

에너지 방출률에 의한 접착이음의 계면균열에 대한 파괴인성의 평가

정남용* · 이명대** · 강삼근***

(1999년 7월 27일 접수)

Evaluation of Fracture Toughness by Energy Release Rate for Interface Crack in Adhesively Bonded Joints

Nam Yong Chung, Myung Dae Lee and Sam Geun Kang

Key Words: Adhesively Bonded Joint(접착이음), Interface Crack(계면균열), Mixed Mode(혼합모드), Double-Cantilever Beam(이중 외팔보), Compliance(컴플라이언스), Fracture Toughness(파괴인성), Energy Release Rate(에너지 방출률)

Abstract

In this paper, the evaluation method of interfacial fracture toughness to apply the fracture toughness was investigated in adhesively bonded joints of Al/Ced./Al. Four types of adhesively bonded double-cantilever beam(DCB) joints with the interface crack were prepared for the test of interfacial fracture toughness. The experiments to measure the interfacial fracture toughness were performed under the various mixed-mode conditions. The critical energy release rate, G_c , was obtained by the experimental measurement of compliances. From the experimental results, the interfacial fracture toughness for the mixed-mode specimens is well characterized by the energy release rate, and the method of strength evaluation by the interfacial fracture toughness was discussed in adhesively bonded joints.

1. 서론

구조접착은 신소재의 새로운 결합기술의 발전과 경량화 및 합리적인 구조설계를 위하여 금속과 비금속재료, 복합재료, 고분자재료 등의 동시접착에 사용되고 있다. 비용접성 이종재료의 결합법으로서 자동차, 우주선, 철도차량, 선박, 반도체, 의료기기 등에 이르기까지 각종 산업분야에

서 폭넓게 활용되고 있기 때문에 이에 대한 강도평가 방법의 확립이 절실히 요청되고 있다.^(1~4)

접착구조물의 계면단(interface edge)은 현저한 응력집중으로 인하여 계면균열(interface crack)이 발생하기 쉽고, 접착구조물이 계면균열에 의해 파괴될 때 일반적으로 가장 낮은 접착강도를 나타내므로 계면균열에 의한 접착강도를 평가하는 것은 매우 중요하다.^(5,6)

그러나 접착구조물의 파괴는 대부분 혼합모드(mixed mode) 파괴양상을 보이므로 혼합모드 계면균열에 대한 파괴역학인자의 해석,⁽⁷⁾ 파괴인성의 시험 및 평가방법의 정립에는 고려하여야 할 문제점이 남아 있다.^(8~11)

최근, 접착이음의 강도평가에 대한 많은 연구

* 회원, 숭실대학교 기계공학과

** 회원, 숭실대학교 대학원(동서울대학 기계설계과)

E-mail : leemd@soback.komet.net

TEL : (031)720-2051 FAX : (031)751-1094

*** 숭실대학교 대학원 기계공학과

결과가 발표되고 있지만,^(1~12) 접착이음의 계면균열에 대한 정량적인 강도평가 방법을 확립하기 위하여 정밀도 높은 계면균열 파괴인자의 해석 방법, 계면균열에 대한 혼합모드 성분의 분리 방법, 파괴인성 시험방법, 및 각 혼합모드 성분에 의한 파괴인성의 명확한 평가방법의 제시가 요구되고 있다.

따라서 본 연구에서는 접착이음의 계면균열에 대한 혼합모드 성분이 변화하는 4가지 형태의 DCB(double-cantilever beam) 시험편을 고안·제작하고 파괴인성 시험을 실시하였다. 접착이음의 계면균열에 대한 컴플라이언스의 측정으로 파괴인성의 에너지 방출률(energy release rate)에 의한 파괴역학 인자를 검토하였다. 또한 접착이음 시험편의 형상 및 치수, 부하조건에 의존하지 않는 에너지 방출률에 의한 정량적인 정적 접착강도 평가를 위한 파괴인성의 시험방법 및 그 평가방법을 제시하고자 한다.

2. 시험편 및 실험방법

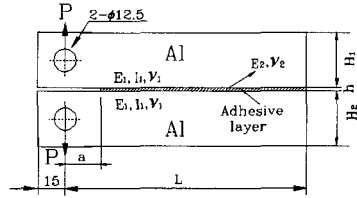
2.1 시험편의 형상 및 치수

시험편의 접착체는 균질재인 알루미늄이고, 접착제는 구조접착제로 널리 사용되고 있는 에폭시계 세메다인(Cemedine; Ced.) 1500을 사용하였다. 접착체와 접착제의 기계적 성질은 실험에서 직접 구하였고, 그 결과는 Table 1과 같다.

