

# 대유량 솔레노이드 밸브 개발에 관한 연구

## A Study on Development of High Flow Solenoid Valves

정찬세<sup>1\*</sup> · 양순용<sup>2</sup>

C. S. Jeong and S. Y. Yang

Received: 22 Oct. 2012, Revised: 04 Feb. 2013, Accepted: 19 Feb. 2013

**Key Words** : High Flow(대유량), Multi-stage(다단), Solenoid valve(솔레노이드 밸브), Diaphragm valve(다이하프 램 밸브), Valve simulation(밸브 시뮬레이션), Air pressure(공기압)

**Abstract:** Port size 80mm or above large-flow type solenoid valves are extensively used in dust collector and power plants. These multi-stage solenoid valve have few problem. first, multi-solenoid valves are almost depend on imports and there are weak in the brine environment and the low energy efficiency. Because these problem, increased the necessity of research on the development of large flow and high pressure type solenoid valves. In this study, describe the design method of multi-stage solenoid test bench and confirm the influence valve performance on several parameter such as diaphragm orifice diameter. At first, each part has modeled by AMESim simulation tool and combining them. This AMESim virtual multi-stage solenoid valve found influence valve performance on the valve parameter. Finally developed the multi-stage solenoid valve and verified that performance on experimental result.

### 1. 서 론

$S$  : effective section area, mm<sup>2</sup>  
 $t$  : exhaust time, s  
 $P$  : after release pressure, MPa  
 $P_0$  : before release pressure, MPa  
 $V$  : Air tank volume, dm<sup>3</sup>  
 $T$  : Air tank temperature  
 $Q_{mi}$  : Flow rate of main input  
 $Q_{mo}$  : Flow rate of main output  
 $Q_{bo}$  : Flow rate of bottom orifice  
 $C_{bd}$  : Flow coefficient of bottom diaphragm

$A_{bd}$  : bottom diaphragm output area  
 $P_{mi}$  : Pressure of main input  
 $P_{mo}$  : Pressure of main output  
 $\rho_{mi}$  : Density of main input  
 $C_{bo}$  : Flow coefficient of bottom orifice  
 $A_{bo}$  : bottom diaphragm orifice area  
 $P_{bc}$  : Pressure of bottom chamber  
 $h_{bd}$  : Distance of bottom diaphragm  
 $d_{bd}$  : Diameter of bottom diaphragm orifice  
 $Q_{ue}$  : Flow rate of upper exhaust  
 $Q_{be}$  : Flow rate of bottom exhaust  
 $C_{uo}$  : Flow coefficient of upper orifice  
 $A_{uo}$  : Upper diaphragm orifice area  
 $P_{uc}$  : Pressure of upper chamber  
 $\rho_{uc}$  : Density of upper chamber  
 $C_{ud}$  : Flow coefficient of upper diaphragm  
 $\rho_{bc}$  : Density of bottom chamber  
 $A_{ud}$  : Upper orifice diaphragm area  
 $P_{be}$  : Pressure bottom exhaust  
 $h_{ud}$  : Distance of upper diaphragm  
 $d_{ud}$  : Diameter of upper diaphragm orifice

\* Corresponding author: worwordl81@nate.com  
 1 Department Mechanical Automotive Engineering Graduate school of University of Ulsan, Ulsan 680-749, Korea  
 2 Soon Yong Yang: Department of Mechanical Engineering, The University of Ulsan, KOREA  
 Copyright © 2013, KSFC  
 This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

## 1. 서 론

최근 들어 국내의 플랜트 산업이 대두되면서 대유량 및 고압의 공기를 작은 동력으로 제어할 수 있는 밸브의 수요가 많아지고 있으며 이러한 밸브는 집진기 및 발전소, 제철소, 질소발생기와 같은 곳에 주로 사용된다. 그러나 접속구경 80 mm 이상의 대유량 제어 밸브는 전량 수입에 의존하고 있어 적정 재고 유지의 어려움이 있고 밸브 사용처의 입지 환경이 고려되지 않아 방청 및 염수환경에 대한 취약한 단점을 가지고 있어 이에 대한 문제해결이 시급한 실정이다<sup>(1)</sup>.

