

도시의 건물 및 수송 부문에서의 수소에너지 전환에 따른 탄소중립 기여도 평가

장소정¹ · 박래상² · 최영훈¹ · 황용우^{3†}

¹인하대학교 순환경제환경시스템전공, ²국토교통과학기술진흥원 SOC플랜트사업실, ³인하대학교 환경공학과

An Evaluation of Net-zero Contribution Regarding Hydrogen Energy Conversion in Urban Building and Transport Sector

SO JEONG JANG¹, RAE SANG PARK², YOUNG HOON CHOI¹, YONG WOO HWANG^{3†}

¹Program in Circular Economy Environment System, Inha University, 100 Inha-ro, Michuhol-gu, Incheon 22212, Korea

²SOC Plant Department, Korea Agency for Infrastructure Technology Advancement, 286 Simin-daero, Dongan-gu, Anyang 14066, Korea

³Department of Environmental Engineering, Inha University, 100 Inha-ro, Michuhol-gu, Incheon 22212, Korea

[†]Corresponding author :
hwangyw@inha.ac.kr

Received 22 March, 2023

Revised 12 April, 2023

Accepted 18 April, 2023

Abstract >> This study evaluated the contribution of carbon neutrality by calculating the carbon reduction amount and reduction intensity targeting the hydrogen pilot city and applying it to the carbon neutral reduction target. In the building sector, the reduction amount for 2030 was 10.8% on average. In addition, by 2050, the contribution to carbon neutrality of plan A was 14.1% on average, and the contribution to carbon neutrality of plan B was 15.1% on average. In the 2030 reduction amount of the transportation sector, the contribution to carbon neutrality was 138.4% on average. In addition, by 2050, the contribution to carbon neutrality in plan A was 82.5% on average, and the contribution to carbon neutrality in plan B was 74.9%. From the above research results, additional carbon reduction is possible when creating a hydrogen city, so it will be used as a basis of city-level carbon neutral model. It will also be used as a basis for technology development and investment promotion for various hydrogen supply methods in the future.

Key words : Hydrogen energy(수소에너지), Hydrogen city(수소도시), Greenhouse gas(온실가스), Climate change(기후변화), Carbon neutrality(탄소중립)

1. 서론

기후변화 협약에 따른 파리협정 시행으로 세계는 한층 강화된 목표인 2050년 탄소중립이라는 새로운

지향점으로 전환 중이며, 인류 생존을 위한 지구 평균 온도 상승 최소화를 위해 전 지구적인 노력을 기하고 있다.

EU는 탄소중립을 위한 감축의 노력으로 “정책이

사람과 만나는 장소”로서 도시가 탄소중립에 중추적 역할을 수행해야 함을 강조했다¹⁾. 또한 프랑스는 장기 저탄소 발전 전략을 수립하여 건물·수송 등 탄소 배출원 중심의 부문 외에도 모든 부문에 걸쳐 적용되는 범분야로 저탄소 도시 계획, 개발 가이드라인을 제공하고 있다²⁾.

우리나라는 장기 저탄소 발전 전략과 국가 온실가스 감축 목표 상향안을 제시하였고, 2050 탄소중립 시나리오를 수립하여 원자력 발전 유무에 따라 A안(전면 중단)과 B안(일부 유지)으로 나누어 탄소중립을 위한 중장기적 전략 및 계획을 수립하고, 관련 정책을 마련하였다. 그중 대통령 소속 2050 탄소중립 녹색성장위원회는 건물·수송 분야의 2030년 및 2050년 감축 목표에서 건물 부문의 2030년 감축 목표량은 2018년 대비 35백만 ton CO₂eq., 2050년은 6.2백만 ton CO₂eq.로 설정하였고, 이에 따라 2018년 총 배출량(직접 배출량) 대비 2030년은 32.8%, 2050년은 88.1%를 감축해야 한다. 또한 수송 부문의 2030년 감축 목표량은 2018년 대비 61백만 ton CO₂eq., 2050년은 9.2백만 ton CO₂eq.로 설정하여 2030년은 37.8%, 2050년은 A안인 경우 97.1%, B안인 경우 90.6%를 감축해야 한다³⁾.

건물·수송 부문의 탄소중립 정책에서 수소에너지의 전환은 중요하다. 국내 온실가스 총 배출량 중 건물·수송 부문의 비중은 21%에 달한다. 기후 변화가 가속화될수록 건물·수송의 특성상 도시 내에서 에너지 사용처들이 유기적으로 배치되어 있어 탄소 배출량을 증가시킬 것으로 예측된다. 따라서 건물·수송 부문의 수소에너지 전환은 중요하다.

이에 우리나라는 수소에너지를 활용할 수 있는 도시를 선정해 2019년부터 4개의 지역(울산, 전주·완주, 안산, 삼척)에 시범적으로 추진하였고, 2023년부터 6개 지역(평택, 남양주, 보령, 당진, 광양, 포항)에 신규 수소도시 사업을 추진한다. 또한, 2020년 2월 「수소경제 육성 및 수소 안전관리에 관한 법률(이하 수소법)」 입법에 이어, 2021년 수소도시 건설 및 운영에서 법·제도적으로 지원하기 위해 「수소도시 건설 및 운영에 관한 법률안(이하 수소도시법)」을 발

의하였고, 현재 국회에서 심사 중이다⁴⁾.

따라서 수소 관련 개별 기술과 설비에 중점이 되어있어 공간 단위에서 환경 부하를 발생시키는 요인을 찾아 해당 법률 내 하위법령의 구성 방향을 제시하기 위한 사전 연구를 수행할 필요성이 제기된다. 이에 본 연구는 이러한 시대적 요구에 부응하고 2050년 탄소중립 정책에 대한 정량적 지표를 제시하고자 하였다. 탄소중립 정책의 일환인 수소시범도시를 대상으로 탄소 저감량을 정량화하여 탄소중립의 기여도를 평가하는 연구를 진행하였다.

2. 연구 방법

본 연구는 ‘A’ 광역시를 대상으로 수소도시 전환 시 나타나는 에너지 사용 감소에 따른 온실가스 감축량을 산정 후 2030년과 2050년의 탄소중립 기여도 평가를 진행하였고, 이에 대한 개요도를 Fig. 1에 나타내었다.

