

전기차 시장의 활성화를 위한 정부의 금융 지원 정책 분석*

김기훈[†]
고려대학교 경영대학

The Analysis of Government Financial Subsidies for the Electric Car Market

Kihoon Kim
Korea University Business School

■ Abstract ■

Several developed countries have recently provided electric vehicle consumers and producers with financial subsidies. There has been some empirical research on the impact of government subsidies on the consumers' purchase of electric cars. However, little analytical research on the government subsidies for the electric car market exists. This research analyzes the impact of the government financial subsidies on the electric car price and technology level as well as the consumers' adoption of electric cars. This research also suggests that the government should subsidize only the electric car market to further improve the electric car technology.

Keywords : Alternative Fuel Vehicles, Electric Cars, Government Financial Subsidies

1. 연구 배경 및 문헌 연구

2000년대 들어오면서 많은 자동차 선진국들은 대

기 오염의 주범인 CO₂ 배출을 줄이기 위해서 친환경 자동차 시장의 활성화를 위한 방안 및 지원을 모색하고 있다. 친환경 자동차로는 하이브리드 전

논문접수일 : 2014년 04월 24일 논문게재확정일 : 2014년 06월 17일
논문수정일(1차 : 2014년 05월 28일)

* 이 논문은 2013년도 고려대학교의 녹색금융 연구비 지원에 의한 연구임.

† 교신저자 kihoon@korea.ac.kr

기 자동차(hybrid electric vehicle), 충전가능한 하이브리드 자동차(plug-in hybrid electric vehicle), 전기 자동차(electric vehicle)를 들 수 있다. 미국은 2015년까지 친환경 자동차 100만대를 도입할 것을 선언하였고, 플러그인 하이브리드 자동차 및 전기 자동차 구입 시 최대 7,500달러의 지원금을 소비자에게 주고 있다. 독일 또한 2020년까지 전기 자동차의 운행 대수를 100만대로 늘릴 계획을 가지고 있다. 일본의 경제산업성(Ministry of Economy, Trade, and Industry)은 2030년까지 하이브리드 자동차의 시장 점유율을 30~40%, 전기 자동차의 비율을 20~30%로 목표로 삼고 있다[9]. 한국의 지식경제부는 2010년 그린카 발전 로드맵에서 친환경 자동차를 2015년까지 120만 대를 생산할 목표를 제시하였다[1]. 중국은 2015년까지 최소 오십만대 이상의 전기 및 플러그인 하이브리드 자동차를 판매하는 것을 목표로 잡고 있다[15].

소비자는 이런 대기 환경 오염을 방지한다는 이유 외에도 석유 가격의 계속적인 인상에 따른 가솔린 차량 유지 비용의 증가로 인하여 친환경 자동차 구입을 고려할 수 있다. 특히 2008년에 발생한 석유 가격 폭등으로 인하여 미국에서는 당시 하이브리드 자동차인 도요타의 프리우스에 대한 수요가 폭발적으로 증가했다. 가솔린 차량과 비교하여 하이브리드 자동차나 전기 자동차의 연료 효율성은 높은 편이지만, 여전히 상용하는 가솔린 자동차에 비하여(절약되는 유지 비용을 감안하더라도) 높은 가격이 매겨지고 있어 소비자 입장에서는 선택 구입하기 어려운 현실이다. 2010년 기준으로 우리나라에서 판매되는 하이브리드 자동차인 도요타 프리우스의 경우, 연비는 29.2Km/L로써 비슷한 크기의 가솔린 자동차인 현대 아반떼의 15.2Km/L에 비하여 두 배 정도 뛰어난 연료 효율성을 가지고 있다. 하지만, 프리우스의 판매 가격은 37,900,000원으로 아반떼의 최고급 모델 판매 가격인 18,970,000원에 비하여 두 배 정도 비싼 것을 알 수 있다[2].

친환경 자동차의 이처럼 낮은 가격 경쟁력을 높이기 위한 정부의 직접적인 소비자 지원은 세금 면제 및 공제와 구매 지원금을 들 수 있다. 전기차 구매

시, 일본은 자동차세 50% 감면 및 최대 약 1,890만 원의 보조금을 지급하고 있으며, 중국은 취득세 50% 감면 및 약 1,030만 원을 구매 시 지원한다. 영국과 프랑스 등의 유럽 국가들 역시 상당한 금액의 구매 보조금을 지급하고 있다. Gallagher and Muehlegger [5]의 연구에 따르면 미국의 경우 세금 면제(tax waiver)가 세금 공제(tax credit)에 비하여 10배 이상의 하이브리드 자동차 판매 증가를 가져온다고 한다. 한국의 경우에는 현재 친환경 자동차에 대한 개별소비세 및 취득세 면제 그리고 공제 구입 감면 등의 세제 지원 및 공공기관의 친환경 자동차 구입 지원 등을 시행하고 있다. 아직 비싼 전기차의 경우, 공공기관에만 구매 보조금을 지원하고 있기 때문에, 세제 지원만으로는 민간 부분의 전기 자동차 구매를 기대하기는 어려운 실정이다.

