

## 고무류의 마찰시험기 개발 및 마찰특성에 관한 실험적연구

천길정 · 오성모\* · 이동환\* · 이봉구 · 김완두\*\*

원광대학교 기계공학부, \*원광대학교 대학원, \*\*한국기계연구원

### Development of a Friction Tester and Experimental Study on the Frictional Characteristics of Rubbers

Gill-Jeong Cheon, Seong-Mo Oh\*, Dong-Hwan Lee\*,  
Bong-Goo Rhee and Wan-Doo Kim\*\*

*Division of Mechanical Engineering, Wonkwang University*

*\*Graduate School, Wonkwang University*

*\*\*Korea Institute of Machinery & Metals*

**Abstract**—Applying design methodology, new type friction tester has been developed. Functional analysis has been executed and functional structure were constructed during the conceptual design. Optimal solution has been selected and a proto model has been manufactured according to the conceptual design. Using the tester developed in the laboratory, frictional characteristics of natural rubbers have been experimentally analyzed. Friction coefficient has been calculated from the measured normal force and friction force under various speeds, loads, and temperatures. The correlations between the various operating conditions and friction coefficients have been verified. Especially, drag friction due to the visco-elastic behavior of the rubber has been observed in this analysis.

**Key words**—friction tester, drag friction, friction coefficient, rubber, friction.

## 1. 서 론

현대 산업에 쓰이는 공업용 고무는 사용 범위가 매우 광범위하다. 고무는 탄성계수가 매우 작고 비선형적인 거동을 보이며, 파단까지의 신장율은 매우 크고 비틀림 변형이 쉬우며 전기 절연성과 내약품성을 지니고 있다. 고무 재료는 금속 재료와는 달리 점탄성이 강하고 마찰 마모특성도 금속과는 매우 다른데, 고무재료의 마찰특성은 온도와 하중 조건뿐만 아니라 마찰계면의 상태(표면 거칠기, 산화, 오염 등)와 마찰 방법(미끄러짐, 구름 등)에 따라서 크게 좌우된다. 이 때문에 고무의 특성이나 거동을 예측하기 위해 필요한 마찰계수를 결정하기가 어렵고 해석이 곤란하다. 마찰계수를 결정하기 위한 실험 방법도 국제적인 표준화가 되어있지 않기 때문에, 각 회사나 연구기관에서 독자적인 시험방법과 장치를 이용하여 평

가하고 있다[1-6].

따라서 본 연구에서는 체계적인 설계 방법론을 적용하여 다양한 가공조건과 운전조건 하에서의 고무류 재질에 대한 마찰특성을 파악할 수 있는 새로운 원리의 마찰 시험기를 개발하고, 향후 고무가 이용되는 기계요소나 기계시스템의 거동을 예측하고 성능과 수명을 개선하는데 이용하고자, 공업용으로 많이 사용되는 천연고무(NR)를 대상으로 다양한 운전조건 하에서의 마찰특성을 측정하였다.

## 2. 마찰 시험기의 개발

### 2-1. 시험기의 기능 분석 및 요구조건

시험기에는 측정하려고 하는 시편과 상대운동에 필요한 에너지 및 시험조건에 관한 신호가 들어가야 하고, 시험이 끝난 시편과 시험 결과에 관한 신호가 시

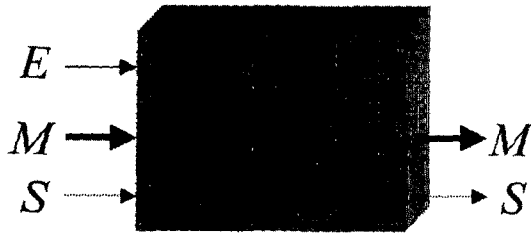


Fig. 1. Black box diagram of the tester.

힘기로부터 나와야 하기 때문에, 시험기를 블랙박스 형태로 표현하면 Fig. 1과 같다[7].

