Trans. of Korean Hydrogen and New Energy Society, Vol. 30, No. 6, 2019, pp. 513~522
DOI: https://doi.org/10.7316/KHNES.2019.30.6.513

KHNES
pISSN 1738-7264 • eISSN 2288-7407

모델링 및 시뮬레이션을 통한 수소충전 프로토콜 영향인자 평가

채충근[1,†] · 강수연[1] · 김한나[1] · 채승빈[2] · 김용규[3]

[1](주)미래기준연구소, [2]광운대학교 화학공학과, [3]아주대학교 환경공학과

Evaluation of Influential Factors of Hydrogen Fueling Protocol by Modeling and Simulation

CHUNGKEUN CHAE[1,†], SUYOUN KANG[1], HANNA KIM[1], SEUNGBEEN CHAE[2], YONGGYU KIM[3]

[1]Mirae EHS-Code Research Institute, JnK Digital Tower 509, 111 Digital-ro 26-gil, Guro-gu, Seoul 08390, Korea
[2]Chemical Engineering, Kwangwoon University, 20 Gwangun-ro, Nowon-gu, Seoul 01897, Korea
[3]Environmental Engineering, Ajou University, 206 World cup-ro, Yeongtong-gu, Suwon 16499, Korea

[†]Corresponding author : chae@meri.co.kr

Received 18 November, 2019
Revised 17 December, 2019
Accepted 30 December, 2019

Abstract >> It is not easy to refuel quickly and safely with 70 MPa hydrogen. This is because the temperature in the vehicle tank rises sharply due to Joule-Thomson effect, etc. Thus protocols such as SAE J2601 in the United States and JPEC-S 0003 in Japan were established. However, they have the problem of over-complexity and lack of versatility by setting the preconditions for hot and cold cases and introducing a number of look-up tables. This study was conducted with the ultimate goal of developing new protocols based on complete real-time communication. Thermodynamic models were made and programs were developed for hydrogen refueling simulations. Simulation results confirmed that there are five parameters in the influencing factors of the hydrogen refueling protocol.

Key words : Hydrogen refueling protocol(수소충전 프로토콜), Thermodynamic model(열역학적 모델), Hydrogen refueling simulation(수소충전 시뮬레이션), Hydrogen tank temperature(수소탱크 온도), Hydrogen tank pressure(수소 탱크 압력)

1. 서 론

산업통자원부는 지난 1월 17일자 보도자료를 통해 2040년까지 수소충전소 1,200개소, 수소택시 8만 대, 수소버스 4만 대, 수소트럭 3만 대를 보급하겠다고 발표하였다. 국내 수소자동차 보급 대수와 충전소 설치 수를 급격하게 늘린다는 계획이다.

수소자동차의 장점은 고효율성, 배출가스 제로(zero), 신재생에너지 활용 가능성에 있다. 그러나 수소자동차의 보급을 늘이기 위해서는 '전통적 자동차 대비 경쟁력 확보'라는 전제조건이 충족되어야 한다. 승용차를 기준으로 할 때 충전 편의 확보를 위하여 3분 내외에 충전이 가능해야 하고, 주행거리 확보를 위해 완충(complete fill)이 가능해야 한다. 그러나 수

2019 The Korean Hydrogen and New Energy Society. All rights reserved.

소의 경우에는 초고압(70 MPa) 충전에 따른 온도 상승 때문에 충전시간 단축이 쉽지 않다. 팽창 시 온도가 증가하는 줄-톰슨효과(Joule-Thomson effect)와 압축에 의한 열(heat of compression) 발생 때문이다[1]. 최단 시간에 안전하게 완충하는 목표를 달성하기 위해서는 특별한 기술이 필요하다. 이 특별히 요구되는 기술을 규격화한 것이 충전 프로토콜(fueling protocol)이다[2].

미국의 Society of Automotive Engineers (SAE)에서는 2010년 세계 최초로 수소충전 프로토콜을 기준화하였다. 뒤를 이어 일본은 이 SAE J2601을 기반으로 하는 JPEC-S 0003 (2012) (圧縮水素充塡技術基準)을 2012년에 제정하였다. 한국도 정부 주도로 수소충전 프로토콜의 제도화를 추진하고 있다.

미국과 일본에서 운영 중인 수소충전 프로토콜의 특징은 충전종료 시 자동차용기 내 가스의 온도가 가장 높게 올라가는 hot case와 가장 낮게 올라가는 cold case를 설정하고 있다는 것이다. 그래서 프로토콜은 이 2가지 최악의 조건 범위에 들어가는 수소자동차에만 적용할 수 있다. 충전에 영향을 미치는 다수의 매개변수(대기온도, 압력상승속도, 용기용량, 공급가스온도, 용기잔압 등)별로 수많은 룩업테이블(look-up table) 중 하나를 선택해서 적용해야 한다. 요컨대 SAE J2601과 JPEC-S 0003은 많은 제약조건 때문에 너무 복잡하고 적용범위도 제한적이다.

충전소와 자동차 사이에 통신의 완벽성이 보장된다면, 충전기에서 온도와 압력을 실시간으로 감시·예측하면서 충전을 진행할 수 있다. Hot case와 cold case라는 전제조건도 필요 없게 되고, 수많은 룩업테이블(look-up table)도 필요 없게 된다. 이 연구의 최종 목표는 심플하고 범용성 있는 새로운 충전 프로토콜을 개발하는 것이다. 이를 위하여 이 연구에서는 수소 충전 시뮬레이션을 할 수 있는 독자적인 프로그램을 개발하였다. 그리고 첫 단계로 수소충전에 영향을 미치는 인자들의 탐색에 이 결과물을 적용해 보았다.