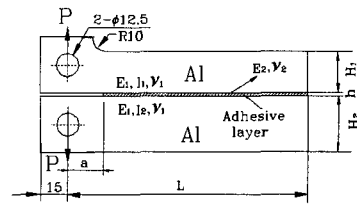
실제의 접착공정에서 생기는 접착계면의 조성·조직 및 형상은 복잡하지만, 역학적으로 취급하기 위해서는 접착이음을 가급적 단순화하여 혼합모드 성분이 변화하는 계면균열의 혼합모드 DCB 접착이음 시험편을 제작하였다. 접착이음에 대한 접착체의 높이, 계면균열의 길이, 접착길이

등을 변화시킨 시험편을 제작하였다.

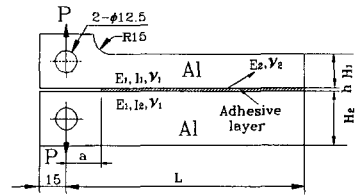
시험편은 계면균열의 혼합모드 성분이 변화하는 DCB 접착이음 시험편을 제작하기 위하여 Fig. 1과 같이 각 접착체의 높이를 변화시킨 4종류의



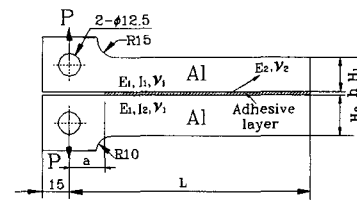
(a) Type 1



(b) Type 2



(c) Type 3



(d) Type 4

Table 1 Mechanical properties of adherend and adhesive

| Specimen materials | Mechanical properties | Young's modulus E (GPa) | Poisson's ratio ν |
|--------------------|-----------------------|----------------------------|--------------------------|
| | | | |
| Adhesive | Cemedine 1500 | 2.06 | 0.4 |

| Size | Height | | Length L | Width B |
|--------|----------------|----------------|-------------|------------|
| | H ₁ | H ₂ | | |
| Type 1 | 29 | 29 | 135 | 15 |
| Type 2 | 20 | 29 | | |
| Type 3 | 15 | 29 | | |
| Type 4 | 15 | 20 | | |

unit : mm

Fig. 1 Shapes and dimensions of adhesively bonded DCB specimens

형태(Type 1~Type 4)로 구분하고, 각 시험편의 형상 및 치수는 Fig. 1과 같다.

2.2 시험편의 제작

시험편에 대한 접착체는 알루미늄 판재를 Fig. 1과 같은 형상과 치수로 밀링 가공하고, 접착면을 #220의 사포(sand paper)로 최종 다듬질 하였다. 가공된 알루미늄 접착체를 아세톤으로 세정하고, 물로 세척한 후 건조시켜 접착제로 접착하였다. 접착체는 주체와 경화제의 혼합형인 세메다인 1500을 사용하였고, 주체와 경화제를 1:1의 중량비로 혼합하였다. 접착제는 기포가 생기지 않도록 충분히 혼합시킨 후 인공 예비균열의 성형을 용이하게 하고, 접착층의 두께를 일정하게 유지시키기 위하여 0.2 mm 두께의 테프론 필름을 삽입하였다. 또한, 접착압력을 일정하게 하기 위하여 접착한 DCB 시험편을 지그에 고정된 상태로 전기로 내에서 60°C로 2시간 동안 경화시켰다.

2.3 실험방법

시험기는 인스트론(Instron)형을 사용하여 핀 하중을 작용시키고, 변위제어 방식으로 하중속도는 0.05 mm/min으로 하였다. 하중-하중점 변위선도는 X-Y 레코더를 사용하여 기록하였고, 하중점의 변위는 클립 게이지를 사용하여 측정하였다. 하중-하중점 변위선도는 하중을 0인 상태에서 서서히 증가시켜 가면서 균열이 진전하면, 하중을 다시 서서히 제거하여 하중이 0인 상태로 되돌린 후 초음파 탐상기를 사용하여 균열길이를 측정하였다. 이러한 방법으로 실험을 반복하여 1개의 시험편을 사용하여 4~6개의 하중-하중점 변위선도를 그리는 방법으로 실험을 계속하였다.

각 시험편마다 실험에서 기록된 하중-하중점 변위선도로부터 각 균열길이에 대한 컴플라이언스(compliance)를 구하였고, 이 컴플라이언스 값을 사용하여 에너지 방출률을 계산하였다.

균열길이의 측정은 이동식 현미경을 사용하여 100배로 확대하여 측정하여 보았지만, 알루미늄과 접착재 사이의 계면균열 선단이 명확히 구별되지 않아 균열길이를 정확히 측정하는 것은 매우 곤란하였다. 따라서, 균열길이의 측정 정밀도를 높이기 위하여 초음파 탐상기를 이용하였다. 사용된 초음파 탐상기는 USK 7D이고, 탐촉자는 수직탐촉자를 이용하였다.