온실가스 저감 원단위를 도출하기 위한 ‘A’ 광역시의 건물·수송 부문의 온실가스 배출량 산정 기준을 Table 1에 나타내었다. 건물 부문은 ‘A’ 광역시의 모든 건물을 대상으로 진행하고, 수송 부문은 ‘A’ 광역시의 일반용과 사업용의 차량 대수와 평균 주행 거리를 적용하여 연구를 진행하였다. 건물 부문의 면적은 48,814,419 m²으로 적용하였다. 수송 부문 내 일반용 및 사업용의 차량 대수는 각각 498,343대, 883대를 적용했으며, 하루 주행 거리는 일반용 및 사

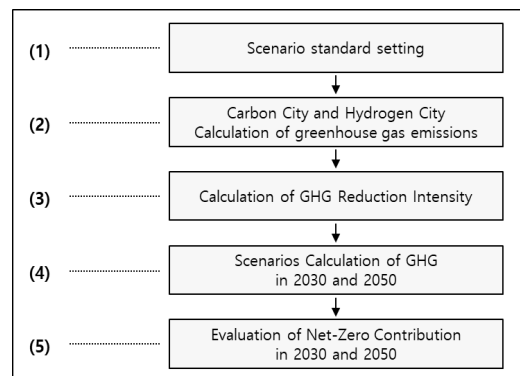


Fig. 1. Schematic diagram of this study

업용 각각 국내 평균인 32.8 km/대, 163.8 km/대를 적용하였다^{5,6)}.

건물·수송 부문 2030년 및 2050년의 수소에너지 시장 점유 목표치를 Table 2에 나타내었다. 건물 부문의 2030년 및 2050년의 시장 점유 목표치는 2021년 국내 수소 시범도시 추진 전략의 수소도시의 확산기 및 고도화기까지의 도시 조성 목표치를 활용하였다. 수소도시의 확산기 및 고도화기의 도시 조성 목표치는 각각 전국 지자체의 10%와 30%로 설정되어 있으며, 이는 국내 도시 총 연면적 2,141,549,522 m² 가운데 각각 214,154,952 m², 642,464,857 m²에 해당된다⁷⁾.

수송 부문의 2030년 및 2050년의 시장 점유 목표치는 2030 Nationally Determined Contribution (NDC) 및 2050 탄소중립 시나리오의 수송 부문 목표치를 활용하였다. 2030년의 목표치는 전기·수소차를 일반용 차량에서 400만 대를 전환하고, 사업용 차량에서 50만 대를 전환하는 것으로 설정되어 있다. 2050년 A안의 목표치는 전기·수소차를 국내 모든 차량에서

100% 전환하는 것으로 설정되어 있으며, 이는 국내 일반용 차량 전체인 20,917,688대와 사업용 차량 전체인 115,581대에 해당된다⁸⁾. B안의 목표치는 전기·수소차를 국내 모든 차량에서 85% 전환하는 것으로 설정되어 있으며, 이는 국내 일반용 차량 17,780,035대와 사업용 차량 98,244대에 해당된다⁹⁾.

수소도시의 탄소중립 기여도를 산정하기 위한 기준으로서 국내 탄소중립 시나리오 내 온실가스 감축 목표치를 사용하였고, 이를 Table 3에 나타내었다. 또한 건물 부문에서의 간접 배출(scope 2)에 대한 탄소중립 기여도를 도출하기 위하여 건물 부문 시나리오에 전환부문을 포함시켰다.

3. 수소도시의 탄소중립 기여도 산정

탄소중립 기여도 산정을 위하여 2021년 기준으로 국내 수소도시 중 한 곳인 ‘A’ 광역시의 기존 도시와 수소도시의 건물·수송 부문 온실가스 배출량을 산정하였다. 산정된 온실가스 배출량을 통하여 기존 도시에서 수소 기술을 도입한 도시로 전환했을 때 나타나는 정량화된 저감 효과 지표를 분석했고, 이를 통해 저감 원단위를 도출하였다. 또한 저감 원단위를 건물·수송 부문 2030년 및 2050년 탄소중립 시나리오에 적용하여 수소도시의 효과를 정량적으로 산출하였다.

Table 1. GHG emission calculation variable values in this study

Sector		Variable value	
Building	Total area (m ²)	48,814,419	
Transport (Car)	Number of vehicles (Unit)	General use	498,343
		Business	883
	Distance driven (km/unit, per day)	General use	32.8
		Business	163.8

Table 2. Scenarios for hydrogen energy variables in buildings and transportation

		2030		2050	
Building (m ²)		214,154,952		642,464,857	
Transport (Car)	General use	4,000,000	A*	General use	20,917,688
				Business	115,581
	Business	500,000	B	General use	17,780,035
				Business	98,244

*Based on all domestic vehicles

Table 3. GHG target emissions by sector within the net-zero scenario

Unit (million tons CO ₂ eq.)	‘18	‘30 NDC (‘18 比)	‘50 Scenario (‘18 比)	
			A	B
Energy transition	269.6	149.9 (△44.4%)	0 (△100%)	20.7 (△92.3%)
Building	52.1	35.0 (△32.8%)	6.2 (△88.1%)	
Transport	98.1	61.0 (△37.8%)	2.8 (△97.1%)	9.2 (△90.6%)

3.1 건물 부문

기존 건물 부문 scope 1에 해당하는 도시가스의 연간 온실가스 배출량은 식 (1)을 이용하여 산정하였다¹⁰⁾. 여기서 $E_{i,j}$ 는 연료(i)의 연소에 따른 온실가스(j)의 배출량(tGHG), Q_i 는 연료(i)의 사용량(측정값, 천 m^3 -연료), EC_i 는 연료(i)의 열량계수(연료 순 발열량, MJ/ m^3 -연료), $EF_{i,j}$ 는 연료(i)에 따른 온실가스(j)의 배출계수(kgGHG/TJ-연료), f_i 는 연료(i)의 산화계수(CH_4 , N_2O 는 미적용)이다.

$$E_{i,j} = Q_i \times EC_i \times EF_{i,j} \times f_i \times 10^{-6} \quad (1)$$

‘A’ 광역시의 연간 도시가스 사용량은 공공통계자료를 이용하였으며, 연료의 열량계수, 배출계수 그리고 산화계수는 2006 Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) guideline을 활용하였다. 온실가스 배출량 산정을 위해 ‘2. 고정 연소 기체연료’ 부문 tier 1을 활용하였으며, 연간 도시가스 사용량은 303,475,219 Nm^3 를 적용하였다. 연료의 열량계수는 38.9 MJ/ Nm^3 , 온실가스 배출계수는 CO_2 는 55,865 kg/TJ, CH_4 는 1 kg/TJ, N_2O 는 0.1 kg/TJ를 적용하였고, 산화계수는 1을 적용하여 온실가스 배출량을 산정하였다¹⁰⁾.

