

이종 접합체의 계면균열에 대한 파괴인성의 평가방법

정 남 용*

숭실대학교 기계공학과*

An Evaluation Method of Fracture Toughness on Interface Cracks in Bonded Dissimilar Materials

Namyong Chung*

*Department of Mechanical Engineering, Soongsil University, Seoul 156-743, Korea

(Received 7 February 2003 / Accepted 30 April 2003)

Abstract : In this paper, an evaluation method of fracture toughness on interface cracks has been investigated under various mixed-mode conditions of the bonded scarf joints. Two types of the bonded scarf joints with an interface crack were prepared to analyze the stress intensity factors using boundary element method(BEM) and to perform the fracture toughness test. From the results of fracture toughness experiments and BEM analysis, an evaluation method of fracture toughness on interface cracks in the bonded dissimilar materials has been proposed and discussed.

Key words : Bonded dissimilar materials(이종 접합체), Scarf joint(경사이음), Interface crack(계면균열), Boundary element method(경계요소법), Stress intensity factor(응력세기계수), Fracture toughness(파괴인성), Fracture criterion(파괴기준)

1. 서 론

항공기, 자동차 및 반도체 산업에서 재료를 특수한 목적에 사용하기 위하여 접착을 비롯하여 세라믹/금속 및 수지/금속의 접합, 반도체 패키지, 브레이징, 납땀과 코팅 등에 각종 접합에 의한 사용이 점차 증가하고 있다. 균질재, 또는 성질이 서로 다른 이종재료를 상호 접합하여 사용하는 경우 접합체(bonded materials)는 단일재에 비하여 진동 및 충격 흡수, 완충 등의 효과가 우수하기 때문에 각종 구조물에 그 활용이 확대되고 있는 추세이다.¹⁻³⁾

각종 이종 접합체가 높은 신뢰성을 가진 결합방법으로서 활용되기 위해서는 접합 계면균열에

대한 정밀도 높은 응력해석과 이를 이용한 응력세기계수의 계산에 의한 파괴인성의 평가가 매우 중요하다.⁴⁻¹⁰⁾ 그러나, 접합체의 계면균열에 대한 응력세기계수의 정밀도 높은 계산방법 및 혼합모드의 분리방법이 제시되어 있지 않기 때문에 접합 계면균열에 대한 파괴인성의 평가방법도 아직 명확히 확립되지 않고 있어, 이에 대한 연구의 필요성이 절실히 요구되고 있다.

따라서, 본 연구에서는 혼합모드 성분이 광범위하게 변화하는 이종 접합체의 시험편을 제작하여 접합 계면균열에 대한 파괴인성의 평가방법을 제시하고자 한다. 접합 시험편은 알루미늄 합금과 에폭시계 접착제인 아랄다이트(Araldite adhesive; Epoxy)에 의한 경사 접합체(Al/Epoxy) 시험편과 알루미늄

*To whom correspondence should be addressed.
nychung@hanmail.net

합금과 연강(mild steel; Steel)을 아랄다이트로 경사 접착(Al/Epoxy/Steel)시킨 시험편을 제작한 후, 경계 요소법(BEM)에 의한 수치 응력 해석과 정적 파괴실험을 수행하여 접합체의 계면균열에 대한 파괴인성의 평가방법을 제시하였다.

2. 시험편 및 실험방법

2.1 시험편 재료의 특성

사용된 접합체는 균질 알루미늄 합금과 연강이고, 접착제는 구조접착제로 널리 사용되고 있는 아랄다이트를 사용하였다. 접합체로 사용된 알루미늄 합금 및 연강의 화학적 조성은 각각 Table 1과 Table 2에 나타내었다.

접착제는 아랄다이트로서 주제와 경화제를 10:3으로 혼합하고, 주제와 경화제를 혼합할 때 기포가 생기지 않도록 세심한 주의를 하였다.

또한, 시험편의 제작에 사용된 접합체의 기계적 성질은 실험을 통하여 직접 구하였고, 그 결과는 Table 3에 나타내었다.

