(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 공개특허공보(A)

(11) 공개번호 10-2015-0007884
(43) 공개일자 2015년01월21일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)
G06F 19/00 (2011.01)
(21) 출원번호 10-2013-0082484
(22) 출원일자 2013년07월12일
심사청구일자 2013년07월12일

(71) 출원인
서강대학교산학협력단
서울특별시 마포구 백범로 35 (신수동, 서강대학교)
(72) 발명자
이형일
경기도 고양시 일산서구 대산로212번길 26 대화성저건영1502-304
현홍철
경기도 고양시 일산동구 백석로 109 백송마을 309-409호
(뒷면에 계속)
(74) 대리인
특허법인명인

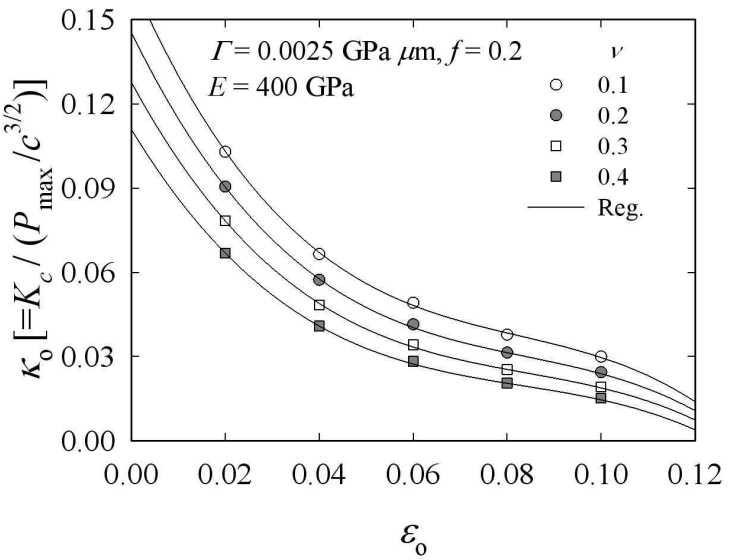
전체 청구항 수 : 총 9 항

(54) 발명의 명칭 **유한요소해에 기초한 취성재료의 압입파괴인성평가 방법**

(57) 요 약

본 발명은 분리요소모델(CZM)을 적용한 균열 해석으로 관찰한 압입균열 특성을 기초로 취성재로의 압입파괴인성을 평가할 수 있는 유한요소해에 기초한 취성재료의 압입파괴인성평가 방법을 제공하는 것이 그 기술적 과제이다. 이를 위해, 본 발명의 유한요소해에 기초한 취성재료의 압입파괴인성평가 방법은, 재료의 "well-developed"균열을 정의하는 기준을 제시하는 단계; 상기 재료의 균열크기에 영향을 미치는 압입변수로 변형률 ε_o, 푸아송비 ν 및 영률 E 절대값을 선정하여 ε_o, ν 그리고 $E_R(\equiv E/E_{1000})$과 $K_o(\equiv P_{max}/c^{3/2})$의 회귀관계를 이용한 압입 파괴인성 평가식을 제시하는 단계; 상기 재료의 압입 접촉길이 a를 이용해 상기 영률의 영향을 배제하고 상기 ε_o, 상기 ν와 $k(\equiv P_{max}/c^i a^{1.5-i})$의 관계를 이용한 파괴인성 평가식을 제시하는 단계; 및 상기 ε_o를 얻기 위하여 상기 영률 E와 경도 H의 비인 E/H와 푸아송비 ν를 이용한 회귀함수를 제시하는 단계를 포함한다.

대 표 도 - 도11



(72) 발명자

김민수

서울특별시 마포구 마포대로20길 26 삼성래미안아파트 107동 503호

최영식

대구광역시 수성구 범어로16길 22-4

이 발명을 지원한 국가연구개발사업

과제고유번호 201234039

부처명 교육과학기술부

연구관리전문기관 서강대학교 산학협력단

연구사업명 중견연구자지원사업(핵심)

연구과제명 CR-FM과 나노 압입시험을 연계한 나노소재 기계적 특성평가 시스템 개발

기 여 율 1/1

주관기관 재)한국연구재단

연구기간 2012.09.01 ~ 2013.08.31

특허청구의 범위

청구항 1

재료의 "well-developed"균열을 정의하는 기준을 제시하는 단계;

상기 재료의 균열크기에 영향을 미치는 압입변수로 변형률 ε_o, 푸아송비 v 및 영률 E 절대값을 선정하여 ε_o, v 그리고 $E_R(\equiv E/E_{1000})$과 $K_o(\equiv P_{max}/c^{3/2})$의 회귀관계를 이용한 압입 파괴인성 평가식을 제시하는 단계;

상기 재료의 압입 접촉길이 a를 이용해 상기 영률의 영향을 배제하고 상기 ε_o, 상기 v와 $k(\equiv P_{max}/c^{i}a^{1.5-i})$의 관계를 이용한 파괴인성 평가식을 제시하는 단계; 및

상기 ε_o를 얻기 위하여 상기 영률 E와 경도 H의 비인 E/H와 푸아송비 v를 이용한 회귀함수를 제시하는 단계

를 포함하는 유한요소해에 기초한 취성재료의 압입파괴인성평가 방법.

청구항 2

제1항에서,

상기 ε_o, v 그리고 $E_R(\equiv E/E_{1000})$과 $K_o(\equiv P_{max}/c^{3/2})$의 회귀관계를 이용한 압입 파괴인성 평가식은

$$\frac{K_c}{P_{\max}/c^{3/2}} = \kappa_{\mathrm{o}}\big|_{\nu}\left(\nu, \varepsilon_{\mathrm{o}}, E_R\right)$$

$$\kappa\left(\nu, \varepsilon_{\mathrm{o}}, E_R\right) = \alpha_i^{\kappa}(\nu, \varepsilon_{\mathrm{o}})(E_R)^i \;\; ; \;\; i = 0,1,2$$

$$\alpha_i^{\kappa}(\nu, \varepsilon_{\mathrm{o}}) = \beta_{ij}^{\kappa}(\nu)\varepsilon_{\mathrm{o}}^j \;\; ; \;\; j = 0,1,2,3$$

$$\beta_{ij}^{\kappa}(\nu) = \gamma_{ijk}^{\kappa}\nu^k \;\; ; \;\; k = 0,1,2$$

이고,

여기서, K_c는 재료파괴인성, P_{max}는 최대하중, c는 균열길이, K_o는 $[K_c/(P_{max}/c^{3/2})]$, $K_o|_V$는 Vickers 압입자로 얻은 K_o, v는 푸하송비, ε_o는 변형률, $E_R(= E / E_{1000})$은 임의 영률값 E_{1000} = 1000 GPa 과 재료영률 E 의 비, α, β, γ는 각각 $[K_c/(P_{max}/c^{3/2})]$ k, α, β에 대한 다항함수의 계수, i, j, k는 상수인 유한요소해에 기초한 취성재료의 압입파괴인성평가 방법.

청구항 3

제1항에서,

상기 ε_o, 상기 v와 $k(\equiv P_{max}/c^{i}a^{1.5-i})$의 관계를 이용한 파괴인성 평가식은

$$\frac{K_c}{P_{\max}/\left(c^i a^{1.5-i}\right)} = \kappa\big|_{\nu}\left(\nu, \varepsilon_{\mathrm{o}}\right)$$

이고,

여기서, K_c는 재료파괴인성, P_{max}는 최대하중, c는 균열길이, a는 접촉길이, $K|_V$는 Vickers 압입자로 얻은 $K(\equiv P_{max}/c^{i}a^{1.5-i})$, v는 푸하송비, ε_o는 변형률, c와 a의 지수(i, 1.5-i)들의 합은 항상 1.5인 유한요소해에 기초한

취성재료의 압입파괴인성평가 방법.

청구항 4

제1항에서,

상기 회귀함수는

$$E / H = f_0^{E/H}(\nu) + f_1^{E/H}(\nu) e^{-f_2^{E/H}(\nu)\varepsilon_o}$$

$$f_i^{E/H}(\nu) = \delta_{ij}\nu^j \;\; ; \;\; i, j = 0, 1, 2$$

이고,

여기서, E는 영률, H는 경도, f는 마찰계수, ν는 푸하송비, ε_o는 변형률, δ는 변위, i 및 j는 상수인 유한요소해에 기초한 취성재료의 압입파괴인성평가 방법.

청구항 5

제1항에서,

상기 재료의 동일 압입자 투영면적에서 압입 균열수와 균열크기의 관계 및 상기 재료의 동일 압입자 형상에서 압입자각과 균열크기의 관계를 이용하여 Vickers 압입에 기초해 정립된 상기 파괴인성 평가식을 다양한 압입자 형태로 확장하는 단계를 더 포함하는 유한요소해에 기초한 취성재료의 압입파괴인성평가 방법.

청구항 6

재료의 "well-developed"균열을 정의하는 기준을 제시하는 단계; 및

상기 재료의 균열크기에 영향을 미치는 압입변수로 변형률 ε_o, 푸아송비 ν 및 영률 E 절대값을 선정하여 ε_o, ν 그리고 $E_R(\equiv E/E_{1000})$과 $K_o(\equiv P_{max}/c^{3/2})$의 회귀관계를 이용한 압입 파괴인성 평가식을 제시하는 단계

를 포함하는 유한요소해에 기초한 취성재료의 압입파괴인성평가 방법.

청구항 7

제6항에서,

상기 ε_o, ν 그리고 $E_R(\equiv E/E_{1000})$과 $K_o(\equiv P_{max}/c^{3/2})$의 회귀관계를 이용한 압입 파괴인성 평가식은

$$\frac{K_c}{P_{\max}/c^{3/2}} = \kappa_o\big|_{I^-}(\nu, \varepsilon_o, E_R)$$

$$\kappa(\nu, \varepsilon_o, E_R) = \alpha_i^{\kappa}(\nu, \varepsilon_o)(E_R)^i \;\; ; \;\; i = 0,1,2$$

$$\alpha_i^{\kappa}(\nu, \varepsilon_o) = \beta_{ij}^{\kappa}(\nu)\varepsilon_o^j \;\; ; \;\; j = 0,1,2,3$$

$$\beta_{ij}^{\kappa}(\nu) = \gamma_{ijk}^{\kappa}\nu^k \;\; ; \;\; k = 0,1,2$$

이고,

여기서, K_c는 재료파괴인성, P_{max}는 최대하중, c는 균열길이, K_o는 $[K_c/(P_{max}/c^{3/2})]$, $K_o|_V$는 Vickers 압입자로 얻은 K_o, ν는 푸하송비, ε_o는 변형률, $E_R(= E / E_{1000})$은 임의 영률값 E_{1000} = 1000 GPa 과 재료영률 E 의 비, α, β, γ는 각각 $[K_c/(P_{max}/c^{3/2})]$ k, α, β에 대한 다항함수의 계수, i, j, k는 상수인 유한요소해에 기초한 취성재료의 압입파괴인성평가 방법.

청구항 8

제6항에서,

상기 ε_o를 얻기 위하여 상기 영률 E와 경도 H의 비인 E/H와 푸아송비 v를 이용한 회귀함수를 제시하는 단계를 더 포함하는 유한요소해에 기초한 취성재료의 압입파괴인성평가 방법.

청구항 9

제8항에서,

상기 회귀함수는

$$E/H = f_0^{E/H}(\nu) + f_1^{E/H}(\nu)e^{-f_2^{E/H}(\nu)\varepsilon_o}$$

$$f_i^{E/H}(\nu) = \delta_{ij}\nu^j \;\; ; \;\; i,j = 0, 1, 2$$ 이고,

여기서, E는 영률, H는 경도, f는 마찰계수, v는 푸하송비, ε_o는 변형률, δ는 변위, i 및 j는 상수인 유한요소해에 기초한 취성재료의 압입파괴인성평가 방법.

명 세 서

기 술 분 야

[0001] 본 발명은 유한요소해에 기초한 취성재료의 압입파괴인성평가 방법에 관한 것이다.

배 경 기 술

[0002] 지난 30년 동안, 압입시험에 기초한 재료 파괴인성 K_c 평가 연구가 활발히 진행됐다. 즉, 압입시험에 의해 발생하는 다수 균열 시스템과 표준방법으로 얻어지는 단일 균열 시스템을 연결시키려는 노력이 계속 수행되어 왔다. 압입시험은 전통적인 파괴인성 평가법과 달리 작은 시편에 바로 적용할 있으며, 한 번의 압입만으로 쉽고 빠르게 파괴인성을 측정할 수 있어 시간 및 비용측면에서 상당히 유리한 평가법이다. 압입 파괴인성평가에 주로 사용되는 수식은 Lawn 등에 의해 제시됐다. Lawn 등과 Anstis 등은 Hill 의 expanding cavity 모델을 이용해 표면 균열길이 c와 압입하중 P_{max}, 경도 H 및 영률 E로부터 파괴인성 K_c를 예측 하는 식 (1)을 제시 했다(도 1 참조).

[0003]
$$K_c = \alpha\left(\frac{E}{H}\right)^{1/2}\left(\frac{P}{c^{3/2}}\right) \quad (1)$$

[0004] Anstis 등은 다양한 유리, 세라믹 재료에 대한 Vickers 압입균열시험으로 α=0.016±0.004 임을 제시했다. 재료물성 및 압입자 각도에 따른 α 값이 주어진 경우, Lawn 등이 제시한 모델의 장점은 압입시험으로 쉽게 얻을 수 있는 E/H, P_{max}, c 로부터 바로 재료의 파괴인성을 예측할 수 있다는 것이다. 하지만 실험 및 Hill 의 expanding cavity model 을 사용한 식 (1)은 많은 가정 및 단순화를 포함하고 있다. 실험적으로 소성역 크기를 측정하기 어려울 뿐만 아니라, α를 재료물성과 무관한 압입자 형상에 따른 함수로만 정의했다. 또한 α를 얻기 위한 구체적인 방법도 제시하지 않았다. 한편 실 압입시험에서는 압입시험 중 균열생성 및 진전 과정을 살펴보기 힘들다. 따라서 표면균열 상태만 가지고 최종 균열형상을 판단할 수 없다. 압입에 의한 균열은 하중 및 해중시 모두 진전할 수 있으며, 표면에 균열이 발생한 경우 단순표면 방사형균열 또는 "well-developed" 균열 형태일 수 있기 때문에 정확한 압입 파괴 인성평가를 위해서는 재료물성, 압입자 형태에 따른 압입하부 균열형상 및 α의 변화를 면밀히 관찰해야 한다. 아울러 압입자 형태에 따른 균열특성 분석도 세밀히 이루어져야

한다. Dukino와 Swain는 다양한 재료에 대해 Vickers와 Berkovich 압입시험에 의한 균열 길이를 비교했다. 그들은 Ouchterlony가 제안한 균열수와 중앙 확장력의 관계 및 Lawn 등과 Laugier가 제안한 압입파괴인성 평가식을 기초로 압입 균열수와 균열크기 관계를 분석 했다. 이를 확장해 다양한 압입자 형태(three/four/six/eight-sided pyramid)에 대한 균열 특성 분석이 동반되어야 한다.

[0005] 상기한 다양한 이유 등으로 압입시험을 이용한 재료 파괴인성의 정확성이 많이 낮다. Ponton과 Rawing은 다양한 압입 파괴인성 평가식에 대해 조사했으며, 대부분의 평가식으로 얻은 파괴인성과 실 파괴인성의 오차가 약 30% 이상임을 보였다. 아울러 Quin과 Bradt도 대표적인 압입파괴인성 평가수식으로 예측된 파괴인성과 실 파괴인성 비교해 Vickers 압입 시험의 한계성을 지적했다.

[0006] 이에 다양한 형태의 유한요소해석 및 측정기술을 활용해 재료 특성에 따른 압입 파괴인성평가 연구가 시도되고 있다. 특히 Gao와 Bower와 Lee 등은 분리 요소모델(CZM: Cohesive zone model)을 이용한 압입 균열 해석기법을 제시했다.

[0007] CZM은 원자들간의 작용력과 거리 사이의 관계에 기초해 개발된 것으로, 미소크기의 재료 거동 모사에 적합하다. 압입 균열시험과 같이 균열생성면이 예상되는 해석에서는 CZM이 유용하게 사용될 수 있다. Lee 등은 CZM의 힘-간격 (traction-separation) 관계 설정변수가 균열특성에 미치는 영향을 분석해, 유효한 해석해를 얻기 위한 해석조건을 제시했다.