소비자 측면에서의 친환경 자동차 선택에 미치는 여러 가지 요소에 대한 다양한 연구들이 최근 이루어져 왔다. Ozaki and Sevastyanova[10]은 영국에서 프리우스 자동차 구매자를 대상으로 설문 조사한 결과를 바탕으로 재정적인 이익 외에도 하이브리드 자동차 구매에 대한 주변 사람들의 인식도 상당한 영향을 끼친다고 밝혔다. 재정적인 이익으로는 연료비 절감 뿐만 아니라 혼잡 통행료 면제 등의 정부 정책을 포함하였다. Shin et al.[12]은 한국의 250가구를 상대로 설문 조사하여 정부가 하이브리드 자동차를 제외한 전기차 구입에만 보조금을 지급했을 때 가장 큰 CO₂ 감소 효과가 있음을 보였다. Hidrue et al.[7]은 미국 시장 소비자들을 대상으로 실험한 결과 전기차의 각 성능의 향상에 대한 소비자들이 지불하고자 하는 금액을 추론하고, 소비자들은 5년 동안의 절약된 연료 비용을 전기차의 가격에 포함시켜 전기차 구매를 고려함을 보였다. 이 연구는 또한 적게는 6,000달러 많게는 16,000달러까지 가솔린 자동차에 비하여 소비자가 더 지불할 수 있음도 보였다. Zhang et al.[15]은 지금까지 전기차 구매에 영향을 미치는 요소로 연구되어 온 것들을 금전적 이익, 성능, 환경친화성, 주변 사람들의 인식 및 자기 만족, 정부 정책 등으로 분류한 후, 중국의 소비자를 대상으로 설문 조

사한 결과 전기차의 성능이 구매에 가장 결정적인 영향을 미치는 것으로 밝혔다. 그리고 이 연구는 정부 정책을 널리 알리는 것이 전기차 구매에 더 큰 영향을 준다고 분석했다.

한편, 기업의 전기 자동차 기술 개발이나 기반 시설(infrastructure) 확충에 대한 각 정부의 금융 지원도 이루어져 왔다. 미국과 중국은 각 80억 달러, 2.9억 달러를 전기차 기술 개발을 위한 자금으로 빌려 주었고, 일본과 중국은 충전 시설 확충에 대한 투자를 하고 있다[1]. 미국의 경우 정부가 벤처 캐피털을 통하여 보장한 용자가 테슬라 모터의 경우 4억 6천 5백만 달러, Fisker Automotive의 경우는 5억 2천 8백만 달러에 달하는 등 그 지원 규모가 엄청나다[6]. 한국 정부는 전기 자동차의 핵심 부품의 성능 개선을 위한 프로젝트 지원을 위해 1000억 원 정도의 예산을 측정한 바 있으며, 한국 환경공단은 수도권 지역 일부에 충전 기반 시설을 갖추었으면 앞으로 이를 확대할 예정이다[1].

이렇게 각 국 정부가 전기 자동차 관련 기업을 금전적으로 지원하고 있음에도 불구하고, 생산자 측면에서의 전기 자동차 시장 활성화에 대한 연구는 미비하다. 정부가 소비자에게 주는 여러 혜택의 효과는 직접적으로 드러나는 데 반하여, 전기 자동차 기술이나 기반 시설에 대한 투자의 효과는 서서히 드러나기 때문에 이를 실증적으로 보여주는 어렵기 때문으로 여겨진다. Hargadon and Kenney [6]는 미국 정부가 clean technology에 벤처 캐피털 회사를 통하여 대규모의 용자를 해 주는 것이 효과를 발휘하기 어려울 지도 모른다고 주장했다. 그 이유는 전기 자동차 시장을 포함한 clean technology 시장이 급격하게 성장하는 구조가 아니기 때문이라고 밝혔다. 이들의 연구는 구체적인 모델링을 포함하지는 않고 있으며, 질적인 주장에 의존하는 단점이 있다. 또한, 테슬라 모터스의 모델 S는 2013년 3분기에만 세계시장에서 5500대를 판매하였고[3], 노르웨이에는 모델 S고객이 무료로 빠른 시간내에 충전할 수 있는 station도 만들 계획이어서[4], 그들의 주장과는 어느 정도 상반된 결과가 나올 수도 있는 것처럼 여겨진다. Supekar et al.

