

# 전자기장 해석을 이용한 CNG 차량 용기용 밸브 솔레노이드의 설계

이효렬\*, 안중환\*, 신진오\*\*, 김화영\*\*\*, #

\*부산대학교 기계공학부, \*\*영도산업(주), \*\*\*부산대학교 기계기술연구원

## Design of a Cylinder Valve Solenoid for a CNG Vehicle using Electromagnetic Field Analysis

Hyo-Ryeol Lee\*, Jung-Hwan Ahn\*, Jin-Oh Shin\*\*, Hwa-Young Kim\*\*\*, #

\*School of Mechanical Engineering, Pusan National Univ., \*\*R&D Center, Youngdo Industrial Co. LTD.,

\*\*\*Research Institute of Mechanical Technology, Pusan National Univ.

(Received 1 December 2015; received in revised form 11 February 2016; accepted 12 February 2016)

### ABSTRACT

Growing concerns regarding environmental pollution have increased the demand for green vehicles. Green vehicles include electric vehicles, compressed natural gas vehicles, fuel cell vehicles, and vehicles running on fuels such as bio diesel or an ethanol blend. CNG vehicles are equipped with a cylinder valve installed in a high-pressure vessel to control the CNG flow. For this purpose, the optimum design of cylinder valve solenoid is necessary to secure at driving a CNG vehicle. In this study, electromagnetic field analysis to ensure the reliable operation of the solenoid was conducted by using a Maxwell V15. The electromagnetic field analysis was performed by magnetostatic technique according to distance between magnetic poles in order to predict the attraction force. Finally, the attraction force was validated through comparison between the Maxwell results and the measurement results. From the results, the error of attraction force was found to be 2.85 N to 6.5 N under the testing conditions.

**Key Words** : CNG Vehicle(압축 천연가스 자동차), Pressure Vessel(압력 용기), Cylinder Valve(용기 밸브), Solenoid(솔레노이드), Electro Magnetic Field Analysis(전자기장 해석)

### 1. 서 론

전 세계적으로 환경문제는 매우 큰 이슈로 자리 매김하고 있으며, 특히 각 국가별로 이산화탄소 발생 감소의 필요성이 대두되고 있다. 운송수단 중의 하나인 차량의 이산화탄소 발생량을 감소시키기 위

해 환경 친화성과 연료 공급용이성 면에서 장점이 있는 압축 천연 가스 차량(Compressed Natural Gas Vehicle, CNG)이 실용화되었으며, 천연가스는 석유, 석탄에 비하여 연소 시 발생하는 이산화탄소 및 아황산가스 등과 같은 공해물질의 발생량이 적어 수요가 점차 증가하고 있는 추세이다. 천연 가스는 -162 °C 이하의 온도에서 액화되기 때문에 대부분 가스 상태로 200 bar 정도의 고압으로 압축 저장하여 운영하고 있다.<sup>[1]</sup>

특히 고압으로 연료를 저장하는 압력 용기와 용

# Corresponding Author : [hyokim@pusan.ac.kr](mailto:hyokim@pusan.ac.kr)

Tel: +82-51-510-3087, Fax: +82-51-581-3087

기에 부착되는 용기용 밸브, 고압 배관의 안전성 확보가 매우 중요하다. 압축 천연 가스 차량의 기술적 근거에 관해서는 세계적으로 ECE R110 유럽 규격을 신뢰하고 있는 추세이다. 2009년 10월에 개정되어 2010년에 배포된 ECE R110규격에 의하면 압축 천연가스 차량 용기용 밸브는 수동으로 조작하여 유로를 개폐하는 장치와 전기적 장치에 의해 유로를 개폐하는 장치가 동시에 장착되어야 하며, 화재, 압력 용기 파열 등의 각종 안전사고로부터 안전성을 확보하기 위해 압력해제 장치, 과류 차단 장치 등의 안전장치 부착을 의무화 하고 있다.<sup>[2]</sup>

따라서 본 논문에서는 전자기장 해석을 이용하여 용기용 밸브에서 유로를 개폐하는 역할을 하는 솔레노이드를 설계하고 실험을 통해 이를 검증하였다.

