

〈논 문〉

Al/Steel 이종재료의 접착이음에 대한 혼합모드의 파괴기준

정 남 용* · 장 진 모**

(1997년 1월 21일 접수)

Fracture Criterion of Mixed Mode in Adhesively Bonded Joints of Al/Steel Dissimilar Materials

N. Y. Chung and J. M. Jang

Key Words : Adhesively Bonded Joint(접착이음), Dissimilar Materials(이종재료), Interface Crack(계면균열), Mixed Mode(혼합모드), Stress Intensity Factor(응력세기계수), Boundary Element Method(경계요소법), Fracture Toughness(파괴인성), Fracture Criterion(파괴기준)

Abstract

A method of strength evaluation applying fracture mechanics in the adhesively bonded joints of Al/Steel dissimilar materials was investigated in this paper. Various shapes of adhesively bonded Al/Steel scarf joints focussing on fracture criterion of mixed mode crack were prepared for the static tests. Also, stress intensity factors of the interface cracks in adhesively bonded joints of Al/Steel dissimilar materials were analyzed with 2-dimensional elastic program of boundary element method(BEM), and the experiment of fracture toughness were carried out under various mixed mode conditions. From the results, the fracture criterion and method of strength evaluation by the fracture toughness in adhesively bonded joints of Al/Steel dissimilar materials were proposed.

1. 서 론

구조접착 기술의 발전에 따라 구조설계의 합리화와 경량화를 목적으로 접착이음이 각종 산업분야에 활용되고 있지만, 접착이음의 방법, 구조설계 및 강도평가에는 해결하여야 할 많은 과제가 남아 있다. 종래의 접착이음에 대한 강도평가방법으로서 공칭응력이 사용되고 있지만, 이 강도평가방법은 이음의 형상, 치수 및 부하형식이 조금만 다르더라도 적용이 곤란하고, 정량적인 강도평가방법의 확

립에는 이르지 못하고 있는 실정이다.^(1~4)

또한, 접착계면단의 응력특이성을 고려한 강도평가 방법도 제안되고 있지만, 이 응력특이성의 해석 및 강도평가방법에도 많은 문제점이 내재되어 있다.^(5~8)

최근, 접착이음의 강도평가방법으로서 균열을 전제로 한 파괴역학적 평가방법이 주목을 받고 있다.^(2~4, 9~13) 접착이음의 강도는 접착계면 또는 접착층내의 균열의 발생 및 성장과정에 따라 결정되므로 접착강도를 파괴역학적으로 해석·평가하고, 파괴역학적 인자에 의한 정량적인 강도평가방법을 확립할 필요성이 요망되고 있다.

그러나 접착이음의 균열은 일반적으로 혼합모드

*회원, 숭실대학교 기계공학과

**회원, 한국승강기관리원

로 되기 때문에 그 파괴역학 인자의 해석 및 평가에도 많은 문제점이 남아 있어, 아직 이종재료의 접착이음에 대한 혼합모드 파괴기준에 관한 연구결과는 거의 보고되고 있지 않다.⁽¹²⁾

본 연구에서는 이종재료의 접착이음에 대한 혼합모드의 파괴기준을 설정하기 위한 선행 연구로서 Al/Steel 이종재료의 접착이음에 대한 파괴기준의 설정에 초점을 두고, 혼합모드 성분이 광범위하게 변화하는 균열상태를 실현하기 위하여 경사 접착이음(adhesively bonded scarf joint) 시험편을 제작하여 파괴역학 인자의 경계요소법(boundary element method; BEM)에 의한 해석과 파괴인성 시험을 실시하고, Al/Steel 이종재료의 접착이음에 대한 혼합모드 파괴기준의 설정 및 강도평가방법에 관하여 검토하였다.

2. 실험

2.1 시험편

실험에 사용된 피착재는 강(steel)과 알루미늄(aluminum)이고, 접착재는 구조접착제로 널리 사용되고 있는 에폭시 수지(epoxy resin)는 아랄다이트(Araldite)로서 주제인 프레폴리머와 무수프탈산계인 경화제를 10 : 3의 중량비로 혼합하였다.^(5, 6)

피착재와 접착재의 기계적 성질은 Table 1에 나타내었고, 각 피착재의 화학적 조성은 Table 2와 Table 3에 각각 나타내었다.

시험편의 형상 및 치수는 Fig. 1과 같고, 경사이음의 각도 $\theta=0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$ 로 변화시키고, 인공 예비균열의 길이 $a=6, 8, 10, 18\text{mm}$ 로 변화시켜 가면서 접착시험편을 제작하였다. 시험편의 제작은 우선 강과 알루미늄 판재를 소정의 치수

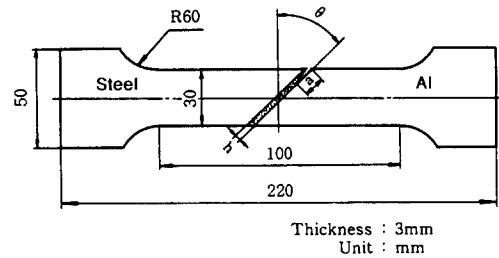


Fig. 1 Shape and dimension of adhesively bonded joint specimen

로 기계가공한 후, 접착면을 #80의 샌드-페이퍼로 거친 가공을 하고, #220의 샌드-페이퍼로 충분히 연마하였다. 접착면은 아세톤으로 세정하고, 물로 씻고 건조시킨 후 접착하였다.

