

X선회절에 의한 철강재료의 미끄럼 마모형태 해석에 관한 연구(고경도강에의 적용)

이 한 영[†]

계명대학교 신소재공학과

Analysis of Sliding Wear Mode on Hardened Steel by X-ray Diffraction Technique

Han-Young Lee[†]

Keimyung University, Department of Materials Engineering, Daegu 704-701, Korea

Abstract – High strength steels are widely used as tribo-materials in the field. Previous study revealed that for mild steel, the states of strain on the worn surface measured by X-ray diffraction has a good relationship with the state of wear. The objective of this study is to identify the relationship between the state of strain on the worn surface and the state of wear in high strength steels. Sliding wear tests were carried out using several hardened steels. X-ray diffraction tests were conducted to analyze the state of strain on the worn surface during wear. The experimental results indicated that the state of strain on worn surface in the hardened steel shows the same tendency as in the mild steel. It is clear that change of half value width on the worn surface as a function of sliding speeds is broadly similar in shape to wear characteristics curve and its magnitude has a good relationship with the wear rate at two different wear modes in the hardened steel.

Key words – high strength steels, half-value width, residual stress, wear characteristics, wear mode, X-ray diffraction.

1. 서 론

두 물체가 접촉하여 상대운동을 하는 부위에서는 필히 마모라는 현상이 발생하여 많은 문제를 야기한다. 이러한 측면에서 이 현상의 제어여부가 많은 기계나 장치 등의 수명이나 성능을 좌우하고 있다 해도 과언이 아닐 것이다. 그러나 마모라는 현상은 접촉양식, 하중, 속도, 환경 등에 영향을 받기 때문에 같은 재료라도 사용조건에 따라서 마모의 형태나 정도가 상이할 뿐만 아니라 법칙성도 적어 정확한 재료의 마모특성 파악은 용이하지 않다[1].

이러한 측면에서 현재 마모가 발생하는 부위에서 직접 마모의 정도를 정량화 할 수 있는 방법이 제시된다면 tribology적인 문제해결에 유용할 것이 분명하다.

이와 관련하여 저지는 지난보고[2]에서 annealing한 저경도강을 이용하여 마모면을 X선회절한 결과, X선적 strain인 잔류응력과 반가폭이 산화마모와 기계적 파괴 마모가 일어나는 영역에서는 마찰거리에 따라 그 변화 양상이 상이하며, 미끄럼속도에 따른 이들 변화는 속도에 대한 마모특성 곡선과 유사한 경향인 것을 확인하였다. 그러나 실제 tribology적인 재료설계의 경우는 저경도의 재료보다 고경도의 재료가 널리 사용된다. 일반적으로 고경도의 재료는 저경도 재료에 비해 초기 strain이 상당히 클 뿐만 아니라 전반적으로 마모율이 적고 마모형태도 저경도의 재료와 상이한 것으로 알려져 있다. 따라서 저경도의 재료에서 밝혀진 이러한 관계에 대한 고경도 재료에서의 성립여부는 실용적인 측면에서 아주 중요한 사안이라 할 수 있다.

본 연구에서는 열처리하여 고경도로 한 냉간금형용 합금공구강을 이용하여 지난보고[2]와 동일하게 여러

[†]주저자 · 책임저자 : lhy@kmu.ac.kr

속도에서 미끄럼 마모시험을 행하고, 각 마모면상의 X선적 strain인 잔류응력과 반가폭을 측정하였다. 그리고 그 결과를 해석하여 고경도 재료의 마모면에서 이들 간의 상관관계를 고찰하였다.

2. 시험 방법

2-1. 시험편

본 연구에서 사용된 시험편은 시판되는 냉간금형용 합금공구강 STD11의 환봉에서 소정의 형태($6\phi \times 25$ mm)로 선삭 가공한 뒤 열처리를 하였다. 열처리는 진공열처리로(10^{-2} torr)에서 분당 10°C 의 속도로 650°C 까지 가열한 뒤 이 온도에서 30분간 유지한 후, 분당 15°C 의 가열속도로 소입온도인 1010°C 까지 가열하는 2단계 가열을 하였다. 그리고 그 소입온도에서 20분간 유지한 뒤 2 bar의 질소가스로 소입하고 450°C 로 유지된 염욕 속에서 2시간 tempering처리를 하였다.

