

구름 접촉(Rolling Contact) 마모 시험

손 진 일

(주) 알앤비

Rolling Contact Wear Test

J. I. Son

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

1. 개 요

앞선 두 가지의 마모 시험은 Pin on disc, Reciprocating wear 등을 설명 하였고, 이번 호에서는 구름 접촉 마모(Rolling Contact Wear) 시험으로, ASTM G77, D2714 규격을 바탕으로 특징과 시험 조건 등을 기술하고자 한다. 미끄럼 마찰에서는 전단 변형에 대한 저항이 크게 작용하나 구름마찰에서는 전단이 거의 일어나지 않는다. 구름마찰에 기여하는 요소로는 미세 미끄럼(Micro slip, Micro sliding), 탄성이력(Elastic hysteresis), 소성변형, 응착효과 등이 있다.

2. 범 위

본 실험 규격은 미끄럼 마찰에 대한 재료의 저항성을 결정하는 실험 과정이다. 여러 조건에 재료의 상대적인 미끄럼 마찰 특성을 결정하기 위하여

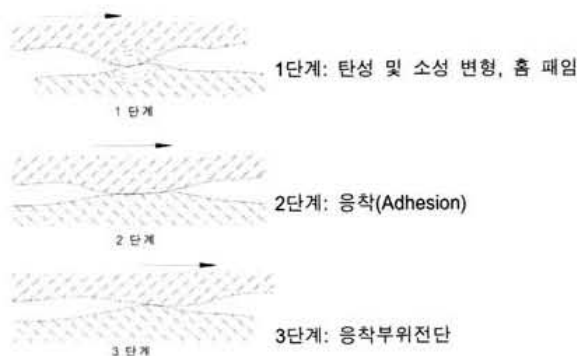


Fig. 1. Surface topography.

Block-on-ring 마찰 마모 시험기를 사용한다. 본 시험법의 중요 특성은 매우 다양하다는 것이다. 만들어 질 수 있는, 또는 적용 될 수 있는 어떤 재료든지 블록과 링으로 시험 할 수 있다. 또한 다양한 윤활 유 또는 액체, 가스 분위기의 모든 상황을 모사 할 수 있다. 회전 속도, 하중 등을 재료의 사용환경에 좀 더 가깝게 모사 할 수 있으며, 블록과 링의 부피 감소 또는 무게 감소를 시험 결과로 나타낸다.

마모 저항성이 높은 재료일수록 부피 감소는 작다.

Block on ring 시험과 동일하게 Rolling fatigue wear 평가로도 쓰인다. 이러한 종류에 시험기의 가장 큰 특징은 두 개 원판의 회전속도를 임의의 비로 조절하여 구름 접촉뿐만 아니라 구름-미끄럼 접촉도 가능 하다는데 있으며 이 때문에 구름-미끄럼 접촉 현상이 나타나는 톱니바퀴 재료나 윤활제의 연구에 많이 쓰이는 윤활제, 또는 재료의 연구를 위해 수만 RPM까지 회전속도가 올라 갈 수 있는 특수 시험기도 있다. 다른 마모 시험기와 달리 구름-미끄럼 마모를 모사 할 수 있는 장점이 있으나 두 개의 원판이 모두 회전하므로 열전대의 부착이 어려워 온도 측정이 쉽지 않은 단점이 있다. 시편의 크기는 보통 직경이 5~10 cm 정도이며 시편의 옆면은 선 접촉이 되도록 원판의 회전축과 평행 하게 가공되거나 크라운(Crown) 가공을 하여 곡면상으로 만들어 점 접촉이 되게 하기도 한다. 원판의 옆면을 회전축에 평행하게 가공하면 시험 조건에 있어 고 하중을 가할 수 없다는 단점이 있다. 고 하중을 가하면 원판의 가장 자리에서부터 시편이 깨져나가기 때문에

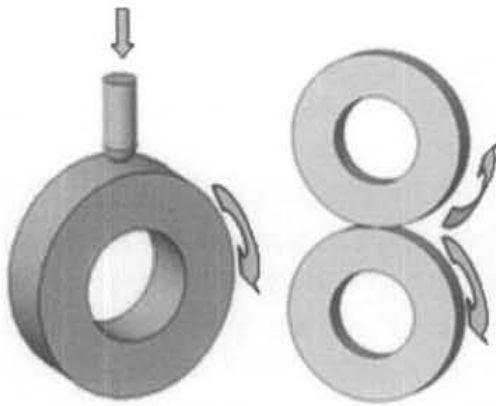


Fig. 2. Block-on-ring, Ring-on-ring.

