

확산 모형을 이용한 수송용 수소 수요 예측 및 CO₂ 저감 효과 분석

이철용* · 정동호** · 신정우***†

*부산대학교 경영학과 조교수, **한국개발연구원 전문위원, ***경희대학교 산업경영공학과 / 빅데이터응용학과 부교수

Forecasting Hydrogen Demand for Transportation Using the Diffusion Model and the CO₂ Reduction Effect

Lee, Chul-Yong* · Jeong, Dongho** · Shin, Jungwoo***†

*Assistant Professor, School of Business, Pusan National University Pusan, Korea

**Specialist, Korea Development Institute, Sejong, Korea

***Associate Professor, Department of Industrial and Management Systems Engineering / Department of Big Data Analytics, Kyung Hee University, Seoul, Korea

ABSTRACT

In order to realize a net-zero emissions society in 2050, transition to a hydrogen economy from a carbon economy is essential. In this study, using the diffusion model and fuel cell electric vehicle (FCEV) data, a hydrogen vehicle forecast for 2040 is created. The demand forecast results of this study and the government's target values are compared. In addition, using the estimated FCEV forecasts, we forecast the demand for hydrogen for transportation and analyze the effect on emissions of CO₂, the core greenhouse gas. The estimation results show that about 2.5 million units will be supplied by 2040, which is 87.4% of the government target of 2.9 million units. To meet increasing demand by 2040, 886,262 tons of hydrogen will be needed, and a net 7,294,113 tons of CO₂ will be reduced. However, it is necessary to maximize CO₂ reduction by converting hydrogen production methods from the current gray hydrogen to green hydrogen and blue hydrogen.

Key words : Forecasting, Hydrogen, Diffusion Model, CO₂ Reduction Effect

1. 서론)

기후위기가 고조됨에 따라 많은 국가에서 탄소중립을 발표하고 있으며 우리나라도 2020년 12월에 2050년까지 탄소중립을 실현할 것을 발표하였다. 탄소중립을 위해서는 현재 탄소경제로부터 수소경제로의 전환이 필수이다. 이에 따라 우리나라 정부는 2040년까지 수소경제 활성화를 위한 정책 방향성과 목표 및 추진전략 등을 담은 수소경제 활성화 로드맵(Joint ministries, 2019a)을 수립하여 2019년 1월에 발표하였다. 본 발표자료에는 수소경제를 선도할 수 있는 산업생태계를 구축하고자 수소차 생산량을 확대하고, 수소충

전소를 확충하는 계획을 제시하고 있다. 정부는 2040년까지 290만대의 수소차를 보급하는 것을 목표로 두고 있다.

하지만 수소차의 보급 실적이 축적됨에 따라 주기적으로 수소차의 전망치를 갱신함으로써 정부의 수소차 보급 목표를 모니터링 할 필요가 있다. 따라서 본 연구의 목적은 지금까지의 수소차 보급 실적을 이용하여 2040년까지 수소차 보급 전망을 수행하여 본 연구의 수요예측 결과와 정부의 목표치를 비교하고자 한다. 하지만 수소차 보급의 역사가 매우 짧기 때문에 모형의 모수 추정이 어려워, 시계열 분석, 인공신경망 모형으로 접근하기에는 한계가 있다. 따라서 확산모형(Diffusion model) 기반의 유사접근법(Analogy)과 전기차 보급자료를 이용하여 수소

1) 본 논문은 Korea Development Institute(2021), “수소충전소 구축·운영 SPC 출자사업 타당성재조사 보고서” 중 일부를 발전시킨 연구입니다.

†Corresponding author : shinjung11@khu.ac.kr (1732, Deogyong-daero, Giheung-gu, Yongin-si, Gyeonggi-do 17104, Republic of Korea. Tel. +82-31-201-3687)

ORCID 이철용 0000-0003-0870-0039 정동호 0000-0003-0432-0119

신정우 0000-0002-7772-8636

차 전망치를 근사하고, Train(2013)이 제시한 재환산(recalibration) 기법을 이용하여 모수를 보정하고자 한다. 또한 추정된 수소차 전망치를 이용하여 수송용 수소 수요를 예측하고, 온실가스의 핵심인 CO₂의 저감 효과를 분석하고자 한다.