[13]은 정부의 친환경 기술에 대한 정책이 기술의 발전 상황, 시장의 성장 모형, 연료 가격의 변화 등에 영향을 줄 수 있음을 감안하여, 기후변화에 대한 정부간 패널(Intergovernmental Panel on Climate Change)이 산정한 온실 가스 감소 목표를 달성하기 위한 최적의 친환경 자동차 운행 믹스를 찾아내는 선형 최적화 모델을 제시하였다. 하지만, 그들의 모델은 정부의 친환경 자동차 기술 및 기반 시설에 대한 투자를 포함하지 않고 있다. 본 연구는 정부의 전기 자동차 소비자 및 생산자에 대한 보조 수준이 전기 자동차 기술 수준 및 가격 그리고 소비자의 전기차 구입에 어떤 영향을 미치는 지를 동적 게임으로 모델링하여 분석한다.

2. 동적 게임 모형 및 분석

본 연구는 우선 아래와 같은 진행 순서를 가지는 동적 게임을 제시한다.

Stage 1 : 정부는 소비자의 전기 자동차 구입에 대한 지원율($1-s$) 및 대표 전기 자동차 생산 업체의 기술개발 비용에 대한 지원율($1-u$)를 결정한다. 즉, $s \in [0,1]$ 는 소비자가 전기자동차 가격 중 부담할 부분을 나타낸다. $u \in [0,1]$ 는 대표 전기 자동차 생산 업체가 기술 개발에 소요되는 비용 중 부담할 부분을 의미한다.

Stage 2 : 대표 전기 자동차 생산 업체는 정부의 보조금 규모를 고려하여 이익을 최대화시키는 기술 수준인 t 와 전기 자동차 가격 p 를 결정한다.

Stage 3 : 소비자는 전기 자동차를 구입할 지를 결정한다. 소비자는 최대 1대의 전기 자동차를 구입한다.

Stage 1에서 정부는 아래와 같은 목적을 가질 수 있다.

- 1) 전기 자동차를 구입하는 소비자 수를 최대화한다. 그리하여, 온실 가스의 양을 최소화한다.
- 2) 정부, 소비자 및 생산자를 포함한 전체 사회의 효용을 최대화한다.

본 연구는 위 세 단계로 이루어진 게임에 대한 subgame perfect Nash equilibrium(SPNE)을 backward induction을 통하여 구한다. 즉, Stage 3에서의 소비자의 전기차 구매 여부를 먼저 분석한 후, Stage 2에서의 생산자의 전기차 기술 수준 및 가격 결정을 파악하며, 마지막으로 Stage 1에서의 정부의 최적 금융 지원 비율을 산출할 수 있는 최적화 문제를 고려할 것이다.

2.1 Stage 3 : 소비자의 전기차 구입 결정

소비자는 전기 자동차가 주는 효용에 대해서 heterogeneous하며 이를 θ 를 통하여 표현한다. 그리고, θ 는 $[0, 1]$ 구간에서 균등 분포(uniform distribution)을 가진다. 소비자가 가격이 p 이고 기술 수준이 t 인 전기차를 구매할 때 느끼는 효용은 다음과 같이 정의된다 :

$$u(\theta) = \theta v(t) - sp. \quad (1)$$

여기에서 $v(t)$ 는 기술 수준 t 가 커질수록 증가하는 전기차의 가치 함수를 의미합니다. 소비자가 전기차를 구매하지 않았을 때 외부에서 얻을 수 있는 효용을 v_0 라고 표현하며, 이는 전기차 이외의 자동차를 구매했을 때 얻을 수 있는 효용으로 생각할 수 있다. 식 (1)에서 정의된 전기 자동차의 효용이 v_0 를 증가하는 소비자만이 전기 자동차를 구입할 것이므로, 전기 자동차를 구매할 가장 낮은 효용을 가진 소비자 θ 는 다음과 같다 :

$$\theta = \frac{v_0 + sp}{v(t)} \quad (2)$$

식 (2)에서 보듯이 기술 수준 t 로 부터 얻는 효

용이 높을수록, 기존 자동차의 효용이 떨어질수록, 그리고 전기 자동차의 실질 가격이 떨어질수록 전기 자동차를 구매하는 소비자의 수는 증가한다.

2.2 Stage 2 : 전기 자동차 기술 수준 및 가격 결정

전기차 생산에 관련된 기업들을 대표하는 업체가 있다고 가정하고, 이를 대표 전기차 생산자라고 부른다. 이 대표 생산자의 이익은 다음과 같다 :

$$\pi(p, t) = (p - c)(1 - \theta) - uF(t), \quad (3)$$

여기에서 θ 는 식 (2)에서 구한 전기자동차를 구매할 가장 낮은 효용을 가지는 소비자의 위치를 표현한다. c 는 전기자동차의 단위 생산비용을 나타내며, $F(t)$ 는 t 수준의 전기차 관련 기술 개발에 들어가는 고정 투자비용을 의미한다.

