

〈論 文〉

균열에너지밀도에 의한 이종재 계면균열의 기초적 검토

권오헌* · 渡辺勝彦** · 서창민*** · 김영호****

(1992년 2월 24일 접수)

A Fundamental Analysis of an Interface Crack by Crack Energy Density

Oh-Heon Kwon, Watanabe Katsuhiko, Chang-Min Suh and Young-Ho Kim

Key Words : Finite Element Method(유한요소법), Crack Behavior(균열거동), Dissimilar Material(이종재료), Interface Crack(계면균열), Mixed Mode(혼합모드), Crack Energy Density(균열에너지밀도), Domain Integral(영역적분)

Abstract

Recently, the composite materials have been researched actively by many researchers because of its useful properties. Especially, an interface crack on the dissimilar material exposes the behavior of the mixed mode crack even though under only the tension stress. In the previous papers, crack energy density(CED) was shown as the crack behavior evaluation parameter which can be expressed consistently from the onset until a final fracture. In a present paper, the basic properties of CED on the interface crack are examined because the results by CED at the homogeneous material above are also expected to be held at the dissimilar material. And we proposed that the contribution of each mode of CED can be separated and be evaluated. Furthermore, the total CED and contribution of each mode are evaluated by domain integral through a finite element analysis at the elastic crack model and the basic examination are carried out.

1. 서 론

복합재료이던 금속재료가던, 파괴는 섬유접합계면 또는 입계의 불순물에서 발생하는 경우가 많은 것이다. 최근 각종 공업분야에서 실용화되고 있는 신소재 및 복합재료는 그 특성의 우수성으로 많은 주목을 받고 있으며, 그 이용의 증대와 더불어 강도평가 및 역학적인 면에 있어서 활발한 연구가 행

하여 지고 있다. 특히 접합부재의 접합계면에 있는 균열에 있어서는, Williams⁽¹⁾가 탄성체의 계면균열 선단 근방에 응력의 진동특이성과 overlapping 현상이 생기는 것을 나타낸 이래, 연구자의 뜨거운 관심사가 되고 있다. 이러한 불합리한 현상을 해결하기 위하여 여러가지 균열모델이 제안은 되고 있으나, 응력확대계수의 정의조차 명확히 되어 있지 못한 실정이다. 또한 이종재에는 기하학적 불연속과 재료 불연속성으로 인해, 인장응력만이 존재할 때에도 전단성분이 발생하여 항상 복합모드의 균열 거동을 나타내기 때문에, 계면균열파라메타로서 사용되는 량을 각 변형모드 성분으로 분리할 필요가 있다.

*정회원, 동경대학 생산기술연구소

**동경대학 생산기술연구소

***정회원, 경북대학교 기계공학과

****정회원, 부산대학교 기계공학과

Lin과 Mar,⁽²⁾ Stern과 Hong,⁽³⁾ Wang⁽⁴⁾ 등은 J 적분을 이용하여 K_I 과 K_{II} 를 구하는 방법을 제시하였다. Sun과 Jih⁽⁵⁾는 K_I 과 K_{II} 에 관계해서 해석적으로 에너지 해방율을 얻어내고 있으나, 파괴파라메타가 탄성에서 소성까지 그대로 확장되어서는 사용될 수 없는 실정이다.

저자들은 앞의 일련의 연구⁽⁶⁻⁹⁾를 통해, 균열에너지밀도(Crack Energy Density; 이하 CED)가, 탄성이던 비탄성이던, 항상 그 물리적 의미가 명확하고, 대상으로 하는 구성칙에 아무런 제한없이, 더욱이 균열진전개시부터 중국적 파단까지 일관되게 표현될 수 있는 유효한 균열거동 평가파라메타인 것을 나타내었다.

본 연구에서는 균질재에서의 결과⁽⁹⁾를 토대로 이중재에서도 그 성질이 보존될 것으로 기대되기 때문에 계면균열에서의 CED의 기본적 성질을 검토한후, 각 모드 인자의 분리법과 평가법을 CED를 통해 제시한다. 또 제시한 수법을 이용하여 우선 탄성균열 모델에서 유한요소해석을 통해 CED 및 각 모드 인자의 평가 및 기초적 검토를 실시하여 그 유효성을 확인한다.

2. 계면균열에서 CED의 기본성질

여기서는 균질재에 존재하는 균열에 대하여 제안되어, 일관한 물리적 의미를 지닌 CED의 개념을⁽¹⁰⁾ 이중재 계면균열에 대해서도 확장하여 정의될 수 있는 것을 나타낸다. 또, CED를 각 변형모드 인자로 분리하는 방법과 각 모드에서 그것을 평가하는 영역독립적분표시가 존재하는 것을 나타낸다.

2.1 CED의 정의

균질재에서 CED는 「균열선단을 포함하는 면내의 각 위치가, 초기상태에서 현재까지 부담해 온 에너지를, 생각하는 면내의 단위면적당으로 나타낸 것」으로 정의된다.⁽¹⁰⁾ 균열이 계면에 따라 존재한다고 생각할 때, Fig. 1과 같은 반원상 노치 균열 모델을 생각하여, 선단의 곡률반경(일반적으로 Fig. 1처럼 계면의 상하 재질에 따라 다르게 생각할 수 있으나 일정곡률반경이라도 무방)을 영으로 한 때의 극한으로서 균열을 생각한다. 이때 CED, ϵ 는 균질재에서의 개념에 의해 식(1)과 같이 정의한다.

