

X선회절에 의한 베어링강의 경도측정에 대한 고찰

이 한 영[†]

계명대학교 재료공학과

Discussion on Hardness Measuring of Bearing Steel by X-ray Diffraction

Han-Young Lee[†]

Department of Materials Engineering, keimyung University, Daegu, Korea

Abstract – The half-value breadth of X-ray diffraction profile line is generally used for a factor in nondestructive hardness measuring method of steel. In this paper, the problem in using the half-value breadth for the hardness measuring method is evaluated in strain hardened steel. And new hardness measuring method using residual stress is proposed X-ray diffraction test after rolling contact fatigue test of ball bearing with inner race of various hardness are carried out to measure the distribution of residual stress and half-value breadth from surface. The result of this study shows that there is little correlation between half-value breadth and hardness in the higher strength region and in the region increasing the hardness by strain hardening. But the magnitude of residual stress on/under race after rolling contact fatigue test becomes clearly to be correlative with hardness. Thus, it is concluded that the hardness of strain hardened steel can be estimated by this relationship between residual stress and hardness.

Key word – X-ray diffraction, hardness, half-value breadth, residual stress.

1. 서 론

일반적으로 재료의 경도는 강도학적인 측면에서 아주 중요한 인자중 하나이다. 특히 철강재료의 경우는 열처리를 하거나 침탄 등의 표면처리를 행한 뒤 처리의 적부를 일반적으로 경도측정으로 가능하기 때문에 경도측정은 각종 소재연구 및 생산공정상의 품질확인의 측면에서 필수불가결한 검사분류에 속한다. 그러나 일반적으로 행해지는 경도측정은 강도를 필요로 하는 부위의 표면에 직접 압자를 접촉시키므로 그 주요부에 압흔이 남게 되고 상황에 따라서는 절단을 하여 추출한 그 단면에 대해 행하게 되므로 피측정물이 손상을 입게 되는 단점을 가지고 있다. 그러므로 제품의 품질보증에 따른 전수검사는 불가능하다 할 수 있다. 이러한 의미에서 최근은 피측정물에 손상을 주지 않고 비파괴

적으로 재료의 경도를 측정하려는 연구[1-5]가 다수 시도되어지고 있다.

이들 연구는 대부분이 X선회절기술을 이용해 적용하려는 것[1-5]으로 재료의 경도상승에 따라 X선회절선의 폭이 증가하는 현상에 주목한 것이다. 그러나 아직 범용적으로 적용하기 까지는 다소 시간이 걸릴 것으로 판단되어 진다. 이러한 이유로는 그들의 연구결과가 주로 열처리에 따른 경도와 회절선의 폭과의 관계만을 주목하였기 때문으로 추측되어 진다. 즉 실제 상황에서는 열처리후 각종 가공을 행하므로 외력이 작용하여 재료의 일부분이 소성변형하게 된다. 이와 같이 소성변형을 수반한 재료는 가공경화에 의해 경도상승을 초래하게 되나 이에 대한 해석이 전혀 행해져 있지 않기 때문에 판단되어 진다.

따라서 본 연구에서는 X선회절에 의해 경도측정을 범용화하기 위하여 고탄소 고Cr합금강인 베어링강을 이용해 기존의 경도와 회절선폭과의 관계를 재검토하고 특

[†]주저자 · 책임저자 : lyh@kmu.ac.kr

히 구름접촉에 의한 가공경화에 따른 경도상승 상황도 고려하여 경도를 추정할 수 있는 방안제시를 하였다.

2. 실험방법

본 연구에서는 시판의 고탄소고Cr강인 베어링장 STB2 (C : 0.98 wt%, Cr : 1.38 wt%, Mn : 0.42 wt%, Si : 0.41 wt% 등)의 환봉을 사용하였다.

2-1. 경도와 반가폭과의 관계조사시험

기존의 경도와 회절선의 폭(반가폭)과의 관계를 재검토하기 위하여 어닐링상태의 환봉을 23 mm×9 mm의 원통형시편으로 가공하였다.

