

미소 비커스 압입균열에 의한 초경합금의 파괴 인성치 측정

이 역 섭*, 손 인 수**, 흥 성 경**, 박 원 구***, 황 선 근***

Measurement of Fracture Toughness of WC-Co Composites by Micro-Vickers Indentation Cracks

O. S. Lee*, I. S. Son**, S. K. Hong**, W. K. Park***, S. K. Hwang***

ABSTRACT

Various techniques to measure fracture toughness which is an important parameter to predict fracture behaviors of structural materials have been reported. Among these methods, this paper describes the micro-Vickers indentation crack method to estimate the fracture toughness of some WC-Co composites. Two indentation crack patterns (such as radial-median cracks (or half-penny cracks) and Palmqvist cracks generated during indentation) are referred precisely. The fracture toughness of WC-4.7wt%Co, WC-6wt%Co and WC-9wt%Co composites were estimated by using some equations given by Shetty et al., Niihara et al. and Anstis et al. in this study. We show the reliability of indentation method by comparing the results with those from literatures. The appropriate equation to estimate the fracture toughness in the case of WC-Co composite is given. In addition, some technical informations in terms of the crack length by indentation in estimating the existence of the surface residual stress that prevents to obtain an accurate fracture toughness are presented.

Key Words : Fracture toughness, Micro-Vickers indentation crack, Vickers hardness, Radial median cracks(or half-penny cracks), Palmqvist cracks, Surface residual stress

1. 서 론

WC-Co 복합재료는 공작기계에 사용되는 각종 공구, 광산장비, 벨트요소 등 내마모성, 고경도, 고강도를 요구하는 기계요소에 광범위하게 응용되고 있다. 이러한

초경합금의 일반적인 특성은 경도는 높으나 인성이 부족하여 충격력이나 파손에 대한 저항력이 약한 것이 큰 단점이다. 따라서, 높은 경도와 적당한 인성치를 동시에 가지는 WC 복합재료들이 개발되고 있으며 이에 따라 초경합금의 파괴인성치를 간단한 실험방법으로 결정

* 인하대학교 기계공학과

** 인하대학교 대학원

*** 인하대학교 금속공학과

할 수 있는 방법론에 대한 연구가 많이 수행되고 있다^[1,2,3]. 파괴인성치는 구조용 재료의 파괴거동을 예측할 수 있는 중요한 매개변수이며 이 값을 정확히 측정하기 위한 여러 방법들이 제시되어 왔는데, 대표적인 것으로는 SENB (Single-Edge Notched Beam), CNB (Chevron-Notched Beam), DCB (Double Cantilever Beam) 시편들을 사용하는 방법과 압입시험법 등이 있다. 본 연구에서는 평면변형 파괴인성치 K_{IC} 를 결정하는 방법으로써 미소 비커스 경도계를 이용한 경도압입방법을 도입하였다. 이 방법은 인성치가 낮은 유리, 세라믹등과 같은 취성재료에 유용하며, 상대적으로 실험준비가 간단하고 신속하며 작은 시편으로 실험이 가능할 뿐 아니라, 특별한 부수적 장비가 필요없이 경도압입시험 장치만으로 실험이 가능하다는 것이 큰 장점이다. 그러나, 이러한 잇점에 반해 여러가지 해결되지 않은 문제를 안고 있다. 즉, 균열 길이 측정에서의 정확도, 실험재료에서 발생하는 압입 파괴에 대한 모델의 다양성, 문헌상으로 보고되고 있는 많은 압입 파괴 인성 방정식, SENB 시험과 같이 규격화된 기존 시험 방법에 의한 파괴인성치와 압입 파괴인성치와의 불일치 등은 아직 미해결된 문제들이다.^[3,4]

본 연구는 이러한 문제들을 해결하려는 첫 시도로서 WC-4.7wt%Co, WC-6wt%Co와 WC-9wt%Co를 시편 재료로 사용하여 얻은 실험결과와 여러 문헌으로부터 얻은 WC-Co 복합재료에 대한 파괴인성치를 비교함으로써, WC-Co 복합재료에서의 미소 비커스 압입 경도시험에 의한 재료의 파괴인성치 측정의 유용성을 밝히고, 이의 정확한 파괴인성치를 얻기 위한 조건으로써 재료 표면에 존재 가능한 잔류응력의 유무를 평가하는 비교 자료를 제시하고자 한다.

2. 이 론

Evans 등은 압입 소성역의 존재에 의해 수정된 탄성응력장의 해를 기초 파괴역학 원리와 실험적 자료를 이용한 차원해석에 응용하여, 파괴인성치가 균열길이와 압입크기의 비율에 서로 밀접한 관계가 있다는 것을 밝혔다.^[5] 이로부터 Blendell은 Evans 등의 실험적 자료를 곡선근사화하여 다음의 식을 얻었다.

$$(K_{IC}\Phi/H_v a^{1/2})(H_v/E\Phi)^{2/5} = 0.055 \log(8.4a/c) \quad (1)$$

여기서, K_{IC} : 모드 I 평면 변형 파괴인성치

H_v : 비커스 경도치

Φ : 구속 인자(constraint factor ≈ 2.7)

