(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 공개특허공보(A)

(11) 공개번호 10-2016-0088756
(43) 공개일자 2016년07월26일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)
G01N 3/42 (2006.01) *G06F 17/10* (2006.01)
(52) CPC특허분류
G01N 3/42 (2013.01)
G06F 17/10 (2013.01)
(21) 출원번호 10-2015-0008245
(22) 출원일자 2015년01월16일
심사청구일자 2015년01월16일

(71) 출원인
서강대학교산학협력단
서울특별시 마포구 백범로 35 (신수동, 서강대학교)
(72) 발명자
이형일
경기도 고양시 일산서구 대산로212번길 26, 1502동 304호 (대화동, 성저마을15단지건영빌라)
최영식
대구광역시 수성구 범어로16길 22-4 (범어동)
(뒷면에 계속)
(74) 대리인
특허법인명인

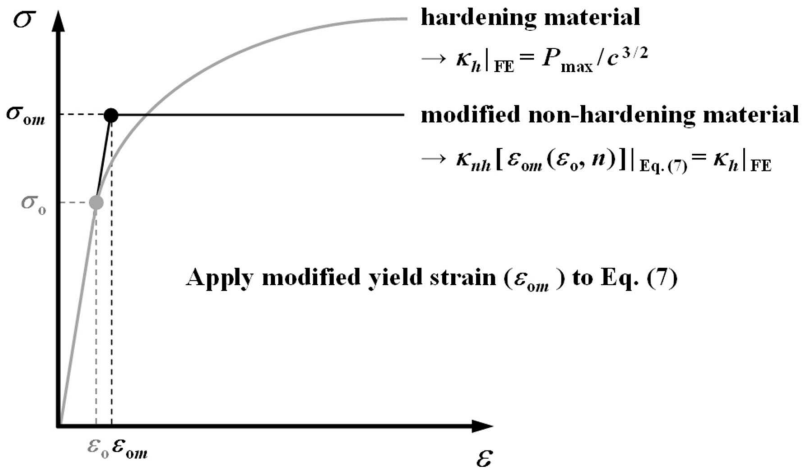
전체 청구항 수 : 총 4 항

(54) 발명의 명칭 **유한요소해에 기초한 경화재의 비커스 압입파괴인성 평가방법**

(57) 요 약

본 발명은 Hyun 등이 제시한 비경화재에 대한 기존 평각식을 활용함으로써 적은 횟수의 해석으로 경화재의 파괴인성을 측정할 유한요소해에 기초한 경화재의 비커스 압입파괴인성 평가방법을 제공하는 것이 그 기술적 과제이다. 이를 위해, 본 발명의 유한요소해에 기초한 경화재의 비커스 압입파괴인성 평가방법은, 상기 경화재를 영률과 푸아송비가 같고 항복변형률만 다른 비경화재로 가정하는 단계; 상기 경화재의 항복변형률과 변형경화지수로부터 상기 비경화재의 수정 항복변형률을 얻는 함수식을 제시하는 단계; 및 상기 함수식에서 얻은 상기 비경화재의 수정 항복변형률을 이용하여 상기 비커스 압입자에 의해 상기 경화재에 미치는 압입하중과 상기 경화재에 발생되는 균열길이로부터 상기 경화재의 파괴인성을 평가하는 단계를 포함한다.

대 표 도 - 도9



(52) CPC특허분류
G01N 2203/0062 (2013.01)
G01N 2203/0078 (2013.01)
(72) 발명자
리키펠릭스로버트
서울특별시 마포구 광성로6안길 13 (신수동)

이진행
서울특별시 영등포구 당산로 214, 412동 1601호 (당산동5가, 당산 삼성 래미안)

명 세 서

청구범위

청구항 1

유한요소해에 기초한 경화재의 비커스 압입파괴인성 평가방법으로,

상기 경화재를 영률과 푸아송비가 같고 항복변형률만 다른 비경화재로 가정하는 단계;

상기 경화재의 항복변형률과 변형경화지수로부터 상기 비경화재의 수정 항복변형률을 얻는 함수식을 제시하는 단계; 및

상기 함수식에서 얻은 상기 비경화재의 수정 항복변형률을 이용하여 상기 비커스 압입자에 의해 상기 경화재에 미치는 압입하중과 상기 경화재에 발생되는 균열길이로부터 상기 경화재의 파괴인성을 평가하는 단계

를 포함하는 유한요소해에 기초한 경화재의 비커스 압입파괴인성 평가방법.

청구항 2

제1항에서,

상기 함수식을 제시하는 단계에서,

상기 함수식은,

$$\varepsilon_{om}\left(\varepsilon_0, n^{-1}\right) = a_i\left(\varepsilon_0\right) n^{-i} \;\; ; \; i = 0,1,2$$

$$a_i\left(\varepsilon_0\right) = b_j\, \varepsilon_0^{\,j} \;\; ; \; j = 0,1,2,3$$

이고,

여기서, ε_o: 항복변형률, n: 변형경화지수, ε_{om}: 수정 항복변형률, a 및 b는 회귀계수인

유한요소해에 기초한 경화재의 비커스 압입파괴인성 평가방법.

청구항 3

제2항에서,

상기 경화재의 파괴인성을 평가하는 단계에서,

평가식으로,

$$K_c = \kappa_{nh}\left(E_R, \varepsilon_0, \nu\right)\left(\frac{P_{\max}}{c^{3/2}}\right)$$

의 식이 사용되고,

여기서, K_c: 재료파괴인성, k: 통합 보정계수, nh: 비경화재료, E: 영률, ε_o: 항복변형률, ν: 푸아송비, P_{max}: 최대압입하중, c: 균열길이, E_R(= E/E_{1000}): 임의 영률값 E_{1000} = 1000Pa 과 재료영률 E의 비인

유한요소해에 기초한 경화재의 비커스 압입파괴인성 평가방법.

청구항 4

제2항에서,

상기 함수식을 제시하는 단계에서,

상기 함수식은,

상기 유한요소해를 기초로 최적요소와 압입깊이를 선정하는 단계;

상기 경화재의 항복변형률과 변경화지수가 상기 비경화재의 수정 항복변형률에 대한 주요인자가 됨을 정량적으로 보이기 위해 직교배열표 및 반응표를 이용하는 단계; 및

상기 비경화재의 수정 항복변형률을 상기 경화재의 항복변형률과 변경경화지수의 함수로 표현하는 단계;를 거쳐 만들어지는

유한요소해에 기초한 경화재의 비커스 압입파괴인성 평가방법.

발명의 설명

기 술 분 야

[0001] 본 발명은 경화재료의 비커스(Vikers) 압입파괴인성 평가방법에 관한 것이다.

배 경 기 술

[0002] 균열성장에 대한 재료 저항력인 파괴인성 K_c 는 구조물의 신뢰성 평가에 있어 중요한 척도이다. 압입시험은 전통적인 파괴인성 평가법과 달리 작은 시편에 바로 적용할 수 있으며, 한번의 압입만으로 쉽고 빠르게 파괴인성을 측정할 수 있어 시간 및 비용측면에서 상당히 유리한 평가법이다. 압입시, 균열은 표면에서 생성되어 하부방향으로 전파되기도 하며, 압입하부 중앙에서 생성되어 표면으로 전파되기도 한다. 해중시에는 압입선단부의 잔류응력이 해방되면서 표면부의 균열성장을 촉진한다. 압입균열형태는 재료, 시험조건, 압입자, 최대압입 하중(또는 최대압입깊이)에 따라 여러 조합으로 다양하게 나타날 수 있다(도 1 참조). 이와 같이 압흔 주위에 발생된 표면 균열크기에 근거해 취성재의 파괴 인성치를 평가하기 위한 다양한 연구가 수행되었다.

[0003] 압입시험으로 재료의 파괴인성을 평가하기 위해 Lawn 등과 Anstis 등은 영률 E, 경도 H, 최대압입하중 P_{max}, 균열길이 c 와 압입자형상 보정계수 α 로부터 파괴인성을 예측하는 수식을 제시했다. 본 수식으로 α 값이 주어지면 실험으로 얻은 E, H, P_{max}, c 로부터 바로 재료의 파괴인성을 예측할 수 있다. 그러나 α 값은 실험적으로 결정된 상수이고, 재료물성과 무관하게 압입자 형상의 함수로만 표현돼서, 재료에 따른 오차를 수반한다. 이에 Lawn 등과 Anstis 등이 제시한 수식을 다양한 물성변수(푸아송비, 항복변형률 등)와 압입자 형상(삼각뿔, 사각뿔 등)을 포함해 확장하려는 연구가 시도되었다.