기존 건물 부문 scope 2에 해당하는 전력의 온실가스 배출량은 식 (2)를 이용하여 산정하였다. 여기서 $GHG\ Emissions_j$ 는 전력 사용에 따른 온실가스(j)별 배출량(tGHG), Q 는 외부에서 공급받은 전력 사용량(MWh), EF_j 는 전력 배출계수(tGHG/MWh)이다.

$$GHG\ Emissions_j = Q \times EF_j \quad (2)$$

‘A’ 광역시의 연간 전력 사용량은 공공통계자료를 이용하였으며, 전력의 온실가스 배출계수는 2006 IPCC guideline을 활용하였다. 온실가스 배출량 산정을 위해 ‘39. 외부에서 공급된 전기 사용’ 부문의 Tier 1을 활용하였으며, 연간 전력 사용량은 857,694,323 kW를 적용하였다. 온실가스 배출계수는 CO_2 는 0.4747 t CO_2 /MWh, CH_4 는 0.0125 t CH_4 /MWh, N_2O 는 0.0100

t N_2O /MWh을 적용하여 온실가스 배출량을 산정하였다.

수소도시 건물 부문의 온실가스 배출량은 식 (3)을 이용하여 산정하였다. 여기서 E_{i,CO_2} 는 연료전지 공정에서의 CO_2 배출량(t CO_2), FR_i 는 원료(i) 투입량(ton), EF_i 는 원료(i)별 CO_2 배출계수(t CO_2 /t-원료)이다.

$$E_{i,CO_2} = FR_i \times EF_i \quad (3)$$

‘A’ 광역시의 연간 연료 사용량은 기존 ‘A’ 광역시의 연간 연료 사용량에서 각 연료전지의 해당하는 연료 사용량을 역산해 산정하였다. 각 연료전지의 연료 열량계수, 배출계수 그리고 산화계수는 2006, 2019 IPCC guideline을 활용하였다. 온실가스 배출량 산정을 위해 ‘28. 연료전지’ 부문 tier 1을 활용하였으며, 연간 부생수소, Liquefied Natural Gas (LNG) 그리고 Liquefied Petroleum Gas (LPG)의 연료전지의 연료 사용량은 각각 83,191,737 kg, 303,475,219 Nm^3 , 202,099,267 Nm^3 를 적용하였다. 연료의 온실가스 배출계수는 3.3 kg CO_2 /kg- H_2 , 2.69281 t CO_2 /t-LNG, 2.9846 t CO_2 /t-LPG를 적용하여 온실가스 배출량을 산정하였다.

‘A’ 광역시의 에너지 사용 시 발생하는 온실가스 배출량을 Table 4에 나타내었다. 기존 에너지의 온실가스 배출량은 3,951,255.3 ton CO_2 eq./y로 나타났다. 수소에너지로 전환했을 경우 부생수소 연료전지는 274,532.7 ton CO_2 eq./y, LNG 연료전지는 817,198.1 ton CO_2 eq./y, LPG 연료전지는 603,185.5 ton CO_2 eq./y로 나타났다. 이를 통해 기존 도시에너지에서 수소에너지로 전환 시 온실가스 배출량이 줄어드는 것을 확인하였다. 또한 연료전지에서도 부생수소<LPG<LNG 순으로 온실가스를 배출한다는 것을 확인하였다.

2030년, 2050년의 건물 부문 목표량 대비 수소도시의 탄소중립 기여도를 산출하기 위해서는 건물 1단위(m^2) 당 저감 원단위가 필요하다. 이에 기존 도시에서 수소도시로 전환되었을 때 탄소중립 기여도를 평가하기 위하여 ‘A’ 광역시를 기준으로 총면적(m^2)에서 해당 연료의 온실가스 저감량을 나누어 온

실가스 저감 원단위(Emission Reduction Intensity)를 도출하였다. 건물 부문의 온실가스 저감 원단위란 에너지 사용 단계를 기준으로 건물의 면적 단위(m²)당 기존 에너지에서 수소에너지로 전환 시의 온실가스 저감량을 정량적으로 나타낸 것이다.

본 연구에서는 ‘A’ 광역시의 건물 부문 기존 에너지 소비를 기준으로 도시가스 및 전기 사용에서 발생하는 온실가스 배출량을 산정하여 기존 에너지에서 수소에너지의 대체 효과에 대한 저감 원단위를 식 (4)를 활용하여 산출하였다. 여기서 *Emission Reduction Intensity*_{GHG_i}는 온실가스 저감 원단위(tCO₂eq./m²), *GHGEmissions Reduction_i*는 연료별(_i) 온실가스 저감량(tCO₂eq.), *TFA*는 ‘A’ 광역시 총면적(m²)이다.

$$Emission\ Reduction\ Intensity_{GHG_i} = \frac{GHGEmissions\ Reduction_i}{TFA} \quad (4)$$

기존 에너지에서 수소에너지로의 대체 효과에 대한 저감 원단위를 Table 5에 나타내었다. 기존 에너지에

서 수소에너지로 전환 시 단위 면적(m²)당 저감 원단위는 부생수소 연료전지가 0.075320 tonCO₂eq./y, LNG 연료전지가 0.064204 tonCO₂eq./y, LPG 연료전지가 0.068588 tonCO₂eq./y로 나타났다.

건물 부문 전환 시나리오에 따른 온실가스의 배출량 산정 결과를 Table 6에 나타내었다. 먼저 부생수소, LNG, LPG 연료전지의 저감 원단위인 0.075320 tonCO₂eq./m², 0.064204 tonCO₂eq./m², 0.068588 tonCO₂eq./m²를 해당 연도 전환 시나리오에 적용하였다⁹⁾. 2030년 전환 시나리오는 면적 214,154,952 m²를 기준으로 온실가스 저감량을 산정한 결과 부생수소 연료전지는 16,130,151 tonCO₂eq./y, LNG 연료전지는 13,749,605

Table 5. GHG reduction & reduction intensity of building sector

Sector		GHG reduction (tonCO ₂ eq./y)	Reduction intensity (tonCO ₂ eq./m ²)
2021	Fuel cell	By-product Hydrogen	0.075320
		LNG	0.064204
		LPG	0.068588

Table 4. GHG emissions of building sector

Sector	Type	GHG emissions (tonCO ₂ eq./y)	Total (tonCO ₂ eq./y)
Carbon energy (A)	Scope 1	CO ₂	660,110.6
		CH ₄	
		N ₂ O	
	Scope 2	CO ₂	3,291,144.7
		CH ₄	
		N ₂ O	
Hydrogen fenergy (Fuel cell)	By-product hydrogen (B)*	CO ₂	274,532.7
		CH ₄	N/A
		N ₂ O	N/A
	LNG (C)**	CO ₂	817,198.1
		CH ₄	N/A
		N ₂ O	N/A
	LPG (D)***	CO ₂	603,185.5
		CH ₄	N/A
		N ₂ O	N/A

