

● 論 文

WC-Co합금의 X선 응력측정에 의한 탄성변형거동의 연구

夫 明 煥* · 吳 世 旭** · 朴 榮 哲** · 廣 瀨 幸 雄*

(94년 7월 1일 접수)

Studies on Elastic Deformation by X-ray Stress Measurement of WC-Co Alloy

Myung-Hwan Boo · Sae-Wook Oh** · Young-Chul Park** · Yukio Hirose

Key Words : X-ray diffraction(X선 회절), X-ray elastic constant(X선적 탄성정수), Stress constant(응력정수), Phase stress(상응력), Macrostress(거시적 응력), Volume Fraction(체적율), Law of Mixture(복합법칙)

초 록

초경합금은 기계적 성질이 다른 WC의 분산상과 Co의 결합상으로 구성되어 있다. 만일 이 합금이 거시적으로 균일하게 변형을 하면, 각 상들은 이들의 응력상태에 따라 다르게 변형될 것이다. 따라서 WC-Co 합금의 변형특성과 강화기구를 명확히 알기 위해서는 각상의 미시적 변형과 파괴기구를 검토할 필요가 있다.

본 연구에서는 시편에 굽힘하중을 가하여, X선 회절로 분산상인 WC상 및 결합상인 Co상의 X선적 탄성정수와 응력정수를 측정하였다. WC-Co합금중의 WC상과 Co상의 상응력은 WC(112)면과 Co(311)면의 회절로서 결정하였다. 그리고 이 상응력들을 복합법칙의 적용가능성에 대하여 검토하였다.

Abstract

Cemented carbides are composed of the dispersing phase of WC and binding phase of Co, which are very different from each other in mechanical properties. When the alloys are deformed uniformly in the macroscopic scale, each phase

* 日本 金沢大學 大學院 自然科學研究科

** 東亞大學校 工科學 機械工學科

may be deformed differently under their own stress state. Therefore, in order to clarify the deformation characteristics and strengthening mechanism of the alloys, it is necessary to investigate microscopic deformation and fracture mechanism of each phase.

In the present study, each phase of the X-ray elastic constant and the stress constant of the dispersing phase of WC and binding phase of Co, were measured by X-ray diffraction method during applied tensile elastic deformation. The phase stress of WC phase and Co phase within a WC-Co alloy was determined for diffraction from WC(112) plane and Co(311) plane. The phase stress was discussed on the basis of the law of mixture.

본논문에서 사용된 기호의 일람

기 호	단 위	의 미
σ	MPa	응력
σ_a	MPa	부하응력
σ_1'	MPa	거시적 응력
ϵ		변형률
ϵ_a		부하변형률
E_x	GPa	X선적 영률(X선 회절로 구한 영률)
ν_x		X선적 푸와송비(X선 회절로 구한 푸와송비)
ψ	deg	시료면법선과 회절면법선이 이루는 각도
θ	deg	회절각(회절격자면과 회절 X선이 이루는 각도)
S_1		X선 컴플라이언스
S_2		X선 컴플라이언스
K	MPa/deg	응력정수($2\theta - \sin^2\psi$ 선도의 기울기 M과 응력값 σ 의 관계를 나타내는 정수로 피측정물의 탄성적 성질, 결정계 및 회절면에 의존한다.)
V_f	vol%	체적률
λ	Å	X선의 파장
PSPC		위치민감형비례계수관(Position Sensitive Proportion Counter) X선 검출기

1. 서 론

초경합금, 서멧 및 세라믹등과 같은 경질재료는 소결체 그 자체로서 제품이 되는 경우가 있지만, 보통 소결후에 최종가공을 하여야 한다. 이와 같이 제품의 특성상 여러 공정인 소결과 소입등의 열처리 또는 연삭등의 표면가공등에 의해 잔류응력이 도입되지만, 이종재료의 피복과 접합등에 의해서도 잔류응력이 도입된다. 또한 경질재료의 인성향상의 유력한 방법으로 이종재료의 혼합에 의한 복합화가 주목을 받고 있지만, 이 경우 각상의 열팽창계수의 차에 의한 잔류응력의 도입은 불가피하다. 또한 이때 도입되는 각상의 잔류응력은 다른 값을 갖게 될 것이며, 복합화된 재료의 변형 특성과 강화기구를 밝히기 위해서는 각상의 응력을 분리하여 측정할 필요가 있다. 각종 형태에 의해 도입되는 잔류응력의 실제 파악에 비파괴적 응력측정법인 X선 응력측정법^{1),2)}이 이용되고 있으며, 유용한 성과를 올리고 있다.^{3)~8)} X선 응력측정법표준⁹⁾이 설정된 이후, 단상재료로 구성된 철강재료에 대해서는 많은 연구가 진행되어 왔지만, 이종재료로 구성된 복합재료에 대한 연구보고는 극히 적다.¹⁰⁾

본 연구에서는 다상재료의 X선 응력측정에 대한 이론적 해석을 하였고, 2상의 재료로 구성되어 있는 WC-Co합금에 대하여, 각상에 대한 X선적 영률, X선적 푸와송비 및 응력정수를 측정하였다. 그리고 이론에 의해 구해진 값들을 기계적인 성질과 비교하였다. 또한 단상체에서 구한 응력정수를 이용하여 각상의 상응력을 구하였으며, Co 함유량이 다른 재료에 대한 복합법칙¹¹⁾의 적용 가능성에 대하여 검토하였다.

