

가변체적내의 압축공기 충전 및 방출특성연구

김 동 수,* 김 형 의,* 박 재 범,** 강 보 식,* 성 백 주*

A Study on Charging and Discharging Characteristics of Variable Volume with Compressed Air

Dong-Soo Kim* Hyoung-Eui Kim* Jae-Bum Park** Bo-Sig Kang* Baek-Ju Sung*

ABSTRACT

Pneumatic System has been mainly used as main equipment for actuation and control of fluid force in manufacturing industry. For velocity control of piston, meter-out restriction method is used in many cases. In this systems, meter-out restriction method is adopted for analysing the Dynamic Characteristics of Charging and Discharging Process which is Variable Volume Chamber. Experiments has been conducted for different supply pressure condition. As a experimental result, charge side chamber pressure rises to supply pressure rapidly and discharge side chamber pressure decreases. Also, When the air in the cylinder is discharged, temperature of air decreases steeply. Restriction of the Cylinder sometimes freeze and it dose not function. The result will be useful for the analysis of pneumatic system.

Key Word : Variable Volume(가변체적), Charging and Discharging(충전 및 방출), Meter-Out Restriction Method(메타아웃회로), Compressed Air(압축공기)

기호설명

A_1 : 실린더 면적(mm²)

A_o : 오리피스 유효단면적(mm²)

C_o : 정압비열(J/kg.k)

C_v : 정적비열(J/kg.k)

k : 단열지수

t_o : 기준시간(sec)

ρ : 공기의 밀도(kg/m³)

V : 체적(mm³)

P_1 : 압력(kgf/cm²)

T_1 : 온도(℃)

* 한국기계연구원 기계부품연구부(정회원)

** 경남대학교 기계공학과 대학원(정회원)

- G_v : 공기의 질량유량(kg/sec)
 - X : 피스톤의 변위(mm)
 - v : 피스톤의 속도(mm/sec)
 - Q : 열전달율(\bar{W})
 - m : 부하질량(kg)
 - M : 공기질량(kg)
- (첨자) c, d, 1, 2는 각 부위에서의 상태를 의미한다.

1. 서 론

공기압시스템은 저가격, 빠른응답 및 제어성 향상등의 압축공기 특성때문에 최근 산업계의 자동화 시스템 구성에 수요가 급격히 증가하는 추세에 있다.

그러나 사용자가 공기압 기기에 대한 이해부족으로 과대설계하여 사용함으로써 막대한 에너지 낭비 및 공기압시스템 구성부품의 가격을 과잉 낭비하고 있는 실정이다.

따라서 본 연구에서는 공기압기기에 대한 동특성 해석을 정확히 구명하여 공기압시스템 구성부품인 실린더 및 밸브등의 최적설계자료획득 및 정밀도가 높은 위치 제어 시스템을 구성하는데 필요한 자료를 도출하고자 함에 그 목적이 있다.

지금까지의 연구는 가변체적내의 압축공기에 대한 동적거동변화 해석시 등온 및 단열과정으로 가정하여⁽³⁾⁽⁴⁾⁽⁵⁾⁽⁶⁾ 실린더 및 제어밸브의 특성을 해석하였으나, 최근에는 열전달을 고려하여 보다 정확한 해석을 위한 연구가 활발하게 진행되고 있는 추세이다.

Kagawa등⁽¹⁾⁽⁶⁾은 공기압실린더 내의 온도변화에 대한 연구결과 방출시 응축현상으로 공기압기기의 작동이 이루어지지 않아서 사용할 수 없다는 결과를 보고한 바 있다.

따라서 본 연구에서는 가변체적의 구조를 갖는 직경φ 80, 행정 500mm인 공기압실린더를 수평으로 설치한 후 메타아웃회로를 구성하여⁽²⁾⁽⁷⁾ 공급압력을 변화시켜가면서 충전 및 방출시 가변체적내의 압축공기 동특성변화를 고찰하는데 그 목적을 두고 연구하였다. 정확한 계측을 위하여 각 센서들을 보정한 후 PCL818 A/D 변환기를 사용하여 데이터를 얻었다.

