

<논 문> SAE NO. 96370086

흑연/에폭시 복합재료의 혼합모우드 층간분리 해석

Analysis of Mixed Mode Delamination in Graphite/Epoxy Composite

염	영	진*	유	희**
Y.	J.	Yum,	H.	You

ABSTRACT

DCB(pure mode I) and CLS(mixed mode) tests were performed to investigate the effect of fracture mode on the interlaminar fracture of composite laminate. Mode I critical strain energy release rate was found to be 133J/m² from the DCB test and total strain energy release rate decreased from 1,270J/m² to 549J/m² as thickness ratio(tl/t) varied from 0.333 to 0.667 from the CLS test. Crack length had no effect on the total strain energy release rate and load was almost constant during the crack growth of the specimen which had the specific thickness ratio. Crack initiated when the stress of the strap ply reached constant stress 42kgf/mm² which was found to be independent of the thickness ratio.

주요기술용어 : Interlaminar Fracture(층간파괴), Delamination(층간분리), Strain Energy Release Rate(변형에너지방출율), Mixed Mode Fracture(혼합모우드파괴)

1. 서 론

섬유강화 복합재료는 등방성 재료에서 볼 수 없었던 특이한 파괴 양상을 보여준다. 그 중 하나는 적층판의 층과 층 사이에 생긴 결합이 진전할 때 생기는 층간 분리현상이다. 층간분리의 원인으로서는 적층판 제작시 적절치 못한 경화로 인한 수지 분포의 불균일 또는 적층판에 작용하는

층간응력이나 충격하중에 의한 손상 등이 있다. 그 결과로 층간분리가 진행됨에 따라 점차적으로 강성 및 강도가 저하되어 결과적으로 적층판의 파손에 이르게 된다. 층간 분리시 층간 파괴인성치는 매우 낮기 때문에 복합재료로 이루어진 구조물의 안정성에 지대한 영향을 미치므로 이에 따라 층간 분리현상에 대한 연구가 필요하다.

복합적층판의 층간 파괴인성치를 측정하는 것은 적층판 내부에 인위적으로 균열을 발생시킬 수 있는 등 시편 제작이 용이한 쌍외팔보(Double Cantilever Beam : DCB), End Notched

* 정회원, 울산대학교 기계공학과

** 울산대학교 대학원 기계공학과

Flexure(ENF) 및 Cracked Lap Shear(CLS) 시편을 이용한 파괴실험을 통하여 많은 연구^{1)~14)}가 이루어지고 있고 실험 결과에 대한 해석방법으로는 단순선형보 이론, 면적법, 일반계적법 및 유한요소법 등이 있다. 복합재료의 층간분리 현상을 규명하기 위한 여러 가지 시험 중 쌍외팔보 시편을 이용한 연구가 가장 많이 수행되어 왔다. 그러나 이 시험은 파괴양상이 세 가지 파괴 모드 중 모드 I 에 국한되어 있어서 실제 구조물의 파괴가 혼합모우드인 점을 감안하면 모드 II, III까지 포함하는 층간분리 해석이 병행되어야 한다. 이러한 관점에서 볼 때 복합재료로 만든 CLS 시편과 ENF 시편은 모드 I 과 II 파괴양상이 동시에 나타나는 혼합모우드 실험을 할 수 있어 복합재료의 층간분리 현상을 규명하는데 있어서 대단히 유용하다. CLS 시편에 대한 기존 연구를 살펴보면 Wilkins 등¹⁾은 흑연/에폭시 복합재료의 모드 I 과 혼합 모드 정적, 피로실험을 하고 3차원 유한요소법을 사용하여 해석한 결과 모드 I 의 경우 피로하중이 정적 임계하중에 도달해야만 균열진전이 생기고 Model II 의 경우는 전단이 균열진전에 중요한 역할을 한다는 것을 보였다. Rankumar와 Whitcomb²⁾은 T300/5028 흑연/에폭시 쌍외팔보시편을 이용하여 모드 I 실험을 하였고 Cracked Lap Shear 시편을 이용하여 혼합 모드 실험을 하였다. 실험 결과를 기하학적 비선형 유한요소 해석에 적용하여 변형에너지 방출율의 모드 I 과 모드 II 성분을 분리한 후 파괴조건식에 대입하여 임계 변형에너지방출율을 구하였다. 그러나 한 종류의 CLS 시편만 실험하였으므로 G_I/G_{II} 의 비가 고정되어 파괴조건식에서 얻어진 G_{IIc} 값을 모드 II에서의 파괴인성치로 간주하기에는 무리가 있다. Whitney³⁾는 기존 해석방법과 달리 횡단변형을 고려한 고차평판이론을 사용하여 쌍외팔보 시편의 변형에너지 방출율에 미치는 시편 형상의 영향과 균열근처의 층간수직응력에 대한 수치해석을 하였다. 또한 층간분리강도 해석의 파괴역학적인 다른 방법으로 평균응력조건식에 대하여도 고찰하였다. Rybicki 등⁴⁾은 흑연/에폭시 시편의 모드 I, 혼합모우드 실험을

