

# X선회절에 의한 미끄럼접촉시 발생하는 마모과정의 해석

## (제1보 : 저경도강의 적용)

Analysis of Wear Process in Sliding Contact by X-ray Diffraction

이 한 영

계명대학교 재료공학과

**ABSTRACT** Understanding of wear mode and prediction of wear rate of parts in sliding contact are very important in field of material design relating with wear resistant. This paper has been undertaken to analyze the possibility of elucidation of wear mode and prediction of wear rate for annealed steel in sliding contact using the X-ray diffraction.

The sliding wear test with various velocities using pin-on-disc machine and the X-ray diffraction test on the worn surface have been carried out.

The results have been shown that the magnitude of residual stress and half-value breadth on the worn surface have a good correlation with wear mode. The difference between before and after test of half-value breadth on worn surface has been shown to be exponential relation with wear rate in the same wear mode.

Key Word : Wear mode, X-ray, Residual stress, Half-value breadth, Wear rate

### 1. 서 론

대부분의 기계나 구조물은 두면이 접촉하여 상대 운동을 하는 부위를 필히 포함하고 있다. 이때 이를 접촉면간에는 마찰이라는 현상이 발생하고 이로 인해 마모, 표면층의 변질, 이착 등과 같은 물리적, 화학적 현상을 수반하게 된다. 이를 현상중 마모현상은 기계 및 구조물의 성능이나 품질을 좌우하는 중요한 인자로 간주되고 있다.

마모는 실제 서서히 진행되는 현상이나 규칙성이 없고 복잡한 것으로 알려져 있다. 이것은 마모라는 현상이 기구학적, 운동학적, 응력조건, 재료조건, 환경조건 등의 내외부적인 조건에 크게 영향을 받고, 그 조건에 따라 여러 가지 마모형태<sup>1)</sup>를 나타내기 때문이다.

일반적으로 실제 적용하고자 하는 기계나 구조물의 접촉조건과 유사한 마모시험을 통

해, 재료의 마모특성과 접촉부위에서 발생하는 마모형태를 정확히 파악하여 대응책을 강구하는 방법을 취하고 있다.

그러나 많은 재료에 대해 여러 내외부적인 조건에서 각각의 마모특성을 조사하는 것은 불가능하고, 마모면에 나타나는 마모의 형태도 일반적으로 몇 가지 형태가 중복되어 나타나, 정량화도 용이하지 않다. 또한 이 결과도 실제 적용하였을 때 동일한 마모특성, 마모형태를 보이지 않을 수도 있다.

이러한 측면에서 마모의 정도나 마모의 형태를 마모면에서 직접, 정량적으로 파악할 수 있는 방법이 제시된다면 내마모성향상을 이루기 위한 재료설계, 시스템설계가 용이해 질 뿐만 아니라 마모현상관련 연구에 많은 도움이 될 것이 분명하다.

마모라는 현상은 주로 표면층 부근에서 발생하는 현상으로 그 영향층은 표면하 수십  $\mu\text{m}$ 정도로 알려져 있다. 그런데 X선회절에

의한 미시적, 거시적 정보는 표면하 수십  $\mu\text{m}$ 정도인 것으로 알려져 있다. 이러한 측 면에서 마모현상의 해석에 X선 회절기술의 적용은 유효할 것으로 생각된다.

본 연구에서는 annealing한 철강재료를 건 조상태에서 미끄럼접촉시키면서 마모면을 X 선회절시험하여 X선회절에 의해 마모정도와 마모형태의 추정이 가능한지의 여부를 조사 하였다.

## 2. 시험편 및 실험방법

본 연구에서는 시편으로 시판의 일반구조 용탄소강인 SM45C(0.43%C)를 사용하였고 상대재로는 공구강으로 알려진 STD11를 사용하였다.

시편( $6 \phi \times 30\text{mm}$ )은 가공전에 표준조직으로 만들어 주기 위하여  $850^{\circ}\text{C}$ 에서 1.5시간 유지한 뒤 공냉하였으며 가공 후에는 접촉면의 조도를 균일하게 하기 위하여 600#의 Abrasive paper로 마무리연마를 하였다. 그리고 연마가공에 의해 발생한 잔류응력을 제거하기 위하여  $600^{\circ}\text{C}$ 로 유지된 진공열처리로 (진공도  $10^{-6}\text{torr}$ )에서 45분간 유지한 뒤 로 냉을 하였다.

