

X선 회절을 이용한 자동차 압연강의 잔류응력 측정에 관한 연구

A Study on the Measurement of Residual Stress in Rolled Steel for Automobile using X-ray Diffraction

홍 순혁*, 이 동 우**, 조 석 수***, 주 원 식****
Soonhyeok Hong, Dongwoo Lee, Seokswoo Cho, Wonsik Joo

ABSTRACT

In textured material, diffraction angle 2θ usually shows a nonlinear relation against $\sin^2\Psi$ due to elastic anisotropy of crystals. SPHD and SPCD steel is cold-rolled carbon steel for automobile. The characteristics X-ray for stress measurement is Cr K_{α} and Mo $K_{\alpha 1}$ characteristic X-ray. The 2θ - $\sin^2\Psi$ diagram under elastic strain seems to have a linear behavior using regression line of data but has a nonlinear behavior in distribution of data by Cr K_{α} characteristic X-ray. As the plastic strain of specimen increases, the nonlinearity of 2θ with respect to $\sin^2\Psi$ increases remarkably. On the other hand, the diffraction angle 2θ by Mo $K_{\alpha 1}$ characteristic X-ray shows a good linearity on 2θ - $\sin^2\Psi$ diagram under plastic strain as well as elastic strain. Therefore, this paper presents the measurement of residual stress in cold-rolled carbon steel for automobile using penetration depth of Mo $K_{\alpha 1}$ characteristic X-ray and multiplicity factor of crystal diffraction plane.

주요기술용어 : X-ray diffraction method(X선 회절법), Residual stress(잔류응력), Textured material(집합조직), Penetration depth(침투깊이), Multiplicity factor(다중도 인자), Cr K_{α} and Mo $K_{\alpha 1}$ characteristic X-ray(Cr K_{α} 와 Mo $K_{\alpha 1}$ 특성 X선)

1. 서 론

잔류응력은 주위 환경과 열적인 평형상태에 있으면서 외부 하중이 작용하지 않을 때 결정 재료의 내부에 존재하게 되는 응력(locked-in stress)¹⁾으로 대부분 모든 가공공정에서 잔류응

력이 발생되고 있으나 후처리에 의해 제거되거나 약화될 수 있다. 이러한 잔류응력은 재료에 부하되는 응력 패턴에 따라 구조물에 상이한 영향을 미친다. 특히 피로와 같은 반복수 의존형 파괴는 재료표면의 잔류응력에 많은 영향을 받고 있으며 이러한 잔류응력을 정확히 모니터링할 수 있다면 실기 부품의 안전성 유지와 보수 기간 및 잔존수명 예측에 유용하게 사용될 수 있다. 잔류응력의 측정방법으로는 구멍뚫기 방법(hole-drilling method), X선 회절법(x-ray diffraction me-

* 회원, 부경대학교 공과대학 C/C Lab.
** 회원, 동아대학교 기계공학과 대학원
*** 회원, 삼척대학교 기계정밀자동차공학부
**** 회원, 동아대학교 기계산업시스템공학부

thod), 초음파법(ultrasonic testing method), 자기장 측정법(magnetic field method)²⁾등을 들 수 있다.

이 중에서 X선 회절법을 이용한 잔류응력 측정법은 재료의 격자면 격자 변형률의 변화량에 기초를 두고 있다.³⁾ 즉, 재료에 외력이 작용하게 되면 격자면 간격이 변화하게 되어 X선 회절시 회절각 변화로부터 잔류응력을 측정할 수 있다.

한편, 白岩⁴⁾등은 냉간 압연강판이 탄성 변형률을 받을 때 Cr-K_α특성 X선을 적용한 결과 재료의 이방성으로 인한 비선형성이 나타난다고 주장하였다. 한⁵⁾등은 Cr-K_α특성 X선을 이용하여 냉간 압연강판에서 발생된 잔류응력을 측정하였으나 2θ-sin²ψ선도에서 강한 비선형성을 나타내어 측정이 어렵다고 하였다.

또한, 栗田⁶⁾등은 집합조직을 가지는 탄화 규소강(silicon carbide)의 Cr-K_α 특성 X선 응력측정에서 시험편에 가한 응력과 7종류의 ψ각에 대한 회절각의 변화를 고찰한 결과 비선형적인 2θ-sin²ψ선도의 값들에 대해 최소자승법을 이용하여 기울기를 구한 뒤 통계학적 방법^{7,8)}을 도입하여 응력을 산출하였다. 그러나 이 방법은 ψ값의 선택에 따라 2θ-sin²ψ선도의 기울기 값의 차이가 크고 ψ값이 많아야 한다는 점과 통계적인 과정을 거쳐야 한다는 어려움이 있다.

