 지표가 높을수록 피로 또는 졸음으로 인한 사고가 발생될 가능성이 높아진다.

다섯째, 안전을 위협하는 두 가지 주요 요소인 피로와 과속을 동시에 측정하고 분석한다. 피로한 상태에서 과속을 하게 되면 사고위험성이 더욱 높아질 수 있다. 그러나 지금까지 개별 차량 단위로 두 요소를 분석한 사례가 없다. 따라서 본 연구를 통해 피로와 과속을 동시에 분석할 수 있는 방법론을 개발하고, 사고와의 연관성을 밝혀 교통안전분야의 새로운 연구방향을 제시한다.

여섯째, 실제 사고의 위험성이 높아지는 속도의 기준과 피로도의 기준을 도출한다. 이는 제한속도나 과속단속속도를 과속기준으로 설정하던 기존의 연구와 달리, 군집의 개념으로 사고위험군을 분류하여 그 경계를 과속기준으로 결정하는 방법이다. 피로도 또한 기존에는 일정 시간(예. 120분) 이상 운전할 경우 피로상태로 판단하였지만, 본 연구에서는 실제 사고위험성을 반영하여 피로상태 기준을 결정한다.

마지막으로, 그동안 자료의 한계로 인해 분석하지 못했던 운전자 행태(피로, 과속)를 대상으로 사고위험성을 평가할 수 있는 분석지표로써 활용할 수 있는 방안을 개발한다. 특히, 도로구간별 위험성을 거시적으로 평가하는 방안부터 개별 차량의 실시간 위험성을 평가하는 미시적 방안까지 다양한 관점에서 활용방안을 제시한다.

2. 연구의 기여도

운전 피로와 과속은 과거부터 계속해서 연구되고 있지만, 실제 도로구간을 통행하는 개별 차량의 시·공간적 특성을 반영한 지표를 개발하는 연구는 아직 초기 단계이며, 구체적으로 소개되지 않고 있다. 이러한 상황에서 앞에서 설명한 연구의 차별성과 더불어 본 연구의 시대적·학문적·기술적·실무적 측면에서 기여도는 다음과 같다.

최근 교통연구는 자료수집 및 분석체계가 전반적으로 변하고 있는 추세에 있다. 자료수집방식은 기존 ITS 기반의 집계자료 중심에서 차량 GPS 궤적 자료 중심으로 진화 중이다(Ambros et al., 2020). 차량 GPS 궤적 자료는 개별 차량을 대상으로 한 이동궤적에 대한 연구를 할 수 있으며, 1초 단위의 동적(dynamic)인 통행특성을 분석할 수 있는 기반을 제공하였다. 이에 대응하여 분석체계 또한 빅데이터를 다룰 수 있는 자료기반 기법을 적용하는 사례가 늘어나고 있다. 본 연구는 이러한 시대적 변화를 기회로 삼아 개별 차량 기반의 차량 GPS 궤적 자료를 이용하여 실제 고속도로 이용차량들의 시·공간적 통행행태를 연구한다.

학문적 측면에서, 본 연구는 비집계자료 기반의 미시분석을 수행하여 동적 과속실태를 분석하고, 운전 피로에 대한 새로운 연구방향을 제시한다. 또한 고속도로 사고위험성을 평가할 수 있는 피로·과속 분석지표 산정 방법론을 개발하고, 피로와 과속의 융합 분석을 통해 사고 요인에 대한 이해도를 높일 수 있도록 한다. 이러한 모든 분석과정은 교통안전 연구분야에서 필요성을 인지하고 있음에도 불구하고 비집계 자료수집 및 활용의 어려움으로 인해 지금까지 시도하지 못했던 것으로써 학문적으로 새로운 통찰력을 제시할 수 있다.

기술적 측면에서 대용량 차량 GPS 궤적 자료를 활용하여 운전 피로와 과속을 분석할 수 있는 알고리즘을 개발한다. 최근 내비게이션 이용률이 증가하면서 차량 GPS 궤적 자료의 수집률이 증가하였으며, 이에 따라 연구에 활용가능한 차량 궤적 자료가 실시간으로 수집되고 있다. 본 연구에서는 1초 단위로 수집된 대용량의 차량 GPS 궤적 자료를 신

속하고 효율적으로 분석할 수 있는 알고리즘 기반의 분석모듈을 개발한다. 특히 분석과정에서 연구의 핵심이 되는 개별 차량의 동적 통행특성을 보존할 수 있도록 한다.

마지막으로 실무적 측면에서, 시·공간적 운전 피로·과속 분석지표는 고속도로 구간의 사고위험성을 평가할 수 있는 지표로서 안전대책 마련을 위해 활용할 수 있다. 각 분석지표는 0.0-1.0의 범위에서 사고위험성이 높을수록 더 높은 값으로 산정되므로 도로구간별 위험성을 비교하기에 용이하다. 특히, 피로 분석지표는 휴게소 및 졸음쉼터의 적정한 설치지점을 선정하기 위한 자료로 활용 가능하며, 과속 분석지표는 과속단속구간을 선정하기 위한 기반자료로 활용 가능하다. 또한 도로이용자의 입장에서는 「화물자동차 운수사업법 시행규칙」에서 연속주행시간에 따른 휴식시간 보장 규정을 생체리듬에 기반하여 출발 시간대까지 고려할 수 있어 운수종사자의 안전운행을 지원할 수 있다. 일반 운전자 대상으로는 내비게이션을 통해 운전지속시간과 속도를 모니터링하고 실시간으로 분석하여 객관적 지표로 제공함으로써 위험운전에 대한 경각심을 갖도록 지원할 수 있다.

제3장 분석자료 구축 및 특성 분석

제1절 자료 구축 개요

1. 분석 활용자료 선정

본 연구는 개별 차량 기반의 동적 운전 피로와 과속행태를 분석하여 지표화하고자 하며, 이 목적을 달성하기 위하여 개별 차량의 위치정보를 1초 단위로 수집하는 차량 GPS 자료를 기초자료로 선정하였다. 기초자료로 선정한 GPS 원시자료는 기본적으로 차량의 암호화된 식별번호와 위치정보 수집일시, 경·위도 좌표 정보를 포함하고 있다. 그리고 해당 자료를 이용하여 구간별 운전지속시간을 산정하기 위해서 전처리 과정을 통해 본 연구의 분석대상 구간에 진입할 때까지 운전한 누적 시간을 추가 정보로 구축하였다.

GPS 자료의 위치정보 수집 오차를 보정하기 위하여 고속도로 경로를 따라 평균적으로 100m 단위로 구축되어있는 경로 보간점[1] 자료를 활용하였다. 본 연구에서 경로 보간점은 GPS 자료의 초당 위치정보와 매칭하는 전처리과정을 수행하여 GPS 좌표의 오차를 보정한다.

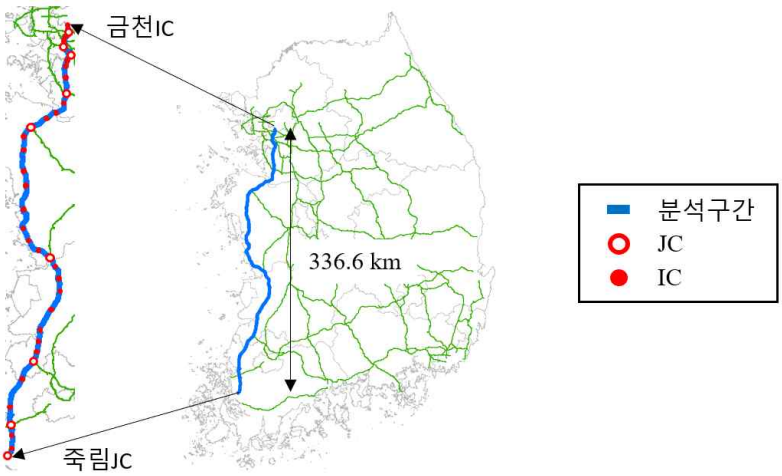
또한 운전 피로와 과속을 분석하는 과정에서 과속단속지점이나 휴게소 및 졸음쉼터 등의 시설물에 의해 통행특성이 달라질 경우 분석지표 산정에 영향을 줄 수 있다. 이러한 시설물의 영향을 배제하기 위하여 고속도로 시설물의 위치자료를 활용한다. 단, GPS 자료는 차량의 위치를 좌표로 확인할 수 있지만, 다양한 종류의 고속도로 시설물들(IC나 JC, 휴게소나 졸음쉼터, 과속단속지점 등)은 노선별 이정으로 위치를 나타내기 때문에 분석을 위해서는 먼저 도로이정과 좌표를 매칭해야 한다.

---

1) 경로 보간점은 GIS 지도의 도로선형을 표현하기 위한 자료이며, 보간점 간 간격은 곡선구간은 최소 0.3m에서 직선구간의 경우 최대 1,245m까지 분포한다.

2. 자료의 내용 및 범위

운전 피로 및 과속 분석 방법론의 개발·평가를 위한 분석대상 구간은 서해안고속도로 금천IC에서 죽림JC까지 하행(서울→목포)하는 약 336.6km 구간으로 선정하였으며, <그림 3-1>과 같다. 해당 구간에는 28개의 IC와 9개의 JC가 존재하며, 콘존 단위(IC 및 JC를 기준으로 분할)를 기준으로 총 36개의 세부 구간으로 나누어 분석한다. 세부 구간의 도로연장은 최소 0.9km에서 최대 24.3km로 편차가 크지만 구간 내에서 유출입이 불가능하여 교통량이 유지되므로 콘존 단위로 구간을 구분하는 것이 본 연구의 교통류 분석에 적합할 것으로 판단하였다. 기타 시설물 현황은 휴게소는 12개소, 졸음쉼터는 10개소가 설치되어 있으며, 총 43개의 지점과속단속(고정식, 이동식, 박스형 포함) 및 한 쌍의 구간과속단속이 존재한다. 이외에도 교통정보 수집, 사고다발지역, 급커브 구간 등이 있지만 본 연구의 분석에는 사용하지 않는다. 분석자료의 시간적 범위는 2017년 10월 10일에서 11월 11일까지(평일 24일간 및 주말 9일간)의 자료를 기준으로 한다. 고속도로 이용행태는 평일과 주말이 다르기 때문에 이를 구분하여 분석한다. 일반적인 교통류 상황에서 운전자의 피로도 수준과 과속행태를 분석하기 위하여 공휴일이 포함되지 않는 시기를 선정하였으며, 특별한 교통상황에 따른 교통류의 영향은 없는 것으로 간주한다.

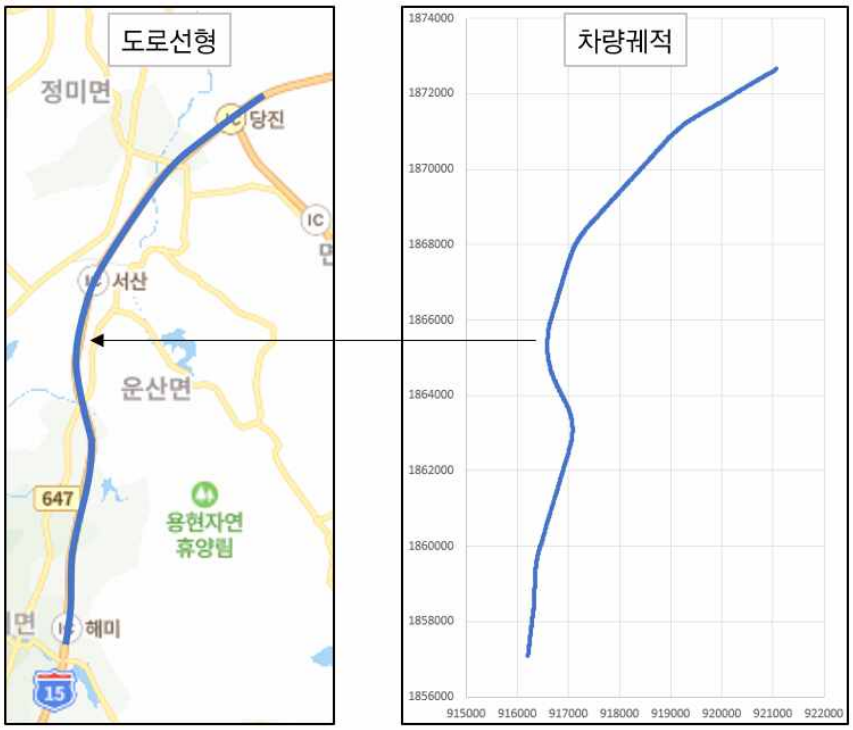


<그림 3-1> 본 연구의 분석대상 구간

제2절 차량 GPS 궤적 자료 구축

본 연구는 내비게이션 기반의 차량 GPS 궤적 자료를 활용하며, 이는 대표적인 모빌리티 궤적 자료이다. 차량 GPS의 보급률은 전세계적으로 꾸준히 증가하고 있으며, 교통안전분야에서 이 자료를 활용하는 연구사례가 계속해서 보고되고 있다(Ambros et al., 2020). 차량 GPS 궤적 자료는 특정되지 않은 전체 도로망에 대하여 실시간에 가까운 개별 차량의 통행정보를 수집할 수 있으며(Bekho et al., 2013), 차량별 이동궤적을 이용하여 동적 과속행태(예시. 과속으로 주행한 시간 및 거리)를 분석할 수 있다(Familar et al., 2011; Kong et al., 2020).

차량 GPS 자료는 장비의 수신상태에 따라 정확한 위치를 기록하지 못하는 오차가 존재하기 때문에 연구에 사용하기 위해서는 오차를 줄이기 위한 보정작업이 필요하다(Guo et al., 2019; Li et al., 2020). 이동식 프로브의 역할을 수행하는 GPS 장착차량의 일련의 통행과정으로부터,



<그림 3-2> 차량 GPS 궤적과 도로선형 매칭

차량이 통행한 경로의 연속적인 지점 간(point-to-point) 위치를 포함하는 도로망에 대한 차량 궤적을 구축할 수 있다(Ambros et al., 2017; Taylor et al., 2015). 이 과정에서 GPS 수신좌표를 도로망의 연결성에 기반한 도로지점(point)과 매칭하여 차량의 궤적이 경로를 구성하는 도로를 벗어나지 않도록 오차를 보정할 수 있다. 본 연구는 이와 같은 일련의 과정으로 가공된 통행자료를 차량 GPS 궤적 자료로 정의하며, 연구의 기초자료로 활용한다. <그림 3-2>는 오차가 보정된 한 차량의 궤적을 지도의 도로선형과 비교한 것이며, 이상치 없이 완벽하게 일치하는 것을 확인할 수 있다. 이와 같이 보정된 자료를 이용하여 1초당 이동거리를 계산하고, 더 정확한 속도를 산출해낼 수 있다.

차량 GPS 궤적 자료는 개별 차량의 1초당 지점좌표 정보를 포함하고 있다. 원시자료의 기본 속성정보는 암호화된 차량의 ID, 통행일자, 시각, 경·위도 좌표(X, Y좌표)이다. 보정이 완료된 궤적 자료는 초당 이동거리를 계산하여 속도(m/sec)를 산출한 후, 과속 분석에 활용한다. 그리고 차량의 출발시점(로그기록의 시작점)과 각 point 궤적의 수집시점간 시간 차이를 계산하여 이를 운전누적시간으로 사용, 피로 분석에 활용한다. 이와 같은 일련의 가공과정이 완료된 자료는 <그림 3-3>과 같다.

과속분석 피로분석

차량ID	년월일	시분초	X좌표	Y좌표	속도(m/sec)	누적시간(초)
159795	20170609	112000	921082	1872644	24.23	3234
159795	20170609	112001	921063	1872629	24.48	3235
159795	20170609	112002	921044	1872613	24.73	3236
159795	20170609	112003	921025	1872597	24.89	3237
159795	20170609	112004	921006	1872581	25.00	3238
159795	20170609	112005	920986	1872565	25.02	3239
159795	20170609	112006	920967	1872549	25.02	3240
159795	20170609	112007	920948	1872533	24.94	3241
159795	20170609	112008	920929	1872518	24.83	3242
159795	20170609	112009	920910	1872502	24.67	3243
159795	20170609	112010	920891	1872487	24.44	3244
159795	20170609	112011	920872	1872471	24.14	3245
159795	20170609	112012	920853	1872456	23.81	3246
159795	20170609	112013	920835	1872442	23.54	3247

<그림 3-3> 분석용 차량 GPS 궤적 자료 예시

차량 GPS 궤적 자료의 수집현황은 <표 3-1>과 같다. 이 자료는 본 연구의 분석범위인 서해안고속도로 구간을 통행한 차량들의 궤적 자료이며, 수집일자별 차량대수와 point 궤적 개수, 파일의 용량을 나타내었다. 일자별 표본수는 최소 1,640대의 3백만 개 궤적(262MB)부터 최대 3,372대의 8백만 개 궤적(727MB)까지 수집되었다. 전체 표본자료수는 총 74,763대의 1억 5,185만 개 point 궤적이며, 용량은 13GB를 초과하는 빅데이터이다.

서해안고속도로 전체 영업소의 2017년 10월 진입교통량은 평균 약 25만 대로 궤적 자료의 표본율은 0.89%이며, 일별 영업소교통량 대비 궤적 자료의 표본율은 0.72%에서 1.13% 수준으로 나타났다. 전체 교통량 대비 높지 않은 표본율이지만, 0.8% 이상의 표본율 수준에서 전반적인 차량들의 통행행태를 내포하고 있음을 증명한 연구결과(Chang and Cheon, 2019)로부터 본 연구에 활용가능성이 충분할 것으로 판단된다.

<표 3-1> 차량 GPS 궤적 자료 수집현황

일자 (연월일)	차량대수 (대)	궤적개수 (천 개)	용량 (MB)	일자	차량대수 (대)	궤적개수 (천 개)	용량 (MB)
20171010	1,640	3,004	262	20171027	2,535	5,313	466
20171011	1,652	3,165	277	20171028	3,372	8,272	727
20171012	1,878	3,597	315	20171029	2,562	4,799	420
20171013	2,371	4,702	412	20171030	1,841	3,485	305
20171014	2,992	6,314	554	20171031	1,860	3,479	305
20171015	2,396	4,507	395	20171101	1,844	3,633	318
20171016	2,148	4,243	372	20171102	2,003	3,730	327
20171017	1,909	3,726	327	20171103	2,319	4,875	428
20171018	1,891	3,817	335	20171104	3,215	7,613	669
20171019	1,991	3,701	324	20171105	2,679	5,159	452
20171020	2,507	5,156	453	20171106	1,991	3,954	346
20171021	3,287	7,635	672	20171107	1,860	3,361	294
20171022	2,698	5,207	456	20171108	1,890	3,698	324
20171023	2,083	4,078	357	20171109	1,944	3,691	323
20171024	1,949	3,626	317	20171110	2,365	5,066	445
20171025	1,985	3,745	328	20171111	3,132	7,632	671
20171026	1,974	3,869	339	전체	74,763	151,850	13,318

본 연구에서 피로 및 과속 분석을 위해 사용하는 차량 GPS 궤적의 속성정보는 <그림 3-4>와 같으며, 시점에 따른 궤적지점, 지점속도, 운전지속시간에 대한 정보를 포함한다.

궤적의 시점 t는 하루 24시간의 초 단위 시각(즉, $1 \le t \le 86400$)이며, 차량 GPS 궤적의 시간간격(time interval)은 1초이므로 차량 한 대가 도로구간을 통행한 일련의 궤적(T)은 $T = [(t_{\min}), \ldots, (t-1), (t), (t+1), \ldots, (t_{\max})], \forall t, t \in T$ 와 같다. 여기서, $t_{\min}$은 분석대상 도로구간에 진입한 시각, $t_{\max}$는 분석대상 도로구간을 진출한 시각이다. 궤적의 각 시점마다 차량이 위치한 도로지점, 즉 t 시점의 궤적지점은 $p(t)$로 정의하며, $p(T) = [p(t_{\min}), \ldots, p(t-1), p(t), p(t+1), \ldots, p(t_{\max})]$와 같다.

차량 GPS 궤적 자료는 도로지점과 궤적지점 간 매칭을 통해 GPS의 위치오차를 보정하였으며, 이에 따라 시점 t의 지점속도 $v(t)$는 1초 동안 이동한 궤적지점 간 거리와 같다. 여기서, 궤적의 시간간격이 1초이므로 식 (3-1)의 방법으로 구할 수 있다. 차량이 출발한 시각(분석대상 도로구간에 관계없이 실제 차량이 통행을 시작한 시각)을 t_0로 정의하면, 시점 t의 운전지속시간(driving duration) $d(t)$는 식 (3-2)와 같이 산정된다.

$$v(t) = p(t) - p(t-1), \quad \forall t, t \in T \qquad \text{식 (3-1)}$$

$$d(t) = t - t_0, \quad \forall t, t \in T \qquad \text{식 (3-2)}$$

시점	$t_{\min}$	…	$t-1$	t	$t+1$	…	$t_{\max}$	시간 방향
궤적지점	$p(t_{\min})$	…	$p(t-1)$	$p(t)$	$p(t+1)$	…	$p(t_{\max})$	
지점속도	$v(t_{\min})$	…	$v(t-1)$	$v(t)$	$v(t+1)$	…	$v(t_{\max})$	
운전 지속시간	$d(t_{\min})$	…	$d(t-1)$	$d(t)$	$d(t+1)$	…	$d(t_{\max})$	

<그림 3-4> 차량 GPS 궤적 시점별 속성정보 정의

제3절 생리적 운전 피로 자료 구축

1. 운전 피로 측정모형 선정

본 연구는 차량 GPS 궤적을 이용하여 고속도로 운전자의 피로도를 측정하고, 도로구간별로 피로운전에 의한 사고위험성을 분석하고자 한다. 따라서 궤적 자료를 이용하여 피로도를 측정할 수 있는 모형을 모색하였다. 선행연구 고찰 결과, 운전자의 피로에 영향을 주는 정보는 운전지속시간과 통행 시간대, 그리고 휴게소 및 졸음쉼터 휴식시간이다. 이들 정보는 모두 차량 GPS 궤적 자료를 이용하여 산출가능하기 때문에 별도의 조사가 필요하지 않으며, 전국 모든 고속도로에 대해서 추출할 수 있는 정보이다. 즉, 본 연구에서 고속도로 구간별 피로운전 위험성을 분석하기 위해 적용가능한 모형은 시간과 관련된 변수만으로 생리적 피로도를 측정하는 모형이어야 한다. 그러나 대부분의 연구들은 생체측정장비를 이용하여 운전시간에 따른 피로도 변화를 정확히 측정하기 위한 연구이며, 시간을 변수로 피로도를 측정한 모형은 Zhang et al. (2020)에서 제시한 모형이 가장 최근에 보고된 모형이다. 이 연구는 Zhang et al. (2014), Zhang et al. (2017), Zhang et al. (2019)의 후속 연구로써 다년 간의 연구를 통해 모형을 고도화하였다.

인간의 생리 및 활동에 따른 피로도는 국적이나 인종에 관계없이 유사하기 때문에(Nillson et al., 1997) 국외에서 개발된 모형이라 할지라도 국내 운전자들의 피로도를 측정하는데 무리가 없다. 이 모형은 실험주행조사로 수집한 표본자료를 기반으로 개발된 것이므로 모든 운전자들의 피로수준을 대표한다고 볼 수는 없지만 이는 모든 모형이 가지는 한계이며, 고속도로를 주행하는 피로운전자들의 사고위험성을 분석하기 위한 기초자료로 활용할 때 일부 오차는 무시할 수 있을 것으로 판단하였다. 그리고 향후에 고도화된 피로도 측정모형이 개발될 경우, 본 연구 방법론에서 적용하는 모형을 교체하여 운전 피로의 사고위험성을 더욱 정확하게 분석할 수 있다.

한편, Zhang et al. (2019)은 실차주행조사를 통해 운전시간대와 운전지속시간에 따른 피로도 측정모형을 개발하였다. 이들은 KSS설문법을 기반으로 조사자마다 다른 시간에 운전을 시작하여 생체피로도와 운전피로도를 동시에 측정하였으며, 생체피로 관련 선행연구를 참조하여 시간대별 피로도 변화를 적용하였다. 그리고 <표 3-2>와 같이 모형으로 측정한 피로도와 KSS 지수를 매칭하여 피로도 지수를 통해 운전자가 느끼는 피로수준을 유추할 수 있도록 하였다. 이 연구는 후속연구인 Zhang et al. (2020)에서 KSS 지표와 SDLP (Standard deviation of lateral position)를 추가조사하여 모형의 정확도를 높였으며, 수면시간에 따른 피로도와 휴식에 따른 피로회복 모형도 개발하였다. 또한 모형으로 산정되는 피로도 지수 '100'을 기준으로 운전자의 정상상태와 피로상태를 구분할 수 있다고 제시하였다.

이 모형은 별도의 측정장비 없이 시간을 변수로 사용하여 운전자의 피로도를 측정할 수 있는 최신의 유일한 모형이며 개인마다 다른 운전행태나 생리적 차이, 차량정보를 배제한 일반화된 모형이다. 즉, 이 모형은 오직 통행시간 정보만 있으면 특정 순간의 운전 피로를 측정할 수 있는 기회를 제공하였고, 본 연구에서 생리적 운전 피로는 이 모형(Zhang et al., 2020)을 적용하여 측정하고자 한다.

<표 3-2> 피로도와 KSS 간 변환표

KSS 지수	설명	피로도 지수	상태
1	완벽히 정상적인 상태	0-18	정상상태
2	매우 정상적인 상태	19-36	
3	정상적인 상태	37-55	
4	비교적 정상적인 상태	56-73	
5	중간 상태	74-91	
6	피곤하지만 정신차리기 위한 노력이 필요 없는 상태	92-110	경계
7	피곤하며 정신차리기 위한 노력이 약간 필요한 상태	111-128	피로상태
8	매우 피곤하며 정신차리기 위해 많은 노력이 필요한 상태	129-146	
9	완벽히 졸린 상태(졸음상태)	147-165	

자료 : Zhang et al. (2019) 인용

2. 생리적 운전 피로 자료 구축 방법

1) 개요

본 연구는 차량 GPS 궤적 자료를 이용하여 생리적 운전 피로를 측정할 수 있는 Zhang et al. (2020)의 모형을 적용한다. 이 때, 개인의 수면시간이나 생체리듬과 같이 생체신호 측정장비를 이용한 조사나 설문조사 등의 추가조사가 필요한 부분은 보편적인 사람들의 특성과 같다는 전제하에 피로도를 측정한다. 생리적 운전 피로를 g로 정의할 때, 식 (3-3)과 같이 생체리듬 피로도 모형과 운전피로도 모형, 휴식피로도 모형의 측정 결과를 합산하여 해당 운전자의 생리적 피로도를 측정할 수 있다.

$$g(t) = g_c(t) + g_d(d) + g_r(c_r) \qquad \text{식 (3-3)}$$

여기서, $g(t)$: 시점 t의 생리적 운전 피로도 지수

$g_c(t)$: 시점 t의 시간대별 생체리듬에 따른 피로도 지수

$g_d(d)$: 운전누적시간(d)에 따른 피로도 지수

$g_r(c_r)$: 휴식시간(c_r)에 따른 피로도 회복 지수

위의 피로도 모형에 따르면 생리적 피로도 지수는 휴식을 취하지 않고 운전을 오래 할수록 지속적으로 올라가며, 특히 새벽 3시에는 생체리듬 피로도 지수만 하더라도 86을 넘는다. 만약 저녁 8시에 출발해서 쉬지 않고 새벽 3시까지 운전하였다면, 피로도 지수는 180이 된다. 그러나 실제 상황이라면 운전 도중에 휴식을 취하거나, 아니면 졸음운전으로 사고가 발생했을 가능성이 있다. 즉 모형으로 측정한 피로도는 실제 피로를 완벽히 표현할 수 없다. 따라서 본 연구에서는 사고의 위험성이 크게 높아지는 특정 수준이 존재할 것으로 가정하고, 그 값을 기준으로 피로운전의 사고위험성을 평가하고자 한다.

2) 시간대별 생체리듬 피로도 측정모형

선행연구를 고찰한 결과, 생체리듬(circadian rhythm)에 따른 피로도는 하루의 시간에 따라 규칙적인 변화를 보이는 것을 알 수 있다(Koh et al., 2007; McEachron, 2012; Minkel and Dinges, 2010; Ting et al., 2008). 본 연구에서는 전체 운전자의 생체리듬 피로도가 통행시각을 변수로 하는 기본적인 고정변수와 같은 개념으로 접근한다. 생체리듬에 따른 피로도는 g_c로 정의하며, 식 (3-4)와 같이 총 8개의 sin 함수로 구성된 형태로 계산된다.

$$g_c(t) = \sum_{i=1}^{8} a_i \sin(b_i t + c_i) \qquad \text{식 (3-4)}$$

여기서, g_c : 생체리듬 피로도 지수

t : 하루 중 초 단위 시간 ($t = [0, ..., 86400]$)

a_i : i번째 sin 함수의 진폭(amplitude) 상수

b_i : i번째 sin 함수의 주파수(frequency) 상수

c_i : i번째 sin 함수의 위상(phase) 편이 상수

위의 모형식에서 sin 함수는 각각 3개의 상수를 가지고 있으며, 상수에 해당하는 값은 <표 3-3>과 같다.

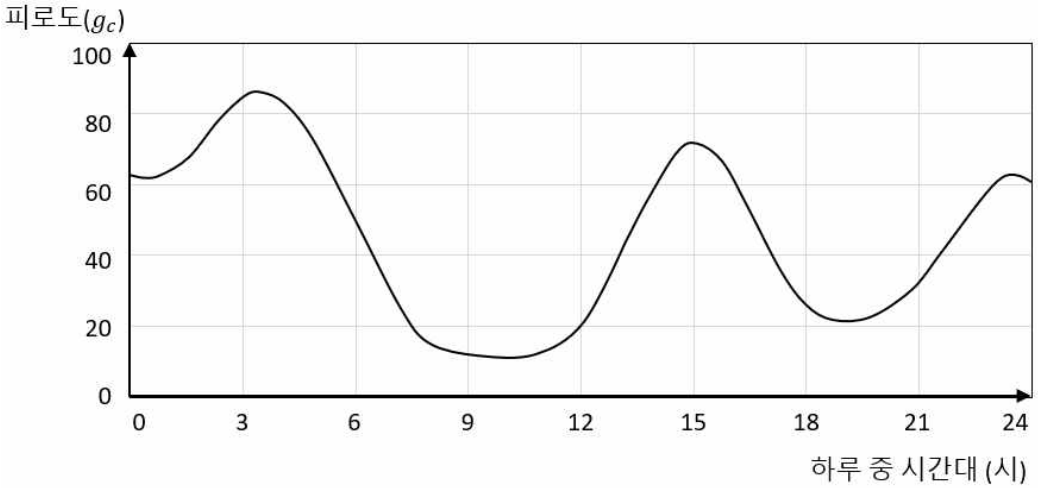
<표 3-3> 생체리듬 피로도 측정모형의 상수값

i	*a*	*b*	*c*	*i*	*a*	*b*	*c*
1	73.26	3.34×10^{-5}	0.4828	5	13.16	2.906×10^{-4}	-2.867
2	46.40	6.869×10^{-5}	2.138	6	14.28	3.276×10^{-4}	4.621
3	19.53	1.529×10^{-4}	0.06796	7	8.315	3.557×10^{-4}	6.925
4	13.48	2.107×10^{-4}	3.122	8	0.6359	5.596×10^{-4}	1.561

주) 상수값은 Zhang et al. (2020)의 연구결과를 준용함

생체리듬에 따른 피로도 측정모형을 통해 시간대별 피로도를 측정하면 <그림 3-5>와 같다. 사람들의 안전운행능력과 경계심은 생체리듬에 따라 달라지며, 피로도가 높을수록 안전운행능력이 저하된다. 그래프에서 새벽 3시경에 피로도가 가장 높게 나타나며, 이후 감소하다가 오전 9시경에 가장 낮아진다. 또한 점심시간이 지난 후 오후 3시경에 다시 최고점까지 오르는 것을 볼 수 있다. 이와 같은 특징은 오전 2-6시 사이와 오후 2-4시 사이에 안전운행능력이 낮다고 보고한 Kaduk et al. (2020)의 연구결과(<그림 2-1> 참조)와 일치하는 것이며, 주로 새벽 시간대와 이른 오후 시간대에 졸음 관련 사고의 비율이 높게 나타난다는 연구 결과와도 맥락을 같이 하는 것으로 판단된다(Chipman and Jin, 2009; Horne and Reyner, 1995; Phillips, 2015; Sahayadhas et al., 2013).

생체리듬 피로도는 운전자가 시간대에 따라 기본적으로 가지는 피로도로 간주한다. 그리고 별도로 조사를 하지 않는 한 개별 운전자의 수면패턴이나 주 활동시간에 대한 정보를 알 수 없기 때문에 모든 운전자가 야간에 수면을 취하고 낮에 활동하는 보편적인 생활을 한다고 가정할 필요가 있다(Riedy et al., 2020). 따라서 모든 운전자는 시간대에 따라 동일한 피로도를 가지는 것으로 가정하며, 생체리듬 피로도를 적용한다.



<그림 3-5> 생체리듬에 따른 피로도 지수

3) 운전 피로도 측정모형

피로는 사전적인 의미로 연속되는 작업에 수반해서 발생하는 심신기능의 저하상태를 의미하며, 운전자는 운전을 할 때 피로가 누적된다. 이와 같은 현상을 피로도 지수로 표현하기 위하여 운전지속시간을 변수로 하는 피로도 측정모형을 적용한다. 본 연구에서 적용하는 운전 피로도 모형은 g_d로 정의하며, 식 (3-5)와 같이 두 개의 sin 함수로 구성된다.

$$g_d(d) = 104.4\sin(4.539 \times 10^{-5}\, d - 0.01652) + 2.922\sin(5.053 \times 10^{-4} - 3.135)$$

식 (3-5)

여기서, g_d : 운전지속시간에 따른 피로도 지수

d : 차량 궤적의 운전지속시간(초)

위의 모형(Zhang et al., 2020)에 따라 측정한 운전지속시간에 따른 피로도 지수를 그래프로 나타내면 <그림 3-6>과 같다. 운전 피로도는 운전지속시간과의 관계가 로그함수와 유사한 형태를 보이며, 5시간까지는 거의 직선에 가깝게 증가하는 특징을 보인다.

<그림 3-6> 운전지속시간에 따른 피로도 지수

4) 휴식 피로도 측정모형

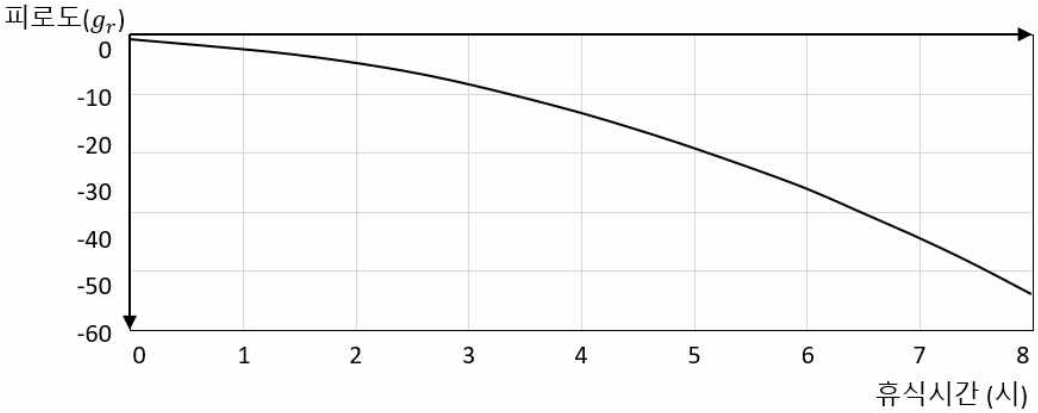
운전을 지속하여 피로가 누적되면 휴식을 취해야 하며, 이는 졸음사고를 예방할 수 있는 가장 효과적인 방법이다. 본 연구의 피로도를 산정할 때 휴식시간은 피로도를 회복(감소)시켜주는 역할을 한다. 본 연구에서 적용하는 휴식 피로도 모형(Zhang et al., 2020)은 휴식시간을 변수로 하며, 식 (3-6)과 같다.

$$g_r(c_r) = -\frac{1.216c_r^2 + 1238c_r + 2.417 \times 10^5}{c_r + 1.6 \times 10^6} \qquad \text{식 (3-6)}$$

여기서, g_r : 휴식시간에 따른 피로도 회복지수

c_r : 휴식시간(초)

휴식시간의 증가에 따른 피로도 회복지수는 <그림 3-7>과 같은 그래프로 나타난다. 휴식 피로도는 휴식시간이 증가할수록 지수함수의 형태로 감소하는 특징을 보인다. 피로를 회복하는 가장 좋은 방법은 수면이며(Horne and Reyner, 1996), 휴식시간 변수만으로는 수면 여부를 알 수 없기 때문에 모형에서 긴 시간을 휴식할수록 피로가 더 큰 폭으로 감소하는 방법으로 표현한 것이다.



<그림 3-7> 휴식시간에 따른 회복 피로도 지수

제4절 교통량 및 사고 자료 구축

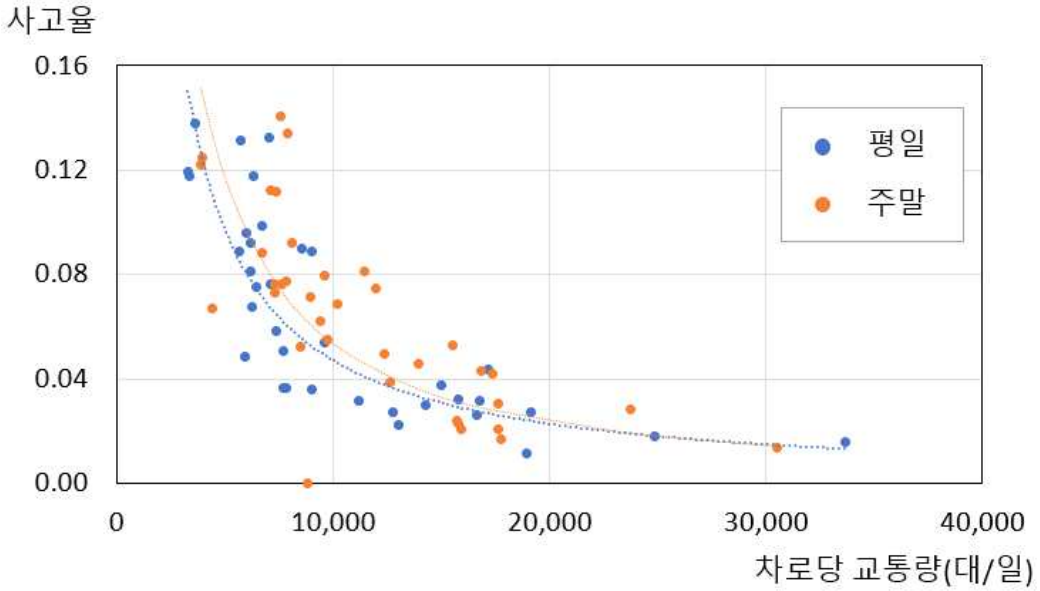
운전 피로 및 과속 분석의 목적은 운전자행태 기반의 교통사고를 설명하기 위함이다. 따라서 분석지표들은 사고를 잘 설명할 수 있는 기능을 갖춰야 하며, 이러한 지표의 성능평가를 위해 본 연구의 대상구간에 대한 사고 자료를 구축한다. 사고 자료는 개별 사고의 발생시각과 주요 사고원인, 고속도로 노선 및 도로이정에 대한 정보가 포함되어 있는 한국도로공사 속보자료를 활용하며, 5년 이상(2015년-2020년 10월)의 자료를 수집하여 적은 표본으로 인해 발생될 수 있는 편의(bias)를 방지하고자 한다. 또한 운전자행태 기반의 사고예측 정확도를 평가하기 위하여 사고원인은 운전자요인에 의해 발생된 사고를 대상으로 하며, 본선구간(휴게소나 졸음쉼터, 진출입로 램프구간 제외)에서 발생된 사고 자료를 구축한다. 사고 자료의 세부 원인(졸음, 과속 등)은 복합적인 경우가 많으며, 정확히 분류되어 있다고 판단하기 어렵기 때문에 전체 운전자요인 사고 자료를 분석에 활용한다.

교통사고를 분석할 때 대표적으로 사용되는 지표는 구간별 사고건수와 사고율이 있다. 사고건수는 구간 내에서 발생한 사고의 빈도를 의미하며, 사고율은 차량의 주행거리와 통행량을 고려한 상대적인 지표이다. 사고율은 '한 차량이 단위km를 주행할 때 경험하는 사고위험성'으로 해석할 수 있으며, 이질적인 그룹 간에 객관적인 비교를 할 때 주로 사용된다(Chipman et al., 1992; Garber and Gadiraju, 1989; Highway Safety Manual, 2010). 본 연구에서 분석지표의 성능평가는 교통량과 도로연장이 모두 다른 고속도로 구간별 사고예측 정확도를 목적으로 하므로 사고율을 지표로 선정하며, 사고율은 식 (3-7)의 방법으로 산정한다. 여기서, $AR(i)$은 구간 i의 사고율을 의미하며, a_i는 사고건수(건/년), q_i는 연평균 일교통량(AADT)(대/일), l_i는 도로길이(km), d는 연간 일수(일)이다.

$$AR(i) = \frac{a_i \times 10^6}{q_i \times l_i \times d} \qquad \text{식 (3-7)}$$

분석 대상구간(36개 도로구간)의 도로길이와 교통량, 운전자요인 사고건수, 사고율 산정결과를 <표 3-4> 및 <표 3-5>와 같이 평일과 주말로 구분하여 구축하였다. AADT는 서울 인근 4만 대/일 이상에서 목포방향으로 내려갈수록 1만 대/일 수준으로 감소하는 추세를 보인다. 반면에 사고건수는 지방으로 내려갈수록 더 많이 발생하는 것으로 나타났다. 특히, 교통량과 구간길이를 이용하여 산정한 사고율은 교통량이 낮은 지방부에서 더 높은 현상이 두드러진다.

도로구간별로 차로당 교통량과 사고율을 비교한 결과는 <그림 3-8>과 같으며, 교통량과 사고율은 전반적으로 반비례하는 관계가 나타난다. 교통량을 기준으로 세부적으로 살펴보면, 일교통량 1만대 이하인 구간에서는 사고율의 편차가 크고 추세가 나타나지 않는다. 그러나 일교통량 1만대 이상 구간에서는 평일 및 주말 모두에서 우하향하는 추세가 명확하게 나타났으며, 교통량과 사고율의 관계는 비선형 관계를 가지는 것으로 나타났다. 교통량이 적은 구간은 과속이 더욱 빈번하게 이뤄지며, 목포방향으로 이동하는 장거리통행이 많아 피로도도 높은 상태이기 때문에 과속 및 피로운전에 따라 사고율이 높게 나타나는 것으로 예상된다. 또한 평일에 비해 주말의 사고율이 다소 높은 경향이 있는 것으로 나타났다.



<그림 3-8> 도로구간별 교통량 대비 사고율 변화

<표 3-4> 도로구간별 교통량 및 사고 자료(평일)

구간	사고건수(건)[1]	AADT(대/일)[2]	구간길이(km)	사고율 (건/백만대·km)
1	5	49,755	4.3	0.018
2	8	67,163	2.9	0.032
3	1	75,785	0.9	0.011
4	13	100,961	6.2	0.016
5	7	38,301	5.2	0.027
6	6	50,014	3.5	0.026
7	9	57,388	4.4	0.027
8	27	47,399	13.6	0.032
9	13	42,786	7.8	0.030
10	19	51,597	6.5	0.044
11	27	45,087	12.3	0.037
12	11	33,530	8.0	0.032
13	19	28,816	9.4	0.054
14	5	26,106	6.6	0.022
15	9	18,023	10.7	0.036
16	10	15,363	13.7	0.036
17	11	15,445	10.8	0.051
18	22	14,701	19.7	0.058
19	9	11,867	12.0	0.049
20	15	13,395	8.7	0.099
21	17	14,237	12.0	0.076
22	10	12,579	9.0	0.068
23	13	18,094	6.2	0.089
24	11	11,296	8.4	0.089
25	19	12,054	12.6	0.096
26	27	12,634	13.9	0.118
27	32	11,523	16.2	0.132
28	13	12,440	9.9	0.081
29	10	12,871	7.9	0.075
30	4	12,373	2.7	0.092
31	21	7,265	16.1	0.138
32	25	6,602	24.3	0.120
33	8	6,684	7.8	0.118
34	5	17,104	2.5	0.090
35	42	14,150	17.2	0.132
36	2	15,615	2.7	0.036

주 1 : 운전자요인 사고 자료(한국도로공사 교통사고 속보자료, 2015-2020년 10월)

2 : 상시·수시교통량조사 자료(2015-2019년)로 각 도로구간별 교통량을 산출함

<표 3-5> 도로구간별 교통량 및 사고 자료(주말)

구간	사고건수(건)[1]	AADT(대/일)[2]	구간길이(km)	사고율 (건/백만대·km)
1	3	47,503	4.3	0.028
2	2	63,707	2.9	0.021
3	1	70,435	0.9	0.030
4	4	91,587	6.2	0.014
5	4	37,909	5.2	0.039
6	2	47,396	3.5	0.023
7	5	52,191	4.4	0.042
8	8	47,174	13.6	0.024
9	10	46,487	7.8	0.053
10	3	53,293	6.5	0.017
11	7	52,863	12.3	0.021
12	8	41,878	8.0	0.046
13	9	37,076	9.4	0.050
14	5	33,732	6.6	0.043
15	10	23,993	10.7	0.075
16	10	20,357	13.7	0.069
17	6	19,439	10.8	0.055
18	12	18,839	19.7	0.062
19	7	14,649	12.0	0.076
20	4	16,931	8.7	0.052
21	8	17,953	12.0	0.071
22	7	16,230	9.0	0.092
23	6	22,894	6.2	0.081
24	7	14,203	8.4	0.113
25	7	14,606	12.6	0.073
26	12	14,817	13.9	0.112
27	10	13,392	16.2	0.088
28	6	15,261	9.9	0.076
29	5	15,735	7.9	0.077
30	3	15,141	2.7	0.141
31	5	8,858	16.1	0.067
32	12	7,764	24.3	0.122
33	4	7,883	7.8	0.125
34	2	19,259	2.5	0.080
35	19	15,805	17.2	0.134
36	0	17,598	2.7	0.000

주 1 : 운전자요인 사고 자료(한국도로공사 교통사고 속보자료, 2015-2020년 10월)

2 : 상시·수시교통량조사 자료(2015-2019년)로 각 도로구간별 교통량을 산출함

제5절 분석 제외구간 설정

1. 과속단속지점 상·하류부의 변속 영향구간 분석

1) 과속단속 영향구간의 정의

고속도로에서 과속으로 주행하는 대부분의 차량들은 과속단속을 피하기 위하여 단속지점에 접근하면서 감속했다가 단속지점을 통과한 이후 다시 과속하는 일명 '캥거루 운전'을 한다. 이러한 주행특성으로 인해 도로구간 내에 과속단속지점이 있는 경우 전체 통행시간(또는 거리) 대비 과속 통행시간(또는 통행거리)의 비율이 감소하기 때문에 본 연구의 과속 분석에 영향을 미친다. 즉, 과속단속지점이 존재하는 구간은 실제 과속현황에 비하여 과소추정될 가능성이 있으며, 구간별 지표산정결과는 과속단속 유무에 따라 객관적인 비교가 어려워진다. 따라서 과속단속지점 상·하류부의 일정 거리를 통행한 궤적 자료는 분석에서 제외하고자 하며, 본 연구에서는 이 구간을 '과속단속 영향구간'으로 정의한다.

과속단속 영향구간을 분석한 선행연구를 검토한 결과, 연구마다 영향구간이 크게 차이나는 것으로 나타났다. 짧은 경우 상·하류부 모두 300-400m로 보고되었으며(Liu et al., 2011), 길게는 최대 1.5km까지 속도가 변하는 것으로 분석되었다(Bar-Gera et al., 2017). 이러한 차이는 도로의 제한속도 차이나 과속단속 영향의 정도(속도 변화폭)를 어떻게 설정하였는지에 따라 발생될 수 있으며, 본 연구는 차량 GPS 궤적을 이용하여 1초 단위 시점별 속도를 분석할 수 있기 때문에 선행연구의 결과를 적용하지 않고 별도의 분석을 통해 과속단속 영향구간을 산정하고자 한다.

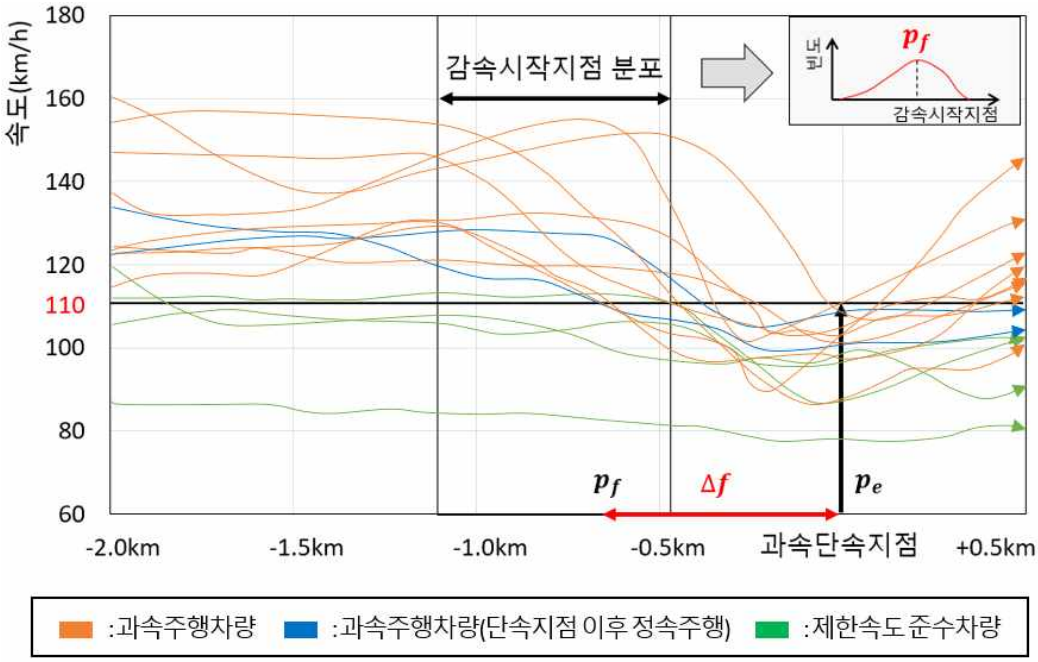
과속 분석 과정에서 적용할 과속단속 영향구간의 거리를 상류부 구간 Δf와 하류부 구간 Δr로 정의하며, 실제 과속단속 지점을 중심으로 상·하류부 2km 내의 개별 차량 속도 변화를 분석하여 산정한다.

2) 과속단속지점 상·하류부 영향구간 분석 방법

과속단속지점 상류부 2km 구간의 개별 차량 속도 변화는 <그림 3-9>와 같으며, 차량들이 접근하면서 제한속도 수준까지 감속하는 것을 확인할 수 있다. 여기서, 상류부 영향구간의 분석 방법은 다음과 같다.

과속단속지점을 p_e로 정의할 때, 해당 구간을 통과하는 차량들의 지점별 평균속도 및 표준편차를 분석한 후, 평균속도와 표준편차의 변동이 시작되는 지점 p_f를 결정한다. 그리고 두 지점을 이용하여 과속단속 상류부 영향구간 거리 Δf는 식 (3-8)과 같이 산정한다.

