

알루미늄 단순겹치기 접착이음의 에지계면균열에 대한 연구

Analysis on the Interface Edge Crack in Aluminum Bonded Single Lap-joint

유영철, 박정환*, 정의섭(숭실대 대학원), 이 원(숭실대)

Y. C. Yu, J. H. Park, E. S. Jeong(Graduate School, Soongsil University), W. Yi(Soongsil University)

Abstract

The analysis of cracks at the interface between dissimilar materials has received a great deal of attention in recent years. In this paper we conducted the static tensile test for the aluminum bonded single lap-joint with the interface edge crack. Comparing this results, that is ultimate load and strain value of aluminum adherend by strain gauge with the fracture mechanics parameters, compliance and stress intensity factors acquired from the boundary element analysis, we concluded that there are critical value of crack length to provoke the interface fracture.

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

1. 서 론

공학적인 활용 면에서 세라믹스/금속, 알루미늄/에폭시 등과 같이 서로 기계적 성질이 다른 이종재료를 접합하여 사용하는 문제는 매우 중요하며, 따라서 이종재료 접합부의 신뢰성 확보를 위하여 이의 강도평가가 요망된다. 두 이종재료가 만나는 계면부는 응력의 불연속으로 인한 취약부가 될 뿐만 아니라, 실제적으로 어느 정도의 거칠기를 갖게 되며 따라서 미발달 단계의 균열을 내재하고 있는 것으로 가정할 수 있어 이러한 균열의 생성·성장으로 인한 응력집중이 이음의 파괴를 일으키는 주원인이 된다. 따라서 계면 균열의 파괴역학적 해석을 통하여 이음 강도를 평가할 수 있으며 이에 대한 많은 연구가 이루어지고 있다^{1), 2)}.

계면균열의 모델에는 여러 종류가 있지만 현재로서는 두 가지가 가장 대표적이다. 그 첫 번째 모델은 개구형 모델(open tip model)로서 Williams³⁾에 의해 최초로 제안되었다. 여기서는 균열이 선단까지 완전히 개구된 것으로 가정하며, 두 이종재료의 접합부로부터 균열면으로 직접적인 전이가 이루어진다고 생각하였다. 그러나 개구형 모델은 균열면의 오버래핑

을 물리적으로 설명할 수 없는 모순을 갖는다. 두 번째 모델은 Comninou⁴⁾에 의해 제안되었으며 폐구형 모델(closed tip model)이라고 한다. 여기서는 균열면이 균열선단에서 항상 접촉을 이루고 있는 것으로 가정하며 균열의 개구부에서는 균열면 사이에 양의 간극을, 접촉영역에서는 압축 수직 표면력을 갖도록 구성한다.

그러나 이러한 연구는 주로 무한판을 대상으로 한 해석적인 경우가 대부분이며 실제 구조물에 적용하기 위해서는 유한판에 대한 실험 또는 수치해석적인 검토가 필요하다. 본 논문에서는 에지계면균열을 갖는 단순겹치기 접착이음 시험편을 사용하여 정적인 장실험과 스트레인게이지에 의한 변형률측정을 실시하고, 균열길이와 계면강도 및 변형률의 관계를 조사하였다. 또한 수치해석결과로부터 계산한 파괴역학적 파라미터를 도입함으로써 실험결과를 정리·검토하였다.

2. 계면균열의 파괴역학적 파라미터

2.1 에너지 해방률

에너지 해방률 G 는 균열이 진전하기 위하여 균열

선단 근방에서 방출되는 에너지로 정의되며, 접합 구조물에 있어서 다음 식과 같이 나타낼 수 있다⁵⁾.

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

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

2.2 계면균열의 응력세기계수

계면균열의 응력세기계수(stress intensity factor)는 균열진전력을 평가하고 균열선단근방의 응력장에 대한 파라미터가 된다. 전통적인 개구형 계면균열모델에서 응력세기계수는 다음식과 같이 된다²⁾.

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

따라서 균열선단근방의 응력장은 다음식과 같이 나타낼 수 있다.

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

여기서 r 은 균열선단으로부터의 거리이며, ϵ 은 이 종재료의 재료상수로부터 결정된다. Yuuki등⁶⁾은 이 종재료 계면균열의 응력세기계수를 외삽에 의하여 결정하는 방법을 제안한 바 있으며 본 논문에서도 이를 적용하여 다음식으로부터 응력세기계수를 구하였다.

