

# 공기압 실린더 고속 구동시스템에서 파라미터 변화에 따른 쿠션성능 비교 Comparison of Cushion Performance on Parameter Changes in High Speed Pneumatic Cylinder Driving System

김도태<sup>1\*</sup> · 장중걸<sup>2</sup>

Do Tae Kim and Zhong Jie Jang

Received: 04 Nov. 2015, Accepted: 25 Nov. 2015

**Key Words** : Pneumatic cylinder(공기압 실린더), Cushioning performance(쿠션성능), Relief valve cushioning device(릴리프밸브형 쿠션기구), Parameter changes(파라미터 변화)

**Abstract**: Due to the tendency to use high speed pneumatic cylinders to improve productivity, cushioning devices are adopted to decelerate the piston motion of pneumatic cylinders to reduce noise, vibration, and impact. This paper presents a comparison of the cushion characteristics of a high speed pneumatic cylinder with a relief valve type cushioning device. The system parameters selected are the damping coefficient, Coulomb friction, heat transfer coefficient, and cracking pressure of the relief valve in the air cushioning device. The integral of the time multiplied square error (ITSE) is used to quantitative measure the cushioning performance to assess the effect of varying these. The cushioning performance achieved good results when the ITSE is a minimum value. In a comparison of the piston displacement and velocity with the variations in system parameters, the heat transfer coefficients are not as significantly affected as the other. Also, the cracking pressure of the relief valve is mainly affected by the pressure and temperature in the cushion chamber.

## 기호 설명

$A$  : area,  $m^2$

$B_v$  : damping coefficient,  $N\cdot s/m$

$C_d$  : discharge coefficient

$C_v$  : specific heat at constant volume,  $kJ/(kg\ K)$

$F_c$  : Coulomb friction force,  $N$

$h$  : heat transfer coefficient,  $kW/(m^2\ K)$

$m$  : mass of air,  $kg$

$\dot{m}$  : mass flow rate,  $kg/s$

$M$  : mass of piston and load,  $kg$

$P$  : pressure,  $Pa$

$R$  : gas constant,  $kJ/(kg\ K)$

$S$  : surface area of cylinder tube,  $m^2$

$T$  : temperature,  $K$

$t$  : time,  $s$

$V$  : volume,  $m^3$

$x$  : displacement,  $m$

$\kappa$  : ratio of specific heat

## 1. 서 론

공기압 실린더의 쿠션기구는 피스톤이 스트로크(stroke) 끝단부에 도달하였을 때 발생하는 충격과 진동을 흡수하며, 보통 실린더 헤드커버와 캡커버에 내장된 공기 쿠션기구를 사용한다.

산업용으로 많이 사용하는 표준 공기압 실린더는 니들밸브형(needle valve type) 쿠션기구를 사용하며, 쿠션실에서 배출되는 공기유량을 교축밸브로 조절하

\* Corresponding author: dtkim@kiu.ac.kr

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

2 College of Mechanical Engineering, Shanghai University of Engineering Science, China

Copyright © 2015, 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.

여 쿠션실 내부에 배압을 발생시켜 완충효과를 얻고, 쿠션기구 해석, 설계 및 동특성 향상 방안 등이 제시되어 있다.<sup>1-4)</sup>

최근 공기압 실린더의 고속화에 따라 큰 충격에너지를 흡수하기 위해서는 기존 쿠션기구의 대용량화가 요구되며, 그 대책의 하나로써 릴리프밸브형(relief valve type) 쿠션기구가 개발되어 있다.<sup>5)</sup>