*(A: Carbon energy)-(B: By-product hydrogen fuel cell), **(A: Carbon energy)-(C: LNG fuel cell), *** (A: Carbon energy)-(D: LPG fuel cell).

tonCO₂eq./y, LPG 연료전지는 14,688,460 tonCO₂eq./y가 저감되는 것으로 나타났다. 2050년 전환 시나리오 면적 642,464,857 m²를 기준으로 온실가스 저감량을 산정한 결과 부생수소 연료전지는 48,390,453 tonCO₂eq./y, LNG 연료전지는 41,248,814 tonCO₂eq./y, LPG 연료전지는 44,065,380 tonCO₂eq./y가 저감되는 것으로 나타났다.

건물 부문의 탄소중립 기여도를 식 (5)를 이용하여 산정하였다. 여기서 *Carbon Neutrality Contribution*_(%)는 건물 부문의 탄소중립 기여도(%), *Sector Reduction*_{GHG}는 수소에너지 전환에 따른 건물 부문의 온실가스 저감량(tonCO₂eq.), *Reduction Target Value*_{GHG}는 건물 부문의 2030년과 2050년 온실가스 목표 저감량(tonCO₂eq.)이다.

$$Carbon\ Neutrality\ Contribution_{(\%)} = \frac{Sector\ Reduction_{GHG}}{Reduction\ Target\ Value_{GHG}} \times 100 \quad (5)$$

국내 수소에너지 전환 시나리오별 건물 부문 온실가스 저감량에 대한 탄소중립 기여도를 Table 7에 나타내었다. 2018년의 온실가스 배출량을 기준으로 2030년과 2050년의 목표 저감량을 비교하여 나타내었다. 2030년 Business as Usual (BAU) 목표 저감량은 137백만 tonCO₂eq.이며, 시나리오별 목표 저감량에 따른 기여도는 부생수소 연료전지는 11.8%, LNG 연료전지는 10%, LPG 연료전지는 10.7%로 나타났다. 2050년 목표 저감량 중 A안의 목표 저감량은 316백만 tonCO₂eq.이며, B안의 목표 저감량은 295백만 tonCO₂eq.이다. 시나리오별 목표 저감량에 따른 기여도는 A안인 경우 부생수소 연료전지는 15.3%,

Table 6. GHG reduction of building scenario

Building scenario (m ²)		Sector (Fuel cell)	Reduction intensity (tonCO ₂ eq./m ²)	GHG reduction (tonCO ₂ eq./y)
2030	214,154,952	By-product hydrogen	0.075320	16,130,151
		LNG	0.064204	13,749,605
		LPG	0.068588	14,688,460
2050	642,464,857	By-product hydrogen	0.075320	48,390,453
		LNG	0.064204	41,248,814
		LPG	0.068588	44,065,380

Table 7. Net-zero contribution of building sector

Building scenario (m ²)		Target rduction (tonCO ₂ eq.)	Sector (fuel cell)	Contribution (%)
2030		137,000,000	By-product hydrogen	11.8
			LNG	10.0
			LPG	10.7
2050	A	316,000,000	By-product hydrogen	15.3
			LNG	13.1
			LPG	13.9
	B	295,000,000	By-product hydrogen	16.4
			LNG	14.0
			LPG	14.9

LNG 연료전지는 13.1%, LPG 연료전지는 13.9%로 나타났다. B안인 경우 부생수소 연료전지는 16.4%, LNG 연료전지는 14.0%, LPG 연료전지는 14.9%로 나타났다. 이에 기존 도시의 에너지 시설을 수소에너지 기술로 전환 시 국내 탄소중립 시나리오에 평균적으로 13.3% 기여하는 것으로 판단된다.

3.2 수송 부문

수송 부문의 해당 연료 온실가스 배출량은 식 (6)을 이용하여 산정하였다. 여기서 $E_{i,j}$ 는 연료(i)의 연소에 따른 온실가스(j)의 배출량(tGHG), Q_i 는 연료(i)의 사용량(KL-연료), EC_i 는 연료(i)의 열량계수(연료 순발열량, MJ/L-연료), $EF_{i,j}$ 는 연료(i)에 따른 온실가스(j)의 배출계수(kgGHG/TJ-연료)이다.

$$E_{i,j} = Q_i \times EC_i \times EF_{i,j} \times 10^{-6} \quad (6)$$

‘A’ 광역시의 일반용(승용차)과 사업용(버스)의 대수는 공공통계자료를 이용하였으며⁸⁾, 연료의 열량계수, 배출계수는 2006 IPCC guideline을 활용하였다. 온실가스 배출량 산정을 위해 ‘5. 이동연소 도로’ 부문 Tier 1을 활용하였으며, 연간 연료 사용량은 일반용(승용차)과 사업용(버스)의 하루 평균 주행거리인 32.8 km, 163.8 km를 기준으로 해당 차량 연비를 적용하여 산정하였다. 기존 일반용(승용차)의 연료 사용량은 휘발유, 경유, LPG가 각각 498,426,265.3 L/y, 476,530,542.8 L/y, 675,669,580.5 L/y로 나타났다. 기존 사업용(버스)의 연료 사용량은 CNG, 경유가 각각 28,664,102.0 kg/y, 1,695,963.6 L/y로 나타났다. 수소 일반용(승용차)의 연료 사용량은 620,183,201.2 kg/y로 나타났고, 수소 사업용(버스)의 연료 사용량은 일반중형, 직행 버스가 각각 2,884,492.8 kg/y, 364,240.8 kg/y로 나타났다.

기존 일반용(승용차)의 연료 열량계수는 휘발유, 경유, LPG에 각각 30.4 MJ/L, 35.2 MJ/L, 58.4 MJ/L를 적용하였고, 기존 사업용(버스)의 연료 열량계수는 CNG, 경유에 각각 49.4 MJ/kg, 35.2 MJ/L를 적용

하였다. 기존 일반용(승용차)의 온실가스 배출계수는 휘발유, 경유, LPG에 각각 75,352 tonCO₂eq., 74,954 tonCO₂eq., 65,358 tonCO₂eq.를 적용하였고, 기존 사업용(버스)의 온실가스 배출계수는 CNG, 경유에 각각 58,892 tonCO₂eq., 74,954 tonCO₂eq.를 적용하였다. 수소 차량의 연료 열량계수 및 온실가스 배출계수는 차량 운행 단계에서 온실가스 배출량이 발생하지 않기 때문에 설정하지 않았다.

