

論文

계면균열의 실험적 해석(I)

- 시험편의 선정 및 이축 층간분리 시험기의 개발 -

채영석* · 최병선*

Experimental Analysis of Interfacial Crack(I)

- Determination of Specimen Geometry and Development of
Biaxial Delamination Tester -

Young-Suck Chai*, and Byoung-Sun Choi*

ABSTRACT

The purposes of this work are to determine the specimen geometry and to develop the high-precision biaxial delamination tester with crack opening interferometry for experimental analyses of interfacial crack problems. Four different types of specimen geometries - double cantilever beam(DCB), modified end notched flexure(MENF), four point flexure, and edge cracked strip specimen - are considered in order to determine the specimen geometry. As a results, the specimen geometry selected was an edge-cracked bimaterial strip, which gave rise to crack length independence of fracture parameters and mode mixity. Preliminary analysis revealed that the potential mode mixity range for positive bond-normal applied displacements was from $-60^\circ < \psi < 90^\circ$. A biaxial delamination tester, which was capable of controlling applied displacements in two perpendicular directions, was developed. In addition to the usual measurements of loads and displacements, normal crack opening displacements(NCOD) were measured near the crack front using crack opening interferometry in order to examine near tip asymptotics, crack face contact and three-dimensional effects.

초 록

복합재료내 계면에서 발생하는 계면분리현상을 이해하기 위한 실험적 해석을 위하여 적절한 시험편의 형상을 결정하고 제시된 시험편을 근거로 한 실험 장치의 개발에 관하여 연구하였다.

본 연구에서는 다음과 같은 네가지 형태의 시험편-쌍 외팔보 시험편, 수정된 끝단노치굽힘 시험편, 4점 굽힘 시험편 그리고 편축균열스트립 시험편-이 고려되었다. 그 중에서 편축균열스트립 시험편이 이축 하중하에서의 법선방향과 접선방향의 변위를 변화시키기에 따라 매우 넓은 영역의 모우드혼합도 ($-60^\circ < \psi < 90^\circ$)를 보이므로 계면균열 해석을 위한 시험편으로 가장 적당함을 알 수 있었다. 선정된 시험편에 수직 이축 변위를 제어하기 위하여 고정밀 이축 층간분리 시험기를 개발하였다. 시험기 주위에는 시험편에 가해진 변위 및 하중을 잴 수 있는 장치와 계면균열 선단 주위에서의 계면균열의 형상을 볼 수 있도록 광학적인 간섭을 이용한 균열수직개구변위 측정장치 등을 개발하였으며, 이로 부터 균열선단 주위의 특이성, 균열접촉 현상, 3차원 효과 등을 해석할 수 있다.

* 영남대학교 기계공학과

1. 서 론

물성이 다른 두가지 이상의 재료를 결합하여 만든 복합재료는 항공, 우주 및 자동차 산업 등과 같이 높은 비강도(strength-to-weight ratio) 혹은 비강성(stiffness-to-weight ratio)이 요구되는 구조 재료 뿐만 아니라 기타 다양한 용도로 이미 개발 및 실용화되고 있다. 그러나 일반적인 복합재료는 강화 재료의 방향에 따라서 심한 이방성을 보이며 기존의 등방성 재료와는 다른 복잡한 역학적 특성과 특이한 파괴현상을 보인다. 복합재료 내부에서 기지재료와 강화재료 사이에 존재하는 계면(interface)은 가장 낮은 하중지지 능력을 가진 취약한 부분이며, 손상허용(damage tolerance) 설계 관점에서 보면 복합재료의 파괴강도는 계면에서의 파괴인성치(interfacial fracture toughness)와 매우 깊은 관계가 있다. 특히 균열이 계면을 따라서 진행된다면 비록 단일 모우드의 외부 하중이 작용하더라도 균열 주위에서는 혼합 모우드(mixed mode)의 형태로 나타나므로, 균열의 발생과 전진현상에 대한 명확한 기준은 혼합 모우드 전역역에 걸쳐 규명되어야 한다.

이 문제와 관련하여 파괴역학 개념을 도입한 계면균열의 이론적 해석은 Williams[1]가 이종재료의 계면에 발생하는 계면균열 문제를 2차원 탄성론에 의거하여 해의 거동을 살펴본 이래로 많은 학자들의 노력이 있었으나, 균열선단 부근의 특이현상(응력의 진동 및 특이성, 균열 상하면의 간섭 등)에 대하여는 여전히 명확한 규명이 이루어지지 않고 있다. 또한 모우드혼합도(mode mixity)가 계면균열의 파괴인성치에 미치는 영향에 관해서는 Malyshev와 Salganik[2] 이래로 많은 실험적인 연구가 진행되었고, 대부분의 결과들은 모우드혼합도 중에서도 전단 성분을 증가시키에 따라 전체적인 계면균열의 파괴인성치가 매우 증가하는 현상이 발견되었다[3~8]. 최근 Liechti와 Chai[9~10]는 유리와 에폭시 수지의 조합으로 된 시험편에 이축 하중을 가하여 계면균열 실험을 행하고, 그 결과를 이론적으로 해석한 바 있다. 그 결과에서도 전단성분이 증가함에 따라 계면의 파괴인성치가 매우 증가함이

발견되었고, 그러한 증가의 원인을 설명하기 위하여 소성이나 점탄성에 의한 에너지소산(energy dissipation)과 표면조도(surface asperities) 등의 영향을 정량적으로 계산하였으나 실제 실험치의 약 30~40% 가량 밖에 설명이 되지 못하였다.

따라서 본 논문에서는 이종재료 사이 계면에서 발생하는 계면분리현상(interfacial debonding mechanism)을 더욱 명확히 이해하기 위한 실험적 해석을 목적으로 하여, 이를 위한 적절한 시험편의 형상을 결정하고 아울러 제시된 시험편을 근거로 한 실험 장치의 개발에 관하여 연구하고자 한다.

계면균열의 실험적 해석을 위해서는 무엇보다도 넓은 영역의 모우드혼합도를 발생시키는 시험편의 형상이 요구된다. 이를 위한 목적으로 대개 모우드혼합도가 서로 다른 여러가지의 시험편을 사용하는 방법과 하나의 시험편에 이축하중을 작용시켜 모우드혼합도를 변화시키는 두가지 방법이 주로 이용되고 있다. 본 연구에서는 계면균열의 실험적 해석을 위하여 주로 사용되는 다음과 같은 네가지 형태의 시험편-쌍 외팔보(double cantilever beam : DCB) 시험편, 수정된 끝단노치굽힘(modified end notched flexure : MENF) 시험편, 4점굽힘(four point flexure) 시험편, 그리고 편측균열스트립(edge cracked strip) 시험편-이 고려되었다. 각 시험편에 대하여 전체 에너지 해방율을 해석적으로 재검토했고 이를 수치적인 결과와 비교하였다. 파괴변수의 각 성분과 모우드혼합도는 유한요소법에 의한 보존적분 기법을 통해 이끌어 낼 수 있었다.