마찰계수를 측정하기 위해서는 시편과 기준재료 사이에 상대운동이 있어야 하고, 이때 두 물체 사이에 작용하는 수직력과 마찰력을 측정하면 마찰계수를 계산할 수 있다. 두 물체 사이에 안정적인 수직력이 작용하는 상태에서 상대운동을 발생시키기 위해서는, 시편 구속과 수직력 부과 및 상대운동 기능과 같은 부분기능이 있어야 한다. 또한 상대운동과 운동상태를 조절하고 감시하기 위한 부분 기능들이 필요하며, 이러한 부분 기능들을 포함하는 전체 기능구조는 Fig. 2와 같다.

실험 조건으로는 하중(접촉압력), 속도, 온도, 분위기(운환, 대기), 표면거칠기, 상대적 재질과 내구성 등을 고려한다. 부분기능인 시편과 기준시편 구속에 요구되는 사항으로는 상대운동시 구속 상태가 풀리지 않아야 하며, 구속에 의해 측정이 영향을 받지 않을 것과, 간단하며 부가적 에너지 소모가 적어야 한다는 점이 필요하다. 또한 염기이어야 하고, 구속 상태에서 부여되는 운동이 가능하며, 탈·착이 용이해야 할뿐 아니라 분위기 조절이 쉬워야함은 물론

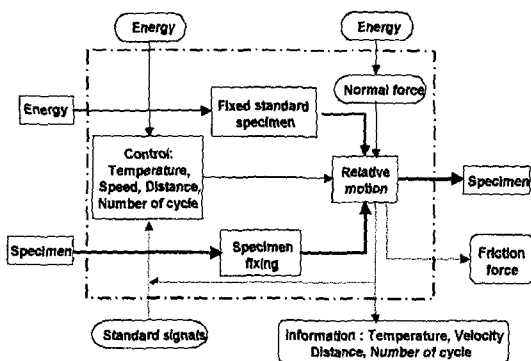


Fig. 2. Functional structure of the tester.

여러가지 재료가 설치 가능하여야 한다. 상대 운동에 관한 요구사항으로는 마찰특성의 결정에 필요한 운동이 가능하여야 하고, 반복 상태에서도 동일한 상태가 유지되어야 하며, 구동부의 소형경량화 및 단순성이 요구된다. 수직력 부과와 관련된 조건으로는 가해진 힘의 계측이 가능해야 하고, 측정 중 안정적이어야 하며 힘의 조절이 용이해야 한다. 마찰력측정을 위해서는 측정 신호가 신뢰성 있고 안정적이며, 간단하고 전산 처리시에 용이하게 이해할 수 있는 디지털 신호를 갖추어야 한다. 제어 측면에서는 설정 조건이 시험지속 기간 중 불변해야 하고 신뢰성이 있어야 한다. 상태정보 측정과 기준신호 제공면에서는 모두 설정이 용이하며 신뢰성이 있어야 한다.

2.2. 시험장치 구성

앞에서 검토한 기능 분석과 요구조건에 따라 다양한 해결방안들을 고안하고 비교한 결과, 상대운동은 시편의 회전운동으로, 시편과 기준시편의 구속은 고정장치로, 수직력 측정은 로드셀로, 마찰력측정은 굽힘변형을 이용한 등가력으로 구현시키고, 운전상태와 조절 및 신호계측은 전용제어기를 이용하는 방안이 제일 적합한 것으로 판정되었다. 개념설계에 의해 결정된 시험기의 전체적 구조는 Fig. 3과 같다.

기준 시편을 고정하고 수직력을 부과하며 마찰력을 측정하는 기능은 상부의 Test arm과 Main arm 및 Balancing Arm이 수행하며, 시편을 고정하고 상대운동을 발생시키며 온도를 조절하는 기능은 하부의 Turn table이 수행한다. 측정된 신호들은 전용 Amp를 거쳐 PC에 저장되고 도시된다. Fig. 4는 시

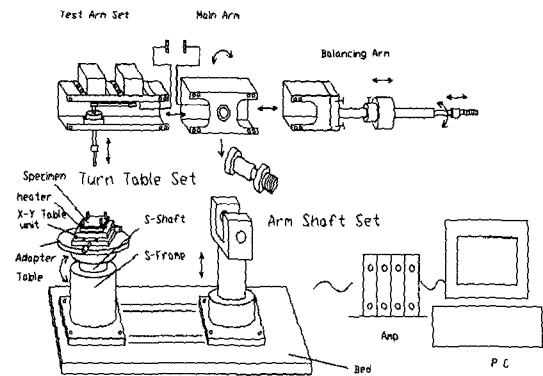


Fig. 3. Schematic diagram of the tester.

