

이종재료의 경사접착이음에 대한 파괴강도의 예측

정 남 용*

Prediction of Fracture Strength on Adhesively Bonded Scarf Joints in Dissimilar Materials

N. Y. Chung

Abstract

Recently advantages joining dissimilar materials and light weight material techniques have led to increasing use of structural adhesives in the various industries. Stress singularity occurs at the interface edges of adhesively bonded dissimilar materials. So it is required to analyze its stress singularity at the interface edges of adhesively bonded joints in dissimilar materials.

In this paper, the analysis method of stress singularity is studied in detail. Also, effects of the stress singularity at the interface edge of adhesively bonded scarf joints in combinations of dissimilar materials are investigated by using 2-dimensional elastic program of boundary element method. As the results, the strength evaluation method of adhesively bonded dissimilar materials using the stress singularity factor, Γ , is very useful. The fracture criterion, method of strength evaluation and prediction of fracture strength by the stress singularity factor on the adhesively bonded dissimilar materials are proposed.

Keywords : Dissimilar Materials(이종재료), Stress Singularity(응력특이성), Adhesively Bonded Joint(접착이음), Interface Edge(계면단), Boundary Element Method(경계요소법), Static Test(정적시험), Fracture Criterion(파괴기준)

1. 서 론

접착이음은 재료의 성질이 서로 다른 비용접성 이종재료의 동시접착 및 경량화가 가능하므로 항공기, 자동차, 우주선 등 각종 산업분야에서 그 활용이 급격히 증가하

고 있는 추세이다. 이종재료의 접착시 두 재료의 접착 계면단은 재료 및 형상의 불연속으로 응력특이점이 되어 응력특이성이 존재한다. 이 응력특이점은 급격한 응력집중 현상이 발생하고 현저한 강도저하를 초래하여 파괴의 기점이 되므로, 이종재료의 접착 계면단에 대한 응력특

* 숭실대 공대

이성을 충분히 고려한 고신뢰성의 접착강도의 평가 및 안전설계 방법이 시급히 요망되고 있다.^{(1)~(4)}

그러나 이종재료의 접착계면단에 대한 고정밀도의 응력해석 및 이들의 파괴를 지배하는 인자의 해석방법 등에 많은 문제점이 있어, 이종재료에 대한 접착강도의 평가방법이 확립되어 있지 않은 실정이다.

무균열 이종재료의 접착이음에 대한 접착강도를 충분히 평가하기 위해서는 접착계면단의 응력특이성^{(5)~(10)}을 고려한 접착강도의 평가가 유효하다고 본다.

이종재료의 적절한 상호조합은 재료특성에 따라 응력특이성이 소멸되기도 하므로, 강도향상에 큰 잇점을 주기도 한다⁽⁸⁾. 또한, 재료의 조합특성이 결정되면 접착면의 경사각을 변화시키는 경사이음(scarf joint)을 적용하여 접착부의 기하학적 형상의 변화로 응력특이성을 완화시켜 강도를 향상시키는 설계도 가능하다.

따라서 본 논문에서는 전보⁽⁸⁾의 계속연구로써 접착층을 갖는 이종재료의 상호조합 특성에 의한 경사이음의 경사각변화에 따른 응력특이성을 경계요소법(boundary element method : BEM)을 이용하여 해석한 후, 응력특이성의 소멸조건 및 강도향상 방법을 검토하였다.

또한, 이종재료에 대한 접착강도의 평가방법을 확립하기 위하여 응력특이성의 해석결과를 이용한 강도평가 방법 및 그 효용성을 검토하였다.

이종재료의 접착계면단에 대한 응력특이성지수가 광범위하게 변화하는 이종재료의 경사 접착이음 시험편을 제작하여 정적파괴실험을 실시한 후, 부하조건, 시험편의 형상 및 치수에 의존하지 않는 정량적이고, 효과적인 응력특이성계수에 의한 이종재료의 접착 파괴기준, 강도평가방법 및 파괴강도의 예측방법을 제안하고자 한다.

2. 이종재료의 접착계면단에 대한 응력특이성

2.1 이종재료에 대한 접착계면 모델의 설정

Fig.1과 같이 두 이종재료를 접착시킨 이종재료의 접착계면 모델을 설정하였다.

두 재료가 이루는 계면의 각도가 $\theta_1 = -\theta_2 = \pi/2$, $\theta = 0$ 이면, 직선경계와 계면이 직교하는 맞대기이음(butt joint)이 되고, 또한, $\theta_1 = \pi/2$, $\theta_2 = -\pi$ 이면 단순접치기이음(single-lap joint)이 되고, 경사각(scarf angle) θ 만이 변화하면 경사이음(scarf joint)

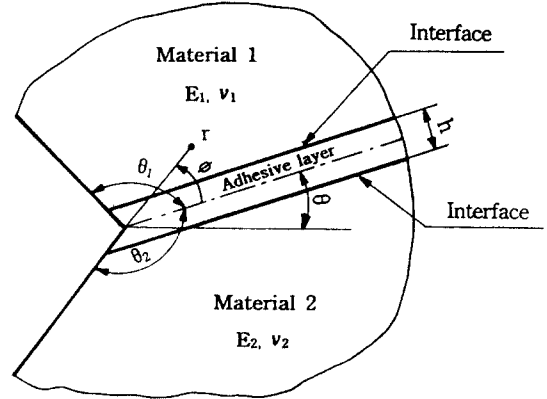


Fig.1 Model of configuration at the adhesively bonded interface edge in dissimilar materials

이 된다.

또한, $\theta_1 = -\theta_2 = \pi/2$ 하면 계면균열(interface crack)모델이 되고, 양쪽 재료를 같게 하면 V--notch 모델이 되므로 응용범위가 매우 넓은 모델이다.