본 연구와 유사연구로 Kwon et al.(2019)에서는 수소충전소의 수소판매량 분석 모형을 구축하여 수소자동차 증가율에 따른 예상 판매량을 도출하였다. Guerra et al.(2016)에서는 스페인의 수소자동차를 포함한 친환경 자동차에 대한 판매량 예측을 통해 적정 충전소 개수와 입지선정 연구를 진행하였다. 수소 수송 및 충전 인프라 관련 연구에서는 수소 수요 예측을 위해서 수소자동차 예측 결과의 예측력 비교를 통해 신뢰성 있는 결과 제시가 미흡하였고, 오히려 적정 충전소의 개수와 입지선정 연구가 주를 이루었다.

마지막으로 수소자동차 보급 및 확산 연구와 관련해서는 Lim and Han(2019), Han et al.(2019), Park et al.(2011), Li et al.(2020b), Shin et al.(2019)가 있다. Lim and Han(2019)에서는 정부 지원 정책에 따른 수소자동차와 전기자동차 보급 확산의 변화를 분석하였고, 환경규제가 있는 국가일수록 보급속도가 빠름을 제시하였다. Park et al.(2011) 연구에서는 Bass 모형을 활용하여 수소자동차 확산 모형을 구축하였고, 수소자동차의 가격변화와 충전인프라 수에 따른 확산 영향을 모형에 반영하였다. Shin et al.(2019)에서는 선택실험법을 활용하여 수소자동차와 전기자동차에 대한 선호도 분석과 사용량을 예측을 분석하였고, 분석결과를 통해 친환경자동차의 환경개선 효과를 비교 분석하였다.

하지만, 국내 수소자동차 판매량 예측결과와 연계하여 수소 수요를 도출한 연구가 미흡하다는 점에서 본 연구에서 진행한 연구는 기존 연구와 차별성을 가진다. 또한 결과의 예측력을 향상시키기 위해 확산모형에 주로 활용되는 Bass, Logistic, Gompertz 모형을 비교 분석하는 검증 과정을 포함한 것이 특징이다.

본 연구의 구성은 다음과 같다. 2장에서 분석 방법론을 소개하고, 3장과 4장에서는 각각 한국의 수송용 수소 수요예측 및 온실가스 감축효과를 추정한다. 5장에서는 결론 및 시사점을 도출한다.

2. 분석 방법론

본 연구에서는 수송용 수소 수요 추정을 위해 다음 그림과 같이 하향식(Top down) 방법을 이용한다. 우선 확산

모형을 이용하여 한국 전체의 수소차 대수를 전망한다. 두 번째 단계에서 정부계획에 기반하여 차종별(승용차, 버스, 택시, 트럭) 수소차 대수를 전망한다. 세 번째 단계에서는 한국의 차종별 수소차의 수소 수요를 전망한다. 마지막 단계에서는 수소 확대에 따른 온실가스 저감 효과를 분석한다.

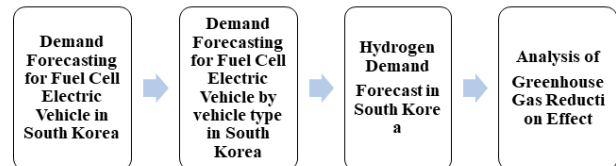


Fig. 1. Flow diagram of analysis

수소 수요 분석을 위해서는 수소자동차 판매량과 평균적인 수소 소비량 정보가 필요하다. 하지만, 수소자동차 시장은 초기 시장으로 관련 정보가 적어 직접적인 분석에는 한계점이 존재한다. 따라서, 본 연구에서는 유사접근법(Analogy)을 활용하여 수소자동차 판매량을 예측하고자 한다. 본 연구에서는 수소자동차의 유사 시장을 전기자동차 시장으로 가정하였는데, 그 이유는 수소자동차와 전기자동차는 1) 친환경 자동차라는 점, 2) 충전/주유인프라의 보급이 해당 자동차 시장 보급에 영향을 준다는 점, 3) 기존 인프라와 별개로 새롭게 인프라를 구성해야 한다는 점에서 공통점을 가지고 있기 때문이다. 이러한 공통점으로 인해 시장 보급 패턴이 유사할 것으로 보고 유사접근법을 적용하였다.

