

GHG를 고려한 수소연료전지 자동차의 경제성 분석

양문희*, 김봉진, 김종욱

An Economic Feasibility Analysis of a Hydrogen Fuel-Cell Vehicle Considering GHG

Moonhee Yang, Bongjin Gim, Jong-Wook Kim

Abstract This paper deals with the economic feasibility model and analysis of a hydrogen fuel-cell vehicle (FCV) against two similar types of non-business vehicles fueled with gasoline (GV) and diesel (DV) considering greenhouse gas (GHG). Considering the price of vehicles and annual operating cost, we build a classical economic feasibility model. Since the economic feasibility could be affected by many input factors such as the prices of vehicles, the price of fuels, annual driving distance and so on, we estimate the average future values of input factors, which is defined as "the average case". Based on the average case, we assess the representative economic feasibility of a FCV with/without GHG, and by changing various annual driving distances, we assess its economy in terms of net-present value, internal rate of return, and payback period. In addition, we make some sensitivity analysis of its economic feasibility by changing the values of the critical input factors one at time.

Based on the average case, it turns out that the consumer of a FCV could save 25,000 won/year for a GV, but the consumer could pay 120,000 won/year more for a DV. This indicates that gasoline vehicles could be replaced gradually by FCVs in Korean market which might be formed by those consumers driving annually more than approximately 14,800 km. As the results of our sensitivity analysis, it turns out that a FCV is no more economical if the difference of the prices between FCV and GV is more than 10,130,000 won or the price of hydrogen fuel could be more than 5,136 won/kg.

Key words Hydrogen fuel-cell vehicle(수소연료전지 자동차), Economic analysis(경제성분석), Incremental analysis(증분분석), GHG emission evaluation(지구온난화가스 배출량평가)

* 단국대학교 공학부(산업공학전공)

■ E-mail : myfriend@dankook.ac.kr ■ Tel : (041)550-3571 ■ Fax : (041)550-3570

Nomenclature

$C_k(t)$: annual operating cost of vehicle k at time period t
 D : annual driving distance (km/year)
 D^* : economic minimum driving distance (km/yr)
 E_k : fuel efficiency of vehicle k
 $F_k(t)$: fuel price of vehicle k at time period t

i : discount rate
 $I_k(t_0)$: price of vehicle k at time period
 n : life period for economic analysis
 NPV_k : net present value for the investment of vehicle k
 r_M : ratio of other operating cost over vehicle price
 r_S : ratio of salvage value to vehicle price
 S_k : salvage value of vehicle k

1. 서론

수소는 연료로서 활용성이 높은 고효율에너지이며, 무한자원인 물에서 추출되어 물로 환원되는 무공해 친환경 에너지이다. 화석연료의 사용에 따른 대기환경오염과 기후변화, 에너지 안보문제 등을 해결하기 위해서 선진국들은 1970년대 말부터 수소의 제조, 저장, 이용 등의 분야별 연구개발에 힘을 쏟아왔으며, 환경개선효과가 큰 수소연료전지 자동차(FCV, fuel-cell vehicle)에 대한 투자와 연구에 중점을 두어왔다.

자동차 업계에 따르면 FCV 시장은 2005년-2010년 동안 전 세계적으로 5만대-10만대 정도가 보급되고, 2030년대에는 매년 5,000만대가 생산되어 세계수요의 10%를 차지할 것으로 전망하고 있다. 일본의 경우 FCV를 2010년까지 5만대를 보급하고 2020년까지 전체 운행대수의 7%에 해당하는 500만대를 보급한다는 장기계획을 수립하였다. FCV 개발의 선두 주자는 Daimler-Chrysler의 NECAR Series로 상용화를 위한 기반기술이 완료된 상태이며 미국 및 일본에서의 시범운행을 위한 2004년도 생산계획을 발표하였다⁽¹⁾.

우리나라는 수소경제체제를 구축하기 위하여 2012년까지 수소의 제조, 저장, 이용 등 각 분야에서 수소에너지의 경제성을 확보하여 초기 수소경제 시대에 진입하고, 2020년까지 수소와 관련된 생산, 저장, 유통산업을 창출하며, 2030년부터 산업체 주도의 수소경제를 실현하며, 2040년까지 물을 분해하여 수소연료를 경제적으로 생산할 수 있는 기술을 확보한다는 로드맵을 제시한 바 있다.

수소경제의 진입 시점을 결정짓는 중요한 관건중의 하나는 FCV이다. FCV 시장창출은 FCV의 경제성에 좌우되며, 그 경제성은 수소연료와 차량의 가격, 연간주행거리, 수소연료와 차량에 대한 조세제도 등에 좌우된다. 연료전지시스템의 생산가격과 수소제조가격이 상대적으로 고가이기 때문에 각국의 자동차업체에서 개발된 FCV는 아직까지는 보편화되고 있지 않은 실정이다. 그러나 연료전지시스템의 기술과 대량생산기술이 빠른 속도로 진행되고 있기 때문에 FCV는 2015년 이후에 본격적인 실용화 단계에 도달할 것으로 예측되고 있다⁽²⁾.

우리나라의 경우에 FCV의 시장규모, 경제성분석, 온실가스 효과 등 초기단계의 연구조차 진행되고 되지 않아 이에 대한 심도 있는 연구가 필요한 시점이며, FCV의 경제적 타당성 분석을 통하여 FCV산업에 영향을 미치는 제반 경제적 요인들을 체계적으로 분석하여 FCV산업의 세계시장침투에 효과적인 전

략을 마련하여야 할 시점으로 사료된다.