상대재( $80 \phi \times 7\text{mm}$ )는 시편가공후  $1050^{\circ}\text{C}$ 에서 3시간 유지 후에 액체 질소로 냉각하고  $180^{\circ}\text{C}$ 로 유지된 염욕속에서 2시간 유지후 공 냉을 하였다. 그리고 상대재도 시편과 마찬 가지로 표면의 조도를 균일하게 하기 위하여 시편전 400# Abrasive paper로 마무리연마를 하였다.

마모시험전 시편의 경도는 Hv 195, 상대재는 Hv 760정도였다.

마모시험은 pin-on-disc식 마모시험기<sup>2)</sup>에서 행하였다.

시험기는 시편을 고정하고 상대재를 회전시키는 방식으로 미끄럼속도(마찰속도)를  $0.41\text{ m/sec}$  부터  $3.91\text{ m/sec}$  사이에서 8조건을 선정하였다. 이때 시험은 286g의 단일하중으

로, 마찰거리 2km로 하고 대기중, 무윤활상태에서 행하였다. 그리고 마모량은 소정의 마찰거리마다 무게감소정도로 평가하였다.

마모면의 X선회절시험은 소정의 마찰거리마다 마모량을 측정한 후 동시에 행하였다. 측정조건은 Table 1에 나타낸 바와 같이 X 선응력측정법표준<sup>3)</sup>에 준하였다. 이때 X선입사방법으로  $\psi_0$ 일정법, 검출기주사방법으로 병경법을 사용하였다. 그리고 측정방향은 미끄럼방향에 대해서  $0^{\circ}$  및  $90^{\circ}$ 의 2방향( $\phi$  각)에서 각각 4개의 입사각( $\psi_0$ 각)의 측정을 하였다. 이때 잔류응력은  $\sin^2\psi$  법<sup>3,4)</sup>으로 계산하였고 반가폭은  $\psi_0=0^{\circ}$ 에서 측정된 회절선의 값을 사용하였다<sup>5)</sup>.

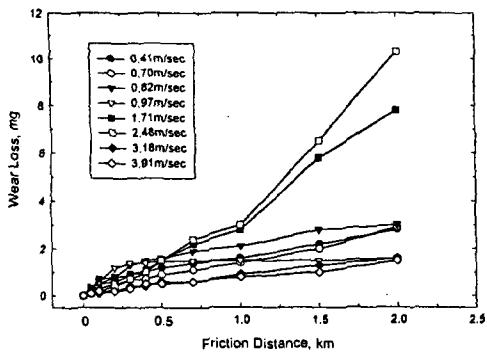
Table 1 Conditions of X-ray Diffraction

Tube	Cr-K $\alpha$
Diffraction Plane	$\alpha\text{-Fe}(211)$
Current and Voltage	30 mA, 30 kV
Irradiation Area	$2 \times 2 \text{ mm}^2$
Time Constant	4 sec
Scan Speed	$2^{\circ}/\text{min}$
Filter	V
Angle of $\varphi$ and $\psi_0$	$\varphi = 0^{\circ}, 90^{\circ}$ $\psi_0 = 0^{\circ}, 15^{\circ}, 30^{\circ}, 45^{\circ}$

