

# 고속 공기압 실린더의 피스톤 실 특성 해석

## Analysis of Piston Seal in High-Speed Pneumatic Cylinders

장중걸 · 김도태 · 한신식

Z. J. Zhang, D. T. Kim and S. S. Han

**Key Words:** High-Speed Pneumatic Cylinder(고속 공기압 실린더), Elastomeric Seal(탄성중합체 실), Piston Seal(피스톤 실), Contact Pressure(접촉압력), Frictional Force(마찰력), Nonlinear Finite Element Analysis(비선형 유한요소해석)

**Abstract:** Nonlinear seal friction in pneumatic cylinders can impede the performance of pneumatic systems designed for high precision positioning with favorable high speed actuation. The behaviour of an elastomeric piston seal in high speed pneumatic cylinders is analysed by nonlinear finite element analysis using ABAQUS. The contact pressures, stress and strain distributions and frictional forces of the piston seal are simulated with variation of interference fits, supply pressures, friction coefficients and piston rod velocities. The nonlinear finite element model of the piston seal is used to predict deformation of a seal, friction force and contact pressure distributions.

### 1. 서론

공기압 실린더에서 실(seal)의 마찰특성은 공기압 구동시스템의 동특성과 제어성능 향상에 중요한 인자이다. 공기압 실린더용 실은 밀봉해야 하는 유체가 압축공기이기 때문에 윤활성이 없어 윤활성을 유지하는 것이 중요하다. 따라서 실의 접촉면 형상을 둥근 R-모양으로 하여 윤활성을 유지하도록 설계한다.

반면 유압용 실은 유압작동유와 같이 주로 기름을 밀봉하기 때문에 Reynolds 윤활이론에 기초하여 유막 두께를 어떻게 하면 얇게 하는가가 중요하다. 따라서 실 접촉면에서 적절한 압력분포가 필요하기 때문에 밀봉면의 형상이 날카로운 모양(sharp edge)이 된다.

또한 공기압용 실은 밀봉하는 유체가 점성이 거의 없는 압축공기이기 때문에 유압작동유를 대상으로 하는 유압용 실과는 다른 특징을 가진다. 유압용 실은 액체에 대한 밀봉성과 동시에 비교적 고압이기 때

문에 내압성이 중요하지만, 공기압 실은 기체를 밀봉하고, 동시에 저압에서 주로 사용되기 때문에 마찰특성(시동성)이 특히 중요하다.

압축공기는 유압작동유와 비교하여 윤활성이 거의 없기 때문에 공기압 실에서는 별도로 윤활유를 공급하여야 한다. 최근에 많이 사용하는 무급유 공기압 실은 실을 끼워 넣을 때 윤활유로써 그리스(grease) 도포하여 사용한다. 무급유의 경우는 실의 내마모성 재료 선정과 기하학적 형상에서부터 실의 마모를 억제하도록 설계하고, 실의 마모에 따른 그리스의 고형화를 방지하여 윤활성을 유지하려는 것도 있다.

지금까지 대부분의 연구는 공기압 실린더의 실 형상이 U패킹과 같은 립형 실(lip seal)이고, 피스톤 속도가 1m/s 이하인 저속인 경우이다<sup>(1),(2),(3)</sup>.

이 연구에서는 저마찰, 고속형 공기압 실린더에 적합한 실 형상을 설계하기 위해, 기본적으로는 접촉면이 O링 형상을 갖는 스퀴즈형 피스톤 패킹(squeeze type piston packing)에 대해 고찰한다. 이 패킹은 양방향 압력용 패킹이기 때문에 U형 패킹과는 달리 실 작용에서 방향성이 없고, 피스톤의 작동 방향으로 작용하는 압력을 밀봉할 수 있기 때문에 피스톤에 한 개의 패킹만 장착하면 된다. 따라서 피스톤에 패킹의 설치 공간을 줄일 수 있고, 전체 비용도 낮아지는 장점이 있다.

