

에지계면균열을 갖는 단순접치기 접착이음의 강도평가

유 영 철*, 박 정 환*, 이 원**

Analysis on the Bonded Single Lap-Joint Containing the Interface Edge Crack

Yeong-Chul Yu*, Jung-Hwan Park*, Won Yi**

ABSTRACT

The problem of interface crack in the bonded structures has received a great deal of attention in recent years. In this paper the aluminum bonded single lap-joint containing the interface edge crack is investigated. The tensile load and the average shear stress of the adhesive joints which have different crack length are obtained from the static tensile tests. The critical value of crack length to provoke the interface fracture is determined to $a/L=0.4$, where a is the interface crack length and L is the adhesive lap-length. The fracture mechanical parameters are introduced to confirm the existence of the critical crack length. The compliance and the stress intensity factors are calculated using the displacement and the stress near the interface crack tip by the boundary element method. These numerical results support the experimental results that the critical value of a/L is 0.4. It is known that the compliance and the stress intensity factors are the efficient parameters to estimate the bonded single lap-joint containing the interface edge crack.

Key Words : Interface Edge Crack(에지계면균열), Bonded Single Lap-Joint(단순접치기 접착이음), Static Tensile Test(정적인장실험), Strain(변형률), Boundary Element Method(경계요소법), Compliance(컴플라이언스), Stress Intensity Factor(응력세기계수)

1. 서 론

접착체에 의한 접합법은 볼트, 리벳 등에 의한 기계적 체결법에 비하여 경량화, 응력집중의 감소, 진동 감소 등 우수한 특징을 갖는다. 최근 구조접착제의 발달에 따라 과거 하중의 부담 및 파손에 따른 위험성이 적은 2차 보조부재에 주로 사용하던 접착접합법을 1차 주부재에 적

용하려는 노력이 이루어지고 있으며, 복합재료, 세라믹스 등 신소재의 접합법으로도 주목되고 있다. 그러나 아직도 접착 메카니즘 및 파괴에 대한 이해가 부족하고, 접착역학과 관련있는 제학문, 물리, 화공, 재료, 기계간의 상호연계가 부족한 상황으로, 이론 정립에 의한 체계화와 아울러, 강도해석 및 시험을 통한 접착접합법의 신뢰성 확보가 필요한 단계이다.

* 숭실대학교 대학원 기계공학과
 ** 숭실대학교 기계공학과

접착접합이음에서 모재와 접착제가 만나는 계면단부는 응력의 불연속으로 인하여 강도가 저하되는 특이점이 되고, 미시적으로는 미발달 단계의 균열을 내재하는 것으로 볼 수 있다. 일반적으로 이러한 접착 계면단으로부터 발생한 균열이 모재에 비하여 강도가 낮은 접착층을 따라서 성장하다가, 균열길이가 소정의 한계길이에 도달하게 되면 이음이 더 이상의 하중을 지탱하지 못하고 파손하는 전형적인 파괴 과정을 따른다. 그러므로 파손의 직접적인 원인이 되는 계면균열의 파괴역학적 해석을 통하여 접착 접합이음의 강도 평가가 가능할 것으로 기대된다.

계면균열 문제에 대한 이론적 검토는 1950년대말에 Williams⁽¹⁾에 의하여 최초로 이루어졌다. Williams는 계면균열의 개구형 모델(open tip model)을 사용하여 계면균열 선단의 탄성장에 대한 점근해석을 실시함으로써 응력과 변위가 진동형태로 거동한다는 사실을 발견하였다. 이 모델에서는 균열이 선단까지 완전히 개구하고, 두 이종재료의 접합부로부터 균열면으로 직접적인 전이가 이루어지는 것으로 가정한다. 이어서 Erdogan⁽²⁾은 균열이 있는 불균질판으로부터 이러한 진동역의 크기가 균열길이의 10⁶오더가 됨을 증명하였으며, Rice 등⁽³⁾은 유한 계면균열에서 균열선단 근방의 응력성분을 복소변수 법과 고유함수 전개에 의하여 구하고, 평면문제에 대한 응력세기계수를 제시하였다. 그러나 개구형 모델은 균열면의 일부에서 균열면간의 간극이 음으로 되는 오버래핑 현상을 물리적으로 설명할 수 없는 모순점을 갖는 것으로 밝혀졌다. 즉 England⁽⁴⁾는 임의의 내압을 받는 계면균열 문제에 대한 연구를 통하여, 개구형 계면균열 모델로는 균열단 근방에서 균열의 상하면이 주름져서 오버랩되어야 하지만 이것은 물리적으로 불가능하므로 재검토되어야 한다고 주장하였다.

