

알루미늄 합금의 접착구조물에 대한 접착강도의 평가방법

정 남 용*, 이 진 호**

Evaluation Method of Bonded Strength in Adhesively Bonded Structures of the Aluminum Alloys

N. Y. Chung*, J. H. Yi**

Abstract

In a view point of earth environmental protection and social requirement, adhesively bonded structures of aluminum alloys have become to be employed for the purpose of decreasing fuel ratio by weight reduction and to improve performance in various engineering fields such as aircrafts, automobiles, rolling stocks and so on. In spite of such wide applications in adhesively bonded structures of aluminum alloys, the quantitative fracture criterion and evaluation method of its bonded strength have not been established yet.

The objective of this paper is to establish fracture criterion considering stress singularity at interface edges in adhesively bonded structures of aluminum alloys. Through the analyses of boundary element method and static fracture experiments with three different types of specimens in the adhesively bonded joints of aluminum alloys, its fracture criterion was proposed and discussed about strength evaluation of adhesively bonded structures.

Keywords : Stress Singularity(응력특이성), Adhesively Bonded Joint(접착이음), Interface Edge(계면단), Boundary Element Method(경계요소법), Adhesively Bonded Structures(접착구조물), Fracture Criterion(파괴기준), Total Critical Stress Singularity Factor(전임계응력특이성계수), Separated Critical Stress Singularity Factor(분리임계 응력특이성계수)

* 숭실대학교 기계공학과

** 숭실대학교 대학원

1. 서론

알루미늄 합금은 구조의 경량화를 위하여 오래 전부터 항공기에 사용되어져 왔고, 최근에는 지구환경보호의 관점에서 자동차의 연비와 성능을 향상시키기 위한 경량화의 사회적 요구에 따라 차체에 기존의 철강 외에 알루미늄 합금의 구조접착이 주목을 받고 있다^(1~3). 또한, 서로 재료특성이 다른 이종재료인 알루미늄 합금, 강판, 또는 FRP(fiber reinforced plastics) 복합재료를 상호 접착하여 사용하기도 하고, 철도차량 통로문의 경량화를 위하여 접착에 의한 알루미늄 하니컴 샌드위치 판재의 사용이 검토되고 있다⁽⁴⁾.

이와 같이 접착에 의한 결합방법은 재료특성이 서로 다른 비용접성 이종재료의 동시 접착이 가능하고, 기계적 결합 및 용접 결합방법에 비하여 많은 이점이 있다. 특히 경량화, 진동·소음의 감소, 구조의 최적화가 가능하고, 내구성에 대한 신뢰성을 향상시킬 수 있는 장점들로 인하여 접착구조물의 사용은 급격히 증가하고 있다. 이러한 접착구조물의 수요증가에 따라 알루미늄 합금의 접착구조물에 대한 강도평가 방법의 필요성이 요망되지만, 정량적인 강도평가 방법이 미확립된 상태이고, 이에 대한 강도평가 방법의 확립이 시급히 요청되고 있다^(5~8).

접착체를 접착제로 접착할 경우 두 재료가 접착되는 계면에서는 재료들의 물성치의 차이, 재료 및 형상의 불연속에 의한 응력특이성이 생기고, 이러한 현상이 강하게 발생하는 응력특이점은 강도저하의 원인이 되어 파괴의 기점이 되고, 결국은 접착구조물의 파괴를 초래하게 된다. 그러므로 접착구조물의 강도는 접착계면의 응력과 응력특이성에 크게 좌우된다^(9~14). 따라서 접착계면의 응력특이성을 고려한 파괴지배인자를 이용하여 알루미늄 합금의 접착구조물에 대한 접착강도를 평가하는 것은 매우 중요한 과제로 남아있다.

본 연구에서는 기하학적 형상을 달리하는 경사이음(scarf joint)과 단순 겹치기이음(single-lap joint)의 접착 시험편에 대하여 경계요소법(boundary element method : BEM) 응력해석과 정적 파괴강도 실험을 실시하여 접착계면의 응력특이성을 해석하고, 응력특이성지수에 의한 전임계 응력특이성계수(total critical stress singularity factor)와 이들의 수치 및 전단응력에 의한 분리임계 응력특이성계수(separated critical stress singularity factor)를 사용한 파괴기준을 각각 설정하였다.

이와 같이 설정된 파괴기준에 의하여 접착구조물에 대

한 접착강도의 평가방법을 제안하였고, 이를 확인하기 위하여 알루미늄의 단순 덧대기이음(single-strap joint) 접착구조 시험편을 제작하여 본 연구에서 얻어진 파괴기준의 유효성과 접착강도의 평가방법에 관하여 검토하였다.

2. 시험편 및 실험방법

2.1 접착체와 접착제의 기계적성질

본 실험에서 사용한 접착체는 알루미늄 합금이고, 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 혼합시켰다.

시험편의 재료인 접착체와 접착제의 기계적 성질은 정적실험으로 직접 구하였고⁽⁷⁾, 그 결과는 Table 1과 같다.

Table 1 Mechanical properties of adherend and adhesive

Mechanical properties Materials	Young's modulus E(GPa)	Poisson's ratio ν
Aluminum alloy	65.56	0.32
Epoxy resin	3.17	0.37

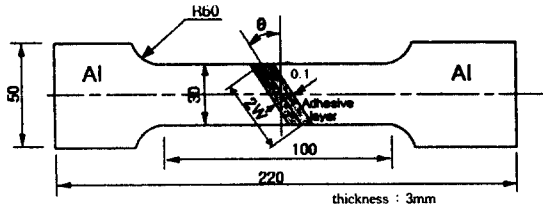
2.2 시험편의 제작

본 실험에서 사용한 접착이음 시험편의 형상 및 치수는 Fig. 1과 같고, 경사이음, 단순 겹치기이음, 그리고 단순 덧대기이음의 접착구조 시험편을 제작하였다.

