

## 수소연료전지 자동차 압력 용기용 전자밸브의 온도 특성에 관한 연구

이호렬 · 안중환\* · 김혁영\* · †김영구

한국가스안전공사 가스안전연구원, \*부산대학교 기계공학부  
(2017년 9월 4일 접수, 2017년 12월 18일 수정, 2017년 12월 19일 채택)

### A Study on Temperature Characteristics of Automatic Valve for High Pressure Cylinder of FCV

Hyo-Ryeol Lee · Jung-Hwan Ahn\* · Hwa-Young Kim\* · †Young-Gu Kim

Institute of Gas Safety R&D, Korea Gas Safety Corporation, Chungcheongbuk-do 27738, Korea

\*School of Mechanical Engineering, Pusan National University, Busan 46241, Korea

(Received September 4, 2017; Revised December 28, 2017; Accepted December 19, 2017)

#### 요 약

수소연료전지 자동차 압력 용기에는 연료전지 스택으로 수소의 흐름을 제어하기 위해 전자 밸브가 부착되고 있다. 전자 밸브의 솔레노이드는 전기 신호에 의해 유로를 개폐하는 역할을 하며, 전원이 인가되는 시간이 경과함에 따라 온도가 상승하여 일정 온도에서 포화된다. 특히 온도의 상승은 솔레노이드의 흡인력을 감소시키므로 안정적인 수소 공급을 위해서 설계 시 포화 온도와 온도에 따른 흡인력 특성 파악이 요구된다. 본 연구에서는 솔레노이드 설계 변수에 따른 포화 온도 계산식을 제안하고 열 유동 해석을 통해 타당성을 확인하였다. 또한, 온도에 따른 흡인력 변화를 분석하기 위해 전자기장 해석을 수행하였으며 온도 특성 실험을 통해 포화 온도와 흡인력 해석 결과를 검증하였다. 포화온도는 계산식과 해석결과를 비교하였을 때 5.3 °C, 해석 결과와 실험 결과를 비교하였을 때 5.9 °C의 오차가 발생하였으며, 흡인력은 1.0 N, 최대 2.1 N의 오차가 발생하였다.

**Abstract** - FCV is installed with a automatic valve attached in an high pressure cylinder to control the hydrogen flow. The supply of hydrogen from the cylinder into the fuel cell stack is controlled via the on/off operation of a solenoid attached to the automatic valve. The solenoid needs to provide the necessary attraction force even at any saturation temperature caused by drive of the vehicle. In this study, the simplified prediction equations for the saturation temperature are suggested. The finite element analysis was performed by steady state technique, according to the boundary condition in order to predict the saturation temperature and attraction force. Finally, the saturation temperature was validated through comparison between the analysis results and measurement results. From the results, the measured saturation temperature 5.9 °C lower with respect to the analysis results. And the error of attraction force ranged from 1.0 to 2.1 N at testing conditions.

**Key words** : fuel cell vehicle, high pressure cylinder, automatic valve, temperature characteristics

#### 1. 서 론

일반적으로 전자 밸브는 전기 에너지를 변환하여 기계적인 구동력을 얻는 장치로서 에너지 변환을 담당하는 솔레노이드와 밸브 몸체로 구성 된다.

전자 밸브는 가격이 저렴하고 오염에 강하면서도 빠른 동적 응답의 이점이 있어 가전, 반도체 공장 자동화와 발전소, 일반 플랜트 유체 제어 등 산업 분야 뿐만아니라 고압으로 연료를 저장하는 압축천연가스 자동차, 수소연료전지 자동차에도 사용되고 있다[1-3].

특히 수소연료전지 자동차 압력 용기용 전자밸브는 용기에 저장된 수소의 흐름을 조절하는 솔레

†Corresponding author:navkyg@kgs.or.kr

Copyright © 2017 by The Korean Institute of Gas

노이드와 화재 등의 원인으로 용기 내부의 압력이 상승하여 이상 과압 상태가 되었을 때 용기 내부의 수소를 대기로 방출시켜 용기의 과열을 방지하는 온도 감응형 압력해제 장치가 있다. 또한 자동차의 충돌 사고 시 고압 배관의 과열로 수소가 다량으로 방출되어 발생하는 2차 사고를 예방하기 위해 일정량 이상의 흐름을 차단하는 과류 차단 장치와 충전 시 온도와 압력 변화를 측정하는 온도와 압력센서를 포함하고 있다[4].