[0004] Jang과 Pharr는 삼각뿔 압입자에 대한 실험으로 (100)Ge, (100)Si 와 같은 단결정 재료의 α 를 압입자각 Ψ 와 푸아송비 ν 의 함수로 나타냈다. 그러나 α 값은 ν 뿐만 아니라 영률, 항복강도 등의 영향도 받는다. 압입시험으로 물성변수를 수식화하려면 시험재료에 따라 압입균열실험이 선행되어야 하고, 다결정재료에서는 결정립 크기가 균열길이 정도로 미세하면 입사광 산란으로 균열 측정오차가 커질 수 있다. 이에 유한요소해석으로 압입시 재료특성에 따른 균열을 모사하고 이로부터 파괴인성을 예측하는 연구가 진행 되고 있다. 특히 Lee 등은 압입하부 중앙 / 압입표면에서 균열이 발생하는 경우, 분리요소모델(CZM: cohesive zone model)을 이용한 균열진전 과정이 Lawn 등에 의한 실험적 관찰과 상당히 유사함을 보였다. 이를 토대로 Hyun 등은 분리요소모델을 이용한 Vickers 압입균열해석에 기초해 Lawn 등이 제안한 압입파괴인성 평가식을 다양한 재료물성(영률, 푸아송비, 항복변형률) 및 압입조건(최대압입하중, 압입자 형상, 압입자각)을 고려해 확장했다.

[0005] Hyun 등은 위의 α 값 대신 새로운 통합 보정계수 k 를 선정한 후, 분리요소모델을 이용한 역해석을 통해 등방성 비경화재에 대한 물성변수인 E, ε_o, ν 의 함수로 표현했다. 역해석을 통한 함수생성 방법은 다음과 같다. 주어진 재료물성 범위내에서 물성변수(K_c, E, ε_o, ν)를 적절히 변화시키면서 수백회 Vickers 압입균열시험을 모사하는 유한요소해석을 실시하고, 해석으로부터 각 물성변수에 상응하는 최대압입하중 P_{max}, 균열길이 c 를 얻는다. 이로부터 각 물성변수에 대한 k [= K_c / (P_{max} / $c^{3/2}$)] 값을 알 수 있다. 이들 데이터를 회귀해 k 값과

물성치를 일대일 대응시키는 함수를 생성한다. E, ε_o, ν를 생성된 수식에 대입해 k 를 알면 시험 / 해석으로 얻은 P_{max} 와 c 로부터 재료의 파괴인성을 구할 수 있다.

발명의 내용

해결하려는 과제

[0006] 본 발명의 기술적 과제는, Hyun 등이 제시한 비경화재에 대한 기존 평각식을 활용함으로써 적은 횟수의 해석으로 경화재의 파괴인성을 측정할 유한요소해에 기초한 경화재의 비커스 압입파괴인성 평가방법을 제공하는 것이다.

과제의 해결 수단

[0007] 상기 기술적 과제를 해결하기 위하여, 본 발명의 실시예에 따른 유한요소해에 기초한 경화재의 비커스 압입파괴인성 평가방법은, 상기 경화재를 영률과 푸아송비가 같고 항복변형률만 다른 비경화재로 가정하는 단계; 상기 경화재의 항복변형률과 변형경화지수로부터 상기 비경화재의 수정 항복변형률을 얻는 함수식을 제시하는 단계; 및 상기 함수식에서 얻은 상기 비경화재의 수정 항복변형률을 이용하여 상기 비커스 압입자에 의해 상기 경화재에 미치는 압입하중과 상기 경화재에 발생되는 균열길이로부터 상기 경화재의 파괴인성을 평가하는 단계를 포함한다.

[0008] 상기 함수식을 제시하는 단계에서, 상기 함수식은,

$$\varepsilon_{om}\left(\varepsilon_o, n^{-1}\right) = a_i\left(\varepsilon_o\right) n^{-i} \;\; ; \; i = 0,1,2$$

$$a_i\left(\varepsilon_o\right) = b_j\, \varepsilon_o{}^{j} \;\; ; \; j = 0,1,2,3$$

[0009]

[0010] 일 수 있고, 여기서, ε_o: 항복변형률, n: 변형경화지수, ε_{om}: 수정 항복변형률, a 및 b는 회귀계수이다.

[0011] 상기 경화재의 파괴인성을 평가하는 단계에서, 평가식으로,

$$K_c = \kappa_{nh}\left(E_R, \varepsilon_o, \nu\right)\left(\frac{P_{max}}{c^{3/2}}\right)$$

[0012]

[0013] 의 식이 사용될 수 있고, 여기서, K_c: 재료파괴인성, k: 통합 보정계수, nh: 비경화재료, E: 영률, ε_o: 항복변형률, ν: 푸아송비, P_{max}: 최대압입하중, c: 균열길이, E_R(= E/E_{1000}): 임의 영률값 E_{1000} = 1000Pa 과 재료영률 E의 비이다.

[0014] 상기 함수식을 제시하는 단계에서, 상기 함수식은, 상기 유한요소해를 기초로 최적요소와 압입깊이를 선정하는 단계; 상기 경화재의 항복변형률과 변경화지수가 상기 비경화재의 수정 항복변형률에 대한 주요인자가 됨을 정량적으로 보이기 위해 직교배열표 및 반응표를 이용하는 단계; 및 상기 비경화재의 수정 항복변형률을 상기 경화재의 항복변형률과 변경경화지수의 함수로 표현하는 단계;를 거쳐 만들어질 수 있다.

발명의 효과

[0015] 이상에서와 같이, 본 발명의 실시예에 따른 유한요소해에 기초한 경화재의 비커스 압입파괴인성 평가방법은 다음과 같은 효과를 가진다.

[0016] 경화재료의 항복변형률과 변형경화지수의 변수를 이용하여 단순화된 비경화재료의 수정 항복변형률을 계산할 수 있는 계산식을 제시하고, 이 단순화된 비경화재료의 물성 정보(영률, 푸아송비, 수정 항복변형률)를 Hyun 등이 제시한 기존 비경화재료에 대한 파괴인성 평가식에 대입하는 방법으로, 적은 횟수의 해석으로 경화재의 파괴인성을 측정할 수 있다.

도면의 간단한 설명

[0017] 도 1은 재료, 시험조건, 압입자, 최대압입하중(또는 최대압입깊이)에 따라 나타날 수 있는 다양한 압입균열형태를 나타내는 도면이다.

도 2는 본 발명에 사용한 Vickers 압입시험을 모사하는 1/4 유한요소모델을 나타내는 도면이다.

도 3은 분리요소모델(CZM)의 결합면 분리와 이에 대응하는 힘 사이의 관계를 나타내는 도면이다.

도 4는 완전적분 및 감차적분 요소 사용에 따른 σ_{eq} - ε_{tot} 값을 관측하고자 선정된 절점을 나타내는 도면이다.

도 5는 도 4와 같이 선정된 각 절점에서 요소 [(a) 완전적분요소, (b) 감차 적분요소] 사용에 따른 σ_{eq} - ε_{tot} 값을 나타내는 그래프이다.

도 6의 (a)와 (b)는 각각 완전적분 및 감차적분 요소 사용에 따른 균열부 확대형상을 나타내는 도면이다.

도 7의 (a)는 E = 100 GPa, ε_o = 0.02, (b)는 E = 200 GPa, ε_o = 0.02, (c)는 E = 100 GPa, ε_o= 0.1, (d)는 E = 200 GPa, ε_o = 0.1 의 재료 물성치를 사용했을 때 h_{max}(=0.6-1.4㎛)에 따른 해중 후 압입하부 균열형상을 나타내는 그래프이다. (참고로, 도 7에서 h_{max} 가 (a)는 1.4, (b)는 0.8, (c)는 0.8, (d)는 0.6㎛에서 균열이 half-penny(= "well-developed") 형상이 된다. 압입하부 균열형태에 따른 명칭은 도 1에 표현되어 있다.)

도 8은 (a)는 E = 100 GPa, ε_o = 0.02, n = 5 (b)는 E = 100 GPa, ε_o = 0.02, n = 13 (c)는 E = 200 GPa, ε_o = 0.02, n = 5 (d)는 E = 200 GPa, ε_o = 0.02, n = 13 의 재료 물성치를 사용했을 때 h_{max}(=1.0-1.6㎛)에 따른 해중 후 압입하부 균열형상을 나타내는 그래프이다.

도 9는 본 발명에서 경화재를 영률과 푸아송비는 같고 항복변형률만 다른 단순화된 비경화재로 가정한 뒤, 이 재료의 수정된 항복변형률 ε_{om} 을 얻는 과정을 나타내는 도식이다.

도 10 및 도 11은 다양한 물성변수(E, ν, ε_o, n)에 따른 ε_{om} 의 추이를 나타 내는 그래프이다. (여기서, 실선은 식 (9)로 회귀되는 곡선이다)

도 12는 변수 E 를 달리해 얻은 무차원화된 압입하중-변위(P-h) 곡선을 비교한 그래프이다.

도 13은 ε_o = 0.02, 0.1과 n = 5, 13 에 대해, E 와 ν 를 변화(E:4 × ν:4)시켜 압입균열해석으로 얻은 심볼인 $k|_{FE}$ [$=K_c|_{given} / (P_{max} / c^{3/2})$] 값과 식 (7),(9)로 계산된 실선 $k|_{Eq}$를 비교한 그래프이다.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

[0018] 이하, 첨부한 도면을 참고해, 본 발명이 속하는 기술 분야에서 통상의 지식을 가진 자가 용이하게 실시할 수 있도록 상세히 설명한다.