2.2 이종재료에 대한 응력특성 방정식

Fig.1에서 접착층이 없는 이종재료의 접합이음의 경우($h=0$), 접합계면 모델에 대한 응력특이성을 결정하는 응력특성 방정식은 Bogy⁽⁵⁾에 의해 유도되었다.

접착계면단 근방의 응력장 σ_{ij} 는 계면단으로부터의 거리 r 에 의해 다음 식과 같이 주어진다.

$$\sigma_{ij} = \frac{\Gamma}{r^\lambda} f_{ij}(\theta) \quad (1)$$

여기서 Γ 는 응력특이성 계수이고, $f_{ij}(\theta)$ 는 부하조건 및 형상에 의존하는 계수이다.

응력특이성지수 λ 는 θ_1 , θ_2 , h 및 각 재료의 조합특성에 의해 결정되는 상수이다.

식(1)로부터 응력특이성이 소멸되는 접착조건은 다음 식과 같이 된다.

$$\lambda \leq 0 \quad (2)$$

응력특이성지수 λ 가 $\lambda < 0$ 이면, 응력특이성이 소멸되는 수도 있다. 접착층이 없는 두 종류의 이종접합재료에

대한 λ 는 응력특성 방정식으로부터 구해지지만⁽⁵⁾, Fig.1과 같은 모델의 경우 응력특성 방정식은 접착층의 두께 h 및 접착재의 기계적성질에 상당한 영향을 받는다. 이러한 해석에 대한 이론해석은 매우 복잡·난해하므로 아직껏 응력특성 방정식의 해석 예는 없다. 따라서 본 논문에서는 BEM수치해석 방법을 적용하여 λ 를 해석하였다.

3. 이종재료의 접착이음에 대한 BEM 응력해석

3.1 이종재료의 접착이음에 대한 BEM 해석모델

이종재료의 조합특성이 결정되면, 이 조건하에서 접착하중을 증가시키기 위하여 실제 접착구조물의 설계에 있어서는 접착면을 경사시키는 경사이음을 적용하는 것이 일반적이다.

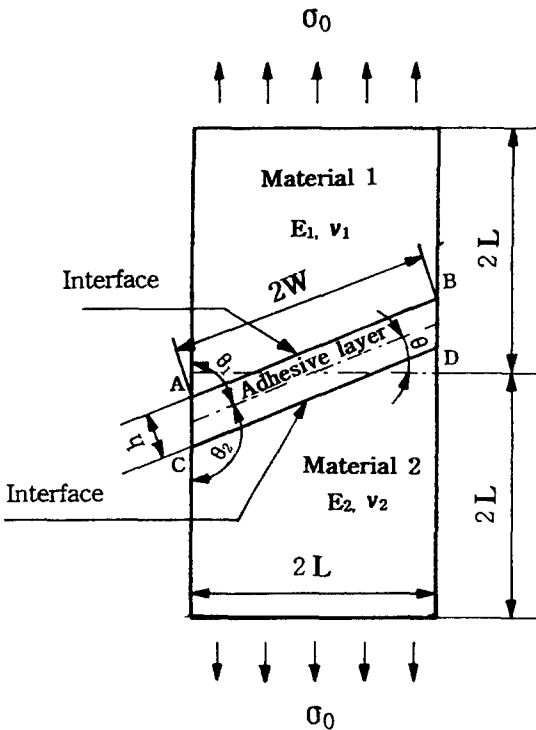


Fig. 2 Model of BEM analysis for adhesively bonded scarf joint in dissimilar materials

Fig.2의 모델에서와 같이 $\theta_1 + \theta_2 = \pi$ 이고, 접착층의 두께를 $h = 0.1, 0.5, 1.0\text{mm}$ 로 변화시키고, 경사각을 $\theta = 0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$ 로 변화시켜가면서, Table 1과 같이 3종류의 이종재료를 에폭시계 접착제로 접착시켰다.

실험에서 직접측정한 피착재와 접착재의 기계적 성질을 Table 1에 나타내었다.

Table 1. Mechanical properties of adherends and adhesive

Mechanical properties		Young's	Poisson's ratio
Specimen materials		modulus E(GPa)	ν
Adherends	Mild Steel	174.7	0.32
	Aluminum	65.56	0.3
	Acryl	2.94	0.345
Adhesive	Epoxy resin	3.165	0.37

3.2 BEM 응력해석의 개요

이종재료의 접착강도를 평가하기 위해서는 우선 접착계면단에 대한 고정밀도의 응력해석이 선행되어야 한다. 본 연구에서는 BEM 2차원 탄성해석을 퍼서널 컴퓨터에서 실행하였다. Kelvin의 기본해를 이용하여 3영역으로 나누어 영역분할법에 의해 응력해석을 실시하였다.

본 해석에서는 2차원 아이소 파라메트릭(isoparametric)요소를 사용하고, 각 모델의 전체 요소분할수는 212개로 일정하게 하였다. 특히 접착계면단의 응력분포를 고정밀도로 해석하기 위하여 서브(sub)요소로 분할하였고, 평면변형률 상태에서 해석하였다.

무균열 이종재료의 경사접착이음에 균일 분포하중이 작용할 때, 이종재료의 상호조합에 의한 접착계면에 대한 BEM 응력해석을 실시하였다.

접착이음의 경사각 $\theta = 0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$ 에 대하여 접착층의 두께를 $h = 0.1, 0.5, 1.0\text{ mm}$ 로 변화시켜 가면서 접착제는 일정하게 고정시키고, 피착재만을 바꿔 가면서 응력해석을 실시하였다.