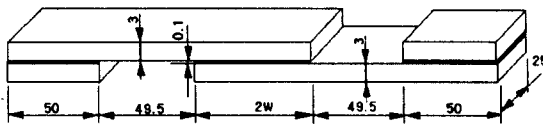
경사접착이음 시험편의 경사각 $\theta=0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ$ 로 하고, 단순겹치기 접착이음 시험편의 겹치기 길이 $2W=12.5, 25, 35$ mm, 접착층의 두께는 각각 $h=0.1, 0.5, 1.0$ mm로 변화시킨 시험편을 제작하였다. 또한 단순 덧대기이음 시험편은 접착층의 두께 $h=0.1$ mm인 경우 겹치기 길이 $2L=30, 50, 70$ mm로 하였다.

시험편의 제작은 우선 알루미늄 판재를 소정의 치수로 기계가공한 후, 접착면을 #80의 샌드 페이퍼로 거친 연마를 하고, 다시 #220의 샌드 페이퍼로 충분히 연마하였다. 접착할 면은 아세톤으로 세정한 후, 물로 씻고 건조시켰다.

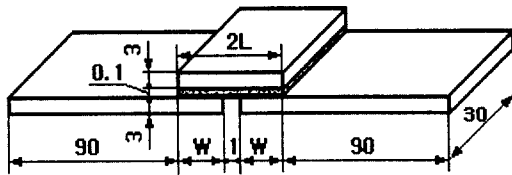
접착제의 경화는 접착시험편을 지그에 고정된 상태로 응력동결로에서 158℃의 온도로 24시간 경화처리한 후 노냉시켰다. 시험편의 가공 및 경화에 따른 잔류응력은 거의 없는 것으로 간주하고⁽¹¹⁾, 이를 무시하였다.



(a) Scarf joint



(b) Single-lap joint



(c) Single-strap joint

Fig. 1 Shape and dimensions of adhesively bonded joint specimens

2.3 실험방법

시험기는 인스트론(Instron)형의 만능 재료시험기 (Model 4206)를 사용하였다. 용량 150kN의 시험기에 로드셀을 적절히 범위의 시험하중으로 설정한 후, 시험편이 파단될 때까지 정적 파괴강도 실험을 실시하고, 그 과정을 X-Y 레코더에 기록하여 최대파괴하중을 측정하였다. 측정된 실험 값은 각 형상의 시험편에 대하여 각각 3개의 시험편의 평균값으로 하였다. 정적실험시 하중속도는 0.2 mm/min으로 일정하게 유지시켰다.

3. 접착계면단의 응력특이성 해석

3.1 접착계면 모델

실제의 접착공정에서 생기는 접착계면의 조성·조직 및 형상은 매우 복잡하지만, 역학적으로 취급하기 위해서는 접착이음을 가급적 단순화하고, 응력특이성이 광범위하게 변화하는 접착이음에 대한 모델의 고안·제작이 필요하다.

Fig. 2와 같은 두 재료의 접착계면 모델을 설정한다. 그림에서 θ 는 접착계면의 경사각, θ_1 과 θ_2 는 접착계면과 두 재료의 계면단이 이루는 경사각이고, 이들의 크기와 방향에 따라 경사접착이음, 단순 겹치기이음 및 단순 덧대기이음의 계면모델이 된다⁽¹¹⁾. 또한, r 은 계면단에서의 거리이고, ϕ 는 r 에 대한 경사각도를 의미한다.

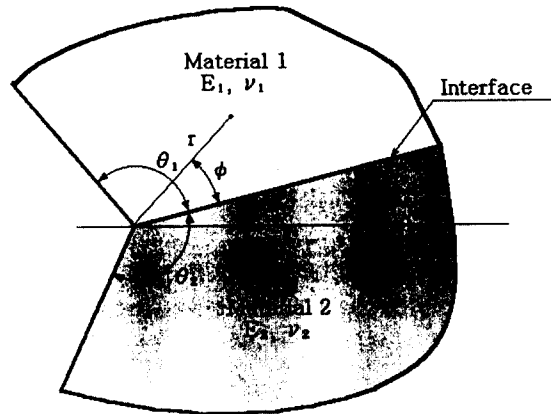
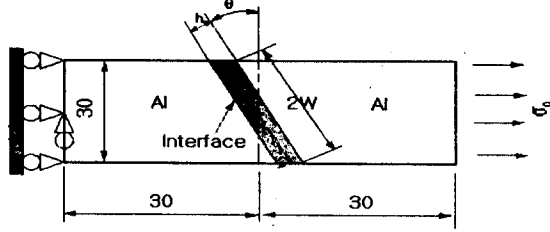