상대재는 시판되는 고속도공구강 SKH51의 환봉에서 소정의 형태($68\phi \times 10$ mm)로 가공한 뒤 1180°C 로 유지된 염욕 속에서 10분간 유지하고 유냉하였다. 그 뒤 560°C 에서 2시간 행하는 tempering처리를 2차례 반복하였다.

이상의 결과 시험진 경도는 시험편의 경우 약 H_rC 55.8, 상대재의 경우 약 H_rC 61.5임이 확인되었다. Table 1은 시험 및 상대재의 화학조성을 나타낸 것이다.

2-2. 마모시험

마모시험은 지난보고[2]와 동일한 pin-on-disc형 미끄럼 마찰마모시험기를 이용하였다. 시험하중은 580 g으로 일정하게 하고 속도는 2 m/sec에서 7 m/sec까지 6조건(2, 3, 4, 5, 6, 7 m/sec)을 선정하였다. 이때 마모량은 소정의 마찰거리마다 시험을 중단하고 중량감소를 측정하여 산출하였으며, 총 마찰거리는 6 km까지로 하였다. 그리고 시험 전에는 시험편과 상대재의 접촉면을 공히 400# abrasive paper로 연마하였으며 모든 시험은 실온의 대기중, 무윤활상태에서 행하였다. 모든 시험은 동일 조건에서 2~5번의 시험을 하여 이들의 평균값을 사용하였다.

Table 1. Chemical composition of the specimen

	C	Si	Mn	Cr	Mo	W	V
STD11	1.45	0.28	0.45	11.89	1.12	-	0.37
SKH51	0.83	0.32	0.38	3.88	5.12	5.63	1.78

Table 2. Conditions of X-ray diffraction

Tube of X-ray	CrK α
Diffraction plane	α -Fe(211)
Current and voltage in tube	10 mA, 30 kV
Irradiation area	2×2 mm ²
Time constant	4 sec
Scan speed	2 deg./min
Filter	V
Angle of φ^* and ψ_c^{**}	$\varphi = 0^{\circ}, 90^{\circ}$ $\psi_c = 0^{\circ}, 15^{\circ}, 30^{\circ}, 45^{\circ}$

*angle between the incident angle of X-ray and the sliding direction.

**angle between the incident angle of X-ray and the specimen normal.

2-3. X선 회절시험

마모면의 X선회절시험은 소정의 미끄럼거리마다 마모량을 측정 한 후 동시에 이루어졌다.

X선회절조건은 X선응력측정법 표준[3]에 준하였으며 Table 2에 그 측정조건을 나타내었다. 이때 X선회절은 4개의 입사각($\psi_c = 0^{\circ}, 15^{\circ}, 30^{\circ}, 45^{\circ}$)을 선정하여 X선 입사방법으로 ψ_c 일정법, 검출기주사방법으로 병행법을 채용하고 미끄럼방향과 평행한 방향으로 이루어 졌다. 잔류응력은 4개의 입사각에서 얻어진 회절선을 해석한 후 $\sin^2\psi$ 법으로 계산[3]하였으며 반가폭은 $\psi_c = 0^{\circ}$ 를 2차례 측정하여 그 평균값을 사용하였다.

이때 고경도강의 경우는 회절선이 상당히 broadening해지므로 계산정도를 고려하여 회절선 해석시 background제거는 반가폭법, 직선근사법, 포물선근사법, 타원근사법을 사용하고 회절각은 반가폭법 및 적분법을 사용[4]하여 각각 산출한 후 이들의 평균값을 사용하였다.

