대한기계학회논문집 A권, 제23권 제7호, pp. 1173~1181, 1999

X선 응력측정에 의한 복합재료의 3축 응력해석

부명환* · 박영철* · 廣瀨幸雄**

(1998년 11월 14일 접수)

Tri-axial Stress Analysis of Composite Materials for X-ray Stress Measurement

Myung-Hwan Boo, Young-Chul Park and Yukio Hirose

Key Words : X-Ray Stress Measurement(X선 응력측정), Tri-Axial Stress Analysis(3축 응력해석), Composite Materials(복합재료), Residual Stress(잔류응력), Ψ-Splitter(Ψ스플리트),

Abstract

In X-ray stress measurements for uni-directionally deformed surfaces such as grinding, a strongly curved $\sin^2\Psi$ diagram, so called Ψ-splitter, has been observed recently. It has been known that this is caused by the residual shear stress induced in the deformed layer by external forces. In this case, it is necessary to consider this enough for ceramics and composite materials with tri-axial stress analysis. However, sufficient studies have not been done about the tri-axial stress analysis of the macro stress and micro stress on each phase of the composite materials. The result of obtaining is as follows.

1. Ψ-splitter does not appear in the vertical direction though Ψ-splitter appears in grinding direction in WC-Co cemented carbides. The reversal of Ψ-splitter to each phase does not appear.
2. Ψ-splitter caused in WC-Co cemented carbides has a close relation in dislocation which accumulates in WC phase and phase transformation caused in Co phase.
3. The residual stress on the surface of grinding of each phase is in the state of the compression stress.

1. 서 론

X선 응력측정법[1]은 X선 회절에 의해 Bragg의 회절조건을 만족하는 특정의 결정면에서 측정되는 격자변형률 ε 또는 회절각 2θ를 탄성이론에 기초하여 응력으로 변환하는 방법이다. 이 방법은 회절각 2θ와 $\sin^2\Psi$ (Ψ:시료면법선과 격자면법선이 이루는 각)사이의 선형관계를 이용한다고 하여 2θ-$\sin^2\Psi$법 또는 $\sin^2\Psi$법이라 한다. 이러한 X선 응력측정법의 사용으로 인하여 특정의 조직, 방위 및 격자면에 생기는 변형률을 선택하여 응력을 측정할 수 있는 등 다른 측정방법에서는 전혀 볼 수 없는 극히 미세한 부분의 응력을 측정할 수 있기 때문에 재료강도학 분야에 널리 이용되고 있다.[2~4] 그러나 위와 같은 X선 응력측정법의 응용범위가 확대 됨과 동시에 측정장치의 발전으로 정밀도가 높은 응력해석이 이루어지게 되었으며, 기계가공면 등에 대한 정밀한 응력측정의 결과, 2θ와 $\sin^2\Psi$의 사이 비선형분포가 나타나는 것이 알려지게 되었다.[5~7] 따라서 가공변질층이 존재하는 경우에는 $\sin^2\Psi$선도와 같이 선형관계를 전제로 한 종래의 방법으로는 충분한 평가를 할 수가 없다.[8]

따라서 본 연구에서는 먼저 3축 잔류응력해석을 위하여 Dölle-Hauk법[9,10]에 대하여 간략하게 설명하였다. 그리고 WC입경 및 Co함유량이 다른 WC-Co초경합금과 같은 복합재료에 대하여 연삭으로 유향성가공을 실시하여 가공표면의 각상(WC상, Co상)에 대한 3축 응력해석을 행하였다. 그리고, $\sin^2\Psi$선도의 비선형, 즉 Ψ스플리트거동에 미치는 조직인자의 영향에 대하여 고찰하였다.

* 회원, 동아대학교 기계공학과
** (日) 金澤大學 理學部

또 이러한 결과를 기초하여 본 재료의 유향성가공표면에 생기는 ψ스플리트의 원인에 대하여 각상의 미시기구모델을 제시하고 이를 고찰하였다.

2. X선 응력해석

2.1 Dölle-Hauk법에 의한 3축 잔응력해석[9,10]

시료좌표계의 응력성분 σ_{ij}와 ϕ, ψ방향에 X선 회절에 의해 측정되는 회절각 $\theta_{\phi\psi}$와의 관계를 일반적인 3축 응력상태로 나타내면 식 (1)로 나타낼 수 있다. X선 응력측정법[1]에서는 이 식을 기초로 하여 잔류응력을 구하며, 2θ-$\sin^2\psi$선도의 기울기를 구하여 시료의 응력상태를 판단한다.

$$2\theta_{\phi\phi} = -2\tan\theta_0\frac{1+\nu}{E}\{(\sigma_{11}\cos^2\phi+\sigma_{12}\sin 2\phi + \sigma_{22}\sin^2\phi)\sin^2\psi+\sigma_{33}\cos^2\psi\}-2\tan\theta_0 \times\frac{1+\nu}{E}(\sigma_{13}\cos\phi+\sigma_{23}\sin\phi)\sin 2\psi+ 2\tan\theta_0\frac{\nu}{E}(\sigma_{11}+\sigma_{22}+\sigma_{33})+2\theta_0 \quad (1)$$