국내의 중소 업체들이 솔레노이드 밸브를 시장에 출시하고 있으나 이들 대부분이 1 인치 미만의 소유량 제품을 생산하여 공장자동화의 부품으로 사용되고 있다. 또한 국내 생산 업체들 중 제품에 대한 자체 설계 능력이나 성능 테스트 능력을 갖춘 업체가 없어 대부분의 제품이 해외 수입품을 단순히 복제하는 수준에 불과하며 제품에 대한 신뢰성이 극히 낮다.

본 논문에서는 국내의 플랜트 설비에 소요되는 솔레노이드 밸브에 대한 국산화가 시급히 요구되는 밸브의 국산화를 위하여 JIS 및 ISO 규격에 따른 성능 시험기 제작 및 솔레노이드 밸브의 기초이론을 기본으로 설계 및 제작에 관하여 기술한다<sup>(2)</sup>.

## 2. 밸브 모델링

### 2.1 회로모델링

밸브 내부의 공기 유동 구조는 밸브 작동 시 소요되는 에너지를 결정해 주는 주요인자이다. 밸브 내부 유동 구조에 따라 플런저에 작용하는 공기 압력 방향이 결정되고 압력 방향과 플런저의 작동방향의 상관관계에 따라 밸브를 동작시키는 에너지의 크기가 결정된다. 또한 공기 압력 방향과 플런저 작동방향에 따라 밸브의 내구성과 동작 성능을 직접적으로 결정된다.

밸브의 성능을 결정하는 것은 밸브 내부 형상, 밸브 내부 부피 및 오리피스 위치 및 크기가 있으며 다이어프램 스프링 및 플런저 스프링의 강성 등이 포함된다. 이러한 파라미터를 고려하여 설계한 밸브 회로도는 Fig. 1과 같다<sup>(3)</sup>.

밸브의 회로는 다이어프램의 스프링과 밸브의 플런저가 같은 방향으로 압력을 받음으로써 밀폐의 신뢰성을 높이고 동작전력의 손실을 최소화 할 수 있도록 회로를 구성하였다.

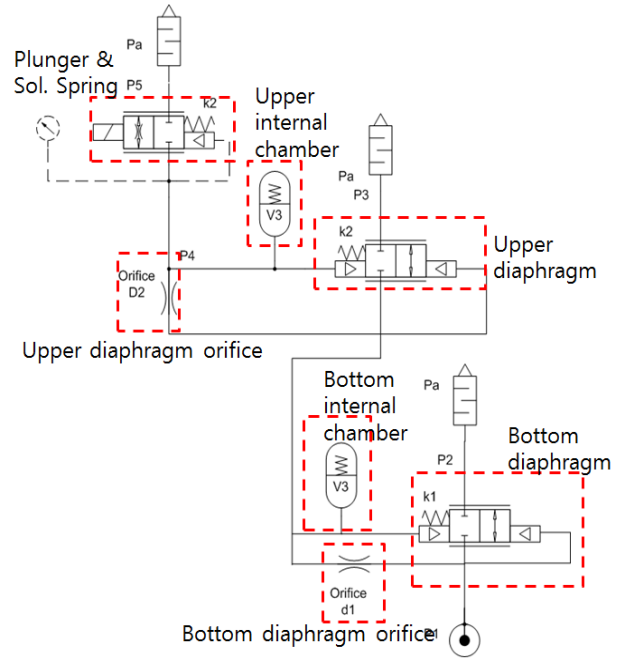


Fig. 1 Circuit of the valve

본 연구에서는 밸브의 성능을 결정짓는 요소 중 다이어프램의 오리피스 직경에 초점을 맞추어 밸브의 성능 변화를 알아보았다.

### 2.2 형상모델링

솔레노이드 밸브는 상부 및 하부 밸브로 구성되며 구조는 Fig. 2와 같다<sup>(4)</sup>.