또한 저마찰, 고속 공기압 실린더는 대부분 지름이

접수일: 2010년 6월 7일

장중걸(발표자): 경일대학교 대학원 기계공학과

E-mail: dtkim@kiu.ac.kr, Tel: 053-850-7126

김도태: 경일대학교 기계자동차학부

한신식: 한국폴리텍VII대학 창원캠퍼스 자동차공학과

작은 소구경 실린더이기 때문에 실 홈의 치수에 제약이 있고, 최대한 단면이 작은 실을 사용하여야 한다. 이러한 관점에서는 O링을 사용하는 것이 경제적으로도 유리하지만, O링을 운동용으로 사용하면 패킹의 구름(회전)이나 비틀림에 의한 파손 및 고착에 따른 마찰력이 증가하는 경향이 있고, 재료의 마모나 노화를 동반하여 압축 영구변형 등 실의 밀봉면이 감소하여 편심 등에 의한 누설이 일어나기 쉽고, 실 성능에서 불리한 점이 많다. 또한 무급유 조건에 대응도 곤란하고, 더구나 소구경 실린더는 출력이 작기 때문에 특히 마찰특성이 양호한 실을 선정할 필요가 있다. 이러한 O링의 결점을 개선한 스퀴즈형 피스톤 패킹은 O링과 비교하여 지름방향의 단면을 길게 하여 O링보다 작은 패킹 변형에서도 유효한 밀봉성을 얻을 수 있고, 구름(회전)에 의한 파손도 방지할 수 있고, 동시에 마찰력도 저감할 수 있는 특징을 가진다. 또한 수명도 길고, 편심추중성도 우수하다.

이 연구에서는 저마찰, 고속 공기압 실린더에 채용할 스퀴즈형 피스톤 패킹의 특성을 해석하기 위해, 실의 간섭량, 공급압력, 피스톤 속도 등 작동조건 변화에 따른 실의 접촉압력, 응력-변형률 분포, 마찰력 등을 구하였다. 탄성중합체 패킹의 해석은 상용 비선형 유한요소해석 소프트웨어인 ABAQUS를 사용하였다.

## 2. 비선형 유한요소 해석 모델

Fig.1은 해석 대상인 고속 공기압 실린더용 스퀴즈형 피스톤 패킹, 실린더 튜브의 접촉면 및 피스톤 홈부에 대한 전체 격자계와 경계조건을 나타낸다. 피스톤 패킹은 2차원 축대칭 CAX8H요소를 사용하였고, 6,950개의 절점(node)과 2,262개의 요소(element)를 사용하여 모델링하였다.

여기서 사용한 스퀴즈형 피스톤 패킹의 재질은 엘라스토머(elastomer; 탄성중합체, 상온에서 고무형태의 탄성을 가진 고체)인 NBR (Nitrile Butadiene Rubber, PPD형, Sakagami사, 일본)이며, 패킹을 유한요소 해석하기 위해서는 패킹 재료의 물성값을 파악하는 것이 중요하다. 피스톤 패킹의 변형을 조사하기 위해, 단축 인장시험에서 얻어진 응력-변형률 결과에서 변형률 에너지함수로부터 구한 응력-변형률 관계식을 이용하여 곡선적합(curve fitting)으로 Mooney-Rivlin 계수를 구하며,  $C_{10}=1.514$ ,  $C_{01}=0.473$ 을 사용하였다<sup>(4)</sup>.