본 연구에서 고려된 시험편 중에서 편측균열스트립 시험편이 계면분리현상을 이해하기 위하여 가장 적당한 시험편으로 제시되었으며, 따라서 실험적 해석을 위한 적절한 실험장치의 개발이 요구되었다. 이 실험 장치는 고정밀 이축 층간분리 시험기 및 균열수직개구변위 측정장치 등으로 구성되며 이 장치는 기존의 일축시험기에서 할 수 없는 매우 넓은 영역의 모우드혼합도를 발생시킬 수 있어 다양한 상황에서 파괴인성 실험을 행할 수 있는 외에 여러가지의 장점을 가지고 있다.

이러한 연구는 계면에서 발생하는 계면균열의

분리현상에 대한 이해와 파괴역학적인 개념을 도입시킨 복합재료 구조의 해석 및 설계에 많은 도움을 줄 수 있을 것이다.

2. 시험편의 선정

이종재료 사이 계면균열 선단의 전방($\theta=0$)으로 부터 거리 r 에서의 응력성분은 다음과 같이 주어 진다.

$$\sigma_{22} + i\sigma_{12} = \frac{K_I r^{1/2}}{\sqrt{2\pi r}} \quad \dots\dots\dots (1)$$

여기서 K 는 복소응력확대계수(complex stress intensity factor)로서 $K = K_1 + iK_2$ 로 정의되며, 이 종재료 상수(bimaterial constant) ϵ 는 다음과 같다.

$$\epsilon = \frac{1}{2\pi} \ln \left[\frac{\kappa_1 \mu_2 + \mu_1}{\kappa_2 \mu_1 + \mu_2} \right] \quad \dots\dots\dots (2)$$

여기서 μ 는 전단탄성계수이고, κ 는 평면변형에 서는 $3-4\nu$ 로 그리고 평면응력에서는 $(3-\nu)/(1+\nu)$ 로 정의된다. 첨자 1과 2는 각각 위와 아래의 재료를 가리킨다.

모우드혼합도 ψ 는 모우드 1과 모우드 2 응력확대계수의 비로서 다음과 같이 정의하였다.

$$\psi = \tan^{-1} \frac{K_2}{K_1} \quad \dots\dots\dots (3)$$

균열선단으로부터 거리 r 에서의 평면변형에 대한 변위성분은 다음과 같다.

$$\Delta u_2 + i\Delta u_1 = \frac{2[(1-\nu_1)/\mu_1 + (1-\nu_2)/\mu_2]}{(1+2i\epsilon) \cosh \pi \epsilon} K \sqrt{\frac{r}{2\pi}} r^{1/2} \quad \dots\dots\dots (4)$$

평면변형에 대한 에너지해방율은 복소응력확대 계수와 다음과 같은 관계를 갖는다.

$$G = \frac{1}{4 \cosh^2 \pi \epsilon} \left[\frac{1-\nu_1}{\mu_1} + \frac{1-\nu_2}{\mu_2} \right] (K_1^2 + K_2^2) \quad \dots\dots\dots (5)$$

2-1. 쌍 외팔보 시험편(DCB specimen)

(a) 단순보 해석

단방향 복합재료의 모우드 I 적층파괴 특성은

그림 1-(a)-1과 같은 쌍 외팔보 시험편이 일반적 으로 제안된다. 쌍 외팔보 시험편에 대한 해석은 균열이 없는 영역은 완전히 고정된 것으로 가정하고 균열이 존재하는 영역만이 하중에 대해 미소처짐이 존재한다는 고전 단순보 이론을 적용하여 간단하게 구할 수 있다. 따라서 쌍 외팔보 시험편의 컴플라 이언스(compliance) C 는 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$C = \frac{a^3}{3E_1 I_1} + \frac{a^3}{3E_2 I_2} \quad \dots\dots\dots (6)$$

여기서 a 는 균열의 길이이고, $E_1 I_1$, $E_2 I_2$ 는 위와

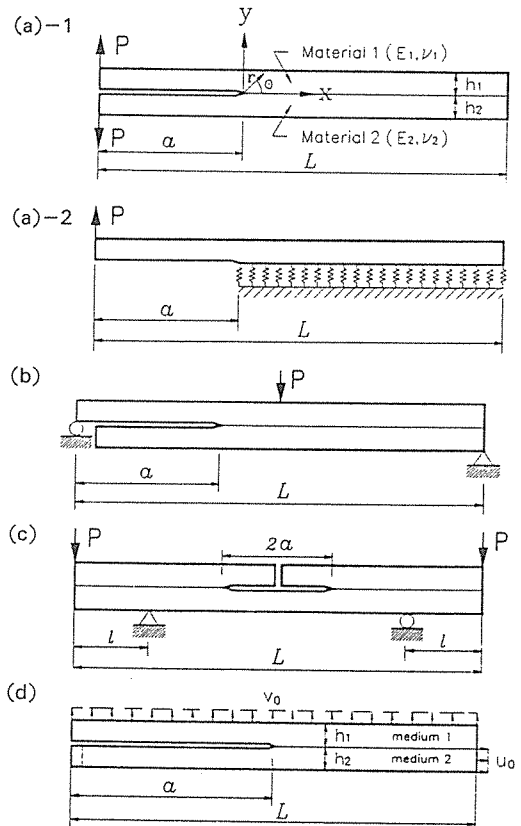


Fig. 1. Specimen geometries for interfacial fracture toughness measurements ;

- (a)-1 double cantilever beam(DCB) specimen-by simple beam theor
- (a)-2 double cantilever beam specimen-considering Winkler foundation
- (b) modified end notched flexure(MENF) specimen
- (c) four point flexure specimen
- (d) edge-cracked strip specimen

아래의 보에 대한 굽힘강성(flexural rigidities)이다. 결국 에너지해방율은 컴플라이언스로부터 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$G = \frac{P^2}{2b} \frac{dC}{da} \\ = \frac{P^2 a^2}{2b} \left(\frac{1}{E_1 I_1} + \frac{1}{E_2 I_2} \right) \quad \dots\dots\dots (7)$$

여기서 P 는 외부하중이고 b 는 시험편의 폭이다.