고 하중을 가하는 시험에서는 시험편의 형상이 곡면이어야 한다.

마모량은 원판의 직경 변화, 중량의 감소 등으로 나타낸다. 이 시험기는 주로 톱니비키니 베어링의 모사 시험에 많이 활용되고 있다.

3. 시험요약

- 설정된 회전 수 및 회전 속도에 따라 회전하는 시험 링에 시험블록에 의해 하중이 주어진다.
- 블록의 마모 부피는 블록 마모 폭으로 계산되고, 링 마모 부피는 링의 무게 감소로 측정된다.
- 블록을 유지하기 위해 요구되는 마찰력은 로드셀을 통해 시험 동안 계속적으로 측정된다.
- 마찰력은 수직력과 조합하여 마찰 계수로 변환하고 결과를 정리한다.

4. 시험기기

그림 3은 Block-on-ring 마모 시험기의 개략도이다.

4.1 Test ring

- 시험 링은 $34.99 \pm 0.025 \text{ mm}$ ($1.377 \pm 0.001 \text{ in}$)의 외경
- 내경과 외경의 편심은 0.00125 mm (0.0005 in) 이하.
- 연삭된 면의 표면 조도는 운동 방향으로 $0.152 \sim 0.305 \text{ um RMS}$ 또는 CLA.
- 다른 표면 조건도 사용자의 요구 사항에 따라

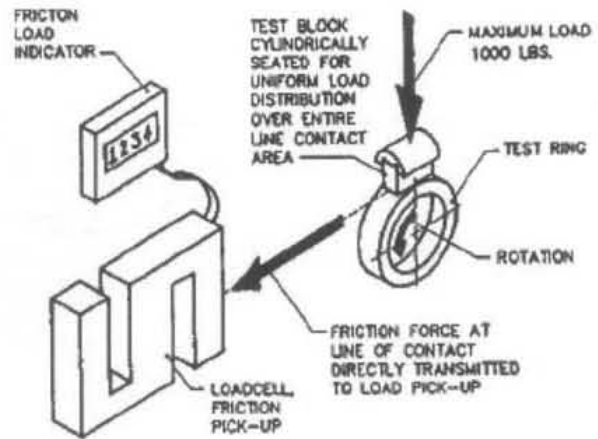


Fig. 3. Test Schematic.

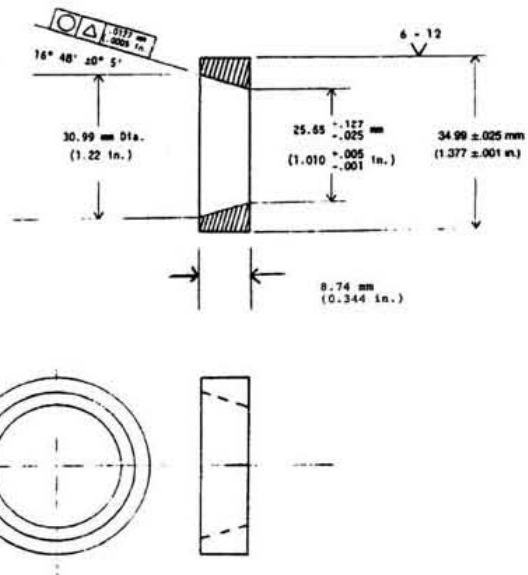


Fig. 4. Test Ring.

사용 가능하나 표면 조건이 미끄럼 마모 결과에 많은 영향을 미칠 수 있음을 유념해야 한다.

