

접착층내 결함이 계면균열의 응력확대계수에 미치는 영향 평가

현철승* · 허성필** · 양원호*** · 류명해****

Effect Evaluation of Hole Defects in Adhesive on SIF of Interface Crack

Cheol-Seung Hyun, Sung-Pil Heo, Won-Ho Yang and Myung-Hae Ryu

Key Words: SIF(응력확대계수), Hole Defects(결함), Damage Zone(손상 영역), Adherend(피착재), Adhesive(접착제)

Abstract

Adherend-adhesive interface failure will occur on a macroscale when surface preparation or material quality are poor. It is well known that the stress singularity occurs at the edges of interface between the adherends and the adhesive, and that crack will initiate from these positions. Also if bubbles are created and remained in the adhesive layer during the bonding process, the stress concentrates around these hole defects. In this paper, the effects of the hole defects on the SIF of interface crack were examined. From results, SIF increased with the hole defects near the interface crack and increased with an decrease in the upper adherend thickness, an increase in the center adhesive thickness.

1. 서론

최근 구조물의 경량화를 위해 경량소재인 알루미늄이나 복합재가 많이 이용되면서 접합부의 설계 및 해석이 중요한 연구분야가 되고 있다. 이들 경량재료는 주로 접착에 의한 접합을 이용하게 되는데 접착제의 기계적 성질이 우수해지고 접합부에 대한 이해가 증대됨에 따라 기계적 결합의 대응으로 많이 쓰이고 있다. 접착접합이음의 강도에 미치는 영향인자는 다양하고 산포도가 크기 때문에 아직 접착접합이음의 강도평가법이

확립되어 있지 않은 실정이다. 접착접합강도의 구조평가에 대한 연구는 접착접합의 강도에 미치는 다양한 인자로 인하여 해석이 복잡하므로 현재까지 통일된 평가방법이 확립되어 있지 않아 해결해야할 과제로 남아 있다. 접착제와 피착재 접합면의 에지에서 파괴가 초기화되며 에지에서 응력특이성이 존재한다는 것은 이미 널리 알려졌다. 또한 접착제의 혼합, 도포, 경화의 과정을 거쳐야 하는 접착접합의 특성상 접착층내 결함(Hole defects)과 같은 다양한 결함이 발생하기 쉬우며 이러한 결함의 존재로 결합 근방의 응력이 증가하여 접착강도를 저하시킨다. 따라서 접착이음의 구조설계 및 신뢰성의 관점에서 이와 같은 결함이 접착이음강도에 미치는 영향을 파악하는 일이 매우 중요하다. Heslehurst⁽¹⁾에 의하면 홀로그램을 통하여 접착제는 시간이 경과하면 고유물성치를 유지하지 못하고 변화한다는 사실을 보고했다. Andrew sheppard⁽²⁾는 Fig. 1과 같은 접착

* 회원, 성균관대학교 대학원 기계설계학과

** 회원, 성균관대학교 대학원 기계공학과

*** 회원, 성균관대학교 기계공학부

**** 안동정보대학 건축설비과

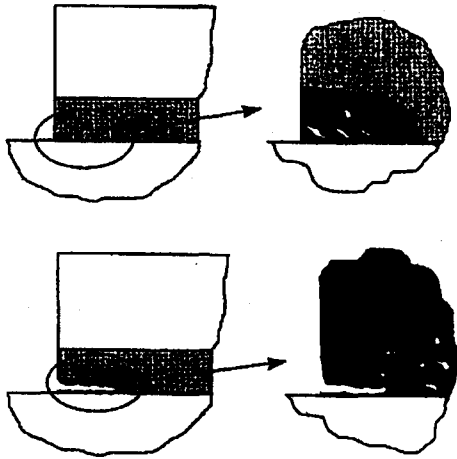


Fig. 1 Damage zone model for a bonded joint suffering cohesive failure⁽²⁾

접합의 파괴는 손상 영역이 발달후 파괴가 발생한다는 모델을 제시하였다. 저하중하에서는 결합에서 초기화된 국부적인 손상(damage)이 발생하고, 중하중에서는 손상 영역이 커지고 파손 하중에 도달할때 각각의 손상요소들의 합체가 되고 균열형태로 발달한다고 하였다. 이는 접착계면에 초기화된 균열은 결합(void, hole, flaw 등)에 의해 응력집중이 발생하여 균열진전을 가속화시킨다고 할 수 있다.

본 연구에서는 접착제와 피착재 계면에 발생한 균열이 접착층내에 접착재 손상에 의하거나 제조과정상 존재하는 결함이 접착계면에 존재하는 계면균열의 응력확대계수에 미치는 영향에 대하여 해석하고자 한다.