## 3. 실험결과 및 고찰

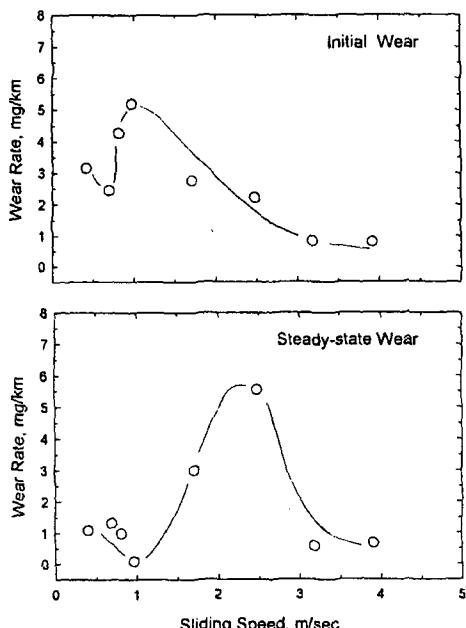
### 3.1 마모시험결과

Fig. 1는 각 속도에서 거리에 따른 마모량의 변화를 나타낸 것이다. 그림에서도 알 수 있듯이 거리가 증가함에 따라 대부분 마모량이 증가하는 일반적인 형태를 보이고 있다. 일반적으로 거리에 따른 마모의 형태는 초기마모와 정상마모로 구분<sup>6,7)</sup>되고 거리에 따른 마모량변화의 기울기가 급변하는 시점을 채택하고 있다. 그러나 본 연구의 일부속도에서 그 구분이 불명확할 경우도 있어 후술하는 마찰거리에 따른 반가폭 및 잔류응력 변화의 결과를 토대로 판단하였다. 그결과 대부분의 속도에서 0.3km부근임이 밝혀졌다.



**Fig.1 Wear characteristics for friction distance at various sliding speed**

Fig.2는 초기마모영역 및 정상마모영역에서 속도와 마모율의 관계를 나타낸 것이다. 이들 마모곡선의 형태는 일반적으로 알려진 형태<sup>6)7)</sup>와 동일함을 알 수 있다. 따라서 정상마모영역에서는 0.41~0.97m/sec까지의 속도는 제1차 산화마모영역이고 1.71m/sec와 2.48m/sec의 속도는 기계적 파괴마모영역, 3.18m/sec와 3.91m/sec의 속도는 제2차 산화마모영역에 상응됨을 알 수 있다. 이와같은 사



**Fig.2 Wear characteristics for sliding speed under initial wear and steady-state wear region**

실은 각 마모영역에서 시험후 마모면에서 산화물의 존재여부에서 확인되었다.

그러나 초기마모영역의 마모곡선의 경우는 정상마모영역의 마모곡선에 비해 기계적 파괴마모영역이 다소 저속도 쪽으로 이동한 형태임을 알 수 있다.

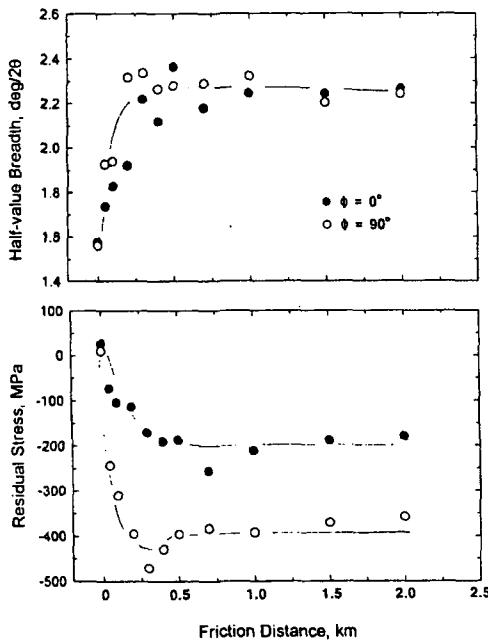
이러한 사실로 미루어 마찰거리 증대에 따라 일부 속도에서는 초기마모영역에서 기계적 파괴마모를 보이다가 산화마모로 또는 산화마모에서 기계적 파괴마모로 마모형태가 천이됨을 추측할 수 있다. 그리고 이와같은 마모형태의 천이가 이루어 지는 속도범위의 마모에 대한 거리특성곡선상에 초기마모와 정상마모가 현저히 구분이 된다는 측면을 고려하면 마모에 대한 거리특성곡선상 변곡점은 마모형태의 천이를 시사하는 현상으로 간주할 수 있을 것으로 추측된다.

