

이종접합 계면균열의 파괴기준에 대한 원공의 영향

정 남 용 송 춘 호* 이 명 대
 (송실대학교 기계공학과) (송실대학교 대학원) (동서울대학 기계설계과)

Influence of Circular Hole for Fracture Criteria of Interface Crack in Bonded Dissimilar Materials

N. Y. Chung(Soongsil Univ.), C. H. Song(Soongsil Grad. Univ.), M. D. Lee(Dongseoul College)

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 criteria of mixed mode crack were analyzed. From the results, the fracture criteria 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 criteria (파괴기준)

1. 서 론

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

현재 이러한 구조물에 대한 강도평가 방법으로는 공칭응력이 사용되고 있고, 이에 대한 접합강도의 평가방

법에 대한 연구가 진행되고 있지만, 정량적인 강도평가 방법의 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 경우 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. 이종접합체의 계면균열에 대한 응력세기계수

2.1 계면균열의 응력해석

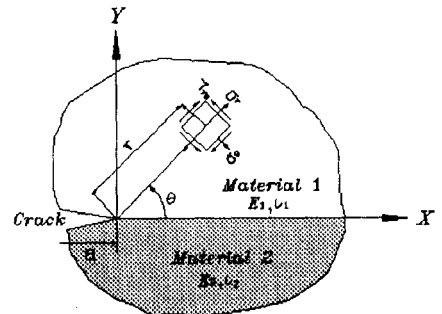


Fig. 1 Crack-tip stress field in the bonded dissimilar materials

Fig. 1과 같이 표면력이 자유인 경계조건을 갖는 이중 접합체에 대한 균열선단의 응력은 다음으로 표시된다⁽⁶⁾.

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

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

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

여기서, ϵ 은 이중재료 정수, μ 는 각 재료의 전단 탄성계수, ν 는 푸아송의 비이고, 첨자는 각각의 재료를 의미한다. 또한 A_{ij} , B_{ij} 는 θ 에 의해 결정되는 계수이고, r 은 균열선단으로부터의 거리, l 은 기준길이를 나타낸다.

2.2 해석모델

이중 접합체 편축 반원공에서 파생된 계면균열에 대한 응력세기계수의 BEM해석에 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 탄성해석을 실시하고, 균열선단에는 특이요소를 사용하여 정밀도를 높게 하였다. 재료의 물성치는 실험에서 직접 측정하였고, 이들의 측정결과는 Table 1과 같다.

Fig. 2 에서 재료는 에폭시 수지와 알루미늄을 사용하였고 반원공의 반경 $R=5$ mm, 초기균열길이 $a=3$ mm,

Table 1 Mechanical properties of materials

Mechanical properties	Young's modulus	Poisson's ratio
Materials	E(GPa)	ν
Epoxy resin	3.17	0.37
Aluminum	65.6	0.32

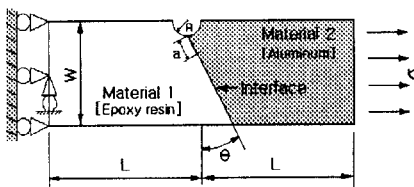


Fig. 2 BEM analysis model of mixed mode interface crack

경사각 θ 를 $0^\circ \sim 60^\circ$ 로 변화시키고, 시험편의 폭 $W=30$ mm, 시험편의 길이 $L=30$ mm 로 하여 경계요소법에 의한 응력해석을 실시한 후, 응력세기계수를 계산하였다.

2.3 응력세기계수의 결정

이중 접합체의 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).

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

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

$$F_1 = K_1 / \sigma \sqrt{\pi l} \quad (6)$$

$$F_2 = K_2 / \sigma \sqrt{\pi l} \quad (7)$$

$$\text{여기서, } Q = \epsilon \ln(r/l) \quad (8)$$

그리고, l 은 균열길이로서 편축균열에서는 a , 중앙균열에서는 $2a$ 를 나타내며, r 은 균열선단으로부터의 거리이고, K_1 , K_2 는 접합 계면균열에 대한 복소응력세기계수이고, 균질재료내의 균열에 대한 모드 I, 모드 II의 응력세기계수 K_I , K_{II} 와는 다르고, 항상 혼합모드 균열로 되고 K_I , K_{II} 와 직접적인 대응은 되지 않는다.

또한 F_1 , F_2 는 무차원화 응력세기계수이다.