이종재료의 접착시 접착계면은 Fig. 3에서와 같이 2개의 계면 AB, CD가 존재하므로, 각 계면의 응력분포를 비교한 결과 탄성계수가 작은 피착재 쪽의 접착계면에 대한 응력집중이 크게 나타났다. Fig. 3에서 재료 1의 피착재가 Table 1의 연강이고, 재료 2의 피착재가

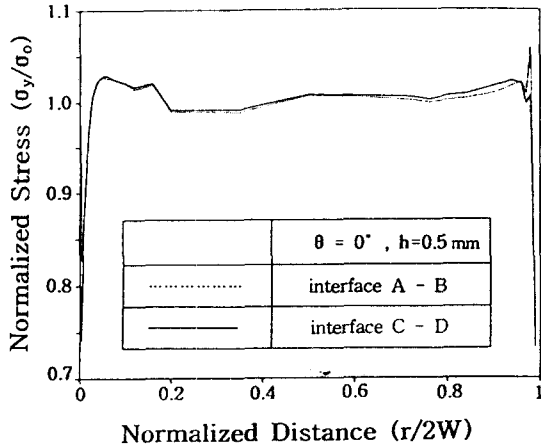


Fig. 3 Relationship between normal stress and a pair of adhesively bonded dissimilar materials

알루미늄인 경우 에폭시 수지로 경사각 $\theta=0^\circ$, 접착층 두께 $h=0.5\text{mm}$ 로 접착하였을 때, 수직응력을 계면단으로부터의 거리로 무차원화하여 도시한 예이다.

탄성계수가 작은 알루미늄 쪽의 접착계면 CD상의 응력집중 현상이 계면단에서 더욱 두드러진 것을 알 수 있다.

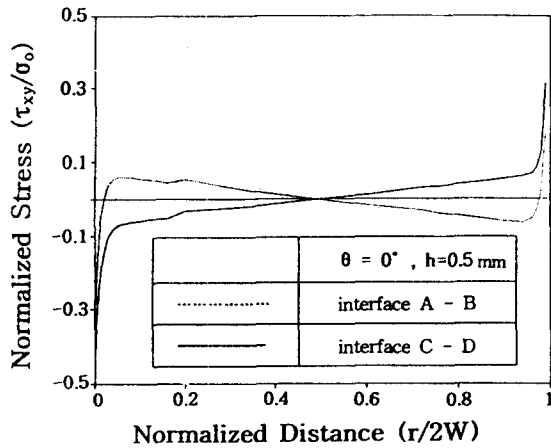


Fig. 4 Relationship between shear stress and a pair of adhesively bonded dissimilar materials

이 경우의 전단응력 해석결과도 Fig. 4에 도시하였지만, 계면 CD상의 계면단 응력분포가 AB상의 응력분포보다 현저히 집중현상이 큰 것을 알 수 있다.

따라서, 이종재료의 경사접착이음에 대한 응력해석 결과는 응력집중 현상이 큰 접착계면 CD상의 응력해석 결과만을 도시하고, 이 결과만을 이용하여 응력특이성을 해석하였다.

3.3 이종재료의 경사접착이음에 대한 응력해석 결과

이종재료의 상호조합에 의한 접착계면에 대한 BEM 응력해석을 3.2절의 요령으로 실시하고, 그 결과를 계면단에서의 거리에 따라 무차원화하여 Fig. 5와 Fig. 6에 각각 나타내었다.

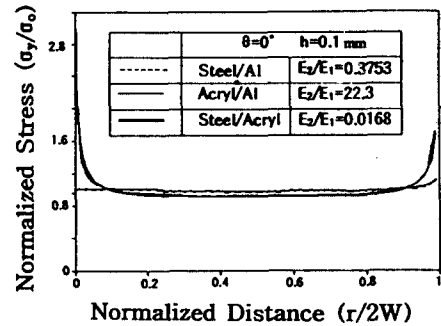


Fig. 5 Relationship between normal stress and a pair of adhesively bonded dissimilar materials

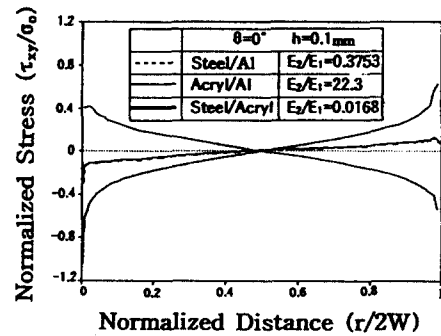


Fig. 6 Relationship between shear stress and a pair of adhesively bonded dissimilar materials

Fig. 5와 Fig. 6은 경사각 $\theta=0^\circ$ 인 맞대기이음 (butt joint)이고, 접착층의 두께가 $h=0.1\text{mm}$ 인 경우의 Steel/Al, Acryl/Al 과 Steel/Acryl에 대한 수직응력과 전단응력의 분포를 각각 도기한 것이다.

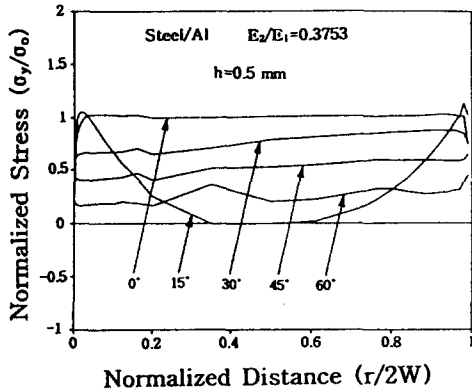


Fig. 7 Relationship between normal stress and a pair of adhesively bonded dissimilar materials

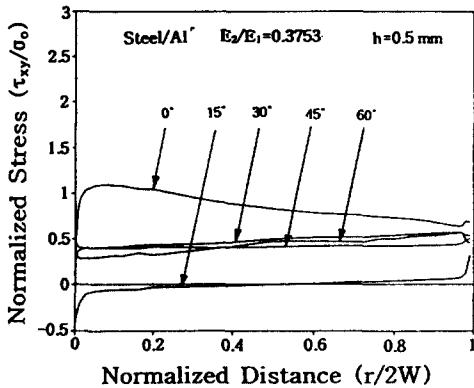


Fig. 8 Relationship between shear stress and a pair of adhesively bonded dissimilar materials

또한, Fig. 7과 Fig. 8은 Steel/Al 을 접착층의 두께가 $h=0.5\text{mm}$ 로 접착시킨 경우에 대한 경사각 θ 의 변화에 따른 수직 및 전단응력의 분포를 도기한 것이다.

