

## 수소충전 시 압력상승률이 표준충전프로토콜 중요변수에 미치는 영향 해석

†채충근 · 김용규\* · 채승빈\*\*

(주)미래기존연구소, \*아주대학교 환경공학과 박사과정, \*\*광운대학교 화학공학과 박사과정  
(2019년 11월 26일 접수, 2020년 1월 20일 수정, 2020년 1월 21일 채택)

## An Analysis of the Effect of Pressure Ramp Rate on the Major Parameters of the Standard Hydrogen Fueling Protocol

†Chungkeun Chae · Yonggyu Kim\* · Seungbeen Chae\*\*

Mirae EHS-Code Research Institute, Seoul, 08390, Korea

\*Environmental Engineering, Ajou University, Suwon 16499, Korea

\*\*Chemical Engineering, Kwangwoon University, Seoul, 01897, Korea

(Received November 26, 2019; Revised January 20, 2020; Accepted January 21, 2020)

### 요 약

수소자동차용기에 높은 압력(70 MPa)의 수소를 빨리 완전 충전하는 것은 쉽지 않다. 그 이유는 줄-톰슨효과 등에 의해 발생하는 열로 인하여 용기내의 온도가 급속히 상승하기 때문이다. 미국의 SAE J2601, 일본의 JPEC-S 0003 같은 충전프로토콜이 제정되어 운영되고 있다. 그러나 이들 프로토콜에는 수많은 가정이 도입되어 내용이 너무 복잡하고 적용범위가 제한적이라는 문제가 있다. 이 연구는 완벽한 실시간 통신에 기반한 새로운 프로토콜을 개발하기 위해서 수행되었다. 이 연구에서는 수소충전 시뮬레이션 프로그램을 이용하여 압력상승률이 자동차용기내의 온도 및 압력 상승과 충전유속에 어떠한 영향을 미치는지 살펴보았다. 그 결과 압력상승률 결정 시 우선 고려하여야 할 매개변수는 자동차 용기의 온도라는 것을 알 수 있었다.

**Abstract** - It is not easy to fully fuel high pressure(70 MPa) hydrogen in a hydrogen vehicle tank quickly. This is because the temperature inside the tank rises rapidly due to heat caused by the Joule-Thomson effect, etc. So fueling protocols such as SAE J2601 in the U.S. and JPEC-S 0003 in Japan appeared. However, there is a problem with these protocols that a number assumption are introduced and the content is too complex and limited in scope. This study was conducted to develop a new protocol based on complete real-time communication. In this study, the hydrogen fueling simulation program were used to examine how the pressure ramp rate affects the temperature and pressure rise in the tank and the fueling flow rate. The results confirmed that the first parameter to be considered in determining the pressure ramp rate is the temperature of the tank.

**Key words** : hydrogen fueling, fueling protocol, fueling simulation, hydrogen vehicle

### I. 서 론

한국 정부는 2040년까지 수소충전소 1,200개소,

수소택시 8만대, 수소버스 4만대, 수소트럭 3만대를 보급하겠다고 지난 1월 17일 발표했다. 한국에 수소충전소와 수소자동차 보급이 급격하게 늘어날 전망이다. 수소자동차는 배출가스 제로(Zero), 높은 열효율, 그리고 신재생에너지 활용이 용이하다는 장점을 가지고 있다. 이 장점을 활용하여 수소자동

†Corresponding author: chae@meri.co.kr

Copyright © 2019 by The Korean Institute of Gas

차의 보급을 늘이기 위해서는 첫째, 충전속도가 기존 연료 자동차와 동등 이상이 되어야 한다. 승용차를 기준으로 3분 내외에 충전이 완료되지 않으면 불편을 느낄 것이기 때문이다. 둘째, 완전충전(Complete fill)도 가능해야 한다. 완전충전이 되지 않으면 주행거리 성능이 떨어지기 때문이다. 그러나 수소자동차의 경우에는 가스의 충전압력이 70 MPa에 달하기 때문에 신속충전과 완전충전이 용이하지 않다. 압축에 의한 열(Heat of compression)의 발생과 줄-톰슨효과(Joule-Thomson effect)에 의한 열의 발생 때문이다[1]. 빨리 완전충전을 하되 안전하게 해야 한다. 그래서 충전 프로토콜(Fueling protocol)이 등장하였고[2], 이 충전프로토콜을 가장 먼저 도입한 나라는 미국과 일본이었다. 미국 SAE(Society of Automotive Engineers)는 2010년에 SAE J2601을 도입하였고, 일본 JPEC(Japan Petroleum Energy Center)도 2012년에 JPEC-S 0003(圧縮水素充填技術基準)을 도입하였다. 한국 정부도 2018년 수소충전 프로토콜을 도입하기 위해 연구를 시작하였다.

미국과 일본에서 도입한 수소충전 프로토콜의 특징은 Hot case와 Cold case를 가정하고 있다는 것이다. 이들 프로토콜에서는 가스의 충전이 종료되었을 때 자동차용기 내의 가스 온도가 최고로 올라가는 경우를 Hot case, 최저로 내려가는 경우를 Cold case로 정의한다. 그리고 이 양쪽 최악의 경우를 벗어나지 않는 경우에만 이 프로토콜을 적용할 수 있다고 규정한다. 따라서 이들 기준에서는 충전소와 자동차의 충전라인, 자동차용기의 사양과 충전 전 상태, 가스공급온도 및 대기온도 등에 관한 각종 매개변수(Parameter)를 Hot case와 Cold case로 나누어 규정한다. 그리고 수소충전의 열역학적 모델을 만들고 여기에 이들 매개변수들을 입력하여 압력상승률과 목표압력에 관한 룩업테이블(Look-up table)을 작성하였다. 이와 같은 이유로 충전조건에 따라 작성된 룩업테이블이 수 십개에 달한다. 이들 프로토콜을 준수하고자 하는 충전설비 설계자는 수많은 조건들과 수많은 룩업테이블을 근거로 다시 복잡한 충전프로그램을 만들어야 한다. 요컨대 이들 프로토콜은 너무 복잡하다. 그리고 프로토콜이 개발된 조건에 맞지 않는 경우에는 적용할 수 없어 적용범위도 너무 제한적이다.