경계조건은 피스톤 패킹이 장착된 피스톤을 실린더 튜브 속에 조립할 때 피스톤 패킹이 약간 찌그러지면서 실린더 튜브에 밀착되어 압축된 상태(피스톤 패킹이 실린더 튜브 내면에 밀착되어 압축된 양을 간섭량(interference fit)으로 표현함)을 나타내기 위해 실린더 튜브는 -x방향으로 변위 조건을 설정하였다. 또한 피스톤이 일정한 속도로 작동할 때, 공급압력과 피스톤의 속도를 표현하기 위해 패킹의 윗면에 압력조건과 피스톤에 -y방향의 속도를 각각 설정하였다. 패킹과 패킹 홈 사이의 마찰계수는 0.6이고, 피스톤 패킹과 실린더 튜브 내면 사이의 마찰계수는 0.2이고, 접촉조건을 적용하였다. 경계조건은 먼저 실린더 튜브 내벽에 -x방향으로 간섭량만큼 변위를 적용하고, 공기압력을 가하고, 마지막으로 패킹 홈에 -y방향으로 속도를 적용하였다. 비선형 유한요소 해석에서 피스톤 패킹의 간섭량은 0.23mm, 0.16mm 및 0.1mm이고, 압축공기의 공급압력은 0.1MPa, 0.5MPa, 1.0MPa이다. 피스톤의 속도는 0.5m/s, 2.0m/s, 3.0m/s로 각각 변화시켰으며, 공기압력과 마찰 계수의 변화에 따른 마찰력을 구하였다.

Fig. 2(a)는 해석에 사용한 스퀴즈형 O링 형상의 피스톤 패킹이며, (b)는 피스톤에 장착된 패킹을 나타낸다.

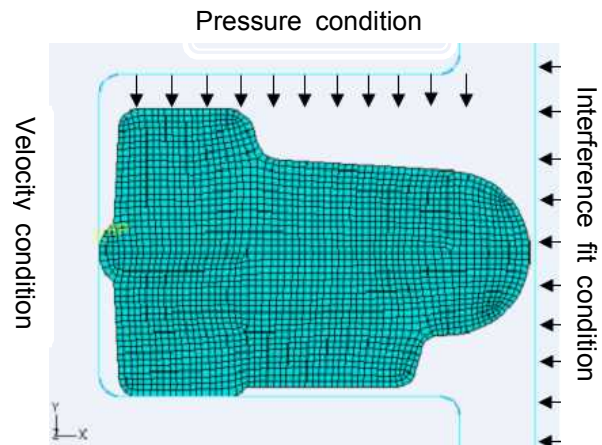


Fig. 1 Finite element model of seal, piston groove and cylinder tube and applied boundary conditions



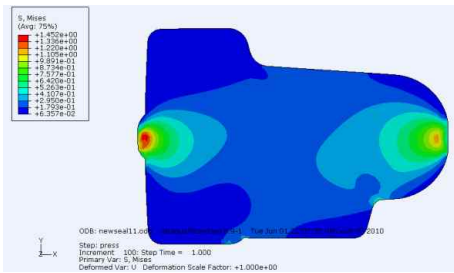
(a)Piston packing (b)Piston packing assembly

Fig. 2 Photo. of piston packing and assembly

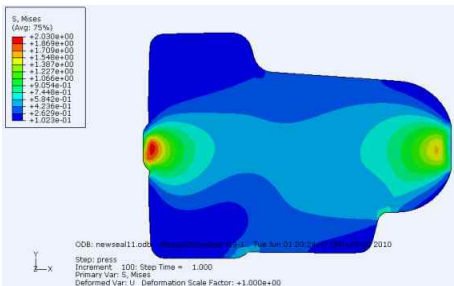
### 3. 스퀴즈형 피스톤 패키징의 해석 결과

#### 3.1 간섭량만 고려한 경우

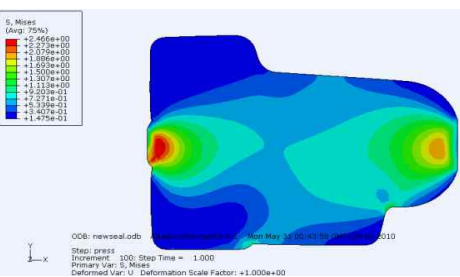
Fig. 3(a),(b),(c)는 간섭량을 0.1mm, 0.16mm 및 0.23mm로 변화시켰을 때의 von Mises 응력을 나타낸다. Fig.3에서 보면 최대응력이 각각 1.45MPa, 2.03MPa, 2.47MPa이고, 피스톤 패키징이 패키징 홈과 실린더 튜브와의 양쪽 밀봉면에서 간섭량이 증가함에 따라 최대응력도 증가하며, 응력의 영향을 받는 영역도 확대되는 것을 볼 수 있다.