접착계면에 대한 응력분포가 매우 복잡하고 계면단에서는 응력집중이 가혹하게 분포하는 현상을 보여준다.

이러한 응력분포현상을 충분히 고려하지 않고서는 접착이음에 대한 효과적인 접착강도의 평가는 곤란하다고 본다.

따라서 응력특이성을 충분히 고려한 정량적이고, 효과적인 파괴지배인자에 의한 이종재료의 접착강도를 평가하기 위해서는 접착계면단에 대한 응력특이성을 고려한 응력특이성지수 λ 를 이용한 평가가 요망된다.

4. 응력특이성의 BEM 해석결과 및 고찰

4.1 응력특이성의 BEM 해석

Fig. 9는 Steel/Al을 접착시킨 것으로, 경사각

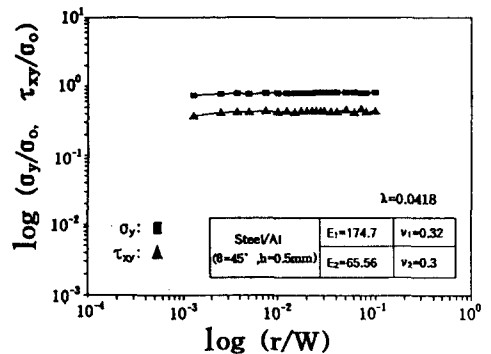


Fig. 9 Calculation of stress singularity index at an adhesively bonded interface edge

Table 2. Stress singularity index by BEM analysis ($\theta=45^\circ, h=0.5\text{mm}$)

Materials	Young's modulus E(GPa)	Poisson's ratio, ν	$\theta=45^\circ, h=0.5\text{mm}$	$\theta=45^\circ, h=0$
			Re λ	Re λ
Steel	174.7	0.32	0.0578	0.0775
Al	65.56	0.3		
Steel	174.7	0.32	0.0426	0
Al	2.94	0.345		
Steel	65.56	0.3	0.1052	0
Al	2.94	0.345		

$\theta = 45^\circ$ 이고, 접착층의 두께가 $h=0.5\text{mm}$ 인 경우의 BEM 응력해석 결과인 Fig. 7과 Fig. 8을 대수그래프에 도시한 후, 응력특이성지수 λ 를 계산하는 방법을 설명하는 한 예이다.

접착계면단의 응력분포가 무한대로 되는 경향을 나타내고 있으므로 계면단에서의 거리에 따른 응력을 외삽하여 그 기울기 λ 를 구하고, 그 결과를 Table 2에 나타내었다. 접착층이 있는 경우 아직껏 비교할 만한 이론 및 수치해석결과가 없기 때문에 직접적인 비교·검토는 곤란하다.

그러나, 접착층의 두께가 $h=0$ 인 접합이음에 대한 접합계면단의 응력특이성지수의 해석은 이론 및 BEM 해석결과가 잘 일치하는 것을 확인할 수 있었으므로, 이종재료의 접착계면단에 대한 응력특이성지수 λ_0 그와 같은 요령으로 BEM 해석을 하여 구하였다.⁽⁸⁾

4.2 응력특이성의 소멸조건

Fig. 10은 Steel/Al 을 접착시킨 경우($E_2/E_1 = 0.3753$), 접착이음의 경사각 변화에 따른 응력특이성지수 λ 의 변화를 나타내었다. 경사각과 접착층의 두께에 따라 응력특이성은 증가하기도 하고, 감소하기도 하는 매우 복잡한 양상을 보여준다.

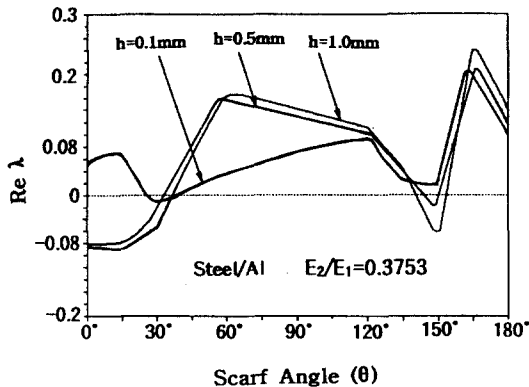


Fig. 10 Effect of scarf angle for stress singularity index at an adhesively bonded interface edge

경사각과 접착층의 두께변화에 따른 응력특이성의 소멸조건은 식(2)에서 $\lambda \leq 0$ 로 되는 접착조건을 고려하

면, Fig. 10에서 응력특이성의 소멸구간을 쉽게 파악할 수 있다. 그림에서 접착층의 두께가 증가할수록 $\theta = 0^\circ$ 에서부터 $\theta = 30^\circ$ 까지와 $\theta = 150^\circ$ 부근에서 응력특이성의 소멸구간이 증가하여 응력이 완화되는 것을 쉽게 파악할 수 있다.

접착층이 없는 경우 ($h=0$)의 소멸조건⁽⁸⁾과 비교하면 상당한 차이를 나타내고 있다.