4.2 Test block

- 블록 폭은 $6.35 + 0.000 - 0.025 \text{ mm}$
- 연마 방향은 블록의 장축에 평행하고, 표면 조도는 운동 방향으로 $0.102 \sim 0.203 \text{ um CLA}$.
- 다른 표면 조건도 요구 조건에 따라 사용 가능하다.
- 저울은 0.1 mg 까지 측정 가능한 정도를 가져야 한다.
- 마모 흔적의 폭을 0.005 mm (0.0002 in)까지 측정 가능한 광학장치가 필수적이다.

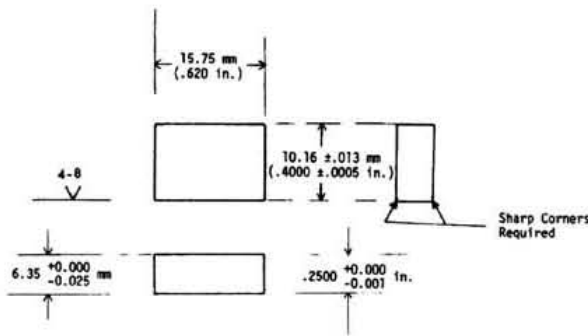


Fig. 5. Test Block.

5. 시 약

블록과 링을 세척하는데 사용한다(Trichloroethane, Methanol).

6. 시험과정

- 블록과 링을 세척한다.
 - Trichloroethane으로 블록과 링을 세척한다. 가능하다면 초음파 세척기를 이용한다.
 - Methanol은 Trichloroethane의 찌꺼기의 잔류물을 없애기 위해 사용한다.
 - 블록과 링을 완전하게 건조, 이때 Lint-free 장갑을 이용하여 깨끗한 상태의 블록과 링을 취급한다.
- 필요하다면 블록과 링의 폭을 가로질러 표면 조도를 측정한다.
- 표면 측면은 표면 형태를 완전하게 기술하지 않아도 되나 시험 표면을 기술하기 위해 주사전자현미경(SEM)을 이용하여 관찰하는 것도 좋다.
- 금속 시편과 금속성의 조립품은 자성을 없애고, 블록과 링의 무게를 0.1 mg까지 측정한다.
- 블록의 폭과 링의 지름을 0.05 mm(0.002 in)까지 측정한다.
- 반구 모양의 블록 홀더, 링 샤프트, 윤활유 저장소를 Trichloroethane을 이용하여 세척한다.
- 블록 위에 반구 모양의 블록 홀더를 장착한다.
- 블록을 잡고 있는 사이에 기기의 정확한 위치에 블록을 위치 시키고, 샤프트에 링을 놓고, 링을 고정 한다. 기기 설계 시에 정해진 Torque를 내기 위해 Torque 렌치를 이용하는 것이 좋다.
- 링에서 블록의 중심을 맞추고, 블록과 링의 접촉면을 맞추기 위해 Lever arm에서 가볍게 수동

으로 눌러 주는 것이 좋다. 블록의 Edge를 확인하고, 링의 Edge에 평행하게 한다.

