

응력특이성을 고려한 접착이음의 강도평가 방법

정남용*, 오봉택**

Evaluation Method of Bonded Strength Considering Stress Singularity in Adhesively Bonded Joints

N. Y. Chung*, B. T. Oh**

Abstract

Advantages of adhesively bonded joints and techniques of weight reduction have led to increasing use of structural adhesives such as LSI (large scale integration) package, automobile, aircraft in the various industries. In spite of such wide applications of adhesively bonded joints, the evaluation method of bonding strength has not been established. Stress singularity occurs at the interface edges of adhesively bonded joints and it is required to analyze it.

In this paper, the stress singularity using 2-dimensional elastic boundary element method (BEM) with the changes of lap length and adhesive for single lap joint was analyzed, and experiments of strength evaluation were carried out. As the results, the evaluating method of bonding strength considering stress singularity at the interface edges of adhesively bonded joints and stress intensity factor of interface crack have been proposed in static and fatigue test.

Keywords : Strength Evaluation (강도평가), Stress Singularity (응력특이성), Adhesively Bonded Joint (접착이음), Single Lap Joint (단순접착기이음), Boundary Element Method (경계요소법), Static and Fatigue Test (정적 및 피로시험), Crack Initiation (균열발생)

1. 서론

구조접착은 비용접성 재료 및 이종재료의 동시접착이 가능하고, 타 결합법에 비하여 고강도화, 경량화가 가능하므로 자동차, 항공기, 우주선을 비롯한 각종 산업분야에서

새로운 결합법으로써 그 활용이 날로 증가하고 있는 추세이다^{(1),(2)}.

국내외적으로 접착기술의 급속한 진전으로 접착의 활용은 필연적이지만, 접착이음의 강도에 영향을 미치는 인자가 다양하고, 이들 인자의 해석에도 많은 어려움이 있기

* 숭실대학교 기계공학과

** 숭실대학교 대학원

때문에 접착강도를 효과적으로 평가할 방법이 아직도 미 확립된 실정이다.

특히 두 재료가 접착되는 계면단은 재료 및 형상의 불 연속으로 응력특이점이 되고, 두드러진 응력집중이 발생한다. 또한, 이것이 원인이되어 현저한 강도의 저하를 일으키거나 균열이 발생하고, 진전하는 파괴의 기점이 되어 전체적인 파괴를 초래하는 경우가 많다.

피착재가 동일한 접착이음에 대하여 종래의 접착강도 평가방법은 공칭응력에 의한 비교평가 방법으로 접착계면에서의 현저한 응력변화를 무시한 강도평가 방법이기 때문에 충분한 강도평가 방법에는 아직 이르지 못하고, 안전강도의 평가상 많은 문제점이 내포되어 있다.^{(3)~(6)}

접착이음이 고신뢰성의 결합법으로 활용되기 위해서는 무균열재의 접착계면에 대한 고정밀도의 응력해석과 접착계면단의 응력특이성을 고려한 강도평가가 절실히 요망되고 있다.

균열이 존재하는 접착부재의 경우는 균열을 전제로하는 파괴역학의 적용에 의한 평가방법이 유효하지만^{(7)~(10)}, 무균열 접착이음의 경우는 접착계면단의 응력특이성을 고려한 접착강도 평가방법의 확립이 필요하다.^{(4),(5),(11)}

따라서 본 연구에서는 피착재가 균질재인 무균열 단순 겹치기(single lap) 접착이음 시험편에 대한 접착길이 및 접착재의 변화에 따른 접착계면단의 응력특이성을 경계요소법(boundary element method : BEM)으로 해석한 후, 이 응력특이성을 고려한 파괴지배인자를 계산하는 방법과 이들 인자의 유효성을 검토한다.

또한, 수치해석에 사용한 접착이음 시험편을 제작하여 정적 및 피로강도 실험을 실시한 후, 종래의 강도평가 방법에 대한 문제점을 검토하고 부하조건, 시험편의 형상 및 치수에 의존하지 않는 응력특이성을 고려한 정량적인 파괴지배인자에 의한 접착 파괴기준의 설정과 정적 및 피로 강도 평가방법을 제안하고자 한다.

2. 접착이음에 대한 응력특이성의 BEM 해석

2.1 접착 계면모델의 설정

Fig. 1은 피착재를 접착재로 접착시킨 계면단에 대한 접착계면 모델이다. 여기서 재료 1과 재료 2의 기계적 성질이 다르면 이종재료의 접착모델이 되고, 재료 1과 재료 2의 기계적 성질이 같을 때는 균질재의 접착모델이 된다.

두 재료가 이루는 접착각도가 $\theta_1 = -\theta_2 = \pi/2$, $\theta = 0$

이면 맞대기 이음(butt joint)이 되고, 경사각 θ 만이 변화하면 경사이음(scarf joint)이 된다.

또한, $\theta = 0$, $\theta_1 = \pi/2$, $\theta_2 = -\pi$ 이면 단순겹치기이음(single lap joint), $\theta_1 = -\theta_2 = \pi$ 로 하면 계면 균열모델이 된다.

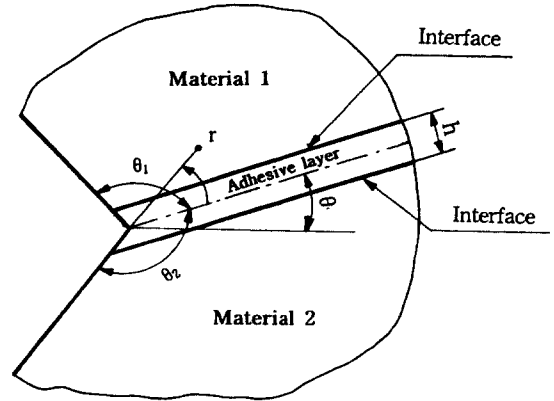


Fig. 1 Configuration of the adhesively bonded interface edge

2.2 접착이음에 대한 응력특성 방정식

Fig. 1에서 접착층이 없는 경우($h=0$), 접합계면 모델에 대한 응력특이성을 결정하는 응력특성 방정식은 Bogy⁽¹²⁾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. 또한, 응력특이성지수 λ 는 θ_1 , θ_2 , h 및 각 재료의 조합특성에 의해 결정되는 상수이다.