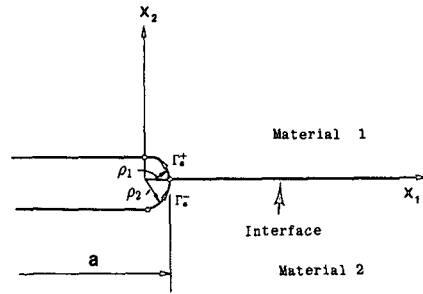


Fig. 1 A notch model of a bimaterial interface crack

$$\epsilon = \lim_{\rho_1 \rightarrow 0} \epsilon_1(\rho_1) + \lim_{\rho_2 \rightarrow 0} \epsilon_2(\rho_2) = \lim_{\rho \rightarrow 0} (\rho) \quad (1)$$

단

$$\begin{aligned} \epsilon_1(\rho_1) &= \int_{\Gamma_a^+} W dx_2 \\ \epsilon_2(\rho_2) &= \int_{\Gamma_a^-} W dx_2 \end{aligned} \quad (2)$$

여기서 W 는 변형률 에너지밀도, $W = \int_0^{\dot{\epsilon}^{ij}(t)} \sigma_{ij} d\epsilon_{ij}$ ($ij=1, 2, 3$)이고, t 는 현재의 시간, σ_{ij} , ϵ_{ij} 는 각각 계면에서의 텐서 성분이다. 또 Γ_a^+ , Γ_a^- 는 상하재료에서 노치 곡률반경 $\rho_1, \rho_2 \rightarrow 0$ 의 극한에서의 균열단경로이다.

2.2 각 변형모드의 분리수법

전절에서 CED는 식(2)로 정의되었다. 이제 여기서 변형률 에너지밀도 W 를 식(3)과 같은 양으로 정의한다.

$$W^{I+II}(\rho) = \int_0^t \sigma_{\alpha\beta} d\epsilon_{\alpha\beta} \quad (3)$$

식(3) 중 인자량의, 각 모드 CED에 영향을 미치는 양을 구하기 위하여, Fig.2에 나타내는 것처럼 계면을 x_1-x_3 면으로 노치모델을 생각한다. 이때 변위 u_i 가 노치단에서 영이 되게 정해지는 것으로 하여, 노치균열단 근방에 단일변형 모드만 존재하는 것으로 가정한다. 여기서 CED에 관계하는 모든 인자중, 모드 I에 관계하는 것은 노치근방에서 x_1-x_3 면을 끼고 대칭이 되는 성분, 모드 II에 관계하는 것은 x_1-x_3 면을 끼고 역대칭이 되는 성분으로 생각할 수 있다.

이때 다시 모든 인자량을 식(4)~(7)로 정의하면, 식(4)는 x_1-x_3 면에 대해 대칭성분, 식(5)는 역대칭성분으로 되어 있음을 알 수 있다.

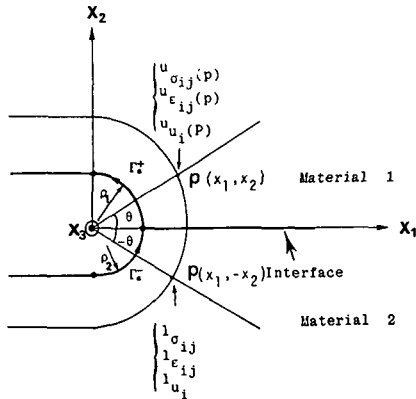


Fig. 2 Components employed at the notch tip

따라서 식(4)~(7)은 각각 모드 I, 모드 II 영향을 미치는 량이 된다.

$$\begin{aligned} \sigma'_{11}(p) &= \frac{1}{2}\{u\sigma_{11} + l\sigma_{11}\}, & \epsilon'_{11}(p) &= \frac{1}{2}\{u\epsilon_{11} + l\epsilon_{11}\} \\ \sigma'_{22}(p) &= \frac{1}{2}\{u\sigma_{22} + l\sigma_{22}\}, & \epsilon'_{22}(p) &= \frac{1}{2}\{u\epsilon_{22} + l\epsilon_{22}\} \\ \sigma'_{12}(p) &= \frac{1}{2}\{u\sigma_{12} - l\sigma_{12}\}, & \epsilon'_{12}(p) &= \frac{1}{2}\{u\epsilon_{12} - l\epsilon_{12}\} \\ \sigma''_{11}(p) &= \frac{1}{2}\{u\sigma_{11} - l\sigma_{11}\}, & \epsilon''_{11}(p) &= \frac{1}{2}\{u\epsilon_{11} - l\epsilon_{11}\} \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \sigma''_{22}(p) &= \frac{1}{2}\{u\sigma_{22} - l\sigma_{22}\}, & \epsilon''_{22}(p) &= \frac{1}{2}\{u\epsilon_{22} - l\epsilon_{22}\} \\ \sigma''_{12}(p) &= \frac{1}{2}\{u\sigma_{12} + l\sigma_{12}\}, & \epsilon''_{12}(p) &= \frac{1}{2}\{u\epsilon_{12} + l\epsilon_{12}\} \end{aligned} \quad (5)$$

$$u'_1(p) = \frac{1}{2}\{u u_1 + l u_1\}, \quad u''_1(p) = \frac{1}{2}\{u u_1 - l u_1\} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} u'_2(p) &= \frac{1}{2}\{u u_2 - l u_2\}, & u''_2(p) &= \frac{1}{2}\{u u_2 + l u_2\} \\ T'_a(p) &= \sigma'_{a\beta}(p) \cdot n_\beta \\ T''_a(p) &= \sigma''_{a\beta}(p) \cdot n_\beta \quad (\alpha, \beta = 1, 2) \end{aligned} \quad (7)$$

식 중 p 는 Fig. 2에서 x_1, x_2 에 의해 정해지는 좌표이고, 첨자 u, l 은 계면의 상하재료 1, 2를 의미하고 있다. 또 T_α, n_β 는 notch단을 사이에 두고 생각하는 경로(path)상의 위치에서의 표면력과 단위 법선벡터의 방향여현이다. 더욱이 변형을 에너지밀도 W 가 식(3)과 같은 량으로 정의되기 때문에 계면 상부에서의 변형을 에너지밀도 ${}^u W^{I+II}$ 는 (8)처럼 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned} {}^u W^{I+II} &= {}^u W^I + {}^u W^{II} + \int_0^t {}^u \sigma_{a\beta}^{II} d^u \epsilon_{a\beta}^I \\ &+ \int_0^t {}^u \sigma_{a\beta}^I d^u \epsilon_{a\beta}^{II} \end{aligned} \quad (8)$$