(b) 탄성기저(elastic foundation)를 고려한 해석

쌍 외팔보 시험편의 개선된 해석 모델은 그림 1-(a)-2와 같이 균열이 존재하는 영역은 단순보로 가정하고 균열이 존재하지 않은 부분은 완전히 고정되지 않고 탄성기저 위에 놓인 보와 같은 형태로 가정하여 해석하는 모델이다. 수학적 해석은 단순보 이론과 Winkler의 탄성기저 이론을 근거로 하였으며, 이에 대한 처짐 $v(x)$ 에 대한 지배 방정식은 다음과 같다.

$$v_1(x) = C_1 x^3 + C_2 x^2 + C_3 x + C_4 \quad \text{for } x < 0 \\ v_2(x) = e^{\mu x} (C_5 \sin \mu x + C_6 \cos \mu x) \\ + e^{-\mu x} (C_7 \sin \mu x + C_8 \cos \mu x) \quad \text{for } x > 0 \quad \dots\dots\dots (8)$$

여기서 μ 는 $(k/EI)^{1/4}$ 로 정의하고 k 는 기저 계수(modulus of foundation)이다. 8개의 미지 계수는 경계조건과 연속조건을 고려함으로써 구할 수 있다.

이 시험편의 컴플라이언스는 다음과 같다.

$$C = \frac{v_{\max}}{P} \quad \dots\dots\dots (9) \\ = \frac{a^3}{3E_1 I_1} + \frac{a^3}{3E_2 I_2} + f_1(\mu_1, a) + f_2(\mu_2, a)$$

여기서

$$f(\mu, a) = \frac{a^3}{3EI} \left[\frac{3}{4\mu^3 a^3} \left(\frac{\sinh 2\beta - \sin 2\beta}{\sinh^2 \beta - \sin^2 \beta} \right) \right. \\ + \frac{3}{2\mu^2 a^2} \left(\frac{\cosh 2\beta - \cos 2\beta}{\sinh^2 \beta - \sin^2 \beta} \right) \\ \left. + \frac{3}{2\mu a} \left(\frac{\sinh 2\beta + \sin 2\beta}{\sinh^2 \beta - \sin^2 \beta} \right) \right] \quad \dots\dots\dots (10)$$

β 는 $\mu(L-a)$ 로 정의한다. 결국 에너지해방율은 다음과 같다.

$$G = \frac{P^2}{2b} \frac{dC}{da} \quad \dots\dots\dots (11) \\ = \frac{P^2 a^2}{2bE_1 I_1} + \frac{P^2 a^2}{2bE_2 I_2} + g_1(\mu_1, a) + g_2(\mu_2, a)$$

여기서

$$g(\mu, a) = \frac{P^2 a^2}{2bEI} \left[\frac{(\sinh 2\beta - \sin 2\beta)(\sinh^2 \beta + \sin^2 \beta)}{\mu a(\sinh^2 \beta - \sin^2 \beta)^2} \right. \\ \left. + \frac{4 \sinh^2 \beta \sin^2 \beta}{(\sinh^2 \beta - \sin^2 \beta)^2} + \frac{(\sinh 2\beta - \sin 2\beta)^2}{4\mu^2 a^2 (\sinh^2 \beta - \sin^2 \beta)^2} \right] \quad \dots\dots\dots (12)$$

균열의 길이에 대한 에너지해방율의 관계를 단순보 이론에 의한 경우와 탄성기저를 고려한 경우에 대하여 그림 2에 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이 상대적으로 긴 균열에 대하여 탄성기저를 고려한 경우의 에너지해방율이 단순보 이론에 의한 값보다 약 10~15% 가량 높게 나타남을 알 수 있다.

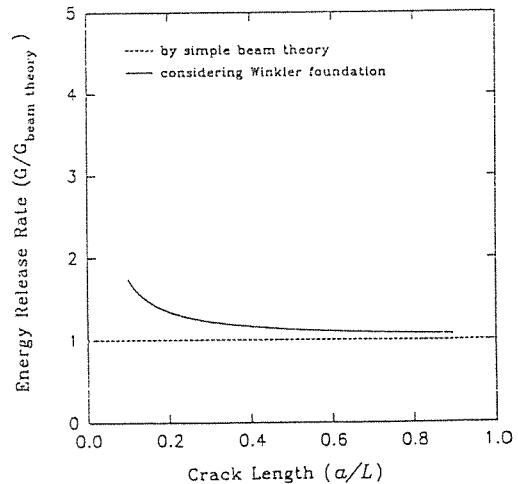


Fig. 2. Variations of energy release rate with crack length for DCB specimen

2-2. 수정된 끝단노치굽힘 시험편 (MENF specimen)

그림 1-(b)와 같은 수정된 끝단노치굽힘 시험편은 혼합 모드 조건하에서의 계면인성을 해석함에 있어 널리 이용되어 왔다. 가상균열이 성장하는 동안 MENF 시험편의 에너지해방율은 균열이 존재하는 경우와 균열이 존재하지 않는 경우의 단위

영역에 저장된 변형에너지 차이로 다음과 같이 구할 수 있다.

$$G = \frac{1}{b\Delta a} \left[\frac{M^2}{2E_1 I_1} (\Delta a) - \frac{M^2}{2E_c I_c} (\Delta a) \right] \\ = \frac{M^2}{2bE_1} \left(\frac{1}{I_1} - \frac{1}{I_c} \right) \dots\dots\dots (13)$$

여기서 M 은 외부 모멘트이고, I_1 은 균열이 있는 경우의 상부 재료에 대한 관성모멘트를 나타내며 I_c 는 균열이 없는 복합보에 대한 관성모멘트를 나타내며 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$I_1 = \frac{1}{12} b h_1^3 \dots\dots\dots (14)$$

$$I_c = \frac{1}{12} b h_1^3 + \frac{1}{12} a b h_2^3 + \frac{1}{4} a b h_1 h_2 \frac{(h_1 + h_2)^2}{(h_1 + a h_2)}$$

여기서 $\alpha = E_2/E_1$ 이고 $h_i (i=1, 2)$ 는 상부 및 하부 재료의 높이이다.