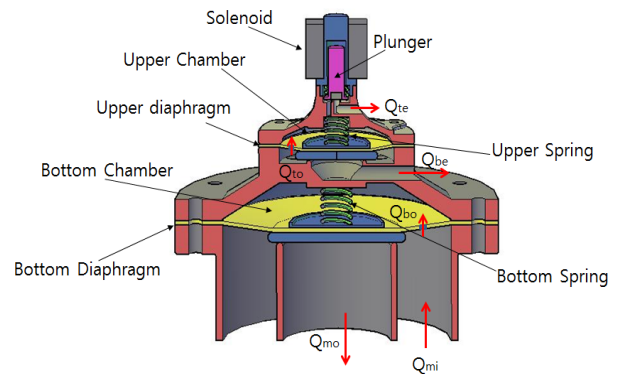


Fig. 2 The structure of the solenoid valve

밸브의 공기유동은 솔레노이드에 전기가 인가되면 플런저가 상부로 움직이게 되며 상부 챔버의 공기가 배출되게 된다. 상부 챔버의 압력이 낮아지면 다이어프램의 압력차이로 다이어프램이 열리게 되며 하부 챔버의 공기가 배출되게 된다. 밸브의 내부 유동은 Fig. 3과 같다.

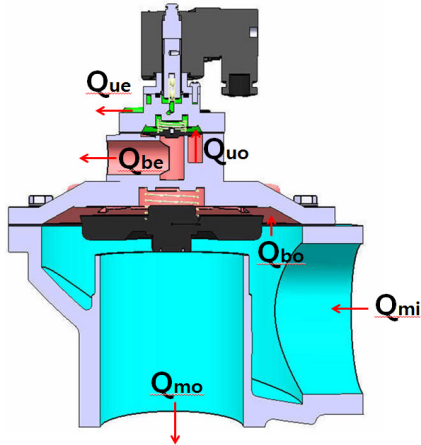


Fig. 3 The inside flow of the solenoid valve

상부와 하부 배기구를 통하여 배출되는 공기는 하부 다이어프램 오리피스를 통하여 공급되는 공기와 같으므로 상부 배기구의 유량은 상부 다이어프램 오리피스로 공급되는 유량과 동일하며 식(1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$Q_{bo} = Q_{ue} + Q_{be}$$

$$Q_{ue} = C_{uo} A_{uo} \sqrt{\frac{2(P_{bc} - P_{uc})}{\rho_{uc}}} \quad (1)$$

하부 배기의 유량은 식(2)와 같이 나타낼 수 있으며

$$Q_{be} = C_{ud} A_{ud} \sqrt{\frac{2(P_{bc} - P_{bc})}{\rho_{bc}}} \quad (2)$$

상부 다이어프램의 열리는 면적은 상부 다이어프램 오리피스 면적으로 식(3)과 같고

$$A_{ud} = \pi d_{uo} h_{ud} \quad (3)$$

상부 다이어프램을 통하여 하부 배기구로 배출되는 면적은 식(4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$A_{uo} = \frac{\pi d_{ud}^2}{4} \quad (4)$$

와 같이 나타낼 수 있다.

하부 챔버의 압력이 낮아지게 되면 하부 다이어프램이 압력차이로 인하여 하부 다이어프램이 열리게 되며 밸브 출구의 공기 유량은 식(5)와 같다.

$$Q_{mi} = Q_{mo} + Q_{bo}$$

$$Q_{mo} = C_{bd} A_{bd} \sqrt{\frac{2(P_{mi} - P_{mo})}{\rho_{mi}}} \quad (5)$$

또한 하부 다이어프램을 통하여 공급되는 공기의 유량은 식(6)과 같이 나타낼 수 있으며

$$Q_{bo} = C_{bo} A_{bo} \sqrt{\frac{2(P_{mi} - P_{bc})}{\rho_{mi}}} \quad (6)$$

하부 다이어프램 오리피스의 면적은 식(7)과 같이 나타낼 수 있으며

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

하부 다이어프램의 열리는 면적은 식(8)과 같다.

$$A_{bd} = \pi d_{mo} h_{bd} \quad (8)$$

### 3. 시뮬레이션

대유량 솔레노이드 밸브의 개발을 위해서 각 부품의 파라미터에 따른 밸브의 성능을 미리 예측하고 그 경향을 파악하기 위하여 LMS imagine사의 공학 상용 시뮬레이션 툴인 AMESim을 기반으로 모델링과 시뮬레이션을 실시하였다.

