

## Pin on Disc 마모시험

손진일  
(주)알앤비

## Pin on Disc Wear Test

J. I. Son

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

### 1. 개 요

마모시험은 앞서 밝힌 것처럼 필요에 따라 여러 가지 모양으로 설계되어 사용되었기 때문에 종류가 무척 많다. 이 모든 시험기를 다 소개할 수는 없으

므로 미국 윤활 학회에서 보고된 자료를 중심으로 시편의 형상과 조합에 따라 10가지 정도로 줄여서 소개된다.

이번 호에서는 Pin on Disc 마모 시험의 특징과 시험조건을 간단히 기술하고자 한다.

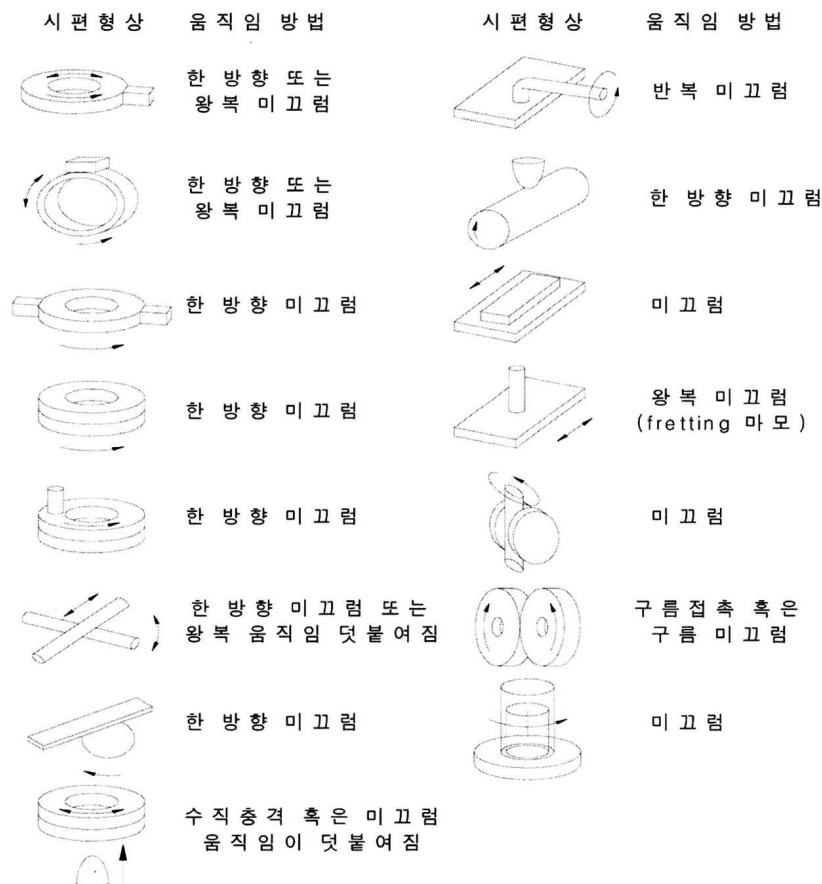


그림 1. 시편의 모양 및 운동방법에 따른 각종 마모시험방법

## 2. Pin on Disc 마찰 시험 기준

ASTM G 99로 시험 방법이 규정되어있으며 Pin on Disk 마찰 마멸 시험을 위해서는 우선 핀과 디스크 시편을 준비하여야 한다. 먼저 핀 시편의 경우에는 끝 부분을 원하는 크기의 반경을 가지도록 가공하며, 핀의 재료와 물성값 등은 용도에 맞게 다양하게 선택 할 수 있다. 핀의 재료와 경도, 표면 거칠기 등의 물성값은 마찰 마멸 시험 결과에 큰 영향을 주는 요인이므로 시험에 사용된 핀의 사양을 시험 결과에 명시하여야 한다. 핀 시편은 수직으로 장비에 장착된 핀의 끝 단에 고정되어 디스크 시편에 수직으로 정해진 하중을 인가 하게 된다. 이 때 하중은 암-레버 구조에 추를 얹는 방식으로 가해주는 것이 일반적이지만, 이 방식으로는 원하는 하중을 마음대로 선택하기가 어렵고 큰 하중을 가하기 어려우므로 큰 하중을 가할 때에는 전동식이나 공/유압식으로 하중을 가하는 구조를 사용한다.

