論文

복합재료/금속 접착 계면의 파괴인성치 측정

김원석*, 이정주**+

Interfacial Fracture Toughness Measurement of Composite/metal Bonding

Won-Seock Kim*, and Jung-Ju Lee**+

ABSTRACT

Prediction of the load-bearing capacity of an adhesive-bonded joint is of practical importance for engineers. This paper introduces interface fracture mechanics approach to predict the load-bearing capacity of composite/metal bonded joints. The adhesion strength of composite/steel bonding is evaluated in terms of the energy release rate of an interfacial crack and the fracture toughness of the interface. Virtual crack closure technique (VCCT) is used to calculate energy release rates, and bi-material end-notched flexure (ENF) specimens are devised to measure the interfacial fracture toughness. Bi-material ENF specimens gave consistent mode II fracture toughness (G_{IIc}) values of the composite/steel interface regardless of the thickness of specimens. The critical energy release rates of double-lap joints showed a good agreement with the measured fracture toughness. Therefore, the energy-based interfacial fracture characterization can be a practical engineering tool for predicting the load-bearing capacity of bonded joints.

초 록

접착제 이용 결합 조인트의 하중지지 능력 예측 기법은 접착제를 이용한 접합 조인트 설계에 있어서 가장 중요한 기술이다. 본 연구는 계면 파괴역학을 이용하여 복합재료/금속 접착 조인트의 하중지지 능력을 예측하는 기법을 소개한다. 구체적으로 복합재료/탄소강 결합의 접착 강도를 계면 균열의 에너지 방출률과 계면 파괴인성치 개념을 사용하여 평가하는 방법을 제시 검증하였다. 계면 균열의 에너지 방출률은 유한요소해석 결과를 이용한 가상 균열 닫음 기법(VCCT)을 사용하여 계산하였으며, 계면 파괴인성치는 이종재료 ENF (end-notched flexure) 시편을 고안하여 측정하였다. 고안된 이종재료 ENF 시편을 사용하여 시편의 두께에 상관 없이 일관된 Mode II 계면 파괴인성치를 측정할 수 있음과 양면 겹치기 접합 조인트의 특성 에너지 방출률이 측정된 계면 파괴인성치와 일치함을 확인하였다. 따라서 에너지 방출률에 근거한 계면 균열 진전 기준은 접착 조인트의 하중지지 능력을 신뢰성 있게 예측하는 실제적인 설계 도구로서 활용될 수 있다.

Key Words: 복합재료/금속 접착(composite/metal bonding), 파괴역학(Fracture mechanics), 계면 균열(Interfacial crack)

* 한국과학기술원 기계항공시스템공학과 기계공학전공 대학원
**+ 한국과학기술원 기계항공시스템공학과 기계공학전공, 교신저자(E-mail: leejungju@kaist.ac.kr)

1. 서 론

접착제를 이용한 서로 다른 재료간의 접합은 항공기, 인공위성 등의 기계 구조물에서부터 반도체 패키지, 마이크로 센서 등의 미소 구조물, 치아의 인레이 및 크라운 치료 등의 의료 구조물에 이르기까지 그 활용 영역이 광범위하며 날로 개선되는 접착제 성능의 향상과 접착제 접합 (adhesive-bonding) 방식 자체가 가지고 있는 장점으로 인하여 그 적용 범위가 계속해서 넓어지고 있다 [1-2]. 접착제를 이용한 접합은 서로 다른 두 재료 사이에 또 다른 재료로 이루어진 접착제 층을 유도하여 결합된 방식을 취하는데, 일반적으로 폴리머 재료로 이루어진 접착제의 물성이 금속이나 복합재료로 이루어진 접착물 (adherend)의 물성보다 약하기 때문에 접착제 층 안에서 균열이 진전하여 파괴되는 응집 파손 모드 (cohesive failure mode)를 나타내거나, 접착제와 접착물 사이 계면에서 발생하는 물리적, 화학적 결합력이 접착물이나 접착제 재료 내부의 분자 결합력 보다 약하기 때문에 계면 파손 모드 (interfacial failure mode)를 나타낸다. 파손 원리를 미시적 관점에서 보면 상대적으로 약한 접착제 및 계면에 초기 균열이 발생하게 되고, 균열 부근에서 나타나는 응력 특이성 (stress singularity)으로 인해 균열은 접착제 층과 계면을 따라 계속 진전하여 구조물의 파손을 야기시킨다. 따라서 접착제를 이용한 접합은 두 재료 사이 접착제 층과 이로 인해 형성된 계면의 결합력이 접착 조인트의 하중지지 능력을 결정한다. 본 연구에서는 계면 파괴역학적 접근법을 사용하여 계면 균열이 존재하는 복합재료/금속 접착 조인트의 하중 지지능력을 예측할 수 있도록 계면 파괴인성치를 측정하는 시험법 및 측정값을 제시하고 이를 이용한 하중지지 능력 예측의 신뢰성을 검증함을 목표로 하였다.