2. 해석모델 및 방법

2.1 해석 모델

Fig. 2는 중앙부 접착층에 균열을 갖는 단순 strap 접착이음으로서 균열길이(a)=1mm, 상단피착재 두께(t_{su})=3mm, 하단 피착재 두께(t_{sb})=3mm, 중앙부 접착층 두께(t_{ac})=0.2mm, 상단부 접착층 두께(t_{au})=0.2mm이다. 상하단부 피착재 재료는 Al5052, 접착제는 에폭시를 적용하였다. 하중은 단순 인장하중으로서 모델의 x방향으로 100MPa를 가하였으며 해석에 사용된 재료의 물성치는 Table 1과 같다.

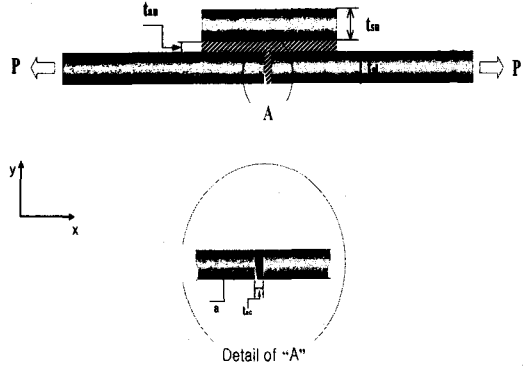


Fig. 2 Configuration and dimension of single strap adhesively joint with void in center adhesive

Table 1 Mechanical properties of adherend and adhesive

	Al5052	Epoxy
Elastic Modulus E (GPa)	65.47	2.07
Poisson's ratio ν	0.34	0.37

2.2 해석 방법

접착층내에 결함이 존재할 경우 이것이 계면균열의 응력확대계수에 미치는 영향을 파악하기 위해 변수로서 결함(hole defect)위치, 계면균열 크기와 관계, 중앙부 접착층 두께, 상단부 피착재 두께 등을 설정하였다. 해석은 2차원 평면변형을 상태에서 8절점 등매개요소(8-node isoparametric quadrilateral element)로 하고 해석은 상용 유한요소 해석 프로그램인 ABAQUS ver 5.8를 사용하였다.

응력확대계수는 기존 연구에서 제안된 다음과 같은 식에 의해 이종재료접합계면의 변위외삽법에 의해 해석을 수행하였다. 이는 유한요소법에서는 먼저 변위를 계산하고 이로부터 응력을 계산하기 때문에 변위외삽법이 응력의외삽법보다 계산상의 오차가 작게 된다.

계면 균열선단, 즉 $r=0$ 인 곳에서는 응력의 진동 특이성(oscillation singularity)이 존재하므로 계면 균열선단에서의 복소응력확대계수 ($K=K_I + iK_{II}$)를 구하기 위해 외삽법을 사용한다. 식 (1)로부터 유한요소법, 경계요소법 등의 수치해석으로 구한

접합계면에서의 균열면의 상대적 변위를 외삽하여 응력확대계수를 구하였다. 여기서 L 은 균열길이 $2a$ 이다.

$$\lim_{r \rightarrow 0} \frac{\sqrt{\Delta u_y^2 + \Delta u_x^2}}{\sqrt{2\pi r}} = \frac{C_1 + C_2}{4\pi\sqrt{1 + 4\epsilon^2 \cosh(\pi\epsilon)}} \sqrt{K_I^2 + K_{II}^2} \quad (1)$$

$$\frac{K_{II}}{K_I} = \lim_{r \rightarrow 0} \frac{1 - \frac{\Delta u_y}{\Delta u_x} \cdot \frac{H_2}{H_1}}{\frac{\Delta u_y}{\Delta u_x} + \frac{H_2}{H_1}} \quad (2)$$

$$\text{여기서, } \frac{H_2}{H_1} = \frac{\tan(\epsilon \ln \frac{r}{L}) - 2\epsilon}{1 + 2\epsilon \tan(\epsilon \ln \frac{r}{L})}$$

3. 해석결과 및 고찰

3.1 결함위치에 대한 영향

Fig. 3은 접합계면 균열길이(a)가 1mm이고 중앙부 접착층내에 지름이 0.2mm인 원형 결함이 존재할 때 균열길이와 결함 위치에 따른 균열의 응력확대계수 변화를 나타낸 것이다. 균열선단에서 결함위치까지 거리를 y 로 설정하였다. 그림에서 알 수 있듯이 결함이 존재하지 않는 경우에 비해 결함이 존재하는 경우 응력확대계수는 증가하였다. 그리고 계면균열 가까이 결함이 존재하는 경우(y/a)에 응력확대계수는 크게 나타나며 결함이 균열에서 멀어질수록 작게 나타난다.