3. 시험결과 및 고찰

3.1. 마모시험결과

Fig. 1은 각 미끄럼속도에서 거리에 따른 마모량의 변화를 나타낸 것이다. 그럼에서도 알 수 있듯이 이들의 변화는 전부 거리증대에 따라 마모량이 증대하고 있다. 그러나 속도에 따라 시험초기의 마모증가양상이 상이하여 2~4 m/sec의 속도에서는 거리에 대해 대부분 점진적으로 증대하나 5 m/sec이상의 속도에서는 초기에 급증한 후 다소 완만해지고 있다.

Fig. 2는 Fig. 1의 결과를 초기마모 및 정상마모 영

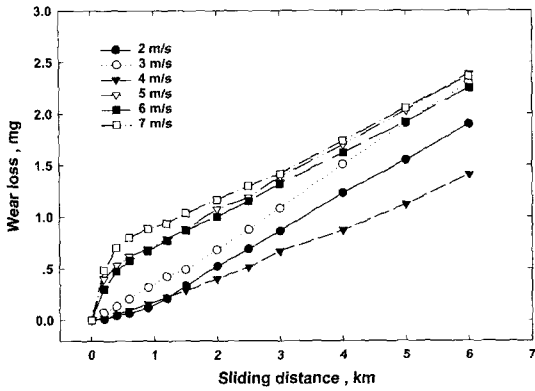


Fig. 1. Wear characteristics as a function of sliding distance at various sliding speeds.

역으로 구분한 후 각 속도에서의 마모율을 비교한 것이다. 초기마모의 경우는 4 m/sec이하의 저속도에서의 마모율은 적으나 5 m/sec의 속도에서 급증하고 있음을 알 수 있다. 이러한 경향은 본 연구와 동일한 조건으로 시험한 고경도의 분말고속도공구강의 시험결과[5]와 유사한 것으로 밝혀져 5 m/sec이후에 시편의 온도 상승이 현저한 것으로 추정된다. 그러나 정상마모의 경우는 3 m/sec에서 다소 큰 마모율을 보이나 5 m/sec 이상의 속도에서도 현저한 증가 없이 전반적으로 속도에 따른 마모율 차이가 적은 것이 관찰된다.

Fig. 3은 여러 속도(2, 4, 5, 7 m/sec)에서 시험한

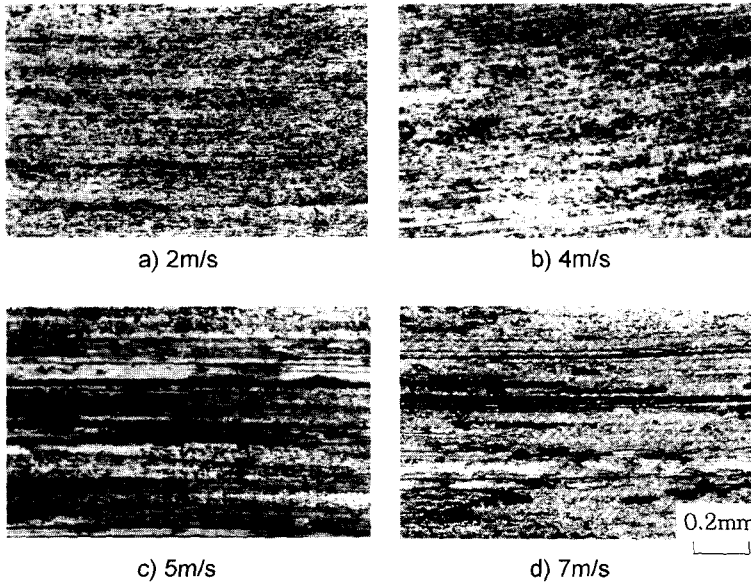


Fig. 3. Optical micrographs on worn surface of testpiece.

