

<학술논문>

DOI <http://dx.doi.org/10.3795/KSME-A.2015.39.5.491>

ISSN 1226-4873(Print)
2288-5226(Online)

필라멘트 와인딩된 카본/에폭시 복합재의 층간파괴인성에 미치는 온도 영향

임재문* · 신광복**† · 황태경***

* 한밭대학교 기계설계공학과, ** 한밭대학교 기계공학과, *** 국방과학연구소

Effect of Temperature on Interlaminar Fracture Toughness of Filament-Wound Carbon/Epoxy Composites

JaeMoon Im*, KwangBok Shin**† and Taekyung Hwang***

* Graduate School of Mechanical Design Engineering, Hanbat Nat'l Univ.,

** Dept. of Mechanical Engineering, Hanbat Nat'l Univ.,

*** Agency for Defence Development

(Received December 24, 2014; Revised February 24, 2015; Accepted March 19, 2015)

Key Words: Filament Wound Composite(필라멘트 와인딩 복합재), Composite Pressure Vessel(복합재 압력 용기), Interlaminar Fracture Toughness(층간파괴인성), 온도영향(Temperature Effect)

초록: 본 논문은 필라멘트 와인딩 공법으로 제작된 구배 단면을 갖는 돔 분리형 복합재 압력용기 접착체결부의 온도영향에 따른 층간파괴인성 평가를 위해 모드 I, II 그리고 혼합모드의 시험적 평가를 수행하였다. 모드 I과 혼합모드 층간파괴인성은 DCB 시편을 사용하였으며, 모드 II 층간파괴인성은 ENF 시편을 사용하여 평가하였다. 와인딩 각도는 $[\pm 10^\circ]_6$, $[\pm 27^\circ]_6$ 그리고 $([\pm 10^\circ]_3/\text{FM73}/[\pm 10^\circ]_3)$ 이며 곡면 단면을 고려하였다. 시험 평가에 적용된 온도 환경은 환경 챔버와 전기로를 이용하여 -30°C 에서 60°C 로 조성하였다. 층간파괴인성에 온도가 미치는 영향을 평가한 결과, 층간파괴인성은 저온에서 높게 나타났으며, 온도가 증가함에 따라 감소하는 경향을 확인하였다. 시편 종류별 결과에서는, 돔부와 헬리컬부가 접착체결된 $[\pm 10^\circ]_3/\text{FM73}/[\pm 10^\circ]_3$ 와인딩 시편이 가장 높은 층간파괴인성을 가짐을 확인하였다.

Abstract: This paper reports an experimental study for evaluating the effect of temperature on the mode I, mode II and mixed-mode interlaminar fracture toughness of adhesive joints with a curved cross-section of filament-wound dome-separated composite pressure vessel. Mode I and mixed-mode interlaminar fracture toughness were evaluated using DCB specimens, while mode II interlaminar fracture toughness was determined using ENF specimens. $[\pm 10^\circ]_6$, $[\pm 27^\circ]_6$ and $([\pm 10^\circ]_3/\text{FM73}/[\pm 27^\circ]_3)$ winding specimens with the curved cross-section were considered. In-situ temperature environments were simulated with a range of -30°C - 60°C using an environmental chamber and furnace. Experimental results on the effect of temperature indicate that interlaminar fracture toughness tends to be high at low temperature and is degraded with increase in temperature. For specimen types, it was found that interlaminar fracture toughness of $[\pm 10^\circ]_3/\text{FM73}/[\pm 27^\circ]_3$ winding specimens considered as adhesive joints of dome and helical part was higher than other specimens.

- 기호설명 -

a : 균열 길이
 b : 시험편 폭

c : 혼합모드 시험 장치의 레버 길이
 G_I : 모드 I 에너지 해방률
 G_{II} : 모드 II 에너지 해방률
 G_{Mixed} : 혼합모드 에너지 해방률
 h : 시험편 두께의 1/2
 L : 시편 스패의 절반

