

수소충전소의 연료 계량 방법에 따른 계량 오차가 발생하는 원인 고찰

이택홍^{1,†} · 강병우¹ · 이은웅² · 정진배² · 홍석진³

¹호서대학교 화학공학과, ²그린에너지공학과, ³(재)충남테크노파크, ³(주)에이치에스티

The Study to Find Causes for Measuring Differences of Hydrogen Fillings in Hydrogen Refueling Station

TAECK HONG LEE^{1,†}, BYOUNG WOO KANG¹, EUN WOUNG LEE², CHUNG JIN BAE², HONG SUK JIN³

¹Departments of Chemical Engineering and Green Energy, Engineering the Graduate School, Hoseo University, 20 Hoseo-ro 79beon-gil, Asan 31499, Korea

²Chungnam Techno Park, #202, 10 Sucheol-gil, Yesan-Eup, Yesan 32422, Korea

³HST CO., LTD., 33 Saeori-ro 286beon-gil, Tanhyeon-myeon, Paju 10858, Korea

[†]Corresponding author :
taecklee@hoseo.edu

Received 29 January, 2018
Revised 23 February, 2018
Accepted 28 February, 2018

Abstract >> There has been an measuring errors between state of charge (SOC; kg) value and mass flow meter (MFM) value in dispenser for hydrogen refueling station. Finally, we observed average 15.5% weight difference between these two values and the MFM readings show a 15.5% higher readout of the SOC readings. Each car was charged with average 2.66 kg of hydrogen fuel during this period. In the initial charging of the day shows less measuring value than the final charging with the maximum 0.038 kg times number of filling. There is no effects of atmosphere temperature change for the hydrogen filled weight during one full year such as January's cold winters and August's hot summers.

Key words : Hydrogen refueling station(수소충전소), State of charge(충전 상태), Mass flow meter(질량식 유량계), Fuel muring mthod(연료 계량 방법), Fuel cell electric vehicle(수소전기차)

Nomenclature

HMI: human-machine interface
MFM (kg): mass flow meter, 질량유량계
NREL: National Renewable Energy Laboratory
SOC (kg): state of charge, SAE J2601에서 정의한 것으로 연료탱크의 충전상태(%)를 kg으로 환산하여 수소 충전량(kg)을 표현한 것

수소계량오차(kg): MFM (kg)-SOC (kg)

1. 서론

1.1 수소충전소 현황과 보급계획

2015년 12월 유엔 기후변화협약 당사국총회(COP21)에서 신기후체제 합의문인 ‘파리 협정(Paris Agreement)’

Table 1. HRS construction plan of South Korea

	2017. 1	2020	2022
Hydrogen fuel cell vehicle	126	10,000	15,000
Hydrogen refueling station	14	100	310

채택을 시작으로 기존의 화석연료 중심의 에너지 체제에서 저탄소 경제로의 이행이 강제되고 있다^{1,2)}. 신기후체제 시대에서는 기존의 화석연료 기반의 경제성장에서 지속가능한 에너지를 이용한 경제성장으로 패러다임의 전환이 필수적이다³⁾. 수소는 그 소비 과정에서 부산물로 순수한 물만을 생산하고 에너지 효율이 매우 높은 특징⁴⁾을 가지고 있다. 또한 잉여 에너지를 수소가스로 전환이 용이하여 세계 각국은 수소를 에너지 기반으로 하는 경제체제로의 이행을 추진 중이다^{5,6)}.

우리나라는 2001년부터 수소충전소 건설을 시작하여 지금까지 21개소의 수소충전소를 건설하였으며 운영 정지된 곳을 제외하고 현재 11개소가 운영되고 있다. 11차 무역투자진흥회의 및 미세먼지 관리 종합대책 등에 따르면 정부는 Table 1과 같이 2020년까지 수소충전소 100개를 설치하고 2022년까지 310개소의 충전소를 설치할 계획이다⁷⁾.

우리나라의 수소충전소 건설 여건은 NREL의 수소충전소 분석에 따르면 state of the art (SOTA) 단계로서 기술개발과 시장 환경이 초기 단계이다. 현재 수소충전소 건설과 운영에 관한 법령과 규제는 초기 단계에 있고 「수소 융복합 및 패키지형 충전소 특례고시」 등 합리적인 상세기준을 정립하고 있는 중이다. 현재 단계에서는 수소충전소의 운영은 정부와 지방자치단체의 지원금을 바탕으로 운영되고 있으며, 수소 판매를 통한 경제성을 실증한 사례는 없고 현재는 H2Korea를 중심으로 수소판매 단가에 대한 기준을 마련하고 있다.

