

메타인 및 메타아웃 제어에 의한 공기압 실린더의 쿠션특성에 관한 실험적 연구

김동수*, 이상천**

Experimental Study of Cushioning Pneumatic Cylinder with Meter In/Meter Out Control System

Dong Soo Kim* and Sang Chun Lee**

ABSTRACT

Pneumatic cylinder is widely used for mechanical handling systems. Often, the impact occurs at the both ends points of pneumatic cylinder and generates destructive shock with in the structural operating members of the machine or equipment. To reduce the damage of system, therefore, shock absorbing devices are required. Cushioning of pneumatic cylinders at one or both ends of piston stroke is used to reduce the shock and vibration. The cylinder body have to withstand under high velocity and load. In this research, the pneumatic cushioning cylinder moving tests have been conducted for different load mass and supply pressure. The velocity of pneumatic cylinder actuation system with multiple orifice cushion sleeve which is set vertically controled with meter-in/out system. This study examines the dynamic characteristics of pneumatic cylinder with cushion devices. It turns out that the cushion pressure is mainly a function of the external load rather than the supply pressure. The cushion region characteristics was also revealed in the meter-in system.

Key Words : Pneumatic cushioning cylinder(공기압 쿠션실린더), Multiple orifice cushion sleeve(다중오리피스 쿠션슬리브), Meter in/out control system(메타인/아웃 제어 시스템)

1. 서론

공기압 쿠션실린더는 단순착탈공정, 조립공정등 일반산업계의 자동화시스템 구성요소로 그 응용이 급격히 증가하는 추세에 있다.

그 이유는 압축공기를 작동유체로 사용하기 때문에 유압에 비해 청결 및 저가격성이고, 전기에 비해 고하중 및 고응답특성을 가지고 있다는 점이

다. 아울러 최근에는 컴퓨터, 전기, 전자등의 급속한 발전에 따른 제어성의 향상에도 그 이유가 있다고 볼수 있다.

공기압제어 시스템은 크게 압축공기발생시스템, 운환, 불순물제거 및 압력조절시스템, 속도, 힘 및 방향을 제어하는 각종 제어밸브, 그리고 튜브 및 피팅, 마지막으로 최종 직선운동을 하는 실린더로 분류되며, 이 중에서 최종 작동기에 해당되는 공기

* 회원, 한국기계연구원 산업기술연구부

** 회원, 영남대학교 기계공학부

압 쿠션실린더의 정확한 특성규명이 제어성 및 최적설계에 의한 생산성 향상에 중요하다. 공기압 실린더가 직선운동을 할 때 최종작업위치에서 관성에너지에 의한 충격력이 발생하여 엔드캡을 파손함으로써, 시스템의 신뢰성에 문제가 된다.

따라서 최종 작업위치에 충격 흡수기를 부착하여 높은 작동압력 및 외부하중에 의해 발생하는 충격력 및 진동을 방지하여 왔다.

충격흡수기와 같은 구조, 즉 오리피스 유체저항 구조와 함께 다중 오리피스형 쿠션슬리브를 실린더내부에 장착한 공기압 쿠션실린더에 대한 지금까지의 연구배경을 살펴보면, Kagawa⁽¹⁾가 메타아웃 제어시스템에서의 온도변화특성에 대한 연구를 수행하였고, Wang⁽²⁾, Adam⁽³⁾등이 공기압 시스템특성에 관한 시뮬레이션을, Parker⁽⁴⁾가 공기압 실린더 충격흡수기의 충격력계산에 대해 연구한바 있다. 그 외에도 Otis⁽⁵⁾, Qiao Yun⁽⁶⁾, Hundal⁽⁷⁾, Romiti⁽⁸⁾, Horlock⁽⁹⁾, Anderson⁽¹⁰⁾등이 실린더시스템에 관한 연구를 수행한바 있으나, 이들 모두 다쿠션영역에 대한 깊이 있는 연구를 수행한 적이 없다.

따라서 본 연구에서는 김동^(11,12)이 연구 개발한 다중 오리피스 쿠션슬리브가 내장된 쿠션실린더의 동적 거동특성변화를 해석하기 위하여, 속도제어 방식은 메타인/아웃 제어시스템 각각에 대하여, 실린더는 수직하강운동을 할 때로 국한하여, 공급압력 및 외부하중을 달리하면서 쿠션영역의 쿠션압력 및 쿠션 스트로크시간변화를 실험을 통하여 규명하고자 한다.