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

3. 정적인장실험

3.1 에지계면균열 시험편

정적인장실험에 사용한 에지계면균열이 있는 단순 겹치기 접착이음의 형상 및 치수는 Fig. 1과 같다. 피착체로는 알루미늄합금 5052를, 접착제로는 이액 혼합형 상온경화 에폭시계 접착제의 한 종류인

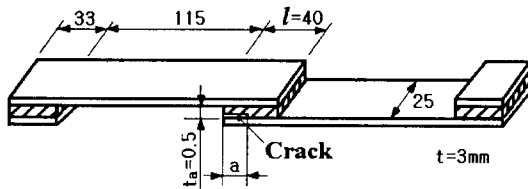


Fig. 1 Aluminum bonded single lap-joint specimen with the interface edge crack.

Table 1 Mechanical properties of adherend and adhesive.

Material Properties	Al 5052	Cemadine 1500
Yield Strength (MPa)	168.9	18.5
Tensile Strength (MPa)	224.8	37.6
Young's modulus (GPa)	65.47	1.16
Poisson's ratio	0.34	0.39

Cemadine 1500을 사용하였다. 두 재료의 기계적 성질은 Table 1과 같다.

시험편 제작과정은 다음과 같은 과정을 거친다. 우선 알루미늄 피착체를 두께 3mm, 폭 25mm로 밀링 가공하고 접착부위를 에머리 페이퍼 #600으로 연마한 후 아세톤으로 표면을 세척한다. 다음으로 접착길이가 40mm, 접착두께가 0.5mm가 되도록 접착제를 도포하고 일정한 압력으로 고정된 후 110°C에서 1시간동안 유지하여 상온 중에서 10일동안 방치한 후 실험을 실시하였다. 이 때 에지계면균열을 인공적으로 만들기 위하여 테프론 테이프를 접착층과 하부 피착체 사이의 한쪽 계면단에 삽입하였으며, 균열길이 a 는 각각 2, 4, 8, 12, 16, 20mm가 되도록 조정하였다.

3.2 정적인장실험 및 변형률의 측정

제작된 시험편에 대하여 정적인장실험을 실시하였다. 실험에는 만능인장시험기 Instron model 4206을 사용하였으며, 크로스헤드의 이동속도를 0.2mm/min으로 일정하게 조정하고 시험편이 파단될 때까지 하중을 증가시켰다. 정확한 데이터를 얻기 위하여 각 균열길이에 대하여 3회 반복하여 실험을 실시하고 그 평균값을 취하였다.

이음이 파괴되는 양상을 관찰하여 Fig. 2에 모식적으로 나타내었다. 하중의 증가에 따라 균열선단부와 접착층 위상단의 계면단부에 응력이 집중되고 이로부터 발생·진전한 균열이 각각 계면을 따라 진전하다가 양쪽의 균열이 어느 정도 이상 가까워지면 접착층 내에서 파단이 일어난다. 이와 같은 사실은 파단면을 관찰하므로써 더욱 확실히 알 수 있는데, 접착층 중앙부를 향하여 양 단부에서 진전해온 균열이 파단면에 물결모양의 궤적을 보이는 전형적인 계면 파괴의 양상을 나타내었다. 또한 알루미늄 피착체의 변형형태를 보면 균열선단부근에서부터 휘어지는 현상이 두드러지게 나타났다.

Fig. 3은 실험으로부터 구한 각 균열길이에 대한

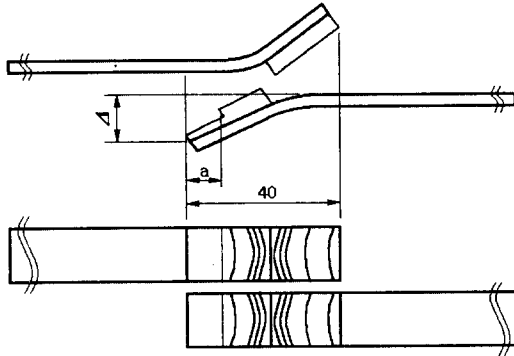


Fig. 2 The observation of fracture process and fracture surface.

극한하중을 그래프로 나타낸 것이다. 균열길이의 증가에 따라 극한하중값은 감소하고 있다. 이는 균열길이가 길어지면 균열전단의 응력특이성이 증가하여 빠른 균열성장으로 인하여 쉽게 파손에 이르게 되기 때문으로 생각된다. 따라서 이음의 하중전달능력의 관점에서는 균열길이가 짧은 것이 유리하다고 할 수 있다.