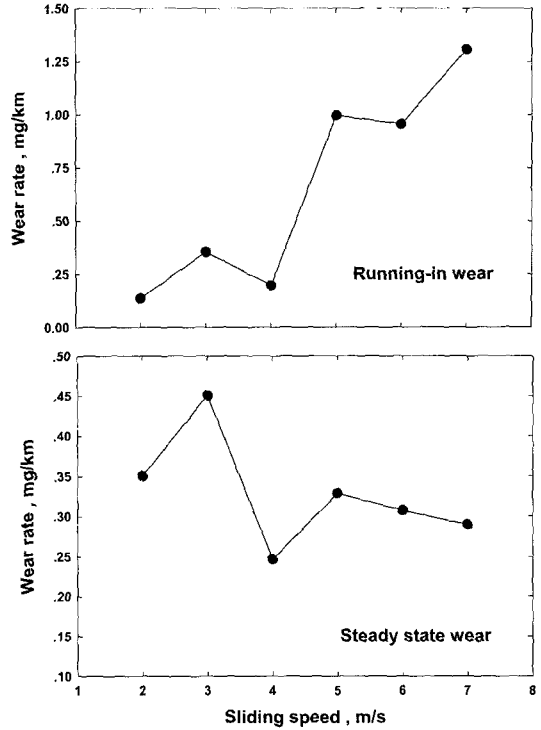


Fig. 2. Wear characteristics as a function of sliding speed.

시편의 마모면을 광학현미경으로 관찰한 결과이다. 그림에서도 보듯이 어느 마모면에서도 화합물이 관찰되

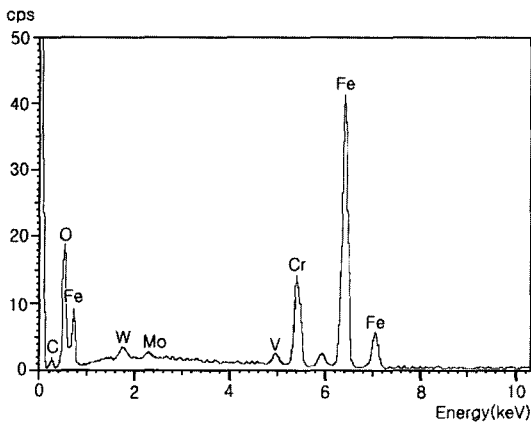


Fig. 4. Result of EPMA on worn surface of testpiece tested at 7 m/s.

고 있다. 저속에서는 주로 미세한 흑색의 화합물이 관찰되나 속도가 빨라질수록 회색의 화합물이 증가하여 5 m/s에서 현저히 생성된 것을 확인할 수 있다. Fig. 4에 7 m/sec의 마모면을 EPMA분석한 결과를 나타내었으나 마모면에서는 산소가 관찰되어 이들은 모두 철산화물인 것으로 밝혀졌다. Fig. 5는 상대재 마모면을 관찰한 결과이다. 이들 면에서도 시편과 마찬가지로 유사한 화합물들이 관찰되나 이들도 EPMA분석결과 시편과 동일하게 철산화물인 것으로 밝혀졌다. 저속의 마모면에서 주로 관찰되는 흑색의 산화물은 Fe_2O_3 및 Fe_3O_4 계의 산화물인 것으로 추정되나 회색의 산화물은

고속으로 될수록 그 량이 많아지는 것으로 미루어 FeO 계의 고온 산화물임에 틀림없다[6].

이러한 측면에서 고경도의 시편과 상대재의 마모면에는 속도에 따라 생성되는 산화물의 종류나 양적인 차이는 있으나 산화물이 생성되어 이들이 금속간 접촉을 방지하므로 정상마모영역에서는 전반적으로 마모율이 적어졌다는 것을 알 수 있다. 아울러 고속영역의 초기마모에서 마모율이 현저히 증대하였던 것은 마찰거리가 적어 고온 산화물 형성이 적었기 때문으로 추정된다. 그러나 Fig. 3과 Fig. 5에서 보듯이 4 m/sec 이하의 속도영역의 마모면(a, b)에서는 현저하지 않으나 5 m/sec 이상의 마모면(c, d)에서는 scratch의 흔적이 다수 관찰되는 것을 확인할 수 있다. 따라서 4 m/s 이하의 속도에서는 주로 응착마모의 형태로 마모가 진행되고 5 m/s 이상의 속도에서는 abrasive적으로 마모가 진행함을 예측할 수 있다. 이러한 마모형태의 변화는 미끄럼 속도가 증가함에 따라 특히 5m/s이상의 속도에서는 마찰열에 의한 온도상승이 현저하였기 때문으로 생각된다. 이러한 측면에서 미끄럼 속도를 더욱 증대하여 상대재의 온도상승도 현저하게 되었다면 시편의 마모율 급증으로 이어 졌음이 분명하다.

