

Cohesive Zone Model 을 이용한 접착제 물성평가 : 모드 I

이찬주* · 이상곤* · 고대철** · 김병민†

(2008년 8월 4일 접수, 2009년 2월 17일 수정, 2009년 2월 24일 심사완료)

Evaluation of Adhesive Properties Using Cohesive Zone Model : Mode I

Chan-Joo Lee, Sang-Kon Lee Dae-Cheol Ko and Byung-Min Kim

Key Words : Cohesive Zone Model(접착지역모델), Adhesive Joint(접착이음), Fracture Toughness(파괴인성), Mode I(모드 I), T-peel test(T형 박리시험)

Abstract

Fracture models and criteria of adhesive with two parameters, namely G_C and σ_{max} , have been developed to describe the fracture process of adhesive joints. Cohesive zone model(CZM) is a representative two parameter failure criteria approach. In CZM, σ_{max} is a critical, limiting maximum value of the stress in the damage zone ahead of the crack and is assumed to have some physical significance in adhesive failure. Based on CZM and finite element analysis method, the relationship between fracture load and adhesive properties, as G_{IC} and $(\sigma_{max})_I$, was investigated in adhesively bonded joint tensile test and T-peel test. The two parameters in tensile mode loading were evaluated by using the relationship. The value of G_{IC} evaluated by proposed method showed close agreement with analytical solution for tapered double cantilever beam(TDCB) test which proposed in an ASTM standard.

기호설명

G_C	: 재료의 파괴인성
G_{IC}	: 모드 I 파괴인성
σ_{max}	: 균열선단에서의 임계응력
$(\sigma_{max})_I$: 모드 I 균열선단에서의 임계응력
δ_0, δ_C	: 데미지 시작점의 변위
L_B, L_P	: 맞대기 이음의 파단하중, 박리하중
E, E'	: 접착제 탄성계수, 접착제 강성
t	: 접착제 두께

1. 서론

자동차 산업에 있어 차체 구조물의 경량화 추세에 의해 알루미늄합금과 같은 경량화 소재의 사용이 증가하고 있다. 이러한 경량화 소재의 사용으로 인하여 용접이 불가능한 경우가 발생하고 있으며, 기존의 스폿용접을 대체하기 위한 기술로서 접착기술이 최근 많이 주목되고 있다.⁽¹⁾

일반적으로 접착이음의 강도평가는 공칭응력을 기준으로 한 평가방법이 이용되고 있지만, 형상이 복잡한 차체 구조물의 접착이음 또는 복잡한 하중 조건 하에 있는 접착이음을 평가하기 어렵다. 최근에는 접착이음의 강도평가에 파괴역학을 적용한 평가방법이 많이 이용되고 있다. 그러나 파괴역학 접근은 균열의 발생 및 성장과정을 해석하기 위해 파괴인성 G_C (Fracture toughness)만을 평가하며,

† 책임저자, 회원, 부산대학교 기계공학부
E-mail : bmkim@pusan.ac.kr
TEL : (051)510-3074 FAX : (051)581-3075

* 부산대학교 정밀기계공학과

** 부산대학교 ILIC

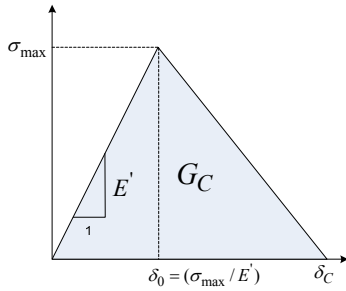


Fig. 1 Traction-Separation law in cohesive zone model

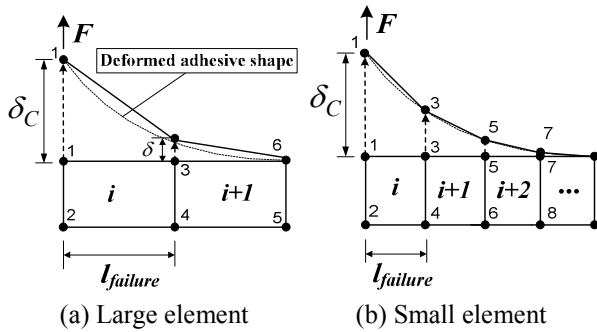


Fig. 2 Effect of element size on failure length of cohesive element in cohesive zone model

균열선단부에서의 임계응력 σ_{max} (Critical stress for crack tip region)은 고려되지 않는다.

반면에 Cohesive zone model(CZM)은 두 개의 파괴역학 인자인 G_C 와 σ_{max} 를 사용하여 접합부의 파괴과정을 해석한다. Hillerborg⁽²⁾과 B.R.K. Blackman⁽³⁾ 등에 의하면 σ_{max} 는 균열선단의 한계 응력으로 물리적으로 중요한 의미를 가진다. σ_{max} 는 데미지(Damage) 시작점으로 국부적으로 요소응력이 σ_{max} 에 도달하게 되면 파괴가 시작된다. $\sigma < \sigma_{max}$ 일 경우에는 탄성상태와 같이 하중 제거시 회복이 가능하며, $\sigma > \sigma_{max}$ 일 경우에는 더 이상 변형부의 응력이 증가하지 못하고, 균열이 발생하는 변위 δ_C 에 도달하여 응력이 0 이 될 때까지 감소한다.

