

수소충전소 계량 정확도 향상을 위한 거래량 산출 모델 연구

최진영¹ · 이화영¹ · 임상식² · 이재훈^{1†}

¹한국가스안전공사 가스안전연구원, ²한국가스안전공사 가스안전교육원

A Study on the Transaction Volume Calculation model for Improving the Measurement Accuracy of Hydrogen Fuelling Station

JINYEONG CHOI¹, HWAYOUNG LEE¹, SANGSIK LIM², JAEHUN LEE^{1†}

¹Institute of Gas Safety R&D, Korea Gas Safety Corporation, 1390 Wonjung-ro, Maengdong-myeon, Eumseong-gun 27738, Korea

²Education Center, Korea Gas Safety Corporation, 331-39 Gyocheonjisan-gil, Mokcheon-eup, Dongnam-gu, Cheonan 31228, Korea

†Corresponding author :
sasimi@kgs.or.kr

Received 2 November, 2022
Revised 19 November, 2022
Accepted 21 November, 2022

Abstract >> With the expansion of domestic hydrogen fuelling station infrastructure, it is necessary to secure reliability among hydrogen traders, and for this, technology to accurately measure hydrogen is important. In this study, 4 types of hydrogen trading volume calculation models (model 1-4) were presented to improve the accuracy of the hydrogen trading volume. In order to obtain the reference value of model 4, and experiment was conducted using a flow rate measurement equipment, and the error rate of the calculated value for each model was compared and analyzed. As a result, model 1 had the lowest metering accuracy, model 2 had the second highest metering accuracy and model 3 had the highest metering accuracy until a certain point. But after the point, model 2 had the highest metering accuracy and model 3 had the second metering accuracy.

Key words : Hydrogen measurement accuracy(수소 계량 정확도), Hydrogen transaction volume calculation model(수소 거래량 산출 모델), Equation of state(상태방정식), Hydrogen measurement error(수소 계량 오차), Flow measurement(유량 측정)

1. 서론

국내 수소충전소 구축과 관련하여 2019년 대비 2020년 국내 수소충전소 증가율은 31%, 2020년 대비 2021년 국내 수소충전소 증가율은 25%로 증가

추세를 유지하고 있다. 수소충전소 인프라 확대에 대응하여 수소 거래 투명성을 유지하기 위해서는 계량 정확도를 통한 공급자와 소비자 간의 신뢰도 확보가 필요하다. 또한 수소의 특성상 대기 중 폭발 범위는 4-75%로 매우 넓고, 최소 점화 에너지는 약 0.02 mJ

로 매우 낮기 때문에 과충전으로 인한 폭발 사고를 예방하기 위해서도 수소의 계량 정확도가 중요하다.

수소충전소의 상거래는 사업자와 사업자 간 거래와 사업자와 개인 간 거래 2가지의 형태로 이루어지고 있다. 사업자 간 거래는 수소정제업체에서 수소충전소로 차량에 고정된 압력용기를 이용하여 튜브 트레일러로 압축수소(약 20 MPa)를 공급하는 off-site 방식으로 이루어지며, 사업자와 개인 간 거래는 수소충전소에서 수소연료전지차량으로 디스펜서를 이용하여 압축수소(약 70 MPa)를 공급하는 방식으로 이루어진다. 사업자 간 거래는 압력용기의 압력 측정값을 체적으로 환산하여 가격을 산출하는 반면, 사업자와 개인 간 거래는 디스펜서의 질량 유량계를 통해 수소연료전지차량에 충전된 적산 질량값을 토대로 비용을 산출한다. 이와 같이 2가지의 거래 형태가 각각 체적 방식과 질량 방식으로 상이함에 따라 단위 통일 문제와 측정 방법의 신뢰성 문제가 존재하며, 결과적으로 수소 거래량의 오차가 우려된다. 특히 사업자와 개인 간 거래의 경우, 현재 International Organization of Legal Metrology (OIML) R 139¹⁾에서 전 세계적으로 허용 가능 오차를 최대 5%로 규정하고 있는 반면, 국내의 경우 약 10-15%의 오차가 발생하고 있다는 연구 결과가 보고되고 있다²⁾. 수소충전소의 계량값이 정확하지 않으면 거래자가 원하는 충전량보다 부족하거나 과도하게 충전될 수 있다. 이러한 경우 거래자 간의 불신을 초래할 수 있고, 과충전으로 인한 폭발 사고를 야기할 수 있으므로 계량 정확도를 확보하는 일이 시급하다.