2. 다상재료의 상응력과 복합법칙

2.1 상응력의 X선 측정¹⁰⁾

다상재료의 경우, X선 응력측정으로 각상의 응력을 개별적으로 측정할 수 있으며, 이 분리된 응력을 상응력(phase stress)라 한다.¹²⁾ 어떤 재

료중에 α 상(분산상)이 β 상(모상)에 분산되어 있다고 가정하자. 만일 분산상이 다결정체이고, 충분히 많이 있다고 가정하면 각상의 탄성변형의 평균적 거동은 등방탄성론으로 취급할 수 있을 것이다. 본 실험에서는 WC를 α 상, Co를 β 상으로 정의하였다. Fig. 1에 나타낸것 같이 α 상에서의 주응력을 $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ 라 하고, 대응하는 주변형률을 $\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3$ 라 하면, OP방향의 수직변형률은 다음 식으로 주어진다.

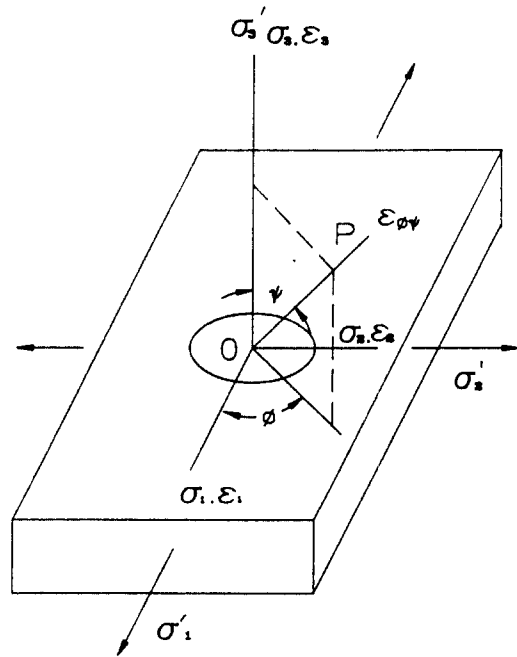


Fig. 1 Directions of stress and strain.

$$\epsilon_{\phi\psi} = \frac{(\epsilon_1 \cos^2 \phi + \epsilon_2 \sin^2 \phi - \epsilon_3) \cdot \sin^2 \psi + \epsilon_3}{\sin^2 \psi + \epsilon_3} \quad (1)$$

여기서 X선 회절법으로 측정된 변형률은 회절 조건을 만족하는 결정립의 변형률의 평균값으로, 응력과의 사이에는 단상다결정체의 X선 컴플라이언스 s_1, s_2 를 사용하면, 다음과 같은 관계가 성립한다.

$$\epsilon_1 = (s_2/2) \sigma_1 + s_1 (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)$$

$$\varepsilon_2 = (s_2/2) \sigma_2 + s_1(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) \quad (2)$$

$$\varepsilon_3 = (s_2/2) \sigma_3 + s_1(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)$$

여기서 $s_1 = -\nu_x/E_x$, $s_2 = 2(1+\nu_x)/E_x$ 이다. 식(2)를 식(1)에 대입하여 정리하면,

$$\varepsilon_{\varphi\psi} = \frac{(s_2/2)(\sigma_1 \cos^2 \varphi + \sigma_2 \sin^2 \varphi - \sigma_3) \cdot \sin^2 \psi + (s_2/2) \sigma_3 + s_1(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)}{\sin^2 \psi} \quad (3)$$

가 된다. 만일 $\varphi=0$ 일 경우, 식(3)은 다음과 같이 된다.

$$\varepsilon_{0\psi} = \frac{(s_2/2)(\sigma_1 - \sigma_3) \sin^2 \psi + (s_2/2) \sigma_3 + s_1(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)}{\sin^2 \psi} \quad (4)$$

X선 응력측정에서는 변형률을 회절각의 변화로서 구한다. 여기서 무변형률일때의 회절각을 θ_0 라 하고, 법선 OP방향의 회절각을 θ_ψ 라 하면

$$\varepsilon_\psi = -\frac{\cot \theta_0}{2} (2\theta_\psi - 2\theta_0) \quad (5)$$

로 ε_ψ 가 구해진다. 식(5)를 식(4)에 대입하여 정리하면 다음식을 얻을 수 있다.