E : 탄성계수

a : Vickers 압입자의 대각선 길이의 반

c : 균열의 반경

Niihara는 Evans 등이 제시하는 식 (1)의 적용 범위를 조사하였는데, WC-Co 복합재료의 압입 거동에 대한 문헌자료가 식 (1)과 잘 맞지 않음을 알아내고 이들의 오차를 유발시키는 원인에 대한 타당한 이유를 제시했다.^[6] Niihara는 식 (1)을 c/a 에 대한 $(K_{IC}\Phi/Ha^{1/2})(H/E\Phi)^{2/5}$ 의 그래프로 도시하고 Dawihi 등의 실험자료를 비교했는데, 낮은 c/a 값에서는 식 (1)과 Dawihi 등의 실험값들 사이에 차이가 있음을 알 수 있었다. 이러한 오차의 원인을 설명하기 위해 c/a 값에 따라 압입자국 주위의 균열의 형태가 다르다고 전제하여 그에 따른 해석방법을 제시했다. 즉, 압입균열은 그 형태에서 크게 두 가지로 분류할 수 있는데, 어느 정도 큰 c/a 값에서는 균열이 압입자국을 완전히 둘러싸고 있는 half-penny 또는 median cracks 형태 (Fig. 1(a))가 발생되고, 낮은 c/a 값 ($c/a < 2.5$)에서는 Palmqvist cracks 형태 (Fig. 1(b))가 발견되는데, 보통 작은 하중범위에서 Palmqvist 균열이 형성되지만 적당한 인성재료의 경우 (WC-6vol%Co 이상)는 높은 하중범위에서도 이 균열이 형성된다는 사실을 밝혔다.^[6,7]

이 경우는 인성치를 평가하기 위해 식 (2)로 표현되는 l/a 가 c/a 보다 적당하다고 생각하였다.

$$l/a = c/a - 1 \quad (2)$$

여기서, l : 표면 균열의 길이

즉, 각각의 경우에 대해 Niihara는 K_{IC} 를 구하는 관계식을 다음과 같이 표현했다.

Palmqvist cracks의 경우 ($0.25 < l/a < 2.5$)

$$(K_{IC}\Phi/Ha^{1/2})(H/E\Phi)^{2/5} = 0.035(l/a)^{-1/2} \quad (3)$$

Median cracks의 경우 ($c/a > 2.5$)

$$(K_{IC}\Phi/Ha^{1/2})(H/E\Phi)^{2/5} = 0.129(c/a)^{-3/2} \quad (4)$$

또한, 비커스 미소 경도 압입에 의해서 발생하는 표면균열은 세라믹과 cermets의 파괴인성 측정에 널리 이용되고 있는데, 세라믹 재료에서 완전 성장된 압입

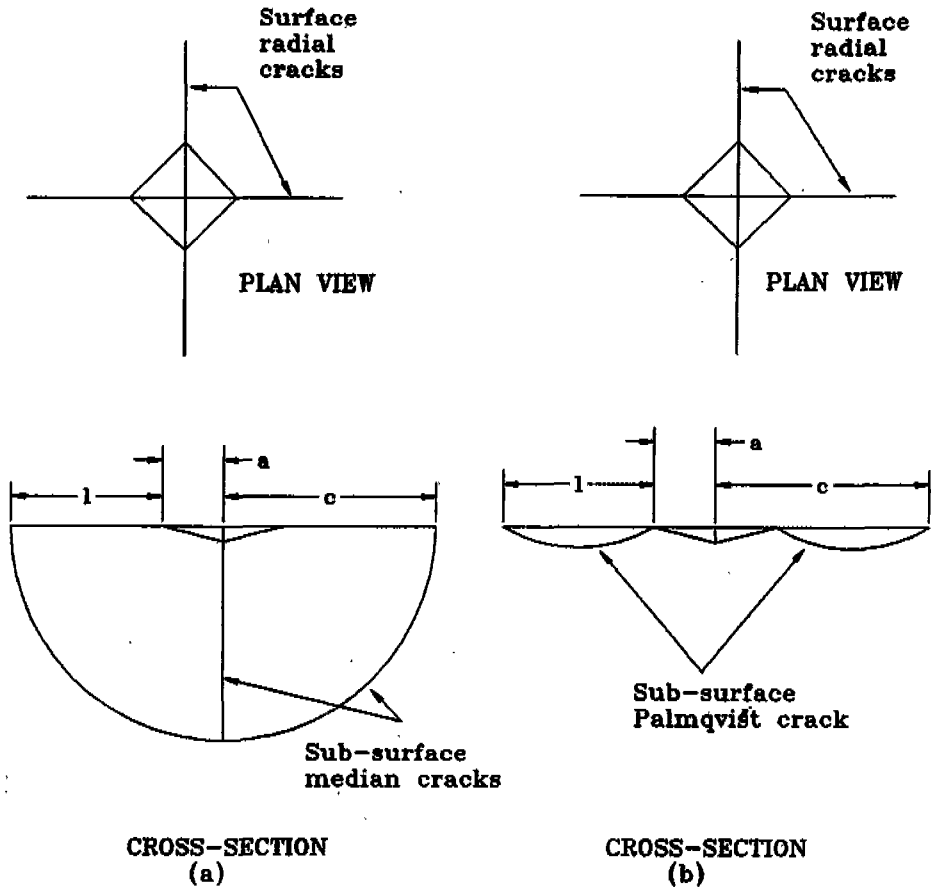


Fig. 1 Geometries of (a) radial median (half-penny) and (b) radial Palmqvist cracks produced by Vickers indentation method