이에 본 연구에서는 국내에 적용 가능한 4가지 유형의 수소충전소 거래량 산출 모델을 제시하였다. 첫 번째 모델(model 1)은 이상기체 상태방정식을 기반으로 충전 전·후 압력용기의 압력 차와 압력용기의 체적을 곱하여 수소의 체적을 계산하는 방법이다. 두 번째 모델(model 2)은 model 1을 압축계수로 보정한 방식으로 온도값을 고려하였으며, 세 번째 모델(model 3)은 model 2에서 온도값을 한 번 더 고려한 방식으로 National Institute of Standards and Technology (NIST)의 밀도 산출식을 활용하였다. 마지막으로 네

번째 모델(model 4)은 질량 유량계로 수소 충전량을 직접 측정하는 방식이다. 다음으로 수소 충전 전·후 압력 차에 따른 충전 오차를 분석하였다. 또한 질량 유량계를 통한 실험 결과인 model 4를 기준으로 model 1-3의 산출 결과를 비교 분석함으로써 수소 거래의 기초 가이드라인을 제공하고 보다 정확한 수소 거래 방법을 정착시키고자 한다. 각 산출 모델의 검증은 사업자와 사업자 간 거래와 사업자와 개인 간 거래 모두 수행하여야 마땅하나, 사업자와 개인 간 거래에 대한 실험은 제도·안전상의 문제로 인해 사업자와 사업자 간 거래로 검증을 수행하였다.

2. 수소충전소 거래량 산출 모델

2.1 수소 거래량 산출 모델(model 1)

첫 번째 수소 거래량 산출 모델(model 1)은 체적 환산 방식으로, 충전 전·후 압력용기의 압력 차와 압력용기의 체적 곱을 통해 수소의 체적을 계산하는 방식이다. model 1의 경우 온도 변수를 고려하지 않으며, 차압에만 의존한다. 수소 거래량 산출 model 1을 식화하면 식 (1)과 같다. 여기서 V 는 수소 공급 체적(Nm^3), V_{TT} 은 튜브 트레일러 내용적(m^3), P_i 는 튜브 트레일러 초기 압력(MPa), P_o 는 튜브 트레일러 최종 압력(MPa)을 의미한다. 수소 공급 체적의 단위인 Nm^3 은 표준상태(normal state)에서의 기체의 체적이며, 표준상태는 0°C , 1기압으로 정의한다.

$$V = 10 \times V_{TT}(P_i - P_o) \quad (1)$$

2.2 수소 거래량 산출 모델(model 2)

두 번째 수소 거래량 산출 모델(model 2)은 model 1의 식 (1)을 압축계수로 보정한 모델이다. 수소의 압축계수(Z)는 NIST³⁾에서 제시하는 정의를 활용하였으며, 식 (2)에 나타내었다. 압축계수는 온도와 압력에 따라 달라지므로 식 (2)의 압축계수를 이용한 식 (1)의 보정이 필요하며, 보정 결과 식 (3)과 같은

