

가황된 천연고무 판재의 마찰특성에 관한 연구

김 완 두[†] · 김 동 진 · 나 창 운* · 이 영 신**

한국기계연구원, *전북대학교 신소재공학부, **충남대학교 기계설계공학과
(2001년 5월 18일 접수)

A Study on the Friction Characteristics of Vulcanized Natural Rubber Plate

W. D. Kim[†], D. J. Kim, C. Nah*, Y. S. Lee**

Rubber Mechanics Lab., Korea Institute of Machinery and Materials, Daejeon 305-343, Korea

*School of Advanced Materials, Chonbuk National University, Chonju 561-756, Korea

**Dept. of Mechanical Design Engineering, Chungnam National University, Daejeon 305-764, Korea

(Received May 18, 2001)

요 약 : 다양한 조건 하에서 고무판의 마찰계수를 측정하기 위하여 수직하중, 미끄럼속도, 경도, 윤활 조건 및 고무판 두께 등을 변화시켜가면서 시험을 실시하였다. 시험에 사용된 고무판의 재질은 천연고무이며, 상대 부품은 강구를 사용하였다. 수직하중과 미끄럼속도는 마찰계수에 현저한 영향을 미치지 않았으며, 고무판의 경도가 높아지고 고무판의 두께가 얇아질수록 마찰계수는 감소하였다. 무윤활 시 마찰계수는 큰 편차를 보였으나, 오일 윤활인 경우 다른 조건에 관계없이 안정된 값을 나타내었다.

ABSTRACT : The friction characteristics of natural rubber plates under various conditions including sliding speed, normal force, hardness, lubrication conditions and thickness of plate are analyzed experimentally. The frictional force and normal force are measured by a tester pin and a load cell with strain gages. Experimental results suggest that the coefficient of friction decreases with increasing the hardness of rubber and decreasing the thickness of plate. The effect of sliding speed is not significant over the speed range employed. The coefficient of friction is found to be about 0.1 under oil lubrication condition and varies from 0.9 to 3.9 under no lubrication condition.

Keywords : friction, natural rubber, hardness, sliding speed, lubrication.

I. 서 론

오늘날 여러 산업분야에서 고무류 기계부품의 사용은 점진적인 증가 추세에 있으며, 자동차, 철도차량, 항공기, 일반기계 및 가전분야에서도 없어서는 안될 중요 부품으로 사용되고 있다. 고무재료가 사용되는 각종 기계류 부품의 설계는 대부분

경험에 의해 이루어져 왔으나, 최근에는 유한요소법을 이용한 고무류 부품 설계·해석 기술이 많이 활용되고 있다. 대부분 고무부품은 대변형으로 인하여 자체와의 접촉과 상대운동이 발생하는 경우가 많으며, 오링, 립실, 고무벨트 등은 상대 운동 및 접촉 현상으로서 그 기능을 수행하는 부품도 있다. 이러한 접촉 및 상대운동이 발생하는 부품의 해석 시에는 마찰계수가 중요한 변수로 작용되고 있으나, 이에 대한 데이터를 구하기 어려운 실정이

[†]대표저자(e-mail : wdKim@kimm.re.kr)

다.

천길정¹, Barquins² 등은 다양한 온도와 하중변화에 따른 고무재료의 마찰특성을 분석하였으며, Yoshitaka³ 등은 고무재료의 마모특성을 분석하였다. 또한 Noriaki⁴ 등은 고무시편의 다양한 형상과 마찰방법 및 형상변화에 따른 연구를 접촉압력과 속도 관점에서 폭넓게 연구했다. 김완두⁵는 고무부품의 다양한 물성분석 및 응용부품의 연구를 위해 많은 시험과 해석을 수행하였다.

본 연구에서는 다양한 조건 하에서 고무판의 마찰계수를 측정하기 위하여 수직하중, 미끄럼속도, 경도, 윤활 조건 및 고무판 두께 등을 변화시켜 시험을 실시하였다. 시험에 사용된 고무판의 재질은 천연고무이며, 상대 부품은 강구를 사용하였다.