밸브의 성능에 영향을 미치는 인자는 상부와 하부 다이어프램 오리피스의 직경, 밸브의 상부와 하부 챔버, 각 스프링의 장력 등이 있으며 가장 영향을 많이 미치는 것은 상부와 하부 다이어프램 오리피스의 직경으로 직접적인 밸브의 동작성능이 결정된다. 밸브의 사용용도에 따라 요구되는 성능과 특성이 다르므로 동작성능특성의 경향을 시뮬레이션 하여 용도에 맞게 파라미터를 설계할 수 있도록 하였다. 본 연구에서는 각 오리피스의 직경에 따른 밸브의 개폐에 따른 밸브 내압( $V_3$ )변화를 시뮬레이션 하여 밸브의 동작성능을 분석하였다.

#### 3.1 시뮬레이션 회로

대유량 솔레노이드 밸브는 솔레노이드, 상부 챔버, 상부 다이어프램, 상부 다이어프램 오리피스, 하부 챔버, 하부 다이어프램, 하부 다이어프램 오리피스로 구성된다. 대유량 솔레노이드 밸브의 AMESim 모델링 회로는 Fig. 4와 같다.

대유량 솔레노이드 밸브의 성능에 가장 영향을 미치는 상부 및 하부 밸브의 오리피스 직경에 따른 밸브 내압의 변화를 시뮬레이션 하였다.

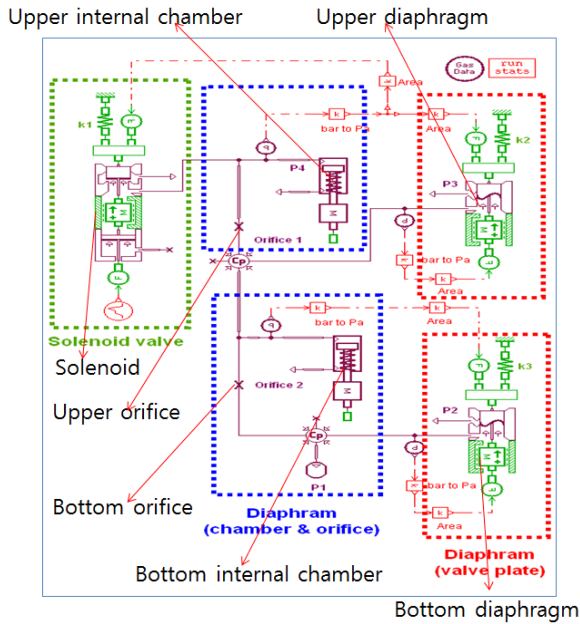


Fig. 4 Circuit of solenoid valve

### 3.2 상부 다이어프램 오리피스 직경의 영향

상부 다이어프램 오리피스의 직경에 따른 하부 챔버의 압력은 상부 다이어프램 오리피스 직경이 작을수록 하부 챔버 압력이 낮아진다. Fig. 5는 상부 다이어프램 오리피스 직경에 따른 하부 챔버의 압력변화를 나타낸 것이다.

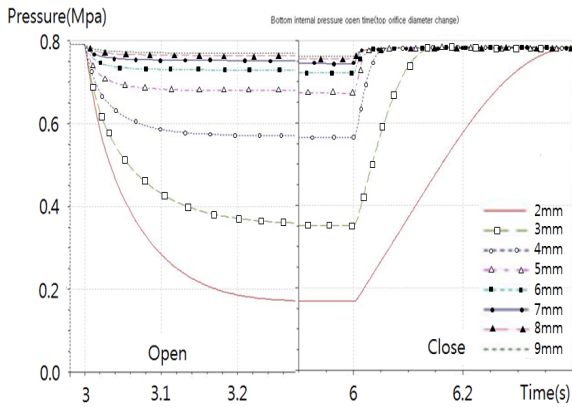


Fig. 5 Internal pressure on top orifice diameter

상부 다이어프램 오리피스 직경이 작아지면 상부 배기구를 통해 나가는 공기의 유량이 증가하게 되고 이에 따라 상부 챔버의 압력이 급격히 낮아진다. 따라서 상부 챔버와 하부 챔버의 압력차이가 급격히 발생하여 하부 챔버의 압력도 급격히 낮아지는 것을 알 수 있다. 하부 챔버의 압력은 낮아지지만 열림시 최저압력 도달시간과 닫힘시 최종압력 도달시간이 길어지는 경향을 확인 하였다.