### 3.2 X선회절시험결과

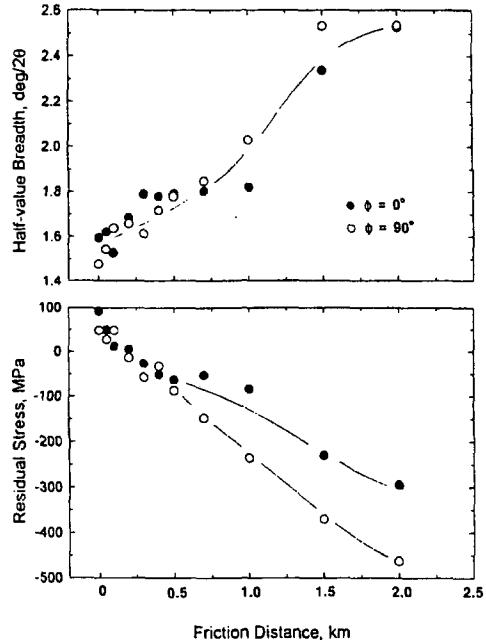
Fig.3과 Fig.4는 정상마모영역에서 산화마모형태와 기계적 파괴마모형태를 나타낸 대표적인 속도 0.82m/sec와 2.48m/sec시의 마찰거리에 따른 마모면의 잔류응력과 반가폭의 변화를 나타낸 것이다.

반가폭은 어느 것도 시험전에는 Annealing 한 상태이므로 아주 낮은 값을 보이고 있으나 거리증대에 따라 증대하고 있음을 알 수 있다. 그러나 그 변화양상은 마모형태에 따라 상이함을 알 수 있다. 산화마모형태를 나타낸 0.82m/sec의 경우는 초기에 급증하다가 0.3km부근에서부터 일정한 값을 갖는다는 것을 알 수 있다. 그러나 기계적 파괴마모를 나타낸 2.48m/sec의 경우는 일정한 값을 나타내지 않고 거리증대에 따라 계속 증가함을 알 수 있다.

잔류응력의 경우는 시험전에는 거의 응력이 없는 상태이나 마모진행에 따라 압축의 잔류응력<sup>8)~12)</sup>이 생성되고 있음을 알 수 있다. 또한 마찰거리에 따른 변화양상은 반가폭의 경우와 동일하게 마모형태에 따라 상이하여 산



**Fig.3 Variation of half-value breadth and residual stress of worn surface with friction distance under sliding speed 0.82m/sec**



**Fig.4 Variation of half-value breadth and residual stress of worn surface with friction distance under sliding speed 2.48m/sec**

화마모시는 일정값을 보이나 기계적 파괴마모시는 계속 증가하고 있다. 그러나 반가폭과 달리 측정방향에 따라 상이한 값을 갖는다는 것을 알 수 있다.<sup>9)13)</sup>

일반적으로 잔류응력은 거시적인 응력상태이고 회절선의 반가폭은 미세결정립의 크기와 micro strain을 반영하는 것으로 알려져 있다<sup>4)</sup>. 따라서 0.82m/sec의 경우는 초기의 마모가 기계적 파괴마모영역이므로 높은 전단력에 의해 다양한 소성유동과 아울러 dislocation이 생성되어 잔류응력 및 반가폭이 급격히 증가한 것으로 생각되어 진다. 그러나 산화마모를 하는 정상마모영역에 들어서면 산화물에 의해 전단력이 감소되고 shakedown limit에 의해 소성변형도 적어질 것이 분명하다. 그리고 이영역에서 마모율이 일정하므로 응력상태가 일정한 것으로 간주할 수 있다. 이로인해 마모면상의 dislocation의 생성과 소멸이 평형을 이루면서 미세조직과 잔류응력이 일정해지는 것으로 생각된다.

그러나 2.48m/sec의 경우는 초기에 산화마모영역에 상용되므로 산화물 존재로 전단력은 적으나 초기에 dislocation도 적고 잔류응력이 없는 상태이므로 마모에 의해 잔류응력과 반가폭의 증대가 이루어 지게 된다<sup>11)</sup>. 그러나 이 경우는 마모율이 적으므로 증대속도는 0.82m/sec보다 적어진다. 그 후 기계적 파괴마모를 일으키는 정상마모영역에 들어서면 산화물의 탈락을 초래할 정도로 전단력이 커져 마모가 증대되고 이로 인해 소성변형량도 증가하므로 마찰거리 증대에 따라 잔류응력 및 dislocation density의 증대가 계속되는 것으로 추측된다. 그러나 이 경우도 잔류응력 및 반가폭의 증대에는 한계가 있을 것으로 추측된다. 일반적으로 가공에 의해 미세조직이 형성되나 마모현상에 의해서도 cell조직을 형성하는 것<sup>14)</sup>이 알려져 있다. 이러한 의미에서 마모현상은 일종의 표면 가공으로 간주할 수 있기 때문에 본 연구의 시험속도 범위에서의 온도상승은 무시하므로 cell조직

