

# 다이어프램형 밸브의 유량특성과 동적성능에 관한 연구

## A Study on Flow Rate Characteristic and Dynamic Performance on Diaphragm Solenoid Valve

정찬세<sup>1</sup> · 양순용<sup>2\*</sup>

C. S. Jeong and S. Y. Yang

Received: 7 May. 2013, Revised: 26 Aug. 2013, Accepted: 26 Aug. 2013

**Key Words** : Diaphragm valve(다이어프램 밸브), Valve simulation(밸브 시뮬레이션), Solenoid valve(솔레노이드 밸브), Flow rate characteristic(유량특성), Dynamic respond time test(동적성능시험)

**Abstract**: Solenoid valve has used in various industrial field extensively. A solenoid valve has different size, shape and method of operation accordantly to industrial field. Many researchers study on kinds of solenoid valve such as flow rate, dynamic, magnetic field, valve shape and operating method. But the flow rate characteristic and dynamic response time performance on the diaphragm valve are not studied. This paper describes the flow rate characteristic and dynamic response time performance on the diaphragm valve. At first, the diaphragm valve is simulated in AMESim simulation tool. AMESim model found that an effect of valve performance depends on parameter. The parameter is the diaphragm orifice area. And the performance test bench confirms the effect in this parameter. Finally, it finds out the flow rate characteristic and dynamic response time performance on the diaphragm valve.

### 기호 설명

 $P$  : Input pressure, kPa $A_{ins}$  : Inside area of diaphragm, mm<sup>2</sup> $F_s$  : Spring force, kgf $m_{dia}$  : Mass of diaphragm, g $A_{out}$  : Outside area of diaphragm, mm<sup>2</sup> $\Delta P$  : Inside pressure change, kPa $F_{dia}$  : Force on diaphragm, kgf $C$  : Shape factor $a_{dia}$  : Acceleration of diaphragm, mm/s<sup>2</sup> $v_{dia}$  : Velocity of diaphragm, mm/s $x_{dia}$  : Operating distance of diaphragm, mm $F_s$  : Spring Force, kg $P_{in}$  : Inside pressure, kPa

### 1. 서론

공압 솔레노이드 밸브는 자동차, 건설, 항만, 조선, 플랜트, 자동화기기, 기계 등 산업 전반에 걸쳐서 많이 사용되는 부품이다. 따라서 그 적용되는 산업에 따라 밸브의 종류와 크기, 형태가 다양하며 각 밸브의 사용조건에 따라 고도의 밸브 설계 기술이 요구된다.

솔레노이드 밸브는 그 작동 방식에 따라 직동형 솔레노이드 밸브와 파일럿 작동 솔레노이드 밸브로 나누어진다. 직동형 솔레노이드 밸브는 주로 자동화기계, 로봇 등의 분야에 많이 사용이 되며 파일럿 작동 밸브는 솔레노이드 크기를 작게 하면서 큰 오리피스를 제어하기 위하여 사용된다.

파일럿 작동밸브는 솔레노이드에 전기가 통하지 않을 때 파일럿 오리피스는 닫혀있고 유체 압력은 피

\* Corresponding author: soonyy@ulsan.ac.kr

1 Department Mechanical Automotive Engineering Graduate school of University of Ulsan, Ulsan 680-749, Korea

2 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.

스톤이나 다이어프램 위에 가하면서 확실한 닫힘을 위해 내려 누르는 게 특징이다. 솔레노이드에 전기가 통할 때는 밸브의 출구 쪽을 거쳐 피스톤 또는 다이어프램 위에 작용하는 압력이 이완되면서 코어가 파일릿 오리피스를 연다.