먼저, Fig. 1에 나타낸 것과 같이 ψ각의 正의 方向을 ψ_+, 負의 방향을 ψ_-라 정의한다. 그리고 ψ각에 대한 正의 方向의 X선 회절각을 $2\theta_{\phi\psi_+}$, 負의 방향의 X선 회절각을 $2\theta_{\phi\psi_-}$라 정의하고, $2\theta_{\phi\psi_+}$와 $2\theta_{\phi\psi_-}$의 평균과 이에 대한 편차를 각각 a_1, a_2라 하면 다음의 식 (2), (3)이 얻어진다.

$$a_1 = \frac{2\theta_{\phi\phi+}+2\theta_{\phi\phi-}}{2} = -2\tan\theta_0\frac{1+\nu}{E}(\sigma_{11}\cos^2\phi+\sigma_{12}\sin 2\phi + \sigma_{22}\sin^2\phi-\sigma_{33})\sin^2\psi-2\tan\theta_0\left\{\frac{1+\nu}{E} \times\sigma_{33}-\frac{\nu}{E}(\sigma_{11}+\sigma_{22}+\sigma_{33})\right\}+2\theta_0 \quad (2)$$

$$a_2 = \frac{2\theta_{\phi\phi+}-2\theta_{\phi\phi-}}{2} = -2\tan\theta_0\frac{1+\nu}{E}(\sigma_{13}\cos 2\phi + \sigma_{23}\sin\phi)\sin|2\psi| \quad (3)$$

위의 식 (2), (3)에 의해 a_1-$\sin^2\psi$, a_2-$\sin|2\psi|$선도는 선형적인 관계를 이룬다. 또한 ψ=0° 일 때의 변형률 $\varepsilon_{\phi\psi}$를 $\varepsilon_{\phi\psi=0°}$라 나타내면 $\varepsilon_{\phi\psi=0°}$는 식 (1)에 의해 ε_{33}과 일치하여 응력성분에 의해 다음과 같이 된다.

$$\varepsilon_{\phi\phi=0°} = \varepsilon_{33} = \frac{1}{E}\{\sigma_{33}-\nu(\sigma_{11}+\sigma_{22})\} \quad (4)$$

이상의 식 (2), (3)의 구배 및 식 (4)의 관계를 이용하면 6개의 응력성분을 구할 수 있다. 단, 3축 응력해석에는 통상의 $\sin^2\psi$법과는 달리 식 (1)에 나타낸 것 같이 무변형률상태의 격자면간격 d_0 즉 회절각 $2\theta_0$가 필요하다.

2.2 거시적 · 미시적응력 및 상응력

본 실험재료와 같이 WC상과 Co상의 2상으로 구성되는 재료에 Fig. 2와 같은 잔류응력분포가 존재한다고 가정하고, 편의상 WC상과 Co상을 각각 α상과 γ상이라 한다. 그림에서 ${}^m\sigma_{ij}$는 일반적으로 제1종 응력(거시적 응력, macro stress)이라 하

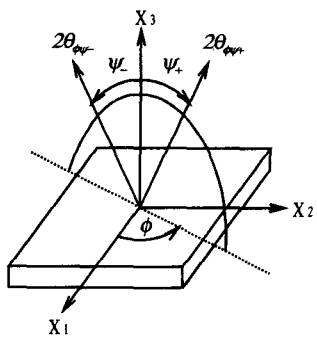


Fig. 1 Definition of diffraction angle of $2\theta_{\phi\psi}$

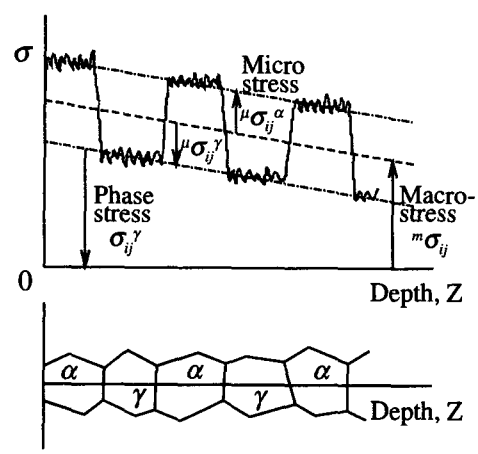


Fig. 2 Macro· micro stress and phase stress.

