



수소연료전지 차량 충전에서의 압력강하 분석

서효민 · †박병흥*

한국교통대학교 화공생물공학과 석사과정, *한국교통대학교 화공생물공학과 교수
(2022년 9월 29일 접수, 2023년 1월 9일 수정, 2023년 1월 10일 채택)

Pressure Drop Analysis on Filling of Hydrogen Fuel Cell Vehicles

Hyo Min Seo · †Byung Heung Park

Dept. of Chemical and Biological Engineering, Korea National University of
Transportation, Chungbuk 27469, Korea

(Received September 29, 2022; Revised January 9, 2023; Accepted January 10, 2023)

요약

수소연료전지 차량 충전 과정에서, 충전소에서의 공급압력과 차량 내 저장 탱크의 압력 차이에 의해 수소가 흐르게 되고 유량은 압력 차에 의존한다. 따라서 충전 과정에서 발생하는 수소의 압력강하에 대한 고려는 필수적이며 이의 분석을 통해 수소 충전 과정의 효율성을 높일 수 있다.

본 연구에서는 충전라인 중 호스, 노즐/리셉터클, 파이프, 밸브에 대하여 압력강하를 분석하였다. 호스와 파이프는 도관에서의 압력강하로, 노즐/리셉터클은 흐름 노즐 식으로, 밸브는 기체 유량 식으로 계산하였다. 또한 각 구성요소에서 발생하는 압력강하 효과를 종합 분석한 결과 전체 충전라인에서 압력강하에 가장 큰 영향을 주는 요소는 밸브에서의 압력강하임이 밝혀졌다. 이번 연구는 추후 수소 충전을 포함한 수소 유통 해석으로 수소 충전 과정의 모델 개발에 활용될 수 있을 것이다.

Abstract - In the hydrogen filling process, hydrogen flows by the pressure difference between the supply pressure at a filling station and a storage tank in the vehicle, and the flow rate depends on the pressure difference. Therefore, it is essential to consider the pressure drop of hydrogen occurring during the filling process, and the efficiency of the hydrogen filling process can be improved through its analysis.

In this study, the pressure drop was analyzed for a hose, a nozzle/receptacle coupling, a pipe, and a valve in a filling line. The pressure drops through hose and pipe, the nozzle, receptacle coupling, and the valve were calculated by using an equation for a straight conduit, a flow nozzle formula, and a gas flow respectively. In addition, as a result of comprehensive analysis of the pressure drop effect occurring in each component, it was found that the factor that has the greatest influence on the pressure drop in the entire filling line is the pressure drop through the valve. This study can be used to develop a model of the hydrogen filling process by analyzing hydrogen flow including hydrogen filling in the future.

Key words : hydrogen filling, flow analysis, pressure drop, hydrogen fuel cell vehicle

1. 서 론

정부는 2019년 ‘수소경제 활성화 로드맵’을 발표한

후 ‘수소 인프라 및 충전소 구축방안 (2019)’, ‘수소 기술개발 로드맵 (2019)’ 등 다양한 정책을 추진하는 한편 ‘수소 안전관리 종합대책 (2019)’과 ‘수소법 제정 (2020)’ 등과 같은 제도 정비를 통해 에너지 전환기에 서 수소의 역할을 강화하고 있다.

‘수소경제 활성화 로드맵’은 수소 산업 전체에 대

†Corresponding author: b.h.park@ut.ac.kr

Copyright © 2023 by The Korean Institute of Gas

한 장기 국가 계획으로, 수소차와 연료전지를 중심으로 수소의 생산부터 활용에 이르는 전 과정에 대해 2040년까지의 계획을 제시하고 있다. 이 계획이 차질 없이 추진된다면 2040년까지 수소차는 620만 대가 생산되고 수소 충전소는 1,200개소가 구축될 것으로 예상된다. 2021년 말을 기준으로, 국내 등록된 수소 연료 전기차는 약 20,000대이고 구축된 수소 충전소는 140개로 계획했던 것에 비해 다소 적은 수치이기는 하지만 수소 연료 전기차 보급과 수소 충전소 확충의 기조는 앞으로도 유지될 것으로 예상된다.

현재 상용화된 수소 자동차는 고압(~70 MPa)의 수소 기체를 연료로 저장하고 있다. 수소 충전소는 수소 차량의 충전압 보다 높은 압력을 유지하여 수소 자동차에 수소를 완충시킬 수 있도록 설계 건설된다. 연료 공급이 필요한 수소 자동차가 충전소의 수소 공급 라인과 연결되면 충전소의 공급압력과 차량 내 수소 저장 탱크의 압력 차에 의해 충전이 진행된다. 수소 자동차 내 수소 탱크로 수소가 유입되면 한정된 부피 내에 추가된 질량에 의해 밀도가 증가하고 압력 또한 상승하게 된다. 열역학적으로 이 과정은 압축 과정과 동일하기 때문에 기체의 온도는 올라가게 된다. 충전 과정에서 온도 상승이 과도해지면 저장 탱크의 안전성을 저해시킬 수 있어 수소 충전 과정에서 온도 제어는 중요한 기술적 이슈이다.

수소 충전소는 충전 프로토콜(protocol)[1-2]이라는 규격화된 절차에 따라 안전하게 수소를 공급한다. 가장 널리 사용되는 프로토콜인 미국의 SAE J2601[3]은 대기 온도, 용기 용량, 공급 수소의 온도 등을 고려하여 압력 상승률을 제어함으로써 수소 저장 탱크의 온도가 과도하게 상승하는 것을 막고 안전한 온도 범위(Type IV 탱크의 경우 $85\text{ }^\circ\text{C}$) 내에서 수소 자동차를 빠르게 완충시킨다.

수소 충전 프로토콜[1-2]은 충전 과정에 대한 열역학 모델을 기초로 개발되었다. 열역학 모델은 엄밀하게는 열역학 이론에만 한정된 것은 아니며 유체역학, 열전달, 열역학 이론 모두에 기초하고 있으나 일반적으로 단순화하여 열역학 모델로 일컬어지고 있다. 현재까지 다양한 열역학 모델들이 프로토콜에 적용 여부와 무관하게 수소 충전 과정을 이해하고 모사하기 위해 개발되고 있다.