1.2 정량 계량의 필요성

선행 연구⁸⁾를 통해 수소충전소에 들어온 입고량

에 비하여 출고된 수소의 양이 더 적게 계량되는 것으로 밝혀졌다. 내포 수소충전소의 경우 2016년 1년 동안 28.7%의 정산 손실이 발생하였다. 주유소에서 휘발유 판매에 대한 수익이 5% 내외로 알려져 있는데, 출고량에서 28.7%의 손실이 있다면 수소충전소 운영에 적자를 겪을 수밖에 없고 정부지원 없이는 운영이 불가하게 된다. 이는 민간 자본의 유입의 저해 요소가 되어 정부가 계획 중인 수소충전소 보급 계획에 어려움이 발생할 수 있다. 따라서 수소충전소의 정량 계량에 대한 연구가 필요하다.

1.3 연구 목적과 범위

SOC와 MFM은 그 계량 특성상 오차가 발생할 수 있는 가능성을 가지고 있다. SOC 방식은 수소전기차에서 충전 관련 정보를 전송받아 그 데이터 값을 J2601의 규정에 따라 계산하여 충전량을 계측한다. 그러나 MFM 방식의 경우 수소충전소의 압축탱크에서 디스펜서를 통해 나가는 양을 직접 계측하는 구조를 가지고 있다. SOC는 계측방식이 밖에서부터 안으로 가지고 들어오는 정보이고, MFM은 수소충전소 안에서 밖으로 내보내는 정보를 계측한 것이다. 계측 방식의 구조적 특성상 서로 다르게 계측할 수 있는 가능성이 존재한다. 본 연구에서는 현재 통용되고 있는 SOC를 MFM값과 비교하여 어떤 요인에 의해 오차가 발생하는지 분석하고자 한다.

따라서 본 연구에서는 수소충전에 대한 계량 오차의 원인을 분석하여 정량 계량을 하기 위한 기초 데이터를 마련하고, 이를 활용하여 수소충전의 정량 계량에 대한 기준을 세우는 데 활용하고자 한다.

2. 연구 방법

2.1. 연구 조건

2.1.1 연구 표본

충남 내포충전소에서 2016년 수소전기차에 공급한 충전 데이터를 사용하였다. 충전 데이터는 수소

전기차의 초기압력, 최종압력, SOC값(kg), MFM값(kg) 등으로 구성되어 있다. 디스펜서에서 적외선 통신을 통해 계량값을 읽어 들여 HMI를 통해 통제실의 데이터베이스에 기록된다. 그러나 간혹 디스펜서 수신된 오류가 나는 데이터 값들이 포함되는 경우가 있다. 본 연구에서는 데이터의 신뢰도와 외기기온을 고려하여 247개의 표본 데이터를 선정하여 한 달 동안 매일 일어나는 충전 오차의 거동을 분석하였다.

2.1.2 State of charge (SOC) 계산 방법

SOC는 수소충전소 국제표준인 SAE J2601에서 정의하고 있다. SOC는 수소차량의 탱크 충전 상태를 지시하는 값으로 0-100%로 표기된다. 현재 수소충전소는 SOC (%)를 kg으로 환산하여 이것을 기준으로 수소충전량을 계량하는 데 사용하고 있다. 내포수소충전소를 이용하는 수소전기차인 투산 IX (수소저장용기 부피 0.144 m³)은 SOC가 100%일 때, 5.64 kg의 수소가 충전됨을 기준으로 충전량이 계산되어 디스펜서 패널에 표기된다. SOC값은 J2601에서 다음과 같이 정의된다⁹⁾.

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

NWP: nominal working pressure, ρ: density, the density of Hydrogen at 35 Mpa at 15°C=24 g/L, the density of Hydrogen at 70 Mpa at 15°C=40.2 g/L.

2.1.3 MFM 사양

MFM는 질량 유량계이다. 단위 시간에 흐르는 질량을 계량한다. MFM는 Fig. 1에서 보는 바와 같이 디스펜서 내부에 설치되어 있으며 차량에 충전되는 수소의 질량을 계량한다. 수소충전소의 모니터링 시스템이 MFM으로부터 수소의 질량 유량값을 관찰하면서 과충전이나 수소누출 등의 사고를 감시한다. 디스펜서 계량값이 차량으로부터 부피, 온도, 압력 등을 통해 수소전기차에서 충전량 데이터를 받아서 오는 것이라면 MFM은 수소충전소의



Fig. 1. Location of mass flow meter in dispenser (MFM)

Table 2. Specifications of MFM

Maker	RHEONIK
Serial No.	RHM-19764
Nominal measurement range	10 kg/min
Temperature range	-45°C to 120°C
Connection size	Autoclave 3/8" MP
Nominal diameter	10
Max allowable pressure	870 bar
Max allowable temperature	120°C
Origin	Made in Germany

디스펜서에서 자체적으로 충전량을 계량하는 점에서 다르다.