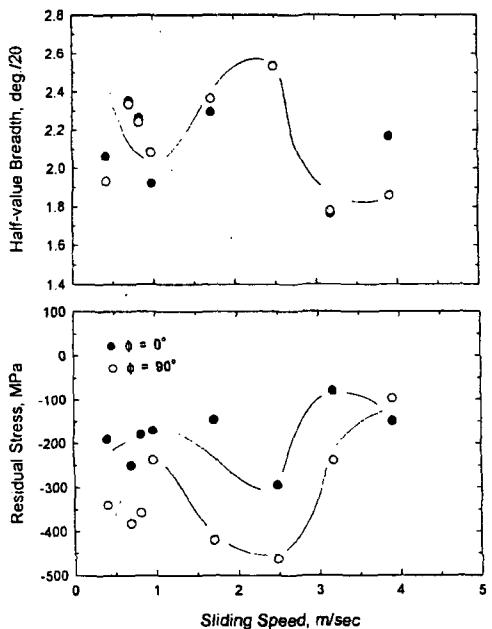
의 크기는 가공시의 변형량<sup>15)</sup>에 상응되는 마모율에 의해 결정된다 해도 과언은 아닐 것이다. 따라서 마모율이 일정하다면 소정의 거리뒤에 일정해 질 것이 분명하다.

잔류응력의 경우도 증가하다가 재료의 전단 강도보다 커지면 소성변형되어 응력해방이 일어날 것이다. 결국 마모율이 일정해지면 응력의 축적과 해방이 평형을 이루면서 일정한 값을 나타내는 것으로 사료된다.

이러한 사실은 Fig. 6에서 1.5km 이후에 기울기가 완만해지는 경향에서 확인할 수 있다.

이상의 결과에서 마모의 형태 및 그 정도에 따라 미끄럼거리에 대한 재료의 미시적 구조와 거시적 구조가 상이함을 알 수 있다. 또한 마모율이 일정하다면 그 마모율에 상당하는 잔류응력 및 반가폭의 값이 존재한다는 것이 분명하다.

### 3.3 X선회절결과와 마모율



**Fig.5 Variation of half-value breadth and residual stress of worn surface with sliding speed after test (at 2km)**

Fig.5는 각 미끄럼속도에서 거리 2km까지 시험한 후 측정된 잔류응력과 반가폭을 나타낸 것이다.

그 결과 각속도에서 반가폭 및 잔류응력의 변화는 속도에 대한 마모특성곡선과 유사하다는 것을 알 수 있다. 이러한 경향은 초기 마모영역에서도 동일하였다. 이러한 측면에서 마찰거리에 따른 X선회절에서 얻어지는 반가폭 및 잔류응력의 변화가 마모형태 및 마모정도와 밀접한 관계가 있음이 분명하다. 그러나 잔류응력의 경우는 일반적으로 알려진 대로 측정방향에 따라 값이 상이<sup>9)10)</sup>하나 반가폭의 경우는 측정방향에 거의 무관하다는 것을 알 수 있다. 따라서 마모형태 및 마모정도의 해석에 반가폭을 사용하는 것이 더욱 유효한 것으로 사료된다.

Fig.6는 각 속도에서 거리에 대한 반가폭의 변화가 증대하다가 일정해지는 반가폭의 수렴치와 초기반가폭과의 차(반가폭의 변화폭 :  $\Delta HVB$ )를 정상마모영역의 마모율과 비교한 것이다.

그 결과 일부속도의  $\Delta HVB$ 에서 변곡점을 가지나  $\Delta HVB$ 가 커질수록 마모율이 지수함수적으로 커짐을 알 수 있다. 변곡점을 나타낸 속도는 전술한 대로 초기마모시 기계적 파괴마모를 영역이고 정상마모에서 산화마영역으로 마모기구가 천이되는 속도영역임이 밝혀졌다. 결국 초기마모시의 기계적파괴마모에 의해 다양으로 만들어진 Dislocation의 미세조직이 마모가 적은 산화마모로 천이되어도 초기마모시에 생성된 미세조직이 그대로 잔존하기 때문으로 생각되어 진다. 그러나 이 영역에서도 반가폭의 변화폭이 클수록 마모율도 커지는 상관관계가 있음이 분명하다.

