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

공학박사학위논문

친환경자동차 시장 전환에 따른 시장 참여 주체의 최적 투자 전략: 한국 시장 실증 분석

Optimal investment strategy of market participants under the market transition to eco-friendly vehicles: An empirical study of the Korean market

2023 년 2 월

서울대학교 대학원
산업공학과

문 새 다 슬

친환경자동차 시장 전환에 따른 시장 참여 주체의 최적 투자 전략: 한국 시장 실증 분석

Optimal investment strategy of market participants under the market transition to eco-friendly vehicles: An empirical study of the Korean market

지도교수 이 덕 주

이 논문을 공학박사 학위논문으로 제출함

2023 년 1 월

서울대학교 대학원

산업공학과

문 새 다 슬

문새다슬의 공학박사 학위논문을 인준함

2023 년 1 월

위 원 장 _____ 홍 유 석 _____ (인)

부위원장 _____ 이 덕 주 _____ (인)

위 원 _____ 장 우 진 _____ (인)

위 원 _____ 김 태 구 _____ (인)

위 원 _____ 김 장 호 _____ (인)

초록

국제 사회에서 내연기관자동차 퇴출을 공식화하면서 자동차 시장은 친환경자동차로 구조적 전환이 발생하고 있다. 본 연구에서는 이러한 전환하에 정부와 소비자, 기업으로 구성되는 각 시장 주체 별 특성과 각 주체 간의 유기적 관계를 반영한 최적 투자 전략을 분석하였다.

정부의 최적 투자 전략을 도출하기 위하여, 친환경자동차 세 대안에 대한 비용효과분석을 수행하였다. 비용효과분석은 친환경자동차 시장 전환에 필수적으로 요구되는 연료 충전 인프라 비용을 고려하여, 수명주기비용분석의 결과와 전 과정 평가를 통한 온실가스감축량을 비교하여 도출하였다. 내연기관자동차와 달리, 친환경자동차는 구매비용은 높지만 연료비용은 낮고, 다른 연료를 사용함으로써 석유가격 변동성이 비용에 직접적으로 반영되지 않은 비용 구조적 차이가 있다. 본 연구에서는 이러한 비용 구조적 차이에 의한 소비자의 비용 비교의 어려움을 극복하기 위하여 불확실성하에서 최적 의사결정 분석에 효과적인 실물옵션 방법을 사용하여 최적 구매 시기와 구매 대안을 도출하였다. 특히, 친환경자동차의 경우 아직 기술개발 단계에 있어 생산비용 저감이 빠른 특징을 반영하기 위하여, 배터리 가격의 하락 추세를 모형에 반영하였다. 연료 충전소는 경제성이 낮아 민간 기업에서 투자가 어려운 실정이다. 본 연구에서는 친환경자동차 제조 기업이 직접 연료 충전소에 투자하는 경우, 간접 네트워크 효과에 의한 자동차 판매 수익까지 기대할 수 있다는 점에 착안하여, 간접 네트워크 효과를 반영한 최적 충전소 투자 모형을 연구하였다. 특히, 간접 네트워크 효과를 실증적으로 추정할 수 있는 이산선택이론을 활용하여 모형의 실용성을 높이였다.

상기 세 연구는 모두 다른 국가와는 다르게 수소자동차에 집중하고 있는 한

국 시장에 적용한 실증 분석을 수행하였다. 실증 분석 결과, 세 연구 모두에서 수소자동차는 아직 친환경자동차의 대안으로 주목받기에 기술적 진보가 더욱 필요한 것으로 도출되었다. 이에 따라 가장 비용효과성이 높은 하이브리드 자동차를 과도기적으로 사용하면서 차츰 무공해차량으로의 전환하는 정책이 필요할 것으로 보인다.

주요어 : 수소자동차, 경제성 공학, 비용효과분석, 실물옵션, 간접 네트워크 효과, 게임 이론
학　번 : 2017-23088

목차

초록 ii

목차 iv

표 목차 iv

그림 목차 v

제 1 장 서론 1

1.1 연구의 배경 및 필요성 ····· 1

1.2 연구의 목적 ····· 5

1.3 논문구성 ····· 8

제 2 장 이론적 고찰 10

2.1 정부의 친환경자동차 비용효과 분석 ····· 10

2.1.1 전 과정 분석(Well-to-wheel analysis) ····· 10

2.1.2 수명주기비용분석(Lifecycle cost analysis)과 총보유비용(Total costs of ownership analysis) ····· 13

2.1.3 비용효과분석(cost-effectiveness analysis) ····· 15

2.2 소비자의 친환경자동차 최적 투자 전략 분석 ····· 17

2.2.1 실물옵션분석(real option analysis) ····· 17

2.3 기업의 연료 충전소 최적 투자 전략 분석 ····· 20
2.3.1 이산선택모형(discrete choice model) ····· 20

제 3 장 정부의 충전인프라 투자비용을 고려한 친환경자동차 비용효과 분석 22

3.1 서론 ····· 22
3.2 친환경자동차 비용효과분석 모형 ····· 27
3.2.1 온실가스 감축량 추정 모형 ····· 29
3.2.2 전환비용 추정 모형 ····· 32
3.2.3 비용효과분석 모형 ····· 36
3.3 한국 시장에서의 친환경자동차 비용효과성 실증 분석 ····· 38
3.3.1 한국 자동차 시장 데이터 ····· 38
3.3.2 실증 분석 결과 ····· 47
3.4 민감도 분석 ····· 54

제 4 장 소비자의 유가 불확실성을 고려한 친환경자동차 최적 투자 전략 분석 64

4.1 서론 ····· 64
4.2 유가 불확실성을 고려한 친환경자동차 최적 투자 전략 모형 ····· 68
4.3 한국 시장에서 소비자의 친환경자동차 최적 투자 전략 실증 분석 ····· 73
4.3.1 한국 자동차 시장 데이터 ····· 37
4.3.2 실증 분석 결과 ····· 47

4.4 민감도 분석 ····· 54

제 5 장 기업의 간접 네트워크 효과를 고려한 충전소 최적 투자 전략 분석 92

5.1 서론 ····· 92

5.1.1 연구의 배경 및 목적 ····· 92

5.1.2 기존 문헌 분석 ····· 95

5.2 기업의 간접 네트워크 효과를 고려한 최적 충전소 투자 모형 ····· 98

5.2.1 내연기관자동차 시장에서 친환경자동차 충전소 최적 투자 모형 ··· 98

5.2.2 친환경자동차간 경쟁을 고려한 충전소 최적 투자 모형 ····· 106

5.3 한국 시장에서 기업의 충전소 최적 투자 전략 실증 분석 ····· 111

5.3.1 한국 자동차 시장 데이터 ····· 111

5.3.2 실증 분석 결과 ····· 115

5.4 민감도 분석 ····· 119

제 6 장 결론 121

6.1 연구의 결과 및 기여 ····· 121

6.1.1 정부의 충전인프라 투자비용을 고려한 친환경자동차 비용효과 분석 ····· 121

6.1.2 소비자의 유가 불확실성을 고려한 친환경자동차 최적 투자 전략 분석 ····· 125

6.1.3 기업의 간접 네트워크 효과를 고려한 충전소 최적 투자 전략 분석

····· 127
6.1.4 종합 결론 ····· 129
6.2 후속 연구 ····· 131

부록 133

참고문헌 156

Abstract 166

감사의 글 168

표 목차

표 1. 한국의 원료 별 발전 비중 및 WTT 계수 ····· 40
표 2. 한국의 수소충전소 현황과 WTT 계수 ····· 41
표 3. 친환경자동차 비용효과분석을 위한 한국 자동차 총보유비용 데이터 ····· 44
표 4. 연료 충전 인프라 비용 데이터(단위: 천 원) ····· 46
표 5. 한국의 연간 자동차 총보유비용, 연료 충전 인프라 비용, 전환 비용 추정 결과(단위: 천 원) ····· 50
표 6. 친환경자동차 최적 투자 전략 도출을 위한 한국 자동차 총보유비용 데이터(단위: 천 원) ····· 75
표 7. 한국 시장에서의 전기자동차 투자 옵션 가치 추정 결과(단위: 만 원) ····· 79
표 8. 한국 시장에서의 수소자동차 투자 옵션 가치 추정 결과(단위: 만 원) ····· 80
표 9. 기존 연구의 충전소 반영 방법 정리 ····· 99
표 10. 연료 충전소 최적 투자 전략 도출을 위한 한국 자동차 비용 데이터 ····· 112
표 11. 자동차 속성 별 효용 계수(출처: Kim et al. (2019)) ····· 113
표 12. 연료 충전 인프라 비용 데이터(단위: 천 원) ····· 114
표 13. 무위험이자율과 유가 변동성 추정 데이터 기간에 따른 시나리오 구분 · 135
표 14. 전기자동차 투자 옵션 가치(시나리오 1: 무위험이자율 1.27%, 지난 10년 유가 변동성) ····· 136
표 15. 수소자동차 투자 옵션 가치(시나리오 1: 무위험이자율 1.27%, 지난 10년 유가 변동성) ····· 137

표 16. 전기자동차 투자 옵션 가치(시나리오 2: 무위험이자율 3.90%, 지난 10년 유가 변동성)····· 138
표 17. 수소자동차 투자 옵션 가치(시나리오 2: 무위험이자율 3.90%, 지난 10년 유가 변동성)····· 139
표 18. 전기자동차 투자 옵션 가치(시나리오 3: 무위험이자율 7.85%, 지난 10년 유가 변동성)····· 140
표 19. 수소자동차 투자 옵션 가치(시나리오 3: 무위험이자율 7.85%, 지난 10년 유가 변동성)····· 141
표 20. 전기자동차 투자 옵션 가치(시나리오 4: 무위험이자율 1.27%, 지난 20년 유가 변동성)····· 142
표 21. 수소자동차 투자 옵션 가치(시나리오 4: 무위험이자율 1.27%, 지난 20년 유가 변동성)····· 143
표 22. 전기자동차 투자 옵션 가치(시나리오 5: 무위험이자율 3.90%, 지난 20년 유가 변동성)····· 144
표 23. 수소자동차 투자 옵션 가치(시나리오 1: 무위험이자율 3.90%, 지난 20년 유가 변동성)····· 145
표 24. 전기자동차 투자 옵션 가치(시나리오 6: 무위험이자율 7.85%, 지난 20년 유가 변동성)····· 146
표 25. 수소자동차 투자 옵션 가치(시나리오 6: 무위험이자율 7.85%, 지난 20년 유가 변동성)····· 147
표 26. 전기자동차 투자 옵션 가치(시나리오 1: 무위험이자율 1.27%, 지난 10년 유가 변동성)····· 148

그림 목차

그림 1. 연구 체계 ····· 7
그림 2. 전 과정 분석에서의 에너지 생산 단계(WTT)와 에너지 사용 단계(TTW) 구분 ····· 12
그림 3. 친환경자동차 비용효과분석 개념도 ····· 28
그림 4. 한국의 차종 별 연간 온실가스 배출량 ····· 48
그림 5. 한국의 친환경자동차 비용효과 분석 결과 ····· 51
그림 6. 구매가격 변화율에 따른 친환경자동차 비용효과성 변화 ····· 54
그림 7. 연평균 주행거리 변화에 따른 친환경자동차의 비용효과성 변화 ····· 55
그림 8. 연료가격 변화율에 따른 친환경자동차의 비용효과성 변화 ····· 57
그림 9. 증기 메탄 개질-자체생산 비중 증가에 따른 수소자동차의 비용효과성 변화 ····· 59
그림 10. 증기 메탄 개질 대규모 생산기지 구축과 파이프라인 유통 방식 조합의 비중 증가에 따른 수소자동차의 비용효과성 변화 ····· 61
그림 11. 소비자의 친환경자동차 투자 의사결정 나무 ····· 69
그림 12. 기초 자산 가격의 변화 과정 ····· 70
그림 13. 친환경자동차 배터리 가격 추세 ····· 76
그림 14. 한국 소비자의 전기자동차 최적 투자 경로 ····· 82
그림 15. 한국 소비자의 수소자동차 최적 투자 전략 경로 ····· 83
그림 16. 전기자동차 주요 영향 요인 민감도 분석 결과 ····· 87
그림 17. 수소자동차 투자 확률 민감도 분석 결과 ····· 89

그림 18. 가정 충전 비율 민감도 분석 결과 ····· 91
그림 19. 친환경자동차간 충전소 투자 경쟁의 균형 형태 ····· 110
그림 20. 한국의 급속 충전소 투자 수준에 따른 이윤 ····· 115
그림 21. 한국의 수소 충전소 투자 수준에 따른 이윤 ····· 116
그림 22. 한국 시장의 친환경자동차 연료충전소 투자 균형 ····· 118
그림 23. 급속충전소 최적 투자 전략 민감도 분석 결과 ····· 121
그림 24. 수소충전소 최적 투자 전략 민감도 분석 결과 ····· 121
그림 25. 지난 20년 한국 10년 국채 수익률 추이 ····· 134
그림 26. 지난 20년 한국 보통 휘발유 가격 추이 ····· 134

제 1 장 서론

제 1 절 연구의 배경 및 필요성

2016년 체결된 파리협정은 지구온난화 방지를 위하여 온실가스를 줄이기 위한 전 지구적 합의로, 지구의 평균 온도 상승을 2도 아래에서 억제하고 1.5도를 넘지 않도록 노력하는 것을 목표로 한다. 2021년 미국의 파리협정 복귀로 2022년 기준 192개국과 유럽연합(European Union, EU)이 참여하고 있다.

파리협정의 주요 시행 규칙은 2021년 제 26차 당사국 총회에서 국제탄소시장 지침을 타결하면서 감축, 적응, 기후 재원, 기술개발 및 이전, 역량배양, 투명성으로 구성된 6대 핵심 조항을 완성하였다. 참여 국가는 온실가스 감축 목표를 제시하여야 하며, 감축 목표 달성을 위한 5년 단위의 계획을 수립하여야 한다. 또한 국가 단위에서는 격년으로 협정 목표 달성을 위한 국가결정기여(Nationally Determined Contribution, NDC) 이행 및 달성 현황을 보고하고, 전 지구적 이행점검(Global Stocktake, GST)을 5년마다 실시하여 협정의 장기 목표에 대한 진전사항을 종합적으로 점검한다. 한국 또한 파리협정의 참여 국가로서 2030년까지 2018년 대비 온실가스 40% 감축 목표를 2021년 12월 UN에 제출하였다(환경부, 2022).

2020년 기준 전 세계 이산화탄소 배출량은 348.1억 톤으로 코로나 팬데믹에 의하여 전년도 367억 톤에 비하여 소폭 감소하였지만, 1940년 48.5억 톤 대비 약 7.2배 증가하였으며, 교토의정서가 발효된 2005년 296톤 대비로 보아도 17.6% 증가하였다(Friedlingstein et al., 2022).

이러한 전 세계 탄소배출량 중 수송 부문(sector)에서 배출되는 탄소배출량은 2020년 기준 약 73억 톤으로 전 세계 탄소배출량 중 약 21%를 차지한다. 그 중 자동차에서 배출되는 탄소배출량은 약 55억 톤으로 전 세계 탄소배출량 중 약 15.8%, 수송 부문에서는 약 75%[1]를 차지한다(IEA, 2020). 2020년 기준 한국의 탄소배출량이 약 5.5억 톤(온실가스종합정보센터, 2022)인 것과 비교하면 세계 자동차 부문 탄소배출량은 한국, 국가 전체 탄소배출량의 10배로, 파리협정의 목표 달성을 위하여 반드시 감축되어야 할 필수 부문이다.

전 세계 자동차 시장은 이러한 수송부문 탄소배출저감의 필요성에 따라 기존 내연기관자동차 시장에서 친환경자동차 시장으로 급속히 전환되고 있다. 미국은 2019년 Multi-State ZEV 이행 계획(Multi-State ZEV Action Plan)을 수립하여 2025년까지 10개 주에서 친환경자동차 330만대 누적 보급과 캘리포니아 주에서 내연기관 승용차 판매금지 정책을 수립하였으며, 일본은 2020년 발표된 녹색성장 전략에서 2030년까지 승용차 신차 판매의 100%를 친환경자동차로 판매하는 정책을 수립하였다. 중국과 유럽연합은 각각 신에너지자동차산업 발전계획(新能源汽车产业发展规划, 2020.11)과 핏포55(Fit for 55, 2022.06)에서 2035년까지 내연기관자동차 판매를 금지하는 정책을 수립하였다. 한국은 2021년 2월 제 4차 친환경자동차 기본계획을 발표하며 2030년까지 신차 판매의 83%를 친환경자동차로 판매하는 정책을 제시하였다.

최근 발표된 이러한 친환경자동차 확산 정책들은 기존 보조금, 세제 혜택 등 간접적으로 지원되던 정책에 비하여 자동차 시장 구조를 직접적으로 전환시키는

[1] 자동차 배출 탄소배출량은 IEA에서 구분한 수송 부문의 소부문 중 “Passenger cars”, “Medium and heavy trucks”, “Buses and minibuses”, “Light commercial vehicles” 부문의 탄소배출량을 더하였다.

정책이다. 따라서 상기 정책들의 내연기관 판매금지 시행 일정을 고려할 때, 2035년까지는 미래 세계 자동차 시장이 기존 내연기관자동차 시장에서 친환경자동차 시장으로 전환될 것이 확정적이다.

그러나 현재의 내연기관자동차 시장이 성공적으로 친환경자동차 시장으로 전환되기 위해서는 시장 참여 주체의 적극적인 투자가 필수적이다. 특히, 정부의 정책이 소비자 및 기업에게 영향을 미치고, 소비자의 구매 특성에 따라 기업의 수익이 결정되므로 친환경자동차로의 성공적인 시장 전환을 위해서는 시장 참여 주체의 유기적 관계를 고려한 시장 전반의 투자 전략을 도출할 필요가 있다.

정부는 대안으로 고려되고 있는 전기, 수소 그리고 하이브리드 자동차의 장단점을 비교하여 각 차종 별 인프라 투자 전략을 도출할 필요가 있다. 특히, 친환경자동차 확산 정책의 당위성이 탄소배출저감에 있으므로 각 대안 별 사회적 투자 비용 대비 탄소배출저감 수준을 비교하는 비용효과성을 고려한 정책 수립이 필요하다. 한국의 경우, 최근 수소경제 활성화 로드맵을 발표하며 다른 국가에서 크게 주목받지 못하고 있는 수소자동차를 주요 친환경자동차 대안으로 포함하고 있다. 따라서 한국 시장을 대상으로 한 실증분석에서는 다양한 수소생산 및 공급 방식의 조합을 고려한 최적 수소 충전 인프라 조합의 비용효과성을 비교할 필요가 있다.

기존 내연기관자동차와 달리 전기, 수소 자동차는 구매비용은 높지만 연료비용은 저렴한 특징이 있다. 따라서 내연기관자동차와 친환경자동차의 비용 비교를 위해서는 자동차 총 보유기간동안 발생하는 모든 비용을 현재가치로 할인한 총보유비용을 비교하여야 한다. 그러나 내연기관자동차의 경우 상대적으로 높은 비중을 차지하는 연료 비용의 변동성이 높다. 지난 10년간 한국이 주로

수입하는 두바이 원유는 배럴 당 41.36 달러(2016년)에서 113.68(2022년) 까지의 변동폭을 보였다. 따라서 소비자의 경제적 의사결정을 위해서는 이러한 높은 연료비용 변동성을 고려한 투자 전략을 도출할 필요가 있다.

친환경자동차 연료 충전소는 현재 높은 구축비용 대비 낮은 수요에 따라 경제성이 부족하여 민간 참여가 부족한 실정이다. 연료 충전소의 보급은 소비자의 충전편의성을 증대시키고 이는 친환경자동차의 효용 증가로 이어져 친환경자동차의 확산에 긍정적 영향을 미친다. 또한 친환경자동차의 확산은 다시 연료 충전소의 수익성을 증대시키므로 다시 연료 충전소의 보급을 확산시킨다. 따라서 자동차 제조 기업은 자사의 친환경자동차 투자 전략을 수립할 때, 이러한 연료 충전소와 친환경자동차의 간접 네트워크 관계를 고려하여야 한다. 특히, 연료 충전 사업만 하는 기업에 비하여 자동차 제조 기업은 충전소 투자로 간접 네트워크 효과에 의한 친환경자동차 판매 수익 증대까지 기대할 수 있으므로 연료 충전소 자체의 경제성이 부족하더라도 투자 유인이 있을 수 있다. 따라서 친환경자동차 확산의 주요 걸림돌로 지적되고 있는 충전 사업의 민간 참여 부족을 극복하기 위하여 간접 네트워크 관계를 고려한 자동차 제조 기업의 최적 연료 충전소 투자 전략을 분석할 필요가 있다.

제 2 절 연구의 목적

본 연구는 내연기관자동차 시장에서 친환경자동차 시장 전환에 따른 시장 참여 주체의 최적 투자 전략을 분석하고 한국 시장을 대상으로 실증 분석을 수행하여 한국의 친환경자동차 확산을 위한 필수적 조건과 효율적 전략 도출을 목적으로 한다. 구체적으로 세부 연구목표와 각 세부 연구 간 관계 및 연구체계는 그림 1과 같다.

먼저, 정부의 투자 전략 연구는 대안으로 고려되고 있는 하이브리드, 전기, 수소 자동차에 대한 비용 대비 탄소감축량을 비교한 비용효과성을 도출하고 이를 기반으로 비용효과성을 달성하기 위한 필수적 조건과 효율적 친환경자동차 전환 전략 제시를 목적으로 한다. 특히, 친환경자동차는 각 사용 연료 별 충전 인프라 구축이 필수적임에도 불구하고 기존 연구에서는 충전 인프라 구축 비용과 그에 따른 탄소배출량 변화가 고려되지 못하고 있다. 이에 본 연구에서는 각 대안 별 충전인프라 비용을 고려하였으며, 실증 분석에서는 한국이 집중하고 있는 수소자동차의 다양한 수소 생산 및 공급 조합을 비교하여 최적의 수소 충전 인프라 대안을 제시하였다.

소비자의 투자 전략 연구는 정부의 투자 전략 연구에서 비용효과성을 도출하기 위하여 고려된 총보유비용을 기반으로 유가 불확실성을 고려한 최적 투자 시기와 투자 대안으로 구성된 최적 투자 전략 도출을 목적으로 한다. 특히, 친환경자동차의 빠른 기술 진보에 따라 생산 비용이 저감되는 추세를 반영하여 전기자동차의 주요 비용 요인인 배터리 가격의 생산성 증대를 분석하여 모형에 반영하였다. 실증 분석에서는 한국의 시장 데이터를 기반으로 한국 소비자의 최적 투자 전략과 함께 친환경 자동차의 경제성을 평가하고자 하며, 민감도 분석을

통하여 친환경자동차가 구매 대안으로서 경쟁력을 가질 수 있는 조건을 도출하였다.

기업의 투자 전략 연구는 친환경자동차와 연료 충전소의 간접 네트워크 효과를 고려한 최적 충전소 투자 전략 도출을 목적으로 한다. 정부와 소비자 연구에서 도출된 총보유비용, 충전인프라 투자 비용을 고려하여 친환경자동차의 연료 충전소의 경제성을 분석하였으며, 이를 기반으로 기업의 최적 충전소 투자 전략을 분석하였다. 특히, 완성차 제조 기업의 경우, 연료 충전소의 경제성이 부족하여도 간접 네트워크 효과에 의한 친환경자동차 판매 수익 증대를 고려하면 충전소 투자의 경제성이 달성될 수 있음을 보였다. 또한 향후 내연기관자동차가 퇴출된 이후 친환경자동차간의 경쟁 상황에서 균형이 승자 독식의 형태로 존재할 수밖에 없음을 보였다. 실증분석에서는 현재 한국 시장에서 연료 충전소의 경제성을 평가하고 한국 기업의 최적 투자 전략을 도출하였다. 특히, 현재 기술 수준에서 전기자동차와 수소자동차간 경쟁은 전기자동차가 향후 시장을 독식하는 형태로 존재하게 될 것임을 보였다.

본 연구의 결과들은 시장 참여 주체들의 최적 투자 전략을 도출하고 각 주체들의 유기적 관계를 고려함으로써 미시적 의사결정의 결과를 거시적 영역으로 확대할 수 있다는 점에서 의의가 있다. 특히, 각 주체들의 최적 전략들을 종합함으로써 시장 전반적인 관점에서 효율적인 정책 수립에 기여할 수 있으며, 한국을 대상으로 수행한 실증분석의 결과들은 현재 한국 시장을 진단 및 평가하고 향후 전략을 도출하는데 기초 자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

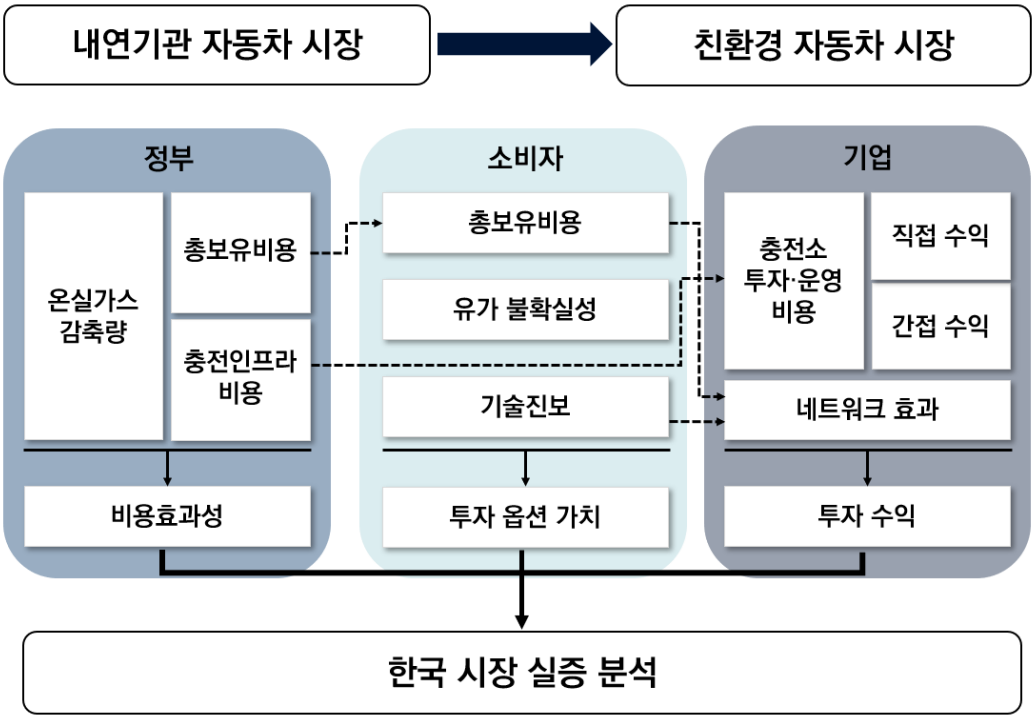
내연기관 자동차 시장
친환경 자동차 시장
정부
온실가스 감축량
총보유비용
충전인프라 비용
비용효과성
소비자
총보유비용
유가 불확실성
기술진보
투자 옵션 가치
기업
충전소 투자·운영 비용
직접 수익
간접 수익
네트워크 효과
투자 수익
한국 시장 실증 분석

그림 1. 연구 체계

제 3 절 논문의 구성

본 논문은 6개의 장으로 구성되어 있다. 2장에서는 각 시장 참여 주체의 최적 투자 전략을 도출하기 위하여 사용된 이론들을 고찰고자 한다. 정부의 최적 투자 전략 도출을 위한 연구에서 사용된 전 과정 분석(Well-to-wheel analysis), 수명 주기 분석(lifecycle cost analysis), 비용 효과 분석(cost-effectiveness analysis)과 소비자의 최적 투자 전략 도출을 위하여 사용된 실물 옵션(real option analysis), 기업의 최적 전략 도출을 위하여 사용된 이산 선택 이론(discrete choice analysis)을 중심으로 고찰하였다.

3장에서는 기존 내연기관자동차 시장에서 친환경자동차 시장으로 전환되는 과정에서 발생하는 총 사회적 비용인 전환 비용(switching costs)을 정의하고, 이를 기반으로 각 대안 별 탄소 감축량과 비교한 비용효과성(cost-effectiveness)을 도출하는 모델을 제안하였다. 제안된 모델을 한국 시장에 적용한 실증분석을 수행하여 한국에서의 최적 대안을 도출하며, 민감도 분석을 통하여 각 요인이 비용효과성에 미치는 영향을 도출하였다. 특히, 수소의 생산과 공급 조합으로 결정되는 수소 충전 인프라의 조합 별 비용효과성을 비교하여 최적 수소 충전 인프라를 도출하였다.

4장에서는 자동차의 총보유비용을 정의하고 유가 불확실성을 이항 과정으로 근사시킨 이항 옵션 모형을 기반으로 유가 불확실성과 기술 진보를 고려한 최적 투자 전략을 모형화하였다. 실증 분석에서는 한국 시장 데이터를 기반으로 전기, 수소자동차의 경제성을 평가하고 한국 소비자의 최적 친환경자동차 투자 전략을 도출하였다. 민감도 분석에서는 전기, 수소자동차의 투자 확률을 기준으로 구매가격, 연료비 변동성, 주행거리 등 각 비용요소들이 최적 전략에 미치는

영향을 평가하였다.

5장에서는 이산선택이론에 기반한 소비자의 친환경자동차 수요 함수와 친환경자동차 판매 수익과 연료 충전소 수익으로 구성된 기업의 이윤 함수를 정의하고 최적 투자 전략을 모형화하였다. 먼저, 내연기관자동차와 친환경자동차의 경쟁 상황에서 친환경자동차의 최적 전략을 도출한다. 이후 내연기관자동차가 퇴출된 상황에서 친환경동차간 경쟁의 균형을 분석하였다. 실증 분석에서는 한국의 시장 데이터를 기반으로 한국에서의 급속, 수소 충전소의 경제성을 평가하고 한국 기업의 최적 급속, 수소 충전소 투자 전략을 도출하였다. 또한 현재 기술 수준 및 시장 상황에서 전기자동차와 수소자동차의 균형 형태를 도출하고 그 특성을 분석하였다. 민감도 분석에서는 주요 비용 요소와 시장 요인의 변화가 최적 급속, 수소 충전소 투자 전략에 미치는 영향을 평가하였다.

마지막으로 6장에서는 각 시장 참여 주체의 최적 투자 전략과 실증 분석 결과를 종합하여 한국의 친환경자동차 확산을 위한 기술적, 정책적 논의와 향후 연구 방향을 제시하였다.

제 2 장 이론적 고찰

제 1 절 정부의 친환경자동차 비용효과성 분석

1. 전 과정 분석(Well-to-wheel analysis)

전 과정 분석의 영문명은 “Well-to-wheel analysis”로 우물을 의미하는 “Well”과 바퀴를 의미하는 “Wheel”로 구성되어 “우물에서 바퀴까지”를 의미한다. 이는 기존 친환경성 평가 방법들이 에너지의 최종 사용 단계만 고려하고 에너지의 원료 생산, 정제, 운반 등의 과정에서 발생하는 온실가스를 고려하지 않아 친환경성을 왜곡할 수 있다는 지적에 따라 에너지 원료의 생산부터 최종 사용 단계까지 전 과정에서 발생하는 온실가스를 고려한다는 의미에서 명명되었다.

전기자동차와 수소자동차는 최종 에너지를 사용하는 단계에서는 온실가스를 배출하지 않는다. 이에 따라 대중들은 일반적으로 두 자동차를 친환경적으로 생각한다. 하지만 전기, 수소자동차가 사용하는 전기와 수소를 생산하는 과정에서 만약 막대한 온실가스가 배출된다면 전기자동차와 수소자동차는 실질적으로 친환경적이지 않을 수 있다. 실제로 개발도상국에서 전기자동차가 정말로 온실가스를 감축시킬 수 있는지 연구한 Wu and Zhang (2017)는 국가 별 단위 전기 생산량의 온실가스 배출량이 최대 8배까지 차이가 날 수 있다고 지적하였다.

이러한 지적에 따라 최근 제품의 친환경성을 평가하는 연구들은 전 과정 분석을 기반으로 한다. 특히, 미국 아르곤 국립 연구소에서는 각 원료의 에너지 생산, 정제, 운송 등의 과정에서 발생하는 탄소배출량을 측정하여 각 생산, 정제,

운송 등의 조합에 따라 발생하는 전 과정 온실가스를 쉽게 계산할 수 있도록 GREET(Greenhouse gases, Regulated Emissions, and Energy use in Transportation)이란 이름의 소프트웨어를 개발하여 무료로 배포한 이후, 특히 친환경자동차의 환경성 평가에서는 전 과정 분석이 주요 방법론으로 이용되고 있다.

전 과정 분석은 크게 에너지의 생산 단계(Well-to-tank, WTT)과 사용단계(Tank-to-wheel, TTW)로 구분된다. 유럽연합에서는 자동차의 전 과정 분석에서 WTT 단계를 에너지 원료 생산, 원료 운송, 원료 가공, 가공된 연료 분배, 자동차 연료 충전까지의 과정으로 구분하며, 이후 자동차에서 에너지를 사용하는 단계만 TTW 단계로 구분하였다. European Commission (2022)은 전 과정 분석에서 각 단계를 그림 2와 같이 구분하고 있다.

따라서 전 과정 분석에서 추정하는 총 온실가스 배출량은 다음과 같이 수식적으로 표현된다.

$$WTW = WTT + TTW \tag{1}$$

$-WTW$: 전과정 온실가스 배출량
$-WTT$: 에너지 생산 단계 온실가스 배출량
$-TTW$: 에너지 사용 단계 온실가스 배출량

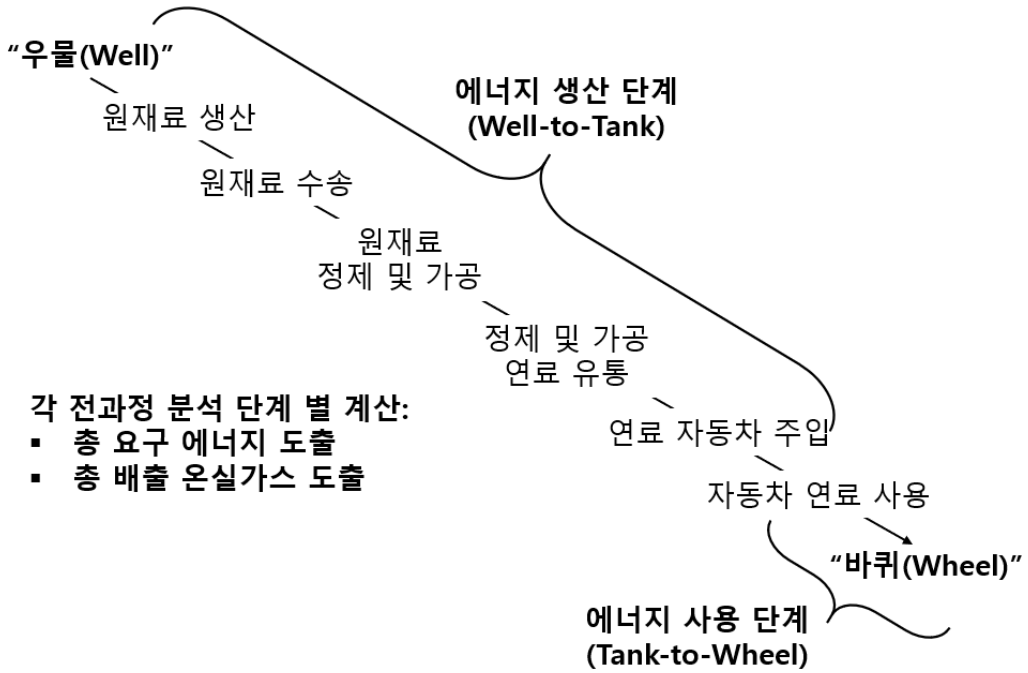

그림 2. 전 과정 분석에서의 에너지 생산 단계(WTT)와 에너지 사용 단계(TTW) 구분

2. 수명주기비용분석(Lifecycle cost analysis)과 총보유비용(Total costs of ownership analysis)

수명주기비용분석(Lifecycle cost analysis, LCA)은 제품의 수명주기 동안 발생하는 총 비용을 분석하는 방법이며, 총보유비용(Total cost of ownership, TCO)은 제품의 취득부터 폐기까지 발생하는 총보유비용을 분석하는 방법이다. 두 분석 방법은 제품의 비용을 바라보는 관점의 차이를 반영하며, 구체적으로 두 방법론의 비용 항목 구성에서 차이를 보인다.

Barbusova et al. (2019)는 총보유비용은 소비자 관점에서의 비용이며, 수명주기비용분석은 거기에 더하여 연구 비용까지 포함한 개념으로 정의하였다. 미국 국방부(Department of Defense, DoD)는 국방조달가이드북(The Defense Acquisition Guidebook)에서 수명주기비용분석은 연구개발비용, 투자비용, 운영 및 지원 비용, 폐기 비용을 모두 포함하는 것으로 제시하고 있으며, 총보유비용은 수명주기비용분석의 모든 비용을 포함하고 거기에 더하여 인프라 또는 비즈니스 프로세스 비용까지 포함하는 것으로 규정하고 있다(Defense Acquisition University, 2010). 이와 다르게 미국 스텐포드 대학의 수명주기분석 가이드북(Guidelines for Lifecycle Cost Analysis)에서는 총보유비용과 수명주기분석을 동일한 분석 방법으로 정의하고 있다(Stnaford University Land and Buildings, 2005).

본 연구에서는 연구개발 및 생산시설 투자 비용 등의 다양한 간접 비용들이 최종 제품의 판매 가격에 포함되고 있다는 가정하에 수명주기비용분석과 총보유비용을 동일하게 정의하여 혼용하였다. 특히, 소비자 입장에서 지불하는 총 비용은 연구개발비나, 인프라, 비즈니스 프로세스와 관련된 비용과 무관하므로 두 비용 분석 방법이 포함하는 비용 항목의 구성 또한 동일하다.

구매 비용과 운영비용, 폐기 비용을 포함하는 총보유비용 또는 수명주기비용은 구매시점의 순현재가치(Net present value, NPV)로 표현하는 것이 일반적이다. 특히, 제품의 유지보수 비용 등 연간 발생하는 비용을 운영비용에 포함하면 총보유비용은 다음과 같이 수식적으로 표현된다.

$$TCO = PC + \sum_{t=1}^{L} \frac{OC}{(1+r)^t} - \frac{SV}{(1+r)^L} \tag{2}$$

-PC:구매비용(Purchase Cost)
-OC: 운영비용(Operation Cost)
-SV: 잔존가치(Salvage Value)
-r: 할인율(Discount rate)
-L:제품수명(The life of product)

3. 비용효과분석(cost-effectiveness analysis)

비용효과분석(cost-effectiveness analysis, CEA)은 분석 대상의 단위당 비용과 효과를 비교하여 투자의 가치가 비용을 정당화하는지 여부를 결정하는 방법론이다(The World Bank, 2022). 비용효과분석은 동일한 효과를 초래하는 유사한 정책, 사업 또는 프로젝트의 순위를 매기거나 비교하기 위하여 사용된다.

비용편익분석(cost-benefit analysis)와 유사하지만 비용편익분석은 편익을 화폐적 가치로 환산하는 반면 비용효과분석은 효과의 단위를 화폐적 가치로 환산하지 않고 그대로 사용함으로써 편익 또는 효과를 화폐적 가치로 환산하는 과정에서 발생할 수 있는 오류를 감소시킬 수 있다는 장점이 있다. 그러나 분석 대상이 여러 편익 또는 효과를 발생시킬 때는 사용할 수 없다는 단점이 있다.

비용효과분석의 적용이 가장 활발한 분야는 의료분야와 환경분야이다. 미국 질병관리통제센터(Centers for Disease Control and Prevention, CDC)는 질병의 예방 및 통제를 위한 다양한 방법들에 대하여 비용효과분석의 결과를 기반으로 의사결정에 활용하고 있다(CDC, 2022). 영국의 건강사회복지부(Department of Health and Social Care) 또한 특정 공공보건 효과를 달성하기 위한 의사결정에 효과적으로 이용될 수 있으며, 특히 임상 결과(clinical outcomes)와 경제적 평가가 관련된 경우, 임상 결과를 측정하기 상대적으로 간편하며, 건강에 미치는 영향에 대한 질병 별 측정을 기반으로 대안에 대한 평가를 제공한다는 점에서 장점이 있다고 설명하고 있다(Office for Health Improvement and Disparities of United Kingdom, 2020).

친환경자동차의 비용효과분석에서는 친환경자동차가 내연기관자동차 대비 감축하는 탄소배출량을, 추가로 발생시키는 비용의 합으로 나누는 방식으로 단위

감축량 대비 비용으로 환산하여 비교한다.

비용의 경우, 이자율을 이용하여 다양한 현금흐름을 특정 시간 단위의 가치로 변환이 용이한 것에 비하여, 비화폐적인 효과는 시간의 변화에 따른 가치 변화를 환산하기가 어려우므로 효과의 크기가 일정한 경우, 효과의 발생 간격에 맞추어 비용을 환산하여 비교한다. 그러나 효과의 발생 간격 또는 크기가 일정하지 않은 경우, 가정을 통하여 적절한 할인율을 사용하여 비교한다.

비용효과를 수식으로 표현하면 다음과 같다.

$$\text{비용효과성}(Cost-Effectiveness)=\sum_{t=0}^{L}\frac{C_t}{(1+r)^t}\Big/\sum_{t=0}^{L}\frac{E_t}{(1+r)^t} \tag{3}$$

-C_t:연간비용(Cost)
-E_t:연간효과(Effect)
-r:할인율(Discount rate)
-L:시스템 수명(The life of system)

제 2 절 소비자의 친환경자동차 최적 투자 전략 분석

1. 실물옵션분석(real option analysis)

실물옵션분석(real option analysis)은 금융공학의 옵션가치 평가기법을 실물투자에 응용한 방법론으로 불확실성 하에서의 최적 의사결정을 분석하는 기법이다. 금융에서의 옵션은 미리 정해진 가격으로 정해진 기간 동안 특정 증권을 사거나 팔 수 있는 권리를 의미한다. 이러한 옵션의 가치를 평가하는 모형은 투자 대상의 가치를 구성하는 항목 중 불확실한 요인이 위너 과정(wiener process)을 따를 때, 무위험 차익을 얻을 수 없다는 전제 하에 이미 시장에서 거래되고 있는 증권의 가치로 포트폴리오를 구성하여 옵션의 미래 현금흐름을 복제한 뒤, 해당 포트폴리오의 시장가치를 통하여 옵션의 가치를 평가한다.

