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

도시계획학 석사학위논문

차량 내비게이션 자료를 활용한 도시내 도로의 통행시간 신뢰성 지표 추정

Estimating Travel Time Reliability of Urban Roads Using Car Navigation Data

2023년 08월

서울대학교 환경대학원

환경계획학과 교통학전공

이 상 석

차량 내비게이션 자료를 활용한 도시내 도로의 통행시간 신뢰성 지표 추정

지도 교수 장 수 은

이 논문을 도시계획학 석사학위논문으로 제출함
2023년 08월

서울대학교 환경대학원
환경계획학과 교통학전공
이 상 석

이상석의 도시계획학 석사학위논문을 인준함
2023년 08월

위 원 장 _____ (인)

부위원장 _____ (인)

위 원 _____ (인)

초 록

통행시간 신뢰성은 통행자가 원하는 도착시간에 정확하게 목적지에 도달할 수 있는가를 나타내는 개념으로, 도로의 서비스 수준을 향상시키기 위해서는 기존의 소통측면 뿐만 아니라 신뢰성 측면에서 안정된 도로를 공급해야 한다. 도로의 변동성을 계량적으로 나타내기 위해 통행시간 신뢰성 지표 개발과 추정 연구가 필요하다. 기존 연구는 주로 지역(도시)간 도로에서 수행되었는데, 도시내 도로는 지역간 도로와는 다른 특성이 있기 때문에 별도의 지표 추정이 필요하다. 첫째, 도시내 도로에는 좁고 짧은 기하구조와 다양한 시설이 있다. 이에 따라 도시내 도로에는 속도제한 규제가 지역간 도로에 비해 더 많이 시행되고, 교차로 회전을 위해 접근로에서 차로를 변경하는 주행이 많다. 그리고 차로 폭과 측방 여유폭이 좁게 설계되고 다수 도로구간의 차로 수가 2차로 이하이기 때문에 주변 차량에 대한 중차량의 영향력이 크다. 또한 첨두 시간대에 직장으로 향하는 통근자가 많으므로 비첨두 시간대와 비교하여 정시성을 지향하는 경향이 뚜렷하다. 마지막으로 단속류 도로로서 돌발상황이 빈번히 발생해 급한 가속/감속 주행이 많다.

본 연구는 개별 차량의 통행시간을 서로 다르게 하는 요인에 대해 "도시내 도로의 통행시간 신뢰성은 도로구간의 혼잡도와 도시내 도로 특성으로 결정된다"라는 관점으로 접근한다. 이에 따라 도로구간 혼잡도와 도로구간 길이로 통행시간 신뢰성을 추정하는 지역간 도로 모형을 기본 모형으로 설정하고 모형의 설명력을 확인한다. 그리고 도시내 도로의 특성이 반영된 확장 모형을 설정하고 기본 모형과의 비교를 통해 최종 모형을 선정한다.

최적모형 추정 결과를 바탕으로 도시내 도로 특성 변수 중 일변동 특성, 버스차량 비율, 급가감속 횟수 비율 변수가 유의하였다. 특히 급가

감속 횟수비율 변수는 통행자의 주행성향으로 볼 수 있기 때문에 도시내 도로의 통행시간 신뢰성은 통행자의 개별특성에 영향을 받는다고 할 수 있다. 다시 말해, 개별 이용자의 특성에 따라 동일할 도로의 기하구조, 교통류 수준에서도 다른 통행시간 편차를 보일 수 있다.

그리고 급가감속 횟수비율과 도로 혼잡도간 상호작용이 유의함을 확인하였다. 급가감속 횟수비율이 많은 구간일수록 도로의 혼잡에 따라 통행시간 신뢰성이 크게 저하되는 것을 볼 수 있다. 반대로 도로가 혼잡한 구간에서는 어떠한 운전자의 급가감속 주행이 도로의 통행시간 신뢰성에 더 큰 영향을 준다고 볼 수 있다. 이러한 상호작용효과는 첨두시간대보다 비첨두 시간대에 강하게 작용한다.

본 연구는 차량 내비게이션 자료를 이용함으로써 도시내 도로의 고유한 특성을 반영하여 도로의 통행시간 신뢰성을 추정하였다. 그리고 추정 결과를 통하여 도시내 도로의 통행시간 신뢰성 영향요인에는 도로 이용자의 개별 특성이 포함되어 있다는 사실을 확인하였다. 더 나아가 도로의 운영 평가지표, 통행시간 신뢰성 편익 추정을 위해 도시내 도로에 적합한 통행시간 신뢰성 지표로 지연시간를 제안하였다. 이에 본 연구에서 구축한 모형과 제안된 지표를 향후 도시지역의 단속류 도로 통행시간 신뢰성 추정 연구에 이용할 수 있을 것이다.

주요어: 도시내 도로, 통행시간 신뢰성, 차량 내비게이션 자료, 통행시간 신뢰성 추정, 운전자 개별 특성

학 번: 2021-25661

목 차

제 1 장 서 론 1
제 1 절 연구의 배경 및 목적 1
제 2 절 연구의 내용 및 범위 2
제 3 절 연구의 방법 및 절차 4

제 2 장 선행연구 고찰 6
제 1 절 선행연구 고찰 8
제 2 절 기존연구 시사점 및 본 연구 기여도 12

제 3 장 연구 방법론 13
제 1 절 분석 모형 13
1. 기본 모형 13
2. 확장 모형 16
제 2 절 모형 검증 20

제 4 장 분석 자료 22
제 1 절 활용 자료 22
제 2 절 변수 구축 27

제 5 장 도시내 도로 통행시간 신뢰성 추정 50
제 1 절 통행시간 신뢰성 추정 52
1. 기본 모형 52
2. 확장 모형 57

제 2 절 추정결과 검증 65
제 3 절 소결.....67

제 6 장 결 론 70
제 1 절 연구요약 및 시사점 70
제 2 절 연구한계 및 향후 연구방향 72

참고문헌 73

Abstract 78

표 목차

[표 2-1] 통행시간 신뢰성 지표 7
[표 2-2] 완충시간 계열 통행시간 신뢰성 지표 추정연구 9
[표 2-3] 표준편차 계열 통행시간 신뢰성 지표 추정연구 10
[표 4-1] 내비게이션 자료 정의서 24
[표 4-2] 교통소통정보 자료 정의서 25
[표 4-3] 제한속도 규제 시설 정보 자료(예시) 26
[표 4-4] 이상치 기준 29
[표 4-5] 시간대별 혼잡지표(CI) 기술통계 33
[표 4-6] 도로구간 길이 기술통계 35
[표 4-7] 도로등급별 속도제한 규제시설 분포 37
[표 4-8] 도로구간별 시간대별 궤적 개수(차량 대수) 42
[표 4-9] 한 단위 가감속 식별과정 44
[표 5-1] 분석 대상 도로구간 현황(진주시) 51
[표 5-2] 통행시간 신뢰성과 혼잡도 상관분석 52
[표 5-3] 통행시간 신뢰성 추정 결과 - 기본모형 55
[표 5-4] 통행시간 신뢰성 추정 결과 - 확장모형1 58
[표 5-5] Chow test 결과 - 일변동 특성 변수 59
[표 5-6] 통행시간 신뢰성 추정 결과 - 확장모형2 61
[표 5-7] 추정 결과(기본모형, 확장모형1, 확장모형2) 64
[표 5-8] 통행시간 신뢰성 지표 산정모형 검증 결과 65

그림 목차

[그림 1-1] 연구 방법 및 절차 5
[그림 2-1] 통행시간 신뢰성 개념 6
[그림 3-1] 통행시간 신뢰성과 혼잡도간 관계 가설 15
[그림 4-1] 네트워크 맵매칭(Q-GIS) 28
[그림 4-2] 도로구간 '2055401' 통행시간 분포(예시) 29
[그림 4-3] 변동계수 히스토그램 30
[그림 4-4] 시간대별 혼잡지표(CI) 상자그림 33
[그림 4-5] 네트워크 자료의 노드와 링크 34
[그림 4-6] 맵매칭 과정(Q-GIS) 37
[그림 4-7] 시간대별 중차량 비율 39
[그림 4-8] 가감속 크기 히스토그램 41
[그림 4-9] 급가감속 횟수 비율 구축과정 42
[그림 4-10] 초단위 속도자료 43
[그림 4-11] 초단위 속도와 한 단위 가감속 식별 44
[그림 4-12] 시간대별 ADR 상자그림 45
[그림 4-13] 도로구간 길이와 ADR 산점도 46
[그림 4-14] 시간대별 변동계수 47
[그림 4-15] 시간대별 통행시간 변화 추이(1) 48
[그림 4-16] 시간대별 통행시간 변화 추이(2) 49
[그림 5-1] 분석 대상 도로구간 50
[그림 5-2] 통행시간 변동계수와 혼잡지표간 산점도 53
[그림 5-3] 통행시간 변동계수와 길이간 산점도 54
[그림 5-4] 상호작용효과(첨두/비첨두) 63
[그림 5-5] 지연시간 R^h 개념 69

제 1 장 서 론

제 1 절 연구의 배경 및 목적

통행에 있어서 기상, 교통사고, 교통량 등의 불확실한 요인 때문에 같은 경로·시간대라도 통행자들이 경험하는 통행시간은 매우 다양하다. 이때 통행자는 통행시간의 정시성(punctuality), 신뢰성(reliability)을 위해 통행계획 시 예상 통행시간에 여유시간을 추가할 것을 고려한다(Knight, 1974; Alves et al., 2011; Wang et al., 2014). 즉, 통행자는 절대 통행시간과 함께 통행시간의 불확실성 또한 최소화하는 선택을 한다(Lyons et al., 2005).

이에 따라 다수의 연구에서 통행시간 신뢰성을 도로 투자 사업의 타당성 평가 편익항목으로서 주목하고 있다. 통행시간 신뢰성을 편익항목으로 반영하기 위하여 도로의 통행시간 신뢰성을 계량화할 필요가 있으며, 이에 따라 통행시간 신뢰성 관련 선행 연구는 통행시간 신뢰성 지표와 가치 추정연구가 수행되었다(Kouwenhoven & Warffemius, 2015).

지표추정 연구는 공간범위가 도시내 도로인 경우가 드물다. 일부 연구는 도시지역 도로를 대상으로 수행되었으나, 대상구간은 국도와 지방도가 혼재되어 있는 간선도로로서 '도시 지역 내부의 짧고 좁은 단속류 도로'로 보기는 어렵다. 영향요인은 혼잡지표, 평균지체, 도로구간 길이 등과 같이 지역간 도로 연구에서 활용한 설명변수가 그대로 이용되었다.

하지만 도시내 도로는 지역간 도로와는 다른 특성이 존재한다(Carrion & Levinson, 2012; Juhász et al., 2017). 지역간 도로와 같은 기능적 위계가 높은 도로는 넓은 차로 폭과 다수의 차로 수, 긴 도로구

간 길이로 인해 돌발상황이 적은 특성을 띈다. 이에 따라 기하구조로 인해 운전자가 주행속도를 변화시키는 경우는 많지 않다. 또한 운전자는 지정차로, 추월차선과 같은 규제와 규칙을 기반으로 주행하기 때문에 운전자의 주행행태는 상대적으로 안정적이다. 하지만 도시내 도로에서는 좁고 짧은 기하구조와 다양한 시설이 운전자의 주행속도에 영향을 미친다. 또한 도시내 도로는 교차로 혹은 중앙버스전용차로를 제외하고 주행에 대한 규칙을 규정하지 않기 때문에 운전자의 주행 행태가 다양하다.

본 연구는 도시내 도로를 대상으로 통행시간 신뢰성을 추정하기 위해서 차량 내비게이션 자료를 이용하며, 도로구간 혼잡도, 도로구간 길이와 도시내 도로 특성을 나타내는 설명변수를 구축하여 회귀분석을 수행한다. 그리고 모형 설명력과 변수의 영향력을 파악하고 모형간 비교를 통해 추정 결과를 검증한다. 이를 통해 최적의 통행시간 신뢰성 추정모형을 제시하고 모형의 구조와 변수들의 함수 관계를 파악하여 도시내 도로의 통행시간 신뢰성 추정 결과를 제시한다.

제 2 절 연구의 내용 및 범위

본 연구는 차량 내비게이션 자료를 이용하여 도시내 도로를 대상으로 통행시간 신뢰성을 추정한다. 이를 위해 종속변수와 설명변수를 선정하고 변수간 관계를 파악한다. 통행시간 신뢰성 지표 추정 모형을 구축하고 추정결과를 기반으로 통행시간 신뢰성에 유의한 영향을 끼치는 요인을 제시한다.

연구 모형은 기본 모형과 확장 모형으로 나뉜다. 기본 모형은 혼잡지표 및 도로구간 길이 자료를 기반으로 개발하며, 확장 모형은 기본 모형에 도시내 도로 특성을 나타내는 변수를 추가한다. 도시내 도로에는 좁고 짧은 기하구조와 다양한 시설이 있다. 이에 따라 도시내 도로에는

속도제한 규제가 지역간 도로에 비해 더 많이 시행되고, 교차로 회전을 위해 접근로에서 차로를 변경하는 주행이 많다. 그리고 차로 폭과 측방 여유폭이 좁게 설계되고 다수 도로구간의 차로 수가 2차로 이하이기 때문에 주변 차량에 대한 중차량의 영향력이 크다. 또한 첨두 시간대에 직장으로 향하는 통근자가 많으므로 비첨두 시간대와 비교하여 정시성을 지향하는 경향이 뚜렷하다. 마지막으로 단속류 도로로서 돌발상황이 빈번히 발생해 급한 가속/감속 주행이 많다. 이와 같은 도시내 도로의 특성을 반영하기 위하여 각 특성을 나타내는 설명변수를 선정하고 연구 모형을 구축한다.

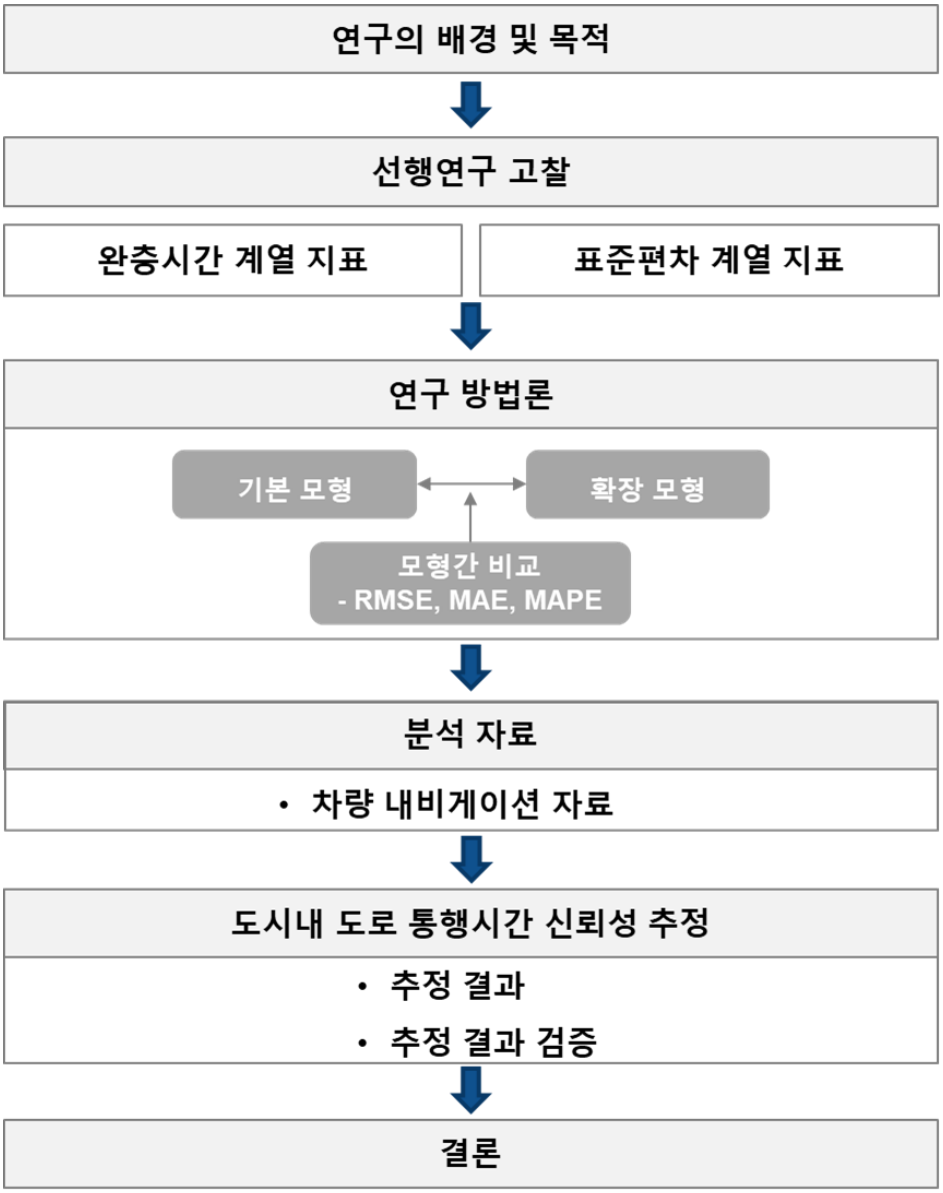
지표추정 연구(최영은, 2017; 박찬운, 2019; Chan, 2007; Van Oort, 2016)는 주로 고속도로요금징수시스템 자료, 구간 검지기 자료, 링크별 속도자료를 활용하고 있으나, 이들은 도로구간 단위의 집계자료로서 평활효과(Smoothing Effect)의 영향이 불가피하다. 즉 도로구간 단위 내 차량의 시간대별(초단위) 속도변화를 알 수 없고 도로구간 단위 평균속도만을 알 수 있기 때문에 통행시간 분산에 대한 설명력이 떨어진다. 본 연구는 통행시간 신뢰성 지표 산정뿐 아니라 이를 설명할 독립변수 구축 시 도로구간 단위 내 차량의 초단위 속도변화를 알 수 있는 비집계자료인 GPS기반 내비게이션 자료를 활용한다.

추정 결과의 검증은 우선 회귀분석 모형의 적합도와 가정의 적절성 여부를 각각 회귀계수(R-squared)와 가정 검정(Assumption)을 통해 살펴본다. 다음으로 추정에 사용되지 않은 자료를 이용하여 평균 절대 오차(Mean Absolute Error: MAE), 평균 절대 오차 백분률(Mean Absolute Percentage Error: MAPE), 평균 제곱 오차(Root Mean Squared Error: RMSE)를 계산하여 모형간 비교를 수행한다. 이에 따라 본 연구는 최종적으로 최적모형을 선정하고 최적모형 추정 결과의 변수별 t값을 활용하여 독립변수의 유의성을 확인한다. 설명변수들과 통행시간 신뢰성의 함수관계를 파악하여 추정 결과를 해석한다.

본 연구의 공간적 범위는 경상남도 진주시 도시지역 단속류 도로로 한정하였다. 시간적 범위는 GPS 내비게이션 자료의 구득가능 조건에 따라 2019년 03월 3주차로 설정한다. 내비게이션 탑재차량의 활동시간은 하루 24시간 전반에 걸쳐 있으므로 분석의 시간적 범위는 24시간(0시~23시)으로 설정한다.