응력 및 변형률을 기반으로 한 접착 조인트의 파손 예측 기법들 또한 많은 연구가 이루어져 왔으나 [3-4], 이와 같은 강도 기반 설계론 (strength based design)은 균열 (crack) 혹은 계면 균열 (interfacial crack)에서 나타나는 응력특이성의 영향을 엄밀하게 고려할 수 없다는 단점이 있다. 따라서 균열 부근에서 나타나는 응력 특이성과 이로 인한 균열 진전 거동에 대한 설명을 가능케 하는 파괴역학 (fracture mechanics, also known as damage tolerant design)은 접착 조인트의 파손 하중을 예측하는 보다 신뢰성 있는 기법으로 인정되고 있다 [1, 5-10].

이종재료 접착제 접합 조인트에 파괴역학적 접근법을 가장 먼저 시도한 연구는 Anderson과 DeVries [5-6]가 에폭시를 이용한 금속간의 접합에 초기 균열의 존재를 가정하고 유한요소 해석을 이용하여 에너지 방출률 (energy release rate, G) 을 구한 후 파괴인성치 (G_c)와 비교하는 방식을 사용한 것이다. Anderson 과 DeVries [5-6] 의 연구는 접착제 층의 두께가 작아질수록 하중 지지 능력은 증가한다는 실험 결과를 이론적으로 설명할 수 있게 해주었다. 접착제 접합 조인트의 파괴하중을 예측하기 위해 파괴역학적 접근법을 수행한 또 다른 예로 Reedy [7] 및 Qian [8]은 맞대기 접착 조인트 (butt joint) 형상의 금속재료와 접착제 사이 계면 모서리에 초기 균열이 있다고 가정한 경우와 없다고 가정한 경우 모두에서 즉 이종재료 접착 계면에 나타난 균열 및 쐐기 형상 모두에서 응력강도계수(stress intensity factor, K)를 결정하여 파괴를 예측하는 변수로서 사용하였다. 이와 같이 이종재료 계면 모서리 및 계면 균열에서 나타나는 특이 응력장 및 변위장을 구하고 특성 응력 강도 계수 (K_C)를 결정하여 접착 조인트의 파괴 하중을 예측하고자 한 많은 연구들이 수행되어왔으나 [5-10], 파괴역학적 접근법을 사용하여 접착제 접합 조인트의 파괴하중을 예측하기 위한 많은 연구들이 Mode I 즉 균열 열림 상태를 대상으로 수행되어왔다. 한가지 재료로 구성된 균질 재료에 있는 균열의 경우 균열은 진전에 가장 저항력이 작은 Mode I 상태로 진전 경로 갖게 되므로 전통적인 파괴역학의 대상은 균열 열림 상태 (Mode I)가 되어왔으며 응력강도계수 및 파괴인성치도 Mode I 의 그것들 (K_I, K_{IC})이 관심 대상이었다. 그러나 계면 균열의 경우 균열은 계면을 따라 진전하므로 균열 열림과 미끄러짐이 혼합되어 나타나게 된다. 또한 구조물용 접착 조인트의 실제적인 적용은 겹치기 접합 조인트 (lap joint) 형태로 설계되어지기 때문에 주로 균열 미끄러짐 (Mode II) 하중 상태에 놓임을 고려할 때, Mode II 파괴인성치를 측정하는 시험법 및 측정값의 제시가 필요하며 Mode I 의 그것들에 비해 더욱 실용적으로 사용될 것을 기대할 수 있다.

본 연구에서는 복합재료/금속 접착 계면의 Mode II 파괴인성치 측정을 위해 이종재료 ENF (End-Notched Flexure) 시편을 고안하였으며, 파괴인성치를 측정하기 위한 시험법 및 파괴인성치 또한 접착 조인트의 설계 자료로서 제시하였다. 측정한 계면 파괴인성치를 접착 조인트의 하중지지 능력을 예측하기 위한 변수로 사용하고 평가하기 위해 복합재료/금속 양면 겹치기 접착 조인트 (double-lap joint)의 접착 계면에 다양한 크기의 균열을 내재시키고 파손 시 에너지 방출률을 계산하여 측정한 Mode II 파괴인성치와 비교함으로 파괴 하중 예측의 신뢰성을 검증하였다.

2장에서는 계면 파괴역학의 간단한 소개와 함께 이를 이용한 접착 조인트 하중지지능력 예측 방법을 설명하였으며 3장은 이를 검증하기 위한 시험과정을 기술하였다. 마지막으로 4장에서 결과와 함께 접착 조인트 하중지지 능력 평가에 대한 고찰을 서술하였다.