초기 열역학 모델들은 수소 밀도에 초점을 두고 수소 저장 시스템의 성능을 해석하기 위한 연구들이 중심을 이루었다[4-7]. 이후 고압 수소 저장 용기가 개발되고 수소 충전 속도에 관심을 갖게 됨에 따라 수소 충전 시간과 온도 변화 모사를 위한 모델들이 개발되었다[8-13]. 수소 충전 과정을 수치적으로 모사하기 위한 열역학 모델들은 수소 충전 시설[14-16]에서 확보

된 실험 자료들을 바탕으로 평가되었으나 각 연구자들은 자신들의 실험 데이터를 대상으로 열역학 모델 개발을 수행하는 경우가 대부분으로, 아직까지 확고한 일반적인 모델은 제시되고 있지 않고 있다.

수소 충전 과정에서 충전소에서의 공급압력과 수소 차량 내 저장 탱크의 압력 사이의 차이에 의해 수소 기체가 흐르게 되며 수소의 유량은 압력 차에 의존하기 때문에 열역학 모델에서 수소의 압력강하에 대한 고려는 반드시 포함되어야 한다[17]. 또한 수소 공급 라인에 따라 발생하는 압력강하는 수소 충전에 소모되는 에너지와도 밀접한 관련이 있기 때문에 이를 정확하게 계산하는 것은 충전 성능뿐만 아니라 충전소 효율 추산에도 필수적으로 요구된다.

유체 흐름에서 압력강하는 주로 마찰 손실에 의해 발생하고 마찰계수(friction factor)를 이용하여 정량적으로 계산된다. 마찰계수는 유체의 물성 및 흐름 특성과 밀접한 관련이 있으며 도표 또는 상관 관계식으로 제시되지만 열역학 모델은 수치 모델이기 때문에 도표보다는 상관 관계식들이 활용되고 있다. 수소 충전을 설명하고 있는 열역학 모델들은 다양한 형태의 마찰계수 상관 관계식을 사용하고 있다. 그러나, 아직까지 상관 관계식을 대상으로 하는 비교 평가는 수행되지 않았다. 본 연구에서는 실제 충전 조건을 고려한 수소 물성을 사용하여 수소 유동 해석에 필요한 다양한 마찰계수 상관 관계식을 비교 검토하였으며 노즐/리셉터클과 밸브에서 발생하는 압력강하에 대한 영향 또한 분석하였다. 수소 충전 조건에 맞는 적절한 마찰계수 상관 관계식을 선택하는 것은 열역학 모델의 신뢰성과 정확성 제고에 필수적이기 때문에 이에 대한 연구는 추후 수소 충전을 포함한 수소 유동 해석에 활용될 수 있을 것이다.

II. 수소 충전 조건 및 수소 물성

2.1. 수소 충전 조건

수소연료전지 차량의 충전 압력은 일반적으로 35MPa 또는 70MPa이다. 수소연료전지 차량 내 수소의 온도 상승을 제어하기 위해 충전소에서는 미리 수소를 냉각시켜 공급한다. 이를 고려하여 수소 충전소는 충전 압력과 냉각 온도로 구분된다. 수소 충전소가 일정한 온도의 수소를 공급하는 것은 어렵기 때문에 온도에 대해서는 일정 범위를 정하고 주어진 범위 내에서 온도를 제어하도록 규정하고 있다. 최근 발표된 SAE J2601[3]에서는 차량의 탱크 규격을 크기에 따라 4종류로 구분하고 작은 용량부터 A, B, C, D로 표기하였다. 이 프로토콜은 가장 큰 용량인 D에 대해서는 70 MPa의 충전압만을 제공하였으며 A, B, C와 비교하여

더 넓은 수소공급 온도 범위를 제시하였다. 수소 공급 압력은 H로, 공급 온도는 T로 표시하여 Table 1과 같이 표기되어 충전소들이 구분된다.

밀도, 점도와 같이 유동과 마찰에 영향을 미치는 수소의 물성은 온도에 의존한다. 본 연구에서는 Table 1에 나타난 것과 같이 충전소를 구분 짓는 온도 범위의 경계 값들(-40 °C, -33 °C, -26 °C, -17.5 °C)에서 압력강하를 비교하였다.

SAE J2601에서는 탱크의 용량에 무관하게 수소 충전 시 질량 유량을 60 g/s 이하로 제한하고 있다[3]. 이러한 제한 조건은 경량 차량에 대해서는 적절한 조건으로 여겨지고 있으나 대형 차량에서는 긴 충전 시간이 소요되는 제한 조건으로 인식되고 있다. 최근에는 대형 차량의 수소 충전 속도를 증가시키기 위해 밸브 등 관련 부속품의 용량을 향상시키는 연구가 진행되고 있다. 따라서, 본 연구에서는 대용량 충전을 고려하여 60 g/s와 120 g/s를 비교 분석을 위한 질량 유량으로 선정하였다.

2.2. 수소 물성

고압의 기체에서 밀도, 점도 등 열역학 물성을 추산하는 다양한 방법이 제안되었으나[18] 수식이 복잡하여 공정 모사에 직접 사용하기에는 어려운 측면이 있다. 최근 기계학습 방법을 이용하여 223.15 K < T < 373.15 K 및 0.1 MPa < P < 100.1 MPa 범위에서 다양한 수소의 물성을 정확히 계산하는 다항식 형태의 상관 관계식이 제안되었다[19]. 이 상관 관계식은 다음과 같이 표현되며 온도(T)의 단위는 K, 압력(P)의 단위는 MPa를 사용한다.

$$\rho \text{ or } \mu = \sum_{i=0}^5 \sum_{j=0}^{5-i} a_{ij} T^i P^j \tag{1}$$

식(1)은 밀도(ρ)와 점도(μ)에 동일하게 사용되며 다항식의 계수인 a_{ij} 를 달리하여 각 물성값을 계산할 수 있다. 이때 계산되는 점도와 밀도의 단위는 각각 mol/L와 $\mu\text{Pa}\cdot\text{s}$ 이다. 식(1)에 사용되는 계수 값들은 Table 2에 나타내었다.