2-3. 4점굽힘 시험편 (four-point flexure specimen)

4점굽힘 시험편은 그림 1-(c)와 같이 상부 재료에는 계면까지 노치가 있고 재료사이의 계면을 따라 대칭적인 예비균열이 존재하며 Charalambides등[13]에 의해 제안되었다. 이 시험편의 에너지해방율은 수정된 끝단노치굽힘 시험편의 경우와 유사하나, 외부하중의 특성상 균열 주위에는 일정한 모멘트가 작용하므로 에너지해방율은 균열의 길이와는 무관함을 알 수 있다.

$$G = \frac{M^2}{2bE_1} \left(\frac{1}{\alpha I_2} - \frac{1}{I_c} \right) \dots\dots\dots (15)$$

2-4. 편층균열스트립 시험편 (edge-cracked strip specimen)

그림 1-(d)와 같은 형상의 시험편($L/h \gg 1$)의 계면에 대하여 각각 법선방향과 접선방향의 균일 분포 외부변위를 작용할 수 있도록 고안된 편층균열스트립 시험편은 충분히 긴 균열에 대해서도 컴플라이언스가 일정한 것으로 잘 알려져 있다. 이 시험편에 대하여 법선방향의 외부변위 v_o 에 대한

해석적인 에너지해방율을 다음과 같이 구할 수 있다[14].

$$G = \frac{(\lambda_1 + 2\mu_1)(\lambda_2 + 2\mu_2)}{2h_1 h_2} \\ \left[\frac{\lambda_1 + 2\mu_1}{h_1} + \frac{\lambda_2 + 2\mu_2}{h_2} \right]^{-1} v_o^2 \dots\dots\dots (16)$$

여기서 λ_i 와 μ_i 는 Lamé 상수들이다($i=1, 2$). 한편, 접선방향 혹은 전단방향의 균일분포 외부변위 u_o 에 대한 에너지해방율은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$G = \frac{\mu_1 \mu_2}{2h_1 h_2} \left[\frac{\mu_1}{h_1} + \frac{\mu_2}{h_2} \right]^{-1} u_o^2 \dots\dots\dots (17)$$

위의 식(16)과 식(17)로부터 편층균열스트립 시험편의 에너지해방율은 균열길이와 무관함을 알 수 있으며, 이는 실험 후 데이터 해석시 방대한 양의 실험데이터를 줄일 수 있다는 점에서 또 하나의 커다란 장점이 된다.

각 시험편에 대하여 앞서의 해석적인 에너지 해방율과 수치해석 결과를 비교하고, 각각의 하중하에서 모우드혼합도를 구하기 위하여 유한요소법을 이용한 수치해석을 하였다. 여기서 모우드혼합도 ψ 는 식(3)과 같이 모우드 1과 모우드 2 응력확대 계수의 비로서 정의하였다. 계면균열 주위의 혼합 모우드에 의한 계면균열 파괴 변수를 결정하는 여러가지 방법 중에서 보존적분기법(conservation integral technique)[11]을 이용하였다. 이 방법은 유한요소법으로 구한 응력 및 변위장과 균열선단 부근의 특이해를 보조해로 사용하여 일반적인 하중하에서 계면균열 주위의 파괴변수 및 모우드혼합도를 구할 수 있는 방법이며, 이 과정은 유한요소 프로그램의 후처리 과정(post-processing unit)에 추가되어 코드화 하였다. 그리고 균열선단 미소 영역은 Stern[15]이 제안한 특이요소로서 모델화 하였다. 해석에서 고려한 재료는 에폭시와 유리를

Table 1. Material Properties

Material	E (GPa)	ν
Epoxy(1)	1.72	0.40
Glass(2)	68.95	0.20
Bimaterial constant $\epsilon = 0.048647$		

조합한 재료로 가정하여 표 1과 같은 재료상수로 놓았다.

쌍 외팔보 시험편에 대하여, 균열길이 변화에 대한 에너지해방율과 모우드혼합도의 관계를 그림 3과 그림 4에 나타내었다. 그림 3에서 알 수 있듯이 보존적분에 의한 에너지해방율과 단순보 이론에 의한 에너지해방율과의 상대적인 차이는 약 10% 정도임을 알 수 있으며, 탄성기저를 고려한 경우의 에너지해방율과는 약 4% 정도의 상대적인 차이를 보임을 알 수 있었다. 그러므로 쌍 외팔보 시험편의

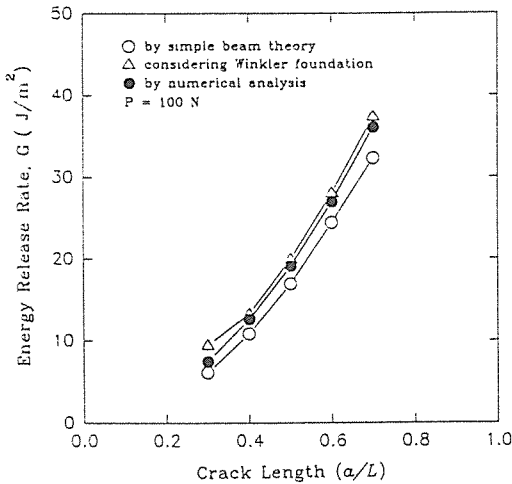


Fig. 3. Total energy release rate with crack length for DCB specimen

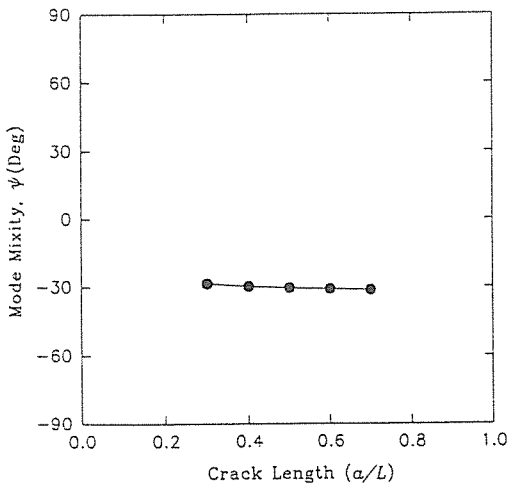


Fig. 4. Variations of mode-mixities with crack length for DCB specimen

해석에 있어 탄성기저를 고려한 해석이 단순보 이론에 의한 해석보다 더 타당함을 알 수 있다. 그리고 그림 4는 균열길이에 따른 모우드혼합도의 변화를 나타낸 것인데 그림에서 보는 바와같이 균열이 진 전함에 따라 모우드혼합도의 변동 폭이 크지 않으므로, 쌍 외팔보 시험편 만으로는 넓은 영역의 모우드혼합도가 요구되는 계면균열 해석을 위한 시험편으로 적당하지 않음을 알 수 있다.