각 시험편에 대한 접착층의 두께 $h=0.2\text{mm}$ 로 유지시키기 위하여 접착용 지그를 사용하고, 예비균열부분은 접착이 되지 않도록 접착하기 전에 미리 두께 0.1mm 의 테프론 필름을 삽입하여 인공균열을 성형시켰다.

접착제인 에폭시 수지는 주제와 경화제를 10 : 3의 중량비로 따로 그릇에 담아 동결로 내에서 158°C 가 될 때까지 완전히 용해시킨 후 혼합시켰다. 혼합시 불순물이나 기포가 생기지 않도록 잘 저어준 후, 노내에서 도포하고 접착시켰다. 접착시험편의 경화는 158°C 의 노내에서 24시간 경화처리한 후, 그대로 노냉시켰다.

경화에 의한 열응력 및 시험편의 가공에 의한 잔류응력을 제거하기 위하여 각 시험편을 풀림(annealing) 처리 하였다.⁽¹⁴⁾ 풀림처리에 의한 이종접합재료에 대한 잔류응력의 완전한 제거는 어려울 것으로 생각되지만, 풀림처리후 열에 의한 잔류응력의 영향은 없는 것으로 간주하였다.⁽¹⁵⁾

Table 1 Mechanical properties of adherends and adhesive

Mechanical properties Materials	Young's modulus E(GPa)	Poisson's ratio, ν
Steel	194.7	0.32
Aluminum	65.56	0.3
Epoxy resin	3.165	0.37

Table 2 Chemical composition of aluminum alloy

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

Table 3 Chemical composition of steel

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

2.2 실험방법

시험기는 인스트론(Instron)형의 만능재료시험기(Model 4206)를 사용하였다. 용량 150 kN의 시험기에 로드 셀을 적절한 범위의 시험하중으로 설정한 후, 시험편이 파단될 때까지 정적 파괴강도실험을 실시하고, 그 과정을 X-Y 레코더에 기록하여 측정하였다.

시험시 작용하중의 속도는 0.2 mm/min으로 일정하게 유지시켰다.

측정한 시험값은 각각 3개의 시험편에 대한 평균값으로 하고, 접착층의 두께 및 균열의 길이는 프로파일 프로젝터를 사용하여 100×배율로 확대시켜 측정하였다.

3. 접착이음의 계면균열에 대한 응력세기계수의 해석

3.1 해석모델 및 해석방법

실제의 접착공정에서 생기는 접착계면의 조성, 조직 및 형상은 매우 복잡하지만, 역학적인 관점에서 취급하기 위하여 이종재료의 접착이음에 대한 접착계면을 가능한 단순화시켜 이상적으로 완전히 접착된 2차원 탄성문제로 근사시켜 BEM 해석을 실시하였다.

Fig. 2는 이종재료인 Al/Steel을 피착재료 한 경사 접착이음의 해석모델 및 구속조건을 나타낸 것이다. 그림에서와 같이 2개의 계면 AB, CD가 존재하고, 각 계면에 대한 응력분포를 비교한 결과 탄성계수가 작은 알루미늄 쪽의 접착계면 CD상의

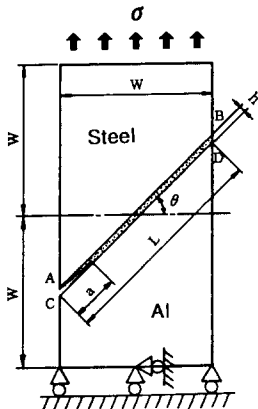


Fig. 2 Model of interface crack for Al/Steel adhesively bonded joint

응력집중이 계면단에서 더욱 크게 나타났으므로 응력집중이 큰 알루미늄 쪽의 접착계면 CD상에서 균열이 발생하는 것을 알 수 있었다.⁽⁶⁾

따라서 응력집중이 큰 알루미늄 쪽의 CD상에 편축균열을 성형하였고, 접착층의 두께 h=0.2 mm, W=30 mm로 하고, 응력해석에 사용한 재료들의 기계적 성질은 Table 1과 같이 하였다.

본 해석에서는 Kelvin의 기본해를 사용한 2차원 탄성 경계요소법을 사용하고, 3개의 영역분할로 전체의 요소수는 266개로 분할하였다.

균열의 길이 a와 경사각 theta를 변화시켜 가면서 균열선단의 응력해석을 실시한 후, 진동 응력특이성이 발생하는 균열선단을 피하여 외삽법으로 응력세기계수를 계산하였다.

3.2 계면균열에 대한 응력세기계수의 해석방법

Fig. 3과 같이 표면력이 자유인 경계조건을 갖는 이종재료 접착계면에 대한 균열선단의 응력분포는 다음 식과 같이 표시된다.