3-2. X선회절에 의한 미끄럼마모 해석

일반적으로 회절선의 broadening은 dislocation의 밀도와 이와 관련된 subgrain의 크기를 반영하는 것으로

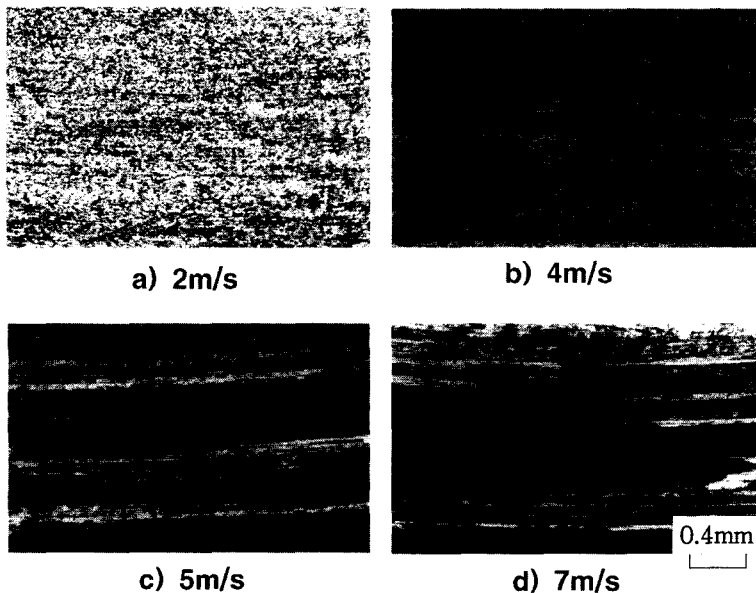


Fig. 5. Optical micrographs on worn surface of counter material.

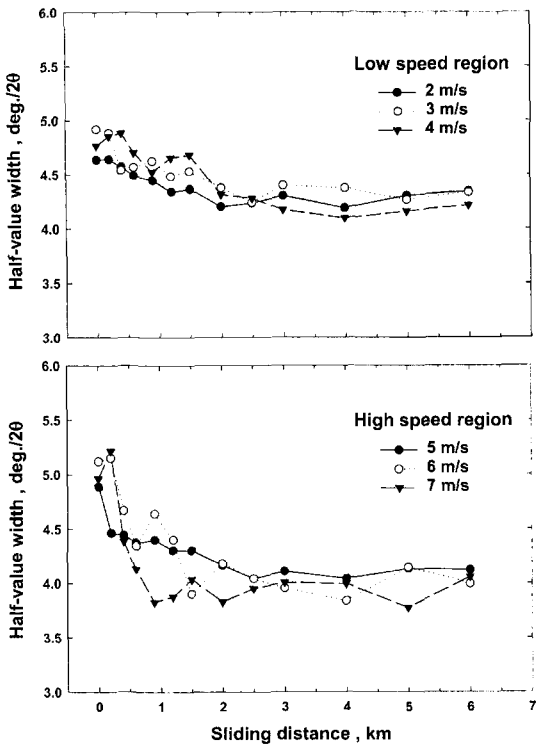


Fig. 6. Variation of half-value width with sliding distance.

알려져 있고 이를 반가폭으로 평가하고 있다[7].