이들 시편의 열처리는 경도수준의 변화를 부여하기 위하여 오스테나이트화 처리온도로 830°C, 900°C 및 950°C의 3온도를 취해 질소분위기하의 유동충열처리로 속에서 각각 40분씩 유지한 뒤 70°C의 기름속에 훈칭처리를 하였다. 그뒤 100°C, 200°C, 300°C, 400°C, 500°C 및 600°C에서 각각 2시간씩 텁퍼링하여 각 오스테나이트화온도에서 훈칭처리를 행하지 않은 상태의 것을 포함해 총 21종류의 시편을 작성하였다. 그리고 각 시편의 경도는 microvickers를 이용해 500 g의 하중에서 5회측정하여 이들의 평균값을 사용하였다.

이들 시편에 대한 X선회절은 열처리후 단면을 1200 # 연마지로 연마한 뒤 중앙에서 행하였으며 그 뒤 연마에 따른 변질층형성의 영향을 제거하기 위하여 각각 100 m 정도를 전해연마한 면에 대해서도 재측정하였다. Table 1에는 X선회절시험의 조건을 나타내고 있다.

Table 1. 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° 2θ/min
Angle of φ^* and ψ^{**}	$\varphi = 0^\circ, 90^\circ$ $\psi = 0^\circ, 12^\circ, 27^\circ, 42^\circ, 57^\circ$

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

**angle between the specimen normal and the normal of the diffracting plane.

2-2. 가공경화에 의한 경도평가시험

가공경화에 따른 경도상승을 보기위해서 본 연구에서는 구름접촉시험을 행하였다.

구름접촉시편은 베어링 #6206(ISO규격)의 내륜(내경 30 mm, 폭 16 mm, 궤도면경 37.175 mm, 외경 40.7 mm, 궤도면곡률 4.81 mm)으로 하고 실제 베어링의 제작공정을 거쳐 제작한 뒤 830°C에서 40분 유지한 뒤 70°C의 기름속에 훈칭하였다. 그 뒤 경도의 변화를 주기 위하여 텁퍼링처리를 180°C, 250°C, 350°C 및 440°C의 4온도에서 각각 2시간씩 행한 뒤 궤도면을 마무리 연마하였다. 그뒤 시판의 동일규격 베어링의 외륜(HRC 62.3) 및 ball(HRC 63.1)을 이용해 베어링 완제품을 제작하였다. 이때 시편의 경도(HRC)는 각각 62.8(이하 No.1), 59.9(이하 No.2), 55.2(이하 No.3), 49.1(이하 No.4)정도임이 밝혀졌다.

구름마찰시험은 Fig. 1에 나타낸 일반 베어링성능시험기[6]에서 행하였다. 본 시험기는 일회 시험에 동시에 4종류의 시편을 사용할 수 있으나 본 시험에서는 2종류를 2개씩 격변으로 장착하고 동시에 시험하였다.

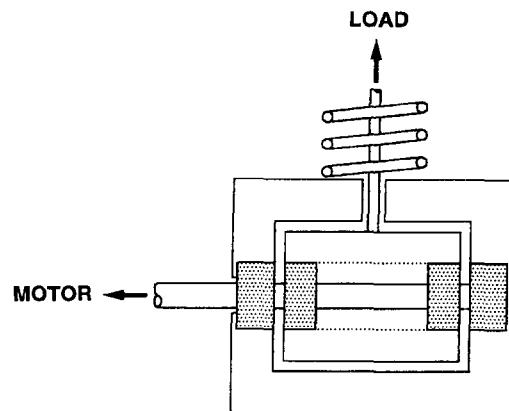


Fig. 1. Schematic diagram of rolling contact fatigue tester for bearing.

