

## 직선왕복동 마모 시험

손진일  
(주알앤비)

### Reciprocating wear test

Son Jinill

R&B Inc. Daedeok Techno Valley 540, Yongsan-dong, Yuseong-gu, Daejeon 305-500 Korea

#### 1. 개요

이번 호에서는 직선왕복동 마모 시험으로, ASTM G133-95 Linear Reciprocating Ball-on-Flat Sliding Wear 규격을 바탕으로 특징과 시험조건 등을 기술하고자 한다.

#### 2. 범위

Ball on flat 형태의 Sliding 마모에 대한 시험으로서 대상 재료는 Ceramic, 금속 및 기타 내 마모 재료를 대상으로 한다. Sliding은 Ball과 Flat 표면을 반복적인 앞, 뒤 운동으로 이루어지며, 주된 측정값은 Ball과 Flat 시편의 마모 무게감소와 마찰계수도 측정한다.

#### 3. 시험요약

미리 결정된 시험 조건으로 두 개의 시편을 직선 왕복운동의 모양으로 Sliding시키는 시험이다. 시편은 각각 한 쌍으로서 하나는 평평한 모양이고 나머지 하나는 Ball 또는 기타 점 접촉을 하는 시편, 선 접촉을 하는 시편 또는 면과 면이 만나는 면 접촉을 하는 시편도 가능하다. 예를 들어 Ball-on flat 시험의 경우 하중은 수평으로 장착된 Flat 시편에 Ball 시편을 통하여 수직 방향으로 가한다. 시험조건은 하중, Sliding 거리, Frequency, Oscillation 형태, 온도, 윤활제, 시험기간, 환경조건(습도) 등이 있다. 시

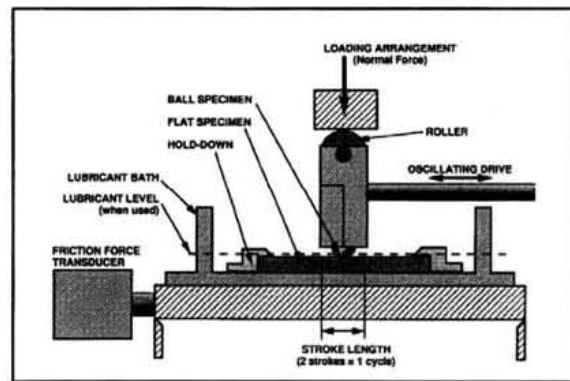


그림 1. Reciprocating test-schematic diagram.

험방법은 구동 모터나 기타 구동 장치를 이용하여 왕복운동을 하지만, Sliding 거리 전체를 일정한 속도로 운동할 수는 없다. Ball과 Flat 시편의 치수 변화는 마모 무게 감소량이나 마모 속도를 계산하는데 사용한다. 마찰력은 시험 중 계속 측정하는데, 접촉조건의 변화를 측정하는데 사용하기도 하고 시간에 따른 운동마찰계수를 계산하는데 도 사용된다.

#### 4. 시험기기

시간에 따른 속도의 변화는 기기의 설계에 따라 결정된다. 그림 1에 일반적인 Reciprocating ball on flat 마모시험기를 나타내었다. Ball은 구형의 끝부분을 가져야 하며, 단단히 고정되어 Flat 시편의 표면을 앞뒤로 Sliding 하는 구조로 되어 있다. 구형의 Tip 구조는 평평한 단면을 가지는 Indenter에서 야기 될 수 있는 Align 문제를 경감시킨다. Ball이

고정되어 있고 Flat 시편이 움직이게 설계할 수도 있다. 온도를 측정하고 조절하는 기능이 있어야 하며 윤활조에 담아서 사용하는 경우도 있고 윤활제 없이 시험하기도 한다. Tangential force는 연속적으로 왕복동 운동 중 측정하며 마찰계수 계산에 사용한다. 시편 이송은 양방향으로 반복적으로 최대 하중 상황에서도 무리 없이 움직여야 한다. 많이 사용하는 방법으로는 Scotch yoke drive system으로 모터의 멈춤이나 방향전환 없이 속도를 시간에 따른 Sine 함수로 조절할 수 있다. Stepper type의 Motor도 사용한다.

