



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공 학 석 사 학 위 논 문

$CO_2$ 냉매용 제어밸브의 부하 압력  
피드백 실 유로 크기에 따른  
응답 특성에 관한 연구



2019년 2월

부 경 대 학 교 산 업 대 학 원

기계시스템 및 조선공학과

박 태 선

공 학 석 사 학 위 논 문

$CO_2$  냉매용 제어밸브의 부하 압력  
피드백 실 유로 크기에 따른  
응답 특성에 관한 연구



지도교수 장 지 성

이 논문을 공학석사 학위논문으로 제출함

2019년 2월

부 경 대 학 교 산 업 대 학 원

기계시스템 및 조선공학과

박 태 선

# 박태선의 공학석사 학위논문을 인준함

2019년 2월



주 심 공 학 박 사 정석호 (인)

위 원 공 학 박 사 고대권 (인)

위 원 공 학 박 사 장지성 (인)

# 목 차

Abstract .....	iv
제 1 장 서 론 .....	1
1.1 연구배경 .....	2
1.2 관련 기술 및 개발 현황 .....	3
1.3 연구목적 .....	4
제 2 장 제어밸브의 구조 .....	5
제 3 장 모델링 .....	8
제 4 장 분석 결과 및 고찰 .....	19
제 5 장 결론 .....	27

참고문헌 .....	28
[별첨1] Nomenclature .....	30
[별첨2] 주요 실험장치 구성품 .....	32
감사의 글 .....	34



A Study on the Response Characteristics  
according to the Fluid Path Size of the  
Load Pressure Feedback Chamber  
of a Control Valve for  
 $CO_2$  Refrigerant

Tae Seon Park

*Department of Mechanical System Engineering and  
Naval Architecture Marine System Engineering,  
The Graduate School of Industry,  
Pukyong National University*

**Abstract**

Pilot operated control valves for  $CO_2$  refrigerant are valves that can perform various functions according to the user's intention by replacing pilot units, which can be widely used for flow rate, pressure and temperature control of the refrigeration and air conditioning system. In addition, Pilot operated control valves

for  $CO_2$  refrigerant which requires high pressure and low critical temperature can be installed and used in all positions of the refrigeration system regardless of the high pressure or low pressure. In this paper, the response characteristics are modeled and analyzed on the behavior of the main piston of the pilot operated control valve. Although various factors influence the operation of the main piston, this paper analyzes the effect of the equilibrium pressure depending on the valve installation position and application, and inlet and outlet orifice size of the load pressure feedback chamber to determine feedback characteristics of the main piston.





# 제 I 장 서 론

## I.1 연구배경

기존 산업용 냉동, 공기 조화 장치 및 히터 펌프 등의 시스템에 사용되던 프레온 냉매는 지구환경에 악영향을 초래한다는 사실이 밝혀지면서 다시 자연냉매를 사용한 냉동 시스템에 대한 연구가 진행되고 있다.

자연냉매로는 HC, NH<sub>3</sub>, H<sub>2</sub>O, Air, CO<sub>2</sub> 등이 있으며, 이 중 CO<sub>2</sub>는 20세기 초까지 냉동, 공기조화장치의 냉매로서 광범위하게 사용되었지만 사용압력 자체가 높아 당시 기술로는 배관, 제어 밸브 등의 기계적인 안정성 확보가 어려웠다. 그러던 중, 1930년대 부식성 및 폭발의 위험이 없고 매우 안정적인 분자 결합 구조를 이루고 있으며, 사용압력도 이산화탄소에 비해 매우 낮은 가)염화불화탄소(CFC)계 프레온 냉매가 개발되면서 이산화탄소 냉매의 사용과 관련 장비의 개발이 정체되었다.

그러나 이후 CFC계 프레온가스에 의한 오존층파괴 문제가 대두되었고, 대체 냉매로 나)오존층파괴지수(ODP)가 낮은 다)수소염화불화탄소(HCFC)계와 ODP가 없는 라)수소불화탄소(HFC)계 프레온가스가 발명되었지만 HFC계 프레온가스 역시 ODP와는 별개로 마)지구온난화지수(GWP)가 높은 문제를 내재하고 있어 몬트리올/교토의정서를 통해 사용량을 규정하게 되었다.<sup>1)</sup>

2010년 이후에는 바)수소불화 올레핀(HFO)이라는 4세대 프레온 냉매가 개발

가) 염화불화탄소(Chloro Fluoro Carbon) - 대기권 안전, 오존층 파괴 강

나) 오존층파괴지수(Ozone Depletion Potential)

다) 수소염화불화탄소(Hydro Chloro Fluoro Carbon) - 대기권 불안전, 오존층 파괴 약

라) 수소불화탄소(Hydro Fluoro Carbon) - 대기권 약간 안전, 오존층 파괴 없음

마) 지구온난화지수(Global Warming Potential)

되어 ODP가 없고 GWP는 4로 매우 낮은 반면 불에 탈 수 있으며 가격이 비싼 단점을 가지고 있어 아직은 실효성에 문제를 내재하고 있다. 따라서 자연냉매들 중 ODP(0)가 없고 GWP(1)가 거의 없는  $CO_2$ (R744)냉매를 사용하여 압력, 방향, 온도, 유량(속도) 및 machine safety 등을 제어하는 밸브에 대한 연구가 유럽, 미국, 일본과 같은 선진국에서 다시 활발하게 진행되고 있다.<sup>2)</sup> 하지만 우리나라에서는 아직까지  $CO_2$ (R744) 냉매를 사용하는 냉동 제어 밸브에 대한 연구는 초기단계이며, 실용화를 위한 연구 성과가 절실하게 필요한 상황이다.

## I.2 관련 기술 및 개발 현황

$CO_2$  용 제어 밸브는  $CO_2$ 의 특성상 증발 잠열이 크고 전열 효율이 뛰어나기 때문에 시스템 내를 순환하는 냉매의 질량 유량을 작게 할 수 있어 응축기, 수액기 등과 같은 부수 설비의 크기를 줄일 수 있으며, 열 교환한 냉매 가스의 압축에 필요한 동력이 작아 기존 설비에 비해 전력 소모를 최소화 할 수 있는 장점을 가지고 있다. 반면, 설계 압력을 프레온용 제어 밸브에 비해 4배 정도 높은 압력으로 설계해야 하므로 고도의 기술력을 필요로 하는 단점도 가지고 있다. 최근 들어서는 증기 압축식이 아닌 코-플루이드(Co-Fluid) 방식의 신 냉동 사이클에서  $CO_2$ (R744)냉매가 흡수제 및 작동유체로 작용할 때 반응열을 이용한 냉동 사이클도 개발진행중으로 고압을 필요로 하지 않지만, 아직 여러 가지 해결해야 할 문제점들이 산재하고 있어 개발에 상당 시일이 소요될 것으로 예상된다.

따라서, 기존의 증기 압축식 냉동 시스템에 사용할 수 있는  $CO_2$  용 제어밸브의 개발이 필요하며, 여러 사양과 용도에 맞는 pilot unit을 적용한다면 산업용

---

바) HFO 수소불화 올레핀(Olefin) 비싸고 불에 탈 수 있는 단점

냉동, 공기 조화 장치 및 히터 펌프 등에서 다양한 기능을 발휘할 수 있는 제어 밸브로 사용될 수 있다. 아직까지 세계적으로  $CO_2$ 와 같은 천연 냉매를 이용한 제어밸브를 생산하는 곳이 많지 않고 한국에서도 생산하는 업체가 전무한 실정이다. 따라서 다양한 pilot unit를 적용한  $CO_2$ 용 제어 밸브의 개발을 통해 기존 설비 밸브의 수를 획기적으로 줄일 수 있을 뿐만 아니라 설치 효율과 비용면에서도 상당한 이점을 발휘할 수 있을 것으로 예상된다. 아울러 최근 들어 개발된 초임계  $CO_2$  발전 설비 기술과 2000년 초반부터 사용되고 있는  $CO_2$ (R744)냉매를 이용한 냉동 쇼 케이스, Cascade 냉동 시스템, 다단 냉동 시스템등과 같은 기존 설비에도  $CO_2$ 용 pilot unit 제어 밸브의 개발을 통해 시점 점유율을 향상할 수 있는 계기가 될 것이다.<sup>3)</sup>

### I.3 연구목적

본 논문에서는  $NH_3$ (R717)에 비해 폭발의 위험과 독성이 없는  $CO_2$ (R744)냉매를 이용한 제어 밸브의 응답 특성에 대해 다루기로 한다.

먼저  $CO_2$ (R744) 냉매의 장점으로는 프레온계 냉매에 비해 높은 냉동능력과 낮은 비등점을 가진다는 점이다. 또한 고압냉매이므로 체적 냉동 능력이 매우 커서 시스템을 소형화 할 수 있다.<sup>4)</sup> 하지만 높은 압력에서 사용되므로 system에 설치되는 장비들은 고압에 견딜 수 있는 구조로 제작되어야만 한다. 개발되고 있는  $CO_2$ (R744) 냉매용 파일럿 조작식 제어밸브는 파일럿 유닛을 교체하여 사용자의 의도에 맞게 다양한 기능을 수행할 수 있는 밸브이므로 냉동 공조 시스템의 유량, 압력, 온도 조절 등에 광범위하게 사용될 수 있다. 또한, 높은 압력과 낮은 임계온도를 필요로 하는  $CO_2$ (R744) 냉매를 사용하므로 고압측, 저

압축에 관계없이 냉동시스템의 모든 위치에 설치하여 사용할 수 있다.<sup>5)</sup>

$CO_2$ (R744) 냉매용 제어 밸브의 메인 피스톤의 거동에 대한 피스톤의 동작에 영향을 미치는 요소로는 피스톤 상하부 수압면적의 크기( $S_{px}$ ), 메인 피스톤을 지지하는 스프링의 스프링 상수( $K_x$ ), 피스톤에 작용하는 정지마찰력( $F_r$ ) 등 다양한 요소가 있지만, 본 논문에서는 밸브의 설치 위치와 사용 용도에 따라 다양하게 변하는 평형압력( $P_{xe}$ )과 메인 피스톤의 피드백 특성을 결정하는 가장 중요한 요소인 부하압력 피드백 챔버 입구 및 출구 유로의 크기( $S_{px}$ )가 메인 피스톤의 움직임에 미치는 영향을 모델링하고 그 결과를 분석하는데 초점을 맞추었다.



