

# 고압용 ACGT 시일의 접촉거동 특성에 대한 유한요소 해석

최동열 · 김성원 · 김청균  
홍익대학교 트라이볼로지 연구센터

## on Contact Behaviour Characters of ACGT Seal for High pressure using Finite Element Analysis

Dong Yul Choi · Sung Wan Kim · Chung Kyun Kim.  
*Tribology Research Center, Hongik University*

**Abstracts** - Minimum clearance between the piston seal groove of a piston and cylinder bore to ensure against extrusion of the piston seal and leakage of working fluids is an important design parameter for a seal designer in hydraulic cylinder application. Contact force, critical pressure at which extrusion occurs, leakage rate, fluid film thickness and friction force have been analyzed for some design parameter such as clearance between cylinder wall piston, depth of rectangular groove and pressure of sealed hydraulic fluid. In this paper, we analyze displacement and stress of ACGT seal by finite element analysis to understand Contact Behaviour Characters

**Key Words** : Seal, Piston, Contact Behaviour Characters, Finite element analysis

### 1. 서 론

기계장비의 자동화 추세에 따라서 유압식 액츄레이터가 널리 사용되고 있으며 유압 실린더용 밀봉 장치에 대한 연구도 매우 활발하게 진행되고 있다. 자동화 설비에서 핵심 부품인 유압 실린더의 용량 누설 수명등에 직접적인 영향을 주고 있는 시일(seal)은 밀봉된 유체의 누설을 방지하거나 외부의 이물질 침입을 차단하는 역할을 하는 요소부품으로 액츄레이터(actuator)의 성능을 좌우할 정도로 큰 비중을 차지하고 있다[1].

유압 실린더의 피스톤과 같이 고압의 저속에서 왕복동 운동을 하는 경우는 피스톤 시일(piston seal)을 사용하여 유체박막(fluid film)에 의해 완벽한 밀봉작용을 할 수 있도록 설계한다.

시일의 파손 원인은 실린더 작동시의 작동유

체의압력, 상대접촉 운동 속도, 간섭량, 시일 소재의 특성등에 따라서 다르기는 하지만 가장 중요한 원인이 시일의 돌출 현상(Extrusion)인 것으로 알려져 있다[2,3]. 또한 Field와 Nau등은 탄성유체윤활에 기본을 둔 시일 접촉(Seal Contact)에서의 누설과(Leakage)과 마찰력(Friction Force)등을 연구하였고[4], Kanters등은 왕복동 고무 시일의 거칠기(Roughness)를 고려하여 마찰력과 왕복동 속도와의 관계에 대한 연구를하였다[5].

시일의 재료는 아크릴 고무(ACM), 니크릴고무(NBR), 불소 고무(FKM), 실리콘 고무(VMQ)와 같은 고무 재질이 가장 일반적이고 최근 PTFE, 테프론등의 수지도 널리 사용되고 있다. 고무 재질의 해석 방법은 일반적으로 크게 3가지로 나눌수 있는데, 이론적인 해석방법과 유한요소법에 의한 수치적해석, 그리고 실험에 의한 해석방법이 있다. 이론적인 해석의 경우 고무소

재의 낮은 변형을 영역에 대하여 Hertz이 접촉 이론을 적용한 해석이 Lindley, AWRE등에 의하여 수행된 바가 있고, 수치적해석의 경우는 여러 가지 비선형재질에 대한 해석 모델이 제시되어 유한요소법에 의한 시일 해석이 활발하게 진행되고 있다[6].

본 논문은 장갑차 현가장치 시스템(ISU)의 안전 설계를 위해서는 액츄에이터의 핵심기술인 피스톤 시일에 대한 기반연구를 통해 GTC(Greene Tweed) 시일제품중 하나인 고압용 ACGT시일의 변형거동 특성과 설계특성을 고찰하였다.

## 2. 모델링 및 해석 조건

ACGT 시일은 메인 피스톤의 외경부에 설치되어 작동유체의 고압과 저압측 오일과의 차압, 즉 피크 압력(peak pressure differential)을 완화시키는 역할을 적절히 수행해야 하는 ACGT 링(Aerospace Capped GT-ring) 형상의 시일은 메인 피스톤에 장착된 1차시일(primary seal)로 PTFE 소재에 의해 실린더의 내경부와 미끄럼 마찰접촉을 하면서 밀봉을 해야하므로 저마찰성과 내마멸성을 유지해야 우수한 시일이 된다.