Kim, Zhang은 릴리프밸브형 쿠션기구를 내장한 고속 공기압 실린더의 쿠션 메커니즘을 모델링하고, 피스톤 지름, 쿠션링의 지름과 길이 및 피스톤 스트로크 변화에 따른 쿠션실 내부의 압력과 온도, 질량유량 변화에 대한 피스톤의 변위와 속도특성을 검토한 결과, 피스톤 속도가 약 1.8 m/s 이상의 고속구동에서는 릴리프밸브형 쿠션기구가 적합하며, 니들밸브형은 스트로크 끝단에서 바운드(bound)현상이 발생하여 정밀한 위치제어가 곤란한 것을 확인하였다.<sup>6-7)</sup>

또한 저마찰, 고속구동 공기압 실린더에 사용하는 스퀴즈형 피스톤 실(piston seal)의 간섭량, 작동압력, 피스톤 속도 등의 구동조건에 대한 실의 접촉압력, 응력-변형률분포, 마찰력 등을 구하여 고속구동에 적합한 피스톤 실의 단면형상에 대한 마찰특성을 조사하였다.<sup>8-9)</sup> 아울러 공기압 실린더에서 발생하는 마찰력을 추정하기 위해 마찰력 관측기와 저속에서 발생하는 스틱슬립(Stick slip)을 보상하기 위해 임펄스제어(impulse control)를 동시에 수행하여 위치제어의 성능개선을 도모하였다.<sup>10)</sup>

본 연구에서는 릴리프밸브형 쿠션기구를 내장한 공기압 실린더의 쿠션특성에 영향을 미치는 감쇠계수, 쿨롱(Coulomb) 마찰력, 열전달계수 및 릴리프밸브의 크래킹압력(cracking pressure) 변화에 따른 피스톤의 변위 및 속도특성을 조사하였다. 또한 파라미터 변화에 따른 공기압 실린더의 위치제어 편차를 나타내는 척도로서 제곱오차 시간곱 적분(ITSE: Integral of Time multiplied by the Square Error)을 사용하여, 오차의 크기를 정량적으로 비교·검토하였다.

## 2. 공기압 실린더 구동 시스템의 모델링

Fig. 1은 릴리프밸브형 쿠션기구를 내장한 고속 공기압 실린더의 개략도이다. 피스톤의 속도제어는 실린더에서 배출되는 공기를 조절하는 미터아웃(meter-out)방식을 채택하였다. 공기압 실린더는 4개의 검사체적(CV)으로 나누어 모델링하였고, 충격·흡수작용이 일어나는 쿠션실(CV3)의 동적거동을 파악

하여 피스톤의 변위 및 속도특성을 조사하였다.

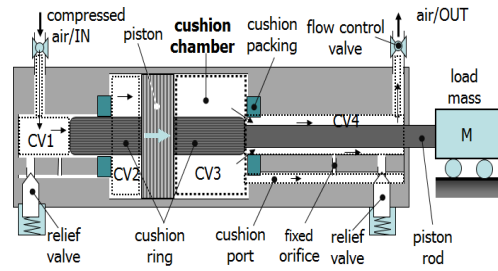


Fig. 1 Pneumatic cylinder driving system

Fig. 1의 쿠션실에서 압력, 평균온도, 질량유량 및 피스톤의 운동방정식은 다음과 같고, 하첨자 3은 쿠션실(CV3)을 나타낸다.<sup>7)</sup>

$$\frac{dP_3}{dt} = -\frac{P_3}{V_3} \frac{dV_3}{dt} + \frac{m_3 R}{V_3} \frac{dT_3}{dt} + \frac{R T_3}{V_3} \dot{m}_3 \quad (1)$$

$$\dot{m}_3 = -\dot{m}_g - \dot{m}_i - \dot{m}_f \quad (2)$$

$$C_V m_3 \frac{dT_3}{dt} = R T_3 \dot{m}_3 - P_3 \frac{dV_3}{dt} + hS(T_a - T_3) \quad (3)$$

$$M \frac{d^2x}{dt^2} = P_2 A_p - P_3 (A_p - A_r) + P_a A_r - B_v \frac{dx}{dt} - F_c \quad (4)$$

식(3)에서,  $\dot{m}_g$ 는 피스톤 로드와 쿠션패킹 사이의 틈새를 통과하는 질량유량,  $\dot{m}_i$ 는 쿠션포트에 고정 오리피스(fixed orifice)를 통과하는 질량유량,  $\dot{m}_f$ 는 릴리프밸브를 통과하는 질량유량이고, 다음과 같이 구한다.