또한 Williams and Hadavinia⁽⁴⁾ 등은 CZM 의 다양한 거동형태에 대한 접착제의 파괴거동을 연구하였으며, 그 결과 CZM 의 거동형태는 접착제의 파괴거동에 큰 영향을 미치지 않으며, G_C 와 σ_{max} 의 정확한 값이 접착제의 파괴거동을 예측하기 위해 필요하다고 하였다. 또한 B.R.K. Blackman⁽⁵⁾은 σ_{max} 을 접착제의 인장강도로 TDCB (Tapered double cantilever beam) 시험에 의해 평가된 G_C 값을 가정하여 평가하였다. 본 연구에서는 Fig. 1 에

나타낸 바와 같이 탄성-선형 파괴거동을 CZM 의 거동형태로 채택하여 유한요소해석을 수행하였다.

본 연구에서는 맞대기 이음시험을 이용하여 수직하중에 대한 구조용 접착제의 $(\sigma_{max})_I$ 를 평가하고, T형 박리시험을 이용하여 수직하중에 의해 균열이 발생하는 모드 I의 변형양식에 대한 G_{IC} 와 $(\sigma_{max})_I$ 를 CZM 과 유한요소 해석을 이용하여 평가하였다. 또한 제안된 평가방법의 유의성을 검증하기 위해 평가된 G_{IC} 을 ASTM 규격에 제시된 TDCB 시험을 통해 평가하였다.

2. 물성평가방법

2.1 CZM 과 FE Analysis

본 연구에서는 맞대기 이음 및 T-peel 시험에서의 접착제 파괴거동을 해석하기 위해 상용해석 s/w 인 ABAQUS 에서 제공하는 접착요소(Cohesive element)를 이용하였다.

Fig. 1 에 나타낸 바와 같이 데미지 시작점의 변위 δ_0 는 균열선단의 σ_{max} 에 대해 식 (1)과 같이 정의된다.

$$\delta_0 = \sigma_{max} / E' \tag{1}$$

여기서 $E' (= E/t)$ 는 접착제의 수직방향 강성(stiffness)이다.

G_C 는 접착제의 균열면의 형성에 소비되는 에너지이므로, 접착제의 균열이 발생하는 임계변위 δ_C 는 식 (2)에 의해 결정된다.

$$\delta_C = 2G_C / \sigma_{max} \tag{2}$$

본 연구에서 사용한 접착요소는 접착요소의 절점의 변위에 의해 파괴거동이 결정되기 때문에 접착요소의 크기에 따라 파괴하중의 오차가 크게 발생할 수 있다. Fig. 2 에 나타낸 것과 같이 i 번째 요소의 절점 1 에 작용하는 힘 F 에 의해 변형되어 임계변위 δ_C 에 이르게 되면 i 번째 요소의 파괴가 시작된다. Fig. 2 의 (a)에 나타낸 것과 같이 접착요소의 크기가 클 경우, 접착요소의 파괴길이, δ_C 가 실제 접착제층의 파괴길이, δ 보다 길기 때문에 실제 파괴하중과의 오차가 발생한다. 반면에 Fig. 2 의 (b)와 같이 접착요소의 크기가 작을수록, 실제 파괴시점과 동일한 파괴길이를 가지기 때문에 보다 정확한 파괴하중을 얻을 수 있다. 그러나 접

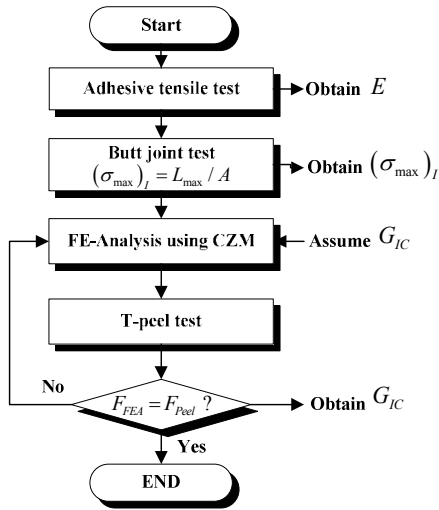


Fig. 3 Flow chart for evaluation method of mechanical properties of adhesive in mode I loading

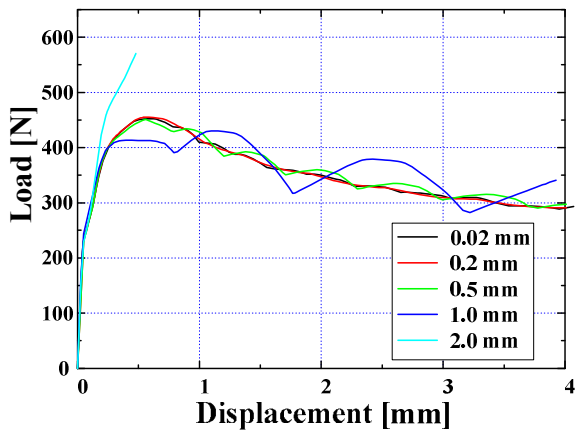


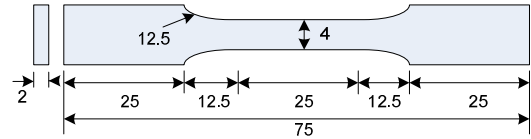
Fig. 4 Effects of cohesive element size on the load-displacement curve