그 결과 온도변화, 압력변화, 충전 및 방출시간등 흥미있는 연구 결과를 얻었으며, 이를 토대로 하여 공기압시스템의 최적설계 및 정확한 위치제어등에 관한 연구를 계속 수행할 예정이다.

2. 이론적 배경

2.1 지배방정식

Fig. 1은 메타 아웃회로에 의한 속도제어의 공기압 실린더 운동시스템을 보여준다. 실린더를 수평으로 고정하고 충전시의 압력P_c와 로드측의 방출압력 P_d라 하면 운동 방정식은 아래와 같다.⁽¹⁾⁽⁸⁾

$$m \frac{d^2x}{dt^2} = A_c(P_c - P_s) - A_d(P_d - P_s) - mg \sin \theta - F_f \quad (1)$$

여기서, mg항은 수평실린더이므로 0(Zero)이고, A_c는 실린더 헤드측의 면적이고 A_d는 실린더 로드측의 면적이며 F_f는 전체 마찰력, P_a는 대기압력을 의미한다.

압축, 팽창의 효과에 따라 실린더 실내의 공기의 온도는 변화하고 공기와 실린더의 벽사이에 열전달에 의해 실린더벽의 온도는 상승하게 된다.

압력변화는 음속에 비교하면 오히려 작으므로 실린더 실내의 압력은 일정하게 다룬다.

에너지 변화는 아래와 같이 쓰여진다.

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \int C_v \rho T' dV &= GC_v T_c + \frac{P}{\rho_c} G - P \frac{dV}{dt} + Q \\ &= GC_v T_c - P \frac{dV}{dt} + Q \end{aligned} \quad (2)$$

G<0인 경우 검사체적을 통과하는 방출온도는 실린더 실내의 평균온도와 같다.

실린더 실내의 공기의 평균온도 T_{avg}는 아래와 같이 정의된다.

$$T_{avg} = \frac{\int_v \rho T' dV}{\int_v \rho dV} = \frac{\int_v \rho T' dV}{M} \quad (3)$$

여기서 ρ는 실린더 실내의 공기의 밀도이며, T'는 실린더 실내의 공기의 온도이다.

실린더 실내에서 공기의 에너지 변화를 고려하면 에너지 방정식은 식(3)를 이용하여 아래와 같은 식을 얻을 수 있다.

$$GC_v T + C_v M \frac{dT}{dt} = GC_v T_c + \frac{P}{\rho_c} G - P \frac{dV}{dt} + Q \quad (4)$$

Q는 공기에 의한 벽면의 열전달율이며 ρ_c는 검사체적을 통과하는 공기의 밀도이다.

식(2)와 식(4)을 이용하여 실린더 내의 평균 온도는 아래와 같다.

$$C_v M \frac{dT}{dt} = GRT - P \frac{dV}{dt} + hA_h(T - T_a) \quad (5)$$

공기가 충전 되었을때(G>0), 검사체적을 통과하는 공기의 벽면온도(T_w)또는 대기온도(T_a)로 존재하여 아래와 같은 에너지 방정식으로 유도된다.

$$C_v M \frac{dT}{dt} = GC_v(T_a - T) + \frac{P}{\rho_c} G - P \frac{dV}{dt} + hA_h(T - T_a) \quad (6)$$

뉴턴의 냉각 법칙에 의해 열전달율, Q는 아래와 같이 쓸 수 있다.

$$Q = hA_h(T - T_a) \quad (7)$$

여기서, A_h는 실린더 실내에서 열전달 면적이며, h는 전체 실린더 표면의 평균 열전달 계수이다.

