

접착이음의 계면균열에 대한 파괴인성 및 평가방법

정 남 용 (숭실대학교 기계공학과) 이 명 대* (대유공전 기계설계과, 숭실대학원) 강 삼 근 (숭실대학원)

Methods of Fracture Toughness and Evaluation for Interface Crack in Adhesively Bonded Joints

N. Y. Chung(Soongsil Univ.) M. D. Lee*(Deayoo Tech. College) S. G. Kang(Soongsil Grad. Univ)

Abstract

In this paper, a method of strength evaluation applying fracture mechanics in adhesively bonded joints of Al/Al materials was investigated. Various adhesively bonded joints of double-cantilever beam with a interfacial crack in its adhesive layer were prepared for the fracture toughness test of comprehensive mixed mode conditions from nearly pure mode I to mode II.

The experiment of fracture toughness was carried out under various mixed mode conditions with an interfacial crack and critical energy release rate, G_c by the experimental measurements of compliances was determined.

From the results, fracture toughness on mixed mode with an interfacial crack is well characterized by strain energy release rate and a method of strength evaluation by the fracture toughness in adhesively bonded joints of Al/Al materials was discussed.

Keywords : Adhesively Bonded Joint(접착이음), Interfacial Crack(계면균열), Mixed Mode(혼합모드), Compliance(컴플라이언스), Fracture Toughness(파괴인성), Energy Release Rate(에너지 방출률)

1. 서 론

구조접착은 신소재의 새로운 결합기술의 발전과 경량화 및 합리적인 구조설계를 위하여 금속과 비금속재료, 복합재료, 고분자재료 등의 동시접착은 물론 비용접성 이종재료의 결합법으로써 자동차, 우주선, 철도차량, 선박, 반도체, 의료기기 등에 이르기까지 각종 산업분야에 폭넓게 활용되고있기 때문에 이에 대한 강도평가방법의 확립이 절실히 요청되고 있다⁽¹⁻⁴⁾. 최근, 접착이음의 강도평가에 대한 연구가 발표되고 있지만, 정량적인 강도평가방법의 확립에는 이르지 못한 실정이다. 또한, 접착이음의 파괴가 계면균열에 의해 발생할 때 가장 낮은 접착강도를 나타내므로 혼합모드 계면균열에 대한 파괴역학적 인자의 해

석 및 파괴인성의 시험과 평가방법에 있어서도 정립해야할 많은 문제점이 남아있다. 접착이음의 접착강도 평가방법을 확립하기 위해서는 혼합모드 파괴기준이 필요하고⁽⁵⁻⁸⁾, 파괴기준의 설정을 위해서는 파괴인성시험 및 평가가 필요하다.

따라서 본연구에서는 계면균열의 혼합모드 성분이 광범위하게 변화하는 각종 DCB (double-cantilever beam) 시험편을 고안·제작하고 파괴인성시험을 실시하였다. 접착이음의 계면균열에 대한 파괴역학 인자를 검토하고, 시험편의 형상 및 치수, 부하조건에 의존하지 않는 파괴역학인자에 의한 정량적인 정적 접착강도평가를 위한 파괴인성의 시험방법 및 그 평가방법을 제시하고자 한다.

2. 시험편 및 실험방법

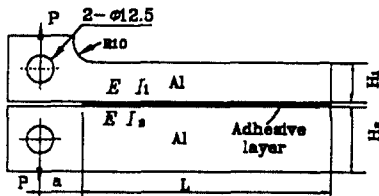
2.1 시험편의 형상 및 치수

시험편의 피착재는 균질재인 알루미늄을, 접착제는 세메다인(Cemadine) 1500을 사용하였고, 그 기계적성질은 Table 1과 같다.

Table 1 Mechanical properties of adherend and adhesive

Mechanical properties		Young's Modulus E (GPa)	Poisson's ratio ν
Specimen materials			
Adherend	Aluminum	65.56	0.3
Adhesive	Cemadine 1500	20.59	0.4

접착이음의 시험편은 혼합모드성분이 광범위하게 변화하는 DCB 시험편을 고안·제작하기 위하여 Fig. 1과 같이 각 시험편의 높이를 변화시켜, 4가지 형태로 구분하였다. 각 시험편의 형상 및 치수를 Fig. 1에 나타내었다.