2. 수소충전의 열역학적 모델링

2.1 충전유량의 계산

관로를 흐르는 가스의 압력손실 $\triangle P$는 밸브의 경우 식 (1), 필터 및 질량유량계의 경우 식 (2), 배관 및 튜브의 경우 식 (3)에 의해 각각 계산할 수 있다[3].

$$\triangle P = \frac{1}{\rho_w k_v^2}\rho \dot{V}^2 \tag{1}$$

$$\triangle P = 0.5 k_p \rho \dot{V}^2 \tag{2}$$

$$\triangle P = (f\frac{L}{d} + k_t)\frac{\rho \dot{V}^2}{2A^2} \tag{3}$$

위 식에서 P는 가스의 압력, ρ_w는 물의 밀도, ρ는 가스의 밀도, V는 가스의 체적유속 k_v는 밸브의 압력손실계수, k_p는 필터 및 질량유량계의 압력손실계수, f는 마찰계수, k_t는 튜브의 압력손실계수를 나타낸다.

식 (1), 식 (2) 및 식 (3)은 적용 시의 편의를 위해 식 (4)와 같이 하나의 식으로 통합할 수 있다.

$$\triangle P = K\rho \dot{V}^2 = K\frac{\dot{m}}{\rho} \tag{4}$$

식 (1) 및 식 (2) 의 경우 K는 각각 $1/(\rho_w k_v^2)$ 및 $k_p/2$이므로 상수이다. 그러나 식 (3)의 경우 K는 $(fL/d+k)/(2A^2)$ 이며 f가 레이놀즈수의 함수이기 때문에 상수로 볼 수 없다. 그러나 난류가 형성되는 유동의 경우에는 이 값도 상수가 된다. 따라서 식 (4)로 표현하는 것이 가능하게 된다. 수소충전소의 충전라인은 튜브, 밸브, 노즐, 리셉터클 등으로 구성되어 있다. 그래서 이들을 망라하는 충전라인의 압력 손실 값은 일반적으로 식 (4)와 같이 표현된다[3-5].

SAE J2601에서는 충전종료 후 수소 자동차용기 내부 온도가 가장 높게 올라가는 경우를 hot case, 온도가 가장 낮게 올라가는 경우를 cold case로 정의하고, 각 case에 대한 충전라인 구성품의 사양을 제시하고 있다. 그 일환으로 기준 충전조건에서 충전라인의 압력 손실값도 제시하고 있는데, 이를 이용하여 압력손실계수를 계산할 수 있고, 식 (5)에 의하여 압력상승속도에 대응하는 수소의 유량을 계산할 수 있다.

$$\dot{m} = \sqrt{\frac{(aprr \times \Delta t) + P_{ba} - P_{\tan k}}{\frac{K_{st}}{\rho_{st}} + \frac{K_{ve}}{\rho_{ve}}}} \quad (5)$$

식 (5)에서 $\dot{m}$은 질량유량, $aprr \times \Delta t$은 압력상승속도, P_{ba}는 브레이크 어웨이(break away) 직전 지점에서의 가스압력, $P_{\tan k}$는 자동차용기 내 가스압력, K_{st} 및 K_{ve}는 각각 충전소 측 충전라인(P_{ba} 측정지점에서 노즐까지) 및 수소자동차 측 충전라인(리셉터클에서 자동차용기까지)의 압력손실계수, ρ_{st} 및 ρ_{ve}는 각각 충전소 측 충전라인과 수소자동차 측 충전라인의 가스밀도를 나타낸다(Fig. 1).

2.2 충전라인 압력 계산

식 (5)에 의하여 질량유량이 결정되면, 충전라인 지점 1의 압력 P_1은 지점 2의 압력 P_2로부터 식 (4)에 의하여 계산할 수 있다.

2.3 충전라인 가스온도 계산

열역학 제1법칙에 따라 충전라인 내부의 에너지 변화는 식 (6)과 같이 표현된다[3,6-11].

$$\frac{dE}{dt} = Q - W + \frac{d}{dt}(m(u + \frac{V^2}{2} + gz)) \quad (6)$$
$$+ \sum(\dot{m}(h + \frac{V^2}{2} + gz))_{in}$$
$$- \sum(\dot{m}(h + \frac{V^2}{2} + gz))_{out}$$

식 (6)에서 dE/dt는 시간에 따른 충전라인 내부의 에너지변화, Q는 입열량, W는 외부에 대한 일량, m은 내부의 물질 총질량, u는 내부에너지, V는 유속, gz는 위치에너지, $\dot{m}$은 질량유량을 나타낸다. 한편, 정상상태에 있는 유동의 경우 제어체적(control volume)으로 들어오는 열량은 식 (7)에 의하여 계산할 수 있다[12].

$$\dot{m}\Delta h = \dot{m} C_p \Delta T \quad (7)$$

식 (7)에서 C_p는 정압열용량, T는 온도를 나타낸다. 식 (6) 및 식 (7)로부터 유도한 식 (8)에 의하여 충전라인 출구의 온도 T_{out}을 계산할 수 있다.

$$Q = \dot{m} C_p (T_{out} - T_{in}) + \dot{m}(\frac{V_{out}^2 - V_{in}^2}{2}) \quad (8)$$