이러한 현상은 얇은 접착층내에서 응력분포가 매우 복잡하게 변화하는 것을 의미하고, 접착계면상에 대한 응력분포는 접착층의 두께에 매우 민감한 영향을 받는 것을 알 수 있다.

4.3 응력특이성계수의 계산

응력특이성지수 λ 를 식(1)에 대입하여 계면단으로 부

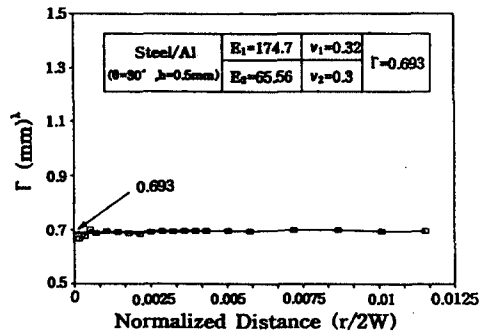


Fig. 11 Extrapolation of Γ for the distance from an interface edge

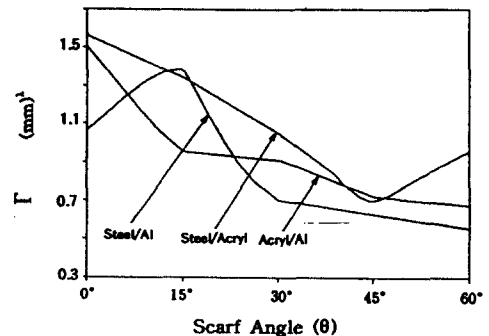


Fig. 12 Effect of scarf angle for stress singularity factor at an adhesively bonded interface edge ($h=0.1\text{mm}$)

터의 거리 r 에 따른 외삽법으로 응력특이성계수 Γ 를 계산하였다.

Fig. 11은 Steel/Al을 접착시킨 경우로 $\theta=30^\circ$ $h=0.5\text{mm}$ 일 때, 계면단에 대한 Γ 를 r 에 따라 외삽하는 방법을 도시하고, 그 계산결과를 나타내었다.

Fig. 12~Fig. 14는 Steel/Al, Steel/Acryl과 Acryl/Al을 접착시킨 것으로 접착층의 두께를 각각 $h=0.1, 0.5, 1.0\text{mm}$ 으로 변화시키고, 경사각 θ 에 따른 Γ 의 변화를 도시한 것이다.

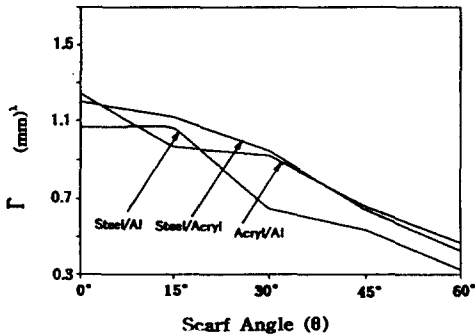


Fig. 13 Effect of scarf angle for stress singularity factor at an adhesively bonded interface edge ($h=0.5\text{mm}$)

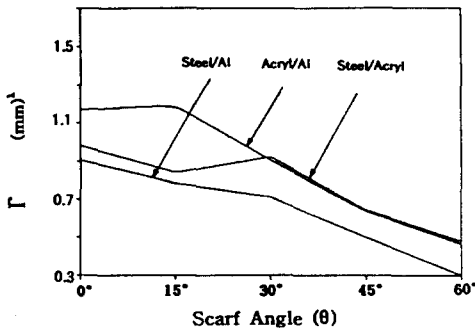


Fig. 14 Effect of scarf angle for stress singularity factor at an adhesively bonded interface edge ($h=1.0\text{mm}$)

이종재료의 상호 조합방법, 접착층의 두께 및 경사각의 변화에 따라 Γ 가 증감하는 매우 복잡한 양상을 나타낸다.

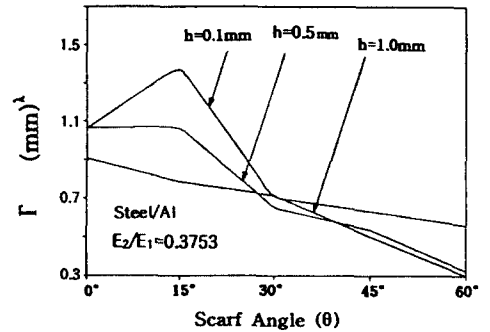


Fig. 15 Effect of adhesive thickness for stress singularity factor at an adhesively bonded interface edge

Fig. 15는 Steel/Al을 접착시켰을 경우, 접착층의 두께와 Γ 의 변화관계를 도시한 것으로, 접착층의 두께가 증가할수록, 경사각이 클수록 Γ 는 감소하는 경향을 나타내고 있다.

이와 같이 접착이음에 대한 파괴강도는 접착계면단에 대한 응력특이성지수 λ 에 밀접한 관계가 있으므로, 접착이음의 강도평가는 접착계면단에 대한 응력특이성지수 λ 를 고려하지 않고서는 충분한 접착강도의 평가는 곤란하다.

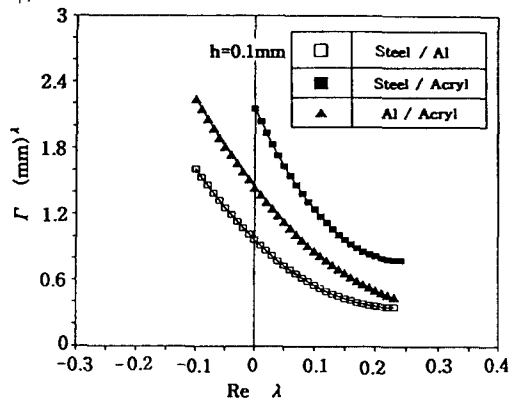


Fig. 16 Relationship between λ and Γ for a pair of adhesively bonded dissimilar materials

Fig. 16은 이종재료의 상호조합에 따른 응력특이성계수 Γ 를 응력특이성지수 λ 에 대하여 도시한 것이고, Fig. 17은 Steel/Al 접착의 경우, 접착층의 두께변화에 따른 Γ 의 영향을 λ 에 대하여 나타낸 것이다.

