Pin-on-Disc식 미끄럼마모시험 시 마모 거동에 미치는 접촉면적 및 하중 조합의 영향

이한영[†]

계명대학교 공과대학 신소재공학과

Effects of Combination of the Load and the Apparent Area of Contact on Sliding Wear behavior of Mild Steel in a Pin-on-disc Type Apparatus

Lee, Han-Young[†]

Dept. of Advanced Material Engineering, Keimyung University

(Received January 15, 2013 ; Revised February 23, 2013 ; Accepted February 25, 2013)

Abstract – The effects of contact pressure on the sliding wear behavior of mild steel in a pin-on-disc type apparatus were investigated. Sliding wear tests were conducted with various combinations of the load and apparent area of contact. The wear behavior of mild steel as a function of sliding speed was independent of contact pressure. However, the wear rate at different sliding speeds was influenced by the load regardless of the apparent area of contact. This was attributed to the fact that there may be no difference in the real area of contact for any combination of the load and apparent area of contact.

Keywords – pin-on-disc(핀온디스크), load(하중), contact area(접촉면적), contact pressure(접촉압력), wear behavior(마모거동)

1. 서 론

두 물체가 접촉하여 상대 운동할 때 발생하는 마모는 복잡하여 실험적으로 재현하기 어려운 현상으로 알려져 있다. 이것은 마모가 상대재의 종류, 접촉양식, 미끄럼거리, 접촉하중, 미끄럼속도, 시험온도, 주변의 습도 등 운동 및 환경 조건에 크게 영향을 받기 때문이다[1]. 그래서 재료의 마모특성 조사 시 시험조건 선정은 가급적 실제와 유사한 접촉조건으로 모사하는 것이 바람직한 것으로 알려져 있다.

현재 재료의 미끄럼 마모특성 조사에는 pin-on-disc 접촉방식의 미끄럼 마찰마모시험기가 널리 사용되고 있다. 이때의 간과하거나 선정하기 어려운 시험조건으로

시험의 크기와 하중을 들 수 있다. pin-on-disc식 마찰마모시험에 권장되는 pin의 직경은 일반적으로 3 mm~5 mm이고 하중은 1 N~50 N의 범위이다[2]. 사실 응착마모시의 마모체적은 Holm-Archard식에 의하면 미끄럼속도와는 무관하나 수직하중과 미끄럼거리에 비례하는 것으로 알려져 있다[3,4]. 그러나 pin-on-disc식 미끄럼마찰마모시험 시의 대부분의 마모형태는 미끄럼속도 뿐만 아니고 미끄럼거리에 따라서도 변화하는 것으로 밝혀졌다[5,6]. 이러한 변화는 미끄럼거리에 따라 접촉면적이 변화한다는 사실과 무관하지 않다[6]. 따라서 pin-on-disc식 마찰마모시험기로 재료의 미끄럼 마모특성을 조사할 경우, 하중 및 접촉면적의 조합에 따라 마모형태 차이를 발생할 가능성이 있고 이로 인해 마모거동의 변화로 이어질 것이 분명하다.

그래서 본 연구에서는 pin-on-disc식 미끄럼 마찰마모

[†]주저자 · 책임저자 : lhy@kmu.ac.kr

시험기를 이용하여 외관상의 접촉 면적이 변화하지 않는 조건에서 시편의 크기와 하중의 조합에 따른 미끄럼 마모시험을 하고 마모형태에 미치는 영향을 조사하였다.

2. 실험방법

본 연구에서는 시판되는 직경 10 mm의 어닐링 상태의 일반 구조용 탄소강 SM45C 환봉에서 지름이 상이한 두 종류의 pin 시편($\phi 5.4 \times 15$ mm 및 $\phi 2 \times 15$ mm)을 제작하였다. 시험 전 이들의 경도는 Hv 190 정도인 것으로 밝혀졌다. 상대재 Disc($\Phi 80 \times 8$ mm)는 냉간 금형용 합금공구강 STD11(1.45%C-12.4%Cr-0.89%Mo-0.23%V)의 환봉에서 소정의 형태로 가공한 후 열처리를 하였다. 열처리에는 650°C 에서 30분간 유지한 뒤 소입온도인 1020°C 까지 재가열하고 그 온도에서 20분간 유지한 후, 유냉하였다. 이후 490°C 에서 2시간 동안 tempering을 처리하였다. 시험전 상대재의 경도는 약 HRC 56(환산 Hv 613)인 것으로 확인되었다.