### 3.3 하부 다이어프램 오리피스 직경의 영향

하부 다이어프램 오리피스 직경은 상부 밸브의 거동에 영향을 미치지 않지만 밸브 전체적인 성능에 가장 큰 영향을 미친다. 하부 다이어프램 오리피스의 직경에 따라 하부 챔버의 압력이 결정이 되며 그에 따라 방출하고자 하는 유체의 유효단면적이 결정되므로 직접적인 성능이 결정된다. 하부 다이어프램 오리피스의 직경에 따른 하부 챔버의 압력변화를 관찰하기 위하여 상부 다이어프램 오리피스의 직경은 고정하여 시뮬레이션을 실시하였다. 하부 다이어프램 오리피스의 직경에 따른 하부 챔버의 압력 변화는 Fig. 6과 같다.

하부 다이어프램 오리피스의 직경이 작을수록 하부 챔버의 압력이 낮아진다. 하부 다이어프램 오리피스 직경이 작으면 오리피스를 통해 상부로 공급되는 공기의 양이 적어지게 되며 밸브 열림시 상부 및 하부 챔버의 압력이 급격하게 낮아진다. 다이어프램의 움직임은 압력차이로 인하여 발생하는 힘에 의존하므로 상부 및 하부 챔버의 급격한 압력변화는 압력의 차이는 다이어프램에 작용하는 힘의 급격한 변화와 같다. 따라서 하부 다이어프램 오리피스의 직경이 작을수록 밸브 열림시 다이어프램에 작용하는 힘의 크기가 크고 밸브를 통하여 방출되는 공기의 방출량이 많아지는 것을 알 수 있다. 또한 하부 다이어프램 오리피스의 직경이 작을수록 밸브 닫힘시 최종 압력 도달시간이 늦어지게 되며 닫힘 시간이 길어지는 것을 알 수 있다.

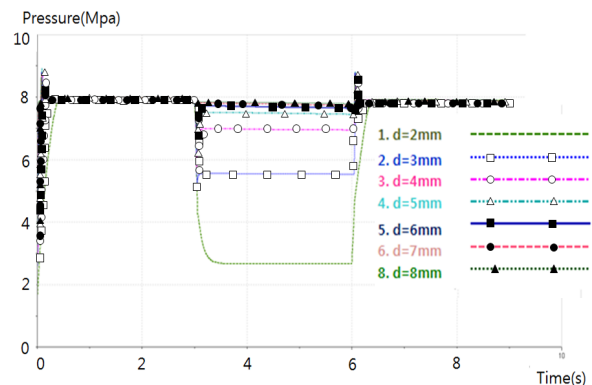


Fig. 6 Internal pressure on bottom orifice diameter

하부 다이어프램 오리피스 직경이 커지면 오리피스를 통하여 상부 밸브로 공급되는 공기의 양이 많아지게 된다. 따라서 밸브 개폐시 요구되는 공기의 양보다 많은 공기가 공급될 경우 개폐시 압력이 피크의 형태를 보이게 된다.

### 4. 성능 시험

대유량 솔레노이드 밸브의 성능 시험은 작동시험, 유량특성시험, 동작성능시험, 내압성시험, 내구성시험의 5가지로 분류된다. 각각의 시험은 JIS, ISO, KS 규격에 시험 방법 및 내용이 규정되어 있다. 성능시험에서 유량특성시험은 유효단면적으로 나타낸다. 유효단면적은 JIS B 8390 : 2000(ISO 6358:1989, KS B 6347-1987)에 의거하여 유체가 오리피스를 통과할 때 실제 단면적보다 축소되는 면적을 말하며 식(9)로 계산할 수 있다<sup>(5,6)</sup>.

$$S = \left\{ 12.9 \cdot V \cdot \frac{1}{t} \log_{10} \left( \frac{P_o + 1.03}{P + 1.03} \right) \right\} \sqrt{\frac{273}{T}} \quad (9)$$

#### 4.1 성능시험기

성능 시험기는 콤프레셔 1기와 4개의 센서, 1개의 대용량 공기탱크, 소음기와 공기관로 그리고 실험 대상 솔레노이드 밸브로 구성된다. 센서의 종류는 압력 센서, 온도센서, 차압센서, 질량유량센서 이며 압력센서와 온도센서는 대상 솔레노이드 밸브 앞쪽에 설치되며 차압센서는 솔레노이드 밸브의 전후의 차압을 측정할 수 있도록 설치하고 질량유량센서는 솔레노이드 밸브 뒤쪽에 설치하였다. 성능시험기의 공압 회로도는 Fig. 7과 같다.

