

◆ 특집 ◆ 개인안전 3 차원 융합제품 제조기술

3D 프린팅을 이용한 고온용 솔레노이드 밸브의 시제품 제작 및 유량과 동적특성 평가

Prototype Manufacturing Using 3D Printing and Characteristics of Flow Rate and Dynamics for High Temperature Solenoid Valve

이형욱¹, 이용문¹, 신보성^{2,4}, 이태구^{3,4}, 강명창^{1,4,✉}
Hyung Wook Yi¹, Yong Moon Lee¹, Bo Sung Shin^{2,4}, Tae Gu Lee^{3,4}, and Myung Chang Kang^{1,4,✉}

¹ 부산대학교 융합학부 (Graduate School of Convergence Science, Pusan National University)

² 부산대학교 광메카트로닉스공학과 (Department of Optics and Mechatronics Engineering, Pusan National University)

³ 부산대학교 디자인학과 (Department of Design, Pusan National University)

⁴ 부산대학교 3 차원혁신제조센터 (Convergence Research Center of 3D Laser-Aided Innovative Manufacturing Technology, Pusan National University)

✉ Corresponding author: mckang@pusan.ac.kr, Tel: +82-51-510-2361

Manuscript received: 2016.4.5. / Revised: 2016.4.15. / Accepted: 2016.4.18.

The solenoid valve is used widely across various industries; however, solenoid valves for use in high-temperature environments have to be highly specified, such as those used in thermal power plants and steel mills. As such, we have developed a solenoid valve, using an already developed solenoid, to allow for more specific use. In this type of development method, use of 3D printing is very effective, allowing for a reduction in errors in design and production. This study includes a mathematical model of the solenoid valve. Then, the simulation from the mathematical model was performed using the AMESim (Advanced Modeling Environment for Simulation of Engineering Systems). We made a prototype valve using the simulation results and also measured the flow rate and dynamic performance.

KEYWORDS: Solenoid valve (솔레노이드 밸브), 3D printing (3D 프린팅), High temperature (고온), Flow rate (유량)

1. 서론

일반적으로 솔레노이드 밸브 (Solenoid Valve)는 자동제어밸브 중 전기에너지를 기계적인 힘으로 변환하여 구동력으로 이용하는 밸브로서 밸브 구동기와 밸브 몸체로 나눌 수 있다. 국내의 경우 현재 각 요소기술은 성숙되어 있어 일반 산업용

On-Off 솔레노이드 밸브의 자체 생산 능력을 확보하고 있다. 다른 제어밸브에 비해 비교적 늦게 개발되었으나 작고 경량이며 매우 빠른 응답특성을 갖는 이점이 있어 전기, 자기, 유체기계기술 분야에서 최근 가장 활발하게 연구 개발되어 발전소나 일반 플랜트의 유체제어용은 물론 가전, 반도체, 공장 자동화 등 산업전반에 적용되고 있다.¹

그러나, 화력 발전소, 제철소 등과 같은 대형 플랜트에서 사용하는 고온용 솔레노이드 밸브의 경우는 국산화가 이루어지지 않고, 해외 수입제품을 사용하고 있다. 기존의 솔레노이드 밸브의 설계 및 개발에 관련하여 많은 선행 연구들이 수행되고 있는데, 현재까지 솔레노이드 밸브에 관한 연구는 밸브 내부에 장착된 솔레노이드의 자기장 연구가 주를 이루고 있으며,^{2,5} 유량 특성에 대한 연구는 AMESim을 이용한 연구가 전부이다.^{6,8} 그래서 상시 60-80℃의 고온 환경에서 사용 가능하고, 최대 100℃ 이상의 환경에서 사용가능한 솔레노이드 밸브를 국산화 하는 것이 필요하다. 그리고 개발 즉시 상업화할 수 있도록 솔레노이드 코일을 별도로 개발하지 않고, PARKER (UK)사의 고온용 솔레노이드 코일을 사용하였다.

한편, 시제품 제작전 3D 프린팅 모델을 제작하여 설계검토 및 조립성검토를 진행하였는데, 가장 대표적인 3D 프린팅 기술중의 하나인 FFF (Fused Filament Fabrication)방식의 3D 프린터를 사용하였다. FFF 기술은 하나의 동일한 액화 원료를 지정된 범위에 한 방울씩 떨어뜨리며 적층시켜 형태를 완성시키는 방식이다.^{9,10} 3D 프린터는 Rokit (Korea)사의 3DISON 제품을 사용하였다.