$$2\theta_\psi = 2\theta_0 - s_2 \tan \theta_0 (\sigma_1 - \sigma_3) \frac{\sin^2 \psi}{\sin^2 \theta_0} - s_2 \tan \theta_0 \sigma_3 - 2s_1 \tan \theta_0 (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) \quad (6)$$

따라서 $2\theta_\psi$ 와 $\sin^2 \psi$ 와의 기울기로 다음의 주응력차를 구할 수 있다.

$$\langle \sigma_1 - \sigma_3 \rangle = K \cdot M \quad (7)$$

$$M = \frac{\partial 2\theta_\psi}{\partial \sin^2 \psi} \quad (8)$$

$$K = -\frac{\cot \theta_0}{s_2} = -\frac{E_x}{2(1+\nu_x)} \cot \theta_0 = E_M / \left(\frac{\partial 2\theta_\psi}{\partial \sin^2 \psi} / \varepsilon_a \right) \quad (9)$$

이때의 K를 응력정수라 한다. 또 $2\theta - \sin^2 \psi$ 선도 (이후, $\sin^2 \psi$ 선도라 한다)의 종축과의 교점 $2\theta_{\psi=0}$ 는 다음과 같이 된다.

$$2\theta_{\psi=0} = 2\theta_0 - s_2 \tan \theta_0 \sigma_3 - 2s_1 \tan \theta_0 (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) \quad (10)$$

2. 2 거시적 응력과 미시적응력

α 상(단상) 다결정체의 응력정수로 구한 응력은 α 상중의 응력의 평균인 상응력으로 거시적 응력과는 구별된다. Fig.2에 상응력의 분포를 모식적으로 나타냈다. 그림에서와 같이 α 상과 β 상이 균일하게 혼합되어 있다면, 복합법칙에 의하여 거시적 응력 σ_1' 은 다음식으로 구할 수 있다.

$$\sigma_1' = \langle \sigma_1 - \sigma_3 \rangle_{\alpha} (1 - V_f) + \langle \sigma_1 - \sigma_3 \rangle_{\beta} V_f \quad (11)$$

여기서 V_f 는 β 상의 체적율이다.

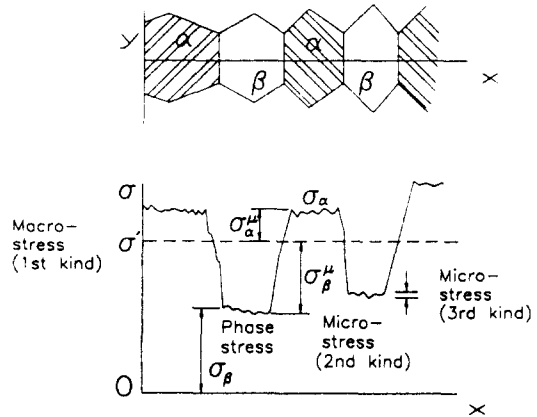


Fig. 2 Phase stresses.

2. 3 복합재료의 X선적 탄성정수

복합재료에서 α 상의 X선적 탄성정수는 시편에 가지는 거시적응력 σ_1' 를 가하여 $\sin^2 \psi$ 선도를 구하고, 그때 기울기의 σ_1' 에 대한 변화에 의하여 결정된다. 즉 식(6)에서 $\sigma_1 \rightarrow \sigma_1'$, $\sigma_2 \rightarrow \sigma_2'$,

$\sigma_3 \rightarrow 0$ 라 하고 S_1, S_2 에 다시를 붙이면 다음과 같이 된다.²⁾

$$2\theta_\psi = 2\theta_0 - s_2' \tan \theta_0 \sigma_1' \sin^2 \psi - 2s_1' \tan \theta_0 (\sigma_1' + \sigma_2') \quad (12)$$

따라서 복합재료의 X선 컴플라이언스는 다음식으로 구해진다.

$$\frac{s_2'}{2} = \frac{1 + \nu_{X'}}{E_{X'}} = \frac{\cot \theta_0}{(13) 2} \cdot \frac{\partial M}{\partial \sigma_1'}$$

$$-s_1' = \frac{\nu_{X'}}{E_{X'}} = \frac{\cot \theta_0}{2} \cdot \frac{\partial 2\theta_{\psi=0}}{\partial \sigma_1'} \quad (14)$$

3. 실험방법

3. 1 재료와 시험편

실험에서 사용한 재료는 WC단상체와 WC-16, 25wt%Co의 초경합금이다. Table 1.에 WC, Co 및 소결체의 체적율, 밀도 및 기계적 성질을 나타냈다. 여기서 소결체의 기계적 성질인 영률과 푸와송비는 공진법¹³⁾으로 구하였다. 또 Co의 체적율(vol%)은 WC 및 Co의 밀도인 15.57g/cm^3 , 8.9g/cm^3 과 소결체의 Co중량분율을 이용하여 구하였다. 혼합시 WC의 평균결정입경은 $3\mu\text{m}$ 이고, Co는 $1.5\mu\text{m}$ 다. 그리고 Table중의 Co의 기계적 성질은 문헌을 참고하였다.¹¹⁾

Table 1. Material properties.

