

## 技術論文

J. of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences 43(11), 1028-1034(2015)

DOI:http://dx.doi.org/10.5139/JKSAS.2015.43.11.1028

ISSN 1225-1348(print), 2287-6871(online)

## 극저온 환경을 고려한 우주발사체용 솔레노이드 밸브 설계

김병훈\*, 한상엽\*, 고영성\*\*

## Design of Space Launch Vehicle Solenoid Valve for Cryogenic Environment

Byunghun Kim\*, Sangyeop Han\* and Youngsung Ko\*\*

Supply System Team, Korea Aerospace Research Institute\*

Dept. of Aerospace Engineering, Chungnam National University\*\*

## ABSTRACT

Solenoid valves for space launch vehicles require the strict limitations on the size, weight and current consumption comparing to industrial solenoid valves. The preliminary design of a cryogenic and high pressure solenoid valve for propellant tank pressurization which can ensure the operation of solenoid valve under such strict limitation conditions was preformed. The Copper and Constantan materials in coil design have used to prevent the excessive rise of the current at cryogenic state. The measured current of solenoid valve at cryogenic temperature satisfies a design requirement.

## 초 록

발사체에 적용되는 솔레노이드 밸브의 경우 산업용 솔레노이드 밸브에 비해 엄격한 전류 및 무게, 크기 제한 조건을 요구한다. 이러한 제한 조건을 만족하며, 솔레노이드 밸브의 작동을 보장하기 위한 추진제탱크 가압제어용 솔레노이드 밸브 설계를 수행하였다. 극저온 상태에서 솔레노이드 전류 상승을 방지하기 위해 구리와 콘스탄탄 재료를 사용한 새로운 형태의 코일 설계를 적용하였으며, 시제품을 이용한 시험결과 측정된 전류는 설계 규격을 만족하고 있다.

**Key Words** : Solenoid Valve(솔레노이드 밸브), Coil(코일), Constantan(콘스탄탄), Cryogenic(극저온), Current(전류)

## 1. 서 론

솔레노이드 밸브는 전기적 신호를 1차적으로 전자기적 에너지로 변환한 다음, 기계적인 직선 운동으로 변환시켜 압력, 유체, 방향 등을 제어하는 장치로, 모터를 이용하는 것보다 구조가 간단하고 가격이 저렴하면서도 일정한 범위에서 비교

적 정밀제어가 가능하기 때문에 자동차, 항공기 등의 핵심부품으로 산업 기계에 광범위하게 사용되고 있다.

한국형발사체 추진제탱크 가압시스템에서 극저온 고압 솔레노이드 밸브는 산화제 탱크 내부의 가압제 탱크에 저장되어 있는 극저온 고압 헬륨가스를 열교환기를 통해 추진제 탱크로 공급하

† Received : July 13, 2015      Revised : October 6, 2015      Accepted : October 12, 2015

\*\* Corresponding author, E-mail : ysko5@cnu.ac.kr

는 핵심 부품으로 이러한 방식의 추진제탱크 가압시스템은 1960년대 개발된 Saturn IC에서부터 Ariane 5 및 Space Shuttle에 이르기 까지 폭넓게 이용되고 있다[1-3].

Yoon 등은[4] 솔레노이드 밸브의 흡입력을 높이기 위해 플런저와 고정자의 표면에 각각 요철 형상을 설치한 새로운 자극면 형상을 제안하였다. 이를 통해 솔레노이드 흡입력을 높일 수 있었으며, 밸브의 동작 시간을 평면 형상의 자극면을 가지는 기본 모델에 비해 약 14% 정도 감소시킬 수 있었다. Sung 등은[5] 솔레노이드 밸브의 작동속도를 높이기 위해 가이드 튜브에 비자성체 구간을 두어 플런저의 운동 속도를 높이는 방법을 제안하였다. Kim 등은[6] 솔레노이드 밸브 스트로크가 큰 초기 상태에 전류 사용량이 크며, 솔레노이드 밸브 작동에 의해 스트로크가 줄어든 상태에서는 열림 상태를 유지하기 위한 전류가 크지 않다는 특성을 이용하여 전류 감소회로 설계를 제안하였다. 그러나 이는 온도가 낮은 상태에서 솔레노이드 밸브 개방 초기에 급격한 전류 증가를 제어할 수 없으며, 별도의 전기회로 설계가 필요하다는 단점이 있다.