Fig. 2 Model of the adhesively bonded interface edge

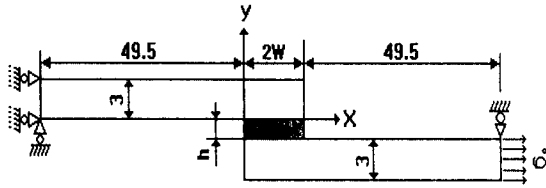
3.2 접착구조물의 해석모델

Fig. 3과 같은 접착이음의 해석모델에 대하여 계면의 경사각, 접착길이 및 접착두께의 변화에 따른 응력을 경계요소법을 이용하여 해석하였다. Fig. 3(a)와 같은 경사 접착이음 시험편은 경사각을 $\theta = 0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ$ 로 변화시키고, Fig. 3(b)와 같은 단순 겹치기이음 시험편에 대한 접착길이는 $2W = 12.5, 25, 35$ mm로 하고, 접착층의 두께는 각각 0.1, 0.5, 1.0 mm로 변화시켰다. 한편 Fig. 3(c)와 같은 단순 덧대기의 접착구조 시험편은 접착층의 두께를 0.1 mm로 하고, 겹치기 길이 $2L = 30$,

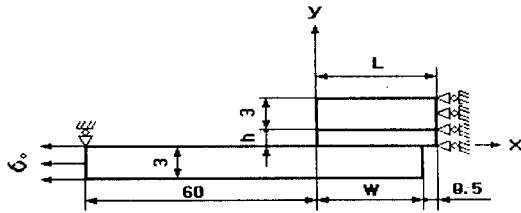
50, 70 mm로 변화시켜 가면서 응력해석을 실시하였다.



(a) Scarf joint



(b) Single-lap joint



(c) Single-strap joint

Fig. 3 Models of the BEM analysis in adhesively bonded structures

3.3 접착계면단의 응력특성 방정식

접착모델에 대한 응력특이성을 결정하는 응력특성 방정식은 Bogy에 의해 유도되었다⁽⁹⁾. 접착계면단 근방의 응력장 σ_{ij} 는 계면단으로부터의 거리 r 에 의해 다음 식과 같이 주어진다⁽¹¹⁾.

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

여기서 Γ_j 는 응력특이성 계수이고, $f_{ij}(\psi)$ 는 부하조건

및 시험편의 형상에 의존하는 계수이고, 응력특이성지수 λ 는 접착계면단의 형상 및 각 재료의 조합특성에 의해 결정되는 상수이다.

이 때 응력특이성지수 λ 는 다음의 특성방정식으로부터 구해진다⁽⁹⁾.

$$A\beta^2 + 2B\alpha\beta + Ca^2 + 2D\beta + 2E\alpha + F = 0 \quad (2)$$

여기서 α, β 는 Dunders 파라미터이며, 다음 식과 같이 된다.

$$\alpha = \frac{\mu_1(k_2 + 1) - \mu_2(k_1 + 1)}{\mu_1(k_2 + 1) + \mu_2(k_1 + 1)} \quad (3)$$

$$\beta = \frac{\mu_1(k_2 - 1) - \mu_2(k_1 - 1)}{\mu_1(k_2 + 1) + \mu_2(k_1 + 1)}$$

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

$$\mu_i = \frac{E_i}{2(1 + \nu_i)} \quad (5)$$

또한, 위 식에서 ν_i, E_i, μ_i 는 각각 재료의 푸와송비, 세로탄성계수, 전단탄성계수이고, 식(2)의 각 계수 A~F는 다음 식과 같이 표시된다.

$$A = 4Q(\lambda, \theta_1) Q(\lambda, \theta_2)$$

$$B = 2(1 - \lambda)^2 [\sin \theta_1 Q(\lambda, \theta_2) + \sin \theta_2 Q(\lambda, \theta_1)]$$

$$C = 4(1 - \lambda)^2 [(1 - \lambda)^2 - 1] \sin^2 \theta_1 \cdot \sin^2 \theta_2 + Q(\lambda, \theta_1 - \theta_2) \quad (6)$$

$$D = 2(1 - \lambda)^2 [\sin^2 \theta_1 \sin^2(\lambda, \theta_2) - \sin^2 \theta_2 \sin^2(\lambda, \theta_1)]$$

$$E = -D + Q(\lambda, \theta_2) - Q(\lambda, \theta_1)$$

$$F = Q(\lambda, \theta_1 + \theta_2)$$

여기서 Q 는 다음과 같이 된다.

$$Q(\lambda, \psi) = \sin^2[\psi(1 - \lambda)] - (1 - \lambda)^2 \sin^2 \psi \quad (7)$$

본 연구에서 응력특성 방정식(2)는 λ 에 관하여 비선형 방정식이므로 λ 가 실수로 되는 경우 $0 < \lambda < 1$ 의 범위에서

만족할 수 있는 정도의 해가 얻어질 때까지 되풀이되는 프로그램을 이용하여 구하였다. 또한 λ 가 복소근이 되는 경우에는 실수부와 허수부로 분리하여 계산하였다⁽¹¹⁾.

Fig. 3에 도시한 접착구조물의 각 모델에 대한 응력특이성지수 λ 의 값을 계산하여 Table 2에 나타내었다. Table 2는 응력집중이 가장 큰 이종재의 계면에 대한 응력특이성지수를 구하기 위하여 경사이음과 단순 겹치기이음에서는 Al/Epoxy 계면단, 단순 덧대기이음에서는 Epoxy/Al 계면단에 대한 응력특이성지수를 구하였다.