2. 계면 파괴역학을 이용한 접착 강도 평가

2.1 파괴역학의 기본 개념

전통적인 파괴역학의 대상은 고체 재료 내부의 균열 문제로서 균열 선단 (crack tip) 부근에서 나타나는 응력 특이성에 근거하여 균열 진전을 설명한다. Irwin [11] 이 제시한 균열 진전기준은 식 (1)과 같이 표현되는데 이는 균열 진전 전과 후 두 상태에 에너지 보존 법칙을 적용한 것으로서 균열 선단 부근의 에너지 방출률 (G)이 재료의 물성으로 나타나는 특정 값 (G_c, 파괴인성치)을 넘어서게 되면 재료의 결합력을 이기고 균열은 진전하게 된다.

$$G = -\frac{d\Pi}{dA} = \frac{dW}{dA} - \frac{dU}{dA} \geq G_c \tag{1}$$

여기서 Π 는 외부에서 가해준 일 (W)과 재료 내부에 저장되는 탄성 에너지 (U) 사이의 차이를 나타내는 균열 진전을 위한 잠재 에너지이며 dA 는 균열 진전으로 인해 생성된 균열면의 미소 증가량을 나타낸다. 따라서 해석 대상으로 하는 구조물의 균열 부근의 에너지 방출률을 구하고 사용된 재료의 파괴인성치를 측정한다면 구조물의 파괴를 예측하는 것이 가능해진다. 본 연구에서는 접착제로 접합된 이종재료 계면 균열 문제를 대상으로 하여 계면 균열에서의 에너지 방출률을 구하고 접착 계면의 물성으로서의 파괴인성치를 측정하여 접착 조인트의 하중지지 능력 평가를 수행하였다. 해석 대상으로 한 이종재료 접합 조인트는 Fig. 1 과 같은 복합재료/금속 양면 겹치기 접합 조인트로서 인장하중 하에서 계면 균열은 균열이 닫힌 상태에서 미끄러지는 Mode II 하중 상태에 놓이게 된다.

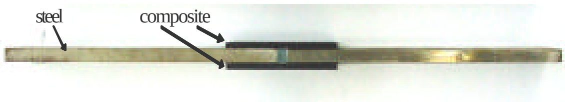

Fig. 1 Composite /metal double-lap joint.

2.2 계면 균열의 에너지 방출률 계산

균열에 작용하는 하중 상태의 모드 분리를 수행하면서 에너지 방출률을 구하는 가장 대표적인 방법은 식 (2)와 같이 표현되는 가상 균열 닫음 기법 (VCCT, virtual crack closure technique)이다. 유한요소해석 결과를 이용하여 얻은 균열 선단에 작용하는 힘과 바로 뒤의 변위 값을 사용하여 진전된 균열을 복귀시키는데 필요한 일을 계산하는 이 기법은 비교적 작은 요소 밀도에서도 정확한 값을 계산할 수 있음이 보고된 바 있다 (Fig. 2) [12].

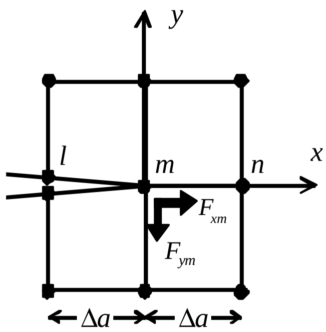

Fig. 2 Finite element mesh at the crack tip for using VCCT.

$$G_I = \frac{1}{2\Delta a} F_{ym} \Delta v_l \ , \ G_{II} = \frac{1}{2\Delta a} F_{xm} \Delta u_l \tag{2}$$

여기서 F_{ym} , F_{xm} 는 균열선단 절점 (m)에 작용하는 y, x 방향의 힘을 각각 나타내며 Δv_l , Δu_l 는 균열 선단 바로 뒤의 절점 (l)에서의 균열 열림 변위 및 미끄러짐 변위를 각각 나타낸다. 본 연구에서는 Mode I 성분이 없는 상태 (균열 닫힘 상태)의 Mode II 에너지 방출률을 구하기 위해 닫혀있는 균열 면에 작용하는 마찰을 고려한 식 (3)을 이용하여 Mode II 에너지 방출률을 구하였다 [13].

$$G_{II} = \frac{1}{2\Delta a}\left(F_{xm} - mF_{ym}\right)\Delta u_l \tag{3}$$

유한요소 해석은 8절점 평면 변형률 요소를 사용하였으며, 서로 다른 재료 물성이 부여된 요소들이 경계에서 동일 절점을 공유하는 방식으로 계면을 묘사하였다. 계면 균열은 요소 경계에서 절점들을 분

리시켜 서로 다른 절점들을 위치만 같게 설정함으로써 묘사하였다. 균열 면은 마찰이 있는 미끄러짐 접촉면 (frictional contact surface)으로 근사, 요소들이 상호 침투하지 못하도록 설정한 후 해석하였다. Fig. 3은 다음 장에서 설명할 ENF 시험편의 유한요소 모델 및 해석 결과로서 계면 균열 선단에서 균열 닫힘과 미끄러짐 즉 Mode II 상태를 묘사하고 있음을 보여준다.