[0019] 본 발명에서는 재료의 변형경화지수를 고려해 등방성 경화재의 파괴인성을 예측한다. 경화재의 파괴인성평가를 위한 주요 물성변수 (E, ε_o, ν, n) 를 모두 고려해 수식을 생성하려면 방대한 해석이 필요하다. 이에 Hyun 등이 제시한 비경화재에 대한 기존 평가식을 활용함으로써 적은 횟수의 해석으로 경화재의 파괴인성 예측 수식을 구한다. 이를 위해 경화재를 보다 단순화된 비경화재로 가정한다. 비경화재로 단순화된 재료의 수정 항복변형률을 기존식에 대입하면 이에 상응하는 경화재의 파괴인성값이 계산된다. 단순화된 재료는 원래의 경화재와 영률과 푸아송비는 같고, 항복변형률만 다르다. 수정 항복변형률은 경화재료에 대한 Vickers 압입시험을 모사하는 역해석을 통해 얻어지는 최대압입하중 및 균열길이와 영률, 푸아송비 등을 기존식에 대입하면 구할 수 있다. 수정 항복변형률은 경화재의 항복변형률과 변형경화지수만이 주요 인자가 되기 때문에 이들 인자만 고려한 적은 횟수의 해석으로 물성평가 범위를 확장할 수 있다. 이에 동일한 영률과 푸아송비 에서 항복변형률과 변형경화지수만 고려해 수정 항복변형률에 대한 함수식을 제시한다. 이를 위해 기초 유한요소해석으로 최적요소와 압입깊이를 선정한다. 이어 실험계획법의 일종인 직교배열표 및 반응표를 이용해 경화재의 항복 변형률과 변형경화지수가 수정 항복변형률에 대한 주요인자가 됨을 정량적으로 보인다. 이들의 함수화를 통해 단순화된

재료모델을 이용한 새로운 물성평가 수치접근법을 제시하고 그 유효성을 검증한다.

[0020] **1. 압입균열시험의 유한요소해석**

[0021] **1.1. 압입균열시험의 유한요소해석**

[0022] Vickers 압입균열시험을 모사하기 위해 도 2 의 유한요소모델을 사용한다. 본 유한요소 모델은 요소 86,600 개와 절점 97,000 개 (Abaqus / Standard, 2010)로 구성되며, 시편형상과 하중이 대칭임을 고려해 시편의 1/4 만 유한요소로 모델링 한다. 압입 시험시 균열이 예상되는 면에 분리요소모델(CZM: cohesive zone model)을 배치했다. CZM은 파괴에너지와 균열선단의 한계응력 등을 사용해 재료 파괴과정을 모사한다. CZM에서 두 결합면(cohesive surface)의 간격이 임계거리에 도달하기 전까지 결합력은 증가하며, 임계거리 도달 이후 결합력은 0으로 점점 감소한다. 결합력이 0이 되면 두 면이 분리되며, 균열이 생긴다(도 3). 본 발명에서는 도 3과 같은 구간선형(piecewise linear)탄성 힘-간격 응답곡선을 적용한다. 선형탄성 힘-간격 응답은 손상시작 응력값 σ_{max} 및 이에 대응하는 손상시작 변위값 δ_{max}, 개구 변위 δ_c(또는 파괴에너지 Γ)로 기술된다. 도 3 의 분리요소 힘-간격 응답곡선의 하부면적은 파괴에너지 Γ를 나타내며, 이 경우 재료 파괴인성 K_c 는 식 (1)로 표현 된다.

[0023]
$$\Gamma = \frac{K_c^2}{E'} = \frac{1}{2}\sigma_{\max}\,\delta_c, \quad E' = \begin{cases} E & \text{for plane stress} \\ E\Big/\left(1-\nu^2\right) & \text{for plane strain} \end{cases} \tag{1}$$

[0024] 유한요소해에 기초한 압입시험에서는 재료물성치가 중요변수가 된다. 따라서 응력-변형률 관계를 정략적으로 표현하는 재료모델식이 필요하다. 이에 아래식과 같이 탄성과 소성영역 구분이 명확한 Hollomon의 구간 멱함수법(piecewise power law)을 사용한다.

[0025]
$$\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} = \begin{cases} \dfrac{\sigma}{\sigma_0} & \text{for } \sigma \le \sigma_0 \\ \left(\dfrac{\sigma}{\sigma_0}\right)^n & \text{for } \sigma \ge \sigma_0 \;;\; 1 < n \le \infty \end{cases} \tag{2}$$

[0026] 여기서 σ_o는 항복강도, $\varepsilon_o(=\sigma_o/E)$ 는 항복변형률이며, E는 영률, n은 변형경화 지수이다. n = 1 일 때는 완전탄성재료(perfectly elastic material)를 나타내며, n = 8 경우는 탄성-완전 소성재료(elastic-perfectly plastic material)를 나타낸다. 즉 1 < n < 8 이면 경화재료이고 n = 8 이면 비경화 취성재료이다. 참고로 FE 해석에서는 입력 물성치 이후의 데이터는 비경화로 간주한다. 식 (2)에서 보듯 멱함수를 사용하면 명시적인 선형탄성 구간과 그에 따른 동일한 항복응력을 정의할 수 있다.

[0027] **1.2. 유효응력-변형률곡선 및 균열형상 비교를 통한 요소선정**

[0028] 압입시 실 재료는 임의 곡률을 가지며 변형하나 유한요소해석에 사용되는 1 차 요소는 선형으로만 변형한다. 이로 인해 3 차원 완전적분요소(C3D6, C3D8) 사용시에는 전단 잠김(shear locking) 현상으로 기하학적 변형이 심한 압입선단부에 과다하게 큰 응력이 발생한다. 이를 보정하는 방법으로 주로 감차적분요소를 사용하나 특정 변형 모드(hourglass mode)를 고려하지 않은 해석 결과가 도출될 수 있다. 이는 해석시 수렴성 및 균열형상에 상당한 영향을 준다. 이에 압입시 완전적분요소와 감차적분요소의 유효응력-변형률 및 균열형상을 비교해 적합

한 모재요소를 선정한다.

[0029] 유효응력 σ_{eq} 및 유효 소성변형률 ε_{eq}^{p} 는 식 (3a), (3b)로 정의된다.

[0030]
$$\sigma_{eq} \equiv \sqrt{\frac{2}{3} S_{ij} S_{ij}} = \sqrt{\frac{1}{2}\left[(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 6(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{xz}^2)\right]} \quad (3a)$$

[0031]
$$\varepsilon_{eq}^{p} \equiv \int d\varepsilon_{eq}^{p}$$
$$d\varepsilon_{eq}^{p} \equiv \sqrt{\frac{2}{9}\left[(d\varepsilon_x^p - d\varepsilon_y^p)^2 + (d\varepsilon_y^p - d\varepsilon_z^p)^2 + (d\varepsilon_z^p - d\varepsilon_x^p)^2 + 6(d\varepsilon_{xy}^{p\,2} + d\varepsilon_{yz}^{p\,2} + d\varepsilon_{zx}^{p\,2})\right]} \quad (3b)$$

[0032] 전 구간에서의 응력-변형률관계를 나타내고자 총변형률 e_{tot} 을 아래처럼 유효 탄성변형률 ε_{eq}^{p}(= s_{eq} / E) 와 유효 소성변형률 ε_{eq}^{p} 의 합으로 정의한다.

[0033]
$$\varepsilon_{tot} = \varepsilon_{eq}^{e} + \varepsilon_{eq}^{p} \quad (4)$$

[0034] E = 200 GPa, σ_{max} = 0.5 GPa, n = 5, ν = 0.3, Γ = 0.0025 GPa · μm (K_c = 0.74 MPa · $\mu m^{1/2}$), f = 0.2 인 재료에 대해 사각뿔 압입자 (Ψ = 68°)로 h_{max} = 1.0 μm 까지 압입했다. 요소에 따른 재료거동을 보고자 도 4와 같이 압입선단부터 압입방향을 따라 아래로 5 개 절점을 선정하고, 완전적분 및 감차적분 요소 사용시 각 경우에 대해 σ_{eq} - ε_{tot} 곡선을 나타냈다[도 5(a)-(b)]. 각 절점간의 거리는 0.25 μm 이다. 완전적분요소는 재료표면 에서 아래로 갈수록 (A→E) 상대적으로 변형이 작아 ε_{tot} 과 상응하는 σ_{eq} 도 작지만 입력물성치를 잘 따른다[도 5(a)]. 이는 첨단형 압입자 사용으로 인한 압입자 선단의 기하학적인 급변성으로 변형률구배가 심할 뿐만 아니라 마찰계수의 영향을 크게 받기 때문이다. 한편 감차적분 요소를 사용하면[도 5(b)] 접촉부를 제외하고 완전적분요소 사용시보다 압입선단부에서 입력값에 근접한 결과를 준다. 이와 같이 감차적분요소를 사용하면 전단잠김 문제는 해결되는 장점이 있으나 요소가 어떤 형상으로 변형하는데 필요한 에너지가 0이 되는 hourglass 모드에 대한 문제가 발생되며, 이로 인해 균열형상이 크게 왜곡된다.