따라서, 본 연구에서는 솔레노이드 코일의 설계 변경없이 밸브몸체 내부의 오리피스 크기 변경을 통해서 솔레노이드 밸브의 유량과 밸브가 열리는 성능을 나타내는 지표인 동적 특성을 평가하였다. 이러한 과정에 있어, 원하는 성능을 추정하기 위한 인자 선택에 AMESim을 이용한 시뮬레이션 데이터를 활용하였고, 얻어진 데이터를 토대로 솔레노이드 밸브의 3D 모델을 제작하여 설계오류 및 조립성검토를 진행하였다. 최종적으로 앞선 시뮬레이션과 3D 모델을 통해 얻어진 데이터를 토대로, 4개의 시제품을 제작하여 유량과 동적 성능을 비교 분석하였다.

2. 솔레노이드 밸브의 수학적 모델링

본 연구는 1개의 입구포트 (Port)와 2개의 출구 포트(Port)를 가지는 3방향 솔레노이드 밸브를 대상으로 진행되었으며, Fig. 1은 입구와 출구 포트를 포함한 밸브몸체의 형상을 나타낸 것이다.

각각의 출구포트는 솔레노이드의 구동이 없을 때 닫혀있는 N.C. (Normal Close)와 솔레노이드의 구동이 없을 때 열려있는 N.O. (Normal Open)의 성격을 가진다. Table 1에 솔레노이드의 동작에 따른 각각의 포트의 Open/Close 상태를 표기하였다.

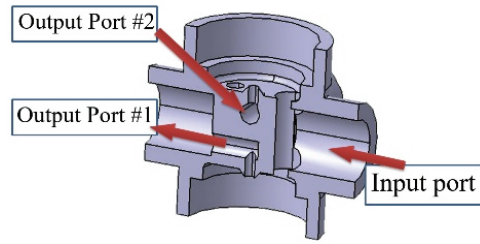
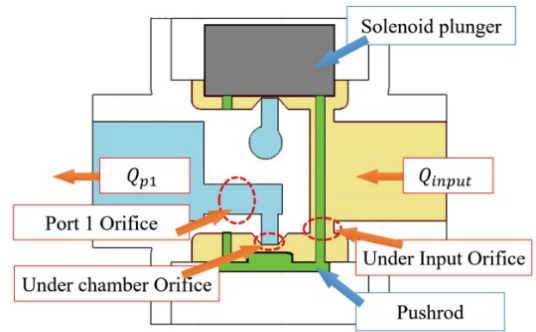


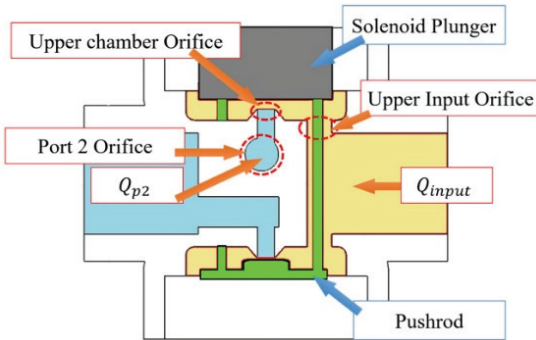
Fig. 1 Geometric shape of input and output port in the solenoid valve body

Table 1 Operating status of the solenoid valve

	Solenoid de-energized	Solenoid energized
Input	OPEN	OPEN
Output #1	OPEN (N.O.)	CLOSE
Output #2	CLOSE (N.C.)	OPEN



(a) Orifice diagram of de-energized state



(a) Orifice diagram of energized state

Fig. 2 Comparison of orifice diagram of de-energized state and energized state

따라서 포트 1과 포트 2는 동일한 구조이며 각각의 포트를 통과하는 유량은 동일하다. 수학적 모델링은 N.C.와 N.O.유체 유동시 저항으로 작용하게 되는 오리피스 3개에 대해서 모델링하였다.¹¹

또한 내부 형상과 유체 속도에 따른 유동저항은 임의의 계수 C_d 로 설정하였다.

