

Al/ Epoxy 이종 접합체에 대한 계면강도의 평가방법

정 남 용*

(2002년 1월 14일 접수, 2002년 9월 4일 심사완료)

Evaluation Method of Interface Strength in Bonded Dissimilar Materials of Al/Epoxy

Nam Yong Chung

Key Words: Bonded Dissimilar Materials(이종접합체), Interface Crack(계면균열), Stress Singularity Factor(응력특이성계수), Stress Intensity Factor(응력세기계수), Scarf Joint(경사이음), Boundary Element Method(경계요소법), Fracture Criterion(파괴기준)

Abstract

The application of bonded dissimilar materials to industries as automobiles, aircraft, rolling stocks, electronic devices and engineering structures is increasing gradually because these materials, compared to the homogeneous materials, have many advantages for material properties. In spite of such wide applications of bonded dissimilar materials, the evaluation method of quantitative strength considering the stress singularities for its bonded interface has not been established clearly. In this paper, the stress singularity factors and the stress intensity factors were analyzed by boundary element method(BEM) for the scarf joints of Al/Epoxy with and without a crack, respectively. From static fracture experiments of the bonded scarf joints, a fracture criterion and a evaluation method of interface strength in bonded dissimilar materials were proposed and discussed.

1. 서 론

신소재의 개발 및 재료를 특수한 목적에 사용하기 위하여 세라믹/금속 접합을 비롯하여 수지/금속의 접합, 반도체 패키지, 브레이징, 납땜과 코팅 등에 접합을 응용한 이종재료의 사용이 점차 증가하고 있다. 재료의 성질이 서로 다른 이종재료를 접합하여 사용하는 경우, 이종 접합체(bonded dissimilar materials)는 단일재료에 비하여 진동 및 충격흡수, 완충 등의 효과가 우수하기 때문에 각종 구조물에 그 활용이 확대되고 있는 추세이다.^(1~6)

이종 접합체의 구조물이 고신뢰성의 결합법으로

써 활용되기 위해서는 접합계면에 대한 고정밀도의 응력해석과 접합 계면단(interface edge) 및 계면균열(interface crack)의 응력특이성(stress singularity)을 충분히 고려한 강도평가 방법의 확립이 절실히 요망되고 있다.

균열이 존재하지 않는 이종 접합체에 대해서는 접합 계면단의 응력특이성을 고려한 강도평가 방법의 확립이 필요하고,^(7~9) 계면균열이 존재하는 이종 접합체의 경우는 파괴역학의 적용에 의한 강도평가 방법의 적용이 요구된다.^(1~3,10~12) 그러나, 이종 접합체의 계면균열 강도평가법은 아직 정확히 확립되지 않고 있어 이에 대한 연구의 필요성이 시급히 요구되고 있다.

따라서, 본 연구에서는 알루미늄 합금과 에폭시 수지를 접합시킨 Al/Epoxy 이종 접합체에 대한 계면강도 평가방법을 확립하기 위하여 초기

* 회원, 숭실대학교 기계공학과

E-mail : nychung@hanmail.net

TEL : (02)820-0660 FAX : (02)823-0920

Table 1 Chemical composition of aluminum alloy

Component	Al	Fe	Cu	Si	Ni	Others
wt. %	98.8	0.77	0.17	0.15	0.07	0.04

Table 2 Mechanical properties of aluminum alloy and epoxy resin

Mechanical properties	Young's modulus	Poisson's ratio	Dunders parameter	Bimetallic constant
Materials	E(GPa)	ν		
Aluminum alloy	65.56	0.32	$\alpha = 0.904$	$\epsilon = -0.06$
Epoxy resin	3.17	0.37	$\beta = 0.184$	

균열이 발생하지 않을 때와 사용 환경에 따라 계면균열이 발생하는 접합 경사이음(bonded scarf joint) 시험편을 제작하고, 이들에 대한 계면 응력 특이성의 경계요소법(boundary element method ; BEM)에 의한 수치 응력 해석과 정적 파괴실험을 실시하였다. 또한, 시험편의 형상 및 치수, 부하 조건에 의존하지 않는 응력특이성을 고려한 정량적인 파괴지배인자에 의한 Al/Epoxy 이종 접합체에 대한 파괴기준의 설정 및 강도평가 방법에 관하여 검토하였다.

2. 시험편 및 실험방법

2.1 접합체의 기계적 성질

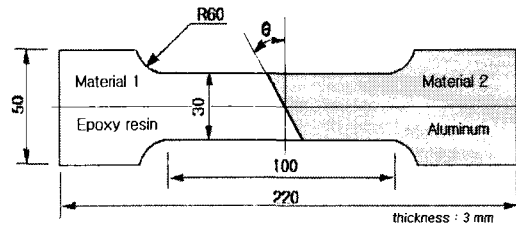
사용된 접합체는 알루미늄 합금과 구조접착제로 널리 사용되고 있는 에폭시 수지를 사용하였다. 접합체로 사용된 알루미늄 합금의 화학적 조성은 Table 1과 같다.

에폭시 수지는 아랄다이트(Araldite)로서 주제와 경화제를 10:3으로 혼합하였다. 주제와 경화제의 혼합시 기포가 발생하지 않도록 세심한 주의로 충분히 혼합하였다. 또한, 시험편의 제작에 사용된 이종 접합체의 기계적 성질은 실험을 통하여 직접 구하였고,⁽⁸⁾ 그 결과는 Table 2에 나타내었다.

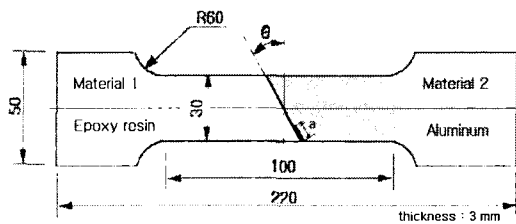
2.2 시험편의 제작

본 실험에서 사용한 이종 접합이음에 대한 시험편의 형상 및 치수는 Fig. 1과 같다.