제 3 절 연구의 방법 및 절차

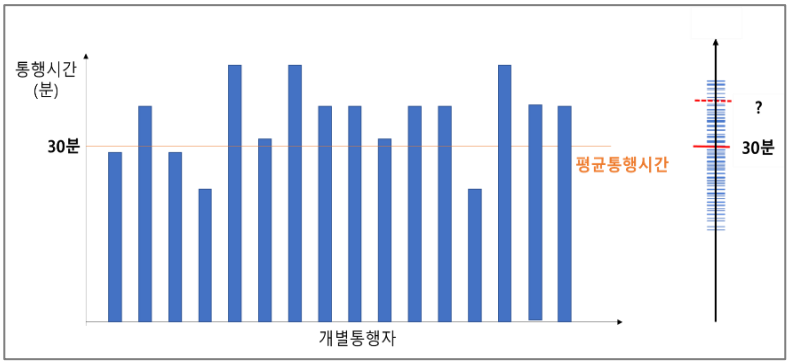
제1장에서 도시내 도로와 지역간 도로간 이질성을 바탕으로 도시내 도로 특성에 기반한 통행시간 신뢰성 추정 연구의 필요성과 목적을 제시한다. 제2장에서는 우선 통행시간 신뢰성과 지표에 대한 이론적 개념을 제시하고, 통행시간 신뢰성 추정 관련 실증연구를 살펴본다. 이를 통해 연구에서 활용된 “신뢰성 지표”, “요인”, “대상 도로”, “자료” 를 정리하고 도시내 도로의 통행시간 신뢰성을 추정하기 위해 도시내 도로 특성을 반영하는 요인과 자료의 측정 단위, 집계 수준 등을 파악한다. 다음으로 선행연구를 검토하여 연구의 목표와 방향을 설정한다. 제3장에서는 통행시간 신뢰성을 추정하기 위한 요인을 바탕으로 본 연구에서 사용할 분석 모형을 설정한다. 그리고 모형의 파라미터 추정 결과를 검증하는 방법을 제시한다. 제4장에서는 변수 구축에 활용된 자료를 설명한다. 그리고 통행시간 신뢰성 지표를 산정하고 도시내 도로의 특성을 나타내는 변수를 구축하며, 구축한 자료의 기술통계를 제시한다. 제5장에서는 분석방법과 분석 자료를 이용하여 도출된 통행시간 신뢰성 추정 결과를 제시한다. 마지막 제6장에서는 연구요약과 시사점, 연구한계와 향후 연구방향을 제시한다.



<그림 1-1> 연구 방법 및 절차

제 2 장 선행연구 고찰

통행시간 신뢰성이란 이용자가 동일한 시간대, 동일한 도로구간을 통행하면서 느끼는 통행시간의 변동성으로서, 일반적으로 기대 통행시간과 실제 통행시간의 차이로 계산된다. <그림 2-1>는 같은 도로구간을 같은 시간대에 통과한 개별통행자들의 통행시간 차이를 보여준다.



<그림 2-1> 통행시간 신뢰성 개념

반복된 통행 경험으로 얻은 평균통행시간 '30분'은 통행자가 통행계획 시 기대 통행시간으로 고려될 수 있다. 하지만 통행시간의 편차가 커서 평균 통행시간이 다수의 통행시간들을 대표할 수 없다면 통행자는 기대 통행시간으로서 '30분'을 신뢰할 수 없을 것이다. 통행자는 이러한 불확실성을 완화하기 위해 예상 통행시간에 여유시간을 추가하는 경향이 있다(Alves et al., 2011; Wang et al., 2014). 즉 통행자는 통행시간이나 통행비용은 물론 통행시간의 불확실성을 동시에 고려하여 통행선택을 한다(Lyons et al., 2005).

통행시간 신뢰성을 측정하기 위해 <표 2-1>과 같이 다양한 지표가 개발되었으며, 크게 '완충시간(Buffer Time) 계열'과 '표준편차 계열'로

분류할 수 있다. 통행시간 표준편차는 직관적 해석이 용이하기 때문에 실무에서 자주 활용되지만(Hyder Consulting, 2008; 박찬운, 2019), 통행시간 신뢰성에 대한 정의, 측정 단위, 경로기반 통행시간 신뢰성으로의 확장 등과 관련하여 다양한 의견이 개진되고 있어 추가 연구가 필요하다.

<표 2-1> 통행시간 신뢰성 지표

지표		수식	정의
완충시간 계열	계획통행시간 (Planning Time)	TT_a	계획한 통행시간
	완충시간 (Buffer Time)	$TT_a - TT_p$	실제통행시간과 계획통행시간의 차이
	완충시간지표 (Buffer Time Index)	$\frac{TT_{90} - TT_{ave}}{TT_{ave}}$	90 분위수 통행시간과 평균통행시간의 상대적 차이
	지각통행 (Tardy Trip)	$\frac{TT_{TT_i > TT_\beta - TT_{ave}}}{TT_{ave}}$	Tardy Trip Time(TOD, DOW 기반 하위 (1- β)% 통행시간)과 평균통행시간 상대적 차이 β의 경우 주로 80% 활용
	비대칭도 (Skewness)	$\frac{TT_{90} - TT_{50}}{TT_{50}}$	통행시간 분포의 비대칭도
표준편차 계열	표준편차 (Standard deviation)	$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(TT_i - TT_{ave})^2}$	통행시간 표준편차
	변동계수 (Coefficient of Variation)	$\frac{\sigma}{TT_{ave}}$	통행시간 표준편차와 평균통행시간의 비율

TT_i : i 번째 관측통행시간
TT_a : 실제통행시간
TT_p : 계획통행시간
TT_{ave} : 평균통행시간
TT_{90} : 통행시간 분포의 90 퍼센타일
TT_β : 통행시간 분포의 (1-β)퍼센타일
N : 관측된 통행시간 자료 개수
TOD: Time of Day; DOW: Day of the week

제 1 절 선행연구 고찰

통행시간 신뢰성 지표 추정 연구에서는 평균-분산 모형(Mean-Variance model), 일정지체 모형(Scheduling delays model), 평균 지체 모형(Mean-lateness model) 등을 측정방법으로 적용하고 있다. 연구목적에 따라 적절한 방법을 선택하지만 다수의 연구가 평균-분산 모형을 활용하며, 신뢰성 지표로 통행시간의 표준편차를 사용하는 추세이다(박찬운, 2019; Hyder Consulting, 2008; DfT, 2014; Kouwenhoven, 2016).

평균-분산 모형(Mean-Dispersion(Variance) Model)은 통행시간 신뢰성을 통행시간 산포도(Dispersion)로 정의하며, 이를 결정하는 요인을 통행시간 분포의 평균(Mean Travel Time)으로 설정한다. 이는 도로의 혼잡도가 도로의 통행시간 신뢰성을 결정한다는 의미이다. 평균-분산 모형을 바탕으로 통행시간 신뢰성을 추정한 연구들은 통행시간 신뢰성 지표에 따라 완충시간 계열 연구와 표준편차 계열 연구로 분류할 수 있다.

<표 2-2> 완충시간 계열 통행시간 신뢰성 지표 추정연구

No	저자	연도	통행시간 신뢰성 지표	영향요인	분석 대상 도로 종류	활용자료
1	Emam and Al-Deek	2006	완충시간	평균통행시간	고속도로	구간통행속도
2	장수은 외	2008	지연시간	교통량	고속도로 일반국도	구간 통행속도
3	Polak et al.	2008	완충시간	교통량	고속도로	구간통행속도
4	Chen and Zhou	2009	METT(Mean-Excess Travel Time)	V/C	일반국도	구간통행속도
5	한국도로공사	2013	완충시간	교통량-용량비 (V/C)	고속도로	VDS 구간속도자료
6	Wright et al.	2015	완충시간지표	교통량	고속도로	구간통행속도
7	Li et al.	2016	완충시간	V/C	지방부 일반국도	구간통행속도
8	Khalili et al.	2021	Tardy trip	평균통행시간	지방부 일반국도	구간통행속도

<표 2-2>는 완충시간 계열의 선행연구를 정리한 것이다. 여기서 지표는 지연시간, 완충시간, METT를, 지표의 영향요인으로는 교통량, V/C를 활용하였다.

주목할 점은 분석 대상 도로 종류와 활용한 자료의 유형이다. 분석 대상 도로는 주로 비도시부에 위치하며, 연속류 혹은 구간이 긴 단속류 도로로서, 고속도로, 고속화도로, 지방부 일반국도, 지방도 등이 포함된다. 분석 자료는 도로구간의 개별차량 통행시간을 활용하기 보다는 동일한 조건에서 복수의 조사를 통해 얻은 도로구간 평균통행시간을 이용하였다. 또한 영향요인을 도로구간 단위로 집계하여 적용하였다.

<표 2-3> 표준편차 계열 통행시간 신뢰성 지표 추정연구

No	저자	연도	지표	영향요인	분석 대상	활용자료	기타
1	Arup	2003	변동계수	혼잡지표 구간 갈이	도시지역 도로	구간주행시간	프로브 차량 주행자료
2	Eliasson	2006	변동계수	혼잡지표 평균통행시간	고속도로	구간통행속도	영상기반 번호판 인식 기술
3	MacDonald	2009	표준편차	통행시간 구간 길이	고속도로	구간통행속도	루프 검지기, 번호판인식 센서기술
4	Hellinga	2011	표준편차	평균통행시간	고속도로	구간주행시간	루프 검지기
5	Peer	2012	표준편차	평균지체 구간 길이	고속도로	구간통행속도	-
6	Carrion and Levinson	2012	표준편차	혼잡지표	일반국도 도시지역 도로	GPS 궤적자료	-
7	Geistefeldt et al.	2014	표준편차	평균지체	고속도로	구간통행속도	시뮬레이션 데이터
9	Transport Analysis Guidance	2017	변동계수	혼잡지표 구간 길이	고속도로 일반국도	구간통행속도	-
10	최영은	2017	변동계수	혼잡지표 구간 갈이	고속도로 고속화도로 도시지역 도로	구간통행시간	통행경로 가정 유료도로 및 무료도로
11	박찬운	2019	표준편차	평균지체 구간 길이 차로 수 중차량 비율	고속도로	구간주행시간	속도프로파일 자료

<표 2-3>은 표준편차 계열의 통행시간 신뢰성 지표를 추정한 연구들이다. 통행시간 신뢰성 지표로는 변동계수와 표준편차를, 영향요인으로는 혼잡지표, 평균지체, 구간길이 등을 활용하였다. 분석 대상 도로 종류와 분석 자료는 완충시간 계열 지표 연구와 유사하다. 다만 일부 연구(Arup, 2003; Carrion & Levinson, 2012; 최영은, 2017)에서 도시내 도로를 대상으로 연구가 수행되었는데, 프로브 차량으로 수집한 도로주행자료이거나 GPS 궤적자료를 이용하여 신뢰성 지표를 산정하였다. 하지만 연구의 공간적 범위가 도시 지역내 일부 도로구간에 제한되어 있어 시공간 전이성에 한계가 있다. 그리고 최영은(2017)의 연구는 공간적 범위로 도시지역 도로를 포함하였지만 통행자가 통과했을 것으로 예상되는 가상의 경로를 대상으로 하였다. 2010년 가구통행실태조사 자료의 유료도로 선택 여부 정보와 최단경로 알고리즘을 이용하여 통행자가 선택한 경로를 가정하고 가상의 경로에 1년 평균속도를 적용하여 구간 통행시간을 추정하였다.

완충시간 계열 연구와 표준편차 계열 연구들을 살펴보면 통행시간 신뢰성에 대한 정의에 따라 평균-분산 모형과 일정 지체모형 등 측정방법을 달리 선택하고 있다. 활용된 지표는 표준편차, 변동계수, 완충시간 등 다양하며, 해석의 직관성, 산정의 용이성 등으로 표준편차가 주로 활용되었다. 연구 범위는 고속도로로서 지역간 도로가 다수이며, 자료는 도로구간 단위 집계자료가 주로 사용되었다. 통행시간 신뢰성을 결정하는 요소로는 평균통행시간, 혼잡지표(ci: Congestion Index), 평균지체(MD: Mean Delay), 교통량-용량비(V/C) 등을 활용하였다.

제 2 절 기존연구 시사점 및 본 연구 기여도

기존 연구들을 고찰한 결과 다수의 연구에서 소통상태를 나타내는 교통량-용량비, 교통량, 평균 지체와 도로의 기하구조 특성으로서 도로구간 길이, 차로 수 등이 설명변수로 활용되고 있다. 또한 공간범위가 지역(도시)간 도로이고 도로구간 단위 집계자료를 활용한 연구가 대다수이다. 그러나 도시내 도로는 지역간 도로와는 다른 특성이 있기 때문에 기존 지역간 도로 추정 모형으로 도시내 도로의 통행시간 신뢰성을 추정하기에는 한계가 있다. 따라서 기존 연구 결과(지표, 요인, 모형 등)를 반영하되, 도시내 도로 특성을 고려한 연구가 수행될 필요가 있다.

본 연구는 내비게이션 자료를 활용한다. 내비게이션 자료는 과속, 가속, 감속, 정속 주행 등 주행 상태를 파악하는 초별 주행 궤적 자료로서, '복잡하고 미시적인' 도시내 도로 특성을 반영할 수 있는 자료이다. 본 연구는 내비게이션 자료를 바탕으로 지역간 도로 연구에서 반영하지 못한 도시내 도로의 특성을 검토하여 통행시간 신뢰성을 추정한다.

제 3 장 연구 방법론

본 장에서는 도시내 도로의 통행시간 신뢰성에 영향을 주는 요인을 바탕으로 분석에 사용할 모형을 설정한다. 그리고 모형의 파라미터 추정 결과를 검증하기 위한 방법을 제시한다.

본 연구는 개별 차량의 통행시간을 서로 다르게 하는 요인에 대해 "도시내 도로의 통행시간 신뢰성은 도로구간의 혼잡도와 도시내 도로 특성으로 결정된다"라는 관점으로 접근한다. 이에 따라 도로구간 혼잡도와 도로구간 길이로 통행시간 신뢰성을 추정하는 지역간 도로 모형을 기본 모형으로 설정하고 모형의 설명력을 확인한다. 그리고 도시내 도로의 특성이 반영된 확장 모형을 설정하고 기본 모형과의 비교를 통해 최종 모형을 선정한다.

제 1 절 분석 모형

1. 기본 모형

평균-분산 모형(Mean-Variance(Dispersion) Model)은 통행시간 신뢰성을 통행시간의 산포도(Dispersion of Travel Time)로 정의하며, 통행시간을 변동시키는 요인으로 평균 통행시간(Mean Travel Time)을 이용한다. 즉 평균 통행시간으로 나타나는 도로의 혼잡도가 통행시간 산포도가 의미하는 도로의 통행시간 신뢰성을 설명한다.

다수의 선행 연구는 평균-분산 모형을 바탕으로 연구 모형을 설정하였으며 모형의 설명변수로 혼잡도 변수와 함께 링크길이를 추가하여

수행하였다(Eliasson, 2006; Macdonald, 2009; Peer, 2012; Geistefeldt, 2014; Kowenhoven & Warffemius, 2016). 본 연구는 도시내 도로의 통행시간 신뢰성을 추정할 때 기존연구의 모형(혼잡도, 링크길이)보다 본 연구의 모형(혼잡도, 링크길이, 도시내 도로 특성)이 높은 예측력을 갖는다는 것을 입증하고자 한다.

이에 따라 본 연구는 기존 평균-분산 모형(Mean-Variance model)의 "v/c가 클수록 도로가 혼잡해지고 이로 인하여 통행시간 신뢰성이 저하된다"는 논리를 차용하였으며, 기존연구의 모형을 바탕으로 혼잡지표(Congetion Index; CI)와 도로구간 길이(Distance; d)를 설명변수로 하여 통행시간 변동계수(Coefficient of Variation: CV)를 산정하는 기본모형을 선정하였다.

$$\boldsymbol{CV = f(ci, d)} \qquad (1-1)$$

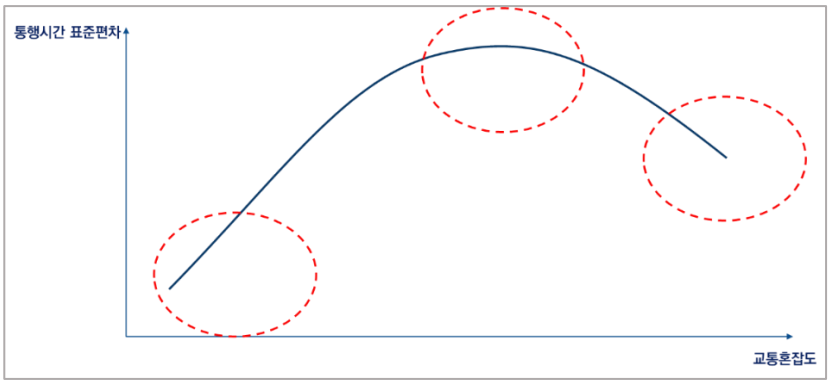
여기서

CV : 변동계수

ci : 혼잡지표

d : 링크길이

기본 모형은 통행시간 신뢰성 지표와 혼잡도, 길이간 관계를 기반으로 설정된다. 그리고 선행연구에 따르면(Eliasson, 2006; MacDonald, 2009; Transport Analysis Guideline, 2017) 통행시간 신뢰성과 혼잡도, 통행시간 신뢰성과 도로구간 길이는 각각 비선형 관계이다. 본 연구는 도시내 도로 범위에서도 혼잡도와 도로구간 길이가 통행시간 신뢰성과 비선형 관계에 있다고 가정하였다.



<그림 3-1> 통행시간 신뢰성과 혼잡도간 관계 가설

연속류와 단속류 도로에서 통행시간 신뢰성 지표 개발을 연구한 장수은(2008)에 따르면, 도로가 가장 혼잡한 상태에서 운전자는 비슷한 상황에 비슷한 대응을 하며 운전자간 속도 편차가 작아지고 도로의 통행시간 신뢰성은 좋아진다. 그리고 혼잡상황이 완화되면서 운전자에게 비슷한 상황이 주어질 때 운전자들은 각기 다른 반응을 하게 되어 속도 편차는 커진다. 하지만 여유혼잡도 상황에서는 운전자들은 자유속도에 수렴하게 주행하며 비슷한 통행시간을 보이고 도로의 통행시간 신뢰성 지표 크기는 작아진다.

이와 같은 혼잡도에 따른 통행시간 신뢰성 현상은 연속류와 단속류 도로에서 동일하게 일어나며 장수은(2008)은 2차식 형태의 추정모형을 각각 개발하였다. 도시내 도로에서도 동일하게 적용될 것으로 간주하였기 때문에 본 연구의 기본 모형 형태는 2차식으로 선정하였다.

$$\boldsymbol{CV = \alpha + \beta ci + \omega ci^2 + \gamma d + \rho d^2} \qquad (1-2)$$

여기서

CV : 변동계수

ci : 혼잡지표

d : 링크길이

$\alpha, \beta, \gamma, \omega, \rho$: 파라미터

2. 확장 모형

도시내 도로는 좁고 짧으며 다양한 시설이 있어 지역간 도로 대비 개별 주행행태가 다양하다는 특징을 갖는다. 이에 따라 확장모형은 기본 모형에 도시내 도로 특성을 반영한 설명변수를 추가한다.