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

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

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

여기서, epsilon은 이종재료 정수, mu는 각 재료의 전

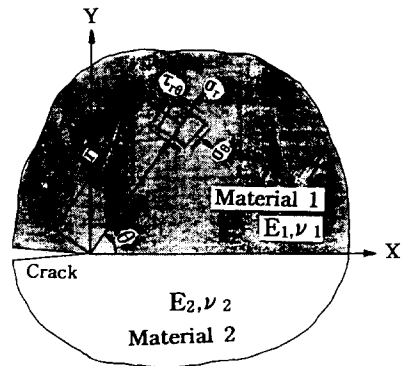


Fig. 3 Crack-tip stress field in the adhesively bonded dissimilar materials

단탄성계수, ν 는 푸아송의 비이고, 첨자는 각각의 재료를 의미한다.

식 (1)에서와 같이 진동 응력특이성이 생기고, $1/\sqrt{r}$ 의 특이응력장으로 되는 것을 알 수 있다. 이 진동특이응력이 발생하는 영역은 균열선단으로부터 매우 가까운 부근에서만 발생하므로 무시가능한 것으로 알려져 있다.

계면균열의 진동 응력특이성이나 오버래핑(overlapping)에 대해서는 Williams,⁽¹⁶⁾ Erdogan,⁽¹⁷⁾ England,⁽¹⁸⁾ Rice,^(19, 20)와 Shih⁽²¹⁾ 등이 오래전부터 명백히 하고 있고, 균열면의 표면력이 자유일 때 수학적으로 정확한 것이 인정되고 있다.

그후 Comninou⁽²²⁾는 진동 특이응력의 발생현상은 물리적으로 이상하기 때문에 균열면의 접촉을 고려한 새로운 모델을 제안하였고, 이 모델에 의하면 응력장의 진동 응력특이성도 소멸된다고 하였지만, 인장에도 불구하고 전단만이 생기는 불합리한 점이 있어 Atkinson,⁽²³⁾ Mak⁽²⁴⁾ 등에 의하여 개량된 모델이 제안되었다.

계면균열에 대한 응력분포는 균열선단으로부터의 거리 r 의 함수로 정의되고, Fig. 3에서 $\theta=0^\circ$ 의 접착제면에 대한 응력분포를 나타내면 다음식과 같이 표시된다.

$$\sigma_y + i\tau_{xy} = \frac{K_1 + iK_2}{\sqrt{2\pi r}} \left(\frac{r}{l} \right)^{i\epsilon} \quad (4)$$

여기서, a 는 균열의 길이이고, σ_y 와 τ_{xy} 는 각각 수직 및 전단응력 성분이며, K_1 과 K_2 는 각각 계면균열에 대한 응력세기계수의 모드 I 성분과 모드 II 성분이다.

Rice 등은 식 (4)에서 $l=1\mu\text{m}$ 로 하여 응력세기계수를 구한 이래 이러한 해석에도 불구하고, Sun 등⁽²⁵⁾이 지적한 것 같이 r 에 대한 단위의 취급방법에

따라 K_2/K_1 의 비가 다르게 되는 모순점이 발생한다. Rice는 이 모순점을 인정하고, 진동 응력특이항을 무차원화한 식 (4)의 정의를 다시 하였지만, 기준길이 l 을 임의로 선택할 것을 주장하였다.

그러나 l 을 임의로 선택하면 K_2/K_1 의 비도 변화하고, 진동 특이응력의 주기에도 영향을 미치게 된다. 그 후, 結城 등은 이러한 모순점을 제거하기 위하여 무차원화한 식 (5)로 정의하고, $l=2a$ 로 할 것을 추천하였다.⁽²⁶⁾

$$\sigma_y + i\tau_{xy} = \frac{K_1 + iK_2}{\sqrt{2\pi r}} \left(\frac{r}{2a} \right)^{i\epsilon} \quad (5)$$

식 (5)는 Sun 등이 지적한 모순점이 제거되고, K_2/K_1 의 비도 균열의 길이에 의존하지 않고 일정하게 된다.

이종재료의 계면균열에 대한 파괴역학 인자의 해석은 계면에 대한 BEM 응력해석 결과를 이용하여 다음 식과 같이 외삽에 의하여 혼합모드 균열의 응력세기계수를 각 모드 성분으로 분리하여 구하였다.^(9~12)

$$K_1 = \lim_{r \rightarrow 0} \sqrt{2\pi r} (\sigma_y \cos Q + \tau_{xy} \sin Q) F_1 \quad (6)$$

$$K_2 = \lim_{r \rightarrow 0} \sqrt{2\pi r} (\tau_{xy} \cos Q - \sigma_y \sin Q) F_2 \quad (7)$$

$$Q = \epsilon \ln(r/2a) \quad (8)$$

여기서, F 는 무차원화 응력세기계수이며, 다음의 식으로 정의된다.

$$F_j = K_j / \sigma \sqrt{\pi a} \quad (j=1, 2) \quad (9)$$

3.3 계면균열에 대한 응력세기계수의 해석결과

Fig. 2에 도시한 해석모델과 Table 1의 재료물성치를 사용한 Al/Steel의 이종재료 경사 접착이음에

Table 4 BEM analysis results of stress intensity factors left ($\sigma=10$ GPa, K : $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$)