1) 쿠션실 내부압력이 릴리프밸브의 설정압력보다 높을 때( $p_3 \geq p_{set}$ )

(1) 초크되지 않은 흐름(unchoked flow)

$$\dot{m}_f = C_d A_v P_3 \sqrt{\frac{2\kappa}{RT_3(\kappa-1)}} \left[ \left( \frac{P_a}{P_3} \right)^{\frac{2}{\kappa}} - \left( \frac{P_a}{P_3} \right)^{\frac{\kappa+1}{\kappa}} \right] \quad (5)$$

(2) 초크 흐름(choked flow)

$$\dot{m}_f = C_d A_v P_3 \left( \frac{2}{\kappa+1} \right)^{\frac{1}{\kappa-1}} \sqrt{\frac{2\kappa}{RT_3(\kappa+1)}} \quad (6)$$

2) 쿠션실 압력이 릴리프밸브의 설정압력보다 낮을 때( $p_3 < p_{set}$ )는 릴리프 밸브가 열리지 않고 식

(2)에서  $\dot{m}_f$ 로 된다. 식에서  $A_v$ 는 릴리프밸브의 개구면적이다.

공기압 실린더의 스트로크가 300 mm일 때, 위치제어 목표값을 0.3 m로 설정하고, 피스톤 변위  $x(t)$ 와 목표값과의 편차를 오차  $e(t)$ 로 나타내면, 식 (7)과 같다.

$$e(t) = 0.3 - x(t) \tag{7}$$

또한 파라미터 변화에 따른 피스톤 변위의 위치제어 편차 크기를 나타내는 척도로써 제곱오차 시간곱적분(ITSE)을 사용하였고, 식 (8)과 같다.

$$ITSE = \int_0^{t_s} t e^2(t) dt \tag{8}$$

이것은 제곱오차에 시간의 가중치를 곱함으로써 피스톤 운동 초기에 발생하는 큰 변위 오차는 ITSE에 크게 영향을 주지 않기 때문에 부하질량과 같은 관성의 영향을 피하기 어려울 때 유리한 이점이 있다. 또한 식(8)에서 상한 값  $t_s$ 는 ITSE 값이 정상상태로 수렴할 때까지의 유한한 시간을 나타내며, 보통 제어계에서는 정정시간(settling time)으로 설정하며, 여기서는 0.5로 하였다.

### 3. 파라미터 변화에 따른 쿠션특성 비교

고속 공기압 실린더 구동시스템의 시스템 파라미터로써 감쇠계수, 쿨롱마찰력, 열전달계수, 릴리프밸브의 크래킹 압력을 선정하고, 식(1)~식(6)의 수학적 모델링 결과를 기초로 하여 MATLAB으로 수치해를 구하여, 그 영향을 조사하였다.

파라미터의 변화에 따른 공기압 실린더의 쿠션성능을 비교할 때, 피스톤 변위나 속도가 어떤 조건에서 쿠션 특성이 양호한가를 명확하게 할 필요가 있다. 주요 고려사항은 피스톤이 최대한 짧은 시간에 스트로크 끝단부에 도달해야 하고, 피스톤이 바운드(bound)하거나 진동하지 않으며, 피스톤이 스트로크 끝단에 도달하기 전에 정지하지 않아야 한다.

Table 1은 고속 구동용 공기압 실린더(SMC사, RHC25-300)의 제원 및 수치해석에 사용한 값이다. 파라미터의 기준 값은 공급압력 0.5 MPa, 질량 2 kg, 감쇠계수 30 Ns/m, 쿨롱 마찰력 10 N, 열전달계수 100 J/(m<sup>2</sup> K) 및 릴리프밸브의 크래킹 압력은 0.7 MPa이다.