본 연구에서는 분석 모형으로 시장 확산 패턴 분석에 주로 사용되는 Bass 모형, Logistic 모형, Gompertz 모형을 활용하여 수소자동차 판매량을 예측하였다. 수소자동차 판매량 예측에 활용되는 Gompertz, Logistic, Bass 모형은 잠재수요(market potential) 추정이 중요하나 시장초기 단계에서는 잠재시장수요 m 을 추정하기에는 어려움이 존재한다. 따라서 잠재시장수요 m 은 외생적으로 가정하고, 수소자동차 판매량 수요에 미치는 변수들을 추정하였다. 다시 말해, 잠재시장수요 m 을 내생적으로 가정하여 분석할 경우 수소자동차 시장이 초기시장임을 감안하더라도 m 이 매우 작게 추정되는 문제가 발생한다. 산업통상자원부(2019)에 따르면, 2040년까지 전기차를 830만대 보급 목표계획을 제시하고 있다. 본 연구에서는 수소차의 유사시장을 전기차로 사용한 점과 미래

친환경자동차 시장은 전기차, 수소차가 공존한다는 가정 하에서 전기차의 보급 목표 대수를 잠재시장 수요 (m)로 고정하였다.

Bass 모형은 두 가지 세그먼트를 고려하고 있으며, 혁신 효과와 모방 효과가 각 세그먼트의 주요 확산 요인으로 가정하였다. 구체적인 산식은 다음과 같다.

$$n(t) = (p + \frac{q}{m}N(t))(m - N(t)) \quad (1)$$

여기서 $n(t)$ 는 t기의 판매량, $N(t)$ 는 t기까지의 누적 판매량, p는 혁신 효과, q는 모방효과, m은 잠재수요를 나타낸다.

Gompertz 모형은 혁신 효과에 의한 확산은 고려하지 않고, 모방 효과에 의한 확산을 고려하는 모형이다. 구체적인 산식은 다음과 같다.

$$N(t) = m \times e^{-e^{-a(t-b)}} \quad (2)$$

여기서 $N(t)$ 는 t기까지의 누적 판매량, m은 잠재수요, a는 성장속도, b는 변곡점을 나타낸다.

Logistic 모형은 Gompertz 모형과 유사하게 혁신 효과에 의한 확산은 고려하지 않고, 모방 효과에 의한 확산을 고려하는 모형이다. 구체적인 산식은 다음과 같다.

$$N(t) = \frac{m}{(1 + e^{-a(t-b)})} \quad (3)$$

여기서 $N(t)$ 는 t기까지의 누적 판매량, m은 잠재수요, a는 성장속도, b는 변곡점을 나타낸다.

Bass, Gompertz, logistic 모형별 수소자동차 예측 결과를 바탕으로 다음 단계에서는 예측력 비교를 통해서 적절한 모형을 도출하였다. 예측력 비교를 위해 Diebold and Mariano(2012)에서 제시한 두 개 모형의 예측력 비교 검정을 수행하였다. Diebold and Mariano(2012)에서는 실제 값과 두 가지 모형의 예측값 간의 우월성을 통계적으로 검증하는 방법으로, 각 모형의 예측 정확도는 적절히 정의된 손실함수로 측정되는데 일반적으로 손실함수는 2차 함수가 사용된다. 모형간의 비교는 결국 어떤 모형의 손실함수가 충분히 낮은지에 따라 결정된다. Diebold and Mariano(2012) 검정에서는 비교대상인 두 모형간의 예측

력이 동일하다는 귀무가설로 설정하고, 귀무가설하에서 기대손실함수는 동일한 값을 가지는지에 대한 통계적 검정을 수행하게 된다.

Diebold and Mariano(2012) 검정을 통해 선정된 예측모형을 바탕으로 모형의 모수를 추정하고, 유사접근법을 활용하여 수소자동차 판매량을 추정하게 된다. 이때, 수소자동차 확산 시점이 전기자동차와 다르므로 Train(2013)에서 제시한 Recalibration of constant 방법을 활용하여 수소자동차 최근 판매량과 예측량을 동일하도록 모형의 상수값을 조정하여 최종 수소자동차 확산 모형을 도출하였다.

3. 수송용 수소 수요예측

유사접근법을 활용한 수소자동차 판매량 예측을 위해 한국자동차산업협회(KAMA)에서 제공하는 월간 자동차등록대수 자료를 이용하였다. KAMA 자료에 따르면, 전기자동차 월간 등록대수 자료는 2010.05에서 2020.08까지 존재하고, 수소자동차 월간 등록대수는 2015.09에서 2020.08까지 데이터가 존재하였다. 본 연구에서는 2010.05부터 2020.08까지 전기자동차 누적 등록대수 정보를 분석에 활용하였다.