실물 옵션은 증권을 사거나, 파는 금융 옵션을 실물 투자에 적용하여 실물 의사결정을 하나의 금융 옵션으로 해석한다. 예를 들어, 생산 설비에 대한 투자 프로젝트의 경우, 투자 또는 포기 여부를 옵션으로, 생산 설비 비용을 금융 옵션의 행사 가격으로 해석한다. 일반적으로 실물 옵션에서 고려되는 의사결정(옵션)의 종류는 포기, 연기, 확장, 축소, 전환이 있으며 투자 대상의 가치 구조와 상황에 따라 다양한 의사결정이 조합될 수 있다.

실물옵션은 의사결정 기간이 연속적인지, 이산적인지에 따라 연속형 모형과 이산형 모형으로 구분된다. 이러한 구분은 연속적 옵션 가치 평가 방법을 개발한 블랙(Black)과 숄즈(Sholes)의 모형과, 이산형 옵션 가치 평가 모형을 개발한 콕스(Cox)와 루빈스테인(Rubinstein)의 모형과 동일하다.

각 모형의 일반적 형태는 다음과 같다.

(연속적 실물옵션 모형)

$$
\begin{aligned}
&V(S_t,t) = N(d_1)S_t - N(d_2)Ke^{-r(T-t)} \\
&where \\
&d_1 = \frac{1}{\sigma\sqrt{T-t}}\left[\ln\left(\frac{S_t}{K}\right) + \left(r + \frac{\sigma^2}{2}\right)(T-t)\right] \\
&d_2 = d_1 - \sigma\sqrt{T-t}
\end{aligned}
\tag{4}
$$

-S_t:시점 t에서의 기초자산 가격(The price of the underlying asset)
-r:무위험 이자율(Risk-free rate)
-s:기초자산 표준편차(Standard deviation)
-N:표준정규분포의 누적분포(Cumulative standard normal distribution)
-$V(S_t,t)$:(S_t,t)노드에서 프로젝트 가치(The value of project at (S_t,t))
-T:프로젝트 만기 시점(The time of project expiration)
-K:프로젝트 행사 가격(The strike price of the project)

(이산형 실물옵션 모형)

$$
\begin{aligned}
&V(d,t) = Max\left(\frac{\pi_u V(d,t+1) + \pi_d V(d+1,t+1)}{1+r},\ 0\right) \\
&V(d,T) = Max(S(d,T) - K,\ 0) \\
&where \\
&\pi_u = \frac{r-D}{U-D}, \pi_d = 1-\pi_u \\
&U = \frac{S(d,t)}{S(d,t-1)} = e^{\sigma}, D = \frac{1}{U}
\end{aligned}
\tag{5}
$$

-*d*:기초자산 가격 감소 횟수(The number of the underlying asset price downmovements)
-*r*:무위험 이자율(Risk-free rate)
-*s*:기초자산 표준편차(Standard deviation)
-*p*:위험중립확률(Risk-neutral probability)
-*S(d,t)*: 상태(d,t)에서 기초자산의 가격(The price of the underlying asset at (d,t) state)
-$V(S_t,t)$:상태(d,t)에서 프로젝트 가치(The value of project at (d,t) state)
-*T*:프로젝트 만기 시점(The time of project expiration)
-*K*:프로젝트 행사 가격(The strike price of the project)

제 3 절 기업의 연료 충전소 최적 투자 전략 분석

1. 이산선택모형(discrete choice model)

이산선택모형(discrete choice model)은 소비자들이 효용을 극대화하기 위하여 주어진 각 대안 중 가장 높은 효용을 지닌 대안을 선택한다는 소비자 이론을 근간으로 소비자의 구매 의사결정을 모형화하여 어떤 제품의 구매 확률을 추정하는 모형이다. 이 때, 이산 선택이란 각 대안이 구매 또는 비구매로 구성된 이산적인 선택을 하게 된다는 것을 의미하며, 이분형 회귀분석에서 대표적으로 이용되는 로지스틱 함수를 이용하여 구매 확률을 추정한다.

구체적으로 각 효용과 그에 따른 확률의 추정 과정은 제품의 효용에 영향을 미치는 주요 요인들로 제품의 평균적 효용을 추정한 후, 관측하지 못한 효용(unobservable utility)이 특정 분포를 따른다고 가정하여 구매 확률을 도출한다. 관측하지 못한 효용이 따르는 분포가 정규분포일 때, 프로빗(Probit) 모델, 검벨 분포(gumbel distribution)일 때 로짓(Logit) 모델로 구분된다. 특히, 검벨 분포는 시행 횟수가 증가할수록 정규 분포로 수렴함이 알려져 있으며, 검벨 분포를 따르는 독립 확률 변수들의 최대값이 로지스틱 분포를 따르는 특징이 있어 이산선택모형에서 주로 활용된다.

로짓 모델의 경우, 제품의 대안의 수나, 제품들의 계층 구조, 소비자의 이질적 특성 반영 여부에 따라 다양한 모형이 개발되어 왔다. 제품의 대안이 2개인 경우 이산형 로짓 모델(binary logit model), 3개 이상인 경우 다항 로짓 모델(multinomial logit model)로 구분되며, 제품 대안들이 계층을 구성할 때, 하나의 계층을 집단화(nest)하여 분석하는 네스티드 로짓 모형(nested logit model), 개개인마다 각 효용 영향 요인들이 효용에 미치는 영향이 다르다는 점을

반영하여, 각 효용 영향 요인들의 파라미터가 정규 분포를 따른다고 가정하고 해당 분포의 모수를 추정하는 혼합 로짓 모형(mixted logit model) 등으로 구분된다.

이산선택모형은 특히, 대중교통의 수요를 추정하는데 실증적으로 사용되어 그 효과성을 인정받았으며, 이산선택이론의 학문적 발전에 기여한 공로로 2000년 다니엘 맥패든 교수가 노벨상을 수상한 바 있다.

본 연구에서는 다항 로짓 모델을 사용하여 친환경자동차의 수요를 추정하였으며, 일반적인 다항 로짓 모델의 수식적 표현은 다음과 같다.

$$U(A_i) = V_i + \varepsilon_i = \boldsymbol{\beta}^{\mathbf{T}}\mathbf{x}_i + \varepsilon_i$$
$$P(A_i) = P(U(A_i) > U(A_j), \forall j \in C,\ j \neq i) = \frac{e^{V_i+\varepsilon_i}}{\sum_{j\in C} e^{V_j+\varepsilon_j}} \qquad (6)$$

-$U(A_i)$:대안 i의 효용(The utility of alternative i)
-C:대안 집합(The set of alternatives)
-V_i:대안 i의 관측가능한 효용(The observable Utility of alternative i)
-b:속성의 효용 계수 벡터(The utility parameter vector of attributes)
-x_i:대안 i의 속성 수준 벡터(The attribute level vector of alternative i)

제 3 장 정부의 충전인프라 투자비용을 고려한 친환경자동차 비용효과 분석

제 1 절 서론

세계 자동차 정책은 온실가스를 감축하기 위한 환경 규제를 강화하는 추세이다. 미국과 중국, 일본, 유럽연합 등 세계 경제 대국들은 시기는 다소 차이가 있지만 늦어도 2035년까지 내연기관자동차의 판매를 금지하는 정책을 수립하였다. 이러한 감축 목표를 달성하기 위하여 현재 자동차 제조기업에게 부과되고 있는 환경규제 또한 강화되고 있다.

유럽연합은 2019년 "CO_2 emission performance standard for new passenger cars and for new light commercial vehicles" 규제를 발표하며, 2020년부터 승용차의 평균 온실가스 배출량을 95 gCO_2/Km로 규정하였다(The European Parliament and of the Council, 2019). 미국은 2022년"Final Rule to Revise Existing National GHG Emissions Standards for Passenger Cars and Light Trucks Through Model Year 2026"를 발표하며 복합 차량 배출 표준을 161 gCO_2/mile로 규정하였다(United States Environmental Protection Agency, 2022). 중국은 2019년"Phase V fuel consumption standards for passenger vehicles"를 발표하여 목표 평균 온실가스 배출량을 기존 117 gCO_2/Km에서 93 gCO_2/Km로 강화하였으며(China Ministry of Industry and Information, 2021), 한국 또한 2012년 도입된 "자동차 온실가스 관리제도"에 따라 2012년 140 gCO_2/Km에서부터 매년 강화되어 2022년 기준 평균 온실가스 배출량을 97 gCO_2/Km로 규제하고 있다 (환경부, 2021).

이러한 노력에 따라 친환경자동차의 시장점유율이 증가하고는 있지만 아직 친환경자동차 시장의 지배적 디자인(dominant design)이 정해진 것은 아니다. 친환경자동차 시장규모가 가장 큰 유럽연합의 경우에도 하이브리드는 3.8%, 전기자동차는 2%, 수소자동차는 점유율이 무시할 수 있을 정도로 적은 수준이다(European Automobile Manufacturers Association, 2019). 친환경자동차 시장에서 지배적 디자인이 도출되기 위해서는 환경성과 경제성을 모두 만족하여야 한다. 그러나 이러한 두 기준은 서로 상충 관계(trade-off)에 있다. 따라서 비용과 환경성을 비교 분석하여 각 친환경자동차 대안의 비용대비 환경성 수준(cost-effectiveness)을 측정하고 이를 기준으로 기술개발과 정책을 수립할 필요가 있다.

친환경자동차에 대하여 비용효과성을 분석한 선구적 연구는 Lareau (1990)가 있다. Lareau는 메탄올 자동차에 대하여 공기 질 개선 효과와 친환경자동차로의 대체 비용을 비교하였으며, 가장 호혜적인 케이스에서만 메탄올 자동차가 비용효과적인 대안이 될 수 있다고 분석하였다.

초기 친환경자동차의 비용효과분석은 당시 환경적 화두였던 오존의 감축을 중심으로 하였으며 고려하였던 친환경자동차의 종류도 당시 실험 단계에 있었던 메탄올 자동차, 태양광 자동차를 대상으로 하였다. 따라서 현재 가장 큰 화두인 온실가스 감축과 하이브리드, 전기, 수소자동차에 대한 연구와는 다소 거리가 있다.

온실가스 감축과 하이브리드, 전기, 수소자동차를 대상으로 비용효과분석을 수행한 초기 연구는 Litman (1998)과 Lave and MacLean (2002)이 있다. Litman은 가상의 전기자동차를 첫 상용 하이브리드 자동차인 도요타 프리우스 및 기존

내연기관자동차와 비교하였다. Litman은 공기 오염물질, 이산화탄소의 감소와 외부 비용으로 교통량, 도로 시설 비용, 소음을 포함하여 분석하였으며 공기 오염물질의 감소가 높은 케이스에서만 전기자동차가 비용효과적이 될 수 있다고 평가하였다. Litman이 가상의 전기자동차를 설정하여 비교한 것에 비하여, Lave와 MacLean은 실증 분석에 보다 집중하였다. 그들은 온실가스 감소 편익이 217 USD/t 이상이거나 휘발유 가격이 1.35 USD/L를 초과하는 경우에만 하이브리드가 비용효과적이라고 분석하였다.

최근의 연구들은 초기의 연구들보다 효과와 비용의 추정을 보다 정밀하게 진행하고 있으며, 다양한 국가, 시장, 기술 상황을 고려하여 진행되고 있다. 특히, 온실가스 감축을 전 과정 평가의 관점에서 진행하고 있으며 비용 또한 수명주기비용분석을 사용하고 있는 특징이 있다.

van Vliet et al. (2011)은 전기자동차와 하이브리드 자동차가 국가 전력 수요에 미치는 영향을 고려하여 비용효과분석을 수행하였다. 그들은 아직 전기자동차는 비용효과적이지 않지만, 하이브리드는 호혜적인 상황에서는 비용효과적이 될 수 있다고 결론지었다. 반면, Hao et al. (2017)는 하이브리드 자동차는 이미 비용효과적이며, 충분한 배터리 가격 또는 석탄 발전의 비중이 감소하거나 휘발유 가격이 높다면, 전기자동차도 비용효과적일 수 있다고 주장하였다.

Hao et al. (2017)의 연구에서와 같이 전기자동차는 친환경성은 해당 국가의 발전원 구성(energy mix)에 큰 영향을 받는다. 또한 전력 사용량이 국가 별 평균 주행거리나 도로한경 등에 큰 영향을 받고 연료 비용 또한 전력 및 휘발유 소매 가격 등 국가적 특성에 영향을 받으므로 국가적 특성을 반영한 연구들이 수행되었다.

Bickert et al. (2015)은 독일에서 중형(compact), 준중형(sub-compact), 소형(mini)으로 자동차 크기를 구분하여 비용효과분석을 수행하였다. Falcão et al. (2017)은 친환경 발전 비율이 80%가 넘는 브라질의 발전 특성을 반영하여 전기자동차의 비용효과분석을 수행하였으며, Lajunen and Lipman (2016)은 미국과 핀란드에서 승용차가 아닌 버스를 대상으로 비용효과분석을 수행하였다. 중국을 대상으로 한 연구는 온실가스의 사회적 비용을 고려한 Zhao et al. (2015)와 중국의 지방 도시 별 특성을 고려한 Hao et al. (2017)가 있다. 그러나 한국을 대상으로 진행한 연구는 확인하지 못하였다.

친환경자동차에 대한 기존의 연구들은 주로 자동차에서 발생하는 비용만을 주로 고려하여 친환경자동차로 시장을 전환하는데 필수적인 연료 충전 인프라 비용을 고려하지 못한 한계가 있다. 또한 친환경자동차 대안으로 하이브리드와 전기자동차를 주로 고려하여 수소자동차를 고려하지 못한 한계가 있다. 이는 2019년 기준 전 세계 수소자동차 판매량이 아직 7,574대에 불과하고, 그 중 대부분이 한국과 일본에서 판매되어 그 외 국가들에서는 친환경자동차 대안으로 주목받지 못하기 때문인 것으로 보인다(Frost & Sullivan, 2020). 그러나 한국과 일본과 같이 화학산업에서 부가적으로 생성되는 부생수소의 활용성이 높으며, 수소 생산 장소와 활용 장소가 상대적으로 가까운 국가에서는 수소 자동차가 비용효과적을 수 있다. 실제로 한국과 일본은 다른 국가들과 달리 정책적으로 수소 자동차에 대한 기술 투자에 집중하고 있다. 한국은 2019년 수소 경제 활성화 로드맵을 발표하며 수소자동차 보급 정책을 구체화하였고[11], 일본 또한 2018년 “the Japan H2 Mobility (JHyM) framework”을 발표하여 수소자동차 보급 계획을 수립하였다(Frost & Sullivan, 2020).

본 연구는 수소자동차와 연료 충전 인프라 투자비용을 고려하여 각 친환경자동차 대안에 대한 비용효과성 도출을 목적으로 한다. 따라서 본 연구에서는 자동차와 연료 충전 인프라 투자 비용을 고려한 전환 비용을 정의하고, 전 과정 분석을 통하여 추정된 온실가스 감축량을 기반으로 각 대안의 비용효과성을 도출하는 모델을 제시하였다. 제안된 모델은 세계 수소자동차 시장점유율이 가장 높은 한국을 대상으로 실증 분석을 수행하였으며 주요 요인에 대한 민감도 분석을 수행하여 수소자동차가 비용효과적이기 위한 기술개발 목표를 제시하였다. 또한 수소 생산 및 공급 조합을 비교하여 최적의 수소 충전 인프라 구성을 제안하였다.

본 연구의 구성은 다음과 같다. 2절에서는 자동차의 총보유비용과 연료충전 인프라 구축 비용으로 구성되는 전환비용과 전 과정 분석을 통한 온실가스감축량을 정의하여 이를 기반으로 각 대안의 비용효과성을 평가하는 모델을 제안한다. 3절에서는 한국을 대상으로 실증분석을 수행한 결과를 논의하며, 4절에서는 주요 요인에 대한 민감도 분석 수행 결과와 최적 수소 충전 인프라 구성을 논의한다.

제 2 절 친환경자동차 비용효과분석 모형

비용효과분석은 특정 목적을 달성하기 위하여 고려되는 대안들의 비용과 효과를 비교하여 대안들을 평가하기 위한 방법으로 정의된다(Levin and McEwan, 2000). 따라서 친환경자동차에 대한 비용효과분석은 내연기관자동차 시장에서 친환경자동차 시장으로 전환되는 과정에서 발생하는 비용과 효과를 비교하여 평가하는 과정이다. 현재 친환경자동차로 시장 전환의 주 목적은 온실가스 감축에 있으므로 본 연구에서는 내연기관자동차 대비 온실가스 감축량을 분석 대상 효과로 정의하였다.

온실가스 감축에 대응되는 비용은 친환경자동차 시장 전환 과정에서 발생하는 총 비용이다. 이는 내연기관자동차 대비 추가로 지출하여야 하는 친환경자동차의 총보유비용뿐만 아니라 친환경자동차의 연료 충전을 위하여 필수적으로 요구되는 연료 충전 인프라 비용도 포함하여야 한다. 따라서 친환경자동차의 비용효과분석은 총보유비용의 증가량과 연료 충전 인프라 비용의 합으로 구성된 전환비용과 온실가스 감축량을 비교하는 과정이다. 이를 도식화하면 다음과 같다.

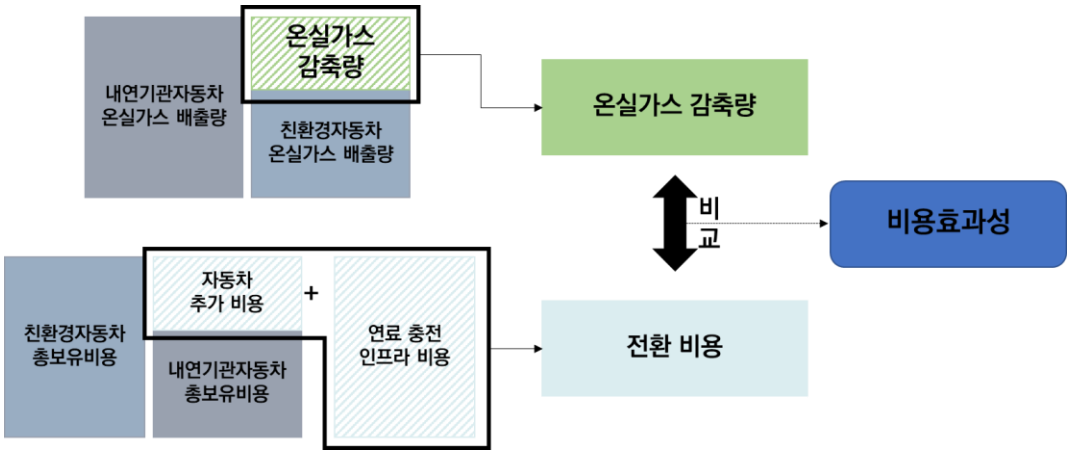

그림 3. 친환경자동차 비용효과분석 개념도

특히, 친환경자동차로의 시장 전환에 따른 온실가스 감축은 사회 전체의 후생(welfare)를 증진시키므로 고려되는 비용 또한 사회적 비용의 관점에서 고려되어야 한다. 따라서 시장 주체들 간의 이전 지출은 사회적 비용에 포함되지 않는다. 예를 들어 정부에서 소비자들에게 지불하는 친환경자동차 구매 보조금은 소비자가 지불해야했던 구매비용을 정부가 일부 대신 지불하는 형태이므로 이전 지출에 해당한다.

기존 연구에서는 정부의 보조금에 의하여 소비자의 구매비용이 감소하는 경우 친환경자동차의 총보유비용이 감소하는 것으로 보았다. 그러나 해당 보조금만큼의 구매비용은 내연기관자동차에서 친환경자동차로 전환되는 과정에서 지불 주체와 상관없이 발생하는 비용이다. 따라서 전환 비용의 관점에서는 보조금에 의한 총보유비용의 감소를 포함하지 않았다.

1. 온실가스 감축량 추정 모형

내연기관자동차를 친환경자동차로 교체함으로써 감축되는 온실가스 배출량은 자동차의 연비, 소비자의 연평균 주행거리, 연료 생산 방식에 영향을 받는다. 전기자동차와 수소자동차는 일반적으로 주행 중 온실가스를 거의 배출하지 않기 때문에 환경 친화적인 것으로 인식된다. 하지만 전기와 수소 생산과정에서 온실가스가 배출될 수 있다. 이러한 이유로 친환경자동차의 환경적 영향은 에너지의 생산 단계에서 배출되는 온실가스를 포함하는 전 과정 분석의 방법으로 평가되어야 한다.

본 연구에서는 단위 에너지 사용량에 따라 배출되는 온실가스의 양(내연기관 및 하이브리드 자동차의 경우 리터(L), 전기자동차의 경우 킬로와트시(kWh), 수소자동차의 경우 킬로그램(Kg))을 전 과정 계수(이하, WTW)로 정의하며, 이는 생산 단계 계수(이하, WTT) 와 사용 단계 계수(이하, TTW)의 합으로 구성된다.

$$\begin{aligned} &WTW_i = WTT_i + TTW_i \\ &i = ICEV, HEV, BEV, FCEV \end{aligned} \tag{7}$$

WTT 계수는 에너지 생산 과정에서 배출되는 단위 에너지 생산량 당 온실가스의 양을 의미한다. 전기, 수소자동차의 경우 전기나 수소의 추출, 정제, 운송 과정에서 배출되는 온실가스를 합산하여 추정한다. TTW 계수는 에너지 소비 시 배출되는 단위 에너지 소비량 당 온실가스의 양을 의미한다. 전기자동차와 수소자동차의 TTW 계수는 0으로 알려져 있다. 이에 따른 차종별 온실가스 총 배출량은 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$
\begin{aligned}
&GHG_i = FE_i \times DD \times WTW_i \\
&i = ICEV, HEV, BEV, FCEV \\
&where \\
&WTW_{EV} = WTT_{EV} = \sum_{j \in E} (e_j \times w_j) \\
&WTW_{FCEV} = WTT_{FCEV} = \sum_{k \in TP_{FCEV}} (e_k \times w_k)
\end{aligned} \tag{8}
$$

E는 발전원 집합이며, TP_{FCEV} 는 수소충전소 유형의 집합이다. e_j는 발전원 j의 단위발전량 당 발생하는 온실가스계수(CO_2eq/kWh)이며, e_k는 수소충전소 유형 k의 단위당 발생하는 온실가스 계수(CO_2eq/kg)이다. w_j와 w_k는 각각 발전원 j 와 수소충전소 유형 k의 비중이다. FE_i는 연비이며, DD는 연평균 주행거리이다. 자동차에서 배출되는 총 배출량은 연비와 연평균 주행거리, 그리고 WTW 계수의 곱으로 식 (8)과 같이 도출될 수 있다.

전기자동차의 경우, 1 kWh의 전력을 생산할 때 발생하는 온실가스 배출량은 개별 에너지원(석탄, 천연가스, 원자력, 재생에너지)의 구성에 따라 결정된다. 따라서 1 kWh당 온실가스 배출량은 특정 에너지원의 온실가스 배출 계수와 해당 에너지원 구성 비중의 가중평균으로 도출된다.

수소자동차의 경우, 수소 1kg 생산 시 배출되는 온실가스 배출량은 생산과 유통 방법의 조합에 따라 결정된다. 수소의 생산 방식은 (1) 코크스 오븐 가스 정화(coke oven gas purification), (2) 나프타 분해(naphtha cracking), (3) 증기 메탄 개질(steam methane reforming), (4) 전기분해(electrolysis)의 네 가지 방식이 대표적이며, 수소의 유통 방식은 (1) 튜브 트레일러(tube-trailer), (2) 파이프라인(pipe-line), (3) 현장 생산(on-site)이 일반적이다. 단위 수소당 총

온실가스 배출량은 각 생산 및 유통 방법 별 온실가스 배출 계수를 그 비중으로 가중 평균하여 도출된다.

2. 전환비용 추정 모형

전환 비용은 기존 기술, 제품, 서비스, 정책 등이 대안으로 대체될 때 발생하는 비용을 의미한다. 내연기관자동차를 하이브리드, 전기, 수소 자동차로 대체하는 과정에서 연료 충전 인프라에 대한 투자가 필수적이다. 따라서 본 연구에서는 전환 비용을 연료 충전 인프라 구축 및 유지 관리에 대한 비용과 내연기관자동차 대비 친환경자동차의 총보유비용 증가분으로 구성하였다. 친환경자동차 연료 충전 인프라의 수명과 자동차의 수명이 다르기 때문에, 비용은 연간 등가로 환산하여 현금흐름 발생 주기를 일치시켰다. 각 친환경자동차 종류에 대한 전환 비용을 수식으로 표현하면 식 (9)와 같다.

$$\begin{aligned} &SC_i = (TCO_i - TCO_{ICEV}) + IC_i \\ &i = HEV, BEV, FCEV \end{aligned} \tag{9}$$

SC_i는 전환비용을 의미하며, TCO_i는 자동차의 연간 총보유비용을 의미한다. IC_i는 연간 연료 충전 인프라 비용이다. 하이브리드 자동차[2]는 내연기관자동차와 같은 주유소에서 충전이 가능하므로 추가적인 연료 충전 인프라 비용이 요구되지 않는다. 총 보유비용은 구매비용과 잔존가치, 연료비용, 보험료, 세금으로 구성되며 연간 비용으로 환산한 식 (10)의 형태로 정의한다.

[2] 본 연구에서는 외부 전원으로부터 배터리 충전이 가능한 플러그인-하이브리드 자동차는 고려하지 않는다.

$$
\begin{aligned}
&TCO_i = \left(PC_i - \frac{SV_i}{(1+r)^{L^v}} \right) \left(\frac{r(1+r)^{L^v}}{(1+r)^{L^v} - 1} \right) + FC_i + INS_i + T_i \\
&i = ICEV, HEV, BEV, FCEV \\
&where \\
&FC_i = FE_i \times DD \times FP_i \\
&FC_{EV} = FE_i \times DD \times (h \times HCP + (1-h) \times PCP)
\end{aligned} \tag{10}
$$

PC_i는 구매비용, SV_i는 잔존가치를 의미하며, FC_i, INS_i, T_i는 각각 연간 연료, 보험, 세금을 의미한다. r은 할인율을 의미하며, L^v는 자동차의 수명을 의미한다. 전기자동차를 제외한 자동차의 연료 비용은 연비와, 연평균 주행거리, 연료 가격의 곱으로 정의된다. 전기자동차의 경우, 공공 충전소의 충전 요금(PCP)과 가정용 충전기의 충전 요금(HCP)이 상이하므로, 가정 충전 비중(h)을 곱한 평균 충전 단가를 사용하여 연료 비용을 정의한다.

이 때, 수소자동차와 전기자동차에서 사용되는 연료비용은 소비자가 충전할 때 실제 지불하는 금액이 아닌 충전소의 도매 공급가격이다. 내연기관자동차와 하이브리드의 경우, 전체 자동차의 연료 수요와 주유소의 수에 비례하는 연료 공급의 시장 균형으로 연료 가격이 결정된다. 주유소의 경우, 석유 판매를 통하여 주유소의 건설과 운영비 등을 회수할 수 있을 때, 사업이 진행되고 그에 따라 연료 가격이 결정되므로 연료의 시장 가격에 주유소의 건설, 운영비가 포함되어 있는 것으로 해석할 수 있다.

그러나 수소자동차와 전기자동차의 경우, 연료 충전 인프라의 건설, 운영비용이 높고, 충전 수요는 적어 시장 형성이 어려운 상태이다. 미국, 중국, EU, 일본 등 주요 국가에서는 친환경자동차의 구입 비용뿐만 아니라 충전소 구축, 운영 비용에 대한 지원이 이루어지고 있으며, 한국의 경우 정부가 직접 충전소를

구축하여 운영하고 있다. 따라서 현재의 수소자동차와 전기자동차의 연료 가격은 시장 균형 가격이 아니므로 내연기관자동차, 하이브리드와 공정한 비교를 위해서는 수소자동차와 전기자동차 시장을 유지하기 위한 인프라 비용을 고려하여야 한다. 이 때, 연료 비용을 실제 충전 가격으로 사용하는 경우, 도매 가격과의 차이인 이윤만큼 충전 인프라 비용이 감소하고, 그만큼 소비자가 연료 비용에서 더 지출하게 되므로, 전체 시스템의 사회적 비용은 도매 가격으로 도출한 경우와 동일하다. 따라서 본 연구에서는 아직 충전 시장이 형성되지 못한 수소자동차와 전기자동차의 경우, 연료 비용은 도매 가격을 사용하였다.

연료 충전 인프라 비용의 경우, 충전소의 구축와 운영 비용외에도 내연기관 및 하이브리드 자동차와 공정한 비교를 위해서는 수소자동차와 전기자동차가 내연기관 및 하이브리드 자동차와 동일한 충전 편의성을 가질 수 있는 자동차 1대가 요구하는 적정 충전소의 수를 고려하여야 한다. 따라서 본 연구에서는 각 친환경자동차간의 공정한 인프라 비용 비교를 위하여, 수소자동차와 전기자동차 1대가 요구하는 적정 충전기 수와 각 충전기의 구축 및 운영비용을 가중평균하여 연료 충전 인프라 비용을 도출하였다. 특히, 연료 충전소의 규모에 따라 충전기의 수가 달라지므로 연료 충전 인프라의 단위는 충전기의 수로 정의하였다. 이를 수식으로 표현하면 식 (11)과 같다.

$$IC_i = \sum_{m \in TP_i} \frac{1}{\omega_m} \times \left[\left(CC_m + ISC_m \right) \left(\frac{r(1+r)^{L_i^c}}{(1+r)^{L_i^c} - 1} \right) + OC_m \right] \qquad (11)$$
$$i = BEV, FCEV$$

TP_i는 충전기 유형의 집합이며, w_m는 각 유형의 충전기와 전체 자동차의

비중이다. 따라서 이를 역수로 취함으로써 자동차 1대 당 충전기의 비율을 도출할 수 있다. CC_m, ISC_m, OC_m는 각각 충전기 비용, 충전기 설치 비용, 운영 비용이다. L_{c_l}는 충전기의 수명이다. 충전기 유형의 집합의 경우, 수소충전소는 앞서 소개한 수송의 생산 및 유통 방식의 조합으로 구성되며, 전기충전소는 공용 급속 충전소와 공용 완속 충전소, 가정용 충전소로 구성된다.

3. 비용효과분석 모형

비용효과성은 기술, 제품, 서비스, 정책 등의 대안이 유발하는 단위 효과와 그에 따라 요구되는 총 투입 비용의 비율을 의미한다. 본 연구에서는 내연기관자동차가 친환경자동차로 대체되는 상황을 대상으로 하고 있으므로 앞서 도입부에서 언급한 바와 같이 내연기관자동차 대비 친환경자동차의 온실가스 저감량과 전환비용을 비교하는 식 (12)로 정의한다.

$$CE = \frac{SC_i}{GHG_{ICEV} - GHG_i} \qquad (12)$$
$$i = HEV, BEV, FCEV$$

친환경자동차의 비용효과성은 내연기관자동차에서 친환경자동차로 시장이 전환되어 발생하는 단위 온실가스 감축 비용으로 해석될 수 있다. 온실가스와 같은 환경적 효과는 일반적으로 경제적인 가치로 환산되기 어려운 특성이 있다. 그러나 최근 온실가스 배출권 거래제도가 시행됨으로써 온실가스 감축량이 경제적 재화로 거래되기 시작하였다. 따라서 친환경자동차의 비용효과성은 온실가스 감축비용과 직접적인 비교가 가능하며, 이보다 광범위적인 온실가스의 사회적 비용을 추정한 연구의 결과와 비교가 가능하다.

친환경자동차의 비용효과성은 전환비용과 온실가스 감축 수준에 따라 양수와 음수를 모두 가질 수 있다. 만약, 전환비용이 양수일 때, 즉, 친환경자동차 시장으로의 전환 비용이 내연기관자동차 시장의 유지 비용보다 더욱 높을 때, 비용효과성이 음수라면, 이는 친환경자동차가 오히려 내연기관자동차보다 더욱 많은 온실가스를 배출함을 의미한다. 이는 수식적으로 분모는 음수이지만, 분자는

양수인 상황에 해당한다.

수소자동차의 경우, 수소의 생산 방식에 따라 오히려 전기자동차보다 온실가스를 더욱 많이 배출하는 경우가 존재할 수 있다. 또한 전기자동차의 경우에도 마찬가지로 석탄 발전 등 비친환경적 발전 비중이 높은 국가의 경우 오히려 내연기관자동차보다 온실가스를 더욱 많이 배출할 수 있다. 이런 경우, 경제성과 환경성 모두에서 내연기관자동차에 비하여 열등하므로 해당 친환경자동차는 경쟁 대상이 될 수 없다.

비용효과성은 또한 무한히 발산할 수 있다. 내연기관자동차와 온실가스 배출량이 비슷할 때, 식의 구성 상 분모가 0에 수렴하기 때문에 이러한 현상이 발생한다. 이는 효과는 미미하지만 비용은 상대적으로 크게 발생하는 경우로 해석할 수 있다. 따라서 이러한 경우 또한 실질적으로 해당 친환경자동차가 현실적인 대안으로 고려되기 어려운 상황을 의미한다.

제 3 절 한국 시장에서의 친환경자동차 비용효과성 실증분석

본 절에서는 제 2절에서 개발한 모델을 한국 시장에 적용한 실증 분석을 수행하였다. 본 실증 분석에서는 브랜드에 따른 비용차이를 제한하기 위하여 분석 대상 자동차 모델을 한국의 대표적인 자동차 제조사인 현대자동차 제품으로 제한하였다. 또한 제품군과 차급(vehicle size)에 따른 비용차이를 제한하기 위하여 휘발유, 하이브리드, 전기 자동차를 모두 판매하는 코나(KONA)를 기준으로 하였다. 특히, 내연기관과 하이브리드는 일반 승용차 기준 휘발유 자동차가 경유 자동차보다 2배 가량 많은 한국 시장의 특성(Korean Ministry of Land, 2020.12)을 반영하여 휘발유를 기준으로 사용하였다. 그러나 코나 제품라인에는 수소자동차가 없으므로 코나와 동일한 소형 SUV인 넥쏘(NEXO)를 분석 대상으로 선정하였다.

1. 한국 자동차 시장 데이터

친환경자동차의 탄소배출량은 제 2절에서 정의한 바와 같이 연료소비량과 각 친환경자동차의 WTW계수의 곱으로 도출된다. 일반적으로 전기자동차와 수소자동차는 주행 단계에서 온실가스를 배출하지 않기 때문에 친환경자동차로 알려져 있다. 그러나 연료의 추출, 정제, 운송 단계에서는 온실가스가 발생하므로, 에너지의 생산부터 사용까지 전 과정에서 발생하는 온실가스를 비교하는 WTW 분석이 필요하다.

내연기관자동차의 경우, 한국을 대상으로 휘발유와 경유 자동차의 WTW 분석을 수행한 Jang and Song (2015)의 연구를 참조하였다. 저자들은 석유의 대부분을 수입에 의존하는 한국의 특성을 반영하여 원유의 해상 운송, 정제, 유통

등의 과정에서 발생하는 온실가스를 분석하여 WTT 계수를 도출하였으며, Korea Energy Agency (2021)에서 측정한 주행 중 발생하는 온실가스 발생량을 TTW 계수로 사용하였다. 그 결과 내연기관 및 하이브리드 자동차의 WTW 계수는 375.8(WTT)+1582.6(TTW)=1958.4(WTW), 375.8(WTT)+1659.2 (TTW)=2035.0(WTW)으로 도출되었다. 특히, 내연기관과 하이브리드 자동차는 모두 석유기반 연료를 사용하므로 WTT의 값은 동일하다. 그러나 연비의 차이에 의하여 TTW는 차이가 있다.

전기자동차는 한국을 대상으로 전기자동차의 WTW 분석을 수행한 Choi and Song (2018)의 연구를 참조하였다. 저자들은 한국의 원료 별 수입 비중, 해양 수송 거리, 송전 손실 등 한국의 특성을 반영하여 각 원료 별 WTT 계수를 도출하였다. 또한 한국의 경우, 최근 신재생에너지 보급 정책과 더불어 원자력 발전 비중을 감소시키는 정책을 시행 중에 있어 저자들의 분석 기준 시점과 현재의 발전 비중이 다르다. 따라서 본 연구에서는 표 1과 같이 현재 입수 가능한 가장 최신 데이터인 2019년 한국의 원료 별 발전 비중을 사용하여 한국의 전력 평균 WTT를 도출하였다(한국전력, 2020.05)

표 1. 한국의 원료 별 발전 비중 및 WTT 계수

에너지원	비중	WTT (gCO_2eq/KWh)
석탄	40.5%	1,032
석유	0.6%	870
천연가스	26.4%	537
원자력	26.0%	9
신재생	6.6%	294*

* 한국의 법적 신재생에너지 분류 기준에는 온실가스를 배출하지 않는 풍력, 태양열, 수력 등의 발전 이외에도 탄소배출량이 많은 부생가스와 바이오연료가 포함되어 있다. 따라서 신재생에너지의 WTT에는 부생가스와 바이오연료의 발전량의 비중과 온실가스 배출 계수를 고려하여 신재생에너지의 WTT 계수를 도출하였다.

수소자동차는 한국을 대상으로 수소자동차의 WTW 분석을 수행한 Yoo et al. (2018)와 동일 연구진의 최신 연구인 Choi et al. (2020) 연구를 참조하였다. 저자들은 원료 별 수입 비중, 해양 수송 거리, 산업 별 부생수소 생산량 등 한국의 특성을 반영하여 각 수소충전소 유형 별 배출계수를 도출하였다. 본 연구에서는 해당 계수를 참조하여, 2020년 기준 상업운영중인 수소충전소의 유형 별 비중을 곱하여 WTT값을 도출하였다. 한국의 수소충전소는 증기 메탄 개질 방식으로 자체 생산하는 한 곳을 제외하고 현재 튜브 트레일러 운송 방식의 부생수소를 사용하고 있다. 2020년 한국의 상업운영중인 수소충전소 현황[3] 과 각 유형 별, WTT 계수는 표 2와 같다(Korean Ministry of Environment, 2020.12).

[3] 현재 상업 운영중인 수소충전소는 43개소가 있으며, 2기의 충전기를 보유한 충전소가 7곳이 있어 총 충전기 수는 50기이며, 평균 충전 용량은 250kg/일 규모이다 (Korean Ministry of Environment, 2020.12).

표 2. 한국의 수소충전소 현황과 WTT 계수

수소 생산 방식	유통 방식	WTT (gCO_2eq/kg)	충전기 비중(가중치)
나프타 분해	튜브트레일러	4,951	50 (98.04%)
증기 메탄 개질	자체 생산	3,909*/17,640	1(1.96%)

* 원료가 매립가스(Land-Fill gas, LFG)인 경우. (일반적으로 증기 메탄 개질의 원료는 천연가스이지만, 한국은 쓰레기 매립 시설을 활용하여 매립가스를 사용하는 충전소 한 곳을 운영 중에 있다. 그러나 쓰레기 매립지를 증가시키지 않는 이상 매립가스 원료의 추가 생산이 어려우므로 추후 분석에서는 증기 메탄 개질의 경우 한 기만 매립가스를 사용하고 이후 추가되는 증기 메탄 개질 충전소는 모두 천연가스를 사용한다고 가정하였다.)

친환경자동차로의 전환 비용은 제 2절에서 정의한 바와 같이 자동차의 총보유비용과 인프라 비용으로 구성된다. 각 비용은 연간 등가로 환산하여 비교하였으며, 할인율은 한국 정부에서 공공투자사업의 경제적 타당성을 분석할 때 사용하는 사회적 할인율 4.5%를 사용하였다.

먼저 자동차의 총보유비용을 도출하기 위하여 현대자동차 공식 홈페이지를 참조하여 분석 대상 차량의 구매비와 연비 데이터를 수집하였다(Hyundai Motor Company, 2021). 이 때, 친환경자동차의 정부 보조금과 세금 혜택은 앞서 언급한바와 같이 친환경자동차로 전환이 이루어지지 않았다면 발생하지 않았을 비용이므로 세금 혜택 전의 구매가격(취등록세 포함)을 사용하였다. 또한 전기자동차와 수소자동차는 배터리 교체 비용이 중요한 비용요소이나 현대자동차는 판매정책 상 10년[4]간 배터리 성능을 보장하므로 배터리 교체 비용은

[4] 전기자동차는 10년 또는 20만 Km 주행거리에 대하여, 수소자동차는 10년 또는 16만

판매가격에 포함되어 있는 것으로 보았다. 주행거리와 자동차 보유 기간은 Korea Transportation Safety Authority (2017)에서 조사한 한국의 연평균 주행거리인 15,000Km와 평균 보유기간인 8년을 사용하였다.

잔존가치는 한국보험개발원에서 제공하는 차량기준가액을 참조하였다(Korea Insurance Development Institute, 2021). 차량기준가액은 차량의 종류와 연식에 따라 감가상각을 적용하여 도출한 기준가액으로 자동차 보험의 보험료와 사고시 최대보상금을 정할 때 활용되고 있다. 현재 분석 대상 모델의 경우, 출시된지 얼마 되지 않아 8년 연식의 차량기준가액이 없으므로 유사가격대의 차량을 기준으로 차량기준가액을 구매가격으로 나눈 잔존가치율을 평균하여 대리 사용하였다. 예를 들어, 코나 가솔린의 경우, i30, i40 살룬, 아반떼 등의 평균 잔존가치율 30.8%를 사용하였다. 코나 하이브리드는 아반떼, 쏘나타, K5 등의 하이브리드 모델의 평균 감소율 27.8%를 사용하였으며, 코나 전기는 8년 연식의 차량가액이 존재하는 유일한 전기자동차인 RAY의 25.6%를 사용하였다. 다만, 수소차는 8년 연식의 차량가액이 존재하지 않으므로 전기자동차와 동일한 값을 사용하였다.[5] 친환경자동차의 경우, 배터리의 감가상각이 존재하므로 내연기관자동차에 비하여 상대적으로 잔존가치율이 낮은 것으로 추정된다.