다시 식(9)와 식(10)을 이용하면 식(3)은 식(11)로 된다.

$$\begin{aligned} {}^u \sigma_{a\beta}^{II} d^u \epsilon_{a\beta}^I &= -{}^l \alpha_{a\beta}^{II} d^l \epsilon_{a\beta}^I \\ {}^u \sigma_{a\beta}^I d^u \epsilon_{a\beta}^{II} &= -{}^l \sigma_{a\beta}^I d^l \epsilon_{a\beta}^{II} \end{aligned} \quad (9)$$

$${}^u W^I = {}^l W^I, \quad {}^u W^{II} = {}^l W^{II} \quad (10)$$

$$W^{I+II} = W^I + W^{II} \quad (11)$$

따라서 CED는 식(12)로 된다.

$$\begin{aligned} \epsilon_{\rho_1, \rho_2}^{I+II} &= \int_{\Gamma_a^+} W^{I+II} dx_2 + \int_{\Gamma_a^-} W^{I+II} dx_2 \\ &= \epsilon_{\rho_1, \rho_2}^{II} + \epsilon_{\rho_1, \rho_2}^{II} \end{aligned} \quad (12)$$

단,

$$\epsilon_{a\rho_2}^I = \int_{\Gamma_a^+} W^I dx_2 + \int_{\Gamma_a^-} W^I dx_2 \quad (13)$$

$$\epsilon_{\rho_1 \rho_2}^{II} = \int_{\Gamma_a^+} W^{II} dx_2 + \int_{\Gamma_a^-} W^{II} dx_2 \quad (14)$$

그리고 모드 I, 모드 II에 대한 CED의 각 인자는 각각 식(15), (16)에 의해 정의된다.

$$\epsilon^I = \lim_{\substack{\rho_1 \rightarrow 0 \\ \rho_2 \rightarrow 0}} \epsilon_{\rho_1, \rho_2}^I \quad (15)$$

$$\epsilon^{II} = \lim_{\substack{\rho_1 \rightarrow 0 \\ \rho_2 \rightarrow 0}} \epsilon_{\rho_1, \rho_2}^{II} \quad (16)$$

2.3 CED의 영역적분 표시

Fig. 3에 나타내는 것처럼 notch단을 포함하는 임의의 경로를 생각한다. Fig. 3중의 W^+, W^- 는 계면에서의 변형을 에너지밀도를 나타낸다. 또 곡률

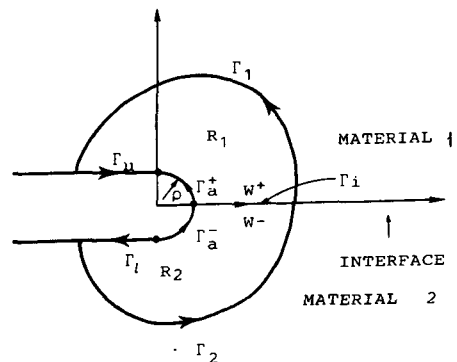


Fig. 3 An arbitrary domain containing a notch

반경은 편의상 $\rho_1 = \rho_2 = \rho$ 로 한다. 그림중의 Γ_a^+, Γ_a^- 는 각각 상하재료에서 노치곡률반경 ρ 인 반원상의 노치단 경로이다.

이때, CED의 영역적분은 식(17)로 표시된다.

$$\begin{aligned} \varepsilon_J^{inf} &= \int_{\Gamma_a^+} W dx_2 + \int_{\Gamma_a^-} W dx_2 \\ &= \int_{\Gamma_1 + \Gamma_2} (W - T_i u_{i,1}) dx_2 \\ &\quad - \int_{R_1} \int_0^t (\sigma_{ij,1} d\varepsilon_{ij} - d\sigma_{ij} \varepsilon_{ij,1}) dt dR \\ &\quad - \int_{R_2} \int_0^t (\sigma_{ij,1} d\varepsilon_{ij} - d\sigma_{ij} \varepsilon_{ij,1}) dt dR \\ &\quad + \int_{\Gamma_i} (W^+ - W^-) dx_2 \end{aligned} \quad (17)$$

ε_J^{inf} 의 첨자 inf는 계면(interface) 균열의 의미이다.

전 CED, ε 는 식(17)의 ε_J^{inf} 에 의해 식(18)로서 평가된다.

$$E = \lim_{\rho \rightarrow 0} \varepsilon_J^{inf} \quad (18)$$

여기서 $\sigma_{ij} = \partial W / \partial \varepsilon_{ij}$ 가 성립할 때에는 식(17)의 면적분의 항은 소거되는 량이다.

각 변형모드의 인자에 대해서도 식(4)~(7)에서 정의한 모드 I, 모드 II에 관한 모든 인자가 평행방정식과 변위, 변형량의 관계, 코-시(cauchy)의 식을 만족하면 같은 방법으로 구해진다. 즉 식(19)에 의해 식(20)으로 평가된다.

$$\begin{aligned} \varepsilon_J^{inf} &= \int_{\Gamma_1 + \Gamma_2} (W^k - T_i^k u_{i,1}^k) dx_2 \\ &\quad + \int_{\Gamma_i} (W^{+k} - W^{-k}) dx_2 \\ &\quad - \int_{R_1} \int_0^t (\sigma_{ij,1}^k d\varepsilon_{ij}^k - d\sigma_{ij}^k \varepsilon_{ij,1}^k) dt dR \\ &\quad - \int_{R_2} \int_0^t (\sigma_{ij,1}^k d\varepsilon_{ij}^k - d\sigma_{ij}^k \varepsilon_{ij,1}^k) dt dR \end{aligned} \quad (19)$$

$$E^k = \lim_{\rho \rightarrow 0} \varepsilon_J^{inf} \quad (20)$$

단, k 는 모드 I과 모드 II에 있어서의 I, II를 의미한다.