- Preloading이나 Step-loading 방법 중 하나를 선택한다.
 - 일반적으로 Preloading은 가변 속도를 가지는 기계에서 선택되고, Step-loading은 초기 높은 마모를 없애기 위해 일정한 속도 기계에서 선택한다.
- 요구되는 하중에 맞는 분동을 놓는다. 기기의 요구 사항에 맞추기 위해 Lever arm을 조정한다. Preloading 진행 절차에 따라 Weight를 올리거나, Step loading 절차에 따라 Weight를 제거하여 하중을 제거한다.
- 만약 윤활유를 이용한 시험을 할 경우, 윤활유와 완전한 접촉을 위해 모든 부품을 세척해야 한다. 링의 제일 낮은 표면으로부터 6.4 mm까지 윤활유를 채운다. 이후 링을 여러 차례 회전 시켜준다.
- 회전 수를 0으로 셋팅 한다.
- 실험이 Preloading 방법을 선택했다면 셋팅 하중을 낮은 Weight부터 순서대로 가한다.
- 만약 가변 속도인 기계를 사용한다면, 기기의 전원을 켜고, 링이 회전을 시작 할 때까지 모터 드라이브의 전원을 증가 시킨다. 이때 마찰력을 “STATIC”으로 기록하면서 한다. 기기의 회전력이 실험 치까지 도달할 때까지 증가시킨다. 그러나 만약 일정한 속도를 가지는 기기를 사용한다면, 기기만 켜면 된다.
- Step-loading법을 사용한다면, Weight가 없는 상황에서 기기를 켜다. 도달 하중에 도달 할 때까지 매 200회의 회전 수 마다 133 N을 가한다. 필요하다면 회전 수를 조정하여도 된다. 만약 셋팅 하중이 133 N보다 작다면 한번에 하중을 더 가하여도 된다.
- 시험 중 마찰력과 윤활유와 블록의 온도를 필요에 따라 기록하고, 실험에 따라 블록의 수직 이동 거리 기록한다.
- 셋팅 회전 수만큼 회전하였다면 수동이던 자동이던 기기를 멈춘다.
- 최종 “STATIC” 마찰력은 가변속도기기에 의해서 측정된다. 최대 하중을 가한 채로 3분 ± 10초를 기다린다. 이후 기기의 전원을 켜고 링이 회전을 시작 할 때까지 계속적으로 파워를 증가시킨다.

“STATIC” 최종 마찰력을 기록한 후 모터의 전원을 끈다.

- 블록과 링을 제거하고 금속은 Trichlorethane을 사용하여 세척한다. 다시 0.1 mg까지 하중을 측정한다.
- 표면 Roughness를 측정한다. Profilometer을 블록과 링의 폭 방향으로 측정, 마모 흔적은 블록의 장축을 따라 있으며, 마모 흔적을 통해 마모 깊이나 모양의 변화는 유용한 데이터이다.
- 테스트 블록의 마모 손상 폭을 측정한다. 각 모서리로부터 1 mm 떨어진 길이의 폭에 있는 손상을 측정, 이때 정밀도는 0.1 mm까지 3번 측정 한 값의 평균을 취한다.
- 마모 손상 폭을 측정 할 때에 눈으로 관찰하여 무시 하고, 손상이 발생하지 않은 범위 내에서 손상을 측정한다.
- 끝이 뾰족한 마모 흔적은 시험 동안 블록의 Alignment가 적절하지 않았음을 보여준다. 만약 어떤 마모 흔적에서 측정된 3번의 계수의 변화의 폭이 10% 보다 크다면, 이 시험은 정확하지 못한 것이다.

7. 시험결과 측정(마모흔 부피계산)

- 블록의 마모 부피를 계산 방법은 그림 6에 나타난 식을 이용하며 컴퓨터에 의해서 프로그램 가능하다.
- 재료의 변형이나 산화 박막 필름의 형성, 윤활유에 의한 재료에의 침투 등의 효과로 블록의 무게가 변할 수 있기 때문에 손상 부피는 일반적으로 블록 무게 감소로 계산되지 않는다. 따라서 마모 질량감소는 준 정량적인 비교방법이다.
- 블록의 마모 손상이 정밀하게 측정될 수 없다면, 손상 부피는 계산할 수 없다.
- 아래와 같이 마찰력 값으로부터 마찰 값의 계수를 계산한다.

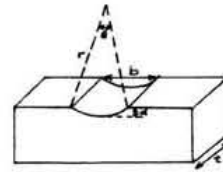
$$f = F/W$$

$$f = \text{마찰계수}$$

$$F = \text{측정된 마찰력, kgf (lb)}$$

$$W = \text{하중, kgf(lb)}$$

부피감소 = 링 감소 부피/ 링 밀도



t = 블록의 폭, mm	마모흔 폭 = $b = D \sin \frac{\theta}{2}$
r = 링의 반지름, mm	마모흔의 부피 = $\frac{D^2 t}{4} (\theta - \sin \theta)$
D = 2r = 링의 지름, mm	$\theta = 2 \sin^{-1} \frac{b}{D}$
b = 마모흔 폭의 평균, mm	ImC 마모흔의 부피 = $\frac{D^2 t}{8} [2 \sin^{-1} \frac{b}{D} - \sin(2 \sin^{-1} \frac{b}{D})]$
θ = 각도	
d = 마모흔의 깊이	

Fig. 6. Block scar volume Based on the width of the scar.