대표 생산자의 이익을 최대화하는 가격과 기술 수준은 아래의 first-order necessary condition을 만족한다 : $v(t)$ 가 0이 아니라는 조건하에서,

$$\frac{\partial \pi}{\partial p} = 0 \Rightarrow p = \frac{c}{2} + \frac{v(t) - v_0}{2s}; \quad (4)$$

$$\frac{\partial \pi}{\partial t} = 0 \Rightarrow \frac{(p - c)(v_0 + sp)v'(t)}{v(t)^2} - uF'(t) = 0. \quad (5)$$

위 2가지 필요조건이 충분조건이 될 수 있는 경우를 알아보기 위해서는 식 (3)의 이익함수가 엄밀하게 오목(strictly concave)한 지를 살펴보면 된다. 아래의 proposition 1에 나와 있는 것처럼 $F(t)$ 가 t 에 대한 엄밀한 의미에서의 볼록(strictly convex)함수이고, $v(t)$ 가 t 에 대하여 오목 함수일 경우에 대표 생산자의 이익함수가 오목 함수일 가능성이 높아지게 됩니다.

Proposition 1

식 (3)에 표기된 대표 생산자의 이익 함수는 아래의 조건이 성립할 경우, p 와 t 에 대한 오목함

수가되어서 식 (4)와 식 (5)는 최적의 p^* 와 t^* 에 대한 충분조건이 된다 :

$$\frac{2s(p-c)(v_0+sp)v''(t)v(t)+(v_0+cs)^2\{v'(t)\}^2}{v(t)^4} \quad (6)$$

$$+\frac{2suF''}{v(t)} > 0.$$

위 Proposition 1을 증명하기 위해서는 이익함수의 Hessian 행렬이 negative definite임을 보여야 한다. 식 (6)은 Hessian 행렬 자체의 determinant가 양수여야 한다는 조건에서 나온 것이다. 이익함수를 p 에 대하여 두 번 미분한 식은 항상 음수임을 쉽게 보일 수 있기에 해당 증명은 생략한다. 만약, $v(t)$ 가 해당 도함수 값에 비하여 훨씬 큰 값을 보인다면 식 (6)이 성립할 가능성은 높다. 그리고, Proposition1의 식 (6)을 만족시킬 수 있는 조건으로 Corollary 1을 생각해 볼 수 있다.

Corollary 1

아래의 조건이 성립할 경우, 식 (4)와 식 (5)는 최적의 p^* 와 t^* 를 구할 수 있는 충분조건이 된다 :

- $F(t)$ 는 t 에 대하여 엄밀하게 볼록하다;
- $V(t)$ 는 t 에 대하여 오목(선형인 경우 포함) 함수다;
- V_0 와 c 는 0에 가깝다.

Corollary 1의 첫 번째 조건은 기술 수준이 증가할수록 단위 기술 수준 향상에 대한 비용이 더 높아진다는 것으로 성립할 가능성이 높다. 두 번째는 전기 자동차 기술 수준이 이미 어느 정도를 넘어서면 단위 기술 수준 향상에 따른 소비자 효용의 증가도 감소한다는 것으로 이도 성립할 가능성이 높다. 만약, 연비향상에 따른 연료 절감만을 고려한다면 $v(t)$ 는 선형으로도 볼 수 있다. 마지막으로, 세 번째 조건은 제시된 모델을 간소화할 경우 성립할 수 있다.

대표 생산자의 이익을 최대화 하는 가격과 기술

수준을 명시적으로 구할 수는 없지만, 식 (4)를 식 (5)에 넣어서 최적의 기술수준 (t)에 대한 음함수 형태의 식 $g(t)$ 를 다음과 같이 구할 수 있다 : $v(t)$ 가 0이 아니라는 조건 하에서,

$$g(t) := \left(\frac{v(t)-v_0-cs}{2s} \right) \left(\frac{v(t)+v_0+cs}{2} \right) \frac{v'(t)}{v(t)^2} \quad (7)$$

$$-uF'(t) = 0.$$

즉, 대표 생산자는 $g(t) = 0$ 을 만족하는 기술 수준을 가진 전기 자동차를 생산하는 것이 이익을 최대화 시킬 수 있게 된다. 그리고, 식 (7)을 만족하는 최적의 기술 수준 t^* 를 식 (4)에 대입하여 최적의 가격 p^* 를 구할 수 있다. $v(t)$ 와 $F(t)$ 에 특정 함수를 지정하면 t^* 를 직접적으로 구할 수 있게 된다.