이들 프로토콜이 이렇게 복잡하게 된 것은 충전소와 수소자동차 사이에 통신이 되지 않는 경우와 통신을 신뢰할 수 없는 경우를 가정하고 있기 때문이다. 항상 통신이 가능하고 통신의 신뢰성이 보장된다면 자동차용기의 위핵요소인 온도와 압력을

실시간으로 감시·예측하면서 실시간으로 압력상승속도와 목표압력을 계산할 수 있고, 프로토콜을 간단하게 만들 수 있다. 이를 위하여 우리는 선행 연구를 통하여 수소충전 시뮬레이션 프로그램을 개발하였다. 이번 연구에서는 개발된 프로그램을 이용하여 수소충전 압력상승률을 변경할 경우 자동차용기 내 온도 및 압력과 충전유속이 어떻게 변하는지 살펴보고 새로운 프로토콜의 적용 가능성을 검토하였다. 선행연구에서 개발한 열역학적 모델과 시뮬레이션 프로그램은 각각 II 및 III과 같다.

## II. 프로그램에 사용된 열역학적 모델

수소 충전라인을 흐르는 가스의 압력손실  $\Delta P$ 는 벨브의 경우 식 (1), 질량유량계의 경우 식 (2), 튜브의 경우 식 (3)과 같이 표현된다[3]. 활용의 편의를 위하여 이들을 하나의 식으로 표현하면 식 (4)와 같이 된다[3-5]. 식 (4) 및 식 (5)에 의하여 충전라인의 질량유량과 충전라인 각 지점의 압력을 계산할 수 있다.

$$\Delta P = \frac{\rho}{\rho_w k_v^2} \dot{V}^2 \quad (1)$$

$$\Delta P = 0.5 k_p \rho \dot{V}^2 \quad (2)$$

$$\Delta P = (f \frac{L}{d} + k_t) \frac{\rho w^2}{2A^2} \quad (3)$$

$$\Delta P = K_\rho \dot{V}^2 = K \frac{\dot{m}}{\rho} \quad (4)$$

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

위 식에서  $P$ 는 가스의 압력,  $\rho_w$ 는 물의 밀도,  $\rho$ 는 가스의 밀도,  $V$ 는 가스의 유속,  $k_v$ 는 벨브의 압력손실계수,  $k_p$ 는 필터 및 질량유량계의 압력손실계수,  $f$ 는 마찰계수,  $k$ 는 압력손실 상당길이,  $\dot{m}$ 은 질량유량,  $aprr \times \Delta t$ 는 평균압력상승속도,  $P_{ba}$ 는 Break away 직전 지점에서의 가스압력,  $P_{ve}$ 는 자동차용기 내 가스압력,  $K_{st}$  및  $K_{ve}$ 는 각각 충전소측 충전라인( $P_{ba}$  측정지점에서 노즐까지) 및 수소자동차

차측 충전라인(리셉터클에서 자동차용기까지)의 압력손실계수,  $\rho_{st}$  및  $\rho_{ve}$ 는 각각 충전소측 충전라인과 자동차측 충전라인의 가스밀도를 나타낸다.

열역학 제1법칙에 따른 충전라인의 에너지 변화 및 엔탈피·온도 관계는 각각 식 (6)[3,6-11] 및 식 (7)[12]과 같이 표현된다. 이들 식으로부터 식 (8)을 유도할 수 있고, 이 식에 의하여 충전라인 출구의 온도  $T_{out}$ 을 계산할 수 있다.

$$\frac{dE}{dt} = Q - W + \frac{d}{dt} \left( m \left( u + \frac{V^2}{2} + gz \right) \right) \quad (6)$$

$$+ \sum \left( \dot{m} \left( h + \frac{V^2}{2} + gz \right) \right)_{in} - \sum \left( \dot{m} \left( h + \frac{V^2}{2} + gz \right) \right)_{out}$$

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

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

위 식에서  $dE/dt$ 는 충전라인 내부의 에너지변화,  $Q$ 는 입열량,  $W$ 는 외부에 대한 일량,  $m$ 은 내부의 물질 총질량,  $u$ 는 내부에너지,  $V$ 는 유속,  $gz$ 는 위치에너지,  $\dot{m}$ 은 질량유량,  $C_p$ 는 정압열용량,  $T$ 는 온도를 나타낸다.