균열은 그 형태가 half-penny (Fig. 1(a))이며 균열의 반경 c 는 압입하중 P 와 다음의 관계를 갖는다.

$$c = kP^{2/3} \quad (5)$$

여기서, k : 실험 상수

식 (5)는 half-penny 균열의 반경과 압입 소성역에 의한 잔류 균열 개구 점력 (residual crack-opening point force)의 평형관계를 반영하는 것이며, 잔류력 (residual force)은 세라믹의 탄소성 특성과 압입자의 형태에 의한 압입 하중과 관련된다. 이에 기초하여 Anstis 등은 균열길이를 부터 파괴인성치를 평가하는 다음 관계식을 제안하였다.^[8,9]

$$K_{IC} = \delta(E/H)^{1/2}(P/c^{3/2}) \quad (6)$$

여기서, δ : 압입자의 형상에만 관여하는 무차원 상수

Anstis 등은 표준 Vickers 다이아몬드 압입자의 경우에 대해 기존의 파괴역학 시험법 (DCB시험)에 의해 구해진 파괴 인성치로 압입 매개변수를 보정하여 $\delta = 0.016 \pm 0.004$ 값을 얻었다.

WC-5vol%Co, 그리고 그 이상의 Co 함량을 갖는 WC-Co 복합재료는 Vickers 압입의 결과로 half-penny 균열로 발전하지 않는다. 이 경우 균열은 Palmqvist 균열 형태 (Fig. 1(b))를 이루는데, 이는 압흔 주위의 얇은 표면에서 균열이 발생됨을 뜻한다.

Half-penny 균열 모델에 의해 적절히 표현할 수 있는 완전 성장된 radial-median 균열과 달리 Palmqvist 균열은 복잡한 균열형태와 소성역을 포함하므로 모델링이 쉽지 않는데, 이는 여러 연구자들에 의해 제안된 서로 다른 파괴역학적 분석에서도 알 수 있다. Shetty 등은 실험적으로 관찰되는 다음의 두 사항을 만족시키는 파괴역학적 분석으로 부터 접근하여 Palmqvist 균열을 해석했다.^[10,11]

① WC-Co 복합재료는 Palmqvist 균열을 형성하며 radial-median 균열모델에서와 같이 압입하중이 균열 길이의 3/2승에 비례하기 보다는 균열길이에 선형적으로 비례하게 된다.^[12] 즉,

$$l = P/4W \tag{7}$$

여기서, W: Palmqvist 균열 저항

② Niihara와 Warren 등이 제안한 다음 관계식에서 K_{IC} , W, H 사이의 관계^[13]

$$K_{IC} = \beta(HW)^{1/2} \tag{8}$$

여기서, β : 압입자 형태에 따른 무차원 상수
W: Palmqvist 균열 저항 ($W = P/4l$)

Palmqvist 균열 형상은 압입하중 증가에 따라 균열 성장이 주로 표면을 따라 이루어지고 균열의 표면이하로의 침투는 소성역 깊이와 잘 대응하는데, 이는 Palmqvist 균열이 3차원 표면 균열보다는 2차원 판통 균열(through-crack)로 표현될 수 있음을 의미한다.

Shetty 등은 Palmqvist 균열은 균열 중앙에 강체 웨지(rigid wedge)를 가진, 그리고 압입 소성역과 같은 wedge 크기를 가진 평형상태에 있는 through-crack인 것으로 간주함으로써 β 에 관한 다음 관계식을 얻었다.^[11]

$$\beta = 1/[3(1-\nu^2)(2^{1/2}\pi^{5/2}\tan\psi)^{1/3}] \tag{9}$$

포아손 비 $\nu = 0.22$, 압입자 각도 $2\psi = 136^\circ$ 인 표준 Vickers 경도계에 대해 $\beta = 0.089$ 을 얻을 수 있다. 따라서, 식 (8)로부터 Palmqvist 균열을 발생시키는 재료에서의 파괴인성치를 구하는 식은 다음과 같다.

$$K_{IC} = 0.089(HW)^{1/2} \tag{10}$$

3. 실험방법

본 연구에서는 미소 비커스 경도시험법을 이용한 초경합금의 파괴인성치를 측정하기 위해서 가공되지 않은 WC-4.7wt%Co, WC-6wt%Co, WC-9wt%Co의 3가지 초경합금을 사용했다.

실험전에 시편을 다이아몬드 휠로 단계적 표면 정마(polishing)한 후, 6 μ m, 3 μ m, 1 μ m의 다이아몬드 분말로 주의를 기울여 마무리 표면 정마를 하였다. 광학 현미경을 사용하여 균열의 길이를 측정하였으며, 시편의 정마 상태에 따라서 균열길이를 측정할 때에 큰 오차를 나타낼 수 있으므로 이에 무엇보다도 주의를 기하였다. 본 실험에서 사용한 초경합금 재료는 가공되지 않은 것으로서 잔류응력이 존재하지 않지만 일단 잔류응력이 존재할 가능성이 있는 재료 표면두께(Exner는 WC-Co 합금에서 표면 연마에 의한 압축응력장의 깊이가 약 30 μ m이라고 밝혔다^[12])보다 상당한 두께를 정마(polishing)하여 잔류응력의 소지를 없애고 실험을 행하였다.

