

릴리프밸브 쿠션기구 내장형 공기압 실린더의 구동 특성

Driving Characteristics of Pneumatic Cylinder with Relief Valve Cushion Devices

김 도 태¹

Do Tae Kim

Received: 22 Jul. 2016, Revised: 23 Aug. 2016, Accepted: 28 Sep. 2016

Key Words : Pneumatic cylinder(공기압 실린더), Relief valve cushion device(릴리프밸브 쿠션기구), Driving characteristics(구동특성), Meter-out control(미터아웃 제어), Meter-in control(미터인 제어)

Abstract: This paper presents the meter-out and meter-in speed control characteristics of a pneumatic cylinder with relief valve type cushion device. The piston displacement and velocity are measured to investigate high speed driving performance with variation of the pressure setting in relief valve, air supply pressure, load mass, the supply and exhaust flow rate from the cylinder. Also, the internal pressures and temperatures driving pressure and cushion chamber are measured. The piston displacements and velocities of meter-out and meter-in control are compared experimentally determined data. A comparison experimental data meter-out and meter-in control show that a relief valve type cushion device is suitable for high speed pneumatic cylinders. The desired response characteristics of piston displacement and velocity are satisfactory adjust the pressure setting of a relief valve with varying system parameters such as air supply pressure, load mass and controlled flow rate.

1. 서 론

공기압 실린더가 고속으로 구동되면 피스톤의 스트로크 끝단에서 충격과 진동이 발생하여 정밀한 위치제어가 곤란하기 때문에 기존 공기압 실린더의 쿠션기구 용량을 크게 하거나 충격 흡수 능력이 우수한 쿠션 메커니즘의 개발이 필요하다.¹⁻³⁾

이러한 요구에 부응하여 고속 구동용 공기압 실린더의 일부에는 릴리프밸브 쿠션기구를 채택하고 있다. 이것은 기존 니들밸브 쿠션기구를 고정 오리피스와 릴리프밸브로 대체하여 쿠션실 내부의 압력을 제어하며, 쿠션실 내부에 공기 압력이 충분히 높아질 때까지 밸브를 닫은 상태로 유지하여 피스톤의 충격

에너지를 효과적으로 흡수한다. 또한 릴리프밸브의 설정압력을 조절함으로써 기존 니들밸브 쿠션기구보다 양호한 쿠션성능을 얻을 수 있다.⁴⁾

Kim 등은 릴리프밸브 쿠션기구 내장형 고속 구동용 공기압 실린더의 실린더 튜브, 쿠션 스피어(cushion spear)와 쿠션 슬리브(sleeve)가 결합된 피스톤과 피스톤 로드, 헤드 커버와 로드 커버 등 주요 부품의 응력과 변형률을 해석하여 구조 안정성을 검토하였다.⁵⁾ 또한 공기압 실린더의 미터 아웃제어 속도 제어에서 릴리프밸브 쿠션기구의 모델링을 통하여 피스톤의 지름, 피스톤 로드의 지름, 쿠션링의 지름과 길이 및 피스톤의 스트로크가 쿠션특성에 미치는 영향을 조사하였다.⁶⁾

Kim, Zhang은 공기압 실린더 피스톤의 속도변화에 따른 쿠션실의 흡수에너지, 피스톤 구동에 따른 충격에너지 및 충격에너지 흡수효율을 도입하여, 피스톤의 구동속도가 1.8 m/s 이상으로 고속 구동될 때는 릴리프밸브 쿠션기구가 적합하며, 기존 니들밸브는 피스톤의 스트로크 끝단에서 바운드(bound) 현상이 발생하여 정밀한 위치제어가 곤란한 것을 지적하였

* Corresponding author: dtkim@kiu.ac.kr

1 School of Mechanical and Automotive Engineering, Kyungil University, Gyeongbuk 38428, Korea

Copyright © 2016, 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.

다.⁷⁾ 또한 공기압 실린더의 고속 구동 시스템에서 감쇠계수, 쿨롱 마찰력, 열전달계수의 파라미터 변화가 피스톤의 변위와 속도특성에 미치는 영향을 조사하였다.⁸⁾

그러나 공기압 실린더의 고속 구동에 따른 쿠션기구의 개선방안으로써 릴리프밸브 쿠션기구를 사용하지만, 미터인, 미터아웃 속도제어에서 릴리프밸브의 압력강하-유량특성 뿐만 아니라 공급포트, 실린더 내부 압력실과 쿠션실 및 배기포트에서 압력과 온도변화가 피스톤의 변위와 속도 등 구동특성에 미치는 영향을 실험으로 확인할 필요가 있다.

본 연구에서는 공기압 실린더의 공급포트와 배기포트에 특수하게 설계·제작한 매니폴트를 부착하여 릴리프밸브 쿠션기구의 설정압력, 공급압력 및 부하 변동에 따른 실린더의 내부 압력실과 쿠션실 및 공급/배기포트에서 압력과 온도를 직접 측정하여 고속 구동에 따른 영향을 조사하였다.