2.1 De-Energized 상태의 모델링

솔레노이드가 구동되지않는 정상 (Normal) 상태에서는 유동은 Fig. 2(a)와 같이 입구포트에서 포트 1번 방향으로 발생한다. 이때의 오리피스는 각각 하부 입구 오리피스 (Under Input Orifice), 하부 챔버 오리피스 (Under Chamber Orifice), 포트 오리피스 (Port Orifice) 1로 구성되며 내부 누설이 없는 것으로 고려하였을 경우 입구 (Q_{input})와 출구 (Q_{p1})의 유량은 동일하므로 식(1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$Q_{input} = Q_{uio1} = Q_{uco1} = Q_{po1} = Q_{p1} \quad (1)$$

여기서, 오리피스의 각 유량은 다음과 같다.

Q_{uio1} : 하부 챔버 입구 오리피스의 유량

Q_{uco1} : 하부 챔버와 포트 1 사이 오리피스의 유량

Q_{po1} : 포트 1의 오리피스 유량

밸브 몸체의 유로와 푸쉬로드 사이의 오리피스를 의미하는 상부 입구 오리피스의 유량 (Q_{uio1})과 단면적 (A_{uio1})은 다음 식(2)와 식(3)과 같다.¹²

$$Q_{uio1} = C_d A_{uio1} \sqrt{\frac{2(P_{input} - P_{out})}{\rho}} \quad (2)$$

$$A_{uio1} = \frac{\pi(d_{ic}^2 - d_{pr}^2)}{4} \quad (3)$$

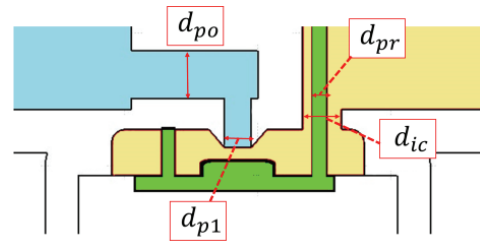
또한 하부공간 (Under Chamber)에서 포트 1 쪽으로 나가는 오리피스인 하부 챔버 오리피스를 통과하는 유체의 유량 (Q_{uco1})과 단면적 (A_{uco1})은 식(4)와 식(5)와 같다.

$$Q_{uco1} = C_d A_{uco1} \sqrt{\frac{2(P_{input} - P_{out})}{\rho}} \quad (4)$$

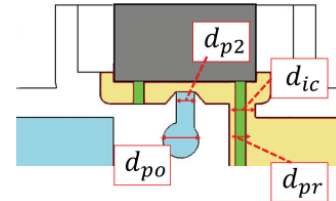
$$A_{uco1} = \frac{\pi d_{p1}^2}{4} \quad (5)$$

출구인 포트 1 오리피스의 유량 (Q_{po1})과 단면적 (A_{po1})은 식(6)과 식(7)과 같다.

$$Q_{po1} = C_d A_{po1} \sqrt{\frac{2(P_{input} - P_{out})}{\rho}} \quad (6)$$



(a) Diameter of de-energized state equation



(b) Diameter of energized state equation

Fig. 3 Comparison of diameter of de-energized state equation and energized state equation

$$A_{po1} = \frac{\pi(d_{po}^2)}{4} \quad (7)$$

Fig. 3(a)에는 오리피스 계산에 사용한 d 값의 위치를 표시하였다.

2.2 Energized 상태의 모델링

솔레노이드에 전원이 인가되어 구동되는 Energized 상태에서는 입구포트에서 출구포트 2번으로 유동이 발생한다. 이때의 오리피스는 각각 하부 입구 오리피스, 하부 챔버 오리피스, 포트 오리피스 2로 구성되며 내부 누설이 없는 것으로 고려하였을 경우 입구와 출구의 유량은 동일하므로 식(8)과 같이 나타낼 수 있다.

$$Q_{input} = Q_{uio2} = Q_{uco2} = Q_{po2} = Q_{p2} \quad (8)$$

Q_{uio2} : 상부 챔버 입구 오리피스의 유량

Q_{uco2} : 상부 챔버와 포트 2 사이 오리피스 유량

Q_{po2} : 포트 2의 오리피스 유량

여기서, 밸브 몸체의 유로와 푸쉬로드 사이의 오리피스를 의미하는 상부 입구 오리피스의 유량 (Q_{uio2})과 단면적 (A_{uio2})은 다음 식 (9)와 식(10)과 같다.