이와같이 X선 회절법을 이용한 응력 측정법은 측정 대상 재료가 등방, 등질이라는 조건과 특정 결정면이 브래그 회절 법칙(bragg's law)을 만족시켜 하중 변화에 따라 회절각의 변화가 일어난다는 조건 및 격자면에서 발생하는 변형률과 응력에 대한 미시적 탄성 이론을 기초로 하고 있다. 그러나 압연등에 의해 집합조직을 가지게 되면 재료가 등방성이라는 가정은 성립되지 않게 된다. 따라서 본 연구에서는 자동차 현가 부품(suspension component)인 로우어 암(lower arm)이나 어퍼 암(upper arm)으로 사용되는 열간 압연강판인 SPHD강과 냉간 압연강판인 SPCD강을 이용하여 각각의 Cr-K_α특성 X선과 Mo-K_{α1}특성 X선에 따른 탄성변형률과 소성변형률에서의 2θ-sin²ψ선도를 파악하여 응력측정의 가능성을 고

찰함으로써 실제 압연강에 대한 잔류응력을 측정하였다.

2. X선 응력측정 원리

Fig. 1은 다결정체 시험편에서 방위가 서로 다른 결정립에 일정한 인장응력이 부하되었을 때 격자면 간격 d는 격자면의 법선이 인장축에 가까운 결정립일수록 넓게 되고 있다. X선 응력측정법은 ψ의 변화에 따른 격자면 간격 d의 변화를 측정해서 응력을 구하는 방법이나 격자면 간격 d를 직접 측정하는 것은 불가능하다. 따라서 X선 응력은 특성 X선이 브래그 회절 조건을 만족시키는 회절면을 이용하여 그 회절각의 변화로서 측정된다.⁹⁾

$$\sigma_x = -\left(\frac{E \cot \theta_0}{2(1+\nu)}\right) \cdot \left(\frac{\partial 2\theta}{\partial \sin^2 \psi}\right) = K \cdot M \quad (1)$$

단,

$$K = -\left(\frac{E}{2(1+\nu)}\right) \cdot \left(\frac{\pi}{180} \cdot \cot \theta_0\right) \quad (MPa/\text{deg})$$

$$M = \left(\frac{\partial 2\theta}{\partial \sin^2 \psi}\right) \quad (\text{deg})$$

여기서 K는 X선 응력정수(x-ray stress constant)이고 M은 2θ-sin²ψ선도의 직선 기울기이며 θ⁰는 무응력 상태에 있는 재료의 X선 회절각 2θ⁰의 1/2이다.

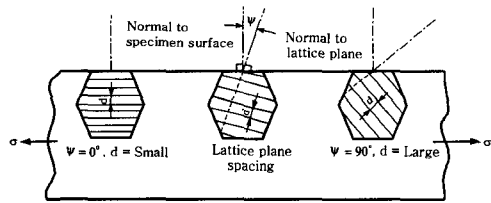


Fig. 1 The change of lattice plane spacing by stress

3. 실험장치 및 방법

3.1 재료 및 시험편

본 실험에 사용한 재료는 압하율 16.7%의 두께 3mm 자동차용 냉간 압연강판인 SPCD 강과

그 모재인 두께 3.6mm 열간 압연강판인 SPHD 강으로 시험편의 화학성분과 기계적 성질을 Table 1과 Table 2에 각각 나타내었다.

Fig. 2와 Fig. 3은 인장시험과 X선 회절시험에 사용된 시험편의 형상과 치수를 나타내낸 것으로 잔류응력을 제거하기 위해 풀림(annealing)처리를 수행하였다. 시험편은 압연방향이 길이방향이 되도록 가공하였으며 밀링가공 후 샌드페이퍼 및 Al₂O₃ 분말입자로 경면연마(polishing)하

고 가공 잔류응력을 제거하기 위하여 표면을 60 μm정도 전해연마 하였다.

3.2 X선 회절 실험

잔류응력 측정은 X선 회절장치(x-ray diffractometer)를 사용하였으며, 시험편을 Fig. 3과 같이 4점 굽힘치구에 장착하고 스트레인 게이지를 시험편 중앙부 아래면에 부착한 후 탄성한도 내에서 탄성변형률을 단계적으로 부하 하면서 특성 X선을 시험편 윗면 중앙부 표면에 조사면적 2 mm × 7 mm로 조사하였다.

또한 소성변형률에 따른 $\sin^2\psi$ - 2θ 선도의 거동을 고찰하기 위하여 만능재료시험기(instron model 1137, 147 kN)와 표점거리 50mm 신장계를 사용하여 시험편에 소성 변형률 5%, 10%를 도입한 뒤 변형률을 단계적으로 부하하면서 특성 X선을 조사하였다.