연구에서 사용된 MFM은 Coriolis type이 사용되고 있다. Coriolis type MFM는 코리올리스 힘 Fc가 질량과 속도의 곱에 비례한다는 원리를 이용하여 코리올리스힘을 측정하여 질량 유량을 구한다.

본 연구에서 사용하는 질량 유량계는 오차범위가 ±0.11% 이내로 보증하고 있는 RHEONIK의 Mass Flowmeter RMH 04를 사용하였다. 유량계의 검정은 2015년 3월 16일에 수행하였다. 본 연구에서 사용한 질량 유량계의 규격은 Table 2와 같다.

MFM의 사양은 수소충전소의 충전 용량을 계량하기에 적합하다. 내포수소충전소는 4.9 kg (=5.64×87%)을 5분 이내 충전하고 있으므로 nominal measurement range의 범위에 포함된다. 디스펜서에서 차량으로 충전되는 온도는 J2601 규격에 따라 pre-cooling이 -40°C, -20°C의 두 가지 시나리오를 권장하고 있는데 이는 MFM의 사용 범위에 포함된다. 또한 내포

Table 3. Hardware summary for Naepo HRS

Equipment	Specificaiton
Compressor	<ul style="list-style-type: none"> Capacity: 200 Nm³/hr Comp. type: diaphragm
Storage tank	<ul style="list-style-type: none"> Capacity: 1,000 L×9 EA (3,600 Nm³) Charging pressure: 400 bar
Dispenser	<ul style="list-style-type: none"> Charging time: charging time below 5 minute per car, 6 car per 1 hr (from SOC 10% to SOC 97% at 700 bar) Charging temperature: below 80°C
Capacity	<ul style="list-style-type: none"> 270 kg/day 40 car/day (working time in 9 hr)

충전소의 경우 안전한 운영을 위하여 SOC (%)값이 97%를 넘지 않도록 운전하고 있어 최대 770 bar에 이르기 전에 충전을 종료한다. 본 MFM은 870 bar까지 측정할 수 있다. 따라서 내포수소충전소의 충전에 대한 계량은 본 MFM 유량계로 측정이 유효한 것으로 판단된다.

2.1.4 내포수소충전소 사양

내포수소충전소는 튜브트레일러를 통하여 수소를 공급받는 충전소이다. Table 3은 내포수소충전소의 시스템 현황이다. 설계 충전 조건은 수소전기차 1대가 차량 가스 잔량 10%에서 97% 이상 충전하는 데까지 5분 이내 충전을 기준으로 하고 있다. SOC (%)가 100%일 때를 5.64 kg으로 정의하여 사용하고 있다. 또한 최대 충전 피크시 시간당 6대(1대당 4.9 kg), 1일(9시간 기준) 40대 충전 조건으로 설계되었다. 가스충전온도는 SAE J2601 T40 조건을 만족하는 것으로 설계되었다.

2.1.5 수소충전차량 사양

내포수소충전소는 충청남도 공용 수소연료전지 차량 17대와 충남테크노파크와 국토부 소속의 연료전지 차량 4대 등 총 21대의 차량에 수소를 공급하고 있다. 충청남도청이 보유한 17대의 차량은 현대 투산 IX FUEL CELL이다. 투산 IX FUEL CELL의 제원은 Table 4와 같다.

Table 4. Specifications of fuel cell electric vehicle for this study

Fuel cell type	Proton exchange membrane
Fuel cell stack power (max)	100 kW
Electric motor power (max)	99.9 kW (134 hp)
Maximum hydrogen storage capacity	5.63 kg at 10,000 psi
Battery energy (Li-on polymer)	0.95 kWh
Battery power (max)	24 kW
Battery capacity	60 AH

2.2. 실험 방법

계량 오차에 영향을 줄 수 있는 요인으로 충전량(kg), 충전압력비(bar), 계절(외기온도), 누적충전에 따른 영향을 파악하였다.