## 2. 압력 용기용 솔레노이드의 구조

저압에서 사용되는 솔레노이드의 경우 단일 플런저의 동작으로 유로를 개폐가 가능하지만 200 bar 정도의 고압으로 연료를 저장하는 용기용 솔레노이드 밸브의 경우에는 단일 플런저 방식을 적용하기에는 한계가 있다. 이를 극복하기 위해 2단 플런저 방식을 적용한 솔레노이드의 구조를 Fig. 1에 나타내었다. 솔레노이드 밸브의 구조는 크게 자기장 형성을 위한 코일, 자기 회로를 구성하는 디스크와 케이스, on/off 동작에 의해 유로를 개폐하는 플런저 A·B, 코일에서 발생한 자기장에 의해 자화되어 플런저를 흡인하는 요크, 플런저를 복원시키는 스프링 등으로 구성된다.

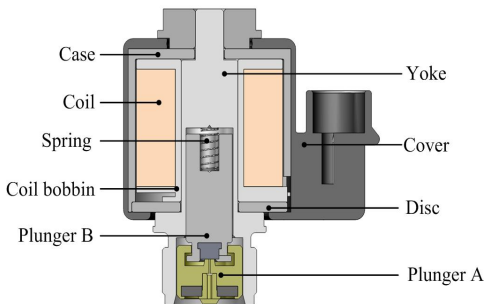


Fig. 1 Schematic of solenoid

## 3. 솔레노이드 설계식

### 3.1 솔레노이드의 요구 흡인력 산출식

솔레노이드에 전압이 인가되기 전 닫혀있는 유로를 개방하기 위해 필요한 흡인력의 산출이 요구된다. 용기 내부 유체의 압력에 의해 플런저에 가해지는 힘을  $F_f$ , 스프링의 예 하중을  $F_s$ , 솔레노이드 동작의 신뢰성을 확보하기 위한 여유율을  $c$ 이라 두면 유로 개방에 필요한 솔레노이드의 흡인력  $F_R$ 를 식(1)과 같이 표현할 수 있다.

$$F_R = c[F_f + F_s] \quad (1)$$

여기서 스프링의 자유 길이를  $l_f$ , 셋팅 길이를  $l_s$ , 스프링 상수를  $K$ 로 두면 스프링의 예 하중  $F_s$ 는 식(2)와 같이 표현할 수 있다.

$$F_s = (l_f - l_s)K \quad (2)$$

### 3.2 솔레노이드의 요구 기자력 산출식<sup>[3]</sup>

솔레노이드에 전압이 인가될 때 코어와 플런저가 자화되어 발생하는 흡인력  $F_A$ 를 식(3)과 같이 나타낼 수 있으며,  $B_g$ 와  $S$ 는 각각 흡인력이 발생하는 공극부의 자속밀도와 단면적을,  $\mu_0$ 는 진공의 투자율을 나타낸다. 공극부의 자속 밀도  $B_g$ 는 기자력  $U$ 와 공극부의 사이의 거리  $d$ 를 통해 식(4)와 같이 표현할 수 있다.

$$F_A = \frac{B_g^2 S}{2\mu_0} \quad (3)$$

$$B_g = \frac{\mu_0 U}{d} \quad (4)$$

기자력은 코일의 권선 수  $N$ 과 코일에 흐르는 전류  $I$ 의 곱으로 나타내거나, 식(4)를 정리하여 식(5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$U = NI = \frac{B_g d}{\mu_0} \quad (5)$$

Fig. 2는 Fig. 1의 솔레노이드 코일 보빈과 보빈에 감겨있는 코일을 단순화하여 나타낸 것이다. 코일 보빈의 내경을  $B_i$ , 외경을  $B_o$ , 높이를  $h$ , 에나멜선의 직경을  $C_d$ 라 하면 코일 보빈의 축 방향 권선 수  $n_c$ 와 반경 방향 적층 수  $m_c$ 는 식(6), (7)과 같고 두 값의 곱으로 표현되는 코일 권선 수는 식(8)과 같이 나타낼 수 있다.

$$n_c = \left( \frac{h}{C_d} \right) - 1 \quad (6)$$

$$m_c = \frac{w}{C_d} \quad (7)$$

$$N = n_c m_c \quad (8)$$

코일에 흐르는 전류는 에나멜선의 절연 층을 제외한 동선 직경  $n_d$ 와 비저항  $\rho$ , 1회 코일 권선의 평균 길이  $l_{ca}$ 를 이용하여 식(9)와 같이 나타낼 수 있다.