발명의 내용

해결하려는 과제

[0008] 본 발명의 기술적 과제는, 분리요소모델(CZM)을 적용한 균열 해석으로 관찰한 압입균열 특성을 기초로 취성재료의 압입파괴인성을 평가할 수 있는 유한요소해에 기초한 취성재료의 압입파괴인성평가 방법을 제공하는 것이다.

과제의 해결 수단

[0009] 상기 목적을 달성하기 위하여, 본 발명의 일 실시예에 따른 유한요소해에 기초한 취성재료의 압입파괴인성평가 방법은, 재료의 "well-developed"균열을 정의하는 기준을 제시하는 단계; 상기 재료의 균열크기에 영향을 미치는 압입변수로 변형률 ε_o, 푸아송비 ν 및 영률 E 절대값을 선정하여 ε_o, ν 그리고 $E_R(\equiv E/E_{1000})$과 $K_o(\equiv P_{max}/c^{3/2})$의 회귀관계를 이용한 압입 파괴인성 평가식을 제시하는 단계; 상기 재료의 압입 접촉길이 a를 이용해 상기 영률의 영향을 배제하고 상기 ε_o, 상기 ν와 $k(\equiv P_{max}/c^{i}a^{1.5-i})$의 관계를 이용한 파괴인성 평가식을 제시하는 단계; 및 상기 ε_o를 얻기 위하여 상기 영률 E와 경도 H의 비인 E/H와 푸아송비 ν를 이용한 회귀함수를 제시하는 단계를 포함한다.

[0010] 상기 ε_o, ν 그리고 $E_R(\equiv E/E_{1000})$과 $K_o(\equiv P_{max}/c^{3/2})$의 회귀관계를 이용한 압입 파괴인성 평가식은

$$\frac{K_c}{P_{\max}/c^{3/2}} = \kappa_o\big|_{\nu}\left(\nu, \varepsilon_o, E_R\right)$$

$$\kappa\left(\nu, \varepsilon_o, E_R\right) = \alpha_i^{\kappa}(\nu, \varepsilon_o)(E_R)^i \;\; ; \;\; i = 0,1,2$$

$$\alpha_i^{\kappa}(\nu, \varepsilon_o) = \beta_{ij}^{\kappa}(\nu)\varepsilon_o^j \;\; ; \;\; j = 0,1,2,3$$

$$\beta_{ij}^{\kappa}(\nu) = \gamma_{ijk}^{\kappa}\nu^k \;\; ; \;\; k = 0,1,2$$

[0011] 일 수 있고,

[0012] 여기서, K_c는 재료파괴인성, P_{max}는 최대하중, c는 균열길이, K_o는 $[K_c/(P_{max}/c^{3/2})]$, $K_o|_{\nu}$는 Vickers 압입자로 얻은 K_o, ν는 푸하송비, ε_o는 변형률, $E_R(= E / E_{1000})$은 임의 영률값 E_{1000} = 1000 GPa 과 재료영률 E 의 비, α,

β, γ는 각각 [$K_c/(P_{max}/c^{3/2})$] k, α, β에 대한 다항함수의 계수, i, j, k는 상수이다.

[0013] 상기 ε_o, 상기 v와 k($\equiv P_{max}/c^i a^{1.5-i}$)의 관계를 이용한 파괴인성 평가식은

$$\frac{K_c}{P_{\max}/\left(c^i a^{1.5-i}\right)} = \kappa\big|_V\left(\nu, \varepsilon_o\right)$$

[0014] 일 수 있고,

[0015] 여기서, K_c는 재료파괴인성, P_{max}는 최대하중, c는 균열길이, a는 접촉길이, $K|_V$는 Vickers 압입자로 얻은 K($\equiv P_{max}/c^i a^{1.5-i}$), v는 푸하송비, ε_o는 변형률, c와 a의 지수(i, 1.5-i)들의 합은 항상 1.5이다.

[0016] 상기 회귀함수는

$$E/H = f_0^{E/H}(\nu) + f_1^{E/H}(\nu)\, e^{-f_2^{E/H}(\nu)\varepsilon_o}$$

$$f_i^{E/H}(\nu) = \delta_{ij}\nu^j \;\; ; \;\; i,j = 0,1,2$$

[0017] 일 수 있고,

[0018] 여기서, E는 영률, H는 경도, f는 마찰계수, v는 푸하송비, ε_o는 변형률, δ는 변위, i 및 j는 상수이다.

[0019] 이와 더불어, 본 발명의 일 실시예에 따른 유한요소해에 기초한 취성재료의 압입파괴인성평가 방법은, 상기 재료의 동일 압입자 투영면적에서 압입 균열수와 균열크기의 관계 및 상기 재료의 동일 압입자 형상에서 압입자각과 균열크기의 관계를 이용하여 Vickers 압입에 기초해 정립된 상기 파괴인성 평가식을 다양한 압입자 형태로 확장하는 단계를 더 포함할 수 있다.

[0020] 한편, 본 발명의 다른 실시예에 따른 유한요소해에 기초한 취성재료의 압입파괴인성평가 방법은, 재료의 "well-developed"균열을 정의하는 기준을 제시하는 단계; 및 상기 재료의 균열크기에 영향을 미치는 압입변수로 변형률 ε_o, 푸아송비 v 및 영률 E 절대값을 선정하여 ε_o, v 그리고 E_R($\equiv E/E_{1000}$)과 K_o($\equiv P_{max}/c^{3/2}$)의 회귀관계를 이용한 압입 파괴인성 평가식을 제시하는 단계를 포함할 수 있다.

[0021] 상기 ε_o, v 그리고 E_R($\equiv E/E_{1000}$)과 K_o($\equiv P_{max}/c^{3/2}$)의 회귀관계를 이용한 압입 파괴인성 평가식은

$$\frac{K_c}{P_{\max}/c^{3/2}} = \kappa_o\big|_V\left(\nu, \varepsilon_o, E_R\right)$$

$$\kappa\left(\nu, \varepsilon_o, E_R\right) = \alpha_i^{\kappa}(\nu, \varepsilon_o)(E_R)^i \;\; ; \;\; i = 0,1,2$$

$$\alpha_i^{\kappa}(\nu, \varepsilon_o) = \beta_{ij}^{\kappa}(\nu)\varepsilon_o^j \;\; ; \;\; j = 0,1,2,3$$

$$\beta_{ij}^{\kappa}(\nu) = \gamma_{ijk}^{\kappa}\nu^k \;\; ; \;\; k = 0,1,2$$

[0022] 일 수 있고,

[0023] 여기서, K_c는 재료파괴인성, P_{max}는 최대하중, c는 균열길이, K_o는 [$K_c/(P_{max}/c^{3/2})$], $K_o|_V$는 Vickers 압입자로 얻은 K_o, v는 푸하송비, ε_o는 변형률, E_R(= E / E_{1000})은 임의 영률값 E_{1000} = 1000 GPa 과 재료영률 E 의 비, α, β, γ는 각각 [$K_c/(P_{max}/c^{3/2})$] k, α, β에 대한 다항함수의 계수, i, j, k는 상수이다.

[0024] 이와 더불어, 상술한 본 발명의 다른 실시예에 따른 유한요소해에 기초한 취성재료의 압입파괴인성평가 방법은, 상기 ε_o를 얻기 위하여 상기 영률 E와 경도 H의 비인 E/H와 푸아송비 v를 이용한 회귀함수를 제시하는 단계를 더 포함할 수 있다.

[0025] 상기 회귀함수는

$$E / H = f_0^{E/H}(\nu) + f_1^{E/H}(\nu) e^{-f_2^{E/H}(\nu)\varepsilon_o}$$

[0026] $$f_i^{E/H}(\nu) = \delta_{ij}\nu^j \;\; ; \;\; i, j = 0, 1, 2$$ 일 수 있고,

[0027] 여기서, E는 영률, H는 경도, f 는 마찰계수, ν는 푸하송비, ε_o는 변형률, δ는 변위, i 및 j는 상수이다.

발명의 효과

[0028] 이상에서와 같이, 본 발명의 실시예들에 따른 유한요소해에 기초한 취성재료의 압입파괴인성평가 방법은 다음과 같은 효과를 가질 수 있다.

[0029] 본 발명의 실시예들에 의하면, 재료의 균열크기에 영향을 미치는 압입변수로 변형률 ε_o, 푸아송비 ν 및 영률 E 절대값을 선정하여 ε_o, ν 그리고 $E_R(\equiv E/E_{1000})$과 $K_o(\equiv P_{max}/c^{3/2})$의 회귀관계를 이용한 압입 파괴인성 평가식을 제시하므로, 취성재로의 압입파괴인성을 평가할 수 있다.

도면의 간단한 설명

[0030] 도 1은 압입자 형상과 이에 따른 균열을 나타내는 것으로, (a)는 사각뿔압입자, (b)는 삼각뿔압입자, (c)는 압입자각 Ψ를 나타낸 도식도이다.

도 2는 CZM(분리요소 모델)의 결합면 분리와 이에 대응하는 힘사이의 관계를 나타내는 도식도이다.

도 3 본 발명에 사용한 다양한 압입자 형상에 따른 재료 압입시험 유한요소모델을 나타내는 것으로, (a)는 1/4 균열해석모델, (b)는 1/3 균열해석모델, (c)는 1/4 균열해석모델 및 (d)는 비대칭 균열 발생 여부 확인(삼각뿔 압입)을 위한 유한요소 해석모델을 나타낸 도식도이다.

도 4는 본 발명에 사용한 다양한 압입자 형상에 따른 재료 압입시험 유한요소모델을 나타내는 것으로, (a)는 사각뿔 압입시험을 하기 위한 1/4 압입해석모델, (b)는 삼각뿔 압입시험을 하기 위한 1/6 압입해석모델을 나타낸 도식도이다.

도 5는 c/a에 따른 $P_{max}/c^{3/2}$의 수렴 여부를 나타내는 그래프이다.

도 6은 해중시 SI3N4의 모재표면 균열형상을 나타내는 그림이다.

도 7은 해중시 SI3N4의 모재하부 균열형상을 나타내는 그래프이다.

도 8은 발생 균열수(압입자 모서리 수)에 따른 균열길이와의 관계를 나타내는 그래프이다.

도 9a는 최대압입하중에서 균열길이 변화를 나타내는 그래프이다.

도 9b는 다른 각도를 가진 압입자에 대한 c/a와 $P_{max}/c^{3/2}$ 관계를 나타내는 그래프이다.

도 10은 다른 각도를 가진 압입자에 대한 균열길이를 Vickers 균열압입 해석으로 얻은 그래프이다.

도 11은 변수 ν을 달리 했을 때 ε_o에 대한 k_o의 변화를 나타내는 그래프이다.

도 12는 변수 E을 달리 했을 때 ε_o에 대한 k_o의 변화를 나타내는 그래프이다.

도 13은 변수 Γ을 달리 했을 때 ε_o에 대한 k_o의 변화를 나타내는 그래프이다.

도 14는 ν가 0.3인 경우 FEA를 이용해 얻은 파괴인성과 본 발명에서 정립한 파괴인성 평가식으로 계산한 파괴인성을 비교한 그래프이다.

도 15는 실 압입균열 시험을 통해 다른 각도를 가진 압입자에 대한 균열길이를 나타내는 그래프이다.

도 16은 변수 E을 달리 했을 때 ε_o에 대한 k_o의 변화를 나타내는 그래프로, 특히 이에 나타난 실선은 식(15)로

회귀되는 곡선이다.

도 17 은 ν가 0.2인 경우 FEA 를 이용해 얻은 파괴인성과 본 발명에서 정립한 파괴인성 평가식으로 계산한 파괴인성을 비교한 그래프이다.

도 18 은 기 선정한 회귀변수 ε_o와 본 발명에서 얻은 식으로부터 얻은 ε_o를 비교한 그래프이다.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

[0031] 이하, 첨부한 도면을 참고로 하여 본 발명의 실시예에 대하여 본 발명이 속하는 기술 분야에서 통상의 지식을 가진 자가 용이하게 실시할 수 있도록 상세히 설명한다. 그러나 본 발명은 여러 가지 상이한 형태로 구현될 수 있으며 여기에서 설명하는 실시예에 한정되지 않는다.

[0032] 이하, 도 2 내지 도 18을 참조하여 본 발명의 실시예에 따른 유한요소해에 기초한 취성재료의 압입파괴인성평가 방법은 상세히 설명한다.

[0033] 압입 균열해석 및 경도평가를 위한 유한 요소모델들을 나타냈고, 사각뿔 압입 균열 시험과의 비교로 CZM을 이용한 압입균열 해석의 유효성을 확인했다. 이어 Si(100), Ge(100) 재료에 대한 압입균열시험으로 균열길이를 얻고 이를 해석과 비교했다. 아울러 삼각뿔 압입에 의한 비대칭 균열생성 여부를 해석적으로 확인 했으며, 압입 발생균열수와 균열길이 관계를 분석했다. 본 발명에서 관찰한 압입균열 특성을 기초로 압입하중과 균열길이를 이용한 파괴인성 평가법을 제시한다.

[0034] 1. CZM(Cohesive zone model) 및 힘-간격 응답 곡선

[0035] 압입하부의 균열발생과 성장과정 모사에 CZM을 사용한다. CZM은 파괴에너지와 균열 선단의 한계 응력 등을 사용해 재료 파괴과정을 모사한다. CZM에서 두 결합면(cohesive surface)의 간격이 임계거리에 도달하기 전까지 결합력(cohesive traction)은 증가하며, 임계 거리 도달 이후 결합력은 0으로 점점 감소한다. 결합력이 0이 되면 두 면이 분리되며, 균열이 형성된다(도 2). 즉, CZM에서의 파괴거동은 결합면의 분리와 이에 대응하는 힘 사이의 관계 (traction-separation law)를 따른다.

[0036] CZM의 특성은 힘-간격 응답곡선의 형태와 다양한 구성변수들로 규정된다. 기존 연구들에서 힘-간격 응답곡선들의 형태는 파괴거동 해석에 영향을 주지 않는다고 했다. 이에 본 발명에서는 도 2와 같은 구간선형(piecewise linear) 탄성 힘-간격 응답에 대해 조사한다. 선형탄성 힘-간격 응답은 손상시작 응력값 σ_{max}, 이에 대응하는 손상시작 변위값 δ_{max}, 개구변위 δ_c (또는 파괴 에너지 Γ)로 기술된다.

[0037] $\sigma > \sigma_{max}$이면 변형부 응력이 감소하기 시작해, 개구변위 δ_c 에서 응력값이 0이 된다. 식 (2)는 CZM에서 구간선형 힘-간격 응답관계를 나타낸다.

[0038]
$$T = \begin{cases} \dfrac{\sigma_{\max}}{\delta_{\max}}\delta & \text{when } 0 \le \delta \le \delta_{\max} \\ \dfrac{\sigma_{\max}}{\delta_c - \delta_{\max}}\left(\delta_c - \delta\right) & \text{when } \delta_{\max} \le \delta \le \delta_c \end{cases} \quad (2)$$

[0039] 도 2의 분리요소 힘-간격 응답곡선의 하부 면적은 파괴에너지 Γ를 나타내며, 이 경우 재료 파괴인성 K_c는 식 (3)으로 표현된다.

[0040]
$$\Gamma = \frac{K_c^2}{E'} = \frac{1}{2}\sigma_{\max}\delta_c,\ E' = \begin{cases} E & : \text{plane stress} \\ E/(1-\nu^2) & : \text{plane strain} \end{cases} \quad (3)$$

[0041] 여기서 ν는 푸아송비이다.