하고 유한요소법으로 수치해석을 하여 변형에너지 방출율의 모드 II 성분은 균열진전에 거의 영향을 미치지 않고 모드 I 성분이 중요한 역할을 한다는 것을 보였는데 이는 충분한 실험 결과가 뒷받침되었다고 볼 수 없다.

한편 Rankumar²⁾는 유한요소 해석결과 모드 I 의 변형에너지방출율과 모드 II 의 변형에너지방출율비는 균열길이에겐 무관하고 하중이 증가함에 따라서는 증가한다고 하였으며 Rybicki⁴⁾는 균열길이에 따라 총변형에너지 방출율이 변한다고 하였다.

이상과 같이 복합적응판의 혼합모우드 파괴현상을 규명할 수 있는 CLS 시편 실험에 대한 연구는 여러 연구자에 의해 수행되어 왔으나 한 가지 두께비를 갖는 시편에 대한 실험만 실시하는 등 충분한 실험결과가 뒷받침하고 있지 못하다. 또한 실험 결과의 경향이 반대인 경우도 있어서 여러 가지 두께비를 갖는 다양한 CLS 시편 실험이 필요하다고 볼 수 있다.

따라서 본 연구에서는 흑연/에폭시 쌍외팔보 시편을 만들어 순수 모드 I 실험을 하여 모드 I 파괴인성치를 구하고 시편 총두께에 대한 상부(Shear Ply)와 하부(Strap Ply)의 두께비가 다른 다양한 CLS 시편을 만들어 혼합모우드 파괴실험을 하여 총변형에너지 방출율을 구한 후 이 값들이 균열 길이에 어떠한 관계가 있는지를 알아보려고 한다. 또한 CLS 시편의 두께비가 다른 경우 균열시발점이 되는 경계의 기준이 무엇인지 확인하려고 한다.

2. 시 험

2.1 시편제작

2.1.1 쌍외팔보 시편(DCB specimen)

선경인더스트리사의 흑연/에폭시 프리프레그를 가로 300mm, 세로 250mm로 제단한 후 일 방향으로 12겹 적층하고 80mm 깊이까지 테프론 필름을 삽입한 후 다시 12겹을 적층하여 시편 중앙에 인위적인 초기균열을 만들었다. 총 24겹 프리프레그를 오토클레이브(autoclave)에서 주어진 Fig.1과 같은 경화 사이클에 따라 경

