

## X선회절에 의한 분말 고속도공구강의 구름접촉피로 해석

Analysis of Rolling Contact Fatigue for PM-High Speed Steel by X-ray Diffraction

이한영, 노정균, 배종수\*, 김용진\*

계명대학교 재료공학과, \*한국기계연구원 재료공정연구부

**ABSTRACT** Recently, PM-high speed steel(PM-HSS) has reportedly been a good alternative material for rolling mill because of its superior performance to conventional HSS. This paper has been aimed to investigate the possibility for application to rolling contact element for PM-HSS by X-ray diffraction technique.

The X-ray elastic constant for PM-HSS has been found by X-ray diffraction during the four-point bending test. Residual stress and half-value breadth on the contact surface during rolling contact fatigue process by X-ray diffraction have also been measured.

The result of this study shows that the application of X-ray diffraction technique to PM-HSS could be as possible alternative material as conventional HSS. Half-value breadth on rolling contact surface by X-ray diffraction is not changed during rolling contact fatigue process. On the other hand, the residual stress is changed. This suggests that dislocation reaction has been hardly occurred in rolling contact, depending on supersaturated carbon in PM-HSS.

### 1. 서 론

고속도공구강은 W, Mo, Cr, V, Co, 등의 합금원소를 다량으로 함유한 고급합금강으로 고온에서 소입한 후 고온tempering을 행하면 다량의 미세한 탄화물이 석출하여 고경도이면서 우수한 고온내구성을 나타내므로 기존의 고Cr주철 압연roll의 대체재료로써 주목을 받고 있다<sup>1)</sup>. 그러나 현재 이들 고속도공구강은 대부분 주조법으로 제조되고 있으나 탄화물의 성장제어가 곤란하여 열처리가 어려운 소재로도 알려져 있다. 그러나 최근 분말법에 의해 제조된 고속도공구강은 이러한 문제점 해결은 물론 동일한 조성이라도 주조법에 의한 것보다 기계적 성질도 우수<sup>2)</sup>하여 고성능 압연 Roll의 소재로의 가능성<sup>3)</sup>을 예견하고 있다.

실제 압연 roll은 영구히 사용할 수 있는 것이 아니다. 사용중 구름접촉 피로축적으로 표면에 여러 형태의 손상이 발생하기 때문이다. 만일 사용중 표면손상이 발생하면 인명

및 생산공정상에 많은 차질이 생기므로 일정한 기간 사용후에 교체 또는 교정을 하고 있다. 이러한 측면에서 장수명을 위한 압연roll의 소재개발뿐만 아니고 수명예측에 대한 연구<sup>4)5)</sup>도 다방면에서 이루어 지고 있다.

현재 이와 관련하여 적용되는 X선회절기술은 압연 roll뿐만 아니라 동일한 구름마찰을 하는 베어링이나 치차 등의 성능개선 및 수명예측에 널리 적용되고 있는 기술중 하나이다.<sup>4)5)</sup>

이러한 측면에서 본 연구에서는 이러한 X선회절기술을 이용하여 분말법으로 제조한 고속도공구강의 구름접촉피로과정을 해석하므로써 구름접촉부재에의 적용가능성을 검토하였다. 그래서 우선 분말고속도공구강의 X선적응력정수를 산출하여 응력축정의 가능성을 타진한 후 분말고속도공구강의 구름접촉피로 과정상의 구름접촉면의 거시적 strain인 잔류응력변화 및 미시적 strain인 반가폭의 변화를 조사하였다.

## 2. 실험방법

### 2-1 시험편

본 연구에서는 Table 1에 나타낸 조성의 합금분말을 진공소결 및 용해후 gas atomizer에 의해 제조하였다. 그리고 이 합금분말을 canning, hiping, swaging 등의 공정을 거쳐 소정의 분말고속도공구강의 환봉으로 추출하였다<sup>6)</sup>.

X선적 응력정수 산출을 위한 4점굽힘시험<sup>7)</sup>은  $\phi 34$ 의 환봉중심부근에서  $110 \times 30 \times 3$ mm의 크기로 추출하였다. 그리고 주조재의 고속도공구강과 비교를 위해 시판되는 SKH51의 환봉에서도 동일한 크기의 시험편도 추출하고 각각 열처리전·후의 응력정수를 구하였다. 열처리시험편은 주조재 및 분말재 공히  $1175^\circ\text{C}$ 에서(14분간 유지) 소입하는 공정을 거친 후  $560^\circ\text{C}$ 에서 1시간 열처리를 하는 tempering처리를 3차례 반복하였다.