(a) Interference fit 0.1mm



(b) Interference fit 0.16mm



(c) Interference fit 0.23mm

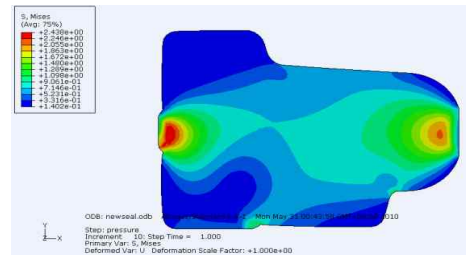
Fig. 3 Stress distributions under interference fit conditions.

#### 3.2 일정한 간섭량에 공기 압력이 작용하는 경우

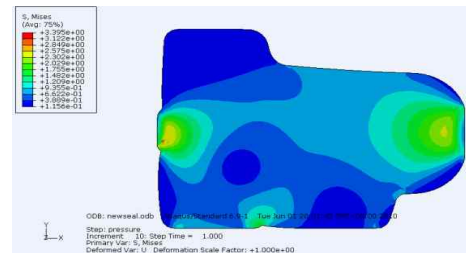
Fig. 4은 피스톤 패키징의 간섭량을 0.23mm로 일정하게 유지하면서 압축공기의 공급압력을 0.1MPa,

0.5MPa, 1.0MPa로 변화시켰을 때 피스톤 패키징의 von Mises응력을 나타낸다. Fig. 4에서 보듯이 최대응력이 각각 2.44MPa, 3.40MPa, 3.19MPa이고, 피스톤 패키징이 실린더 튜브와 밀착되는 오른쪽 원호부분과 피스톤 패키징의 홈과 밀착되어 있는 왼쪽부분의 원호부분에서 공급압력이 증가함에 따라 최대응력의 영향을 받는 영역이 증가하지만 최대응력은 줄어지는 것을 알 수 있다.

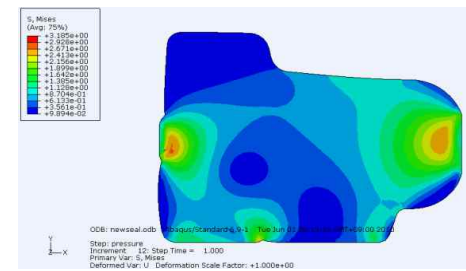
Fig. 5는 Fig. 4와 같은 조건에서 변형률분포를 구한 것이다. 공급압력이 0.1MPa에서 0.174mm, 0.5MPa에서 0.193mm, 1.0MPa에서 0.194mm로 나타났다.



(a) Supply pressure 0.1MPa

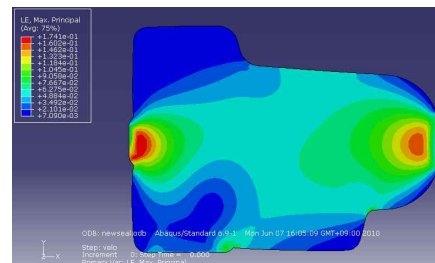


(b) Supply pressure 0.5MPa

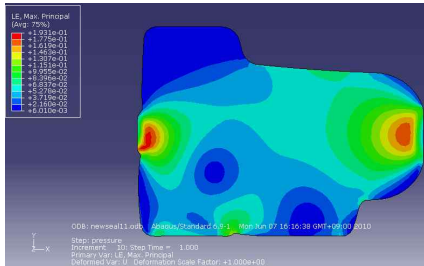


(c) Supply pressure 1.0MPa

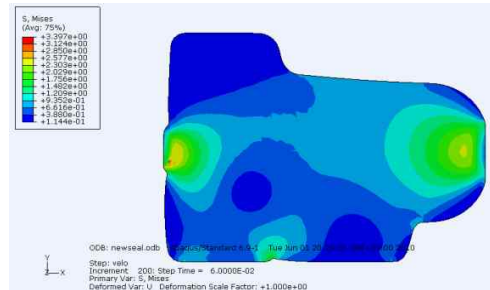
Fig. 4 Stress distributions with variation of supply pressures, under constant interference fit