실험장비는 980N까지 하중을 가할 수 있는 표준 미소 비커스 경도계를 사용하였고, 하중시간은 15초, 하중범위 98~490N에서 실험을 행하였다. 압입 실험 후 즉시 경도계에 부착된 200, 400, 600 배율의 광학 현미경을 통해 압입 후 발생하는 표면균열 길이를 측정하였다. Fig. 2는 하중 294N에서 비커스 압입자의 압흔 사진이다.

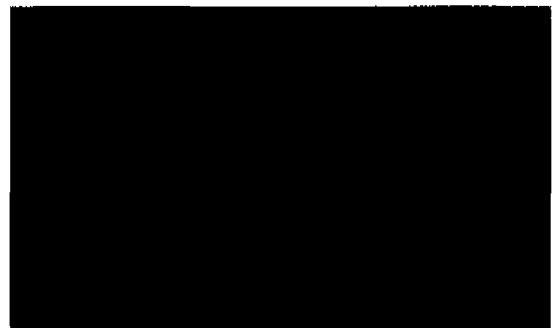


Fig. 2 Optical micrograph of the Vickers indentation; WC-6wt%Co, 294N

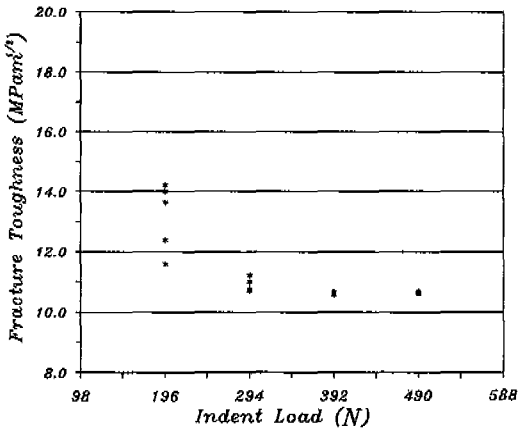


Fig. 3 Relationship between fracture toughness and indentation load in WC-4.7wt%Co; analysed by Shetty eq. (10)

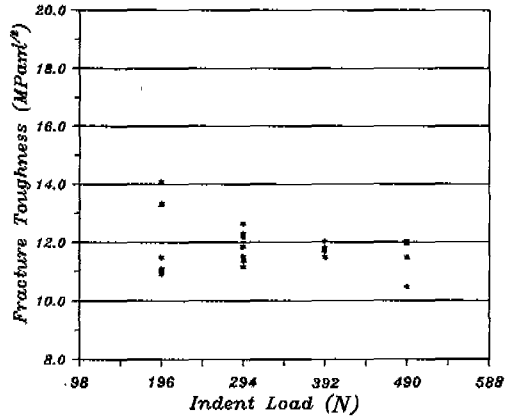


Fig. 5 Relationship between fracture toughness and indentation load in WC-9wt%Co; analysed by Shetty eq. (10)

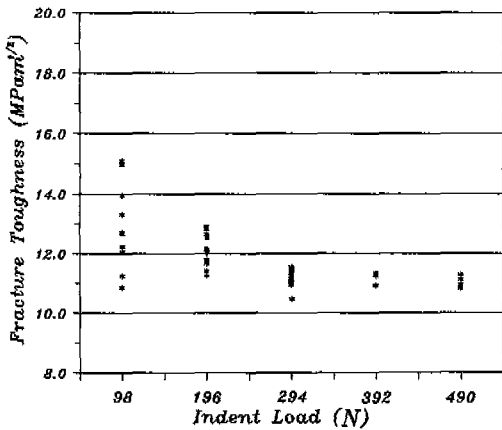


Fig. 4 Relationship between fracture toughness and indentation load in WC-6wt%Co; analysed by Shetty eq. (10)

4. 실험결과 및 고찰

4-1 미소 비커스 압입균열법에 의한 파괴인성치 측정

각 재료에 하중 98N, 196N, 294N, 392N 그리고 490N을 가하여 얻은 압입 표면균열의 길이로 부터 Niihara 등의 식 (3), Shetty 등의 식 (10)과 Anstis 등의 식 (6)을 적용하여 재료의 파괴인성치를 결정하고, 각 하중에 따른 파괴인성치를 Fig. 3, 4, 5에

나타내었다.