3. 실험

3.1 시험편의 형상 및 치수

이중 접합체의 편축 계면균열과 편축 반원공에서 파생한 계면균열에 대한 파괴인성시험을 하기 위하여 Fig. 3과 같은 형상과 치수로 시험편을 제작하였다. 시험편의 재질은 알루미늄과 에폭시 수지를 사용하였으며, Fig. 5 반원공의 반경 $R=5$ mm, 예비균열길이 $a=3$ mm로 시험편을 제작하였다.

3.2 시험편의 제작방법

Fig. 3에 나타난 시험편은 알루미늄과 에폭시 수지의 몰딩접합에 의하여 제작하였다. 두께 3 mm의 알루미늄판재를 경사각도 0° , 15° , 30° , 45° , 60° 로 밀링가공한 시험편과 반경 5 mm의 구멍을 가공한 시험편을 각각 제작하고, 접합부위를 샌드페이퍼 #220으로 연마한 후 아세톤으로 세척하였다. 에폭시 수지는 노내의

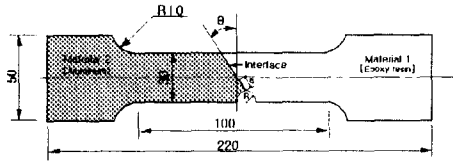


Fig. 3 Geometries and configurations of Al/Epoxy bonded joint specimens

온도가 158℃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℃의 온도로 24시간 경화시키고, 12시간 서냉시킨 후 시험편을 완성하였다.

또한, 예비균열의 도입은 두께 0.1 mm의 테프론 필름을 삽입하여 인공균열을 몰딩 성형시키고, 편축 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 5 kN을 부착하여 정적인장시험을 실시하였다. 정적하중속도는 변위가 0.2 mm/min로 유지되

도록 서서히 하중을 가하여 시험편이 파단될 때까지 실험을 계속하였다.

4. 실험결과 및 고찰

4.1 이종 접합체의 파괴인성

Fig. 3과 같은 Al/Epoxy 이종 접합체에 편축 원공에서 파생한 계면균열이 존재하는 경우에 대한 시험편을 제작한 후, 파괴인성 시험을 실시한 결과를 Table 2에 나타내었다.

각 시험편에 대한 축방향 균열발생 하중과 파괴하중은 거의 차이가 없었으므로 균열발생 응력을 파괴응력으로 하였다. 파괴응력 σ_t 는 $\sigma_t = P_f / (W \cdot t)$ 에서 구하였고, P_f 는 파괴하중이고, W 는 시험편의 폭, t 는 시험편의 두께이다.

Table 3은 실험에서 얻은 축방향 파괴응력을 이용하여 축방향 파괴인성치를 구하고, 이것을 각 모드성분에 대한 응력세기계수의 BEM 해석결과를 이용하여 분리한 파괴인성치를 나타낸 것이다.

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

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

Table 2 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_t : 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 3 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_{Ic} (MPa \sqrt{m})	K_{2c} (MPa \sqrt{m})	K_c (MPa \sqrt{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

4.2 이종 접합체의 혼합모드 파괴기준

실험에서 구한 K_c 값으로는 정량적인 파괴인성 평가와 파괴기준의 설정이 곤란하기 때문에⁽³⁾, Fig. 4와 같이 Al/Epoxy 이종 접합체에 대하여 파괴인성 실험 결과와 BEM수치해석 결과를 이용하여 각 모드성분으로 분리한 K_{Ic} 와 K_{IIc} 로서 파괴기준을 나타내었다.

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

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

Fig. 4에서 점선은 실험에서 얻은 값을 curve fitting한 것이며, 이 때 K_{Ic}^* , K_{IIc}^* 그리고 Table 3의 K_{Ic} , K_{IIc} 값을 사용하여 식(9)에 대입하여 A, B 값을 구하여 식(10)과 같은 파괴기준식을 구하였으며, 실선은 이 식을 이용해서 구한 파괴기준이다.