구름마찰시험편은  $\phi 50$ 의 환봉에서  $\phi 44$ 의 소정의 원통형 시험편으로 가공하여 전술한 4점굽힘시험편과 동일한 열처리를 행하였다. 그리고 일부 시험편에 대해서는 하부조직의 성상변화를 부여하기 위해 tempering전  $-196^\circ\text{C}$ 에서 1시간 subzero처리(이하 SZ처리)를 한 시험편도 제작하였다.

이때 상대재로는 시판되는 냉간 금형용 합금공구강인 SKD11을  $\phi 76$ 의 원통형의 시험편으로 가공한 후  $1010^\circ\text{C}$ 에서 20분 유지 후 소입한 후  $460^\circ\text{C}$ 에서 1시간 처리하는 tempering처리를 2차례 반복하였다. 시험전 상대재의 경도는 HRC 57.8정도인 것으로 밝혀 졌다.

Table 1 Composition of testpiece

C	Si	Mn	Cr	Mo	W	V	Co
1.29	0.36	0.33	4.35	4.76	6.42	2.86	0.026

### 2-2 X선적 응력정수 산출시험

분말 고속도공구강의 X선적 응력정수산출은 4점굽힘시험기<sup>7)8)</sup>를 사용하였다.

이때 각 시험편중앙 배면에는 strain gage를

부착한 후 일반적으로 알려진 철강재료의 탄성정수인 210GPa로 가정하고 부가하중을 산출하였다. 이때 부가응력의 범위는 최대  $156.8\text{MPa}$ <sup>8)</sup>로 하고 5단계( $0 \rightarrow 39.2\text{MPa} \rightarrow 78.4\text{MPa} \rightarrow 117.6\text{MPa} \rightarrow 156.8\text{MPa}$ )로 차례로 부가하였다.

그리고 각 소정의 응력이 부가된 상태에서 중심부에 대해 각각 X선회절시험을 행하였다.

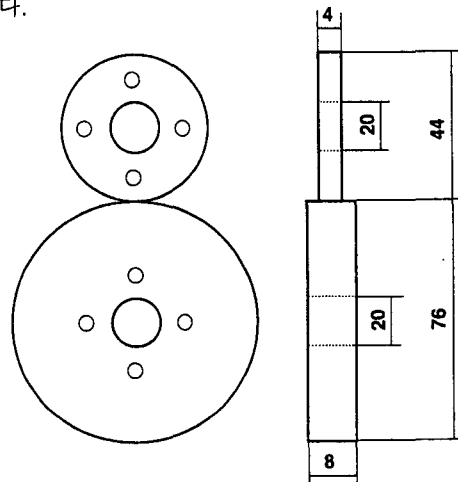


Fig.1 Confuguration of testpiece and opponent

### 2-3 구름마찰시험

Fig. 1은 구름 마찰시험의 시험편상 및 접촉상황을 나타낸 것이다.

하중은 지렛대를 사용하여 시험축에 dead weight로 147N을 가하면 면압(Pmax)이  $707.6\text{MPa}$ 이 되는 조건을 선정하였고 상대재 하부에 윤활유조를 설치, 상대재의 회전에 의해 윤활유를 공급하는 방식을 취했다. 이때 윤활유는 VG46를 사용하였고 상대재의 회전속도는 500rpm으로 하였다. 따라서 시험반경과 기어비에 따른 상대재 및 시험편의 접촉부에서의 선속도를 환산하면 각각  $1.9893\text{m/sec}$ ,  $1.1315\text{m/sec}$ 정도가 얻어져 미끄럼율이 43.1%정도임을 알 수 있다.

그리고 구름마찰시험은 최종 회전수를  $2 \times 10^6$  회전으로 하고 소정의 회전수마다 구름 접촉면에 대해 X선회절시험을 하였다.

## 2-4 X선회절시험

X선회절시험은 CrK $\alpha$  선을 이용하여  $\alpha$  Fe (211)면을 측정하였다.

Table 2 Conditions of X-ray diffraction

	Elastic Constant	RCF test
Tube of X-ray	CrK $\alpha$	
Diffraction plane	$\alpha$ Fe(211)	
Current and voltage	30kV,30mA	
Irradiation area	2 $\times$ 2 mm <sup>2</sup>	
Time constant	4 sec	
Filter	V	
Scan speed	1' /min	
Angle of $\varphi$ and $\psi$	$\varphi = 0^\circ$ $\psi_0 = 0^\circ, 10^\circ, 15^\circ,$ 20 $^\circ, 30^\circ, 35^\circ, 45^\circ$	$\varphi = 0^\circ, 180^\circ$ $\psi_0 = 0^\circ, 15^\circ, 30^\circ,$ 40 $^\circ$

이때의 모든 측정조건은 X선응력측정표준<sup>7)</sup>에 준해 설정하고 이들을 Table.2에 나타내었다.