[0035] 도 6은 해중 후, 완전적분요소[도 6 (a)]와 감차적분요소[도 6 (b)]에 대한 균열부 확대형상을 보여준다. 감차적분요소 사용시에는 균열부에서의 왜곡된 요소 형상으로 인해 실 압입균열을 모사하지 못한다. 이런 요소형상의 왜곡은 균열길이 측정을 모호하게 하고, 해의 수렴성에도 치명적인 문제를 야기한다. 이론과는 달리, 본 해석에서는 감차적분 요소를 사용시 완전적분요소 사용시보다 훨씬 긴 시간이 소요되었다. 압입균열에 대한 기존 연구에서 완전적분요소를 사용한 것은 이러한 문제를 갖기 때문이다. 이에 본 발명에서는 해석시 수렴성의 문제를 갖지 않으며, 균열모사가 용이한 완전적분 요소를 사용한다.

[0036] **1.3. 최대압입깊이 선정**

[0037] 기존 연구에서는 균열이 "well-developed(half-penny)" 형태가 되는 압입깊이 h_{max} 이상에서는 P_{max} / $c^{3/2}$ 값이 수렴함을 이용해 파괴인성평가식을 제시했다. P_{max} / $c^{3/2}$ 값이 수렴하므로 h_{max} 에 관계없이 동일 $k|_{FE}$ [=

$K_c|_{given}$ / (P_{max} / $c^{3/2}$)] 값이 얻어진다. 동일 깊이까지 압입할 경우 영률이 커지면 경도가 커진다. 영률증가에 따른 하중증가로 인해 균열길이가 증가한다. 균열길이가 커진다는 것은 낮은 압입깊이에서 well-developed 균열이 빨리 형성되는 것이다. 또한 항복변형률이 크면 radial 균열보다 median 균열이 잘 형성되고, 이로 인해 더 빨리 well-developed 균열로 진전한다. 변형경화지수가 작아지면 균열길이는 감소하며, well-developed 균열이 늦게 생성되는 요인이 된다. 이에 본 연구에서는 ν = 0.3, Γ = 0.0025 GPa · μm 로 고정하고 E, ε_o, n, h_{max} 를 바꿔가며 (압입균열 해석으로) 각 물성에 대한 압입 하부 균열형상을 관찰한다. 이를 통해 well-developed 균열형상을 얻기에 가장 적합한 최대압입깊이 h_{max} 를 선정한다.

[0038] 도 7 은 E (= 100, 200 GPa), ε_o (= 0.02, 0.1), h_{max} (= 0.6-1.4 μm)에 따른 비경화재의 해중후 압입하부 균열형상이다. "well-developed" 균열형태를 주는 h_{max}는 E, ε_o 가 작아지면 커진다. E = 100 GPa, ε_o = 0.02 인 경우 h_{max} = 1.4 μm 에서, 다른 경우 h_{max} = 1.0 μm 에서 균열이 well-developed 된다. 도 8 은 변형경화지수 n(= 5, 13)에 따른 압입하부 균열형상에 대한 영향을 나타낸다. 도 7(a), 도 8 (a)-(b)로부터 n 이 작으면 더 큰 h_{max} 에서 균열이 well-developed 됨을 알 수 있다. 다양한 물성에 대한 균열해석을 수행한 결과 경화 / 비경화 재료 모두 E = 100 GPa, ε_o = 0.02 인 경우를 제외하면 h_{max} = 1.0 μm 에서 균열이 well-developed 된다. 깊이 압입하면 균열길이가 커져 미세요소망을 확장해야 하고, 마찰의 영향이 커져 수렴문제를 야기한다. 이에 경제성과 수렴성을 고려해 h_{max} = 1.0 μm를 최대압입깊이로 선정한다.

[0039] **2. 경화재의 파괴인성 평가를 위한 수치접근법**

[0040] 압입시 "well-developed" 균열이 발생하는 압입깊이 이상에서는 압입깊이에 관계없이 최대 압입하중 P_{max} 와 균열길이 c 의 비 (P_{max} / $c^{3/2}$) 가 일정한 값으로 수렴한다. Lawn 등과 Anstis 등은 이러한 수렴조건하에서, 압입시험 으로 취성재의 파괴인성을 평가하는 식을 아래와 같이 제시했다.

[0041]
$$K_c = \alpha \left(\frac{E}{H} \right)^{1/2} \left(\frac{P_{\max}}{c^{3/2}} \right) \quad (5)$$

[0042] 여기서 E 는 영률, H 는 경도이며 α 는 압입자 형상과 관계된 상수이다. 그러나 식 (5)는 많은 가정을 포함하고 있다. 따라서 이 식을 일반화해 사용하기에는 많은 제약이 따른다. 실제 α 값은 E, ν, ε_o 등 재료물성에 따라 변한다. 이에 Hyun 등은 식 (6)과 같이 α 값 대신 k 를 새로운 통합변수로 선정한 후, 역해석을 통해 식 (7)처럼 k 를 등방성 비경화재 에 대한 주요 물성변수인 E, ε_o, ν의 함수로 나타냈다.

[0043]
$$K_c = \kappa \left(\frac{P_{\max}}{c^{3/2}} \right) \quad (6)$$

$$K_c = \kappa_{nh}\left(E_R, \varepsilon_0, \nu\right)\left(\frac{P_{\max}}{c^{3/2}}\right) \quad (7)$$

[0044]

[0045] 여기서 E_R 은 임의 영률값 E = 1000 GPa($\equiv E_{1000}$)과 재료영률 E 의 비(E/E_{1000})이다. 본 발명에서 하첨자는 경화재(h), 비경화재(nh), 비경화재로 단순화된 재료의 수정 항복점(om)을 의미한다. 참고로 균열이 well-developed 되면 k_{nh} 값은 E, ε_o, ν 의 각각의 변화에 대해 단조 증가 / 감소하는 특징이 있어 회귀식 생성이 용이하다.

[0046] 본 발명에서는 재료의 변형경화지수를 고려해 등방성 경화재의 파괴인성 평가법을 제시한다. k 를 E, ε_o, ν, n 의 함수로 선정하고 수식을 생성하려면 방대한 해석이 필요하다. 이에 보다 현실적으로 Hyun 등의 식 (7)을 활용함으로써 적은 횟수의 해석으로 경화재의 파괴인성을 예측하고자 한다. 이를 위해 도 9와 같이 경화재를 보다 단순화된 비경화재로 가정한다. 여기서 회색 / 검정 실선은 각각 경화재와 이에 상응하는 단순화된 비경화재를 나타낸다. 단순화 재료모델의 물성을 기존식 (7)에 대입하면, Vickers 압입시험으로 측정된 균열길이와 압입하중 으로부터 상응하는 경화재의 파괴인성이 계산된다. 단순화된 재료는 원래의 경화 재와 영률과 푸아송비는 같고 항복변형률만 다르다. 이 재료의 수정 항복변형률은 다음 과정으로 얻는다. 이 때 각각 압입균열해석 및 기존 비경화에 대한 파괴인성 평가식 (7)로 얻은 k 값이 사용되는데, 혼돈을 피하고자 하첨자 FE, Eq 를 사용해 명확히 구분한다.

[0047] 먼저 경화재에 대한 Vickers 압입균열해석을 실시해 최대압입하중 P_{max}, 균열길이 c 를 얻는다. 이들 값을 식 (6)에 대입하면 해석 $k_h|_{FE}$ 값을 구할 수 있다. K_c 는 해석시 입력값으로 아는 값이다. 이어 경화재의 E, ν 를 식 (7)에 대입해 $k_h|_{FE}$ 값과 동일한 $k_{nh}|_{Eq}$ 값을 주는 비경화재의 항복변형률을 계산한다. 본 연구에서는 상술된 방법으로 계산된 항복변형률을 수정 항복변형률 ε_{om} 이라 정의한다. 과정을 요약하면 아래식 (8)과 같다(도 9).

$$\kappa_h|_{\mathrm{FE}} = \kappa_{nh}|_{\mathrm{Eq}}\left(E_R, \varepsilon_{om}, \nu\right) \quad (8)$$

[0048]

[0049] 즉 비경화재로 단순화된 재료물성을 기존식 (7)에 대입하면 $k_h|_{FE}$ 값과 동일한 값이 계산된다. 수정 항복변형률은 경화재의 항복변형률과 변형경화지수만이 주요 인자가 되기 때문에 이들 인자만 고려한 적은 해석으로 물성 평가범위를 확장할 수 있다. 압입시 σ_o 와 E 가 달라도 그 상대비인 항복변형률 ε_o 와 변형경화지수 n 이 같으면, 동일 압입깊이에서 유효 소성변형률 ε_p가 같다. 따라서 ε_o, n 은 압입초기와 완전 소성영역에서의 변형특성을 결정하는 지배변수가 된다. 수정 항복변형률에 대해서도 ε_o, n 이 주요 지배변수가 된다. 이에 ε_{om} 을 경화재의 ε_o 와 n 의 함수로 나타내고, 다양한 E, ν 에 대해 본 식으로 계산된 $k_{nh}|_{Eq}$ 값과 $k_h|_{FE}$ 값을 비교 함으로써, 그 유효성을 검증한다. 본 식으로부터 구한 $k_{nh}|_{Eq}$ (E, ε_{om}, ν) 값을 사용 하면 해석 / 실험으로 얻은 P_{max}와 c 로 경화재의 파괴인성을 구할 수 있다.