#### 4.1 Ball specimen

강구나 끝 부분이 구형인 시편을 사용하며 시험 중 미끄럼이 없도록 단단히 고정하여 편심이나 Tilting이 없어야 한다.

#### 4.2 Flat 시편

다양한 형태의 시편으로 준비가 가능하며 시험기의 Base plate에 단단히 고정하여 시험 중 미끄럼이나 휨이 없어야 한다.

#### 4.3 마찰력

Load cell을 이용하여 측정하며 양방향으로 운동하므로 압축과 인장 방향을 고정하여야 하며, 측정 방법과 기록 방법은 보고서에 기록하여야 한다.

- 시험시간은 다음과 같은 식으로 계산한다.

$$X = 0.002 \times t \times f \times L \quad (1)$$

또는

$$N = t \times f \quad (2)$$

여기서,

X = Ball의 총 미끄럼 거리, m

N = Cycle의 수

t = 실험시간, s

f = 진동 주파수, Hz (cycles/s)

L = Stroke 길이, mm

#### 4.4 시험 횟수

Cycle은 앞, 뒤 왕복을 합하여 한 Cycle로 한다.

#### 4.5 습도

마찰시험에는 매우 중요하므로 습도 Sensor를 시편 주위에 설치하여 시험 전 및 시험 중의 습도를 측정하여야 한다.

#### 4.6 온도

상온 시험 시에는 주위의 온도, 윤활유 분위기에서 시험하는 경우는 Bath 온도를 측정하여 기록한다.

## 5. 교 정

주 Part인 Loading system, Motion drive(시간 및 거리), 마찰력 Sensor를 교정하여야 한다.

#### 5.1 Loading system

시편에 가해지는 수직 하중은 주기적으로 기준 Load cell을 이용하여 교정을 하여야 한다. 하중은 Spring이나 Lever를 사용하여 부하하는 방법이 일반인데 최근에는 Digital로 표시된다. 하중의 정밀도는 시험 중  $\pm 2\%$  이내로 유지 되어야 한다. 왕복 운동의 특성 상 어느 정도 하중의 변화는 예상되며 이는 Dynamic 시험의 특성상 피할 수 없다.

#### 5.2 Motion drive(시간 및 거리)

왕복주기를 주기적으로 측정하여야 한다. 주의점은 주기 선택 시 공진이 일어나는 점은 피하여야 한다.

#### 5.3 마찰력 Sensor

역시 교정을 하여야 하며 양방향 교정이 필요하며 적절한 Fixture를 사용하여 실제 상황과 유사한 조건에서 교정하는 것이 바람직하다.

## 6. 시험과정

#### 6.1 시편준비

주로 Polishing 조건의 시편을 사용하나 특별히 지정된 조건의 시편을 사용하기도 한다. 시편 표면은 Polishing에 따른 여러 결함이 없는 것을 사용하며 일반적인 표면조도는  $0.02 \sim 0.05 \mu\text{m Ra}$ (Arithmetic roughness)이다.

6.2 시편세척

아래 순서에 따라 행하며, 기공이 많은 시편은 150°C 이상의 오븐에서 4시간 이상 가열 하여 사용하여야 한다.

실험실의 부드러운 유리 세척제로 세척한다.

건조 시킨다.

Acetone에 담근 상태로 초음파 세척한다(2 Min).

건조 시킨다.

Methanol에 담근 상태로 초음파 세척한다(2 Min).

건조 시킨다.

- 시편을 장착 한 후에는 아세톤 및 methanol을 면봉을 이용하여 장착 시 묻은 오염 물질을 제거 한다.  
이는 매우 중요한 과정으로 매우 적은 양의 오염으로도 결과에 지대한 영향을 미치는 경우가 많다.
- Ball은 확대경을 이용하여 오염이나 결함이 없는 지를 최종 확인하고 모터를 작동하기 전에 원하는 Oscillating speed를 점검하여야 한다.
- 시험 방법은 크게 두 개의 시험과정이 있으며 상황에 따라 선택하여 사용한다. A 및 B 시험 조건이 맞지 않는 경우에는 임의의 실험과정을 사용하는데 이 경우에는 실험과정을 자세히 기술하여야 한다.