일반적으로 솔레노이드 밸브는 솔레노이드 코일에 과도한 전류가 흐르면 코일의 발열에 의해 코일의 저항이 증가하고 이로 인해 전류 감소 및 솔레노이드의 흡입력이 감소하거나, 심한 경우 코일이 파손되어 솔레노이드 밸브가 정상적으로 작동하지 않을 수도 있다. 따라서 솔레노이드 제작에 사용되는 코일은 솔레노이드 온도 상승에 따른 코일의 발열 등급이 정해져 있으며, 이에 맞는 적절한 코일 등급을 사용하도록 되어 있다. 그러나 이와 반대로 외부환경 또는 극저온 작동 유체에 의해 솔레노이드 코일의 온도가 떨어지면 솔레노이드 코일의 저항이 감소하고 이에 코일을 통해 흐르는 전류가 급격하게 증가한다. 이는 일반 산업용 솔레노이드 밸브에서는 큰 문제가 되지 않지만 발사체와 같이 배터리에서 전원을 공급받는 시스템의 경우 배터리 용량증가에 의해 시스템 무게 증가의 원인이 된다. 본 연구는 극저온에서 작동하는 솔레노이드 밸브의 전류 사용량을 최소로 하기 위한 새로운 솔레노이드 코일 설계를 제시한다.

## II. 본 론

### 2.1 밸브 요구조건 및 오리피스 설계

Table 1은 솔레노이드 밸브 설계 요구조건을

Table 1. Solenoid Valve Requirement

Initial Position	N. C
Working Medium	He, N <sub>2</sub>
Working Temperature, K	70 ~ 323
Working Pressure, MPa	2 ~ 23
Flow Coefficient, Cv	≥ 0.2
Open/Close Time, s	≤ 0.25
Voltage, VDC	28 ± 4
Max. Current, A	≤ 3.0 (@70 K)
Max. Mass	≤ 1.4 kg

보여준다. 솔레노이드 밸브는 작동압력이 2 ~ 23 MPa, 작동온도는 70 ~ 323 K이며, 솔레노이드 밸브의 유량계수는 0.2 이상을 만족하여야 한다. 또한 솔레노이드 밸브는 전압 28 ± 4 VDC에서 작동하여야 하며, 이때 솔레노이드 코일에 흐르는 최대 전류는 작동온도 범위에서 3.0 A 이하를 만족하여야 한다.

유량계수(C<sub>v</sub>)는 주로 미국에서 사용하는 밸브 성능표시 인자로 60 F° 물이 1 psi 차압 조건에서 1분 동안 흐르는 갤런(gallon) 유량으로 정의된다. 유량계수 정의와 식 (1)을 이용하여 밸브 오리피스 면적을 선정하고, 이를 통해 오리피스 직경을 계산하였다. 식 (1)에서 손실계수(C<sub>d</sub>)는 유사 밸브 개발 경험을 바탕으로 선정하였다[7]. 유량계수 0.2를 만족하는 오리피스 직경은 최소 2.4 mm 이상이어야 하며, 본 밸브 설계에서는 약간의 마진을 두어 오리피스 직경을 2.5 mm 이상으로 선정하였다.

밸브의 스트로크는 식 (2)를 이용하여 계산하였다. 밸브의 스트로크는 유량계수를 만족하는 오리피스 직경 2.5 mm를 고려할 때 0.625 mm이며, 밸브 제작 및 조립 공차를 고려하여, 스트로크를 0.6 ~ 0.65 mm 로 하였다.

$$A_{orifice} = \frac{\dot{m}}{C_d \times \sqrt{2 \times \rho \times \Delta p}} \quad (1)$$

$$X_{stroke} = \frac{A_{orifice}}{\pi \times D_{orifice}} = \frac{D_{orifice}}{4} \quad (2)$$

### 2.2 솔레노이드 밸브 흡입력

솔레노이드 밸브에서 밸브 작동에 필요한 흡입력은 솔레노이드 크기, 무게뿐만 아니라 솔레노이드 밸브 작동속도에 가장 중요한 설계 인자 중 하나이다. 일반적으로 솔레노이드 밸브 작동에