$$Q_{uio2} = C_d A_{uio2} \sqrt{\frac{2(P_{input} - P_{out})}{\rho}} \quad (9)$$

$$A_{iio2} = \frac{\pi(d_{ic}^2 - d_{pr}^2)}{4} \quad (10)$$

상부공간 (Upper Chamber) 에서 포트 2쪽으로 나가는 오리피스인 상부 챔버 오리피스를 통과하는 유체의 유량 (Q_{uco2}) 과 단면적 (A_{uco2}) 은 식(11) 과 식(12)와 같다.

$$Q_{uco2} = C_d A_{uco2} \sqrt{\frac{2(P_{Input} - P_{out})}{\rho}} \quad (11)$$

$$A_{uco2} = \frac{\pi d_{p2}^2}{4} \quad (12)$$

출구인 포트 2 오리피스의 유량 (Q_{po2}) 과 단면적 (A_{po2}) 은 식(13)과 식(14)와 같다.

$$Q_{po2} = C_d A_{po2} \sqrt{\frac{2(P_{Input} - P_{out})}{\rho}} \quad (13)$$

$$A_{po2} = \frac{\pi d_{po}^2}{4} \quad (14)$$

Fig. 3(b)에는 오리피스 계산에 사용한 d 값의 위치를 표시하였다.

모델링의 결과 출구포트 1, 2번 각각에 대응되는 오리피스 사이즈가 모두 동일하며, 유량 또한 같은 것으로 나타났다.

한편, 입구 오리피스는 유로의 크기는 다른 오리피스에 비해 2배 이상으로 충분히 크므로 밸브의 성능에 큰 영향을 미치지 않을 것으로 판단되고, 포트 오리피스는 솔레노이드 밸브의 구조상 챔버 오리피스의 크기에 종속 관계가 있기 때문에, 솔레노이드 밸브의 성능에 크게 좌우되는 오리피스는 챔버 오리피스로 판단된다.¹¹

2.3 AMESim 시뮬레이션

수학적 모델링을 통하여 밸브의 성능에 가장 직접적으로 영향을 미치는 파라미터로 챔버 오리피스와 포트 오리피스로 판단되었다. 이를 기반으로 유공압해석 상용툴인 AMESim을 이용하여 모델을 개발하였으며, Table 2에 나타난 파라미터로 시뮬레이션을 진행하였다.

챔버 오리피스 직경 (Chamber Orifice Diameter)의 파라미터값은 경험적으로 알고 있는 값을 기준으로 임의로 정했고, 챔버 오리피스 면적 (Chamber

Table 2 Parameter of AMESim simulation (Unit: mm)

	Chamber orifice diameter	Chamber orifice area	Port orifice area
A	2.0	3	12
B	2.5	5	15
C	3.0	7	18
D	3.5	9	21
E	4.0	12	25

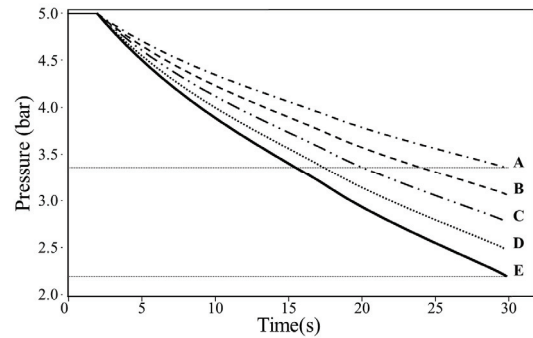


Fig. 4 Simulation results of flow rate between time and pressure

Orifice Area)값은 임의로 설정한 챔버 오리피스 직경으로 구한 면적값의 소수점 이하를 반올림해서 결정 하였다. 포트 오리피스 면적 (Port Orifice Area)은 실제 제작시에 챔버 오리피스의 둘레값이므로, 반올림하여 근사치를 추정, 대입 하였다. 방출시뮬레이션 결과 공기탱크의 초기압력을 5bar로 설정하고 각 파라미터에 따른 공기탱크 내의 압력 특성을 나타내는 시뮬레이션이다. 각 파라미터에 따른 방출 시뮬레이션은 오리피스 면적이 넓을수록 방출시간이 짧고 방출유량이 많은 것으로 나타났다. 방출 시뮬레이션 시간에 따른 공기탱크의 압력특성은 Fig. 4와 같다. 밸브의 동적성능은 밸브의 출구를 막고 밸브에 작동전압을 인가하였을 때 밸브 출구의 압력변화가 공급압력의 50%가 되는 시간을 측정하여 그 성능을 평가한다.