미끄럼 마모시험은 pin-on-disc식 미끄럼 마찰마모 시험기[7]를 사용하였으며 시험전 pin과 상대재 disc의 접촉면은 공히 600# Abrasive paper로 연마하여 거칠기를 조절하였다. 시험하중은 200 g, 300 g, 500 g의 3종류로 선정하고 두 직경의 시편($\phi 5.4$ 및 $\phi 2$)을 조합하여 접촉압력으로 0.87 kgf/cm^2 ($\phi 5.4$, 200 g), 2.18 kgf/cm^2 ($\phi 5.4$, 500 g), 9.55 kgf/cm^2 ($\phi 2$, 300 g), 15.92 kgf/cm^2 ($\phi 2$, 500 g)이 되는 4개의 조합을 선정하였다. 미끄럼 거리는 시험도중 접촉 면적이 변화하는 것을 고려하여 pin의 외관상 단면이 전면 마모된 시점을 기준으로 하여 6 km까지 시험하였다. 그리고 미끄럼 속도는 0.3 m/sec, 1 m/sec 그리고 3 m/sec를 취하여 대기 중 무윤활 상태에서 각각 시험하였다. 마모량 측정은 소정의 마찰거리마다 pin 시편의 중량감소로 산출하였으며 동일 조건에서 복수의 시편(2~3개)을 시험을 하여 이들의 평균값을 사용하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3-1. 접촉압력에 따른 미끄럼 마모특성

Fig. 1은 하중과 시편 직경의 조합으로 접촉압력이 0.87 kgf/cm^2 및 15.92 kgf/cm^2 인 조건에서 미끄럼거리에 대한 마모량의 변화를 속도별로 나타낸 것이다. 그림에서 보듯이 각 조건에서 마모량의 변화는 거리증대

Fig. 1. Wear loss as a function of sliding distance at various speeds.

에 따라 증가하는 경향이나 접촉압력이 클수록 그 정도가 현저하다. 그림 중 화살표의 위치는 시험도중 시편의 외관상 단면 전체에서 마모가 발생한(즉 전면접촉이 일어난) 시점을 나타낸 것이나 그 시점 역시 접촉압력이 클수록 빨라지는 것으로 확인되었다. 일반적으로 미끄럼거리에 따른 마모의 진행은 초기마모에서 정상마모로 마모형태가 전환된다[5,6]. 이러한 전환에 대해서는 여러 원인이 알려지고 있으나 접촉면적의 변화도 포함된다. 즉 초기에는 표면의 roughness, waviness 등으로 인해 국부적인 접촉이 일어나나 점차 접촉부가 확대되어 전면접촉으로 전환되어 마모형태가 변화한다는 것이다[6]. Fig. 2는 전면접촉 시점이후의 미끄럼거리에 따른 마모량의 변화를 나타낸 것이나 어느 것도 직선의 상관계수가 0.999 이상으로 크게 향상되는 것으로 확인되었다.

Fig. 3은 미끄럼속도에 따른 마모율의 변화를 하중과 시편 직경의 조합 즉 각 접촉압력별로 나타낸 것이다. 그림에서도 알 수 있듯이 어느 접촉압력에서도 미끄럼속도 1 m/sec에서 마모율이 가장 큰 것으로 밝혀졌다.

Fig. 2. Wear loss as a function of sliding distance at various speeds after steady state contacting.

Fig. 3. Variation of wear rate with sliding speed at constant contact pressure.

사실 이 미끄럼속도는 지난보고(접촉압력 1.76 kg/cm²)에서도 마모율의 극대가 나타난 속도구간이다[8]. 이러한 사실로 미루어 접촉압력이 변화하더라도 마모의 극대가 일어나는 미끄럼 속도구간은 변화는 하지 않는 것으로 생각되어진다. 그리고 그림에서도 알 수 있듯이

Fig. 4. Variation of wear rate with contacting load at each sliding speed.

일정 속도에서 접촉압력과 마모율과는 상관관계가 성립하지 않는 것을 알 수 있다.

한편, Fig. 4는 시편직경을 무시하고 미끄럼속도 별로 수직하중과 마모율과의 관계를 나타낸 것이다. 미끄럼속도 1 m/sec의 수직하중 500 g에서는 시편직경에 따라 마모율의 차이가 관찰되지만 다른 속도에서는 차이가 없고 전반적으로 수직하중 증대에 따라 마모율이 직선적으로 증가하고 있다. 이때 직선의 기울기는 미끄럼속도에 따라 상이하고 마모율의 극대를 나타낸 1 m/sec 시의 기울기가 가장 크다.