Fig. 2-1은 메인 피스톤에 설치된 1차 밀봉장치인 ACGT 시일의 형상을 보여주고 있다. ACGT의 1차시일은 3개의 기능 부품이 있고, 총 4피스가 서로 상호간에 이시적인 미끄럼 마찰접촉 운동을 하면서 각기의 역할을 담당하고 있다.

### (1) 에너지이저 링

탄성체 에너지이저 링(elastomeric energizer ring)은 메인 피스톤의 외경부와 밀봉캡 링(sealing cap ring) 사이에 접촉하면서 저온특성과 탄성특성이 아주 우수한 FKM 소재를 사용하여 밀봉캡의 탄성 복원력을 백업하고 동시에 내구성을 확보토록 하여 밀봉캡의 유막형성과 접촉 응답성을 원활히 제공하여 ACGT 시일의 밀봉성을 보증토록 하는 중요한 역할을 담당하고 있다.

### (2) 밀봉캡

밀봉캡 링(sealing cap ring)은 카본과 열수지 계통을 충전한 PTFE 소재로 탄성체 에너지이저

링과 실린더 내경부 사이에 위치한다. 밀봉캡 링의 외경부는 피스톤의 미끄럼 마찰속도에 의해 실린더 내경부와 직접 접촉하면서 마찰접촉 운동을 하므로 이 간극에 원활한 유막형성과 저마찰 특성의 유지는 ACGT 시일의 밀봉성에 직접적으로 영향을 미치는 가장 중요한 1차시일의 핵심부이다.

### (3) 백업링(Scarf Cut Backup Ring)

백업링(backup ring)은 밀봉캡의 좌우에 1개씩 총 2개가 설치되어 피스톤의 왕복운동에 따른 밀봉캡의 압출변형(extrusion) 발생을 완벽하게 차단하고, 동시에 밀봉캡의 변위량이 탄성체 에너지이저 링에 전달되어 변형하게 되면서 불완전 접촉을 하게 되면 에너지이저 링의 변형이 균일하게 이루어지도록 바로 잡아주는 중요한 역할을 담당한다.

## 2-1. 소재

에너지이저링의 소재는 FKM계열로서 아주 우수한 저온특성과 탄성특성이 있다.

밀봉캡의 소재는 PTFE 계열의 Avalon 89(thermoplastic and carbon filled, lubricated PTFE)이다. 밀봉캡 소재는 내구성과 윤활성, 저마찰성 등을 고루 갖추고 있어야 밀봉캡으로써의 역할을 충분히 발휘할 수 있다.

백업링은 Arlon 1330, Lubricated PEEK 계열의 소재를 사용하고 있다.

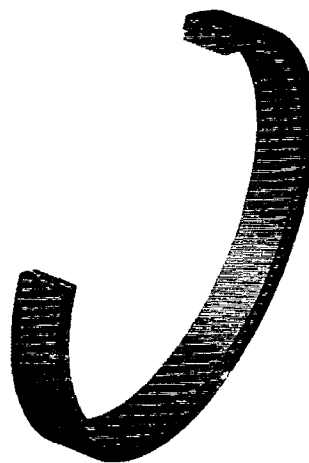


Fig. 2-1 Anlysis model of an ACGT seal

## 2-2. 해석조건과 경계조건

피스톤과 실린더 사이를 밀봉하기 위한 피스톤시일의 기하하적인 형태와 변형은 축대칭이고 접촉력 해석시 시일이 온도는 등온상태(isothermal)를 유지하며 시일의 작동조건에 따른 영향은 피스톤 본체와 실린더를 제외한 고무에만 미친다고 가정한다.

시일의 동적 거동상태를 해석하기 위하여 고무의 비선형성(비선형 재질, 기하학적 비선형성, 비선형 경계조건)을 고려하여 해석할수 있는 비선형유한요소 코드인 MARC를 사용하였다.

