

이종 접합체에 대한 혼합모드 파괴기준의 설정

정남용(송실대학교 기계공학과), 송춘호*(송실대학교 대학원)

Establishment of Fracture Criterion for Mixed Mode in Bonded Dissimilar Materials

N. Y. Chung(Soongsil Univ.) C. H. Song(Soongsil Grad. Univ.)

Abstract

Application of bonded dissimilar materials in various industries are increasing. When these materials are used in structures, it needs to investigate strength evaluation applying fracture mechanics. Al/Epoxy bonded dissimilar materials with an interface crack and an interface crack emanating from an edge semicircular hole were prepared for the static tests so that experiment of fracture toughness were carried out. Stress intensity factors of interface cracks in bonded dissimilar materials were computed with boundary element method(BEM) and the fracture criterion of mixed mode crack were analyzed. From the results, the fracture criterion and the method of strength evaluation by the fracture toughness in Al/ Epoxy bonded dissimilar materials were proposed.

Keywords : Bonded Dissimilar Materials(이종접합체), Interface Crack(계면균열), Edge Semicircular Hole(편측 반원공) Mixed Mode(혼합모드), Stress Intensity Factor(응력세기계수), Boundary Element Method(경계요소법), Fracture Toughness(파괴인성), Fracture Criterion(파괴기준)

1. 서론

각종 산업분야에서 이종 접합체의 활용이 증가하고 있으며, 이러한 이종 접합체를 구조물에 사용하는 경우 접합계면의 응력집중현상으로 계면 균열이 발생하기 쉽다. 또한 볼트와 너트, 리벳등으로 체결하는 경우 원공주위의 국부적 응력집중현상으로 인하여 원공에서 접합계면균열이 발생·성장하여 결국은 구조물의 파괴를 초래한다.

현재 이러한 구조물에 대한 강도평가 방법으로는 공칭응력이 사용되고 있고, 이에 대한 접합강도의 평가방법에 대한 연구가 진행되고 있지만, 정량적인 강도평가방법의 확립에는 이르지 못하고 있는 실정이다^(1~5).

또한, 균열을 전제로한 접합이음의 파괴역학적 강도 평가방법의 확립이 요구되고 있지만, 접합이음의 균열은 일반적으로 혼합모드로 되기 때문에 이에 대한 파괴역학 인자의 해석 및 평가에

많은 문제점이 남아 있어 이종재료의 접합이음에 대한 혼합모드 파괴기준에 대한 연구결과는 거의 보고되고 있지 않다^(3,4).

본 연구에서는 이종 접합체에 대한 혼합모드 파괴기준을 설정하기 위하여 Al/Epoxy 이종 접합체의 편측 반원공에서 파생하는 경사 계면균열이 존재하는 경우와 반원공이 없는 시험편을 제작하여 파괴인성 시험을 실시하고, 경계요소법(boundary element method : BEM)에 의한 파괴역학 인자의 계산결과를 이용하여 실험에서 얻어진 혼합모드 파괴인성치의 분리방법과 Al/Epoxy 이종 접합체에 대한 파괴기준의 설정 및 강도평가 방법에 관하여 검토하였다.

2. 이종 접합체의 계면균열에 대한 응력세기계수

2.1 계면균열의 응력해석

Fig. 1과 같이 표면력이 자유인 경계조건을 갖는

이종 접합체에 대한 균열선단의 응력은 다음으로 표시된다⁽⁶⁾.

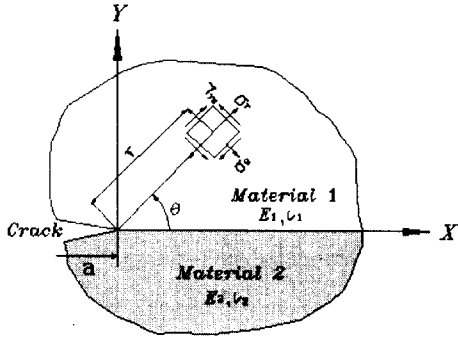


Fig. 1 Crack-tip stress field in the bonded dissimilar materials

$$\sigma_{ij} = \frac{1}{\sqrt{r}} A_{ij}(\theta) \sin(\epsilon \ln \frac{r}{l}) + \frac{1}{\sqrt{r}} B_{ij}(\theta) \cos(\epsilon \ln \frac{r}{l}) \quad (1)$$

$$\epsilon = \frac{1}{2} \pi \ln \left[\frac{x_1/\mu_1 + 1/\mu_2}{x_2/\mu_2 + 1/\mu_1} \right] \quad (2)$$

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

여기서, ϵ 은 이종재료 정수, μ 는 각 재료의 전단탄성계수, ν 는 푸아송의 비이고, 첨자는 각각의 재료를 의미한다. 또한 A_{ij} , B_{ij} 는 θ 에 의해 결정되는 계수이고, r 은 균열선단으로 부터의 거리, l 을 기준길이로 나타낸다.

