

<학술논문>

DOI:10.3795/KSME-A.2009.33.10.1125

O-ring의 마찰, 마모 특성에 관한 실험적 고찰

오준철* · 김대은† · 김현준* · 김문환** · 김춘일**
(2009년 7월 21일 접수, 2009년 8월 29일 수정, 2009년 8월 31일 심사완료)

Experimental Investigation of Friction and Wear Characteristics of O-Ring

Jun-Chul Oh, Dae-Eun Kim, Hyun-Jun Kim, Mun-Hwan Kim and Chun-Il Kim

Key Words: O-Ring(오링), Friction(마찰), Rubber(고무), Wear(마모)

Abstract

O-rings are commonly used in machines as a seal. Due to prolonged use the surface of an O-ring can degrade which can lead to leakage as well as contamination. Damage of O-rings used in vacuum applications such as sputter is caused by various mechanisms. Particles detached from the O-ring may cause significant problems on the performance of the system in the vacuum chamber. Therefore, understanding the tribological behavior of O-rings is important to tackle the damage caused by repeated contact. In this work, FKM rubber was used for friction and wear tests conducted to investigate the tribological behavior of O-rings. A reciprocating type of a tribo-tester was used for the tests. The friction coefficient between the steel ball and the FKM specimen was quite high. Also, in order to identify the wear behavior, the surface of the FKM specimen was characterized using both optical and scanning electron microscopes. Evidence of wear due to adhesion and extrusion could be found. The results of this work will aid in improving the durability of O-rings.

1. 서론

오링은 사용 환경과 역할에 따라 다른 단면을 가진 간단하고도 다양한 링 모양의 것으로서 유동부위나 고정부위에 장착되어 두 표면 사이에서 가깝게 밀착되면서 유동체가 흘러 들어올 수 있는 통로에 누설을 막아주는 특성을 갖으며 이는 오링의 재질인 고무에 기인한다. 고무가 상대 접촉을 하여 마찰이 발생 할 때는 두 가지 메커니즘으로 설명할 수 있다. 첫 번째는 실제 접촉 면

적에서 발생하는 접촉력에 의한 것이고, 다른 하나는 고무의 변형에 의한 것이라고 설명 할 수 있다. 고무와의 상대 접촉에 의한 마찰력은 실제 접촉 면적에서 상대 면과의 분자간의 결합을 파괴하면서⁽¹⁾ 소모된 에너지라고 볼 수 있는 응착(adhesion)에 의한 것과 고무의 점탄성에 의한 변형 특성인 이력현상(hysteresis)에 의한 마찰력으로 볼 수 있으며 식 (1) 과 같이 표현 할 수 있다.^(2,3)

$$F = F_{adh} + F_{hys} \quad (1)$$

고무의 특성인 이력현상은 고무가 상대 면과 접촉하여 거동하며 마찰이 발생하는 동안의 점탄성적 특성을 보이게 되는데 이것은 고무분자의 압축과정과 완화과정이 반복 되는 것으로서 Fig. 1과 같이 표현 할 수 있다.⁽⁴⁾ 또한, 이러한 고무의

[이 논문은 2009년도 신뢰성부문 춘계학술대회(2009. 5. 21., BEXCO) 발표논문임]

† 책임저자, 회원, 연세대학교 기계공학과
E-mail : kimde@yonsei.ac.kr
TEL : (02)2123-2142 FAX : (02)365-0491
* 연세대학교 기계공학과
** LG디스플레이

