

MC 기법을 이용한 수소 탱크 충전 성능 향상에 관한 연구

최지아¹ · 지상원² · 장지성^{2†}

¹국립부경대학교 일반대학원 기계시스템공학과, ²국립부경대학교 기계시스템공학전공

A Study on the Improvement of Hydrogen Tank Fueling Performance Using MC Methods

JIAH CHOI¹, SANGWON JI², JISEONG JANG^{2†}

¹Department of Mechanical System Engineering, Pukyong National University Graduate School of General Studies, 45 Yongso-ro, Nam-gu, Busan 48513, Korea

²Department of Mechanical System Engineering, Pukyong National University, 45 Yongso-ro, Nam-gu, Busan 48513, Korea

†Corresponding author :
jangjs@pknu.ac.kr

Received 25 August, 2023
Revised 25 September, 2023
Accepted 12 October, 2023

Abstract >> SAE J2601, hydrogen fueling protocols, proposes two charging methods. The first is the table-based fueling protocol, and the second is the MC formula-based fueling protocol. Among them, MC formula-based fueling protocol calculates and supplies the target pressure and pressure ramp rate (PRR) using the pre-cooling temperature of the hydrogen and the physical parameters of the tank in the vehicle. The coefficient of the MC formula for deriving MC varies depending on the physical parameters of the tank in the vehicle. However, most studies use the MC coefficient derived from SAE J2601 as it is, despite the difference in the physical parameters of the tank applied to the study and the tank used to derive the MC coefficient from SAE J2601. In this study, the MC coefficient was derived by applying the hydrogen tank currently used, and the difference with the fueling performance using the MC coefficient proposed in SAE J2601 was verified. In addition, the difference was confirmed by comparing and analyzing the fueling performance of the table-based method currently used in hydrogen fueling stations and the MC formula-based method using MC coefficient derived in this study.

Key words : MC method(MC 기법), Hydrogen fueling protocol(수소 충전 프로토콜), Hydrogen station(수소 충전소), Hydrogen charging(수소 충전), Hydrogen fueling simulation(수소 충전 시뮬레이션)

1. 서론

현재 수소 충전소에서 주로 사용하고 있는 table

기반 수소 연료 공급 프로토콜은 수소 자동차를 구매한 사용자들이 불편함을 느끼지 않도록 기존 휘발유 자동차 급유 시간인 3-5분 이내 충전 완료를 목표

로 개발되었다^{1,2)}. 수소 충전을 전술한 목표 시간 내에 완료하기 위해서는 고압의 기체 수소를 단시간에 주입해야 한다. 하지만 고압의 기체 수소가 충전소로부터 차량 내 탱크로 빠르게 유입되면 탱크 내 기체 수소가 압축되어 온도가 급격히 상승하는 문제가 발생한다. 예를 들면 현재 주로 이용하는 70 MPa급 type iv 탱크는 내부 온도가 상승하면 탱크를 구성하고 있는 라이너 소재인 고밀도 폴리에틸렌의 성능이 저하된다. 이를 방지하기 위해서는 수소 탱크 내부 온도를 85°C 이하로 유지해야 한다. 그러므로 국제 프로토콜인 SAE J2601에서는 충전소에서 공급하는 기체 수소를 -40°C에서 -33°C로 냉각시켜 충전하도록 규정하고 있다¹⁻⁵⁾.

수소 연료 공급 프로토콜인 SAE J2601에서는 두 가지 충전 방법을 제시하고 있다^{1,2)}.

첫 번째는 table 기반 충전 방법(이하 table 기법)이다. table 기법은 자동차 탱크 내 초기 압력과 수소 충전소 대기 온도 및 기체 수소 사전 냉각 온도를 이용하여 지정한 표에 기술된 평균 압력 변화율(average pressure ramp rate, APRR)을 결정하고, 이를 토대로 시간에 따라 공급 압력이 일정한 압력 변화량을 가지도록 기체 수소를 공급한다. 이 기법은 충전하는 동안 기체 수소의 사전 냉각 온도가 일정하다고 가정하고 있다. 하지만 수소 충전소의 냉각기 성능과 충전한 차량 수에 따라 사전 냉각 온도는 달라질 수 있다.

이를 보완하기 위하여 달라지는 사전 냉각 온도를 변수로 이용하는 두 번째 방법인 MC를 이용한 충전 방법(이하 MC 기법)이 개발되었다. MC는 수소 저장 탱크의 열용량이며 수소 충전 시 발생하는 열을 흡수하는 능력을 나타낸다. 이 기법은 기체 수소의 사전 냉각 온도와 차량 내 탱크의 물리적 파라미터를 이용하여 목표 압력과 압력 변화율(pressure ramp rate, PRR)을 계산하도록 규정하고 있다. MC 기법은 table 기법과 달리 실시간으로 계측한 기체 수소의 사전 냉각 온도를 변수로 사용하기 때문에 시간에 따른 공급 압력의 기울기가 변한다. 또한 차량 내 탱크의 크기, 소재 등 물리적 파라미터에 따라 MC를

도출하기 위한 방정식의 계수인 MC 계수가 달라진다. 이 계수는 시뮬레이션을 통해 구할 수 있다.

