

나프타 기반 수소 연료전지 자동차의 전과정 온실가스 발생량 분석

김명수·유은지·송한호*

서울대학교 기계항공공학부 어드밴스드 에너지 시스템 연구실

Well-to-Wheel Greenhouse Gas Emissions Analysis of Hydrogen Fuel Cell Vehicle - Hydrogen Produced by Naphtha Cracking

Myoungsoo Kim · Eunji Yoo · Han Ho Song*

Department of Mechanical & Aerospace Engineering, Seoul National University, Seoul 08826, Korea
(Received 24 November 2016 / Revised 4 January 2017 / Accepted 5 January 2017)

Abstract : The Fuel Cell Electric Vehicle(FCEV) is recently evolving into a new trend in the automobile industry due to its relatively higher efficiency and zero greenhouse gas(GHG) emission in the tailpipe, as compared to that of the conventional internal combustion engine vehicles. However, it is important to analyze the whole process of the hydrogen's life cycle(from extraction of feedstock to vehicle operation) in order to evaluate the environmental impact of introducing FCEV upon recognizing that the hydrogen fuel, which is used in the fuel cell stack, is not directly available from nature, but instead, it should be produced from naturally available resources. Among the various hydrogen production methods, ~54.1 %⁸⁾ of marketed hydrogen in Korea is produced from naphtha cracking process in the petrochemical industry. Therefore, in this study, we performed a well-to-wheels(WTW) analysis on the hydrogen fuel cycle for the FCEV application by using the GREET program from the US Argonne National Laboratory with Korean specific data. As a result, the well-to-tank and well-to-wheel GHG emissions of the FCEV are calculated as 45,638-51,472 g CO₂eq/GJ and 65.0-73.4 g CO₂eq/km, respectively.

Keywords : Well-to-wheel analysis(전과정 분석), Hydrogen(수소), FCEV(연료전지 자동차), Naphtha cracking(나프타 분해), Greenhouse gas(온실가스)

Nomenclature

FCEV : fuel cell electric vehicle
GHG : greenhouse gas
GWP : global warming potential
LHV : lower heating value
NCC : naphtha cracking center
WTT : well-to-tank
WTW : well-to-wheel
SHP steam : super-high-pressure steam

DS : dilution steam
BFW : boiler feed water
QO : quench oil
PFO : pyrolysis fuel oil
PGO : pyrolysis gas oil
PG : pyrolysis gasoline
LPG : liquefied petroleum gas
RAFF : raffinate
RPG : raw pyrolysis gasoline
TLE : transfer line exchangers

*Corresponding author, E-mail: hhsong@snu.ac.kr

1. 서론

1.1 연구 배경

세계적으로 자동차에 대한 수요가 높아지면서 그에 따른 온실가스 배출량이 큰 이슈가 되고 있다. 이에 따라 국가적 차원에서 온실가스 규제를 통해 많은 자동차 관련 업종들이 온실가스 배출을 줄이기 위해 노력하고 있다. 이를 위한 방안으로 다양한 대체 연료와 에너지 변환 방식에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있는 상황에서 여러 가지 기술들에 대해 환경성을 평가하고 온실가스 배출량을 정량화하여 객관적으로 비교하기 위한 기준 마련이 필요하다.

본 연구팀은 이전 연구에서 연료의 전과정 분석 방법(Well-to-wheel, WTW)을 적용하여 휘발유와 경유,¹⁾ 천연가스²⁾에 대한 분석 결과를 발표하였으며 이 외에도 LPG, 전기 발전, 바이오연료 등에 대한 연구를 동시에 진행하여 국내 상황에 특화된 종합적인 분석을 수행하고 있다. 이번 연구에서는 최근 각광 받고 있는 수소 연료 전지 자동차에 대한 전과정적인 온실가스 발생량 분석 방법과 결과를 다루고 있다.

1.2 연구 목적 및 방법

연료전지 차량은 수소를 연료로 사용하여 연료전지를 통해 전기를 생산하고 차량을 구동하는 전기 자동차의 일종이다. 이에 연료전지 차량은 운행 시 온실가스가 전혀 나오지 않는다는 측면에서 친환경적이라는 평가를 받고 있다. 하지만 연료전지 차량의 객관적인 친환경성을 판단하기 위해서는 연료인 수소를 제조하거나 저장 및 운송하는 과정에서 발생하는 온실가스 또한 같이 고려해야 한다.

이번 연구는 국내에 존재하는 다양한 수소 생산 방식 중에서도 주로 석유화학 공장에서 나프타 분해 방식을 통해 제조되는 부생 수소에 한하여 원료 채굴, 정제, 수소 제조, 저장, 압축 및 운송 과정에서 발생하는 온실가스를 분석하였다.

각 과정을 분석하기 위해 필요한 데이터는 국내외 문헌 자료와 보고서 및 동 연구진에 의해 분석한 결과 등에 근거해 수집하였으며, 연구에 필요한 계산은 미국 아르곤 국가 연구소에서 제작한 엑셀 기

반 스프레드시트 형식의 GREET³⁾ (Greenhouse Gases, Regulated Emissions and Energy Use in Transportation) 프로그램을 이용하였다. 최종적으로 연료전지 차량의 전과정을 다른 차량들의 전과정 온실가스 분석 결과와 비교하여 친환경성을 평가하였다.