2. 실험장치

Fig. 1은 공기압 실린더의 미터아웃 속도제어 회로도, Photo. 1은 실험장치, Photo. 2는 압력센서와 온도센서가 부착된 매니폴드(manifold)이고, 실린더의 공급포트와 배기포트에 각각 결합되어 공급포트, 실린더 내부 압력실과 쿠션실 및 배기포트에서 압력과

온도를 직접 측정하도록 설계·제작하였다. 릴리프밸브 쿠션기구 내장형 공기압 실린더는 지름 25 mm, 스트로크 300 mm를 사용하였다. 공기압 실린더의 구동회로는 압축공기 공급원, 공기탱크, FR유닛, 유량조정밸브, 방향제어밸브 및 부하로 구성된다. 압축공기의 공급압력은 FR유닛의 감압밸브에서 조절하였고, 솔레노이드 조작 5포트 방향제어밸브로 압축공기의 흐름방향을 제어하였다.

Fig. 1에서 방향제어밸브와 유량조정밸브 및 공기압 실린더 사이는 지름 3/8 in로 배관하였다. 공기압 실린더의 미터아웃과 미터인 속도제어 회로는 공기압 실린더의 입구와 출구에 설치된 유량조정밸브로 공급유량과 배기유량을 제어하여 구성하였다.

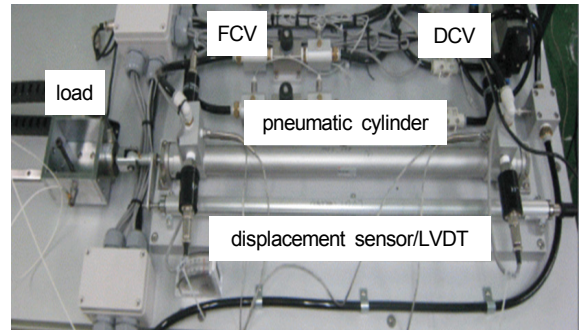


Photo. 1 Driving circuit of a pneumatic cylinder

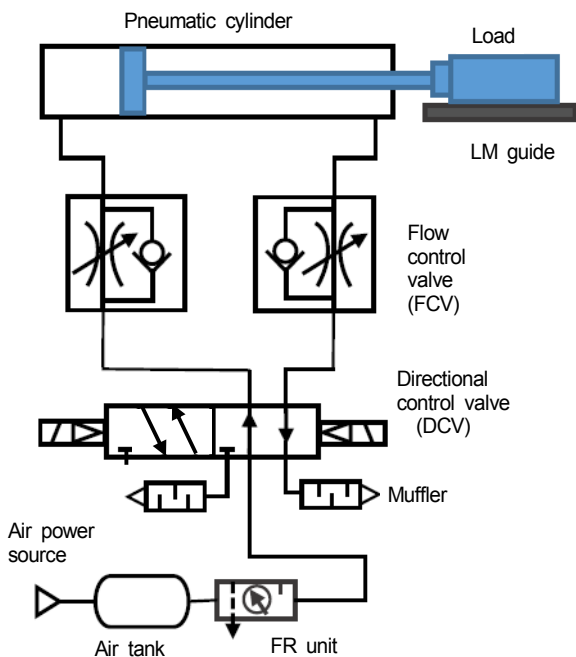


Fig. 1 Pneumatic circuit diagram of meter-out speed control

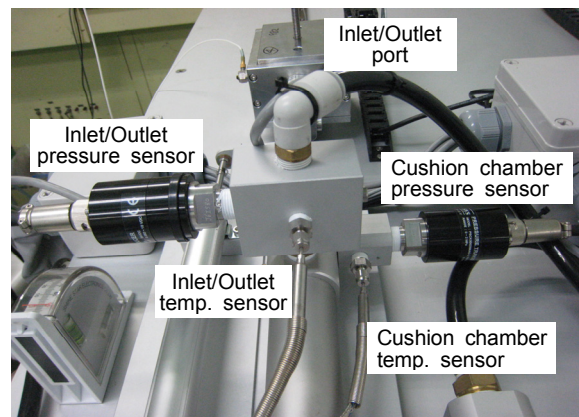


Photo. 2 Manifold attached a head and rod cover in a pneumatic cylinder

부하는 피스톤 로드와 직접 연결하였고, 마찰을 줄이기 위해 LM 가이드(THK HSR15) 레일 위에서 구동하도록 제작하였다. 부하 질량은 10.2 kg까지 변화시킬 수 있다. 공기의 압력은 반도체형 고정밀도 압력변환기(PSCK0002MAAG-W)로 측정하였고, 온도센서는 K형 열전대를 사용하였고, 배기유량은 유량계(GFMS-010018)로 측정하였다.

피스톤 변위는 Photo.1과 같이 피스톤 로드와 연결된 LVDT(SANTEST(주))를 사용하여 최대 600 mm까지 측정할 수 있다.