Pin on Disk 시험 결과는 여러 가지 인자로 표현할 수 있는데, 가장 많이 활용되는 데이터는 마모시험 후 무게 감소량이다. 이밖에 정의된 수식을 통해 비 마모량과 내마모성 등을 평가 할 수도 있으며, 마찰 마멸시험 전후의 디스크와 핀의 선형 치수와 형상을 측정하여 마멸양을 계산할 수 있다. 이때 마멸양을 여러 미끄럼 거리에 대하여 측정하면, 미끄럼 거리 대 마멸양 그래프를 얻을 수 있다. 여기서 미끄럼 거리와 마멸양은 일정 구간에서 비선형성을 보일 수 있는데, 이는 마멸 방식이 전환될 때 나타나는 현상이다. 이와 같은 비선형성 구간의 비중은 시험 재료나 조건에 따라 달라질 수 있다.

마찰 마멸 시험기에 변위센서가 장착되어 볼의 수직변위를 측정할 수 있는 경우에는 시험이 진행되는 동안 마멸 깊이를 실시간으로 측정하여 마모량 값을 연속적으로 얻을 수 있다. 그러나 이 경우에는 시편이 마모되는 과정에서 마멸 트랙에 발생하는 마멸 입자와 전이막(Transfer film) 때문에 마멸 깊이 측정이 왜곡될 수 있으며, 또한 마멸 과정에서 발생한 열로 인해 열팽창이 일어나서 마멸 깊이가 잘못 측정 될 수 있다. 따라서 시험이 진행되는 동안에 연속적으로 산출된 마모량 데이터는 시험 후에 별도로 측정된 마모량과 비교하여 검증할 필요가 있다.

이 종류의 시험기는 크게 핀이 움직이는 경우, 평판이 움직이는 경우, 접촉면이 2곳 이상인 경우의 3가지로 나눌 수 있다. Ball on Disc 시험 및 Thrust washer 시험도 유사하다.

### 2.1 핀이 회전하는 경우

핀과 원판은 미끄럼 마모 시험에서 널리 쓰이는 방법 가운데 하나이다. 여기에서는 원판이 고정되어 있고 핀이 회전하는 방식의 시험기로서 이 종류의 시험기는 거의 대부분 고체윤활제의 특성 평가시험이 주목적이다. 핀의 크기는 대부분 직경이 1/4인치 정도이고 핀은 하중을 가하는 것과 구동의 편의성을 위해 보통 3개이며 끝부분은 반구 모양으로 가공되어 있다. 하중은 0.1 kg~200 kg 정도의 고 하중까지 가해지고 회전속도도 3.3 rpm에서 900 rpm까지 다양하다.

### 2.2 원판이 회전하는 경우

원판이 회전하는 시험기는 미끄럼 마모 시험기 가운데 가장 널리 쓰이는 방식이다. 핀이 회전하는 경우는 핀이 보통 3개 있으나 원판이 회전하는 경우는 대부분 핀이 한 개인 점이 다르다. 핀이 한 개이고 고정되어 있으므로 마찰력의 측정이 비교적 쉽고 구동방식도 핀을 회전시키는 것이 아니라 원판을 회전시키므로 쉽다. 시험목적도 다양하며 시험조건도 그에 따라 매우 넓은 범위에 걸쳐있다.