본 시뮬레이션에서는 각 파라미터에 따른 동적성능 시뮬레이션을 수행하여 밸브의 성능변화 경향을 예측하였다. 동적성능 시뮬레이션 결과는 Fig. 5와 같다.

파라미터에 따라 동적성능은 각각 3.8, 4.1, 5.0, 6.0, 7.5 ms 로 오리피스 면적이 작을수록 공급압력의 50%가 되는 시간이 증가하는 것으로 나타났다. 하지만 포트 오리피스의 경우 면적이 한계가 있으

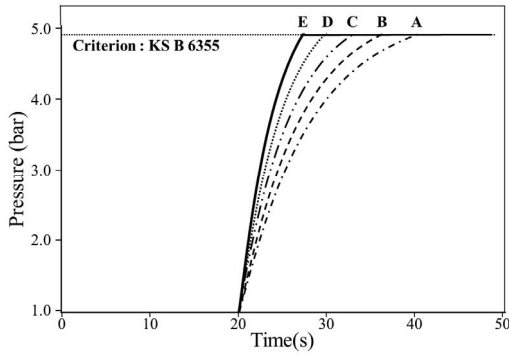


Fig. 5 Simulation results of dynamic performance between time and pressure

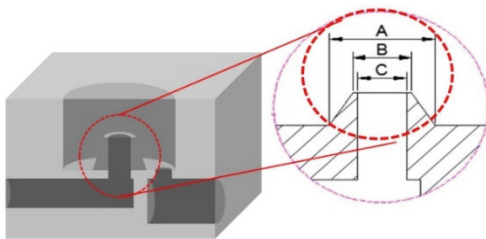


Fig. 6 Design and each orifice type of solenoid valve body

므로 밸브의 성능에 가장 영향을 미치는 파라미터는 챔버 오리피스의 영향이 가장 클 것으로 예상된다.

3. 솔레노이드 밸브 제작 및 성능평가

3.1 설계 및 조건 설정

AMESim의 시뮬레이션 경향에 따라 챔버 오리피스의 직경을 변경하고, 오리피스형상을 변경하여 4가지 형태로 제작하여 성능 시험을 하기로 결정하였다.

Table 3에서, A는 오리피스가 있는 포트의 외경 지름이고, B는 오리피스의 외경, C는 오리피스의 내경을 의미한다.

C의 오리피스 값을 변경한 4개의 도면을 제작하였고, 작성된 도면의 검토를 위하여, 3D 프린터를 이용한 모형품을 제작하였다. 실제 솔레노이드 밸브는 많은 숫자의 부품으로 구성되어 있다. 또한 그 크기가 작으므로, 작은 부품 사이즈 변경 혹은 조립 공차에 의해서 의도한 성능이 나오지 않는 경우가 빈번하다. 대량 생산품의 경우 금형

Table 3 Size of orifice (Unit: mm)

	A	B	C
Type 1	5	2.4	2
Type 2	6	3.4	3
Type 3	7	4.4	4
Type 4	7	2.4	2

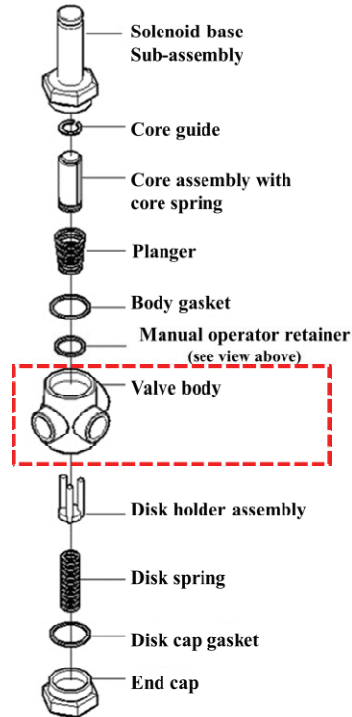


Fig. 7 Component of solenoid valve system

을 이용하거나, 자동화된 공정을 이용하기 때문에 그러한 오류를 줄일 수 있지만, 개발 단계에서는 단순한 도면 검토만으로 제작시 발생할 수 있는 각종 문제에 대해서 예측하기는 매우 어렵다.