현재 MC 기법에 관한 연구가 활발히 진행되고 있지만, 연구에 적용한 탱크와 SAE J2601에서 MC 계수를 도출하기 위하여 사용한 탱크의 물리적 파라미터가 다름에도 불구하고 대부분의 연구에서는 SAE J2601에서 도출한 MC 계수를 그대로 이용하고 있다^{6,7)}.

본 논문에서는 현재 국내 수소 자동차에 사용하고 있는 수소 탱크를 시뮬레이션에 적용하여 MC 계수를 도출하고, SAE J2601에서 제시한 MC 계수를 이용한 충전 성능과의 차이를 검증하였다. 또한 현재 수소 충전소에서 주로 사용하고 있는 table 기법과 제안한 MC 계수를 적용한 MC 기법의 충전 성능을 비교 분석하여 그 차이를 확인하였다.

2. MC 기법 개요 및 MC 계수 도출

2.1 MC 기법

MC 기법을 이용한 수소 충전에는 두 가지 제어 요소가 존재한다^{8,9)}. 첫 번째 요소는 디스펜서를 통해 공급되는 기체 수소 압력이다. MC 기법은 실시간으로 계측한 디스펜서 출구 측 온도를 기반으로 PRR을 계산하고, 이를 이용하여 시간에 따라 공급 압력이 달라지도록 기체 수소를 공급한다. 두 번째 요소는 목표 충전 상태(state of charge, SOC) 도달에 필요한 목표 압력이다. 여기서 SOC는 차량 내 탱크의 충전 상태를 말하며, 표준 온도 15°C이고 정격 압력(nominal working pressure, NWP)일 때 기체 수소 밀도와 탱크 내부 기체 수소 밀도의 비를 백분율로 나타낸 것이다. 이는 식 (1)을 통해 계산할 수 있다. 탱크 내 기체 수소 밀도는 충전이 진행됨에 따라 변화하는 압력과 온도에 의해 달라진다. 그러므로 목표 SOC를 만족하는데 필요한 목표 압력 또한 달라진다. 목표 SOC는 95-100%이며 100%일 때가 완충 상태이다.

$$SOC(\%) = \frac{\rho(P, T)}{\rho(NWP, 15^\circ\text{C})} \times 100 \quad (1)$$

식 (1)에서 ρ 는 밀도, P 는 압력, T 는 온도를 나타낸다.

목표 압력을 계산하기 위한 주요 요소는 탱크 내 기체 수소의 온도이다. 하지만 탱크 내 기체 수소의 온도는 직접 계측하기 어려우므로 예측값을 계산하여 이용한다. 이때 기체 수소 온도의 예측값은 식 (2)를 이용하여 계산할 수 있다.

$$T_{expect} = \frac{m_{target} c_v T_{adiabatic} + T_{initial} MC}{MC + m_{target} c_v} \quad (2)$$

식 (2)에서 m 은 충전된 수소 질량, c_v 는 정적비열, MC 는 수소 저장 탱크 열용량을 나타낸다. 아래 첨자 *target*은 목표치, *initial*은 초기치, *expect*는 예측치, *adiabatic*은 단열이라고 가정했을 때의 값을 각각 나타낸다. 식 (2)에 나타낸 MC 는 식 (3)으로 구할 수 있다.

$$MC = AC + BC \times \ln \sqrt{\frac{U_{adiabatic}}{U_{initial}}} + GC \times (1 - e^{-KC \times \text{triangle}}) JC \quad (3)$$

식 (3)에서 AC , BC , GC , KC , JC 는 MC 계수이고, $U_{adiabatic}$ 은 단열일 때의 탱크 내부 에너지, $U_{initial}$ 은 탱크 내부 초기 에너지, Δt 는 30초를 초과하는 충전 시간을 나타낸다.