충전라인 외부로부터 내부로 들어오는 열량  $Q$ 는 1-dimensional unsteady heat conduction 계산방식에 의하여 구할 수 있다. 이 연구에서는 충전라인 벽을 5개의 레이어로 분할하여 순차적으로 계산하는 방법을 적용하였다. 벽을 통한 열전달량 계산식, 가스 또는 공기 접촉면의 열전달계수는 각각 식 (9)[12] 및 식 (10) 내지 식(12)와 같이 표현할 수 있

다[3,16-19]. 이들 식에 의하여 충전라인의 입열량  $Q$ 를 계산할 수 있다.

$$Q = kA \frac{T_{m-1} - T_m}{\Delta x} \quad (9)$$

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

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

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

$$\alpha = \frac{Nu k}{d_h} \quad (12)$$

위 식에서  $k$ 는 열전도도,  $A$ 는 단면적,  $T_m$ 은  $m$  레이어의 온도,  $T_{m-1}$  및  $T_{m+1}$ 은  $m$  레이어 전 및 후 레이어의 온도,  $\Delta x$ 는 레이어의 두께,  $T_m^{i+1}$  및  $T_m^i$ 는  $\Delta t$  시간 동안의 온도 변화,  $\rho$ 는 레이어 밀도,  $V_{layer}$ 는 레이어 부피,  $C_p$ 는 레이어 정압열용량,  $k$ 는 레이어 열전도도,  $T_w$ 는 벽의 온도,  $L$ 은 벽의 두께,  $\alpha_g$  및  $\alpha_a$ 는 각각 gas와 접촉하는 면과 공기와 접촉하는 면의 열전달계수,  $Nu$ 는 너셀넘버(Nusselt's number),  $d_h$  수력학적 직경(hydraulic diameter)을 나타낸다.

수소 충전에 따른 자동차용기 내 에너지 변화 및 내부에너지와 온도의 관계는 각각 식 (13)[11,20] 및 식 (14)[21]와 같이 표현된다. 이 식을 통하여 자동차용기 내의 가스 온도를 계산할 수 있다.

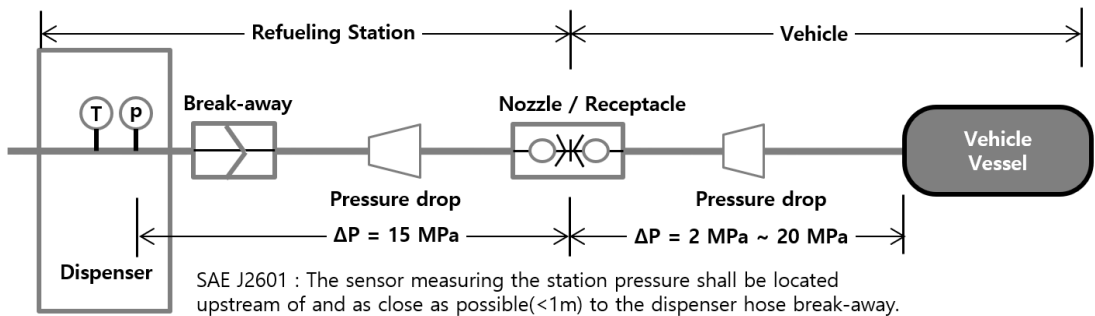


Fig. 1. Hydrogen refueling protocol coverage

$$\frac{d}{dt}(u) = \dot{m}_{in}h_{in} - \dot{m}_{out}h_{out} + \dot{Q} \quad (13)$$

$$\frac{\Delta u}{\Delta t} = C_v \frac{\Delta T}{\Delta t} \quad (14)$$

위 식에서  $u$  및  $m$ 은 각각 자동차용기 내 가스의 내부에너지와 질량,  $\dot{m}_{in}$  및  $\dot{m}_{out}$ 은 각각 용기 내로 들어오는 가스 질량과 나가는 가스 질량,  $h_{in}$  및  $h_{out}$ 은 각각 용기 내로 들어오는 가스의 엔탈피와 나가는 가스의 엔탈피,  $\dot{Q}$ 는 용기 벽을 통한 열 전달량을 나타낸다. 이  $\dot{Q}$ 는 식 (9) 내지 식 (12)와 동일한 방법에 의하여 계산할 수 있다. 이 연구에서는 용기의 벽을 라이너 쪽에 5개 레이어, 복합재료 쪽에 10개의 레이어로 분할하여 순차적으로 계산하는 방법을 적용하였다.

충전에 따른 자동차용기 내 압력은 식 (15)에서 식 (17)까지에 의하여 계산할 수 있다[18,22-25].

$$\rho = (m_0 + \int_0^i m_i dt) / V_{ve} \quad (15)$$

$$P = Z\rho RT \quad (16)$$

$$Z = 1 + \sum_{i=1}^9 a_i \left(\frac{100K}{T}\right)^{b_i} \left(\frac{P}{1MPa}\right)^{c_i} \quad (17)$$

위 식에서  $\rho$ 는 밀도,  $m_0$ 는 자동차용기 내 가스의 충전 개시 전 질량,  $m_i$ 는 시간  $i$ 에서 용기로 들어오는 가스 질량,  $V_{ve}$ 는 용기 부피,  $P$ 는 용기 내 가스 압력,  $Z$ 는 가스의 압축계수(compressibility factor),  $R$ 은 기체상수,  $T$ 는 자동차 용기 내 가스의 온도,  $M$ 은 몰질량(Molar Mass)를 나타낸다.  $a_i$ ,  $b_i$  및  $c_i$ 는 관련 참고문헌을 통해 구할 수 있다.

### III. 개발된 시뮬레이션 프로그램

선행 연구에서 수학적 모델은 SAE J2601에서 제시하는 열역학적 방법론에 기반하였고, 구체적인 수치해석은 관련 이론서들과 논문들에서 가장 일반적으로 사용되고 있는 방법론을 따랐다. 입력 데이터의 경우에는 SAE J2601에서 제시하는 Worst case 중 충전종료 시점에서 자동차용기 내 온도가 가장 높게 올라가는 Hot case 데이터를 적용하였다.