[0050] **3. 수정 항복변형률을 이용한 경화재의 압입 파괴인성 평가**

[0051] **3.1 직교배열표를 이용한 변수 선정**

[0052] 다양한 설계인자에 따른 거동의 변화 추이를 파악하려면 각 설계인자를 변화시키면서 시험 / 해석을 수행해야

한다. 실험계획법은 주어진 설계인자의 개수에 대한 재료거동의 변화 추이를 정확하게 파악하기 위해 필요한 최소한의 실험 횟수와 각 실험에 대한 설계인자 값들을 체계적으로 결정하는 기법이다. 본 연구에서는 수정항복변형률 ε_{om} 에 영향을 주는 주요변수를 효율적으로 선택하고자 실험계획법의 일종인 직교배열표(orthogonal array) 및 반응표(response table)을 이용 한다.

[0053] 표 1처럼 네가지 (E, ν, ε_o, n) 설계변수와 세가지 수준 (설계변수값)을 고려한 $L_9(3^4)$ 형의 직교배열표를 사용했다. E, ν, ε_o 값의 범위는 비경화재에 대한 파괴인성 평가식 생성시 사용된 범위와 같다. 실제 재료의 n 값의 범위는 대개 $n > 5$ 로 이를 반영해 n 값의 수준을 정했다. 배열표를 따른 해석에서 얻은 ε_{om} 은 표 2와 같고, 이를 토대로 표 3의 반응표를 작성했다. 예로 변수 A(E) 첫째값(수준 1)의 효과(response)는 표 2의 run 1~3 에 대한 ε_{om} 평균값 [(0.036 + 0.045 + 0.060) / 3 = 0.047]이다. 같은 방법으로 모든 변수값에 대한 효과를 구했다. 효과의 최대차이로 정의되는, 일종의 민감도인, 편차(delta)도 구했다. 각 변수의 편차로 그 변수의 ε_{om} 에 대한 영향을 평가한다. 따라서 ε_o, n 의 영향은 크며 E, ν의 영향은 미미함을 알 수 있다. 상술된 결과를 검증하기 위해 E = 200 GPa, ν = 0.3으로 고정시킨 상태에서 ε_o, n (ε_o:5 ×n:7)을 변화시키면서 유한요소해석을 수행한 후, 이들 변화에 따른 ε_{om} 변화추이를 도 10 에 심볼로 나타냈다. 그림에서 ε_{om} 은 ε_o, n 의 함수임이 확인된다. 한편 도 11(a)-(b)의 심볼은 ε_o = 0.02, 0.1 과 n = 5, 13 에 대해 E, ν 변화 (E:4 ×n:4)에 따른 ε_{om} 값을 보여주는데, E, ν 가 바뀌어도 ε_o, n 이 같으면 ε_{om} 이 거의 같다. 즉 ε_o 와 n 이 주어 지면 E 에 관계없이 E 나 σ_o로 무차원화된 압입하중-변위(P-h) 곡선이 완전히 일치한다(도 12). 또한 소성구간에 비해 탄성구간은 무시될 만큼 작아 탄소성 영역에서 ν 의 영향이 미미하다. 즉 압입 P-h 특성을 결정하는 지배변수는 ε_o, n 이다. 여기에서도 ε_o, n 이 ε_{om} 에 대한 주요 지배변수가 됨을 확인할 수 있다. 이에 본 발명에서는 ε_o, n 만을 고려해 평가식을 제시하고, 이어 E, ν에 대한 유효성을 평가한다.

표 1

[0054]

level	A [E (GPa)]	B (ν)	C (ε_o)	D (n)
1	100	0.1	0.02	5
2	200	0.2	0.04	13
3	300	0.3	0.06	50

표 2

[0055]

run	A [E (GPa)]	B (ν)	C (ε_o)	D (n)	ε_{om}
1	100	0.1	0.02	5	0.036
2	100	0.2	0.04	13	0.045
3	100	0.3	0.06	50	0.060
4	200	0.1	0.04	50	0.042
5	200	0.2	0.06	5	0.077
6	200	0.3	0.02	13	0.024
7	300	0.1	0.06	13	0.065
8	300	0.2	0.02	50	0.021
9	300	0.3	0.04	5	0.054

표 3

[0056]

	A [E (GPa)]	B (ν)	C (ε_o)	D (n)
level 1	**0.047**	**0.048**	**0.027**	**0.056**
level 2	**0.048**	0.048	0.047	0.045
level 3	0.047	**0.046**	**0.068**	**0.041**
delta	0.001	0.002	**0.041**	**0.015**

[0057] **3.2 압입변수 ε_o, n 을 고려한 수식**

[0058] ε_o, n 을 독립변수로 설정해 ε_{om} 를 아래식 (9) 와 같이 나타냈다. 도 10 의 흰색 심볼 데이터를 사용해 먼저 ε_{om} 과 n^{-1} 관계를 회귀한 후, 얻어진 회귀계수들을 ε_o 에 대해 재회귀했다. 이와 같은 과정을 거치면 식 (9) 와 같이 ε_{om} 은 ε_o 와 n^{-1} 의 통합 함수로 표현된다. 표 4 는 회귀계수이다.

[0059]
$$\varepsilon_{om}\left(\varepsilon_o, n^{-1}\right) = a_i\left(\varepsilon_o\right) n^{-i} \;;\; i = 0,1,2$$
$$a_i\left(\varepsilon_o\right) = b_j\, \varepsilon_o{}^{j} \;;\; j = 0,1,2,3 \qquad (9)$$

[0060] 식 (9) 로 회귀되는 곡선을 도 10 - 11에 실선으로 나타냈다. 여기에서 식 (9)로 계산된 ε_{om} 은 회귀식 생성시 사용된 데이터 (흰색 심볼; n = 3, 7, ∞)외 (회색 심볼; n = 4, 5, 10, 20) 에서도 매우 근접한 값을 준다.

[0061] 위 식의 범용성을 확인하고자 ε_o = 0.02, 0.1과 n = 5, 13 에 대해, E 와 ν 를 변화 (E:4 × n:4)시켜 압입 균열해석을 수행했다. 해석으로 얻은 심볼인 $k|_{FE}$ [= $K_c|_{given}$ / (P_{max} / $c^{3/2}$)] 값과 식 (7),(9)로 계산된 실선 $k|_{Eq}$가 도 13에 비교되어 있다. 본 식은 E = 200 GPa, ν = 0.3 에 기초했으나 그림에서 보듯 E, n 가 달라도 유효한 $k|_{Eq}$ 값을 준다.

표 4

[0062]

	i = 0	i = 1	i = 2
j = 0	1.052e-3	1.231e-1	-1.342e-1
j = 1	9.849e-1	-6.529e+0	1.668e+1
j = 2	0	1.529e+2	-3.372e+2
j = 3	0	-9.472e+2	1.799e+3

[0063] Hyun 등은 영률 4 가지, 항복변형률 5 가지, 푸아송비 4 가지를 고려해 비경화재에 대한 파괴인성평가식을 제시했다. 여기에 변형경화지수 3 가지를 추가로 고려해 회귀수식을 얻으려면 240 회(E:4 × ε_o:5 × ν × n:3)의 해석이 필요하다. 본 발명 에서는 기존식을 활용함으로써 15 회 해석으로 물성평가 범위를 확장했다.

[0064] **4. 결론**

[0065] 본 발명에서는 분리요소모델을 이용한 Vickers 압입균열시험의 유한요소해석 전산모사를 통해 경화재의 압입 파

괴인성 평가법을 제시했다. 여기서 얻어진 결론들은 다음과 같다.

[0066] (1) 분리요소모델을 이용한 균열해석시 감차적분요소를 사용하면 hourglass 모드에 대한 문제가 발생되며, 이로 인해 균열형상이 크게 왜곡된다. 이는 균열 길이 측정을 모호하게 하고, 해의 수렴성에도 문제를 야기한다. 완전적분요소 사용시에는 기하학적 변형이 심한 압입선단부를 제외하면 입력값에 근접한 유효 응력-변형률 값을 주며, 균열을 잘 모사한다. 따라서 분리요소모델을 이용한 균열해석시에는 완전적분요소를 사용하는 것이 적합하다.