θ a/L	0°		15°		30°		45°		60°	
	K_1	K_2	K_1	K_2	K_1	K_2	K_1	K_2	K_1	K_2
0.1	11.536	0.591	9.910	2.910	7.863	3.510	6.315	6.707	1.210	8.785
0.2	15.430	1.630	11.350	3.356	10.713	4.491	7.400	7.010	1.590	9.580
0.3	19.674	2.500	15.843	4.480	13.344	5.970	7.820	8.737	2.030	11.453
0.4	25.597	3.244	20.044	5.100	19.360	8.500	9.190	9.940	3.730	12.890
0.5	43.253	3.944	37.676	7.422	35.200	9.171	28.680	25.150	19.030	30.650

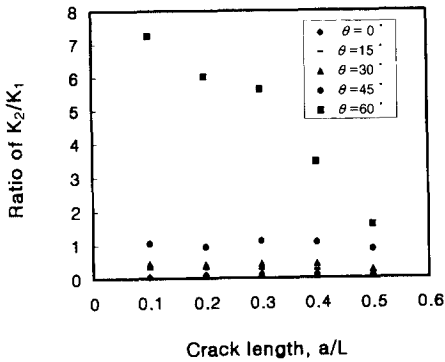


Fig. 4 Relationship between K_2/K_1 and crack length

대한 계면균열의 응력세기계수를 BEM 해석하고, 그 결과를 Table 4에 나타내었다.

경사각의 각도 $\theta=0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$ 에 대하여 접착층의 두께 $h=0.2\text{ mm}$ 로 하고, 접착길이에 대한 균열길이의 비 $a/L=0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5$ 인 5종류로 변화시킨 응력세기계수의 계산 결과를 나타낸 것이다.

Fig. 4는 Table 4의 수치해석 결과를 균열길이의 비에 대해서 응력세기계수의 비를 경사각에 대하여 도시한 것이다. 경사각이 동일할 때는 a/L 의 변화에 대한 K_1 과 K_2 의 변화는 a/L 의 비가 커질수록 양쪽 다 증가하지만, K_1 이 K_2 의 값보다 큰 폭으로 증가하는 경향을 보여준다.

균열길이의 비 a/L 에 대한 K_2/K_1 의 비는 경사각 $\theta=0^\circ\sim 45^\circ$ 범위에서는 경사각이 동일할 때 a/L 가 증가하더라도 거의 일정하고, $\theta=60^\circ$ 일 때 a/L 가 증가할수록 K_2/K_1 의 값은 거의 직선적으로 급격히 감소하는 경향을 나타낸다.

Fig. 5는 경사각 θ 에 대한 응력세기계수의 비율

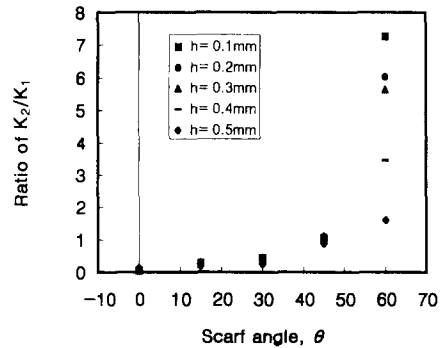


Fig. 5 Relationship between K_2/K_1 and scarf angle

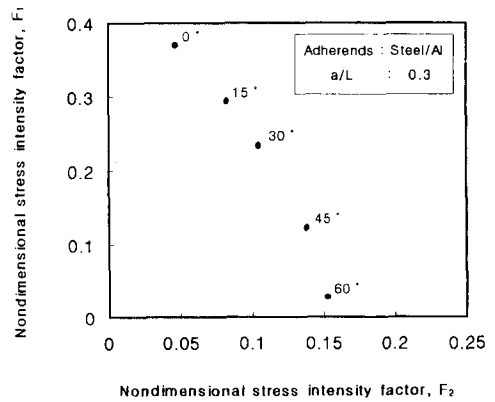


Fig. 6 Relation of nondimensional stress intensity factor scarf angle

균열길이의 비에 대하여 나타낸 것이다.

균열길이의 비 a/L 가 일정할 때 경사각 $\theta=0^\circ\sim 45^\circ$ 의 범위에서는 θ 가 증가하더라도 K_2/K_1 의 값은 거의 변화가 없지만, $\theta=60^\circ$ 일 때 a/L 가 증가할수록 K_2/K_1 의 비는 큰 차이로 감소한다.

Table 5는 Table 4의 응력세기계수의 해석결과

Table 5 BEM analysis results of nondimensional stress intensity factors

θ	0°		15°		30°		45°		60°	
	F_1	F_2	F_1	F_2	F_1	F_2	F_1	F_2	F_1	F_2
0.1	0.376	0.019	0.317	0.093	0.238	0.106	0.173	0.184	0.028	0.202
0.2	0.355	0.038	0.257	0.076	0.230	0.096	0.143	0.136	0.026	0.156
0.3	0.370	0.047	0.293	0.083	0.234	0.105	0.124	0.138	0.027	0.152
0.4	0.417	0.053	0.321	0.082	0.293	0.129	0.126	0.136	0.043	0.148
0.5	0.630	0.058	0.539	0.106	0.477	0.124	0.351	0.308	0.196	0.316

를 식 (8)에 대입하여 무차원화한 응력세기계수를 나타낸 것이다.