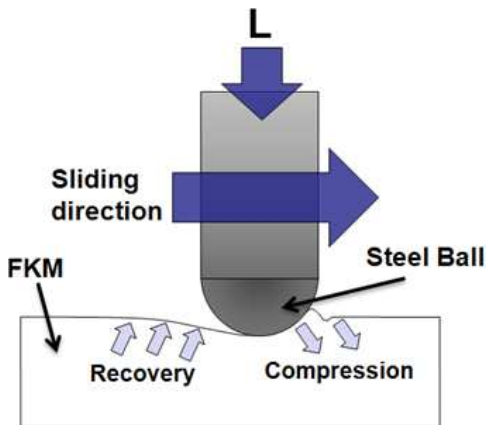


Fig. 1 Hysteresis mechanism of rubber

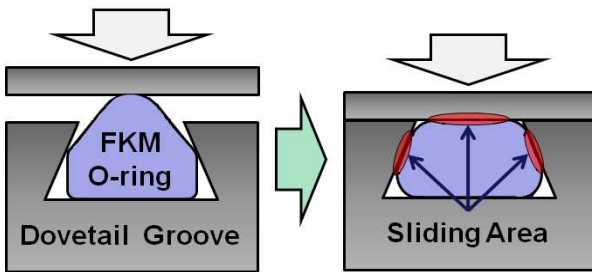


Fig. 2 Schematic of dovetail groove and O-ring

마찰 현상의 반복은 일반 금속간의 마찰에서와 다른 마찰 마모 경향을 보인다.⁽⁵⁾ 이러한 형상은 고무가 접촉하여 상대 운동을 할 때 고무의 접촉 표면이 미끄럼 상대운동 방향에 수직해서 결을 보인다는 Schallmach에 의해 정의된 Schallmach wave⁽⁶⁾를 통해 설명 할 수 있다. 본 연구에서는 진공장비 출입구(gate)에 사용되는 Fig. 2와 같은 도브테일 그루부(dovetail groove) 안에 장착된 오링의 반복 적인 접촉에 의해 발생하는 표면파손 현상을 고찰하였다.

실험에 사용된 시편은 상용 FKM 오링을 사용하여 실험 결과를 현장에서 바로 응용이 가능하도록 하였으며, 실험 방법에 있어서는 오링이 장비에 장착되어 본연의 역할을 할 때 대표적인 접촉 메커니즘이라고 볼 수 있는 왕복 운동을 구현한 pin-on-reciprocating tribo-tester를 이용하여 마모를 유발하고 광학 현미경과 전자현미경을 이용하여 마모 경향을 분석하였다. 또한, 오링의 마찰/마모 시험을 통한 마모의 메커니즘을 분석 하였으며, Archad's law⁽⁷⁾를 이용한 마모 계수를 통해 오링의 마모 정도의 경향을 알 수 있었다. 이러한 분석은 산업 현장에서 오링의 설계나 마모의 원인 규명에 도움을 줄 수 있을 것이다.

Table 1 Mechanical property of FKM (O-ring) and stainless steel (ball)

	FKM	Stainless steel
Poisson's Ratio	0.46	0.31
Hardness	71 (Shore A)	63 (HRC)
Modulus of Elasticity	5.00 MPa	1.93 GPa
Tensile Strength	16.5 MPa	207 MPa

2. 실험 및 분석 방법

2.1 실험 시편

실험에 사용한 시편은 스퍼터 장비에 장착되는 FKM 오링을 사용하였다. FKM 고무는 Table 1에서와 같이 일반 고무 보다 높은 경도를 보이고 있으며 내열성과 내유성, 내약품성 등 일반적인 고무에서는 찾아볼 수 없는 뛰어난 특성을 가지고 있어 다양한 산업 현장에서 이용되고 있다. FKM 오링의 상대 마찰재로는 볼 베어링 용 스테인리스 강 볼로 선정하였다. 그 이유로는 실제 오링이 접촉하는 스퍼터 장비의 재료와 유사한 재질인 동시에 스테인리스 강 볼의 경도는 HRC 63으로 고무보다 매우 높아 상대적으로 마모량이 작기 때문에 상대 마찰재로 적합하다고 판단되었다.