[0067] (2) 동일 깊이까지 압입할 경우 영률이 커지면 경도가 커진다. 영률증가에 따른 하중 증가로 인해 균열길이가 증가한다. 이로 인해 낮은 압입깊이에서 "well-dveloped" 균열이 형성된다. 또한 항복변형률이 크면 "radial" 균열보다 "median" 균열이 잘 형성되고, 이로 인해 더 빨리 well-developed 균열로 진전한다. 변형경화 지수가 작아지면 균열길이는 감소하며, well-developed 균열이 늦게 생성되는 요인이 된다.

[0068] (3) 경화재의 파괴인성 평가식을 얻으려면 방대한 해석이 필요하다. 이에 비경화재에 대한 파괴인성 평가식을 경화재에 적용하는 방법을 제안했다. 단순화된 비경화재의 수정 항복변형률을 얻기 위한 수식을 회귀로 얻었다. 이 식으로 계산된 수정 항복변형률을 기존평가식에 대입하면 원래 경화재의 파괴인성값과 동일한 값을 준다.

[0069] (4) 실험계획법으로 수정 항복변형률이 경화재의 항복변형률과 변형경화지수 만의 함수임을 정량적으로 보였다. 두 변수들만을 고려한 적은 횟수의 해석으로 수정 항복변형률을 구하는 수식을 생성했다.

부호의 설명

[0070] K_c: 재료파괴인성 n: 변형경화지수

Γ: 파괴에너지 H: 경도

σ_{max}: 손상시작 응력값 P_{max}: 최대압입하중

δ_{max}: 손상시작 변위값 c: 균열길이

δ_c: 개구변위 α: 압입자형상 보정계수

E: 영률 k: 통합 보정계수

ν: 푸아송비 h: 경화재료

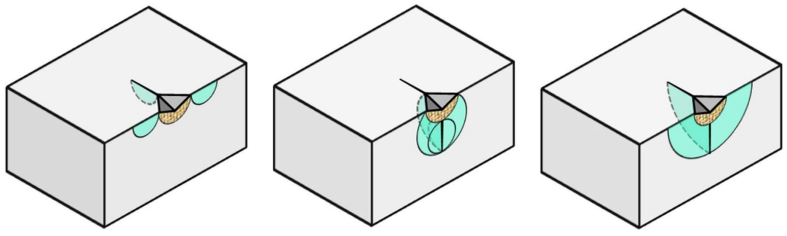
ε_o: 항복변형률 nh: 비경화재료

ε_{om}: 수정 항복변형률

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

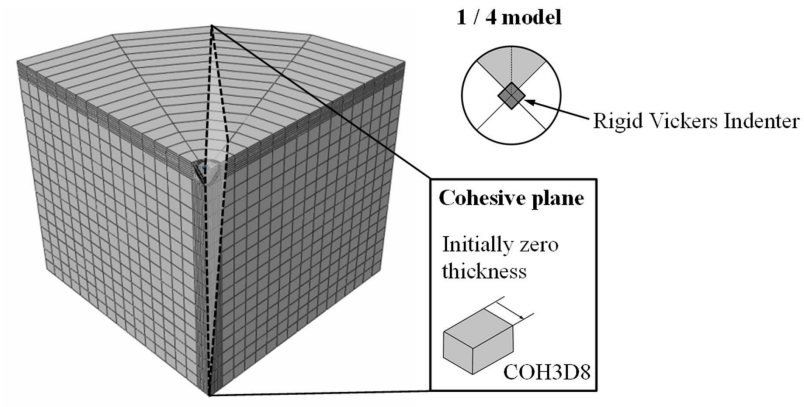
도면

도면1

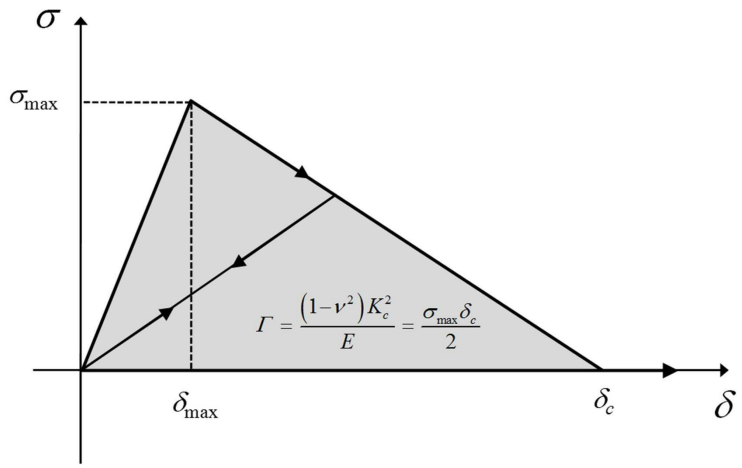


Radial Median Half-penny

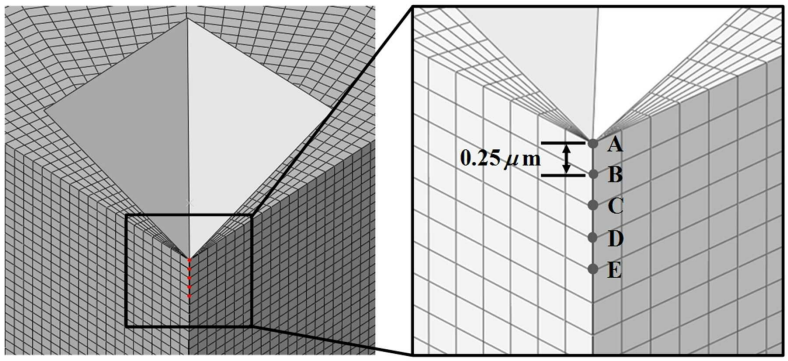
도면2


1 / 4 model
Rigid Vickers Indenter
Cohesive plane
Initially zero thickness
COH3D8

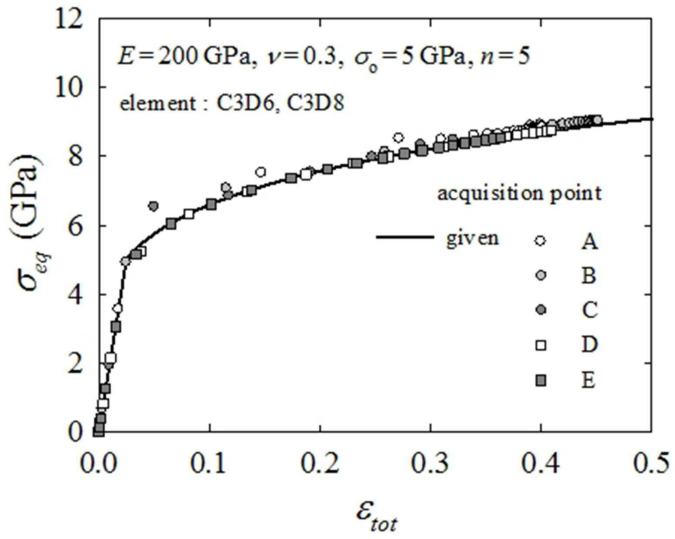
도면3


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

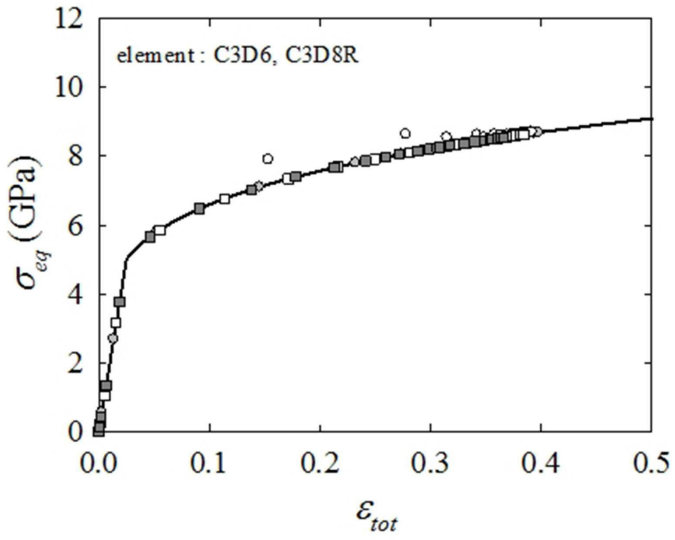
도면4


0.25 μm
A
B
C
D
E

도면5

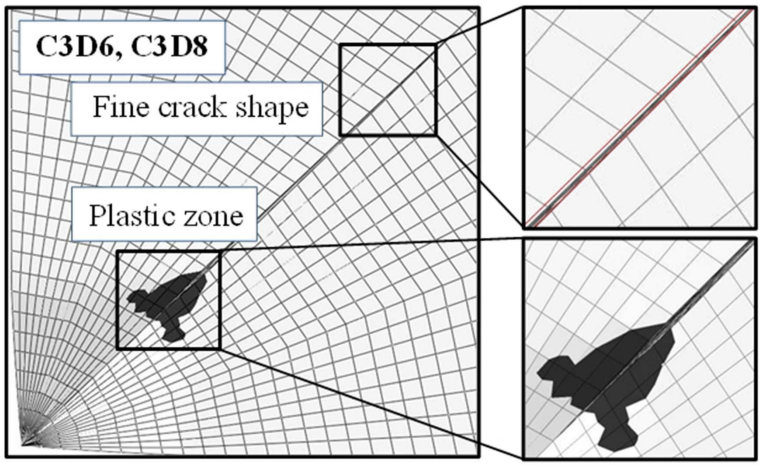

E = 200 GPa, ν = 0.3, σ0 = 5 GPa, n = 5
element : C3D6, C3D8
acquisition point
given
A
B
C
D
E
σeq (GPa)
εtot
0
2
4
6
8
10
12
0.0
0.1
0.2
0.3
0.4
0.5