접착층이 없는 접합재료에 대한 λ 는 응력특성 방정식으로부터 직접 구해지지만⁽¹²⁾, Fig. 1과 같은 모델의 경우 응력특성 방정식은 접착층의 두께 h 및 접착재의 기계적성질에 상당한 영향을 받는다.

이러한 모델에 대한 이론해석은 매우 복잡·난해하므로 아직껏 응력특성 방정식의 해석 예는 보고되지 않고 있다.

따라서 본 논문에서는 BEM수치해석 방법을 적용하여 λ 를 해석하였고, 이에 대한 구체적인 내용은 별도의 논문에 보고되고 있다^{(4),(5)}.

2.3 접착이음에 대한 BEM 응력해석 모델

접착이음의 종류는 피착재의 조합과 접착부의 형상 및 이에 작용하는 하중의 형태에 따라 분류되고, 실제로 접착이음의 설계에 사용되는 형상은 매우 복잡하고 다양하다.

본 연구에서는 Fig. 2와 같이 접착이음 중에서도 가장 기본이 되는 단순겹치기 이음을 해석모델로 설정하였다. 단순 겹치기이음은 축방향 편심하중의 작용으로 전단응력과 굽힘모멘트에 의한 수직응력을 동시에 받는다. 그림에서와 같이 접착층의 두께를 $h=0.1\text{mm}$ 로 일정하게 유지하고, 겹치기 길이 $2L=12.5\text{mm}, 25\text{mm}, 35\text{mm}$ 의 3종류로 변화시키고, Table 1과 같이 3종류의 접착제로 접착시킨 시험편에 대해서 BEM 응력해석을 실시하였다. 실험에서 직접 측정된 피착재와 접착재의 기계적성질을 Table 1에 나타내었다.

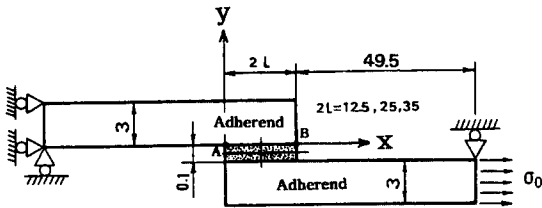


Fig. 2 Model of BEM analysis and boundary condition

Table 1 Mechanical properties of adherend and adhesives

Mechanical properties		Young's modulus E(MPa)	Poisson's ratio ν
Specimen materials			
Adherend	Acryl	2941.2	0.345
Adhesives	Cemendine 1500	2058.8	0.4
	Cemendine EP-007	1127.5	0.41
	Hysol EA-9410	1921.6	0.45

2.4 접착계면에 대한 BEM 응력해석

접착강도를 평가하기 위해서는 접착계면에 대한 고정밀도의 응력해석이 선행되어야 한다. 단순겹치기 접착이음 시험편에 대한 BEM해석 모델 및 구속조건은 Fig. 2와 같다.

본 연구에서는 등매개(isoparametric)요소를 사용하였고, Kelvin의 기본해를 이용한 2차원 탄성해석을 실시하였다. 요소분할 방법은 고정밀도의 응력해석을 하기 위하여 각 시험편의 전부분을 5개의 영역으로 분할하여 계면 단에서의 요소분할이 세밀하게 이루어지도록 하였고, 접착 겹치기 길이에 대해서 접착층의 두께방향을 9요소, 길이 방향을 140요소로 분할하고, 피착재는 두께방향을 6요소, 길이방향을 175요소로 분할하여 전체 요소분할 수는 468개로 일정하게 하였다.

특히 접착계면에 대한 고정밀도의 응력해석을 위하여 서브요소를 사용하였고, 평면변형률상대에서 응력해석을 실시하였다.

무균열 단순 겹치기 접착이음에 균일분포하중이 작용할 때 피착재는 아크릴 수지로 하고, 접착제 및 겹치기 길이를 변화시켜 가면서 접착계면에 대한 BEM 응력해석을 실시하고, 그 결과를 계면단으로부터의 거리에 따라 무차원화 하여 Fig. 3과 Fig. 4에 각각 도시하였다.

Fig. 3과 Fig. 4는 접착제를 세메다인 1500으로 하고, 겹치기 길이 $2L=12.5\text{mm}, 25\text{mm}, 35\text{mm}$ 로 변화시켜 가면서 응력해석을 실시한 경우의 수직응력과 전단응력의 분포를 나타낸 것으로 계면단에서는 응력집중이 가혹하게 분포하며, 겹치기 길이가 변화함에 따라 증가하기도 하고 감소하기도 하는 복잡한 양상을 보여준다.

따라서, 이러한 응력집중현상을 고려하지 않고서는 접착이음에 대한 효과적인 접착강도의 평가는 곤란하므로 정량적이고, 효과적인 파괴지배인자에 의한 접착강도를 평가하기 위해서는 접착계면에 대한 응력특이성을 충분히 고려한 응력특이성지수 λ 를 이용한 평가방법의 확립이 요망된다.

3. 응력특이성의 해석결과 및 고찰

3.1 접착 계면단에 대한 응력특이성의 BEM 해석

겹치기 길이 $2L=12.5\text{mm}$ 로 하고, 아크릴 수지를 세메다인 1500으로 접착시킨 단순 겹치기 시험편에 대한

응력해석 결과인 Fig. 3과 Fig. 4의 결과를 이용하여 대수그래프상에서 계면단의 응력특이성지수를 계산하는 방법^{(4),(5)}과 계산된 한 예를 Fig. 5에 나타내었다.

접착 계면단에서는 응력분포가 매우 집중되는 경향을 나타내고 있으므로 계면단 근방에서의 거리에 따른 응력 분포에 대한 기울기 λ 를 구하고, 이를 응력특이성지수라 한다.