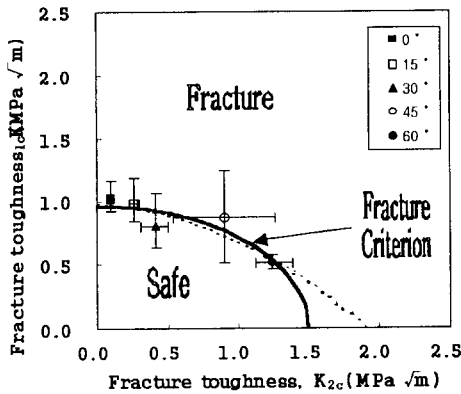


Fig. 4 Fracture criteria of mixed mode in Al/Epoxy bonded dissimilar materials with an interfacial crack emanating from an edge semicircular hole

$$1.047 \left(\frac{K_{Ic}}{K_{Ic}^*} \right)^2 + 1.69 \left(\frac{K_{IIc}}{K_{IIc}^*} \right)^2 = 1 \quad (10)$$

Al/Epoxy 이종 접합체를 안전하게 사용하려면 계면균열이 존재하는 경우 Fig. 4에서 타원의 아래에 있도록 사용응력을 제한할 필요가 있고, 작용응력이 증가하여 파괴기준선인 타원선 이상이 되면 Al/Epoxy 이종 접합체가 파단됨을 판정할 수 있다.

4.3 이종접합체의 파괴기준에 대한 원공의 영향

Fig. 5는 Fig. 2에서 반원공의 반경이 일정할 때 균열길이와 시험편폭의 비 $a/W=0.1, 0.2, 0.5$ 그리고 $\theta=30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$ 인 경우 실험과 수치해석에 의한 파괴기준을 나타내었다. 반원공의 반경 R 이 일정한 경우 균열길이의 변화에 대한 파괴인성 K^* 를 계산하는 식을 구하기 위하여 Fig. 5에서 K_{Ic}^* 와 K_{IIc}^* 의 관계를 Fig. 6과 같이 그림으로 나타내었다.

이 때, a/W 의 변화에 대한 K_{Ic}^* , K_{IIc}^* 사이 관계를 구하여 반원공의 반경이 일정한 경우($R/W=0.1667$) 균열길이 변화에 대한 파괴인성을 계산하는 식을 식(11), (12)로 구하였다.

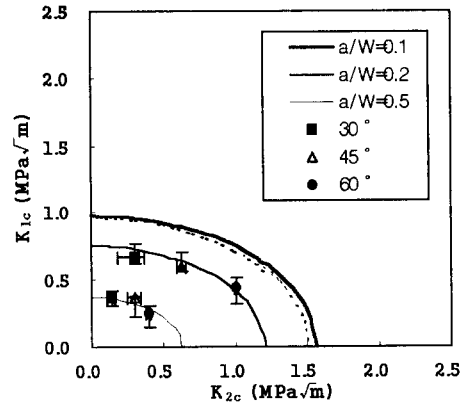


Fig. 5 Fracture criteria of mixed mode in Al/Epoxy bonded dissimilar materials with an interfacial crack emanating from an edge semicircular hole

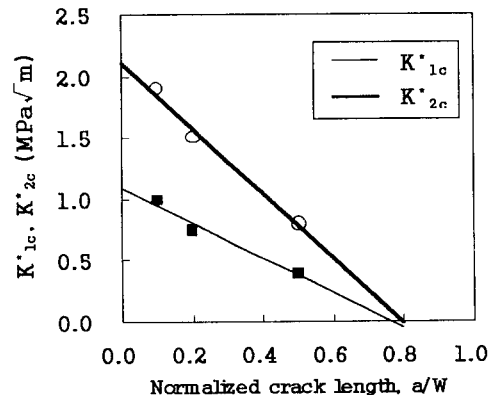


Fig. 6 Relation between a/W and fracture toughness in Al/Epoxy bonded dissimilar materials with an interface crack emanating from an edge semicircular hole

$$K_{1c}^* = -1.425(a/W)+1.089 \quad (11)$$

$$K_{2c}^* = -2.654(a/W)+2.107 \quad (12)$$

또한, a/W 의 변화에 대해서 식(9)와 같은 형태의 파괴기준을 설정하는 식을 구하기 위하여 실험과 수치해석에서 구한 K_{1c} , K_{2c} 와 Fig. 6의 K_{1c}^* , K_{2c}^* 값을 식(9)에 대입하여 A, B값을 계산하여 식(13)과 같은 a/W 변화에 대한 파괴기준을 계산하는 식을 구하였다.

$$1.025\left(\frac{K_{1c}}{K_{1c}^*}\right)^2 + 1.544\left(\frac{K_{2c}}{K_{2c}^*}\right)^2 = 1 \quad (13)$$