본 연구에서는 FCV의 경제성 분석시점을 2015년으로 선정하였으며, FCV와 경제적 측면에서 비교될 자동차로 자가용 승용차인 휘발유자동차(현대 투싼, 2.0 VVT 2WD MX, 고급형, 베이지 내장, A/T)와 경유자동차(현대 투싼, 2.0 CRDi 4WD JX 고급형, 베이지 내장, A/T)를 기준하였다.

경제성 분석방법은 크게 세 가지 형태로 구분할 수 있다. 경제성분석에 필요한 편익과 비용에 대한 현금흐름을 확정적으로 간주한 후 경제성분석과 민감도분석을 통하여 확정적 현금흐름을 해석하는 고전적인 편익/비용 분석방법(benefit/cost analysis)이 있으며, 현금흐름을 확률변수로 간주하여 확률적 기법으로 경제성분석을 시도하는 방법이 있다. 최근에는 R&D 평가, 신제품평가, 사업평가, 재생에너지평가 등 경제성분석 대상별로 개별적인 경제성평가방법이 등장하고 있다⁽³⁾.

본 연구에서는 일반적으로 많이 사용되고 있는 수명주기(life cycle)에 기초한 편익/비용 분석방법을 사용하였다. 이론적으로는 각 방법별로 해석상의 의미가 있으나 평가결과는 어느 방법을 사용하든지 관계없이 거의 유사한 결과가 도출되고, 입력변수와 모형매개변수 자체의 불확실성을 배제하는 방법론이 없기 때문에 일반적으로 편익/비용 분석방법이 많이 사용되고 있는 실정이다.

본 논문은 다음과 같이 구성된다. 2장에서는 휘발유자동차(GV, gasoline vehicle) 및 경유자동차(DV, diesel vehicle)와 비교한 FCV의 경제성모형을 정립하며, 모형입력변수에 대한 자료 수집을 통하여 대표적인 경제성분석을 수행한다. 3장에서는 경제성에 영향을 미치는 중요한 입력변수에 대하여 민감도 분석을 수행한다. 또한 GV와 DV에 비교하여 FCV의 경제성이 존재하기 위한 최소 연간주행거리를 파악하는 분기점분석을 수행한다. 4장에서는 환경비용을 고려한 FCV의 경제성을 재해석한다. 5장에서는 논문의 결과를 요약하고, 문제점을 제시하며, 향후 연구방향에 대하여 논한다.

2. FCV의 경제성분석

2.1 경제성모형의 정립

소비자입장에서 자동차의 경제성은 초기투자비에 해당하는 차량가격, 연간운영비, 잔존가치 등에 의하여 결정된다. 전

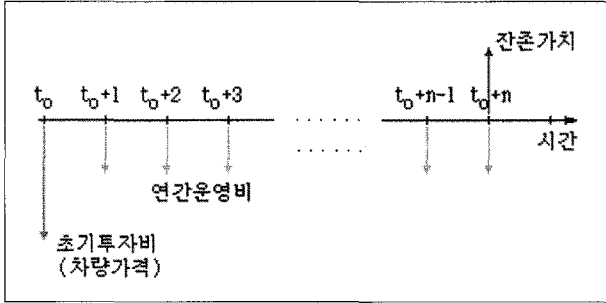


Fig. 1 자동차 경제성분석을 위한 현금흐름도

의 편의상, $I_k(t)$ 를 자동차 k의 t년도 최종소비자 가격으로 정의하자. 여기서 변수 k가 1이면 FCV, 2이면 GV, 3이면 DV를 의미한다. 그림 1에서 제시된 바와 같이 경제성분석시점을 t_0 , 분석기간을 n년으로 가정하자. 자동차 경제성모형의 현금흐름은 시점 t_0 에서의 초기투자비 $I_k(t_0)$ 와 시점 t에서의 연간운영비, $C_k(t)$, for $t = t_0 + 1, \dots, t_0 + n$, 그리고 시점(t_0+n)에서의 자동차 잔존가치 S_k 등으로 구성된다.

할인율 i가 연도에 상관없이 일정하다고 가정하면, 시점 t_0 에서의 자동차 k의 순현재가를 나타내는 $NPV_k(t_0)$ 는 식 (1)과 같이 산출될 수 있다. 참고로 음수는 소비자입장에서 지출을 의미한다.

$$NPV_k(t_0) = I_k(t_0) + \frac{S_k}{(1+i)^n} - \sum_{t=t_0+1}^{t_0+n} \frac{C_k(t)}{(1+i)^{t-t_0}} \quad (1)$$

일반적으로 자동차의 연간운영비는 연료비, 자동차 보험료, 예방정비비(고장이 나기 전에 예방정비 측면에서 부품이나 오일을 교환할 때 지출되는 비용), 고장수리비(고장이 난 후에 지출되는 수리비용), 세금(자동차세, 지방교육세) 등으로 분류할 수 있다. 비교대상이 되는 차량들의 배기량은 거의 비슷하므로, 본고에서는 자동차소유와 관련된 세금은 동일하다고 가정하여 연간운영비에서 제외하였다.

자동차보험은 책임보험과 종합보험으로 구분되며 종합보험 중 자기차량손해보험만 차량가격과 거의 비례관계에 있으며, 예방정비비와 고장수리비는 자동차 종류, 주행환경, 운전자특성 등 여러 요인에 기인하지만 차량가격과 비례관계에 있다고 가정할 수 있을 것이다. 따라서 본고에서는 보험료, 예방정비비와 고장수리비의 합을 기타비용으로 정의하며, 기타비용은 차량가격과 비례한다고 가정한다. 즉 연간기타비용은 최종소비자기준의 차량가격에 대한 비율인 r_M 으로 연도와 관계없이 일정하다고 가정한다.