또한, Fig. 2의 두 계면단 A, B에서는 서로 다른 응력 특이성지수를 나타내지만, 계면단 A에서의 값이 크므로 강도평가에는 계면단 A에서의 값만을 이용하였다. 그림에서 λ_1 은 수직응력 성분만에 의한 응력특이성지수이고, λ_2 는 전단응력 성분만에 의한 응력특이성지수이며, λ 는 수직 및 전단응력 성분을 동시에 고려한 응력특이성지수로서 $\lambda = \sqrt{\lambda_1^2 + \lambda_2^2}$ 의 식에서 구하였다.

경사접착이음에서와는 달리 수직응력 성분에 의한 기울기는 직선적으로 되지 않고, λ_1 과 λ_2 의 값이 서로 다르게 나타났다⁽⁵⁾. 수직응력에 의한 λ_1 은 직선성이 보장되지 않는 것으로 보아서 복수개의 응력특이성지수가 존재할 가능성이 있다. 그러나 λ 의 계산은 계면단 근방에서 진동 응력특이성이 발생하는 2~3개의 데이터는 제외하고, 직선성이 잘 유지되는 $r/L = 0.003 \sim 0.02$ 의 범위의 데이터만을 사용하여 직선적으로 근사시켜 구하였다.

이와 같이 구한 응력특이성지수의 계산결과를 Table 2에 나타내었다. 여기서 피착재는 아크릴 수지이고, 접착기 길이 $2L=12.5\text{mm}, 25\text{mm}, 35\text{mm}$ 로 하고, 접착제는

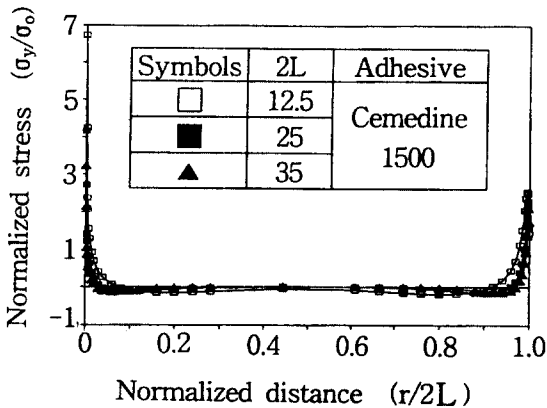


Fig. 3 Relationship between normal stress along the interface AB and lap length of single lap joint

에폭시계인 세메다인(Cemedine) 1500, EP-007과 하이솔(Hysol) EA-9410의 3종류로 변화시킨 단순 겹치기 접착이음에 대한 응력특이성지수의 계산결과이다.

접착제의 종류가 다르거나 동일한 접착제라도 겹치기 길이의 변화에 따른 λ_2 의 변화는 작지만, λ_1 은 큰 폭으로 변화한다. 이러한 현상은 겹치기의 길이가 증가하면 전단응력 성분보다는 굽힘모멘트에 의한 수직응력 성분이 증가하기 때문이다.

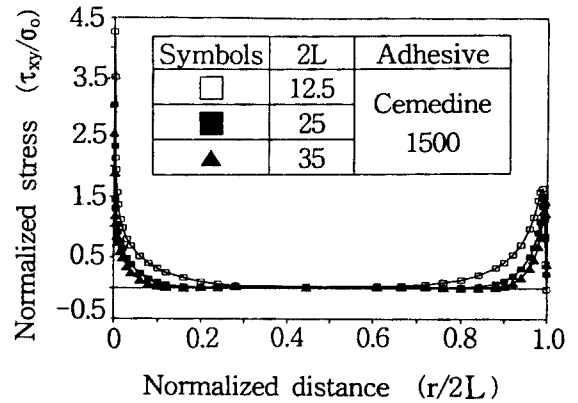


Fig. 4 Relationship between shear stress along the interface AB and lap length of single lap joint

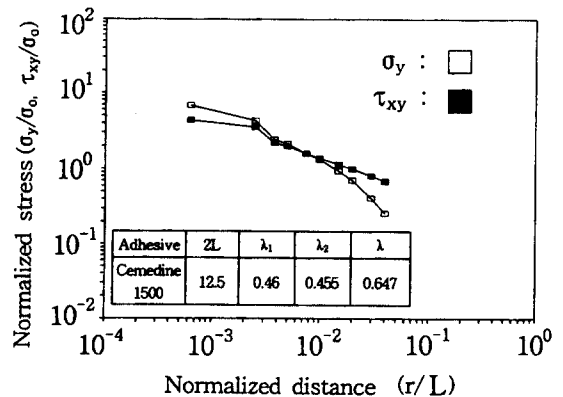


Fig. 5 Calculation of stress singularity index at an interface edge of single lap joint

Table 2 BEM analysis of stress singularity index for changes of lap length and adhesives

Adhesives	2L	λ_1	λ_2	λ
Cemedine 1500	12.5	0.46	0.455	0.647
	25	0.4899	0.481	0.687
	35	1.076	0.474	1.176
Cemedine EP-007	12.5	0.479	0.431	0.644
	25	0.76	0.456	0.886
	35	1.023	0.409	1.102
Hysol 9410	12.5	0.576	0.499	0.762
	25	0.848	0.515	0.992
	35	1.092	0.487	1.196

3.2 응력특이성계수의 계산

수직 및 전단응력 성분을 동시에 고려한 응력특이성지수 λ 를 식(1)에 대입하여 계면단으로부터 거리 r 에 따른 외삽법으로 응력특이성계수 Γ 를 계산하였다^{(4),(5)}. 식에서도 알 수 있듯이 응력특이성지수 λ 가 증가함에 따라 응력특이성계수 Γ 는 일정한 값으로 감소하는 것을 알 수 있다. 접착이음에 대한 파괴는 박리에 의한 파괴가 매우 중요하므로, 수직 및 전단응력 성분을 동시에 고려하는 것이 더욱 합리적이라고 생각된다.