수정된 끝단노치굽힘 시험편에 대한 에너지해방율의 변화는 그림 5에 나타내었다. 에너지해방율의

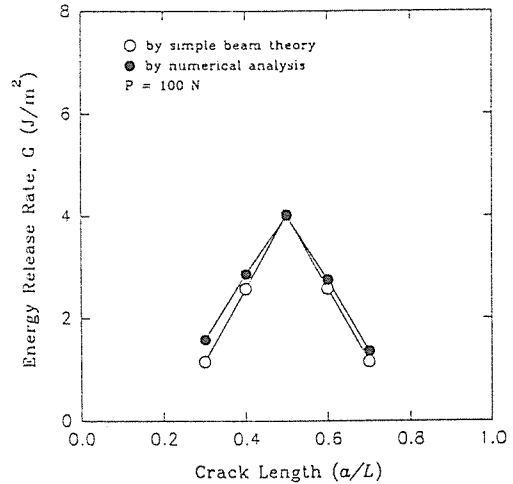


Fig. 5. Total energy release rate with crack length for MENF specimen

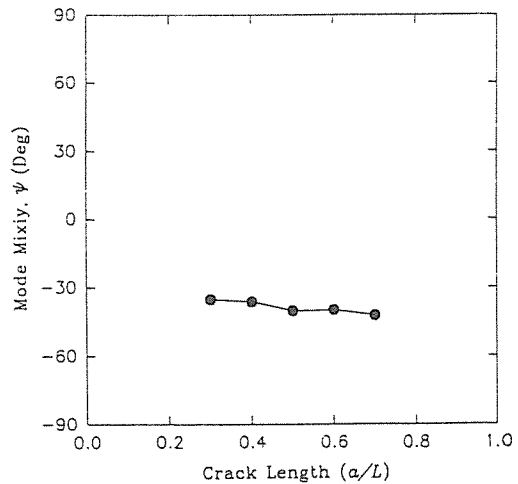


Fig. 6. Variations of mode-mixities with crack length for MENF specimen

최대값은 균열선단 부근이 최대 굽힘모멘트에 놓이는 시험편의 중간에 위치할 때이다. 그림 6은 균열길이에 대한 모우드혼합도의 변화를 나타내었는데 역시 모우드혼합도의 변화는 크지 않음을 알 수 있었다.

그림 7과 그림 8은 4점굽힘 시험편의 균열길이에 대한 에너지해방율과 모우드혼합도의 변화를 보여준다. 식(15)의 해석적인 에너지해방율과 비교할 때, $a/L > 0.6$ 까지는 보존적분에 의한 수치 해와 잘

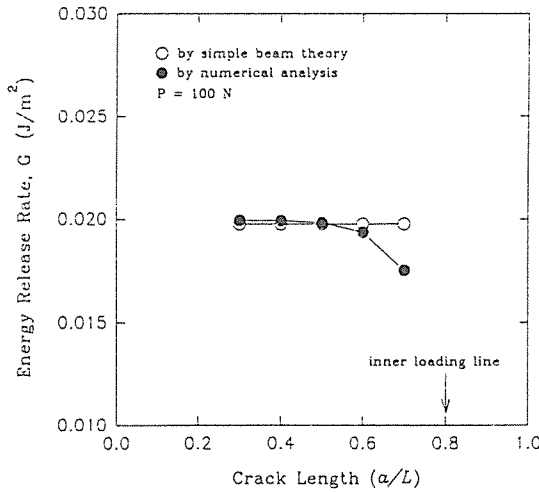


Fig. 7. Total energy release rate with crack length for point flexure specimen

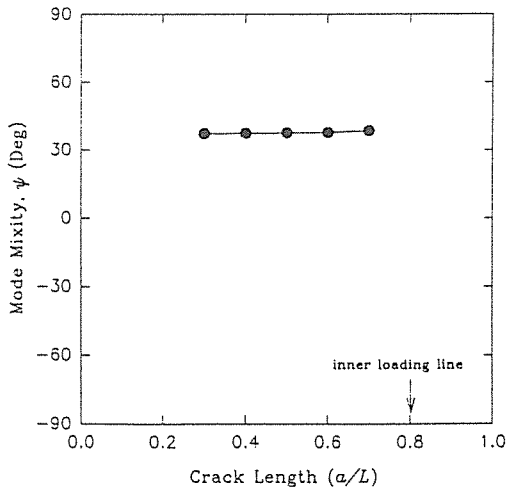


Fig. 8. Variations of mode-mixities with crack length for four point flexure specimen

일치함을 알 수 있고, 이 영역 밖에서는 경계효과 때문에 잘 일치하지 않음을 알 수 있었다. 균열이 진전함에 따라 모우드혼합도도 역시 거의 변하지 않았다.

그림 9와 그림 10은 편축균열스트립 시험편의 계면에 대하여 각각 법선방향과 접선 방향의 균열 분포 외부변위를 가하였을 때, 균열길이에 대한 에너지해방율과 모우드혼합도의 변화를 각각 나타

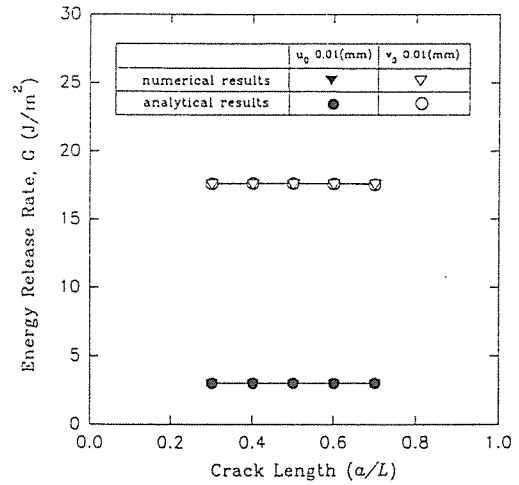


Fig. 9. Total energy release rate with crack length for edge-cracked strip specimen under normal and shear displacements

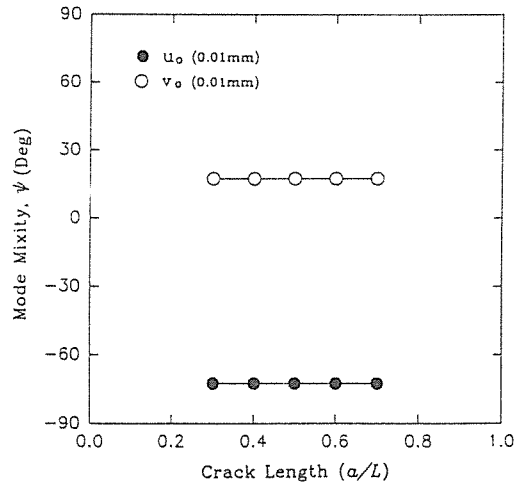


Fig. 10. Variations of mode-mixities with crack length for edge-cracked strip specimen under normal and shear displacements