Table 2. Conditions of rolling contact fatigue test

Rotation speed	2,000 r.p.m
Load	11.6×10^3 N (60% of BDLR*) 5.8×10^3 N (30% of BDLR*)
Rating life (L_{10})	0.6C test : 38.6 hr 0.3C test : 308.6 hr
Lubricant oil	Turbine oil #68

*BDLR(Calculating Basic Dynamic Load Rating) : 19.4×10^3 N)

이때 시험은 베어링의 기본동정격하중(19.3×10^3 N)의 60%(이하 0.6C시험), 30%(이하 0.3C시험)의 두 하중 수준에서 본 규격의 베어링의 계산수명(0.3C시험; 308.6 hr, 0.6C시험; 38.6 hr)까지를 목표로 행하였다. 그러나 경도가 낮은 No.3의 시편과 No.4의 시편이 0.6C시험 중 각각 31.8 hr, 4.2 hr에서 박리현상이 일어나 이들은 이 시점에서 시험을 중단하였다. Table 2에 구름마찰시험조건을 나타내었다.

X선회절시험은 Table 1과 동일조건에서 행하였으며 궤도면하부의 깊이방향으로의 측정은 궤도면을 순차 전해연마하면서 측정하였다. 또한 본 연구에서의 회절 선폭의 평가는 구름마찰면에 평행한 α -Fe(211)를 측정한 $\Psi=0^\circ$ 때의 회절선의 반가폭으로 하였으며 잔류응력은 $\sin^2\Psi$ 법[7]을 사용하여 계산하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3-1. 경도와 반가폭과의 관계

기존의 경도와 반가폭과의 관계는 KURITA 및 IHARA에 의해 밝혀진 바에 의하면 다음과 같은 식으로 정량화되어 있다[2].

$$H_V = 276(B - 1.89)^{0.468} + 232\sqrt{C} - 37$$

여기서 B 는 반가폭이고 C 는 소재의 탄소함유량을 나타내고 있다.

Fig. 2는 본 연구에서 원통형시편을 X선회절하여 얻어진 반가폭과 경도와의 관계를 나타낸 것이다. 그림 중 실선은 상기식을 나타낸 것이나 그림에서 보듯이 실측치와 대체적으로 잘 일치하고 있다는 것을 알 수

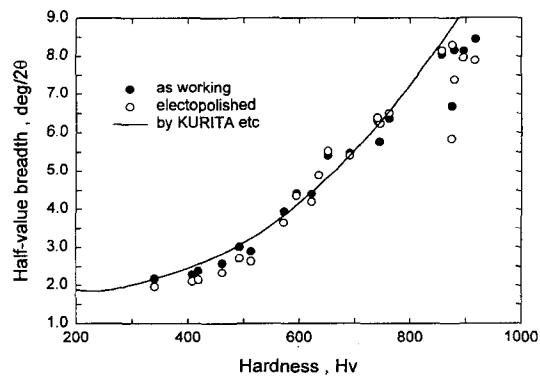


Fig. 2. Variation of half-value breadth on surface with hardness after heat treatment.

있다. 그러나 고경도측에서는 그들 실험식에서 다소 벗어나는 경향임을 알 수 있다. 이것은 그곳의 회절선의 폭이 넓어 계산의 오차가 커진 이유로도 생각할 수 있으나 어느 한계이상의 경도에서는 그들 관계가 성립하지 않는다는 것을 시사 하는 결과로 생각되어 진다.

또한 그림상에는 중간경도(H,600~800)의 경우는 전해연마전후의 반가폭상에는 큰 차이가 보이지 않으나 그외의 경도에서는 전반적으로 표면을 전해연마하기 전 즉 strain이 존재한 상태에서는 다소 적은 값을 나타내는 경향으로 이 현상은 고경도측에서 더욱 현저하다는 것을 알 수 있다.

3-2. 구름마찰후의 궤도면의 X선회절시험 결과

일반적으로 재료의 경도는 잔류응력과 밀접한 관계가 있는 것으로 알려지고 있다[8].