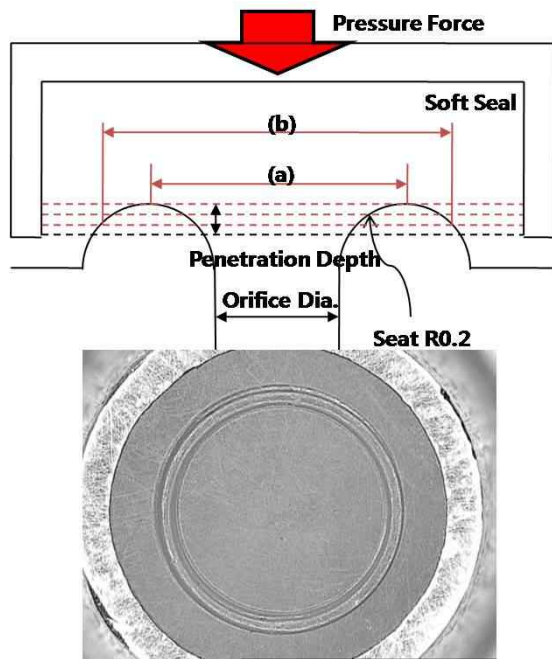


Fig. 1. PCTFE seal penetration depth

필요한 힘은 식 (3)과 같이 오리피스에 작용하는 압력에 의한 힘, 플런저를 누르는 스프링 힘 및 플런저 작동 시 나타나는 마찰력의 합보다 커야 한다. 여기서 오리피스에 작용하는 압력 힘은 오리피스 면적, 오리피스에 작용하는 압력, 씨트(seat) 형상 및 씰(seal)이 씨트에 눌리는 깊이 등을 고려하여야 하며, 스프링 힘은 플런저의 무게 및 밸브에 작용하는 가속도 조건 등을 고려하여 결정한다[8]. 특히 오리피스 면적이 작은 밸브의 경우, 씨트 형상 및 씰이 씨트에 눌리는 깊이에 따라 오리피스에 작용하는 압력 힘의 변화가 크기 때문에 솔레노이드 흡입력 설계에서 이를 반드시 고려하여야 한다.

$$F_{solenoid} > F_{pressure} + F_{spring} + F_{friction} \quad (3)$$

Figure 1은 씰 눌림 량을 고려할 때 압력이 작용하는 면적 변화를 형상화하여 도시한 것이다. (a)는 눌림 량을 무시한 것이며, (b)는 눌림 량을 고려할 때 압력이 작용하는 면적(직경)이 증가하는 것을 보여준다. 이러한 변화는 씨트의 형상 및 씰에 사용되는 재질에 따라라도 변하게 된다. 솔레노이드 밸브 최대 작동압력 23 MPa, 오리피스 지름 2.5 mm, 씨트 형상이 반경 0.2 mm를 가진다고 가정할 때, 씰이 눌리지 않으면 압력 힘은 151.8 N 이지만, 씰이 0.1 mm 눌린다 면 압력 힘은 190.3 N으로 압력에 의해 씰이 눌리는 힘이 약 25.4% 정도 증가한다. 밸브 설계에 사용된 씰 재료는 PCTFE이며, 씰의 눌림 량은

0.1 mm로 가정하였다. 이는 Fig. 1의 아래 그림에서와 같이 유사한 형상 및 압력 조건을 가지는 씰에서 실제 눌림 량을 측정된 결과이다.

본 솔레노이드 밸브의 흡입력은 오리피스에 작용하는 압력 힘과 스프링 힘을 고려하여 결정되었으며, 최소 흡입력이 260 N 이상이다.

### 2.3 솔레노이드 코일

일반적으로 솔레노이드 밸브 제작에 사용되는 코일 소재는 비저항(resistivity)이 작고 비교적 가격이 저렴한 구리를 주로 사용하며, 코일의 절연 및 내열성능 향상을 위해 구리코일 외부에 절연재를 코팅하여 사용한다. 그러나 구리 코일의 경우 Table 2에서 보는 것과 같이 온도계수(thermal coefficient)가 비교적 크기 때문에 솔레노이드 온도 변화에 따라 저항이 크게 변하는 단점이 있다. 이는 본 솔레노이드 밸브 개발 조건

Table 2. Coil properties with material[9]

	Resistivity (Ω-m)	Temperature Coefficient (1/K)
Copper	$1.68 \times 10^{-8}$	0.0039
Constantan	$4.9 \times 10^{-7}$	0.000008