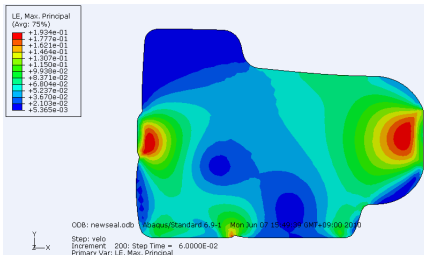
(a) Supply pressure 0.1MPa



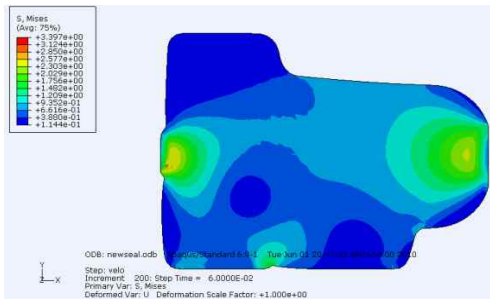
(b) Supply pressure 0.5MPa



(b) Piston velocity 2.0m/s



(c) Supply pressure 1.0MPa



(c) Piston velocity 3.0m/s

Fig. 5 Strain distributions with variation of supply pressures under constant interference fit

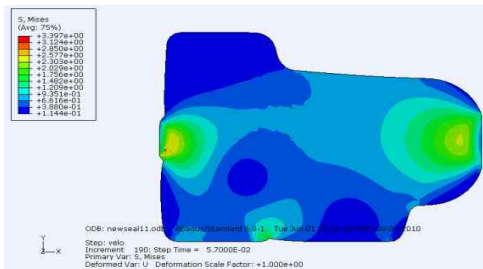
Fig. 6 Stress distributions with variation of piston velocity under constant interference fit and piston velocity

### 3.3 일정한 간섭량과 공급압력에서 피스톤의 속도를 변화시킨 경우

Fig. 6은 공기압 실린더의 실제 작동조건을 부여하기 위해, 피스톤 패키지의 간섭량 0.23mm, 압축공기 공급압력 0.5MPa인 조건에서 피스톤에 -y방향으로 0.5m/s, 2.0m/s, 3.0m/s로 속도를 변화시킨 경우의 von Mises 응력을 나타낸다. Fig. 6에서 최대응력과 최대응력 구역은 거의 같은 것을 알 수 있다.

### 3.4 피스톤 패키징과 실린더 튜브 사이의 접촉 압력

Fig. 7은 피스톤 패키징의 간섭량 0.23mm, 압축공기의 공급압력 0.5MPa, 피스톤 속도 2.0m/s인 조건에서 피스톤 패키징과 실린더 튜브 사이의 접촉압력을 나타낸다. Fig. 7에서 보면, 패키징 접촉면의 길이방향에 따라 접촉응력은 3.05MPa, 3.65MPa, 3.75MPa로 변하고, 스키즈형 피스톤 패키징은 실린더 튜브와 밀착된 영역에서 접촉압력이 공기 공급압력 0.5MPa보다 크기 때문에 패키징이 양호하게 밀봉되는 것을 알 수 있다.



(a) Piston velocity 0.5m/s

Fig. 8은 피스톤 패키징의 간섭량을 0.10mm, 0.16mm, 0.23mm로 변화시켜서 접촉 압력의 영향을 고찰한 것이다. Fig. 8에서 간섭량이 클수록 접촉영역이 넓어지고 접촉압력도 높아진 것을 알 수 있다.