Table 3은 회절각을 측정하기 위한 X선 회절조건을 나타낸 것이다. 회절각 2θ 의 결정은 X선 응력 측정법 표준⁹⁾에 따라 반가폭(half-value breadth)으로 하였으며, 병경법의 광학계로 6점 입사 $\psi = 0^\circ, 9^\circ, 18^\circ, 27^\circ, 36^\circ, 45^\circ$ 로 $\sin^2\psi$ 법으로 응력을 계산하였다. 본 재료의 경우 무응력 상태에서 Cr-K α 특성 X선을 이용하면 회절각 $2\theta_0$ 는 156.45° 이고 Mo-K α 특성 X선을 이용하면 회절각 $2\theta_0$ 는 153.91° 이다.

Table 1 Chemical compositions of SPHD and SPCD steel (wt. %)

C	Si	Mn	P	S
0.0464	0.018	0.172	0.015	0.014

Table 2 Mechanical properties of SPHD and SPCD steel

Material	Yield strength σ_{ys} (MPa)	Tensile strength σ_{ts} (MPa)	Poisson's ratio γ	Fracture strain ϵ (%)	Young's modulus E(GPa)
SPHD steel	249.6	324.2	0.287	40.61	200
SPCD steel	351.4	414.4	0.293	37.54	203

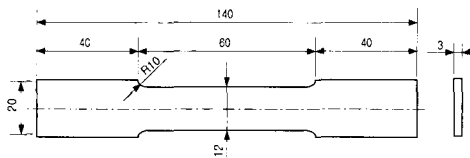


Fig. 2 Geometry and dimensions of tensile test specimen (unit : mm)

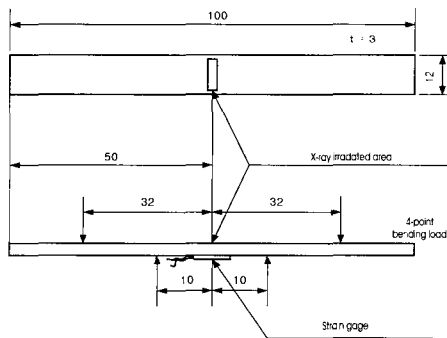


Fig. 3 Geometry and dimensions of specimen for X-ray stress constant (unit : mm)

Table 3 X-ray diffraction condition in SPHD and SPCD steel

Test condition	Parallel-beam method	Parallel-beam method
Diffraction angle	156.45°	153.91°
Characteristic X-ray	Cr-K α	Mo-K α 1
Diffraction plane	(211)	(732 + 652)
Filter	V	Zr
Tube voltage	30Kv	40Kv
Tube current	10mA	20mA
Irradiated area	$2 \times 7 \text{ mm}^2$	$2 \times 7 \text{ mm}^2$
Soller slit	1°	1°
Scanning speed	$2^\circ/\text{min}$	$2^\circ/\text{min}$
Chart speed	40 mm/min	40 mm/min
Time constant	5 sec	5 sec

4. 실험결과 및 고찰

4.1 탄성 변형을 증가에 따른 $\sin^2\psi-2\theta$ 선도

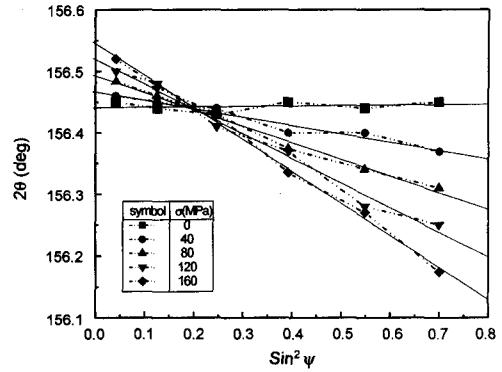
Fig. 4의 (a)와 (b)는 Cr- K_{α} 를 사용하여 측정된 SPHD강과 SPCD강의 $2\theta \sin^2\psi$ 선도를 나타낸 것이다. Fig. 4의 (a)와 (b)는 Cr- K_{α} 특성 X선을 사용하여 측정된 SPHD 강과 SPCD 강의 $2\theta-\sin^2\psi$ 선도를 나타낸 것이다. 표준 X선 응력 측정법⁹⁾에 의하면 등방, 등질 재료의 경우 각 탄성 부하응력에 대한 $2\theta-\sin^2\psi$ 선도가 격자면 변형률이 0이 되는 지점에서 일치한다.