Fig. 6은 Table 4에서 $a/L=0.3$ 인 경우의 무차원화 응력세기계수 F_1 과 F_2 를 경사각 θ 에 대하여 도시한 것으로, θ 가 증가할수록 F_1 의 크기는 감소하고 F_2 는 증가하는 것을 알 수 있다.

4. 실험결과 및 고찰

4.1 Al/Steel 접착이음의 파괴인성 시험결과

Fig. 1과 같이 Al과 Steel을 피착재로 하여 예폭 시 수지로 접착시킨 계면균열이 존재하는 이종재료의 경사 접착이음 시험편을 제작한 후, 파괴인성 시험을 실시한 결과를 Table 6에 나타냈다. 접착이음의 경사각 $\theta=0^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$ 의 4종류와 4개의 균열길이에 대한 경사 접착이음 시험편의 축방향 최대 파괴하중 및 파괴응력도 동시에 나타내었다.

실험에서 측정된 하중-변형선도는 하중이 작용하여 최종 파괴될 때까지의 전 구간에서 선형적인 탄성거동을 나타내었다.

또한 초기 균열의 발생점과 파단점의 하중은 거의 분간할 수 없을 정도로 일치하였으므로 파괴인

성치의 계산시 균열발생 하중으로 최대 파괴하중 값을 사용하였다.

일반적으로 접착이음의 파괴는 균열이 피착재와 접착재 사이의 계면을 따라 진전하는 계면파괴와 접착층내를 진전하는 응집파괴로 구분된다.

본 실험에서 균열의 진전은 알루미늄과 접착재 사이의 계면을 따라 진전하는 계면파괴의 양상이 지배적이었고, 균열진전의 초기에는 계면파괴를 이 르키다가 균열진전의 도중에 접착층내로 진전경로 를 바꾸는 응집파괴의 현상도 나타났다.

이러한 현상은 피착재와 접착재의 상호조합에 의한 결합력과 밀접한 관계가 있고, 결합력은 두 재료의 친화성과 접착성 및 계면반응에 관계되며, 피착재와 접착재의 연성과 취성 등에도 영향을 받는 매우 복잡한 계면구조와 파괴기구(fracture mechanics)를 형성하기 때문이라고 생각된다.

각 시험편에 대한 축방향 파괴응력 $\sigma_f = P_f / W_t$ 에서 구하였고, P_f 는 파괴하중이고, W 는 시험편의 폭, t 는 시험편의 두께이다.

Table 7은 실험에서 구한 축방향 파괴응력을 이용하여 축방향 파괴인성치를 구하고, 이것을 각 모드 성분비에 대한 응력세기계수의 BEM 해석결과로 분리한 파괴인성치를 나타낸 것이다.

Table 6 Experimental result of static fracture strength

Specimen No.	Scarf angle (θ)	Specimen thickness (t : mm)	Specimen width (w : mm)	Crack length (a : mm)	a/L	Fracture load (P_f : kN)	Fracture stress (σ_f : MPa)
1-1	0°	3	29.8	5.8	0.1946	1.156	12.9307
1-2	0°	3	29.8	5.9	0.1980	1.196	13.3781
1-3	0°	3	29.6	5.9	0.1993	1.037	11.6779
2-1	30°	3	29.8	7.45	0.2166	1.127	12.6063
2-2	30°	3	29.8	7.45	0.2166	1.489	16.6555
2-3	30°	3	29.4	8.1	0.2389	1.096	12.4263
3-1	45°	3	29.2	10.1	0.2446	1.694	19.3379
3-2	45°	3	29.2	9.8	0.2373	1.178	13.4475
3-3	45°	3	28.8	9.9	0.2426	1.235	14.2940
4-1	60°	3	29.6	18.1	0.3057	1.198	13.4901
4-2	60°	3	29.5	17.9	0.3034	1.527	17.2542
4-3	60°	3	29.7	18.1	0.3047	1.160	13.0191

Table 7 Experimental result of fracture toughness

Specimen No.	θ	a/L	F ₁	F ₂	F	K _{1c} (MPa√m)	K _{2c} (MPa√m)	K _c (MPa√m)
1-1	0°	0.1946	0.3561	0.03652	0.35838	0.6222	0.0637	0.6255
1-2	0°	0.1980	0.35581	0.03714	0.35774	0.6481	0.0676	0.6516
1-3	0°	0.1933	0.35678	0.03628	0.35862	0.5673	0.0577	0.5702
2-1	30°	0.2166	0.23033	0.09766	0.25018	0.4442	0.1883	0.4825
2-2	30°	0.2166	0.23033	0.09766	0.25018	0.5869	0.2489	0.6375
2-3	30°	0.2389	0.23131	0.09949	0.25018	0.4585	0.1972	0.4991
3-1	45°	0.2446	0.13439	0.13698	0.19190	0.4629	0.4718	0.6610
3-2	45°	0.2373	0.13580	0.13682	0.19277	0.3205	0.3229	0.4549
3-3	45°	0.2426	0.13478	0.13694	0.19214	0.3398	0.3452	0.4844
4-1	60°	0.3057	0.02791	0.15177	0.15431	0.0898	0.4882	0.4964
4-2	60°	0.3034	0.02754	0.15186	0.15434	0.1127	0.6214	0.6315
4-3	60°	0.3047	0.02775	0.15181	0.15433	0.0861	0.4713	0.4791

