

## 저마찰 · 고속 공압실린더의 마찰특성 연구

김동수(한국기계연구원 산업기술연구부), 김광영(한국기계연구원 산업기술연구부),  
최병오(한국기계연구원 산업기술연구부)

### An Experimental Study on the Friction Forces in Low Friction and High Speed Pneumatic Cylinders

D. S. Kim(Industrial Tech. Dept., KIMM), K. Y. Kim(Industrial Tech. Dept., KIMM), B. O. Choi(Industrial Tech. Dept., KIMM)

#### ABSTRACT

A Knowledge of friction force in pneumatic cylinders makes it possible to improve cylinder description during simulation and to asses performance under changing operating conditions more accurately.

Such knowledge is particularly useful, for example, when modeling continuous pneumatic positioning systems or predicting the operating conditions under which stick slip may occur, as well as in establishing preventive maintenance procedures for pneumatic cylinders.

Friction force depends on a number of factors, including operating pressure, seal running speed on the cylinder barrel and rod, barrel material and surface roughness, seal dimensions and profile, seal material, lubrication conditions, cylinder distortion during assembly, and the operating temperature of cylinder components. This paper shows a system for measuring the friction force caused by a seal used in pneumatic cylinders. Results of experimental tests show that seal friction forces for grease lubricated service are clearly dependent on speed and pressure and are less sensitive to other parameters, i.e., barrel material and roughness, seal material, and profile.

Key Words : Friction Force (마찰력), Pneumatic Cylinder (공압실린더), Roughness (조도), Lubrication and No Lubrication (윤활 및 무급유)

#### 1. 서론

저마찰 · 고속 공압 실린더의 응용은 최근에 압축 공기를 작동유체로한 저 가격형 공압서보제어시스템, 각종 피로시험기, 시뮬레이터 및 첨단시험장비의 위치, 속도 및 힘제어유닛등에 채택되어 활용되면서부터 급증하는 추세에 있다.

정확한 제어를 위해서는 제어밸브, 최종 작동기 및 센서의 응답성, 마찰특성 및 해상도 등 3박자가 맞아 야 하는데 이의 만족을 위해서 제어밸브는 독일의 Kolvenbach, FESTO, 미국의 DYVAL, TEXTRON 등에서 서보밸브를 생산하고 있고 센서는 미국의 MTS, 실린더는 일본의 SMC와 독일의 FESTO에서 저마찰 · 고속공압실린더를 생산하고 있는 실정이다.

유압실린더의 경우, 수많은 연구가 이루어져 왔으며 Wernecke(1)는 피스톤로드와 실 사이의 윤활막 두

께, 온도 및 압력 분포특성 해석을 실험적으로 규명하였고, Prokop(2) 등은 PTFE 실에 대한 마찰력, 윤활막 두께 및 접촉압력 측정방법을 제시하였고 Kanters(3) 등은 실의 누설 특성에 대한 평가를 피스톤로드의 표면 조도에 따라 수행하였다. 이외에도 Gawrys(4) 등은 U자형 유압실의 누설량 및 마찰력 측정방법과 작동조건에 따른 영향을 제시한 적이 있다. 공압실린더의 경우, Belforte(5)와 Brokelmann(6)등이 실의 거동 특성에 대한 실험적 연구와 실 재질별로 기계적, 화학적, 물리적 성질에 대하여 단동실린더를 이용하여 마찰력을 결정한 적이 있으나 미흡한 실정이다. 본 연구에서는 저마찰화 및 고속화 기술을 위한 공압실린더의 마찰특성에 대하여 고찰함으로써 공압 위치제어 시스템 모델링, 스틱슬립현상 규명 및 보수유지기간 예측 등 다양한 정보를 획득하는데 기여하고자 한다.

따라서, 공압실린더의 마찰력에 영향을 주는 지배

인자를 규명하기 위하여 공급압력, 피스톤속도 등 작동 조건을 변화시켜가면서 씰 종류별, 실린더튜브 종류별, 윤활과 무급유 등에 따라 마찰력을 측정하였다. 실험장치는 서보밸브를 이용한 서보제어와 100KHz A/D, D/A Converter를 사용하여 1채널당 샘플링 개수는 초당 2300개로 하여 데이터의 정확성을 도모하였으며, 마찰력은 압력과 피스톤속도의 지배 함수이며 다른 조건들은 영향이 미흡함을 알 수 있었다.