‘A’ 광역시의 일반용(승용차량), 사업용(버스) 운행 시 발생하는 온실가스 배출량을 Table 8에 나타내었다. 기존 일반용(승용차량)의 온실가스 배출량은 휘발유, 경유, LPG가 각각 1,141,745.4 tonCO₂eq./y, 1,257,267.4 tonCO₂eq./y, 2,578,968.1 tonCO₂eq./y로 나타났다. 기존 버스의 온실가스 배출량은 CNG, 경유가 각각 83,391.5 tonCO₂eq./y, 4,474.6 tonCO₂eq./y로 나타났다. 기존 에너지와 비교해 보았을 때 수소 에너지는 사용 단계에서 온실가스가 발생하지 않는다는 점에서 친환경에너지라는 점을 확인하였다.

2030년, 2050년의 수송 부문 목표량 대비 수소도시의 탄소중립 기여도를 산출하기 위해서는 운행 단위(km)당 저감 원단위가 필요하다. 이에 기존 도시 차량에서 수소 차량으로 전환되었을 때 탄소중립 기여도를 평가하기 위하여 ‘A’ 광역시를 기준으로 총 주행 거리(km)에서 해당 연료의 온실가스 저감량을 나누었다. 또한 운행 단위(km)를 산정하기 위하여 ‘A’ 광역시의 해당 차량 대수를 나누어 온실가스 저감 원단위를 도출하였다. 수송 부문의 온실가스 저감 원단위란 차량 운행 단계를 기준으로 차량의 운행 거리 단위(km)당 기존 차량 연료에서 수소 연료로 전환 시의 온실가스 저감량을 정량적으로 나타낸다.

본 연구는 ‘A’ 광역시의 차량 대수를 기준으로 기존 차량 연료에서 발생하는 온실가스 배출량을 산정하여 기존 에너지에서 수소에너지의 대체 효과에 대한 저감 원단위를 식 (7)을 활용하여 산출하였다. 여기서 $Emission\ Reduction\ Intensity_{GHG}$ 는 온실가스 저감 원단위(tCO₂eq./km), $GHG\ Emissions\ Reduction_i$ 는 연료 별(i) 온실가스 저감량(tCO₂eq.), $VD_{(i)}$ 는 총 주행 거리(km), NV_c 는 ‘A’ 광역시의 차량 대수이다.

$$Emission\ Reduction\ Intensity_{GHG} = \left(\frac{GHG\ Emissions\ Reduction_i}{VD_u} \right) \div NV_c \quad (7)$$

기존 에너지에서 수소에너지의 대체 효과에 대한 저감 원단위를 Table 9에 나타내었다. 기존 일반용(승용차)에서 수소에너지로 전환 시 단위(km)당 저감 원단위는 휘발유, 경유, LPG에서 각각 0.000191

tonCO₂eq./y, 0.000211 tonCO₂eq./y, 0.000432 tonCO₂eq./y로 나타났고, 기존 버스의 저감 원단위는 CNG, 경유에서 각각 0.001779 tonCO₂eq./y, 0.000756 tonCO₂eq./y로 나타났다.

수송 부문 전환 시나리오에 따른 온실가스의 배출량 산정 결과를 Table 10에 나타내었다⁵⁾. 먼저 일반용(승용차)의 휘발유, 경유, LPG와 사업용(버스)의

Table 8. GHG emissions of transport sector

Sector		Type of fuel	GHG emissions (tonCO ₂ eq./y)		
Carbon vehicle	General use	Gasoline	CO ₂	1,096,213.2	1,141,745.4
			CH ₄	7,954.9	
			N ₂ O	37,577.4	
		Diesel	CO ₂	1,235,614.0	1,257,267.4
			CH ₄	1,373.8	
			N ₂ O	20,279.6	
	LPG	CO ₂	2,525,145.9	2,578,968.1	
		CH ₄	51,375.8		
		N ₂ O	2,446.5		
	Business	CNG	CO ₂	79,338.9	83,391.5
			CH ₄	2,735.7	
			N ₂ O	1,316.9	
Diesel		CO ₂	4,397.5	4,474.6	
		CH ₄	4.9		
		N ₂ O	72.2		
Hydrogen vehicle	General use	Hydrogen	CO ₂	0	0
			CH ₄	0	
			N ₂ O	0	
	Business	Hydrogen	CO ₂	0	0
			CH ₄	0	
			N ₂ O	0	

Table 9. GHG reduction & reduction intensity of transport sector

Sector		Type of fuel	GHG reduction (tonCO ₂ eq./y)		Reduction intensity (tonCO ₂ eq./km)
Hydrogen vehicle	General use	Hydrogen	Gasoline	1,141,745.4	0.000191
			Diesel	1,257,267.4	0.000211
			LPG	2,578,968.1	0.000432
	Business	Hydrogen	CNG	83,391.5	0.001779
			Diesel	4,474.6	0.000756

CNG, 경유의 저감 원단위를 각각 0.000191 tonCO₂ eq./km, 0.000211 tonCO₂eq./km, 0.000432 tonCO₂eq./km, 0.001779 tonCO₂eq./km, 0.000756 tonCO₂eq./km로 산정한 후 해당 연도 시나리오에 적용하였다.

2030년 전환 시나리오는 승용차에 해당하는 일반용 부문 4,000,000대 및 버스에 해당하는 사업용 부문 500,000대를 기준으로 온실가스 저감량을 산정하였다. 일반용(승용차)의 휘발유, 경유, LPG 승용차에서 수소 차량으로 전환 시 각각 9,146,608 tonCO₂eq./y, 10,104,368 tonCO₂eq./y, 20,687,616 tonCO₂eq./y가 저감되는 것으로 나타났다. 버스 부문의 경우 CNG, 경유 버스에서 수소 버스로 전환 시 각각 53,180,537 tonCO₂eq./y, 22,599,486 tonCO₂eq./y가 저감되는 것으로 나타났다.