그러나 강도평가를 위해서는 응력에 의한 비교가 바람직하므로 이음의 극한하중에 대한 평균전단응력을 계산하여 Fig. 4에 나타내었다. 이 때 작용면적은 균열부위를 제외한 순수접착부의 면적으로 하였다. 그래프로부터 균열길이가 증가하면 작용하는 평균전단응력도 이에 따라 증가함을 알 수 있고 따라서 Fig. 3의 결과도 이로부터 설명이 가능하다. 즉 균열길이가 증가하면 접착층이 받는 평균전단응력이 증

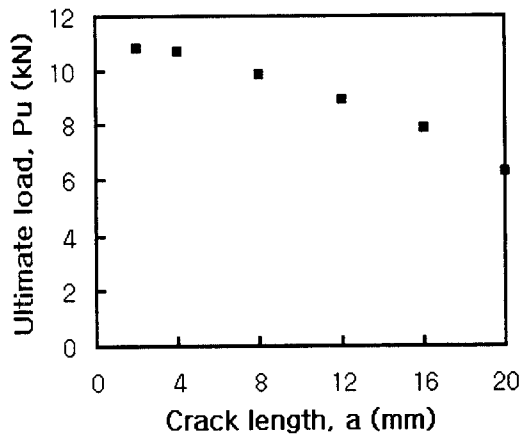


Fig. 3 Relationship between experimental ultimate load of aluminum bonded single lap-joint with interface edge crack and crack length.

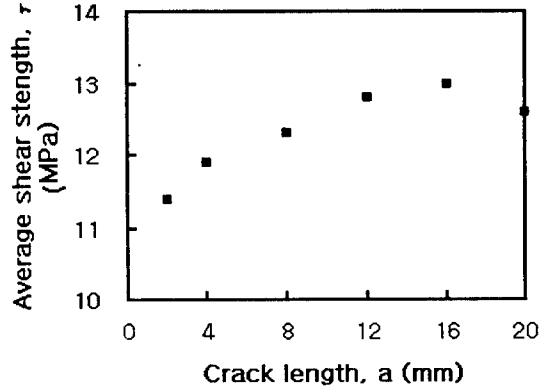


Fig. 4 Relationship between average shear stress and crack length.

가하고 이 때문에 상대적으로 낮은 하중에서 파단되는 것으로 보인다. 평균전단응력은 균열길이 $a = 16\text{mm}$ 즉, $a/l=0.4$ 까지 증가하고 이후에는 감소한다. 이와 같은 결과는 저자들이 이미 보고한 바 있는 파단한계 균열길이비⁷⁾의 존재를 실험적으로 입증한 것으로 주목된다. 이에 대한 구체적인 고찰은 4장에서 다시 하기로 한다.

한편 스트레인게이지를 이용하여 인장실험시 피착체의 변형률을 측정하므로써 각 균열길이에 따른 하중상태를 비교·고찰하고자 하였다. Fig. 5는 균열길

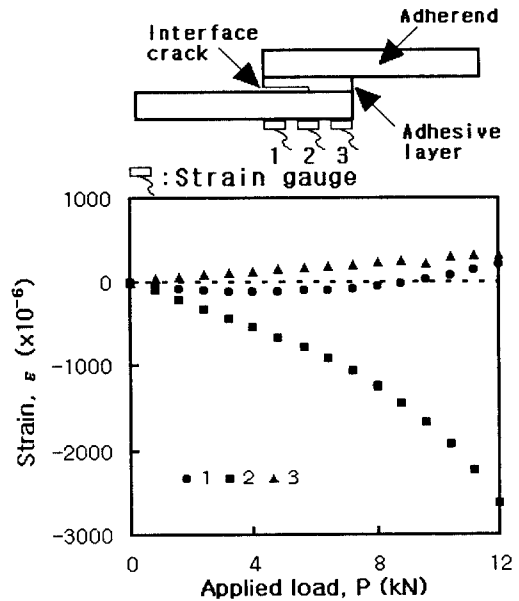


Fig. 5 Results of strain according to the position of strain gauge ($a=20\text{mm}$).