† Corresponding Author, shin955@hanbat.ac.kr

© 2015 The Korean Society of Mechanical Engineers

- P : 적용 하중
 δ : 하중점 변위
 λ : 탄성기반 매개변수, $\lambda = (3k/bh^3 E_{11})^{1/4}$

1. 서 론

복합재료(Composite materials)는 금속재보다 비강도 및 비강성이 높은 재료로써 기계구조물의 경량화 및 성능향상을 위해 다양한 분야에 적용되고 있다. 특히 방산 및 항공우주분야의 적용이 활발해지고 있는데 이는 항공기, 로켓, 미사일 등의 경량화로 인해 비거리 향상에 유리하기 때문이다.⁽¹⁾ 이런 복합재 구조물의 경우 원하는 형상은 일체성형을 통해 제작하는 방법이 구조적으로 가장 유리하나 구조물의 크기와 사용용도 등에 따라 구조물들을 각각 성형한 후 접착체결에 의해 제작하는 방법도 사용되게 된다. 이때, 접착체결방법은 리벳 등을 활용한 기계적 체결 방식에 비해 경량화 설계에 유리하고, 하중을 접착면적 전체에 분포시킬 수 있는 장점이 있어 최근 많이 활용되고 있는 추세이다. 또한 피접착물 사이의 완전한 접촉으로 유체로부터 밀봉이 가능하고,⁽²⁾ 추가적인 가공이 필요하지 않아 섬유와 불연속이 발생하지 않는 장점도 가지고 있다.⁽³⁾

복합재 압력용기의 경우 내압에 대해 충분한 구조적 강도를 유지하기 위해 돔과 실린더를 필라멘트 와인딩 공법에 의해 일체성형하는 방법이 주로 사용되어 왔다. 그러나, 최근의 개발동향은 돔과 실린더를 따로 제작한 후 접착체결방식에 의해 제작하는 방법이 적용되고 있다. 돔과 실린더를 따로 제작한 후 접착체결에 의해 압력용기를 접합시킬 경우 불필요한 내부 접합부분이 일체성형 방법에 비해 줄일 수 있어 추가 경량화 및 내부의 추진제 탑재량을 증가시킬 수 있는 장점이 있는 것으로 알려져 있다.⁽⁴⁾

이런 돔 분리형 복합재 압력용기의 경우 추가적인 경량화 및 내부의 추진제 증가 등의 장점을 가지고 있으나, 돔과 실린더 접합체결부의 파손 평가가 중요한 과제로 남게 된다. 일반적으로 돔 분리형 압력용기의 파손평가는 접착체 층에서 균열이 진전하여 파괴되는 응집 파손 모드(cohesive failure mode)가 나타나므로 단순한 강도값보다는 층간파괴인성치(fracture toughness)가 파손평가에 있어서 매우 중요한 인자가 된다.⁽⁵⁾ 이때, 복합재

압력용기 접합체결부의 층간파괴인성치를 평가하기 위해서는, 압력용기가 필라멘트 와인딩 공법에 의해 제작되어 곡률을 가지게 되므로 시편 역시 압력용기와 같은 곡률을 갖는 시편에 대해 평가가 이루어져야 한다. 또한, 압력용기의 접합체결부에 대한 층간파괴인성치는 보관 및 운영온도 환경에 따라 값이 변하므로 온도 변화에 따른 영향 역시 변수로 고려되어야 한다.

윤성호 등^(6,7)은 텀팅열차 차체에 적용된 탄소 섬유/에폭시 복합재의 모드 I, II 층간파괴인성을 평가하였으며, 초기균열의 두께가 얇은 경우 층간파괴인성이 높음을 확인하였다. 이택순 등⁽⁸⁾은 탄소섬유/에폭시 복합재료의 적층 각도에 따른 모드 I 층간파괴인성을 평가하였으며 섬유가 이루는 상대각도가 클수록 층간파괴인성이 높음을 확인하였다. A. B. Pereira 등⁽⁹⁾은 카본/에폭시 복합재의 모드 II 층간파괴인성을 평가하여 적층된 섬유의 상대각도가 클수록 층간파괴인성이 높아짐을 확인하였다. 이처럼, 문헌조사를 통한 기존의 연구사례에서는 대부분 곡률이 없는 적층 복합재의 층간파괴인성치 평가가 주로 수행되었으며, 온도 조건은 상온만을 고려하여 평가되어 곡률을 갖는 복합재 압력용기 접합체결부의 층간파괴인성치 평가를 위해서는 다른 시험적 접근방법이 필요하다.