## 제 II 장 제어밸브의 구조

본 연구에서 대상으로 하는  $CO_2$  냉매용 제어밸브의 메인 피스톤 구조도를 Fig. 1에 나타낸다.

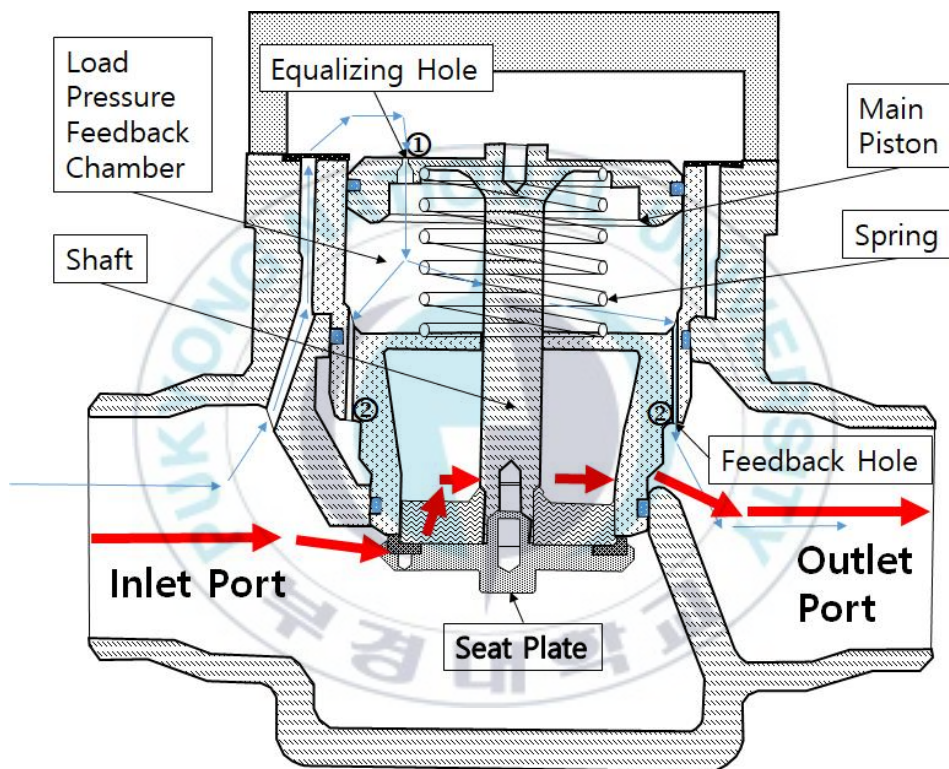


Fig. 1 Structure of a  $CO_2$  control servo valve

Fig. 1에 나타낸  $CO_2$  control 밸브는 밸브 입구(inlet port) 압력보다 출구(outlet port) 압력이 낮아지면서 입/출구간 압력차가 발생하면 메인 피스톤 상부 챔버에서 부하압력 피드백 챔버(load pressure feedback chamber)로 흘러가는 유량①과 부하 압력 피드백 챔버에서 밸브 출구로 흘러가는 유량②이 발생한다. 각각의 유량이 일치하는 시점에서 메인 피스톤(main piston) 상·하부 압력과 수압면적에 의한 구동

력 및 시트 플레이트(seat plate) 상·하부 압력과 수압면적에 의한 구동력, 그리고 스프링력의 균형에 의하여 시트 플레이트가 하부로 이동하여 정지하게 되고 밸브 입구 측에서 출구 측으로의 유로가 개방되어  $CO_2$  냉매가 흘러간다. 밸브 출구 압력이 증가하여 입구 압력과 차이가 감소하면 각각의 유량이 감소하여 부하압력 피드백 챔버 내부 압력이 증가하므로 시트 플레이트가 상부로 이동하고, 밸브 입구 측에서 출구 측으로의 유로가 폐쇄된다.

메인 밸브 가동부가 움직이는 조건은  $0 < P_2 - P_3 < 0.2 \text{ bar}$ ,  $P_2 - P_3 \geq 0.2 \text{ bar}$  이면 메인 피스톤이 아랫방향으로 완전히 이동하여 시트 플레이트가 완전히 개방 된다.

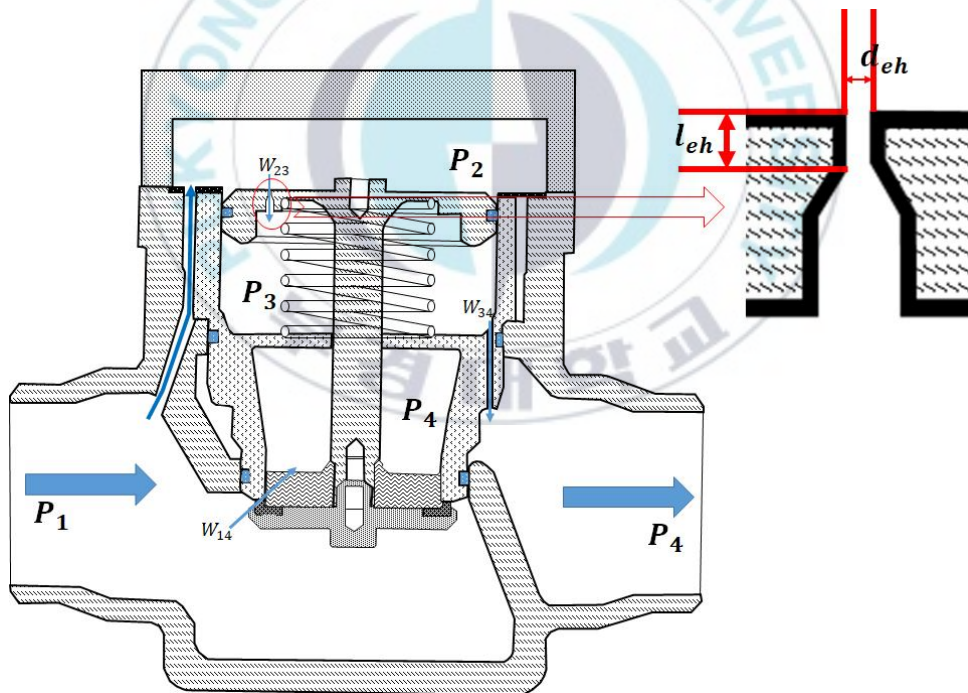


Fig. 2 Pressure and weight flow of a  $CO_2$  control servo valve

Fig 2에서  $P_1[Pa]$  은 밸브 입구압력,  $P_2[Pa]$  은 메인 피스톤 상부 압력,  $P_3[Pa]$

은 메인 피스톤 하부 압력,  $P_4[Pa]$  은 밸브 출구압력을 나타낸다.  $d_{ch}[mm]$ 는 균압 홀 직경,  $l_{ch}[mm]$ 는 균압 홀 길이를 나타낸다.

$W_{23}[kg/s]$  는 메인 피스톤 상부 챔버에서 부하압력 피드백 챔버로 연결된 좁은 유로(orifice)를 통과하는 질량유량을 나타내고,  $W_{34}[kg/s]$  는 부하압력 피드백 챔버에서 밸브 출구로 연결된 좁은 유로(orifice)를 통과하는 질량유량을 나타낸다.

그리고  $W_{12}[kg/s]$  는 Seat Plate가 아랫방향으로 작동할 경우 밸브 입구에서 밸브 출구로 통과하는 질량유량을 나타낸다.

이번 논문을 통해 하기의 사항에 대해 선형화하고 선형화된 수식을 활용하여 메인 피스톤의 특성 관계를 분석하도록 한다.

- 1) 균압 홀 직경( $d_{ch}$ ) 변화와 메인피스톤 정특성과의 관계 분석( $P_3$ 는 일정한 것으로 가정, 부하압력과  $P_4$ 의 피드백은 무시)
- 2) 균압 홀 직경( $d_{ch}$ ) 변화와 메인피스톤 동특성과의 관계 분석( $P_3$ 는 일정한 것으로 가정, 부하압력과  $P_4$ 의 피드백은 무시)
- 3) 균압 홀 직경( $d_{ch}$ ) 변화와 메인피스톤 정특성과의 관계 분석( $P_3$ 는 부하압력과  $P_4$ 의 피드백에 따라 변함 --> 피드백 오리피스 고려)
- 4) 균압 홀 직경( $d_{ch}$ ) 변화와 메인피스톤 동특성과의 관계 분석( $P_3$ 는 부하압력과  $P_4$ 의 피드백에 따라 변함 --> 피드백 오리피스 고려)

● 단, 균압 홀 길이( $l_{ch}$ )의 변화에 따른 메인피스톤의 특성 변화는 차후 진행토록 한다.