차요소의 크기가 작으면, 상대적으로 해석시간이 길어지기 때문에 적절한 접착요소의 크기 선정이 중요하다. 접착요소 크기를 0.02 ~ 2mm 로 설정하여 유한요소해석을 수행하였으며, 그 결과를 Fig. 4 에 나타내었다. 0.2mm 이하의 유한요소해석결과에서는 접착요소의 길이에 관계없이 거의 동일한 하중-변위곡선을 나타내었다. 본 연구에서는 파괴하중의 오차와 해석시간을 고려하여 접착요소의 길이를 0.2mm 로 설정하였다.

2.2 물성평가절차

Fig. 3 는 모드 I (인장변형) 대한 접착제의 G_{IC} 와 $(\sigma_{max})_I$ 를 결정하기 위한 물성평가방법의 개략적인 순서도이다. 본 연구에서 제안한 물성평가방법은 다음과 같은 절차로 진행된다.

- 1) 접착제 인장시험을 실시하여 접착제 탄성계



(a) Dimension of adhesive tensile specimen



(b) Adhesive tensile specimen

Fig. 5 Dimension of adhesive specimen for tensile test

수를 측정한다.

- 2) 맞대기 이음(Butt joint) 시험에 대한 유한요소 해석을 수행한다. 유한요소해석결과를 바탕으로 $(\sigma_{max})_I$ 과 맞대기 이음의 파단하중 L_B 의 관계를 찾는다.
- 3) 맞대기 이음시험을 수행하고, 실험결과와 맞대기 이음의 파단하중과 유한요소해석결과와 파단하중이 일치하는 $(\sigma_{max})_I$ 를 접착제의 $(\sigma_{max})_I$ 로 결정한다.
- 3) G_{IC} 을 변화시키면서, T-peel 시험에 대한 유한요소해석을 수행한다. 유한요소 해석결과를 바탕으로 G_{IC} 에 대한 Peel 하중관계를 분석한다.
- 4) T-peel 시험을 수행하고, 실험결과와 Peel 하중과 해석결과와 Peel 하중이 일치하는 G_{IC} 을 찾고 이를 접착제의 모드 I 파괴인성 G_{IC} 으로 결정한다.

3. 접착제 탄성계수와 임계응력

3.1 접착제 탄성계수 결정

본 연구에서는 접착제의 탄성계수 E 를 평가하기 위해 접착제 인장시험을 실시하였다. EN ISO 527-2 규격⁽⁶⁾에 따라 이형 실리콘을 이용하여 인장시험편 형상의 틀을 만들고, 접착제를 이형 실리콘 틀에 채워 경화시켰다. 본 연구에서는 Henkel 사의 구조물용 1 액형 에폭시 접착제를 사용하였으며, 180℃에서 20분간 경화시켰다.

Fig. 5 에 본 연구에서 사용한 접착제 인장시험편을 나타내었다. 경화시 접착제와 이형 실리콘 틀 사이에 많은 기공이 발생하기 때문에 경화 후 기계가공을 하여 접착제 시험편의 표면부에 존재하는 기공을 제거하였다. 표면부의 기공은 기계가공으로 제거가능하나 내부의 기공은 제거하기

Table 1 Elastic modulus of adhesive evaluated by using adhesive tensile test and nano-indentation test

	Tensile test	Nano-indentation
Elastic modulus	2.71 ± 0.13 [GPa]	2.92 ± 0.53 [GPa]
Tensile strength	31.5 ± 0.60 [MPa]	-



(a) Defected specimen (b) Fine specimen

Fig. 6 Cross-section image of adhesive tensile test specimen measured by 3D X-ray CT