따라서, 본 연구에서는 돔 분리형 복합재 압력용기의 접합체결부에서의 모드 I, II 그리고 혼합모드에 대한 층간파괴인성 평가를 위해 시편을 필라멘트 와인딩 공법에 의해 제작하여 압력용기와 동일한 곡률을 갖도록 하였다. 이때, 시편은 압력용기 접합체결부의 모재부와 접합부에 대한 층간파괴인성치를 모두 평가하기 위해, 모재부에 해당하는 헬리컬부의 $[\pm 10^\circ]_6$ 와 돔부의 $[\pm 27^\circ]_6$ 적층판 시편 그리고 접합부에 해당하는 $[\pm 10^\circ]_3/FM73/[\pm 27^\circ]_3$ 시편, 세 종류를 제작하였다. 모드 I과 혼합모드에 대한 층간파괴인성치는 DCB(Double Cantilever Beam) 시편으로, 모드 II의 층간파괴인성치는 ENF(End Notched Flexure) 시편으로 제작하여 평가하였다. 또한, 온도에 따른 모드 I과 II의 층간파괴인성 특성 변화를 평가하기 위해 -30°C 의 저온 환경, 상온 환경(20°C) 그리고 60°C 의 고온 환경을 고려하였다. 온도 환경은 압력용기의 보관 및 운영환경을 고려하여 -30°C ~ 60°C 온도범위에서 선정하였다. 모든 시험결과는 5개의 시편에

대해 수행하여 평균값을 취하였다.

2. 시편 제작 및 형상

2.1 시편의 제작 방법

돔 분리형 복합재 압력용기는 Fig. 1과 같은 형상을 가지며 돔부 와인딩, FM73 항공용 접착 필름 부착, 그리고 실린더부(헬리컬부, 스커트부) 와인딩의 순서로 제작공정이 진행되어 접착면에는 별도의 표면처리 없이 성형하여 제작된다. 따라서, 돔 분리형이 아닌 일반적인 복합재 압력용기와는 다른 체결구조를 갖기 때문에 모재부에 해당하는 헬리컬부($[\pm 10^\circ]_6$), 돔부($[\pm 27^\circ]_6$) 그리고 접합부($[\pm 10^\circ]_3$ /FM73/ $[\pm 27^\circ]_3$)에 대한 층간파괴인성치들은 돔 분리형 복합재 압력용기의 파손 해석과 평가에 중요한 인자가 된다. 또한, 앞에서도 언급하였듯이 복합재 압력용기의 경우 필라멘트 와인딩 공법에 의해 제작되어 곡률을 가지므로 실제 압력용기의 파손거동을 예측하기 위해서는 시편 역시 같은 곡률을 갖도록 제작되어야 한다. 따라서, 본 연구에서는 Fig. 1과 같이 설계된 돔 분리형 복합재 압력용기의 제작방법과 동일한 방법으로 시편을 제작하였다.

탄소섬유는 T700 계열을 사용하였으며 시편은 실제 압력용기와 같은 1,700mm의 직경을 갖도록 제작하였으며, 초기균열은 이형필름을 삽입하여 생성하였다. 이때 시편은 $\pm 10^\circ$ 의 와인딩 각도를 갖는 헬리컬부($[\pm 10^\circ]_6$)와 $\pm 27^\circ$ 의 와인딩 각도를 갖는 돔부($[\pm 27^\circ]_6$) 그리고 헬리컬부와 돔부가 FM73 접착제로 체결되어 있는 접합부($[\pm 10^\circ]_3$ /FM73/ $[\pm 27^\circ]_3$) 시편, 총 세 종류를 제작하였다. Fig. 2는 필라멘트 와인딩 공법으로 제작되는 돔 분리형 압력용기의 모습을 보여준다.

2.2 모드별 시편의 형상

복합재의 층간파괴인성은 모드 I, II 그리고 혼합모드에 대해 평가하였다. 모드 I은 분리부가 존재하는 시편의 양쪽 끝단에 하중이 가해지면서 열림 변위가 증가하여 파괴되는 모드이고, 모드 II는 3점 굽힘 시험의 형태로 지지부의 중앙에 가해지는 하중에 의해 분리부에서 전단이 발생하여 파괴되는 모드이다. 혼합모드는 모드 I과 모드 II가 동시에 발생하여 층간파괴가 진행되는 모드를 의미한다. Fig. 3은 각각의 모드별 시험 개략도를 보여준다.