$$I = \frac{V}{4\rho \left( \frac{l_{ca} N}{\pi N_d^2} \right)} \quad (9)$$

$$l_{ca} = \frac{\pi(B_i + B_o)}{2}$$

일반적으로 코일에 전류가 가해지면 온도가 점차 상승하여 어느 온도에서 포화되어 일정해진다. 온도 증가는 코일 저항의 상승으로 이어져 솔레노이드의 흡인력 감소를 초래하며, 솔레노이드의 요구 흡인력과 온도 증가에 의해 감소된 흡인력을 비교하는 것이 중요하다. 온도 증가에 의한 코일의 저항 상승값  $R_h$ 는 20 °C에서의 코일 저항인  $R_{20}$ 과 포화 온도  $T_h$ 를 이용하여 식(10)을 이용하여 구할 수 있다.<sup>[4]</sup>

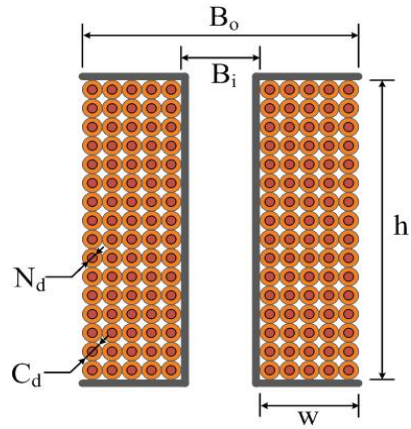


Fig. 2 Schematic of coil bobbin<sup>[5]</sup>

$$R_h = R_{20} \times \left( \frac{234.5 + T_h}{234.5 + 20} \right) \quad (10)$$

## 4. 솔레노이드 설계 및 전자기장 해석

### 4.1 솔레노이드 설계

ECE R110 유럽 규격에 의하면 용기용 밸브의 최대 허용 압력을 250 bar, 사용 온도 범위를 -40~85 °C로 규정하고 있다. 규정된 사용 조건에서 솔레노이드가 동작하기 위해서 최대 허용 압력과 최고 사용 온도 조건에서 유로를 개방하기 위한 솔레노이드의 요구 흡인력 산출이 요구된다. 식(1)에서 유체의 압력에 의해 플런저에 가해지는 힘  $F_f$ 는 Fig. 3에서 솔레노이드에 전압이 인가되지 않은 초기 밀폐 상태에서 플런저 B에 가해지는 기밀력(Z방향)의 합과 같다. 기밀력은 A 영역과 같이 플런저 A, B가 접촉한 면적과 최대 사용 압력인 250 bar를 이용하여 8.76 N의 결과를 얻었으며, 수평 방향(X방향)의 힘은 중심축 대칭인 플런저 A, B의 형상으로 인해 상쇄된다. 스프링의 자유 길이에서 셋팅 길이로 압축되면서 발생하는 스프링의 예하중은 식(2)를 이용하여 3.53 N의 값을 얻었으며 스프링의 사양을 Table 1에 정리하여 나타내었다. 여기서 신뢰성 확보를 위한 여유율을 20%로 두었을 때 유로 개방에 필요한 솔레노이드의 흡인력은 식 (1)에 의해 14.75

N으로 결정된다.

솔레노이드 흡인력에 영향을 미치는 설계 조건 중 코일 보빈의 내경, 외경, 높이 및 공극부의 면적과 거리, 인가전압을 고정값으로 두고, 보빈에 권선되는 에나멜선의 직경을 설계 변수로 선정하였으며 이를 Table 2에 정리하여 나타내었다.

Table 3은 ECE R110 규격에 규정된 용기용 밸브의 사용 온도 범위 중 최저 온도인 -40 ℃, 상온인 20 ℃와 최고 온도인 85 ℃ 조건에서 코일 보빈에 권선된 에나멜 선의 직경에 따른 기자력을 식(5) ~ (10)을 이용하여 계산한 결과를 나타낸 것이다.