3. 선형탄성체중의 계면균열 해석 및 CED평가

여기서는 유한판에 존재하는 계면균열에 대해 유한요소해석을 행하여, 각 변형모드의 평가를 시도

해, 그 유효성 및 CED에 관한 기초적 검토를 한다.

3.1 해석대상

수치해석에 사용된 균열모델은 노치(notch) 모델로서, 중앙계면균열과 편측(片側) 계면 균열을 가진 2종류의 유한판이 균일 인장응력(1 kg/mm²)을 받고 있는 경우에 대하여, 탄성유한요소해석을 행하였다. Fig. 4에 나타내는 것처럼 중앙계면균열의 경우에는 시험편의 좌우대칭성에 의해 우반부만 해석하였고, 편측계면균열의 경우에는 중앙계면균열을 가진 유한판의 우반부를 전체모델로 간주하였다. 해석은 평면응력상태로 가정하였다.

요소는 3각형 정변형률요소를 사용하고 있으며, 전 요소수와 절점수는 각각 1014, 563으로 했다. 계산에 있어서 재료정수는 포와송비(Poisson's ratio) $\nu_1 = \nu_2 = 0.3$ 으로 하고, E_1/E_2 를 2, 5, 10, 100, 1000의 5종류로 변화시켜 계산했다. 노치의 반경을 0.1~0.8에서 5단계로 변화시켜 계산해 곡률의 영향을 조사했다.

적분경로는 Fig. 4에 표시하고 있으며, CED평가에 대한 결과에 이용한 것은 그 평균치이다. 전 CED의 평가는 노치곡률반경 ρ 가 충분히 작다고 생각되어, 우선 ε_J^{inf} 를 식(17)에 의해 평가한 값을 사용했다. 각 변형모드에서의 인자의 평가는 전절에서 설명한 방법에 의해 모드 I, 모드 II 인자에 분리된 $\sigma_{a\beta}, \varepsilon_{a\beta}, U_{a(\text{or } \beta)}$ 를 이용하여 계산한 식(19)의 $\varepsilon_J^{infI}, \varepsilon_J^{infII}$ 에 의해 평가했는데, $\sigma_{a\beta}^k, \varepsilon_{a\beta}^k, U_{a(\text{or } \beta)}^k$ ($k = I, II$)의 대칭치는 아래와 같이 구했다.

즉 응력, 변형률에 관해서는 3각형 정변형률요소를 사용하는데, 그 삼각형요소의 중심점에 대칭이 되는 점이 포함된 삼각형요소의 중심점의 값을 이용했다(Fig. 5(a) 참조). 또 변위에 관해서도 같은 방법으로 대칭요소의 절점에서 일차 내삽함수에 의해 구한 값을 대칭점의 값으로 사용했다(Fig. 5(b) 참조). 다음의 결과들은 이 $\varepsilon_J^{infI}, \varepsilon_J^{infII}, \varepsilon_J^{infIII}$ 의 값을 $\lim_{\rho \rightarrow c} \varepsilon_J^{inf}$ 로 간주했을 때 얻어진 값으로서 이용한 것이다. 여기서 c 는 진동특성을 보이지 않는 작은 반경이다.