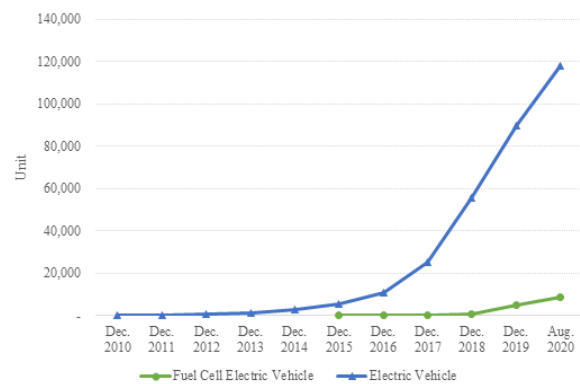


Fig. 2. Number of registered fuel cell electric vehicles and electric vehicles

(Source: Ministry of Land, Infrastructure, and Transport, 2020)

전기자동차 등록대수 자료를 바탕으로 Gompertz, Logistic, Bass 모형을 분석한 결과는 아래 표와 같다. 추정된 계수는 모두 1% 수준에서 모두 유의하게 추정되었다.

Table 1. Analysis result of electric vehicle sales by model

Variables	Gompertz model	Logistic model	Variables	Bass model
a	0.0091**	0.0501**	p	0.00001**
b	293.93**	218.06**	q	0.0395**

Note: ** 1% significant level

Gompertz, Logistic, Bass 모형별 Diebold and Mariano (2012) 적합성 검증을 수행하였고, 그 결과는 아래 표와 같다. Diebold and Mariano(2012) 검증결과, Gompertz > Logitsic > Bass 순으로 적합성의 차이가 유의하게 나타났다. 따라서 예측모형으로는 Gompertz가 가장 적절한 것으로 도출되었다.

Table 2. Diebold and Mariano(2012) Goodness of Fit test result

Performanc e	Models	MAE	Significance of the MAE difference between the alternative model and the proposed model		
			Gompertz	Logistic	Bass
Gompertz > Logistic > Bass	Gompertz	1405.45			
	Logistic	2408.22	**		
	Bass	6151.62	**	**	

Note: *** 1% significant level, ** 5% significant level, * 10% significant level

따라서 유사접근법에 적용하는 모형으로는 예측력이 가장 좋은 Gompertz 모형을 활용하였다. 또한, 2020.08 기준 수소자동차 누적 등록대수가 8,911대임을 고려하여 전기자동차 누적 판매량 예측 모형인 Gompertz 모형의 변곡점을 나타내는 모수를 재환산(recalibration)하여 2020.08 기준 판매량이 8,911가 도출되게 수소차 확산 모형을 구축하였다. 유사접근법을 통해 추정된 모수를 예측에 그대로 활용하게 되면 실제 수소차 판매량과 예측치에 차이가 크게 발생하게 된다. 따라서 본연구에서는 재환산(recalibration)을 통해 유사접근법으로부터 추정된 모수를 보정하여 실제 자료와의 격차를 보완하였다. 또한 본 연

구는 재환산(recalibration) 과정을 통해 수소차 판매량의 수요를 예측한다는 점에서 전기차와 수소차의 보조금 정책과 방향이 유사하다고 가정하였다. 추정된 결과는 정부의 수소차 보급 목표와 비교 분석되었다. 구축된 모형을 바탕으로 추정된 수소자동차 확산의 누적 판매량 예측량과 정부 목표는 Table 3과 같다.

Table 3. Demand forecasting for fuel cell electric vehicle

Time	Forecasts(A)	Government's Target (B)	A/B*100
2022	37,230	67,000	55.6%
2025	147,161	-	-
2030	652,162	850,000	76.7%
2035	1,541,335	-	-
2040	2,533,409	2,900,000	87.4%

본 연구에서 추정된 2022년 수소차 예측치는 37,230대로 정부 목표대비 55.6% 수준일 것으로 예상된다. 2020년 8월 기준으로 수소차의 누적 보급대수가 8,911대임을 고려해 볼 때 2022년 정부의 목표치 67,000대는 달성이 어려울 것으로 보인다. 하지만 수소차가 전기차의 확산패턴을 따를 경우 시간이 지남에 따라 확산속도가 매우 가파르게 증가할 것으로 예상된다. 따라서 2030년경에는 누적 보급 대수가 652,162대로 정부 목표치 850,000대 대비 76.7%에 육박할 것으로 전망된다. 이 수치는 CAGR 37.4%로 매우 빠른 속도로 확산될 것으로 보인다. 2040년경에는 2,533,409대로 전망되어 정부 목표 2,900,000대 대비 87.4%에 육박할 것으로 전망되었다. 이 전망치는 2030~2040 기간동안 CAGR 13.1%로 성장하는 것을 의미한다. 신기술의 확산패턴은 통상 S자 곡선을 보이며, 초기에는 성장률이 높지만 시장이 성숙되면서 성장률이 둔화되는 모습을 보인다.