2.2.1 충전량(kg)

충전량(kg)은 SOC값(kg)이나 MFM값(kg) 둘 중 하나를 기준으로 설정할 수 있다. 본 연구에서는 현재 수소충전소에서 사용되고 있는 SOC값(kg)을 충전량 기준으로 설정하였다. SOC값과 MFM값이 일정한 오차비율을 가지는 경우 충전량이 늘어남에 따라 오차량도 늘어날 것이므로 SOC값(kg)의 변화에 따른 MFM/SOC 값(%)과 MFM-SOC 값(kg)의 거동을 분석하였다.

2.2.2 충전압력비(bar)

SOC값은 식 (1)과 같이 수소충전차량으로부터 제공되는 온도와 압력으로 결정되어 진다. 따라서 온도와 압력을 수소계량오차에 영향을 미칠 수 있는 변수로 설정하였다. 최초압력과 최종압력 각각을 단순 변수로 하여 거동을 선행 분석하였는데 최초압력과 최종압력은 SOC 충전량 계산 과정에서 포함되어 나타나기 때문에 본 연구에서는 제외하였다. 단순 변수를 대신하여 본 연구에서는 최초압력과 최종압력의 차이에 따라 오차가 어떻게 거동하는지 충전압력비율(=최종압력/최초압력)에 대한 오차의 거동을 분석하였다.

2.2.3 외기온도(계절)변화

충남 내포지방의 외기온도는 겨울철 평균 -1.7°C 에서 여름철 평균 26.4°C 까지 변화한다. 최대 28°C 의 외기온도 편차는 수소전기차 연료탱크의 온도에 직접적인 영향을 미치므로 외기온도 변화에 따라 수소계량오차가 어떻게 거동하는지 분석하였다.

2.2.4 누적충전

내포수소충전소는 하루 평균 10-12회의 충전을 하고 있다. 수소충전소는 100-700 bar에 이르는 고압이 간헐적으로 충전되는 특징이 있다. 고압으로 간헐적으로 누적되는 충전 특성이 계량에 영향을 미칠 수 있는지 분석하였다. 하루 동안 최초충전에서 최종충전에 이르기까지 충전이 누적됨에 따르는 계량 오차의 거동을 분석하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 수소충전량(SOC [kg]) 분포

MFM과 SOC의 계량 오차를 분석하기에 앞서 표본 충전 데이터에서 1회 충전시 어느 정도의 양을 충전하는지 고찰하였다. Fig. 2와 같이 충전량 분포를 분석한 결과 수소전기차는 1 kg에서 2.5 kg을 가장 많이 충전하는 거동을 나타내었다. 평균 충전량은 2.66 kg으로 측정되었다.

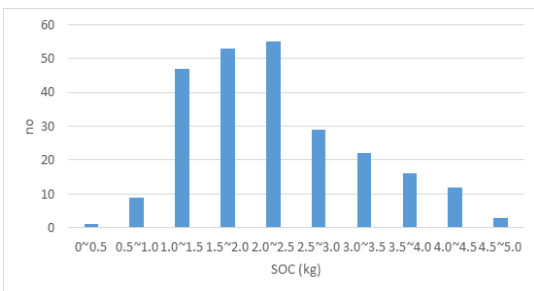


Fig. 2. Filled hydrogen weight for cars with SOC reading values (kg)

3.2. 충전량(kg)

3.2.1 MFM/SOC 값(%) 특성

수소전기차에 수소를 충전하여 SOC값(kg)이 증가함에 따라 MFM/SOC 값의 변화량을 Fig. 3과 같이 분포그래프로 나타내었다. 그 결과 SOC값이 1 kg에서 5 kg까지 증가하는 동안 MFM/SOC 값(%)은 평균 115.5%로 일정하게 수렴하였다. 이론상 MFM과 SOC값이 동일한 유량에 대하여 동일한 계측값을 가진다면 MFM/SOC 값(%)은 100%가 되어야 한다. 그러나 MFM/SOC는 평균 115.5%로 MFM이 SOC값보다 15.5% 더 높게 계측되는 것으로 분석되었다.

유사한 오차비율이 반복적으로 나타나는 것을 볼 때 SOC와 MFM의 계량 오차는 단순 계량 기기의 오작동이나 일시적인 현상이 아니라 SOC와 MFM 상호 간에 오차비율이 있다고 판단된다.