솔레노이드는 자동차 시동시 전원이 인가되어 용기에서 스택으로 이어지는 유로를 개방하고 운행 중 개방된 상태를 유지하다가 시동을 끝 때 솔레노이드의 전원이 차단되어 유로가 폐쇄된다. 자동차의 원활한 주행을 위해서는 수소의 공급이 안정적으로 이루어져야하며 이를 담당하는 솔레노이드의 동작 신뢰성 확보가 중요하다. 하지만 자동차 운행 시간이 경과할수록 코일의 온도가 상승하여 흡인력이 감소하며, 코일이 충분히 냉각되지 못한 상태에서 자동차를 재시동하는 경우가 빈번하기 때문에 포화온도에서의 흡인력이 유로개방에 필요한 힘을 만족하는지 확인해야한다. 본 연구에서는 열 저항 모델을 이용하여 솔레노이드의 포화온도 계산식을 제시하고 유한요소 해석과 실험을 통해 포화 온도와 온도에 따른 흡인력 변화를 검증하였다.

## II. 열 저항 기반 솔레노이드 포화온도 예측 모델

### 2.1. 솔레노이드 구조

Fig. 1은 본 연구에 사용된 전자 밸브 솔레노이드의 구조를 나타낸 것이다. 솔레노이드는 전자장 형성을위한 코일, 자기 회로를 구성하는 디스크와 케

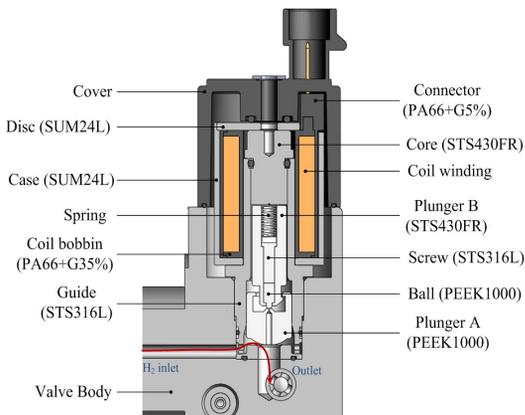


Fig. 1. Construction of solenoid actuator for cylinder valve.

Table 1. Dimensions of solenoid actuator

Components	Inner diameter	Outer diameter
Plunger	.	9.5 mm
Guide	9.5 mm	14 mm
Bobbin	14.2 mm	16.2 mm
Coil	16.2 mm	25 mm
Connector	25 mm	26.5 mm
Case	27 mm	30 mm

※ Height(L) = 30 mm

이스, 코일에서 발생한 전자장에 의해 자화되어 플런저를 흡인하는 코어, 기계적 운동으로 유로를 개폐하는 플런저, 용기 내부의 고압을 지지하면서 플런저의 운동을 안내하는 가이드, 누설 방지와 전원 차단 시 플런저의 위치를 복귀시키는 스프링, 전원 공급용 커넥터 등으로 구성된다.

솔레노이드는 PWM 전원을 이용하며 자동차 시동 시 12 V, 듀티비 90 %의 전원을 2초간 인가하여 유로를 개방한다. 2초 후에는 플런저와 코어 사이의 거리 감소로 동일 전력 대비 흡인력이 증가하고, 소모 전력 감소를 위해 듀티비를 30 %로 조정하여 개방된 유로를 유지시킨다. 따라서 포화온도 예측에는 운행 시 장시간 솔레노이드에 인가되는 듀티비 30 % 조건을 이용하고, 온도 상승에 따른 흡인력 감소 확인에는 유로 개방 시 인가되는 듀티비 90% 조건을 사용하여 요구 흡인력과 비교하고자 한다.