Table 2 Stress singularity index for specimens of Fig. 1

Model	Materials	$\theta_1(^{\circ})$	$\theta_2(^{\circ})$	$\theta(^{\circ})$	λ
Scarf joint	Al/Epoxy	90	-90	0	0.2392
		75	-115	15	0.2402
		60	-120	30	0.1588
		45	-135	45	0.085
Single-lap joint		180	-90	0	0.3496
Single-strap joint	Epoxy/Al	90	-180	0	0.46

3.4 BEM 응력해석

응력해석은 Kelvin의 기본해를 이용한 경계요소법 탄성해석을 실시하였다. 2차원 등매개(isoparametric)요소를 사용하고, 접착계면단에서의 응력분포를 고정밀도로 해석하기 위하여 서브요소로 분할하였고, 평면변형을 상태에서 해석하였다. 각 시험편의 접착계면 모델에 대한 BEM 응력해석을 실시하고, 그 결과를 계면단에서의 거리로 무차원화하여 그 한 예를 Fig. 4와 Fig. 5에 나타내었다. Fig. 4와 Fig. 5는 단순 겹치기이음에서 접착층의 두께 $h=0.1$ mm이고, 접착길이가 12.5, 25, 35 mm로 변화할 때 접착계면에 대한 수직응력과 전단응력의 분포를 나타낸 것이다.

접착계면단에 대한 응력분포의 변화가 매우 심하고, 전단응력에 비해 수직응력의 집중이 크게 나타나는 현상을 보여준다. 이러한 응력분포 현상은 접착구조물에 나타나는 일반적인 현상으로 이를 충분히 고려하지 않고서는 효과적인 접착강도의 평가는 곤란하다고 본다. 따라서 접착구

조물의 강도해석은 접착계면단에 대한 응력특이성을 충분히 고려한 정량적이고, 효과적인 파괴지배인자에 의한 평가가 요망된다.

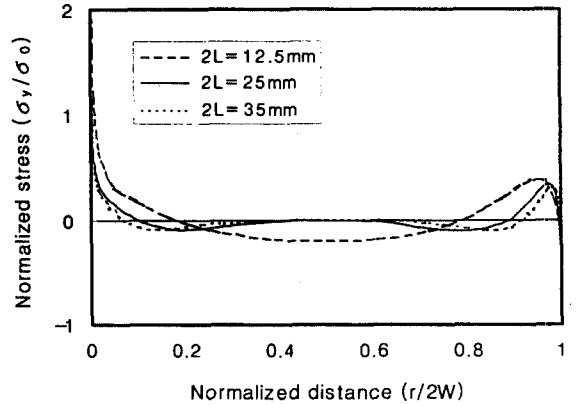


Fig. 4 Normalized stress for the change of lap length (single-lap joint, $h=0.1$ mm)

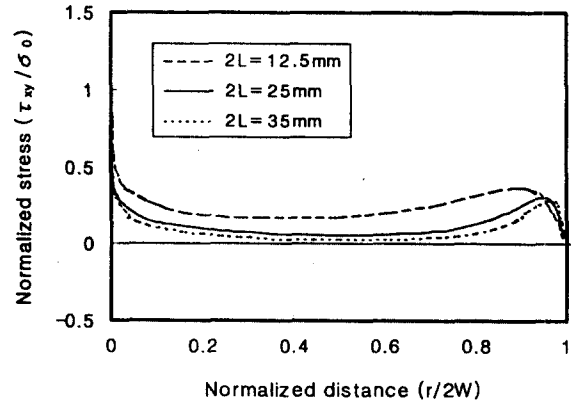


Fig. 5 Normalized shear stress for the change of lap length (single-lap joint, $h=0.1$ mm)

3.5 응력특이성계수의 계산

BEM 응력해석 결과와 식(2)에서 구한 Table 2의 응력특이성지수의 계산결과를 식(1)에 대입하여 계면단으로부터의 거리 r 에 따른 외삽법으로 응력특이성계수는 각각 다음 식에서 계산하였다.

$$\Gamma_1 = \sigma_y \cdot \lim_{r \rightarrow 0} (r)^\lambda$$

$$\Gamma_2 = \tau_{xy} \cdot \lim_{r \rightarrow 0} (r)^\lambda \tag{8}$$

$$\Gamma = \sqrt{\Gamma_1^2 + \Gamma_2^2}$$

여기서 Γ_1 과 Γ_2 는 각각 BEM 응력해석 결과인 수직 및 전단응력 성분을 사용한 값이고, 이들의 합을 전응력특이성계수 Γ 로 하였다.

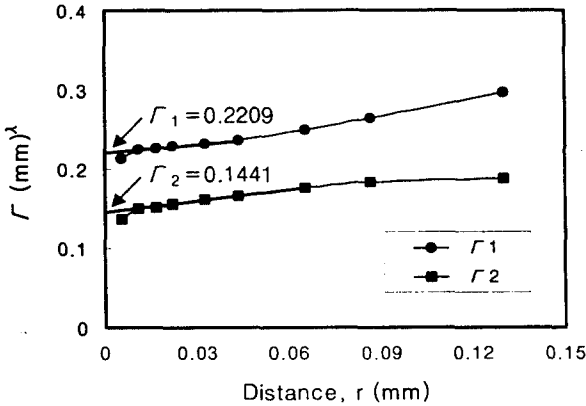


Fig. 6 Extrapolation of stress singularity factor at an adhesively bonded interface edge

Fig. 6은 경사이음의 경사각 $\theta=30^\circ$ 일 때, 수직 및 전단응력의 BEM 해석결과와 Table 2에서 구한 응력특이성지수 0.1588을 식(8)에 대입한 후 r/W 로 외삽하여 응력특이성계수 Γ_1 과 Γ_2 를 구하는 방법을 나타내고 있다.