특정 함수를 지정하지 않아도, 정부의 전기차 기술 개발 및 구매에 대한 지원 정도가 변함에 따라서 전기차의 기술 및 가격이 어떻게 변하는 지를 알아볼 수 있다. 우선, 대표 생산자의 이익 함수인 식 (3)을 이용하면, 소비자에 대한 정부 지원 금액이 변함에 따라, 대표 생산자의 최적 기술 수준과 가격이 어떻게 변할 지를 Topkis[14]의 monotone comparative statics(MCS) 결과를 이용하면 알 수 있다. 식 (3)을 가격(p), 기술수준(t) 및 (네거티브) 생산자 부담율($-u$)의 함수로 생각하면,

$$\pi(p, t, -u) = (p-c) \left(1 - \frac{v_0+sp}{v(t)} \right) - uF(t). \quad (8)$$

식 (8)을 최대화하는 가격과 기술수준이 대표 생산자의 전기차 기술 개발비 부담이 감소할수록 높아짐을 아래 식 (9)의 결과를 통하여 알 수 있다.

$$\frac{\partial^2 \pi}{\partial p \partial t} = \frac{(v_0+2sp-cs)v'(t)}{v^2(t)} > 0; \frac{\partial^2 \pi}{\partial p \partial (-u)} \quad (9)$$

$$= 0 (\geq 0); \frac{\partial^2 \pi}{\partial t \partial (-u)} = F'(t) > 0.$$

소비자의 전기차 구매에 대한 부담이 증가할수록 식 (8)을 최대화하는 가격과 기술 수준이 어떻게

변화하는 지는 MCS결과를 이용할 수는 없어서, 아래에 나와 있는 것처럼 음함수 정리(implicit function theorem)을 이용하여 확인할 수 있다. MCS 결과를 이용할 수 없는 이유는

$$\frac{\partial^2 \pi}{\partial p \partial s} = -\frac{2p}{v^2(t)} < 0; \frac{\partial^2 \pi}{\partial t \partial s} = \frac{(p-c)p v'(t)}{v^2(t)} > 0$$

의 값을 가지게 되어서 충분 조건을 활용할 수 없기 때문이다. 앞에서 설명한 것처럼 최적의 기술수준 (t^*)과 소비자 및 생산자 부담율인 s 와 u 는 식 (7)을 만족한다. 식 (7)에 음함수 정리를 적용하면,

$$\frac{\partial t}{\partial s} = -\frac{\frac{\partial g}{\partial s}}{\frac{\partial g}{\partial t}}; \quad \frac{\partial t}{\partial u} = -\frac{\frac{\partial g}{\partial u}}{\frac{\partial g}{\partial t}}$$

앞에서 설명한 것처럼, 식 (9)를 통하여 t^* 는 u 가 증가함에 따라 감소함을 알 수 있다. 그러므로, $\frac{\partial t}{\partial u} \leq 0$ 이고 아래 식 (10)에 나와 있는 것처럼 $\frac{\partial g}{\partial u} < 0$ 이므로 $\frac{\partial g}{\partial t} < 0$ 임을 알 수 있다.¹⁾ 나아가서, 식 (10)에서 보듯이 $\frac{\partial g}{\partial s} < 0$ 이므로 $\frac{\partial t}{\partial s} < 0$ 임을 확인할 수 있다. 즉, 전기 자동차 구매에 따른 소비자의 가격 부담율이 증가할수록 최적 기술 수준이 감소하게 된다.

$$\frac{\partial g}{\partial s} = -\frac{v'(t)}{v^2(t)} \left\{ \frac{v^2(t) - v_0^2}{4s^2} + \frac{c^2}{4} \right\} < 0; \quad (10)$$

$$\frac{\partial g}{\partial u} = -F'(t) < 0$$

마지막으로 식 (4)를 통하여 소비자 및 대표 생산자의 부담율인 s 와 u 가 증가할수록 전기 자동차의 최적 가격 또한 감소함을 알 수 있다. 위 내용을 정리하면 다음의 Proposition 2를 얻을 수 있다.

1) 그리하여, $g(t) = 0$ 을 만족하는 여러 해가 존재할 경우, $g'(t) < 0$ 인 해만 고려해야 한다.

Proposition 2(Comparative Statics)

전기 자동차 구매에 따른 소비자의 가격부담율이 증가할수록, 전기 자동차의 가격 및 기술 수준은 낮아진다. 그리고, 전기 자동차 기술 개발에 따른 생산자의 비용 부담율이 증가할수록, 전기 자동차의 가격 및 기술 수준 역시 낮아진다.