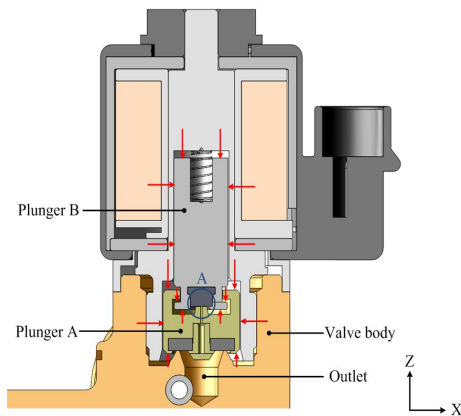
공극부의 거리가 1.2 mm이고, 유로 개방에 필요한 흡인력이 14.75 N 일 때 필요한 공극부의 자속 밀도 값은 식(3)을 이용하여 0.69 T의 결과를 얻었

**Table 2 Design parameters of solenoid**

Parameters	Values
Distance between magnetic poles( $d$ )	1.2mm
Magnetic pole area( $S$ )	78.5mm <sup>2</sup>
Height of coil bobbin( $h$ )	23mm
Inner diameter of coil bobbin( $B_i$ )	14.5mm
Outer diameter of coil bobbin( $B_o$ )	31mm
Copper wire diameter( $N_d$ )	0.55, 0.5, 0.45, 0.4, 0.37, 0.35, 0.32, 0.3mm
Voltage( $V$ )	12V
Permeability of free space( $\mu_0$ )	$4\pi \times 10^{-7} H/m$

**Table 3 Magnetomotive force with enameled wire diameter**

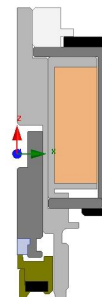
$N_d$ [mm]	$C_d$ [mm]	$\rho$ [Ω/km]	$n_c$	$m_c$	N	U[AT] (-40℃)	U[AT] (20℃)	U[AT] (85℃)
0.55	0.584	72.57	38	14	532	3037.22	2321.17	1848.95
0.5	0.534	87.81	42	15	630	2528.60	1932.47	1539.32
0.45	0.482	109.2	46	17	782	2016.81	1541.34	1227.76
0.4	0.43	138.2	52	19	988	1595.29	1219.19	971.16
0.37	0.398	161.5	56	20	1120	1377.90	1053.05	838.81
0.35	0.378	180.5	59	21	1239	1234.07	943.13	751.25
0.32	0.348	215.9	65	23	1495	1028.70	786.17	626.23
0.3	0.328	245.6	69	25	1725	896.49	685.14	545.75



**Fig. 3 Distribution of pressure at initial status**

**Table 1 Specifications of spring**

Parameters	Values
Material	STS304
Wire diameter	φ 0.3mm
Inside diameter	φ 3.2mm
Outside diameter	φ 3.8mm
Free length	12mm
Setting length	8.4mm
Minimum length	7.4mm
Number of coils	12(Right hand wound)
Spring constant	0.98N/mm



**Fig. 4 2D model for electro magnetic field analysis**

으며, 자속 밀도 값을 충족시키기 위한 기자력을 식(4)를 이용하여 계산하였을 때 787.27 AT을 얻었

다. 이를 Table 3의 에나멜 선의 직경에 따른 기자력 계산 결과와 비교하였을 때 85 °C 조건에서 에나멜 선의 직경이 0.378 mm 이하일 때 요구 기자력 값을 만족하지 못함을 확인하였다.