연료비용은 연료 가격과 사용량으로 도출된다. 먼저 내연기관자동차의 경우, 한국석유공사 석유정보센터에서 제공하는 한국 주유소의 최근 5년 평균 보통 휘발유 판매가격을 사용하였다(Korea National Oil Corporation Petroleum Information and Service Center, 2021). 수소자동차의 경우, 수소충전소 유형에

Km에 대하여 무상 보증하고 있다.

[5] 현재 코나 전기와 넥쏘의 차량가액은 4년차까지 존재하여, 각 연도의 차량기준가액 감소율은 소수점 이하 첫째 자리까지 동일하다.

따라 공급원가가 다르므로 각 충전소 유형의 공급원가와 각 유형의 비중을 가중평균하여 도출하였다.

현재 한국에서의 수소 생산가격은 부생수소의 경우, 1,750원/Kg, 천연가스 추출수소의 경우, 3,900 원/Kg, 수전해는 9,500 원/Kg이다(Korea Energy Economics Institute, 2019).[6] 이 때, 수소 자체 생산의 경우 운송비용이 발생하지 않으므로 생산비용을 공급원가로 사용하였다. 튜브트레일러로 운송하는 경우 운송비용이 추가되지만 운송비용은 운송거리에 따라 다르다. 따라서 부생수소-튜브트레일러의 경우, 2020년 한국의 24개 수소 충전소의 도매 공급가격의 평균값 7021.9원/Kg을 사용하였다(Korea Energy Economics Institute, 2020).

전기자동차는 공공 충전 요금과와 가정용 충전 요금을 구분하였다. 공공 충전 요금은 충전 인프라를 통하여 공급되므로 공급원가를 사용하였으며, 가정용 충전 요금은 그 자체가 공급원가와 동일하다. 공공 충전의 경우, 한국의 공공충전 정책 가격 설정 근거로 활용된 Korea Energy Economics Institute (2017)의 연구를 참고하였으며, 완속충전 평균 가격은 환경부에서 운영하는 저공해차 통합 누리집을 참조하였다(Korean Ministry of Environment, 2022). 공공 충전과 가정용 충전 비중은 한국교통연구원이 전기자동차 이용자 305명을 대상으로 인터뷰를 통하여 조사한 비율을 사용하였다(Korea Transport Institute, 2017).

연간 보험료는 한국손해보험협회에서 제공하는 한국의 모든 보험사들의 분석 대상 차량의 연간 보험료 중 중위값을 사용하였다(General Insurance Association of Korea, 2021). 자동차 세금은 한국 행정안전부에서 운영하는 차량세금계산기의 데이터를 사용하였다(Korean Ministry of the Interior and Safety, 2021).

[6] 가격이 범위로 주어진 경우 중간값을 사용하였다.

전기자동차와 수소자동차의 경우, 기존 배기량을 기반으로 세금을 부여하던 방식을 적용할 수 없으므로 현재 한국 정부는 공통적으로 동일한 금액의 세금을 부과하고 있다.

충전인프라 비용은 충전기 구매비용, 설치비용과 운영비용으로 구성된 충전소 구축과 운영비용과 친환경자동차 1대가 내연기관자동차와 동일한 충전 편의성을 제공하기 위한 각 충전 인프라 유형 별 요구 비중을 필요로 한다. 요구 비중의 경우, 국가 별 평균 주행거리, 주거형태 등 다양한 요인에 영향을 받는다.

본 연구에서는 한국 정부에서 교통량과 에너지 수요 등을 종합적으로 고려하여 수립한 친환경자동차의 보급 목표와 충전 인프라 보급 목표를 요구 비중으로 사용하였다.[7]

표 3. 친환경자동차 비용효과분석을 위한 한국 자동차 총보유비용 데이터(단위: 천 원)

차종	구매가격	잔존가치	연비 (Km/Unit)	연료가격 (원/Unit)	보험료	세금
수소	70,728	-18,075	96.2	6,959	1,729	130
전기	49,034	-12,531	5.6	101	1,494	130
하이브리드	26,859	-7,476	19.3	1,466	1,371	253
휘발유	22,440	-6,907	13.6	1,466	1,254	457

[7] 현재 한국 정부는 2025년까지 수소자동차 20만대, 전기자동차 113만대를 보급 목표로 설정하였으며, 이에 맞추어 수소충전소 450기, 전기차 충전기는 급속 1,700기, 완속 500,000기를 목표로 하고 있다.

이러한 관점은 정부의 정책에 대한 평가의 측면에서도 의의가 있다. 다만, 정부에서 구체적으로 제시하지 않은 수소 충전소의 유형 별 비중과 전기자동차의 가정용 충전기 비중은 현재 수준과 동일하다고 가정하였다.

수소 충전소의 충전기 구매비와 설치비는 정부의 수소 자동차 정책에서 사용한 값을 동일하게 사용하였다(Korea Energy Economics Institute, 2019). 부생수소-튜브트레일러와 증기 메탄 개질-자체생산은 구매비와 설치비, 운영비가 모두 증기 메탄 개질-자체생산이 비싸다는 단점이 있지만, 운송비용이 발생하지 않아 충전소의 공급 가격이 저렴하다는 장점이 있다. 운영비용은 부생수소-튜브트레일러의 경우, 한국 시장에서의 균등화 수소원가를 분석한 Korea Energy Economics Institute (2020)의 연구를 참조하였다. 충전소 운영 비용인 냉각기, 압축기 비용은 가동률에 비례하므로, 정책 목표에 따른 가동률 75.95%[8]를 가정하여 운영비용을 도출하였다. 증기 메탄 개질-자체생산은 현재 운영중인 증기 메탄 개질-자체생산 충전소의 2020-2021년의 연간 실제 운영비용을 사용하였다(Seoul Metropolitan Government, 2020). 각 유형의 운영비는 모두 model section에서 설명한 바와 같이 수소 공급 비용은 포함하지 않은 비용이다. 수소충전소 수명은 선행연구(Viktorsson et al., 2017)를 참조하여 20년으로 가정하였다.

전기자동차 충전소의 구축 및 운영비용은 지방 정부의 정책 수립에서 사용한 값을 동일하게 사용하였다(Gyeonggi Research Institute, 2017). 운영비용은 한국의 공공충전 정책 가격 설정 근거로 활용된 Korea Energy Economics Institute

[8] 한국의 정책 목표인 수소자동차 20만대와 수소충전소 450기(250kg/day)를 기준으로 분석 대상모델인 넥쏘의 연 평균 연료 사용량을 나누어 연 평균 가동률을 산출하였다.

(2017)의 연구를 참고하였다. 해당 보고서는 급속 충전기의 운영비용만 고려하였으나 데이터 확보의 어려움으로 가정용 충전기와 공용 완속 충전기의 운영비용은 충전기의 구축비용과 비례한다고 가정하였다. 전기자동차 충전기 수명은 선행연구(Korean Ministry of Trade Industry and Energy, 2016)를 참조하여 10년으로 가정하였다.

연료 충전 인프라의 연간 비용을 계산하기 위한 데이터를 정리하면 다음과 같다.

표 4. 연료 충전 인프라 비용 데이터(단위: 천 원)

차종	충전기 유형	충전기 비용	설치비용	운영비용	요구비중 (대/기)	수명 (년)
수소	부생가스-튜브 트레일러	1,700,000	900,000	273,052	453.5	20
	증기 메탄 개질-자체생산	2,200,000	3,400,000	457,205	2,222.2	20
전기	가정용	800		85	1.26	10
	공용 완속	5,000		530	2.26	10
	공용 급속	40,000		4,225	664.7	10

2. 실증 분석 결과

비용효과분석을 수행하기 위하여 먼저, 전주기적 관점에서 배출되는 총 온실가스를 분석하였다. 현재 부생수소를 활용하는 한국의 경우, 수소자동차의 연평균 온실가스 배출량은 약 0.81톤으로 전기자동차의 1.57톤 대비 약 절반 수준이며, 내연기관자동차의 2.24톤의 약 30%를 배출하여 가장 환경성이 우수한 것으로 분석되었다.

전기자동차는 하이브리드와 유사하지만 근소하게 더 많은 온실가스를 배출하는 것으로 분석되었다. 이러한 결과는 한국에서 전기자동차가 하이브리드보다 더 친환경적이라고 분석한 Choi and Song (2018)의 결과와 차이가 있다. Choi and Song (2018)의 연구의 분석 연도인 2015년 대비 2019년의 발전원 비중은 한국의 원전감소 정책에 따라 탄소배출량이 적은 원전의 비중이 5.38% 감소하였으며, 천연가스 발전은 3.4% 증가하였다. 따라서 전력 생산에 따른 탄소배출량이 증가하였고, 전기자동차의 탄소배출량 또한 증가한 것으로 해석된다.

이러한 결과는 국가별 친환경자동차의 탄소배출량을 비교한 Wu and Zhang (2017)의 연구의 결과와 부합한다. Wu and Zhang (2017)는 석탄 발전 비중이 높은 중국과 인도의 경우 전기자동차의 환경성이 낮으며, 신재생에너지 비중이 높은 브라질, 프랑스의 경우 환경성이 높은 것으로 분석하였다.

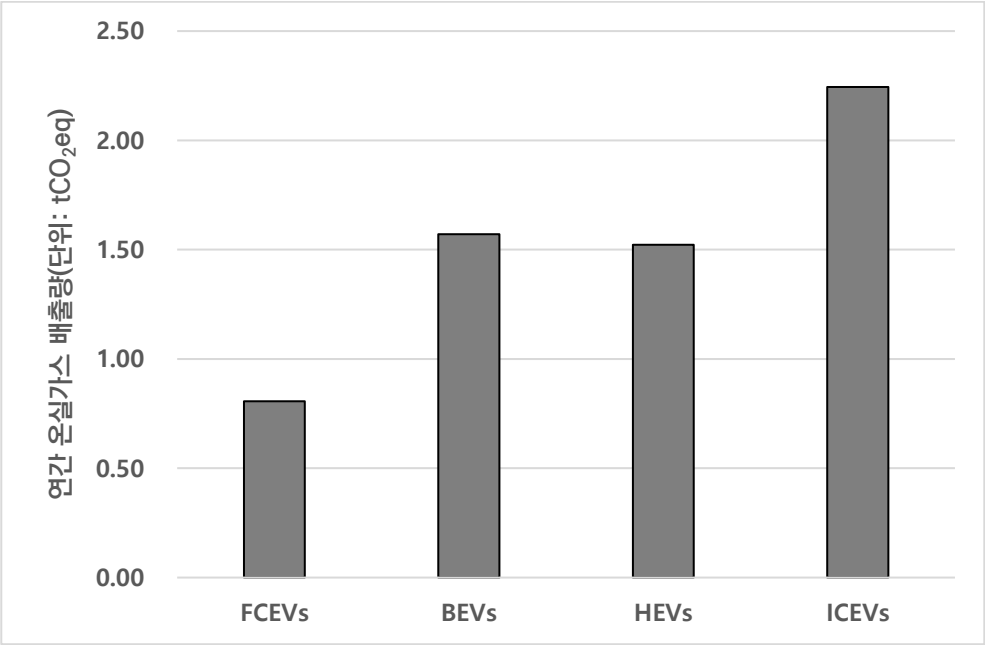

그림 4. 한국의 차종 별 연간 온실가스 배출량

수소자동차의 높은 친환경성은 부생수소를 적극 활용하는 한국의 특성에 기인하는 것으로 해석된다. 미국 시장을 대상으로 친환경자동차를 조사한 Gao and Winfield (2012)의 경우, 수소자동차 온실가스 배출량은 하이브리드와 유사한 것으로 분석하였으며, 중국 시장을 대상으로 조사한 Li et al. (2021)의 경우, 수소자동차가 전기자동차보다 CO_2, CH_4 등 대다수의 온실가스 종류에서 더욱 높은 배출량을 보이는 것으로 분석하였다.

한국에서 증기 메탄 개질-자체생산의 온실가스 배출량은 17,640 gCO_2eq/Kg으로 부생수소의 약 3배이며, 전기분해의 경우, 37,413gCO_2/Kg으로 약 7.6배[9] 이다(Choi et al., 2020). 따라서 부생수소의 활용이 어려운 경우,

[9] 전기자동차와 같이, 수소자동차 또한 Choi et al. (2020)에서 사용한 계수를 2019년 최신 에너지 발전 비중과 현재 한국의 수전해 효율 55%(Korea Energy Economics Institute,

수소자동차는 전기자동차나 하이브리드 보다 환경성이 낮으며, 심지어 내연기관자동차 보다도 환경성이 낮을 수 있다.

한국시장에서 수소자동차의 높은 친환경성은 생산량이 제한적인 부생수소에 기인하므로 추후 수소자동차가 확산될수록 그 환경성은 점차 감소할 것으로 예상된다. 한국의 연평균 부생수소 생산량 140만톤 중 수소차에 활용가능한 양은 약 10만톤 가량으로 분석대상 모델인 넥쏘를 641,026대 운영할 수 있는 양이다(Korea Gas Safety Corporation, 2017).

부생수소는 석유화학 공정의 부산물이므로 생산량을 늘릴 수가 없다. 따라서 그 이상 수소자동차가 보급된다면, 천연가스개질 또는 전기분해 등 다른 수소 생산방식이 혼용되어야 하며, 이 경우 수소자동차의 환경성은 점차 감소할 것이다. 수소 생산방식의 비중 변화에 따른 수소자동차의 비용효과성 변화는 민감도 분석에서 논의하였다.

한국 시장 데이터를 대입한 내연기관자동차와 친환경자동차의 연간 총보유비용과 연료 충전 인프라 비용 및 전환 비용을 추정 결과는 표 5와 같다. 연간 온실가스 배출량 추정 결과와 비교하면, 정도의 차이는 있으나 환경성과 경제성의 트레이드 오프 관계가 확인된다. 보조금을 제외한 현재 수준에서의 총보유비용은은 수소자동차가 가장 높으며 하이브리드는 내연기관자동차와 유사한 수준인 것으로 분석되었다. 이는 하이브리드의 경우, 구매비용에서 내연기관자동차보다 비싸고, 잔존 가치에서 다소 손해를 보지만 연료비가 저렴하여 총 보유비용 관점에서는 유사한 것으로 분석된다. 그러나 전기자동차의 경우, 아직까지 저렴한 연료비용이 높은 구매비용을 모두 상쇄하지 못하며, 특히

2020)를 사용하여 재산정하였다.

표 5. 한국의 연간 자동차 총보유비용, 연료 충전 인프라 비용, 전환 비용 추정 결과(단위: 천 원)

차종	총보유비용 (A)	내연기관 총보유비용 (B)	자동차 추가 비용 (C=A-B)	충전 인프라 비용 (D)	전환비용 (E=C+D)
수소	12,491		6,259	823	7,081
전기	8,513	6,232	2,281	800	3,081
하이브리드	6,323		91	0	91

수소자동차의 경우, 구매비용과 연료비 모두에서 경제성이 낮기 때문에 총보유비용값이 높은 것으로 보인다.

연료 충전 인프라 비용의 경우, 수소자동차는 자동차 1대당 연간 822,696원인 것에 비하여 전기자동차의 경우 800,230원으로 유사한 수준으로 분석되었다. 그러나 수소의 인프라비용은 추후 증기 메탄 개질-자체생산의 비중이 커질수록 증가할 것으로 보인다. 부생가스-튜브트레일러와 증기 메탄 개질-자체생산 1기의 한계 연료 충전 인프라 비용은 각각 1,776.5, 4,438.6원으로 증기 메탄 개질-자체생산이 약 2.5배 높다. 따라서 부생수소의 활용이 어려워 증기 메탄 개질-자체생산의 비중이 높아지는 경우, 인프라 비용은 최대 약 2.5배 상승할 수 있다.

전환비용은 수소자동차가 7,081,354원으로 가장 높으며 하이브리드는 90,884원으로 사실상 전환비용이 거의 발생하지 않는 것으로 분석되었다. 이는 하이브리드의 경우, 상대적으로 기술적 완성도가 높아 생산비용이 상대적으로 낮으며, 추가적인 연료 충전 인프라 투자가 필요하지 않기 때문인 것으로 보인다.

전환비용은 기술 발전에 따른 자동차 생산비용과 연료가격의 변동성에 크게 의존한다. 따라서 추후 민감도 분석에서는 비용효과성을 달성하기 위한 자동차 생산비용 저감 수준과 휘발유 비용의 변화에 따른 비용효과성의 변화를 논의하였다.

분석 결과 수소자동차가 온실가스저감량이 가장 크지만, 비용 또한 가장 크기 때문에 온실가스 1톤 저감 비용으로 정의되는 비용효과성은 가장 낮은 것으로 조사되었다. 이러한 결과는 인프라 투자 비용의 고려 여부와 관계없이 동일하며, 인프라 투자 비용을 고려하지 않았을 때, 그 차이가 더욱 커지는 것을 확인할 수 있다.

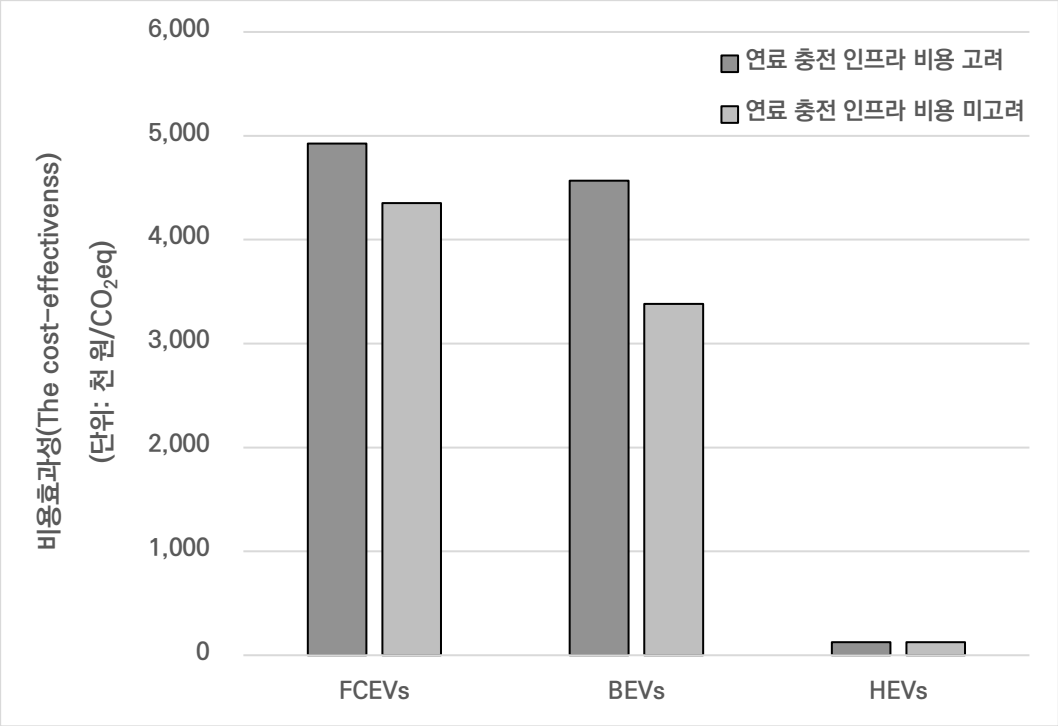

그림 5. 한국의 친환경자동차 비용효과 분석 결과

가장 저감비용이 낮은 친환경자동차는 하이브리드로 톤당 125,807원으로 분석되었다. 이러한 분석 결과는 하이브리드에 대한 비용효과분석을 수행한 Hao et al. (2017) 와 van Vliet et al. (2011)의 결과와 유사하다. 두 연구 모두 수소자동차를 포함하지 않았지만, 전기자동차와 하이브리드의 비교에서 전기자동차와 비교하였을 때, 하이브리드가 비용효과적으로 분석하였다. 그러나 하이브리드는 전기 모터를 엔진의 보조로 사용하는 기술적 특성에 따라 무공해차량은 될 수 없으므로 전기자동차와 수소자동차가 기술발전을 통하여 비용효과성을 달성하는 과도기동안 현실적인 대안으로 고려될 필요가 있다.

현재 한국의 주요 수소 생산방식인 부생수소는 사용량에 제한이 있지만 저렴하면서 온실가스배출량도 적은 생산방식이다. 그러나 이러한 부생수소를 사용하는 경우에도 수소자동차의 비용효과성이 낮은 것으로 확인되었다. 따라서 이후 수소자동차 보급에 따라 천연가스, 전기분해 등 다른 생산비용이 높고, 환경성이 낮은 생산방식의 비중이 증가한다면, 수소자동차의 비용효과성은 더욱 낮아질 것으로 예상된다. 민감도 분석에서는 수소의 다양한 생산방식에 따른 비용효과성의 변화를 논의하였다.

탄소배출권 가격 또는 온실가스의 사회적 비용과 비교하였을 때, 친환경자동차의 비용효과성은 현재 가장 비용효과적인 하이브리드의 경우에도 낮은 것으로 분석되었다. 2020년 한국의 탄소배출권 평균 가격은 30,181원이며, 유럽 탄소배출권 평균 가격 24.62유로[10]로 하이브리드의 톤당 감축 비용의 약 25 %수준이다.

[10] 2020년 평균 환율 1,346.11(원/유로)로 환산하면 약 33,141원이다(European Energy Exchange, 2021; KOREA EXCHANGE, 2021).

또한 58개의 탄소의 사회적 비용 추정 연구를 메타 분석한 Wang et al. (2019)에 따르면, 이산화탄소의 사회적 비용은 −13.36$에서 2,386.91$/tCO_2의 범위를 가지며, 평균 54.70$/t$CO_2$를 가지는 것으로 조사하였다.[11] 그들의 연구 결과와 비교하면, 하이브리드의 감축비용은 상대적으로 이산화탄소의 사회적 비용의 평균과 가깝지만, 수소자동차나 전기자동차는 범위에서 크게 벗어나는 것으로 조사되었다. 따라서 친환경자동차가 탄소배출권 또는 이산화탄소의 사회적 비용의 수준으로 비용효과성을 가지기 위해서는 기술발전이 더욱 필요할 것으로 보인다.

[11] 2020년 평균 환율 1,179.9(원/달러)로 환산하면 −15,763에서 2,816,315원이며 평균 값은 64,541원이다.

제 4 절 민감도 분석

현재 수소자동차와 전기자동차의 비용 중 가장 큰 비중을 차지하는 것은 구매비용이다. 수소자동차의 경우 총보유비용에서 구매비용이 차지하는 비중은 약 91.9%이며, 전기자동차는 93.4%로 사실상 총보유비용의 대부분을 차지한다. 따라서 친환경자동차의 비용효과성을 달성하기 위해서는 구매비용의 감소가 필수적이다.

구매비용에 대한 민감도 분석 결과 수소자동차가 현재의 전기자동차와 동일한 비용효과성을 달성하기 위해서는 현재보다 구매비용이 5.4% 감소하여야 하는 것으로 분석되었다. 또한 가장 비용효과성이 높은 하이브리드와 동일한 비용효과성을 가지기 위해서는 수소자동차는 72.3%, 전기자동차는 45.4%의 구매비용 저감이 필요한 것으로 분석되었다.

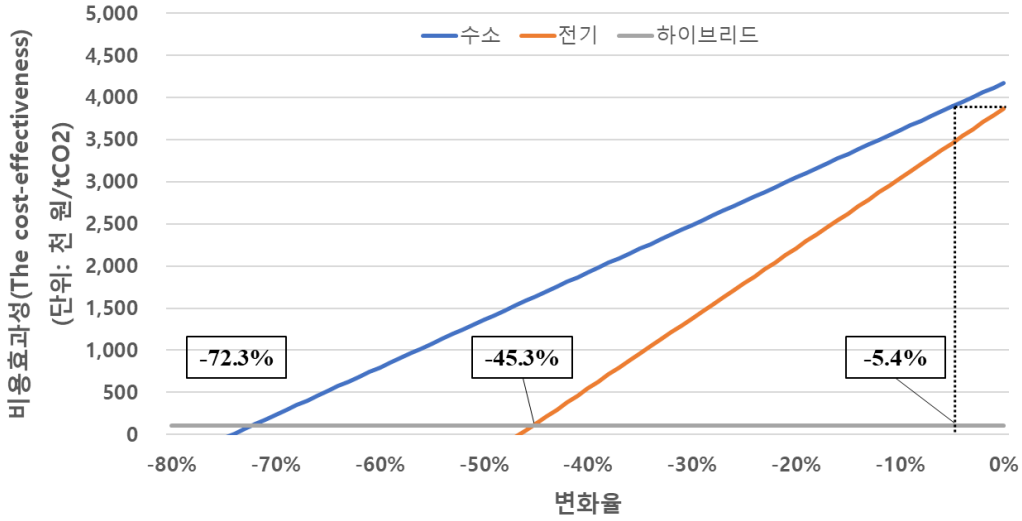

그림 6. 구매가격 변화율에 따른 친환경자동차 비용효과성 변화

기술발전과 친환경자동차의 확산에 따라 연비개선, 인프라 비용 감소 등 다양한 요인들에 의하여 비용효과성이 함께 개선될 수 있으므로 현실적으로는 저 수치보다 더 낮은 수준에서도 비용효과성을 달성할 수 있을 것이다. 또한 구매비용의 감소에 따라 비용효과성이 음수가 발생하기도 하는데, 해당 경우는 내연기관자동차보다 총보유비용 및 연료 충전 인프라 비용이 낮아 전환비용이 음수가 되는 경우이다. 이 경우는 내연기관자동차보다 탄소배출량도 적으면서 동시에 비용도 적으므로 더 이상 내연기관자동차는 경쟁 대상이 되지 않음을 의미한다.

연평균 주행거리는 연료비뿐만 아니라 연료 사용에 따른 온실가스 배출량에도 영향을 미친다. 특히, 전기자동차의 경우, 상대적으로 연료비용이 매우 낮으므로 연평균 주행거리가 높을 때 큰 비용효과성을 얻는다.

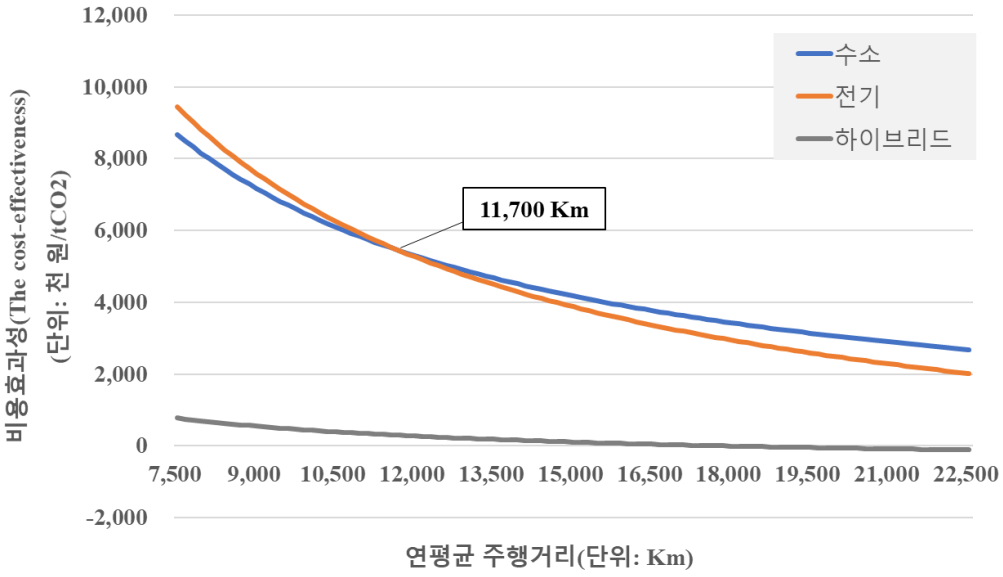

그림 7. 연평균 주행거리 변화에 따른 친환경자동차의 비용효과성 변화

친환경자동차는 모두 내연기관자동차 대비 연료비용에서 우위에 있다. 따라서 연평균 주행거리의 증가에 따라 세 종류의 친환경자동차 모두 비용효과성이 증대됨을 확인할 수 있다. 연평균 주행거리의 변화에 가장 민감하게 반응하는 친환경자동차는 전기자동차이다. 전기자동차는 15,000Km 기준 연간 연료비가 270,230원으로 수소자동차 1,085,158원, 하이브리드 1,139,245원, 내연기관자동차 1,616,722원에 비하여 매우 낮은 수준이다. 따라서 연평균 주행거리가 상대적으로 긴 택시 등 영업용 승용차에서 전기자동차가 합리적인 대안이 될 수 있다. 반대로 수소자동차는 11,700Km보다 낮은 주행거리에서는 전기자동차보다 높은 비용효과성을 달성할 수 있는 것으로 분석되었다.

연료 비용은 총보유비용 중 가장 변동성이 높은 비용이다. 한국 시장에서 휘발유 소매가격은 지난 1년간 1,381원에서 1,986원까지 큰 폭의 변동성을 보여왔다. 전환비용은 내연기관자동차의 총보유비용 대비 친환경자동차의 총보유비용 증가분으로 정의되므로 내연기관자동차의 총보유비용 중 연료비용이 변화하면 전체 친환경자동차의 비용효과성에 영향을 미치기 때문에 중요하다.

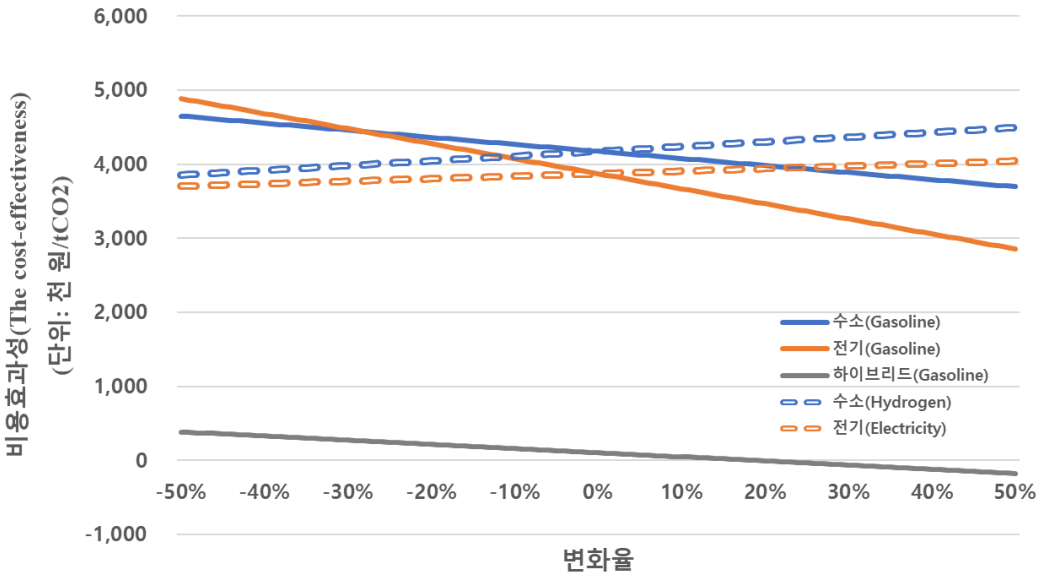

그림 8. 연료가격 변화율에 따른 친환경자동차의 비용효과성 변화

(차종 옆의 괄호안 연료는 변화되는 연료의 종류를 의미한다. 예를 들어 수소(gasoline)은 휘발유 가격 변화에 대한 수소자동차의 비용효과성 변화를 의미한다. 휘발유 가격의 변화에 따른 친환경자동차의 비용효과성 변화는 굵은 검은색으로 표현하였다.)

휘발유 가격의 변화는 전체 친환경자동차의 비용효과성에 영향을 주지만, 상대적으로 전기자동차에 더욱 큰 영향을 미친다. 만약 휘발유 가격이 분석 기준 가격보다 28% 하락한 1,055 원/L 이하가 된다면 수소자동차가 전기자동차보가 비용효과성이 앞서게 된다. 특히, 하이브리드의 경우, 분석 기준 가격보다 약 10% 증가한 1,612 원/L 이상이 되면 내연기관자동차와 총보유비용이 역전되어, 비용과 환경성 모두에서 우월한 대안이 된다.

전기와 수소 가격의 경우, 상대적으로 수소가 전기보다 연비가 좋지 않기

때문에 동일한 변화율에서 수소가 더욱 민감하게 변하는 것으로 분석되었다. 수소자동차의 경우, 분석 기준 가격 보다 약 48% 하락한 3,749 원/Kg에 도달하여야 전기자동차와 동일한 비용효과성이 달성되는 것으로 분석되었다.

수소충전소는 수소의 생산방법과 운송방법에 따라 수소의 판매가격과 인프라 구축 및 운영비용에 큰 차이가 있다. 부생수소-튜브트레일러의 경우 저렴한 부생수소를 활용할 수 있고 상대적으로 구축 및 운영비용이 저렴하지만 수소의 운송비용이 높다. 따라서 부생수소 생산지에서 충전소까지의 거리가 먼 경우, 수소의 공급가격이 높아질 수 있다. 그에 반하여 증기 메탄 개질-자체생산의 경우, 인프라 구축 및 운영비용은 높지만 자체적으로 생산하므로 운송비용이 발생하지 않는다. 또한 각 수소 생산방식은 온실가스 발생량에도 차이가 있다.

한국은 2025년까지 수소충전소 450기 구축을 목표로 한다. 그러나 구체적인 충전소의 종류와 각 종류 별 보급 목표는 수소자동차의 지역 별 보급량, 수소 생산 기술 발전 등을 보면서 결정하겠다고 발표하였다. 따라서 본 민감도 분석에서는 증기 메탄 개질-자체생산의 비중을 변화시켰을 때, 수소자동차의 비용효과성에 미치는 영향을 분석하였다.

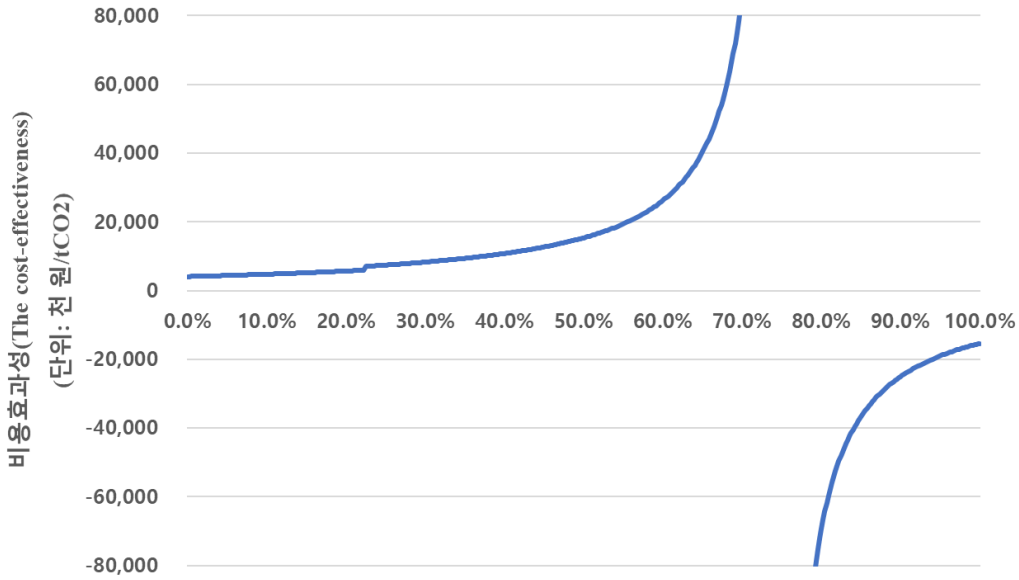

그림 9. 증기 메탄 개질-자체생산 비중 증가에 따른 수소자동차의 비용효과성 변화

현재 한국에서 천연가스 기반 증기 메탄 개질 수소생산의 탄소배출량은 부생수소의 약 3배이기 때문에, 증기 메탄 개질-자체생산의 비중이 높아질수록 수소자동차의 비용효과성은 낮아지는 것을 알 수 있다. 특히, 74.4%에서 수소자동차의 온실가스 배출량이 내연기관자동차와 동일해지므로 비용효과성의 분모가 0이 되어 그 값이 무한대로 발산하는 것을 알 수 있다. 또한 그 이상의 영역에서 수소자동차의 비용효과성은 음수가 된다. 이는 전환비용은 발생하지만 오히려 온실가스는 내연기관자동차보다 더 배출하는 영역으로 수소자동차가 더 이상 친환경 대안이 아니게 됨을 의미한다.

수소자동차의 비용효과성은 증기 메탄 개질-자체생산의 비중이 0%일 때 가장 낮은 것을 알 수 있다. 이는 한국에서 부생수소-튜브트레일러가 증기 메탄

개질-자체생산에 비하여 비용과 환경성 모두 우월하기 때문이다. 부생수소-튜브트레일러는 부생수소 생산지에서 수소충전소가 멀어지는 경우 수소 운반비용이 상승하기 때문에 그 경쟁력이 낮아진다. 그러나 한국의 경우, 부생수소 생산량이 인구 대비 높은 편이며, 국토 면적이 좁고 수소생산지와 주요 사용지까지 도로 인프라가 구축되어 있어서 상대적으로 수소 운송비용이 적어 부생수소-튜브트레일러의 경제성이 높다.

증기 메탄 개질-자체생산의 경우, 현재 기준이 되는 250kg/day의 용량보다 더욱 큰 대규모 생산기지를 조성하고 해당 기지에서 가까운 충전소로 파이프라인 또는 튜브트레일러로 공급하는 방법을 적용한다면 경제성이 더욱 높아질 수 있다. 한국은 90kg/h 급 수소생산기지를 구축하여 부생수소 생산지에서 상대적으로 거리가 먼 수요지에 공급할 계획을 발표하였다(Korea Energy Economics Institute, 2019).

한국의 증기 메탄 개질과 수전해 생산방식의 균등화 수소원가를 연구한 Korea Energy Economics Institute (2020)에 따르면, 2020년 한국의 90kg/h급 증기 메탄 개질의 균등화 수소원가는 3,077원/Kg이다. 균등화 수소원가는 수소 생산설비의 수명주기 동안 발생하는 구축 비용과 운영비용을 수명주기 총 수소 생산량으로 나누어 도출한 단위 수소 생산량의 원가이다. 따라서 균등화 수소 원가를 사용한다면, 수소 원가만 고려하여도 수소 생산 설비의 구축과 운영 비용이 반영되었다고 할 수 있다. 또한 한국의 파이프라인 운반형 수소충전소의 구축비용은 27억원이고 파이프라인 건설비용은 1 Km 당 4억이다(Korea Energy Economics Institute, 2019). 부생수소-튜브트레일러 충전소의 운영비는 수소의 운송비와는 관계없으므로 파이프라인 운반형 수소충전소의 경우에도 동일한

운영비가 발생한다고 가정하였다. 이상의 가정에 따라 증기 메탄 개질 생산기지 비중 증대에 따른 민감도 분석을 수행하였다.

증기 메탄 개발 대규모 생산기지-파이프라인 수소 충전소의 비중 증가에 따른 비용효과성 분석은 앞서 증기 메탄 개발-자체생산 충전소 민감도 분석과 동일한 개형을 따르며, 73-75%에서 비용효과성이 발산하게 된다. 그러나 발산하는 영역까지 그래프로 표현하면 각 그래프가 겹쳐지게 되어 가독성을 위하여 증기 메탄 개질 생산기지-파이프라인 유형 증가에 따른 민감도 분석에서는 10%까지만 표현하였다.

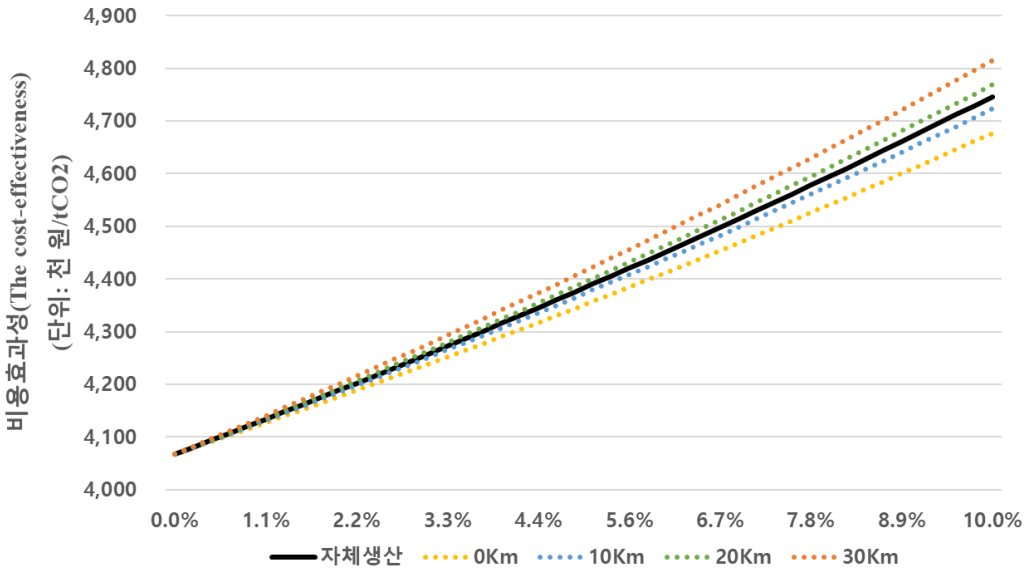

그림 10. 증기 메탄 개질 대규모 생산기지 구축과 파이프라인 유통 방식 조합의 비중 증가에 따른 수소자동차의 비용효과성 변화

(점선은 수소충전소가 생산기지로부터 떨어진 평균 거리를 의미한다. 자체생산은 생산기지가 아닌 수소충전소에서 수소를 충전하는 기존 유형을 의미한다)

그래프에서 0.0%는 부생수소-튜브트레일러로만 충전소가 구성된 경우이므로 모든 케이스에서 동일하며, 증기 메탄 개질의 비중이 커질수록 모든 케이스에서 비용효과성이가 증가하는 것을 알 수 있다. 따라서 기존 증기 메탄 개질-자체생산과 더불어 증기 메탄 개질 생산 기지-파이프라인을 고려하여도 부생수소-튜브트레일러가 가장 비용효과적인 것을 알 수 있다. 이는 증기 메탄 개질-자체생산 케이스와 마찬가지로 수요지 근처에 생산기지를 건설하여 수소 운송비용이 절감되는 효과보다 증기 메탄 개질 생산방식에 따른 온실가스 증가가 더욱 크기 때문인 것으로 분석된다.