즉, 진공, 불활성 가스 분위기뿐만 아니라 고온 및 저온 분위기, 고속 및 저속회전 등도 포함되어 있다. 핀은 보통 1/4인치 직경의 것이 많이 쓰이고 끝부분은 반구 모양으로 가공되어 있으며 원판의 직경은 보통 5~10 cm이다.

마모특성시험을 시작할 때 극 미량의 하중을 가하는 시험에서는 전기저항을 측정하여 어느 때 산화층의 막이 깨지는지 감지하기도 한다. 마모량의 측정은 핀과 원판이 각각 다른데 핀의 경우에는 끝이 반구 모양으로 가공된 시편이 마모되어 생기는 마모면의 원지름을 현미경으로 잰 다음 이 결과로부터 마모된 부피를 계산하여 나타내고, 원판의 경우는 마모궤적에서 4~6곳을 선정하여 표면형상을 측정한 다음 그 평균 깊이와 원주길이를 곱하여 마모부피를 알아 내어 나타낸다.

### 3. 시편 준비

#### 3.1 재료

시편의 재료는 시험 목적에 따라 다양하게 선택할 수 있다. 즉 마찰, 마멸 특성을 평가하고자 하는 재료로 디스크와 볼 시편을 제작해야 한다. 다만 시편의 크기, 형태, 표면처리상태, 조성, 미세조직 구조, 가공 방법 및 경도 등을 명시해야 한다. 디스크 시편의 경우에는 시험 도중 수직 하중으로 인해 시편이 휘는 등의 변형이 일어나거나 마찰로 인한 응력을 견디지 못하고 파손되는 일이 없도록 시편의 크기를 결정해야 한다.

#### 3.2 형태와 크기

Pin on Disk 시험장치 중 핀 시편은 원통형태로 가공하여 사용할 수도 있으며, 긴 원통형 끝에 볼을 끼워 사용할 수도 있다. 볼 시편의 경우 일반적으로 지름이 2 mm~10 mm인 크기를 사용하며, 디스크 시편은 30 mm~100 mm의 지름과 2 mm~10 mm 두께의 시편을 사용한다.

#### 3.3 표면 처리

디스크 시편의 평균 표면 거칠기는 0.8  $\mu\text{m}$  이하인 것을 사용한다. 시편을 표면 처리할 때에는 시편의 내부 모재에 손상이 가해지지 않도록 특별히 주의해야 한다. 시험 보고서에는 표면처리 방법을 명시해야 한다.

### 4. 시험 변수

시험에 영향을 미치는 변수는 하중, 속도, 미끄럼 거리, 온 습도와 같은 환경 등이 있다.

#### 4.1 하중

핀 시편을 통해 디스크 시편 위에 수직으로 가해지는 하중의 크기는 힘의 SI단위인 N(뉴턴)으로 표시한다. 하중의 크기는 시험 시편과 마찰, 마멸 특성에 맞게 작업자가 선택해야 하며, 시험 하중 값을 보고서에 명시해야 한다. 일반적으로 금속 재료에 대한 마찰, 마멸 시험에서는 수십 g에서 수십 kg 정도의 하중이 선택된다.

#### 4.2 속도

핀과 디스크가 상대 운동하는 지점의 선 속도를 SI단위인 m/s로 표시한다. 일반적으로 속도를 측정하기 위해서는 디스크의 회전각속도를 측정한 후 디스크의 중심으로부터 마찰이 일어나는 지점까지의 셋팅된 반지름 값을 이용하여 선속도로 환산하게 된다.

#### 4.3 미끄럼 거리

마찰 시험중의 총 미끄럼거리를 SI 단위인 m로 표시해야 한다.

#### 4.4 온 · 습도

온도의 경우에는 마찰이 일어나는 지점의 국부 온도를 측정해야 하며, 습도는 마찰이 일어나는 주위의 대기 조건을 측정하여 기록한다.