전기차 이외의 기존 자동차인 가솔린이나 하이브리드 자동차의 기술이 뛰어나게 되면, 전기차의 기술 수준이나 가격이 어떻게 변할 지를 알아보는 것도 흥미로울 수 있다. 기존 자동차의 연비가 향상될수록, 더 많은 고객이 전기 자동차를 사도록 생산자가 기술수준을 높일 수도 있을 것이다. 하지만, 아래 식(11)에서 보는 것처럼, 기존 자동차의 연비가 증가하게 되면, 전기 자동차의 기술수준은 반대로 떨어지게 된다.

$$\frac{\partial t}{\partial v_0} = -\frac{gv_0}{gt} < 0 \quad (11)$$

$$0 \left(\because \frac{\partial g}{\partial v_0} = -\frac{(v_0 + 2cs)v'(t)}{4sv^2(t)} < 0 \text{ and } g_t < 0 \right).$$

이는 전기자동차 기술을 더 발전시킬 경우, 비용이 증가하는 측면을 고려해야 하기 때문이다. 그리고, 전기 자동차 기술이 향상되면 그에 따른 가격도 높아져서 전기 자동차 구매 고객의 숫자를 늘리기가 용이하지 않기 때문이다.

Proposition 3(Comparative Statics)

기존 자동차의 기술(연비 등)이 향상될수록, 전기 자동차의 기술 수준 및 가격은 낮아진다.

위 Proposition 3은 정부가 전기 자동차의 기술 발전을 위해서는 가솔린 및 하이브리드 차량의 연비 향상을 동시에 지원하기 보다는 전기 자동차의 기술 개발만 지원하는 것이 전기 자동차 보급을 위해서는 더 나을 수 있음을 보여준다. Shin et al. [12]이 설문조사를 통하여 실증적으로 밝힌 연구에 의하면 정부가 전기 자동차 구매에만 보조금을 지

급했을 때 환경 오염의 주범 중의 하나인 이산화탄소 가스량을 가장 많이 줄일 수 있다고 한다. 이는 앞의 결과와도 일치하는 점이 있다.

2.3 Stage 1 : 최적 금융 지원 수준의 결정

2.3.1 전기 자동차 보급 대수의 최대화

정부는 Stage 2에서 정해진 전기차 기술 수준과 가격 (식 (4)와 식 (5), 또는 식 (4)와 식 (7))을 바탕으로 전기자동차 대중화를 위한 보조금 수준을 결정할 수 있다. 우선, 전기 자동차의 구매량을 최대화 시킬 수 있는 보조금 수준을 구해보자. 전기 자동차 구매 대수는 $1-\theta$ 이므로 전기 자동차 소비자 수를 최대화시키기 위해서는, 다음의 최적화 문제를 풀어야 한다.

$$\text{Minimize}_{s, u} \frac{v_0 + cs}{v(t)},$$

여기에서 t 는

$$g(t) = \left(\frac{v(t) - v_0 - cs}{2s} \right) \left(\frac{v(t) + v_0 + cs}{2} \right) \frac{v'(t)}{v(t)^2} - uF'(t) = 0$$

을 만족한다.

위 목적 함수는 식 (4)를 $\theta = \frac{v_0 + sp}{v(t)}$ 에 대입하면, $1-\theta = \frac{1}{2} - \frac{v_0 + cs}{2v(t)}$ 를 통하여 구할 수 있다. 그리고, 이를 통하여 최대 전체 소비자의 반이 전기 자동차를 구매할 수 있음을 알 수 있다. 즉, 소비자의 자기 부담율(s)이 증가할수록 그리고 전기 자동차의 기술 수준(t)이 낮을수록 더 적은 수의 소비자가 전기 자동차를 구매하게 되는 것이다. 위 문제는 통상 우리가 접하는 제한 조건이 있는 경우의 최적화 문제와는 다르다. s와 u의 선택에 따라서 t가 정해지기 때문에, 단순히 위 목적함수에 $g(t) = 0$ 을 제한 조건으로 두는 최적화 문제를 풀면 올바른 해를 구할 수 없다. 위 문제에 대한 최적해는 의외로 간단하다. 예산에 제한 조건이 없다면, 소비자

자 및 전기 자동차 생산자의 부담율을 모두 0으로 만들면, 위 목적함수를 최소화 시킬 수 있게 된다. 즉, $s^* = 0$ and $u^* = 0$ 을 0으로 두면 분자는 v_0 만 남고, 분모는 Proposition 2에 의하여 최대화 시킬 수 있게 된다.