Cr- K_{α} 특성 X선을 각 압연재에 대하여 조사한 결과는 응력이 커짐에 따라 $\sin^2\psi$ 에 대한 회절각 2θ 의 비선형성이 감소하고 있다. 특히 선도에서 SPHD 강은 $\sin^2\psi$ 에 대한 회절각 2θ 가 선형성을 보이면서 대략 $\sin^2\psi=0.2$ 부근에서 일정한 값을 가지고 있으나 SPCD 강은 $\sin^2\psi$ 에 대한 회절각 2θ 가 비선형성을 강하게 나타내고 $\sin^2\psi$ 에 대한 2θ 의 회귀식은 대략 $\sin^2\psi=0.23$ 부근에서 교차되나 각각의 회절각 2θ 는 상당한 분산을 보이고 있다.

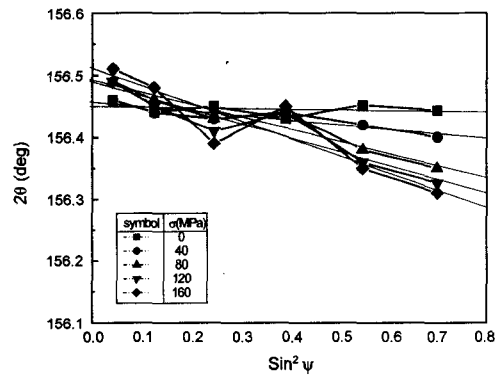
이러한 결과는 SPHD 강인 경우 재결정 온도 이상의 고온에서 가공하기 때문에 압연된 입자의 재결정에 의해 결정립이 등방, 등질에 가까운 재료 조직으로 되므로 특성 X선의 입사각에 대한 결정립의 격자면 간격이 규칙적으로 배열되나 SPCD 강인 경우 냉간 압연 과정에서 발생한 결정립변형에 의해 특정면과 방향에서 특성 X선의 입사각에 대한 이방성을 가지므로 결정립의 격자면이 극소적으로 불규칙하게 배열되기 때문이라 생각된다. 그리고 시험편 표면이 압연에 의해 조대해짐에 따라 X선 조사면적 내에서 회절되는 결정립 수가 적어지므로 거시적 평균 변형률을 얻을 수 없다.

따라서 Cr- K_{α} 특성 X선으로 회절실험을 하기 위해서는 결정립의 크기에 제한을 받고 있으며 이러한 점을 극복하려면 공학적으로 단위조사면적 1mm^2 당 1000개 이상의 결정립을 확보하여야 하므로 결정립 직경의 크기가 최대 $30\mu\text{m}$ 이하

가 되어야 한다.⁹⁾



(a) Annealed SPHD steel



(b) Annealed SPCD steel

Fig. 4 $2\theta-\sin^2\psi$ diagram by Cr- K_{α} characteristic X-ray

Fig. 5의 (a)와 (b)는 Mo- $K_{\alpha 1}$ 특성 X선을 사용하여 측정된 SPHD 강과 SPCD 강인 $2\theta-\sin^2\psi$ 선도를 나타낸 것이다. Mo- $K_{\alpha 1}$ 특성 X선을 이용하여 각 압연재에 대하여 조사한 결과 SPHD 강과 SPCD 강 모두 등방, 등질 재료의 경우와 같이 $\sin^2\psi$ 에 대한 회절각 2θ 가 대체적으로 선형성을 가지고 있다. 특히 선도에서 SPHD 강과 SPCD 강 모두 2θ 는 $\sin^2\psi=0.2$ 부근에서 일정한 값을 가지고 있으며 그 분산도 거의 일정한 값을 가지고 있어 압연에 의한 재료의 이방성이 응력측정에 거의 영향을 미치지 않음을 알 수 있다.

이러한 결과는 Mo- $K_{\alpha 1}$ 특성 X선이 Cr- K_{α} 특성 X선에 비하여 고회절각도 영역에서 다중도 인자¹⁰⁾가 4배나 더 크고 파장이 짧아 침입깊이¹¹⁾

