



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](#)

공학석사학위논문

진화게임을 이용한 신기술의 경쟁적 확산
분석: 전기자동차와 수소자동차를
중심으로

An Analysis on the Diffusion of New Competitive
Technologies Based on Evolutionary Game Theory :
Battery Electric Vehicle and Fuel Cell Electric Vehicle

2020 년 2 월

서울대학교 대학원
산업공학과

이 연 정

초록

기술발전 속도가 증가함에 따라 대체재로 기능할 수 있는 다양한 기술들이 동시에 등장하고 있다. 본 연구는 새로운 기술들 사이의 경쟁이 존재할 때 각 기술의 확산을 정부, 기업, 소비자와 같은 경제 주체들 간 상호작용의 관점에서 기술경제적으로 분석하는 진화게임 모델을 제시한다. 각 주체들에게 주어지는 수익 및 비용과 같은 경제적 가치를 통해 특정 기술을 선택함으로써 얻게 되는 효용을 설정하고, 이를 3단계 경쟁적 의사결정 모형으로 모델링하여 분석한다.

또한 전기자동차와 수소자동차의 예시를 통해 현실에서 각 기술들이 어떠한 양상으로 확산될지 확인한다. 차량의 가격, 생산비, 운영비, 차종별 차량 이용 편익 등 기업과 소비자의 입장에서 차종 선택에 영향을 주는 경제적 수치를 적용하고, 이를 기반으로 정부가 기업 및 소비자에게 주는 정책적 유인의 변화에 따라 소비자와 기업의 행동이 어떠한 방식으로 변화하는지 확인한다. 분석 결과, 보조금을 받는 대상과 온실가스의 사회적 비용 변화에 따라 균형 전략 및 차종별 확산 양상이 달라짐을 확인하였으며, 정부가 두 신기술에 정책적 유인을 제공하여 비슷한 수준의 경쟁력을 갖게 하는 것은 두 신기술 모두의 확산을 방해할 수 있음을 확인하였다.

주요어: 친환경자동차, 확산, 게임이론, 의사결정 모형, 정책적 유인

학번: 2018-23843

목차

초록	i
목차	ii
표 목차	iv
그림 목차	v
제 1 장 서론	1
1.1 연구 배경.....	1
1.2 문제 정의.....	2
1.3 논문구성.....	3
제 2 장 선행연구	4
2.1 친환경자동차 확산에 대한 선행 연구	4
2.2 다단계 의사결정 모형을 반영한 선행 연구	6
2.3 다제품 독점 기업에 대한 선행 연구	8
제 3 장 신기술 확산에 대한 경쟁적 의사결정 모형	10
3.1 3단계 경쟁적 의사결정 모형의 개요.....	10
3.2 소비자의 최적 차종 선택 모형.....	12

3.3	기업의 최적 가격 설정 모형.....	14
3.4	정부의 최적 보조금 설정 모형.....	16
제 4 장	분석	17
4.1	균형 전략의 조건.....	17
4.2	균형 전략의 존재 및 도출.....	22
4.3	균형 전략의 특성 분석.....	25
4.3.1	수치 예제.....	25
4.3.2	소비자 보조금 균형 전략의 특성 분석.....	29
4.3.3	기업 보조금 균형 전략의 특성 분석.....	32
4.3.4	온실가스의 사회적 비용 변화에 따른 균형 전략 변화.....	35
제 5 장	결론 및 향후 연구	40
	참고문헌	43
	Abstract	49

표 목차

표 1 매개변수.....	25
---------------	----

그림 목차

그림 1	3단계 경쟁적 의사결정 모형.....	10
그림 2	정부 효용.....	26
그림 3	기업 효용.....	27
그림 4	소비자의 차종 선택 비율.....	27
그림 5	소비자 효용.....	28
그림 6	소비자 보조 시 차종 선택 비율 및 정부 효용.....	30
그림 7	기업 보조 시 차종 선택 비율 및 정부 효용.....	33
그림 8	소비자 보조와 기업 보조 시 각 주체의 효용.....	34
그림 9	소비자 보조 시 사회적 비용 변화에 따른 보조금 변화.....	36
그림 10	소비자 보조 시 사회적 비용 변화에 따른 차종 선택 비율 변화.....	36
그림 11	기업 보조 시 사회적 비용 변화에 따른 보조금 변화.....	38
그림 12	기업 보조 시 사회적 비용 변화에 따른 차종 선택 비율 변화.....	38

제 1 장 서론

1.1 연구 배경

2015년 파리 협정이 체결된 이래, 한국은 2030년에 2009년 BAU 대비 30% 감축이라는 목표를 위해 다양한 정책을 실행하고 있다. 특히 운송 수단과 관련하여, 한국 정부는 제3차 환경 친화적 자동차 개발 및 보급 기본계획과 수소경제 활성화 로드맵을 진행하고 있으며, 이를 통해 전기자동차(Electric Vehicle; EV)와 수소자동차(Fuel Cell Electric Vehicle; FCEV) 확산에 힘쓰고 있다. 그러나 전기자동차와 수소자동차의 경우 내연기관자동차(Internal Combustion Engine Vehicle; ICEV)에 비하여 관련 기술이 초기 단계에 머물러 있으며, 높은 가격, 인프라 부족 등의 이유로 확산 수준 역시 미미한 상황이다.

전기자동차와 수소자동차의 확산은 단순히 내연기관자동차와 친환경자동차로 대표되는 구기술과 신기술의 경쟁에서 벗어나 하나의 주요 기술과 두 신기술이 동시에 경쟁하는 특성을 가진다. 더하여 기업의 경우 전기자동차와 수소자동차의 확산 정도를 고려하여 두 자동차의 가격을 동시에 설정해야 하며, 소비자의 경우 단순히 가격 등과 관련된 경제적 효용뿐만 아니라 한정된 인프라를 공유하는 인원이 늘어남으로써 발생하는 불편도 또한 고려해야 하는 상황에 직면하고 있다. 따라서 해당 특성을 고려하여 전기자동차 및 수소자동차 확산을 위한 정책 실행에 따른 기업과 소비자의 반응을 예측할 수 있다면 정책의 효율성 증가에 기여할 것이다.

1.2 문제 정의

기존 연구의 경우 대부분 정부와 기업이 소비자의 반응과 관계 없이 고정적인 정책 및 가격을 설정한다고 가정하였다. 그러나 정부와 기업, 소비자는 상호작용하는 주체로서 각자의 의견이 서로에게 영향을 미친다. 또한 기존 논문의 경우 친환경자동차와 내연기관자동차의 경쟁 상황에서 수소자동차를 분석 범위에 넣지 않았으나, 보다 정확한 분석을 위해서는 수소자동차 역시 분석 대상에 포함시켜야 한다.

따라서 본 논문은 정부의 정책적 유인 수준 결정, 기업의 차종 가격 결정, 소비자의 차종 채택으로 이어지는 3단계 경쟁적 의사결정 모형을 수립하고자 한다. 특정 상황에서 정부 및 기업, 소비자의 균형 전략을 파악하여 정부의 정책 변화가 기업 및 소비자의 반응에 미치는 영향에 대해 확인하고자 하며, 소비자의 차종 채택 단계에서 인프라 수준이 한정된 친환경자동차를 선택하는 소비자들의 효용 변화를 고려하기 위해 진화게임이론을 활용한다.

1.3 논문구성

본 논문은 5장으로 구성된다. 제 2장에서는 선행 연구를 살펴보며, 제 3장에서는 문제 상황을 반영하는 3단계 경쟁적 의사결정 모형을 제시한다. 제 4장에서는 균형 전략을 도출하기 위한 조건을 분석하고 수치 예제를 통해 균형 전략의 특성을 살펴본다. 마지막으로 제 5장에서는 결론과 향후 연구방향을 제시한다.

제 2 장 선행연구

2.1 친환경자동차 확산에 대한 선행 연구

친환경자동차 확산과 관련된 연구는 지속적으로 진행되었으며, 소유 총비용(Total Cost of Ownership; TCO), 에이전트 기반 모델링(Agent-based model) 등 다양한 관점에서 연구되어 왔다. [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7] 최근에는 확산에 있어서 정부 역할의 중요성을 인정하고 정책의 효율성을 증가시키기 위한 연구가 진행되고 있다. [8, 9] Sierzchula 등 [10]은 30개국의 2012년 전기자동차 확산 정도를 분석하고 경제적 유인과 충전 인프라가 확산에 있어 통계적으로 유의한 요인임을 확인하였다. Diamond [11]는 하이브리드자동차 확산을 위한 인센티브 정책의 효과를 확인하는 연구를 진행하였으며, Green 등 [12]은 현재 미국의 전기자동차 정책의 비효율성을 지적하고 이를 해결하기 위해 얼리 어답터(Early Adopter)와 틈새시장에 집중한 정책 수행을 주장하였다. Gnamn 등 [13]은 독일의 실제 운행 데이터를 기반으로 전기자동차 확산을 추정하고, 확산 효율성 증가를 위한 정책을 제안하였다.

나아가 분석 대상에 정부를 포함시키거나, 정부 정책으로 시나리오를 구성하여 친환경자동차 시장에서 정부와 기업, 소비자의 상호작용을 확인하고자 하는 연구도 진행되고 있다. Encarnação 등 [14]은 전기자동차 채택에 있어 정부, 기업, 소비자 세 주체가 참여하는 진화게임이론 모형을 구성함으로써 각 주체들 사이의 전략적 상호작용을 확인하였다. 또한 Fan and Dong [15]은 정부의 보조금

전략 시나리오에 따른 소비자와 생산자의 반응을 확인하는 모델을 구성하고 친환경자동차의 사례를 기반으로 시뮬레이션을 진행하였으며, 그 결과 기업이 저탄소 관련 전략을 취하고 소비자가 저탄소 관련 소비를 하는 비율이 적을 때는 정부 보조금만으로 친환경자동차를 확산시킬 수 없다는 결론을 도출하였다.

친환경자동차 사이의 경쟁을 고려한 연구도 진행되고 있다. Offer 등 [16]은 2030년까지의 비용 예측을 기반으로 영국에서의 내연기관자동차 및 친환경자동차에 대한 기술경제적 분석을 진행하였으며, 그 결과 2030년에는 수소자동차가 내연기관자동차보다 저렴해질 것으로 예측하였다. Morrison 등 [17]은 전기자동차와 수소자동차의 소유 총 비용(TCO)을 분석한 뒤 이를 기반으로 경량자동차(Light Duty Vehicle) 부문에서 두 자동차의 경쟁력 및 확산 정도를 예측하였다.