또한 실린더 실내의 공기의 상태방정식은 아래와 같다.

$$PV = MRT \quad (8)$$

식(8)을 미분하여 압력변화에 대한 방정식은 다음과 같다.

$$\frac{dP}{dt} = -\frac{P}{V} \frac{dV}{dt} + \frac{MR}{V} \frac{dT}{dt} + \frac{RT}{V} G \quad (9)$$

Fig.1에서 압축성 유체가 정상적으로 흐른다고 가정할 때 에너지 평형식은

$$g + \frac{P_1}{\rho_1 g} - \frac{P_2}{\rho_2 g} + W = u_2 - u_1 + \frac{W_1^2 - W_2^2}{2g} + (h_2 - h_1)$$

이 되며

여기서 위치에너지, 기계 및 열적변화없다고 하면,

$$W_2 = \sqrt{\frac{2gK}{K-1} \cdot \frac{P_1}{\rho_1 g} \left\{ 1 - \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{K-1}{K}} \right\}}$$

이 되고

$$\frac{P_1}{\rho_1 g} = RT_1 \quad \text{과} \quad C_v = \frac{R}{K-1} \text{의 관계와 단열변화를}$$

가정할때의 $\frac{P_2}{P_1} = \left(\frac{\rho_2}{\rho_1}\right)^K$ 와 $\frac{1}{v_1} = \rho_1 g$ 에 의해 유속,

$$W_2 = \sqrt{\frac{2gK}{K-1} P_1 v_1 \left\{ 1 - \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{K-1}{K}} \right\}}$$

이
W₂을 구하면
된다.

$$G = \frac{Q}{V_2}, V_2 = V_1 \left(\frac{P_1}{P_2}\right)^{\frac{1}{K}}$$

공기의 중량유량,

$$G = \frac{Q}{V_2} = \frac{A_c W_2}{V_2} = A_c \sqrt{\frac{2gK}{K-1} P_1 V_1 \left\{ \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{2}{K}} - \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{K+1}{K}} \right\}} = A_c P_1 \sqrt{\frac{2K}{(K-1)RT_1} \left\{ \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{2}{K}} - \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{K+1}{K}} \right\}}$$

이 된다.

실린더 실내의 공기 질량유량에 대한 충전, 방출은 다음식과 같이 표현되어 진다.⁽⁹⁾

$$G = A_c P_1 \sqrt{\frac{2k}{RT_1(k-1)} \left[\left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{2}{k}} - \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{k+1}{k}} \right]}, \quad \frac{P_2}{P_1} \geq 0.528 \quad (10)$$

$$G = A_c P_1 \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{1}{k-1}} \sqrt{\frac{2k}{RT_1(k+1)}}, \quad \frac{P_2}{P_1} < 0.528 \quad (11)$$

식(5)(6)(9)에서 공기압 실린더 시스템의 변수들인, 압력, 온도, 위치에 대하여 만약 열전달계수 h가 주어 진다면 시뮬레이션 될 수 있다.

2.2 피스톤의 최종속도

메타아웃회로에 의한 피스톤의 속도는 부하변화가 피스톤의 최종속도에 많은 영향을 끼치지 않는다는 장점을 가지고 있다. 피스톤의 운동 시작이후 공기의 온도 변화가 작다고 가정하면 피스톤의 최종속도는 식(9)에 의해 다음과 같이 결정된다.

$$P_c \frac{dV}{dt} = P_c A_c v_c G \quad (12)$$

식(12)에 식(11)을 대입하면 최종속도는 아래와 같

이 정의 된다.

$$v_{\infty} = \frac{A_c}{A_c} \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{1}{k-1}} \sqrt{\frac{2k}{k+1} RT_{\infty}} \quad (13)$$

여기서 T_c 는 최종속도를 얻었을 때 실린더 헤드측의 공기온도이다.

식(13)은 최종속도가 실린더내의 공기 온도변화에 의해 영향을 받음을 알 수 있다.