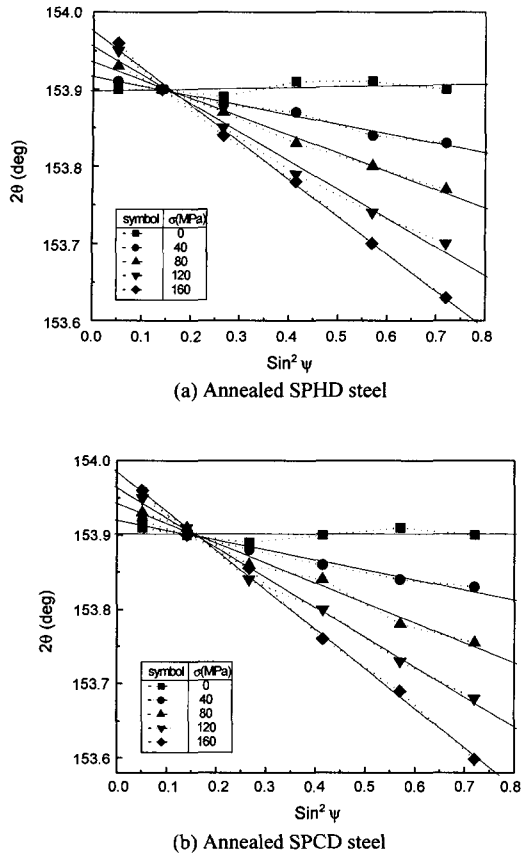


Fig. 5 2θ - $\sin^2\psi$ diagram by Mo- $K_{\alpha 1}$ characteristic X-ray

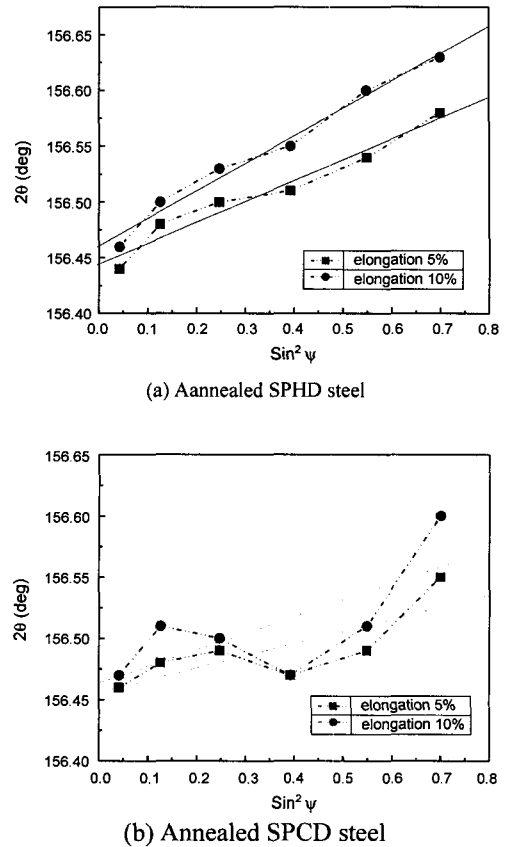


Fig. 6 2θ - $\sin^2\psi$ diagram by Cr- K_{α} characteristic X-ray

가 3배정도 깊어지므로 대략 12배 정도 많은 결정립이 회절에 기여함으로써 결정립의 거시적 평균 변형률을 측정하였기 때문이라 생각된다.

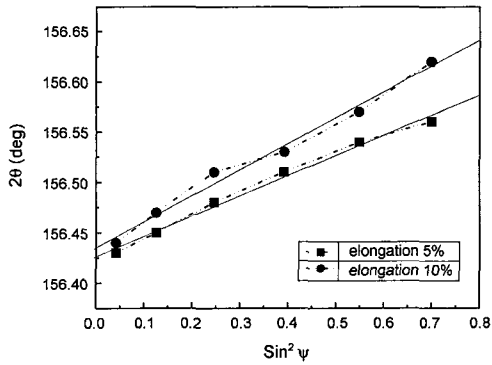
4.2 소성 변형률 증가에 따른 $\sin^2\psi$ - 2θ 선도

Fig. 6과 Fig. 7는 각 압연강에 소성 변형률 5%, 10%를 가한 후의 2θ - $\sin^2\psi$ 선도를 나타내었다. Cr- K_{α} 특성 X선을 이용하면 SPHD 강과 SPCD 강에서 탄성 변형률은 받는 경우와 비슷한 거동을 나타나고 있으나 SPCD 강에서는 탄성 변형률을 받을 때 보다 비선형성이 더 증가하고 있다. 그러나 Mo- $K_{\alpha 1}$ 특성 X선을 이용하면 탄성 변형률 상태와 같이 SPHD 강과 SPCD 강에서 $\sin^2\psi$ 에 대한 회절각 2θ 의 선형적 거동이 잘 나타나고 있다.