Table 2. Material propertise of an ACGT seal

	Cap	Back-up Ring	Energizer
Material type	AVALON 89	ARLON 1330	777
Young's modulus, MPa	600	3400	7.2
Possion's ratio	0.49	0.49	0.49
Mass density, kg/m <sup>3</sup>	2000	1380	1820
Thermal expansion coefficient at 20°C $\mu\text{m/m}\cdot\text{K}$	130	47	21.78
Thermal conductivity, W/m·K	0.64	0.25	0.19
Specific heat, J/kg·K	1000	1000	945

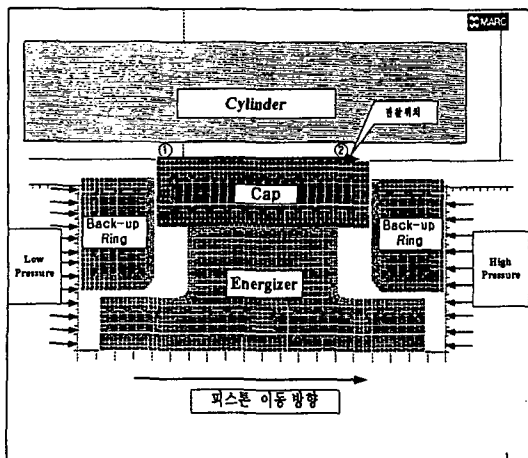


Fig. 2-2 Boundary condition

Fig 2-2는 피스톤 시일 모델 해석에 사용된 유한요소 데이터로 Acgtring은 2452개의 축대칭 4각형요소와 2777개의 요소절점으로 구성되어 있다.

해석조건은 피스톤 조합시, 스트로시, 리턴스트로크시 3가지경우에 대하여 X축변위량과 응력의 변형량을 비교하였으며 마찰계수, 좌측압력차, 속도의 조건에 대하여서 고찰을 하였다.

## 3. 해석 결과 및 토의

### 3-1 응력분포 해석

#### ① 조립 초기의 응력분포

ACGT링이 구형 그루브(rectangular groove)에 조립된 초기에 실린더와 메인 피스톤 사이의 밀봉간극(sealing clearance)은 0.2mm, 마찰계수는 0.05, 메인 피스톤 속도는 3m/s, 좌측압력은 160bar, 우측압력은 800bar가 작용할 경우 ACGT링에 걸리는 von Mises 응력분포를 Fig. 3-2에서 보여주고 있다. cap링의 양쪽 끝단 ①②지역에서 최대응력 35.3MPa이 발생한다.

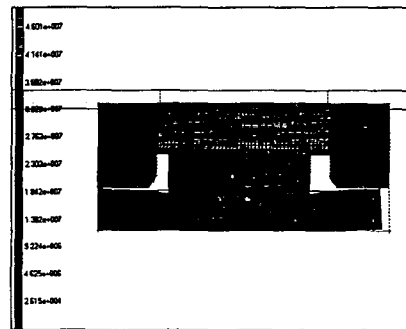


Fig. 3-1 메인 피스톤이 1회 왕복운동후 ACGT링의 응력분포도

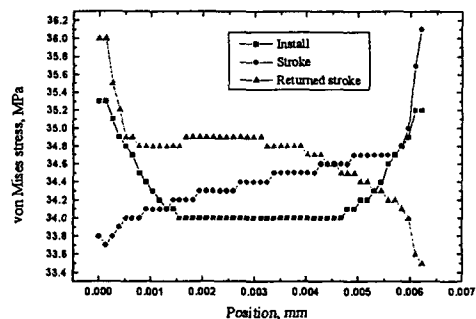


Fig. 3-2 메인 피스톤이 왕복운동을 하면서 발생된 최대응력

② 메인 피스톤의 스트로크가 작용할 경우의 응력분포

왕복운동을 하는 메인 피스톤의 스트로크(stroke) 작용에 의해 ACGT링이 마찰력을 받아 메인 피스톤의 운동방향과는 반대되는 방향으로 이동할 경우, ACGT링에 걸리는 von Mises 응력분포를 Fig. 3-2에서 보여주고 있다.

③ 메인 피스톤의 리턴 스트로크가 작용할 경우의 응력분포

왕복운동을 하는 메인 피스톤의 리턴 스트로크(return stroke) 작용에 의해 ACGT링이 마찰력을 받아 메인 피스톤의 귀환운동 방향과는 반대되는 방향으로 이동할 경우, ACGT링에 작용하는 실린더와 메인 피스톤 사이의 밀봉간극은 0.2mm, 마찰계수는 0.05, 피스톤 속도는 3m/s, 좌측 압력은 160bar, 우측 압력은 800bar이다. 이러한 작동조건에서 ACGT링에 걸리는 von Mises 응력분포를 Fig. 3-2에서 보여주고 있다. 최대응력이 Cap 링의 실린더와 접하는 왼쪽 상단부 모서리 ①지역에서 36MPa 발생했다.