4점 굽힘시험편에 대한 X선회절은 시료면의 법선과 입사beam과의 각도인  $\psi_0$ 를 0 $^\circ$ , 10 $^\circ$ , 15 $^\circ$ , 20 $^\circ$ , 30 $^\circ$ , 35 $^\circ$ , 45 $^\circ$ 의 7방향으로 하였으나 구름마찰면의 응력측정은 0 $^\circ$ , 15 $^\circ$ , 30 $^\circ$ , 40 $^\circ$ 의 4방향에서 측정하였다. 이때 미세 strain을 반영하는 회절선의 반가폭은  $\psi_0=0^\circ$ 를 2차례 측정하여 이들의 평균값을 사용하였다.

그리고 모든 측정은 병경법으로  $\psi_0$  일정법을 채용하여 측정한 후 응력값의 산출은  $\sin^2\psi$  법으로 계산<sup>7)</sup>하였다. 이때 잔류응력값은 일반적으로 구름접촉시 관찰되는 split현상<sup>9)</sup>을 고려하여 구름방향과 반구름방향의 응력을 각각 측정한 후 이들값의 평균값으로 사용하였다.

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3-1 분말 고속도공구강의 X선적 응력정수

Fig.2는 분말고속도공구강의 열처리전의 시편에 대해 각 굽힘 부가응력에서 얻어진  $\sin^2\psi$  선도의 일례를 나타낸 것이다. 그림에서도 알 수 있듯이 어느 것도 무하중시는 가공에 의해 압축의 잔류응력을 나타내

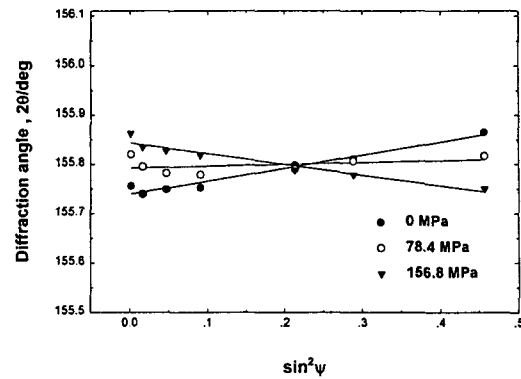


Fig. 2  $\sin^2\psi$  diagram of PM-HSS (before HT)

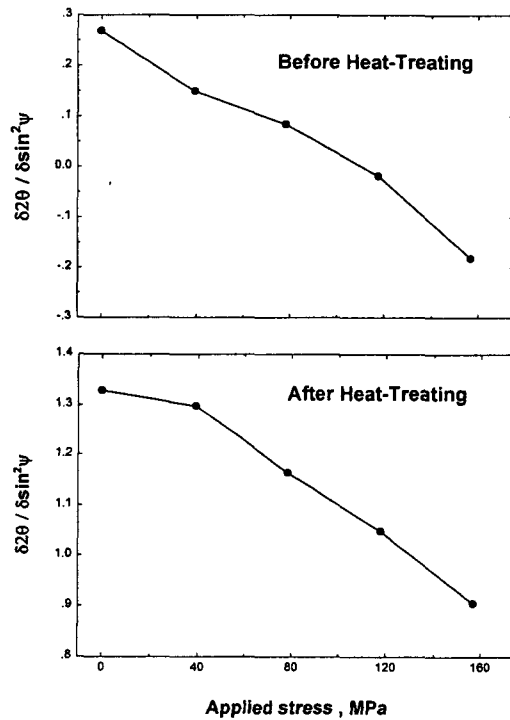


Fig.3 Applied stress vs  $\delta 2\theta / \delta \sin^2\psi$  (PM-HSS)

고 있으나 굽힘하중에 의한 인장력이 증대함에 따라 인장의 잔류응력쪽으로 변화하고 있음을 알 수 있다. 이러한 부가하중에 대한 기울기의 변화정도는 열처리후의 시편 및 주조재의 경우도 거의 유사하였다.