본 연구에서 주목하는 도시내 도로의 특성을 반영한 변수로는 식 (2-1)과 같이 제한속도 규제시설 여부, 중차량 비율, 회전차량 비율, 급가감속 비율, 일변동 특성변수이다.

$$\boldsymbol{CV = g(ci, d, SL, BR, TR, TNR, ADR, DF)} \qquad (2-1)$$

여기서,

CV : 변동계수

ci : 혼잡지표

d : 링크길이

SL : 속도제한 규제시설 여부(더미)

BR : 버스차량 비율

TR : 화물차량 비율

TNR : 회전차량 비율

ADR : 급가감속 횟수비율

DF : 일변동 특성

설명변수의 형태에 따라 확장 모형의 유형이 나뉜다. 설명변수가 연속형 변수일 경우 변수는 모형식의 1개의 항으로 추가된다. 그러나 설명변수가 범주형이면, 두가지 방법으로 수식에 적용될 수 있다. 첫 번째 방법은 더미변수화(Dummy Variable)이다. 더미변수화를 위해 특정 기

준을 바탕으로 변수를 0 혹은 1로 처리하여 모형식의 1개 항으로 포함시킨다. 두 번째 방법은 시장분할 분석이다. 전체 표본을 특정 기준에 따라 하위집단으로 분류하고 각 집단별로 모형식을 구축함으로써 변수를 적용한다.

1)확장 모형 1

① 첨두 시간대

$$\boldsymbol{CV = \alpha + \beta ci + \gamma ci^2 + \delta \mathrm{d} + \eta \mathrm{d}^2 + \zeta SL + \kappa BR + \mu TR + \omega TNR + \rho ADR} \quad (2-2)$$

② 비첨두 시간대

$$\boldsymbol{CV = \alpha + \beta ci + \gamma ci^2 + \delta \mathrm{d} + \eta \mathrm{d}^2 + \zeta SL + \kappa BR + \mu TR + \omega TNR + \rho ADR} \quad (2-3)$$

여기서,

CV	: 변동계수
ci	: 혼잡지표
d	: 링크길이
SL	: 속도제한 규제시설 여부(더미)
BR	: 버스차량 비율
TR	: 화물차량 비율
TNR	: 회전차량 비율
ADR	: 급가감속 횟수비율
$\alpha, \beta, \gamma, \delta, \eta, \zeta, \kappa, \mu, \omega, \rho$	: 파라미터

식 (2-2)를 살펴보면 도시내 도로 특성 중 일변동 특성을 적용하기 위해 시간대를 기준으로 첨두시간대와 비첨두시간대로 표본을 분류하고 각 집단별로 모형을 구축하였다. 반면에 속도제한 규제 여부 변수는 시설의 유무에 따라 0과 1로 처리하여 더미변수로 추가되었다.

그리고 도시내 도로 특성 변수 중 급가감속횟수비율 변수는 개별 차량의 주행상태 정보를 바탕으로 급작스럽게 주행속도를 변화시킨 운전자의 개별성향을 내포한다. 이에 따라 본 연구는 급가감속횟수비율 변수에 대하여 도로구간 내 공격적인 운전자가 많을수록 도로의 혼잡을 가중시킬 뿐만 아니라 도로의 혼잡 증가에 따른 통행시간 신뢰성 악화를 촉진하 것으로 가정하였다.

2) 확장 모형 2

① 첨두 시간대

$$\boldsymbol{CV = \alpha + \beta ci + \gamma ci^2 + \delta d + \eta d^2 + \zeta SL + \kappa\, BR + \mu\, ci * ADR + \omega TNR + \rho ADR} \quad (2-4)$$

② 비첨두 시간대

$$\boldsymbol{CV = \alpha + \beta ci + \gamma ci^2 + \delta d + \eta d^2 + \zeta SL + \kappa\, BR + \mu\, ci * ADR + \omega TNR + \rho ADR} \quad (2-5)$$

여기서,

CV	: 변동계수
ci	: 혼잡지표
d	: 링크길이
SL	: 속도제한 규제시설 여부(더미)
BR	: 버스차량 비율
TR	: 화물차량 비율
TNR	: 회전차량 비율
ADR	: 급가감속 횟수비율
$\alpha, \beta, \gamma, \delta, \eta,$ $\zeta, \kappa, \mu, \omega, \rho$	: 파라미터

가설에 따라 도로 혼잡도 변수와 급가감속 횟수 비율 변수간 상호작

용 효과(Interaction effect)를 계량화하고 모형식에 적용하기 위해 두 변수의 교차항을 추가하였다. 다만 도로 혼잡도 변수는 변동계수와 비선형관계에 따라 1차항과 2차항으로 적용되었기 때문에 도로 혼잡도 1차항과만 교차항을 처리한 경우, 도로 혼잡도 2차항과만 교차항을 처리한 경우 그리고 두 항에 모두에 처리한 경우를 각각 수행하였다.

제 2 절 모형 검증

추정 결과 검증은 두 단계로 수행된다. 먼저 회귀계수(R-squared), 가정 검정(잔차의 정규성, 다중 공선성 등)을 통해 모형별(기본 모형, 확장 모형1, 확장 모형2) 모형의 적합도와 가정의 적절성 여부를 확인한다. 다음으로, 3가지 모형의 예측 성능을 계산하여 모형간 비교를 통해 최종 모형을 선정한다. 예측 성능을 통한 모형 검증은 각 모형의 예측 결과와 추정에 사용되지 않은 실측 자료를 이용하여 3가지 지표를 계산하고 모형을 비교하여 이루어진다. 검증에 사용된 실측자료(149개)는 모형의 추정에 사용된 자료 외 자료로서 전체 데이터셋의 약 30%에 해당한다.

검증에 활용된 지표는 평균 절대 오차(Mean Absolute Error), 평균 제곱 오차(Root Mean Squared Error), 평균 절대 오차 백분율(Mean Absolute Percentage Error)이다. RMSE는 값이 작을수록 오차가 적다고 해석되며, MAPE의 경우 수치가 10 이하면 정확한 모형, 20 이하면 비교적 정확한 모형, 50 이상이면 부정확한 모형으로 판단한다(Meade, 1982; Ahn & Hyun, 2014). MAE는 RMSE와 동일하게 해석하되 모형 예측값 및 실측값과 같은 단위에서 해석된다.

① 평균절대오차

$$MAE = \sum \frac{1}{N} |y - \hat{y}| \tag{3-1}$$

② 평균제곱오차

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum (y - \hat{y})^2} \tag{3-2}$$

③ 평균절대오차백분율

$$MAPE = \frac{\sum \left| \frac{y - \hat{y}}{y} \right| * 100}{N} \tag{3-3}$$

여기서,

y : 실측값

$\hat{y}$: 예측값

N : 검증자료 수

제 4 장 분석 자료

본 장에서는 분석에 활용된 자료를 설명하고 선정된 통행시간 신뢰성 지표와 도시내 도로 특성 변수를 제시한다. 8가지 변수의 구축과정과 기술통계를 제시한다.

제 1 절 활용 자료

본 연구는 한국교통연구원 KTDB의 GPS 내비게이션 자료를 활용하여 변동계수, 도로구간 길이, 급가감속 횟수 비율을 계산하였다. 그리고 혼잡지표를 산정하기 위해 국토교통부 국가교통정보센터에서 제공하는 진주시 도로별 5분 단위 속도자료를 이용하였다. 진주시 경찰청이 수집하고 관리하는 어린이보호구역, 노인장애인보호구역, 과속 단속카메라의 위치 정보는 제한속도 규제시설 유무를 파악하는데 이용되었다.

1. 내비게이션 자료

선행 연구(한국도로공사, 2013; 윤서연 외, 2015; 한동희 외 2017; 박찬운, 2019; 한국교통정책경제학회, 2019)는 통행시간 신뢰성을 산정하기 위해 고속도로 운임수집시스템(Toll Collection System: TCS), 차량 검지시스템(Vehicle Detection System: VDS)기반 구간의 통행시간 자료, 차량 단말기와 노변기지국(Road Side Equipment: RSE)간 통신기반 개별차량의 주행궤적 자료, 범지구위치결정시스템(Global Positioning System: GPS), 통신자료로 집계된 구간별 속도프로파일 자

료를 활용하였다. 하지만 기존에 활용된 자료를 고려하면, 두 가지 측면에서 도시내 도로의 통행시간 신뢰성 추정에 한계가 드러난다.

첫 번째로 자료의 공간적 범위가 한정적이다. TCS, VDS, DSRC 시스템은 고속도로만의 통행시간과 통행량 등을 제공한다. 또한 국토연구원(2021)의 보고에 따르면, 한국교통연구원에서 제공하는 VIEW-T 자료는 하위도로를 포함한 모든 도로 유형의 시간대별 속도, 교통량을 일시적으로 제공하였으나, 현재는 하위도로 뿐만 아니라 고속도로 범위에서도 동일한 자료를 공개하지 않고 있다.

두 번째로 자료의 집계 단위가 크다. 기존 자료들은 개별차량이 도로구간을 진입하고 진출한 시간을 통해 도로구간의 주행시간과 평균 속도를 계산하였다. 이와 같은 집계방식의 경우, 차량의 도로구간 내 통행속도 변화를 알 수 없기 때문에 주행 중 상태를 파악할 수 없다. 하지만 도시내 도로에서는 좁고 짧은 기하구조와 다양한 운영 시설 때문에 가속 혹은 감속, 방향전환이 자주 일어나므로 다양한 주행 중 상태 변화를 파악할 필요가 있다. 이에 따라 도시내 도로의 통행시간 신뢰성을 추정하기 위해 도로구간 단위 내의 비집계 자료가 필요하다

본 연구는 차량 내비게이션 자료를 활용하여 기존 자료의 한계를 완화하였다. 차량 내비게이션 자료는 초 단위 포인트 자료로서, 초 단위 위치, 속도, 가감속도를 알 수 있기 때문에 개별차량의 도로구간 내 주행행태를 파악할 수 있다. 이를 통해 본 연구는 기존 통행시간 신뢰성 지표 모형이 설명하지 못했던 통행시간의 분산을 분석할 수 있다.

연구에서 활용한 내비게이션 자료는 한국교통연구원 KTDB 랩플랫폼 Track에서 관리·제공하는 자료이다. 랩플랫폼 Track은 "인공지능 기반의 미래교통운영 기반기술 개발 및 활용" R&D를 통해 이용자 맞춤형 자료 분석 환경을 제공한다는 목표로 구축된 모빌리티 빅데이터 리빙랩이다. 랩플랫폼 Track은 모빌리티 빅데이터(차량 내비게이션 자료, 모바일 자료, 대중교통카드 자료)와 자료 처리 기술을 OpenAPI 형태로 공

공에 제공하고 있다.

본 연구에서 사용한 모빌리티 빅데이터는 GPS 차량 내비게이션 자료로서, 아이나비 팅크웨어가 수집하고 제공하는 초 단위 포인트 궤적 자료이다. 차량용 내비게이션 단말기를 사용하는 차량으로부터 1초 간격으로 위치좌표(WGS84 도분 좌표계)를 수집하는 방식이다. 초 단위 포인트 궤적 자료는 “개별 차량의 이동경로에 대해 시간의 연속성과 공간의 연결성이 동시에 수집되는 자료”라는 의미를 갖는다(랩플랫폼 Track, 2023).

<표 4-1> 내비게이션 자료 정의서

필드명	설명
OBU_ID	통행 ID
PASNG_ID	통행식별부호
CVT_CD	차종구분코드
VTL_LINK_ID	GPS 와 매칭된 링크 ID
LINK_ENT_TM	링크 진입시간(Unix time)
LINK_EXT_TM	링크 진출시간(Unix time)
LINK_LNTH	네트워크 링크 길이
LINK_KPH	네트워크 링크 길이로 계산된 속도

내비게이션 자료는 8개의 필드로 정리되어 제공되는데 통행차량의 ID, 통행식별부호, 차종, 통과하는 도로구간, 도로구간 진입시간, 진출시간 등이 포함된다.

2. 교통소통정보 자료

본 연구는 진주시 전체도로에 대하여 표준 노드링크체계 기반 링크(도로구간)별 5분단위 통행속도 자료를 사용하였다. 5분단위 통행속도 자료는 국토교통부 국가교통정보센터가 제공하는 교통소통정보 자료에서 구축되었고, 연구의 분석 대상인 243개 도로구간별 혼잡상태를 파악하는데 활용되었다.

국가교통정보센터는 학술적, 산업적 활용을 위해 공공에 오프소스 자료를 제공하며, 교통소통정보, 돌발상황정보, CCTV 화상정보, 차량검지정보 등 다양한 정보를 API 인증 키 발급을 통해 제공한다(국가교통정보센터 보고서, 2019).

<표 4-2> 교통소통정보 자료 정의서

필드명	설명
resultCode	응답 코드 (0: 성공 / 1: 실패)
resultMsg	응답 메세지
totalCount	총 개수
roadName	도로명
roadDrcType	도로 방향 유형
linkNo	일련 번호
linkId	링크 ID
startNodeId	시작 노드 ID
endNodeId	종료 노드 ID
speed	통행 속도(시/km)
travelTime	통행 시간(초)
createdDate	생성 일시(YYYYMMDDHH24MISS)

교통소통정보 자료는 "응답 코드", "응답 메세지", "총 개수", "도로명

", "도로 방향 유형", "일련 번호", "링크 ID", "시작 노드 ID", "종료 노드 ID", "통행 속도(시/km)", "통행 시간(초)", "생성 일시"로 구성된다. 본 연구는 분석대상 도로구간의 첨두시간대와 비첨두시간대에 해당하는 자료를 링크 ID를 통해 추출하고 통행속도를 도로구간 단위로 집계하여 활용하였다.

3. 속도제한 규제 구간 위치자료

속도제한 시설의 설치위치 정보를 파악하기위해 진주시와 경찰청에서 제공하는 어린이보호구역, 노인장애인보호구역, 단속카메라구간 위치정보를 활용한다.

<표 4-3> 제한속도 규제 시설 정보 자료(예시)

위치(건물명)	위치(경위도)	도로명	규제시설 유형
장대동 반도병원 앞	35.1913324, 128.088337	경상남도 진주시 남강로 702	교통단속카메라
시외버스터미널 앞	35.1912871, 128.088655	경상남도 진주시 남강로 706	교통단속카메라
상대동 KT 맞은편	35.1836991, 128.117491	경상남도 진주시 대신로 260-1	교통단속카메라
상대동 홈플러스 앞	35.1880894, 128.117278	경상남도 진주시 대신로 310	교통단속카메라

해당 자료는 건물명, 경위도 좌표, 도로명을 통한 규제시설의 위치정보와 규제시설의 유형으로 구성된다.

진주시의 경우, 어린이 보호구역 66개소, 노인장애인보호구역 9개소, 교통단속 카메라 29개소로, 총 104개가 운영 중이다. 본 연구는 분석대상 도로구간에 한하여 제한속도 규제 시설 정보를 활용한다. 활용된

규제시설은 총 36개이며 규제시설 유형별로 어린이 보호구역 16개소, 노인장애인보호구역 5개소, 교통단속 카메라 15개소로 분류된다.

제 2 절 변수 구축

본 절에서는 통행시간 신뢰성에 영향을 미치는 요인을 선정하고 각 요인을 나타내는 최적의 지표를 추정 모형의 변수로 구축하였다. 각 변수별 정의, 산정 방법, 구축과정을 설명하고 기술통계를 제시한다.

1. 통행시간 신뢰성 지표

1) 도로구간 변동계수

통행시간 신뢰성을 추정하기 위해 통행시간 신뢰성을 적절히 계량할 수 있는 지표가 필요하다. 추정 연구의 최근 연구동향은 통행시간 신뢰성 지표로 표준편차를 활용한다. 표준편차는 직관적 해석이 용이하고, 예상 통행시간보다 짧은 통행시간도 고려할 수 있는 장점이 있다. 하지만 평균통행시간이 긴 도로구간과 짧은 도로구간에서의 표준편차의 크기는 의미가 다르기 때문에 절대적 편차를 나타내는 표준편차보다는 상대적 편차를 표현하는 변동계수(상대적 표준편차, 비율)나 평균지체(상대적 표준편차, 차이)가 보다 적절한 지표일 수 있다.

본 연구는 통행시간 변동계수를 지표로 통행시간 신뢰성을 산정한다. 변동계수는 동일시간대 동일한 도로구간을 이용하는 차량들의 통행시간 분포를 통해 산정된다. 변동계수는 평균통행시간으로 통행시간 표준편차를 나누어 식 (4-1)과 같이 산정된다.

$$CV = \frac{\sigma}{\mu} \qquad (4-1)$$

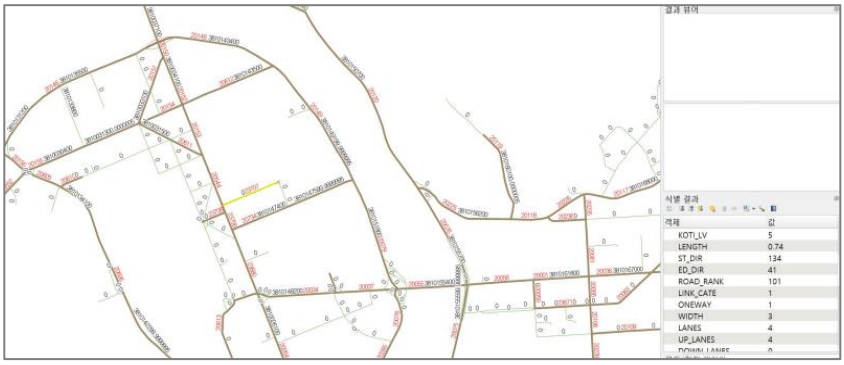
여기서

CV : 변동계수

σ : 평균통행시간 표준편차(초)

μ : 평균통행시간(초)

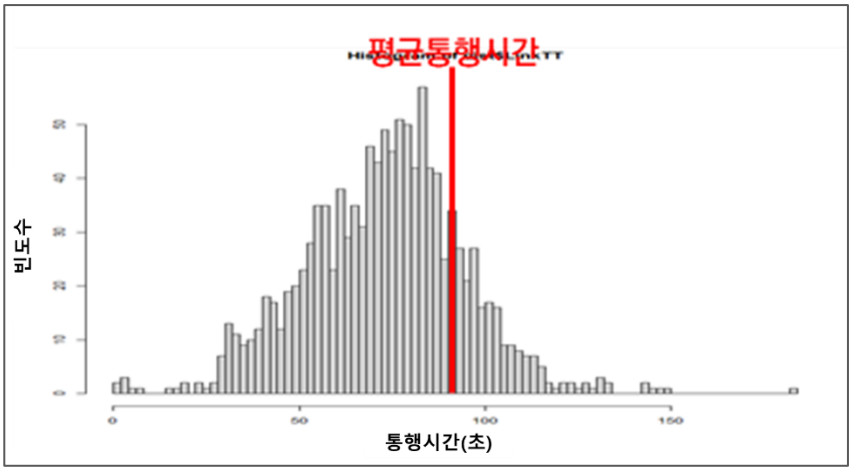
본 연구는 개별 차량의 통행시간 정보를 얻기 위해 경로기반 궤적 자료를 활용한다. 랩플랫폼 Track은 차량 내비게이션 자료를 자체 네트워크에 맵매칭하여 초별 포인트자료에서 링크 진입/진출자료로 가공하였다. 경로기반 궤적 자료는 차량이 통과한 도로구간의 정보(링크 아이디, 링크의 진입시간, 링크 진출시간)를 포함하기 때문에 내비게이션 탑재 차량들을 도로구간을 기준으로 집계할 수 있다.