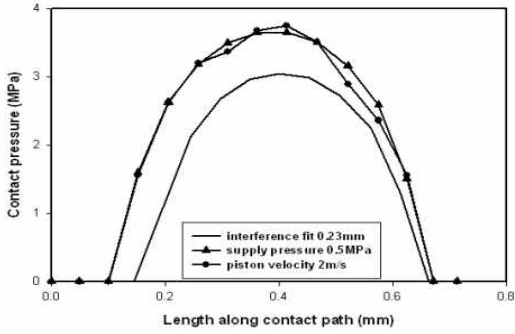


Fig. 7 Variation of contact pressure under applied interference fit, supply pressure and velocity

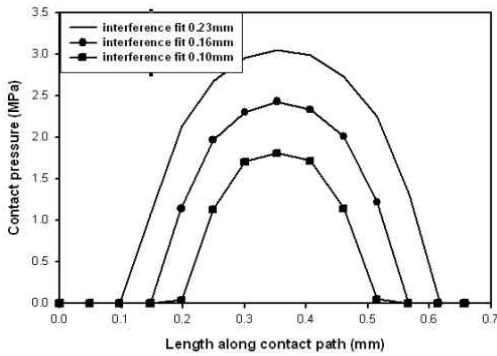
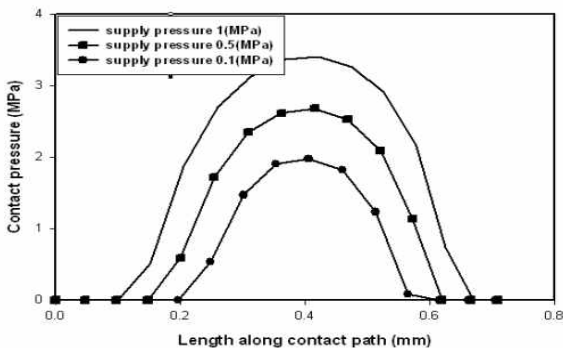


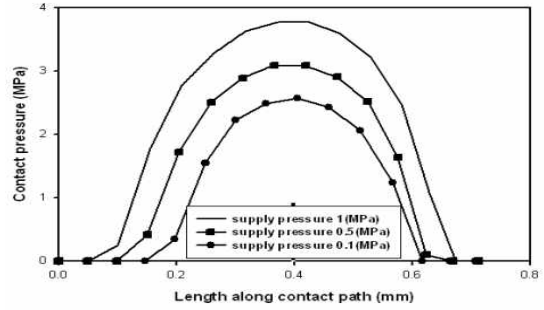
Fig.8 Variation of contact pressure under different interference fits

Fig. 9는 피스톤 패킹의 간섭량을 일정하게 하고, 공급압력을 변화시켰을 때 패킹과 실린더 튜브 사이의 접촉압력 분포를 나타낸다. 일반적으로 압축공기의 누설을 방지하여 밀봉하기 위해서는 패킹과 실린더 튜브 사이의 접촉압력이 압축공기의 공급압력보다 같거나 커야한다. Fig. 9에서 간섭량과 공급압력이 증가함에 따라 접촉압력이 증가하고, 또한 최대 접촉압력이 공급압력보다 큰 것을 확인할 수 있다.

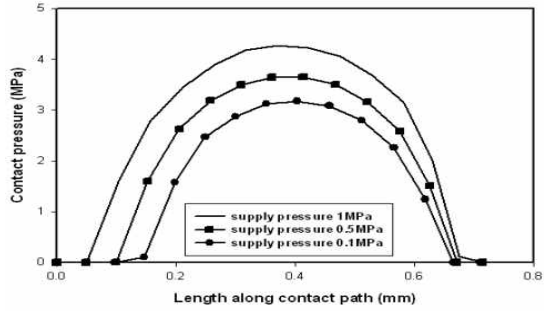
Table 1은 간섭량과 공급압력 변화에 따른 최대 접촉압력을 나타낸다.



(a) Interference fit 0.10mm



(b) Interference fit 0.16mm



(c) Interference fit 0.23mm

Fig. 9 Variation of contact pressure under different supply pressure and interference fit

Table 1 Max. values of contact pressure between piston packing and cylinder tube with variation of interference fit and supply pressure

Supply pressure [MPa]	Max. contact pressure[MPa]		
	Inter. fit 0.1mm	Inter. fit 0.16mm	Inter. fit 0.23mm
0.1	1.98	2.68	3.41
0.5	2.57	3.09	3.78
1.0	3.18	3.65	4.27