실선으로 표시된 증기 메탄 개질-자체생산과 점선으로 표시된 증기 메탄 개질 생산기지-파이프라인을 비교하면, 생산기지와 충전소 사이의 거리가 15Km이하인 경우에서 생산기지를 구축하여 파이프로 수소를 공급하는 경우가 비용효과성이 더 높은 것으로 분석되었다. 그러나 수소생산기지의 경우, 대용량 생산이 이루어지므로 만약 파이프로 연결된 충전소가 해당 생산량을 소비하지 못하여 생산량이 감소하는 경우, 생산기지의 균등화 수소원가는 증가할 수 있다. 따라서 증기 메탄 개질 생산기지-파이프라인의 경우, 인근 수요가 생산량을 모두 소비할 수 있을 만큼 커야 한다는 제약이 있다. 한국의 경우, 수요처가 크고 부생수소 생산지로부터 거리가 먼 서울 등의 일부 지역에서 생산기지를 활용할 계획에 있다.

수소자동차와 전기자동차는 현재 하이브리드보다 비용효과성이 낮지만, 석유를 필요로 하는 본질적인 한계가 있는 하이브리드와 달리 재생에너지를 사용함으로써 무공해 운송수단이 될 수 있는 가능성이 있기 때문에 미래 친환경 자동차로 주목받고 있다. 따라서 수전해 방식을 도입한 수소자동차와

전기자동차의 비용효과성을 비교해 볼 필요가 있다.

한국의 2020년 1MW급 알칼라인 수전해 균등화 수소원가는 7,068원/Kg으로 추정된다(Korea Energy Economics Institute, 2019). 또한 한국의 2019년 전력원 구성에서 수전해의 온실가스 배출량은 37,413 gCO_2/Kg이므로 증기 메탄 개질 생산기지-파이프라인보다 생산원가는 높고, 배출량 또한 많으므로 현재 수준에서는 다른 수소충전소 유형과 비교하여 경쟁력이 없는 것으로 보인다. 따라서 전기자동차와 비교하여도 수전해 방식을 도입한 수소자동차는 경쟁력이 없는 것으로 보인다.

만일 신재생에너지 발전율이 100%가 되는 RE100 케이스에서는 수전해 방식의 수소자동차와 전기자동차의 비용효과성은 어떻게 될까? 이 케이스에서는 두 친환경자동차 모두 전력을 기초 에너지원으로 하므로 에너지 효율을 비교할 필요가 있다. 동일한 15,000 Km 주행을 위하여 수소자동차는 156 Kg의 수소를, 전기자동차는 2,679 kWh의 전력을 필요로 한다. 이 때, 한국의 현재 수전해 효율 55%를 가정한다면, 156 Kg의 수소를 생산할 때 필요한 전력량은 9,451kWh[12]이다. 따라서 전기자동차와 연료비 경쟁력을 갖추기 위해서는 앞으로 수전해 효율과 연비 향상을 통하여 현재보다 3.5배 이상의 효율향상이 요구된다.

[12] Choi et al (2020)과 동일한 방법으로 열량 1GJ의 1kWh 환산 계수인 277.798과 수소 1 Kg의 열량 0.12 GJ을 사용하여 도출하였다.

제 4 장 소비자의 유가 불확실성을 고려한 친환경자동차 최적 투자 전략 분석

제 1 절 서론

전기자동차 확산의 주요 걸림돌 중 하나로 전기자동차 기술이 아직 도입단계에 있어 구매비용이 기존 내연자동차에 비하여 높다는 점이 지적되고 있다. 일반적으로 소비자들은 높은 구매비용만을 보고 전기자동차가 내연기관자동차에 비하여 비싸다는 인식이 강하다(Axsen and Kurani, 2012; Contestabile et al., 2011; Dumortier et al., 2015; Krause et al., 2013). 반면 전기자동차의 운영비용이 저렴하다는 측면에서 총보유비용은 오히려 저렴할 수 있고, 현재는 비싸더라도 전기자동차의 기술이 빠르게 발전하고 있으므로 가까운 미래에는 전기자동차가 내연기관자동차보다 더 저렴할 것이라는 주장도 제기되고 있다(Dumortier et al., 2015; Krause et al., 2013; Lévay et al., 2017). 따라서 자동차의 교체를 고려하는 소비자는 어떤 기술의 자동차를 언제 구매하여야 하는지에 대한 의사결정 문제가 발생한다.

최근 소비자의 전기자동차 수용에 대한 연구는 소비자의 특성과 이산선택이론을 활용하여 전기자동차 확산을 분석한 연구(Chorus et al., 2013; Hackbarth and Madlener, 2013; Helveston et al., 2015; Hoen and Koetse, 2014)와 소비자의 전기자동차에 대한 태도와 전기자동차 수용의 관계에 대한 연구(Egbue and Long, 2012; Schmalfuß et al., 2017; Sierzchula et al., 2014; Skippon and Garwood, 2011), 그리고 소비자 입장에서 전기자동차 구매 때, 총보유비용을

고려한 경제성 분석 연구로 구분된다.

소비자의 전기차 구매의 경제적 의사결정에 대한 주요 연구는 다음과 같다. Bubeck et al. (2016)는 독일 자동차 시장을 차급, 소비자 유형, 주행 기술과 향후 기술 개발을 고려하여 각 기술 별 총보유 비용을 비교하였다. 그들은 친환경 자동차 중 하이브리드 자동차는 독일시장에서 이미 가격 경쟁력이 있다고 결론 지었다. Hagman et al. (2016)은 기존 연구가 주로 경제적 요인과 차급, 성능에만 집중하여 소비자 중심 경제성 분석 연구가 부족했던 점을 지적하며, 스웨덴 자동차 시장의 소비자 중심 총보유비용 분석을 통하여 정책과 마케팅의 중요성을 주장하였다. Sharma et al. (2012)은 오스트레일리아의 주행 환경에서 배터리 가격에 대한 시나리오에 따라 내연기관, 하이브리드, 전기자동차의 총보유비용을 분석하였다.

또한 총보유비용분석에 있어서 탄소배출량도 함께 고려해야 한다는 주장도 제기되었다. van Vliet et al. (2010)이 처음으로 총보유비용에서 탄소배출량을 함께 고려하였으며, 이후 Tseng et al. (2013)는 기존 연구가 미흡하였던 세제 혜택과 탄소배출량을 함께 고려하였고, Elgowainy et al. (2013)는 탄소배출 뿐만 아니라 다른 대체 연료의 사용을 함께 고려하였다.

전기자동차의 경제성 분석에 불확실성을 고려한 연구는 Wu et al. (2015)가 있다. Wu et al. (2015)는 배터리 가격, 연료 가격 등이 불확실성을 몬테카를로 시뮬레이션 기법을 사용하여 차급과 연평균 주행거리에 따라 9가지 시나리오를 설정하여 전기차의 경제성을 분석하였다.

소비자의 자동차 교체 의사결정에는 다음과 같은 어려움이 있다. 첫 째, 소비자는 구매 비용에 보다 민감하여 운영비용을 포함한 비구매비용을 적절히

고려하지 못할 수 있다. 장기적으로 운영 비용의 절감으로 더 저렴한 기술일지라도 소비자는 구매비용만을 고려하여 기술을 구매하는 경향이 높다(Dumortier et al., 2015). 하지만 실제 운영비용을 포함한 전체 비용의 정보가 기술에 대한 선호에 영향을 미치므로(Nixon and Saphores, 2011), 총보유비용의 비교가 필요하다. 둘 째, 기술진보를 반영하기 어렵다. 기술도입기에 있는 전기자동차의 특성상, 기술진보에 따른 가격 저하와 품질 개선 속도가 빠르다. 하지만 소비자가 기술진보를 반영하여 의사결정을 하기에는 어려움이 따른다. 마지막으로 유가의 불확실성이 있다. 의사결정의 대안으로 고려되는 기존 내연기관자동차의 경우, 전체 비용 중, 24%가 연료 비용에 해당한다(Consumer report, 2015). 지난 10년간 한국이 주로 수입하는 두바이 원유는 배럴 당 41.36 달러(2016년)에서 113.68(2022년)까지의 변동폭을 보였다. 따라서 총 보유기간동안 발생하는 총 연료 비용을 적절히 추정하기에 어려움이 따른다.

기존 논문들은 운영비용을 고려함에 있어서 유가 불확실성을 시뮬레이션에 따른 시장 상황만을 예측하였을 뿐, 소비자들의 의사결정을 위하여 최적 대안 선택과 최적 구매 시점을 제시하는 연구는 아직 시도되지 못하였다.

본 연구는 실물옵션 이론을 이용하여 유가 불확실성과 전기 자동차의 기술 진보를 반영하여 소비자의 총보유비용을 최소화하는 최적 전기자동차 교체 시점 모델 개발을 목표로 한다. 기술수명주기상 초기에 있는 전기자동차의 특성에 따라 전기자동차의 기술 진보를 반영하기 위하여, 전기자동차 배터리 가격을 경향 분석법을 이용하여 예측하였다. 제안된 모델을 한국 자동차 시장에 적용하여 한국 소비자의 최적 전기자동차 구매시점에 대한 실증분석을 실시하였으며, 민감도 분석을 통하여 주요 요인의 변화에 따른 최적 전략의 변화를 분석하였다.

본 연구의 구성은 다음과 같다. 제 2절에서는 실물옵션 기법을 응용한 소비자의 최적 친환경자동차 투자 전략 모형을 제시한다. 제 3절에서는 제시된 모형을 한국 시장에 적용하여 한국 소비자의 최적 친환경자동차 투자 전략을 도출한다. 제 4절에서는 실증 분석 결과에 대하여 주요 요인들의 변화에 따른 최적 전략의 변화를 분석한다.

제 2 절 유가 불확실성을 고려한 친환경자동차 최적 투자 전략 모형

기존 내연기관자동차 시장에서 친환경자동차 시장으로 전환되는 과정에서 소비자는 기존의 내연기관자동차와 더불어 친환경자동차 또한 구매 대안으로 고려되기 시작하였다. 그러나 기존 내연기관자동차 간의 비용 비교는 같은 유가 불확실성을 공유하고 있으므로 구매비용과 연비의 비교로 비용 비교가 상대적으로 용이하였다. 그러나 친환경자동차는 구매비용은 높지만 연료비용은 낮은 특징을 비용 구조적 차이가 있으며 유가의 불확실성이 친환경자동차의 경제성에 큰 영향을 미치지 않으므로 비용 비교의 어려움이 있다.

본 연구에서는 기존 노후 내연기관자동차를 보유한 소비자가 유가 불확실성 하에서 친환경자동차를 대안으로 포함하여 교체하려할 때, 최적 전략을 도출하고자 한다. 이 때, 유가 불확실성은 이항 과정을 따르는 것을 가정한다. 따라서 소비자는 현재 시점에서 내연기관자동차 또는 친환경자동차로 바로 교체할 수도 있지만 기존 노후 자동차를 1년 더 보유하고 유가의 변화를 관측한 후(wait and see) 교체를 진행할 수 있다. 이러한 소비자의 의사결정 문제를 도식화하면 다음과 같다.

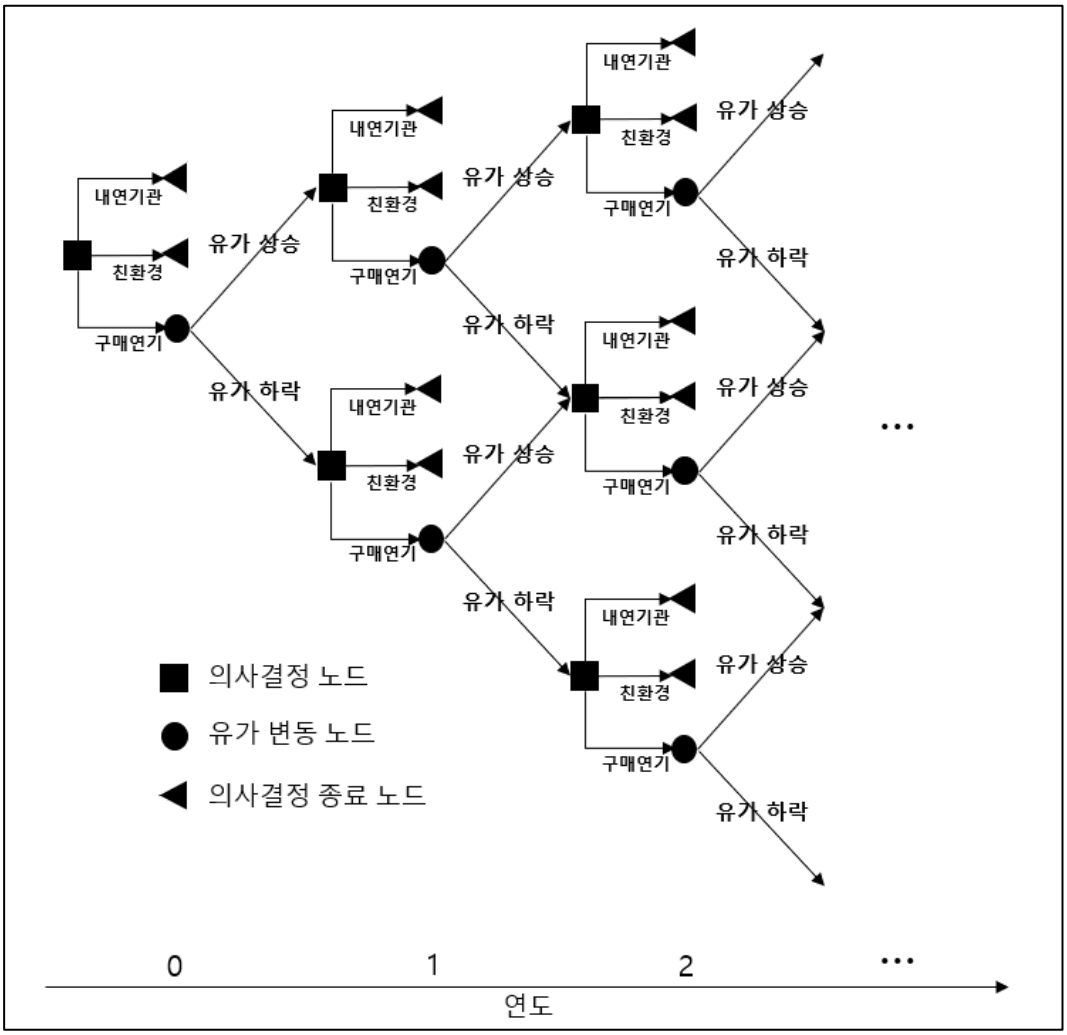

그림 11. 소비자의 친환경자동차 투자 의사결정 나무

유가의 변동률은 장기적으로 로그정규 분포를 따르므로 이항 과정으로 근사될 수 있다.[13] 실물옵션이론에서는 가치 평가에서 실제 기초자산의 변동율에

[13] 한국이 주로 수입하는 두바이유의 로그 가격을 2010년부터 2021년까지 정규성 검정을 수행한 결과 콜모고로프-스미르노프(Kolmogorov-Smirnov)에서 최대 유의확률인 0.2, 샤피로-윌크(Shapiro-Wilk)검정에서 0.742의 유의확률로 정규성을 지닌 것으로 도출되었다. 보통 휘발유의 로그 가격을 2012년부터 2021년까지 정규성 검정을 수행한 결과 또한 콜

기반하여 추정되는 기초자산의 증가율과 감소율이 주어지면, 그에 따라 가치 평가에서 활용되는 위험중립확률을 도출하여 이항 과정을 구성한다. 이를 수식으로 표현하면 다음과 같다.

$$
\begin{aligned}
& FP(d,t) = U^{t-d} D^{d} FP(0,0) = \frac{\pi_u FP(d,t+1) + \pi_d FP(d+1,t+1)}{1+r} \\
& where \\
& U = e^{\sigma}, D = 1/U \\
& \pi_u = (e^{r} - D)/(U - D),\ \pi_d = 1 - \pi_u
\end{aligned}
\tag{13}
$$

*FP(d,t)*는 기초 자산이 초기 시점(t=0)에서부터 t시점까지 d번 하락하였을 때의 가격을 의미하며, $\pi_u(\pi_d)$는 기초자산의 가격이 상승(하락)할 위험중립 확률이다. σ는 기초자산의 변동율을 의미하며, *U(D)*는 기초자산의 증가율(감소율)을 의미한다. r은 무위험이자율을 의미한다.

상기 수식에 의하여 기초 자산 가격의 변화를 도식화하면 다음과 같다.

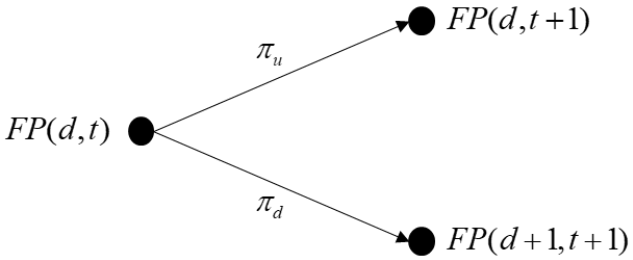

그림 12. 기초 자산 가격의 변화 과정

모고로프-스미르노프(Kolmogorov-Smirnov)에서 최대 유의확률인 0.2, 샤피로-윌크(Shapiro-Wilk)검정에서 0530의 유의확률로 정규성을 지닌 것으로 도출되었다.

본 연구에서 도출하고자 하는 최적 투자 전략은 총보유비용을 최소화하는 투자 전략이므로, 친환경성이나 그 외 다른 요인들의 영향은 모형에 반영되지 않는다. 따라서 복수의 친환경자동차를 구매 대안으로 상정하는 경우, 친환경자동차는 유가 변동성에 의하여 총보유비용이 변화하지 않으므로 가장 비용이 적은 친환경자동차만이 최적 대안으로 선택된다. 따라서 본 모형에서는 복수의 친환경자동차를 구매 대안으로 포함하지 않는다.

소비자의 최적 구매 의사결정은 매 의사결정 노드에서 내연기관자동차와 친환경자동차, 투자 연기 옵션의 가치를 최소화하는 의사결정 과정으로 구성되며 이를 모형화하면 다음과 같다.

$$
\begin{aligned}
&V(d,t) = Min\left\{\begin{array}{c} TCO_{Eco}(d,t) \\ TCO_{ICEV}(d,t) \\ C_{Wait}(d,t) + \dfrac{\pi_u \cdot V(d,t+1) + \pi_d \cdot V(d+1,t+1)}{1+r} \end{array}\right\} \\
&V(\cdot,T) = 0 \\
&where \\
&TCO_i(d,t) = (PP_i(t) - SV_i(t)) + \sum_{j=t}^{T} \frac{FC_i(d,t) + MR_i(j) + INS(j) + TAX_i(j)}{(1+r)^{j-t}} \\
&C_{Wait}(d,t) = FC(d,t) + MR_{OLD}(t) + INS_{OLD}(t) + \Delta SV_{OLD}(t) \\
&PP_i(t) = PP_i(0) - (BP(0)(1 - BD(t)) \\
&i = ICEV, HEV, BEV
\end{aligned}
\tag{14}
$$

$V(d,t)$는 옵션 가치이며, $TCO_i(d,t)$는 자동차의 총보유비용을 의미한다. C_{Wait}는 의사결정을 연기하였을 때, 지불하는 비용으로 노후 자동차의 연간 운영을

의미한다. 총보유비용은 구매비용(PC_i)에서 잔존가치의 현가(SV_i)를 빼고, 연간 발생하는 연료비용(FC_i), 유지보수비용(MR_i), 보험료(INS_i), 세금(T_i)의 현재가치를 더하는 것으로 구성된다. 연기비용은 총보유비용의 연간비용 구성과 동일하지만 잔존가치의 감소분이 반영되어 있다.

상기 모형은 의사결정 종료 시점(T)에서부터 후진귀납법(backward induction)을 통하여 각 노드 별 최적 의사결정과 그에 따른 옵션 가치를 도출하여 최종적으로 분석 시작 시점(t=0)에서의 옵션 가치를 도출할 수 있다.

제 3 절 한국 시장에서 소비자의 친환경자동차 최적 투자 전략 실증 분석

1. 한국 자동차 시장 데이터

본 연구에서는 앞서 수립한 소비자의 최적 친환경자동차 투자 모형을 한국의 자동차 시장에 적용하여, 한국의 시장 및 정책 특성에 따른 최적 교체 모델을 제시하고자 한다. 본 실증분석에서는 분석기간을 2021년부터 2030년까지, 총 10년으로 상정하였다. 또한 제 3장 정부의 친환경자동차 비용효과분석에서와 동일하게 분석 대상 모델로 브랜드 가치 차이의 영향과 제품군에 의한 비용차이를 제한하기 위하여 한국의 대표적인 자동차 제조사인 현대자동차의 코나를 기준으로 하였다. 내연기관자동차는 휘발유 자동차가 경유 자동차보다 2배 가량 많은 한국 시장의 특성(Korean Ministry of Land, 2020.12)을 반영하여 휘발유를 기준으로 사용하였다. 그러나 코나 제품라인에서는 수소자동차가 없으므로 코나와 동일한 소형 SUV인 넥쏘를 분석 대상으로 선정하였다.

구매 연기 옵션의 가치를 반영하기 위하여, 차량 노후화에 따라 유지비용이 매년 10%씩 증가한다고 가정하였다. 본 가정은 추후 민감도 분석을 통하여 연간 유지비용의 증가율 변화의 영향을 분석하였다. 무위험이자율은 2021년 10년 국채 평균 수익률 2.74%를 기준 무위험이자율로 사용하였다. 그러나 최근 기준 금리의 급격한 변동으로 국채 수익률 또한 변동성이 증가하고 있다. 본 연구에서는 이를 반영하기 위하여 무위험이자율의 변화를 고려한 시나리오 분석을 부록에 추가하였다.

제 3장에서는 정부의 관점에서 친환경자동차로 시장이 전환되는 과정에서 발생하는 사회적 비용을 도출하기 때문에 보조금이나 세제 혜택 등을 포함하지

않은 것에 비하여, 본 연구에서는 소비자의 관점에서 지불하는 총비용을 추정하기 때문에 다양한 세제 혜택과 실제 연료 판매가격을 반영하였다. 이에 따라 구매가격은 세제 혜택을 반영하여 코나 가솔린은 2,244만원, 코나 전기는 4,690만원, 넥쏘는 6,765만원을 사용하였다.

내연기관자동차의 연료비용은 한국석유공사 석유정보센터에서 제공하는 한국 주유소의 최근 5년 평균 보통휘발유 판매가격을 사용하였다(Korea National Oil Corporation Petroleum Information and Service Center, 2021). 또한 유가 변동성은 최근 10년의 보통휘발유 판매가격의 변동성을 기준 변동성으로 사용하였다. 그러나 유가 변동성은 분석 기간의 변화에 따라 그 값이 달라지므로 유가 변동성의 크기에 따른 시나리오 분석을 부록에 추가하였다.

전기자동차는 공공 충전 요금과 가정용 충전의 충전 비중을 가중평균한 값을 사용하였다. 가정 충전 비중은 한국교통연구원이 전기자동차 이용자 305명을 대상으로 인터뷰를 통하여 조사한 비율(Korea Transport Institute, 2017)인 42.85%를 사용하였으며, 공공 충전 요금은 환경부 공공 충전소 충전 요금(50kW 이하) 292.9원/kWh을 사용하였으며, 가정용 충전 요금은 환경부에서 운영하는 무공해차 통합누리집의 완속 충전 단가 81.4원/kWh을 사용하였다(Korean Ministry of Environment, 2022). 전기자동차의 경우, 가정용 충전의 비중에 따라 연료 요금에 큰 차이를 보이므로 추후 민감도 분석을 통하여 가정용 충전 비중의 영향을 평가하였다.

수소 충전 가격은 2022년 현재, 전국의 수소 충전비용 평균값인 8,438원/Kg을 사용하였다(Korean Ministry of Environment, 2022). 또한 잔존가치의 감소율은 한국의 자동차 평균 보유기간인 8년 후 표 3에서 사용한

잔존가치를 기준으로 정률법을 사용하였다. 총보유비용을 계산하기 위한 주요 데이터를 정리한 결과는 표 6과 같다.

친환경자동차는 기술성숙도가 높은 내연기관에 비하여 아직 초기 단계에 있으나 빠른 속도로 기술이 개발되고 있다. 현재 친환경자동차의 높은 구매 비용은 주로 배터리 비용에 기인한다. 그러나 BloombergNEF (2022)에 따르면 빠른 기술 개발과 대량 생산에 따라 차량용 배터리 가격은 2010년 1,183 USD/kWh에서 2021년 132 USD/kWh로 약 89% 감소하였다. 이러한 추세를 추정한 결과는 그림 13과 같다.

전기자동차의 배터리 비용은 보험개발원에서 전기차 전용보험 상품개발 및 시장활성화 연구에서 사용한 아이오닉 전기, 쏘울 전기, SM3 전기의 판매가격 대비 배터리가격 비율 평균 32.77%를 사용하여, 코나 전기의 판매가격과 곱하여 코나 전기의 배터리가격을 추정하였다(Korea Insurance Development Institute, 2016).

표 6. 친환경자동차 최적 투자 전략 도출을 위한 한국 자동차 총보유비용 데이터(단위: 천 원)

차종	구매 가격	잔존 가치	연비 (Km/Unit)	연료가격 (원/Unit)	보험료	세금 총합
수소	67,650	-18,075	96.2	8,438	1,729	5,859
전기	46,900	-12,531	5.6	202.3	1,494	4,407
휘발유	22,440	-6,907	13.6	1,466	1,254	5,521

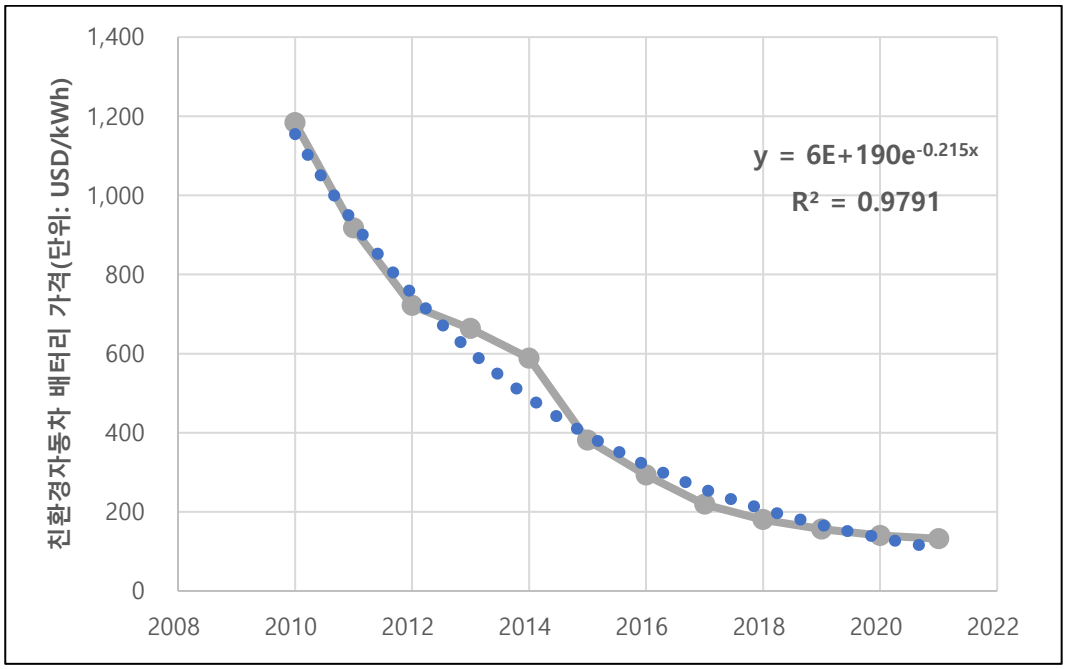

그림 13. 친환경자동차 배터리 가격 추세

수소자동차의 경우, 배터리를 포함한 연료전지스택이 주요 비용 요인이며, 수소자동차 비용의 약 40%를 차지한다(한국과학기술기획평가원, 2018). 따라서 넥쏘의 판매가격에 40%를 곱하여 연료전기스택의 비용을 추정하였다. 본 연구에서는 배터리 비용 감소율을 연료전지스택의 향후 기술진보 속도로 대리하여 사용하였다.

유지보수 비용의 경우, 연료비용, 보험료, 세금, 운행비용, 주차료, 정비료 등이 포함되는 것이 일반적이나 본 연구에서는 연료비용, 보험료, 세금은 개별 항목으로 분석하였으므로, 통행료, 주차료, 수리비만을 유지보수 비용에 포함하였다. 본 실증분석에서는 내연기관자동차의 유지보수 비용을 서울 시민의 승용차 이용 특성을 분석한 안기정, 김범식 (2015)을 참조하여, 경차의 평균 유지보수비용인 연 210 만원을 사용하였다. 상기의 유지보수 비용은 매년

동일하게 발생한다고 가정하였으나, 기존 노후 차량의 경우, 차량 노후화에 따라 연비와 함께 연간 10%씩 증대된다고 가정하였다. 본 가정은 추후 민감도 분석을 통하여 연간 노후율 변화의 영향을 평가하였다.

한국의 자동차세는 배기량이 증가할수록 세액이 증대되며, 3년 이상인 비영업용 승용차에 한하여 연간 5%씩, 최대 50%의 세액이 경감되는 특징이 있다(Korea Ministry of the Interior and Safety). 본 연구에서는 한국의 자동차세 정책에 따라 코나 가솔린의 초기 자동차세인 456,995원을 3년 후부터 5%씩 최대 50%까지 경감된 세액을 연간 내연기관자동차의 자동차세로 사용하였다. 기존 노후 차량은 한국 평균 자동차 보유기간인 8년된 노후 차량을 가정하고 있으므로, 해당 보유기간에 따른 자동차세를 계산하여 사용하였다. 전기, 수소 자동차는 배기량에 따라 세액이 정해질 수 없으므로, 한국의 지방세법 127조에 따라 연간 13만원을 부과하고 있으며 개별소비세 3.5% 할인 혜택은 구매 비용에 반영하였다.

친환경자동차의 보조금은 중앙 정부에서 지급하는 국고 보조금과 각 지자체 별로 지급하는 지자체 보조금으로 구성된다. 또한 각 보조금은 구매 대상 자동차의 모델에 따라 상이하다. 2021년 기준 코나 전기의 국고 보조금은 800만원이며, 넥쏘의 국고 보조금 2,250만원이다. 지자체 보조금은 지자체 별로 상이하나 본 연구에서는 가장 많은 인구가 거주하는 서울의 보조금을 사용하였다. 서울은 2021년 기준 코나 전기는 400만원, 넥쏘는 1,100만원의 보조금을 지급하였다. 그러나 기술진보에 따른 친환경자동차의 구매비용이 하락하면 동일한 보조금 액수도 상대적으로 비중이 커지므로, 미래 보조금 규모는 구매가격 하락에 맞추어 동일한 비율로 지급된다고 가정하였다.

2. 실증 분석 결과

한국 시장에서 기준 시나리오에 대한 내연기관자동차와 전기, 수소 자동차에 대한 최적 투자 의사결정을 분석한 결과는 표 7 및 표 8과 같다. 무위험이자율과 유가 변동성의 변화를 고려한 시나리오 분석은 부록에 첨부하였다.

옵션 가치 추정 결과는 휘발유의 가격 변동에 따라 각 시점에서 해당 옵션을 구매하였을 때의 가치를 나타낸다. 분석 기간을 2030년까지로 설정하였으므로 각 연도 별 보유 기간이 상이하여, 총보유비용은 연도별 차이가 있다.

옵션 가치 추정 결과는 연료가격이 하락한 경우 대각선 방향으로 우하향한 노드로 이동하며, 연료가격이 상승한 경우 오른쪽 노드로 이동하여 기재하였다. 예를 들어 2022년 하락횟수 0과 1에 대응하는 두 노드는 각각 2021년 가격 대비 유가가 상승, 하락했을 경우이다. 또한 2030년 하락횟수 0의 수소옵션 가격 1,257만원은 휘발유 가격이 10년간 계속 상승했을 때의 옵션 가치이다. 각 노드에서 최소 비용인 옵션은 회색으로 음영처리 하였다.

본 연구에서는 2030년까지 자동차를 보유하는 상황을 가정하였으므로, 각 연도 별 보유 기간이 상이하며, 특히 기술 발전에 따라 매년 감소되는 친환경자동차의 구매 비용의 절대값이 다른 특징이 있다. 따라서 표 7의 노드 (2, 2030), (5,2030), (6,2030)과 표 8의 노드 (0,2030), (5,2030), (6,2030)처럼 구매가 이루어진 이후(옵션이 행사된 이후) 최적 전략이 일관되지 못하고 변화하는 구간이 존재할 수 있다. 이러한 현상은 유가 불확실성은 비용 요소 중 유지비용에 영향을 미치는데, 단 1년만 보유하는 경우 동일한 유가 수준이 미치는 영향력의 크기가 작고 상대적으로 다른 요인의 영향이 크기 때문이다.

표 7. 한국 시장에서의 전기자동차 투자 옵션 가치 추정 결과(단위: 만 원)

하락횟수	옵션	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030
	전기자동차	7,022	6,446	5,868	5,281	4,680	4,056	3,400	2,702	1,953	1,139
0	내연기관자동차	6,920	6,521	6,083	5,600	5,064	4,467	3,798	3,047	2,201	1,243
	투자 연기	6,645	6,271	5,821	5,303	4,776	4,233	3,669	3,074	2,442	1,522
			6,446	5,868	5,281	4,680	4,056	3,400	2,702	1,953	1,139
1			6,257	5,826	5,353	4,833	4,256	3,613	2,895	2,090	1,183
			6,106	5,709	5,237	4,719	4,165	3,587	2,976	2,320	1,379
				5,868	5,281	4,680	4,056	3,400	2,702	1,953	1,139
2				5,611	5,148	4,640	4,079	3,459	2,769	1,997	1,132
				5,532	5,109	4,628	4,083	3,504	2,881	2,201	1,260
					5,281	4,680	4,056	3,400	2,702	1,953	1,139
3					4,976	4,479	3,932	3,330	2,663	1,920	1,090
					4,926	4,469	3,955	3,391	2,769	2,080	1,160
						4,680	4,056	3,400	2,702	1,953	1,139
4						4,344	3,810	3,223	2,575	1,856	1,054
						4,322	3,818	3,263	2,653	1,973	1,077
							4,056	3,400	2,702	1,953	1,139
5							3,708	3,133	2,501	1,802	1,025
							3,702	3,156	2,557	1,866	1,008
								3,400	2,702	1,953	1,139
6								3,059	2,440	1,757	1,001
								3,056	2,462	1,765	950
									2,702	1,953	1,139
7									2,389	1,720	980
									2,357	1,681	902
										1,953	1,139
8										1,689	963
										1,611	862
											1,139
9											949
											828

표 8. 한국 시장에서의 수소자동차 투자 옵션 가치 추정 결과(단위: 만 원)

하락횟수	옵션	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030
	수소자동차	7,775	7,105	6,439	5,771	5,093	4,397	3,675	2,918	2,116	1,257
0	내연기관자동차	6,920	6,521	6,083	5,600	5,064	4,467	3,798	3,047	2,201	1,243
	투자 연기	6,758	6,430	6,045	5,589	5,057	4,479	3,870	3,223	2,521	1,522
			7,105	6,439	5,771	5,093	4,397	3,675	2,918	2,116	1,257
1			6,257	5,826	5,353	4,833	4,256	3,613	2,895	2,090	1,183
			6,146	5,772	5,335	4,850	4,318	3,729	3,075	2,347	1,379
				6,439	5,771	5,093	4,397	3,675	2,918	2,116	1,257
2				5,611	5,148	4,640	4,079	3,459	2,769	1,997	1,132
				5,537	5,116	4,642	4,120	3,545	2,908	2,201	1,260
					5,771	5,093	4,397	3,675	2,918	2,116	1,257
3					4,976	4,479	3,932	3,330	2,663	1,920	1,090
					4,926	4,469	3,955	3,391	2,769	2,080	1,160
						5,093	4,397	3,675	2,918	2,116	1,257
4						4,344	3,810	3,223	2,575	1,856	1,054
						4,322	3,818	3,263	2,653	1,973	1,077
							4,397	3,675	2,918	2,116	1,257
5							3,708	3,133	2,501	1,802	1,025
							3,702	3,156	2,557	1,866	1,008
								3,675	2,918	2,116	1,257
6								3,059	2,440	1,757	1,001
								3,056	2,462	1,765	950
									2,918	2,116	1,257
7									2,389	1,720	980
									2,357	1,681	902
										2,116	1,257
8										1,689	963
										1,611	862
											1,257
9											949
											828

분석 시작 시점인 2021년 전기, 수소 자동차의 2030년까지 총보유비용은 각각 7,022만원, 7,775만원으로 내연기관 6,920만원에 비하여 각각 102만원, 855만원 높은 것으로 도출되었다. 그러나 투자를 연기하는 옵션의 가치는 전기자동차는 6,645만원, 수소자동차는 6,758만원으로 당장 투자하지 않고 향후 휘발유 가격의 변화를 기다리는 전략이 최적인 것으로 도출되었다. 전기자동차와 수소자동차의 투자 연기 옵션의 가치가 다른 이유는 노후자동차를 한 해 더 보유하는 비용은 동일하지만 투자를 연기했을 때 기대되는 미래 옵션 가치가 다르기 때문이다. 기대 미래 옵션 가치는 지금 투자를 결정하면 얻지 못하는 미래 최적 투자의 위험 중립 평균 가치로, 이는 경제학적으로 기회비용의 개념과 동일하다.

전기자동차는 2024년까지 휘발유 가격이 모두 상승하는 상황에서 처음으로 최적 대안이 되며, 수소자동차는 2026년까지 휘발유 가격이 모두 상승해야 최적 대안이 되는 것으로 도출되었다. 이 때의 휘발유 가격은 각각, 1,924원/L, 2,307원/L이다. 최근 10년간 가장 높은 휘발유 가격은 2022년 6월 서울의 휘발유 가격 2,152 원/L으로 수소자동차가 근미래에 최적 대안으로 선택되기 위해서는 지난 10년간 배터리 가격 감소 추세보다 빠른 기술진보가 요구되는 것으로 해석된다. 전기자동차는 2026년 배터리 가격이 지금보다 약 48%감소한 수준에서 휘발유 가격이 1,605원/L일 때도 최적 전략으로 도출된다.

상기 옵션 가치에 기반한 한국 소비자들의 최적 친환경자동차 투자 전략은 다음과 같이 도식화될 수 있다.