3. 릴리프밸브 쿠션기구의 압력-유량특성

Fig. 2는 릴리프밸브 쿠션기구의 압력강하와 유량을 측정하기 위한 공기압 회로이다. 압축공기는 쿠션실과 쿠션포트를 통과하여 릴리프밸브에 작용하도록 구성하였고, 피스톤 로드는 고정하였다. 쿠션실 내부 압력은 레귤레이터로 조정하였고, 릴리프밸브의 압력설정용 조정나사로 압력을 설정하였다. 따라서 압력조정나사를 조절하면, 쿠션실 내부의 압력을 임의로 제어할 수 있고, 릴리프밸브의 포핏(poppet)이 열려 쿠션실에서 압축공기가 릴리프밸브를 통하여 배출될 때 압력강하 $\Delta P (= P_3 - P_4)$ 와 유량을 측정하였다.

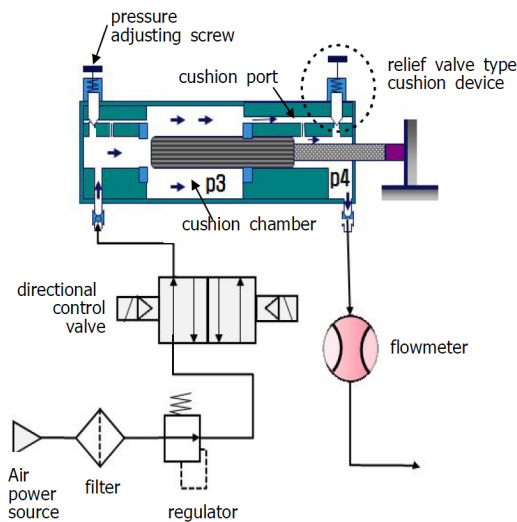


Fig. 2 Test set-up of the relief valve

Fig. 3은 릴리프밸브 쿠션기구의 압력강하-유량 특성을 나타낸다. 실험에서, Fig. 2의 왼쪽 릴리프밸브 압력설정용 조정나사는 완전히 잠근 상태에서 오른쪽 릴리프밸브의 압력조정나사를 3회전부터 7회전까지 풀어가면서 밸브 통과유량과 압력강하를 측정하였다. 압력조정나사를 풀면 릴리프밸브의 포핏에 작용하는 스프링 힘이 줄어들어 크래킹 압력이 낮아지고, 쿠션실 압력이 조금만 증가하여도 밸브가 열린다. 공급압력은 10 bar로 일정하게 유지한 상태에서 압력조정나사 3회전과 7회전을 비교해 보면, 3회전에서는 압력차가 약 7.8 bar까지는 유량이 거의 없고, 압력차가 9.2 bar에서 60 L/min 정도가 밸브에서 배출

된다. 7회전에서는 3.5 bar에서 124 L/min이고, 6 bar에서는 237 L/min의 유량이 밸브를 통과한다. 이 결과에서 릴리프밸브 쿠션기구의 압력조정나사로 릴리프밸브의 크래킹 압력을 조절하여, 쿠션실 압력과 밸브 통과유량을 적절하게 제어할 수 있다.

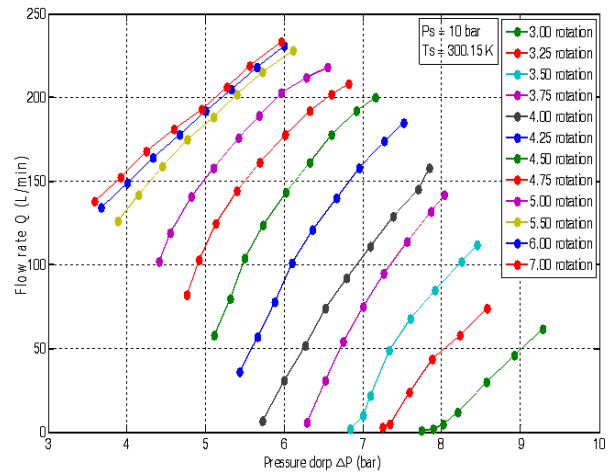


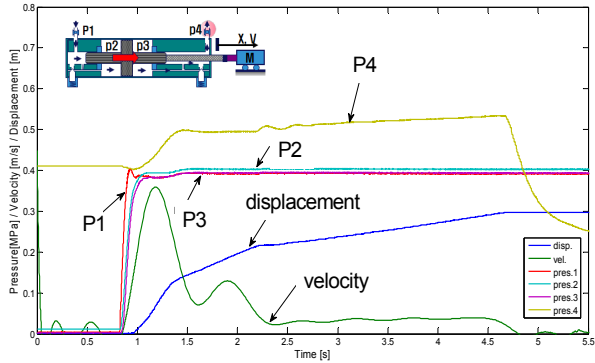
Fig. 3 Pressure drop-flow rate characteristics of relief valve type cushion device