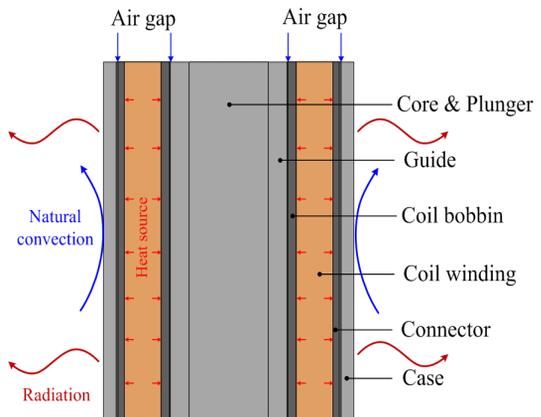
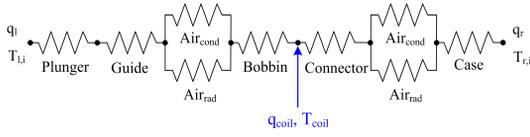


Fig. 2. Schematics of heat transfer for solenoid.



**Fig. 3.** Thermal equivalent circuit for solenoid actuator.

## 2.2. 열 저항 모델

Fig. 2는 포화온도를 파악하기 위해 디스크, 케이스, 코일 보빈, 커넥터의 상단면과 하단면의 원판부분을 제거한 원통 형상으로 단순화하여 나타낸 것이다. 코일에서 발생하는 열은 구성품 사이의 접촉으로 인한 전도, 외부 표면과 대기의 온도 차이에 의한 자연 대류, 복사를 통해 전달된다.

Fig. 3은 열 저항 등가법을 이용한 솔레노이드의 열 저항 회로를 나타낸 것이다. 구성품 사이에는 조립을 위한 공차로 인해 0.5mm 미만의 얇은 공기층이 존재하며 공차의 미세한 틈새로 빠져나가는 유량이 매우 작기 때문에 공기층에서 대류의 영향을 무시하였다. 또한 공기층에 인접한 구성품 사이의 온도 차이가 매우 작을 것으로 예상되어 복사에 의한 열전달은 무시하고 전도만을 고려하였다[5].

코일에서 발생하는 열량은 Fig. 2에서 코일을 기준으로 원통 중심 방향으로 전달되는 열 전달량  $q_l$  과 외부 반경 방향으로 전달되는 열 전달량  $q_r$  의 합과 같으며 이를 식(1)에 나타내었다. 여기서  $T_{coil}$  은 코일의 포화온도,  $T_{l,i}$  와  $T_{r,i}$  는 솔레노이드 내·외부 공기의 온도,  $R_{th,cond}$  는 전도에 의한 열저항,  $R_{conv,cuse}$  는 자연 대류에 의한 열저항을 나타낸다.

$$q_{coil} = q_l + q_r$$

$$= \frac{T_{coil} - T_{l,i}}{\sum R_{th,cond}} + \frac{T_{coil} - T_{r,i}}{\sum R_{th,cond} + R_{conv,cuse}} \quad (1)$$

전도에 의한 열 저항은 구성품의 내경( $r_i$ )과 외경( $r_o$ ), 높이( $L$ ), 열 전도 계수( $k_{th}$ )를 이용하여 식(2)과 같이 나타낼 수 있다.

$$R_{th,cond} = \frac{\ln(r_o/r_i)}{2\pi k_{th} L} \quad (2)$$

외부표면에서 발생하는 자연 대류에 의한 열 저항은 발생 원통면의 외경( $r_o$ )과 높이( $L$ ), 대류 열 전달 계수( $h$ )를 이용하여 식(3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$R_{conv} = \frac{1}{2\pi r_o h L} \quad (3)$$

코일의 발생 열량은 PWM 전원의 피크전압  $V_P$ , 듀티비  $D$ , 코일의 저항  $R$ 을 이용하여 식(4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$q_{coil} = \frac{(V_P \cdot D)^2}{R} \quad (4)$$

Table 1과 2는 설계된 구성품의 치수와 사양을 정리하여 나타낸 것이며, 유로 개방을 위해 솔레노

**Table 2.** Specification of solenoid actuator

Properties	Values
Peak voltage of PWM (Vp)	12 V
PWM duty ratio (D)	30 %
Number of turns in a coil (N)	440
Coil resistance (R)	3.2 Ω
Power consumption ( $q_{coil}$ )	4.05 W(D=0.3)
Distance of between core and plunger	0.9 mm
Required attraction force for opening	15.3 N