(a)

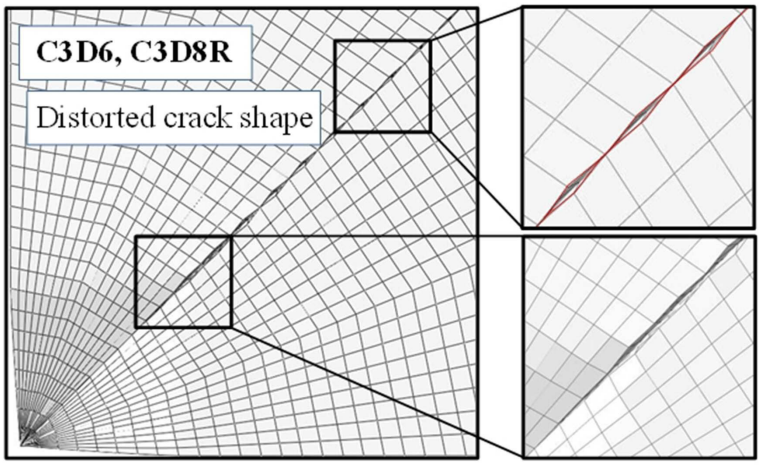

element : C3D6, C3D8R
σeq (GPa)
εtot
0
2
4
6
8
10
12
0.0
0.1
0.2
0.3
0.4
0.5

(b)

도면6

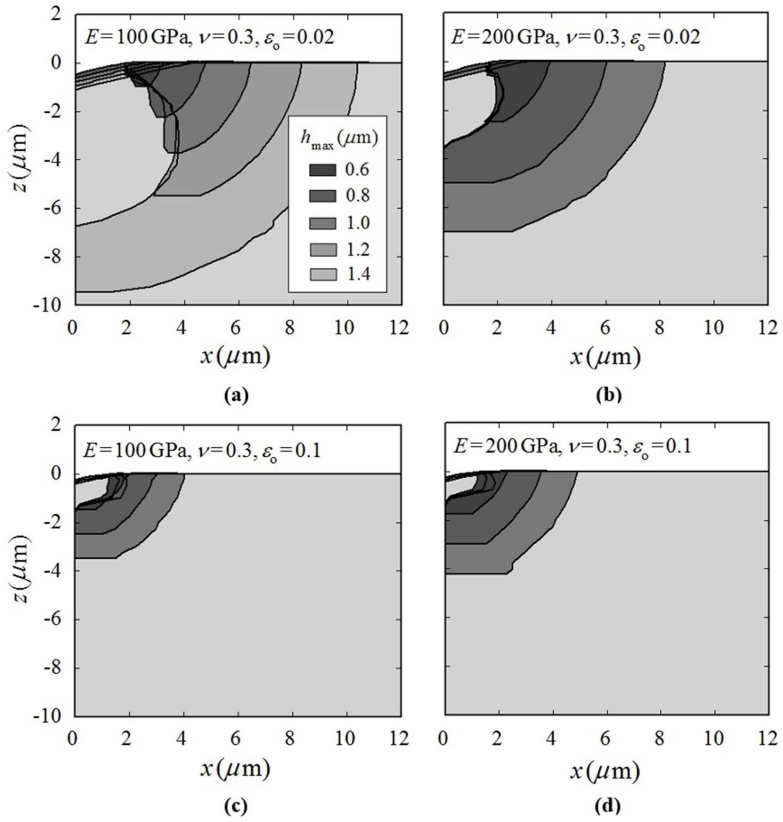

C3D6, C3D8
Fine crack shape
Plastic zone

(a)

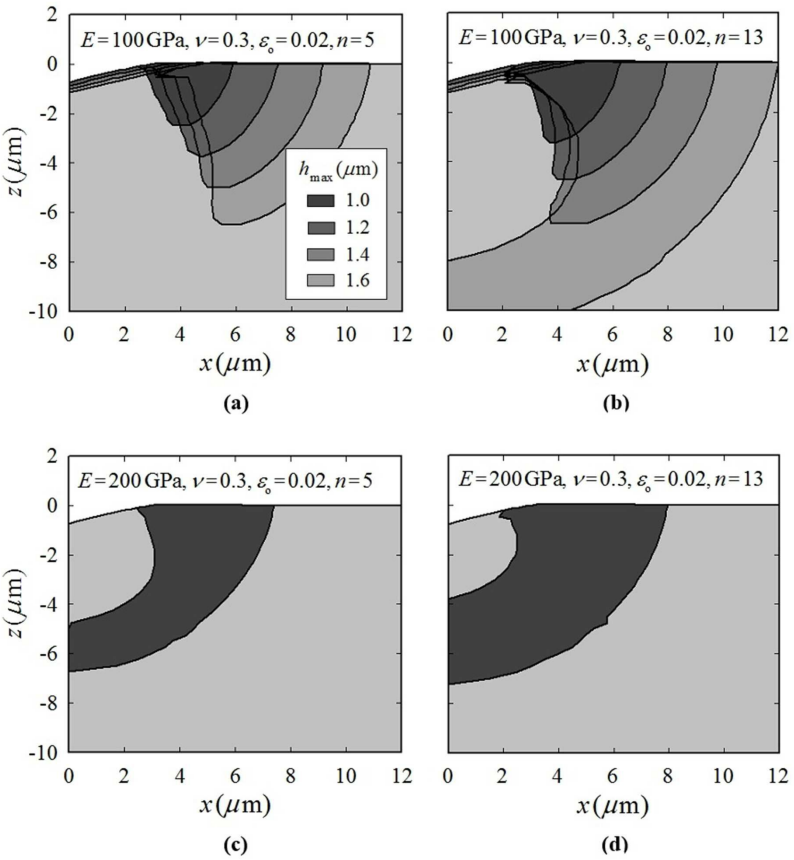

C3D6, C3D8R
Distorted crack shape

(b)

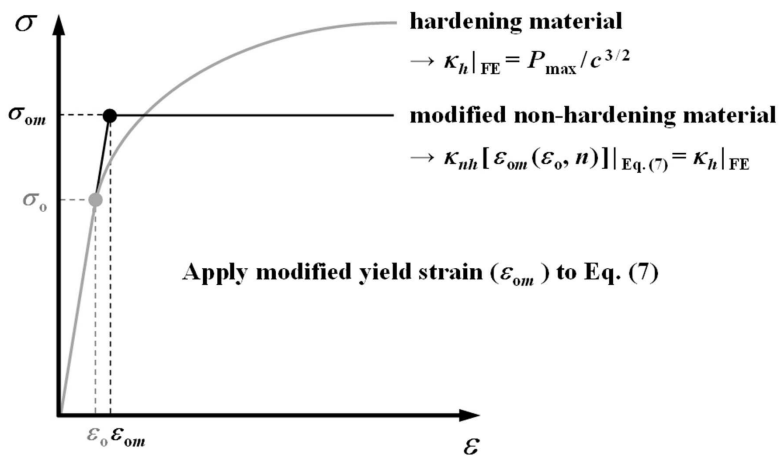
도면7


E=100 GPa, ν=0.3, ε_o=0.02
h_max (μm)
0.6
0.8
1.0
1.2
1.4
E=200 GPa, ν=0.3, ε_o=0.02
E=100 GPa, ν=0.3, ε_o=0.1
E=200 GPa, ν=0.3, ε_o=0.1
z (μm)
x (μm)
(a)
(b)
(c)
(d)