본 연구에서 사용하는 GREET 프로그램의 분석 방법은 Fig. 1과 같다. 분석을 위해 필요로 하는 값은 크게 두 가지이며, 단위에너지의 생산품을 만들기 위한 과정연료의 에너지량(Fig. 1에서의 Process fuel)과 에너지를 공급한 연료조성(Fig. 1에서의 Process fuel share)이 이에 해당한다. 연료는 각 연료의 평균 사용기술비율(Fig. 1에서의 Combustion technology share)에 따라 일괄적으로 분배되며, 각 기술 별로 주어진 온실가스 가중치인 배출계수(Emission factors)가 곱해져 최종적인 온실가스량이 계산된다. 이에 따라서 아래 본문에서는 GREET 분석에 필요한 과정연료량과 과정연료에 사용된 연료를 위주로 제시하였다.

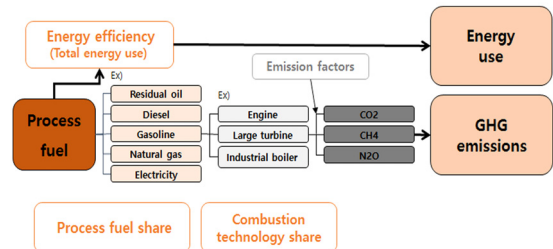


Fig. 1 GREET calculation process

1.2.1 연료 전과정 분석(Well-to-wheel analysis)

전과정 분석이란 특정 제품의 가공, 제조, 유통, 사용, 재활용 등의 모든 일련의 과정에 대한 환경성을 평가하는 기법이다. 본 연구에서 다루고 있는 연료 전과정이란 연료의 원료를 추출하는 과정(Well)부터 차량을 구동하는 과정(Wheel)까지의 생산 및 사용의 모든 과정을 의미한다. 그 외의 대표적인 자동차 관련 전과정 분석으로 자동차 제품의 전과정을 평가하는 차량 전과정 분석이 있으며, 이 또한 국내외에서 활발히 이뤄지고 있다.⁴⁾

본 연구에서는 나프타 분해를 통해 생산되는 수소를 연료로 사용하는 연료전지자동차의 전과정에 대해 분석하였으며, 전과정 온실가스(CO₂, CH₄, N₂O

포함) 배출량을 계산하였다. Fig. 1은 나프타 기반 수소 연료전지 자동차의 전과정을 그림으로 나타낸 것이다.

1.2.2 효율의 정의

전과정 분석을 수행하기 위해서는 Fig. 2에 표기 한 각 과정에서의 효율과 사용되는 연료 및 에너지의 비율을 구해야 한다. 앞으로 논문에서 언급되는 각 과정의 효율은 식 (1)과 같은 정의를 가지며, 이는 GREET에서의 정의와 동일하다.

$$Efficiency = \frac{Energy\ Output}{Energy\ Input} \quad (1)$$

여기서 과정연료(Process fuel)란 각 과정을 일으키기 위해 추가적으로 투입되는 에너지이다. 에너지 산출량(Energy output)은 과정을 끝낸 물질이 최종적으로 함유하고 있는 에너지를 의미하며 발열량을 바탕으로 계산된다. 에너지 투입량(Energy input)은 에너지 산출량과 과정연료 에너지의 합을 의미한다. 본 효율은 분석에서 단위 에너지 산출량에 요구되는 과정연료량을 나타내는 값으로 사용된다.

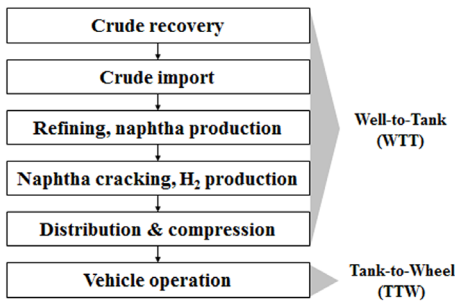


Fig. 2 WTT process of FCEV

2. 수소 전과정 분석 내용

2.1 나프타 생산

2.1.1 나프타 생산 개요

2.1.2-2.1.4절에서는 수소를 생산하기 위한 원료인 나프타를 생산하는 모든 Upstream 과정을 설명하였다. 산지에서 원유를 추출하고 이를 수입하고, 국내 정제소에서 원유를 정제하여 나프타를 비롯한 석유제품을 생산하기까지의 과정이 포함된다. 본 연구팀의 선행 연구인 장재준과 송한호¹⁾에서 자

세한 분석 방법과 세부적인 데이터를 소개하고 있으며 아래 본문에는 주요한 내용을 간략히 기술하였다.

2.1.2 원유 추출

산지에서 원유를 추출하고 처리하는 과정이다. 원유 추출 과정의 효율은 해외 문헌과 보고서를 바탕으로 산유국별 원유 추출 에너지 데이터를 수집하고, 국내 원유 산지별 수입량을 통해 가중평균하여 원유 추출 과정에서 사용되는 과정연료의 에너지와 온실가스 배출량을 계산하였다. 또한 원유 추출 과정에서 발생하는 수반가스를 연소시키는 Flaring, 누출시키는 Venting에 의해 발생하는 CH₄와 CO₂의 양을 추가로 고려하였다.