식이 도출된다. 식 (2)에서 Z는 기체의 온도 및 압력에 따른 실제 거동 특성을 반영한 압축계수이며, P는 절대압력(MPa·A), T는 절대온도(K), ρ는 밀도(kg/m³)를 의미한다. 또한 R은 기체 상수로 8.314472 J/mol·K이며, Z(P_i, T_i)는 초기 압축계수, Z(P_o, T_o)는 최종 압축계수를 의미하며, V와 V_{TT}, P_i와 P_o의 값은 식 (1)에서 대응되는 값과 동일하다.

$$Z(P, T) = \frac{P}{\rho RT} \quad (2)$$

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

$$V = 10 \times V_{TT} \left(\frac{P_i}{Z(P_i, T_i)} - \frac{P_o}{Z(P_o, T_o)} \right) \quad (3)$$

$$\rho_{@P, T} = (a_1 P^4 + a_2 P^3 + a_3 P^2 + a_4 P + a_5) \times T^4 + (a_6 P^4 + a_7 P^3 + a_8 P^2 + a_9 P + a_{10}) \times T^3 + (a_{11} P^4 + a_{12} P^3 + a_{13} P^2 + a_{14} P + a_{15}) \times T^2 + (a_{16} P^4 + a_{17} P^3 + a_{18} P^2 + a_{19} P + a_{20}) \times T + (a_{21} P^4 + a_{22} P^3 + a_{23} P^2 + a_{24} P + a_{25}) \quad (4)$$

$$\rho(P, T) = \frac{P}{\left(1 + \sum_{i=1}^9 a_i \left(\frac{100K}{T} \right)^{b_i} \left(\frac{P}{1MPa} \right)^{c_i} \right) RT} \quad (5)$$

$$M = V_{TT} (\rho(P_i, T_i) - \rho(P_o, T_o)) \quad (6)$$

2.3 수소 거래량 산출 모델(model 3)

세 번째 수소 거래량 산출 모델(model 3)은 압력과 온도를 통해 산출된 밀도에 기반하여 수소의 공급량을 계산하는 모델로, model 2로부터 온도 보정이 추가적으로 이루어진다. 압력 및 온도 계측장치는 「국가표준기본법」에 의거, 소급성을 유지하므로, 수소충전소의 수소 최초 인입부 압력과 온도를 측정하여 얻은 밀도값을 기반으로 거래량을 산출한다. 수소의 대표적인 밀도 산출 방법은 Society of Automotive Engineers (SAE) J2601⁴⁾의 밀도 계산식 또는 NIST에서 제시한 밀도 계산식을 활용하는 방법이다. SAE J2601에서는 look-up Table을 제시하기 위해 수소의 밀도 계산식을 적용하였으며, 사용된 밀도 산출 식은 식 (4)와 같다. 여기서 P와 T, ρ의 값은 식 (2)에서 대응되는 값과 동일하며, 계수 a₁~a₂₅는 Table 1에 나타내었다. 해당 밀도 계산식은 NIST에서 개발한 식이며, NIST에서는 2008년도에 수 (5)와 같이 업데이트된 밀도 계산식을 제시하였다. 수 (5)를 계산하기 위한 계수 a_i, b_i, c_i는 Table 2에 나타내었으며, K는 온도 단위, MPa은 압력단위를 의미한다. P, T, ρ, R의 값은 식 (2)에서 대응되는 값과 동일하며, M은 수소의 몰 질량으로 2.01588 g/mol을 의미한다. 식 (5)를 이용하여 밀도를 산출할 경우의 오차를 Fig. 1에 나타내었다. 밀도 계산식을 이용한 거래량은 튜브 트레일러의 내용적을 기반으로, 튜브 트레일러 입고 시