2.2. 해석 모델

이종 접합체 편축 계면균열과 편축 반원공에서 파생된 계면균열에 대한 응력세기계수의 BEM 해석에 사용된 모델 및 구속조건은 Fig. 2와 같다. BEM 수치해석시 해석모델은 2개의 영역으로 분할하였고, 전체요소수는 284개로 하였다. 이때 균열 및 반원공의 크기에 따라 원공주위와 균열선단의 요소분할에 특히 주의를 기울였다. 또한, Kelvin의 기본해를 사용하였고, 2차원 탄성 해석을 실시하고, 균열선단에는 특이요소를 사용하여 정밀도를 높게 하였다. 재료의 물성치는 실험에서 직접 측정하였고, 이들의 측정결과는 Table 1과 같다.

Fig. 2 에서 재료는 에폭시 수지와 알루미늄을

사용하였다. Fig. 2(a)는 균열길이 $a=10\text{mm}$ 로 하였고, Fig. 2(b)는 반원공의 반경 $R=5\text{mm}$, 초기 균열길이 $a=3\text{mm}$, 경사각 θ 를 $0^\circ \sim 60^\circ$ 로 변화시키고, 시험편의 폭 $W=30\text{mm}$, 시험편의 길이 $L=30\text{mm}$ 로 하여 경계요소법에 의한 응력해석을 실시한 후, 응력세기계수를 계산하였다.

Table 1 Mechanical properties of materials

Mechanical properties Materials	Young's modulus E(GPa)	Poisson's ratio ν
Epoxy resin	3.165	0.37
Aluminum	65.56	0.3

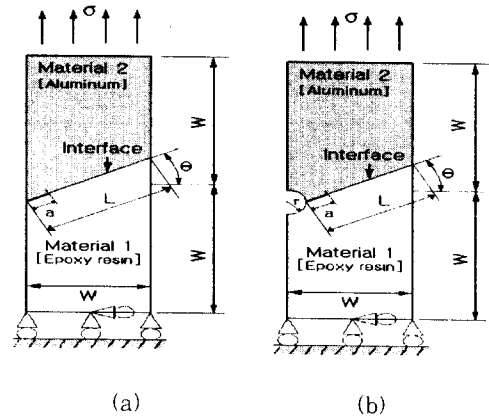


Fig. 2 BEM analysis model of mixed mode interfacial crack

2.2. 응력세기계수의 결정

이종 접합체의 편축 계면균열과 편축 반원공에서 파생한 계면균열에 대한 파괴역학인자의 해석은 각각에 대한 BEM 응력해석 결과를 이용하여 계면상의 응력분포를 구한 후, 다음 식과 같이 외삽에 의하여 응력세기계수를 구하였다^(3,6).

$$K_1 = \lim_{r \rightarrow 0} \sqrt{2\pi r} (\sigma_y \cos Q + \tau_{xy} \sin Q) \cdot F_1 \quad (4)$$

$$K_2 = \lim_{r \rightarrow 0} \sqrt{2\pi r} (\tau_{xy} \cos Q - \sigma_y \sin Q) \cdot F_2 \quad (5)$$

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

여기서, K_1 , K_2 는 각각 계면균열의 응력세기계수에 대한 모드 I 및 모드 II 성분이고, $l=a$ 로 하였고, F 는 무차원화 응력세기계수이며, 다음의 식으로 정의된다.

$$F_j = K_j / \sigma \sqrt{\pi a} \quad (j=1,2) \quad (7)$$

2.3 응력세기계수의 해석결과

Fig. 2에 도시한 해석모델과 Table 1의 재료물성치를 사용한 Al/Epoxy의 이중접합체에 대한 응력세기계수를 해석하고, 그 결과를 Table 2와 Table 3에 나타내었다.