Fig. 3는 0.3C시험 및 0.6C시험 후 궤도면하부 깊이 방향으로의 잔류응력분포를 나타낸 것이다. 그림에서도 알 수 있듯이 표면상에서의 잔류응력은 시험하중에 관계없이 경도가 클수록 압축쪽으로 큰 값을 보이고 있으나 내부에서는 그와 반대로 경도가 적을수록 넓게

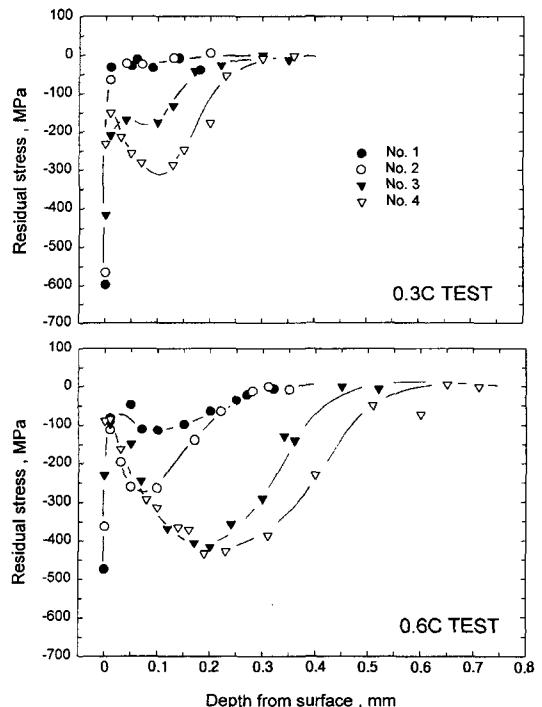


Fig. 3. Distribution of residual stress below contact surface after test.

존재하고 압축의 극대값도 커지는 것으로 밝혀졌다.

재료를 완전 훈칭하면 표면이나 내부의 잔류응력발생은 거의 없다. 그러나 시험전에 미무리가공에 의해 최표면에서 수 micron정도까지 가공의 영향층이 존재하나 이들은 표면조도를 고려하고 구름마찰초기에 재분포될 것임을 고려한다면 시험후 내부의 이러한 잔류응력발생은 순수하게 구름마찰에 의해 생성된 것으로 생각할 수 있다.

일반적으로 잔류응력은 구속력에 의한 잔류응력(외부적 요인)과 소성변형에 의한 잔류응력(내부적 요인)의 조합으로 일어지며 대부분 불균일소성변형에 의해 생성된다[8]. 구름마찰시는 깊이방향으로 응력분포를 가지며 마찰계수가 1/9이상이면 최대전단응력이 표면에 작용하는 것으로 알려져 있으나 본 시편에 작용하는 마찰계수는 이보다 적을 것[9]으로 예상되어 표면 하부 일정깊이에서 최대전단응력이 작용할 것이다. 그러나 최표면에는 필히 조도에 의한 요철이 존재하므로 이들은 차동slip[9]에 의한 소량의 접선력과 요철의 접촉에 따른 접촉압력상승에 따라 소성변형을 일으키게 된다. 그러나 표면직하는 소성변형을 하지않아 이로인해 표면이 구속되어 압축잔류응력을 보이나 이 압축잔류응력은 재료가 고경도일수록 구속력이 크므로 큰 값을 나타내는 것으로 생각된다. 반면 내부는 실제 구름접촉에 따른 응력분포와 재료경도에 상응하여 소성변형량정도의 차이를 나타내는 것으로 추측되어 진다.

이러한 경향은 고하중시(0.6C시험결과)에 더욱 현저하여 고경도재의 경우도 표면하부에 잔류응력의 극대치가 관찰되는 것으로 미루어 내부에서도 일부 소성변

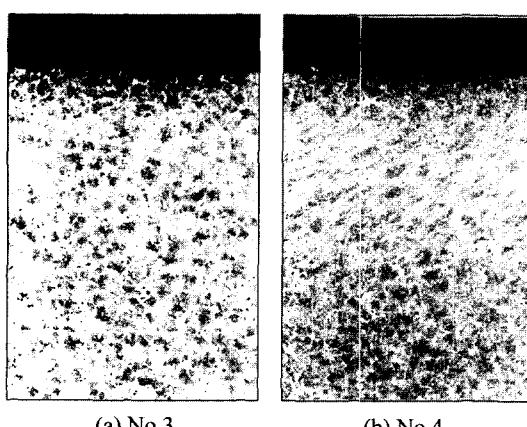


Fig. 4. Micrographs of parallel section to rolling direction after test under 0.6C test (x200).

형이 일어났음을 추측할 수 있다.