수소자동차 판매량 예측결과를 바탕으로 수소 수요를 도출하기 위해서는 차종별(승용차, 버스, 택시, 트럭) 수소 자동차 판매량을 분석해야 한다. 또한 차종별로 연비가 상이하기 때문에 차종별 수소 판매량에 따라 온실가스 저감효과가 달라지게 된다. 따라서, 차종별 수소자동차 판매량을 도출하기 위해서는 「수소경제 활성화를 위한 수소 인프라 및 충전소 구축 방안」(Joint ministries, 2019b)에서 제시된 차종별 수소자동차 판매량 비율 패턴을 따른다고 가정하였다.

Joint ministries(2019b) 자료에서는 2022년, 2030년,

Table 4. Demand forecasting by FCEV type and hydrogen

(Units)

Time	Car	Bus	Taxi	Truck	Sum (units)	Hydrogen demand (Ton)
2022	36,118	1,111	-	-	37,229	16,194
2025	141,813	4,018	665	665	147,161	64,104
2030	621,472	15,345	7,672	7,672	652,161	286,565
2035	1,465,202	27,767	27,767	20,599	1,541,335	614,329
2040	2,402,370	34,944	69,887	26,208	2,533,409	886,262

2040년의 차종별 수소자동차 보급량을 제시하고 있어 연도별 비중은 연평균성장률이 구간별로 동일하다는 가정 하에서 보간법을 적용하였다. 따라서 차종별 수소자동차 판매량은 Table 4와 같이 도출된다.

차종별 수소자동차 예측결과를 바탕으로 차종별 1대당 연간 수소 수요 정보는 (승용차) 0.15톤, (버스) 9.7톤, (택시) 0.8톤, (트럭) 5톤을 활용하여 연도별 차종별 전체 수소 수요량을 도출하였다(Joint ministries, 2019b).

4. 수소차 확산에 따른 CO₂ 감축효과 추정

CO₂ 감축효과를 추정하기 위해서는 수소 1톤당 차종별 CO₂ 감축 원단위를 추정해야 한다. 우선 수소 차종별 1톤으로 주행할 수 있는 거리는 Table 5와 같다.

Table 5. Fuel efficiency driving distance per ton of hydrogen and by FCEV type

FCEV type	Driving distance per ton of hydrogen	Note
Car	96,200	Based on Hyundai Nexo
Bus	10,000	Joint ministries, 2019(a), p.23.
Taxi	96,200	Based on Hyundai Nexo
Truck	12,500	About 400km travel distance with a hydrogen storage capacity of 32kg

Source: FCEV Car and Taxi (<https://www.hyundai.com/kr/ko/e/Vehicles/nexo/spec>), FCEV Truck(<https://www-trucknb.us.hyundai.com/kr/news/Press-Kit/trucknb-eco-0707?sn=BL00000569>)

다음으로 차종별 수소 톤당 주행가능 거리에 따른 CO₂ 감축효과를 도출해야 한다. 이를 위해 수소승용차는

휘발유승용차, 경유승용차, 전기승용차를 회피한다고 가정한다. 수소버스는 전기버스를 회피한다고 가정한다. 환경부가 그동안 CNG버스를 중심으로 보급정책을 펴왔던 시내버스, 경찰버스 등이 전기와 수소차 보급 정책으로 인해 CNG차량이 2015년 27,189대에서 2019년 26,989대로 약 200대 줄어들었다(National Association of Bus Transportation Business Associations., 2020, p.56). 즉 수소버스가 보급이 안되면 전기버스가 보급될 것이므로 전기버스를 회피한다고 볼 수 있다. 수소 택시는 기존 LPG 택시를 회피하며, 수소 트럭은 기존 경유 트럭을 회피한다. 일부 휘발유 및 LPG 트럭이 존재하나 경유 트럭에 비해 매우 적으므로 무시하도록 한다.

먼저 1 km 주행거리 당 기존 자동차의 CO₂ 배출량은 다음 Table 6과 같다. 전기버스의 CO₂ 배출량이 가장 많으며, 전기 승용차가 가장 적은 것으로 나타났다.