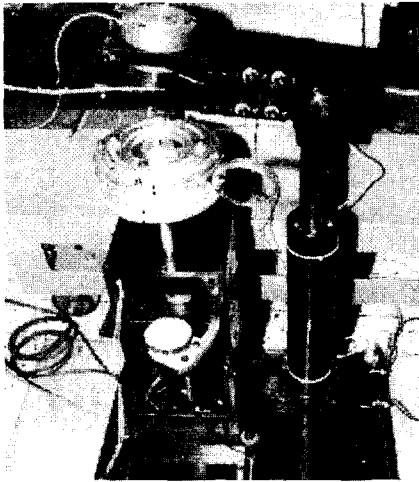


Fig. 4. Appearance of the tester.

험기의 전체 외관을 보여준다.

2.3. 마찰특성 예비실험

본 연구에 의해 개발된 마찰시험기의 특징은, 마찰력을 측정하는데 있어서 시편과 시편 고정요소들의 운동에 의한 관성력이 영향을 미치지 않는다는 점이다[1]. 시편과 기준시편이 접촉을 유지하며 상대운동을 일으킬 때 발생하는 마찰력을 측정하기 위하여 기준시편이 외팔보 형태의 핀 끝에 고정되어 있기 때문에, 마찰력으로 인한 집중하중이 핀 끝에 작용함으로써 핀에는 굽힘모멘트와 전단력이 작용하고, 이를 핀의 표면에 부착된 스트레인게이지를 이용하여 측정하도록 되어있다(Fig. 5). 한편 수직력 측정은 힘의 작용선 상에서 측정하는 것이 제일 정확하므로 수직력이 핀을 통하여 직선적으로 전달되도록 하였기 때문에, 핀에는 마찰력에 의한 힘과 수직력에 의한 힘이 모두 작용한다. 수직력이 작용하는 상태에서 상대운동에 의한 마찰력이 추가로 발생하면, 스트레인게이지에 의해서 측정되는 변형률과 응력은 마찰력과 수직력의 영향을 모두 포함하고 있다. 따라서 스트레인게이지를 이용하여 측정된 신호를 마찰력 계산에 이용하고자할 때, 수직력에 의한 성분이 오차 요인으로 작용하므로, 이에 의한 예상 오차를 검토하였다.

Fig. 5와 같이 수직력 N과 마찰력 F가 작용하는 핀의 끝에서 스트레인게이지가 부착된 부분까지의 거리가 l, 변적모멘트가 I, 탄성계수 E일 때, 굽힘모

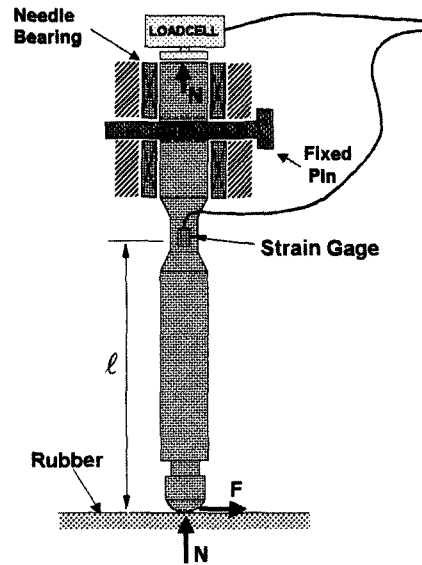


Fig. 5. Schematic diagram of the tester pin showing friction force and bending moment.