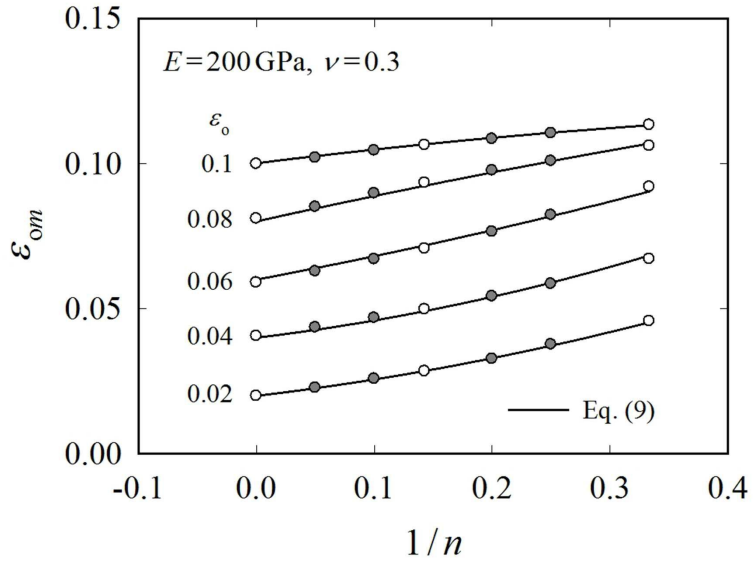
도면8


E=100 GPa, ν=0.3, ε_o=0.02, n=5
h_max (μm)
1.0
1.2
1.4
1.6
E=100 GPa, ν=0.3, ε_o=0.02, n=13
E=200 GPa, ν=0.3, ε_o=0.02, n=5
E=200 GPa, ν=0.3, ε_o=0.02, n=13
z (μm)
x (μm)
(a)
(b)
(c)
(d)

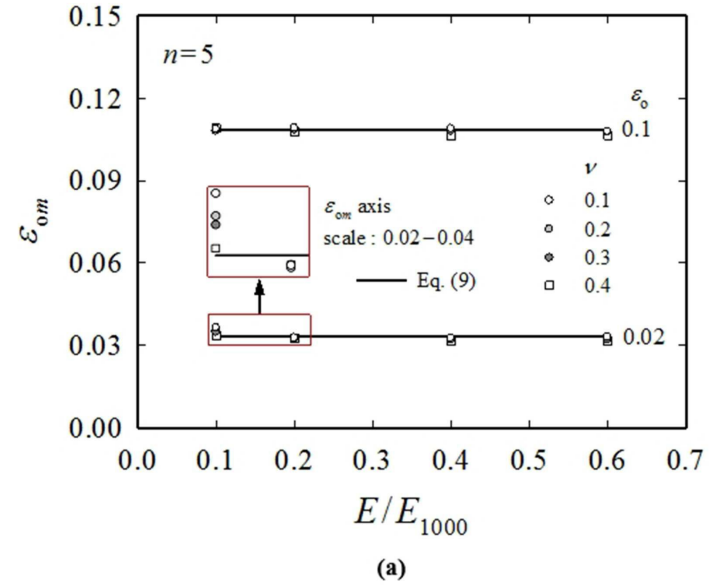
도면9


σ
σom
σo
hardening material
→ κh|FE = Pmax/c3/2
modified non-hardening material
→ κnh[εom(εo, n)]|Eq.(7) = κh|FE
Apply modified yield strain (εom) to Eq. (7)
εo εom
ε

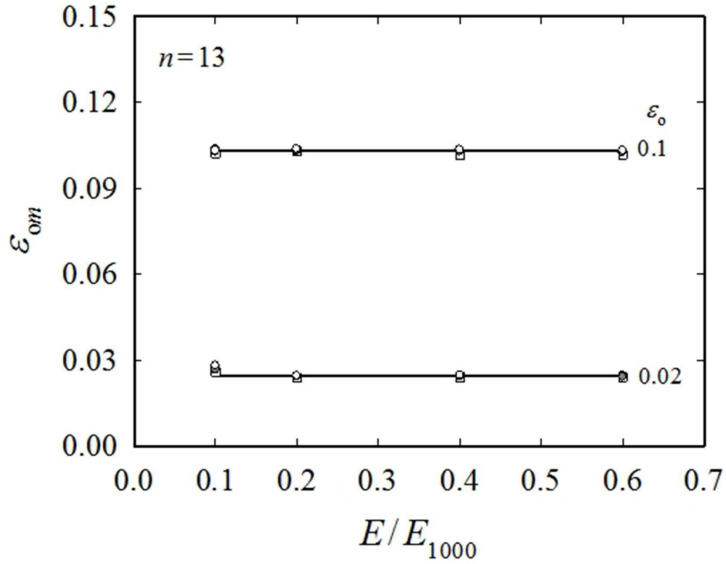
도면10


E=200 GPa, ν=0.3
εo
0.1
0.08
0.06
0.04
0.02
Eq. (9)
0.15
0.10
0.05
0.00
εom
-0.1
0.0
0.1
0.2
0.3
0.4
1/n

도면11

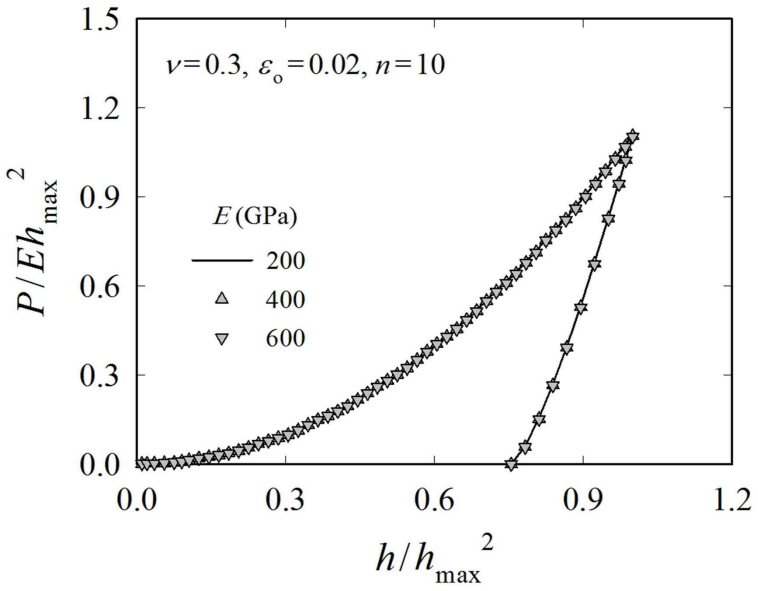

n=5
ε_o
0.1
0.02
ν
0.1
0.2
0.3
0.4
ε_{om} axis
scale : 0.02−0.04
Eq. (9)
ε_{om}
E/E_{1000}
0.00
0.03
0.06
0.09
0.12
0.15
0.0
0.1
0.2
0.3
0.4
0.5
0.6
0.7

(a)

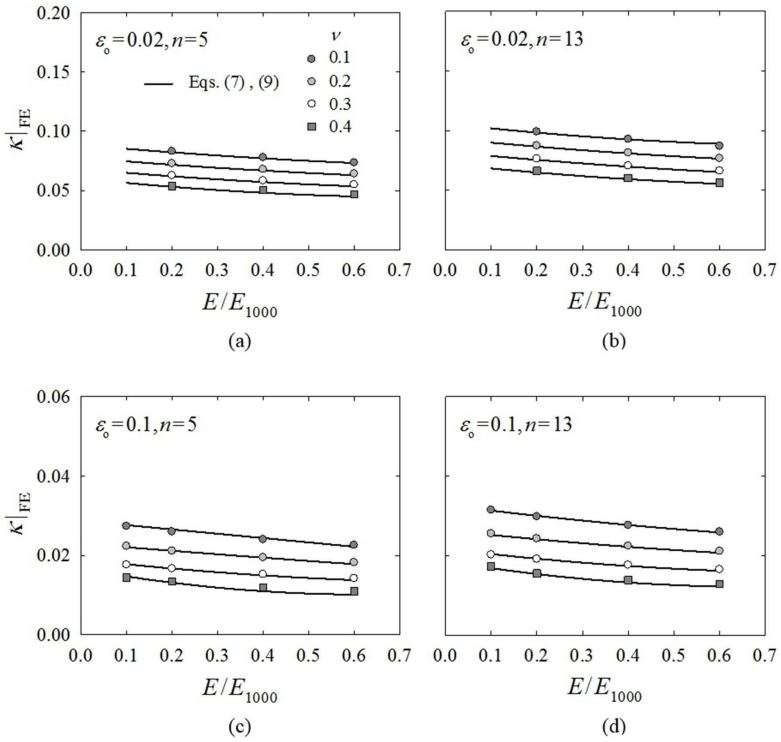

n=13
ε_o
0.1
0.02
ε_{om}
E/E_{1000}
0.00
0.03
0.06
0.09
0.12
0.15
0.0
0.1
0.2
0.3
0.4
0.5
0.6
0.7

(b)

도면12


ν=0.3, ε_o=0.02, n=10
E (GPa)
200
400
600
P/Eh_max^2
h/h_max^2
0.0
0.3
0.6
0.9
1.2
1.5

도면13


ε_o=0.02, n=5
Eqs. (7), (9)
ν
0.1
0.2
0.3
0.4
κ|_FE
E/E_1000
(a)
ε_o=0.02, n=13
(b)
ε_o=0.1, n=5
(c)
ε_o=0.1, n=13
(d)