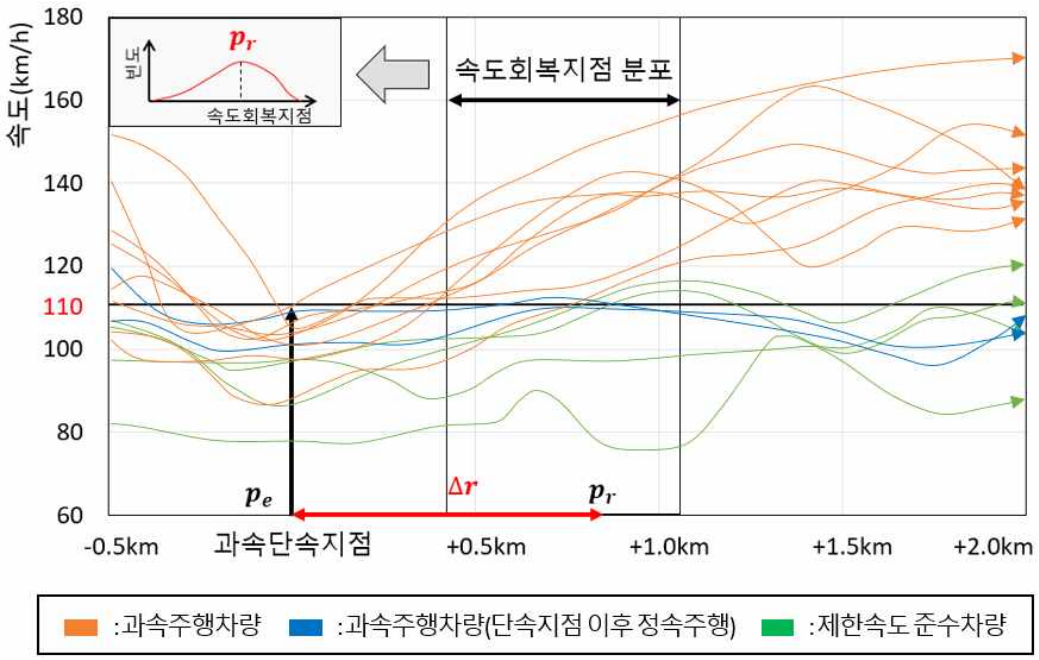
$$\Delta f = |p_e - p_f| \qquad \text{식 (3-8)}$$



<그림 3-9> 과속단속지점 상류부 2km 구간의 개별 차량 속도 변화

과속단속지점 하류부 2km 구간의 개별 차량 속도 변화는 <그림 3-10>과 같으며, 과속단속지점을 통과한 후 과속주행 차량들은 다시 속도를 높이는 경향을 보인다. 이 때, 단속지점을 지난 후에도 정속주행하는 차량들도 존재하며, 속도의 편차는 단속지점보다 커지게 된다. 이 관계를 이용하면 하류부 영향구간은 다음과 같은 방법으로 분석할 수 있다. 과속단속지점 p_e를 지난 후, 해당 구간을 통과하는 차량들의 지점별 평균속도 및 표준편차를 분석하여 두 지표의 변동이 안정되는 지점을 p_r로 정의한다. 따라서 과속단속 하류부 영향구간 거리 Δr은 식 (3-9)와 같이 산정한다.

$$\Delta r = |p_e - p_r| \qquad \text{식 (3-9)}$$

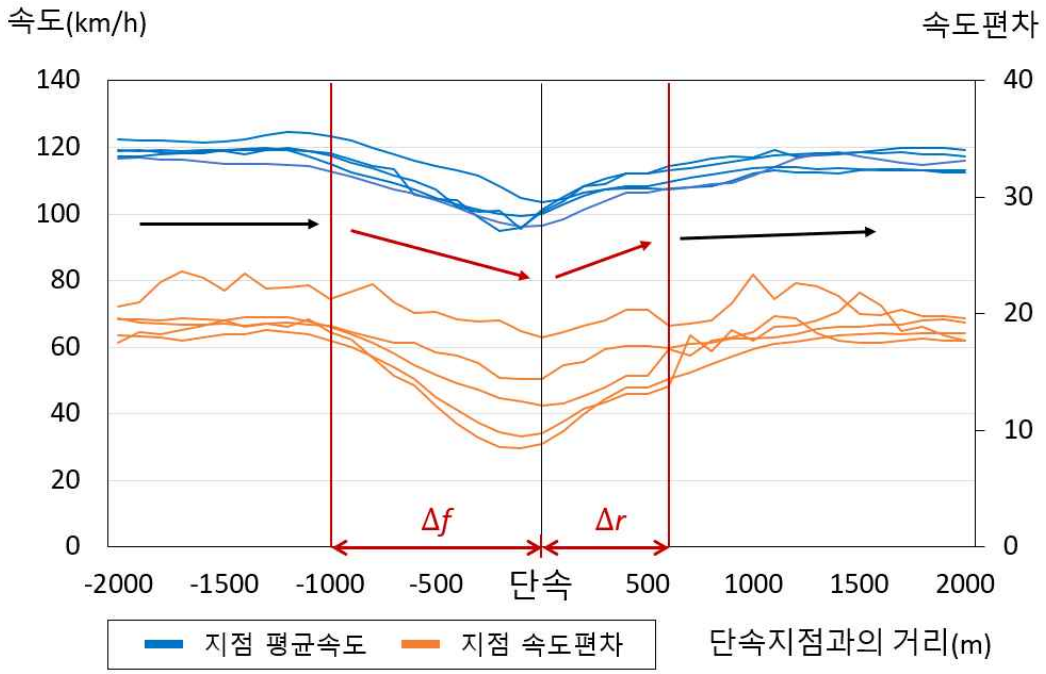


<그림 3-10> 과속단속지점 하류부 2km 구간의 개별 차량 속도 변화

3) 과속단속지점 상·하류부 영향구간 분석결과

본 연구의 대상구간 중 인근에 IC나 JC, 그리고 휴게소나 졸음쉼터가 존재하지 않는 5개의 과속단속지점을 선정하여 상·하류부 2km 범위에 대해서 100m 단위로 지점평균속도와 지점속도 표준편차를 산정하였다. <그림 3-11>은 그 결과를 그래프로 나타낸 것이다.

상류부 2km 지점에서 과속단속지점(0m)으로 접근하는 동안 약 1km까지는 평균속도와 속도편차가 큰 변화가 없었다. 하지만 1km 이내부터 두 지표가 모두 감소하였으며, 본 연구의 상류부 영향구간(Δf)은 1km로 결정한다. 단속지점을 지난 후 평균속도와 표준편차는 다시 증가하는 추세를 보였으나, 약 600m 이후부터는 그 증가추세가 약해지고 조금씩 꾸준히 증가하는 것으로 나타났다. 이는 비교적 서서히 가속하는 운전행태가 자연스럽게 반영된 것으로, 본 연구의 하류부 영향구간(Δr)은 600m로 결정한다.

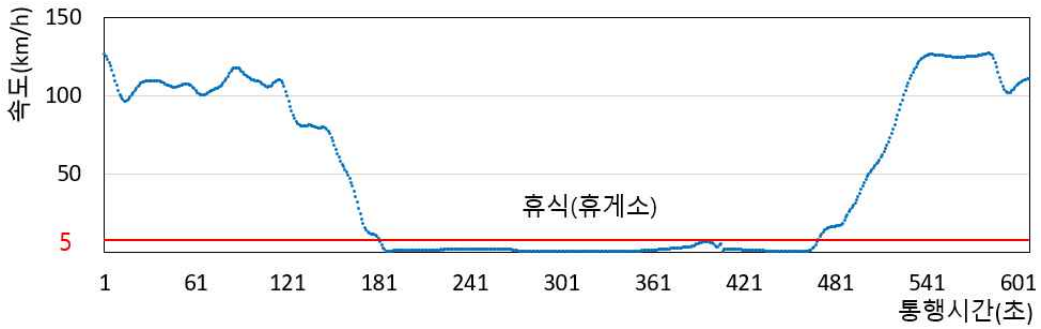


<그림 3-11> 과속단속지점 상·하류부 영향구간 분석

2. 휴게소 및 졸음쉼터 영향구간 설정

차량 GPS 궤적 자료는 개별 차량의 속도변화를 이용하여 차량이 휴게소 또는 졸음쉼터에서 휴식을 취하였는지 유추할 수 있다. <그림 3-12>는 휴게소에서 휴식을 취한 것으로 추정되는 한 차량의 속도를 그래프로 나타낸 것이다. 차량의 궤적은 휴게소 지점에서 속도가 0에 가까운 상태로 약 5분간 유지되었다. 단, GPS는 저속일 때 오차가 커지며 멈춰 있을 때 수신좌표가 이동하는 경우가 있다. 이와 같은 GPS 오차를 고려할 때 속도가 '0km/시'일 때만 정차 중인 것으로 판단할 경우 실제로는 정차 중임에도 불구하고 이동 중인 것으로 오판할 수 있다. 따라서 본 연구는 '5km/시 이하'를 정차의 기준속도로 설정하였으며, 그 결과 그림의 차량은 300초에 가까운 시간 동안 휴식을 취한 것으로 판단할 수 있다.

그러나 차량의 속도가 5km/시 이하일지라도 실제로 휴식을 취하기 위해 정차한 것이 아니라면 곧 다시 속도를 높일 가능성도 있다. 또한 5분 미만의 휴식은 피로회복에 큰 도움이 되지 않으며(Wang and Pei, 2014), 전방에 교통사고와 같은 돌발상황 발생시 잠시 정차하는 경우도 있을 수 있다. 이처럼 속도 자료만으로 휴식 여부를 판단해야 하는 경우, 어느 정도의 범위를 두고 보수적으로 접근하는 것이 바람직할 것으로 판단된다. 따라서 본 연구에서는 5km/시 이하의 속도로 5분 이상 유지할 경우 휴식을 취한 것으로 정의한다.

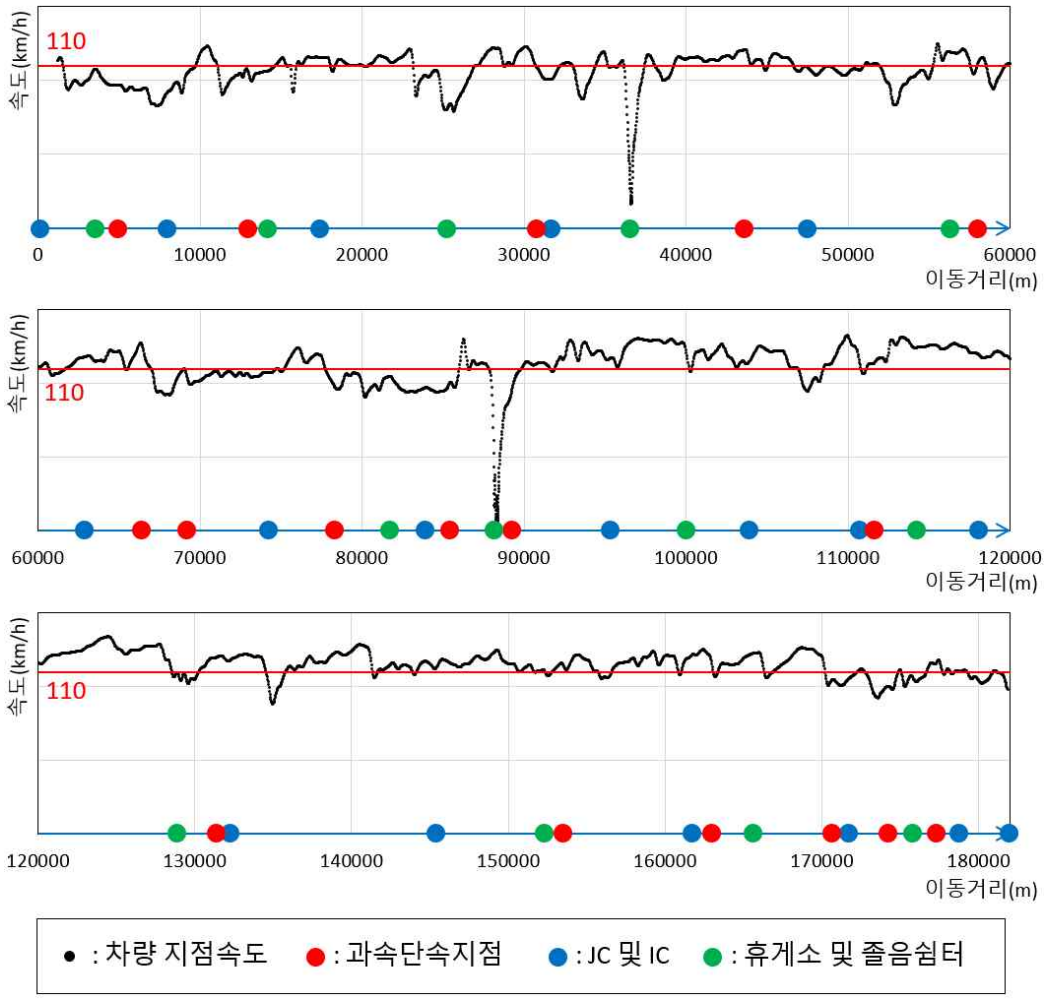


<그림 3-12> 휴게소 및 졸음쉼터 영향구간

제6절 수집자료 특성 분석

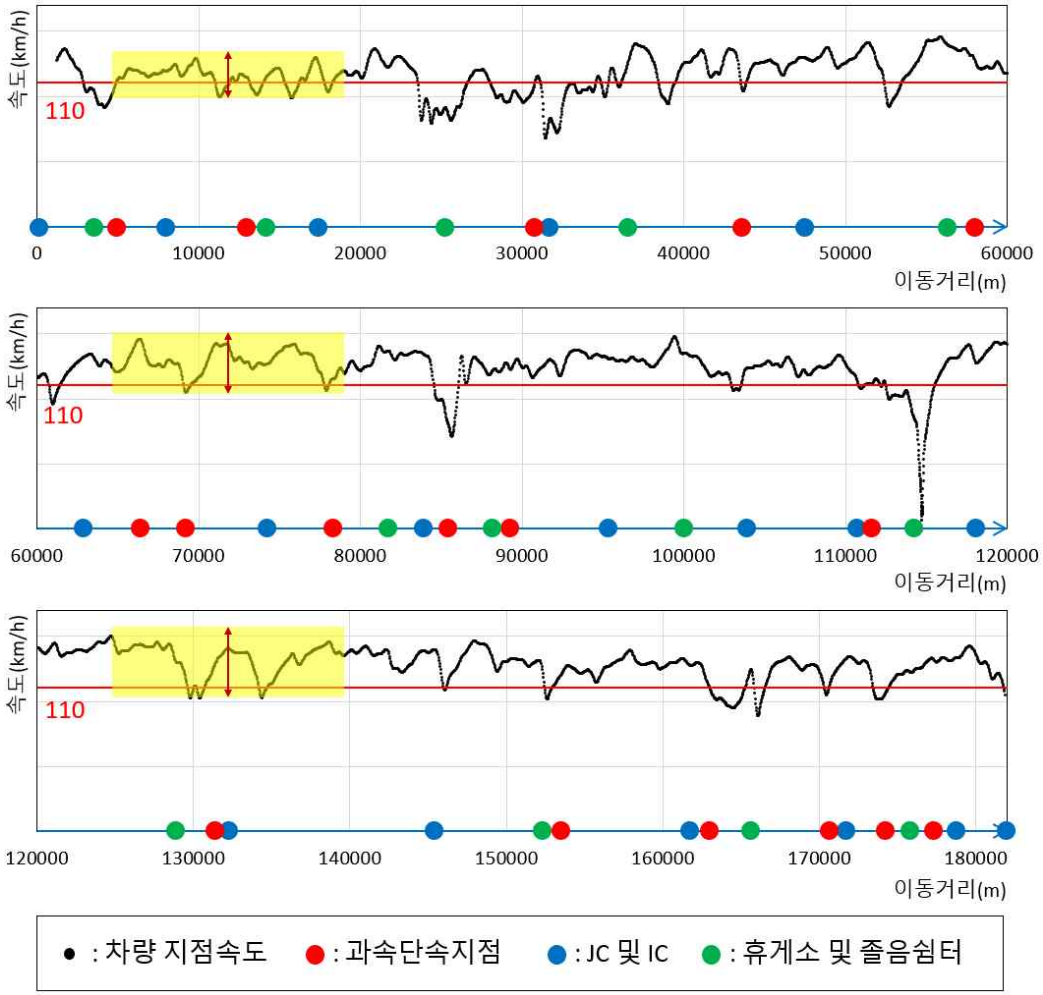
1. 개별 차량의 시·공간 속도 특성

당진JC에서 고창JC(총 182km, 17개 세부구간)까지 통행한 차량의 지점별 속도를 그래프로 나타내면 <그림 3-13>과 같다. 그림의 차량은 해당 구간을 통행한 평균속도가 108.9km/시이지만, 그래프에서는 제한속도(110km/시)를 초과한 지점이 상당수 존재하였다.



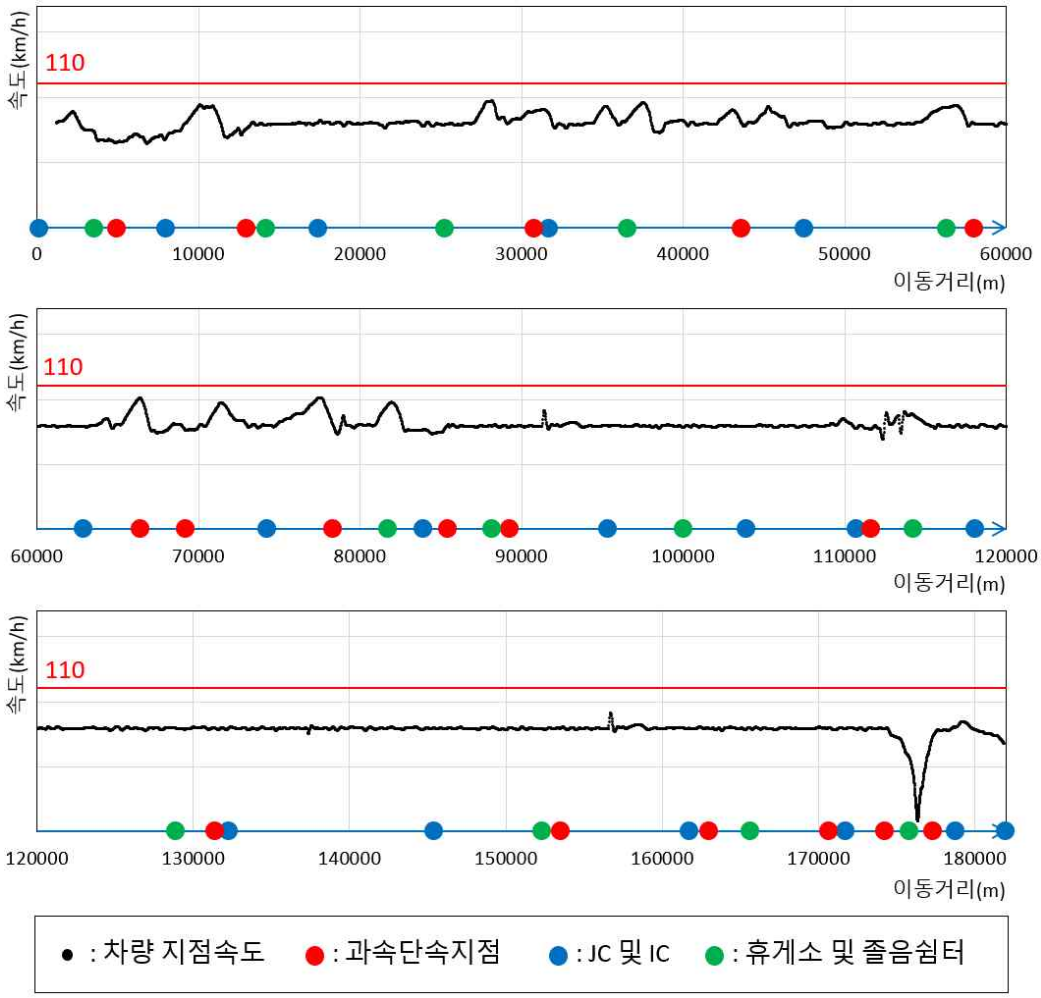
<그림 3-13> 순간속도의 시·공간 변동(일반 유형)

<그림 3-14>는 동일한 방법으로 과속차량의 속도변화 그래프를 나타낸 것이다. 그림의 차량은 오후 1시경에 출발하여 약 180km 구간을 통행하였으며, 평균속도가 121.3km/시로 나타나 과속차량임을 알 수 있다. 과속단속지점을 통과할 때마다 감속하는 캥거루 운전행태가 확인되었다. 또한 속도의 변동폭이 일반차량보다 더 크게 나타난다. JC 또는 IC를 통과할 때 속도가 크게 감소하는 특성을 보여 혼잡이 다소 존재했던 것으로 추정되며, 주행거리가 길어지면서 속도가 전반적으로 높아지는 양상을 보였다. 이는 운전지속시간이 증가하면 속도가 다소 증가한다는 선행연구의 내용과 일치한다(Kong et al., 2020; Ranney et al., 1999).



<그림 3-14> 순간속도의 시·공간 변동(과속 유형)

<그림 3-15>는 저속으로 주행한 차량의 속도를 그래프로 표현한 것이다. 해당 차량은 전체 구간을 평균속도 79.6km/시로 주행한 차량이며, 전반적으로 속도의 변동이 적은 저속차량임을 알 수 있다. 속도자료만으로는 정확한 차종을 알 수 없지만, 거의 지속적으로 속도를 유지한 것으로 미루어보아 대형화물차일 가능성이 높아 보인다. 본 연구에서 사용하는 자료는 내비게이션 GPS 자료이기 때문에 다양한 차종이 모두 포함되어 있으며, 이 차량과 유사한 시·공간적 속도 특성을 보이는 차량은 저속 유형의 차량으로 볼 수 있다.

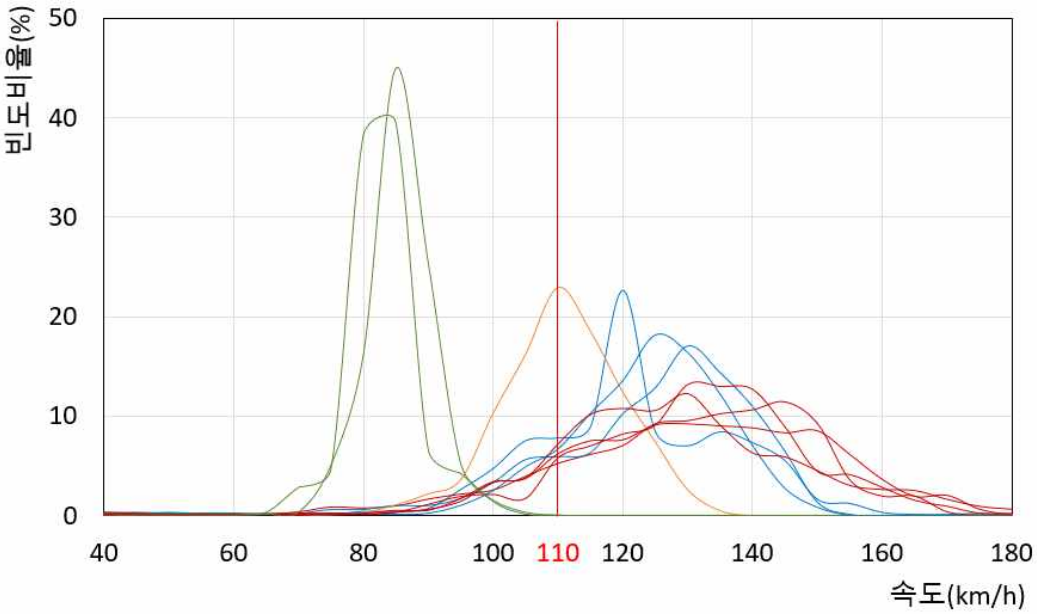


<그림 3-15> 순간속도의 시·공간 변동(저속 유형)

2. 개별 차량의 속도분포 특성

개별 차량의 전체 구간에 대한 속도분포를 그래프로 나타내면 <그림 3-16>과 같다. 이 그림은 당진JC-고창JC 구간(17개 세부구간)을 통행한 장거리 통행차량들의 1초 단위로 수집된 모든 속도자료를 5km/시 단위의 빈도분포로 산출한 후 그 빈도에 따른 비율을 그래프로 나타낸 것이다.

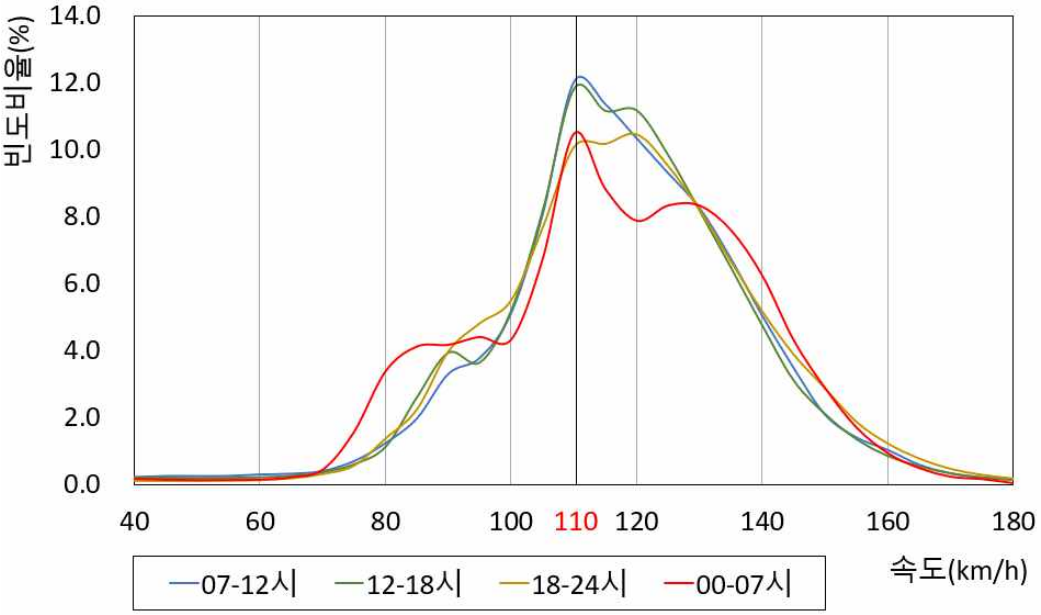
속도분포 특성에서 중요한 점은 집계자료를 활용한 연구에서 가장 많이 사용하던 지표인 평균속도와 속도 표준편차의 활용 가능성에 대한 논의일 것이다. 그림에서 최빈속도가 제한속도와 같은 110km/시인 차량(주황색)의 경우 정규분포에 가까운 형태를 보인다. 평균속도가 110km/시 수준으로 집계기반으로는 과속차량이 아니지만, 실제로는 주행 중 절반은 110km/시 이상으로 주행하였다. 또한 개별 차량들의 속도 표준편차는 과속으로 주행한 차량일수록 비교적 넓은 형태의 분포를 보이며, 속도의 편차가 큰 것으로 판단할 수 있다. 이 결과는 속도의 편차가 클수록 사고위험성이 높아진다는 기존의 연구결과를 뒷받침할 수 있다.



<그림 3-16> 개별 차량 속도분포 그래프

3. 시간대별 속도분포 특성

모든 차량의 전체 구간에 대한 속도분포를 시간대별(오전, 오후, 저녁, 새벽)로 구분하여 그래프로 나타낸 결과는 <그림 3-17>과 같다. 시간대별 속도분포 특성을 분석한 결과, 평균속도는 시간대별로 큰 차이를 보이지 않았다. 그러나 속도분포를 살펴보면 시간대별로 일부 차이가 있었다. 특히 새벽시간대에는 80km/시의 속도로 저속 주행한 비율이 두드러지게 나타났으며, 이와 동시에 140km/시의 과속 비율도 높은 것으로 나타났다. 새벽시간대에 화물차의 비중이 비교적 크고, 교통량이 적어 과속으로 주행하는 차량이 많은 것이 원인일 것으로 예상되며, 저속 및 과속 차량이 혼재되기 때문에 사고의 위험성이 더 클 것으로 판단된다.



구분	오전시간대 (07-12시)	오후시간대 (12-18시)	저녁시간대 (18-24시)	새벽시간대 (00-07시)
평균속도 (km/시)	116.2	115.9	117.9	115.7

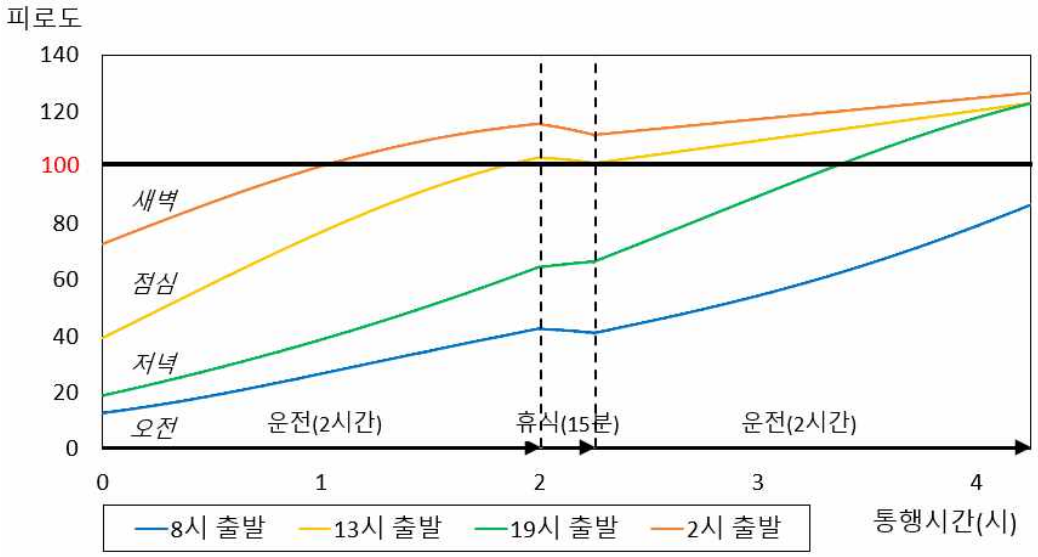
<그림 3-17> 시간대별 속도분포 그래프

4. 생리적 운전 피로 특성

생리적 운전 피로의 측정 결과가 어떤 특성을 보이는지 검토하기 위하여 <표 3-6>과 같이 네 가지 시나리오로 구성하여 피로도 지수를 각각 산정하였다. 모든 시나리오는 [2시간 운전-15분 휴식-2시간 운전]하는 일정으로 동일하며, 각각 오전, 점심, 저녁, 새벽 시간대에 출발하는 것으로 구분하였다. 시나리오별 피로도 측정 결과는 <그림 3-18>과 같다. 피로도 100을 정상/피로상태 경계라 할 때, 새벽 2시에 출발한 운전자는 1시간 운전 후, 오후 1시에 출발한 운전자는 2시간 운전 후에 경계값에 도달하였다. 반면에 오전과 저녁에 출발한 경우 3-5시간 이상 운전시 경계값에 도달했다. 즉, 생리적 운전 피로는 차량의 출발 시간대의 영향이 크게 작용한다는 것을 확인할 수 있다.

<표 3-6> 생리적 운전 피로 측정 시나리오

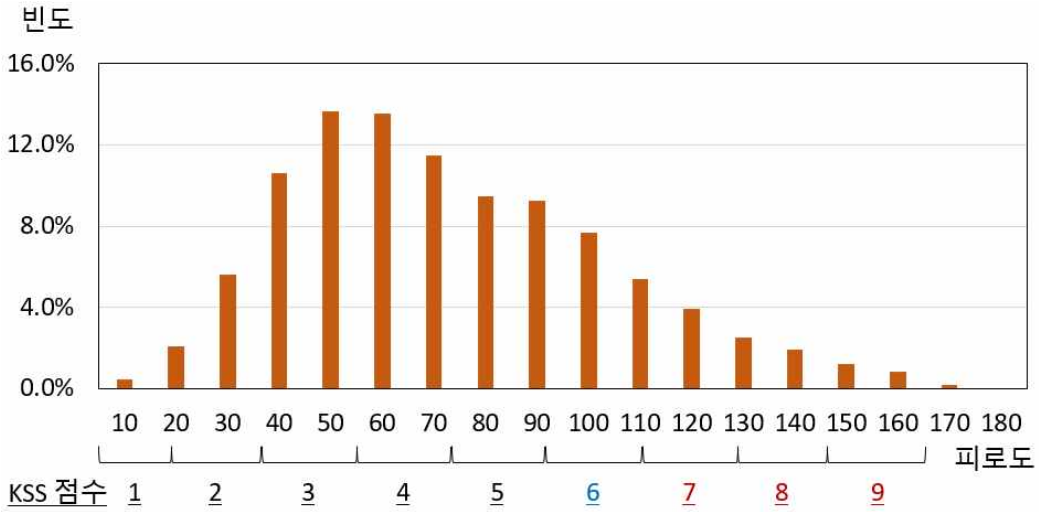
시나리오	출발시각	운전 및 휴식시간	비고
1	08:00	2시간 운전 후	오전 시간대 출발
2	13:00	15분 휴식,	점심 시간대 출발
3	19:00	휴식 후 2시간 운전	저녁 시간대 출발
4	02:00	(모두 동일한 운전일정 가정)	새벽 시간대 출발



<그림 3-18> 시나리오별 생리적 운전 피로 측정결과

모든 차량 GPS 궤적에 대한 생리적 피로도를 측정한 후, 피로도 10 단위로 빈도분포를 분석한 결과는 <그림 3-19>와 같다. Zhang et al. (2019)은 모형으로 추정한 생리적 피로도를 KSS 피로수준과 매칭하였으며 그림에 함께 표현하였다. 운전자의 피로 측면에서 정상상태로 볼 수 있는 KSS 5점 이하의 운전자는 전체 중에서 76.2%에 해당한다. 정상과 피로상태의 경계인 KSS 6점에 해당하는 운전자는 7.7%이며, 나머지 16.1%의 운전자가 KSS 7점 이상의 피로상태로 운전한 것으로 분석되었다. 그 중에서도 극심한 피로상태인 KSS 9점인 상태에 해당하는 운전자가 2.3% 존재하는 것으로 나타났다.

피로도 빈도분포를 분석한 결과, 많은 운전자들이 피로상태로 운전하는 것으로 나타났다. 피로상태로 운전할 경우 부주의한 운전을 하거나 졸음운전을 하여 교통사고가 발생될 수 있으며, 실제로 운전부주의 및 졸음운전은 고속도로 교통사고의 주요 발생원인 중 하나이다.



<그림 3-19> 차량 GPS 궤적 피로도 빈도분포

5. 피로도와 속도의 관계 분석

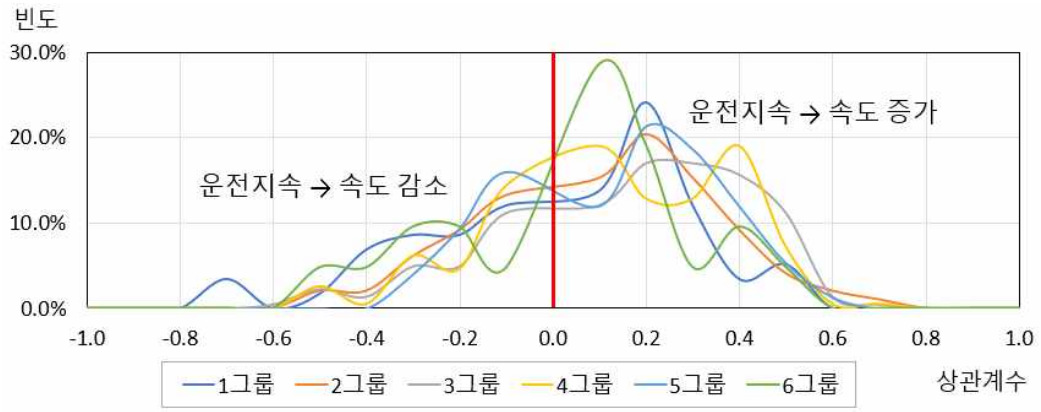
장시간 운전을 할 때 피로가 누적되면서 목적지에 더 빨리 도착하기 위하여 평균속도가 점진적으로 증가하는 경향이 나타날 수 있다(Ranney et al., 1999). 그러나 이는 시뮬레이션 주행실험 결과이며, 실제 도로에서 수집한 교통자료를 이용하여 피로도에 따른 속도의 관계를 분석한 연구는 현재까지 보고되지 않았다. 차량의 주행속도는 도로조건이나 교통량과 같은 주행환경에 큰 영향을 받기 때문에 피로도와 속도의 관계를 정확히 분석하기 어려운 한계가 있다. 차량 GPS 궤적 자료를 이용할 경우 차량의 운전지속시간에 따른 속도의 변화를 분석할 수 있지만 그 변화가 도로조건의 차이나 주변 교통량의 영향에 따른 것인지, 또는 운전자의 피로에 따른 것인지 정확히 판별해낼 수 있는 방법이 없다. 이처럼 다른 모든 조건을 완벽히 통제할 수 없는 한계를 감안하더라도 피로도와 속도 간에 일련의 관계가 존재할 수 있다는 가능성을 검토하는 것은 사고예방 대책을 마련하는데 도움이 될 수 있다.

따라서 차량 GPS 궤적 자료를 이용하여 다음의 두 가지 접근법으로 통제변수를 다르게 적용하여 피로도에 따른 속도의 변화를 분석하였다. 첫 번째 접근법은 개별 차량의 운전지속시간에 따른 속도의 변화를 분석하는 방법이다. 이 방법은 한 운전자가 장시간 운전할수록 속도가 어떻게 변화하는지 분석하는 것이므로 피로도와 속도의 관계를 가장 직관적으로 확인할 수 있다. 그러나 교통량이나 기하구조 등 도로구간 특성에 따른 속도 변화를 통제할 수 없는 한계가 있다. 두 번째 접근법은 특정 구간과 특정 시간대를 선정하여 해당 시간대에 해당 도로구간을 통행한 차량들의 피로도 및 속도 수준을 분석하는 방법이다. 이는 모두 다른 운전자를 대상으로 하기 때문에 실제 운전자의 피로가 누적됨에 따른 속도의 변화를 분석하는 것은 아니지만, 도로특성과 교통량특성을 통제한다는 점에서 이점이 있다. 또한 이 접근법은 중심극한의 정리에 따라 운전자들의 차량운행특성이 집계과정을 거치면서 정규분포를 따르며 전반적인 추세를 보일 것이라는 다소 강한 전제조건을 기반으로 한다.

먼저 개별 차량의 운전지속시간에 따른 속도의 변화를 분석하였다. 이때, 피로도에 따른 속도의 변화는 저속차량과 과속차량이 서로 다른 특성을 보일 것으로 예상된다. 특히 화물차와 같은 저속차량은 기본적으로 규정속도를 지키기 때문에 운전의 지속에 따라 속도변화가 적을 것으로 판단되며, 평소 과속성향이 있는 운전자의 경우 피로도가 누적됨에 따라 속도가 높아질 것으로 예상된다. 이에 당진JC에서 고창JC까지 전구간을 통행한 671대의 차량들을 대상으로 전구간에 대한 평균속도를 산정, 그룹화하여 운전지속시간과 각 차량의 궤적시점별 속도 간의 상관분석을 수행하였으며, 그 결과는 <표 3-7>과 <그림 3-20>과 같다. 운전지속시간과 속도의 관계는 70.6%의 차량들이 양의 관계가 있는 것으로 나타났고, 특히 평균속도가 110-130km/시인 그룹에서 운전지속에 따른 속도의 증가가 더 많이 나타났다(상관계수 0.4 이상인 차량 30%).

<표 3-7> 개별 차량의 운전지속시간과 속도의 상관분석

그룹	평균속도 (km/시)	표본수	속도(km/시)		상관분석 결과		
			평균	표준편차	양의 관계	음의 관계	(+) 비율
1	100 미만	58	89.5	9.9	34	24	58.6%
2	100-110	98	106.2	10.8	66	32	67.3%
3	**110-120**	223	115.0	14.2	**167**	56	**74.9%**
4	**120-130**	195	124.3	16.0	**140**	55	**71.8%**
5	130-140	76	134.4	18.2	53	23	69.7%
6	140 이상	21	144.9	20.9	14	7	66.7%
전체		671	115.9	19.4	**474**	197	**70.6%**

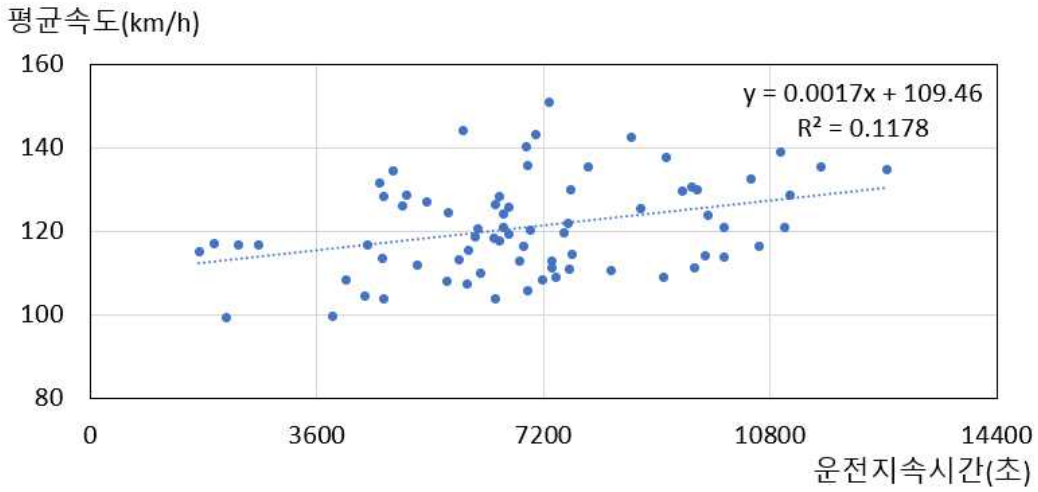


<그림 3-20> 차량별 운전지속시간과 속도의 상관관계 빈도분포

두 번째 방법으로 특정 구간과 특정 시간대를 선정하여 해당 시간대에 해당 도로구간을 통행한 차량들의 피로도 및 속도 수준을 분석하였다. 구간은 광천IC에서 대천IC로 통행하는 2km의 직선구간(과속단속의 영향이 없는 구간)으로 선정하였으며, 시간대는 생체피로의 영향을 배제하기 위하여 생체피로가 낮은 오전 8시부터 오전 11시까지를 분석대상으로 결정하였다. 즉, 해당 시간대에 이 구간을 통행한 차량들의 구간평균속도를 산정하여 운전지속시간과 속도의 상관분석을 수행함으로써 두 변수의 관계를 분석하였다.

오전 8-11시 사이에 광천IC에서 대천IC 사이의 2km 직선구간을 통행한 74대 차량들의 궤적 자료를 분석하였다. 그 결과는 <그림 3-21>과 같으며, 운전지속시간이 높을수록 차량들의 구간평균속도가 다소 높은 것으로 나타났다. 또한 운전지속시간과 평균속도의 상관분석을 수행한 결과 상관계수는 +0.34로 양의 관계가 있는 것으로 분석되었다.

운전지속시간과 속도의 관계를 두 가지 접근법으로 분석한 결과 두 방법 모두에서 운전지속시간이 증가할수록 속도가 증가하는 경향을 보인다는 Ranney et al. (1999)의 연구결과와 일치하는 결과가 도출되었다. 즉, 운전자의 피로도가 증가하면 속도도 다소 높아지는 양의 관계가 있으며, 사고 요인의 관점에서 피로와 과속을 독립적인 상태가 아닌 일정 부분 상관관계가 존재하는 것으로 접근하는 것이 적합할 것으로 판단된다.

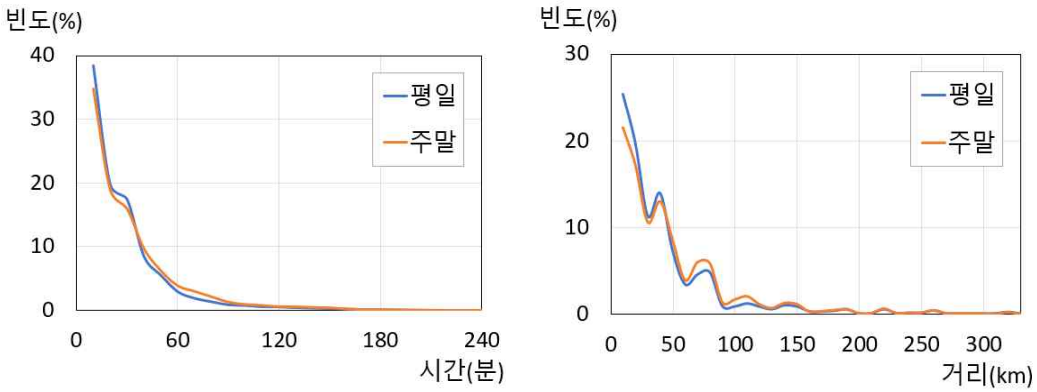


<그림 3-21> 운전지속시간과 속도의 관계

6. 평일 및 주말의 통행특성 분석

평일과 주말의 통행특성 차이를 비교하기 위하여 차량들의 통행시간 및 통행거리 분포를 분석하였다. 일반적으로 통행시간(운전지속시간)이 길수록 운전자의 피로도가 높아지며, 이에 따라 졸음사고의 위험성이 높아진다. 즉, 평일과 주말의 통행시간 및 통행거리 비교를 통해 요일 구분에 따른 사고 위험성을 유추할 수 있다. 그리고 그 결과를 본 연구의 분석결과와 비교하여 합리적인 분석이 이뤄졌는지 검토할 수 있다.

평일 및 주말의 통행시간과 통행거리 분포를 분석한 결과는 <그림 3-22>와 같다. 두 그래프의 형태는 평일과 주말에 유사한 추세를 보이는 것으로 분석되었으며, 30분 이내(약 40km 이내)의 단거리 통행차량들의 비율은 주말보다 평일에 다소 높은 것으로 나타났다. 평일에 출퇴근 목적으로 짧은 구간을 통행하는 교통량이 더욱 많기 때문에 이와 같은 결과가 나타난 것으로 판단된다. 장거리 통행차량 비율은 주말에 전반적으로 높은 것으로 분석되어 피로운전 위험성은 주말에 다소 높을 것으로 예상되며, 앞에서 주말의 사고율이 평일보다 높게 나타난 결과와도 일치한다. 통행거리 분포 그래프에서 거리구간대별로 빈도가 증감을 반복하는 것으로 나타났으며, 이는 고속도로의 진출입이 IC를 통해서만 이뤄지는 도로이용특성이 반영된 결과이다.



<그림 3-22> 평일 및 주말의 통행시간과 통행거리 분포

제4장 운전 피로 및 과속 분석 방법론 개발

제1절 운전 피로 분석 방법론

1. 운전 피로 분석 방법 정립

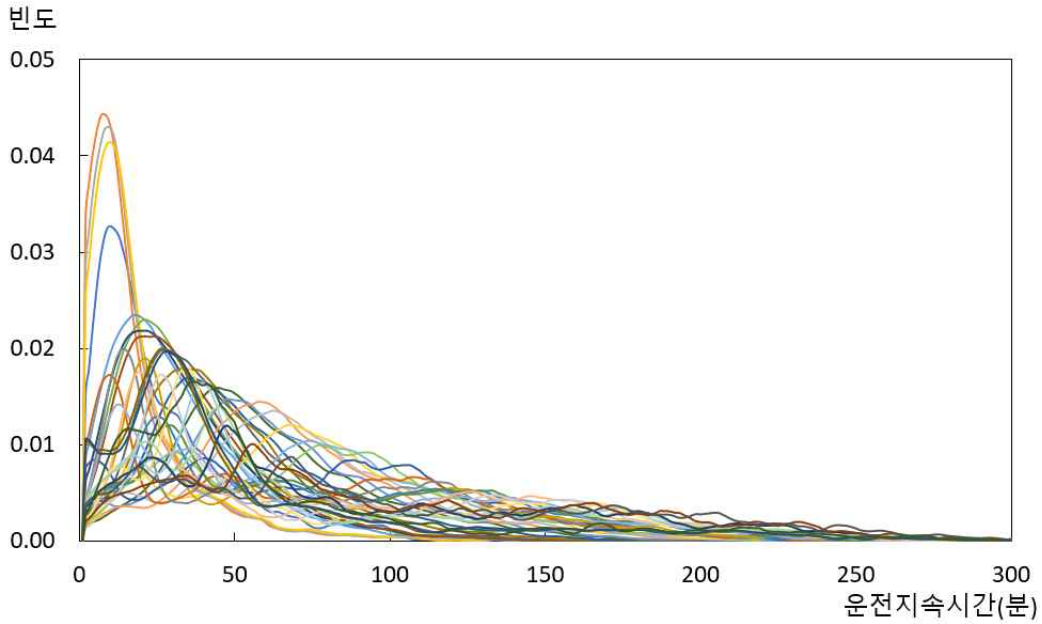
1) 고속도로 전체 구간에 대한 피로 분석

본 연구는 차량 GPS 궤적을 이용하여 고속도로 운전자들의 피로도를 측정하고, 도로구간별 피로운전의 위험성을 나타내는 피로 노출도 지표 산정방법론을 개발한다. 이 방법론은 객관적인 분석과정을 통해 고속도로 전체 구간에 적용가능하도록 하는 것을 기본 전제로 한다.

고속도로는 철도와 함께 도시간 이동을 담당하는 주요 교통체계 중 하나이다. 인접도시간 연결뿐만 아니라 전국 도시를 연결하는 역할을 수행하기 때문에 단거리통행과 장거리통행이 모두 이뤄진다. 따라서 위계가 낮은 도로에 비해 피로한 상태로 운전하는 경우가 현저히 많으며, 특히 고속으로 주행하기 때문에 피로(졸음)운전의 위험성은 더욱 높다. 그럼에도 불구하고, 전국의 모든 고속도로가 피로운전의 위험에 노출되는 것은 아니다. 도로구간에 따라 대다수의 차량들이 단거리통행을 하는 경우도 있으며, 이들 구간은 피로운전의 위험성이 비교적 낮을 것이다. 이러한 측면에서 실효성 있는 안전대책을 마련하기 위해서는 어느 구간이 피로운전의 위험성에 노출되어 있는지 파악할 필요가 있다.

<그림 4-1>은 서해안고속도로 금천IC에서 죽림JC까지(하행) 36개 도로구간의 운전지속시간 빈도분포를 나타낸 것이다. 국가의 토지이용행태에 따라 운전지속시간이 짧은 구간(좌측 편향된 단봉의 형태)부터 단·장거리통행이 혼합된 구간(우측으로 편향되면서 다봉의 형태)까지 존재하여 분포의 형태가 매우 복잡하고 다양한 것을 볼 수 있다. 일부 선행연

구들은 60분 이상 운전을 지속할 경우 사고위험성이 높아지는 피로한 상태가 된다고 보고하였으며(Thiffault and Bergeron, 2003b; Yamakoshi et al., 2009), 이를 적용하면 60분 이상 운전지속한 차량의 비율은 최소 4%에서 최대 65%로 분석되었다. 운전지속시간이 낮은 도로구간은 주로 서울에 인접한 구간이며, 목포 방향으로 갈수록, 그리고 JC를 통해 연결되는 도로구간의 경우 운전지속시간이 점차 높아지는 것으로 나타났다. 기본적으로 운전지속시간이 길수록 운전 피로가 증가하기 때문에 도로구간별로 피로도 분포는 큰 차이를 보일 것으로 예상되며, 이러한 변별력을 바탕으로 도로구간별 졸음사고 위험성을 평가할 수 있는 피로 분석 방법론을 개발하고자 한다.



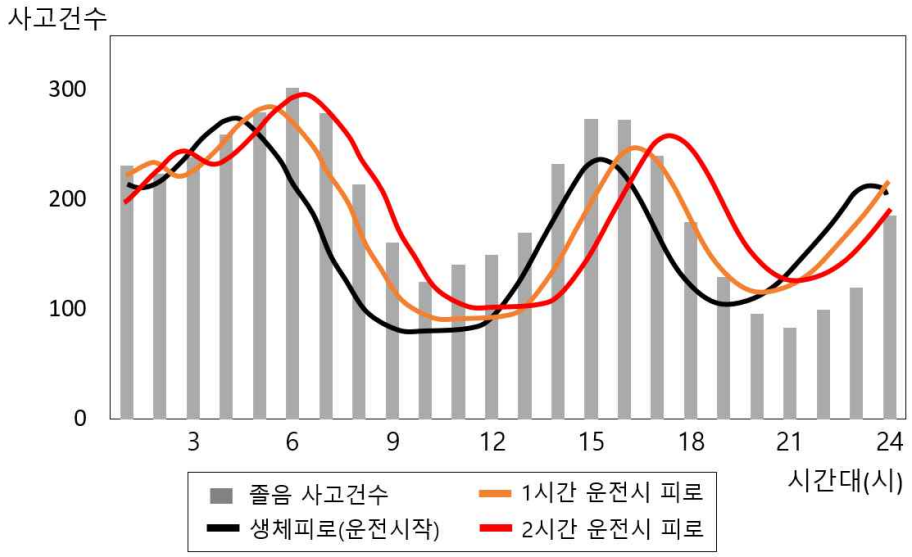
<그림 4-1> 도로구간별 운전지속시간 분포 다양성

2) 시간대별 생체리듬 피로도 반영

운전자의 피로는 기본적으로 내적요인(생리적 피로)과 외적요인(운전에 의한 피로)으로 분류된다. 그러나 기존의 교통안전 연구들은 외적요

인에 따른 피로만을 피로요인으로 고려하였다. <그림 4-2>는 전국 고속도로의 시간대별 졸음운전 사고건수(고속도로 교통사고 속보자료, 2015.01- 2020.10)와 생체리듬 피로도 측정모형을 이용하여 산출한 시간대별 피로도를 그래프로 나타낸 것이다. 졸음운전사고(막대그래프)는 오전 6시와 오후 3시에 가장 높은 쌍봉 형태를 보이고 있다. 이 형태는 시간대별 피로도(검정색 선)를 기준으로 1-2시간 운전한 운전자의 피로도 변화와 매우 유사하다. 즉, 피로(졸음)운전의 사고위험성은 시간대에 따라 큰 변화를 보이며, 이러한 변화는 생체리듬에 따른 피로도를 반영할 필요가 있음을 시사한다.

본 연구는 운전자의 피로관련 요소를 생체리듬 피로도와 운전피로도, 운전중 휴식 등의 세 가지로 정의하고, Zhang et al. (2020)에서 실험주행조사를 통해 개발한 모형을 활용하여 피로도를 측정하고자 한다. 생체리듬 피로도 측정모형의 시간대별 피로도가 국내 고속도로 졸음사고 현황을 잘 설명하고 있기 때문에 본 연구에 적용하는 것은 무리가 없는 것으로 판단하였다. 또한 각각의 모형은 모두 시간(운전지속시간, 통행시각, 휴식시간)을 변수로 피로도를 측정할 수 있기 때문에 본 논문에서 차량 GPS 궤적 자료를 이용하여 피로도를 측정하기에 가장 적합하며, 이외에 시간을 변수로 피로도를 측정하는 다른 모형은 보고된 바 없다.