멘트에 의한 변형률은 식 (1)과 같이 계산된다.

$$\epsilon_b = \frac{\sigma_{max}}{E} = \frac{1}{E} \cdot \frac{M \cdot r}{I} = \frac{1}{E} \cdot \frac{8}{\pi r^3} \cdot M = \frac{1}{E} \cdot \frac{8}{\pi r^3} \cdot F \cdot l \quad (1)$$

한편 작용되는 수직력이 N, 핀의 단면적이 A일 때 압축력에 의해 발생하는 변형률은 다음과 같다.

$$\epsilon_c = \frac{N}{EA} \quad (2)$$

굽힘모멘트에 의한 변형률과 수직력에 의한 변형률의 상대적 크기는

$$\frac{\epsilon_c}{\epsilon_b} = \frac{N}{EA} \cdot \frac{E \pi r^3}{8Fl} = \frac{N}{E \pi r^2} \cdot \frac{E \pi r^3}{8Fl} = \frac{r}{8l} \cdot \frac{N}{F} \quad (3)$$

수직력과 마찰력사이의 관계식을 이용하여 식 (3)을 변형하면 식 (4)와 같다.

$$\frac{\epsilon_c}{\epsilon_b} = \frac{r}{8l} \cdot \frac{1}{\mu} \quad (4)$$

설계된 핀의 반경 r=4 mm, 핀의 끝에서 스트레인게이지가 부착된 위치까지의 거리 l=70 mm이고, 고무류에서 예상되는 마찰계수를 대략 μ=0.5로 할 때, 일정한 크기의 수직력에 의한 오차 성분은 다음

과 같다.

$$E_{stat} = \frac{\epsilon_c}{\epsilon_b} = \frac{4}{8 \times 70} \times \frac{1}{0.5} \\ = 0.0143 \approx 1.4\%$$

한편 수직력이 가해지고 상대운동은 없는 상태에서 발생하는 스트레인게이지의 신호를 오토발란싱(auto-balancing)을 이용하여 영으로 하면[8], 이후에는 상대운동에 의해 발생하는 마찰력만이 신호로써 검출된다. 상대운동에 의한 채터링 등에 의해 수직력이 미소하게 변화하나, 그 변동 크기는 대략 정적 하중의 10%를 넘지 않기 때문에 오토발란싱을 거친 후의 수직력에 의한 오차 성분은 아래에 보인 바와 같이 극히 작은 값으로서 일반적인 마찰계수 정확도에는 거의 영향을 미치지 않는 것을 알 수 있다.

$$E_{tot} \approx E_{stat} \times 0.1 = 0.14\%$$

한편 오차를 최소화하기 위한 최적화 설계는 좌굴 방지가 가능한 한 마찰부로 부터의 길이는 길게 하고, 게이지 부착부 직경은 가늘게 함으로써 실현 가능하다.

### 3. 마찰 특성 측정 실험

#### 3-1. 실험 조건

시편과 상대마찰을 하는 표준 시편은 직경이 8.7 mm인 구이고, 재질은 베어링강이다. 시편이 설치되는 항온조의 표면온도는 상온과 40°C, 그리고 60°C로 조절된다. 수직력은 각각 20 N, 50 N, 70 N으로 변화되고, 시편의 선속도는 2.7 mm/sec와 13.8 mm/sec이다. 고무시편은 직경 150 mm인 원판으로 두께가 1.5 mm인 것을 사용하였다.

#### 3-2. 실험 방법

항온조의 윗 면에 별다른 접촉제를 사용하지 않고 시편을 얹은 후, 링 형태의 지그를 사용하여 시편의 둘레를 눌러서 고정한다. 이 경우 수직력이 지나치게 높으면, 시편과 마찰재의 틈 사이에 상대운동이 발생하지 않고, 시편인 고무재료의 초기 접촉 부위가 계속해서 인장되어 틈의 운동 방향으로 끌려감으로써 마찰 계수를 측정할 수 없다. 따라서 수직력은 두 재질 사이에 상대운동이 발생할 수 있