이상의 결과로부터 pin-on-disc식 미끄럼마모시험기에서 관찰되는 철강재료의 마모율은 접촉면적과는 무관하고 수직하중과 상관관계가 성립하는 것으로 밝혀졌다. 이것은 pin-on-disc시험기에서 사용하는 시편직경은 다소 상이하더라도 진실 접촉면적은 거의 유사하기 때문으로 생각되어 진다.

3-2. 미끄럼 마모면 해석

Fig. 5는 시편직경 φ5.4이고 수직하중이 500 g인 조합으로 접촉압력 2.18 kgf/cm²에서 시험한 후, 마모면을 광학현미경으로 관찰한 결과를 나타낸 것이다. 그림에서도 알 수 있듯이 0.3 m/sec로 시험한 pin의 마모면에서는 흑색 반점이 관찰되고 3 m/sec에서는 흑색의 띠가 관찰된다. 이들 부위를 EDX 분석한 일례를 Fig. 6에 나타내었다. 그림에서 보듯이 이들 부위는 철산화물인 것으로 밝혀졌다. 상대재 disc의 마모면에서도 이들과 양상은 상이하나 유사한 산화물이 생성된 것으로 확인되었다. 반면, 1 m/sec의 pin의 마모면에서는 EDX 분석결과, 산소 peak가 현저하지 않을

Fig. 5. Optical micrograph on worn surfaces of pin and disc tested at contacting stress of 2.18 kgf/cm^2 (500 g, $\phi 5.4$)

Fig. 6. An example of EDX analysis on the worn surface of the disc tested at contacting stress of 2.18 kgf/cm^2 .

뿐만 아니라 많은 scratch가 관찰되고, 육안으로도 금속광택을 띄는 것으로 확인되었다. 결국 이 속도에서는 고경도인 상대재 disc 마모면에 산화물이 생성되거나 이들이 탈락하면서 시편을 abrasive시켜 마모율이 현저히 증대한 것으로 생각되어진다. 이러한 측면에서 전술한 0.3 m/sec 및 3 m/sec의 속도는 전형적인 산화마모(즉 mild wear) 속도영역에 해당되는 것으로 추정된다.

Fig. 7은 접촉면적을 Fig. 5의 경우와 동일하게 하고 수직하중을 500 g에서 200 g으로 낮추어 접촉압력이 0.87 kgf/cm^2 가 되는 조건에서 시험한 마모면의 광학현미경 사진을 나타낸 것이다. Fig. 5와 비교하면

Fig. 7. Optical micrograph on worn surfaces of pin and disc tested at contacting stress of 0.87 kgf/cm^2 (200 g, $\phi 5.4$).

Fig. 8. Optical micrograph on worn surfaces of pin and disc tested at contacting stress of 15.9 kgf/cm^2 (500 g, $\phi 2$).

모든 상대재 disc 마모면에서 현저한 산화물 생성이 확인된다. 그리고 마모율의 극대가 나타난 1 m/sec에서의 pin의 마모면에서도 얇은 산화물 층 생성이 확인된다. 이것은 상대재로부터의 이착물인 것으로 확인되었다.

Fig. 8은 수직하중을 Fig. 5의 경우와 동일하게 하고 시편직경을 $\phi 2$ 로 적게 하여 접촉압력이 15.9 kgf/cm^2 가 되는 조건에서 시험한 마모면의 광학현미경 사진을 나타낸 것이다. 1 m/sec의 pin과 상대재 disc의 마모면은 Fig. 5의 결과와 유사하나 다량의 물입된 이착물과 scratch가 관찰된다. 결국 이러한 다량의 이착물로 인해 높은 접촉압력임에도 불구하고 마모량이 오히려 적었던 것으로 생각된다. 3 m/sec에서는 Fig. 5와 비교하면 pin과 disc 공히 마모면에 산화물이 현저히 감소한

Fig. 9. Surface profile across worn track of discs tested at 3 m/sec.

것을 알 수 있다. 이것은 높은 접촉압력에 의해 산화물들이 깨어지고 탈락되었기 때문으로 생각된다. 그럼에도 불구하고 이 경우의 마모율은 접촉압력과 무관한 것으로 밝혀졌다.