3.5 피스톤 패킹과 실린더 튜브 사이의 마찰력

Fig. 10은 스퀴즈형 O링 형상 피스톤 패킹이 장착된 공기압 실린더에 0.1MPa, 0.5MPa, 1.0MPa의 압축공기를 공급하고, 피스톤의 속도가 2.0m/s로 일정하게 운동하는 조건에서, 피스톤 패킹과 실린더 튜브 내부 표면 사이의 마찰계수를 0.05, 0.1, 0.2 및 0.3으로 변화시켰을 때 마찰력 변화를 나타낸다. Fig. 9에서 보면, 공급압력과 마찰력 계수가 증가함에 따라 피스톤 패킹과 실린더 튜브 사이의 마찰력이 약 0.5N에서 4.65N까지 변화하는 것을 알 수 있다.

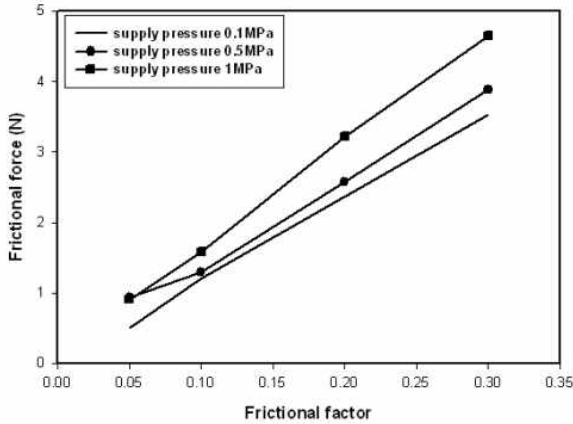


Fig. 10 Friction force prediction for variation of friction coefficients between rubber seal and cylinder bore under different pneumatic pressure

### 4. 결론

이 논문은 비선형 유한요소 해석을 이용하여 고속 공기압 실린더에 사용하는 스퀴즈형 O링 형상 피스톤 패키징의 특성을 해석하였으며, 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

1)엘라스토머 재질인 NBR계 피스톤 패키징의 특성을 예측하기 위해, 간섭량, 공급압력, 피스톤 속도 등의 구동조건 변화에 대한 스퀴즈형 피스톤 패키징의 비선형 유한요소 해석 모델을 구축하였다.

2)피스톤 패키징의 작동 환경에서 성능을 예측하기 위해 피스톤 패키징과 실린더 튜브 사이의 간섭량만 고려할 경우, 간섭량과 공급압력을 고려한 경우 및 간섭량과 공급압력 및 피스톤의 작동속도를 고려한 각각의 경우에 대해 해석하고, 패키징의 응력, 변형률, 접촉압력 및 마찰력을 구하였다.

3)앞으로 스퀴즈형 피스톤 패키징과 실린더 튜브 사이의 윤활과 패키징의 온도변화를 고려한 패키징의 특성을 검토할 예정이다.

### 후기

이 연구는 지식경제부와 에너지관리공단에서 지원한 에너지자원기술개발사업(세부과제명: 쿠션실린더의 특성해석 및 설계)으로 수행되었음을 밝힙니다.

### 참고 문헌

- 1) T. Raparelli, A. Manuello, L. Mazza, "Experimental and numerical Study of Friction in an Elastomeric Seal for Pneumatic Cylinders", Vol. 30, No. 7, pp. 547~552, 1997.
- 2) G. Belforte, T. Raparelli, M. Velardocchia, "Study of the Behavior of Lip Seal in Pneumatic Actuators", J. of the Society of Tribologists and Lubrication Engineers, pp. 775~780, 1993
- 3) H. D. Jo, T. J. Park, "Analysis of Piston seal Behavior Characteristics for Pneumatic Cylinder", 유공압시스템학회 2009년 춘계학술대회논문집, pp. 76~80, 2009
- 4) S. H, C. S. Woo, D. S. Kim, Y. S. Kim, "The Behavior and Characterization Analysis of Elastomer Seal for High Speed Pneumatic Cylinder", 대한기계학회 2008년도 추계학술대회 논문집, pp. 1215~1220, 2008