<그림 4-1> 네트워크 맵매칭(Q-GIS)

맵매칭에 사용된 교통네트워크는 표준 노드-링크 네트워크 자료와 비교하여 링크가 보다 세분화되어 있으며 표준 노드-링크 네트워크 자료와 호환이 가능하다. 하지만 경로기반 궤적 자료는 한 행에 열 별로 한 차량(OBU ID)이 통과한 링크(Link ID)와 링크 진입(Link IN), 진출시간(Link OUT)이 연속으로 제공되고 있으므로 일련의 자료 전처리 과

정을 거쳐 시간대별 도로구간별 개별 차량들의 통행시간을 집계하였다.



<그림 4-2> 도로구간 '2055401' 통행시간 분포(예시)

이를 바탕으로 도로구간별로 집계된 차량들의 통행시간을 이용하여 통행시간 분포를 구축할 수 있다. 구축된 분포의 정보를 앞 식 (4-1), (4-2)을 통해 표준편차와 평균통행시간, 변동계수를 산정한다.

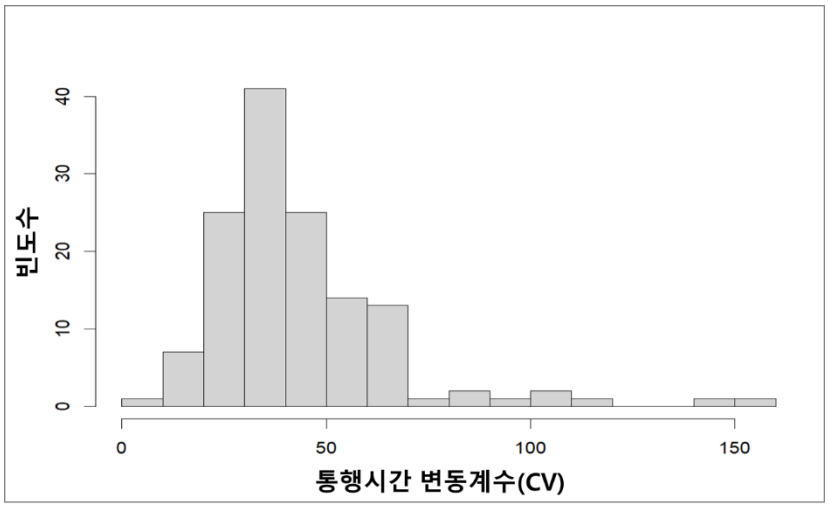
해당 과정에서 실제 측정값을 활용하기 때문에 표본에 이상자료(Extreme Value)가 포함될 수 있다. 본 연구는 이상치를 확인하고 제거하기 위해 IQR Method를 활용한다.

<표 4- 4> 이상치 기준

범위	분포 내 비율
$\mu \pm 1\sigma$	68.27
$\mu \pm 2\sigma$	95.45
$\mu \pm 3\sigma$	99.73
$\mu \pm 4\sigma$	99.99
$\mu \pm 5\sigma$	99.99

본 연구에서 이상치 기준은 $\mu \pm 3\sigma$이다. Hyder Consulting(2008)에서 적용한 방법으로 $\mu \pm 3\sigma$의 기준치를 이용하였다. 또한 남대식(2009)은 일반 범위의 고속도로 구간 속도를 살펴보기 위해 에서도 이

상치 제거 기준을 $\mu \pm 3\sigma$로 하였다. 본 연구의 이상치 판단기준은 통계적으로 전체 자료의 99.7%를 나타내며, 상위 및 하위 0.3%를 이상치로 규정하고 제거한다.



<그림 4-3> 변동계수 히스토그램

구축한 변동계수에 대하여 히스토그램, 시간대별 기술통계를 제시하였다. 변동계수의 히스토그램을 살펴보면 오른쪽 꼬리가 긴 분포를 보이지만 자료들이 전반적으로 평균에 수렴하고 양극단에 치우치지 않았으므로 산정과정에서 이상치가 적절히 제거되고 구축되었다고 볼 수 있다.

2. 통행시간 신뢰성 요인 지표

1)도로구간 혼잡지표

도로의 혼잡도는 소통수준을 나타내는 지표이다. 도로가 혼잡하면 소통수준이 좋지 못하고 교통류가 와해된 상태에서는 통행자가 도로를 통과하는 시간이 길어진다. 반대로, 도로의 혼잡도가 낮으면 소통이 원활함을 의미하고 통행자의 통행시간도 줄어든다. 이처럼 도로구간의 혼잡도는 통행자의 통행시간에 큰 영향을 미친다. 또한 선행연구(Eliasson, 2006; Macdonald, 2009; Peer, 2012; Geistefeldt, 2014; Kowenhoven & Warffemius, 2016)에 따르면 도로구간의 혼잡도를 통행시간 신뢰성(변동성)의 주요요인으로 제시하고 있다. 이에 따라 본 연구는 통행시간 신뢰성 요인으로 도로구간 혼잡도를 선정하였다. 혼잡도 지표로는 평균통행시간 혹은 평균통행속도, 용량-교통량비(V/C), 평균지체(Mean Delay: MD), 혼잡지표(Congestion Index: CI) 등이 존재한다(Juhász et al., 2017). 최근 연구동향에 따르면 도로구간의 혼잡도 지표는 혼잡지표, 평균지체를 많이 활용한다(Bate et al., 2004; Giestefeldt et al.,2014; de Jong and Bliemer, 2015).

혼잡지표란 도로의 혼잡상황을 나타내는 지표로서 기준속도로 통행한 시간 대비 특정 시간대 평균속도로 소요한 시간으로 계산한다.

$$ci = \frac{\text{평균속도 통행시간}}{\text{기준속도 통행시간}} \qquad (4-3)$$

여기서

ci : 혼잡지표

평균속도 통행시간 : 도로구간을 통과한 차량들의 통행시간 평균(분)

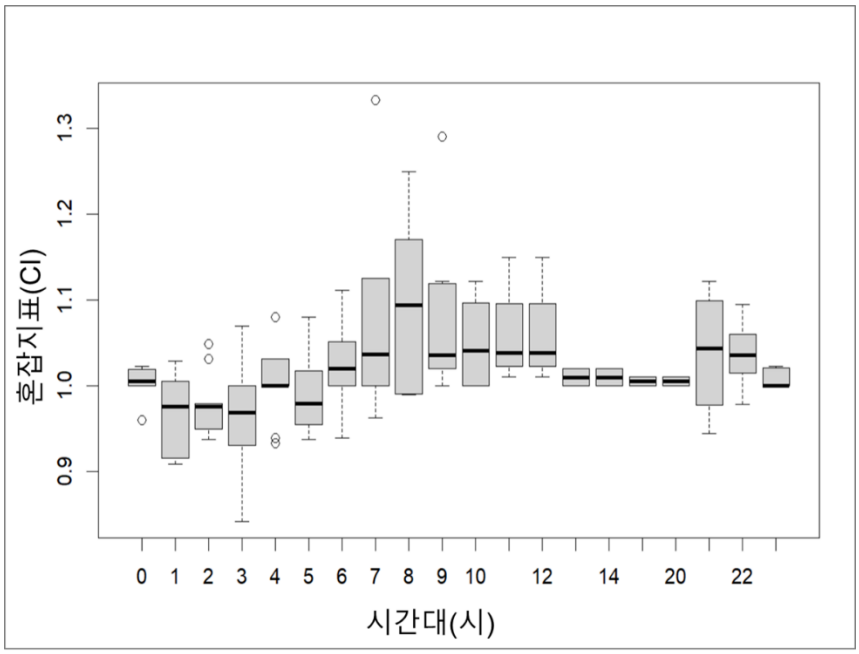
기준속도 통행시간 : 심야시간대 도로구간을 통과한 차량들의 통행시간 평균(분)

식(4-3)에 따라 본 연구는 혼잡지표를 계산하기 위하여 평균속도와 기준속도를 활용한다. 평균속도 통행시간은 구축한 도로구간 차량들의 통행시간을 평균하여 계산한다.

하지만 기준속도의 경우 기준속도 설정과 관련하여 다양한 방법이 있기 때문에 연구의 목적에 따라 방법을 선택하고 일정한 기준속도 통행시간을 설정하여야 한다.

기준속도란 혼잡이 없는 일정 수준 이하의 교통류 상태에서 일반적인 운전자가 통행하는 평균속도로 정의하고 있다(한국교통연구원, 2018). 그러나 혼잡이 없는 상태에서 측정한 속도자료는 구득하기 용이하지 않으므로 측정된 시간대 속도 중 가장 비혼잡한 시간대의 속도를 이용한다.

비혼잡한 시간대를 심야시간대(0~6시)로 활용한 연구가 있지만 한국교통연구원 KTDB에 따르면, 도로의 위치, 유형에 따라 심야시간대 화물차, 졸음운전과 같은 원인으로 새벽시간대가 비혼잡 시간대를 대표하기에 적절치 않다고 제시하였다(한국개발연구원, 2018). 박찬운(2019)은 기준속도로 한국교통연구원에서 제시한 도로의 수요분석용 초기속도를 활용하였다. 또한 한국교통연구원가 산정한 초기속도 기준에 따르면 시간대별 통행속도분포를 활용하여 누적%별 통행속도를 기준속도로 이용하였다.



<그림 4-4> 시간대별 혼잡지표(CI) 상자그림

혼잡지표는 기준속도 통행시간 대비 평균속도 통행시간으로 계산하며 도로의 혼잡함을 나타낸다. 시간대별 혼잡지표 상자그림을 통해 분포를 확인한 결과 시간대별 도로의 혼잡수준은 첨두시간대, 비첨두시간대, 심야시간대로 분류되는 것으로 보였다.

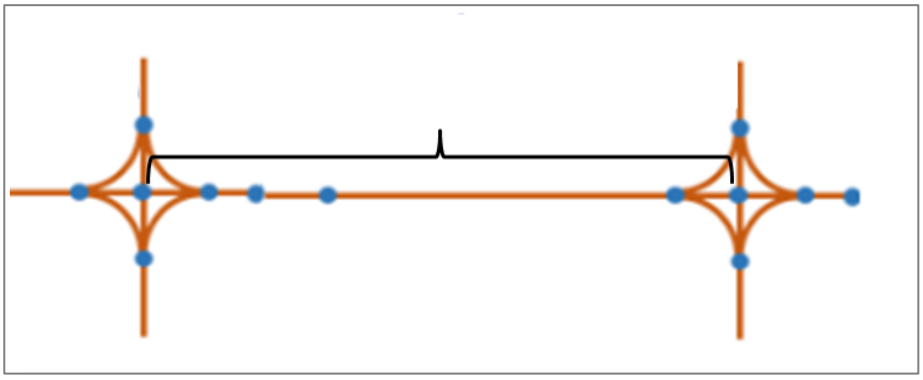
<표 4-5> 시간대별 혼잡지표(CI) 기술통계

	첨두시간대 (오전 및 오후)	비첨두시간대	심야시간대 (0-6 시)
최소값	0.842	0.87	0.75
1 사분위	0.991	0.956	0.892
중앙값	1.01	0.98	0.972
평균	1.028	0.966	0.933
3 사분위.	1.044	1	1
최대값	1.333	1.059	1.039

시간대별 혼잡수준 차이를 수치적으로 확인하기 위해 첨두시간대, 비첨두시간대, 심야시간대별 혼잡지표의 기술통계를 확인하였다. <그림 4-4>에서 보인 시간대별 극명한 차이와 달리, <표 4-5>에 따르면 혼잡지표의 평균은 첨두시간대에 가장 높았으며 심야시간대에 가장 낮았으나 시간대별 차이가 있다고 보이지 않았다.

2)도로구간 길이

도로구간 길이는 연구분석 대상 도로구간의 링크 길이다. 본 연구에서 링크는 신호교차로(노드)와 신호교차로(노드)사이 구간으로 정의된다. 그러므로 링크 길이는 신호교차로간 거리이며 대상 도로구간에 해당하는 네트워크 내 링크의 속성 정보(도로 길이)를 통해 계산된다.



<그림 4- 5> 네트워크 자료의 노드와 링크

도로구간 길이는 분석에 활용된 대상 도로구간들의 링크 길이로서 링크내 일부에서 속도변화를 겪더라도 손실된 시간을 회복할 수 있는 공간이다. 그러므로 긴 도로구간에서는 어떠한 이유로 차량간 속도 편차가 발생하더라도 통행자는 남은 거리동안 편차를 극복하여 도로구간의 끝지점에서는 차량간 편차가 적은 상태로 진출한다. 하지만 짧은 도로구간에서는 통행자가 돌발상황의 영향을 상쇄하기 이전에 도로 끝에 도착하므

로 차량간 통행시간 편차가 클 것이다.

<표 4-6> 도로구간 길이 기술통계

변수명	최소값	1 사분위수	중앙값	평균값	3 사분위수.	최대값
도로구간 길이(m)	80.56	347.4	728.5	2,098	4,058	4,297

도시내 도로에서 교차로와 이면도로가 빈번히 교차하기 때문에 도로구간의 길이가 짧다는 특징이 있다. 기술통계는 이러한 특징을 잘 반영하였는데, 분석대상 도로구간의 평균 길이는 약 2km이며 가장 긴 도로구간의 길이는 4.3km이다.

3)속도제한 규제시설 유무

본 요인은 속도제한 규제시설에 따른 통행자들의 속도 변화 행태가 도로의 통행시간 신뢰성에 영향을 준다는 가설에서 선택되었다.

도시내 도로의 특성 중 첫번째는 도시내 도로의 통행자는 도시간 도로를 주행할 때 보다 속도제한 규제를 빈번히 마주한다. 그리고 속도제한 규제시설에 접근하는 통행자는 통행속도를 제각기 변화시킨다. 이에 따라 본 연구는 속도제한 규제시설이 존재하는 도로구간은 존재하지 않는 구간보다 다양한 속도 편차를 보일 것이라고 예상한다.

또한 한국교통안전공단(2021)에 따르면, 5030시행 이후 50km/h 제한 도로에서 제한속도 준수율은 평균 78%에 해당하며 특히 준수율이 높은 구간일수록 차량간 속도 편차가 유의미하게 낮아졌다고 제시하였다. 이에 따라 제한속도 규제 구간의 통행시간 신뢰성 영향력은 규제시설의 유무 뿐 아니라 통행자들의 준수율에 따라 달라질 수 있다.

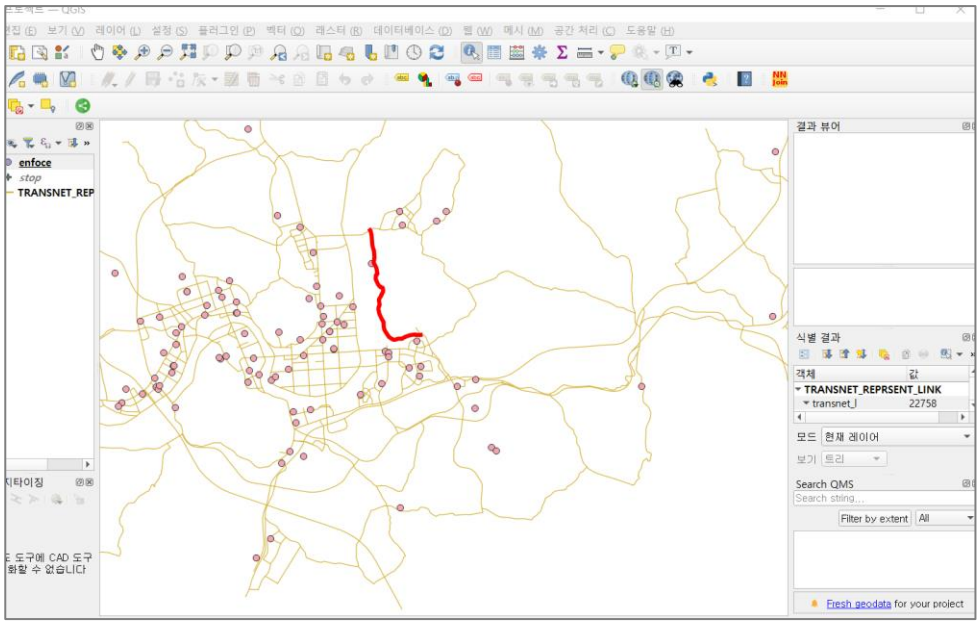
제한속도로 규제하는 시설유형은 어린이보호구역, 노인장애인보호구역, 단속카메라구간이 있으며 시설 위치가 포함된 도로구간은 속도제한 규제 구간으로 선정된다.

$$SL = 1\,(if\ \textit{도로구간 내 규제시설 존재}) \qquad (4-4)$$

여기서,

SL : **속도제한 규제시설 여부(1: 규제시설 포함, 0: 규제시설 미포함**

속도제한 규제 구간 여부 변수를 구축하기 위하여 2019년 진주시의 어린이보호구역, 노인장애인보호구역, 단속카메라 운영 정보를 파악한다. 그리고 Q-GIS 프로그램을 활용하여 해당 시설들의 위치(경위도 좌표)를 네트워크 자료와 병합한다.



<그림 4-6> 맵매칭 과정(Q-GIS)

분석 대상 도로는 총 126개의 구간이며, 이중 속도제한 규제 구간은 22개로 전체의 약 17.5%에 해당하며, 이 중 단속카메라 구간이 7.9%(10개), 어린이보호구역 6.4%(8개), 노인장애인보호구역 3.2%(4개)로 구성되었다.

<표 4-7> 도로등급별 속도제한 규제시설 분포

도로등급	단속카메라	어린이보호구역	노인장애인보호구역
고속도로	41	0	2.878
국가지원지방도	10	0	1.000
일반국도	276	53	1.993
지방도	201	87	1.189
시군도	352	33	1.787
연결로	59	0	1.424

4)도로구간 중차량 비율

중차량 비율은 버스차량 비율(Bus Rate: BR)과 화물차량 비율(Freight Rate: FR)로 구분한다. 도시내 도로에서 버스는 대중교통으로서 승객들에게 높은 정시성을 제공하는 수단이다. 또한 버스는 버스전용차로에서 운영되어 일반차량과의 물리적으로 분리되므로 주변 차량에 큰 영향을 미치지 않을 것으로 예상된다.