며 거시적 영역에서의 평균응력이다. 다음에 ${}^{m}\sigma_{ij}^{a}$, ${}^{m}\sigma_{ij}^{\gamma}$는 제2종 응력(미시적 응력, micro stress)이라 하며 a상과 γ상의 평균응력(상응력, phase stress)과 ${}^{m}\sigma_{ij}$과의 차를 나타내는 응력이다. 상기의 분류에 의하면 X선 회절법에 의해 측정되는 잔류응력은 각각의 상에 대한 평균응력(상응력)이 된다. 여기서 모재와 개재물이 균일하게 혼합되어 있고, 복합법칙[11]이 성립한다고 가정하여 각상의 상응력을 σ_{ij}^{p} (p=a, γ)라 하면, 거시적 응력 ${}^{m}\sigma_{ij}$ 및 미시적 응력 ${}^{\mu}\sigma_{ij}^{p}$은 다음 식으로 구해진다.

$$\sigma_{ij}^{a} = {}^{m}\sigma_{ij} + {}^{\mu}\sigma_{ij}^{a} \quad (5\text{-}1)$$

$$\sigma_{ij}^{\gamma} = {}^{m}\sigma_{ij} + {}^{\mu}\sigma_{ij}^{\gamma} \quad (5\text{-}2)$$

X선 회절영역내에서 각상의 상응력의 총합은 ${}^{m}\sigma_{ij}$과 같기 때문에 γ상의 체적률을 f로 나타내면 식 (5)는 복합법칙[11]에 의해 아래와 같이 된다.

$$\langle {}^{m}\sigma_{ij} \rangle = (1-f)\langle \sigma_{ij}^{a} \rangle + f\langle \sigma_{ij}^{\gamma} \rangle \quad (6)$$

또한, 위의 식 (5), (6)에 의해 다음과 같은 미시적 응력의 적합조건식이 얻어진다.

$$(1-f)\langle {}^{\mu}\sigma^{a} \rangle + f\langle {}^{\mu}\sigma^{\gamma} \rangle = 0 \quad (7)$$

3. 실험방법

3.1 공시재와 시험편

공시재로는 1653K에서 진공소결한 WC-Co 초경합금을 이용하였고, 그 기계적 성질을 Table 1에 나타내었다. 시험편은 5× 10× 25mm^3의 블록으로 그 표면을 먼저 연삭가공한 후 진공로를 이용하여 소둔처리(1073K, 18ksec)를 한 후, 이 시험편에 대하여 연삭가공(이하 유향성가공)을 행하였다. 연삭은 직경 180mm의 다이야몬드휠(SDC220-BW)를 사용하였고 회전수는 3460rpm으로 연삭깊이는 10μm씩 3회 왕복 연삭하였다. 가공방향과 X선 응력측정의 방위관계는 Fig. 3에 나타내었다.

3.2 X선 응력측정

X선 응력측정에는 평형빔식의 응력측정 전용장치(MSF)를 사용하였으며, Table 2에 X선 응력측정조건을 나타내었다. 응력측정에는 특성X선인 FeKα선에 의해 WC상은 (112)을, Co상은 (311)의 회절면을 선택하였다. 단, 14Co3재의 Co상의 경우 X선 회절강도가 약하기 때문에 X선의 조사시간을 50초로 하였다.

Table 1 Mechanical properties.

Materials	WC-14Co	WC-22Co	WC-22Co
Code	14Co3	22Co3	22Co6
Co fraction (wt%)	14	22	22
WC grain size (μm)	3	3	6
Co mean free path (μm)	1.26	1.96	2.17
Young's modulus (GPa)	559	480	529

Table 2 X-ray stress measurement condition.

Diffraction plane		WC(112)	Co(311)
Characteristic X-ray		FeK_{α}	
Filter		Mn	
Method		MSF	
Tube voltage	(kV)	30	
Tube current	(mA)	10	
Irradiated area	(mm)	ϕ4	
Irradiated time	(sec)	10	40
X-ray Young's modulus	(GPa)	696	218
X-ray Possion ratio	ν	0.225	0.348

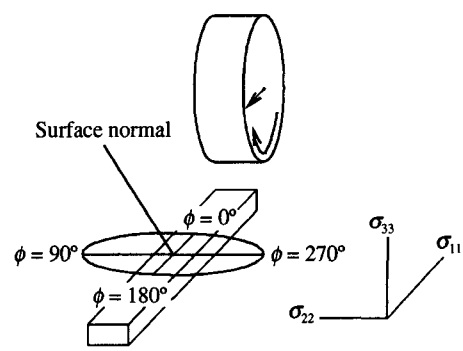


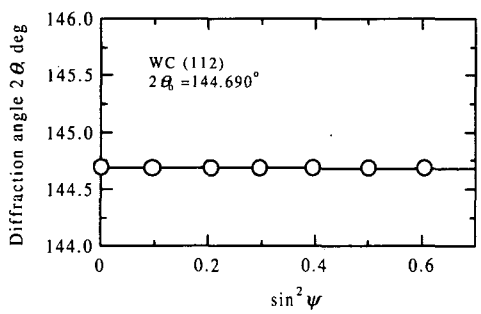
Fig. 3 Relation between the working direction and azimuth ϕ.