본 연구대상물은 Fig. 7과 같이 많은 부속품들이 사용되는데, 이때의 조립성검토와 제작의 용이성을 위해, 몇번의 도면 수정이 있었고, 각각의 도면마다 3D 프린터를 이용한 모형을 제작하였다. 현재는 3D프린팅 장비 구조와 방식의 다변화, 정밀하고 강력한 레이저의 개발, 제어 장치와 운용 소프트웨어 개발에 의하여, 광범위한 산업분야에서 디자인 검토, 기능성 시험, 양산성 검증등에 사용되고 있다.¹⁰ 그러나 3차원 프린터는 물론 모든 적층조형을 이용하는 공정은 계단현상 때문에 표면이 거칠다.¹³ 따라서 후가공없이 사용하기는 어

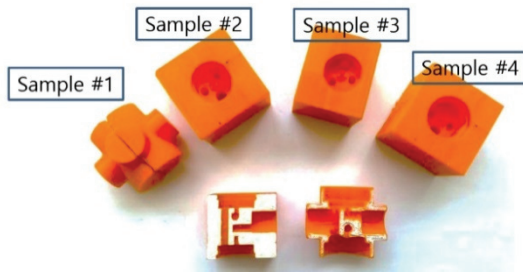


Fig. 8 Models with a 3D printer

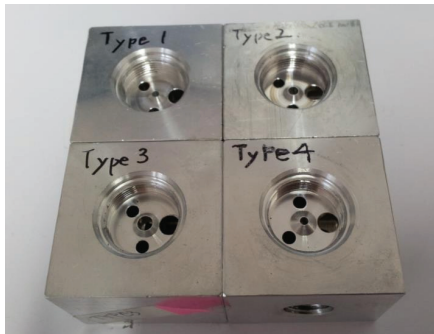


Fig. 9 Prototype valve body for performance test

Table 4 C_v data of the prototype solenoid valves

	C_v
Conventional	0.31
Type 1	Leakage, no test
Type 2	0.54
Type 3	0.54
Type 4	0.22

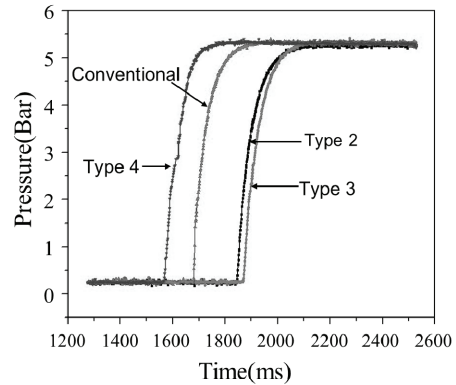


Fig. 10 Graph of dynamic performance test results

럽다. 일반적으로 후가공은 사포 (Sand Paper)나 모래분사기 (Sand Blaster)를 이용해서 이루어진다.¹⁴

본 연구에서는 사포를 사용하여 후가공을 진행하였으나, 3D 모형 내부 및 나사산의 경우는 후가공이 불가능하여 단순 형상 검토 및 조립성 검토만 하였다.

위의 Fig. 8은 제작되었던 3D 모델들이며, 이 중 샘플 #4의 형상으로 제작하기로 결정하였고 Fig. 9는 실제 제작된 4개의 솔레노이드 밸브 모형이다. 이때, 오리피스는 Table 3의 사이즈에 따라 제작되었다.

솔레노이드 밸브 성능 및 신뢰성에 관한 시험 방법과 지표는 KS를 비롯한 각종 산업표준에 명시되어 있다.^{15,16} 본 연구에서는 사용자가 체감적으로 가장 중요하게 생각되는 밸브의 유량과 Open/Close 속도를 측정하는 동적성능 시험을 진행하여, 기존 제품과의 성능을 비교하였다. 유량시험은 유량계를 사용하여 측정할 수도 있으나, 표준 규격에서 명시하는 유효단면적을 측정하여 유량을 예측하는 방식을 적용하였다. 또한, 사용 환경에서 주어지는 공급 압력값에 따른 유량을 예측에 유용한, 유량계수 (C_v) 값을 계산하였다. 이때 시험과 측정 방법은 KS B 6355에 따라 진행 하였다. 데이

터의 비교를 위해서, 기존제품과 제작된 4개의 시료를 시험하여 결과를 비교하였다. 하지만, 밸브 조립과 시험 과정에서 시료 1번의 외부 누설이 발생하여 시험용 시료는 적합하지 못하여, 제외하고 시험을 진행하지 않았다.