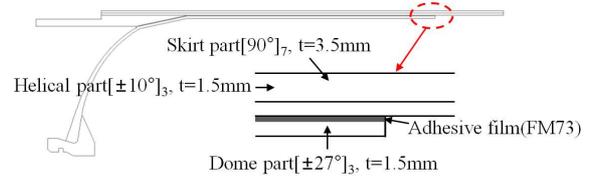


Fig. 1 Configuration of a composite pressure vessel

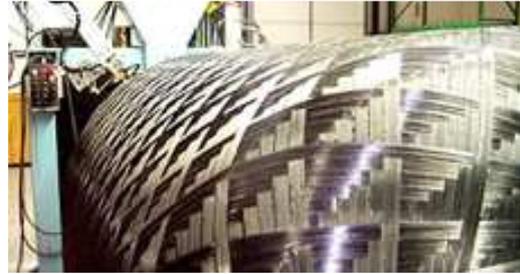


Fig. 2 Filament-wound dome-separated composite pressure vessel

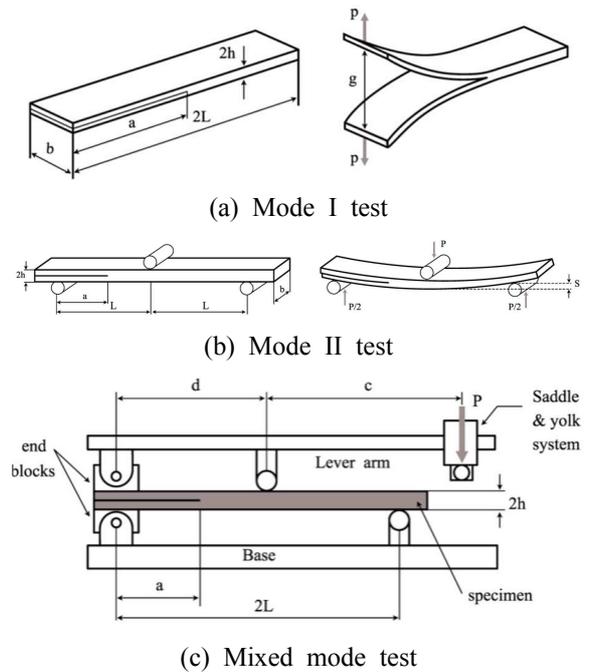


Fig. 3 Schematics diagrams of the mode test

모드 I, II 그리고 혼합모드 시편은 ASTM D5528⁽¹⁰⁾과 ASTM D6671/D6671M⁽¹¹⁾에 의거하여 폭 25mm, 길이 150mm로 제작하였으며, 초기 균열은 50mm로 이형필름을 삽입하여 생성하였다. 이때 모드 I은 DCB(Double Cantilever Beam), 모드 II는 ENF(End Notched Flexure) 시편으로 제작하였다. 모드 I 시편은 에폭시타입의 접착제를 이용하여 경첩을 부착하였으며 모드 II 시편은 균열이 접착층을 따라 진행이 되지 않아 시편의 전체 길이는 여러 번의 시험을 통해 모드 II 층간파괴

이 접착층을 따라 순수하게 발생되도록 150mm의 길이 중 접착체결부 25mm를 절단하여 125mm로 축소하였고, 양단 지지거리를 110mm에서 85mm로 축소하였다. 혼합모드 시편의 경우 모드 I 시편과 동일한 형상으로 제작하였다. Fig. 4(a)와 (b)는 각각 모드 I과 혼합모드 시편 그리고 모드 II 시편으로 곡률($\rho=1/1700$)을 갖고 있음을 확인할 수 있다.

3. 층간파괴인성 평가

3.1 시험 장치 및 방법

시험에는 Instron 5848 Micro Tester를 사용하였으며, $-40^{\circ}\text{C}\sim 320^{\circ}\text{C}$ 의 분위기 온도를 조성할 수 있는 환경챔버를 이용하여 액화질소와 전기히터로 저온(-30°C) 및 고온(60°C) 환경을 조성하였다. 하중은 $1\text{mm}/\text{min}$ 의 변위제어를 통해 부과하였다. Fig. 5는 환경챔버 내의 시편과 지그 장착 모습을 보여준다.