Fig. 4의 그래프는 WC-6wt%Co 복합재료를 사용하여 Shetty 등의 식 (10)으로 산정한 파괴인성값을 나타내고 있는데, 낮은 하중에서 얻은 파괴인성값이 높은 하중에서 얻은 값보다 클 뿐만 아니라 넓은 범위에 분포되어 있어 (98N에서 표준 편차 1.435, 196N에서 표준 편차 0.591, 294N에서 표준 편차 0.290, 392N에서 표준 편차 0.162, 490N에서 표준 편차 0.169) 정확한 파괴인성치를 얻기가 매우 곤란함을 알 수 있다. Fig. 4에서와 마찬가지로 Fig. 3, Fig. 5에서도 294 ~ 490N의 하중을 사용했을때의 파괴인성치가 작은 표준 편차를 나타내고 있어 이 하중에서 얻은 결과가 낮은 하중에서의 결과보다 더 신뢰할 수 있는 것으로 사료된다. 이는 기본적으로 시편 표면 정마상태에 기인한 균열 길이의 측정에 따른 오차일 수도 있으며, 낮은 하중에서는 c/a 또는 l/a 값이 작기 때문에 이 값의 분포 오차가 파괴인성치에 미치는 영향이 높은 하중에서의 영향보다 크게 되기 때문이다. 초경합금보다 취성이 강한 세라믹재료에서는 98N 이하에서도 큰 c/a 값을 얻을 수 있겠지만, WC-Co 복합재료와 같은 재료에서는 비커스 압입균열시험에서 294N 이상의 높은 하중을 필요로 한다.

미소 비커스 압입균열로부터 평가된 파괴인성치가 결합제로 쓰인 Co의 함량에 따라 변화하는 양상을 관찰하기 위하여, 참고문헌으로부터 얻은 파괴인성치의 자료와 비교하여 실험값에 대한 고찰을 하였다. Laugier

Table 1 Experimental results of fracture toughness of WC-Co by micro-Vickers indentation method (load 294 ~ 490N)

Co contents (wt%)	Grain size (μm)	Vickers hardness (GPa)	c/a	$K_{IC}^{(9)}$ (MPa√m)	$K_{IC}^{(10)}$ (MPa√m)	$K_{IC}^{(6)}$ (MPa√m)
4.7	2	17.12	1.95~2.3	13.4 (σ=0.246)	10.73 (σ=0.184)	11.84 (σ=0.682)
6.0	1.2	15.62	1.78~2.07	14.47 (σ=0.328)	11.17 (σ=0.256)	13.71 (σ=0.563)
9.0	1.2	13.72	1.57~1.78	15.79 (σ=0.685)	11.73 (σ=0.503)	15.65 (σ=0.883)

$(K_{IC}^{(9)}): (K_{IC} \Phi / Ha^{1/2}) (H/E\Phi)^{3/5} = 0.035 \log(l/c)^{-1/2}$
 $K_{IC}^{(6)}: K_{IC} = \delta(E/H)^{1/2} (P/c^{3/2})$, $K_{IC}^{(10)}: K_{IC} = 0.089(HW)^{1/2}$,
 σ : Standard Deviation

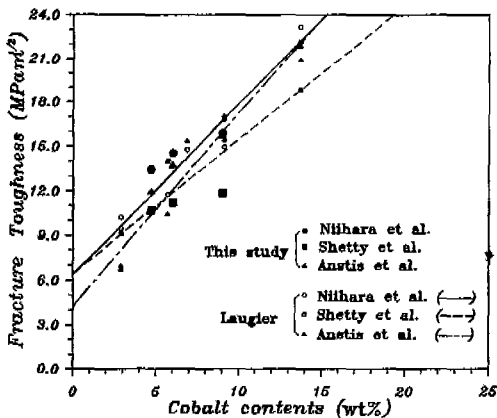


Fig. 6 Comparison of experimental fracture toughness to those from literatures

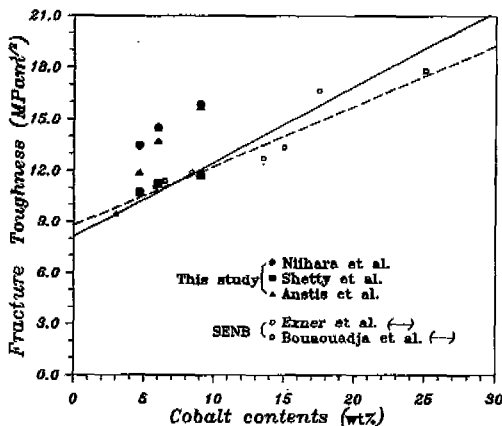


Fig. 7 Comparison of experimental fracture toughness to those from literatures

는 압입 균열시험을 한 후 여러가지 파괴인성 적용식을 사용하였는데,^[3,4] 이 중에서 위에서 제시한 3개의 해석 방정식(Niihara 등의 식, Shetty 등의 식, Anstis 등의 식)을 사용하여 산정한 Laugier의 실험 결과치(394 ~ 490N 하중 사용)와 Table 1에 나타낸 본 연구의 결과를 Fig. 6에 도시하여 비교하여 보았다.

Fig. 6에서는 Co 함량에 따라 파괴 인성치가 증가함을 보이며, Laugier가 발표한 자료와 실험 결과치가 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 그러나, WC-Co 복합 재료에서 발행하는 표면 Palmqvist 균열에 대한 적용식 (3)과 식 (10)에 의한 값들이 서로 차이를 나타내고 있으며, 반면에 half-penny 균열로 모델링한 식 (6)에 의한 값이 오히려 식 (3)에 의한 값과 유사성을 가지고 있다.