[0042] 식 (2)로 표현되는 cohesive 요소의 거동(선형 힘-간격 응답)은 상용해석 프로그램에 이미 설정되어 있다. Lee 등은 균열길이(또는 접촉길이, a), process zone 크기, 최소 요소크기 등을 비교해 유효한 해석해를 얻기 위한

다양한 조건들을 제시했다. 이를 통해 Lee 등은 균열 생성면에 cohesive 요소를 적용한 압입 균열해석 모델을 구축했다. Lee 등이 제시한 해석조건은 다음과 같다. 우선 (i) 구간선형 힘-간격 응답을 이용한 압입균열 해석에서 균열 길이 c는 δ_{max}/δ_c에 무관하다. 아울러 (ii) "well-developed (c >> a ; 접촉길이 a)" 균열에서는 최소 요소크기와 σ_{max}의 변화(Γ는 동일)는 c에 큰 영향을 미치지 않는다. 그리고 (iii) CZM을 이용한 압입균열 해석시 균열생성을 보장하고 선형탄성 파괴조건(c >> process zone size)을 만족시키기 위해 $\sigma_{max} \leq \sim 0.2\sigma_o$($\sigma_o$, 항복강도)를 만족해야 한다. 이에 본 발명에서는 Lee 등이 제시한 조건(i 내지 iii)을 바탕으로, "well-developed" 균열에 대해 압입자 형상에 따른 압입 균열 크기 및 균열 형태의 변화를 관찰한다.

[0043] 재료물성, 압입깊이(또는 최대하중), 압입자 형태(압입자각, 모서리수), 푸아송비 등 여러 압입 변수에 따른 균열 크기 및 형상의 변화를 살펴보고자 도 3과 같은 유한요소 해석모델 들을 생성했다. 1/3 및 1/4 균열해석모델(도 3)은 약 87,000개의 요소와 97,000개의 절점으로 구성된다. 비대칭 균열발생 여부 확인(삼각뿔 압입, 도 3)을 위한 3D 전체 유한요소 해석 모델은 약 260,000개의 요소와 270,000개의 절점으로 구성된다. 대칭축 상 절점들은 대칭축에 수직방향 변위성분들을 구속하고, 압입자 모서리와 분리요소의 분리방향을 수직하게 설정했다. 기하학적 대칭성으로 인해 압입시 Mode I 형태의 균열만 발생하므로, 수직 힘-간격 응답거동만 고려했다. 한편 마찰계수 f 에 따라 압입하부의 응력상태가 달라지게 되며, 이로 인해 균열길이가 변한다. 본 발명에서는 금속 및 세라믹재료 사이의 마찰계수가 약 0.1~0.3이므로, f =0.2로 고정하고 해석을 진행했다.

[0044] 압입 경도평가를 위한 1/4 사각뿔[도 4(a)]및 1/6 삼각뿔[도 4(b)] 3D 압입해석모델을 도 4에 나타냈다. 유한요소 해석모델은 약 38,000개의 요소와 약 51,000개의 절점으로 구성된다. 압입자와 모재의 대칭축상 절점들은 대칭축에 수직방향 변위성분을 구속했다. 한편 1/6 삼각뿔 압입 해석모델의 경우 추가적으로 x축에 60° 경사면은 x 방향변위와 y 방향변위의 비가 1: $\sqrt{3}$ 이 되도록 구속했다(도 4). 이후 모재 밑면을 구속시킨 후, 다이아몬드 압입자(압입자 영률 E_I=1,016GPa, 압입자 푸아송비 ν_I=0.07)를 하강시킨다.

[0045] 2. 사각뿔 균열해석과 압입시험 비교

[0046] Anstis 등이 제시한 압입균열시험 데이터를 이용해 압입균열해석을 수행했다(표 1). 이를 위해 도 4의 3D 1/4 Vickers 압입 유한요소모델을 이용해 5가지 재료[Si3N4(NC132), Glassceramic, Si3N4 (NC350), Aluminosilicate glass, Soda-lime glass]들의 항복강도 σ_o(반복해석으로 시험 평가와 동일한 경도 H를 주는 항복강도 획득)를 얻었다(표 1). 푸아송비는 기존문헌 값을 이용했다.

[0047] 시행착오법으로 얻은 σ_o와 E를 이용해 균열 압입해석을 수행한다. 압입 균열해석은 도 3의 1/4 Vickers 유한요소모델을 이용해 압입하중[P_{max} = 1~100N]에 따른 균열길이를 얻었다(표 1). 재료에 따라 $P_{max}/c^{3/2}$ 가 일정해지는 최대 하중값이 달라진다. Si_3N_4(NC132) 재료는 비교적 높은 하중($P_{max} \geq 80N$) 이상에서 $P_{max}/c^{3/2}$ 값이 일정값으로 수렴하며, Aluminosilicate glass와 Soda-lime glass는 낮은 하중에서($P_{max} \leq 3N$)도 $P_{max}/c^{3/2}$ 은 일정하다(도 5). 아울러 재료에 따라 $P_{max}/c^{3/2}$ 값이 일정해지는 c/a 값도 달라진다. Aluminosilicate glass, Soda-lime glass 및 Glass ceramic 재료들은 $c/a \leq 2.0$에서도 $P_{max}/c^{3/2}$ 값이 일정값으로 수렴한다(도 5). 대체적으로 E/H 값이 작은 경우 낮은 c/a 에서도 "well-developed" 균열이 발생하며, $c/a \geq 2.5$ 경우에는 모든 재료에서 $P_{max}/c^{3/2}$은 일정하다. $P_{max}/c^{3/2}$은 일정해 질 때 압입하부에서는 모든 경우에 반원형의 균열이 관찰된다. 즉, $P_{max}/c^{3/2}$=constant 또는 $c/a \geq 2.5$인 경우 "well-developed" 균열로 판단하는 것이 적정하다.

[0048] 해석과 실 압입균열 시험에서 얻은 $P_{max}/c^{3/2}$ 값을 비교했다(표 1). 실험 $P_{max}/c^{3/2}$ 값은 Anstis 등이 제시한 평가 K_c 값과 식 (1)(a = 0.016) 을 이용해 얻었다. "well-developed" 균열 발생시 실험과 압입 균열해석으로 얻은 $P_{max}/c^{3/2}$ 값들의 차이는 약 12% 이다. 균열측정의 오차를 고려하면 CZM을 사용한 균열해석이 비교적 정확하게

균열진전 및 균열형상을 모사하는 것으로 판단된다. Si_3N_4(NC132)재료에 대해 P_{max} = 100mN에서 구한 압입표면 및 하부 균열형태를 도 6 및 도 7에 나타냈다.

[0049] 3. 압입자 형상변화에 따른 균열크기변화

[0050] 압입자 형상에 따른 균열압입 특성의 주요차이점은 균열수(압입자 모서리 수), 균열크기(또는 균열 크기와 접촉길이 비), 균열발생 임계하중 등이다. Ouchterlony는 압입 균열수에 따른 균열크기 변화를 살폈다. 중앙 확장력 F_c 작용시 응력확대 계수와 균열수는 다음 관계를 갖는다.

[0051]
$$K = k_1(n_c)\, K_F; \quad k_1(n_c) = \sqrt{\frac{\frac{n_c}{2}}{1+\frac{n_c}{2\pi}\sin\frac{2\pi}{n_c}}} \qquad (4)$$

[0052] 여기서 n_c 는 균열수이며, star(n_c = 6)형태의 균열인 경우 $K_F = F/(\pi a)^{1/2}$ 이다. 파괴인성 K_c와 압입하중 P 및 균열길이 c는 다음과 같은 관계를 갖는다.

표 1

[0053]

Materials, K_c (MPa·$m^{1/2}$)	FE Analysis (σ_{max} = 0.5GPa)					Indentation test
	E/H	σ_o (GPa)	P_{max}(N)	c(m)	$P/c^{3/2}$	$P/c^{3/2}$
Si_3N_4(NC132), 4.0	300/18.5	10.2	5	12.1	124.2	60
			10	21.9	97.7	
			20	38.5	83.9	
			40	65.8	75.0	
			60	89.3	70.9	
			80	109.1	68.4	
			100	129.2	67.9	
Glass ceramic (C9606), 2.5	108/8.4	4.5	5	18.8	60.4	43
			10	32.9	53.1	
			20	55.5	48.3	
			40	91.9	45.3	
			50	107.1	45.0	
Si_3N_4(NC350). 2.0	170/9.6	4.5	3	12.8	30.9	33
			5	16.7	28.8	
			10	23.2	27.1	
			20	32.9	26.3	
Aluminosilicate glass, 0.91	89/6.6	3.6	3	15.2	16.4	19
			5	19.3	16.3	
Soda lime glass, 0.74	70/5.5	3.1	1	9.6	13.2	14
			3	17.5	13.1	

[0054]
$$K_c \propto x_B P/c^{3/2} \quad ; \quad K_c \propto x_V P/c^{3/2} \qquad (5)$$

[0055] 여기서 x_B(for Berkovich indenter)와 x_V(for Vickers indenter)는 압입자 형상계수이다. 압입자 형상계수 x_B와 x_V 의 관계는 다음과 같다.

$$x_B = \frac{k_1(4)}{k_1(3)} x_V \quad (6)$$

[0056]

[0057] 식 (4)에 따르면 Vickers와 Berkovich에 대한 k_1의 비는 약 1.073이며, 식 (5) 및 식 (6)에 의해 Berkovich(n_c = 3)와 Vickers(n_c = 4) 압입자에 의한 균열길이 비는 약 $(1.244)^{2/3} \approx 1.05$이다. 아울러 Berkovich($n_c$ = 3)와 six-sided pyramid(n_c = 6), eight-sided pyramid(n_c = 8), twelve-sided pyramid(n_c = 12) 압입자에 의한 균열길이 비는 각각 약 $(1.244)^{2/3} \approx 1.16$, $(1.327)^{2/3} \approx 1.21$, $(1.408)^{2/3} \approx 1.26$이다. 발생 균열수가 많을수록 발생된 균열의 크기는 작아진다. 한편 구형압입시 균열이 발생하지 않는다고 볼 수 있다. 즉 구형 압입자를 무한각형($n_c = \infty$) 압입자로 가정하면, 이 경우 균열크기는 0으로 수렴한다. 식 (5) 및 식 (6)로 얻은 압입자 형태(발생균열 수)에 따른 균열 길이를 Vickers 압입 시험의 균열길이(c_V)로 무차원화해 도 8(회색 실선)에 나타냈다.

[0058] 압입자 형태에 따른 균열길이 변화를 살피고자 도 3의 유한요소모델로 압입 균열해석을 수행했다. E = 200GPa, σ_o = 5GPa, ν = 0.3, σ_{max} = 0.5GPa, Γ = 0.0025GPa·mm[0.74MPa·$m^{1/2}$]인 탄성-완전 소성재료에 대해 압입자각 Ψ = 69.8° (eight-sided pyramid), 69.4° (six-sided pyramid), 68° (Vickers), 65.3° (Berkovich)인 압입자로 압입했다. 압입자들은 동일 압입깊이에서 동일 접촉면적을 갖는다. 최대 압입깊이 h_{max} = 0.4-1.2mm까지 압입 후 균열길이 c, 접촉길이 a 를 얻었다. 균열해석으로 얻어지는 c, a 등은 손상시작 변위 δ_{max}와 개구변위 비(δ_{max}/δ_c)에 상관없이 일정하므로, δ_{max}/δ_c = 1/4로 고정했다. 또한 유한요소해석에서 분리 요소거동은 구간선형(piecewise linear) 탄성 힘-간격 응답을 따른다. 동일 최대압입하중에서 균열수(n_c)가 적을수록 반경방향 및 압입하부 방향균열은 커진다(도 9a).

[0059] 한편 동일 압입깊이에서 Berkovich 압입하중이 Vickers, six/eight-sided pyramid 압입하중보다 크다. 이는 압입자 형상에 따른 실 접촉면적과 접촉 강성 차이에 기인한다. 이에 압입자 형상들(Berkovich, Vickers, six / eight-sided pyramid) 따른 균열길이 변화를 정확히 비교하려면 동일하중까지 압입 하거나, 동일 하중압입에서의 균열길이를 유추해야 한다. 기존 연구에서는 "well-developed" 균열 (half-penny crack, c/a ≥ 2.5)이 발생한 경우에만 c 가 $P_{max}^{2/3}$에 비례 한다고 했으며, Jang과 Pharr는 Si(100), Ge(100) 재료의 압입균열 길이는 낮은 압입하중에서도 $P_{max}^{2/3}$에 비례한다고 했다. 하지만 다양한 물성범위를 갖는 재료들에 대해서는 조사 하지 않았다.

[0060] 압입자 형태별로 압입깊이(h_{max} = 0.4-1.2mm)에 따라 구한 $P_{max}/c^{3/2}$ 값들의 최대 오차는 약 27% 이며, 평균오차는 약 18% 이다. 따라서 Si(100), Ge(100) 재료의 경우만 낮은 압입하중에서도 $P_{max}/c^{3/2}$ 값들이 일정한 것으로 판단된다. 4가지 압입자에 대해 $P_{max}/c^{3/2}$ 값들은 $h_{max} \geq 0.8$mm에서 일정 값으로 수렴한다. 한편 $P_{max}/c^{3/2}$가 일정 값으로 수렴하는 임계 c/a 값은 압입 균열수가 많아질수록 (Berkovich → eight sided) 증가하게 된다(도 9b). "well-developed" 균열발생($P_{max}/c^{3/2}$ = constant) 시에 압입자 형상에 따른 균열크기를 비교했다. Vickers 압입과 동일하중에서 Berkovich, six/eight-sided pyra-mid 압입 균열길이 $c_{B'}$, $c_{six'}$ 및 $c_{eight'}$를 구했다. 이 경우 $c_{B'}/c_V$, $c_{six'}/c_V$, $c_{eight'}/c_V$ 는 각각 약 1.09, 0.86, 0.76이다(표 2). 재료물성이 달라져도 (E = 400GPa, Γ = 1.048MPa·$m^{1/2}$) 균열길이 비는 거의 일정하게 유지된다.

표 2

[0061]

E = 200 GPa, σ_{max} = 0.5 GPa, σ_o = 5 GPa, ν = 0.3, f = 0.2, δ_{max}/δ_c = 1 / 4						
Cohesive zone properties	P_{max} (mN)	c_V (μm)	c_B' / c_V	c_V ' / c_V	c_{six} ' / c_V	c_{eight} ' / c_V
K_c = 0.741 MPa·m$^{1/2}$ (E = 200 GPa)	231.6	8.09	1.10	1.00	0.86	0.76
K_c = 1.048 MPa·m$^{1/2}$ (E = 400 Pa)	311.3	9.63	1.09	1.00	0.84	0.75

[0062] 한편 Duckino와 Swain은 6가지 재료(LinBO3, Ge, SF17, BK7, Si, SiC)에 대한 압입 균열 시험으로 Berkovich 및 Vickers 압입 균열길이를 비교했다. 동일하중에서 두 압입자에 대한 균열길이 비는 $c_B/c_V \fallingdotseq 1.07$ 이다. 이는 CZM을 이용한 압입균열 해석으로 구한 균열길이 비($c_B/c_V \fallingdotseq 1.09$)와 거의 같다. 균열길이 비를 이용해 균열수(Vickers 압입자 기준)와 균열 크기 관계를 함수화 했다. 균열수가 늘수록 균열크기가 감소함을 고려해 ($c|_{n_c=\infty} \rightarrow 0$), 균열수 ($n_c$)와 균열크기 관계를 식 (7)의 형태로 나타냈다.

[0063]
$$c/c_V = k_1 e^{-k_2 n};\ (k_1, k_2) = (1.3680, 0.0778),\ n_c \geq 3 \qquad (7)$$

[0064] 식 (7)로 회귀되는 곡선을 도 8에 나타냈다. 식 (7)은 Vickers 압입 균열길이를 기준으로 압입자 형상(모서리 수 변화)에 따른 균열길이를 예측한다. 따라서 동일형상[동일 압입자 모서리 수 및 동일 균열수]에서 압입자각 변화에 따른 균열길이를 추가 예측해야 한다. Lawn 등은 α가 $(\cot\Psi)^{2/3}$에 비례하는 상수로 간주했다. 따라서 동일하중에서 균열길이 c는 $(\cot\Psi)^{4/9}$에 비례한다. 이 관계는 Vickers 균열압입 해석에서도 얻을 수 있다(도 10). 사각뿔 압입자에 대해 압입자 각 Ψ = 55°, 68°, 75°에 따른 균열길이를 얻었다(E = 200GPa, σ_o = 5GPa, ν = 0.3, σ_{max} = 0.5GPa, Γ = 0.0025GPa·mm). 따라서 동일 하중에서 Ψ_1에 대한 c_1을 알면 Ψ_2에 대한 c_2를 식 (8)로 유추할 수 있다.

