

유한요소법을 이용한 접착조인트의 인장모드 물성평가 The evaluation of material properties of adhesively bonded joint in tensile mode by using FEM

*이찬주¹, #김병민¹, 김재영¹, 이상곤², 고대철³, H. Schäfer⁴

*C.J. Lee¹, #B.M. Kim(bmkim@pusan.ac.kr)¹, J.Y. Kim¹, S.K. Lee², D.C. Ko³, H. Schäfer⁴

¹ 부산대학교 기계공학부, ²PNU-IFAM 국제공동연구소, ³부산대학교 ILIC ⁴Fraunhofer IFAM

Key words : Design of Experiment, Plate holder

1. 서론

최근 차체 구조물의 경량화 추세에 의해 알루미늄 합금과 같은 경량화 소재의 사용이 증가하고 있다. 이러한 경량화 소재의 사용으로 인하여 용접이 불가능한 경우가 발생하고 있으며, 기존의 스폿용접을 대체하기 위한 기술로서 접착기술이 최근 많은 이슈가 되고 있다.[1]

일반적으로 접착이음의 강도평가는 공칭응력을 기준으로 한 평가방법이 이용되고 있지만, 이러한 평가방법으로는 형상이 복잡한 차체 구조물의 접착이음 또는 복잡한 하중조건 하에 있는 접착이음을 평가하기 어렵다. 최근에는 접착이음의 강도평가에 파괴역학을 적용한 평가방법이 많이 이용되고 있다. 이러한 파괴역학적 접근은 균열의 발생 및 전파과정을 해석하기 위해 파괴인성 G_C (Fracture toughness)만을 평가하며, 균열선단부에서의 임계응력 σ_{max} (Critical stress for crack tip region)은 고려되지 않는다.

반면에 Cohesive zone model(CZM)은 두개의 파괴역학 인자인 G_C 와 σ_{max} 를 사용하여 접합부의 파괴과정을 해석한다. B.R.K. Blackman[2]에 의하면 σ_{max} 는 균열선단의 한계응력으로 물리적으로 중요한 의미를 가진다. Hillerborg[3]등에 의하면, σ_{max} 는 데미지(Damage) 시작점으로 국부적으로 응력이 σ_{max} 에 도달하게 되면 파괴가 발생한다. Williams와 Hadavinia[4] 등은 CZM의 다양한 거동형태에 대한 접착제의 파괴거동을 연구하였으며, 그 결과, CZM의 거동형태는 접착제의 파괴거동에 큰 영향을 미치지 않으며, G_C 와 σ_{max} 의 정확한 값이 접착제의 파괴거동을 예측하기 위해 필요하다고 하였다. Fig. 1과 같이 $\sigma < \sigma_{max}$ 일 경우에는 탄성상태로 하중제거시 회복이 가능하다. $\sigma > \sigma_{max}$ 일 경우에는 더 이상 변형부의 응력이 증가하지 못하고, 균열이 발생하는 변위 δ_C 에 도달하여 응력이 0이 될 때까지 감소한다. 본 연구에서는 T형 박리시험(T-peel test)에서 인장하중에 의해 균열의 발생에 대한 G_C 와 σ_{max} 를 CZM과 유한요소해석을 이용하여 접착조인트의 인장모드 물성을 평가하였다.

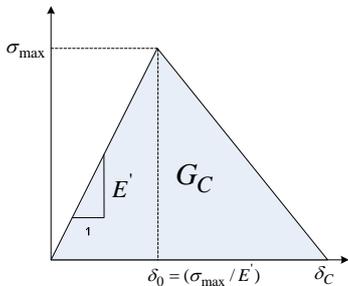


Fig. 1 Traction-separation law in cohesive zone model

2. 물성평가방법

본 연구에서는 T형 박리시험에서의 접착제 파괴거동을 해석하기 위해 상용해석 s/w인 ABAQUS에서 제공하는 cohesive element를 이용하였다. Fig.1에 나타난 바와 같이 데미지 시작점(Damage initiation)의 변위 δ_0 는 균열선단의 σ_{max} 에 대해 식(1)과 같이 정의된다.

$$\delta_0 = \sigma_{max} / E' \quad (1)$$

여기서 $E' (= E/t)$ 는 접착제의 수직방향 강성이다. G_C 는 접착제 균열면의 형성에 소비되는 에너지이므로, 접착제 균열이 발생하는 임계변위 δ_C 는 식(2)에 의해 결정된다.

$$\delta_0 = 2G_C / \sigma_{max} \quad (2)$$

본 연구에서는 다음과 같은 절차에 의해 접착조인트의 인장모드 물성을 평가하였다.