D를 연간주행거리(km/년), $F_k(t)$ 를 자동차 k의 t년도 km당 연료가격(원/km)으로 정의하면, 시점 t에서의 연간 연료비는 $DF_k(t)$ 가 된다. 시점 t_0 에서 차량을 구입한다면 자동차 k에 대한 t년도 연간운영비는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$C_k(t) = DF_k(t) + r_M I_k(t_0), (t_0 + 1) \leq t \leq (t_0 + n) \quad (2)$$

시점 ($t_0 + 1$)에서의 잔존가치 S_k 는 차량가격의 r_S 라고 가정하고, 식 (2)를 식 (1)에 대입하면 식 (1)은 다음과 같이 전개된다.

$$\begin{aligned} NPV_k(t_0) &= I_k(t_0) + \frac{r_S I_k(t_0)}{(1+i)^n} \\ &\quad - \sum_{t=t_0+1}^{t_0+n} \frac{\{DF_k(t) + r_M I_k(t_0)\}}{(1+i)^{t-t_0}} \\ &= - \left\{ 1 - \frac{r_S}{(1+i)^n} + r_M \sum_{t=t_0+1}^{t_0+n} \frac{1}{(1+i)^{t-t_0}} \right\} I_k(t_0) \\ &\quad - D \sum_{t=t_0+1}^{t_0+n} \frac{F_k(t)}{(1+i)^{t-t_0}} \\ &= - (\beta_1 + \beta_2 r_M) I_k(t_0) - D \sum_{t=t_0+1}^{t_0+n} \frac{F_k(t)}{(1+i)^{t-t_0}} \quad (3) \end{aligned}$$

여기서

$$\begin{aligned} \beta_1 &= 1 - \frac{r_S}{(1+i)^n}, \\ \beta_2 &= \sum_{t=t_0+1}^{t_0+n} \frac{1}{(1+i)^{t-t_0}} = \frac{\{(1+i)^n - 1\}}{i(1+i)^n} \end{aligned}$$

참고로 β_2 는 등가지불현재가계수(equal-payment-series present-worth factor)이다. 식 (3)의 우변에 있는 $F_k(t)$ 는 시점 t의 함수로서 식 (4)의 관계식을 만족하는 상수 F_k 가 항상 존재하며, F_k 는 식 (5)와 같이 표현될 수 있다.

$$\sum_{t=t_0+1}^{t_0+n} \frac{F_k(t)}{(1+i)^{t-t_0}} = \sum_{t=t_0+1}^{t_0+n} \frac{F_k}{(1+i)^{t-t_0}} = F_k \beta_2 \quad (4)$$

$$F_k = \frac{1}{\beta_2} \sum_{t=t_0+1}^{t_0+n} \frac{F_k(t)}{(1+i)^{t-t_0}} \quad (5)$$

따라서 식 (3)은 다음과 같이 표현된다.

$$NPV_k(t_0) = (\beta_1 + \beta_2 r_M) I_k(t_0) - \beta_2 DF_k \quad (6)$$

GV와 DV에 대한 FCV의 경제성을 평가하기 위하여 순현재가의 차이를 비교하면 된다. 이러한 분석방법은 증분 분석(incremental analysis) 방법으로서 $\Delta I_{ik} = I_k(t_0)$, $\Delta F_{ki} = F_k - F_i$ 로 정의하면, 식 (6)으로부터 두 자동차의 순현재가의 차이는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\begin{aligned} NPV_{ik} &= NPV_{i(t_0)} - NPV_{k(t_0)} \\ &= -(\beta_1 + \beta_2 r_M) \Delta I_{ik} + \beta_2 D \Delta F_{ki} \end{aligned} \quad (7)$$

식 (7)의 우변 첫째항은 차량가격 차이인 ΔF_{ki} 만큼 발생하는 투자 및 기타비용의 순현재가를 의미하며, 둘째 항은 km당 연료가격과 연간주행거리의 차이에서 발생하는 연료비의 순현재가를 의미한다. 따라서 km당 연료가격과 연간주행거리의 차이로 발생된 편익이 차량가격의 차이로 발생하는 비용을 상회하면 FCV의 경제적 타당성이 인정된다. 본고에서는 주어진 연간주행거리 D에서 $NPV_{ik} \geq 0$ 인 경우 비교되는 자동차 k에 대한 FCV의 경제성이 있다고 정의한다.

FCV의 경제성은 식 (7)에 제시된 바와 같이 벡터(ΔI_{ik} , ΔF_{ki} , β_1 , β_2 , r_M)의 값에 따라 좌우되며, ΔF_{ki} 는 부피 또는 무게를 기준한 연료가격과 자동차의 연비에 따라 좌우된다. 본고에서는 2015년 시점에서 각 입력변수의 표준값을 추정하였고 이러한 변수들의 표준값의 집합을 표준벡터로 정의하고, 표준벡터를 기준한 대표적인 경우에 대한 경제성평가를 수행하였다.

2.2 표준벡터의 변수추정

FCV의 경제성분석을 위해서는 적절한 분석기간 n의 선정이 필요하며, 분석기간을 설정하는 대표적인 방법은 자동차의 수명으로 설정하는 방식이다. 본고에서는 모든 자동차의 수명을 10년으로 가정하였다. 연료전지의 수명은 현재 약 2,000시간이지만 2010년 이후에 약 5,000시간이 될 것으로 예측되고 있으므로 FCV의 수명기간을 10년으로 동일하게 설정하여도 큰 무리는 없을 것으로 판단된다.