2.1.3 원유 수입

유조선을 이용하여 산지에서 국내 정유소까지 원유를 수입하는 과정이다. 국가별 수송 거리 데이터와 국내 원유 수입국 비율을 이용하여 수입국에서 국내까지의 평균 수송 거리를 11,745 km로 계산하였다. 또한 원유 운반선의 제원은 GREET 모델의 기본값을 사용하였다.

2.1.4 석유 정제

원유를 정제하여 휘발유, 경유, 등유 등의 석유 제품을 생산하는 과정으로 이 과정에서 나프타가 생산된다. 국내 정유사의 목표관리제 데이터를 바탕으로 석유 정제 과정에서 소모되는 에너지량과 온실가스 배출량을 계산하였다. 또한 석유 제품은 연산품이므로 개별 제품의 세부 공정을 고려한 정제 에너지 할당 비율을 설정함으로써 각 정유 제품별 에너지 사용량 및 온실가스 배출량을 계산하였다.

2.2 나프타 분해(Naphtha Cracking)

2.2.1 나프타 분해 개요

나프타를 분해하여 수소를 생산하는 과정은 Fig. 3과 같이 일반적으로 분해, 급랭, 압축, 정제의 4가지 과정으로 구성되어 있다. 나프타 분해는 주로 석유 화학제품의 연료로 쓰이는 에틸렌과 프로필렌을 생산하는 데에 사용되며 수소의 발생량은 약 1%로 공정의 부산물로 분류된다.¹²⁾ Table 1은 나프타 분해 과정에서 만들어지는 생산품들의 종류와 각각의 질

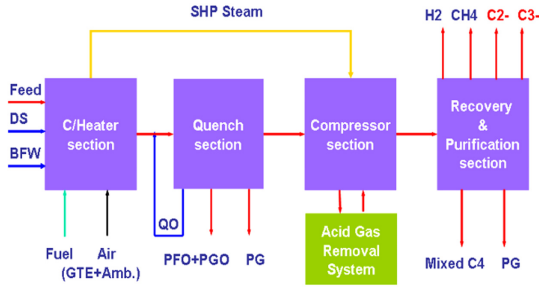


Fig. 3 Naphtha cracking process¹³⁾

Table 1 Product composition from naphtha cracking center

Product (wt.%)		LHV (kJ/kg)	(energy.%)
Ethylene (31 %)		47,170	31.5
Propylene (16 %)		45,770	15.8
C4 Raffinate (10 %)	Butadiene (5 %)	44,118	4.8
	Butene (5 %)	45,277	4.9
RPG (14 %)	Benzene	40,487	4.1
	Toluene	40,496	4.1
	Xylene	40,782	4.1
CH ₄ , H ₂ , LPG	Methane (14 %)	47,141	14.2
	Hydrogen (1 %)	120,210	2.6
	LPG (14 %)	46,607	14

량을 나타낸 표이다. 세부적인 생산품들은 Ren 등⁵⁾에 따라 분배하였으며 각 생산품들의 발열량을 바탕으로 생산품의 에너지 구성비 또한 계산하였다.

2.2.2 나프타 분해 에너지 할당

나프타 분해 공정에서는 수소를 비롯하여 에틸렌, 프로필렌, 방향족 등 여러 생산품이 생산된다. 일반적으로 각 과정에서 사용된 에너지(과정연료)는 특정 단일 생산품을 생산하기 위해 사용된다기 보다는 동일한 공정에서의 여러 연산품들을 생산하는 데에 사용되었다고 볼 수 있다. 따라서 이러한 연산 공정에서 개별 생산품을 제조하는 데에 사용된 에너지를 평가하기 위해서는 소모된 전체 에너지에서 어느 정도의 비율을 적용할 것인지에 대한 고려가 필요하며 이를 에너지 할당(Allocation)이라고 한다.

전과정 분석에서는 이러한 연산 공정에 대해서 여러 가지 할당 방법을 적용하고 있으며, 본 논문에서

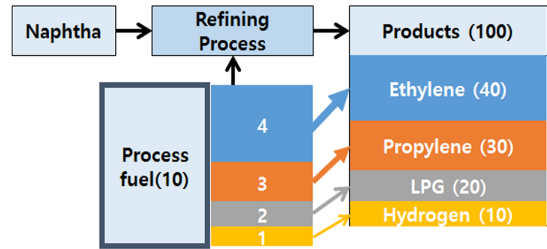


Fig. 4 Energy allocation example

서는 그 중에서도 비교적 간단하면서도 공학적으로 의미가 있는 에너지 할당 방법을 적용하였다. 이러한 방법에서는 나프타 분해 공정에서의 과정연료 에너지 사용량이 각각의 생산품이 함유하는 에너지에 비례하여 분배되고 사용된다는 가정을 한다. 예컨대 에틸렌 생산량이 전체 생산품 에너지의 30% energy. %를 차지한다고 가정하면, 에틸렌 생산에 사용된 과정연료 에너지는 전체 과정연료 에너지의 30%라 볼 수 있다.