II. 마찰시험기 및 시편

1. 마찰시험기의 원리

본 연구에 사용된 마찰시험기의 원리는 회전하는 고무판재와 하중을 측정하는 센서로 구성된다. Fig. 1은 마찰시험기의 사진을 보여주고 있다.

고무판은 도넛(donut)형으로 제작되었으며, 회전하는 테이블의 상단에 장착된다. 고무판은 도넛형과 블록(block)형의 고정장치와 볼트를 이용하여 회전테이블에 체결된다. Fig. 2는 고무판의 장착상태를 보여준다. 회전테이블은 감속기가 장착된 모터에 의해 작동되며, 제어기(controller)로부터 지시된 회전수로 작동된다.

하중을 측정하는 센서는 마찰하중과 수직하중을 측정할 수 있도록 구성되었으며, 마찰하중을 측정하는 테스터 핀과 수직하중을 측정하는 원판으로 제작되었다. 테스터 핀과 원판은 외부에서 작용하는 하중에 의해 변형이 발생되며, 변형률은 테스터 핀과 원판에 장착된 스트레인게이지에 의해 측정이 가능하다. 측정된 변형률을 이용하여 하중의 크기를 계산할 수 있다. Fig. 3은 테스터 핀과 원판의 형상과 구성을 나타낸다. Fig. 3(a)는 하중이 부여되기 전의 모습이며, Fig. 3(b)는 수직하중 및 마찰하중이 가해질 때의 변형모습을 확대하여 보여주

고 있다. 이러한 테스터 핀과 원판은 외팔보형 측정비에 장착되며, 외팔보형 측정비는 시험기의 프레임에 고정되었다. 외팔보형 측정비는 수직하중변화에 따라 수직방향의 운동만 가능하도록 제작되었으며, 무게 추의 위치 및 개수 변화에 따라 5 N부터 20 N까지 다양한 하중을 부여할 수 있도록 제작되었다.

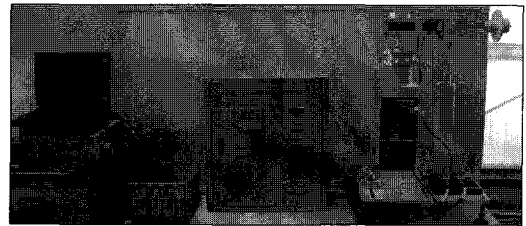


Figure 1. Photograph of the rubber friction tester.

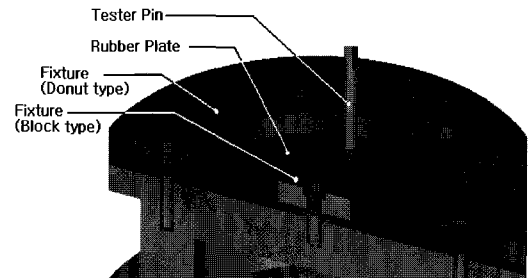


Figure 2. The shape of tester pin and rubber plate.

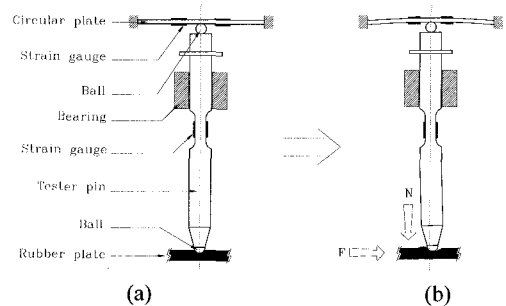


Figure 3. Schematic diagram of sensors for measurement of frictional and normal forces.

2. 센서구성 및 설계

2.1 테스터 핀의 설계

고무판과 테스터 핀은 접촉되어 있으며, 고무판의 회전에 의해 테스터 핀은 굽힘하중을 받는다. 테스터 핀의 측면에 각 2개씩 총 4개의 스트레인 게이지를 부착하여 적절한 회로 구성을 통하여 압축변형률은 제거시키고 단지 굽힘변형률만 측정되도록 하였다.⁶

테스터 핀의 형상은 직경 0.01 m, 길이 0.126 m 봉 형상으로 제작되었으며, 큰 변형률과 스트레인 게이지 부착이 용이하도록 테스터 핀의 중간에 평면 단을 만들었다. 또한 작은 하중에서 큰 변형률을 얻기 위해 알루미늄으로 제작하였다. 환봉의 자유단에 법선방향의 하중이 작용할 경우, 1축 단순 굽힘응력식을 적용하여 식(1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\sigma_b = \frac{M}{Z} \tag{1}$$