I를 인플레이션율, i'를 경사가격에 의한 할인율이라 표기하면, 불변가격에 의한 무인플레이션 할인율 i는 다음과 같이 산출될 수 있다⁽⁴⁾.

$$i = \frac{1+i'}{1+I} - 1 \quad (8)$$

본고에서는 할인율은 6%로 가정하였으며 4%와 8%에 대한 민감도분석을 수행하였다. 인플레이션율이 약 3%이고, 경사가격에 의한 할인율이 9.2% 수준인 경우에 i는 6% 수준이 된다.

정부는 중고차의 과세표준액을 산정하기 위하여 승용자동차의 연도별 잔존가치비율 또는 잔가율은 6년이 경과한 후부터 차량가격의 10%로 인정하고 있으며, 본고에서는 10년이 경과한 중고차량의 잔존가치비율을 초기 구입가격의 5%로 가정하였다.

소비가가 투산(GV)을 구입하였을 경우에 연간 평균보험료는 26세 이상 한정특약기준으로 약 75만원(차량가격대비 4.1%), 예방정비비는 약 61만원(차량가격대비 3.3%)으로 차량가격 대비 약 7.4%로 추정되었다. 본고에서는 자동차기술의 발달에 따른 고장수리비를 감안하여 r_M 은 8%로 설정하였다.

자동차의 연간주행거리는 에너지경제연구원에서 표본조사한 통계자료를 기준으로 추정하였다⁽⁵⁾. 위와 같은 연구결과에 의하면 승용휘발유의 경우에 중형자동차의 연간주행거리는 14,756km, 대형자동차의 연간주행거리는 17,204km로 조사되었으나 투산은 중대형에 속하고, 선진국의 소득이 증가할수록 연간주행거리가 점차 감소하는 현상을 감안하여 본고에서는 GV의 연간주행거리를 15,000km로 가정하였다. 다목적경유의 경우 중형은 18,491km, 대형은 20,710km로 조사되었으나 동일한 논리로 19,000km를 기준하였다.

자동차의 최종소비자가격은 대리점이나 영업소의 판매가격에 특별소비세, 부가가치세, 취득세, 등록세, 교육세 등의 세금과 채권구입비 등으로 구성된다. 도시철도공채 구입과 수도권 기준으로 제반 세금을 포함하여 $I_2(t) = 18,503,579$ 원, $I_3(t) = 20,657,033$ 원으로 설정하였다. 식 (7)에 제시된 바와 같이 GV 또는 DV에 대한 FCV의 경제성분석을 위하여 차종간 차량가격의 차이에 대한 예측이 필요하다. FCV의 최종소비자 가격은 2015년에 제조기술과 대량생산기술에 힘입어 GV 판매가격보다 1000만원 정도 상회할 것으로 예측되고 있으므로, 본고에서는 FCV의 최종소비자가격인 $I_1(t) = 28,503,579$ 원으로 추정하였다.

자동차 k의 실제연비를 E_k (GV와 DV는 km/liter, FCV는 km/kg으로 정의함), 자동차 k의 연료가격을 P_k (GV와 DV는 원/liter, FCV는 원/kg으로 정의함)라 표기하면 차량들의 km당 연료비의 차이를 나타내는 ΔF_{ki} 은 다음과 같이 표현된다.

$$\Delta F_{k1} = F_k - F_1 \frac{P_k}{E_k} - \frac{P_1}{E_1} \quad (9)$$

휘발유가격 P_2 는 2005년 9월 주유소 평균소비자가격인 1,511원/liter을 기준하였으며, 경유가격 P_3 는 2007년 7월부터 시행될 제2차 에너지 세제 개편안에 따라 휘발유가격의 85%인 1284원/liter로 설정하였다. 수소연료가격의 추정에 관한 논문은 Myers et. al.(2002년)⁶⁾, Adame et. al.(2004년)⁷⁾ 등이 있으나, 미국의 NRC (National Research Council)에 따르면 \$2.33- \$3.51/kg 수준까지 최종적으로 떨어질 것으로 예측하고 있다⁸⁾. 본고에서는 이러한 수소가격을 감안하여 수소가격을 2015년에서 2025년까지 불변가격을 기준하여 5,000원/kg으로 일정하다고 가정하였다.

투산을 기준한 GV와 DV의 정부공인 표준연비는 각각 9.8Km/liter, 11.9Km/liter로 발표된 바 있다. 그러나 이러한 표준연비는 실제연비와 상이하다. 산업자원부는 표준연비와 실제연비의 차이를 20-30% 정도 인정하고 있으며, 국산차 700여대를 대상으로 공인연비와 실제연비 차이를 실측한 결과 공인 표준연비 대비 실제연비는 약 70%로 산출된 바 있다⁹⁾. 연비비율은 향후 향상될 것으로 가정하여 본고에서는 연비비율의 표준값을 75%로 적용하여, GV와 DV의 실제연비를 각각 7.35km/liter, 8.93km/liter로 가정하였다. 한편 본고에서는 FCV의 실제연비를 2005년도 EVS21 몬테카를로 랠리에서 투산이 기록한 80km/kg으로 추정하였다. 편의상 앞에서 논의한 표준값을 Table 1에 요약하였다.

2.3 표준벡터기준 FCV의 경제성분석

두 개의 연간주행거리 15,000km와 19,000km에 대하여 표준벡터를 기준한 자동차별 초기투자비, 잔존가치 및 연간운영비를 Table 2에 요약하였다.