[0065]
$$c_2 = c_1 \left(\frac{\cot\psi_2}{\cot\psi_1} \right)^{4/9} \qquad (8)$$

[0066] 따라서 식 (7) 및 식 (8)을 이용하면 동일하중에서 압입자 형태(모서리 수, 압입자각 변화)에 따른 균열길이 변화를 예측할 수 있다. 즉 압입파괴인성 평가법을 임의 압입자 형상(모서리 수) 및 압입자 각에 대해 구축하면, 이를 다양한 압압자 형태로 확장 적용할 수 있다.

[0067] 4. 압입 파괴인성평가

[0068] Lawn 등은 α를 압입자각[centerline-to-face angle, Ψ, 도 1(c)]의 함수로만 설정했으나, 재료 물성 등 다양한 압입변수에 따라 달라진다. 힘-간격응답 특성, 재료물성, 압입깊이, 압입자 각, 푸아송비, 마찰계수 등 여러 압입변수에 따른 α의 변화를 살펴보고자 1/4 및 1/3 유한 요소 해석모델을 이용했다. Lee 등은 다양한 구간선형 힘-간격 응답을 이용한 압입균열 해석에서 c(또는 α)는 δ_{max}/δ_c에 무관함을 보였다. 또한 "well-developed" 균열에서는 σ_{max}의 변화(Γ는 동일)도 c및 α에 큰 영향을 미치지 않음을 보였다. 이에 본 발명에서는 "well- developed" 균열에 대해 압입자 형상에 따른 압압균열 크기 및 균열형태의 변화를 관찰한다. 아

울러 CZM을 이용한 압입균열 해석시, 균열생성을 보장하고 선형탄성 파괴조건(c >> process zone size)을 만족시키기 위해 모든 경우에 $\sigma_{max} \leq \sim 0.2\sigma_o$($\sigma_o$, 항복강도)가 되도록 했다.

[0069] 손상시작 응력값 및 파괴에너지는 σ_{max} = 0.5GPa 및 Γ = 0.0025MPa·$m^{1/2}$ 로 고정한 후, 영률(E = 100, 200, 400GPa) 값을 변화시켜, 파괴인성(K_c = 0.52, 0.74, 1.05 MPa·$m^{1/2}$)에 따른 α의 변화를 살폈다. ε_o와 Γ가 같을 때, E가 커지면 α값은 감소한다(표 3). 이는 $\varepsilon_o(\equiv \sigma_o/E)$ 뿐만 아니라 E 값 자체도 α값 변화에 영향을 미치는 변수임을 의미한다. 아울러 푸아송비 ν가 증가하면 α값은 감소한다(표 4). 표 5는 압입자각 Ψ에 따른 α값의 변화를 보여준다. 압입자각 Ψ가 감소하면 동일하중(동일 접촉면적)에서 전체 압입부피가 증가해 균열길이가 커져 α는 증가하게 된다. 이에 새로운 압입 파괴인성 평가식을 압입자각 Ψ, 항복 변형률 ε_o, 푸아송비 ν 및 영률 E 등의 영향을 고려해 제시한다.

[0070] 압입 파괴인성 평가식을 식 (9)와 같이 변수 $\cot\Psi$, ν, ε_o의 항으로 나타냈다.

[0071]
$$\frac{K_c}{P_{max}/c^{3/2}} = \kappa_o\left(\cot\psi, \nu, \varepsilon_o\right) \qquad (9)$$

[0072] 항복변형률 5가지(ε_o = 0.02, 0.04, 0.06, 0.08, 0.1), 푸아송비 4가지(ν = 0.1, 0.2, 0.3, 0.4), 압입자각 3가지(Ψ = 55°, 68°, 75°) 경우에 대해 해석을 진행한다. 한편 Jang과 Pharr 및 Hyun 등은 각각 다양한 삼각뿔형 압입균열시험 및 cohesive interface 모델을 이용한 사각뿔형 압입 균열해석으로 c와 $(\cot\Psi)^{4/9}$가 선형적인 관계임을 보였다.

표 3

[0073]

ν=0.3, f=0, h_{max}=0.6㎛, δ_{max}/δ_c=1/4					
K_c(MPa·$m^{1/2}$)	ε_o(ε_o/E)	P_{max}(mN)	H (GPa)	c/a	α
0.52	0.025(2.5/100)	42.6	5.7	1.58	0.0157
0.74	0.025(5.0/200)	84.8	11.3	1.92	0.0149
1.05	0.025(10.0/400)	168.8	22.5	2.23	0.0132
0.52	0.050(5.0/100)	55.0	8.2	1.53	0.0127
0.74	0.050(1.0/200)	113.9	17.0	1.83	0.0116
1.05	0.050(20.0/400)	227.4	34.0	2.11	0.0102

표 4

[0074]

E = 200GPa, σ_o=5GPa, =0, h_{max}=0.6m, $\delta_{max}/_c$=1/4					
K_c(MPam$^{1/2}$)	ν	P_{max}(mN)	H(GPa)	c/a	α
0.71	0.1	76.3	10.2	2.25	0.0191
0.72	0.2	80.1	10.7	2.10	0.0170
0.74	0.3	84.8	11.3	1.93	0.0150

표 5

[0075]

E= 200GPa, σ_o=5GPa, ν=0.3, =0.2, K_c=0.74MPa·$m^{1/2}$, h_{max}=1.0㎛, δ_{max}/δ_c=1/4					
Cohesive zone properties	ψ(°)	P_{max}(mN)	H (GPa)	c/a	α

σ_{max}=0.5GPa Γ=0.0025 GPa·㎛	55	99.2	11.8	2.72	0.0217
	68	231.7	10.6	2.45	0.0159
	75	426.1	10.3	2.17	0.0107

[0076] 이 경우 식 (9)의 k_o는 $(\cot\Psi)^{2/3}$에 비례하게 된다. 이에 Ψ = 68°(Vickers) 에 대해 파괴인성 예측식을 정립하고, 이후 k_o와 $(\cot\Psi)^{2/3}$가 비례관계임을 이용해 파괴인성 예측식을 다른 압입자 각으로 확장할 수 있다.

[0077] 균열해석시 손상시작 응력값 σ_{max}은 균열생성 및 전진이 보장되도록 $\sigma_{max}/\sigma_o \leq$ ~0.2의 범위에서 사용했다. 한편 해석시 Γ = 0.0025, 0.0010 GPa·㎛ 또는 E = 100, 200, 400, 600 값을 조정해 재료의 파괴인성값(K_c = 0.5025 ~ 2.0966 MPa·$\mu m^{1/2}$)을 달리 부가했다[식 (3) 참조]. 탄성-완전소성 재료에 대해 최대 압입깊이 "well-developed" 균열 발생시까지 압입해 k_o를 얻었다. 각 E에 대해 ε_o와 ν에 따른 k_o변화를 살폈다(도 11 및 도 12). Γ, E 및 ε_o가 동일할 때 푸아송비 ν가 증가하면, k_o은 감소하게 된다(도 11). 이는 일반적으로 ν가 증감함에 따라 재료의 지배적인 특성이 취성에서 연성으로 변해, 균열길이가 감소하기 때문이다. 한편 Γ, E 및 ν가 동일할 때, 항복변형률 ε_o가 증가함에 따라 k_o는 감소한다(도 11). 즉, 재료의 항복 강도가 증가하면 균열길이가 감소한다. 한편 Γ, ε_o 및 ν가 동일해도, E가 다르면 k_o는 다른 값을 갖는다(도 12). 이는 식 (3)에서 알 수 있듯이, Γ가 동일해도 E가 다르면, 재료의 파괴 인성값이 달라지기 때문이다.

[0078] E의 영향을 살펴보기 위해 E = 400GPa, ν = 0.3, Γ = 0.010GPa·mm(K_c = 2.0966MPa·$m^{1/2}$) 재료에 대해 항복변형률 변화에 따른 k_o 값을 얻었다. 여기서 얻은 k_o 값들은 E = 400GPa, ν = 0.3, Γ = 0.0025GPa·mm(K_c = 1.0482MPa·$m^{1/2}$)에서 얻은 k_o 값들과 동일하다(도 13). 즉 E와 ε_o가 동일하면 Γ (또는 K_c)에 상관없이 일정한 k_o 값을 얻는다. 이에 E의 영향을 고려하고자 임의 영률값 E_{1000} = 1000GPa과 재료영률 E의 비 E_R(= E/E_{1000})을 압입변수로 추가했다. 각 압입 변수들에 대한 회귀방법은 다음과 같다. 먼저 각 항복변형률과 푸아송비가 주어지면 E_R에 대해 회귀한다. 이어 얻어진 회귀계수들을 항복 변형률에 대해 회귀하고, 이어 푸아송비에 대해 회귀한다. 이와 같은 과정을 거치면 식 (10)과 같이 영률비, 항복 변형률, 푸아송비의 통합함수로 된다. 도 11에 식 (10)으로 회귀되는 곡선을 나타냈다.

[0079]
$$\frac{K_c}{P_{\max}/c^{3/2}} = \kappa_o\big|_{\Gamma}(\nu, \varepsilon_o, E_R)$$
$$\kappa(\nu, \varepsilon_o, E_R) = \alpha_i^{\kappa}(\nu, \varepsilon_o)(E_R)^i \;\; ; \;\; i = 0,1,2$$
$$\alpha_i^{\kappa}(\nu, \varepsilon_o) = \beta_{ij}^{\kappa}(\nu)\varepsilon_o^j \;\; ; \;\; j = 0,1,2,3$$
$$\beta_{ij}^{\kappa}(\nu) = \gamma_{ijk}^{\kappa}\nu^k \;\; ; \;\; k = 0,1,2 \qquad (10)$$

[0080] 여기서 $k_o|_V$는 Vickers(Ψ = 68°) 압입자로 얻은 k_o를 의미한다. 식 (10)을 이용해 예측된 파괴 인성 값들을 도 14에 나타냈다. 계산된 파괴인성값들의 평균 오차는 약 1.2% 정도이다.

[0081] 실 Vickers 압입균열 시험에서 얻은 압입하중과 균열길이로 파괴인성값을 예측한다. 압입 균열시험 데이터는 Anstis 등이 실험한 재료 중 파괴인성 값(0.74~4.0MPa·$\mu m^{1/2}$) 및 H/E 값(0.6~0.8)의 범위를 고려해 Si3N4(NC132), Glass-ceramic(C9606), Si3N4(NC350), Alumino-silicateglass, Soda-limeglass 등 5개를 선정했다. 식 (10)을 이용한 압입 파괴인성 평가에는 재료의 항복변형률($\varepsilon_o \equiv E/\sigma_o$) 정보가 필요하다. 이에 Vickers 압입 유한요소해석으로 실험 H와 동일한 H를 주는 재료의 항복강도를 얻었다(표 5). Si3N4(NC350)을 제외하면 식 (10)은 비교적 정확하게 파괴인성을 예측한다. 파괴인성 평가오차는 푸아송비, 영률 및 전통적으로 평가된 파괴인성값 그리고 압입균열길이 측정 오차에서 기인할 수 있다.

[0082] 앞서 기술했듯이 k_o와 $(\cot\Psi)^{2/3}$는 선형적인 관계를 갖는다. 따라서 압입자각 $\Psi = 55^\circ$ 인 사각뿔 압입자와 Vickers 압입자($\Psi = 68^\circ$)로 각각 얻은 k_o는 다음과 같은 관계를 갖는다.

$$\kappa_0\Big|_{55^\circ} = \kappa_0\Big|_{I'}\left(\frac{\cot 55}{\cot 68}\right)^{2/3}$$

[0083] (11)

[0084] 따라서 Vickers 압입자를 기준으로 구축된 파괴인성 예측식 (10)은 $\Psi = 55^\circ$ 인 사각뿔 압입자에 대해 다음과 정리된다.

$$\frac{K_c}{P_{\max}/c^{3/2}} = \left(\frac{\cot 55}{\cot 68}\right)^{2/3} \kappa\Big|_{I'}(\nu, \varepsilon_0, E_R)$$

[0085] (12)

[0086] 식 (12)와 $\Psi = 55^\circ$ 압입 균열해석에서 얻은 최대하중 및 균열길이를 이용해 재료의 파괴인성을 예측했다(표 6). $\Psi = 55^\circ$ 압입에서 실 및 예측 파괴인성값의 평균오차는 약 2% 이다. 한편 동일 압입하중에서 압입균열수와 균열크기 관계식을 이용하면, Berkovich 압입에 대한 파괴 인성식은 다음과 같이 정리된다.

$$\frac{K_c}{P_{\max}/c_B^{3/2}} = \left(k_1 e^{-3k_2}\right)^{3/2} \kappa\Big|_{I'}(\nu, \varepsilon_0, E_R);$$
$$(k_1, k_2 = 1.3680, 0.078)$$

[0087] (13)

[0088] 여기서 c_B는 Berkovich 압입시험으로 얻은 균열 길이이다. 식 (13)과 $\Psi = 65.3^\circ$(Berkovich) 압입 균열해석에서 얻은 데이터를 이용해 재료의 파괴인성을 예측했다(표 7). $\Psi = 65.3^\circ$ 압입에서 실 및 예측 파괴인성값의 최대오차는 약 5% 이하이다.

[0089] Si(100) 재료($K_c|_{conventional} = 0.7MPa \cdot m^{1/2}$)에 대한 압입자각에 따라 얻은 삼각뿔 압입균열실험 데이터로 파괴인성을 예측했다. Nano Indenter-XP(Agilent Technologies)를 이용해, 압입자각 $\Psi = 35.3^\circ$(cube-corner), 45°, 55°, 65.3°(Berkovich)인 압입자로 $P_{max} = 50mN$ 까지 압입해 균열 길이를 얻었다(표 9). 압입시험은 하중인가율(압입속도 $V_I = 0.5mN/s$) 조건으로 압입자각 별로 각 9회씩 압입했다.

[0090] 식 (13)으로 예측한 압입자각 별 파괴인성을 표 9에 나타냈다. 재료물성값은 Hyun 등이 Oliver-Pharr 방법과 시행착오법으로 얻은 값을 사용했다. $\Psi = 65.3^\circ$ 압입자로 예측한 파괴인성값을 제외하면, 각 압입자 별로 예측한 파괴인성값의 오차는 모두 10% 미만이다. k_o와 $(\cot\Psi)^{2/3}$가 선형적인 관계이면, "Well-developed" 균열에서 c는 $(\cot\Psi)^{4/9}$에 비례한다. $\Psi = 65.3^\circ$ 압입에서는 균열길이가 c/a 값이 작아 "Well-developed" 균열로 보기 어렵고, 비례관계 $c \propto (\cot\Psi)^{4/9}$에서 다소 벗어나는 것으로 판단된다(도 15). 아울러 $\Psi = 65.3^\circ$ 압입에 의한 파괴 인성 평가 오차는 실험 측정오차에서 기인할 수도 있다.

표 6

[0091]

Material	E/σ_o	ν	$P_{max}/c^{3/2}$	K_c(MPa·m$^{1/2}$)	
				Traditional method	Eq. (10)
Si_3N_4(NC132)	300/10.2	0.24	60	4.0	3.83(-4.2)
Glass-ceramic (C9606)	108/4.5	0.24	43	2.5	2.52(+1.0)
Si_3N_4(NC350)	170/4.5	0.24	33	2.0	2.63(+31.6)
Aluminosilicate glass	89/3.6	0.28	19	0.91	1.11(+22.0)
Soda-lime glass	70/3.1	0.24	14	0.74	0.79(+5.9)

표 7

[0092]

ν=0.3, f=0.2, δ_{max}/δ_c= 1/4, σ_{max}=0.5GPa, Γ=0.0025GPa·μm, ε_o=0.04					
Given K_c(MPa·m$^{1/2}$)	h_{max}	E (GPa)	k_o	Computed K_c(MPa·m$^{1/2}$)	Error(%)
0.5241	1.5	100	0.0831	0.5148	1.78
0.7412		200	0.0780	0.7297	1.55
1.0483		400	0.0718	1.0296	1.78
1.2839		600	0.0691	1.2326	4.00
2.0966*	5.0	400	0.0712	2.0772	0.94

표 8

[0093]

ν=0.3, f=0.2, δ_{max}/δ_c=1/4, σ_{max}=0.5GPa, Γ=0.0025GPa·μm, ε_o=0.04					
Given K_c(MPa·m$^{1/2}$)	h_{max}	E (GPa)	k_o	Computed K_c(MPa·m$^{1/2}$)	Error(%)
0.5241	1.5	100	0.0657	0.5148	1.78
0.7412		200	0.0614	0.7297	1.55
1.0483		400	0.0575	1.0296	1.78
1.2839		600	0.0542	1.2326	4.00

표 9

[0094]

Indentation cracking test, Si(100), K_c=0.7MPa·m$^{1/2}$					
ψ(°)	P_{max}(mN)	c(m)	k_o	Computed K_c(MPa·m$^{1/2}$)	Error(%)
35.3	50	2.48	0.0871	0.704	0.6
45		3.37	0.0937	0.683	2.4
55		4.23	0.1495	0.757	8.1
65.3		4.83	0.1188	0.906	38.3

[0095] 이러한 점을 고려하면, 식 (10), (12) 및 (13) 등을 이용하면 다양한 압입자각 및 압입자형상에 대해 파괴인성을 예측 할 수 있다.