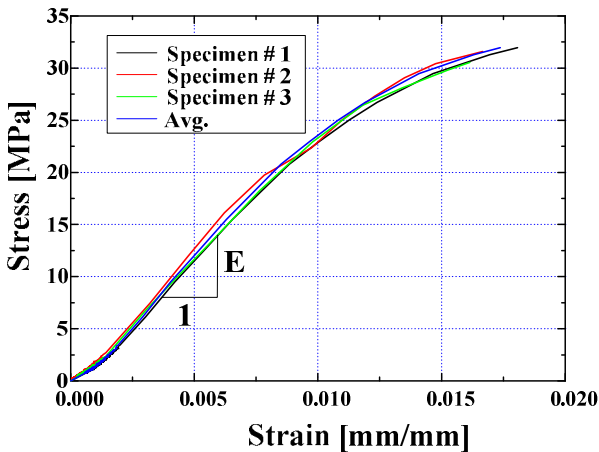


Fig. 7 Stress-strain curve of adhesive tensile test

불가능하므로 본 연구에서는 3D X-ray CT 를 이용하여 접착제 인장시험 편의 내부에 기공의 존재여부를 평가하였다. Fig. 6 는 3D X-ray CT 에 의해 촬영된 내부단면이다. Fig. 6 의 (a)와 같이 내부기공이 존재할 경우, 인장시험시 내부기공이 존재하는 단면에서 파단이되며, 정확한 탄성계수를 얻을 수 없다. 본 연구에서 Fig. 6 의 (b)와 같이 내부상태가 양호한 시험편을 사용하였으며, 이때 최대 직경 0.2mm 의 내부기공이 존재하였으며, 접착제 인장시험편의 전체체적에 대한 내부기공비율은 약 2% 이하로 나타났다. Fig. 7 에 접착제 인장시험 결과를 나타내었다. 접착제의 탄성계수는 초기 변형률 0.002 ~ 0.007 구간에서 직선의 기울기로 측정하였다. 내부기공이 접착제 탄성계수 평가에 미치는 영향 및 평가된 접착제 탄성계수의 신뢰성확보를 위해 Lee⁽⁷⁾ 등이 제안한 나노인덴테이션 기법을 이용하여 접착제의 탄성계수를 측정하여 Table 1 에 비교하였다. 인덴테이션 기법으로 측정

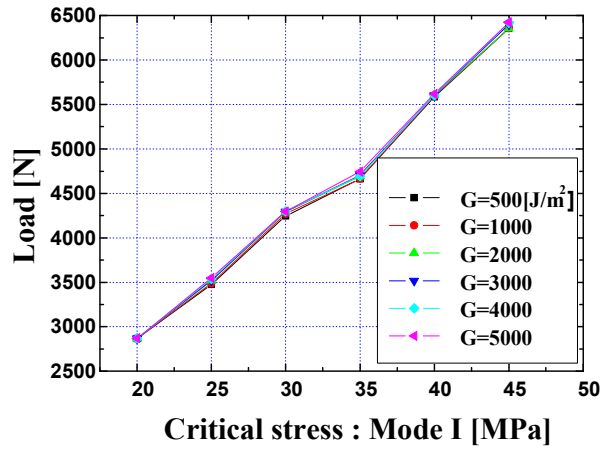


Fig. 8 Variation of fracture load in butt joint test with various critical stress and fracture toughness

된 결과의 탄성계수는 2.92 ± 0.53 GPa 로 접착제 인장시험에서 평가된 탄성계수 2.71 ± 0.13 GPa 과 유사한 결과를 얻을 수 있었다.

3.2 접착제의 임계응력(모드 I) 결정

$(\sigma_{max})_I$ 를 결정하기 위하여 맞대기 이음시험을 수행하였다. CZM 과 유한요소해석을 이용하여 $(\sigma_{max})_I$ 와 G_{IC} 에 따른 맞대기 이음의 파단하중 L_B 의 변화를 조사하였다. B.R.K. Blackman⁽³⁾은 CZM 와 유한요소해석을 이용하여 DCB 시험을 해석하였으며, 그 결과는 $(\sigma_{max})_I$ 에 의해 초기 하중이 결정되지만, 균열의 성장에는 큰 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다.

본 연구에서는 ASTM D 2095 규격⁽⁸⁾과 같은 직경 12.75 mm 의 AISI 1045 원형봉을 맞대기 접착이음 시험편을 사용하였다. 유한요소해석을 통하여 $(\sigma_{max})_I$ 와 G_{IC} 의 변화에 따른 접착파단하중의 변화를 조사하였다. $(\sigma_{max})_I$ 가 증가함에 따라 파단하중은 증가하는 경향을 나타내었으며, 파단하중 L_B 와 $(\sigma_{max})_I$ 의 관계는 식 (3)과 같이 나타났다.

$$L_B [N] = 133.93 \sigma_{max} - 81.2 \quad (3)$$

Fig. 8 에 나타낸 것과 같이 G_{IC} 는 맞대기 이음의 파단하중 L_B 에 영향을 거의 미치지 않는 것으로 나타났다. T.L. Anderson⁽⁹⁾에 의하면 층간분리가 발생하는 복합재료에서 접합계면의 G_{IC} 가 층간분리에 미치는 영향이 뚜렷하게 나타나기 위해서는 균열이 발생하고 성장해야 한다. 맞대기 이음의 경우 균열이 발생하고 성장할 수 있는 길이가 상

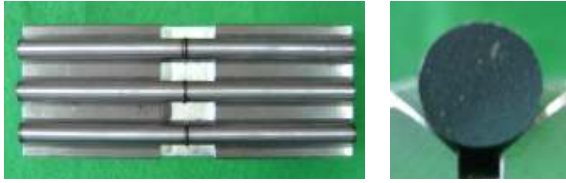


Fig. 9 Butt joint specimen and its failure mode

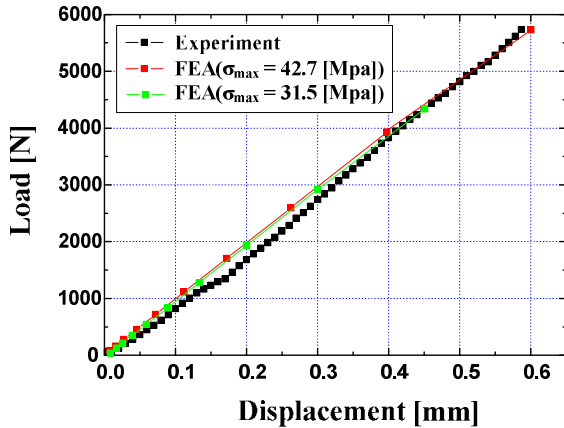


Fig. 10 Comparison load-displacement curve of butt joint test with experiment and FEA

대적으로 매우 짧기 때문에 G_{IC} 는 접착 파단하중에 영향을 거의 미치지 않음 알 수 있다.