4. 미터아웃/미터인 속도제어 계측파형 비교

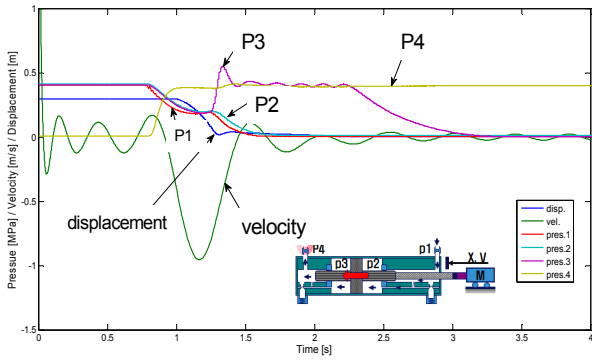
4.1 미터아웃/미터인 속도제어 계측파형 비교

Fig. 4는 공기압 실린더($\phi 25$ -S300)의 배기측 유량 제어밸브 유효단면적 0.52 mm^2 에서 미터아웃 제어인 경우 공급압력 0.4 MPa, 부하질량 3.0 kg, 릴리프밸브 압력조정나사 3회전에서 동력행정(a)과 복귀행정(b)의 계측파형이다. P_1 은 공급압력, P_2 는 실린더 내부 압력, P_3 는 실린더 내부 쿠션실 압력, P_4 는 배기측 압력, Displacement는 피스톤의 변위, Velocity는 속도파형이다. Fig. 4의 종축에는 압력 [MPa], 속도 [m/s], 변위 [m]를 같은 스케일로 나타내었다. 동력행정은 피스톤이 왼쪽에서 오른쪽으로 전진하는 행정이며, 압축공기가 실린더에 공급되면, 공급압력 P_1 과 압력실 압력 P_2 는 급격하게 상승하며, 피스톤은 정지 상태에서 속도가 급격하게 증가하고, 피스톤의 변위파형에서 보듯이 피스톤이 이동하여 쿠션작용이 일어나면 감속된다. 미터아웃 제어는 실린더에서 배출되는 공기의 유량을 제어하기 때문에 배기압력 P_4 가 증가하여 배압(back pressure)을 형성하고, 공급압력 P_1 과 압력실 압력 P_2 는 피스톤이 구동하는 동안 고압으로 유지된다. 복귀행정(b)은 배기측 유량이 제어되지 않기 때문에 동력행정보다도 피스

톤 속도가 증가한다. (b)에서 보듯이 피스톤의 속도가 약 1 m/s 정도로 빠르기 때문에 쿠션실 내부압력 P_3 가 상승하여 릴리프밸브 쿠션기구가 작동하고 스트로크 끝단 부근에서 감속된다.



(a) Power stroke(forward stroke)

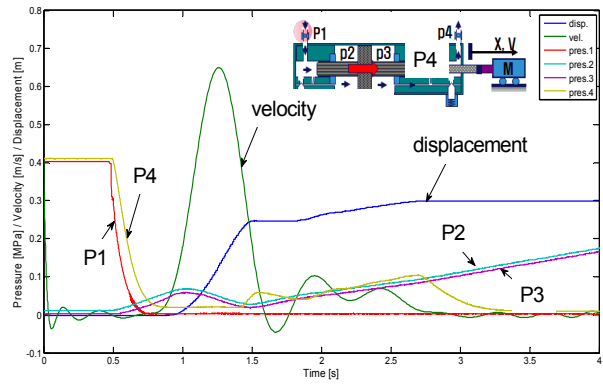


(b) Return stroke(backward stroke)

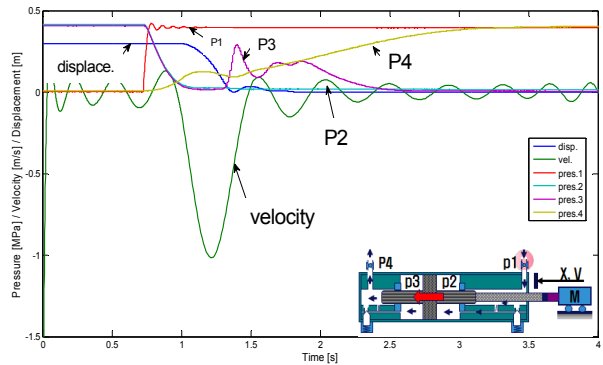
Fig. 4 Measured wave forms of meter out control for exhaust effective area 0.52 mm^2