Materials	Co fraction		Density ρ (g/cm ³)	Young's modulus E_M (GPa)	Poisson's ratio ν_M
	f wt%	vol%			
WC	0	0	15.57	706	0.220
Co	100	100	8.90	210	0.300
WC-16wt%Co	16	25.0	13.80	516	0.213
WC-25wt%Co	25	36.9	13.09	456	0.250

시험편은 길이 55mm, 폭 8mm, 두께 2mm로 직사각형의 판재이며, 시험편의 X선 조사면은 #600의 다이아몬드 휠로 연삭한 후, 다시 랩가공을 하였다.

3.2 X선 응력측정

X선 응력측정은 미소부응력측정장치(PSPC/MSF)를 사용하여 변경법으로 측정하였다. 입사각 ψ 는 $\sin^2 \psi$ 가 0에서 0.5까지 0.1의 간격으로 6단계가 되도록 하였고, 회절각 2θ 는 회절프로파일의 피크점을 포함한 포물선근사법으로 측정하였다. 특성 X선으로는 Fe-K α 선을 사용하였으며, 회절면은 WC상에서는 WC(112)면을, Co상에서는 Co(311)면을 이용하여 X선 응력측정을 하였고, 회절면들은 다른면에서의 회절과 중복되지 않는 독립피크이다. Table 2.에 X선 측정조건을 나타냈다.

Table 2. X-ray diffraction conditions.

	WC	Co
Characteristic X-ray	Fe-K α	Fe-K α
Filter	Mn	Mn
Diffraction plane	WC(112)	Co(311)
Diffraction angle (deg)	145.17	130.54
Detector	PSPC	PSPC
Tube voltage (kV)	30	30
Tube current (mA)	20	20
Irradiated area (mm)	$\phi 4$	$\phi 4$
Irradiated time (sec)	50	100

하중은 Fig.3에 나타낸것 같이 4점 굽힘장치에 의해 시험편에 굽힘부하를 가하였다. 시험편의 표면(압축면)에 부착한 스트레인 게이지로 부하변형률 ϵ_a 을 설정하였다. 부하를 가한 상태에서 X선을 조사하였으며, 부하를 점차 증가시키면서 X선 조사를 반복하였다. 부하변형률은 0, 100, 200, 300, 400, 500×10^{-6} 의 6단계로 하였다.

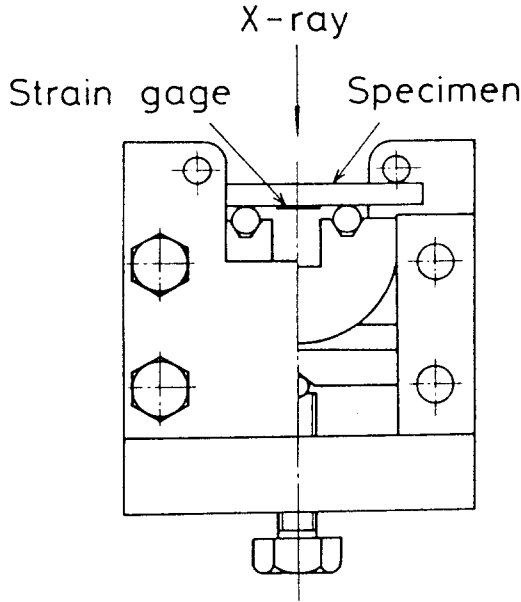


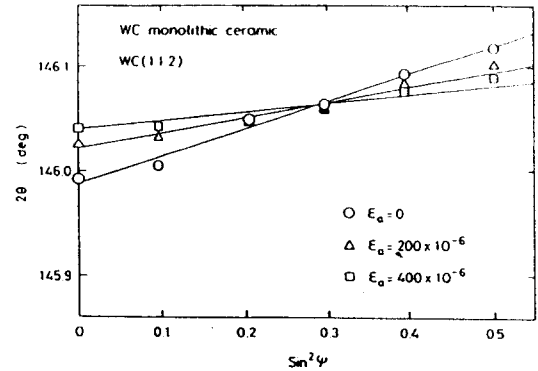
Fig. 3 Schematic illustration of four-point bending jig for X-ray stress measurement.