Fig. 4는 앞서 설명한 에너지 할당을 그림으로 나타낸 예시이다. 주어진 예시에 대해서 1.2.2절의 효율의 정의에 따라 각각의 생산품의 효율을 계산해보면 모든 생산품의 효율은 91%(예시값)로 동일하다. 이를 통해 에너지 할당을 적용할 경우 생산품들의 효율은 전부 같다는 것을 알 수 있다. 위의 결과를 바탕으로 본 논문에서는 수소 제조 효율을 도출함에 있어서 이와 동일한 값을 갖는 NCC의 주 생산품인 에틸렌 제조 효율로 대신하여 분석을 수행하였다. 이는 석유화학공정에서 에틸렌 제조 효율에 대한 분석이 자세하게 이루어져 있기 때문이다.

2.2.3 나프타 분해 공장(Naphtha Cracking Center, NCC) 자료

2.2.3.1 과정연료

나프타 분해 공정에서 사용되는 과정연료는 Ren 등⁵⁾에 따르면 95% 가량이 공정 자체의 부산물이다. 외부에서 들어오는 부분은 전기 에너지로서 전체 과정연료의 5% 정도에 해당한다. 다만 이 경우 95%의 부산물 에너지에는 자체적으로 생산되고 소멸되는 스팀 에너지를 포함하고 있다. 이보다 자세한 과정연료 사용량 데이터는 입수하기 어려운 상황이어서 아래와 같은 가정 및 분석을 통해 평가를 진행하였다.

나프타 분해의 네 가지 과정에서 첫 번째로 수행되는 분해 과정에서는 열을 얻기 위하여 연료가 공급되며, 정량적인 에너지 사용량 값은 Table 2와 같다. 한국산업안전공단¹³⁾에 따르면 이 과정에서의 연료는 앞서 언급한 바와 같이 공정의 부산물인 수소, 메탄, 에탄, C3 LPG, C4 RAFF.III 등이 사용된다. 주어진 문헌에서는 표에서 나타난 전체 에너지 사용량 1046 GJ/hr 중에서 부산물인 수소와 메탄이 대략 837 GJ/hr, 나머지 과정연료량 부족분은 C3 LPG, C4 RAFF.III이 사용되는 것으로 보고하고 있다.

이때 분석을 위한 추가적인 가정으로, 837 GJ/hr 을 차지하는 수소와 메탄 사용량은 각각 생산품의 에너지 구성비를 나타내는 표인 Table 1에 따라 2.6:14.2의 energy.% 비율을 이용하였으며, 계산의 편의를 위해 나머지 209 GJ/hr은 전부 LPG로 가정하였다. 위의 가정을 통해 총 1046 GJ/hr에서 각각의 연료가 차지하는 연료량과 비율은 Table 3과 같다.

분해 과정을 제외한 세 가지 과정(급랭, 압축, 정제)에서 또한 전기에너지 및 다른 과정연료들이 사용된다. Ren 등⁵⁾에 의하면 분해과정에서 사용되는 에너지는 전체 공정에서의 에너지의 대략 65 %를 차지하며, 급랭과 압축 과정에서는 전체 과정연료의 15 %, 정제과정은 20 % 정도를 사용하는 것으로 보고하고 있다. 결국 전체 공정에서 사용된 에너지는 분해 과정에서 사용된 과정 연료량인 1046 GJ/hr 에 0.65를 나눈 약 1611 GJ/hr 정도로 산정할 수 있다.

분해과정을 제외한 나머지 과정(급랭, 압축, 정제)에서 사용된 전체 NCC 과정 연료의 35 %에 해당하는 565 GJ/hr은 Ren 등⁵⁾을 참고하여 연료 사용

량을 분배하였다.

전체 과정연료 사용량의 5 %를 차지(~1 GJ/ton ethylene)하는 전기에너지는 물이나 오일 펌프를 냉각시킬 때와 메탄 압축기에 사용되며 이는 급랭과 압축 과정에 해당된다. 전기에너지를 제외한 나머지 급랭과 압축 그리고 정제에서의 에너지 30 %는 Steam과 그 밖의 연료를 포함하고 있다.

Steam에 해당하는 과정연료 비율은 에너지절감 지식포털(EG-TIPS)¹⁴⁾에서 제공하는 특정 나프타 분해 기술의 데이터를 참고하였다. 위의 기술에서는 Steam은 일반적으로 약 1.14 GJ/ton ethylene을 사용하고 있으며, 에틸렌의 발열량을 바탕으로 전체 과정연료량 대비 Steam 에너지 사용량을 계산하면 이는 ~5.8 %에 해당한다.

급랭, 압축, 정제를 포함한 총 35 %의 과정연료에서 전기와 Steam 에너지를 제외하면 24.2 %가 남는다. 이렇게 남은 과정연료는 앞서 분해 과정에서의 과정연료와 마찬가지로 공정의 부산물로 취급하여 동일한 연료인 천연가스, 수소, LPG가 사용되며 같은 구성비를 갖는다고 가정하여 Table 3의 비율을 적용하여 분배하였다.

Table 4는 위의 내용들을 종합하여 전체 과정연료의 분배를 계산하여 나타낸 표이다. 세 번째 열은 Steam의 구성비를 제외하여 계산한 분배 비율이다.