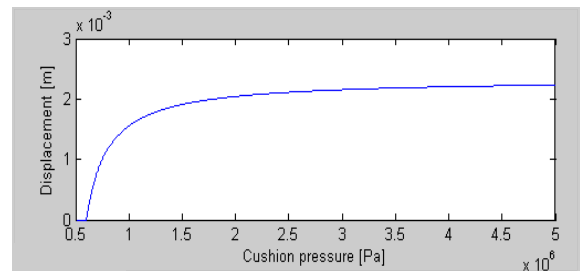
Table 1 Simulation parameters

피스톤 지름	25 mm	$M$	2 kg
피스톤 로드 지름	12 mm	$C_v$	0.717kJ/(kg K)
스트로크	300 mm	$R$	287 J/(kg K)
쿠션링 지름	12 mm	$\kappa$	1.4
쿠션링 길이	80 mm	$C_d$	0.65

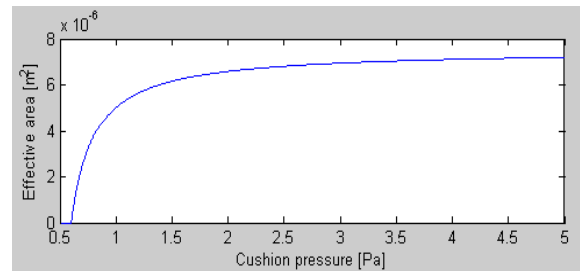
#### 3.1 쿠션기구의 릴리프밸브 특성

Fig. 2는 고속 공기압 실린더의 쿠션기구에 내장된 릴리프밸브 특성을 나타낸다. 릴리프밸브의 개구면적을 통과하는 공기유동은 압축성을 고려한 단일과정으로 가정하였고, 식 (5), (6)에서 질량유량을 구하였다. 이 때 릴리프밸브의 포핏(poppet)이 열리기 시작하는 크래킹 압력  $P_c$ 은 0.6 MPa, 릴리프밸브 출구포트 압력은 대기압으로 설정하였다.

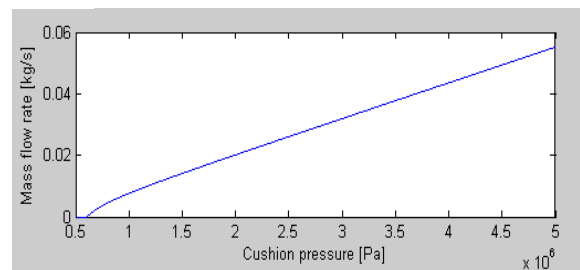
Fig. 2에서 보듯이 Fig. 1의 쿠션실(CV3) 압력이 크래킹압력 보다 높아지면 릴리프밸브의 포핏이 열리고, 약 3 MPa 이상이 되면 포핏의 최대 변위인 2.3