Size	Height H ₁	Height H ₂	Length L	Width B
Type 1	30	30	135	15
Type 2	20	30		
Type 3	15	30		
Type 4	15	20		

unit : mm

Fig. 1 Shapes and dimensions of adhesively bonded DCB specimens

2.2 시험편의 제작

실제의 접착공정에서 생기는 접착계면의 조성·조직 및 형상은 복잡하지만, 역학적으로 취급하기 위해서는

접착이음을 가급적 단순화하여 혼합모드 성분이 광범위하게 변화하는 계면균열의 혼합모드 시험편을 고안·제작하였다. 시험편의 높이, 계면균열의 길이, 접착길이 등을 변화시켜 접착이음 시험편을 제작하였다. 피착재는 알루미늄 판재를 Fig. 1과 같은 형상과 치수로 밀링 가공하고 접착면을 #220의 사포로 최종다듬질한 후 아세톤으로 세정하고 물로 세척하여 건조시켜 접착제로 접착하였다. 접착제는 에폭시계 구조접착제인 세메다인 1500을 사용하였고, 주제와 경화제를 1:1의 비율로 혼합하였다. 인공예비균열과 일정한 접착층의 두께를 유지 시키기 위하여 0.2mm두께의 테프론 필름을 삽입하였다. 접착압력을 일정하게 하기위하여 지그에 고정된 상태로 전기로내에서 60°C로 2시간 동안 경화시켰다.

2.3 실험방법

시험기는 인스트론(Instron)형을 사용하였다. 하중은 핀하중을 작용시키고, 변위제어 방식으로 하중속도는 0.05mm/min으로 하였다. 하중-변위선도는 X-Y 레코더를 사용하여 기록하였고, 하중점의 변위를 측정하였다. 균열길이는 이동식 현미경으로 100배로 확대하여 측정하였다. 하중을 작용하고, 균열이 진전하면 하중을 서서히 제거하여 하중이 0인 상태로 되돌린 후 하중을 다시 증가하면서 하중-변위선도를 그리는 방법으로 실험을 계속하였다. 각 시험편마다 기록된 하중-변위선도로부터 각 균열길이에 대한 컴플라이언스(compliance)를 구하였다. 이 컴플라이언스 값을 사용하여 에너지 방출률을 구하였다.

3. 계면균열에 대한 파괴역학 인자의 검토

3.1 응력세기계수와 에너지방출률

접착이음을 파괴역학적으로 평가하기 위해서는 우선 파괴역학인자의 검토가 필요하다. 일반적으로 균질선형 탄성체의 경우에는 응력 세기계수가 이용되지만, 접착이음의 경우는 접착계면균열의 진동 특이성의 문제가 있고, 균열진전이 계면 파괴 또는 접착층내 파괴로 되어도 전체 에너지 방출률은 변하지 않으므로 에너지 방출률 G가 일반적으로 적용되고 있다.

Fig. 2와 같은 이중재료의 접착이음에 대한 혼

합모드 계면균열은 $\theta=0$ 일 때, 균열선단으로 부터의 거리가 r 인 경우 응력분포는 다음 식과 같이 된다.

$$\sigma_y + i\tau_{xy} = \frac{(K_1 + iK_2)}{\sqrt{2\pi r}} \left(\frac{r}{l}\right)^{i\epsilon} \quad (1)$$

$$\epsilon = \frac{1}{2\pi} \ln \frac{k_1\mu_2 + \mu_1}{k_2\mu_1 + \mu_2} \quad (2)$$

$$k_j = \begin{cases} 3-4\nu_j & (\text{평면변형률}) (j=1,2) \\ (3-\nu_j)/(1+\nu_j) & (\text{평면응력}) \end{cases} \quad (3)$$

여기서 σ_y , τ_{xy} 는 각각 수직 및 전단응력 성분이고, K_1 과 K_2 는 각각 계면균열의 응력세기 계수에 대한 모드 I 및 모드 II 성분을 나타낸다.