만약 예산에 대한 제한 조건이 있다면, 그 조건을 넣은 최소화 문제를 생각해 볼 수 있다.

$$\left. \begin{aligned} & \text{Minimize}_{s, u} \frac{v_0 + cs}{v(t)}, \\ & \text{subject to } M \left(\frac{v(t) - v_0 - cs}{2v(t)} \right) \left(\frac{v(t) - v_0 + cs}{2s} \right) \\ & \qquad \qquad \qquad (1-s) + (1-u)F(t) \leq B \end{aligned} \right\} (12)$$

where t is determined by

$$\left. \begin{aligned} & g(t) - \left(\frac{v(t) - v_0 - cs}{2s} \right) \left(\frac{v(t) + v_0 + cs}{2} \right) \frac{v'(t)}{v(t)^2} \\ & - uF'(t) = 0 \end{aligned} \right\}$$

여기에서 M은 전체 소비자 수를 나타내고, B는 보조금에 할당된 예산을 나타낸다. 최적의 해는 예산을 다 소비한 경우에 나타날 것이므로, 위 제한 조건의 부등식은 등호가 성립한다. 위 최적화 문제를 풀면 전기 자동차 보급 대수를 최대화 시킬 수 있는 소비자 및 전기 자동차 생산자 부담율을 구할 수 있게 된다.

2.3.2 사회적 효용의 최대화

정부를 포함하여 소비자 및 전기 자동차 생산자의 총 효용은

$$\begin{aligned} & \int_{\theta}^1 (\theta v(t^*) - sp^*) d\theta + \pi(p^*, t^*) - (1-s)p^*(1-\theta) \\ & - (1-u)F(t^*) = \frac{1-\theta^2}{2} v(t^*) - c(1-\theta) - F(t^*) \\ & = \frac{1}{2} \left\{ 1 - \frac{(v_0 + sp^*)^2}{v^2(t^*)} \right\} v(t^*) - c \left\{ 1 - \frac{v_0 + sp^*}{v(t^*)} \right\} - F(t^*) \\ & = -\frac{v_0 + 2c}{4} + \frac{3v(t^*)}{8} + \frac{(4c+1)(v_0 + cs)}{8v(t^*)} - \frac{cs}{4} - F(t^*). \end{aligned}$$

그러므로, 정부가 사회적 전체 효용을 최대화 할 경우, 아래 최적화 문제를 풀게 된다 :

$$\left. \begin{aligned} & \text{maximize}_{s,u} \frac{3v(t^*)}{8} + \frac{(4c+1)(v_0+cs)}{8v(t^*)} \\ & \quad - \frac{cs}{4} - F(t^*), \\ & \text{where } t^* \text{ satisfies} \\ & g(t) = \left(\frac{(v(t)-v_0-cs)}{2s} \right) \left(\frac{v(t)+v_0+cs}{2} \right) \frac{v'(t)}{v(t)^2} \\ & \quad - uF'(t) = 0 \end{aligned} \right\} (13)$$

식 (12)와 식 (13)으로 표현된 두 최적화 문제에 대한 일반적인 해는 구할 수 없지만, 기술 수준의 증가에 따른 $v(t)$ 와 $F(t)$ 에 특정 함수를 지정하면, 최적의 해를 구할 수 있다. 예를 들어, Corollary 1의 세 번째 조건처럼 v_0 와 c 를 0으로 하면, 식 (7)을 만족하는 자동차 기술 수준 $t^* = 1/(8su)$ 를 얻을 수 있고, 식 (12)의 목적함수가 자동으로 0이 되어 소비자 반이 전기 자동차를 구매함을 알 수 있다. 그리고, 식 (13)의 최적화 문제를 풀게 되면 $s^*u^* = 2/3$ 임을 얻게 되어 전체 효용을 최대화 시키려면 소비자 및 생산자의 부담율이 일정 비율로 반비례 해야 함을 알 수 있다.

3. 결론 및 향후 연구 방향

본 연구는 전기 자동차 시장 활성화를 위한 정부의 재정 지원이 있을 때, 전기 자동차를 구매할 소비자의 규모 및 전기 자동차의 기술 수준과 가격이 어떻게 경제학적 모델링을 통하여 결정될 수 있는지를 보여준다. 전기 자동차를 구매할 소비자의 규모는 다른 대체 수단인 기존의 가솔린 및 하이브리드 자동차의 연비가 낮을수록 증가함을 보여준다.

전기 자동차의 기술 수준은 정부의 소비자 및 생산자에 대한 지원율이 증가할수록 높아지게 되며, 이에 따라서 전기 자동차의 가격 또한 증가하게 된다. 그런데, 한 가지 재미있는 결과로 기존 가솔린 및 하이브리드 자동차의 연비가 증가할수록 전기 자동차

의 성능이 상승하지 않고, 오히려 하락한다는 것이다. 이는 전기 자동차를 구매할 소비자의 규모가 감소하면서, 기술 수준을 늘리기 보다는 전기 자동차 생산자가 이익 챙기기에 급급해 질 수 있다는 것을 의미한다. 즉, 정부가 전기 자동차 보급을 위한 전기 자동차 기술 향상을 피하고자 한다면 하이브리드 자동차나 기존 가솔린 자동차의 연구 개발에 대한 도움을 주기 보다는, 오직 전기 자동차 기술 개발에만 지원을 해야 한다는 것을 의미한다. 이 결과는 Shin et al.[12]의 실증적 분석과도 일맥 상통한다.