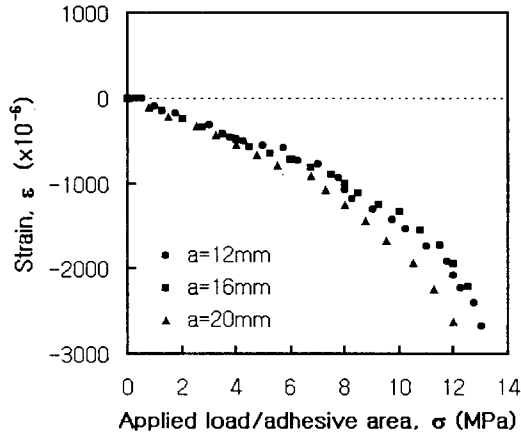


Fig. 6 Results of strain according to the applied stress for the different crack length, $a = 12, 16, 20\text{mm}$.

이 20mm인 시험편에 대하여 3개의 스트레인게이지를 알루미늄 피착체의 각 위치에 부착하고 하중변화에 따른 변형률 값을 측정할 것이다. 2번 스트레인게이지의 변형률이 가장 큰 것으로 보아 균열선단에 응력이 집중됨을 간접적으로 알 수 있다. 따라서 균열길이의 변화에 따라서 변형률을 비교하기 위해 균열길이 12, 16, 20mm의 각 경우에 대하여 균열선단부에 스트레인게이지를 부착하고 하중증가에 따른 변형률을 측정하여 그 결과를 Fig. 6에 나타내었다. 여기서 횡축의 응력은 측정된 하중을 각 균열길이에 따른 접착면적으로 나눈 값이다. 낮은 응력단계에서는 각 균열길이에 따른 변형률 값의 크기가 균열길이 12, 16, 20mm의 순서대로 나타나지만, 약 8MPa를 지나면서 12mm와 16mm의 변형률 값이 역전된다. 이것은 균열길이 16mm근방의 응력-변형률 상태가 매우 복잡함을 나타내며 따라서 이 부근을 응력한계길이라고 고찰한 앞서의 정적인장실험결과에 타당성을 제공한다. 한편 균열길이 20mm의 경우에는 12, 16mm의 경우와 점점 더욱 큰 차이를 보이며 파단시까지 증가한다. 이는 이미 균열한계길이를 지난 20mm의 경우 방출된 에너지가 변형률로 변환되어 변형률이 크게 나타나는 것으로 생각된다.

4. 파괴역학적 고찰

4.1 BEM 해석

정적인장실험과 스트레인게이지에 의한 변형률 측정결과로부터 고찰한 계면균열을 갖는 접착이음의 한계균열길이에 대하여 파괴역학적 파라미터를 도입

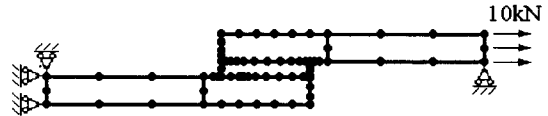


Fig. 7 A typical boundary element analysis model.

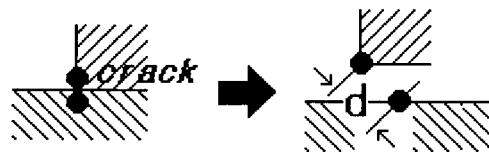
하여 검증하기 위하여 탄성경계요소 응력/변위해석⁸⁾을 실시하였다. 해석에 사용한 경계조건과 하중조건을 Fig. 7에 나타내었다. 해석은 2차원 평면변형률상태에서 최소 448개의 요소를 사용하여 퍼스널컴퓨터에서 이루어졌다.

4.2 컴플라이언스의 계산

2.1절에서 에너지해방률 G 는 컴플라이언스 C 의 함수로 주어지므로 본 절에서는 균열개구면의 변위 해석결과로부터 컴플라이언스를 계산하여 균열길이와의 관계를 알아본다. Fig. 8은 접착층과 하부피착체가 만나는 균열개구부 변위의 변형전과 변형후 상태를 도해적으로 나타낸 그림이다. 변형전에 서로 맞닿아 있던 균열개구부의 상하절점이 변형 후 거리 d 만큼 떨어지게 되므로 수치해석결과로부터 d 값을 계산하여 작용하중 10kN으로 나누어 컴플라이언스를 구하였다. 이렇게 구한 컴플라이언스 C 값을 접착길이를 무차원화시킨 균열길이에 대하여 Fig. 9에 나타내었다. 그래프로부터 컴플라이언스는 균열길이비 $a/l=0.4$ 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 계산결과는 3.2절의 실험결과를 입증하는 것이며 따라서 파단한계 균열길이비 $a/l=0.4$ 가 이 경우에서도 확인되었다.