2.2 시험편의 제작

본 실험에서 사용한 접합 시험편의 형상 및 치수는 Fig. 1과 같다. 시험편의 제작은 우선, 알루미늄 판재를 소정의 치수로 기계가공 한 후, 접합면을 샌드 페이퍼로 충분히 연마하였다. 또한, 접합할 면은 아세톤으로 세정한 후, 물로 씻고 건조시켰다.

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 Chemical composition of mild steel

Component	Fe	C	Mn	Cu	Ni	Others
wt. %	99.6	0.05	0.22	0.03	0.02	0.08

Table 3 Mechanical properties of adherends and adhesive

Mechanical properties Materials	Young's modulus E(GPa)	Poisson's ratio ν
Mild steel	194.7	0.32
Aluminum alloy	65.6	0.32
Adhesive(Epoxy)	3.2	0.37

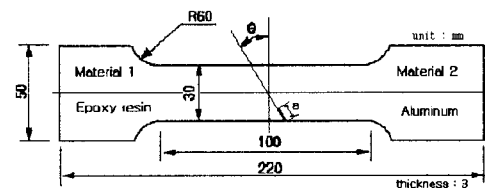
Fig. 1(a)의 시험편은 기계 가공된 알루미늄 접합체를 형틀에 고정시킨 후, 아랄다이트로 몰딩하여 접합이음 시험편을 제작하였고, Fig. 1(b)의 시험편은 접합체 사이에 접착제를 발라 접착하였다. 경사 접합 시험편의 경사각은 $\theta=0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$ 로 하고, 예비균열은 두께 0.1mm의 테플론 필름을 삽입하여 인공균열을 성형시켰다.

접합 시험편은 158℃의 노내에서 24시간 경화처리 한 후 서서히 노내에서 냉각시켰다. 시험편의 가공 및 경화에 따른 잔류응력을 제거하기 위하여 각 시험편을 어닐링(annealing) 처리하였다.¹¹⁾ 또한, 시험편을 제작할 때 경화 과정에 의한 온도차와 재료 정수 차이에 의한 접합 잔류응력은 경계요소법을 이용하여 해석하였다.¹²⁾ 이들 결과에서도 접합 잔류응력에 의한 영향은 거의 나타나지 않았다.

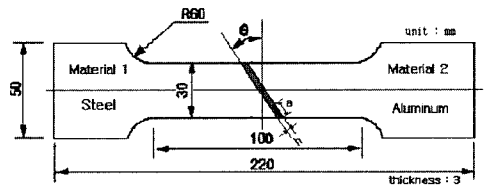
2.3 실험방법

시험기는 인스트론형의 만능재료시험기 (Model 4206)를 사용하였고, 로드 셀은 용량 5 kN을 부착하여 정적 인장시험을 실시하였다. 정적 하중속도는 0.2 mm/min의 변위가 유지되도록 서서히 하중을 가하면서 실험을 하였다. 하중-변위 선도는 X-Y 레코더를 사용하여 기록하였다.

측정한 실험값은 각각 3개의 시험편에 대한 평균값으로 하고, 접착층의 두께 및 균열의 길이는 금속 현미경을 이용하여 확대 측정하였다.



(a) Bonded joint with a crack



(b) Adhesive joint with a crack

Fig. 1 Shapes and dimensions of the bonded joint specimens

3. 계면균열의 응력세기계수

3.1 해석모델

접합체에 대한 BEM 응력해석 모델은 Fig. 2와 같은 편축 계면균열을 갖는 경사이음으로 하였다. Fig. 2(a)는 접착층이 없는 것으로 알루미늄 합금과 에폭시 수지가 몰딩 접합된 계면에 균열이 발생한 것이다. 또한, Fig. 2(b)는 접합체 사이에 접착층이 있고, 한쪽 접착체와 접착재 사이에서 편축 계면균열이 발생한 경사 접착이음에 대한 모델로서 구속조건도 함께 도시하였다.