마지막으로, 본 연구는 정부가 전기 자동차 구매 대수 또는 전체 사회적 효용의 최대화를 피할 때 적정 지원율을 어떻게 구할 수 있는 지에 대한 일반적인 최적화 문제를 제시한다. 전기 자동차 기술 수준에 따른 소비자의 효용 및 전기 자동차 기술 개발에 따른 비용의 증가를 실증적인 자료에 근거하여 특정 함수로 모델링 하면, 목적에 맞는 정부의 최적 보조율을 구할 수 있다.

본 연구를 확장하여 전기 자동차 생산 업체간의 경쟁 및 비전기 자동차와 전기 자동차 간의 경쟁등을 고려한다면 좀 더 현실에 가까운 모델링을 통하여 흥미있는 결과를 도출할 수 있을 것으로 여겨진다. 또한, 실증적인 자료에 근거하여 전기 자동차의 가치 및 투자비용을 나타내는 특정 함수들을 도출하여, 실질적인 정부의 최적 금융 지원 비율을 찾는 연구도 향후 필요할 것으로 여겨진다.

참고 문헌

- [1] 전황수, “주요국의 전기자동차 정책 및 시사점”, 한국전자통신연구원, 2012.
- [2] Bae, J. and H. Jung, “Forecasting Market Shares of Environment-Friendly Vehicles under Different Market Scenarios,” *Environmental and Resource Economics Review*, Vol.22, No.1(2013), pp.3-29.
- [3] Blanco, S., “Tesla sells 5,500 Model S EVs in 3Q, will soon need ‘giga-factory’ battery

- plant,” Autblog green, <http://green.autoblog.com/2013/11/05/tesla-sells-5-500-model-s-evs-in-3q-will-soon-need-giga-factor/>(accessed Nov 29, 2013).
- [4] Europe, T.M., “Tesla Motors Brings Revolutionary Supercharger to Europe With Launch Across Norway,” <http://www.teslamotors.com/about/press/releases/tesla-motors-brings-revolutionary-supercharger-europe-launch-across-norway>(accessed Nov 30, 2013).
- [5] Gallagher, K.S. and E. Muehlegger, “Giving green to get green? Incentives and consumer adoption of hybrid vehicle technology,” *Journal of Environmental Economics and Management*, Vol.61, No.1(2011), pp.1-15.
- [6] Hargadon, A.B. and M. Kenney, “Misguided policy? Following venture capital into clean technology,” *California Management Review*, Vol.54, No.2(2012), pp.118-139.
- [7] Hidrue, M.K., G.R. Parsons, W. Kempton, and M.P. Gardner, “Willingness to pay for electric vehicles and their attributes,” *Resource and Energy Economics*, Vol.33, No.3(2011), pp.686-705.
- [8] Ito, N., K. Takeuchi, and S. Managi, “Willingness-to-pay for infrastructure investments for alternative fuel vehicles,” *Transportation Research Part D : Transport and Environment*, Vol.18(2013), pp.1-8.
- [9] Ministry of Economy, Trade and Industry (METI) of Japan, “The Next-Generation Vehicle Strategy 2010,” http://www.meti.go.jp/english/press/data/20100412_02.html(accessed Dec. 5, 2013).
- [10] Ozaki, R. and K. Sevastyanova, “Going hybrid : An analysis of consumer purchase motivations,” *Energy Policy*, Vol.39, No.5(2011), pp.2217-2227.
- [11] Rochet, J.C. and J. Tirole, “Two-sided markets : a progress report,” *The RAND Journal of Economics*, Vol.37, No.3(2006), pp.645-667.
- [12] Shin, J., J. Hong, J. G. Jeong, and J. Lee, “Impact of electric vehicles on existing car usage : A mixed multiple discrete-continuous extreme value model approach,” *Transportation Research Part D : Transport and Environment*, Vol.17, No.2(2012), pp.138-144.
- [13] Supekar, S.D., K.A. Caruso, M.S. Daskin, and S.J. Skerlos, “Least-Cost Technology Investments in the Passenger Vehicle and Electric Sectors to Meet Greenhouse Gas Emissions Targets to 2050,” *Springer Singapore, In Re-engineering Manufacturing for Sustainability*, (2013), pp.461-467.
- [14] Topkis, D.M., “Minimizing a submodular function on a lattice,” *Operations Research*, Vol. 26, No.2(1978), pp.305-321.
- [15] Zhang, X., K. Wang, Y. Hao, J.L. Fan, and Y.M. Wei, “The impact of government policy on preference for NEVs : The evidence from China,” *Energy Policy*, Vol.61(2013), pp.382-393.