Fig. 4는 0.6C시험후 관찰한 No.3 및 No.4의 단면 조직을 나타낸 것이다. No.4의 경우는 내부에 거시적인 소성유동이 관찰되나 No.3은 결정립이 그대로 관찰되어 거의 조직변화가 없다는 것을 알 수 있다. 이러한 사실은 고경도인 No.1, No.2에서도 확인되었다. 이러한 측면에서 고경도재의 소성변형은 결정립단위의 미시적인 소성변형임을 추측할 수 있다.

Fig. 5는 시험전후 깊이방향으로 X선회절하여 조사한 반가폭의 분포를 나타내고 있다.

No.1 및 No.3의 경우는 시험전에 비해 시험후에 최표면 및 최대전단응력이 작용하는 깊이부근에서 크게

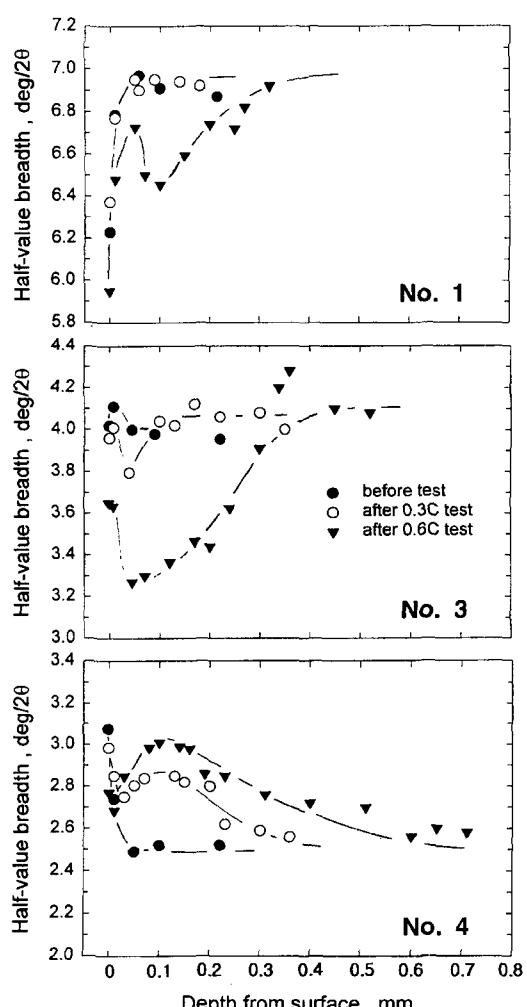


Fig. 5. Distribution of half-value breadth below surface before/after test.

감소하고 있으나 거시적 소성변형이 발생한 No.4의 경우는 시험후에 최대전단응력이 작용하는 깊이부근에서 오히려 증대하고 있음을 알 수 있다.

이러한 반가폭의 변화차이는 소성변형의 형태와 관계가 있는 것으로 추측되어 진다. 반가폭은 일반적으로 재료의 미시적인 strain 즉 dislocation의 밀도 및 부결정립의 크기를 반영하는 것으로 알려져 있다[10]. 이러한 측면에서 외력에 의해 고경도재의 반가폭의 감소는 부가되는 외력에 의해 dislocation이 이동하여 소멸되었다는 사실을 시사하는 결과로 결국 strain이 해방된 것으로 간주할 수 있다.