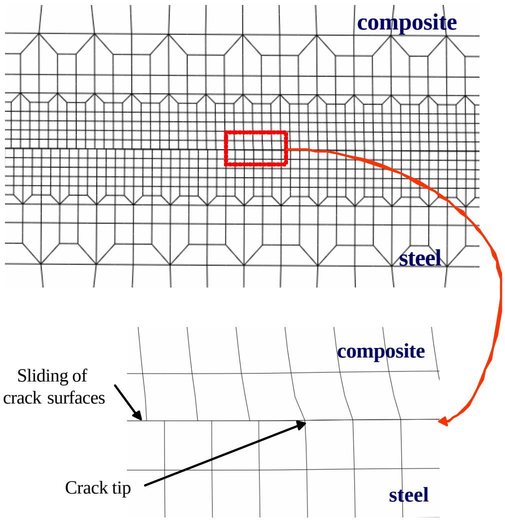

Fig. 3 Finite element model for a composite/steel interfacial crack.

3. 시험편 및 시험방법

3.1 접착 과정 및 시험편 제작

사용된 접착 방법은 동시 경화 성형 접착법 (co-cure bonding process)으로서 복합재료 적층 시 접착물을 성형되기 전의 프리프레그 적층판에 맞붙임으로써, 복합재료의 성형 과정에서 프리프레그에서 빠져 나오는 에폭시 레진이 접착제로 사용되어 접착물과 접착되도록 하는 방식이다. 동시 경화 성형 접착법은 복합재료의 성형과 동시에 접착이 이루어지기 때문에 산업 생산적으로 경제적으로 효율성이 높으며 접착 강도 또한 매우 우수하다.

해석 대상으로 한 Fig. 1의 복합재료/금속 양면 겹치기 접합 조인트는 ASTM D3528 규격을 기반으로 치수를 결정하였다 (Fig. 4). 재료는 탄소강 (SM45C)과 일방향 적층된 탄소섬유/에폭시 복합재료로서 0.15mm 두께의 프리프레그(SK SkyFlex, USN150B)를 16장 적층하여 구성된 적층판($[0_{16}]_T$)을 사용하였다. 접착 물성을 향상시키기 위해 탄소강 표면을 sandpaper #60으로 연마하여 표면 조도를 조절한 후 아세톤 세척 과정을 거쳤다. 접착 계면에 초기 균열을 주기 위하여 접착하기 전 탄소강 표면에 에폭시 이형제 (Epoxy release agent ER-650, 남방CNA, Korea)를 도포하였으며 초기 균열 길이 (a_0)는 5, 10, 15, 20 mm로 설정하였다. 접착 조인트의 하중 지지 능력 측정 시험은 정적 인장 하중을 유압 재료 시험기 (MTS-815)를 사용하여 가해 주었으며 인장 속도는 1mm/min 로 설정하였다.

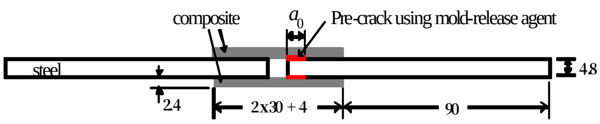

Fig. 4 Dimensions of a double-lap joint with pre-cracks.

3.2 Mode II 계면 파괴인성치 측정

동시 경화 성형법으로 접착된 복합재료/금속 계면의 Mode II 파괴인성치, G_{IIc} 는 본 연구에서 고안된 이종재료 ENF 시편을 이용하여 측정하였다. ENF 시편은 Russell 과 Street [14] 가 복합재료의 Mode II 층간 파괴인성치를 측정하기 위해 도입한 이후 접착제 결합의 Mode II 파괴인성치를 측정하는 데에도 선호되어 사용되어온 시험편이다 [15]. 이종재료 ENF 시편은 복합재료 ENF 시험편의 변형된 형태로서 균열이 있는 계면을 중심으로 한쪽은 복합재료 이지만 반대쪽은 다른 재료로 구성, 이종재료 접착 계면의 파괴인성치를 측정하도록 고안한 것이다 (Fig. 5).

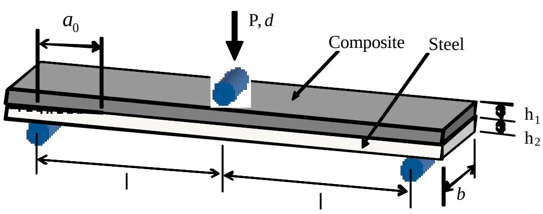

Fig. 5 Schematics of the composite/metal ENF specimen.