Table 2 BEM analysis results of nondimensional stress intensity factors for an edge interface crack

θ \ F	a/W	F ₁	F ₂	F
0°	0.33	1.46	-0.320	1.4946
15°	0.33	1.44	0.056	1.4411
30°	0.33	1.233	0.265	1.2333
45°	0.33	0.862	0.546	1.0204
60°	0.33	0.499	0.732	0.8809

Table 3 BEM analysis results of nondimensional stress intensity factors for an interface crack emanating from an edge semicircular hole

θ \ F	a/W	F ₁	F ₂	F
0°	0.27	1.142	0.065	1.144
15°	0.27	1.334	0.258	1.359
30°	0.27	1.123	0.522	1.239
45°	0.27	0.756	0.755	1.068
60°	0.27	0.404	0.943	1.026

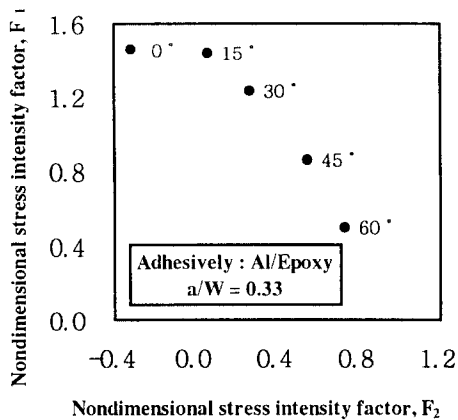


Fig. 3 Relation of nondimensional stress intensity factors for an edge interface crack

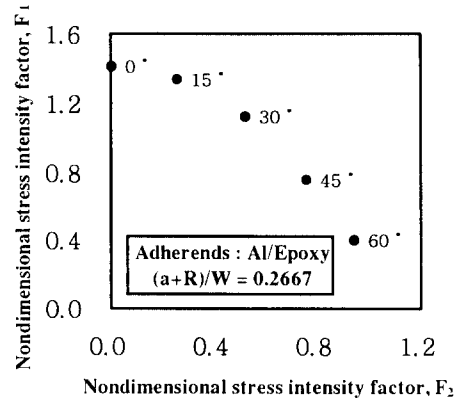


Fig. 4 Relation of nondimensional stress intensity factors for an interface crack emanating from an edge semicircular hole

Fig. 3은 Table 2, Fig. 4는 Table 3의 무차원화 응력세기계수 F_1 과 F_2 를 경사각도 θ 에 대하여 도시한 것으로, 균열만 존재하는 경우 경사각도 0°의 경우 F_2 성분이 (-)로 나타나는것은 (+)보다 극히 적은 값으로 F_2 가 거의 작용하지 않음을 나타내는 것이며, θ 가 증가할수록 F_1 의 크기는 감소하고 F_2 는 증가하는 것을 알 수 있다.

3. 실험

3.1 시험편의 형상 및 치수

이중 접합체의 편축 계면균열과 편축 반원공에서 파생한 개면균열에 대한 파괴인성시험을 하기 위하여 Fig. 5와 같은 형상과 치수로 시험편을 제작하였다. 시험편의 재질은 알루미늄과 에폭시

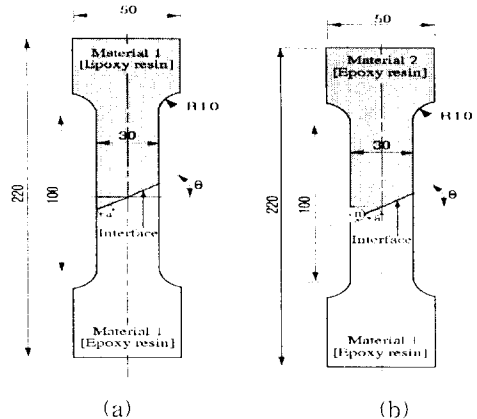


Fig. 5 Geometry and onfiguration of Al/Epoxy bonded joint specimens

수지를 사용하였으며, Fig. 5(a)는 예비균열길이 $a=10\text{mm}$, Fig. 5(b)는 반원공의 반경 $R=5\text{mm}$, 예비균열길이 $a=3\text{mm}$ 로 시험편을 제작하였다.