철강재료를 필두로 대부분의 재료는 소성변형을 하

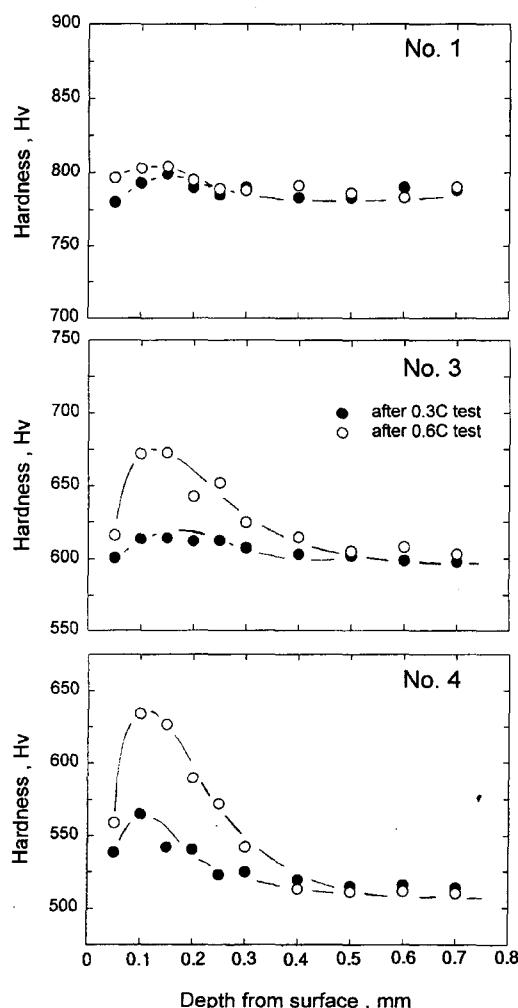


Fig. 6. Distribution of haldness below contact surface after test.

면 재료는 가공경화에 의해 경도가 상승하게 된다. Fig. 6은 시험후 깊이방향으로 측정한 경도분포를 나타낸 것이다. 본 연구에서도 재료경도와 하중에 따라 경도는 상이하나 소성변형에 의해 전부 경도가 상승한 것을 확인할 수 있다. 따라서 고경도재의 경우는 소성변형이 일어나면 기존의 경도와 반가폭과의 관계가 성립하지 않는다는 것을 알 수 있다.

3-3. 잔류응력을 이용한 경도측정

일반적으로 구름마찰에 의한 표면 잔류응력변화는 마찰초기에 급변하나 이후는 소성변형에 의해 shake-down limit[11]로 거의 변화가 없는 것으로 알려져 있다[12]. 이러한 측면에서 재료의 소성변형과 관계가 있는 잔류응력도 경도와 상관관계가 있음이 분명하다.

Fig. 7은 재료의 경도와 0.6C시험결과(실선) 생성된 표면 및 내부극대 잔류응력과의 상관관계를 나타낸 것이다. 이들의 상관은 경도증가에 따라 표면의 잔류응력은 거의 직선적으로 증대하나 내부는 지수함수적으로 감소하고 있음을 알 수 있다. 이러한 경향은 0.3C시험결과(점선)에서도 각각 저경도측으로 평행이동하는 것으로 밝혀졌다.

표면의 잔류응력은 전술한대로 최표면의 소성변형과 이로인한 하부의 구속력에 의한 생성되는 거시적인 잔류응력일 것이다. 최표면의 소성변형의 형태는 거시적 인지 미시적인지는 불명확하나 재료경도가 낮을수록 소성변형량은 많을 것으로 예상되나 하중영향층도 비례하여 증가하므로 구속력지하로 잔류응력은 적을 것이다. 그러나 경도가 증대할수록 소성변형량 및 하중영향층은 감소할뿐만 아니라 재료의 탄성한 증대에 따라 포화 응력치도 커질 것이므로 표면의 잔류응력은 경도에 직선적으로 증대하는 것으로 생각되어 진다.

그러나 내부의 잔류응력의 경우, 고경도재는 소성변형이 미시적인 소성변형의 형태 즉 결정립내의 dislocation이동과 관계되고 이 경우 반가폭의 감소되어 미시적 응력 해방이 이루어진 것으로 추정되어 이것이 거시적인 잔류응력에 영향을 끼쳤음이 분명하다. 이러한 경향은 경도가 적을수록 dislocation이동이 용이하므로 경도가 적을수록 응력해방(반가폭의 감소)은 비례하여 많이 발생한 것으로 생각되어 진다. 그러나 No.4의 경우와 같이 경도가 현저히 감소하면 거시적인 소성변형이 수반되어 현저히 dislocation이 생성되므로 이러한 비례관계에서 벗어 난 것으로 생각된다.