3.2 CED평가 결과 및 고찰

Fig. 6은 중앙계면균열의 경우에 있어서, ε_J^{inf}

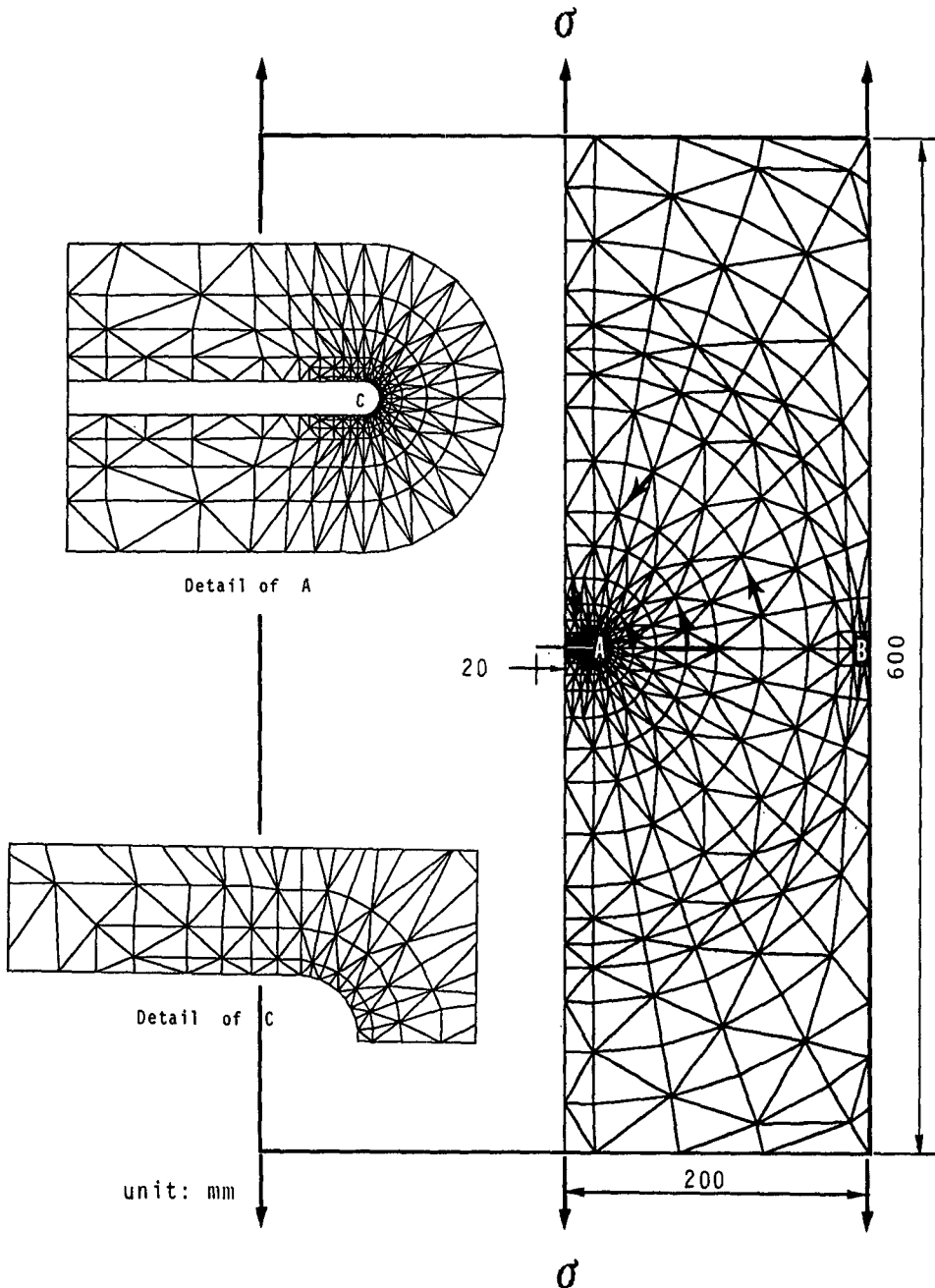


Fig. 4 A finite element mesh with a notch crack

ϵ_{J1} , ϵ_{J2} 적분의 영역독립성을 조사한 것의 일례이다. 어느 결과에 있어서도 좋은 영역독립성이 성립하고 있음을 알 수 있다.

Fig. 7은 중앙계면균열의 경우의, 각각의 E_1/E_2

에서 노치 곡률반경 ρ 의 영향을 조사한 것이다. 각각의 E_1/E_2 에서 ρ 의 영향은 겨우 수 $\times 10^{-2}\%$ 이내로 거의 나타나지 않고 있다.

Fig. 8은 편측계면균열의 경우의, 각각의 E_1/E_2

에서 노치 곡률반경의 영향을 조사한 것이다. 중앙 계면균열에서는 ρ 의 영향이 거의 없는데 반해, 여기에서는 E_1/E_2 의 값에 따라 ρ 의 영향을 약간 받는 경우가 생기고 있음을 알 수 있다. 그러나 이와 같이 비교적 체계적인 입장에서 조사한 결과에서, 중앙계면균열이라면 ρ 가 여기서의 범위정도, 또 편측계면균열일 경우에도 ρ 가 0.2정도의 범위라면