기준속도는 아래식과 같이 정의된다.

$$v_0 = \frac{A_c}{A_c} \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{1}{k-1}} \sqrt{\frac{2k}{k+1} RT_0} \quad (14)$$

그리고, 기준시간은 다음과 같다.

$$t_p = \frac{l}{v_0} \quad (15)$$

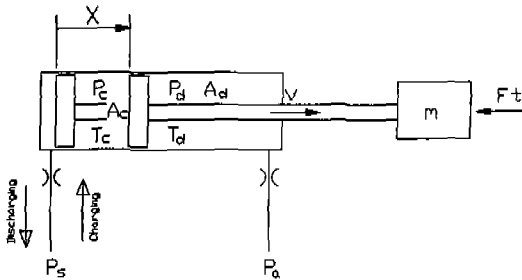


Fig. 1 Pneumatic Cylinder Model for Variable Volume Chamber.

3. 실험 장치 및 방법

3.1 실험장치 구성

Fig. 2는 가변체적에서 공기압실린더를 이용한 충전 및 방출 실험장치이며 (1)(6)(7), Table 1.은 연구에 사용된 계측기의 사양들이다.

본 연구에서 복동식 공기압실린더(ϕ 80×500st)를 이용하여 각 산업계에서 가장 널리 사용되는 공기압 구성회로인 메타아웃방법으로 공기압 실린더를 수평실험대에 설치하였다.

실험장치에 사용한 솔레노이드 밸브는 4방향3위치의 양오픈 센터밸브를 채택하였으며, 솔레노이드 전단부에 압축공기의 불순물 제거 및 공급압력 조절을 위한 압력

조절기(F.R.L Unit)를 설치 하였다.

또한 부하하중의 변화에 따라 충전 및 방출시의 응답 특성을 시험하기 위해 임의의 부하하중을 가할 수 있는 대차와 부하하중용 시편2개를 제작하였고, 대차의 마찰 부하를 극소화하기 위해 대차 하단부에 2개의 LM Guide를 부착하였다.

실린더 내의 동적 특성을 조사하기 위해 각 부위에 압력, 온도, 유량센서를 부착하였으며, 피스톤의 속도 및 변위 특성과 부하 하중측정을 위한 위치 및 속도센서(LVDT)와 부하센서(Load Cell)을 피스톤로드 상단에 부착하였다.

데이터측정은 A/D변환 측정용 PCL-818과 각 센서를 인터페이스 시켰으며, 실험에 사용된 프로그램은 BorlandC++이다.

피스톤의 출구유량을 일정하게 하기 위해 메타아웃회로로 구성하였다.

실린더내의 충전 및 방출시의 압력, 온도를 정확하게 측정하기 위해 실린더 헤드부와 엔드부에 직경 ϕ 3mm의 구멍을 가공하여 측정용 센서를 부착하였다.

3.2 계측기 보정

Fig. 3, 4, 5는 계측기의 보정데이터시트들이다.

압력센서 보정방법은 아날로그 압력계와 디지털압력계를 같은 장소에 체결한 후, 아날로그 게이지값과 디

Table 1. Specification of Experimental apparatus

구분	종 명	사 양	Maker
계 측 장 비	압력센서	• Range:200~500Psi • Accuracy:+(-)0.5%	Digitec(주)
	위치 및 속도센서	• Stroke:650mm • Nonlinearity:0.005% • Hysteresis:0.02mm	Tempsonic(주)
	부하센서	• Capacity:2000lbs • Hysteresis:0.1%	Transducer Technique(주)
	온도 센서	• Thermo-couple • K-Type	CALEX(주)
	유량계	• Accuracy:+(-)0.5% • Output Voltage:0~5V • Flow Range:1800(l/min)	Sponzier(주)
	충족기	• Frequency:0.25% • Gain Range:1000 • Nonlinearity:+(-)0.01%	CALEX(주)
공기압 시스템	공기압실린더	• ϕ 80×500*	KIMM
	전자밸브	• Pressure Range: 1.5~9.9bar • Voltage:AC110V	CKD(주)
제어 및 데이터 처리부	A/D변환기	• 12bit,A/D:16CH,D/A:2CH • Sampling Rate:100KHz	ADVANTECH(주)
	컴퓨터	• Vectra 486/66U	HEWLET PACHARD(주)