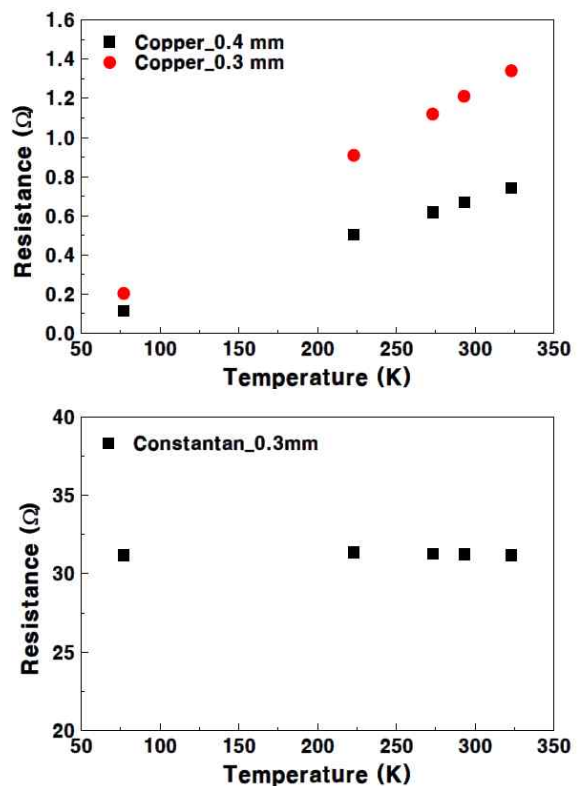


Fig. 2. Coil resistance with temperature

과 같이 극저온 상태에서 솔레노이드 밸브가 작동할 경우 구리 저항이 급격히 감소하고 이에 따라 코일을 통해 흐르는 전류가 급격하게 증가하게 된다.

Figure 2는 직경이 각각 0.3 mm, 0.4 mm이며, 길이 2 m인 구리 코일과 지름이 0.32 mm이며, 길이 2 m인 콘스탄탄 코일에 대한 온도에 따른 저항 변화를 측정된 결과를 보여준다.

구리 코일의 경우 예상한 것과 같이 측정된 저항이 온도 변화에 따라 매우 크게 변하는 것을 알 수 있으며, 콘스탄탄 코일은 저항이 구리 코일에 비해 매우 크지만 온도에 따른 저항 변화가 거의 없는 것을 알 수 있다. 그러나 콘스탄탄은 비저항이 매우 크기 때문에 솔레노이드 흡입력에 중요한 코일의 권선 수를 충분히 감을 수 없다는 단점이 있다.

본 연구에서는 구리 코일의 작은 비저항 특성 및 콘스탄탄 코일의 작은 온도계수 특성을 이용한 새로운 형태의 솔레노이드 코일을 설계하였다. 즉 1차적으로 비저항이 작은 구리 코일을 사용하여 솔레노이드 흡입력을 만족할 수 있는 코일의 권선 수를 가지도록 하였으며, 2차적으로 콘스탄탄 코일을 사용하여 솔레노이드의 온도가 변하여도 저항 변화가 최소화 되도록 하였다.

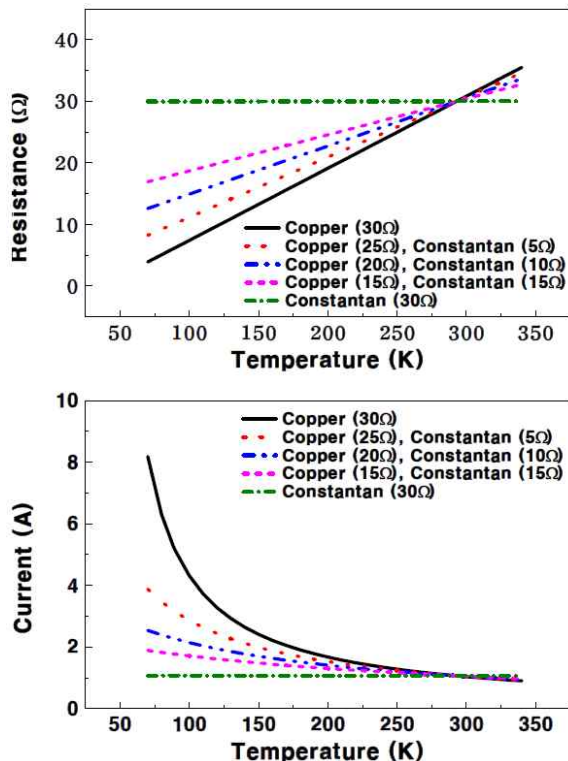


Fig. 3. Resistance and current variation with temperature

Figure 3은 주어진 온도조건에서 솔레노이드의 전류 특성을 만족시키기 위한 구리 및 콘스탄탄 코일 조합을 보여준다. 온도 70 K에서 전류가 3.0 A이하를 만족하기 위해서는 구리 코일의 저항이 20 Ω, 콘스탄탄 코일의 저항이 10 Ω이어야 함을 알 수 있다.