을 정도의 크기 이내로 제한 하였다. 시편과 접촉하는 항온조의 윗면에 써모커플을 설치하여 항온조 윗면의 온도가 1°C 이내의 변동을 하도록 제어한다. 시편과 표준시편의 상대 마찰로 인하여 마찰 표면에서 발생될 것으로 예상되는 열에 대해서는 특별한 대책을 강구 하지 않았다. 틈을 통하여 수직 하중을 가한 상태에서 시편이 설치된 항온조 판을 정역전 회전 시켜 상대운동을 일으킨다. 수직력은 틈이 부착된 테스터 핀과 동일 선상에 설치된 로드셀을 이용하여 측정하고, 마찰력은 테스터 핀에 부착된 스트레인게이지의 변형률에 의하여 등가적으로 측정한다. 수직력과 마찰력은 A/D보드를 통하여 실시간으로 수집 저장하고, PC에서 마찰계수를 계산 처리한다. 이때 측정 온도, 부하 하중, 재질 및 형상 등을 동시에 기록하고 저장한다. 측정 시편은 첨가제의 종류와 양에 따라 모두 다섯가지(A, B, C, D, E)를 선택 하였다.

#### 3-3. 실험 결과 및 고찰

##### 3-3-1. 마찰계수의 일반적 특성

Fig. 6은 저속·저하중 상온에서의 일반적 거동을 보여주는 측정 결과이다. 시험에 이용된 모든 재질은 하중과 속도 및 온도 조건에 관계없이 stick-slip에 의한 것으로 추정되는 채터링현상이 발생하여, 일방향 상대 운동의 경우에도 마찰계수 값이 일정하지 않고 주기적으로 변화한다. 이때의 최고치와 최저치를 각각 정마찰 계수( $\mu_s$ )와 동마찰 계수( $\mu_k$ )로 간주한다.

Fig. 7은 60°C, 70 N, 13.8 mm/sec 상태의 마찰계

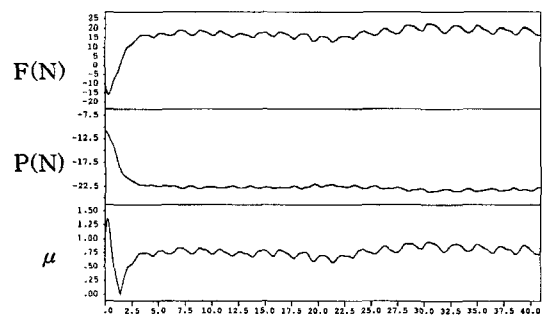


Fig. 6. Measured forces and friction coefficient (F: Friction force, P: Normal force,  $\mu$ : Friction coefficient) [Specimen: A, Temperature; 23.5°C, Load; 20 N, Velocity; 2.7 mm/s].

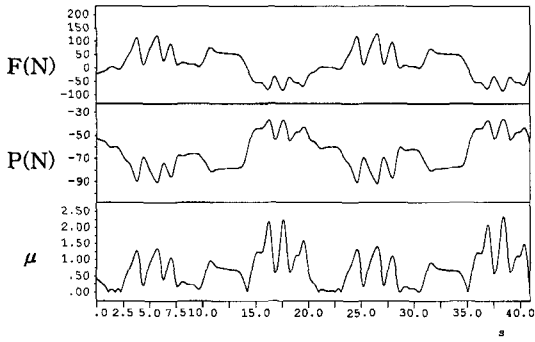


Fig. 7. Measured forces and friction coefficient (F: Friction force, P: Normal force,  $\mu$ : Friction coefficient) [Specimen: A, Temperature; 60.0°C, Load; 70 N, Velocity; 13.8 mm/s].

수를 보여주는 일반적인 거동 측정 결과이다. 저속, 저하중, 상온에서의 결과와는 달리, 일정한 크기의 정하중을 가하였음에도 불구하고 수직력이 현저한 변동을 보이고, 이에 따라 마찰력과 마찰계수도 급격한 변동을 보인다.

채터링 주기는 동일 재질의 경우에도 하중과 속도 및 온도 변화에 따라 상이하며, 따라서 채터링 진동은 시험기 고유의 진동특성이 아닌 재질 및 운전 조건에 따라 결정되는 변수로 추정된다.