오랫동안의 딜레마 이후, 70년대 후반 Comninou⁽⁵⁻⁷⁾에 의하여 새로운 대안이 제시되었다. 그는 균열면이 상호 관통할 수는 없으므로 균열 선단부 근방에서 균열이 완전히 개구하지 않고 마찰이 없는 접촉을 이루고 있는 것으로 생각하였다. 이에 따르면 균열의 개구부에서는 균열면 사이에 양의 간극을 이루고, 접촉영역에서는 압축 수직 표면력의 상태가 된다. 이러한 계면균열 모델을 폐구형 모델(closed tip model)이라고 하며, Atkinson⁽⁸⁾, Wang 등⁽⁹⁾에 의하여 발전되었다. Atkinson은 접촉역을 갖는 계면균열 문제를 해석적으로 다루고, 접촉역의 크기에 따라서 비현실적인 진동특이성이 소거될 수 있음을 증명하였다. Wang 등은 이방성 이종재료 사이의 계면균열

에 대하여 해석하였다.

한편 계면균열 문제에 있어서 국부적 응력특이성을 정의하는 응력세기계수를 보완하기 위하여 전역적 에너지 평형에 기초한 에너지 해방률에 의한 연구가 이루어졌다. Malyshev 등⁽¹⁰⁾에 의하여 계면균열에 대한 에너지 해방률이 연구된 이후, Krenk⁽¹¹⁾는 접착이음의 혼합모드 에너지방출율을 보이론에 의한 국부응력집중 σ_{max} , τ_{max} 의 향으로 유도하고, 중량대칭적으로 하중이 작용하는 접착이음에 대하여 혼합모드 에너지 해방률과 대응하는 하중 위상각을 계산하였다.

계면균열 문제에 대한 고전적 해석의 적용은 수학적인 어려움 때문에 몇가지 특별한 경우로 국한된다. 이와는 달리 유한요소법, 경계요소법 등의 수치해석법은 대상의 기하학적 성질, 물성 등을 함께 고려할 수 있고 다양한 모델을 비교적 제약없이 운용할 수 있으므로 보다 실제적이고 범용적으로 문제에 접근할 수 있는 장점을 갖는다. Zande 등⁽¹²⁾은 이종재료의 계면에 존재하는 균열의 거동을 조사하기 위하여 모드 II 응력세기계수를 계산할 수 있는 유한요소모델을 개발하고, Comninou의 적분방정식에 의한 해석 결과⁽⁵⁻⁷⁾와 비교·검토하였다. 또 Sun 등⁽¹³⁾은 이종재료 계면상에 존재하는 균열의 모드 I, 모드 II 에너지 해방률을 해석적인 방법과 유한요소법으로부터 계산하고, 해의 정밀도가 가상균열진전장에 의존함을 증명하였다. Matos 등⁽¹⁴⁾은 가상균열진전법에 기초한 유한요소해로부터 계면 응력세기계수를 구하고 기존의 엄밀해와 비교함으로써 계면균열 문제에 대한 유한요소법의 유용성을 검토하였다.

여러 공학 분야에서 수치해석법으로 널리 활용되고 있는 경계요소법에 의하여 계면균열 문제를 해석한 결과도 있다. Yuuki 등⁽¹⁵⁾은 Hetenyi의 기본해를 이용한 경계요소법을 사용하여 이종재료 계면균열을 해석하고, 응력세기계수 결정법으로서 외삽법을 제안하였다. 또한 Miyazaki 등⁽¹⁶⁾은 경계요소법에 의하여 계면균열재의 응력해석을 실시하고, 균열선단 주위에 가상적인 유한요소를 가정하는 가상균열진전법과 결합하여 응력세기계수를 계산하였다.