**Table 3.** Thermal properties of used at components materials

Material	Density (kg/m <sup>3</sup> )	Specific heat capacity (J/kg·°C)	Thermal conductivity (W/m·°C)
Air	1.171	1007	0.0261
Copper	8930	385	401
STS 430FR	7610	460	24.9
STS 316L	8000	500	14.0
SUM 24L	7700	472	51.9
PA66+G35%	1410	1500	0.35
PEEK 1000	1310	320	0.25

이드에 요구되는 흡인력은 87.5 MPa 조건에서 동작 여유율을 20 %로 산정하였을 때의 값이다[6].

Table 3은 솔레노이드 구성품 재질과 25 °C 대기

압 기준에서 공기의 밀도, 비열, 열 전도 계수를 나타낸 것이다. 대류 열전달 계수는  $5 \text{ W/m}^2 \cdot \text{°C}$ 를 사용하였으며, 식(1)~(4)를 이용하여 계산한 결과 코일의 포화온도는  $52.5 \text{ °C}$ 로 나타났다.

### III. 솔레노이드 온도 특성 해석

#### 3.1. 열 유동 해석 모델 및 조건

전도와 자연 대류가 고려된 열 저항법으로 계산한 솔레노이드의 포화온도를 검증하기 위해 열 유동 해석을 수행하였으며, 상용 코드인 ANSYS CFX V15.0을 이용하였다. 해석방법으로 속도가 매우 작고 밀도 차이로 인한 부력으로 발생하는 자연대류를 해석하기 위해 속도와 압력의 연계인 SIMPLE기법을 적용하였다. 난류 모델은 k-ε 모델을 사용하였으며, 솔레노이드 외부 유체는 초기온도가  $25 \text{ °C}$ 인 비압축성 공기로 가정하여 정상상태의 포화온도를 해석하였다[7]. 유체 영역의 크기는 솔레노이드 축 방향의 2배, 반경 방향의 3배로 설정하였으며 이를 Fig. 4에 나타내었다. 코일을 heat source로 지정하고 총  $4.05 \text{ W/mm}^3$ 의 열 부하로 균일하게 발열하도록 설정하였다. 유체 영역의 외부 면은 부력에 의해 발생한 유동이 자유롭게 출입하도록 Opening 조건을 설정하였다.

솔레노이드 내부 형상이 복잡하기 때문에 사면체 격자를 이용하였다. 내부 유동장의 왜곡을 최소화 하면서 얇은 공기층 부분에 해석 격자를 조밀하

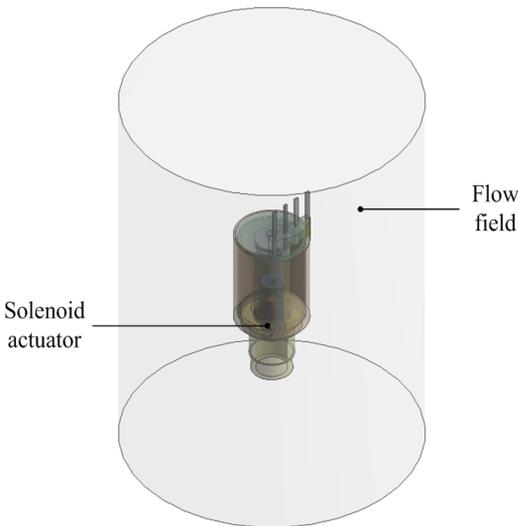


Fig. 4. 3D model of heat flow analysis.

게 생성하기 위해 격자의 최소 크기는  $0.01 \mu\text{m}$ , 최대 크기는  $2 \text{ mm}$ , 곡률 법선 각도는  $10 \text{ °}$ 로 설정하였다. 솔레노이드에 생성된 격자수는 3,118,002개 노드 수는 5,037,901개이며, 유체 영역에 생성된 격자수는 7,881,317개 노드 수는 12,485,339개이다.