4. 실험

4.1 피착재와 접착제

피착재는 기포 및 결함의 존재 유무, 접착상태의 검사를 용이하게 하고, 실험시 균열의 발생 및 진전을 직접 육안으로 관찰할 수 있고, 수치해석을 용이하기 위하여 투명·균질체인 아크릴 수지를 사용하였다.

접착제로는 최근 구조접착에 널리 사용되고 있는 세메다인 1500, EP-007과 하이솔 EA-9410의 에폭시계 접착제를 사용하였다. 접착제에 대한 기계적 성질의 측정실험은 접착 시험편을 제작할 때와 동일한 조건에서 접착제 자체의 시험편을 제작하여 측정하였고, 그 결과를 Table

1에 나타내었다.

4.2 시험편의 제작

피착재를 소정의 치수로 기계가공한 후, 접착면을 #1000의 샌드페이퍼로 충분히 연마하였다. 이것을 아세톤으로 세정하고, 건조시킨 후 접착하였다.

접착제는 주재와 경화제의 혼합형으로 중량비로 세메다인 1500과 EP-007은 1:1로 혼합하고, 하이솔 EA-9410은 100:23으로 혼합하였고, 접착시 기포가 생기지 않도록 충분히 혼합시켰다.

시험편의 제작은 접착용 지그를 고안하여 볼트를 이용한 가압력과 미소 이동거리의 동시조절로써 접착층의 두께를 일정하게 유지하려고 노력하였다. 특히 불순물이나 기포가 혼입되지 않도록 세심한 주의를 기울여 접착시킨 후 최종적으로 Fig. 6과 같은 형상 및 치수의 시험편을 제작하였다.

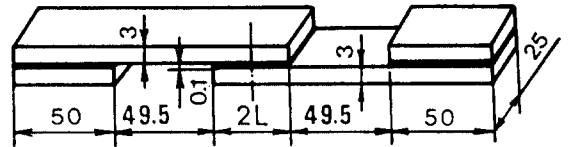


Fig. 6 Configuration and dimensions of adhesively bonded specimen

시험편의 경화처리는 접착용 지그에 고정된 상태로 세메다인 1500과 EP-007 접착제의 경우는 전기로 내에서 60℃로 2시간 경화처리한 후 노냉시키고, 하이솔의 경우는 상온에서 24시간 경화처리하였다. 또한 각 시험편은 1주일이상 경과한 후, 정적 및 피로강도실험에 사용하였다.

4.3 실험방법

시험기는 유압서보식 피로시험기로 로드셀 980N을 사용하여 정적 및 피로강도실험을 실시하였다.

정적강도 측정실험에서는 각 시험편의 소정위치에 스트레인 게이지를 부착하여 시험기의 RAMP파를 사용하여 하중을 작용시키고, 하중변화에 따른 변형률을 X-Y레코더에 기록한 후 측정하였다. 피로강도실험은 응력비 $R=0.1$ 로 하고, 교반속도는 10Hz에서 실시하였다. 균열의 발생 및 진전은 이동식 현미경을 사용하여 주의 깊게 관찰하였다.

5. 실험결과 및 고찰

5.1 공칭응력에 의한 접착강도 평가방법의 문제점

(1) 정적 접착강도의 평가방법

접착부의 겹치기 길이 $2L=25\text{mm}$ 인 단순 겹치기 접착이음 시험편의 계면단에서 2mm 떨어진 축방향 중심선상에 스트레인 게이지를 부착하고, 하중에 대한 변형률을 X-Y 레코더로 측정된 결과를 Fig. 7에 도시하였다. 응력특이성으로 인하여 접착계면단에서 초기에 초기균열이 발생하고 균열이 진전할수록 굽힘모멘트의 감소로 하중은 계속 증가하다가 파단직전에서 양쪽의 계면균열이 합체되면서 최대 파괴하중에 도달하는 현상을 보여주었다.

접착부의 겹치기 길이 및 접착제의 종류에 따른 정적 파괴강도 실험결과를 Fig. 8에 나타내었다. 여기서 정적 파괴응력은 $\tau_{\max} = \frac{P_f}{2L \times B}$ 의 식에 구하였고, P_f 는 파단하중, $2L$ 은 겹치기 길이, B 는 시험편의 폭을 의미한다. 그림에서도 알 수 있듯이 겹치기 길이가 길어져 접착면적이 증가하더라도 응력특이성의 변화로 평균응력에 의한 파괴강도는 감소하는 경향을 보여준다. 정적하중에 의한 초기균열의 발생응력을 기준으로 하여도 정적 파괴강도보다는 약간 낮은 값으로 동일한 경향을 보여주고 있다.

이와 같이 평균응력에 의한 접착강도의 평가는 접착계면단에 대한 응력특이성을 고려하지 않는 정성적인 평가

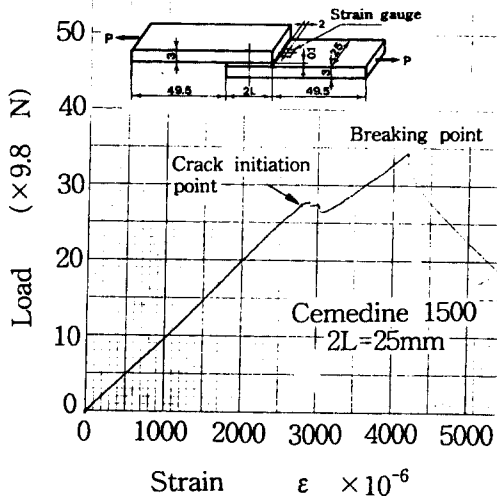


Fig. 7 Relationship between crack initiation and breaking point

방법이므로 시험편의 형상 및 치수, 실험조건이 완전히 동일하지 않으면 강도의 직접적인 비교평가는 곤란하므로, 효과적이고 정량적인 접착강도의 평가방법에 이르지 못하고 있는 실정이다.