<그림 4-2> 시간대별 졸음운전사고 및 생체리듬 피로도 비교

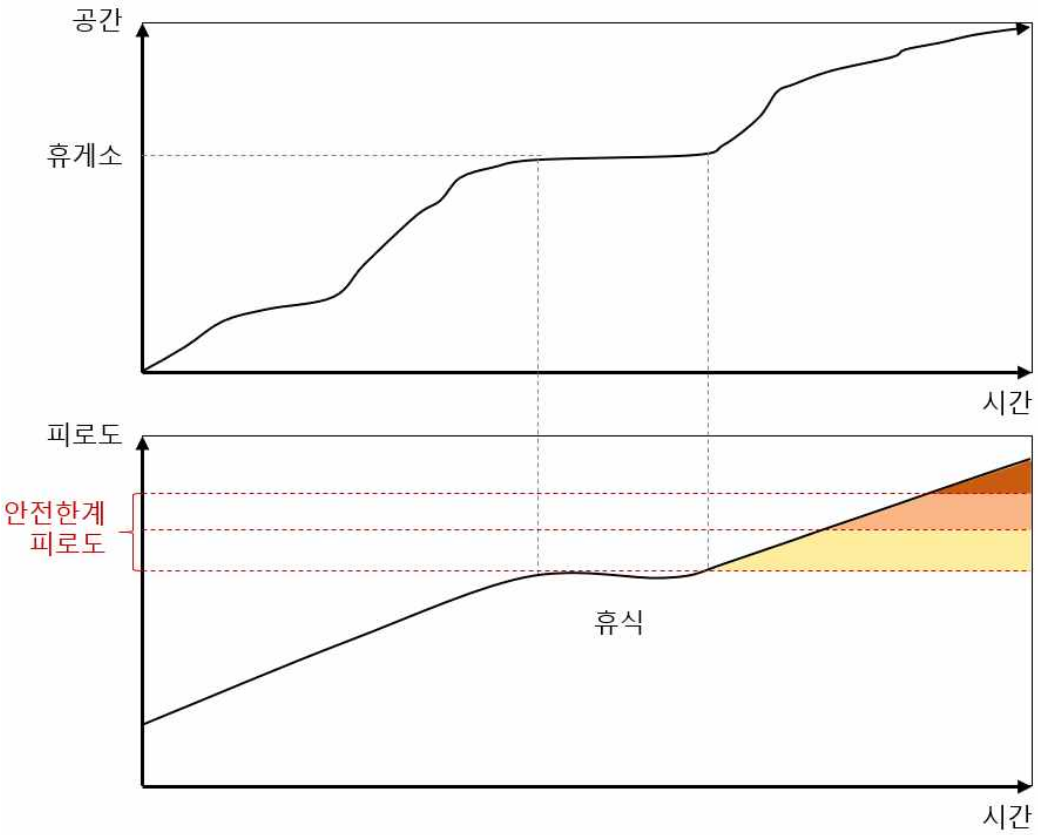
3) 실제 사고위험을 반영한 안전한계피로도

운전자의 피로와 사고위험의 관계를 분석한 선행연구들은 대부분 운전지속시간의 증가에 따른 위험운전행동(차로이탈, 급감속 등) 또는 신체적 변화(눈의 잦은 깜빡임, 고개의 끄덕임, 심장박동, 뇌파, 호흡 등)를 관측하거나 모의주행실험을 통해 연구를 수행하였다. 즉, 대부분의 연구들이 운전지속시간이 증가함에 따라 사고의 발생확률이 어떻게 변하는지 그 관계를 분석하는 데 초점을 두고 있다.

그 중에서 Chang and Yoon (2020)은 선행연구 고찰 결과 특정 시간 이상 운전을 하는 경우 사고위험성이 높아진다는 점에 착안하여, 차량 GPS 궤적을 분석하여 사고율이 높아지는 경계값이 125분임을 밝혔다. 그리고 고속도로 구간별로 125분 이상 운전한 차량의 비율을 산정하였을 때 실제 사고율과 높은 상관관계를 보이는 것을 증명하였다.

운전 피로는 정상상태와 피로상태, 그리고 졸음상태로 구분할 수 있으며, 보통의 경우 단계적으로 변화한다. 만약, 실제 주행을 하다가 졸음상태에 이르게 되면 사고가 발생할 가능성이 매우 높기 때문에 본 연구에서 사용하는 차량 GPS 자료에는 졸음단계에 해당하는 궤적이 거의 존재하지 않을 수 있다. 즉, 궤적 자료 분석에서 운전 피로는 정상상태와 피로상태로 구분할 수 있으며, 선행연구들의 공통된 결과와 같이 일정 시간 이상 운전하면서 피로상태가 되면 사고위험성이 높아진다. 이 맥락에서, 연구에 따라 피로상태가 되는(사고위험성이 높아지는) 운전지속시간은 60분에서 235분까지 매우 다양하다. 이는 연구자마다 위험운전의 기준을 다르게 적용하기 때문이며, 또한 실험주행환경이 모두 다르고 실험주행을 한 시간대가 다르다는 것도 생체리듬의 관점에서 중요한 원인일 수 있다.

본 연구는 정상상태와 피로상태를 구분하는 피로도의 경계를 '안전한계피로도'로 정의하며, 실제 통행자료와 사고율의 관계를 기반으로 사고위험성이 높아지는 안전한계피로도를 도출하고자 한다. <그림 4-3>과 같이 안전한계피로도에 따라 피로도 지표의 산정결과가 크게 달라지기 때문에 안전한계피로도를 도출하는 과정은 신중한 접근이 필요하다.



<그림 4-3> 안전한계피로도에 따른 피로 노출도

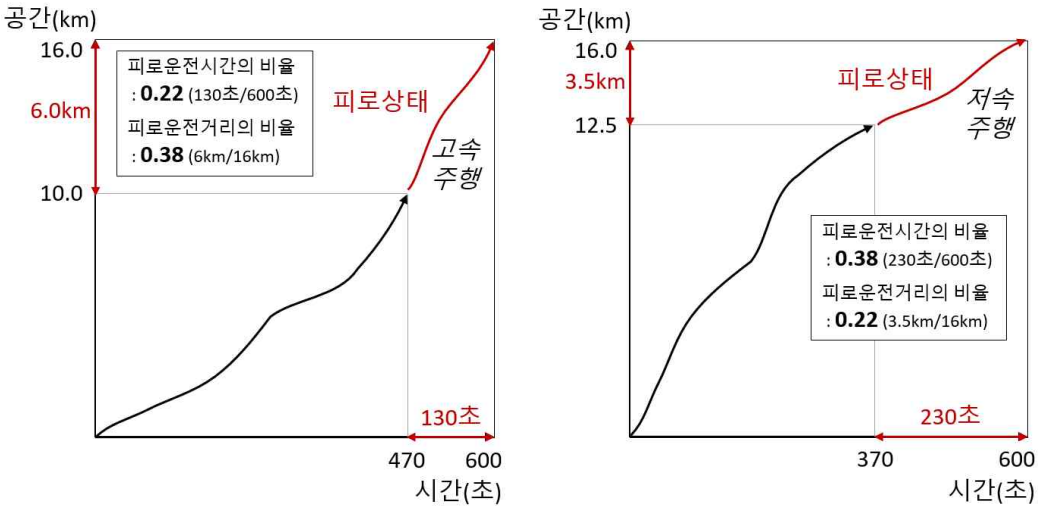
4) 시·공간 관점의 피로 노출도 산정

앞서 제3장에서 서술한 바와 같이, 차량의 이동은 시간과 공간의 관점으로 설명된다. 운전자의 피로도는 기본적으로 운전을 지속할수록(즉, 통행시간이 길어질수록) 증가한다. 고속도로를 통행할 때 일정한 속도를 유지하는 차량들의 경우에는 도로구간을 피로상태로 주행하는 시간과 거리의 비율이 큰 차이가 없다. 그러나 피로상태에서 고속으로 주행하는 차량이나 저속으로 주행하는 차량의 경우에는 <그림 4-4>와 같이 두 관점에 따라 상반된 결과가 나타날 수 있다. 이는 높은 속도로 통행할수록 비교적 짧은 시간동안 더 멀리 이동할 수 있기 때문에 나타나는 당연한 결과이며, 이러한 측면에서 어느 하나의 관점에서만 분석할 경우 왜

곡된 결과가 도출될 수 있음을 시사한다.

두 관점에 따른 도로구간의 피로 노출도 지표는 다음과 같이 산정한다. 먼저 개별적인 피로운전시간 비율과 피로운전거리 비율을 산정한 후에 도로구간을 통행한 모든 운전자들의 정보로 집계함으로써 각 도로구간의 피로 노출도를 산정할 수 있으며, 각 관점에 따른 지표는 다음과 같은 의미로 해석된다. 예를 들어, 시간적 피로 노출도는 "당진JC에서 서산IC까지 통행하는 운전자들의 총 통행시간 중 30%의 시간 동안 피로상태로 통행한다."와 같이 해석할 수 있고, 공간적 피로 노출도는 "당진JC에서 서산IC까지 통행할 때 전체 구간 중 30%에 해당하는 구간은 피로운전자의 영향을 받는다"고 볼 수 있다.

피로의 정의로부터, 개별 운전자의 입장에서는 피로도가 누적되어 피로상태에 접어들게 되면 일정 시간 이상 휴식(수면)을 취하지 않는 한 정상상태로 다시 회복되는 경우가 거의 없다. 따라서 피로 노출도 지표는 도로구간을 이용하는 피로상태의 운전자 비율과 유사한 의미로도 해석할 수 있다.



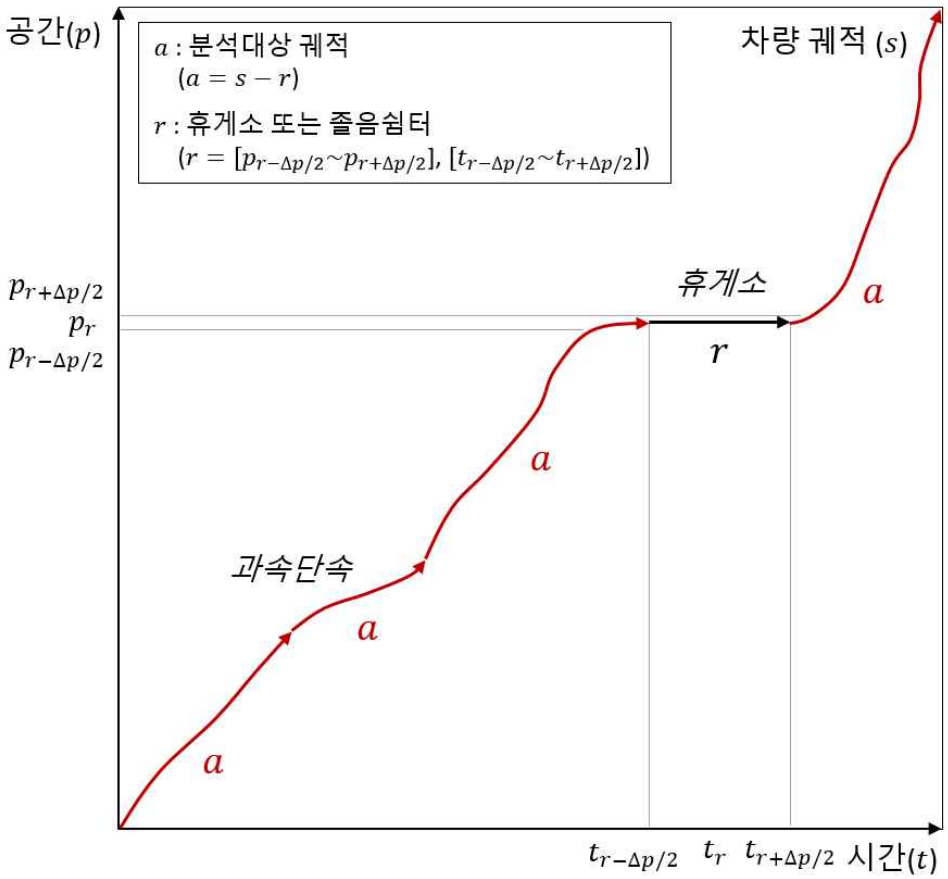
[차량 1. 피로상태에서 고속주행] [차량 2. 피로상태에서 저속주행]

<그림 4-4> 시·공간 관점에 따른 피로 노출도 차이

2. 운전 피로 분석 대상구간 및 입·출력 변수 정의

1) 피로 분석 대상구간 정의

본 연구는 피로한 운전자의 사고위험성을 나타내는 피로 노출도 지표를 이용하여 도로구간별로 위험성을 예측하고자 한다. 이 때, 도로구간마다 휴게소 등 시설물 설치유무가 다르기 때문에 이로 인해 발생될 수 있는 편향을 피하고 객관적인 비교를 위하여 분석대상구간을 정의한다. 피로 분석 대상구간은 휴게소 및 졸음쉼터에서 휴식을 위해 주정차한 시간을 배제하는 개념이며, 이를 시공도로 표현하면 <그림 4-5>와 같다.



<그림 4-5> 피로 분석 대상구간 정의 및 개념도

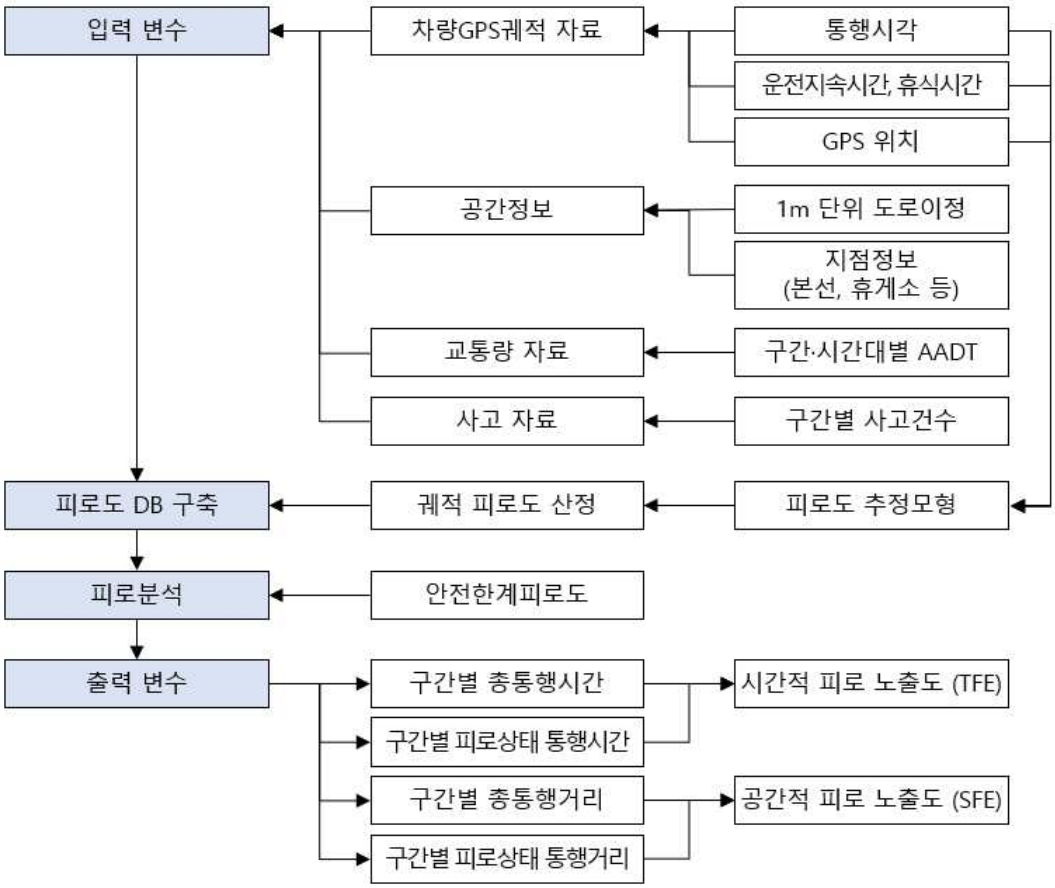
차량들의 통행특성은 도로구간의 과속단속 및 휴게소/졸음쉼터 유무에 따라서 달라진다. 그러나 운전자의 피로도는 운전을 지속하면서 계속해서 증가하며 일부 차량들이 과속단속지점에서 감속하는 행태를 보이더라도 피로운전의 위험성은 그대로 유지된다. 따라서 일시적인 감속이 피로노출도 지표 산정에 미치는 영향은 미미하기 때문에 피로 분석에서는 과속단속의 영향을 고려하지 않고 분석대상에 포함시킨다. 도로구간별 피로 분석은 기본적으로 본선을 주행하는 차량을 대상으로 한다. 따라서 운전 중 휴식을 위해 휴게소 또는 졸음쉼터에 진입한 차량의 경우, 피로운전의 위험성이 본선구간에 영향을 주지 않는 상태가 된다. 이와 같이 휴식을 위한 주정차의 영향을 배제하기 위하여 휴게소 및 졸음쉼터의 주차공간에 해당하는 궤적 자료를 분석대상에서 제외한다.

차량이 도로구간을 주행한 궤적을 s라 정의하면, $s=\{a,r\}$과 같다. 여기서, r은 휴게소 및 졸음쉼터 영역(휴게소 및 졸음쉼터의 진입부 감속차로부터 진출부 가속차로까지의 구간, Δp)이며, a는 피로 분석의 대상구간 궤적을 의미한다. 즉, 휴게소 및 졸음쉼터 지점을 p_r이라 할 때, 휴식 영향구간(r)은 $r=[t_{r-\Delta p/2} \sim t_{r+\Delta p/2}]$와 같다. 결과적으로, 도로구간 s에서 피로 분석 대상구간(a)은 식 (4-1)과 같이 산정한다. 여기서, $t_{s,\min}$과 $t_{s,\max}$는 각각 도로구간 s에 진입한 시점과 진출한 시점이다.

$$a=(t_{s,\max}-t_{s,\min})-(t_{r+\Delta p/2}-t_{r-\Delta p/2}) \qquad \text{식 (4-1)}$$

2) 피로 분석 입·출력 변수 정의

차량 GPS 궤적 자료를 이용하여 고속도로 구간별 피로 분석을 수행하기 위한 입·출력 변수를 <그림 4-6>과 같이 설계하였다. 입력 변수는 차량 GPS 궤적 자료와 궤적의 위치를 도로와 매칭할 수 있는 공간정보, 사고 설명력 검증을 위한 교통량 및 사고 자료로 구성한다. 피로도 추정 모형을 통해 궤적 시점별 피로도를 산정하여 피로도 DB를 구축한 후, 본 연구의 피로 분석 방법론을 이용하여 운전 피로 분석을 수행한다. 이때, 사고를 가장 잘 설명할 수 있는 안전한계피로도를 추정하여 적용한다. 최종적으로 구간별 총통행시간(거리) 및 피로상태 통행시간(거리)를 산정하여 최종 출력 변수인 시·공간적 피로 노출도 지표를 산정한다.



<그림 4-6> 피로 분석 입·출력 변수 정의

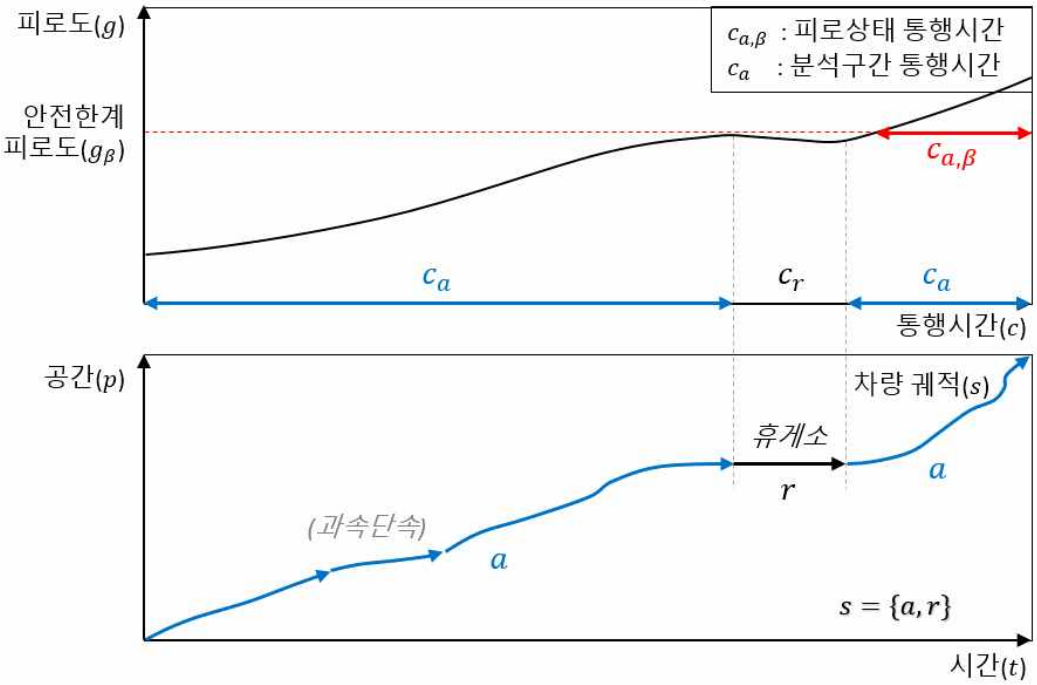
3. 시간적 피로 분석 방법론

1) 개별 차량의 피로 운전시간 산정방법

피로한 상태로 운전하는 차량이 도로구간에 노출되는 수준을 '피로 노출도'로 정의하며, 속도 변화에 따른 피로 노출도 지표의 안정성을 고려하여 시간적 관점과 공간적 관점으로 구분하여 분석한다. 시간적 피로의 측면에서 도로구간을 통행한 모든 차량들의 총 통행시간 중 피로한 상태로 운전한 시간이 차지하는 비중은 해당 도로구간을 통행하면서 피로운전의 위험에 노출되는 시간의 비율로 해석할 수 있으며, 본 연구에서는 이 비율을 '시간적 피로 노출도'로 정의한다. 시간적 피로 노출도는 도로구간의 피로운전 위험성을 판단하기 위한 지표로서, 이 값이 클수록 해당 도로구간에서 피로(졸음)운전으로 인한 사고의 가능성이 높음을 의미한다.

시간적 피로 노출도는 개별 차량을 기반으로 산정하며, 피로운전시간에 대한 개념은 <그림 4-7>과 같다. 도로구간 s의 통행시간을 c_s로 정의하면, 시간적 피로 분석의 대상구간(a)에 대한 통행시간 c_a는 $c_a = c_s - c_r$과 같다. 여기서 c_r은 휴게소 또는 졸음쉼터에서 휴식한 시간이며, $a, r \in s$이다. 피로하지 않은 정상상태와 피로한 상태는 일정 피로도를 기준(안전한계피로도)으로 구분할 수 있다. 안전한계피로도 설정시 기초가 되는 가설은 피로도가 특정 수준 이상일 때 사고의 위험성이 높아지는 관계가 존재한다는 것이다(Ting et al., 2008).

안전한계피로도를 g_β로 정의할 때, 시간적 피로 노출도는 g_β의 값에 따라 다른 결과가 산정되므로 피로운전으로 인한 사고위험성을 가장 잘 설명할 수 있는 값으로 안전한계피로도를 설정해야 한다. 따라서 g_β의 변화에 따른 시간적 피로 노출도의 사고설명력을 평가하는 최적화과정을 수행하여 최적의 안전한계피로도를 결정하도록 한다.



<그림 4-7> 차량별 피로 운전시간 산정 개념도

분석대상구간(a) 내에서 차량 궤적의 t시점에 대한 피로운전여부 판단변수는 $w_{a,\beta}(t)$으로 나타내며, 만약 $g_a(t) > g_\beta$인 경우 $w_{a,\beta}(t) = 1$, 그렇지 않은 경우 $w_{a,\beta}(t) = 0$과 같은 값을 가진다. 분석대상구간에 대한 일련의 피로운전여부 판단변수($W_{a,\beta}$)는 $W_{\alpha,\beta} = [w_{\alpha,\beta}(t_{\min}), \ldots, w_{\alpha,\beta}(t), \ldots, w_{\alpha,\beta}(t_{\max})]$이며, $W_{\alpha,\beta} = \{1, 0\}$이다. 안전한계피로도를 초과한 상태로 통행한 시간을 $c_{a,\beta}$로 정의할 때, $W_{a,\beta}$를 이용하면 $c_{a,\beta}$는 식 (4-2)와 같이 산정된다. 개별 차량이 도로구간을 통행하는데 걸린 총 통행시간 중 피로상태로 통행한 시간의 비율(개별 차량의 피로 운전시간 비율)은 $c_{a,\beta}/c_a$와 같으며, 전체 계산과정은 식 (4-3)과 같다.

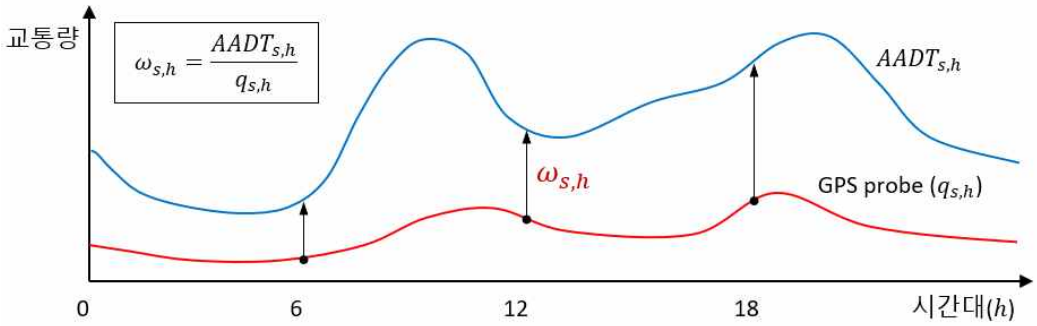
$$c_{a,\beta} = \sum_{t = t_{a,\min}}^{t_{a,\max}} w_{a,\beta}(t), \quad \forall t, w_{a,\beta}(t) = \{1, 0\} \qquad \text{식 (4-2)}$$

$$\frac{c_{a,\beta}}{c_a} = \frac{\sum_{t = t_{a,\min}}^{t_{a,\max}} w_{a,\beta}(t)}{(t_{s,\max} - t_{s,\min}) - (t_{r+\Delta p/2} - t_{r-\Delta p/2})} \qquad \text{식 (4-3)}$$

2) 도로구간별 시간대별 집계 가중치 산정방법

차량 GPS 궤적 자료는 도로구간을 통행한 전체 교통량의 일부분에 해당하는 표본자료이다. 따라서 <그림 4-8>과 같이 도로구간별, 시간대별로 표본률이 다르기 때문에 개별 차량의 궤적으로 산정한 피로운전시간 비율은 구간과 시간에 따라 전체 교통량 중에서 차지하는 비중이 달라진다. 이러한 비중의 차이로 인해 개별 차량의 피로운전시간/거리 비율을 기반으로 도로구간의 시·공간적 피로 노출도를 산정하는 과정에서 다소 비현실적인 결과가 도출될 수 있다. 예를 들어, 한 도로구간의 시간당 교통량이 새벽시간과 오후첨두시에 각각 100대, 1,000대일 때, 궤적 자료가 동일하게 1대인 경우가 있다고 하자. 새벽시간에 이 차량의 피로운전시간 비율이 0.8, 오후첨두시에는 0.2로 산정되었다면, 단순하게 산술평균할 경우 해당 도로구간의 시간적 피로 노출도는 0.5(=(0.8+0.2)/2)로 계산된다. 그러나 궤적 자료가 모집단의 대표성을 가진다고 가정할 때 실제 피로 노출도는 교통량을 기준으로 가중평균하여 0.25(=(100×0.8+1,000×0.2)/1,100)로 계산된다.

실제 궤적 자료 또한 시간대별로 표본률에 큰 차이가 있기 때문에 개별 차량의 피로운전시간/거리 비율을 도로구간 단위로 집계하는 과정에서 이와 같은 오차가 발생할 수 있다. 따라서 현실적인 집계결과를 도출하기 위하여 도로구간 및 시간대별로 궤적 자료의 표본률을 산정하며, 그 역수를 가중치로 적용한다. 즉, 도로구간별(s), 시간대별($h=[1,2,\ldots,24]$) 연평균일교통량이 $AADT_{s,h}$이고, GPS 프로브 교통량이 $q_{s,h}$일 때, 개별 노출도의 집계 가중치($\omega_{s,h}$)는 $\omega_{s,h}=AADT_{s,h}/q_{s,h}$의 방법으로 산정한다.



<그림 4-8> 시간대별 집계 가중치 산정 개념

3) 도로구간의 시간적 피로 노출도(TFE) 산정방법

도로구간 s를 통행한 차량이 n대인 경우, i번째 차량에 대한 일련의 궤적은 $T^i = [(t^i_{\min}), \ldots, (t^i - 1), (t^i), (t^i + 1), \ldots, (t^i_{\max})]$와 같이 표현된다. 이 때, 모든 i와 t^i에 대해서 $i \le n, t^i \in T^i$ 이다.

따라서 도로구간 s의 분석대상구간 a에 대해서 전체 차량 n대에 해당하는 피로 운전시간의 비율을 도로구간의 시간적 피로 노출도(TFE, Temporal fatigue exposure)로 정의하며, TFE는 식 (4-4)와 같이 산정한다. 이 식을 개별 차량 기반의 산정식으로 풀어쓰면 식 (4-5)와 같다. 여기서, $w^i_{a,\beta}(t)$는 분석대상구간 a에 대한 차량 i의 t시점 피로여부($w^i_{a,\beta}(t) = \{1,0\}$)이며, $t^i_{s,\min}$와 $t^i_{s,\max}$는 각각 차량 i가 도로구간 s에 진입한 시점과 진출한 시점, $t^i_{r-\Delta p/2}$와 $t^i_{r+\Delta p/2}$는 차량 i가 휴게소 또는 졸음쉼터에서 휴식을 시작한 시점과 종료한 시점, $\omega^i_{s,h}$는 차량 i의 통행시간대 h에 대한 집계 가중치이다. 여기서 사용하는 집계 가중치는 앞에서 설명한 도로구간별 시간대별 집계 가중치와 같다.

TFE는 0에서 1 사이의 값으로 산정되며($0 \le TFE \le 1$), 1에 가까울수록 해당 도로구간이 피로운전 위험에 크게 노출된다고 해석할 수 있다. 즉, 도로구간의 시간적 피로 노출도가 0.3이라면, 해당 구간을 통행한 모든 차량들의 전체 통행시간 중 30%의 시간 동안 피로상태로 통행한다는 것을 의미한다.

$$TFE = \frac{\sum_{i=1}^{n} c^i_{a,\beta} \times \omega^i_{s,h}}{\sum_{i=1}^{n} c^i_{a} \times \omega^i_{s,h}} \qquad \text{식 (4-4)}$$

$$TFE = \frac{\sum_{i=1}^{n} \sum_{t=t_{a,\min}}^{t_{a,\max}} w^i_{a,\beta}(t) \times \omega^i_{s,h}}{\sum_{i=1}^{n} ((t^i_{s,\max} - t^i_{s,\min}) - (t^i_{r+\Delta p/2} - t^i_{r-\Delta p/2})) \times \omega^i_{s,h}} \qquad \text{식 (4-5)}$$

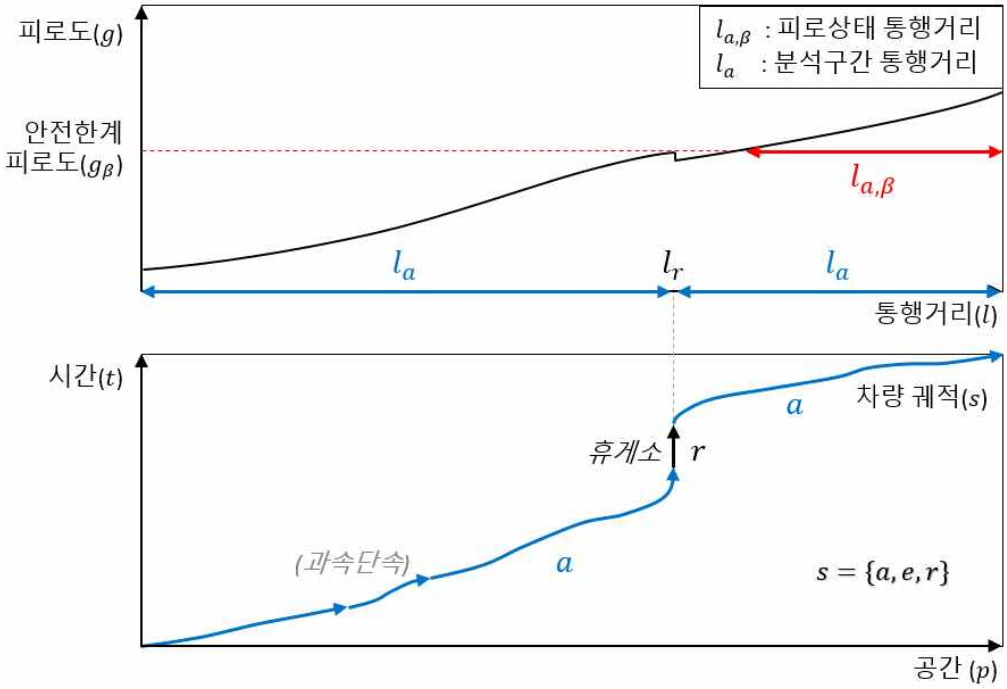
4. 공간적 피로 분석 방법론

1) 개별 차량의 피로 운전거리 산정방법

공간적 피로의 측면에서 도로구간을 통행한 모든 차량들의 총 통행거리 중 피로상태로 통행한 거리(피로 운전거리)가 차지하는 비중은 해당 도로구간을 통행하면서 피로운전에 노출되는 구간거리의 비율로 해석할 수 있으며, 본 연구에서는 이 비율을 '공간적 피로 노출도'로 정의한다. 공간적 피로 노출도는 시간적 피로 노출도와 마찬가지로 도로구간의 피로운전 위험성을 판단하기 위한 지표이며, 이 값이 클수록 해당 도로구간에서 피로운전으로 인한 사고의 가능성이 높음을 의미한다.

차량별 피로 운전거리 산정방법을 개념적으로 표현하면 <그림 4-9>와 같다. 도로구간 s의 통행거리를 l_s로 정의하면, 공간적 피로 분석의 대상구간(a)에 대한 통행거리 l_a는 $l_a = l_s - l_r$과 같다. 여기서 휴식으로 정차하는 경우 공간적 관점에서 l_r의 거리는 그 영향력이 적으므로 무시할 수 있다. 따라서 l_a는 다시 $l_a = l_s$로 정의되며, $a = s$이다. 즉, 공간적 피로 분석시 분석대상구간은 전체 도로구간과 같다.

공간적 피로 노출도를 산정할 때에도 시간적 피로 노출도와 같이 안전을 고려한 안전한계피로도를 설정하는 것이 중요하다. 사고위험성이 높아지는 안전한계피로도는 시·공간적 관점에서 거의 동일하게 설정될 가능성이 높다. 그러나 피로운전자의 차량마다 속도가 다르고, 그 차이로 인해 같은 시간 동안 이동하는 거리가 달라지기 때문에 두 관점에서 피로운전의 위험은 차이가 다소 발생할 수 있다. 즉, 피로상태로 운전하는 차량의 속도에 따라 시간적 분석과 공간적 분석에서 안전한계피로도 g_β는 크지 않은 범위 내에서 서로 다른 값으로 추정될 수 있다. 따라서 안전한계피로도의 변화에 따른 사고위험성을 기준으로 피로한 상태와 피로하지 않은 상태를 구분할 수 있는 최적의 안전한계피로도 값을 추정하여, 공간적 과속 노출도 산정을 위한 안전한계속도로 적용한다.



<그림 4-9> 차량별 피로 운전거리 산정 개념도

분석대상구간(a) 내에서 차량 궤적의 t시점에 대한 피로운전여부 판단변수는 $w_{a,\beta}(t)$으로 나타내며, 만약 $g_a(t) > g_\beta$인 경우 $w_{a,\beta}(t) = 1$, 그렇지 않은 경우 $w_{a,\beta}(t) = 0$과 같은 값을 가진다. 분석대상구간에 대한 일련의 피로운전여부 판단변수($W_{a,\beta}$)는 $W_{\alpha,\beta} = [w_{\alpha,\beta}(t_{\min}), \ldots, w_{\alpha,\beta}(t), \ldots, w_{\alpha,\beta}(t_{\max})]$이며, $W_{\alpha,\beta} = \{1, 0\}$이다. 안전한계피로도를 초과한 상태로 통행한 거리를 $l_{a,\beta}$로 정의할 때, $W_{a,\beta}$를 이용하면 $l_{a,\beta}$는 식 (4-6)으로 계산된다. 개별 차량이 도로구간을 통행하는데 이동한 총 통행거리 중 피로상태로 통행한 거리의 비율은 $l_{a,\beta}/l_a$와 같으며, 전체 계산과정은 식 (4-7)과 같다.

$$l_{a,\beta} = \sum_{t=t_{a,\min}}^{t_{a,\max}} (p_a(t) - p_a(t-1)), \quad \forall t, w_{a,\beta}(t) = 1 \qquad \text{식 (4-6)}$$

$$\frac{l_{a,\beta}}{l_a} = \frac{\sum_{t=t_{a,\min}}^{t_{a,\max}} (p_a(t) - p_a(t-1))}{(p_{s,\max} - p_{s,\min})}, \quad \forall t, w_{a,\beta}(t) = 1 \qquad \text{식 (4-7)}$$

2) 도로구간의 공간적 피로 노출도(SFE) 산정방법

도로구간 s를 통행한 차량이 n대인 경우, i번째 차량에 대한 일련의 궤적지점은 $p(T)^i = [p(t^i_{\min}), \ldots, p(t^i-1), p(t^i), p(t^i+1), \ldots, p(t^i_{\max})]$와 같이 표현된다. 이 때, 모든 i와 t^i에 대해서 $i \le n, t^i \in T^i$ 이다.

도로구간 s의 분석대상구간 a에 대해서 전체 차량 n대에 해당하는 피로 운전거리의 비율을 도로구간의 공간적 피로 노출도(SFE, Spatial fatigue exposure)로 정의하며, SFE는 식 (4-8)과 같이 산정한다. 그리고 이 식을 개별 차량 기반의 산정식으로 풀어쓰면 식 (4-9)와 같다. 여기서, $p^i_a(t) - p^i_a(t-1)$은 분석대상구간 a에서 차량 i가 t시점에 피로상태로 운전한 경우(즉, $w^i_{a,\beta}(t) = 1$)에 1초 동안 이동한 거리이며, $p_{s,\min}$과 $p_{s,\max}$는 각각 도로구간 s의 시작지점과 종료지점, $\omega^i_{s,h}$는 차량 i의 통행시간대 h에 대한 집계 가중치이다. 단, 공간적 피로 노출도를 산정할 때 분석대상구간의 거리가 정해져 있기 때문에 모든 차량이 동일한 거리를 통행한다. 따라서 차량별로 총 통행거리를 계산할 필요가 없으며, 차량대수(n)를 분모에 곱하여 계산식을 단순화하였다.

SFE는 0에서 1 사이의 값으로 산정되며($0 \le SFE \le 1$), 1에 가까울수록 해당 도로구간이 피로운전 위험에 크게 노출된다고 해석할 수 있다. 만약, 도로구간의 공간적 피로 노출도가 0.4로 산정되었다면, 해당 구간을 통행한 모든 차량들의 전체 통행구간 중 40%의 구간을 피로상태로 통행한다는 것을 의미한다.

$$SFE = \frac{\sum_{i=1}^{n} l^i_{a,\beta} \times \omega^i_{s,h}}{\sum_{i=1}^{n} l^i_a \times \omega^i_{s,h}} \qquad \text{식 (4-8)}$$

$$SFE = \frac{\sum_{i=1}^{n} \sum_{t=t_{a,\min}}^{t_{a,\max}} (p^i_a(t) - p^i_a(t-1)) \times \omega^i_{s,h}}{n(p_{s,\max} - p_{s,\min}) \times \omega^i_{s,h}}, \ \forall t, w^i_{a,\beta}(t) = 1 \qquad \text{식 (4-9)}$$

제2절 미시적 차량 궤적 기반 과속 분석 방법론

1. 과속 분석 방법 정립

1) 고속도로 전체 구간에 대한 과속 분석

고속도로와 같은 연속류에서 차량속도는 혼잡유무에 따라 다른 특성을 보인다. 도로가 혼잡한 경우에는 대부분의 차량들이 차량군을 이루며 비슷한 속도로 주행하기 때문에 사고위험성이 비교적 낮다. 반면, 도로가 혼잡하지 않은 경우 운전자들은 주변 차량의 영향과 차량 및 도로조건, 그리고 제한속도의 제약 내에서 본인이 원하는 속도를 선택하여 주행할 수 있다. 따라서 과속은 주로 혼잡하지 않은 상황에서 많이 발생하며, 과속이 심하게 나타나는 도로구간일수록 심각한 사고가 발생될 가능성이 높아진다.

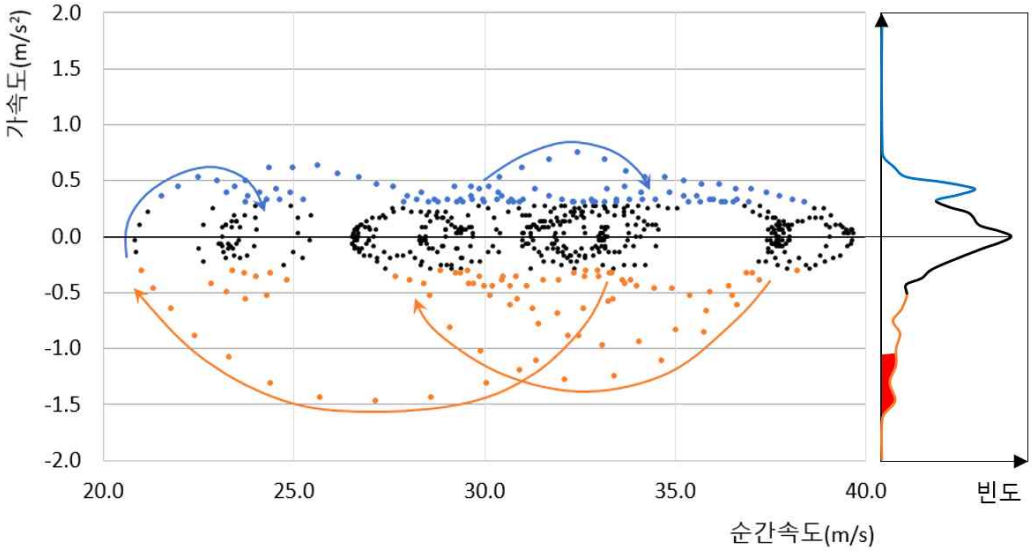
우리나라는 지속적인 도로개발의 효과로 정체가 발생하는 본선구간이 비교적 적다. 즉 많은 도로구간이 과속의 위험에 노출되어 있는 상황이다. 따라서 고속도로 전구간에 대해서 적은 비용과 노력으로 실제 과속 행태를 측정할 수 있는 방법이 필요하다.

2) 속도의 시·공간적 변화특성 반영

속도는 가속도에 따라 실시간으로 변하는 동적(dynamic) 특성을 지닌다. 이러한 동적 특성은 높은 속도일 때나 낮은 속도일 때 모두에서 나타나는 근본적인 특성이며, 차량속도의 시·공간적 변화행태는 매우 가변적인 혼돈계(chaos system)의 상태로 볼 수 있다. 차량 GPS 궤적에서 속도상태(speed state)는 <그림 4-10>과 같이 가속도의 연속적인 변화에 따라 차량이 주행가능한 속도 범위 내에서 주기적으로 원형을 그리는 형태가 나타난다. 일정 속도를 유지하는 동안(그림의 검은색 지점)에도 감속과 가속이 연속적으로 이뤄지며 롤러코스터와 같이 작은 원의 형태

를 그리는 매우 동적인 특성을 보인다. 감속도와 가속도의 관점에서 보면 가속은 비교적 서서히 이뤄지는 반면, 감속은 가속보다 전반적으로 빠르게 진행되는 것으로 나타난다. 이 현상은 과속차량의 궤적에서 더욱 심하게 나타나며, 과속으로 주행 중에 급격히 감속하는 경우 사고위험성이 높다.

동적 속도상태와 관련하여 과속행태는 시간과 공간의 흐름에 따라 지속적인 변화과정을 보인다. 본 연구는 차량 궤적 기반의 1초 단위 지점자료를 사용함으로써 시·공간적 과속특성이 반영된 과속지표를 제시하고자 한다.



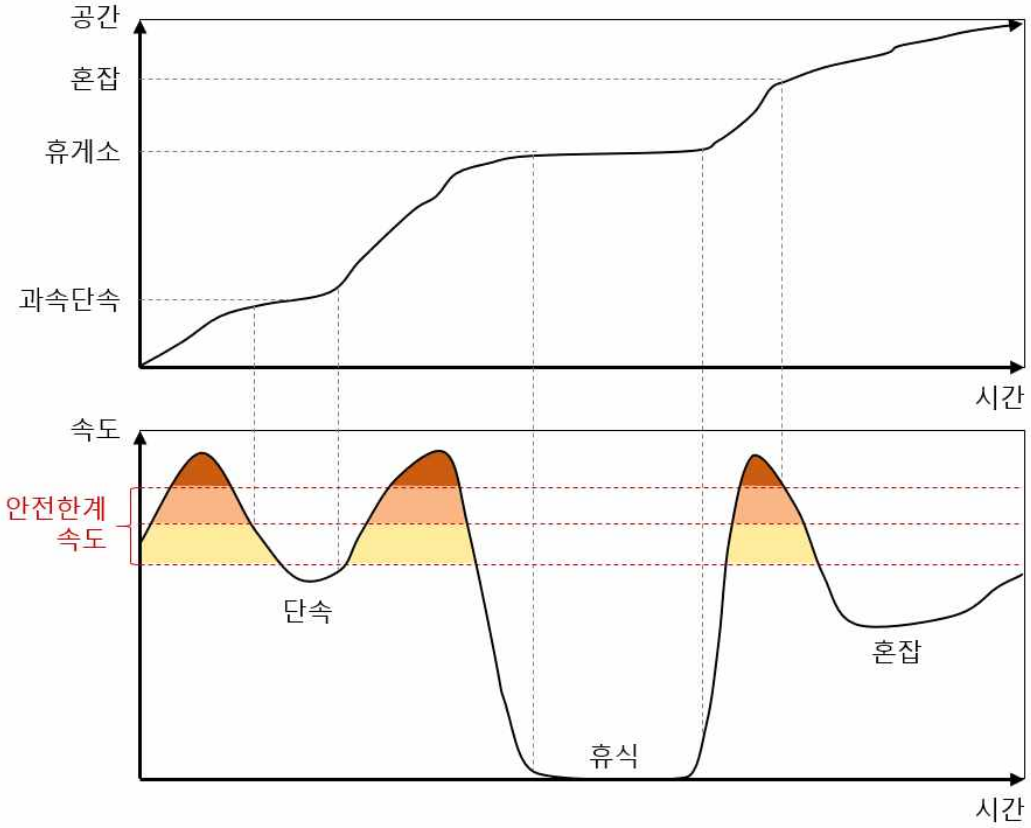
<그림 4-10> 속도의 동적 변화(roller coaster) 특성

3) 실제 사고위험을 반영한 안전한계속도

과속행태를 분석한 모든 선행연구들은 과속의 기준을 특정속도(제한속도나 법적단속규정속도 등)로 정의하여 그 기준 이상의 속도로 주행할 경우 과속으로 판단하였다. 그러나 이들은 법·제도적으로 지정된 속도이며, 이 속도에 대한 안전측면의 검토는 이뤄지지 않았다. 예를 들어, 실제 도로에서 제한속도를 초과하는 속도로 주행하는 차량이 많음에도 불

구하고 사고가 빈번하게 발생하지는 않는다. 그런데 제한속도를 과속기준으로 정하게 되면 과속과 사고의 연관성은 당연하게도 낮을 수밖에 없다. 따라서 연구의 목적이 과속과 사고의 관계를 분석하기 위한 것이라면, 과속기준의 설정에 따라 연구의 결과가 달라질 수 있기 때문에 이 기준을 어떻게 설정할 것인지 결정하는 것이 연구의 핵심적인 부분이라 할 수 있다.

과속의 위험성은 운전자라면 누구나 알고 있는 상식이다. 그러나 과연 일반적인 고속도로 환경에서 시속 몇 km 이상의 속도로 주행할 때 사고발생 가능성이 높아지는지 답할 수 있는 사람이 있을까? 이에 대한 연구는 지금까지 보고된 사례도 찾아볼 수 없다. 즉, 과속이 사고발생의 중요한 요인임을 예상함에도 불구하고 명확한 관계를 규명하지 못했던 이유는 과속기준속도의 설정에 문제가 있었기 때문일 수 있다.



<그림 4-11> 안전한계속도에 따른 과속 노출도

한 대의 차량이 고속도로 구간을 주행한 궤적을 시공도로 그리면 <그림 4-11>과 같다. 그동안 사용하던 집계자료로는 이와 같은 시공도를 그릴 수 없었기 때문에 과속에 대한 실질적인 분석이 어려웠으나, 차량 GPS 궤적을 이용하여 연속적인 속도의 변화를 분석함으로써 동적 과속 행태를 분석할 수 있다. 대부분의 과속 운전자들은 과속단속카메라가 위치한 지점에 접근하면서(내비게이션을 통해 해당 지점을 미리 파악하므로 사전에 감속이 가능하게 됨) 속도를 낮추기 시작하며, 단속지점을 지난 후 다시 속도를 높이는 경향이 있다. 또한 휴게소에서 휴식을 할 때에는 정지된 상태로 유지되며, 혼잡할 때는 주변 교통류 상황에 따른 속도로 감속하는 것을 시공도를 통해 확인할 수 있다.

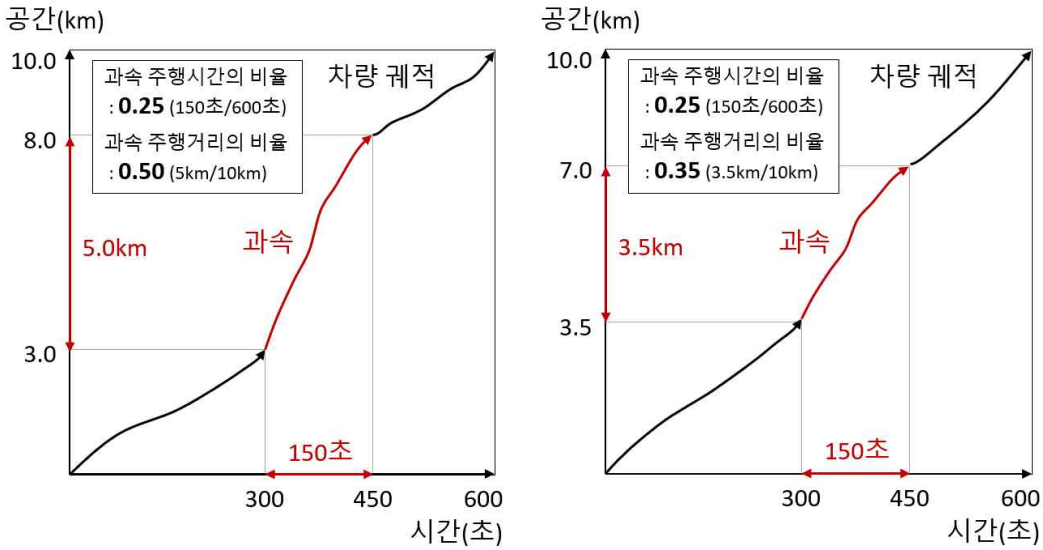
여기서 중요한 점은 안전한계속도를 어떻게 설정하는가에 따라 이 차량이 얼마나 과속으로 주행했는지 결과가 달라진다. 따라서 본 연구는 도로구간별로 통행한 모든 차량들의 시·공간에 따른 속도를 분석하여 사고를 설명하기에 가장 적합한 안전한계속도를 선정하고자 한다.

4) 시·공간 관점의 과속 노출도 산정

차량의 이동은 기본적으로 통행시간과 통행거리와 같이 시간과 공간의 관점으로 설명할 수 있다. 그리고 속도는 일정 시간 동안 이동하는 거리의 개념이므로 시·공간적 과속 노출도는 속도의 차이에 따라 다르게 산정될 수 있다. 이러한 차이는 어느 관점을 통제하는가에 따라 다르게 도출된다. 예를 들어, 10km 구간을 10분 동안 주행한 두 차량이 있다고 가정해보자. 두 차량의 이동궤적을 시공도로 표현하면 <그림 4-12>와 같이 표현된다. 한 차량은 저속으로 주행하다가 일부 구간에서 고속으로 주행하였고, 다른 차량은 모든 구간에서 비슷한 속도로 주행하였으나 일부 구간에서 다소 높은(안전한계속도 이상) 속도로 주행하였다. 이 때, 과속으로 주행한 시간은 동일하게 150초라 하더라도 더 빠른 속도로 주행한 첫 번째 차량의 과속주행거리는 두 번째 차량보다 길다. 따라서 과속주행시간의 비율은 두 차량이 동일한 반면(시간 통제), 과속 주행거리의 비율은 0.50과 0.35로 첫

번째 차량이 높게 산정된다. 만약, 과속주행거리가 같다면(공간 통제), 속도가 높을수록 과속 주행시간의 비율은 반대로 낮아지는 관계가 나타난다.

두 관점에 따른 지표는 각각의 해석과 활용처가 다를 수 있다. 시간적 과속 노출도는 운전자의 측면에서 과속수준을 판단하는데 용이하다. 예를 들어, 시간적 과속 노출도는 "당진JC에서 서산IC까지 통행하는 시간 중 30%는 과속으로 주행한다."와 같이 해석할 수 있으며, 이러한 내용은 운전자가 체감하는 주관적 지표로 볼 수 있다. 공간적 과속 노출도는 운영자의 측면에서 도로구간의 과속실태를 보다 객관적으로 파악하는데 용이하다. 즉, "당진JC에서 서산IC까지의 도로구간 중 30% 구간에서 과속이 이뤄진다."와 같이 해석할 수 있으며, 개별 차량의 속도보다는 정해진 구간 내에서 과속의 현황을 보여주는 객관적 지표로 볼 수 있다. 이처럼 두 접근법의 차이가 중요함에도 불구하고, 그동안 비집계기반의 통행시간과 속도자료의 부재로 인해 연구분야로 주목받지 못하였다(Pei et al., 2012). 따라서 도로안전을 평가할 때 어느 하나의 지표를 사용하기보다는 어떤 형태로든 시·공간 노출도를 결합하여 고려하는 것이 신중한 방법이다(Chipman et al., 1992).