#### 3.2. 열 유동 해석 결과

Fig. 5는 솔레노이드 포화온도 해석 결과를 나타낸 것이다. 코일의 온도는  $47.2 \text{ °C}$ 로 열 저항 모델에서 구한 포화온도와 비교하였을 때  $5.3 \text{ °C}$  정도의 오차가 발생하였다. 열 유동 해석에는 단순화된 모델이 아닌 실제 모델을 사용하여 단순화 과정에서 제거된 상·하단부에서 발생하는 전도와 대류에 의한 열 전달을 반영하기 때문에 포화온도가 감소한다. 또한 열 저항 모델에서 사용한 일반적인 대류 열전달 계수와 달리 해석에서는 표면의 형상, 유체의 운동특성, 유체의 물성치, 속도 등을 고려하여 계산 값을 사용하며 두 값의 차이로 인해 오차가 발생한다.

#### 3.3. 흡인력 특성 해석 조건 및 결과

솔레노이드의 온도에 따른 흡인력 특성을 확인하기 위해 전자기장 해석을 수행하였다. Fig. 6은 전자기장 해석에 사용된 2D 모델을 나타낸 것이며, 자기장의 세기가 0으로 수렴하는 해석 영역을 솔레노이드 중심축, 반경 방향 길이의 두 배로 설정하였다.

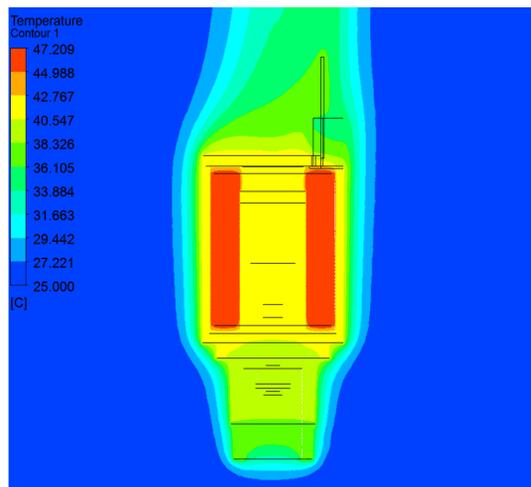


Fig. 5. Analysis results of temperature distribution.

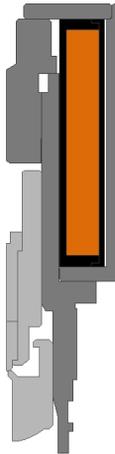


Fig. 6. 2D model of attraction force analysis according to temperature.

Table 4. Analysis conditions according to rising temperature

Temperature [°C]	Resistance [ $\Omega$ ]	Magnetomotive force [A]	Attraction force [N]
20	3.20	1485.00	20.02
25	3.26	1456.39	19.61
30	3.33	1428.86	19.24
35	3.39	1402.35	18.87
40	3.45	1376.80	18.52
45	3.51	1352.17	18.18
50	3.58	1328.41	17.85
55	3.64	1305.47	17.52
60	3.70	1283.30	17.21
65	3.77	1261.88	16.91
70	3.83	1241.16	16.62
75	3.89	1221.11	16.33
80	3.95	1201.69	16.06
85	4.02	1182.89	15.79
90	4.08	1164.66	15.54
95	4.14	1146.99	15.29
100	4.21	1129.84	15.04

솔레노이드 구성품 재질 중 비자성체의 경우 투자율을 1로 설정하였으며, 자성체인 STS 430FR과 SUM24L은 자화특성이 비선형이기 때문에 재질의 B-H선도를 이용하였다. 해석 격자는 삼각형 격자를 이용하였으며 솔레노이드 내부의 격자 크기를 0.2 mm로 조밀하게 설정하였다. 생성된 격자 수는 114,051개이다. 해석 조건으로는 공극부의 거리를 0.9 mm로 고정시키고 온도에 따른 코일의 기자력을 입력하여 잔차항이 0.0001 이하로 수렴하도록 해석하였다. 식(5)와 (6)은 온도에 따른 코일 저항과 기자력을 계산식을 각각 나타낸 것이다.

$$R_t = R_{20} \times \left( \frac{234.5 + T}{234.5 + 20} \right) \quad (5)$$

$$U = \frac{DNV_p}{R_t} \quad (6)$$

여기서  $R_{20}$ 은 20 °C에서 코일의 저항값이며, T는 코일의 온도,  $R_t$ 는 이 때 코일의 저항값 이다. U는 듀티비 D, 코일의 온도가 T 일 때 기자력이며, N은 코일의 감은수이다. Table 4는 계산된 코일의 저항과 기자력, 흡인력 해석결과를 정리하여 나타낸 것이다. 온도가 상승함에 따라 코일의 저항은 상승하고, 이로 인해 흡인력이 감소하는 경향을 보인다.