물리량을 계측하기 위해 시험대상물에 압력, 힘, 위치, 속도, 가속도센서를 부착하였고, 데이터측정은 컴퓨터 키보드방식에 의한 아날로그-디지털 변환기의 디지털 입/출력포트로 밸브를 개폐하고 이때 아날로그-디지털 변환기로 1채널당 초당 데이터 샘플링 개수를 2,000개로 하여 정확성을 도모하였으며, 그 결과 쿠션특성변화는 외부하중에 영향이 있었으며, 메타아웃제어에서 시스템의 안정성이 있는 것으로, 메타인제어에서 쿠션부위의 속도, 가속도 및 쿠션 압력등의 변화가 불안정한 것으로 판명되었다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

Fig. 1은 본 연구대상인 공기압 쿠션실린더의

내부 구조도이며, 여기서, P_1 , T_1 은 공급 및 배기측 압력 및 온도를 나타내며, P_{c1} , P_{c2} 는 쿠션압력을 나타낸다. Fig. 2는 쿠션실린더 내부에 설치된 다중오리피스 쿠션슬리브 사진이다. 그리고 Fig. 3은 실험장치 개략도이며, Table 1은 시험대상실린더의 사양이고, 여기서, 유량제어밸브 직경 10(5)mm의 의미는 메타인/아웃제어회로의 공급측 및 배기측 배관의 직경을 나타낸다. 즉, 메타인회로에서는 공급측직경이 5mm이고, 배기측직경이 10mm이며, 메타아웃회로에서는 그 반대이다. Table 2는 실험장치 구성에 사용한 계측장비 사양을 나타낸다.

본 연구에 사용된 시험장비는 크게 테스트 메카니즘부, 압축공기공급부, 각종센서를 이용한 데이터계측 및 압축공기 공급제어 시스템부로 분류할 수가 있다.

Fig. 3에서와 같이 테스트 메카니즘부는 쿠션장치를 내장한 시험대상실린더의 상부에 외부하중을 가변하여 장착할수 있도록 설계, 제작하였으며, 마찰을 최소화하기 위하여 직선베어링을 사용하였다. 시험대상물의 각요소별로 위치, 속도 및 가속도센서, 온도측정을 위한 열전대, 스트레인게이지형 압력센서, 인장압축겸용 로드셀, 유량측정용 터빈형 유량계를 취부하였으며, 시험메카니즘은 수평, 수직 및 원하는 각도로 조정가능 하도록 설계하였다.

압축공기공급부는 압축기, 운환, 불순물제거 및 압력조절장치, 유량, 압력 및 방향제어밸브, 그리고 튜브, 피팅등으로 구성 하였으며, 데이터 획득 및 제어시스템은 컴퓨터, 데이터측정 및 제어카드, 프린터로 구성하였고 이때 사용된 프로그램은 볼랜드 C++을 사용하였다.

본 실험에 사용한 속도제어방법은 Fig. 4에서와 같이 메타인 및 메타아웃제어 시스템 두가지방법을 채택하였다.

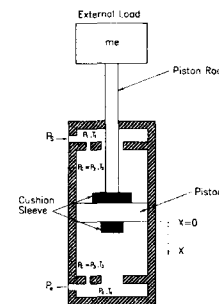


Fig. 1 Schematic of a vertically mounted double acting pneumatic cushioning cylinder.

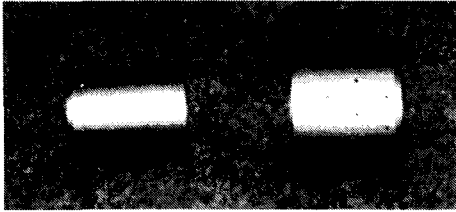


Fig. 2 Photograph of multiple orifice cushion sleeve.