본 연구에서는 에지계면균열을 갖는 단순접착이음 시험편을 해석대상으로 한다. 단순접착이음은 일반적으로 구조접착부재로서 널리 활용되며, 치수 변화가 용이하므로 기하학적 설계 파라미터에 따른 강도 변화의 파악에 적합하다. 알루미늄 피착재와 에폭시계 접착층의 계면상에 편층에지균열을 삽입한 단순접착이음 접착이음에

대하여 정적인장실험을 실시하였다. 시험편에 따라 균열 길이를 단계적으로 변화시켜 인장강도의 초기 균열길이에 대한 의존성을 조사하였다. 이음의 변형을 관찰하기 위하여 피착재의 표면에 스트레인이메이지를 부착하고 변형률을 측정하였다. 또한 경계요소 수치해석을 수행하고, 균열개구 변위와 균열선단 근방의 응력값으로부터 켄플라잉스와의 응력세기계수를 각각 계산하였다. 이를 실험결과와 비교함으로써, 파괴역학 파라미터를 통하여 접착이음의 강도를 평가하고자 하였다.

2. 정적인장실험

2.1 에지계면균열 시험편

정적인장실험에 사용한 에지계면균열을 갖는 단순접착기 접착이음의 형상 및 치수는 Fig. 1과 같다. 피착재로는 알루미늄합금 5052를, 접착제로는 이액혼합형 상온경화 에폭시계 접착제의 한 종류인 Cemedine 1500을 사용하였다. 두 재료의 기계적 성질은 Table 1과 같다⁽¹⁷⁾.

시험편 제작과정은 다음과 같다. 우선 피착재를 준비하기 위하여 알루미늄 판재를 두께 $t=3\text{mm}$, 폭 $b=25\text{mm}$ 가 되도록 밀링 가공하고, 접착부위를 에머리 페이퍼 #600으로 연마한 후, 아세톤으로 표면을 세정한다. 다음으로 접착제를 도포하여 접착길이 $L=40\text{mm}$, 접착두께 $t_a=0.5\text{mm}$ 가 되도록 접착층을 형성하고, 두께 0.1mm의 테프론 테이프를 이용하여 접착층과 상부피착재 사이의 일측 계면단에 에지계면균열을 초기균열로서 삽입한다. 이 때 균열길이 a 는 각각 2, 4, 8, 12, 16, 20mm가 되도록 조정하였다. 또한 인장시험시 시험편의 장착을 고려하여 피착재와 동일재질, 동일두께로 길이 33mm의 물림부를 형성하였다. 접착부에 일정한 압력을 가하도록 클램프로 고정하고, 전기로내에서 110°C , 1시간동안 유지한 뒤 노냉한다. 이후 상온 중에서 10일동안 방치하여 완전 경화시키면 시험편 제작이 완료된다.

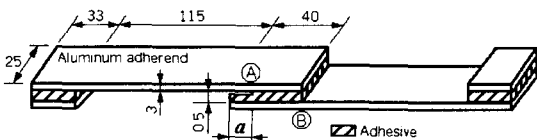


Fig. 1 Bonded single lap-joint specimen containing the interface edge crack.

Table 1 Mechanical properties of the adherend and the adhesive.

Materials Properties	Al 5052	Cemedine 1500
	Yield Strength (MPa)	168.9
Tensile Strength (MPa)	224.8	37.6
Young's modulus (GPa)	65.47	1.16
Poisson's ratio	0.34	0.39

2.2 정적인장실험

제작된 시험편에 대하여 정적인장실험을 실시하였다. 실험에는 10ton 용량의 만능인장시험기를 사용하였다. 크로스헤드의 이동속도를 0.2mm/min으로 일정하게 조정하고, 시험편이 파단될 때까지 하중을 증가시켰다. 정확한 데이터를 얻기 위하여 각 균열길이에 대하여 3회 이상 반복하여 실험을 실시하고 그 평균값을 최종 데이터로 취하였다.