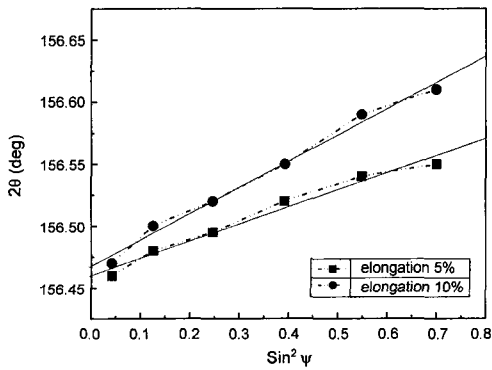
이러한 결과는 각 압연강에 도입된 소성 변형률로 인한 결정립의 변형 거동과 관계되어 지는 것으로 생각된다. 즉 압연강의 경우 X선에 회절되는 결정립이 선형적 변형을 가지는 결정립과 비선형적 변형을 가지는 결정립으로 구성되어 있으므로 특정 $\sin^2\psi$ 에 대하여 회절각 2θ 가 급격히 변화하는 영역은 비선형적 격자면 변화를 가지는 입자수가 증가하기 때문이라 생각된다. 또한 Mo- $K_{\alpha 1}$ 특성 X선에 의한 결과는 탄성 변형률의 경우와 동일하다.

4.3 X선 응력정수 K의 측정

Fig. 8과 Fig. 9는 각 응력 σ 에 대한 2θ - $\sin^2\psi$ 선도의 기울기 M의 값을 나타낸 것이다. 부하응력 σ 에 대한 M은 Cr- K_{α} 특성 X선을 이용하면



(a) Annealed SPHD steel



(b) Annealed SPCD steel

Fig. 7 2θ - $\sin^2\Psi$ diagram by Mo- $K_{\alpha 1}$ characteristic X-ray

SPHD 강 의 경우 선형적 거동을 보이 나 SPCD 강 의 경우 비선형적 거동을 보이고 있다. 그러나 Mo- $K_{\alpha 1}$ 특성 X선 의 경우 SPHD 강 과 SPCD 강 에 대하여 모두 선형적 거동을 나타내고 있다. X선 응력정수 K는 이론적으로 구하는 방법과 실험적으로 구하는 방법이 있다. 우선 식 (1)을 이용하여 응력정수 K를 이론적으로 구해 보면 Cr- K_{α} 특성 X선을 이용하는 경우 SPHD 강은 -282.7MPa/deg이고 SPCD 강은 -285.6MPa/deg이다. 그러나 Mo- $K_{\alpha 1}$ 특성 X선을 이용하여 구한 응력정수 K는 SPHD 강 의 경우 -314.2MPa/deg이었고 SPCD 강 의 경우 -317.4MPa/deg이다. 또한 응력정수 K의 실험값은 Fig. 8과 Fig. 9에서 구한 M- σ 선도의 기울기의 역수를 이용하여 구하였다. 측정결과 Cr- K_{α} 특성 X선을 이용하여 응력정수 K를 구해 보면 SPHD강은 -303.9MPa/deg이고 SPCD강의

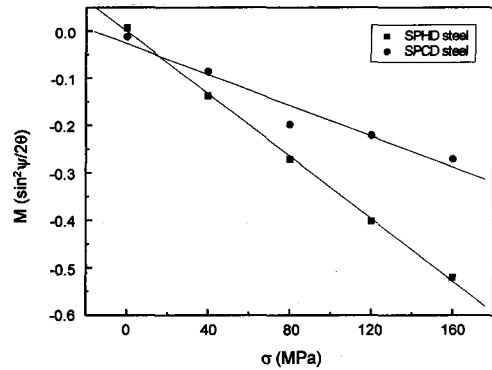


Fig. 8 Variation of slope M of 2θ as a function of applied stress σ_0 (Cr- K_{α})

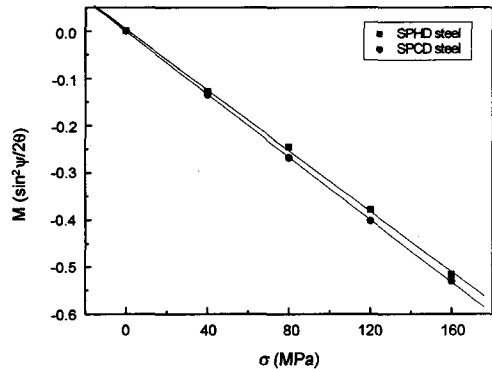


Fig. 9 Variation of slope M of 2θ - $\sin^2\Psi$ diagram as a function of applied stress σ_0 (Mo- $K_{\alpha 1}$)

응력정수 K는 -584.8MPa/deg이다.