2050년 전환 시나리오의 A안은 승용차에 해당하는 일반 부문 20,917,688대 및 버스에 해당하는 사업용 부문 115,581대를 기준으로 온실가스 저감량을 산정하였다. 일반용(승용차)의 휘발유, 경유, LPG 승용 차량에서 수소 차량으로 전환 시 각각 47,831,473 tonCO₂eq./y, 52,840,004 tonCO₂eq./y, 108,184,274 ton

CO₂eq./y가 저감되는 것으로 나타났다. 사업용(버스)의 CNG, 경유 버스에서 수소 버스로 전환 시 각각 12,293,319 tonCO₂eq./y, 5,224,142 tonCO₂eq./y가 저감되는 것으로 나타났다. 2050년 전환 시나리오의 B안은 승용차에 해당하는 일반 부문 17,780,035대 및 버스에 해당하는 사업용 부문 98,244대를 기준으로 온실가스 저감량을 산정하였다. 일반용(승용차)의 휘발유, 경유, LPG 승용차에서 수소 차량으로 전환 시 각각 40,656,753 tonCO₂eq./y, 44,914,004 tonCO₂eq./y, 91,956,634 tonCO₂eq./y가 저감되는 것으로 나타났다. 사업용(버스)의 CNG, 경유 버스에서 수소 버스로 전환 시 각각 10,449,337 tonCO₂eq./y, 4,440,528 tonCO₂eq./y가 저감되는 것으로 나타났다.

수송 부문의 탄소중립 기여도를 식 (8)을 이용하여 산정하였다. 여기서 *Carbon Neutrality Contribution (%)* 은 수송 부문의 탄소중립 기여도(%), *Sector Reduction GHG* 는 수소에너지 전환에 따른 수송 부문의 온실가스 저감량(tonCO₂eq.), *Reduction Target Value GHG* 는 수송 부문의 2030년과 2050년 온실가스 목표 저감량(tonCO₂eq.)이다.

Table 10. GHG reduction of transport scenario

Transport scenario (car)			Fuel sector	Annual reduction intensity (tonCO ₂ eq./km)	GHG reduction (tonCO ₂ eq.)	
2030	General use	4,000,000	Gasoline→Hydrogen	0.000191	9,146,608	
			Diesel→Hydrogen	0.000211	10,104,368	
			LPG→Hydrogen	0.000432	20,687,616	
	Business	500,000	CNG→Hydrogen	0.001779	53,180,537	
			Diesel→Hydrogen	0.000756	22,599,486	
2050	A	General use	20,917,688	Gasoline→Hydrogen	0.000191	47,831,473
				Diesel→Hydrogen	0.000211	52,840,004
				LPG→Hydrogen	0.000432	108,184,274
		Business	115,581	CNG→Hydrogen	0.001779	12,293,319
				Diesel→Hydrogen	0.000756	5,224,142
	B	General use	17,780,035	Gasoline→Hydrogen	0.000191	40,656,753
				Diesel→Hydrogen	0.000211	44,914,004
				LPG→Hydrogen	0.000432	91,956,634
		Business	98,244	CNG→Hydrogen	0.001779	10,449,337
				Diesel→Hydrogen	0.000756	4,440,528

$$\text{Carbon Neutrality Contribution}(\%) = \frac{\text{Sector Reduction}_{GHG}}{\text{Reduction Target Value}_{GHG}} \times 100 \quad (8)$$

국내 수소에너지 전환 시나리오별 수송 부문 온실가스 저감량에 대한 탄소중립 기여도를 Table 11에 나타내었다. 2018년의 온실가스 배출량을 기준으로 2030년·2050년 목표 저감량을 비교하여 나타내었다. 2030년 BAU 목표 저감량은 37백만 tonCO₂eq.이며, 시나리오별 목표 저감량에 따른 기여도의 평균은 138.4%로 나타났다. 2050년 목표 저감량 중 A안의 목표 저감량은 95백만 tonCO₂eq.이며, B안의 목표 저감량은 89백만 tonCO₂eq.이다. 시나리오별 목표 저감량에 따른 기여도의 평균은 A안은 82.5%, B안은 74.9%로 나타났다. 이를 통해 2030년 및 2050년 국내 탄소중립 목표 시나리오를 그대로 이행할 경우, 수송 부문의 탄소중립 기여도는 시나리오의 저감 목표량 이상일 것으로 판단된다.

4. 부문별 탄소중립 기여도 결과

국내 수소에너지 전환 시 발생하는 탄소중립 기여도를 Table 12 및 Fig. 2에 나타내었다. 2030년 건물 부문의 탄소중립 기여도를 산정하기 위하여 부생수소, LNG, LPG 연료전지에 대한 연간 온실가스 저감 원 단위인 0.075320 tonCO₂eq./m², 0.064204 tonCO₂eq./m², 0.068588 tonCO₂eq./m²를 기준으로 2030년 전환 목표 면적인 214,154,952 m²에 적용하였다. 건물 부문의 온실가스 저감량을 산정한 결과 각각 16,130,151 tonCO₂eq., 13,749,605 tonCO₂eq., 14,688,460 tonCO₂eq.로 나타났다. 이후 건물 부문의 2030년 온실가스 목표 저감량 137,000,000 tonCO₂eq. 기준으로 부생수소, LNG, LPG 연료전지의 탄소중립 기여도를 산정하였고, 그 결과 평균 10.8%로 나타났다.

2030년 수송 부문의 탄소중립 기여도를 산정하기 위하여 일반용 차량에 해당하는 휘발유, 경유, LPG와 사업용 차량에 해당하는 CNG, 경유에 대한 연간

Table 11. Net-zero contribution of transport scenario

Target reduction of transport sector (tonCO ₂ eq.)		Sector 1 (General use)	Sector 2 (Business)	GHG reduction (tonCO ₂ eq./y)	Contribution (%)
2030	37,000,000	Gasoline	CNG	62,327,145	168.5 (△68.5%)
			Diesel	31,746,094	85.8
		Diesel	CNG	63,284,905	171.0 (△71%)
			Diesel	32,703,854	88.4
		LPG	CNG	73,868,153	199.6 (△99.6%)
			Diesel	43,287,102	117.0 (△17%)
2050	A 95,000,000	Gasoline	CNG	60,124,792	63.3
			Diesel	53,055,615	55.8
		Diesel	CNG	65,133,323	68.6
			Diesel	58,064,147	61.1
		LPG	CNG	120,477,593	126.8 (△26.8%)
			Diesel	113,408,417	119.4 (△19.4%)
	B 89,000,000	Gasoline	CNG	51,106,090	57.4
			Diesel	45,097,280	50.7
		Diesel	CNG	55,363,341	62.2
			Diesel	49,354,532	55.5
		LPG	CNG	102,405,971	115.1 (△15.1%)
			Diesel	96,397,162	108.3 (△8.3%)

온실가스의 저감 원단위인 0.000191 tonCO₂eq./km, 0.000211 tonCO₂eq./km, 0.000432 tonCO₂eq./km, 0.001779 tonCO₂eq./km, 0.000756 tonCO₂eq./km를 기준으로 일반 차량 4,000,000대와 사업용 차량 500,000대에 적용하였다. 수송 부문의 온실가스 저감량을 산정한 결과 일반용 차량은 각각 9,146,608 tonCO₂eq., 10,104,368 tonCO₂eq., 20,687,616 tonCO₂eq.로 산정되었고, 사업용 차량은 각각 53,180,537 tonCO₂eq., 22,599,486 tonCO₂eq.로 나타났다. 이후 수송 부문의 2030년 온실가스 목표 저감량 37,000,000 tonCO₂eq. 기준으로 일반용 차량과 사업용 차량에 해당하는 휘발유+CNG, 휘발유+경유, 경유+CNG, 경유+경유, LPG+CNG, LPG+경유 연료의 탄소중립 기여도를 산

정하였고, 그 결과 평균 138.4%로 나타났다.