기존의 공압 밸브에 대한 연구는 여러 분야에서 진행되고 있다. 최정주는 솔레노이드 밸브의 유동과 관련하여 유량제어 시스템에서 각 밸브에 따라 압력, 온도, 점도, 포트 설계과 같은 저항 파라미터들이 밸브의 효율에 미치는 영향을 분석하고 별도의 유량계 없이 압력으로 밸브의 유량을 측정하는 방법을 제안하였다.<sup>1)</sup> Koichi Igarashi 외 2명은 유체의 밀도, 점도, 유량을 동시에 측정할 수 있는 시스템에 관한 연구를 수행하였으며 Zhao Wei 외 2명은 폴리트로픽 지수의 동적 규칙을 기반으로 한 유량특성의 측정에 대하여 연구하였다.<sup>2,3)</sup> 또한 화력발전소 흡입필터 세정용 다이어프램 밸브개발과 다이어프램을 사용하는 대유량 다단 솔레노이드 밸브 개발에 관한 연구가 수행되었다.<sup>4,5)</sup>

본 연구에서는 다이어프램형 파일릿 밸브의 유량특성과 동적성능에 대하여 그 성능에 영향을 미치는 파라미터들에 대하여 AMESim을 이용하여 시뮬레이션을 수행하였다. 또한 성능시험을 통하여 각 파라미터에 따른 유량특성과 동적성능을 검증하였다.

## 2. 다이어프램 밸브

### 2.1 다이어프램 밸브 구성

밸브는 솔레노이드, 내부 스프링, 플런저, 밸브바디, 다이어프램 스프링, 다이어프램, 다이어프램 오리피스로 구성된다. 밸브의 작동원리는 압축공기가 다이어프램 오리피스를 통하여 밸브 입구와 밸브 바디 내부에 압축 공기를 공급하게 된다. 다이어프램 밸브의 구성도는 Fig. 1과 같다.

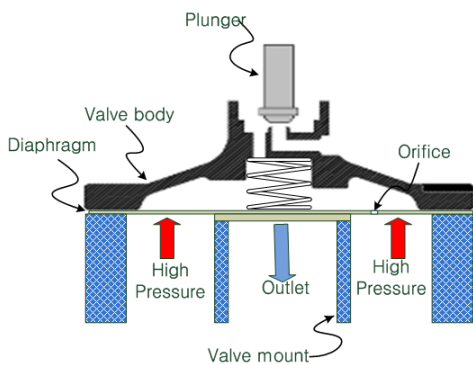


Fig. 1 Configuration of diaphragm valve

다이어프램 밸브의 동작은 솔레노이드에 전압이 인가되면 플런저가 열리게 되고 밸브 내부의 압력이 급격히 떨어지게 된다. 밸브 내부의 압력이 떨어지면 공급부 압력과 압력차이로 인하여 다이어프램이 열리게 된다. 솔레노이드의 전원이 차단되면 플런저 내부의 내부 스프링 장력으로 인하여 플런저가 닫히게 되며 밸브 내부의 다이어프램 스프링 장력과 다이어프램 오리피스를 통하여 공급되는 압축공기의 힘으로 밸브가 닫히게 된다.

### 2.2 다이어프램 밸브의 성능 파라미터

다이어프램 밸브의 성능은 밸브의 다이어프램에 작용하는 힘의 크기에 따라 성능이 결정된다. 따라서 밸브에 작용하는 힘을 분석하여 밸브의 성능을 결정하는 파라미터를 도출하였다.

다이어프램에 작용하는 힘은 밸브 내부의 압력 ( $PA_{ins}$ )과 스프링 힘( $F_s$ ) 및 다이어프램의 중력( $m_{dia}$ )에 의한 힘이 하부 방향으로 작용하며 다이어프램 외부에서는 공급 압력( $PA_{out}$ )이 작용한다. 다이어프램 밸브에 작용하는 힘은 Fig. 2와 같다.