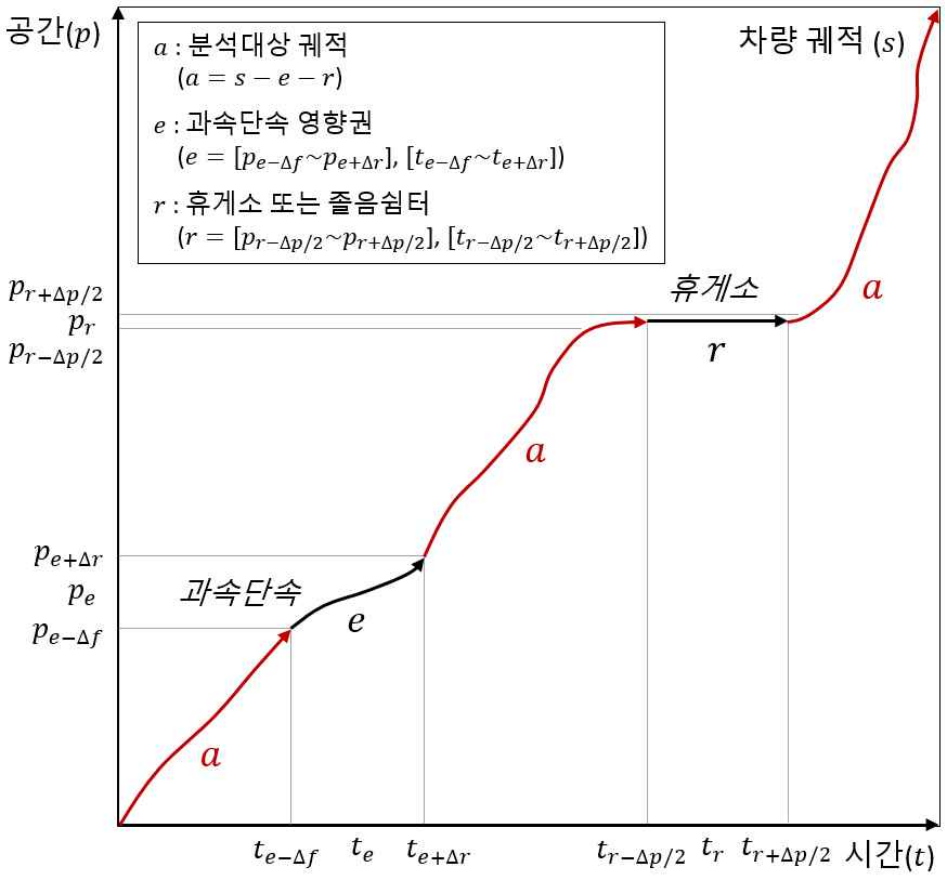
[차량 1. 일부 구간만 고속주행] [차량 2. 전체 구간에서 속도 유지]

<그림 4-12> 시·공간 관점에 따른 과속 노출도 차이

2. 과속 분석 대상구간 및 입·출력 변수 정의

1) 과속 분석 대상구간 정의

본 연구는 과속의 사고위험성을 나타내는 과속지표를 이용하여 도로구간별로 위험성을 예측하고자 한다. 시·공간적 통행특성이 모두 다른 차량 GPS 궤적을 이용하기 때문에 도로구간별 객관적인 예측을 위해 분석대상구간을 정의한다. 분석대상구간은 기본적으로 과속단속에 의한 속도의 시·공간적 변화와 휴게소 및 졸음쉼터에서 휴식을 위한 주정차 시간을 배제하기 위한 개념이며, 이를 시공도로 표현하면 <그림 4-13>과 같다.



<그림 4-13> 과속 분석 대상구간 정의 및 개념도

차량이 도로구간을 주행한 궤적을 s라 정의하면, $s=\{a,e,r\}$과 같다. 여기서, e는 과속단속 영향구간, r은 휴게소 및 졸음쉼터 영역이며, a는 과속분석의 대상구간궤적을 의미한다. 실제 고속도로 이용특성의 관점에서, 많은 차량들이 과속단속지점에 접근하면서 속도를 줄이고 단속지점을 지난 후에 다시 속도를 높이는 경향이 있다. 따라서 과속단속지점이 존재하면 과속의 비중이 감소한다. 이와 같은 불균형 문제를 해결하기 위하여 과속단속 영향구간(상류부 감속구간(Δf) 및 하류부 가속구간(Δr))을 분석대상구간에서 제외한다. 공간적 관점에서 과속단속지점을 p_e라 할 때, 과속단속 영향구간(e)은 $e=[p_{e-\Delta f}\sim p_{e+\Delta r}]$와 같다. 그리고 시간적 관점에서 과속단속지점을 지나는 시점은 t_e이며, 과속단속 영향구간을 통행한 시간은 $e=[t_{e-\Delta f}\sim t_{e+\Delta r}]$와 같다.

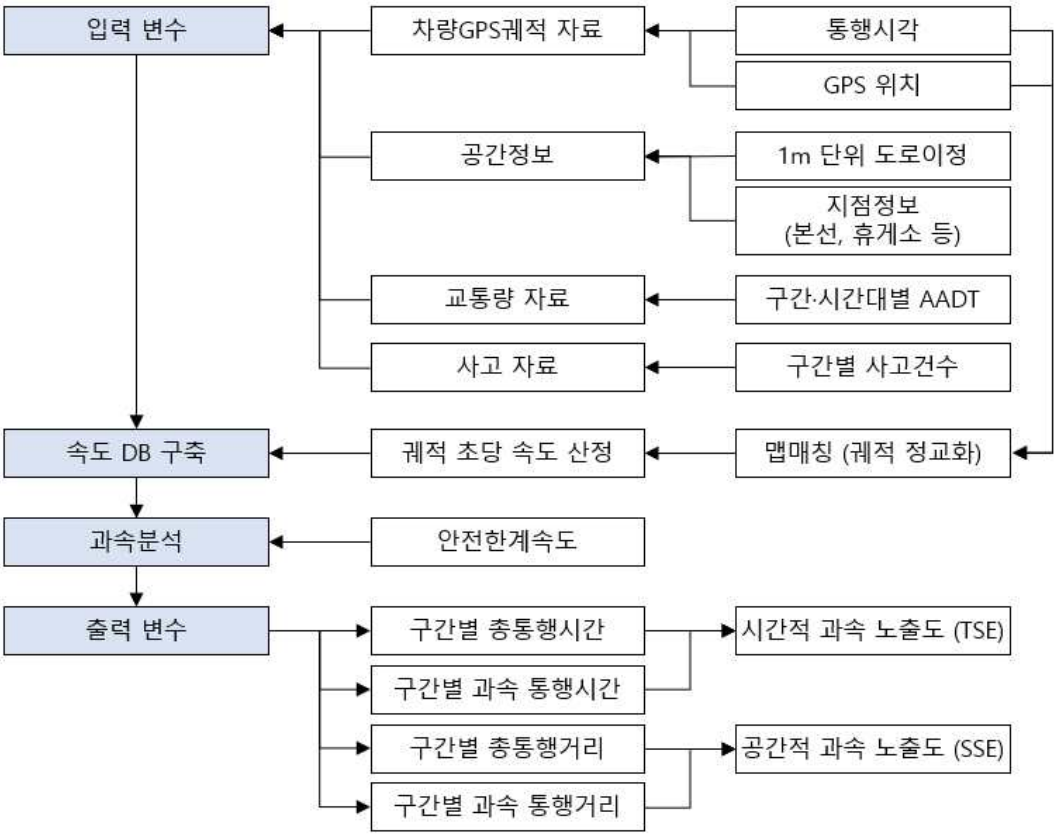
휴게소 또는 졸음쉼터에서 휴식을 하는 경우, 차량이 주정차된 상태이므로 속도가 0km/시로 기록된다. 차량이 정차한 경우 공간적 관점에서는 과속의 비중을 분석하는데 영향이 적지만, 시간적 관점에서는 휴식시간이 길어질수록 전체 통행시간이 길어지므로 전체 통행시간 중 과속이 차지하는 비중이 적어지는 문제가 발생한다. 이와 같이 휴식을 위한 주정차는 과속분석에 불합리한 영향을 주기 때문에 이를 배제하기 위하여 휴게소 및 졸음쉼터의 영향구간(주차공간)에 해당하는 구간(Δp)을 분석대상구간에서 제외한다. 휴게소 및 졸음쉼터의 위치를 기준으로 영향구간을 설정하며, 진입부 감속차로 시점은 $r-\Delta p/2$, 진출부 가속차로 종점은 $r+\Delta p/2$로 나타낼 수 있다. 즉, 휴게소 및 졸음쉼터 지점을 p_r이라 할 때, 공간적인 휴식 영향구간(r)은 $r=[p_{r-\Delta p/2}\sim p_{r+\Delta p/2}]$와 같으며, 차량의 궤적에서 시간적인 휴식 영향구간은 $r=[t_{r-\Delta p/2}\sim t_{r+\Delta p/2}]$와 같다. 결과적으로, $p_{s,\min}$과 $p_{s,\max}$는 각각 도로구간 s의 시작지점과 종료지점, $t_{s,\min}$과 $t_{s,\max}$는 각각 도로구간 s의 진입시간과 진출시간일 때, 도로구간 s에서 공간적 및 시간적 과속분석 대상구간(a)은 식 (4-10)과 같이 정의한다.

$$a=(p_{s,\max}-p_{s,\min})-(p_{e+\Delta r}-p_{e-\Delta f})-(p_{r+\Delta p/2}-p_{r-\Delta p/2})$$

$$a=(t_{s,\max}-t_{s,\min})-(t_{e+\Delta r}-t_{e-\Delta f})-(t_{r+\Delta p/2}-t_{r-\Delta p/2}) \qquad \text{식 (4-10)}$$

2) 과속 분석 입·출력 변수 정의

차량 GPS 궤적 자료를 이용하여 고속도로 구간별 과속 분석을 수행하기 위한 입·출력 변수를 <그림 4-14>와 같이 설계하였다. 입력 변수는 차량 GPS 궤적 자료와 궤적의 위치를 도로와 매칭할 수 있는 공간정보, 사고 설명력 검증을 위한 교통량 및 사고 자료로 구성한다. 맵매칭을 통한 정교화를 통해 속도를 산정하여 속도 DB를 구축한 후, 본 연구의 과속 분석 방법론을 이용하여 분석을 수행한다. 이 때, 사고를 가장 잘 설명할 수 있는 안전한계속도를 추정하여 적용한다. 최종적으로 구간별 총통행시간(거리) 및 과속 통행시간(거리)를 산정하여 출력 변수인 시·공간적 과속 노출도 지표를 산정한다.

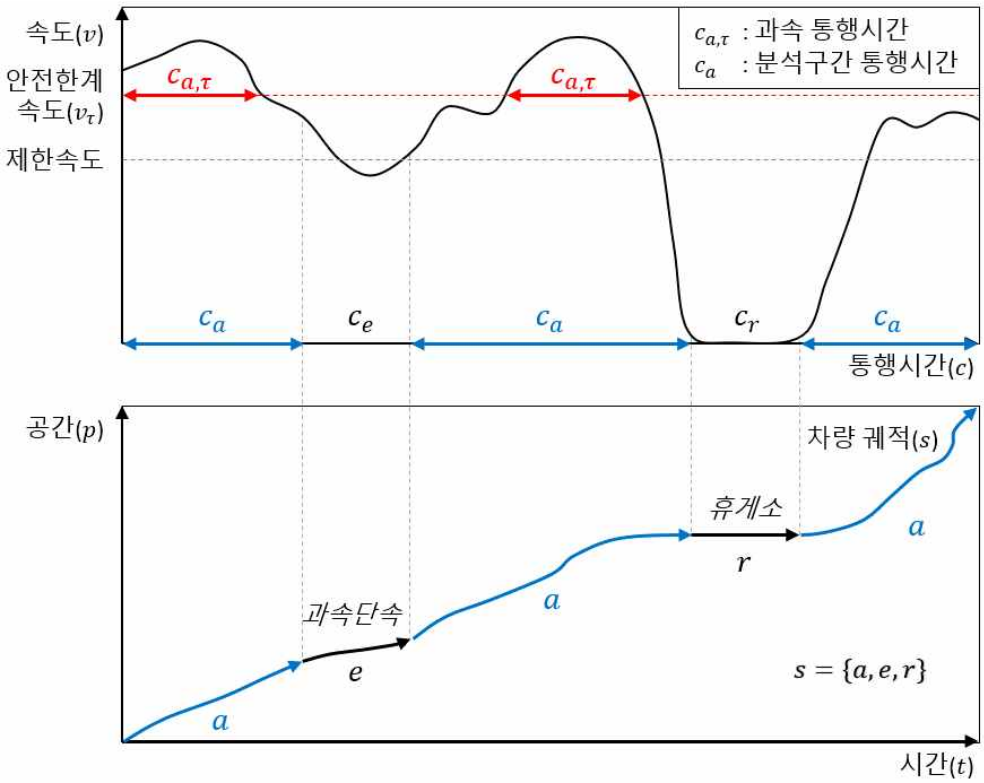


<그림 4-14> 과속 분석 입·출력 변수 정의

3. 시간적 과속 분석 방법론

1) 개별 차량의 과속 통행시간 산정방법

속도는 시간과 공간의 조합으로 이뤄진 개념이다. 따라서 과속은 시간적 관점과 공간적 관점으로 구분하여 분석할 수 있다. 과속의 시간적 측면에서 도로구간을 통행한 모든 차량들의 총 통행시간 중 과속으로 통행한 시간이 차지하는 비중은 해당 도로구간을 통행하면서 과속에 노출되는 시간의 비율로 해석할 수 있으며, 본 연구에서는 이 비율을 '시간적 과속 노출도'로 정의한다. 시간적 과속 노출도는 도로구간의 과속 위험성을 판단하기 위한 지표로서, 이 값이 클수록 해당 도로구간에서 과속으로 인한 사고의 가능성이 높음을 의미한다. 차량별 과속 통행시간 산정 방법을 개념적으로 표현하면 <그림 4-15>와 같이 나타낼 수 있다.



<그림 4-15> 차량별 과속 통행시간 산정 개념도

도로구간 s의 통행시간을 c_s로 정의하면, 시간적 과속 분석의 대상구간(a)에 대한 통행시간 c_a는 $c_a = c_s - c_e - c_r$과 같다. 여기서 c_e는 과속단속 영향구간의 통행시간이고, c_r은 휴게소 또는 졸음쉼터에서 휴식한 시간이며, $a, e, r \in s$이다. 시간적 과속 노출도를 산정할 때 핵심이 되는 요소는 과속상태를 구분하는 속도의 기준(안전한계속도)이다. 선행연구 고찰 결과, 보편적으로 사용하는 과속기준은 제한속도(또는 제한속도+α)임을 알 수 있었다. 그러나 제한속도를 과속기준으로 설정하는 방법은 법·행정적 기준을 적용한 것이다. 본 연구는 과속의 사고위험성을 분석하기 위한 연구목적에 부합하도록 안전한계속도를 추정하여 적용한다. 안전한계속도는 기본적으로 「도로의 구조, 시설기준에 관한 규칙」에서 정한 설계속도(고속도로의 지방부 평지는 120km/시, 산지 및 도시는 100km/시)보다 높을 가능성이 크다. 안전한계속도를 v_τ로 정의할 때, 시간적 과속 노출도는 v_τ의 값에 따라 다른 결과가 산정된다. 따라서 과속으로 인한 사고위험성을 더 잘 설명하기 위해서는 안전한계속도 설정에 신중한 접근이 필요하다. 본 연구에서는 v_τ의 변화에 따른 시간적 과속 노출도의 사고설명력을 기준으로 최적화과정을 통해 안전한계속도를 설정한다.

분석대상구간(a) 내에서 차량 궤적의 t시점에 대한 과속여부 판단변수는 $w_{a,\tau}(t)$으로 나타내며, 만약 $v_a(t) > v_\tau$인 경우 $w_{a,\tau}(t) = 1$, 그렇지 않은 경우 $w_{a,\tau}(t) = 0$과 같은 값을 가진다. 분석대상구간에 대한 일련의 과속여부 판단변수($W_{a,\tau}$)는 $W_{\alpha,\tau} = [w_{\alpha,\tau}(t_{\min}), \ldots, w_{\alpha,\tau}(t), \ldots, w_{\alpha,\tau}(t_{\max})]$이며, $W_{\alpha,\tau} = \{1, 0\}$이다. 차량이 안전한계속도를 초과한 속도로 통행한 시간(과속 통행시간)을 $c_{a,\tau}$로 정의할 때, $W_{a,\tau}$를 이용하면 과속 통행시간 $c_{a,\tau}$는 식 (4-11)로 계산된다. 따라서 개별 차량이 도로구간을 통행하는데 걸린 총 통행시간 중 과속 통행시간의 비율은 $c_{a,\tau}/c_a$와 같으며, 전체 계산과정은 식 (4-12)와 같다.

$$c_{a,\tau} = \sum_{t = t_{a,\min}}^{t_{a,\max}} w_{a,\tau}(t), \quad \forall t, w_{a,\tau}(t) = \{1, 0\} \qquad \text{식 (4-11)}$$

$$\frac{c_{a,\tau}}{c_a} = \frac{\sum_{t=t_{a,\min}}^{t_{a,\max}} w_{a,\tau}(t)}{(t_{s,\max} - t_{s,\min}) - (t_{e+\Delta r} - t_{e-\Delta f}) - (t_{r+\Delta p/2} - t_{r-\Delta p/2})} \qquad \text{식 (4-12)}$$

2) 도로구간의 시간적 과속 노출도(TSE) 산정방법

도로구간 s를 통행한 차량이 n대인 경우, i번째 차량에 대한 일련의 궤적은 $T^i = [(t^i_{\min}), \ldots, (t^i - 1), (t^i), (t^i + 1), \ldots, (t^i_{\max})]$와 같이 표현된다. 이 때, 모든 i와 t^i에 대해서 $i \le n, t^i \in T^i$ 이다. 따라서 도로구간 s의 분석대상구간 a에 대해서 전체 차량 n대에 해당하는 과속 통행시간의 비율을 도로구간의 시간적 과속 노출도(TSE, Temporal speeding exposure)로 정의하며, TSE는 식 (4-13)과 같이 산정한다. 이 식을 개별 차량 기반의 산정식으로 풀어쓰면 식 (4-14)와 같다. 여기서, $w^i_{a,\tau}(t)$는 분석대상구간 a에 대한 차량 i의 t시점 과속여부 $(w^i_{a,\tau}(t) = \{1,0\})$이며, $t^i_{s,\min}$와 $t^i_{s,\max}$는 각각 차량 i가 도로구간 s에 진입한 시점과 진출한 시점, $t^i_{e-\Delta f}$와 $t^i_{e+\Delta r}$는 차량 i가 과속단속 영향구간에 진입한 시점과 진출한 시점, $t^i_{r-\Delta p/2}$와 $t^i_{r+\Delta p/2}$는 차량 i가 휴게소 또는 졸음쉼터에서 휴식을 시작한 시점과 종료한 시점, $\omega^i_{s,h}$는 차량 i의 통행시간대 h에 대한 집계 가중치이다.

TSE는 0에서 1 사이의 값으로 산정된다$(0 \le TSE \le 1)$. 1에 가까울수록 과속에 노출되는 시간의 비중이 커짐을 의미하며, 해당 도로구간이 과속에 크게 노출된다고 해석할 수 있다. 즉, 도로구간의 시간적 과속 노출도가 0.3이라면, 해당 구간을 통행한 차량들의 전체 통행시간 중 30%의 시간 동안 과속으로 주행한다는 것을 의미한다.

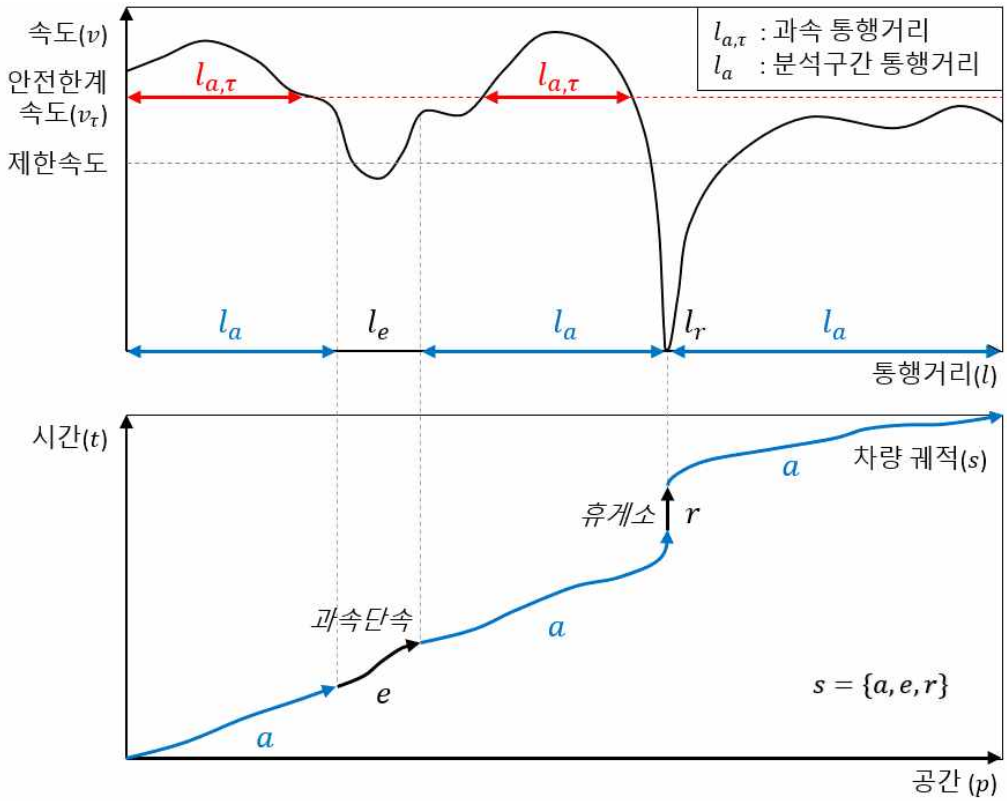
$$TSE = \sum_{i=1}^{n} c^i_{a,\tau} \times \omega^i_{s,h} \Big/ \sum_{i=1}^{n} c^i_a \times \omega^i_{s,h} \qquad \text{식 (4-13)}$$

$$TSE = \frac{\sum_{i=1}^{n} \sum_{t=t_{a,\min}}^{t_{a,\max}} w^i_{a,\tau}(t) \times \omega^i_{s,h}}{\sum_{i=1}^{n} ((t^i_{s,\max} - t^i_{s,\min}) - (t^i_{e+\Delta r} - t^i_{e-\Delta f}) - (t^i_{r+\Delta p/2} - t^i_{r-\Delta p/2})) \times \omega^i_{s,h}} \qquad \text{식 (4-14)}$$

4. 공간적 과속 분석 방법론

1) 개별 차량의 과속 통행거리 산정방법

공간적 과속의 측면에서 도로구간을 통행한 모든 차량들의 총 통행거리 중 과속으로 통행한 거리가 차지하는 비중은 해당 도로구간을 통행하면서 과속에 노출되는 구간거리의 비율로 해석할 수 있으며, 본 연구에서는 이 비율을 '공간적 과속 노출도'로 정의한다. 공간적 과속 노출도는 시간적 과속 노출도와 마찬가지로 도로구간의 과속 위험성을 판단하기 위한 지표이며, 이 값이 클수록 해당 도로구간에서 과속으로 인한 사고의 가능성이 높음을 의미한다. 차량별 과속 통행거리 산정방법을 개념적으로 표현하면 <그림 4-16>과 같다.



<그림 4-16> 차량별 과속 통행거리 산정 개념도

도로구간 s의 통행거리를 l_s로 정의하면, 공간적 과속 분석의 대상구간 (a)에 대한 통행거리 l_a는 $l_a = l_s - l_e - l_r$과 같다. 여기서 l_e는 과속단속 영향구간의 통행거리이고, 휴식으로 정차하는 경우 공간적 관점에서 l_r의 거리는 그 영향력이 적으므로 무시할 수 있다. 따라서 l_a는 다시 $l_a = l_s - l_e$로 정의되며, $a, e \in s$이다.

공간적 과속 노출도를 산정할 때에도 시간적 과속 노출도와 같이 안전을 고려한 안전한계속도를 설정하는 것이 중요하다. 당연하게도, 사고위험성이 높아지는 안전한계속도는 시·공간적으로 볼 때 거의 동일하게 설정될 가능성이 높다. 그러나 속도가 높을수록 같은 시간 동안 이동하는 거리가 길어지기 때문에 관점에 따라 차이가 다소 발생할 수 있다. 즉, 과속차량의 속도에 따라 시간적 분석과 공간적 분석에서 안전한계속도 v_τ는 크지 않은 범위 내에서 서로 다른 값으로 추정될 수 있다. 따라서 앞서 제시한 방법과 동일한 최적화방법을 이용하여 공간적 과속 노출도 산정을 위한 안전한계속도를 결정한다.

분석대상구간(a) 내에서 차량 궤적의 t시점에 대한 과속여부 판단변수는 $w_{a,\tau}(t)$으로 나타내며, 만약 $v_a(t) > v_\tau$인 경우 $w_{a,\tau}(t) = 1$, 그렇지 않은 경우 $w_{a,\tau}(t) = 0$과 같은 값을 가진다. 분석대상구간에 대한 일련의 과속여부 판단변수$(W_{a,\tau})$는 $W_{\alpha,\tau} = [w_{\alpha,\tau}(t_{\min}), \ldots, w_{\alpha,\tau}(t), \ldots, w_{\alpha,\tau}(t_{\max})]$이며, $W_{\alpha,\tau} = \{1, 0\}$이다. 차량이 안전한계속도를 초과한 속도로 통행한 거리(과속 통행거리)를 $l_{a,\tau}$로 정의할 때, $W_{a,\tau}$를 이용하면 $l_{a,\tau}$는 식 (4-15)로 계산된다. 따라서 개별 차량이 도로구간을 통행하는데 이동한 총 통행거리 중 과속 통행거리의 비율은 $l_{a,\tau}/l_a$와 같으며, 전체 계산과정은 식 (4-16)과 같다.

$$l_{a,\tau} = \sum_{t=t_{a,\min}}^{t_{a,\max}} (p_a(t) - p_a(t-1)), \quad \forall t, w_{a,\tau}(t) = 1 \qquad \text{식 (4-15)}$$

$$\frac{l_{a,\tau}}{l_a} = \frac{\sum_{t=t_{a,\min}}^{t_{a,\max}} (p_a(t) - p_a(t-1))}{(p_{s,\max} - p_{s,\min}) - (p_{e+\Delta r} - p_{e-\Delta f})}, \quad \forall t, w_{a,\tau}(t) = 1 \qquad \text{식 (4-16)}$$

2) 도로구간의 공간적 과속 노출도(SSE) 산정방법

도로구간 s를 통행한 차량이 n대인 경우, i번째 차량에 대한 일련의 궤적지점은 $p(T)^i = [p(t^i_{\min}), \ldots, p(t^i-1), p(t^i), p(t^i+1), \ldots, p(t^i_{\max})]$와 같이 표현된다. 이 때, 모든 i와 t^i에 대해서 $t^i \in T^i, i \in n, T^i \in T$ 이다.

도로구간 s의 분석대상구간 a에 대해서 전체 차량 n대에 해당하는 과속 통행거리의 비율을 도로구간의 공간적 과속 노출도(SSE, Spatial speeding exposure)로 정의하며, SSE는 식 (4-17)과 같이 산정한다. 그리고 이 식을 개별 차량 기반의 산정식으로 풀어쓰면 식 (4-18)과 같이 나타낼 수 있다. 여기서, $p^i_a(t) - p^i_a(t-1)$은 분석대상구간 a에서 차량 i가 t시점에 과속한 경우(즉, $w^i_{a,\tau}(t) = 1$)에 1초 동안 이동한 거리이며, $p_{s,\min}$과 $p_{s,\max}$는 각각 도로구간 s의 시작지점과 종료지점, $p_{e-\Delta f}$와 $p_{e+\Delta r}$는 각각 과속단속 영향구간의 시작지점과 종료지점, $\omega^i_{s,h}$는 차량 i의 통행시간대 h에 대한 집계 가중치이다. 단, 분석대상구간의 거리는 정해져 있으므로 모든 차량이 동일한 거리를 통행한다. 따라서 차량별로 총 통행거리를 계산할 필요가 없으며, 차량대수(n)를 구간거리에 곱하여 계산식을 단순화하였다.

SSE는 0에서 1 사이의 값으로 산정되며($0 \le SSE \le 1$), 1에 가까울수록 과속에 노출되는 거리의 비중이 커짐을 의미한다. 만약, 도로구간의 공간적 과속 노출도가 0.4로 산정되었다면, 해당 구간을 통행한 차량들이 전체 구간 중 40%의 구간을 과속으로 통행한다고 해석할 수 있다.

$$SSE = \frac{\sum_{i=1}^{n} l^i_{a,\tau} \times \omega^i_{s,h}}{\sum_{i=1}^{n} l^i_a \times \omega^i_{s,h}} \qquad \text{식 (4-17)}$$

$$SSE = \frac{\sum_{i=1}^{n} \sum_{t=t_{a,\min}}^{t_{a,\max}} (p^i_a(t) - p^i_a(t-1)) \times \omega^i_{s,h}}{n((p_{s,\max} - p_{s,\min}) - (p_{e+\Delta r} - p_{e-\Delta f})) \times \omega^i_{s,h}}, \ \forall t, w^i_{a,\tau}(t) = 1 \qquad \text{식 (4-18)}$$

제3절 운전 피로·과속 융합 분석 방법론

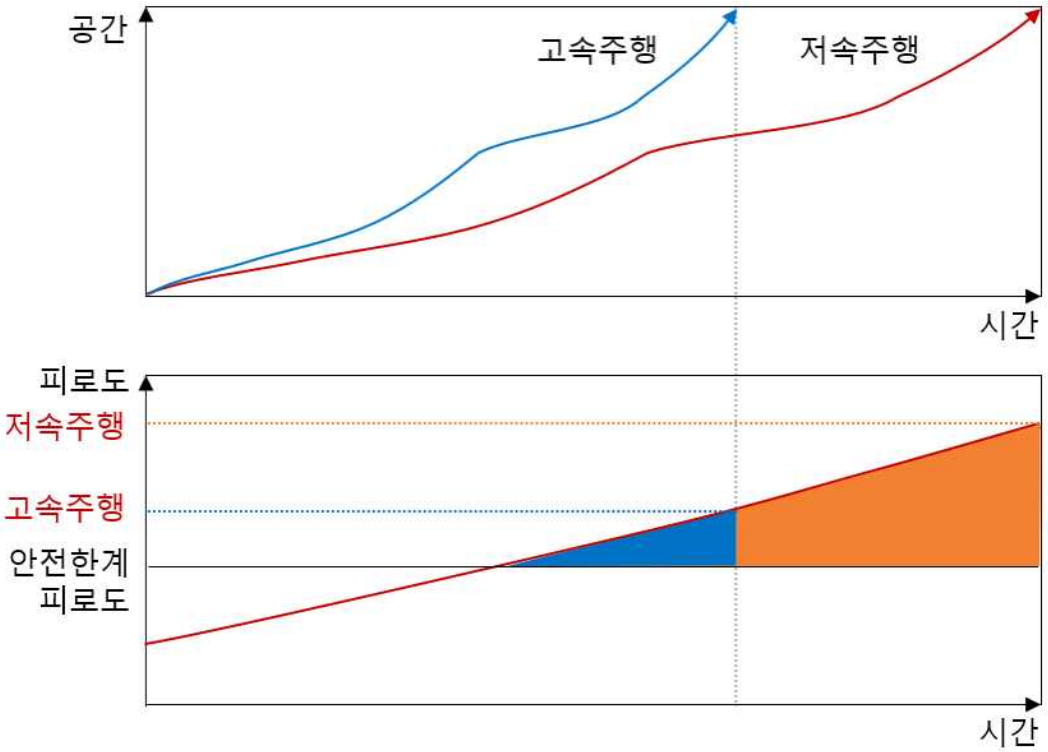
1. 융합 분석 의의

피로운전과 과속은 가장 주요한 사고발생 원인으로 인식되고 있으며, 이에 대한 연구가 지속적으로 수행되고 있다. 그러나 지금까지 피로와 과속을 개별적으로 분석하고 있으며, 두 요소의 복합적인 영향에 따른 사고발생을 분석한 연구는 전무한 상황이다. 피로와 과속은 운전자의 생리적 상태와 운전습관에 기인한다. 두 요소가 사고발생에 미치는 영향은 서로 독립적이지 않으며, 피로한 상태에서 과속으로 주행하거나 정속주행할 수 있고, 반대로 피로하지 않은 상태에서 과속주행 또는 정속주행할 수도 있다.

일부 연구자들은 시뮬레이션 주행실험을 통해 피로와 과속의 관계를 분석하였다. Soares et al. (2020)은 운전지속시간의 증가에 따라 평균속도가 어떻게 변하는지 조사하였다. 50인을 대상으로 모의주행 실험을 하였으며, 모두 생체리듬 피로도가 높은 오후 2시부터 운전을 시작하였다. 그 결과, 운전지속시간이 약 30분에서 1시간 사이에서 높은 속도로 주행하였으며, 그 이후로 보통의 속도로 주행하였다. 그러나 이 주행실험은 최대 운전지속시간이 75분으로 제한되어 있어 더 높은 피로수준에서 속도가 어떻게 달라지는지에 대해서는 조사하지 못하였다. 도로선형에 따른 피로와 속도의 영향을 분석한 Du et al. (2015)의 결과 또한 피로한 상태에서의 평균속도는 정상상태일 때보다 일관적으로 높은 것으로 나타났다. Hargutt et al. (2000)은 모의실험 주행시간이 증가하면서 속도가 높아지는 것을 발견하였으며, 그 원인은 신체와 정신적인 각성을 시도하여 피로를 이겨내기 위한 행동일 수 있다고 언급하였다.

이처럼 피로한 상태의 운전자는 목적지까지 조금이라도 빨리 도착하기 위해 평소의 속도보다 다소 높은 속도로 주행하는 경향을 보인다 (Ranney et al., 1999). 이러한 경향에 따른 위험 노출도 변화는 <그림

4-17>을 통해 이해할 수 있다. 이 그림은 동일한 피로도 수준에 있는 두 운전자가 같은 도로구간을 주행하였을 때, 한 대는 고속으로 주행하고 다른 한대는 저속으로 주행한 것을 표현한 시공도와 피로도 그래프이다. 두 차량은 동일한 도로구간을 주행하였지만 고속차량이 더 짧은 시간동안 구간을 통과하였다. 이 관계를 피로도로 살펴보면, 운전지속시간이 증가함에 따라 피로도가 꾸준히 증가하기 때문에 동일한 거리를 주행하였을 때 저속으로 주행한 운전자의 피로도는 고속의 운전자 피로도보다 높아진다. 즉, 낮은 속도로 주행할수록 누적되는 피로도는 증가하며, 피로운전의 위험성이 커진다. 이 결과를 잘못 해석하면 피로할수록 더 높은 속도로 주행해야 사고의 위험성이 낮아진다고 오해할 수 있다. 그러나 과속의 위험성은 피로할 때 더욱 커질 수 있기 때문에 적정 속도를 유지해야 하며, 이와 같은 이유로 사고위험성을 제대로 이해하기 위해서는 피로와 과속을 동시에 고려해야 한다(Kong et al., 2020).



<그림 4-17> 차량속도에 따른 피로 노출도 변화

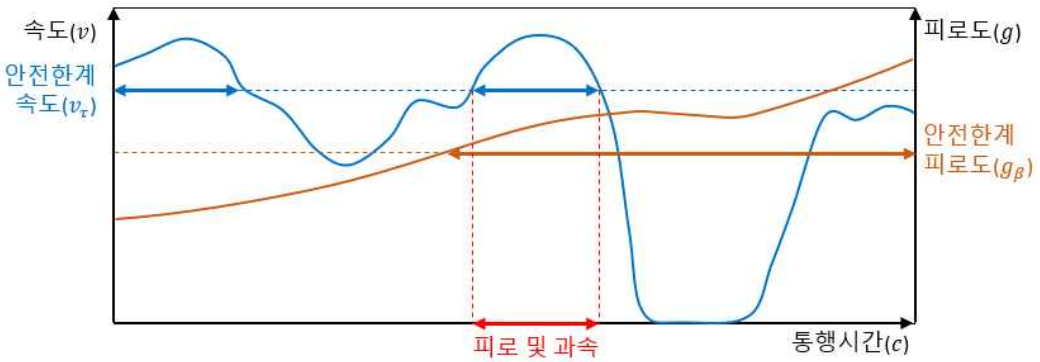
2. 융합 분석 접근법

본 연구는 차량 GPS 궤적을 이용하여 개별 차량의 운전 피로와 과속 행태를 기반으로 사고 위험도를 분석하고자 한다. 앞에서 제시한 시·공간적 피로 노출도와 과속 노출도는 운전 피로와 과속행태를 각 요인별로 분석하여 사고 위험도를 분석하는 것이며, 융합 분석은 운전자가 피로한 상태로 운전하거나 과속을 하는 행태를 동시에 분석한다는 점에서 차별성을 갖는다. 차량 GPS 궤적 자료는 개별 차량의 속도와 피로도의 동적 특성을 동시에 분석할 수 있는 기회를 제공하였으며, 운전자가 피로한 상태에서 과속을 할 때의 사고 위험성이나 두 요인 중 무엇이든 위험한 상태(피로하거나 또는 과속할 때)일 때의 사고 영향력을 분석할 수 있다. 본 연구에서 운전 피로와 과속의 융합 분석은 기본적으로 집합분석(set analysis)의 개념으로 접근하며, 또한 개별 분석지표를 조합하는 방법을 통해 과속과 피로도의 사고영향력 비중을 분석하고자 한다.

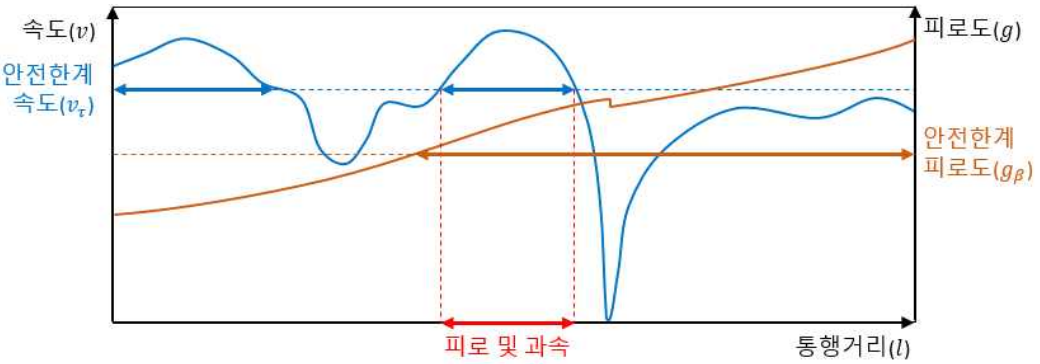
집합은 교집합(∩)과 합집합(∪), 차집합(−)의 방법이 있다. 이들 중 차집합의 개념은 사고와의 관계를 분석할 때 중요한 의미를 가지지 않을 것으로 판단하여 제외하고, 교집합과 합집합에 대한 분석을 수행한다. 즉, 피로와 과속의 관계에서 집합의 개념을 적용하면 {피로∩과속, 피로∪과속}과 같이 구성할 수 있다. 교집합(피로 및 과속 노출도)의 경우, 피로상태에서 과속을 하는 것을 의미하며 피로로 인해 반응속도가 느려진 상태에서 제동거리가 길어지기 때문에 사고위험성이 더 높아질 것으로 예상된다. 합집합(피로 또는 과속 노출도)의 경우는 피로상태이거나 과속을 하는 상태에 대한 사고 위험성을 판단할 수 있는 지표이다. 융합 분석 또한 시·공간적으로 구분하여 산정하며 시·공간적 피로과속교집합 노출도는 TIE(Temporal intersection exposure) 및 SIE(Spatial intersection exposure)로 정의하고, 시·공간적 피로과속합집합 노출도는 TUE(Temporal union exposure) 및 SUE(Spatial union exposure)로 정의한다. 그리고 시·공간적 조합분석 지표는 TCE(Temporal combination exposure) 및 SCE(Spatial combination exposure)로 정의한다.

3. 시·공간적 피로과속교집합 노출도(TIE, SIE) 산정방법

개별 차량에 대한 시·공간적 피로과속교집합 노출도는 운전자의 피로도가 안전한계피로도를 초과하는 상태에서 차량의 속도가 안전한계속도를 초과하는 상태로 통행하는 시간 또는 거리의 비율을 의미한다. 개별 차량의 시·공간적 피로과속교집합 노출도는 <그림 4-18>과 같이 나타낼 수 있다. 두 관점에 따른 지표 산정방법의 개념에는 차이가 없으며, 피로도 및 속도가 모두 안전한계기준을 초과하는 상태의 통행시간 및 통행거리의 비율과 같다. 즉, 차량이 피로운전의 위험성과 과속의 위험성을 동시에 가지고 있을 때의 통행시간비율 또는 통행거리비율과 같다.



[시간적 관점]



[공간적 관점]

<그림 4-18> 시·공간적 피로과속교집합 노출도 산정 개념도

시·공간적 피로과속교집합 노출도(TIE, SIE)의 산정방법은 피로 노출도 산정방법과 과속 노출도 산정방법을 기본으로 한다. 단, 도로구간 s에서 분석대상구간 a는 과속 노출도 산정시와 동일하게 과속단속 영향구간(e)과 휴게소 또는 졸음쉼터 영향구간(r)을 제외한 구간으로 설정한다.

피로과속교집합 노출도를 산정할 때에는 피로 노출도와 과속 노출도를 개별적으로 산정할 때 도출되는 안전한계피로도 및 안전한계속도를 사용하지 못한다. 그 이유는 실제 도로를 주행할 때 피로한 상태에서 과속을 하는 경우는 일반적인 과속과 그 특성이 다르며, 그 차이로 인해 사고위험성이 높아지는 속도기준이 달라지기 때문이다. 따라서 피로과속교집합 노출도 산정시 별도의 최적화 과정을 통해 안전한계피로도와 안전한계속도를 결정해야 한다. 여기서, 최적화 과정은 두 기준을 파라미터로 설정하여 노출도 지표가 사고를 가장 잘 설명할 수 있는 파라미터들의 최적값을 도출해내는 과정이다.

시·공간적 피로과속교집합 노출도 산정방법은 다음과 같다. 분석대상구간(a) 내에서 차량 궤적의 t시점에 대한 피로운전여부 판단변수는 $w_{a,\beta}(t)$로 정의하며, 만약 $g_a(t) > g_\beta$인 경우 $w_{a,\beta}(t) = 1$, 그렇지 않은 경우 $w_{a,\beta}(t) = 0$과 같다. 그리고 과속여부 판단변수는 $w_{a,\tau}(t)$으로 정의하며, 만약 $v_a(t) > v_\tau$인 경우 $w_{a,\tau}(t) = 1$, 그렇지 않은 경우 $w_{a,\tau}(t) = 0$과 같다. 따라서 분석대상구간에 대한 일련의 피로운전여부 판단변수와 과속여부 판단변수는 각각 $W_{\alpha,\beta} = \{1, 0\}$, $W_{\alpha,\tau} = \{1, 0\}$와 같다.

시점 t에서 피로상태로 과속하는 경우는 두 판단변수의 조건을 이용하여 $\{t | w_{a,\tau}(t) = 1 \text{ 그리고 } w_{a,\beta}(t) = 1\}$과 같이 나타낼 수 있다. 이는 두 판단변수가 모두 1일 때의 시점을 의미하기 때문에 별도의 조건을 부여할 필요없이 $w_{a,\tau}(t) \times w_{a,\beta}(t)$로 표현하여 두 조건을 모두 만족하는 시점 t를 판단할 수 있다. 이 조건을 이용하면 개별 차량의 피로 및 과속 통행시간($c_{a,\tau,\beta}$)은 식 (4-19)와 같이 산정한다. 그리고 피로 및 과속 통행거리($l_{a,\tau,\beta}$)는 식 (4-20)과 같이 산정한다.

$$c_{a,\tau,\beta} = \sum_{t=t_{a,\min}}^{t_{a,\max}} w_{a,\tau}(t) \times w_{a,\beta}(t) \qquad \text{식 (4-19)}$$

$$l_{a,\tau,\beta} = \sum_{t=t_{a,\min}}^{t_{a,\max}} (p_a(t) - p_a(t-1)) \times (w_{a,\tau}(t) \times w_{a,\beta}(t)) \qquad \text{식 (4-20)}$$

도로구간 s를 통행한 차량이 n대인 경우, i번째 차량에 대한 일련의 궤적은 $T^i = [(t^i_{\min}), \ldots, (t^i - 1), (t^i), (t^i + 1), \ldots, (t^i_{\max})]$와 같이 표현된다. 이 때, 모든 i와 t^i에 대해서 $i \le n, t^i \in T^i$ 이다. 따라서 도로구간 s의 분석대상구간 a에 대해서 전체 차량 n대에 해당하는 시간적 피로 및 과속 노출도는 식 (4-21)과 같이 산정하며, 이 식을 개별 차량 기반의 산정식으로 풀어쓰면 식 (4-22)와 같다. 그리고 공간적 피로 및 과속 노출도는 식 (4-23)과 같으며, 개별 차량 기반의 산정식으로 풀어쓰면 식 (4-24)와 같다.

$$TIE = \frac{\sum_{i=1}^{n} c^i_{a,\tau,\beta} \times \omega^i_{s,h}}{\sum_{i=1}^{n} c^i_a \times \omega^i_{s,h}} \qquad \text{식 (4-21)}$$

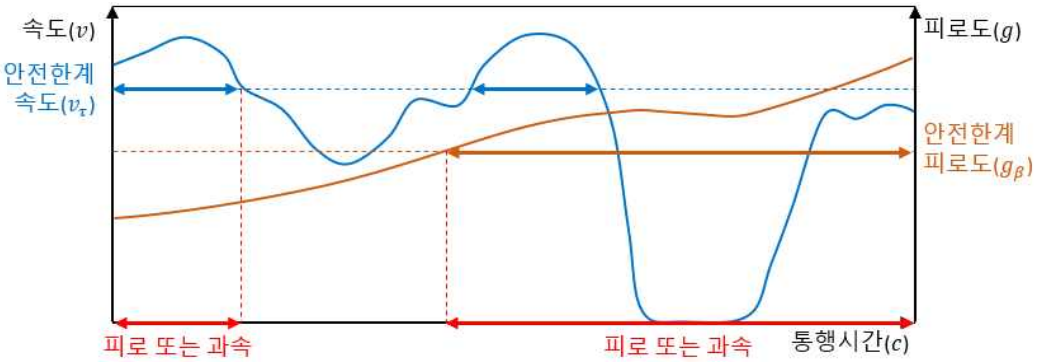
$$TIE = \frac{\sum_{i=1}^{n} \sum_{t=t_{a,\min}}^{t_{a,\max}} (w^i_{a,\tau}(t) \times w^i_{a,\beta}(t)) \times \omega^i_{s,h}}{\sum_{i=1}^{n} ((t^i_{s,\max} - t^i_{s,\min}) - (t^i_{e+\Delta r} - t^i_{e-\Delta f}) - (t^i_{r+\Delta p/2} - t^i_{r-\Delta p/2})) \times \omega^i_{s,h}} \qquad \text{식 (4-22)}$$

$$SIE = \frac{\sum_{i=1}^{n} l^i_{a,\tau,\beta} \times \omega^i_{s,h}}{\sum_{i=1}^{n} l^i_a \times \omega^i_{s,h}} \qquad \text{식 (4-23)}$$

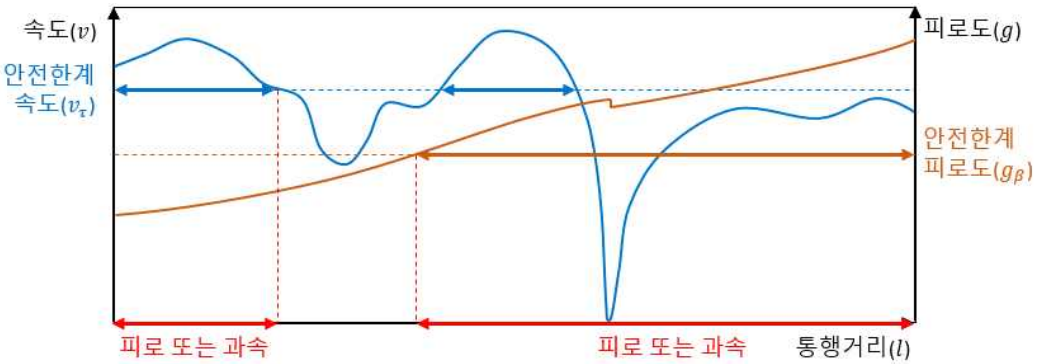
$$SIE = \frac{\sum_{i=1}^{n} \sum_{t=t_{a,\min}}^{t_{a,\max}} (p^i_a(t) - p^i_a(t-1)) \times (w^i_{a,\tau} \times w^i_{a,\beta}) \times \omega^i_{s,h}}{n((p_{s,\max} - p_{s,\min}) - (p_{e+\Delta r} - p_{e-\Delta r})) \times \omega^i_{s,h}} \qquad \text{식 (4-24)}$$

4. 시·공간적 피로과속합집합 노출도(TUE, SUE) 산정방법

개별 차량에 대한 시·공간적 피로과속합집합 노출도는 운전자의 피로도가 안전한계피로도를 초과하는 상태이거나 차량의 속도가 안전한계속도를 초과하는 상태로 통행하는 시간 또는 거리의 비율을 의미한다. 개별 차량의 시·공간적 피로과속합집합 노출도는 <그림 4-19>와 같이 나타낼 수 있다. 두 관점에 따른 지표 산정방법의 개념은 동일하며, 피로도 또는 속도 중 어느 하나라도 안전한계기준을 초과하는 상태의 통행시간 및 통행거리의 비율과 같다. 즉, 차량이 피로운전의 위험성이나 과속의 위험성 중 하나의 위험성이라도 가지고 있을 때의 통행시간비율 또는 통행거리비율과 같다.



[시간적 관점]



[공간적 관점]

<그림 4-19> 시·공간적 피로과속합집합 노출도 산정 개념도

시·공간적 피로과속합집합 노출도(TUE, SUE)의 산정방법은 피로 노출도 산정방법과 과속 노출도 산정방법을 기본으로 한다. 단, 도로구간 s에서 분석대상구간 a는 과속 노출도 산정시와 동일하게 과속단속 영향구간(e)과 휴게소 또는 졸음쉼터 영향구간(r)을 제외한 구간으로 설정한다.

피로과속합집합 노출도를 산정할 때에도 피로 노출도와 과속 노출도를 개별적으로 산정할 때 도출되는 안전한계피로도 및 안전한계속도를 사용하지 못한다. 그 이유는 시·공간적 피로과속교집합 노출도 산정방법에서 설명한 바와 같이 각 지표마다 기준에 따른 사고위험성이 다르기 때문이며, 기준의 도출과정은 동일한 방법을 사용한다.