Table 6. CO₂ emissions per kilometer mileage

(Unit: g/km)

Vehicle type	CO ₂ emissions
Gasoline car	209.8
Diesel car	243.4
Electric car	77.1
Electric Bus	693.5
Taxi	228.8
Diesel Truck	304.0

Note: Emissions from diesel trucks are estimated using the fuel efficiency ratio of diesel cars and diesel trucks. Emissions of electric buses are estimated using the efficiency ratio between electric cars and electric buses.

Source: Korea Institute of Public Finance(2017), p.35, reconstructed

Table 6에서 전기 승용차와 전기 버스의 경우 전력을 구성하는 에너지 믹스에 따라 오염물질 배출량이 다를 수 있

다. 본 연구에서는 2019년 발전 믹스를 고려하여 오염물질 배출량을 계산하였다. LNG와 석탄으로부터 전기가 생산될 경우의 전기 승용차의 1 km 주행거리 당 오염물질 배출량은 Table 7과 같다. LNG와 석탄의 온실가스 배출계수는 각각 0.3625, 0.8230(kg-CO₂e/kWh)이고 전기자동차 전비 6.3km/kWh, 송배전손실 3.69%, 충전손실 9.5%를 이용하여 도출한 수치이다(Korea Institute of Public Finance, 2017) 예컨대 LNG 발전을 이용한 전기차의 CO₂ 배출량은 $0.3625(\text{kg} - \text{CO}_2\text{e}/\text{kWh})/6.3(\text{km}/\text{kWh}) / (1 - 0.0369 - 0.095) \times 1000(\text{g}/\text{kg}) = 66.3(\text{g}/\text{km})$ 와 같이 계산된다. LNG의 발전 비중은 27.7%이고 석탄 발전 비중은 39.0%이므로 이를 반영하여 전기 승용차의 CO₂ 배출량을 추정할 수 있다. 나머지 33.3%의 에너지 발전원은 원자력과 재생에너지로 CO₂를 배출하지 않는다고 가정하였다.

Table 7. CO₂ emissions per kilometer of electric car (Unit: g/km)

구분	CO ₂
Electric car (LNG)	66.3
Electric car (Coal)	150.5
Electric car (Power generation mix in 2019)	77.1

Source: Korea Institute of Public Finance(2017), p.35, reconstructed

휘발유 승용차, 경유 승용차, 전기 승용차의 최근 3년간 신규 등록대수 비율(휘발유 승용차 : 경유 승용차 : 전기 승용차 = 52.3% : 43.0% : 4.7%)을 적용하여 대표 승용차의 CO₂ 배출량을 계산하면 218.01 g/km가 도출된다.

다음으로 추가적으로 고려해야 할 것은 수소 생산 방식이다. 수소충전소에서 공급받는 수소 생산 방식에 따라 CO₂ 배출량이 달라지기 때문이다. 현재는 수소 생산을 위해 부생수소 방식과 추출수소 방식(천연가스 개질)을 이용한다. 추출수소 방식을 사용할 경우 천연가스를 이용하게 되므로 CO₂ 저감효과가 줄어든다. 천연가스 개질 과정에서 CO₂가 발생하기 때문이다. 「수소경제 활성화를 위한 수소 인프라 및 충전소 구축 방안」(Joint ministries, 2019b)에 의하면 수소 공급방식이 부생수소 1%, 추출수소 99%임을 명시하고 있다. 2030년 이후에는 수전해 기술과 해외수입이 도입되어 추출수소가 50%까지 줄어들 계획이다. 따라서 본 연구에서는 수소 공급방식이 정부 로드맵을 따른다고 가정한다.

추출수소의 경우 Salkuyeh et al.(2017)와 McKinsey & Company(2018) 등은 천연가스 수소추출기 효율을 약

66%(=생산된 수소의 저위발열량 ÷ 투입된 천연가스(메탄)의 저위열량 × 100)을 가정하여, 수소 1 kg을 생산할 경우 천연가스 수소추출기를 통해 이산화탄소 9.8 kg이 배출되는 것으로 추정하였다. 따라서 수소 1톤을 생산할 경우 CO₂는 9,800 kg이 발생한다.

수소차 확산에 따른 CO₂ 절감량 추정치는 아래 그림과 같다. 내연기관차에서 수소차 전환에 따른 CO₂ 절감량은 2020년 188,359톤에서 2040년 11,636,797톤으로 크게 증가할 것으로 전망된다. 하지만 수소를 생산하는 과정에서 CO₂가 배출되므로, 이를 고려할 경우 CO₂ 순절감량은 2022년 31,245톤에서 2040년 7,294,113톤으로 증가할 것으로 예측된다. 2030년에 수소생산에 따른 CO₂ 배출량이 갑자기 줄어드는 이유는 앞서 언급한 대로 정부 로드맵에 따라 수전해 기술과 해외수입이 도입되어 추출수소가 50%까지 줄어들기 때문이다.