2.2 MC 계수 도출 방법

식 (3)에 나타낸 MC 계수를 구하기 위해 AMESim 프로그램(SIEMENS, Munich, Germany)을 이용하여 개발한 수소 충전 시뮬레이션 모델¹⁰⁾인 Fig. 1을 이용하여 시뮬레이션을 진행하였다. Fig. 1에 나타낸 모델은 충전소로부터 호스를 통해 주입된 기체 수소가 차량 내 탱크로 전달되는 과정을 나타내며, 이 과정에서 발생하는 호스, 노즐, 배관 등의 열전달과 수

소의 흐름을 반영하였다. 시뮬레이션에 이용한 수소 저장 탱크는 70 MPa 급 Type iv 탱크이며, Table 1에 이 연구에서 사용한 수소 저장 탱크 사양을 나타내었다. Table 2는 시뮬레이션에 이용한 경계 조건을 나타내며, 수소 충전 시 발생할 수 있는 다양한 경우를 대표하고 있다. 시뮬레이션은 총 24번 진행하였고, SOC가 100%일 때 종료하였다.

시뮬레이션 결과를 이용한 MC 계수 도출 과정은 다음과 같다.

먼저 식 (4), (5)에 나타낸 탱크 내 기체 수소 초기 질량 $m_{initial}$ 과 목표 질량 m_{target} 을 구한다.

$$m_{initial} = V \times \rho_{initial} \quad (4)$$

$$m_{target} = V \times \rho_{target} \quad (5)$$

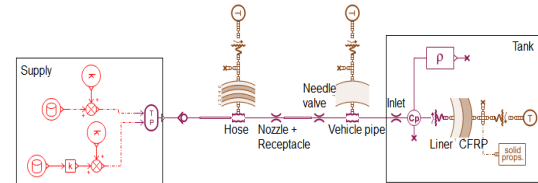


Fig. 1. A simulation model used to calculate MC coefficients

Table 1. Physical parameters of a hydrogen storage tank used in this study

Geometry	Units	Value
Volume	m ³	0.0522
Diameter	mm	363
Length	mm	870
Stored hydrogen mass	kg	2.1
Material Properties		
Type tank (Liner)		
Density	kg/m ³	946
Thermal conductivity	W/m/K	0.49
Specific heat capacity	J/kg/K	2050
Type tank (CFRP)		
Density	kg/m ³	1580
Thermal conductivity	W/m/K	0.7
Specific heat capacity	J/kg/K	1300

식 (4), (5)에서 V 는 수소 탱크 체적, $\rho_{initial}$ 과 ρ_{target} 은 각각 탱크 내 기체 수소 초기 밀도와 목표 밀도를 나타낸다.

식 (4), (5)에서 $\rho_{initial}$ 은 대기 온도와 탱크 내 초기 압력을 이용하여 계산하고, ρ_{target} 은 목표 SOC에 도달했을 때의 수소 압력과 온도를 이용하여 계산한다. 본 논문에서 이용한 탱크는 70 MPa급 탱크이므로 식 (1)을 참고하면 70 MPa, 15°C일 때 목표 SOC에 도달함을 알 수 있다. 여기서 밀도는 National Institute of Standards and Technology (NIST)의 데이터를 참조하여 구할 수 있다.

Table 2. Boundary conditions applied to simulations for deriving MC coefficients

No.	Ambient temperature []	Supply fuel temperature []	Initial pressure [MPa]	APRR [MPa/min]
1	0	-40	2	146.6
2	20	-40	2	57.0
3	40	-40	2	28.5
4	0	-40	20	115.7
5	20	-40	20	45.0
6	40	-40	20	22.5
7	0	-40	40	81.4
8	20	-40	40	31.7
9	40	-40	40	15.8
10	0	-40	60	47.1
11	20	-40	60	18.3
12	40	-40	60	9.2
13	0	-22.5	2	146.6
14	20	-22.5	2	57.0
15	40	-22.5	2	28.5
16	0	-22.5	20	115.7
17	20	-22.5	20	45.0
18	40	-22.5	20	22.5
19	0	-22.5	40	81.4
20	20	-22.5	40	31.7
21	40	-22.5	40	15.8
22	0	-22.5	60	47.1
23	20	-22.5	60	18.3
24	40	-22.5	60	9.2

다음으로 탱크 내 기체 수소 온도와 압력의 함수인 탱크 내 평균 엔탈피를 구하기 위해 NIST의 기체 수소 엔탈피 데이터를 참조하여 식 (6)을 통해 계산하였다.

$$h_{ave} = \frac{\sum_0^i [(m_{(i)} - m_{(i-1)}) \times 0.5(h_{(i)} + h_{(i-1)})]}{\sum_0^i (m_{(i)} - m_{(i-1)})} \quad (6)$$

식 (6)에서 h 는 엔탈피, 아래 첨자 ave 는 평균, i 는 충전 시간을 나타낸다. 평균 엔탈피를 이용하면 식 (7), (8)을 통하여 단열일 때의 비내부에너지 $u_{adiabatic}$ 와 내부에너지 $U_{adiabatic}$ 을 계산할 수 있다.