경사 접합이음 시험편의 경사각은 $\theta=0^\circ, 15^\circ,$



(a) Bonded joint without crack



(b) Bonded joint with crack

Fig. 1 Shape and dimensions of bonded joint specimens

$30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$ 로 하고, 예비균열은 테프론 필름을 삽입하여 시험편을 제작하였다. 시험편의 제작은 우선, 알루미늄 판재를 소정의 치수로 기계가공 한 후, 접합면을 샌드 페이퍼로 충분히 연마하였다. 또한, 접합할 면은 아세톤으로 세정한 후, 물로 씻고 건조시켰다. 기계 가공된 알루미늄 접합체를 형틀에 고정시킨 후, 에폭시 수지로 몰딩하여 이종 접합이음 시험편을 제작하였다. 예비균열의 도입은 두께 0.1 mm의 테프론 필름을 삽입하여 인공균열을 몰딩 성형시켰다. 접합 이음 시험편은 158°C 의 노내에서 24시간 경화 처리 한 후 서서히 노내에서 냉각시켰다. 시험편의 가공 및 경화에 따른 잔류응력을 제거하기 위하여 각 시험편을 어닐링(annealing) 처리하였다.⁽¹³⁾ 또한, 시험편의 몰딩 제작에 있어 경화 과정에 의한 온도차와 재료정수 차이에 의한 접합 잔류응력을 경계요소해석을 하였다. 이들 결과에서도 접합 잔류응력에 의한 영향은 거의 없었다.

2.3 실험방법

시험기는 인스트론형의 만능재료시험기 (Model 4206)를 사용하였고, 로드 셀의 용량 5 kN을 부착

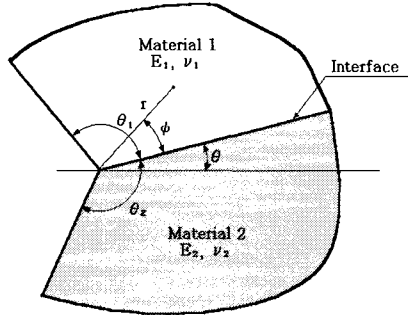


Fig. 2 Model of bonded interface edge in dissimilar materials

하여 정적 인장시험을 실시하였다. 정적 하중속도는 0.2 mm/min의 변위가 유지되도록 서서히 하중을 가하면서 실험을 하였다. 하중-변위 선도는 X-Y 레코더를 사용하여 기록하였다.

3. 계면 응력특이성의 해석

3.1 접합 계면 모델

본 연구에서는 Fig. 2에서와 같은 이종 접합체의 계면모델을 설정하였다. 그림에서 두 재료가 이루는 접합계면의 각도에 따라 각각 맞대기 이음(butt joint), 단순접치기 이음(single-lap joint), 경사 이음(scarf joint) 및 V 노치 모델이 된다. 경사 이음의 경우 $\theta_1 + \theta_2 = \pi$ 이고, 계면의 경사각 θ 가 $0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$ 로 변화하면 균열이 없는 계면모델(interface model)이 되고, 동일 조건에서 $\theta_1 = -\theta_2 = \pi$ 로 되면 계면균열 모델이 된다. 또한, 계면의 경사각 θ 의 변화와 두 이종재료의 상호 조합방법에 따라 응력특이성도 변화한다.

3.2 응력특성 방정식

Fig. 2와 같은 접합 계면모델에 대한 응력특이성을 결정하는 응력특성 방정식은 Bogy에 의해 유도되었다.⁽⁷⁾ 접합 계면단 근방의 응력장 σ_{ij} 는 계면단으로부터의 거리 r에 의해 다음 식과 같이 된다.⁽⁸⁾

$$\sigma_{ij} = \frac{\Gamma_i}{r^\lambda} f_{ij}(\phi) \tag{1}$$

여기서, Γ_i 는 응력특이성계수이고, $f_{ij}(\phi)$ 는 부하조건 및 시험편의 형상에 의존하는 계수이고, 응력특이성지수 λ 는 접착계면단의 형상과 각 재료의 조합특성에 의해 결정되는 상수이다. 이 때 응력특이성지수 λ 는 다음의 특성방정식으로부터 구해진다.⁽⁷⁾

$$A\beta^2 + 2B\alpha\beta + C\alpha^2 + 2D\beta + 2E\alpha + F = 0 \tag{2}$$

여기서, α, β 는 Dunders 파라미터이며, 다음 식과 같이 된다.

$$\alpha = \frac{\mu_1(x_2 + 1) - \mu_2(x_1 + 1)}{\mu_1(x_2 + 1) + \mu_2(x_1 + 1)} \tag{3}$$

$$\beta = \frac{\mu_1(x_2 - 1) - \mu_2(x_1 - 1)}{\mu_1(x_2 + 1) + \mu_2(x_1 + 1)}$$

$$x_i = \begin{cases} 3 - 4\nu_i & (\text{평면변형률 상태}) \\ \frac{3 - \nu_i}{1 + \nu_i} & (\text{평면응력 상태}) \end{cases} \quad (i=1,2) \tag{4}$$

$$\mu_i = \frac{E_i}{2(1 + \nu_i)} \tag{5}$$

또한, 위 식에 포함되는 ν_i, E_i, μ_i 는 각각 재료의 푸아송비(Poisson's ratio), 세로탄성계수, 전단탄성계수이다. 평면 변형률 상태에서의 α 와 β 를 Table 2에 나타내었다. 식 (2)에 대한 각 계수 A~F는 별도의 논문에 상세히 기술되어 있다.⁽⁸⁾ 응력특성 방정식 (2)는 λ 에 관한 비선형 방정식이므로 λ 가 실수로 되는 경우 $0 < \lambda < 1$ 의 범위에서 만족할 수 있는 정도의 해가 얻어질 때까지 반복되는 프로그램을 이용하여 구하였다. 또한 λ 가 복소근이 되는 경우에는 실수부와 허수부로 분리하여 계산하였다.