## 제 III 장 모델링

Fig. 1, 2에 나타낸 밸브를 모델링하기 위하여 Fig. 1을 Fig. 3와 같이 단순화 하였다. Fig. 3에서  $S_{p1}[m^2]$ ,  $S_{p2}[m^2]$ ,  $S_{p3}[m^2]$ ,  $S_{p4}[m^2]$ 은 피스톤 각부의 수압면적을 나타낸다.  $P_1[Pa]$ 은 밸브 입구압력,  $P_2[Pa]$ 은 메인 피스톤 상부 압력,  $P_3[Pa]$ 은 메인 피스톤 하부 압력,  $P_4[Pa]$ 은 밸브 출구압력을 나타낸다.  $K_x[N/m]$ 는 피스톤에 설치한 스프링 상수를 나타낸다.  $V_2[m^3]$ 은 피스톤 상부 챔버 체적,  $V_3[m^3]$ 은 피스톤 하부의 부하 압력 피드백 챔버 체적,  $V_4[m^3]$ 는 밸브 출구의 부하 체적을 나타낸다.  $S_{23}[m^2]$ 은  $V_2$ 와  $V_3$ 을 연결하는 좁은 유로(orifice) 단면적을 나타내고,  $S_{34}[m^2]$ 은  $V_3$ 와  $V_4$ 를 연결하는 좁은 유로(orifice) 단면적을 나타낸다.  $W_{23}[kg/s]$ 는  $S_{23}$ 을 통과하는 질량유량,  $W_{34}[kg/s]$ 는  $S_{34}$ 을 통과하는 질량유량을 각각 나타낸다.  $x[m]$ 는 피스톤의 변위,  $m_p[kg]$ 은 피스톤 질량을 나타낸다.

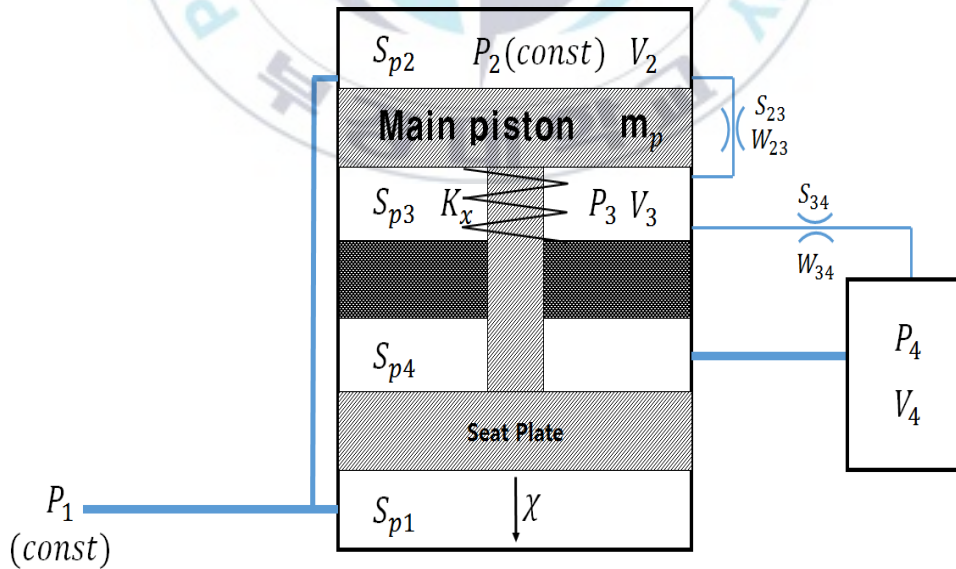


Fig. 3 Schematic diagram of a  $CO_2$  control servo valve



해석을 단순화하기 위하여,  $P_1, P_2$ 는 일정하게 유지되는 것으로 가정하고 Seat Plate가 아래방향으로 이동하면  $x[m]$ 는 +방향,  $V_3$ 는 감소한다. orifice를 통과하는 질량유량과 임계질량유량은 다음과 같이 나타낼 수 있다.<sup>6),7)</sup>

$$\left(\frac{P_{low}}{P_{hi}}\right) > \left(\frac{2}{k+1}\right)^{k/(k-1)}$$

$$W_{lh} = \frac{S_{lh}P_{hi}}{\sqrt{T_{hi}}} \left[ \frac{2k}{(k-1)R} \left[ \left(\frac{P_{low}}{P_{hi}}\right)^{2/k} - \left(\frac{P_{low}}{P_{hi}}\right)^{(k+1)/k} \right] \right]^{1/2} \quad (1)$$

$$\left(\frac{P_{low}}{P_{hi}}\right) \leq \left(\frac{2}{k+1}\right)^{k/(k-1)}$$

$$W_{cr} = \frac{S_{lh}P_{hi}}{\sqrt{T_{hi}}} \left[ \frac{k}{R} \left(\frac{2}{k+1}\right)^{(k+1)/(k-1)} \right]^{1/2} \quad (2)$$

식 (1), (2)에서  $S_{lh}$ 는 유로 단면적,  $W_{lh}$ 는  $S_{lh}$ 를 통과하는 질량유량,  $W_{cr}$ 은 임계 질량유량,  $P_{hi}$ 는 고압측 압력,  $P_{low}$ 는 저압측 압력,  $T_{hi}$ 는 고압측 온도,  $R$ 은 기체상수,  $k$ 는 비열비를 나타낸다.

Fig. 3에 나타낸 질량유량  $W_{23}, W_{34}$ 은 식 (1), (2)를 이용하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$W_{23} = W_{cr}N_{23} = \frac{S_{23}P_2F_fN_{23}}{\sqrt{T_2}},$$

$$W_{cr} = \frac{S_{23}P_2F_f}{\sqrt{T_2}}$$

$$F_f = \sqrt{\frac{k}{R} \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{(k+1)}{(k-1)}}},$$

$$N_{23} = \frac{W_{23}}{W_{cr}} = \sqrt{\frac{\left(\frac{P_3}{P_2}\right)^{\frac{2}{k}} - \left(\frac{P_3}{P_2}\right)^{\frac{k+1}{k}}}{\frac{k-1}{k} \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k+1}{k-1}}}} \quad (3)$$

$$W_{34} = W_{cr} N_{34} = \frac{S_{34} P_3 F_f N_{34}}{\sqrt{T_3}},$$

$$W_{cr} = \frac{S_{34} P_3 F_f}{\sqrt{T_3}}$$

$$N_{34} = \frac{W_{34}}{W_{cr}} = \sqrt{\frac{\left(\frac{P_4}{P_3}\right)^{\frac{2}{k}} - \left(\frac{P_4}{P_3}\right)^{\frac{k+1}{k}}}{\frac{k-1}{k} \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k+1}{k-1}}}} \quad (4)$$

식 (3), (4)에서  $T_2[K]$ ,  $T_3[K]$ 는 각각  $V_2$ ,  $V_3$ 내의  $CO_2$  온도를 나타내며,  $F_f[N]$ 는 피스톤에 작용하는 유체력을 나타낸다.  $R[J/(kg \cdot k)]$ 는  $CO_2$  기체상수,  $k$ 는 비열비를 나타낸다.  $W_{23}$ ,  $W_{34}$ 의 변화량은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\delta W_{23} = \frac{\sigma W_{23}}{\sigma P_2} \delta P_2 + \frac{\sigma W_{23}}{\sigma P_3} \delta P_3 \quad (5)$$

$$\frac{\sigma W_{23}}{\sigma P_2} = (1 + H_{23}) \frac{W_{23e}}{P_{2e}},$$

$$\frac{\sigma W_{23}}{\sigma P_3} = -H_{23} \frac{W_{23e}}{P_{3e}},$$

$$H_{23} = \frac{(k-1)/2k}{(P_{2e}/P_{3e})^{(k-1)/k} - 1} - \frac{1}{k},$$

$$F_f = \left[ \frac{k}{R} \left( \frac{2}{k+1} \right)^{(k+1)/(k-1)} \right]^{1/2}$$

$$W_{23e} = \frac{F_f P_{2e} S_{23} N_{23e}}{\sqrt{T_{2e}}}$$

$$\delta W_{34} = \frac{\sigma W_{34}}{\sigma P_3} \delta P_3 + \frac{\sigma W_{34}}{\sigma P_4} \delta P_4 \quad (6)$$

$$\frac{\sigma W_{34}}{\sigma P_3} = (1 + H_{34}) \frac{W_{34e}}{P_{3e}},$$

$$\frac{\sigma W_{34}}{\sigma P_4} = -H_{34} \frac{W_{34e}}{P_{4e}},$$

$$H_{34} = \frac{(k-1)/2k}{(P_{3e}/P_{4e})^{(k-1)/k} - 1} - \frac{1}{k},$$

$$W_{34e} = \frac{F_f P_{3e} S_{34} N_{34e}}{\sqrt{T_{3e}}}$$

식 (5), (6)에서 아래첨자  $e$ 는 평형상태,  $k$ 는  $CO_2$  비열비,  $F_f$ 은 피스톤에 작용하는 유체력을 나타내며  $H_{23}, H_{34}$ 는  $V_3$ 로 들어가고 나오는 질량 유량의 압력비에 대한 계인 형태의 전달함수이다.

실제기체의 상태방정식은 식 (7)과 같이 기술할 수 있다.<sup>8)</sup> 식 (7)에서  $m_3[kg]$ 은  $V_3$ 내부  $CO_2$  질량을 나타내고,  $a, b$ 는  $CO_2$ 의 van der waals 계수를 나타낸다.