### 4.2 솔레노이드 전자기장 해석

솔레노이드 설계식을 이용하여 솔레노이드의 요구 흡인력을 만족하는 에나멜선의 직경 선정의 타

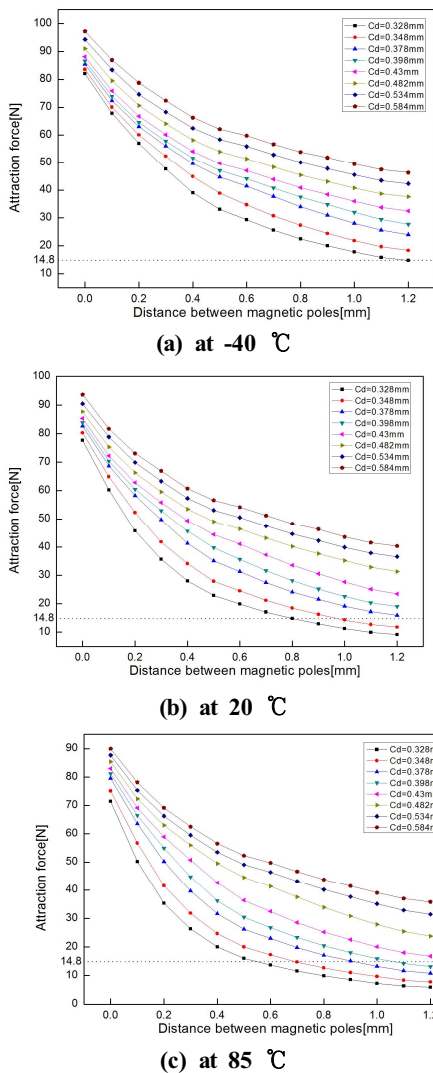


Fig. 5 Comparison of attraction force with enameled wire diameter

Table 4 Material of solenoid valve components

Part name	Material	Relative permeability
Cover	PA66+G35%	1
Case	SUM24L	B H nonlinear characteristic
Disc	SUM24L	B H nonlinear characteristic
Yoke	STS 430FR	B H nonlinear characteristic
Coil	Copper	1
Plunger A	Brass	1
Plunger B	MER1F	B H nonlinear characteristic
Coil bobbin	PA66+G35%	1

당성을 검증하기 위해 전자기장 상용 소프트웨어인 Maxwell V15를 이용하여 -40 °C, 20 °C와 85 °C 조건에서 공극부 사이의 거리에 따른 흡인력 변화를 해석하였다. Fig. 4은 전자기장 해석을 위해 단순화된 솔레노이드의 2D 모델을 나타낸 것이다. 해석에 사용된 온도에 따른 코일의 기자력은 Table 3의 결과를 활용하였으며, 공극부의 사이의 거리는 0 mm 부터 1.2 mm 까지 0.1 mm 간격으로 설정하였다. 또한 플런저의 자중과 스프링의 탄성력을 고려하지 않았으며, 해석에 사용된 솔레노이드 구성품의 재질 정보를 Table 4에 나타내었다. 마지막으로 전자기장 해석에 사용된 격자는 사면체 격자를 이용하였으며 생성된 격자수는 63,906개이다.

Fig. 5의 (a), (b), (c)는 각각 -40 °C, 20 °C, 85 °C 조건에서 에나멜 코일의 직경과 공극부의 거리에 따른 흡인력 변화를 나타낸 것이다. -40 °C 조건에서는 모든 조건에서, 20 °C 조건에서는 에나멜선의 직경이 0.378 mm 이상일 때 요구 흡인력을 만족한다. 85 °C 조건에서는 온도 상승으로 인한 기자력의 감소로 에나멜선의 직경이 0.43 mm 이상의 조건에서 요구 흡인력을 만족한다. 에나멜선의 직경이 증가할수록 소모 전력이 증가하므로 소모 전력이 가장 작은 0.43 mm의 에나멜선이 가장 적절하다. 앞의 솔레노이드 설계식을 이용하여 선정된 에

나멜선의 직경과 전자기장 해석 결과를 비교하였을 때 다소 차이가 발생하며, 이는 자기 회로에서 발생하는 자기력 손실 때문이라 사료된다.

### 5. 솔레노이드 성능평가 시험

Fig.6은 0.43 mm 직경의 에나멜선을 이용하여 제작한 솔레노이드의 시제품과 흡인력 측정 장치 구성을 나타낸 것이다. 흡인력 측정 장치는 솔레노이드, 로드셀, 레이저 변위센서, 리니어 스테이지, 전원공급기, 데이터 수집 장치로 구성된다. 시험 방법은 공극부의 간격을 조절하기 위해 상하방향으로 이송이 가능한 리니어 스테이지에 솔레노이드를 고정시킨다.

다음으로 요크와 플런저의 자화로 인해 발생하는 흡인력을 측정하기 위해 고정된 솔레노이드의 동일 중심축 선상에 로드셀을 고정시키고, 플런저 A를 로드셀에 체결하여 흡인력이 로드셀에 전달되도록 하였다. 그리고 플런저 B와 코어가 완전 접촉하는 지점으로부터 0.1 mm 간격으로 리니어 스테이지를 이동시키고 실제 이동 변위를 레이저 변위센서를 이용하여 확인하였다.