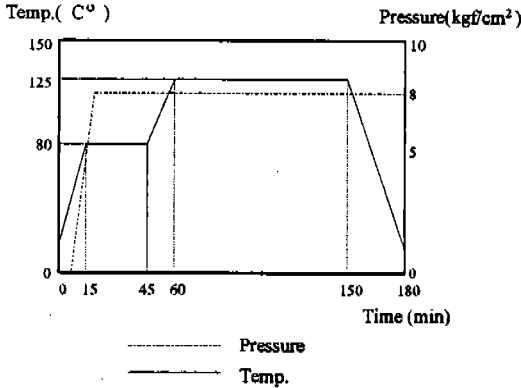


Fig.1 Curing cycle for graphite/epoxy specimen

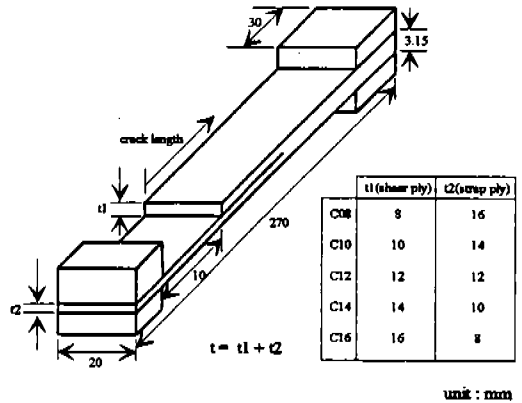


Fig.3 Geometry of cracked lap shear specimen

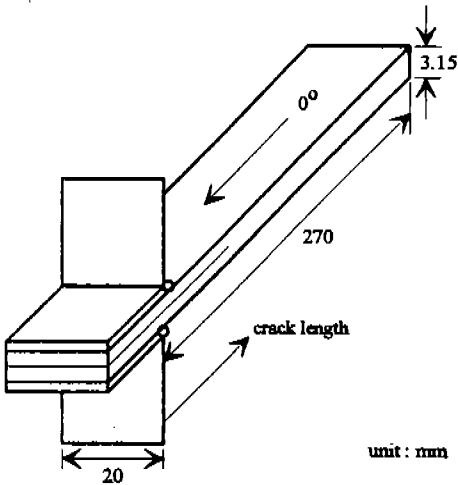


Fig.2 Geometry of double cantilever beam specimen

화하고 3.15mm 두께로 된 적층판을 섬유방향인 시편의 길이 방향이 되도록 다이아몬드 커터로 절단하여 길이 300mm, 두께 3.15mm, 폭 20mm의 쌍외팔보 시편을 제작하였다. 굽힘모우멘트가 발생하지 않도록 시편 상하면에 접착제로 한지탐을 붙이고 하중 증가에 따른 균열 진전길이를 측정하기 위하여 시편 옆면 즉 균열이 진전하는 부위에 흰색 수정액으로 코팅을 하고 5mm 간격으로 눈금을 표시하였다. 시편의 형상은 Fig.2에 나와 있다. 한지탐으로부터 시편의 총길이는

270mm이고 초기균열을 만들기 위하여 삽입된 테프론 테이프까지의 길이는 50mm이다. 균열길이는 한지탐에 하중이 가하여지는 부분부터이다.

2.1.2 Cracked Lap Shear Specimen 시편

CLS 시편의 제작방법은 쌍외팔보 시편의 경우와 같으나 모우드 I 과 II 성분의 비율 여러 가지로 하기 위하여 초기균열을 만들기 위한 테프론 필름의 삽입 위치를 변화시켰다. 즉 쌍외팔보 시편에서는 전체 24겹 중 12번 재와 13번 재 층 사이에 테프론 필름을 삽입하여 상하 대칭 시편을 만들었지만 CLS 시편 제작시에는 8-9, 10-11, 12-13, 14-15, 16-17 층들 사이에 삽입하여 다양한 혼합모우드비가 발생하도록 하였다. 쌍외팔보 시편과 동일한 경화 사이클을 거쳐 제작된 적층판을 다이아몬드 커터기로 길이 270mm, 총두께 3.15mm, 폭 20mm로 가공한 후 테프론 테이프가 삽입되어 있는 끝 부분부터 40mm까지 상부 부분만 절단하여 CLS시편을 제작하였다. 이 때에도 섬유방향인 시편의 길이 방향이 되도록 하였다. 쌍외팔보 시편과 마찬가지로 하중 증가에 따른 균열 진전길이를 측정하기 위하여 시편 옆면 즉 균열이 진전하는 부위에 흰색 수정액으로 코팅을 하고 5mm 간격으로 눈금을 표시하였다. 각 시편의 이름은 상부층 (shear ply) 수로 구별을 하였다. 즉 C08시편은 상부층이 8겹이고 하부층(strap ply)이 16겹이며 C16시편은 상부층이 16겹 하부층이 8겹인

시편이다. 완성된 시편의 형상은 Fig.3에 나와 있다.