3.2 시험편의 제작방법

Fig. 5에 나타난 시험편은 알루미늄과 에폭시 수지의 몰딩접합에 의하여 제작하였다. 두께 3mm 의 알루미늄 판재를 경사각도 0° , 15° , 30° , 45° , 60° 로 밀링가공한 시험편과 반경 5mm 의 구멍을 가공한 시험편을 각각 제작하고, 접합부위를 샌드페이퍼 #220으로 연마한 후 아세톤으로 세척하였다. 에폭시 수지는 노내의 온도가 158°C 의 상태에서 아랄다이트(Araldite : Ciba사 제품)의 주제를 용해하고, 주제와 경화제를 10 : 3의 중량비로 혼합하였다.

시험편의 몰딩접합은 전기로 내에서 유리판 위에 셀로판지를 덮고 실리콘으로 둘레를 실링한 후, 준비된 알루미늄 시험편을 올려 놓고 에폭시 수지로 몰딩 접합시켰다. 이때, 158°C 의 온도로 24시간 경화시키고, 12시간 서냉시킨 후 시험편을 완성하였다.

이때, 예비균열의 도입은 두께 0.1mm 의 테프론 필름을 삽입하여 인공균열을 몰딩 성형시키고, 편측 반원공 부분은 테프론 봉을 사용하여 몰딩 성형시키는 방법으로 시험편을 제작하였다.

3.3 실험방법

시험기는 인스트론(Instron)식의 만능재료시험기(Model 4206)를 사용하였다. 시험기에 로드 셀의 용량 5kN 을 부착하여 정적인장시험을 실시하였다. 정적하중속도는 변위가 $0.2\text{mm}/\text{min}$ 로 유지되도록 서서히 하중을 가하여 시험편이 파단될 때까지 실험을 계속하였다.

4. 실험결과 및 고찰

4.1 이중 접합체의 파괴인성

Fig. 2(a)와 같이 Al/Epoxy 이중 접합체에 편측 계면균열이 존재하는 경우에 대한 시험편을 제작한 후, 파괴인성 실험을 실시한 결과를 Table 4에 나타내었다. 실험에서 균열은 에폭시 쪽으로 진전하였으며, 이것은 알루미늄 보다는 에폭시의 강도가 작기 때문이고, 에폭시가 순간적으로 파단되는 취성파괴의 특성을 나타내었다.

각 시험편에 대한 축방향 균열발생하중과 파괴하중은 거의 차이가 없었으므로 균열발생하중은 파괴응력으로 하며, 파괴응력 $\sigma_f = P_f / (W \cdot t)$ 에서 구하였고, P_f 는 파괴하중이고, W 는 시험편의 폭, t 는 시험편의 두께이다.

Table 5는 실험에서 얻은 축방향 파괴응력을 이용하여 축방향 파괴인성치를 구하고, 이것을 각

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_f : N)	Fracture stress (σ_f : 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_{Ic} ($\text{MPa}\sqrt{m}$)	K_{IIc} ($\text{MPa}\sqrt{m}$)	K_{Ic} ($\text{MPa}\sqrt{m}$)
1	0°	0.33	1.4471	-0.3516	1.4811	1.799	-0.101	1.842
2	15°	0.33	1.4366	0.0538	1.4376	1.691	0.063	1.692
3	30°	0.33	1.2131	0.2604	1.2407	1.704	0.366	1.743
4	45°	0.33	0.8558	0.5397	1.0117	1.228	0.775	1.452
5	60°	0.33	0.5014	0.7286	0.8844	1.738	1.073	1.303

모드성분에 대한 응력세기계수의 BEM 해석결과를 이용하여 분리한 파괴인성치를 나타낸 것이다.

축방향 파괴인성치 $K_c = \sigma_f \sqrt{\pi a} F$ 의 식에서 구하였고, K_c 를 각 모드성분으로 분리하여 K_{1c} 와 K_{2c} 로 표시하였다.

이때, $K_{1c} = \sigma_f \sqrt{\pi a} F_1$ 의 식과 $K_{2c} = \sigma_f \sqrt{\pi a} F_2$ 의 식에서 각각 계산하였고, 무차원화 응력세기계수 $F = \sqrt{F_1^2 + F_2^2}$ 로 표시된다.