친환경자동차 확산 관련 연구의 경우 주로 소비자의 관점에서 친환경자동차 선택에 영향을 미치는 여러 변수들을 고려하여 각 자동차 간의 경제성 분석 및 확산 정도를 비교하였으며, 정부와 기업의 경우 대부분 소비자의 반응과 관계없이 특정 정책 및 가격을 설정한다고 가정하여 연구를 진행하였다. 그러나 실제로 정부 및 기업의 경우 소비자의 반응을 예측한 뒤 그에 따라 정책과 가격을 결정한다. 따라서 해당 상황을 반영한 상호작용 및 그에 따른 확산 정도 분석이 필요하다.

2.2 다단계 의사결정 모형을 반영한 선행 연구

친환경자동차 관련 의사결정 문제는 정부, 기업 등 다양한 주체들의 관점에서 진행되어 왔다. 특히 친환경자동차의 다단계 의사결정 모형은 주로 스마트 그리드 관련 충전 분야에서 이루어져 왔으며, 대부분 Stackelberg 모형을 활용하여 분석을 진행하였다. Yoon 등 [18]은 전기자동차를 집에서 충전하는 상황에서 소매업자(Retailer)가 가격 설정을 통해 자신의 이윤을 극대화하고 소비자는 가격을 기반으로 자신의 효용을 극대화하는 상황을 Stackelberg 모형으로 분석하였다. Maharjan 등 [19]은 기존의 수요 반응 경영(Demand Response Management; DRM) 연구 영역을 종합하여 공익 기업(Utility Company)와 사용자(End-user) 간의 Stackelberg 모형을 도출한 뒤 주체들이 지엽적 정보만 가지고 있는 경우에 대하여 알고리즘을 통해 분석하였다. Yu and Hong [20]은 하나의 기업과 다수의 사용자에게 대하여 전기 교환을 위한 수요 반응 모델을 구성하고, 실시간 가격(Real-Time Prices)을 적용하여 결과를 확인하였다.

한편 최근에는 친환경자동차의 확산에서도 다단계 의사결정 모형이 사용되고 있다. Gu 등 [21, 22]은 정부가 생산자와 소비자에게 보조금을 지급하고, 생산자가 전기자동차와 내연기관자동차를 생산하며, 소매업자가 생산된 자동차를 소비자에게 판매하는 모델을 구축하여 보조금의 효과 및 연료 가격과의 연관성 등을 확인하였다. Zhu 등 [23]은 중국에서의 전기자동차 판매량 과 전기자동차 충전 인프라 설치 사이의 간접적인 네트워크 효과(Network effects)를 확인하기 위해 정부, 인프라 투자자, 전기자동차 소비자로 구성되는 Stackelberg 모형을 구성하고 정부 보조금의 변화에 따른 전기자동차 확산 정도 및 네트워크 효과

고려 여부에 따른 보조금의 변화를 파악하였다. 그러나 대부분의 연구에서 분석 대상이 전기자동차로 국한되었다. 현재 전세계 시장에서 판매되고 있는 친환경자동차는 하이브리드자동차, 전기자동차, 수소자동차로 총 세 가지이다. 이 중 하이브리드자동차의 경우 한국에서 이미 지원이 종료된 상황이므로 정부 정책이 영향을 미치지 않으며, 따라서 정부의 정책적 유인의 효과를 확인하기 위해서는 전기자동차에 더하여 수소자동차로 그 범위를 넓혀 연구를 진행하는 것이 필요하다. 따라서 본 연구는 전기자동차와 수소자동차에 대하여 3단계 의사결정 모형을 수립하여 분석을 진행한다.

2.3 다제품 독점 기업에 대한 선행 연구

다제품 독점 기업(Multiproduct Monopolist)에 대한 연구는 주로 하나의 기업이 여러 제품을 동시에 판매하는 상황에서 가격 설정 방식의 변화 등을 통해 기업의 이윤이 어떻게 변화하는지에 대해 분석한다. McAfee 등 [24]은 개별 소비자들의 선호도에 대한 지식이 한정적일 때 다제품 독점기업이 묶어팔기(Bundling)를 통해 이윤을 극대화할 수 있는 조건에 대해 제시한다. Mirman & Sibley [25]는 기업이 비균등분포를 가지는 가격 함수를 설정함으로써 갖게 되는 여러 특성들을 분석한다. Mayo [26]는 전기 등의 공공재의 비용 구조를 고려하였을 때 기업의 크기가 작은 경우에는 규모의 경제가 발생하나 기업의 생산량이 증가하여 경쟁적 압력이 부재하는 상황이 되면 규모의 불경제가 발생함을 확인하였다.

또한 다제품 독점 기업이 가격을 설정하는 상황에서 정부의 정책이 어떠한 방식으로 기업의 행동을 변화시키는지 확인하는 연구도 다수 진행되어 왔다. Vogelsang & Finsinger [27]는 규제 주체가 기업의 정보를 추적하는 데 한계가 있을 때 다제품 독점 기업이 특정 가격 설정 방식을 사용하도록 하는 유인 매커니즘에 대해 이야기한다. Fraser [28]는 가격 상한 규제(Price-Cap Regulation)가 다제품 독점 기업의 가격과 비용 간 관계에 미치는 영향에 대해 확인한다. Amir 등 [29]은 상호 관계의 선형적 수요와 일정한 한계 비용을 가지는 다제품 독점 상황에서의 가격과 자중 손실을 분석하고, 생산 보조금이 사회적 효율성에 미치는 영향에 대해 확인한다. Armstrong & Vickers [30]는 규제가 없는 독점 상황, 규제가 존재하는 독점 상황, 쿠르노 과점 상황에서의 다제품 기업의

행동을 확인한다. 본 연구에서는 정부의 정책 변화에 따른 기업의 가격 변화를 반영하여, 다제품 독점 기업이 두 친환경자동차의 가격을 결정하는 다제품 독점 기업의 상황에서 정부의 정책적 유인이 기업의 가격 변화에 미치는 영향을 확인하고자 한다.

제 3 장 신기술 확산에 대한 경쟁적 의사결정 모형

3.1 3단계 경쟁적 의사결정 모형의 개요

본 논문에서 제안하는 3단계 의사결정 모형은 현재 시장상황을 주도하고 있는 내연기관자동차와 신기술에 속하는 전기자동차와 수소자동차 간의 경쟁 관계를 고려하여 정부의 정책적 유인이 기업 및 소비자의 행동에 미치는 영향을 파악하고, 친환경자동차의 확산 정도를 분석한다. 해당 모형이 그림 1에 표현되어 있다.

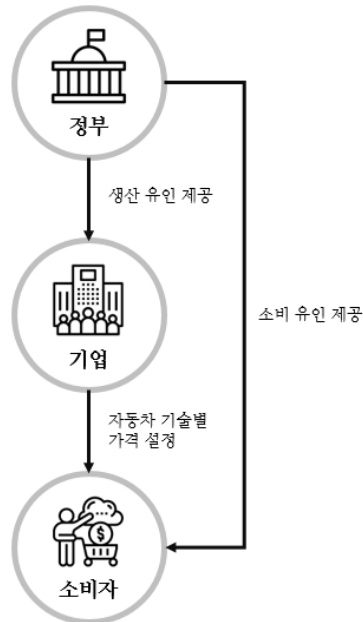


그림 1. 3단계 경쟁적 의사결정 모형

먼저, 1단계에서 정부는 기업 및 소비자에게 정책적 유인을 제공함으로써 전기자동차와 수소자동차를 확산시키고자 하며, 이를 통해 사회 후생(Social Welfare)을 극대화하고자 한다. 즉, 정부는 전기자동차와 수소자동차의 확산뿐만 아니라 차종이 확산되는 과정에서 기업과 소비자의 효용 또한 높이는 것을 목적으로 한다.

또한 2단계에서 기업은 정부가 기업에게 부여하는 정책적 유인 수준을 확인하여 전기자동차와 수소자동차의 가격을 설정하며, 차량 판매를 통해 얻게 되는 이윤을 극대화하고자 한다. 본 연구에서는 독점 기업을 가정하여 하나의 기업이 가격을 결정하며, 동시에 기업은 전기자동차와 수소자동차의 가격만 결정하여 내연기관자동차의 가격은 현재 수준으로 고정되어 있다고 가정한다.

소비자는 3단계에서 정부가 설정한 정책적 유인 수준 및 기업이 설정한 가격에 기반하여 개인의 효용을 극대화하는 차종을 선택하며, 이러한 선택을 통해 얻게 되는 효용은 해당 차종을 사용하는 소비자의 수에 영향을 받는다. 친환경자동차의 경우 한정된 인프라를 공유하는 사람의 수가 증가함에 따라 인프라를 통해 얻게 되는 효익이 감소하게 되며, 이는 곧 효용의 감소로 이어진다.

본 논문에서 제안하는 3단계 의사결정모형은 정부가 결정하는 정책적 유인 수준이 기업에게 도달하여 기업의 가격 설정에 영향을 미치고, 기업이 설정한 차종의 가격이 소비자의 차종 선택에 영향을 미친다. 이 때 1단계에서 2단계로 넘어갈 때 정부가 선도자, 기업이 추종자로 기능하며, 2단계에서 3단계로 넘어갈 때에는 기업이 선도자, 소비자가 추종자가 된다. 따라서 제안된 의사결정모형은 Stackelberg Game과 유사성을 가지며, 분석 역시 3단계 Stackelberg Game 모형에 기반하여 진행하고자 한다.

3.2 소비자의 최적 차종 선택 모형

소비자는 정부가 부여하는 정책적 유인의 수준 및 기업이 설정한 가격을 확인하여 차종을 선택하며, 인프라 수준으로 인하여 현재 특정 차종을 선택하고 있는 사람의 수에 영향을 받는다. 내연기관자동차, 전기자동차, 수소자동차를 선택함에 따라 달라지는 소비자의 효용 U 는 다음과 같이 정의된다. $x_{ICEV}, x_{EV}, x_{FCEV}$ 는 각각 내연기관자동차, 전기자동차, 수소자동차를 선택한 사람의 수이며, 총합은 N 으로 고정되어 있다. 또한, 소비자들은 동일한 상황에서 모두 동일한 효용을 가진다고 가정한다.

$$U_{ICEV} = B_{ICEV}(x_{ICEV}, k_{ICEV}) - p_{ICEV} - o_{ICEV} \quad (3.1)$$

$$U_{EV} = B_{EV}(x_{EV}, k_{EV}) - p_{EV} - o_{EV} + s_{EV}^{con} \quad (3.2)$$

$$U_{FCEV} = B_{FCEV}(x_{FCEV}, k_{FCEV}) - p_{FCEV} - o_{FCEV} + s_{FCEV}^{con} \quad (3.3)$$

B_i 는 차종 i 를 구매함으로써 소비자가 얻게 되는 차량 이용 편익이며, 차량을 구매함으로써 얻게 되는 이동의 편의성 등을 포함한다. k_i 로 표현되는 충전소 수가 한정되어 있는 상황에서 해당 차종을 선택하는 소비자의 수가 증가하게 되면 소비자는 차량을 이용하는 과정에서 불편함을 느끼게 되며, 따라서 차량 이용 편익은 충전소 수와 현재 해당 차종을 이용하는 사람에 영향을 받는다. p_i 는 차종 i 의 가격이며 o_i 는 차종 i 의 운행비용이다. 내연기관자동차의 경우 운행비용에 유류비가 포함되며, 전기자동차는 전기 가격, 수소자동차는 수소 가격이 포함된다. s_{EV}^{con} 과 s_{FCEV}^{con} 은 각각 소비자가 전기자동차와 수소자동차를

선택함으로써 정부가 제공하는 정책적 유인이다.