축방향 파괴인성치 $K_c = \sigma_f \sqrt{\pi a} F$ 의 식에서 구하였고, K_c 를 각 모드성분으로 분리하여 K_1 과 K_2 로 표시하였다.

이때, $K_1 = \sigma_f \sqrt{\pi a} F_1$ 의 식과 $K_2 = \sigma_f \sqrt{\pi a} F_2$ 의 식에서 각각 계산하였고, 무차원화 응력세기계수 $F = \sqrt{F_1^2 + F_2^2}$ 로 표시된다.

4.2 Al/Steel 접착이음에 대한 파괴인성의 고찰

Fig. 7~Fig. 10은 실험결과를 도시한 것으로, 각 데이터는 시험편 3개에 대한 값을 표시한 것이다. 각 데이터의 최대값과 최소값을 도시하였고, 그 평균값의 표시를 기호(◆, ▲, ●, ■)로 나타내어 실험값의 편차를 쉽게 알 수 있다.

접착이음의 접착강도에 대한 각 데이터의 편차가 크게 나타나는 현상은 일반적으로 인식되고 있는 사항이며, 이에 영향을 주는 인자로는 피착재와 접착제의 상호조합에 의한 두 재료사이의 친화성과 접착성에 따른 결합력의 차이 및 계면반응에 밀접한 관계가 있고, 매우 복잡한 계면구조와 파괴기구의 차이 때문이라고 보여진다.

본 실험에서 균열의 진전은 알루미늄과 접착제 사이의 계면을 따라 진전하는 계면파괴가 지배적이었고, 이 때의 접착강도는 가장 낮게 나타났다. 또한, 균열진전의 초기에는 알루미늄과 접착제 사이

의 계면파괴를 이르기다가 균열진전의 도중에 접착층내로 진전경로를 바꾸는 응집파괴의 과정에서 접착강도는 계면파괴의 강도보다 증가하므로 실험값의 편차는 더욱 커지게 된다.

Fig. 7은 Table 7의 실험결과를 균열길이의 비 a/L에 대하여 축방향 파괴인성치 K_c 를 경사각 θ 의 변화에 따라 도시한 것이다.

균열길이의 비 a/L에 대한 K_c 는 경사각이 증가할수록 조금씩 감소하는 경향을 나타내므로 균열길이에 대한 K_c 의 값은 일정하지 않고, K_2 의 성분이 증가하면 K_c 도 증가하여 접착이음의 파괴에 대한 저항도 커짐을 알 수 있다.

Fig. 8은 경사각 θ 의 변화에 따른 K_c 를 도시한 것으로 θ 가 증가하면, K_1 성분은 감소하고 K_2 성분은 증가하지만, K_c 의 값은 조금씩 감소하므로 경사각에 의한 파괴인성의 평가는 곤란하다.

그러므로 접착이음에 대한 정량적인 파라미터에 의한 파괴인성의 평가와 파괴기준의 설정이 필요하다.

Fig. 9는 접착이음의 응력세기계수의 비 K_2/K_1 에 대한 K_c 를 경사각 θ 의 변화에 따라 도시한 것이다. 응력세기계수의 비에 대한 K_c 도 경사각이 변화하면 그 값도 조금씩 변화하므로, 이 자체로는 평가가 곤란하고 K_c 를 각 모드성분으로 분리하여

평가할 필요성이 요망된다.

Fig. 10은 K_{Ic} 를 각 모드성분으로 분리하여 나타낸 것으로 경사각이 증가하면, K_1 성분은 점점 감소하고 K_2 성분은 증가한다.

따라서 파괴인성의 시험결과는 K_1 성분과 K_2 성분이 그리는 타원상에 모이게 된다.