[0096] 식 (13)은 항복변형률 외에 영률 절대값의 영향을 고려하기 위해, 임의의 영률비를 추가변수로 선정했다. 이에 영률비 E_R을 회귀변수에서 제외하고, 함수형태를 간소화하기 위해 균열길이 c, 접촉길이 a를 이용해 식 (10)을 다음과 같이 나타냈다.

$$\frac{K_c}{P_{\max}/\left(c^i a^{1.5-i}\right)} = \kappa\big|_V\left(\nu, \varepsilon_o\right)$$

[0097] (14)

[0098] 식 (14)에서 c와 a의 지수들의 합은 항상 1.5 이다. 동일변형률에서 c와 a의 지수에 따라 얻은 k 값들의 변화를 살폈다. c 및 a의 지수가 각각 1.9 및 -0.4일 때 동일 ε_o에서 E에 따른 k 값들의 차이가 가장 작다(도 16). 여기서 상대오차는 E=100, 600GPa 및 ν=0.1, 0.2, 0.3, 0.4에 대해 각 변형률에서 얻은 k 값들의 차이를 평균해서 얻었다. 아울러 c=1.9, a=-0.4 일 때 Γ가 다른 경우에도 E 값이 동일하면 거의 같은 k 값을 얻는다(도 16).

[0099] 식 (14)를 각 압입변수들에 대해 회귀한다. 각 압입 변수들에 대한 회귀방법은 다음과 같다. 먼저 각 푸아송비가 주어지면 항복변형률에 대해 회귀한다. 이어 얻어진 회귀계수들을 푸아송비에 대해 회귀한다. 이와 같은 과정을 거치면 식 (15)와 같이 항복변형률, 푸아송비의 통합함수로 표현할 수 있다. 도 16에 식 (15)로 회귀되는 곡선을 나타냈다.

$$\frac{K_c}{\left(P_{\max}/c^{1.9}\right)a^{0.5}} = \kappa\big|_V\left(\nu, \varepsilon_o\right)$$

$$\kappa'\left(\nu, \varepsilon_o\right) = \alpha_i^{\kappa}(\nu)\,\varepsilon_o^{\,i} \;\; ; \;\; i = 0,1,2,3$$

$$\alpha_i^{\kappa}(\nu) = \beta_{ij}^{\kappa}\nu^j \;\; ; \;\; j = 0,1,2$$

[0100] (15)

[0101] 식 (15)로 얻은 파괴인성값들을 도 17에 나타냈다. 계산된 파괴인성값들의 평균오차는 약 2.1% 정도이다. 한편 취성재료의 거동 특성상 항복변형률을 정확히 측정하기 어렵다. 이에 기 선정한 회귀 변수 ε_o를 대신해, E/H 등을 이용하면 보다 실용적인 평가법이 될 수 있다. 푸아송비와 항복변형률 변화에 따른 E/H 변화를 살폈다(도 18). 영률값이 달라도 항복 변형률이 동일하면, 영률의 절대값에 상관없이 일정한 E/H를 얻는다. E/H 값은 푸아송비와 항복 변형률이 클수록 감소한다.

[0102] 푸아송비 4 가지, 항복변형률 5 가지 경우에 대해, 이들 물성치와 E/H의 관계를 회귀했다. 회귀방법은 식 (12)에서 사용한 방법과 동일하다. 회귀함수는 다음 식 (16)과 같다.

$$E/H = f_0^{E/H}(\nu) + f_1^{E/H}(\nu)\,e^{-f_2^{E/H}(\nu)\varepsilon_o}$$

$$f_i^{E/H}(\nu) = \delta_{ij}\nu^j \;\; ; \;\; i,j = 0,\,1,\,2$$

[0103] (16)

[0104] 여기서 푸아송비와 E/H 값을 이용해 역으로 항복 변형률 값을 얻게 된다.

표 10

[0105]

Material	$P_{max}/c^{3/2}$	E/H	ε_o		K_c(MPa·$m^{1/2}$)	
					Traditional method	Eq.(10)
Si_3N_4(NC132)	60	16.2	0.034	0.24	4	3.65 (-8.8)
SiC	50	18.2	0.030	0.14	4	3.67 (-8.2)
Al_2O_3(AD999)	36	20.2	0.023	0.22	3.9	2.83 (-27.4)
Al_2O_3(AD90)	24	29.8	0.007	0.22	2.9	2.89 (-0.2)

Glass ceramic	43	12.8	0.055	0.24	2.5	2.04 (-18.5)
Si_3N_4(NC350)	33	17.7	0.029	0.24	2	2.37 (+18.4)
Sapphire	22	19.5	0.025	0.22	2.1	1.65 (-21.5)
Glass(AS)	19	13.5	0.047	0.28	0.91	0.96 (+5.0)
Glass(SLI)	14	12.7	0.056	0.24	0.74	0.67 (-9.7)
Glass LA	14	13.3	0.051	0.24	0.68	0.72 (+5.3)
Si	13	15.8	0.037	0.22	0.7	0.82 (+16.8)

[0106] Anstis 등이 제시한 재료의 E/H 및 $P_{max}/c^{3/2}$ 등을 이용해 10가지 재료에 대해 파괴인성을 예측했다(표 9). 10가지 재료에 대한 실 파괴인성과 예측 파괴인성의 평균오차는 약 13.8% 이다. 예측 오차는 비정질재료(Glass 계열)보다, 다결정재료[Al2O3 (AD999) 등]에서 보다 크게 나타난다. 이는 다결정재료에서 결정립크기가 미세한 재료인 경우 결정립 경계에서 입사광 산란이 발생해 균열 이미지 측정오차가 크게 발생할 수 있기 때문이다. 아울러 예측 오차는 식 (16)으로 예측된 항복변형률의 오차에서도 기인할 수 있다. 식 (16)을 이용하면 별도의 항복변형률 평가과정 없이 압입시험에서 얻어지는 E/H 값과, 압입하중, 균열길이로 재료의 파괴인성을 예측할 수 있다.

[0107] 5. 결과

[0108] 본 발명에서는 cohesive zone 모델을 이용한 유한요소해석에 기초해 압입 파괴인성 평가식을 제시했다. 먼저 다양한 재료물성 및 압입조건들이 균열크기에 미치는 영향을 살펴보았다. 이러한 분석을 바탕으로 균열크기에 영향을 미치는 주요 압입변수들을 선정했으며, 재료 파괴인성을 압입시 측정되는 최대하중과 균열길이로 나타낼 수 있는 수식을 회귀를 통해 얻었다. 이상의 과정을 통해 다음과 같은 결론을 도출했다. (i) 압입시 균열크기는 항복 변형률 ε_o, 푸아송비 ν 및 그리고 영률 E 절대값의 영향을 받는다. 이에 ε_o, ν 그리고 $E_R(\equiv E/E_{1000})$과 $k_o(\equiv P_{max}/c^{3/2})$의 회귀관계를 이용한 압입 파괴인성 평가식을 제시했다. 해석으로 평가된 파괴인성치들의 평균오차는 약 3% 이내이다. 아울러 (ii) 압입 접촉길이 a(해중후 측정)를 이용해 재료 영률의 영향을 배제하고, 압입변수 ε_o, ν와 $k(\equiv P_{max}/c^{i}a^{1.5-i})$의 관계를 이용한 파괴인성 평가법을 제시했다. 이 경우 i=1.9이다. (iii) 제시된 수식 (10), (14)들은 ε_o를 주요변수로 사용하고 있다. 취성재료의 거동 특성상 항복변형률을 정확히 측정하기 어려울 뿐만 아니라, 항복변형률을 얻기 위한 별도의 과정이 필요하다. 이에 본 발명에서 선정한 회귀변수 ε_o를 E/H와 ν를 이용해 얻는 방법을 제시했다[식 (16)]. 식 (10), (16)에 기초해 10가지 Vickers 압입 균열시험 데이터로 얻은 예측 파괴인성값과 실 파괴인성값의 평균오차는 약 14% 이다. (iv) 동일 압입자 투영면적에서 압입 균열수와 균열크기관계 및 동일 압입자 형상에서 압입자각과 균열 크기의 관계를 이용하면, Vickers 압입에 기초해 정립된 파괴인성 평가식을 다양한 압입자 형태로 확장할 수 있다.

[0109] 이상에서 본 발명의 바람직한 실시예에 대하여 상세하게 설명하였지만 본 발명의 권리범위는 이에 한정되는 것은 아니고 다음의 청구범위에서 정의하고 있는 본 발명의 기본 개념을 이용한 당업자의 여러 변형 및 개량 형태 또한 본 발명의 권리범위에 속하는 것이다.

부호의 설명

[0110] K_c: 재료파괴인성 P_{max}: 최대하중

c: 균열길이 a: 접촉길이

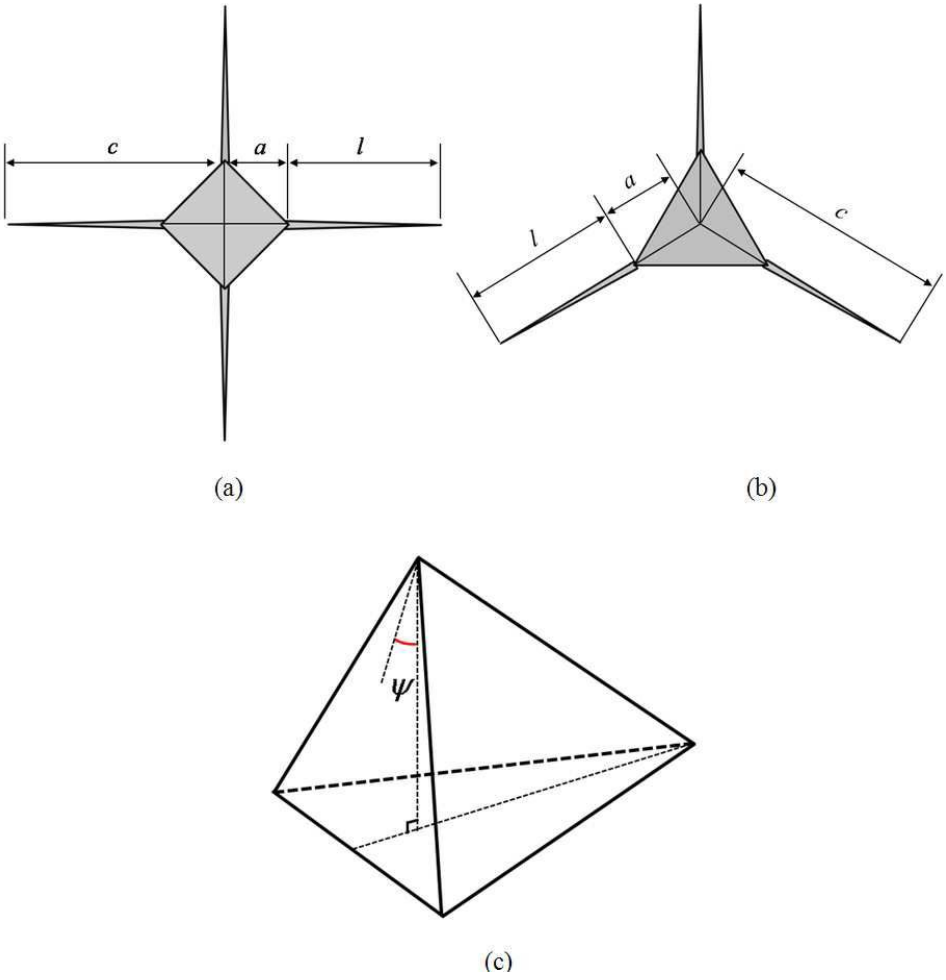
K_o: $[K_c/(P_{max}/c^{3/2})]$ $K_o|_V$: Vickers 압입자로 얻은 K_o

ν: 푸하송비 ε_o: 변형률

$E_R(= E / E_{1000})$: 임의 영률값 E_{1000} = 1000 Pa 과 재료영률 E 의 비

도면

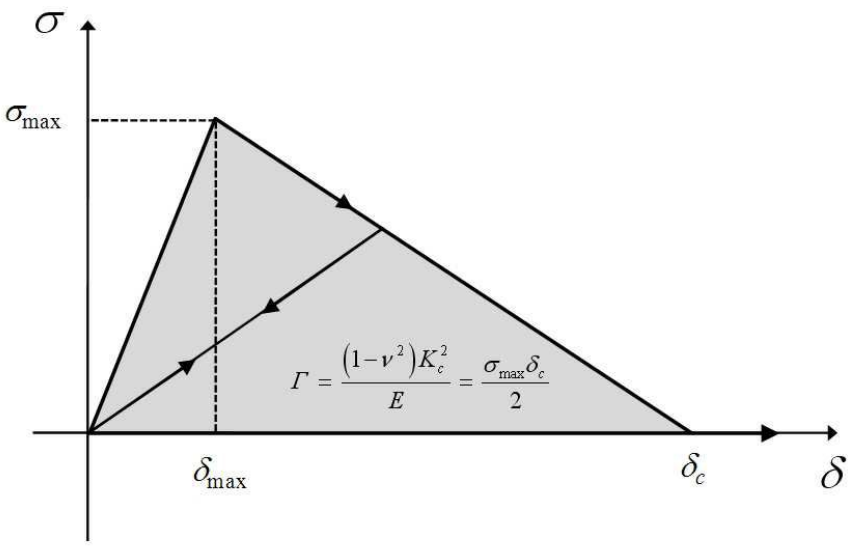
도면1

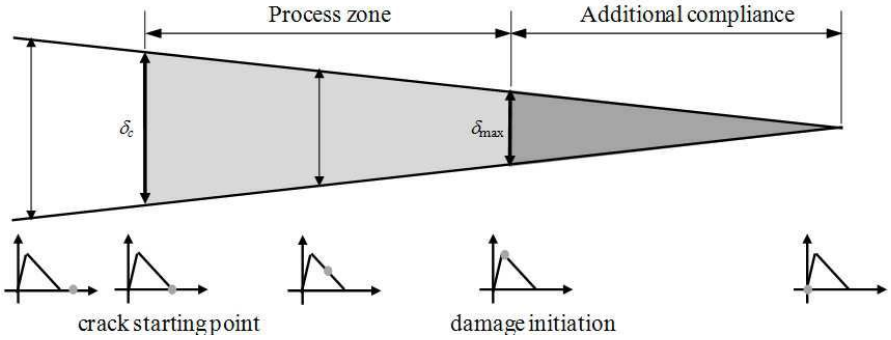


(a) (b)