(a) Cushion pressure-poppet displacement



(b) Cushion pressure-effective area



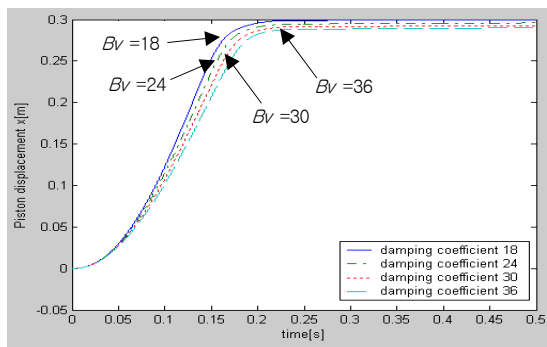
(c) Cushion pressure-mass flow rate

Fig. 2 Characteristics of relief valve

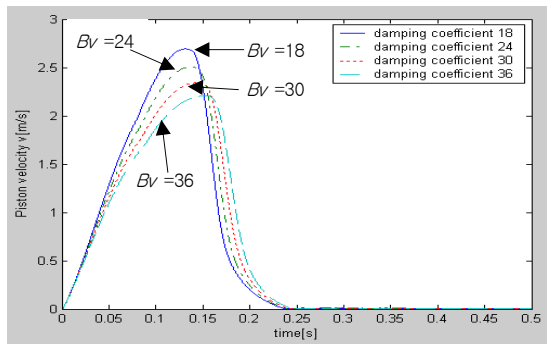
mm에 근접한다. 또한 쿠션실 내부 압력이 1.0 MPa 까지 높아지면 포핏 변위도 급격하게 증가하며, 1.0 MPa일 때 변위가 약 1.5 mm로 되어 릴리프밸브가 65% 정도가 열리는 것을 알 수 있다. 포핏의 변위가 증가함에 따라 밸브 유효면적(effective area)도 같은 경향으로 증가하며, 밸브가 완전히 열린 상태에서 유효면적은  $7.2 \times 10^{-6} \text{ mm}^2$  이다. 또한 유효면적이 증가함에 따라 릴리프밸브를 통과하는 질량유량도 비례하여 증가한다.

### 3.2 감쇠계수의 영향

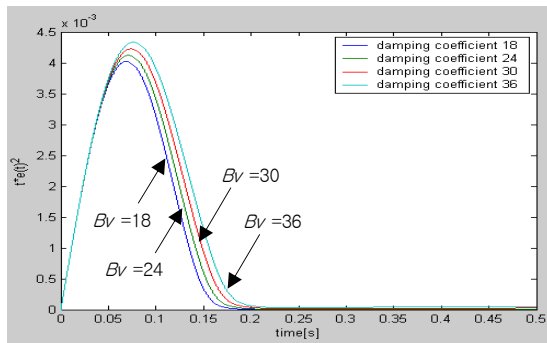
Fig. 3은 수평으로 설치된 고속 공기압 실린더의 미터아웃제어에서 감쇠계수 변화에 따른 쿠션특성을 나타낸다. 시뮬레이션에서는 Table 1과 파라미터의



(a) Piston displacement wave forms



(b) Piston velocity wave forms



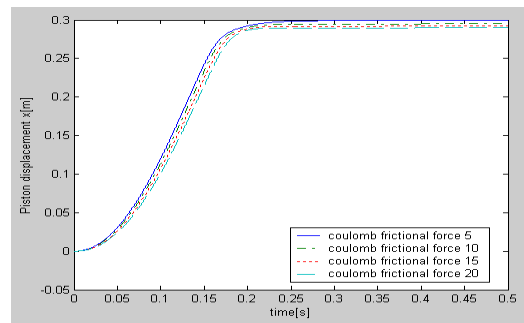
(c) Time multiplied by the square error

Fig. 3 The effect of varying damping coefficients

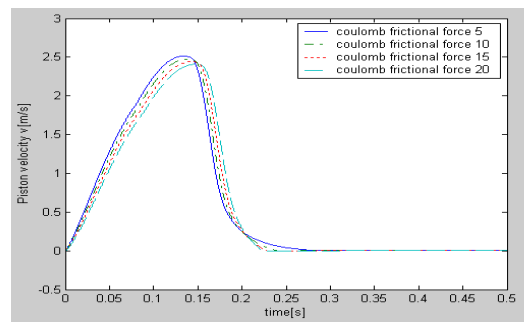
기준 값을 사용하고 감쇠계수만을 변화시킨 경우의 결과이다. 피스톤의 변위와 속도파형에서 감쇠계수가 18에서 36 N·s/m까지 2배로 증가할 때 최대속도는 2.8에서 2.2m/s로 약 20 % 정도 감소하며, 응답시간도 약 0.02초 늦어진다. 또한 감쇠계수가 18 N·s/m일 때 피스톤의 응답 특성이 가장 양호하며, Table 2에서 제시한 ITSE 값도 가장 작다.