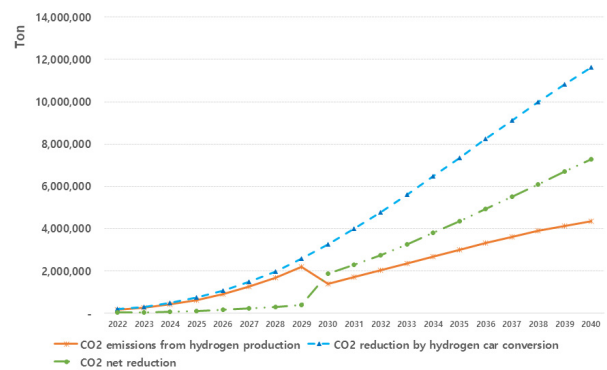


Fig. 3. Forecasting CO₂ reduction by diffusion of FCEV

차종별 수소차 대당 연간 CO₂ 절감효과를 살펴보면 Table 8과 같다. 한 가지 주목할 점은 승용차와 택시는 수소차 전환에 따른 CO₂ 순 절감량이 양수이지만, 버스와 택시는 음수로 도출된다는 점이다. CO₂ 순 절감량이 음수로 나온다는 것은 수소차 전환에 따른 CO₂ 절감량보다 수소 생산에 따른 CO₂ 배출량이 많다는 것을 의미한다. 추출수소 비중이 99%에서 50%로 감소하게 되면 이러한 현상은 완화되어 버스는 양수로 전환되지만, 트럭은 여전히 음수로 유지된다. 따라서 온실가스 감축을 위해서는 수소 생산 방식을 현행 추출수소로부터 수전해 기술로 전환되어야 한다. 혹은 수소 추출 과정에서 CO₂를 포집하는 방법이 있다. 하지만 2가지 방법 모두 비용이 가파르게 증가하여 경제성을 떨어뜨리므로 이에 대한 대책이 강구된다.

Table 8. Annual CO₂ reduction effect per FCEV by vehicle type (Unit: Ton)

	Car	Bus	Taxi	Truck
CO ₂ reduction due to hydrogen car conversion	3.15	67.27	17.61	19.00
CO ₂ emissions from hydrogen production (99% of reforming from LNG)	1.46	94.11	7.76	48.51
CO ₂ emissions from hydrogen production (50% of reforming from LNG)	0.74	47.53	3.92	24.50
CO ₂ net reduction (99% of reforming from LNG)	1.69	-26.84	9.85	-29.51
CO ₂ net reduction (50% of reforming from LNG)	2.41	19.74	13.69	-5.50

5. 결론 및 시사점

많은 국가에서 수송부문에서 온실가스를 줄이기 위해 내연기관을 전기차 또는 수소차로 전환하는 목표와 정책을 수립하고 있다. 우리나라 정부도 전기차와 수소전기차 보급 목표를 설정하고 2019년부터 수소전기차를 비롯한 수소경제 활성화를 위한 다양한 정책을 내놓고 있다.

본 연구에서는 확산모형과 지금까지의 수소차 및 전기차 추세를 이용하여 미래의 수소차 보급량과 수소 수요를 예측하였다. Gompertz, Logistic, Bass model 중에서 Gompertz의 적합성이 가장 뛰어난 것으로 나타나 Gompertz model을 이용하여 미래 수소차 및 수소 수요를 전망하였다. 추정 결과에 의하면 2040년까지 수소차 약 250만대가 보급되는 것으로 나타났으며, 이는 정부 목표 290만대 대비 87.4% 수준이다. 하지만 수소차 보급이 예상보다 빠르게 보급된다면 정부의 목표 이상으로도 보급될 수 있는 가능성은 충분히 열려 있다. 따라서 후속 연구에서 수소차 예측 분석을 지속적으로 수행할 필요가 있다. 2040년까지 늘어나는 수소차 수요를 충족하기 위해서는 886,262톤의 수소가 필요한 것으로 나타났다.