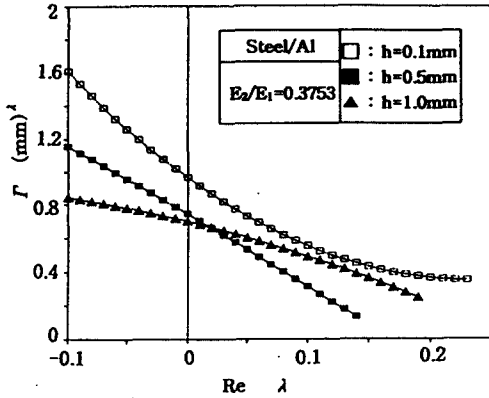


Fig. 17 Relationship between λ and Γ for the thickness of adhesive layers

Fig. 12~Fig. 15에서 경사각 θ 에 대한 Γ 를 도시한 결과는 매우 복잡하게 변화하였지만, Fig. 16과 Fig. 17에서 알 수 있듯이 λ 에 대한 Γ 를 도시한 결과는 일정한 양상으로 변화하는 것을 알 수 있다.

5. 실험

접착이음에 대한 강도평가방법이 미확립된 상태이므로 파괴강도의 예측 및 그 시험방법도 아직 정립되어 있지 않은 상태이다. 본 연구에서는 이종재료의 접착강도 시험법의 확립과 정적강도의 평가방법을 제안하기 위하여 응력특이성지수가 광범위하게 변화하는 시험편을 준비하여 정적파괴 실험을 실시하였다.

5.1 피착재와 접착제

본 실험에서 사용한 피착재는 연강과 알루미늄 판재이고, 접착제로는 구조접착제로 널리 사용되고 있는 에폭시 수지를 사용하였다. 에폭시 수지는 아랄다이트(Araldite)로서 주체인 프레 폴리머와 무수 프탈산계인 경화제의 혼합형으로 혼합비는 중량비로 주체와 경화제를 10:3으로 하였다. 주체와 경화제의 혼합시 기포가

생기지 않도록 세심한 주의로 충분히 혼합하였다.

연강, 알루미늄과 에폭시 수지의 기계적성질은 정적실험을 실시하여 구하였고, 그 결과를 Table 1에 나타내었다. 에폭시 수지의 기계적성질의 측정실험은 시험편 제작시와 동일한 조건하에서 시험편을 제작하여 스트레인 게이지를 부착하여 실험에서 직접 구하였다.

5.2 시험편의 제작

본 실험에서 사용한 시험편의 형상 및 치수는 Fig. 18과 같다. 경사이음의 경사각도를 $\theta=0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$ 로 변화시켜 가면서 접착시험편을 제작하였다.

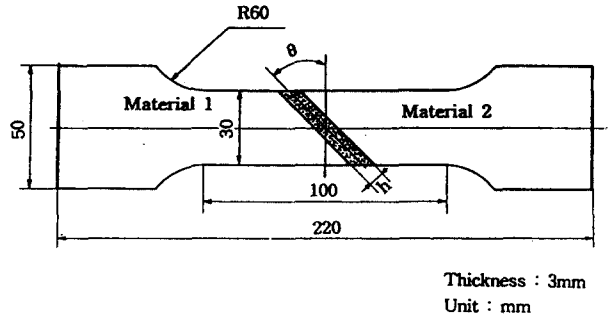


Fig. 18 Shapes and dimensions of adhesively bonded joint specimens

시험편의 제작은 우선 연강과 알루미늄 판재를 소정의 치수로 기계가공한 후, 접착면을 #80의 샌드페이퍼로 거친 연마를 하고, 다시 #220의 샌드페이퍼로 충분히 연마하였다.

접착할 면은 아세톤으로 세정한 후, 물로 씻고 건조시켰다. 접착시 접착층의 두께를 일정하게 유지시키려고 노력하였고, 특히 불순물이나 기포가 혼입되지 않도록 세심한 주의를 기울여 접착하였다.

접착제의 경화는 접착시험편을 지그에 고정된 상태로 응력동결로에서 158°C 의 온도로 24시간 경화처리한 후 노냉시켰다. 시험편의 가공 및 경화에 따른 잔류응력을 제거하기 위하여 풀림(annealing)처리⁽¹¹⁾하였다. 이종재료의 접착에 의한 잔류응력의 완전제거는 어려운 것으로 생각되지만, 열에 의한 잔류응력의 영향은 없는 것으로 간주하고, 본 논문에서는 잔류응력은 고려하지 않았다.

5.3 실험방법

시험기는 인스트론(Instron)형의 만능 재료시험기 (Model 4206)을 사용하였다. 용량 150kN의 시험기에 로드셀을 적절한 범위의 시험하중으로 설정한 후, 시험편이 파단될 때까지 정적파괴강도 실험을 실시하고, 그 과정을 X-Y 레코더에 기록하여 측정하였다. 측정된 실험값은 각각 3개의 시험편에 대한 평균값으로 하였다. 정적실험시 하중속도는 0.2mm/min으로 일정하게 유지 시켰다. 또한, 접착층의 두께는 금속현미경을 사용하여 100배율로 측정하고, 그 평균 값을 택하였다.