4. 결과 및 고찰

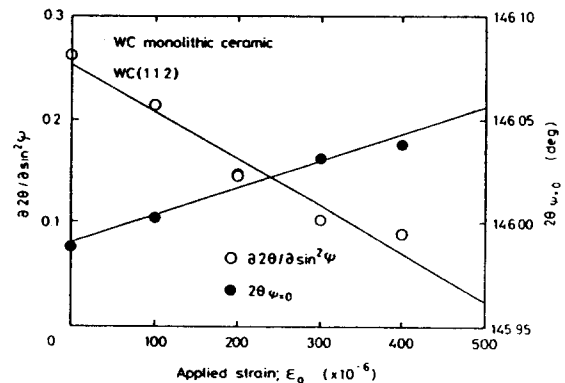
4. 1 $\sin^2\psi$ 선도

부하변형률 $\epsilon_a = 0, 200, 400 \times 10^{-6}$ 에 대한 WC단상의 WC(112)면의 $\sin^2\psi$ 선도를 Fig.4(a)에 나타냈다. 실험점들은 최소자승법에 의해 직선근사가 가능하였고, 그림중의 직선은 회귀직선으로 거의 한점에서 교차하고 있다. $\sin^2\psi$ 선도의 기울기 M은 부하변형률이 증가함에 따라 감소하고 종축과의 교점 $2\theta_{\psi=0}$ 는 증가한다. $\epsilon_a = 0$ 의 경우, $\sin^2\psi$ 선도의 기울기 M가 "+"인 것은 시험편에 압축의 잔류응력이 있다는 것을 나타낸다. 기울기는 부하변형률이 증가할 수록 감소하고 있다. 그리고 Fig.4(b)에 최소자승법에 의한 기울기 M 및 Fig.4(a)에서 2θ 축(y축)과 회귀직선의 교점인 $2\theta_{\psi=0}$ 의 ϵ_a 에 대한 변화를 나타냈다. 역시 이들 관계에서도 직선근사가 가능하였고, 그림중에 최소자승법에 의한 회귀직선을 나타내었

다. Fig.4의 $\sin^2\psi$ 선도 및 M, $2\theta_{\psi=0}$ 와 ϵ_a 와의 관계에서 양호한 직선관계가 얻어졌으며, 이것은 Fig.1에서 가정한 것과 같이 부하응력의 주축방향과 α 상의 주축방향이 일치하고 있다는 것을 의미한다. 이렇게 $\sin^2\psi$ 선도의 기울기와 부하변형률이 구해지면 각상의 상응력을 구할 수 있다.



(a) 2θ vs. $\sin^2\psi$



(b) M, $2\theta_{\psi=0}$ vs. ϵ_a

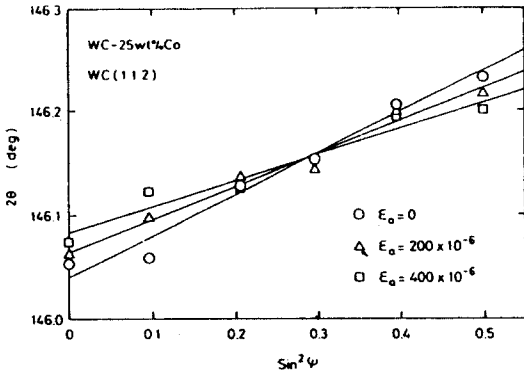
Fig.4 $\sin^2\psi$ diagram for WC(112) of WC monolithic ceramics.

Fig.5(a), (b)에 WC-25wt%Co에 관한 WC(112)면과 Co(311)면의 $\sin^2\psi$ 선도를 나타냈다. WC와 Co의 복합재료의 경우도 단상체와 같이 각각의 성분에 대한 $\sin^2\psi$ 선도를 구할 수 있었고, 이 경우도 Fig.4(a)와 같은 경향을 나타내고

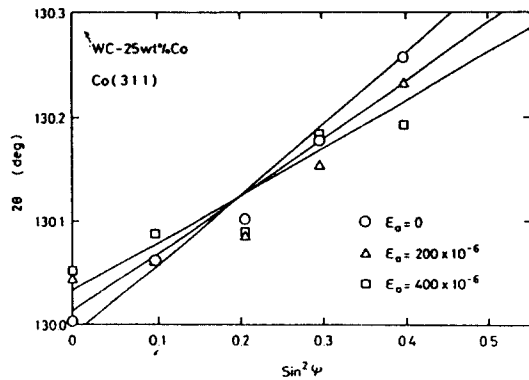
있음을 알 수 있다.

4.2 X선적 탄성정수

단상체의 $\sin^2\psi$ 선도의 기울기와 부하변형률의 변화를 식(13), (14)에 대입하여 구한 단상체의 X선적 영률, X선적 푸와송비 및 응력정수를 Table 3에 나타냈다. X선 회절로 구한 WC 및 Co단상체의 응력정수는 각각 -1555, -649MPa/deg이다. Table 3.의 값들을 Table 1.의 단상체의 값들과 비교하면 거의 일치하였다. 그리고 같은 방법으로 구한 복합재료의 각상에 대한 X선적 탄성정수를 Table 4에 나타냈다. Table 3.에 나타난 단상체의 값과 비교해 보면, 복합재료의 X선적 탄성정수 및 응력정수는 대체적으로 Co상의 체적율 V_f 가 증가할 수록 감소함을 알 수 있다. 이것은 Co상의 체적율이 증가함에 따라 재료에 미치는 WC상의 기계적 성질의 영향이 상대적으로 적어지기 때문이다.