식(1)에서 M 은 스트레인 게이지 부착부분에 작용하는 굽힘모멘트이며, Z 는 스트레인게이지가 장착된 부분의 단면형상계수이며, 82.9 mm^3 이다. 식(1)에서 구해진 굽힘응력(σ_b)은 식(2)의 Hooke의 법칙을 통해 변형률을 구할 수 있다.

$$\epsilon = \frac{\sigma_b}{E} \tag{2}$$

식(2)에서 E 는 알루미늄 재료의 탄성계수이며, 70 GPa이다. 마찰하중(frictional force)은 10 N부터 50 N까지 작용하는 것으로 계산하였으며, 알루미늄 환봉의 스트레인 게이지 부분에 작용하는 굽힘응력과 변형률은 Table 1과 같이 구할 수 있었다. 굽힘하중 10 N이 작용할 경우, 15.2 MPa의 굽힘응력이 작용하므로 알루미늄의 항복강도인 20 MPa 보다 작으므로 설계상 안전함을 알 수 있었다. 그러나 20 N 이상에서는 항복강도보다 크게 나타나므로 소성변형을 발생하게 된다. 본 연구에 사용된 마찰시험기의 마찰하중은 10 N 이내로 제한하고 있다.

Table 1. Bending Stress and Strain of Tester Pin

Frictional Force (N)	Bending Stress (MPa)	Strain ($\mu\epsilon$)
10	15.2	217
20	30.4	434
30	45.6	651
40	60.8	868
50	75.9	1085

2.2 원판의 설계

시험에 가해지는 수직하중은 테스터 핀 상단에 설치된 원판 형태의 로드셀로 측정하였다. 이 로드셀은 중앙 집중하중을 받는 원판 형태로서, 상하면에 4개의 스트레인게이지가 부착된 자체 제작된 부품이다. 정확한 수직하중 부여를 위해 원판과 테스터 핀 사이에 볼을 삽입하였으며, 점(point) 접촉이 발생되도록 설계하였다. 작은 하중에서 큰 변형률을 얻기 위해 원판의 재질을 알루미늄으로 제작하였다.

원판의 중앙에 집중하중이 작용할 경우 식(3)과 같이 판의 길이방향 및 원주방향에 작용하는 응력을 구할 수 있다.⁷

$$\sigma_r = \frac{3P}{2\pi t^2} \left[(1+\nu) \ln \frac{a}{r} - 1 \right] \tag{3}$$

$$\sigma_\theta = \frac{3P}{2\pi t^2} \left[(1+\nu) \ln \frac{a}{r} - \nu \right]$$

식(3)에서 σ_r 은 길이방향으로 작용하는 응력을 나타내며, σ_θ 는 원주방향으로 작용하는 응력을 나타낸다. P 는 원판의 중앙에 수직으로 작용하는 하중이며, t 는 원판의 두께를 나타낸다. a 는 원판의 반경으로 0.0325 m이다. ν 는 알루미늄 재료의 포와송비이며, 0.33이 사용되었다. 원판에 작용하는 응력은 식(4)을 이용해서 변형률로 환산할 수 있다.

$$\epsilon_r = \frac{1}{E} (\sigma_r - \nu\sigma_\theta)$$

$$\epsilon_{\theta} = \frac{1}{E} (\sigma_{\theta} - \nu\sigma_r) \quad (4)$$

식(4)에서 ϵ_r 은 길이방향의 변형률이며, ϵ_{θ} 는 원주방향의 변형률이다. E 는 재료의 탄성계수이며, 알루미늄재료의 탄성계수인 70 GPa를 사용하였다. Fig. 4는 원판의 형상과 치수를 나타내고 있다.