Exener 등과 Bouaouadja 등^[14,15]이 SENB 시험 방법으로 구한 파괴인성치와 본 연구의 결과치를 Fig. 7에 나타내었는데, 본 연구에서 사용한 3가지 식에 의한 파괴인성치들이 어느 정도의 차이를 보이지만, Exener 등과 Bouaouadja 등이 얻은 자료와 비교할 때 Shetty 등이 제안한 Palmqvist 균열식 (10)으로부터 결정된 파괴인성치가 SENB 시험에 의한 파괴인성치에 아주 접근하여 있다는 것을 알 수 있다.

4-2 미소 비커스 압입 균열법에서 재료의 표면 잔류응력과 미세구조의 효과

비커스 압입 균열법으로 얻은 파괴인성치가 실제값에 근접하는 값으로 인정되기 위해서는 몇 가지 사항을 고려하여야 한다. 첫째, 비커스 압입 시험시 흔히 무시할 수도 있는 압입전의 표면응력 상태이다. 이 표면 잔류응력은 기계적 손상, 열처리, 이온 교환, 이온 폭발 등의 여러가지 여건에 의해 주어질 수 있는데, 압축 표면 잔류응력이 존재할 경우에는 표면 잔류응력이 존재하지 않을 경우의 평형 균열길이보다 감소하여 높은 파괴인성치로 산정되고, 인장 표면잔류응력의 경우는 이와 반대일 것이다. 예를 들어, 표면 연마에 의한 기계적 손상의 경우는 압축 잔류응력이 작용하게 된다. 이렇게 발생가능한 재료 표면에서의 잔류응력의 존재 유무 평가와 그의 정량적 평가가 미소 비커스 압입경도법을 이용하여 수행되어져 왔으며, 우선 이에 대해 간단한 설명을 하겠다.

Ikuma와 Virkar는 PSZ(partially-stabilized ZrO₃), PSH(partially-stabilized HfO₂), ZTA 재

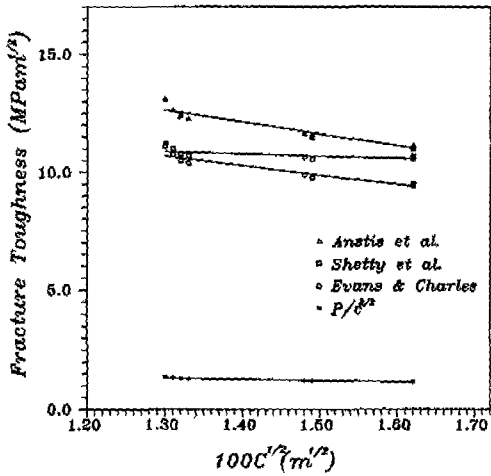


Fig. 8 Fracture toughness of WC-4.7wt%Co plotted as a function of $c^{1/2}$

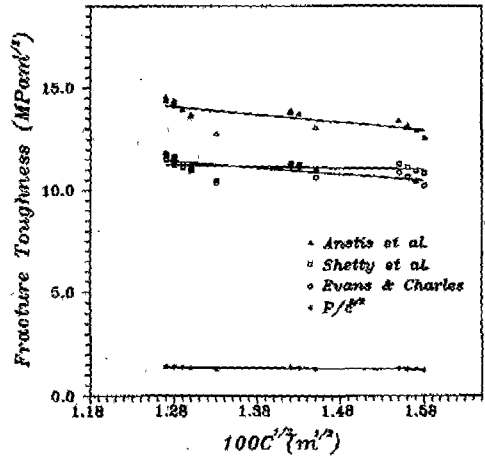


Fig. 9 Fracture toughness of WC-6wt%Co plotted as a function of $c^{1/2}$

표등에 대해서, Evans와 Charles의 식 (1)을 이용하여 재료의 파괴인성치를 계산하였는데, 그들은 이들 압축 잔류응력을 가진 재료에서 $c^{1/2}$ 증가에 따라 파괴인성치 K_{IC} 값이 선형적으로 증가함을 알아냈다.^[16,18]

또 Green은 Anstis 등의 식 (6)을 이용하여 ZTA 재료에서의 $c^{1/2}$ 에 대한 K_{IC} 값의 그래프를 도시했는데, 이로부터 표면 잔류응력이 존재하지 않는 ZTA에서는 $c^{1/2}$ 에 대하여 $P/c^{3/2}$ 값이 무관한 반면에 표면 잔류응력이 존재하는 ZTA는 $c^{1/2}$ 이 증가함에 따라 $P/c^{3/2}$ 값이 선형적으로 감소함을 알 수 있었다.^[17]

위에서 설명한 바와 같이 미소 비커스 경도법에 의한 잔류응력 측정법으로서 $c^{1/2}$ 에 대한 K_{IC} 값의 상관관계를 이용하였는데, $c^{1/2}$ 에 대한 K_{IC} 값의 기울기는 실험재료와 K_{IC} 계산을 위해 사용한 비커스 압입 파괴방정식에 의존한다. 즉 실험재료의 응력 자유조건과 잔류압축 또는 인장응력 조건에서의 $c^{1/2}$ 에 대한 K_{IC} 값의 그래프를 서로 비교하여야만 표면 잔류응력의 유무를 알 수 있으며 압축과 인장응력의 구분이 가능하다.