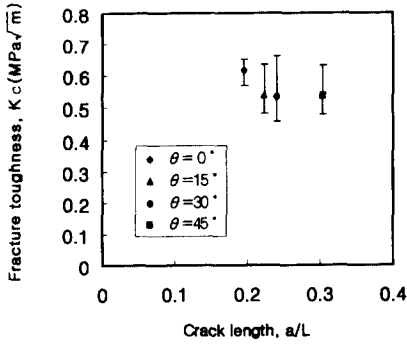


Fig. 7 Fracture toughness K_c for ratio of crack length

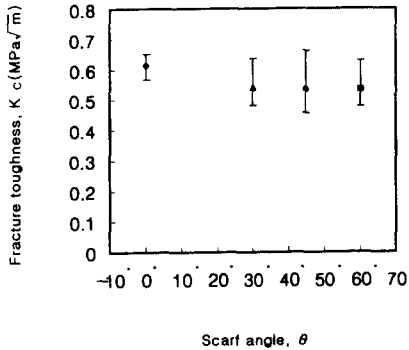


Fig. 8 Fracture toughness K_c for scarf angle

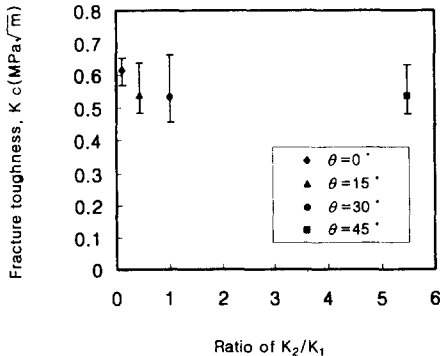


Fig. 9 Relationship between fracture toughness K_c and K_2/K_1

4.3 Al/Steel 접착이음에 대한 혼합모드의 파괴 기준

계면균열이 존재하는 Al/Steel의 이종재료 접착이음에 대한 파괴인성의 시험결과인 Fig. 10으로부터 혼합모드의 파괴기준이 고려되어진다.

순수모드 I의 파괴인성치를 K_{Ic} , 순수모드 II의 파괴인성치를 K_{2c} 라 하면, 다음과 같은 타원의 식에 의한 파괴기준식을 제안한다.

$$\left[\frac{K_1}{K_{Ic}} \right]^2 + \left[\frac{K_2}{K_{2c}} \right]^2 \geq 1 \quad (9)$$

따라서 접착이음을 안전하게 사용하려면, Fig. 10에서 타원선의 아래에 있도록 사용응력을 제한할 필요가 있고, 작용응력이 증가하여 파괴기준선인 타원선 이상이 되면 Al/Steel의 접착부재는 파괴됨을 쉽게 판정할 수 있다.

본 실험에서 얻어진 Al/Steel 접착이음에 대한 파괴기준을 피착재가 균질체인 접착이음의 파괴기준^(3,9,10)과 비교하면 모드 II 성분의 지배영역은 매우 적고, 모드 I 성분의 지배영역이 크기 때문에 박리현상에 강한 파괴기준을 나타낸다.

이러한 현상은 이종재료인 피착재와 접착제의 상호조합에 따른 기계적 성질의 차이와 이들의 친화력에 의한 계면특성에 따른 복잡한 응력상태의 변화 및 파괴기구의 차이가 접착강도에 영향을 주기 때문인 것으로 설명된다.⁽⁵⁾

또한, 실험에 사용한 Al/Steel의 접착이음에 균열이 존재하지 않을 때, 접착계면단의 응력특이성 지수는 경사각이 증가할수록 크게 되어 접착강도는 감소하는 경향과도 상호관련이 있다고 보여진다.

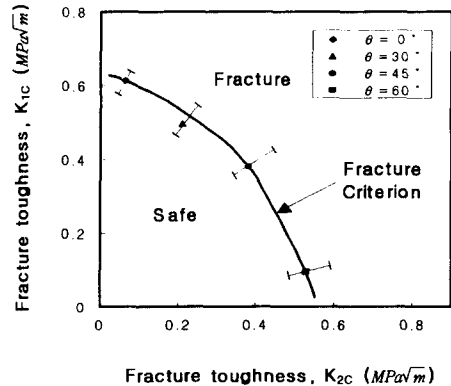


Fig. 10 Fracture criterion of mixed mode in adhesively bonded joints of Al/Steel dissimilar materials

본 실험에서 균열은 알루미늄과 접착재 사이의 계면을 따라 진전하는 계면파괴가 지배적이었지만, 만일 접착층내를 균열이 진전하는 응집파괴로 된다면 파괴역학 인자의 계산은 균질재인 접착재에 대한 계산만으로 가능하다. 따라서, 계면균열에 대한 응력세기계수의 계산보다는 더욱 간단하고, 실험에서 나타나는 파괴인성치도 계면파괴일 때 보다는 약간 큰 값을 보일 것이다.

이와 같이 접착이음에서 계면파괴의 경우가 파괴인성치가 가장 작기때문에 응집파괴가 발생한다면, 이 경우의 파괴기준은 Fig. 10의 파괴기준선보다 약간 상승할 것이다. 그러므로, 응집파괴가 발생하는 경우 계면파괴의 인성치를 기준으로 한 Fig. 10의 파괴기준을 사용한다면 더욱 안전할 것이다.

이와 같이 접착파괴강도는 파괴기구에 따라 차이를 나타내기 때문에 본 연구에서와 같이 접착강도가 가장 낮은 계면균열에 대한 파괴인성 시험을 실시하고, 이를 근거로한 파괴기준을 설정하는 것이 더욱 효과적이라고 생각된다.

본 연구에서 얻어진 Al/Steel의 접착이음에 대한 파괴기준의 설정방법은 각종 이종재료의 접착부재에 대한 파괴기준의 설정에도 확대적용이 가능하고, 이들을 안전하게 사용할 수 있는 지의 파괴강도의 예측, 파괴강도의 평가 및 안전설계방법의 확립에도 기여할 것으로 기대된다.