Table 2. Coefficients of Eq. (1) for hydrogen density and viscosity[13]

	ρ [mol/L]	μ [$\mu\text{Pa}\cdot\text{s}$]
a_{00}	1.22604E+01	4.43973E+00
a_{10}	-1.79281E-01	-2.54194E-02
a_{20}	1.02937E-03	3.88441E-04
a_{30}	-2.90490E-06	-1.46520E-06
a_{40}	4.03358E-09	2.61578E-09
a_{50}	-2.20656E-12	-1.82785E-12
a_{01}	1.46962E+00	2.03992E-01
a_{11}	-6.43678E-03	-1.82222E-03
a_{21}	1.18840E-05	7.19879E-06
a_{31}	-7.23047E-09	-1.36045E-08
a_{41}	-1.29223E-12	9.94388E-12
a_{02}	-1.51406E-02	1.06892E-03
a_{12}	7.48869E-05	-4.12956E-06
a_{22}	-1.31934E-07	9.34365E-09
a_{32}	7.68085E-11	-7.24722E-12
a_{03}	6.59177E-05	-8.83595E-06
a_{13}	-2.62691E-07	5.08461E-09
a_{23}	2.69539E-10	-3.70674E-12
a_{04}	-9.85005E-08	7.12976E-08
a_{14}	2.54693E-10	-2.27399E-11
a_{05}	-2.37334E-11	-1.99217E-10

Table 1. Hydrogen refueling station (HRS) classification by fuel delivery temperature categories per pressure classes [3]

Temperature	Pressure	
	35 MPa	70 MPa
-40 °C to -33 °C	H35-T40	H70-T40 H70-T40D
-33 °C to -26 °C	H35-T30	H70-T30
-26 °C to -17.5 °C	H35-T20	H70-T20
-40 °C to -26 °C	-	H70-T30D
-40 °C to -17.5 °C	-	H70-T20D

III. 수소 충전 압력 강하

수소 충전라인은 충전소에서부터 브레이크 어웨이, 호스, 노즐/리셉터클, 차량 내 파이프, 밸브와 다양한 부속품들로 구성되어 있다. 본 연구에서는 충전라인의 필수 구성품들이며 압력강하의 관심이 되는 호스, 노즐/리셉터클, 파이프, 밸브에 대한 압력강하를 분석하였다.

3.1. 도관에서의 압력강하

충전라인 중 호스와 파이프는 도관 내부 흐름으로 다를 수 있다. 수소는 기체로, 열역학적으로는 압력에 따라 부피가 변화하는 압축성 유체이지만 유동 현상을 다룰 경우 일정 속도 이하로 움직이는 기체는 비압축성 유체로 취급될 수 있다. 이때, 속도는 고정된 값으로 판단되지 않으며 음속에 대한 상대속도로 평가된다. 기체의 음속은 유체의 물성이므로 온도와 압력에 따라 변화한다. 따라서, 수소 충전 과정을 비압축성 유체로 취급할 수 있는 온도, 압력, 유속 조건이 존재하게 된다. 수소 충전 조건에서 유동 분석 결과에 따르면 극단적으로 관의 직경이 작은 경우를 제외하면 수소 충전 유동은 비압축성으로 다를 수 있다[20].

일단 유동이 비압축성으로 분석된다면 유동 형태가 층류인지 난류인지를 구분해야 적절한 마찰계수 관계식을 사용할 수 있으며 압력강하를 정확히 계산할 수 있게 된다. 충전소에서 차량으로 공급되는 수소의 온도는 비교적 안정적으로 유지되는 반면 압력은 큰 범위에서 변화된다. 그렇기 때문에 충전 과정에서 수소의 밀도가 지속적으로 변화하고 층류와 난류를 구분하는 지표인 레이놀즈수(Re) 또한 변화하게 된다. 밀도와 함께 Re에 고려되는 점도 역시 압력의 함수이므로 이들의 변화를 동시에 고려해야 유동 형태를 판단할 수 있다. 최근 이러한 흐름 분석에 대한 연구가 진행되었으며 충전 온도와 압력 범위에서 수소의 유동은 난류인 것으로 밝혀졌다[20].

원형 도관 내의 압력강하(ΔP)는 마찰계수(f_f)를 포함하는 다음 식으로부터 계산될 수 있다.

$$\Delta P = 2f_f \rho \frac{L}{D} v^2 = 2f_f \frac{L}{D} \frac{G^2}{\rho} \quad (2)$$

위 식에서 ρ , v , G 는 각각 유체의 밀도, 유동의 선속도, 질량플럭스(mass flux)이고 도관의 길이와 직경은 각각 L 과 D 로 표기되었다.

식(2)에서 마찰계수 f_f 는 Fanning의 마찰계수로 Darcy의 마찰계수 f_D 와 구분해야 하며 마찰계수 상관관계식을 사용할 때는 어떤 마찰계수에 대한 표현식

인지를 확인한 후 사용해야 한다.

난류 흐름에서 마찰계수는 일반적으로 Re 및 관의 거칠기와 직경의 비(e/D)로 정의되는 상대 거칠기(relative roughness)의 함수로 표현된다. 그러나 매끄러운 관을 통해 유체가 흐를 때에는 상대 거칠기 개념이 없기 때문에 단순히 Re의 함수로 마찰계수를 구할 수 있다.

Table 3은 난류 유동에서 마찰계수를 추산하는 10 종류의 다양한 상관 관계식을 정리하여 보여주고 있다. 이 중 상대 거칠기가 포함되지 않은 Nikuradse, Blasius, Koo 식은 매끄러운 관에서만 적용 가능한 식들이다.