2050년 건물 부문의 탄소중립 기여도를 산정하기 위하여 2050년 전환 시나리오 면적인 642,464,857 m² 기준으로 부생수소, LNG, LPG 연료전지에 대한 온실가스 저감량을 산정한 결과 각각 48,390,453 tonCO₂eq., 41,248,814 tonCO₂eq., 44,065,380 tonCO₂eq.으로 나타났다. 이후 2050년 전환 시나리오 중 A안인 경우, 온실가스 목표 저감량 316,000,000 tonCO₂eq. 기준으로 부생수소, LNG, LPG 연료전지에 대하여 탄소중립 기여도를 산정하였고, 이는 평균 14.1%로 나타났다. B안인 경우, 온실가스 목표 저감량 295,000,000 tonCO₂eq. 기준으로 부생수소, LNG, LPG 연료전지의 탄소중립 기여도를 산정하였고, 이는 평균 15.1%로 나타났다.

2050년 수송 부문의 탄소중립 기여도를 산정하기 위하여 2050년 전환 시나리오 중 A안의 일반 차량 20,917,688대와 사업용 차량 115,581대를 기준으로 일반 차량에 해당하는 기존 휘발유, 경유, LPG 연료에 대한 온실가스 저감량은 각각 47,831,473 tonCO₂eq., 52,840,004 tonCO₂eq., 108,184,274 tonCO₂eq.으로 나타났고, 사업용 차량에 해당하는 기존 CNG, 경유 연료에 대한 온실가스 저감량은 각각 12,293,319 tonCO₂eq., 5,224,142 tonCO₂eq.으로 나타났다. B안인 경우, 일반 차량 17,780,035대와 사업용 차량 98,244대를 기준으로 일반 차량에 해당하는 기존 휘발유, 경유, LPG 연료에 대한 온실가스 저감량은 각각 40,656,753 tonCO₂eq., 44,914,004 tonCO₂eq., 91,956,634

Table 12. Net-zero contribution results of building-transport sector

Sector (%)		2030	2050	
			A	B
Building (fuel cell)	(A) By-product hydrogen	11.8	15.3	16.4
	(B) LNG	10.0	13.1	14.0
	(C) LPG	10.7	13.9	14.9
Transport sector (Fuel)	(D) Gasoline+CNG	168.5	63.3	57.4
	(E) Gasoline+diesel	85.8	55.8	50.7
	(F) Diesel+CNG	171.0	68.6	62.2
	(G) Diesel+diesel	88.4	61.1	55.5
	(H) LPG+CNG	199.6	126.8	115.1
	(I) LPG+diesel	117.0	119.4	108.3

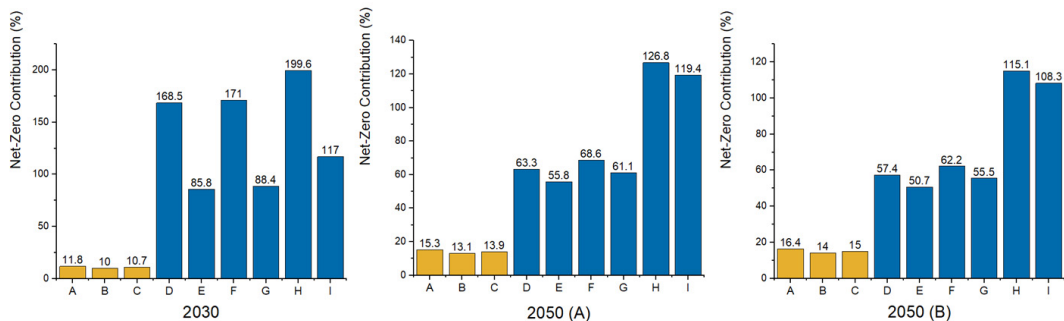


Fig. 2. Net-zero contribution results of sector

tonCO₂eq.으로 산정되었고, 사업용 차량에 해당하는 기존 CNG, 경유 연료에 대한 온실가스 저감량은 각각 10,449,337 tonCO₂eq., 4,440,528 tonCO₂eq.으로 산정되었다. 이후 2050년 A안에 해당하는 온실가스 목표 저감량 95,000,000 tonCO₂eq. 기준으로 일반과 사업용에 해당하는 휘발유+CNG, 휘발유+경유, 경유+CNG, 경유+경유, LPG+CNG, LPG+경유 연료의 탄소중립 기여도를 산정하였고, 그 결과 평균 82.5%로 나타났다. B안인 경우, 온실가스 목표 저감량 89,000,000 tonCO₂eq. 기준으로 일반과 사업용에 해당하는 휘발유+CNG, 휘발유+경유, 경유+CNG, 경유+경유, LPG+CNG, LPG+경유 연료의 탄소중립 기여도를 산정하였고, 그 결과 평균 74.8%로 산정되었다.

5. 결론

본 연구는 2030년 및 2050년 탄소중립 정책에 수소에너지의 정량적 감축 효과를 제시하고자 하였다. 이에 탄소중립 정책 중 일환인 수소시범도시를 대상으로 온실가스 저감 효과를 정량적으로 나타내어 탄소중립 기여도를 평가하는 연구이다.

국내 수소시범도시 내 수소 기술에 대한 효과를 분석하기 위하여 건물 부문에서는 부생수소, LNG, LPG 연료전지를 기준으로 산정하였고, 수송 부문에서는 일반용 차량 연료에 해당하는 휘발유, 경유, LPG 연료와 사업용 차량 연료에 해당하는 CNG, 경유에 대한 탄소중립 기여도를 산정하였다.