6. 실험결과 및 고찰

6.1 종래의 접착강도 평가법의 문제점

피착재를 연강과 알루미늄 판재로 하고, 접착이음의 경사각 $\theta=0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$ 로 변화시켜 가면서 접착시험편을 제작한 후, 정적파괴강도 실험을 실시하였다.

접착이음의 경사각과 접착면적을 변화시켜 가면서 실시한 정적 최대파괴응력 값을 Fig. 19에 나타내었다.

경사각이 0° 보다는 15° 가 접착단면적이 증가하였지만, 접착파괴응력은 감소하였다.

또한, 경사각이 15° 인 경우보다는 접착단면적이 증가한 30° 의 경우, 접착파괴응력은 급격히 증가한다. 그러나, 경사각이 $45^\circ, 60^\circ$ 로 커지면 단면적이 증가하지만, 접착파괴응력은 오히려 급격히 감소하는 경향을 나타낸다.

이러한 현상은 단면적의 변화에 관계없이 일정한 응력 값을 갖는 균질재에서 나타나는 현상과는 달리, 접착 및 접합의 경우 단면적의 변화에 따라 접착강도는 증가하기도 하고, 감소하기도 하는 복잡한 양상을 보여주는 한 예이다. 이것은 접착이음의 경우, 본 연구에서 해석한 접착계면단에 대한 응력특이성이 존재하기 때문이다.

이러한 현상의 파악은 Fig. 10, Fig. 12와 Fig. 19를 동시에 비교·검토하면 쉽게 파악할 수 있다. 즉, Fig. 10과 Fig. 12에서 경사각 θ 에 대한 응력특이성지수 λ 및 응력특이성계수 Γ 는 $\theta=0^\circ$ 인 경우보다 $\theta=15^\circ$ 의 경우가 크기 때문에 $\theta=15^\circ$ 인 경우의 접착파괴강도가 감소하는 것을 알 수 있다.

또한, $\theta=15^\circ$ 인 경우가 $\theta=30^\circ$ 인 경우보다 λ 및 Γ

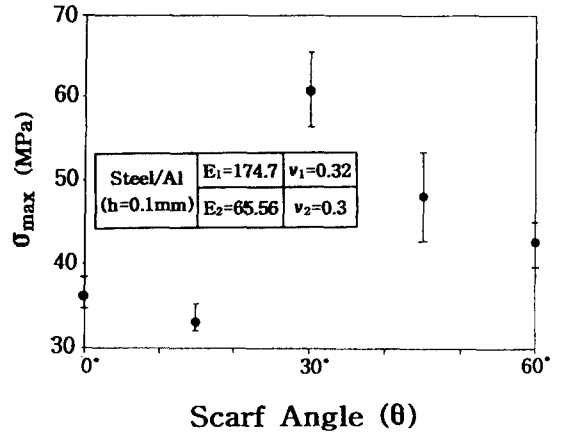


Fig. 19 Experimental static fracture strength for scarf angle of adhesively bonded joints

가 상당히 크고, $\theta=60^\circ$ 인 경우보다 크기 때문에 응력 집중 현상이 증가하여 접착파괴강도는 반대로 감소하는 것을 알 수 있다.

실제 실험에서 축방향 최대접착파괴하중 P_{max} 은 경사각 θ 가 증가함에 따라 증가하지만, 최대파괴응력 σ_{max} 은 접착계면단에 대한 응력특이성지수 λ 에 관계되므로, 접착이음의 파괴강도는 계면단의 λ 를 고려하지 않고서는 충분한 접착강도를 평가하기는 곤란하다고 본다.

따라서, 종래의 평균응력에 의한 접착강도 평가방법은 충분한 강도평가방법으로 인정되기 어렵고, 고정밀도의 정량적인 접착강도를 평가하기 위해서는 응력특이성지수 λ 를 고려한 응력특이성계수 Γ 에 의한 강도평가가 요망된다.

6.2 이종재료 접착이음에 대한 파괴강도 예측방법의 제안

실험에서 구한 접착이음에 대한 축방향 최대파괴응력 σ_{max} 을 응력특이성지수 λ 에 관하여 Fig. 20에 도시하였다.

Fig. 19에서 λ 를 고려하지 않은 σ_{max} 의 결과들이 Fig. 20에서 λ 의 값에 따라 순차적으로 감소하는 경향을 보여준다. 그림에서 λ 의 값만 알면 접착이음 시험편

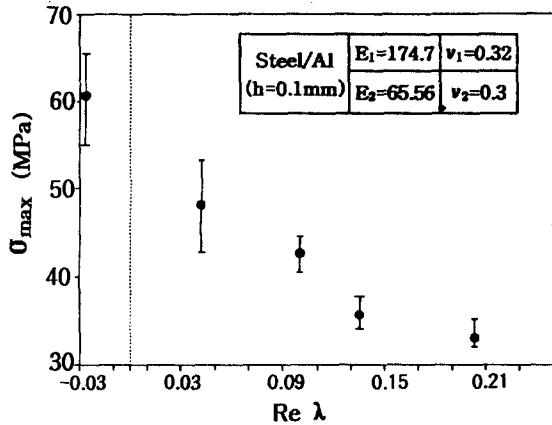


Fig. 20 Experimental static fracture strength for stress singularity index of adhesively bonded joints

에 대한 파괴응력을 직접 구할 수 있고, 접착단면적을 고려하면 고정밀도의 파괴하중 및 파괴강도의 예측도 가능하다.