5. 결 론

이종재료의 경사 접착이음에 계면균열이 존재할 때, 정적파괴강도를 정량적으로 평가할 수 있는 혼합모드의 파괴기준을 설정하기 위하여 Al/Steel의 이종재료 접착이음 시험편에 대한 파괴역학 인자의 경계요소법 해석과 파괴인성시험을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) Al/Steel의 이종재료 경사 접착이음에 계면균열이 존재할 때 경사각과 균열길의 변화에 대한 고정밀도의 응력세기계수의 BEM 해석이 가능하였고, 이들의 상호변화 관계를 비교·검토했다.

(2) 이종재료 접착이음의 계면균열에 대한 파괴인성의 시험방법과 혼합모드 성분의 분리에 의한 파괴인성의 평가방법을 제시하였다.

(3) 이종재료 접착이음에 대한 혼합모드 파괴기준의 설정방법과 Al/Steel의 접착이음에 대한 파괴기준을 제안하였다.

(4) 본 연구에서 얻어진 파괴기준의 설정방법은 각종 접착부재의 파괴기준은 물론, 파괴강도의 예측, 강도평가에도 확대적용이 가능할 것으로 기대된다.

후 기

본 논문은 1996년도 숭실대학교 교내학술연구비의 지원을 받아 수행되었습니다.

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学の應用 (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," 한국공작기계기술학회지, 제4권, 제4호, pp. 50~60.
- (6) 정남용, 오봉택, 1996, "응력특이성계수에 의한 이종 접합재료의 강도평가," 대한기계학회논문집(A), 제20권, 제7호, pp. 2087~2096.
- (7) 腹部敏雄, 1990, "應力特異場パラメ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 523號, pp. 618~623.
- (8) 小林英男, 荒居善雄, 中村春夫, 1989, "セラミックス/金屬接合體の強度評價," 日本機械學會論文集(A), 第55卷 512號, pp. 750~755.
- (9) 結城食治, 劉金橋, 許金泉, 1993, "混合モード界面き裂の破壊試験とその評價," 日本機械學會論文集(A), 第59卷 557號, pp. 74~80.
- (10) 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.

- (11) 정남용, 송춘호, 1996, "이종접합재의 계면균열에 대한 진전경로의 예측," 한국자동차공학회 논문집, 제4권, 제3호, pp. 112~121.
- (12) 정남용, 장진모, 1996, "Al/Steel 접착이음에 대한 혼합모드의 파괴기준," 대한기계학회 추계 학술대회 논문집(A), pp. 108~113.
- (13) Liechti, K. M. and Chai, Y. S., 1991, "Biaxial Loading Experiments for Determining Interfacial Fracture Toughness," *J. Applied Mechanics.*, Vol. 58, pp. 680~687.
- (14) 辻二郎, 西田正孝, 河田行三, 1965, 光弾性實驗法, 日刊工業, pp. 51~170.
- (15) 정남용, 오봉택, 송춘호, 1996, "이종재료의 접합이음에 대한 접합잔류응력의 검토," 대한기계학회 추계학술대회 논문집(A), pp. 192~197.
- (16) Williams, M. L., 1959, "The Stress Around a Fault or Crack in Dissimilar Media," *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol. 49, pp. 199~204.
- (17) Erdogan, F., 1965, "Stress Distribution in Bonded Dissimilar Materials with Cracks," *J. Applied Mechanics*, Vol. 32, pp. 403~410.
- (18) England, A. E., 1965, "A Crack Between Dissimilar Media," *Trans. ASME, J. of Applied Mechanics*, Vol. 32, pp. 400~402.
- (19) Rice, J. R., 1988, "Elastic Fracture Mechanics Concepts for Interfacial Cracks," *Trans. ASME, J. of Applied Mechanics*, Vol. 55, pp. 98~105.
- (20) 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.
- (21) Shih, C. F. and Asaro, R. J., 1988, "Elastic-plastic Analysis of Cracks on Bimaterial Interfaces; Part 1," *Trans. ASME, J. of Applied Mechanics*, Vol. 55, pp. 299~316.
- (22) Comninou, M., 1979, "The Interface Crack in a Combined Tension-compression and Shear Field," *Trans. ASME, J. of Applied Mechanics*, Vol. 46, pp. 345~351.
- (23) Atkinson, C., 1982, "The Interface Crack with a Contact Zone," *Int. J. of Fracture Mechanics*, Vol. 18, pp. 161~177.
- (24) Mak, A. F. et al., 1980, "A Non-slip Interface Crack," *Trans. ASME, J. of Applied Mechanics*, Vol. 47, pp. 347~350.
- (25) Sun, C. T. and Jih, C. J., 1987, "On Strain Energy Release Rates For Interfacial Cracks in Bimaterial Media," *Eng. Fracture Mechanics*, Vol. 28, pp. 13~20.
- (26) 結城良治, 曹相鳳, 1989, "異材界面き裂の應力擴大係數の境界要素弾性解析," 日本機械學會論文集(A), 第 55卷 510號, pp. 340~347.