Fig. 9는 시편직경과 하중의 조합에 따른 여러 접촉압력에서 3 m/sec의 미끄럼속도로 시험한 상대재 마모 track(마모진행 방향)에 수직방향으로 측정된 표면 profile의 일례를 비교한 것이다. 접촉압력이 현저히 적었던 (a)의 경우는 pin의 마모발생도 적었지만 상대재 disc의 마모도 적었음을 알 수 있다. 이것은 Fig. 7과 같이 산화물이 접촉면간에 잔존하여 급속한 접촉을 방

지하였기 때문으로 생각된다. 그러나 접촉압력이 높았던 (b)와 (c)에서는 (a)와 달리 현저한 groove 형성이 확인된다. 그러나 (b)와 (c)간의 groove의 깊이 차이는 현저하지 않다. 이와 같이 시편직경과 하중 조합에 따라 마모면의 양상은 다르지만 pin 및 disc의 마모정도는 유사한 것으로 밝혀져 pin-on-disc식 마모시험에서의 마모거동은 접촉면적과 무관하고 오로지 수직하중에만 관계함을 시사하는 결과로 생각되어 진다. 일반적으로 진실 접촉면적은 일반적으로 외관상의 접촉면적의 0.01~0.1%를 넘지 않을 정도로 극히 적은 것으로 알려져 있다[9]. 따라서 접촉시 외관상 접촉면적의

차이가 있더라도 진실접촉면적으로는 차이가 현저하지 않기 때문일 것이다. 특히 접촉면간에 마모입자가 개입될 경우는 외관상의 접촉 면적이 상이하더라도 더욱더 진실 접촉면적 차이가 없어지기 때문으로 생각되어진다. 반면 하중이 증가하면 접촉부의 면적증가보다 접촉점의 숫자증대로 이어지는 것이 일반적이다[10]. 따라서 200 g에서 500 g으로 하중변화(Fig. 7과 Fig. 5를 비교)는 접촉점의 숫자가 증대되어 접촉횟수가 늘어나 전단력의 증대로 이어질 것이다. 이러한 전단력의 증대는 고경도의 상대재처럼 산화마모의 경향이 강한 경우는 상대재 마모면의 산화물이 탈락되어 마모율을 증가시키는 것으로 생각된다.

4. 결 론

철강재료의 pin-on-disc 미끄럼 마모시험에서 하중 및 접촉면적의 조합에 따른 미끄럼마모 거동을 조사한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 각 미끄럼속도에 대한 마모형태는 하중과 시편직경과의 조합에 따른 접촉압력의 영향이 적었다.
- 2) 각 미끄럼속도에서 마모율은 접촉면적(시편직경)과 무관하고 수직하중과 비례하는 것으로 밝혀졌다. 이것은 진실 접촉 면적이 외관상의 pin의 직경과 무관하기 때문으로 생각되었다.

- 3) 접촉압력의 영향은 마모면상의 산화물의 잔존과 관계하는 것으로 밝혀졌다. 그래서 높은 접촉압력에서 산화물이 깨어지고 용이하게 탈락하여 마모면의 양상은 상이 한 것으로 밝혀졌다.

참고문헌

1. 笹田 直, “磨耗試験法と磨耗特性,” 日本潤滑學會 第5回磨耗シンポジウム `pp. 21-30, 1973.
2. 日本機械學會(JSME), “磨耗の 標準試験方法(JSME S 013),” p. 4, 丸善, TOKYO, 1999
3. 遠藤吉郎, 表面工學, pp.65, 養賢堂, 1985.
4. I. M. Hutchings, Tribology, p. 23, CRC, 1992.
5. 佐藤健兒, 萱場孝雄, 高梨三郎, 菅原 舜, 松井正己, 武田信男, “金屬の磨耗とその對策,” 養賢堂, pp. 44-47, 1965.
6. 佐藤健兒 “金屬の磨耗とその對策,” pp.44-47, 養賢堂, 1965.
7. H.Y.Lee, “Analysis of Sliding Wear Mode on Annealed Steel by X-ray Diffraction Technique,” Wear, Vol. 256, pp. 657-663, 2003.
8. 이한영, 김근영, “미끄럼접촉을 하는 탄소강의 경도차 조합에 따른 마모특성 변화연구,” 한국윤활학회 제37회 추계 학술대회발표 논문집, pp. 85-90, 2003.
9. I.V.Kragelsky and V.V.Alsin, Tribology-Lubrication, Friction, and Wear, p. 22, Professional Engineering Pub. UK, 1981.
10. 曾田範宗, “固體の摩擦と潤滑,” pp. 21-27, 丸善(株), 1961.