Table 1. Coefficient used in equation (4)

a ₁	-1.1671E-16	a ₂	3.5429E-14	a ₃	-3.80467E-12
a ₄	1.51947E-10	a ₅	-3.76254E-12	a ₆	1.59364E-13
a ₇	-4.91286E-11	a ₈	5.38378E-09	a ₉	2.22007E-07
a ₁₀	5.12189E-09	a ₁₁	-8.26768E-11	a ₁₂	2.6014E-08
a ₁₃	-2.93356E-06	a ₁₄	0.00012714	a ₁₅	-2.63185E-06
a ₁₆	1.95877E-08	a ₁₇	-6.34261E-06	a ₁₈	0.0007478
a ₁₉	-0.0354828	a ₂₀	0.000608078	a ₂₁	-1.8437E-06
a ₂₂	0.000623884	a ₂₃	-0.0798237	a ₂₄	4.77618
a ₂₅	-0.0536549	-	-	-	-

Table 2. Coefficient for calculating the density of hydrogen

i	a _i	b _i	c _i
1	0.058884600	1.325	1.00
2	-0.061361110	1.870	1.00
3	-0.002650473	2.500	2.00
4	0.002731125	2.800	2.00
5	0.001802374	2.938	2.42
6	-0.001150707	3.140	2.63
7	0.9588528E-4	3.370	3.00
8	-0.110904E-6	3.750	4.00
9	0.1264403E-9	4.000	5.00

튜브 트레일러에 충전되어 있는 수소량과 충전소로의 공급 후 잔류 수소량의 차이가 수소충전소에 공급되었다는 가정을 적용하며, 최종적으로 이를 식으로 표현하면 식 (6)과 같다. 여기서 M 은 수소충전소에 공급된 수소의 질량(kg)이며, V_{TT} 은 튜브 트레일러 내용적(m^3), $\rho(P_i, T_i)$ 는 튜브 트레일러 초기 수소 밀도(kg/m^3), P_i 는 튜브 트레일러 초기 압력($MPa \cdot A$), T_i 는 튜브 트레일러 초기 온도(K), $\rho(P_o, T_o)$ 는 초기 수소 밀도(kg/m^3), P_o 는 튜브 트레일러 최종 압력($MPa \cdot A$), T_o 는 튜브 트레일러 최종 온도(K)를 의미한다.

2.4 수소 거래량 산출 모델(model 4)

네 번째 수소 거래량 산출 모델(model 4)는 수소 충전소의 수소 인입 최초단에 유량계를 설치하고 측정되는 순사유량을 적산하여 거래량을 산정하는 방식으로 가장 보편적이며 정확도가 높은 방법이다. 본 실험에서 사용된 질량 유량계는 Emerson의 micro

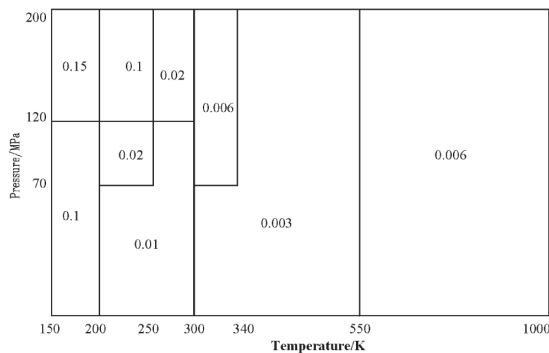


Fig. 1. Error diagram of hydrogen density calculation according to temperature and pressure³⁾

Table 3. Calibration results of the mass flow meter used in the experiment

Component	Flow rate (kg/min)	Error (%)
Micro motion mass flow sensor (Emerson)	5.17	-0.010
	1.034	0.013
	2.585	0.058
	5.17	-0.010

motion mass flow sensor (CMFS010M319N6BIECZZ, Emerson Electric Co., St. Louis, MO, USA)이며, 측정범위는 0-5.17 kg/min로 Micro Motion, Inc.에서 수행된 유량계 교정 결과를 Table 3에 나타내었다.