(a) 2θ vs. $\sin^2\psi$ for WC(112).



(b) 2θ vs. $\sin^2\psi$ for Co(311).

Fig. 5 $\sin^2\psi$ diagrams for WC(112) and Co(311) of WC-25wt%Co.

4.3 상응력과 거시적 응력

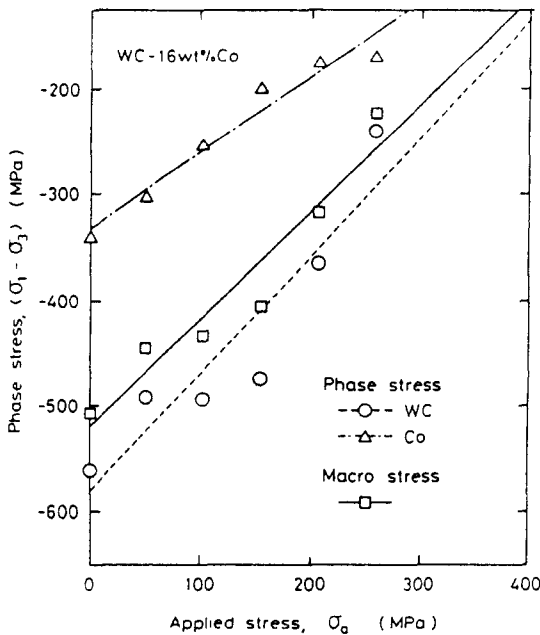
Fig.6(a)에 $\sin^2\psi$ 선도의 기울기 M과 식(7)을 이용해서 구한 상응력 $\langle\sigma_1-\sigma_3\rangle$ 과 부하응력의 관계를 WC-16wt%Co에 대하여 나타냈다. 여기서 거시적 응력 σ_1' 는 사각형으로 나타내었고, Co상의 체적율을 사용하여 복합법칙인 식(11)으로 구하였다. 부하응력 σ_a 가 0일때, 거시적 응력은 표면압축으로 나타났으며, 이것은 WC-25wt%Co에 대해서도 마찬가지이다. 거시적 응력이 압축인 것은 1380°C이상에서의 고온소결과 냉각시에 생기는 온도의 차에 의해 시험편의 내부와 외부에 냉각속도의 이상을 초래하여, 시험편에 열잔류응력이 도입되었기 때문이라 생각된다. 또한 거시적 응력의 차로써 주어지는 상대적인 상응력은 WC

Table 3. X-ray elastic constants of monolithic ceramics.

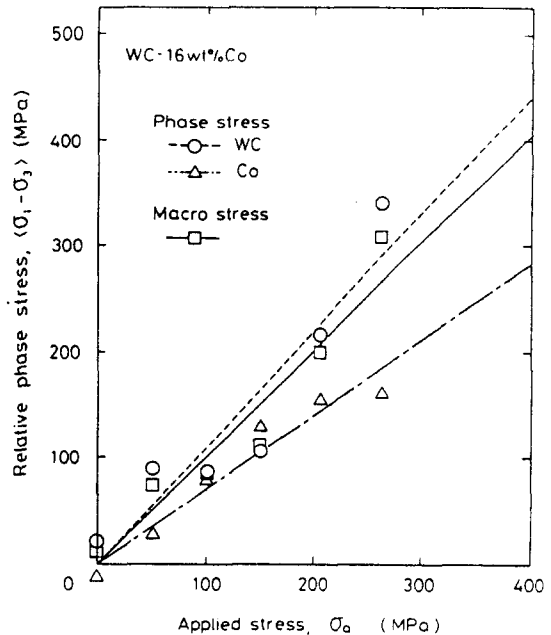
Diffraction plane	X-ray compliance		X-ray elastic constant			Stress constant K (MPa/deg)
	$S_2/2$ ($10^{-3}/\text{GPa}$)	$-S_1$ ($10^{-4}/\text{GPa}$)	$E_x/(1+\nu_x)$ (GPa)	E_x (GPa)	ν_x	
WC(112)	1.76	3.23	568	696	0.225	-1555
Co(311)	6.17	15.96	162	218	0.348	-649

Table 4. Experimental values of X-ray elastic constants of composite ceramics.

Materials	Diffraction plane	X-ray compliance		X-ray elastic constant			Stress constant K (MPa/deg)
		$S_2'/2$ ($10^{-3}/\text{GPa}$)	$-S_1'$ ($10^{-4}/\text{GPa}$)	$E_{x'}/(1+\nu_{x'})$ (GPa)	$E_{x'}$ (GPa)	$\nu_{x'}$	
WC-16wt%Co	WC(112)	1.95	5.68	512	723	0.411	-1394
	Co(311)	4.47	13.66	224	322	0.441	-900
WC-25wt%Co	WC(112)	1.97	3.53	507	618	0.219	-1389
	Co(311)	4.48	11.03	209	272	0.30	-841



(a) Phase stress vs. Applied stress.