소비자는 가능한 최소의 비용을 지불하여 최고의 편익을 누리하고자 하며, 이 과정에서 자신의 효용을 극대화하는 차종을 선택하고자 한다. 이 때 소비자 간의 게임은 모든 소비자가 동일한 대칭적 게임(Symmetric Game)이며, 따라서 소비자 개인의 효용을 극대화하는 것은 전체 소비자의 효용을 극대화하는 것과 동일하다. 따라서 소비자들의 효용을 극대화하는 문제는 식 (3.4)와 같이 나타낼 수 있다. 이 때 $C = \{ICEV, EV, FCEV\}$, $C^E = \{EV, FCEV\}$ 이며, $\tilde{x} = \{x_{ICEV}, x_{EV}, x_{FCEV}\}$ 이다.

$$\max_{\tilde{x}} U(\tilde{x}(\tilde{p}, \tilde{s})) = \sum_{i \in C} U_i x_i \quad (3.4)$$

$$\text{s.t. } x_i \geq 0 \quad i \in C, \quad j \in C^E \quad (3.5)$$

3.3 기업의 최적 가격 설정 모형

기업은 정부가 부여한 정책적 유인 수준을 확인한 뒤 차종의 가격을 결정하여 자신의 이윤을 극대화하고자 하며, 이 때 이윤은 소비자의 차종 선택 비율에 영향을 받는다. 내연기관자동차, 전기자동차, 수소자동차를 판매함에 따라 얻을 수 있는 기업의 이윤 π 는 다음과 같이 정의된다.

$$\pi_{ICEV} = (p_{ICEV} - c_{ICEV}) \quad (3.6)$$

$$\pi_{EV} = (p_{EV} - c_{EV} + s_{EV}^{pro}) \quad (3.7)$$

$$\pi_{FCEV} = (p_{FCEV} - c_{FCEV} + s_{FCEV}^{pro}) \quad (3.8)$$

c_i 는 차종 i 를 생산하여 발생하는 생산비이며, s_{EV}^{pro} 와 s_{FCEV}^{pro} 는 기업이 전기자동차와 수소자동차를 생산함에 따라 정부가 제공하는 정책적 유인이다. 즉, 기업은 차종 i 를 한 대 판매함으로써 $p_i - c_i$ 만큼의 수익을 얻게 되며, 동시에 친환경자동차를 판매할 경우 s_i^{pro} 만큼의 추가적인 이익을 얻는다. 내연기관자동차의 가격은 현재 수준으로 고정되어 있으며, 기업은 전기자동차와 수소자동차의 가격을 결정한다. 기업의 경우 전기자동차와 수소자동차 가격을 내연기관자동차 가격 이하로 감소시키지 않는다.

기업은 가격 설정을 통해 많은 수익을 제공하는 차종을 확산시키고자 한다. 따라서 기업이 최적 가격 설정 전략인 $\tilde{p} = \{p_{EV}, p_{FCEV}\}$ 를 선택하는 문제는 식 (3.9)와 같이 정의된다.

$$\max_{\tilde{p}} \Pi(\tilde{p}; \tilde{x}(\tilde{p}, \tilde{s}), \tilde{s}) = \sum_{i \in C} \pi_i x_i \quad (3.9)$$

$$\text{s.t.} \quad \begin{cases} x_i \geq 0 \\ p_j \geq p_{ICEV} \end{cases} \quad i \in C, \quad j \in C^E \quad (3.10)$$

3.4 정부의 최적 보조금 설정 모형

기업과 소비자에게 보조금을 제공함에 따라 결정되는 정부의 이득 함수는 사회적 후생 함수로 정의하고, 이를 표현하면 (3.11)과 같다. 이 때 $\tilde{s} = \{s_{EV}^{con}, s_{EV}^{pro}, s_{FCEV}^{con}, s_{FCEV}^{pro}\}$ 이다.

$$\max_{\tilde{s}} \gamma U(\tilde{x}(\tilde{p}, \tilde{s})) + (1-\gamma) \Pi(\tilde{p}; \tilde{x}(\tilde{p}, \tilde{s}), \tilde{s}) - I(\tilde{s}; \tilde{x}(\tilde{p}, \tilde{s})) + A(\tilde{x}(\tilde{p}, \tilde{s})) \quad (3.11)$$

$$I(\tilde{s}, \tilde{x}(\tilde{p}, \tilde{s})) = \sum_{j \in C^E} (s_j^{con} + s_j^{pro}) x_j \quad (3.12)$$

$$A(\tilde{x}) = \sum_{j \in C^E} \alpha_j x_j \quad (3.13)$$

$U(\tilde{x}(\tilde{p}, \tilde{s}))$ 는 소비자가 차종을 선택함으로써 얻게 되는 효용의 총량, 즉 소비자 잉여이며, $\Pi(\tilde{p}; \tilde{x}(\tilde{p}, \tilde{s}), \tilde{s})$ 는 기업이 가격을 설정하고 차종을 판매함으로써 얻게 되는 이윤의 총량이다. $I(\tilde{s}, \tilde{x}(\tilde{p}, \tilde{s}))$ 는 정부가 기업과 소비자에게 지급한 보조금 비용의 총합으로 (3.12)와 같이 정의되며, $A(\tilde{x})$ 는 친환경자동차를 확산시킴으로써 정부가 얻게 되는 환경적 효용의 총량으로, α 는 친환경자동차를 통해 얻게 되는 환경적 편익이다. 즉, 정부의 이득 함수는 전체 소비자 잉여 및 생산자 잉여, 그리고 정부가 느끼는 환경 관련 이익을 종합한 사회 후생을 반영한다. 정부는 보조금 수준인 \tilde{s} 를 조정함으로써 이러한 사회 후생을 극대화하고자 한다.

제 4 장 분석

4.1 균형 전략의 조건

본 논문에서 제시하는 소비자의 효용 함수의 경우 내부에 특정 차종을 선택한 소비자의 비율이 포함되어 있다. 따라서 소비자들 간에 차종을 선택하는 상황은 전통적 게임이론으로 분석하는 데 무리가 있다. 또한, 친환경 정책과 관련하여 소비자가 기존의 행동에서 친환경적 행동으로 변화하는 데 있어 관성이 작용하며, 다수가 어떻게 행동하느냐에 따라 개인의 행동 변화에 영향을 미친다. [31] 즉, 소비자들은 다른 소비자들의 차종 선택을 관측한 뒤 자신의 전략을 최적화하며, 본 논문은 친환경자동차 채택 과정에서의 이러한 특성을 반영하기 위하여 소비자의 차종 선택 상황을 진화게임이론[32, 33]을 활용하여 모형화하며, Replicator dynamic을 통해 균형을 찾고자 한다.

Replicator dynamic의 균형에서 소비자들은 자신이 선택한 차종에 상관없이 모두 동일한 효용을 가지며, 따라서 선택을 변화시킬 유인이 존재하지 않는다. 이러한 균형을 분석하기 위해 앞서 모델에서 제시되었던 x_i 를 차종 i 를 선택하는 사람의 비율로 사용한다.

한편, 각 차종을 선택하는 비율은 해당 차종을 선택함으로써 얻게 되는 효용과 전체 소비자 집단이 누리고 있는 효용의 평균의 차이에 영향을 받는다. 현재 차종 i 를 선택함으로써 얻는 효용이 소비자 전체의 평균보다 크다면 해당 차종을 선택하는 소비자의 비율은 증가하게 되며, 반대의 경우 감소하게 된다.

더하여, 특정 차종을 선택하는 소비자의 비율이 클수록 해당 차종을 선택하는 소비자의 비율은 증가한다. 따라서 차종 i 를 선택하는 소비자 비율의 변화율 \dot{x}_i 는 (4.1)과 같이 정의된다.

$$\dot{x}_i = x_i \frac{(U_i - \bar{U})}{\bar{U}} \quad (4.1)$$

$$\bar{U} = \sum_{i \in C} U_i x_i \quad (4.2)$$

\bar{U} 는 전체 소비자들이 누리는 효용의 평균이며, 소비자들은 현재 선택한 차종의 효용이 평균보다 낮을 경우 $\frac{(U_i - \bar{U})}{\bar{U}}$ 의 확률로 차종을 변경한다. 모든 i 에 대해 \dot{x}_i 가 0이 되면 차종을 바꾸는 사람의 비율이 0이므로 해당 지점이 균형이 되며, 도출된 균형은 $\tilde{x}^* = (x_{ICEV}^*, x_{EV}^*, x_{FCEV}^*)$ 로 나타낼 수 있다. 이 때 x_i^* 는 균형점에서 차종 i 를 선택하는 소비자들의 비율이다.