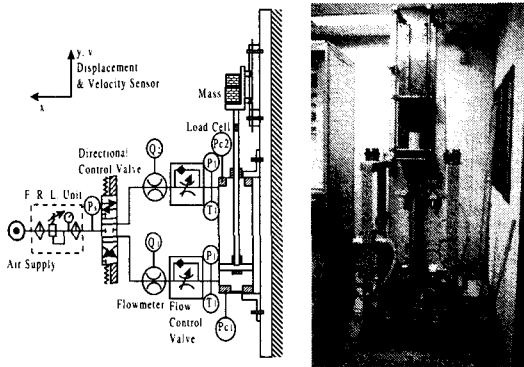
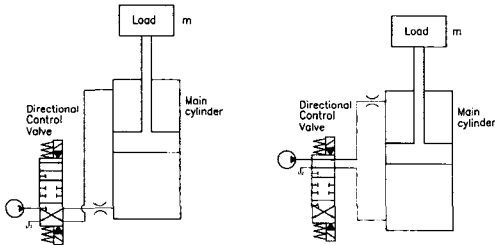


Fig. 3 Schematic diagram of experimental apparatus.



(a) Meter-out control system (b) Meter-in control system
Fig. 4 Velocity control system of a pneumatic cylinder.

2.2 실험방법

본 실험에 들어가기 이전에 정확한 물리량 계측을 위해 각종센서들의 보정실험^(13,14)을 수행하였다. 압력센서의 경우, 초정밀 아날로그 압력게이지와 같은 위치에 디지털 압력센서를 취부하여 아날로그 게이지의 눈금과 디지털센서의 전압값의 관계로, 위치 및 속도센서의 경우는 버어니어 캘리퍼스의 눈금과 마그네틱 센서의 전압값과의 관계로, 부하센서의 경우에는 시편을 가공하여 저울에서 무게를 측정한 다음, 로드셀 상단부위에 올려놓은 다음 이미 알고 있는 무게와 로드셀의 전압과의 관계로, 그리고 온도센서의 경우에는 얼음속에 수은온도계와 열전대를 동시에 넣은 후 온도계 눈금과 전압과의 관계로 보정 실험을 하였다.

그리고 난 다음 본 실험을 수행하였으며, 솔레노이드 밸브의 구동은 100kHz PCL I/O카드를 사용하여 5volt 트리거신호를 릴레이에 보내어, 컴퓨터 키보드제어방식으로 밸브개폐시작과 동시에 데이터를 A/D변환기를 통하여 획득하였으며, 일시적으로 RAM에 저장한 후 출력하는 방법을 채택하였다. 이때 1채널당 초당 데이터 샘플링 개수는 2,000개로 하여 정확성을 도모하였으며, 그래프출력시에는 약 200개의 데이터를 사용하였다.

Table 1 Specifications of pneumatic cushioning cylinder.

Piston Diameter	Piston Rod Diameter	Stroke	Cushion Diameter	Cushion Length
φ 80mm	φ 25mm	500mm	φ 20mm	28mm
Orifice Diameter	Flow Control Valve Dia.	Directional Control Valve Dia.	Pipe Dia.	Pipe Length
φ 3mm	φ 10(5)mm	φ 14mm	φ 12mm	1000mm

Table 2 Specifications of experimental apparatus.

Items	Pressure Sensor	LVDT Sensor	Load Cell
Specification	.Straingage .0-500psi .0.05% F.S. .0-10volt	.Magnet .0-650mm .0.005% .0.02mm .0-10volt	.Compression & Tension .0-2000lbf .0.1% .0-10volt
Maker	Digitec	Tempsonic	Transducer Technique
Temp. Sensor	Flowmeter	A/D Converter	Amplifier
.T-type thermocouple .φ 0.002mm	.Turbine .Pmax.=10bar .18-1800l/min .1-5volt	.12bit .100KHz A/D16ch. .D/I, O2ch.	.10KHz, 0.25% .Gain 1000 .Nonlinearity 0.0%
OMEGA	Sponsler	Advantech	Calex

실험은 속도제어방법을 두 가지로 하여 메타인 및 메타아웃제어 각각에 대하여 수직하강으로 작동할 때에만 국한하여 수행하였으며, 외부조건에 따른 쿠션영역의 특성인자인 쿠션압력 및 쿠션스트로크 시간의 변화를 고찰하기 위해 외부하중 및 공급압력을 변화시켜가면서 실험을 하였다.

즉, 공급압력 4, 5, 6bar 각각의 일정한 값에서 외부하중을 40, 70, 100kg으로 증가시켰을 때와 외부하중을 40, 70, 100kg의 일정한 값에 대하여 공급압력을 4, 5, 6bar로 증가시켜가면서 위치, 속도, 가속도, 힘, 압력변화를 측정하였다.

이들 모두 시험초기조건은 피스톤 로드를 완전히 수직상승시킨 상태에서 실험하였으며, 각각의 센서들은 증폭 및 필터링과정을 거쳐 컴퓨터에 입력되도록 하였다.