2.2 시 험

2.2.1 쌍외팔보 시험

시험은 전기유압식 재료시험기 MTS 819에서 변위 제어 모우드로 크로스헤드 속도를 1mm/min으로 수행하였다. 지그에 시편을 장착할 때 시편의 자중에 의한 처짐을 방지하기 위하여 무게는 거의 무시할 수 있을 정도의 마분지로 힌지 지그를 만들어 시편과 함께 장착하였다. 테프론 필름을 사용하여 만든 인위적인 균열 끝단은 수지과다(resin rich) 지역으로 완전히 날카로운 균열로 볼 수 없으므로 본 시험에 들어가기 전에 초기하중을 가하여 10mm 이상되는 초기균열을 생성시켰다. 시험중 하중과 변위는 상용프로그램인 GLOBAL LAB과 A/D 변환기를 이용하여 데이터를 수집하였으며 균열진전 길이는 가시적으로 파악할 수 있기 때문에 균열길이가 10mm 증가할 때마다 전압차를 표시할 수 있는 전기 회로를 구성하여 하중과 변위 데이터에 연속적으로 기록되게 하였다.

2.2.2 Cracked Lap Shear 시편 시험

CLS 시편의 인장시험시 시편을 지그에 장착할 때 정확한 수평이 이루어지지 않으면 시편의 양쪽 끝단 부위의 균열진전이 다르게 나타나기 때문에 이를 특히 주의하였다. CLS시편은 균열진전 속도가 쌍외팔보 시편에 비해 상대적으로 빠를 뿐만 아니라 시편의 적층 상태에 따라서도 상이한 차이를 보인다. C08, C10, C12시편에서는 크로스헤드 속도를 0.01mm/min으로 하여 균열진전 길이를 10mm마다 가시적으로 측정할 수 있어 쌍외팔보시편과 마찬가지로 한 시편에 대해서도 여러 가지 균열진전 길이에 대한 하중과 변위를 구할 수 있었으나 C14, C16시편은 균열진전 속도가 너무 빨라 균열진전 길이를 가시적으로 측정할 수가 없었다. 따라서 C14, C16시편에서는 각각의 시편들에 대해 초기 균열길이가 다른 시편들을 7개 이상 제작하여 시험을 수행하여 균열길이에 따른 하중과 변위를 구하였다.

3. 결과 및 토론

쌍외팔보 시험으로부터 얻은 대표적인 하중-변위선도가 Fig.4에 나와 있다. 균열길이가 50mm일 때부터 10mm 증가할 때마다 하중부과-하중제거를 반복하여 총 균열길이가 90mm일 때까지 시험을 수행하였다. 하중을 증가시켜서 균열진전이 시작될 때까지의 하중-변위선도는 거의 선형에 가까웠다. 균열진전 길이에 대한 컴플라이언스 변화(Fig.5)를 보면 균열길이가 증가함에 따라 컴플라이언스가 급격히 증가함을 알 수 있다. 이 결과로부터 변형에너지 방출율을 구하기 위하여 다음과 같은 컴플라이언스법을 사용하였다.

$$G_{IC} = (P_c^2 / 2w) (dC / da)$$

여기서 w 는 시편의 폭, P_c 는 균열이 진전할 때의 임계하중, C 는 컴플라이언스, a 는 균열길이를 나타낸다. 이 식에서 구한 순수 모우드 I 상태의 임계변형에너지방출율 G_{IC} 는 133J/m²로서 참고문헌 [2]의 102.6J/m², [4]의 137.9J/m²와 비슷한 크기를 나타내었다. 순수 모우드 I 파괴인성치 G_{IC} 값은 혼합모우드 상태에서의 모우드 I 성분 G_c 의 값보다는 항상 커야하므로

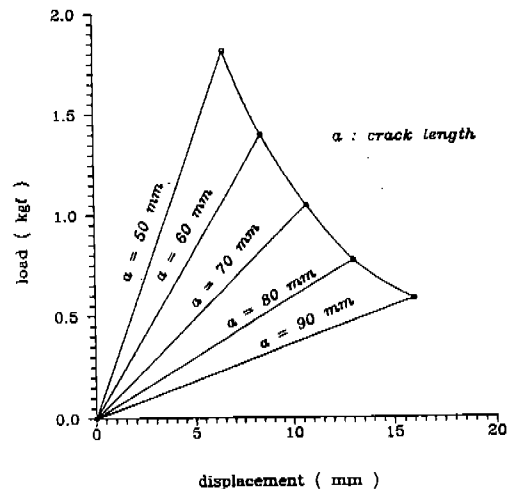


Fig.4 Load-displacement graph for DCB specimen

CLS시험에서 얻은 총변형에너지방출을 G_c 중에서 모우드 II 성분이 어느 정도인지 판단하는 기준이 될 수 있다.