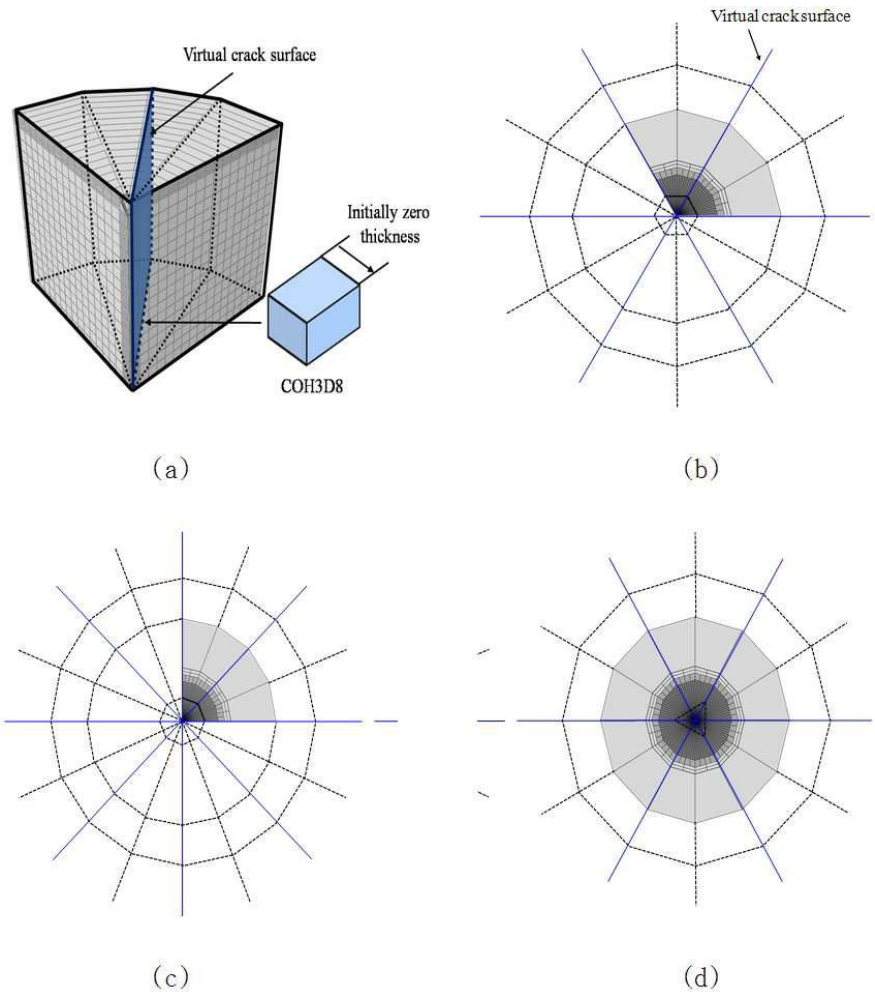
(c)

도면2

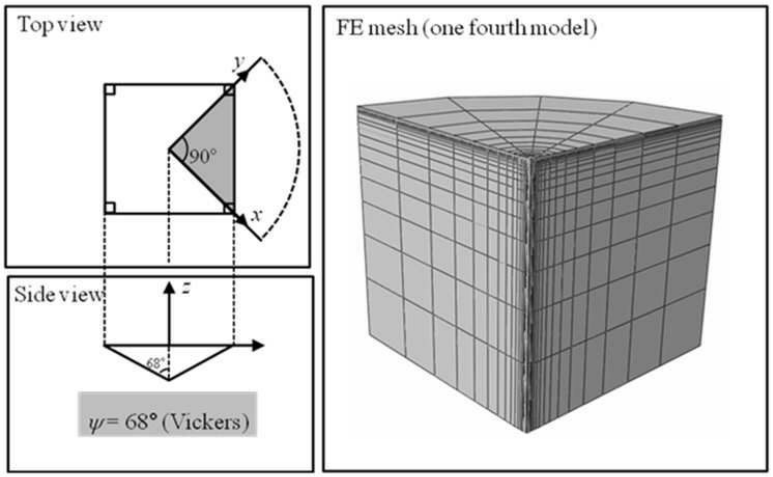

σ
σmax
Γ = (1−ν²)K_c²/E = σmax δc/2
δmax
δc
δ


Process zone
Additional compliance
δc
δmax
crack starting point
damage initiation

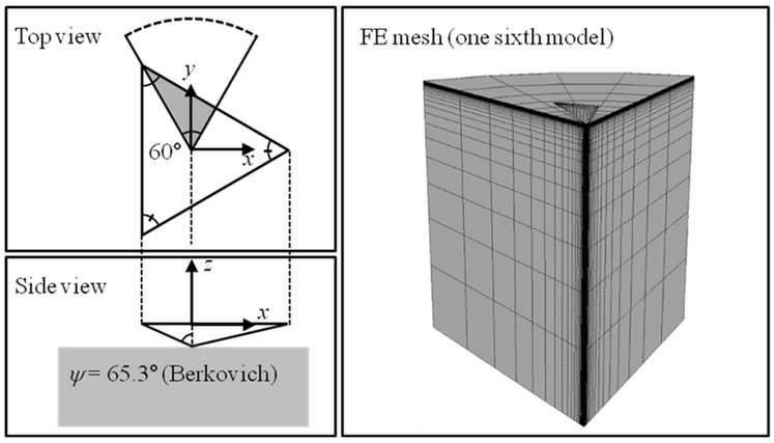
도면3


Virtual crack surface
Initially zero thickness
COH3D8
(a)
Virtual crack surface
(b)
(c)
(d)

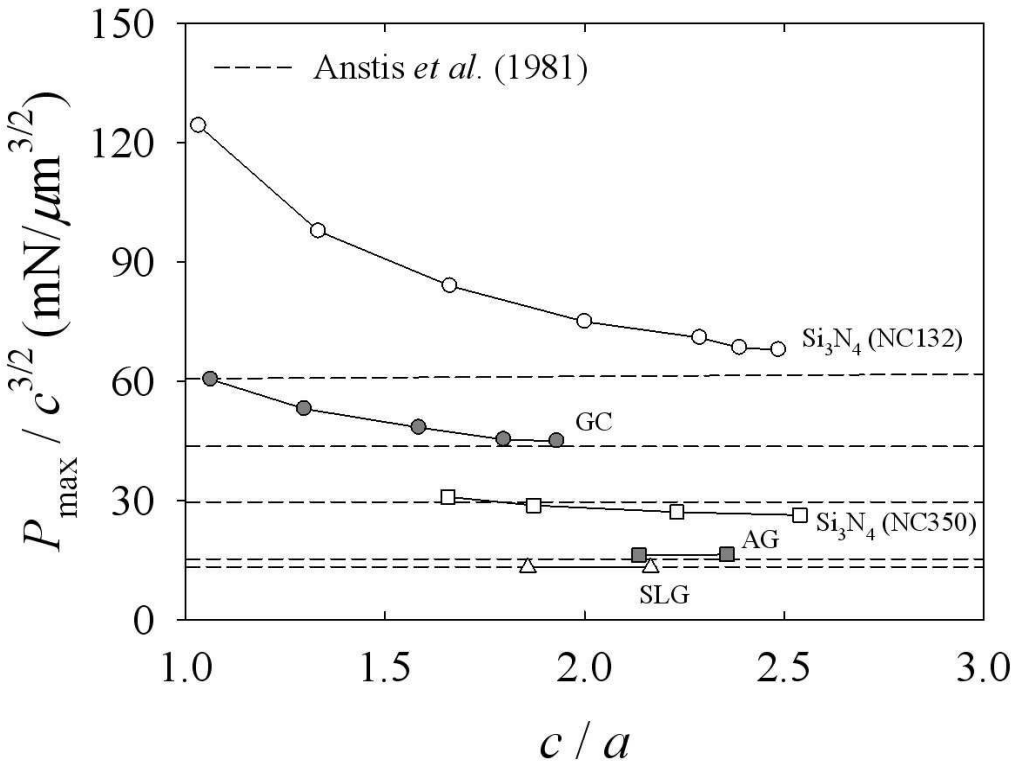
도면4


Top view
y
90°
x
Side view
z
68°
ψ= 68° (Vickers)
FE mesh (one fourth model)

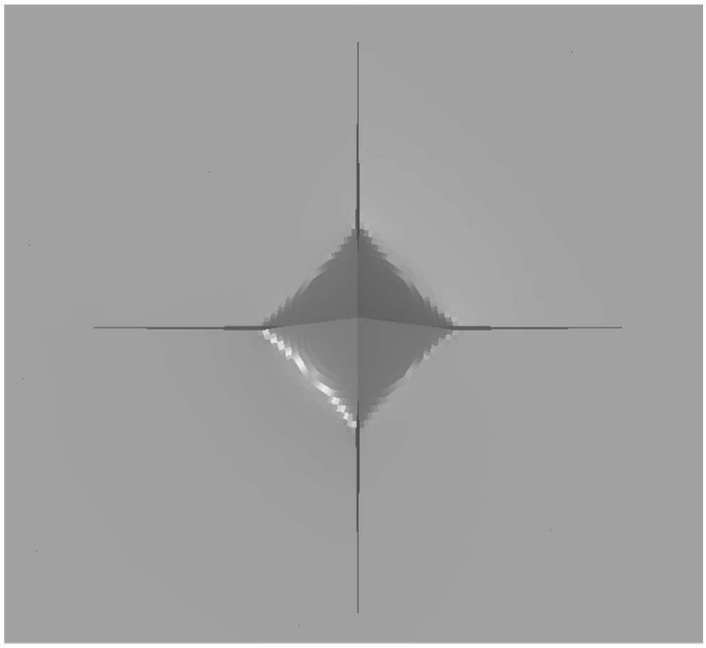
(a)


Top view
y
60°
x
Side view
z
x
ψ= 65.3° (Berkovich)
FE mesh (one sixth model)

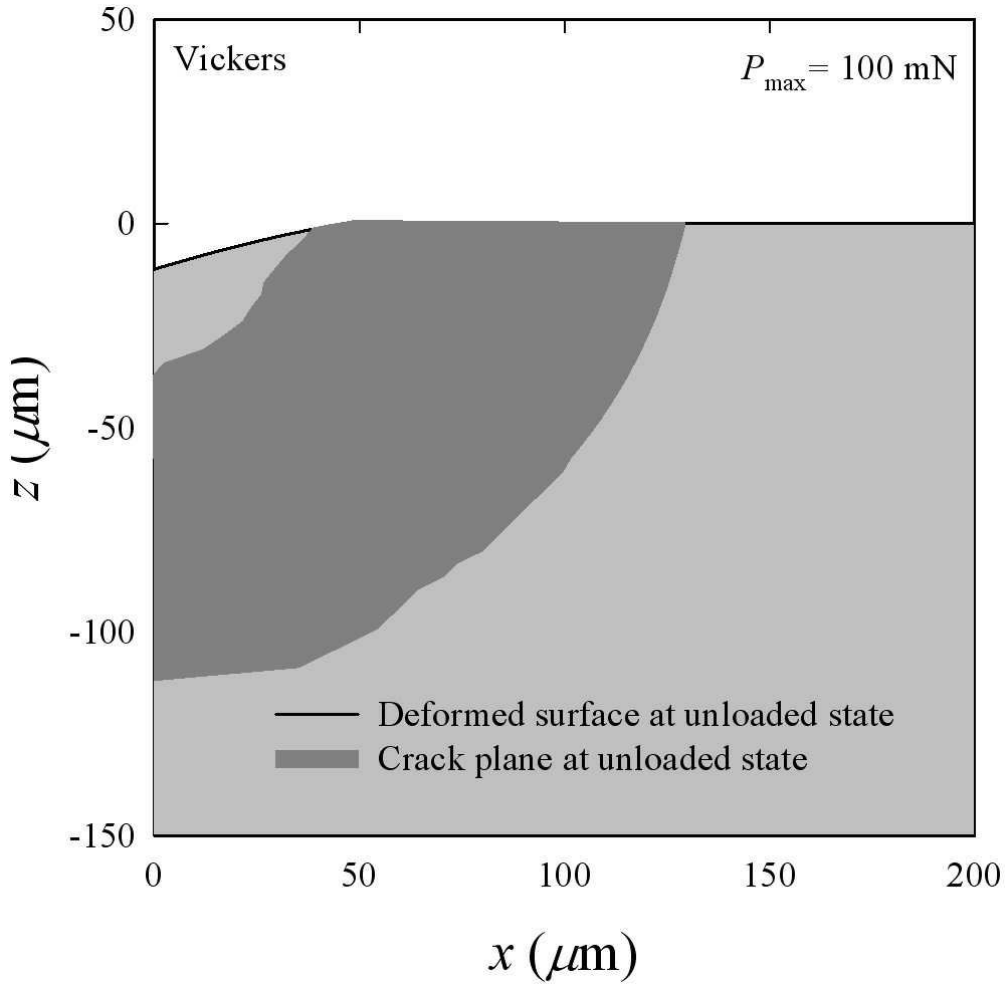
도면5


150
120
90
60
30
0
1.0
1.5
2.0
2.5
3.0
Anstis et al. (1981)
Si3N4 (NC132)
GC
Si3N4 (NC350)
AG
SLG
P max / c 3/2 (mN/μm 3/2)
c / a

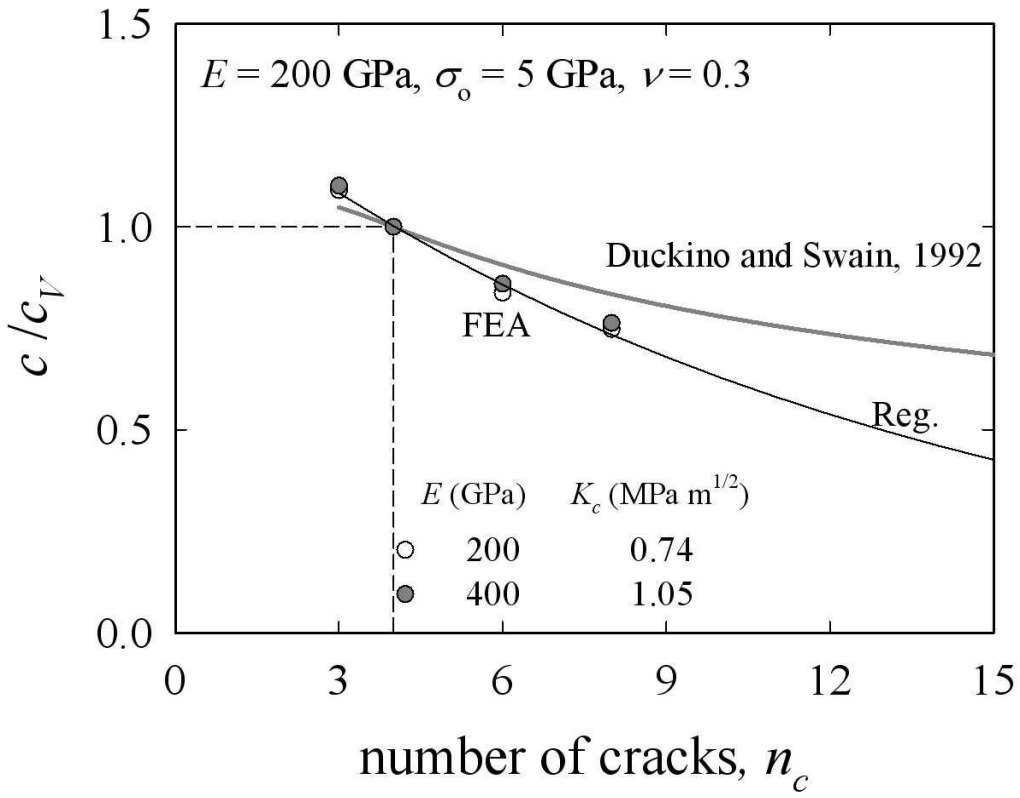
도면6



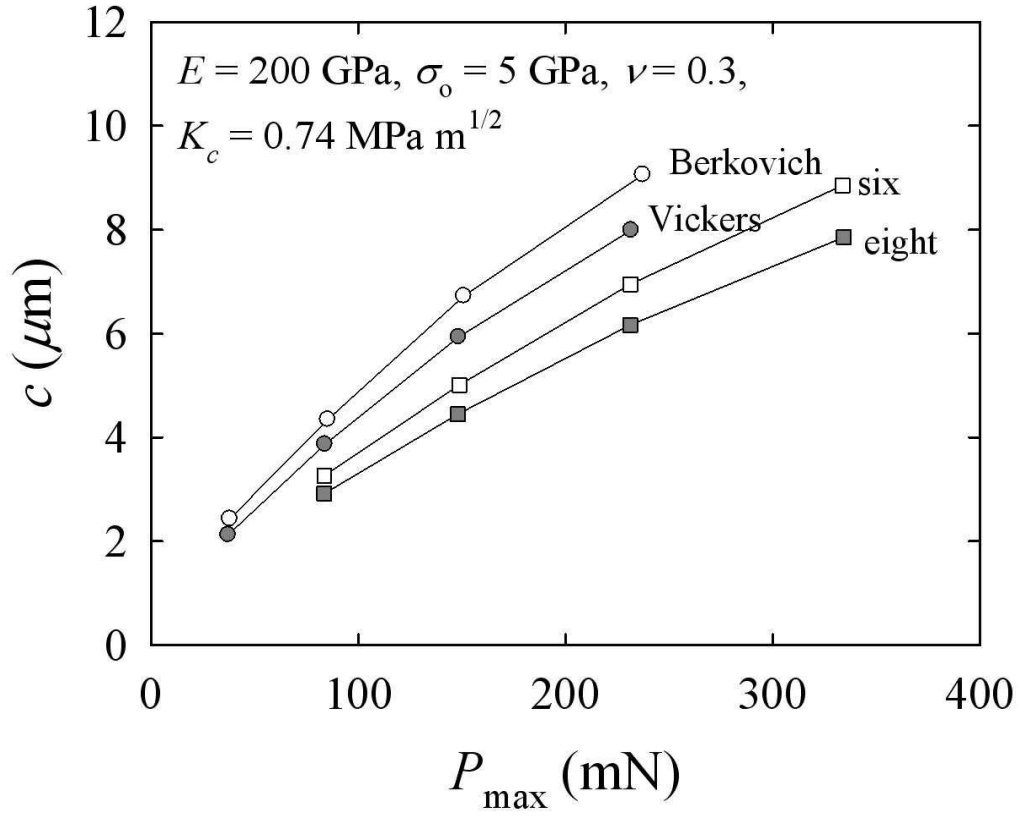
도면7


Vickers
P_{max} = 100 mN
50
0
-50
-100
-150
z (μm)
0
50
100
150
200
x (μm)
Deformed surface at unloaded state
Crack plane at unloaded state