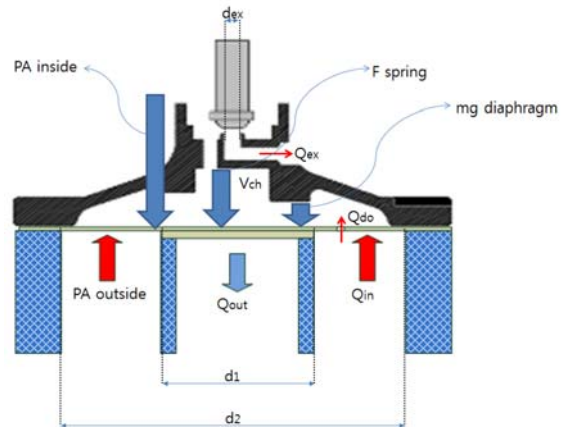


Fig. 2 The forces on the diaphragm

밸브가 작동되지 않고 닫혀 있을 경우 다이어프램 내부의 힘이 외부의 힘보다 크게 되며 솔레노이드에 전압이 인가되면 밸브 내부의 압력이 낮아지게 되고 일정 압력에서는 열리지 않는 구간이 생기게 된다. 압력변화에 따라 열리지 않는 구간은 무시할 수 있을 만큼 짧은 시간이며 밸브 내부의 압력이 낮아짐에 따라 다이어프램 내부힘과 외부힘이 유사해지는 구간이 발생한다. 밸브 내부의 압력이 지속적으로 낮아지게 되면 밸브 내부의 힘보다 외부의 힘이 커지게 되며 외부 힘의 영향으로 다이어프램이 움직이게 된다. 밸브의 하부 방향을 양의 힘으로 하여 다이어프램에 작용하는 힘을 정리하면 식 (1)과 같다.

$$F_{dia} = (P - \Delta P)A_{ins} + F_s + m_{dia}g - CPA_{out} \quad (1)$$

식 (1)을 다시 정리하면

$$F_{dia} = m_{dia} \left( \frac{(P - \Delta P)A_{ins}}{m_{dia}} + \frac{kx}{m_{dia}} + g \right) - \frac{CPA_{out}}{m_{dia}} \quad (2)$$

따라서 다이어프램의 가속도는 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$a_{dia} = \frac{(P - \Delta P)A_{ins}}{m_{dia}} + \frac{kx}{m_{dia}} + g - \frac{CPA_{out}}{m_{dia}} \quad (3)$$

다이어프램의 가속도를 시간에 따라 적분을 하게 되면 다이어프램의 속도를 구할 수 있으며 다이어프램의 속도는 식 (4)과 같다.

$$v_{dia} = \int \left( \frac{(P - \Delta P)A_{ins}}{m_{dia}} + \frac{kx}{m_{dia}} + g \right) dt - \frac{CPA_{out}}{m_{dia}} \quad (4)$$

다이어프램의 속도를 시간에 따라 적분하게 되면 다이어프램의 이동거리를 구할 수 있으며 이동거리는 밸브의 성능을 나타내는 지표가 된다. 다이어프램의 이동거리는 식 (5)와 같다.

$$x_{dia} = \iint \left( \frac{(P - \Delta P)A_{ins}}{m_{dia}} + \frac{kx}{m_{dia}} + g \right) dt - \frac{CPA_{out}}{m_{dia}} \quad (5)$$

식 (5)에서 다이어프램 밸브의 성능을 결정하는 파라미터를 선정하면 다이어프램 내부면적( $A_{ins}$ ), 스프링 하중( $kx$ ), 다이어프램 내부 부피( $V_{ins}$ ), 다이어프램 외부 면적( $A_{out}$ ), 다이어프램 외부 형상계수( $C$ )를 도출할 수 있다. 다이어프램 내부면적( $A_{ins}$ ), 스프링 하중( $kx$ ), 다이어프램 내부 부피( $V_{ins}$ ), 다이어프램 외부 면적( $A_{out}$ )은 밸브의 전체의 형상에 따라 결정된다. 따라서 초기설계 이후에 변경이 불가능한 파라미터이다. 최소한의 설계 변경으로 밸브의 성능에 영향을 미치는 요소는  $\Delta P$  와 형상계수  $C$  이다.  $\Delta P$  는 내부 압력을 결정하게 되며 내부 압력은 다이어프램이 열리는 거리를 결정하게 된다. 따라서 다이어프램의 형상계수  $C$ 는  $\Delta P$ 에 따라 변화하게 되며 식 (6)과 같은 관계가 형성된다.

$$C = f(\Delta P) \quad (6)$$

또한  $\Delta P$  는 다이어프램 오리피스를 통하여 공급되는 공기량( $Q_{do}$ )과 밸브내부 배기관로를 통하여 배출되는 공기량( $Q_{ex}$ )에 따라 결정된다.