Fig. 2(b)의 Al/Epoxy 이중 접합체의 편축 반원공에서 발생하는 계면균열에 대한 파괴인성실험결과를 Table 6에 나타내었고, Table 7에는 시험에서 구한 파괴인성치를 응력세기계수의 BEM 해석결과로 분리하여 나타내었다.

4.2 이중 접합체의 혼합모드 파괴기준

실험에서 구한 K_c 값으로는 정량적인 파괴인성 평가와 파괴기준의 설정이 곤란하기 때문에⁽³⁾, Fig. 6, Fig. 7과 같이 Al/Epoxy 이중 접합체에 대하여 파괴인성 실험 결과와 BEM 수치해석 결과를 이용하여 각 모드성분으로 분리한 K_{1c} 와 K_{2c} 로서 파괴기준을 나타내었다.

순수모드 I의 파괴인성치를 K_{1c}^* , 순수모드 II의 파괴인성치를 K_{2c}^* 라 하면, 다음과 같은 타원의 식에 의한 파괴기준식이 제안된다.

$$\left[\frac{K_{1c}}{K_{1c}^*} \right]^2 + \left[\frac{K_{2c}}{K_{2c}^*} \right]^2 \geq 1 \quad (8)$$

따라서 Al/Epoxy 이중 접합체를 안전하게 사용하려면 계면균열이 존재하는 경우와 편축 반원공에서 발생하는 계면균열의 경우 각각 Fig. 6과 Fig. 7에서 타원의 아래에 있도록 사용응력을 제한할 필요가 있고, 작용응력이 증가하여 파괴기준선인 타원선 이상이 되면 Al/Epoxy 이중 접합

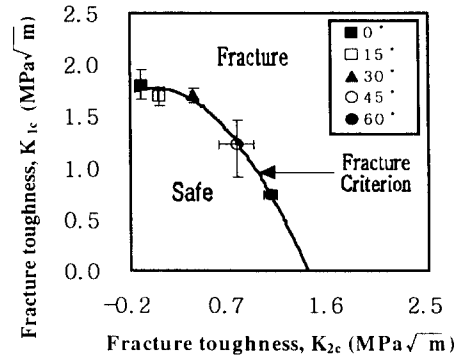


Fig. 6 Fracture criterion of mixed mode in Al/Epoxy bonded dissimilar materials with an interface crack

Table 6 Experimental result of static fracture strength for an interface crack emanating from an edge semicircular hole

Specimen No.	Scarf angle (θ)	Specimen thickness (t : mm)	Specimen width (W : mm)	Hole radius (R : mm)	Crack length (a : mm)	(a+R)/W	Fracture load (P _f : N)	Fracture stress (σ_f : MPa)
1	0°	3	30.2	5	3.00	0.27	343	4.573
2	15°	3	30.2	5	3.03	0.27	350	4.671
3	30°	3	30.6	5	2.90	0.26	341	4.542
4	45°	3	30.4	5	2.98	0.26	549	7.315
5	60°	3	30.1	5	3.08	0.27	607	8.089

Table 7 Experimental result of fracture toughness for an interface crack emanating from an edge semicircular hole

Specimen No.	θ	(a+R)/W	F ₁	F ₂	F	K_{1c} (MPa√m)	K_{2c} (MPa√m)	K_c (MPa√m)
1	0°	0.27	1.4046	0.0057	1.4046	1.021	0.004	1.021
2	15°	0.27	1.3254	0.2447	1.3478	0.983	0.182	1.001
3	30°	0.26	1.1177	0.5133	1.2457	0.800	0.400	0.968
4	45°	0.26	0.7578	0.7465	1.1470	0.877	0.865	1.327
5	60°	0.27	0.3984	0.9341	1.0155	0.514	1.204	1.301

Table 8 Experimental results of fracture toughness for homogeneous materials

Specimen No.	θ	a/W	F ₁	F ₂	F	K _{1c} (MPa√m)	K _{2c} (MPa√m)	K _c (MPa√m)
Al	0°	0.33	1.354	0	1.354	15.077	0	15.077
	45°	0.33	0.739	0.739	1.046	9.871	9.871	13.947
Epoxy	0°	0.33	1.344	0	1.344	2.912	0	2.912
	45°	0.33	0.765	0.765	1.082	1.967	1.967	2.805