Table 3. Friction factor correlation equations for turbulent flow

Name (Id.)	Equation
Nikuradse (NK)	$\frac{1}{\sqrt{f_f}} = 4.0 \log_{10} \{Re \sqrt{f_f}\} - 0.40$
Blasius (BL)	$f_f = 0.0791 Re^{-1/4}$
Koo (KO)	$f_f = 0.0014 + \frac{0.125}{Re^{0.32}}$
Colebrook k (CB)	$\frac{1}{\sqrt{f_f}} = -4.01 \log_{10} \left[\frac{e}{3.7D} + \frac{1.255}{Re \sqrt{f_f}} \right]$
Colebrook k-White (CW)	$\frac{1}{\sqrt{f_f}} = -4.01 \log_{10} \left(\frac{e}{D} + \frac{4.67}{Re \sqrt{f_f}} \right) + 2.28$
Haaland (HL)	$\frac{1}{\sqrt{f_f}} = -3.61 \log_{10} \left[\frac{6.9}{Re} + \left(\frac{e}{3.7D} \right)^{10/9} \right]$
Swamee-Jain (SJ)	$f_f = \frac{0.0625}{\left[\log_{10} \left(\frac{e/D}{3.7} + \frac{5.74}{Re^{0.9}} \right) \right]^2}$
Shacham (SC)	$f_f = \frac{1}{16} \left[\log_{10} \left\{ \frac{e/D}{3.7} - \frac{5.02}{Re} \log_{10} \left(\frac{e/D}{3.7} + \frac{14.5}{Re} \right) \right\} \right]^{-2}$
Chen (CH)	$\frac{1}{\sqrt{f_f}} = -4 \log_{10} \left[\frac{e}{3.7D} - \frac{5.02}{Re} \log_{10} A \right],$ $A = \frac{e}{3.7D} + \left(\frac{6.7}{Re} \right)^{0.9}$
Churchill (CC)	$f_f = 2 \left[\left(\frac{8}{Re} \right)^{12} + \frac{1}{(A+B)^{1.5}} \right]^{1/12}$ $A = (2.457 \ln C)^{16}, B = \left(\frac{37530}{Re} \right)^{16},$ $C = \left[\left(\frac{7}{Re} \right)^{0.9} + 0.27 \frac{e}{D} \right]^{-1}$

마찰계수를 추산하기 위해 요구되는 Re 는 다음과 같이 정의된다.

$$Re = \frac{Dv\rho}{\mu} = \frac{DG}{\mu} \quad (2)$$

식(2)에서 보인 것과 같이 Re 는 유체의 점도 μ 에 의존하고 수소의 점도는 온도와 압력에 따라 변화하므로 최종적으로 마찰계수가 온도와 압력에 의존하게 된다.

Re 와 마찰계수를 계산하기 위해서는 관의 직경이 필요하다. 본 연구에서는 수소 충전소에 사용될 수 있는 표준강관에 대해 계산을 수행하여 관의 직경에 따른 마찰계수에 대한 영향을 검토하였다. Table 4는 수소 유동이 발생하는 도관에서의 마찰계수 계산에 고려된 조건들을 정리하여 보여주고 있다.

Fig. 1은 질량유량 60 g/s, 온도 -26°C 직경 6.83 mm 조건에서 Table 2에 제시된 10종류의 상관 관계식으로 부터 얻은 마찰계수를 비교하여 보여주고 있다.

Fig. 1에서 보인 것과 같이 Blasius 식을 제외하면 9종류의 상관 관계식이 유사한 값을 나타내고 있다. 압력 증가에 따라 마찰계수 값이 $2.7 \times 10^{-3} \sim 2.9 \times 10^{-3}$ 까지 약 0.2×10^{-3} 정도 증가하고 이는 압력 증가에 의하여 수소의 점도가 감소하고 이로 인해 레이놀즈수는 증가하기 때문이다.

실제 수소 충전에서 필요한 정보는 관의 길이에 따른 압력강하이기 때문에 단위 길이당 압력강하가 중요한 고려사항이다. Fig. 1의 조건에서의 단위 길이 당 압력강하($\Delta P/D$)는 Fig. 2에 나타내었다. Blasius 식을 제외한 9개 식은 Fig. 2로는 비교하기 어려울 만큼 차이가 미세하다. 따라서 본 연구에서는 Blasius 식을 제외한 9개의 식 중에서 상대 거칠기(e/D)를 포함하고

Table 4. Conditions for friction factor estimation

Item	Values	Remark
Mass flow rate	60 g/s, 120 g/s	Light and heavy duty fueling
Temperature	-40°C, -33°C, -26°C, -17.5°C	T40, T30, T20, T10,
Diameter	6.83mm, 9.25mm, 12.52mm, 15.80mm	1/8, 1/4, 3/8, 1/2 inch Sch. 40
	5.46mm, 7.67mm, 10.74mm, 13.87mm	1/8, 1/4, 3/8, 1/2 inch Sch. 80
Pressure	Increasing up to 90 MPa	

마찰계수가 양의 함수로 나타나 계산이 편리한 식 중에서 Chen 식을 선정하고, 이의 압력 및 질량 유량에 따른 압력강하에 대하여 비교하였다.

Fig. 3 (a)와 (b)는 각각 Chen 식의 온도 -40°C와 -17.5°C에서의 압력 및 질량 유량에 따른 단위 길이당 압력강하 그래프이다. Fig. 3에 압력이 매우 낮을 경우 압력강하가 매우 높게 나타난다. 그러나, 압력이 낮을 경우 떨어질 수 있는 압력에 한계가 있으므로 실제로는 이러한 압력강하는 나타날 수 없으며 수식적으로만 계산된 수치들이다. 온도, 압력, 질량 유량이 높을 수록 단위 길이당 압력강하가 증가하는 것을 Fig.3을 통해 확인할 수 있다.