또한 ϵ 은 이중재료 정수(bimetallic constant), μ 는 각 재료의 전단탄성계수, ν 는 푸와송의 비이고, 첨자는 각각의 재료를 의미한다.

식 (1)에서 l 은 기준길이로써 균열의 길이로 사용할 것이 추천된다⁽⁵⁾.

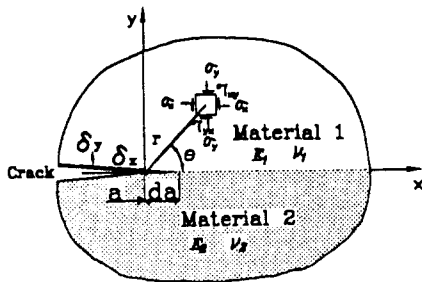


Fig. 2 Crack-tip stress field in adhesively bonded joint

에너지 방출률 G 는 Griffith의 에너지 밸런스 이론에 근거하고, 균열을 진전시키기 위한 새로운 균열면의 형성에 소비되는 에너지의 방출로써 포텐셜 에너지의 감소율을 의미하고, 균열의 단위 면적의 균열을 진전시키기 위하여 소요되는 에너지로 나타낸다.

Fig.2 에서 균열의 길이 a 에서 da 만큼 진전한

경우 에너지 방출률은 역으로 균열길이가 $a+da$ 에서 a 의 상태로 복원되기 위하여 필요한 일로서 다음 식과 같이 된다.

$$G = \lim_{da \rightarrow 0} \frac{1}{2da} \int_0^{da} \{ \sigma_y(x) \delta_y(da-x) + \tau_{xy}(x) \delta_x(da-x) \} dx \quad (4)$$

여기서 δ_x, δ_y 는 계면균열선단 근방의 상하면에 대한 x 및 y 방향 변위를 나타내고, 이때의 상대 변위는 각각 $\delta_x(da-x)$ 와 $\delta_y(da-x)$ 가 된다.

식 (1)에 계면균열의 상대변위를 대입하여 정리하면, 다음 식을 얻을 수 있다.

$$G = \frac{1}{16 \cosh^2(\pi\epsilon)} \left[\frac{k_1+1}{\mu_1} + \frac{k_2+1}{\mu_2} \right] (K_1^2 + K_2^2) \quad (5)$$

식(5)에서 에너지 방출률은 모드성분 분리에 의한 K_1 과 K_2 의 계산이 필요하다.

3.2 컴플라이언스와 에너지 방출률

에너지 방출률은 컴플라이언스의 실험적인 측정으로 구할 수 있다. Fig. 3과 같이 두께 B , 균열길이 a 인 탄성체에 정적하중 P 가 작용하여 균열이 da 만큼 진전하였을 때, 하중-변위선도는 Fig.4와 같이 된다. 균열의 길이가 a 에서 $a+da$ 로 진전할 동안 하중은 $P+dP$ 에서 P 로 감소한다.

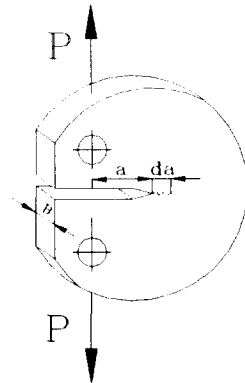


Fig. 3 Cracked plate subjected to tensile stress

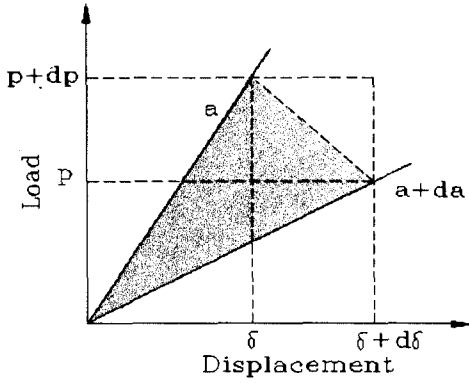


Fig 4. Load-displacement of cracked plate

이때 균열진전에 소요되는 에너지 방출률은 컴플라이언스의 변화를 초래하고, 균열면의 성장에 유효하게 소비된 단위 면적에 대한 에너지로 정의되고, Fig. 4에서 증분된 에너지로 빗금친 면적을 의미한다. 따라서 증분된 균열의 면적이 dA 인 경우 균열진전에 의해 방출되는 에너지는 다음 식으로 된다.