이와 같이 SPCD강의 경우 이론적 값과 실험적 값 사이에 상당한 차이를 보이는 이유는 냉간 압연 과정에서 발생된 결정립의 편향적 배열에 의하여 응력 변화에 대하여 결정면 사이의 거리 변화가 등방, 등질 재료에 비하여 과도하게 적기 때문이라 생각된다. 따라서 SPCD강의 경우와 같이 압연율이 과도한 경우 Cr- K_{α} 특성 X선을 이용하여 X선 응력을 측정할 수 없다. 한편 Mo- $K_{\alpha 1}$ 특성 X선을 이용하여 구한 응력정수 K는 SPHD 강 의 경우 -327.7MPa/deg이고 SPCD 강 의 경우 -332.7MPa/deg이므로 이론적 응력정수에 대하여 실험적 응력정수가 4.3%, 4.8%의 오차를 가지고 있으므로 공학적 오차 범위 내에서 측정할 수 있다. 이러한 결과는 Mo- $K_{\alpha 1}$ 특성 X선의 큰 침입

깊이와 결정의 회절 다중성으로 인하여 응력 변화에 대한 결정면 사이의 거리 변화가 거시적 평균값으로 나타나기 때문이라 생각된다.

4.4 X선 응력과 기계적 응력의 비교

각 압연강에 부하된 응력은 응력정수 K 에 각 부하응력의 $2\theta\text{-sin}^2\psi$ 선도 기울기 M 을 곱하여 X선 응력을 계산할 수 있다. Fig. 10과 Fig. 11은 특성 X선에 의해 측정된 응력과 스트레인 게이지 (strain gage)에 의해 측정된 기계적 응력을 서로 비교한 것이다. 각 압연강이 탄성 변형률을 받을 때 Cr- K_{α} 특성 X선에 의해 측정된 응력은 SPHD 강과 SPCD 강 모두 기계적 응력과 잘 일치하고 있으나 SPCD 강과 비교하여 37.5% 정도의 오차를 보이고 있어 공학 오차 범위를 벗어나고 있다. 이러한 결과

는 SPHD 강과 SPCD 강 모두 기계적 응력과 잘 일치하고 있다. 이러한 결과는 Mo- $K_{\alpha 1}$ 특성 X선의 경우 시험편에 대한 X선 침입깊이가 깊어짐으로 해서 평균화된 결정립의 변화율이 측정되기 때문이다. 따라서 각 압연강에 대한 잔류응력은 Cr- K_{α} 특성 X선보다 Mo- $K_{\alpha 1}$ 특성 X선을 이용하여 측정할 수 있음을 알 수 있다.

그러나 Mo- $K_{\alpha 1}$ 특성 X선에 의해 측정된 응력은 SPHD 강과 SPCD 강 모두 기계적 응력과 잘 일치하고 있다. 이러한 결과는 Mo- $K_{\alpha 1}$ 특성 X선의 경우 시험편에 대한 X선 침입깊이가 깊어짐으로 해서 평균화된 결정립의 변화율이 측정되기 때문이다. 따라서 각 압연강에 대한 잔류응력은 Cr- K_{α} 특성 X선보다 Mo- $K_{\alpha 1}$ 특성 X선을 이용하여 측정할 수 있음을 알 수 있다.

Fig. 12와 Fig. 13에서는 상술에서 구한 응력정

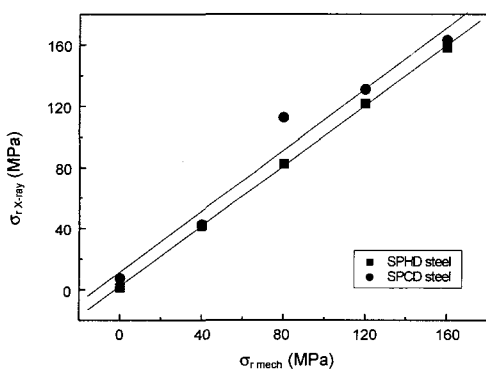


Fig. 10 Comparison of mechanical stress with X-ray stress (Cr- K_{α})

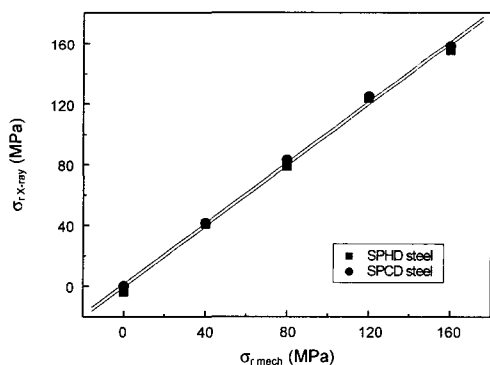


Fig. 11 Comparison of mechanical stress with X-ray stress (Mo- $K_{\alpha 1}$)