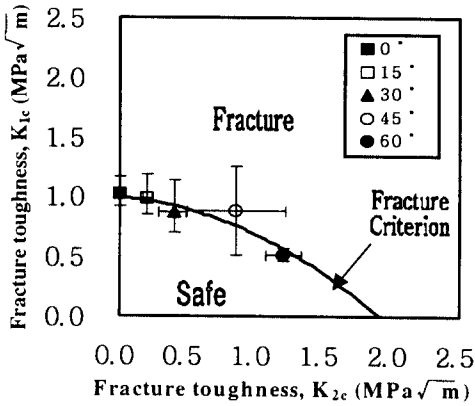


Fig. 7 Fracture criterion of mixed mode in Al/Epoxy bonded dissimilar materials with an interfacial crack emanating from an edge semicircular hole

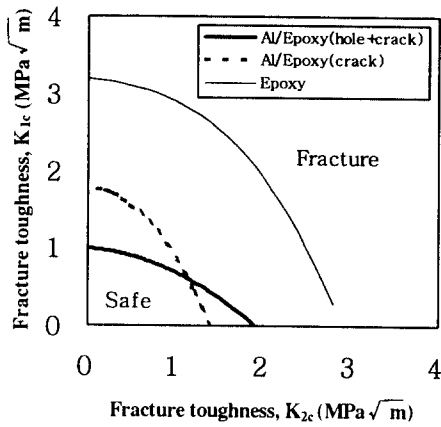


Fig. 8 Fracture criterion of mixed mode in Al/Epoxy bonded dissimilar materials and Epoxy material

체는 파단됨을 판정할 수 있다. 또한, Al/Epoxy 이종 접합체의 경우 파단시 알루미늄보다 에폭시 쪽의 강도가 약하므로 에폭시쪽으로 균열이 진전하기 때문에 균질재인 에폭시 자체의 파괴기준과

비교하기 위하여 에폭시의 파괴인성 실험결과를 Table 8에 나타내었다.

에폭시 균질재료와 Al/Epoxy 이종 접합체에 대한 파괴기준의 결과를 Fig. 8에 나타내었다. 이때, 이종 접합체에 계면균열만 존재하는 경우보다 원공에서 파생한 계면균열의 경우 모드II 성분이 더 크고, 모드I 성분은 더 작은 것을 알 수 있으며 이것은 원공이 존재함으로 인한 영향이며 두가지 경우 모두 에폭시 재료에 대한 파괴기준보다는 안쪽에서 파단이 일어남을 알 수 있다.

Fig. 9는 Fig. 2(b)에서 균열길이가 일정할 때 편축 반원공과 균열길이의 합에 대한 시험편폭의 비 $(a+R)/W=0.15\sim 0.4$ 까지 변화하는 경우 무차원화 응력세기계수 F_1, F_2 를 경사각도 θ 에 대하여 도시하였으며, 심볼은 $(a+R)/W=0.27$ 인 경우로 Fig. 7의 실험에서 구한 파괴인성치와 같은 조건에서 구한 F_1, F_2 값을 나타내고 있다.

Fig. 8을 고려하여, Fig. 9의 $(a+R)/W=0.15$ 인 경우 $(a+R)/W=0.27$ 의 경우와 비교하여 보면 편축 반원공의 크기가 작은 경우에는 파괴인성치가 균열에 더 큰 영향을 받아 균열만 존재하는 경우와 유사하게 모드I 성분은 커지고 모드II 성분은 줄어드는 형태의 파괴기준 설정이 가능할 것이다.

또한, $(a+R)/W=0.4$ 의 경우에는 파괴인성치가 균열길이 보다는 원공에 의해 더욱 큰 영향을 받을 것이므로 모드I 성분은 줄어들고 모드II 성분은 커지는 형태의 파괴기준이 설정될 것이므로 이를 이용하여 원공크기의 영향에 의한 파괴기준의 설정이 가능할 것이다.