$V_3$ 내부  $CO_2$  질량 변화가 아주 적어서  $\delta m_3/\delta V_3 \approx 0$ 로 가정하면 식 (7)을 식 (8)과 같이 기술할 수 있다.

$$P_3 = \frac{m_3 R T_3}{V_3 - m_3 b} - a \left( \frac{m_3}{V_3} \right)^2 \quad (7)$$

$$\delta P_3 \delta V_3 = \delta m_3 R \delta T_3 \quad (8)$$

$V_3$ 내부  $CO_2$ 의 상태변화를 열의 이동을 동반하는 가역과정인 폴리트로픽 과정으로 가정하고, 식 (8)을 미분하여 정리하면 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$\frac{m_{3e}}{nP_{3e}}\Delta\delta P_3 = \Delta\delta m_3 + \frac{S_{p3}m_{3e}}{V_{3e}}\Delta\delta x,$$

$$\delta V_3 = S_{p3}(X_0 - x), \quad \frac{\delta V_3}{\delta t} = -S_{p3}\Delta x$$

$$\Delta\delta m_3 = \delta W_{23} - \delta W_{34} \quad (9)$$

위의 식에서  $X_0$  는 스프링 초기 길이,  $n$ 은 폴리트로픽 지수,  $\Delta$ 는 라플라스 연산자를 나타낼 수 있다. 식 (5),(6)을 식 (9)에 대입하여 정리하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta m_3 = \frac{\sigma W_{23}}{\sigma P_2}\delta P_2 + \frac{\sigma W_{23}}{\sigma P_3}\delta P_3 - \left(\frac{\sigma W_{34}}{\sigma P_3}\delta P_3 + \frac{\sigma W_{34}}{\sigma P_4}\delta P_4\right)$$

$$\frac{m_{3e}}{nP_{3e}}\Delta\delta P_3 = \frac{\sigma W_{23}}{\sigma P_2}\delta P_2 + \frac{\sigma W_{23}}{\sigma P_3}\delta P_3 - \left(\frac{\sigma W_{34}}{\sigma P_3}\delta P_3 + \frac{\sigma W_{34}}{\sigma P_4}\delta P_4\right) + \frac{S_{p3}m_{3e}}{V_{3e}}\Delta x$$

$$\left(-\frac{\sigma W_{23}}{\sigma P_3} + \frac{\sigma W_{34}}{\sigma P_3} + \frac{m_3}{nP_3}\Delta\right)\delta P_3 = \frac{\sigma W_{23}}{\sigma P_2}\delta P_2 - \frac{\sigma W_{34}}{\sigma P_4}\delta P_4 + \frac{S_{p3}m_{3e}}{V_{3e}}\Delta x$$

$$\left(-\frac{\sigma W_{23}}{\sigma P_3} + \frac{\sigma W_{34}}{\sigma P_3} + \frac{m_3}{nRT_3}\Delta\right)\delta P_3 = \frac{\sigma W_{23}}{\sigma P_2}\delta P_2 - \frac{\sigma W_{34}}{\sigma P_4}\delta P_4 + \frac{S_{p3}P_{3e}}{RT_{3e}}\Delta x$$

$P_2$ 가 일정하게 유지되므로  $\delta P_2 = 0$

$$\left(-\frac{\sigma W_{23}}{\sigma P_3} + \frac{\sigma W_{34}}{\sigma P_3} + \frac{m_3}{nRT_3}\Delta\right)\delta P_3 = -\frac{\sigma W_{34}}{\sigma P_4}\delta P_4 + \frac{S_{p3}P_{3e}}{RT_{3e}}\Delta x$$

$$\tau_3 = \frac{V_{3e}}{nRT_{3e}\left(-\frac{\sigma W_{23}}{\sigma P_3} + \frac{\sigma W_{34}}{\sigma P_3}\right)} = \frac{V_{3e}}{nRT_{3e}\left[H_{23e}\frac{W_{23e}}{P_{3e}} + (1 + H_{34e})\frac{W_{34e}}{P_{3e}}\right]}$$

$$= \frac{V_{3e}}{nRT_{3e}\frac{W_{34e}}{P_{3e}}(1 + H_{23e} + H_{34e})}$$

위와 같이 시정수  $\tau_3$ 로 나타낼 수 있고, 정리하면

$$\left(-\frac{\sigma W_{23}}{\sigma P_3} + \frac{\sigma W_{34}}{\sigma P_3}\right)(1 + \tau_3 \Delta)\delta P_3 = -\frac{\sigma W_{34}}{\sigma P_4}\delta P_4 + \frac{S_{p3}P_{3e}}{RT_{3e}}\Delta x$$

$$(1 + \tau_3 \Delta)\delta P_3 = \frac{-\frac{\sigma W_{34}}{\sigma P_4}\delta P_4}{\left(-\frac{\sigma W_{23}}{\sigma P_3} + \frac{\sigma W_{34}}{\sigma P_3}\right)} + \frac{nS_{p3}P_{3e}}{V_{3e}}\tau_3 \Delta x$$

$$(1 + \tau_3 \Delta)\delta P_3 = -G_3 \delta P_4 + \frac{nS_{p3}P_{3e}}{V_{3e}}\tau_3 \Delta \delta x, \quad (10)$$

$$\frac{\sigma W_{34}}{\sigma P_4} = -H_{34} \frac{W_{34e}}{P_{4e}}$$

$$-\frac{\sigma W_{23}}{\sigma P_3} + \frac{\sigma W_{34}}{\sigma P_3} = H_{23} \frac{W_{23e}}{P_{3e}} + (1 + H_{34}) \frac{W_{34e}}{P_{3e}}$$

$$G_3 = \frac{\frac{\sigma W_{34}}{\sigma P_4}}{\left(-\frac{\sigma W_{23}}{\sigma P_3} + \frac{\sigma W_{34}}{\sigma P_3}\right)} = \frac{-H_{34e} \frac{P_{3e}}{P_{4e}}}{1 + H_{23e} + H_{34e}} \quad (10) - 1$$

식 (10)-1에서  $G_3$ 는 부하압력의 변화  $\delta P_4$ 와 부하압력 피드백 챔버 압력의 변화  $\delta P_3$ 와의 관계를 나타내는 계인 형태의 전달함수이다.

이제 피스톤의 운동에 대해 분석해 보자. 피스톤의 운동방정식은 다음과 같이 기술할 수 있다.

$$S_{p2}\delta P_2 - S_{p1}\delta P_1 + S_{p4}\delta P_4 + \rho_4 QV \sin\theta + m_p g - \delta F_r - S_{p3}P_3 - K_x \delta x - B_x \Delta \delta x = m_p \Delta^2 \delta x$$

$\delta P_1, \delta P_2, m_p g = 0$  이라 가정하면,

$$S_{p4}\delta P_4 + \rho_4 QV \sin\theta - \delta F_r - S_{p3}\delta P_3 - K_x \delta x - B_x \Delta \delta x = m_p \Delta^2 \delta x \quad (11.1)$$

$$S_{p4}\delta P_4 + \delta F_f = S_{p3}\delta P_3 + K_x\delta x + B_x\Delta\delta x + m_p\Delta^2\delta x + \delta F_r, \quad (11.2)$$

$$\rho_4 QV \sin\theta = \delta F_f$$

식 (11.2)에서  $F_f[N]$ 은 피스톤에 작용하는 유체력,  $K_x[N/m]$ 은 피스톤에 설치된 스프링 상수,  $B_x[N/(m/s)]$ 와  $F_r[N]$ 은 각각 피스톤에 작용하는 점성 마찰계수와 정지마찰력을 나타낸다.

식 (10)을 (11.1)에 대입하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\delta P_3 = \frac{(-G_3\delta P_4 + \frac{nS_{p3}P_{3e}}{V_{3e}}\tau_3\Delta x)}{(1 + \tau_3\Delta)}$$

식 (11.1)에서  $\delta F_f = 0$ 으로 가정하면 하기와 같이 나타낼 수 있다.

$$S_{p3}\delta P_3 = S_{p4}\delta P_4 + \rho_4 QV \sin\theta - (m_p\Delta^2\delta x + K_x\delta x + B_x\Delta\delta x) - \delta F_r$$

$$S_{p3} \left[ \frac{(-G_3\delta P_4 + \frac{nS_{p3}P_{3e}}{V_{3e}}\tau_3\Delta x)}{(1 + \tau_3\Delta)} \right] = S_{p4}\delta P_4 + \rho_4 QV \sin\theta - \delta x(m_p\Delta^2 + K_x + B_x\Delta) - \delta F_r$$

$$S_{p3}(-G_3\delta P_4 + \frac{nS_{p3}P_{3e}}{V_{3e}}\tau_3\Delta x) = (1 + \tau_3\Delta)[S_{p4}\delta P_4 + \rho_4 QV \sin\theta - \delta x(m_p\Delta^2 + K_x + B_x\Delta) - \delta F_r]$$

$$\delta x(m_p\Delta^2 + K_x + B_x\Delta)(1 + \tau_3\Delta) + \frac{nS_{p3}^2 P_{3e}}{V_{3e}}\tau_3\Delta x = G_3 S_{p3}\delta P_4 + (1 + \tau_3\Delta)[S_{p4}\delta P_4 + \rho_4 QV \sin\theta - \delta F_r]$$

$$\delta x[m_p\tau_3\Delta^3 + (m_p + B_x\tau_3)\Delta^2 + (K_x\tau_3 + B_x + \frac{nS_{p3}^2 P_{3e}}{V_{3e}}\tau_3)\Delta + K_x] =$$

$$(\tau_3 S_{p4}\Delta + G_3 S_{p3} + S_{p4})\delta P_4 + (1 + \tau_3\Delta)(\rho_4 QV \sin\theta - \delta F_r)$$

$$\begin{aligned}\delta x &= \frac{(\tau_3 S_{p4} \Delta + G_3 S_{p3} + S_{p4}) \delta P_4 + (1 + \tau_3 \Delta)(\rho_4 Q V \sin \theta - \delta F_r)}{m_p \tau_3 \Delta^3 + (m_p + B_x \tau_3) \Delta^2 + (K_x \tau_3 + B_x + \frac{n S_{p3}^2 P_{3e}}{V_{3e}} \tau_3) \Delta + K_x} \\ &= \frac{(\tau_3 S_{p4} \Delta + G_3 S_{p3} + S_{p4}) \delta P_4 + (1 + \tau_3 \Delta)(\rho_4 Q V \sin \theta - \delta F_r)}{m_p \tau_3 \Delta^3 + (m_p + B_x \tau_3) \Delta^2 + (K_x \tau_3 + B_x + K_p \tau_3) \Delta + K_x}\end{aligned}$$

여기서,  $\rho_4 Q V \sin \theta$  는  $\delta F_f$  이므로,

$$\begin{aligned}\delta x &= \frac{G_3 S_{p3} \delta P_4 + (1 + \tau_3 \Delta)(S_{p4} \delta P_4 + \delta F_f - \delta F_r)}{m_p \tau_3 \Delta^3 + (m_p + B_x \tau_3) \Delta^2 + (K_x \tau_3 + B_x + K_p \tau_3) \Delta + K_x}, \\ K_p &= \frac{n S_{p3}^2 P_{3e}}{V_{3e}}\end{aligned}\tag{12}$$

식 (12)에서  $K_p [N/m]$  은 유체스프링 상수를 나타낸다.