더하여, 분석을 위해 차량 이용 편익 모형을 이동성 확보로 인한 기본 편익과 충전소 수 등 인프라에 따른 편익의 합으로 구성하였으며, 식은 다음과 같다.

$$B_{ICEV} = B_{car} + \theta_{ICEV} \quad (4.3)$$

$$B_{EV}(x_{EV}, k_{EV}) = B_{car} + \theta_{EV}^{Slow} \frac{k_{EV}^{Slow}}{x_{EV}} + \theta_{EV}^{Fast} \frac{k_{EV}^{Fast}}{x_{EV}} \quad (4.4)$$

$$B_{FCEV}(x_{FCEV}, k_{FCEV}) = B_{car} + \theta_{FCEV} \frac{k_{FCEV}}{x_{FCEV}} \quad (4.5)$$

θ_i^j 는 충전소 수와 관련된 인프라 편익을 다른 편익의 단위로 조정하는 환산계수이며, k_i^j 는 차종 i 의 충전소 수이다. 전기자동차의 경우 급속충전과 완속충전으로 나누어지기 때문에 이를 각각 k_{EV}^{Fast} 와 k_{EV}^{Slow} 로 분리하였다. 인프라의 경우 동력원에 따른 인프라 차이가 존재한다. 내연기관자동차는 인프라 완성도가 높은 반면, 친환경자동차는 인프라가 완벽하게 구축되어 있지 않다. 따라서 내연기관자동차의 인프라는 고정되어 있다고 가정하며, 동시에 친환경자동차의 인프라 편익은 혼잡성에 의해 감소한다고 가정한다. 균형점에서 소비자 전체의 효용은 다음과 같이 정의된다.

$$U(X^*) = \sum_{i \in C^A} U_i x_i^* \quad (4.6)$$

$$\text{s.t. } B_j(x_j, k_j) \leq B_{ICEV} \quad (4.7)$$

한편, 기업은 3단계에서 소비자들 간의 진화게임이론 결과 도출된 균형을 기반으로 자신의 이윤을 극대화하기 위해 적절한 가격 전략을 취한다. 즉, 기업의 입장에서는 가격에 따른 소비자의 행동 변화를 파악할 수 있으며, 따라서 3.3절의 가정에 근거하여 가능한 가격들을 고려한 뒤 정부가 부여한 정책적 유인 수준을 바탕으로 전기자동차 및 수소자동차의 가격을 결정한다. 기업의 효용은 다음과 같이 정의되며, 균형점 $\tilde{p}^* = \{p_{EV}^*, p_{FCEV}^*\}$ 에서의 가격 설정 전략은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Pi(\tilde{p}^*, \tilde{x}^*) = \sum_{i \in C^A} \pi_i x_i^* \quad (4.8)$$

정부는 3단계의 소비자 균형을 기반으로 기업이 2단계에서 내린 결정을 종합하여 사회적 후생 함수를 극대화하기 위해 보조금 수준을 설정한다. 이 때 정부는 보조금 변화에 따른 기업 및 소비자의 행동 변화를 파악할 수 있으므로 가능한 범위 내에서 사회 후생을 극대화하는 보조금 수준을 결정한다. 이를 반영한 식은 다음과 같으며, 균형점 $\tilde{s}^* = \{s_{EV}^{con,*}, s_{EV}^{pro,*}, s_{FCEV}^{con,*}, s_{FCEV}^{pro,*}\}$ 에서의 보조금 수준 설정 전략은 다음과 같다.

$$U(\tilde{x}^*) + \Pi(\tilde{p}^*; \tilde{x}^*) - I(\tilde{s}^*; \tilde{x}^*) + A(\tilde{x}^*) \quad (4.9)$$

정부는 동일한 효과를 내는 보조금 경우 그 값이 작은 것을 택한다고 가정한다. 여러 보조금 수준이 차종별 동일한 확산 수준을 도출하는 경우 가장 저렴한 보조금을 선택하며, 이를 통해 예산의 효율화를 추구한다. 동시에 정부는 예산의 한정성으로 인하여 일정 수준 이상의 보조금을 제공할 수 없다. 즉, 보조금 수준의 총합에는 최대값이 존재하여 해당 값을 넘어서는 유인을 제공할 수 없다.

더하여, 친환경자동차 j 를 확산시킴으로써 정부가 얻을 수 있는 환경적 효용인 α_j 는 자동차 생산부터 운행까지 나오는 온실가스의 양인 WTW (Well-to-Wheel) 값을 고려하여 결정된다. 친환경자동차 확산의 주요 의도가 온실가스 감축에 있으므로 친환경자동차를 확산시킴으로써 정부에게 주어지는 환경적

효용은 내연기관자동차 대비 친환경자동차를 사용함으로써 감소되는 온실가스의 양과 온실가스의 사회적 비용인 SC 를 곱함으로써 도출한다. 따라서 $A(\tilde{x})$ 는 아래와 같이 나타난다.

$$A(\tilde{x}) = SC \times \left(\sum_{j \in C^E} WTW_j \times x_j \right) \quad (4.10)$$

4.2 균형 전략의 존재 및 도출

본 논문에 제시된 3단계 경쟁적 의사결정 모형의 경우 소비자들 간의 균형이 보장된다는 전제 하에 정부, 기업 및 소비자의 균형 전략을 도출할 수 있다. 따라서 소비자들 간 게임에서의 균형 존재 여부를 확인하는 것이 필요하다. 본 논문에서 사용된 진화 게임의 균형 존재 여부 및 수렴 조건은 아래의 Theorem 1에서 확인할 수 있다.

Theorem 1. 본 논문에서 제시하는 소비자들 간 진화게임 모형에는 균형이 존재하며, $t \rightarrow \infty$ 이면 균형에 수렴한다.

Proof. [34]에 의하면 Replicator dynamic 하의 대칭적 게임 상황에서 \tilde{x}_0 지점에서 시작할 때, $t \rightarrow \infty$ 이면 \tilde{x} 는 유일한 한계점에 수렴하며, 그 지점은 균형이다. 본 논문의 진화게임 모형은 replicator dynamic으로 구성되어 있으며, 동시에 소비자들이 모두 동일하여 각자가 선택한 전략으로만 구분되는 대칭적 게임이다. 따라서 [34]의 전제조건을 만족하므로 논문에 제시된 소비자들 간 진화게임 모형은 균형이 존재하며, 시간이 지나면 균형에 수렴하게 된다.

위에서 제시된 3단계 경쟁적 의사결정 모형의 부분게임 완전균형(Subgame Perfect Equilibrium)을 구하기 위한 의사 코드(Pseudo-code)는 다음과 같다. \tilde{s}_0 에서 주어지는 보조금의 총합의 최대 수준은 정해져 있으며, \tilde{p}_0 에서 주어지는 전기자동차 가격과 수소자동차 가격은 각각의 차종이 가질 수 있는 가격의 최대값이다. 정부는 가능한 보조금 조합을 변화시키며 사회후생의 가중평균 값의

최대치를 가져오는 보조금 수준을 채택하고자 하며, 기업은 가능한 가격 조합을 변화시키며 이윤을 극대화하는 가격을 선택하고자 한다. 또한 소비자는 정부의 보조금 및 기업의 가격을 확인하여 효용을 극대화하는 방향으로 균형 전략을 수립하게 되며, 이 과정에서 소비자 간의 진화게임에서 균형으로 수렴하기 위해 필요한 충분한 시간이라고 판단되는 T 만큼의 반복 횟수를 적용하여 균형을 찾고자 한다.

Pseudo-code 1: 3-stage Competitive Decision Model

- 1: The government announces the subsidy level \tilde{s}_0 to the enterprise and the consumer.
 - 2: while $s_{EV}^{con} + s_{EV}^{pro} + s_{FCEV}^{con} + s_{FCEV}^{pro} \geq 0$ do
 - 3: The enterprise set the price level \tilde{p}_0 .
 - 4: while $p_{FCEV} \geq p_{ICEV}$ and $p_{EV} \geq p_{ICEV}$ do
 - 5: Set initial penetration rate of ICEV, EV and FCEV.
 - 6: for i in $1:T$
 - 7: Compute the consumers' utility.
 - 8: Calculate the average utility \bar{U} .
 - 9: If $\bar{U} > U_i$ then
 - 10: Change the vehicle type with probability $\frac{(U_i - \bar{U})}{\bar{U}}$ in (4.2).
 - 11: Else
 - 12: Maintain the type.
 - 13: End if
-

-
- 14: End for
 - 15: Check the equilibrium among consumers and consumers' utility.
 - 16: Calculate the profit of the enterprise.
 - 17: Change the combination of p_{EV} and p_{FCEV} .
 - 18: End while
 - 19: The enterprise finds out the best price level on the subsidy level.
 - 20: Calculate the utility of the government on the best price level of the enterprise.
 - 21: Change the combination of s_{EV}^{con} , s_{EV}^{pro} , s_{FCEV}^{con} , s_{FCEV}^{pro} .
 - 22: End while
 - 23: The government finds out the best subsidy level to maximize its utility.
-

4.3 균형 전략의 특성 분석

4.3.1 수치 예제

본 절에서는 수치 예제를 통해 3단계 경쟁적 의사결정 모형을 분석하고자 한다. 분석을 위해 사용한 변수들은 아래의 표 1과 같다. 생산비는 초기 가격 수준의 절반으로 가정하였다. 내연기관자동차 값은 모두 고정되어 있으며, 전기자동차 및 수소자동차의 값은 변화할 수 있다. Well-to-Wheel 값은 [35, 36, 37]을 참조하였다.

표 1. 매개변수

매개변수	수치	매개변수	수치
B_{car}	4,000,000	k_{EV}^{Slow}	5,350
P_{ICEV}	1,755,000	k_{EV}^{Fast}	3,408
P_{EV}	4,893,750	k_{FCEV}	29
P_{FCEV}	8,612,500	θ_{ICEV}	575,350
O_{ICEV}	1,684,159	θ_{EV}^{Slow}	1.8
O_{EV}	414,513	θ_{EV}^{Fast}	16.7
O_{FCEV}	1,320,000	θ_{FCEV}	200
C_{ICEV}	877,500	WTW_{ICEV}	2,958,783
C_{EV}	2,446,875	WTW_{EV}	1,378,530
C_{FCEV}	4,306,250	WTW_{FCEV}	11,971
k_{ICEV}	11,507	SC	3

전기자동차와 수소자동차에 부여할 수 있는 정책적 유인 수준의 최대값은 각각 전기자동차 초기 가격의 30%, 수소자동차 초기 가격의 50% 수준이라고 가정한다. 즉, 정부는 전기자동차에 1,650,000 이하, 수소자동차에 4,300,000 이하의 정책적 유인만 제공할 수 있다.

본 모형은 3단계 Stackelberg 게임 모형으로, 정부가 게임의 선도자로서 정책적 유인 수준을 지정하면 기업이 해당 수준을 관측한 뒤 가격을 설정하고, 소비자는 정부의 유인 수준 및 기업의 가격을 관측한 뒤 차종을 선택하게 된다. 즉, 그림 2와 같이 정부가 설정한 보조금 별로 소비자들의 차종 선택 비율 균형과 소비자 효용, 기업 효용 및 사회 후생이 도출되면 정부는 가장 높은 사회 후생을 도출하는 보조금을 선택하고, 그림 3과 같이 기업이 설정한 가격 별로 기업의 효용이 도출되며, 가격에 따라 그림 4, 5와 같이 소비자들의 차종 선택 비율 균형 및 소비자 효용이 도출된다.