화물의 경우 박찬운(2019)은 도로구간의 중차량 비율이 도로의 통행시간 신뢰성에 영향을 미친다는 결과를 제시하였다. 그러나 화물차량의 경우 도시내 도로에서는 주로 1톤 이하의 소형화물차가 주행하므로 기존 연구의 중차량 변수와 다른 추정 결과를 보일 것이다.

$$BR = \frac{\sum \text{도로구간 버스 차량 대수}}{\sum \text{도로구간 차량 대수}} \tag{4-5}$$

$$FR = \frac{\sum \text{도로구간 화물 차량 대수}}{\sum \text{도로구간 차량 대수}} \tag{4-6}$$

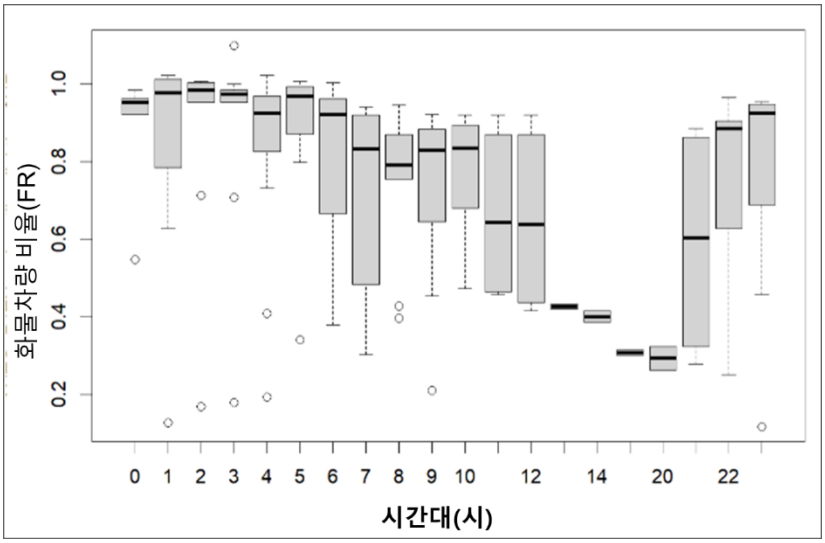
여기서,

BR : 도로구간 내 버스차량 비율

FR : 도로구간 내 화물차량 비율

버스차량 비율과 화물차량 비율은 각각 도로구간 전체 차량 대수 중 버스차량과 화물차량 대수의 비율로서 계산된다.

도로의 도시내 위치에 따라 다르지만, 시간대별 중차량 비율을 살펴보면, 중차량은 13시~20시 사이에 가장 적게 통행하고, 22시부터 심야시간개 05시까지 가장 많이 통행하는 것을 볼 수 있다.



<그림 4-7> 시간대별 중차량 비율

5)도로구간 회전차량 비율

도로구간 회전차량 비율은 도로구간 차량 대수 중 회전차량 대수(우회전, 좌회전)의 비율이다. 회전차량 비율은 내비게이션 자료 내 개별 차량의 회전 방향 정보를 통해 계산된다.

이는 도로구간에 차로 변경이 얼마나 많은가를 파악하는 변수로서 도로구간의 회전차량 비율이 높다면 통행자는 도로구간 주행 중 차로를 변경하는 차량을 마주할 가능성이 높다. 그리고 통행자는 충돌을 피하기 위해 주행상태를 변화시킬 것이다. 이에 따라 본 연구는 도로구간 회전차량 비율은 도로의 통행시간 신뢰성에 영향을 끼칠 것이라고 가설하였다.

$$TR = \frac{\sum \text{도로구간 회전차량 대수}}{\sum \text{도로구간 차량 대수}} \tag{4-7}$$

여기서,

TR : 도로구간 내 회전차량 비율

회전차량 대수 : 도로구간 차량의 회전차량 여부(1) 합계(1: 우회전, 좌회전, 0:직진)

회전차량 비율 산정은 개별 차량의 회전 방향(좌회전, 우회전, 직진) 정보가 활용된다. 네트워크 기반 차량 궤적 자료는 링크와 링크진입시간, 링크 진출시간, 회전정보가 있다. 회전 정보를 통해 해당 도로구간을 지나는 차량들의 회전 여부를 파악하고 합산하여 회전차량 비율을 계산한다.

6)도로구간 급가감속 횟수 비율

개별차량의 주행 궤적자료를 이용하여 주행가속도, 주행속도, 운전상태 등을 산정하고 이를 바탕으로 개별의 성향과 상황이 반영된 개별 특성을 통행시간 신뢰성 지표의 요인으로 구축한다

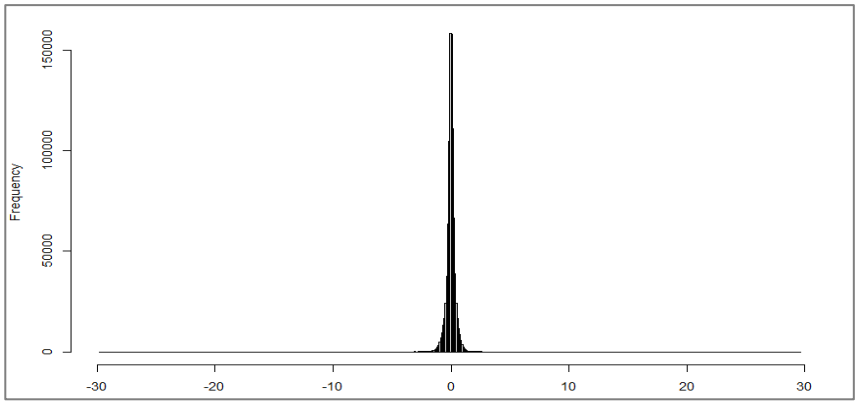
동일한 도로혼잡도 상황에서도 급가속과 급감속이 존재할 경우, 내부마찰이 크게 발생하고 주변 차량의 주행에 영향을 줄 것이라고 예상한다. 이러한 가감속도가 많은 도로구간에서는 통행시간 변동성이 크고 통행시간 신뢰성이 낮게 나올 것이라고 가정한다.

또한 가감속도는 보다 미시적으로 도로의 혼잡을 설명할 수 있기 때문에 평균속도가 설명하지 못하는 부분을 식별할 수 있다. 그 중 급가감속은 도로의 통행시간 신뢰성 지표에 영향을 줄 것이다. 이를 위해 본 연구는 급가감속을 계량적으로 정의하고 각 감속과 가속 중 급가속과 급감속을 구분하여 도로구간별로 전체 가/감속 중 급가속과 급가속의 비율을 계산한다.

도로구간 모든 차량들이 주행하면서 발생한 가속, 감속 이벤트 횟수 중 급가속과 급감속 횟수의 비율로 계산한다.

$$ADR = \frac{\sum \text{도로구간 급가속/급감속 주행 횟수}}{\sum \text{도로구간 가속/감속 주행 횟수}} \quad (4-8)$$

급가속 혹은 급감속은 주행 중 일반적으로 발생하는 가감속이 아닌 급작스러운 도로 위 상황에 대하여 운전자가 의식적으로 반응한 극적수준의 가속 호근 감속으로 정의한다. 본 연구는 가감속 분포에서 이상치로 해당하는 가감속을 급가감속으로 정의한다.



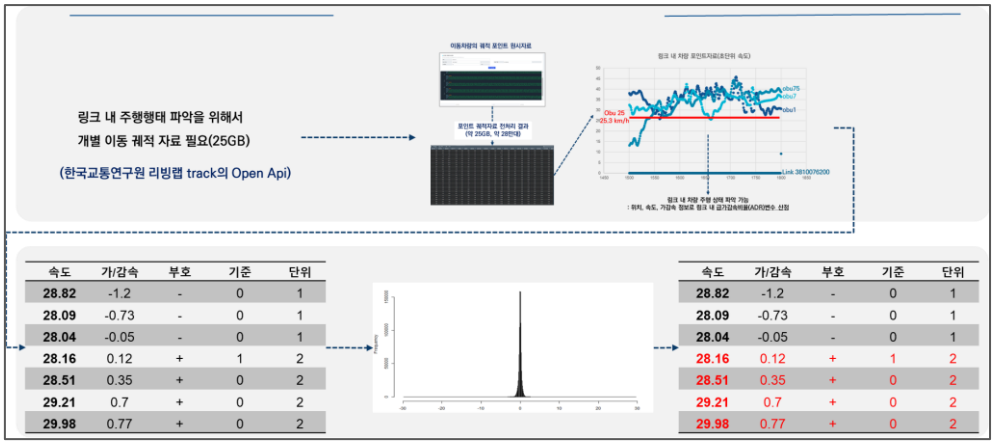
<그림 4-8> 가감속 크기 히스토그램

가감속 크기 분포를 통해 평균과 표준편차를 산정할 수 있고, 통계적 기법을 통해 이상치를 식별할 수 있다.

평균으로부터 1표준편차 떨어진 경우, 2표준편차 떨어진 경우, 3표준편차 떨어진 경우, 각 범위에서 차지하는 비율은 각각 68%, 95%, 99%이다. 반대로 나머지 범위 외에 차지하는 비율은 각각 32%, 5%, 1%이며 이를 이상치로 확인하고 급가속과 급감속을 정의할 수 있다.

가감속 크기의 분포를 기반으로 1표준편차를 기준으로 급가감속을 정의하는 기준치는 “1.76085m/s^2”, 급감속을 정의하는 기준치는 “-1.787933m/s^2”으로 계산되었다.

본 연구에서 대용량 개별 이동궤적 자료(25GB)를 통해 도로구간 내에서 개별 차량의 주행상태를 변수화 하였다.



<그림 4-9> 급가감속 횟수 비율 구축과정

GPS 포인트자료의 제공 형태는 Jason파일로 제공하며, 자료 형태는 List 유형으로서 차량별로 1초별 위치(경위도 좌표)를 제공한다.

우선 해당 포인트 자료를 교통네트워크와 매칭하여 분석 대상 도로구간별로 차량들의 궤적자료를 그룹화할 필요가 있다.

차량의 모든 궤적으로 네트워크 링크별 매칭하지 않고, 분석대상 도로 구간에 해당 차량의 진입시간과 진출시간 정보를 통해 차량의 궤적 둥 진입시간에 해당하는 시점부터 진출시간에 해당하는 시점까지 발췌한다. 이와 같은 과정은 모든 차량과 모든 분석대상 도로구간에 반복 시행하였다.

243개의 분석대상 도로구간에 대하여 전체 188,323대 차량 중 14,626대 차량의 궤적이 이용되었다. 분석대상 도로구간별 활용 차량은 다음 표와 같다

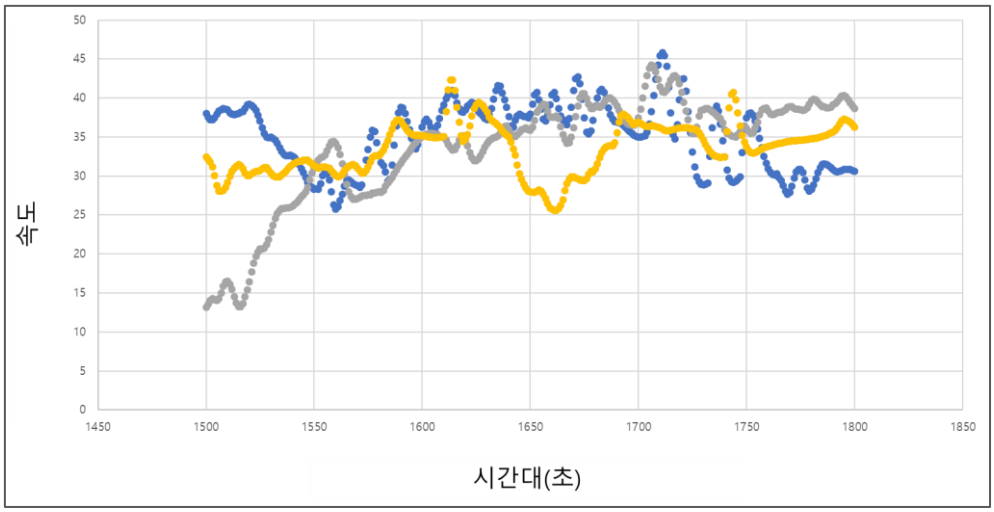
<표 4-8> 도로구간별 시간대별 궤적 개수(차량 대수)

No	도로구간 ID	시간대	차량 대수
1	10000	0	406
2	10000	1	403
3	10000	2	468

4	10000	3	437
5	10000	4	542
6	10000	5	402
	…	…	…

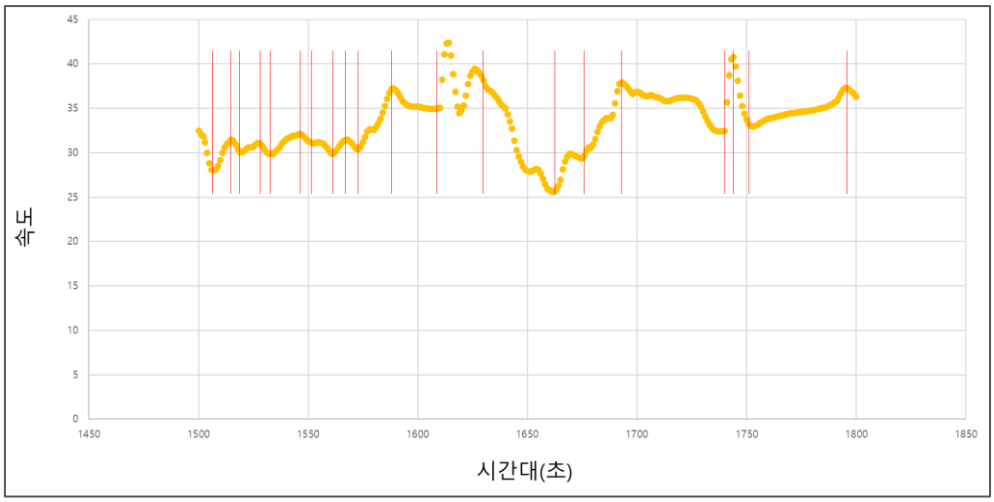
다음으로 1초별 위치자료인 궤적 자료로부터 가속도와 감속도 이벤트를 계산한다.

그러나 1초별 위치자료를 통해 1초별 속도와 1초별 가/감속도를 계산할 수 있으나, 위치와 속도가 주행상태인 것과 달리 가/감속은 운전자가 악셀이나 브레이크를 밟는 행위이며 이러한 행위를 지속하는 시간은 상황에 따라 다르다. 즉 가속도와 감속도의 크기를 계산하기 위하여 1번의 가감속을 한 단위시간을 모든 이벤트별로 계산하여야 한다. 이를 위해 본 연구는 속도의 부호 정보를 이용하였다.



<그림 4-10> 초단위 속도자료

먼저 급가감속을 계량적으로 정의하기 위하여 GPS 이동차량별 초단위 속도 자료를 이용한다. 초단위 속도로부터 한번의 가속 혹은 감속을 파악하기 위하여 초단위 속도차의 부호를 계산한다.



<그림 4-11> 초단위 속도와 한 단위 가감속 식별

부호가 '-'에서 '+'로 바뀌거나, '+'에서 '-'로 바뀔 때를 기준으로 한 단위의 가속과 감속을 정의한다.

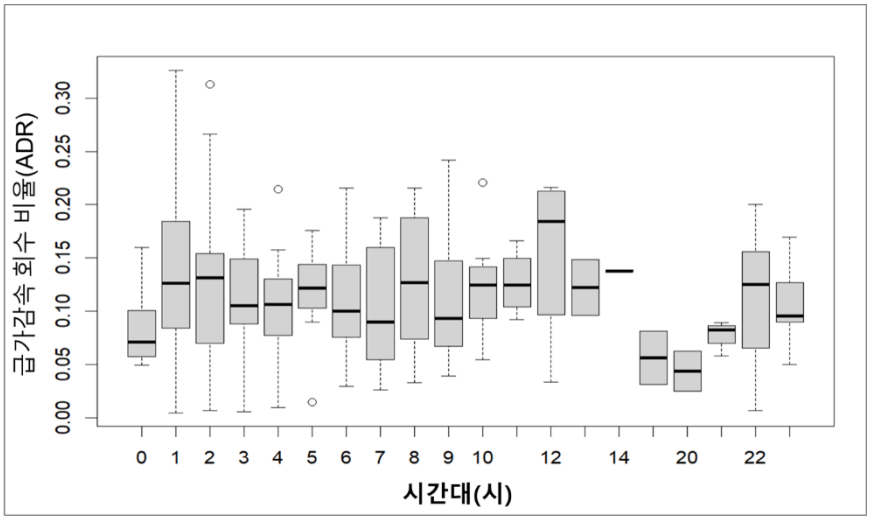
<표 4-9> 한 단위 가감속 식별과정

속도	가/감속	부호	기준	단위
32.47				
32.11	-0.36	-		
31.82	-0.29	-	0	1
31.17	-0.65	-	0	1
30.02	-1.15	-	0	1
28.82	-1.2	-	0	1
28.09	-0.73	-	0	1
28.04	-0.05	-	0	1
28.16	0.12	+	1	2
28.51	0.35	+	0	2
30.61	0.63	+	0	2
30.99	0.38	+	0	2
31.24	0.25	+	0	2
31.48	0.24	+	0	2
31.32	-0.16	-	1	3
30.95	-0.37	-	0	3

30.39	-0.56	-	0	3
30.05	-0.34	-	0	3
30.05	0	+	1	4
30.26	0.21	+	0	4

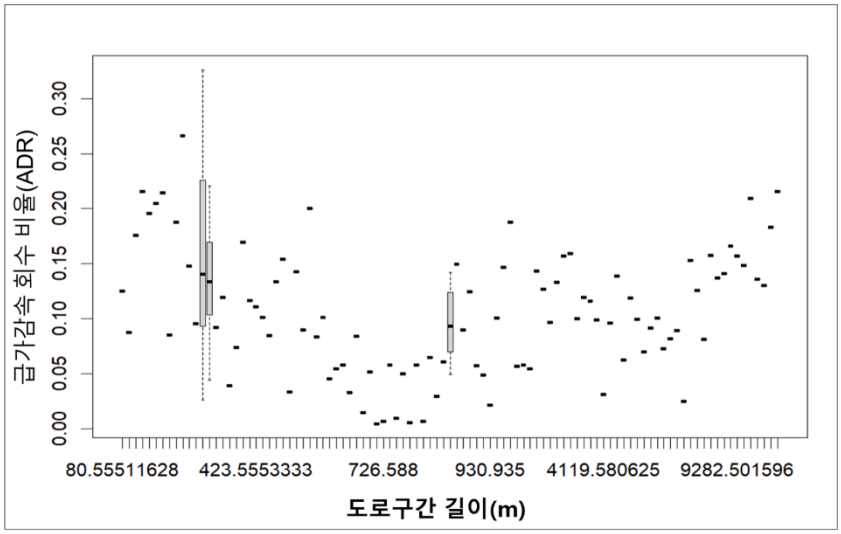
마지막으로 모든 가감속 이벤트별로 한 번의 가속과 감속행위를 지속한 시간이 정의되면 한번의 가속도와 감속도 크기를 계산한다. 이를 통해 일반적인 크기의 가감속과 극단적인 크기의 급가감속을 구별한다.