연간주행거리 15,000km를 기준한 FCV의 연간총비용은 자본비 376만원과 연간운영비 322만원의 합인 698만원, GV의 연간 총비용은 자본비 244만원과 연간운영비 456만원의 합인 701만원으로 산출되어, FCV를 구입할 경우 GV에 비하여 연간 25,000원이 절감될 것으로 계산되었다. 그러나 19,000km를 기준한 FCV의 연간총비용은 723만원, DV는 712만원으로 산출되어 FCV는 DV에 비하여 연간 약 12만원이 더 소요되는 것으로 나타났다.

Table 1. 표준벡터 변수의 추정값

| 변수 | 추정값 | | |
|-------------|---------------------------------|--------------|--------------|
| n | 10년 | | |
| i | 6% | | |
| β_2 | n=10, i=6%일 때 7.3601 | | |
| r_s | 5% | | |
| β_1 | n=10, i=6%, r_s =5%일 때 0.9721 | | |
| r_M | 8% | | |
| D | 15,000 km/년(GV), 19,000km/년(DV) | | |
| - | FCV | GV | DV |
| $I_k(2015)$ | 28,503,579원 | 18,503,579원 | 20,657,033원 |
| P_k | 5,000원/kg | 1,511원/liter | 1,284원/liter |
| E_k | 80km/kg | 7.35km/liter | 8.93km/liter |
| F_k | 62.5원/km | 205.6원/km | 143.9원/km |

Table 2. 표준벡터기준 자동차별 초기투자비, 잔존가치, 연간운영비

| 항목 | 자동차 | FCV | | GV | DV |
|--------|-----|------------|-----------|------------|------------|
| | | 15,000km | 19,000km | | |
| 초기투자비 | | 28,503,579 | | 18,503,579 | 20,657,033 |
| 잔존가치 | | 1,425,179 | | 925,179 | 1,032,852 |
| 연간자본비 | | 3,764,598 | | 2,443,852 | 2,728,269 |
| 연간 운영비 | 연료비 | 937,500 | 1,187,500 | 3,083,673 | 2,734,190 |
| | 기타 | 2,280,286 | 2,280,286 | 1,480,286 | 1,652,563 |
| 비용 | 소계 | 3,217,786 | 3,467,786 | 4,563,960 | 4,386,753 |
| 연간총비용 | | 6,982,384 | 7,232,384 | 7,007,812 | 7,115,022 |

Table 3. 표준벡터기준 증분분석에 의한 연도별 순현금흐름 및 경제성평가

(단위 : 원)

| 구분 | 자동차 | FCV - GV | FCV - DV |
|--------|-----|-------------|------------|
| 2015년 | | -10,000,000 | -8,000,000 |
| 2016년 | | 1,346,174 | 918,967 |
| 2017년 | | 1,346,174 | 918,967 |
| 2018년 | | 1,346,174 | 918,967 |
| 2019년 | | 1,346,174 | 918,967 |
| 2020년 | | 1,346,174 | 918,967 |
| 2021년 | | 1,346,174 | 918,967 |
| 2022년 | | 1,346,174 | 918,967 |
| 2023년 | | 1,346,174 | 918,967 |
| 2024년 | | 1,346,174 | 918,967 |
| 2025년 | | 1,846,174 | 1,318,967 |
| NPV | | 187,151 | -863,797 |
| IRR(%) | | 6.38 | 3.68 |
| PBP(년) | | 10 | - |

식 (7)을 이용하여 GV에 대한 FCV의 경제성을 증분분석 방법에 의해 산출한 연도별 순현금흐름과 이러한 순현금흐름에 근거한 경제성 평가결과를 Table 3에 수록하였다.

증분분석에 의한 경제성 평가 결과는 순현재가(NPV)가 약 19만원, IRR은 6.38%, 불변가격기준으로 초기투자비를 회수하는 기간 PBP(payload period)는 10년으로 산출되어 연간주행거리 15,000km를 기준으로 FCV는 GV에 비하여 경제성이 있는 것을 재확인 할 수 있다. 반면에 DV에 대한 FCV의 순현재가는 -86만원, IRR은 3.68%로 산출되어 19,000km 기준으로 FCV는 DV에 비하여 경제성이 없는 것으로 나타났다.

3. 민감도 및 분기점 분석

3.1 민감도 분석

본 절에서는 GV에 대한 FCV의 경제성에 큰 영향을 미치는 차량가격, 수소가격, 할인율, 연간주행거리의 변동에 따른 민감도를 표준벡터기준으로 분석하였다.

Table 4를 보면 표준벡터 기준으로 차량가격차이 ΔI_{12} 가 1,500만원이면 GV에 대한 FCV의 경제성은 없으며, ΔI_{12} 가 1,013만원 이상인 경우에 FCV의 경제성은 없는 것으로 나타났다.

Table 5에 제시된 바와 같이 수소가격이 6,000원/kg이면 FCV의 경제성은 없으며, 이 5,136원/kg 이상이면 FCV의 경제성은 없는 것으로 나타났다.

Table 6을 보면 할인율이 8%인 경우에 FCV의 경제성은 없는 것으로 분석되었다. GV에 대한 FCV의 경제성은 연간주행거리에 따라 달라질 수 있기 때문에 연간주행거리에 따른 민감도 분석결과를 Table 7에 수록하였다.

Table 7에 제시된 바와 같이 연간주행거리가 14,000km 이하인 경우에 FCV의 경제성은 없는 것으로 나타났으며, 연간주행거리가 30,000km인 경우 순현재가는 약 1,598만원, IRR은 33%인 것으로 나타났다. 순현재가는 연간주행거리가 1,000km 씩 증가 할 때마다 약 105만원씩 증가하였다.