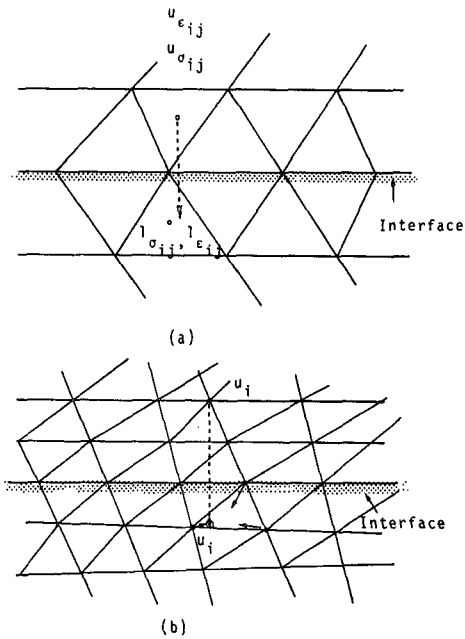


Fig. 5 A computing method for symmetric components

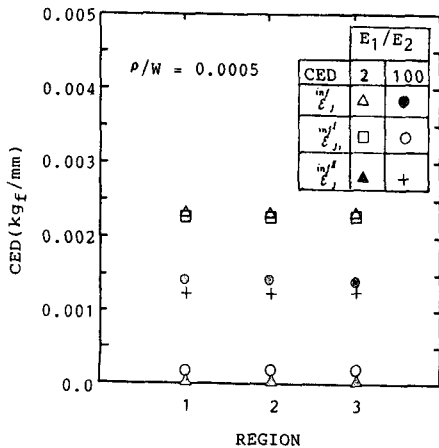


Fig. 6 Domain independence at each mode

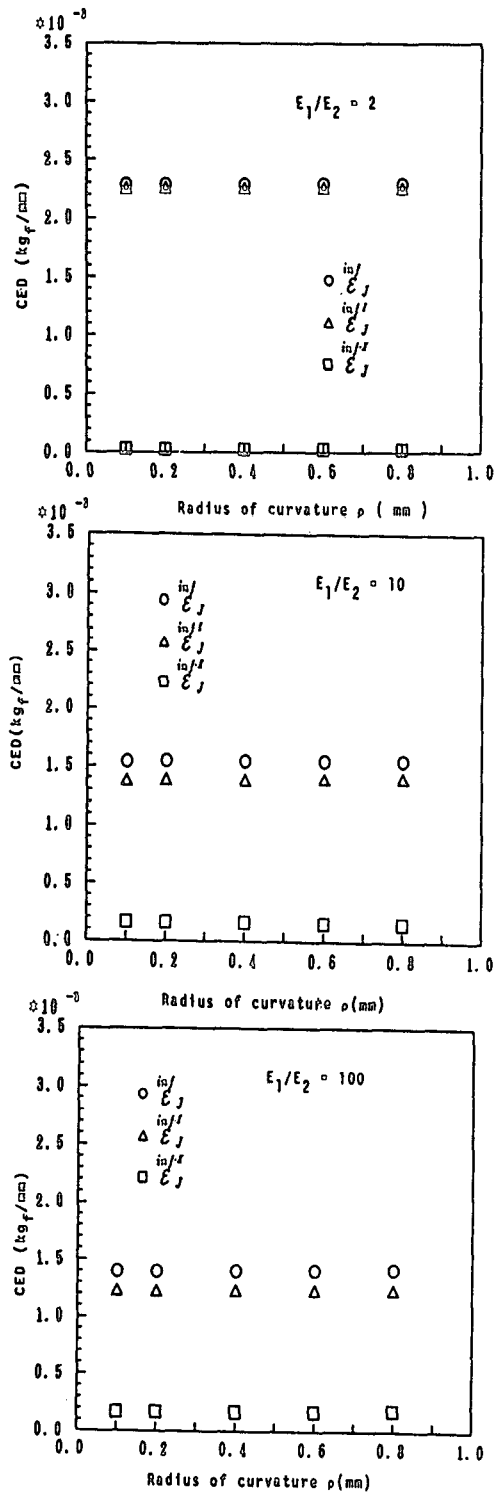


Fig. 7 Effect of notch curvature on CED(central crack)

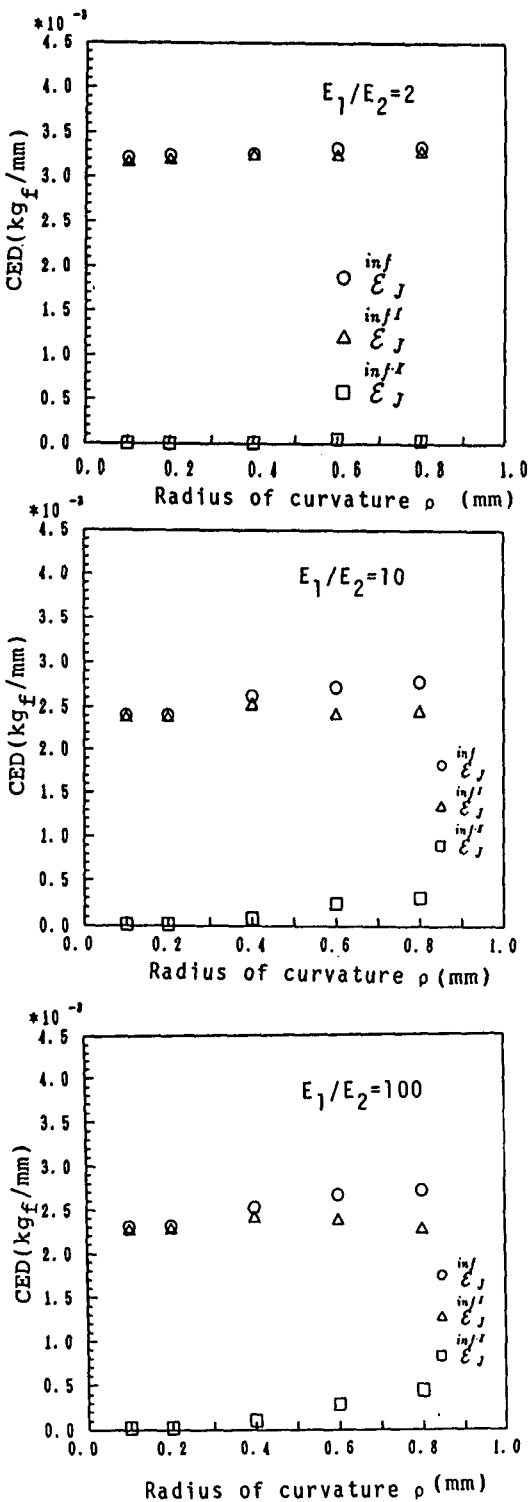


Fig. 8 Effect of notch curvature on CED(single edge crack)

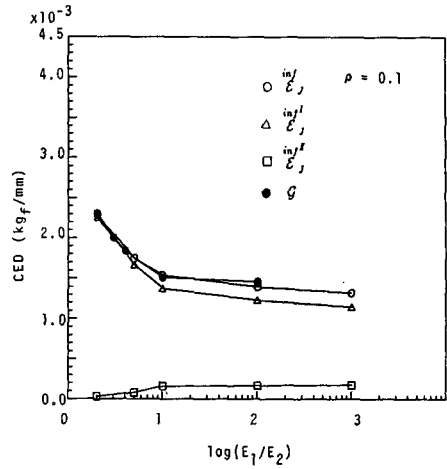


Fig. 9 Variation of CED according to E₁/E₂(central crack)

실용상 충분한 정도로 CED가 평가될 수 있다고 생각한다.

Fig.9는 중앙계면균열의 $\rho/W=0.0005$ 일 때 E_1/E_2 의 변화에 따르는 CED의 변화를 나타낸다. 현재의 인장응력만 받고 있는 경우도 전단모드성분이 발생하여, 계면균열은 혼합모드상태로 되어있는 것을 알 수 있다. 다른 ρ 의 값에 있어서도 거의 같은 결과가 얻어졌다.

Fig. 10은 편측계면균열에 있어서 E_1/E_2 의 변화에 따르는 CED의 변화를 나타낸다. 또 ϵ 가 E_1/E_2 의 증가에 따라 조금씩 증가하는데, 그 값은 작아, 거의 모드 I에 지배받고 있음을 알 수 있다.