Fig. 6는 전술한대로 마모형태가 5 m/sec 부근을 기점으로 상이한 것으로 밝혀져 시험속도를 저속영역(2~4 m/sec)과 고속영역(5~7 m/sec)으로 구분하여 마찰거리에 따른 회절선 반가폭의 변화를 나타낸 것이다. 그림에서도 보듯이 고경도강의 반가폭은 지난 저경도강의 경우[2]와 달리 시험전 상당히 큰 값을 보이고 미끄럼 거리가 증대함에 따라 오히려 감소하고 있음을 알 수 있다. 이러한 경향은 고경도강의 미끄럼마모에 의한 조직변화가 시험전 열처리 및 연마가공 등에 의해 조직내에 고밀도의 dislocation이 random한 상태로 존재하고 있으나 미끄럼거리 증대에 따라 이들이 이동되어 소실되는 등 마모면의 미세조직의 변화가 일어난다는 사실을 시사하고 있다. 그러나 소정의 거리이후의 이들 변화는 저경도강[2]의 산화마모시의 경우와 동일하게 어느 것도 일정해지는 것으로 밝혀져, 고경도강의 경우도 정상마모영역에서는 소정의 cell조직이 형성되는 것으로 추측할 수 있다. 일반적으로 가공재에서 cell조직이 형성되기 위해서는 소정의 가공율을 필요로 하고 그 cell조직의 크기는 가공율의 정도에 영향

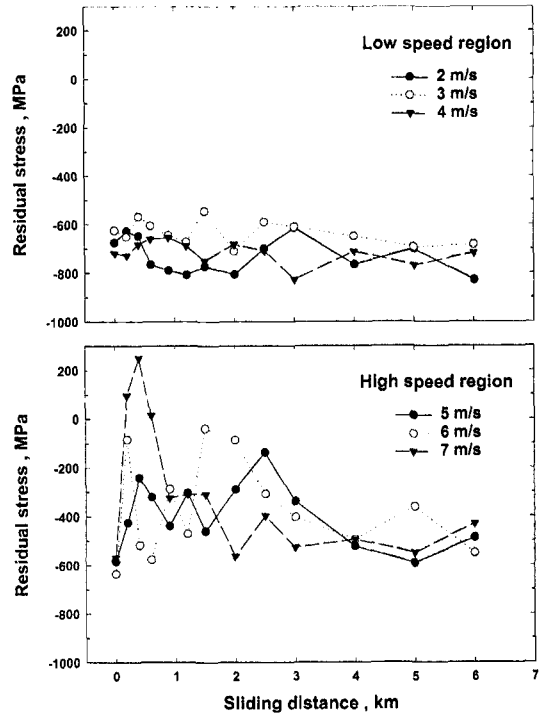


Fig. 7. Variation of residual stress with sliding distance.

을 받는 것으로 알려져 있다[8]. 이러한 측면에서 지난 보고[2]와 마찬가지로 cell조직의 크기를 반영하는 반가폭의 크기는 마모율에 영향을 받을 것이 분명하다. 이것은 그림에서 각 속도에서의 반가폭이 일정해지는 거리가 저속보다 초기마모율이 큰 고속영역의 경우가 짧고, 고속영역에서도 전반적으로 속도가 빨라짐에 따라 그 거리가 짧아진다는 사실에서 예측할 수 있다.

Fig. 7은 반가폭과 마찬가지로 미끄럼거리에 따른 마모면의 잔류응력의 변화를 저속영역과 고속영역으로 구분하여 나타낸 것이다. 그림에서도 보듯이 시험전후에 커다란 압축잔류응력을 가지고 있으나[9] 미끄럼 거리에 따른 그 변화양상은 속도영역에 따라 상이함을 알 수 있다. 저속영역에서는 현저한 변화가 없을 뿐만 아니라 속도에 따른 변화양상의 차이도 거의 없음을 알 수 있다. 이것은 전술한대로 저속영역에서는 응착마모로 진행되어 산화물의 존재로 마모율이 적고 점진적으로 증가하기 때문으로 생각된다. 그러나 초기마모가 큰 고속영역에서는 어느 것도 감소를 보인 후 미끄럼 거리에 따라 증대한 후 일정해지고 있다. 이들은 전반적으로 미끄럼 속도가 빨라질수록 감소폭도 커지고 최대 감소하는 거리도 짧아지는 경향이나 특히 속도