Fig. 5는 Fig. 4와 같은 조건에서 공급측 유량제어 밸브 유효 단면적 0.52 mm^2 에서 미터인 제어의 계측 파형이다. Fig. 5의 종축은 압력 [MPa], 속도 [m/s], 변위 [m]를 같은 스케일로 나타내었다. Fig. 4의 미터아웃 계측 결과와 비교해 보면, 압력과 속도파형에서 큰 차이를 보인다. 특히 배기측 압력 P_4 는 피스톤이 움직이기 시작하면 급격하게 낮아지고, 실린더 내부압력실 압력 P_2 와 쿠션실 압력 P_3 는 피스톤의 변위와 함께 증가하고, 피스톤이 스트로크 끝단에 도달하였을 때 공급압력과 같아진다. 배기측에 배압이 작용하지 않기 때문에 피스톤의 속도는 크게 증가한다. 복귀행정(b)에서는 배기측 유량이 제어되지 않고 신속하게 배출되므로 속도가 증가하게 된다. 복귀행정에서 피스톤의 최대속도는 약 1 m/s 정도로 빠르기

때문에 쿠션실 내부압력 P_3 가 상승하여 릴리프밸브 쿠션기구가 작동하는 것을 알 수 있다.



(a) Power stroke(forward stroke)



(b) Return stroke(backward stroke)

Fig. 5 Measured wave forms of meter in control for inlet effective area 0.52 mm^2

Fig. 6은 공급압력 0.6 MPa, 부하질량 6.0 kg, 릴리프밸브 압력조정나사 3회전에서, 미터아웃제어와 미터인 제어의 쿠션실 압력과 온도, 배기측 온도 및 피스톤 변위 파형이다. 미터아웃과 미터인 제어의 쿠션실 압력파형에서 보듯이, 미터아웃 제어는 배출되는 유량을 제어하기 때문에 피스톤이 움직이기 시작하면 쿠션실 내부에 배압이 발생되어 압력이 급상승하며, 이에 따라 쿠션실 온도도 약 2°C 정도 상승하는 것을 알 수 있다. 또한 배기측 온도도 피스톤 변위와 더불어 완만하게 증가하는 경향을 보인다. 미터인 제어는 공급측 유량을 제어하여 피스톤 속도를 제어하기 때문에 배기측에는 배압이 거의 작용하지 않는다. 따라서 쿠션실 압력과 온도는 피스톤 변위와 더불어 증가하며, 피스톤이 움직이기 시작하면 배기측 온도는 낮아지며, 미터아웃 제어와 다른 온도특성을 나타낸다.

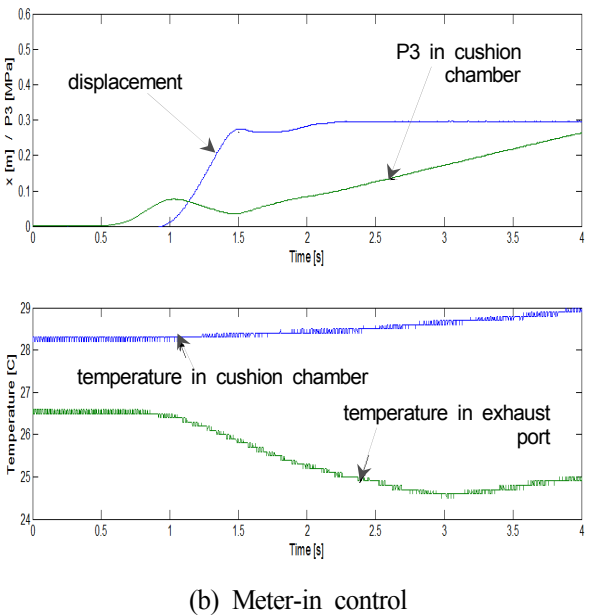
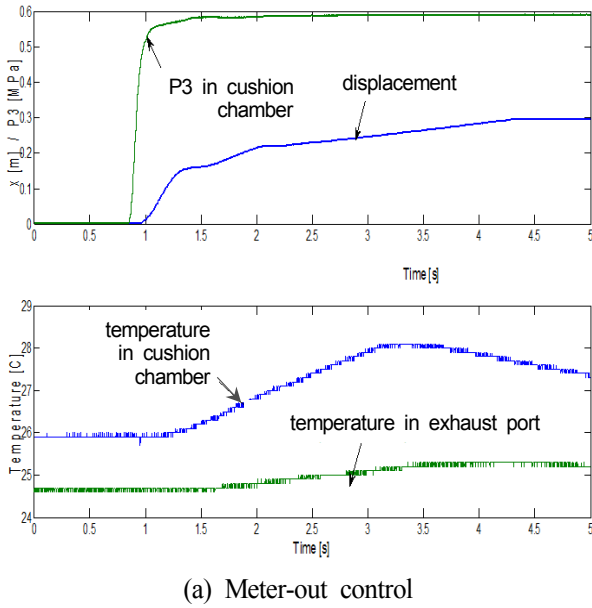


Fig. 6 Comparison of pressure and temperature wave forms in cushion chamber

4.2 릴리프밸브 설정압력의 영향

릴리프밸브 쿠션기구는 압력조정나사로 릴리프밸브의 포트에 작용하는 스프링 힘을 조절하여 쿠션실에 작용하는 최고 압력을 설정한다.