3. 실험결과 및 고찰

Table 3은 메타인 및 메타아웃 제어시스템의 특성데이터 비교표이며, Table 4는 메타인 및 메타아웃의 두 종류의 속도제어특성을 나타낸 것이다. Fig. 5는 메타인 제어회로에서 공급압력 6bar, 외부하중100kg일때의 수직하강으로 설치된 시험대상 쿠션실린더의 특성을 나타내는 그래프이고, Fig. 6은 Fig. 5와 동일한 시험조건으로 메타아웃 제어회로에서 실험한 결과이다. 따라서 이들의 실험결과에 대하여, 메타인 제어회로, 메타아웃 제어회로, 그리고 메타인 및 아웃제어 회로의 특성에 대해 구분하여 고찰하고자 한다.

Table 3 Comparison of data for velocity control system ; operating condition, load mass 100kg, supply pressure 6bar.

Items	Velocity Control Method	
	Meter In Control Circuit	Meter Out Control Circuit
Supply Pressure(bar)	4	6
Flow Control Valve Dia.(mm)	$\varnothing 5 / \varnothing 10$	$\varnothing 10 / \varnothing 5$
Mean Velocity(m/s)	0.6	0.4
Maximum Velocity(m/s)	1.1	0.7
Cushion Peak Pressure(bar)	12.5	12.0
Cushion Stroke Time(sec)	0.26	0.4
Total Stroke Time(sec)	1.0	1.6
Maximum Acceleration(m/s ²)	17.5	7.0
Maximum Load(kg)	175	70
Internal Pressure(bar)	1.8	6.0

Table 4 Comparison of characteristics for velocity control system.

Items	Velocity Control Method	
	Meter In Control System	Meter Out Control System
Valve On-Off Time	independ on effective area	depend on effective area
Total Stroke Time	depend on load	independ on load
Final Velocity	rapidly down	normally down
Internal Pressure	almost atmosphere	almost equal to supply pressure
Cushion Capacity	bad	good

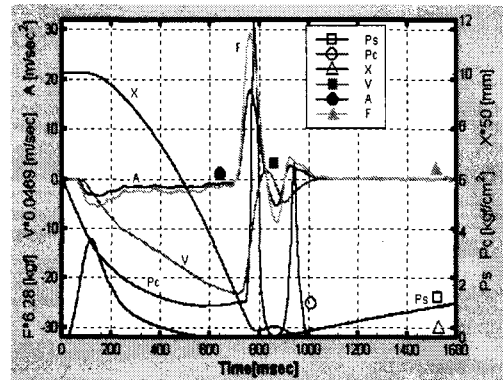


Fig. 5 Experimental results of pneumatic cylinder with meter in control circuit.

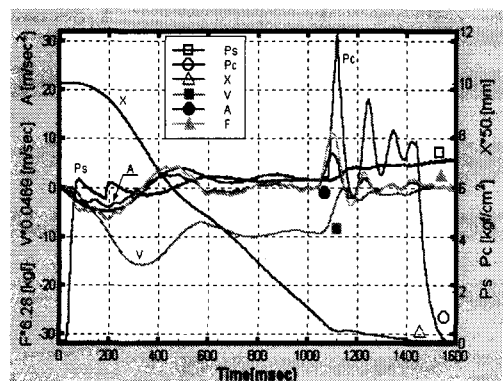


Fig. 6 Experimental results of pneumatic cylinder with meter out control circuit.

3.1. 메타인 제어 시스템의 경우

Fig. 7은 외부하중을 100kg로 일정하게 두고 공급압력을 4, 5, 6bar로 증가시켰을때의 쿠션압력 파형에 대한 실험결과이고, Fig. 8은 위치를 계측한 결과로써, 쿠션 최대압력은 12.5bar, 쿠션스트로크 시간은 0.26sec, 전체 스트로크 시간 1.0sec로 거의 일정하게 나타났으며, 이는 공급압력의 증가는 쿠션영역에 커다란 영향이 없음을 나타낸다. Fig. 9와 Fig. 10은 공급압력을 6bar로 일정하게 두고 외부하중을 40, 70, 100kg으로 증가시켰을 경우의 쿠션압력파형 및 위치에 대한 실험값으로써, 쿠션 최대압력은 외부하중이 증가함에 따라서 4.5, 10.5, 12.5bar로 급격히 증가하였고, 쿠션 스트로크 시간은 0.3, 0.28, 0.26sec로 줄었으며, 전체 스트로크 시간은 1.3, 1.1, 1.0sec로 감소하였다. 따라서 외부하중은 쿠션영역에 지배적인 영향을 끼치므로 제어 및 설계과정에서 고려해야할 파라메타임을 알았다.