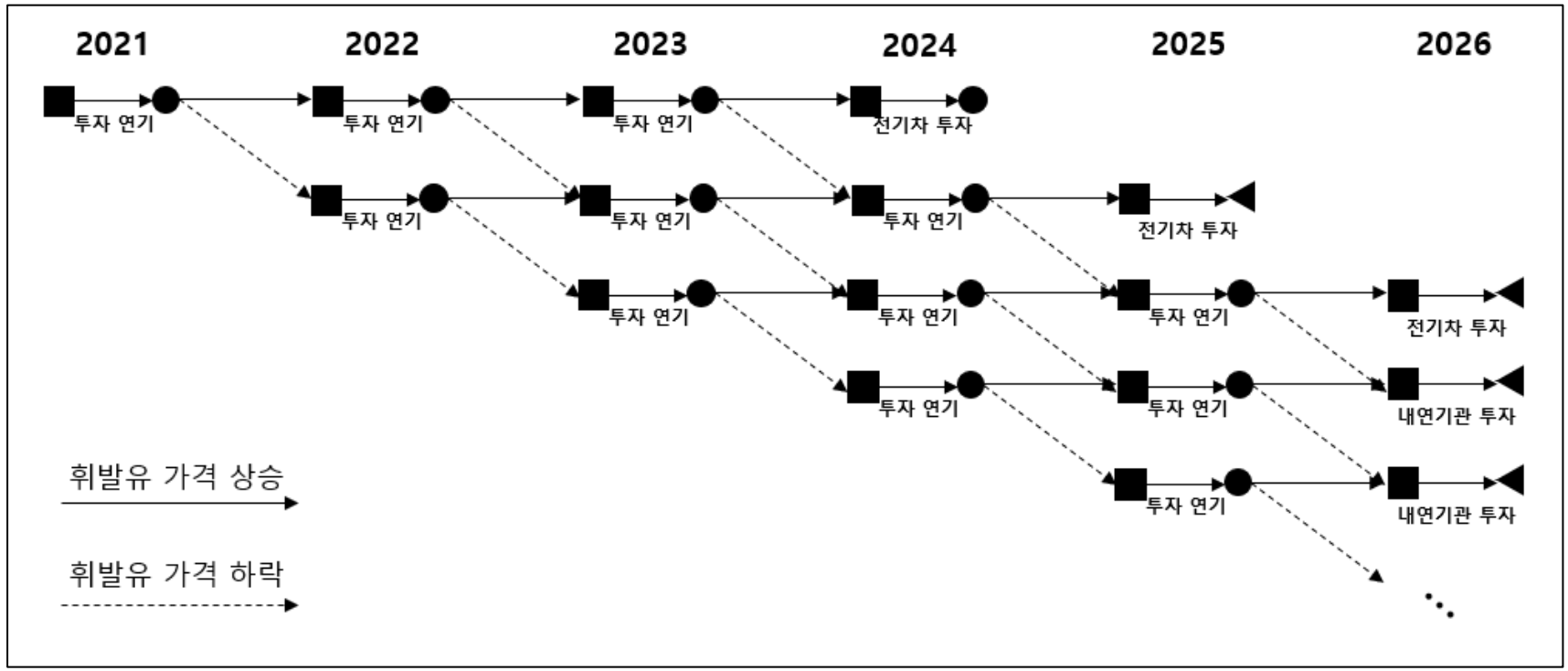

그림 14. 한국 소비자의 전기자동차 최적 투자 경로

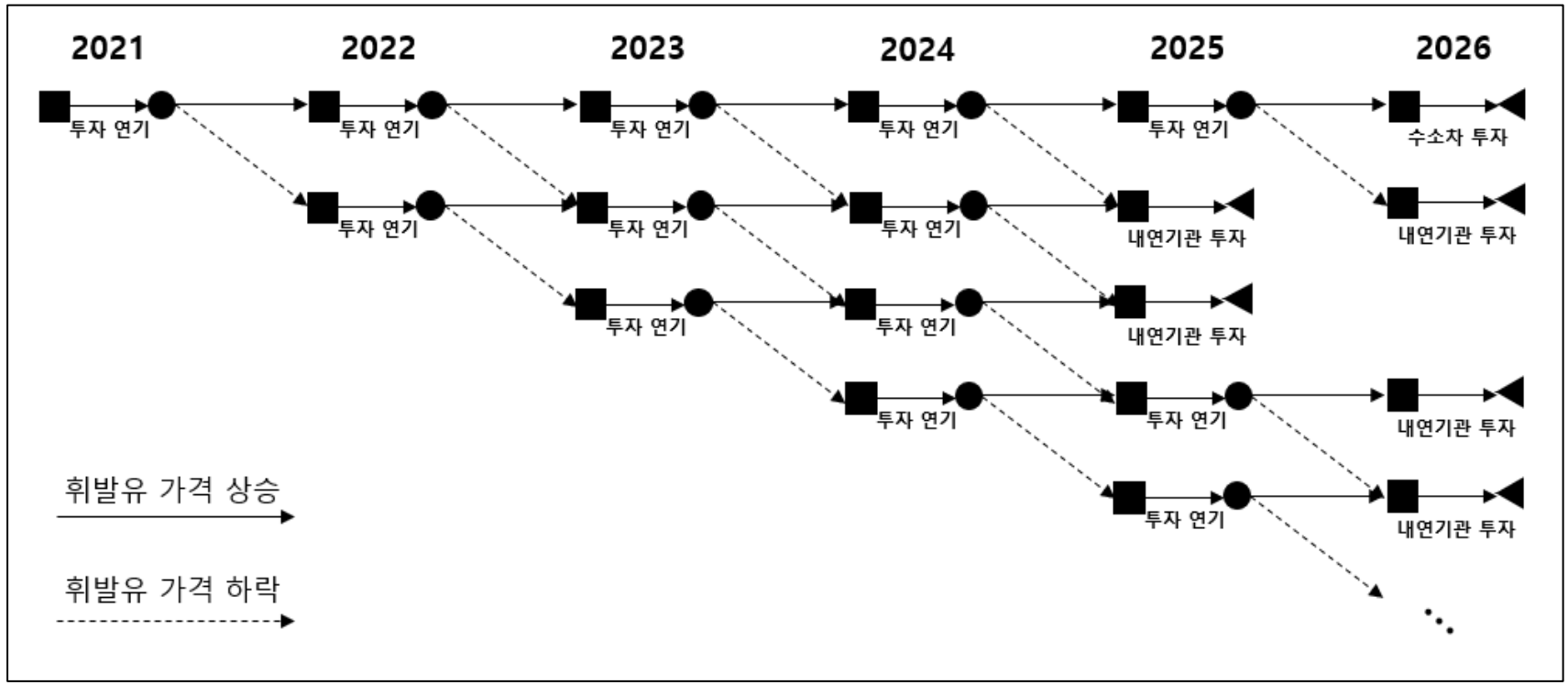

그림 15. 한국 소비자의 수소자동차 최적 투자 전략 경로

옵션 가치를 구하기 위해서는 후진귀납법을 사용하여야 하기 때문에 옵션 가치 추정 표에서는 의사결정 종료기간까지 모든 옵션 가치를 도출하였다. 그러나 최적 의사결정 경로는 앞서 투자가 이루어진다면 이후 해당 노드는 종료되므로 이후 더 이상 분화되지 않는다. 따라서 이후 다른 대안이 최적이 되더라도 해당 노드는 도달할 수 없으므로 후진귀납법 과정에서 최적 옵션 가치를 도출할 때는 해당 노드의 가치가 반영이 되지만 최적 의사결정 경로에는 포함되지 않는다. 예를 들어 2025년 수소자동차 투자 옵션 가치의 노드(0, 2030)는 내연기관자동차가 최적 대안이지만, 해당 노드는 노드(0, 2026)를 만드시 지나야 하므로 도달할 수 없는 노드이다. 이러한 최적 의사결정과 해당 경로만 표현한 결과는 그림 14와 그림 15와 같다.

한국 소비자의 최적 전기자동차 투자 전략은 2024년, 2025년, 2026년에 각각 기술진보와 휘발유 가격 변화를 관찰한 뒤, 휘발유 가격이 0번, 1번, 2번 하락했을 때 전기자동차 투자하고, 3, 4번 하락했을 때는 내연기관자동차를 투자하며, 모두 하락했을 때(5번 하락)는 투자 연기하는 것이 최적 전략으로 도출되었다.

한국 소비자의 최적 수소자동차 투자 전략은 2025, 2026년까지 기술진보와 휘발유 가격 변화를 관찰한 뒤, 휘발유 가격이 계속 오르는 경우는 수소자동차를 투자하고, 모두 하락하는 경우는 계속 투자를 연기하며 그 외의 경우는 내연기관자동차 투자가 최적인 것으로 도출되었다.

소비자가 친환경자동차를 투자할 확률은 친환경자동차 투자 의사결정이 발생하는 모든 노드에 도달할 확률의 합과 같다. 예를 들어, 수소자동차 최적 투자 경로에서 내연기관자동차 투자 의사결정이 발생하는 노드(1, 2026)에 도달할 확률은 2025년까지 휘발유 가격이 계속 상승하다가 2026년에 처음으로 하락할

확률과 같으므로 θ_u을 가격이 상승할 실제 확률이라 할 때, 이를 수식으로 표현하면 $\Pr(1,2026)=\theta_u^4\theta_d^1$으로 표현될 수 있다.

일부 경로는 중간에 경로가 끊어지는 경우도 존재하는데, 전기자동차 최적 투자 경로에서 전기자동차 투자 의사결정이 발생하는 노드(1, 2025)는 3번의 휘발유 가격 상승과, 1번의 하락으로 도달할 수 있는 노드이지만, 연속해서 3번의 상승이 이루어지고, 하락이 이루어지는 경로는 노드(0, 2024)에서 전기자동차 투자 의사결정이 이루어지면서 끊기므로 해당 경로의 확률은 포함될 수 없다. 따라서 해당 경로에 도달할 확률은 전체 경로의 확률에서 끊기는 경우의 확률을 뺀 $Pr(1,2025)=\binom{4}{1}\theta_u^3\theta_d^1-\theta_u^3\theta_d^1$ 또는 $Pr(1,2025)=\binom{3}{1}\theta_u^2\theta_d^1\times\theta_u^1$과 같다.

이 때, 가격이 상승할 실제 확률 θ_u은 가치 평가를 위하여 사용되는 위험중립확률과 달리 실제 유가가 상승할 확률이며, 다음과 같이 근사하여 추정될 수 있다(Shockley, 2007).

$$\theta_u=\frac{1}{2}+\frac{\hat{\mu}}{2\hat{\sigma}} \tag{15}$$

한국 시장에서 휘발유 소매 가격의 연평균증가율은 2%이며, 표준편차는 9.1%이므로 실제 휘발유가 상승할 확률은 61.1%이다. 따라서 수소자동차 최적 투자 경로에서 노드(1, 2026)에 도달할 확률은 5.2%이다.

이와 같은 방법으로 우리는 향후 친환경자동차가 최적 대안이 될 확률, 즉 친환경자동차가 경제적일 확률을 도출할 수 있다. 전기자동차가 최적 투자 대안으로 도출 되는 확률은 노드(0, 2024), 노드(1, 2025), 노드(2, 2026)에 도달할

확률의 합인 70.2%이다. 반면, 수소자동차가 최적 투자 대안으로 도출되는 노드는 노드(0, 2026)뿐이므로 해당 노드의 도달 확률을 계산하면 8.5%이다. 따라서 지난 10년간 휘발유 가격 변동성과 기술 진보율을 고려하였을 때, 전기자동차가 수소자동차에 비하여 경제성을 가질 확률이 높으며, 투자 확률이 50%이상임을 고려하면, 향후 10년 내에는 내연기관자동차보다도 경제성이 높을 것으로 예상된다. 그러나 이러한 결과는 보조금이 포함된 결과이므로 보조금 수준에 따른 투자 확률 변화를 도출할 필요가 있으며, 제 4절 민감도 분석에서 다루고 있다.

제 4 절 민감도 분석

앞서 한국 시장의 실증분석 결과에서는 현재의 기술 및 시장 조건에서 친환경자동차가 경제성이 있을 확률을 전기자동차는 70.2%, 수소자동차는 8.5%로 도출되었다. 그러나 해당 결과는 다양한 경제성 영향 요인에 의하여 영향을 받는다. 본 절에서는 주요 경제성 요인인 연료 가격 변동률, 보조금, 연평균 주행거리, 노후율의 변화가 투자 확률에 미치는 영향을 분석하였다.

특히, 보조금의 경우, 증가한 금액만큼 구매 가격이 하락한 경우로도 해석할 수 있다. 따라서 보조금에 대한 민감도 분석은 동시에 구매 가격에 대한 민감도 분석으로도 해석할 수 있다. 예를 들어 보조금 20% 증가는 금액으로 240만원이 증가한 경우이므로, 동시에 구매 가격이 240만원 하락한 경우로 해석할 수 있다.

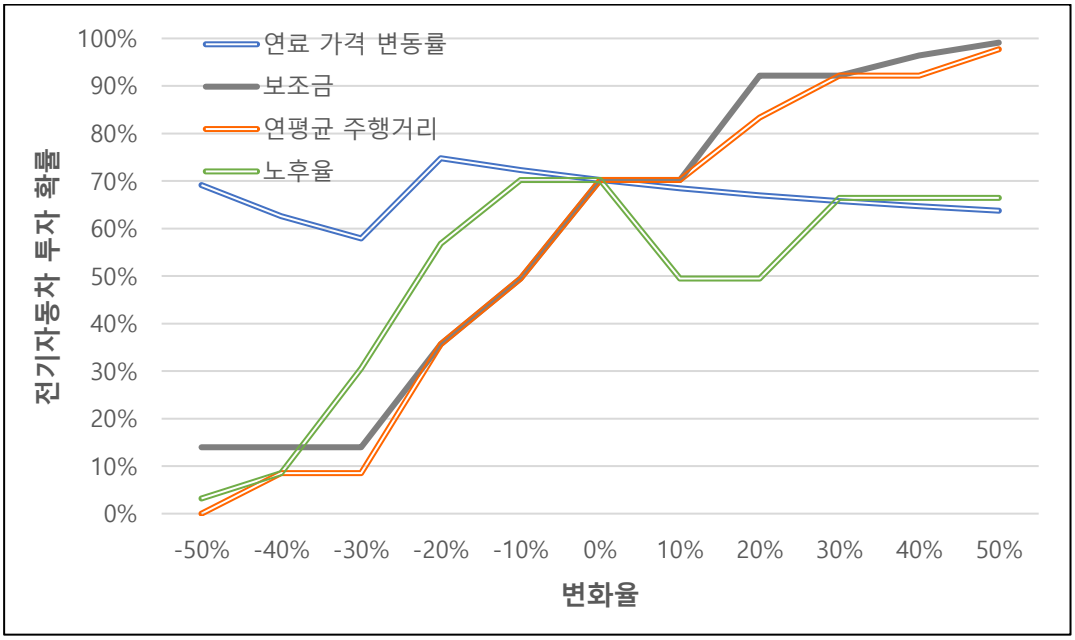

그림 16. 전기자동차 주요 영향 요인 민감도 분석 결과

먼저 보조금과 연평균주행거리는 유사한 수준으로 투자 확률에 영향을 미치는 것으로 도출되었다. 두 요인 모두 지금 수준보다 50% 증가하였을 때, 전기자동차 투자 확률이 100%에 수렴하며 변화율의 기울기 또한 매우 유사한 것으로 도출되었다. 다만, 연평균주행거리가 50%가 적은 7,500Km에서 투자 확률은 0%이지만, 보조금은 50%가 삭감된 600만원 수준에서도 투자 확률이 10%가 넘는 특징이 있다.

보조금 또는 구매 가격의 하락은 현재 보다 보조금이 20% 증가 또는 구매 가격이 240만원 하락하였을 때, 전기자동차의 구매 확률이 90%를 넘는 것으로 도출되었다. 그러나 보조금이 30% 하락 또는 구매 가격이 360만원 하락하였을 때 구매 확률이 70.2%에서 14.0%로 56.2%p가 감소한다. 따라서 정부는 전기자동차의 기술 진보 수준과 휘발유 가격 수준에 맞추어서 보조금을 유연하게 조정할 필요가 있다. 예를 들어 유가가 현재보다 상승하는 경우, 상대적으로 전기자동차의 경제성은 개선되므로 보조금을 일부 삭감할 수 있으며, 유가가 현재보다 감소하는 경우, 보조금을 증대하여 구매 확률을 유지할 수 있다.

연료 가격 변동성은 전기자동차 투자 확률에 주요한 영향을 미치지 않는 것으로 도출되었다. 지난 10년간의 휘발유 가격 변동성은 팬데믹 기간을 포함하여 실제 변동성보다 과대하게 추정되었을 가능성이 있다. 그러나 현재 수준보다 50%가 적다고 하여도 유사한 투자 확률을 보여 분석 결과의 강건성이 있는 것으로 보인다.

노후율의 경우, 노후율의 상승은 전기자동차 투자 확률에 큰 영향을 미치지 못하지만, 노후율의 하락은 큰 영향을 미치는 것으로 분석되었다. 이는 노후율이 적다면 오로지 경제적인 관점에서는 구매 비용을 절감할 수 있기 때문이다. 특히,

노후율이 하락할수록 내연기관자동차의 구매 확률 또한 하락하는 특징이 있는데, 만약 새로운 자동차의 구매에 대한 비경제적 가치를 포함한다면, 구매 확률에 미치는 영향은 제한적일 것이다.

보조금에 대한 민감도 분석 결과 현재 기술 및 시장 조건에서 보조금 수준이 20% 증가하였을 때, 투자 확률이 약 10%에서 70%로 큰 폭으로 상승하는 것으로 도출되었다. 현재 보조금 3,350만원에서 20% 증가한 보조금은 4,020만원으로 현재 수준 대비 670만원 증가한 값이다. 이는 현재 수소자동차 구매 가격이 약 670만원 저감이 필요함을 의미한다. 특히, 보조금이 10%만 하락하여도 수소자동차의 투자 확률은 0으로 수렴하는데, 보조금 10% 하락 수준에서 전기자동차의 투자 확률이 50%를 유지하는 것과 대조적이다.

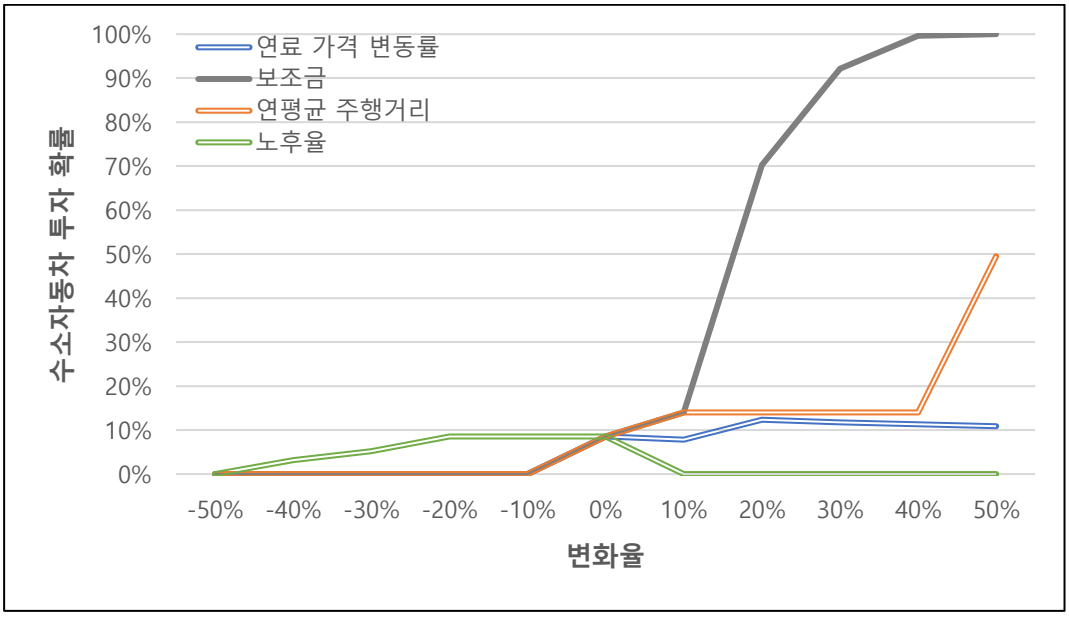

그림 17. 수소자동차 투자 확률 민감도 분석 결과

연평균 주행거리가 증가하는 경우, 상대적으로 수소자동차의 연비가 좋기 때문에 수소자동차의 경제성이 개선되는 것으로 분석되었다. 그러나 10~40% 상승까지는 투자 확률에 큰 영향을 미치지 못하였으며 50%가 상승하여 연평균 주행거리가 22,500Km일 때, 투자 확률이 약 45%까지 증가하는 것으로 분석되었다.

연료가격 변동률의 변화는 투자 확률에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 분석되었다. 이는 변동률이 높아질수록 연료 가격이 상승할 확률은 50%에 수렴하게 되기 때문인 것으로 보인다. 상승 확률이 점차 50%에 수렴할수록 수소자동차가 경제성이 있기 위한 휘발유 가격에 도달할 확률 또한 수렴하게 되므로 투자 확률 또한 수렴하게 된다.

노후 경유차의 노후율이 증가하여 연기 비용이 증가하는 경우, 수소자동차가 기술진보를 이루어 가격이 하락하거나, 수소자동차가 경제성을 달성할 수 있는 가격까지 상승하기 전에 투자 의사결정이 이루어지므로 수소자동차의 투자 확률은 낮아지는 것을 확인할 수 있다. 반대로 노후율이 감소하면 소폭 증가하다가 다시 감소하게 되는데, 이는 의사결정 시기가 늦춰지면서 휘발유 가격이 충분히 상승할 수 있는 확률이 증가하다가 너무 노후율이 낮아지는 경우, 투자 의사결정 자체가 발생하지 않기 때문이다.

전기자동차는 가정 충전 비율이 높을수록 상대적으로 충전 시간은 오래 걸리지만 저렴하게 충전할 수 있는 특징이 있다. 그러나 한국의 경우, 가정용 충전기를 설치하기 어려운 주거 환경에 따라 현재 가정 충전 비율은 42.9%이다. 전기자동차의 가정 충전 비율에 대한 민감도 분석 결과를 정리한 결과는 다음과 같다.

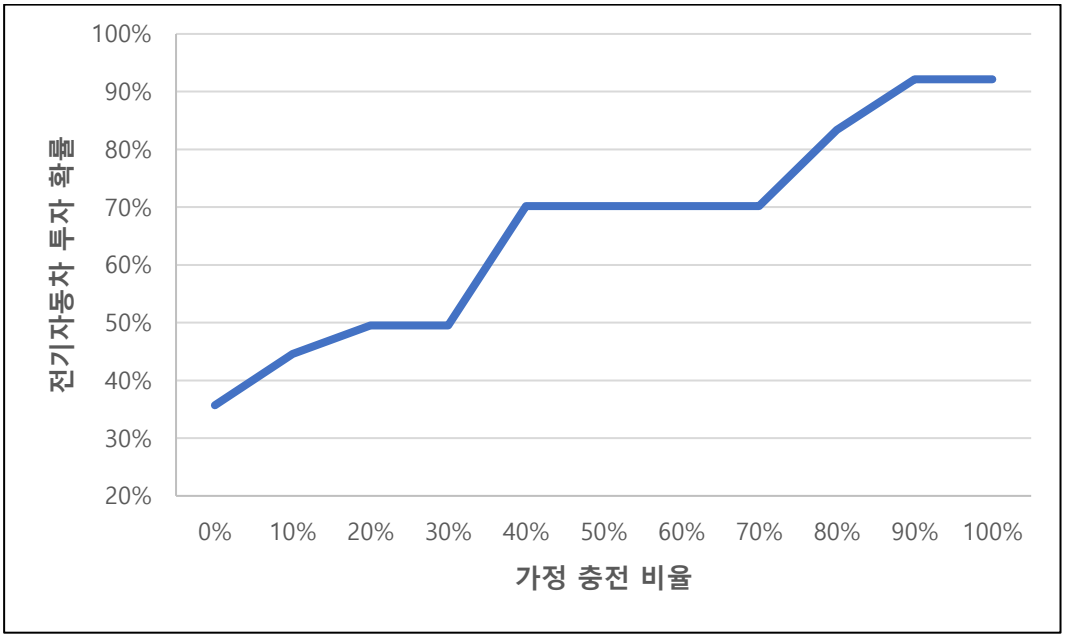

그림 18. 가정 충전 비율 민감도 분석 결과

만약 한국에서 가정 충전 비율을 90%이상 달성할 수 있다면 전기자동차 투자 확률이 92%까지 상승하는 것으로 분석되었다. 반면, 가정에서 충전이 불가능한 환경에서는 투자 확률이 36%까지 하락하는 것으로 분석되었다. 가정용 충전기와 그 설치 비용이 상대적으로 저렴한 점을 고려할 때, 가정용 충전기의 설치가 용이한 주거환경에 우선적으로 전기자동차를 보급하는 경우, 비용대비 효과적으로 투자 확률을 높일 수 있을 것으로 분석된다.

제 5 장 기업의 간접 네트워크 효과를 고려한 충전소 최적 투자 전략 분석

제 1 절 서론

1. 연구 배경 및 목적

친환경자동차 시장 확산을 위한 국제사회의 노력에도 불구하고 아직까지 친환경자동차의 시장 점유율은 매우 낮은 수준이다. 하이브리드 자동차를 포함한 친환경자동차의 세계시장 점유율은 2019년 기준 4.7%이며, 전기자동차와 수소자동차의 시장점유율은 각각 1.6%, 0.008%이다. 한국의 경우에도 전기자동차는 1.78%, 수소자동차는 0.23%의 시장점유율로 세계시장점유율보다는 소폭 높은 수준이지만 아직 친환경자동차는 내연기관자동차에 비하여 경쟁력이 부족한 실정이다(관계부처 합동, 2021).

소비자들로부터 친환경자동차가 외면 받는 주요 원인으로 경제적으로는 높은 구매 비용이 지적되고 있으며 비경제적 원인으로는 낮은 충전편의성이 지적되고 있다. 전기자동차의 경우, 내연기관자동차에 비하여 충전 시간이 길고 배터리를 완전히 충전하여도 주행가능 거리가 상대적으로 짧다는 단점이 있다. 따라서 잦은 충전이 필요하고 가정용 충전기를 설치하기 어려운 주거환경의 경우, 충전을 위하여 충전소에 장시간 주차를 해야 하며, 주차공간이 부족한 공용 주차장의 경우에는 충전공간에 내연자동차가 주차되어 있는 경우가 있어 갈등이 유발되기도 한다(Korea Transport Institute, 2017).

수소자동차는 내연기관자동차의 주유소와 유사한 충전 특성을 지닌다. 수소충전 시간 또한 내연기관자동차와 유사하고, 한번 충전이 완료되면 주행가능

거리도 내연기관보다 길다는 장점이 있다. 그러나 기존 발전 시설과 전력공급망을 이용할 수 있는 전기충전소와 달리 수소의 생산과 유통을 위한 인프라를 구축해야 하고, 수소충전소 자체의 구축 및 운영 비용 또한 높은 단점이 있다.

이러한 충전 편의성 부족 문제는 충전기술 발전과 더불어 충전소의 절대적 수가 증가하여야 극복될 수 있다. 그러나 친환경자동차의 낮은 보급량과 높은 충전소 구축 및 운영비용에 따라 충전 사업은 경제성이 부족한 것으로 지적되고 있다. 한국의 경우, 충전기 설치비의 최대 50% 지원, 운영비와 임대료 감면 등 다양한 보조 정책이 시행 중임에도 2021년 수소 충전소 66개소 중 흑자를 본 충전소는 4개소에 불과하다(Korean Ministry of Environment, 2022; 관계부처 합동, 2021). 연료 충전 사업의 경제성 부족에 따라 연료 충전 사업에 대한 민간 참여율도 저조한 실정이다. 2020년 기준 민간 연료 충전소 구축 비율은 전기충전소는 26%, 수소충전소는 22%로 대다수의 연료 충전소가 공공기관에서 운영하고 있다. 그러나 예산의 한계에 따라 추가 증축에 어려움이 있다.

연료 충전소의 경제성이 부족과 그에 따른 저조한 민간 참여율 문제는 친환경자동차와 연료 충전소의 네트워크 효과를 고려할 때, 친환경자동차 제조 기업이 직접 투자하는 경우 해결될 수 있는 가능성이 있다. 친환경자동차의 친환경자동차와 연료 충전소는 친환경자동차의 판매 증가가 연료 충전소의 수익을 개선하고, 연료 충전소의 증가가 친환경자동차의 충전 편의성을 증가에 따른 효용을 증대시키는 간접 네트워크 관계에 있다. 따라서 연료 충전소 증대에 따라 친환경자동차 판매 수익을 기대할 수 있는 자동차 제조업의 경우, 충전 사업의 경제성이 부족한 경우에도 충전소 투자가 합리적일 수 있다.

본 연구에서는 연료 충전소의 증가가 친환경자동차 판매량 증대에 미치는

영향, 즉 간접 네트워크 효과를 이항로짓모형(binary logit model)을 이용하여 모형화한 뒤, 이를 기반으로 자동차 제조 기업의 최적 충전소 투자 전략을 도출하였다. 특히, 내연기관자동차와 친환경자동차의 경쟁 상황과 향후 내연기관자동차가 퇴출된 이후 친환경자동차간의 경쟁만 남게되는 상황을 구분하여 각 경쟁 상황에서의 최적 투자 전략을 도출하였다. 개발된 모형은 한국 시장을 대상으로 실증분석을 수행하였으며, 주요 영향 요인의 변화에 따른 최적 투자 전략의 변화를 민감도 분석을 통하여 도출하였다.

본 연구의 구성은 다음과 같다. 제 2절에서는 독점 상황에서 소비자의 수요 함수를 이산선택이론하에 추정하고 이를 기반으로 친환경자동차 제조 기업의 최적 연료 충전소 투자 전략 모형을 개발한다. 제 3절에서는 한국을 대상으로한 실증 분석을 수행하여 한국 기업의 최적 수소충전소 투자 전략을 도출한다.

2. 기존 문헌 분석

Katz and Shapiro (1985)가 긍정적 선순환을 선구적으로 네트워크 효과로 분석한 이후, 네트워크 효과를 고려한 다양한 연구들이 시도되었다. 그러나 초기의 연구들은 이론적 측면에서 네트워크 효과를 하나의 파라미터로 가정하여 분석을 수행하였고, 네트워크 효과를 실증적으로 추정하는 연구는 주목받지 못하였다.

이후 Shankar and Bayus (2003)가 가정용 비디오 게임 산업을 대상으로 네트워크 효과를 계량적으로 추정하고 이를 기반으로 기업의 최적 의사결정에 대한 연구를 수행하였다. 그러나 이미 시장이 충분히 형성되어 계량분석이 가능한 시장 데이터가 존재하는 경우에만 추정이 가능하므로 수소자동차와 같이 아직 시장이 형성되지 못한 신제품의 네트워크 효과를 추정하기에는 어려움이 따른다.

신제품의 출시 이전 잠재 시장을 효과적으로 추정하는 방법 중 특히 교통분야의 수요 예측에 주로 사용되는 방법으로 이산선택이론이 주목받아왔다. 이산선택이론은 소비자가 효용을 최대화하는 제품을 선택한다는 이론적 배경하에 다양한 제품의 속성을 변화시켜가며 잠재 소비자들을 대상으로 선택실험을 수행하여 향후 제품 수요를 예측하는 방법이다.

친환경자동차의 수요 예측의 경우, 충전소의 접근성을 친환경자동차의 속성으로 설문하여 충전소의 증가가 친환경자동차의 효용에 미치는 영향을 분석하고 향후 시장 점유율까지 예측할 수 있다.

이산선택이론을 기반으로 친환경자동차의 수요를 추정한 연구는 Brownstone et al. (2000)이 대표적이다. 그들은 전기와 천연가스, 메탄올 자동차를 가정하여 조인트 혼합 로짓 모형(joint mixed logit models)을 사용하여 켈리포니아에서

대체연료 자동차의 잠재 수요를 예측하였다.

한국의 경우, 다양한 전력원 구성을 가정하여 전기자동차의 수요를 예측한 Choi et al. (2018)과 서울을 대상으로 친환경자동차를 다양한 집단으로 계층화하고 이를 차량 크기에 따라 분석한 Hahn et al. (2018)이 있다.

수소자동차를 주요 대안으로 포함한 연구는 중국을 대상으로 수소자동차의 지불의사액을 추정한 Li et al. (2020)와 한국에서 수소자동차의 지불의사액을 추정한 Kim et al. (2019), 수소자동차를 포함한 친환경자동차의 수요를 혼합로짓모형을 이용하여 추정하고 친환경자동차의 전 과정 분석으로 도출한 온실가스감축량을 수요와 곱하여 향후 한국에서 친환경자동차에 의한 온실가스 감축 수준을 분석한 Kim et al. (2020)이 있다.

기존 연구와 달리 친환경자동차 제조기업의 최적 충전소 투자 전략은 간접 네트워크 관계에 있는 두 제품을 하나의 기업이 모두 공급한다는 구조적 차이점이 있다. Shankar and Bayus (2003)가 분석한 가정용 비디오 게임 산업의 경우, 게임 콘솔 제작 업체가 소비자들에게 게임 콘솔을 판매하고, 비디오 게임 제작 업체는 따로 해당 게임 콘솔을 보유한 소비자들에게 게임을 판매한다. 이러한 문제는 네트워크 효과 분석 이론에서 흔히 “하드웨어와 소프트웨어” 문제로 분류된다. 그러나 본 연구에서는 친환경자동차 제조기업이 연료 충전소 또한 공급하므로 하나의 기업이 하드웨어와 소프트웨어를 모두 공급하는 특이점이 있다.

또한 기존 연구에서는 이론적 측면에서 간접 네트워크 수준을 파라미터로 간주하고 간접 네트워크 효과에 따른 전략 변화만을 관찰한 것에 비하여 본 연구에서는 실제 간접 네트워크 수준을 계량적으로 측정 가능한 모델을 도입하여

연구의 실용성을 높이었다. 특히, 아직 내연기관자동차와의 경쟁에만 집중한 기존 연구와는 달리 향후 내연기관자동차가 퇴출된 이후 친환경자동차 간의 경쟁 상황을 포함하여 분석하였다는 점에서 의의가 있다.

마지막으로 수소자동차를 주요 대안으로 지원하고 있는 한국의 시장에서 실증 분석을 수행하여 현재 한국 시장에서 최적 급속, 수소 충전소의 투자 전략을 도출하고 주요 변화 영향 요인에 대한 민감도 분석을 수행하여 한국의 충전소 보급 전략 수립에 대한 제언을 포함하였다.

제 2 절 기업의 간접 네트워크 효과를 고려한 최적 충전소 투자 모형

1. 내연기관자동차 시장에서 친환경자동차 충전소 최적 투자 모형

현재 자동차 시장은 내연기관자동차 시장에서 친환경자동차 시장으로 전환되는 초기 단계에 있다. 따라서 현재 상황에서 최적 연료 충전소 투자 전략은 현재의 내연기관자동차의 효용과 친환경자동차의 효용을 비교하고 그에 따라 도출된 친환경자동차의 수요 함수를 기반으로 충전소 투자의 경제성을 분석하여야 한다.

소비자의 자동차 효용은 주로 자동차의 구매가 격과 연비 등 경제적 요인과 충전 편의성, 성능, 브랜드, 차종, 차급 등 비경제적 요인으로 구분된다. 이러한 요인들 중 충전 편의성은 연료 충전소의 증가에 따라 친환경자동차 판매량을 증대시키는 간접 네트워크 요인이다.

충전소 증대에 따른 간접 네트워크 효과를 반영하는 방법은 연구마다 다르다. 충전소 증대의 영향은 충전소까지의 거리 감소, 충전 대기 시간 감소, 연료 부족 불안감(driving anxiety) 감소 등 다양한 형태로 존재할 수 있기 때문이다. 이산선택이론을 사용하여 친환경자동차에 대한 기존의 연구들은 연료 충전소의 효용을 주로 현재 주유소 대비 충전소의 보급 수준으로 설문하였다. 한국 또는 수소자동차를 포함한 기존 연구에서 충전소를 반영한 방법을 정리한 결과는 다음과 같다.

표 9. 기존 연구의 충전소 반영 방법 정리

연구	분석 모형	충전소 반영 방법
Woo et al. (2018)	Mixed logit	주유소 대비 보급 수준(%)
Choi et al. (2018)	MNL, nested, mixed logit	
Yoo et al. (2019)	Mixed logit	
Lee et al. (2020)	Mixed logit	
Zhang et al. (2020)	Binary logit	
Jang, S., & Choi, J. Y (2021)	Mixed logit	주유소 거리

본 연구에서는 기존 연구와 동일하게 주유소 대비 연료 충전소 보급 수준으로 간접 네트워크 효과를 반영하였다. 그러나 주유소 대비 충전소 비율로 설문한 기존 연구와 달리, 본 연구에서는 최적 충전소 수를 도출하기 위하여 기업의 투자 비용을 반영해야 하므로 충전소 투자 수준을 전체 주유소의 수로 나누어 반영하였으며 이를 수식으로 표현하면 다음과 같다.

$$
\begin{aligned}
&U_i(CS) = V_i(CS) + \varepsilon_i \\
&where \\
&i = Eco, ICEV \\
&V_{Eco}(CS) = \alpha \cdot \frac{CS}{GS} + \boldsymbol{\beta}^{\mathbf{T}}\mathbf{x}_{Eco} \\
&V_{ICEV} = \alpha + \boldsymbol{\beta}^{\mathbf{T}}\mathbf{x}_{ICEV}
\end{aligned}
\tag{16}
$$

*CS*는 충전소 투자 수준을 의미하며, $U_i(CS)$는 CS를 변수로 하는 소비자의

효용이다. V는 관측 가능한 제품의 효용이며 ε는 관측하지 못한 제품의 효용으로 유형1 극단치 분포인 검벨(gumbel)분포를 따른다고 가정한다. α는 충전소 접근성의 효용 계수이며 접근성이 증대될수록 효용이 증가하여야 하므로 양수를 가정한다. GS는 현재 주유소의 수이며, β는 충전소 외의 다른 제품 속성의 효용 계수이고 $\mathbf{x}$는 각 제품의 효용 수준이다.

α는 충전소의 증가에 따라 충전 편의성이 증가하고, 충전 편의성 증가가 구매 확률을 증가시키는 간접 네트워크 계수이다. 그러나 본 연구에서는 충전소의 수를 의사결정 변수로 사용하며, 주유소의 수를 주어진 값으로 사용하므로 실질적인 간접 네트워크 계수는 α/GS이다.

소비자가 친환경자동차를 구매할 확률은 친환경자동차의 효용이 내연기관자동차보다 클 확률과 동일하며, 시장 수요 관점에서 이는 시장점유율과 같다.

$$\begin{aligned} S(Eco) &= P(Eco) = P(U_{Eco} > U_{ICEV}) = P(V_{Eco} + \varepsilon_{Eco} > V_{ICEV} + \varepsilon_{ICEV}) \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} P(\varepsilon_{ICEV} < V_{Eco} - V_{ICEV} + \varepsilon_{Eco} \mid \varepsilon_{Eco}) P(\varepsilon_{Eco}) d\varepsilon_{Eco} \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} e^{-e^{-(V_{Eco} - V_{ICEV} + \varepsilon_{Eco})}} e^{-\varepsilon_{Eco}} e^{-e^{-\varepsilon_{Eco}}} d\varepsilon_{Eco} \\ &= \frac{e^{V_{Eco}}}{e^{V_{Eco}} + e^{V_{ICEV}}} \end{aligned} \tag{17}$$

이항로짓모형은 일반적인 시장 상황에서 각 제품의 효용에 따른 구매 확률을 도출한다. 만일 연료 충전소가 존재하지 않는 등 충전 편의성의 저하가 아닌 충전 불가능에 이를 수 있다면, 이는 효용 함수의 구조가 다른 형태가 된다. 이런 경우, 특정 비율 이하의 수소충전소 보급 수준에서의 효용함수와, 일반적인 비율에서의

효용함수를 구분하여야 한다. 본 연구에서는 기존 연구와 같이 최소한의 충전소 보급이 이루어진 이후의 상황을 고려하고 있으며, 이는 충전소 최소 투자량 제한으로 모형에 반영하였다.

기업은 친환경자동차 판매 수익과 연료 충전소를 투자하여 연료를 판매하여 얻는 충전 수익을 얻을 수 있다. 연료 충전소는 일반적인 충전소 규모를 기준으로 1개소로 가정한다. 하지만 연료 충전소의 규모는 조정이 가능하므로 분석의 편의를 위하여 정수 단위로 제한하지 않는다.

본 연구에서는 분석의 편의를 위하여 단일 친환경자동차 기업을 가정하였다. 따라서 충전 수익의 경우, 전체 친환경자동차가 지출하는 연료 충전 비용을 충전 수익으로 산정하였다. 이 때, 충전 수익은 신차 판매 수익과는 다르게 기존에 판매된 친환경자동차 누적 판매량에 비례한다. 만약 충전소와 다른 속성의 값이 변하지 않는다면 매년 동일한 구매확률이 발생할 것이므로 모형의 단순화를 위하여 누적 친환경자동차 보급량은 구매확률과 연간 자동차 판매량, 평균 자동차 보유기간의 곱으로 가정한다.

이를 수식으로 표현하면 다음과 같다.

$$
\begin{aligned}
&\pi(CS) = Q_{Eco}(CS)(PC \cdot m + AL \cdot CR) - IC \cdot CS \\
&Where \\
&Q_{Eco}(CS) = MS \cdot S_{Eco}\left(CS\right) \\
&CR = FE \cdot DD \cdot FP \\
&IC = \left(CC + ISC\right)\left(\frac{r(1+r)^L}{(1+r)^L - 1}\right) + OC \\
&CS_{Min} \le CS
\end{aligned}
\tag{18}
$$

π는 기업의 이윤 함수이며, Q_{Eco}는 친환경자동차 판매량, PC는 친환경자동차 구매비용, m은 판매비용 대비 마진율, MS는 연간 자동차 시장 규모이다. AL은 평균 자동차 보유기간(the average length of vehicle ownership)이며, CR은 충전소 수입(charging revenue)으로 친환경자동차의 연비(FE)와 연평균주행거리(DD), 연료 수익(FP)의 곱으로 구성된다. 충전소 비용은 충전기 비용(CC)과 설치비용(ISC)의 연간 등가와 연간 운영비용(OC)의 합으로 구성된다.

시장 수요 관점에서 친환경자동차 구매 확률은 시장점유율과 동일하므로 기업의 친환경자동차 판매량은 연간 자동차 판매량에서 친환경자동차 판매 확률을 곱하여 도출된다. 이 때, 친환경자동차 구매 확률, 즉 시장점유율은 식 (17)과 같다. 충전소 투자 비용은 제 2장에서 다룬 연료 충전소의 투자 비용과 운영 비용을 연간 등가로 환산한 식 (11)과 동일하다. 다만, 식 (11)에서는 자동차 한 대의 관점에서 바라보았기에 자동차와 연료 충전소의 비율과 다양한 형태의 충전소 종류를 고려하였으나, 본 연구에서는 전기는 급속 충전소, 수소는 가장 비용효과적인 부생가스-튜브트레일러 종류만을 고려한다.

정의 1. 친환경자동차가 시장점유율 100%를 달성하였을 때 억을 수 있는 최대 수익, $K = MS \cdot (PC \cdot m + AL \cdot CR)$을 수익 상한($K$)으로 정의한다.

정의 1은 친환경자동차의 관점에서 최대 잠재 시장을 의미한다. 그러나 현실적으로 내연기관자동차가 존재하는 상황에서 친환경자동차의 시장점유율이 100%를 달성하는 것은 불가능하므로 최대 잠재 시장에서의 수익을 수익 상한으로 명명하였다.

정리 1. 기업의 최적 충전소 투자 수준은 항상 존재한다. 최적 투자 수준이 최소 충전소 투자 수준(CS_{Min})이 아닐 존재할 필요 조건은 수익 상한과 간접 네트워크 효과의 곱이 4배의 충전소 투자 비용보다 큰 경우($\alpha/GS \cdot MS \cdot (PC \cdot m + AL \cdot CR) > 4 \cdot IC$)이다.

증명) 부록 참조

정리 1은 최적 전략이 항상 존재함을 보장함과 동시에 최적값이 최소 수준에서 존재하지 않기 위한 기본 제약을 제시한다. 특히, 간접 네트워크 효과가 가장 구매 확률을 높이는 구간이 효용이 동일하여 시장점유율이 50%일 때이므로, 기본 제약은 수익상한과 간접 네트워크 효과 계수의 곱과 4배의 충전소 비용의 비교로 구성되는 것을 확인할 수 있다.