해석모델에 대한 요소분할은 Fig. 2(a)에서는 2개 영역, 전체 요소수는 284개로 분할하고, Fig. 2(b)는 3개 영역, 전체 요소수는 326개로 분할하였다. 또한, 접합체의 기계적 성질은 Table 3에 나타난 실험 측정 결과를 사용하였다. 균열길이 $a=3 \sim 18\text{mm}$, 접합층의 두께 $h=0.1\text{mm}$, 접합 경사각 $\theta=0^\circ \sim 60^\circ$ 로 변화시키고, 시험편의 폭 $W=30\text{mm}$, 시험편의 길이 $L=30\text{mm}$ 로 하여 경계요소법에 의한 응력해석을 하였다.

3.2 BEM 응력해석

응력해석은 Kelvin의 기본해를 이용한 경계요소법에 의한 2차원 탄성해석을 실시하였다. 계면균열에 대한 정밀도 높은 응력해석을 하기 위하여 균열선단은 서브 요소로 분할하였고, 평면변형률 상

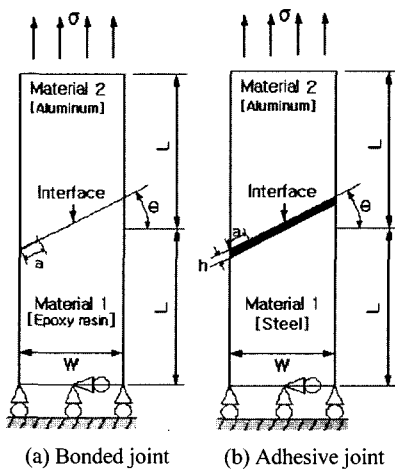


Fig. 2 BEM analysis models on the bonded dissimilar materials

태에서 해석하였다. Fig. 2의 각 경사이음의 모델에 대한 BEM 응력해석을 하였고, 이때 경사각 $\theta = 0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$ 로 변화시켰다.

3.3 계면균열의 응력세기계수 계산

Fig. 2와 같이 경사이음에 편축 계면균열이 존재하는 경우, Fig. 3에서와 같이 $\theta=0^\circ$ 일 때 균열선단에 대한 응력장은 다음 식과 같이 표시된다.

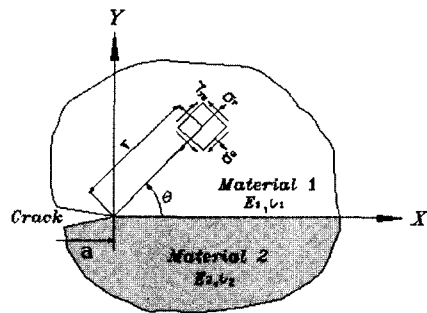
$$\sigma_y + i\tau_{xy} = \frac{(K_I + iK_{II})}{\sqrt{2\pi r}} \left(\frac{r}{l}\right)^{ie} \quad (1)$$

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

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

여기서, σ_y 와 τ_{xy} 는 각각 수직 및 전단응력 성분을 나타내며, r 은 균열선단으로부터의 거리이다. 또한, K_I, K_{II} 는 계면균열에 대한 복소 응력세기계수이다. 균질재료 내의 균열에 대한 모드 I 과 모드 II의 각 응력세기계수 K_I, K_{II} 와 다르고, 항상 혼합모드 균열로 되고 K_I, K_{II} 와 직접적인 대응은 되지 않는다. 또한, ε 은 이종재료 정수(bimetallic constant) μ_j 는 각 재료의 전단 탄성계수, ν_j 는 푸아송의 비이고, l 은 기준길이로서 균열의 길이를 사용 할 것이 추천되고 있다.

계면균열에 대한 응력세기계수는 각 모델의 계면에 대한 BEM 응력해석 결과를 이용하여 다음 식으로 외삽하여 구하였다.



Fi. 3 Interfacial crack-tip stress field in the bonded dissimilar materials

$$K_1 = \lim_{r \rightarrow 0} \sqrt{2\pi r} (\sigma_y \cos Q + \tau_{xy} \sin Q) \quad (4)$$

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

$$F_1 = K_1 / \sigma \sqrt{\pi a} \quad (5)$$

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

$$Q = \epsilon \ln(r/a) \quad (6)$$

여기서, F_1 과 F_2 는 무차원화 응력세기계수이다.