시·공간적 피로과속합집합 노출도 산정방법은 다음과 같다. 분석대상구간(a) 내에서 차량 궤적의 t시점에 대한 피로운전여부 판단변수 $w_{a,\beta}(t)$와 과속 판단변수 $w_{a,\tau}(t)$는 TIE 및 SIE 산정시와 같다. 시점 t에서 피로상태이거나 과속하는 경우는 두 판단변수의 조건을 이용하여 $\{t|w^i_{a,\tau}=1 \text{ 또는 } w^i_{a,\beta}=1\}$과 같이 나타낼 수 있다. 이는 두 판단변수 중 한 개 이상이 1일 때의 시점을 의미하며, 이 조건에 부합하는 시점 t의 상태를 $W(t)$로 정의하면 이 조건문은 식 (4-25)와 같이 표현된다. 이 식에 의하면 피로상태이거나 또는 과속인 조건을 만족하는 시점 t를 판단할 수 있다. 개별 차량의 피로 또는 과속 통행시간($c^*_{a,\tau,\beta}$)은 식 (4-26)과 같이 산정하며, 피로 또는 과속 통행거리($l^*_{a,\tau,\beta}$)는 식 (4-27)과 같이 산정한다.

$$W(t)=(w_{a,\tau}(t)+w_{a,\beta}(t))-(w_{a,\tau}(t)\times w_{a,\beta}(t)) \qquad \text{식 (4-25)}$$

여기서, 모든 t에 대해 $w_{a,\tau}(t)=\{0,1\}, w_{a,\beta}(t)=\{0,1\}$

$$c^*_{a,\tau,\beta}=\sum_{t=t_{a,\min}}^{t_{a,\max}} W(t) \qquad \text{식 (4-26)}$$

$$l^*_{a,\tau,\beta}=\sum_{t=t_{a,\min}}^{t_{a,\max}} (p_a(t)-p_a(t-1))\times W(t) \qquad \text{식 (4-27)}$$

도로구간 s를 통행한 차량이 n대인 경우, i번째 차량에 대한 일련의 궤적은 $T^i = [(t^i_{\min}), \ldots, (t^i - 1), (t^i), (t^i + 1), \ldots, (t^i_{\max})]$와 같이 표현된다. 이 때, 모든 i와 t^i에 대해서 $i \le n, t^i \in T^i$ 이다. 따라서 도로구간 s의 분석대상구간 a에 대해서 전체 차량 n대에 해당하는 시간적 피로과속합집합 노출도는 식 (4-28)과 같이 산정하며, 이 식을 개별 차량 기반의 산정식으로 풀어쓰면 식 (4-29)와 같다. 그리고 공간적 피로과속합집합 노출도는 식 (4-30)과 같으며, 개별 차량 기반의 산정식으로 풀어쓰면 식 (4-31)과 같다.

$$TUE = \frac{\sum_{i=1}^{n} c^{i*}_{a,\tau,\beta} \times \omega^i_{s,h}}{\sum_{i=1}^{n} c^i_a \times \omega^i_{s,h}} \qquad \text{식 (4-28)}$$

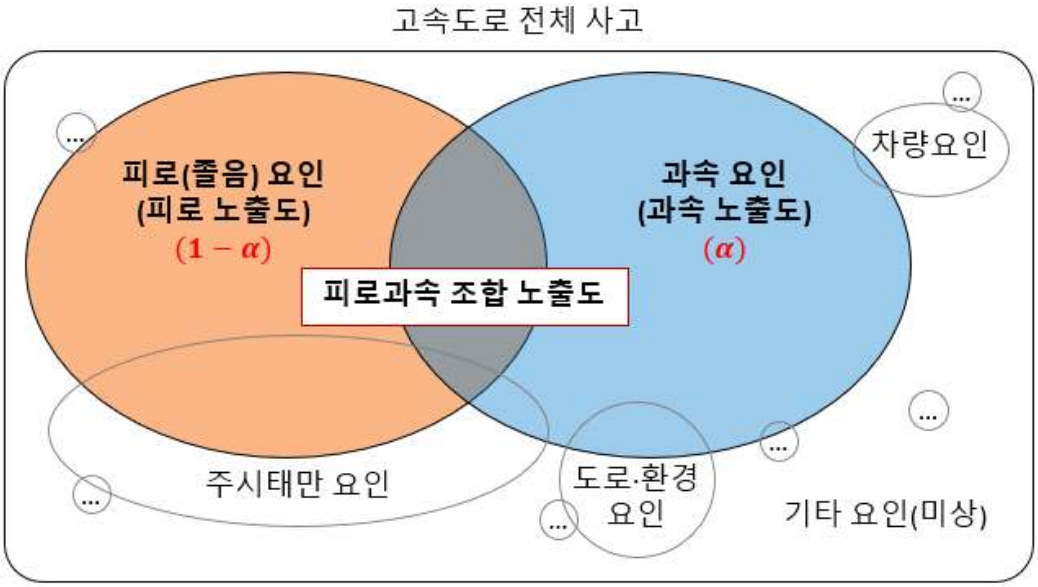
$$TUE = \frac{\sum_{i=1}^{n} \sum_{t=t_{a,\min}}^{t_{a,\max}} W^i(t) \times \omega^i_{s,h}}{\sum_{i=1}^{n} ((t^i_{s,\max} - t^i_{s,\min}) - (t^i_{e+\Delta r} - t^i_{e-\Delta f}) - (t^i_{r+\Delta p/2} - t^i_{r-\Delta p/2})) \times \omega^i_{s,h}} \qquad \text{식 (4-29)}$$

$$SUE = \frac{\sum_{i=1}^{n} l^{i*}_{a,\tau,\beta} \times \omega^i_{s,h}}{\sum_{i=1}^{n} l^i_a \times \omega^i_{s,h}} \qquad \text{식 (4-30)}$$

$$SUE = \frac{\sum_{i=1}^{n} \sum_{t=t_{a,\min}}^{t_{a,\max}} (p^i_a(t) - p^i_a(t-1)) \times W^i(t) \times \omega^i_{s,h}}{n((p_{s,\max} - p_{s,\min}) - (p_{e+\Delta r} - p_{e-\Delta r})) \times \omega^i_{s,h}} \qquad \text{식 (4-31)}$$

5. 피로과속 조합 노출도 산정 방법론

본 연구에서 제시한 개별 분석지표(시·공간적 피로 노출도, 시·공간적 과속 노출도)는 고속도로 구간에서 각각의 위험성에 노출되는 수준을 분석한 것이다. 피로와 과속이 사고위험성에 미치는 영향은 동일하지 않으며, 피로도 수준과 과속 정도에 따라 두 요인의 사고위험 비중이 다를 수 있다. 예를 들어, 피로도가 낮은 수준에서는 과속에 의한 사고위험성의 비중이 높은 반면에 피로도가 높은 수준에서는 과속보다 피로에 따른 사고위험성의 비중이 더 높을 것으로 판단된다. 그러나 지금까지 두 요인의 사고위험성 비중에 대해서 연구된 적이 없다. 따라서 본 연구에서는 두 위험노출도 지표를 특정 비율(α)로 조합하여 새로운 지표인 시·공간적 피로과속 조합 노출도를 산출해내고, 이 지표를 이용하여 두 요인의 사고에 대한 영향력 비중을 분석하고자 한다. 이와 같은 관계는 <그림 4-20>과 같이 표현할 수 있다. 조합분석을 수행할 때 두 요소는 반드시 시·공간 개념을 동일하게 유지해야 한다. 즉, 시간적 분석과 공간적 분석으로 구분하여 조합지표를 산정하도록 한다.



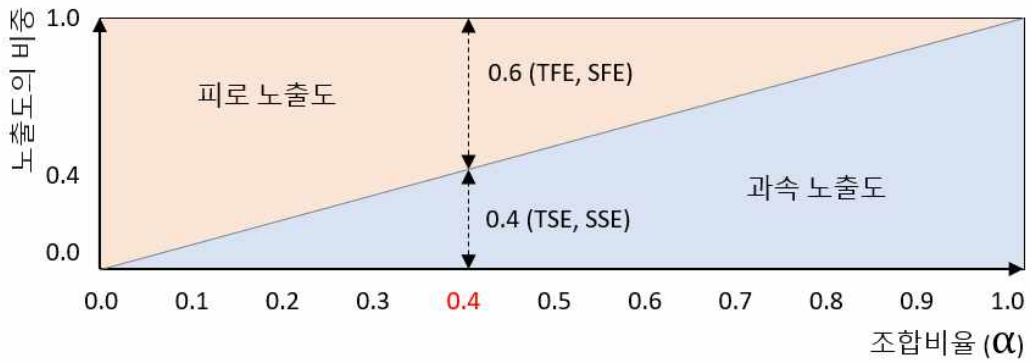
<그림 4-20> 피로과속 조합 노출도의 개념

두 위험요소의 조합비율(combination rate)을 결정하는 것은 피로과속 조합분석에서 핵심이 되는 부분이다. 여기서, 조합비율은 α로 정의하며, 전체(두 요소의 합)를 1.0으로 할 때 조합비율에 따라 두 노출도가 차지하는 비중을 결정하게 된다. 즉, $\alpha = [0.0 \sim 1.0]$의 범위 내에서 결정되며, α_t는 시간적 조합비율이고, α_s는 공간적 조합비율일 때, $\alpha = \{\alpha_t, \alpha_s\}$와 같다. α는 최적화 과정을 통해 사고를 가장 잘 설명할 수 있는 조합비율로 결정한다.

시간적 피로 노출도와 시간적 과속 노출도를 조합비율 α_t로 조합하면, 시간적 조합 노출도를 산정할 수 있으며, 이는 TCE(Temporal combination exposure)로 정의한다. 그리고 TCE는 식 (4-32)와 같이 산정한다. 또한 공간적 조합 노출도는 공간적 피로 노출도와 공간적 과속 노출도를 조합비율 α_s로 조합하여 산정하며, 이는 SCE(Spatial combination exposure)로 정의한다. SCE는 식 (4-33)과 같이 산정한다. 두 관점의 조합 노출도는 조합비율(α_t, α_s)이 0에서 1까지 변할 때 과속 노출도의 비중은 0에서 1까지 비례하게 커지는 반면, 피로 노출도는 반비례로 적어진다. 만약, <그림 4-21>과 같이 조합비율이 0.4인 경우 과속 노출도의 비중은 0.4, 피로 노출도의 비중은 0.6으로 조합 노출도를 산정한다.

$$TCE = \alpha_t \times TSE + (1-\alpha_t) \times TFE, \quad \forall \alpha_t,\ \alpha_t = [0.0 \sim 1.0] \qquad \text{식 (4-32)}$$

$$SCE = \alpha_s \times SSE + (1-\alpha_s) \times SFE, \quad \forall \alpha_s,\ \alpha_s = [0.0 \sim 1.0] \qquad \text{식 (4-33)}$$



<그림 4-21> 조합비율 변화에 따른 피로 및 과속 노출도 비중 변화

개별 분석지표(TFE, SFE, TSE, SSE)와 집합분석 지표(TIE, SIE, TUE, SUE)는 모두 피로상태와 과속행태를 개별 차량을 기반으로 분석하는 지표이다. 즉, 차량(운전자)의 운행행태를 개별적으로 분석하는 접근방법이다. 그러나 조합분석 지표(TCE, SCE)는 도로구간별로 산정한 개별 분석지표를 기초 자료로 활용하여 하나의 지표로 재구성하는 접근방법이기 때문에 앞의 8개 지표와는 다른 방식으로 산정된다. 따라서 본 연구의 적용파트에서 사고예측 모형을 구축할 때에는 개별 분석지표와 집합분석 지표를 변수로 사용하며, 조합분석 지표는 피로와 과속의 사고위험 영향력 비중을 산정하는 목적으로 활용한다.

앞에서 서술한 바와 같이, 사고위험성에 대한 피로 및 과속의 비중은 피로도 수준과 속도에 따라 다르게 산출될 것으로 예상된다. 따라서 조합분석의 유형을 <표 4-1>과 같이 다양하게 설계하여 민감도 분석과 같은 방법으로 두 요인의 사고위험성 비중을 산정하도록 한다. 조합분석의 유형은 안전한계피로도가 낮은 정상상태(40, 60)부터 중간상태(80), 피로상태(100, 120), 졸음상태(140)에 해당하는 피로도 수준까지 20 단위로 증가하는 것으로 설정하며, 동시에 안전한계속도 설정값은 100km/시에서 170km/시까지 5km/시 단위로 증가시켜 안전한계피로도와 안전한계속도의 설정값 변화에 따른 조합비율 α를 각각 추정한다. 여기서, 조합비율 α는 과속의 사고위험성 비중을 나타내며 피로운전의 사고위험성 비중은 $1-\alpha$와 같다. 전체 사고위험성을 1이라 할 때 이와 같은 조합분석 방법을 적용하여 피로 및 과속의 사고위험성 비중을 분석할 수 있다.

<표 4-1> 조합분석 유형 설계

안전한계피로도		안전한계속도
설정값	피로 수준 설명	설정값
40	지극히 정상	100-170km/시 (5km/시 단위)
60	정상	
80	중간	
100	피로	
120	심한 피로	
140	졸음	

제4절 운전 피로 및 과속 분석 알고리즘

지금까지 4개의 개별 분석지표(시·공간적 피로 노출도, 시·공간적 과속 노출도)와 4개의 융합 분석지표(시·공간적 피로 및 과속 노출도, 시·공간적 피로 또는 과속 노출도)를 산정하는 방법론을 설명하였으며, 추가적으로 피로 및 과속의 위험비중을 분석할 수 있는 조합분석 지표를 제시하였다. 본 연구에서는 개별 분석지표와 융합 분석지표를 산정하기 위한 전반적인 과정을 <그림 4-22>와 같은 알고리즘으로 구현하였다. 이 알고리즘은 약 1억 5천만 개에 달하는 대용량 궤적 자료를 분석하기 위한 목적이기 때문에 가능한 단순명료한 방법을 적용하고자 하였다. 특히, 전체 궤적 자료를 한 줄씩 순차적으로 읽음과 동시에 8개의 분석지표 산정에 필요한 변수들을 즉각적으로 업데이트하는 방식을 적용하여 불필요한 반복 처리과정을 줄이고 수행시간을 최소화하였다.

8개의 분석지표들은 모두 개별 차량의 GPS 궤적 $S=[s_1, s_2, ..., s_n]$을 기반으로 분석이 이뤄지며, 궤적 S는 시간 T와 공간 P의 정보를 포함하고 있다. 단계별 수행과정은 첫 번째로 궤적 자료를 이용하여 피로 및 과속 분석의 기초자료로 사용되는 속도DB와 운전자의 생리적 피로도DB를 구축한다. 두 번째 단계에서 궤적 자료의 위치를 분석대상 도로구간과 매칭하여 분석대상 궤적을 갱신한다. 세 번째 단계에서는 8개의 분석지표를 산정하기 위한 통행거리 및 통행시간 변수들을 계산한다. 이 단계에서 계산되는 변수는 모든 차량들의 총통행거리와 총통행시간, 개별 분석지표에 사용되는 통행거리 및 통행시간(안전한계피로도를 초과하는 경우, 안전한계속도를 초과하는 경우), 융합 분석지표에 사용되는 통행거리 및 통행시간(안전한계피로도와 안전한계속도를 초과하는 경우, 안전한계피로도 또는 안전한계속도를 초과하는 경우) 등이다. 세 번째 단계에서 전체 궤적 자료에 대한 분석을 모두 마치면, 분석지표 산정에 필요한 변수들의 계산이 완료된다. 그리고 최종적으로 이 변수들을 사용해서 8개의 분석지표를 산정한다.

Given $S=[s_1, s_2, \ldots, s_n]$

$s_i=[(p_1^i, t_1^i), (p_2^i, t_2^i), \ldots, (p_k^i, t_k^i)] \ \forall s_i, i=[1, 2, \ldots, n]$

Given P, T

$P^i=[p_1^i, p_2^i, \ldots, p_k^i]$, $T^i=[t_1^i, t_2^i, \ldots, t_k^i]$

STEP 1: Establishing Speed DB and Driver Fatigue DB

For all s_i

−Calculating V^i by eq. (3−1), $\forall i, V=[v_1, v_2, \ldots, v_k]$

−Calculating G^i by eq. (3−3), $\forall i, G=[g_1, g_2, \ldots, g_k]$

STEP 2: Searching Target Trajectory Data

For all s_i

−Mathching P^i, T^i with target road segment by eq. (4−10)

−Updating s_i

STEP 3: Calculating Travel Time and Distance

For all s_i

$$c=\sum_{i=1}^{n}(t_k^i-t_1^i), \ l=\sum_{i=1}^{n}(p_k^i-p_1^i)$$

If $g>g_\beta$ Then

−calculating c_β by eq. (4−2), l_β by eq. (4−6)

If $v>v_\tau$ Then

−calculating c_τ by eq. (4−11), l_τ by eq. (4−15)

If $g>g_\beta$ and $v>v_\tau$ Then

−calculating $c_{\tau,\beta}$ by eq. (4−19), $l_{\tau,\beta}$ by eq. (4−20)

If $g>g_\beta$ or $v>v_\tau$ Then

−calculating $c^*_{\tau,\beta}$ by eq. (4−26), $l^*_{\tau,\beta}$ by eq. (4−27)

STEP 4: Updating Driver Fatigue and Speeding Index

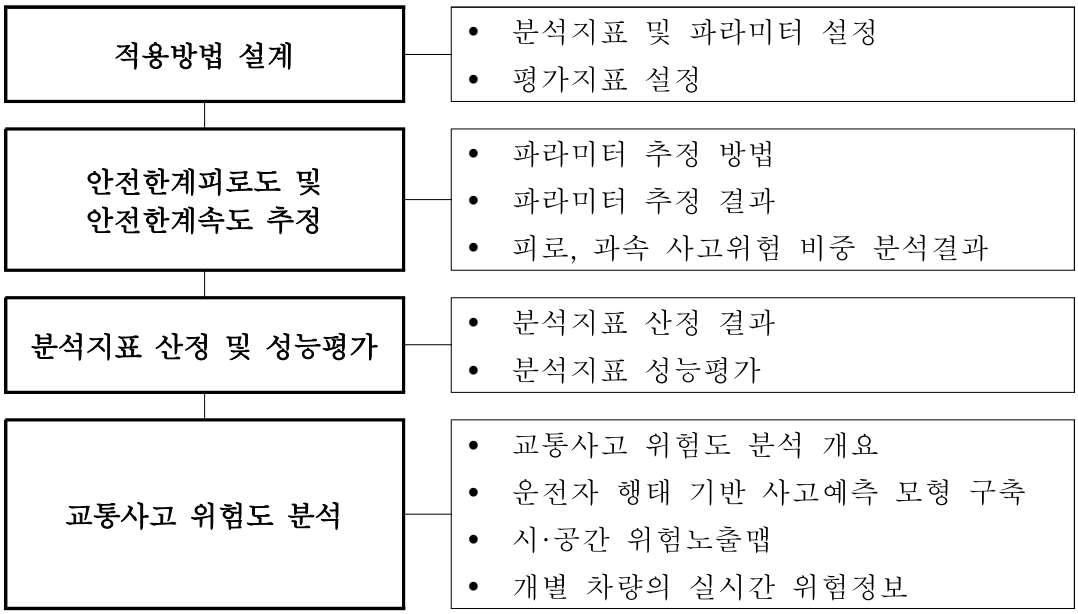
−Estimating TFE by eq. (4−5) and SFE by eq. (4−9),
TSE by eq. (4−14) and SSE by eq. (4−18),
TIE by eq. (4−22) and SIE by eq. (4−24),
TUE by eq. (4−29) and SUE by eq. (4−31)

<그림 4-22> 운전 피로 및 과속 분석 알고리즘

제5장 방법론 적용 및 교통사고 위험도 분석

제1절 적용 및 분석 개요

본 장에서는 <그림 5-1>의 과정에 따라 4장에서 제시한 운전 피로 및 과속 분석 방법론을 적용한다. 전반적인 과정은 적용방법 설계, 안전한계피로도 및 안전한계속도 추정, 분석지표 산정 및 성능평가, 교통사고 위험도 분석의 순서로 구성된다. 적용방법 설계에서, 분석지표를 정의하고 성능평가를 위한 평가지표를 설정한다. 다음 단계에서 안전한계피로도(g_β) 및 안전한계속도(v_τ)를 추정하는 방법을 설계하고, 평가지표를 기반으로 각 파라미터들의 최적값을 추정한다. 이후, 분석지표를 최종 산정하여 결과를 제시하며 분석지표별 사고율과의 관계를 기반으로 설명력을 분석·평가한다. 마지막으로 운전 피로 및 과속 노출도 지표를 이용하여 교통사고 위험도를 분석하고, 본 연구에서 제시한 분석지표들의 활용방안을 제시한다.

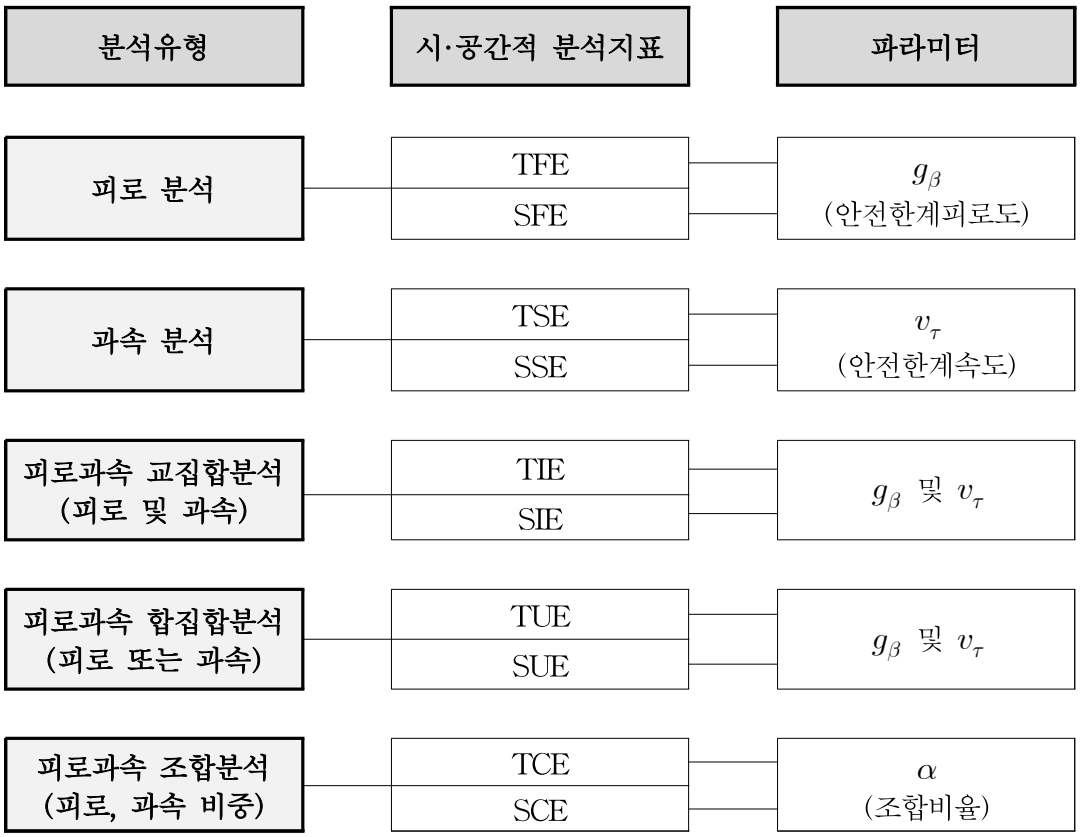


<그림 5-1> 방법론 적용 및 교통사고 위험도 분석 과정

제2절 적용방법 설계

1. 분석지표 및 파라미터 설정

본 연구는 운전 피로와 과속을 대상으로, 다양한 유형으로 구분하여 분석을 수행한다. 분석유형은 개별적인 피로 분석과 과속 분석을 기본으로 하며, 집합의 개념으로 두 위험요소를 융합하여 사고위험도를 분석하는 피로과속 교집합분석과 합집합분석, 그리고 개별 분석지표를 이용한 조합분석을 새로운 분석유형으로 제시한다. 이와 같은 5가지의 분석유형들은 모두 시간적 분석지표와 공간적 분석지표로 구분하여 개별적으로 산정한다. 따라서 본 연구의 분석지표는 <그림 5-2>와 같이 총 10개로 구성된다.



<그림 5-2> 분석지표 및 파라미터 설정

2. 평가지표 설정

운전 피로 및 과속 노출도 지표의 산정목적은 실제 교통사고를 더 잘 설명하기 위한 것이기 때문에 사고설명력을 기반으로 하는 평가지표를 설정하여 지표의 성능을 평가하고자 한다. 사고예측의 정확도 평가를 위한 지표는 평균절대백분위오차(Mean absolute percentage error, 이하 MAPE(%))를 사용하며, 분석지표를 이용한 사고예측 모형의 설명력은 선형회귀모형의 결정계수(Coefficient of determination, 이하 R^2)를 사용하여 평가한다.

본 연구에서 예측하고자 하는 사고건수는 도로구간별로 1건에서 42건까지 큰 차이가 존재한다. 이와 같이 변동폭이 큰 경우에 MAPE는 도로구간별로 직관적이고 공정한 평가를 할 수 있는 기준이 되며, 식 (5-1)과 같이 산정한다. 여기서, y_i는 실제 사고율, $\hat{y}_i$는 예측 사고율, 그리고 n은 전체 도로구간의 개수이다. 또한 본 연구에서 개발한 분석지표의 파라미터 최적화 과정에서도 MAPE를 평가지표로 이용한다.

MAPE를 통해 사고예측 오차가 요구되는 수준을 만족하면, 예측모형의 설명력 또한 안정적인 수준이 되어야 한다. 본 연구의 사고예측 모형 설명력 평가지표인 R^2는 설명변수로 설명할 수 있는 종속변수의 분산비율과 같으며, 식 (5-2)와 같다. 이는 상대적인 성능을 직관적으로 판단할 수 있는 지표이며, 일반적으로 결정계수가 높을수록 모형의 적합도가 높은 것으로 평가한다.

$$MAPE = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\frac{|y_i - \hat{y}_i|}{y_i} \times 100 \qquad \text{식 (5-1)}$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}(y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^{n}(y_i - \overline{y})^2} \qquad \text{식 (5-2)}$$

제3절 안전한계피로도 및 안전한계속도 추정

1. 파라미터 추정 방법

안전한계피로도와 안전한계속도는 본 연구의 피로 및 과속 분석지표들을 산정하기 위한 핵심적인 기능을 담당한다. 만약 운전지속시간(예시. 2시간 이상)과 같이 단편적이고 편향될 소지가 있는 값이나 제한속도와 같은 법·제도적 기준을 안전한계피로도 또는 안전한계속도로 적용하게 되면 산정된 분석지표가 사고를 설명하는 역할을 수행하기 어렵다. 그러나 지금까지 실제 사고위험성을 고려한 안전한계피로도나 안전한계속도에 대한 연구는 보고된 적이 없는 실정이다. 따라서 본 연구는 데이터 기반 예측연구에서 통상적으로 이용되는 데이터 시뮬레이션 기법을 이용하여 최적의 파라미터 값을 결정하고자 한다(Chang and Yoon, 2020; Smith et al., 2002). 데이터 시뮬레이션 기법을 이용한 최적화는 실제 관측값을 알고 있을 때 파라미터 값의 공간을 한정하고 그 범위 내에서 모든 가능한 조합의 시나리오에 대한 예측오차의 변화량을 분석하는 방법이다. 즉, 민감도 분석을 수행함으로써 허용가능한 오차수준에서 최적의 파라미터 값을 결정하는 방법이다. 이 방법으로 추정하는 안전한계피로도와 안전한계속도는 주어진 분석대상범위와 분석자료를 기반으로 하기 때문에 공간과 궤적 자료에 따라 변동가능한 동적 특성을 가진다. 이러한 특성으로 인해 도로의 기하구조와 도로이용행태에 따라 사고위험성이 다를 수 있는 현실의 상황을 반영할 수 있다.

본 연구의 파라미터 추정방법은 다음과 같다. 먼저 식 (5-3)과 같이 도로구간 $i(1 \le i \le 36)$별 실제 사고율 y_i(표 3-4 참조)를 종속변수로 사용하고 시·공간적 분석지표를 단일 설명변수(x_i)로 사용하는 단순선형회귀모형을 구축한다.

$$\hat{y_i} = \beta_0 + \beta_1 x_i, \quad \forall i, 1 \le i \le 36 \qquad \text{식 (5-3)}$$

파라미터 최적화를 위해서는 먼저 추정문제를 정의해야 한다. 이에 안전한계피로도는 식 (5-4), 안전한계속도는 식 (5-5)와 같이 예측모형의 오차(MAPE)가 최소인 파라미터 값을 결정하는 것으로 정의한다.

$$g_\beta = \arg\min\left(\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\frac{|y_i - \hat{y}_i|}{y_i}\times 100\right)$$
$$s.t.\ \ 0 \le g_\beta \le 180 \qquad \text{식 (5-4)}$$

$$v_\tau = \arg\min\left(\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\frac{|y_i - \hat{y}_i|}{y_i}\times 100\right)$$
$$s.t.\ \ 0 \le v_\tau \le 180 \qquad \text{식 (5-5)}$$

데이터 시뮬레이션 기법을 적용하기 위한 공간범위는 피로도와 속도자료의 최소-최대값을 기반으로 다음과 같이 설정한다. 본 연구에서 측정하는 피로도는 최대 180으로 산정되므로(Zhang et al., 2020), 모든 피로도 지수는 0-180 사이의 값으로 산정된다. 피로도와 KSS간 변환표(표 3-2)를 참조하면 KSS 1-5점(피로도 0-91)은 정상상태로 분류하고 있으며 이 상태는 피로를 느끼지 않는 상태로 해석된다. 그리고 KSS 6점(피로도 92-110)은 경계상태로 분류하며 이 중에서도 100을 정상상태 임계값으로 보고, 100 이상이 되면 피로상태가 된다고 제시하였다. 운전자가 피로상태가 되면 정상적인 운전이 어려워지며 졸음운전 등 사고위험성이 높아지게 된다. 또한 속도의 측면에서 고속도로에서 주행가능한 속도는 0-180km/시 수준으로 볼 수 있으며, 만약 180km/시를 초과하는 경우가 존재할 경우에는 최대 180km/시로 보정하여 분석한다.

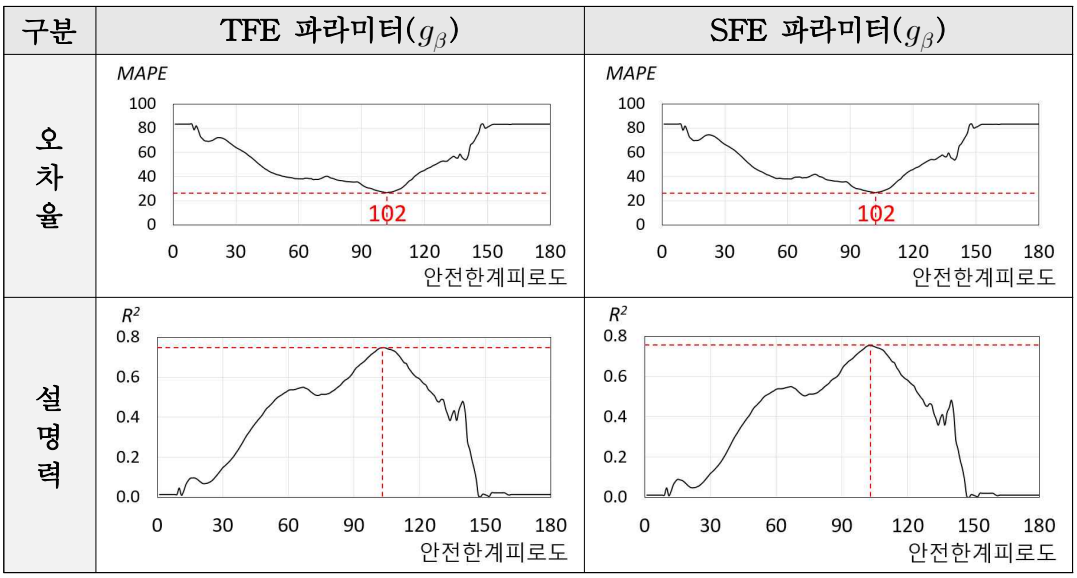
융합 분석의 경우 안전한계피로도와 안전한계속도를 모두 최적화해야 하기 때문에 수행시간이 증가하는 문제가 있다. 그러나 이 과정 또한 실시간 분석을 목적으로 하지 않으므로 시간이 다소 소요되더라도 통상적인 시뮬레이션 기법으로 간단하게 해결할 수 있다.

2. 파라미터 추정 결과

1) 피로 분석 파라미터 추정결과

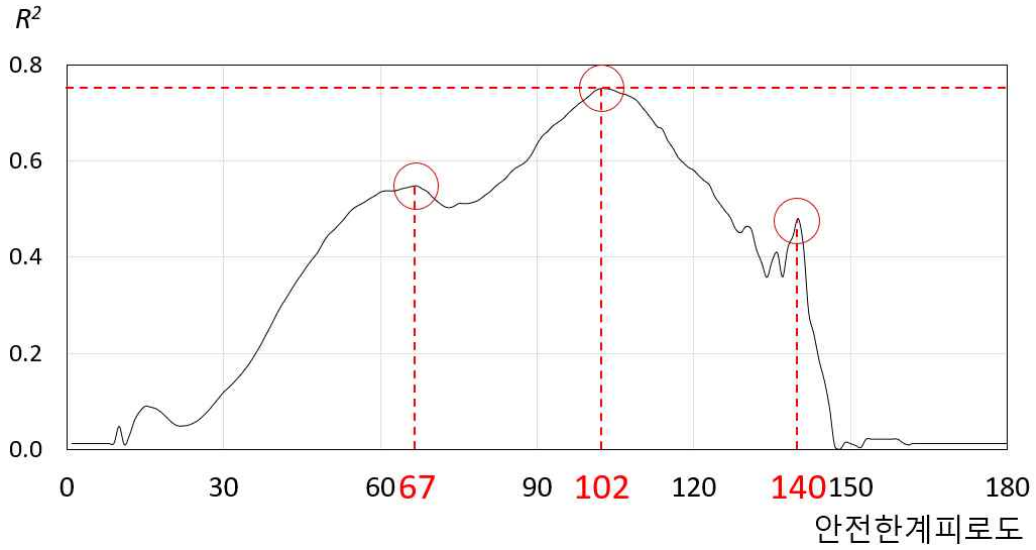
피로 분석 파라미터는 운전자의 피로여부를 판단하는 기준(안전한계피로도, g_β)이다. 이는 1-180의 공간범위 내에서 사고예측 오차(MAPE)가 최소인 값으로 결정하며, 추정결과는 <그림 5-3>과 같다.

정확도 평가지표인 MAPE가 최소인 피로도는 TFE, SFE에서 모두 102로 분석되었으며, 이 때 R^2 또한 최고점에 가까운 것으로 나타났다. 즉, 피로 분석 지표를 산정할 때 운전자의 피로도가 102를 초과할 경우 피로상태로 분류하게 되면 사고를 가장 잘 설명할 수 있다. 선행연구의 내용을 참조하면 이 피로도 수준은 피로를 느끼기 시작하는 상태(<표 5-1> 참조)이며, 선행연구(Zhang et al., 2020) 또한 피로도 100을 피로상태 임계값으로 제시하고 있어 신뢰할만한 분석결과인 것으로 판단된다. 따라서 본 연구의 시·공간적 피로 노출도 지표는 102를 안전한계피로도로 결정한다.

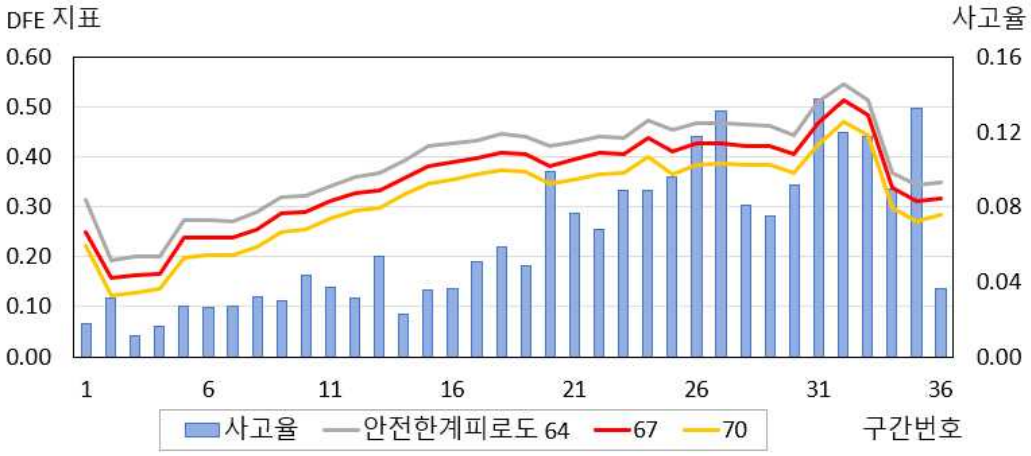


<그림 5-3> 피로 분석 파라미터 추정결과

<그림 5-4>는 SFE의 안전한계피로도 변화에 따른 설명력 변화 그래프를 상세히 나타낸 것이며, 안전한계피로도가 67, 102, 140일 때 고점(peak)이 나타났다. 이 분석에서 사용되는 설명력(R^2)은 다음과 같은 과정으로 산출된다. 개별 차량 궤적의 피로도가 안전한계피로도를 초과하는 경우 이 궤적을 피로상태로 판단하고, 이를 집계하여 SFE 지표를 산정한다. 다음으로 산정된 지표를 이용하여 사고율을 종속변수로 하는 선형회귀분석을 수행하고, 설명력을 산출한다.

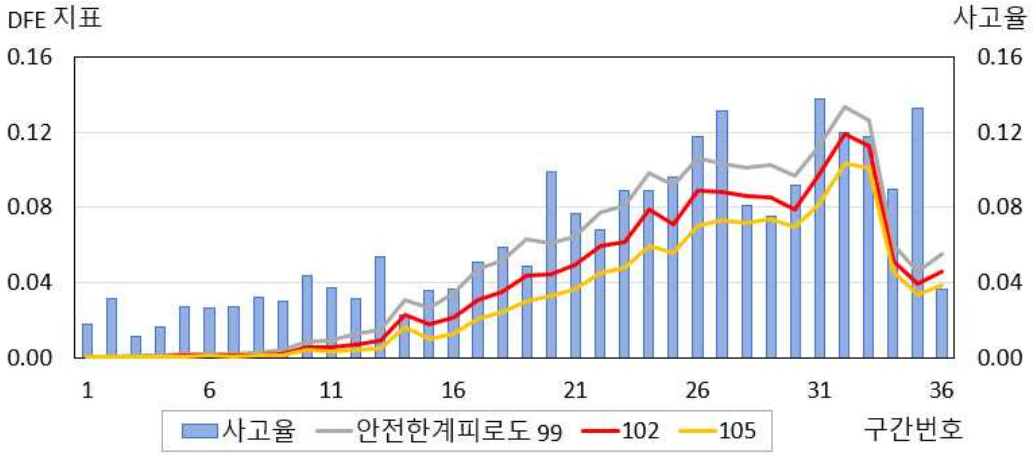


<그림 5-4> 안전한계피로도에 따른 SFE 지표의 설명력 변화

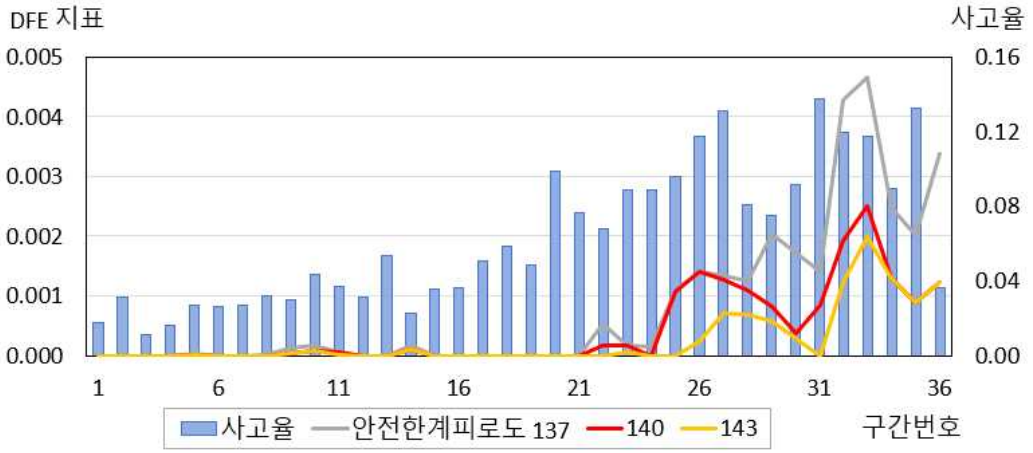


<그림 5-5> SFE 지표와 사고율(peak 1)

세 개의 peak에 해당하는 안전한계피로도 값을 적용하여 SFE 지표를 산정한 결과는 <그림 5-5>, <그림 5-6>, <그림 5-7>과 같다. peak 1에서 SFE 지표값은 최소 0.15에서 최대 0.50 수준으로 전반적으로 높으며, 그 변화추세가 사고율 증가추세에 비해 단조롭다. 반면에, peak 2에서는 11번째 구간까지는 낮지만 이후부터 크게 증가하여 사고율의 증가추세와 가장 유사하게 나타났다. peak 3은 SFE 지표값이 모든 구간에서 0.005 미만으로 매우 낮은 수준(피로도가 140을 초과하는 궤적 자료는 전체의 2.3%에 불과)이기 때문에 변별력이 떨어지는 것으로 판단된다. 따라서 지표 산정값과 사고율의 추세를 비교해볼 때 peak 2가 가장 적합하다.



<그림 5-6> SFE 지표와 사고율(peak 2)



<그림 5-7> SFE 지표와 사고율(peak 3)

피로도 지수에 따른 운전자의 상태는 <표 5-1>과 같이 해석할 수 있다. 단, 이 분류기준은 피로도 지수에 따른 KSS 설문에 의한 결과로써 절대적인 기준은 아니므로 대략적인 수준을 가늠하는 용도로 참고한다. 표에서 피로도 0-91 수준은 정상상태로 분류되며, 92-110 수준은 피로를 느끼기 시작하는 단계로 운전에 집중하기 위한 별도의 노력은 필요치 않은 상태이며, 100을 피로상태의 임계값으로 제시하고 있다. 111-128 수준은 피곤하여 정신을 차리기 위해 약간의 노력이 필요한 상태로 사고의 위험성이 다소 증가하기 시작하며, 그 이상부터는 상당히 위험한 상태로 볼 수 있다. 그리고 129 이상은 매우 피곤한 상태이며, 147 이상은 완벽히 졸린 상태로 졸음운전의 위험성이 매우 높아 즉시 운전을 멈추고 휴식(수면)을 취해야 한다.

<표 5-1> 피로도 지수에 따른 운전자 상태 분류

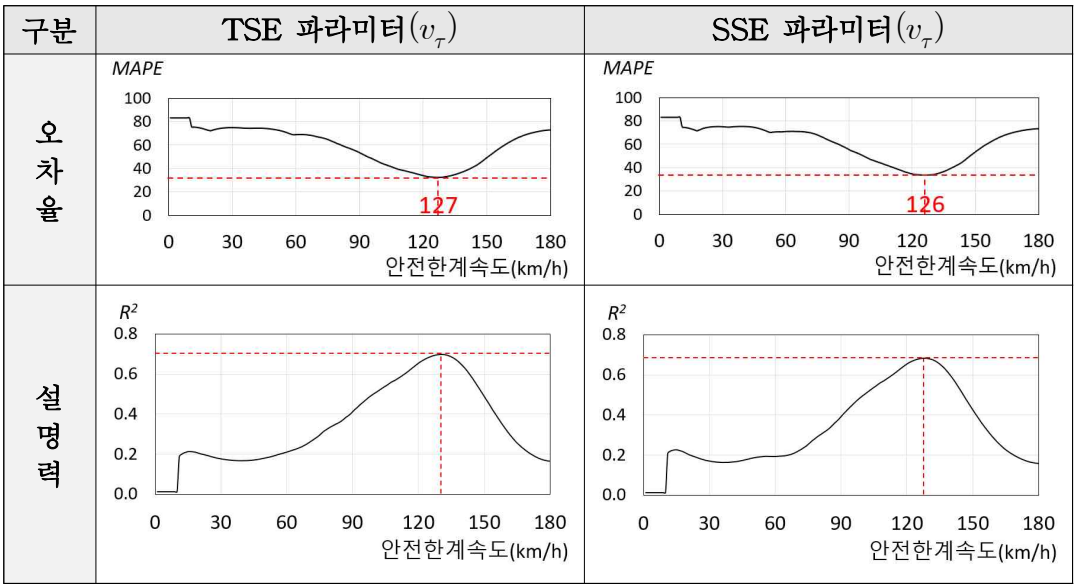
피로도 지수	설명	상태분류
0 - 18	완벽히 활기찬 상태	정상
19 - 36	매우 활기찬 상태	
37 - 55	활기찬 상태	
56 - 73	비교적 활기찬 상태	
74 - 91	중간	
92 - 110	피로를 느끼지만 정신차리기 위한 노력이 필요 없는 상태	정상/피로 경계
111 - 128	피곤하며 정신차리기 위한 노력이 약간 필요한 상태	피로
129 - 146	매우 피곤하며 정신차리기 위해 많은 노력이 필요한 상태	
147 - 165	완벽히 졸린 상태(수면상태)	

자료 : Zhang et al. (2019) 인용

2) 과속 분석 파라미터 추정결과

과속 분석 파라미터는 차량의 과속여부를 판단하는 속도의 기준(안전한계속도, v_τ)이다. 이는 1-180km/시의 공간범위 내에서 사고예측 오차(MAPE)가 최소인 값으로 결정하며, 추정결과는 <그림 5-8>과 같다.

정확도 평가지표인 MAPE가 최소인 속도는 TSE, SSE에서 각각 127km/시, 126km/시로 분석되었다. R^2의 경우 최고점은 각각 131km/시, 128km/시로 나타났지만 MAPE가 최소인 경우에도 0.7에 근접한 높은 설명력을 보이므로 MAPE가 최소로 분석된 안전한계속도를 최적값으로 결정한다. 즉, TSE 지표 산정시에는 127km/시, SSE 지표 산정시에는 126km/시를 초과하는 경우에 과속으로 판단하며, 이를 안전한계속도로 정의한다. 시·공간 관점에 따른 추정결과는 1km/시의 근소한 차이로 나타났다. 그리고 안전한계속도는 분석자료를 기반으로 하기 때문에 분석대상구간이 변경되거나 다른 시기의 궤적 자료를 적용할 경우 값이 변동될 수 있는 동적 특성을 가진다.



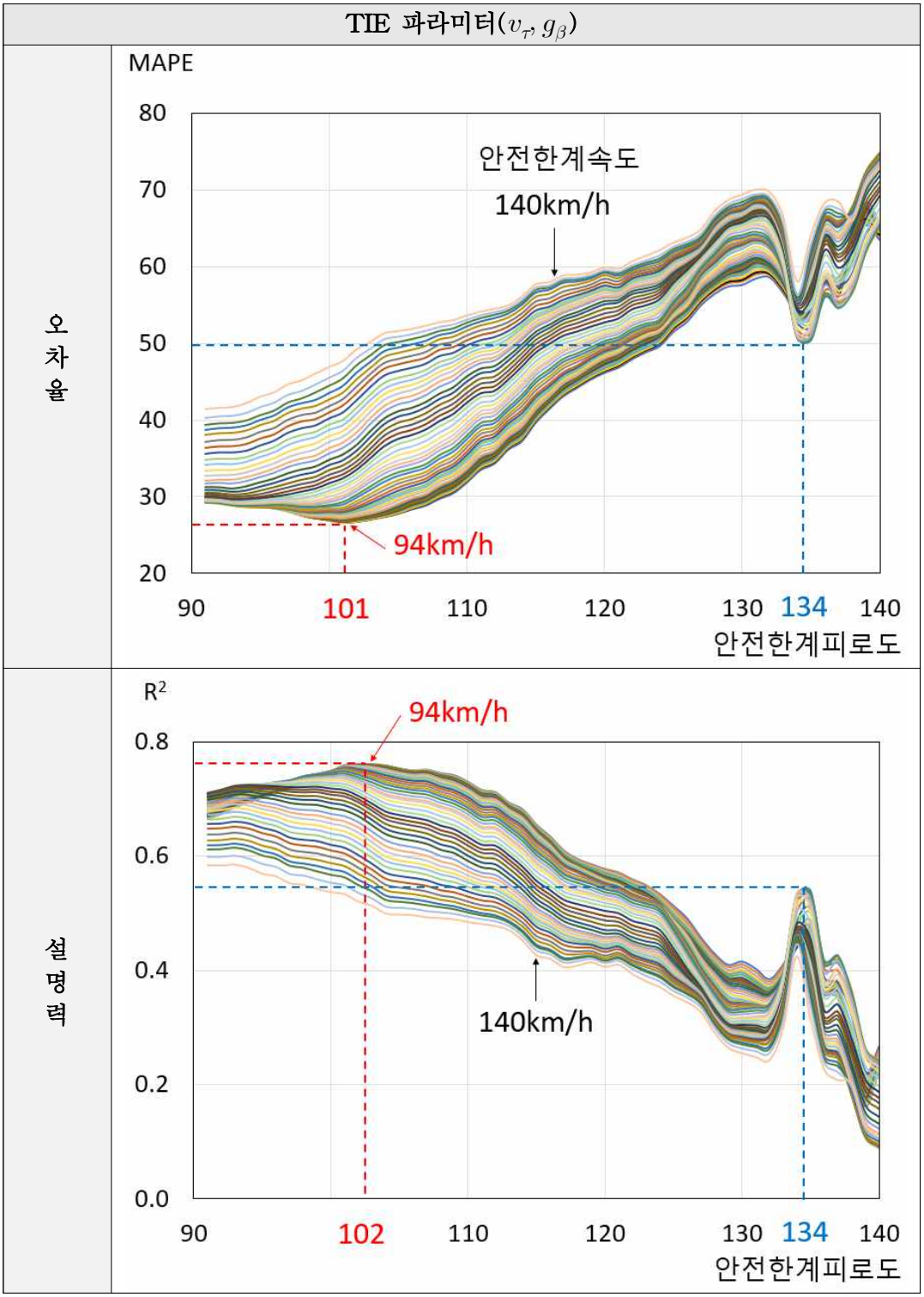
<그림 5-8> 과속 분석 파라미터 추정결과

3) 피로과속 교집합분석 파라미터 추정결과

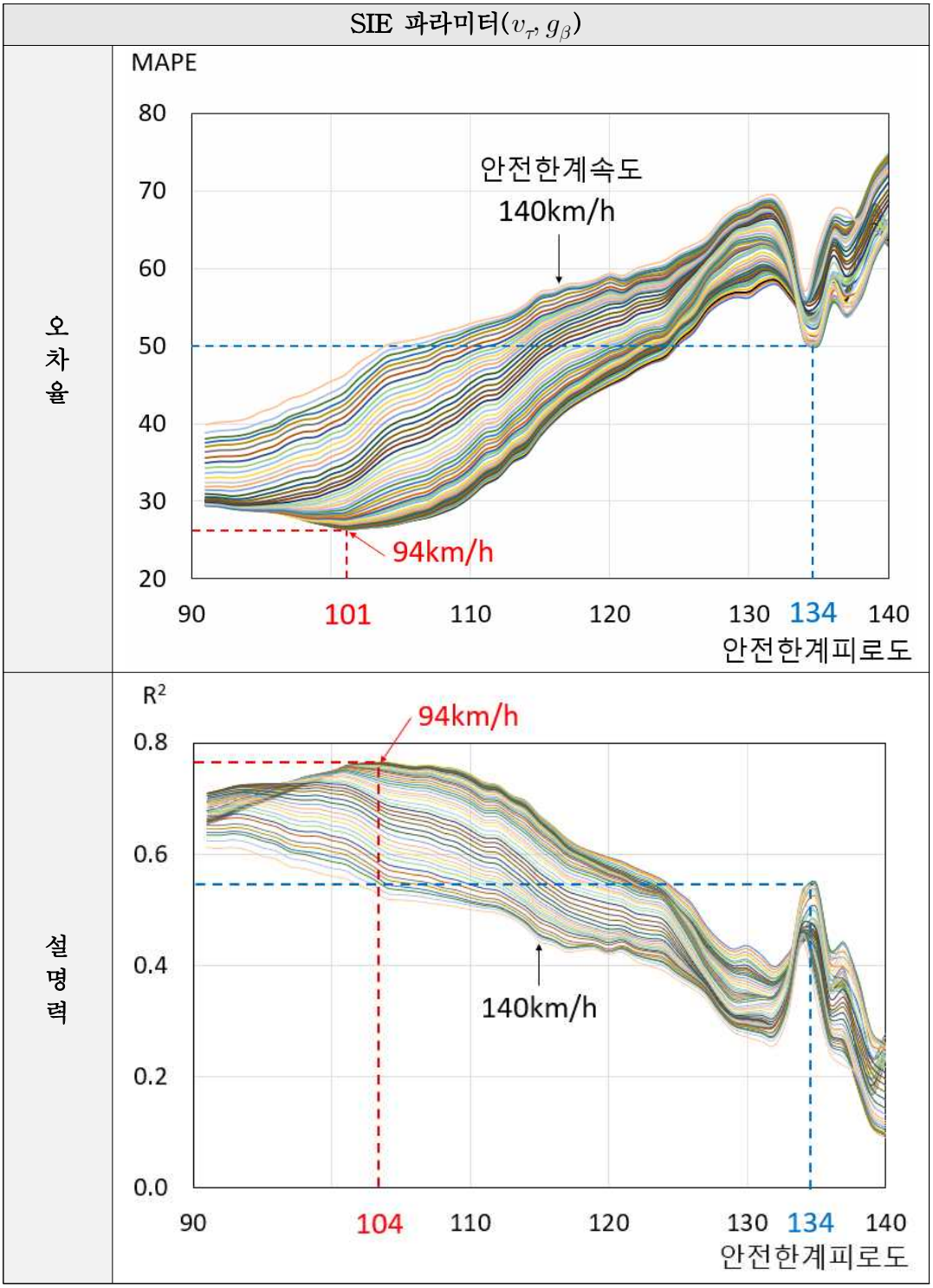
피로과속 교집합분석 파라미터는 안전한계피로도와 안전한계속도이며, 두 파라미터의 조합에 따른 최적화 과정을 수행해야 한다. 두 파라미터의 공간범위(1-180) 내에서 모든 가능한 조합의 시나리오에 대한 예측오차의 변화량을 분석한 결과는 <그림 5-9>와 같다. TIE 및 SIE의 파라미터 최적화 결과, MAPE가 최소인 안전한계피로도와 안전한계속도는 모두 101, 94km/시로 분석되었으며, R^2가 최대인 안전한계피로도는 각각 102, 104, 안전한계속도는 94km/시로 분석되어 두 평가지표가 거의 동일하게 나타났다.

교집합분석 또한 안전한계피로도는 Zhang et al. (2020)이 제시한 피로상태 임계값인 100에 가깝게 산출되어 본 방법론의 적용결과가 선행연구에서 실제 신체측정장비로 측정한 피로경계와 일치하는 것으로 나타났다. 즉, 운전자의 피로도가 101 이상일 때부터 피로상태로 분류함이 적절하며, 피로상태에서 94km/시 이상의 속도로 주행할 경우 사고위험성이 높아짐을 의미한다. 94km/시의 속도는 제한속도에 비해 약 20km/시 낮은 속도이므로 비교적 안전할 것으로 보이는 저속주행임에도 불구하고, 피로한 상태에서는 고속도로 주행시 위험성이 그만큼 커진다는 것을 확인할 수 있다. 예를 들어, 94km/시로 주행시 초당 약 26m를 이동하기 때문에 피로로 인해 눈을 약 2초간 깜빡이게 되면 50m 이상을 주행하게 되며 반응속도 또한 저하되어 순간적인 돌발상황에 대처하지 못하고 사고위험성이 높아지는 것이 당연한 결과이다. 즉, 피로한 상태에서의 안전한계속도가 과속 분석 파라미터(127km/시)보다 현저히 낮게 분석된 것은 현실성을 잘 반영하는 결과로 판단된다.

사고 설명력의 측면에서도 사고예측 오차와 거의 동일한 결과가 나타났으며, 개별적인 피로 노출도 지표와 과속 노출도 지표의 설명력보다 다소 높은 0.76 이상의 설명력을 보였다. 이와 같은 결과는 피로한 상태에서 94km/시 이상으로 주행할 때의 위험성이 정상상태에서 127km/시 이상으로 과속할 때의 위험성보다도 높음을 시사한다.