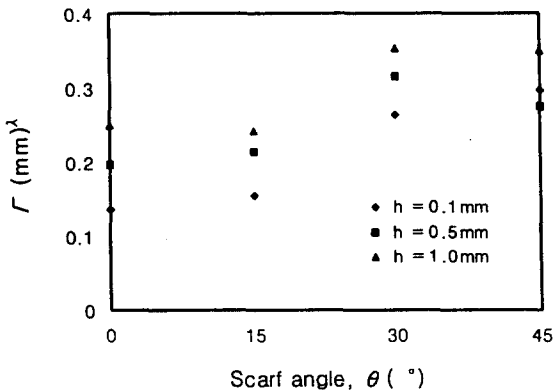


Fig. 7 Effect of scarf angle for total stress singularity factor according to the change of adhesive thickness.

Fig. 7은 경사접착이음에 대하여 접착두께와 경사각의 변화에 따른 전응력특이성계수 Γ 의 관계를 도시한 것이다. 경사각과 접착층의 두께가 증가할수록 전응력특이성계수 Γ 는 대체로 증가하는 경향을 보인다. 특히 $\theta=15^\circ$ 와 $\theta=30^\circ$ 사이에서 크게 증가하는 경향을 보이고 있는데, 이 구간은 응력특이성지수가 크게 감소하는 구간으로써 전응력특이성계수 Γ 는 응력특이성지수 λ 의 영향을 크게 받는 것을 알 수 있다.

Fig. 8은 단순 겹치기이음에 대하여 겹치기 길이와 접착층의 두께변화에 따른 전응력특이성계수 Γ 의 변화를 나타낸 것이다. 접착층의 두께가 증가함에 따라 Γ 의 값은 약간 증가하지만, 겹치기 길이가 증가할수록 전응력특이성계수는 급격히 감소한다.

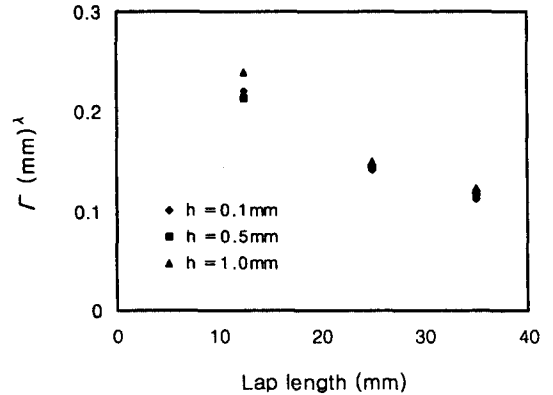


Fig. 8 Effect of lap length for total stress singularity factor according to the change of adhesive thickness.

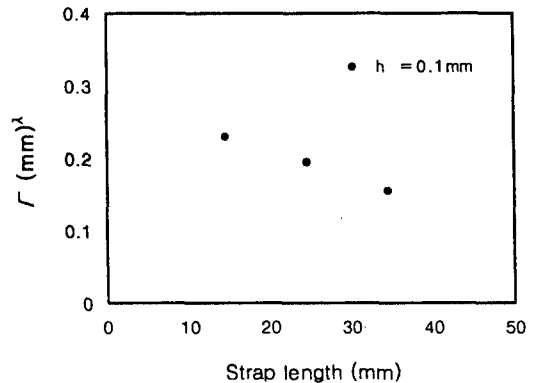


Fig. 9 Effect of strap length for total stress singularity factor ($h=0.1$ mm)

Fig. 9는 단순 덧대기이음에 대하여 덧대기 길이의 변화에 의한 전응력특이성계수 Γ 의 관계를 도시한 것이다. 단순 겹치기이음에서와 같이 겹치기 길이가 증가함에 따라 전응력특이성계수 Γ 는 감소하는 유사한 경향을 보이고 있다. 그러나 이러한 경향만으로는 정량적인 파괴기준의 설정과 강도평가가 곤란하므로 응력특이성지수 및 응력특이성계수에 의한 파괴기준의 설정방법을 검토하고자 한다.

4. 실험결과 및 고찰

4.1 접착파괴강도의 실험결과

Fig. 1과 같은 접착시험편을 제작하여 정적파괴강도 실험을 실시하여 얻은 최대 파괴응력(최대 파괴하중/접착단면적)인 σ_{max} 의 값을 Fig. 10과 Fig. 11에 각각 도시하였다.

Fig. 10은 접착층의 두께 $h=0.1$ mm인 경사접착이음에 대한 최대 파괴응력을 경사각 θ 에 대하여 나타낸 것으로 경사각이 증가할수록 파괴응력도 조금씩 증가하는 경향을 보여준다. 이러한 현상은 Table 2에서 알 수 있듯이 경사각이 증가할수록 응력특이성지수는 대체로 감소하기 때문에 파괴응력은 증가하는 현상으로 나타난다.