## 2.4 FEMM 전자기 해석

솔레노이드 형상 설계를 위해 FEMM (Finite Element Method Magnetics) 4.2를 사용하였다 [10]. Fig. 4는 솔레노이드 흡입력 해석에 사용된 솔레노이드 단면 형상을 보여준다. 솔레노이드는 플런저(plunger), 스탱(stop), 하부케이스(lower case), 링(ring), 하우징(housing) 및 코일(coil)로 구성되며, 코일 및 링을 제외하고 모두 연 자성 소재(soft magnetic material)를 사용하였다. 솔레노이드 내부는 고압의 작동유체에 노출되기 때문에 스탱, 링 및 하부케이스는 브레이징(brazing)을 수행하여 고압에 견딜 수 있도록 설계하였다.

일반적으로 솔레노이드 흡입력은 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$F = \frac{B_g^2 \times A_g}{2\mu_0} \quad (4)$$

여기서  $B_g$ 는 공극부의 자속밀도(flux density),  $A_g$ 는 공극부의 면적,  $\mu_0$ 는 상수인 진공 투자율(vacuum permeability)이다. 식 (4)에서 보는 것과 같이 솔레노이드 흡입력은 공극부의 자속밀도 및 공극부의 면적에 크게 의존하는 것을 알 수 있다. 여기서 공극부의 자속밀도는 솔레노이드의 코일 권선 수 및 전류가 같아도 솔레노이드 형상 및 자성소재의 자기이력특성에 따라 변한다.

Table 3은 전자기 해석에 사용된 파라미터를 보여주며, Fig. 5는 링 소재의 특성에 따른 공극부 자속밀도 분포를 보여준다. 링 소재로 비자성체를 사용할 경우 공극부에 자속밀도가 집중되지만, 링 소재를 자성체로 사용할 경우 자속이 공극부에 집중되지 못하고 링을 통해 흐르는 것을

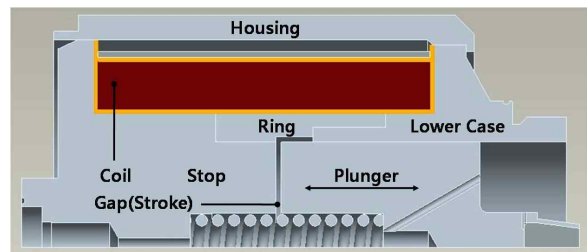


Fig. 4. Solenoid cross section

Table 3. FEMM Analysis Parameter

Parameter		Value
Input Current		0.8 A
Resistance		30 Ω
Plunger Diameter		26 mm
Stroke		0.65 mm
Non-Magnet Material		STS 316
Magnet Material	Housing	VIM VAR Iron
	Plunger etc.	430FR
Coil	Copper	Φ0.4 mm, 1203 turn
	Constantan	Φ0.32 mm, 11 turn

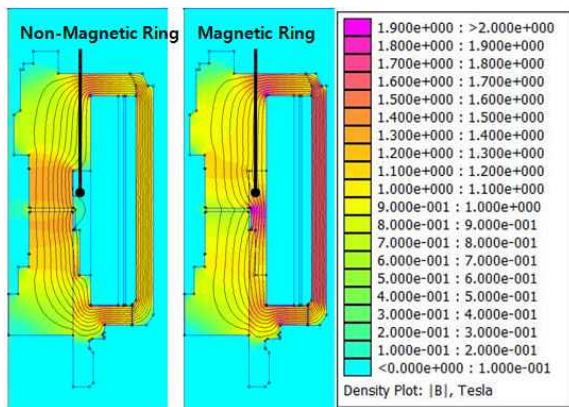


Fig. 5. Distribution of magnetic flux line and density with ring material

볼 수 있다[5]. 본 설계에서는 공극부 주변에 비자성체를 배치하여 솔레노이드 흡입력을 71.8 N에서 271.2 N으로 약 3.8배 향상시킬 수 있었다.

솔레노이드 흡입력은 공극부의 자속밀도 뿐만 아니라 공극부의 면적 또한 솔레노이드 흡입력 결정에 중요하다. 그러나 솔레노이드 흡입력을 높이기 위해 플런저의 외경을 증가시켜 플런저의 면적을 증가시킬 경우 솔레노이드의 크기 및 무게가 증가하는 단점이 있기 때문에, 플런저의 면적을 최소화하며 솔레노이드 흡입력을 만족시키는 최적 형상을 찾는 것이 중요하다.

Figure 6(a)은 플런저 외경 증가, 즉 플런저 면적 증가에 따른 솔레노이드 흡입력 변화를 보여 준다. 솔레노이드 흡입력은 Fig. 6(a)에서 보는 것과 같이 플런저 면적이 증가하면서 흡입력이 증가한다. 그러나 플런저 면적이 어느 이상에서는 솔레노이드 흡입력이 더 이상 증가하지 못하고 오히려 약간 감소하는 경향을 볼 수 있다. 이는 플런저 공극부의 면적이 증가하면서 솔레노이드 흡입력이 증가하지만, Fig. 6(b)에서와 같이 면적 증가에 의해 공극부의 자속밀도가 감소하여 솔레노이드 흡입력 증가를 상쇄시키기 때문이다.