$$G = \frac{1}{dA} (dW - dU) \quad (6)$$

여기서, dW 는 작용하중에 의한 일의 증분, dU 는 균열진전에 의한 탄성변형률 에너지의 증분을 나타내고, dA 는 증분된 균열의 면적이다.

또한 증분된 면적 $dA = B \cdot da$ 이므로 식(6)은 다음식과 같이된다.

$$G = \frac{1}{B \cdot da} (dW - dU) \quad (7)$$

컴플라이언스 C 는 스프링 상수의 역수로서 다음 식과 같이 된다.

$$\delta = CP \quad (8)$$

또한, W 및 U 는 다음 식으로 표시된다.

$$W = \int_0^\delta P d\delta \quad (9)$$

$$U = \frac{1}{2} P\delta = \frac{1}{2} CP^2 \quad (10)$$

식 (6), (7)과 식(9)에서 다음 식이 얻어진다.

$$G = \frac{1}{B} \left(P \frac{d\delta}{da} - \frac{dU}{da} \right) \quad (11)$$

식(8)을 식(11)에 대입하면 다음 식과 같이 된다.

$$\begin{aligned} G &= \frac{1}{B} \left(P^2 \frac{dC}{da} + PC \frac{dP}{da} - \frac{1}{2} P^2 \frac{dC}{da} - CP \frac{dP}{da} \right) \\ &= \frac{P^2}{2B} \frac{dC}{da} \end{aligned} \quad (12)$$

또한 균열의 진전조건은 다음 식과 같이 된다.

$$dW - dU \geq G_c dA \quad (13)$$

여기서, G_c 는 임계 에너지 방출률로써 파괴인성 (fracture toughness)을 의미한다.

파괴조건은 작용하중에 의한 G 가 그 재료의 파괴인성값 G_c 이상이어야 하며, 다음 식으로 표시한다.

$$G \geq G_c \quad (14)$$

따라서 혼합모드의 파괴인성은 다음 식과 같이 된다.

$$G_c = G_I, G_{II} = \frac{P_c^2}{2B} \frac{dC}{da} \quad (15)$$

여기서 P_c 는 균열진전에 필요한 임계 하중값을 나타낸다. 식(15)에서 임계에너지 방출률은 실험에서 컴플라이언스와 임계하중을 측정하여 직접 구할수 있기 때문에 본 연구에서는 식(15)를 사용하기로 한다.

4. 실험결과 및 고찰

Fig. 5 ~ Fig. 7은 실험에서 측정된 하중과 하중점의 변위를 사용하여 컴플라이언스를 구한 후 균열길이에 대해서 나타낸 것이다. 그림에서 ●표시는 실험데이터이고, 실선은 균질재에 대한 Ripling의 식을 나타내었다. 집착층이 없는 균질재의 DCB시험편에 대한 컴플라이언스를 나타내는 Ripling의 식은 다음 식과 같이 된다.

$$\begin{aligned} C &= \frac{2}{3EI_1} [(a+a_0)^3 + H_1^2 a] \\ &+ \frac{2}{3EI_2} [(a+a_0)^3 + H_2^2 a] \end{aligned} \quad (16)$$

여기서 E는 피착재의 세로탄성계수, I는 단면2차 모멘트, H는 시험편의 높이이고, a는 균열길이이다. H^2a 는 전단에 의한 수정량이고, a_0 는 회전보정량이고, Ripling은 $a_0=0.6H$ 로 하였다.

Fig. 5는 $H_1/H_2=1$ 인 Type 1 시험편으로 기의 모드 I 성분만이 작용하고, 변형이 가장 어려운 것으로 변위가 작기 때문에 균열길이에 대한 컴플라이언스는 가장 작다.