3.3 이종 접합체의 경사이음 모델

Fig. 2에 근거하여 접합계면의 응력특이성이 광범위하게 변화하는 이종 접합체의 경사이음에 대한 BEM 응력해석은 Fig. 3(a)와 같이 균열이 발생하지 않는 경우와 Fig. 3(b)와 같이 편측에서 계면균열이 발생한 경우의 시험편을 설정하고, 구속조건도 함께 도시하였다.

BEM 응력해석 모델은 2개의 영역으로 분할하

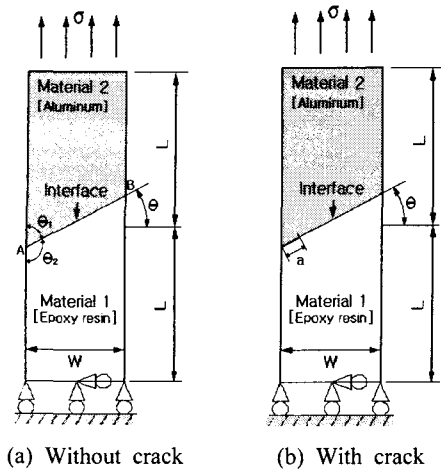


Fig. 3 Analysis models of BEM in bonded scarf joints

였고, 전체 요소수는 284개로 하고, 균열선단의 요소분할에 특히 주의를 기울였다.

Fig. 3에서 접합체는 에폭시 수지와 알루미늄 합금을 사용하였고, 접합체의 기계적 성질은 Table 1에 나타낸 실험 측정 결과를 사용하였다.

균열길이 $a=10$ mm로 하였고, 접합 경사각 θ 는 $0^\circ \sim 60^\circ$ 로 변화시키고, 시험편의 폭 $W=30$ mm, 시험편의 길이 $L=30$ mm 로 하여 경계요소법에 의한 응력해석을 하였다.

3.4 BEM 응력해석

응력해석은 Kelvin의 기본해를 이용한 경계요소법에 의한 2차원 탄성해석을 실시하였다. 접합 계면단에서의 응력분포를 고정밀도로 해석하기 위하여 서브 요소로 분할하였고, 평면변형을 상태에서 해석하였다. Fig. 3에 대한 각 경사 이음의 모델 시험편에 대한 BEM 응력해석을 실시하였다. 이때 경사각 $\theta = 0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$ 로 변화시켰다.

접합 계면단에 대한 응력분포는 매우 급격히 변화하고, 경사각의 변화에 따라 응력집중이 가중, 또는 완화되는 현상을 나타내었다. 이러한 응력분포 현상은 접합 구조물에 나타나는 일반적인 현상으로서 접합 구조물의 강도평가는 접합 계면단에 대한 응력특이성을 충분히 고려한 정량적인 파괴인자(fracture parameter)에 의한 평가가 요망된다.

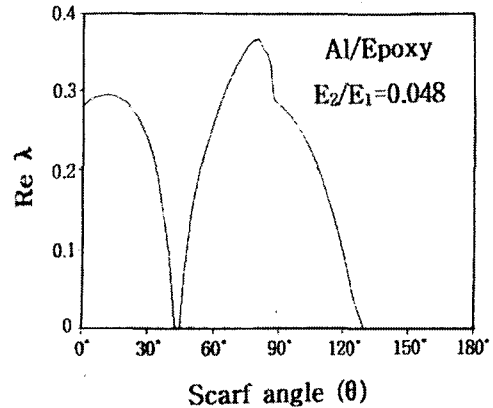


Fig. 4 Effects of scarf angles for stress singularity index at an interface edge

3.5 응력특이성의 소멸조건

Dunders는 $\theta_1 = -\theta_2 = \pi/2$ 인 경우에 대해서 응력특이성이 소멸되는 재료특성의 상호 조합을 다음과 같이 표시하고 있다.⁽¹⁴⁾

$$a(\alpha - 2\beta) \leq 0 \tag{6}$$

식 (6)은 이중 접합체의 상호 재료에 대한 적합성의 판정에 사용되는 식이다. 그러나 접합 경사각을 변화시킨 경우에는 적합성의 좋고 나쁨이 상호 변화하여, 그 반대로 될 가능성도 있다. 이와 같은 경우는 식 (6)을 그대로 적용할 수 없고, 새로운 응력특이성의 소멸조건을 고려하여야 한다. 따라서, θ_1 과 θ_2 의 변화에 따른 식 (2)의 특성방정식으로부터 응력특이성이 소멸되는 적합조건은 다음 식과 같이 된다.⁽⁸⁾

$$\lambda \leq 0 \tag{7}$$

식 (7)로부터 응력특이성의 소멸조건인 실수근의 λ 가 $Re \lambda > 0$ 로 되는 근을 갖지 않도록 하는 조건을 구하였다.

Fig. 4는 접합체로 알루미늄 판재와 에폭시 수지를 사용한 Fig. 1(a)와 같이 균열이 없는 실제 시험편의 경우 Table 2에 나타낸 접합체의 재료정수를 식 (2)에 대입하여 계산된 응력특이성 지수를 경사각의 변화에 따라 도시한 것이다.

경사각을 크게 하여 접합면적을 증가시키더라도 응력특이성지수 λ 는 일정한 변화를 보이지 않고 경사각의 변화에 따라 복잡하게 달라지고, 어떤 경우는 $\lambda < 0$ 이 되어 응력특이성이 소멸된다. 따라서, $\lambda > 0$ 인 구간에서는 응력특이성이 발생하는 것을 쉽게 알 수 있다.