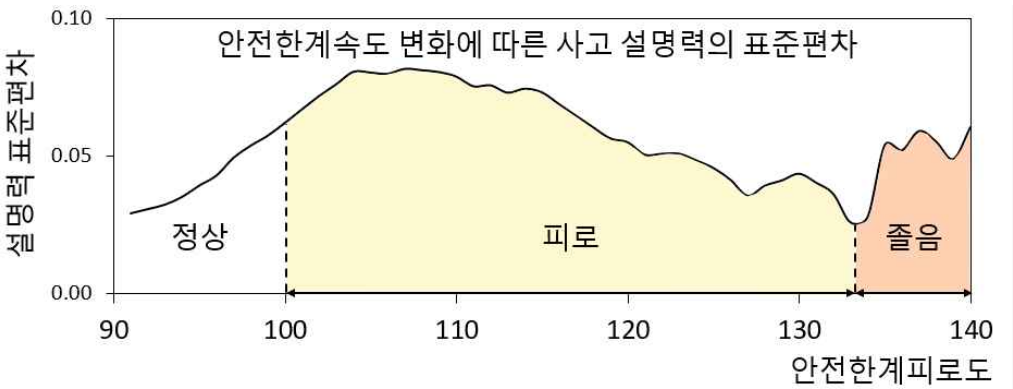
<그림 5-9> 피로과속 교집합분석 파라미터 추정결과



<그림 5-9 계속> 피로과속 교집합분석 파라미터 추정결과

인간의 피로단계는 피로수준이 증가함에 따라 정상상태, 피로상태, 졸음상태(마이크로수면상태)와 같이 단계적으로 진행된다(Borghini et al., 2014; Guo et al., 2016). 이러한 피로의 단계적 변화는 생체신호측정장비를 이용하여 운전자의 피로도를 측정한 연구들의 공통된 결과이다. 피로상태가 되면 차로이탈이 잦아지고 반응속도가 느려지며 속도편차가 증가하는 등 안전운행능력이 급격히 저하된다. 그리고 졸음상태에서는 정상적인 운행이 불가능해진다.

이와 같은 피로의 단계적 변화는 피로과속 교집합분석 파라미터의 설명력 변동에서도 확인된다. 먼저 피로상태는 사고위험성이 급격히 높아지는 상태이므로 안전한계피로도가 100 수준일 때 즉, 피로도가 100을 초과하는 경우에 피로상태로 정의할 수 있다. 두 파라미터의 변화에 따른 사고 설명력의 표준편차를 그래프로 나타내면 <그림 5-10>과 같다. 안전한계피로도가 100일 때 안전한계속도의 변동에 따른 설명력 편차가 높게 나타났다. 이는 피로상태에서 속도가 높을수록 사고위험성이 커지는 현상이 반영된 것이다. 반면에, 안전한계피로도가 134일 때에는 설명력의 표준편차가 최저로 나타났다. 즉, 피로도가 134 이상일 때에는 속도가 낮을 때나 높을 때 모두 비슷한 수준의 사고위험성을 가진다. 따라서 운전 자체가 위험한 졸음상태로 판단할 수 있다. 이러한 결과는 선행연구 결과와 일치하는 것이며, 궤적 자료를 이용하여 피로도를 측정하고 사고위험성을 분석하는 본 연구 방법론이 적정하다는 가능성을 보여준다.



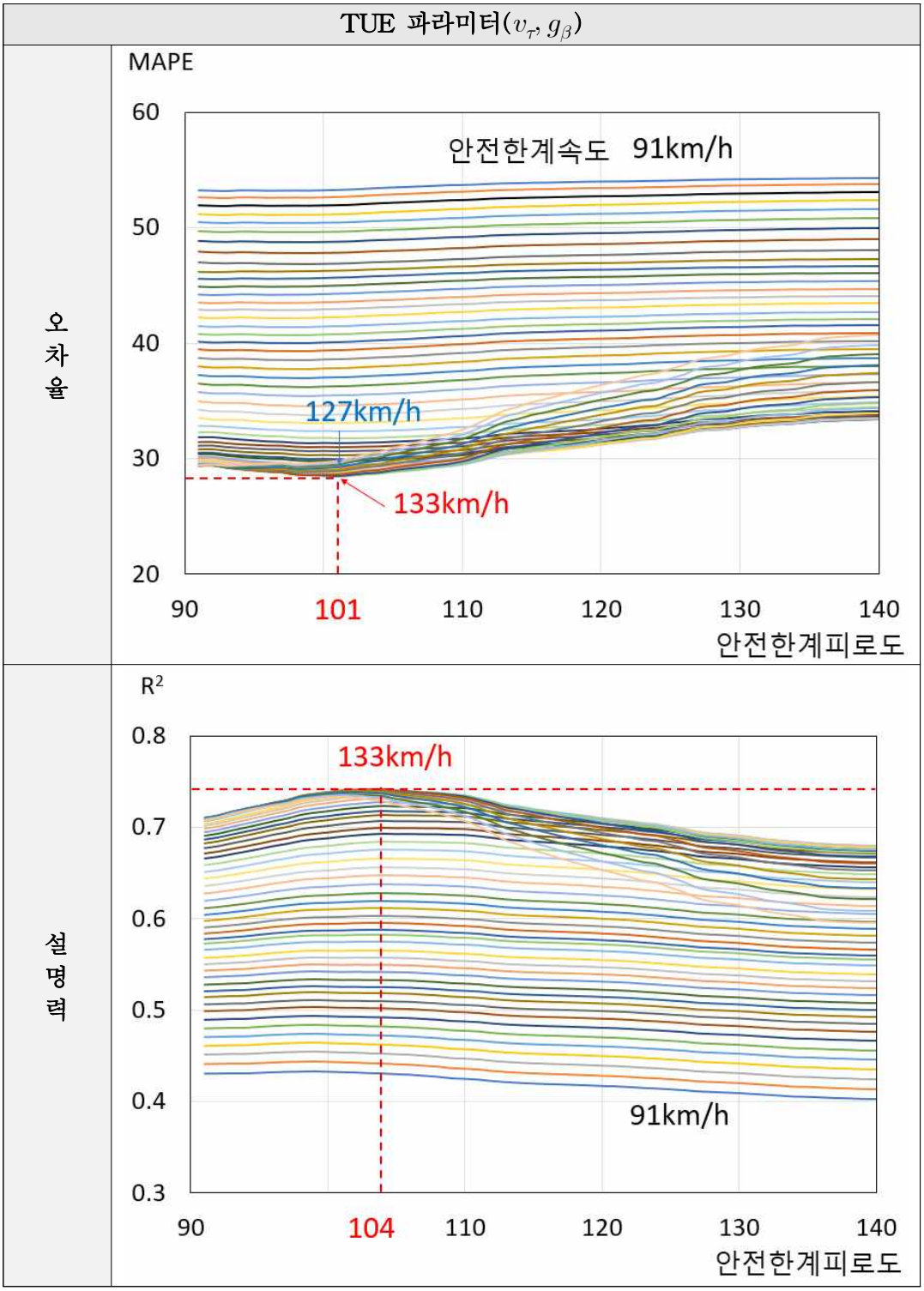
<그림 5-10> 파라미터를 이용한 운전 피로단계 정의

4) 피로과속 합집합분석 파라미터 추정결과

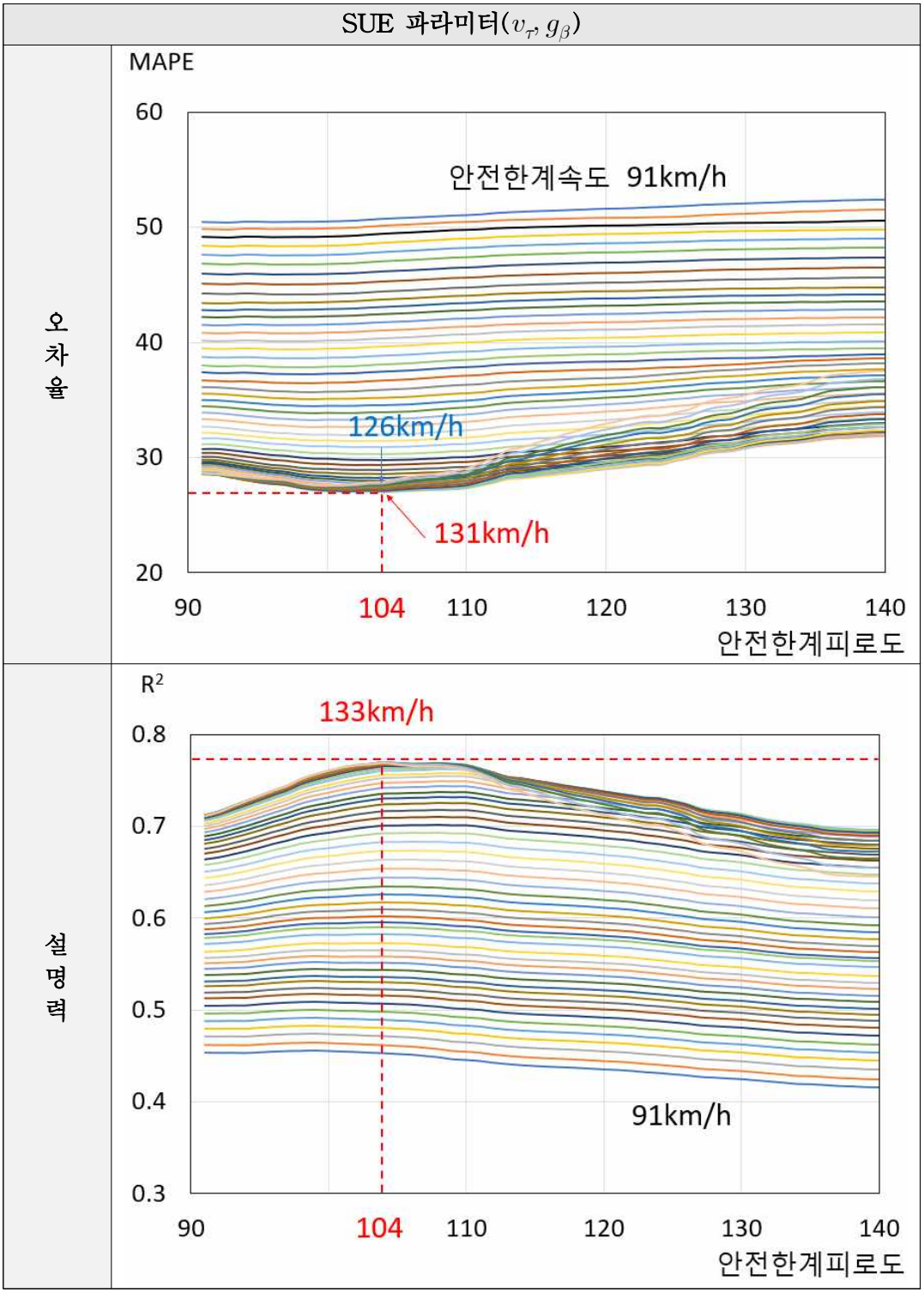
피로과속 합집합분석 파라미터는 안전한계피로도와 안전한계속도이며, 두 기준의 조합에 따른 최적화 과정을 수행해야 한다. 두 파라미터의 공간범위(1-180) 내에서 모든 가능한 조합의 시나리오에 대한 예측오차의 변화량을 분석한 결과는 <그림 5-11>과 같다. TUE의 파라미터 최적화 결과, MAPE가 최소인 안전한계피로도는 101, 안전한계속도는 133km/시로 분석되었으며, R^2가 최대인 안전한계피로도는 104, 안전한계속도는 133km/시로 분석되어 두 평가지표가 거의 동일하게 나타났다. 그리고 SUE의 파라미터 최적화 결과는 MAPE가 최소인 안전한계피로도는 104, 안전한계속도는 131km/시로 분석되었으며, R^2가 최대인 안전한계피로도는 104, 안전한계속도는 133km/시로 분석되었다.

피로과속 합집합분석은 개별 차량의 위험운전(피로운전 또는 과속주행)에 따른 사고위험성을 나타내는 지표이다. 개별 노출도 지표와 달리 피로운전의 위험성과 과속의 위험성을 동시에 고려하기 때문에 안전한계기준이 개별 기준과 다르게 산출되었다. 특히, 안전한계속도는 TSE 및 SSE보다 6km/시 더 높은 133km/시로 나타났으나 오차율의 절대적인 차이는 127km/시일 때와 1% 미만으로 큰 차이가 없다. 이와 같은 결과로부터, 피로하지 않은 상태에서는 피로한 상태로 운전할 때보다 더 높은 속도로 주행할 때 사고위험성이 높아진다는 현실성이 보여진다. 즉, 과속 분석시에는 피로상태에 대한 판단없이 속도만을 고려하기 때문에 피로운전의 영향이 내재되어 있으며, 따라서 안전한계속도가 비교적 낮게 분석되었다. 그러나 피로과속 합집합분석에서는 피로운전의 영향을 고려하기 때문에 피로하지 않을 때의 안전한계속도가 더 높은 값으로 산출된 것으로 판단된다.

사고 설명력은 TUE 0.74, SUE 0.77로 분석되어 개별적인 피로 노출도 지표와 과속 노출도 지표의 설명력보다 다소 높게 나타났다. 따라서 개별 차량 단위로 운전자의 피로와 과속을 동시에 분석할 때 교통사고의 위험성을 더 잘 설명할 수 있음을 확인할 수 있다.



<그림 5-11> 피로과속 합집합분석 파라미터 추정결과



<그림 5-11 계속> 피로과속 합집합분석 파라미터 추정결과

5) 파라미터 추정 종합 결과

파라미터 최적화 결과를 종합하면 <그림 5-12>와 같다. 모든 지표에서 안전한계피로도는 101-104 수준으로 추정되었다. 이는 본 연구에서 적용한 피로도 모형을 개발한 연구(Zhang et al., 2020)가 제시하고 있는 운전 피로상태 임계값인 100에 매우 근접하기 때문에 본 연구의 파라미터 추정 방법이 실제 운전자들의 피로상태를 우수하게 반영하는 것으로 볼 수 있다. 안전한계속도의 추정결과는 각 분석지표의 특징(피로 반영여부)에 따라 94km/시에서 133km/시까지 다양하게 산출되었다. 결과적으로 피로도에 따른 사고위험성은 100 이상이 되면서 높아지기 때문에 이를 기준으로 피로 노출도가 높은 구간을 명확히 밝혀내면 졸음사고를 줄일 수 있다. 또한 피로수준마다 속도에 따른 사고위험성이 달라짐을 인식하고, 융합 분석을 통해 개별 차량의 위험운전상태를 판단할 수 있다.

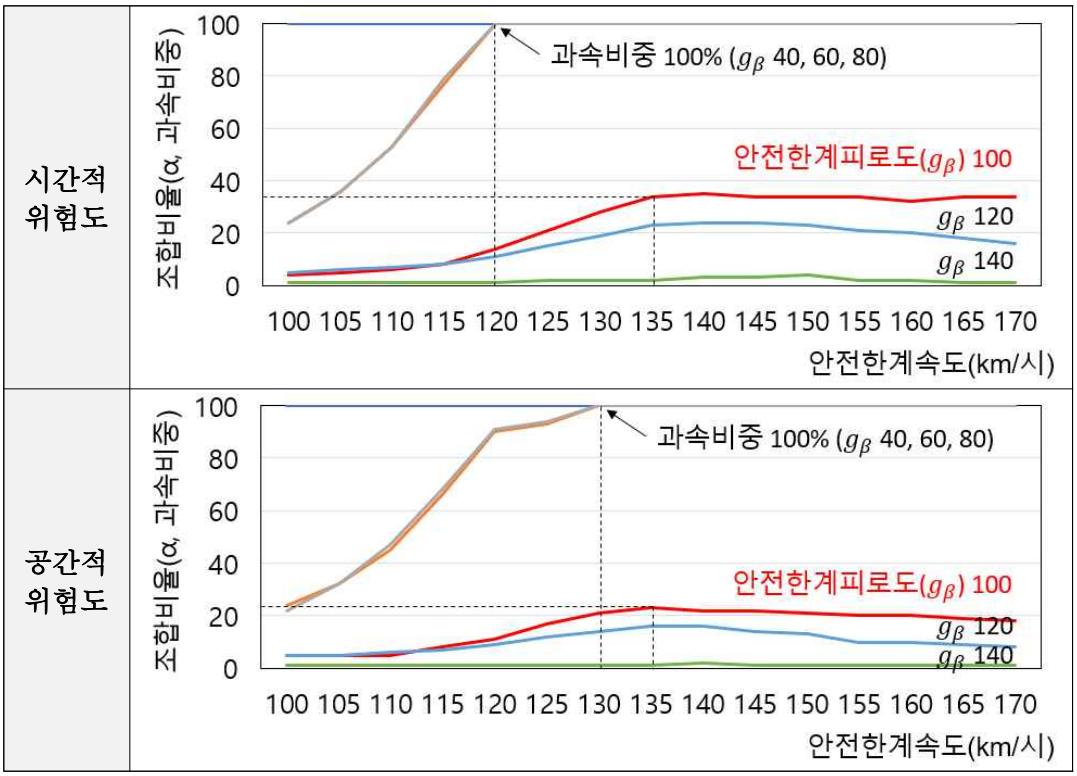
분석유형	분석지표	파라미터	최적값
피로 분석	TFE	g_β (안전한계피로도)	102
	SFE	g_β (안전한계피로도)	102
과속 분석	TSE	v_τ (안전한계속도)	127km/시
	SSE	v_τ (안전한계속도)	126km/시
피로과속 교집합분석 (피로 및 과속)	TIE	g_β 및 v_τ 조합	101, 94km/시
	SIE	g_β 및 v_τ 조합	101, 94km/시
피로과속 합집합분석 (피로 또는 과속)	TUE	g_β 및 v_τ 조합	101, 133km/시
	SUE	g_β 및 v_τ 조합	104, 131km/시

<그림 5-12> 분석지표별 파라미터 추정결과

3. 피로, 과속 사고위험 비중 분석결과

조합분석 파라미터인 조합비율(α)을 이용하여 피로도 및 속도변화에 따른 피로·과속의 사고위험 영향력 비중을 시간·공간적 위험도로 구분하여 분석한 결과는 <그림 5-13>과 같다.

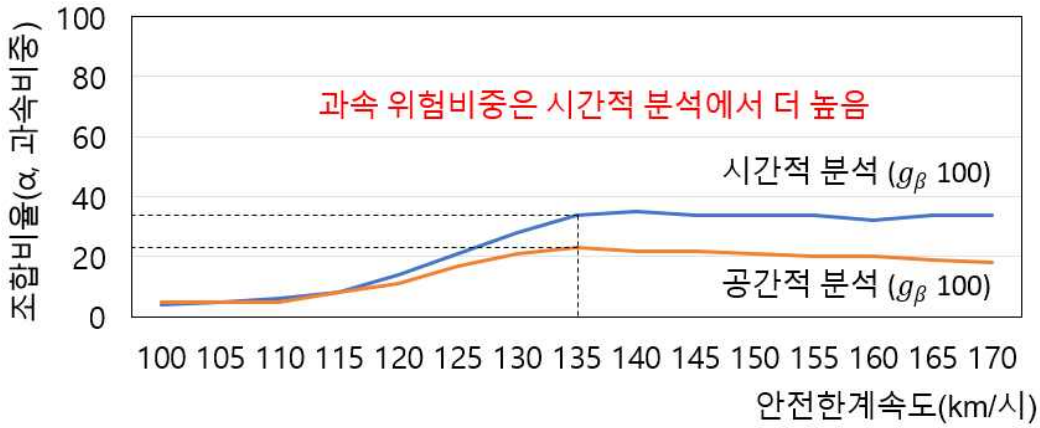
이 결과로부터 다음과 같은 두 가지 시사점을 도출하였다. 첫째, 피로 및 과속의 사고위험 영향력 비중은 운전자의 피로수준에 따라 크게 달라진다. 시·공간적 분석결과 모두에서 안전한계피로도가 80 이하일 때에는 일정 속도 이상에서 과속의 위험비중이 100%인 것으로 나타났다. 반면에, 안전한계피로도가 피로상태 임계값인 100일 경우에는 과속의 위험비중이 최대 35% 수준으로 급격히 감소하였다. 또한 안전한계피로도가 140일 때에는 졸음운전의 위험비중이 100%에 가까워진다. 둘째, 피로도에 따른 사고위험은 100을 기준으로 정상상태와 피로상태로 명백히 구분



<그림 5-13> 피로·과속 사고위험 비중 분석결과

된다. 즉, 운전자의 피로도가 정상상태일 때는 과속의 위험비중이 대부분을 차지하며, 정상상태 운전자가 많은 도로구간에서 실질적으로 사고를 예방하기 위해서는 속도저감을 유도하는 정책이 큰 효과를 낼 수 있다. 반면에, 피로도가 100을 넘는 피로상태의 운전자가 많을 경우에는 피로위험의 비중이 70% 이상으로 급격히 증가하기 때문에 졸음운전을 예방하는 정책이 효과적이다.

안전한계피로도가 100일 때 피로·과속 사고위험 비중의 시·공간적 분석 결과를 비교하면 <그림 5-14>와 같다. 그 결과, 안전한계속도가 135km/시일 때 과속의 위험비중은 시간적 분석에서 34%, 공간적 분석에서 23%로 나타났다. 이와 같은 결과는 앞에서 융합 분석의 의의를 설명한 내용을 뒷받침하는 근거를 제공한다. 정해진 도로구간 내에서 더 빠른 속도로 주행할수록 그 구간을 통과하는 시간은 줄어들기 때문에 피로도의 증가폭은 상대적으로 감소한다. 따라서 시간적으로 접근할 때 과속주행시간의 비율이 높을수록 그 위험비중은 피로의 위험비중보다 높게 나타나게 된다. 반면에, 공간적 분석에서는 안전한계피로도와 안전한계속도 이상으로 주행한 절대적인 구간길이를 사용하기 때문에 속도의 고저에 따른 영향을 받지 않고, 도로이용행태의 관점에서 위험구간의 피로 및 과속 위험비중을 객관적으로 평가한다. 결과적으로, 시·공간 관점에 따라 분석결과가 달라지며 이를 분석·평가할 수 있는 가능성을 확인하였다.



<그림 5-14> 피로·과속 사고위험 비중의 시·공간적 비교

제4절 분석지표 산정 및 성능평가

1. 분석지표 산정 결과

분석지표별로 추정한 파라미터를 적용하여 도로구간별 피로 분석 지표와 과속 분석 지표를 산정한 결과는 <표 5-2>와 같다.

<표 5-2> 시·공간적 피로 노출도 및 과속 노출도 지표 산정결과

도로구간	TFE	SFE	TSE	SSE
구간 1	0.0001	0.0001	0.0049	0.0108
구간 2	0.0004	0.0005	0.0093	0.0183
구간 3	0.0004	0.0006	0.0070	0.0146
구간 4	0.0008	0.0007	0.0280	0.0513
구간 5	0.0010	0.0010	0.0549	0.1062
구간 6	0.0013	0.0015	0.0524	0.1020
구간 7	0.0012	0.0013	0.0461	0.0844
구간 8	0.0015	0.0016	0.0648	0.1187
구간 9	0.0023	0.0023	0.1031	0.1684
구간 10	0.0066	0.0064	0.0517	0.0898
구간 11	0.0062	0.0062	0.0179	0.0339
구간 12	0.0090	0.0087	0.0713	0.1159
구간 13	0.0109	0.0107	0.1033	0.1618
구간 14	0.0267	0.0249	0.0574	0.0992
구간 15	0.0201	0.0195	0.1500	0.2367

<표 5-2 계속> 시·공간적 피로 노출도 및 과속 노출도 지표 산정결과

도로구간	TFE	SFE	TSE	SSE
구간 16	0.0239	0.0240	0.1816	0.2709
구간 17	0.0376	0.0372	0.1809	0.2696
구간 18	0.0410	0.0394	0.2281	0.3237
구간 19	0.0518	0.0496	0.2145	0.3108
구간 20	0.0518	0.0498	0.2006	0.2890
구간 21	0.0574	0.0547	0.2312	0.3362
구간 22	0.0647	0.0641	0.2089	0.2990
구간 23	0.0714	0.0697	0.1655	0.2422
구간 24	0.0875	0.0850	0.2108	0.3084
구간 25	0.0806	0.0780	0.2180	0.3196
구간 26	0.0978	0.0944	0.2162	0.3041
구간 27	0.0961	0.0934	0.2355	0.3318
구간 28	0.0907	0.0893	0.2331	0.3263
구간 29	0.0910	0.0894	0.1658	0.2569
구간 30	0.0841	0.0847	0.1557	0.2353
구간 31	0.0992	0.1020	0.3025	0.4059
구간 32	0.1225	0.1246	0.3371	0.4853
구간 33	0.1185	0.1178	0.2774	0.3863
구간 34	0.0519	0.0547	0.1029	0.1582
구간 35	0.0419	0.0419	0.2195	0.3445
구간 36	0.0498	0.0494	0.0460	0.0784

피로과속 융합 분석지표(교집합 노출도, 합집합 노출도)를 산정한 결과는 <표 5-3>과 같다.

<표 5-3> 시·공간적 피로과속 융합 분석지표 산정결과

도로구간	TIE	SIE	TUE	SUE
구간 1	0.0000	0.0000	0.0080	0.0039
구간 2	0.0006	0.0004	0.0084	0.0051
구간 3	0.0006	0.0004	0.0065	0.0035
구간 4	0.0003	0.0002	0.0273	0.0165
구간 5	0.0004	0.0003	0.0682	0.0377
구간 6	0.0006	0.0004	0.0630	0.0343
구간 7	0.0007	0.0005	0.0422	0.0259
구간 8	0.0009	0.0006	0.0762	0.0435
구간 9	0.0016	0.0011	0.1086	0.0697
구간 10	0.0032	0.0024	0.0524	0.0347
구간 11	0.0033	0.0024	0.0298	0.0173
구간 12	0.0045	0.0034	0.0622	0.0427
구간 13	0.0064	0.0049	0.0921	0.0653
구간 14	0.0096	0.0072	0.0725	0.0528
구간 15	0.0122	0.0088	0.1676	0.1123

<표 5-3 계속> 시·공간적 피로과속 융합 분석지표 산정결과

도로구간	TIE	SIE	TUE	SUE
구간 16	0.0166	0.0137	0.1928	0.1368
구간 17	0.0242	0.0190	0.1966	0.1394
구간 18	0.0273	0.0232	0.2382	0.1787
구간 19	0.0324	0.0282	0.2509	0.1844
구간 20	0.0329	0.0281	0.2251	0.1726
구간 21	0.0358	0.0292	0.2759	0.2067
구간 22	0.0448	0.0372	0.2402	0.1856
구간 23	0.0443	0.0382	0.2021	0.1555
구간 24	0.0548	0.0462	0.2744	0.2104
구간 25	0.0500	0.0421	0.2823	0.2130
구간 26	0.0614	0.0527	0.2596	0.2103
구간 27	0.0631	0.0548	0.2815	0.2275
구간 28	0.0640	0.0563	0.2737	0.2222
구간 29	0.0594	0.0488	0.2280	0.1750
구간 30	0.0558	0.0462	0.2172	0.1666
구간 31	0.0790	0.0666	0.3451	0.2809
구간 32	0.1014	0.0837	0.4733	0.3571
구간 33	0.0945	0.0788	0.3685	0.2995
구간 34	0.0418	0.0345	0.1387	0.1082
구간 35	0.0322	0.0267	0.3031	0.2072
구간 36	0.0275	0.0225	0.0823	0.0651

2. 분석지표 성능평가

본 연구에서 제시한 8개 분석지표의 성능을 평가하기 위하여 각 분석지표를 단일 설명변수로 사용하여 단순선형 회귀모형을 구축하였다. 이때, 모형의 종속변수는 사고율(건/백만대km)이다. 지표의 성능은 회귀분석의 결정계수(R^2)로 평가할 수 있으며, 그 결과는 <표 5-4>와 같다.

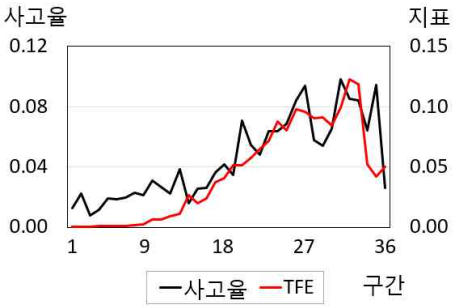
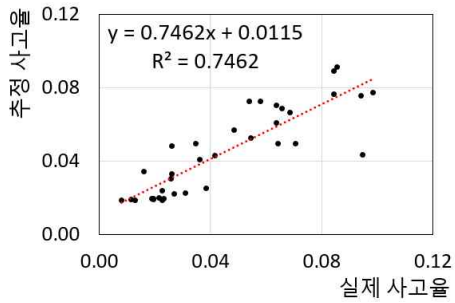
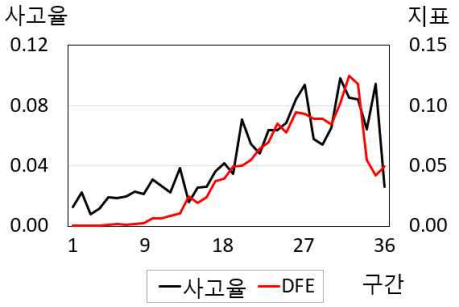
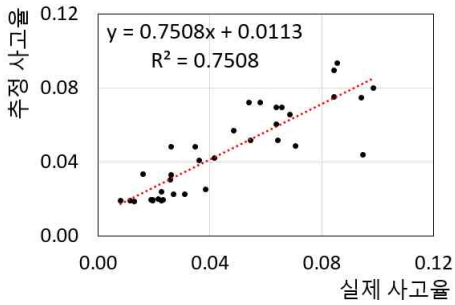
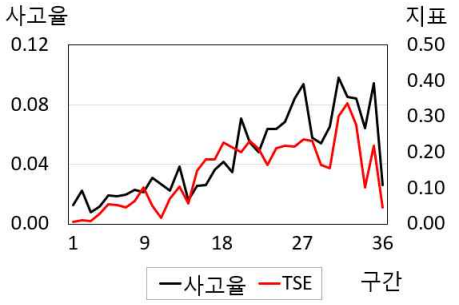
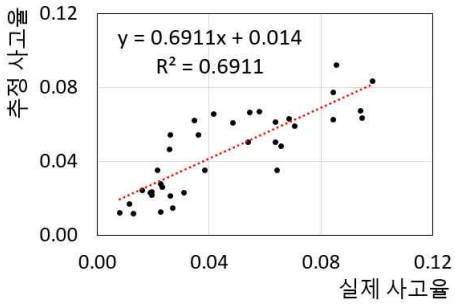
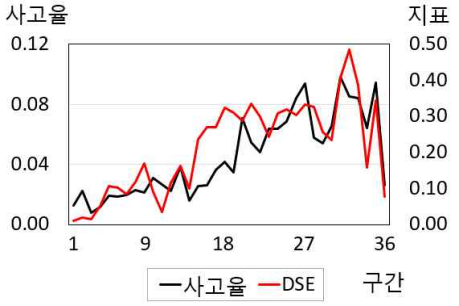
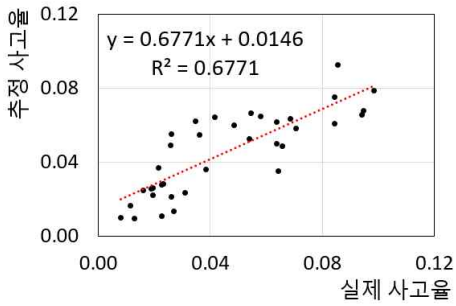
사고 설명력이 가장 높게 산정된 분석지표는 공간적 융합 분석지표인 SIE와 SUE이며, 이 변수만으로 76.5%의 사고를 설명할 수 있는 것으로 나타났다. 시간적 융합 분석지표인 TIE 및 TUE는 각각 76.0%와 74.0%의 설명력을 가지는 것으로 분석되었다. 그리고 피로 분석 지표인 TFE와 SFE는 설명력이 각각 74.6%, 75.1%, 과속 분석 지표인 TSE 및 SSE는 설명력이 각각 69.1%, 67.7%로 개별 분석지표 또한 높은 설명력을 가지는 것으로 나타났다.

결과적으로, 모든 분석지표들의 사고 설명력은 최소 67.7%에서 최대 76.5%까지 높은 성능을 가지는 것으로 평가된다.

<표 5-4> 전체 분석지표의 사고 설명력 평가결과

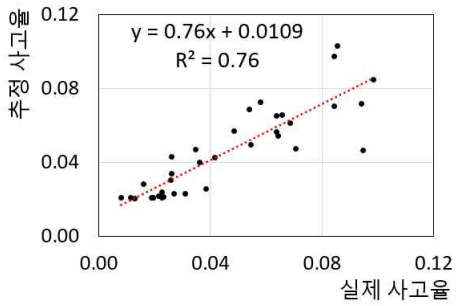
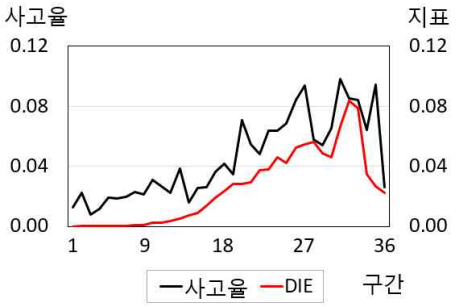
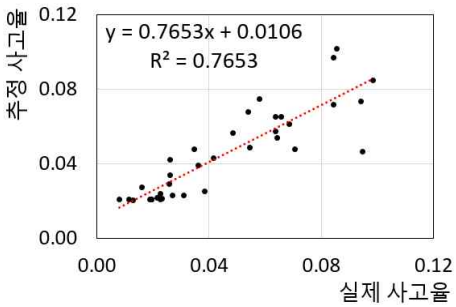
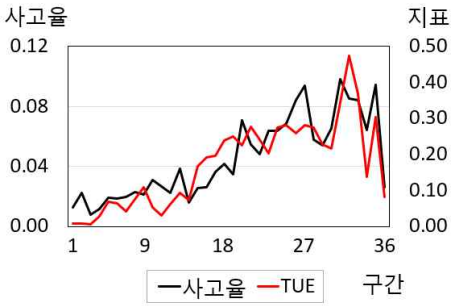
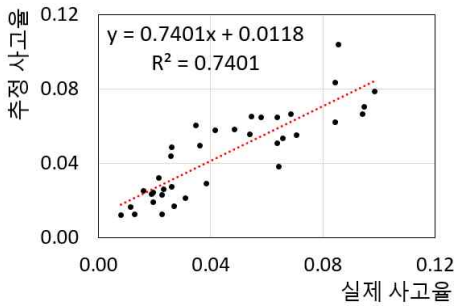
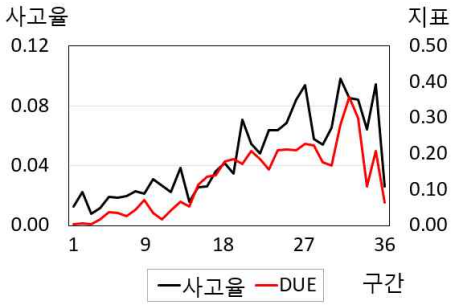
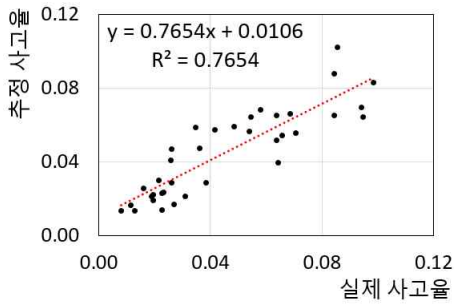
분석유형	분석지표	R^2	MAPE	RMSE
피로 분석	TFE	0.746	0.0094	0.0139
	SFE	0.751	0.0094	0.0137
과속 분석	TSE	0.691	0.0120	0.0153
	SSE	0.677	0.0124	0.0156
과속피로 교집합분석	TIE	0.760	0.0096	0.0135
	SIE	0.765	0.0095	0.0133
과속피로 합집합분석	TUE	0.740	0.0109	0.0140
	SUE	0.765	0.0104	0.0133

개별 분석지표와 사고율의 관계, 선형회귀모형의 사고율 추정값과 실제 사고율을 비교한 결과는 <그림 5-15>와 같다.

지표	지표와 사고율 관계	사고율 실제값과 추정값 비교
TFE		
SFE		
TSE		
SSE		

<그림 5-15> 개별 분석지표 성능평가 결과

융합 분석지표와 사고율의 관계, 선형회귀모형의 사고율 추정값과 실제 사고율을 비교한 결과는 <그림 5-16>과 같다.

지표	지표와 사고율 관계	실제값과 추정값 비교
TIE		
SIE		
TUE		
SUE		

<그림 5-16> 융합 분석지표 성능평가 결과

제5절 교통사고 위험도 분석

1. 교통사고 위험도 분석 개요

미시적인 관점에서 운전 피로와 과속을 분석하고자 하는 최종 목표는 교통사고를 실질적으로 예방할 수 있는 교통안전 정책의 기초자료를 마련하는 데 있다. 본 절에서는 이 연구를 통해 개발한 피로·과속 분석 방법론을 이용하여 <그림 5-17>과 같이 세 가지 방법으로 교통사고 위험도를 분석하고자 한다.

첫째, 운전 피로와 과속 등의 운전자 특성을 반영한 분석지표를 산정한 후 콘존 단위의 도로구간을 대상으로 사고예측 모형을 구축하여 거시적 관점에서 사고위험도를 분석한다. 이 방법은 교통안전 분야에서 통상적으로 수행되고 있는 방법이지만 운전자 특성을 반영한다는 점에서 선행연구들과 차별성이 있다. 둘째, 시·공간을 15분 및 1km 단위로 세분화하여 분석지표를 산정한 후 위험노출맵을 작성한다. 이를 통해 시·공간적인 운전 피로와 과속의 위험패턴을 파악할 수 있어 한국도로공사의 위험구간 선정에 활용할 수 있다. 마지막으로, 개별 차량의 실시간 궤적을 이용하여 운전 피로와 과속상태에 따른 위험도를 분석하고, 본인이나 주변 차량의 위험정보를 직접적으로 제공할 수 있는 방안을 제시한다.

분석대상	분석 방법 및 내용	활용방안
도로구간	**(1) 운전자 행태 기반 사고예측 모형 구축** -도로구간(콘존)별 사고건수 예측	도로구간별 거시적 위험도 분석 (위험구간 도출)
세부구간 및 시간대	**(2) 시·공간 위험노출맵** -시간 15분, 공간 1km 단위의 위험도 분석	시·공간적 위험도 패턴분석 (위험시·공간 도출)
실시간 개별 차량	**(3) 개별 차량의 실시간 위험정보** -개인의 피로·과속상태에 따른 위험도 분석	개인별 위험도 분석 및 정보제공 (위험차량 도출)

<그림 5-17> 교통사고 위험도 분석 개요

2. 위험도 분석 (1) 운전자 행태 기반 사고예측 모형 구축

1) 사고예측 개요

고속도로에서 사고가 발생할 경우 사고의 치명률은 일반도로에 비해 현저히 높은 것으로 알려져 있다. 이에 교통안전 분야의 연구자들은 고속도로 사고에 영향을 미치는 요인들을 밝혀내고 사고예측 모형을 개발하여 도로구간별 사고위험성을 추정하기 위한 연구를 수행하고 있다. 그동안 사고예측 정확도를 높이기 위한 연구들이 지속적으로 수행되면서 다양한 종류의 개선된 모형들이 제안되었고, 또한 기계학습 등 자료기반 기법이 적용되면서 사고를 예측할 수 있는 새로운 방법이 계속해서 보고되고 있다. 그러나 대부분의 사고예측 연구들은 도로특성(기하구조, 터널 등) 및 기상조건을 변수로 사용하고 있으며 교통류 특성은 교통량(AADT, 시간당 지점평균 교통량 등)과 속도(제한속도, 운영속도, 평균속도 등)를 사용하는 것이 전부이다. 사고예측 모형의 지속적인 발전에도 불구하고 집계기반의 제한적인 자료로 인해 개발될 수 있는 통계적 방법론에는 근본적인 한계가 있었다(Lord and Mannering, 2010). 사고예측 정확도를 높일 수 있는 핵심적인 요소는 사고를 잘 설명할 수 있는 적절한 변수를 개발하여 적용하는 것이며(Mannering et al., 2020), 적절한 변수가 적용된 이후에 설명변수들이 사고를 잘 설명할 수 있는 모형을 선택하여 고도화하는 것이 앞으로 추구해야 할 방향일 것이다.

이러한 관점에서 본 연구에서 제시한 운전 피로 및 과속 지표는 지금까지 보고되지 않았던 운전자 행태를 기반으로 한 새로운 변수이며, 이는 현대의 고속도로 교통사고(운전자 요인 중심)와 밀접한 관련이 있는 요인이다. 따라서 운전자 행태 기반의 피로도 및 과속 분석지표들을 활용하여 사고예측 모형을 구축하고, 도로구간별 거시적 위험도를 분석하고자 한다. 그리고 모형의 성능을 선행연구 결과와 비교·평가함으로써 사고예측 연구의 개선방향에 대한 시사점을 도출하고자 한다.

2) 사고예측 방법 및 후보 변수 선정

사고예측 모형의 구축과정은 다음과 같다. 먼저 도로특성을 포함한 설명변수들을 도로구간별로 수집한다. 그 후 모든 변수들 간의 상관관계를 분석하여 다중공선성의 문제가 발생되지 않는 변수들 집합을 구성한다. 예측모형의 종속변수는 다음과 같은 두 가지 이유로 사고건수를 사용하였다. 첫째, 예측모형에서 사고건수 대신 백만대·km당 사고율을 종속변수로 사용할 경우 공변량의 유의성이 달라질 수 있고, 이에 따라 잘못된 결과가 도출될 수 있으므로 주의가 필요하다(Caliendo et al., 2016). 둘째, 사고율을 적용할 경우 교통량과 도로길이가 더 이상 설명변수가 아니라 종속변수가 되면서 사고와 선형관계로 작용한다. 그러나 일반적으로 교통량과 도로길이는 사고건수와 선형관계가 아니기 때문에 설명변수로 포함시키고, 종속변수는 사고건수로 정하는 것이 적절한 것으로 판단하였다.

설명변수는 도로특성, 교통류 특성, 운전자 특성 변수로 구성하며, 새로운 지표의 설명력을 평가하기 위하여 통계적으로 유의한 최소한의 변수를 사용하여 모형을 추정한다. 먼저 선행연구에서 가장 많이 사용되는 도로특성 변수는 도로길이, 평면선형, 종단선형, 길어깨폭, 차로폭, 차로수 등이 있으나, 본 연구 구간은 길어깨폭과 차로폭, 종단선형에 큰 차이가 없으므로 도로길이와 평면선형, 차로수를 설명변수로 채택하며, 평면선형은 도로구간내 급커브 구간수로 대체한다. 교통류 특성 변수는 AADT, 중차량비율, 차량속도 등이 있다. 여기서 차량속도는 과속 지표로 대체하며, AADT와 중차량비율을 설명변수로 채택한다. 운전자 특성 변수는 본 연구에서 제시한 피로도 및 과속 지표를 사용한다. 선정된 후보 변수는 <표 5-5>와 같으며, 각 변수의 기술통계는 <표 5-6>과 같다.

<표 5-5> 사고예측 모형 변수 선정

도로 특성 변수	교통류 특성 변수	운전자 특성 변수
도로길이, 급커브구간수, 차로수	AADT, 중차량비율	운전 피로, 과속 지표

<표 5-6> 사고예측 모형 변수 기술통계

변수		평균	표준편차	최소값	최대값
도로 특성	L	9.35	5.28	0.9	24.3
	CU	2.39	0.60	2	4
	LN	0.33	0.54	0	2
교통류 특성	AADT	27,806	22,488	6,602	10,0961
	HV	0.301	0.064	0.180	0.378
운전자 특성	TFE	0.0444	0.0394	0.0001	0.1225
	TSE	0.1432	0.0929	0.0049	0.3371
	TIE	0.0439	0.0391	0.0001	0.1246
	TUE	0.2137	0.1269	0.0108	0.4853
	SSE	0.0302	0.0290	0.0000	0.1014
	SFE	0.0253	0.0245	0.0000	0.0837
	SIE	0.1732	0.1186	0.0065	0.4733
	SUE	0.1297	0.0944	0.0035	0.3571

3) 후보 변수 간 상관분석

사고예측 모형을 구축하기 위해 선정된 후보 변수들에 대해 변수 간의 상관성이 존재하는지 확인하는 과정이 필요하다. 이에 모든 변수들을 대상으로 상관분석을 수행하였으며, 그 결과는 <표 5-7>과 같다. 운전자 특성 변수들 간의 상관관계를 살펴보면, 모든 관계가 83% 이상으로 나타나 두 개 이상의 변수가 동시에 적용될 수는 없을 것으로 판단된다. 이외에 도로길이(L), 차로수(LN), 급커브구간(CU), AADT, 중차량비율(HV) 또한 운전자 변수들과 유의한 상관관계가 존재하는 것으로 나타났으므로 사고예측 모형 구축시 변수 설정에 이를 고려할 필요가 있다.

<표 5-7> 사고예측 설명변수들의 상관분석 결과

변수	L	LN	CU	AADT	HV	TFE	TSE	TIE	TUE	SFE	SSE	SIE	SUE
L	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
LN	-.419*	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
CU	.319	-.238	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
AADT	-.484**	.833**	-.212	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-
HV	.256	-.441**	.300	-.529**	1	-	-	-	-	-	-	-	-
TFE	.427**	-.702*	.169	-.765**	.525**	1	-	-	-	-	-	-	-
TSE	.709**	-.708**	.272	-.805**	.454**	.851**	1	-	-	-	-	-	-
TIE	.457**	-.656**	.194	-.729**	.462**	.985**	.862**	1	-	-	-	-	-
TUE	.681**	-.713**	.280	-.802**	.458**	.894**	.984**	.909**	1	-	-	-	-
SFE	.426**	-.697**	.173	-.761**	.516**	.999**	.850**	.990**	.895**	1	-	-	-
SSE	.716**	-712**	.265	-.812**	.458**	.835**	.997**	.845**	.985**	.834**	1	-	-
SIE	.457**	-.655**	.191	-.727**	.460**	.986**	.863**	.999**	.907**	.990**	.845**	1	-
SUE	.652**	-.713**	.267	-.799**	.464**	.923**	.981**	.936**	.996**	.923**	.976**	.936**	1

주 : **상관관계가 0.01 수준에서 유의함, *상관관계가 0.05 수준에서 유의함

4) 사고예측 모형의 구조

사고 자료는 양의 정수를 가진 이산적인 확률분포를 따르기 때문에 대부분의 사고예측 모형에서는 포아송 분포 또는 음이항 분포를 활용하고 있다. 포아송 분포는 종속변수를 회귀계수의 선형함수로 모형화하지 않고 자연로그를 적용한 선형함수로 모형화한다.

사고예측 모형의 일반적인 함수식의 형태는 식 (5-6)과 같으며, 식 (5-7)과 같이 양변에 로그를 적용하는 방법으로 선형회귀분석을 이용하여 모형을 구축할 수 있다. 여기서, $\hat{y}$는 예측 사고건수, α_0는 상수, β_i는 회귀계수, x_i는 설명변수, L은 도로길이(km), $AADT$는 연평균일교통량(대/일)이다.

$$\hat{y} = \alpha_0 \times L^{\beta_1} \times AADT^{\beta_2} \times e^{\sum_{i=1}^{n} \beta_i x_i} \qquad \text{식 (5-6)}$$

$$\ln(\hat{y}) = \ln(\alpha_0) + \beta_1 \ln(L) + \beta_2 \ln(AADT) + \sum_{i=1}^{n} \beta_i x_i \qquad \text{식 (5-7)}$$

5) 후진제거법을 활용한 설명변수 선정결과

본 연구에서 고려한 후보 변수들 중 적정한 설명변수를 선택하기 위한 방법으로 후진제거법을 이용한다. 후진제거법은 설명변수 후보를 모두 포함시킨 모형에서 시작하여 전체 변수들의 정보를 확인한 후 유의하지 않거나 영향력이 가장 적은 변수를 하나씩 제거하면서 최종 모형을 선택할 수 있는 단계적 변수선택 방법이다. 이 때, 노출도 지표들은 시간적 지표와 공간적 지표로 구분하여 별도로 수행한다. 후진제거 단계에 따른 결과는 <표 5-8> 및 <표 5-9>와 같으며, 각각 시간적 노출도 지표로 구축한 모형과 공간적 노출도 지표로 구축한 모형이다.

시간적 노출도 지표를 설명변수로 사용한 사고예측 모형 구축결과는 식 (5-8)과 같다. 최종적으로 채택된 변수는 도로길이와 교통량, 중차량 비율, 시간적 피로 및 과속 노출도이며 모든 변수들은 사고와 양(+)의 관계가 있는 것으로 나타났다. 이 결과는 도로길이가 길수록, 교통량이 많으며 특히 중차량이 많을수록, 그리고 피로 및 과속에 노출되는 시간의 비율이 높을수록(즉, 피로한 상태로 과속하는 시간이 길수록) 사고위험성이 높다는 것으로 해석할 수 있으며, 이는 모두 상식에 부합하는 것으로 판단된다. 시간적 지표로 추정한 사고예측 모형의 설명력은 85.4%로 매우 우수한 것으로 분석되었다.

$$\hat{y} = -8.328 \times L^{1.143} \times AADT^{0.740} \times e^{2.401HV + 10.064TIE} \qquad \text{식 (5-8)}$$

<표 5-8> 모형 구축 단계별 변수 추정치 및 적합도(시간적 지표)

변수	1 (시작)	2	3	4	5	6 (최종)
상수	-7.814**	-7.849**	-7.915**	-7.398**	-7.314**	-8.328**
ln(L)	1.128**	1.126**	1.127**	1.155**	1.148**	1.143**
ln(AADT)	0.652*	0.656*	0.661*	0.608**	0.601**	0.740**
LN	0.127	0.125	0.134	0.149	0.154	제외
CU	-0.057	-0.057	-0.052	-0.044	제외	-
HV	2.685*	2.685*	2.600*	2.551*	2.466*	2.401*
TFE	-1.596	-1.622	제외	-	-	-
TSE	-0.205	제외	-	-	-	-
TIE	9.636	9.769	7.722	9.045*	8.965*	10.064**
TUE	0.792	0.634	0.679	제외	-	-
F	20.403	23.834	28.218	33.896	41.768	52.078
R^2	0.833	0.839	0.845	0.849	0.853	**0.854**

주 : **0.01 수준에서 유의함, *0.05 수준에서 유의함

공간적 노출도 지표를 설명변수로 사용한 사고예측 모형 구축결과는 식 (5-9)와 같다. 최종적으로 채택된 변수는 도로길이와 교통량, 중차량 비율, 공간적 피로 및 과속 노출도이며 모든 변수들은 사고와 양(+)의 관계가 있는 것으로 나타났다. 이 결과는 도로길이가 길수록, 교통량이 많으며 특히 중차량이 많을수록, 그리고 피로 및 과속에 노출되는 거리의 비율이 높을수록(즉, 피로한 상태로 과속하는 거리가 길수록) 사고위험성이 높다는 것으로 해석할 수 있으며, 이는 모두 상식에 부합하는 것으로 판단된다. 공간적 지표로 추정한 사고예측 모형의 설명력은 85.6%로 시간적 지표를 이용한 모형보다도 더 우수한 것으로 분석되었다.

$$\hat{y} = -8.375 \times L^{1.142} \times AADT^{0.745} \times e^{2.401HV + 12.126DIE} \qquad \text{식 (5-9)}$$

<표 5-9> 모형 구축 단계별 변수 추정치 및 적합도(공간적 지표)

변수	1 (시작)	2	3	4	5	6 (최종)
상수	-7.762*	-7.723**	-7.267**	-7.465**	-7.389**	-8.375**
ln(L)	1.119**	1.118**	1.138**	1.154**	1.147**	1.142**
ln(AADT)	0.650*	0.648*	0.603**	0.616**	0.609**	0.745**
LN	0.109	0.106	0.114	0.147	0.152	제외
CU	-0.046	-0.060	-0.060	-0.043	제외	-
HV	2.729*	2.830*	2.858*	2.547*	2.465**	2.401*
SFE	-5.430	-5.800	-6.737	제외	-	-
SSE	1.711	0.382	제외	-	-	-
SIE	22.504	18.780	20.619	10.956*	10.881*	12.126**
SUE	-2.768	제외	-	-	-	-
F	20.956	24.378	28.807	34.457	42.476	52.983
R^2	0.837	0.842	0.848	0.852	0.856	0.856

주 : **0.01 수준에서 유의함, *0.05 수준에서 유의함

6) 각 분석지표별 최종 모형 구축결과

앞에서 전체 후보 변수들을 대상으로 후진제거법을 수행하여 설명변수를 선정한 결과, 기하구조 특성변수와 교통류 특성변수들 중 유의한 변수들은 도로길이, 교통량, 중차량비율로 분석되었다. 그리고 운전자 특성변수로는 시·공간적 교집합 노출도 지표가 선택되었다.

여기서는 도로길이, 교통량, 중차량비율 변수들은 유지하면서 다른 운전자 특성변수를 각각 적용함으로써 모든 분석지표들의 사고 설명력을 검증하였다. 먼저 개별 분석지표(시·공간적 피로 노출도 지표와 시·공간적 과속 노출도 지표)를 활용하여 사고예측 모형을 구축한 결과는 <표 5-10>과 같다. 모든 모형들은 최소한 0.1 수준에서 유의한 것으로 분석되었으며, 결정계수는 시·공간적 피로 노출도 지표의 경우 각각 0.847, 0.849, 시·공간적 과속 노출도 지표는 각각 0.834, 0.833으로 나타났다. 피로 노출도 지표의 설명력이 다소 높지만, 모두 83% 이상의 사고를 설명할 수 있는 것으로 분석되었다.