Fig. 7은 공급압력 0.6 MPa, 부하질량 3kg, 유효단면적 0.52mm²에서 릴리프밸브의 설정압력 변화에 따른 미터아웃과 미터인 제어의 변위파형이다. Fig. 7에서 보듯이 압력조정나사를 3회전, 5회전, 7회전함에 따라 피스톤 변위파형과 응답성에 큰 차이를 보인다. 이것은 압력조정나사를 7회전까지 풀게 되면 밸브 포트에 작용하는 스프링 힘이 약해져 쿠션실에서 발

생되는 배압이 낮아지기 때문에 릴리프밸브가 낮은 압력에도 열려 쿠션작용이 거의 일어나지 않기 때문이다. 3회전에서는 밸브의 스프링 힘이 포트에 강하게 작용하므로 쿠션실 내부의 배압이 증가하여 피스톤의 변위 응답이 늦어진다. 이 결과에서 쿠션실의 압력, 즉 피스톤 운동방향에 대항하여 발생하는 배압은 릴리프밸브의 압력조정나사로 적절하게 제어할 수 있고, 쿠션실 압력을 조절하여 양호한 변위파형을 얻을 수 있는 것을 볼 수 있다. 또한 미터아웃과 미터인 제어의 피스톤 변위파형에서 응답성이 비교적 양호한 7회전을 비교해 보면, 미터아웃 제어는 스트로크 0.3 m에 도달하는데 약 1.9초가 소요되며, 미터인 제어에서는 약 0.57초가 걸린다. 이 결과로부터 같은 구동조건에서 피스톤의 변위의 응답성 측면만을 고려하면 미터인 제어가 유리하다.

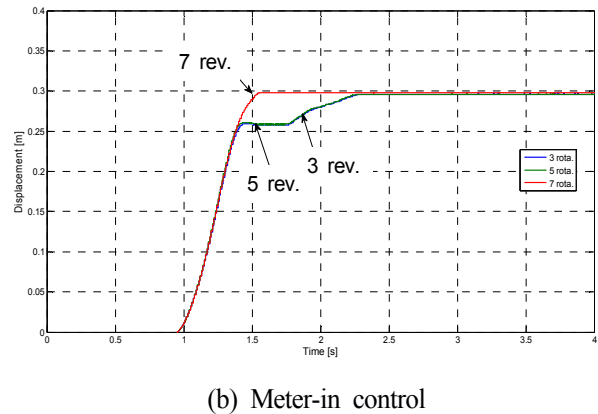
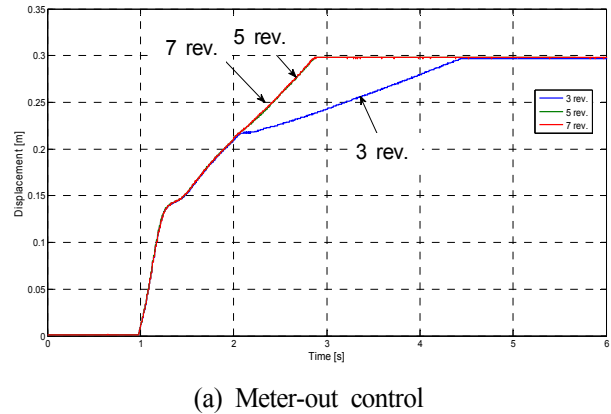
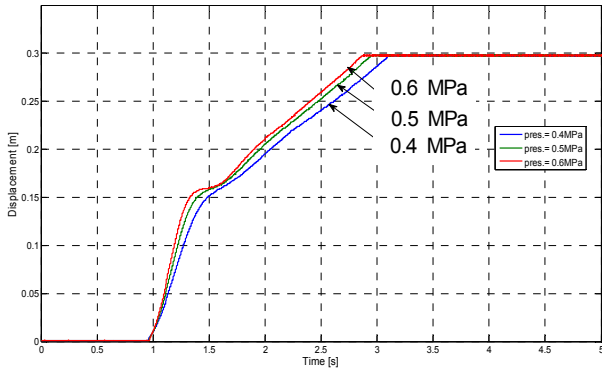


Fig. 7 Comparison of displacement wave forms varying pressure setting

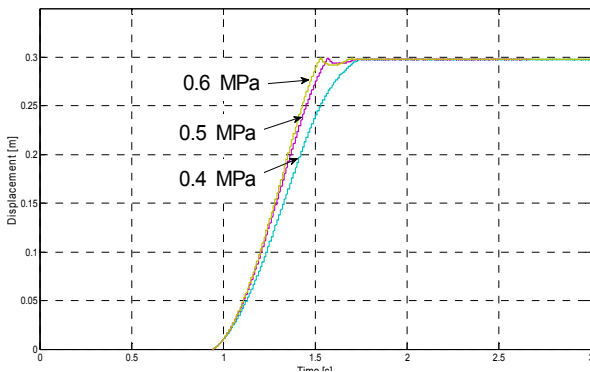
4.3 공급압력의 영향

Fig. 8은 유량제어밸브의 유효단면적 0.52 mm²에서 부하질량 6 kg, 릴리프밸브 압력조정나사 7회전에서 공급압력 변화에 따른 피스톤 변위파형이다. 미터아

웃과 미터인 제어의 변위과형을 비교해 보면, 같은 조건에서 미터인제어의 응답성이 미터아웃제어 보다 양호하다. 또한 공급압력이 증가할수록 미터아웃과 미터인 제어 모두 응답성이 향상된다. 이것은 공급압력이 증가하면 밀도가 큰 압축공기가 실린더에 공급되기 때문에 질량유량이 증가하기 때문이다.