복합재료 ENF 시편과 마찬가지로 이종재료 ENF 시

편 또한 보 이론 (beam theory) 을 이용하여 파괴인성치를 구하는 식을 유도할 수 있다. Fig. 5와 같은 3 점 굽힘 하중 하에서 Castigliano 의 에너지 방법을 적용하면 중심의 변위 (d) 는 식 (4)와 같이 탄성에너지 (U) 의 하중에 대한 미분 관계로 얻어질 수 있다.

$$d = \frac{\partial U}{\partial P} \tag{4}$$

이종재료 ENF 시편에 가해진 굽힘 하중과 이로 인한 변형으로 저장된 탄성에너지는 식 (5)로 표현된다.

$$U = \int_0^{2\ell} \frac{1}{2} \frac{M^2}{EI} dx = \int_0^{a_0} \frac{M_1^2}{2E_1 I_1} dx + \int_0^{a_0} \frac{M_2^2}{2E_2 I_2} dx + \int_{a_0}^{2\ell} \frac{M^2}{2(EI)_{\mathrm{eff}}} dx \tag{5}$$

여기서 I_1 은 접착면 위쪽 보 단면의 2차 면적 모멘트를, I_2 는 접착면 아래쪽 보 단면의 2차 면적 모멘트를, $(EI)_{\mathrm{eff}}$ 는 접착된 보 전체 단면의 굽힘 강성을 각각 나타낸다. 보의 단면에 가해진 굽힘 모멘트 (M) 또한 균열이 있는 단면에서는 위쪽과 아래쪽에서 M_1 과 M_2 로 분리되어 작용된다고 고려하였다. ($M = M_1 + M_2$). 두 재료의 두께는 항상 중립면이 계면에 위치하도록 일정한 비율로 유지하였다 $\left(\frac{h_1}{h_2} = \left(\frac{E_2}{E_1} \right)^{\frac{1}{2}} \right)$.

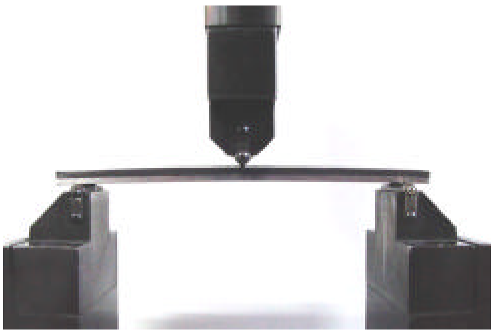

Fig. 6 3-point bend test of a bi-material ENF specimen.

ENF 시편이 3점 굽힘 하중 하에 있을 때, 보의 중심에서 작용하는 하중과 변위에 관한 컴플라이언스는 식 (6)과 같이 표현되며

$$C = \frac{d}{P} = \frac{a^3}{12(E_1 I_1 + E_2 I_2)} + \frac{(2L^3 - a^3)}{12(EI)_{\mathrm{eff}}} \tag{6}$$

따라서 이종재료 ENF 시편에 작용하는 하중에 따른 Mode II 에너지 방출률은 다음과 같이 표현된다.

$$G_{II}^{BT} = \frac{P^2}{2b} \frac{dC}{da} = \frac{9P^2 a^2}{8b^2 (E_1 h_1^3 + E_2 h_2^3)} \tag{7}$$

P는 재료에 작용하는 하중, b는 균열 진전 방향에 수직한 방향 재료 폭, 그리고 dC/da 는 균열 진전에 따른 컴플라이언스 변화율을 나타낸다. 보 이론으로 얻어진 에너지 방출률 계산식 (7)은 에너지 방출률을 구하는데 영향을 주는 인자들에 대한 직관적인 통찰을 제공하지만 정확성은 수치해석 방법에 비교 떨어진다. 이는 보 이론으로는 전단 변형률, 균열 선단에서의 응력 특이성, 잔류 열응력의 영향들을 고려할 수 없기 때문이다. 따라서 유한 요소 해석 결과를 이용하여 에너지 방출률을 구한 후 보 이론으로 얻은 이론식에 보정 상수를 곱하여 주는 방식으로 이론 식을 보정하여 사용하였다.

$$G_{IIC} = \frac{9P_c^2 a^2}{8b^2 (E_1 h_1^3 + E_2 h_2^3)} \left(a + b \left(\frac{H}{a} \right)^2 \right) \tag{8}$$

식 (8)의 a 와 $ß$ 는 이론식이 유한요소해석 결과와 맞도록 첨가한 보정 상수들이다. H는 시편 전체의 두께를 나타내며 $(H = h_1 + h_2)$, 보 이론에서 고려하지 않은 보의 두께 효과를 고려하기 위한 첨가항을 구성한다 [15]. 이와 같이 보정된 식을 사용하면 실험할 때마다 유한요소 해석을 다시 수행할 필요 없이 간단한 식으로 파괴인성치를 구할 수 있다. 파괴인성치는 실험결과 얻은 파괴하중을 식 (8)의 P_c 에 대입함으로 얻을 수 있다.

4. 결과 및 토의

복합재료/금속 이종재료 ENF 시험편의 3점 굽힘 시험 결과, 접착된 보의 중심에 인가된 하중과 중심의 변위는 선형 비례함을 관찰할 수 있다 (Fig. 7). 하중이 특정 값에 도달하면 계면 균열이 불안정적으로 진전 (unstable crack propagation), 접착은 갑작스럽게 파괴된다. 서로 다른 5개의 두께를 가진 시편 모두 불안정적인 균열진전 거동으로 인해 접착의 파괴와 동시에 순간적인 하중 감소를 보여 주었으며 시험편의 두께가

두꺼울수록 더 큰 하중지지 능력을 가짐을 관찰할 수 있다 (Fig. 7).