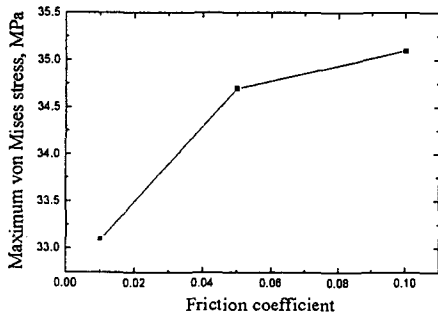


Fig. 3-3 메인 피스톤과 실린더 사이의 마찰계수 변화에 따른 von Mises 최대응력

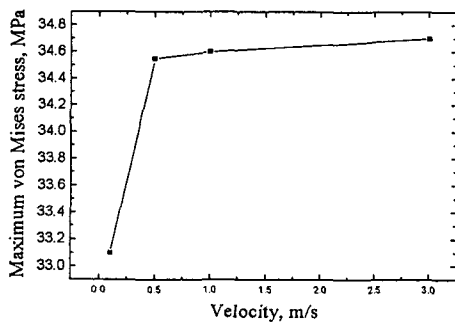


Fig. 3-4 메인 피스톤의 왕복동 속도 변화에 따른 von Mises 최대응력

Fig. 3-3는 메인 피스톤과 실린더 사이의 밀봉간극은 0.2mm, 마찰계수는 0.01~0.1, 메인 피스톤 속도는 3m/s, 좌측 압력은 160bar, 우측 압력은 800bar일 경우에 ACGT링에 걸리는 von Mises 최대응력 크기를 제시하고 있다.

여기서 마찰계수가 증가함에 따라서 von Mises 최대응력은 크게 증가하는 경향을 나타낸다.

Fig. 3-4는 메인 피스톤과 실린더 사이의 밀봉간극은 0.2mm, 마찰계수는 0.05, 메인 피스톤 속도는 0.1~3m/s, 좌측 압력은 160bar, 우측 압력은 800bar일 경우 ACGT링에 걸리는 von Mises 최대응력 크기를 제시하고 있다. 여기서 메인 피스톤의 속도가 증가함에 따라 특히 초기과정에서 von Mises 최대응력이 34.56MPa로 크게 증가하였다가 완만하게 증가하는 경향을 나타낸다.

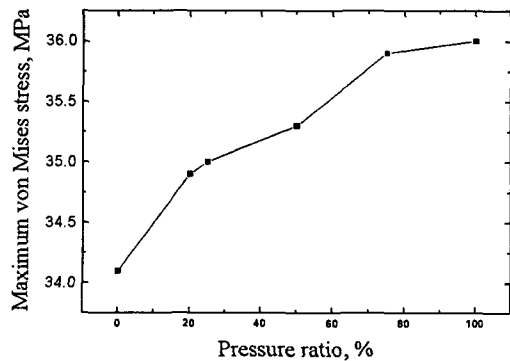


Fig. 3-5 웨어링에 걸리는 압력차에 따른 von Mises 최대응력

Table 3-1 ACGT링에 걸리는 압력비율

Low pressure	High pressure	Pressure ratio
0	800	0%
160	800	20%
200	800	25%
400	800	50%
600	800	75%
800	800	100%

Fig. 3-5는 메인 피스톤과 실린더 사이의 밀봉 간극은 0.2mm, 마찰계수는 0.05, 메인 피스톤 속도는 3m/s, 압력비는 0~100%일 경우에 ACGT링에 걸리는 von Mises 최대응력 크기를 제시하고 있다. 압력차가 증가할수록 34.1MPa에서부터 36.03MPa로 증가했다.

### 3-2 변위량 분포 해석

#### ① 조립 초기의 수평변위량 분포

ACGT링이 구형 그루브에 조립된 초기에 실린더와 피스톤 사이의 밀봉간극은 0.2mm, 마찰계수는 0.05, 메인 피스톤 속도는 3m/s, 좌측압력은 160bar, 우측압력은 800bar가 작용할 경우 ACGT링에서 발생한 수평방향 변위량 분포를 Fig. 3-7에서 보여주고 있다. Cap링 양쪽 끝단 ①, ②지역에서 최대변위량 0.115mm가 발생했다.