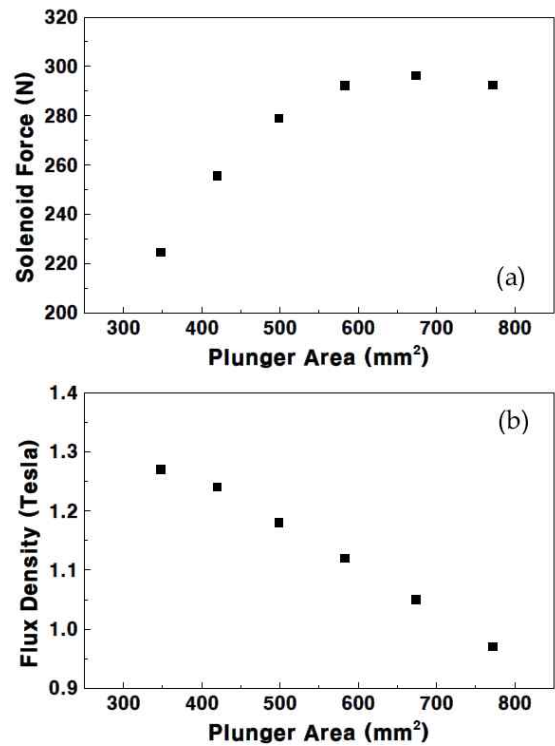


Fig. 6. Solenoid force and flux density with plunger area

솔레노이드 제작에 사용되는 구리 코일의 직경은 매우 다양하며, 솔레노이드 제작에 앞서서 코일 직경 결정은 솔레노이드 크기 및 무게에 중요하다. 일반적으로 솔레노이드에 사용되는 코일의 총 저항이 정해진 상태에서 솔레노이드 제작에 사용되는 코일의 직경이 작을수록 솔레노이드 크기를 줄일 수 있다. 그러나 구리 코일의 직경이 작을 경우 단위 길이 당 저항이 크기 때문에 솔레노이드 흡입력을 만족시키기 위한 코일 권선수를 만족할 수 없다. 또한 솔레노이드 흡입력을 만족시키기 위해 구리 코일의 직경이 큰 것을 사용할 경우 구리 코일 자체의 무게 증가뿐만 아니라 솔레노이드 외형 증가에 따른 무게 증가의 원인이 된다. 따라서 솔레노이드 크기 및 무게를 최소화하며 솔레노이드 흡입력을 만족할 수 있는 코일의 직경을 선정하여야 한다.

솔레노이드 플런저 형상 및 저항을 일정하게 유지한 상태에서 코일 직경을 변화시키며 솔레노이드 흡입력 및 구리 코일 무게 변화를 확인하였다. Fig. 7의 아래 그림에서 보는 것과 같이 코일 직경이 증가할수록 솔레노이드 흡입력은 증가한다. 그러나 코일 직경이 커지면 코일의 무게가 Fig. 7의 위의 그림처럼 급격히 증가하기 때문에 코일의 직경을 너무 크게 하는 것을 바람직하지 않다. 현재 설계에서 솔레노이드 흡입력을 만족