3. 접착이음의 계면균열에 대한 에너지 방출률의 검토

3.1 계면균열의 응력세기계수와 에너지방출률

균질·선형 탄성체의 경우 파괴역학 인자는 일반적으로 응력세기계수가 사용되고, 응력세기계수는 균열선단 근방의 변위, 또는 응력해석 결과를 이용하지만, 접착이음의 접착계면균열에 대하여 정밀도 높은 응력해석을 하는 데는 많은 어려움이 있다. 또한, 균열선단 근방에서 진동 응력특이성이 발생하기 때문에 응력세기계수의 계산이 용이하지 않다. 그러나 에너지 방출률은 균열선단에서 멀리 떨어진 하중점의 변위를 이용하기 때문에 실험에서 직접 측정된 컴플라이언스로부터 계산이 가능하다. 또한, 에너지 방출률은 균열의 진전이 계면파괴 또는 접착층내 파괴로 되어도 전체 에너지 방출률은 변하지 않고, 계면균열에 대한 균열선단 근방의 진동 응력특이성도 상쇄되기 때문에 접착이음의 경우 일반적으로 에너지 방출률 G 가 적용되고 있다.

Fig. 2와 같이 표면력이 자유인 경계조건을 갖는 이중재료 접착계면에 대한 혼합모드 계면균열은 $\theta = 0$ 일 때, 균열선단으로부터의 거리가 r 인 경우 응력분포는 다음 식과 같이 된다.^(13,14)

$$\sigma_y + i\tau_{xy} = \frac{(K_I + iK_{II})}{\sqrt{2\pi r}} \left(\frac{r}{l}\right)^{ie} \quad (1)$$

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

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

여기서 σ_y , τ_{xy} 는 각각 수직 및 전단응력 성분이고, K_I 과 K_{II} 는 각각 계면균열에 대한 복소 응력세기계수로서, 균질체의 균열에 대한 순수모드 I, 모드 II의 응력세기계수 K_I , K_{II} 와는 다르고, 항상 혼합모드 균열로 존재하고, K_I , K_{II} 와 직접적인 대응은 되지 않는다. 또한 ε 은 이중재료 정수(bimetallic constant), μ 는 전단탄성계수, ν 는 푸와송의 비이고, 첨자는 각각의 재료를 의미한다. 식 (1)에서 l 은 기준길이로써 균열의 길이로 사용할 것이 추천된다.⁽⁷⁾

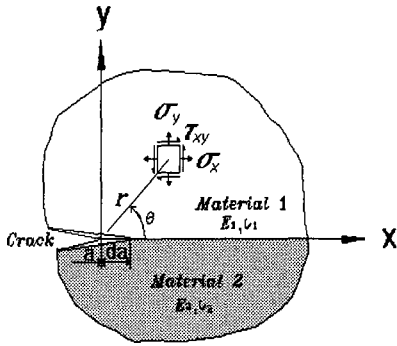


Fig. 2 Crack-tip stress field in adhesively bonded joint

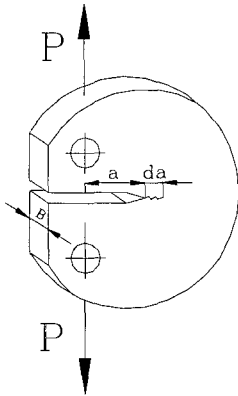


Fig. 3 Cracked plate subjected to tensile stress

또한, 계면균열에 대한 응력세기계수와 에너지 방출률의 관계는 다음 식과 같이 된다.

$$G = \frac{1}{16 \cosh^2(\pi \epsilon)} \left[\frac{k_1 + 1}{\mu_1} + \frac{k_2 + 1}{\mu_2} \right] (K_1^2 + K_2^2) \quad (4)$$

식 (4)에서 에너지 방출률을 구하기 위해서는 수치해석 등에 의한 응력세기계수 K_1 과 K_2 의 계산이 필요하다.

3.2 컴플라이언스와 에너지 방출률

에너지 방출률은 컴플라이언스를 실험에서 직접 측정하여 구할 수 있다. Fig. 3과 같이 두께 B , 균열길이 a 인 탄성체에 정적하중 P 가 작용하

여 균열이 da 만큼 진전하였을 때 하중-하중점 변위선도에서 컴플라이언스 C 와 변위 δ 는 다음 식과 같이 된다.

$$\delta = CP \quad (5)$$

또한, 에너지 방출률 G 와 컴플라이언스 C 는 다음 식으로 표시된다.

$$G = \frac{P^2}{2B} \frac{dC}{da} \quad (6)$$

따라서 혼합모드의 파괴인성은 다음 식과 같이 된다.

$$G_c = G_I + G_{II} = \frac{P_c^2}{2B} \frac{dC}{da} \quad (7)$$

여기서 G_c 는 임계 에너지 방출률로서 파괴인성(fracture toughness)을 의미하고, P_c 는 균열진전에 필요한 임계 하중값을 나타낸다. 식 (7)에서 임계에너지 방출률은 실험에서 컴플라이언스와 임계하중을 측정하여 구할 수 있기 때문에 본 연구에서는 식 (7)을 사용하여 혼합모드 파괴인성치를 구하였다.