### 5. 시험 절차

- 시험 또는 시편의 무게 측정 전에 시편을 깨끗하고 건조한 상태로 만들어 주어야 한다.  
시편 표면에 묻은 불순물이나 시편 재료 이외의 물질이 붙어있는지 확인하고 제거해 준다. 염소 성분이 포함되지 않고, 시편 표면에 막을 형성하지 않는 용제를 사용하여 시편을 세척한다. 세척 후에는 건조 과정을 통해 시편 표면의 틈새에 남아있을 수 있는 세척액을 제거한다.  
자성을 가진 금속 시편의 경우에는 자성을 없애주어야 한다. 시편 세척 방법을 보고서에 기술한다.
- 시편의 치수 및 무게를 측정한다.  
치수의 경우에는 1  $\mu\text{m}$  분해 능력으로 측정하며, 무게의 경우에는 0.1 mg 분해 능력으로 측정한다.
- 디스크 시편을 고정 장치에 설치한다.  
이때 디스크는 중심축으로부터  $\pm 1^\circ$  이내의 수직도로 설치 되어야 한다.
- 핀 시편을 핀 Holder에 설치한다.  
핀 시편이 디스크와  $\pm 1^\circ$  이내로 수직하게 접촉할 수 있도록 한다.
- 레버암 구조를 가진 경우, 핀 상단부에 적당한 추를 얹어서 원하는 수직 하중을 가한다. 그러나 공압 및 유압 등을 이용하는 시험기라면 Computer 화면에서 손 쉽게 한하는 하중을 설정할 수 있다.

- 편을 디스크에 접촉시키지 않은 상태에서 구동 프로그램을 작동하여 원하는 회전속도로 모터를 회전하는지 확인한 후 다시 모터를 정지시킨다. 소프트웨어 Setting 시에 샘플링 주파수를 디스크 회전주파수의 10배로 Setting하는 것이 이상적이다. 그러나 빠른 디스크 회전속도에서 시험할 경우에는 A/D 변환기의 한계로 인해서 샘플링 주파수를 크게 가져 갈 수 없다. 이러한 경우에는 샘플링 주파수를 디스크 회전주파수의 최소 2배 이상으로 Setting하도록 한다.
- 구동 프로그램을 Setting하여 시험이 종료될 조건을 입력한다. 시험 종료 조건으로는 일정 회전수, 시간 등이 사용된다.
- 시편에 원하는 수직하중이 가해진 상태에서 구동 프로그램을 실행하여 시험을 시작한다.
- 시험이 종료되면 시편을 꺼내어 마멸 입자를 제거한다. 마멸 트랙을 관찰하여 돌출부, 변색, 미세 균열 등이 있으면 기록해 둔다.
- 시편의 치수 및 무게를 시험 전과 같은 방법으로 다시 측정한다.
- 필요한 경우, 같은 방법으로 다른 시편에 대해 시험을 반복한다.
- 위와 같은 시험 과정에 대한 정보와 시험 데이터는 보고서 양식에 맞게 기입한다.

## 7. 시험 결과 분석

### 7.1 마멸양

마멸양은 디스크와 편 시편에 각각에 대해 mm<sup>3</sup> 단위로 측정한다.

- 편 시편의 끝 단이 반지름이 구형이며, 디스크 시편이 초기에 편평하다면, 편 시편이 마멸되었을 때와 디스크 시편이 마멸되었을 때의 각각의 시편의 마멸양은 다음 식으로 표현된다.

$$\text{Pin의 부피감소} = \frac{\pi h}{6} \left( \frac{3d^2}{4} + h^2 \right)$$

$$h = r - \left( r^2 - \frac{d^2}{4} \right)^{\frac{1}{2}}$$

d: 편 시편의 마멸된 부분의 지름(mm)

r: 편 끝 단 구의 반지름(mm)

Disc의 부피감소 =

$$2\pi R \left[ r^2 \sin^{-1} \left( \frac{w}{2r} \right) - \frac{w}{4} (4r^2 - w^2)^{\frac{1}{2}} \right]$$