이 때, Fig. 5에 $a/W=0.1$ 인 경우 식(10)에 의한 파괴기준을 점선으로 나타내어 식(13)에 의한 파괴기준과 비교하여 보았는데 파괴기준설정에 있어서 그 차이가 무시할 수 있을 정도로 나타나 균열길이 변화에 대한 파괴기준식을 식(13)으로 하였다. Fig. 7은 식(11), (12)를 사용하여 a/W 에 대한 K_{1c}^* 와 K_{2c}^* 를 계산한 후 식(13)에 대입하여 파괴기준을 구하여 편축반원공의 반원의 크기가 일정하고 균열길이가 변화하는 경우에 대한 파괴기준을 나타내고 있다. 이 때 각각의 심볼은 실험에 의한 결과를 나타내고 있다.

Al/Epoxy 이종 접합체의 경우 파단시 알루미늄보다 에폭시 쪽의 강도가 약하므로 에폭시 쪽으로 균열이 진전하기 때문에 균질체인 에폭시 자체의 파괴기준과 비교하기 위하여 에폭시의 파괴인성 실험을 실시하여 Fig. 7에 함께 나타내었다.

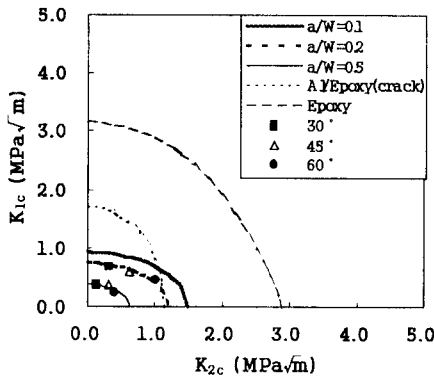


Fig. 7 Fracture criteria of mixed mode in Al/Epoxy bonded dissimilar materials with an interface crack. ($R/W=0.167$)

실험에서 균열은 에폭시 쪽으로 진전하였으며, 이것은 알루미늄 보다는 에폭시의 강도가 작기 때문이고, 에폭시가 순간적으로 파단되는 취성파괴의 특성을 나타내었다. 이 때, 이종 접합체에 계면균열만 존재하는 경

우와 원공에서 파생한 계면균열의 경우를 비교하여 보았는데 원공에서 파생한 계면균열의 경우 모드II 성분이 더 크고, 모드I 성분은 더 작은 것을 알 수 있으며 이것은 원공이 존재함으로 인한 영향이며 두 가지 경우 모두 에폭시 재료에 대한 파괴기준보다는 안쪽에서 파단이 일어남을 알 수 있다.

앞에서와 동일한 방법으로 균열길이가 일정 ($a/W=0.1$)하고 편축반원공의 반경이 변화하는 경우에 대한 파괴기준을 구하여 Fig. 8에 나타내었다.

$$K_{1c}^* = -2.68(R/W)+1.488 \quad (14)$$

$$K_{2c}^* = -4.85(R/W)+2.822 \quad (15)$$

식 (14)와 (15)는 편축 반원공의 반경이 변화하는 경우에 대한 균열길이가 일정한 경우의 파괴인성을 계산하는 식이고 식 (16)은 파괴기준을 설정하는 식이다.

$$1.213\left(\frac{K_{1c}}{K_{1c}^*}\right)^2 + 1.548\left(\frac{K_{2c}}{K_{2c}^*}\right)^2 = 1 \quad (16)$$

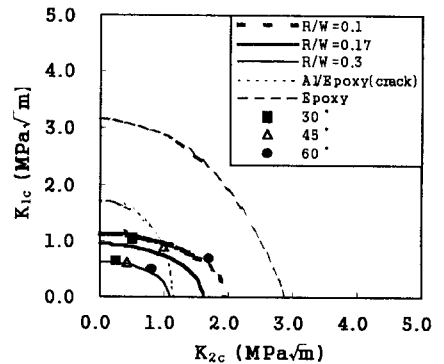


Fig. 8 Fracture criteria of mixed mode in Al/Epoxy bonded dissimilar materials with an interface crack. ($a/W=0.1$)

이 경우 이종 접합체에 계면균열만 존재하는 경우보다 모드II 성분이 더 크고, 모드I 성분이 더 작은 것을 알 수 있으며 이것은 원공의 영향에 의한 것이다.