2.4 충전라인 입열량 계산

충전라인 외부로부터 내부로 들어오는 열량 Q는 Fig. 2와 같이 1차원 비정상상태 열전달(1-dimensional unsteady-state heat conduction) 계산방식에 의하여 구할 수 있다. 이 연구에서는 계산 결과의 정확성을 높이기 위해 충전라인 벽을 5개의 레이어로 분할하여 순차적으로 계산하였다. 평면 벽을 통한 비정상상태 열전달량의 계산식은 식 (9)와 같이 표현된다[12].

$$Q = kA\frac{T_{m-1} - T_m}{\Delta x} \quad (9)$$
$$= \rho V_{layer} C_p \frac{T_m^{i+1} - T_m^i}{\Delta t} + kA\frac{T_m - T_{m+1}}{\Delta x}$$

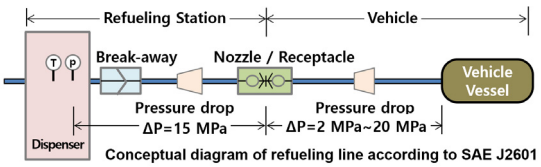

Fig. 1. Hydrogen refueling protocol coverage

식 (9)에서 k는 열전도도, A는 단면적, T_m은 m 레이어의 온도, T_{m-1}및 T_{m+1}은 m레이어 전 및 후 레이어의 온도, $\triangle x$는 레이어의 두께, $T_m^{i+1} - T_m^i$는 $\triangle t$ 시간 동안의 온도 변화, ρ는 레이어 밀도, V_{layer}는 레이어의 부피, C_p는 레이어의 정압열용량을 나타낸다(Fig. 3).

경계조건, 즉 가스와 접촉하는 안쪽 면과 공기와 접촉하는 바깥쪽 면의 열교환량 계산은 식 (10) 및 식 (11)과 같이 표현된다[3,13-16].

$$k\frac{dT_w}{dx}|_{x=0} = \alpha_g(T_g - T_w|_{x=0}) \tag{10}$$

$$k\frac{dT_w}{dx}|_{x=L} = \alpha_a(T_a - T_w|_{x=L}) \tag{11}$$

위 식에서 k는 충전라인 벽의 열전도도, T_w는 벽의 온도, x는 벽의 안쪽에서 바깥쪽으로의 거리, L은 벽의 두께, α_g 및 α_a는 각각 가스와 접촉하는 면의 열전달계수와 공기와 접촉하는 면의 열전달계수를 나타낸다.

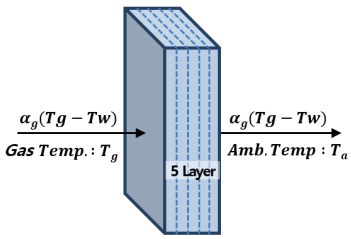

Fig. 2. Diagram of heat transfer through a refueling line wall

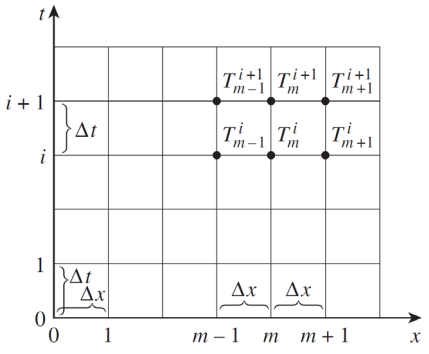

Fig. 3. Finite difference formulation of time dependent problems involves discrete points in time as well as space

한편 가스와 접촉하는 면의 열전달계수 α_g는 다음 식 (12)로부터 구할 수 있으며, 식 (12)에 필요한 무차원수들은 식 (13) 내지 식 (15)를 이용하여 구할 수 있다[3,16-19].

$$\alpha_g = \frac{N_u k}{d_h} \tag{12}$$

$$N_u = 0.023 Re^{4/5} \mathrm{Pr}^{0.3} \tag{13}$$

$$\mathrm{Pr} = \frac{C_p \mu}{k} \tag{14}$$

$$Re = \rho \frac{\dot{V}}{A_{cross}} \frac{d_h}{\mu} \tag{15}$$

위 식에서 Nu는 너셀수(Nusselt number), Pr은 프랜틀수(Prandtl number), Re는 레이놀즈수(Renolds number), d_h수력학적 직경(hydraulic diameter), k는 열전도도, C_p는 정압열용량, μ는 점도, $\dot{V}$는 체적유속, ρ는 밀도, A_{cross}는 단면적을 나타낸다.

2.5 용기 내 온도 계산

초고압의 수소를 급속하게 충전하는 공정의 경우 용기 내 온도를 예측하는 것은 쉽지 않다. 줄-톰슨효과(Joule-Thomson effect)와 같은 변수들이 많기 때문이다. 수소 충전에 따른 자동차용기 내 에너지 변화는 식 (16)과 같이 나타낼 수 있다[11,20].

$$\frac{d}{dt}(u) = \dot{m}_{in} h_{in} - \dot{m}_{out} h_{out} + \dot{Q} \tag{16}$$

위 식에서 u 및 m은 각각 용기 내 가스의 내부에너지와 질량, $\dot{m}_{in}$ 및 $\dot{m}_{out}$은 각각 용기 내로 들어온 가스 질량과 나간 가스 질량, h_{in} 및 h_{out}은 각각 용기 내로 들어온 가스의 엔탈피와 나간 가스의 엔탈

피, $\dot{Q}$는 용기 벽을 통한 열전달량을 나타낸다. 충전의 경우에는 $\dot{m}_{in}$값이 0이 되고, 자동차 운행(가스 사용)의 경우에는 $\dot{m}_{out}$이 0이 된다.