또한 본 연구에서는 수소차가 확산됨에 따라 CO₂ 저감 효과도 추정하였는데, 2040년까지 7,294,113톤의 CO₂가 순저감하는 것으로 나타났다. 하지만 수소 생산 방식이 추출수소(그레이 수소)에 탄소포집 장치를 설치(블루 수소)하거나, 수전해 기술(그린 수소)을 이용한다면 CO₂ 저감은 11,636,797톤까지 확대될 수 있다. 따라서 수소 생산 방식

이 현행 그레이 수소에서 그린 수소와 블루 수소로 전환될 필요가 있다. 특히 현행 그레이 수소 방식에서는 수소버스와 수소트럭의 경우 CO₂가 오히려 증가되는 효과가 있기 때문에 수소 생산 방식의 빠른 전환이 요구된다.

본 연구는 그동안 부재했던 연도별 수소수요를 예측하고, CO₂ 저감 효과를 분석했다는 점에서 의의가 있다. 본 연구의 결과는 수소차 관련 재정정책 수립 및 충전소 구축에 도움이 될 것으로 예상된다. 수소차 기술의 발전은 빠르게 진행되고 있다. 하지만 본 연구에서는 개발 속도를 고려하지 않고 현재 수준의 기술 수준을 유지한다는 가정 하에 분석을 진행하였다. 추후 연구에서는 기술발전 수준을 반영하여 수소차 및 수소수요를 예측하고 이에 따른 CO₂ 저감 효과를 갱신할 필요가 있다. 또한 전기차의 CO₂ 배출량을 계산할 때 2019년 발전믹스가 지속된다고 가정하였는데, 향후에는 재생에너지의 비중이 늘어날 것이므로 본 연구의 추정치보다 작아질 것으로 예상된다. 향후 연구에서는 미래 전력믹스를 고려하여 전기차의 CO₂ 배출량을 추정할 것을 제안한다.

사사

이 과제는 부산대학교 기본연구지원사업(2년)에 의하여 연구되었음.

References

Diebold FX & Mariano RS. 2012. Comparing predictive accuracy. *Journal of Business & economic statistics*, 20(1), 134-144.

Guerra CF. et al. 2016. Modeling of the behavior of alternative fuel vehicle buyers. A model for the location of alternative refueling stations. *International Journal of Hydrogen Energy*, 41(42), 19312-19319.

Han TW, Lim D, Kim J. 2019. Environmental and Economic Impact of EV and FCEV Penetration into the Automobile Industry: A CGE Approach. *Environmental and Resource Economics Review*, 28(2), 231-276.

Joint ministries. 2019(a). *Hydrogen Economy Revitalization Roadmap*.

Joint ministries. 2019(b). *How to build hydrogen*

- infrastructure and charging stations to revitalize the hydrogen economy.
- Korea Development Institute. 2021. Re-examination of feasibility of SPC investment project for building and operating hydrogen charging station.
- Korea Institute of Public Finance. 2017, Policy direction of tax system related to the proliferation of eco-friendly vehicles.
- Kwon OJ, Jo HJ, Chung HH & Myung KJ. 2019. Analysis and Modeling of Hydrogen Sales at Hydrogen Filling Stations. *Transactions of The Korean Society of Automotive Engineers*, 27(2), 93-100.
- Li W, Long R, Chen H, Chen F, Zheng X, He Z & Zhang L. 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
- Lim D & Han TW. 2019. A Study on Changes in the Distribution Rate of Hydrogen Vehicles and Electric Vehicles by Government Support Policies. *Proceedings of the Joint Conference on Economics of the Korean Society of Environmental Economics*, 1-18.
- McKinsey & Company. 2018. Korea Hydrogen Roadmap
- Ministry of Land, Infrastructure, and Transport 2020. Vehicle registration data statistics.
- National Association of Bus Transportation Business Associations. 2020. 2019 Bus Statistical Manual.
- Park SY, Kim JW & Lee DH. 2011. Development of a market penetration forecasting model for hydrogen fuel cell vehicles considering infrastructure and cost reduction effects, *Energy Policy*, 39(6), 3307-3315.
- Salkuyeh YK, Saville BA, MacLean HL. 2017. Techno-economic analysis and life cycle assessment of hydrogen production from natural gas using current and emerging technologies, *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(30), pp.18894-18909.
- Shin J, Hwang WS & Choi H. 2019. Can hydrogen fuel vehicles be a sustainable alternative on vehicle market? Comparison of electric and hydrogen fuel cell vehicles, *Technological Forecasting and Social Change*, 143, 239-248.
- Train KE. 2003. *Discrete Choice Methods with Simulation*. Cambridge university press, Cambridge: U.K.