그러나 실제의 경우 균열길이가 편축 반원공의 반경이 동시에 변화하므로 이에 대한 파괴기준을 설정하는 것이 중요하기 때문에 앞에서와 동일한 방법으로 균열길이가 편축반원공의 반경이 동시에 변화하는 경우의 파괴기준을 구하였다.

Fig. 9는 $(a+R)/W$ 이 변화하는 경우에 대한 파괴기준을 나타내고, 이 때 파괴인성 K_{1c}^* 와 K_{2c}^* 는 다음 식에서 계산하였다.

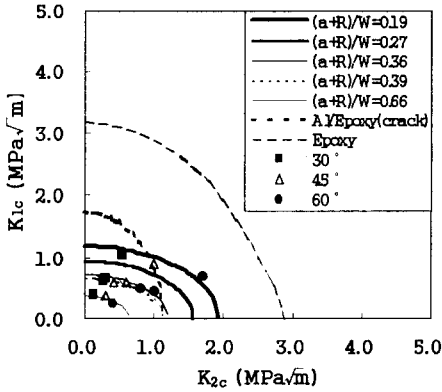


Fig. 9 Fracture criteria of mixed mode in Al/Epoxy bonded dissimilar materials with an interface crack.

$$K_{1c}^* = -1.73 [(a+R)/W] + 1.462 \quad (17)$$

$$K_{2c}^* = -3.21 [(a+R)/W] + 2.799 \quad (18)$$

또한, 파괴기준은 다음 식(19)에 의하여 계산하였다.

$$1.119 \left(\frac{K_{1c}}{K_{1c}^*} \right)^2 + 1.544 \left(\frac{K_{2c}}{K_{2c}^*} \right)^2 = 1 \quad (19)$$

즉, 균열길이와 편측반원공의 반경을 아는 경우 식(19)를 사용하여 파괴기준을 구하여 사용응력이 파괴기준선 안쪽에 존재할 경우 안전하게 사용할 수 있다.

5. 결론

Al/Epoxy 이중 접합체에 편측 반원공에서 파생하는 계면균열이 존재할 때, 혼합모드의 파괴기준을 설정하기 위하여 경계요소법에 의한 응력세기계수의 해석과 파괴인성시험을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) Al/Epoxy의 이중 접합체에 편측 반원공에서 파생하는 계면균열이 존재하는 경우 경사각, 균열길이, 반원공의 크기 변화에 대한 정밀도 높은 BEM 해석에 의한 응력세기계수를 해석하였고, 원공의 영향을 검토하였다.

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

(3) 이중 접합체 편측 반원공에서 파생한 계면균열에 대하여 편측 반원공의 크기와 균열길이의 변화에 따른 파괴기준식을 구하는 방법을 제시하였고, 이를 이용한 파괴기준의 예측이 가능하다.

(4) 이중 접합체 편측 반원공에서 파생한 계면균열의 파괴기준은 균열만 존재하는 경우의 파괴기준보다 원공에 의한 영향으로 모드 II 성분이 크고, 모드 I 성분이 작으며 균열재의 파괴기준보다 안쪽에서 파단이 일어남을 알 수 있다.

참고문헌

- (1) 정남용, 1992, "접착이음의 강도평가에 관한 연구 (제1보)," 대한기계학회논문집, 제16권, 제4호, pp. 667~674.
- (2) 정남용, 1995, "이종재료의 경사 접착이음에 한 파괴강도의 예측," 한국공작기계학회지, 제4권, 제4호, pp. 50~60.
- (3) 정남용, 장진모, 1997, "Al/Epoxy 이중재료의 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 criteria for an Interface Crack Kinking Out of the Interface in Dissimilar Materials," Eng. Frac. Mech., Vol. 41, No.5, pp. 635~644.
- (6) 정남용, 송춘호, 1996, "이중접합재료의 계면 균열에 대한 진전경로의 예측," 한국자동차공학회 논문집, 4권 3호, pp.112~121.
- (7) Isida M., Noguchi H., 1984, "Tension of a Plate Containing an Embedded Elliptical Crack," Eng. Frac. Mech., Vol. 20, No. 3, pp. 387~408.
- (8) Lin X.B., Smith R.A., 1999, "Stress intensity factors for corner cracks emanating from fastener holes under tension," Eng. Frac. Mech., Vol. 62, pp. 535~553.