한편 내부에너지와 온도의 관계는 식 (17)과 같이 표현된다. 이 식을 통하여 용기 내의 온도를 계산할 수 있다[21].

$$\frac{\triangle u}{\triangle t} = C_v \frac{\triangle T}{\triangle t} \tag{17}$$

2.6 용기 벽을 통한 열전달량 계산

용기 벽을 통한 열전달량의 계산방법은 충전라인 벽을 통한 열전달량 계산방법과 동일하다. 다만 용기 벽의 경우에는 Fig. 4와 같이 금속 또는 플라스틱으로 만들어진 라이너와 그것을 덮고 있는 복합재료로 구성되어 있어 경계조건을 하나 더 고려해야 한다.

이 연구에서는 정확성을 높이기 위하여 용기의 벽을 라이너 쪽에 5개 레이어, 복합재료 쪽에 10개의 레이어로 분할하여 순차적으로 계산하였다.

2.7 용기 내 압력 계산

충전에 따른 자동차용기 내 압력은 식 (18) 및 식 (19)에 의하여 계산할 수 있다[18,22,23].

$$\rho = (m_0 + \int_0^i m_i dt) / V_{ve} \tag{18}$$

$$P = Z\rho RT \tag{19}$$

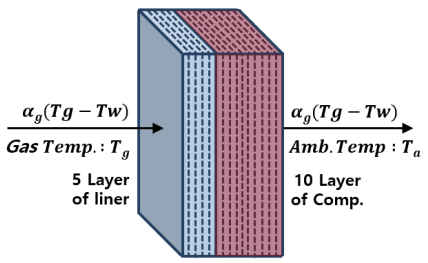

Fig. 4. Diagram of heat transfer through a vehicle tank wall

식 (19), (20)에서 ρ는 밀도, m_0는 충전 개시 전 자동차용기 내 가스의 질량, m_i는 시간 i에서 용기로 들어오는 가스의 질량, V_{ve}는 용기의 부피, P는 용기 내 가스의 압력, Z는 가스의 압축계수(compressibility factor), R은 기체상수, T는 온도를 나타낸다. 여기에서 압축계수는 식 (20)에 의하여 구할 수 있다[24,25].

$$Z = 1 + \sum_{i=1}^{9} a_i \left(\frac{100K}{T}\right)^{b_i} \left(\frac{P}{1MPa}\right)^{c_i} \tag{20}$$

식 (20)에서 M은 몰질량(molar mass)을 나타낸다. a_i, b_i 및 c_i는 관련 참고문헌을 통해 구할 수 있다.

3. 수소충전 시뮬레이션

수리모델과 논리모델을 만들어 이를 컴퓨터가 계산하도록 하는 것을 프로그래밍 시뮬레이션이라 한다. 이 연구에서 수리모델은 SAE J2601에서 제시하는 열역학적 방법론에 기반하였고, 구체적인 수치해석은 관련 이론서들과 논문들에서 가장 일반적으로 사용되고 있는 방법론을 따랐다. 입력 데이터의 경우에는 SAE J2601에서 제시하는 최악의 조건(worst case) 중 충전종료 시점에서 자동차용기 내 온도가 가장 높게 올라가는 hot case 해당 데이터를 활용하였다. 적용한 입력변수의 종류는 Table 1과 같다[1]. 프로그래밍에는 Matlab을 사용하였고, 프로그램 로직은 Fig. 5와 같다.

2014년 Schneider 등[2]은 BMW, Honda, 현대자동차 등의 지원을 받아 Powertech Lab.에서 SAE J2601에 대한 타당성 실험을 수행하였다. 실험의 기본 조건은 충전압력 70 MPa, 가스공급온도 -40℃, 용기 category 4-7 kg, 용기 종류 Type IV, 충전 전 용기 초기 압력 5 MPa로 하였다. 여러 가지 실험 중 Test 5-2B는 대기온도 0℃, 평균압력상승속도(APRR) 28.5 MPa/min로, Test 5-3A는 대기온도 10℃, 평균압력상승속도 28 MPa로 진행되었다.

이 연구에서는 시뮬레이션 결과 타당성 비교검증

대상으로 Test 5-2B 및 Test 5-3B를 선택하였다. 실험결과(test result)와 이 연구 시뮬레이션 결과(this sim. result)의 비교결과는 Table 2와 같다. 충전시간에서는 다소 차이가 있었으나, 최고 온도, 최고 압력 및 최대 질량 유속은 잘 맞는 것으로 나타났다.

Table 1. Assumption for "hot case" and "cold case"

Parameter/initial cond./boundary cond.	Hot case	Cold case
Station fuel delivery temperature	Upper bound	Lower bound
Station pipe diameter	Small: 5 mm	Large: infinite
Station components thermal mass	High thermal mass: S2	Low thermal mass: S1
Station components initial temperature	Ambient	Ambient
Vehicle components thermal mass	Common representative thermal mass	
Vehicle components initial temperature	Ambient	Ambient
Pressure drop in fuel line from dispenser to vehicle	Large: 35 MPa	Small: 17 MPa
Pressure ramp rate type	HPRR	APRR
Intermediate pressure leak checks	None	Every 3,000 psi pressure increase
Vehicle vessel geometry	Large/small vessel	Small vessels
Vehicle vessel count	Single vessel	Multiple identical vessels
Vehicle vessel liner material	Plastic (Type IV)	Aluminum (Type III)
Vehicle vessel soak state	Hot soak	Cold soak
Vehicle history	None	Driving from initially full

HPRR, Hot Pressure Ramp Rate; APRR, Average Pressure Ramp Rate.