### 3.3 쿨롱 마찰력의 영향

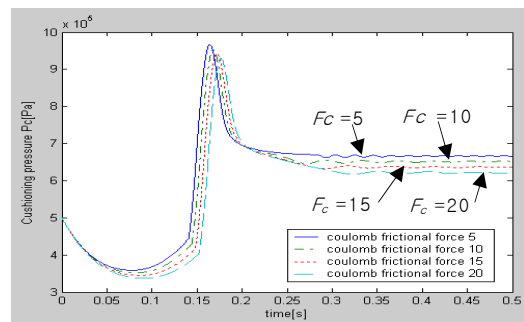
Fig. 4는 쿨롱 마찰력 변화에 대한 피스톤 변위, 속도 및 쿠션실 내부 압력파형을 나타낸다. 쿠션실 압력파형에서 보듯이 쿨롱 마찰력이 작을수록 쿠션실 내부 압력이 높고, 최고 압력에 도달하는 시간도 짧아진다. 또한 정상상태에 도달하였을 때도 쿠션실 내부 압력이 일정하게 유지되어 양호한 변위특성을 얻는다. 쿨롱 마찰력이 커질수록 피스톤의 스트로크



(a) Piston displacement wave forms



(b) Piston velocity wave forms



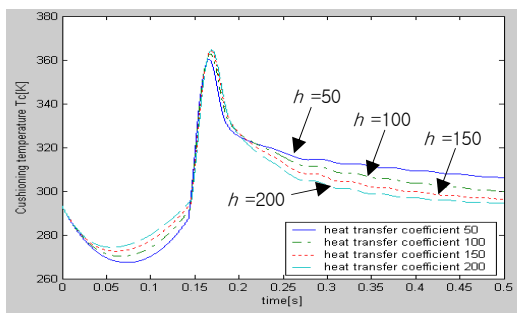
(c) Pressure wave forms in CV3

Fig. 4 The effect of varying Coulomb frictions

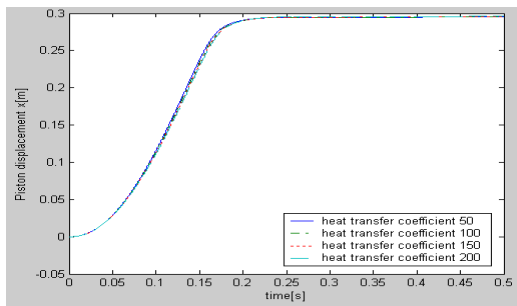
끝단부에서 압력강하가 커지고 변위특성도 나빠게 된다. 쿨롱 마찰력이 작을수록 쿠션특성이 양호하며, ITSE 값도 작아진다.

### 3.4 열전달계수의 영향

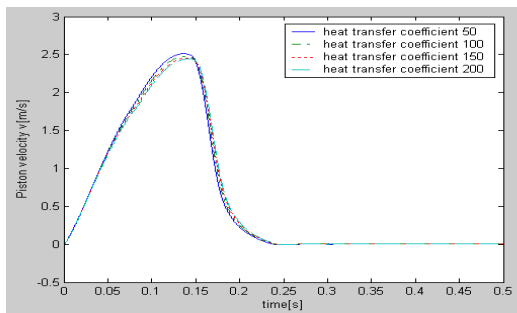
Fig. 5는 열전달계수만을 변화시킨 경우의 결과이다. 열전달계수는 피스톤이 급속하게 전진하는 구간 ( $0.02 < t < 0.15$ )과 스트로크 끝단에 도달한 후( $t > 0.2$ )에 쿠션실 온도 변화에 크게 영향을 주는 것을 볼 수 있다. 쿠션작용이 일어나기 이전에는 열전달계수가 작을수록 온도 변화가 크게 나타나고, 쿠션이 완료된 정상상태에서는 열전달계수가 증가됨에 따라 쿠션실과 외부와의 열전달이 활발하여 쿠션실 내부 온도가 빠르게 낮아지는 경향을 나타낸다. 그러나 열전달계수는 피스톤 변위와 속도에는 크게 영향을 주지 않는다.