시험결과 Table 4의 결과와 같이 유형 2, 3 유량계수가 0.54로 가장 좋게 나왔다. 그런데, 중요한 점은 유형 3의 경우 오리피스가 증가하였으나 유량은 증가하지 않았음을 알 수 있다. 이는 우리가 변경하지 않고 고정값으로 둔 포트 오리피스의 영향에 의한 것으로 판단된다.

밸브의 동적성능 시험은 밸브의 동작 후 압력의 변화가 발생하는 시점과 경향을 측정하는 방식으로 이루어진다. 본 연구에서는 압력센서를 이용하여 압력의변화를 DAQ 시스템으로 수집 하도록 구성 하였다. DAQ 시스템으로 National Instruments (USA)사의 NI USB-6212 를 사용하였고, 압력센서로 Sensys (KOREA)사의 PSIE0010 (정밀도±0.5%FS) 모델을 사용하였다. 측정 결과는 Fig. 10의 그래프로 나타내었다. 측정결과는 모든 밸브가 압력변화의 지점이 0.2S 이내에서 유사한 성능을 보였고, 그 중 유형 2가 기존제품과 가장 유사한 형태를 보임을 알 수 있다. 따라서 개발품은 기존품 대비

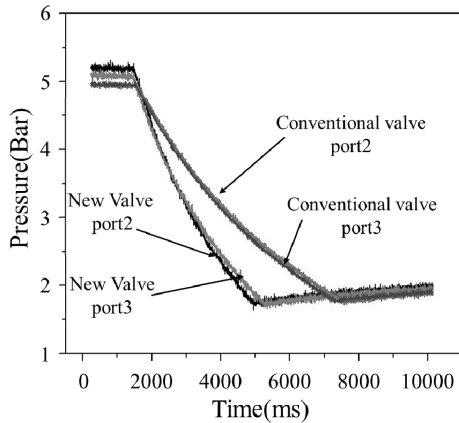


Fig. 11 Comparing the test results of conventional product and this developments

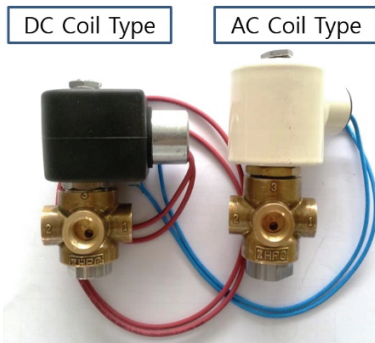


Fig. 12 The development of the solenoid valve

동적성능은 유사하면서 유량특성이 좋은 설계치는 유형 2임을 알 수 있다. Fig. 11은 유형 2의 데이터로 제작한 밸브의 유량 방출 실험 결과이며, Table 5에 그 결과를 정리 하였다.

기존제품에 비해서 유량계수가 증가하였으며, 이에 따라 유량이 증가 하였음을 알 수 있다.

제품에는 두 개의 포트가 있어서, 제품당 2개의 결과가 존재한다. 데이터의 검토는 5 bar에서 2 bar로 떨어지는 데 걸리는 시간을 측정한다.^{11,15,16}

KS 규격의 수식에 따라 구해진 유효의 Y축은 압력을 나타내고, X축은 시간을 나타내는데, 그래프의 기울기가 클수록 유량이 많음을 의미하며, 개발품이 기존제품에 비해 유량이 더 많음을 알 수 있다.

동적성능은 그래프의 변곡점이 발생하는 위치의 비교를 통해서 알 수 있으며, 그래프상 변곡점의 위치가 유사함을 확인할 수 있다.

Table 5 Measuring data of the effective sectional area

	Effective sectional area
Conventional valve port2	4.27 mm ²
Conventional valve port3	4.28 mm ²
New valve port2	6.52 mm ²
New valve port3	7.34 mm ²

따라서, 개발된 솔레노이드 밸브는 동작 속도는 유사하나, 유량이 많음으로 단위시간에 훨씬 더 많은 유체를 통과시킴을 알 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 Park사의 고온용 코일 (Coil)을 사용하여 목표하는 유량과 동적성능을 얻기 위한 연구를 수행하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

(1) AMESim을 이용한 시뮬레이션의 결과 챔버 오리피스 크기가 큰 솔레노이드 밸브에서 압력이 빨리 낮아져 유량에 가장 큰 영향을 줄 것으로 예상되었고, 서로 다른 크기의 챔버 오리피스를 가진 시제품 4개를 제작하여 실제 비교 측정한 결과 유량에 가장 큰 영향을 주는 오리피스는 챔버 오리피스임을 확인할 수 있었다.