Table 4 BEM analysis results of nondimensional stress intensity factors on the bonded Al/Epoxy ($a/W=0.33$)

θ	F_1	F_2	F
0°	1.4471	-0.1516	1.4811
15°	1.4366	0.0538	1.4376
30°	1.2131	0.2604	1.2407
45°	0.8558	0.5397	1.0117
60°	0.5014	0.7286	0.8844

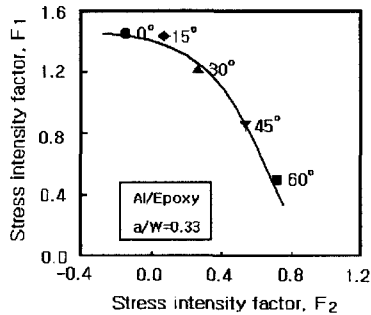


Fig. 4 Relationships between F_1 and F_2 on the bonded Al/Epoxy joints

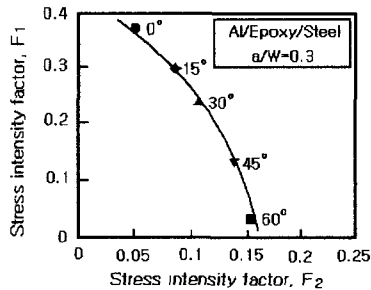


Fig. 5 Relationships between F_1 and F_2 on the adhesively bonded Al/Epoxy/Steel joints

Fig. 2(a)의 해석모델과 Table 3의 재료정수를 사용한 Al/Epoxy의 접합이음에 대한 계면균열의 응력세기계수를 해석하고,⁴⁾ 그 결과를 Table 4에 나타내었다. 또한, Fig. 2(b)의 해석모델과 Table 3의 재료정수를 사용한 Al/Epoxy/Steel 접합이음에 대한 응력세기계수의 해석결과를 Fig. 5에 나타내었다.

Fig. 4는 Table 4의 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 않고, 이 경우 F_2 성분(-)로 나타난 것은 압축응력이 작용한 것을 의미한다. 또한, Fig. 4에서 θ 가 증가할수록 F_1 의 크기는 감소하고, F_2 는 점점 증가하는 것을 알 수 있다.

Fig. 5의 경우도 Fig. 4와 유사한 경향을 나타내고 있지만, Al/Epoxy/Steel 이중 접합이음에 의한 접합체의 상호조합과 접착층이 존재하기 때문에 응력세기계수 F_1 과 F_2 의 값이 경사각도에 따라 Fig. 4와 큰 차이를 보이고 있다.

4. 실험결과 및 고찰

4.1 파괴인성의 실험결과

4.1.1 접착층이 없는 이중 접합체

Fig. 1(a)와 같이 Al/Epoxy 이중 접합체에 편축 계면균열이 존재하는 시험편을 제작한 후, 파괴인성 시험을 실시한 결과를 Table 5에 나타내었다.

각 시험편에 대한 축방향 균열발생 하중과 파괴하중은 거의 차이가 없었으므로 파괴응력을 균열 발생 응력으로 간주하였다. 축방향의 최대 파괴응력 $\sigma_{max} = P_{max} / (W \cdot t)$ 에서 구하였고, P_{max} 은 축방향 최대 파괴하중이고, W 는 시험편의 폭, t 는 시험편의 두께를 나타낸다.

Table 6은 실험에서 얻은 축방향 파괴응력을 이용하여 축방향 파괴인성치 K_{Ic} 를 구하고, 이것을 각 모드 성분에 대한 응력세기계수의 해석결과인 Table 4를 이용하여 각 모드 성분으로 분리한 파괴인성치를 나타내었다. 축방향 파괴인성치 K_{Ic} 는 $K_{Ic} = \sigma_{max} \sqrt{\pi a} \cdot F$ 의 식에서 구하였다. 또한 K_{Ic} 를 각 모드성분으로 분리하여 K_{1c} 와 K_{2c} 로 각각 표시하였다. 이때 $K_{1c} = \sigma_{max} \sqrt{\pi a} \cdot F_1$ 와 $K_{2c} = \sigma_{max} \sqrt{\pi a} \cdot F_2$