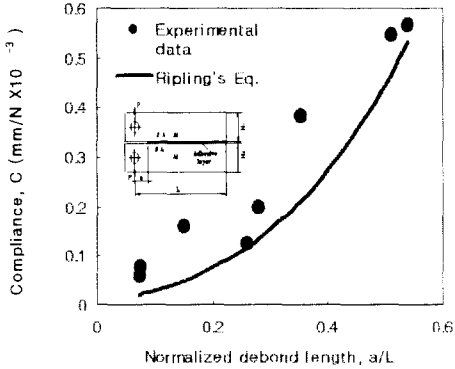


Fig. 5 Relationship between compliance and bonded length (Type 1)

Fig. 6은 $H_1/H_2=0.5$ 인 Type 3 시험편으로 Type 1보다 H_1 이 반으로 줄었기 때문에 변형하기 쉽고, 균열길이에 대한 컴플라이언스도 증가 하였다. 또한 전단응력이 증가하여 임계하중 값도 증가하였다.

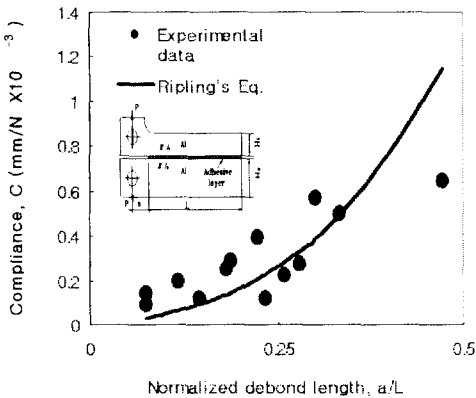


Fig. 6 Relationship between compliance and bonded length (Type 3)

Fig. 7은 $H_1/H_2=0.75$ 인 Type 4 시험편으로 변형하기가 가장 쉽고, 전단응력이 더욱 증가하여 임계하중은 증가 하였다. 실험으로부터 구한 컴플라이언스를 Ripling의 식과 비교할 때, 큰 편차를 보이는 것은 얇은 집착층 두께의 영향, 재료물성치와 균열길이의 측정오차에 의한 것으로 본다.

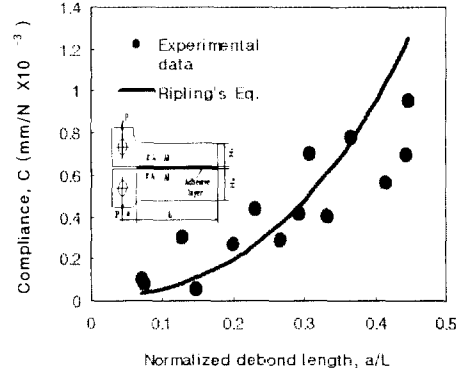


Fig. 7 Relationship between compliance and bonded length (Type 4)

Fig. 5 ~ Fig. 7의 컴플라이언스와 실험에서 측정된 균열 전전에 필요한 임계하중 값을 식(15)에 대입하여 임계 에너지 방출률을 계산하고, 그 결과를 각 균열길이에 대해서 Fig. 8 ~ Fig. 10에 도시하였다. 그림에서 ●표시는 실험결과이고 실선은 이들 값을 평균하여 나타낸 것이다.

혼합모드 성분이 변화하는 시험편의 파괴인성값이 약간의 편차는 있지만, 균열길이의 변화에 관계없이 일정한 값을 나타낸다.

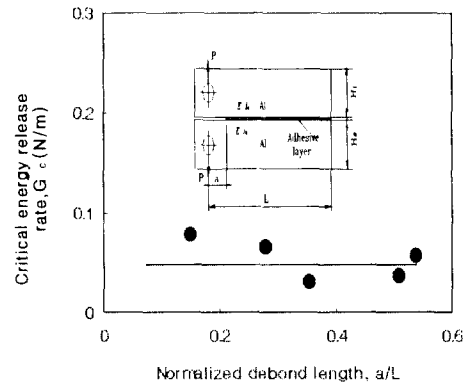


Fig. 8 Critical energy release rate for debond length (Type 1)

Fig. 8은 Type 1 시험편에 대한 실험결과로서 거의 모드 I 성분만이 작용하여 파괴인성이 작게 나타나는 것으로 보아 박리에 매우 약한 것을 알 수 있다.