파단된 이음에서 피착재의 변형과 접착층의 파괴형태를 관찰하고 Fig. 2에 개략적으로 나타내었다. 하중의 증가에 따라서 균열선단부 ㉔와 접착층 우하단의 계면단부 ㉕에 응력이 집중되고 이로부터 발생한 균열이 각각 계면을 따라 진전하다가 양측의 균열이 만나는 접착중상부 근방에서 파단이 일어난다. 파단면은 전형적인 계면파괴의 양상을 보이며, 피착재와 완전히 분리된 접착층 표면에서 물결모양의 균열전파 궤적을 관찰할 수 있었다. 파손된 피착재는 접착부에서 심하게 휘어져 있었으며, 특히 균열선단부근에서부터 이와 같은 현상이 두드러지게 나타난다. 따라서 인장-전단하중의 작용에 따른 피착재의 굽힘과 계면균열의 전파에 의한 접착층의 소성변형이 파괴의 직접적 원인을 알 수 있다.

Fig. 3은 정적인장실험으로부터 측정된 각 균열길이의 접착이음에 대한 인장하중을 그래프로 나타낸 것이다. 균열길이에 대한 접착길이에 대한 균열길이의 비 a/L 을 무차원 인자로 하여 적용하였다. 균열길이가 길수록 인장하중값은 감소하는 것으로 나타났다. 한편 최대인장하중 작용시 이음에 추가되는 작용응력을 비교하기 위하여 각 균열길이에 대한 접착부의 단위면적당 작용인장하중을 평균전단응력으로 하여 Fig. 4에 나타내었다. 이 때 작용면적은 접착부 면적($40\text{mm} \times 25\text{mm}$)에서 균열부를 제외한 순수

접착부의 면적으로 하였다. 그래프로부터 균열길이의 증가에 따라서 $a/L = 0.4$ 까지는 작용하는 평균전단응력도 함께 증가함을 알 수 있다. 여기서 균열길이가 길다는 것은 접착면적의 감소를 의미하고 따라서 적은 면적으로 작용부하를 견뎌야 하므로 대단히 높은 응력상태가 되며, 특히 균열선단은 과도한 응력집중상태가 되어 균열전파에 의한 파단이 상대적으로 낮은 하중에서 발생한다. 그러나 $a/L = 0.4$ 즉, 균열길이 $a=16\text{mm}$ 이후에서는 오히려 평균전단응력이 감소하였다. 따라서 에지계면균열을 갖는 접착이음에서는 접착길이에 대한 계면균열길이의 비가 0.4일 때 평균전단응력이 최대가 되므로 이음이 가장 취약하게 된다. 본 논문에서는 이 때의 균열길이를 임계균열길이라고 정의한다.

스트레인게이지를 이용하여 인장실험시 피착재의 변형률을 측정함으로써 이음내의 하중상태를 간접적으로 비교·고찰하였다. Fig. 5는 균열길이 20mm인 시험편에 대하여 3개의 스트레인게이지를 각각 좌측 접착단(1번 게이지), 균열단(2번 게이지), 우측 접착단(3번 게이지)에 대응하는 알루미늄 피착재의 상부 표면에 부착하고 하중변화에 따른 변형률값을 측정한 결과를 나타낸 것이다. 여기서 종축의 응력은 변형률 측정시의 작용하중을 접착면적으로 나눈 값으로 하였다. 세 위치의 변형률을 비교하면 균열단에 부착한 2번 게이지의 변형률 변화가 가장 큰 것으로 나타났다. 이는 Fig. 2에서 기술했던 바와 같이 균열선단부에 대한 응력집중으로 피착재가 심하게 변형된 결과이다. 그러므로 계면균열이 있는 접착이음의 강도평가에는 균열선단부에서의 변형률이 중요한 기준이 될 것으로 생각된다. 한편 변형률의 부호로부터 피착재

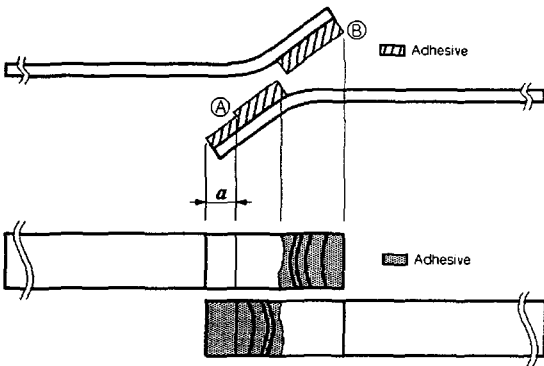


Fig. 2 Schematic presentation of the deformation of adherend and the fracture surface.