#### IV. 솔레노이드 온도 특성 실험

##### 4.1. 실험 장치 구성

열 유동 및 전자기장 해석 결과 검증을 위해 실험 장치를 구성하고, 포화온도와 온도 상승에 따른 흡인력 특성을 파악하는 실험을 진행하였다. Fig. 7은 설계된 솔레노이드 시제품과 시간 경과에 따른 온도, 흡인력을 측정하기 위한 실험 장치 구성을 나타낸 것이다. 실험 장치는 PWM 발생회로에 전원을 인가하기 위한 전원 공급기, 전원 공급기의 직류 전압을 10 kHz 주파수, 듀티비 10~100 % 범위의 PWM 전원으로 변환시키는 변환회로, 인가된 PWM 전원에 의해 발생하는 코어와 플런저 사이의 흡인력을 측정하는 로드셀, 온도 변화를 측정하는 열전대, 코어와 플런저 사이의 공극부 거리를 조절하는 리니어 스테이지, 로드셀과 열전대의 출력 값 수집을 위한 데이터 수집 장치로 구성된다. 로드셀은 실험 장치 하부 지그에 고정시키고 Fig. 1의 플런저 A에 체결하여 흡인력이 전달되도록 하였다. 열전대는 K타입을 사용하였으며, 시제품 제작 시 코일 보빈에 권선을 한 후 커넥터를 분리할 수 없도록 사출하기

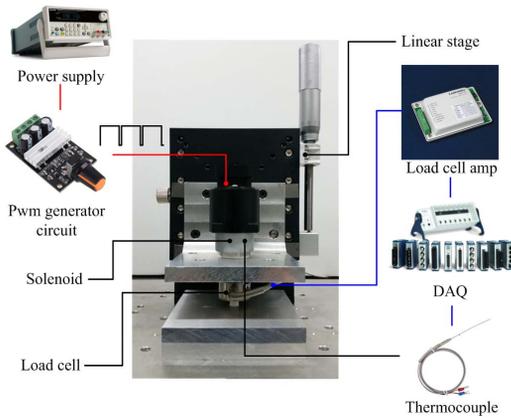


Fig. 7. Experimental setup for testing temperature characteristics.

Table 5. Comparing saturation temperature data sets

Method	Saturation temperature [°C]	Error [°C]
Thermal equivalent circuit	52.5	-
Analysis of heat flow	47.2	5.3
Experiment	41.3	11.2

때문에 보빈보다 두께가 얇은 커넥터 표면에 열전대를 위치시켜 온도를 측정하였다.

#### 4.2. 포화 온도 실험 결과

Fig. 8은 개방된 유로를 유지하기 위한 듀티비 30 % 조건에서 솔레노이드의 온도 변화를 1 Hz의 샘플링 주파수로 수집한 결과를 나타낸 것이다. 솔레노이드의 온도는 점차 상승하여 약 41.3 °C에서 포화되고, 열 유동 해석결과에서 코일 온도와 비교하였을 때 5.9 °C, 열전대가 부착된 커넥터 표면 온도와 비교하였을 때 4.2 °C 오차가 발생하였으며 이를 정리하여 Table 5에 나타내었다. 이는 열 유동 해석에서 코일의 소모 전력을 초기 25 °C의 값으로 고정시켜 해석 하였으나, 실제 코일은 온도가 상승함에 따라 소모 전력이 감소하기 때문이다[2]. 또한 열 유동 해석에서는 솔레노이드와 고정 지그 사이에 발생하는 전도와 솔레노이드 외부 표면과 공기 사이에 온도 구배로 인해 발생하는 복사가 고려되지 않았기 때문이다.