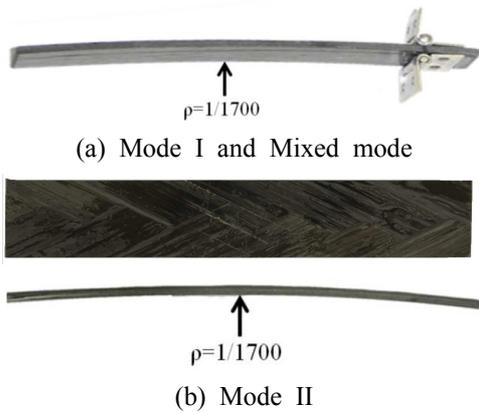


Fig. 4 Shape of specimens

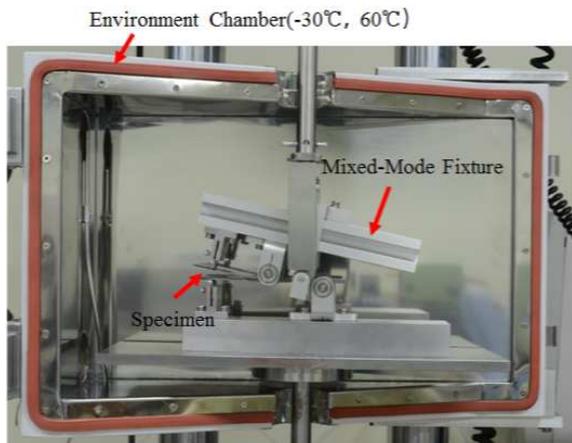
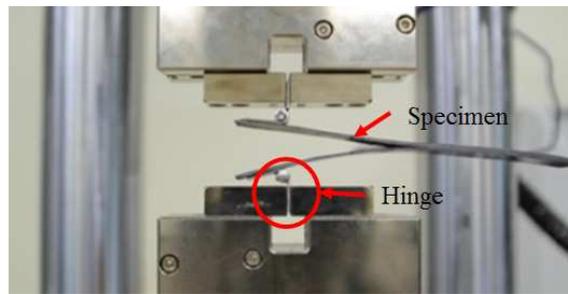


Fig. 5 Test equipments

3.2 층간파괴인성 평가 방법

모드 I 층간파괴인성은 ASTM D5528에 의거하여 측정하였고, 가장 일반적으로 사용되고 있는 DCB 시편을 사용하였다. 모드 II와 혼합모드의 층간파괴인성은 ASTM D6671/D6671M에 의거하여 측정하였으며, 모드 II는 일반적으로 사용되는 ENF 시편을 이용하여 평가하였다. 혼합모드는 레버길이를 조절하여 1/3, 1, 3의 모드비(G_I/G_{II})로 평가를 수행하였다. Fig. 6은 각각 모드 I과 II 그리고 혼합모드의 시험 모습을 보여준다.

모드 I 층간파괴인성은 수정된 보 이론(Modified Beam Theory)인 식 (1)을 통해 도출하였으며, 모드 II 층간파괴인성은 단순보 이론(Simple Beam Theory)인 식 (2)를 적용하였다. 혼합모드의 경우 수정된 보 이론이 적용된 식 (3)의 첫 번째 항을 통해 모드 I의 에너지 해방률 구하고, 단순보 이론이 적용된 두 번째 항을 통해 모드 II 에너지 해방률을 계산하여 G_{Mixed} 를 도출하였다.⁽¹²⁾



(a) Mode I



(b) Mode II



(c) Mixed mode

Fig. 6 Fracture toughness test

$$G_I = \frac{3P\delta}{2ba} \quad (1)$$

$$G_{II} = \frac{9a^2P\delta}{2b(2L^3 + 3a^3)} \quad (2)$$

$$G_{Mixed} = \frac{3P^2(3c-L)^3}{4b^2h^3L^2E_{11}} \left[a^2 + \frac{2a}{\lambda} + \frac{1}{\lambda^2} + \frac{h^2E_{11}}{10G_{13}} \right] + \frac{9P^2(c-L)^2}{16b^2h^3L^2E_{11}} \left[a^2 + \frac{0.2h^2E_{11}}{G_{13}} \right] \quad (3)$$

3.3 모드 I 층간파괴인성 평가

모드 I 층간파괴인성은 헬리컬부와 돔부의 접착부를 모사한 시편($[\pm 10^\circ]_3/FM73/[\pm 27^\circ]_3$)의 층간파괴인성이 가장 높았으며, 그 다음으로는 돔부($[\pm 27^\circ]_6$), 헬리컬부($[\pm 10^\circ]_6$)의 순서로 층간파괴인성치가 낮아짐을 확인하였다. 이는 헬리컬부($[\pm 10^\circ]_6$)와 돔부($[\pm 27^\circ]_6$) 복합재의 층간파괴인성치를 결정하는 주요 인자가 에폭시 수지인 것에 비해 헬리컬부와 돔부의 접착부를 모사한 시편($[\pm 10^\circ]_3/FM73/[\pm 27^\circ]_3$)의 경우에는 접착면에 적용된 FM73 접착제의 기계적 특성이 에폭시 수지에 비해 월등히 높아 층간파괴인성치가 가장 높게 평가된 것으로 판단된다. 또한 헬리컬부($[\pm 10^\circ]_6$)보다 돔부($[\pm 27^\circ]_6$)의 층간파괴인성치가 높은 것은 적층된 섬유가 이루는 각도가 클수록 파이버 브리징(Fiber Bridging)에 의해 층간파괴에 대한 저항이 증가하고 섬유의 횡방향 파단에 의한 파괴면적이 증가하기 때문이다.⁽⁸⁾ 즉, 균열이 진전하는 직각방향으로 섬유 적층각도가 증가할수록 층간파괴인성치는 상대적으로 증가하기 때문이다.