가 가장 빨랐던 7 m/sec의 경우는 초기에 인장의 잔류 응력이 생성될 정도의 현저한 변화를 하고 있음을 알 수 있다. 이러한 경향은 전술한대로 이들 마모면에는 초기의 마모에 의해 Fe₂O₃ 및 Fe₃O₄계의 산화물이 생성되나 온도상승이 커서 모재의 강도가 현저히 저하하므로 탈락하여 마모가 abrasive적으로 진행하기 때문인 것으로 추정된다. 그러나 잔류응력이 최대로 감소한 거리부근에서는 반가폭의 변화는 이미 일정해지는 단계 (Fig. 6)인 것으로 미루어 마모면에는 이미 상당량의 FeO계 고온 산화물이 생성되어 이후는 점진적으로 마모율에 상응되는 응력상태로 전환되는 것으로 생각되어 진다. 이러한 측면에서 마모 초기단계에서 관찰되는 응력의 감소는 충분한 고온 산화물이 생성되기 전 마모면의 소성변형과 관계됨이 분명하다. 이러한 측면에서 미끄럼 속도가 빨라질수록 온도상승이 크므로 변형량이 커서 응력 감소폭이 커지나 산화물 생성속도가 빨라지므로 정상상태로 되는 거리도 짧아지는 것으로 생각된다.

3-3. X선회절결과와 마모율

지난보고[2]에서는 미끄럼 속도에 따른 마모면상의 반가폭과 잔류응력의 변화로 마모에 대한 속도특성곡선을 유추할 수 있었으나 잔류응력의 경우는 측정방향에 따라 값이 변화하여 반가폭이 유용한 파라미터인 것으로 확인되었다. 본 연구에서도 잔류응력의 경우는 온도상승이 현저한 고속영역에서 마모의 속도특성곡선의 경향과 무관하게 감소하는 것으로 밝혀져, 마모면의 응력상황에는 마찰열에 의한 응력 해방이 가산되는 것으로 밝혀졌다. 그러나 dislocation은 열평형적으로 존재하는 결함이 아니라는 점을 생각하면 마모면의 반가폭의 크기는 미끄럼 속도와 관계없이 마모율과 상관관계를 나타낼 것이 분명하다.

Fig. 8은 정상마모영역에서 일정해지는 반가폭 값을 미끄럼 속도별로 비교한 것이다. 그림에서도 보듯이 전술한 마모에 대한 속도특성곡선(Fig. 2, 정상마모영역)과 비교할 경우, 이들의 변화는 4~5 m/sec사이의 변곡점유무를 제외하면 유사한 형태인 것을 알 수 있다. 고경도강에서 변곡점이 나타나지 않은 것은 저속도에서는 응착마모가 우선적이나 고속에서는 abrasive적으로 마모가 진행하게 되어 마모형태가 바뀌었기 때문으로 생각된다.

Fig. 9는 마모면의 일정해지는 반가폭과 마모율과의 상관관계를 나타낸 것이다. 그림에서 좌측의 3점이 고

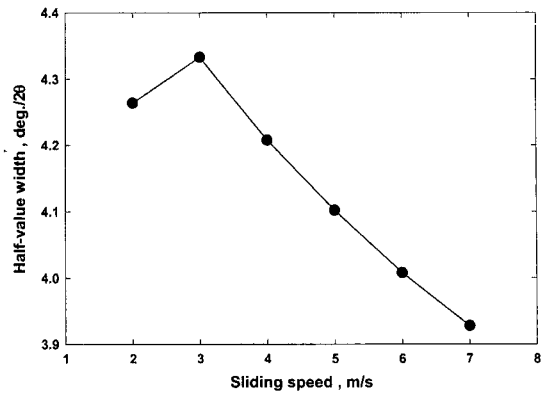


Fig. 8. Variation of half-value width on worn surface with sliding speed.