E_1/E_2 가 커지면 ϵ 에 대한 ϵ 의 비는 점점 커져, 모드 II의 영향이 나타나고 있다. 또한, 중앙계면균열의 경우이던 측면계면균열이던, $\epsilon^{in/I}$, $\epsilon^{in/II}$ 는 E_1/E_2 가 증가함에 따라 감소하는데, E_1/E_2 가 10까지는 급속히 변화해서 그 이후는 감소가 둔화되어 거의 안정하고 있음을 알 수 있다. 중앙계면균열에서 $\epsilon^{in/I}$ 에 대한 $\epsilon^{in/III}$ 의 비는 최대 15.27%정도이다. Figs. 9, 10 중 \bullet 기호는 같은 조건에서 Yuuki⁽¹¹⁾등이 경계요소해석에 의해 구한 $K_1/K_2, \sqrt{K_1^2+K_2^2}/(\rho\sqrt{\pi a})$ 의 결과에서 식(21)에 의해 구한 전 에너지 해방을, G 이며, 현재의 계산결과의 $\epsilon^{in/I}$ 와 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.

$$G = \frac{1}{16\cos^2(\alpha\pi)} (\lambda_1 + \lambda_2) (k_1^2 + k_2^2)$$

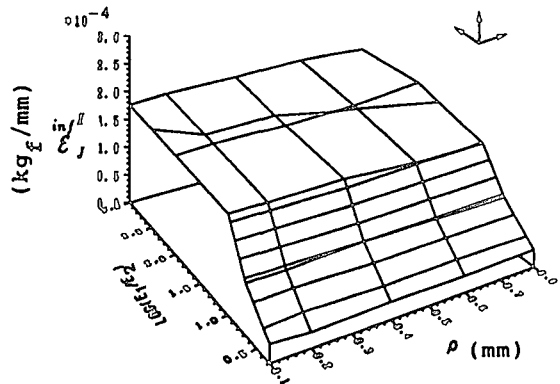
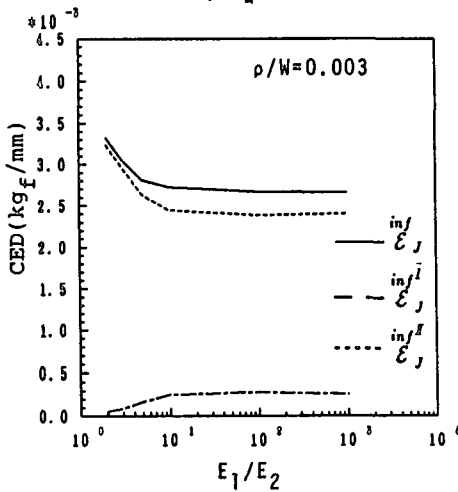
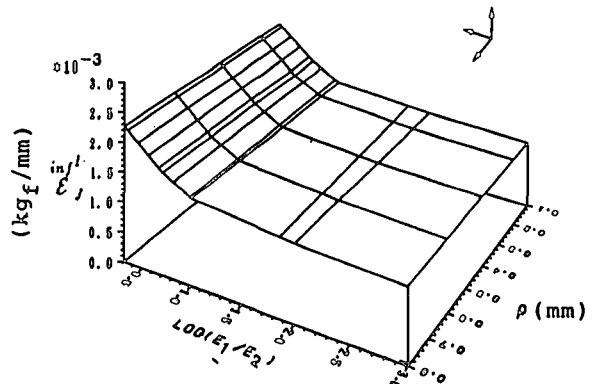
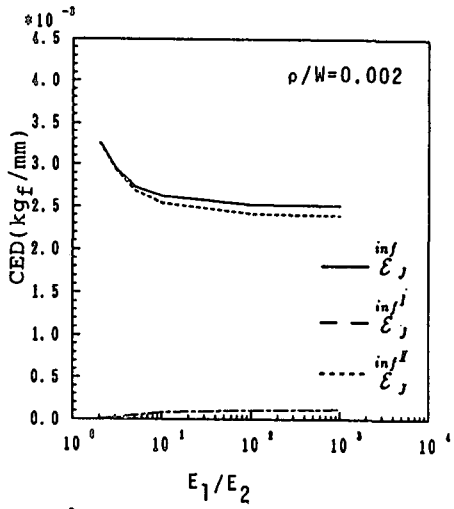
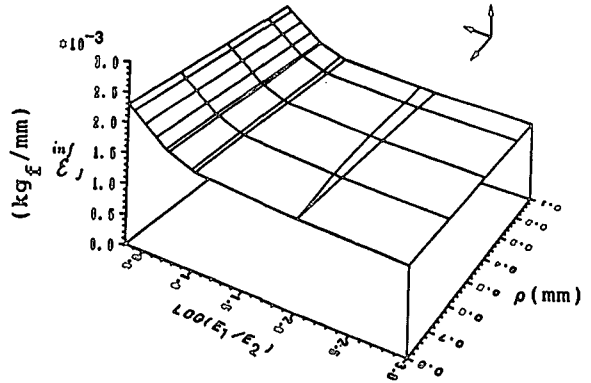
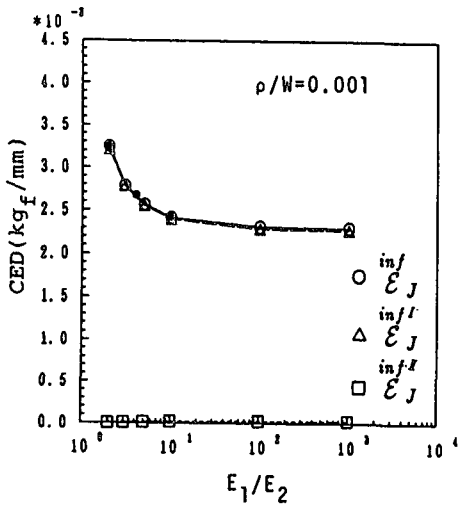


Fig. 10 Variation of CED according to E_1/E_2 (single edge crack)