표면에서는 좌측 접착단이 압축에 이은 인장, 균열단이 압축, 우측 접착단이 인장 상태가 되는 비선형 거동을 보임을 알 수 있다. 반면에 게이지 부착면의 반대편이 되는 균열면에는 좌측 접착단에 인장에 이은 압축, 균열단에 인장, 우측 접착단에 압축이 작용하게 된다. 따라서 균열단부에 작용하는 인장력에 의하여 균열선단은 모드 I 과 모드 II의 혼합모드 상태가 되어 균열이 개구하면서 진전하게 된다.

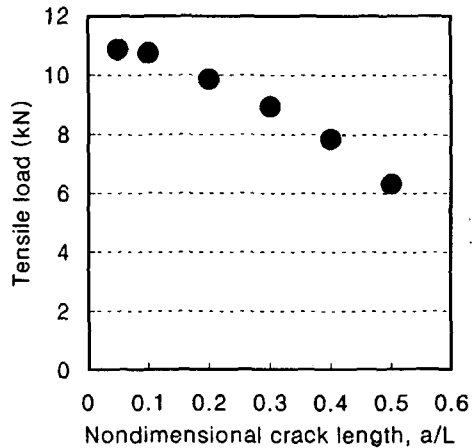


Fig. 3 Relationship between the tensile load of the bonded single lap-joint containing the interface edge crack and the nondimensional crack length, a/L .

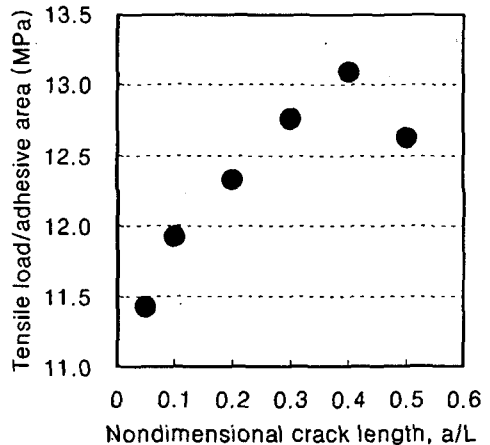


Fig. 4 Relationship between the average shear stress of the bonded single lap-joint containing the interface edge crack and the nondimensional crack length, a/L .

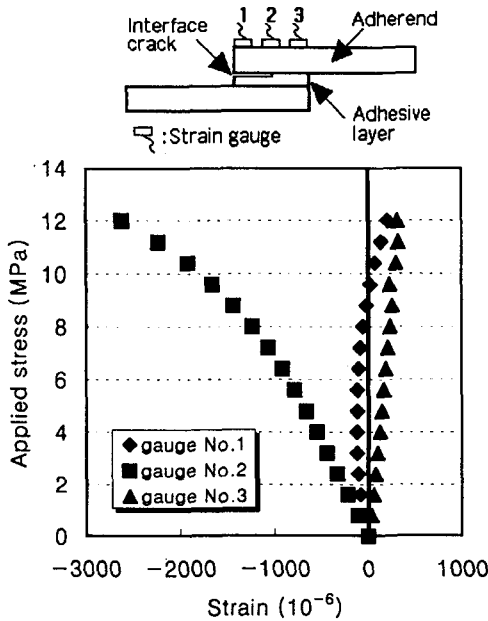


Fig. 5 Results of the strain of the bonded single lap-joint containing the 20mm interface edge crack according to the position of strain gauge.

3. 파괴역학적 고찰

3.1 BEM 해석

정적인장실험에서 결정한 계면균열을 갖는 단순접합기 접착이음의 임계균열길이를 파괴역학적 파라미터를 도입하여 고찰한다. 변위/응력해석에는 2차원 탄성경계요소법⁽¹⁸⁾을 사용하였다.

경계요소법은 주어진 경계만 이산화하는 것으로 충분하고, 문제의 차원이 한차원 낮아지는 특징이 있으므로, 전체 영역을 대상으로 하는 유한요소해석에 비하여 모델링 작업도 간단하고, CPU 계산시간도 절약되는 장점이 있다⁽¹⁹⁾.