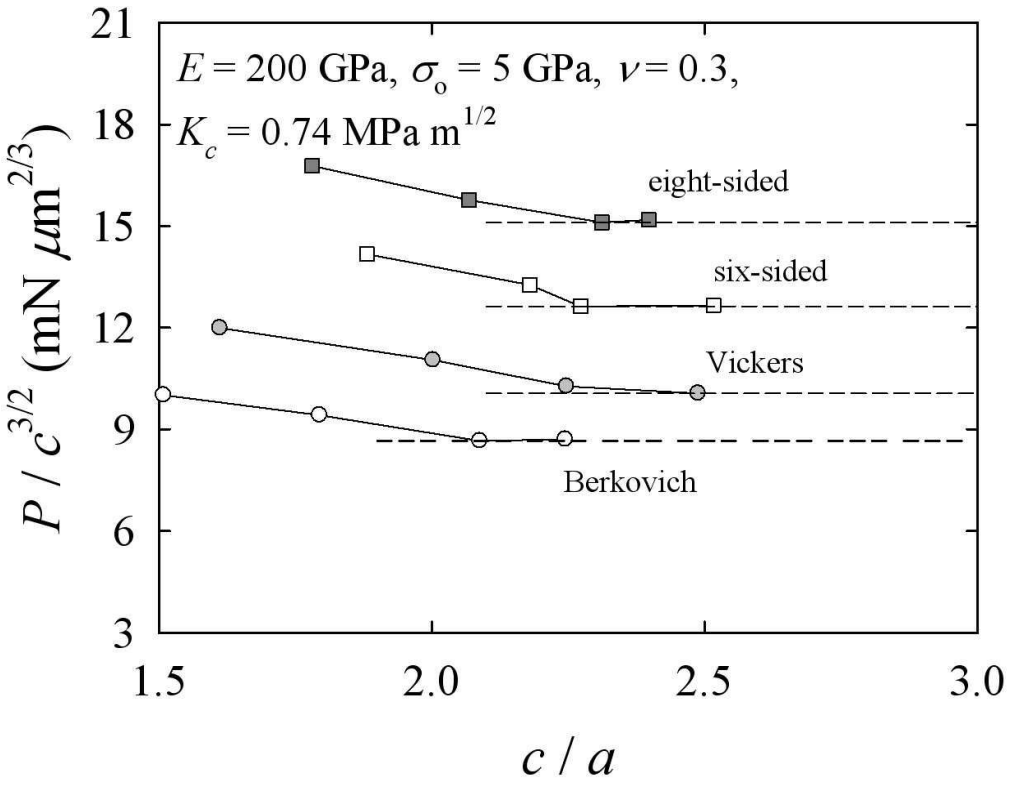
도면8


E = 200 GPa, σo = 5 GPa, ν = 0.3
Duckino and Swain, 1992
FEA
Reg.
E (GPa)
Kc (MPa m1/2)
200
0.74
400
1.05
c /cV
number of cracks, nc
1.5
1.0
0.5
0.0
0
3
6
9
12
15

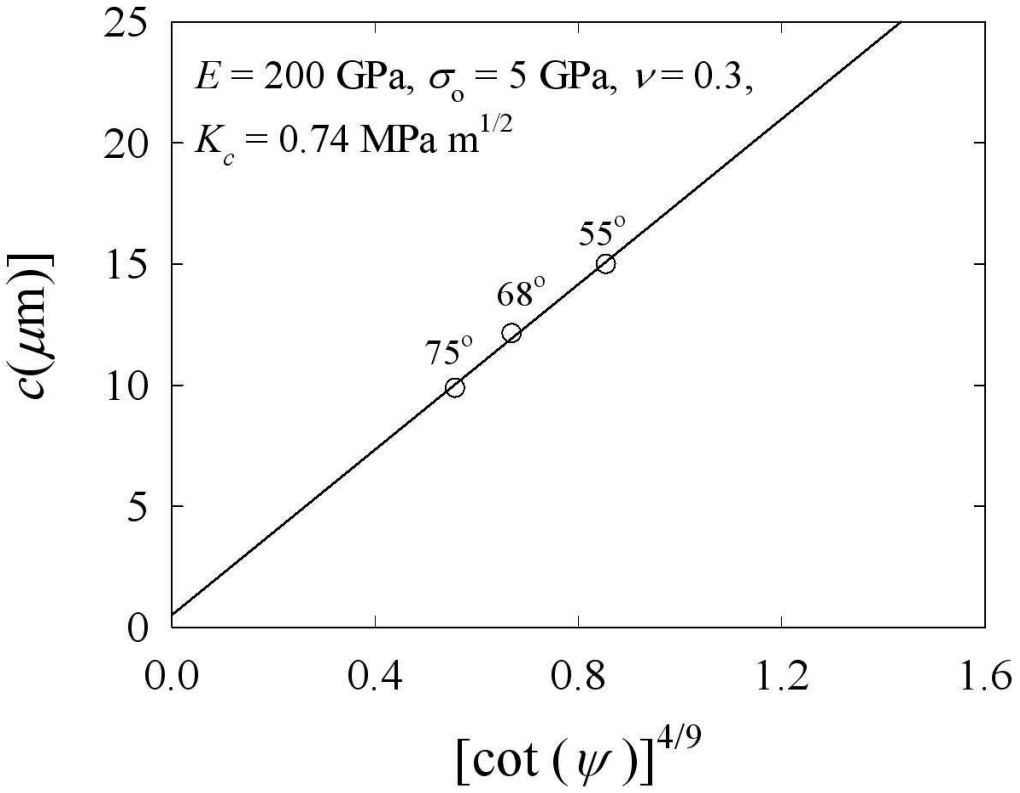
도면9a


E = 200 GPa, σo = 5 GPa, ν = 0.3,
Kc = 0.74 MPa m1/2
Berkovich
six
Vickers
eight
c (μm)
Pmax (mN)
12
10
8
6
4
2
0
0
100
200
300
400

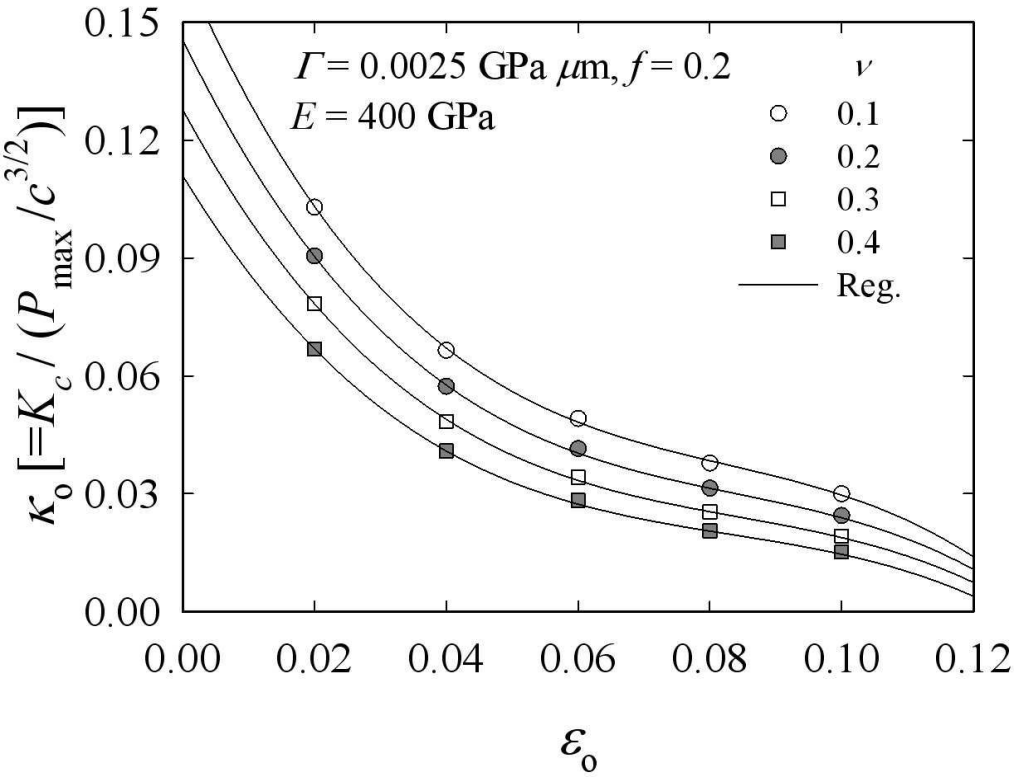
도면9b


E = 200 GPa, σo = 5 GPa, ν = 0.3,
Kc = 0.74 MPa m1/2
eight-sided
six-sided
Vickers
Berkovich
P / c3/2 (mN μm2/3)
c / a
21
18
15
12
9
6
3
1.5
2.0
2.5
3.0

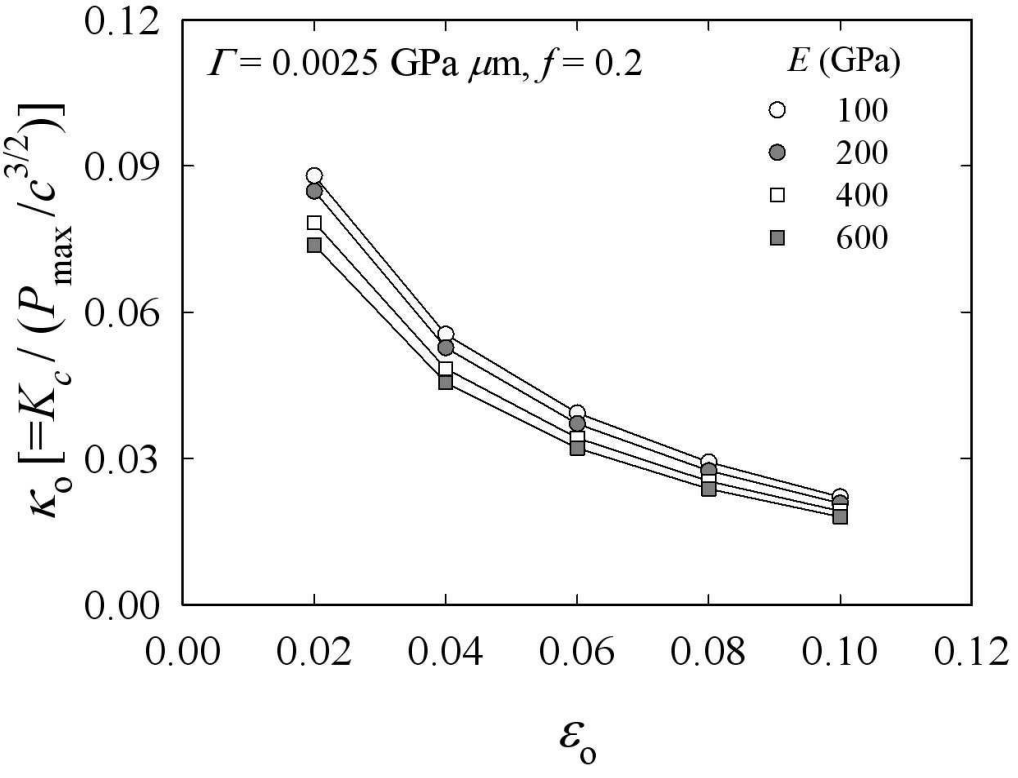
도면10


E = 200 GPa, σo = 5 GPa, ν = 0.3,
Kc = 0.74 MPa m1/2
55°
68°
75°
c(μm)]
[cot (ψ)]4/9
25
20
15
10
5
0
0.0
0.4
0.8
1.2
1.6

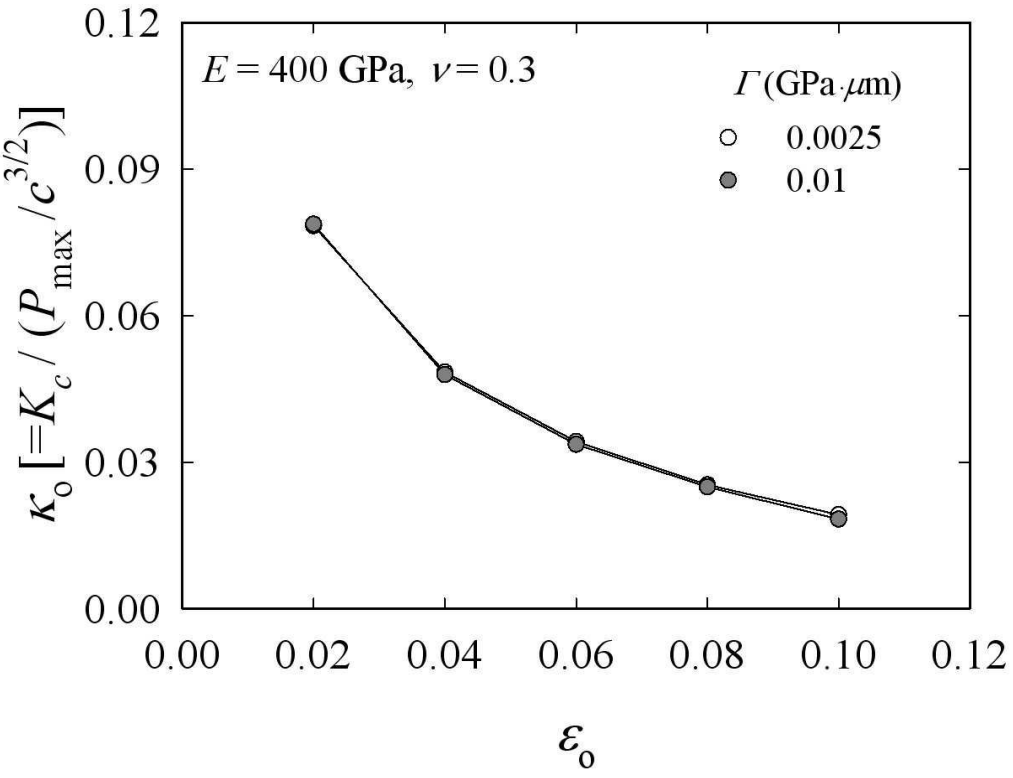
도면11


Γ = 0.0025 GPa μm, f = 0.2
E = 400 GPa
ν
0.1
0.2
0.3
0.4
Reg.
κ_o [=K_c / (P_{max}/$c^{3/2}$)]
ε_o
0.00
0.03
0.06
0.09
0.12
0.15
0.00
0.02
0.04
0.06
0.08
0.10
0.12