8. 보고서

- 기본적으로 모든 사항을 기록하며 특히 예외적인 사항은 필히 기록한다.
기기의 Overload shutoff 같은 드문 경우도 보고하고 기기가 정상작동 하지 않거나, 시험 블록에 뾰족한 마모 흔적을 보인다면, 이 데이터는 사용 할 수 없으며, 시험은 다시 행해야 한다.

8.1 보고서 기록 사항

- Test parameters
- 블록의 재료와 경도
- 링의 재료와 경도
- 링과 블록의 처음과 마지막 표면 거칠기
- 링의 RPM
- 윤활유
- 시험 하중
- 시험 거리
- 각 시험 조건에서의 반복 시행 횟수
- 결과 - 평균 값과 변동 계수(만약 계수의 변화량 표준 편차가 평균값에 의해 나누어 진다면, 이 값은 %).
- 블록의 마모 손상 폭, mm
- 블록의 마모 손상 부피(mm³) 마모 손상 폭으로 계산된 블록 마모 손상 부피
- 링의 무게 감소 mg
- 링의 마모 손상 부피 mm³,
- 최종 동적 마찰 계수

8.2 부가적 기록사항

- 블록 무게 감소, mg
- 링의 열처리 조건
- 블록의 열처리 조건
- 윤활유의 성분
- 마찰 계수(초기 정적, 동적 마찰과 최종 동적 마찰)