- 1) 접착제 인장시험을 실시하여 접착제 탄성계수 및 인장강도를 측정한다.
- 2) 접착제의 인장강도를 인장모드 σ_{max} 로 가정하여, G_C 를 변화시키면서 T형 박리시험에 대한 유한요소해석을 실시한다.
- 3) T형 박리시험을 수행하고, 실험결과와 박리하중과 해석결과와 박리하중이 일치하는 G_C 를 찾는다.

3. 접착제 물성평가

접착제의 탄성계수를 구하기 위해 접착제 인장시험을 실시하였다. 이형 실리콘을 이용하여 EN ISO 527-2 규격과 같은 인장시험편 형상의 틀을 만들고, 접착제를 이형 실리콘 틀에 채워 경화시켰다. 본 연구에서 사용한 접착제는 구조물용 에폭시 접착제를 사용하였으며, 180°C에서 20분간 경화시켰다. Fig. 2에 접착제 인장시험편의 치수를 나타내었다.

경화시 접착제와 이형실리콘 틀 사이에 많은 기공이 발생하기 때문에 경화 후 기계가공을 하여 접착제 시험편의 표면부에 존재하는 기공을 제거하였다. Table 1에 접착제 인장시험을 통해 얻은 탄성계수 및 인장강도를 나타내었다. 탄성계수는 2.71 ± 0.13 [GPa]로, 인장강도는 31.5 ± 0.60 [MPa]로 평가되었다. 또한 내부기공이 접착제 탄성계수 평가에 미치는 영향 및 평가된 접착제 탄성계수의 신뢰성을 확보하기 위해 인텐테이션 기법을 이용하여 탄성계수를 측

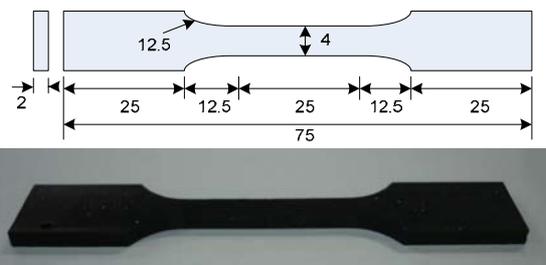


Fig. 2 Dimension of adhesive specimen for tensile test

Table 1 Elastic modulus and tensile strength of adhesive

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

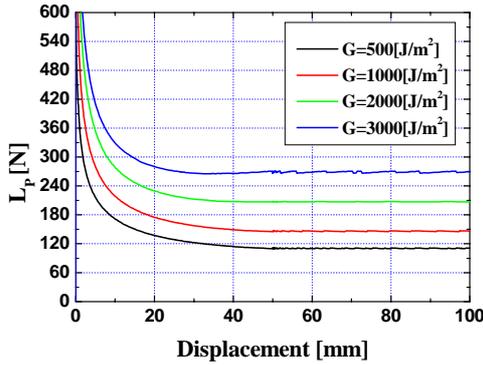


Fig. 3 Variation of peel load with increasing G_C in T-peel test

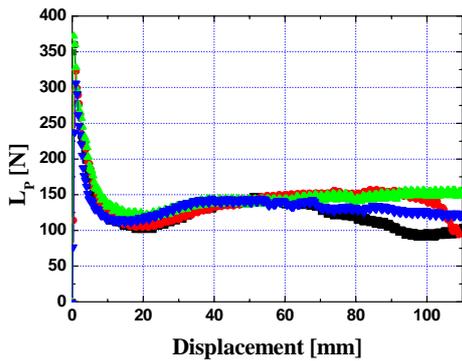


Fig. 4 Peel load of adhesively boned T-peel specimen



Fig. 5 T-peel test specimen and its cohesive failure mode

정하였으며, 측정된 결과는 인장시험결과와 비교하여 유사한 탄성계수를 가지는 것으로 평가되었다.

B.T.K. Blackman 은 T 형 박리시험의 유한요소해석에서 σ_{max} 와 G_C 의 조합에 따라 동일한 박리하중이 나타남을 보였다. 본 연구에서는 인장시험에서의 접착제 인장강도를 σ_{max} 로 가정하고, G_C 의 변화에 대한 박리하중의 변화를 조사하였다.