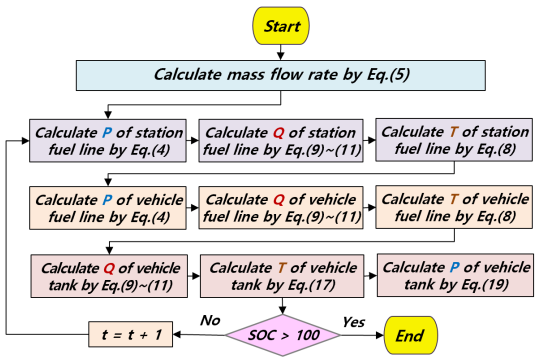

Fig. 5. Hydrogen fueling simulation programming logic

4. 결과 및 고찰

4.1 외기온도의 영향

외기온도(ambient temperature)가 수소 충전 공정에 미치는 영향은 2가지이다. 첫째는 충전라인 벽을 통한 열전달로 공급하는 수소가스 온도의 상승 또는 강하를 유발하는 것이고, 둘째는 자동차용기 벽을 통한 열전달로 용기 내 수소기체 온도의 상승 또는 강하를 유발한다는 것이다. 공급하는 수소의 온도는 자동차용기로 들어가는 가스의 엔탈피를 증가시켜 용기 내 가스온도 상승의 원인이 되기 때문에 수소충전의 중요한 변수 중 하나이다. 그래서 SAE J2601의 룩업테이블(look-up table)에서는 평균압력상승속도 선택의 매개변수(parameter)로 대기온도를 사용하고 있다.

Fig. 6은 위에서 기술한 Test 5-3A (대기온도 10℃)와 동일한 조건으로 시뮬레이션을 하면서 대기온도만 −10℃, 0℃, 10℃, 20℃, 30℃, 40℃로 변경해 본 것이다. 대기온도가 10℃보다 낮은 경우에는 온도는 물론 압력 및 유량 요구조건에도 모두 만족되는 것으로 나타났다. 그러나 대기온도가 10℃를 초과하는 경우 중에서는 20℃인 경우에는 문제없이 충전이 완료되는 것으로 나타났으나, 30℃ 및 40℃인 경우에는

Table 2. Comparison between Schneider et al.[2] experimental results with this simulation results

Variables	Test 5-2B		Test 5-3A	
	Test result	This sim. result	Test result	This sim. result
Refueling time (s)	191	151	181	154
Temperature (℃)	75.2	74.6	76.5	76.2
Pressure (㎫)	80	82	81.5	82.0
Mass flow rate (kg/s)	35	35	34	34

충전 도중 온도가 87.5℃를 초과하는 것으로 나타나, 대기온도가 미치는 영향의 중요성을 확인할 수 있었다.

4.2 충전가스 공급 온도의 영향

외기온도와 같은 이유로 충전가스 공급 온도(fuel delivery temperature)도 자동차용기 내 가스온도 상승의 원인이 된다. 외기온도의 경우에는 열전달 속도의 한계로 그 영향이 크지 않다. 그러나 가스 공급 온도는 자동차용기 내 가스 온도 상승의 직접적인 원인으로 작용하기 때문에 그 영향이 크다. 그래서 SAE J2601에서는 룩업테이블(look-up table) 선택의 매개변수(parameter)로 자동차용기 용량을 사용하고 있다. 최근에 설치되는 수소충전소의 경우에는 대용량 냉동기를 설치하여 가스공급온도를 최하 기준온도인 -40℃에 맞추고 있다.

Fig. 7은 위에서 기술한 Test 5-3A (가스공급온도 -40℃)와 동일한 조건으로 시뮬레이션을 하면서 가스공급온도만 -17.5℃, -26℃, -33℃, -40℃로 변경해 본 것이다. 가스공급온도가 -33℃보다 낮은 경우에는 온도는 물론 압력 및 유량 요구조건에도 모두 만족되는 것으로 나타났다. 그러나 가스공급온도가 -26℃ 및 -17.5℃인 경우에는 충전 도중 온도가 87.5℃를 초과하는 것으로 나타나, 가스공급온도가 미치는 영향이 크다는 것을 확인할 수 있었다.

4.3 자동차용기 용량의 영향

동일한 충전라인을 이용하여 동일한 평균압력상승속도(APRR)로 충전을 진행하는 경우, 자동차용기 용량이 달라지면 충전하는 가스의 유속(V)이 달라지게 된다. 유속은 식 (21)과 같이 자동차용기로 들어가는 가스의 에너지에 영향을 미친다. 그래서 SAE J2601에서는 룩업테이블(look-up table) 선택의 매개변수(parameter)로 자동차용기 용량을 사용하고 있다.

$$E = \dot{m}\left(h + \frac{V^2}{2}\right) \tag{21}$$

Fig. 8 및 Fig. 9는 앞에서 기술한 Test 5-3A (자동차용기 부피 117 L)와 동일한 조건으로 시뮬레이션을 하면서 자동차용기 부피만 50 L, 117 L, 174 L, 249 L로 변경해 본 것이다. 용기부피가 117 L보다 작은 경우에는 온도는 물론 압력 및 유량 요구조건에도 모두 만족되는 것으로 나타났다. 용기부피가 174 L인 경우에는 충전 도중 온도가 87.5℃를 초과하는 것으로 나타났고, 용기부피가 249 L인 경우에는 충전 도중 온도가 100℃ 이상으로 크게 상승한 상태로 충전이 종료되는 것으로 나타났다. 또한 가스의