Table 5 Experimental fracture strength on the bonded Al/Epoxy joints

Specimen No.	Scarf angle (θ)	Specimen thickness (t : mm)	Specimen width (W : mm)	Crack length (a : mm)	a/W	Fracture load (Pmax : 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 6 Fracture toughness on the bonded Al/Epoxy joints

Specimen No.	θ	a/W	F ₁ /F	F ₂ /F	F	K _{1c} (MPa√m)	K _{2c} (MPa√m)	K _c (MPa√m)
1	0°	0.33	0.977	-0.102	1.4811	1.767	-0.185	1.777
2	15°	0.33	0.999	0.037	1.4376	1.665	0.062	1.666
3	30°	0.33	0.978	0.210	1.2407	1.703	0.366	1.742
4	45°	0.33	0.846	0.533	1.0117	1.209	0.762	1.429
5	60°	0.33	0.567	0.824	0.8844	0.726	1.055	1.281

Table 7 Experimental fracture strength on the adhesively bonded Al/Epoxy/Steel joints

Specimen No.	Scarf angle (θ)	Specimen thickness (t : mm)	Specimen width (W : mm)	Crack length (a : mm)	a/W	Fracture load (Pmax : N)	Fracture stress (σ max : MPa)
1	0°	3	29.7	5.70	0.20	1.13	12.66
2	15°	3	29.5	7.67	0.26	1.24	13.91
3	30°	3	29.1	9.93	0.34	1.37	15.69
4	60°	3	29.6	18.03	0.61	1.30	14.59

Table 8 Fracture toughness on the adhesively bonded Al/Epoxy/Steel joints

Specimen No.	θ	a/W	F ₁ /F	F ₂ /F	F	K _{1c} (MPa√m)	K _{2c} (MPa√m)	K _c (MPa√m)
1	0°	0.20	0.35607	0.03665	0.35825	0.61	0.06	0.62
2	15°	0.26	0.23066	0.09827	0.25018	0.50	0.21	0.54
3	30°	0.34	0.13499	0.13691	0.19227	0.37	0.38	0.53
4	60°	0.61	0.02773	0.15081	0.15433	0.10	0.53	0.54

를 각각 계산하였고, 무차원화 응력세기계수 F 는 $F = \sqrt{F_1^2 + F_2^2}$ 을 의미한다.

4.1.2 접착층이 있는 이중 접합체

Fig. 1(b)와 같이 접착층이 있는 Al/Epoxy/Steel 이중 접합이음에 편축 계면균열이 존재하는 시험편에 대한 파괴인성 시험결과를 Table 7에 나타내었다. 또한, Table 8은 Table 7의 결과를 각 모드성분에 대한 응력세기계수의 BEM 해석결과로 분리한 파괴인성 값을 나타낸 것이다.

4.2 이중 접합체의 파괴기준

4.2.1 접착층이 없는 이중 접합체

실험에서 구한 K_c 값은 계면의 경사각 θ 의 값에

따라 변화하므로 정량적인 파괴인성 평가 및 파괴 기준으로 사용하기 곤란하다. 따라서, Al/Epoxy 이중 접합체에 대한 파괴인성 실험 결과인 Table 5와 응력세기계수의 계산결과인 Table 6을 이용하여 혼합모드를 각 모드 성분으로 분리한 파괴인성값 K_{1c} 와 K_{2c} 에 의한 파괴기준을 Fig. 6에 나타내었다.

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

$$A \left[\frac{K_{1c}}{K_{1c}^*} \right]^2 + B \left[\frac{K_{2c}}{K_{2c}^*} \right]^2 \geq 1 \quad (7)$$

Fig. 6에서 점선은 실험에서 구한 값을 곡선적합 (curve fitting)한 것이다. 이 때 K_{1c}^* , K_{2c}^* 와 Table 6의 K_{1c} , K_{2c} 값을 식 (6)에 대입하여 A,B값을 구한 후, 식 (7)과 같은 파괴기준식을 구하였다. 그림에서 실선은 다음 식을 이용해서 구한 파괴기준을 나타낸 것이다.

$$1.039\left(\frac{K_{1c}}{K_{1c}^*}\right)^2 + 1.532\left(\frac{K_{2c}}{K_{2c}^*}\right)^2 = 1 \quad (8)$$

계면균열이 존재하는 경우 Al/Epoxy 이종 접합체가 파괴되지 않고 안전하게 사용되려면, Fig. 6에서 파괴기준인 타원 선의 안쪽에 있도록 사용 응력을 제한할 필요가 있다. 작용 응력이 증가하여 타원선의 바깥으로 되면 Al/Epoxy 이종 접합체는 파괴되는 것을 판정할 수 있다.