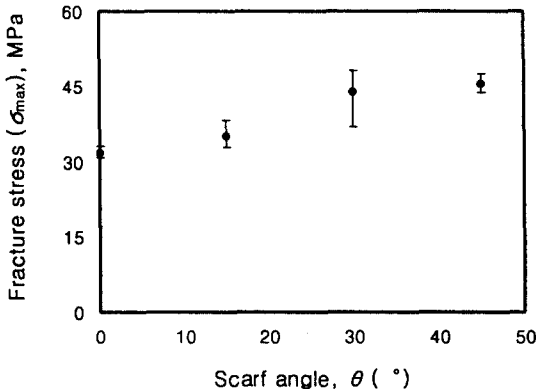


Fig. 10 Experimental fracture stress according to the change of scarf angle (scarf joint, $h=0.1$ mm)

Fig. 11은 접착층의 두께 $h=0.1$ mm인 단순 겹치기 접착이음에 대한 최대 파괴응력을 겹치기 길이에 대하여

도시한 것이다. 겹치기 길이의 증가에 따라 파괴응력은 감소하는 경향을 나타내고 있다. 실제 실험에서 축방향의 최대 파괴하중은 겹치기 길이가 길어질수록 증가하지만, 최대 파괴응력은 반비례하는 경향을 나타내며, 단순 덧대기 이음에서도 이와 같은 경향을 보여준다. 이러한 현상은 단면적의 변화에 관계없이 일정한 응력값을 갖는 균질재의 경우와는 달리, 계면이 존재하는 접착의 경우 응력특이성의 변화에 따라 파괴응력은 증가, 또는 감소하는 복잡한 양상을 나타낸다. 따라서 접착구조물의 파괴기준 및 접착강도의 해석은 접착계면단의 응력특이성을 충분히 고려할 필요성이 요망된다.

이와 같이 접착구조물의 파괴는 접착이음의 형상과 부하조건에 따라 수직 및 전단응력 성분의 차이와 이들의 각 성분이 접착이음의 파괴에 영향을 주는 기여도가 다르기 때문에 미세 파괴기구의 차이를 보이고, 또한 이들의 상호관계가 균열의 전진속도에 영향을 미치기 때문일 것이다.

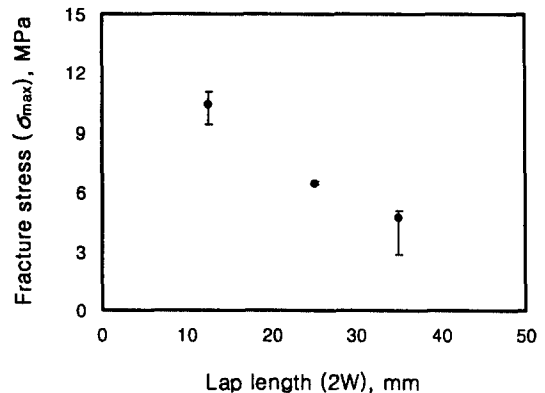


Fig. 11 Experimental fracture stress according to the change of lap length (single-lap joint, $h=0.1$ mm)

4.2 알루미늄 합금의 접착구조물에 대한 파괴기준

(1) 전임계 응력특이성계수에 의한 방법

Fig. 12는 알루미늄 합금을 에폭시 수지로 접착시킨 경사이음 및 단순 겹치기이음 시험편에 대하여 응력특이성지수 λ 와 전임계 응력특이성계수(total critical stress singularity factor) Γ_{cr} 의 관계를 나타내었다. 전임계 응력특이성계수 Γ_{cr} 은 경사이음 및 단순 겹치기이음의

해석모델에 대하여 계면단의 형상에 따른 응력특이성지수 λ 를 식(2)에서 구하고, 각 시험편에 대한 정적인장시험을 실시하여 얻은 축방향 최대파괴응력을 고려한 전임계 응력특이성계수 Γ_{cr} 의 관계를 나타낸 것이다. 이들을 커브 피팅(curve fitting)한 곡선이 파괴기준(fracture criterion)선이 된다.

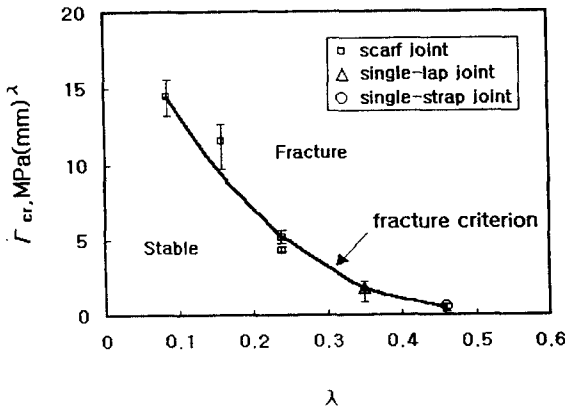


Fig. 12 Fracture criterion by total critical stress singularity factor and stress singularity index in adhesively bonded structures of Al/Al adherends (epoxy resin, $h=0.1$ mm)

이 결과로부터 알루미늄 합금을 에폭시 수지로 접착한 접착구조물의 안전성의 파악이 가능하다. 또한 이러한 파괴기준선의 유효성을 파악하기 위하여, 또 다른 접착구조 시험편인 단순 덧대기이음을 사용하여 응력특이성지수에 대한 전임계 응력특이성계수를 Fig. 12에 함께 나타내었다. 이 경우에도 경사 및 단순 겹치기접착이음에 대한 파괴기준선에 잘 일치하는 것을 확인할 수 있다.

따라서 본 연구의 알루미늄 합금과 에폭시 수지로 접착한 임의 형상의 접착구조물의 파괴기준은 작용하중에 의한 Γ 와 기본적인 접착이음 시험편을 사용한 전임계 응력특이성계수 Γ_{cr} 값을 비교하여 다음 식으로 주어진다.

$$\Gamma \geq \Gamma_{cr} \quad (9)$$

Fig. 12에서와 같이 접착구조물의 계면단 형상에 의한 λ 를 계산한 후 이에 대한 작용하중에 따른 Γ 의 값이 파

괴기준선 아래에 놓이면 파괴되지 않고 안전하며, 파괴기준선 이상에 놓이게 되면, 식 (9)와 같이 되어 접착구조물은 파괴된다.