4. 계면강도 평가인자의 해석

4.1 응력특이성계수의 계산

계면 단에서의 거리 r 에 따른 응력특이성계수 는 외삽법을 사용하여 다음 식에서 계산하였다.

$$\begin{aligned} \Gamma_1 &= \sigma_y \cdot \lim_{r \rightarrow 0} (r)^\lambda \\ \Gamma_2 &= \tau_{xy} \cdot \lim_{r \rightarrow 0} (r)^\lambda \\ \Gamma &= \sqrt{\Gamma_1^2 + \Gamma_2^2} \end{aligned} \quad (8)$$

여기서, Γ_1 과 Γ_2 는 각각 BEM 응력해석 결과 인 수직 및 전단응력 성분을 사용한 값이고, 이들의 합을 전응력특이성계수 Γ 로 하였다.

Fig. 5는 경사이음의 경사각 $\theta = 30^\circ$ 일 때, 수직 및 전단응력의 BEM 해석결과와 식 (2)에서 구한응력특이성지수 값을 식 (8)에 대입한 후 계면단에서의 거리 r 로 외삽하여 응력특이성계수 Γ_1 과 Γ_2 를 구하는 방법을 나타낸 것이다.

4.2 계면균열에 대한 응력세기계수의 계산

Fig. 3(b)와 같이 편축 계면균열이 존재하는 경우, Fig. 6에서와 같이 $\theta = 0^\circ$ 일 때 균열선단에 대한 응력장은 다음 식과 같이 표시된다.

$$\sigma_y + i\tau_{xy} = \frac{(K_1 + iK_2)}{\sqrt{2\pi r}} \left(\frac{r}{l}\right)^{\epsilon} \quad (9)$$

$$\epsilon = \frac{1}{2\pi} \ln \left[\frac{\kappa_1 \mu_2 + \mu_1}{\kappa_2 \mu_1 + \mu_2} \right] \quad (10)$$

여기서, σ_y 와 τ_{xy} 는 각각 수직 및 전단응력 성분을 나타내며, r 은 균열선단으로부터의 거리이다.

K_1 , K_2 는 계면균열에 대한 복소 응력세기계수이고, 균열재료 내의 균열에 대한 모드 I, 모드

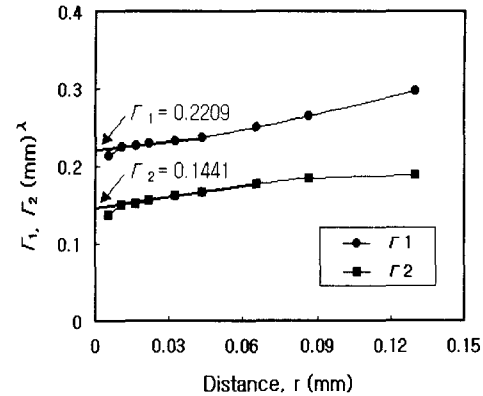


Fig. 5 Extrapolation of stress singularity factors at bonded interface edge

II의 응력세기계수 K_I , K_{II} 와 다르고, 항상 혼합 모드 균열로 되고 K_I , K_{II} 와 직접적인 대응은 되지 않는다. 또한, ϵ 은 이중재료 정수 (bimetallic constant)를 의미하고, 평면 변형률 상태에서의 ϵ 의 값을 Table 2에 나타내었다. l 은 기준길이로서 균열의 길이를 사용 할 것이 추천된다.

계면균열에 대한 파괴역학인자의 해석은 각 모델에 대한 BEM 응력해석 결과를 이용하여 계면상의 응력분포를 구한 후, 다음 식과 같이 외삽에 의하여 응력세기계수를 구하였다.⁽³⁾

$$K_1 = \lim_{r \rightarrow 0} \sqrt{2\pi r} (\sigma_y \cos Q + \tau_{xy} \sin Q) \quad (11)$$

$$K_2 = \lim_{r \rightarrow 0} \sqrt{2\pi r} (\tau_{xy} \cos Q - \sigma_y \sin Q) \quad (12)$$

$$F_1 = K_1 / \sigma \sqrt{\pi a} \quad (13)$$

$$F_2 = K_2 / \sigma \sqrt{\pi a}$$

$$Q = \epsilon \ln(r/a) \quad (13)$$

여기서, F_1 과 F_2 는 무차원화 응력세기계수이다.

Fig. 3(b)의 해석모델과 Table 2의 재료정수를 사용한 Al/Epoxy의 이중 접합체에 대한 계면균열의 응력세기계수를 해석하고,⁽⁹⁾ 그 결과를 Table 3에 나타내었다.

Fig. 6은 Table 3의 무차원화 응력세기계수 F_1 과 F_2 를 경사각도 θ 에 대하여 도시한 것이다. 계면균열이 존재하는 경우 경사각도가 0° 라 하더라도 순수 모드 I으로 되지 않는다. 또한 이 경우

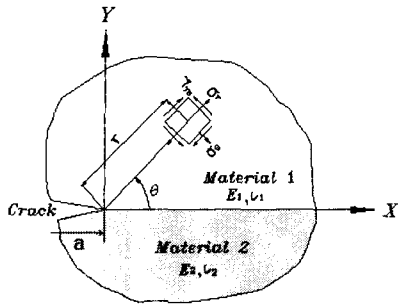


Fig. 6 Crack-tip stress field in dissimilar materials

Table 3 BEM analysis results of nondimensional stress intensity factors for an edge interface crack ($a/W=0.33$)