공극부의 사이의 거리 조절이 완료되면 전원 공급기를 이용하여 솔레노이드에 12 V의 전압을 인가하고 로드셀로 측정된 흡인력을 값을 데이터 수집 장치를 이용하여 수집하고 분석하였다.

성능평가 시험에 사용한 솔레노이드의 경우 전자기장 해석 결과와 비교하기 위해 20 °C 조건에서 플런저 복귀를 위한 스프링 없이 자기력에 의한 흡

**Table 5** Attraction force with Distance between magnetic poles

Distance between magnetic poles	Attraction force				Error
	Maxwell			Experimental	
	(-40°C)	(20°C)	(85°C)		
0.1mm	75.87N	72.26N	69.15N	69.41N	2.85N
0.2mm	66.80N	62.86N	58.93N	59.71N	3.15N
0.3mm	60.10N	55.84N	50.74N	51.91N	3.93N
0.4mm	54.06N	49.37N	42.65N	44.98N	4.39N
0.5mm	49.69N	44.37N	36.36N	38.57N	5.8N
0.6mm	47.04N	41.08N	32.46N	34.58N	6.5N
0.7mm	43.89N	37.26N	28.59N	31.12N	6.14N
0.8mm	40.89N	33.59N	25.23N	27.65N	5.94N
0.9mm	38.45N	30.55N	22.51N	24.36N	6.19N
1.0mm	35.97N	27.65N	20.07N	22.28N	5.37N
1.1mm	33.75N	25.16N	18.01N	20.72N	4.44N
1.2mm	32.45N	23.44N	16.79N	19.16N	4.28N

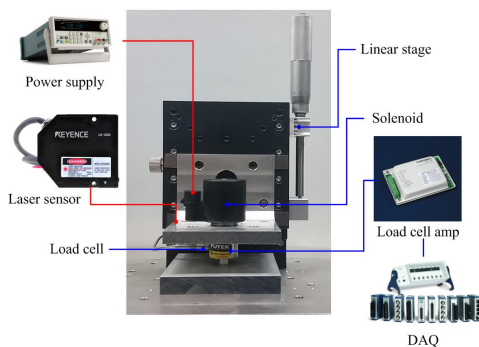
인력만을 측정하였으며, 측정 간격 간 충분한 시간을 두어 코일의 온도가 일정하도록 유지하였다.

공극부 사이의 거리가 0 mm인 지점에서는 플런저와 코어가 완전 접촉하여 흡인력 측정이 불가능하며 이를 제외한 측정 결과를 Table 5에 나타내었다.

측정 결과 값을 전자기장 해석으로 구한 흡인력과 비교하였을 때 오차는 최소 2.85 N, 6.5 N으로 측정되었다. 오차 발생의 원인은 전자기장 해석에서 사용된 2D 모델이 Fig. 1의 솔레노이드 중심축을 기준으로 좌측 부분에 해당하며, 솔레노이드 커넥터 부분에서 발생하는 자속의 누설을 반영하지 못하기 때문이다. 또한 전자기장해석에서는 플런저의 자중을 고려하지 않았으나 실제 측정값에서는 플런저의 자중이 반영되기 때문이다.

### 5.2 고-저온 압력 시험을 통한 성능평가

ECE R110의 규격에 의하면 용기용 밸브를 40, 20, 85 °C의 시험 온도에서 최소 8시간 이상 노출시킨 후 250 bar로 가압하고 밸브 내부 및 외부 누설을 측정하여 누설이 없거나 20 cc/h 이하를 만족해야 한다. 이때 용기용 밸브 내부 유로 전체에 시험 가스를 공급하기 위해 시험 온도에서 솔레노이드를 동작시켜야 한다. Fig. 7과 Table 6은 시험 온