본 연구의 대상 도로에서 급가감속한 비율은 11.37%로 시간대별 급가감속 발생 비율은 아래와 같다.



<그림 4-12> 시간대별 ADR 상자그림

또한 도로구간의 길이가 길다면 시거가 확보되고 이에 따라 도로상황에 미리 반응이 가능하며 결과적으로 급가감속을 할 경우가 줄어든다. 이에 따라 도로구간 길이에 따른 급가감속 비율을 살펴보았다.



<그림 4-13> 도로구간 길이와 ADR 산점도

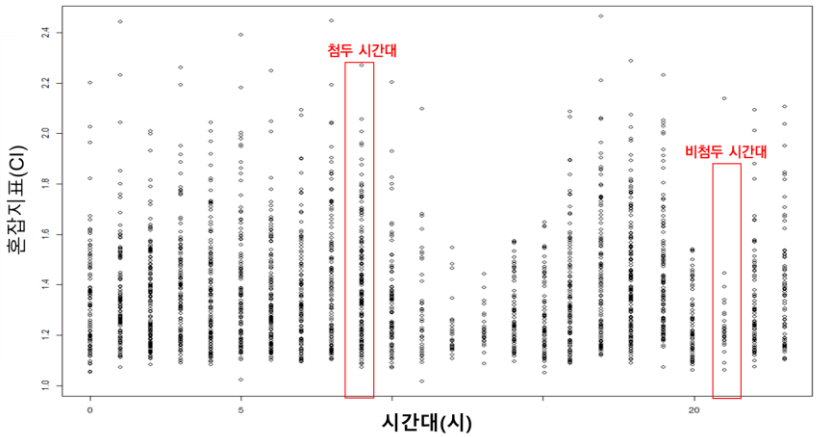
400m이하의 도로구간에서는 많은 급가감속이 발생하였다. 짧은 구간의 경우 신호교차로를 마주하는 경우가 많았다. 또한 주변차량으로의 내부마찰이 많기 때문에 기본적으로 가감속이 많이 발생하는 구간으로 해석된다.

그러나 예상과 달리 도로구간길이가 500~900m사이에서 가장 적은 급가감속이 발생하였고 이후 4km이상도로에서 급가감속 발생비율이 증가한다. 이는 도로의 마찰이 적고 설계속도가 높은 도로로서 차량은 고속으로 주행하는 경우가 빈번할 것이다. 하지만 고속도로와 달리 도시내 도로는 단속류로서 일정 빈도에서 교차하는 도로(비신호교차로, 이면도로 등)가 존재하고 이에 따른 감속 시 고속의 초기속도 영향으로 급가감속 비율이 많은 것으로 해석된다.

7) 일변동 특성

일변동(Diurnal variation) 특성은 시간대에 따른 통행행태 차이를 담는 변수이다. 도시지역의 통행자는 오전 첨두시간대에 통근을 목적으로 직장으로 향하므로 정시도착을 지향한다. 반대로 첨두시간대를 지나 비첨두 시간대에는 통행목적지의 위치가 공간적으로 분산되어 있으며 통행목적은 다양하므로 특정 행태를 뚜렷이 보이지 않는다.

이에 따라 오전 첨두시간대와 오후 첨두시간대, 비첨두시간대 각각 통행 행태(경향)이 다르며, 본 연구에서는 각 시간대에 따라 다른 행태가 신뢰성에 영향을 미칠 것이라고 가정한다. 첨두시간대의 통행자들은 반복된 통행의 경험으로 경로에 대한 정보가 많고 정시도착을 지향하므로 도로구간 내 돌발상황에도 통행속도를 쉽게 변화시키지 않을 것이다, 반면에 비첨두시간대 통행자는 통행시간의 변동을 최소하기보다는 통행시간을 최소화하기 위하여 지체를 유발하는 돌발상황을 회피하고자 한다.

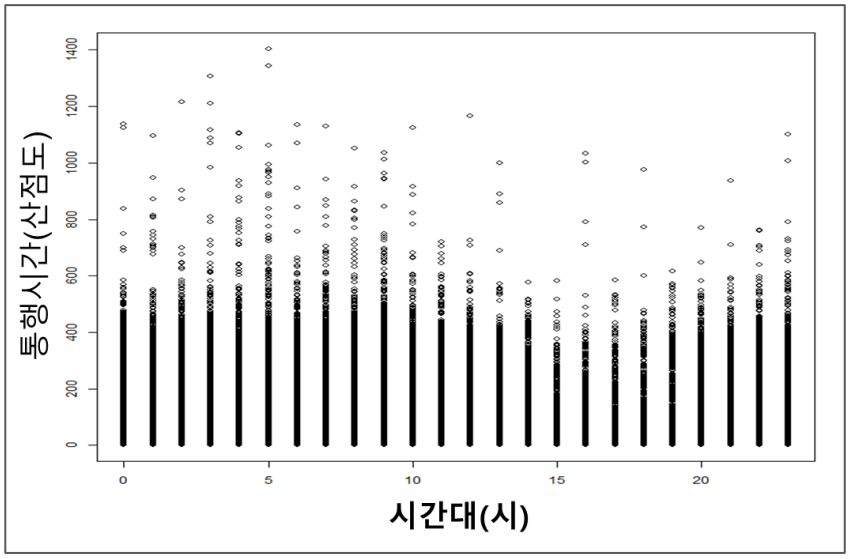


<그림 4- 14> 시간대별 변동계수

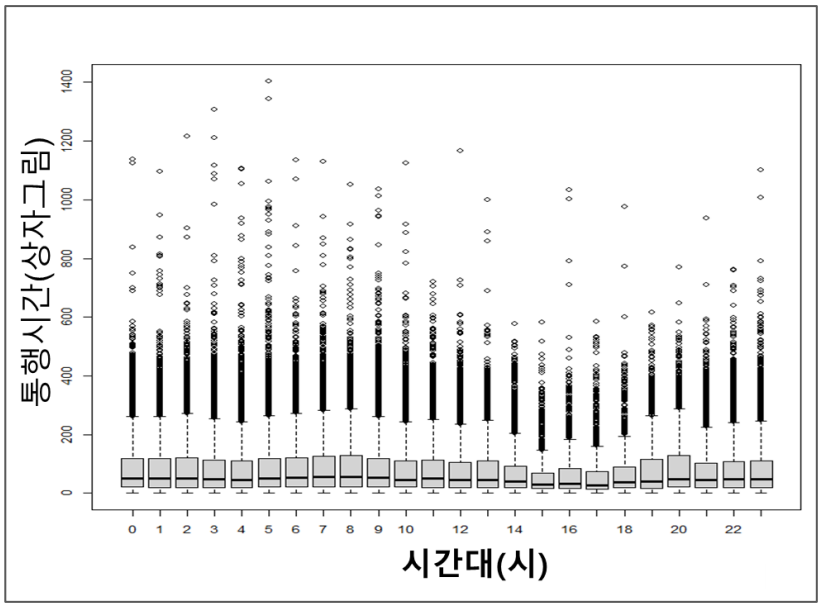
본 연구에서는 첨두시간대를 9시로 비첨두 시간대를 21시로 설정하였다. 일변동 특성을 변수로 반영하기 위하여 두 가지 방법 있다. 첫번

째는 더미변수(첨두시간대를 1, 그외를 0)로 계량화하고 모형에 추가하는 방법이다. 두 번째는 첨두시간대와 비첨두시간대로 하위 그룹을 만들고 각각 분석하는 시장분할 방법론 방식이다.

일변동(Diurnal variation) 특성은 시간대에 따른 통행행태 차이를 담는 변수로서 연속형 변수가 아니며 비첨두 시간대와 첨두 시간대 하위 집단 분류를 통해 확인할 수 있다. <그림 5-5>, <그림 5-6>은 시간대별 통행시간 분포, 상자그림으로서 평균 통행시간이 작은 경우와 통행시간 분산이 작은 경우를 시간대에 따라 확인하여 운전자의 주행 행태를 추정하였다.



<그림 4-15> 시간대별 통행시 변화 추이(1)



<그림 4-16> 시간대별 통행시간 분포 변화 추이(2)

오전, 오후 첨두시간대, 비첨두 시간대 각각 통행 행태(경향)이 다르며, 본 연구에서는 각 시간대에 따라 다른 행태는 도로의 통행시간 신뢰성 지표 크기에도 영향을 미칠 것이라고 가정한다.

제 5 장 도시내 도로 통행시간 신뢰성 추정

본 연구는 개별 차량의 통행시간을 서로 다르게 하는 요인에 대해 “도시내 도로의 통행시간 신뢰성은 도로구간의 혼잡도와 도시내 도로 특성으로 결정된다”라는 관점으로 접근한다. 이에 따라 우선 기존 지역간 도로에서 밝혀진 연구결과가 도시내 도로에서도 유의한지를 알아보기 위해 혼잡도와 도로구간 길이를 설명변수로 2차함수 형태의 기본 모형을 설정한다. 그리고 도시내 도로의 특성을 반영한 확장모형을 구축한다.

구축한 3개의 모형(기본 모형, 확장모형1, 확장모형2)에 대해 회귀계수(R-squared), 가정 검정(잔차의 정규성, 다중 공선성 등)을 통해 모형의 적합도와 가정의 적절성 여부를 확인한다. 그리고 각 모형의 예측 성능을 계산하여 모형간 비교를 통해 최종 모형을 선정한다.

<그림 5-1> 분석 대상 도로구간

본 연구의 공간적 범위는 경상남도 진주시 도시지역 단속류 도로로

한정하였다. 시간적 범위는 GPS 내비게이션 자료의 구득가능 조건에 따라 2019년 03월 3주차로 설정한다. 연구의 대상은 첨두시간대와 비첨두시간대의 도시내 도로구간이며 분석 대상 도로구간의 공간적 분포는 <그림5-1>과 같다. 짧고 좁은 도로를 대상으로 선정하였기 때문에 도시의 골격을 담당하는 외곽도로는 제외되고, 도시의 중심부에 위치한 도로가 포함되었다.

<표 5-1> 분석 대상 도로구간 현황(진주시)

도로등급	도로구간 개수	분석 대상 도로구간 개수	평균 도로 연장 (km)	평균 차로 수
고속도로	41	0	2.878	2.8
국가지원지방도	10	0	1.000	3.1
일반국도	276	113	1.993	0.76
지방도	201	97	1.189	1.58
시군도	352	33	1.787	0.52
연결로	59	0	1.424	0.44

<표 5-1>을 통해 분석 대상 도로구간의 세부사항을 살펴본 결과 도로등급은 일반국도, 지방도, 시군도에 해당하고 도로 연장은 평균적으로 1.1km에서 1.9km까지 비교적 짧으며 평균 차로 수는 2차로 이하이다.

제 1 절 통행시간 신뢰성 추정

1. 기본 모형

1)통행시간 신뢰성과 혼잡도 지표 선정

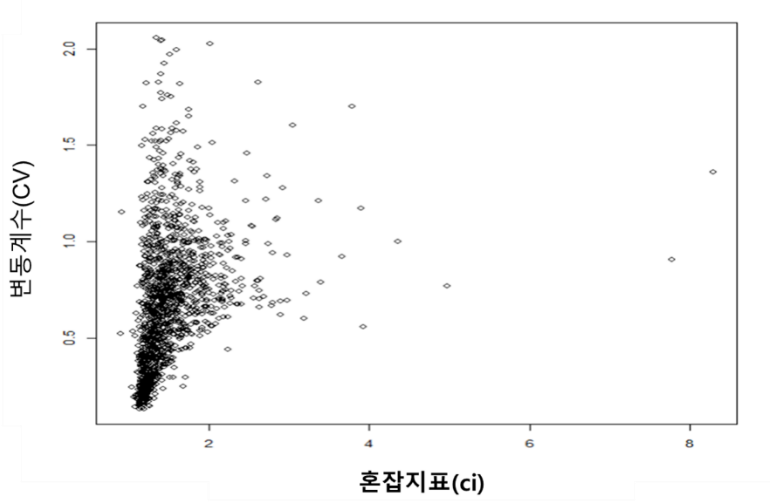
통행시간 신뢰성 추정에 앞서 통행시간 신뢰성 지표의 대안인 변동계수, 표준편차와 혼잡도 지표의 대안인 혼잡지표, 평균지체 그리고 도로구간 길이간 상관관계를 분석하고 통행시간 신뢰성과 혼잡도의 적절한 지표를 선정하였다. 본 연구는 통계분석 프로그램 R의 cor() 함수를 통해 상관분석을 수행하였고, 각 변수에 대한 피어슨 상관계수를 구하였다.

<표 5-2> 통행시간 신뢰성과 혼잡도 상관분석

	SD	CV	ci	d	MD
SD	1.000	0.205	0.354	0.400	0.573
CV	0.205	1.000	0.318	-0.479	-0.091
ci	0.354	0.318	1.000	-0.221	0.471
d	0.400	-0.479	-0.221	1.000	0.433
MD	0.573	-0.091	0.471	0.433	1.000

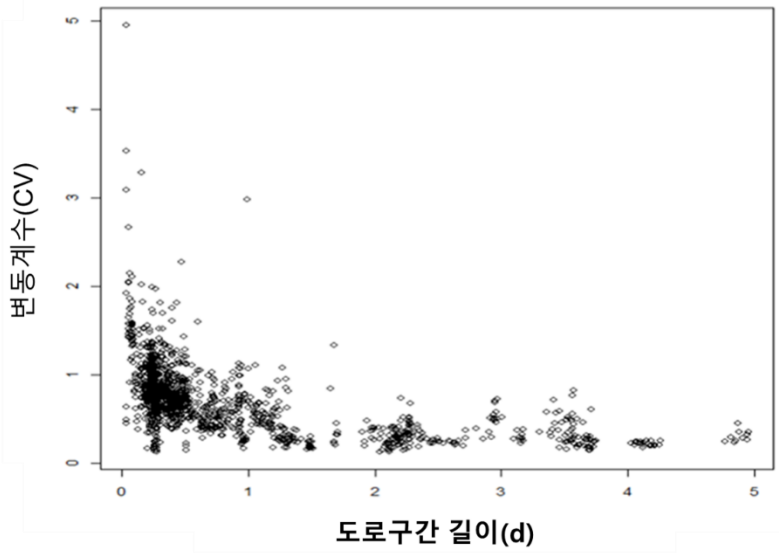
<표 5-2>는 통행시간 신뢰성 지표 후보인 표준편차(SD)와 변동계수(CV)와 설명변수인 혼잡지표(ci)와 평균지체(MD), 도로구간 길이(d)간 상관계수를 살펴보았다. 표준편차는 혼잡지표, 평균지체와 상관성이 존재하지만 평균지체와 더 높은 상관성을 보였다. 또한 도로구간 길이에도 양의 상관관계를 보였다. 변동계수는 혼잡지표와 상관성을 보였고 도로구간 길이와는 음의 상관관계를 보였다.

2)혼잡지표 및 도로구간 길이 형태 검토



<그림 5-2> 통행시간 변동계수와 혼잡지표간 산점도

구축한 자료에서 혼잡지표와 변동계수 간의 산점도를 살펴보면 혼잡지표 2.5를 넘어가면서 변동계수가 감소하는 경향을 확인할 수 있다. 이러한 경향을 통해 가설한 바와 같이 2차 함수 형태가 적절한 것으로 보인다. 변동계수가 감소하는 경향이 크지 않아 Power 함수 형태도 가정될 수 있으나 큰 값의 혼잡지표가 충분히 구축되지 않아 발생한 것으로 보고 본 연구는 혼잡도와 신뢰성 간 모형구축을 위해 2차 함수로 진행한다.



<그림 5-3> 통행시간 변동계수와 길이간 산점도

또한 도로구간 길이의 경우, 기존 연구 결과에 따르면 충분한 도로구간 길이가 있다면 도로구간의 돌발상황으로 속도 편차가 발생하더라도 그 영향을 극복하고 도로구간 끝에서 속도 차이가 감소하지만 도로구간 길이와 통행시간 변동계수를 선형관계로 해석하기에는 무리가 있다. 일정 도로구간 길이 이상인 도로에서는 오히려 도로구간이 길어서 돌발상황이 발생할 확률이 높아지고 이에 따라 도로구간일 길수록 속도 편차가 발생할 경우도 존재하기 때문이다. 또한 도로구간 길이와 변동계수 간의 산점도를 살펴본 결과, 3km 이상 도로구간에서 길이가 증가하면서 변동계수가 증가하는 경향을 볼 수 있다. 이를 바탕으로 본 연구는 도로구간 길이와 통행시간 변동계수를 2차 함수 형태로 설정한다.

3)추정 결과

혼잡지표와 도로구간 길이의 2차 함수형태로 변동계수를 추정한 기본 모형은 식 (5-1)과 같다.

$$\boldsymbol{CV = \alpha + \beta ci + \gamma ci^2 + \delta d + \mu d^2} \qquad (5-1)$$

여기서,

CV : 변동계수

ci : 혼잡지표

d : 링크길이

$\alpha, \beta, \gamma, \boldsymbol{\delta}, \boldsymbol{\mu},$: 파라미터

기본 모형을 기반으로 추정한 통행시간 신뢰성 지표 추정 결과는 다음과 같다.

<표 5-3> 도시내 도로 통행시간 신뢰성 지표 추정 결과 – 기본 모형

	추정값	표준오차	t	유의확률
$\boldsymbol{\alpha}$	0.555533	0.046944	11.834	〈 2e-16 ***
$\boldsymbol{\beta}$	0.319962	0.036606	8.741	〈 2e-16 ***
$\boldsymbol{\gamma}$	-0.030679	0.005731	-5.353	1.01e-07 ***
$\boldsymbol{\delta}$	-0.475931	0.022257	-21.383	〈 2e-16 ***
$\boldsymbol{\mu}$	0.082661	0.005629	14.684	〈 2e-16 ***
R^2	0.5627			

<표 5-3>는 기본모형의 추정 결과를 나타낸다. 기본 모형의 회귀계수가 0.5627이므로 모형의 적합도의 경우 도로 혼잡도와 도로 길이가 변동계수를 56% 설명하는 것으로 나타났다. 기본 모형은 혼잡지표와 혼

잡지표의 제곱, 도로구간 길이와 도로구간 길이의 제곱으로 이루어진 비선형 모형이므로 다중공선성 진단에 적합하지 않다. 혼잡지표는 변동계수를 설명하는데 유의한 변수이다(1차항 유의확률: 2e−16 ***, 2차항 유의확률: 1.01e−07 ***). 그리고 두 변수간 관계는 위로 볼록한 포물선으로 가설과 같이 도로 혼잡도가 어느 수준을 넘어서면 차량간 속도편차는 감소한다. 도로구간 길이 또한 유의한 결과(1,2차항 유의확률:< 2e−16 ***)를 보였으며 변동계수와 아래로 볼록한 포물선 관계이다.