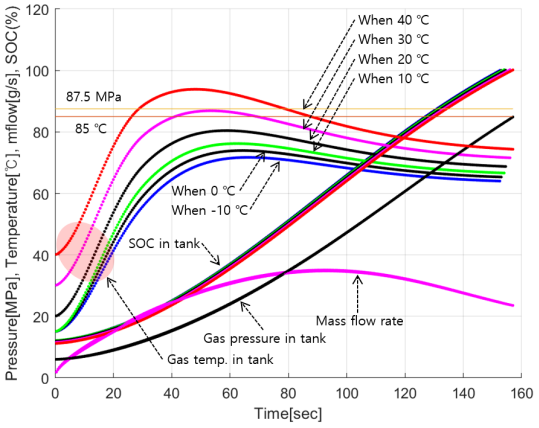

Fig. 6. Effect of ambient temperature on gas temperature, pressure, SOC in the vehicle tank and mass flow rate

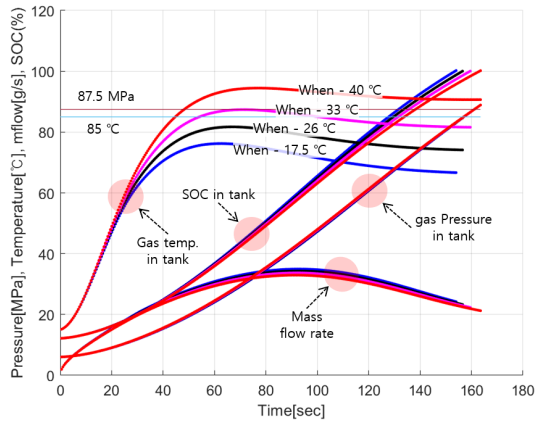

Fig. 7. Effect of gas delivery temperature on gas temperature, pressure, SOC in the vehicle tank and mass flow rate

유속도 한계 조건인 60 g/s에 도달하는 것으로 나타났다. 자동차용기 용량이 자동차용기의 안전에 미치는 영향을 극명하게 보여준다.

4.4 자동차용기 초기 압력의 영향

자동차용기의 초기 압력도 자동차용기 내 가스온도 상승의 원인이 된다. 그래서 SAE J2601의 룩업테이블(look-up table)에서는 충전의 목표압력 선택의 매개변수(parameter)로 사용하고 있다.

Fig. 10 및 Fig. 11은 위에서 기술한 Test 5-3A (자동차용기 초기압력 5 MPa)와 동일한 조건으로 시뮬레이션을 하면서 자동차용기 초기 압력만 2 MPa, 5 MPa, 10 MPa 및 15 MPa로 변경해 본 것이다. 초기 압력이 5 MPa보다 큰 경우에는 자동차용기 내 온도는 물론 압력 및 유량 요구조건에도 모두 만족되는 것으로 나타났다. 그러나 초기 압력이 2 MPa인 경우에는 충전 도중 용기 내 가스 온도가 100℃ 이상으로 크게 상승하는 것으로 나타났다. 자동차용기 초기 압력이 자동차용기의 안전에 미치는 영향을 극명하게 보여준다. 그래서 SAE J2601에서는 0.5 MPa 미만인 용기에 대한 충전을 금지하고 있다.

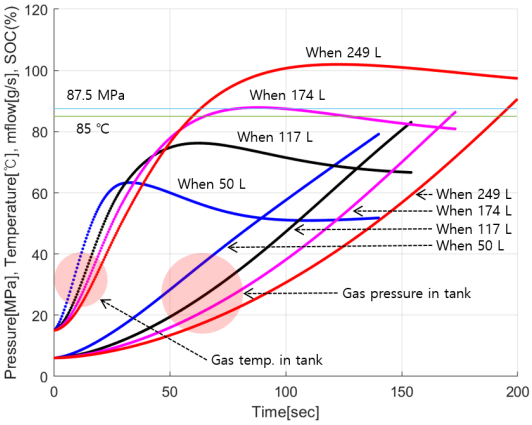

Fig. 8. Effect of gas the vehicle tank volume on gas temperature and pressure in the vehicle tank

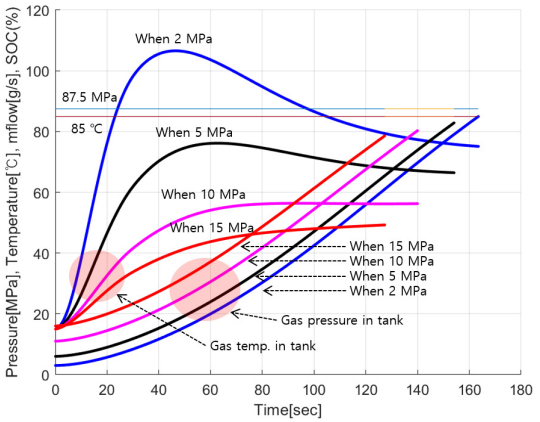

Fig. 10. Effect of the vehicle tank initial pressure on gas temperature and pressure in the vehicle tank

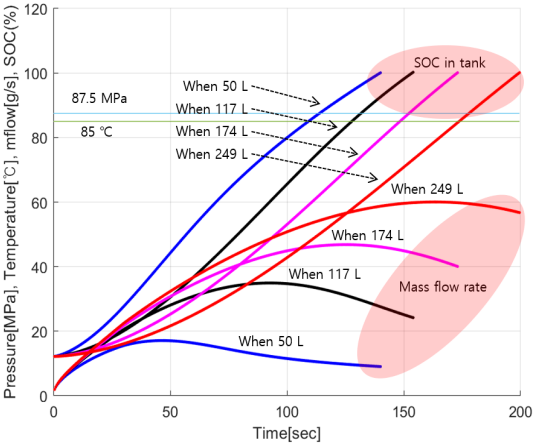

Fig. 9. Effect of gas the vehicle tank volume on gas SOC in the vehicle tank and mass flow rate