#### ② 메인 피스톤의 스트로크가 작용할 경우의 수평변위량 분포

왕복운동을 하는 메인 피스톤의 스트로크(stroke) 작용에 의해 ACGT링이 마찰력을 받아 메인 피스톤의 운동방향과는 반대되는 방향으로 이동할 경우, ACGT링에 걸리는 수평방향 변위량 분포를 Fig. 3-7에서 보여주고 있다.

ACGT링에 걸리는 수평방향의 최대 변위량은 0.147로 Cap 링 왼쪽 끝단과 실린더가 접촉하는 ①지역에서 발생한다.

#### ③ 메인 피스톤의 리턴 스트로크가 작용할 경우의 수평변위량 분포

왕복운동을 하는 메인 피스톤의 리턴 스트로크(return stroke) 작용에 의해 ACGT링이 마찰력을 받아 피스톤의 귀환운동 방향과는 반대되는 방향으로 이동할 경우, ACGT링에 걸리는 수평방향의 변위량 분포를 Fig. 3-7에서 보여주고 있다.

이러한 작동조건에서 ACGT링에 걸리는 수평방향의 최대 변위량은 0.147mm로 Cap링의 오른쪽 모서리부분과 실린더가 접촉하는 ②지역에서 발생한다. Fig. 4-7에서는 Cap링과 접촉하는 정점부를 중심으로 좌측에서는 스트로크 과정에서 가장 큰 변위량이 발생하지만, 우측에서는 리턴 스트로크 과정에서 가장 큰 변위량이 발생되고 있음을 제시하고 있다.

Fig. 3-8은 메인 피스톤과 실린더 사이의 밀봉 간극 0.2mm, 마찰계수 0.01~0.1, 메인 피스톤

속도 3m/s, 좌측압력은 160bar, 우측압력은 800bar일 경우에 ACGT링에 걸리는 수평방향 변위량 크기를 제시하고 있다. Fig. 3-8 계산결과에 의하면 마찰계수가 증가함에 따라서 최대 변위량은 증가하는 경향을 나타낸다.

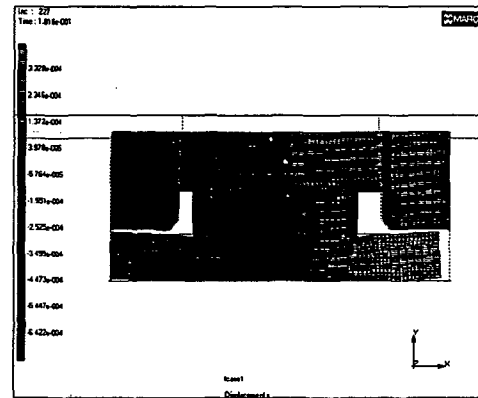


Fig. 3-6 메인 피스톤의 1회 왕복운동 후에 발생한 수평방향의 변위량 분포도

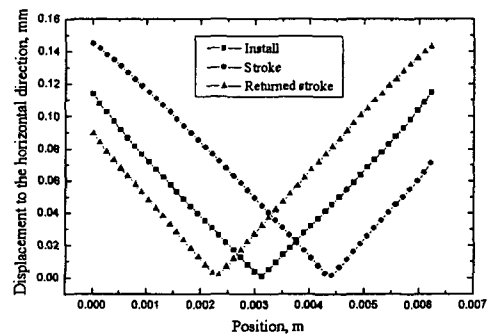


Fig. 3-7 메인 피스톤의 왕복운동 후에 발생한 수평방향의 변위량

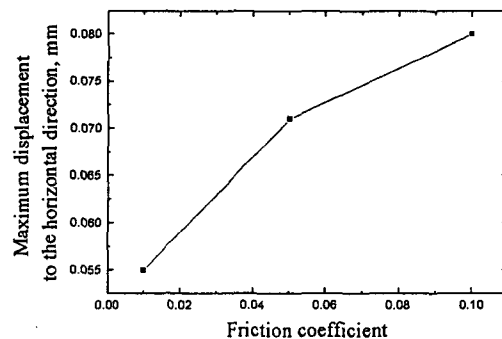


Fig. 3-8 메인 피스톤과 실린더 사이의 마찰계수 변화에 따른 수평최대 변위량

Fig. 3-9은 메인 피스톤과 실린더 사이의 밀봉 간극은 0.2mm, 마찰계수는 0.05, 메인 피스톤 속도는 0.1~3m/s, 좌측압력은 160bar, 우측압력은 800bar일 경우 ACGT링에 걸리는 변위량을 제시하고 있다. Fig. 3-9의 계산결과에 의하면 메인 피스톤 속도가 증가함에 따라서 수평방향의 최대 변위량은 속도가 증가함에 따라 비례해서 증가함을 보여주고 있다.