2. 확장 모형

확장모형은 도시내 도로의 이질적 특성을 반영하여 도시내 도로 통행시간 신뢰성 지표를 보다 정교하게 추정하기 위해 구축되었다. 이를 위해 기존에 밝힌 혼잡지표와 도로구간 길이로 구축한 기본 모형에 도시내 도로 특성 변수를 추가하였으며 도시내 도로 특성 변수들은 크게 도시내 도로 기하구조, 운영시설과 관련한 변수와 도시내 도로 개별 주행행태와 관련한 변수로 구분된다. 도로의 회전차량 비율과 중차량 비율의 경우 도로구간의 교통류의 특성을 도로구간 기반 집계된 교통량에 국한하지 않고 주행 방향, 주행 능력에 따라 세분화한 변수이다. 급가감속 횟수 비율은 특정 상황에서의 운전자의 주행특성을 반영한 변수이다. 동일한 혼잡도, 동일한 도로구조에서 이용자의 개별 특성이 신뢰성 지표에 영향을 줄 수 있음을 살펴볼 변수이다.

1)추정 결과 1 – 하위집단별 다중 회귀분석

기본 모형에 도시내 도로의 특성을 나타내는 변수 6개를 동시에 투

입하였다. 단 일변동 특성 변수와 속도제한 규제 여부 변수는 범주형 변수이며, 각각 시장분할 분석과 더미변수로 모형에 적용되었다.

이에 따라 일변동 특성의 경우 비첨두 시간대와 첨두 시간대 하위집단을 분류하고 시간대별로 모형을 구축하고 통행시간 신뢰성을 추정하였다. 그리고 모형간 파라미터 차이가 통계적으로 유의한지를 Chow 검정을 통해 확인하였다. 그리고 속도제한 규제 여부 변수는 규제시설 유무에 따라 0과 1로 코딩하여 변수화 하였다. 결과적으로 도시내 도로 특성 변수 6개 중 5개 변수는 모형의 설명변수로서 식(5-2)와 같이 동시에 투입하여 적용하였다.

① 첨두 시간대

$$\boldsymbol{CV = \alpha + \beta ci + \gamma ciTT^2 + \delta d + \eta d^2 + \zeta SL + \kappa BR + \mu TR + \omega TNR + \rho ADR} \quad (5-2)$$

② 비첨두 시간대

$$\boldsymbol{CV = \alpha + \beta ci + \gamma ciTT^2 + \delta d + \eta d^2 + \zeta SL + \kappa BR + \mu TR + \omega TNR + \rho ADR} \quad (5-3)$$

여기서,

CV	: 변동계수
ci	: 혼잡지표
d	: 링크길이
SL	: 속도제한 규제시설 여부(더미)
BR	: 버스차량 비율
TR	: 화물차량 비율
TNR	: 회전차량 비율
ADR	: 급가감속 횟수비율
$\alpha, \beta, \gamma, \delta, \eta, \zeta, \kappa, \mu, \omega, \rho$	: 파라미터

추정 결과 도시내 도로 특성 변수 중 일변동 특성, 버스 차량 비율, 급가감속 횟수 비율이 통행시간 변동계수에 영향을 미치고 있음을 확인했다. 식(5-4)~(5-5)는 유의미한 도시내 도로 특성 변수로 재구성한 확장 모형이다.

① 첨두 시간대

$$\boldsymbol{CV = \alpha + \beta ci + \gamma ciTT^2 + \delta d + \mu d^2 + \vartheta BR + \varphi ADR} \quad (5-4)$$

② 비첨두 시간대

$$\boldsymbol{CV = \alpha + \beta ci + \gamma ciTT^2 + \delta d + \mu d^2 + \vartheta BR + \varphi ADR} \quad (5-5)$$

여기서,

CV	: 변동계수
ci	: 혼잡지표
d	: 도로구간 길이
BR	: 버스차량 비율
ADR	: 급가감속 횟수 비율
$\boldsymbol{\alpha, \beta, \gamma, \delta, \mu, \vartheta, \varphi}$	: 파라미터

<표 5-4> 추정결과 – 확장모형1 (하위집단별 다중 회귀모형)

	첨두시간대		비첨두시간대	
	Estimate	Pr(>|t|)	Estimate	Pr(>|t|)
$\boldsymbol{\alpha}$	0.38329	0.01842 *	-0.24144	0.588
$\boldsymbol{\beta}$	0.6248	7.02e-06 ***	1.23869	0.0227 *
$\boldsymbol{\gamma}$	-0.10062	0.00049 ***	-0.30156	0.0596.
$\boldsymbol{\delta}$	-0.52449	< 2e-16 ***	-0.48085	2.86e-11 ***
$\boldsymbol{\mu}$	0.09443	1.01e-09 ***	0.08777	4.29e-07 ***

ϑ	-1.65747	0.02597 *	-0.30572	0.7303
φ	1.64398	0.075092.	4.98196	0.0259 *
R-squared	0.6045		0.5873	

<표5-4>의 파라미터 추정 결과를 살펴보면, 확장 모형의 회귀계수가 0.6045(첨두시간대), 0.5873(비첨두시간)이므로 모형의 적합도가 기본모형 대비 증가하였다. 확장 모형은 기본 모형에 도시내 도로 특성 변수가 추가되었으므로 다중공선성 진단을 수행하였다. 버스차량 비율 변수의 분산팽창계수(VIF, Variance Inflation Factor)는 1.075735, 급가감속 횟수 비율의 VIF는 1.116140로 설명변수가 다중공선성은 작은 수준으로 확인되었다.

또한 일변동 특성 변수의 영향력을 살펴보면, 시간대별로 각 변수의 파라미터가 부호는 동일하지만 크기가 다르다는 것을 확인할 수 있다. 그러나 이와 같이 정성적으로 확인한 파라미터의 차이는 결과 해석에 한계가 존재하므로 Chow 검정 통계량을 통해 통계적 유의성을 확인하였다.

Chow test는 하위집단별로 회귀분석 추정모형을 달리 구축해야 하는지를 검정하는 방법이다(Chow, 1960). 본 연구에서 첨두시간대와 비첨두 시간대로 하위 집단을 분류하고 집단별 추정 결과가 유의미하게 차이가 있는지를 검증하기 위해 Chow test를 실시하였다.

<표 5-5> Chow test 결과 – 일변동 특성 변수

구분	기준
	첨두시간대 - 비첨두 시간대
F-value	3.4446
유의확률	0.03283

Chow검정을 수행한 결과 첨두시간대와 비첨두시간대에 따라서 통

행시간 신뢰성 추정 결과는 구분하여 추정하는 것이 적합하다고 확인하였다. 이는 정시도착을 지향하는 첨두시간대와 최소시간 통행을 지향하는 비첨두시간대 통행 행태에 차이로 볼 수 있다. 최소시간을 지향하는 비첨두시간대 통행은 혼잡에 따른 반응을 크게 하므로 통행시간 편차가 크게 발생하고 이는 파라미터의 크기가 첨두시간 대비 큰 값을 보이는 것으로 확인할 수 있다.

2)추정 결과2 – 하위집단별 상호작용 회귀분석

급가감속 횟수 비율 변수에 대하여 도로구간 내 공격적인 운전자가 많을수록 도로의 혼잡을 가중시킬 뿐만 아니라 도로의 혼잡 증가에 따른 통행시간 신뢰성 악화를 촉진하 것으로 가정하였다. 가설에 따라 도로 혼잡도 변수와 급가감속 횟수 비율 변수간 상호작용 효과(Interaction effect)를 계량화하고 모형식에 적용하기 위해 두 변수의 교차항을 추가하였다.

① 첨두 시간대

$$\boldsymbol{CV = \alpha + \beta ci + \gamma ciTT^2 + \delta d + \eta d^2 + \kappa\, BR + \rho ADR + \mu\, ci * ADR + \omega ci^2 * ADR} \quad (5-5)$$

② 비첨두 시간대

$$\boldsymbol{CV = \alpha + \beta ci + \gamma ciTT^2 + \delta d + \eta d^2 + \kappa\, BR + \rho ADR + \mu\, ci * ADR} \quad (5-6)$$

여기서,

CV : 변동계수

ci : 혼잡지표

d : 링크길이

SL : 속도제한 규제시설 여부(더미)

BR : 버스차량 비율

TR : 화물차량 비율

TNR : 회전차량 비율

ADR : 급가감속 횟수비율

$\alpha, \beta, \gamma, \delta, \eta, \zeta, \kappa, \mu, \omega, \rho$: 파라미터

도로 혼잡도 변수는 변동계수와 비선형관계에 따라 1차항과 2차항으로 적용되었기 때문에 도로 혼잡도 1차항과만 교차항을 처리한 경우, 도로 혼잡도 2차항과만 교차항을 처리한 경우 그리고 두 항에 모두에 처리한 경우를 각각 수행하였다.

<표 5-6> 추정결과 – 확장모형2 (하위집단별 상호작용 회귀모형)

	첨두시간대		비첨두시간대	
	Estimate	Pr(>|t|)	Estimate	Pr(>|t|)
α	1.51277	< 2e-16 ***	1.77604	6.41e-07 ***
β(ci)	0.79472	1.93e-05 ***	1.48113	0.00693 **
γ(ci2)	-0.14546	0.000695 ***	-0.3869	0.01667 *
δ(d)	-0.51927	< 2e-16 ***	-0.46741	4.48e-11 ***
μ (d)	0.09486	6.68e-10 ***	0.08575	4.56e-07 ***
ϑ (BR)	-1.78637	0.015657 *	-0.16754	0.84972
φ (ADR)	-11.31537	0.012559 *	5.8111	0.01080 *
U(ci * ADR)	-17.50759	0.027032 *	-13.88464	0.06958 .
V(ci ^{2}* ADR)	3.20372	0.025853 *		
R-squared	0.6534		0.6345	

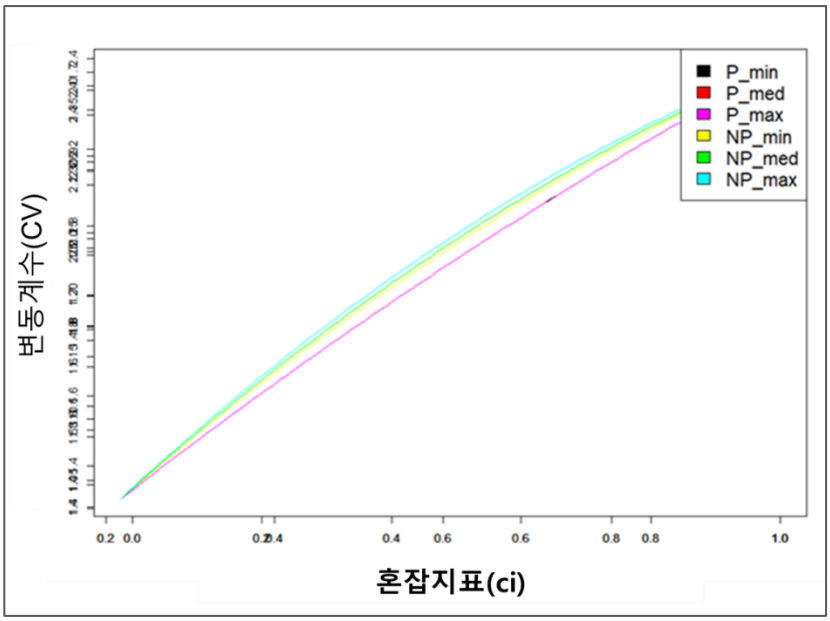
<표5-6>를 보면 모형의 적합도가 첨두시간대에 0.6534, 비첨두시간대에 0.6345로 기본모형과 확장모형1 보다 상승하였다. 그리고 첨두시간대와 비첨두 시간대에서 상호작용항의 파라미터가 유의성이 있었다. 즉 이 결과는 혼잡지표와 급가감속 횟수비율간 상호작용 효과가 있음을 의미하며 또한 급가감속 횟수비율(혼잡지표)의 수준에 따라 혼잡지표(급가감속 횟수 비율)와 변동계수간 기울기가 달라진다는 것을 의미한다. 또한 결과적으로 첨두시간대 급가감속 변수와 혼잡지표(1, 2차항)간 교차항이 유의하였다. 그러나 비첨두시간대 급가감속 변수와 혼잡지표의 1차항간 교차항은 유의하였지만 혼잡지표의 2차항과는 유의함을 보이지 않았다.

상호작용 효과의 통계적 유의함의 의미를 수식으로 나타내면 식(5-7)과 같다.

$$\boldsymbol{CV = \alpha + \beta ci + \gamma ci^2 + \delta d + \mu d^2 + \vartheta BR + \varphi ADR + uci * ADR + vci^2 * ADR} \quad (5-7)$$

$$= \boldsymbol{(\alpha + \varphi ADR) + (u * ADR + \beta)ci + (v * ADR + \gamma)ci^2 + \delta d + \mu d^2 + \vartheta BR}$$

또한 상호작용효과를 시각화하기 위하여 그래프를 그리고 급가감속 횟수비율의 수준을 최소값에서 중위값, 최대값으로 임의로 변화할 때 기울기 변화를 나타냈다. 첨두시간대와 비첨두 시간대의 그래프를 함께 나타냈다.



<그림 5-4> 혼잡지표와 급가감속 횟수비율 상호작용효과(첨두/비첨두)

급가감속 횟수비율이 많은 구간일수록 도로의 혼잡에 따라 통행시간 신뢰성이 크게 저하되는 것을 볼 수 있다. 반대로 도로가 혼잡한 구간에서는 어떠한 운전자의 급가감속 주행이 도로의 통행시간 신뢰성에 더 큰 영향을 준다고 볼 수 있다. 또한 첨두시간대보다 비첨두시간대에 급가감속 횟수비율과 혼잡지표간 상호작용효과가 강하게 작용한다.

3. 추정 결과

본 연구에서 제시하는 5개 모형(기본모형, 첨두시간대 확장모형1, 첨두시간대 확장모형2, 기본모형, 비첨두 시간대 확장모형1, 비첨두 시간대 확장모형2)에 대해 파라미터를 추정하였다.

<표 5-7> 추정 결과(기본 모형, 확장 모형1, 확장 모형2)

	기본 모형	확장 모형 1		확장 모형 2	
	-	첨두시간대	비첨두 시간대	첨두시간대	비첨두 시간대
	Estimate	Estimate	Estimate	Estimate	Estimate
α	0.555533 (< 2e-16)	0.38329 (0.01842)	-0.24144 (0.588)	1.51277 (< 2e-16)	1.77604 (6.41e-07)
β (ci)	0.319962 (< 2e-16)	0.6248 (7.02e-06)	1.23869 (0.0227)	0.79472 (1.93e-05)	1.48113 (0.00693)
γ (ci^2)	-0.030679 (1.01e-07)	-0.10062 (0.00049)	-0.30156 (0.0596)	-0.14546 (0.000695)	-0.3869 (0.01667)
δ (d)	-0.475931 (< 2e-16)	-0.52449 (< 2e-16)	-0.48085 (2.86e-11)	-0.51927 (< 2e-16)	-0.46741 (4.48e-11)
μ (d^2)	0.082661 (< 2e-16)	0.09443 (1.01e-09)	0.08777 (4.29e-07)	0.09486 (6.68e-10)	0.08575 (4.56e-07)
ϑ (BR)		-1.65747 (0.02597)	-0.30572 (0.7303)	-1.78637 (0.015657)	-0.16754 (0.84972)
φ (ADR)		1.64398 (0.075092)	4.98196 (0.0259)	-11.31537 (0.012559)	5.8111 (0.01080)
U (ci*ADR)		-	-	-17.50759 (0.027032)	-13.88464 (0.06958)
V (ci^2*ADR)		-	-	3.20372 (0.025853)	
R-squared	0.5627	0.6045	0.5873	0.6534	0.6345

회귀계수를 살펴보면 확장 모형이 기본 모형보다 모형의 적합도가 높다. 도시내 도로에서 통행시간 신뢰성은 도로의 혼잡수준과 기하구조 뿐만 아니라 도시내 도로의 특성에 의해 더 정교하게 해석될 수 있다.

확장 모형1과 교차항이 추가된 확장 모형2를 비교하면 확장모형2가 모든 시간대에서 높은 설명력을 보인다. 이러한 결과는 급가감속 비율과 도로 혼잡도간 상호작용 효과가 유효하게 작용하였음을 보여준다.

제 2 절 추정결과 검증

본 연구에서 제시하는 5개 모형(첨두시간대 기본모형, 확장모형1, 확장모형2, 비첨두 시간대 기본모형, 확장모형1, 확장모형2) 구축하였다. 분산분석과 가정 검증을 통해 모형의 적합도와 가정의 적정성을 확인하고 모형간 비교하는 것은 충분치 않으므로 실측자료를 이용한 모형간 비교를 실시한다. 파라미터 추정에 사용되지 않은 나머지 30%의 자료를 통해 실측값과 모형 예측값을 비교한다. 검증을 위해 활용한 지표는 RMSE, MASE, MAPE이다.

<표 5-8> 통행시간 신뢰성 지표 산정모형 검증 결과

	-	첨두시간대		비첨두시간대	
	기본 모형	확장 모형 1	확장 모형 2	확장 모형 1	확장 모형 2
RMSE	0.2142973	0.2071815	0.2016909	0.204501	0.1988781
MAE	0.145605	0.1429096	0.1320091	0.1388881	0.1325498
MAPE	24.22159	21.63209	25.80565	21.06999	26.0879

3개 지표에 대하여 동일하게 확장 모형은 기본 모형 대비 높은 모

형 예측력을 보이는 것을 확인하였다. 이는 도시내 도로에서 혼잡지표와 도로구간 길이만으로 지표를 추정하기보다는 도시내 도로 특성 변수가 반영하여 추정하는 것이 적합하다는 것을 의미한다.

확장 모형1과 확장 모형2간 비교 시 RMSE와 MAE와 같이 예측오차 크기만을 고려한 지표에서는 교차항이 추가된 확장 모형2가 높은 성능을 보였지만 MAPE와 같이 상대적인 예측오차에서는 확장모형 1이 보다 나은 성능을 보인다. RMSE와 MAE에서 모형간 성능차이는 크지 않고 MAPE의 결과는 동일한 크기에서 비교한 결과이므로 MAPE에 따른 성능비교를 하였다. 결과적으로 교차항이 포함되지 않은 확장모형 1의 성능이 가장 안정적으로 높은 성능을 보인다.

제 3 절 소결

본 연구는 빅데이터 내비게이션 자료를 활용하여 도시내 도로 범위에서 통행시간 신뢰성을 추정한다. 내비게이션 자료의 주행 궤적 정보를 이용하여 '복잡하고 미시적인' 도시내 도로 특성을 변수로 구축하고 반영되지 않은 모형(기본 모형)과 반영된 모형(확장모형1, 확장모형2)간 추정결과를 비교하였다. 그리고 추정 결과 검증을 통해 가장 적합한 모형을 선정하고, 해당 모형의 추정결과를 해석하여 도시내 도로 특성 중 신뢰성에 영향주는 요인을 파악하였다.