3.2.2 MFM-SOC (kg) 특성

Fig. 4는 SOC 충전량(kg)과 MFM-SOC (kg)의 분포그래프를 그린 것이다. 만약 3.2.1에서 밝힌 것과 같이 MFM과 SOC 사이에 15.5%의 오차비율이 일정하다면 y축의 MFM-SOC의 값은 x축의 동일한 SOC값에 대하여 동일한 값을 나타내어야 한다. 또한 SOC (kg) 값이 증가할 때 MFM-SOC 값(kg)은 $y=0.155x$ 의 그래프를 가지며 증가해야 한다.

$$\text{MFM} = 1.155 \times \text{SOC} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \text{MFM-SOC} &= 1.155 \times \text{SOC} - \text{SOC} \\ &= 0.155 \times \text{SOC} \end{aligned} \quad (3)$$

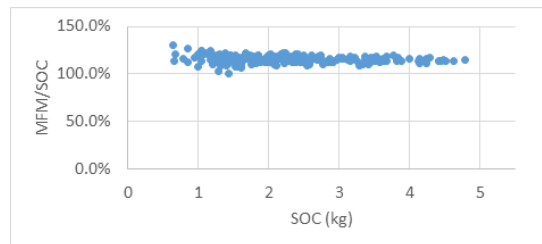


Fig. 3. Properties of SOC (kg)-MFM/SOC

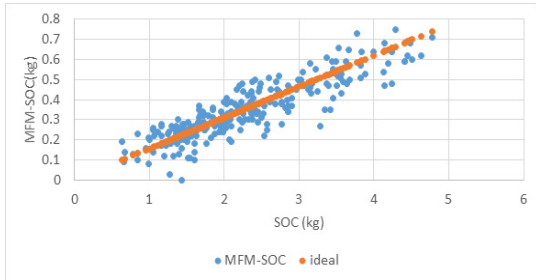


Fig. 4. Weighing errors between SOC (kg) and MFM-SOC (kg)

그러나 Fig. 4에서 보이는 바와 같이, 동일한 SOC 값일 때 계량오차가 동일하지 않고 상호 간에 편차를 나타내고 있다. 이는 계량오차가 SOC와 MFM 오차비율에 의해서만 발생하는 것이 아니라 다른 요인에 의해서도 계량 오차가 복합적으로 영향을 주고 있다고 판단된다.

3.3 충전압력비(bar): MFM-SOC 값(kg) 특성

압력에 의한 계량 오차의 영향을 분석하기 위해 충전압력비(충전최종압력/충전초기압력)에 따른 계량 오차의 변화를 분석하였다. 충전초기압력과 충전최종압력은 각각을 단독 변수로 설정하지 않았다. 충전초기압력과 충전최종압력은 SOC 충전량을 계산할 때 각각 모두 사용되는 변수여서 SOC 충전량 그래프와 유사한 분포를 나타낸다. 따라서 충전압력에 의한 영향을 도출하기 위하여 충전최종압력을 충전초기압력으로 나눈 충전압력비를 변수로 하여 초기압력과 최종압력의 편차 비율의 증가에 따라 계량 오차에 대한 영향을 분석하였다.

그 결과 충전압력비와 계량 오차의 분포는 다른 변수와는 달리 선형적으로 증가하거나 감소하는 경향성을 나타내지 않고 Fig. 5와 같이 로그함수 그래프 형태로 나타났으며 충전압력비가 최소 1.23에서 최대 13.24까지 증가하는 동안 평균 0.8 kg 이내로 수렴하는 형태로 나타났다. 식 (1)에 따라 충전압력비는 충전량과 직접적인 연관 관계에 있으므로 충전압력비의 증가는 충전량의 증가에 영향을 미치고 충

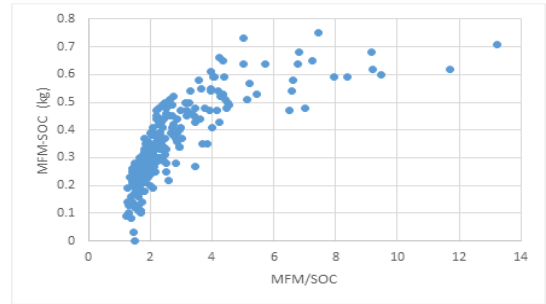


Fig. 5. Measuring errors between MFM/SOC vs. MFM-SOC

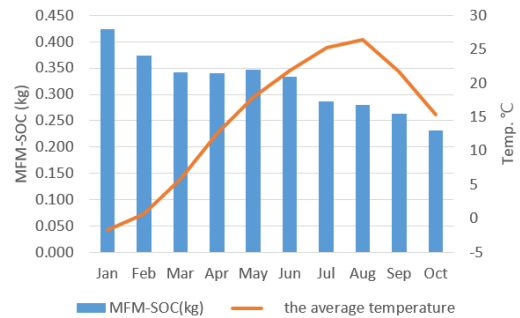


Fig. 6. Monthly measuring errors along with month by month

전량의 증가에 따라 계량 오차가 증가하는 것으로 판단된다. 충전압력비에 의한 계량 오차의 최대값이 0.8 kg 의 값으로 수렴하고 있고 충전량에 의한 최대 계량 오차도 0.8 kg으로 동일하다. 따라서 충전압력비는 그 자체가 단독 변수로 영향을 미치는 것보다는 충전량을 통하여 계량 오차에 영향을 미치는 것으로 판단된다.