◆ Procedure A: 비 윤활 상태에서의 실험과정

- (a) Pin tip radius: 4.76 mm(<sup>3</sup>/<sub>16</sub> in.)
- (b) Normal force: 25.0 N
- (c) Stroke length: 10.0 mm
- (d) Oscillating frequency: 5.0 Hz
- (e) Test duration: 16 min 40 s(Sliding distance 100 m)
- (f) Ambient temperature: 22 ± 3°C
- (g) Relative humidity: 40 to 60%
- (h) Lubrication: none applied

◆ Procedure B: 윤활 상태, 고온에서의 실험과정

- (a) Pin tip radius: 4.76 mm(<sup>3</sup>/<sub>16</sub> in.)
- (b) Normal force: 200.0 N
- (c) Stroke length: 10.0 mm
- (d) Oscillating frequency: 10.0 Hz

(e) Test duration: 33 min 20 s(Sliding distance 400 m)

(f) Temperature: 150 ± 2°C

(g) Relative humidity: 40 to 60%

(h) Lubrication: Full immersion under the selected lubricant

- 과정 B의 가열은 시험 전 최소한 5분 이상은 시험온도에서 유지하여야 하며 온도는 ± 2°C 이내 이어야 하고 윤활유는 항상 새로운 것을 사용해야 한다.
- 시계나 Cycle counter를 Setting하고 온도 및 마찰력의 기록을 시작하며 시험을 시작한다.
- 규정된 시간의 실험 후 Motor를 정지하고 하중을 제거 한 다음 마찰력이 Zero로 복원되는지 점검한다.
- 시편이 충분히 식은 다음 시편을 제거한다. 마모량을 측정하기 위하여 윤활유가 없는 경우에는 Jet air를 용하여 마모편을 제거하고 윤활상태에서의 실험에서는 초음파 세척기를 사용하여 세척한다. 이후 세척 과정은 초기 실험 전 세척 과정과 동일하다.
- Ball 시편은 시험 중 Rolling이나 움직임이 있어서는 안 된다. 이상 움직임은 시험결과에 악영향을 미치게 된다. 마찬가지로 Flat 시편 역시 움직임이 있어서는 안 된다.
- 기타 Procedure: 여러 가지 이유로 하여 표준 조건 A 및 B 이외의 조건으로 실험하는 경우에는 필히 Report에 명시하고 그 결과는 표준 결과와 비교할 수는 없다.

7. 시험결과 측정

Ball과 평판 시편 사이의 상대 마모에 따라 다양한 마모흔이 나타날 수 있다. 그림 2는 여러 종류의 예상되는 마모 조건을 보여주고 있다. 2(a)는 평판시편이 Ball 시편에 비하여 내마모가 월등한 경우이고 2(b)는 그 반대이다. 2(c)는 양쪽 시편에 공히 마모가 일어나는 경우이다.

7.1 Ball 시편에 마모가 일어나는 경우

시험조건 때문에 Ball에 나타나는 마모흔은 언제나

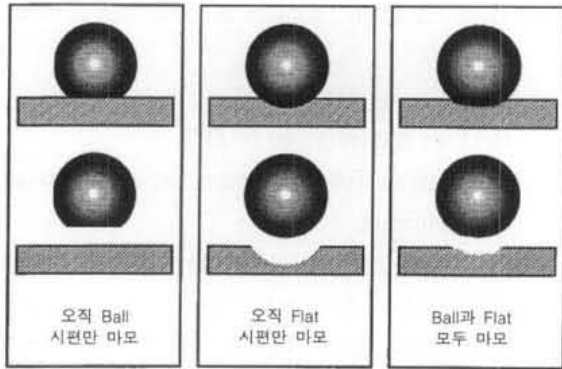


그림 2. Possible situations for differing wear resistance of ball and flat specimens.

구형이나 Flat 한 모양을 나타내지는 않는다.