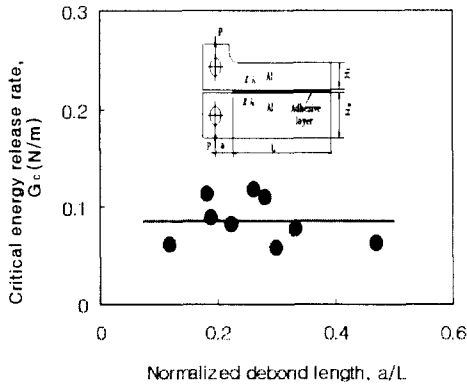


Fig. 9 Critical energy release rate for debond length (Type 3)

Fig. 9는 Type 3 시험편으로 H_1 이 Type 1에 비하여 반으로 줄었으므로 수직응력이 감소하고, 전단응력이 증가하여 파괴인성값은 크게 되어 박리에 더욱 강한 현상을 나타낸다.

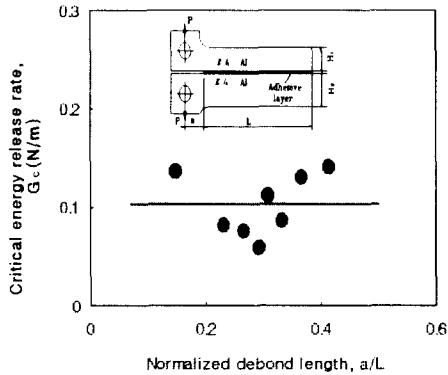


Fig. 10 Critical energy release rate for debond length (Type 4)

Fig. 10은 Type 4 시험편으로 H_1 과 H_2 양쪽이 감소하여 수직응력이 감소하고 전단응력이 더욱 증가하여 더욱 큰 파괴인성값을 보여준다.

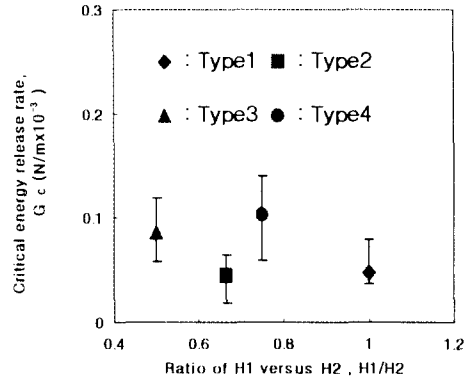


Fig. 11 Relationship critical energy release rate and H_1/H_2

Fig. 11은 Type 1~Type 4 시험편에 대한 파괴인성값을 H_1/H_2 의 비에 대해서 도시한 것이다. 수직응력이 많이 작용하는 Type 2 시험편은 박리에 약하여 낮은 파괴인성값을 나타내고, 수직응력이 감소하고 전단응력이 증가하는 Type 3과 Type 4 시험편은 수직응력이 감소하는 만큼 박리에 강하여 높은 파괴인성값을 보여주었다.

이와 같이 접착구조물을 안전하게 사용하려면 수직응력은 감소하고, 전단응력은 증가하는 혼합모드 접착이음을 설계하는 것이 중요하고, 접착구조물을 더욱 안전하게 사용할 수 있을 것이다.

Type 1~Type 4 시험편의 파괴는 계면균열이 지배적이었고, 혼합모드 시험편의 형태에 따라 균열의 진전경로와 파면형태도 다르고, 상하피착재에 접착제가 붙어 있는 형상도 달랐다.

또한, 접착이음의 계면균열에 대한 파괴인성의 평가는 에너지 방출률이 유효하고 균열길이의 변화에 관계없이 일정한 파괴인성값이 얻어진다.