3.4 외기온도(°C): MFM-SOC 값(kg) 특성

식 (1)에 따라 SOC값은 연료탱크의 온도변화에 직접적인 영향을 받는다. 외기온도에 의한 영향을 분석하기 위하여 기상청에서 2016년 충남 서산지방의 월별 평균 기온데이터를 사용하고 1월부터 10월까지의 각각의 월별 평균 계량 오차값을 사용하였다(11월과 12월의 데이터는 디스펜서 설비 교체로 인해 SOC값을 정확히 분석할 수 없어 제외하였다). 1월부터 10월까지를 x축으로 두고, 그 달에 발생하는 각각의

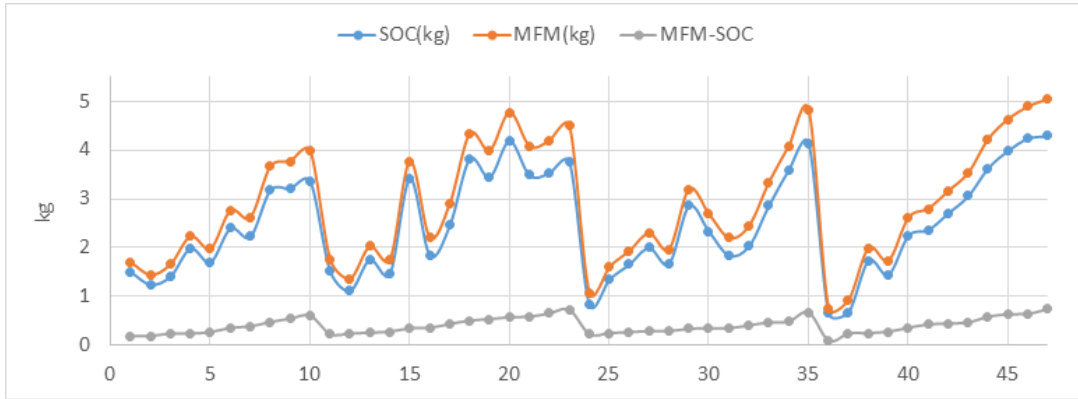


Fig. 7. Diagram of SOC, MFM, and MFM-SOC

평균 수소 계량 오차와 평균 외기온도를 y축에 두고 그 거동을 분석하였다.

그 결과 Fig. 6에서 보는 바와 같이 외기온도가 1월 -1.7°C에서부터 8월 26.4°C로 변화할 때 월별 계량 오차는 온도변화에 직접적인 영향을 받지 않고 있음을 확인할 수 있었다. 외기온도가 1월부터 8월까지 증가하고 8월부터 10월까지 감소하는 거동을 나타내었다. 그러나 월별 편차는 1월부터 4월까지 감소하다가 5월에 다시 증가하고 이후 다시 감소하는 그래프의 형태를 나타내고 있다. 외기온도의 영향이 수소 계량 오차에 직접적인 영향을 미치지 않는 것으로 판단된다.

3.5 누적충전횟수: MFM-SOC 값(kg) 특성

Fig. 7은 2016년 5월 4일부터 5월 11일까지 47개 표본의 SOC값(kg), MFM값(kg), MFM-SOC 값(kg)을 그래프로 나타낸 것이다. 그래프에서 나타난 바와 같이 하루 동안 충전횟수가 증가할수록 MFM-SOC 값(kg)이 비례하여 증가하는 것으로 나타났다. 특히 하루의 충전을 마치고 다음 날 충전이 시작되는 경우에 MFM-SOC 값이 초기화되어, 최초충전에서 최종충전에 이르기까지 MFM-SOC 값이 다시 증가하는 특성을 나타내었다. 충전횟수가 증가할수록 MFM-SOC 값이 더 증가하는 특성은 표본 81개를 포함하여 247개의 모든 데이터 값에서도 동일한 특성을 나타내고