(a) Meter-out control



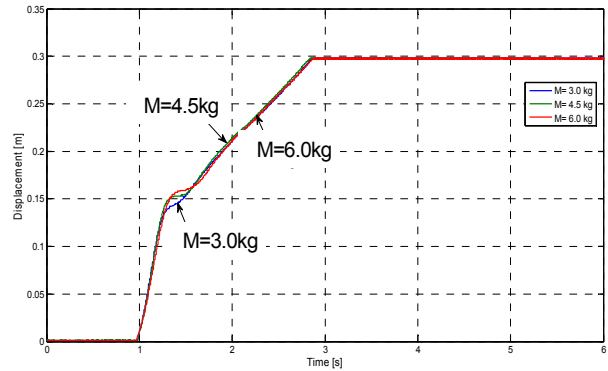
(b) Meter-in control

Fig. 8 Comparison of displacement wave forms varying supply pressures

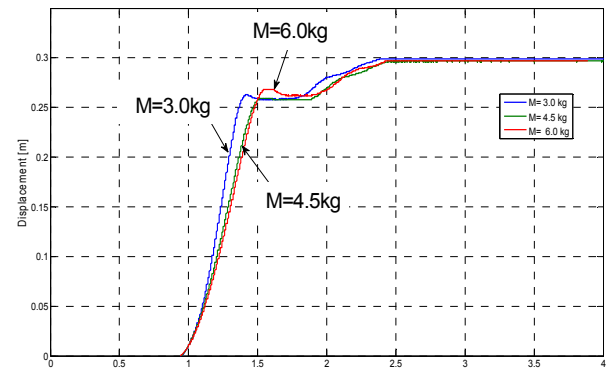
4.4 부하질량의 영향

Fig. 9는 유량제어밸브 유효단면적 0.52 mm^2 , 공급압력 0.5 MPa , 압력조정나사 3회전에서 부하질량을 3 kg , 4.5 kg , 6 kg 으로 변화시켰을 때 변위과형이다. Fig. 9(a)에서 보듯이 미터아웃 제어는 부하변동에 따라 피스톤이 움직이기 시작할 때와 행정 끝단에 도달할 때까지 걸리는 시간은 거의 같고, 스트로크 끝단에 도달하는 과정에서 약간의 응답성이 차이는 있지만, 부하질량이 변위과형에 큰 영향을 주지 않는다. 미터아웃제어는 실린더의 쿠션실에서 배압이 발생되고, 피스톤의 압력실과 쿠션실에서 작용하는 압력차에 따라 피스톤이 운동하기 때문에 부하질량의 영향은 크게 작용하지 않은 것으로 판단된다. 같은

조건에서 미터인 제어는 미터아웃 제어보다 응답성은 양호하지만 부하의 영향을 크게 받는다. 또한 미터아웃제어에서도 릴리프밸브의 설정압력을 적절하게 조정하면 응답성이 양호한 변위과형을 얻을 수 있는 것을 확인하였다.



(a) Meter-out control



(b) Meter-in control

Fig. 9 Comparison of displacement wave forms varying load masses

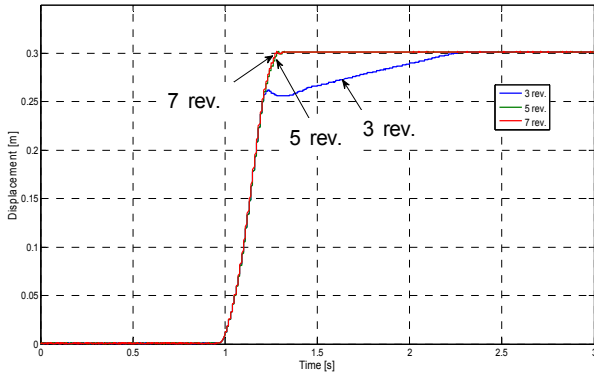
4.5 제어유량의 영향

Fig. 9(a)는 Fig. 7(a)의 미터아웃 제어와 같은 조건에서 배기측 유량제어밸브의 유효단면적을 0.52 에서 3.48 mm^2 으로 실린더에서 배출유량을 증가시켰을 때의 피스톤 변위과형이다. Fig. 7(a)의 과형과 비교해 보면, 배출유량이 증가하면 피스톤의 속도도 증가하여 피스톤의 응답성이 크게 향상된다.