3.2 분기점 분석

본 절에서는 연간주행거리 D를 중심으로 FCV의 경제성에 중요한 영향을 미치는 두 변수인 차량가격 차이와 수소가격(ΔI_{1k} ,

Table 4. 차량가격의 변동에 따른 민감도분석

| ΔI_{12} (만원) | NPV(원) | IRR(%) | PBP(년) |
|----------------------|-------------|--------|--------|
| 500 | 7,991,587 | 33.00 | 4 |
| 1000 | 187,151 | 6.38 | 10 |
| 1500 | -7,617,285 | -6.10 | - |
| 2000 | -15,421,721 | -15.04 | - |

Table 5. 수소가격의 변동에 따른 민감도분석

| i | NPV(원) | IRR(%) | PBP(년) |
|-------|------------|--------|--------|
| 3,000 | 2,947,184 | 11.73 | 8 |
| 4,000 | 1,567,168 | 9.12 | 9 |
| 5,000 | 187,151 | 6.38 | 10 |
| 6,000 | -1,192,865 | 3.48 | - |
| 7,000 | -2,572,881 | 0.37 | - |

Table 6. 할인율의 변동에 따른 민감도분석

| i | NPV(원) | IRR(%) | PBP(년) |
|----|-----------|--------|--------|
| 4% | 1,256,455 | 6.38 | 9 |
| 6% | 187,151 | 6.38 | 10 |
| 8% | -735,470 | 6.38 | - |

Table 7. 연간주행거리의 변동에 따른 민감도분석

| D(km) | NPV(원) | IRR(%) | PBP(년) |
|--------|------------|--------|--------|
| 10,000 | -5,078,190 | -6.10 | - |
| 11,000 | -4,025,122 | -3.22 | - |
| 12,000 | -2,972,053 | -0.58 | - |
| 13,000 | -1,918,985 | 1.87 | - |
| 14,000 | -865,917 | 4.19 | - |
| 15,000 | 187,151 | 6.38 | 10 |
| 16,000 | 1,240,220 | 8.48 | 9 |
| 17,000 | 2,293,288 | 10.51 | 8 |
| 18,000 | 3,346,356 | 12.46 | 8 |
| 19,000 | 4,399,424 | 14.36 | 7 |
| 20,000 | 5,452,492 | 16.20 | 6 |
| 21,000 | 6,505,561 | 18.01 | 6 |
| 22,000 | 7,558,629 | 19.78 | 6 |
| 23,000 | 8,611,697 | 21.51 | 5 |
| 24,000 | 9,664,765 | 23.22 | 5 |
| 25,000 | 10,717,834 | 24.90 | 5 |
| 26,000 | 11,770,902 | 26.56 | 4 |
| 27,000 | 12,823,970 | 28.19 | 4 |
| 28,000 | 13,877,038 | 29.81 | 4 |
| 29,000 | 14,930,107 | 31.41 | 4 |
| 30,000 | 15,983,175 | 33.00 | 4 |

P_1)의 변동이 GV에 대한 FCV의 경제성에 미치는 효과를 분석하였다.

식 (7)에 제시된 NPV_{1k} 는 (β_1, β_2, r_M) 이 연도에 관계없이 일정할 경우 즉 이 (r_s, i, n) 연도에 관계없이 일정할 경우에 $(\Delta I_{1k}, \Delta F_{k1}, D)$ 의 함수가 된다. 따라서 $(\Delta I_{1k}, \Delta F_{k1})$ 이 주어질 경우에는 순현재가 0으로 하는 연간주행거리가 존재한다. 이러한 연간주행거리를 경제적 분기점(break-even point)이라 정의하자. 식 (7)로부터 순현재가 0으로 하는 연간주행거리의 경제적 분기점(D^*)은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$D^* = \frac{(\beta_1 + \beta_2 r_M) \Delta I_{1k}}{\beta \Delta F_{k1}} \quad (10)$$

수소가격 $P_1 = 5,000$ 원/kg이고 차량가격차이 $\Delta F_{12} = 1,000$ 만원인 경우에 $\Delta F_{21} = 143$ 원/km이므로, 이를 식 (10)에 대입하면 연간주행거리의 분기점 D^* 는 14,822km가 된다.

Table 8에 제시된 바와 같이 $P_1 = 6,000$ 원/kg이고 $\Delta I_{12} = 1,000$ 만원일 때 D^* 는 16,241km이고, $\Delta I_{12} = 6,000$ 원/kg이고 $=2,000$ 만원인 경우에는 연간주행거리가 32,482km 이상이 되어야 FCV의 경제성이 있는 것을 보여주고 있다. 한편 차량가격 차이가 500만원 증가할 때마다 D^* 는 7,411km씩 증가되는 것으로 나타났다.

DV에 대한 FCV의 연간주행거리의 분기점은 마찬가지로 방법으로 산출할 수 있으며, $P_1 = 5,000$ 원/kg이고 $\Delta I_{13} = 1000$ 만원일 때 D^* 는 26,052km, $P_1 = 5,000$ 원/kg이고 $\Delta I_{13} = 1500$ 만원일 때 D^* 는 39,078km인 것으로 분석되었다. 한편 DV의 경우에는 차량가격이 500만원 증가할 때마다 D^* 는 13,026km씩 증가되었다. 다목적DV의 연간평균주행거리가 20,249km인 점을 감안하면 FCV가 DV를 대체할 가능성은 많지 않은 것으로 사료된다.