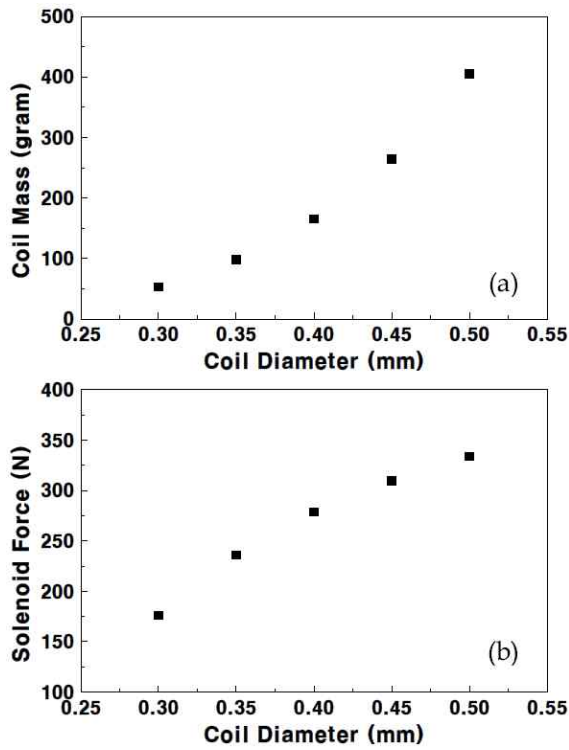


Fig. 7. Copper coil mass and solenoid force with coil diameter

하는 구리 코일 직경은 0.4 mm임을 알 수 있으며, 3D 모델링을 수행하여 무게 분석을 수행한 결과 코일 직경이 0.45 mm 이상일 경우 솔레노이드 밸브의 총 무게가 약 1.5 kg으로 예측되며, 이는 솔레노이드 밸브 무게 설계 요구 조건을 만족하지 못하는 결과를 보인다.

2.5 솔레노이드 밸브 시제품

솔레노이드 밸브 설계 결과를 이용 솔레노이드 밸브 시제품을 제작하여 솔레노이드 밸브의 흡입력 및 온도에 따른 전류 특성 확인하였다. Table 4 및 Fig. 8은 시제품 솔레노이드 밸브의 주요 제원 및 형상을 보여준다. Fig. 9는 시제품에 대한 솔레노이드 흡입력시험 결과를 보여준다. 정격전류 0.8 A에서 솔레노이드 흡입력은 설계조건 260 N 이상을 만족하고 있으며, FEMM

Table 4. Solenoid Valve Main Parameter

Parameter	Value	
Orifice Diameter	2.5 mm	
Stroke	0.6 ~ 0.65 mm	
Plunger Diameter	26 mm	
Housing Thickness	3.0 mm	
Coil	Copper	$\Phi$ 0.4 mm, 1203 turn
	Constantan	$\Phi$ 0.32 mm, 11 turn



Fig. 8. Prototype solenoid valve

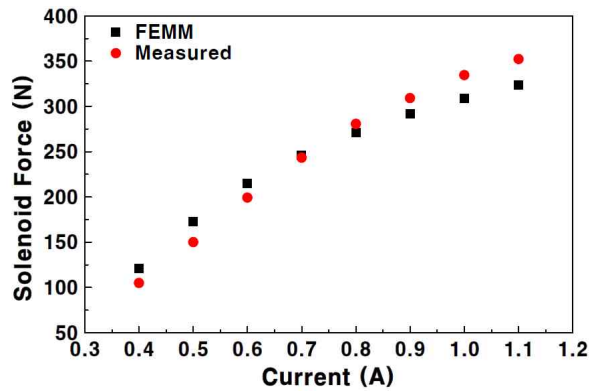


Fig. 9. Solenoid force with current

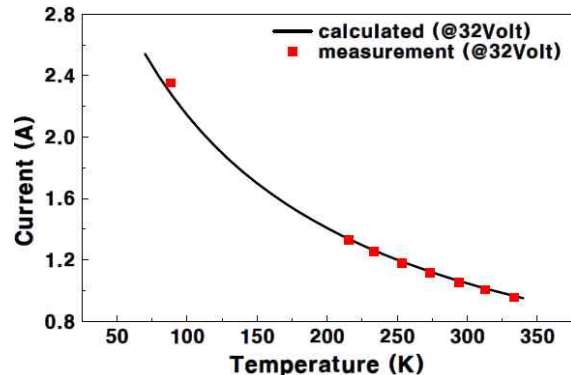
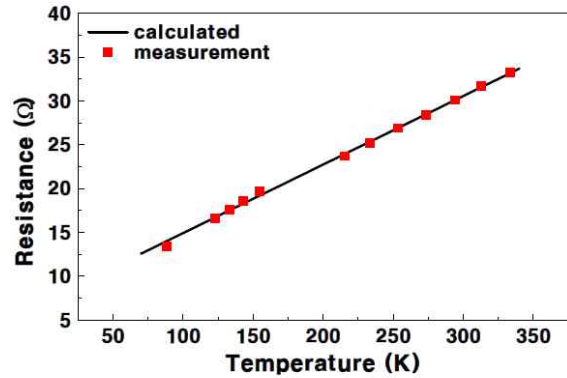


Fig. 10. Solenoid valve resistance and current with temperature

해석 결과와 유사한 것을 볼 수 있다.

온도에 따른 솔레노이드 밸브 저항 및 전류 특성을 확인하기 위해 솔레노이드 밸브를 향한 챔버에서 일정시간 대기하여 온도 평형을 유지한 후 전류 및 저항을 측정하였으며, 극저온 상태의 경우 솔레노이드 밸브를 액체질소에 약 1시간 놓아둔 후 저항 및 전류를 측정하였다. Fig. 10은 온도변화에 따른 솔레노이드 밸브의 저항 및 전압 32 Volt에서 코일을 통해 흐르는 전류 변화를 보여준다.