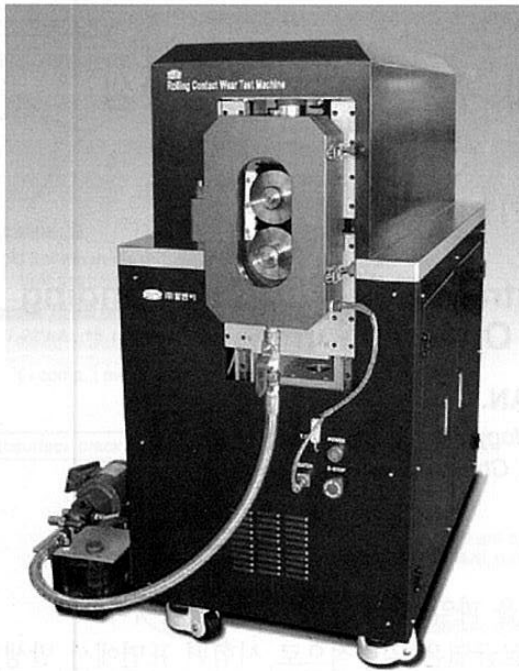
9. 정밀도

- 본 시험 절차에 따라 구해지는 측정의 정밀도는 어느 정도로 시험 절차에 충실한가에 따라 결정된다.
- 동일한 재료를 가지고 반복되는 시험에서 일치의 정도는 재료의 균질성, 기기와 재료의 상호 작용, 그리고 유능한 시험 Operator에 의한 정밀한 관찰에 따라 좌우된다.
- 블록 마모흔 폭 변화는 Test Method ASTM D2714의 Calibration 방법에 기술된 폭 내에 있다.
- 블록 마모 부피 계산은 필수적으로 손상 폭 측정의 Cubing을 포함한다. 블록 마모 손상 부피의 변동 계수는 대체적으로 블록의 마모 손상 폭보다 크다.
- 건식 시험의 경우 초기 표면 조건에 매우 민감하므로, 변동 계수가 습식 시험에 비해 건식에서 더 높다.
- 만일 재료가 Gallings이 일어날 정도의 조건에서 실험을 한다면 마모흔의 폭이나 마모부피감소의 변화가 매우 크게 나타난다. 이런 경우에는 좀 더 극악한 상황(예를 들면 저 하중)에서 시험을 다시 한번 실시한다.
- 반대로 매우 작은 마모가 되어서 측정 정밀도의 극한에 이르러 변동 계수가 매우 크게 나타나는 경우, 좀 더 극악한 상황(과 하중이나, 좀 더 긴 시험 시간)에서 실험이 요구된다.
- 신뢰성 있는 결과를 위해 많은 횟수의 반복 시험을 하는 것이 유리하나 경제적인 면을 고려해야 된다.
- 첫째로 허용 가능한 시험 크기를 결정해야 하며, Sampling error를 방지하기 위한 조절 비용, 시험 절차에 따른 변동 계수의 서술을 따르는 것 등이 있다.
- 변동 계수는 Block-on-ring 시험에서 보다 높게 나타날 수 있기 때문에, 의미 있는 시험 결과는 얻기 위해서는 최소한 세 번 이상의 시험이 행해져야 한다.
- Sampling error는 시험편의 크기를 크게 함으로써 줄일 수 있다. Practice E 122에서 Sample size(n)과 Sampling error(e)와 시험 변동 계수(v)의 상관 관계는 $n = (1.96 v/e)^2$ 으로 나타낼 수 있다.
- 아래는 평균값과 95% 신뢰성을 가지는 금속용 Round robin three용이다. H-60 블록과 S-10링과 건식 시험이며, 5,400 회전에서(197 rpm), 134 N의 하중일 때 블록의 마모 부피의 평균 값은 0.65 mm³이다. 실험실에서 95%의 신뢰성은 0.47 mm³이고, 다른 실험실간의 95%의 신뢰성은 0.67 mm³이다. 마모 손상 폭의 평균값은 2.76 mm이고, 한 실험실에서의 95% 신뢰성은 0.076 mm이고, 다른 실험실 간의 95%의 신뢰성은 0.47 mm이다. Mineral oil lubrication을 가지며 10,800 회전(197 rpm)에서 803 N 하중을 가한 블록이 마모 부피의 평균값은 0.047 mm³이다. 한 실험실에서 95%의 신뢰성을 가지는 값은 0.020 mm³이며, 다른 실험실 간에 95%의 신뢰성을 가지는 구간은 0.57 mm³이다, 마모 손상 폭의 평균 값은 1.09 mm이며, 95%의 신뢰성을 가지는 한 실험실은 0.098 mm이고 다른 시험실 간에는 95%의 신뢰성 구간은 0.27 mm이다. 윤활유가 없는 블록의 마모 부피의 평균값은 5,400 회전 수(72 rpm), 134 N 하중 시험에서 0.71 mm³이다. 한 실험실에서는 95% 신뢰성이 0.74 mm³이고, 각기 다른 실험실에서는 0.83 mm³이다. 마모 손상 폭의 평균값은 2.83 mm이며, 한 실험실에서는 95%의 신뢰성 구간이 1.02 mm이고, 각기 다른 실험실에서의 95% 신뢰성은 1.12 mm이다.

10. Rolling Contact Wear Tester (Model RC-106)

10.1 Specification

- Power : 220 vav, Single phase



- Motor : AC Servo motor
- Load : AC Servo motor or Hydraulic control system
- Load capacity : 20~10,000 N
- Load cell (10,000 N~100 N changeable)
- RPM : 60~3,000 rpm
- Heating system: R.T to $150 \pm 2^{\circ}\text{C}$
- Lubricating chamber: R.T to $150 \pm 2^{\circ}\text{C}$
- Vibration sensor

10.2 Test mode

- Two Rolling Test
- Block on Ring Test
- Lubricant Evaluation Test
- Ring on Ring Test
- Temperature

재료의 구름, 미끄러짐 접촉에 의한 마모 현상을 Simulation 할 수 있는 고속, 고 하중용 Rolling Contact Wear Tester이다. ASTM 2714, ISO 7148 규격에 따라 시험을 수행 할 수 있고 Data acquisition 및 분석 Software에 의해 온도, 하중, 시간, 회전 수, 속도 등을 On line으로 Data 를 받아들이고 저장, Plotting 이 가능하도록 설계 되었다.

본 시스템은 원하는 하중의 제어를 Servo motor 에 의한 정 하중 장치를 부착하여 설정 하중을 정확하고 손쉽게 부가할 수 있다.