건물 부문의 2030년 기존 화석에너지에서 수소에너지로 전환이 가능한 부생수소, LNG, LPG 연료전지에 대한 탄소중립 기여도는 평균 10.8%로 산정되었다. 또한, 2050년 전환 시나리오 중 A안의 기존 화석에너지에서 수소에너지로 전환이 가능한 부생수소, LNG, LPG 연료전지에 대한 탄소중립 기여도는 평균 14.1%로 산정되었고, B안의 기존 화석에너지에서 수소 에너지로 전환이 가능한 부생수소, LNG, LPG 연료전지에 대한 탄소중립 기여도는 평균 15.1%로 산정되었다. 이와 같은 결과로 부생수소 연료전지는 다른 연료전지들과 비교해 보았을 때 탄소중립

기여도가 가장 높은 것으로 나타났고, LNG 연료전지와 LPG 연료전지는 비슷한 수준을 유지하는 것으로 나타났다.

수송 부문의 2030년 일반용과 사업용에 해당하는 휘발유+CNG, 휘발유+경유, 경유+CNG, 경유+경유, LPG+CNG, LPG+경유 연료에서 수소에너지로 전환 시 탄소중립 기여도는 평균 138.3%로 산정되었다. 또한, 2050년 A안의 일반용과 사업용에 해당하는 휘발유+CNG, 휘발유+경유, 경유+CNG, 경유+경유, LPG+CNG, LPG+경유 연료에서 수소에너지로 전환 시 탄소중립 기여도는 평균 82.5%로 산정되었다. 또한 B안의 일반용 차량과 사업용 차량에 해당하는 휘발유+CNG, 휘발유+경유, 경유+CNG, 경유+경유, LPG+CNG, LPG+경유 연료에서 수소에너지로 전환 시 탄소중립 기여도는 평균 74.9%로 산정되었다. 2030년도 기여도에 비하여 2050년도의 기여도가 더 낮게 나타나는데, 이는 사업용 차량의 2050년도 목표치보다 2030년도의 목표치가 더 크기 때문이다.

2030년 NDC, 2050년 시나리오상 감축 목표 및 주요 정책 목표에 따르면 수송 부분에서의 목표는 기존 차량에서 전기자동차와 수소자동차로의 전환을 의미한다. 본 연구는 수소의 생산, 자동차의 생산 그리고 기존 차량의 폐기 과정을 적용하지 않았기 때문에 기여도 측면에서 100% 이상 초과 달성하였다. 이에 추후 연구를 통해 수송 부문의 사용 단계를 포함하고 원료의 생산에서 폐기 과정까지 고려한 전(全) 과정 프로세스를 적용하여 다양한 차량의 탄소중립 기여도 평가의 필요성이 제기된다.

현재 우리나라는 수소가 에너지원으로 사용되는 일부 기능을 실증하는 수소시범도시 단계를 벗어나 도시 내 다양한 기능을 대체하는 실질적인 수소도시로 전환되고 있는 시점이다. 위와 같은 연구 결과는 에너지 수급에 대한 국내의 정세 변화에 안정적이고 유연하게 대응하고, 다양한 수소 공급 방식에 대한 기술 개발 및 투자 추진을 위한 근거 자료로서 활용될 수 있을 것이다.

후 기

본 연구는 2022년도 정부(국토교통부)의 재원과 지원으로 수행된 연구임(2022년 수소시범도시 안전관리체계 구축 및 운영관리 방안 연구, 2022.12). 본 연구는 정부(환경부)의 재원으로 한국환경산업기술원의 지원을 받아 수행된 연구임(지식기반 환경서비스 특성화대학원사업).

References

1. H. Y. Ahn and E. J. Yoon, "Carbon neutral policy directions and tasks at national and urban levels", Korea Research Institute for Human Settlements, 2021. Retrieved from https://www.krihs.re.kr/galleryPdfView.es?bid=0024&list_no=27834&seq=1.
2. D. W. Noh, "2050 long term low carbon development strategy (LEDS) trends in major countries", Korea Energy Economics Institute, Vol. 17, No. 4, 2020, pp. 28-33. Retrieved from http://www.keei.re.kr/keei/download/focus/ef2012/ef2012_40.pdf.
3. Joint Ministries, "2050 Carbon Neutral Scenario", Presidential Commission on Carbon Neutrality and Green Growth, 2021. Retrieved from <https://2050cnc.go.kr/base/board/read?boardManagementNo=4&boardNo=101&searchCategory=&page=1&searchType=&searchWord=&menuLevel=2&menuNo=15>.
4. J. S. Lee, "Monthly hydrogen economy, ministry of land, infrastructure and transport to promote 6 hydrogen city development projects starting this year," Monthly Hydrogen Economy, 2023. Retrieved from <https://h2news.kr/news/article.html?no=10650>.
5. Ministry of Land, Infrastructure and Transport, "Building energy consumption statistics", Green Together, 2021. Retrieved from <https://www.greentogogether.go.kr:8343/stat/stat-data.do#%EA%B2%80%EC%83%89>.
6. Korea Transportation Safety Authority, "Vehicle mileage statistics", Korean Statistical Information Service, 2020. Retrieved from doi:https://kosis.kr/statHtml/statHtml.do?orgId=426&tblId=DT_42601_N002&lang_mode=ko&vw_cd=MT_ZTITLE&list_id=I1_426&conn_path=14.
7. E. J. Yoon, "Korea land issue report: domestic and overseas hydrogen city policy trends and implications", Korea Research Institute for Human Settlements, 2021, pp. 1-12. Retrieved from https://www.krihs.re.kr/galleryPdfView.es?bid=0024&list_no=27833&seq=1.
8. Ministry of Land, Infrastructure and Transport, "Vehicle Registration Status Report", Korean Statistical Information Service, 2022. Retrieved from https://kosis.kr/statHtml/statHtml.do?orgId=116&tblId=DT_MLTM_1244&vw_cd=MT_ZTITLE&list_id=&scrId=&seqNo=&lang_mode=ko&obj_var_id=&itm_id=&conn_path=E1&docId=0378455147&markType=S&itmNm=%EC%A0%84%EA%B5%AD.
9. Ministry of Land, Infrastructure and Transport, "2021 Land Transport Carbon Neutral Roadmap", Ministry of Land, Infrastructure and Transport, 2021. Retrieved from http://www.molit.go.kr/USR/NEWS/m_71/dtl.jsp?lcmepage=1&id=95086352.
10. The Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), "2006 IPCC guideline", IPCC, 2006. Retrieved from <https://www.ipcc.ch/report/2006-ipcc-guidelines-for-national-greenhouse-gas-inventories/>.