피스톤에 작용하는 점성 마찰계수  $B_x$  를 0으로 가정하고,  $K_x/K_p \ll 1$  이면 식 (12) 를 다음과 같이 기술할 수 있다.

$$\begin{aligned}\frac{\delta x}{\delta P_4} &= \frac{G_3 S_{p3}}{m_p \tau_3 \Delta^3 + (m_p + B_x \tau_3) \Delta^2 + (K_x \tau_3 + B_x + K_p \tau_3) \Delta + K_x} \\ &= \frac{G_3 S_{p3}}{[m_p \tau_3 \Delta^3 + m_p \Delta^2 + (K_x + K_p) \tau_3 \Delta + K_x]} = \frac{G_3 S_{p3}}{m_p \tau_3 (\Delta^3 + \frac{1}{\tau_3} \Delta^2 + \frac{K_x + K_p}{m_p} \Delta + \frac{K_x}{m_p \tau_3})} \\ &= \frac{\frac{G_3 S_{p3}}{m_p \tau_3}}{(\Delta^3 + \frac{1}{\tau_3} \Delta^2 + \frac{K_x + K_p}{m_p} \Delta + \frac{K_s}{m_p \tau_3})} = \frac{k_n A w_n^2}{(\Delta + A)(\Delta^2 + 2\zeta w_n \Delta + w_n^2)} \\ &= \frac{k_n A w_n^2}{\Delta^3 + (A + 2\zeta w_n) \Delta^2 + (2\zeta w_n A + w_n^2) \Delta + A w_n^2}\end{aligned}$$

여기서,  $k_n$ 은 루프계인,  $A$ 는 실근값,  $w_n$ 은 고유진동수,  $\zeta$ 는 감쇠비를 나타낸다.

피스톤의 이동 변위  $\delta x$ , 고유진동수  $w_n$ 와 감쇠비  $\zeta$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\delta x \approx \frac{(S_{p4}\tau_3\Delta + G_3S_{p3} + S_{p4})\delta P_4 + (1 + \tau_3\Delta)(\delta F_f - \delta F_r)}{K_p\tau_3(\Delta + \frac{K_x}{K_p\tau_3})(\frac{1}{\omega_n^2}\Delta^2 + \frac{2\zeta}{\omega_n}\Delta + 1)}$$

$$\omega_n = \sqrt{\frac{K_p}{m_p}}, \zeta = \frac{1}{2\tau_3} \sqrt{\frac{m_p}{K_p}} \quad (13)$$

이번에는 Seat Plate부의 작동을 보다 자세히 모델링하기 위해 Fig. 4와 같이 단 순화 시켜 보기로 하자. Fig. 4에서  $L[m]$ 은  $P_1$ 에서  $P_4$ 로 냉매가 흘러갈 때의 Seat Plate 유로 직경,  $X[m]$ 는 Seat Plate stroke,  $d_s[m]$ 는 seat 직경,  $Q[m^3/s]$ 는 Seat Plate 통과유량,  $V[m/s]$ 는 Seat Plate 통과유속,  $\rho[kg/m^3]$ 는 Seat Plate 통과 유체 밀도를 나타낸다.

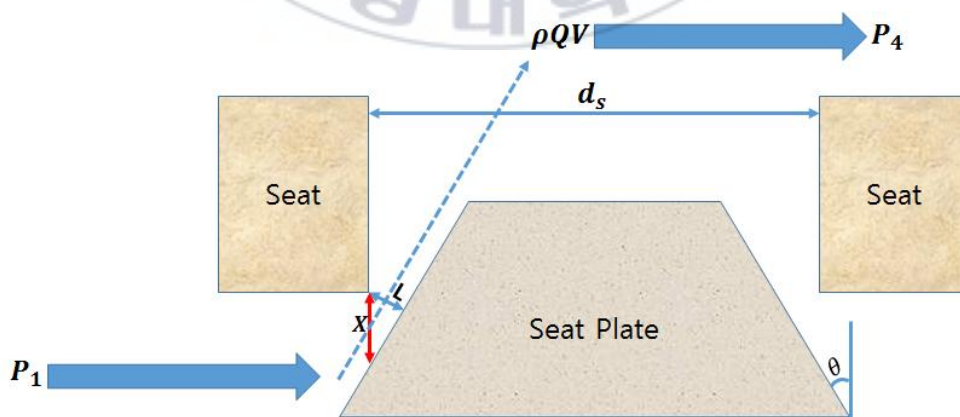


Fig. 4 Schematic diagram for calculation of a Seat Plate cross section area



먼저,  $P_1$  과  $P_2$  가 일정하고 정상상태일 경우  $W_{23}$  의 균압홀 변화에 따른 피스톤 정 특성 변화에 의한 운동은 식(11.1), (11.2)에 언급한 것처럼 하기와 같이 나타낼 수 있다.

$$P_2 S_{p2} - P_1 S_{p1} + P_4 S_{p4} + \rho_4 Q V \sin \theta + m_p g - F_r - P_3 S_{p3} - K_x X - B_x \Delta X = m_p \Delta^2 X$$

정상상태에서는  $\Delta x = \Delta^2 x = 0$  이므로

$$P_3 S_{p3} + K_x X = P_2 S_{p2} - P_1 S_{p1} + P_4 S_{p4} + \rho_4 Q V \sin \theta + m_p g - F_r$$

따라서 seat plate stroke( $X$ )는 식 (14)로 나타낼 수 있다.

$$X = \frac{P_2 S_{p2} - P_3 S_{p3} - (P_1 S_{p1} - P_4 S_{p4}) + \rho_4 Q V \sin \theta - F_r}{K_x}$$

피스톤에 작용하는 정지마찰력을 무시한다면

$$X = \frac{-P_3 S_{p3} + P_4 S_{p4} + \rho_4 Q V \sin \theta}{K_x} \quad (14)$$

$P_1$  에서  $P_4$  로 통과하는 부하유량은 식 (15)으로 나타낼 수 있으며,

$$\rho_4 Q V \sin \theta = \rho_4 C_d S_x V^2 \sin \theta \quad (15)$$

$$Q_{14} = C_d S_{14} V_{14}, \quad \text{원뿔형 포핏 } C_d \approx 0.8$$

$CO_2$  냉매가 액체상태일 경우  $P_1$  에서  $P_4$  로 통과하는  $V_{14}$  는 식 (16)과 같으며,

$$V_{14} = \sqrt{\frac{2(P_1 - P_4)}{\rho}} [m/s], \quad (16)$$

식 (15)에 대입하면 하기의 식으로 표현된다.

$$\rho_4 Q V \sin\theta = \rho_4 C_d S_x \frac{2(P_1 - P_4)}{\rho} \sin\theta = 1.6 S_x (P_1 - P_4) \sin\theta$$

$CO_2$  냉매가 기체상태일 경우에는  $P_1$ 에서  $P_4$ 로 통과하는  $V_{14}$ 는 식 (17)로 나타낼 수 있으며, 여기서  $h$ 는 단위질량당 엔탈피[Nm/kg] 를 나타낸다.

$$V_{14} = 91.48 \sqrt{h_1 - h_4}, \quad (17)$$

다시 식 (15)에 대입하면 아래와 같이 기체상태일 경우의 부하유량관련식을 도출할 수 있다.

$$\rho_4 Q V \sin\theta = \rho_4 C_d S_x 91.48^2 (h_1 - h_4) \cos\theta = 6694.87 \rho_4 S_x (h_1 - h_4) \sin\theta$$

$P_1$ 에서  $P_4$ 로 통과하는 유로 단면적은 식 (18)와 같이 나타낼 수 있다.

$$S_{14} = L C_{ir} = x \sin\theta \cdot \pi (d_s - x \sin\theta \cos\theta) [m^2] \quad (18)$$

$$L = x \sin\theta [m]$$

$$C_{ir} = 2\pi \left( \frac{d_s}{2} - \frac{x \sin\theta \cos\theta}{2} \right) = \pi (d_s - x \sin\theta \cos\theta) [m]$$

$$\frac{\sigma S_x}{\sigma x} = \sin\theta \cdot \pi d_s \left( 1 - \frac{x}{d_s} \sin 2\theta \right) [m^2/m]$$

## 제 IV 장 분석 결과 및 고찰

본 연구에서 대상으로 하는  $CO_2$  밸브의 물리파라미터는 WC300 R&D에 의해 실험 확인된 내용을 적용하였으며, 정확한 수치는 개발연구에 중요한 자료이므로 삭제하였다.

다음 Fig. 5은  $P_1, P_2$ 를 50bar로 유지하면서  $P_{4e}$ 를 변화시켰을 때의  $P_{3e}$ 의 변화를 나타낸다. Fig. 3에서  $d_{23}$ 은  $S_{23}$ 의 직경을 나타낸다.

이하에서  $P_{3e}$ 과  $P_{4e}$ 은 Fig. 5에 나타낸 값을 사용한다.