$$u_{adiabatic} = \frac{m_{initial}u_{initial} + (m_{target} - m_{initial})h_{ave}}{m_{target}} \quad (7)$$

$$U_{adiabatic} = m_{target} \times u_{ad} \quad (8)$$

다음으로 MC 는 식 (9)를 이용하여 구할 수 있다. 식 (9)에서 T_{target} 은 목표 온도를 나타내며, 제한 온도인 85°C로 설정하였다.

$$MC = \frac{m_{target}(u_{adiabatic} - u_{target})}{T_{target} - T_{initial}} \quad (9)$$

MC 계수는 식 (4)-(9)를 통해 산출한 값들을 이용하여 구할 수 있다. 먼저 식 (3)에서 AC , BC 를 도출하려면 우변의 세 번째 항이 0이 되어야 한다. 우변의 세 번째 항이 0이 되기 위해서는 변수인 $triangleret$ 가 0이 되어야 한다. Δt 는 t 가 30초일 때 0이 되므로 이때의 MC 를 $U_{adiabatic}/U_{initial}$ 에 대하여 나타내면 AC , BC 를 도출할 수 있다.

Fig. 2는 식 (3)의 AC 와 BC 도출에 사용한 그래프를 나타낸다. Fig. 2에서 점은 각 경계 조건별로 t 가 30초일 때 산출한 MC 데이터를 나타낸다. 이 데이터를 이용한 피팅 결과를 실선으로 나타내었다. 식 (10)은 피팅에 사용한 방정식을 나타낸다. 이를 이용

하면 $AC=0.2002$, $BC=0.3545$ 를 얻을 수 있다.

$$MC = AC + BC \times \ln \sqrt{U_{adiabatic} / U_{initial}} \quad (10)$$

Fig. 3은 식 (3)의 GC , KC , JC 도출에 사용한 그래프를 나타낸다. GC , KC , JC 를 구하기 위해서는 식 (3) 우변의 첫 번째 항과 두 번째 항이 0이 되어야 한다. 우변의 첫 번째 항과 두 번째 항은 $t > 30$ 일 때 일정한 값이므로 ΔMC 를 계산하면 0이 된다. 따라서 $t > 30$ 일 때 MC 와 $t=30$ 일 때 MC 의 차이 ΔMC 를 계산하고, 그 결과를 $t > 30$ 일 때 시간과 $t=30$ 일 때 시

간의 차이 Δt 에 대해 나타내면 GC , KC , JC 를 구할 수 있다. 모든 시간에 대하여 나타낼 수는 없으므로 Fig. 3에서는 Δt 가 0, 4, 30, 60, 90, 150, 270, 570, 1170, 2370, 3570 s일 때의 계산 결과를 나타내었다.

Fig. 3에서 점은 각 경계 조건별로 Δt 에 대해 ΔMC 를 계산한 후 각 Δt 별 평균값을 계산하여 나타낸 값이다. 이 값을 이용한 피팅 결과를 Fig. 3의 실선으로 나타내었다. 식 (11)은 피팅에 사용한 방정식을 나타낸다. 이를 이용하면 $GC=1.3695$, $KC=0.00003096$, $JC=0.1260$ 을 얻을 수 있다.

$$\Delta MC = GC \times (1 - e^{-KC \times \text{triangle}t})^{JC} \quad (11)$$

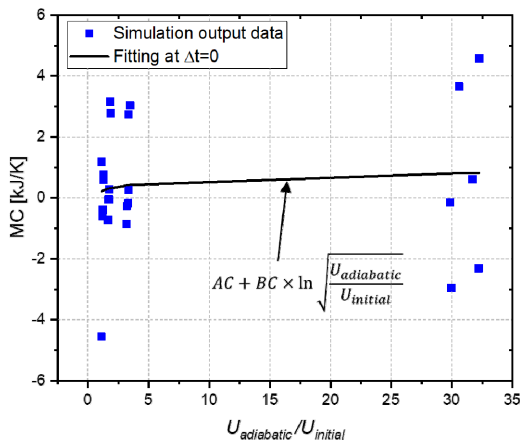


Fig. 2. MC according to $U_{adiabatic}/U_{initial}$ at $\Delta t=0$ and optimal fitting result