<표 5-10> 시·공간적 피로과속 개별 분석지표 활용 모형 구축결과

변수	시간적 피로 사고예측 모형	시간적 과속 사고예측 모형	공간적 피로 사고예측 모형	공간적 과속 사고예측 모형
상수	-8.165***	-7.391***	-8.373***	-7.254***
ln(L)	1.151***	0.994***	1.156***	0.991***
ln(AADT)	0.730***	0.191***	0.748***	0.644***
HV	2.066**	0.959***	2.095**	2.620**
운전자특성 지표	7.302**	1.687*	7.646**	2.030*
F	49.401	44.968	50.331	44.568
R^2	0.847	0.834	0.849	0.833

주 : ***0.01 수준에서 유의함, **0.05 수준에서 유의함, *0.1 수준에서 유의함

융합 분석지표(시·공간적 피로 및 과속 노출도 지표와 시·공간적 피로 또는 과속 노출도 지표)를 활용하여 사고예측 모형을 구축한 결과는 <표 5-11>과 같다. 모든 모형들은 0.05 수준에서 유의한 것으로 분석되었으며, 결정계수는 시·공간적 피로과속 교집합 노출도 지표의 경우 각각 0.854, 0.856, 시·공간적 피로과속 합집합 노출도 지표는 각각 0.842, 0.848로 나타났다. 융합 분석지표들은 개별 분석지표보다 1-2% 정도 높은 설명력을 가지는 것으로 분석되었다.

전체 결과로부터 본 연구의 운전자 행태를 나타내는 8개의 분석지표들 중에서 사고를 가장 잘 설명하는 지표는 설명력이 85.5% 수준인 교집합 노출도임을 확인할 수 있다. 이와 같은 결과는 피로한 상태에서 과속을 할 때 가장 위험성이 높을 것이라는 상식에 부합하는 결과이다. 다음으로는 설명력이 84.8% 수준인 피로 노출도 지표로 나타났다. 즉, 사고를 유발하는 가장 주요한 원인은 운전자의 생리적 피로임을 확인할 수 있으며, 과속은 피로보다는 낮지만 사고발생에 상당한 영향력을 가지는 것으로 분석되어 각 분석지표들이 사고를 설명할 수 있는 적절한 대안이 될 수 있음을 증명하였다.

<표 5-11> 시·공간적 피로과속 융합 분석지표 활용 모형 구축결과

변수	시간적 교집합 사고예측 모형	시간적 합집합 사고예측 모형	공간적 교집합 사고예측 모형	공간적 합집합 사고예측 모형
상수	-8.328***	-8.242***	-8.375***	-8.807***
ln(L)	1.143***	1.008***	1.142***	1.019***
ln(AADT)	0.740***	0.736***	0.745***	0.789***
HV	2.401**	2.638***	2.401**	2.609***
운전자특성 지표	10.064***	2.699**	12.126***	3.775**
F	52.078	47.771	52.983	49.834
R^2	0.854	0.842	0.856	0.848

주 : **0.01 수준에서 유의함, *0.05 수준에서 유의함

7) 소결

그동안 선행된 사고예측 연구들은 평면선형이나 종단선형과 같은 기하구조, 교통량, 평균속도, 제한속도와 같은 집계된 교통류, 그리고 기상조건 등을 설명변수로 사용하여 사고를 설명하기 위한 모형을 구축하였다. 그러나 이들은 피로나 과속과 같은 운전자의 행태와 관련된 요인을 설명변수로 반영하지 못하였다(표 2-1 참조). 그 중에서도 본 연구의 대상과 동일하게 고속도로를 대상으로 한 연구들의 사고예측 모형 설명력은 다음과 같이 보고되었다. Shankar et al. (1995)은 지방부 고속도로 사고를 예측하는 음이항회귀모형을 구축하였으며, 설명변수는 도로 기하구조(평면선형, 종단선형) 및 환경요인(날씨, 계절)을 사용하였다. 이 모형은 56%의 설명력을 가지는 것으로 보고하였다. 지방부 고속도로의 사고예측 모형(음이항회귀)을 개발한 Montella et al. (2008)는 교통량과 차종비율, 평면선형 및 종단선형, 설계 일관성, 시거, 길어깨폭, 제한속도, 연결로 존재여부 등을 설명변수로 사용하였으며, 설명력은 54.2%로 분석되었다. Caliendo et al. (2007)은 이탈리아 고속도로를 대상으로 음다항회귀모형(설명변수는 도로기하구조 및 날씨, 교통량)을 이용하여 사고를 예측하였다. 그러나 모형의 설명력이 25.9% 수준에 불과하였으며 그 원인으로 실제 사고발생에 큰 영향을 줄 수 있는 인적 요인(human behaviour)을 반영하지 못하였음을 연구의 한계로 제시하였다.

선행연구들의 모형 성능을 살펴본 결과, 그 설명력은 대부분 60%에 못 미치는 것으로 나타났다. 반면에, 본 연구에서 제시한 운전자행태 관련 분석지표들을 이용한 모든 모형들의 사고 설명력이 83% 이상으로 분석되어 선행연구 결과에 비해 25% 이상의 개선된 성능을 보였다. 각 분석지표들이 우수한 설명력을 가진다는 것은 개별 차량 기반으로 나타나는 운전자의 피로와 과속행태가 사고를 설명할 수 있는 중요한 변수임을 증명하는 것이다. 즉, 운전자행태는 사고위험성과 밀접한 관계가 있는 요소이므로 사고예측 연구에서 이를 고려할 필요가 있음을 시사하며, 본 연구를 통해 운전자행태를 분석할 수 있는 적절한 방법론을 제시하였다.

3. 위험도 분석 (2) 시·공간 위험노출맵

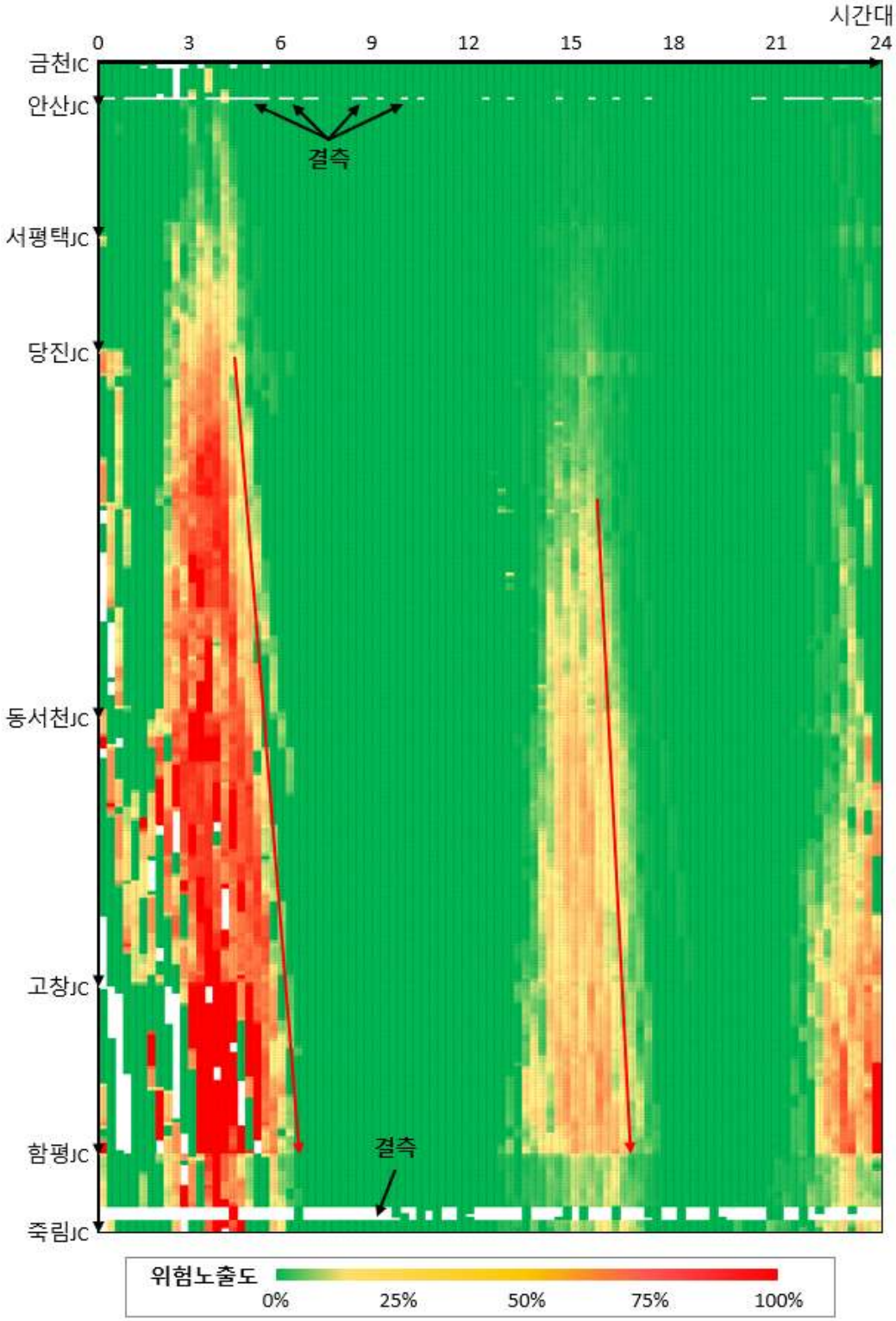
1) 개요

본 연구의 8개 분석지표들은 모두 피로·과속에 대한 각각의 위험성을 100%를 만점으로 점수화하여 나타낸다. 그리고 개별 차량의 궤적을 기반으로 하기 때문에 분석대상을 결정함에 있어 시·공간적 제약을 받지 않는다. 이러한 특성은 도로운영자의 입장에서 교통안전정책을 설계하기 위해 필요로 하는 수준에 따라 도로의 위험성을 자유자재로 변경하여 분석할 수 있는 편의성을 제공한다.

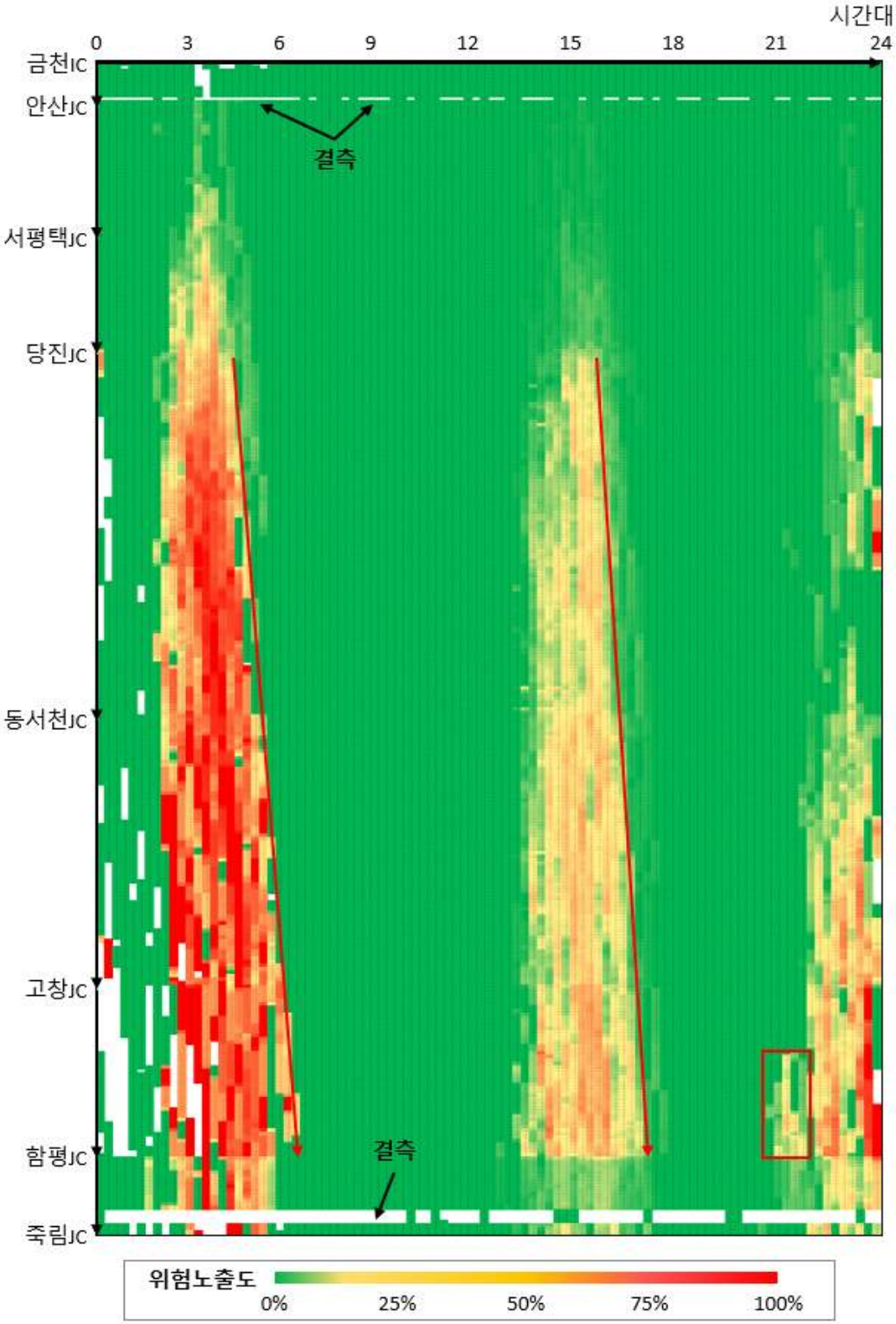
여기서는 하나의 활용 예시로써 시·공간 범위를 15분 및 1km 단위로 세분화하여 각각의 분석지표를 산정하고, 100%를 기준으로 점수대별로 색상을 구분하여 시·공간 위험노출맵을 작성·제시하였다. 또한 고속도로 이용행태는 평일과 주말의 특성이 다를 것으로 예상되기 때문에 평일과 주말을 구분하여 작성하였다. 단, 시간과 공간에 따른 분석지표 산정결과는 큰 차이가 없으므로 여기에서는 공간적 분석지표를 제시하도록 한다.

2) 시·공간 피로 위험노출맵

가장 먼저 운전자의 생리적 피로도 분석지표인 SFE를 사용하여 위험노출맵을 작성하였으며, 평일 및 주말의 피로 위험노출맵은 각각 <그림 5-18>, <그림 5-19>와 같다. 위험노출맵 분석결과, 오후 10시부터 피로 위험도가 상승하기 시작하여 새벽 2-6시에 가장 높고, 오후 1-3시경에도 피로 위험도가 다소 높은 것으로 나타났다. 도로구간별로 살펴보면, 당진JC 이후로 피로 위험도가 높아지기 시작하여 동서천JC 이후부터는 이른 오후 시간대에도 피로 위험도가 30-40%로 높게 나타났다. 평일과 주말의 피로 위험도는 서로 유사한 특성을 보이고 있으나, 주말 밤 9시 이후의 피로 위험도는 평일에 비해 다소 높은 것으로 나타났다. 이는 주말에 여가활동을 한 후에 귀가하는 차량들의 영향일 것으로 판단된다.



<그림 5-18> 운전 피로 위험노출맵(평일)



<그림 5-19> 운전 피로 위험노출맵(주말)

3) 시·공간 과속 위험노출맵

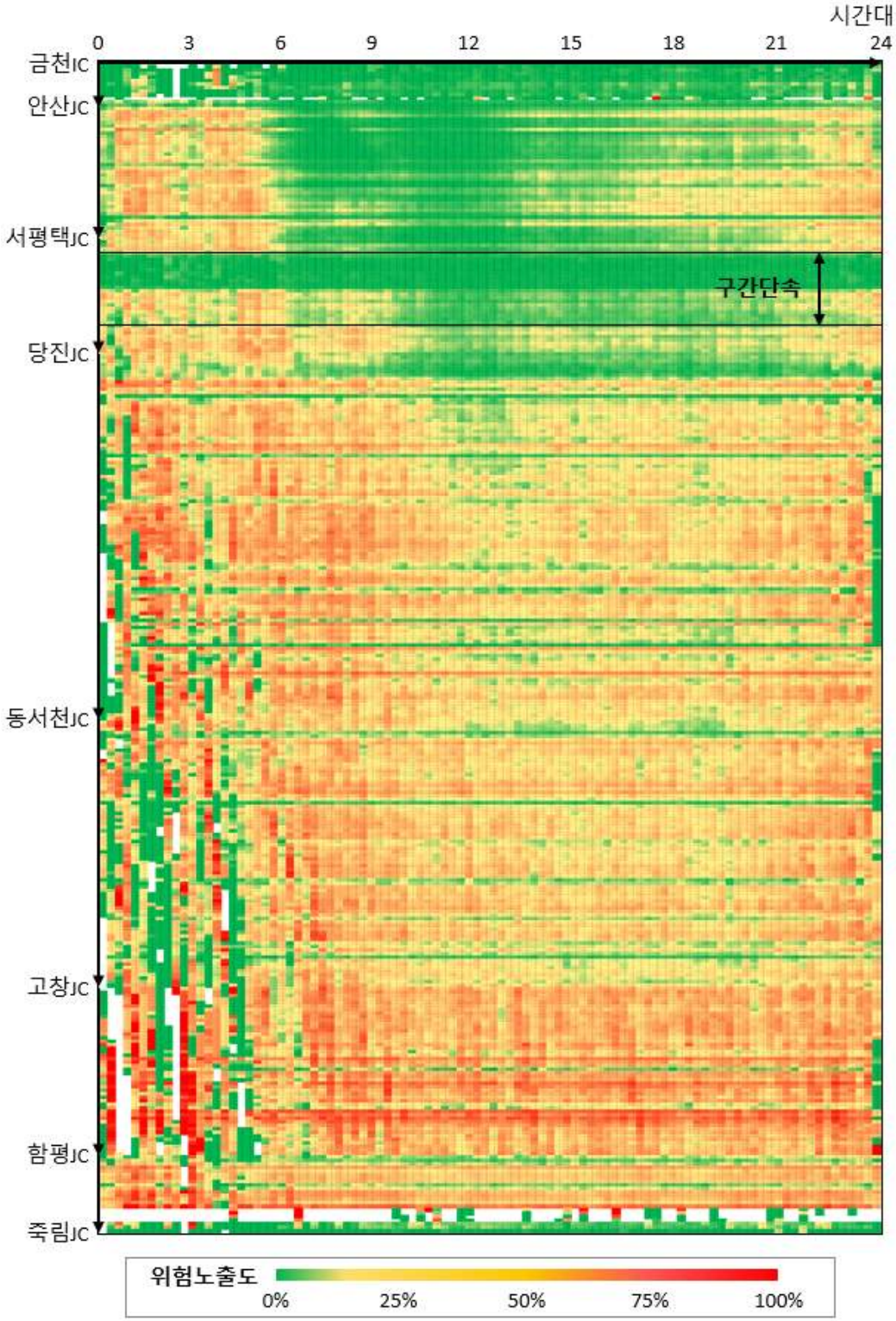
미시적 과속 분석지표인 SSE를 기반으로 위험노출맵을 작성하여 도로 구간 및 시간대별 과속의 위험도를 분석하였다. 평일 및 주말의 과속 위험노출맵은 각각 <그림 5-20>, <그림 5-21>과 같다.

먼저 시간대에 따른 과속 위험도는 전반적으로 교통량이 적은 새벽 및 밤 시간대에 과속 노출도가 높은 것으로 나타났다. 반면에, 당진JC 인근까지는 주간 시간대(오전 6시부터 오후 6시)에 과속 노출도가 낮아 과속으로 인한 사고 위험성은 비교적 적을 것으로 판단된다.

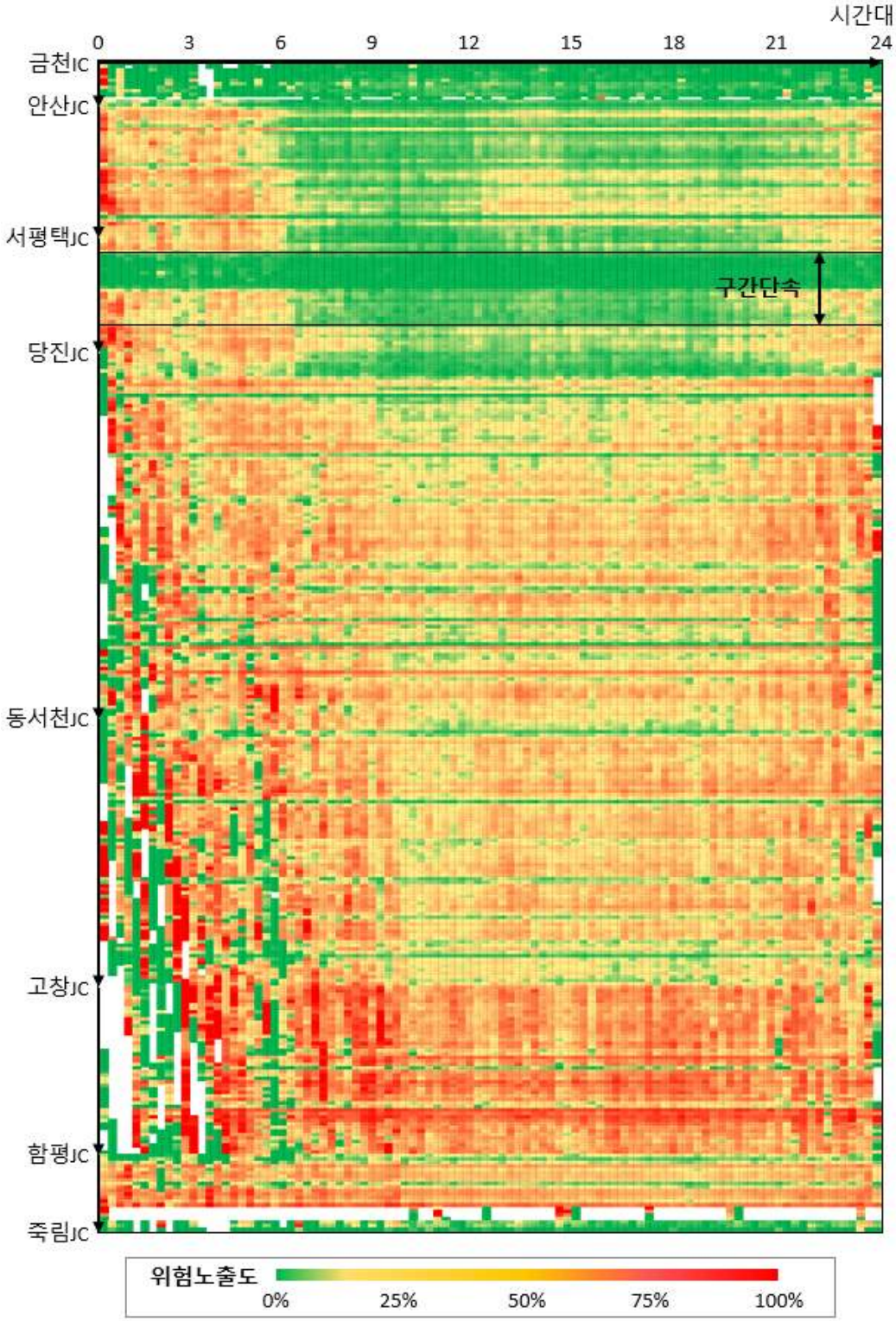
위험노출맵에서 특이사항은 서평택JC에서 당진JC 사이의 약 18km 구간에서 구간과속단속이 시행되고 있으며, 이에 따라 해당 구간에서의 과속 노출도는 매우 낮은 수준으로 나타났다. 이 결과로부터 구간과속단속의 시행이 과속을 실질적으로 감소시킬 수 있음을 확인할 수 있다. 지점과속단속이 시행되는 구간(1km) 또한 과속 노출도는 0%에 가깝게 나타났지만, 해당 구간 이전과 이후 구간은 과속 노출도가 높아 과속의 예방효과가 짧은 구간에 한정되는 것으로 확인되었다.

전반적인 과속 노출도의 변화추세를 살펴보면 서울 근교에서 죽림JC 방향으로 갈수록 과속 위험도가 점차 증가하는 것으로 분석되었다. 1km 단위의 구간에 따른 변화를 상세히 분석해 보면 동일한 콘존 내에서도 과속 위험도가 더 높은 구간이 존재한다. 이러한 구간은 직선구간이거나 내리막구간과 같이 다른 구간에 비해 더 높은 속도로 주행하기 좋은 도로환경일 수 있으며, 위험노출맵을 통해 실제 통행차량들의 과속행태를 쉽게 파악할 수 있다.

평일과 주말의 과속 위험노출맵을 비교해보면, 과속 위험도가 높은 구간과 시간대가 거의 유사한 특성을 보이고 있다. 그러나 주말에는 과속 위험도가 높은 구간에서 노출도 지표가 5-10% 이상 더 높아 평일보다 주말에 과속사고의 위험성이 더욱 높은 것으로 분석되었다.



<그림 5-20> 과속 위험노출맵(평일)



<그림 5-21> 과속 위험노출맵(주말)

4) 시·공간 피로 및 과속 위험노출맵

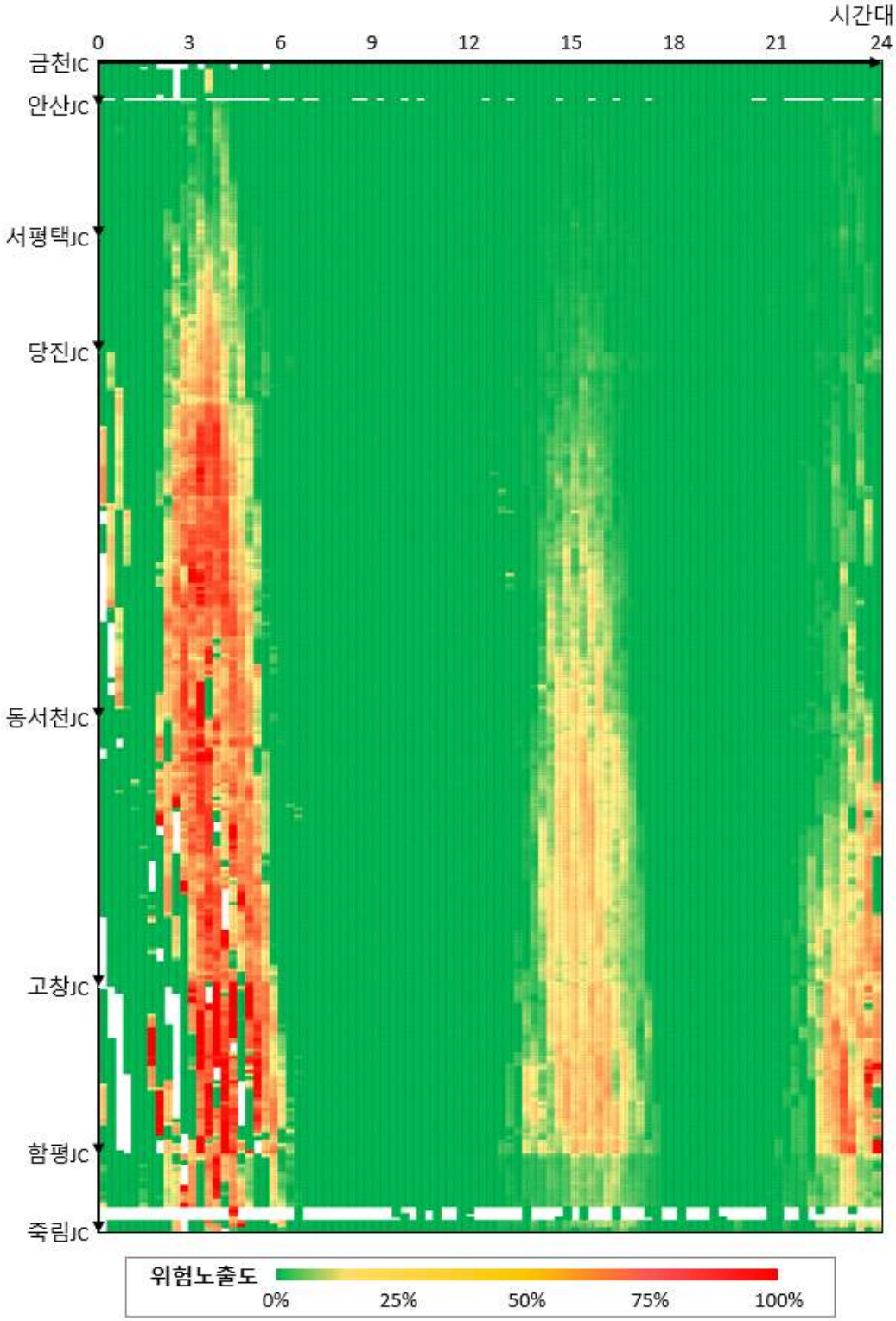
피로과속 융합 분석지표인 SIE를 기반으로 위험노출맵을 작성하여 도로구간 및 시간대별로 피로한 상태에서의 과속 위험도를 분석하였다. 평일과 주말의 피로 및 과속 위험노출맵은 각각 <그림 5-22>, <그림 5-23>과 같으며, 이 지표는 피로한 상태를 기본으로 하기 때문에 피로 위험노출맵의 형태와 유사하게 나타났다.

시간대에 따라서는 새벽 시간대와 이른 오후 시간대, 그리고 밤 10시 이후 시간대에 피로 및 과속 위험도가 높은 것으로 분석되었다. 그 노출도 수준은 전반적으로 피로 노출도에 비해서는 낮지만 새벽 시간대의 위험도는 50% 이상으로 높게 나타났다.

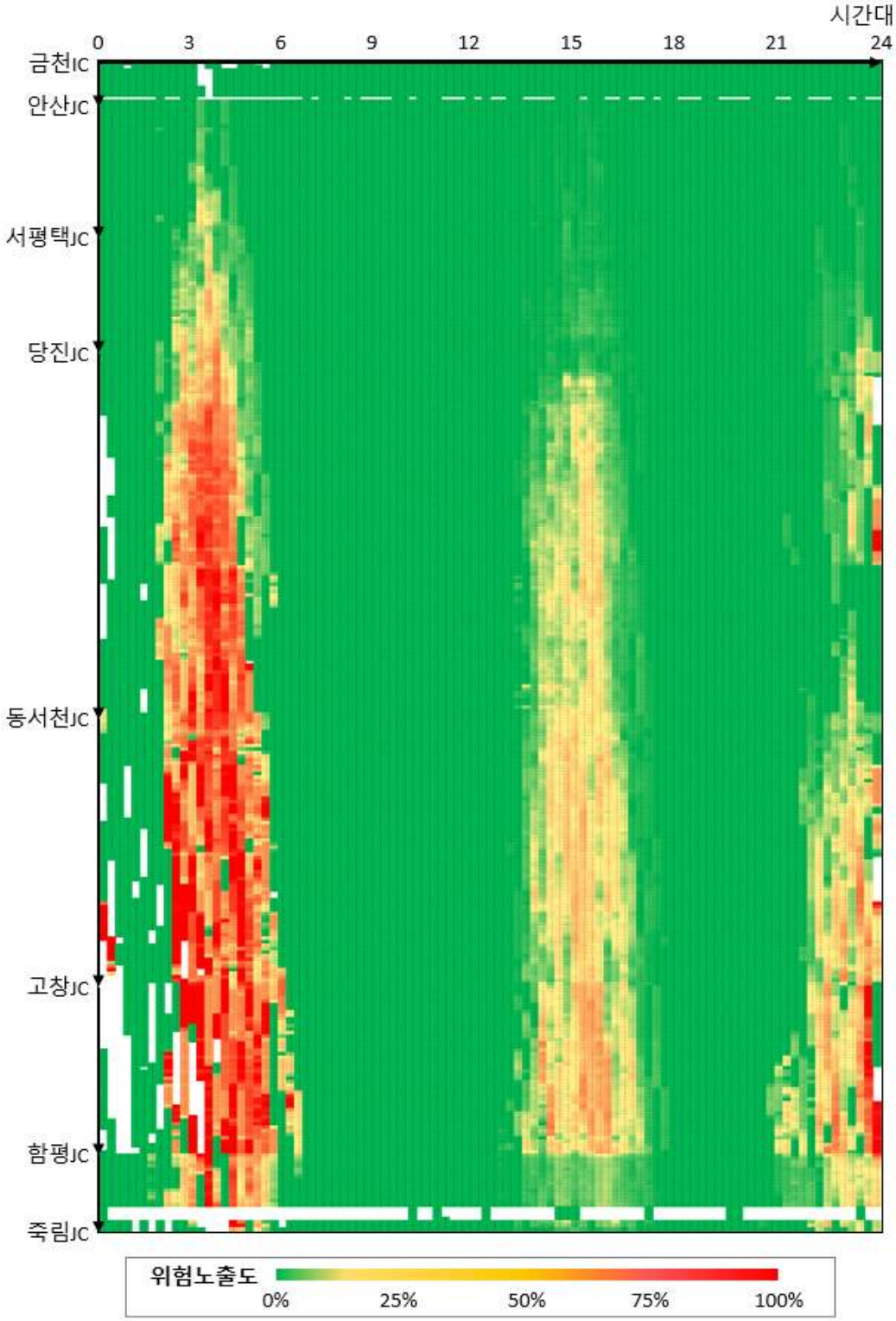
구간별로 보면 당진JC 이후 구간에서부터 위험도가 점차 높아지는 특징을 보인다. 그리고 피로 노출도가 높은 구간과 시간대에 피로 및 과속 노출도 또한 높은 것으로 미루어 볼 때, 피로한 운전자들 중 과속으로 주행하는 사람들이 많은 비중을 차지하고 있다고 판단할 수 있다. 피로한 상태에서의 과속 위험성은 피로 또는 과속의 개별적인 위험성보다 더욱 클 것으로 예상되기 때문에 이와 같은 현상은 사고 위험성을 높이는 요인으로 작용할 수 있다.

평일과 주말의 위험노출맵을 비교해보면, 위험도가 높은 구간과 시간대는 서로 유사하게 나타났다. 그러나 상대적으로 볼 때 주말의 위험도가 평일의 위험도보다 다소 높으며, 특히 이른 오후 시간대와 밤 시간대에는 당진JC 이후 구간에서부터 30% 이상(주황색)의 위험도가 나타나는 것으로 분석되었다.

피로 및 과속 노출도는 본 연구에서 제시하는 분석지표들 중 가장 위험성이 높은 지표이며, 고속도로에서 발생되는 교통사고 중 피로와 과속에 의한 사고가 절반 이상을 차지한다. 따라서 사고예방을 위한 정책 시행구간 및 시간대를 결정할 때 본 위험노출맵을 기초로 할 경우 사고예방 효과를 실질적으로 높일 것으로 판단된다.



<그림 5-22> 피로 및 과속 위험노출맵(평일)



<그림 5-23> 피로 및 과속 위험노출맵(주말)

5) 시·공간 피로 또는 과속 위험노출맵

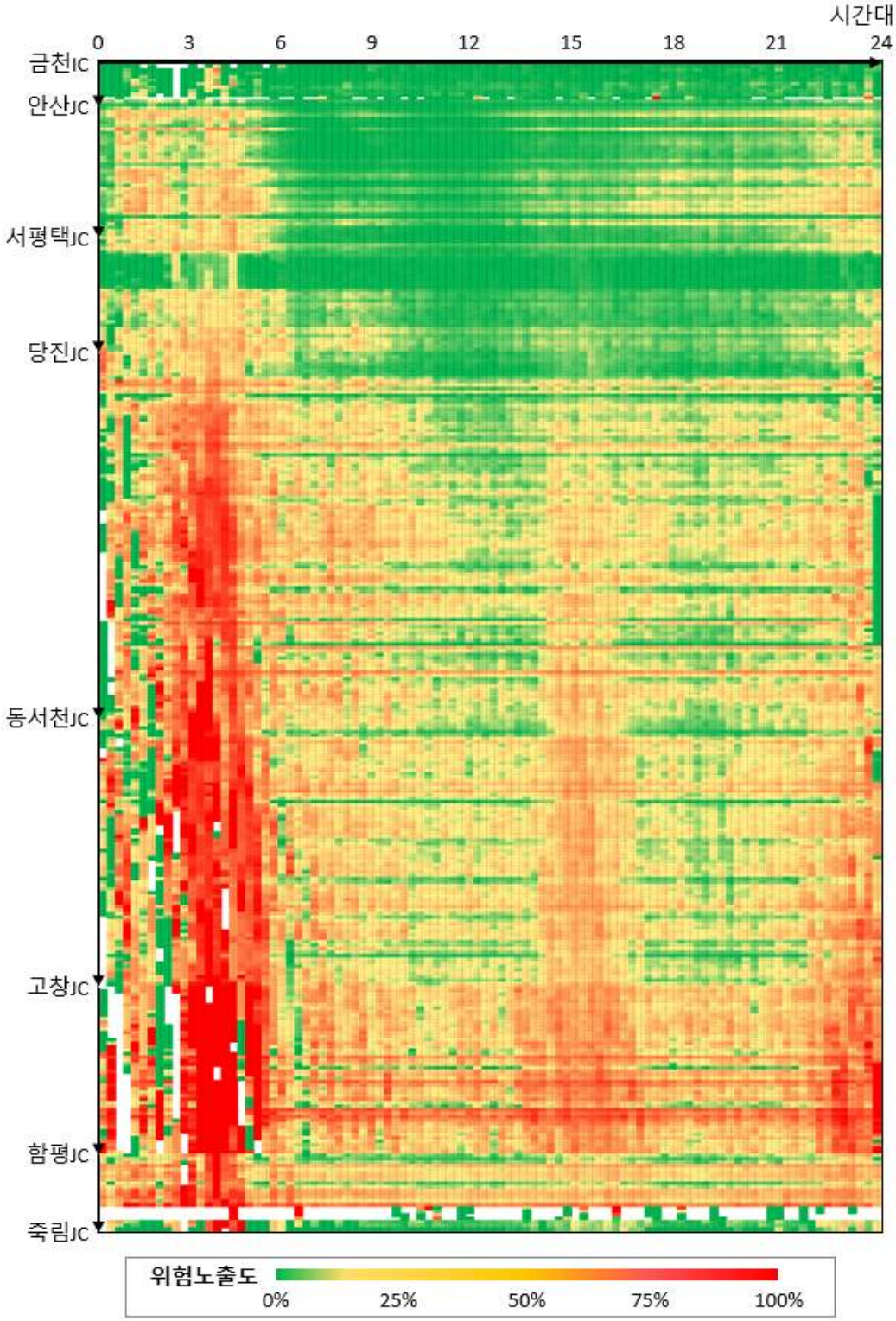
피로과속 융합 분석지표인 SUE를 기반으로 위험노출맵을 작성하여 도로구간 및 시간대별로 피로 또는 과속의 위험도를 분석하였다. 평일과 주말의 피로 또는 과속 위험노출맵은 각각 <그림 5-24>, <그림 5-25>와 같다. 이 지표는 개별 차량의 운전자요인(피로, 과속) 사고위험성을 의미하며, 두 가지 요인 중 어떠한 요인이든 위험한 상태에 대한 노출도를 나타낸다. 따라서 피로 또는 과속 위험노출맵은 피로 위험노출맵과 과속 위험노출맵이 병합된 형태로 나타났다.

시간대별로 보면, 피로 노출도가 높은 새벽 시간대와 이른 오후 시간대, 그리고 밤 10시 이후 시간대에 위험도가 높은 것으로 분석되었다. 동시에 과속 노출도가 높게 나타났던 교통량이 적은 시간대에도 위험도가 높게 분석되어, 밤 10시 이후부터 오전 6시까지 전체 시간대에 걸쳐 높은 위험도를 가지는 것으로 나타났다.

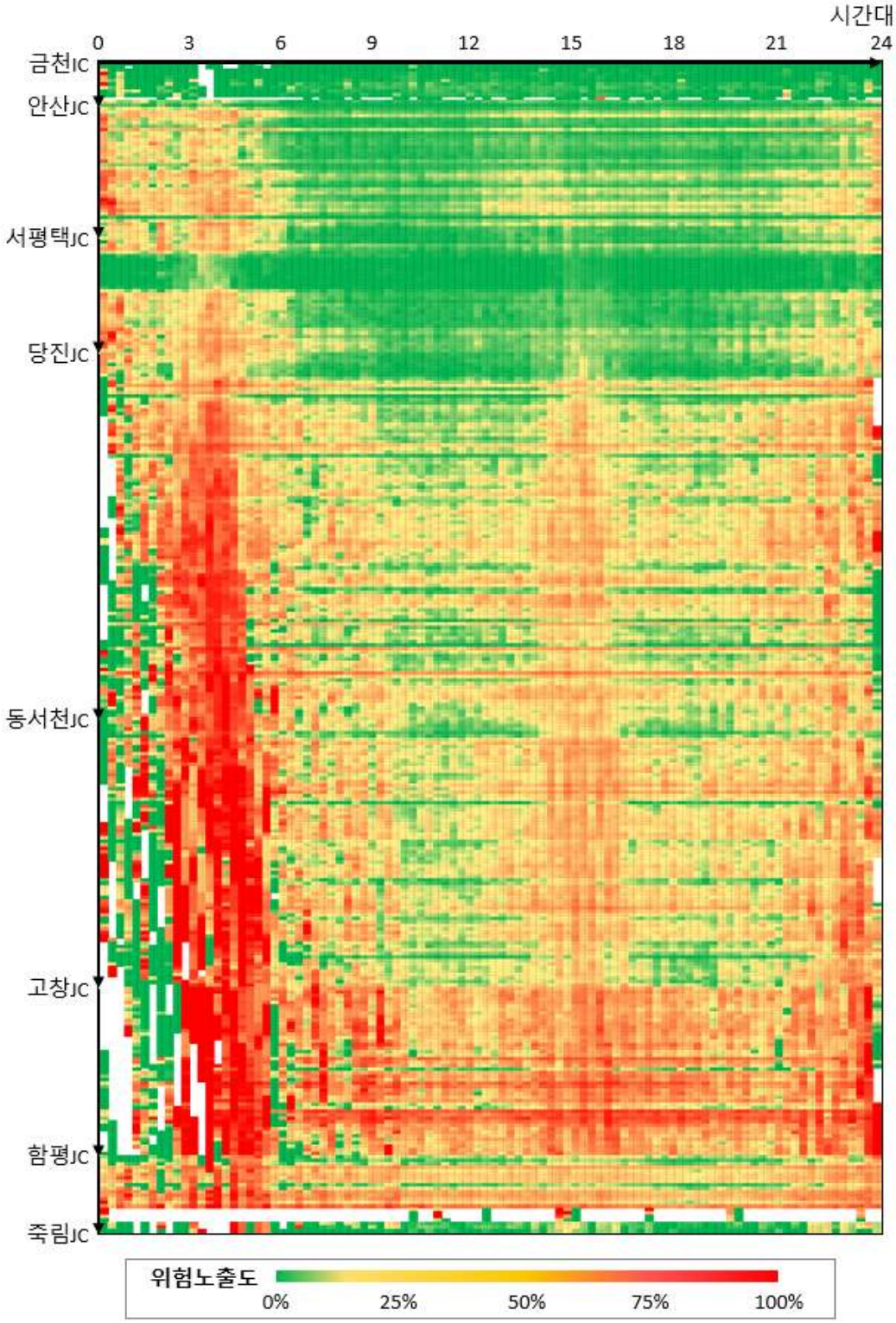
구간별로 살펴보면, 피로 위험노출맵과 같이 당진JC 이후 구간에서부터 위험도가 점차 높아지는 특징을 보이며, 과속단속지점(또는 구간)의 위험도는 다소 낮은 현상을 보이고 있다. 특히, 서해안고속도로 내에서 위험도가 가장 높은 구간은 고창JC에서 함평JC까지의 구간으로 나타났으며, 해당 구간은 24시간 내내 다른 구간에 비해 높은 위험도를 지니고 있는 것으로 분석되었다.

평일과 주말의 위험노출맵은 서로 유사한 형태로 나타났다. 그러나 평일은 시간의 흐름에 따른 위험도 변화가 비교적 적은 반면, 주말에는 15분 단위시간마다 위험도가 더 크게 변하는 경향을 보인다.

피로 또는 과속 위험노출맵을 통해 교통사고의 주요 원인인 피로와 과속의 전체적인 위험도를 분석할 수 있다. 즉, 요인에 관계없이 어느 도로구간이 어느 시간대에 사고위험성이 높은지 판단하는데 도움이 된다. 따라서 세부적인 안전정책을 계획하기 전에 전반적인 위험노출도를 파악하기 위한 용도로 본 위험노출맵을 활용할 수 있을 것으로 판단된다.



<그림 5-24> 피로 또는 과속 위험노출맵(평일)



<그림 5-25> 피로 또는 과속 위험노출맵(주말)

6) 소결

시·공간 위험노출맵은 실제 차량들의 통행궤적을 기반으로 운전 피로와 과속 위험도를 분석하여 시각적으로 표현하였다. 위험노출맵은 시간대와 도로구간별로 사고발생 가능성을 분석하여 위험구간의 운전자들에게 위험정보를 적시적으로 제공함으로써 운전자 스스로 안전운전을 하도록 유도하고, 결과적으로 사고위험성을 낮추는 목적으로 활용할 수 있다. 이는 TAAS(교통사고분석시스템)에서 서비스 중인 위험도로예보시스템이나 한국도로공사의 사고잦은곳에 대한 정보제공과 같이 과거의 사고이력을 기반으로 하는 서비스와 차별성이 있다. 기하구조나 기상조건 등 도로운행환경에 의한 사고는 위험한 도로구간을 특정할 수 있는 반면에, 최근 교통사고의 약 70% 비중을 차지하는 운전자요인에 의한 사고는 발생지점이 특정되지 않는 경우가 많다. 즉, 개별 운전자가 위험을 인지하고 안전운전을 하는 것이 사고를 예방하는 가장 효과적인 방법이다.

위험노출맵 분석은 다음과 같은 한계가 존재한다. 첫째, 시간대와 도로구간별 위험도를 과거 통행이력 자료를 활용한 패턴분석과 같은 방법으로 산정하기 때문에 실시간 위험도가 반영되지 않는다. 이는 과거의 기상자료를 이용하여 기상예보를 제공하는 것과 유사하다. 그러나 고속도로의 통행패턴(기종점별 통행량, TLFD 등)은 평일이나 주말, 명절, 휴가철과 같이 구분할 경우 통행특성이 유사하게 나타난다. 따라서 위험노출맵을 이용하여 특정 시간대 및 구간에 대한 일반적인 피로·과속 위험상태를 파악할 수 있다. 둘째, 위험노출맵의 정확성은 분석자료의 표본률에 의존하기 때문에 표본률이 너무 낮을 경우 분석결과의 신뢰성을 보장하기 어렵다. 분석시간대와 도로구간을 세분화할수록 교통량이 적은 시간대에는 궤적 자료가 수집되지 않는 구간이 존재한다. 본 연구에서 활용한 차량 GPS 궤적 자료의 표본률은 약 1-3% 수준이며, 위험노출맵의 일부에서 결측이 나타났다. 이 문제는 전국적인 C-ITS 구축계획에 따라 차량단말기가 확대보급되고, 이에 따라 GPS 궤적 자료의 수집률이 증가하면서 더욱 정확한 위험노출맵 분석이 가능해질 것으로 전망된다.

4. 위험도 분석 (3) 개별 차량의 실시간 위험정보

1) 개요

도로구간의 사고위험도를 분석하는 최종 목표는 교통사고를 효과적으로 예방하기 위한 안전정책을 지원하는 것이다. 즉, 어느 도로구간이 위험에 노출되어 있는지 파악하여 실증적인 사고예방 서비스를 시행할 수 있도록 기초자료를 제공하는 것이다. 과거의 고속도로 교통안전관리는 사후 대책에 초점이 맞춰져 있었지만, 4차 산업혁명 시대에 맞춰 개별 차량 단위의 미시적 통행자료를 기반으로 위험도를 분석·제공함으로써 교통사고 발생 징후를 사전에 감지하고, 선제적인 대응을 할 수 있게 되면 사고를 더욱 효과적으로 저감시킬 수 있다.

여기서는 운전 피로 및 과속 분석 방법론을 활용하여 사고예방 정책에 활용할 수 있는 개별 차량의 실시간 위험도 정보제공 방안을 제안하고자 한다. 운전자 요인의 교통사고는 기본적으로 위험운전행태에 의해 발생하기 때문에 피로상태로 운전 중이거나 과속 중인 특정 위험운전자와 그 위험에 노출되어 있는 주변의 익명 운전자들에게 내비게이션과 해당 구간에 설치된 VDS를 통해 사고위험 정보를 직접적으로 전달하는 것이 사고를 예방할 수 있는 효과적인 방안이 될 수 있다. 사고 위험도에 따라 정보를 제공하는 대상은 <그림 5-26>과 같이 정의한다.

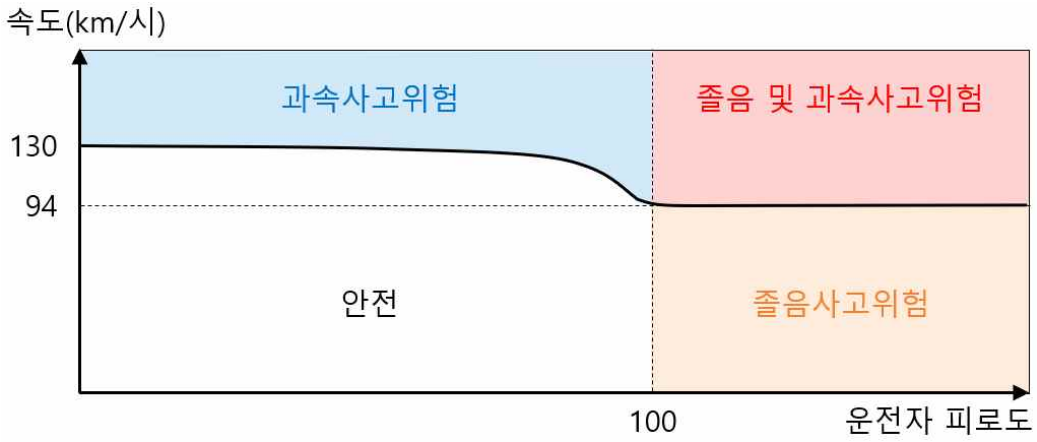
구분	개별 차량의 실시간 위험정보 제공	
위험	주변 운전자	특정 위험운전자
	위험운전자 주변의 운전자 ➔ 방어운전을 위한 위험 주의	피로·과속 위험도가 높은 상태의 운전자 ➔ 위험운전자 본인에게 위험 경고
주의	특정 위험운전자	
	피로·과속 위험도가 다소 높은 상태의 운전자 ➔ 위험운전자 본인에게 위험 주의	

<그림 5-26> 위험노출도에 따른 위험정보 제공 대상

2) 개별 차량 실시간 위험상태 정의

개별 차량의 실시간 위험도는 내비게이션이 장착된 차량의 GPS 자료를 실시간으로 분석하여 운전 피로와 속도를 측정한다. 여기서, 위험도의 상태분류는 <그림 5-27>과 같이 운전 피로와 속도에 따라 안전, 과속사고위험, 졸음사고위험, 졸음 및 과속사고위험 등 4가지 상태로 정의한다. 그리고 이들 상태 간 경계기준은 본 연구의 피로과속 집합분석 과정에서 추정한 안전한계피로도와 안전한계속도를 적용할 수 있다.

과속사고위험의 경계기준은 합집합분석에서 추정한 안전한계속도를 적용한다. 합집합분석의 안전한계기준은 피로 또는 과속상태에서의 사고위험을 기준으로 하기 때문에 이 때의 안전한계속도는 피로하지 않은 상태에서의 위험속도와 같다. 본 연구의 피로과속 합집합분석에서 안전한계속도는 시·공간적으로 각각 133km/시와 131km/시로 추정되었으며, 성능에 큰 차이가 없으므로 적용 편의상 130km/시를 적용할 수 있다. 본 연구의 안전한계피로도는 모든 분석지표에서 101에서 104로 추정되었으며, 이는 선행연구의 결과와 일치하는 수준이다. 따라서 졸음사고위험은 운전 피로도 100을 경계기준으로 적용한다. 마지막으로 졸음 및 과속사고위험의 경계속도는 교집합분석의 결과인 94km/시를 적용한다.