따라서 잔류응력은 전술한대로 소성변형의 내외부적

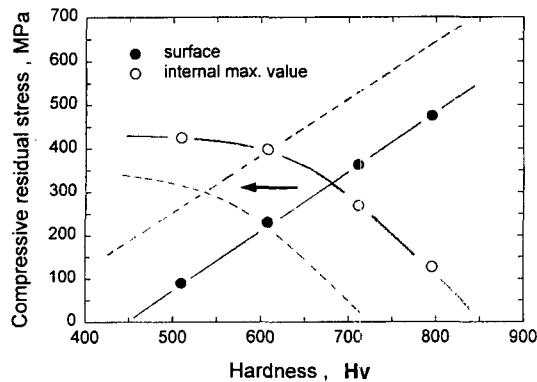


Fig. 7. Variation of residual stress with hardness (0.3C TEST : dot line, 0.6C TEST : straight line).

요인에 의해 생성된 잔류응력의 조합이므로 이들이 각각 Fig. 7과 같이 경도와 상관관계가 성립하므로 잔류응력측정으로 고경도재의 소성변형후의 경도예측이 가능하다는 것을 알 수 있다.

즉 고경도재의 가공경화에 의한 경도상승분은 구속력증대에 따른 경도상승분과 미시적 소성변형에 의한 경도감소분의 합으로 얻어짐이 분명하고 이들은 각각 경도와 표면의 잔류응력의 변화 및 내부의 잔류응력변화에 대응할 것으로 생각된다.

Fig. 8은 Fig. 7을 모식화한 것이나 만일 소성변형후 표면에서 잔류응력이 A의 값이 얻어졌다면 $\frac{ec}{df}$ 가 가공경화에 의한 경도상승분이 될 것으로 추측된다.

Table 3는 Fig. 7을 이용해 표면하 0.1 mm 및 0.2 mm의 위치에서 실측한 경도값과 기준의 반가폭을 이용해 산출한 경도값 및 잔류응력을 이용해 산출한 경도값을 비교한 것이다.

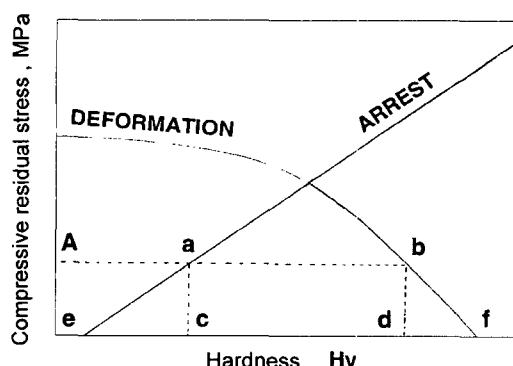


Fig. 8. Schematic diagram of relationship between residual stress and hardness.

Table 3. Comparison of hardness calculated by half-value breadth and residual stress with measuring hardness

	0.1 mm depth			0.2 mm depth		
	M	HVB	RS	M	HVB	RS
No.1	0.3C	783	785	792	790	783
	0.6C	803	755	807	786	768
No.2	0.3C	721	713	710	709	715
	0.6C	743	679	752	733	738
No.3	0.3C	614	581	627	608	589
	0.6C	672	515	652	643	545
No.4	0.3C	565	466	547	541	445
	0.6C	634	485	559	590	471
						567

*M : by measuring

HVB : by using the half-value breadth

RS : by using the residual stress

기준의 반가폭을 이용하여 경도를 산출한 결과에서 가공경화가 적을 경우는 전반적으로 잘 일치하나 No.3, No.4와 같이 소성변형량이 많으면 오차(최대 23.3%)가 커진다는 것을 알 수 있다. 그러나 잔류응력을 이용한 경우는 거시적 소성변형이 발생한 No.4의 0.6C시험(오차11.8%)을 제외하면 오차가 대부분 3%내외임을 알 수 있어 정도가 높다는 것을 알 수 있다.

그러나 앞으로 많은 소재의 종류 및 소성변형의 종류 등에 따른 적용가능성에 대한 검토가 이루어져야 할 것으로 사료되나 Fig. 7과 같은 잔류응력과 경도와의 관계가 명확해 진다면 X선회절에 의해 충분히 가공경화를 고려한 경도추정이 가능할 것으로 생각된다.