## 2. 실험장치 및 방법

### 2.1 실험장치

마찰력을 측정하기 위하여 Fig.1과 같이 실린더튜브와 피스톤 씰 시스템을 설계하였다. 시험할 저마찰·고속 공압실린더는 이중 피스톤로드 복동실린더로 압축공기 압력과 피스톤 속도는 서보밸브에 의해 제어 되도록 하였으며, 피스톤로드에 인장, 압축겸용 로드셀을 부착하고 직선운동 메카니즘에 연결하였으며, 위치 및 속도 센서를 부착하였다.

피스톤 씰은 Fig.2와 같은 구조의 V자형 씰이고 재질은 NBR을 사용하였다. 또한 실린더 튜브는 알루미늄과 스테인레스강을 사용하였으며, 피스톤 직경은  $\phi 16mm$  행정은 200mm의 실린더를 채택하였다. 피스톤과 튜브 틈새는 80 $\mu m$ 이고, 튜브 조도 Ra는 알루미늄이 0.12, 스테인레스강이 0.31 $\mu m$ 였다. 실험은 크게 튜브 재질을 달리하고 동종의 씰을 사용하여 윤활을 하지 않은 상태에서 압력 및 속도 변화에 의한 마찰력 특성 변화와 실린더 튜브 1기종에 대하여 씰 종류를 달리하고 윤활을 한 상태에서 압력 및 속도 변화에 의한 마찰력 특성 변화를 실험으로 규명하였다.

최대속도 3m/s이고 최대압력을 8kgf/cm<sup>2</sup>로 하여 실험하였으며 피스톤 씰 마찰력,  $F_s$ 는 일정속도, 정상상태 운동으로 Fig.1.에서 구해보면 다음과 같다.

$$F_s = F_F - (F_c + F_{G1} + F_{G2}) \dots \dots (1)$$

여기서,  $F_F$ 는 로드 셀에 의해 측정되는 구동력

$F_c$ 는 직선운동기구의 LM 베어링력

$F_{G1}$ 과  $F_{G2}$ 는 피스톤 로드 씰 마찰력이다.

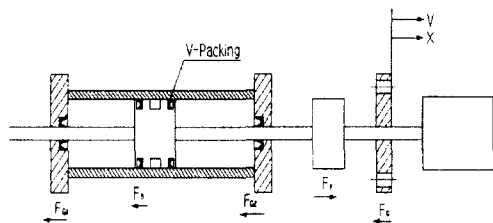
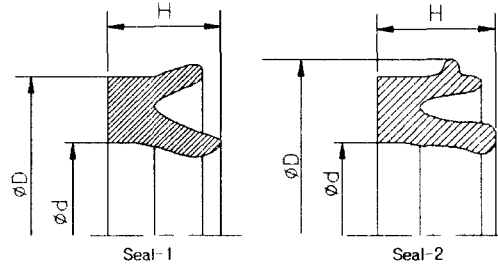


Fig.1 Schematic of Cylinder Tube-Piston Seal System



(a) Seal Profile

Item	Seal Specifications	
	Seal-1	Seal-2
H	3mm	1.5mm
D	16.4mm	16.4mm
d	12mm	10mm

(b) Seal Dimension

Fig.2 Seal Profile and Dimension

### 2.2 실험방법

Fig.3은 피스톤씰 마찰력을 측정하기 위한 실험장치 개략도이며, Fig.4는 실험장치 사진이다. 압력과 속도를 정확하게 제어하기 위하여 보조어댑터와 레귤레이터, 그리고 서보밸브를 시험할 실린더 앞에 최대한 가깝게 부착하였다. 그리고 정확한 압력과 유량을 계측하기 위하여 스트레인게이지형 압력센서와 노즐형유량계를 부착하였으며, 각각의 압력별, 속도별 마찰력과 속도를 계측하기 위하여 인장, 압축겸용 스트레인게이지형 로드셀과 마그네틱형 위치/속도센서를 피스톤로드와 직선운동 기구부에 설치하였다.

이 실험장치는 컴퓨터에 의해 전자동으로 제어 및 계측할 수 있도록 구성하여 D/A변환기에 의해 서보밸브에 제어신호를 보내면 서보밸브는 0~10Volt 신호에 의해, 0~5Volt에서는 실린더가 후진하고, 5~10Volt에서는 실린더가 전진하여 전압 값에 비례하여 실린더 피스톤 속도가 변한다. 피스톤속도는 0~10Volt에 비례하여 0~3m/s로 변하며 이의 값은 위치/속도센서에 의해 계측되어 A/D 변환기에 의해 데이터를 획득하도록 하였다.

압력은 레귤레이터에서 조절되며 마찰력은 로드셀에 의해 데이터를 계측하여 컴퓨터에 저장하도록 하였으며 100Hz A/D, D/A 변환기를 사용하여 1채널당 샘플링 개수는 초당 2300개로 하여 실험데이터의 정확성을 도모하였다.