4. 실험결과 및 고찰

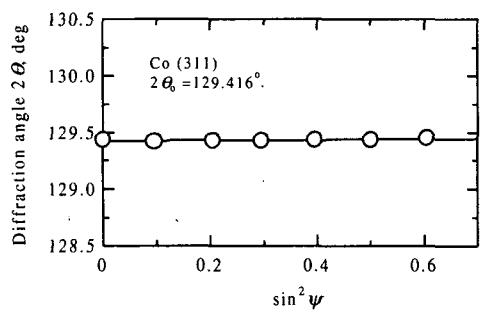
4.1 무변형률상태의 회절각 $2\theta_0$

일반적으로 $\sin^2\psi$선도에서 ψ스플리트가 나타나는 경우, σ_{31}등의 전단응력성분에 의한 것이므로 평면응력상태를 가정한 $\sin^2\psi$법에서는 엄밀한 해석을 할 수 없기 때문에 3축 응력상태를 고려하여 응력해석을 하여야 한다. 그러나 3축 응력해석을 할 경우 식 (1)에서 알 수 있는 것과 같이 무변형률상태의 격자회절각 $2\theta_0$가 필요하므로 진공 열처리한 WC와 Co의 분말시료를 준비하여 무변형률상태의 회절각을 측정하였다.

Fig. 4에 진공로에서 소둔한 WC 및 Co분말의 $\sin^2\psi$선도를 나타내었다. 각상에 대한 2θ와 $\sin^2\psi$와의 관계는 직선 근사가 가능하였고, 그 기울기는 거의 수평을 이루고 있는데 이는 무응력상태를 의미한다. 또 각각의 최대오차는 0.139%와 0.541%로 오차가 작기 때문에 충분한 측정정밀도



(a) WC(112)



(b) Co(311)

Fig. 4 $\sin^2\psi$ diagram for annealed WC powder and Co powder.

라 생각된다. 이상의 WC(112)면과 Co(311)면의 X선 회절결과로 부터 무변형률 상태의 회절각 $2\theta_0$를 각각 144.690° 및 129.416° 라고 결정하였다.

4.2 유향성가공표면층의 $\sin^2\psi$ 선도

Fig. 5는 연삭가공표면에서 얻은 WC(112)면의 $\sin^2\psi$선도이다. 모든 재료에 대해서 ϕ=0° 와 180° 일 때의 $\sin^2\psi$선도에는 명확한 ψ스플리트가 나타났다. ψ스플리트의 정도는 Co함유량의 증가와 함께 조금씩 증가하지만, WC입경의 크기에 대해서는 적어지는 경향을 나타냈다. 그러나 직각방향의 ϕ=90° 와 270° 에서의 $\sin^2\psi$선도는 일치하여 ψ스플리트가 나타나지 않았다.

Fig. 6은 연삭가공표면에서 얻은 Co(311)면의 $\sin^2\psi$선도이다. Fig. 5와 비교하여 ϕ=0° 와 180° 의 사이의 $\sin^2\psi$선도에는 큰 ψ스플리트가 나타났으며, 전단성분의 영향이 강하게 나타난다는 것을 알 수 있다. 또 ψ스플리트의 정도는 Co함유량과 WC입경의 증가와 함께 작아지고 있다. 그러나 ϕ=90° 와 270° 에서의 $\sin^2\psi$선도는 거의 일치하여 ψ스플리트가 나타나지 않았다. 본 실험재료와 같은 WC-Co초경합금은 Co상의 평균두께 λ[12]는 Co함유량 및 WC입경에 비례[13,14]하기 때문에 Co상의 ψ스플리트는 Co상의 평균두께 λ와 관계가 있다. 한편, Hanabusa등[15]은 철강재료를 연삭 및 선삭한 결과 모재와 개제물사이에는 ψ스플리트의 역전이 생긴다고 하였다. 그러나 본 실험재료의 경우, WC상과 Co상의 사이에는 ψ스플리트의 역전은 나타나지 않았으며, 그 이유에 대해서는 후술하기로 한다.

이상과 같이 ψ스플리트현상은 철강재료의 연삭면 및 절삭면[5]과 세라믹재료에서는 ZrO_2단상[16] 및 $ZrO_2 \cdot Al_2O_3$복합재의 ZrO_2상의 연삭면[17]에서 나타난다고 보고되고 있지만, 본 연구에서 사용한 WC-Co초경합금의 연삭면에 대해서도 ψ스플리트가 확인되었다.

4.3 유향성 표면가공층의 3축 잔류응력해석

본 실험에서는 Fig. 5, 6에 나타낸 것 같이 ϕ=90° 와 270° 에서의 $\sin^2\psi$선도가 일치하기 때문에 X선 응력측정법[1]에 따라 σ_{12} 및 σ_{23}를 0이라 하고 Dölle-Hauk법에 의한 3축 응력해석을 행하였다. Fig. 7 및 8은 식 (2)~(4)에 대입하여 구한 잔류응력성분 σ_{11}, σ_{22}, σ_{33} 및 잔류전단응력성분 σ_{31}