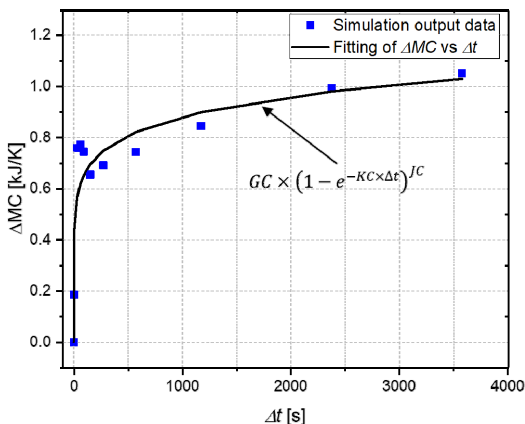


Fig. 3. ΔMC according to Δt and optimal fitting result

3. 수소 탱크 충전 시뮬레이션

3.1 MC 기법을 이용한 충전 및 시뮬레이션 절차

시뮬레이션에 이용한 MC 기법의 순서도를 Fig. 4에 나타내었다. MC 기법의 절차는 크게 다섯 가지 과정으로 구분할 수 있다. 먼저 통신 확인 과정이다. 충전을 시작하기 전에 차량과 통신이 잘되고 있는지 확인하고 통신 상태가 원활하다고 판단되면 충전을 시작한다. 충전이 시작되면 제어 요소 중 하나인 PRR을 계산한다. 이때 최초 30초 동안은 계산된 값을 이용하지 않고 초기 설정값을 이용하여 충전한다. 초기 설정값은 디스펜서 제조 업체에서 설정하는 값과 차량 내 탱크의 부피, 대기 온도 등에 의해 결정된다. 30초 이후부터는 계산된 PRR에 따라 차량에 기체 수소를 공급한다. 기체 수소가 탱크로 주입되면 디스펜서 출구 측의 온도와 압력을 측정하여 목표 압력을 계산한다. 탱크 내 기체 수소의 압력이 목표 압력에 도달하면 충전을 종료한다.

위 절차들을 구현하기 위하여 시뮬레이션 모델을 두 가지로 나누어 모델링하고 각 모델을 연동하였다. 첫 번째 모델은 Fig. 4에서 파란색 점선으로 나타낸 모델이다. 이 모델은 수소 공급 압력에 따른 탱크 내부 수소 충전 상태를 확인할 수 있는 모델이고, Fig. 1에 나타낸 선행 연구 시뮬레이션 모델⁹⁾을 이용하였다.

두 번째 모델은 Fig. 4에서 빨간색 점선으로 나타난 모델이다. 이 모델은 MATLAB의 Simulink 프로그램(MathWorks, Natick, MA, USA)을 이용하여 MC 기법에 필요한 제어 요소들을 계산한다. 첫 번째 모델은 두 번째 모델에서 PRR이 산출되면 그에 맞춰 가스 수소 공급 압력을 설정하여 탱크 충전 시뮬레이션을 수행한다. 두 번째 모델은 첫 번째 모델에서 계산한 노즐 토출 측 온도를 이용하여 PRR과 목표 압력을 계산한다.

3.2 수소 탱크 충전 시뮬레이션 결과 및 고찰

Table 3은 수소 탱크 충전 시뮬레이션에 사용한 MC 계수를 정리하여 나타낸다.

Table 4는 경계 조건을 나타낸다. 대기 온도, 탱크 내 초기 압력, 기체 수소의 공급 온도에 대해서는 충

전 기법에 상관없이 모두 같은 경계 조건을 적용하였다. MC 기법과 table 기법에 따라 달라지는 조건은 SAE J2601에 명시된 기준에 따라 결정하였다. 먼저 MC 기법에서 요구되는 조건 중 차량과 충전소 간의 통신은 1초에 한 번씩 이루어진다고 가정하였다. 다음으로 table 기법을 이용할 때 필요한 APRR은 국제 프로토콜 중 Type A T40-H70 표를 참고하

Table 3. MC Coefficients used in the simulation

Coefficients	This study	SAE J2601
AC	0.2002	1.1049
BC	0.3545	2.2047
GC	1.3695	22.220
KC	0.00003096	0.0016
JC	0.1260	0.8233