밸브내부 배기관로를 통하여 배출되는 공기량( $Q_{ex}$ )은 배기관로의 면적에 영향을 받게 되며 배기관로는 초기설계에서 결정되면 변경할 수가 없다. 따라서  $\Delta P$ 를 결정하는 주요 파라미터는 다이어프램 오리피스 면적이 된다. 다이어프램 오리피스를 통하여 공급되는 공기량( $Q_{do}$ )은 식 (7)과 같고 다이어프램 오리피스의 단면적은 식 (8)와 같다.

$$Q_{do} = C_{do}A_{do}\sqrt{\frac{2(P - P_{in})}{\rho_{inp}}} \quad (7)$$

$$A_{do} = \frac{\pi d_{do}^2}{4} \quad (8)$$

따라서 다이어프램 밸브의 유량특성 및 동적성능에 영향을 미치는 인자로 다이어프램 오리피스 면적을 선정 할 수 있다.

### 2.3 다이어프램 밸브의 유량 및 동적특성

다이어프램 밸브의 유량특성은 밸브의 형상과 크기 등을 하나의 오리피스로 가정하여 밸브의 유효단면적으로 밸브의 특성을 표시하는 방법으로 KS B 6347 공기압용 2포트 솔레노이드 밸브 규격에 명시되어 있다. 유량 특성 시험은 압력 500kPa 로 충전된 내용적  $V$  의 용기에 밸브를 직결하고 여자회로에 고정적 전압을  $t$  시간 가하여 용기내 압력이 200kPa로 될 때까지 공기를 대기에 방출한 후 남은 압력을 측정한다. 측정된 값은 식 (9)에 대입하여 밸브의 유효단면적을 계산하게 된다.<sup>6)</sup>

$$S = \left( 12.9 V \frac{1}{t} \log_{10} \frac{P_0 + 101}{P + 101} \right) \sqrt{\frac{273}{T}} \quad (9)$$

다이어프램 밸브의 동적 성능은 밸브의 열리는 성능을 나타내는 지표로 한국기계연구원에서 발행한 RS-KIMM-2012-0000 규격에 명시되어 있다. 동적 성능은 시험 대상 밸브 입구 포트에 압력을 가한 상태에서 출구 포트에 압력 센서를 설치하고 유로는 차단한다. 밸브의 작동부인 솔레노이드에 정격 전압을 공급하고 솔레노이드의 전류가 변하는 시점부터 압력 센서의 압력이 공급압력의 50%가 되는 시간을 측정

하여 밸브의 동적 성능 지표로 나타내게 된다.<sup>7)</sup>

### 3. 시뮬레이션

다이어프램 밸브의 파라미터에 따른 유량특성과 동적성능을 미리 예측하고 그 경향을 파악하기 위하여 LMS imagine사의 공학 상용 시뮬레이션 툴인 AMESim을 기반으로 모델링과 시뮬레이션을 실시하였다.

#### 3.1 시뮬레이션 회로

다이어프램 밸브의 시뮬레이션 모델은 공기탱크, 다이어프램 오리피스, 플런저, 밸브 내부 챔버, 다이어프램으로 구성된다. 모델에서는 플런저와 다이어프램을 밸브로 설정하였고 다이어프램 오리피스의 전후 압력차이를 기반으로 다이어프램의 개폐를 결정하도록 하였다. 개발된 다이어프램 밸브의 시뮬레이션 모델은 Fig. 3과 같다.