본 연구에서는 충분한 정마를 거친 초경합금 3가지에 대해 $c^{1/2}$ 에 대한 K_{IC} 값의 그래프를 도시함으로써 실험재료와 균열형태에 따른 K_{IC} 지배방정식에 따라 잔류응력이 존재하지 않는 경우의 $c^{1/2}$ 에 대한 K_{IC} 의 기울기를 개략적으로 평가해 보았다. Fig. 8은 $c^{1/2}$ 에 대한 WC-4.7wt%Co의 파괴인성치를 나타낸 그래프이며, Fig. 9는 WC-6wt%Co, Fig. 10은 WC-9wt%Co에 대한

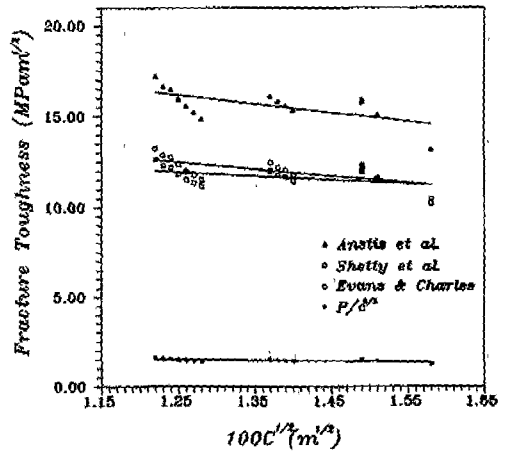


Fig. 10 Fracture toughness of WC-9wt%Co plotted as a function of $c^{1/2}$

그래프이다. 세 그래프가 모두 다음과 같은 유사한 경향을 나타내고 있다. 우선 $c^{1/2}$ 는 $P/c^{3/2}$ 의 값과는 무관함을 알 수 있으며 이는 Green의 실험결과와 잘 일치하고 있다.^[17] 또 half-penny 균열형태의 모델에서 유도된 파괴인성 지배방정식 (Anstis 등의 방정식 (6)과 Evans와 Charles의 방정식 (1))에 의한 파괴인성값은 $c^{1/2}$ 증가에 대해 약간의 감소경향을 보이고 있으며, Palmqvist 균열형태의 모델에서 유도된 파괴인성 지배방정식 (Shetty 등의 방정식 (10))에 의한 파괴인성값

은 $c^{1/2}$ 의 증가에 대해 거의 무관함을 알 수 있다. 이 결과는 Ikuma와 Virkar 그리고 Green이 발표한 낮은 c/a 범위에서 각각 Evans와 Charles의 방정식 (1)과 Anstis 등의 방정식 (6)에 의해 구한 파괴인성치는 응력자유재료에서 $c^{1/2}$ 의 증가에 일정한 값을 갖지 않는다는 내용과 일치한다. 즉, 낮은 c/a 범위에서 Palmqvist 균열을 형성하는 WC-Co 초경합금의 경우 Palmqvist 균열 모델에 따라 유도된 방정식 Shetty 등의 식 (10)으로부터 구한 파괴인성치는 $c^{1/2}$ 에 대해 무관하게 일정한 값을 갖지만, half-penny 균열 모델에 따라 유도된 방정식 (1)과 (6)으로부터 구해진 파괴인성치는 $c^{1/2}$ 의 증가에 대해 감소하는데 그 이유는 WC-Co 초경합금이 half-penny 균열 모델에 따라 유도된 방정식 (1)과 (6)의 적용범위 (c/a) 약 2.5) 밖에 있기 때문이라고 결론지을 수 있다. [5, 16, 17, 18, 19]. Figs. 8, 9, 10에 제시된 표면 응력자유 재료의 $c^{1/2}$ 에 대한 K_{IC} 의 그래프를 초경합금 WC-Co의 표면 잔류응력의 존재 유무를 평가하기 위한 비교 자료로서 제시하였다.

미소 비커스 압입 균열법에서 다음으로 중요하게 고려되어야 할 사항이 재료의 미세구조가 압입균열 형태와 길이에 미치는 효과이다. 등방성 재료의 경우 압흔 구석에서 발생하는 표면균열의 크기가 모두 같고, 압흔의 대각선을 따라 등축이다. 그러나, 취성이 큰 다결정 재료에서 미세구조는 균열 예상로와 만나는 기공 (porosity)이나 입자 경계면에서의 균열정지 그리고 입자 경계를 따른 굴절등의 여러면에서 압입균열에 영향을 미친다. 그리고, WC-Co 초경합금의 미세구조와 파괴인성치 사이의 관계에 대한 연구도 상당히 많이 발표되었는데, Liu와 Zang 등은 WC의 입자 크기가 증가할수록 K_{IC} 가 증가한다고 발표하였다. [20, 21] 즉, 같은 Co 함량을 가진 재료에서도 WC의 입자 크기에 따라 상이한 파괴인성치를 얻을 수 있다는 것을 유의하여야 한다.

5. 결 론

미소 비커스 압입균열법을 이용하여 몇 가지 WC-Co 초경합금의 모드 I 평면변형 파괴인성치를 결정하였다. 각종 문헌상에서 보고되고 있는 여러 개의 해석 방정식을 적용하여 WC-Co 복합재료의 파괴인성치를 얻었고, 해석 방법에 따른 인성값을 검증하여 다음의 결과를 얻었다.