온도에 따른 층간파괴인성은 모든 시편에 대해 저온에서 가장 높았으며, 고온에서는 상온에 비해 다소 감소하는 경향을 보이고 있다. 이는 저온의 경우 온도차이로 인해 발생하는 수축변형률이 초기 균열 발생을 늦춰 층간파괴인성치를 증가시켰기 때문으로 판단된다. 일반적으로 저온에서의 복합재 강성과 강도 물성이 상온에서의 물성보다 증가하는 거동과 같다고 볼 수 있다.⁽¹³⁾ 고온의 경우에는 상온에 비해 기계적 물성이 감소하고 인장변형률이 발생하여 층간파괴인성치가 감소한 것으로 판단된다. Fig. 7은 시편 종류와 온도변화에 따른 모드 I 층간파괴인성치 결과를 보여준다.

3.4 모드 II 층간파괴인성 평가

모드 II 층간파괴인성은 모드 I 층간파괴인성 평가

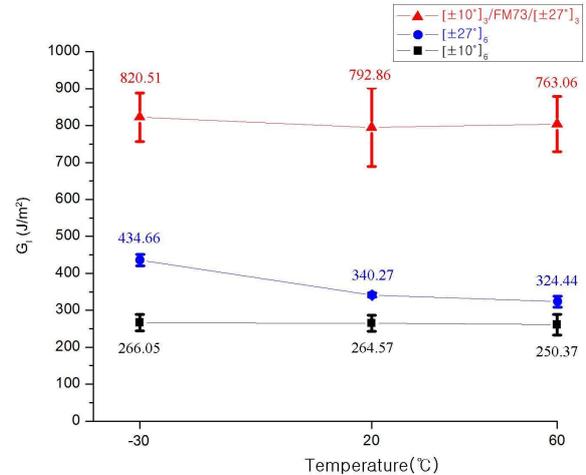


Fig. 7 Test results of mode I interlaminar fracture toughness

결과와 마찬가지로 FM73 접착제로 접합된 헬리컬부와 돔부의 접합부를 모사한 시편($[\pm 10^\circ]_3/FM73/[\pm 27^\circ]_3$)에서 가장 높았으며, 헬리컬부($[\pm 10^\circ]_6$)의 층간파괴인성이 가장 낮음을 확인하였다. 이는 앞서서도 언급하였듯이 FM73의 기계적 특성이 복합재의 에폭시 수지에 비해 기계적 특성과 접합특성이 우수하기 때문으로 판단된다. 온도에 따른 층간파괴인성은 저온에서 가장 높았으며 고온으로 갈수록 낮아짐을 확인하였다. 이는 모드 I의 경우와 마찬가지로 저온에서의 복합재 물성이 상온과 고온에서의 물성보다 높아지는 경향이 있고 저온일수록 수축변형률이 발생하여 층간파괴인성에 대한 저항으로 작용하기 때문으로 판단된다. 다만, 모드 II의 경우 고온으로 갈수록 모드 I의 층간파괴인성치의 감소폭보다 더 크다는 것이다. 이는 상대적으로 모드 II의 층간파괴인성치가 온도에 대해 모드 I에 비해 민감하다고 할 수 있다. 이는 섬유지배 물성인 모드 I 층간파괴인성치보다 수지 지배 물성인 모드 II 층간파괴인성치에 온도에 영향이 큰 것으로 판단된다. 또한, 헬리컬부($[\pm 10^\circ]_6$)보다 돔부($[\pm 27^\circ]_6$)의 층간파괴인성이 높은 것을 확인하였는데 이는 모드 I 층간파괴인성의 결과와 마찬가지로 층간파괴가 진행될 때 섬유들 간의 박리현상이 발생하기 때문으로 판단된다. 크로스플라이 복합재(cross-ply composite)가 일방향 적층 복합재에 비해 섬유의 박리가 더 많이 관찰되기 때문이다.⁽¹⁴⁾ Fig. 8은 시편 종류와 온도변화에 따른 모드 II 층간파괴인성치 결과를 보여준다.