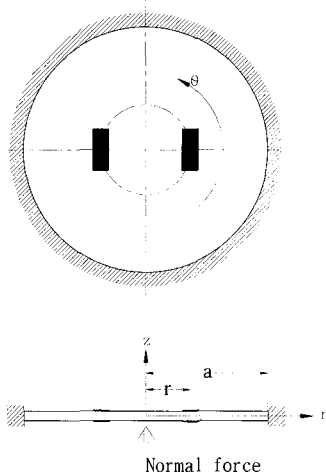


Figure 4. Dimensions and shape of circular plate.

원판의 설계는 스트레인게이지의 부착위치 및 방향을 결정하기 위한 것이며, 식(4)을 이용해서 다양한 하중변화에 따른 길이방향 및 원주방향의 변형률을 계산하였다. 계산에 사용된 수직하중은 5 N부터 20 N까지 고려하였으며, 중심점으로부터 원주방향으로 0.005 m, 0.015 m, 그리고 0.025 m의 위치에서 계산하였다. Table 2는 스트레인게이지의 부착위치 변화에 따른 원판의 응력과 변형률을 나타내며, Fig. 5와 Fig. 6은 원판에 작용하는 응력과 변형률을 나타 내고 있다.

계산결과 두께가 0.001 m인 알루미늄 원판에 중앙집중하중이 작용할 경우, 5 N부터 20 N까지 하중증가에 따라 응력이 증가됨을 볼 수 있었으며, 길이방향의 응력보다 원주방향의 응력이 크게 나타남을 볼 수 있었다. 또한 원판에 작용하는 응력은 알루미늄의 항복강도인 20 MPa보다 작게 나타남을 알 수 있었다.

Table 2. Stress and Strain of Circular Plate

Load(N)	Radius(m)	Stress(Mpa)		Strain(10 ⁻⁶)	
		σ_r	σ_{θ}	ϵ_r	ϵ_{θ}
5	0.005	3.56	5.15	26.5	56.9
	0.015	0.07	1.66	-6.8	23.5
	0.025	-1.56	0.04	-22.4	7.9
10	0.005	7.12	10.31	53.0	113.8
	0.015	0.14	3.33	-13.7	47.0
	0.025	-3.11	0.09	-44.8	15.9
15	0.005	10.67	15.47	79.5	170.7
	0.015	0.20	5.00	-20.6	70.5
	0.025	-4.67	0.13	-67.2	23.9
20	0.005	14.23	20.63	106.0	227.6
	0.015	0.27	6.67	-27.5	94.0
	0.025	-6.22	0.18	-89.7	31.9

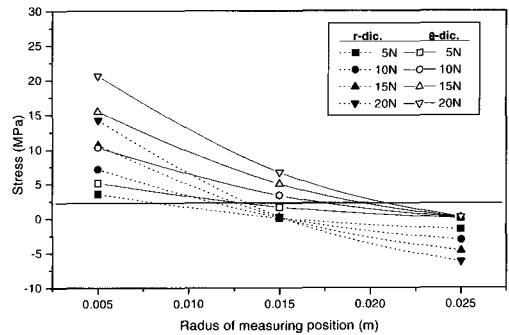


Figure 5. Stress of circular plate for various load and radius of circular plate.

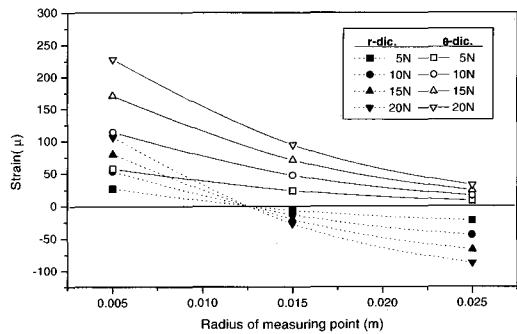


Figure 6. Strain of circular plate for various load and radius of circular plate.

2.3 센서의 신호처리

센서에 부착된 4개의 스트레인 게이지는 휘스톤 브리지(Wheatstone bridge)로 구성되었으며, 신호증폭기를 통해 증폭된 신호는 A/D 변환기를 통해 컴퓨터 내에 저장된다. 마찰계수는 컴퓨터에 저장된 마찰력과 수직하중 값으로부터 계산된다. Fig. 7은 마찰시험장치의 신호처리계통도를 나타 내고 있다.