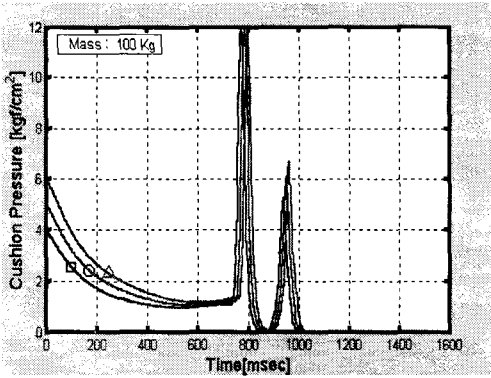


Fig. 7 Cushion pressure of different supply pressures for load mass 100kg.

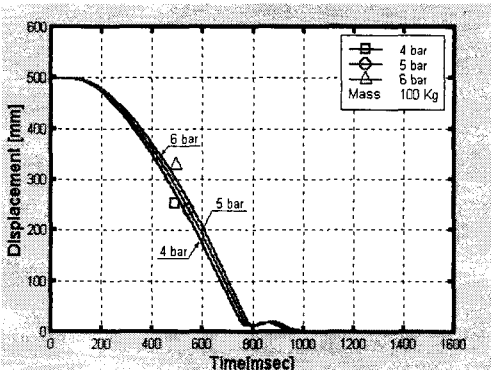


Fig. 8 Displacement of different supply pressures for load mass 100kg.

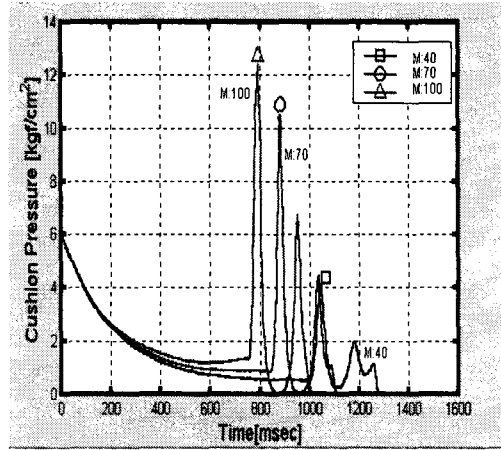


Fig. 9 Cushion pressure of different load masses for supply pressure 6bar.

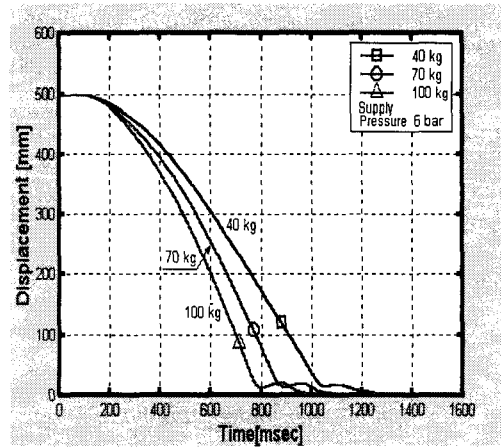


Fig. 10 Displacement of different load masses for supply pressure 6bar.

3.2. 메타아웃 제어 시스템의 경우

3.1절의 방법과 동일하게 시험한 결과, Fig. 11은 외부하중을 100kg로 일정하게 두고 공급압력을 4, 5, 6bar로 증가시켰을 때의 쿠션압력 파형에 대한 실험결과이고, Fig. 12는 위치를 계측한 결과로써, 쿠션 최대압력은 공급압력의 한배만큼 일정하게 8, 10, 12.0bar, 쿠션스트로크 시간은 동일하게 0.4sec, 전체스트로크 시간 1.5, 1.55, 1.6 sec로 거의 일정하게 나타났으며, 이는 공급압력의 증가로 쿠션영역에 커다란 영향이 없음을 나타낸다. Fig. 13과 Fig. 14는 공급압력을 6bar로 일정하게 두고 외부하중을 40, 70, 100kg으로 증가시켰을 경우의 쿠션압력과