4.2 응력세기계수의 계산

각 균열길이에 대한 BEM 응력해석결과를 이용하여 식(4)로부터 응력세기계수를 계산할 수 있다. 즉



(a) pre-deformation (b) post-deformation

Fig. 8 Schematic representation to the deformation of the crack opening face.

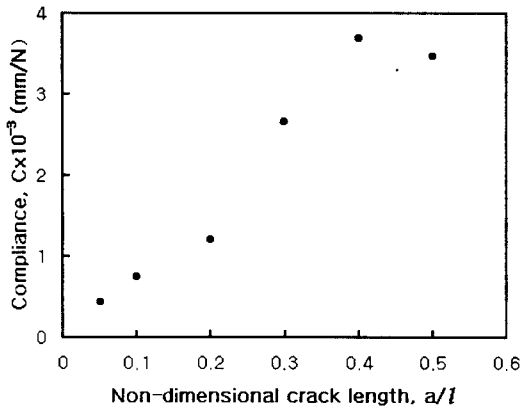


Fig. 9 Compliance versus the non-dimensional crack length, a/l .

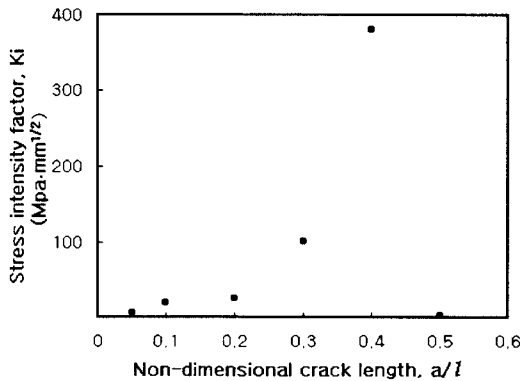


Fig. 10 Stress intensity factor versus the non-dimensional crack length, a/l .

균열선단에 가까운 몇 개 절점의 응력세기계수를 균열선단으로부터의 거리의 함수로 구하고, 이중 일차선형조건을 만족하는 절점들을 대상으로 직선외삽하여 그 y 절편 값을 응력세기계수로 정한다. 이와 같은 방법으로 구한 에지계면균열의 응력세기계수를 Fig. 10에 나타내었다. 컴플라이언스 계산결과와 마찬가지로 균열길이비 $a/l=0.4$ 근방에서 최대가 되며 따라서 응력세기계수의 계산결과에서도 파단한계 균열길이비는 0.4가 되었다.

6. 결 론

길이가 다른 에지계면균열을 인공적으로 가공한 단순겹치기 접착이음 시험편에 대하여 정적인장실험과 스트레인게이지에 의한 변형률 측정을 실시하고, 경계요소 수치해석결과로부터 구한 컴플라이언스와 응

력세기계수를 이용하여 고찰한 결과, 파단한계 균열 길이비 $a/l=0.4$ 로 결정되었다.

참 고 문 헌

- 1) Rice, J. R., "Elastic Fracture Mechanics Concepts for Interfacial Cracks", *Journal of Applied Mechanics*, Vol. 55, pp. 98~103, 1988.
- 2) Kelly, P., Nowell, D. and Hills, D. A., "The Edge Interface Crack", *International Journal of Fracture*, Vol. 67, pp. 263~271, 1994
- 3) Williams, M. L., "The Stresses around a Fault or Crack in Dissimilar Media", *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 49, pp. 199~204, 1959.
- 4) Comninou, M., "The Interface Crack", *Journal of Applied Mechanics*, Vol. 44, pp. 631~636, 1977.
- 5) Kinloch, A. J., "Adhesion and Adhesives: Science and Technology", *CHAMPMAN and HALL*, pp. 267, 1987.
- 6) 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. 179~188, 1989.
- 7) 정의섭, 유영철, 윤인식, 이원, "에지계면균열을 갖는 단순겹치기 접착이음의 파괴역학 파라미터 해석", '96 대한기계학회 추계학술대회논문집(I), pp. 162~167, 1996.
- 8) 이원, 유영철, 정의섭, 윤인식, "경계요소법에 의한 이종재료 접합 잔류열응력의 해석", 한국비파괴검사학회지 Vol. 15, No. 4, pp. 540~548, 1995.