Fig.3는 분말고속도공구강의 각 부가응력에서의  $\sin^2\psi$  선도의 기울기를 비교한 것이나 각각 양호한 직선관계가 성립됨을 알 수 있다. 이러한 측면에서 X선을 이용한 분말고속도공구강의 응력측정은 가능하다는 것을 알

수 있다.

Table 3은 이러한 관계에서 산출된 X선적 응력정수를 비교한 것이다.

Table 3 X-ray elastic constant (MPa)

	Before HT	After HT
SKH51	-388.6 (-367.5~-409.6)	-377.3 (-357.7~-369.9)
PM-HSS	-383.2 (-345.9~-420.8)	-385.1 (-348.9~-421.4)

표에서 보듯이 분말고속도공구강의 X선적 응력정수는 열처리유무와 관계없고 일반 주조재와 동일하게 -380MPa정도인 것을 알 수 있다.

그러나 X선응력정수는 일반적으로 합금조성이나 일반 고속도공구강을 포함하는 대부분의 ferrite계 철강재료의 X선적 응력정수로는 -318MPa이 사용<sup>7)</sup>되고 있음을 감안하고 구름접촉피로해석시는 주로 상대비교를 행하는 것을 고려할 때 분말고속도공구강의 경우도 이러한 표준값 사용이 적절한 것으로 생각된다.

### 3-2 분말 고속도공구강의 X선회절에 의한 구름마찰특성 해석

일반적으로 구름접촉피로 손상축적에 따른 접촉면의 잔류응력 및 반가폭의 변화는 회전수에 대해 각각 극대극소변화를 하고<sup>10)11)</sup> 재료에 따라 정해지는 일정값을 보인 후 수명(pitting발생)에 도달하는 것<sup>11)</sup>으로 알려져 있다.

Fig.4는 분말 고속도공구강의 회전수에 따른 구름접촉면의 잔류응력의 변화를 나타내고 있다. 시험전의 잔류응력은 SZ처리 유무에 따라 다소 차이는 있으나 약 120MPa정도의 압축의 잔류응력을 가지고 회전수가 증대함에 따라 압축쪽으로 더욱 급증을 하고 있음을 알 수 있다. 그러나 급증정도는 SZ 처리한 것이 현저하나 각각 극대치를 보인후

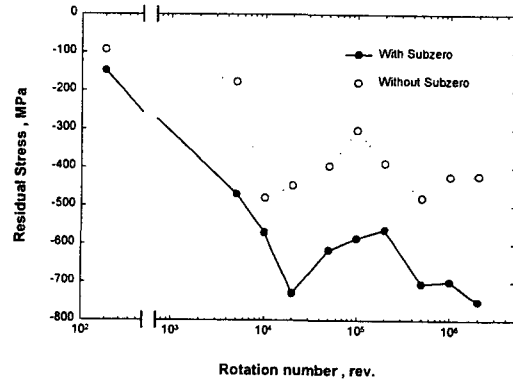


Fig.5 change of residual stress during the rotation number

감소하고 다시 증가하는 소위 극대극소현상을 보이며 진행되고 있음을 알 수 있다.

이와같이 분말고속도공구강의 경우도 일반적인 구름접촉피로 진행과정상에서 나타나는 극대극소현상을 보이는 것은 본 연구에는 사용된 분말고속도공구강이 수명에 도달하지는 않았지만 구름접촉피로에 의한 손상축적이 진행되고 있음을 시사하고 있는 것으로 추정된다. 즉 SZ처리유무에 따라 시기는 다소 상이하지만 극대를 보인 뒤 감소하는 것으로 미루어 응력해방과 관련된 결정립 크기의 미세한 균열이 생성, 전파하는 것으로 생각되고 이후 다시 증대하는 것은 미세균열의 전파가 정체되고 다시 손상축적과정에 들어섰음을 나타내고 있는 현상<sup>10)11)</sup>일 것이다.

그러나 SZ처리유무에 따라 절대값의 차이를 보이는 것은 SZ처리에 따른 미세조직의 차츰 모재속의 탄화물의 양 및 고용탄소의 정도에 기인하는 것으로 추정된다.

Fig.5은 회전수에 따른 구름접촉면의 반가폭의 변화를 나타내고 있다.