형 및 위치에 대한 실험값으로써, 쿠션최대압력은 외부하중이 증가함에 따라서 7.8, 9.2, 12.0bar로 급격히 증가하였고, 쿠션스트로크시간은 0.4sec로 거의 일정하며, 전체스트로크시간은 1.7, 1.62, 1.6sec로 감소하였다. 따라서 외부하중은 쿠션영역의 쿠션압력변화에 큰 영향을 미치고 있으며, 전체 스트로크시간이 거의 일정함으로 제어관점에서 상당히 좋은 제어범임을 확인하였다. 그리고 중요한 사실은 쿠션스트로크 시간은 쿠션 슬리브의 치수, 즉 기하학적인 영향이 지배적이지, 외부의 영향인 외부하중 및 공급압력 등에는 무관하다는 사실을 발견하였다.

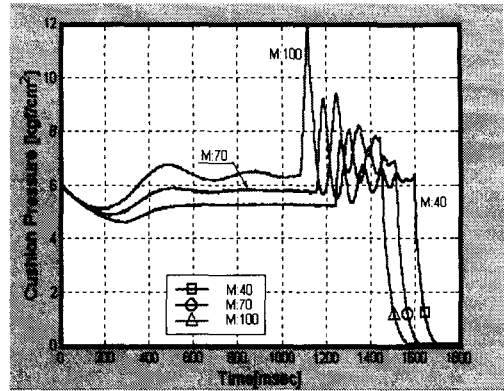


Fig. 13 Cushion pressure of different load mass for supply pressure 6bar.

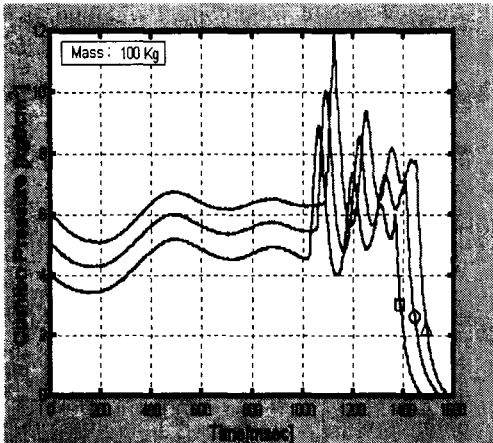


Fig. 11 Cushion pressure of different supply pressures for load mass 100kg.

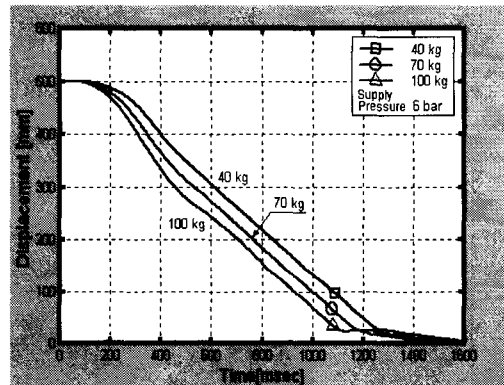


Fig. 14 Displacement of different load mass for supply pressure 6bar.

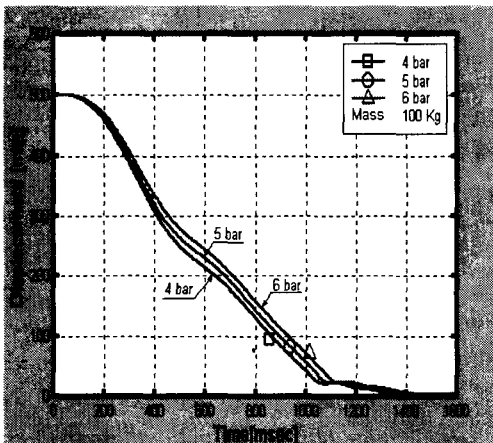


Fig. 12 Displacement of different bar supply pressures for load mass 100kg.

3.3. 메타인 및 메타아웃 제어 시스템의 동특성 해석

3.1 및 3.2절에서 살펴본 바와 같이, 두 가지 속도제어방법에 따라서 상당히 구별되는 특징을 확인한바 있다. Fig. 15 ~ Fig. 20까지의 그래프는 메타인 및 메타아웃제어시스템에 대한 비교 그래프로써, 공급압력6bar, 외부하중100kg일 때의 공급압력, 위치, 속도, 가속도, 힘 및 쿠션압력에 대한 값이다.