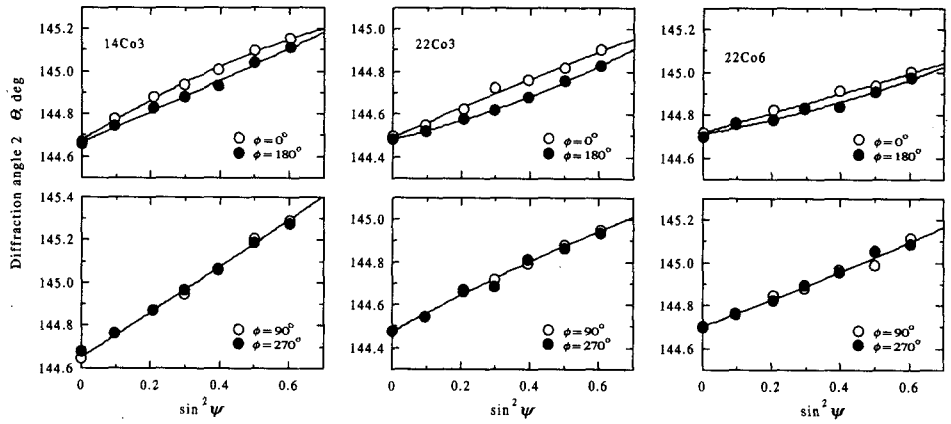


Fig. 5 $\sin^2\psi$ diagram for WC phase obtain from ground surface of WC-Co cemented carbides.

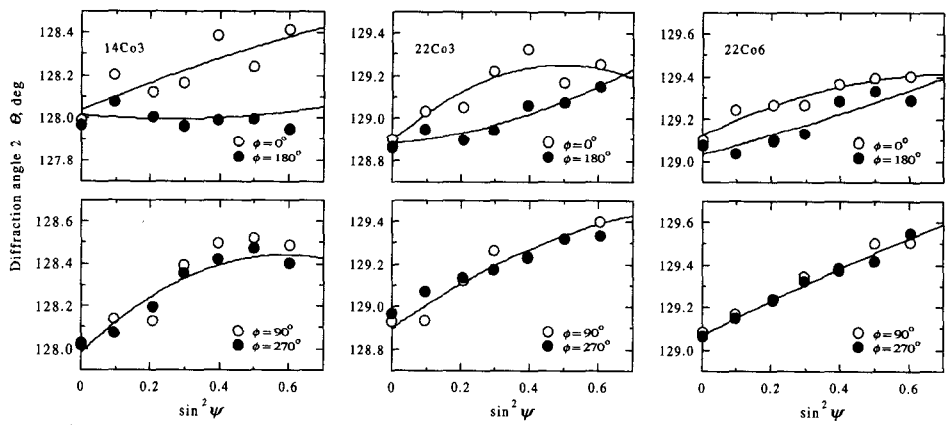
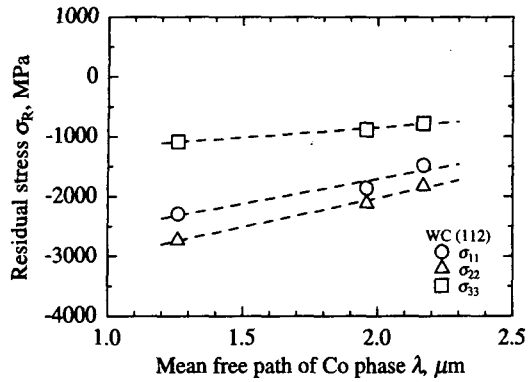


Fig. 6 $\sin^2\psi$ diagram for Co phase obtain from ground surface of WC-Co cemented carbides.

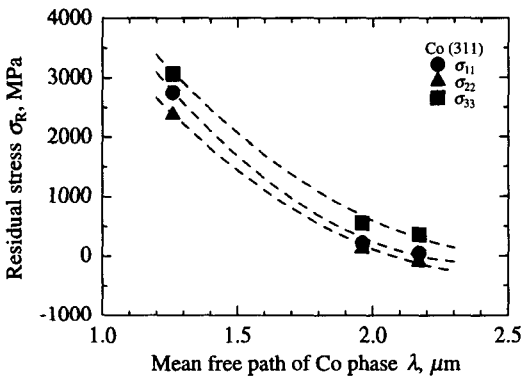
과 Co상의 평균두께 λ와의 관계를 각상에 대하여 나타낸 것이다. 먼저 Fig. 7의 각상에 대한 잔류응력성분을 보면, WC상에 대해서는 압축응력상태를 나타냈으며, λ와 함께 증가하는 경향(正의 기울기)을 나타내었다. 그러나 Co상에 대해서는 인장응력상태를 나타냈으며, λ와 함께 감소하는 경향(負의 기울기)을 나타내었다. 또 연삭방향의 직각방향쪽이 연삭방향보다 큰 압축이 발생하는 것을 알 수 있다. 연삭가공층의 압축잔류응력은 본 실험결과와 같이 직각방향쪽이 큰것이 많지만 그 반대의 결과도 있다[18].

Fig. 8은 각상의 잔류전단응력성분 σ_{31}과 Co상의 평균두께 λ와의 관계를 나타낸 것이다. 먼저 WC상에 대한 σ_{31}을 보면 14Co3재와 22Co3재에서는 λ에 대하여 거의 일정하지만, 22Co6재에서는 크게 증가하였다. 한편, Co상의 σ_{31}은 λ와 함께 거의 직선적으로 증가하는 것을 알 수 있다. 따라서, WC-Co초경합금의 경우 잔류전단응력성분 σ_{31}은 WC상은 WC입경이, Co상은 λ에 의하여 지배된다는 것을 알 수 있다. 그 원인은 다음과 같이 생각된다.