내었다. 식(16)과 (17)의 해석적인 에너지해방율의 해와 수치해석에 의한 해를 비교해 볼 때, 상대적인 오차가 0.2% 이하로 매우 잘 일치함을 알 수 있었다. 그림에서 보는 바와 같이 에너지해방율과 모우드혼합도는 균열길이와는 무관하게 일정함을 보여주고 있으며, 이는 실험 후 데이터 해석을 용이하게 만들어 줄 수 있을 것이다. 그리고 같은 정도의 변위량에서, 법선방향의 변위에 의한 에너지해방율은 접선방향의 변위에 의한 에너지해방율보다 약 4배 이상 커짐을 알 수 있었다. 그림 11은 인장 상태, 즉 양의 방향으로 법선방향의 변위($v_0 > 0$)를 가하면서 접선방향의 변위를 동시에 작용시킨 경우, 두 방향의 변위의 비에 따른 모우드혼합도의 변화 영역을 나타내었다. 순수 법선방향의 변위가 작용할 때, 즉 $u_0=0$ 인 경우 약 16° 의 혼합도를 보이는데 이는 계면에서의 물성의 불일치에 의한 것으로 생각된다. 그리고 접선방향의 변위와 법선방향의 변위의 비가 1:1인 경우 모우드혼합도는 $\psi=0^\circ$ 을 보이며, 반면 $(-7):1$ 경우에는 거의 $\psi=90^\circ$ 의 값을 보임을 알 수 있었다. 또한 $u_0/v_0 > 20$ 인 범위에서는 모우드혼합도가 거의 -60° 에 접근하였다. 따라서 모우드혼합도의 변화영역이 $-60^\circ < \psi < 90^\circ$ 로 매우 넓은 영역을 보여 계면균열 해석을 위한 시험편으로 적합함을 알 수 있었다.

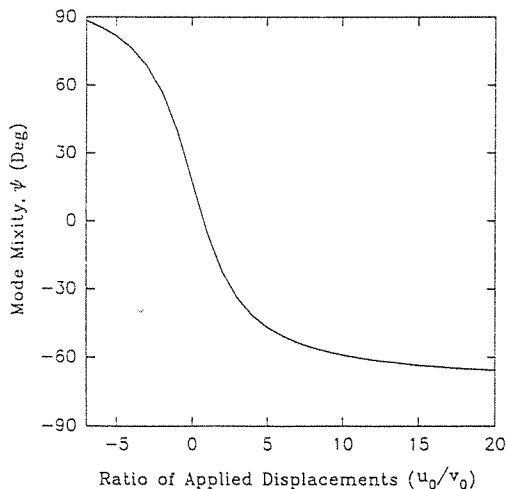


Fig. 11. The range of mode-mixities available under positive normal displacements

이 문제와 관련하여 Liechti와 Hanson[6]은 단일 blister 시험편을 이용하여 blister 직경이 증가함에 따라 $-30^\circ < \psi < 16^\circ$ 의 모우드혼합도 영역에서 실험을 행하였고, Cao와 Evans[7]는 4가지의 서로 다른 시험편을 이용하여 $0^\circ < \psi < 90^\circ$ 사이의 단축적인 영역에서 실험을 행한 바 있다. 따라서 편축 균열스트립 시험편은 기존의 계면균열 시험편과 비교하여 이축하중을 제어함으로써 매우 넓고 연속적이며 음양 모든 영역의 모우드혼합도를 발생시킬 수 있으며, 또한 해석자가 다양한 모우드혼합도의 환경을 임의로 만들 수 있다는 장점을 가지고 있으므로 계면균열 해석을 위한 시험편으로 가장 적합하다고 생각된다.

3. 실험장치의 개발

3-1. 이축 층간분리 시험기

앞서 설명한 바와 같이 편축균열스트립 시험편은 계면균열 문제를 이해하기 위한 시험편으로 많은 장점을 지니고 있고 실제로 이 시험편에 이축 하중을 가하기 위하여 고정밀(high precision), 고분해능(high resolution), 고정렬(well-aligned) 그리고 시험기 자체에 의한 처짐 등을 고려한 이축 층간분리시험기의 제작이 요구되었다. 따라서 다음과 같이 설계, 제작하였는데 가장 중점을 둔 사항은 정확하고 독립적인 이축 변위 제어와 가한 하중에 대하여 충분한 강성을 갖도록 설계하였다.

그림 12는 시험기의 실물 사진이며 그림 13은 시험기의 구조이다. 시험기의 각 축의 구조는 크게 이송부와 그립부로 이루어졌으며 이러한 두 축이 직각으로 배치된 구조이다. 먼저 부하를 발생시키는 부분인 이송부에는 1/100의 감속비를 가지는 감속기가 부착되어 1회전을 50,000 스텝으로 분해하는 스텝핑 모터를 사용하였는데, 이 모터의 허용토크는 4상 여자방식(full-step mode)일 때 80 kgf-cm이고, 4~5상 여자방식(half-step mode)일 때는 150 kgf-cm이다. 이는 마찰계수가 0.003이며 예압이 부여되어 백래쉬가 없고 허용인장하중이 3,200 kgf인 직경 20 mm, 리드 5 mm의 볼나사(ball sc-

rew)를 구동시킴으로서 한 펄스 당 $0.1\mu\text{m}$ 의 변위를 제어할 수 있으며, 특히 4~5상 여자 방식일 때는 한 펄스 당 $0.05\mu\text{m}$ 까지 제어할 수 있다. 그리고 볼나사부의 유효 나사 길이는 260 mm로서 최대 제어변위는 약 100 mm까지 제어할 수 있다. 이때 모터에 의해서 발생하는 최대 부하량은 약 1,000 kgf이다.