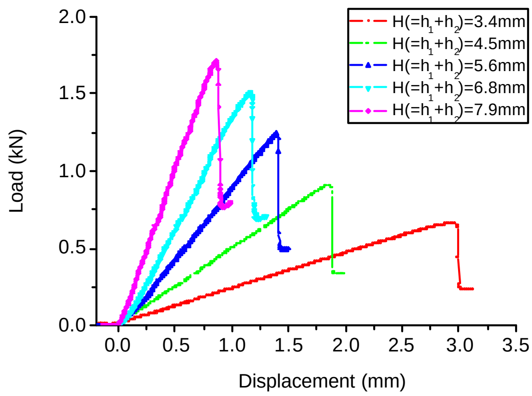

Fig. 7 Load-deflection curves of bi-material ENF specimens. Specimens with five different thicknesses were tested to measure the fracture toughness of the interface.

유한요소 해석으로 구한 파괴인성치 G_{II}^{FE} 는 유한요소 해석 모델에 파괴하중을 대입하여 응력 및 변위장을 구한 후 2장에서 언급한 가상 균열 닫음 기법을 사용하여 구하였다. 각 두께에서 대표적인 파괴하중을 유한요소 해석에 적용하여 얻은 파괴인성치 G_{II}^{FE} 와 이론식 (7)에 대입하여 얻은 파괴인성치 G_{II}^{BT} 를 비교함으로 식 (8)의 보정계수 a 와 $ß$ 를 얻었다 (Fig 8). 이를 이용하여 매 실험마다 유한 요소 해석을 반복함을 피하였다.

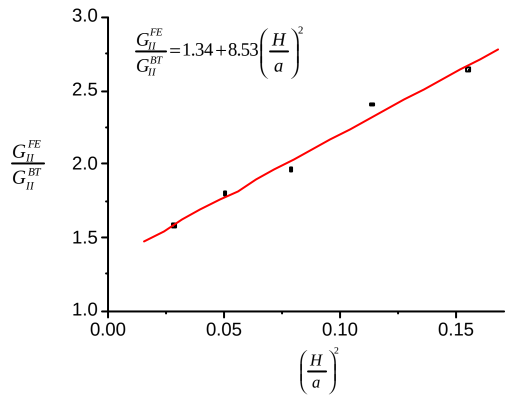

Fig. 8 Beam theory correction parameter determination using finite element analysis.

계면의 파괴인성치는 시험편의 두께에 상관없이 동일한 값이 측정되었다 (Fig. 9). 시험편의 두께에 상관없이 동일한 파괴인성치에서 접착이 파괴됨은 접착 조인트의 치수 및 형상이 바뀌어 파괴 하중이 달라져도 에너지 방출률이 계면의 물성인 정해진 파괴인성치에 도달할 때 균열이 진전, 파손을 야기한다는 파괴역학의 기본 가정을 사용하여 파괴를 예측할 수 있음을 나타낸다.

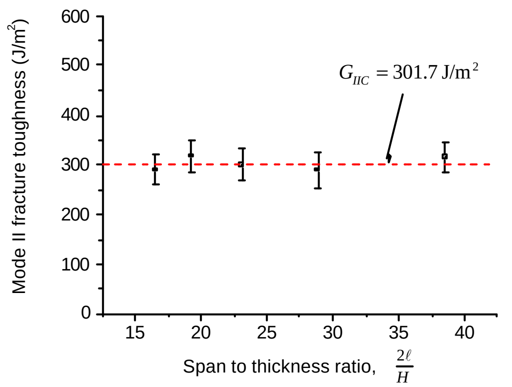

Fig. 9 Measured fracture toughness according to different span-to-thickness ratios (2l/*H*). Each thickness group was tested on more than five specimens.

측정된 계면의 파괴인성치 평균값은 301.7 J/m^2 이며 이 값은 본 연구에서 사용한 복합재료/금속 (일방향 USN150/탄소강) 재료의 동시경화 접착법으로 접착된 계면의 물성이므로 재료 구성이나 접착 방식이 바뀐다면 새롭게 측정하여야 하는 물성 값이다. 그러나 본 연구에서 제시한 이종재료 ENF 시편과 시험 방법은 임의의 접착 계면 물성 측정을 위해 사용할 수 있다.

측정된 계면 파괴인성치가 다른 형상의 접착 조인트의 파괴를 예측할 수 있는지 검증하기 위해 수행한 초기 균열을 가진 양면 겹치기 접착 조인트의 파손 시험 결과는 Fig. 10과 같다.

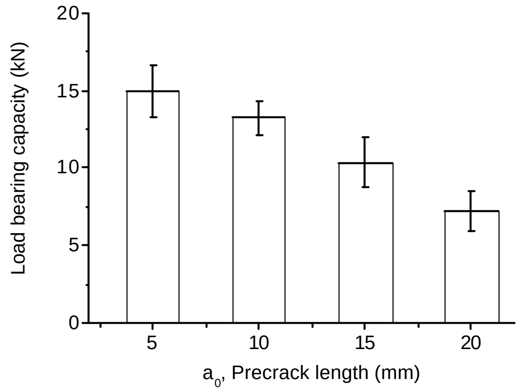

Fig. 10 Load-bearing capacity of double-lap joints with various pre-crack lengths.