Ψ스플리트의 원인은 X선 침입깊이 범위내에 존재하는 잔류전단응력성분 σ_{31}에 의한 것으로 Hanabusa등[15]은 유향성가공층내부의 전위구조모델를 이용하여 설명하였다. 그는 전단응력이 작용한 결과로서 방향성이 있는 전위분포가 형성되며, 경질의 탄화물입자 주위에 집적하는 전위, 결정입계에 집적하는 전위 및 아결정계에 형성하는 전위 등으로 구성된다고 하였다. 그러나 본 재료의 투과형전자현미경에 의한 전위구조의 관찰결



(a) WC(112)



(b) Co(311)

Fig. 7 Residual stress component of ground surface.

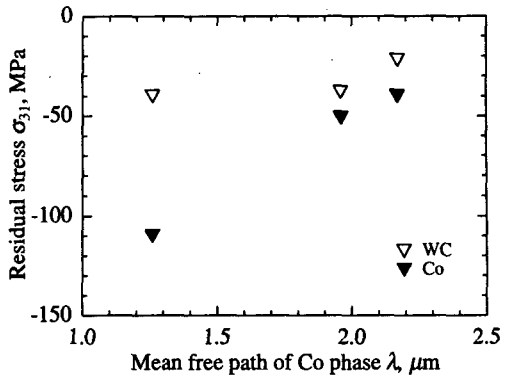


Fig. 8 Relation between residual share stress and mean free path of Co phase.

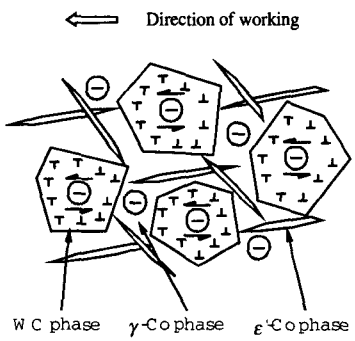


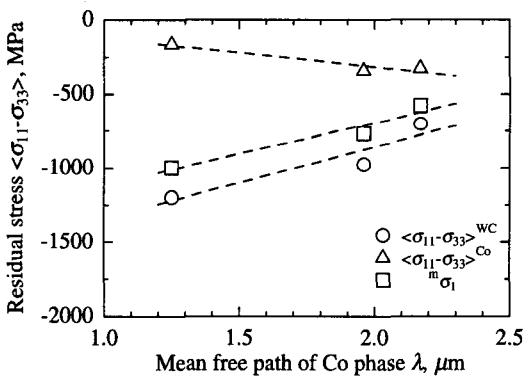
Fig. 9 A model of dislocation in WC phase and phase transformation in Co phase within a uni-directionally deformed layer.

과[19]에 의하면 소성변형한 WC상에는 적층결함이 나타나며, Co상에는 상변태에 의해 극히 미세하게 발달한 라메라(lamera)상의 hcp구조의 ε'-Co상이 생성된다고 하였다. 또한 Co상은 소성변형을 받으면 조직의 일부만이 상변태를 일으키는 것으로 확인 되었다.[13,14] 따라서 WC-Co초경합금의 소성변형기구는 철강재료의 그것과 다르기 때문에 Hanabusa등[15]의 전위구조모델을 그대로 적용할 수 없다는 것을 알 수 있다.

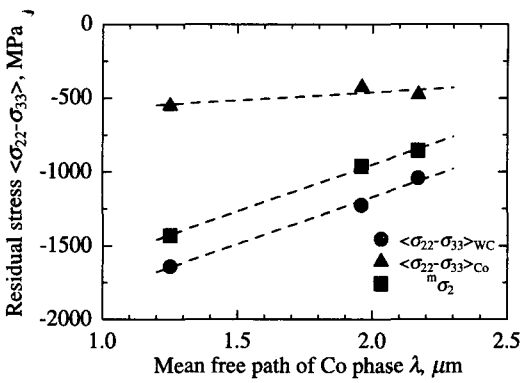
Fig. 9는 본 재료의 유향성가공에 의한 각상의 전위구조모델을 나타낸 것이다. 연삭가공에 의한 전단응력이 작용한 결과로서 WC상중에는 적층결함에 의한 방향성이 있는 전위가 형성되며, Co상중에는 전단응력이 구동력이 되어 응력유기변태가 생겨 fcc구조의 γ-Co에서 hcp구조의 ε'-Co로 변태한 상과 미변태상(γ-Co)으로 구성된다고 생각된다. WC상의 경우, 철강재료의 거동[15]과 같이 입자내부에 집적한 전위에 의한 작용으로서 부의 전단응력상태가 될 것이다. 그리고 14Co3재 및 22Co3재와 같이 Co의 함유량만 증가하는 경우에는 WC상의 입경은 일정하기 때문에 전단응력에는 큰 변화가 나타나지 않을 것이다. 그러나 22Co6재에서와 같이 WC입경이 2배로 증가하는 경우에는 중간상(결합상)으로 존재하는 Co상의 평균두께 λ는 커지게 된다. 이 때문에 본 재료중에 생기는 소성변형은 WC상보다는 Co상에 집중하여 WC상중의 전위밀도는 상대적으로 감소되어 WC상에서 측정되는 σ_{31}은 14Co3재와 22Co3재에 비하여 작아졌다고 생각한다. Co상의 경우, WC상과 같이 소성변형에 의해 부의 전단응력상태에 놓여지게 되지만 변태한 ε'-Co상중에 쌍정