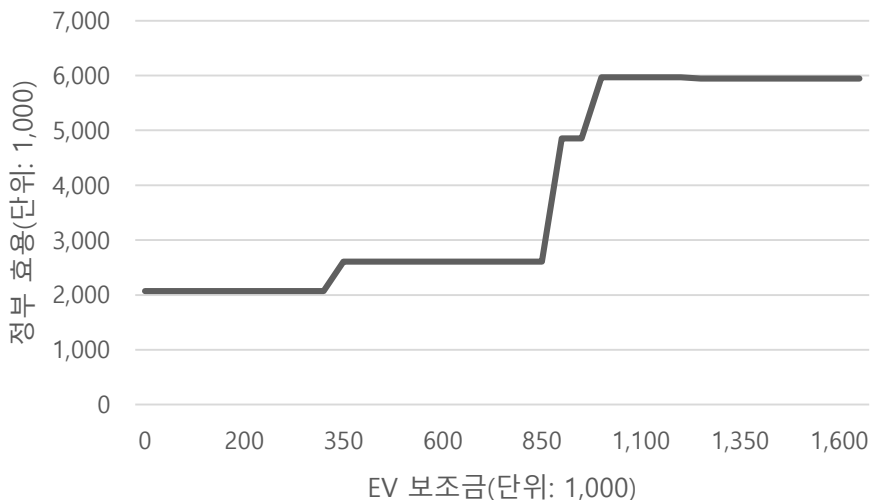


그림 2. 정부 효용

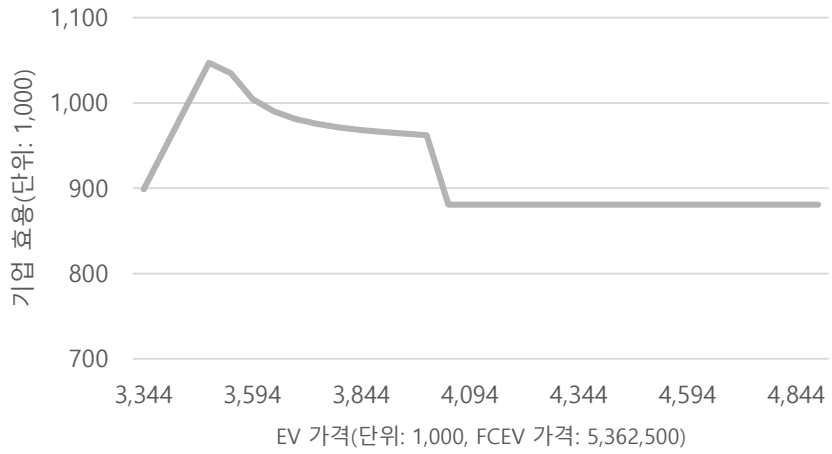


그림 3. 기업 효용

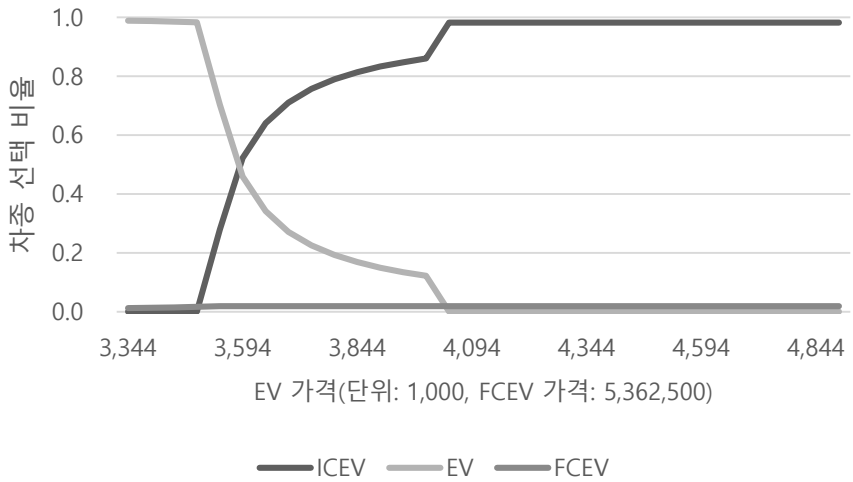


그림 4. 소비자의 차종 선택 비율

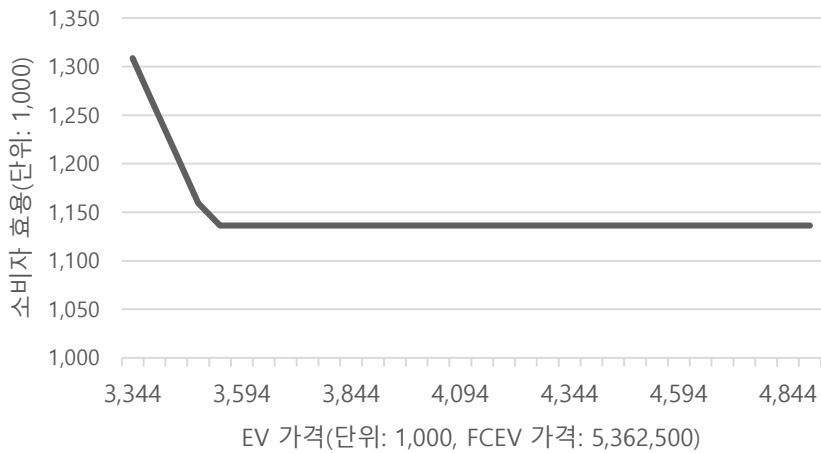


그림 5. 소비자 효용

본 연구에서는 기업이 친환경자동차의 가격을 50,000씩 조정하여 소비자의 반응을 관측한 뒤 자신의 이윤을 극대화하는 가격을 선택하고, 정부는 보조금 수준을 50,000씩 조정하여 기업 및 소비자의 반응을 확인한 뒤 사회 후생을 극대화하는 수준을 선택하도록 하여 모형을 분석하였다. 내연기관자동차, 전기자동차, 수소자동차의 초기 채택 비율은 0.95, 0.04, 0.01로 설정하였으며, T 는 소비자들의 차종 선택 비율이 수렴하기에 충분하다고 판단되는 500으로 설정하였다.

4.3.2 소비자 보조금 균형 전략의 특성 분석

소비자에게만 보조금을 지급하는 경우, 정부는 소비자에게 친환경자동차 보조금을 지급하며 기업은 소비자에게 지급되는 보조금 수준을 관측한 뒤 가격을 설정하고, 소비자는 자신에게 지급된 보조금 및 기업이 설정한 가격을 종합하여 차종을 선택한다. 분석 결과, 균형 전략 하에서 정부는 소비자에게 수소자동차 가격의 43%로 보조금을 제공하며, 해당 상황에서 수소자동차 가격은 최대 가격의 약 61% 선에서, 전기자동차 가격은 최대 가격의 약 86 ~ 100% 선에서 형성된다. 주어진 보조금 수준 하에서 전기자동차 가격이 주어진 범위 이하로 떨어질 경우 소비자의 입장에서 전기자동차로 얻을 수 있는 효용이 증가하며, 수소자동차의 상대적 경쟁력이 감소하게 되어 수소자동차를 선택했던 소비자 중 일부가 내연기관자동차 및 전기자동차로 분산된다. 이는 기업의 입장에서 이윤의 감소를 가져온다. 따라서 기업은 제시된 범위를 벗어나지 않는 선에서 가격을 결정하게 되며, 그 결과 수소자동차가 확산된다.

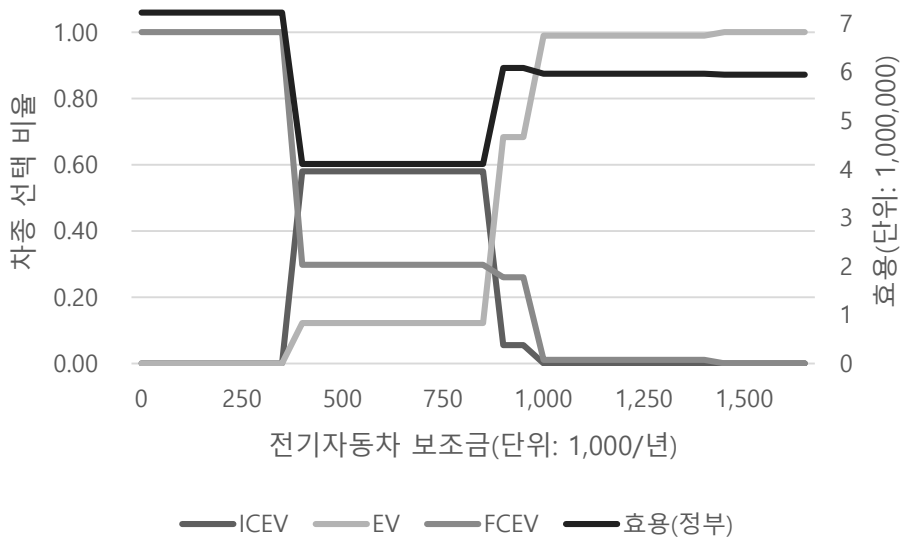


그림 6. 소비자 보조 시 차종 선택 비율 및 정부 효용

한편, 수소자동차에 제공되는 보조금 수준을 3,700,000으로 고정시켰을 때 전기자동차에 제공되는 유인이 변화됨에 따라 함께 변화하는 정부의 이득 및 차종 선택 비율은 그림 6과 같다. 수소자동차에 충분한 수준의 보조금이 제공되었기 때문에 전기자동차의 보조금 수준이 낮은 경우 수소자동차가 세 차종 간 경쟁에서 우위를 점한다. 따라서 소비자들은 수소자동차를 가장 많이 선택하게 되며, 수소자동차가 정부에게 주는 환경적 효용으로 인해 정부의 이득 또한 높아지게 된다.

그러나 전기자동차에 제공되는 보조금이 증가하여 특정 구간에 진입하게 되면 전기자동차 역시 경쟁력을 갖게 되며, 따라서 수소자동차와 전기자동차가 경쟁하는 양상을 보인다. 전기자동차와 수소자동차가 비슷한 경쟁력을 가지게

되면 기업은 낮은 가격으로 소비자들을 친환경자동차 중 한 쪽으로 유인하기보다는 두 친환경자동차 모두에게서 이윤을 얻기 위해 두 차종에 비교적 높은 가격을 설정한다. 이 과정에서 내연기관자동차의 확산 비율이 높아지고 수소자동차와 전기자동차가 그 뒤를 잇게 된다. 내연기관자동차의 확산으로 인하여 정부는 이전과 같은 환경적 효용을 누릴 수 없게 되며, 따라서 정부의 효용은 급격히 낮아지게 된다. 이를 통해 두 신기술에 정책적 유인을 제공해야 하는 경우 비슷한 수준의 유인을 제공하는 것은 두 신기술 모두의 확산을 저해하는 효과를 가져올 수 있음을 알 수 있다.

한편, 전기자동차에 부여되는 정책적 유인 수준이 충분히 높아질 경우 기업은 다시 하나의 친환경자동차를 선택하여 다른 친환경자동차 대비 낮은 가격을 설정한다. 기업의 입장에서 친환경자동차는 내연기관자동차 대비 많은 이윤을 낼 수 있는 차종이기 때문에 친환경자동차의 가격을 이전보다 조금 낮추어서라도 해당 차종을 확산시키고자 한다. 이 때 전기자동차의 유인 수준이 높아짐에 따라 기업은 전기자동차의 가격을 충분히 낮추게 되며, 소비자들 또한 기업의 가격 설정에 반응하여 수소자동차 대신 전기자동차를 선택하게 된다.