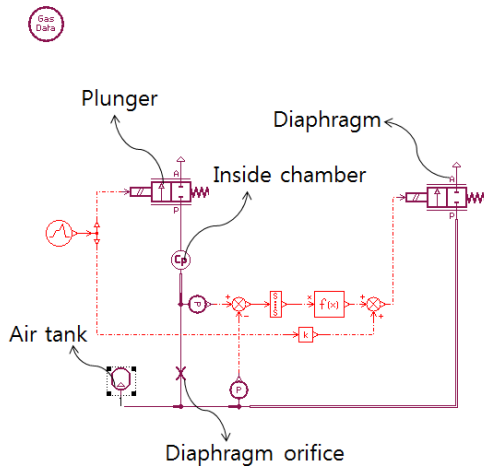


Fig. 3 The simulation model

시뮬레이션에 적용된 파라미터의 사양은 Table. 1과 같다.

Table 1 Simulation parameters

구분	사양
Inside volume(리터)	0.3
Orifice area(mm <sup>2</sup> )	4
Air tank volume(리터)	1000
f(x)	x <sup>2</sup>

f(x)는 다이어프램의 열리는 값을 결정하는 함수로 dynamic differentiator를 통하여 동적 신호로 변경된 압력데이터를 제공하였다.

본 연구에서는 각 파라미터에 따른 밸브의 유량특성과 동적성능에 대하여 시뮬레이션을 하였으나 지면의 제한으로 다이어프램 오리피스 면적에 따른 밸브의 유량특성과 동적성능에 대하여 기술하였다.

#### 3.2 다이어프램 오리피스 면적의 영향

다이어프램 오리피스는 밸브 바디 내부에 압축 공기를 공급하는 유로이다. 따라서 다이어프램 오리피스의 면적은 다이어프램의 이동거리에 영향을 미치게 되며 밸브의 동적성능과 유량특성에 직접적인 영향을 미친다. 본 연구에서는 다이어프램 오리피스 면적을 4mm<sup>2</sup>, 5.6mm<sup>2</sup>, 8mm<sup>2</sup>, 10mm<sup>2</sup>로 설정하여 밸브의 개폐에 따른 밸브 내부의 압력과 공기탱크 압력에 대하여 방출 시뮬레이션을 수행하였다. 방출 시뮬레이션은 유량 특성을 나타내도록 500 kPa에서 200 kPa까지 방출하는 시뮬레이션이다. 밸브가 개방될 때 다이어프램 오리피스의 직경에 따른 밸브 내부의 압력은 Fig. 4와 같다.

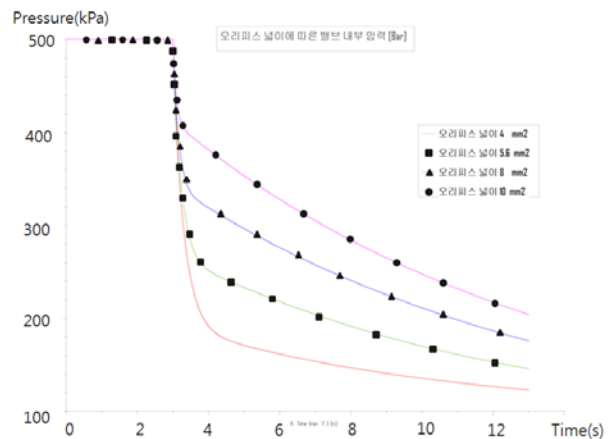


Fig. 4 The simulation result of internal pressure.

밸브 개방시 다이어프램 오리피스의 면적이 클수록 밸브가 밸브 내부의 압력저하 시간이 증가하고 다이어프램 오리피스의 면적이 작을수록 다이어프램은 열리는 시간이 짧은 것으로 나타났다.