4.2.2 접착층이 있는 이종 접합체

4.2.1절에서 설명한 것과 동일한 방법을 이용하여 접착층이 있는 Al/Epoxy/Steel의 이종 접합체에

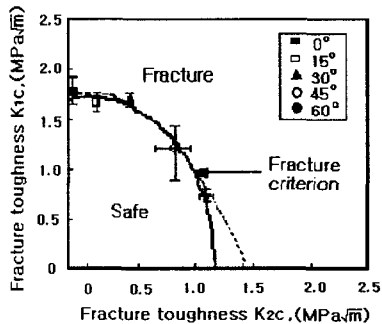


Fig. 6 Fracture criterion on the bonded Al/Epoxy joints

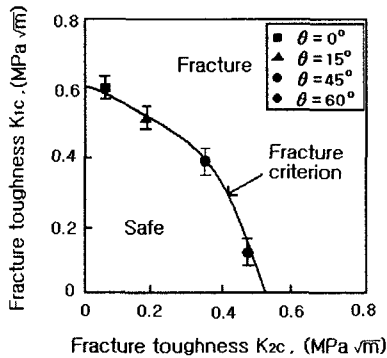


Fig. 7 Fracture criterion on the adhesively bonded Al/Epoxy joints

대한 파괴기준을 구하면, 다음 식으로 설정이 가능하다.

$$\left[\frac{K_{1c}}{K_{1c}^*}\right]^2 + \left[\frac{K_{2c}}{K_{2c}^*}\right]^2 \geq 1 \quad (9)$$

Fig. 7에서 실선은 식 (8)에서 구한 파괴기준선을 나타내며, 타원선 안에서는 안전하지만, 작용응력이 증가하여 타원선 밖에 존재하면 파괴되는 것을 판정할 수 있다.

본 실험에서 얻어진 Al/Epoxy/Steel 접착체의 파괴기준을 균질재의 파괴기준과 비교하면 모드 II 성분의 지배영역은 매우 작고, 모드 I 성분의 지배영역이 크기 때문에 박리현상에 강한 파괴기준을 나타낸다. 이러한 현상은 이종 재료의 상호 조합에 의한 기계적 성질의 차이와 이들의 친화력에 의한 계면특성에 따른 복잡한 응력상태의 변화 및 파괴기구의 차이가 접합 및 접착강도에 영향을 미치기 때문이다. 접합 및 접착강도는 계면파괴, 응집파괴, 또는 모재 자체의 파괴에 따른 파괴기구의 차이에 따라 다르고, 계면파괴의 경우가 가장 낮은 파괴인성을 나타낸다. 그러므로 접합 및 접착강도는 파괴인성이 가장 낮은 계면균열에 대한 파괴인성의 평가방법을 제시하면, 이들 접합체에 대한 파괴기준의 설정, 파괴강도의 예측, 파괴강도의 평가 및 안전설계 방법의 확립에도 기여할 것으로 기대된다.

그러므로 이종 접합체의 계면균열에 대한 파괴인성의 평가방법을 확립하기 위해서는 다음의 순서를 밟는 것이 효과적이다. 우선, 계면균열이 존재하는 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 수치응력해석을 하고, 식 (3)~(5)에서 계면균열에 대한 응력세기계수 K_1 , K_2 및 K 등을 계산한다. 접합체의 계면균열에 대한 파괴인성 실험을 통하여 축방향 최대 파괴응력과 축방향 파괴인성 값 K_c 를 구한 후 K_{1c} 와 K_{2c} 로 분리하여 파괴기준을 설정한다.