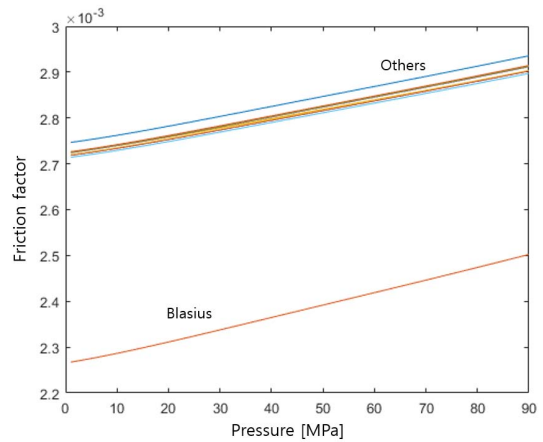


Fig. 1. Friction factor with H_2 pressure at -26°C, 60g/s, 6.83mm

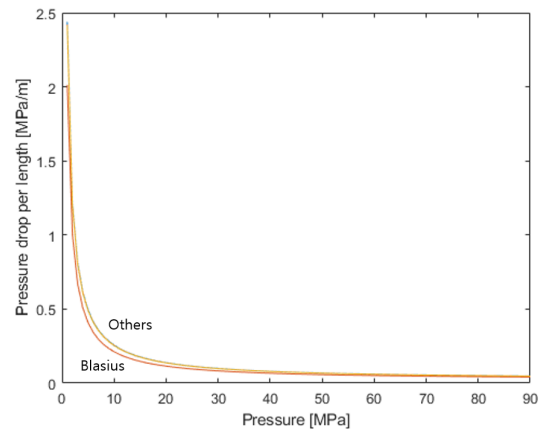
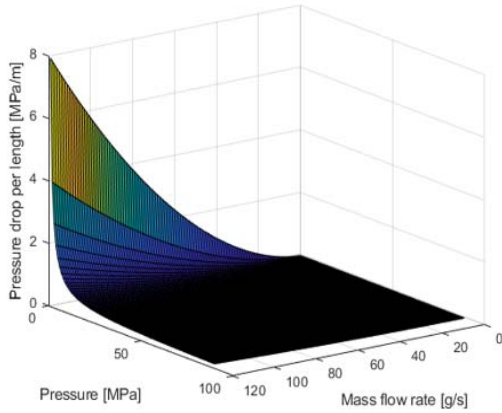
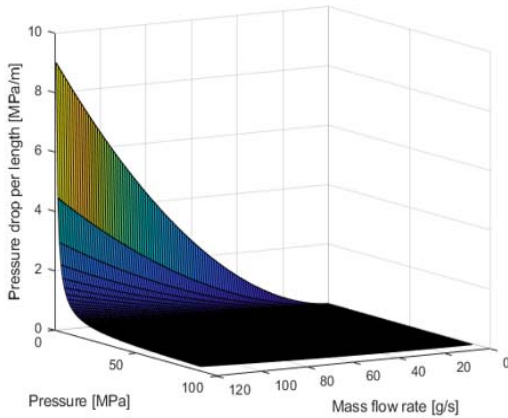


Fig. 2. Pressure drop per length with H_2 pressure at -26°C, 60g/s, 6.83mm



(a)



(b)

Fig. 3. Pressure drop per length with H_2 pressure and mass flow rate at (a) -40°C and (b) -17.5°C by Chen eq.

직경에 따른 단위 길이 당 압력강하는 도관의 직경이 단위 길이 당 압력강하에 얼마나 영향을 주는지를 나타낸다. 질량 유량 60 g/s, 온도 -26°C 일 때의 직경에 따른 단위 길이당 압력강하를 Fig. 4에 나타내었다. Fig. 4를 보면 도관의 직경이 작을 때 초기압력에서의 단위 길이당 압력강하가 비교적 크다. 실제 수소 충전 시 초기압력은 5MPa 부근인 점을 생각하면 Fig. 4의 초기압력에서의 단위 길이당 압력강하는 실제 충전과는 관련이 없는 수치이지만 전반적으로 직경이 작을수록 단위 길이당 압력강하가 크다는 것은 수소 충전 시 고려해야 할 사항이다.

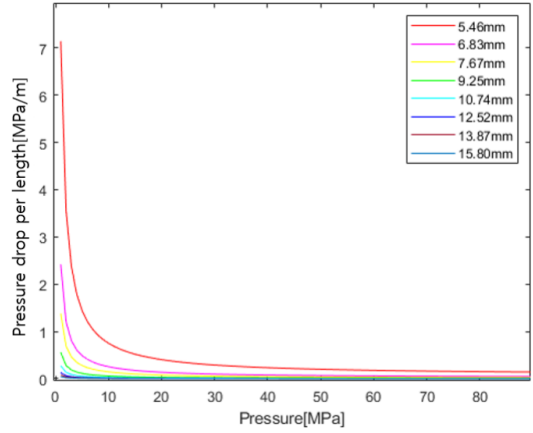


Fig. 4. Pressure drop per length with H_2 pressure at various pipe diameters by Chen eq.

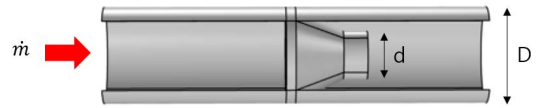


Fig. 5. internal nozzle diameter(d)[m] and internal hose diameter(D)[m].

3.2. 노즐/리셉터클에서의 압력강하

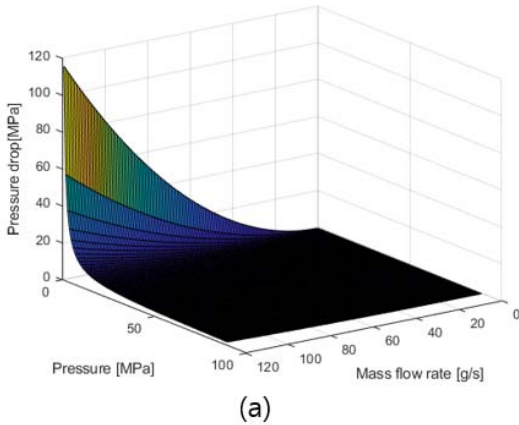
충전라인 중 노즐은 디스펜서와 리셉터클을 연결 해주며 압력을 이용하여 차량으로 연료를 공급한다. 리셉터클은 수소 충전소 측의 충전 노즐과 차량 또는 저장 시스템을 연결해주는 장치로서 수소 충전 주입구라고도 한다. 상용 수소 충전소에서는 노즐과 리셉터클을 결합하여 충전소와 차량의 수소 라인을 연결 또는 분리할 수 있다.

Fig. 5는 노즐과 리셉터클의 연결을 흐름노즐(flow nozzle)로 나타낸 것이다. Fig. 5에서 d 와 D 는 각각 작동 조건에서의 내부 노즐 직경과 내부 호스 직경이다. 노즐과 리셉터클이 결합된 상태에서의 압력강하는 식(3)의 흐름노즐 식을 이용하여 구할 수 있다.

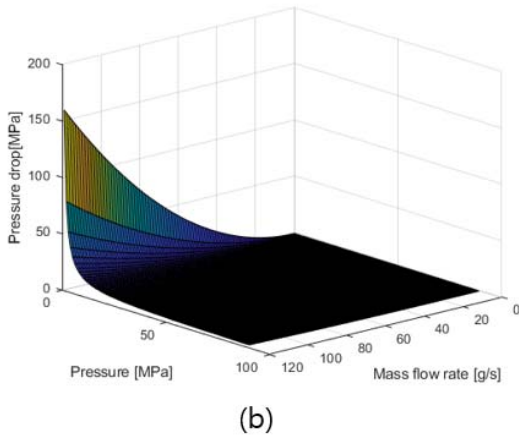
$$\dot{m} = \frac{C}{\sqrt{1-\beta^2}} \epsilon \frac{\pi}{4} d^2 \sqrt{2\rho\Delta P} \quad (3)$$

위의 식 (3)에서 \dot{m} 은 질량 유량, C 는 계수 인자, β 는 노즐의 직경과 호스의 직경의 비(d/D), ϵ 는 팽창 계수, ρ 와 ΔP 는 각각 밀도와 압력강하이다.