(a) Piston displacement wave forms



(b) Piston displacement wave forms

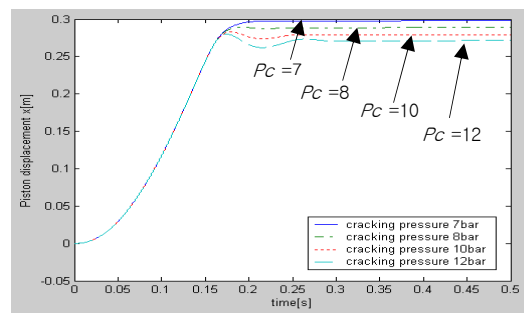


(c) Piston velocity wave forms

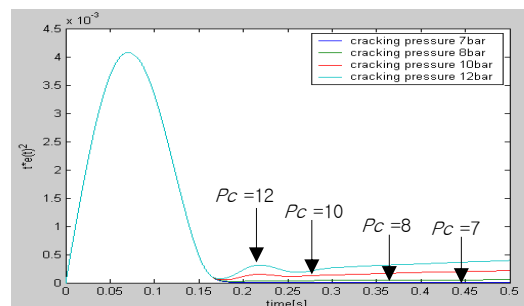
Fig. 5 The effect of varying heat transfer coefficients

### 3.5 릴리프밸브 크래킹 압력의 영향

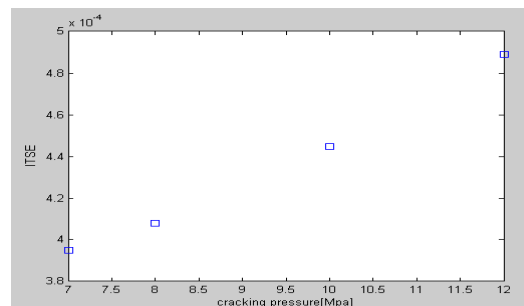
Fig. 6은 공급압력이 0.5 MPa로 일정한 조건에서 릴리프밸브 크래킹 압력 변화에 따른 결과이다. 크래킹 압력은 쿠션기구에 내장된 릴리프밸브의 포핏이 열리기 시작할 때의 압력이다. 피스톤의 변위파형(a)에서 보듯이 크래킹 압력은 피스톤이 스트로크 끝단에 도달하기 이전까지는 거의 영향을 받지 않지만, 크래킹 압력이 너무 높으면 스트로크 끝단 부근, 즉 피스톤의 변위가 0.3 m 근방에 도달하였을 때 바운드 현상이 발생하거나 스트로크 끝단부에 도달하지 못하고 중간에 정지하는 것을 볼 수 있다. 이것은 크래킹 압력이 너무 높으면 쿠션실 내부의 압축공기가 릴리프밸브를 통과하여 적절하게 배출되지 않기 때문에 피스톤이 너무 감속되어 나타나는 현상이다. 또 크래킹 압력이 너무 낮으면 쿠션실 내부 압력이 너무 낮아져 충격에너지를 흡수하는 데 필요한 만큼



(a) Piston displacement wave forms



(b) Time multiplied by the square error



(c) The ITSE of varying cracking pressures

Fig. 6 The effect of varying cracking pressures

쿠션성능이 얻어지지 않기 때문에 피스톤이 스트로크 끝단에서 직접 충돌하게 된다. 결과적으로 양호한 쿠션특성을 얻기 위해서는 릴리프밸브의 크래킹 압력을 최적인 상태로 조절하는 것이 중요하며, 크래킹 압력은 피스톤의 속응성 보다는 스트로크 끝단부에서 위치 정밀도에 크게 영향을 주는 것을 알 수 있다.