다이어프램 오리피스 면적에 따른 공기탱크 압력 변화는 오리피스 면적이 클수록 방출시간이 증가하고 오리피스 면적이 작을수록 방출시간이 짧은 것으로 나타났다. 시뮬레이션 결과는 Fig. 5와 같다.

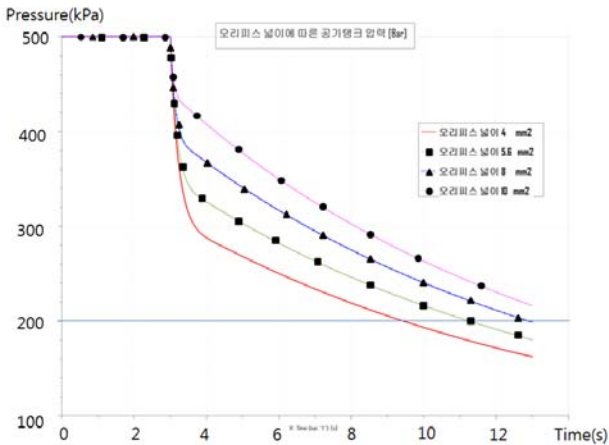


Fig. 5 The simulation result of air tank pressure

밸브 다이어프램 오리피스 면적에 따른 동적 성능 시뮬레이션은 다이어프램 오리피스의 면적을 각각  $4\text{mm}^2$ ,  $5.6\text{mm}^2$ ,  $8\text{mm}^2$ ,  $10\text{mm}^2$  로 설정하여 시뮬레이션 하였다. 동적 성능은 솔레노이드에 전압을 인가시키고 공급압력의 50%가 되는 시간으로 성능을 판단한다. 다이어프램 오리피스 면적에 따른 밸브의 동적 성능은 Fig. 6과 같다.

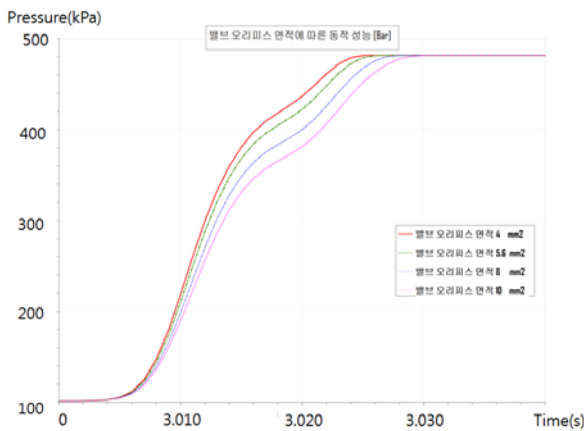


Fig. 6 The simulation result of exhaust pressure

밸브 다이어프램 오리피스 면적에 따른 동적 성능은 오리피스 면적이 작을수록 출구 압력의 변화가 빠른 것으로 나타났지만 대략 1~2 ms 정도의 차이로 실제로 큰 차이를 보이지는 않았다.

#### 4. 성능 시험기

##### 4.1 성능시험기

성능 시험기는 압축기, 압력센서, 대용량 공기탱크, 소음기와 공기관로 그리고 실험 대상 솔레노이드 밸

브로 구성된다. 압력센서는 대상 솔레노이드 밸브 전후에 설치되며 배기구에는 동적성능시험시 배기 유로를 차단하여야 하므로 수동밸브를 장착하였다. 수동밸브는 유량특성시험을 시험할 때에는 개방하고 동적성능시험을 시험할 때에는 차단하게 된다. 개발된 성능시험기는 Fig. 7과 같다.