Fig. 6에서 노즐의 직경이 3 mm이고, 계수 인자 0.95, 팽창계수가 1.0, 온도 -26°C , 질량 유량 60 g/s라는



(a)



(b)

Fig. 6. Pressure drop with H_2 pressure and mass flow rate at (a) 5.46 mm and (b) 15.80 mm.

공통 조건에서 호스의 직경을 다르게 하여 그에 따른 압력강하를 비교하였다. 식 (3)에서 내부 호스의 직경이 커질수록 β 의 크기가 작아지고 일정한 질량 유량 조건에서 ΔP 와 $1 - \beta^2$ 는 비례관계이므로 압력강하는 커진다는 것을 알 수 있다. 즉 호스 직경이 커질수록 압력강하는 증가한다.

Fig. 7은 내부 노즐의 지름과 계수 인자, 팽창 계수, 질량 유량을 Fig. 6와 동일한 조건으로 하고 호스의 직경이 6.83 mm일 때 각 온도 -40°C , -33°C , -26°C , -17.5°C 에서의 압력강하이다. Fig. 7에서 최종압력인 90MPa에서의 최대 압력강하인 -17.5°C 에서의 압력강하와 최소 압력강하인 -40°C 에서의 압력강하의 차이는 약 0.034로 매우 낮다. 온도가 낮을수록 압력강하가 작아

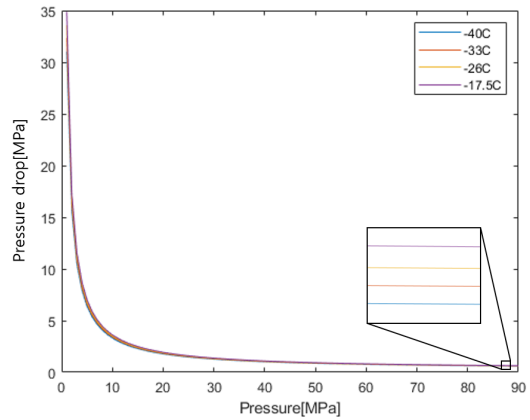


Fig. 7. Pressure drop with H_2 pressure at various Temperatures.

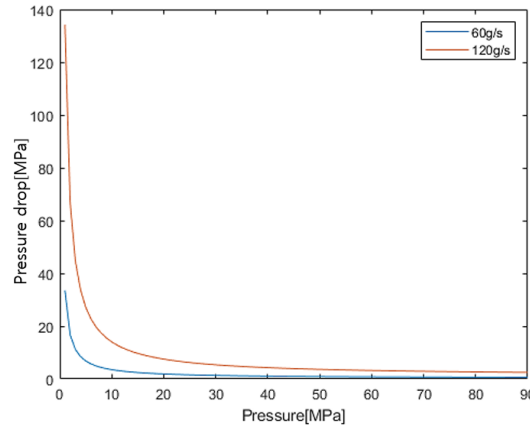


Fig. 8. Pressure drop with H_2 pressure at 60 g/s, 120 g/s.

지지만 온도에 따른 차이는 거의 없고 이는 수소공급 시 노즐/리셉터클에서 온도의 영향이 크지 않은 것으로 분석되었다.

대용량 충전 시 질량 유량을 SAE J2601의 제한 조건인 60 g/s로 제한하면 충전에 오랜 시간이 걸린다. 대용량 차량의 충전 효율을 높이기 위하여 이번 연구에서는 질량 유량을 60 g/s와 120 g/s에서 비교 분석하였다. Fig. 8은 호스 지름 6.83 mm, 온도 -26°C , 노즐 지름 3mm, 계수 인자 0.95, 팽창 계수 1.0의 조건에서 질량 유량에 대한 압력-길이에 따른 압력강하 그래프이다.

Fig. 8에서 질량 유량이 120 g/s일 때 60 g/s에서보다

초기 압력강하가 훨씬 크다. 이를 통해 질량 유량이 클수록 압력강하가 커지는 것을 확인할 수 있다.

3.3. 밸브에서의 압력강하

수소 충전에서 밸브는 수소 기체를 공급 및 차단하여 수소의 공급압력을 제어하는 기능을 한다. 고압 기체를 통하여 연료를 공급하는 수소 충전에서는 압력 및 유량을 제어하는 밸브의 안정성 확보가 중요하다.

밸브의 압력강하는 식 (4)의 표준 조건에서의 기체 유량 식을 통해 구할 수 있다[21].

$$Q_g = \frac{4140 \times C_v}{\sqrt{G_g(273+t)}} \sqrt{(P_1 - P_2)P_2} \quad (4)$$

위의 식에서 Q_g 는 표준 조건에서의 기체 유량, C_v 는

정적 비열, G_g 는 가스 상대 밀도, P_1 과 P_2 는 각각 1차 절대압력 및 2차 절대압력, t 는 섭씨온도이다. 식 (4)는 $P_2 > P_1/2$ 일 때만 유효하고, 2차 절대압력이 1차 절대압력의 절반 이상 낮아지며 흐름이 압력차에 무관한 초크(choke) 현상이 발생한다.

Fig. 9는 2차 압력을 각각 (a) 15MPa 및 (b) 10MPa로 하였을 때의 각 온도 조건을 질량 유량에 따른 압력강하에 대하여 나타낸 것이다.