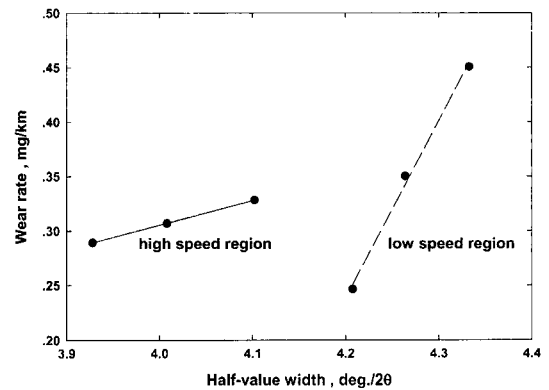


Fig. 9. Relationship between wear rate and half-value width.

속영역, 우측의 3점이 저속영역에 해당되나 이들 경향은 마모율이 클수록 마모면의 반가폭이 증대하는 경향이나 마모형태에 따라 상이한 비례관계를 가짐을 알 수 있다. 이러한 결과는 지난보고[2]에서 산화마모와 기계적파괴마모간의 마모형태가 바뀌면 비례상수가 변한다는 사실과 일치한다.

이러한 측면에서 고경도강에서도 마모면의 반가폭과 마모율과는 상관관계가 성립하고 이를 이용하면 X선 회절에 의해 마모면을 해석할 수 있음이 분명하다.

4. 결 론

고경도강을 이용하여 거리 및 속도에 따른 재료의 미끄럼 마모특성과 마모면상의 X선적 strain인 반가폭과 잔류응력과의 상관관계를 고찰한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 고경도강의 마모형태는 산화마모가 우선적이나 고속영역에서는 산화물에 의해 abrasive 적으로 마모가 진행하였다. 그러나 어느 속도에서도 마찰거리에 따른 X선회절에 의한 마모면의 반가폭 및 잔류응력의 변화는 소정의 거리이후에 일정한 값을 나타낸다.

2) 속도에 따른 마모면상의 반가폭의 변화는 마모형태가 상이한 저속영역과 고속영역에서 각각 마모의 속도특성곡선과 유사하였다.

3) 고경도강 마모면의 반가폭의 크기는 마모율과 상관관계를 가지며 마모형태가 바뀌면 비례상수가 변화하는 것으로 밝혀졌다.

참고 문헌

1. 笹田 直, "摩耗試験法と摩耗法則," 日本潤滑學會 第5回 磨耗シンポジウム講演要旨集, pp.21-30, 1973.
2. H.Y. Lee, "Analysis of sliding wear mode on

annealed steel by X-ray diffraction technique," submitted by Wear and in printing (reference No. WEA9809).

3. 日本材料學會, "X線應力測定法標準," 1982.
4. 이한영, "X선응력측정의 고정도화를 위한 회절선의 해석방법에 대한 연구," 계명대학교 산업기술연구소 논문보고집, 20, 1, pp.161-169, 1997.
5. 이한영, 배종수, 김용진, "분말고속도공구강의 마찰 마모특성에 미치는 Co의 영향," 한국윤활학회지, 15, 2, pp.156-163, 1999.
6. K.H. Zum Gahr, "Microstructure and wear of materials," Elsevier, New York, pp.378, 1987.
7. K. Nakajima, "Metallurgical approach to friction and wear," J. JSLE, 30, 5, pp.306-311, 1985.
8. G.E. Dieter, "Mechanical Metallurgy," McGraw-Hill, pp.299, 1986.
9. 佐佐木敏美, 山田俊宏, 波多野和好, "焼入れした0.4%C鋼の乾燥摩擦で生じた摩擦面應力について," 日本金屬學會, 38, 7, pp.599-603, 1974.