정리 2. 기업의 최적 충전소 투자 수준은 최소 투자 수준 또는 극대점에서 존재한다. 또한 극대점은 유일하며 다음과 같이 표현된다.

$$CS^* = GS + \frac{GS}{\alpha} \ln \left(\frac{\frac{\alpha}{GS} \cdot K - 2IC + \sqrt{\left(\frac{\alpha}{GS} \cdot K - 4IC \right) \frac{\alpha}{GS} \cdot K}}{2IC} \right) - \frac{GS}{\alpha} \boldsymbol{\beta}^{\mathbf{T}} (\mathbf{x}_{Eco} - \mathbf{x}_{ICEV}) \tag{19}$$

증명) 부록 참조

정리 2는 만약 충전소 외의 친환경자동차의 효용이 내연기관자동차보다 좋다면(X_{ECO}-X_{ICEV}>0) 최적 충전소 투자 수준은 주유소보다 적어질 수 있으며, 그렇지 않다면 최적 충전소 투자 수준은 주유소보다 많아야 한다는 것을 의미한다.

그러나 현실적으로 충전소 투자만으로 달성할 수 있는 수요 증대는 한계가 있다. 따라서 최대 충전소 투자 수준에 상한을 두는 것이 현실적이다. 일반적으로 기존 연구들은 충전소의 최대 투자 수준을 현재 주유소의 수(GS)로 두고 있다. 특히, 아직 친환경자동차의 충전소 외 효용이 내연기관자동차보다 부족한 현재의 상황에서 극대점은 최대 투자 수준(GS)보다 큰 곳에서 존재한다. 따라서 최대 투자 수준을 고려하는 경우, 최소 투자 수준과 최대 투자 수준의 비교만으로 최적 투자 전략을 도출할 수 있다.

정리 3. 최대 투자 수준이 최적이 되기 위한 충분조건은 최소 투자 수준에서의 이윤과 잠재 시장 비율 및 간접 네트워크 효과의 곱이 투자 비용보다 큰 경우이다.

증명) 최적 투자 전략은 최소 또는 최대 투자 수준에서만 존재하므로, 최소 투자 수준에서 기울기가 양수이면 최대 투자 수준이 항상 최적이 된다.

$$\frac{d\pi(CS_{Min})}{dCS} = K \cdot S_{Eco}(CS_{Min}) \cdot \frac{\alpha}{GS} \cdot (1 - S_{Eco}(CS_{Min})) > IC$$

기업의 이윤 함수의 1계 미분은 현재의 수익($\mathrm{K} \cdot \mathrm{S}_{\mathrm{Eco}}$)과 잠재 시장과 간접 네트워크 효과의 곱($\frac{\alpha}{GS}(1 - S_{Eco})$)에서 투자 비용을 빼는 형태로 구성된다. 특히,

간접 네트워크 효과는 잠재 시장에서 충전소의 증대로 잠재 고객을 유인하는 수준으로 해석할 수 있으므로 잠재 시장의 크기에 의존한다.

정리 4. 최대 투자 수준이 최적이 되기 위한 필요충분조건은 수익 상한 대비 투자 비용 증분의 비중보다 시장점유율 증가분이 더 높아야 한다.

증명) 최적 투자 전략이 최소 또는 최대 투자 수준에서만 존재하므로 최소 투자 수준보다 최대 투자 수준에서 이윤이 더 높으면 최대 투자 수준이 최적이 된다.

$$
\begin{aligned}
& S_{Eco}(CS_{Max}) \cdot K - IC \cdot CS_{Max} > S_{Eco}(CS_{Min})K - IC \cdot CS_{Min} \\
& \rightarrow S_{Eco}(CS_{Max}) - S_{Eco}(CS_{Min}) > IC \cdot (CS_{Max} - CS_{Min}) / K \\
& \rightarrow \Delta S_{Eco} > \Delta IC / K
\end{aligned}
$$

정리 4는 기업이 수익 상한 대비 최대 투자 비용의 비중 수준의 시장점유율을 최대 투자 수준으로 달성할 수 있는지 여부로 손쉽게 의사결정 할 수 있다는 것을 의미한다. 이는 간접 네트워크 효과를 추정하지 않아도 시장 데이터만으로 의사결정을 진행해야 하는 상황에서 활용될 수 있다.

또한 충전 사업자 대비 친환경자동차 제조 기업은 간접 네트워크 효과에 의한 자동차 판매 수익만큼 수익 상한이 더 크므로 목표로 달성해야하는 시장점유율의 크기가 더욱 낮아 상대적으로 최대 투자 수준이 최적이 되기 용이하다는 것을 알 수 있다.

2. 친환경자동차간 경쟁을 고려한 충전소 최적 투자 모형

최근 국제 사회는 친환경자동차 확산을 위하여 내연기관자동차 판매를 금지하는 정책을 수립하고 있다. 미국은 2019년 Multi-State ZEV 이행 계획(Multi-State ZEV Action Plan)을 수립하여 2025년까지 10개 주에서 친환경자동차 330만대 누적 보급과 캘리포니아 주에서 내연기관 승용차 판매금지 정책을 수립하였으며, 일본은 2020년 발표된 녹색성장전략에서 2030년까지 승용차 신차 판매의 100%를 친환경자동차로 판매하는 정책을 수립하였다. 중국과 유럽연합은 각각 신에너지자동차산업 발전계획(新能源汽车产业发展规划, 2020.11)과 핏포55(Fit for 55, 2022.06)에서 2035년까지 내연기관자동차 판매를 금지하는 정책을 수립하였다. 한국은 2021년 2월 제 4차 친환경자동차 기본계획을 발표하며 2030년까지 신차 판매의 83%를 친환경자동차로 판매하는 정책을 제시하였다.

이러한 정책에 따라 향후 자동차 시장의 분석에서는 친환경자동차 간의 경쟁 상황을 고려하여야 한다. 특히, 한국의 경우 전기자동차와 수소자동차를 주요 대안으로 고려하고 있으므로 두 차종의 경쟁 상황을 고려한 최적 투자 전략을 분석할 필요가 있다.

내연기관자동차가 퇴출된 이후 친환경자동차만 시장에 남게 되는 경우, 소비자의 효용 함수는 식 (16)과 동일하지만 두 대안 모두 친환경자동차로 구성되는 차이가 있다.

$$
\begin{aligned}
&U_i(CS_i) = V_i(CS_i) + \varepsilon_i \\
&Where \\
&V_i(CS_i) = \alpha \cdot \frac{CS_i}{GS} + \boldsymbol{\beta}^{\mathrm{T}}\mathbf{x}_i
\end{aligned} \tag{20}
$$

그러나 소비자가 친환경자동차 i를 구매할 확률은 해당 차종의 연료 충전소 수뿐만 아니라 경쟁 차종의 연료 충전소 수에도 영향을 받는다. 따라서 경쟁을 고려하는 경우 구매 확률(시장점유율)은 다음과 같이 두 변수를 가진 함수로 표현된다.

$$
\begin{aligned}
&P_i(CS_i, CS_{-i}) = S_i(CS_i, CS_{-i}) = P(U_i(CS_i) > U_{-i}(CS_{-i})) \\
&= P(V_i(CS_i) + \varepsilon_i > V_{-i}(CS_{-i}) + \varepsilon_{-i}) = \frac{e^{V_i(CS_i)}}{e^{V_{-i}(CS_{-i})} + e^{V_i(CS_i)}}
\end{aligned} \tag{21}
$$

기업의 이윤 모형은 내연기관자동차 시장에서의 친환경자동차 이윤 모형과 구성은 동일하지만 친환경자동차 간 경쟁을 고려함에 따라 해당 차종의 연료 충전소와 경쟁 차종의 연료 충전소 투자 수준을 변수로 가진 함수로 표현된다.

$$
\begin{aligned}
&\pi_i(CS_i, CS_{-i}) = Q_i(CS_i, CS_{-i})(PC_i \cdot m_i + AL \cdot CR_i) - IC_i \cdot CS_i \\
&Where \\
&Q_i(CS_i, CS_{-i}) = MS \cdot P_i\left(CS_i, CS_{-i}\right) \\
&CR_i = FE_i \cdot DD \cdot FP_i \\
&IC_i = \left(CC_i + ISC_i\right)\left(\frac{r(1+r)^{L_i}}{(1+r)^{L_i} - 1}\right) + OC_i \\
&CS_i^{Min} \le CS_i
\end{aligned} \tag{22}
$$

정리 5. 주어진 경쟁 차종의 연료 충전소 수준(CS_{-i})에 대하여 정리 1과 정리 2가

성립한다.

증명) 부록 참조

정리 5는 친환경자동차 간의 경쟁 상황에서도 정리 1과 정리 2가 성립하며, 특히 정리 2의 경우, 극대점이 경쟁 차종의 연료 충전소 투자 수준에 대한 선형 함수의 형태로 존재함을 의미한다. 또한 만약 최소 투자 수준이 최적이 아니라면 경쟁 차종의 투자 수준에 대한 최적 반응(best response)이 극대점이 된다. 따라서 경쟁 차종의 투자 수준에 대한 최적 반응은 경쟁 차종의 투자 수준을 기준으로 충전소외 효용의 차이만큼 가감하고 극대점까지의 거리만큼 더하는 형태로 존재한다.

$$CS_i^*(CS_{-i}) = CS_{-i} + \frac{GS}{\alpha}\ln\left(\frac{\frac{\alpha}{GS}\cdot K_i - 2IC_i + \sqrt{\left(\frac{\alpha}{GS}\cdot K_i - 4IC_i\right)\frac{\alpha}{GS}\cdot K_i}}{2IC_i}\right) - \frac{GS}{\alpha}\boldsymbol{\beta}^{\mathbf{T}}(\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_{-i})$$

Where

$$K_i = MS\cdot(PC_i\cdot m_i + AL\cdot CR_i)$$

(23)

따름 정리 1. 정리 2의 $CS_i^*(CS_{-i})$에서 $S_i(CS_i^*(CS_{-i}), CS_{-i})$는 CS_{-i}값과 관계없이 동일하다.

증명) 부록 참조

따름 정리 1은 경쟁 차종의 투자 수준과 관계없이 극대점에서 시장점유율은

동일하다는 것을 의미한다. 특히, 극대점에서의 시장점유율은 차종 고유의 특징인 연료 충전소 투자 비용과 수익상한, 간접 네트워크 계수에 의하여 결정된다. 따름정리 1은 정리 6의 증명에 직접적으로 사용된다.

정리 6. 균형은 승자 독식(winner takes all market) 형태로 존재한다. 즉, 최소 하나의 차종은 최소 투자가 균형이 된다.

증명) 부록 참조

정리 6은 친환경자동차간 충전소 투자 경쟁의 균형이 승자 독식의 형태로 존재하는 것을 의미한다. 그러나 균형이 항상 존재하는 것은 아니다. 만약 정리 1을 만족하지 못하는 차종이 있으면, 해당 차종은 항상 최소 투자가 최적 전략이다. 그러나 만약 두 차종이 정리 1을 모두 만족하고, 경쟁 차종의 최소 투자 수준에서 극대점이 최적 전략이라면, 균형은 존재하지 않을 수 있으며 존재한다면 승자 독식의 형태로 존재한다. 즉, 어떤 한 차종은 균형에서 최소 투자가 최적이 된다.

2014년 노벨 경제학상을 수상한 장 티롤(Jean Triole)은 네트워크 효과가 존재하는 플랫폼 사업에서 승자 독식의 균형이 존재하기 쉽다는 점을 증명하였다. 특히, 네트워크 효과에 의하여 승자 독식이 이루어져 해당 플랫폼이 독점적 지위를 얻게 되었을 때, 기존 독점 규제와 동일한 방법으로 규제를 하면 오히려 부작용이 발생할 수 있으므로 산업 고유의 특성을 고려한 규제 도입의 필요성을 역설하였다.

친환경자동차간 충전소 투자 경쟁에서는 승자 독식을 시장지배적

디자인(dominant design)으로 해석할 수 있다. 특히, 친환경자동차의 생산량 증대에 따른 규모의 경제뿐만 아니라, 충전소에 대한 규모의 경제까지 고려한다면 승자 독식 형태의 균형은 더욱 일반적일 것이다.

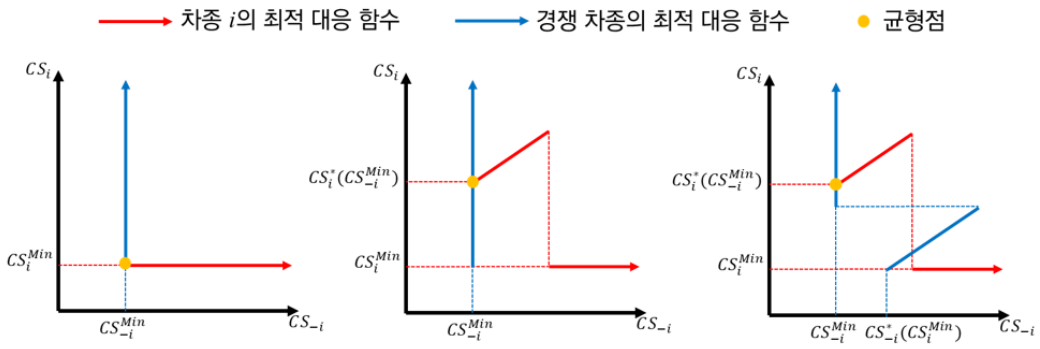

그림 19. 친환경자동차간 충전소 투자 경쟁의 균형 형태

제 3 절 한국 시장에서 기업의 충전소 최적 투자 전략 실증 분석

1. 한국 자동차 시장 데이터

본 연구에서 분석 대상으로 하는 자동차 모델은 브랜드 가치 차이의 영향과 제품군에 의한 비용차이를 제한하기 위하여 앞서 제 3장과 제 4장의 연구에서와 동일하게 한국의 대표적인 자동차 제조사인 현대자동차의 코나 가솔린, 코나 전기를 기준으로 하였다. 판매가격의 경우, 세금을 제외한 금액이 실제 기업의 수익이므로, 소비자가 지불하는 총 금액을 사용하였으며, 그 외 연비와 연평균주행거리는 모두 표 10과 동일하다. 다만 보조금의 경우, 구매 확률을 도출할 때는 소비자가 지불하는 금액으로 도출하였으며, 기업의 판매 수익에서는 보조금 또한 기업의 수입이므로 보조금을 제외한 판매 가격을 사용하였다.

보조금은 전기자동차는 국고 보조금 800만원와 서울시 보조금 400만원의 합인 1,200만원을 사용하였으며, 수소자동차는 국고 보조금 2,250만원, 서울시 보조금 1,100만원의 합인 3,350만원을 사용하였다. 자동차의 연평균 보유기간 또한 한국의 평균 보유 기간인 동일하게 8년을 사용하였다.

제 3장과 제 4장의 연구와는 다르게 인프라 비용의 연가를 도출하기 위한 이자율은 현대자동차가 분석 대상 모델의 구매 시 제공하는 대출 이자율 5%를 가정한다[14]. 제 3장의 경우 사회적 비용의 관점에서 분석하여 사회적 할인율 4.5%를 사용하였으며, 제 4장의 경우 실물옵션의 가치 평가 방법에서 사용하는 무위험이자율을 사용하였다. 그러나 본 연구는 일반 기업의 투자 분석을

[14] 36개월 상환 기준
(https://www.hyundai.com/kr/ko/e/vehicles/installment/J/OS15, 접속일: 2022.11.24)

모형화하는 모형이므로, 현대자동차가 제공하는 대출이자율을 최소요구수익률로 해석하였다.

연료 판매에 따른 수익은 연료의 판매가격에서 원가를 뺀 중간 이윤(margin) 사용하였다. 전기자동차는 급속충전기를 충전소 투자 대상으로 가정하였으며, 환경부 급속충전 판매가격인 292.9원/kWh에서 급속충전 원가인 115.5원/kWh의 차익 177.4원/kWh를 사용하였다. 다만 가정 충전 이용 비율만큼 충전소 충전량이 감소하므로 가정 충전 비율 42.85%는 전체 충전 수요에서 차감하여 사용하였다. 수소자동차는 시중 평균 수소 가격인 8,438원/Kg과 수소 공급 원가인 6,960원/Kg의 차익 1,478원/Kg을 사용하였다.

한국의 연평균 자동차 판매량은 국가 승인 통계인 국내 완성차 판매 실적 조사 데이터에 기반한 지난 10년간 연평균 자동차 판매량 1,472,700대을 사용하였으며(자동차산업협회, 2022), 주유소 수는 한국석유관리원에서 제공하는 전국 주유소 현황 자료를 참고하여 2021년 전국 주유소 수 11,378개소를 사용하였다(한국석유관리원, 2022). 또한 마진율은 2021년 현대자동차 자동차부문 영업이익률 4.41%를 사용하였다(현대자동차, 2022).

표 10. 연료 충전소 최적 투자 전략 도출을 위한 한국 자동차 비용 데이터

차종	구매 가격 (천 원)	연비 (Km/Unit)	중간이윤 (원/Unit)	주행거리 (Km)	보조금 (천 원)
수소	67,650	96.2	1,478	15,000	33,500
전기	46,900	5.6	177.4	15,000	12,000

친환경자동차의 수요 함수는 자동차의 속성 별 효용 계수와 각 속성의 값에 기반하여 추정된다. 한국 소비자의 자동차 속성 별 효용 계수는 한국 시장에서 친환경자동차의 미래 수요를 이산선택모형을 이용하여 추정한 Kim et al. (2019)의 연구를 참고하였다. 특히, 오직 효용의 차이만이 실제 구매 확률에 영향을 주므로 내연기관자동차와 동일한 속성값을 지니는 주행거리, 자동차 크기는 제외하였으며, 전기자동차의 경우, 전기자동차 더미 상수에 충전시간이 고려되므로, 평균 급속 충전시간 15분을 사용하여 더미 상수의 값을 조정하였다.

분석 대상 연료 충전소는 전기자동차는 급속 충전소, 수소자동차는 제 3장의 연구 결과에 따라 가장 비용효과적인 부생수소-튜브트레일러를 대상으로 한다. 전기자동차 충전소의 구축 및 운영비용은 지방 정부의 정책 수립에서 사용한 값을 동일하게 사용하였다(Gyeonggi Research Institute, 2017). 운영비용은 한국의 공공충전 정책 가격 설정 근거로 활용된 Korea Energy Economics Institute (2017)의 연구를 참고하였다. 수소충전기 구매비와 설치비는 정부의 수소 자동차 정책에서 사용한 값을 동일하게 사용하였다(Korea Energy Economics Institute, 2019). 운영비용은 부생수소-튜브트레일러의 경우, 한국 시장에서의 균등화 수소원가를 분석한 Korea Energy Economics Institute (2020)의 연구를 참조하였다.

표 11. 자동차 속성 별 효용 계수(출처: Kim et al. (2019))

자동차 더미 상수	연비 (USD/10Km)	충전소 (주유소 대비 %)	구매 가격 (10,000 USD)
수소:-0.625 전기: -0.505 가솔린: 0	-1.321	0.0144	-1.742

표 12. 연료 충전 인프라 비용 데이터(단위: 천 원)

차종	충전기 유형	충전기비용	설치비용	운영비용	수명	연평균비용
수소	부생가스-튜브트레일러	1,700,000	900,000	273,052	20	355,309
전기	공용 급속	40,000		4,225	10	9,280

2. 실증 분석 결과

한국 시장 데이터를 기반으로 현재 시장 상황 및 기술 수준에서 친환경자동차의 구매 확률은 전기자동차 16.2%, 수소자동차는 2.8%로 도출되었다. 그러나 이 확률은 친환경자동차 보조금이 100% 지급된다는 전제에서 도출되어 다소 과장된 측면이 있다. 실제로 친환경자동차의 보조금은 선착순으로 예산에 한계가 있다.

전기자동차의 충전소수익은 약 4천200억원이며, 수소자동차는 156억원으로 도출되었다. 따라서 보조금 지급에 한계가 없다면, 전기충전소와 수소충전소 모두 현재 시장 상황 및 기술 수준에서 경제성이 있는 것으로 분석되었다. 판매수익까지 고려한 결과는 전기자동차는 9,126억원, 수소자동차는 1,386억원으로 분석된다.

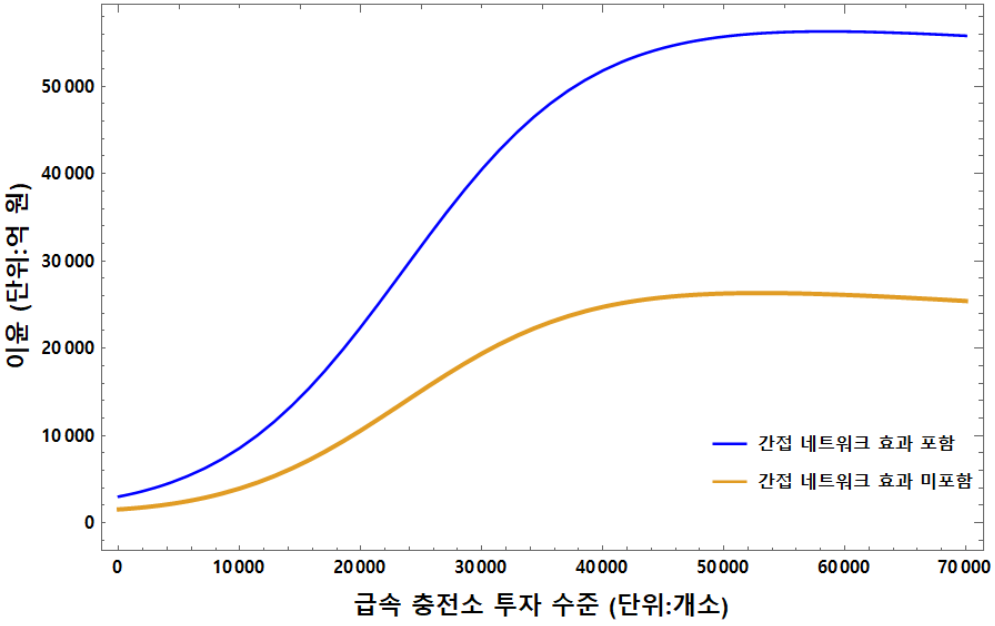

그림 20. 한국의 급속 충전소 투자 수준에 따른 이윤

전기자동차의 최적 투자 전략을 도출한 결과 최적 충전소 투자 수준은 약 58,500개로 5조6284억의 이윤을 달성할 수 있는 것으로 조사되었다. 해당 충전소 투자 수준은 시장점유율 98.8%를 달성하는 수준이다. 그러나 급속 충전소만으로 달성할 수 있는 효용에는 한계가 있다. 일반 내연기관충전시간이 5분이고 급속충전기의 충전시간이 15분이므로 충전시간을 감안하여 최대 충전소 투자 수준을 현재 주유소의 3배로 가정한다면, 최적 투자 수준은 최대 투자 수준이 되며, 약 4조 6305억의 이윤을 달성할 수 있는 것으로 조사되었다. 만약 간접 네트워크 효과에 의한 자동차 판매 수익을 고려하지 않는 경우, 이러한 이윤은 크게 감소하는 것으로 도출되었다.

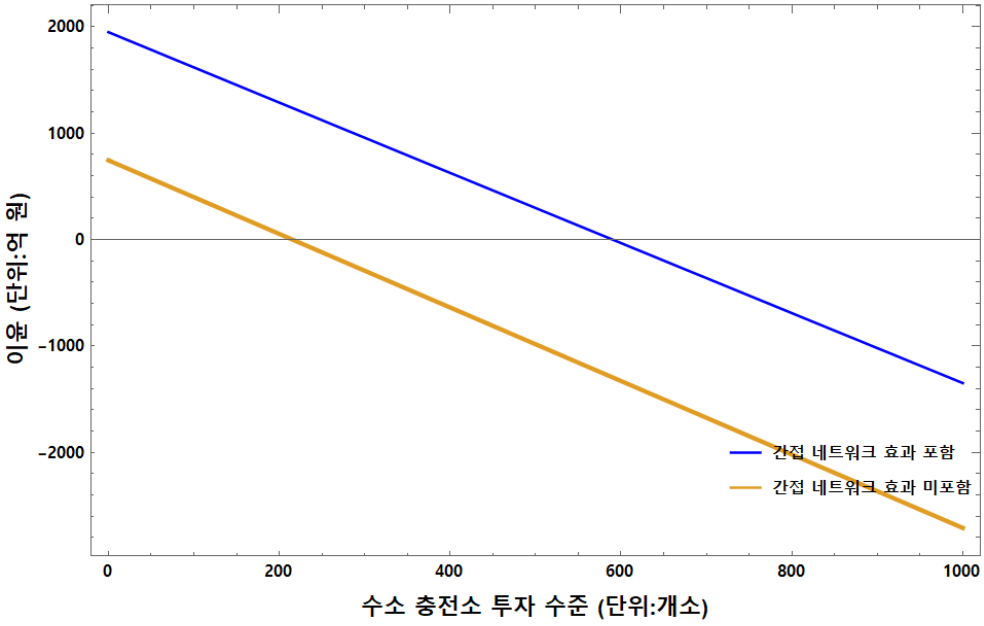

그림 21. 한국의 수소 충전소 투자 수준에 따른 이윤

대조적으로 수소자동차의 최적 투자 전략은 최소 투자 수준으로 도출되었다. 특히, 수소자동차 시장의 수익 상한은 7조 1088억원이지만, 간접 네트워크 계수와 주유소 수를 고려한 명제 1의 조건은 -5억 2155만원으로 음수로 도출되었다. 따라서 전체 구간에서 기울기가 음수이므로 최소 투자 전략이 최적으로 도출된다. 수소 충전소의 투자가 이윤을 보는 마지노선은 간접 네트워크 수익을 포함하는 경우, 약 590개소, 간접 네트워크 효과를 포함하지 않는 경우, 약 215개소이다.

구매 보조금을 고려하지 않는 다면, 수소 자동차의 구매 확률은 0에 수렴한다. 그러나 전기자동차는 약 3.1%의 구매 확률이 존재하며, 상대적으로 적은 급속 충전소 투자 비용에 따라 급속 충전소의 최대 투자가 최적 전략으로 도출된다.

한국 시장의 친환경자동차간 경쟁에서 최적 충전소 투자 균형은 급속충전소 30,604개소, 수소충전소 310개소(최소 투자 수준[15])으로 도출되었다. 그러나 수소충전소의 경우, 최소 투자 수준에서도 이윤이 음수로 도출되어 장기적으로 시장 퇴출도 가능할 것으로 분석되었다. 이는 전기자동차는 정리 1을 만족하는 반면, 수소자동차는 정리 1을 만족하지 못하기 때문이다. 또한 균형에서 전기자동차의 시장점유율은 98.8%로 내연기관자동차 시장에서의 최적 투자 전략에서의 시장점유율과 동일한 것을 알 수 있다. 이는 따름 정리 1에 따라 극대점에서의 시장점유율은 경쟁 차종의 투자 수준과 관계 없이 차종 고유의 특성에 따라 결정되기 때문이다. 다만, 내연기관시장에서와 달리, 수소자동차와의 경쟁 상황에서는 경쟁 차종의 상대적 효용이 작으므로 극대점의 투자 수준은 58,500개소에서 30,604개소로 크게 감소한다. 즉, 충전소외 효용에서

[15] 수소충전소의 최소 투자 수준은 정부의 수소충전소 전략적 배치 계획에서 제시한 목표값을 사용하였다. 해당 계획에서는 권역 별 인구 비중을 고려하여 충전 편의성을 개선하기 위한 균형 배분 계획을 수립하였다.

전기자동차가 수소자동차보다 우위에 있으므로 더 적은 충전소 수준만으로 동일한 시장점유율의 달성이 가능한 것을 의미한다.

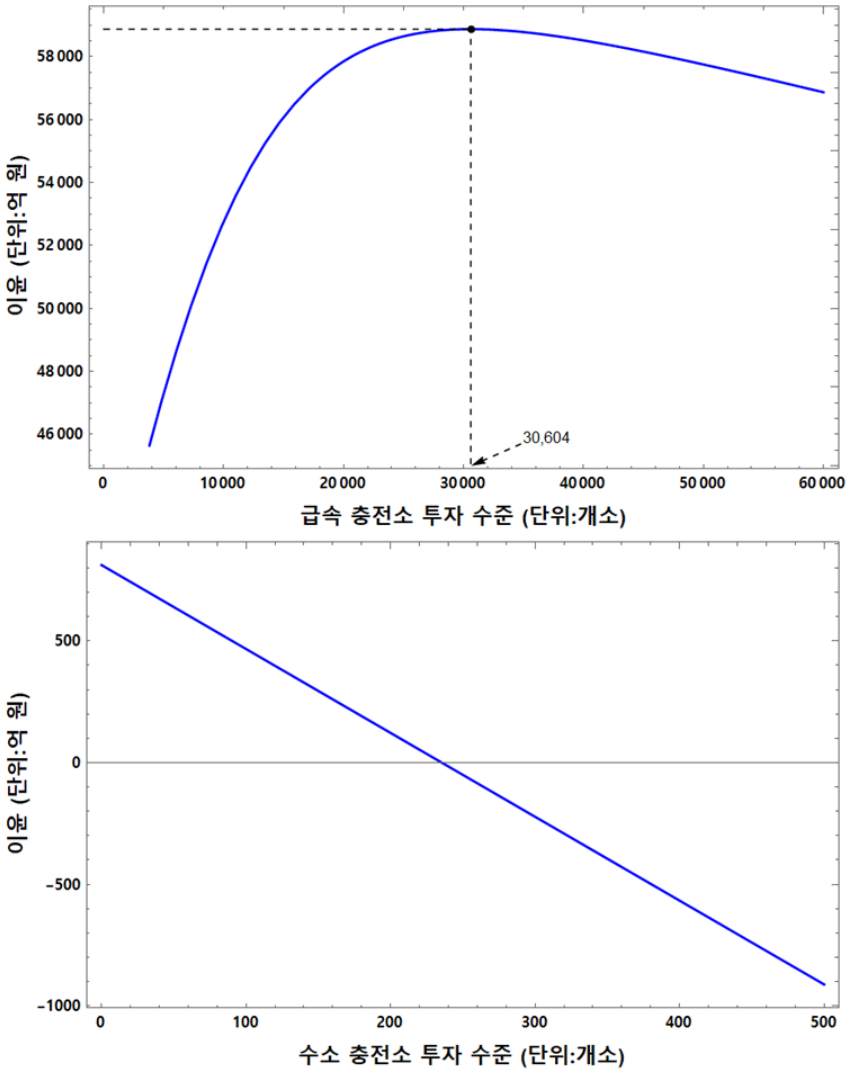

그림 22. 한국 시장의 친환경자동차 연료충전소 투자 균형

제 4 절 민감도 분석

내연기관자동차 시장에서 친환경자동차 연료 충전소 최적 투자 전략에 대한 민감도 분석은 주요 영향 요인인 연료 충전소 투자 비용, 보조금, 간접 네트워크 효과, 자동차 시장 규모에 대하여 전기자동차와 수소자동차 각각 진행하였다.

급속충전소 최적 투자 전략의 경우, 자동차 시장 규모가 가장 주요한 영향 요인으로 도출되었다. 이는 자동차 시장 규모가 지금보다 50% 작은 경우에도 정리 1을 만족하며, 극대점이 최적 투자 전략이기 때문이다. 따라서 따름 정리 1에 따라 항상 동일한 시장점유율을 가지기 때문에 자동차 시장 규모가 커질수록 이윤 또한 비례하여 커지게 된다.

보조금과 네트워크 효과, 급속충전소 투자 비용은 상대적으로 영향이 적은 것으로 도출되었다. 특히, 보조금의 경우 가장 적은 영향 요인으로 도출되었으며, 지금보다 50%가 적은 수준에서도 유사한 수준의 이윤을 얻을 수 있는 것으로 도출되었다. 이는 극대점이 최적 투자 전략으로 유지되는 경우, 보조금 감소에 의한 전기자동차의 효용 감소를 충전소 투자 증대로 보완할 수 있기 때문이다. 그러나 만약 최대 투자 수준을 고려하는 경우, 보조금의 감소는 보다 큰 이윤 감소로 이어진다.

네트워크 효과와 급속충전소 투자 비용의 경우, 상대적으로 얻는 수익에 비하여 충전소 투자 비용이 크지 않기 때문에 상대적으로 최적 투자 전략에서의 이윤에 미치는 영향이 적다. 예를 들어 기준값에서 급속 충전소의 최적 투자 수준 58,492개소에서 투자 비용은 5,428억으로 수익 6조 1712억원에 비하여 상대적으로 작다. 따름 정리 1에 따라 수익은 변화가 없으므로 급속충전소 투자 비용이 절반으로 감소하여도 이윤에 미치는 영향은 상대적으로 적다.

수소충전소 최적 투자 전략의 경우, 보조금이 가장 주요한 영향 요인으로 도출되었다. 이는 전체 민감도 분석 범위 내에서 최소 투자가 최적이기 때문에 수소자동차의 효용에서 충전소의 효용은 동일한 반면, 충전소외 효용에서 보조금의 증가에 따라 구매비용이 감소하여 수소자동차의 효용이 증가하기 때문이다.

급속충전소의 최적 투자 전략에서 가장 주요한 요인이었던 자동차 시장 규모는 상대적으로 적은 영향을 미치는 것으로 분석되었다. 이는 최소 투자 수준이 최적 전략이기 때문에 시장점유율이 낮으므로 수익 상한의 증가에 따른 이윤 증대가 많지 않기 때문이다.

수소충전소 투자 비용이 급속충전소 투자 비용에 비하여 매우 높지만 최소 투자가 최적 전략이기 때문에 수소 충전소 비용 또한 영향력이 낮을 것을 확인할 수 있다. 같은 이유로 네트워크 효과의 영향력도 낮은데, 급소충전소와는 달리 네트워크 효과가 커질수록 이윤이 감소하는 특징이 있다. 이는 최소 투자가 최적 전략이기 때문에 네트워크 효과가 커질수록 수소충전소가 적은 단점이 더욱 부각되기 때문이다.

친환경자동차간 경쟁에서 균형의 경우, 모든 민감도 분석 범위에서 기존의 균형에서 변화가 없는 것으로 도출되었다. 구체적으로 수소충전소는 항상 최소 투자인 310개소가 최적이며, 급속충전소는 그에 대한 극대점까지의 투자가 균형으로 도출되었다. 이는 급속충전소에 비하여 수소충전소의 투자 비용이 매우 크고, 전기자동차가 수소자동차에 비하여 충전소외 효용도 크기 때문이다. 따라서 수소자동차가 시장지배적 디자인이 되기 위해서는 수소자동차뿐만 아니라 수소충전소의 경제성 또한 개선이 필요하다.

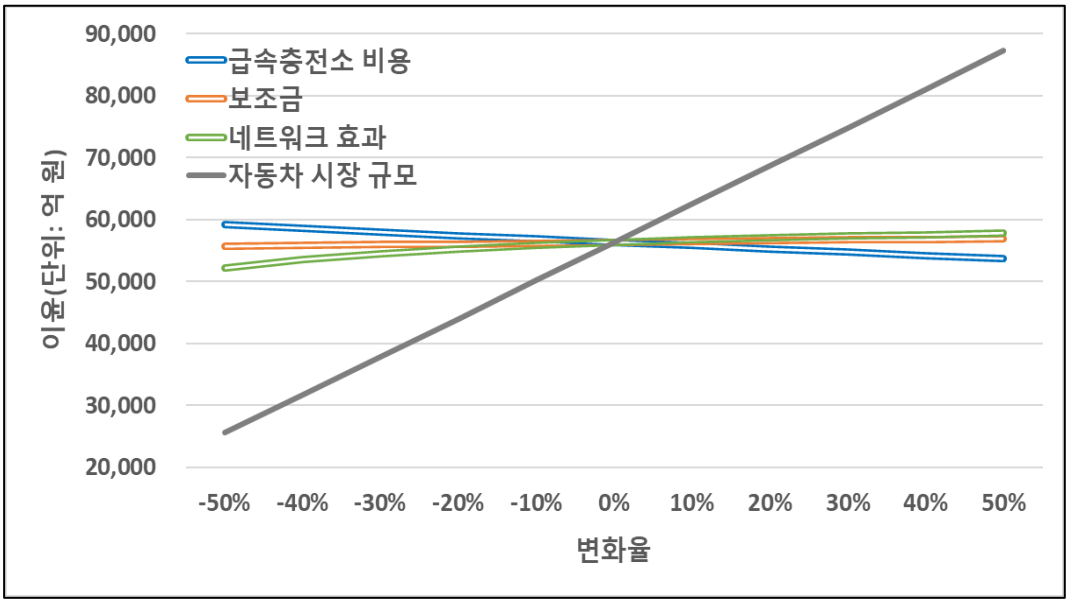

그림 23. 급속충전소 최적 투자 전략 민감도 분석 결과

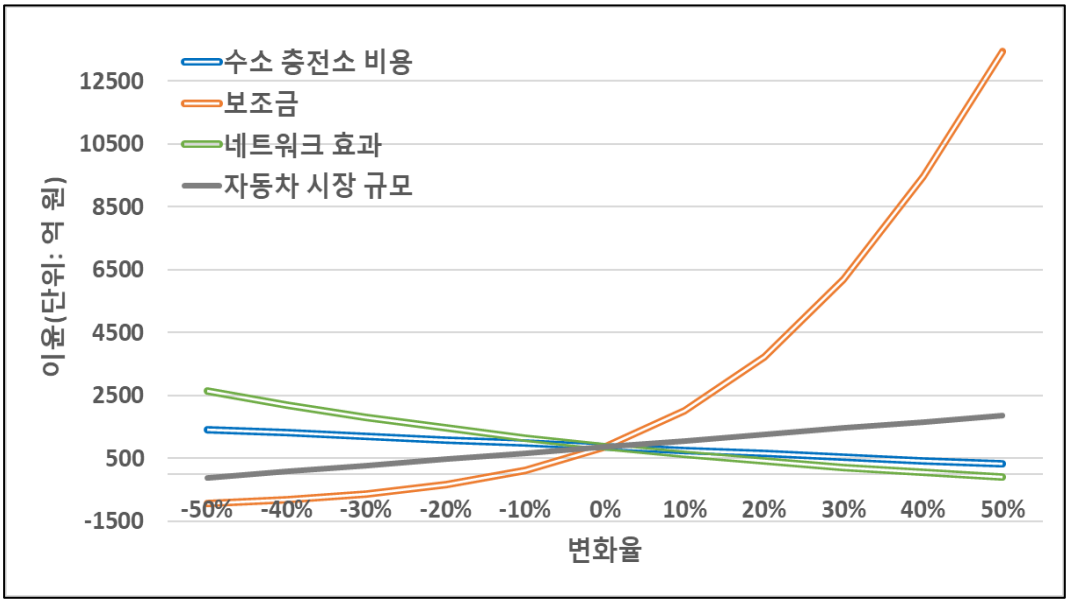

그림 24. 수소충전소 최적 투자 전략 민감도 분석 결과

제 6 장 결론

제 1 절 연구 결과 및 기여

1. 정부의 충전인프라 투자비용을 고려한 친환경자동차의 비용효과 분석

탄소중립을 위한 국제사회의 노력으로 세계 자동차 시장은 기존 내연기관자동차를 친환경자동차로 대체하는 구조적 개혁이 진행되고 있다. 현재 대안으로 제시되고 있는 전기, 수소, 하이브리드는 각자 장단점이 존재하며, 아직 시장 지배적 디자인이 나타나지는 않은 상황이다.

미래 친환경자동차 시장을 선점하기 위해서는 환경적 타당성과 함께 경제성이 전제되어야 한다. 그러나 세 가지 대안 모두 내연기관에 비해 경제성이 부족하며, 연료 충전 인프라도 부족하여 아직 시장 점유율이 낮은 상황이다. 특히, 수소자동차는 오직 한국과 일본에서만 실질적으로 도입되어 기존 연구에서 대안으로 주목받지 못하였다. 하지만 한국이나 일본 등 수소전기차 관련 정부 사업이 활발히 진행 중인 국가에서는 수소전기차가 자동차 시장에서 경쟁력을 가질 수 있으므로 수소자동차 또한 주요 대안으로 비용효과분석을 수행할 필요가 있다.

본 연구에서는 친환경자동차의 총보유비용과 전 과정 분석을 통한 온실가스 배출량을 기반으로 비용효과성을 도출하였다. 특히, 전기자동차 및 수소자동차는 연료 충전 인프라가 필수적이므로 기존 연구에서 포함하지 못하였던 충전 인프라 비용을 고려한 비용효과분석 모형을 개발하여, 가장 수소자동차가 많이 보급된 한국을 대상으로 실증분석을 수행하였다.

한국의 실증분석 결과에서 가장 친환경적인 대안은 현재 부생수소를 활용한

수소자동차인 것으로 분석되었다. 그러나 수소자동차는 전환비용 또한 가장 높은 것으로 조사되었다. 환경성과 경제성을 종합적으로 고려한 비용효과성은 하이브리드 자동차가 가장 우월한 것으로 평가되었다.

민감도 분석 결과, 하이브리드와 같은 수준의 비용 효율성에 도달하려면 수소자동차와 전기자동차는 각 72.3%, 45.3%의 구매 비용 절감이 필요하다. 또한 세 종류의 친환경자동차 모두 연간 주행거리가 증가할수록 비용효과성이 개선되는 것으로 나타났는데, 이는 상대적으로 연료비가 저렴하기 때문이다.

부생수소 생산이 제한적이기 때문에 한국 정부는 수소 생산 방법으로 증기 메탄 개질 방식을 고려하고 있다. 유통 방식으로는 자체 생산 방식과 대량 생산 기지를 구축 후 인근 수소충전소로 파이프라인을 구축하여 공급하는 방식이 검토되고 있다.

그러나 한국에서 검토되고 있는 수소충전소 유형들은 분명한 한계가 있다. 증기 메탄 개질 생산 방식은 높은 온실가스 배출로 인해 자체생산과 생산기지 구축 후 파이프라인 공급 방식 모두 현재 부생수소-튜브트레일러 방식에 비하여 비용효과적이지 않은 것으로 분석되었다. 가장 친환경적인 수소 생산 방식으로 인식되는 전기분해 방식도 현재 기술 수준에서는 전기자동차에 비해 경제성이 낮고 온실가스 배출 수준이 높은 것으로 보인다. 재생에너지로 생산된 전기만 사용하는 “RE100”의 경우에도, 수소자동차가 전기자동차보다 더 비용효과적이기 위해서는 수소 생산 효율성 또는 연비가 현재보다 최소 3.5배 향상되어야 하는 것으로 평가되었다.