Table 2는 파라미터 변화에 따른 ITSE 값을 비교한 것이다. 각각의 파라미터 변화에 대해 ITSE 값이 작을수록 양호한 쿠션특성을 나타내고, 다른 파라미터와 비교하여 상대적으로 열전달계수 변화에 따른 쿠션특성의 영향이 작은 것을 볼 수 있다.

Table 2 Comparison of ITSE

감쇠계수	ITSE×10 <sup>4</sup>	쿨롱마찰력	ITSE×10 <sup>4</sup>
18	3.77	5	3.99
24	4.08	10	4.14
30	4.43	15	4.42
36	4.80	20	4.73
열전달계수	ITSE×10 <sup>4</sup>	크래킹압력	ITSE×10 <sup>4</sup>
50	4.07	7	3.95
100	4.14	8	4.08
150	4.19	10	4.45
200	4.23	12	4.89

#### 4. 결 론

본 연구에서는 릴리프밸브 내장형 고속 공기압 실린더 구동시스템에서 파라미터 변화에 따른 쿠션특성을 조사하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 고속 공기압 실린더에서 쿠션성능의 척도로써 ITSE를 사용하여 파라미터 변화에 따른 피스톤의 변위 및 속도편차를 정량적으로 비교·검토한 결과, ITSE 값이 작을수록 양호한 결과를 얻었다.

(2) 다른 파라미터와 비교하여 열전달계수는 쿠션실 내부의 온도변화에 영향은 주지만, 쿠션특성에는 크게 영향을 미치지 않는다.

(3) 고속 공기압 실린더에서 양호한 쿠션특성을 얻기 위해서는 릴리프밸브의 크래킹 압력을 최적인 상태로 조절하는 것이 중요하며, 크래킹 압력은 위치제어의 응답성 보다는 스트로크 끝단부에서 위치 정밀도에 크게 영향을 준다.

#### 후 기

이 연구는 2015년도 경일대학교 교내연구비지원사업으로 수행되었음을 밝힙니다.

#### References

- 1) K. Saito, "Cylinder Cushioning Mechanism", J. of the Japan Fluid Power System Society, Vol. 39, No. 2, pp. 97-102, 2008.
- 2) T. Fujita, L. R. Tokashiki, Y. Ishii and T. Kagawa, "Analysis of Pneumatic Cylinder Response Driven by Meter-out Circuit", J. of the Japan Hydraulics and Pneumatics Society, Vol. 29, No. 4, pp. 87-94, 1998
- 3) J. Matsuura, "Rubber Air Cushion", J. of Japan Hydraulics and Pneumatics Society, Vol. 35, No. 21, pp. 98-101, 2004,
- 4) J. G. Lee, X. F. Qin, J. C. Lee and H. M. Shin, "Simulation Study on the Dynamic Analysis of Spring Type needle Valve to Absorb Surge Pressure in Pneumatic Cushion Cylinder", J. of Korea Fluid Power Systems, Vol. 2, No. 1, pp. 15-22, 2005.
- 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, "Analysis of a Low Friction Piston Seal in Pneumatic Cylinders", J. of the Korea Fluid Power System Society, Vol.11, No.9, pp.21-26, 2011.
- 9) D. T. Kim and Z. J. Zhang, "The Friction Characteristics with Variation of Cross Section of Piston Seals for High Speed Pneumatic Cylinders", J. of the Korean Society for Fluid Power and Construction Equipments, Vol.9, No.1, pp.18-24, 2012.
- 10) D. T. Kim and Z. J. Zhang, "Position Control of a Pneumatic Cylinder Considering Friction Compensation", J. of the Korean Society for Fluid Power and Construction Equipments, Vol.10, No.1, pp.1-6, 2013.