경계요소해석에 사용된 경계조건과 하중조건을 Fig. 6에 나타내었다. 2차원 평면변형률상태에서 최대 472개의 요소를 사용하여 퍼스널 컴퓨터상에서 해석하였다. 전체 해석영역을 5부분으로 분할함으로써 응력집중부가 되는 접착단과 계면단에 요소를 집중시켜 해의 정밀도를 높였다. 그림에서 1, 2영역이 상부피착재, 3영역이 접착재, 4, 5영역이 하부피착재가 된다. 해석에 사용한 재료의 기계적 성질은 Table 1에서의 값을 사용하였다.

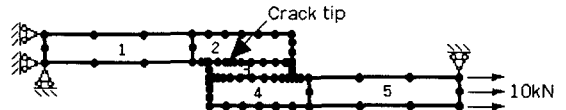


Fig. 6 Typical boundary element analysis model.

3.2 컴플라이언스의 계산

에너지 해방률 G 는 균열이 진전하기 위하여 균열 선단 근방에서 방출되는 에너지로 정의되며, 접합 구조물에 있어서 다음 식과 같이 된다⁽²⁰⁾.

$$G = \frac{F^2}{2b} \frac{\partial C}{\partial a} \quad (1)$$

여기서 F 는 작용하중이며, b 는 구조물의 두께, a 는 계면균열길이, C 는 구조물의 컴플라이언스(변위/하중)이다. 실험 또는 이론적으로 C 가 a 의 함수로서 구해지면 $\partial C / \partial a$ 를 계산할 수 있다.

따라서 에너지해방률 G 가 컴플라이언스 C 의 함수로 주어지므로 본 절에서는 균열 개구면의 경계요소 변위해석 결과로부터 컴플라이언스를 계산하고, 균열길이와의 관계를 알아본다. Fig. 7은 접착층과 상부피착재가 만나는 균열개구부 변위의 변형전과 변형후 상태를 도해적으로 나타낸 그림이다. 변형전에 서로 맞닿아 있던 균열개구부의 상하 절점이 변형 후 거리 d 만큼 떨어지게 되므로 수치해석결과로부터 d 값을 계산하여 작용하중 10kN으로 나누어 컴플라이언스를 구하였다. 이렇게 구한 컴플라이언스 C 값을 접착길이로 무차원화시킨 균열길이에 대하여 Fig. 8에 나타내었다. 그래프로부터 컴플라이언스는 $a/L=0.4$ 까지 대략 선형적으로 증가하다가 이후 감소한다. 이는 $a/L=0.4$ 즉, 균열길이 16mm에서 균열면의 누적 방출에너지가 최대가 되어 균열의 급격한 전파에 의한 파단을 예상하게 한다. 이와 같은 컴플라이언스 계산결과

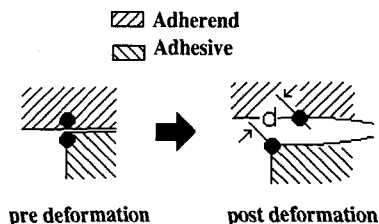


Fig. 7 Schematic representation to the deformation of the crack opening face.

는 앞에서의 정적인장실험 결과와 일치하며, 따라서 $a/L=0.4$ 가 단순접치기 접착이음의 임계균열길이로서 존재함을 확인할 수 있다.

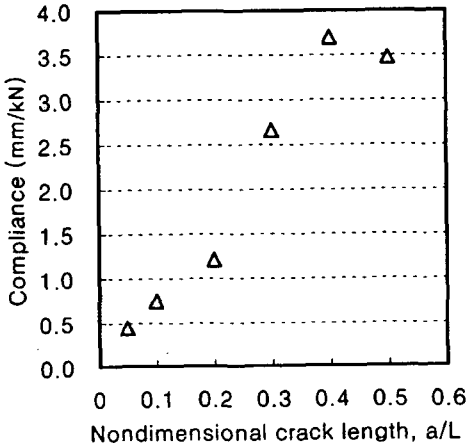


Fig. 8 Variation of the compliance with the nondimensional crack length, a/L

3.3 응력세기계수의 계산

계면균열의 응력세기계수, K_i 는 균열선단근방의 응력장에 대한 파라미터가 되며, 균열진전력을 평가한다. 전통적인 개구형 계면균열모델에서 응력세기계수는 다음 식과 같이 모드 I과 모드 II의 복소 응력세기계수에 의하여 표시된다⁽²¹⁾.