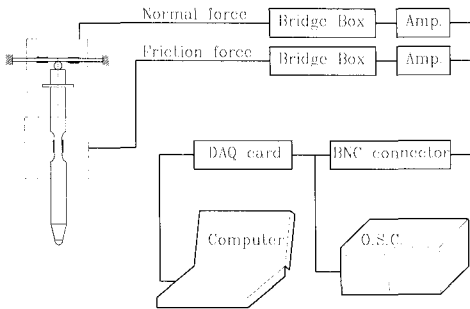
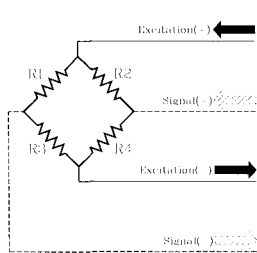
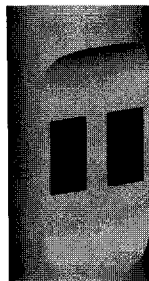


Figure 7. Block diagram of the friction tester for signal processing.

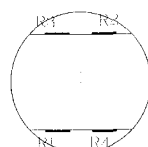
Fig. 8(a)는 휘스톤브리지의 결선도를 나타내었다. 각각 2개의 입력단자와 출력단자로 구성되었다. 센서로 제작된 구조물의 변형에 의해 스트레인게이지의 저항값이 변화되며, 저항값의 변화에 따라 출력전압이 변화된다. Fig. 8(b)는 테스터 핀의 스트레인게이지 부착위치와 방향을 나타내며, Fig. 8(c)는 로드셀 제작에 사용된 원판의 스트레인게이지 부착위치 및 방향을 나타 내고 있다.



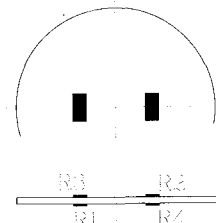
(a) Wheatstone bridge



(b) Tester pin



Friction force



Normal force

(c) Circular plate

Figure 8. The attachment position and direction of strain gage.

2.4 센서의 보정

로드셀과 테스터 핀을 이용하여 수직하중과 마찰력을 측정해야되며, 하중변화에 따른 출력신호의 보정이 필요하다. 즉, 하중이 비례적으로 증가할 경우 출력되는 신호값 또한 비례적으로 증가해야 되며, 하중과 출력 신호값이 선형성을 유지해야된다.

센서의 보정은 5N의 표준분동을 이용하여 수행하였으며, 분동의 수량변화에 따라 다양한 하중을 부여할 수 있다. 출력신호(voltage)는 증폭기(amp.)의 게인(gain)을 통해서 입력된 하중과 동일한 수치의 출력신호가 발생될 수 있도록 조정하였다. 즉, 5 N(0.5 kg)의 하중이 작용할 경우 0.5 V의 출력신호가 나오도록 조정하였다.

센서보정 방법은 5 N, 10 N, 15 N 그리고 20 N의 하중을 점진적인 증가와 감소를 반복하며 수행하였다. Table 3은 하중변화에 따른 출력신호값을 나타내며, Fig. 9 및 10은 테스터 핀과 로드셀의 보정결과를 나타내었다. 센서의 보정시험 결과 테스터 핀 및 원판의 신호는 하중변화에 따라 비례적으로 나타났으며, 선형성을 나타냄을 알 수 있었다.

Table 3. Output Voltage of Sensor for Various Load Step

Sensors	Load(N)						
	5	10	15	20	15	10	5
Tester Pin	0.51	1.01	1.50	2.02	1.50	1.01	0.51
Circular plate	0.51	1.00	1.51	2.00	1.50	1.00	0.51

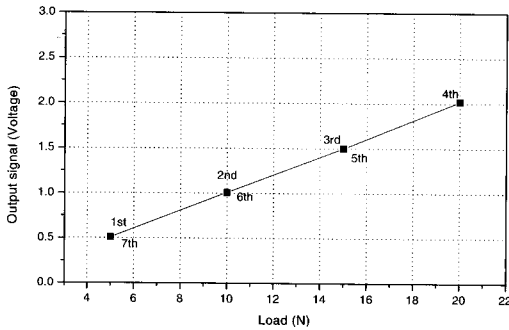


Figure 9. The calibration result for various load steps of tester pin.