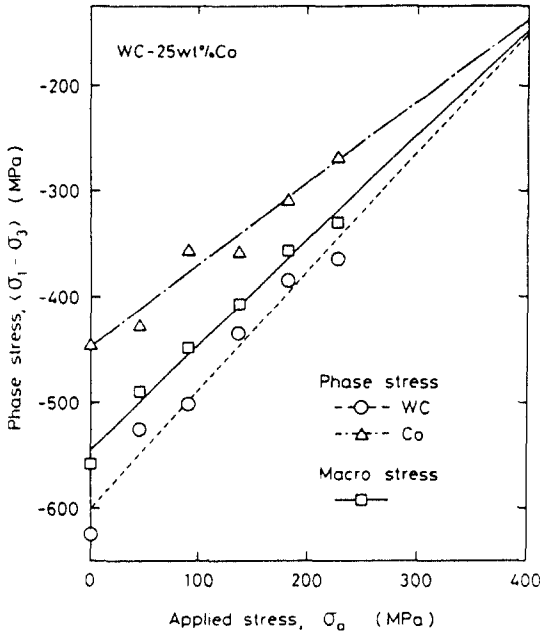
(b) Relative phase stress vs. Applied stress.

Fig. 6 Relation between phase stress and applied stress for WC-16wt%Co.

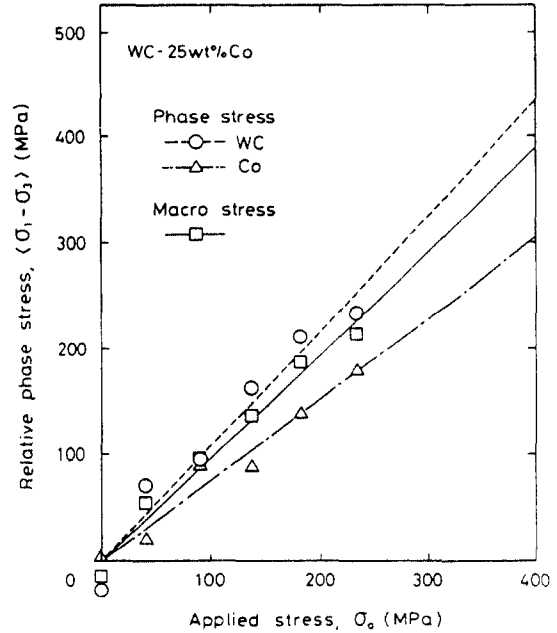
상에서는 압축, Co상에서는 인장으로 나타났다. 이것은 각상의 열팽창계수의 차에 의한 것으로, 각상의 열팽창계수($\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)는 WC상이 5.7~7.2, Co상이 12.5로¹⁴⁾ WC상이 작다. 이로 인해 미시적으로 WC상에는 압축, Co상에는 인장의 잔류응력이 생길 것이며, 이것이 상응력의 차로서 나타난다. 여기에 부하응력을 가하면 상응력은 직선적으로 증가하게 되고, 그 기울기는 영물이 큰

WC상쪽이 크다. Fig.6 (b)는 Fig.6(a)에서의 직선의 종축과의 교점의 변화분을 구한 것이다. 동일 부하응력 σ_a 에 대해서 상응력은 WC상이 Co상보다 크고, 거시적 응력은 부하응력과 거의 일치하고 있음을 알 수 있다.

Fig.7(a),(b)에 WC-25wt%Co에 관한 결과를 나타냈지만, 전반적인 결과는 Fig.6과 동일하다. 한편 Tanaka¹⁵⁾ 등은 WC-25wt%Co의 경우,



(a) Phase stress vs. Applied stress.



(b) Relative phase stress vs. Applied stress.

Fig. 7 Relation between phase stress and applied stress for WC-25wt%Co.

Cu-K α 선을 이용해 WC(211)면의 회절에서 구한 연삭면의 표면(연삭깊이 $5\mu\text{m}$)에는 약 -1500MPa 의 압축응력이 생기며, 그 깊이는 연삭면에 대하여 약 $10\mu\text{m}$ 라고 하였다. 본 시험편의 WC 상은 -625MPa 정도의 압축응력으로 약 42% 정도로 작은데, 이는 다이아몬드휠에 의한 연삭과 랩 가공에 의해 어느 정도 가공잔류응력이 제거되었기 때문이라 생각된다.

Table 5.에 최소자승법으로 구한 상응력 및 거시적 응력의 기울기를 부하응력과 비교하여 나타냈다. 복합법칙으로 구한 σ'_1 와 σ_a 의 비는 WC-16wt%Co에 대하여 1.0076, WC-25wt%Co에 대하여 0.9716으로 복합재료의 거시적 응력은 부하응력과 거의 일치하였고, Co함유량이 다른 재료에 대해서도 복합법칙의 성립이 확인되었다.

Table 5. Phase stress and Macrostress.