CLS시험을 한 C12 시편에 대한 하중-변위 선도가 Fig.6에 나와 있다. 쌍외팔보시험과 마찬가지로 균열길이가 30mm 일 때부터 10mm 진전할 때마다의 하중부과-하중제거를 반복한 결과를 나타내는 것으로서 각 균열길이에서의 변위 차이는 극히 작지만 균열진전시까지는 거의 선형에 가까움을 알 수 있다. 또한 균열길이가 증가함에 따라 하중-변위선도의 기울기는 감소하지만 균열진전시의 하중변화는 거의 없음을 알 수 있다. 이러한 현상은 다른 종류의 시편에서도 동일하게 관찰할 수 있었고 참고문헌[2]의 실험결과도 같은 경향을 보여준다.

CLS시험에서의 컴플라이언스는 쌍외팔보 시험에서 보다 상당히 낮은 값을 보였으며 두께비가 증가할수록 컴플라이언스 변화량이 큼을 알 수 있다(Fig.7). 여기서 두께비는 Shear Ply의 두께 t 과 전체 적층판의 두께 t_w 와의 비를 나타낸다. 각 시편의 균열길이에 대한 폭을 고려한 컴플라이언스 변화량 즉 $(1/2w)(dC/da)$ 는 거의 선형에 가까웠으며 최소자승법으로 선형화한 결과 C16일 때 7.71437E-8, C08일 때 3.

65907E-8 $1/kgf \cdot mm$ 이었다. 또한 두께비가 증가할수록 균열길이에 대한 컴플라이언스는 증가하였다. 이러한 경향으로부터 모우드 I 과 모우드 II의 혼합비(mixed mode ratio)가 변화하는 것을 알 수 있다. Fig.8은 두께비에 대한 하중의 변화량을 나타낸 것이다. 이 그림에서 한 두께비에 대하여 여러 개의 점들이 있는 것은 여러 가