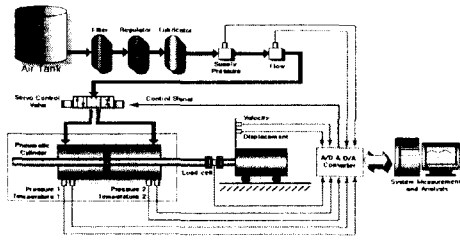


Fig.3 Experimental Apparatus

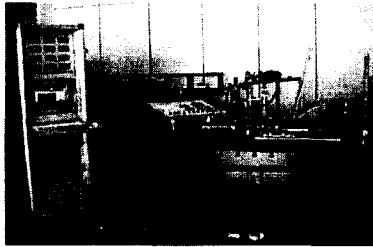


Fig.4 Photo of Experimental Apparatus

### 3. 실험결과 고찰

지금까지 실험대상 썰과 실린더 튜브 그리고 실험 장치에 대하여 살펴 보았으며 본장에서는 썰 및 실린더 튜브 종류별, 압력과 속도변화에 의한 썰 마찰력을 측정 한 결과 크게 윤활과 무급유 2가지 상태로 실험한 결과를 살펴보기로 하겠다.

Fig.5는 Seal-2에 대하여 윤활을 하지 않은 상태에서 알루미늄 실린더 튜브에 대한 각각의 속도별 압력 증가에 의한 썰 마찰력과 각각의 압력별 속도 변화에 의한 썰 마찰력을 측정 한 결과로써 속도가 증가할수록 썰 마찰력은 급격하게 증가하는 추세를 나타내고 있다.

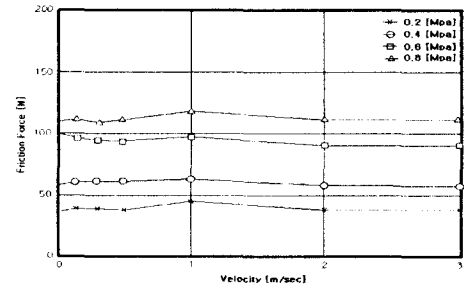
Fig.6은 Seal-2에 대하여 윤활을 하지 않은 상태에서 스테인레스강 튜브에 대한 각각의 속도별 압력 증가와 각각의 압력별 속도 변화에 의한 썰 마찰력을 측정 한 결과로써 속도가 증가할수록, 압력이 증가할수록 썰 마찰력이 급격히 증가함을 알 수가 있다.

Fig.7은 Seal-1에 대하여 윤활을 한 상태에서 알루미늄 실린더 튜브를 사용하여 속도와 압력을 증가시키 가면서 썰 마찰력을 측정 한 결과이며 속도와 압력 의 증가에 따른 썰 마찰력 증가가 크게 나타났으며, Fig.8 은 Seal-2에 대하여 윤활을 한 상태에서 알루미늄 실린더 튜브를 사용하여 Fig.7과 같이 실험한 결과이며 결론적으로 Fig.7과 같이 속도와 압력 변화에 따라 썰마찰력이 급증하였다.

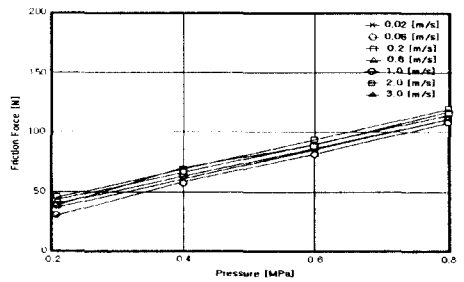
따라서 실험결과 썰마찰력은 작동압력과 속도에 지배적인 영향을 받고 있음을 알았으며, 썰마찰력,

$F_s$ 는 실험결과를 토대로 아래 식과 같이 속도와 압력에 비례한다고 추정할 수가 있겠다.

$$F_s = F_o + K_v V + K_p P \dots \dots \dots (2)$$

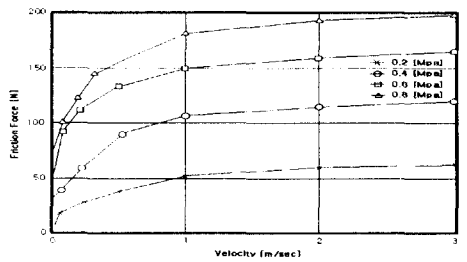


(a)

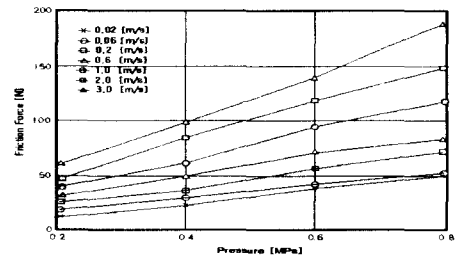


(b)