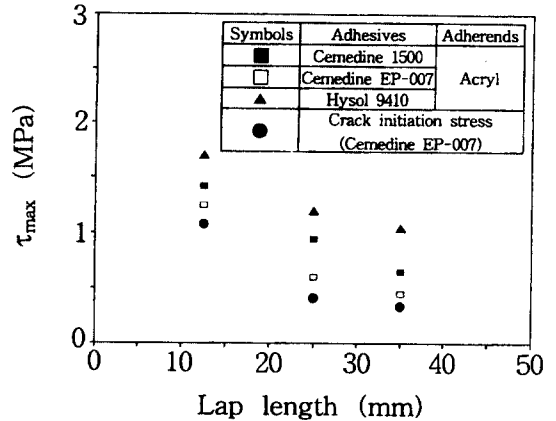


Fig. 8 Breaking shear stress for changes of lap length and adhesive

(2) 접착 피로강도의 평가방법

정적 강도실험과 동일한 단순 겹치기 접착이음 시험편을 사용하여 피로수명 시험을 실시하면서 균열의 진전길이를 측정된 결과를 Fig. 9에 도시하였다. 접착계면단에서 초기에 균열이 발생하고, 피로수명의 대부분은 균열의 진전과정에 소비되는 경향을 보여주고 있다.

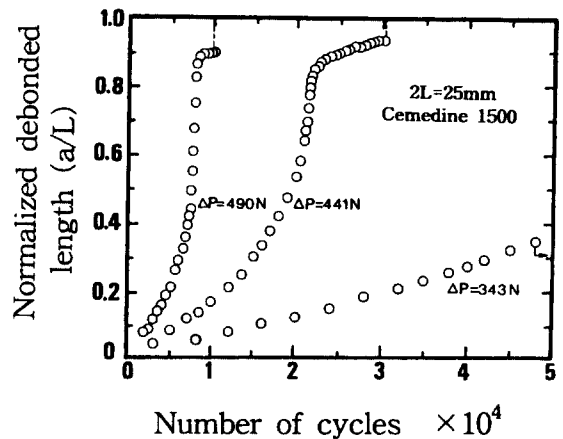


Fig. 9 Fatigue life of crack initiation and propagation for the single lap joint

또한, Fig. 10에는 피로 파단수명과 균열 발생수명에 대한 실험결과를 평균전단응력으로 나타내었다. 정적 강도 실험에서와 같이 접치기 길이가 길어져 접착면적은 증가하지만, 응력특이성의 변화로 피로한도는 저하하는 현상을 나타내고 있다.

접착이음에 대한 균열의 전진수명은 파괴역학적인 평가가 효과적이지만⁽³⁾, 초기균열이 발생하기까지의 무균열 접착이음에 대해서는 응력특이성을 충분히 고려하고 시험편의 형상 및 치수에 의존하지 않는 정량적이고, 통일적인 파괴지배인자에 의한 피로강도 평가가 필요하다.

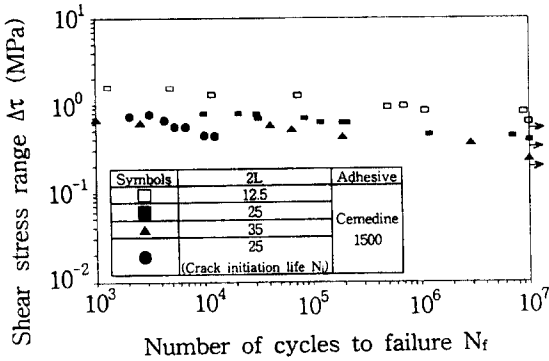


Fig. 10 Fatigue life for changes of lap length and adhesive

5.2 응력특이성을 고려한 접착강도의 평가

(1) 정적 접착강도의 평가

정적 접착강도를 지배하는 파라미터를 검토하기 위하여 Table 2에 나타난 각 시험편의 응력특이성지수를 사용하여 정적 접착파괴 응력을 정리하여 Fig. 11~Fig. 13에 나타내었다.

Fig. 11은 수직응력 성분만으로 구한 응력특이성지수의 실수부 $Re \lambda_1$ 으로 정적 접착강도를 도시하였을 때, 각 접착제에 대한 응력특이성지수가 커질수록 응력집중도 증가하여 접착강도는 감소하는 경향을 보여준다.

또한, Fig. 12에서는 각 접착제에 대한 접착강도를 전단응력 성분만으로 구한 응력특이성지수 λ_2 로 나타내었을 때, λ_2 에 대한 접착강도가 잘 정리되지 않고 큰 편차를 나타내었다.

이것은 접치기 길이가 변화하더라도 전단응력에 따른 응력특이성지수는 거의 변화가 없기 때문이다.

Fig. 13은 수직 및 전단응력 성분을 동시에 고려한 응력특이성지수 λ 를 사용하여 접착강도를 도시한 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 λ 가 증가함에 따라 접착강도는 일정한 값으로 감소하는 경향을 보여준다. 따라서 수직응력 성분만을 고려하기 보다는 전단응력 성분도 동시에 고려하는 것이 더욱 합리적이라 생각된다. 이와 같이 λ 에 의한 접착응력만으로도 강도평가는 가능하지만, 접착응력은 시험편의 형상 및 치수에 의존하므로 이에 의존하지 않는 정량적이고 통일적인 파라미터를 고려할 필요가 있다.