Fig. 7 The test bench

성능시험기의 소프트웨어는 National Instrument사의 LabVIEW를 이용하여 개발하였다. 데이터 수집을 위한 DAQ는 National Instrument사의 NI UBS-6212를 사용하였다. NI UBS-6212는 Fig. 8과 같다.<sup>8)</sup>



Fig. 8 The NI USB 6212

#### 5. 시험 결과

성능 시험은 유량 특성을 나타내는 유효단면적 측정시험과 밸브의 동적 성능을 나타내는 동적 성능 시험으로 구분된다. 유효단면적 시험은 공기탱크의 압력이 500 kPa에서 200 kPa 까지의 방출 시간을 측정하여 유효단면적과 유량을 계산함으로써 밸브의 유량 특성을 나타내며 동적 성능시험은 밸브 출구를 막은

후 밸브를 작동시켜 공급압력의 50% 가 될 때까지의 시간을 측정하는 시험이다.

시험은 다이어프램 오리피스 면적을 각각 1.3 mm<sup>2</sup>, 2.5 mm<sup>2</sup> 으로 설정하여 시험하였다.

### 5.1 다이어프램 밸브의 유량특성시험

다이어프램의 오리피스 면적에 따른 유량 방출 시험결과 다이어프램 오리피스 면적이 1.3 mm<sup>2</sup> 일 경우 약 5.6 초이며 1.8mm<sup>2</sup> 일 경우 7.4 초로 오리피스 면적이 클수록 방출시간이 길어지는 것을 확인하였다. 방출시간을 토대로 계산한 유효단면적은 각각 1347.05 mm<sup>2</sup>, 1019.39 mm<sup>2</sup> 로 다이어프램 오리피스 면적이 작을수록 유효단면적은 크게 나타났다. 다이어프램 오리피스 면적에 따른 유량특성 시험결과는 Fig. 9와 같다.

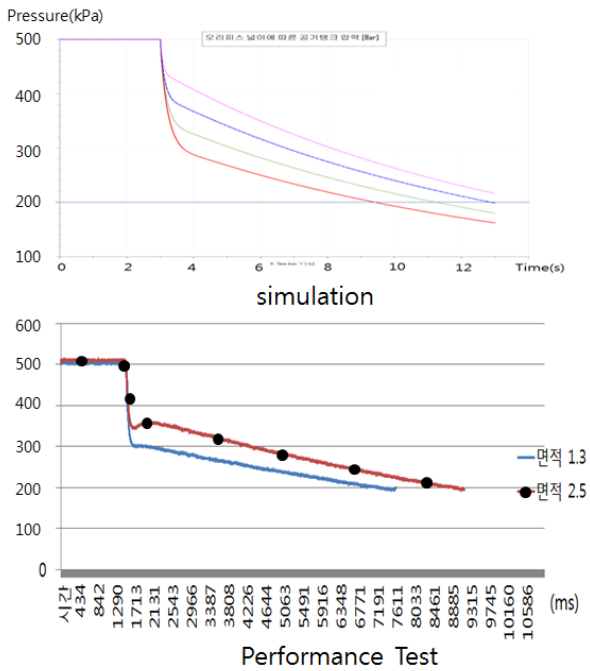


Fig. 9 The experimental result of flow rate characteristic test

### 5.2 다이어프램 밸브의 동적성능시험

다이어프램 밸브의 동적 성능 시험 결과 공급압력의 50% 가 되는 시간은 다이어프램 오리피스 면적에 따라 큰 변화를 보이지 않았으며 대략 66ms로 나타났다. 실제 시험에서는 약간의 누설이 있었기 때문에 시간적 오차는 발생할 수 있으나 다이어프램 오리피스 면적이 동적성능에는 크게 영향을 미치지 않으며 유사한 압력증가가 나타났다. 따라서 오리피스 면적에 따른 동적성능을 구분하기 위하여 다이어프램 오

리피스 면적이 1.3 mm<sup>2</sup> 인 동적성능시험시 초기 압력을 약 510 kPa로 설정하여 시험하였다. 다이어프램 밸브 동적 성능 시험 결과는 Fig. 10 과 같다.