2.2 실험 장치 및 방법

2.2.1 실험 장치

본 실험에서는 Fig. 3과 같이 마찰/마모 작용을 구현하는 pin-on-reciprocating tribo-tester를 이용하였다. 핀과 reciprocating 구동을 하는 평판 부를 한 쌍의 마찰재로 한다. 위의 pin부는 고정되어 있고 왕복 운동을 하는 reciprocator 위의 평판부가 운동을 한다. 이때 미끄럼 거리는 40 mm (왕복거리 80 mm), reciprocator의 왕복 주기는 1 Hz 이고, 속도는 약 80 mm/sec 이다. 마찰력은 핀부에 장착되어 있는 full bridge 스트레인링에 의한 스트레인량을 전압으로 변환하고 이를 실시간으로 PC에 저장하였다. 하중은 dead weight를 핀위에 가해지도록 했으며, 또한, balance weight를 두어 평판부의 시편표면과 평행을 유지하여 실험 장치의 자중은 제외되도록 하였다.

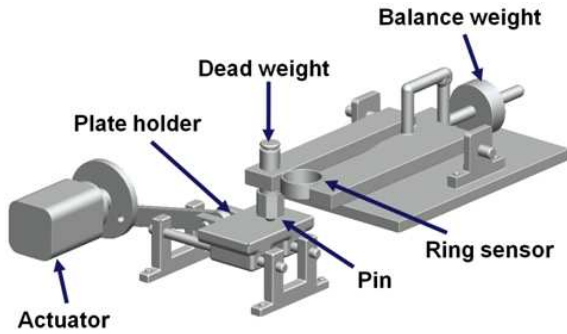


Fig. 3 Schematic of pin-on-reciprocating tribo-tester

2.2.2 실험 방법

그루부 내에 장착되어 사용되는 오링은 접촉하는 면과 미끄럼 운동을 유발하면서 하중을 받게 되므로 오링에 가해지는 힘은 오링의 점탄성 특성으로 인하여 비선형적으로 작용하게 된다.⁽⁵⁾ 그러므로 접촉하는 조건이 실제와 다르기 때문에 마찰/마모 실험에서 적합한 조건을 찾기 위해서 다양한 하중에서 예비 실험을 진행하였으며, 실험은 건조 상태에서 진행하였다. 실험에서의 하중은 100, 200, 300, 400 gf로, 미끄럼 선속도는 80 mm/sec로 하였다. 실험 시간은 실험 장치 plate부의 1회 왕복운동을 1 cycle로 하여 100 cycles 동안 실행 하였다. 또한, 마모 발생 형상을 고찰하기 위한 실험에서는 200 gf 하중을 인가하여 18000 cycles 동안 실험을 진행하였다. 실험에서 200 gf 하중 선정근거는 지나치게 높은 하중은 경하지 않은 약한 소재인 오링의 마모율에 비정상적인 가속한 영향을 초래하여 원래의 마모 메커니즘에서 벗어날 수 있기 때문이다. 또한, 표면 조도기를 이용하여 표면 조도를 측정하였고, 광학 현미경과 전자 현미경을 이용하여 마모 표면의 경향을 분석하였다.

3. 실험 결과

3.1 하중에 따른 마찰계수 변화

다양한 하중에서 tribo-tester를 통해 각각의 하중에 대한 마찰력을 측정하였다. Fig. 4는 100 gf 하중에서 전체 100 cycles 중 일부분의 왕복운동을 통한 마찰력 데이터로서 양과 음의 데이터가 반복해서 나타나는 것을 확인할 수 있으며, 마찰력 변화는 100 cycles 동안 다른 하중에서도 같은