시험결과 솔레노이드 밸브의 전류 및 저항이 예측 값과 거의 일치하는 것을 볼 수 있다. 또한 극저온 상태(88 K)에서 최대 전류는 2.35 A로 솔레노이드 밸브 설계 규격을 만족하는 것을 알 수 있다. 이는 Fig. 3 에서 보는 것과 같이 구리 코일만을 이용 솔레노이드 밸브를 제작할 경우 예측되는 전류 5.24 A에 비해 약 55% 작은 값을 보이고 있다.

### III. 결 론

본 연구는 한국형발사체 3단 추진제탱크 가압 시스템에 사용되는 극저온 솔레노이드 밸브 설계를 수행하여 극저온 환경에서 코일을 통해 흐르는 전류를 최소화하기 위해 코일 설계를 수행하였다. 일반적으로 솔레노이드 밸브 제작에 사용되는 구리 코일의 경우 온도계수가 크기 때문에 온도 변화에 따른 저항 및 전류 변화가 크게 나타난다. 이러한 문제를 해결하기 위해 본 설계에서는 구리와 콘스탄탄 코일을 사용하는 새로운 형태의 솔레노이드 코일을 제안하여 온도 변화에 따른 저항 및 전류 변화를 줄일 수 있도록 하였다. 또한 전자기 해석을 수행하여 솔레노이드 밸브 성능 조건을 만족하는 적절한 플런저 형상 및 코일 직경을 확인할 수 있었다.

본 설계를 통해 얻은 설계 변수를 이용하여 구리/콘스탄탄 코일을 사용하는 극저온 솔레노이드 밸브 시제품을 제작하였다. 시제품에 대한 온도 환경시험을 수행한 결과 극저온 상태에서 전류 사용이 구리 코일만을 사용하는 솔레노이드 밸브에 비해 약 55% 감소하는 것을 확인하였다.

본 연구를 통해 극저온 상태에서 전류 감소를 위한 구리/콘스탄탄 코일의 솔레노이드 밸브 개발 가능성을 확인하였다.

### References

- 1) S. H. Levine, "A Description of the S-IC Stage Propellant and Propellant Pressurization Systems", NASA-CR-153830, 1967.
- 2) Gabriel Dussollier and Alain Teissier, "Ariane 5 Main Stage Oxygen Tank Pressurization", AIAA/SAE/ASME/ASEE 29th Joint Propulsion Conference and Exhibit, Monterey, CA, AIAA 93-1969, 1993.
- 3) Tibor Lak, Mai Nguyen and Susan Hauver, "Fixed Orifice Pressurization System for the Space Shuttle LO2 Tank", AIAA/SAE/ASME/ASEE 26th Joint Propulsion Conference and Exhibit, Orlando, FL, AIAA 90-2350, 1990.
- 4) Hee Sung Yoon, In Sung Hwang, Dong Soo Kim, So Nam Yun and Chang Seop Koh, "Shape Optimization of DC Solenoid Valve to Minimize the Time of Action Using Response Surface Method", The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineering, B, Vol. 55, No. 9, 2006, pp. 449~458.
- 5) Back-Ju Sung and Eun-Woong Lee, "Non-Magnetic Ring Effect for Speed Increase of Solenoid Actuator", KIEE International Transactions on Electrical Machinery and Energy Conversion Systems, Vol.5-B, No. 4, 2005, pp. 317~323.
- 6) Myoung-Sub Kim and Domg-Soo Kim, "A Study of ON/OFF Solenoid Actuator with Power Saving Circuit", Proceeding of the JFPS International Symposium on Fluid Power, 2008, pp. 477~482.
- 7) Byunghun Kim, "KARI Internal Report", L2-TR-00198, 2014.
- 8) Boyko, V., Troiak, A., and Piatak, I., "Electro-Pneumatic Valve (SV-03) Analysis P444-31/09", KARI-08-0037, 2009, pp. 1~24.
- 9) [http://en.wikipedia.org/wiki/Magnet\\_wire](http://en.wikipedia.org/wiki/Magnet_wire)
- 10) Kyungsik Kim, Kibong Baek, Eunjo Park, Seunghwan Cho and Sugyeom Kim, "A Development of Solenoid Valve for Satellite Propulsion System", Proceedings of the 2011 KSPE Fall Conference, 2011, pp. 456~459.