동일한 L_B 를 가지는 $(\sigma_{max})_I$ 의 조건을 결정하기 위하여 맞대기 이음시험을 수행하였으며, 해석결과와 비교하였다. 이 때 맞대기 이음시험편의 파괴모드는 유한요소해석에서 가정한 접착파괴 (Cohesive failure) 모드와 동일해야 한다. Fig. 9 는 본 연구에서 사용한 맞대기 이음시험과 접착면의 파괴단면을 나타낸 것이다. Fig. 9 의 (b)에 나타낸 것과 같이 접착층 내에서 파괴가 발생하는 접착파괴가 발생하였으며, 이것은 유한요소해석에서 맞대기 이음시험의 접착부에 접착요소의 사용이 가능함을 의미한다.

B.R.K. Blackman⁽⁵⁾은 σ_{max} 을 접착제의 인장강도로 가정하여 평가하였으나, Fig. 10 에 나타낸 것과 같이 $(\sigma_{max})_I$ 의 값을 접착제의 인장강도 31.5 MPa 로 가정한 경우, 유한요소해석에서의 파단하중은 4.3kN 으로 맞대기 이음시험의 파단하중 5.8kN 보다 낮게 나타났다. 실제에 있어서 응력분포는 단면의 형상이 갑작스럽게 변하는 시험편 끝단부에서 높게 나타나기 때문에 손상값 시작점인 $(\sigma_{max})_I$ 이 평균응력인 접착제 인장강도보다 높아야 한다. $(\sigma_{max})_I$ 는 Table 1 에 나타낸 접착제 인장 시험편의 인장강도보다 더 높은 42.7MPa 로 평가

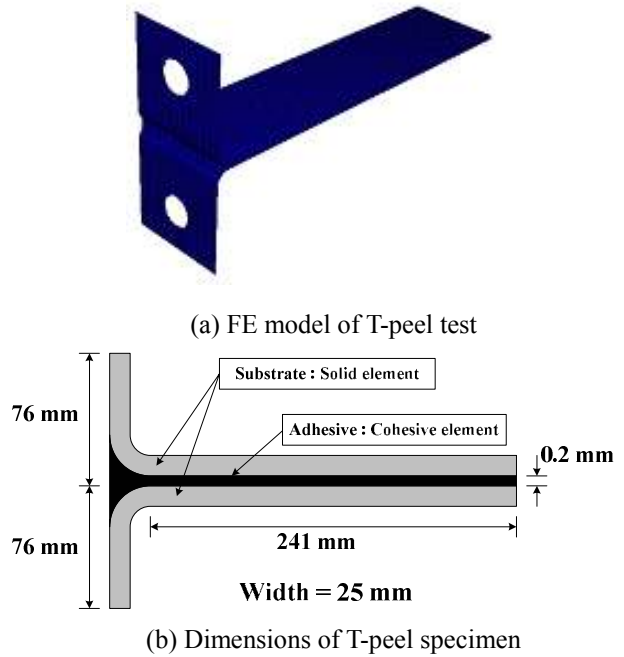


Fig. 11 FE model and dimensions of T-peel specimen

되었으며, Fig. 10 에 나타낸 것과 유한요소해석과 맞대기 이음시험의 파단하중은 거의 유사하게 나타났다.

4. 접착제 파괴인성평가

4.1 T형 박리시험 유한요소해석
B.R.K. Blackman⁽³⁾은 T형 박리시험에서 $(\sigma_{max})_I$ 와 G_{IC} 의 조합에 따라 동일한 박리하중이 나타남을 보였다. 본 연구에서는 B.R.K. Blackman 이 지적한 문제점을 보완하기 위하여 맞대기 이음시험을 통하여 $(\sigma_{max})_I$ 을 결정하고, G_{IC} 를 T형 박리시험을 통해 결정하였다. T형 박리시험에서 G_{IC} 의 변화에 따른 박리하중 L_p 의 변화를 유한요소 해석을 이용하여 조사하였다. Fig. 11 에 나타낸 T형 박리 시험 유한요소모델은 모재의 탄소성 변형거동을 나타내기 위한 체적요소(Solid element)와 접착제 파괴거동을 나타내기 위한 접착요소로 구성된다. 접착요소의 변위는 동일한 위치에 있는 체적요소의 변위와 같으며, 체적요소의 변위에 따라 접착 요소 응력이 결정된다. 이 때 T형 박리시험편은 ASTM D 1876 규격⁽¹⁰⁾과 동일하다.