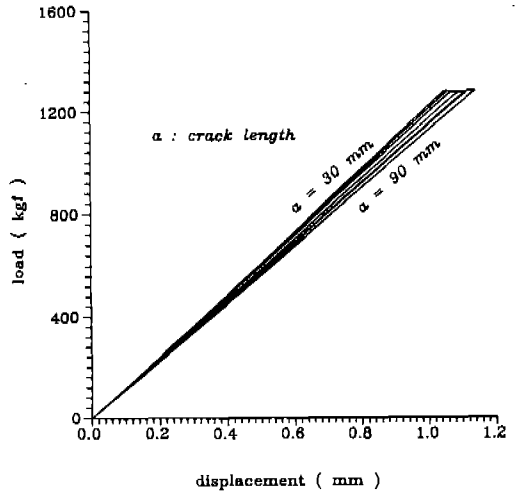


Fig.6 Load-displacement graph for CLS specimen

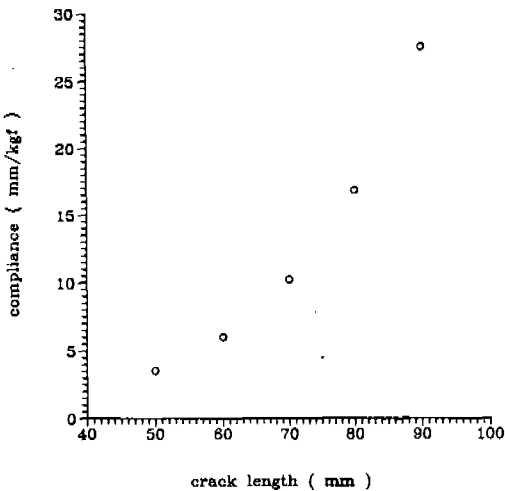


Fig.5 Compliance variation for crack length of DCB specimen

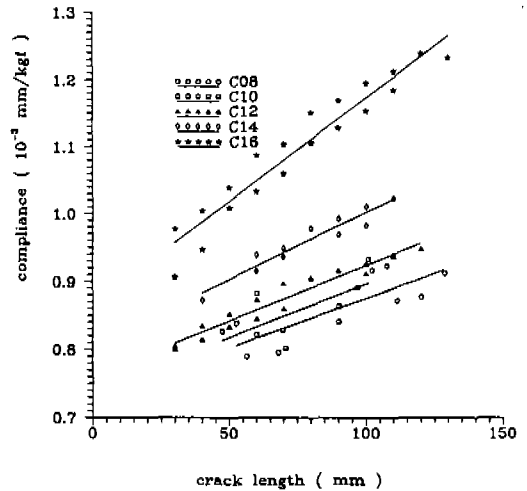


Fig.7 Compliance vs. crack length for each CLS specimen

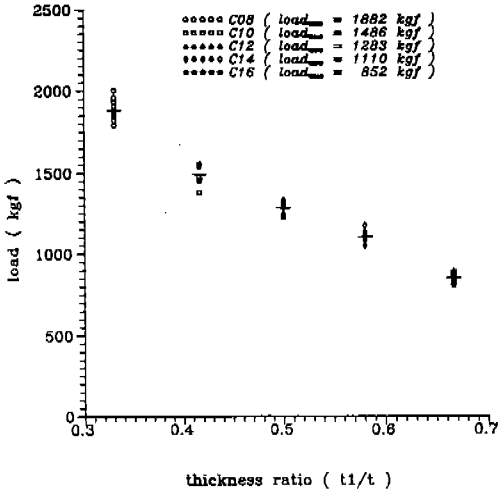


Fig.8 Load variation for thickness ratio of CLS specimen

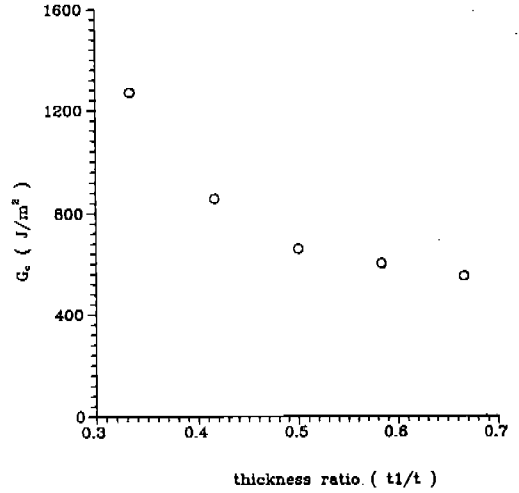


Fig.10 G_c variation for thickness ratio of CLS specimen

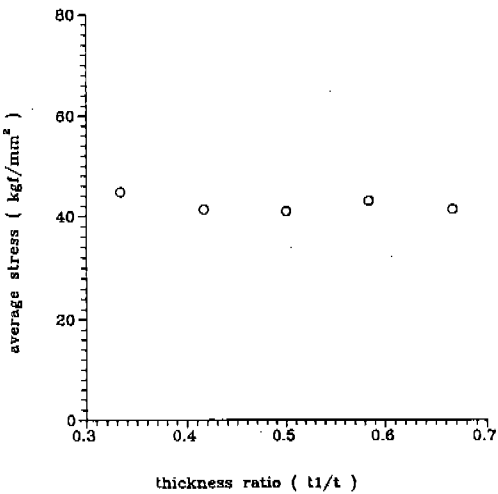


Fig.9 Stress variation for thickness ratio of CLS specimen

Table 1 Average tension test data of CLS specimens.

specimen name	thickness ratio (t1/t)	average stress (kgf/mm ²)	average G_c (J/m ²)
C08	.333	44.8	1,270
C10	.417	41.3	857
C12	.500	40.9	658
C14	.583	43.0	600
C16	.667	41.3	549