3. 수소충전소 유량 측정 실험 방법

3.1 유량 측정 장비의 설계

튜브 트레일러 질량 유량 측정을 위하여 1차적으로 유량 측정 장비 개념 설계를 수행하였다. 장비의 개념도는 Fig. 2에 나타내었으며, 장비는 질량 유량계, 압력 센서, 온도 센서, 디스플레이 및 데이터 저장 시스템, 밸브, 배터리를 노트북으로 구성하였다. 튜브 트레일러는 수소충전소의 압축기실에 위치하며, 압축기실은 한국가스안전공사(Korea Gas Safety, KGS) 코드인 KGS GC101⁵⁾의 방폭 구역 설정에 따라 제1종 방폭 구역에 해당된다. 따라서 실험에 사용된 전기기기는 KGS GC102⁶⁾에 의한 제1종 방폭 구역에서 사용 가능한 제품으로 선정하였다. 실험은 유량계와 온도·압력 센서 등의 계측기류로 구성된 유량 측정 장비를 튜브 트레일러와 수소충전소 사이에 설치하여 수행하였으며, 실험 현장 사진을 Fig. 3에 나타내었다.

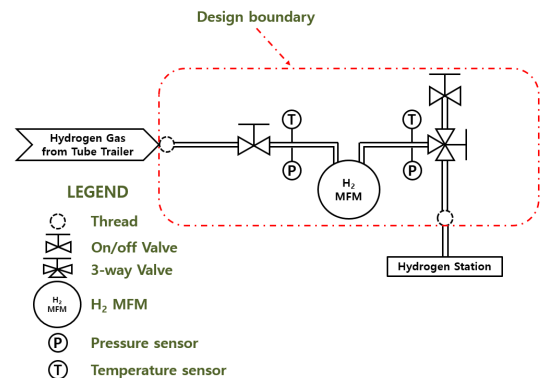


Fig. 2. Conceptual diagram of flow measuring equipment

3.1.1 유량계의 선정

본 연구에서는 소급성 유지를 위하여 코리올리 질량 유량계를 사용하였으며, 20 MPa 이하에서 충전되는 튜브 트레일러 특성을 고려하여 설계압력을 35 MPa로 설정하였다. 유량계의 정확도는 $\pm 99.5\%$ v.MW 이상으로 정확도에 관련된 교정 성적서를 제출하도록 하여 검증된 유량계를 사용하였다. 압력센서와 온도센서도 설계압력을 35 MPa로 설정하였으며, 수소용 검교정 제품으로 본질 안전 방폭 인증을 받은 제품을 사용하였다.

3.1.2 데이터 획득 시스템

유량계에서 얻은 데이터의 형태는 연속적 신호(analog signal)로, 이를 추적하기 위하여 이산적 신호(digital signal)로 변환하며, 데이터 수집 속도는 초당 최소 1회(1 Hz)로 설정하였다. 또한 유량 데이터를 실시간으로 받고 처리하기 위한 데이터 획득 시스템(data acquisition)을 구성하였다.

4. 결과 및 고찰

4.1 수소 거래량 산출 결과

실험 결과, 장비 내 질량 유량계를 통해 측정된 적산 유량 값인 model 4의 결과를 기준으로 압력 차에 따른 수소 거래량 산출 모델 model 1-3의 산출값을 비교 분석하였다. 먼저 압력 차에 따른 부피 산출값을 Fig. 4와 같이 나타내었으며, Fig. 5에서는 model

4의 산출값을 기준으로 튜브 트레일러의 수소 공급 전·후 압력 차에 따른 오차율을 나타내었다. 두 그래프에서 검은 선은 온도 변수에 대한 보정이 이루어지지 않은 model 1을 통해 계산된 값을 나타내며, 붉은 선은 압축 계수를 통해 온도 보정이 1회 이루어진 model 2의 방식으로 계산된 값, 파란 선은 NIST의 밀도 계산식을 통해 온도 보정이 2회 이루어진 model 3의 방식으로 계산된 값을 나타낸다. 마지막으로 검은 테두리의 원은 기준값으로, 질량 유량계를 이용한 model 4의 방식으로 측정된 유량 값을 나타내며, 이론식에 해당되는 model 1-3와의 구분을 위하여 다르게 표시하였다.