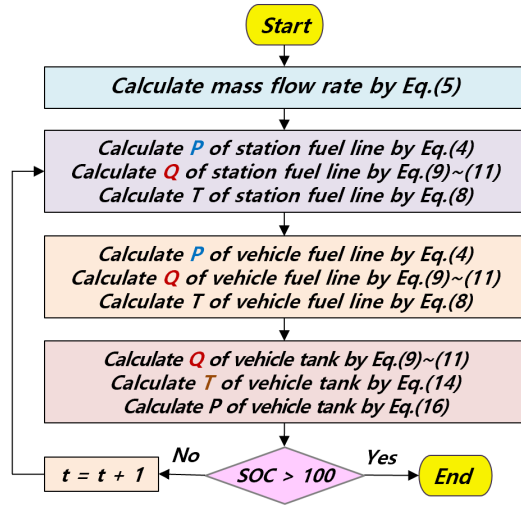


Fig. 2. Hydrogen fueling simulation program logic

Table 1. Comparison between Schneider et al.'s experimental results with this simulation results

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

수학적 모델 해석은 상용 프로그램인 매트랩(Matlab R2019a)을 사용하였고, 프로그램 로직은 Fig. 2와 같다.

2014년 J. Schneider 등은 BMW, Honda, 현대자동차 등의 지원을 받아 Powertech Lab.에서 SAE J2601에 대한 타당성 실험을 수행하였다. 실험의 기본 조건은 충전압력 70 MPa, 가스공급온도 -4 0°C, 용기 category 4-7 kg, 용기 종류 Type IV, 충전 전 용기 초기 압력 5 MPa로 설정되었다. 이들이 수

행한 실험 중 Test 5-2 B는 대기온도 0°C, 평균압력 상승속도(APRR) 28.5 MPa로, Test 5-3 A는 대기온도 10°C, 평균압력상승속도 28 MPa로 진행되었다. 이 연구에서는 시뮬레이션 결과 타당성 비교검증 대상으로 Test 5-2 B 및 Test 5-3 B를 선택하였다. 실험결과(Test result)와 선행 연구 시뮬레이션 결과(This sim. result)의 비교결과는 Table 1과 같다. 충전시간에서는 다소 차이가 있었으나, 최고 온도, 최고 압력 및 최대 질량 유속은 잘 맞는 것으로 나타났다.

#### IV. 압력상승률의 영향 평가

APRR은 충전시간을 결정하는 가장 중요한 매개변수(Parameter)이다. 초기 압력이 2MPa인 자동차용기에 APRR 28.5 MPa/mim로 충전하면 3분만에 충전 상한 압력인 87.5(2+28.5x3=87.5) MPa에 도달하게 된다.

이 연구에서는 2014년 J. Schneider 등이 SAE J2601의 타당성 검증을 위해 수행한 실험 중 Test 5-3 A(충전시스템 Hot case, 충전소스 카테고리 H70-T40, 용기용량 4-7kg, 용기초기압력 5 MPa, 외기온도 10°C, APRR 28 MPa)의 실험 조건을 기본 시뮬레이션 조건으로 하였다. 자동차용기 용량( $V_{ve}$ ) 및 초기압력( $P_0$ ), 대기온도( $T_{amb}$ ) 및 공급가스온도( $T_{de}$ ) 등을 변경하면서 다양한 APRR의 영향을 살펴보았다. 시뮬레이션에는 앞에서 기술한 프로그램을 사용하였다.

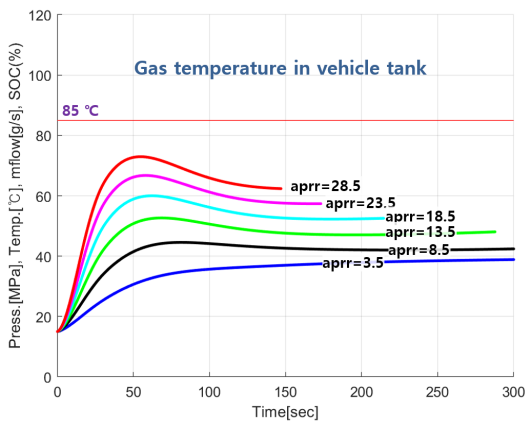


Fig. 2. Vehicle tank gas temperature when  $V_{ve} = 99(L)$ ,  $P_0 = 5$  MPa,  $T_{amb} = 10^\circ\text{C}$ ,  $T_{de} = -40^\circ\text{C}$

#### 4.1. 자동차용기 온도상승에 대한 영향

동일한 충전라인 및 자동차용기에 APRR을 변경하면서 충전을 진행하면 식(5)와 같이 충전하는 가스의 유량( $\dot{m}$ )이 달라진다. 유량이 달라지면 식(13)과 같이 용기로 들어가는 에너지의 양이 달라지고, 식(14)와 같이 용기내의 온도상승에 영향을 미친다. Fig. 2 내지 Fig. 6은 다양한 매개변수 값에서 이 영향의 정도를 살펴보기 위해 진행한 시뮬레이션 결과이다.