(2) 분리임계 응력특이성계수에 의한 방법

수직 및 전단응력 성분이 각각 파괴기구(fracture mechanism)에 미치는 영향을 파악하기 위하여 Fig. 13과 같이 기본 시험편인 경사접착이음과 단순 겹치기이음 시험편에 대한 전임계 응력특이성계수 Γ_{cr} 을 수직 및 전단응력에 의한 성분으로 분리하여 Γ_{1cr} 과 Γ_{2cr} 의 관계로 나타내었고, 이들을 커브 피팅하여 분리임계 응력특이성계수(separated critical stress singularity factor)에 의한 파괴기준선을 나타내었다.

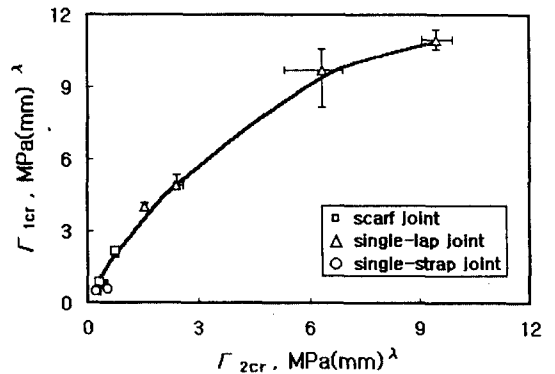


Fig. 13 Fracture criterion by separated Γ_{1cr} and Γ_{2cr} of Γ_{cr} in adhesively bonded structures of Al/Al adherends (epoxy resin, $h=0.1$ mm)

또한 검증용 시험편인 단순 덧대기 접착구조 시험편에 대해서도 각각의 성분분리에 의한 파괴기준선을 나타내었는데, 그 결과 파괴기준선에 잘 놓여지는 것을 확인하였다.

각 시험편에 대한 Γ_1 과 Γ_2 의 성분은 경사접착이음의 시험편에서 Γ_{1cr} 과 Γ_{2cr} 이 가장 큰 값들을 나타내어 수직 및 전단응력 모두에서 가장 안정한 것으로 나타났다. 그 다음으로 단순 겹치기이음의 시험편에 대한 Γ_{1cr} 과 Γ_{2cr} 의 값이 단순 덧대기 접착구조의 시험편에서보다 큰 값을 나타내었다. 단순 겹치기 시험편에 대한 Γ_{1cr} 값은 Γ_{2cr} 값보다 크게 나타났고, 이것은 전단응력 보다는 인장응력에 의한 강도가 큰 것을 의미한다. 또한 단순 덧대기 접착구

조의 일부 시험편에 대한 Γ_{2cr} 이 Γ_{1cr} 보다 큰 것으로 나타나고 있는데, 이는 덧대기 길이가 짧을수록 수직응력에 대한 파괴인성이 작다는 것을 의미한다.

이러한 Γ_{1cr} 과 Γ_{2cr} 값의 비교는 접착구조물의 파괴기구를 해석하는데 중요한 역할을 하고, 수직응력에 의한 Γ_{1cr} 이나 혹은 전단응력에 의한 Γ_{2cr} 의 상호성분에 의한 파괴 강도를 예측할 수 있다.

4.3 접착구조물의 강도평가 방법의 제한

Fig. 14는 접착구조물의 강도평가 방법을 결정하는 일련의 과정을 나타낸 도표이다.

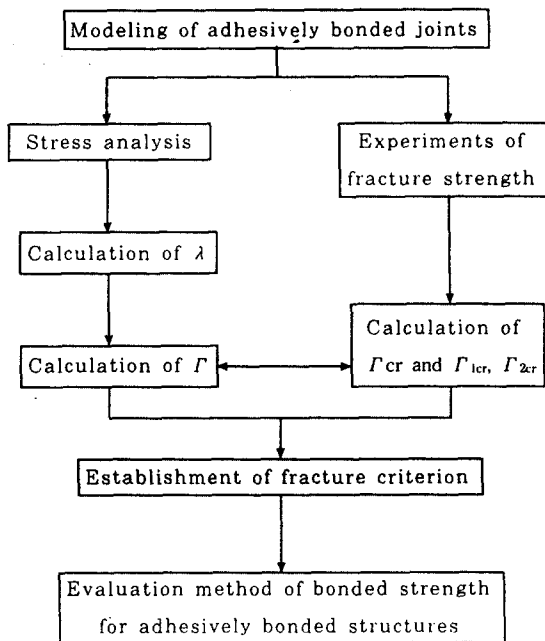


Fig. 14 Flow chart of evaluation method for strength in adhesively bonded structures

접착구조물의 강도평가 방법을 제시하기 위해서는 먼저 접착구조물의 강도가 접착계면단의 응력특이성에 크게 좌우되므로, 일정하게 주어진 재료들의 조합에 대하여 접착구조물의 응력특이성지수를 광범위하게 변화시킬 수 있는 모델의 고안·제작이 필요하다. 이렇게 설정된 모델에 대하여 수치해석으로 접착계면, 특히 접착계면단에 대한 고정밀도의 응력해석을 수행하고, 이러한 응력해석 결과와