이 때, Ren 등⁵⁾에서 각 과정의 과정연료량 비율을 계산 시에 Steam과 연료가 동시에 고려되었다. 하지만 Steam은 TLE(Transfer Line Exchangers)를 통해 생산된 것으로 사실상 연료의 에너지를 바탕으로 공정 내에서 자체적으로 생산된 것이다. 이에 실질적으로 사용된 전체 과정연료량은 1611 GJ/hr이지만 본 연구에서 효율을 구하는 과정에선 에너지가 중복 계산되는 Steam을 제외한 과정연료량이 사용되어야 한다. 본 연구에서는 전체 과정연료를 Steam

Table 2 Share of process fuel usage in C/heater section¹³⁾

Share of process fuel usage	GJ/hr
Furnace	837
Gas turbine	167
Flare burner, etc.	42
Total	1046

Table 3 Process fuel energy usage in C/heater section

Process fuel	GJ/hr	energy.%
Hydrogen	130	12.4
Methane	707	67.6
LPG	209	20

Table 4 Share of process fuel in naphtha cracking process(%)

Process fuel	w/ steam	w/o steam
Natural gas	60.3	64.0
LPG	17.8	19.0
Hydrogen	11.1	11.7
Electricity	5	5.3
Steam	5.8	
Total	100	100

에너지를 제외한 1519 GJ/hr을 이용하였다.

공정의 부산물이 과정연료로 사용될 경우, 외부에서 공급되는 과정연료와는 다르게 Input 중 일부 에너지가 Output으로 나가지 않고 내부적으로 사용되기 때문에 Input과 Output의 에너지 차이를 만들어 낸다. 이를 고려하기 위해 Loss factor를 계산하는데, 이는 일반적으로 부산물의 과정연료 이용이나 Leakage와 같은 상황에서 적용된다. 예를 들어, 특정 과정에서 1 J의 B(Output)를 생산하기 위해 1.1 J의 A(Input)이 필요하다고 할 때, 1 J의 B를 생산하기 위한 전과정적 에너지 사용량 및 온실가스 배출량을 계산할 때는, 그전 과정까지 1 J의 A를 만들기 위해 필요한 전과정 에너지 및 배출된 온실가스량에 “Input/Output = 1.1/1”으로 정의되는 Loss factor만큼이 곱해져서 더해져야 한다.

나프타 분해 공정의 개략도는 아래 Fig. 5와 같다. 이에 본 논문에서는 나프타 분해 공정의 Loss factor를 원료인 나프타(Input) 에너지인 147에 생산품(Output) 에너지인 130을 나눴을 때의 값인 1.13으로 적용하였다.

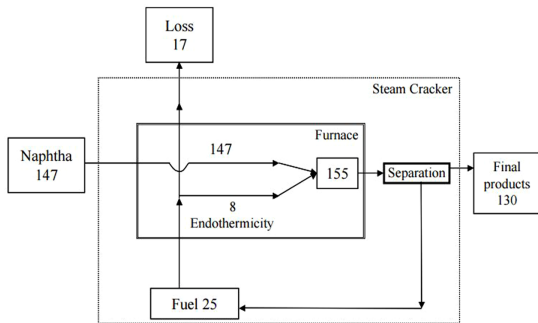


Fig. 5 Brief flow diagram of naphtha cracking⁵⁾

2.2.3.2 에틸렌 제조

2007년 기준으로 국내의 에틸렌 공장에서는 나프타 분해 기술로 Lummus, S&W, Kellogg 공정을 사용하고 있다. 이 중 Lummus 공정을 통한 에틸렌 생산량이 약 60%로 국내 나프타 분해 공정 중 가장 큰 비중을 차지하고 있다.¹³⁾ 이에 본 연구에서는 Lummus 공정을 나프타 분해를 대표하는 공정으로 선정하여 분석하였다.

Table 5는 각각 국내의 회사들과 그 회사에서 운

Table 5 Ethylene production capacity (2007)¹³⁾

NCC / Licence		1,000 ton/year	GJ/hr
YNCC	Lummus	857	4622.5
YNCC	Lummus	400	2157.3
LGPC	Lummus	860	4638.4
HPC	Lummus	720	3883.6
STC	Lummus	1,000	5394.0
KPIC	Lummus	460	2481.1
Average		716.2	3863.1

영하는 NCC의 에틸렌 생산량을 나타낸 표이다. 표에서의 YNCC는 여천NCC, LGPC는 LG석유화학, HPC는 호남석유화학, STC는 삼성토탈(현 한화토탈), KPIC는 대산유화를 의미한다. 시간당 생산되는 에틸렌 에너지는 연단위로 생산되는 에틸렌의 질량과 에틸렌의 발열량을 통해 단위환산하여 나타내었다. 나프타 분해 공장은 24시간 가동되며 2~3년 중에 한 번 정도 점검을 위해 가동을 중단하므로 항상 가동된다고 가정하였으며, 이는 연단위의 에틸렌 생산량을 시간단위의 생산량으로 환산할 수 있게 한다.

Table 5를 통해 알 수 있듯이 NCC별로 생산된 에틸렌 양이 다르므로 각 공장에서 사용되는 과정연료량 또한 다르다. 이에 따라 Table 5의 NCC 에틸렌 생산량을 평균 내었을 때만큼 에틸렌을 생산하였을 시에 Table 2의 과정연료 양을 사용한다고 가정하였다. 평균에 대한 불확실성은 표본 신뢰도 90%의 오차범위를 두어 최종 결과의 Error bar로 나타내어 신뢰구간을 확보하였다.