그러나, 시험편의 형상 및 치수, 부하조건에 의존하지 않고, 수직 및 전단의 혼합하중이 작용할 때 각 응력성분에 의한 접착파괴를 지배하는 정량적이고, 통일적인 파괴인자의 사용이 보다 효과적이라 생각되어 응력특이성계수 Γ 를 사용하고자 한다.⁽⁴⁾

Fig. 16과 Fig. 17에 도시한 λ 와 Γ 의 관계식과 식(1)을 이용하여 실험에서 구한 축방향 최대파괴응력 σ_{max} 을 대입하여 임계 응력특이성계수 Γ_{cr} 을 구한 후, λ 에 관하여 Fig. 21에 나타내었다. 이 결과로부터 이종재료의 접착이음에 대한 파괴기준의 파악, 파괴강도의 예측 및 고정밀도의 강도평가도 가능하므로 새로운 접착강도 평가방법으로 제안한다.

즉, Steel/Al을 예복시 수치로 접착시킨 경우, 실제 작용하중에 의한 Γ 와 파괴하중에 대한 Fig. 21의 Γ_{cr} 의 값을 비교하면, 파괴기준은 다음 식에서 결정된다.

$$\Gamma \geq \Gamma_{cr} \quad (3)$$

접착이음이 파괴되지 않고 안정되려면, Fig. 21에서

λ 에 대한 Γ 의 값이 Γ_{cr} 의 선 아래에 있도록 해야하고, $\Gamma \geq \Gamma_{cr}$ 이면 접착이음은 파괴된다.

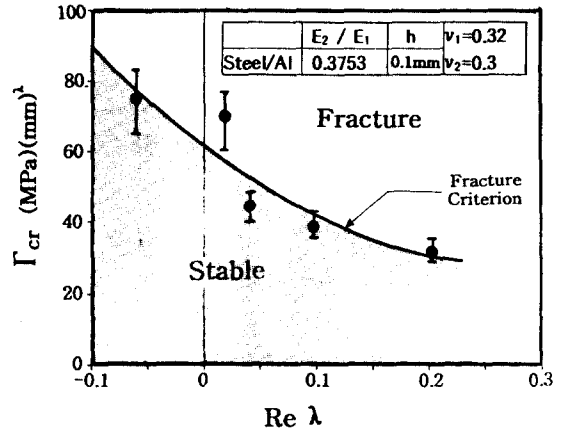


Fig. 21 Fracture criterion for the adhesively bonded joints of dissimilar materials

이러한 파괴기준을 파악하면, 이종재료의 접착·접합이음에 대한 고정밀도의 정량적인 파괴강도의 평가 및 예측도 용이하다.

또한, 이러한 파괴기준식은 각종 접착·접합이음 및 접착 구조물, 세라믹/금속 접합이음에 대한 강도평가에도 확대 적용이 가능할 것으로 기대된다.

7. 결 론

이종재료의 접착강도 평가법을 확립하기 위하여 재료의 조합특성 및 접착면의 경사각을 변화시켜 가면서 BEM 응력해석 및 응력특이성을 해석하고, 정적파괴강도 실험을 실시한 후, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 이종재료의 상호조합, 경사각 및 접착층의 두께 변화에 따른 접착면에 대한 고정밀도의 BEM 응력해석 및 응력분포의 파악이 가능하였다.
- (2) 이종재료 경사접착이음의 BEM 응력해석 결과를 이용하여 접착계면단 응력특이성지수 λ 를 구하고, 이종재료의 상호조합, 경사각 및 접착층의 두께 변화에 따른 λ 의 상호관계를 명백히 하였다.

- (3) 이종재료의 경사접착이음에 대한 경사각의 변화에 따른 응력특이성지수 λ 의 소멸구간을 분명히 하였다.
- (4) 접착계면단에 대한 응력특이성지수 λ 의 계산에 의한 응력특이성계수 Γ 를 사용한 무균열 이종재료의 접착이음에 대한 정량적인 파괴강도의 예측 및 강도평가방법을 제안하였다.
- (5) 본 연구에서 얻어진 평가방법을 이용하여 접착-접합구조물의 파괴강도의 예측 및 강도 평가가 가능하고, 특히 세라믹/금속 접합부재의 강도평가도 가능할 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

- (1) Reinhart, T. J., 1981, "Use of Structural Adhesives by the U.S. Air Force", Adhesive Age, Vol. 10, No.5, pp. 20-25.
- (2) 정남용, 1992, "접착이음의 강도평가에 관한 연구 (제1보)", 대한기계학회논문집, 16~4, pp. 667-674.
- (3) 정남용, 1993, "접착이음의 강도평가에 관한 연구 (제2보)", 대한기계학회논문집, 7~4, pp. 855-862.
- (4) 정남용, 오봉택, 1995, "응력특이성을 고려한 이종 접합재의 강도평가", 대한기계학회 춘계학술대회 논문집(I), pp. 642-645.
- (5) Bogy, D.B., 1975, "The Plane Solution for Joined Dissimilar Elastic Semistrips under Tensions", J. Appl. Mech., Vol. 42, pp. 93-98.
- (6) 服部, 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), 56~523, pp. 618-623.
- (7) 久保, 大路, 1991, "自由縁應力特異性を消失させるための異種材料接合端の幾何學的條件", 日本機械學會論文集(A), 57~535, pp. 632.
- (8) 정남용, 오봉택, 1994, "이종재 경사이음의 접합계면단에 대한 응력특이성계수의 해석", 대한기계학회 추계학술대회 논문집(I), pp. 409-412.
- (9) 정남용 외 2인, 1994, "이종재료 단순접치기 접착이음에 대한 응력특이성의 해석", 한국자동차공학회 추계학술대회 논문집(II), pp. 417-423.
- (10) 정남용, 1995, "이종재 접착이음에 대한 응력특이성의 BEM해석", 대한기계학회 춘계학술대회 논문집(I), pp. 584-587.
- (11) 辻二郎, 西田正孝, 河田行三, 1965, "光彈性實驗法", 日刊工業, pp. 107-110.