메타인 제어시스템은 실린더 내압이 존재하지 않음으로 응답성은 빨랐으나, 외부조건변화에 따른 스트로크시간의 변화가 심함으로 제어측면에서 곤란하며, 반면에 메타아웃 제어시스템은 시스템의 안정성 및 쿠션능력측면에서 우수함으로써 효율의 극대화 및 신뢰성을 도모할 수 있을 뿐 아니라 제어성에서도 뛰어나므로 대부분의 제어시스템이 이것을 채택하고 있다.

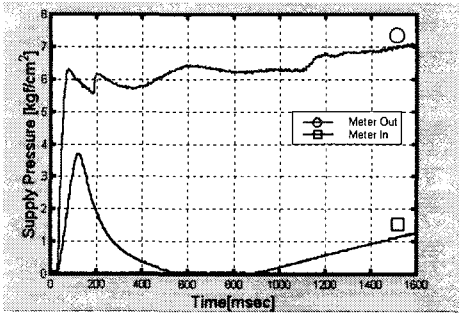


Fig. 15 Comparison of the supply pressure for different velocity control system.

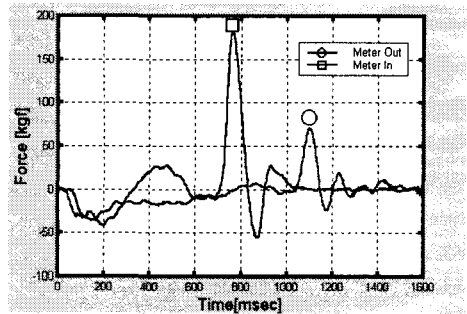


Fig. 19 Comparison of the load force for different velocity control system.

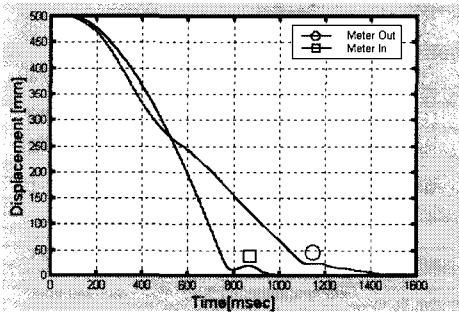


Fig. 16 Comparison of the displacement for different velocity control system.

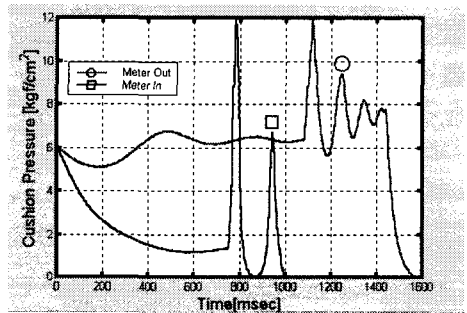


Fig. 20 Comparison of the cushion pressure for different velocity control system.

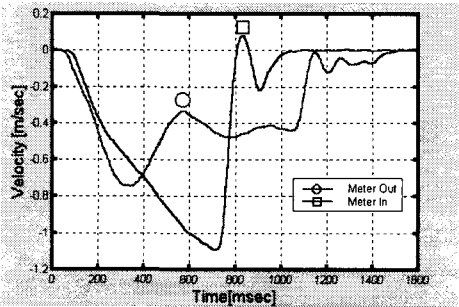


Fig. 17 Comparison of the velocity for different velocity control system.

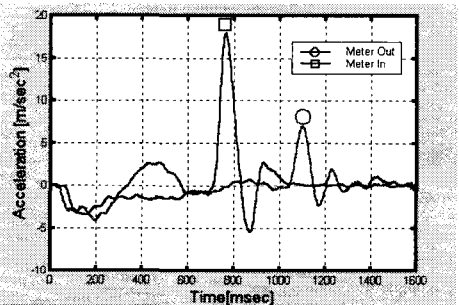


Fig. 18 Comparison of the acceleration for different velocity control system.