2.2.4 나프타 분해 국내 효율

에틸렌의 발열량인 47250 kJ/kg과 공장의 평균 에틸렌 생산 용량 및 과정연료량을 고려하면 나프타 크래킹 과정의 효율을 계산할 수 있다. 1.2.2의 효율의 정의대로 계산하였으며, 식 (2)와 같다.

$$Efficiency = \frac{Ethylene\ Energy}{Ethylene\ Energy + Process\ fuel} \quad (2)$$

에너지 산출량에 해당하는 Ethylene Energy는 시간당 생산되는 에틸렌 에너지량이며 Table 5의 평균 생산량을, 과정연료는 2.2.3.1에서 최종적으로 계산된 1518.8 GJ/hr을 2.2.2의 에너지 할당하여 사용하였다. 이를 통해 계산된 최종적인 나프타 크래킹의

효율은 89.0 %이며, 신뢰 구간을 고려한 오차 범위는 86.5 % ~ 90.7 %이다.

동일한 효율의 정의로 Ren 등⁵⁾을 통한 나프타 분해 효율을 계산할 수 있다. 그 결과 효율은 88.3~89.8 %로 나왔으며, 앞서의 국내 데이터를 바탕으로 계산한 효율인 89.0 %와 유사한 값이 나오는 것을 확인할 수 있었다.

2.3 수소 운송 및 분배

2.3.1 국내 수소 운송 및 분배 개요

생산된 수소는 연료전지자동차에 충전되기에 앞서 여러 차례 저장 및 운송의 과정을 거친다. 일단 나프타 분해 공장에서 추출된 수소는 근처의 수소 유통업체 공장으로 운송되고 저장된다. 이 과정에서 수소의 운송 수단으로 카트리지와 파이프라인이 사용된다. 이후 유통업체 공장의 용기에 저장되었던 수소는 카트리지에 실려 차량용 충전소로 운송 및 저장되며, 최종적으로 연료전지자동차로 충전된다. 이러한 과정에서 압축기 및 카트리지 운송 등에서 에너지가 사용되며, 위 과정들은 전과정 에너지 사용량 또는 온실가스 배출량 결과의 상당 부분을 차지한다. 2.3.2-2.3.4절에서는 각 운송, 저장과정에 대하여 전과정 분석에 필요한 값을 구하기 위해 사용한 자료와 분석 방법에 대하여 설명하였다.

아래에 논의될 내용은 특별한 언급을 하지 않는 이상 일반적인 수소 연료의 운송과 분배에 대해 적용될 수 있으며 나프타 분해 부생 수소에만 국한되지 않는다. 다만 필요에 따라 나프타 분해 부생 수소에만 적용될 수 있는 일부 변수들에 대해서는 별도로 정보를 수집하여 연구를 진행하였다.

2.3.2 나프타 분해 공장에서 유통업체 공장까지의 수송 및 압축 과정

국내 석유화학공장에서 유통업체 공장까지 수소를 운송하는 방법은 두 가지가 있다. 가장 많이 차지하고 있는 방법은 파이프를 통해 압축된 수소 및 연료들을 운송하는 방법이다. 이는 운송효율은 높지만 초기 건설 비용이 커서 공장과 최종 소비지의 거리가 가까울 때 주로 많이 사용된다. 두 번째로는 카트리지(혹은 튜브 트레일러)를 사용한 운송 방법이다. 이는 용기에 수소를 압축하여 충전한 후에 트럭

을 통해 운송하는 방법으로 파이프라인보다 효율이 낮지만 초기 비용이 적게 들어 널리 사용된다.

심규성⁶⁾의 2002년에 발표한 자료에 의하면 국내 전체 수소 유통량은 파이프라인 56 %, 카트리지 44 %이다. 반면 가스 저널에서 2010년에 발표한 자료에 따르면 국내 전체 수소 유통량은 파이프라인이 88 %, 카트리지가 12 %를 차지하고 있다.¹⁵⁾ 두 자료의 연도와 유통량 비율을 통해 석유화학공장에서 유통업체 공장까지의 수소 운송에 차지하는 파이프라인의 비중과 중요도가 점점 커지고 있다는 것을 알 수 있다. 이에 본 연구에서는 나프타 분해 공장과 수소 유통업체는 대체로 매우 가까이에 있다는 점에 착안하여, 이 둘 사이의 수소 운송은 전량 파이프라인을 통해 이뤄진다고 가정하였다. 특히 국내에서 가장 큰 나프타 분해 공장인 여천 NCC공장과 유통업체 공장인 덕양에너지 여수공장 사이 거리는 약 3 km이며 이를 파이프라인 운송 거리로 사용하였다. 파이프라인 압축기와 관련된 자료는 GREET 값을 참조했다. 이때 사용된 Isentropic efficiency는 80 %, 사용된 NG 압축기의 효율은 40 %이다.³⁾

유통업체로 운송된 수소는 저장용기에 저장되며, 이 과정에서 또한 압축기가 사용된다. 용기로 저장시의 입력압력과 출력압력은 각각 10 bar와 180 bar로 설정하였다. 입출력 압력을 제외한 나머지 자료는 GREET 값을 참조하였다. 참조된 자료의 Isentropic efficiency는 80 %, 사용된 NG 압축기의 효율은 35 %이다.