4. 실험결과 및 고찰

4.1 DCB 접착 시험편의 임계하중

Fig. 4는 Type 3에 대한 Al/Ced./Al의 DCB 접착 시험편 1개를 사용하여 실험에서 직접 그려낸 대표적인 4개의 하중-하중점 변위선도의 예를 나타낸 것이다. 하중-하중점 변위선도는 하중의 증가에 따라 거의 직선적으로 변화하고, 균열이 성장하기 시작하는 임계하중에 도달하면서 매우 미소한 비선형적인 거동을 나타내었다. 각 형태에 대해서 각각 4~6개의 시험편을 사용하여 이와 같은 방법으로 하중-하중점 변위선도를 실험에서 직접 얻었다.

Table 2는 Fig. 4의 하중-하중점 변위선도에서 실험 측정순서 ①~④에 따라 균열길이와 임계하중의 측정결과를 나타낸 것이다. 하중-하중점

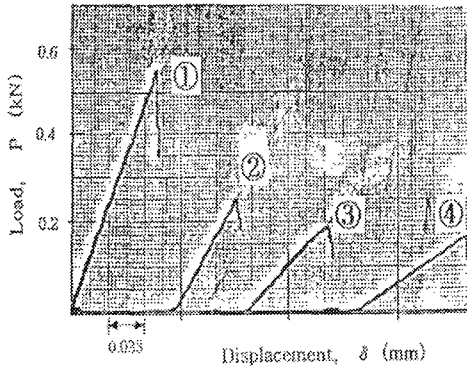


Fig. 4 Load-displacement diagrams drawn with X-Y recorder by experiment (Type 3)

Table 2 Relation of critical load and crack length (Type 3)

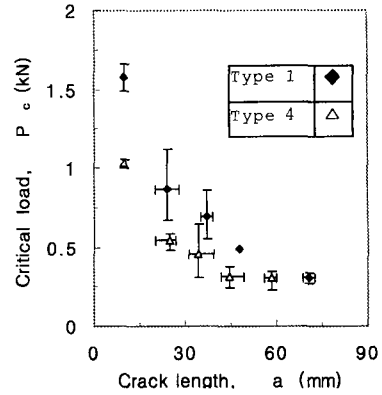
| Measurement No. | a(mm) | P _C (kN) |
|-----------------|-------|---------------------|
| ① | 20.4 | 0.54 |
| ② | 43.6 | 0.23 |
| ③ | 51.3 | 0.18 |
| ④ | 56.1 | 0.16 |

변위선도에서 각 균열길이에 대한 초기 균열발생 하중을 구하여 이것을 임계하중 P_C로 나타내었다.

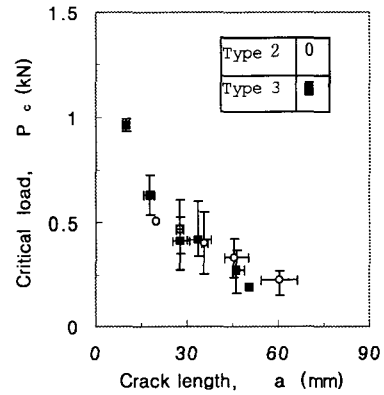
다른 형태의 각 시험편에 대해서도 이와 같은 방법으로 임계하중 P_C를 구하고, 이것을 균열길이에 대해서 나타내면, Fig. 5와 같이 균열의 길이가 길어질수록 임계하중 P_C는 폭선적으로 감소하는 경향을 나타내고 있다.

4.2 DCB 접착이음 시험편의 컴플라이언스

Fig. 6과 Fig. 7은 실험에서 측정된 하중과 하중점의 변위를 사용하여 컴플라이언스를 구한 후 균열길이에 대해서 나타낸 것이다. Fig. 6은 H₁/H₂=1인 Type 1 시험편에 대해서 균열길이와 컴플라이언스의 변화를 나타낸 것이다. 접착층



(a) Type 1 and Type 4



(b) Type 2 and Type 3

Fig. 5 Variation of critical load versus crack length

의 두께 변화에 대하여 경계요소법 및 실험에 의한 컴플라이언스와 균질재에 대한 Ripling의 식을 나타내었다. 접착층이 없는 균질재의 DCB시험편에 대한 컴플라이언스를 나타내는 Ripling의 식은 다음 식과 같이 된다.⁽¹⁵⁾

$$C = \frac{1}{3EI_1} [(a + a_0)^3 + H_1^2 a] + \frac{1}{3EI_2} [(a + a_0)^3 + H_2^2 a] \quad (8)$$