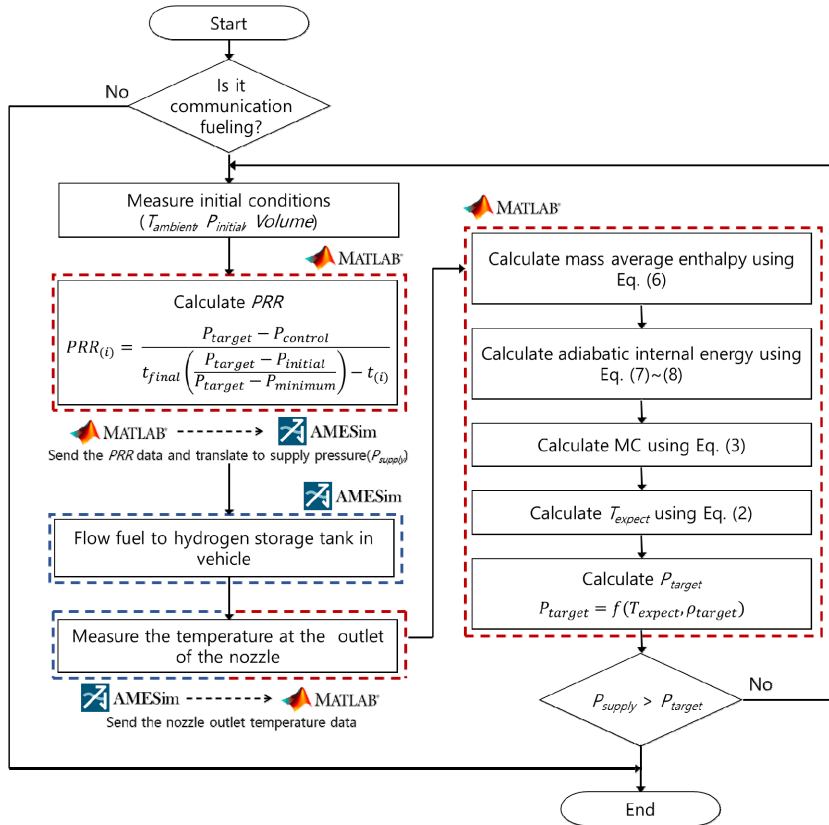


Fig. 4. Gas hydrogen fueling simulation procedure using MC method

였다.

시뮬레이션 결과를 Figs. 5-7에 나타내었다. Figs. 5-7에서 실선과 파선은 MC 기법 시뮬레이션 결과이

Table 4. Boundary conditions for comparison of fueling performance with different fueling methods

Parameters	Units	Value
Ambient temperature	°C	20
Initial pressure of tank	MPa	5
Supply temperature of hydrogen gas	°C	-40
MC method		
Communication frequency	s	1
Table method		
APRR	MPa/min	19.3
Target pressure	MPa	81.3

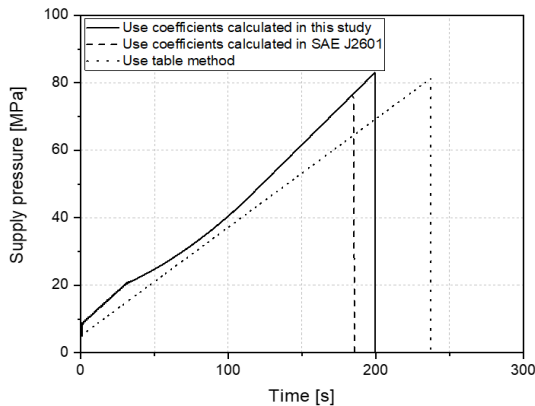


Fig. 5. Supply pressure variations during fueling simulation

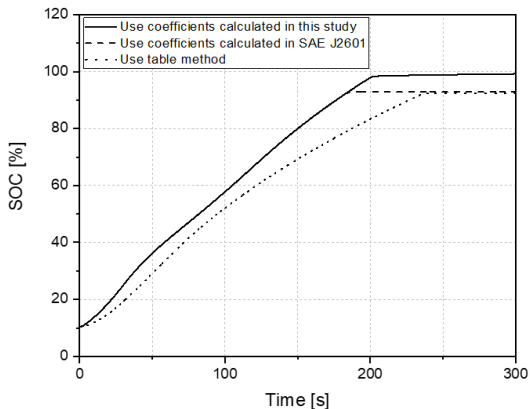


Fig. 6. SOC variations during fueling simulation

다. 실선은 본 논문에서 도출한 MC 계수를 이용한 결과이고 파선은 SAE J2601에 명시된 MC 계수를 이용한 시뮬레이션 결과를 나타낸다. 점선은 table 기법을 이용한 시뮬레이션 결과이다.

Fig. 5는 디스펜서 토출 압력인 수소 공급 압력 (supply pressure)을 나타낸다. 본 논문에서 도출한 계수를 이용한 MC 기법과 table 기법을 비교하면 최종 공급 압력은 각각 83, 81.3 MPa이며, 충전 소요 시간은 196초, 238초이다. 이를 통해 본 논문에서 도출한 계수를 이용한 MC 기법이 충전 시간은 더 짧고 최종적으로 더 많은 양의 기체 수소를 공급했음을 알 수 있다. 다음으로 본 논문에서 도출한 MC 계수를 이용한 시뮬레이션과 SAE J2601에서 제시한 MC 계수를 이용한 시뮬레이션 결과를 비교하였다. 분석 결과 최종 공급 압력은 각각 83, 76.9 MPa로 충전이 완료되었으며, 충전 소요 시간은 각각 196초, 185초이다. 이 결과로부터 충전 소요 시간은 SAE J2601에서 제시한 계수를 이용한 경우가 더 빨랐으나 최종 공급 압력은 본 논문에서 도출한 계수를 이용한 경우가 더 높음을 알 수 있다.