4. 환경비용을 고려한 FCV의 경제성

우리나라는 교토의정서에 의해 2012년부터 온실가스(GHG, greenhouse gas) 감축의무를 받게 될 것이 확실시되고 있다. FCV의 GHG 방출량은 GV나 DV의 GHG 방출량에 비하여 낮기 때문에 경제성 평가시 이러한 장점이 환경비용 측면에서 감안되어야 하며, 본장에서는 환경비용을 감안하여 FCV의 경제적 타당성을 재해석한다.

Table 8. GV를 기준한 수소가격과 차량가격차이 변화에 따른 연간주행거리 분기점

| P_1 (원/kg) \ ΔI_{12} | 1000만원 | 1500만원 | 2000만원 |
|--------------------------------|--------|--------|--------|
| 3,000 | 12,618 | 18,926 | 25,235 |
| 3,500 | 13,105 | 19,657 | 26,210 |
| 4,000 | 13,631 | 20,447 | 27,263 |
| 4,500 | 14,202 | 21,303 | 28,404 |
| 5,000 | 14,822 | 22,233 | 29,645 |
| 5,500 | 15,499 | 23,249 | 30,999 |
| 6,000 | 16,241 | 24,362 | 32,482 |

Table 9. DV를 기준한 수소가격과 차량가격차이 변화에 따른 연간주행거리 분기점 D^*

| P_1 (원/kg) \ ΔI_{12} | 1000만원 | 1500만원 | 2000만원 |
|--------------------------------|--------|--------|--------|
| 3,000 | 19,931 | 29,896 | 39,862 |
| 3,500 | 21,175 | 31,762 | 42,349 |
| 4,000 | 22,584 | 33,876 | 45,168 |
| 4,500 | 24,194 | 36,291 | 48,389 |
| 5,000 | 26,052 | 39,078 | 52,104 |
| 5,500 | 28,218 | 42,328 | 56,437 |
| 6,000 | 30,778 | 46,167 | 61,556 |

자동차별 GHG 방출량을 Q_k (톤/km), 환경부담금을 P_E (원/톤)이라 표기하면, 자동차의 km당 환경비용 $S_k = P_E Q_k$ 가 된다. FCV의 km당 환경비용효과 ΔS_{k1} 을 $(S_k - S_1)$ 으로 정의하면 연간 환경비용효과는 $D \Delta S_{k1}$ 가 되며, n년 동안 발생한 환경비용효과의 순현재가는 $\beta_2 \Delta S_{k1}$ 가 된다. 따라서 n년 동안의 환경비용효과를 반영한 GV와 DV에 비교한 FCV의 순현재가 $NPVE_{1k}$ 는 식 (7)을 이용하여 다음과 같이 표현된다.

$$NPVE_{1k} = NPV_{1k} + \beta_2 D \Delta S_{k1} = -(\beta_1 + \beta_2 r_M) \Delta I_{1k} + \beta_2 D (\Delta F_{k1} + \Delta S_{k1}) \quad (11)$$

우리나라 제조업에 대한 탄소배출권의 시장가격은 이산화탄소 톤당 약 \$20(25,303원/CO₂톤)에 이를 것으로 예측된 바 있다⁹⁾. 2005년 현재 유럽의 배출권 시장가격은 톤당 18유로에서 29유로 사이에서 형성되고 있으며, 미국의 시카고 기후거래소의 탄소거래가격은 \$2.16를 중심으로 상승 또는 하강하고 있으나 톤당 \$200까지 치솟을 것이라는 예상도 나오고 있다. 본고에서는 정부의 보고서와 유럽가격을 고려하여 2015년에서 2025년 사이의 톤당 환경비용부담금을 탄소배출권의 시장가

Table 10. 자동차별 연간 GHG 방출량, 연간환경비용과 순현재가

| 항목 | 자동차 | FCV | PV | DV |
|---------------|---------|---------|---------|---------|
| GHG 방출량(g/km) | | 159 | 303 | 275 |
| km당 환경비용(\$) | | 3,9776 | 7,5668 | 6,8676 |
| 연간주행거리(km) | 15,000 | 19,000 | 15,000 | 19,000 |
| 연간 GHG방출량(톤) | 2,3866 | 3,0230 | 4,5401 | 5,2194 |
| 연간 환경비용(원/년) | 59,664 | 75,575 | 113,502 | 130,485 |
| 순현재가(원) | 439,135 | 556,238 | 835,386 | 960,379 |

격인 25,000원/CO₂톤으로 가정하였다.

자동차별(투산 기준) km당 GHG 배출량 자료는 현재 발표된 바가 없으므로 미국의 연구보고서에서 제시한 자료를 인용하여, FCV는 159g/km, GV는 303g/km, DV는 275g/km로 설정하였다⁽¹⁰⁾.

연간주행거리 15,000km와 19,000km에 대하여 상기 추정치를 이용하여 각 자동차의 GHG 방출량과 연간환경비용을 계산한 결과를 Table 10에 요약하였다.

연간주행거리가 15,000km인 FCV의 연간 GHG 방출량은 2,3866톤/년, 연간환경비용은 59,664원으로 10년 동안 발생하는 환경비용효과의 순현재가는 약 44만원인 것으로 추정되었다. GV의 환경비용효과의 순현재가는 84만원으로 GV에 대한 FCV의 환경비용효과는 두 환경비용효과의 차액인 약 40만원으로 추정되었다. 한편 DV에 대한 FCV의 환경비용효과도 비슷한 수준으로 약 40만원인 것으로 나타났다.