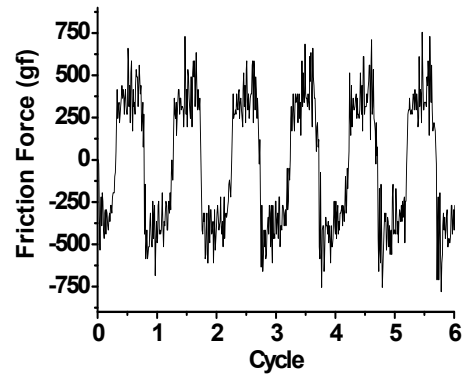


Fig. 4 Friction force of FKM O-ring

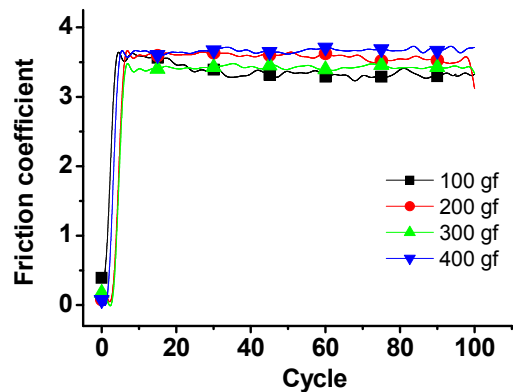


Fig. 5 Friction coefficient of FKM O-ring

경향을 보였다. Fig. 5는 실험을 통해 얻은 마찰력 데이터를 절대 값으로 변환 하여 1 cycle의 평균값을 하중으로 나누어 마찰계수 값을 구하여 연속적으로 나타낸 것이다. 마찰계수는 약 3.5 정도의 높은 값을 보였는데 그 이유는 고무의 마찰 현상에서는 이력현상과 응착의 영향이 다른 금속간의 마찰 보다 크기 때문이라고 판단된다. 다른 이유로는 오링의 상대 마찰재로 사용한 베어링용 볼의 표면 거칠기가 비교적 낮아 오링과의 실제 접촉 면적이 다소 크다는 것에서 비롯된다. 강과 FKM 고무와의 미끄럼 접촉에서 표면조도에 따른 마찰계수의 변화를 본 Mofidi⁽⁸⁾의 연구에서 강의 표면 조도가 0.5 ~ 0.7 μm 에서 0.15 ~ 0.3 μm 로 낮아짐에 따라 마찰계수도 약 0.5에서 2.5를 보이는 연구 결과와 Myshkin⁽⁹⁾의 연구에서 고무의 특성에 의하여 여러 가지 실험 인자에 의하여 다양한 크기의 마찰 계수를 갖는 것을 보았을 때 본 연구에서의 마찰 계수 3.5는 타당성이 있는 마찰 계수로 판단된다.

3.2 마모 특성 분석

마모 발생 현상을 파악하기 위하여 tribo-tester 를 이용하여 200 gf 하중에서 18000 cycles 동안 진행한 실험을 통하여 얻은 O-링의 마모된 표면을 광학 현미경과 전자 현미경을 통해 분석하였다. Fig. 6은 FKM O-링위에 강 볼에 하중(L)을 받은 상태에서 미끄럼 방향으로 이동하며 미끄럼 접촉을 할 때 발생하는 O-링의 대표적인 마모 메

커니즘을 나타낸 것이다. Fig 7은 광학 현미경을 통하여 실험 후 마모표면의 표면파손 부분을 관찰한 것이다. Fig. 7의 (a)와 (f)는 미끄럼 왕복 운동을 한 시편의 양 끝부분으로서 이미지의 중앙 부분에서 물결모양의 형상으로 O-링의 표면이 마모가 된 것을 볼 수 있는데 이 현상의 메커니즘은 이력현상의 반복으로 Fig. 6(a)와 같은 extrusion 마모의 초기 현상이라고 볼 수 있다. Fig. 7(b)

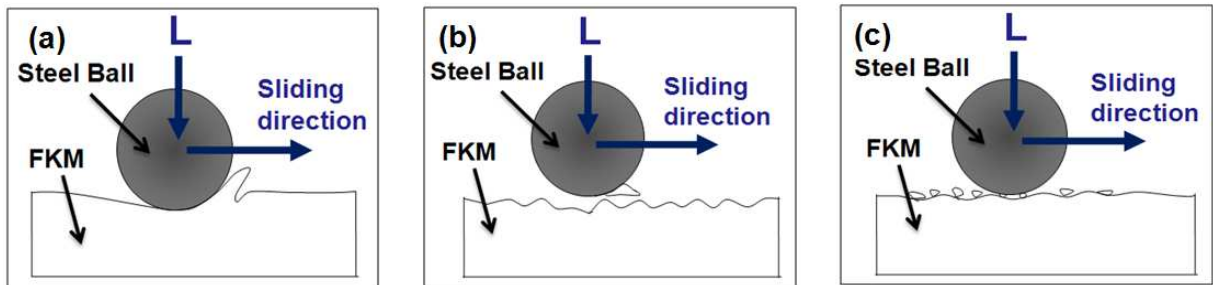


Fig. 6 Wear mechanisms of FKM O-ring: (a) extrusion wear, (b) adhesive wear, and (c) abrasive wear