외기온도가 10°C일 때 SAE J2601 Look-up table에 의한 적정 APRR은 28 MPa이다. Fig. 2에서는 APRR을 다양하게 할 경우 자동차용기 내 가스온

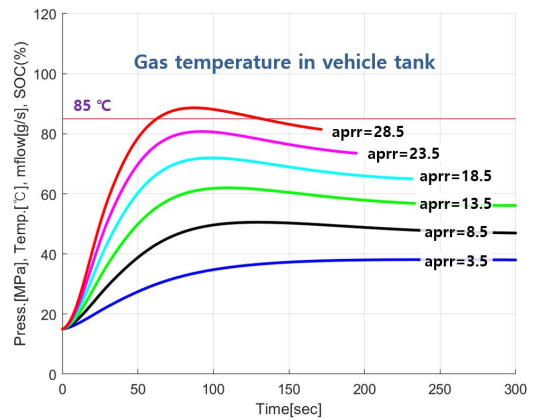


Fig. 3. Vehicle tank gas temperature when  $V_{ve} = 174(L)$ ,  $P_0 = 5$  MPa,  $T_{amb} = 10^\circ\text{C}$ ,  $T_{de} = -40^\circ\text{C}$

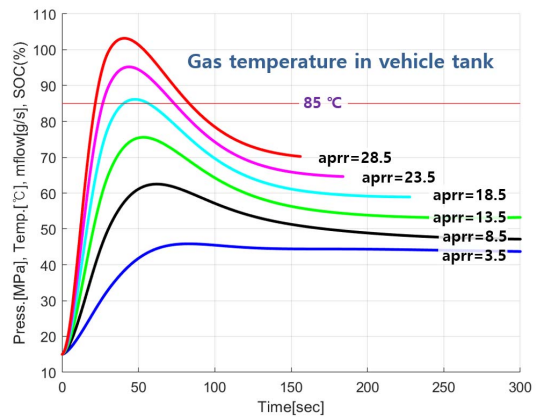


Fig. 4. Vehicle tank gas temperature when  $V_{ve} = 99(L)$ ,  $P_0 = 2$  MPa,  $T_{amb} = 10^\circ\text{C}$ ,  $T_{de} = -40^\circ\text{C}$

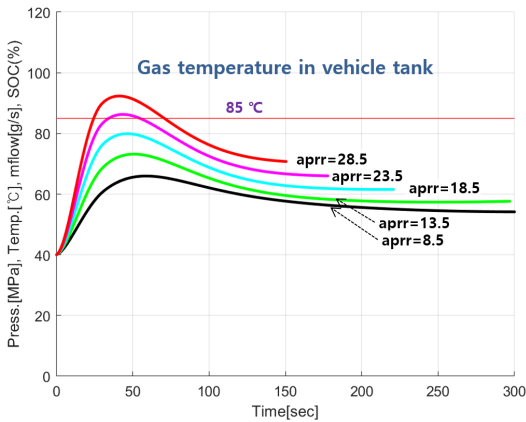


Fig. 5. Vehicle tank gas temperature when  $V_{ve} = 99(L)$ ,  $P_0 = 5 \text{ MPa}$ ,  $T_{amb} = 40^\circ\text{C}$ ,  $T_{de} = -40^\circ\text{C}$

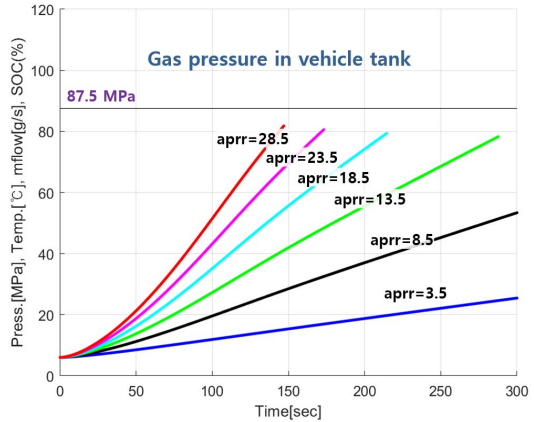


Fig. 7. Vehicle tank gas pressure when  $V_{ve} = 99(L)$ ,  $P_0 = 5 \text{ MPa}$ ,  $T_{amb} = 10^\circ\text{C}$ ,  $T_{de} = -40^\circ\text{C}$

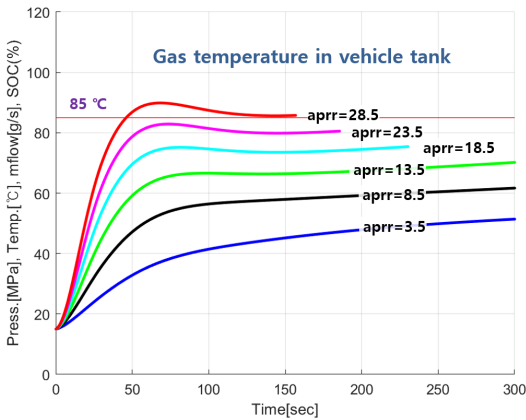


Fig. 6. Vehicle tank gas temperature when  $V_{ve} = 99(L)$ ,  $P_0 = 5 \text{ MPa}$ ,  $T_{amb} = 10^\circ\text{C}$ ,  $T_{de} = -17.5^\circ\text{C}$

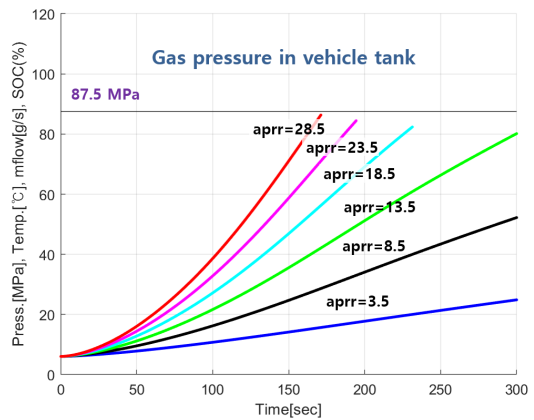


Fig. 8. Vehicle tank gas pressure when  $V_{ve} = 174(L)$ ,  $P_0 = 5 \text{ MPa}$ ,  $T_{amb} = 10^\circ\text{C}$ ,  $T_{de} = -40^\circ\text{C}$

도가 어떻게 상승하는지 보여준다. Fig. 3 내지 Fig. 6에서는 각각 자동차용기의 용량을 크게 할 경우, 자동차용기의 초기압력을 낮게 할 경우, 대기온도를 높게 할 경우 및 공급가스온도를 높게 할 경우의 변화를 보여준다. APRR 값이 큰 경우에서  $85^\circ\text{C}$ 를 초과하는 현상이 나타났다. APRR이 자동차용기 내 가스온도에 큰 영향을 미치며, 충전기 설계시 충전조건을 잘 못 설정하면 상한온도  $85^\circ\text{C}$ 를 초과하는 위험이 발생한다는 것을 확인할 수 있다.