**Fig. 6** Schematic of attraction force test device

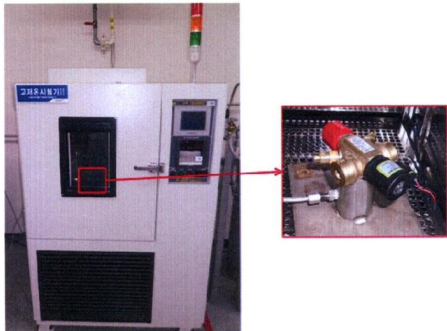


Fig. 7 Test equipment and installation status for solenoid

Table 6 Results of internal and external leakage test

	Test Pressure [bar]	Requirement [cc/h]	Results [cc/h]
Internal leakage test at -40℃	250	< 20	0
Internal leakage test at 20℃	250	< 20	0
Internal leakage test at 85℃	250	< 20	0
External leakage test at -40℃	250	< 20	0
External leakage test at 20℃	250	< 20	0
External leakage test at 85℃	250	< 20	0

도에 따른 용기용 밸브의 누설 시험을 위한 고-저온 압력 시험기, 압력시험기에 용기용 밸브가 장착된 모습, 시험 결과를 나타낸 것이다. 시험 결과 -40, 20, 85 ℃에서 솔레노이드가 동작하여 용기용 밸브 내부 유로 전체에 압력이 가해짐을 확인 하였으며, 내부 및 외부 누설을 측정결과 누설이 발생하지 않아 솔레노이드의 설계가 타당함을 확인하였다.

## 6. 결 론

본 연구에서는 솔레노이드 설계식과 전자기장 해석을 이용하여 CNG 차량 용기용 밸브 솔레노이드를 설계하였다. 설계 목표는 유로 개방에 필요한

솔레노이드의 요구 흡인력을 만족하면서 소모 전력이 최소가 되는 에나멜 선의 직경을 선정하는 것이다. 전자기장 해석과 솔레노이드 흡인력 시험 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 솔레노이드 설계식과 전자기장 해석을 통해 용 밸브의 사용 온도 범위인 -40~85 ℃에서 에나멜 선의 직경이 0.43 mm 이상일 때 유로 개방을 필요한 흡인력을 만족함을 알 수 있었다.

2. 에나멜 선의 직경이 증가함에 따라 소모 전력 역시 증가하며 소모 전력이 최소가 되는 0.43 mm 에나멜 선을 이용하여 솔레노이드 시제품을 제작하였다. 솔레노이드 흡인력 측정 장치를 이용하여 공극부 거리에 따른 솔레노이드의 흡인력을 측정하였으며 이를 전자기장 해석 결과와 비교하였을 때 오차의 최소값이 2.85 N, 최대값이 6.5 N이 발생함을 확인하였다.

3. ECE R110의 규격에 의한 -40, 20, 85 ℃에서의 용기용 밸브 내·외부 누설 시험을 통해 솔레노이드의 동작을 확인하여 설계의 타당성을 확인하였다.

## 후 기

"이 논문은 2013년 교육부와 한국연구재단의 지역혁신창의인력양성사업의 지원을 받아 수행된 연구 결과임(No. 2013032233)."

## REFERENCES

1. Yeo, K. M., Park, K. T., Park, T. J., Chung, H. T. and Kang, B. R., "Icing Analysis of Fuel Supply Line Components for CNG Vehicle," Proceedings of the KSME 2006 Spring Annual Meeting, pp. 197-202, 2006.
2. United Nations Economic Commission for Europe, Regulation No. 110 Rev. 2, CNG Equipment - Part 1: Approval of specific components of motor vehicles using compressed natural gas (CNG) in their propulsion system, Part 2: Vehicles with regard to the installation of specific components of an approved type for the

use of compressed natural gas (CNG) in their propulsion system, pp. 1-149, 2009.

3. Sung, B. J., Lee, E. W. and Kim, H. E., "Empirical Design of an On and Off Type Solenoid Actuator For Valve Operation," KIEE International Transactions on Electrical Machinery and Energy Conversion Systems, Vol. 4, pp. 39-46, 2004.
4. Fitzgerald, A. E., Kingsley, C. Jr. and Umans, S. D., Electric Machinery 6th ed, McGraw-Hill, pp. 258-265, 2003.
5. Jang, J. H., Kim, J. H. and Lee, S. J., "Parameter Study on the Design of Solenoid to Enhance the Velocity of Coilgun," Journal of the Korean Magnetics Society, Vol. 25, No. 3, pp. 87-91, 2015.