한편 시험편이 부착되는 그림부는 최대 $200\times 100\text{ mm}$ 의 시험편을 부착할 수 있도록 하였고, 시험편의 체결방식은 시험편의 강성을 고려하여 강력 접착제에 의한 체결이 용이하도록 설계하였으며, 경우에 따라서 적당한 형태의 그림으로 바꿀 수 있도록 하였다. 또한 그림부에 정확한 법선방향과 접선방향의 변위를 각각 독립적으로 부여하기 위하여 1,000 mm 주행시 $10\mu\text{m}$ 이내의 평행도를 유지하는 고정도의 직선운동 시스템을 적용하였는데 정적 허용모멘트가 40 kgf-m인 블록을 각 축당 4개씩 부착함으로써 충분한 강성이 유지되도록 하였다. 또한 접선방향 축의 그림부에는 시험편의 계면균열의 발생 및 진전 현상을 관찰할 수 있도록 미세 각도 조절이 용이한 거울 부착대를 마련하였다. 이와 동시에 하중을 최대 1톤까지 측정할 수 있는 고정도의 로드 셀을 이송부와 그림부의 중간에 부착하고 모터에서 부여한 펄스에 대하여 상대적인 실제 변위량을 검증할 수 있도록 분해능이 $0.5\mu\text{m}$ 까지 감지할 수 있는 변위 측정기를 그림부에 부착하였다. 이렇게 함으로서 이축 방향의 변위와 하중을 동시에 출력 데이터로 얻을 수 있도록 하

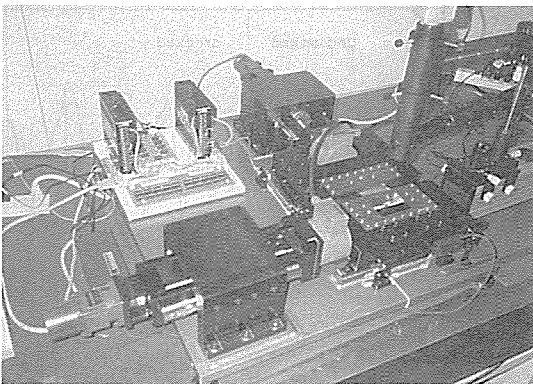


Fig. 12. Biaxial delamination tester

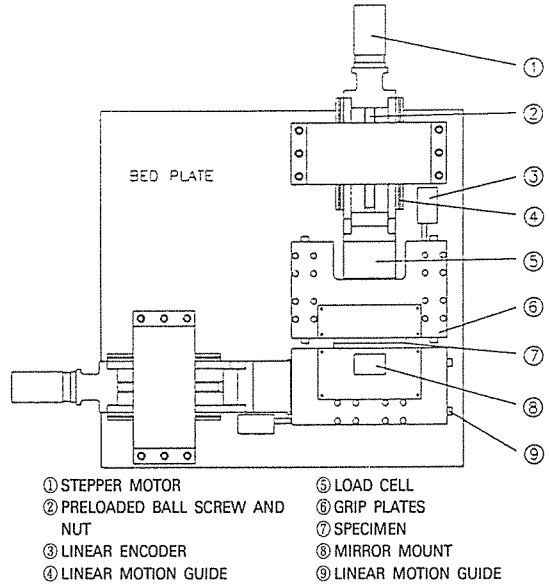


Fig. 13. Schematics of biaxial delamination tester

였다. 그리고 순수한 인장, 압축력만이 작용하고 이송부의 자중이 볼나사부에 미치지 않도록 이송부에도 역시 직선 운동 시스템을 부착하였고 불필요한 모멘트에 의해 좌굴이 발생하지 않도록 이송부의 볼나사와 하중 변환기, 그리고 시험편이 장착되는 그림부가 일직선상에 놓이도록 설계하였다. 또 한편으로 두 축의 전체 자중으로 인한 처짐을 보완하기 위해 모든 시스템은 고정도로 가공된 강성이 좋은 두꺼운 평판에 설치되도록 설계하였다.

한편 본 시험기는 개인용 컴퓨터와 접속하여 폐회로를 구성하였으며, 두축의 각 스텝핑 모터를 구동하기 위한 펄스파를 출력하도록 하였고, 그에 따른 시험기에서 출력되는 두축의 하중변환기, 변위측정기의 실제 변환값을 인터페이스 카드를 통해 컴퓨터로 입력되도록 설계하였다.

2-2. 균열수직개구변위 측정장치

계면균열에서 균열수직개구변위(normal crack opening displacement ; NCOD) 측정 및 계면균열의 발생과 진전현상을 직접 눈으로 확인, 분석하기 위하여 그림 14와 같은 균열수직개구변위 측정장

치를 고안하였다. 그림 15는 측정장치의 원리 및 구성도이다.

재료 중 한쪽을 투명체로 선택하여 광원으로부터의 빛을 광분리장치(beam separation unit)와 그림부에 부착된 반사 거울을 통해 계면에 수직으로 입사한다. 이때 입사된 빛은 계면균열을 이루는 상하 두 면에서 반사되어 균열수직개구변위 만큼의 반사지연으로 인한 그림 16-(a)와 같은 빛의 간섭무늬(fringe pattern)를 얻을 수 있는데, 그림에서 어두운 부분은 계면이 접합되어 있는 상태를 나타내고 밝고 어두운 띠 무늬(간섭무늬) 부분은 계면이 분리되어 계면균열의 상태를 나타내고 있다. 이 간섭무늬로부터 평면변형 조건을 만족시킬 수 있는 시험편의 중간부분에 선(scanning line)을 선택하여 각 화소(pixel)의 빛의 세기를 수치화하면 계면균열의 형상을 실험적으로 구할 수 있다. 그림 16-(b)는 화상분석기(digital image analyser)를 이용하여 수치화한 각 화소들의 밝기를 나타낸 그림이다. 여기서 광학의 기본 원리로 부터 균열 개구변위 Δv 는 식 (18)과 같이 구할 수 있으며 이로 부터 그림 16-(c)와 같은 계면균열의 형상을 그릴 수 있다.

$$\Delta v = m \frac{\lambda}{2} \quad \dots\dots\dots (18)$$

여기서 m 은 무늬차수(fringe order)이고 λ 는 입사광의 파장(wavelength)이다. 본 실험에서는 광원으로서 He-Ne 레이저 빔을 사용하였고 이 빛의 파장은 632.8 nm이므로 한 무늬차수내에서의 어

두운 무늬와 밝은 무늬와의 간격은 158.2 nm의 균열수직 개구변위를 나타낸다.