Fig.5 Seal-2, No Lubrication, Aluminum Tube



(a)



(b)

Fig.6 Seal-2, No Lubrication, Stainless Steel Tube

#### 4. 결론

공압실린더 씰의 마찰력을 압력, 속도, 윤활상태 등 작동조건 변화, 튜브 조도 및 재질변화, 씰형상변화에 대하여 살펴본 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 씰마찰력은 윤활 또는 무급유상태, 실린더튜브 재질 및 조도, 씰형상보다는 작동압력과 속도의 함수임을 확인하였다.

(2) 씰마찰력은 실린더튜브 조도에 따라 감소하는 경향을 나타냈으며, 알루미늄튜브가 스테인레스강튜브에 비해 마찰력이 작다는 사실을 알았다.

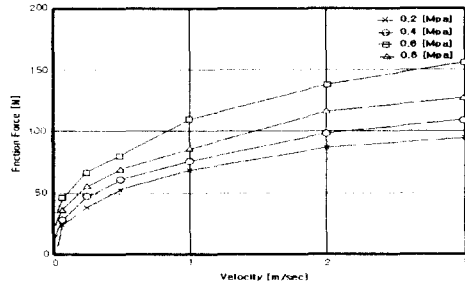
(3) 씰 마찰력은 씰형상과 치수에 영향을 나타냈으며, 실접촉부의 단면적이 큰 씰이 마찰력이 크게 증가함을 알 수 있었다.

#### 후기

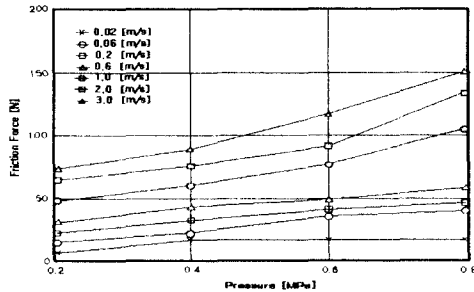
본 과제는 산업자원부 Spin Off 과제인 저마찰 고속 공압 실린더 개발과제의 일부임을 밝혀둡니다.

#### 참고문헌

1. Wernecke, P.W., "Analysis of the Reciprocating Sealing Process", proc. of 11th Int. Conf. of Fluid Sealing, E1, pp. 249-277, 1987.
2. Prokop, H.J. and Muller.H.K., "Film Thickness, Contact Pressure and Friction of PTFE Rod Seals", proc. 12th. Int. Conf. on Fluid sealing, C1, pp.147-163, 1989.
3. Kanters, A.F.G., and Visscher. M., "Lubrication of Reciprocating Seals Experiments on the Influence of Surface Roughness of Friction and Leakage", proc. of the 15th Leed-Lyon symp. on Trib., pp. 69-77, 1988.
4. Gawrys, E., and Kollek, W., "The Effect of the Operating Conditions on the Design of the Seals for Reciprocating Motion", Proc. 10th Int. Conf. on Fluid Sealing, F4, pp.285-294, 1984.
5. Belforte, G., D' Alfio, N. and Raparelli, T., "Experimental Analysis of Friction Forces in Pneumatic Cylinders", Journ. of Fl. Cont., 20, pp. 12-60, 1989.
6. Brokelmann. J., "Pneumatic Seal Material for Oil-Free Air", Fluid Techniche Nuove, Milano, pp. 50-58, 1989.

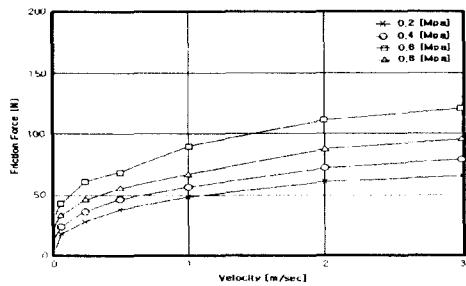


(a)

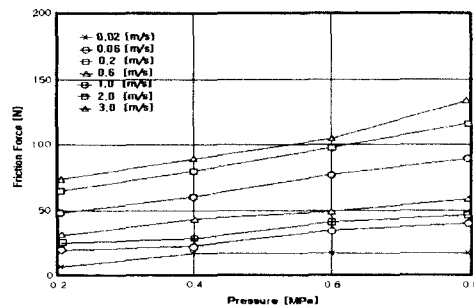


(b)

Fig.7 Seal-1, Lubrication, Aluminum Tube



(a)



(b)

Fig.8 Seal-2, Lubrication Aluminum Tube