따라서 마모형태가 기계적파괴마모에서 산화마모로 천이되지 않는 한 반가폭의 변화폭과 마모율과는 지수적인 상관관계가 존재하여 반가폭을 측정하므로써 마모율추정이 가능하다는 것을 알 수 있다. 그리고 마모형태가 기계적 파괴마모에서 산화마모로 천이되

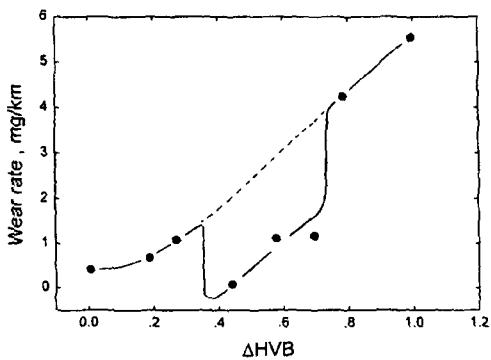


Fig.6 Relationship between wear rate and increments of half-value breadth

더라도 동일한 상관을 가지나 초기마모의 영향으로 이동하는 형태가 된다.  
이상과 같이 마모형태 및 그 정도에 따라 재료의 거시적인 구조와 미시적 구조가 상이한 것으로 밝혀져 이들을 평가하면 마모형태를 예측할 수 있음이 분명하다.

#### 4. 결론

X선회절기술에 의해 마모면의 마모형태와 마모의 정도를 추정하기 위해 마모면의 마모형태에 따른 잔류응력과 반가폭을 조사해 본 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 거리에 대한 마모특성곡선상 변곡점은 마모형태가 천이되는 과정으로 추측되었다.
- 2) 마찰거리에 따른 잔류응력 및 반가폭의 변화는 마모형태에 따라 상이하였다. 그 변화는 정상마모영역에서 산화마모시에는 일정한 값을 가지나 기계적 파괴마모시에는 계속 증가하였다.
- 3) 속도에 대한 마모곡선과 각 속도에서 마모면의 잔류응력 및 반가폭의 대소와는 상관관계가 있음이 밝혀졌다. 그러나 잔류응력을 측정방향의 영향이 커서 반가폭이 유효한 것으로 생각되었다.
- 4) 마모면의 반가폭의 변화량과 마모율과는

지수적인 관계가 성립하나 마모형태가 기계적 파괴마모에서 산화마모로 천이하는 경우는 상관계수가 변화한다.

이상의 결과에서 마모면을 X선회절하여, 반가폭을 평가하면 마모형태와 마모정도가 추정 가능하다는 것이 밝혀졌다.

#### 5. 참고문헌

- 1) 日本潤滑學會：“潤滑ハンドブック”，養賢堂(1975)72
- 2) 이한영, 배중수, 김용진 : 윤활학회지, 15,2(1999)156
- 3) 日本材料學會：“X線應力測定法標準”，(1982)
- 4) 日本材料學會：“X線材料強度學”，養賢堂(1981)
- 5) 이한영 : 계명대학교 산업기술연구소 논문보고집, 20(1997)161
- 6) 笹田直 : 日本潤滑學會 第5回 磨耗シンポジウム講演要旨集, (1970)21
- 7) 葉山房夫：“金屬合金の磨耗現象の基礎”，丸善(1987)88
- 8) 竹内榮一 : 熱處理, 16,3(1976)146
- 9) 佐佐木敏美, 山田俊宏, 波多野和好 : 日本金屬學會, 38,7(1974)599
- 10) 高橋利夫, 阿部利彦, 井川克也 : 鑄物, 57,5(1985)309
- 11) J.W.Ho, C.Noyan, B.Cohen, V.D.Khanna and Z.Eliezer : Wear, 84(1984)183
- 12) D.Mairey, J.M.Sprauel, M.Churd and J.Mignot : J. of Tribology, 107(1985)195
- 13) 李漢瑛, 川本信, 岡林邦夫 : トライボロジスト, 34(1989)43
- 14) 中島耕一: 潤滑 30,5(1985)306
- 15) G.E.Dieter : "Mechanical Metallurgy" McGraw-Hill,(1986)299