3-3-2. 끌림마찰(Drag Friction) 현상

대체로 고온 고속 조건하에서 마찰계수의 평균값이 일정하지 않고, 상대운동이 계속 됨에 따라 마찰력이 계속해서 증가하며, 이로 인하여 마찰계수 역시 선형적으로 증가하거나 급격히 증가하는 현상이 관찰된다(Fig. 8). 이 때의 최대 마찰계수 값을 끌

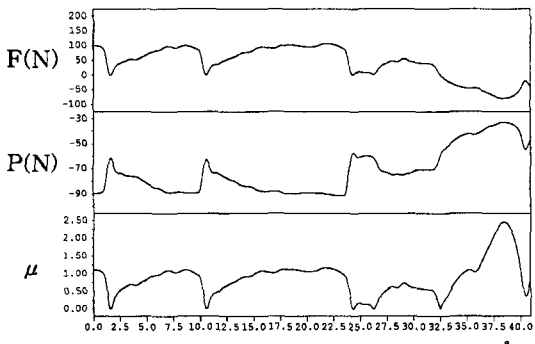


Fig. 8. Measured forces and friction coefficients showing drag phenomena (F: Friction force, P: Normal force,  $\mu$ : Friction coefficient) [Specimen: C, Temperature; 60°C, Load; 70 N, Velocity; 2.7 mm/s].

림마찰계수( $\mu_d$ )로 정의 하였다. 이러한 현상은, 고무류 재질의 초탄성특성으로 인하여 마찰 표면이 큰 전단탄성 변형을 일으키고, 이 탄성변형에 비례하는 탄성력이 그대로 마찰력으로 작용하며, 운동 방향으로 밀린 표면이 돌기를 형성하여 상대운동에 저항하다가 급격한 탄성회복이 이루어지기 때문인 것으로 판단 된다. 특히 고온 고속 조건하에서 이와 같은 현상이 현저해 지는 이유는 높은 마찰 손실에 의해 발생된 마찰열에 의하여 계면 상태가 많은 변화를 일으키고 큰 영향을 받기 때문인 것으로 추정 된다.

3-3-3. 속도 변화에 따른 마찰계수의 변화 경향

여러 가지 재질에 대한 하중과 온도에 따른 변화 경향을 Fig. 9에 나타내었으며, 그중에서 재질 A에 대한 결과를 Fig. 10에 나타 내었다. Fig. 10에서 보는 바와 같이 동일 조건하에서는 온도나 하중 상태와 관계 없이, 속도가 증가하면 마찰계수도 증가하며, 속도에 의한 마찰계수 변화량이 매우 큼을 알 수 있다. 이러한 경향은 고속의 상대 운동시 국소적 윤착 표면을 형성할 시간이 충분하지 않음으로서 마찰계수가 줄어드는 금속의 일반적인 경향과는 상반되는 현상이다. 이러한 특성은 고무류 표면에서의 점탄성 특성에 기인 하는 것으로 추정된다. 60°C의 경우 모든 하중 조건에서 저속일 때는 상대 운동이 발생하지 않아 마찰 계수를 얻을 수 없었으며, 특히 60°C 70 N의 경우에는 끌림 마찰만이 발생 하였는데, 이것은 고온 고하중에서의 마찰열에의해 두 상

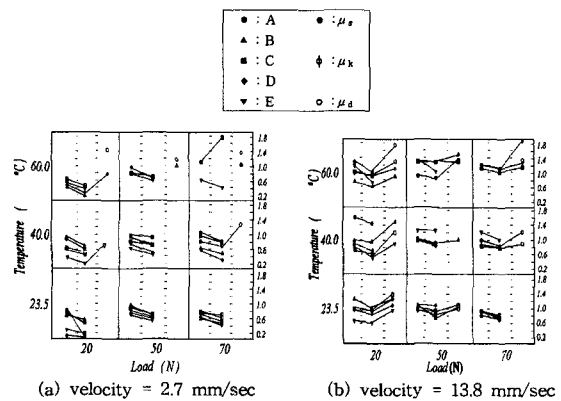


Fig. 9. Friction coefficients of various materials as a function of loads and temperature at various velocity ( $\mu_s$ : static friction,  $\mu_k$ : kinetic friction,  $\mu_d$ : drag friction).