Materials	Diffraction Plane	$\frac{\langle \sigma_1 - \sigma_3 \rangle}{\sigma_a}$	$\frac{\sigma'_1}{\sigma_a}$
WC-16wt%Co	WC(112)	1.1081	1.0076
	Co(311)	0.7061	
WC-25wt%Co	WC(112)	1.0961	0.9716
	Co(311)	0.7586	

5. 결 론

X선 응력측정법을 이용하여 WC-Co합금에 대한 각상의 응력을 측정하였다. 먼저 X선 회절에 의한 X선적 탄성정수를 측정하였고, 그 값을 기계적인 값과 비교하였다. 측정된 응력정수로 WC상과 Co상의 상응력을 구하여 미시적 응력과 거시적 응력을 복합법칙에 대하여 검토하였다. 얻어진 결론은 다음과 같다.

1. WC-Co합금에 Fe-K α 선을 이용한 WC(112)면 및 Co(311)면에서의 회절은 모두 독립피크이고, 각상의 상응력을 개별적으로 구할 수 있다.

2. X선 회절로 단상체의 응력정수를 구할 수 있었고, WC 및 Co단상체의 응력정수는 각각 -1555, -649MPa/deg이었다. 또 X선 회절로 구한 단상체의 영률과 푸와송비를 기계적인 성질과 비교하면 거의 일치하였다.

3. 복합재료의 각상에 대해 구한 X선적 영률 $E_x'/(1+\nu_x')$, E_x' 및 응력정수를 단상체의 값들과 비교해 보면, X선적 탄성정수 및 응력정수는 Co상의 체적을 V_f 가 증가할수록 감소하였다.

4. 부하된 응력에 대하여, WC상 및 Co상의 상응력은 비례적으로 증가하였고, WC상의 증가율이 컸다. 부하응력이 0인 경우, 거시적 응력은 표면압축으로 나타났으며, 상대적인 상응력은 WC가 압축, Co가 인장으로 나타났다. 또 복합법칙으로 구한 복합재료의 거시적 응력은 부하응력과 거의 일치하였고, Co함유량이 다른 재료에 대해서도 복합법칙이 성립을 알 수 있었다.

참고문헌

- 1) B.D.Cullity, 韓鳳熙譯, 1990, X線回折, 半島出版社, 서울, pp.556~596.
- 2) 日本材料學會, 1981, X線應力測定法, 養賢堂, 東京, pp.54~88.
- 3) 廣瀨幸雄, 田中啓介, 矢島善次郎, 岡林邦夫, 1979, “高張力鋼の應力腐食割れのフラクトグラフィ的研究”, 材料, 第28卷, 第306號, pp. 189~195.
- 4) Y.Hirose, Z.Yajima, and T.Mura, 1986, “X-ray Fractography on Fatigue Fracture Surfaces of AISI 4340”, Advances in X-Ray Analysis, Vol.29, pp.63~70.
- 5) Y.Hirose, Z.Yajima, and K.Tanaka, 1990, “X-ray Fractographic Approach to Fracture Toughness of AISI 4340 Steel”, Advances in X-Ray Analysis, Vol.33, pp.289~296.
- 6) Y.Hirose, Z.Yajima, and K.Tanaka, 1987, “X-ray Examination of Fatigue Fracture Surfaces of Nodular Cast Iron”, Mech. Beh. Mat. V, pp.551~558.
- 7) 韓鳳熙, 許善茂, 1982, “X線回折에 의한 AISI 4140鋼의 疲勞破壞 壽命豫測에 관한研究”, 大韓金屬學會誌, 第20卷, 第6號, pp.500~506.
- 8) 吳世旭, 朴洙瑩, 金得鎭, 夫明煥, 1993, “X線回折을 이용한 Al7075-T651合金의 破損解析”, 韓國海洋工學會誌, 第7卷, 第2號, pp. 281~291.
- 9) 日本材料學會 X線材料強度部門委員會, 1982, X線應力測定法標準, 東京.
- 10) 田中啓介, 山本雄司, 鈴木賢治, 栗村隆之, 1989, “ジルコニア・アルミナ複合セラミック스의X線的彈性定數”, 材料, 第38卷, 第430號, pp.840~846.
- 11) 香川 豊, 八田博志, 1990, セラミックス基複合材料, 承風社, 東京, pp.96~119.
- 12) 阿部武治編, 1984, 綜合材料強度學講座 Vol. IV, オーム社, 東京, pp.217~219.
- 13) JIS R 1602, 1986, Testing Methods for Elastic Modulus of High Performance Ceramics, p.5.
- 14) 鈴木壽編, 1986, 超硬合金と燒結硬質材料, 丸善, 東京, p.114.
- 15) S.Tanaka, K.Higashi, Y.Hirose and K.Tanaka, 1989, “Grinding Residual Stress in Tungsten Carbides with Various Cobalt Contents”, ICRS3, pp.595~600.