Fig. 9에서 수평선은 2차 압력이 1차 압력의 절반 이상으로 떨어져 유체의 흐름이 초크되는 지점이다. 따라서 Fig. 9에서 수평선 위의 압력강하에서의 그래프는 식 (4)의 적용 범위를 넘어서는 영역이다. Fig. 9를 보면 (a)와 (b) 모두 온도가 높을수록 낮은 질량 유량을 갖는 것을 볼 수 있다. 또한 압력강하가 15MPa일 땐 질량 유량이 대략 60 g/s일 때까지 유체의 흐름이 있고, 압력강하가 10MPa일 땐 질량 유량이 약 120

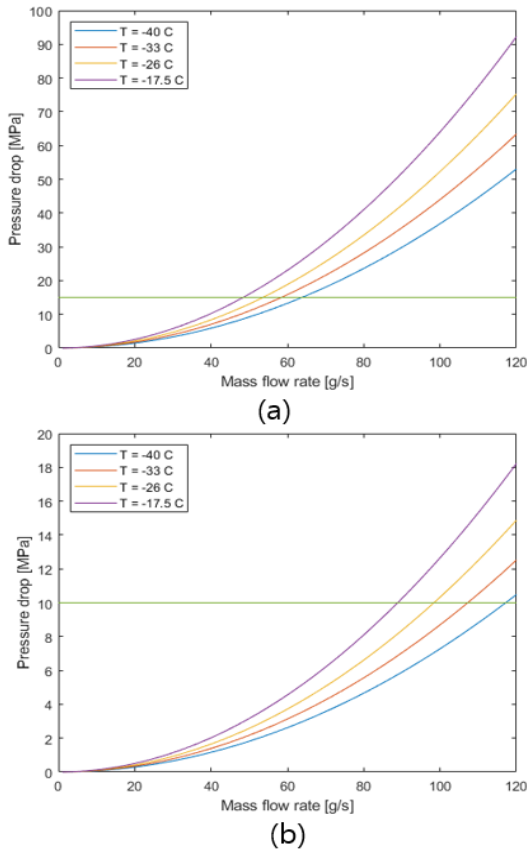


Fig. 9. Pressure drop through valve at (a) 15MPa, (b) 10MPa

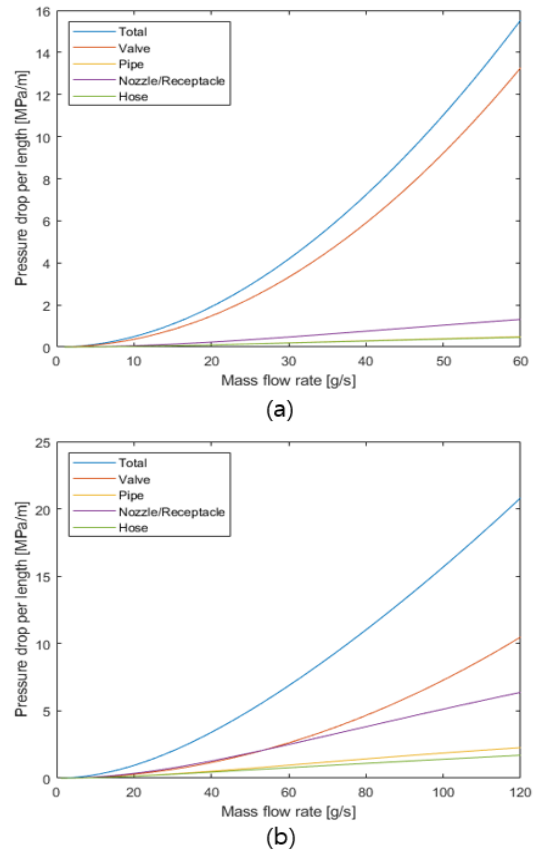


Fig. 10. Pressure drop through refueling line at (a) 15MPa, (b) 10MPa

g/s까지 유체의 흐름이 있다. 이를 통해, 온도가 낮고, 압력이 낮을수록 더 많은 질량의 유체를 보낼 수 있음을 알 수 있다.

3.4. 전체 충전라인에서의 압력강하

수소 충전은 디스펜서로부터 호스, 파이프를 지나 노즐 및 리셉터클을 연결하여 차량으로 연료를 공급한다. 여기에서는 앞에서 다루었던 도관, 노즐/리셉터클, 밸브 각각의 요소에서의 압력강하가 전체 충전라인에 미치는 영향에 대하여 비교하고 전체 충전라인에서의 압력강하에 대하여 분석하였다.

Fig. 10은 호스 및 파이프의 길이가 5 m이고, 노즐이 3 mm, 계수 인자가 0.95, 팽창 계수가 1일 때 충전라인 각각의 압력강하와 전체 충전라인에서의 압력강하를 2차 절대압력이 각각 15MPa, 10MPa일 때와 비교한 것이다. 질량 유량은 밸브에서의 기체 유량식 (4)의 조건(choked flow)을 고려하여 15MPa에서는 60 g/s, 10MPa에서는 120 g/s까지로 하였다. 그 결과, Fig. 10에 전체 충전라인의 압력강하에 밸브가 가장 큰 영향을 미치고 호스 및 파이프는 다소 영향이 적은 것이 밝혀졌다.

IV. 결론

본 연구에서는 충전라인의 필수 구성품 중에서 압력강하의 관심이 되는 호스, 노즐/리셉터클, 파이프, 밸브에 대한 압력강하를 분석하였다. 호스와 파이프는 도관 내부 흐름으로 다루고 마찰계수를 포함하는 단위길이당 압력강하 식으로 계산하였다. 그 결과 온도, 압력, 질량 유량이 높고 직경이 작을수록 단위길이당 압력강하가 크다는 것을 확인하였다. 노즐/리셉터클은 흐름 노즐 식으로 구할 수 있고 그 결과, 일정한 질량 유량 조건에서 호스의 직경이 커질수록 압력강하는 증가하고, 온도가 낮을수록 압력강하가 작아지지만 영향이 크지 않은 것으로 분석되었다. 밸브의 압력강하는 기체 유량 식으로 계산하였는데 압력강하가 15MPa 일 땐 질량 유량이 60 g/s 이상일 때 초크되고, 10MPa일 땐 질량 유량이 120 g/s 부근일 때 초크된다. 이를 통해 압력이 낮을수록 더 많은 질량의 유체를 보낼 수 있음을 알 수 있었다. 또한 각 구성요소에서 발생하는 압력강하 효과를 종합 분석한 결과 전체 충전라인에서 압력강하에 가장 큰 영향을 주는 요소는 밸브에서의 압력강하임이 밝혀졌다.

감사의 글

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지

기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구과제 (No. 20203010040010)로 지원에 감사드립니다.