Fig. 12 에 G_{IC} 의 변화에 따른 박리하중 L_p 의 변화를 나타내었다. G_{IC} 는 재료의 파괴인성으로 G_{IC} 값이 클수록 재료의 파괴에 대한 저항이 크

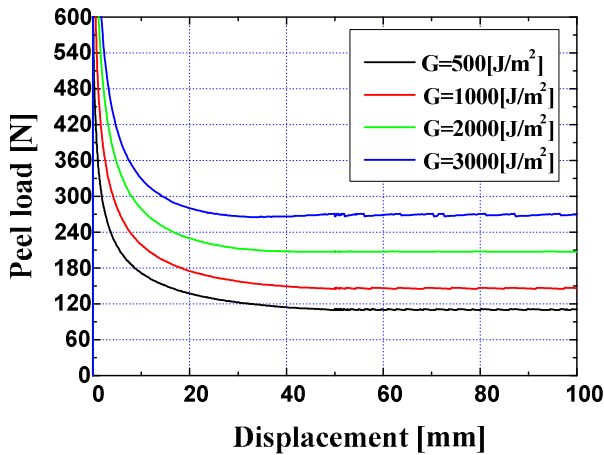


Fig. 12 Variation of fracture load in T-peel test with various fracture toughness

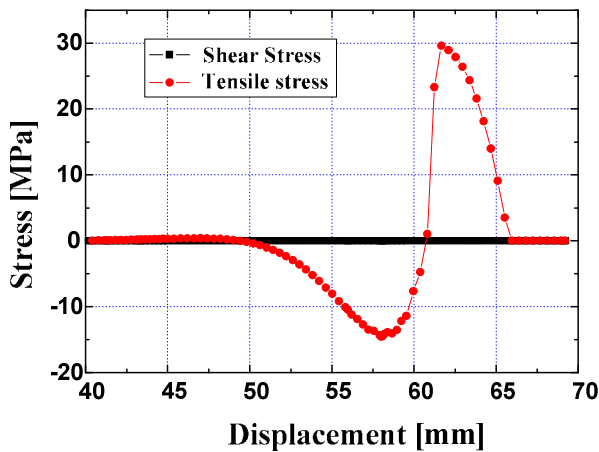


Fig. 13 Tensile and shear stress variations of cohesive element during the T-peel test



(a) T-peel test (b) Failure mode of specimen
Fig. 14 Cohesive mode of T-peel specimen

로 박리하중이 증가한다. 본 연구에서는 유한요소 해석을 통해 얻어진 파괴인성 G_{IC} 와 박리하중 L_p 의 관계를 식 (4)과 같이 나타내었다.

$$L_p [N] = 60.6 G_{IC} + 81.3 \quad (4)$$

본 연구에서 박리하중 L_p 는 하중이 일정하게 유지되는 변위가 50mm 이상인 구간에서의 평균박

리하중으로 결정하였다. 본 연구는 인장하중에 의한 접착제층의 파괴와 관련된 접착제 물성치의 평가를 목적으로 하기 때문에 전단응력의 영향이 없어야 한다. 또한 일반적인 접착요소는 인장응력과 전단응력이 동시에 작용하는 Mixed mode 거동을 하기 때문에 인장모드 시험인 T 형 박리시험에서도 전단응력 분포양상이 파괴하중에 미치는 영향을 반드시 평가하여야 한다. 즉, 유한요소해석시 접착제층에 나타나는 전단응력이 없거나 전단응력에 의한 영향을 무시할 수 있을만큼 작아야 한다.

본 연구에서는 T 형 박리시험에서 박리하중 L_p 에 미치는 전단응력의 영향을 조사하기 위해 손상 값 시작 이전의 거동은 Von-Mises 거동과 동일한 것으로 가정하여 유한요소해석을 수행하였다. 이때 임의의 접착요소에서 발생하는 인장 및 전단응력의 변화를 조사하여 전단응력의 영향이 없음을 검증하였다.

Fig. 13 은 T 형 박리시험 유한요소모델에서 균열 시작부에서 30mm 떨어진 접착요소의 응력변화를 나타낸 것이다. 초기에는 인장력에 의해 모재에 발생하는 벤딩모멘트가 발생하여 접착제층이 압축되기 때문에 압축응력 발생한다. 이후 박리하중에 의해 균열이 진전됨에 따라 접착제층의 인장응력이 증가한다. $(\sigma_{max})_I$ 에 도달하면 응력이 감소하며, 최종적으로 파괴가 발생한다. 파괴시 접착 요소에 작용하는 인장응력에 대한 전단응력의 비는 3.5×10^{-6} 이며, 전단응력의 영향은 거의 없었으며, 순수인장모드로 가정할 수 있다.

4.2 T 형 박리시험

Fig. 11 의 (b)에 나타낸 것과 같이 유한요소해석 모델과 동일한 치수로 프레스 가공용 강판인 SPCUD 를 이용하여 T 형 박리시험편을 제작하였다. 본 연구에서 사용한 접착요소는 여러가지 접착제의 파괴모드 중 접착제층 내의 파괴발생시 접착제층의 파괴거동을 나타내기 위한 요소이다. 그러므로 T 형 박리시험에서 접착제 층의 파괴가 발생하는 접착파괴가 발생하여야만 본 연구에서 제안한 CZM 을 이용한 접착제 물성평가 방법의 적용이 가능하다.

Fig. 14 는 T 형 박리시험편을 나타낸 것이다. 시험편의 파괴모드는 접착파괴 모드로 접착제층 내에서 파괴가 발생하였다. 이것은 본 연구에서 사용한 T 형 박리시험편에 대한 접착요소의 적용이 가능함을 의미한다.