4. 결 론

기준의 재료의 경도를 비파괴적으로 측정하는 X선회절선의 반가폭과 경도의 관계를 재검토하고 잔류응력을 이용해 경도추정의 가능성성을 조사한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 기준의 반가폭과 경도와의 관계는 고경도재의 경우는 그들의 경향에서 벗어나는 경향을 보였으며 가공경화에 따른 경도상승과도 대응하지 않았다. 이것은 고경도재의 소성변형이 미시적이기 때문인 것으로 생각되었다.

2) 구름접촉후 최표면 및 내부의 잔류응력은 재료의 경도와 좋은 상관을 보여 전자는 경도 증대에 따라 직선적으로 증대하였고 후자는 지수함수적으로 감소하였다.

3) 소성변형후 잔류응력은 구속력에 의한 잔류응력과 소성변형에 의한 잔류응력으로 구성되며 각각의 경도와의 상관관계를 이용해 이들의 조합으로 가공경화에 따른 경도상승분을 추정할 수 있다.

즉 가공경화에 의한 경도상승분 =
 $\delta H_V(\text{by arrest}) - \delta H_V(\text{by defomation})$

참고문헌

- 中西英介, “X線半價幅, 回折像解析法の應用,” 日本材料學會 第11回材料強度に關する討論 會前刷集, pp41-47, 1974.
- 小峰克郎, 中西英介, 森 宗義, “焼入焼戻もどしきれた鋼材料の半價幅とかたさの對應について,” 材料, Vol 26, pp24-30, 1977.
- 栗田政則, 井原郁夫, “X線回折による焼入鋼の硬度測定,” 材料, Vol 34, pp91-97, 1975.
- 栗田政則, ‘新しい回折X線幅の評價法と硬さ及び塑性ひずみ測定への應用,’ 塑性と加工, Vol 26, pp869-875,
- 1983.
- 栗田政則, 新保正志, 宮川松男, “X線回折による鋼の焼入れ硬化の新しい評價法,” 非破壊検査, Vol 39, pp67-73, 1990.
- 이한영, “X선회절에 의한 Shot peening처리 구름베어링의 구름접촉피로해석,” 윤활학회지, Vol 13, pp39-45, 1997.
- 日本材料學會, “X線應力測定法標準,” 1981.
- 米谷 茂, “殘留應力의 發生と對策,” 養賢堂, pp243, 1987.
- 田原久祺, 綿林英一, “ペアリングのおはなし,” 日本規格協會, pp108, 1991.
- 日本材料學會, “X線材料強度學,” 養賢堂, pp302, 1981.
- K.L.Johnson, “A shakedown limit in rolling contact” : Proc. 4th US Nat. Congr. Appl. Mech., pp971, 1962.
- 李 漢瑛, 川本 信, 岡林邦夫, “X線回折による鋼のころがり疲れの研究(第1報),” トライボロジスト, vol 34, pp43-50, 1989.

윤활학회 원고투고 안내

학회에서는 회원 여러분의 학술·기술논문을 비롯하여 총설, 해설원고와 국내외 과학기술정책 또는 연구소·산업계의 연구동향이나 회원동정 등의 투고를 기다리고 있습니다. 많은 참여 바랍니다.

국문학회지 제18권 제4호(2002. 8. 31 발행) : 논문접수 : 수시 / 해설 및 기타 원고마감 : 2002. 7. 31
 제18권 제5호(2002. 10. 31 발행) : 논문접수 : 수시 / 해설 및 기타 원고마감 : 2002. 9. 30
 제18권 제6호(2002. 12. 31 발행) : 논문접수 : 수시 / 해설 및 기타 원고마감 : 2002. 11. 30

KSTLE International Journal

Vol.3, No.2(2002. 12. 31 발행) 논문접수 : 2002. 10. 31 까지

※유의사항 : 논문투고 시 본지에 게재되어있는 논문집필요령을 참고하시기 바랍니다.

논문투고료(국문학회지)

6면 기준 100,000원(별쇄본 50부 포함) - 6면 초과시 1면당 15,000원 추가부담
 단, 연구비 지원 논문은 총액의 50% 추가부담.