정부의 입장에서 환경적 효용이 더 큰 차종은 수소자동차이다. 따라서 정부가 전기자동차에 보조금을 많이 부여하면 전기자동차에 보조금을 제공하지 않을 때에 비하여 정부의 효용이 낮아지게 된다. 따라서 정부 입장에서는 전기자동차 보조금을 많이 지급하지 않는 것이 나으며, 동일한 수준으로 수소자동차를 확산시킬 수 있는 보조금 조합 중에서 보조금의 합이 가장 낮은 조합, 즉 전기자동차에는 보조금을 주지 않으면서 수소자동차에만 일정 수준의 보조금을 주는 것이 최적이 된다.

4.3.3 기업 보조금 균형 전략의 특성 분석

기업에게만 보조금을 지급하는 경우, 정부는 기업에게 친환경자동차 보조금을 지급하며 기업은 보조금 수준을 관측한 뒤 가격을 설정하고, 소비자는 기업이 설정한 가격을 종합하여 차종을 선택한다. 분석 결과, 소비자에게 유인을 제공한 경우와 달리 균형 전략 하에서 정부는 전기자동차와 수소자동차에 모두 유인을 지급하며, 전기자동차의 경우 초기 가격의 약 20%의 유인을 지급하여 가격이 51% 수준으로, 수소자동차의 경우 초기 가격의 약 45%의 유인을 지급함으로써 가격이 20% 수준으로 낮아지게 된다.

수소자동차는 그 가격이 내연기관자동차 수준으로 낮아짐에도 불구하고 확산되지 않는데, 이는 수소자동차의 인프라의 불완전성 및 높은 운행 비용에서 기인한다. 수소자동차는 인프라의 완성도가 높은 내연기관자동차에 비하여 낮은 수준의 인프라를 가지고 있다. 동시에 수소자동차의 경우 연료 비용이 내연기관자동차와 비슷한 수준으로, 전기자동차의 약 3배이며, 따라서 수소자동차는 연료 비용 측면에서 전기자동차 대비 강점을 가지지 못한다. 소비자의 입장에서 수소자동차는 내연기관자동차와 전기자동차 대비 강점을 가지지 못하는 차종이다. 따라서 소비자는 내연기관자동차 또는 전기자동차를 선택하여 자신의 효용을 극대화하고자 한다.

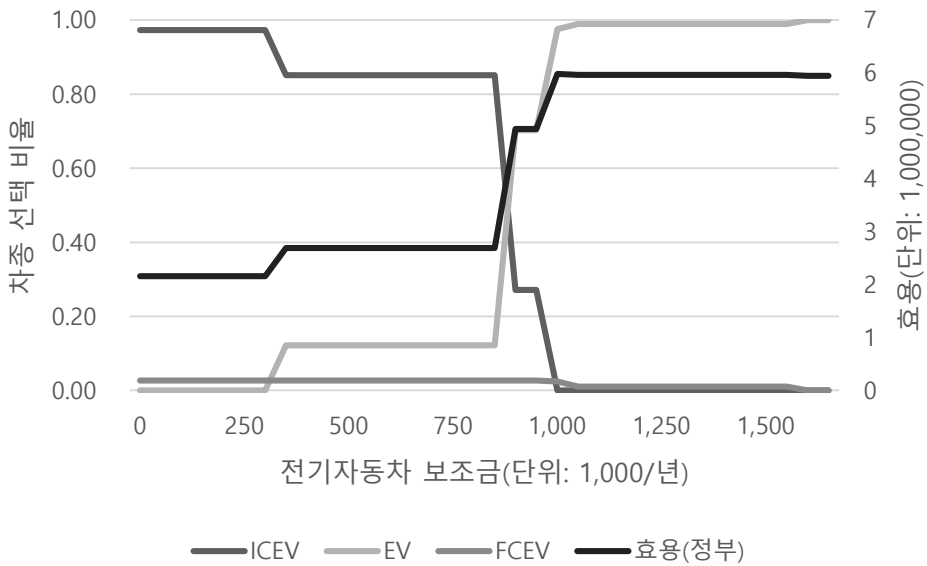


그림 7. 기업 보조 시 차종 선택 비율 및 정부 효용

수소자동차에 부여되는 정책적 유인이 3,850,000 수준일 때 전기자동차 정책 유인 수준 변화에 따른 정부 이득 변화 및 소비자의 차종 선택 변화는 그림 7과 같다. 소비자에게 유인을 부여했을 때와 달리 수소자동차의 경쟁력이 감소하여 내연기관자동차와 전기자동차 간의 경쟁이 주가 되는 형태를 가진다.

전기자동차에 주어지는 보조금 수준이 낮을 때에는 내연기관자동차 대비 전기자동차의 가격이 지나치게 높아 전기자동차가 내연기관자동차 대비 경쟁력을 가지지 못하며, 내연기관자동차, 수소자동차, 전기자동차 순으로 소비자에게 채택되는 비율이 높아진다. 그러나 보조금이 일정 수준 이상 높아지면 기업은 전기자동차의 가격을 낮추며, 이는 소비자 측면에서 전기자동차를 선택함으로써 얻게 되는 효용의 증가로 이어지므로 대부분의 소비자가 내연기관자동차 대신

전기자동차를 선택하게 된다.

정부의 입장에서는 내연기관자동차 대비 전기자동차가 확산됨으로써 얻는 효용이 크며, 따라서 전기자동차의 확산 양상과 정부의 효용 변화 양상이 동일한 형태를 가지게 된다. 전기자동차에 제공되는 유인이 적을 때는 정부가 얻을 수 있는 환경적 효용이 작으므로 정부가 얻는 효용 또한 작으나, 유인이 증가하며 전기자동차가 확산됨에 따라 정부가 얻을 수 있는 환경적 효용이 증가하여 정부의 전체 효용 또한 증가하는 양상을 보인다.

종합하면, 소비자에게 보조금을 제공하였을 때와 기업에 보조금을 제공하였을 때 각 경제 주체의 효용의 변화는 다음 그림 8과 같다. 소비자 보조 상황에서는 소비자의 효용, 기업 보조 상황에서는 기업의 효용이 높아진다. 또한, 소비자에게 유인을 제공하였을 때는 수소자동차가, 기업에 유인을 제공하였을 때는 전기자동차가 확산되는데, 정부의 경우 수소자동차의 확산으로 인한 환경적 효용의 증대로 인하여 소비자에게 유인을 제공하는 경우에 더 큰 효용을 얻는다.

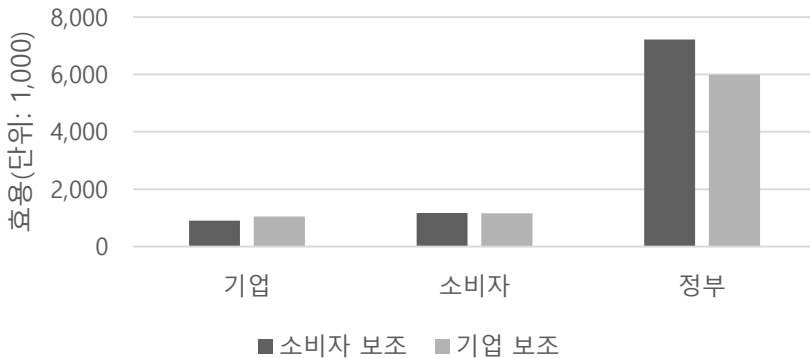


그림 8. 소비자 보조와 기업 보조 시 각 주체의 효용

4.3.4 온실가스의 사회적 비용 변화에 따른 균형 전략 변화

정부가 친환경자동차를 확산시키고자 하는 데는 친환경자동차로 인한 환경적 효용의 증가가 원인으로 작용한다. 즉, 친환경자동차를 통해 얼마나 많은 온실가스 감축을 이루어낼 수 있는가, 정부가 환경적 측면을 얼마나 많이 고려하고 있는가가 정부의 정책 변화에 영향을 미치게 되며, 이에 따라 차종이 확산되는 양상 또한 달라지게 된다. 따라서 본 절에서는 정부의 환경적 효용에 영향을 미치는 온실가스의 사회적 비용(SC)의 값을 변화시킴으로써 정부의 정책적 유인 수준 및 각 차종의 확산 양상이 어떻게 변화하는지 확인한다. 소비자에게 보조금을 제공하는 상황에서 온실가스의 사회적 비용 수준을 초기 대비 1/10 수준인 0.3, 1/2 수준인 1.5로 변화시키며 균형 전략 및 소비자들의 차종 선택 양상이 어떠한 방식으로 변화하는지 확인하였다. 사회적 비용을 변화시키며 확인한 결과 결정되는 정부의 보조금 수준 및 소비자의 차종 선택 비율은 그림 9와 10에 제시되어 있다.

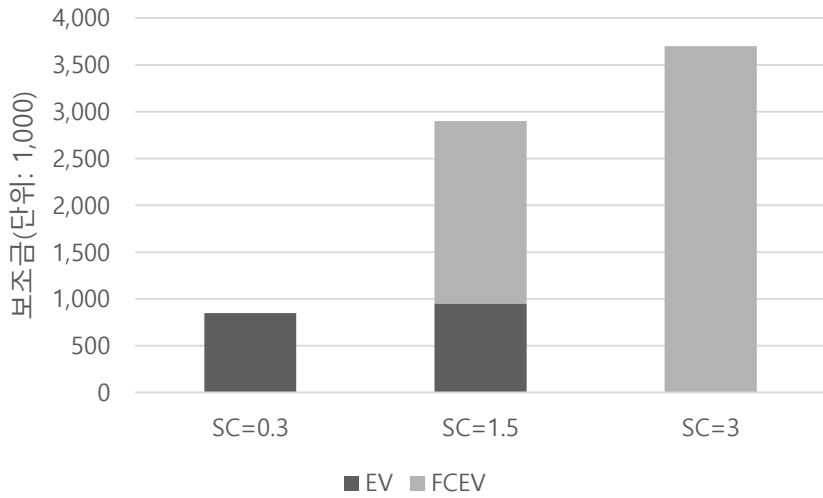


그림 9. 소비자 보조 시 온실가스의 사회적 비용 변화에 따른 보조금 변화

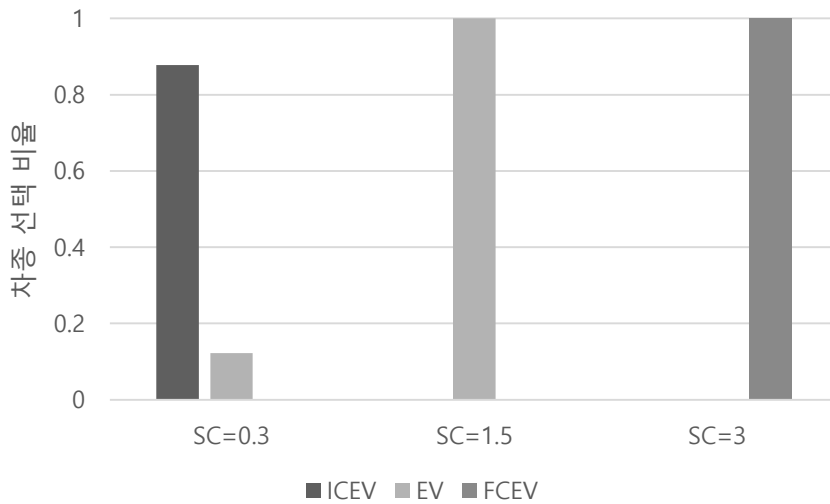


그림 10. 소비자 보조 시 온실가스의 사회적 비용 변화에 따른 차종 선택 비율 변화

SC가 높을 경우 정부의 효용은 환경적 효용에 큰 영향을 받는다. 따라서 정부는 전기자동차보다 온실가스 배출량이 작은 수소자동차에 높은 수준의 정책적 유인을 부여하여 해당 차종을 확산시키고자 하며, 대부분의 소비자가 수소자동차를 선택하게 된다.