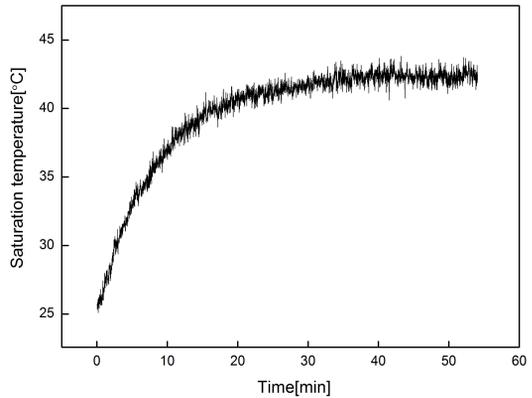


Fig. 8. Measured temperature along with time.

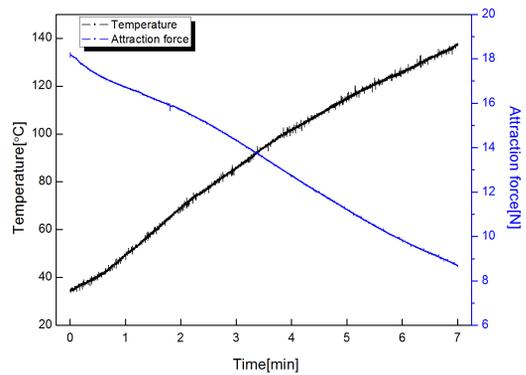


Fig. 9. Measured attraction force and temperature along with time.

#### 4.3. 흡인력 특성 실험 결과

Fig. 9는 유로 개방 시 듀티비 90 % 조건에서 솔레노이드 온도 및 흡인력 변화를 50 Hz의 샘플링 주파수로 수집한 결과를 나타낸 것이다. 전원 인가 후 흡인력은 18.2 N이며 7분이 경과한 시점에서 온도는 137 °C 까지 상승하며 흡인력은 8.7 N으로 감소한다. 압력 용기의 최대 허용 압력인 87.5 MPa 조건에서 유로 개방에 필요한 솔레노이드의 흡인력은 15.3 N이며, 이를 만족하는 온도 한계는 PWM 전원 인가 후 약 2분이 초과한 시점에서의 74 °C로 확인되었다.

Fig. 10과 Table 6은 온도 상승에 따른 흡인력 해석결과와 실험 결과를 비교하여 나타낸 것이며, 해석결과와 비교하였을 때 최소 1.0 N, 최대 2.1 N의 오차가 발생하였다. 전자기장 해석에는 Fig. 1의 솔레노이드 중심축을 기준으로 좌측 부분을 사용하였으며, 코일에서 생성된 자속이 디스크와 케이스 외

Table 6. Comparing attraction force data sets

Temperature [°C]	Attraction force [N]		Error [N]
	Simulation	Experiment	
35	18.9	17.7	1.2
40	18.5	17.3	1.2
45	18.2	17.0	1.2
50	17.9	16.7	1.2
55	17.5	16.4	1.1
60	17.2	16.2	1.0
65	16.9	15.9	1.0
70	16.6	15.6	1.0
75	16.3	15.3	1.0
80	16.1	14.9	1.2
85	15.8	14.4	1.4
90	15.5	14.0	1.6
95	15.3	13.5	1.8
100	15.0	13.0	2.1

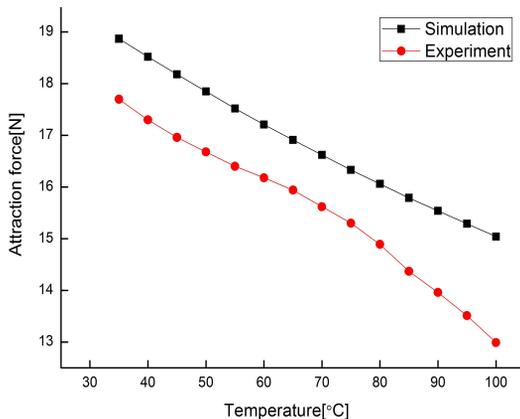


Fig. 10. Comparison attraction force between analysis and experiment.

부로 누설되지 않는다. 하지만 실제 솔레노이드 시제품에서는 Fig. 1의 우측 부분처럼 전원 어댑터 체결을 위한 커넥터의 공간만큼 디스크 부피가 제거되며 이를 통해 자속의 일부가 누설되어 흡인력이 감소하기 때문이다.