이러한 반가폭은 일반적으로 dislocation의 밀도나 하부조직(cell조직)의 크기를 반영하는 것으로 알려져 있다. 이러한 측면에서 고경도재의 경우는 열처리에 의해 시험전 dislocation밀도가 높으므로 일반적으로 구름접촉에 의해 dislocation반응이 일어나 반가폭이 감소<sup>3)4)12)</sup>를 한 후 소정의 하부조직을 생성하는 것<sup>11)</sup>으로 알려져 있다. 그러나 Fig. 5에서

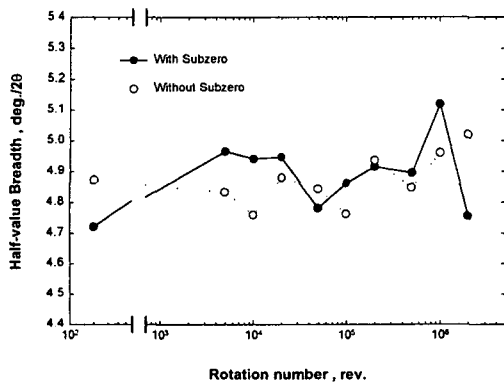


Fig.5 change of half-value breadth during the rotation number

보듯이 열처리에 의해 회절선의 폭이 넓어 다소 편차는 있으나 거의 변화가 없다는 것을 알 수 있다. 이러한 측면에서 분말고속도 공구강의 경우는 구름접촉피로과정에서 dislocation반응이 전혀 발생하지 않음을 예측할 수 있다.

결국 분말고속도공구강의 구름마찰특성은 dislocation반응이 거의 발생하지 않아 pitting과 같은 표면손상의 발생이 용이하지 않으나 거시적인 응력상황은 충분하여 일단 소정의 크기의 균열이 형성되면 전파는 용이할 것으로 추정된다. 이러한 결과는 분말고속도공구강의 특징적인 미세조직이 구름마찰에 의한 dislocation반응을 어렵게 하기 때문으로 생각된다.

일반적으로 고속도공구강의 우수한 성능은 열처리에 의해 석출되는 미세한 탄화물에 의한 것으로 알려진다. 이들의 미세 탄화물량은 열처리조건에 주로 의존하나 사실 이들 탄화물의 정도에 의해 모재속의 고용탄소량도 변화하게 된다.

Table 3은 본 연구에 사용한 시편을 CrKa선을 이용,  $\psi$ 일정법으로 (211)면을 측정하고 얻어진 회절선을 해석한 결과를 나타낸 것이나 열처리전에는 철강재료의 이론적인 (211)의 면간거리와 거의 유사하고 반가폭도 아주 적다는 것을 알 수 있다.

일반적으로 분말고속도공구강을 소입하면 과

Table 3 Result of X-ray diffraction

	Diffraction Angle (2θ)	Distance of Plane (Å)	Half-value Breadth (2θ)	Integral Intensity (cps)	Hardness (H <sub>v</sub> C)
Before	155.836	1.1714	2.612	67,800	-
Q→T	154.270	1.1750	5.076	52,400	65.7
Q→SZ→T	153.825	1.1760	5.236	44,500	65.8

포화martensite와 잔류austenite의 혼합조직이 형성되나 이후의 tempering시에 과포화 martensite를 tempered martensite로 치환하고 잔류austenite를 분해시켜 조직 및 기계적 성질의 안정화를 꾀하고 있다. 이때 SZ처리하는 tempering전에 잔류austenite는 완전히 분해시키는 공정이나 사실 without SZ의 경우도 3회 행하는 tempering시에 잔류austenite의 분해는 완전히 이루어진다. 그러나 이때의 분해는 서서히 진행하므로 결국 SZ처리유무는 과포화martensite의 열이력에만 영향을 미칠 것이 분명하다.

표에서 보듯이 열처리후의 적분강도가 열처리전에 비해 감소하여 2차 탄화물의 석출이 일어났음을 예견할 수 있으나 특히 with SZ의 경우는 현저한 적분강도의 감소를 보여 탄화물석출이 더욱 많은 것으로 추정된다. 그런데 면간거리는 열처리전에 비해 현저히 증대하였으나 특히 with SZ의 경우는 아주 크다는 것을 알 수 있다. 이와같은 사실은 고용탄소(free carbon 또는 미세탄화물 형태)가 충분한 열이력에 의해 격자중에 확산되어 왔음을 시사하는 결과로 추정된다. 결국 martensite조직에는 다량의 dislocation 및 twin을 가지고 있다는 사실을 감안하면 tempering시 과포화 martensite에서 tempered mastensite로 되면서 고용탄소는 2차탄화물도 생성하지만 이들 dislocation과 같은 결함부위로의 확산되었음이 분명하다. 이러한 사실은 이러한 현상은 열이력을 충분히 받으면 촉진될 것이 분명하므로 열이력이 충분하였던 with SZ시에 격자상수 및 반가폭이 크다는 사실에서 추측할 수 있다.