또는 슬립이 발생[19]하여 전단응력을 완화하는 것으로 생각된다. 또, γ-Co상중에 생기는 상변태량은 λ와 함께 증가[13,14]하기 때문에 이에 따른 응력완화가 증가되어 전단응력은 감소하는 것으로 생각된다.

연삭 등과 같은 소성가공에 의해 상변태가 일어나지 않는 철강재료의 경우, 모재과 개재물과의 ψ스플리트거동은 전위구조모델만으로 설명이 가능하다. 그러나 본 재료와 같이 소성가공에 의한 그 조직의 일부가 상변태를 일으키는 경우에는 철강재료의 전위구조모델만으로는 본 재료의 각상에 대한 ψ스플리트거동을 완전히 설명할 수 없기 때문에 전위구조와 함께 소성변형에 의해 생기는 Co상의 상변태의 영향을 고려할 필요가 있다.



(a) $\langle\sigma_{11}-\sigma_{33}\rangle$ direction



(b) $\langle\sigma_{22}-\sigma_{33}\rangle$ direction

Fig. 10 Relation between residual stress and mean free path of Co phase.

4.4 거시적 응력과 미시적 응력

Fig. 10은 3축 응력해석에 의해 얻어진 실험결과에서 식 (5), (6)를 이용하여 구한 WC상 및 Co상의 거시적 응력 ${}^{m}\sigma_1$, ${}^{m}\sigma_2$ 및 상응력을 Co상의 평균두께 λ와의 관계로 나타낸 것이다. 여기서 σ_1 방향은 연삭방향이며, σ_2방향은 연삭수직방향이다. 그 결과 어느 상에 대해서도 응력의 상태는 압축잔류응력이며, 응력은 Co상의 평균두께 λ와 함께 감소하는 경향을 나타내었다. 동일 회절면에서는 연삭수직방향인 $\langle\sigma_{22}-\sigma_{33}\rangle$가 연삭방향인 $\langle\sigma_{11}-\sigma_{33}\rangle$보다 큰 압축응력상태를 나타내고 또 동일 연삭조건에서는 WC상쪽이 큰 압축응력상태를 나타내었다. 거시적 응력을 비교하여 보면 ${}^{m}\sigma_2$이 ${}^{m}\sigma_1$보다 약 1.5배정도의 압축상태를 나타낸다.

Fig. 10의 결과를 식 (6)을 이용하여 계산한 각상의 미시적 응력을 Table 3에 나타내었다. WC상의 미시적 응력은 압축을, Co상은 인장응력을 나타내었다. 그 이유는 Co상쪽이 WC상에 비하여 탄성정수 및 변위저항이 적고 연삭에 의해 거시적 압축잔류응력이 생기기 때문이다.

일반적으로 기계구조물의 부품들은 여러 가지 가공방법에 따라 가공되며 이러한 공정에 의해 내부응력 즉 잔류응력이 잔존하게 된다. 특히 고인성 및 고기능성을 목적으로 하는 세라믹복합재료의 경우 이종재료의 열팽창계수 및 기계적 성질의 차이에 의한 잔류응력은 불가피하며 재료의 강도특성뿐만 아니라 기능성에도 큰 영향을 미치기 때문에 신기술의 개발에서는 잔류응력의 정확한 평가와 제어가 중요하다.

이상의 실험 결과와 같이 X선 회절에 의한 3축 응력해석은 WC-Co와 같은 복합재료의 연삭면에 대한 각상의 미시적 및 거시적 잔류응력을 정확히 측정할 수 있으며 3축 방향에 대하여 해석이 가능하기 때문에 그 활용 가능성이 무한히 넓을 것으로 기대된다.

Table 3 Residual micro stress of ground WC-Co cemented carbides.

Code	Microstress (MPa)			
	${}^{\mu}\langle\sigma_1-\sigma_3\rangle^{WC}$	${}^{\mu}\langle\sigma_1-\sigma_3\rangle^{Co}$	${}^{\mu}\langle\sigma_2-\sigma_3\rangle^{WC}$	${}^{\mu}\langle\sigma_2-\sigma_3\rangle^{Co}$
14Co3	-170	711	-183	767
22Co3	-210	425	-263	535
22Co6	-127	758	-192	391

5. 결 론

WC-Co초경합금에 대한 유향성가공을 실시하여 가공표면층에 생기는 잔류응력상태을 Dölle-Hauk 법에 의한 3축 응력해석을 행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) WC-Co초경합금의 연삭면의 각상에 대해서도 철강재료와 같이 ψ스플리트거동이 나타났으나, 연삭의 수직방향에는 ψ스플리트거동이 나타나지 않았다. 또 각상에 대한 ψ스플리트의 역전이 확인되지 않았다.