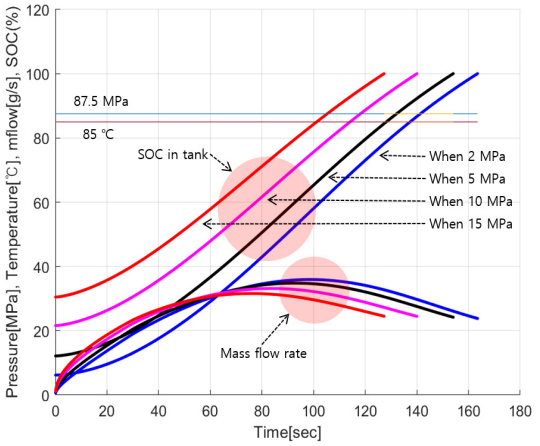

Fig. 11. Effect of a vehicle tank initial pressure on SOC in a vehicle tank and mass flow rate

5. 결 론

수소충전 프로토콜 개발의 도구로 활용하기 위해 수소충전에 관한 열역학적 모델을 도출하고 시뮬레이션을 위한 프로그램을 개발하였다. 열역학적 모델 개발 시에는 매개변수 확보의 편의성과 타당성 검증의 용이성을 고려하여 SAE J2601에 제시된 모델을 충실히 벤치마킹하였다. 또한 시뮬레이션을 위한 프로그램 제작에는 범용성을 고려하여 Matlab을 이용하였다. 결과물은 2014년 Schneider 등[2]이 SAE J2601의 타당성 검증을 위하여 수행한 실험결과와 잘 맞는 것으로 나타났다.

수소충전 프로토콜에 영향을 미치는 인자를 대기온도, 압력상승속도, 자동차용기 용량, 충전가스 공급온도 및 자동차용기 초기 압력 등 5가지로 파악하고, 각 인자의 영향 정도에 대하여 살펴보았다. 연구결과는 첫째, 외기온도와 충전가스 공급온도의 변화는 자동차용기 내 압력 상한값과 질량유속 상한값에 영향을 거의 미치지 않는 것으로 나타났고, 자동차용기 내 온도에는 비교적 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다. 둘째, 자동차용기의 용량과 자동차용기의 초기압력의 변화는 질량유속 상한값에는 큰 영향을 미치지 않지만, 자동차용기 온도 상한값에는 크게 영향을 미치는 것으로 밝혀졌고, 자동차용기 압력의 상한값에도 다소 영향을 미치는 것으로 나타났다. 셋째, 4가지 충전조건 변화에서 자동차용기 온도는 중간에 상한 경계를 벗어났다가 다시 복귀되는 경우가 있어 최종 온도만을 관리대상으로 해서는 안 된다는 것이 밝혀졌다. 요컨대 수소충전 프로토콜의 영향인자에는 5가지 매개변수가 있다는 것이 재확인되었고, 특히 자동차용기의 안전 확보를 위해 충전 전 과정에서 관리되어야 할 매개변수는 자동차용기의 온도라는 것이 밝혀졌다.

후 기

이 연구는 산업통상자원부 에너지안전기술개발사업인 수소 융복합스테이션 위험성 평가 및 연구사업(과제번호:20162220100180)의 연구비 지원으로 수행되었다.

References

1. Society of Automotive Engineers (SAE), "Fueling protocols for light duty gaseous hydrogen surface vehicles (Standard J2601_201612)", 2016, doi: https://doi.org/10.4271/j2601_201612.
2. J. Schneider, G. Meadows, S. R. Mathison, M. J. Veenstra, J. H. Shim, R. Immel, M. Wistoft-Ibsen, S. Quong, M. Greisel, T. McGuire, and P. Potzel, "Validation and Sensitivity Studies for SAE J2601, the Light Duty Vehicle Hydrogen Fueling Standard", SAE Int. J. Alt. Power, Vol. 3, No. 2, 2014, doi: https://doi.org/10.4271/2014-01-1990.
3. E. D. Rothuizen, "Hydrogen Fuelling Stations: A Thermodynamic Analysis of Fuelling Hydrogen Vehicles for Personal Transportation", Ph.D. Dissertation, Technical University of Denmark, Kongens Lyngby Denmark, 2013. Retrieved from https://orbit.dtu.dk/en/publications/hydrogen-fuelling-stations-a-thermodynamic-analysis-of-fuelling-h.
4. K. Handa and S. Yamaguchi, "Development of Real-time Pressure Loss Compensation Method for Hydrogen Refueling Station to Increase Refueling Amounts", J. Automatic Engineering, Vol. 9, No. 4, 2018, pp. 310-315, doi: https://doi.org/10.20485/jsaeijae.9.4_310.
5. S. Yamaguchi, Y. Fujita, and K. Handa, "New Tank Volume Estimation Method for Hydrogen Fueling", Society of Automotive Engineers of Japan, 2018.
6. Y. A. Çengel and M. A. Boles, "Thermodynamics: An Engineering Approach", 5th ed, McGraw-Hill, USA, 2006, pp. 227-232.
7. M. Deymi-Dashtebayaz, M. Farzaneh-Gord, and H. R. Rahbari, "Simultaneous thermodynamic simulation of CNG filling process", J. Chemical Technology, Vol. 16, No. 1, 2014, pp. 7-14, doi: https://doi.org/10.2478/pjct-2014-0002.
8. M. Deymi-Dashtebayaz, M. Farzaneh-Gord, N. Nooralipoor, and H. Niazmand, "The Complete Modelling of the Filling Process of Hydrogen Onboard Vehicle Cylinders", Brizilian J. Chemical Engineering, Vol. 33, No. 2, 2016, pp. 391-399, doi: https://doi.org/10.1590/0104-6632.20160332s20140209.
9. M. Mond and M. Kosaka "Understanding of Thermal Characteristics of Fueling Hydrogen High Pressure Tanks and Governing Parameters", J. Alt. Power, Vol. 2, N. 1, 2013, pp. 61-67, doi: https://doi.org/10.4271/2013-01-0474.
10. J. Xiao, S. Ma, X. Wang, S. Deng, T. Yang, and P. Bénard, "Effect of Hydrogen Refueling Parameters on Final State of