한편 균열의 발생 및 진전되는 전체 과정의 연속적인 간섭무늬를 CCD 카메라를 통해 타이머가 부착된 고해상도의 VCR에 녹화되도록 하였는데 이는 후에 녹화된 간섭무늬를 재생함으로써 균열의

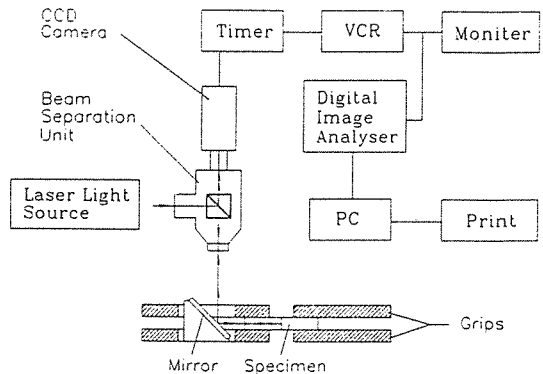


Fig. 15. Schematics of crack opening interferometry

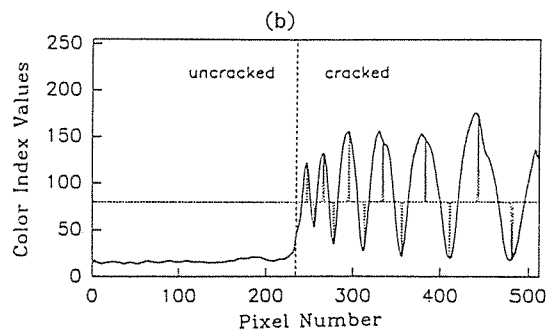
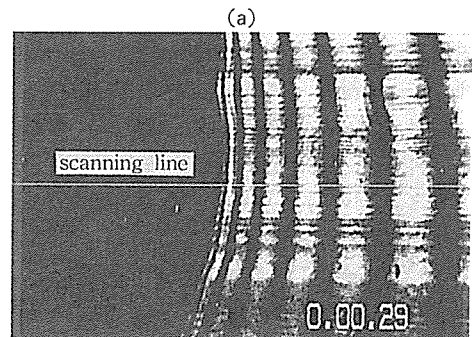


Fig. 16. Experimental determination of NCOD using digital image analyser

(a) Typical fringe pattern (b) Fringe counting scheme (c) Resulting NCOD profiles



Fig. 14. Crack opening interferometry

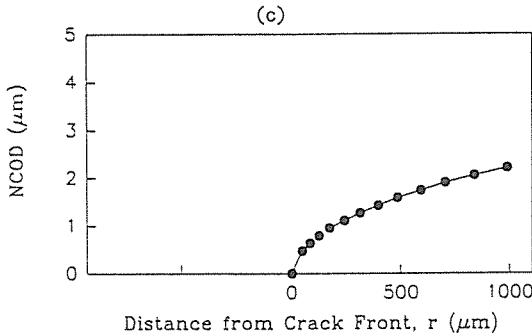


Fig. 16. (Continued)

발생 및 진전되는 정확한 시점을 알 수 있으며 이를 이용하여 시험편의 임계응력확대계수 K_{IC} 를 구할 수 있고, 또한 이 간접 무리로부터 계면균열의 형상 뿐 아니라 계면균열선단 주위의 균열접촉 현상, 비선형 혹은 소성거동 그리고 시험편 두께 방향으로의 3차원현상 등도 해석이 가능하다.

4. 결 론

계면균열 문제의 이해를 위한 시험편의 선정 및 실험장치 개발에 대한 연구 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

첫째, 이축 하중하에서의 편축균열스트립 시험편은 법선방향과 접선방향의 변위를 변화시킴에 따라 매우 넓은 영역의 모우드혼합도($-60^\circ < \psi < 90^\circ$)를 보이므로 계면균열 해석을 위한 시험편으로 가장 적당함을 알 수 있었다.

둘째, 선정된 시험편은 계면균열의 발생과 진전 현상을 이해하기 위한 시험편으로 많은 장점을 지니고 있으므로 실제로 이 시험편에 대한 실험적 해석을 위하여 고정밀 이축 증간분리시험기 및 균열수직개구변위 측정장치 등을 개발하였다.

후 기

본 논문은 1994학년도 영남대학교 학술연구조성비에 의해 수행되었으며, 관계자 여러분께 감사드립니다.

참 고 문 헌

- Williams, M.L., "The Stresses around a Fault or Crack in Dissimilar Media," *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 49, 1959, pp.199-204.
- Malyshev, B.M. and Salganik, R.L., "The Strength of Adhesive Joints Using the Theory of Cracks," *Int. J. Fract.*, Vol. 1, 1965, pp.114-128.
- Trantina, G., "Combined Mode Crack Extension in Adhesive Joint," *J. Comp. Mats.*, Vol. 6, 1972, pp.371-385.
- Anderson, G.P., DeVries, K.L. and Williams, M.L., "Mixed Mode Stress Fields Effect in Adhesive Fracture," *Int. J. Frac.*, Vol. 10, 1974, pp.565-583.
- Mulville, D.R., Hunston, D.L. and Mast, P.W., "Developing Failure Criteria for Adhesive Joints Under Complex Loading," *J. Eng. Mat. Tech.*, Vol. 100, 1978, pp.25-31.
- Liechti, K.M. and Hanson, E.C., "Non-linear Effects in the Mixed-Mode Interfacial Delamination," *Int. J. Frac.*, Vol. 36, 1988, pp. 199-217.
- Cao, H.C. and Evans, A.G., "An Experimental Study of the Fracture Resistance of Bimaterial Interfaces," *Mechanics of Materials*, Vol. 7, 1989, pp.295-304.
- Wang, J.S. and Suo, Z., "Experimental Determination of Interfacial Toughness using Brazil-Nut-Sandwich," *Acta. Metal.*, Vol. 38, 1990, pp.1279-1290.
- Liechti, K.M. and Chai, Y.S., "Biaxial Loading Experiments for Determining Interfacial Fracture Toughness," *J. Appl. Mech.*, Vol. 58, 1991, pp.680-687.
- Liechti, K.M. and Chai, Y.S., "Asymmetric Shielding in Interfacial Fracture Under In-Plane Shear," *J. Appl. Mech.*, Vol. 59, 1992,

pp.295-304.

11. Yau, J.F. and Wang, S.S., "An Analysis of Interface Cracks between Dissimilar Isotropic Materials using Conservation Integrals in Elasticity," *Eng. Fract. Mech.*, Vol. 20, 1984, pp.423-432.

12. Kanninen, M.F., "An Augmented Double Cantilever Beam Model for Studying Crack Propagation and Arrest," *Int. J. Fract.*, Vol. 9, 1973, pp.83-92.

13. Charalambides, P.G., Lund, J., Evans,

A.G. and McMeeking, R.M., "A Test Specimen for Determining the Fracture Resistance of Bimaterial Interfaces," *J. Appl. Mech.*, Vol. 56, 1989, pp.77-82.

14. Atkinson, C., "On Stress Singularities and Interfaces in Linear Elastic Fracture Mechanics," *Int. J. Fract.*, Vol. 13, 1977, pp.807-820.

15. Stern, M., "Families of Consistent Conforming Elements with Singular Derivative Fields," *Int. J. for Num. Meth. in Eng.*, Vol. 14, 1979, pp.409-421.