Fig. 15 에 T 형 박리시험에서의 하중-변위 선도를 나타내었다. T 형 박리시험결과, 유한요소해석

Table 2 Comparison of fracture toughness G_{IC} between result of T-peel and TDCB test

T-Peel test G_{IC}	TDCB test		Error
	Load	G_{IC}	
1089[J/m ²]	4.440 [kN]	1201[J/m ²]	112 [J/m ²]

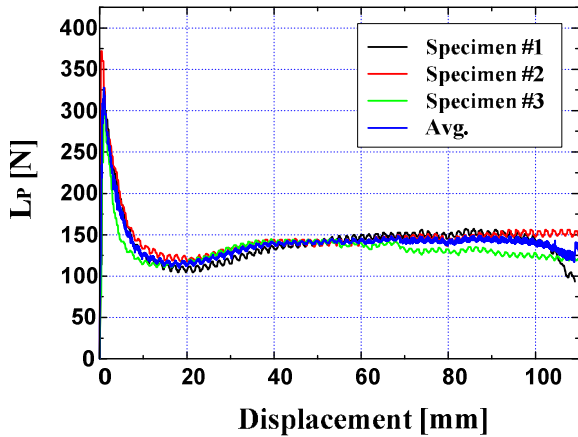
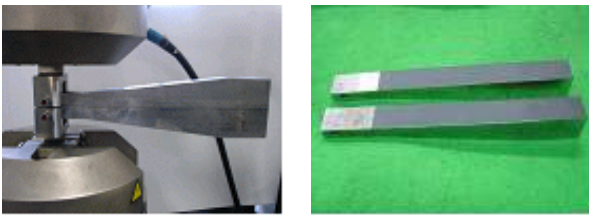


Fig. 15 Load-displacement curves of T-peel test



(a) TDCB specimen (b) Failure mode of specimen
Fig. 16 TDCB specimen and its failure mode

에서 나타난 하중변화와 유사한 결과를 얻을 수 있었다. 변위 50mm 이상인 구간의 평균박리하중은 147.3 N 으로 나타났다. G_{IC} 을 구하기 위해 T 형 박리시험에서 구한 평균박리하중을 식 (4)에 대입하였다. 식 (4)에 의해 G_{IC} 는 1089 J/m² 으로 평가되었다.

T 형 박리시험편의 초기 파단하중은 유한요소해석과 많은 오차가 발생하였다. 시험편 제작시 발생한 T 자 곡률부의 오차로 인해 발생한 T 자 곡률부의 접착제 층의 두께 차이에 의해 초기 최대 파괴하중의 오차가 발생한 것으로 판단된다. 그러나 박리하중 L_p 는 50 mm 이상부터 일정한 값의 박리하중을 가지는 유한요소해석과 동일한 경향을 나타내었다. 일부 변위 50mm 구간에서 박리하중이 감소하는 현상이 발생하였는데, 이것은 시험제작시 접착제 두께의 편차 및 내부 기공에 의한 영향으로 판단된다.

5. 파괴인성 G_{IC} 검증

본 연구에서는 T 형 박리시험을 통해 평가된 접착제의 파괴인성 G_{IC} 값을 검증하기 위해 ASTM D 3433 규격⁽¹¹⁾의 TDCB 시험을 수행하였다. TDCB 시험시 시험편에 인가된 하중에 대한 균열성장거리를 측정하였다. TDCB 시험은 인장하중에 대한 접착제의 파괴인성 G_{IC} 를 결정하기 위한 시험으로 균열이 성장하였을 때 시험편의 컴플라이언스를 이용한다. 본 연구에서는 AISI 1045 소재를 이용하여 TDCB 시험시 시험편의 컴플라이언스 값을 일정하도록 제작하였으며, 식 (4)에 의해 접착제 G_{IC} 를 평가하였다.

$$G_C = \frac{P^2}{2b} \frac{dC}{da} = \frac{4P^2}{Eb^2} \left(\frac{3a^2}{h^3} + \frac{1}{h} \right) \quad (5)$$

여기서 P 는 하중, C 는 TDCB 시험편의 컴플라이언스이며, 균열길이 a 의 변화에 대한 TDCB 시험편의 컴플라이언스 C 의 변화는 일정하며, 본 연구에서 사용한 TDCB 시험편 dC/da 의 값은 2.0 N⁻¹ 이다.

Fig. 16 에 나타낸 것과 같이 TDCB 시험편의 파괴모드는 T 형 박리시험과 동일한 접착파괴모드로 나타났으며, 이것은 T 형 박리시험편에서 평가된 접착제의 파괴모드와 동일한 모드의 파괴물성이 평가됨을 알 수 있다.

TDCB 시험에서 평가된 접착제의 파괴인성 G_{IC} 를 Table 2 에 나타내었으며, 이 결과는 1201J/m² 으로 T 형 박리시험에서 얻은 결과와 유사한 것으로 나타났다. TDCB 시험과 T 형 박리시험에서 평가된 접착제 파괴인성 G_{IC} 의 오차는 약 112J/m² 로 평가되었다. 이러한 오차는 T 형 박리시험의 T 자 곡률부의 오차 및 TDCB 시험편의 접착제 층 두께의 불균일함에 의한 것으로 판단된다.