이러한 관점에서 세메다인 1500의 접착제에 대한 응력특이성계수를 계산하여 이것에 의한 접착이음의 파괴조건

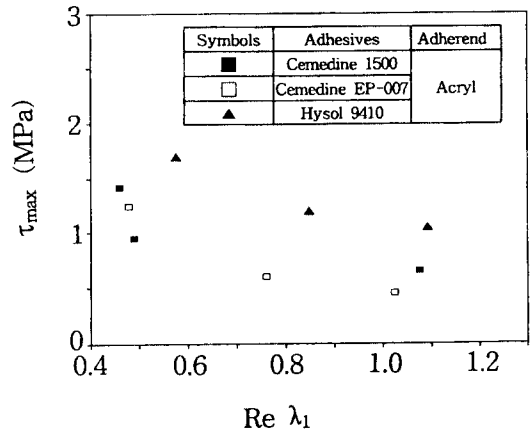


Fig. 11 Relationship between breaking shear stress and λ_1 for changes of adhesives

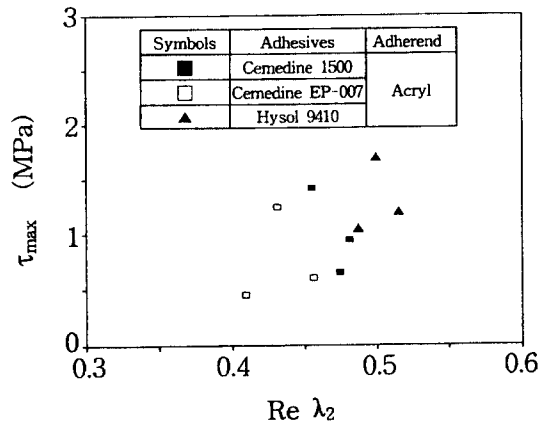


Fig. 12 Relationship between breaking shear stress and λ_2 for changes of adhesives

을 Fig. 14에 도시하였다. 그림에서 ■표시는 최대파괴응력 τ_{max} 의 실험데이터와 Table 2의 λ 를 식(1)에 대입하여 임계 응력특이성계수 Γ_c 의 값을 나타낸 것이고, 파괴기준(fracture criterion)선은 이들 데이터를 이용하여 최소자승법으로 구한 것이다.

접착이음은 응력특이성지수 λ 에 대한 임계 응력특이성계수 Γ_c 의 값보다 작은 응력상태에서는 안전하고, Γ_c 의 값 이상의 응력을 작용시키면 파괴됨을 알 수 있다.

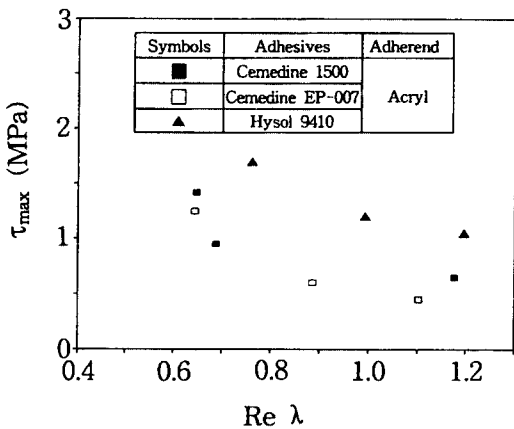


Fig. 13 Relationship between breaking shear stress and λ for changes of adhesives

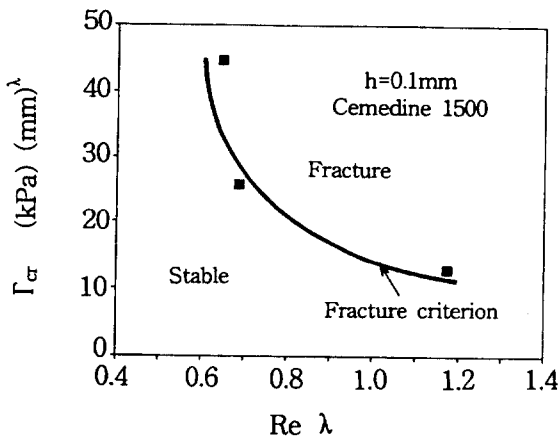


Fig. 14 Fracture criterion for λ of the adhesively bonded single lap joint

(2) 접착 피로강도의 평가

Fig. 10의 피로수명 시험결과를 각 시험편에 대한 응력특이성계수의 범위로 정리하여 Fig. 15~Fig. 17에 도시하였다.

Fig. 15는 수직응력 성분만으로 구한 응력특이성계수의 범위 $\Delta\Gamma_1$ 를 사용하여 피로수명을 도시한 것으로 겹치기 길이가 35mm인 경우는 상당히 분산되는 것을 알 수 있다. 이것은 겹치기 길이가 길어질수록 식(1)에서 알 수 있듯이 λ 가 증가하면 Γ 가 감소하기 때문이다.

Fig. 16은 전단응력 성분만에 의한 응력특이성계수의 범위 $\Delta\Gamma_2$ 를 사용하여 도시한 것으로 각 데이터가 일직선 상에 집중하는 것을 알 수 있다. 그러나 실제 접착이음에 있어서 수직응력 성분에 의한 박리현상은 접착파괴에 매우 밀접한 영향을 미치므로 수직응력과 전단응력 성분을

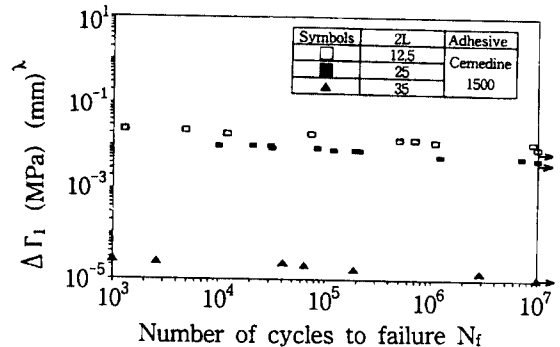


Fig. 15 Relationship between fatigue life and $\Delta\Gamma_1$ for changes of lap length and adhesive

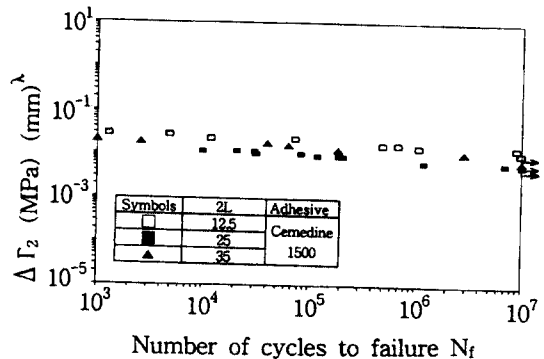


Fig. 16 Relationship between fatigue life and $\Delta\Gamma_2$ for changes of lap length and adhesive

동시에 고려한 응력특이성계수의 범위 $\Delta\Gamma$ 를 사용한 피로파단수명을 Fig. 17에 도시하였다. 이때, 응력특이성계수 Γ 는 $\Gamma = \sqrt{\Gamma_1^2 + \Gamma_2^2}$ 의 식에서 구하였고, 응력특이성계수에 의한 피로시험결과가 응력특이성을 고려하지 않은 Fig. 10의 결과보다는 더욱 잘 정리되는 것으로 보아 가장 유용한 파라미터라 생각된다.