(2) 챔버 오리피스의 크기는 적용 가능한 코일의 흡입력과 밸브 크기에 제한을 받는다. 3D 프린팅으로 금형 제작 전 코일과의 조립성 검토 및 밸브의 전체 크기 및 외형의 검토가 가능하여 챔버 오리피스와 포트 오리피스의 최대 크기의 추정에도 매우 효율적인 방법이었다.

(3) 새로이 개발된 제품은 기존 상용화된 ASCO 제품과 유사한 수준의 동적특성을 보이면서, 유량은 57%가 증가되는 우수한 결과를 얻었다.

후 기

이 논문은 2015년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임 (No. 2015R1A5A7036513).

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 the Korean Society for Fluid Power & Construction Equipments, Vol. 11, No. 1, pp. 26-34, 2014.

2. Lim, B. J., Park, C. D., Lee, T. G., Yun, S. N., and Chung, K. Y., "A Study on the Improvement of Attraction Force of Solenoid Operated Valves," Proc. of the 36th Korean Society of Marine Engineering Fall Conference, pp. 121-122, 2012.
3. Yun, S. and Yun, D., "Performance Improvement Strategy of Solenoid Valve and Magnetic Material Technique," Journal of Drive and Control, Vol. 6, No. 3, pp. 28-34, 2009.
4. Paek, T. K. and Sung, S. J., "Analysis of Dynamic Characteristics for High Speed Plunger-Type Solenoid," The Transactions of Korea Institute of Power Electronics, Vol. 2, No. 3, pp. 26-32, 1997.
5. Jeon, Y., Ju, M., Oh, Y., and Kim, D., "Characteristic Analysis of Low Consumption Power ISO Solenoid Valve," Proc. of the KSME Fall Annual Meeting, pp. 1250-1254, 2008.
6. Lee, J.-Y., Jung, T.-K., Han, S.-Y., and Kim, Y.-M., "Characteristics of System Application Using Control Valve," Aerospace Engineering and Technology, Vol. 5, No. 2, pp. 126-133, 2006.
7. Jeong, C. S., Yi, H. W., Yun, D. H., and Yang, S. Y., "Modelling and Controller Design of Electro-Magnetic Valve," Proc. of the Korea Fluid Power Systems Society Autumn Conference, pp.43-48, 2010.
8. Lee, C. S., "Study on the Flow Characteristics of Solenoid Valves," M.Sc. Thesis, Department of Mechanical Design Engineering, Chungnam National University, 2014.
9. Cha, H. H., "A Study on Personal 3D Printer Safety Guide," M.Sc. Thesis, Department of Industrial Engineering, Kumoh National University, 2014.
10. Ham, W. S., Lee, S. Y., Lee, S. C., and Lee, S. H., "A Study of Metal 3D Printing Applied for Mold/Tooling Practices and Effects," Proc. of Korea Manufacturing Technology Conference, Vol. 2014, No. 4, p. 37, 2014.
11. Jeong, C. and Yang, S., "A Study on Development of High Flow Solenoid Valves," Journal of Drive and Control, Vol. 10, No. 1, pp. 7-13, 2013.
12. Ji, S. W., "Flow Equations of Pneumatic Valve," Journal of the Korea Fluid Power Systems Society, Vol. 2, No. 2, pp. 20-25, 2006.
13. Kim, H.-C., Lee, S., and Lee, S.-H., "Rapid Tooling Technology for Producing Functional Prototypes Using Ceramic Shell Investment Casting and Patterns Produced Directly from Thermojet 3D Printer," J. Korean Soc. Precis. Eng., Vol. 23, No. 8, pp. 203-210, 2006.
14. Ahn, D., Kim, H., Jeong, H., and Lee, S., "A Study on Improving the Surface Roughness of Stereolithography Parts," J. Korean Soc. Precis. Eng., Vol. 21, No. 9, pp. 196-203, 2004.
15. KSB6355, "3-Port Solenoid Operated Valves for Pneumatic Use," 2002.
16. KSB6931, "Pneumatic Fluid Power - Determination of Flow-Rate Characteristics of Pneumatic Control Valves," 2013.