Fig. 3 에 G_C 의 변화에 따른 박리하중 L_p 의 변화를 나타내었다. G_C 값이 클수록 파괴에 대한 저항이 크므로 박리하중이 증가한다. 본 연구에서는 G_C 과 L_p 의 관계를 식(3)과 같이 나타내었다.

$$L_p = 63.0G_C + 82.5 \quad (3)$$

Fig. 4 는 T형 박리시험의 하중을 나타내었다. T형 박리시험에서 사용한 모재의 재료는 SPCUD를 사용하였으며, Fig. 5 에 T형 박리시험편을 나타내었다. 박리시험후 시험편의 파괴모드는 cohesive failure 모드로 접착제층 내에서 파괴가 일어났으며, 이것은 T형 박리시험편에 대한 cohesive element의 적용이 가능함을 보여준다. 이 때의 박리하중은 평균 147.3 [N]으로 나타났다. 평균 박리하중은 40 ~ 100[mm]의 변위구간에 대한 박리하중의 평균으로 하였다. T형 박리시험에서의 박리하중을 식(3)에 대입하여 G_C 을 계산하였다. 평가된 G_C 은 1070 [J/m²]으로 나타났으며, 이 값을 검증하기 위해 TDCB 시험(Tapered double cantilever beam test)를 통해 동일한 접착제의 G_C 를 평가하여 비교하였다. TDCB 시험에서 G_C 는 식(4)에 의해 평가되었다.

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

여기서 P 는 하중, C 는 TDCB시험편의 컴플라이언스이며, 균열길이에 대한 C 의 변화는 일정하다. TDCB 시험에서 평가된 G_C 를 Table 2 에 나타내었으며, 이 결과는 T-peel 시험에서 얻은 결과와 유사한 것으로 나타났다. TDCB 시험과 T형 박리시험에서 평가된 G_C 의 오차는약 0.131[J/m²]로 평가되었다. 이러한 오차는 T형 박리시험시 T자 곡률부의 오차 및 접착제 층의 불균일함에 의한 것으로 판단된다. 그러나 본 연구에서 제안한 방법은 실제 접착제의 인장모드 물성평가함에 있어 적용하기 편리할 뿐만 아니라 TDCB 시험에서 구할 수 없는 σ_{max} 및 G_C 를 용이하게 구할 수 있다.

Table 2 Comparison of G_C between TDCB and T-peel test

	TDCB test	T-peel test	Error	
	Load	G_C	G_C	
	4.440 [kN]	1.201[J/m²]	1.070[J/m²]	0.131[J/m²]

4. 결론

본 연구에서는 접착제 인장시험 및 T 형 박리시험을 이용하여 접착조인트의 일장물성평가 방법을 제안하였다. 제안된 방법으로 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

- 1) 접착제 인장시험을 통해 접착제의 탄성계수 및 인장강도를 얻었으며, 탄성계수는 2.71[GPa], 인장강도는 31.5 [MPa]로 평가되었다.
- 2) 접착제의 파괴인성 G_C 의 변화에 대한 박리하중의 변화를 유한요소해석 및 CZM 를 이용하여 평가하였으며, 박리하중은 G_C 가 증가함에 따라 증가하는 경향을 나타냈다.
- 3) T형 박리시험을 통해 평가된 박리하중은 평균 147.3[N]으로 나타났으며, 유한요소해석을 통해 평가된 박리하중과 G_C 의 관계를 이용하여 평가된 접착제 G_C 는 1.07 [J/m²]로 나타났다.

후기

이 논문은 2007 년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 국제과학기술협력재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. K20601000004-07E0100-00410).

참고문헌

1. 이찬주, 이상근, 박근환, 김병민, “대기압 Ar/O2 플라즈마를 표면처리된 자동차용 냉연강판의 표면특성 및 접착특성평가,” 대한기계학회 논문집 A 권, 제 32 권, 제 4 호, 354-361, 2008
2. B.R.K. Blackman, H. Hadavinia, A.J. Kinloch, and J.G. Williams, “The use of a cohesive zone model to study the fracture of fibre composites and adhesively-bonded joint,” International Journal of Fracture, **119**, 25-46, 2003.
3. A. Hillerborg, M. Modeer, and P.E. Peterson, “Analysis of crack formation and growth in concrete by means of fracture mechanics and finite elements,” Cement and Concrete Research, **6**, 773-782, 1976.
4. J.G. Williams and H. Hadavinia, "Analytical solutions of cohesive zone models,” journal of Mechanics and Physics Solids, **50**, 809-825, 2002.