현재 세계 자동차 시장은 저탄소 단계를 넘어 탄소 제로 사회(net-zero)를 목표로 구조적 개혁을 진행하고 있다. 그러나 무공해 자동차가 가능한 전기와

수소자동차는 비용효과성이 아직 하이브리드 자동차에 비하여 매우 낮은 수준이다. 따라서 전기와 수소자동차가 충분한 기술 발전을 이룰 때까지 하이브리드를 과도기적으로 사용하는 정책이 전략적으로 필요하다. 다만, 한국의 온실가스 감축 목표인 “2030년까지 2018년 대비 온실가스 40% 감축”을 달성하기 위해서는 100% 내연기관자동차 대체를 가정하더라도 내연기관 대비 32.2%의 온실가스를 감축하는 하이브리드만으로는 목표 달성이 불가능한 기술적 한계가 있다. 따라서 목표 달성을 위해서는 내연기관 대비 64.1%의 온실가스를 감축하는 수소자동차를 적절히 활용할 필요가 있다.

특히, 전기와 수소 자동차는 주행거리가 증가할수록 비용효과성이 빠르게 개선되는 특징이 있으므로, 시내 버스나 택시와 같이 장거리 운전을 하는 상업용으로 우선적으로 공급하는 전략을 고려할 필요가 있다. 다만, 수소자동차의 현재 수준의 비용효과성이 부생수소에 기반하고 있으므로 성급한 수소자동차의 보급 정책은 시장 내 비효율을 유발할 수 있으므로 신중하여야 한다. 한국 자동차 시장에 수소전기차를 추가로 공급하기 위해서는 증기 메탄 개질이나 전기분해 방식의 발전을 포함한 수소 생산 분야의 기술 발전이 전제되어야 할 것으로 보인다.

2. 소비자의 유가 불확실성을 고려한 친환경자동차 최적 투자 전략 분석

국제 사회는 내연기관자동차 시장을 친환경자동차로 전환하기 위한 노력을 하고 있다. 친환경자동차 시장으로의 전환은 소비자에게 기존 자동차 구매 대안과는 구조적으로 다른 유형의 대안을 비교하여야 하는 어려움을 유발한다.

친환경자동차는 비용 구조에 있어서 내연기관자동차에 비하여 상대적으로 구매 비용은 높고 연료 비용은 낮은 특징이 있다. 또한 동일한 연료 가격 불확실성을 공유하여 연비만 비교하면 되었던 내연기관자동차 간의 비용 비교에서 다른 연료를 사용하는 친환경자동차는 단순 연비의 비교로 비용을 비교하기에 어려움이 따른다.

본 연구에서는 유가 불확실성을 고려한 친환경자동차의 최적 투자 전략을 분석하였다. 특히, 기존 연구에서 주목받지 못한 수소자동차를 분석 대상으로 내연기관자동차와 비교하였으며, 수소자동차가 가장 많이 보급된 한국 시장을 대상으로 실증분석을 수행하였다.

한국 시장에서 전기자동차는 현재의 보조금 수준과 기술 진보율을 고려할 때, 향후 10년 내에 경제성을 달성할 수 있을 것으로 분석되었다. 특히, 전기자동차는 2026년 배터리 가격이 지금보다 약 48%감소한 수준에서 휘발유 가격이 1,605원/L일 때도 최적 전략으로 도출된다.

한국은 부생수소의 활용이 가능하여 상대적으로 수소충전 요금이 저렴하고, 정부 차원에서 수소자동차에 대한 정책적 지원이 활발하다. 그러나 이러한 한국 시장에서도 수소자동차가 경제성이 있으려면, 휘발유 가격이 약 2,300 원/L 이상 상승해야 하는 것으로 분석되었다. 과거 10년간 휘발유 가격 변동성을 고려하였을 때, 수소자동차가 경제성을 달성할 확률은 약 8.5%로 추정된다.

전기자동차의 경제성에 가장 주요한 영향을 미치는 것은 보조금과 구매가격, 연평균주행거리로 분석되었다. 보조금 또는 구매가격의 변화에 따라 전기자동차의 민감도가 크게 변화한다. 따라서 정부는 보조금 수준을 설정할 때 유가 수준과 기술 진보 수준을 기준으로 예산 제약하에서 구매 확률을 최대화시키는 보조금 수준을 정할 필요가 있다. 연평균주행거리는 7,500 Km 수준에서는 구매확률이 0으로 수렴하므로 전기자동차는 주행거리가 상대적으로 긴 특성을 지닌 소비자들을 대상으로 판매 전략을 도출할 필요가 있다. 또한 가정용 충전 비율도 주요한 영향 요인으로 도출되었다. 가정용 충전기가 상대적으로 저렴하다는 점을 고려할 때, 가정용 충전이 용이한 주거 환경을 조성하는 것이 전기자동차를 비용효과적으로 보급시킬 수 있는 방안으로 해석된다.

수소자동차의 경제성은 보조금 또는 구매가격이 가장 주요한 영향을 미치며 그 외의 요인은 큰 영향을 미치지 않는 것으로 분석되었다. 특히, 시장에 확산되기 위해서는 현재 수준 대비 보조금이 약 20% 이상 증가할 필요가 있다. 이는 구매가격의 관점에서는 수소자동차가 가격 경쟁력을 달성하기 위해서는 현재 구매 가격보다 약 10% 가격 저감이 요구되는 것을 의미한다.

전기, 수소 자동차의 경제성은 모두 주행거리가 길수록, 증가하는 특징이 있다. 따라서 주행거리가 긴 버스, 영업용 승용차, 택시 등에 우선적으로 공급될 필요가 있다.

3. 기업의 간접 네트워크 효과를 고려한 최적 충전소 투자 전략 분석

국제 사회의 노력에도 불구하고 아직 친환경자동차는 시장 점유율이 낮은 상황이다. 친환경자동차의 시장 확산이 더딘 이유는 경제적인 이유로는 높은 구매비용이, 비경제적인 요인으로는 연료 충전 인프라의 부족이 지적되고 있다.

그러나 아직 연료 충전 사업의 경우 수익성이 부족하여 투자가 이루어지지 못하고 있다. 한국의 경우, 수소 충전소 66개소 중 네 곳을 제외한 62개소가 모두 적자를 보고 있다.

연료 충전 인프라와 친환경자동차는 서로 간접 네트워크 관계에 있다. 따라서 친환경자동차 판매 기업이 직접 연료 충전소에 투자하는 경우, 간접 네트워크 효과에 의한 자동차 판매 수익까지 기대할 수 있어 상대적으로 투자 유인이 높다.

본 연구에서는 간접 네트워크 효과를 계량적으로 추정할 수 있는 이산선택모형을 기반으로 수요 모형을 수립하고 이를 기반으로 친환경자동차 제조기업의 최적 충전소 투자 전략을 분석하였다. 모형적 분석에서 내연기관자동차 시장에서의 연료 충전소 최적 투자 전략은 최소 수준 투자 또는 극대점 수준 투자에서만 최적해가 도출되는 것을 확인하였다. 만약 최대 투자 상한을 고려하는 경우 최대 투자가 최적이 되는 조건은 수익 상한 대비 최대투자금액 비중만큼 친환경자동차가 시장점유율을 달성 여부만 확인하면 되는 것으로 조사되었다.

친환경자동차간 경쟁 모형에서 균형은 승자 독식의 형태로 존재하는 것을 확인하였다. 기술경쟁에서 승자 독식은 지배적 디자인으로 해석될 수 있으므로, 친환경자동차에서 자동차의 경쟁력뿐만 아니라 충전소 투자의 경쟁력까지 고려하여 지배적 디자인이 결정될 것으로 보인다.

한국 시장을 대상으로 수행한 실증 분석의 경우, 전기자동차와 수소자동차 모두 현재 시장 상황 및 기술 수준에서 연료 충전소의 수익성이 존재하는 것으로 분석되었다. 그러나 최적 투자 전략의 경우, 전기자동차는 최대 투자 전략이 최적임에 비하여, 수소자동차는 최소 투자 전략이 최적인 것으로 도출되었다. 특히, 수소자동차는 아직 명제 1조차 달성하지 못하여 전체 구간에서 한계 이윤이 음수인 것으로 조사되었다. 수소충전소가 수익성이 존재하는 최대 한계는 간접 네트워크 수익을 포함하는 경우, 약 590개소, 간접 네트워크 효과를 포함하지 않는 경우, 약 215개소이다. 반면, 전기자동차는 간접 네트워크 효과의 포함여부와 관계없이 항상 최대 투자가 최적인 것으로 도출되었다.

한국 시장에서 전기자동차와 수소자동차의 경쟁 상황에서 연료 충전소 투자 균형은 전기자동차는 극대점까지 투자, 수소자동차는 최소 투자에서 균형이 도출되었다. 따라서 전기자동차가 지배적 디자인이 될 것으로 예상된다. 특히, 민감도 분석의 범위 모두에서 이러한 균형이 바뀌지 않는 것으로 확인되었다.

간접 네트워크 효과에 따른 최적 투자 전략은 급속충전소는 자동차 시장 크기, 수소충전소는 보조금이 가장 주요한 영향 요인으로 도출되었다. 이는 전기자동차는 최대 투자, 수소자동차는 최소 투자가 균형이기 때문이다. 특히, 수소충전소의 경우, 지금보다 수소충전소 투자 비용이 50%가 감소하여도 총이윤의 증대에 미치는 영향은 제한적임을 확인하였다.

4. 종합 결론

친환경자동차의 비용효과성 분석 연구에서 부생수소 기반 수소자동차가 가장 친환경적이지만 비용 또한 가장 크다는 것을 알 수 있다. 또한 전기자동차는 하이브리드 자동차와 유사한 수준으로 온실가스를 감축하지만 아직 경제성이 높지 않은 것을 알 수 있다. 따라서 현재 가장 비용 효과적인 하이브리드 자동차를 과도기적으로 사용할 필요가 있다.

그러나 하이브리드 자동차만으로는 정부의 온실가스 감축 목표 달성이 불가능하다. 따라서 필연적으로 전기자동차와 수소자동차의 활용이 요구된다. 두 자동차는 모두 주행 거리가 증가할수록 비용효과성이 개선되는 특징이 있으므로, 버스나 택시, 영업용 차량 등에 우선적으로 공급할 필요가 있다.

수소자동차의 경우, 부생수소를 기반으로 했을 때에만 비용효과적이며, 아직 증기 메탄 개질이나 수전해는 비용효과적이지 않다. 특히, 추후 내연기관자동차가 퇴출되었을 때, 전기자동차와 수소자동차의 경쟁이 승자 독식의 형태로 균형이 발생할 가능성이 높다. 따라서 수소자동차의 경우 제한적인 시장에서 활용하는 방안이 요구된다. 우리나라의 경우, 울산 등 일부 지역에서 주로 부생수소가 생산되고 있으며 해당 지역은 장거리 화물 트럭의 수요가 높다. 특히, 부생수소의 활용이 제한적이고 향후 일반 승용차 부분에서 전기자동차에 비하여 경쟁력이 약한 특징을 고려할 때, 부생수소 생산단지 주변의 장거리 화물트럭 위주의 수소자동차 공급을 고려할 필요가 있다. 해당 분야는 전기자동차의 경우 배터리 무게에 따라 대형 화물트럭에 적용하는 경우 연비가 떨어지고 아직 전기자동차는 한번 충전으로 주행할 수 있는 최대 거리가 낮기 때문에 수소자동차가 비용효과적인 분야이다. 또한 수소충전소의 막대한 투자 비용에 따라 일반 대중을

대상으로 경쟁력 있는 충전 편의성을 제공하기 어려우므로 소수의 충전소로 대량의 소비가 발생하는 장거리 화물트럭 위주의 공급은 충전소 투자 관점에서도 타당성이 존재한다.

친환경자동차의 확산이 증가할수록, 정부의 보조금 지급에 대한 재정적 부담 또한 커지고 있다. 소비자의 전기자동차 최적 투자 전략 분석 결과에서 휘발유 가격이 증가하는 경우, 보조금의 수준을 낮추어도 전기자동차가 경제성이 존재한다는 점을 보였다. 따라서 보조금의 수준은 유가의 변동성에 맞추어 가감할 필요가 있다.

제 2 절 후속 연구

후속 연구에서는 정부와 소비자, 기업의 최적 투자 전략을 종합하여 각 주체의 의사결정에 따른 영향 관계를 분석할 필요가 있다. 정부는 비용효과성을 기반으로 하이브리드, 전기, 수소자동차의 보조금 수준을 결정한다. 특히, 친환경자동차 시장 확산에 따라 정부의 보조금 지급에 의한 재정 부담을 고려하여 예산 제약을 고려할 필요가 있다. 또한 차급, 지역, 소비자 특성에 따라 비용효과성이 달라지므로 이러한 시장을 구분할 필요가 있다.

소비자는 경제성에 근거하여 최적 투자 의사결정을 분석하였다. 하지만 향후 연구에서는 소비자의 효용을 최대화하는 최적 투자 의사결정을 분석할 필요가 있다. 특히, 불확실한 상황에서 소비자는 투자를 연기할 수 있으므로 정적(static)한 분석 보다는 동적인 분석을 도입하여 분석할 필요가 있다. 현재 실물옵션을 통한 최적 투자 전략 분석은 목적함수가 효용인 경우, 사용되기 어려운 한계가 있다. 따라서 로짓 모형에 기반한 최대지불의사액을 통하여 효용의 수준을 비용으로 환산하여 간접적으로 반영하는 방법을 도입할 필요가 있다.

기업은 앞서 정부가 결정한 최적 보조금 수준과 소비자의 최적 의사결정을 수요 함수로 받아들여서 본 연구와 유사한 최적 충전소 투자 수준을 도출할 필요가 있다. 그러나 후속 연구에서는 동시에 자동차 판매 가격까지 의사결정 변수로 도입하여 분석할 필요가 있다.

상기와 같은 시장 참여 주체의 목적 함수를 기반으로 세 참여 주체의 균형 전략은 게임 이론을 통하여 도출될 수 있다. 이미 우리는 친환경자동차 간의 경쟁에서 승자 독식의 형태로 균형이 존재함을 발견하였다. 따라서 시장 구분에 따라 미리 최적 대안을 정하여 둔다면 균형을 보다 쉽게 도출할 수 있다.

세 참여 주체의 의사결정을 동시에 고려하는 경우, 개별적으로 분석한 현재의 연구에 비하여 보다 각 주체 간의 영향 관계를 잘 반영할 수 있다는 장점이 있다. 본 연구에서는 정부의 보조금 수준이나 기업의 충전소 투자 수준, 소비자의 소비 행태를 개별적으로 민감도 분석 등으로 다루었지만, 실제 세 주체의 목적함수를 기반으로 균형 의사결정을 도출한다면 개별 단위에서의 분석 결과와 다른 결과가 나올 수 있다.

개별 연구에서의 최적 투자 전략은 주체간 상호작용을 고려하는 경우 균형이 되지 못할 수 있다. 본 연구에서 도출한 최적 전략은 다른 주체의 의사결정이 고정된 상수로 가정하여 도출된 결론이다. 따라서 어떤 한 주체의 최적 전략에 따라 다른 주체의 의사결정이 바뀐다면 더 이상 해당 전략은 균형이 아니게 된다. 따라서 추후 연구에서는 균형 전략에 대한 연구가 필요하다.

부록

1. 무위험이자율과 유가 변동성 시나리오에 따른 소비자의 최적 친환경자동차 투자 전략

소비자의 최적 친환경자동차 투자 전략은 가정하고 있는 주요 파라미터인 무위험이자율과 유가 변동성 수준에 따라 결과에 큰 영향을 받는다. 특히, 최근 기준 금리의 변화에 따라 국채 금리 또한 큰 변화를 보이고 있는 상황과 본 연구에서 사용한 지난 10년 유가 데이터를 다른 기간의 데이터를 사용하였을 때 유가 변동률 추정값에서 큰 변화를 보이는 점을 고려할 때 주요 무위험 이자율 및 유가 변동성 시나리오에 대한 추가 분석이 필요하다.

현재 확보 가능한 채권 수익률 및 보통휘발유 가격 데이터는 각각 2000년, 1997년부터 데이터가 존재한다. 따라서 본 시나리오 분석에서는 본 연구에서 사용한 10년과 더불어 지난 20년 데이터까지 활용하여 분석하였다.

2001년 1월부터 2021년 12월까지 지난 20년간 한국의 10년 채권 수익률은 최소 1.27%에서 최대 7.85%까지 변화하였다. 지난 20년 수익률 평균은 3.90%로 본 분석에서 사용한 10년 평균 수익률 2.74%보다 다소 높다. 반면, 지난 20년 보통휘발유 가격은 리터 당 최소 1,220원에서 최대 2,059원까지 변화하였으며, 20년 평균 가격은 리터 당 1,559원으로 본 연구에서 사용한 1,466원보다 다소 높다. 지난 20년 유가 변동성은 평균 1.4%, 표준편차 7.9%로 기존 평균 2.0%, 표준편차 9.1%에 비하여 평균과 표준편차 모두 다소 작다.

본 시나리오 분석에서는 유가 변동성 추정 데이터 기간을 10년, 20년으로 구분하고 무위험이자율은 최소, 평균, 최대값을 사용하여 총 6개의 시나리오를 구성하여 분석하였다.

그림 25. 지난 20년 한국 10년 국채 수익률 추이

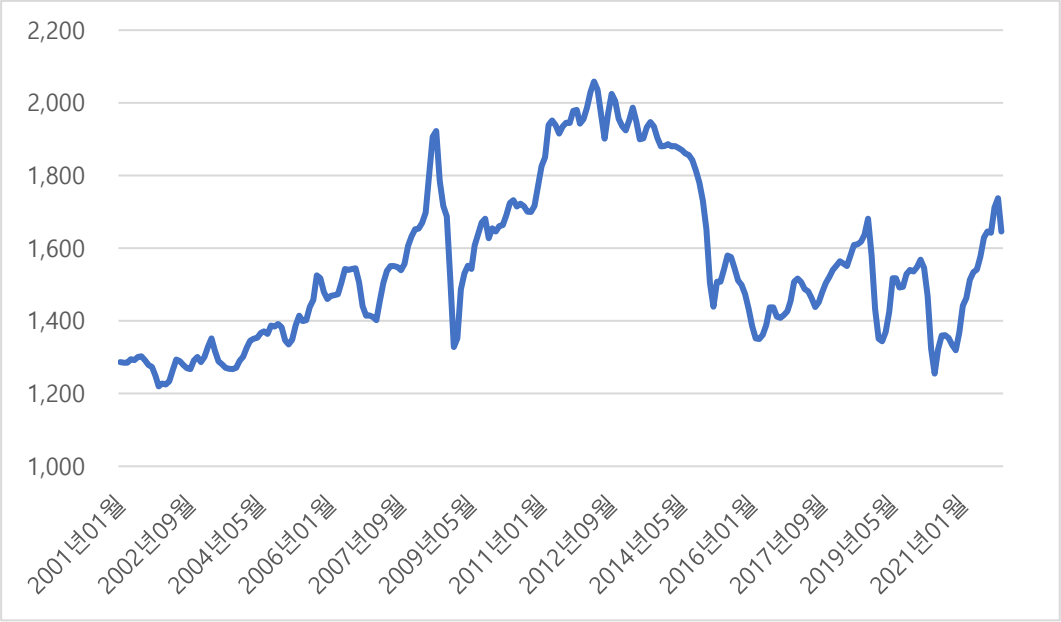

그림 26. 지난 20년 한국 보통 휘발유 가격 추이

구체적으로 유가 변동성 추정 데이터 기간을 10년으로 했을 때, 무위험이자율을 최소, 평균, 최대값을 사용한 경우를 각각 시나리오 1, 2, 3으로 설정하였으며, 유가 변동성 추정 데이터 기간을 20년으로 했을 때의 무위험이자율의 최소, 평균, 최대값을 사용한 경우를 각각 시나리오 4, 5, 6으로 구분하였다.

6개 시나리오는 구매 확률이나, 최적 투자 노드의 정도의 차이는 있지만 전반적으로 본 연구의 결과와 유사한 결과를 보여준다. 전기자동차의 경우, 가장 구매확률이 낮은 시나리오는 무위험이자율을 지난 20년 최소값으로, 유가 변동성은 지난 10년 데이터로 추정한 시나리오 1이다. 시나리오 1에서 전기자동차의 구매 확률은 45.6%로 본 연구의 70.2%에 비하여 24.6%p 낮다. 해당 시나리오에서 수소자동차의 구매 확률은 0%로 본 연구의 8.5%보다 낮다.

수소자동차는 6개 시나리오에서 전반적으로 구매 확률이 낮게 도출되었다. 대부분의 경우 0%의 구매 확률이 도출되어 경제성이 없는 것으로 도출되었으며 구매확률이 가장 높은 시나리오는 시나리오 3으로 5.1%로 도출되었다. 따라서 본 연구의 결과와 유사하게 수소자동차가 비용 경쟁력을 가지기 위해서는 배터리 기술 진보보다 빠른 기술 진보가 요구된다.

표 13. 무위험이자율과 유가 변동성 추정 데이터 기간에 따른 시나리오 구분

	시나리오					
	1	2	3	4	5	6
무위험이자율	1.27%	3.9%	7.85%	1.27%	3.9%	7.85%
유가 변동성 추정 데이터 기간	지난 10년(2011-2021)			지난 20년(2001-2021)		

표 14. 전기자동차 투자 옵션 가치(시나리오 1: 무위험이자율 1.27%, 지난 10년 유가 변동성)

하락횟수	옵션	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030
	전기자동차	7,242	6,612	5,985	5,355	4,716	4,061	3,382	2,670	1,918	1,114
0	내연기관자동차	7,122	6,679	6,201	5,680	5,111	4,486	3,796	3,031	2,179	1,226
	투자 연기	6,955	6,509	5,982	5,406	4,839	4,264	3,676	3,068	2,433	1,522
			6,612	5,985	5,355	4,716	4,061	3,382	2,670	1,918	1,114
1			6,415	5,943	5,434	4,880	4,275	3,611	2,879	2,068	1,165
			6,341	5,882	5,346	4,783	4,196	3,594	2,969	2,314	1,379
				5,985	5,355	4,716	4,061	3,382	2,670	1,918	1,114
2				5,729	5,228	4,687	4,099	3,457	2,753	1,975	1,115
				5,700	5,219	4,687	4,116	3,515	2,878	2,197	1,260
					5,355	4,716	4,061	3,382	2,670	1,918	1,114
3					5,056	4,526	3,952	3,328	2,647	1,898	1,072
					5,039	4,535	3,992	3,406	2,770	2,076	1,160
						4,716	4,061	3,382	2,670	1,918	1,114
4						4,392	3,830	3,221	2,559	1,834	1,037
						4,390	3,854	3,278	2,654	1,975	1,077
							4,061	3,382	2,670	1,918	1,114
5							3,728	3,132	2,485	1,780	1,008
							3,740	3,171	2,557	1,875	1,008
								3,382	2,670	1,918	1,114
6								3,057	2,424	1,736	983
								3,082	2,473	1,775	950
									2,670	1,918	1,114
7									2,373	1,698	963
									2,384	1,691	902
										1,918	1,114
8										1,667	946
										1,621	862
											1,114
9											932
											828

표 15. 수소자동차 투자 옵션 가치(시나리오 1: 무위험이자율 1.27%, 지난 10년 유가 변동성)

하락횟수	옵션	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030
	수소자동차	8,266	7,513	6,770	6,031	5,288	4,534	3,763	2,965	2,134	1,258
0	내연기관자동차	7,122	6,679	6,201	5,680	5,111	4,486	3,796	3,031	2,179	1,226
	투자 연기	7,041	6,646	6,197	5,693	5,165	4,573	3,929	3,251	2,517	1,522
			7,513	6,770	6,031	5,288	4,534	3,763	2,965	2,134	1,258
1			6,415	5,943	5,434	4,880	4,275	3,611	2,879	2,068	1,165
			6,367	5,929	5,435	4,916	4,354	3,743	3,076	2,342	1,379
				6,770	6,031	5,288	4,534	3,763	2,965	2,134	1,258
2				5,729	5,228	4,687	4,099	3,457	2,753	1,975	1,115
				5,700	5,219	4,708	4,157	3,559	2,909	2,197	1,260
					6,031	5,288	4,534	3,763	2,965	2,134	1,258
3					5,056	4,526	3,952	3,328	2,647	1,898	1,072
					5,039	4,535	3,992	3,406	2,770	2,076	1,160
						5,288	4,534	3,763	2,965	2,134	1,258
4						4,392	3,830	3,221	2,559	1,834	1,037
						4,390	3,854	3,278	2,654	1,975	1,077
							4,534	3,763	2,965	2,134	1,258
5							3,728	3,132	2,485	1,780	1,008
							3,740	3,171	2,557	1,875	1,008
								3,763	2,965	2,134	1,258
6								3,057	2,424	1,736	983
								3,082	2,473	1,775	950
									2,965	2,134	1,258
7									2,373	1,698	963
									2,384	1,691	902
										2,134	1,258
8										1,667	946
										1,621	862
											1,258
9											932
											828

표 16. 전기자동차 투자 옵션 가치(시나리오 2: 무위험이자율 3.90%, 지난 10년 유가 변동성)

하락횟수	옵션	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030
	전기자동차	6,863	6,324	5,780	5,226	4,652	4,051	3,412	2,726	1,980	1,159
0	내연기관자동차	6,774	6,406	5,997	5,541	5,029	4,452	3,800	3,060	2,218	1,257
	투자 연기	6,417	6,095	5,702	5,223	4,725	4,207	3,661	3,078	2,448	1,522
			6,324	5,780	5,226	4,652	4,051	3,412	2,726	1,980	1,159
1			6,141	5,740	5,294	4,797	4,241	3,615	2,908	2,107	1,196
			5,929	5,580	5,156	4,669	4,139	3,579	2,979	2,325	1,379
				5,780	5,226	4,652	4,051	3,412	2,726	1,980	1,159
2				5,525	5,088	4,604	4,065	3,461	2,782	2,015	1,146
				5,402	5,023	4,583	4,059	3,496	2,885	2,205	1,260
					5,226	4,652	4,051	3,412	2,726	1,980	1,159
3					4,917	4,443	3,918	3,332	2,676	1,938	1,103
					4,834	4,417	3,927	3,380	2,769	2,084	1,160
						4,652	4,051	3,412	2,726	1,980	1,159
4						4,309	3,795	3,225	2,588	1,873	1,068
						4,262	3,789	3,252	2,653	1,973	1,077
							4,051	3,412	2,726	1,980	1,159
5							3,693	3,135	2,514	1,820	1,039
							3,666	3,143	2,551	1,859	1,008
								3,412	2,726	1,980	1,159
6								3,061	2,453	1,775	1,014
								3,031	2,445	1,758	950
									2,726	1,980	1,159
7									2,402	1,737	994
									2,335	1,674	902
										1,980	1,159
8										1,706	977
										1,604	862
											1,159
9											963
											828

표 17. 수소자동차 투자 옵션 가치(시나리오 2: 무위험이자율 3.90%, 지난 10년 유가 변동성)

하락횟수	옵션	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030
0	수소자동차	7,765	7,121	6,479	5,830	5,166	4,479	3,760	2,997	2,181	1,296
	내연기관자동차	6,774	6,406	5,997	5,541	5,029	4,452	3,800	3,060	2,218	1,257
	투자 연기	6,546	6,267	5,929	5,518	5,050	4,499	3,896	3,250	2,524	1,522
1			7,121	6,479	5,830	5,166	4,479	3,760	2,997	2,181	1,296
			6,141	5,740	5,294	4,797	4,241	3,615	2,908	2,107	1,196
			5,977	5,649	5,257	4,801	4,289	3,717	3,075	2,350	1,379
2				6,479	5,830	5,166	4,479	3,760	2,997	2,181	1,296
				5,525	5,088	4,604	4,065	3,461	2,782	2,015	1,146
				5,407	5,029	4,593	4,091	3,533	2,908	2,205	1,260
3					5,830	5,166	4,479	3,760	2,997	2,181	1,296
					4,917	4,443	3,918	3,332	2,676	1,938	1,103
					4,834	4,417	3,927	3,380	2,769	2,084	1,160
4						5,166	4,479	3,760	2,997	2,181	1,296
						4,309	3,795	3,225	2,588	1,873	1,068
						4,262	3,789	3,252	2,653	1,973	1,077
5							4,479	3,760	2,997	2,181	1,296
							3,693	3,135	2,514	1,820	1,039
							3,666	3,143	2,551	1,859	1,008
6								3,760	2,997	2,181	1,296
								3,061	2,453	1,775	1,014
								3,031	2,445	1,758	950
7									2,997	2,181	1,296
									2,402	1,737	994
									2,335	1,674	902
8										2,181	1,296
										1,706	977
										1,604	862
9											1,296
											963
											828

표 18. 전기자동차 투자 옵션 가치(시나리오 3: 무위험이자율 7.85%, 지난 10년 유가 변동성)

하락횟수	옵션	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030
	전기자동차	6,403	5,964	5,517	5,052	4,560	4,029	3,447	2,798	2,064	1,222
0	내연기관자동차	6,351	6,067	5,740	5,361	4,921	4,407	3,807	3,103	2,276	1,304
	투자 연기	5,690	5,513	5,274	4,956	4,555	4,112	3,626	3,082	2,464	1,522
			5,964	5,517	5,052	4,560	4,029	3,447	2,798	2,064	1,222
1			5,803	5,483	5,115	4,689	4,196	3,622	2,951	2,165	1,243
			5,352	5,136	4,852	4,495	4,044	3,544	2,983	2,343	1,379
				5,517	5,052	4,560	4,029	3,447	2,798	2,064	1,222
2				5,268	4,909	4,496	4,020	3,467	2,824	2,073	1,192
				4,973	4,715	4,396	3,980	3,470	2,897	2,215	1,260
					5,052	4,560	4,029	3,447	2,798	2,064	1,222
3					4,738	4,335	3,873	3,339	2,719	1,996	1,150
					4,518	4,218	3,831	3,339	2,765	2,091	1,160
						4,560	4,029	3,447	2,798	2,064	1,222
4						4,201	3,751	3,231	2,630	1,931	1,115
						4,034	3,669	3,208	2,646	1,955	1,077
							4,029	3,447	2,798	2,064	1,222
5							3,648	3,142	2,557	1,878	1,085
							3,494	3,054	2,508	1,834	1,008
								3,447	2,798	2,064	1,222
6								3,067	2,496	1,833	1,061
								2,901	2,376	1,733	950
									2,798	2,064	1,222
7									2,444	1,796	1,041
									2,266	1,649	902
										2,064	1,222
8										1,765	1,023
										1,579	862
											1,222
9											1,009
											828

표 19. 수소자동차 투자 옵션 가치(시나리오 3: 무위험이자율 7.85%, 지난 10년 유가 변동성)

하락횟수	옵션	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030
	수소자동차	7,160	6,638	6,110	5,569	5,002	4,401	3,750	3,037	2,244	1,349
0	내연기관자동차	6,351	6,067	5,740	5,361	4,921	4,407	3,807	3,103	2,276	1,304
	투자 연기	5,884	5,733	5,521	5,236	4,870	4,384	3,841	3,243	2,535	1,522
			6,638	6,110	5,569	5,002	4,401	3,750	3,037	2,244	1,349
1			5,803	5,483	5,115	4,689	4,196	3,622	2,951	2,165	1,243
			5,444	5,242	4,975	4,638	4,195	3,677	3,071	2,360	1,379
				6,110	5,569	5,002	4,401	3,750	3,037	2,244	1,349
2				5,268	4,909	4,496	4,020	3,467	2,824	2,073	1,192
				4,984	4,728	4,411	3,998	3,493	2,904	2,215	1,260
					5,569	5,002	4,401	3,750	3,037	2,244	1,349
3					4,738	4,335	3,873	3,339	2,719	1,996	1,150
					4,518	4,218	3,831	3,339	2,765	2,091	1,160
						5,002	4,401	3,750	3,037	2,244	1,349
4						4,201	3,751	3,231	2,630	1,931	1,115
						4,034	3,669	3,208	2,646	1,955	1,077
							4,401	3,750	3,037	2,244	1,349
5							3,648	3,142	2,557	1,878	1,085
							3,494	3,054	2,508	1,834	1,008
								3,750	3,037	2,244	1,349
6								3,067	2,496	1,833	1,061
								2,901	2,376	1,733	950
									3,037	2,244	1,349
7									2,444	1,796	1,041
									2,266	1,649	902
										2,244	1,349
8										1,765	1,023
										1,579	862
											1,349
9											1,009
											828

표 20. 전기자동차 투자 옵션 가치(시나리오 4: 무위험이자율 1.27%, 지난 20년 유가 변동성)

하락횟수	옵션	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030
	전기자동차	7,242	6,612	5,985	5,355	4,716	4,061	3,382	2,670	1,918	1,114
0	내연기관자동차	7,122	6,661	6,165	5,629	5,047	4,414	3,721	2,959	2,119	1,189
	투자 연기	6,965	6,507	5,976	5,396	4,824	4,241	3,642	3,021	2,369	1,436
			6,612	5,985	5,355	4,716	4,061	3,382	2,670	1,918	1,114
1			6,431	5,943	5,419	4,853	4,239	3,569	2,836	2,030	1,141
			6,361	5,887	5,344	4,776	4,185	3,575	2,941	2,268	1,322
				5,985	5,355	4,716	4,061	3,382	2,670	1,918	1,114
2				5,754	5,240	4,687	4,089	3,439	2,730	1,954	1,100
				5,728	5,232	4,693	4,113	3,505	2,860	2,164	1,225
					5,355	4,716	4,061	3,382	2,670	1,918	1,114
3					5,087	4,545	3,961	3,328	2,641	1,889	1,065
					5,072	4,555	4,002	3,406	2,762	2,062	1,143
						4,716	4,061	3,382	2,670	1,918	1,114
4						4,424	3,852	3,234	2,564	1,834	1,035
						4,425	3,879	3,293	2,661	1,975	1,072
							4,061	3,382	2,670	1,918	1,114
5							3,759	3,153	2,498	1,787	1,010
							3,775	3,197	2,574	1,889	1,012
								3,382	2,670	1,918	1,114
6								3,084	2,443	1,746	988
								3,115	2,501	1,799	960
									2,670	1,918	1,114
7									2,395	1,712	969
									2,426	1,721	916
										1,918	1,114
8										1,683	953
										1,655	879
											1,114
9											940
											847

표 21. 수소자동차 투자 옵션 가치(시나리오 4: 무위험이자율 1.27%, 지난 20년 유가 변동성)

하락횟수	옵션	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030
	수소자동차	8,266	7,513	6,770	6,031	5,288	4,534	3,763	2,965	2,134	1,258
0	내연기관자동차	7,122	6,661	6,165	5,629	5,047	4,414	3,721	2,959	2,119	1,189
	투자 연기	7,042	6,627	6,160	5,639	5,096	4,510	3,874	3,181	2,423	1,436
			7,513	6,770	6,031	5,288	4,534	3,763	2,965	2,134	1,258
1			6,431	5,943	5,419	4,853	4,239	3,569	2,836	2,030	1,141
			6,384	5,929	5,420	4,887	4,313	3,693	3,018	2,283	1,322
				6,770	6,031	5,288	4,534	3,763	2,965	2,134	1,258
2				5,754	5,240	4,687	4,089	3,439	2,730	1,954	1,100
				5,728	5,232	4,708	4,145	3,538	2,880	2,164	1,225
					6,031	5,288	4,534	3,763	2,965	2,134	1,258
3					5,087	4,545	3,961	3,328	2,641	1,889	1,065
					5,072	4,555	4,002	3,406	2,762	2,062	1,143
						5,288	4,534	3,763	2,965	2,134	1,258
4						4,424	3,852	3,234	2,564	1,834	1,035
						4,425	3,879	3,293	2,661	1,975	1,072
							4,534	3,763	2,965	2,134	1,258
5							3,759	3,153	2,498	1,787	1,010
							3,775	3,197	2,574	1,889	1,012
								3,763	2,965	2,134	1,258
6								3,084	2,443	1,746	988
								3,115	2,501	1,799	960
									2,965	2,134	1,258
7									2,395	1,712	969
									2,426	1,721	916
										2,134	1,258
8										1,683	953
										1,655	879
											1,258
9											940
											847

표 22. 전기자동차 투자 옵션 가치(시나리오 5: 무위험이자율 3.90%, 지난 20년 유가 변동성)

하락횟수	옵션	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030
0	전기자동차	6,863	6,324	5,780	5,226	4,652	4,051	3,412	2,726	1,980	1,159
	내연기관자동차	6,774	6,387	5,961	5,489	4,965	4,380	3,724	2,988	2,158	1,220
	투자 연기	6,428	6,093	5,693	5,214	4,710	4,184	3,627	3,031	2,384	1,436
1			6,324	5,780	5,226	4,652	4,051	3,412	2,726	1,980	1,159
			6,157	5,740	5,280	4,770	4,204	3,572	2,865	2,069	1,172
			5,953	5,590	5,158	4,662	4,127	3,560	2,951	2,281	1,322
2				5,780	5,226	4,652	4,051	3,412	2,726	1,980	1,159
				5,551	5,101	4,604	4,054	3,443	2,760	1,993	1,131
				5,435	5,041	4,590	4,058	3,488	2,869	2,171	1,225
3					5,226	4,652	4,051	3,412	2,726	1,980	1,159
					4,948	4,463	3,927	3,332	2,670	1,929	1,096
					4,871	4,439	3,936	3,380	2,761	2,069	1,143
4						4,652	4,051	3,412	2,726	1,980	1,159
						4,342	3,817	3,238	2,593	1,873	1,066
						4,302	3,814	3,267	2,660	1,975	1,072
5							4,051	3,412	2,726	1,980	1,159
							3,724	3,157	2,527	1,826	1,040
							3,707	3,171	2,573	1,873	1,012
6								3,412	2,726	1,980	1,159
								3,088	2,472	1,786	1,019
								3,078	2,485	1,782	960
7									2,726	1,980	1,159
									2,424	1,751	1,000
									2,383	1,705	916
8										1,980	1,159
										1,722	984
										1,638	879
9											1,159
											971
											847

표 23. 수소자동차 투자 옵션 가치(시나리오 1: 무위험이자율 3.90%, 지난 20년 유가 변동성)

하락횟수	옵션	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030
0	수소자동차	7,765	7,121	6,479	5,830	5,166	4,479	3,760	2,997	2,181	1,296
	내연기관자동차	6,774	6,387	5,961	5,489	4,965	4,380	3,724	2,988	2,158	1,220
	투자 연기	6,547	6,248	5,891	5,464	4,981	4,445	3,847	3,180	2,430	1,436
1			7,121	6,479	5,830	5,166	4,479	3,760	2,997	2,181	1,296
			6,157	5,740	5,280	4,770	4,204	3,572	2,865	2,069	1,172
			5,995	5,649	5,242	4,771	4,248	3,666	3,017	2,291	1,322
2				6,479	5,830	5,166	4,479	3,760	2,997	2,181	1,296
				5,551	5,101	4,604	4,054	3,443	2,760	1,993	1,131
				5,437	5,043	4,593	4,080	3,512	2,879	2,171	1,225
3					5,830	5,166	4,479	3,760	2,997	2,181	1,296
					4,948	4,463	3,927	3,332	2,670	1,929	1,096
					4,871	4,439	3,936	3,380	2,761	2,069	1,143
4						5,166	4,479	3,760	2,997	2,181	1,296
						4,342	3,817	3,238	2,593	1,873	1,066
						4,302	3,814	3,267	2,660	1,975	1,072
5							4,479	3,760	2,997	2,181	1,296
							3,724	3,157	2,527	1,826	1,040
							3,707	3,171	2,573	1,873	1,012
6								3,760	2,997	2,181	1,296
								3,088	2,472	1,786	1,019
								3,078	2,485	1,782	960
7									2,997	2,181	1,296
									2,424	1,751	1,000
									2,383	1,705	916
8										2,181	1,296
										1,722	984
										1,638	879
9											1,296
											971
											847

표 24. 전기자동차 투자 옵션 가치(시나리오 6: 무위험이자율 7.85%, 지난 20년 유가 변동성)

하락횟수	옵션	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030
0	전기자동차	6,403	5,964	5,517	5,052	4,560	4,029	3,447	2,798	2,064	1,222
	내연기관자동차	6,351	6,049	5,704	5,310	4,857	4,335	3,731	3,031	2,216	1,267
	투자 연기	5,691	5,504	5,256	4,936	4,539	4,089	3,593	3,035	2,399	1,436
1			5,964	5,517	5,052	4,560	4,029	3,447	2,798	2,064	1,222
			5,819	5,483	5,100	4,662	4,159	3,579	2,907	2,128	1,219
			5,373	5,145	4,852	4,492	4,033	3,525	2,955	2,301	1,322
2				5,517	5,052	4,560	4,029	3,447	2,798	2,064	1,222
				5,294	4,921	4,496	4,010	3,449	2,802	2,052	1,178
				5,014	4,741	4,409	3,984	3,468	2,875	2,181	1,225
3					5,052	4,560	4,029	3,447	2,798	2,064	1,222
					4,768	4,355	3,882	3,339	2,712	1,987	1,143
					4,559	4,244	3,843	3,339	2,757	2,079	1,143
4						4,560	4,029	3,447	2,798	2,064	1,222
						4,234	3,773	3,244	2,636	1,931	1,113
						4,085	3,703	3,226	2,656	1,955	1,072
5							4,029	3,447	2,798	2,064	1,222
							3,679	3,164	2,570	1,884	1,087
							3,555	3,099	2,536	1,848	1,012
6								3,447	2,798	2,064	1,222
								3,095	2,514	1,844	1,065
								2,957	2,416	1,758	960
7									2,798	2,064	1,222
									2,467	1,809	1,047
									2,313	1,680	916
8										2,064	1,222
										1,780	1,031
										1,614	879
9											1,222
											1,017
											847

표 25. 수소자동차 투자 옵션 가치(시나리오 6: 무위험이자율 7.85%, 지난 20년 유가 변동성)

하락횟수	옵션	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030
	수소자동차	7,160	6,638	6,110	5,569	5,002	4,401	3,750	3,037	2,244	1,349
0	내연기관자동차	6,351	6,049	5,704	5,310	4,857	4,335	3,731	3,031	2,216	1,267
	투자 연기	5,896	5,725	5,496	5,196	4,821	4,351	3,807	3,176	2,440	1,436
			6,638	6,110	5,569	5,002	4,401	3,750	3,037	2,244	1,349
1			5,819	5,483	5,100	4,662	4,159	3,579	2,907	2,128	1,219
			5,463	5,242	4,958	4,607	4,154	3,626	3,013	2,301	1,322
				6,110	5,569	5,002	4,401	3,750	3,037	2,244	1,349
2				5,294	4,921	4,496	4,010	3,449	2,802	2,052	1,178
				5,015	4,743	4,411	3,986	3,471	2,875	2,181	1,225
					5,569	5,002	4,401	3,750	3,037	2,244	1,349
3					4,768	4,355	3,882	3,339	2,712	1,987	1,143
					4,559	4,244	3,843	3,339	2,757	2,079	1,143
						5,002	4,401	3,750	3,037	2,244	1,349
4						4,234	3,773	3,244	2,636	1,931	1,113
						4,085	3,703	3,226	2,656	1,955	1,072
							4,401	3,750	3,037	2,244	1,349
5							3,679	3,164	2,570	1,884	1,087
							3,555	3,099	2,536	1,848	1,012
								3,750	3,037	2,244	1,349
6								3,095	2,514	1,844	1,065
								2,957	2,416	1,758	960
									3,037	2,244	1,349
7									2,467	1,809	1,047
									2,313	1,680	916
										2,244	1,349
8										1,780	1,031
										1,614	879
											1,349
9											1,017
											847

표 26. 전기자동차 투자 옵션 가치(시나리오 1: 무위험이자율 1.27%, 지난 10년 유가 변동성)

하락횟수	옵션	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030
	전기자동차	7,242	6,612	5,985	5,355	4,716	4,061	3,382	2,670	1,918	1,114
0	내연기관자동차	7,122	6,679	6,201	5,680	5,111	4,486	3,796	3,031	2,179	1,226
	투자 연기	6,955	6,509	5,982	5,406	4,839	4,264	3,676	3,068	2,433	1,522
			6,612	5,985	5,355	4,716	4,061	3,382	2,670	1,918	1,114
1			6,415	5,943	5,434	4,880	4,275	3,611	2,879	2,068	1,165
			6,341	5,882	5,346	4,783	4,196	3,594	2,969	2,314	1,379
				5,985	5,355	4,716	4,061	3,382	2,670	1,918	1,114
2				5,729	5,228	4,687	4,099	3,457	2,753	1,975	1,115
				5,700	5,219	4,687	4,116	3,515	2,878	2,197	1,260
					5,355	4,716	4,061	3,382	2,670	1,918	1,114
3					5,056	4,526	3,952	3,328	2,647	1,898	1,072
					5,039	4,535	3,992	3,406	2,770	2,076	1,160
						4,716	4,061	3,382	2,670	1,918	1,114
4						4,392	3,830	3,221	2,559	1,834	1,037
						4,390	3,854	3,278	2,654	1,975	1,077
							4,061	3,382	2,670	1,918	1,114
5							3,728	3,132	2,485	1,780	1,008
							3,740	3,171	2,557	1,875	1,008
								3,382	2,670	1,918	1,114
6								3,057	2,424	1,736	983
								3,082	2,473	1,775	950
									2,670	1,918	1,114
7									2,373	1,698	963
									2,384	1,691	902
										1,918	1,114
8										1,667	946
										1,621	862
											1,114
9											932
											828

2. 기업의 네트워크 효과를 고려한 최적 투자 전략 주요 정리 증명

정리 1. 기업의 최적 충전소 투자 수준은 항상 존재한다. 최적 투자 수준이 최소 충전소 투자 수준(CS_{Min})이 아닐 존재할 필요 조건은 수익 상한과 간접 네트워크 효과의 곱이 4배의 충전소 투자 비용보다 큰 경우($\alpha/GS \cdot MS \cdot (PC \cdot m + AL \cdot CR) > 4 \cdot IC$)이다.