여기서 E는 접착체의 세로탄성계수, I는 단면2차모멘트, H는 접착체의 높이이고, a는 균열길이

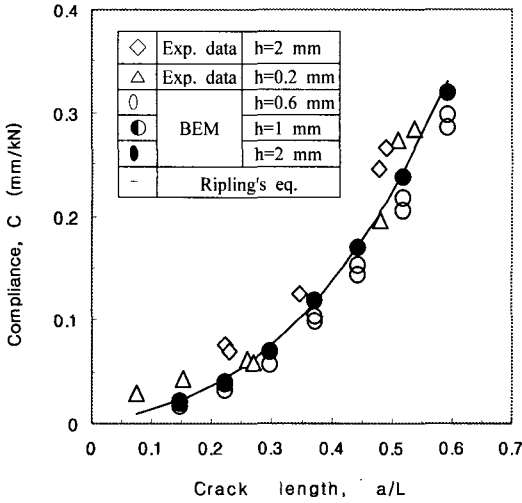


Fig. 6 Relation between compliance and crack length (Type 1)

이다. $H_1^2 a$ 와 $H_2^2 a$ 는 전단에 의한 수정량이고, a_0 는 회전보정량으로 Ripling은 $a_0=0.6H_1$, 또는 $a_0=0.6H_2$ 로 하였다.

Fig. 6에서 균열길이에 대한 컴플라이언스의 변화는 거의 모드 I 성분이 지배적으로 작용하고, 다른 형태의 시험편에 비하여 굽힘 변형이 가장 어려운 것으로 변위가 작기 때문에 균열길이에 대한 컴플라이언스도 가장 작다.

또한, Type 1에 대한 컴플라이언스의 변화를 Ripling의 식, 경계요소해석⁽¹²⁾과 실험결과를 비교하였는데, 이들 결과는 매우 잘 일치하였다. 특히 실험에서 접착층의 두께가 0.2 mm와 2 mm의 컴플라이언스를 비교하였는데, 2 mm의 경우가 약간 크게 나타났지만, 이들의 미분 값 dC/da 는 거의 동일한 값을 나타내었다.

Fig. 7은 Type 2~Type 4의 시험편에 대해서 Fig. 6에 도시한 방법으로 균열길이의 변화에 대한 컴플라이언스를 나타낸 것이다.

Type 2 시험편은 $H_1/H_2=0.69$ 인 경우에 대한 컴플라이언스를 나타낸 것으로 Type 1보다 H_1 이 2/3로 줄었기 때문에 굽힘 변형이 더욱 쉽고, 균열길이에 대한 컴플라이언스도 증가하였다. 또한, 전단응력이 증가하여 임계하중 값도 증가한 것으로 추측된다.

또한, Type 3 시험편은 $H_1/H_2=0.52$ 로서 Type 1보다 H_1 이 거의 반으로 줄었기 때문에 Type 2에

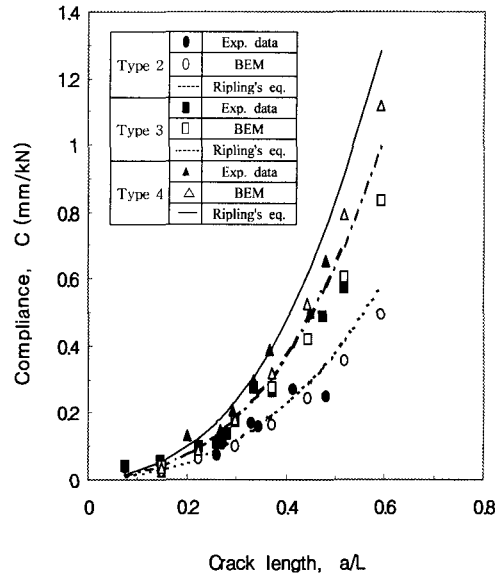


Fig. 7 Relation between compliance and crack length (Type 2~Type 4)

비하여 굽힘 변형이 더욱 쉽고, 균열길이에 대한 컴플라이언스도 증가하였고, 전단응력이 증가하여 임계하중 값도 크게 나타났다.

Type 4 시험편은 $H_1/H_2=0.75$ 인 경우의 컴플라이언스의 변화를 도시한 것으로 다른 형태의 시험편에 비하여 굽힘 변형이 가장 쉽고, 전단응력도 크게 되어 임계하중도 증가하였다.

Fig. 6과 Fig. 7에서 실험으로부터 구한 컴플라이언스는 Ripling의 식 및 경계요소 해석과 비교할 때 매우 잘 일치하였고, 실험에서 구한 값이 약간 큰 값으로 편차를 보이는 것은 얇은 접착층 두께의 영향, 재료물성치와 균열길이의 측정오차, 또는 점탄성 등의 영향에 의한 것으로 고려된다.