#### 4.2. 자동차용기 압력상승에 대한 영향

APRR을 변경하면서 충전을 진행하면 식(5), 식

(13) 및 식(14)와 같이 용기 내 온도가 달라지고 온도가 달라지면 식(16)과 같이 용기 내 압력도 달라진다. Fig. 7 내지 Fig. 11은 매개변수 값을 변경할 경우 다양한 APRR에서 자동차용기 내 가스압력이 어떻게 상승하는지를 살펴보기 위해 진행한 시뮬레이션 결과이다. 자동차용기의 용량, 용기의 초기압력, 대기온도 및 공급가스온도를 변경할 경우 자동차용기 내 가스압력의 변화 패턴에는 변화가 없음을 보여준다. 인위적으로 설정한 극단적인 충전조건의 경우 외에는 압력이 상한값인  $87.5 \text{ MPa}$ 를 초과하지도 않는 것으로 나타났다.

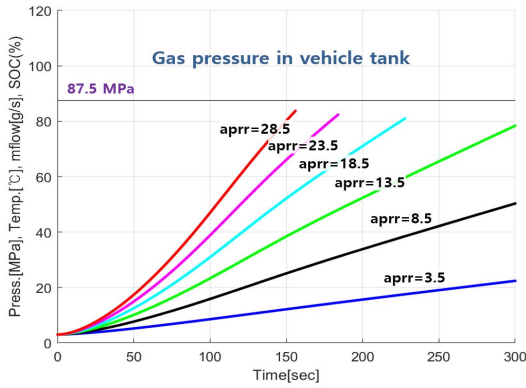


Fig. 9. Vehicle tank gas pressure when  $V_{ve}=99(L)$ ,  $P_0=2$  MPa,  $T_{amb}=10^\circ\text{C}$ ,  $T_{dc}=-40^\circ\text{C}$

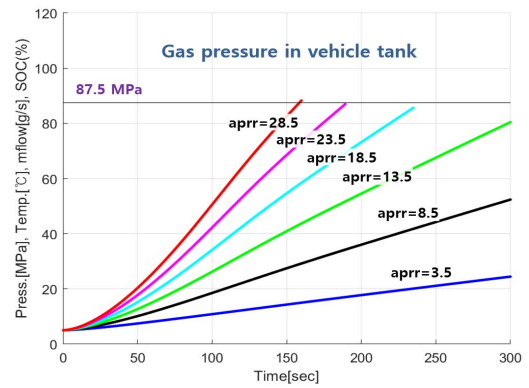


Fig. 11. Vehicle tank gas pressure when  $V_{ve}=99(L)$ ,  $P_0=5$  MPa,  $T_{amb}=10^\circ\text{C}$ ,  $T_{dc}=-17.5^\circ\text{C}$

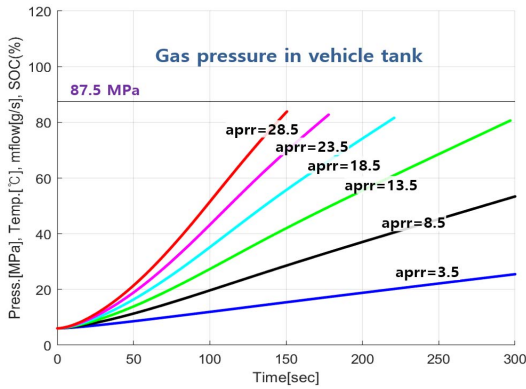


Fig. 10. Vehicle tank gas pressure when  $V_{ve}=99(L)$ ,  $P_0=5$  MPa,  $T_{amb}=40^\circ\text{C}$ ,  $T_{dc}=-40^\circ\text{C}$

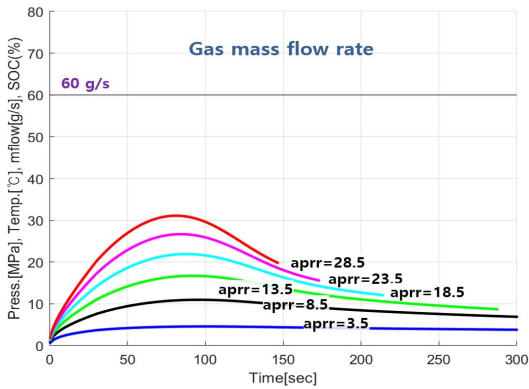


Fig. 12. Flow rate when  $V_{ve}=99(L)$ ,  $P_0=5$  MPa,  $T_{amb}=10^\circ\text{C}$ ,  $T_{dc}=-40^\circ\text{C}$

### 4.3. 충전가스 유속에 대한 영향

APRR을 변경하면서 충전을 진행하면 식(5)와 같이 충전하는 가스의 유량( $m$ )이 달라진다. Fig. 12 내지 Fig. 16은 자동차용기의 용량, 용기의 초기압력, 대기온도 및 공급가스온도를 변경할 경우 다양한 APRR에서 충전라인을 흐르는 질량유량이 어떻게 상승하는지를 보여주는 시뮬레이션 결과이다. 어떠한 경우에도 충전라인의 질량유량 변화 패턴에는 큰 변화가 없음을 보여준다. 특히 유량의 상한값인 60g/s에는 크게 못 미치는 것으로 나타났다. 결과적으로 Hot case의 경우에는 질량유량이 문제가 되지 않는다는 것을 확인할 수 있다.