3.2 균열크기에 의한 영향

균열길이의 크기에 따른 결함의 영향을 파악하기 위해 Fig. 2의 모델에서 결함을 균열선단에서 0.3mm인 곳에 위치하게 하고 균열길이를 $a=0.6, 0.8, 1.2, 1.5$ 로 변화시켰을 때 응력확대계수의 변화를 나타낸 것이 Fig. 4이다. 균열길이(a)가 0.6mm에서 결함이 존재하는 경우가 결함이 존재하지 않는 경우에 비하여 응력확대계수 증가율이 22%인데 반해 $a=1.5$ mm에서는 응력확대계수 증가율이 8%로 나타나, 균열길이가 짧은 경우에 결함에 의한 영향이 상대적으로 커짐을 알 수 있다.

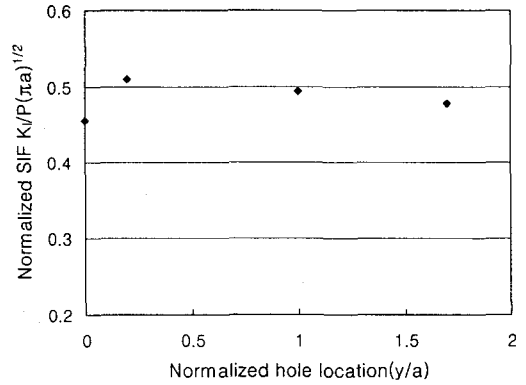


Fig. 3 Normalized stress intensity factor of the void location in adhesive

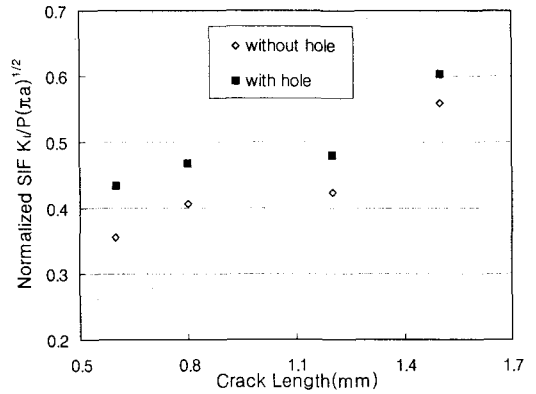


Fig. 4 Normalized stress intensity factor of with versus without void in adhesive with respect crack length

3.3 접착제 두께의 영향

Fig. 5는 접착제와 피착제사이의 계면균열에 대한 중앙부 접착제 내에 존재하는 결함에 의한 영향을 분석하기 위해 중앙부 접착제 두께(t_{ac})를 1, 1.5, 2, 2.5mm로 변화시켰을 때의 해석 결과를 나타내는 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 접착제 두께가 증가할수록 응력확대계수는 증가한다. 결함이 존재하는 경우 접착층 두께가 증가할수록 응력확대계수 증가율이 커지고 있으며 두께가 가장 두꺼운 $a=2.5$ mm에서 가장 크게 나타나고 있음을 알 수 있다.

3.4 접착 길이에 의한 영향

Fig. 6은 접착길이(L)를 20, 30, 40, 50mm로 변

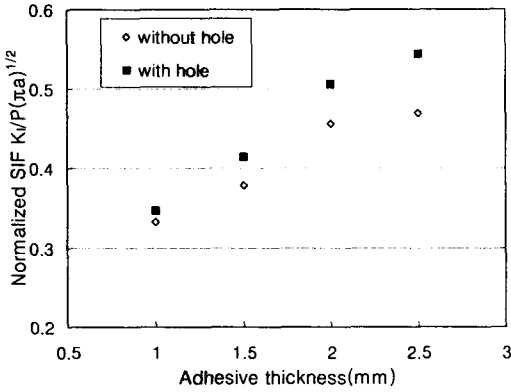


Fig. 5 Normalized stress intensity factor of with versus without void in adhesive with respect center adhesive thickness

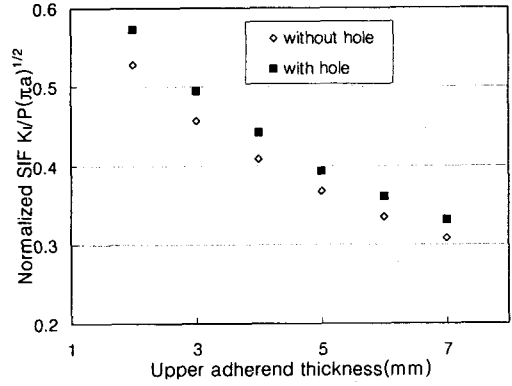


Fig. 7 Normalized stress intensity factor of with versus without void in adhesive with respect upper adherend thickness