2.3.3 유통업체 공장에서 수소충전소까지 수송, 압축 및 충전 과정

14년도 기준으로 국내에는 총 15개의 수소충전소가 운영 중에 있으며 대부분의 수소충전소는 수도권에 위치해 있다. 이에 따라 이번 연구에서는 수소충전소까지의 운송 거리 대푯값을 수도권으로의 수소 운송 거리로 사용하였다. 수도권으로 수소를 조달하는 유통업체 공장은 충청남도 서산시 대산읍에 위치해 있다. 각각의 수소 스테이션의 정확한 위치를 알기 어려운 관계로, 수도권에 있는 수소 충전소는 서울 시청에 위치해 있다고 가정하여 유통업체 공장과의 거리를 이용해 평균값으로 이용하였다.

계산된 거리는 134 km이다.

유통업체 공장에서 수소 충전소로 운반되는 수소의 운송방식은 모두 카트리지를 통해 이뤄지며 180 bar로 가압된 기체 상태의 수소를 저장된 용기에 탱크로 담아 운송한다. 점보형 카트리지의 적재용량인 320 kg-H₂/대로 수송한다고 가정하였으며¹⁰⁾ 수송 트럭의 연비는 GREET 값을 참조하였다.

2.3.4 수소충전소

수소충전소로 전달된 수소는 카트리지의 용기에서 충전소의 저장탱크로 이송되며 이 과정에서 압축기가 사용된다. 최종적으로 저장된 수소를 차량으로 충전할 시에 각 차량 탱크의 충전압력에 따라 압축기의 사용여부가 결정된다. 이렇듯 수소충전소로 전달되어 온 수소를 최종적으로 차량에 충전할 때까지 적게는 한 번 혹은 최대 두 번의 압축 과정을 거치게 된다.

180 bar의 카트리지로부터 수소충전소 저장탱크에 수소를 전달할 때는, 카트리지의 압력이 180 bar에서부터 정해져 있는 저압까지 떨어지게 된다. 따라서 본 연구에서는 카트리지 공급압력을 평균 100 bar로 가정하였고, 수소 저장탱크에는 450 bar로 저장되므로 압축기 출력압력은 450 bar로 놓고 압축기에서의 에너지 소모량을 계산하였다. 또한 차량 탱크 압력을 산정함에 있어서, 현재 판매중인 FCEV 모델인 투싼ix의 경우 충전압력이 700 bar이므로 충전 시에 450 bar에서 700 bar로 가압하는 압축과정을 계산에 추가하였다.¹¹⁾

2.3.5 수소 운송 및 분배 압축 효율 계산

국내의 가장 큰 수소 유통업체인 덕양에너지에 따르면 수소충전소를 제외한 모든 유통과정에서 사용되는 압축기는 NG엔진을 사용한다. 반면 수소 충전소에서는 대부분의 경우 전기 모터를 이용한 압축기를 사용한다. 위의 자료들을 바탕으로 GREET로 계산한 결과, 전체 압축 과정의 효율은 84.8 %로 계산되었다.

3. 결과 분석

3.1 연료전지 자동차 전과정 분석

Fig. 6의 결과는 원유의 추출과정부터 1 GJ의 수

소를 연료전지 자동차에 충전까지의 과정(Well-to-Tank, WTT)에서 발생하는 온실가스(Greenhouse Gases, GHGs)를 누적하여 나타낸 것으로 계산된 값은 45,638-51,472 g-CO₂eq./GJ이다. 계산에 고려된 온실가스는 CO₂, CH₄, N₂O이며 각각의 지구온난화지수(Global Warming Potential, GWP)는 IPCC 가이드라인에 따라 1, 25, 298를 적용하였다.⁷⁾ 연료전지 자동차는 주행 시에 발생하는 온실가스가 없어 사실상 위 WTT의 값은 WTW까지의 값과 동일하다고 볼 수 있다.

더 명확한 정보가 부족한 상태에서 전기모터와 NG엔진을 사용하는 압축기의 효율은 GREET에서 주어진 값을 사용하였다. 이에 실제 사용되는 압축기의 효율과의 오차 가능성을 고려하여 Efficiency 값을 10% 내외로 변화시켜 2.2.3.2에서 언급한 과정연료의 오차범위와 누적하여 Error bar로 나타내었다.

본 논문의 2장에서 설명하는 과정은 Fig. 6 그래프의 Naphtha cracking, T&D(Transportation and distribution), H₂ Compression 과정에 해당한다. Crude recovery, Crude T&S(Transportation and Storage), Refining 과정은 원유를 추출하고 수입하여, 정제 과정을 통해 나프타를 생산하는 과정으로 본 연구의 선행 연구인 장재준과 송한호¹⁾의 논문에서 원유 기반 연료의 전과정 분석을 수행하여 구한 값을 참조하였다. 나프타 분해는 정제 시(Fig. 6에서 Naphtha cracking에 해당되는 부분)에 발생하는 온실가스 배출량은 다른 과정에서의 온실가스 배출량과 비교하였을 때 상대적으로 크지 않은 것으로 분석되었다. 반면 수소는 운송 및 충전 중에 고압으로 압축하는 과정이 여러 번 있어, 압축기를 운행하기 위해 필요한 에너지의 전과정으로부터 발생하는 온실가스(Fig. 6에서 H₂ compression에 해당하는 부분)가 전체 과정의 34 %로 상당히 큰 비율을 차지하고 있다.