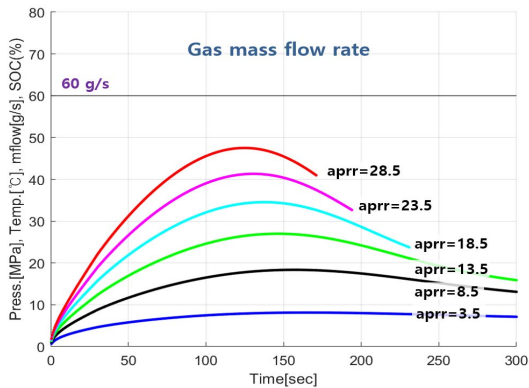


Fig. 13. Flow rate when  $V_{ve}=174(L)$ ,  $P_0=5$  MPa,  $T_{amb}=10^\circ\text{C}$ ,  $T_{dc}=-40^\circ\text{C}$



## V. 결론

수소충전 프로토콜 개발의 도구로 활용하기 위해 선행 연구에서 수소충전의 열역학적 모델을 도출하고 시뮬레이션을 위한 프로그램을 개발하였다. 이 번 연구에서는 그 프로그램을 활용하여 자동차용기의 용량, 용기의 초기 압력, 외기온도 및 가스공급온도를 변경하면서 APRR이 자동차용기 내 온도 및 압력과 충전유속에 어떻게 영향을 미치는지 살펴보았다.

첫째, APRR은 용기 내의 온도, 압력 및 충전유속에 직접인 영향을 미치는 것을 확인할 수 있었다. 둘째, 용기 내의 온도에 미치는 영향으로는 자동차용기의 용량이 증가하는 경우, 용기의 초기 압력이 감소하는 경우, 외기온도가 상승하는 경우 및 가스공급온도가 상승하는 경우 모두에서 상한온도인 85°C를 초과할 수 있다는 것을 확인할 수 있었다. 셋째, 용기 내의 압력에 미치는 영향에서는 자동차용기의 용량이 증가하는 경우, 용기의 초기 압력이 감소하는 경우, 외기온도가 상승하는 경우 및 가스공급온도가 상승하는 경우에도 압력 상한계인 87.5 MPa를 초과하지 않는다는 것을 확인할 수 있었다. 넷째, 충전유속은 자동차용기의 용량이 증가하는 경우, 용기의 초기 압력이 감소하는 경우, 외기온도가 상승하는 경우 및 가스공급온도가 상승하는 경우에도 유속상한계인 60 g/s에 많이 못 미치는 것을 확인할 수 있었다.

결과적으로 이 번 연구에서는 새로운 충전프로토콜을 개발하는 경우 APRR은 용기 내의 온도상승만을 고려하여 결정하면 되고, 용기 내의 압력과 충전유속은 감시대상 매개변수(Parameter)로 설정하여 관리하면 된다는 것을 확인할 수 있었다.

## 감사의 글

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)
- [2] Schneider, J., Meadows, G., Mathison, S.,

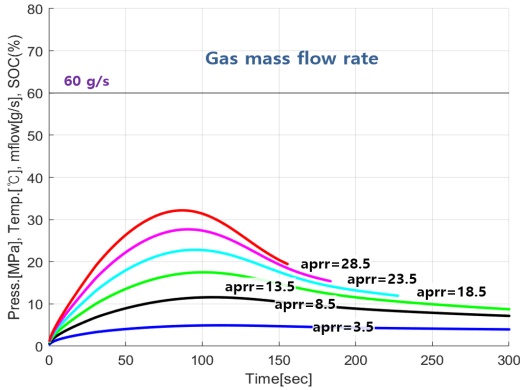


Fig. 14. Flow rate when  $V_{vc}=99(L)$ ,  $P_0=2$  MPa,  $T_{amb}=10^\circ C$ ,  $T_{de}=-40^\circ C$

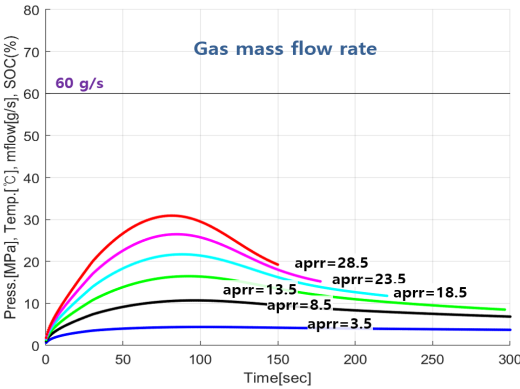


Fig. 15. Flow rate when  $V_{vc}=99(L)$ ,  $P_0=5$  MPa,  $T_{amb}=40^\circ C$ ,  $T_{de}=-40^\circ C$

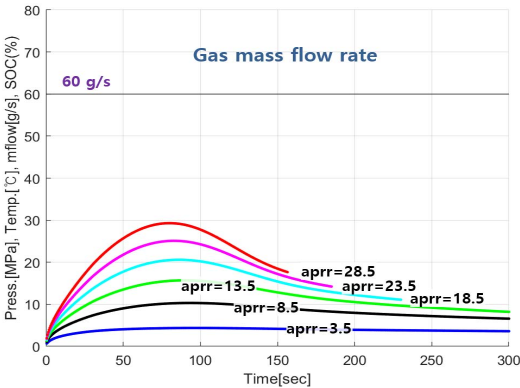


Fig. 16. Flow rate when  $V_{vc}=99(L)$ ,  $P_0=5$  MPa,  $T_{amb}=10^\circ C$ ,  $T_{de}=-17.5^\circ C$