4.3 DCB 접착이음 시험편의 에너지 방출률

DCB 접착 시험편에 대한 실험결과인 Fig. 6의 컴플라이언스와 경계요소법(BEM)에 의한 컴플라이언스,⁽¹²⁾ Ripling의 식 (8)을 식 (6)에 대입하여 에너지 방출률을 해석하여 Fig. 8에 비교 도시하였다. 이때 에너지 방출률은 실험 및 경계요소 해석에 의한 컴플라이언스를 균열길이에 대하여 최소자승법을 이용하여 3차 근사식을 구한 후, 이를 미분하여 식(6)에서 구하였다. Ripling의 식에 의한 것과 BEM에 의한 에너지 방출률은 거의

동일한 값을 나타내었고, 실험에 의한 에너지 방출률이 약간의 차이를 보이는 것은 Fig. 6의 컴플라이언스의 실험측정에서 나타나는 영향이다.

4.4 DCB 접착 시험편의 파괴인성

Fig. 6의 컴플라이언스와 실험에서 측정한 균열진전에 필요한 Fig. 5의 임계하중 값을 식 (7)에 대입하여 임계 에너지 방출률을 계산하고, 그 결

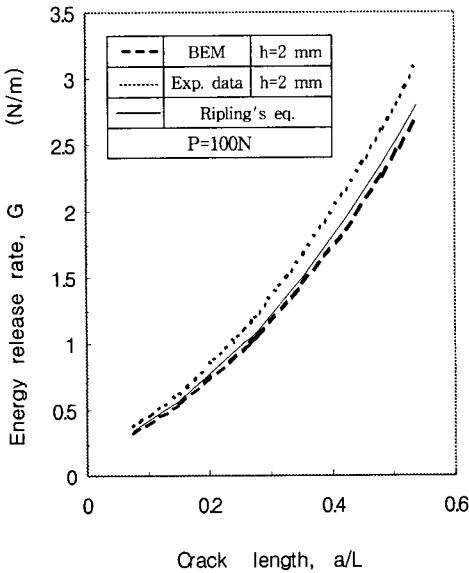


Fig. 8 Relation between energy release and crack length (Type 1)

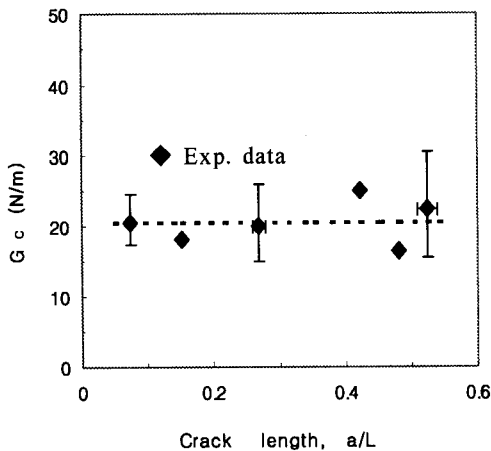


Fig. 9 Critical energy release rate for crack length (Type 1)

과를 각 균열길이에 대해서 Fig. 9에 도시하였다. 그림에서 ◆표시는 실험결과이고, 점선은 이들 값을 평균하여 나타낸 것으로 파괴인성치를 의미한다.

Fig. 10은 이와 같은 방법으로 Fig. 7의 컴플라이언스에 대해서도 임계 에너지 방출률을 구하여 H_1/H_2 에 대하여 도시한 것이다. Fig. 10은 식 (1)에서 접착 계면균열에 대한 혼합모드 성분 K_1 과 K_2 를 경계요소 응력해석 결과를 이용하여 계산⁽¹²⁾한 후, 이것을 식 (4)에 대입하여 구한 임계 에너지 방출률도 함께 도시하였다. 경계요소법의 응력해석을 이용하여 K_1 과 K_2 를 외삽법으로 구하는 방법 및 그 결과의 정밀도에 대해서는 별도의 논문에서 상세히 기술되어 있다.⁽¹²⁾

특히, 응력세기계수 K 는 균열선단의 매우 가까운 응력, 또는 변위를 이용한 것이고 에너지 방출률 G 는 균열선단에서 매우 멀리 떨어진 하중점의 변위를 이용하는 방법이지만, 이 두 방법에 의한 DCB 접착이음의 파괴인성치가 잘 일치하는 것은 매우 흥미롭다. 컴플라이언스의 측정에 의한 G_c 가 응력세기계수의 계산에 의한 G_c 의 값보다 약간 크게 나타났지만, 이 두 방법에 의한 G_c 의 미소한 차이는 얇은 접착층 두께의 영향, 재료정수의 측정오차, 접착제의 점탄성 및 소성효