θ \ F	F_1	F_2	F
0°	1.447	-0.152	1.4946
15°	1.436	0.054	1.4411
30°	1.213	0.260	1.2333
45°	0.856	0.539	1.0204
60°	0.501	0.728	0.8809

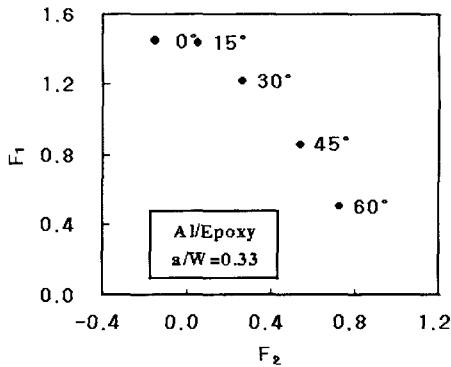


Fig. 7 Relationship between F_1 and F_2 for an edge interface crack

F_2 성분이 (-)로 나타난 것은 압축응력이 작용한 것을 의미한다.

Fig. 7에서 θ 가 증가할수록 F_1 의 크기는 감소하고, F_2 는 점점 증가하는 것을 알 수 있다.

5. 실험결과 및 고찰

5.1 접합강도의 실험결과

5.1.1 균열이 없는 이중 접합체

Fig. 1(a)와 같이 Al/Epoxy 이중 접합체에 균열이 없는 시험편을 제작한 후 경사각을 변화시켜 접합 단면적을 증가시켜 가면서 실시한 정적 파괴응력의 평균값을 Fig. 8에 나타내었다. 그림에서 평균값은 상당히 큰 편차를 나타내는 것을 알 수 있고, 이것은 접합 실험에서 나타나는 일반적인 현상이다. 또한, 본 실험에서 이중 접합체의 파괴거동은 계면파괴, 또는 에폭시 수지 쪽으로의 파괴가 지배적이었으며, 경사각의 변화에 따라 이러한 파괴거동도 차이를 나타내었다.

따라서, 이러한 파괴경로의 변화에 의한 파괴기구의 차이에 따라 Fig. 8에 도시한 평균 응력값의 편차가 더욱 커지는 것을 알 수 있었고, 동일한 조건에서 계면파괴의 경우가 모재 파괴의 경우 보다 낮은 응력 값을 나타내었다.

경사각이 0° 인 경우보다 15° 인 경우가 접합 파괴응력 값은 약간 감소하다가 $\theta = 30^\circ \sim 45^\circ$ 에서는 접합 파괴응력 값이 급격히 증가한다. 그러나 경사각이 60° 로 증가하면 접합 파괴응력의 값은 오히려 급격히 감소하는 경향을 보여준다. 이러한 현상은 균질재의 경우 단면적의 변화에 무관하게 일정한 응력을 나타내는 것과는 달리, 이중 접합체의 경우 θ 의 변화에 따라 단면적이 다르게 되고, 계면단의 응력특이성도 변화하여 접합 파괴응력은 증가, 또는 감소하는 복잡한 양상을 보여준다. 이러한 현상은 Fig. 4의 응력특이성지수 λ 와 Fig. 8의 접합 파괴응력을 동시에 비교하면 쉽게 알 수 있다. 그림에서 경사각 θ 에 대한 응력특이성지수 λ 가 $\theta = 0^\circ, 15^\circ$ 인 경우가 $\theta = 45^\circ$ 인 경우보다 매우 크고, $\theta = 30^\circ$ 인 경우보다 크므로 θ 만에 의한 파괴강도의 예측은 곤란하다고 본다.

실험결과 축방향 최대 파괴하중 P_{max} 은 θ 가 커지면 증가하지만, 축 방향 최대 파괴응력 σ_{max} 은 계면단의 응력특이성지수 λ 에 관계되므로 λ 가 증가하면 σ_{max} 은 감소한다.

또한, 이중 접합체에 대한 파괴경로도 λ 가 클수록 응력특이성이 커지므로 계면파괴의 경향이 짙고, λ 가 작을 경우 접합강도가 크므로 모재 파괴의 경향을 나타내었다. 따라서, 이중 접합체의 계면 강도평가는 응력특이성지수 λ 를 고려한 평가가 요망된다.

Fig. 9는 실험에서 얻어진 Fig. 8의 축방향 최대

파괴응력 σ_{max} 을 Fig. 4의 응력특이성지수 λ 에 대하여 도시한 것이다. Fig. 8에서 복잡하게 변화하는 σ_{max} 의 값들을 λ 에 대하여 나타내면, Fig. 9에서와 같이 λ 의 값이 증가함에 따라 식 (1)에서 알 수 있듯이 감소하는 경향을 잘 나타내고 있다. 그러므로, 그림에서와 같이 λ 의 값만 알 수 있다면, 파괴응력을 직접 구할 수 있으므로 파괴강도의 예측이 가능하다.

5.1.2 균열이 존재하는 이종 접합체

Fig. 1(b)와 같이 Al/Epoxy 이종 접합체에 편측 계면균열이 존재하는 시험편을 제작한 후, 파괴인성시험을 실시한 결과를 Table 4에 나타내었다. 각 시험편에 대한 축방향 균열발생 하중과 파괴 하중은 거의 차이가 없었으므로 파괴응력을 균열 발생 응력으로 간주하였다. 축방향 최대 파괴응력 $\sigma_{max} = P_{max} / (W \cdot t)$ 에서 구하였고, P_{max} 은