접착이음의 피착재와 접착제의 상호 친화성에 따라 결합력이 달라지며, 이러한 결합특성은 파괴인성 값에 차이를 주지만, 파괴역학인자인 에너지 방출률에 의한 정량적인 평가가 가능하다.

따라서 본 연구에서와 같이 컴플라이언스와 균열진전하중을 실험에서 직접 측정하여 임계에너지 방출률을 구하여 파괴인성을 평가하는 것이 바람직하다. 또한, Fig. 11에서 알 수 있듯이 혼합모드 성분비에 따라 파괴인성값 G_c 가 다르므로

파괴기구의 규명을 위해서는 혼합모드 성분의 비를 분리하는 방법을 모색하여야 하며, 이들 성분 분리에 의한 파괴기준의 설정이 필요하다.

5. 결 론

접착이음의 계면균열에 대한 파괴인성 및 평가방법을 확립하기 위하여 균질재인 알루미늄 피착재와 세메다인 1500의 접착제를 사용하여 순수 모드 I 에서 모드 II 에 가까운 각종 혼합모드 DCB 접착시험편을 제작하여 파괴인성시험을 실시하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 접착 DCB 시험편이 4가지 형태로 서로 다른 경우에도 실험에서 측정된 컴플라이언스는 균질재에 대한 Ripling의 근사식이 잘 일치하는 것을 확인하였다.

(2) 컴플라이언스와 균열이 진전하는 임계하중을 실험에서 직접 측정하고, 임계에너지 방출률을 구하는 파괴인성 시험방법을 제시하였다.

(3) 접착이음의 계면균열에 대한 파괴인성의 평가에는 정량적인 파괴역학 인자로서 에너지 방출률이 유효하고, 균열길이의 변화에 관계없이 거의 일정한 파괴인성값이 얻어진다.

(4) 혼합모드 성분의 비가 변화하여 모드 I 성분이 감소하고 모드 II 성분이 증가할수록 박리현상에 강하고, 파괴인성값은 크게 되고, 이들 모드 성분의 차이에 따라 파괴인성 값도 큰 차이를 나타내었다.

(5) 접착이음의 파괴기구의 규명을 위해서는 혼합모드 성분의 분리에 의한 파괴인성의 평가가 요망된다.

후 기

본 논문은 1997년도 대우공업전문대학 교내 연구비의 지원을 받아 수행되었으며, 이에 감사를 드립니다.

참고문헌

- (1) 정남용, 1992, "접착이음의 강도평가에 관한 연구 (제1보)", 대한기계학회논문집, 제16권, 제4호, pp.667~674.
- (2) 정남용, 1993, "접착이음의 강도평가에 관한 연구 (제2보)", 대한기계학회논문집, 제17권, 제4호, pp.855~862.
- (3) 鄭南龍, 結城良治, 石川晴雄, 中野 禪, 1990, "接着継手の混合モード破壊基準", 材料, 第39卷 443號, pp. 1095~1100.
- (4) 鄭南龍, 結城良治, 石川晴雄, 中野 禪, 1988, "接着継手の強度評價への破壊力學の應用 (第1報)", 日本機械學會論文集(A), 第54卷 506號, pp. 1895~1902.
- (5) 정남용, 장진모, 1997, "Al/Steel 이종재료의 접착이음에 대한 혼합모드의 파괴기준", 대한기계학회 논문집(A), 제21권, 제8호, pp.1322~1331.
- (6) R. Yuuki, and J. Q. Xu, 1992, "Stress based criterion for an interface crack kinking out of the interface in dissimilar materials", Eng. Frac. Mech, Vol. 41, No. 5, pp. 635-644.
- (7) K. M. Liechti and Y. S. Chai, 1991, "Biaxial Loading Experiments for Determining Interfacial Fracture Toughness", J. Applied Mechanics, Vol. 41, No. 5, pp. 635-644.
- (8) J. R. Rice, 1988, "Elastic fracture mechanics concepts for interfacial cracks ", Trans. ASME, J. of Applied Mechanics, Vol. 55, pp. 98-105.