- Veenstra, M. et al., "Validation and Sensitivity Studies for SAE J2601, the Light Duty Vehicle Hydrogen Fueling Standard," *SAE Int. J. Alt. Power*, 3(2), 257-309, (2014)
- [3] E. 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)
- [4] K. Handa, S. Yamaguchi, "Development of Real-time Pressure Loss Compensation Method for Hydrogen Refueling Station to Increase Refueling Amounts", *J. Automatic Engineering*, 9(4), 310-315, (2018)
- [5] S. Yamaguchi, Y. Fujita, 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, 227-232, (2006)
- [7] M. Deymi-Dashtebayaz, M. Farzaneh-Gord, H. R. Rahbari, "Simultaneous thermodynamic simulation of CNG filling process", *J. Chemical Technology*, 16(1), 7-14, (2014)
- [8] M. Deymi-Dashtebayaz, M. Farzaneh-Gord, N. Nooralipoor, H. Niazmand, "The Complete Modelling Of The Filling Process Of Hydrogen Onboard Vehicle Cylinders", *Brizilian J. Chemical Engineering*, 33(2), 391-399, (2016)
- [9] M. Mond, M. Kosaka "Understanding of Thermal Characteristics of Fueling Hydrogen High Pressure Tanks and Governing Parameters", *J. Alt. Power*, 2, 61-67, (2013)
- [10] J. Xiao, S. Ma, X. Wang, S. Deng, T. Yang, P. Bénard, "Effect of Hydrogen Refueling Parameters on Final State of Charge", *J. Energies*, 12, (2019)
- [11] M. Farzaneh-Gord, M. Deymi-Dashtebayaz, H. R. Rahbari, H. Niazmand, "Effects of storage types and conditions on compressed hydrogen fuelling stations performance", *J. Hydrogen Energy*, 37, 3500-3509, (2012)
- [12] Y. A. Çengel and A. J. Ghajar, "Heat and Mass Transfer: Fundamentals and Applications" 5th ed, McGraw-Hill, 18, 334-337, (2015)
- [13] T. Kuroki, N. Sakoda, K. Shinzato, M. Monde, Y. Takata, "Prediction of transient temperature of hydrogen flowing from pre-cooler of refueling station to inlet of vehicle tank", *J. Hydrogen Energy*, 43, 1846-1854, (2018)
- [14] P.L. Woodfield, M. Monde, T. Takano, "Heat Transfer Characteristics for Practical Hydrogen Pressure Vessels Being Filled at High Pressure", *J. Thermal Science and Technology*, 3, 241-253, (2008)
- [15] M. Monde, P. Woodfield, T. Takano, M. Kosaka, "Estimation of temperature change in practical hydrogen pressure tanks being filled at high pressures of 35 and 70 MPa", *J. Hydrogen Energy*, 37, 5723-5734, (2012)
- [16] M. Heath, P. L. Woodfield, W. Hall, M. Monde, "An experimental investigation of convection heat transfer during filling of a composite-fibre pressure vessel at low Reynolds number", *J. Experimental Thermal and Fluid Science*, 54, 151-157, (2014)
- [17] T. Bourgeois, F. Ammouri, M. Weber, C. Knapik, "Evaluating the temperature inside a tank during a filling with highly-pressurized gas", *J. Hydrogen Energy*, 40, 11748-11755, (2015)
- [18] J. Guo, J. Yang, Y. Zhao, X. Pan, L. Zhang, L. Zhao, J. Zheng, "Investigations on temperature variation within a type III cylinder during the hydrogen gas cycling test", 13, 3926-13934, (2014)
- [19] P.L. Woodfield, M. Monde, Y. Mitsutake, "Measurement of Averaged Heat Transfer Coefficients in High-Pressure Vessel during Charring with Hydrogen Nitrogen or Argon Gas", *Thermal Science and Technology*, 2, 180-191, (2007)
- [20] T. Kuroki, N. Sakoda, K. Shinzato, M. Monde, Y. Takata, "Dynamic simulation for optimal hydrogen refueling method to Fuel Cell Vehicle tanks", *J. Hydrogen Energy*, 43, 5714-5721, (2018)
- [21] D. G. Casey et al., "METHOD FOR CALCULATING HYDROGEN TEMPERATURE DURING VEHICLE FUELNG", Patent No.: US 7,647,194 B1, (2010)
- [22] M. Monde, Y. Mitsutake, P. L. Woodfield, S.

- Maruyama, "Characteristics of Heat Transfer and Temperature Rise of Hydrogen during Rapid Hydrogen Filling at High Pressure", *J. Heat Transfer-Asian Research*, 36, 13-27, (2007)
- [23] J. Xiao, P. Benard, R. Chahine, "Charge-discharge cycle thermodynamics for compression hydrogen storage system", *J. Hydrogen Energy*, 41, 5531-5539, (2016)
- [24] E. W. Lemmon, M. L. Huber, J. W. Leachman, "Revised Standardized Equation for Hydrogen Gas Densities for Fuel Consumption Applications", *J. Res. Natl. Inst. Stand. Technol*, 113, 341-350, (2008)
- [25] H. Chen, J. Zheng, P. Xu, L. Li, Y. Liu, H. Bie, "Study on real-gas equations of high pressure hydrogen", *J. Hydrogen Energy*, 35, 3100-3104, (2010)