사용기호

a_{ij}	: Polynomial coefficients
C	: Coefficient factor
C_v	: Static volume specific heat
d	: Internal orifice diameter under operating conditions [m]
D	: Diameter of duct [m]
f_f	: Friction factor
G	: Mass flux [$g/m^2 \cdot s$]
G_g	: Gas relative density
L	: Length of duct [m]
\dot{m}	: Mass flow rate [g/s]
P	: Pressure [MPa]
P_1	: Primary absolute pressure [MPa]
P_2	: Secondary absolute pressure [MPa]
ΔP	: Pressure drop [MPa]
Q_g	: Gas flow rate in standard conditions [m^3/h]
Re	: Reynolds number
t	: Fluid temperature [$^{\circ}C$]
T	: Temperature [K]
v	: Linear velocity of flow [m/s]

그리스 문자

β	: Diameter ratio of nozzle diameter to hose diameter
ϵ	: Expansion coefficient
μ	: Viscosity [$\mu Pa \cdot s$]
ρ	: Density of fluid [mol/L]

REFERENCES

- [1] Chae, C. K., Kang, S. Y., Kim, H. N., Chae, S. B. and Kim, Y. G., "Evaluation of Influential Factors of Hydrogen Fueling Protocol by Modeling and Simulation", *Trans. of the Korean hydrogen and new energy society*, 30(6), 513-522, (2019)
- [2] Chae, C. K., Kim, Y. G. and Chae, S. B., "An Analysis of the Effect of Pressure Ramp Rate on the Major Parameters of the Standard Hydrogen Fueling Protocol", *KIGAS*, 24(1), 23-32, (2020)
- [3] Society of Automotive Engineers (SAE), "Fueling protocols for light duty gaseous hydrogen surface

- vehicles (Standard J2601_202005)", (2020)
- [4] Xu, G. D., Pareek, K. P., Li, N., and Cheng, H. S., "High capacity hydrogen storage at room temperature via physisorption in a coordinatively unsaturated iron complex", *Int. J. Hydrogen Energy*, 40, 16330-16337, (2015)
- [5] Pareek, K. P., Rohan, R. P. S., Chen, Z. X., Zhao, D., and Cheng, H. S., "Ambient temperature hydrogen storage in porous materials with exposed metal sites", *Int. J. Hydrogen Energy*, 42, 6801-6809, (2017)
- [6] Hua, T. Q., Ahluwalia, R. K., Peng, J.K., Kromer, M., Lasher, S., McKenney, K., Law, K., and Sinha, J., "Technical assessment of compressed hydrogen storage tank systems for automotive applications", *Int. J. Hydrogen Energy*, 36, 3037-3049, (2011)
- [7] Ahluwalia, R. K., Hua, T. Q., and Peng, J. K., "On-board and Off-board performance of hydrogen storage options for light-duty vehicles", *Int. J. Hydrogen Energy*, 37, 2891-2910, (2012)
- [8] He, C. M., Yu, R., Sun, H. R., and Chen, Z. L., "Lightweight multilayer composite structure for hydrogen storage tank", *Int. J. Hydrogen Energy*, 41, 15812-15816, (2016)
- [9] Li, M. X. O., Bai, Y. F., Zhang, C. Z., Song, Y. X., Jiang, S. F., Grouset, D. D., and Zhang, M. J., "Review on the research of hydrogen storage system fast refueling in fuel cell vehicle", *Int. J. Hydrogen Energy*, 44, 10677-10693, (2019)
- [10] Maus, S., Hapke, J., Ranong, C. N., Wuchner, E., Friedlmeier, G., and Wenger, D., "Filling procedure for vehicles with compressed hydrogen tanks", *Int. J. Hydrogen Energy*, 33, 4612-4621, (2008)
- [11] Lee, H. W., Oh, D. H. and Seo, Y. J., "Prediction of Changes in Filling Time and Temperature of Hydrogen Tank According to SOC of Hydrogen", *Trans. of the Korean hydrogen and new energy society*, 31(4), 345-350, (2020)
- [12] Park, B. H., "Simulation of Temperature Behavior in Hydrogen Tank During Refueling Using Cubic Equations of State", *Trans. of the Korean hydrogen and new energy society*, 30(5), 385-394, (2019)
- [13] Noh, S. G., "Estimation of Hydrogen Filling Time Using a Dynamic Modeling", *Trans. of the Korean hydrogen and new energy society*, 32(3), 189-195, (2021)
- [14] Cebolla, R.O., Acosta, B., Moretto, P., and Miguel, N. D., "GASTEF: The high pressure gas tank testing facility of the European commission joint research centre", *Int. J. Hydrogen Energy*, 44, 8601-8614, (2019).
- [15] Cebolla, R.O., Acosta, B., Moretto, P., Frischauf, N., Harskamp, F., Bonato, C., and Baraldi, D., "Hydrogen tank first filling experiments at the JRC-IET GasTeF facility", *Int. J. Hydrogen Energy*, 39, 6261-6267, (2014)
- [16] Acosta, B., Moretto, P., Miguel, N. D., Ortiz, R., Harskamp, F., and Bonato, C., "JRC reference data from experiments of on-board hydrogen tanks fast filling", *Int. J. Hydrogen Energy*, 39, 20531-20537, (2014)
- [17] Baek, J. U., Gwak, G. M., Kim, N. Y., Cho, Y. M. and Lyu, S., K., "Study on the Optimal Design of the Nozzle Shape of the 700 bar Hydrogen Refueling Nozzle for Hydrogen Electric Vehicles", *KSMPE*, 21(7), 28-33, (2022)
- [18] Poling, B. E., Prausnitz, J. M., and O'connell, J. P., *The Properties of Gases and Liquids*, 4th ed., McGraw-Hill, New York, (2001)
- [19] Park, B. H. and Chae, C. K., "Development of Correlation Equations on Hydrogen Properties for Hydrogen Refueling Process by Machine Learning Approach", *Int. J. Hydrogen Energy*, 47, 4185-4195, (2022)
- [20] Park, B. H. and Lee, D. H., "Flow Analysis and Development of a Model to Simulate Transient Temperature of Hydrogen from Pre-cooler to On-board Storage Tank during Hydrogen Refueling", *Korean J. Chem. Eng.*, 39, 902-912, (2022)
- [21] Nam, C. W., Kim, R. M. and Kim, H. H., "A Numerical Study Of Flow Control Valve to Flow Characteristics by Pressure Difference for Hydrogen Station", *KIGAS*, 25(2), 22-33, (2021)