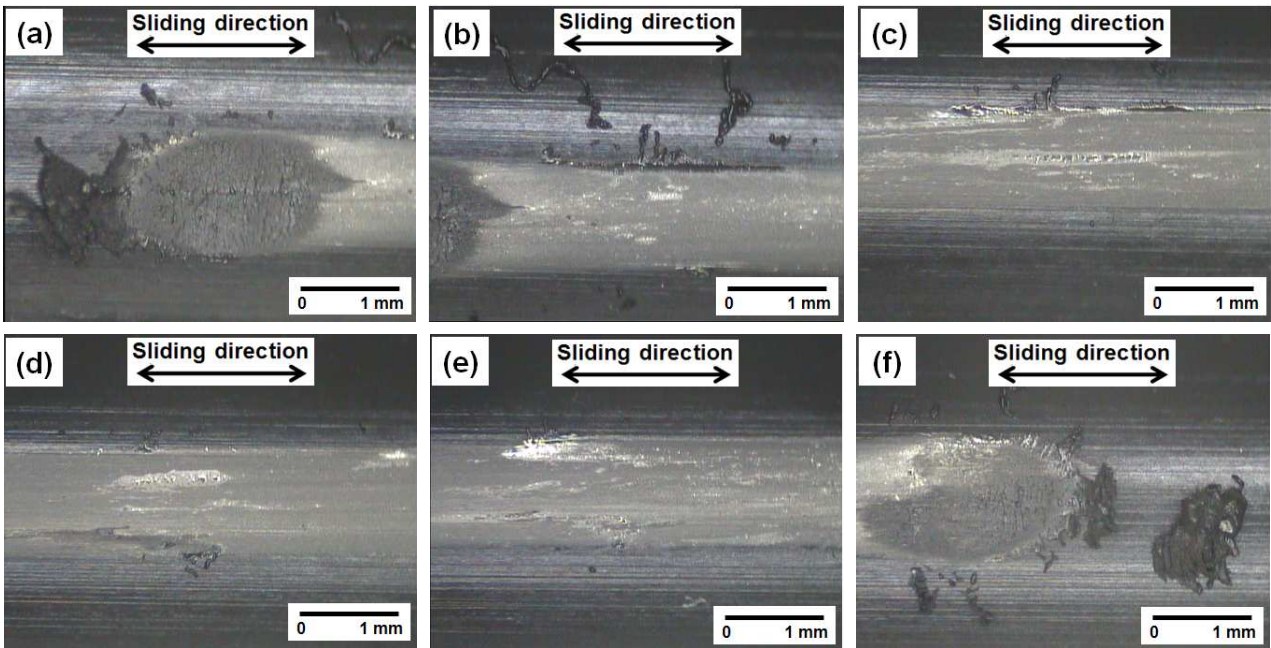


Fig. 7 Optical micrographs of FKM O-ring wear pattern

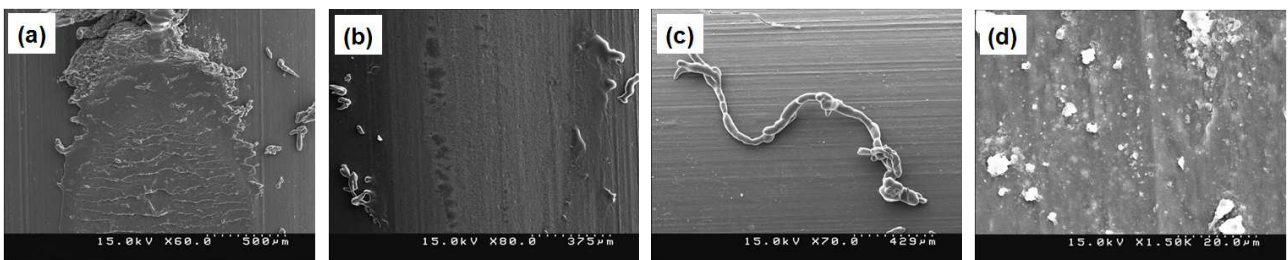


Fig. 8 SEM micrographs of FKM O-ring wear patterns

윗부분에 보이는 롤 형태의 마모 입자는 extrusion 현상에 의하여 발생된 마모입자가 구름운동을 경험하면서 형성된 것으로 판단된다. Fig. 7의 (c), (d)와 (e)의 중앙 부분에서는 Fig. 6(b)와 같은 응축에 의하여 표면이 떨어져 나간 것을 볼 수 있는데 이것은 고무의 높은 응축력에 의한 것으로 판단된다. Fig. 8(a)는 Fig. 7(a)의 중앙 부위를 전자 현미경을 통해서 본 것으로서 마모된 표면이 물결모양을 형성 한 것을 명확히 볼 수 있으며, 마모 입자가 쌓여 있는 부분이 한 번에 떨어져 나간 것이 아닌 적층되어 형성 된 것을 알 수 있다. Fig. 8(b)는 Fig. 7(d)의 중앙 부위를 전자 현미경을 통해서 본 것으로서 응축에 의하여 떨어져 나간 부분의 넓이가 수십 μm^2 정도가 되며 반복해서 떨어져 나간 것을 볼 수 있다. Fig. 8(c)는 Fig. 7(b)의 좌측 상부의 롤 형태의 마모 입자로서 1 mm의 길이를 가지며 반복적인 구름운동에 의하여 마모 입자가 말려서 길게 형성 된 것을 알 수 있다. Fig. 8(d)는 마모된 오링 표면을 확대한 것으로 많은 마모입자가 존재함을 알 수 있다. 이러한 마모입자는 Fig. 6(c)와 같이 표면에서 연삭 작용을 유발할 수 있으며 이는 마찰력을 증가시키며 마모를 촉진할 수 있는 원인이 된다.

3.3 마모의 정량적 분석