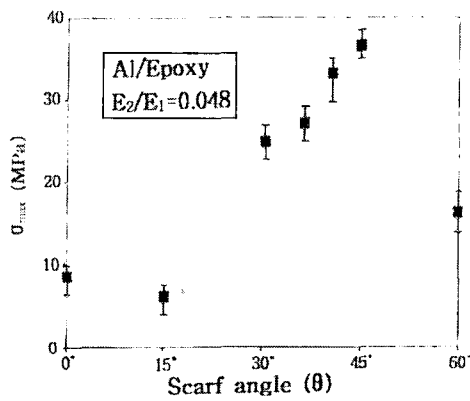


Fig. 8 Fracture strength for scarf angle of bonded scarf joint

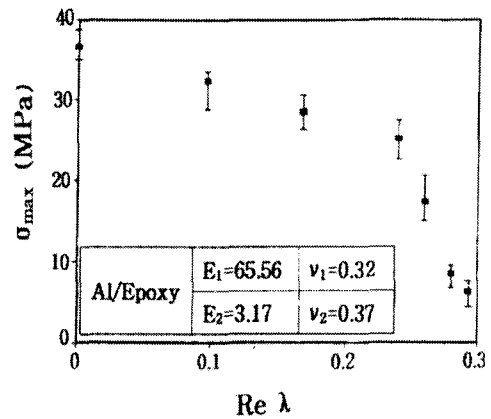


Fig. 9 Fracture strength for stress singularity index of bonded scarf joint

Table 4 Experimental result of static fracture strength for an interface crack

Specimen No.	Scarf angle (θ)	Specimen thickness (t : mm)	Specimen width (W : mm)	Crack length (a : mm)	a/W	Fracture load (P_{max} : N)	Fracture stress (σ_{max} : MPa)
1	0°	3	30.47	10.05	0.33	630	6.99
2	15°	3	30.43	10.16	0.33	597	6.64
3	30°	3	30.47	10.03	0.33	724	7.91
4	45°	3	30.43	10.03	0.33	728	8.09
5	60°	3	30.47	10.02	0.33	747	8.29

Table 5 Experimental result of fracture toughness for an interface crack

Specimen No.	θ	a/W	F ₁	F ₂	F	K _{1c} (MPa√m)	K _{2c} (MPa√m)	K _c (MPa√m)
1	0°	0.33	1.4471	-0.1516	1.4811	1.767	-0.185	1.777
2	15°	0.33	1.4366	0.0538	1.4376	1.665	0.062	1.666
3	30°	0.33	1.2131	0.2604	1.2407	1.703	0.366	1.742
4	45°	0.33	0.8558	0.5397	1.0117	1.209	0.762	1.429
5	60°	0.33	0.5014	0.7286	0.8844	0.726	1.055	1.281

축방향 최대 파괴하중이고, W 는 시험편의 폭, t 는 시험편의 두께를 나타낸다.

Table 5는 실험에서 얻은 축 방향 파괴응력을 이용하여 축 방향 파괴인성치 K_c 를 구하고, 이것을 각 모드 성분에 대한 응력세기계수의 해석결과인 Table 3을 이용하여 각 모드 성분으로 분리한 파괴인성치를 나타내었다. 축 방향 파괴인성치 K_c 는 $K_c = \sigma_{max} \sqrt{\pi a} \cdot F$ 의 식에서 구하였다. 또한 K_c 를 각 모드성분으로 분리하여 K_{1c} 와 K_{2c} 로 각각 표시하였다. 이때 $K_{1c} = \sigma_{max} \sqrt{\pi a} \cdot F_1$ 와 $K_{2c} = \sigma_{max} \sqrt{\pi a} \cdot F_2$ 를 각각 계산하였고, 무차원화 응력세기계수 F 는 $F = \sqrt{F_1^2 + F_2^2}$ 을 의미한다.

5.2 이종 접합체의 파괴기준

5.2.1 균열이 없는 이종 접합체

각 시험편에 대한 Fig. 9의 축방향 최대 파괴 응력 σ_{max} 을 식 (1)에 대입하여 Γ_c 를 구하고, 그 계산 결과를 최소 자승법으로 정리하여 Fig. 10에 도시하였다. 그림에서 알 수 있듯이 이종 접합체의 파괴기준의 설정이 가능하고, 이에 대한 정량적인 접합강도의 평가도 가능하다고 본다. 따라서 이종 접합체의 파괴기준은 작용하중에 의한 Γ 와 Al/Epoxy 이종 접합체에 대한 임계 응력특이성계수 Γ_c 의 값을 비교하여 다음 식에서 결정된다.

$$\Gamma \geq \Gamma_c \tag{14}$$

Al/Epoxy 이종 접합체의 경우 Fig. 10에서 λ 에 대한 Γ 의 값이 Γ_c 값을 나타내는 곡선의 아래쪽에 있으면 파괴되지 않고 안정되며, $\Gamma \geq \Gamma_c$ 이면 파괴를 일으킨다. 이러한 파괴기준을 파악하면 이종 접합체에 대한 정량적인 파괴강도의 평가 및 예측도 가능하다.

5.2.2 균열이 존재하는 이종 접합체

실험에서 구한 K_c 값은 계면의 경사각 θ 의 값에 따라 변화하므로 정량적인 파괴인성 평가 및 파괴기준으로 사용하기 곤란하다. 따라서, Al/Epoxy 이종 접합체에 대한 파괴인성 실험 결

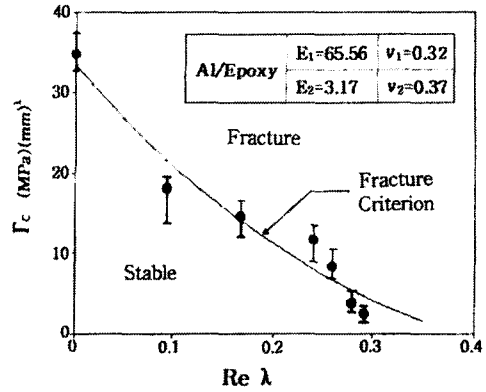


Fig. 10 Fracture criterion for the bonded joints of without a crack(Al/Epoxy)

과인 Table 5와 응력세기계수의 계산결과인 Table 3을 이용하여 혼합모드를 각 모드 성분으로 분리한 파괴인성치 K_{1c} 와 K_{2c} 에 의한 파괴기준을 Fig. 11에 나타내었다.