또한 응력특이성계수에 대한 피로균열 발생수명도 동시에 도시하였지만, 피로파단수명보다는 다소 낮게 동일한 경향을 보여주는 것을 알 수 있다.

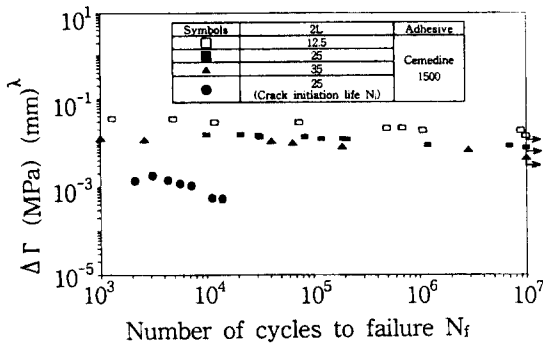


Fig. 17 Relationship between fatigue life and $\Delta\Gamma$ for changes of lap length and adhesive

5.3 파괴역학 파라미터에 의한 피로강도의 평가

접착이음의 계면균열에 대한 응력세기계수의 해석은 BEM 응력해석 결과를 이용하여, 다음의 식에서 외삽하여 구하였다^{(13),(14)}.

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

$$K_2 = \lim_{r \rightarrow 0} \sqrt{2\pi r} (\tau_{xy} \cos Q - \sigma_y \sin Q) \cdot F_2 \quad (3)$$

$$Q = \varepsilon \ln(r/2a) \quad (4)$$

$$\varepsilon = \frac{1}{2\pi} \ln \left[\frac{k_1/\mu_1 + 1/\mu_2}{k_2/\mu_2 + 1/\mu_1} \right] \quad (5)$$

$$k_j = \begin{cases} 3 - 4\nu_j \text{ (평면변형률)} \\ \frac{3 - \nu_j}{1 + \nu_j} \text{ (평면응력)} \end{cases} \quad (j = 1, 2) \quad (6)$$

여기서 ε 은 이종재료의 정수이고, a 는 균열길이, μ 는 전단탄성계수, ν 는 프와송의 비이고, F 는 무차원화 응력

세기계수이다.

무균열 단순 겹치기 접착이음이지만, 미소균열을 전제로하여 계면균열에 대한 응력세기계수를 구한 결과를 Fig. 18에 도시하였다.

겹치기 길이 $2L=12.5\text{mm}$ 의 경우 균열의 길이가 커질수록 응력세기계수는 증가하는 경향을 보이고, $2L=25, 35\text{mm}$ 의 경우는 비교적 일정한 양상을 보인다. 이것을 다시 외삽하여 $\frac{a}{2L} = 0$ 인 접착계면단에 대한 응력세기계수를 구한 후, 피로수명 데이터를 응력세기계수의 범위 ΔK 로 정리한 것을 Fig. 19에 도시하였다. 그림에서 겹치기 길이 $2L=12.5\text{mm}$ 인 경우의 데이터만이 조금 분산되어 있는데, 이것은 균열진전을 고려하지 않은 피로수명에 대한 데이터를 사용하였으므로 접착이음의 종류에 따른 파괴기구 (fracture mechanism)의 미세한 차이로 생각된다.

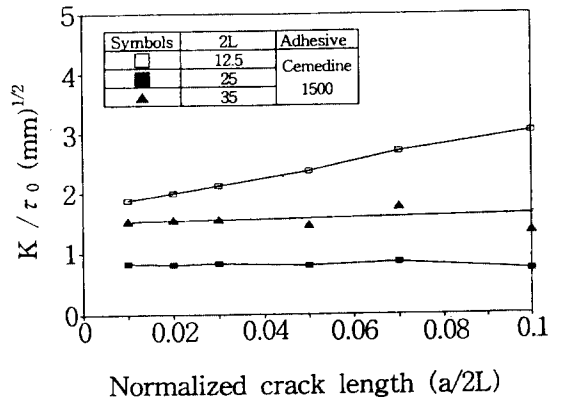


Fig. 18 BEM analysis of stress intensity factor for the single lap joint

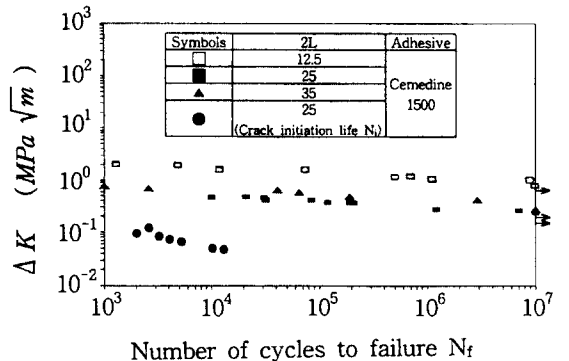


Fig. 19 Fatigue life for stress intensity factor range of single lap joint without crack

또한, 응력세기계수에 의한 균열발생수명의 정리결과도 동시에 도시하였지만, Fig. 17과 유사한 경향을 나타낸다.

따라서 무균열 접착이음에 대한 피로강도의 평가는 계면단의 응력특이성을 고려한 응력특이성계수를 사용하는 것이 효과적이라고 본다.

6. 접착강도 평가방법의 제안

이상의 무균열 접착이음 시험편에 대한 정적 및 피로강도 평가방법의 고찰결과 정적 파괴강도의 평가는 수직 및 전단응력 성분을 동시에 고려한 응력특이성계수에 의한 파괴기준을 설정하여 평가하는 것이 종래의 평균응력에 의한 평가보다는 더욱 유효하다.