- 마모흔이 구형이 아닌 평평한 면으로 나타나면 마모흔의 최대 및 최소 값의 평균값을 마모흔의 직경으로 계산한다.
- Ball을 Holder 에서 제거하여 현미경을 이용하여 Pin scar를 측정하기도 한다.
- 평평한 마모흔(Effective diameter D)의 경우 마모부피는 다음 식에 따라 계산한다.

$$V_p = (\pi h/6)[3D^2/4 + h^2] \tag{3}$$

여기서,

h = 마모된 재료의 높이, mm

구형 마모 부피를 가정하고, 마모된 재료의 높이는 Ball에서 마모된 부분의 직경 D를 이용하여 아래 식으로 구할 수 있다.

$$h = R - [R^2 - (D^2/4)]^{1/2} \tag{4}$$

여기서,

R = 기존 Ball의 반지름, mm

- 만일 Ball 끝이 명백히 마모되었는데도 Flat 시편의 마모흔은 그림 2(C)처럼 Ball이 완전히 Flat 하지 않음을 나타내며 이런 사실을 기록하여야 한다. 또한 다른 방법으로 양측의 마모량을 측정하여야 한다.
- 만일 Ball에 아주 작은 마모흔 만이 존재한다면 'No measurable wear'로 표시한다.
- 만일 Tip에 마모편이 묻어 있다면 'No measurable wear'로 표시하고 측정불능 이유를 적는다.

### 7.2 Flat시편에 마모가 일어나는 경우

마모흔의 길이와 평균 단면적으로 계산한다.

- 마모흔 단면적은 폭과 깊이 차이가 25% 이내일 경우는 3점의 평균으로 가능하고 마모흔이 균일하지 않다면 6점의 평균으로 취한다.
- 양쪽 끝의 형상학적 오차는 무시한다.
- 시험 중 깊이의 연속적인 측정은 열팽창, 마모편 등 여러 요인으로 인하여 의미가 없다
- 마모 단면적은 축침이나 Planimeter 등으로 측정한다.
- 마모부피는 다음 식으로 계산한다.

$$V_f = A \times L \tag{5}$$

여기서,

A = 트랙의 횡단면적 평균, mm<sup>2</sup>

L = Stroke 길이, mm.

## 8. 보고서

보고서에는 모든 이상징후- 소음, Chattering, 과도한 떨림 등을 기록하고 모든 실험조건을 기록한다. 마모현상 및 실험과정이 A 또는 B가 아니라면 실험조건을 기록한다.

### 8.1 기록사항

- Ball 및 Flat 시편의 재질- 성분, 제조과정, 표면처리, 표면조도(RMS) 및 일반적인 분류번호.
- 윤활제를 사용한 경우에는 상품명 및 기타 참고 자료
- 시편의 입도크기 및 기공량
- 실험조건: 수직하중, 실험 길이, 시간, Frequency, Drive system의 구동형식(예로 Sin 파 등), 상대 습도, 윤활조건 등
- 실험결과: 마모무게만을 적는다. (마모속도는 의미가 없다. 왜냐하면 일정한 속도로 마모가 일어난다는 보장이 없기 때문이다.)
- Ball 시편의 마모부피
- Flat 시편의 마모부피
- 자세한 마모흔의 상태, 사진 첨가

### 8.2 보조 Report

- 최대 Elastic contact stress (Sc): Hertz 식으

로 계산한 접촉응력으로 아래 식으로 나타낸다.

$$S_c = 0.918[P/(D^2E_0^2)]^{1/3} \quad (6)$$

여기서,

P = 정하중, N

D = 구의 반지름 m

E<sub>0</sub> 다음 식을 포함한다:

$$E_0 = \{[(1 - \nu_1^2)/E_1] + [(1 - \nu_2^2)/E_2]\} \quad (7)$$

여기서,

E<sub>1,2</sub> = 두 시편의 접촉에 대한 elastic moduli (Young's moduli), Pa

V<sub>1,2</sub> = 두 재료의 각 Poisson's ratios (dimensionless)

- 만일 계산된 압력이 각 재료의 최대 경도값 보다 크면 영구 소성 변형이 일어나고 따라서 탄성조건을 만족할 수 없다.