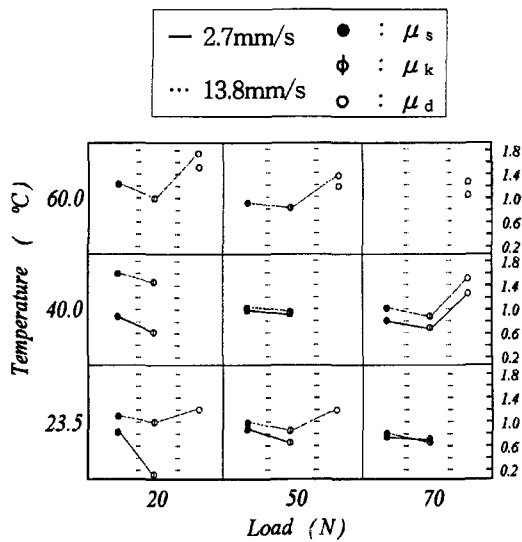


Fig. 10. Friction coefficients as a function of load and temperature[specimen : A ]

대 마찰재질의 표면이 강한 윤착을 한 결과로 추정된다.

3-3-4. 하중 변화에 따른 마찰계수의 변화 경향

Fig. 10에서 보는바와 같이 동일 조건하에서 수직 하중이 증가하면 마찰계수는 미소하게 감소하는 경향을 보인다. 하중이 증가함으로써 평균 접촉 면적이 증가하고, 이로 인하여 접촉 압력이 감소함으로써 접촉 표면간의 점착력이 감소하기 때문인 것으로 추정되며, 이러한 경향은 금속의 경우와 동일함을 알 수 있다.

3-3-5. 온도 변화에 따른 마찰계수의 변화 경향

온도 변화에 따라 마찰계수가 변화하나, 그 경향은 재질과 수직하중 조건에 따라 모두 상이하여 일관성이 없다. 온도가 높을수록 상대 마찰 재질 들간의 윤착에 기인하는 것으로 추정되는 끌림마찰 현상이 현저해 진다. 또한, 고하중일수록 재질에 따른 마찰계수의 차이가 줄어드는 경향이 관찰 된다.

4. 결 론

체계적인 설계방법론을 적용하여 고무의 마찰특성 평가를 위한 마찰시험기를 개발 하였으며, 개발된 시험기는 다양한 운전조건 하에서의 고무류 마찰특성 측정이 가능하고 안정적이고 신뢰성 있는 데이터 획득이 가능함을 확인 하였다.

금속과는 달리 초점탄성에 기인하는 끌림마찰 현상이 발생하며, 이 경향은 특히 고온 고속의 경우에 현저하다. 상대속도가 증가할수록 고무류의 마찰계수는 증가하며, 접촉 압력이 증가함에 따라 마찰계수는 미소한 감소현상을 보인다. 온도 변화에 따른 마찰계수 변화 경향은 일관성을 찾을 수 없었다. 마찰계수는 온도, 속도, 하중 및 표면조도와 상대 재질에 따라 최고 70% 이상까지 변화하므로, 정확한 마찰계수의 측정은 실제 사용 상태와 동일한 시험 조건 하에서 수행되어야 한다.

참고문헌

1. Brown, R. P., "Physical Testing of Rubber," 3rd ed. Chapman & Hall, 1996.
2. Alliston-Greiner, A. F., "Friction Test Machines for Rubbery Materials," Tribotest Journal 1-1, Sep., 1994.
3. Barquins, M. and Roberts, A. D., "Rubber Friction Variation with Rate and Temp. : Some New Observations," J. Phys., Vol. 19, pp. 547-563, 1986.
4. 内山吉隆, "ゴムの 摩擦と アブレーションパターンの 生成過程,"トライボロジスト, Vol.30, No.7, pp. 524-531, 1985.
5. 内山吉隆, "ゴム材料の 摩擦特性,"トライボロジスト, Vol.34, No.5, pp. 344~347, 1989.
6. 鈴木雅博, "ゴムローラの トライボロジ,"トライボロジスト, Vol.42, No.5, pp.327-332, 1997.
7. 한동철, 천길정, 이건상, "공학설계론," 동명사, 1998.
8. Measurement Group, "Signal Conditioning Amplifier 2310 Instruction Manual," 1995, NC.