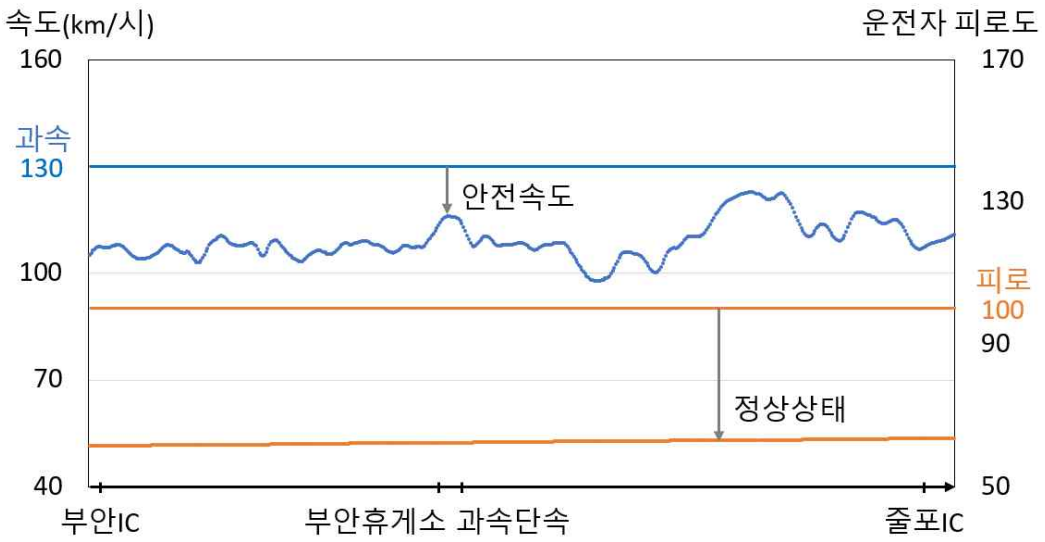


<그림 5-27> 개별 차량 실시간 위험상태 정의

3) 개별 차량 실시간 위험도 사례분석

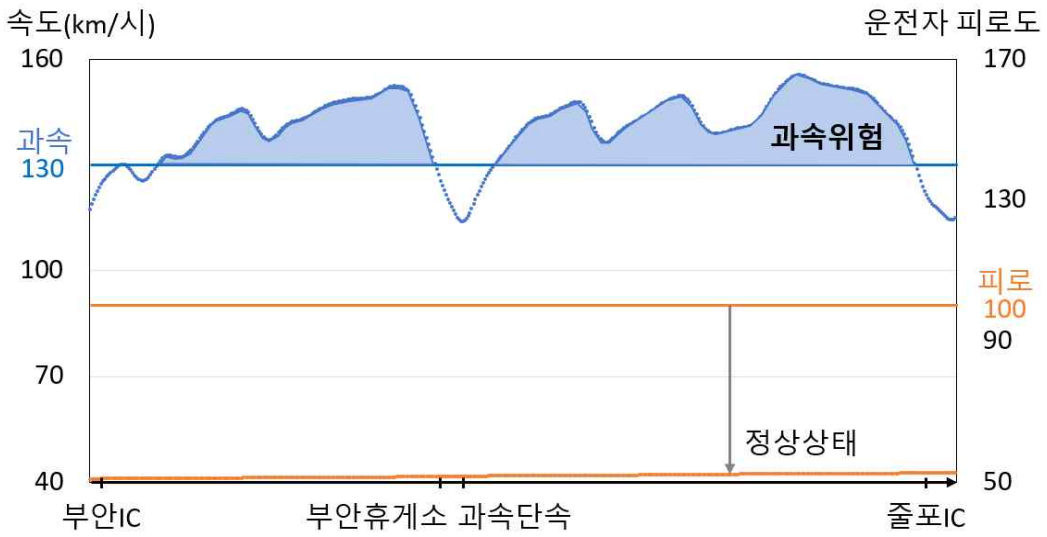
현 시점에서는 개별 차량의 자료를 실시간으로 활용할 수 있는 여건이 마련되어 있지 않다. 하지만 향후 사고예방을 위한 정책적 노력으로 내비게이션 회사가 자료를 협조하거나 이용자의 안전을 위해 자체 서비스를 개발할 경우 본 연구의 방법론을 적용하여 개별 차량에 대한 실시간 위험도 정보를 제공할 수 있다. 여기서는 앞에서 정의한 4가지 상태(안전, 과속, 졸음, 졸음 및 과속)에 해당하는 차량 GPS 궤적을 이용하여 운전 피로 및 속도에 따른 실시간 위험도를 분석하고, 그 결과를 제시한다. 사례분석의 대상구간은 피로 또는 과속 위험성이 높은 구간으로 분석되었던 부안IC에서 줄포IC까지의 콘존구간을 선정하였다.

실제 부안IC-줄포IC 구간을 통행한 차량의 속도와 운전 피로를 분석하여 실시간 위험도를 평가하였다. <그림 5-28>은 이 구간 내에서 안전운전을 한 차량의 위험도 평가사례이다. 이 운전자의 피로도는 60-65 수준으로 정상상태이며 속도는 130km/시 이하로 주행하여 피로나 과속사고의 위험성이 낮다. 따라서 이 운전자에게는 내비게이션을 통해 '안전' 상태로 실시간 위험도를 안내할 수 있다.



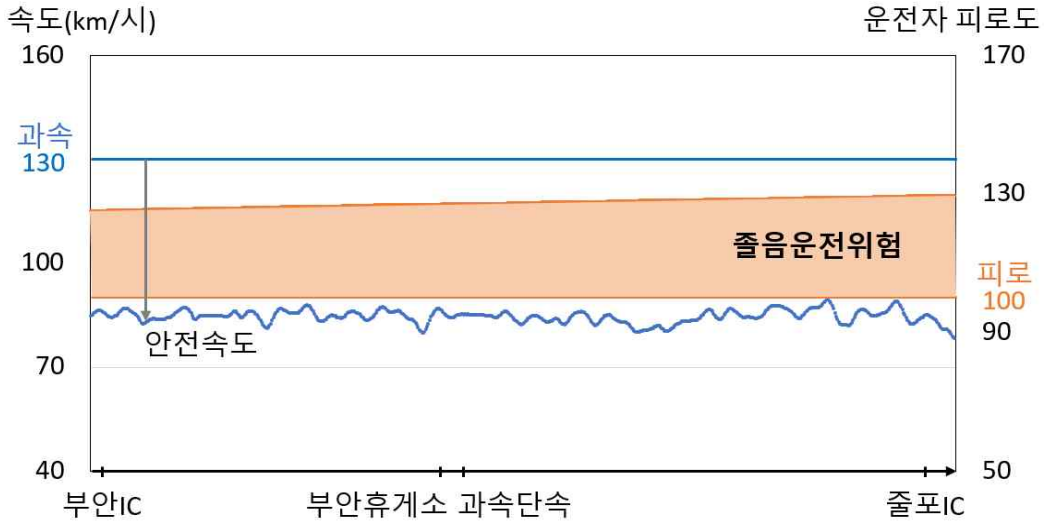
<그림 5-28> 개별 차량 실시간 위험도 (1) 안전운전 사례

<그림 5-29>는 과속사고위험이 있는 사례이다. 이 차량의 운전 피로는 50-55 수준으로 정상상태이지만 과속단속지점을 제외한 대부분의 구간에서 130km/시를 초과하는 속도로 주행하였다.



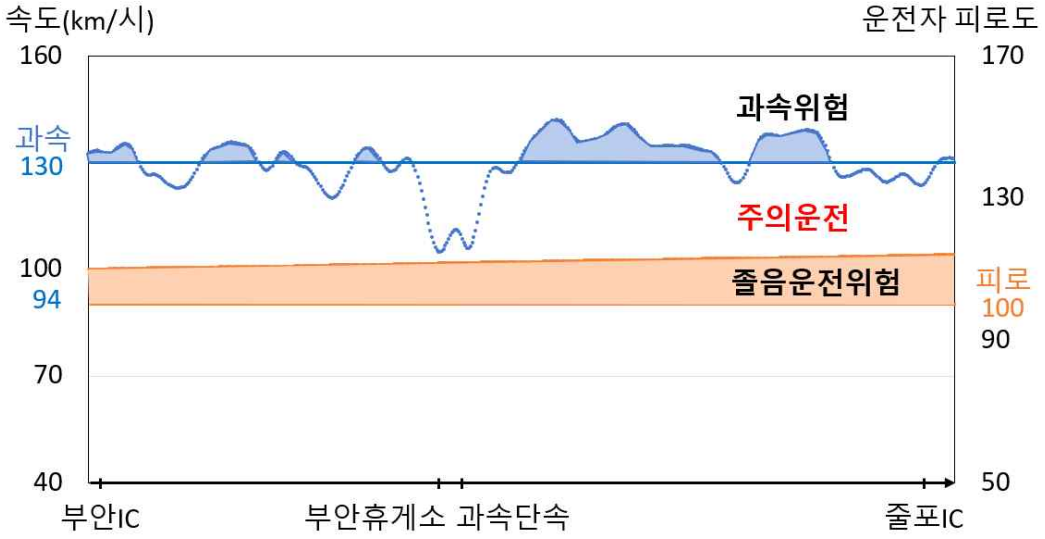
<그림 5-29> 개별 차량 실시간 위험도 (2) 과속사고위험 사례

<그림 5-30>은 졸음사고위험이 있는 사례이다. 이 차량은 전구간을 80-90km/시로 저속운전하였지만 운전 피로가 130에 가까워 졸음운전의 위험성이 높은 상태로 주행하였다.



<그림 5-30> 개별 차량 실시간 위험도 (3) 졸음사고위험 사례

마지막으로 졸음 및 과속사고위험이 있는 사례는 <그림 5-31>과 같다. 이 차량은 전구간에서 운전 피로도가 100을 초과하는 피로상태로 운전하여 졸음사고위험이 있으며, 정상상태의 과속 경계기준인 130km/시를 초과하는 속도로 주행하여 상당히 위험한 상태이다. 만약 이와 같은 주행궤적이 실시간으로 포착될 경우 내비게이션을 통해 다음과 같은 정보를 제공할 수 있다. 현재 운전자가 피로한 상태이므로 안전한계속도인 94km/시 이하로 주행하도록 권장하고, 휴식을 취할 수 있도록 가까운 휴게소나 졸음쉼터 정보를 안내한다.



<그림 5-31> 개별 차량 실시간 위험도 (4) 졸음 및 과속사고위험 사례

4) 소결

일반적으로 운전자들은 본인이 얼마나 피로한 상태인지 자각하지 못하는 경우가 많다(Anund et al., 2018). 따라서 개별 차량에 대한 실시간 위험도를 객관적으로 측정하여 위험정보를 제공하는 것은 자신의 상태를 스스로 확인할 수 있는 계기를 제공하는 것이며, 이를 통해 안전하게 운전하도록 유도할 수 있다. 또한 위험차량과 동일한 구간을 통행하고 있는 운전자들에게도 주변에 졸음운전 또는 과속차량이 있다는 정보를 제공하면 미리 경계하고 방어운전을 하여 사고를 예방할 수 있다.

제6장 결론 및 향후 연구

제1절 결론

교통 사망사고 및 심각한 사고의 주요 발생원인은 졸음운전과 과속이다. 졸음운전은 기본적으로 장시간 운전을 할 때 피로가 누적되면서 발생되지만, 그 외에도 새벽이나 점심식사 이후에 생리적인 현상으로 졸음이 올 수 있다. 실제로 졸음운전으로 인한 사고를 시간대별로 살펴보면 새벽 2-5시 사이와 오후 1-4시 사이에 가장 많이 발생하는 것으로 나타났다. 이러한 원인은 하루 24시간을 주기로 하는 생체리듬의 영향으로 볼 수 있다. 그러나 기존의 교통안전 연구들은 대부분 운전 피로를 운전 지속시간이나 주행거리만을 변수로 고려하였고, 생체리듬의 영향을 함께 고려한 연구가 거의 없는 실정이다. 과속은 차량 이동의 기본 요소인 속도와 연관된 위험요소로서 과거부터 지속적으로 연구되고 있다. 그러나 과거 연구에서 활용한 자료들은 대부분 ITS 교통정보수집체계로 수집하는 집계자료이다. 시간 또는 공간적인 기준으로 집계된 속도자료는 개별 통행특성을 반영하지 못하기 때문에 실시간으로 크게 변동하는 동적 과속행태를 분석하기에 한계가 있었다.

최근 통신기술이 발달하면서 차량 GPS가 전국적으로 보급되고 있으며, 전국 도로망을 통행하는 차량들로부터 교통자료를 수집할 수 있는 기회가 제공되었다. 하지만 아직까지 개인정보보호와 같은 사안으로 인해 자료 구득이 쉽지 않아 연구에 적극적으로 활용되지 못하고 있다. 그럼에도 불구하고 연구자들에 의해 GPS 자료를 이용한 연구가 일부 수행되고 있으며, 집계 기반 분석의 한계를 넘어 비집계 기반의 동적 교통특성을 분석하고자 시도하고 있다. 교통안전 분야에서도 사고예측 모형을 개선하고 데이터 기반의 분석기법을 적용하면서 사고를 더 잘 설명하기 위해 연구하고 있으며 성과를 높이고 있다. 그러나 집계 기반의 설명변수만으로 복합요인의 사고를 더 잘 설명할 수 없었으며, 개별 차량 기반의 동적 운전 피로와 과속행

태 등의 운전자요인을 반영할 필요가 있음을 인지하고 있었다.

이에 본 연구는 내비게이션 기반의 차량 GPS 궤적 자료를 이용하여 개별 차량 단위의 동적 운행특성을 분석하고, 고속도로 구간의 운전 피로와 과속 현황을 사실적으로 반영할 수 있는 분석지표를 고안하였다. 특히 운전자행태에 따른 사고위험성을 보다 실질적인 관점에서 접근하였으며, 최적화 알고리즘을 통해 사고위험성이 높아지는 과속의 기준속도(안전한계속도)와 운전 피로 상태의 경계기준(안전한계피로도)을 도출해 내는 방법론을 정립하였다. 이를 기반으로 운전 피로와 과속의 위험노출도를 개별적으로 분석함과 동시에 피로한 상태에서 과속으로 주행할 때의 위험성과 피로 또는 과속의 위험성과 같이 두 위험요소의 융합 분석 방법론을 개발하여 제시하였다. 그리고 모든 분석지표들을 시간과 공간적 관점으로 구분하여 산정하여 지표의 활용목적에 따라 시간적 지표 또는 공간적 지표를 이용할 수 있으며, 두 관점을 모두 활용할 경우 더욱 안정적으로 위험도를 측정할 수 있다.

본 연구에서 제시한 지표들은 도로구간별 실제 사고건수를 종속변수로 사고예측 모형을 구축하여 지표의 성능을 검증하였으며 그 결과, 피로 노출도는 84.9%, 과속 노출도는 83.4%, 피로과속 융합 노출도는 85.6%까지 사고를 설명할 수 있는 것으로 분석되었다. 선행연구들이 개발한 사고예측 개선모형들의 설명력이 60% 이하였음을 고려할 때, 운전자 특성 지표를 이용한 선형회귀분석의 결과가 우수한 설명력을 보였다는 점으로부터 운전자 행태가 사고에 기여하는 바가 크다는 것을 시사하는 바이다.

각 지표들을 기반으로 1km 단위구간 및 15분 시간대별 위험도를 분석하여 위험노출맵으로 시각화함으로써 실무에서 안전정책을 마련할 때 활용할 수 있는 방안을 제시하였다. 또한 교통사고 위험도 분석결과를 이용하여 사고위험 정보 서비스를 제공하는 방안을 제시하였다. 사고위험도가 높은 구간에서는 VMS를 통해 해당 도로를 통행하는 다수의 운전자에게 위험정보를 제공하며, 또한 개별 차량의 실시간 GPS 궤적을 이용하여 피로상태(순간졸음상태) 또는 과속 중인 차량의 내비게이션을 통해 위험정보를 적시적으로 제공하는 실용화 방안을 제안하였다.

제2절 향후 연구

운전자 요인으로 인한 교통사고를 더욱 효과적으로 예방하기 위해서 운전 피로 및 과속에 대한 지속적인 향후 연구가 필요하다.

첫째, 운전자들의 피로상태를 더 정확히 측정하기 위하여 사람들의 다양한 인적특성이 반영된 피로도 추정모형이 개발되어야 한다. 본 연구에서 제시한 운전 피로 지표는 생체리듬과 운전지속시간, 휴식시간을 변수로 하는 모형으로 측정한 피로도를 기초자료로 사용하였다. 그러나 이 모형은 운전자 생체신호 측정장비를 이용한 실험주행조사 자료를 기반으로 보편적인 사람들의 생활패턴에 부합하도록 국외에서 개발된 모형이다. 이와 같은 운전 피로 측정연구는 아직까지 국내에서 수행된 적이 없다. 또한 사람들의 생활패턴에 따라 생체 피로도가 다르고 주행도로환경에 따라 피로가 누적되는 정도가 다를 수 있다(즉, 고속도로에서 단조로운 운전을 할 때 더 빠르게 피로해짐). 따라서 국내 도로를 주행하는 운전자들을 대상으로 실험조사를 수행하여 다양한 패턴을 가진 사람들에 대한 생체 및 운전 피로 자료를 수집하고, 이를 기반으로 피로도를 추정하는 모형개발 연구가 필요하다. 국내 사람들의 생활패턴과 도로환경을 반영한 피로도 추정모형이 개발된다면 본 연구에서 개발한 피로 분석 지표가 국내 교통사고 위험성을 더 잘 설명할 수 있고, 이 정보를 통해 사고예방 정책의 효용을 높일 수 있다.

둘째, 차량 GPS 자료의 수집과 가공단계 모두에서 오차를 줄이고 차로 수준까지 정교화할 수 있는 기반기술이 발전되어야 한다. 현재 차량 GPS 자료의 오차를 보정하고 맵매칭 등을 통해 정교화하는 기술이 지속적으로 연구되고 있으나, 차로 수준까지 정밀한 위치수집이 가능해져야 차량의 속도 정보에 대한 신뢰성을 확보할 수 있다. 실시간으로 과속 행태를 분석하고 운전자에게 위험정보를 제공하기 위해서는 더욱 정확한 속도자료가 확보되어야 한다.

셋째, 고속도로의 다양한 노선과 국도 등 다른 위계의 도로에 대한 운전 피로 및 과속 분석이 필요하다. 본 연구의 분석지표들은 모두 차량

GPS 궤적 자료를 기반으로 산정하기 때문에 기본적으로 공간에 구애받지 않으며, 전국 도로망에 대해서 적용이 가능하다. 그러나 도로구간마다 통행특성이 다르고 사고원인에 따른 사고발생 확률이 다르기 때문에 모든 구간에서 분석지표들의 사고 설명력이 유의한 결과가 도출되지 않을 수 있다. 따라서 여러 고속도로 노선과 국도 등 다른 도로구간의 자료를 적용하여 분석지표를 산정하고, 유의한 수준으로 사고를 설명할 수 있는지 공간적 전이성에 대한 검토가 필요하다. 또한 다른 공간에서 산정된 분석지표의 사고 설명력을 기반으로 운전 피로와 과속행태가 해당 도로구간에서 사고를 얼마나 유발하고 있는지 비교분석할 수 있다.

마지막으로 효과적으로 사고를 예방하기 위해서 실제 도로구간의 운전 피로와 과속행태를 분석한 결과를 어떤 방식으로 활용할 수 있을지 실행방안을 강구해야 한다. 본 연구에서는 도로구간별 사고예측 모형, 시·공간 위험노출맵과 같은 거시적 관점에서 개별 차량에 대한 사고위험정보를 제공하는 미시적 관점까지 세 가지 활용방안을 제시하였다. 이외에도 더욱 효과적으로 적용가능한 활용방안이 존재할 수 있으므로 이에 대한 실용 측면의 연구가 필요하다.

참 고 문 헌

도로교통공단, 1999년-2020년 교통사고 통계분석, 1999-2020.

Aarts, L., & van Schagen, I. (2006). Driving speed and the risk of road crashes: A review. Accident Analysis & Prevention, 38(2), 215-224. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.aap.2005.07.004

Abdel-Aty, M., & Pande, A. (2005). Identifying crash propensity using specific traffic speed conditions. Journal of Safety Research, 36(1), 97-108. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jsr.2004.11.002

Abdelwahab, H. T., & Abdel-Aty, M. A. (2001). Development of Artificial Neural Network Models to Predict Driver Injury Severity in Traffic Accidents at Signalized Intersections. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 1746(1), 6-13. https://doi.org/10.3141/1746-02

Abdulhafedh, A. (2016). Crash Frequency Analysis. Journal of Transportation Technologies, 06(04), 169-180. https://doi.org/10.4236/jtts.2016.64017

Åkerstedt, T., & Folkard, S. (1996). Predicting duration of sleep from the three process model of regulation of alertness. Occupational and Environmental Medicine, 53(2), 136-141. https://doi.org/10.1136/oem.53.2.136

Åkerstedt, T., & Folkard, S. (1997). The Three-Process Model of Alertness and Its Extension to Performance, Sleep Latency, and Sleep Length. Chronobiology International, 14(2), 115-123. https://doi.org/10.3109/07420529709001149

Åkerstedt, T., & Kecklund, G. (2001). Age, gender and early morning highway accidents. Journal of Sleep Research, 10(2), 105-110. https://doi.org/10.1046/j.1365-2869.2001.00248.x

Ambros, J., Elgner, J., Turek, R., & Valentová, V. (2020). Where and when do drivers speed? A feasibility study of using probe

vehicle data for speeding analysis. Archives of Transport, 53(1), 103-113. https://doi.org/10.5604/01.3001.0014.1747

Ambros, J., Valentová, V., Gogolín, O., Andrášik, R., Kubeček, J., & Bíl, M. (2017). Improving the Self-Explaining Performance of Czech National Roads. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2635(1), 62-70. https://doi.org/10.3141/2635-08

American Association of State Highways and Transportation Officials, (2010). Highway Safety Manual (1st edn). Transportation Research Board of the National Academies: Washington, D.C.

Anastasopoulos, P. C., & Mannering, F. L. (2009). A note on modeling vehicle accident frequencies with random-parameters count models. Accident Analysis & Prevention, 41(1), 153-159. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.aap.2008.10.005

Anastasopoulos, P. C., Mannering, F. L., Shankar, V. N., & Haddock, J. E. (2012). A study of factors affecting highway accident rates using the random-parameters tobit model. Accident Analysis & Prevention, 45, 628-633. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.aap.2011.09.015

Anund, A., Ahlström, C., Fors, C., & Åkerstedt, T. (2018). Are professional drivers less sleepy than non-professional drivers? Scandinavian Journal of Work, Environment & Health, 44(1), 88-95. https://doi.org/10.5271/sjweh.3677

Balkin, T. J., Horrey, W. J., Graeber, R. C., Czeisler, C. A., & Dinges, D. F. (2011). The challenges and opportunities of technological approaches to fatigue management. Accident Analysis & Prevention, 43(2), 565-572. https://doi.org/10.1016/j.aap.2009.12.006

Bar-Gera, H. (2007). Evaluation of a cellular phone-based system for measurements of traffic speeds and travel times: A case study from Israel. Transportation Research Part C: Emerging Technologies,

15(6), 380-391. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.trc.2007.06.003

Bar-Gera, H., Schechtman, E., & Musicant, O. (2017). Evaluating the effect of enforcement on speed distributions using probe vehicle data. Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour, 46, 271-283. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.trf.2016.07.011

Barua, S., El-Basyouny, K., & Islam, M. T. (2016). Multivariate random parameters collision count data models with spatial heterogeneity. Analytic Methods in Accident Research, 9, 1-15. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.amar.2015.11.002

Bekhor, S., Lotan, T., Gitelman, V., & Morik, S. (2013). Free-Flow Travel Speed Analysis and Monitoring at the National Level Using Global Positioning System Measurements. Journal of Transportation Engineering, 139(12), 1235-1243. https://doi.org/10.1061/(asce)te.1943-5436.0000607

Borbély, A. A. (1980). Sleep: Circadian rhythm versus recovery process. In: Koukkou, M., Lehmann D., Angst J. (eds) Functional states of the brain: their determinants. Elsevier, Amsterdam, 151-161.

Borbély, A. A. (1982). A two-process model of sleep regulation. Human Neurobiology, 195-204.

Borghini, G., Astolfi, L., Vecchiato, G., Mattia, D., & Babiloni, F. (2014). Measuring neurophysiological signals in aircraft pilots and car drivers for the assessment of mental workload, fatigue and drowsiness. Neuroscience & Biobehavioral Reviews, 44, 58-75. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2012.10.003

Brown, I. (1995). Methodological issues in driver fatigue research. In L. Hartley (Ed.), Fatigue & driving. London: Taylor & Francis.

Caliendo, C., De Guglielmo, M. L., & Guida, M. (2016). Comparison and analysis of road tunnel traffic accident frequencies and

rates using random-parameter models. Journal of Transportation Safety & Security, 8(2), 177-195. https://doi.org/10.1080/19439962.2015.1013167

Caliendo, C., Guida, M., & Parisi, A. (2007). A crash-prediction model for multilane roads. Accident Analysis & Prevention, 39(4), 657-670. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.aap.2006.10.012

Chang, H.-H., & Cheon, S.-H. (2019). The potential use of big vehicle GPS data for estimations of annual average daily traffic for unmeasured road segments. Transportation, 46(3), 1011-1032. https://doi.org/10.1007/s11116-018-9903-6

Chang, H.-H., & Yoon, B.-J. (2020). Potential of Highly Automated Vehicles for Monitoring Fatigued Drivers and Explaining Traffic Accidents on Motorway Sections. Journal of Advanced Transportation, 2020, 3610923. https://doi.org/10.1155/2020/3610923

Chang, L.-Y. (2005). Analysis of freeway accident frequencies: Negative binomial regression versus artificial neural network. Safety Science, 43(8), 541-557. https://doi.org/10.1016/j.ssci.2005.04.004

Chang, L.-Y., & Chen, W.-C. (2005). Data mining of tree-based models to analyze freeway accident frequency. Journal of Safety Research, 36(4), 365-375. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jsr.2005.06.013

Chipman, M., & Jin, Y. L. (2009). Drowsy drivers: The effect of light and circadian rhythm on crash occurrence. Safety Science, 47(10), 1364-1370. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ssci.2009.03.005

Chipman, M. L., MacGregor, C. G., Smiley, A. M., & Lee-Gosselin, M. (1992). Time vs. distance as measures of exposure in driving surveys. Accident Analysis & Prevention, 24(6), 679-684. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0001-4575(92)90021-A

De Bellis, E., Schulte-Mecklenbeck, M., Brucks, W., Herrmann, A., & Hertwig, R. (2018). Blind haste: As light decreases, speeding increases. PLOS

ONE, 13(1), e0188951. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0188951

Delen, D., Sharda, R., & Bessonov, M. (2006). Identifying significant predictors of injury severity in traffic accidents using a series of artificial neural networks. Accident Analysis & Prevention, 38(3), 434-444. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.aap.2005.06.024

Dinges, D. F. (1995). An overview of sleepiness and accidents. Journal of Sleep Research, 4, 4-14. https://doi.org/10.1111/j.1365-2869.1995.tb00220.x

Du, H., Zhao, X., Zhang, X., Zhang, Y., & Rong, J. (2015). Effects of Fatigue on Driving Performance Under Different Roadway Geometries: A Simulator Study. Traffic Injury Prevention, 16(5), 468-473. https://doi.org/10.1080/15389588.2014.971155

Elvik, R. (2009). The Power Model of the relationship between speed and road safety. Update and new analyses. Report 1034/2009, Institute of Transport Economics, Oslo, Norway.

Elvik, R., Christensen, P., & AmunSSEn, A. (2004). Speed and road accidents. An evaluation of the Power Model. TØI report 740/2004. Institute of Transport Economics TOI, Oslo.

Elvik, R., & Mysen, A. (1999). Incomplete Accident Reporting: Meta-Analysis of StuSIEs Made in 13 Countries. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 1665(1), 133-140. https://doi.org/10.3141/1665-18

Familar, R., Greaves, S., & Ellison, A. (2011). Analysis of Speeding Behavior. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2237(1), 67-77. https://doi.org/10.3141/2237-08

Fu, R., Wang, H., & Zhao, W. (2016). Dynamic driver fatigue detection using hidden Markov model in real driving condition. Expert Systems with Applications, 63, 397-411. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.eswa.2016.06.042

Garber, N. J., & Ehrhart, A. A. (2000). Effect of Speed, Flow, and Geometric Characteristics on Crash Frequency for Two-Lane Highways. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 1717(1), 76-83. https://doi.org/10.3141/1717-10

Garber, N. J., & Gadiraju, R. (1989). Factors affecting speed variance and its influence on accidents. Transportation research record, 1213, 64-71. http://dx.doi.org/

Gastaldi, M., Rossi, R., & Gecchele, G. (2014). Effects of Driver Task-related Fatigue on Driving Performance. Procedia - Social and Behavioral Sciences, 111, 955-964. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2014.01.130

Gawron, V. J., French, J., & Funke, D. (2001). An overview of fatigue. In Stress, workload, and fatigue. (pp. 581-595). Lawrence Erlbaum Associates Publishers.

Geedipally, S. R., & Lord, D. (2010). Investigating the effect of modeling single-vehicle and multi-vehicle crashes separately on confidence intervals of Poisson - gamma models. Accident Analysis & Prevention, 42(4), 1273-1282. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.aap.2010.02.004

Greibe, P. (2003). Accident prediction models for urban roads. Accident Analysis & Prevention, 35(2), 273-285. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0001-4575(02)00005-2

Guo, M., Li, S., Wang, L., Chai, M., Chen, F., & Wei, Y. (2016). Research on the Relationship between Reaction Ability and Mental State for Online Assessment of Driving Fatigue. International Journal of Environmental Research and Public Health, 13(12), 1174. https://doi.org/10.3390/ijerph13121174

Guo, Q., Li, L., & Ban, X. (2019). Urban traffic signal control with connected and automated vehicles: A survey. Transportation

Research Part C: Emerging Technologies, 101, 313-334. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.trc.2019.01.026

Hargutt, V., & Krüger, H. -P. (2000). Eyelid movements and their predictive value for fatigue stages. International Conference of Traffic and Transport Psychology (ICTTP).

Horner, J. A., & Foster, S. C. (1995). Can exercise overcome sleepiness?. Sleep Res. 24A, 437.

Horne, J. A., & Reyner, L. A. (1995). Driver sleepiness. Journal of Sleep Research, 4, 23-29. https://doi.org/10.1111/j.1365-2869.1995.tb00222.x

Horne, J. A., & Reyner, L. A. (1996). Counteracting driver sleepiness: Effects of napping, caffeine, and placebo. Psychophysiology, 33(3), 306-309. https://doi.org/10.1111/j.1469-8986.1996.tb00428.x

Horne, J. A., & Reyner, L. A. (2001). Beneficial effects of an "energy drink" given to sleepy drivers. Amino Acids, 20(1), 83-89. https://doi.org/10.1007/s007260170068

Hossain, M., & Muromachi, Y. (2012). A Bayesian network based framework for real-time crash prediction on the basic freeway segments of urban expressways. Accident Analysis & Prevention, 45, 373-381. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.aap.2011.08.004

Hosseinpour, M., Yahaya, A. S., & Sadullah, A. F. (2014). Exploring the effects of roadway characteristics on the frequency and severity of head-on crashes: Case stuSIEs from Malaysian Federal Roads. Accident Analysis & Prevention, 62, 209-222. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.aap.2013.10.001

Hu, X., & Lodewijks, G. (2020). Detecting fatigue in car drivers and aircraft pilots by using non-invasive measures: The value of differentiation of sleepiness and mental fatigue. Journal of Safety Research, 72, 173-187. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jsr.2019.12.015

Ingre, M., Akerstedt, T., Peters, B., Anund, A., Kecklund, G., &

Pickles, A. (2006). Subjective sleepiness and accident risk avoiding the ecological fallacy. Journal of Sleep Research, 15(2), 142-148. https://doi.org/10.1111/j.1365-2869.2006.00517.x

Ivan, J. N., Wang, C., & Bernardo, N. R. (2000). Explaining two-lane highway crash rates using land use and hourly exposure. Accident Analysis & Prevention, 32(6), 787-795. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0001-4575(99)00132-3

Jing, T., Xinghao, S., Lijuan, J., Qichong, S., & Changxu, P. (2013). Experimental study of fatigue characteristics of bus drivers under the condition of consecutive driving. Journal of Transportation Safety & Security, vol. 3, pp. 87-92.

Jovanis, P. P., Wu, K.-F., & Chen, C. (2012). Effects of Hours of Service and Driving Patterns on Motor Carrier Crashes. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2281(1), 119-127. https://doi.org/10.3141/2281-15

Kaduk, S. I., Roberts, A. P. J., & Stanton, N. A. (2020). The circadian effect on psychophysiological driver state monitoring. Theoretical Issues in Ergonomics Science, 1-25. https://doi.org/10.1080/1463922x.2020.1842548

Kaduk, S. I., Roberts, A. P. J., & Stanton, N. A. (2021). The manual shift in phase: the impact of circadian phase on semi-autonomous driving. What can we learn from current understanding in manual driving? Theoretical Issues in Ergonomics Science, 22(1), 103-123. https://doi.org/10.1080/1463922x.2020.1758829

Kandelaars, K. J., Fletcher, A., Dorrian, J., Baulk, S. D., & Dawson, D. (2006). Predicting the Timing and Duration of Sleep in an Operational Setting Using Social Factors. Chronobiology International, 23(6), 1265-1276. https://doi.org/10.1080/07420520601096393

Karlaftis, M. G., & Golias, I. (2002). Effects of road geometry and traffic volumes

on rural roadway accident rates. Accident Analysis & Prevention, 34(3), 357-365. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0001-4575(01)00033-1

Klerman, E. B., Dijk, D. J., Kronauer, R. E., & Czeisler, C. A. (1996). Simulations of light effects on the human circadian pacemaker: implications for assessment of intrinsic period. American Journal of Physiology-Regulatory, Integrative and Comparative Physiology, 270(1), R271-R282. https://doi.org/10.1152/ajpregu.1996.270.1.R271

Klerman, E. B., & Hilaire, M. S. (2007). Review: On Mathematical Modeling of Circadian Rhythms, Performance, and Alertness. Journal of Biological Rhythms, 22(2), 91-102. https://doi.org/10.1177/0748730407299200

Koh, A., Jones, G. R., Spencer, J. W., & Thomas, I. (2007). Chromatic analysis of signals from a driver fatigue monitoring unit. Measurement Science and Technology, 18(3), 747-754. https://doi.org/10.1088/0957-0233/18/3/026

Kong, X., Das, S., Jha, K., & Zhang, Y. (2020). Understanding speeding behavior from naturalistic driving data: Applying classification based association rule mining. Accident Analysis & Prevention, 144, 105620. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.aap.2020.105620

Kumara, S. S. P., & Chin, H. C. (2005). Application of Poisson Underreporting Model to Examine Crash Frequencies at Signalized Three-Legged Intersections. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 1908(1), 46-50. https://doi.org/10.1177/0361198105190800106

Li, L., Jiang, R., He, Z., Chen, X., & Zhou, X. (2020). Trajectory data-based traffic flow stuSIEs: A revisit. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 114, 225-240. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.trc.2020.02.016

Li, X., Lord, D., Zhang, Y., & Xie, Y. (2008). Predicting motor vehicle crashes using Support Vector Machine models. Accident Analysis & Prevention, 40(4), 1611-1618. https://doi.org/10.1016/j.aap.2008.04.010

Li, X., Lord, D., Zhang, Y., & Xie, Y. (2008). Predicting motor vehicle crashes using Support Vector Machine models. Accident Analysis & Prevention, 40(4), 1611-1618. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.aap.2008.04.010

Lin, T. D., Jovanis, P. P., & Yang, C. Z. (1994). Time of Day Models of Motor Carrier Accident Risk, Transportation Research Record 1457, National Academy Press, Washington, DC.

Liu, P., Zhang, X., Wang, W., & Xu, C. (2011). Driver Response to Automated Speed Enforcement on Rural Highways in China. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2265(1), 109-117. https://doi.org/10.3141/2265-12

Lord, D. (2006). Modeling motor vehicle crashes using Poisson-gamma models: Examining the effects of low sample mean values and small sample size on the estimation of the fixed dispersion parameter. Accident Analysis & Prevention, 38(4), 751-766. https://doi.org/10.1016/j.aap.2006.02.001

Lord, D., Geedipally, S. R., & Guikema, S. D. (2010). Extension of the Application of Conway-Maxwell-Poisson Models: Analyzing Traffic Crash Data Exhibiting Underdispersion. Risk Analysis, 30(8), 1268-1276. https://doi.org/10.1111/j.1539-6924.2010.01417.x

Lord, D., & Mannering, F. (2010). The statistical analysis of crash-frequency data: A review and assessment of methodological alternatives. Transportation Research Part A: Policy and Practice, 44(5), 291-305. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.tra.2010.02.001

Lord, D., Washington, S. P., & Ivan, J. N. (2005). Poisson, Poisson-gamma and zero-inflated regression models of motor vehicle crashes:

balancing statistical fit and theory. Accident Analysis & Prevention, 37(1), 35-46. https://doi.org/10.1016/j.aap.2004.02.004

Ma, X., Chen, F., & Chen, S. (2015). Modeling Crash Rates for a Mountainous Highway by Using Refined-Scale Panel Data. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2515(1), 10-16. https://doi.org/10.3141/2515-02

Ma, Z., Zhang, H., Chien, S. I. J., Wang, J., & Dong, C. (2017). Predicting expressway crash frequency using a random effect negative binomial model: A case study in China. Accident Analysis & Prevention, 98, 214-222. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.aap.2016.10.012

Maher, M. J., & Summersgill, I. (1996). A comprehensive methodology for the fitting of predictive accident models. Accident Analysis & Prevention, 28(3), 281-296. https://doi.org/10.1016/0001-4575(95)00059-3

Mannering, F., Bhat, C. R., Shankar, V., & Abdel-Aty, M. (2020). Big data, traditional data and the tradeoffs between prediction and causality in highway-safety analysis. Analytic Methods in Accident Research, 25, 100113. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.amar.2020.100113

Mannering, F. L., & Bhat, C. R. (2014). Analytic methods in accident research: Methodological frontier and future directions. Analytic Methods in Accident Research, 1, 1-22. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.amar.2013.09.001

Mannering, F. L., Shankar, V., & Bhat, C. R. (2016). Unobserved heterogeneity and the statistical analysis of highway accident data. Analytic Methods in Accident Research, 11, 1-16. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.amar.2016.04.001

Maycock, G., & Hall, R. D. (1984). Accidents at 4-Arm Roundabouts. Laboratory Report LR1120. Transport Research Laboratory, Crowthorne, Berks, U.K.

McDonald, A. D., Lee, J. D., Schwarz, C., & Brown, T. L. (2018). A

contextual and temporal algorithm for driver drowsiness detection. Accident Analysis & Prevention, 113, 25-37. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.aap.2018.01.005

McEachron, D. L., & Donnelly, G. F. (2012). Timing Is Everything: A Chronobiologist's Perspective on Health, Illness, and Circadian Rhythms. Holistic Nursing Practice, 26(4). https://journals.lww.com/hnpjournal/Fulltext/2012/07000/Timing_Is_Everything__A_Chronobiologist_s.3.aspx

Miaou, S.-P. (1994). The relationship between truck accidents and geometric design of road sections: Poisson versus negative binomial regressions. Accident Analysis & Prevention, 26(4), 471-482. https://doi.org/10.1016/0001-4575(94)90038-8

Minkel, J. D., & Dinges, D. F. (2009). Circadian rhythms in sleepiness, alertness, and performance. In: Squire LR, ed. Encyclopedia of Neuroscience. Oxford: Academic Press, 965 - 970.

Mitler, M. M., Carskadon, M. A., Czeisier, C. A., Dement, W. C., Dinges, D. F., & Graeber, R. C. (1988). Catastrophes, Sleep, and Public Policy: Consensus Report. Sleep, 11(1), 100-109. https://doi.org/10.1093/sleep/11.1.100

Montella, A., Colantuoni, L., & Lamberti, R. (2008). Crash Prediction Models for Rural Motorways. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2083(1), 180-189. https://doi.org/10.3141/2083-21

Nilsson, T., Nelson, T. M., & Carlson, D. (1997). Development of fatigue symptoms during simulated driving. Accident Analysis & Prevention, 29(4), 479-488. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0001-4575(97)00027-4

Oh, J., Washington, S. P., & Nam, D. (2006). Accident prediction model for railway-highway interfaces. Accident Analysis & Prevention,

38(2), 346-356. https://doi.org/10.1016/j.aap.2005.10.004

Pan, G., Fu, L., & Thakali, L. (2017). Development of a global road safety performance function using deep neural networks. International Journal of Transportation Science and Technology, 6(3), 159-173. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijtst.2017.07.004

Park, E. S., & Lord, D. (2007). Multivariate Poisson-Lognormal Models for Jointly Modeling Crash Frequency by Severity. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2019(1), 1-6. https://doi.org/10.3141/2019-01

Pei, X., Wong, S. C., & Sze, N. N. (2012). The roles of exposure and speed in road safety analysis. Accident Analysis & Prevention, 48, 464-471. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.aap.2012.03.005

Philip, P., Sagaspe, P., Moore, N., Taillard, J., Charles, A., Guilleminault, C., & Bioulac, B. (2005). Fatigue, sleep restriction and driving performance. Accident Analysis & Prevention, 37(3), 473-478. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.aap.2004.07.007

Philip, P., Taillard, J., Guilleminault, C., Quera, S., Bioulac, B., & Ohayon, M. (1999). Long Distance Driving and Self‐Induced Sleep Deprivation among Automobile Drivers. Sleep, 22(4), 475-480. https://doi.org/10.1093/sleep/22.4.475

Phillips, R. O. (2015). A review of definitions of fatigue – And a step towards a whole definition. Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour, 29, 48-56. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.trf.2015.01.003

Powell, N. B., Schechtman, K. B., Riley, R. W., Guilleminault, C., Chiang, R. P.-Y., & Weaver, E. M. (2007). Sleepy Driver Near-Misses May Predict Accident Risks. Sleep, 30(3), 331-342. https://doi.org/10.1093/sleep/30.3.331

Qiang, J., Lan, P., & Looney, C. (2006). A probabilistic framework for

modeling and real-time monitoring human fatigue. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics - Part A: Systems and Humans, 36(5), 862-875. https://doi.org/10.1109/tsmca.2005.855922

Quddus, M. (2013). Exploring the Relationship Between Average Speed, Speed Variation, and Accident Rates Using Spatial Statistical Models and GIS. Journal of Transportation Safety & Security, 5(1), 27-45. https://doi.org/10.1080/19439962.2012.705232

Ranney, T. A., Simmons, L. A., & Masalonis, A. J. (1999). Prolonged exposure to glare and driving time: effects on performance in a driving simulator. Accident Analysis & Prevention, 31(6), 601-610. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0001-4575(99)00016-0

Richard, C., Campbell, J. L., Brown, J. L., Lichty, M. G., Chrysler, S. T., & Atkins, R. (2013). Investigating Speeding Behavior with Naturalistic Approaches. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2365(1), 58-65. https://doi.org/10.3141/2365-08

Richards, D., & Cuerden, R. (2009). The relationship between speed and car driver injury severity. Road Safety Web Publication 9, Department for Transport, London, U.K.

Riedy, S. M., Roach, G. D., & Dawson, D. (2020). Sleep - wake behaviors exhibited by shift workers in normal operations and predicted by a biomathematical model of fatigue. Sleep, 43(9). https://doi.org/10.1093/sleep/zsaa049

Riviere, C., Lauret, P., Ramsamy, J. F. M., & Page, Y. (2006). A Bayesian Neural Network approach to estimating the Energy Equivalent Speed. Accident Analysis & Prevention, 38(2), 248-259. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.aap.2005.08.008

Saeed, T. U., Hall, T., Baroud, H., & Volovski, M. J. (2019). Analyzing road crash frequencies with uncorrelated and correlated

random-parameters count models: An empirical assessment of multilane highways. Analytic Methods in Accident Research, 23, 100101. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.amar.2019.100101

Sahayadhas, A., Sundaraj, K., & Murugappan, M. (2013). Drowsiness detection during different times of day using multiple features. Australasian Physical & Engineering Sciences in Medicine, 36(2), 243-250. https://doi.org/10.1007/s13246-013-0200-6

Shankar, V., Mannering, F., & Barfield, W. (1995). Effect of roadway geometrics and environmental factors on rural freeway accident frequencies. Accident Analysis & Prevention, 27(3), 371-389. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0001-4575(94)00078-Z

Smith, B. L., Williams, B. M., & Oswald, R. K. (2002), Comparison of parametric and nonparametric models for traffic flow forecasting, Transportation Research Part C, 10, 303-321.

Soares, S., Monteiro, T., Lobo, A., Couto, A., Cunha, L., & Ferreira, S. (2020). Analyzing Driver Drowsiness: From Causes to Effects. Sustainability, 12(5), 1971. https://doi.org/10.3390/su12051971

Sun, J., & Sun, J. (2015). A dynamic Bayesian network model for real-time crash prediction using traffic speed conditions data. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 54, 176-186. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.trc.2015.03.006

Taylor, M. C., Baruya, A., & Kennedy, J. V. (2002). The relationship between speed and accidents on rural single-carriageway roads. TRL Report 511, Transport Research Laboratory, Crowthorne, Berkshire.

Taylor, M. C., Lynam, D. A., & Baruya, A. (2000). The effects of drivers' speed on the frequency of road accidents. TRL Report, No. 421. Transport Research Laboratory TRL, Crowthorne, Berkshire.

Taylor, J., Zhou, X., Rouphail, N. M., & Porter, R. J. (2015). Method for investigating intradriver heterogeneity using vehicle trajectory data: A Dynamic Time Warping approach. Transportation Research Part B: Methodological, 73, 59-80. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.trb.2014.12.009

Thiffault, P., & Bergeron, J. (2003a). Fatigue and individual differences in monotonous simulated driving. Personality and Individual Differences, 34(1), 159-176. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0191-8869(02)00119-8

Thiffault, P., & Bergeron, J. (2003b). Monotony of road environment and driver fatigue: a simulator study. Accident Analysis & Prevention, 35(3), 381-391. https://doi.org/10.1016/s0001-4575(02)00014-3

Ting, P.-H., Hwang, J.-R., Doong, J.-L., & Jeng, M.-C. (2008). Driver fatigue and highway driving: A simulator study. Physiology & Behavior, 94(3), 448-453. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.physbeh.2008.02.015

Usman, T., Fu, L., & Miranda-Moreno, L. F. (2011). Accident Prediction Models for Winter Road Safety. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2237(1), 144-151. https://doi.org/10.3141/2237-16

Wang, L., & Pei, Y. (2014). The impact of continuous driving time and rest time on commercial drivers' driving performance and recovery. Journal of Safety Research, 50, 11-15. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jsr.2014.01.003

Wang, X., Zhou, Q., Quddus, M., Fan, T., & Fang, S. e. (2018). Speed, speed variation and crash relationships for urban arterials. Accident Analysis & Prevention, 113, 236-243. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.aap.2018.01.032

Wang, Z., Zhang, H., Zhang, Q., & Li, S. (2018). Interactive effect of circadian rhythm and time on task on driver fatigue level. COTA International Conference of Transportation Professionals

2018, 2170-2178.

Williams, A. F. (1985). Nighttime driving and fatal crash involvement of teenagers. Accident Analysis & Prevention, 17(1), 1-5. https://doi.org/10.1016/0001-4575(85)90002-8

Xie, Y., Lord, D., & Zhang, Y. (2007). Predicting motor vehicle collisions using Bayesian neural network models: An empirical analysis. Accident Analysis & Prevention, 39(5), 922-933. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.aap.2006.12.014

Xu, C., Tarko, A. P., Wang, W., & Liu, P. (2013). Predicting crash likelihood and severity on freeways with real-time loop detector data. Accident Analysis & Prevention, 57, 30-39. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.aap.2013.03.035

Yamakoshi, T., Rolfe, P., Yamakoshi, Y., & Hirose, H. (2009). A novel physiological index for Driver's Activation State derived from simulated monotonous driving stuSIEs. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 17(1), 69-80. https://doi.org/10.1016/j.trc.2008.09.002

Yan, Y., Zhang, Y., Yang, X., Hu, J., Tang, J., & Guo, Z. (2020). Crash prediction based on random effect negative binomial model considering data heterogeneity. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 547, 123858. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.physa.2019.123858

Yang, G., Lin, Y., & Bhattacharya, P. (2010). A driver fatigue recognition model based on information fusion and dynamic Bayesian network. Information Sciences, 180(10), 1942-1954. https://doi.org/10.1016/j.ins.2010.01.011

Yu, R., & Abdel-Aty, M. (2013). Utilizing support vector machine in real-time crash risk evaluation. Accident Analysis & Prevention, 51, 252-259. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.aap.2012.11.027

Yu, R., Quddus, M., Wang, X., & Yang, K. (2018). Impact of data

aggregation approaches on the relationships between operating speed and traffic safety. Accident Analysis & Prevention, 120, 304-310. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.aap.2018.06.007

Zhang, H., Yan, X., Wu, C., & Qiu, T. Z. (2014). Effect of Circadian Rhythms and Driving Duration on Fatigue Level and Driving Performance of Professional Drivers. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2402(1), 19-27. https://doi.org/10.3141/2402-03

Zhang, H., Wang, Z., Li, Y., Zhang, Q., & Zhang, J. (2017). Research on time relevant variables based fatigue level prediction model. 4th International Conference on Transportation Information and Safety (ICTIS), 1-5. https://doi.org/10.1109/ICTIS.2017.8047712.

Zhang, Q., Wang, Y., Wu, C., & Zhang, H. (2019). Research on Maximum Driving Time Based on Driving Fatigue Model from Field Experiment. 5th International Conference on Transportation Information and Safety (ICTIS), 1068-1073. https://doi.org/10.1109/ICTIS.2019.8883733

Zhang, Q., Wu, C., & Zhang, H. (2020). Driving Fatigue Prediction Model considering Schedule and Circadian Rhythm. Journal of Advanced Transportation, 2020, 9496259. https://doi.org/10.1155/2020/9496259

Zhao, G., & Wu, C. (2013). Effectiveness and acceptance of the intelligent speeding prediction system (ISPS). Accident Analysis & Prevention, 52, 19-28. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.aap.2012.12.013

Abstract

Integrated Analysis of Dynamic Driving Fatigue and Speeding Risk Using Individual Vehicle Trajectory Data

Kang, Taeseok
Transportation Studies
Department of Environmental Planning
The Graduate School
Seoul National University

A motorway traffic accident is a major cause of irregular traffic congestion and socioeconomic losses (e.g., severe mortality and economic loses). Naturally, myriads of academic and practical efforts have been made to explore and identify the critical causes of traffic accidents for decades. Despite the academic achievements, the number of motorway vehicle crashes have not decreased at least in the case of South Korea, even though all motorway sections meet design standards and guidelines through the continuous efforts of improvements. This indirectly indicates that the main cause of motorway crashes could be closely related to the features of drivers rather than driving conditions (e.g., road geometry or traffic states).

In this context, discovering and identifying the critical features of drivers, deeply related to motorway vehicle crashes, is still one of on-going issues that should be successfully addressed in academia. There is also a consensus that driving fatigue and speeding are the major causes of traffic accidents especially in the case of motorways. Fortunately, individual vehicle trajectory data, collected through various vehicle GPS systems, have key clue information about the features of drivers (i.e., driving fatigue states and microscopic speeding behaviors of individual drivers).

To realize this opportunity, a novel methodology for the dynamic evaluation of motorway accident risks was developed in this research using individual point-to-point vehicle-GPS trajectory big data. The method was based on the two new sub-methods to microscopically and dynamically monitor driving fatigue and speeding, respectively. The two measured variables (i.e., driving fatigue states and speeding states for each driver) according to the dimension of microscopic space and dynamic time were integrated in order for decision-making on accident risks for road segments.

To demonstrate the feasibilities of the methodology devised in this dissertation, two types of ground-truth data were employed. Individual vehicle crash data for five years (2015-2019) from the motorway line 15 (Seohaean motorway) which is one of major lines in South Korea was used. The individual accidents were aggregated into accident rate per road segment for a year. Individual second-by-second vehicle trajectory big data collected by virtue of advanced vehicle-GPS systems for a full month (October, 2017) was used for the temporally and spatially local measurement of both driving fatigue and speeding states for each vehicle-GPS trip according to motorway sections by using the two developed sub-methods.

The analysis results were remarkable from three standpoints: accident prediction, the temporal and spatial evolution of driving fatigue and speeding states, and the online monitoring of driving fatigue states. Regarding the accident prediction, it turned out that the predictabilities of both driving fatigue and speeding variables overwhelmingly exceeded those of road geometry and traffic flow variables in terms of statistical coefficient of determination. The explanatory-power values (i.e., R^2) of both driving fatigue and speeding variables were, at the very least, up to 84.9% and 83.4%, respectively, whereas those of road geometry and traffic flow variables were less than 0.6. In addition, it should be noted that no research with this sort of high explanatory power has been reported in the area of traffic accident research. This fact exactly stands on the same line with expert consensus that driving fatigue and speeding are the critical causal factors of vehicle crashes at the very least on motorway networks. This directly indicates that research direction in the modeling of traffic accident prediction needs to turn into the microscopic states of driving fatigue and speeding at least in the case of motorway segments.

As for the temporal and spatial evolution of driving fatigue and speeding states, it was analyzed through a couture map that was regularly consistent of space-and-time cells with one-kilometer space and 15-minute time interval. It turned out that the temporal and spatial evolution of states for the two variables (i.e., driving fatigue and speeding) has a kind of distinguished pattern which are deeply related to the risk levels of vehicle crashes. It was found out that the pattern of driving fatigue according to space and time is different from that of speeding. In addition, it can be seen that this pattern is highly related to nation-wide land use and its trip activity in the

case of regional motorways. The findings indicate that motorway accidents caused by driving fatigue and speeding should be analyzed and explained through the nation-wide motorway networks and land use. Most importantly, the space-and-time couture maps for driving fatigue and speeding could be effectively serviced through smart device or variable message sign as the information of vehicle-crash risks for drivers on motorway sections.

In particular, the analysis results showed that the fatigue progress (e.g., non-fatigue, fatigue, microsleep, drowsy) of an on-driving driver can be dynamically and effectively monitored using driving tasks which are intrinsically included in second-by-second vehicle trajectory. Note that drivers have a tendency to underrate and ignore their fatigue in many cases. In addition, the method, presented in this research, for monitoring dynamic driving fatigue levels for a driver is still useful regardless the type of road, as it was devised based on driving-time task. It is, hence, expected that the monitored fatigue states can be dynamically served as a customized safety-driving information for individual drivers through vehicle GPS systems in order to recognize their fatigue and to cut down the risk of accident occurrences.

This study initiatively contributes a first step toward proposing a promising and feasible solution to the temporal and spatial monitoring of driving fatigue and speeding using vehicle trajectory big data. The noticeable results of this study say that the research direction of modeling and analysis of motorway accidents analysis needs to change from macroscopic driving circumstances (e.g., road geometry conditions, traffic states, and weather conditions) to dynamic and microscopic driver states (e.g., driving fatigue and speeding). Despite the remarkable results of this study, there still are many opportunities

in both dynamic monitoring of driving fatigue progress and microscopic measuring of speeding with advanced methodologies and advanced mobility data (e.g., autonomous vehicle trajectory data, smart mobility trajectory data, vehicle-to-infrastructure trajectory data). In addition, further investigations into the monitoring of driving fatigues for heavy vehicles (e.g., inter-regional bus, truck) especially covering the long haul should be made in order to reduce the undesirable heavy-vehicle related traffic accidents.

keywords : Mobility Big Data, Individual Vehicle Trajectory, Physiological Driving Fatigue, Dynamic Speeding Behavior, Integrated Analysis of Fatigue and Speeding, Traffic Accident Risk, Real-time Monitoring

Student Number : 2015-30677