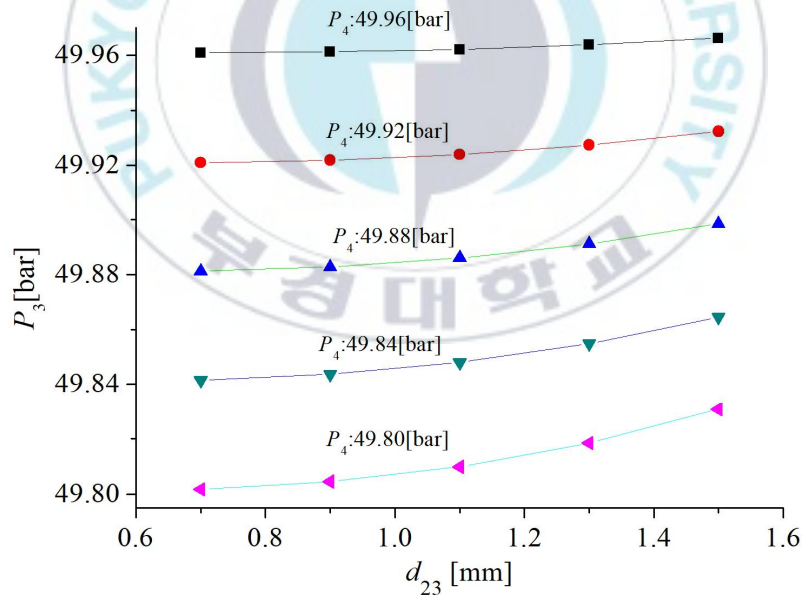


Fig. 5 Change of  $P_3$  according to change of  $P_4$

균압홀 오리피스 사이즈가 증가하면  $V_3$  내부 압력  $P_3$ 가 증가하고  $P_3$ 에 대한 시정

수  $\tau_3$ 가 증가한다.

균압홀 오리피스 size가 변할 때  $P_4$ 가 감소할수록 균압홀 오리피스 사이즈가 증가에 따른  $\frac{P_3}{P_4}$  증가폭이 커지고  $\frac{P_2}{P_3}$  감소폭이 작아진다.

Fig. 6와 Fig. 7은  $P_{4e}$ 를 일정하게 설정하고  $d_{23}$ 을 변화시켰을 때의  $\delta x/\delta P_4$ 에 대한 주파수 응답과 1차계의 대역폭  $K_x/(K_p\tau_3)$ , 고유진동수  $\omega_n$ 을 각각 나타낸다.

Fig. 6와 Fig. 7로부터  $d_{23}$ 가 증가하면 식 (13)에 나타난 감쇠비  $\zeta(= \frac{1}{2\tau_3} \sqrt{\frac{m_p}{K_p}})$ 가 작아지므로 피스톤 응답 속도의 진동이 증가하지만  $K_x/(K_p\tau_3) \ll \omega_n$  이므로  $d_{23}$  증가에 의한 감쇠비 변화가 피스톤 변위응답에는 영향을 미치지 못함을 알 수 있다.

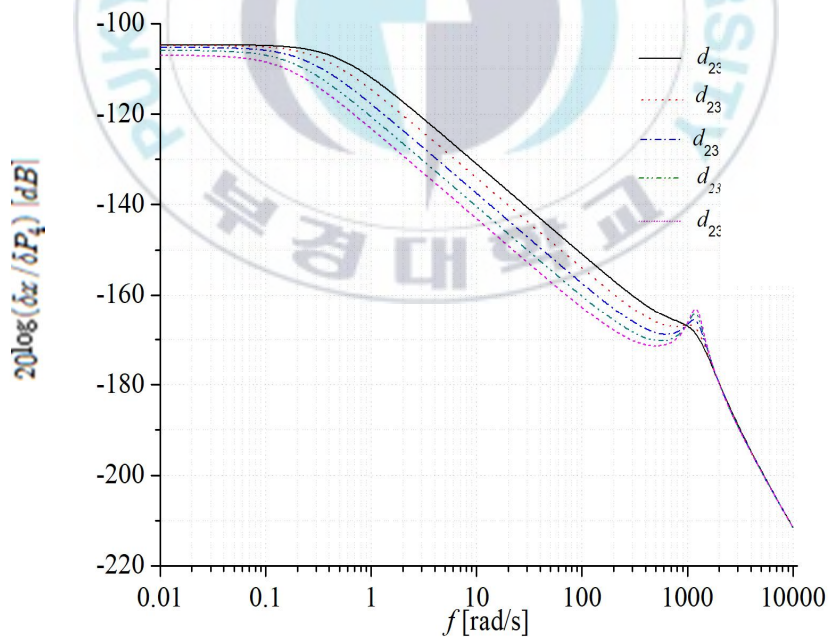


Fig. 6 Frequency response of piston displacement due to the variation of  $d_{23}(S_{23})$

또한, Fig. 6, Fig. 7로부터  $d_{23}$ 가 증가하면 피스톤 이동 변위  $\delta x$ 가 감소함을 알 수 있다.

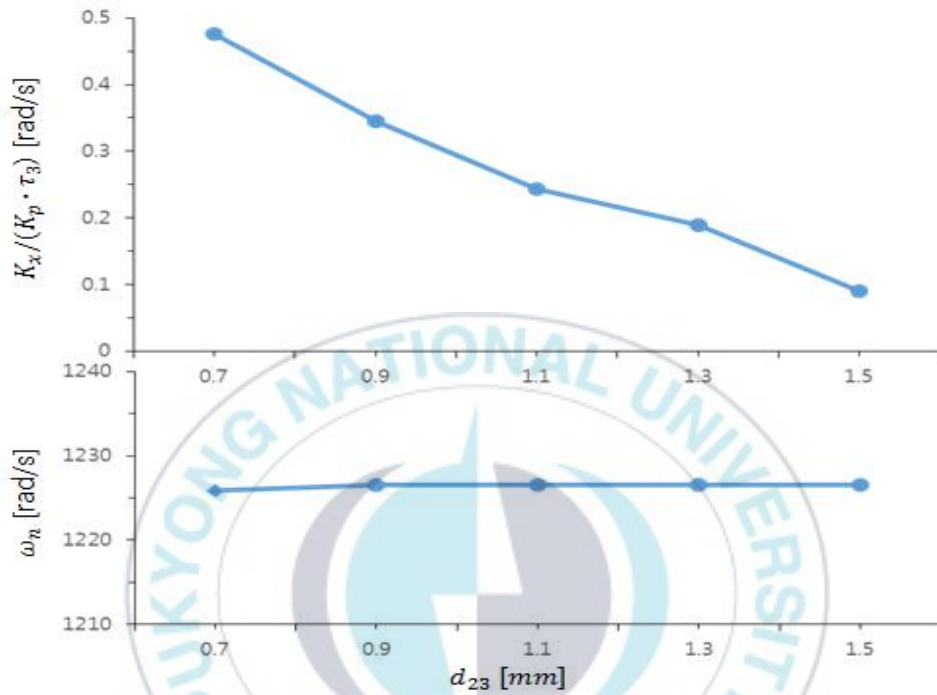


Fig. 7 Bandwidth and Natural frequency of piston displacement due to the variation of  $d_{23}(S_{23})$

식 (13)에서  $\delta F_f$ 와  $\delta F_r$ 을 0으로 가정하고  $\delta x/\delta P_4$ 의 최종치를 구하면  $P_4$ 의 변화에 따른  $\delta x$ 의 최종값을 식 (19)로 나타낼 수 있다.

$$\lim_{\Delta \rightarrow 0} \Delta \left( \frac{\delta x}{\delta P_4} \right) = \frac{G_3 S_{p3} + S_{p4}}{K_x} \quad (19)$$

여기서  $G_3$ ,  $K_{23e}$ ,  $K_{34e}$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$G_3 = \frac{-K_{34e}}{1 + K_{23e} + K_{34e}} \frac{\rho_e}{P_{4e}}$$

$$K_{23e} = \frac{(k-1)/2k}{(P_{2e}/P_{3e})^{(k-1)/k} - 1} - \frac{1}{k}$$

$$K_{34e} = \frac{(k-1)/2k}{(P_{3e}/P_{4e})^{(k-1)/k} - 1} - \frac{1}{k}$$

식 (10)과 (14)로부터  $d_{23}$ 가 증가하면  $G_3$ 가 감소하고, 그 결과  $\delta x$ 가 감소함을 알 수 있다.

$\delta x$  감소에 가장 큰 영향을 미치는 것은 균압홀 오리피스 사이즈가 증가에 따른  $G_3$ 의 감소임을 알 수 있고 균압홀 오리피스 사이즈가 증가하면  $K_{23e}$ 가 증가하고  $K_{34e}$ 가 감소한다는 사실도 알 수 있다.

Fig. 8은  $\delta P_4$ 를 입력으로 한  $\delta x$ 의 스텝응답을 나타낸다.