순수모드 I의 파괴인성치를 K_{1c}^* , 순수모드 II의 파괴인성치를 K_{2c}^* 라 하면, 다음과 같은 타원의 식에 의한 이종 접합체의 파괴기준식을 제안할 수 있다.

$$A \left[\frac{K_{1c}}{K_{1c}^*} \right]^2 + B \left[\frac{K_{2c}}{K_{2c}^*} \right]^2 \geq 1 \tag{15}$$

Fig. 11에서 점선은 실험에서 얻어진 값을 곡선 적합(curve fitting)한 것이다. 이 때 K_{1c}^* , K_{2c}^* 와 Table 5의 K_{1c} , K_{2c} 값을 사용하여 식 (15)에 대입하여 A, B값을 구한 후, 식 (16)과 같은 파괴기준식을 구하였다. 그림에서 실선은 다음 식을 이용해서 구한 파괴기준을 나타낸 선이다.

$$1.039 \left(\frac{K_{1c}}{K_{1c}^*} \right)^2 + 1.532 \left(\frac{K_{2c}}{K_{2c}^*} \right)^2 = 1 \tag{16}$$

계면균열이 존재하는 경우 Al/Epoxy 이종 접합체가 파괴되지 않고 안전하게 사용하려면, Fig. 11에서 파괴기준인 타원 선의 아래에 있도록 사용응력을 제한할 필요가 있고, 작용응력이 증가하여 타원 선 이상이 되면 Al/Epoxy 이종 접합체

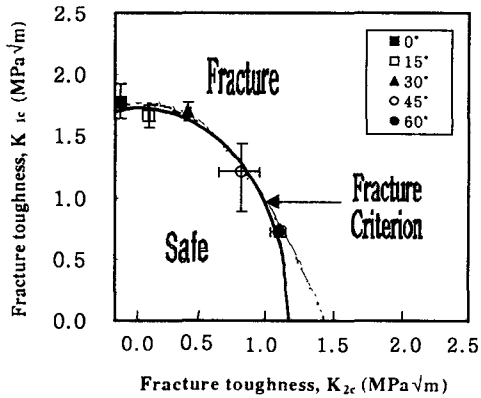


Fig. 11 Fracture criterion for bonded joints of with a crack(Al/Epoxy)

는 파괴되는 것을 판정할 수 있다.

5.3 이종 접합체의 강도평가 방법

Fig. 12는 이종 접합체에 균열이 없는 경우와 균열이 존재하는 경우 접합계면의 강도평가 방법에 대한 일련의 과정을 나타낸 것이다.

5.3.1 균열이 없는 이종 접합체

균열이 없는 이종 접합체의 강도평가 방법을 제시하기 위해서는 접합 계면단의 응력특이성이 접합강도를 크게 좌우하므로 일정하게 조합된 재료들의 응력특이성지수를 광범위하게 변화시킬 수 있고, 수치 응력해석 및 실험이 용이한 간단한 시험편의 고안·제작이 우선적으로 필요하다. 설정된 모델의 접합계면에 대한 정밀도 높은 응력해석을 수행하고, 식 (2)에서 응력특이성지수 λ 를 구한 후 식 (8)에서 응력특이성계수 Γ 를 계산한다. 또한, 이종 접합체에 대한 파괴기준을 설정하기 위해서 모델 시험편을 제작하고, 정적 파괴실험을 통해서 축 방향 최대 파괴응력을 구한다. 수치 응력해석 결과, λ 및 Γ 의 계산결과를 이용하여 전임계 응력특이성계수 Γ_c 를 계산한다. 응력특이성지수 λ 와 전임계 응력특이성계수 Γ_c 는 재료조합이 동일한 이종 접합체에 대해서는 유일한 값을 나타낸다. 따라서 동일한 재료조합을 가지는 이종 접합체에 대한 파괴기준을 설정할 수 있으며, 이러한 파괴기준선을 이용하여 접합 구조물에 대한 정량적인 강도평가 및 안정성을 예측할 수 있을 것이다. 본 연구에서 얻어지

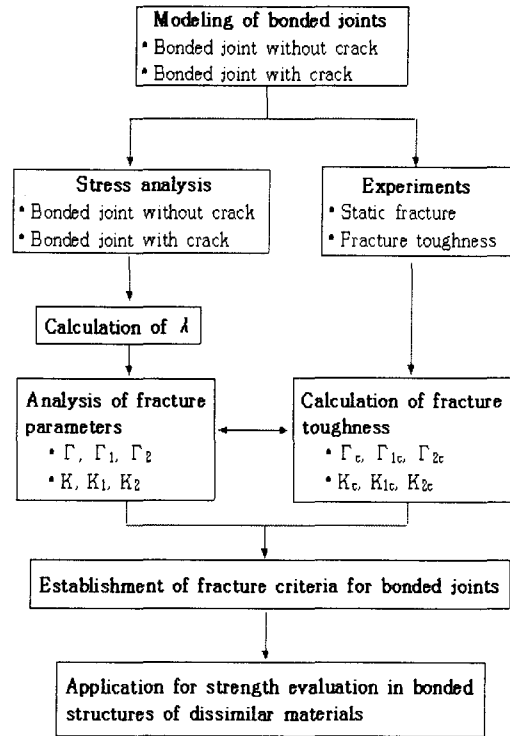


Fig. 12 Flow chart for strength evaluation in bonded structures of dissimilar materials

는 Al/Epoxy 이종 접합체의 강도평가 방법은 임의의 이종재료의 상호조합에 대한 이종접합체의 강도평가에도 확대적용이 가능할 것으로 기대된다.