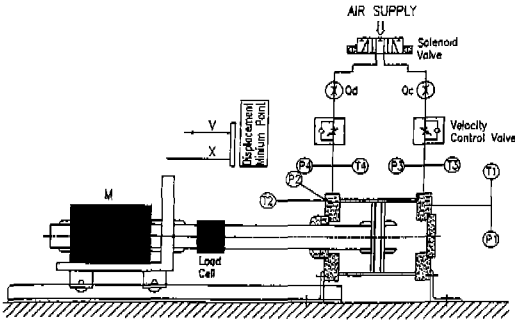


Fig. 2 Schematic of Experimental apparatus

지탈 게이지값을 비교하여 Fig.3과 같이 조절하였다.

속도와 변위 측정용 위치 및 속도센서는 버어니어 캘리퍼스를 피스톤 상단에 고정시킨 후 피스톤로드를 10mm씩 증가시켜, 계인을 조절하였다.

부하측정용 부하센서는 정하중을 가할 수 있는 시편들을 각각 제작한 후, 각 시편의 중량을 기록하고 시편들을 부하센서(Load Cell)상단에 가하여 Fig.4 와 같이 계인을 조절하였다.

온도센서는 Thermocouple-K형으로 만들었으며, 센서의 전달부를 수은온도계와 함께 얼음그릇속에 넣은 후, 온도를 서서히 높여가면서 수은 온도계의 눈금변화와 센서의 출력전압을 측정하는 방법으로 Fig.5와 같은 센서의 온도 기울기를 얻었다.

3.3 실험방법

실린더 내의 충전 및 방출시의 압력, 온도를 정확하게 측정하기 위해 실린더 헤드부와 엔드부에 측정용센서를 부착하였다.

본 연구의 실험 결과를 솔레노이드밸브의 팽창피스톤 직경설계에 응용하기 위해, 실험 초기조건을 실린더 헤드 및 로드축의 압력 6kg/cm²로 유지시킨후, I/O Port의 출력신호로 솔레노이드 밸브를 개폐시키는 방법을 채택하여 아래와 같이 실험하였다.

(1) 충전실험

실린더로드측의 압력을 6kgf/cm²로 유지시킨후, 공기압솔레노이드밸브를 작동시켜 실린더 헤드측에 공급압력 6kgf/cm²을 가한다. 이때 로드측의 방출과 헤드측의 충전은 동시에 이루어진다.

(2) 방출실험

실린더헤드측의 압력을 6kgf/cm²로 유지시킨후, 공기압솔레노이드밸브를 작동시켜 실린더 로드측에 공급

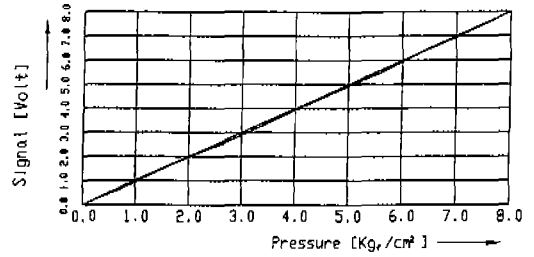


Fig. 3 Pressure Sensor Calibration Curve

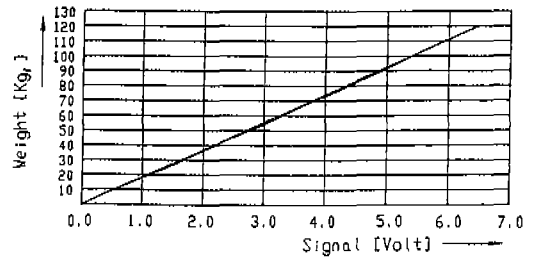


Fig. 4 Load Cell Calibration Curve

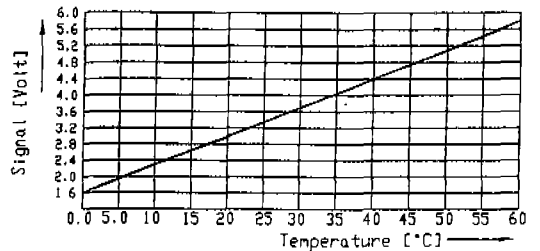


Fig. 5 Temperature Sensor Calibration Curve

압력 6kgf/cm²을 가한다. 이때 헤드측의 방출과 로드측의 충전은 동시에 이루어진다.