3.2 다른 차종과의 분석 및 비교

Fig. 7은 수소 기반 FCEV의 전과정적인 온실가스 배출량을 이해하기 위해, 기존의 방식으로 운전되는 차량들의 온실가스 배출량 값과 이번 연구에서

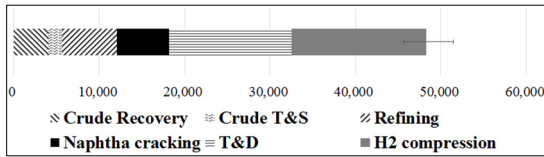


Fig. 6 WTT GHG emissions (g-CO₂ eq./GJ)

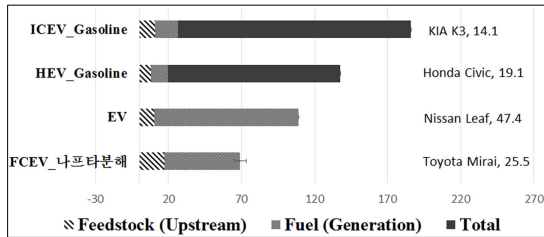


Fig. 7 WTW GHG emissions (g-CO₂ eq./km)

분석한 나프타 분해로 생산된 수소를 사용하는 연료전지 자동차(FCEV)의 온실가스 배출량 값을 비교, 분석한 그래프이다. ICEV(Internal Combustion Engine Vehicle), HEV(Hybrid Engine Vehicle), EV (Electric Vehicle)은 각각 가솔린¹⁾ 엔진 자동차, 하이브리드 엔진 자동차, 전기 자동차⁹⁾를 의미하고, 이에 대한 결과값은 본 연구진이 별도로 수행한 연구 결과를 참고하였다. 본 연구에서 수행한 FCEV 차량의 결과값은 65.0-73.4 g-CO₂eq./km으로, 연료전지 차량이 1 km 주행 시 배출되는 온실가스의 양을 의미한다. 그 외 다른 차량의 결과값은 자체적으로 해당 연료의 전과정 분석을 수행하여 얻은 결과값으로 나타내었다. 비교를 위해 사용된 특정 차량과 연비(km per liter)는 각 차종 그래프의 우측에 나타내었다.¹⁶⁾

후 기

본 연구는 산업핵심기술개발사업(10049010, 100kW 급 고온 연료전지-엔진 하이브리드 발전시스템 엔지니어링 기술 개발)의 일환으로 산업통상자원부의 연구비 지원으로 수행되었습니다.

References

1) 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 Assessment, Vol.20, No.8, pp.1102-1116, 2015.

2) W. J. Choi and H. H. Song, "Well-to-wheel Analysis on Greenhouse Gas Emission and Energy use with Natural Gas in Korea," Int. J. Life Cycle Assessment, Vol.19, No.4, pp.850-860, 2014.

3) ANL(Argonne National Laboratory), GREET1 (Greenhouse Gases, Regulated Emissions, and Energy Use in Transportation) Transportation Fuel Cycle Analysis Model Version 2012 rev2," 2012.

4) Y. J. Kim, H.W.Cho, H.K.Kim and J. B. Ha, "A Trend of LCA Application on the Vehicle," KSAE Fall Conference Proceedings, pp.1129-1134, 1997.

5) T. Ren, M. Patel and K. Blok, "Olefins from Conventional and Heavy Feedstocks: Energy Use in Steam Cracking and Alternative Processes," Energy, Vol.31, No.4, pp.425-451, 2005.

6) K. S. Sim, J. W. Kim, J. D. Kim, G. J. Hwang and H. S. Kim, "Status of Domestic Byproduct Hydrogen and Infrastructure," Trans. of Korea Hydrogen and New Energy Society, Vol.13 No.4, pp.330-338, 2002.

7) IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change), IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, 2006.

8) KNREC, 2014 New & Renewable Energy White Paper, p.171, 2015.

9) W. J. Choi, E. Yoo, E. Seol, M. S. Kim and H. H. Song, "Life Cycle Analysis on Greenhouse Gas Emission of Electric Vehicles in Korea," KSAE Spring Conference Proceedings, p.201, 2016.

10) SPG Corporation, Cartridge Supply of Hydrogen, http://www.spgdream.com/sub/sub03_01.php, 2016.

11) S. H. Jang, Approval of Installing Composite Hydrogen Storage in Refueling Station, <http://www.todayenergy.kr/news/articleView.html?idxno=107565>, 2015.

12) KPIA, Introduction of Petrochemical Industry, http://www.kpia.or.kr/pcind/pcind_02_03.html, 2015.

- 13) KOSHA, 납사분해(NCC) 공정, 석유화학공정
심사기준편람, pp.1-13, 2011.
- 14) EG-TIPS 에너지절감 지식포털, 납사의 접촉
분해를 통한 에틸렌 생산, http://tips.energy.or.kr/new_overConSector/overconsector_view_01.aspx?code_num=MP&ch_code_num=MP01,
- 2016.
- 15) 이락순, 국내 수소제조 및 유통량, 수소에너지
지정보, 33호, 2010.
- 16) KEA, Vehicle Display Fuel Consumption, http://bpms.kemco.or.kr/transport_2012/car/car_choice.aspx?f=system, 2016.