먼저 RMSE, MAE, MAPE에서 확장 모형1과 확장모형 2는 기본 모형 대비 높은 모형 예측력을 보이는 것을 확인하였다. 확장 모형1과 확장모형 2은 MAPE의 결과에 따라 교차항이 포함되지 않은 확장모형 1이 안정적인 모형 예측력을 보인다고 확인하였다. 그리고 회귀계수(R-squared)를 통해 모형의 적합도(설명력)을 확인한 결과, 확장모형이 기본모형보다 추정에 우수하고, 확장모형2가 확장모형1에 비해 통행시간 신뢰성을 정교하게 설명하였다. 즉, 도시내 도로에서 혼잡지표와 도로구간 길이만으로 추정하기보다는 도시내 도로 특성 변수를 반영하여 추정하는 것이 적합하다는 것을 의미한다.

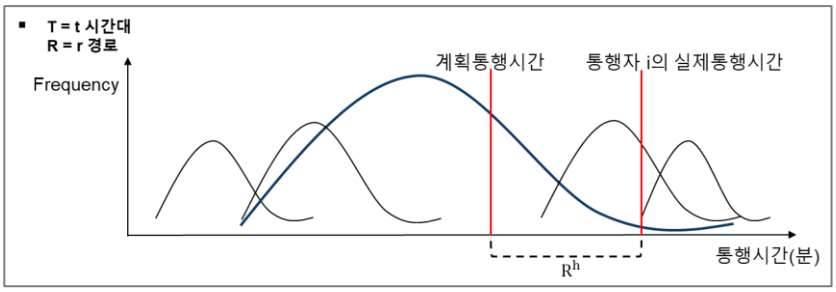
다음으로 확장모형의 추정 결과의 파라미터 결과를 살펴보면 중차량 중 버스 비율 변수가 유의하였다. 버스 비율이 증가할수록 통행시간 신뢰성 지표는 작아지는 결과를 통해 도시내 도로에서 버스는 주변차량이 군집 주행하도록 유도한다고 해석할 수 있다. 도시내 도로의 기하구조와 버스의 중차량 속성이 원인이라고 추론한다. 본 연구의 대상도로 구간은 일반국도, 지방도, 시군도이며 평균도로연장은 15km이내이고 평균 차로수는 2차로 이내이다. 즉 분석대상의 차량 대부분은 저속차량을 추월할 만한 차로가 없거나 1개 차로가 있더라도 주행하는 차량들로 인해 차로

변경이 용이하지 않다. 그리고 도시내 도로에서 트럭은 1톤이하 트럭으로 일반 차량과 속도차이가 발생하지 않지만 버스는 대중교통이며 노선내 정류장에 반복적으로 정지하는 주행 패턴을 갖으므로 일반차량 대비 저속 주행을 하여 속도차이가 있다.

일변동 특성은 도시지역 생활인구의 규칙적이고 반복적인 통행 특성을 의미한다. 통근통행 시간대의 정시성을 지향하는 통행자와 여가시간대의 일반적 최소시간 지향 통행자는 도로의 주행 행태에서 차이를 보인다. Chow test를 통해 두 집단간 파라미터의 차이가 없음을 기각하였는데 이는 시간대별로 통행시간 신뢰성의 양상이 다르다는 것을 의미한다. 추정 결과에서도 첨두시간대에는 양의 파라미터 크기가 비첨두 시간대 양의 파라미터보다 작고, 첨두시간대 음의 파라미터 크기가 비첨두 시간대 음의 파라미터가 보다 크다. 이는 비첨두 시간대에는 도로의 이벤트가 발생함에 따라 신뢰성이 상대적으로 쉽게 떨어지고 첨두시간대에는 안정적인 도로의 신뢰성을 보인다는 의미이다. 이러한 경향은 상호작용 효과에서도 확인할 수 있다.

급가감속 횟수 비율의 유의한 파라미터를 살펴보면 도로내 특정 상황에서 운전자의 급작스러운 가속과 감속 주행이 도로의 통행시간 신뢰성에 부정으로 영향을 준다. 급작스러운 속도 변화는 주변차량의 속도 변화를 야기하고 이러한 혼란은 도로의 신뢰성을 떨어뜨리기 때문이다.

또한 급가감속 횟수 비율은 동일한 혼잡도, 동일한 도로구조에서도 통행자의 주행 성향으로 볼 수 있다. 급가감속 횟수 비율 변수가 유의하므로 도시내 도로에서는 개별 주행 성향에 따라 도로의 통행시간 신뢰성이 일부 결정된다. 결국 통행시간 신뢰성은 도로의 평가지표이기 때문에 도로기하구조 및 시설, 교통량 이외의 요인은 신뢰성 추정에 노이즈이며 이러한 요인에 영향을 받는 변동계수는 지표로서 한계를 갖는다.



<그림 5-5> 지연시간 R^h 개념

장수은, (2009)은 동일한 조건의 도로에서 유사한 집단들의 통행시간을 수집하고 통행시간 분포를 구축하였다. 통행시간 분포로부터 평균 혹은 최빈값을 통해 대표 통행시간을 선정하고 타 집단의 대표 통행시간과 이루는 대표 통행시간의 분포를 그렸다. 이와 같이 대표 통행으로 산정되는 지연시간(R^h)은 개별 특성이 나타나는 도시내 도로에서 적절한 통행시간 신뢰성 지표로 활용될 수 있다.

신뢰성 지표를 산정하기 위하여 식(5-8)과 같이 "분포 평균의 평균"과 "각 집단의 분포평균"차이를 계산하였다. 이를 수정된 버퍼시간이라 제시하였다

$$\boldsymbol{R^h = t_a - t_p} \qquad (5-8)$$

여기서

R^h 지연시간; 수정된 완충시간(초/km)

t_a : 실제통행시간

t_p : 계획통행시간

제 6 장 결 론

제 1 절 연구요약 및 시사점

본 연구는 차량 내비게이션 자료를 이용하여 도시내 도로를 대상으로 통행시간 신뢰성을 추정한다. 본 연구에서 도시내 도로는 좁고 짧은 도로 기하구조와 다양한 도로의 시설을 갖는다. 이에 따라 도시내 도로만의 고유한 특성이 존재하고 도로의 통행시간 신뢰성에 영향 끼친다.

본 연구는 이를 통행시간 신뢰성 추정에 반영하기 위해 도시내 도로의 특성을 나타내는 설명변수를 차량 내비게이션 자료를 이용하여 구축하였다. GPS기반 내비게이션 자료를 활용하여 설명변수가 도로구간 단위 내 정보를 반영할 수 있도록 구축하였다. 도시내 도로 특성을 나타내는 변수를 추가한 확장 모형과 기존 지역간 도로 모형과 동일한 기본 모형을 비교하고 도시내 도로에서 확장 모형이 통행시간 신뢰성 추정에 우수한 성능을 보임을 확인하였다.

기본 모형 추정결과를 통해 도시내 도로에서도 도로의 혼잡도와 도로구간 길이는 통행시간 변동계수와 비선형 형태로 상관관계가 있다. 그리고 확장 모형 1 추정 결과를 바탕으로 도시내 도로 특성 변수의 유의성을 확인하였다. 일변동 특성, 버스차량 비율, 급가감속 횟수 비율이 유의하였다. 특히 급가감속 횟수비율 변수는 개별차량의 주행특성으로 볼 수 있으며 유의한 변수로 파악되기 때문에 도시내 도로에서는 개별 특성이 도로의 통행시간 신뢰성에 영향을 준다고 해석할 수 있다.

확장 모형 1의 결과를 기반으로 급가감속 횟수 비율과 혼잡지표 간 상호작용효과를 분석할 필요성을 확인하였다. 이에 따라 본 연구는 상호작용항이 포함된 확장 모형 2를 분석하였고 급가감속 횟수비율과 도로

혼잡도간 상호작용이 유의함을 확인하였다. 즉 미시적이고 다양한 상황이 무작위로 발생하는 도시내 도로 환경에서 교통류 상태와 이용자 운전행태가 도로의 신뢰성을 상호 교차하며 영향을 준다. 이는 개별 이용자의 특성에 따라 동일할 도로의 기하구조, 교통류 수준에서도 다른 통행시간 편차를 보일 수 있다는 뜻이다. 하지만 도로의 성능을 평가하는 의미에서 도로의 통행시간 신뢰성 지표가 도로 이용자의 개별 특성에 영향을 받는다는 것은 적합하지 않다.

이를 위해 본 연구에서는 Buffer Time 계열 지표중 지연시간을 제안한다. 지연시간은 개별 이질성을 처리하기 위해 개별 대표 통행으로 산정되어 개별 특성의 효과를 통제할 수 있다. 그러므로 지연시간은 도시내 도로의 다양한 상황에서도 도로의 통행시간 신뢰성을 적절히 측정하는 지표이다.

제 2 절 연구한계 및 향후 연구방향

본 연구는 결론 중 도시내 도로 한정하여 적정한 통행시간 신뢰성 지표를 제안하였다. 하지만 지연시간 지표를 산정하기 위하여 개별 운전자가 동일 도로구간을 동일한 조건(만성적 지체 요인의 수준)에서 다수의 주행 자료가 필요하다. 본 연구에서 활용한 내비게이션 자료는 1주일치의 표본 자료이므로 지연시간을 구축하기에 한계가 있다.

이에 따라 본 연구에서는 도시내 도로의 신뢰성 지표로서 지연시간 개념을 소개한 것으로 의의를 갖을 뿐이다. 하지만 단일의 지역에 대하여 1년치 이상의 내비게이션 자료를 구축할 수 있다면 동일한 통행자가 동일한 도로구간을 지나가는 궤적자료를 얻을 수 있고 지연시간 R^h 구축이 가능하다. 향후 연구에서 보다 대용량의 주행 궤적 자료를 통해 도시내 도로의 지연시간 구축과 도시내 도로 특성 요인을 통한 추정을 시도해볼 수 있을 것이다.

참고 문헌

Ahn G. H. and Hyun C. S. (2014), UTIS based Traffic Congestion Alleviation Time Forecast, The Road Traffic Authority, 66.

Ahmed, A. and P. Stopher (2014). "Seventy Minutes Plus or Minus 10 — A Review of Travel Time Budget Studies." Transport Reviews 34(5): 607-625.

Chen A., Z. Z. (2010). "The a-reliable mean-excess traffic equilibrium model with stochastic travel times."

Wright B., Zou Y., and Wang Y. (2015) “Impact of Traffic Incidents on Reliability of Freeway Travel Times” Transportation Research Record 2484(1): 90-98

Carrion C., and Levinson D(2012). “Value of Travel Time Reliability: A Review of Current Evidence.” Transportation Research Part A: Policy and Practice 46(4): 720–741.

Chow, G, C(1960), Test of equality between sets of coefficients in two linear regressions, Econometrica, 28, 591-605.

Drolet, A., et al. (2009). "When Does Choice Reveal Preference? Moderators of Heuristic versus Goal-Based Choice." Journal of Consumer Research 36(1): 137-147.

Dixit, M., et al. (2019). "Passenger Travel Time Reliability for Multimodal Public Transport Journeys." Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board 2673(2): 149-160.

Emam, E. B., & Al-Deek, H. (2006). Using real-life dual-loop

detector data to develop new methodology for estimating freeway travel time reliability. Transportation research record, 1959(1), 140-150.

Justin S. Chang (2010). “Assessing travel time reliability in transport appraisal”, Transport Geography 18: 419-425

Khalili, F. B., Antunes, A. P., & Mohaymany, A. S. (2022). How is freight distribution affected by travel time unreliability?. Transportation Research Procedia, 62, 147-154.

Knight, T. E. (1974). "An approach to the evaluation of changes in travel unreliability: A Safety margin? hypothesis." Transportation 3(4): 393-408.

Kouwenhoven, M., & Warffemius, P. (2016). Forecasting Travel Time Reliability in Road Transport: a new Model for The Netherlands.

Lyons, G. and J. Urry (2005). "Travel time use in the information age." Transportation Research Part A: Policy and Practice 39(2-3): 257-276.

Luke, S., & MacDonald, M. (2006, September). Public transport mode selection: a review of international practice. In European Transport Conference 2006.

Metz, D. (2008). "The Myth of Travel Time Saving." Transport Reviews 28(3): 321-336.

MeadeN. (1982), “ Industrial and Business Forecasting Methods ,” Journal of Forecast 2(2): 194-196.

Ohi-Seop Kim, Y.-J. L. (2021). "The Effects of the Environmental-Friendly Meal Service Quality of the University Foodservice on Customer Satisfaction and loyalty." Culinary Science

& Hospitality Research 27.

Senna, L. A. D. S. (1994). "The influence of travel time variability on the value of time." Transportation 21(2): 203-228.

SMALL, R. B. N. a. K. A. (1995). "Travel-Time Uncertainty, Departure Time choice, and the cost of morning commutes." TRANSPORTATION RESEARCH RECORD 1493

Soriano, A., et al. (2020). "The vehicle routing problem with arrival time diversification on a multigraph." European Journal of Operational Research 286(2): 564-575.

Umunnakwe Clifford, G.-B. K. (2019). "The Impact of Service Quality, Satisfaction, Trust on Customer

Loyalty for Mobile Operators in Nigeria." East Asian Journal of Business Economics 7.

Ushiwaka, K., et al. (2005). "On the Commuter's Safety Margin and Perceived Travel Time Uncertainty." INFRASTRUCTURE PLANNING REVIEW 22: 569-574.

Watling, D. (2006). "User equilibrium traffic network assignment with stochastic travel times and late arrival penalty." European Journal of Operational Research 175(3): 1539-1556.

Yasunori Iida, T. A., Takashi Uchida (1992). "Experimental analysis of dynamic route choice behavior." Transportation Bristow, G.; Farrington, J.; Shaw, J.; Richardson, T. Developing an evaluation framework for crosscutting policy goals: The accessibility policy assessment tool. Environ. Plan. A 2009, 41, 48–62.

El-Geneidy, A.; Levinson, D.; Diab, E.; Boisjoly, G.; Verbich, D.; Loong, C. The cost of equity: Assessing transit accessibility and social disparity using total travel cost. Transp. Res. Part A Pol. Pract.

2016, 91, 302–316.

Eliasson, J. (2007, June). The relationship between travel time variability and road congestion. In World Conference on Transport Research, Berkeley.

P. Hall, Travel outcome and performance: The effect of uncertainty on accessibility, Transportation Research Part B 17 (1983) 275–290.

R. Sivakumar, R. Batta, The variance−constrained shortest path problem, Transportation Science 28 (4) (1994) 309–316.

S. Sen, R. Pillai, S. Joshi, A. Rathi, A mean−variance model for route guidance in advanced traveler information systems, Transportation Science 35 (1) (2001) 37–49.

H. K. Lo, Y. K. Tung, Network with degradable links: capacity analysis and design, Transportation Research Part B 37 (4) (2003) 345–363 Research Part B: Methodological 26.

Van Oort, N. (2016). "Incorporating enhanced service reliability of public transport in cost−benefit analyses." Public Transport 8(1): 143−160.

곽만순, 이. (2005). "효율성추정과 확률적 생산변경모형에 대한 문헌연구."計量經濟學報 16(4).

박철구 (2004). "출근통행자의 출발시각 결정구조 – 도착시각이 지정되어 있는 출근교통을 대상으로 –." 대한토목학술지 24: 337−344.

박찬운 (2019) “고속도로 통행시간 신뢰성 지표 추정 모형 개발”, 서울대학교 박사학위논문

윤서연·이춘용·김호정·육동형·김상록 (2015). “지역 간 교통수요 예측의 신뢰성 제고를 위한 빅데이터 활용방안 연구”

이경재, 이성우 "교통SOC 투자계획은 TOD 위주 정책 방향에 부합

하는가 수도권 통근자의 통근수단 선택 분석 및 예측, 2005-2030."

장수은 (2008). "통행시간 신뢰성 지표 개발 및 산정에 관한 연구." 대한교통학회 26(5): 10.

장수은 (2008). "통행시간 신뢰성 지표 개발 및 산정에 관한 연구." 대한교통학회 26(5): 217-226.

장윤정, 이경제. (2016). "20~30대 1인 가구의 여가통행 목적지 공간 선택과 선호에 관한 행태특성 연구." 서울도시연구 17.

최영은 (2017),“유료도로 선택행태를 이용한 통행시간 신뢰성의 가치 추정”, 서울대학교 박사학위논문

한국교통연구원(2016), “도로사업의 통행시간 신뢰성 향상 편익 반영 방안“

한국교통정책경제학회(2019), “통행시간 신뢰성 향상 편익 등 신규 편익 발굴 연구 용역”

한동희·김수희·박제진·이정희·김준현(2017). “차량의 통행경로 자료를 활용한 교통분석체계 구축 연구”

Abstract

Estimating Travel Time Reliability of Urban Roads Using Car Navigation Data

Sangsuk Lee
Transportation Studies
Department of Environmental Planning
The Graduate School of Environmental Studies
Seoul National University

Travel time reliability refers to the concept of whether a traveler can reach their desired destination accurately at the preferred arrival time. To improve the level of service for roads, it is essential to supply reliable roads not only from the perspective of traffic flow but also from the aspect of reliability. Quantifying the variability of travel time on roads requires the development and estimation of travel time reliability measures. Previous studies have mainly focused on inter-city roads, but urban roads have distinct characteristics that necessitate separate estimation of travel time reliability measures.

Urban roads have narrow and short geometries with various facilities. As a result, urban roads often have more speed limit regulations compared to inter-city roads, and frequent lane changes

occur at access roads for intersection. Furthermore, the lane width and lateral clearance are narrower on urban roads, and many road segments have only two lanes or less, resulting in negative influence of neighboring vehicles on heavy vehicles. Moreover, during peak hours, there are many commuters for work, leading to prioritize punctuality compared to non-peak hours. Finally, as enforcement roads, unexpected events occur frequently, leading to rapid accelerations and decelerations.

In this study, Factors that cause individual travel times to vary are considered to be "the congestion level on roads and unique characteristics of urban roads." Accordingly, a basic model is developed to estimate travel time reliability using the congestion level and length of road segments as explanatory variables. The characteristics of urban roads are incorporated into an extended model, and a comparison with the basic model is performed to select the optimal model.

The results estimating the optimal model reveal that variables representing Diurnal variation, bus-vehicle rate, and the frequency of rapid accelerations and decelerations are significant. Especially, the frequency of rapid accelerations and decelerations can be seen as a driving behavior of travelers, indicating that travel time reliability on urban roads is influenced by individual characteristics of travelers. In other words, even under the same geometries and traffic flow levels on the same road, different travelers may exhibit different travel time reliability.

Moreover, the interaction effect between the frequency of rapid accelerations and decelerations and congestion index is found to be

significant. Road segments with a higher frequency of rapid accelerations and decelerations experience more significant deterioration in travel time reliability due to congestion. Conversely, in congested road segments, any driver's rapid accelerations and decelerations have a greater impact on travel time reliability. This interaction effect is more pronounced during non-peak hours compared to peak hours.

This study utilized car navigation data to estimate travel time reliability on urban roads, which takes into account their unique characteristics. Results demonstrate that travel time reliability on urban roads includes individual characteristics of road users. Furthermore, Delay Time, the modified buffer time, is proposed as a suitable travel time reliability measure for urban roads, which can be utilized in future studies to estimate travel time reliability on roads located in urban areas and where traffic flow is interrupted.

Keywords : Urban Road, Travel Time Reliability, Car Navigation Data, Travel Time Reliability Estimation, Individual Driver Characteristics

Student Number : 2021-25661