Fig. 6은 SOC 계산 결과를 나타낸다. 본 논문에서 도출한 계수를 이용한 MC 기법과 table 기법의 최종 SOC는 각각 98.3%, 94.3%이다. 이를 통해 본 논문에서 도출한 계수를 이용한 MC 기법이 table 기법보

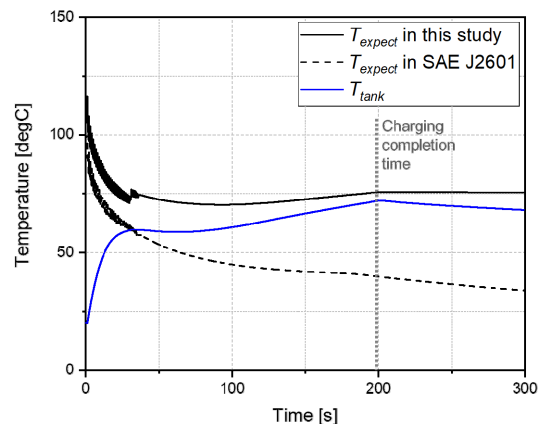


Fig. 7. Comparison of calculation results of gas hydrogen temperature in tank according to gas hydrogen fueling simulation using Fig. 1 and prediction results using Eq. 2

다 더 많은 양의 기체 수소를 충전하였음을 알 수 있다. 다음으로 본 논문에서 도출한 MC 계수를 이용한 경우와 SAE J2601에서 제시한 MC 계수를 이용한 경우의 최종 SOC는 각각 98.3%, 94.8%이다. MC 기법의 목표 SOC는 95-100%이기 때문에 SAE J2601에서 제시한 계수를 이용한 경우 목표 SOC에 도달하지 못하는 것을 알 수 있다. 반면에 본 논문에서 도출한 계수를 이용하였을 때는 98.3%로 목표 SOC에 도달함을 확인할 수 있다. 이러한 결과로부터 본 논문에서 도출한 계수를 이용한 MC 기법으로 충전하였을 때 가장 높은 SOC를 얻을 수 있음을 알 수 있다.

Fig. 7은 시간에 따른 T_{expect} 와 T_{tank} 를 나타낸 그래프이다. Fig. 7에서 파란색 실선으로 나타낸 T_{tank} 는 기체 수소 충전에 따른 탱크 내 기체 수소 온도를 나타낸다. T_{expect} 는 MC 기법을 이용하였을 때 충전이 완료된 시점의 T_{tank} 를 예측한 값이며 검은색으로 나타내었다. 본 논문에서 도출한 계수를 이용한 T_{expect} 가 T_{tank} 와 더 유사하며, SAE J2601에서 제안한 계수를 이용한 시뮬레이션 결과는 T_{tank} 와 큰 차이를 보임을 알 수 있다. 특히 T_{expect} 는 충전이 완료될 때 탱크 내부의 최종 온도를 예측하는 값이므로 충전이 완료된 시점의 온도를 중점으로 비교하면, 본 논문과 SAE J2601에서 제시한 계수를 이용하였을 때의 오차가 각각 4.76%, 41.94%이다. 따라서 본 논문에서 도출한 계수를 이용하였을 때 탱크 내부 온도를 더 정확하게 예측할 수 있음을 알 수 있다.

전술한 충전 시뮬레이션 결과를 Table 5에 정리하

여 나타내었다. Table 5로부터 본 논문에서 도출한 계수를 이용한 MC 기법을 적용한 충전 결과가 가장 우수함을 알 수 있다.

4. 결론

본 논문에서는 현재 국내 수소 자동차에 사용하고 있는 수소 탱크를 적용하여 MC 계수를 도출하고, SAE J2601에서 제시한 MC 계수를 이용한 충전 성능 및 table 기법을 이용한 충전 성능과 비교 분석하였다.

1) 본 논문에서 도출한 MC 계수를 이용한 MC 기법을 table 기법과 비교한 결과, MC 기법을 이용하면 충전 소요 시간은 17.65% 단축되었으며 SOC는 4.07% 상승하였음을 알 수 있다. 이를 통해 MC 기법을 이용하면 table 기법보다 더 많이, 더 빨리 탱크를 기체 수소로 충전할 수 있음을 알 수 있다.

2) 본 논문에서 도출한 계수와 SAE J2601에서 제시한 계수를 이용한 MC 기법을 비교하면 SOC는 각각 98.3%, 93%였다. MC 기법에서는 목표 SOC가 95-100%이므로 SAE J2601에서 제시한 계수를 이용한 경우는 목표 SOC에 도달하지 못했음을 알 수 있다.