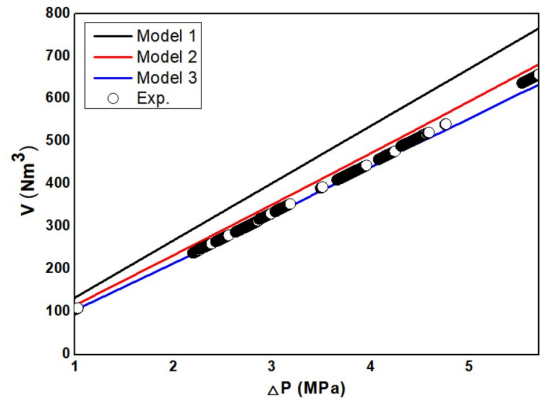


Fig. 4. ΔP vs. V of model 1, model 2, model 3, and model 4

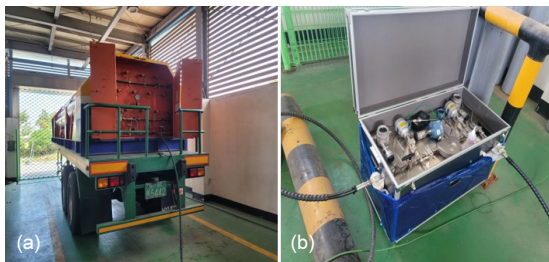


Fig. 3. Field image of hydrogen fuelling station (a) image of trailer connection part, (b) image of flow measuring equipment connection part

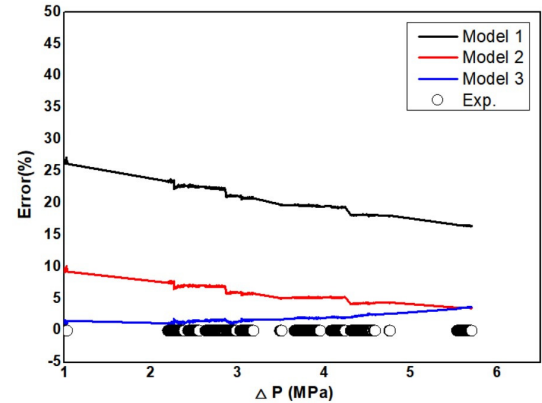


Fig. 5. ΔP vs. Error of model 1, model 2, model 3, and model 4

Fig. 4에서는 모든 모델에서 압력 차가 커질수록 부피도 증가하는 것을 확인할 수 있으며, 산출되는 부피 값을 큰 순서대로 나열하면 model 1, model 2, model 4, model 3로 나타난다. 또한 model 1-3 중 model 3를 통해 산출된 수소 거래량이 model 4에 해당되는 수소충전소 유량 측정 실험 결과로 얻은 수소 거래량 값과 가장 유사함을 확인할 수 있다. 오차율을 좀 더 자세히 확인하기 위한 그래프를 Fig. 5에 나타내었다. Fig. 5에서 model 1과 model 2의 경우 수소 공급 전·후 압력 차가 증가함에 따라 오차율이 감소한 반면, model 3의 경우 튜브 트레일러를 이용한 수소 공급 전·후 압력 차가 증가함에 따라 오차율이 감소하다가 압력 차가 약 2.35 MPa인 지점부터 오차율이 다소 증가하는 추세를 보였다.

유량 측정 시간 내의 평균 오차율은 model 1의 경우 약 19.84%로 나타났으며, model 2는 약 5.38%, model 3은 약 2.10%로 나타났다.

5. 결론

본 연구에서는 국내에 적용 가능한 수소 거래량 산출 모델 4가지를 제시하였으며, 유량 측정 장비를 사용하여 얻은 유량 값을 기준으로 산출 모델별 부피 산출값의 오차율을 도출하였다. 분석 결과는 다음과 같다.