1. WC-Co 복합재료는 취성이 큰 재료이면서도 비교적 높은 파괴인성치를 가지므로 294N의 하중으로 압입 시 시편의 표면에서 Palmqvist 균열을 형성하며, 이에 적용할 수 있는 식은 Niihara 등에 의한 방정식과 Shetty 등에 의한 방정식이다.

2. WC-4.7wt%Co, WC-6wt%Co, WC-9wt%Co 초경합금을 압입균열법으로 해석하여 구한 평면변형 파괴인성치는 Shetty 등의 식을 사용할 때 기존의 파괴인성치 측정방법인 SENB 시편을 이용한 인성치와 아주 유사한 값을 얻었다.

3. WC-Co의 압입균열법은 Co의 함량이 커질수록 높은 하중을 사용하여야 신뢰할 수 있는 결과를 얻을 수 있으며, 정확한 표면 균열을 측정하기 위해서 최소한 1mm 입자 크기의 다이아몬드 분말을 사용하여 세심한 정마를 할 필요가 있다. 또한 표면 잔류응력의 존재 유무를 고려하여 압입 균열 시험 전의 시편의 가공상태가 명시되어야 하며, 재료의 미세구조 역시 그 영향이 고려되어야 한다.

4. 표면 응력자유 재료의 $c^{1/2}$ 에 대한 K_{IC} 의 그래프를 초경합금 WC-Co의 표면 잔류응력의 존재 유무를 평가하기 위한 비교 자료로서 제시하였다.

후 기

본 연구는 과학재단 특정기초 연구과제 (92-23-00-13) 지원에 의해 수행되었으며 이에 감사를 드립니다.

참고문헌

1. J. P. Hong, "A study of the cracking process and the fracture toughness of WC-Co alloys", PhD thesis, Brown University, 1982.
2. G. D. Quinn, J. Salem, "Fracture toughness of advanced ceramics at room temperature", J. Res. Nat. Inst. Stand. Tech., 97, 5, 1992.
3. C. B. Ponton and R. D. Rawlings, "Vickers indentation Fracture toughness test: Part 1", Mater. Sci. Technol., 5, (9) 865-872, 1989.
4. C. B. Ponton and R. D. Rawlings, "Vick-

- ers indentation Fracture toughness test: Part 2", Mater. Sci. Technol., 5, (10), 961-976, 1989.
5. A. G. Evans and E. A. Charles, "Fracture Toughness Determinations by Indentation", J. Am. Ceram. Soc., 59, 7-8, 371-372, 1976.
 6. K. Niihara, R. Morena, D. P. H. Hasselman, "Evaluation of K_{IC} of brittle solids by the indentation method with low crack-to-indent ratios", J Mater. Sci. Lett., 1, 13-16, 1982.
 7. J. Lanford, "Indentation microstructure in Palmqvist crack regime", J Mater. Sci. Lett., 1, 493-495, 1982.
 8. G. R. Anstis, P. Chntikul, B. R. Lawn, D. B. Marshall, "A critical evaluation techniques for measuring fracture toughness", J. Am. Ceram. Soc., 64, 533-538, 1981.
 9. M. T. Laugier, "The elastic/plastic indentation of ceramics", J. Mater. Sci. Lett., 4, 1539-1541, 1985.
 10. K. K. Shetty, I. G. Wright, P. N. Mincer, A. H. Clauer, "Indentation fracture of WC-Co cermets", J. Mater. Sci., 20, 1873-1882, 1985.
 11. D. K. Shetty, I. G. Wright, "On estimating fracture toughness of cemented carbides from Palmqvist crack sizes", J. Mater. Sci. Lett., 365-368 1986.
 12. H. E. Exner, Trans. Met. Soc. AIME, 245, 677-683, 1969.
 13. K. Niihara, "A fracture mechanics analysis of indentation-induced Palmqvist crack in ceramics", J. Mater. Sci. Lett., 2, 221-223, 1983.
 14. E. L. Exner, Pickens, and J. Gurland, "A comparison of indentation crack resistance and fracture toughness of WC-Co alloys", European Symposium on Powder Metallurgy, Vol. 1, 4-8, 1978.
 15. N. Bouaouadja, M. Hamidouche, H. Osmani, "Fracture toughness of WC-Co cemented carbides at room temperature", J. Mater. Sci. Lett., 13, 17-19, 1994.
 16. Y. Ikuma and A. V. Virkar, "Crack-size dependence of fracture toughness in transformation-toughened ceramics.", J. Mater. Sci., 19 2233-2238, 1985.
 17. D. J. Green "Comments on 'crack-size dependence of fracture toughness in transformation-toughened ceramics'", J. Mater. Sci., 20 4239-4241, 1985.
 18. Y. Ikuma and A. V. Virkar, "Reply to comments on 'Crack-size dependence of fracture toughness in transformation-toughened ceramics' J. Mater. Sci., 20, 4241-4244, 1985.
 19. C. B. Ponton and R. D. Rawlings, "Dependence of the Vickers indentation fracture toughness on the surface crack length", Br. Ceram. Trans. J., 88, 83-90, 1989.
 20. Y. H. Liu and S. H. Zang, "Relationships between fracture toughness and microstructure of WC-Co cemented carbide alloys".
 21. L. Lindau, "On the fracture toughness of WC-Co cemented carbides" Fracture, Vol. 2, 19-24, 1977.