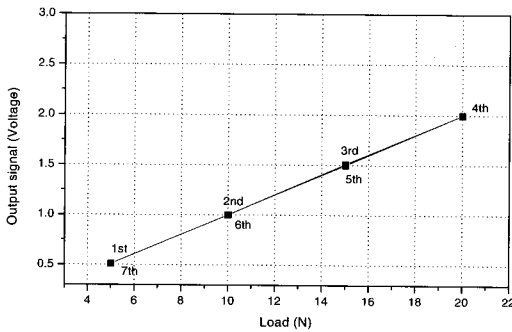


Figure 10. The calibration result for various load steps of circular plate.

Ⅲ. 고무마찰시험

1. 시험조건 및 방법

본 연구에서는 다양한 조건 하에서 고무판의 마찰계수를 측정하기 위하여 수직하중, 미끄럼속도, 경도, 윤활 조건 및 고무판 두께 등을 변화시켜가면서 시험을 실시하여 각각의 마찰계수를 측정하였다. 테스트터 핀은 구형이며, 재질은 구조용강이다.

수직하중은 외팔보형 측정비에 장착되는 무게추의 증·감 및 위치변화에 따라 하중을 변화시킬 수 있으며, 본 시험에서는 5 N과 10 N 두 가지 경우로 하였다.

미끄럼속도는 39.4 mm/s, 67.3 mm/s, 102.7 mm/s 그리고 111.6 mm/s 등의 4가지 조건으로 실시하였다. 동일한 시험조건을 유지하기 위해 회전테이블

의 회전이 시작되는 시점부터 60초까지 가속시킨 후, 90초까지 등속도를 유지하였으며, 90~100초 동안 데이터를 측정하였다. Fig. 11은 시험 시 회전하는 테이블의 속도분포와 마찰력 측정위치를 나타내었다.

윤활 조건은 무윤활과 오일 및 그리이스 윤활 상태 등이며, 시험에 사용된 윤활제의 규격을 Table 4에 보여주고 있다. 윤활제를 사용할 경우 윤활막이 원활히 형성되도록 충분한 윤활제를 공급해 주었다.

두께 변화의 영향을 시험하기 위하여 동일한 경도를 갖는 2 mm와 4 mm 두께의 시편을 사용하였다.

Table 4. The Types and Characteristics of Oil and Grease

Type	Manufacturing Co. (Model No.)
Oil	Mobil Korea Lube Oil (DTE-25)
Grease	Mobil Asia-Pacific Pte. Ltd.(Mobiltac 81.) - NLGI Grade 2 - Dropping Point 260° / 1kg

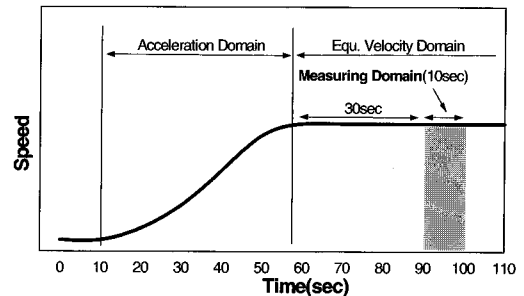


Figure 11. Measuring time history for the friction test of rubber specimen.

2. 고무시편

고무재료는 제작사의 배합성분 및 공정 조건에 따라 기계적 성질이 다를 수 있으므로, 동일한 조건으로 제작된 시편을 사용하여 시험하였다. 시편의 표면조도의 영향을 배제하기 위하여 동일한 표면거칠기의 시편을 사용하였으며, 시편 표면에 이물질, 결함 및 불균일성 등이 없는 시편을 골라 시

합하였다. 고무 시편의 재질은 자동차용 방진고무 용으로 사용되는 천연고무이다.

속도변화, 경도변화, 윤활 조건에 따른 영향은 4 mm 두께로 제작된 고무시편을 사용하였으며, 회전 테이블에 장착할 수 있도록 Donut type으로 제작되었다. 고무판재의 경도는 쇼어 A 50, 66 및 80도를 사용하였다.