4. 결론

본 연구에서는 공기압 쿠션실린더의 수직하강 작동과정에서, 속도제어방법인 메타인 및 메타아웃 제어시스템 각각에 대하여, 공급압력 및 외부하중을 변화시켜가면서 쿠션영역의 특성변화 및 제어시스템의 특성분석에 초점을 두고 실험을 수행하였으며, 그 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 메타인 제어시스템으로 실험한 결과, 외부하중을 일정하게 두고 공급압력을 변화시킬경우, 쿠션영역의 압력 및 위치변화는 거의 일정하고, 반대로 공급압력을 일정하게 두고 외부하중을 증가시켰을 경우 쿠션압력은 급격히 증가하였으나, 쿠션스트로크시간은 거의 일정하였으며, 아울러 전체응답시간은 빨랐다.

따라서, 쿠션영역의 특성은 외부하중의 함수이고, 쿠션스트로크시간은 쿠션슬리브의 길이에 좌우되며, 쿠션압력파형은 쿠션슬리브의 다중오리피스 분포와 밀접한 관계에 있음을 확인하였다.

(2) 메타아웃제어시스템으로 속도제어시스템을 구성한 후, 상기 항목(1)과 동일한 절차로 시험을 수행한결과, 전자는 쿠션압력이 공급압력의 배수만큼 증가하여 8, 10, 12bar로, 쿠션스트로크시간은 모두 0.4sec로 동일하였고, 후자의 경우는 쿠션압력이 7.8, 9.2, 12.5bar로 급격히 증가하였고, 쿠션스트로크시간은 0.4sec로 일정하였으며, 전체응답시간은 메타인보다 길었다.

따라서, 쿠션영역의 특성은 외부하중에 관계가 있으며, 공급압력과는 무관함을 알았다.

(3) 메타인 및 메타아웃제어시스템의 특성을 비교한 결과, 실린더 전체 응답성은 메타인이 메타아웃에 비해 0.6sec정도 빨랐고 외부조건에 따라 변화가 심하였으나, 메타아웃은 외부조건에 관계없이 거의 일정한 반면에 메타인에 비해 응답성이 길었다. 그러나 실린더내부에 공급압력과 거의 비슷한 내압이 존재하여 안정성이 뛰어났으며, 쿠션능력 또한 좋았다. 따라서 산업계의 응용시 메타아웃 제어시스템의 채택이 바람직함을 입증하였다.

참고문헌

1. Toshiharu Kagawa and Masashi Shimizu, "Air Temperature Change of Pneumatic Cylinder with Meter-out Control and Its effect on the Velocity," ASME, pp. 549-554, 1991.
2. Wang, Y. T., Singh, R. and Guenther, D. A., "Computer Simulation of a Shock-Absorbing Pneumatic Cylinder," Journal of Sound and vibration, Vol. 93, No. 3, pp. 353-364, 1983.
3. Adams, G. O., Bonnell, R. D. and Funk, J. E., "Computer Simulation of Fluid Power Systems," NCFP, pp. 169-182, 1968.
4. Parker, G. A. and Bell, J. W., "An Analysis of Pneumatic Cylinder Cushioning," IFPC, E3-39-60, 1975.
5. David, R. O., "A Computer Program for Simulation of the Air Cylinder Actuation Process," University of Wisconsin-Madison, Mechanical Engineering Dept. Rep., No. ME- FP-905, 1990.
6. Yund, Q. and Li, Y., "Computer-Aided Test and Analysis for the Dynamic Behaviour of Pneumatic Actuators and The Seal Friction," ICFP, pp. 701-703, 1987.
7. Hundal, M. S., "Response of Shock Isolators with Linear and Quadratic Damping," JOSV, Vol. 76, No. 2, pp. 273-281, 1980.
8. Romiti, A. and Raparelli, T., "Dynamic Modeling and Simulation of Pneumatic System," ISFP, pp. 137-146, 1990.
9. Horlock, J. H. and Woods, W. A., "The Thermodynamics of Charging and Discharging Processes," IME Paper Vol. 180, pp. 16-24, 1965.
10. Andersen, B. W., "The Analysis and Design of Pneumatic Systems," Wiley, 1967.
11. Kim, H. E. and Kim, D. S., "Pneumatic Cylinder utilizing Cushioning Sleeves," Quick Exhaust Valve and Quick Supply Valves, USA Patent5517898, 1996.
12. 김동수의 1인, "공압실린더," 대한민국특허등록 제166223호, 1998.
13. 김동수의 2인, "가변체적에서의 압축공기 Charging 및 Discharging 동특성 해석," KSME춘계학술대회, 1994.
14. 김동수의 3인, "공기압 쿠션실린더의 동특성에 관한 실험적 연구," KSME추계학술대회, 1994.