3) 탱크 내 기체 수소 온도(T_{tank})와 MC 기법에서 계산한 탱크 내 기체 수소의 최종 온도 예측값(T_{expect})을 비교하면 SAE J2601에서 제시한 계수를 이용하였을 때는 큰 차이를 보였지만 본 논문에서 도출한 계수를 이용했을 때는 근소한 차이를 보였다.

4) 위 결과로부터 충전에 이용된 탱크와 MC 계수 도출에 이용된 탱크의 물리 파라미터가 다른 경우에 MC 기법을 사용하면 탱크 내 기체 수소 온도(T_{tank})와 최종 온도 예측값(T_{expect})의 오차가 커지므로 목표로 하는 충전 성능을 달성할 수 없음을 알 수 있다.

전술한 결과로부터 본 논문에서 도출한 MC 계수를 사용한 MC 기법의 충전 성능이 가장 우수함을 확인하였다. 그러므로 탱크의 물리 파라미터가 달라지는 경우 탱크에 적합한 MC 계수를 도출하여 MC 기법을 적용하면 가장 우수한 수소 탱크 충전 성능을 달성할 수 있음을 알 수 있다.

Table 5. Results of fueling simulation

Parameter	MC method		table method
	This study	SAE J2601	
Final supply pressure [MPa]	83	76.9	81.3
Fueling duration [s]	196	185	238
SOC [%]	98.3	94.8	94.3
Fueling completed status	Success	Failed	Success
Error rate between T_{expect} and T_{tank} at fueling completion [%]	4.76	41.94	-

후 기

본 논문은 부경대학교 자율창의학술연구비(2023년)에 의하여 연구되었음.

References

1. Society of Automotive Engineers (SAE) International, "Fueling protocols for light duty gaseous hydrogen surface vehicles (J2601_201407)", SAE International, 2014. Retrieved from https://www.sae.org/standards/content/j2601_201407/.
2. Society of Automotive Engineers (SAE) International, "Fueling protocols for light duty gaseous hydrogen surface vehicles (J2601_201612)", SAE International, 2016. Retrieved from https://www.sae.org/standards/content/j2601_201612/.
3. 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", *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 37, No. 7, 2012, pp. 5723-5734, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2011.12.136>.
4. R. O. Cebolla, B. Acosta, N. de Miguel, and P. Moretto, "Effect of precooled inlet gas temperature and mass flow rate on final state of charge during hydrogen vehicle refueling", *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 40, No. 13, 2015, pp. 4698-4706, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2015.02.035>.
5. W. Kang, J. Shin, S. H. Lee, B. R. Yoon, and U. Baek, "Development of hydrogen flow field standard in hydrogen refueling station", *Journal of Hydrogen and New Energy*, Vol. 33, No. 6, 2022, pp. 684-691, doi: <https://doi.org/10.7316/KHNES.2022.33.6.684>.
6. K. Reddi, A. Elgowainy, N. Rustagi, and E. Gupta, "Impact of hydrogen SAE J2601 fueling methods on fueling time of light-duty fuel cell electric vehicles", *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 42, No. 26, 2017, pp. 16675-16685, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.04.233>.
7. H. Luo, J. Xiao, P. Bénard, R. Chahine, and T. Yang, "Dynamic simulation of hydrogen fueling performance based on look-up table and MC methods", In: Z. Sun, P. Das, editors. *Proceedings of the 9th International Conference on Energy Engineering and Environmental Engineering. ICEEEE 2022; 2022 Dec 9-10; Sanya, China. Environmental Science and Engineering*. Cham: Springer; 2023, pp. 23-35, doi: https://doi.org/10.1007/978-3-031-30233-6_3.
8. R. Harty and S. Mathison, "Improving hydrogen tank refueling performance through the use of an advanced fueling algorithm - The MC method", In: *Proceedings of the National Hydrogen Association Hydrogen Conference & Expo; 2010 May 3-6; Long Beach, CA, USA*. Retrieved from <https://nha.confex.com/nha/2010/webprogram/Paper4917.html>.
9. S. Mathison, K. Handa, T. McGuire, T. Brown, T. Goldstein, and M. Johnston, "Field validation of the MC default fill hydrogen fueling protocol", *SAE International Journal of Alternative Powertrains*, Vol. 4, No. 1, 2015, pp. 130-144, doi: <https://doi.org/10.4271/2015-01-1177>.
10. J. A. Choi, S. W. Ji, and J. S. Jang, "A study on the modeling of fueling hydrogen tank in vehicle using dispenser", *Journal of Drive and Control*, Vol. 19, No. 2, 2022, pp. 36-44, doi: <https://doi.org/10.7839/ksfc.2022.19.2.036>.