(2) 유향성가공에 의해 WC-Co초경합금에 생기는 ψ스플리트거동 즉 전단응력거동은 유향성가공에 의해 WC상중에 생기는 적층결함에 의해 방향성을 가지고 집적하는 전위분포 및 Co상중에 응력유기변태에 의해 생기는 상변태의 정도에 밀접한 관계가 있다.

(3) 각상의 연삭표면의 거시적 응력 및 상응력은 압축응력상태이며, 연삭방향보다 수직방향쪽이 큰 압축응력상태를 보였다. 또, 동일 연삭조건에서는 Co상보다 WC상쪽이 큰 압축응력상태를 나타냈으며, 미시적 응력은 WC상에서는 압축응력을, Co상에서는 인장응력상태를 나타내었다.

참고문헌

(1) 日本材料學會編, 1981, 改著X線應力測定法, p. 54 養賢堂.

(2) 박영철, 허선철, 부명환, 김현수, 강재욱, 1997, "세라믹/금속접합재의 고온 열사이클에 따른 잔류응력분포 및 굽힘강도 특성," 대한기계 학회지, 제21권, 제10호, pp. 1541~1550.

(3) 오세욱, 박수영, 김득진, 부명환, 1993, "X선 회절을 이용한 Al7075-T651합금의 파손해석", 한국해양공학회지, 제7권, 제2호, pp. 281~ 291.

(4) Hirose Y. and Tanaka K., 1986, "X-Ray measurement of Residual Stress near Fatigue Fracture Surfaces of High Strength Steel," *Advances in X-Ray Analysis*, Vol. 29, pp. 265~270.

(5) Wakayabashi M., Nakagawa M. and Nagata A., 1977, "Influence of Grinding Direction on Residual Stress Measured by X-Ray," *Journal of the Japan Society of Precision Engineering*, Vol. 43, pp. 661~667.

(6) Wakayabashi M. and Nakagawa M., 1977, "Analyses of Macro- and Microresidual Stresses," *Journal of the Japan Society of Precision Engineering*, Vol. 44, pp. 710~716.

(7) Dölle H., 1979, "The Influence of Multiaxial Stress States, Stress Gradients and Elastic Anisotropy on the Evaluation of (Residual) Stresses by X-Rays," *J. Appl. Crtst.* Vol. 12, pp. 489~510.

(8) Sasaki T. and Hirose Y., 1994, "A Method of X-Ray Stress Measurement for Composite Materials Considering Macro- and Microstress with Steep Stress Gradient," *Transactions of Japan Society of Mechanical Engineers*, A-61, pp. 1031~1037.

(9) Dölle H. and Hauk V., 1976, HTM, 31, p.165.

(10) Dölle H. and Cohen J. B., 1980, Metallurgical Trans., 11, p. 159.

(11) 香川 豊, 八田博志, 1990, セラミックス基 複合材料, 承風社, pp. 96~119.

(12) Fullman R. L., 1953, *Trans. ASME*, Vol. 3, p. 447.

(13) 부명환, 박영철, 廣瀨幸雄, 1997, "WC-Co 초경합금의 피로균열진전특성에 미치는 Co함유량의 영향," 대한기계학회지, 제22권, 제8호, pp. 1401~1408.

(14) 부명환, 박영철, 廣瀨幸雄, 1997, "WC-Co 초경합금의 피로균열진전특성에 미치는 미시조직의 영향," 대한기계학회지, 제22권, 제8호, pp. 1409~1417.

(15) Hanabusa T. and Fugiwara H., 1981, "Residual Stress in Uni-Directionally Deformed Surface Layer and d-sin$^2\psi$ Diagram by X-Ray Stress Measurement," *J. Soc. Mat. Sci. Japan*, Vol. 30, pp. 1095~1101.

(16) Tanaka N., Kurimura T., Akiniwa Y., Suzuki K. and Nakagawa H., 1989, "X-Ray Residual Stress Measurement of Yttria-Partially Stability Zirconia," *Transactions of Japan Society of Mechanical Engineers*, A-55, pp. 318~325.

(17) Tanaka K., Yamamoto Y., Mine N., Susuki K. and Nakagawa H., 1990, "X-Ray Measurement of Phase Stresses of Zirconia-Alumina Composite,"

Transactions of Japan society of Mechanical Engineers, A-56, p. 402.

(18) Hanabusa T., Fugiwara H. and Y. Fujimoto, 1988, "Residual Stress in Ground Layer of Hot-Pressed Si_3N_4 Ceramics and its Thermal Stability," *J. Soc. Mat. Sci. Japan*, Vol. 37, pp. 210~215.

(19) Sarin V. K. and Johannesson T., 1975, "On the Deformation of WC-Co Cemented Carbides," *Metal Science*, Vol. 9, pp. 472~476.

(20) 田村今男, 堀内 良, 1984, 綜合材料强度學 講座, Vol.2, 材料强度物理學, オ-ム社.