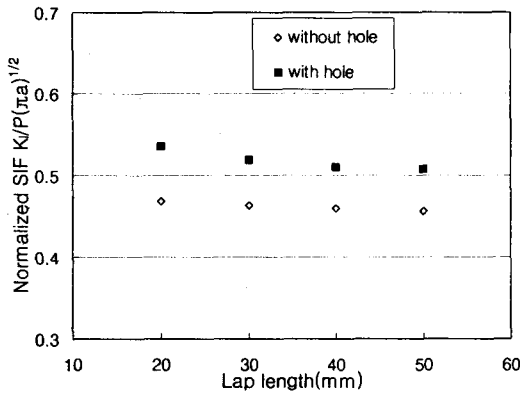


Fig. 6 Normalized stress intensity factor of with versus without void in adhesive with respect lap length

화시켰을 때 피착재와 접착제 계면에서의 균열에 대한 접착층 내에 존재하는 결함에 의한 영향을 나타내는 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 접착길이 길수록 결함에 의한 영향이 상대적으로 감소됨을 알 수 있으나 변화량이 미소하여 접착길이는 균열진전에 큰 영향을 미치지 않는다고 할 수 있다.

3.5 상단부 피착재 두께에 의한 영향

Fig. 7은 상단부 피착재 두께를 2, 3, 4, 5, 6, 7mm로 변화하였을 때 피착재와 접착제 계면에서의 균열에 대한 접착층 내에 존재하는 결함의 영향을 나타내는 것이다. 접착층 내 결함이 존재할

때 상단부 두께가 얇은 경우가 두께가 두꺼운 경우에 비해 상대적으로 응력확대계수에 미치는 영향이 큼을 알 수 있다.

4. 결론

접합계면 균열이 발생한 경우 접착층내에 존재하는 결함 등의 손상요소가 균열에 미치는 영향을 파악하기 위해 결함위치, 균열크기 등을 변화시키며 해석을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 계면균열과 접착층내 결함이 존재하는 경우 결함 위치에 따른 영향을 해석한 결과 결함이 계면균열 선단 부근에 위치할 때 균열의 응력확대계수가 가장 크게 나타남을 알 수 있었다.

(2) 계면균열 크기에 따른 결함의 영향을 해석한 결과 균열크기가 작을수록 응력확대계수 증가율이 크게 나타나 결함에 민감하다고 할 수 있다.

(3) 중앙부 접착층의 두께변화에 따른 접착층내 존재하는 결함이 계면균열에 미치는 영향을 해석한 결과 접착층 두께가 두꺼울수록 응력확대계수가 크게 증가하였다.

(4) 계면균열과 접착층내 결함과 상단부 피착재 두께변화에 대해 해석을 수행한 결과 피착재 두께가 얇을수록 상대적으로 결함에 대해 민감하게 작용함을 알 수 있다.

후 기

본 논문은 한국과학재단 산하 성균관대학교 산업설비 안전성평가 연구센터의 연구비 지원으로 이루어진 것으로서, 이에 관계자 여러분들께 감사 드립니다.

참고문헌

- (1) R. B. Heslehurst, 1999, "Observations in the structural response of adhesive bondline defects," *International Journal of Adhesion & Adhesive*, 19, pp. 133~154.
- (2) Andrew Sheppard, 1998, "A damage zone model for the failure analysis of adhesively bonded joints," *International Journal of Adhesion & Adhesive*, 18, pp. 385~400.
- (3) Shinuh-Chuan Her, 1999, "Stress analysis of adhesively bonded lap joints," *Composite Structures*, Vol. 46, pp. 673~678
- (4) A. K. Mitra, 1994, "Interfacial stresses and deformations of an adhesive bonded double strap butt joint under tension," *Composite Structures*, Vol. 55, pp. 687~694.
- (5) Chai H., 1993, "Observation of deformation and damage at the tip of cracks in adhesive bonds loaded in shear and assessment of a criterion for fracture", *Int J. Fracture*, Vol. 60, pp. 313~326.
- (6) Clark JD and McGregor R., 1993, "Ultimate tensile stress over a zone: a new failure criterion for adhesive joints," *International Journal of Adhesion & Adhesive*, 42, pp. 227~245.