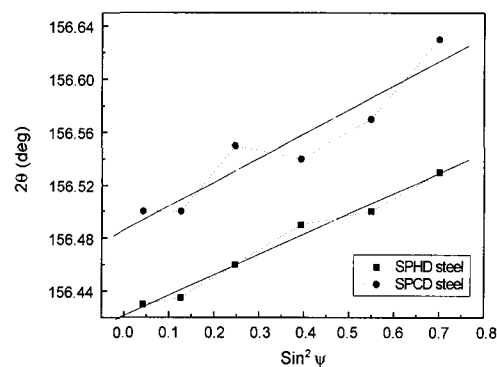


Fig. 12 Measured value for in-service material by Cr- K_{α}

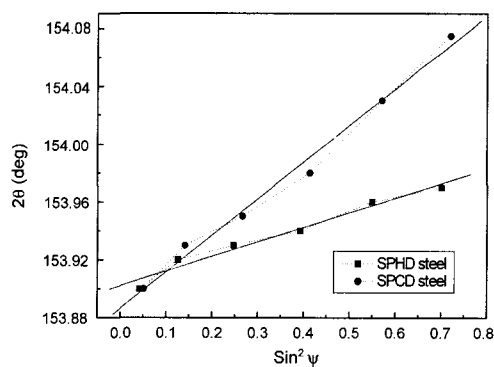


Fig. 13 Measured value for in-service material by Mo- $K_{\alpha 1}$

수 K와 Cr-K α 특성 X선과 Mo-K α_1 특성 X선을 이용하여 풀림 처리되지 않은 SPCD 강 of 잔류응력을 측정 한 결과를 나타낸 것이다. 그림에서 전자의 특성 X선을 이용하는 것에 비하여 후자의 특성 X선을 이용하는 것이 재료의 이방성을 최소화시킬 수 있음을 알 수 있다. 따라서 Mo-K α_1 특성 X선을 이용하여 잔류응력을 측정 한 경우 SPHD 강은 -140.8MPa, SPCD강은 -270.1MPa의 값이 측정되어졌다.

5. 결론

자동차 구조용 재료로 사용되는 SPHD 강과 SPCD 강에 대해 Cr-K α 특성 X선과 Mo-K α_1 특성 X선을 이용하여 잔류응력을 측정 한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) Cr-K α 특성 X선으로 측정 한 경우 SPHD 강 의 2θ - $\sin^2\psi$ 선도는 탄성과 소성변형을 상태 모두 선형적이나 SPCD 강 의 경우는 탄성과 소성 변형을 상태 모두 비선형을 나타내고 있다.
- 2) Mo-K α_1 특성 X선으로 측정 한 경우 SPHD 강과 SPCD 강 의 2θ - $\sin^2\psi$ 선도는 탄성 변형을 상태나 소성 변형을 상태 모두 선형적으로 나타나고 있다.
- 3) Mo-K α_1 특성 X선을 이용하여 구한 응력과 기계적으로 측정 한 응력은 공학적 오차범위 내에서 잘 일치하고 있다.

참고 문헌

- 1) 李順福, “잔류응력의 공학적응용”, 대한기계학회지, 제25권 제2호, pp.112-116, 1985.
- 2) G. S. Schajer, L. Yang, “Residual Stress Measurement in Orthotropic Materials using the Hole-drilling Method,” *Experimental Mechanics*, pp.324-333, 1994.
- 3) 韓鳳熙 譯, X線回折, 반도출판사, p.563, 1990.
- 4) T. Shiraiwa, Y. Sakamoto, “The Sumitomo Search,” Vol.7, p.109, 1972.
- 5) 한봉희, 박원규, “집합조직을 가진 재료의 X선 잔류응력 측정법,” 대한금속학회지, 제22권 제9호, pp.768-773, 1984.
- 6) 栗田政則, “集合組織をもつ材料のX線應力測定法,” *日本機械學會論文集 A編*, 62卷 596號, pp.1104-1110, 1996.
- 7) 栗田政則, “定時計數法による回折線半價幅の統計學的解析,” *日本機械學會論文集 A編*, 54卷 508號, pp.2154-2160, 1989.
- 8) 栗田政則, “定時計數法によるX線應力測定における應力定數および彈性定數の統計學的解析,” *日本機械學會論文集 A編*, 55卷 511號, pp.590-597, 1989.
- 9) 日本材料學會 材料強度部門委員會編, “X線應力測定法標準”, pp.61-137 1981.
- 10) 韓鳳熙 譯, X線回折, 반도출판사, p.158, 1990.
- 11) 金文執, 徐日煥 共譯, X-선회절분석, 반도출판사, pp.46-48, 1998.