이상의 충전 및 방출 실험방법으로 다음과 같은 다양한 조건으로 실험하였다.

가)공급압력변화

공급압력을 각각 4kgf/cm², 5kgf/cm², 6kgf/cm²로 실험하였다.

나)부하하중변화

부하하중은 피스톤, 피스톤로드의 하중을 무시한 무부하실험, 피스톤, 피스톤로드, 부하센서(Load Cell)을 포함한 Car 전체하중이 40kgf일때 와 30kgf의 부하를 대차에 부착한 후 부하하중 70kgf, 100kgf일때, 부하 하중 변화에 따라 실험하였다.

본 실험에서 공기압 솔레노이드밸브의 구동은 PCL-818의 I/O Port에서 5Volt의 트리거 신호를 릴레이(SSR)에 보내 솔레노이드를 On, Off시켰으며, 컴퓨터의 키보드 제어방법을 사용하였다. 각 센서부에 위치한 데이터값 처리는 A/D변환기에 의해 읽어 들인후 일시적으로 RAM에 저장하여 출력하는 방법을 사용하였으며, 1채널에 초당 읽혀진 데이터수는 약 2300개 정도의 실험값들을 얻을 수 있었다.

4. 실험 결과 및 고찰

본 연구는 피스톤직경(ϕ 80mm), 속도제어밸브 오리피스 직경(ϕ 10mm)에서 실험한 결과이며, 가변체적 전체용적 2.51 l에 공급 압력 6kgf/cm²를 가하였을 때, 동적거동은 충전시 Fig.6, 7, 방출시 Fig.8,9 과 같은 결과를 얻었다.

(1) 충전과정

피스톤의 변위와 속도응답에서 보는 바와 같이 피스톤의 응답은 약0.8초의 시간응답을 얻을 수 있었으며, 온도변화는 약4℃의 온도상승이 일어났다.

이는 압축공기의 충전시 온도가 상승됨을 알 수 있었다.

(2) 방출과정

피스톤의 변위와 속도응답에서 보는 바와 같이 피스톤의 응답은 약 1.2초의 시간응답을 얻을 수 있었으며, 온도 변화는 약 -6℃의 온도 하강이 일어났다.

이는 압축공기의 방출시 온도는 하강함을 알 수 있었다.

Fig. 6, 7, 8, 9에서 가변체적 전체용적 2.51 l에서의 동적응답변화는 방출시간보다 충전시간이 약0.4초 빨랐다.

따라서, 가변체적의 충전 및 방출실험에서 충전과정이 방출과정보다 빠른 응답특성을 가진다는 사실을 알 수 있다. 이상의 결과로부터 오리피스형상을 가진 공기압 실린더 및 공기압제어밸브를 설계 할 때, 방출측에 주안점을 두어 설계하여야 한다는 사실을 알 수 있었다.

5. 결 론

압축공기 충전 및 방출과정에서 가변체적내의 동적거동 특성변화를 살펴본 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 압축공기 충전시 압력변화에 따른 온도변화는 +4℃로 상승하였으며 방출시는 -6℃로 하강하였는데 이는 방출시 응축현상으로 인하여 공기압기의 기능이 저하

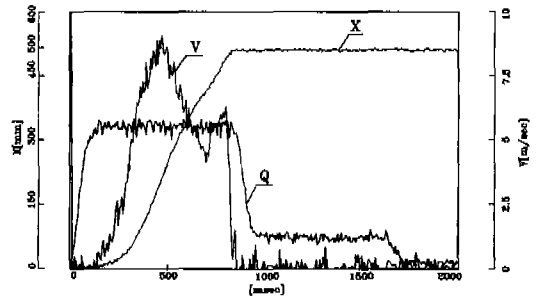


Fig. 6 Experimental Result of charging process (Supply Pressure: 6kgf/cm², External Load: 70kgf)