3. 마찰계수 측정

센서에서 측정된 신호는 컴퓨터 프로그램에서 데이터로 출력되며, 출력된 신호들(마찰력, 수직하중)은 식(5)의 관계를 통해 마찰계수 값으로 계산된다.

$$\mu = F/N \tag{5}$$

여기서, F 는 테스터 핀과 고무판의 상대운동에 의해 생기는 마찰력이며, N 은 테스터 핀에 작용하는 수직하중이다. μ 는 수직하중과 마찰력의 관계에서 계산된 마찰계수이다.

IV. 결과 및 고찰

1. 하중, 속도 및 경도의 영향

Fig. 12은 무윤활 상태의 하중, 미끄럼속도 및 경도 변화에 따른 마찰계수 값을 보여주고 있다. 5 N의 하중이 작용할 때, 경도와 속도 변화에 따라 마찰계수는 1.6부터 3.9 범위에서 경도와 속도가 커질수록 작아지는 경향을 나타냈다. 10 N의 하중이 작용할 때는 0.9부터 2.7까지 범위로 나타났으며, 경도가 커질수록 마찰계수는 작아지는 경향을 보였으나, 속도 변화에 의한 영향은 명확하지 않았다. 속도는 39.4~111.6 mm/s로 변화시켰다.

Fig. 13은 오일 윤활 상태의 하중 및 경도 변화에 따른 마찰계수 값을 보여주고 있다. 오일 윤활의 경우 경도나 속도 변화의 영향이 거의 없었으며, 하중 변화의 영향도 현저하지 않아 0.9부터 1.3 정도의 안정적인 값을 나타냈다.

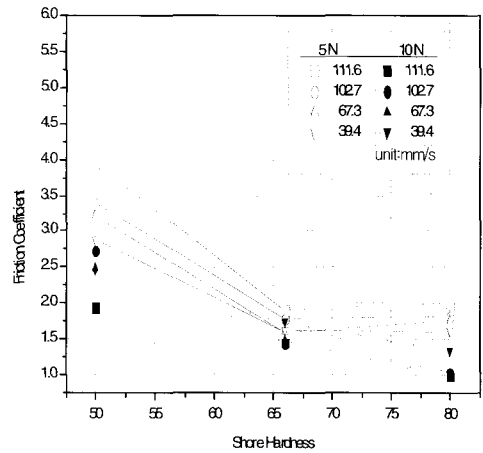


Figure 12. Frictional coefficients for various normal force and hardness under no lubrication.

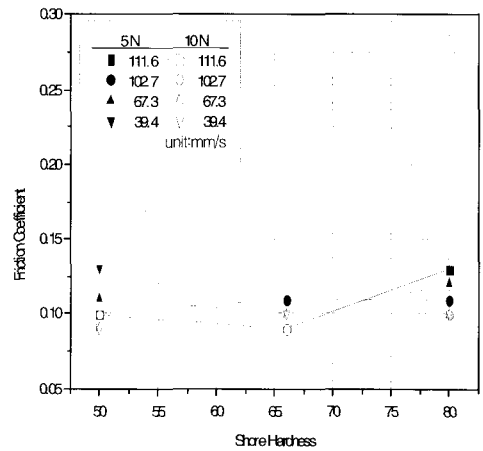


Figure 13. Frictional coefficients for various normal force and hardness under oil lubrication.

2. 윤활 조건의 영향

Fig. 14는 윤활조건 변화에 따른 마찰계수의 분포를 보여주고 있다. 5 N의 하중이 작용할 경우 마찰계수는, 무윤활의 경우 1.6~3.9, 오일 윤활의 경우 0.09~0.13, 그리고 그리이스 윤활의 경우 0.1~0.2의 값으로서 오일 윤활의 경우가 가장 안정적이고 작은 마찰계수 값을 나타내었다. 10 N의 하중이 작용할 경우, 무윤활 시 0.9~2.7, 오일 윤활 시 0.09~0.1, 그리고 그리이스 윤활 시 0.11~0.14 로

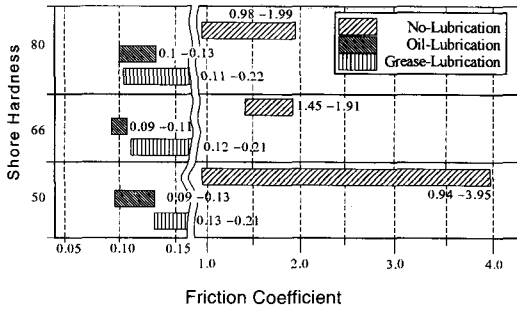


Figure 14. Friction coefficient for various conditions of lubrication.