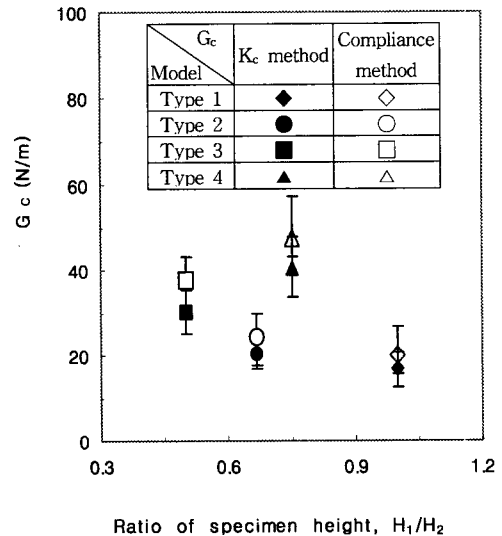


Fig. 10 Critical energy release rate for ratio specimen height

과, 균열길이의 측정오차, 파괴기구(fracture mechanism)의 차이 등이 고려되어진다.

$H_1/H_2=1$ 인 Type 1 시험편은 전단응력에 비해 수직응력이 지배적이므로 계면분리(debonding)에 약하여 가장 낮은 파괴인성치를 나타내었다. Type 2와 Type 3 시험편은 Type 1과 모든 조건이 동일하고, H_1 만이 더욱 감소하기 때문에 수직응력과 전단응력에 의한 모드 I 및 모드 II 성분이 증가하여⁽¹²⁾ 파괴인성치는 크게 된다. Type 4 시험편은 Type 1 시험편에서 H_1 과 H_2 양쪽이 감소하여 수직응력보다는 전단응력이 더욱 증가하여 가장 큰 파괴인성치를 나타낸다. 이러한 현상의 파악은 각 형태의 시험편에 대한 응력세기계수 K_1 과 K_2 를 해석하여 이들 혼합모드 성분의 비를 고려하면 더욱 효과적일 것이다.

이러한 현상을 파악하기 위하여 각 형태의 시험편 Type 1~Type 4에 대하여 별도 논문⁽¹²⁾에서 경계요소법으로 구한 혼합모드 성분의 비 $\tan^{-1}(K_2/K_1)$ 에 의한 Fig. 10의 K_c 방법으로 구한 파괴인성치 G_c 를 Fig. 11에 나타내었다. Fig. 10에 도시한 각 형태의 시험편에 대하여 높이의 비 H_1/H_2 에 의한 파괴인성치 G_c 의 변화가 Fig. 11에서 각 시험편 Type 1~Type 4의 순서로 혼합모드의 성분비 $\tan^{-1}(K_2/K_1)$ 가 증가할 수록 K_1 성분 보다는 K_2 성분이 더욱 증가하므로, 결국 파괴인성치는 모드 II 성분 보다는 모드 I 성분에 의해 지배적이 되므로 파괴인성치 G_c 도 증가한다.

이와 같이 접착구조물을 안전하게 사용하려면

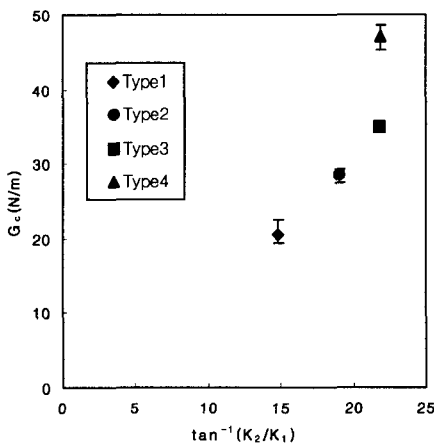


Fig. 11 Critical energy release rate for the ratio of mixed mode component

모드 I 성분은 감소하고, 모드 II 성분이 증가하는 혼합모드 접착이음을 설계하는 것이 중요하고, 이러한 접착이음의 설계방법은 접착구조물을 더욱 안전하게 사용할 수 있을 것이다.

또한, Type 1~Type 4 시험편은 계면균열에 의한 파괴가 지배적이었고, 시험편의 형태에 따라 균열 진전경로와 파면의 모양도 다르고, 상하 접착체에 접착제가 붙어 있는 형상도 달랐다.

이와 같이, 접착이음의 계면균열에 대한 파괴인성의 평가는 에너지 방출률이 유효하고, 균열길이의 변화에 관계없이 일정한 파괴인성치가 얻어진다. 또한, 에너지 방출률은 번거로운 수치해석이 불필요하고, 실험적인 컴플라이언스의 측정에 의해 용이하게 정량적인 파괴역학인자를 계산할 수 있는 잇점도 있다.