3.3.1 표면 조도기를 이용한 마모면적 측정

실험에 사용된 오링의 마모를 정량적으로 분석하기 위해 실험이 끝난 후 각 시편에 대하여 접촉식

표면조도기를 이용하여 마모된 표면을 5회 측정하였다. Fig. 9(a)는 실험전의 오링 상부 면의 표면 형상이고, Fig. 9(b)는 오링의 상부 면에 200 gf 하중을 가하여 18000 cycles 미끄럼운동을 한 후의 표면형상을 나타낸다. Fig. 9(a)와 Fig. 9(b)를 비교해보면 오링 상부면의 형상이 마모로 인하여 평탄화 된 것으로 알 수 있다. 오링의 마모 면적은 오링의 실험 전후의 형상을 비교하여 구하였으며, 5회의 측정 데이터로부터 얻은 값의 평균치로 최종적으로 마모 면적을 구하였다.

3.3.2 접촉압력 분석

오링과 볼 간의 접촉에서 발생하는 응력을 Hertzian contact 이론을 이용하여 분석하였다. Hertz 이론은 일반적인 탄성특성을 갖는 물질에 대하여 접촉 면적과, 변형 정도와 최대 압력 분포를 예측하는데 유용하다. Hertzian 이론을 적용하기 위해 실제로 접촉을 하는 오링 끝부분의 형상을 볼로 가정하여 사용한 볼의 반경 R_1 을 2.5 mm, 오링의 끝부분의 반경 R_2 를 2.8 mm로 하였으며 최대 접촉 압력 p_o , 접촉 반지름 a 를 수식 (2), (3)을 이용하여 구하였다. 여기서 P 는 최대하중으로 200 gf를 적용하였으며, E^* 는 stainless steel과 FKM 각각의 탄성계수 E_1 , E_2 와 포아송비 ν_1 , ν_2 의 조합으로 구해진 값으로서 Table 1에 제시된 물성치를 바탕으로 식 (4)를 이용하여 구하였다. 또한 R 은 각각의 재료의 반경 R_1 , R_2 의 조합으로 된 식 (5)을 통하여 얻었다.