증명) 기업의 이윤 함수가 정의역에서 연속이므로 최대값이 항상 존재한다. 또한 기업 이윤의 1계 미분은 다음과 같다.

$$\frac{d\pi(CS)}{dCS} = \frac{\alpha}{GS} \cdot S_{Eco}(CS) \cdot (1 - S_{Eco}(CS)) \cdot MS \cdot (PC \cdot m + AL \cdot CR) - IC \qquad (24)$$

$S_{Eco}(CS)(1 - S_{Eco}(CS))$의 최대값은 ¼이므로 최저 수준이 아닌 곳에서 최대값이 존재할 필요 조건은 $\frac{\alpha}{GS} \cdot MS \cdot (PC \cdot m + AL \cdot CR) > 4 \cdot IC$이다.

정리 2. 기업의 최적 충전소 투자 수준은 최소 투자 수준 또는 극대점에서 존재한다. 또한 극대점은 유일하며 다음과 같이 표현된다.

$$CS^* = GS + \frac{GS}{\alpha}\ln\left(\frac{\frac{\alpha}{GS}\cdot K - 2IC + \sqrt{\left(\frac{\alpha}{GS}\cdot K - 4IC\right)\frac{\alpha}{GS}\cdot K}}{2IC}\right) - \frac{GS}{\alpha}\boldsymbol{\beta}^{\mathbf{T}}(\mathbf{x}_{Eco} - \mathbf{x}_{ICEV}) \tag{25}$$

증명) 1계 미분 함수에서 친환경자동차의 시장점유율을 양의 미지수로 해석하면, 1계 조건 은 다음과 같은 시장점유율에 대한 2차 방정식이 된다.

$$\begin{aligned} &\frac{\alpha}{GS}\cdot S_{Eco}(CS)\cdot(1 - S_{Eco}(CS))\cdot K - IC = 0 \\ &Where \\ &K = MS\cdot(PC\cdot m + AL\cdot CR) \end{aligned} \tag{26}$$

상기 2차 방정식의 근은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} &S_{Eco}(CS) = \frac{1}{2} \pm \frac{1}{2}\sqrt{\frac{\frac{\alpha}{GS}\cdot K - 4IC}{\frac{\alpha}{GS}\cdot K}} \\ &Where \\ &K = MS\cdot(PC\cdot m + AL\cdot CR) \end{aligned} \tag{27}$$

정리 1을 만족하면 시장점유율은 실근을 가지며, 0과 1사의 값을 가지는 것을 알

수 있다. 기업의 이윤 함수의 2계 미분은 다음과 같으므로

$$\left(\frac{\alpha}{GS}\right)^2 K\, S_{Eco} S_{icev} \left(S_{icev} - S_{Eco}\right)$$
$$Where \tag{28}$$
$$K = MS \cdot (PC \cdot m + AL \cdot CR)$$

2계 조건이 만족하는 점은 친환경자동차의 시장점유율이 50%이상인 경우이다. 또한 시장점유율은 충전소 투자에 대하여 일대일 대응이므로, 극대점은 식 (25)와 같다.

정리 5. 주어진 경쟁 차종의 연료 충전소 수준(CS-i)에 대하여 정리 1과 정리 2가 성립한다.

증명) 경쟁 차종의 연료 충전소 수준(CS-i)이 주어지면, 기업의 이윤 함수에 대한 1계 미분은 식 (26)과 동일하다. 따라서 동일한 방법으로 정리 1과 2의 증명이 성립한다.

따름 정리 1. 정리 2의 $CS_i^*(CS_{-i})$에서 $S_i(CS_i^*(CS_{-i}), CS_{-i})$는 CS_{-i}값과 관계없이 동일하다.

증명)

$$S_i(CS_i^*, CS_{-i}) =$$

$$\exp\left[\frac{\alpha}{GS}\left(CS_{-i} + \frac{GS}{\alpha}\left(\ln\left[\frac{\frac{\alpha}{GS}\cdot K_i - 2IC_i + \sqrt{\left(\frac{\alpha}{GS}\cdot K_i - 4IC_i\right)\frac{\alpha}{GS}\cdot K_i}}{2IC_i}\right] - \boldsymbol{\beta}^{\mathbf{T}}\left(\mathbf{x_i} - \mathbf{x_{-i}}\right)\right)\right) + \boldsymbol{\beta}^{\mathbf{T}}\mathbf{x_i}\right] /$$

$$\exp\left[\frac{\alpha}{GS}CS_{-i} + \boldsymbol{\beta}^{\mathbf{T}}\mathbf{x_{-i}}\right] +$$

$$\exp\left[\frac{\alpha}{GS}\left(CS_{-i} + \frac{GS}{\alpha}\left(\ln\left[\frac{\frac{\alpha}{GS}\cdot K_i - 2IC_i + \sqrt{\left(\frac{\alpha}{GS}\cdot K_i - 4IC_i\right)\frac{\alpha}{GS}\cdot K_i}}{2IC_i}\right] - \boldsymbol{\beta}^{\mathbf{T}}\left(\mathbf{x_i} - \mathbf{x_{-i}}\right)\right)\right) + \boldsymbol{\beta}^{\mathbf{T}}\mathbf{x_i}\right]$$

$$= 1 - \frac{2IC_i}{\frac{\alpha}{GS}\cdot K_i + \sqrt{\left(\frac{\alpha}{GS}\cdot K_i - 4IC_i\right)\frac{\alpha}{GS}\cdot K_i}}$$

정리 6. 균형은 승자 독식(winner takes all market) 형태로 존재한다. 즉, 최소 하나의 차종은 최소 투자가 균형이 된다.

증명) 정리 1을 만족하지 못하는 경우, 경쟁 차종의 충전소 투자 수준과 관계없이 최소 투자가 최적 대응이다. 정리 2에 따라 정리 1을 만족하는 차종의 최적 대응 수준은 주어진 경쟁 차종의 충전소 투자 수준에 대하여, $\boldsymbol{CS_i^{Min}}$ 또는 $\boldsymbol{CS_i^*(CS_{-i})}$이므로, 최적 대응 함수는 다음과 같다.

$$BR_i(CS_{-i}) = \begin{cases} CS_i^*(CS_{-i}) & if\ \pi_i(CS_i^{Min}, CS_{-i}) \le \pi_i(CS_i^*(CS_{-i}), CS_{-i}) \\ CS_i^{Min} & if\ \pi_i(CS_i^{Min}, CS_{-i}) > \pi_i(CS_i^*(CS_{-i}), CS_{-i}) \end{cases} \tag{29}$$

최적 대응 함수의 개형을 알아보기 위하여, 다음의 함수는 고려하자.

$$f(CS_{-i}) = \pi_i(CS_i^*(CS_{-i}), CS_{-i}) - \pi_i(CS_i^{Min}, CS_{-i}) \tag{30}$$

CS_i^{Min}은 상수이고, $CS_i^*(CS_{-i})$는 CS_{-i}에 대하여 기울기가 1인 선형 함수이다. 이때, $\pi_i(CS_i^*(CS_{-i}), CS_{-i})$는 따름 정리 1에 따라 수익이 고정되어 있으며, CS_{-i}에 따라 투자 비용(IC_i)이 선형으로 증가한다. 반면, $\pi_i(CS_i^{Min}, CS_{-i})$은 투자 비용은 $IC_i \cdot CS_i^{Min}$으로 고정이지만 CS_{-i}에 따라 시장점유율($S_i(CS_i^{Min}, CS_{-i})$)이 감소하는 함수이다. 따라서 $f(CS_{-i})$의 극대, 극소점은 정리 2의 증명과 유사하게 다음과 같이 도출된다.

(극소점)

$$CS_{-i} = CS_i^{Min} + \frac{GS}{\alpha}\ln\left(\frac{\frac{\alpha}{GS}\cdot K - 2IC - \sqrt{\left(\frac{\alpha}{GS}\cdot K - 4IC\right)\frac{\alpha}{GS}\cdot K}}{2IC}\right) + \frac{GS}{\alpha}\boldsymbol{\beta}^{\mathbf{T}}(\mathbf{x}_{Eco} - \mathbf{x}_{ICEV})$$

(31)

(극대점)

$$CS_{-i} = CS_i^{Min} + \frac{GS}{\alpha}\ln\left(\frac{\frac{\alpha}{GS}\cdot K - 2IC + \sqrt{\left(\frac{\alpha}{GS}\cdot K - 4IC\right)\frac{\alpha}{GS}\cdot K}}{2IC}\right) + \frac{GS}{\alpha}\boldsymbol{\beta}^{\mathbf{T}}(\mathbf{x}_{Eco} - \mathbf{x}_{ICEV})$$

(32)

특히, $f(CS_{-i})$는 극소점에서 극소값이 0이다. 또한 $\lim_{CS_{-i}\to\infty} f(CS_{-i}) = -\infty$ 이므로 $f(CS_{-i})$는 양수에서 음수로 단 한번 전환되는 함수이다. 따라서 전환점(CS_{-i}^{*}) 이전에서 최적 대응은 $CS_i^{*}(CS_{-i})$이며, 이후 CS_i^{Min}이다. 이를 정리하면 다음과 같다.

$$BR_i(CS_{-i}) = \begin{cases} CS_i^{*}(CS_{-i}) & if\ CS_{-i} \le CS_{-i}^{'} \\ CS_i^{Min} & if\ CS_{-i}^{'} < CS_{-i} \end{cases} \tag{33}$$

따라서 균형이 존재하면, 반드시 두 차종 중 하나의 최소 투자 수준에서 존재한다.

참고 문헌

Axsen, Jonn and Kurani, Kenneth S. (2012). Interpersonal Influence within Car Buyers' Social Networks: Applying Five Perspectives to Plug-in Hybrid Vehicle Drivers. *Environment and Planning A: Economy and Space, 44*(5), 1047-1065. doi:10.1068/a43221x

Barbusova, Miroslava, Medvecká, Iveta, and Gašo, Martin. (2019). *Use of TCO Analysis in Industry 4.0. Průmyslové inženýrství Conference doi:* 10.24132/PI.2019.08948.010-017

Bickert, Stefan, Kampker, Achim, and Greger, Dennis. (2015). Developments of CO2-emissions and costs for small electric and combustion engine vehicles in Germany. *Transportation Research Part D: Transport and Environment, 36*, 138-151. doi:https://doi.org/10.1016/j.trd.2015.02.004

BloombergNEF. (2022). Battery Pack Prices Fall to an Average of $132/kWh, But Rising Commodity Prices Start to Bite. Retrieved from https://about.bnef.com/blog/battery-pack-prices-fall-to-an-average-of-132-kwh-but-rising-commodity-prices-start-to-bite/, 접속일: 2022,11.24

Brownstone, David, Bunch, David S., and Train, Kenneth. (2000). Joint mixed logit models of stated and revealed preferences for alternative-fuel vehicles. *Transportation Research Part B: Methodological, 34*(5), 315-338. doi:https://doi.org/10.1016/S0191-2615(99)00031-4

Bubeck, Steffen, Tomaschek, Jan, and Fahl, Ulrich. (2016). Perspectives of electric mobility: Total cost of ownership of electric vehicles in Germany. *Transport Policy, 50*, 63-77. doi:https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2016.05.012

CDC. (2022). Cost-Effectiveness Analysis. Retrieved from https://www.cdc.gov/policy/polaris/economics/cost-effectiveness/index.html, 접속일: 2022,12.15

China Ministry of Industry and Information. (2021). Fuel consumption limits for passenger cars. Retrieved from https://std.samr.gov.cn/gb/search/gbDetailed?id=BBE32B661B818FC8E05397BE0A0AB906, 접속일: 2022,09.05

Choi, Hyunhong, Shin, Jungwoo, and Woo, JongRoul. (2018). Effect of electricity generation mix on battery electric vehicle adoption and

its environmental impact. *Energy Policy, 121*, 13–24. doi:https://doi.org/10.1016/j.enpol.2018.06.013

Choi, Wonjae and Song, Han Ho. (2018). Well–to–wheel greenhouse gas emissions of battery electric vehicles in countries dependent on the import of fuels through maritime transportation: A South Korean case study. *Applied Energy, 230*, 135–147. doi:https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.08.092

Choi, Wonjae, Yoo, Eunji, Seol, Eunsu, Kim, Myoungsoo, and Song, Han Ho. (2020). Greenhouse gas emissions of conventional and alternative vehicles: Predictions based on energy policy analysis in South Korea. *Applied Energy, 265*, 114754. doi:https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.114754

Chorus, Caspar G., Koetse, Mark J., and Hoen, Anco. (2013). Consumer preferences for alternative fuel vehicles: Comparing a utility maximization and a regret minimization model. *Energy Policy, 61*, 901–908. doi:https://doi.org/10.1016/j.enpol.2013.06.064

Contestabile, Marcello, Offer, GJ, Slade, Raphael, Jaeger, F, and Thoennes, M. (2011). Battery electric vehicles, hydrogen fuel cells and biofuels. Which will be the winner? *Energy & Environmental Science, 4*(10), 3754–3772.

Defense Acquisition University. (2010). *Defense Acquisition Guidebook,* Retrieved from: https://www.dote.osd.mil/Portals/97/docs/TEMP Guide/DefenseAcquisitionGuidebook.pdf, 접속일: 2022.12.28

Dumortier, Jerome, Siddiki, Saba, Carley, Sanya, Cisney, Joshua, Krause, Rachel M., Lane, Bradley W., Rupp, John A., and Graham, John D. (2015). Effects of providing total cost of ownership information on consumers' intent to purchase a hybrid or plug–in electric vehicle. *Transportation Research Part A: Policy and Practice, 72*, 71–86. doi:https://doi.org/10.1016/j.tra.2014.12.005

Egbue, Ona and Long, Suzanna. (2012). Barriers to widespread adoption of electric vehicles: An analysis of consumer attitudes and perceptions. *Energy Policy, 48*, 717–729. doi:https://doi.org/10.1016/j.enpol.2012.06.009

Elgowainy, Amgad, Rousseau, Aymeric, Wang, Michael, Ruth, Mark, Andress, Dave, Ward, Jake, Joseck, Fred, Nguyen, Tien, and Das, Sujit. (2013). Cost of ownership and well–to–wheels carbon emissions/oil use of alternative fuels and advanced light–duty vehicle technologies. *Energy for Sustainable Development, 17*(6), 626–641. doi:https://doi.org/10.1016/j.esd.2013.09.001

European Automobile Manufacturers Association. (2019). MAKING THE TRANSITION TO ZERO-EMISSION MOBILITY. Retrived from: https://www.acea.be/uploads/publications/ACEA_progress_report_2019.pdf, 접속일: 2022,09.05

European Commission. (2022). Well-to-Wheel Analyses. Retrieved from https://joint-research-centre.ec.europa.eu/welcome-jec-website/jec-activities/well-wheels-analyses_en, 접속일: 2022,09.05

European Energy Exchange. (2021). *EmissionSpotHistory_Ecarbix_2020*. Retrieved from: https://www.eex.com/en/market-data/environmental-markets/spot-market, 접속일: 2022,09.05

Falcão, Eduardo Aparecido Moreira, Teixeira, Ana Carolina Rodrigues, and Sodré, José Ricardo. (2017). Analysis of CO2 emissions and techno-economic feasibility of an electric commercial vehicle. *Applied Energy, 193*, 297-307. doi:https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.02.050

Friedlingstein, P., Jones, M. W., O'Sullivan, M., Andrew, R. M., Bakker, D. C. E., Hauck, J., Le Quéré, C., Peters, G. P., Peters, W., Pongratz, J., Sitch, S., Canadell, J. G., Ciais, P., Jackson, R. B., Alin, S. R., Anthoni, P., Bates, N. R., Becker, M., Bellouin, N., Bopp, L., Chau, T. T. T., Chevallier, F., Chini, L. P., Cronin, M., Currie, K. I., Decharme, B., Djeutchouang, L. M., Dou, X., Evans, W., Feely, R. A., Feng, L., Gasser, T., Gilfillan, D., Gkritzalis, T., Grassi, G., Gregor, L., Gruber, N., Gürses, Ö, Harris, I., Houghton, R. A., Hurtt, G. C., Iida, Y., Ilyina, T., Luijkx, I. T., Jain, A., Jones, S. D., Kato, E., Kennedy, D., Klein Goldewijk, K., Knauer, J., Korsbakken, J. I., Körtzinger, A., Landschützer, P., Lauvset, S. K., Lefèvre, N., Lienert, S., Liu, J., Marland, G., McGuire, P. C., Melton, J. R., Munro, D. R., Nabel, J. E. M. S., Nakaoka, S. I., Niwa, Y., Ono, T., Pierrot, D., Poulter, B., Rehder, G., Resplandy, L., Robertson, E., Rödenbeck, C., Rosan, T. M., Schwinger, J., Schwingshackl, C., Séférian, R., Sutton, A. J., Sweeney, C., Tanhua, T., Tans, P. P., Tian, H., Tilbrook, B., Tubiello, F., van der Werf, G. R., Vuichard, N., Wada, C., Wanninkhof, R., Watson, A. J., Willis, D., Wiltshire, A. J., Yuan, W., Yue, C., Yue, X., Zaehle, S., and Zeng, J. (2022). Global Carbon Budget 2021. *Earth Syst. Sci. Data, 14*(4), 1917-2005. doi:10.5194/essd-14-1917-2022

Frost & Sullivan. (2020). *Strategic Collaborations Towards Technology*

Development Transforming The Global Fuel Cell Vehicles Market, 2020-2030.

Gao, Lin and Winfield, Zach C. (2012). Life Cycle Assessment of Environmental and Economic Impacts of Advanced Vehicles. *Energies, 5*(3), 605-620.

General Insurance Association of Korea. (2021). Personal car insurance comparison. Retrieved from https://e-insmarket.or.kr/aimt/aimtRealIntro.knia, 접속일: 2021.02.24

Gyeonggi Research Institute. (2017). *A study on Establishment of Proper Installation Criteria of Electric Vehicle Charging Station in Gyeonggi-Do* Retrieved from: https://www.gri.re.kr/%EC%97%B0%EA%B5%AC%EB%B3%B4%EA%B3%A0%EC%84%9C/?brno=7300&prno=5336, 접속일: 2022.12.28

Hackbarth, André and Madlener, Reinhard. (2013). Consumer preferences for alternative fuel vehicles: A discrete choice analysis. *Transportation Research Part D: Transport and Environment, 25*, 5-17. doi:https://doi.org/10.1016/j.trd.2013.07.002

Hagman, Jens, Ritzén, Sofia, Stier, Jenny Janhager, and Susilo, Yusak. (2016). Total cost of ownership and its potential implications for battery electric vehicle diffusion. *Research in Transportation Business & Management, 18*(Supplement C), 11-17. doi:https://doi.org/10.1016/j.rtbm.2016.01.003

Hahn, Jin-Seok, Lee, Jang-Ho, and Choi, Keechoo. (2018). Heterogeneous preferences of green vehicles by vehicle size: Analysis of Seoul case. *International Journal of Sustainable Transportation, 12*(9), 675-685. doi:10.1080/15568318.2018.1425782

Hao, Han, Cheng, Xiang, Liu, Zongwei, and Zhao, Fuquan. (2017). Electric vehicles for greenhouse gas reduction in China: A cost-effectiveness analysis. *Transportation Research Part D: Transport and Environment, 56*, 68-84. doi:https://doi.org/10.1016/j.trd.2017.07.025

Helveston, John Paul, Liu, Yimin, Feit, Elea McDonnell, Fuchs, Erica, Klampfl, Erica, and Michalek, Jeremy J. (2015). Will subsidies drive electric vehicle adoption? Measuring consumer preferences in the U.S. and China. *Transportation Research Part A: Policy and Practice, 73*, 96-112. doi:https://doi.org/10.1016/j.tra.2015.01.002

Hoen, Anco and Koetse, Mark J. (2014). A choice experiment on alternative fuel vehicle preferences of private car owners in the

Netherlands. *Transportation Research Part A: Policy and Practice, 61*, 199-215. doi:https://doi.org/10.1016/j.tra.2014.01.008
Hyundai Motor Company. (2021). Hyundai Motor model information. Retrieved from https://www.hyundai.com/kr/ko/e, 2021.02.23)
IEA. (2020). *Energy Technology Perspectives 2020* Retrieved from: https://www.iea.org/reports/energy-technology-perspectives-2020, 접속일: 2022.12.26
Jang, Jae Jun and Song, Han Ho. (2015). Well-to-wheel analysis on greenhouse gas emission and energy use with petroleum-based fuels in Korea: gasoline and diesel. *The International Journal of Life Cycle Assessment, 20*(8), 1102-1116. doi:10.1007/s11367-015-0911-x
Katz, Michael L. and Shapiro, Carl. (1985). Network Externalities, Competition, and Compatibility. *The American Economic Review, 75*(3), 424-440.
Kim, Imjung, Kim, Junghun, and Lee, Jongsu. (2020). Dynamic analysis of well-to-wheel electric and hydrogen vehicles greenhouse gas emissions: Focusing on consumer preferences and power mix changes in South Korea. *Applied Energy, 260*, 114281. doi:https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.114281
Kim, Ju-Hee, Kim, Hyo-Jin, and Yoo, Seung-Hoon. (2019). Willingness to pay for fuel-cell electric vehicles in South Korea. *Energy, 174*, 497-502. doi:https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.02.185
Korea Energy Agency. (2021). The amount of CO2 emission of vehicle. Retrieved from http://bpms.kemco.or.kr/transport_2012/car/car_choice.aspx, 접속일: 2022.02.23
Korea Energy Economics Institute. (2017). *A Study for the Vitalization of Electric Vehicle Charging Service Industry in Korea*
Korea Energy Economics Institute. (2019). *The study on establishment of hydrogen economy activation roadmap*
Korea Energy Economics Institute. (2020). *Strategies for market-driven hydrogen economy early settlement*
KOREA EXCHANGE. (2021). Carbon trading market information flatform. Retrieved from https://ets.krx.co.kr/contents/ETS/03/03010000/ETS03010000.jsp, 접속일: 2021.05.12,
Korea Gas Safety Corporation. (2017). *Hydrogen industry safety management policy research* Retrieved from: http://www.alio.go.kr/informationResearchView.do?seq=2352852, 접속일: 2022.05.10
Korea Insurance Development Institute. (2016). *Development of insurance*

products for electric vehicles and research on market activation
Korea Insurance Development Institute. (2021). Vehicle Insurance Standard Price. Retrieved from https://kidi.or.kr/user/car/carprice.do, 접속일: 2022.05.07,
Korea Ministry of the Interior and Safety. (2018). Vehicle tax. Retrieved from https://www.wetax.go.kr/main/?cmd=LPTIIA1R1, 접속일: 2022.12.11
Korea National Oil Corporation Petroleum Information and Service Center. (2021). *Domestric petroleum monthly price trend*. Retrieved from: https://www.opinet.co.kr/user/ofdoptd/getOfdoptdSelect.do, 접속일: 2022.12.11
Korea Transport Institute. (2017). *Research to promote the supply of electric vehicles through actual purchaser survey and analysis*
Korea Transportation Safety Authority. (2017). *Korean average mileage of automobile*. Retrieved from http://kosis.kr/statHtml/statHtml.do?orgId=426&tblId=DT_426001_N004, 접속일: 2022.11.24
Korean Ministry of Environment. (2020.12). *Started to build the pipeline hydrogen charging station for the first time in Korea*. Retrieved from https://me.go.kr/home/web/board/read.do?pagerOffset=0&maxPageItems=10&maxIndexPages=10&searchKey=&searchValue=&menuId=286&orgCd=&boardId=1421520&boardMasterId=1&boardCategoryId=39&decorator=, 접속일: 2022.12.22
Korean Ministry of Environment. (2022). Integrated low-emission vehicle website. Retrieved from https://ev.or.kr/portal/chargerfee, 접속일: 2022.11.22
Korean Ministry of Land, Infrastructure and Transport. (2020.12). *Vehicle registration statistics*. Retrieved from: http://stat.molit.go.kr/portal/cate/statFileView.do?hRsId=58&hFormId=5, 접속일: 2022.12.22
Korean Ministry of the Interior and Safety. (2021). Vehicle expected tax calculator Retrieved from https://www.wetax.go.kr/main/, 접속일: 2022.02.24
Korean Ministry of Trade Industry and Energy. (2016). *Business feasibility analysis based on market acceptance analysis of new energy industry*
Krause, Rachel M., Carley, Sanya R., Lane, Bradley W., and Graham, John D. (2013). Perception and reality: Public knowledge of plug-in electric vehicles in 21 U.S. cities. *Energy Policy, 63*, 433-440. doi:https://doi.org/10.1016/j.enpol.2013.09.018
Lajunen, Antti and Lipman, Timothy. (2016). Lifecycle cost assessment

and carbon dioxide emissions of diesel, natural gas, hybrid electric, fuel cell hybrid and electric transit buses. *Energy, 106*, 329-342. doi:https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.03.075

Lareau, Thomas J. (1990). THE ECONOMICS OF ALTERNATIVE FUEL USE: SUBSTITUTING METHANOL FOR GASOLINE. *Contemporary Economic Policy, 8*(4), 138-152. doi:https://doi.org/10.1111/j.1465-7287.1990.tb00307.x

Lave, Lester B. and MacLean, Heather L. (2002). An environmental-economic evaluation of hybrid electric vehicles: Toyota's Prius vs. its conventional internal combustion engine Corolla. *Transportation Research Part D: Transport and Environment, 7*(2), 155-162. doi:https://doi.org/10.1016/S1361-9209(01)00014-1

Lévay, Petra Zsuzsa, Drossinos, Yannis, and Thiel, Christian. (2017). The effect of fiscal incentives on market penetration of electric vehicles: A pairwise comparison of total cost of ownership. *Energy Policy, 105*, 524-533. doi:https://doi.org/10.1016/j.enpol.2017.02.054

Levin, H. M. and McEwan, P. J. (2000). *Cost-effectiveness analysis: Methods and applications* (Second edition ed. Vol. Vol. 4): Sage.

Li, Junjie, Liang, Mei, Cheng, Wanjing, and Wang, Shuhao. (2021). Life cycle cost of conventional, battery electric, and fuel cell electric vehicles considering traffic and environmental policies in China. *International Journal of Hydrogen Energy, 46*(14), 9553-9566. doi:https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.12.100

Li, Wenbo, Long, Ruyin, Chen, Hong, Chen, Feiyu, Zheng, Xiao, He, Zhengxia, and Zhang, Linling. (2020). Willingness to pay for hydrogen fuel cell electric vehicles in China: A choice experiment analysis. *International Journal of Hydrogen Energy, 45*(59), 34346-34353. doi:https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.01.046

Litman, Todd. (1998). A Critical Evaluation of Electric Vehicle Benefits. Retrieved from www. vtpi. org, 접속일: 2022.12.28

Nixon, Hilary and Saphores, Jean-Daniel. (2011). Understanding household preferences for alternative-fuel vehicle technologies.

Office for Health Improvement and Disparities of United Kingdom. (2020). Cost effectiveness analysis: health economic studies. Retrieved from https://www.gov.uk/guidance/cost-effectiveness-analysis-health-economic-studies, (2022,12.15)

Schmalfuß, Franziska, Mühl, Kristin, and Krems, Josef F. (2017). Direct experience with battery electric vehicles (BEVs) matters when evaluating vehicle attributes, attitude and purchase intention.

Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour, 46, 47–69. doi:https://doi.org/10.1016/j.trf.2017.01.004

Seoul Metropolitan Government. (2020). Sangam hydrogen station operation. Retrieved from https://opengov.seoul.go.kr/search?items_per_page=50&searchKeyword=%EC%83%81%EC%95%94%EC%88%98%EC%86%8C, 접속일: 2021.03.02

Shankar, Venkatesh and Bayus, Barry L. (2003). Network effects and competition: an empirical analysis of the home video game industry. *Strategic Management Journal, 24*(4), 375–384. doi:https://doi.org/10.1002/smj.296

Sharma, R., Manzie, C., Bessede, M., Brear, M. J., and Crawford, R. H. (2012). Conventional, hybrid and electric vehicles for Australian driving conditions – Part 1: Technical and financial analysis. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 25*, 238–249. doi:https://doi.org/10.1016/j.trc.2012.06.003

Shockley, Richard Lester. (2007). *An applied course in real options valuation*: Thomson Higher Education.

Sierzchula, William, Bakker, Sjoerd, Maat, Kees, and van Wee, Bert. (2014). The influence of financial incentives and other socio-economic factors on electric vehicle adoption. *Energy Policy, 68*, 183–194. doi:https://doi.org/10.1016/j.enpol.2014.01.043

Skippon, Stephen and Garwood, Mike. (2011). Responses to battery electric vehicles: UK consumer attitudes and attributions of symbolic meaning following direct experience to reduce psychological distance. *Transportation Research Part D: Transport and Environment, 16*(7), 525–531. doi:https://doi.org/10.1016/j.trd.2011.05.005

Stnaford University Land and Buildings. (2005). *Guidelines for lifecycle cost analysis*, Retrieved from: https://sustainable.stanford.edu/sites/default/files/Guidelines_for_Life_Cycle_Cost_Analysis.pdf, 접속일: 2022.12.28

The European Parliament and of the Council. (2019). setting CO2 emission performance standards for new passenger cars and for new light commercial vehicles, and repealing Regulations. In.

The World Bank. (2022). Cost-effectiveness anlysis. Retrieved from https://dimewiki.worldbank.org/Cost-effectiveness_Analysis, 접속일: 2022,11.22

Tseng, Hui-Kuan, Wu, Jy S., and Liu, Xiaoshuai. (2013). Affordability of electric vehicles for a sustainable transport system: An economic

and environmental analysis. *Energy Policy, 61*, 441-447. doi:https://doi.org/10.1016/j.enpol.2013.06.026

United States Environmental Protection Agency. (2022). Final Rule to Revise Existing National GHG Emissions Standards for Passenger Cars and Light Trucks Through Model Year 2026. Retrieved from https://www.epa.gov/regulations-emissions-vehicles-and-engines/final-rule-revise-existing-national-ghg-emissions, 접속일: 2022.08.06

van Vliet, Oscar, Brouwer, Anne Sjoerd, Kuramochi, Takeshi, van den Broek, Machteld, and Faaij, André. (2011). Energy use, cost and CO2 emissions of electric cars. *Journal of Power Sources, 196*(4), 2298-2310. doi:https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2010.09.119

van Vliet, Oscar P. R., Kruithof, Thomas, Turkenburg, Wim C., and Faaij, André P. C. (2010). Techno-economic comparison of series hybrid, plug-in hybrid, fuel cell and regular cars. *Journal of Power Sources, 195*(19), 6570-6585. doi:https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2010.04.077

Viktorsson, Ludvik, Heinonen, Jukka Taneli, Skulason, Jon Bjorn, and Unnthorsson, Runar. (2017). A Step towards the Hydrogen Economy—A Life Cycle Cost Analysis of A Hydrogen Refueling Station. *Energies, 10*(6), 763.

Wang, Pei, Deng, Xiangzheng, Zhou, Huimin, and Yu, Shangkun. (2019). Estimates of the social cost of carbon: A review based on meta-analysis. *Journal of Cleaner Production, 209*, 1494-1507. doi:https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.11.058

Wu, Geng, Inderbitzin, Alessandro, and Bening, Catharina. (2015). Total cost of ownership of electric vehicles compared to conventional vehicles: A probabilistic analysis and projection across market segments. *Energy Policy, 80*, 196-214. doi:https://doi.org/10.1016/j.enpol.2015.02.004

Wu, Ya and Zhang, Li. (2017). Can the development of electric vehicles reduce the emission of air pollutants and greenhouse gases in developing countries? *Transportation Research Part D: Transport and Environment, 51*, 129-145. doi:https://doi.org/10.1016/j.trd.2016.12.007

Yoo, Eunji, Kim, Myoungsoo, and Song, Han Ho. (2018). Well-to-wheel analysis of hydrogen fuel-cell electric vehicle in Korea. *International Journal of Hydrogen Energy, 43*(41), 19267-19278. doi:https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.08.088

Zhao, Xin, Doering, Otto C., and Tyner, Wallace E. (2015). The economic competitiveness and emissions of battery electric vehicles in China. *Applied Energy, 156*, 666-675. doi:https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.07.063

관계부처 합동. (2021). *제4차 친환경자동차 기본계획(2021-2025)*. Retrieved from: https://policy.nl.go.kr/search/searchDetail.do?rec_key=SH2_PLC20210276085, 접속일: 2022.12.28

안기정, 김범식. (2015). 서울시민 승용차 소유와 이용특성 분석. *서울연구원 정책과제연구보고서, 1-102.*

온실가스종합정보센터. (2022). *2020 배출권거래제 운영결과보고서*. Retrieved from: https://www.gir.go.kr/home/board/read.do?pagerOffset=0&maxPageItems=10&maxIndexPages=10&searchKey=&searchValue=&menuId=20&boardId=56&boardMasterId=9&boardCategoryId=, 접속일: 2022.12.28

자동차산업협회. (2022). *2022년 1월 자동차 등록자료 통계*. Retrieved from: https://stat.molit.go.kr/portal/cate/statFileView.do?hRsId=58&hFormId=5, 접속일: 2022.12.28

한국과학기술기획평가원. (2018). *KISTEP 기술동향브리프, 수소전기차 (2018-20), Retrieved from: https://www.kistep.re.kr/board.es?mid=a10306050000&bid=0031&b_list=10&act=view&list_no=34960&nPage=15&keyField=&orderby=,* 접속일: 2022.12.28

한국석유관리원. (2022). 상표별 주유소 현황. Retrieved from https://www.kpetro.or.kr/lay1/S1T602C604/contents.do, 접속일: 2022,11.24

한국전력. (2020.05). *Statistics of Electric Power in Korea* Retrieved from: http://epsis.kpx.or.kr/epsisnew/selectEkfaFclFesGrid.do?menuId=020702, 접속일: 2022.12.28

현대자동차. (2022). *현대자동차 사업보고서 (2021.12)*, Retrieved from: https://www.hyundai.com/kr/ko/company-intro/ir-information/finance-information/report/business-report.html,접속일: 2022.12.28

환경부. (2021). *자동차 평균 온실가스 차기 기준*. Retrieved from: https://me.go.kr/home/file/readDownloadFile.do?fileId=211318&fileSeq=1, 접속일: 2022.12.28

환경부. (2022). *파리협정 함께보기*. 발간등록번호: 11-1480000-001814-01, Retrieved from: https://www.keep.go.kr/portal/144?action=read&action-value=45818708983c12e7b57403c91115d6bd, 접속일: 2022.12.28

Abstract

Optimal investment strategy of market participants under the market transition to eco-friendly vehicles: An empirical study of the Korean market

Saedaseul Moon
Department of Industrial Engineering
The Graduate School
Seoul National University

The global society is formalizing the withdrawal of internal combustion engine vehicles, and thus, the automobile market is undergoing a structural transition to eco-friendly vehicles. Under this transition, in this thesis, I analyzed the optimal investment strategy that reflects the characteristics of each market entity composed of the government, consumers, and businesses and the systematic relationship between each entity.

To derive the optimal investment strategy of the government, a cost-effectiveness analysis was conducted on the eco-friendly alternatives. The cost-effectiveness was derived by comparing the life cycle cost with the GHG reduction by considering the cost of fuel/charging infrastructure, which is essential for the

transition to the eco-friendly vehicle market. Unlike internal combustion engine vehicles, eco-friendly vehicles have high purchase costs and low fuel costs, and because they use other fuels, oil price volatility is not directly reflected in costs. In this thesis, to overcome the difficulty of cost comparison by consumers due to such cost structural differences, the optimal purchase timing and purchase alternatives were derived using the real option method, which is effective for optimal decision-making analysis under uncertainty. Particularly, for eco-friendly vehicles, the downward trend in battery prices was reflected in the model to reflect the characteristics of rapid reduction in production costs as they are still in the technological development stage. It is difficult for private companies to invest in fuel stations owing to their low economic feasibility. In this thesis, we studied the optimal charging station investment model that reflected the indirect network effect by focusing on the fact that when an eco-friendly vehicle manufacturer directly invests in a fuel station, it can expect car sales revenue through indirect network effects. Particularly, the practicality of the model was enhanced by utilizing the discrete choice theory, which can empirically estimate the indirect network effects.

All the aforementioned studies conducted empirical analysis that applied to the Korean market, which is focusing on hydrogen vehicles unlike other countries. The result of the empirical analysis of all three studies suggested that hydrogen vehicles need further technological progress to garner attention as an alternative to eco-friendly vehicles. Accordingly, a policy of transitioning to zero-emission vehicles while transitioning to the most cost-effective hybrid vehicles is needed.

Keywords: Fuel Cell Electric Vehicles, Engineering Economy, Cost-effectiveness analysis, Real Options, Indirect Network Effects, Game Theory

Student Number: 2018-12345

감사의 글

2011년 6월 27일 이덕주 교수님께 진로 상담을 부탁드리는 메일에서 저는 교수님께서 하시는 경제성 분석을 저도 자세히 공부해 보고 싶다고 말씀드린 바 있습니다. 그로부터 약 11년 6개월이 지난 지금 부족한 제자가 경제성 분석을 주제로 학위 논문을 완성하였습니다.

부족한 제자에게 항상 사랑과 격려를 아끼지 않으신 이덕주 교수님께 진심으로 감사드립니다. 교수님의 제자일 수 있어서 더없이 행운이었고 행복했습니다. 스승의 은혜는 하늘 같다지만 저에게 베푸신 교수님의 은혜는 그보다 높았습니다.

바쁘신 일정에도 제 학위 논문을 심사하여 주신 홍유석 교수님, 장우진 교수님께 감사드립니다. 특히, 먼 걸음 해주신 김장호 교수님과 대학원 입학부터 조언을 아끼지 않으신 김태구 교수님께 감사드립니다.

오랜 연구실 생활을 하며 추억을 쌓은 인연들이 많습니다. 서울대학교 경제성 분석 연구실 선·후배 여러분 모두에게 진심으로 감사드립니다. 같이 연구실 생활을 하며 부족한 저 때문에 실망도, 고생도 하셨을 여러분들에게 항상 죄송하고 감사했습니다. 한 분 한 분 감사의 말을 따로 전하고 싶지만 지면이 허락하지 않아 개별적으로 전하도록 하겠습니다. 여러분들과의 추억을 잊지 않겠습니다.

Acknowledgement

본 연구는 2022학년도 서울대학교 지속가능발전연구소 학위논문작성 지원사업을 통해 작성되었음