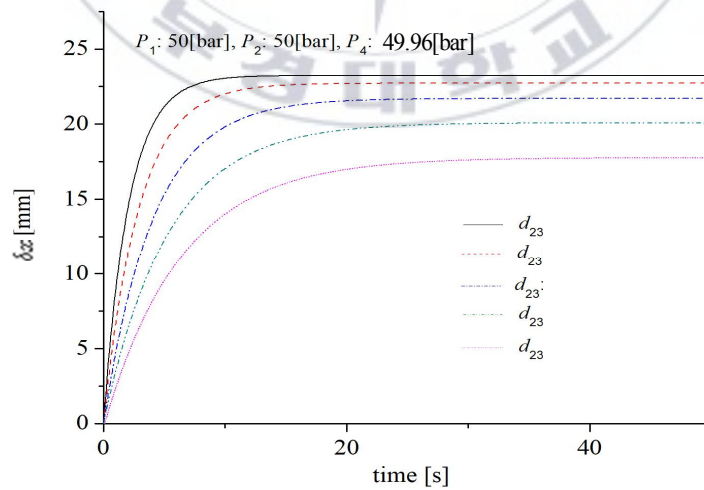


Fig. 8 Step response of piston displacement due to the variation of  $d_{23}$

Fig. 9는  $\delta P_3$ 와  $\delta P_4$ 와의 관계를 나타내는 계인  $G_3$ ,  $\delta x/\delta P_4$ 의 최종치를 각각 나타낸다. Fig. 8, Fig. 9로부터 주파수응답에서 확인한 바와 같이  $K_x/(K_p\tau_3) \ll \omega_n$  이므로  $[K_x/(K_p\tau_3)]^{-1}$ 의 크기가 피스톤의 응답속도를 결정함을 알 수 있다. 여기서  $[K_x/(K_p\tau_3)]^{-1}$ 는 피스톤이 최종값의 66.3%에 도달하는 시간(시정수)을 나타내며,  $[K_x/(K_p\tau_3)]^{-1}$ 는  $d_{23}$ 가 증가하면 증가하므로  $d_{23}$ 가 증가하면 이것은 결국  $\delta x$ 의 응답속도가 느려진다는 것을 의미한다. 또한 Fig. 6, Fig. 7에서 확인한 바와 같이  $d_{23}$ 가 증가하면  $\delta P_4$ 에 의한  $\delta x$ 가 감소함을 알 수 있다.

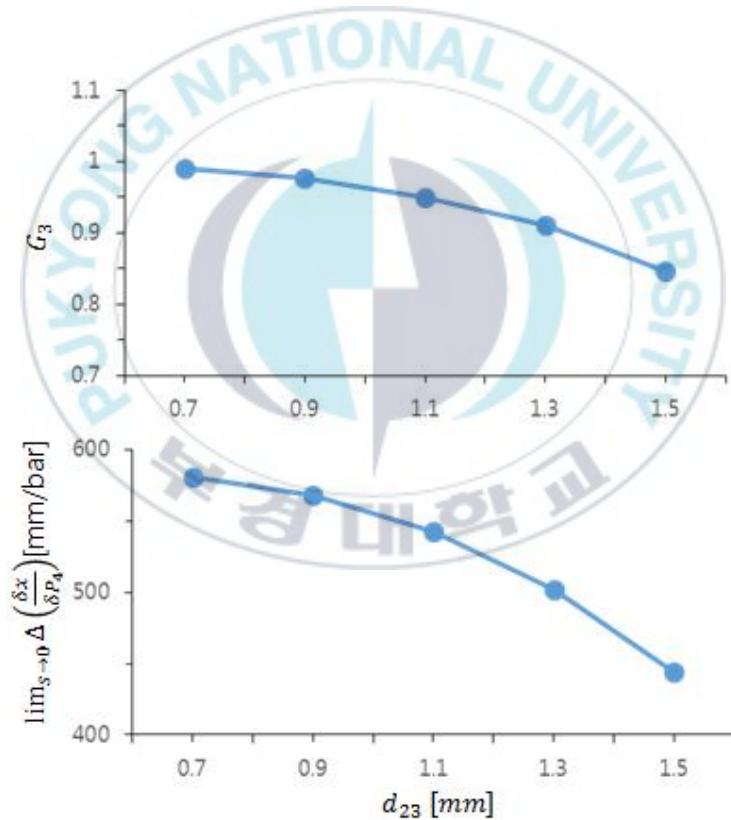


Fig. 9 Step response of piston displacement due to the variation of  $d_{23}$

Fig. 10~12은  $d_{23}$ 를 일정하게 유지하면서  $P_{2e}$ 를 변화시켰을 때의 피스톤 응답을

나타낸다. 실험으로 얻어진 그래프의 수치는 WC300 R&D를 참조하였다.

Fig. 10~12으로부터  $P_{2e}$ 가 증가하면 피스톤 응답속도가 느려짐을 알 수 있다. 이 결과는  $P_{2e}$ 가 증가하면  $[K_x/(K_p\tau_3)]^{-1}$ 가 커지는 것이 원인임을 알 수 있다. 또한, Fig. 8~10으로부터  $d_{23}$ 가 일정하면  $P_{2e}$ 가 변하여도  $\delta x$ 의 최종치가 일정하게 유지됨을 알 수 있다. 이것은  $d_{23}$ 가 일정하면  $P_{2e}$ 가 변하여도  $P_{2e}/P_{3e}$  및  $P_{3e}/P_{4e}$ 가 일정하게 유지되므로 식 (14)에 나타난 피스톤 최종치가 일정하게 유지되기 때문이다.

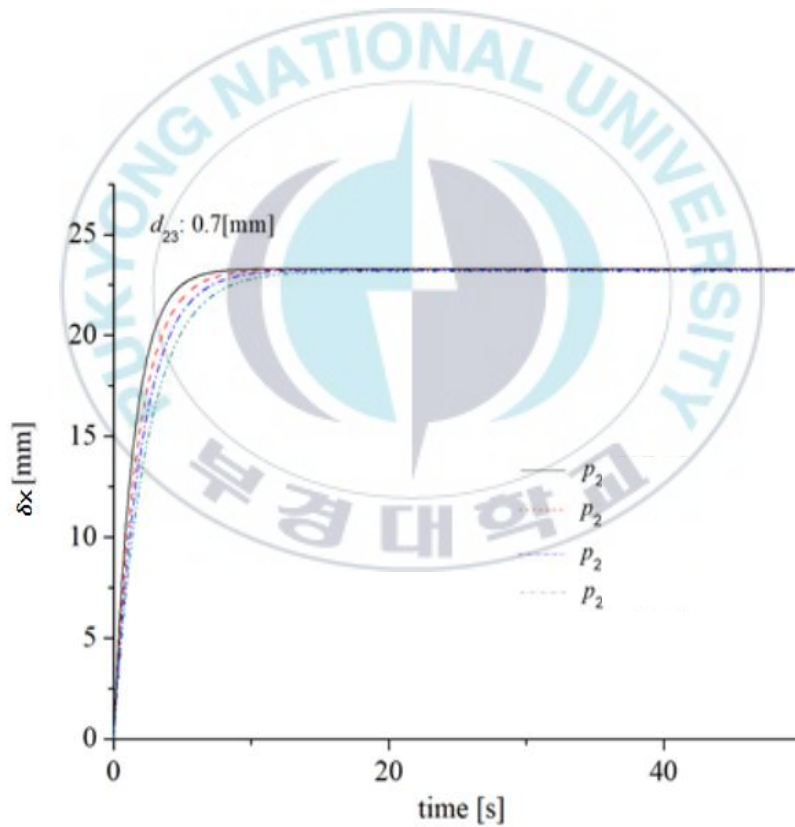


Fig. 10 Step response of piston displacement due to the variation of  $P_{2e}$



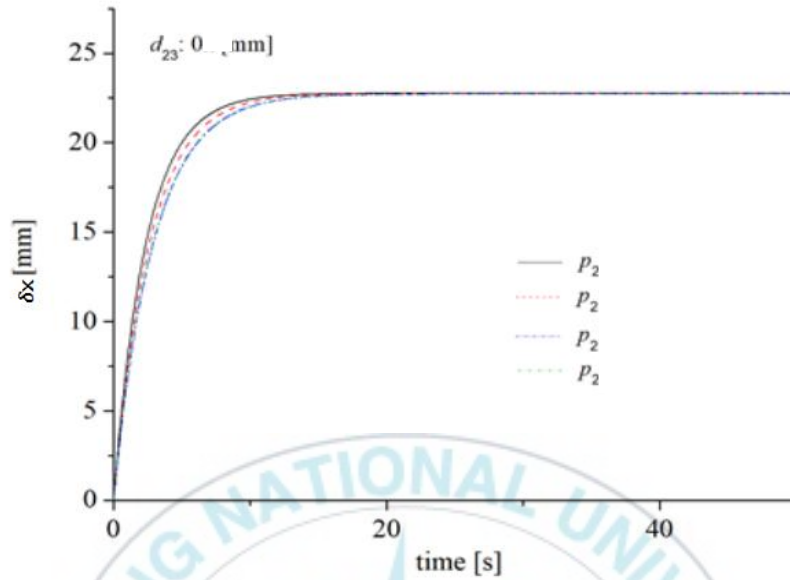


Fig. 11 Step response of piston displacement due to the variation of  $P_{2e}$

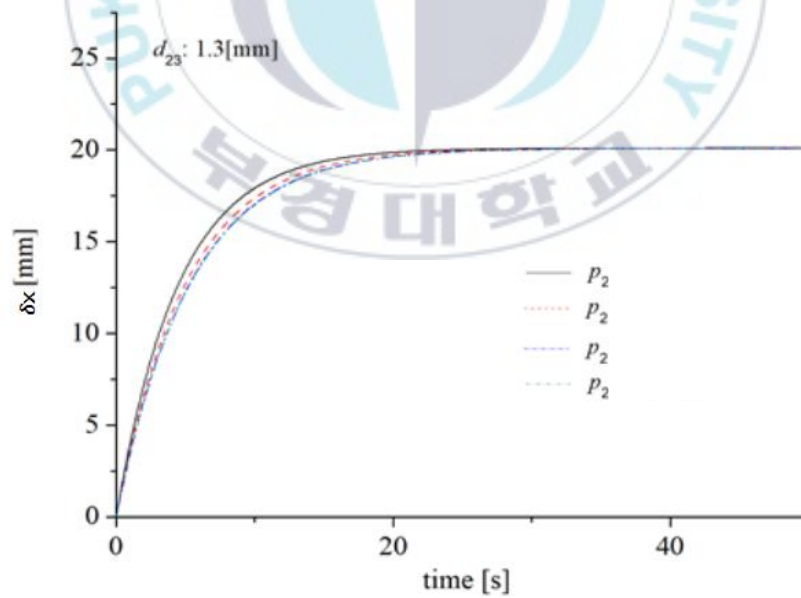


Fig. 12 Step response of piston displacement due to the variation of  $P_{2e}$

## 제 V 장 결 론

본 논문에서는  $CO_2$  냉매용 제어밸브의 메인 피스톤 거동에 대한 모델링을 수행하고 부하압력 피드백 챔버 입구 및 출구 유로의 크기와 밸브의 평형 압력 변화가 메인 피스톤의 응답에 미치는 영향을 분석하였다. 본 논문에서는 얻어진 성과는 다음과 같다.