$$p_o = \left(\frac{6PE^*}{\pi^3 R^2} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (2)$$

$$a = \left(\frac{3PR}{4E^*} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (3)$$

$$E^* = \left(\frac{1-\nu_1^2}{E_1} + \frac{1-\nu_2^2}{E_2} \right) \quad (4)$$

$$R = \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right)^{-1} \quad (5)$$

앞의 과정을 통해 알게 된 최대 접촉 압력(p_o) 2.06 MPa과 접촉 반지름(a) 0.67 mm를 이용한 식 (6)과 (7)을 통하여 최대 전단 응력 τ 와 최대 인장 응력 σ 를 알 수 있다. 식 (6), (7)에서 r 은 접촉 반지름(a)에서 최대 전단 응력이 작용하는 지점까지

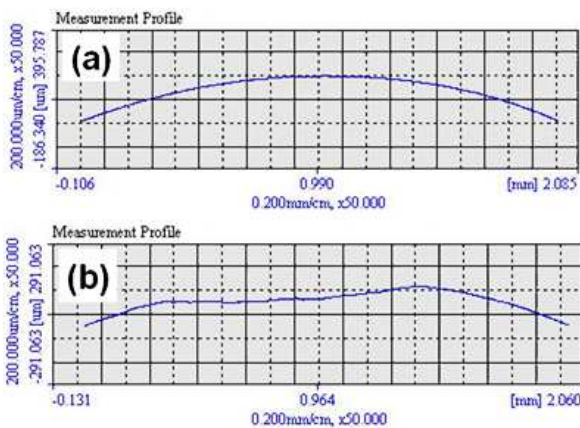


Fig. 9 Profile of FKM O-ring specimen: (a) original surface and (b) worn surface

의 거리이고, z 는 접촉점을 0으로 하여 수직방향으로 응력이 작용 하는 거리 이다.

$$\tau = 0.31p_o \quad \text{at } r=0, \quad z = 0.48a \quad (6)$$

$$\sigma = \frac{1}{3}(1-2\nu)p_o \quad \text{at } r=a, \quad z=0 \quad (7)$$

위의 과정을 통해 획득한 최대 전단 응력(τ)는 접촉면 중심에서 수직 방향으로 0.32 mm인 지점에서 0.64 MPa이 작용한다. 또한, 최대 인장 응력(σ)는 접촉면 반경인 0.67 mm에서 0.05 MPa이 작용하는 것을 알 수 있다. 이를 통하여 Table 1의 FKM 오링의 물성과 비교해 보았을 때 상당히 작은 힘이 작용한 다는 것을 알 수 있으며, 이는 tribo-tester를 이용한 마모 실험이 타당하다고 할 수 있다.

3.3.3 마모계수 분석

오링의 마모 정도를 파악하기 위하여 마모계수를 구하였다. 마모계수는 Archard's law⁽⁷⁾를 이용하여 구할 수 있으며 수식은 (8)과 같다.

$$V = \frac{kLx}{H} \quad (8)$$

이 이론식에 따르면, 마모체적 V 는 마모계수 k , 하중 L 과 이송거리 x 에 비례하고, 소재의 경도 H 에 반비례 하는 관계를 나타낸다. 그러므로 각각에 해당하는 값을 알면 마모계수를 간단하게 구할 수 있다. 마모체적, 이송거리, 하중은 실험을 통해서 구할 수 있으며 소재의 물성치인 경도는 고무 경도계(durometer)를 이용하여 측정할 수 있다. 실험에서 가한 하중(L)은 200 gf 이며 이송거리(x)는 80 mm를 18000 cycles 동안 반복하였으므로 1,440 m가 된다. 경도(H)는 고무 경도계를 이용하여 측정한 경도를 ASTM E 140의 경도 전환 표(hardness conversion table)을 참고하여 157 MPa을 얻을 수 있었다. 마지막으로 마모체적을 구하기 위하여 3.3.1절에서 설명한 바와 같이 실험을 통해 얻은 오링의 표면형상을 이용하여 마모체적을 구하였다. 마모체적(V)는 마모면적 0.05 mm²에 일회 이송거리 40mm를 곱하여 2 mm³를 얻었다. 이러한 과정을 통해 얻은 마모계수(k)는 1.1 x 10⁻⁴임을 알 수 있었다. 이 값은 일반적인 접촉 미끄