Charge", J. Energies, Vol. 12, No. 4, 2019, pp. 645, doi: https://doi.org/10.3390/en12040645.
11. M. Farzaneh-Gord, M. Deymi-Dashtebayaz, H. R. Rahbari, and H. Niazmand, "Effects of storage types and conditions on compressed hydrogen fuelling stations performance", J. Hydrogen Energy, Vol. 37, No. 4, 2012, pp. 3500-3509, doi: https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2011.11.017.
12. Y. A. Çengel and A. J. Ghajar, "Heat and Mass Transfer: Fundamentals and Applications", 5th ed, McGraw-Hill, USA, 2015, pp. 18, 334-337.
13. T. Kuroki, N. Sakoda, K. Shinzato, M. Monde, and Y. Takata, "Prediction of transient temperature of hydrogen flowing from pre-cooler of refueling station to inlet of vehicle tank", International J. of Hydrogen Energy, Vol. 43, No. 3, 2018, pp. 1846-1854, doi: https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.11.033.
14. P. L. Woodfield, M. Monde, and T. Takano, "Heat Transfer Characteristics for Practical Hydrogen Pressure Vessels Being Filled at High Pressure", J. Thermal Science and Technology, Vol. 3, No. 2, 2008, pp. 241-253, doi: https://doi.org/10.1299/jtst.3.241.
15. M. Monde, P. Woodfield, T. Takano, and M. Kosaka, "Estimation of temperature change in practical hydrogen pressure tanks being filled at high pressures of 35 and 70 MPa", J. Hydrogen Energy, Vol. 37, No. 7, 2012, pp. 5723-5734, doi: https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2011.12.136.
16. M. Heath, P. L. Woodfield, W. Hall, and M. Monde, "An experimental investigation of convection heat transfer during filling of a composite-fibre pressure vessel at low Reynolds number", Experimental Thermal and Fluid Science, Vol. 54. 2014, pp. 151-157, doi: https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2014.02.001.
17. T. Bourgeois, F. Ammouri, M. Weber, and C Knapik, "Evaluating the temperature inside a tank during a filling with highly-pressurized gas", J. Hydrogen Energy, Vol. 40, No. 35, 2015, pp. 11748-11755, doi: https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2015.01.096.
18. J. Guo, J. Yang, Y. Zhao, X. Pan, L. Zhang, L. Zhao, and J. Zheng, "Investigations on temperature variation within a type III cylinder during the hydrogen gas cycling test", Vol. 13, No. 25, 2014, pp. 13926-13934, doi: https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2014.03.097.
19. P. L. Woodfield, M. Monde, and Y. Mitsutake, "Measurement of Averaged Heat Transfer Coefficients in High-Pressure Vessel during Chagring with Hydrogen Nitrogen or Argon Gas", J. Thermal Science and Technology, Vol. 2, No. 2, 2007, pp. 180-191, doi: https://doi.org/10.1299/jtst.2.180.
20. T. Kuroki, N. Sakoda, K. Shinzato, M. Monde, and Y. Takata, "Dynamic simulation for optimal hydrogen refueling method to Fuel Cell Vehicle tanks", J. Hydrogen Energy, Vol. 43, No. 11, 2018, pp. 5714-5721, doi: https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.01.111.
21. D. G. Casey. "Method for Calculating Hydrogen Temperature During Vehicle Fueling", Patent No.: US 7,647,194 B1, 2010. Retrieved from https://patentimages.storage.googleapis.com/9a/0e/15/a4a42fb4da4519/US7647194.pdf.
22. M. Monde, Y. Mitsutake, P. L. Woodfield, and S. Maruyama, "Characteristics of Heat Transfer and Temperature Rise of Hydrogen during Rapid Hydrogen Filling at High Pressure", J. Heat Transfer-Asian Research, Vol. 36, No. 1, 2007, pp. 13-27, doi: https://doi.org/10.1002/htj.20140.
23. J. Xiao, P. Benard, and R. Chahine, "Charge-discharge cycle thermodynamics for compression hydrogen storage system", J. Hydrogen Energy, Vol. 41, No. 12, 2016, pp. 5531-5539, doi: https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2015.12.136.
24. E. W. Lemmon, M. L. Huber, and J. W. Leachman, "Revised Standardized Equation for Hydrogen Gas Densities for Fuel Consumption Applications", J. Res. Natl. Inst. Stand. Technol, Vol. 113, No. 6, 2008, pp. 341-350, doi: https://doi.org/10.6028/jres.113.028.
25. H. Chen, J. Zheng, P. Xu, L. Li, Y. Liu, and H. Bie, "Study on real-gas equations of high pressure hydrogen", J. Hydrogen Energy, Vol. 35, No. 7, 2010, pp. 3100-3104, doi: https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2009.08.029.