$$K_i = K_I + iK_{II} \quad (2)$$

이를 이용하여 균열선단근방의 응력장을 나타내면 다음 식과 같이 된다.

$$\sigma_{yy} + i\tau_{xy} = \frac{K_i}{\sqrt{2\pi}} r^{-1/2+ie} \quad (3)$$

여기서 r 은 균열선단으로부터의 거리이며, ϵ 은 이종재료의 재료상수로부터 결정되는 이종재료상수이다. Yuuki 등⁽¹⁵⁾은 이종재료 계면균열의 응력세기계수를 외삽에 의하여 결정하는 방법을 제안한 바 있으며, 본 논문에서도 이를 적용하여 다음 식으로부터 응력세기계수를 구하였다.

$$K_i = \lim_{r \rightarrow 0} \sqrt{2\pi r (\sigma_{yy}^2 + \tau_{xy}^2)} \quad (4)$$

각 균열길이에 대한 경계요소 응력해석결과를 이용하여 식(4)로부터 응력세기계수를 계산할 수 있다. 즉 균열선단에 가까운 몇 개 절점의 응력세기계수를 균열선단으로부터의 거리의 함수로 구하고, 이 중에서 일차선형조건을 만족하는 절점들을 대상으로 직선 외삽하여, 그 y 절편값을 응력세기계수로 결정한다. 이와 같은 방법으로 구한 에지계면균열의 응력세기계수를 Fig. 9에 나타내었다. 컴플라이언스 계산결과와 마찬가지로 $a/L=0.4$ 근방에서 최대가 되며 따라서 응력세기계수에 의한 평가에서도 임계균열길이는 $a/L=0.4$ 인 것으로 확인되었다.

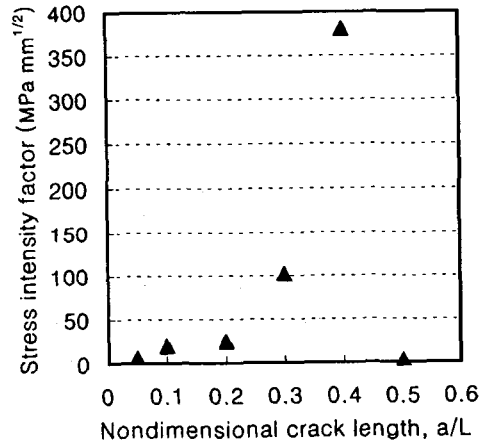


Fig. 9 Variation of the stress intensity factor with the nondimensional crack length, a/L

4. 결 론

길이가 서로 다른 편축 에지계면균열을 삽입한 단순접치기 접착이음 시험편에 대하여 정적인장실험을 실시하였다. 각 이음의 최대인장상태에서 평균전단응력을 비교한 결과 접착길이에 대한 균열길이의 비 a/L 이 0.4일 때 최대가 되었다. 접착이음의 계면상에서 균열이 발생하여 진전하다가 균열길이가 $a/L=0.4$ 에 도달하면 이음에 작용하는 응력이 최대가 됨으로써 이후 파손이 급격히 진행되는 것으로 보인다. 따라서 $a/L=0.4$ 가 되는 균열길이를 접착이음의 수명기준이 되는 임계균열길이라고 결정할 수 있다.

인장실험시 피착재 표면에 스트레인게이지를 부착하여 접착단과 균열단의 변형률을 측정하여 이음의 변형거동을 조사하였다. 균열단의 변형률이 접착단에 비하여 크게 나타났고, 균열면상에는 굽힘에 의한 인장응력이 작용함을 알 수 있었다.