결국 분말고속도공구강의 구름마찰시 회전수

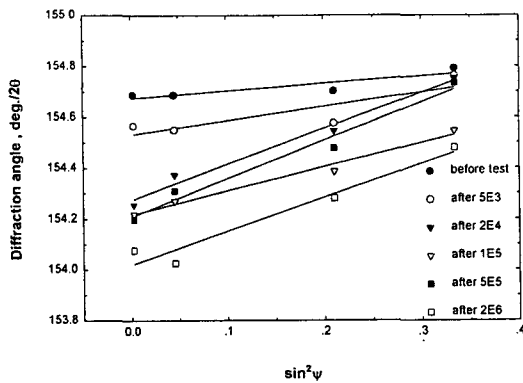


Fig. 6 change of  $\sin^2\psi$  diagram during the rolling contact fatigue

에 따라 반가폭의 변화가 거의 없었던 것은 고용탄소의 dislocation고착 작용에 의해 dislocation반응이 늦어지기 때문으로 추정된다.

이러한 고용탄소의 확산은 소성변형중에 촉진되는 것으로 알려져 구름마찰과정중에도 발생하고 있음이 확인되었다. Fig. 6은 SZ처리하지 않는 시편의 구름마찰회전수에 따른  $\sin^2\psi$  선도를 나타내고 있으나 회전수가 증대함에 따라 회절각이 감소하여 격자상수가 증대하고 있다는 것을 알 수 있다. 이러한 경향은 고용탄소가 많은 잔류austenite의 구름마찰시의 변화와 유사하다는 것<sup>8)</sup>을 알 수 있다.

#### 4. 결론

분말 고속도공구강의 구름마찰에 대한 성능 해석에 X선회절기술의 적용가능성을 조사하기 위하여 X선적 응력정수를 산출하고 그 결과를 구름접촉피로시험시에 적용한 결과 다음과 같은 결과가 얻어졌다.

- 1) 분말고속도공구강의 X선회절기술에 의한 응력측정이 가능할 뿐만 아니라 이때 사용되는 X선적 응력정수값도 주조재와 동일한 것으로 밝혀졌다.
- 2) X선회절에 의해 분말고속도공구강의 구름마찰과정을 조사한 결과 잔류응력은 극대 극소현상이 관찰되어 구름접촉피로에 따른

손상축적이 진행되는 응력상태를 보였으나 반가폭은 거의 변화가 없어 구름접촉에 따른 dislocation반응이 거의 없는 것으로 밝혀졌다.

3) 이러한 원인으로는 모재속의 고용탄소에 의한 Dislocation의 고착작용에 의한 것으로 밝혀졌다.

이상의 결과 분말고속도공구강의 구름마찰부재에 적용 가능성은 높은 것으로 밝혀졌다.

#### 5. 참고문헌

- 1) K.Goto, Y.Matsuda, K.Sakamoto, Y.Sugimoto : ISIJ inter, 32, 11,(1992)1184
- 2) 宮川大海 : "鉄鋼材料学", 朝倉書店, 日本,(1982)189
- 3) X線材料強度部門委員会塑性と破壊分科会 : 材料 28(1979)847
- 4) 武智 弘, 難波和郎, 川崎宏一, 藤原圭三 : 鉄と鋼, 65, 14.(1979)2067
- 5) K.Ishii, T.Hayasaka, E.Endoh, T.Abe, Y.Kamitsuma : Metal Powder Report, 6(1986)533
- 6) 이한영, 배중수, 김용진 : 윤활학회지, 15, 2(1999)156
- 7) 日本材料学会 : "X線応力測定法標準", (1982)
- 8) 이한영 : 대한금속학회지, 34, 2, (1996) 150
- 9) 室 博 : 潤滑, 23, 11(1978)828
- 10) 藤田公明, 吉田 彰, 山本敏夫 : 潤滑, 21, 4(1976)256
- 11) 李 漢瑛, 川本 信 : トライボロジスト, 34, 11(1989)815
- 12) 예를들어 広田忠雄, 清水建一 : 不二越技報, 43, 2(1987)43
- 13) 木村達己, 石井正武, 岡 裕, 中野昭三郎 : 材料とプロセス, 4, 2(1991)466
- 14) 日本材料学会 : "X線応力測定法", 養賢堂 (1981)163