초기균열의 발생 직전까지는 응력특이성계수에 의한 파괴조건에 관한 식(7)을 적용하고, 일단 초기균열이 발생하면 파괴역학을 적용한 혼합모드 파괴기준식(8)을 사용한 파괴인성에 의한 강도 평가방법을 제안한다.

$$\Gamma \geq \Gamma_{cr} : \text{파괴기준 (무균열재)} \quad (7)$$

$$K \geq K_c : \text{파괴기준 (균열재)} \quad (8)$$

여기서 Γ_{cr} 은 무균열재에 대한 임계 응력특이성계수, K_c 는 균열재의 파괴인성치이고, Γ 및 K 는 각각 작용하중에 대한 무균열재와 균열재의 응력특이성계수 및 응력세기계수를 의미한다.

또한 피로강도 평가방법에 있어서도 수직 및 전단응력 성분을 동시에 고려한 응력특이성계수를 사용한 피로수명의 평가방법이 종래의 평균응력에 의한 평가방법보다 더욱 유효하다고 본다.

일반적으로 피로파단수명 N_f 는 식(9)와 같이 표시된다.

$$N_f = N_i + N_r \quad (9)$$

여기서 N_i 는 초기균열 발생수명이고, N_r 는 피로균열 진전수명이다. 따라서 초기균열 발생수명은 응력특이성에 의한 평가가 요망되고, 접착부재의 피로수명을 연장하기 위해서는 초기균열의 발생이 지연되는 접착이음부의 형상을 고려한 설계가 필요하다. 그러나 일단 균열이 발생하여 진전하면 파괴역학을 적용한 균열진전속도를 고려한 접착강도의 평가방법을 제안한다.

일반적으로 피로균열 진전속도는 식(10)과 같이 된다.

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^m \quad (10)$$

여기서 a 는 균열길이, ΔK 는 응력세기계수의 범위이고, C 및 m 은 재료상수이다.

또한 피로균열 진전수명 N_f 는 식(10)으로부터 다음 식과 같이 된다.

$$N_f = \int_0^{a_c} \frac{1}{C(\Delta K)^m} da \quad (11)$$

여기서 a_c 는 파괴인성시험 결과로부터 결정되는 임계 균열길이를 나타낸다.

이와 같이 접착이음에 대한 정적 및 피로강도는 응력특이성지수를 감소시키는 접착계면단의 형상으로 설계하여 균열발생 응력을 완화시켜 초기균열의 발생을 지연시키므로써 정적 및 피로강도를 향상시킬 수 있는 접착이음의 설계도 가능하다고 본다.

7. 결론

접착이음의 강도평가 방법을 확립하기 위하여 무균열 단순겹치기 접착이음 시험편에 대한 응력특이성의 BEM 해석과 정적 및 피로강도 실험을 실시하여 강도평가 방법을 검토한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 단순 겹치기 접착이음에 대한 겹치기 길이 및 접착제의 변화에 따른 고정밀도의 BEM 응력해석과 응력특이성지수를 구하고, 그 상호관계를 비교·검토하였다.
2. 정량적이고, 통일적인 파라미터인 접착계면단의 응력특이성계수에 의한 정적 및 피로강도 평가방법의 유효성을 검증하였다.
3. 무균열 접착이음의 경우 응력특이성계수를 적용하고, 균열이 존재하는 접착이음의 경우 응력세기계수에 의한 파괴기준과 정적 및 피로강도 평가방법을 제안하였다.
4. 본 연구에서 얻어진 접착강도의 평가방법은 이종재료의 접착 및 접합이음, 특히 세라믹/금속접합재의 강도평가에도 확대적용이 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. 井出 正, 1979, "自動車用接着劑の動向", 日本接着協會誌, 第15卷 10號, pp. 476~482.
 3. 정남용, 1992, "접착이음의 강도평가에 관한 연구 (제 1보)", 대한기계학회 논문집, 제 16권 4호, pp. 667~674.
 4. 정남용, 1995, "이종재료의 경사접착이음에 대한 파괴 강도의 예측", 한국공작기계기술학회지, 제 4권 4호, pp. 50~60.
 5. 정남용, 오봉택, 1996, "응력특이성계수에 의한 이종 접합재료의 강도평가", 대한기계학회 논문집(A), 제 20권 7호, pp. 2087~2096.
 6. 정남용, 김기성, 김희승, 1996, "세라믹/금속 접합재에 대한 응력특이성의 해석", 대한기계학회 논문집(A), 제 20권 10호, pp. 3058~3067.
 7. 정남용, 1993, "접착이음의 강도평가에 관한 연구 (제 2보)", 대한기계학회 논문집, 제 17권 4호, pp. 855~862.
 8. 鄭南龍 外 3人, 1988, "接着継手の強度評價への破壊力學の應用(第1報)", 日本機械學會論文集(A), 第 54卷 506號, pp. 1895~1902.
 9. 鄭南龍 外 3人, 1989, "接着継手の強度評價への破壊力學の應用(第2報)", 日本機械學會論文集(A), 第 55卷 517號, pp. 1984~1991.
 10. 鄭南龍 外 3人, 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.
 11. 腹部敏雄, 坂田莊司, 1989, "應力特異場パラメータを用いた接着界面強度評價", 日本機械學會論文集(A), 第 54卷 495號, pp. 2151~2160.
 12. Bogy, D. B., 1975 "The Plane Solution for Jointed Dissimilar Elastic Semistrips under Tensions", J. Appl. Mech., Vol. 42, pp. 93~98.
 13. 結城良治, 曹相, 1989, "異材界面龜裂の應力擴大係數の境界要素彈性解析", 日本機械學會論文集(A), 第 55卷 510號, pp. 340~347.
 14. 정남용, 송춘호, 1996, "이종접합재의 계면균열에 대한 진전경로의 예측", 한국자동차공학회 논문집, 제 4권 3호, pp. 112~121.