5.3.2 균열이 존재하는 이종 접합체

이종 접합체에 계면균열이 존재하는 경우 응력세기계수 K_1 과 K_2 등의 광범위한 변화가 가능하고, 수치 응력해석 및 실험이 용이한 간단한 시험편의 고안·제작을 한다. 설정된 모델의 접합계면에 대한 정밀도 높은 응력해석을 하고, 식 (11)~(13)에서 계면균열에 대한 응력세기계수 K_{1c} , K_{2c} 및 K 등을 계산한다. 이종 접합체의 계면균열에 대한 파괴기준을 설정하기 위한 시험편을 제작하고, 파괴인성 실험을 통해서 축방향 최대 파괴응력을 구한다. 또한, 축방향 파괴인성치 K_c 를 구한 후 K_{1c} 와 K_{2c} 로 분리하여 파괴기준을 설정한다. 파괴인성치 K_{1c} 와 K_{2c} 는 재료조합이 동일한 이종 접합체에 대해서는 유일한 값을 갖는다. 따

로서, 동일한 재료조합을 가지는 이종 접합체의 계면균열에 대한 파괴기준의 설정이 가능하고, 이러한 파괴기준을 이용하여 접합 구조물에 대한 정량적인 강도평가 및 안정성의 예측이 가능할 것이다.

6. 결 론

Al/Epoxy 이종 접합체에 대한 계면 강도평가 방법을 확립하기 위하여 경사 접합이음 시험편의 경사각을 변화시켜 가면서 경계요소법에 의한 응력 및 응력특이성을 해석하고, 정적 파괴실험을 실시한 후 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 이종 접합체의 계면단에 대한 응력특이성지수 λ 를 구하고, 응력해석 결과와 λ 를 이용하여 응력특이성계수 Γ 를 구하는 방법을 제시하였다.

(2) 이종 접합체의 상호 조합특성 및 계면 경사각의 변화에 따른 응력특이성지수 λ 에 대한 소멸구간의 파악이 가능하고, 이를 이용한 응력특이성의 완화도 가능하다.

(3) 이종 접합체에 균열이 없는 경우 파괴지배 인자인 임계 응력특이성계수 Γ_c 를 구하고, 이를 이용한 파괴기준의 설정 및 정량적인 계면 접합 강도 평가방법을 제시하였다.

(4) 이종 접합체에 균열이 존재하는 경우 파괴 인성치를 구하고, 이를 이용한 파괴기준의 설정 및 계면 접합강도 평가방법을 제시하였다.

(5) 본 연구에서 얻어진 파괴기준을 이용하여 Al/Epoxy 이종 접합체의 임의 형상에 대한 접합 구조물의 정량적인 접합강도의 평가 및 파괴강도의 예측이 가능할 것으로 기대된다.

참고문헌

- (1) Chung, N. Y. and Jang, J. M., 1997, "Fracture Criterion of Mixed Mode in Adhesively Bonded Joints of Al/Steel Dissimilar Materials," *Transaction of the KSME, A*, Vol. 21, No. 8, pp. 1322~1331.
- (2) 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, 第443號, pp. 1095~1100.
- (3) Yuuki, R. and Xu, J. Q., 1992, "Stress Based Criteria for an Interface Crack Kinking Out of the Interface in Dissimilar Materials," *Eng. Frac. Mech.*, Vol. 41, No. 5, pp. 635~644.
- (4) 服部敏雄, 1990, "應力特異場パラメータを用いた接着継手の強度評價," *日本機械學會論文集(A)*, 第56卷, 第523號, pp. 618~623.
- (5) Chung, N. Y. and Song, C. H., 1996, "Prediction of Propagation Path for the Interface Crack in Bonded Dissimilar Materials," *Transaction of the KSAE*, Vol. 4, No. 3, pp. 112~121.
- (6) Chung, N. Y. and Yi, J. H., 1999, "Evaluation Method of Bonded Strength in Adhesively Bonded Structures of the Aluminum Alloys," *Transaction of the KSMTE*, Vol. 8, No. 1, pp. 35~44.
- (7) Bogy, D. B., 1971, "Two Edge Bonded Elastic Wedges of Different Materials and Wedge Angles under Surface Traction," *J. Appl. Mech.*, Vol. 93, pp. 377~386.
- (8) Chung, N. Y. and Oh, B. T., 1996, "Evaluation Method of Bonded Strength Considering Stress Singularity in Adhesively Bonded Joints," *Transaction of the KSME, A*, Vol. 20, No. 7, pp. 2087~2096.
- (9) Groth, H. L., 1988, "Stress Singularities and Fracture at Interface corners in Bonded Joints," *International J. Adhesion and Adhesives*, Vol. 8, pp. 107~113.
- (10) Liechti, K. M. and Chai, Y. S., 1991, "Biaxial Loading Experiments for Determining Interfacial Fracture Toughness," *Trans. ASME, J. Appl. Mech.*, Vol. 58, pp. 680~687.
- (11) Rice, J. R., 1988, "Elastic Fracture Mechanics Concepts for Interfacial Cracks," *Trans. ASME, J. Appl. Mech.*, Vol. 55, pp. 98~105.
- (12) Munz, D., 1992, "Stress Singularities at the Interface in Bonded Dissimilar Materials under Mechanical and Thermal Loading," *Trans. ASME, J. Appl. Mech.*, Vol. 59, pp. 857~861.
- (13) 辻二郎, 西田正孝, 河田行三, 1965, "光弾性實驗法," *日刊工業*, pp. 107~110.
- (14) Dunders, J., 1969, "Discussion of Edge Bonded Dissimilar Orthogonal Elastic Wedges under Normal and Shear Loading," *J. Appl. Mech.*, Vol. 36, pp. 650~652.