## V. 결론

본 연구에서는 수소연료전지 자동차의 주행 안정성에 영향을 미치는 전자 밸브 솔레노이드의 온도 특성을 파악하기 위해 열 저항 등가법을 이용한 이론 모델을 제시하였다. 전산유체역학 소프트웨어를 활용하여 포화온도를 시뮬레이션하고 이론 모델과 비교 평가 하였다. 그리고 전자기장해석 소프트웨어를 활용하여 온도 변화에 따른 흡인력 특성을 시뮬레이션하고 실험 결과와 비교 분석하였다. 온도 특성 분석 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 용기용 전자밸브 솔레노이드 코일의 포화온도를 열 저항 등가법을 사용하였을 때 52.5 °C로 예측되었다. 동일한 소모 전력 조건에서 열 유동 해석 결과와 비교하였을 때 5.3 °C 높게 측정되었다.

(2) 전자기장 해석결과 온도가 상승함에 따라 솔레노이드의 흡인력은 감소하는 경향을 보이며, 95 °C 이상의 온도에서 솔레노이드의 흡인력이 유로 개방에 필요한 힘을 만족하지 못하였다.

(3) 열 전대와 로드셀을 이용하여 솔레노이드 온도 특성을 분석하기 위한 실험 장비를 구성하였으며, 시뮬레이션 결과와 실험결과를 비교하였을 때 포화 온도는 5.9 °C, 흡인력은 최대 2.1 N의 오차가 발생하였다. 유로 개방에 필요한 요구 힘을 만족하는 온도한계는 74 °C로 시뮬레이션 결과보다 낮게 측정되었다.

본 연구는 온도 특성 해석에 전도와 대류만을 고려하여 시뮬레이션을 수행하였다. 향후 보다 정확한 포화 온도 파악을 위해 복사 열전달을 고려하고자 한다. 제시한 이론 모델과 시뮬레이션 결과는 수소연료전지 자동차 용기용 전자밸브에 사용되는 솔레노이드 뿐만아니라 사용 온도에 민감한 산업용 밸브용 솔레노이드 설계에 유용하게 활용 될 것이다.

## 감사의 글

본 연구는 "산업통상자원부", "한국산업기술평가원", "우수기술연구센터사업(수소자동차 용기 용 105 MPa 급 스마트 밸브 기술개발)"으로 수행되었으며, 지원에 감사를 드립니다.(10062425).

## REFERENCES

- [1] Lim, B. J., Park, C. D., Chung, K. Y., and Yun, S. N., "Development of Solenoid Operated Valve

- for Nuclear Power Plant", *Journal of Drive and Control*, **11**(1), 26-34, (2014)
- [2] Park, C. D., Lim, B. J., and Chung, K. Y., "Design verification methodology for a solenoid valve", *Journal of Drive and Control*, **11**(1), 42-47, (2014)
- [3] Jang, K. M., Eom, S. H., Kim, I. C., and Kim, C. K., "Experiment Study on Operation Model of Automatic Cylinder Valve by the Temperature Differences", *KIGAS*, **16**(6), 73-79, (2012)
- [4] Lee, H. R., Ahn, J. H., Shin, J. O., and Kim, H. Y., "Safety Evaluation Based on Structural Analysis of Cylinder Valves for Fuel Cell Vehicles", *KSMTE*, **25**(3), 189-197, (2016)
- [5] Bergman, T. L., Lavine, A. S., Incropera, F. P., and DeWitt, D.P., *Fundamental of Heat and mass Transfer*, 7th ed., Wiley, New York, (2011)
- [6] Lee, H. R., Ahn, J. H., Shin, J. O., and Kim, H. Y., "Design of Solenoid Actuator for FCV Cylinder Valve Considering Structural Safety", *KSMTE*, **25**(3), 157-163, (2016)
- [7] Kim, J. H., Lee, J. G., Lee, K. S., Lee, W., and Lee, H. B., "Thermal Fluid Flow Analysis for Temperature Characterization of Mold Transformer in Distribution Power System", *The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers*, **62**(1), 6-11, (2013)