반면, 중간 수준의 SC 상황에서 정부는 사회 후생을 위해 다른 전략을 취한다. 환경적 효용의 중요성을 인지하여 친환경자동차를 확산시키고자 하나 SC가 높은 경우와 달리 사회 후생의 증대를 위해 소비자 및 기업의 효용 수준 또한 환경적 효용과 마찬가지로 사회 후생에 중요한 요인이 된다. 소비자와 기업의 입장에서 수소자동차는 가격, 인프라, 운행 비용 등의 문제로 인해 다른 차종 대비 효용과 이윤이 적다. 따라서 정부는 수소자동차 대신 전기자동차 확산을 위하여 보조금을 지급하게 된다.

한편 SC가 매우 작아지는 경우에는 환경적 효용보다 소비자 및 기업의 효용의 중요도가 증가하며, 따라서 해당 부분을 증가시키는 것이 사회 후생의 증가에 더 도움이 된다. 따라서 정부는 친환경자동차의 확산을 무조건적으로 늘리는 방향보다 친환경자동차를 적절히 확산시키면서 타 주체의 효용을 늘리는 방향으로 보조금을 지급하게 된다. 정부는 전기자동차의 완전한 확산에 필요한 보조금보다 적은 양의 보조금을 지급하고, 이러한 과정에서 내연기관자동차가 80% 이상의 확산을 보인다. 이를 통하여 정부가 환경적 이슈에 민감하게 반응하여 사회적 비용을 높게 산정할수록 정부 정책에 해당 내용이 반영되어 친환경자동차의 확산을 촉진함을 알 수 있다.

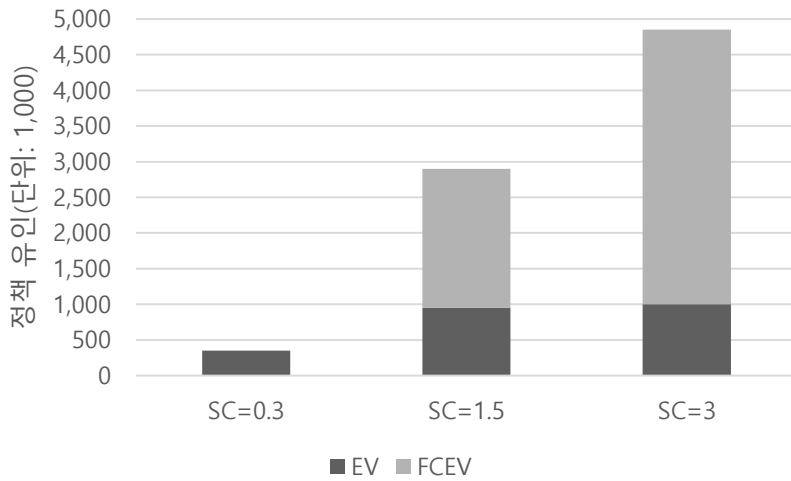


그림 11. 기업 보조 시 온실가스의 사회적 비용 변화에 따른 보조금 변화

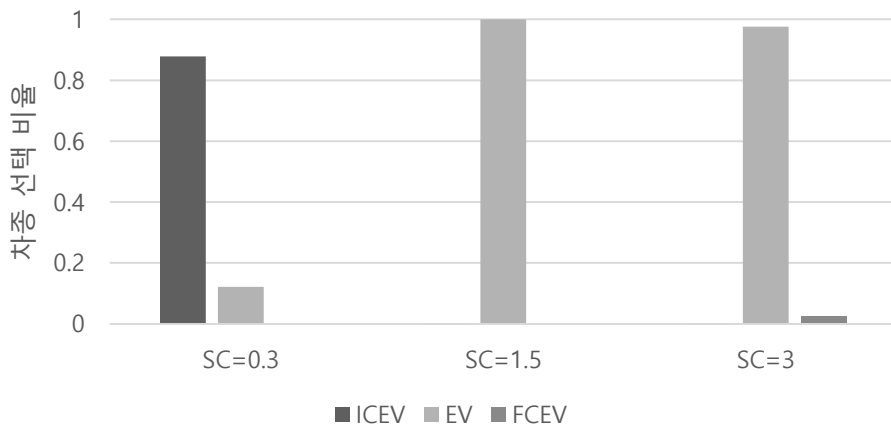


그림 12. 기업 보조 시 온실가스의 사회적 비용 변화에 따른 차종 선택 비율 변화

한편, 기업에게 정책 유인을 제공하는 경우의 보조금 수준 및 차종 선택 비율 변화는 그림 11과 12에 나타난다. SC 가 낮을 때와 중간 수준일 때에는 소비자에게 유인을 제공할 때와 동일한 양상을 보인다. 친환경자동차의 확산보다 소비자의 효용 및 기업의 이윤을 중요하게 생각하여 해당 부분을 높이는 방향으로 보조금을 설정한다.

한편 SC 가 높아지는 경우에는 소비자에게 유인을 제공할 때와 달리 수소자동차의 높은 연료 비용 및 기업의 가격 설정 조건으로 인하여 대부분의 소비자가 전기자동차를 선택한다. 그러나 정부의 입장에서 환경적 효용과 직접적인 관련이 있는 SC 값이 무시할 수 없을 정도로 크며, 수소자동차가 적은 수준으로라도 확산되는 것이 정부의 사회 후생의 증가에 도움이 된다. 따라서 정부는 수소자동차에 대한 유인 수준과 전기자동차에 대한 유인 수준을 동시에 제공하여 수소자동차를 늘리고자 하며, 그 결과 SC 값이 작을 때는 확산되지 않던 수소자동차가 2% 수준으로 확산된다.

제 5 장 결론 및 향후 연구

본 논문에서는 친환경자동차 확산과 관련한 정부, 기업, 소비자 사이의 의사결정 문제를 분석하기 위해 정부가 기업과 소비자에게 정책적 유인을 제공하고, 기업은 유인 수준을 관측한 뒤 가격 수준을 결정하며, 소비자는 정책적 유인과 가격 수준을 모두 관측한 뒤 차종을 선택하는 3단계 경쟁적 의사결정 모형을 제안하였다. 본 연구에서 제시하는 모형은 정부의 정책 변화에 따른 기업과 소비자의 반응 변화를 확인할 수 있다. 따라서 정부가 신기술 확산 정책을 실행할 때 최적 의사 결정을 내리는 데 도움을 줄 수 있다. 특히 환경적 문제와 관련하여 소비자, 기업, 환경적 효용의 중요도를 파악하고, 이를 기반으로 보조금 수준을 설정하는 데 기여할 수 있다.

또한 진화게임이론 및 Stackelberg 게임을 활용하여 모형을 수립하고, 제시된 모형의 부분게임 완전균형이 존재하기 위한 조건을 도출하였으며, 수치 예제를 통해 특정 상황 하에서의 균형, 즉 정부의 보조금 수준 및 기업의 가격 수준, 소비자의 차종 채택 비율을 확인하였다. 이 과정에서 정부가 소비자에게 보조금을 제공하는 경우와 기업에 보조금을 제공하는 경우의 두 가지를 적용하여 보조금을 지급받는 주체에 따른 보조금 수준 및 차종 채택 비율 변화를 확인하고, 온실가스의 사회적 비용의 변화에 따라 균형이 어떻게 변화하는지 확인하였다.

분석 결과, 정부가 소비자에게 보조금을 지급하는 경우 정부는 수소자동차에만 보조금을 지급하며, 소비자는 대부분 수소자동차를 선택하게 된다.

수소자동차에 제공되는 보조금 수준을 고정시킨 뒤 전기자동차 보조금을 변화시키며 차종별 확산율이 어떻게 변화하는지 확인한 결과 정부가 두 신기술에 정책적 유인을 모두 제공하는 경우 각 기술이 비슷한 수준의 경쟁력을 갖게 하는 유인을 제공하는 것은 오히려 두 신기술 모두의 확산을 방해하는 결과로 이어질 수 있음을 파악하였다. 따라서 정부는 다수의 기술을 확산시킬 때 각 기술에 부여할 유인 수준을 충분히 고려하여 결정해야 한다.

또한 기업에 보조금을 지급하는 경우 정부는 전기자동차와 수소자동차 모두에게 보조금을 지급하나, 소비자에게 보조금을 지급하는 경우와 달리 전기자동차가 확산됨을 확인하였다. 수소자동차의 가격이 내연기관자동차 수준으로 낮아짐에도 불구하고 수소자동차가 확산되지 못한 것은 수소자동차의 인프라 부족 및 높은 운행 비용의 결과로 확인되며, 수소자동차 확산을 위해서는 해당 문제를 해결해야 함을 알 수 있었다. 수소자동차의 경쟁력 약화로 인하여 내연기관자동차와 전기자동차 간의 경쟁으로 게임이 진행되며, 따라서 전기자동차에 부여되는 보조금 수준이 증가할수록 전기자동차를 선택하는 소비자의 비율이 증가한다.

더하여 정부의 사회 후생에 영향을 미치는 온실가스의 사회적 비용이 변화함에 따라 균형이 달라짐을 확인하였다. 사회적 비용이 높은 경우 정부는 수소자동차에 높은 보조금을 부여하여 적은 수준이라도 수소자동차를 확산시키고자 하나, 사회적 비용이 비교적 작은 경우 친환경자동차의 확산보다는 소비자의 효용 및 기업의 이윤을 더 중요하게 생각하여 내연기관자동차를 확산시키는 방향으로 보조금을 설정한다. 즉, 친환경자동차의 확산에 직접적인 관련이 있는 온실가스의 사회적 비용이 높을수록 온실가스 감축 효과가 높은

친환경자동차가 확산되며, 따라서 국제적으로 온실가스 감축 효과를 높이고자 하는 경우, 온실가스 배출로 인하여 발생하는 비용을 높여 각 정부에서 자발적으로 친환경자동차 확산을 위한 보조금을 설정하도록 하는 것이 하나의 방안이 될 수 있다.