3.5 혼합모드 층간파괴인성 평가

혼합모드 층간파괴인성 역시 모드 I, II 층간파

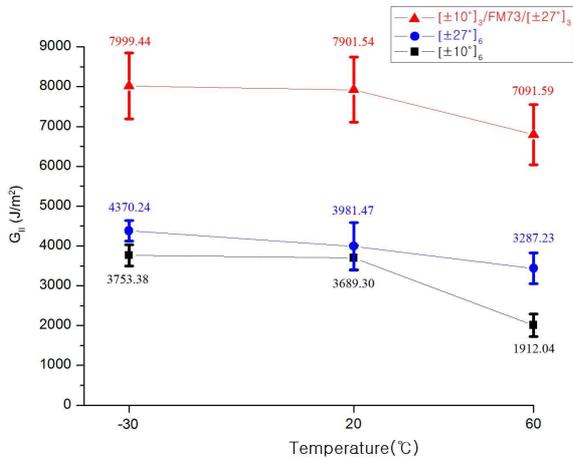


Fig. 8 Test results of mode II interlaminar fracture toughness

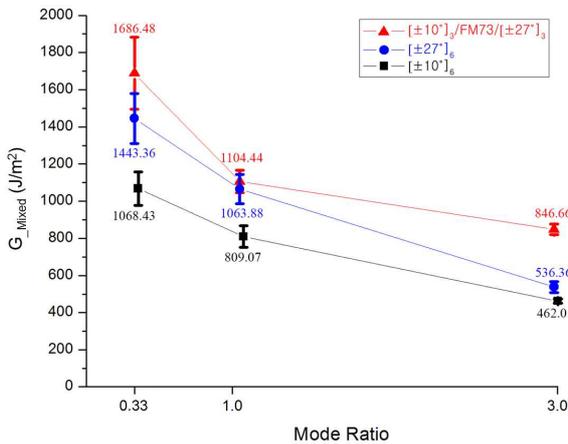


Fig. 9 Test results of mixed mode interlaminar fracture toughness

괴인성 평가 결과와 마찬가지로 FM73 접착제로 체결된 시편([±10°]₆/FM73/[±27°]₃)의 층간파괴인성이 가장 높았으며, 헬리컬부([±10°]₆)의 층간파괴인성이 가장 낮게 나타났으나 상대적인 차이는 모드 I과 모드 II 층간파괴인성보다 작았다. 또한 모드비가 증가함에 따라 모드 I의 영향이 크게 작용하여 층간파괴인성이 현저히 낮아짐을 확인하였다. 이는 모드 I의 에너지 해방률을 나타내는 식 (3) 첫 번째 항이 모드 II의 에너지 해방률을 나타내는 두 번째 항보다 매우 낮기 때문에 모드 I의 영향을 크게 받는 모드비에서 에너지 해방률이 낮아지는 것으로 판단된다. Fig. 9는 모드비별 층간파괴인성 평가 결과를 보여준다.

4. 결론

본 논문에서는 돔 분리형 복합재 압력용기의 접착

체결부에 대한 층간파괴인성치를 평가하기 위해 필라멘트 와인딩 공법으로 곡률($\rho=1/1700$)을 갖는 시편을 헬리컬부, 돔부 그리고 헬리컬부와 돔부의 접합부 시편을 제작하여 모드 I, 모드 II 그리고 혼합모드의 파괴인성치 평가를 수행하였다. 또한, 압력용기의 보관과 운영환경에서의 특성 변화를 관찰하기 위해 -30°C, 20°C, 60°C의 3가지 온도 환경을 고려하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 모든 경우의 층간파괴인성 평가에서, 온도와 모드변화에 관계없이 FM73 접착제로 접착 체결된 헬리컬부와 돔부의 접합부 시편([±10°]₆/FM73/[±27°]₃)이 가장 높은 층간파괴인성 특성을 가짐을 확인하였다. 이는 복합재를 구성하는 수치보다 FM73 접착제의 기계적 특성이 우수하여 상대적으로 접합부 시편에서 높은 층간파괴인성특성을 나타낸 것으로 판단된다.

(2) 각 온도에 따른 평가 결과, 저온의 경우 모드에 무관하게 층간파괴인성치가 증가하는 경향을 보였으며, 온도가 증가할수록 상온의 층간파괴인성치에 비해 다소 감소하는 경향을 확인하였다. 이는 저온으로 인해 발생하는 수축변형률이 초기 균열 발생을 늦춰 층간파괴인성치를 증가시켰기 때문이라 판단되며, 고온의 경우에는 상온에 비해 낮은 기계적 물성과 인장변형률의 발생으로 층간파괴인성치가 감소한 것으로 판단된다.