앞에서 자세히 설명한 응력특이성지수 λ 의 계산과정을 거쳐 식(8)에서 각 응력성분에 의한 응력특이성계수를 분리하여 계산한다. 이러한 수치해석과 더불어 접착구조물에 대한 파괴기준을 설정하기 위해서는 앞에서 설정된 모델에 대한 시험편을 제작하고, 정적인장실험을 통해서 축방향 최대파괴응력을 측정한다. 수치응력해석 결과와 λ 의 계산 결과를 식(8)에 대입하여 Γ 를 계산하고, 정적인장 실험에서 얻어진 파괴응력을 고려하여 전입계 응력특이성계수 Γ_{cr} 과 수직 및 전단응력에 의한 Γ_{1cr} 과 Γ_{2cr} 을 계산한다. 이러한 모델 시험편에 대한 응력특이성지수 λ 와 전입계 응력특이성계수 Γ_{cr} 은 각각의 시험편에 대하여 유일한 값을 나타낸다. 따라서 동일한 재료의 조합을 가지는 접착구조물에 대하여 파괴기준을 설정할 수 있으며, 이러한 파괴기준선을 이용하여 접착구조물에 대한 정량적인 강도평가가 가능하고, 구조물에 대한 안전성의 여부를 확인할 수 있게 된다. 또한 성분분리에 의한 Γ_{1cr} 과 Γ_{2cr} 를 사용하여 설정된 파괴기준에 의하여 파괴기구를 규명할 수도 있다.

이와 같은 강도평가 방법은 일반적으로 접착에 의하여 결합되어지는 임의의 재료조합에 대해서도 확대적용이 가능할 것으로 기대된다.

5. 결론

알루미늄 합금의 접착구조물에 대한 정적접착강도의 평가방법을 확립하기 위하여 접착에 의한 경사이음, 단순 겹치기이음, 단순 덧대기 접착구조 시험편에 대한 접착면의 경사각과 겹치기 길이 및 접착두께를 변화시켜 가면서 경계요소법에 의한 응력해석과 응력특이성을 해석하고, 정적 파괴강도 실험을 실시한 후, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 알루미늄 합금을 에폭시 수지로 접착시킨 경사이음, 단순 겹치기이음 및 단순 덧대기 접착구조 시험편에 대한 응력특이성지수를 계산하고, 이것과 경계요소법에 의한 응력해석 결과를 이용하여 응력특이성계수를 구하는 방법을 제시하였다..
- (2) 접착이음의 강도실험에서 얻은 최대파괴응력을 이용하여 전입계 응력특이성계수를 구하는 방법과 이들의 분리방법 및 정량적인 강도평가인자로 사용하는 방법을 제시하였다.

- (3) 알루미늄 합금을 에폭시 수지로 접착시킨 경사 및 단순 접착기 접착시험편을 제작하여 접착구조물에 대한 파괴기준의 설정방법을 제시하고, 단순 덧대기 접착구조 시험편을 사용하여 그 유효성을 검증하였다.
- (4) 본 파괴기준을 이용하여 알루미늄 합금을 에폭시 수지로 접착시킨 임의 형상의 접착구조물에 대한 정량적인 접착강도의 평가방법을 제안하였으며, 파괴강도의 예측이 가능하였다.

후 기

본 연구는 1997년도 숭실대학교 교내학술연구비의 지원을 받아 수행되었습니다.

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, 16권 4호, pp. 667-674.
- (3) 정남용, 장진모, 1997, "Al/Steel 이종재료의 접착이음에 대한 혼합모드의 파괴기준", 대한기계학회 논문집(A), 제21권 8호, pp. 1322~1331.
- (4) 이승발, 1997, "철도차량 통로문의 경량화를 위한 알루미늄 하니컴 판재의 적용에 관한 실험적 해석", 석사학위논문, 숭실대학교.
- (5) 정남용, 오봉택, 송춘호, 1996, "이종재료의 접합이음에 대한 접합잔류응력의 검토", 대한기계학회 춘계학술대회 논문집(I), pp. 192~197.
- (6) Munz, D. and Yang, Y. Y., 1992, "Stress Singularities at the Interface in Bonded Dissimilar Materials under Mechanical and Thermal Loading", J. Appl. Mech., Vol. 59, pp. 857~861.
- (7) 정남용, 1995, "이종재료의 경사접착이음에 대한 파괴강도의 예측", 한국공작기계학회지, 제4권 4호, pp. 50~60.
- (8) 정남용, 이진호, 1997, "Al/Al 접착이음에 대한 계면 파괴강도의 해석", 대한기계학회 춘계학술대회 논문집(A), pp. 7~12.
- (9) Bogy, D. B., 1971, "Two Edge Bonded Elastic Wedges of Different Materials and Wedge Angles under Surface Traction", J. Appl. Mech., Vol. 93, pp. 377~386.
- (10) 服部敏雄, 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.
- (11) 정남용, 오봉택, 1996, "응력특이성계수에 의한 이종 접합재료의 강도평가", 대한기계학회논문집(A), 제20권 7호, pp. 2087~2096.
- (12) Groth, H. L., 1985, "A Method to Predict Fracture in an Adhesively Bonded Joint", Int. J. Adhesion and Adhesives, Vol. 5, No. 1, pp. 19~22.
- (13) 정남용, 김기성, 김희승, 1996, "세라믹/금속 접합재에 대한 응력특이성의 해석", 대한기계학회 논문집(A), 제20권 10호, pp. 3058~3067.
- (14) 정남용, 1998, "응력특이성을 고려한 접착이음의 강도평가방법", 한국공작기계학회지, 제7권 1호, pp. 58~68.