한편, 본 연구에서는 다제품 독점 기업을 가정하였으나, 실제로는 여러 제품을 생산하는 기업이 존재한다. 기업의 형태 역시 전기자동차만 생산하는 기업, 수소자동차만 생산하는 기업, 모든 종류의 자동차를 생산하는 기업 등으로 다양하며, 차종에 따라 준중형, 중형 등 크기도 다변화된다. 추후 연구에서는 과점 기업으로 모형을 확장하여 기업들 간의 경쟁을 반영함과 동시에 차종의 다양성을 모형에 적용하여 현실성을 강화하고자 한다. 더하여, 정부가 소비자 보조금 및 기업 보조금을 동시에 줄 때 각 주체에게 부여되는 보조금의 비율 변화에 따른 차종 선택 비율의 변화를 확인하고자 한다. 본 연구에서는 소비자 및 기업 두 주체 중 한 주체에게만 보조금을 주는 상황을 가정하였으나, 현실에서 정부는 한정된 예산을 기업과 소비자 모두에게 제공함으로써 정책적 목표를 달성하고자 한다. 또한, 전기자동차와 수소자동차는 아직 기술발전이 제대로 이루어지지 않은 신기술이며, 정부가 중장기적 정책을 결정하여 시행하는 도중에도 기술 발전으로 인하여 생산비, 인프라 수준 등이 지속적으로 변화할 여지가 존재한다. 추후 연구에서는 이러한 부분을 반영하여 본 모형의 실용성을 개선하고자 한다.

참고 문헌

- [1] T. Gnam, T. S. Stephens, Z. Lin, P. Plötz, C. Liu, and J. Brokate, *What drives the market for plug-in electric vehicles? - A review of international PEV market diffusion models*, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 93 (2018), pp. 158–164.
- [2] J. Hagman, S. Ritzén, J. J. Stier, and Y. Susilo, *Total cost of ownership and its potential implications for battery electric vehicle diffusion*, *Res. Transp. Bus. Manag.*, 18 (2016), pp. 11–17.
- [3] D. McCoy and S. Lyons, *Consumer preferences and the influence of networks in electric vehicle diffusion: An agent-based microsimulation in Ireland*, *Energy Res. Soc. Sci.*, 3 (2014), pp. 89–101.
- [4] T. Zhang, S. Gensler, and R. Garcia, *A study of the diffusion of alternative fuel vehicles: An agent-based modeling approach*, *J. Prod. Innov. Manag.*, 28 (2011), pp. 152–168.
- [5] K. Oshiro and T. Masui, *Diffusion of low emission vehicles and their impact on CO2 emission reduction in Japan*, *Energy Policy*, 81 (2015), pp. 215–225.
- [6] R. J. Javid and A. Nejat, *A comprehensive model of regional electric vehicle adoption and penetration*, *Transp. Policy*, 54 (2017), pp. 30–42.
- [7] S. Vergis and B. Chen, *Comparison of plug-in electric vehicle adoption in*

- the United States: A state by state approach*, Res. Transp. Econ., 52 (2015), pp. 56–64.
- [8] J. P. Helveston, Y. Liu, E. M. Feit, E. Fuchs, E. Klampfl, and J. J. Michalek, *Will subsidies drive electric vehicle adoption? Measuring consumer preferences in the U.S. and China*, Transp. Res. Part A Policy Pract., 73 (2015), pp. 96–112.
- [9] A. C. Mersky, F. Sprei, C. Samaras, and Z. (Sean) Qian, *Effectiveness of incentives on electric vehicle adoption in Norway*, Transp. Res. Part D Transp. Environ., 46 (2016), pp. 56–68.
- [10] W. Sierzchula, S. Bakker, K. Maat, and B. van Wee, *The influence of financial incentives and other socio-economic factors on electric vehicle adoption*, Energy Policy, 68 (2014), pp. 183–194.
- [11] D. Diamond, *The impact of government incentives for hybrid-electric vehicles: Evidence from US states*, Energy Policy, 37 (2009), pp. 972–983.
- [12] E. H. Green, S. J. Skerlos, and J. J. Winebrake, *Increasing electric vehicle policy efficiency and effectiveness by reducing mainstream market bias*, Energy Policy, 65 (2014), pp. 562–566.
- [13] T. Gnam, P. Plötz, A. Kühn, and M. Wietschel, *Modelling market diffusion of electric vehicles with real world driving data - German market and policy options*, Transp. Res. Part A Policy Pract., 77 (2015), pp. 95–112.

- [14] S. Encarnação, F. P. Santos, F. C. Santos, V. Blass, J. M. Pacheco, and J. Portugali, *Paths to the adoption of electric vehicles: An evolutionary game theoretical approach*, *Transp. Res. Part B Methodol.*, 113 (2018), pp. 24–33.
- [15] R. Fan and L. Dong, *The dynamic analysis and simulation of government subsidy strategies in low-carbon diffusion considering the behavior of heterogeneous agents*, *Energy Policy*, 117 (2018), pp. 252–262.
- [16] G. J. Offer, M. Contestabile, D. A. Howey, R. Clague, and N. P. Brandon, *Techno-economic and behavioural analysis of battery electric, hydrogen fuel cell and hybrid vehicles in a future sustainable road transport system in the UK*, *Energy Policy*, 39 (2011), pp. 1939–1950.
- [17] G. Morrison, J. Stevens, and F. Joseck, *Relative economic competitiveness of light-duty battery electric and fuel cell electric vehicles*, *Transp. Res. Part C Emerg. Technol.*, 87 (2018), pp. 183–196.
- [18] S. G. Yoon, Y. J. Choi, J. K. Park, and S. Bahk, *Stackelberg-Game-Based Demand Response for At-Home Electric Vehicle Charging*, *IEEE Trans. Veh. Technol.*, 65 (2016), pp. 4172–4184.
- [19] S. Maharjan, Q. Zhu, Y. Zhang, S. Gjessing, and T. Başsar, *Dependable demand response management in the smart grid: A stackelberg game approach*, *IEEE Trans. Smart Grid*, 4 (2013), pp. 120–132.

- [20] M. Yu and S. H. Hong, *Supply–demand balancing for power management in smart grid: A Stackelberg game approach*, Appl. Energy, 164 (2016), pp. 702–710.
- [21] X. Gu, P. Ieromonachou, and L. Zhou, *A game theory approach in subsidizing electric vehicle supply chain*, 2016 Int. Conf. Logist. Informatics Serv. Sci., 2017, pp. 1–7.
- [22] X. Gu, P. Ieromonachou, and L. Zhou, *Subsidising an electric vehicle supply chain with imperfect information*, Int. J. Prod. Econ., 211 (2019), pp. 82–97.
- [23] L. Zhu, P. Wang, and Q. Zhang, *Indirect network effects in China’s electric vehicle diffusion under phasing out subsidies*, Appl. Energy, 251 (2019), p. 113350.
- [24] R. P. McAfee, J. McMillan, and M. D. Whinston, *Multiproduct Monopoly, Commodity Bundling, and Correlation of Values*, Q. J. Econ., 104 (1989), pp. 371–383.
- [25] L. J. Mirman and D. Sibley, *Optimal Nonlinear Prices for Multiproduct Monopolies*, Bell J. Econ., 11 (1980), pp. 659–670.
- [26] J. W. Mayo, *Multiproduct Monopoly, Regulation, and Firm Costs*, South. Econ. J., 51 (1984), pp. 208–218.
- [27] I. Vogelsang and J. Finsinger, *A Regulatory Adjustment Process for*

- Optimal Pricing by Multiproduct Monopoly Firms*, Bell J. Econ., 10 (1979), pp. 157–171.
- [28] R. Fraser, *The relationship between the costs and prices of a multi-product monopoly: The role of price-cap regulation*, J. Regul. Econ., 8 (1995), pp. 23–31.
- [29] R. Amir, J. Y. Jin, G. Pech, and M. Tröge, *Prices and Deadweight Loss in Multiproduct Monopoly*, J. Public Econ. Theory, 18 (2016), pp. 346–362.
- [30] M. Armstrong and J. Vickers, *Multiproduct pricing made simple*, J. Polit. Econ., 126 (2018), pp. 1444–1471.
- [31] I. Lorenzoni, S. Nicholson-Cole, and L. Whitmarsh, *Barriers perceived to engaging with climate change among the UK public and their policy implications*, Glob. Environ. Chang., 17 (2007), pp. 445–459.
- [32] J. Hofbauer and K. Sigmund, *Evolutionary Game Dynamics*, Bull. New. Ser. Am. Math. Soc., 40 (2003), pp. 479–519.
- [33] D. Friedman, *On economic applications of evolutionary game theory*, J. Evol. Econ., 8 (1998), pp. 15–43.
- [34] V. Losert and E. Akin, *Dynamics of Games and Genes: Discrete Versus Continuous Time*, J. Math. Biol., 17 (1983), pp. 241–251.
- [35] E. Yoo, M. Kim, and H. H. Song, *Well-to-wheel analysis of hydrogen fuel-cell electric vehicle in Korea*, Int. J. Hydrogen Energy, 43 (2018), pp. 19267–

19278.

- [36] J. J. Jang and H. H. Song, *Well-to-wheel analysis on greenhouse gas emission and energy use with petroleum-based fuels in Korea: gasoline and diesel*, Int. J. Life Cycle Assess., 20 (2015), pp. 1102–1116.
- [37] W. Choi and H. H. Song, *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*, Appl. Energy, 230 (2018), pp. 135–147.

Abstract

An Analysis on the Diffusion of New Competitive Technologies Based on Evolutionary Game Theory : Electric Vehicle and Fuel Cell Electric Vehicle

Yeonjeong Lee

Department of Industrial Engineering

The Graduate School

Seoul National University

As the speed of the technology development increases, technologies that can be replaced by others appear simultaneously. This paper suggests the model that analyzes the diffusion of each technology in terms of the interaction between the consumer, enterprise and government when there exists competition between new technologies. We construct the agents' payoff with respect to the values like profit and cost, and figure out the equilibrium modelling the situation based on the evolutionary game theory. We also apply the case of Electric Vehicle(EV) and Fuel Cell Electric Vehicle(FCEV) to this model. We set the payoff with respect to the economic values including vehicle price, production cost, operation cost and driving benefit, which affect the adoption of vehicle, and estimate the impact of

the government's incentive for the consumer and producer. As a result, we found out that the equilibrium strategy and the diffusion rate vary with respect to the subsidized agent and the social cost of greenhouse gases, and when the government gives the technologies subsidies so that they get similar level of competitiveness, it might disturb the diffusion of both technologies.

Keywords: Environmental vehicle, Game theory, Decision-making model, Political incentive

Student Number: 2018-23843