Fig. 11 3-dimensional representation for the relations of CED and notch curvature radius and E_1/E_2 (central crack)

$$= \varepsilon = \varepsilon^{inf} + \varepsilon^{inI} + \varepsilon^{inIII} \quad (21)$$

$$\lambda_j = \begin{cases} (1-\nu_j)/4\mu_j & : \text{plane strain} \\ 1/4\mu_j(1+\nu_j) & : \text{plane stress} \end{cases} \quad (22)$$

여기서 a 는 Williams의 계면재료정수이고, ν_j, ν_j 는 각각 포와송비와 전단탄성계수이다.

$$\alpha = \frac{1}{2\pi} \ln \left\{ \left(\frac{\kappa_1 + 1}{\mu_1} \right) / \left(\frac{\kappa_2 + 1}{\mu_2} \right) \right\} \quad (23)$$

$$\kappa_{1,2} = \begin{cases} 3-4\nu_j, & \text{plane strain} \\ (3-\nu_j)/(1+\nu_j), & \text{plane stress} \end{cases} \quad (24)$$

Fig. 11은 노치곡률반경 ρ 와 E_1/E_2 의 변화에 대한 CED의 각 모드성분의 평가치를 3차원적으로 나타내어 본 결과이다. 각 모드성분평가에 미치는 ρ 의 영향은 거의 보이지 않음을 역시 알 수 있다.

본래 $\rho=0$ 의 완전한 균열에 대해서는, CED는 유한한 ρ 의 노치에 대해 정의되는 량을 $\rho \rightarrow 0$ 로 하는 경우의 극한으로서 주어진다. 영역적분에서의 유한요소해석으로 $\varepsilon_j^{inf}, \varepsilon_j^{inI}, \varepsilon_j^{inIII}$ 를 평가할 때 해석대상으로서 완전한 균열을 사용하면 영역적분식의 면적분의 항이 평가되지 않으므로 충분히 작은 곡률반경을 가진 노치를 이용한다. 여기서와 같이 노치의 ρ 를 계통적으로 변화시켜 유한요소해석을 행하여 ρ 와 $\varepsilon_j^{inf}, \varepsilon_j^{inI}, \varepsilon_j^{inIII}$ 와의 관계를 명확히 하면 CED의 평가에 있어서 적절한 ρ 값이 선정 가능하여 타당한 평가가 이루어 지게 된다.

4. 결 론

균질재에서 유효한 균열파라메타로서 그 역할을 수행해 온 균열에너지밀도(CED)의 개념을 이종재 계면균열에 적용하여, 이론적인 면에서 기본성질을 검토한 후, 유한판의 탄성유한요소해석을 하여 다음의 결과를 얻었다.

- (1) 이종재 계면균열에 대해서도 균질재에서의 이론이 확장가능하였으며, 구성조건에 제한없이 정의 가능하였다.
- (2) 응력, 변형률등 여러가지 인자의 대칭, 역대칭성분을 생각함으로써 CED는 각 변형모드의 인자로 분리가능하고, 또 각각에 대해 대응하는 영역적분표시가 주어져, 그 인자들은 유한요소법에 의해 평가가 가능하였다.
- (3) CED의 값에 대한 노치반경의 영향은 현재의 조건하에서 거의 나타나지 않아, 이렇게 정해지

는 CED값은 균열단의 상황을 대표하는 량이 될 수 있다고 여겨진다.

(4) CED는 여기에서 제안한 수법을 탄소성체에도 적용함으로써 이종재 계면균열에 있어서도 탄성과 소성에서 일관되게 유효한 균열파라메타가 될 수 있을 것으로 예상된다.

참고문헌

- (1) Williams, M.L., 1959, "The Stress around a Fault or Crack in Dissimilar Media," Bull. Seism. Soc. Am. 49, pp. 199~204.
- (2) Lin, K.Y. and Mar, J.W., 1976, "Finite Element Analysis of Stresses Intensity Factor for Cracks at a Bimaterial Interface," Int. J. of Fracture, 12, pp. 521~531.
- (3) Hong, C.C. and Stern, M., 1978, "The Computation of Stress Intensity Factors in Dissimilar Materials," J. of Elasticity, 8, pp. 21~34.
- (4) Wang, S.S. and Yau, J.F., 1982, "Interface Cracks in Adhesively Bounded Lap-Shear Joint," Int. J. of Fracture, 19, pp.295~309.
- (5) Sun, C.T. and Jih, C.J., 1987, "On Strain Energy Release Rate for Interface Cracks in Bimaterials," Engng Fracture Mech., 28, pp. 13~20.
- (6) Watanabe, K. and Azegami, H., 1986, "an Evaluation of the Fracture Resistance of A Stably Growing Cracks by Crack Energy Density," Trans. of JSME, A, 52-475, pp. 727~735.
- (7) Azegami, H., Kwon, O.H. and Watanabe, K., 1989, "An Evaluation of the Fracture Resistance of a Stably Growing Cracks by Crack Energy Density," Trans. of JSME, A, 56-514, pp. 1293~1300.
- (8) Kwon, O.H. and Watanabe, K., 1991, "CED-Based Fracture Resistance Evaluation of Stably Growing Cracks by Generation Phase Simulation," Trans. of JSME, A, 57-534, pp.285~290.
- (9) Utsunomiya, T. and Watanabe, K., 1989, "A Fundamental Study on the Evaluation and Applicability as a Mixed-Mode Fracture Criterion of Crack Energy Density in an Arbitrary Direction," Trans. of JSME, A, 55-516, pp. 1832~1840.
- (10) Watanabe, K., 1981, "A Proposal of a Concept

of Crack Energy Density and Its Role As a Fracture Parameter," Trans. of JSME, A, 47-416, pp. 406~415.

Element Analysis of Stress Intensity Factor of Crack in Dissimilar Materials," Trans. of JSME, A, 55-510, pp. 340~347.

(11) Yuuki, R. and Cho, S.B., 1989, "Boundary