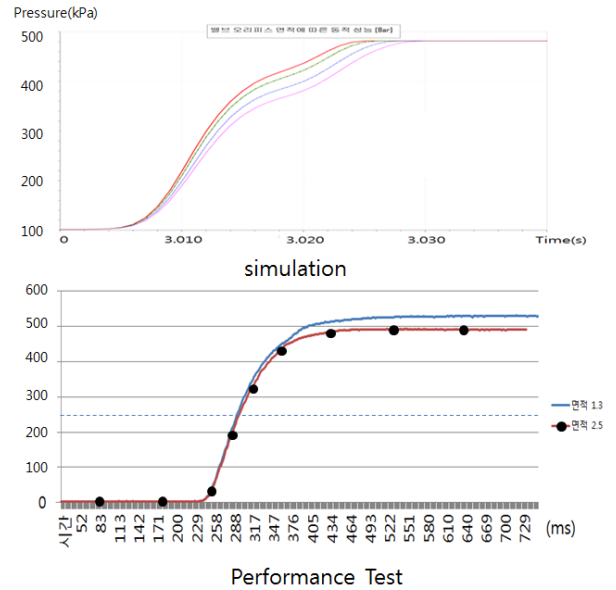


Fig. 10 The experimental result of dynamic response time test

다이어프램 밸브 동적 성능 시험 결과는 공급 압력의 50% 가 되는 시간은 1ms 이내에서 동일하게 나타났다으며 각 면적의 그래프를 구분하기 위하여 다이어프램 오리피스 면적이 1.3mm<sup>2</sup>을 공급압력 510kPa로 하여 실험 후 안정된 압력의 비교로 실험결과를 구분할 수 있었다.

## 6. 결론

본 연구는 다이어프램 밸브의 유량특성과 동적성능에 대하여 연구를 수행하였고 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- 1) 다이어프램 밸브의 작동원리 및 기초이론을 정립하였고 밸브의 성능에 영향을 미치는 파라미터를 정리하였다.
- 2) AMESim을 이용하여 다이어프램 밸브를 모델링하였으며 시뮬레이션 결과를 통하여 밸브의 다이어프램 오리피스 면적에 따른 밸브의 거동을 확인 하였다.
- 3) 다이어프램 밸브의 오리피스 직경에 따른 밸브의 거동을 실험을 통하여 검증하였다.
- 4) 다이어프램 오리피스 면적이 작을수록 유효단면적이 넓은 것을 확인하였다.

5) 다이어프램 오리피스 면적에 따른 밸브의 동적 성능은 큰 차이가 나지 않는 것을 확인하였다.

### 참 고 문 헌

- 1) J. J. Choi, "Flow control system design without flow meter sensor", *Sensors and Actuators A*, 185, pp.127-131, 2012
- 2) Koichi Igarashi, Kenji Kawashima, Toshiharu Kagawa, "Development of simultaneous measurement system for instantaneous density, viscosity and flow rate of gases", *Sensors and Actuators A*, 140, pp. 1-7, 2007
- 3) Zhao Wei, Ye Qian, Meng Guo-Xiang, "Measurement of flow rate characteristics of pneumatic components based on the dynamic regularity of polytropic exponents", *Flow Measurement and Instrumentation*, 22, pp.331-337, 2011
- 4) C. S. Jeong, H. U. Lee, Y. M. Jeong, C. D. Lee and S. Y. Yang, "Development of the Quick Exhaust Valve to Blowing the Intake Filter for the Thermal Power Plant", *Journal of the Korean Society of Machine Tool Engineers*, Vol. 19, No. 4, pp. 548-552, 2010
- 5) C. S. Jeong, S. Y. Yang, "A Study on Development of High Flow Solenoid Valves", *KSFC*, Vol. 10, No. 1, pp.7-13, 2013
- 6) KS B 6347, "2-port solenoid operated valves for pneumatic use", *KS standard*, pp. 1-13, 1987
- 7) KIMM, "3Port 2Position Air Solenoid Valve", *RS-KIMM-2012-0000*, pp.1-17, 2012
- 8) D. Y. Kwak, "Easy. Powerful. Open LabVIEW", *Ohm*, pp.255-408, 2008.