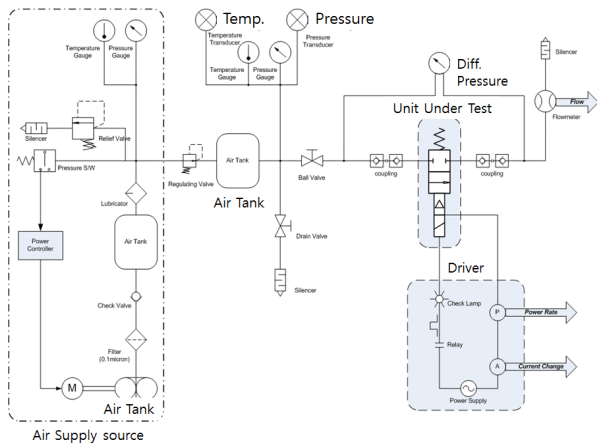


Fig. 7 Circuit of test bench

성능 시험기의 가압탱크 용량은 밸브의 크기를 고려하여 2,000 dm<sup>3</sup>로 산정하였다.

성능 시험기의 동작은 마이크로컨트롤러를 통하여 시험을 수행하게 되며 시험중 출력되는 데이터의 수집은 LabVIEW를 이용하였다<sup>(7)</sup>.

성능 시험기는 ㄷ자 형태의 배관으로 밸브의 입구

는 측면이며 출구는 하부이다. 제작된 성능시험기는 Fig. 8 과 같다.<sup>(8)</sup>



Fig. 8 Designed test bench

#### 4.2 성능시험기 소프트웨어

각 센서의 데이터를 받아 처리 하는 프로그램은 LabVIEW를 이용하여 개발하였다. 본 연구에서 개발된 프로그램은 총 6개의 채널에서 데이터를 수집한다. 4개의 아날로그 전류와 2개의 디지털 값을 받아 액셀에 저장하여 저장된 데이터를 바탕으로 솔레노이드 밸브의 성능을 분석한다. 또한 데이터를 수집하기 위한 샘플링 타임은 1000 Hz로 설정하였고 루프 타임을 100 ms, 샘플개수를 100개로 설정하였다. 개발된 소프트웨어의 프론트 패널은 Fig. 9와 같다.

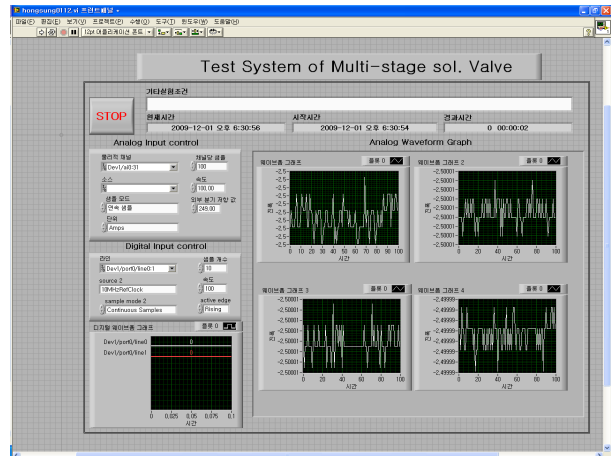


Fig. 9 Front panel of test software

프론트 패널은 사용자가 시험을 하면서 대상 솔레노이드 밸브의 내용과 특이사항을 임의로 작성할 수 있도록 기타 실험조건을 기재 할 수 있으며 실험의 시작시간, 종료시간 및 경과시간을 출력할 수 있도록 하였다.

Waveform Graph는 수집된 데이터를 실시간으로 그래프로 나타내어 사용자가 그래프를 통하여 프로그



램의 정상작동 여부를 판단하고 대상 솔레노이드 밸브의 동작에 따른 각 센서값을 대략적으로 인지할 수 있도록 하였다.