- 1) 부하압력 피드백 챔버 입구 유로 크기가 변하면 메인 피스톤의 감쇠비가 변하지만 1차계의 대역폭  $K_x/(K_p\tau_3)$  이 메인 피스톤의 고유진동수  $\omega_n$ 보다 훨씬 작으므로 출구 유로의 크기 변화에 의한 감쇠비 변화가 메인 피스톤 변위  $\delta x$ 의 응답에는 영향을 미치지 못한다.
- 2) 부하압력 피드백 챔버 입구 유로가 커지면 부하압력의 변화가 부하압력 피드백 챔버 압력의 변화에 미치는 계인의 크기가 감소하므로 메인 피스톤 이동 변위가 감소한다.
- 3) 1차계의 대역폭이 메인 피스톤 구동계의 고유 진동수와 비교하여 훨씬 작으므로 1차계의 시정수인  $[K_x/(K_p\tau_3)]^{-1}$  의 크기가 메인 피스톤의 응답속도를 결정한다. 그러므로, 부하압력 피드백 챔버 입구 유로 크기가 증가하면  $[K_x/(K_p\tau_3)]^{-1}$  가 커지고, 그 결과 메인 피스톤 변위가 최종치에 도달하는 시간이 길어진다.
- 4) 부하압력 피드백 챔버 입구 유로와 출구 유로 크기가 일정하면 메인 피스톤 상부 압력  $P_{2e}$ 가 변하여도 부하압력 피드백 챔버 압력과 메인 피스톤 상부 압력의 비  $P_{2e}/P_{3e}$  및 부하압력과 부하압력 피드백 챔버 압력의 비  $P_{3e}/P_{4e}$ 가 일정하게 유지되므로 메인 피스톤 변위가 일정하게 유지된다.

## 후 기

이 논문은 월드클래스300프로젝트 기술개발지원사업(WC300 R&D)(과제번호 : S2522408)의 연구지원에 의해 연구되었음.

## 참 고 문 헌

- 1) The magazine of the Society of Air-conditioning and Refrigerating Engineers of Korea 관련메뉴 v.44 no.7, 2015년, pp.34 - 45
- 2) J.Petterson, "An efficient new auto-mobile air-conditioning system based on  $CO_2$  vapor compression", Vol. 100, No. 2, pp657-665, 1994
- 3) News & Information for chemical engineers. vol.33. no.6, 2015년, pp.688-693
- 4) N. Stulgies, J. Kohler, W. Tegethoff, s. Forsterling, a Muller and H. Kappler, "Developing Flow correlations of for different valve geometries Using reference media for R-744", HAVC & Re-seach, Vol. 14, No. 3 , pp 417-433. 2008
- 5) M.S. Kim, "Heat pump and refrigeration systems using natural refrigerants". Magazine of the SAREK, Vol. 26, no.3, pp171-182, 1997.
- 6) M. A. Saad, "Compressible fluid flow", Prentice hall, 1993.
- 7) S.H. Han and J.S. Jang, "Design of a Robust Controller for a Watertight Damper Driving System", Journal of Drive and Control, Vol. 14, No.2, pp. 45-51, 2017.

- 8) J.D. van der Waals, "On the continuity of the gaseous and liquid states", Dover Publications, Inc., 2004.
- 9) SW Cho, JT Woo "Development of Air-Conditioning System using Natural Refrigerants" The magazine of the Society of Air-conditioning and Refrigerating Engineers of Korea Vol.36 no. 7, 2007.7, pp32-38
- 10) JY Do, MG Kang and SB Lee, "Analysis of flow characteristics in the spool valve notch of an excavator depending on the openings by using commercial CFD code" KSFC conference S2-1, 2017.11. pp93-98.



---

## Nomenclature

---

$S_{px}$	피스톤 각부의 수압 면적 [ $m^2$ ]
$K_x$	피스톤에 설치된 스프링 상수
$V_x$	각부 체적 [ $m^3$ ]
$W_{xx}$	질량 유량 [ $kg/s$ ]
$m_p$	피스톤 질량 [ $kg$ ]
$R$	기체 상수 [ $J/(kg \cdot K)$ ]
$k$	비열비
$\Delta$	라플라스 연산자
$G_3$	$\delta P_3/\delta P_4$ 관계를 나타내는 계인 형태의 전달함수
$T_x$	온도 [ $K$ ]
$F_f$	피스톤에 작용하는 유체력 [ $N$ ]
$F_r$	피스톤에 작용하는 정지마찰력 [ $N$ ]
$B_x$	피스톤에 작용하는 점성마찰계수 [ $N/(m/s)$ ]
$n$	폴리트로픽 지수
$K_p$	유체스프링 상수 [ $N/m$ ]

---

[별첨1] Nomenclature

---

Nomenclature

---

$w_n$	피스톤의 고유 진동수
$K_x/(K_p\tau_3)^{-1}$	1차계의 시정수
$C_d$	유량 계수
$H_{xx}$	질량 유량과 압력비에 대한 계인 형태의 전달함수
$K_n$	루프게인
$\tau_3$	메인 피스톤의 응답 속도를 결정하는 시정수
$\zeta$	감쇠비

[별첨2] 주요 실험장치 구성품

Table 1.

AIR RECEIVER TANK	
design pressure	0.97 Mpa
design temperature	75 °C
size & thickness	ID185x621.4TL, 2.5 t
hydro test pressure	1.26 Mpa
net weight	4.7 kg
capacity	0.018 m <sup>3</sup>
MFR	(주)한국에어브레이크



Table 2.

Precision regulator	
MAX.SUP.PRESS.	1.0 Mpa
OUT PUT PRESS.	0.005 ~ 0.8 Mpa
MFG	SMC
MODEL	IR2020-02BG



Table 3.

Pilot Controlled Servo Valves		
maximum working pressure		52 bar g/754 psi g.
ICV type		Industrial control servo valve all common
refrigerants		refrigerants including R744 and R717
temperature range		-60/+120 °C
opening differential pressure		Min 0.2 bar Max 40 bar


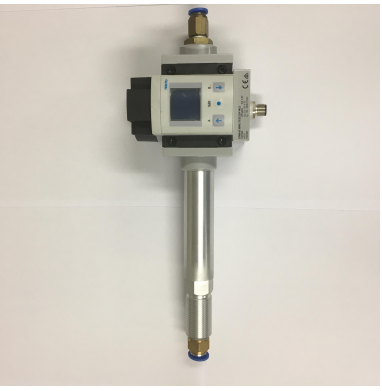


Table 4.

Flow sensor	
Model	SFAM-62-3000L-TG1 2
flow measuring range	max. 3000 l/min
working pressure	0 ~ 16 bar
Measuring principle	Thermal
Accuracy of flow rate	± 3% <i>o.m.v.</i> + 0.3% <i>FS</i>





## 감사의 글

원양참치선망어선 기관장출신으로 8년간의 승선과 동원산업이라는 선박회사에서의 또다른 8년간의 직장 생활을 뒤로하고 새로이 입사한 직장에서 필요한 지식을 함양하기 위해 산업대학원생으로 생업과 학업을 병행해야 하는 고난의 날들이 반복되었지만 장지성 교수님을 비롯한 여러 실험실 친구들이 도와줘서 여기까지 오게 되었습니다. 이산화탄소 냉매용 제어 밸브에 대한 연구를 하면서 제가 경험했던 선상에서의 냉동 경험이 이번 연구에 도움이 될 것이라 생각하고 조금이나마 연구에 기여를 하고 싶었으나 그리 많은 도움을 드리진 못했던 것 같아 죄송스럽습니다. 선박의 승선 경험을 바탕으로 쉽게 생각했던 많은 부분들에 대한 무지가 절실하게 느껴졌으며, 배움에는 끝이 없다는 진리를 새삼 알게 된 시간이었습니다. 그럼에도 불구하고 빈 항아리에 물을 붓듯이 지나온 시간들이 다시 한 번 나를 일으켜 세워 앞으로 나갈 수 있는 원동력이 되었다고 생각합니다. 비록 실험실에 있던 친구들과 오랜 시간 같이하진 못했고 각자의 삶속에서 다시 치열한 모험을 해야 하는 앞날이 다가오고 있지만 그들의 앞날에 무궁한 영광이 있길 기원하며, 언젠가 다시 만나 오늘의 연구가 미래의 우리를 더욱 빛나게 했다는 것을 얘기할 수 있는 기회가 있을 거라 확신합니다. 하지만 항상 지나고 나면 후회하는 것이 비록 이뿐만이 아니겠지만 이 번 연구도 좀 더 깊게 시간을 가지고 접근했다라면 보다 더 좋은 결과를 도출하지 않았을까하는 반성도 해 봅니다. 만약 또 다른 연구 기회가 주어진다면 오늘보다는 나은 내일의 결과가 도출되도록 최선을 다해야겠다고 다짐해 봅니다. 다시 한번 지난 시간동안 저에게 주신 관심과 협조에 감사함을 표하며 이만 감사의 글을 마칠까 합니다.

2019년 2월

박태선