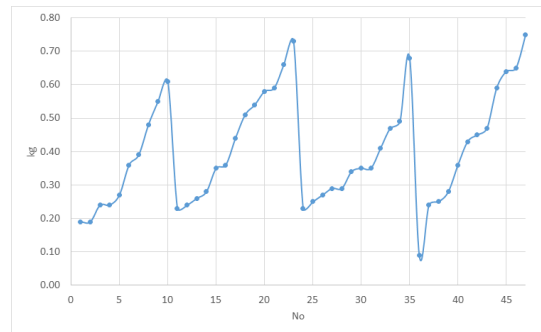


Fig. 8. Measuring errors for 4 consecutive days and peaks are the end of the filling day

있다.

3.2.1에 밝힌바와 같이 SOC와 MFM은 15.5%의 일정한 오차비율을 가지고 있다. 계량 오차가 SOC와 MFM의 오차비율에 의해서만 발생한다면 하루 동안 충전하는 동안 MFM-SOC 값은 $0.155 \times \text{SOC}$ 로서 SOC 증감에 따라 MFM-SOC 값도 증감을 따라가야 한다. 적어도 SOC가 증가하는 거동을 보일 경우 MFM-SOC 값도 증가하는 거동을 보여야 하고, SOC가 감소하는 거동을 보이는 경우 MFM-SOC도 감소하는 기울기를 가져야 한다.

SOC가 47회의 충전이 이루어지는 동안 SOC의 그래프가 감소하는 횟수가 16회이었다. 3.2.1에 따르면 MFM-SOC는 SOC에 비례하므로 MFM-SOC 값도 16회 감소하는 그래프를 예상하였다. 그러나 Fig. 8에서와 같이 1회를 제외하고는 모든 구간에서 지속

Table 5. Results of daily error ratio

Date	The first error (kg)	The last error (kg)	Filling number	Slope	Ratio (%)
Day 1	0.12	0.59	8	0.0588	5.88%
Day 2	0.13	0.62	12	0.0408	4.08%
Day 3	0.19	0.61	10	0.0420	4.20%
Day 4	0.23	0.73	13	0.0385	3.85%
Day 5	0.23	0.68	12	0.0375	3.75%
Day 6	0.09	0.75	12	0.0550	5.50%
Day 7	0.18	0.64	14	0.0329	3.29%
Day 8	0.26	0.54	8	0.0350	3.50%
Day 9	0.22	0.65	10	0.0430	4.30%
Day 10	0.16	0.59	12	0.0358	3.58%
Day 11	0.22	0.68	15	0.0307	3.07%
Day 12	0.11	0.71	15	0.0400	4.00%
Day 13	0.03	0.6	15	0.0380	3.80%
Day 14	0.08	0.53	14	0.0321	3.21%
Day 15	0	0.48	13	0.0369	3.69%
Day 16	0.12	0.54	14	0.0300	3.00%
Day 17	0.11	0.62	15	0.0340	3.40%
Day 18	0.2	0.48	14	0.0200	2.00%
Day 19	0.17	0.39	8	0.0750	7.50%
Day 20	0.1	0.37	13	0.0208	2.08%
Average			12.35	0.0388	3.88%

적으로 MFM-SOC 값이 증가하는 것으로 나타났다. 이 결과는 3.2.1에서 분석한 오차 원인 이외에도 계량 오차에 영향을 미치는 것이 있다는 것으로 분석된다.

추가적인 계량 오차 원인을 밝히기 위하여 충전횟수의 반복에 따른 MFM-SOC 값의 거동을 분석하였다. 하루 중 최초충전에서 발생하는 MFM-SOC의 오차와 최종충전에서 발생하는 MFM-SOC의 오차를 Table 5에서 정리하였다. 그 결과 x축을 수소충전횟수 y축을 수소 계량 오차로 둘 때 수소충전횟수가 증가할수록 수소 계량 오차도 $0.038 \text{ kg} \times (\text{충전횟수})$ 만큼 비례하여 MFM-SOC 값이 추가로 증가하는 것으로 나타났다.

계량 오차가 발생하는 원인을 정리하면 3.2.1에서

밝힌 바와 같이 최초의 충전은 MFM과 SOC 상호 간의 오차비율에 의해 SOC값을 기준으로 평균 15.5%의 오차가 발생한다. 그 이후, 충전횟수가 거듭될수록 최초의 오차에서 누적충전에 따라 $0.038 \text{ kg} \times (\text{충전횟수})$ 의 계량 오차가 더해지는 것으로 나타났다.