R: 마멸트랙 반지름(mm)

w: 마멸트랙 폭(mm)

위 식들은 디스크의 마멸이 거의 없다고 가정했을 때의 편 마멸양이며, 반대로 편 마멸이 거의 없다고 가정했을 때의 디스크의 마멸양이다. 이 식들은 약간 변형하여 약간의 오차를 갖는 간편 식으로 다음과 같이 표현할 수도 있다.

$$\text{Pin의 부피감소} = \frac{\pi d^4}{64r} \quad \text{Disc의 부피감소} = \frac{\pi R w^3}{6r}$$

상기 간편식의 정밀도는 대략  $w/R < 0.3$ 의 경우 1% 이내,  $w/R < 0.8$ 의 경우는 5% 이내의 정밀도를 가진다.

- 편 시편의 끝 단 형상이 구형이 아닌 경우에는, 시험 전후 시편의 형상에 따라 기하학적으로 마멸양을 산출해야 한다.
- 마멸 트랙 단면 형상은 적어도 2곳 이상의 대표성을 띄는 지점에서 측정한 후 평균을 취한다.
- 편과 디스크 시편 모두에서 마멸이 일어난 경우에는 양쪽 시편에서 모두 마멸 깊이를 프로파일로 측정해야 한다. 이러한 측정에는 일반적으로 측정형 표면 거칠기 측정기가 사용되며, 측정된 디스크 표면의 마멸된 단면 형상에 마멸 트랙 길이를 곱하여 디스크 시편의 마멸양을 계산한다. 편 시편의 경우에는, 마멸된 부분을 90° 방향으로 두 번 측정하여 평균한 후 편 마멸양을 계산한다.
- 마멸된 부분의 질량은 밀도와 부피 식을 통해 간단하게 계산할 수 있다. 위에서 구한 마멸양(부피)에 시편의 밀도를 곱하여 구한다.
- 만약 Pin on Disk 시험 결과, 편과 디스크 시편 사이에 상당한 양의 물질 전이가 일어난 경우에는 위와 같은 방법으로 측정된 마멸양이 실제 일어난 마찰, 마멸의 정도와 비례한다고 볼 수 없기 때문에 위와 같은 방법으로 마멸의 정도를 평가하면 안 된다.

**Test mode**

- Pin on Disc test
- Ball on Disc test
- Thrust washer test
- Ball on Flat test
- Temperature control
- Wear loss measuring
- Friction coefficient measuring



그림 2. Pin on Disc Wear Tester (Model No RB 102 PD)

**7.2 마찰계수**

마찰 계수는 마찰력과 수직하중의 비로 계산되며, 디스크와 핀 사이의 상대운동이 시작하는 순간과 정상 상태에서 각각 측정하여야 한다.

$$\mu = \frac{F}{N}$$

$\mu$ : 마찰계수, F: 마찰력(N), N: 수직하중(N)

**7.3 시편의 특성 기록**

시험에 사용된 시편의 여러 특성은 시험 결과에 큰 영향을 주기 때문에, 시편의 재료, 형태, 가공 공정, 표면처리 및 시편 준비 과정을 기록해야 한다.

필요한 경우, 시편의 경도 값도 기록해야 한다.

Pin on disc, Ball on disc, Thrust washer test를 기본으로 수행 할 수 있으며, 회전속도에 따라 Three pin, Three ball on test까지 가능하다. 윤활유 특성에 따른 마모시험도 가능하도록 윤활 Chamber의 구성이 가능하다. 하중은 공압을 이용한 Closed loop control 방식으로 다양한 하중에서의 실험이 가능하다.

금속재료, 세라믹, 비철재료, 복합재료 등 소재의 내마모성 비교평가에 유용하며, 시편의 형상에 따라 Jig의 교체가 다양하며, 특수목적에 따른 Jig의 고안으로 다양하게 시험이 가능하다.