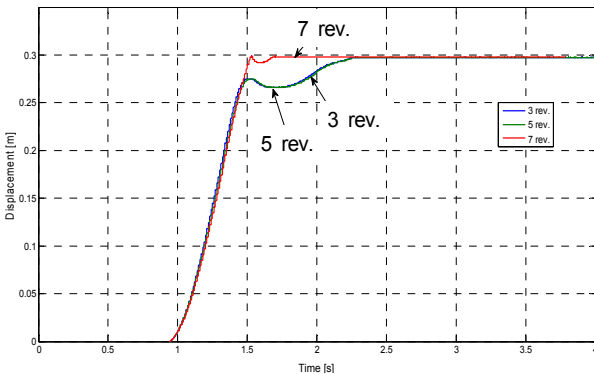
또한 3회전에서는 피스톤 변위 과형의 초기 응답성은 양호하지만 전체적으로 변위과형이 만족스럽지 못한 결과를 나타낸다. 이것은 릴리프밸브의 설정압력이 쿠션실 압력보다 높게 설정되었고, 실린더에 공급되는 유량이 부족하기 때문에 나타나는 현상으로 판단된다.

Fig. 9(b)는 공급측 유량제어밸브의 유효 단면적

1.74 mm², 공급압력 0.4 MPa, 부하질량 3.0 kg에서 미터인 제어의 변위파형을 나타낸다. Fig. 7(b)와 비교하여 응답성은 크게 향상되지만, 압력조정나사의 3회전, 5회전에서는 릴리프밸브의 설정압력이 너무 높아 피스톤 변위파형의 응답 지연이 발생하며, 7회전에서는 설정압력이 낮아 피스톤이 스트로크 끝단에 도달하였을 때 약간 바운드 현상이 일어나지만, 이것은 압력조정나사로 적절히 제어할 수 있다.



(a) Meter-out control



(b) Meter-in control

5. 결론

본 연구에서는 릴리프밸브 쿠션기구 내장형 공기압 실린더의 미터아웃과 미터인 속도제어 실험을 수행하고 실험결과를 고찰하여, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 릴리프밸브 쿠션기구는 공기압 실린더의 고속 구동에 적합하며, 다양한 구동조건에 대응하여 압력 조정나사로 쿠션실 압력을 제어하여 양호한 쿠션 성능을 얻을 수 있었다.

2) 미터아웃과 미터인 제어에서 공기압 실린더 내부 압력실과 쿠션실의 압력과 온도를 직접 측정하여 쿠션성능에 미치는 영향을 확인하였다.

3) 미터아웃 제어의 피스톤 속도는 미터인 제어 보다 부하질량에 큰 영향을 받지 않고 일정하며, 피스톤의 응답성 측면만 고려하면 미터인 제어가 유리하다.

4) 미터아웃과 미터인 제어에서 공급압력과 부하 변동 및 유량제어밸브의 유효 단면적 변화에 따른 피스톤의 변위는 릴리프밸브의 압력조정나사로 제어할 수 있고, 구동조건에 적합한 쿠션실 압력을 설정하여 양호한 쿠션성능을 얻을 수 있었다.

References

- 1) K. Saito, "Cylinder Cushioning Mechanism", J. of the Japan Fluid Power System Society, Vol. 39, No. 2, pp. 97-102, 2008.
- 2) B. Peter, "Pneumatic Drives, System Design, Modelling and Control", Springer, Germany, pp. 99-111, 2007.
- 3) J. Matsuura, "Rubber Air Cushion", J. of the Japan Fluid Power System Society, Vol. 35, No. 2, pp. 98-101, 2004.
- 4) Y. Yamashita, "Hydraulic and Pneumatic components with Shock-Absorbing Capacity (Shock-Absorbing Technique at Air Cylinder)", J. of the Japan Fluid Power System Society, Vol. 35, No. 2, pp. 106-109, 2004.
- 5) D. T. Kim, D. S. Kim and M. J. Ju, "A Study on the Design of a High-Speed Pneumatic Cushion Cylinder", Transactions of Korean Society of Machine Tool Engineers, Vol. 18, No. 5, pp. 491-497, 2009.
- 6) D. T. Kim and Z. J. Zhang, "Analysis of Cushion Mechanism with Relief Valve for High-Speed Pneumatic Cylinder", Transactions of KSAE, Vol. 18, No. 3, pp. 95-103, 2010.
- 7) D. T. Kim and Z. J. Zhang, "Characteristic Comparison on Internal Cushion Devices at High-Speed Pneumatic Cylinders", Transactions of KSAE, Vol. 21, No.6, pp.24-30, 2013.
- 8) D. T. Kim and Z. J. Zhang, "Comparison of Cushion Performance on Parameter Changes in High Speed Pneumatic Cylinder Driving System", J. of Drive and Control, Vol.12, No. 4, pp.54-59, 2015.