- 양 시편의 마모흔에 대한 사진

- 실험 중 마찰거동 및 운동 마찰계수(아래 식으로 계산)

$$\mu_k = F/P \quad (8)$$

여기서,

μ<sub>k</sub> = 동적 마찰계수,

F = 미끄럼 동안 측정된 마찰력, N,

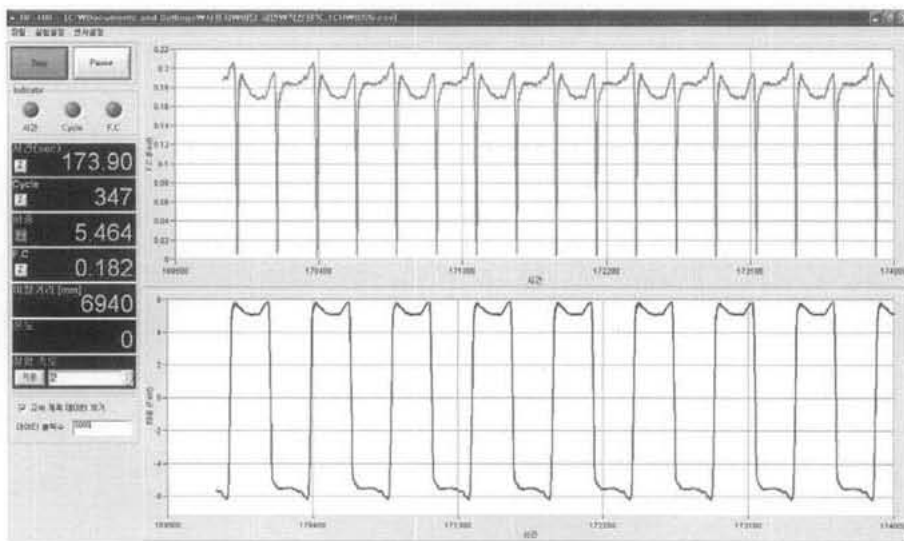
P = 정하중, N.

- 어떤 시험기의 경우에는 Root mean square friction force를 측정하기도 한다. 이 경우 측정하는 방법도 기술한다. 좀 더 자세한 사안은 G115에서 볼 수 있다.

- 어느 정도 마모 시험이 진행된 후 마찰계수가 일정해 지면 그 값을 적으면 되나 일정하지 않고 계속적으로 변한다면 Range를 적는다.

**Specification**

- Load range: 5~1,000N
- Load cell: 5N or 100N, 1,000N changeable
- Transducer type: Piezo-Electric or strain gage type
- Frequency range: 1 to 50 Hz
- Stroke range: 0.5~20mm
- Heating method: cartridge or hot air heater
- Heating range: ambient to 150 °C(400 °C option)
- Temperature sensor: K type thermocouple
- Point contact: 6mm & 12.7mm ball
- Line contact: 6mm dia. x 10mm, 15mm long
- Area contact: 8mm, 10mm, 12mm dia. x 4mm t disc
- Plate specimen: 40 x 60 x 4mm t (changeable)



※ 실험 데이터의 그래프 화면

### 9. 왕복동 마모시험기 예 (Model No RB 108 RF)

다양한 접촉조건 하에서 재료의 마찰, 마모특성을 평가 할 수 있는 장비로서 Point/Line/Area 접촉 특성을 Jig의 교체에 따라 구현할 수 있다. 원하는 Stroke를 Setting하여 다양한 접촉상태를 구현할 수 있도록 하였다.

분위기에 의한 시험조건을 구현할 수 있도록 Test

chamber를 설치하여 윤활조건 및 Gas 분위기에서 재료의 마찰, 마모거동을 평가 할 수 있다.

측정모드는 마찰력, 마찰계수, 마모량, 접촉저항, 온도로서 시험조건을 설정 및 시험 중 변화하는 데이터를 수집, 저장되도록 구성되었으며, 간단한 형태의 시편으로 미끄럼, 구름운동에 의한 마모, 마찰거동을 평가 할 수 있다.