럼운동을 하는 기계요소의 마모보다 비교적 높은 값으로써 오링의 수명향상을 위해서는 마모계수를 감소시키는 방안을 모색할 필요가 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 진공 장비에 사용되는 FKM 오링의 마찰/마모 특성을 파악하기 위하여 pin-on-reciprocating tribo-tester를 이용하여 마찰/마모 실험을 수행하였다. 또한, 마모의 경향과 메커니즘을 고찰하기 위해 광학 현미경과 전자 현미경을 이용하여 분석하였으며 마모계수를 정량적으로 계산하였다.

(1) FKM 오링과 스테인리스 강 볼의 접촉에서의 마찰계수가 다양한 하중에서 약 3.5정도의 비교적 높은 값을 균일하게 보였다. 이와 같은 높은 마찰계수는 경도가 낮은 FKM 오링의 마모를 유발 시키는 원인이 되므로 오링의 형상 설계나 선택에 있어서 오링의 내마모성은 중요시 고려되어야 할 인자로 판단된다.

(2) 마모실험을 통하여 얻은 오링 표면의 마모 형상과 마모 입자를 분석한 결과 extrusion 마모와 응착마모가 발생하였음을 알 수 있었으며 특정한 마모된 부위에는 표면이 연삭작용으로 마모되었음을 알 수 있었다. 따라서 오링의 마모는 다양한 복합적인 요인에 의해 마모가 발생 된다는 것을 알 수 있다.

(3) 실험에서 얻은 마모체적, 미끄럼거리, 하중으로부터 Archard's law를 이용하여 마모계수를 계산하였다. 본 연구에서 사용한 오링의 마모계수는 1.1 x 10⁻⁴로서 비교적 높은 값을 가진다는 것을 알 수 있다. 따라서 오링의 수명을 향상 시킬 수 있는 대책이 요구된다.

참고문헌

- (1) Schallamach, A., 1963, "A Theory of Dynamic Rubber Friction," *Wear*, Vol. 6, No. 5, pp. 375-382.
- (2) Moore, D. F., Geyer, W., 1972, "A Review of Adhesion Theories for Elastomers," *Wear*, Vol. 22, No. 2, pp. 113-141.
- (3) Moore, D. F., Geyer, W., 1974, "A Review of Hysteresis Theories for Elastomers," *Wear*, Vol. 30,

- No. 1, pp. 1~34.
- (4) Persson, B. N. J., 1998, "On The Theory of Rubber Friction," *Surface Science*, Vol. 401, No. 3, pp. 445~454.
- (5) Hwang, D. H., Sung, I. H. and Kim, D. E., 1998, "The Effects of Relative Material Properties on the Friction and Wear Behavior of Pure Metals," *Journal of KSTLE*, Vol. 14, No. 2, pp. 10~20.
- (6) Schallamach, A., 1971, "How Does Rubber Slide?," *Wear*, Vol. 17, No. 4, pp. 301~312.
- (7) Bhushan, B., 1999, Principles and Applications of Tribology, John Wiley & Sons, Inc.
- (8) Mofidi, M. and Prakash, B., 2008, "Influence of Counterface Topography on Sliding Friction and Wear of Some Elastomers Under Dry Sliding Conditions," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*, Vol. 222, No. 5, pp. 667~673.
- (9) Myshkin, N. K., Petrokovets, M. I. and Kovalev, A. V., 2005, "Tribology of Polymers : Adhesion, Friction, Wear, and Mass Transfer," *Tribology International*, Vol. 38, No. 11, pp. 910~921.