Fig. 10은 Fig. 2(b)에서 편축 반원공의 반경이 일정할 때 편축 반원공과 균열길이의 합에 대한 시험편폭의 비 $(a+R)/W=0.27\sim 0.67$ 까지 변화하는 경우로 무차원화 응력세기계수 F_1, F_2 를 경사각도 θ 에 대하여 도시하였으며 심볼은 $(a+R)/W$

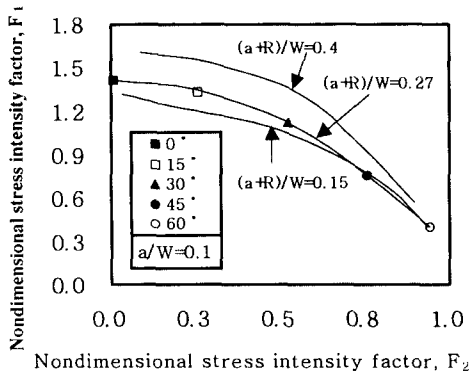


Fig. 9 Relation of nondimensional stress intensity factors for interface crack emanating from an edge semicircular hole

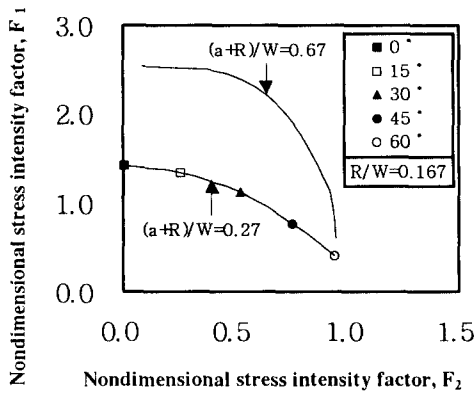


Fig. 10 Relation of nondimensional stress intensity factors for an interface crack emanating from an edge semicircular hole

=0.27인 경우로 실험에서 Fig. 7의 파괴인성치와 같은 조건에서 구한것을 나타낸 것이다.

이 때, Fig. 8의 원공에서 파생한 균열인 경우와 균열만 존재하는 경우의 파괴기준을 비교하면 Fig. 10의 $(a+R)/W=0.67$ 인 균열길이가 긴 경우에는 균열만 존재하는 경우쪽으로 파괴기준이 설정 될 것이고, $(a+R)/W=0.27$ 인 균열길이가 짧은 경우에는 편측 반원공과 균열이 존재하는 쪽으로 파괴기준의 설정이 가능할 것이다.

5. 결론

Al/Epoxy 이종 접합체에 편측 계면균열과 편측 반원공에서 파생하는 계면균열이 존재할 때, 혼

합모드의 파괴기준을 설정하기 위하여 경계요소법에 의한 응력세기계수의 해석과 파괴인성실험을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) Al/Epoxy의 이종 접합체에 편측 계면균열과 편측 반원공에서 파생하는 계면균열이 존재하는 경우 경사각, 균열길이, 반원공의 크기 변화에 대한 정밀도 높은 BEM 해석에 의한 응력세기계수를 해석하였다.

(2) 이종 접합체의 편측 계면균열과 편측 반원공에서 파생한 계면균열이 존재하는 경우에 대한 파괴인성의 실험방법과 혼합모드 성분의 분리에 의한 파괴인성의 평가방법을 제시하였다.

(3) 이종 접합체 편측 반원공에서 파생한 계면균열에 대하여 편측 반원공의 크기와 균열길이의 변화에 따른 파괴기준을 설정방법을 제시하였고, 이를 이용한 파괴의 예측이 가능하다.

(4) 이종 접합체 편측 반원공에서 파생한 계면균열에 대하여 수치해석과 실험을 이용하여 편측 반원공 크기와 균열길이의 변화에 대한 파괴기준의 설정이 가능할 것으로 기대된다.

참고문헌

- (1) 정남용, 1992, "접착이음의 강도평가에 관한 연구 (제1보)," 대한기계학회논문집, 제16권, 제4호, pp. 667~674.
- (2) 정남용, 1995, "이종재료의 경사 접착이음에 대한 파괴강도의 예측," 한국공작기계학회지, 제4권, 제4호, pp. 50~60.
- (3) 정남용, 장진보, 1997, "Al/Epoxy 이종재료의 접착이음에 대한 혼합모드의 파괴기준," 대한기계학회논문집(A), 제21권, 제8호, pp. 1322~1331.
- (4) 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.
- (5) Yuuki, R. and Xu, J. Q. 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.
- (6) 정남용, 송준호, 1996, "이종접합재료의 계면균열에 대한 진전경로의 예측," 한국자동차공학회 논문집, 4권 3호, pp.112~121.