초기 균열의 길이가 클수록 하중지지 능력은 감소하며 초기 균열 길이가 길어질 때 그 감소 폭이 더 커짐을 알 수 있다. 실험적으로 구한 파괴하중의 평균값을 유한 요소 해석 모델에 대입하여 계면 균열에서 에너지 방출률을 구했을 때, 다양한 초기균열 길이에 상관없이 에너지 방출률 값이 이종재료 ENF 시험에서 구했던 계면의 파괴인성치 값의 표준편차 범위 안에 위치하고 있음을 확인할 수 있다 (Fig. 11).

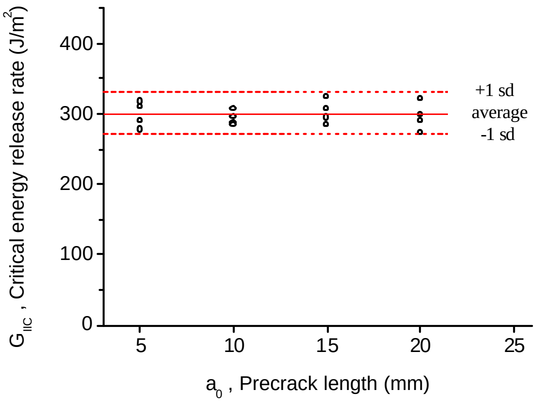

Fig. 11 Critical energy release rates of double-lap joints are within the standard deviation range of the measured interfacial fracture toughness.

이상과 같이 이종재료 ENF 시편으로 측정한 계면 파괴인성치가 계면 균열을 가진 양면 겹치기 접착 조인트 시편의 파괴시 나타나는 에너지 방출률과 일치함이 확인하였다. 따라서 계면 파괴인성치를 이용한 접착 조인트의 파괴 예측은 조인트의 형상 변화에 상관없이, 동일한 접착 계면이 형성되었다면 동일한 계면 파괴인성치를 사용하여 파손을 예측할 수 있음이 검증되었다.

파괴인성치가 재료의 물성이듯이 계면 파괴인성치는 두 재료의 접합으로 생성된 계면의 물성이다. 따라서 접착 조인트의 파괴를 예측하기 위해 계면 파괴인성치를 사용할 때에는 동일한 계면이 형성되었는지를 확인하여야 한다. 즉 동일한 재료 구성과 동일한 접착법으로 이루어진 계면일 때 동일한 값의 계면 파괴인성치를 갖는다고 가정할 수 있다. 동시경화 성형법으로 접착된 복합재료/금속 계면의 모습을 광학 현미경으로 관찰하면 복합재료의 프리프레그에서 빠져나온 에폭시 레진이 탄소강 표면에 흡착된 모습을 보여준다 (Fig. 12). ENF 시험편과 양면겹치기 접합 시험편 모두 동일한 접착 계면이 생성되었다. 또한 파괴인성치는 균열 부근에서 하중이 인가되는 Mode의 함수이듯이 계면 균열 또한 균열 열림 (Mode I)과 균열 미끄러짐 (Mode II) 그리고 두 가지의 혼성 정도에 따라 다른 파괴인성치를 갖는다. 본 연구에서 비교한 ENF 시험편과 양면 겹치기 접합 시험편 모두 균열이 온전히 닫혀진 균열 미끄러짐 조건 이었기에 동일한 파괴인성치로 비교가 가능하였다.

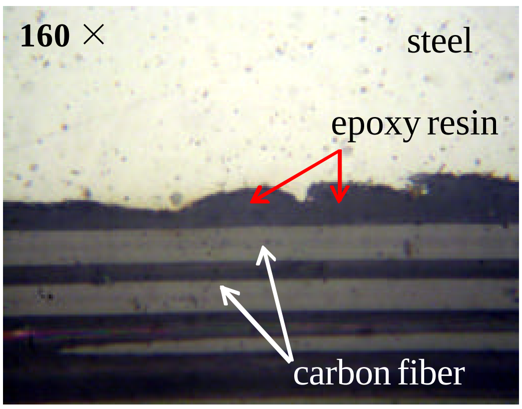

Fig. 12 Co-cure bonded composite/metal interface.

5. 결론

본 연구에서는 파괴역학을 도입하여 접착제 접합 조인트의 파괴를 예측할 수 있도록 계면의 Mode II 파괴인성치를 측정하기 위한 시편을 고안하고 측정 시험을 수행하였다. 또한 측정한 파괴인성치와 접착 조인트의

파괴 하중에서의 에너지 방출률을 비교함으로써 사용한 파손 기준과 고안한 시편으로 측정한 파괴인성치를 검증하였다.