Chung⁽¹²⁾ 등에 의하면 접착제의 파괴물성을 평가하기 위한 기존의 DCB 시험에서 균열길이의 측정시 균열선단이 명확히 구별되지 않아 균열길이를 정확히 측정하는 것이 곤란하다고 하였다. 그러나 본 연구에서 제안한 방법은 유한요소해석을 통해 평가된 파괴인성 G_{IC} 과 박리하중관계를 이용하기 때문에 균열길이의 측정이 필요 없기 때문에 정확한 값을 평가할 수 있을 것으로 판단된다. 또한 얇은 판재부품의 접합시 적용하기 편리하다.

6. 결 론

참고문헌

본 연구에서는 접착제 인장시험, 맞대기 접착이음시험 및 T 형 박리시험을 이용하여 접착제의 인장물성평가 방법을 제안하였다. 제안된 방법으로 접착제의 탄성계수, 임계응력 $(\sigma_{max})_I$ 및 파괴인성 G_{IC} 를 평가하였으며, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 접착제 인장시험을 통해 접착제의 탄성계수 및 인장강도를 얻었으며, 탄성계수는 2.71GPa, 인장강도는 31.5MPa 로 평가되었다.

(2) 맞대기 접착이음시험을 통해 평가된 임계응력 $(\sigma_{max})_I$ 은 42.7 MPa 로 평가되었으며, 접착제의 인장강도보다 높게 나타났다.

(3) T 형 박리시험을 통해 평가된 박리하중은 평균 147.3N 으로 나타났으며, 유한요소해석을 통해 평가된 박리하중과 G_C 의 관계를 이용하여 평가하였으며, 접착제의 파괴인성 G_{IC} 는 1089 J/m² 로 평가되었다.

(4) TDCB 시험을 통해 본 연구에서 제안한 방법에 의해 평가된 접착제의 G_{IC} 를 검증하였다. 검증결과, 파괴인성 G_{IC} 의 오차는 112J/m² 로 평가되었다.

본 연구에서 제안한 방법은 유한요소해석기법을 적용하기 때문에 기존의 TDCB 시험에서 균열거리에 대한 시험편의 컴플라이언스를 구함에 있어 발생하는 오차를 줄일 수 있어 보다 정확한 접착제 물성을 얻을 수 있다. 향후 본 연구에서 제안한 방법에서 의해 평가된 접착물성은 접착구조물의 해석에 있어 유용하게 사용될 수 있을 것으로 기대된다.

후 기

이 논문은 2008 년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 국제과학기술협력재단(KICOS, K20601000004-07E0100-00400)의 지원을 받아 수행된 연구임.

- (1) Lee, C.J., et al., 2008, "The Evaluation of Surface and Adhesive Bonding Properties for Cold Rolled Steel Sheet for Automotive Treated by Ar/O₂ Atmospheric Pressure Plasma," *Trans. of the KSME(A)*, Vol. 32, No. 4, pp. 354~361.
- (2) Hillerborg, A., et al., 1976, "Analysis of Crack Formation and Growth in Concrete by Means of Fracture Mechanics and Finite Elements," *Cement and Concrete Research*, Vol. 6, pp. 773~782.
- (3) Blackman, B.R.K., et al., 2003, "The Use of a Cohesive Zone Model to Study the Fracture of Fibre Composites and Adhesively-Bonded Joint," *International Journal of Fracture*, Vol. 119, pp. 25~46.
- (4) Williams, J.G. and Hadavinia, H., 2002, "Analytical Solutions of Cohesive Zone Models," *Journal of Mechanics and Physics*, Vol. 50, pp. 809~825.
- (5) Blackman, B.R.K., et al., 2003, "The Calculation of Adhesive Fracture Energies in Mode I: Revisiting the Tapered Double Cantilever Beam (TDCB) Test," *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 70, pp. 233~248.
- (6) EN ISO 527-2, 1996, "Determination of Tensile Properties – Part 2 : Test Conditions for Moulding and Extrusion Plastic," *European Standard*.
- (7) Lee, J.M., et al., 2008, "Improvement of Dao's Reverse Analysis and Determination of Representative Strain for Extracting Elastic-Plastic Properties of Materials in Analysis of Nanoindentation," *Trans. of the KSME(A)*, Vol. 32, No. 2, pp. 105~118.
- (8) ASTM D2095, 2002, "Standard Test Method for Tensile Strength of Adhesives by Means of Bar and Rod Specimens," *ASTM*.
- (9) Anderson, T.L., et al., 1993, "Numerical Procedures to Model Ductile Crack Extension," *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 46, pp. 254~264.
- (10) ASTM D1876, 2002, "Standard Test Method for Peel Resistance of Adhesives(T-peel test)," *ASTM*.
- (11) ASTM D3433, 2002, "Standard Test Method for Fracture Strength in Cleavage of Adhesives in Bonded Metal Joints," *ASTM*.
- (12) Chung, N.Y., et al. 1999, "Analyses of Stress Intensity Factors and Evaluation of Fracture Toughness in Adhesively Bonded DCB Joints," *Trans. of the KSME(A)*, Vol. 24, No. 6, pp. 1547~1556.