경계요소 변위/응력해석에 의하여 계면균열의 대표적인 파괴역학적 파라미터인 컴플라이언스와 응력세기계수를 계산하였다. 계산결과를 사용하여 인장실험결과를 잘 설명할 수 있었으며, $a/L = 0.4$ 에서 역시 최대값을 나타내었다. 따라서 이들 파괴역학적 파라미터는 균열을 갖는 접착이음에 있어서 유용한 평가인자로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

- Williams, M. L., "The Stresses Around a Fault or Crack in Dissimilar Media," Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 49, No. 2, pp. 199-204, 1959.
- Erdogan, F., "Stress Distribution in a Non-homogeneous Elastic Plane with Cracks," Journal of Applied Mechanics, Vol. 30, pp. 232-237, 1963.
- Rice, J. R., Sih, G. C., "Plane Problems of Cracks in Dissimilar Media," Journal of Applied Mechanics, Vol. 32, pp. 418-423, 1965.
- England, A. H., "A Crack Between Dissimilar Media," Journal of Applied Mechanics, Vol. 32, pp. 400-402, 1965.
- Comninou, M., "The Interface Crack," Journal of Applied Mechanics, Vol. 44, pp. 631-636, 1977.
- Comninou, M., "The Interface Crack in a Shear Field," Journal of Applied Mechanics, Vol. 45, pp. 287-290, 1978.
- Comninou, M., "The Interface Crack in a Combined Tension-Compression and Shear Field," Journal of Applied Mechanics, Vol. 44, pp. 631-636, 1977.
- Atkinson, C., "The Interface Crack with a Contact Zone," International Journal of Fracture, Vol. 18, No. 3, pp. 161-177, 1982.
- Wang, S. S., Choi, I., "The Interface Crack Between Dissimilar Anisotropic Materials," Journal of Applied Mechanics, Vol. 50, pp. 169-178, 1983.
- Malyshev, B. M., Salganik, R. L., "The Strength of Adhesive Joints Using the Theory of Cracks," International Journal of Fracture, Vol. 1, pp. 114-128, 1965.
- Krenk, S., "Energy Release Rate of Symmetric Adhesive Joints," Engineering Fracture Mechanics, Vol. 43, No. 4, pp. 549-559, 1992.
- Zande, H. D., Grootenboer, H. J., "A Finite Element Approach to Interface Cracks," Journal of Applied Mechanics, Vol. 53, pp. 573-578, 1986.
- Sun, C. T., Jih, C. J., "On Strain Energy Release Rates for Interfacial Cracks in Bimaterial Media," Engineering Fracture Mechanics, Vol. 28, No. 1, pp. 13-20, 1987.
- Matos, P. P. L., McMeeking, R. M., Charalambides, P. G., Drory, M. D., "A Method for Calculating Stress Intensities in Bimaterial Fracture," International Journal of Fracture, Vol. 40, pp. 235-254, 1988.
- Yuuki, R., Cho, S. B., "Efficient Boundary Element Analysis of Stress Intensity Factors for Interface Cracks in Dissimilar Materials," Engineering Fracture Mechanics, Vol. 34, No. 1, pp. 179-88, 1989.
- Miyazaki, N., Ikeda, T., Soda, T., Munakata, T., "Stress Intensity Factor Analysis of Interface Crack Using Boundary Element Method(1): Application of Virtual Crack Extension Method," Journal of JSME, Vol. 57, No. 541, pp. 2063-2069, 1991.
- 오승규, 유영철, 정의섭, 이원, "Al합금 단순접착기 접착이음의 인장-전단강도 평가," 한국정밀공학회 1997년도 춘계학술대회논문집, pp. 567-571, 1997.

18. 이원, 유영철, 정의섭, 윤인식, "경계요소법에 의한 이종재료 접합 잔류열응력의 해석," 한국비파괴검사학회지, Vol. 15, No. 4, pp. 540-548, 1995.
19. Sun, D., Ma, X., "An Application of the Boundary Element Method to the Fatigue Crack Propagation in a Cracked Heterogeneous Body," Engineering Fracture Mechanics, Vol. 56, No. 6, pp. 839-840, 1997.
20. Kinloch, A. J., "Adhesion and Adhesives: Science and Technology," CHAMPMAN and HALL, pp. 267, 1987.
21. Kelly, P., Nowell, D., Hills, D. A., "The Edge Interface Crack," International Journal of Fracture, Vol. 67, pp. 263-271, 1994.