Fig. 3-10는 메인 피스톤과 실린더 사이의 밀봉 간극은 0.2mm, 마찰계수는 0.05, 메인 피스톤 속도는 3m/s, 압력비는 0~100%(Table 2-3 참조)일 경우에 ACGT링에 걸리는 최대 변위량을 제시하고 있다. 압력차가 20%( 좌측압력 160bar 우측압력 800bar)까지는 변화가 거의 없으나 압력차가 20%이상부터 급격하게 증가하고 있음을 보이고 있다.

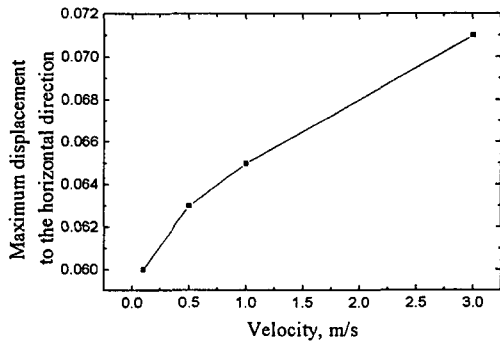


Fig. 3-9 메인 피스톤의 왕복동 속도 변화에 따른 최대 수평변위량

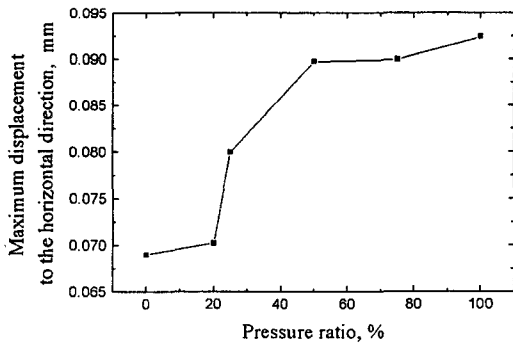


Fig. 3-10 ACGT링에 걸리는 압력차에 따른 최대 수평변위량

#### 4. 결론

자동화 설비에서 핵심부품인 실린더의 용량 누설 수명등에 직접적인 영향을 주고 있는 시일은 밀봉된 유체 누설을 방지하거나 외부의 이물질 침입을 차단하는 역할을 하는 요소부품으로 액추레이터의 성능을 좌우할 정도로 큰 비중을 차지하고 있다. ACGT시일의 응력이나 변형량 거동 특성은 양호한 데이터를 제공하고 있으며, 부분적인 수정설계를 한다면 완벽한 밀봉시스템이 될 것으로 예상된다. 여기서 시일의 수평방향 압출변형에 대한 백업링의 보완이 비교적 잘 이루어져 있는 것이 특징이다. 마찰계수가 증가함에 따라 응력과 변형량이 증가하는 형태를 보이고 있으며 또한 속도가 증가함에 따라 응력과 변형량이 증가한다. 실린더와 시일의 접촉면에 충분한 유막이 형성되어야 함을 알 수 있다.

#### 5. 참고문헌

- [1] Banks, D. D. and Banks D.S., "Industrial Hydraulic System," Prentice Hall, 1988.
- [2] Botto, P., Dragoni, E., and Strozzi, A., "Finite Element Redesign of Reciprocating 'PTFE' Rod Seals," Proc of 13th BHRA Conf., pp673~678, 1992
- [3] Belforte, G., Raparelli, T., and Velardocchia, M., "Effect of Mounting Tolerances on Pneumatic Cylinder Lip Seal Friction Forces," STLE, Vol. 50, No. 11 pp. 841~845, 1994
- [4] Field, C. J., and Nau, B.S., "An Experimental Study of Reciprocating Seals," Proc. Conf. on Elasto Hydr. Ludr., organized by the Inst. Mech. Eng., Paper C5, pp 29~35, 1972
- [5] Kanters, A. F. G., and Visscher, M., "Lubrication Roughness on Friction and Leakage," Proc. of 15th Leeds-Lyon Symp. on Trib., pp. 69~77, 1998
- [6] Lindley, P. B., "Compression Characteristics of Laterally Unrestrained Rubber 'O' Rings," J. of IRI, 1967.