### 5. 시험 결과

#### 5.1 상부 다이어프램 오리피스 직경에 따른 동작시험

상부 다이어프램 오리피스의 직경에 따른 밸브의 거동을 확인하기 상부 다이어프램 오리피스의 직경을 각각 2mm, 3mm 인 다이어프램으로 교체하면서 실험을 상부 챔버 내압과 밸브 입구의 배관 압을 측정하였다. 상부 다이어프램 오리피스 직경에 따른 상부 챔버 내압의 변화는 Fig. 10과 같다.

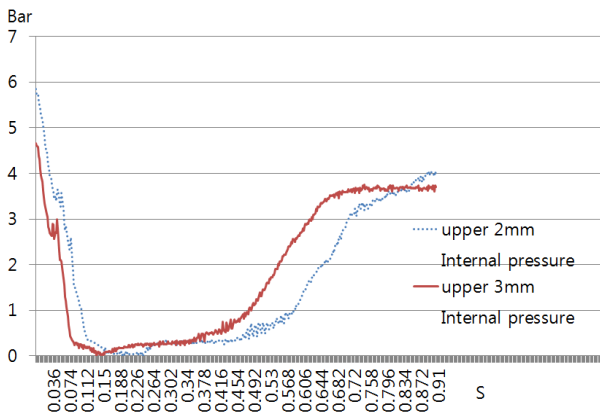


Fig. 10 Internal pressure on upper orifice diameter

상부 다이어프램 오리피스 직경의 영향은 상부 다이어프램 오리피스 직경이 클수록 닫힘시 상부 챔버 내압이 급격히 상승하는 것을 확인하였다. 상부 다이어프램 오리피스 직경에 따른 배관 압의 변화는 Fig. 11과 같다.

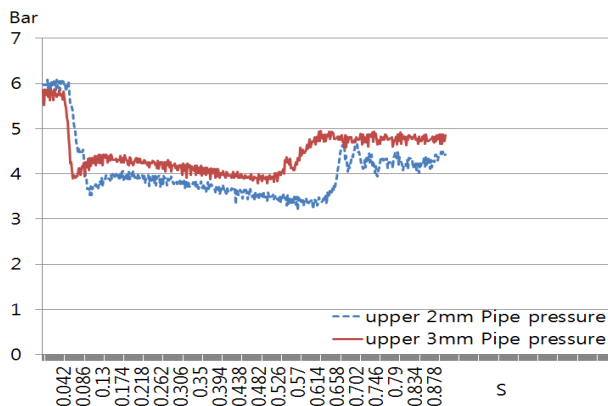


Fig. 11 Pipe pressure on upper orifice diameter

상부 다이어프램 오리피스 직경에 따른 밸브 입구 배관 압은 오리피스 직경이 클수록 닫힘시 압력의 급격히 증가하는 것을 확인하였다. 상부 다이어프램 오리피스 직경이 클수록 상부 챔버로 공급되는 공기가 많아지기 때문이며 상부 다이어프램 오리피스 직경은 밸브의 닫힘시에 더 영향을 주는 것을 확인하였다.

#### 5.2 하부 다이어프램 오리피스 직경에 따른 동작시험

하부 다이어프램 오리피스 직경에 따른 동작시험은 오리피스 직경을 각각 4mm, 5mm, 6mm로 그 거동을 시험하였다. 하부 다이어프램 오리피스 직경에 따른 하부 챔버 내압은 하부 다이어프램 오리피스의 직경에 따라 하부 다이어프램 오리피스의 직경이 클수록 하부 챔버 압력이 급격히 변하는 것을 확인하였다. 또한 하부 다이어프램 오리피스 직경이 작은 경우 열림시 하부 챔버의 압력이 급격히 떨어지지만 닫힘시 상부 및 하부 챔버에 공기를 채우는 구간이 발생하게 되며 닫힘 지연이 가장 많이 발생하게 된다. 하부 다이어프램 오리피스 직경에 따른 내압의 변화는 Fig. 11과 같다.