(3) 모드 I, 모드 II 그리고 혼합모드 층간파괴인성은 모든 경우 층간분리가 일어나는 중간층(mid-surface)에 적층된 섬유들의 상대 각도가 클수록 높아짐을 확인하였다. 모드 I의 경우, 파이버 브리징에 의한 층간파괴 저항의 증가와 섬유의 횡방향 파단에 의한 파괴면적의 증가로 인한 결과이며, 모드 II의 경우, 층간파괴가 진행될 때 섬유들 간의 박리 현상이 발생하기 때문으로 판단된다.

(4) 1/3, 1, 3의 혼합모드비에 따른 혼합모드 층간파괴인성의 평가 결과, 모드 I의 비율이 높아질수록 에너지 해방률이 낮아짐을 확인하였다. 이는 혼합모드에서의 모드 I 에너지 해방률이 모드 II 에너지 해방률보다 매우 낮아 모드 I의 영향을 크게 받는 높은 모드비에서 에너지 해방률이 낮아지는 것으로 판단된다.

참고문헌
(References)

(1) Oh, J. O., Yoon, S. H., Lee, S. W., Ahn, C.

- W. and Hwang, T. K., 2012, "Prediction of High Temperature Tensile Strengths for Carbon Fiber/Epoxy Composite," *Fall Conference of The Korean Society of Propulsion Engineers*, pp. 665~667.
- (2) Kim, W. S. and Lee, J. J., 2010, "Composite/Metal Interfacial Toughness Measurement and Improvement," *Conference of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences*, pp. 191~194.
- (3) Kim, J. H., Shin, K. B. and Hwang, T. K., 2013, "Study on Mode I, II Interlaminar Fracture Toughness for Filament Wound Composite," *Spring Conference of The Korean Society of Propulsion Engineers*, pp. 323~327.
- (4) F. Mard, 1993, "Design, Manufacture and Test of the Composite Case for ERINT-1 Solid Rocket Motor," *29th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference*, pp. 93~2462.
- (5) Kim, H. J., Park, M. I., Gwark, D. W., Kim, J. D. and Koh, S. W., 2002, "A Study on Mode II Interlaminar Fracture Toughness of Hybrid Composites," *The Korean Society of Ocean Engineers*, Vol. 16, No. 4, pp. 42~47.
- (6) Yoon, S. H., Heo, K. S. and Kim, J. S., 2005, "Evaluation of Mode I Interlaminar Fracture Toughness for Carbon Fabric/Epoxy Composite for Tilting Train Carbody," *The Korean Society for Railway*, Vol. 8, No. 6, pp. 573~580.
- (7) Yoon, S. H., Lee, E. D., Heo, K. S., Jung, J. C. and Shin, K. B., 2005, "Evaluation of Mode II Interlaminar Fracture Toughness for Carbon Fabric/Epoxy Composites for Tilting Train Carbody," *The Korean Society for Railway*, Vol. 8, No. 2, pp. 195~201.
- (8) Lee, T. S. and Choi, Y. G., 1995, "A Study on the Influence of Fiber Orientation on the Mode I Interlaminar Fracture Behavior of Carbon/Epoxy Composite Materials," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng.*, Vol. 19, No. 2, pp. 391~401.
- (9) Pereira, A. B., de Moraes, A. B., Marques, A. T. and de Castro, P.T., 2004, "Mode II Interlaminar Fracture of Carbon/Epoxy Multidirectional Laminates," *Composites Science and Technology*, Vol. 64, pp. 1653~1659.
- (10) ASTM International, 2007, "Standard Test Method for Mode I Interlaminar Fracture Toughness of Unidirectional Fiber-Reinforced Polymer Matrix Composites," ASTM D5528.
- (11) ASTM International, 2006, "Standard Test Method for Mixed Mode I-Mode II Interlaminar Fracture Toughness of Unidirectional Fiber Reinforced Polymer Matrix Composites," ASTM D6671/D6671M.
- (12) James, R. R. and John. Jr, C. R., 1990, "Mixed-Mode Bending Method for Delamination Testing," *AIAA Journal*, Vol. 28, No. 7, pp. 1270~1276.
- (13) Im, J. M., Shin, K. B. and Hwang, T. K., 2013, "Evaluation of Mechanical Properties of Carbon/Epoxy Composites under Low and High Temperature," *Spring Conference of The Korean Society for Composite Materials*, pp. 112~113.
- (14) Ozdil, F., Carlsson, L. A. and Davies, P., 1998, "Beam Analysis of Angle-Ply Laminate End-Notched Flexure Specimens," *Composites Science and Technology*, Vol. 58, pp. 1929~1938.