충전횟수에 따른 계량 오차는 MFM의 영향인 것으로 사료된다. SOC의 경우 상술한 수식과 같이 수소전기차의 연료탱크에서 보내주는 정보를 처리하여 나타낸다. 따라서 SOC와 수소충전설비의 충전횟수에 의한 관련성은 상대적으로 낮을 것으로 판단된다. MFM의 경우 측정 구조상 기체가 유입이 되면 기체의 질량과 유속에 비례하여 MFM의 튜브에 코리올리스 힘이 발생하고 이 힘이 튜브의 비틀림을 발생시켜 이 비틀림의 각도를 측정하여 질량유량을 측정하는 원리를 가지고 있다. 수소충전소는 100-700 bar의 고압의 기체가 5분 이내로 하루 10여회의 간헐적인 충전이 이루어지는 특징이 있다. 이런 수소충전소의 충전 특성이 MFM의 계량에 어떤 영향을 미치는지 향후 더 연구하고자 한다.

4. 결론

선행 연구를 통하여 동일한 충전량에 대하여 SOC값과 MFM값(질량식유량계)이 서로 오차가 발생하고 있음을 밝혔다. 본 연구에서는 SOC값과 MFM값의 오차가 어떤 요인에 의해 발생하고 얼마나 영향을 미치는지 분석하였다.

1) 본 연구에 사용된 데이터에서 MFM의 계량값과 SOC의 계량값은 평균 15.5%로 오차비율을 가지며 MFM이 SOC값보다 15.5% 더 높게 계측되는 것으로 분석되었다.

2) MFM이 SOC값보다 15.5% 높게 계량되므로, 수소충전량(SOC)이 증가할수록 수소 계량 오차(MFM-SOC)의 값도 비례하여 커지는 것을 밝혔다.

3) 외기온도가 1월 -1.7°C 에서부터 8월 26.4°C 로 변화할 때 월별 계량 오차는 온도 변화에 직접적인 영향을 받지 않고 있음을 확인할 수 있었다.

4) 하루 중 충전횟수가 누적됨에 따라 수소 계량

오차(MFM-SOC)의 값이 일정하게 증가하는 것을 발견하였고, 충전횟수의 증가에 따라 수소 계량 오차는 $0.038 \text{ kg} \times (\text{충전횟수})$ 만큼 추가 증가하는 것으로 분석되었다.

본 연구에서는 MFM과 SOC 상호 간에 일정한 오차비율이 존재하고 있음을 밝혔다. 또한 하루 동안 충전횟수가 누적될수록 계량 오차가 추가로 발생하는 것을 발견하였다. 본 연구가 수소충전의 정량 계량에 대한 기준을 세우는 데 기초자료로 활용되고자 한다.

References

1. M. H. Lee, "Assessment of Korea's GHG reduction targets through comparative analysis of OECD countries' nationally determined contributions (NDCs)", Master Degree Thesis, Hanyang Cyber University, Korea, 2017.
2. I. J. Yoon, "Issues and Prospects of the Paris Agreement", Han Yang Law Review, Vol. 28, No. 2, 2017, pp. 113-144.
3. T. H. Lee, "Chungcheongnam-do New and Renewable Energy Industrialization Development Plan & Establishing strategy to implement hydrogen economy society", Hoseo University, Korea, 2016, p. 23.
4. S. I. Yang, "Economic Analysis of Hydrogen Fueling Stations", Journal of Advanced Engineering and Technology, Vol. 2, No. 1, 2009, pp. 101-111.
5. T. H. Lee, "Chungcheongnam-do New and Renewable Energy Industrialization Development Plan & Establishing strategy to implement hydrogen economy society", Hoseo University, Korea, 2016, p. 26.
6. D. C. Jeon, "A Study on Safety Policies for a Transition to a Hydrogen Economy", Ph. D. Dissertation, Korea Polytechnic University, Korea, 2014, pp. 16-33.
7. Gasnews, "Accurate understanding of gas quantification", <http://www.gasnews.com/news/articleView.html?idxno=81153>, 2018. 1. 2.
8. T. H. LEE, "A Study on the Variation of Unit Price of Hydrogen Fuel by Difference of Fuel Measuring Method", Trans. of the Korean Hydrogen and New Energy Society, Vol. 28, No. 3, 2017, pp. 279-286.
9. The International Organization for Standardization (ISO), "ISO/TS 19880-1:2016(en), Gaseous hydrogen Fuelling stations, Part 1: General requirements", <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:ts:19880:-1:ed-1:v1:en>, 2016.