서 5 N의 경우와 마찬가지로 오일 윤활의 경우가 가장 안정적이고 작은 마찰계수 값을 나타내었다.

3. 시편 두께의 영향

시편 두께의 영향을 알아보기 위하여 2 mm와 4 mm 두께의 경도 66도 시편을 39.4~111.6 mm/s 속도범위에서 윤활 조건을 변화시키면서 시험하였다. Fig. 15는 시편 두께 변화에 따른 마찰계수 값을 보여주고 있다. 시험결과 무윤활 시 4 mm 시편은 속도 증가에 따라 마찰계수가 커지는 경향을 보였으나, 2 mm 시편은 속도 변화에 거의 영향을 받지 않았다. 그러나 오일 윤활의 경우 두께변화에 따른 마찰계수의 차이가 거의 없어 윤활 조건에 따라 시편 두께의 영향이 차이가 있음을 알 수 있다.

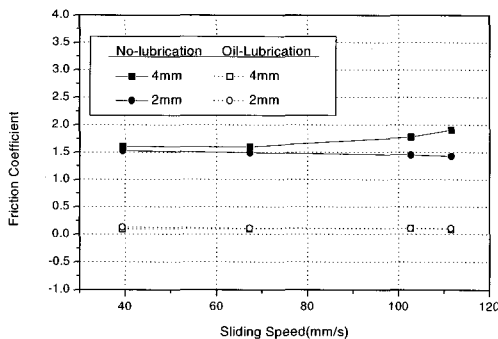


Figure 15. Effect of the thickness of specimen on the friction coefficient.

V. 결 론

다양한 조건 하에서 천연고무판의 마찰계수를 측정하기 위하여 수직하중, 속도, 경도, 윤활 조건 및 고무판 두께 등을 변화시켜가면서 시험을 실시하였으며, 아래의 결론을 얻었다.

1. 윤활 조건에 따라 마찰계수는 큰 차이를 나타냈다. 무윤활 시 1.0~3.9 범위로 큰 편차를 보였으며, 오일 윤활의 경우 약 0.1, 그리이스 윤활의 경우 0.1~0.2 값으로 오일 윤활의 경우가 안정된 값을 나타내었다
2. 윤활 조건에 따라 차이가 있긴 하나 대체로 고무판의 경도가 높아지면 마찰계수는 감소하는 경향을 보였다.
3. 하중이 5 N이고 무윤활인 경우에만 속도 증가에 따라 마찰계수가 감소하는 경향을 보였을 뿐, 하중이 더 커지거나 오일 및 그리이스 윤활인 경우 그 경향은 현저하지 않았다.
4. 고무 판재 두께 변화가 마찰계수에 끼치는 영향은 무윤활 시에 현저하나, 오일 윤활의 경우에는 거의 변화가 없었다.
5. 고무판재의 마찰계수는 수직하중, 속도, 경도, 윤활 조건 및 고무판 두께 등에 의해 복합적으로 영향을 받음을 알 수 있었다.

감사의 글

본 논문은 국가지정연구실 사업비에 의해 연구 되었으며 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. 천길정, J. Korea Soc. Tribology Lubrication Eng. (KSTLE), 15(2), 193 (1999).
2. M. Barquins. and A. D. Roberts, J. Phys., 19, 547 (1986).
3. 丙山吉隆, “ゴム材料の 摩擦特性,” 트라이보로지스트, 34(5), 344 (1989).
4. W. Noriaki, JSRI, 69(6), 430 (1996).
5. 김완두 외, “초탄성체 고무류 기계부품의 변형해석

- 및 설계기술 개발,” 과학기술부, UCN236-712.M, 1999.
6. J. W. Dally, and W. F. Riley, “Experimental Stress Analysis,” pp. 205~272, McGraw-Hill, 1978.
7. A.C.Ugural, “Stress in Plates and Shell,” p. 37, McGraw-Hill, New York, 1981.