접착이음에 대한 접착체와 접착제의 조합방법에 따라 상호 친화성에 의한 결합력이 달라지며, 이러한 결합특성은 접착강도에 영향을 주어 파괴인성치의 변화를 가져오지만, 계면균열에 대한 파괴역학인자로서 에너지 방출률에 의한 정량적인 접착강도의 평가가 가능하다.

따라서 본 연구에서는 컴플라이언스와 균열진전에 필요한 임계하중을 실험에서 직접 측정하여 에너지 방출률을 구하여 접착이음의 파괴인성을 평가하는 방법을 제시하고, 그 유효성을 검토한 결과 접착이음의 파괴인성의 평가는 에너지 방출률을 적용하는 것이 바람직하다고 본다.

그러나, Fig. 10에서 알 수 있듯이 H_1/H_2 의 비에 따라 혼합모드 성분의 비도 변화하므로 파괴인성치 G_c 는 H_1/H_2 의 비에 의해 정량적으로 평가되지 않지만, Fig. 11에 의해 더욱 정량적으로 평가됨을 알 수 있다. 또한, 파괴를 지배하는 인자 및 파괴기구의 규명을 위해서는 혼합모드 성분을 분리하여 파괴인성을 평가하는 방법을 모색하여야 하며, 이들 모드성분의 분리에 의한 파괴기준의 설정도 요구된다.⁽⁸⁾

5. 결론

접착체가 균질재인 알루미늄을 세메다인 1500의 접착제로 접착시켜 혼합모드 성분이 변화하는 4가지 형태의 DCB 접착이음 시험편을 제작하여 계면균열에 대한 파괴인성 시험 및 에너지 방출률에 의한 파괴인성의 평가를 통하여 다음과 같

은 결론을 얻었다.

(1) 4가지 형태의 서로 다른 DCB 접착이음 시험편의 경우에도 실험에서 측정된 컴플라이언스는 균질재에 대한 Ripling의 근사식 및 경계요소법에 의한 결과가 잘 일치하였다.

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

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

(4) H_1/H_2 의 비가 변화하여 모드 I 성분보다는 모드 II 성분이 증가할수록 계면분리(debonding) 현상에 강하고, 파괴인성치도 크게 되지만, H_1/H_2 의 비에 의한 파괴인성치의 정량적인 평가는 곤란하지만, 혼합모드 성분의 비 K_2/K_1 에 의해 정량적인 평가가 가능하다.

(5) 접착이음의 계면균열에 대한 파괴의 지배적 인자 및 파괴기구의 규명을 위해서는 파괴인성치의 혼합모드 성분에 의한 분리평가가 요망된다.

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, 1995, "이종재료의 경사 접착이음에 대한 파괴강도의 예측," 한국공작기계학회지, 제4권, 제4호, pp. 50~60.
- (6) 정남용, 송춘호, 1996, "이종접합재의 계면균열에 대한 진전경로의 예측," 한국자동차공학회 논문집, 제4권, 제3호, pp. 112~121.
- (7) 曹相鳳, 結城良治, 1989, "異材界面き裂の應力擴大係數の境界要素彈性解析," 日本機械學會論文集(A), 第55卷, 510號, pp. 340~347.
- (8) 정남용, 장진모, 1997, "Al/Steel 이종재료의 접착이음에 대한 혼합모드의 파괴기준," 대한기계학회 논문집(A), 제21권, 제8호, pp. 1322~1331.
- (9) Yuuki, R. and Xu, J. Q., 1992, "Stress Based Criterion for an Interface Crack Kinking out of the Interfaced in Dissimilar Materials," *Eng. Fracture Mech.*, Vol. 41, No. 5, pp. 635~644.
- (10) Liechti, K. M. and Chai, Y. S., 1991, "Biaxial Loading Experiments for Determining Interfacial Fracture Toughness," *J. Applied Mech.*, Vol. 41, No. 5, pp. 635~644.
- (11) Rice, J. R., 1988, "Elastic Fracture Mechanics Concepts for Interfacial Cracks," *Trans. ASME, J. Applied Mech.*, Vol. 55, pp. 98~105.
- (12) 정남용, 이명대, 강삼근, 1999, "DCB 접착이음의 계면균열에 대한 파괴인성의 평가," 대한기계학회, 춘계학술대회 논문집(A), pp. 566~572.
- (13) Edorgan, F., 1965, "Stress Distribution in Bonded Dissimilar Materials with Cracks," *J. Applied Mechanics*, Vol. 32, pp. 400~402.
- (14) Rice, J. R. and Sih, G. C. 1965, "Plane Problems of Cracks in Dissimilar Media," *Trans. ASME, J. of Applied Mechanics*, Vol. 32, pp. 418~423.
- (15) Ripling, E. J., Mostovoy, S. and Patrick, R.L., 1964, "Measuring Fracture Toughness of Adhesive Joints," *Materials and Research and Standards*, Vol. 4, pp. 129~134.