실험결과 고안된 이종재료 ENF 시편은 두께에 상관없이 동일한 파괴인성치에서 접착이 파괴됨을 확인하였다. 다양한 초기 균열 길이를 가진 양면 겹치기 접착 조인트 또한 계면 균열의 에너지 방출률이 ENF 시편을 이용하여 측정한 파괴인성치에 도달할 때 파괴됨을 확인하였다. 따라서 본 연구에서 제시한 이종재료 ENF 시편을 사용하여 접착 계면의 파괴인성치를 측정한다면 시편과 동일한 방식으로 형성된 계면을 가진 접착 조인트가 특정 하중에서 나타내는 에너지 방출률과 비교함으로써 균열 진전의 여부 및 파괴 하중을 예측할 수 있다.

본 연구에서 검증한 파괴역학을 이용한 접착 조인트의 파손 예측 기법의 사용은 다음과 같은 제한이 있음에 주의하여야 한다. 접착 조인트의 파괴인성치는 접착제의 물성이라고 간주되어서는 안되며 계면의 물성으로서 제시되어야 한다. 이는 동일한 접착제를 사용하여도 접착물, 표면 처리, 접착 두께 등 계면 상태를 변화시키는 다양한 변수들의 변화에 따라 접착 강도 즉 파괴인성치가 달라지기 때문이다. 또한 파괴인성치는 하중의 작용 모드에 따라 달라진다. 본 연구에서는 Mode II 복합재료/금속 계면 파괴인성치를 측정하기 위한 시험법 및 파괴인성치의 제시에 국한된 것이며 따라서 단면 겹치기 접착 조인트 (single-lap joint)와 같이 균열 열림 (Mode I)과 균열 미끄러짐 (Mode II)이 동시에 나타나는 혼합 모드 상태의 접착 조인트의 파손 예측에는 사용될 수 없다. 다양한 혼합모드에서 계면 파괴인성치를 측정하는 연구 또한 필요하며 접착 구조물 설계를 위한 유용한 자료로 사용될 것으로 사료된다.

후 기

이 논문은 2008년도 정부(과학기술부)의 재원으로 한국과학재단의 지원을 받아 수행된 연구입니다. (No. R01-2007-000-20655-0)

참고문헌

1) Kinloch A.J., *Adhesion and Adhesives: science and technology*, 1987, Chapman and Hall.

2) Pocius A.V., *Adhesion and Adhesives Technology: An introduction*, 1997, Hanser Publishers.

3) Tong L., “An assessment of failure criteria to predict the strength of adhesively bonded composite doubler Lap Joints,” *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, Vol. 16, No. 18, 1997, pp. 698-713.

4) 김광수, 이영무, 김천곤, “일방향 복합재료 Single Lap 접합 조인트의 파손 모드 및 파손 강도: II 파손 예측,” 한국복합재료학회지, 제18권 제1호, 2005, pp. 1-9.

5) Anderson G.P. and DeVries K.L., “Predicting bond strength,” *Journal of Adhesion*, Vol. 23, 1987, pp. 289-302.

6) Anderson G.P. and DeVries K.L., “Predicting strength of adhesive joints from test results. *International Journal of Fracture*, Vol. 39, 1989, pp. 191-200.

7) Reedy E.D. and Guess T.R., “Comparison of butt tensile strength data with interface corner stress intensity factor prediction,” *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 30, No. 21, 1993 pp. 2929-2936.

8) Qian Z.Q. and Akisanya A.R., “An experimental investigation of failure initiation in bonded joints,” *Acta materia*, Vol. 46, No. 14, 1998, pp. 4895-4904.

9) Akisanya AR and Fleck NA., “Interfacial cracking from the free edge of a long bi-material strip,” *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 34, 1997, pp. 1645-1665.

10) 김원석, 신금철, 이정주, “복합재료-탄소강 접착제 결합 조인트의 하중지지 능력 예측을 위한 이종재료 접합 계면의 파괴역학적 분석,” 한국복합재료학회지, 제19권 제4호, 2006, pp. 15-22.

11) Irwin G.R., “Analysis of stresses and strains near the end of a crack traversing a plate,” *Journal of Applied Mechanics*, Vol. 24, 1957, pp. 361-364.

12) Hellen T.K., “On the method of virtual crack extension,” *International Journal for Numerical methods in Engineering*, Vol. 9, 1975, pp. 187-207.

13) Qian W. and Sun C.T., “A frictional interfacial crack under combined shear and compression,” *Composites Science and Technology*, Vol. 58, 1998, pp. 1753-1761.

14) Russell A.J. and Street K.N., “Moisture and temperature effects on the mixed-mode delamination fracture of unidirectional graphite/epoxy,” *Delamination and Debonding of Materials, ASTM STP 876*, 1985, pp. 349-370.

15) Carlsson L.A., Gillespie JW. and Pipes RB., “On the analysis and design of the end notched flexure (ENF) specimen for mode II testing,” *Journal of Composite Materials*, Vol. 20, 1986, pp. 594-604.