환경비용효과를 고려한 경제성분석을 위하여는 2.3절에서 추정된 NPV_{1k}에 약 40만원을 추가하여 해석하면 된다. 환언하면 2.3절에서 NPV₁₂는 약 19만원으로 추정되었으므로 NPV₁₂는 환경비용효과 40만원을 더하여 59만원으로 추정하면 된다. NPV₁₃는 환경비용효과를 더하여도 약 -46만원이 되므로 표준벡터기준으로 FCV가 DV를 대체할 가능성은 낮게 나타났다.

5. 결론

본고에서는 현대투산을 기준으로 경제성 분석시점을 2015년으로 선정하여 자가용 승용차인 GV와 DV에 대한 FCV의 경제성분석을 수행하였다. GV에 대한 FCV의 연간주행거리에 따른 개별적 경제성분석을 수행하였으며, 입력변수의 변동에 따른 민감도분석을 수행하였다. 또한 GV와 DV에 대하여 연간주

행거리의 경제적 분기점분석과 환경비용을 고려한 경제성분석을 수행하였다.

표준벡터 기준으로 FCV는 GV에 비하여 매년 25,000원을 절감할 수 있을 것으로 나타났으며, DV에 비하여 약 12만원이 더 지출될 것으로 나타났다. 따라서 FCV는 연간주행거리가 15,000km 이상인 GV 소비자를 중심으로 시장이 형성될 것으로 전망된다.

민감도분석 결과 표준벡터 기준으로 FCV의 경제성에 영향을 미치는 차량가격차이가 1013만원 이상, 또는 수소연료가격이 5,136원/kg 이상, 또는 인율이 6.38%이상, 또는 기타비용비율이 8.25%이상일 경우 FCV의 경제성확보는 어려울 것으로 나타났다. 따라서 FCV의 차량가격과 수소연료가격의 목표를 단계적으로 설정하여 제조 및 생산기술에 대한 심도 있는 연구가 지속적으로 진행되어야 할 것이며, 동시에 FCV와 관련된 조세제도와 법에 대한 심도 있는 연구와 제정이 이루어져야 할 것으로 사료된다.

본고에서 제시된 결론은 경제성평가모형을 기준으로 여러 가지 가정 하에서 도출된 결과이기 때문에 해석상의 주의가 필요하다. 따라서 화석연료 가격, 연비, 기타비용, GHG 배출량, 환경비용 등 모형입력변수에 대한 정확한 자료의 수집이 필요하다. 또한 향후에는 수소버스 등에 대한 경제성분석도 필요할 것이다.

후기

이 연구는 과학기술부 프론티어 연구사업인 고효율수소에너지제조·저장·이용기술개발사업단의 연구비 지원으로 수행되었음(과제번호:M103KW010018-05K2301-01812).

References

- [1] 김정인, 2003, 수소에너지 이용 현황과 전망, CEO Energy Briefs, 에너지경제연구원, 제2003-24호.
- [2] 이기춘, 2002, 연료전지기술 Workshop, 한국화학공학회, pp. 77-87.
- [3] 김봉진 외, 1998, "국내 천연가스 수요관리의 경제성 분석 : 고효율 가스보일러 도입 사례연구", 한국에너지공학회지, 제7권 제1호, pp. 1-6.
- [4] 박찬석, 김규태, 최성호, 2004, 경제성공학, 영지문화사, pp. 58.

- [5] 이성근 외, 2005, 가정부문 에너지소비 형태분석 및 건물부문 DB구축, 에너지경제연구원 정책연구보고서 04-04.
- [6] D. B. Myers, G. D. Ariff, B. D. James, J. S. Lettow, C. E. thomas, and R. C. Kuhn, 2002, "Cost and Performance Comparison of Stationary Hydrogen Fueling Appliances", Proceeding of the 2002 U.S. DOE Hydrogen Program Review, NREL/CP-610-32405.
- [7] C. Adame, M. Caldwell, J. Crosby, P. Glanville, M. Gonzalez, R. Heffner, K. Heinen, R. McCarthy, and J. Weinert, 2004, "Bid in Response to the DOE/NHA Proposal to Design a Public Hydrogen Fueling Station", U.C. Davis.
- [8] <http://www.fuelcells.org/info/library/QuestionsandAnswers062404.pdf>
- [9] 노동운, 강윤영, 2004, 온실가스 배출저감 정책수단이 제조업의 생산성에 미치는 영향, 에너지경제연구원, 기본연구보고서 04-13, 12월.
- [10] N. Brinkman, M. Wang, T. Weber, T. Darlington, Well-to-Wheels Analysis of Advanced Fuel/Vehicle Systems - A North American Study of Energy Use, Greenhouse Gas Emissions, and Criteria Pollutant Emissions, May 2005, Appendix D.

양 문 희



1978년 서울대학교 자원공학과 공학사
 1981년 서울대학교 산업공학과 공학석사
 1988년 Georgia Institute of Technology 산업공학과 공학박사

현재 단국대학교 공학부(산업공학전공), 교수
 (E-mail : myfriend@dankook.ac.kr)

김 봉 진



1977년 서울대학교 산업공학과 공학사
 1980년 한국과학기술원 산업공학과 공학석사
 1988년 미국 Texas A&M 대학교 산업공학과 공학박사

현재 단국대학교 공학대학 산업공학과 교수
 (E-mail: bjgim@dankook.ac.kr)

김 종 욱



1980년 고려대학교 산업공학과 공학사
 1991년 아주대학교 에너지공학과 공학석사
 1999년 아주대학교 에너지공학과 공학박사

현재 한국에너지기술연구원 정책연구부 책임연구원(부장)
 (E-mail : jongwkim@kier.re.kr)