따라서, 동일한 재료조합을 이루는 임의 형상의 이종 접합체 계면균열에 대한 파괴기준을 설정할 수 있고, 이러한 파괴기준을 이용하여 이종 접합체에 대한 정량적인 강도평가 및 안정성의 예측이 가능하다.

5. 결론

이종 접합체의 계면균열에 대한 파괴인성의 평가 방법을 제안하기 위하여 Al/Epoxy와 Al/Epoxy/Steel의 이종 접합체에 대한 경사 접합이음 시험편의 경사각을 변화시켜 가면서 경계요소법에 의한 응력 및 응력세기계수를 해석하고, 파괴인성 실험을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 접착층이 없는 이종 접합체 및 접착층이 있는 이종 접합체 계면균열이 존재할 때 접합 경사각과 균열길이의 변화에 따른 정밀도 높은 응력 및 응력세기계수를 해석하고, 이들 결과를 상호 비교·검토하였다.

2) 이종 접합체 시험편에 계면균열이 존재할 때 파괴인성의 실험방법 및 혼합모드 파괴인성의 분리 및 평가방법을 제시하였다.

3) 이종 접합체 시험편의 계면균열에 대한 파괴인성을 이용한 파괴기준의 설정방법 및 접합강도의 평가방법을 제시하였다.

4) 본 연구에서 얻어진 파괴기준을 이용하여 임의 형상에 대한 Al/Epoxy와 Al/Epoxy/Steel 이종 접합체의 접합강도의 평가 및 파괴강도의 예측이 가능할 것으로 기대된다.

후 기

본 연구는 숭실대학교 교내 연구비 지원으로 이루어졌음.

References

- 1) N. Y. Chung, C. H. Song, "Prediction of Propagation Path for the Interface Crack in Bonded Dissimilar Materials," Transactions of KSAE, Vol.4, No.3, pp.112-121, 1996.
- 2) N. Y. Chung, S. I. Park, C. H. Park, "Ultrasonic Detection of Interface Crack in Adhesively Bonded DCB Joints," Int. J. Automotive Technology, KSAE, Vol.3, No.4, pp.157-163, 2002.
- 3) N. Y. Chung, "Evaluation Method of Interface Strength in Bonded Dissimilar Materials of Al/Epoxy," Transaction of KSME, Vol.26, No.11, pp.2277-2286, 2002.
- 4) N. Y. Chung, J. M. Jang, "Fracture Criterion of Mixed Mode in Adhesively Bonded Joints of Al/Steel Dissimilar Materials," Transaction of KSME, Vol.21, No.8, pp.1322-1331, 1997.
- 5) N. Y. Chung, R. Yukki, H. Ishikawa, S. Nakano, "Fracture Criterion of Mixed Mode in Adhesively Bonded Joints," Material, Vol.39, No.443, pp.1095-1100, 1990.
- 6) R. Yuuki, J. Q. Xu, "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, 1992.
- 7) K. M. Liechti, Y. S. Chai, "Biaxial Loading Experiments for Determining Interfacial Fracture Toughness," Trans. ASME, J. Appl. Mech., Vol.58, pp.680-687, 1991.
- 8) S. B. Lee, Y. Y. Earmme, "An Experimental Study on Interfacial Toughness between Chip and Leadframe," pp.560-565, 1999.
- 9) N. Y. Chung, M. D. Lee, S. K. Kang, "Analyses of Stress Intensity Factors and Evaluation of Fracture Toughness in Adhesively Bonded DCB Joints," Transaction of KSME, Vol.24, No.6, pp.1547-1556, 2000.
- 10) N. Y. Chung, C. H. Song, "Establishment of Fracture Criteria for Mixed Mode in Bonded Dissimilar Materials with an Crack Emanating from an Edge Semicircular Hole," Transaction of KSME, Vol.25, No.6, pp.907-915, 2001.
- 11) Z. Tuzi, M. Nisida, K. Kawata, "Experimental Method of Photoelasticity," Nikkankogyo, pp.107-110, 1965.
- 12) N. Y. Chung, B. T. Oh, C. H. Song, "Bonding Residual Stress in Bonded Joints of Dissimilar Materials," Proceeding of the KSME Spring Annual, pp.192-197, 1996.