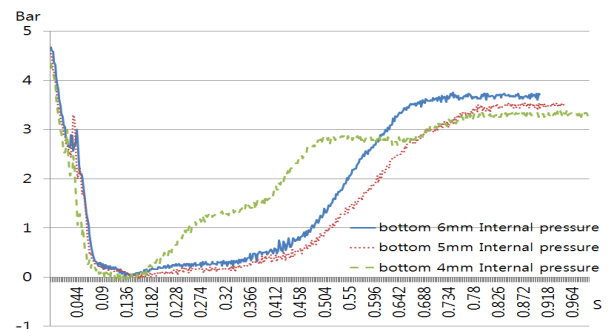


Fig. 12 Internal pressure on bottom orifice diameter

하부 다이어프램의 직경에 따른 밸브의 배관 압변화는 Fig. 12와 같다.

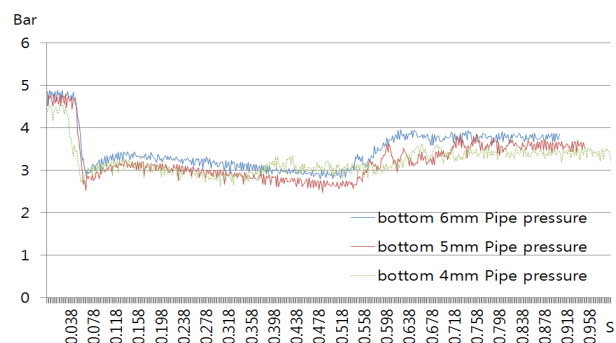


Fig. 13 Pipe pressure on bottom orifice diameter

하부 다이어프램의 직경에 따른 밸브 입구 배관 압은 오리피스 직경이 작을수록 열림시 급격한 압력변화가 나타나지만 닫힘시에는 지연이 발생하는 것을 확인하였다. 하지만 하부 다이어프램의 직경이 클수록 닫힘시 밸브 입구 배관압이 급격히 증가하는 것을 확인하였다.

## 6. 결 론

본 연구는 대유량 솔레노이드 밸브 개발을 위한 연구를 수행하였고 다음과 같은 결론을 구하였다.

- 1) 대유량 솔레노이드 밸브의 작동원리 및 기초이론을 정립하였다.
- 2) AMESim을 이용하여 대유량 밸브를 모델링하였으며 시뮬레이션 결과를 통하여 밸브의 각 파라미터에 따른 밸브의 거동을 확인 하였다.
- 3) 대유량 솔레노이드 밸브의 상부 및 하부 다이어프램 오리피스 직경에 따른 밸브의 거동을 검증하였다.
- 4) 기초 이론 및 시뮬레이션을 기반으로 대유량 솔레노이드 밸브를 설계하고 제작하였다.
- 5) 공압 솔레노이드 밸브의 성능 시험을 위한 시험장치를 설계 및 제작하였다.
- 6) 제작된 성능시험기를 통한 실험으로 개발된 제품의 특성 및 성능을 시험하였고 제품으로써의 가능성을 확인하였다.

## 후 기

이 논문은 2012년 울산대학교 연구비에 의하여 연구되었음.

## 참고 문헌

- 1) C. S. Kim, K. T. Kim, J. H. Kim, K. J. Jang and K. S. Hong, "The Development of Safety Relief Valve for Nuclear Service," Spring conference of the KSME, pp. 629~636, 2003.
- 2) D. J. Kim, M. K. Kim, M. S. Hong, "The Latest Pneumatic Technology", Books Hill, pp. 206~207, 2004.
- 3) C. S. Jeong, H. U. Lee, Y. M. Jeong, H. S. Kim, C. D. Lee and S. Y. Yang, "Development of the Quick Exhaust Valve to Blowing the Intake Filter," Spring conference of the KSMTE, pp. 209~213, 2009.
- 4) C. S. Jeong, H. U. Lee, D. H. Yun and S. Y. Yang, "A Study on Orifice of Multi-stage diaphragm Valve", KFPS Conference, pp. 43~48, 2010.
- 5) J. S. Jang, "Analysis of Pressure Flow Valve", Annual Special seminar, pp. 1~29, 2009.
- 6) KS B 6347, "2-Port Solenoid Operated Valves for Pneumatic Use", Korea Standards, pp. 1~11, 1987,
- 7) D. Y. Kwak, "Easy. Powerful. Open LabVIEW", Ohm, pp. 255~408, 2008.
- 8) S. N. Yun and D. W. Yun, "Performance Improvement Strategy of Solenoid Valve and Magnetic Material Technique", KFPS, Vol 6, No 3, pp. 28~34, 2009