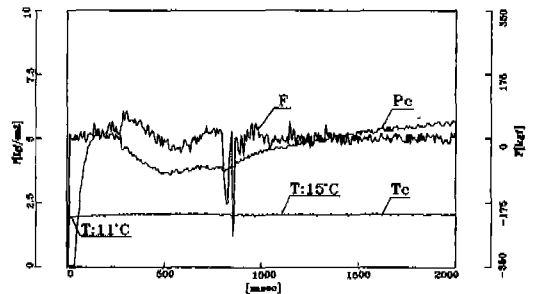


Fig. 7 Experimental Result of charging Process (Supply pressure: 6kgf/cm², External Load: 70kgf)

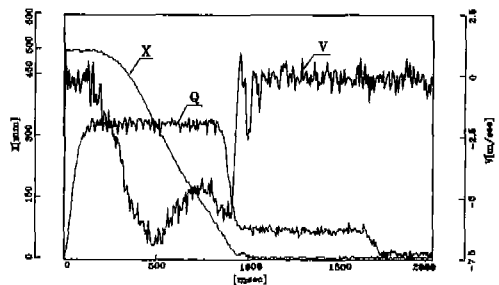


Fig. 8 Experimental Result of Discharging Process (Supply pressure: 6kgf/cm², External Load: 70kgf)

된다는 사실을 알 수 있었다.

(2) 가변체적내의 압축공기 충전 및 방출에 필요한 시간은 충전시에 0.4sec 정도빨랐으며 이는 충전시에 열전달이 잘 일어남을 알 수 있었다.

따라서, 가변체적과 오리피스구조를 갖는 공기압기, 즉, 실린더, 제어밸브 및 배관등을 설계할 때 방출측에

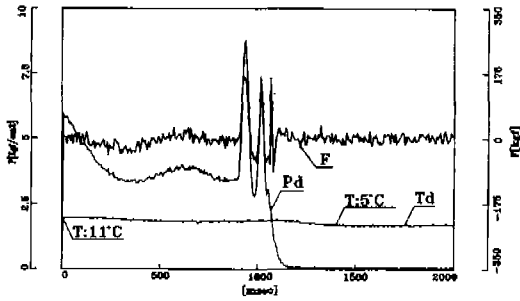


Fig. 9 Experimental Result of Discharging Process
(Supply pressure: 6kgf/cm², External Load: 70kgf)

주안점을 두고 설계해야 된다는 사실을 알았다.

(3) 가변체적 내의 온도, 압력동 동특성 변화는 공급 압력을 달리하더라도 큰 변화가 없음을 알 수 있었다.⁽¹⁰⁾

참고문헌

1. Toshiharu Kagawa, "Temperature change of air in Pneumatic System", Fluid Power, 1993.
2. Guido Belforte, "Fast transients in complex pneumatic Circuit", Fluid Power, 1993.

3. J.H.Horlock and W.A.Woods, "The thermodynamic Charging and Discharging Process", FMC, 1965.
4. H.S.Jebar, "Thermodynamic analysis of Charging and Discharging process", FPS, 1976.
5. Romiti and Rapaelli, "Dynamic modeling and simulation of pneumatic system", Fluid Power, 1990
6. Toshiharu kagawa and Masashi SHIMZU, "Air temperature change of pneumatic cylinder with Meter-Out control and Its effect on the Velocity", ASME, 1991.
7. 김동수, 김형의, 박재범, "가변체적에서의 압축공기 Charging 및 Discharging 동특성해석", KSME, 1994.
8. B.L.Anderson, "The Analysis and Design of Pneumatic Systems", Wiley, 1967.
9. 송창섭, "공기압 기술 실무 매뉴얼", pp 188-191, 1991.
10. 박재범, 김동수, 김형의, 염만오, "공기압 쿠션실린더의 동특성에 관한 실험적 연구", KSME, 1994.