우선, 부피 산출값은 model 1, model 2, model 4, model 3의 순서대로 크게 나타났다. 이어서 장비 내 유량계 측정값인 model 4의 값을 기준으로 튜브 트레일러의 수소 공급 전·후 압력 차가 증가함에 따라 model 1을 통해 산출된 수소 거래량 값은 꾸준히 최대 오차율을 나타냈으며, model 2의 경우, 압력 차 약 5.6728 MPa까지는 두 번째로 높은 오차율을 나타냈으나 그 이후로는 model 1-3 중 가장 낮은 오차율을 나타내었다. model 3은 model 2와 반대로, 압력 차 약 5.6728 MPa까지 model 1-3 중 가장 낮은 오차율을 보였으나 그 이후로는 두 번째로 높은 오차율을 나타내었다.

수소 거래량을 산출하는 방법으로는 산출 model 4

에 해당되는 질량 유량계 활용 방법이 가장 정확도가 높은 방법이나, 형식 승인 및 검정 기준이 마련되어 있지 않다. 또한 수소 질량 유량계의 경우, 계량 성능 외에도 방폭 성능 및 높은 내압 성능이 요구되어 단가가 높고 「국가표준기본법」에 따른 소급체계를 유지할 수 없으므로 수소충전소에서 즉시 도입하기에 어려움이 있다.

따라서 본 연구에서 제시하는 수소 거래량 산출 모델 model 1-3 중 계량 정확도가 비교적 높게 나타나는 model 2 또는 model 3의 거래량 산정 방식을 표준 가이드라인으로 도입하여 국내 수소충전소 거래량 오차를 점차 줄여나가는 방안을 고려해 볼 필요가 있다고 판단된다.

후 기

본 연구는 2020년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구과제이다(No. 20202910100060).

References

1. International Organization of Legal Metrology (OIML), "International recommendation: Compressed gaseous fuel measuring systems for vehicles (OIML R 139)", OIML, 2018. Retrieved from https://www.oiml.org/en/files/pdf_r/r139-p-e18.pdf/view.
2. W. Han, S. Yim, B. Song, S. Kil, Y. Kim, and H. Kim, "Evaluation of metering accuracy of hydrogen station using master meter method" *Journal of the Korean Institute of Gas*, Vol. 23, No. 6, 2019, pp. 67-73, doi: <https://doi.org/10.7842/KIGAS.2019.23.6.67>.
3. E. W. Lemmon, and M. L. Huber, "Revised standardized equation for hydrogen gas densities for fuel consumption applications", *Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology*, Vol. 113, No. 6, 2008, pp. 341-350, doi: <https://doi.org/10.6028/jres.113.028>.
4. Society of Automotive Engineers (SAE), "Fueling Protocols for light duty gaseous hydrogen surface vehicles (SAE J2601)", SAE, 2020. Retrieved from https://www.sae.org/standards/content/j2601_202005/.
5. KGS Code, "Classification code for explosive hazardous area on gas facility (KGS GC101 2018)", Korea Gas Safety

Corporation (KGS), 2018. Retrieved from https://cyber.kgs.or.kr/codesrc/kgscodesrc_pdf/2018/GC101_180712.pdf; cyberJSESSIONID=2IgtL-Ue7dtZBHSjfmcf89QhjFObRrUsCafZHIVJ5nZUxhVw0bLm!2850685!-1002397855.

6. KGS Code, “Design, selection and installation code for explosion-proof electrical equipment (KGS GC102 2018)”,

Korea Gas Safety Corporation (KGS), 2018. Retrieved from https://cyber.kgs.or.kr/codesrc/kgscodesrc_pdf/2018/GC102_180712_E_V.PDF; cyberJSESSIONID=4q7pPyNAlkz3yoLrWQjiQKUldGZUGKur8CY0oMKSywByJ4Aycvfg!621934465!NONE.