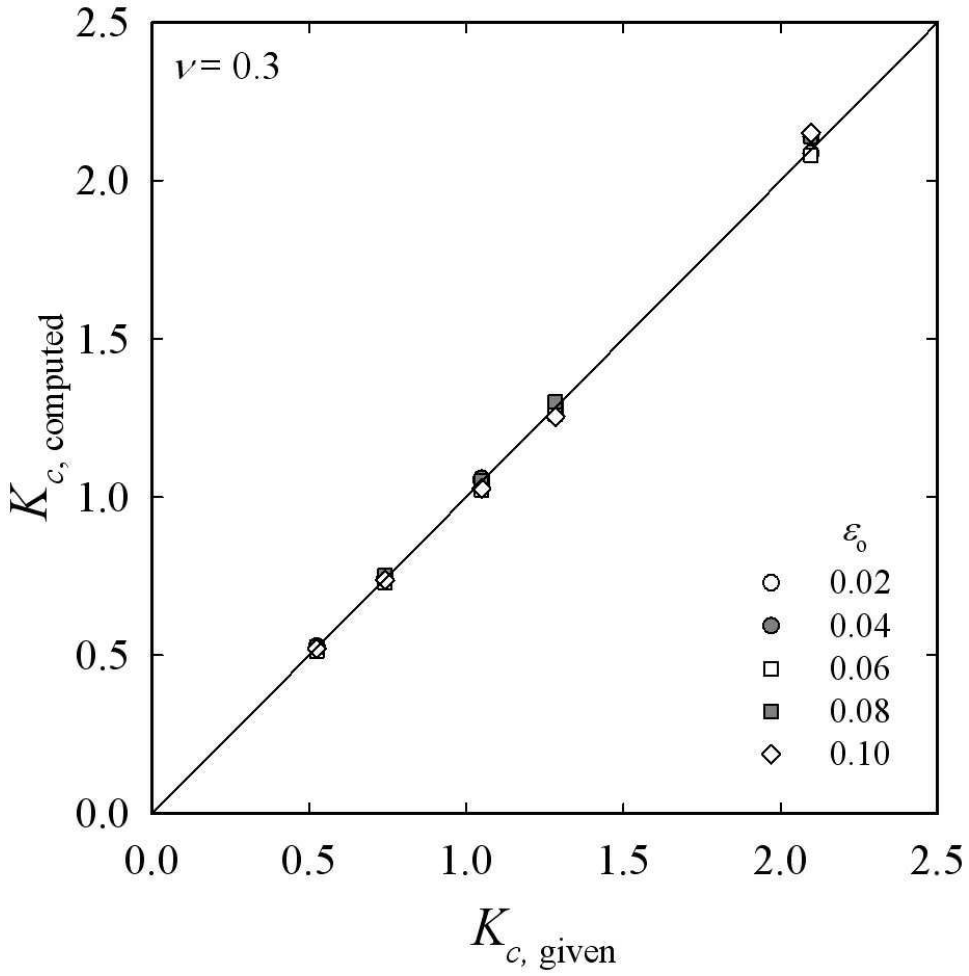
도면12


Γ = 0.0025 GPa μm, f = 0.2
E (GPa)
100
200
400
600
κ_o [=K_c / (P_{max}/$c^{3/2}$)]
ε_o
0.00
0.03
0.06
0.09
0.12
0.00
0.02
0.04
0.06
0.08
0.10
0.12

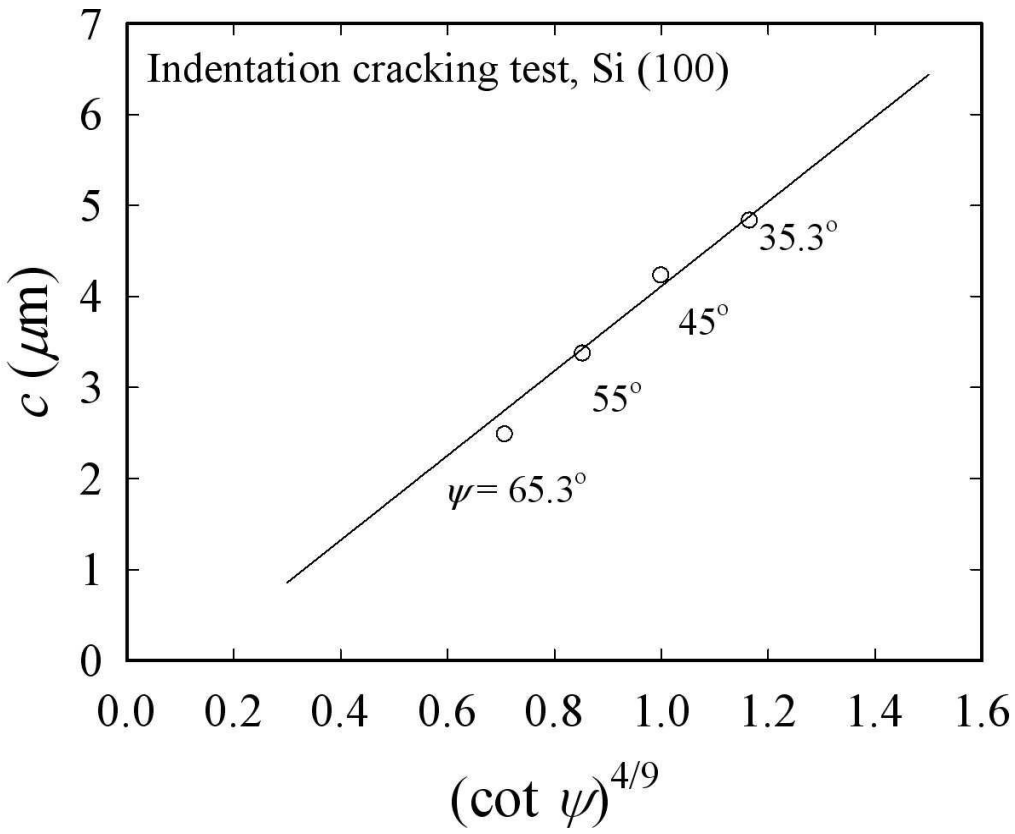
도면13


0.12
0.09
0.06
0.03
0.00
0.00
0.02
0.04
0.06
0.08
0.10
0.12
$E = 400$ GPa, $\nu = 0.3$
Γ (GPa·μm)
0.0025
0.01
κ_o [$=K_c / (P_{max}/c^{3/2})$]
ε_o

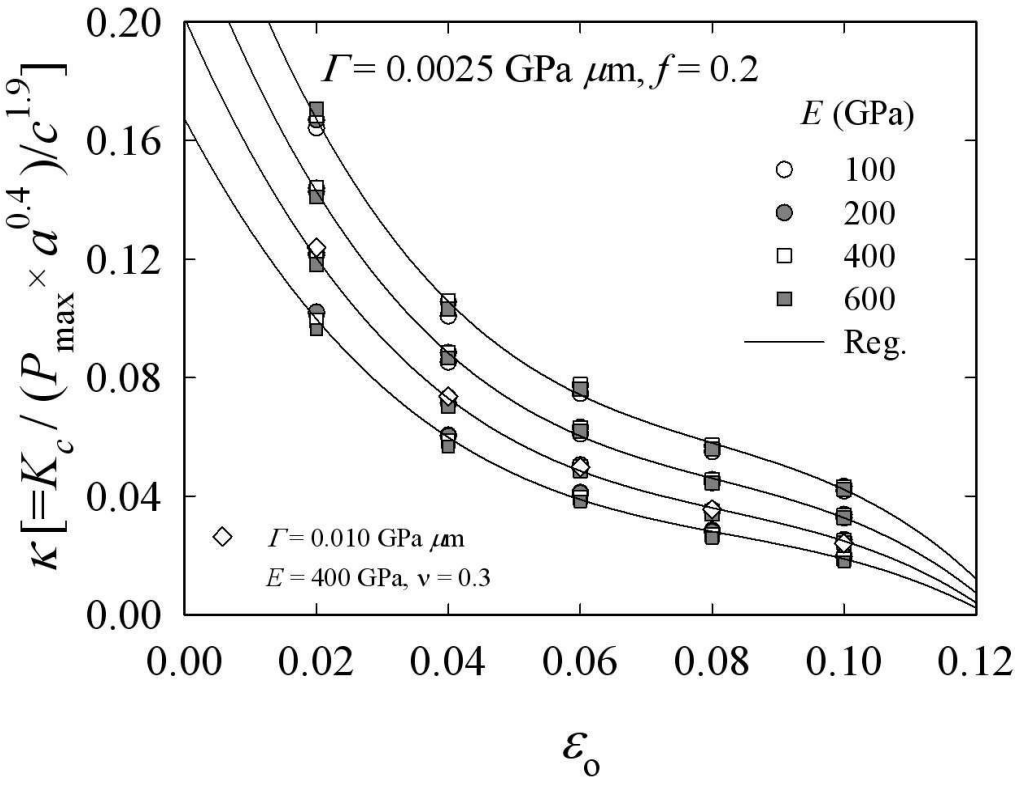
도면14


2.5
2.0
1.5
1.0
0.5
0.0
0.0
0.5
1.0
1.5
2.0
2.5
ν = 0.3
$K_{c,\ computed}$
$K_{c,\ given}$
ε_0
0.02
0.04
0.06
0.08
0.10

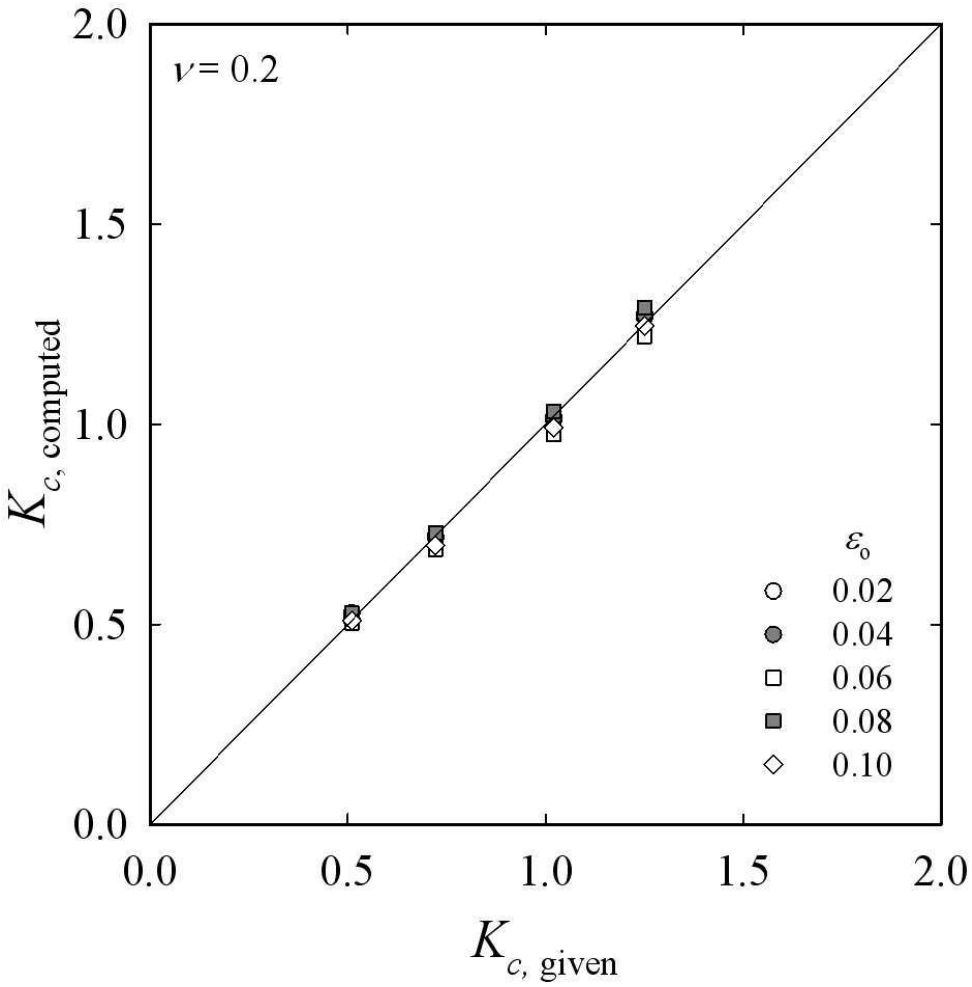
도면15


Indentation cracking test, Si (100)
c (μm)
(cot ψ)^4/9
ψ= 65.3°
55°
45°
35.3°
0
1
2
3
4
5
6
7
0.0
0.2
0.4
0.6
0.8
1.0
1.2
1.4
1.6

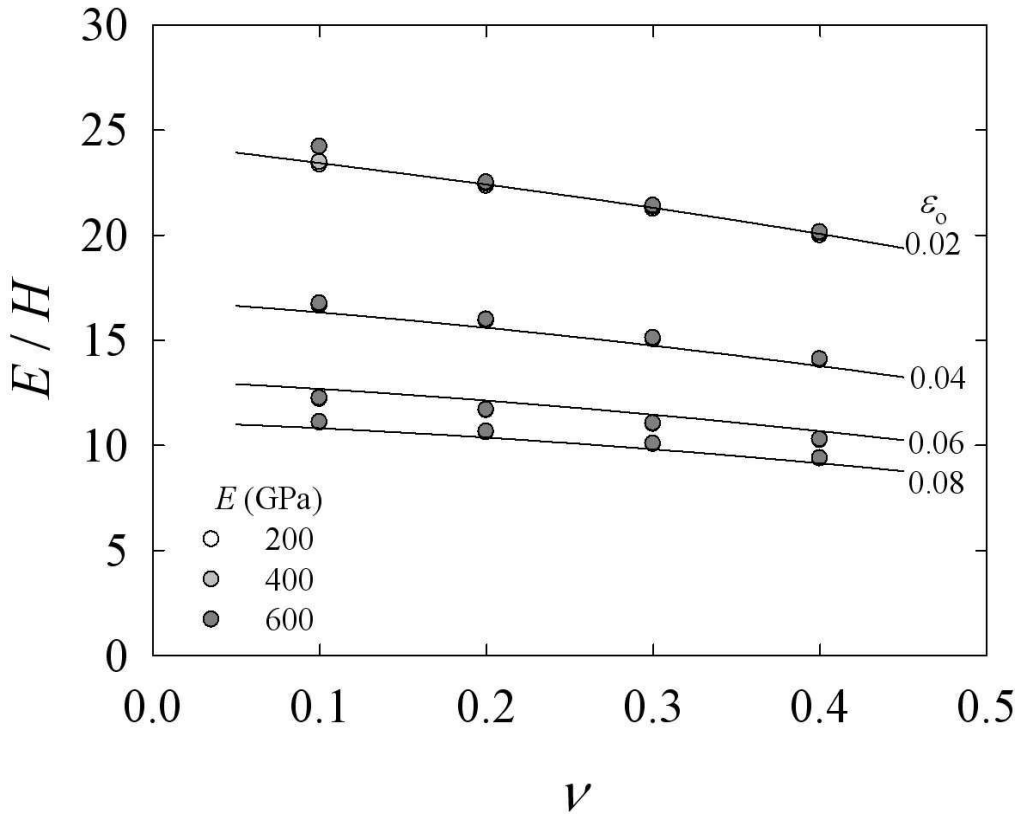
도면16


Γ= 0.0025 GPa μm, f= 0.2
E (GPa)
100
200
400
600
Reg.
Γ= 0.010 GPa μm
E = 400 GPa, ν = 0.3
κ [=K_c / (P_max × a^0.4)/c^1.9]
ε_o
0.00
0.04
0.08
0.12
0.16
0.20
0.00
0.02
0.04
0.06
0.08
0.10
0.12

도면17


2.0
1.5
1.0
0.5
0.0
0.0
0.5
1.0
1.5
2.0
ν = 0.2
$K_{c,\ computed}$
$K_{c,\ given}$
ε_0
0.02
0.04
0.06
0.08
0.10

도면18


30
25
20
15
10
5
0
0.0
0.1
0.2
0.3
0.4
0.5
E / H
ν
ε_o
0.02
0.04
0.06
0.08
E (GPa)
200
400
600