지 균열길이를 갖는 시편 각각의 임계하중값을 나타내고 데이터점 사이의 짧은 실선은 평균하중값을 나타낸다. 이 결과로부터 두께비가 일정한 시편들의 경우 균열길이와 관계없이 임계하중이 거의 일정함을 알 수 있다. 또한 두께비가 증가할수록 하중이 감소함을 보여주고 있다. 이 그림으로부터 얻은 각 두께비에서의 평균임계하중을

하부층(Strap Ply)의 단면적으로 용력을 구하면 Fig.9와 Table 1과 같이 되는데 최소 40.9kg/mm²에서 최대 44.8kg/mm²로 두께비에 대한 영향을 거의 받지않고 있음을 알 수 있다. 따라서 시편이 두께비가 다르게 제작되었다 할지라도 한 시편만을 시험해 봄으로써 다른 시편들에 대한 균열진전 시발점을 예측할 수 있다는 결론을 얻을 수 있었다. 즉 CLS시편과 같은 형태를 갖는 같은 재료에서는 두께비가 다르더라도 파손은 임계용력에 좌우됨을 알 수 있다.

하중-변위선도가 거의 직선에 가까우므로 층변형에너지방출율은 컴플라이언스법을 사용하여

구하였는데 그 결과는 Fig.10과 Table 1에 두께비에 대한 총변형에너지방출율로 나와 있다. 총변형에너지방출율은 두께비가 0.5를 기준으로 하여 0.5 이상일 때는 변화가 그리 심하지 않았으나 0.5 이하인 경우는 급격히 변함을 알 수 있다. 이와 같은 경향은 다른 문헌[14]에서도 찾아볼 수 있는데 두께비가 0.5이하가 되면 혼합모우드 상태에서 모우드 II 성분이 급격히 증가함으로써 나타나는 결과로 사료된다. 일반적으로 순수 모우드 I 상태의 파괴인성치는 순수 모우드 II 상태의 파괴인성치보다 현저히 낮은 값을 갖는다고 알려져 있다. 또한 쌍외팔보 시험에서 구한 순수모우드 I 파괴인성치가 133 J/m^2 로서 혼합모우드 상태에서의 변형에너지방출율의 모우드 I 성분이 이 값보다 작은 점을 고려하면 순수모우드 II일 때의 파괴인성치 G_{IC} 는 최소 $1,137 \text{ J/m}^2$ 이상으로 G_{IC} 의 8배 이상이 될 것으로 판단된다.

이상의 결과로부터 혼합모우드 상태에서의 총변형에너지방출율은 쌍외팔보 시험으로부터 구한 순수모우드 I 임계에너지 방출율보다는 훨씬 큼을 알 수 있었고 본 시험 형태에서는 모우드 II 성분이 주로 파손에 영향을 미침을 확인하였다. 혼합모우드 상태에서 모우드 I 성분과 모우드 II 성분을 분리하기 위해서는 두께비가 매우 큰 경우와 작은 경우로 시편을 제작하여 시험하여야 하는데 이런 경우 시편의 상태에 매우 민감할 뿐만 아니라 시험의 어려움으로 인하여 결과의 신뢰성이 결여되어 본 연구에서는 수행하지 않았다.

4. 결 론

복합적층판의 층간파괴인성을 측정하기 위하여 쌍외팔보 시험과 CLS 시험을 병행하였다. 순수 모우드 I 상태의 임계변형에너지 방출율은 쌍외팔보 시험을 통해서 구하였으며 혼합모우드 상태의 총 변형에너지 방출율은 CLS 시험을 통하여 구하였다. CLS 시험결과 총 변형에너지방출율 중 모우드 II 성분이 지배적임을 알 수 있었다. 총변형에너지 방출율은 두께비(t_l/t)가 0.

333에서 0.667까지 변환에 따라 $1,270 \text{ J/m}^2$ 에서 549 J/m^2 까지 감소하였다. 총 변형에너지 방출율은 균열길이에는 무관하고, 균열이 진전되는 동안 하중은 거의 일정하였다. 또한 균열진전 시 발점은 하부층이 일정 응력 약 42 kgf/mm^2 일 때이며 두께비에는 무관함을 알 수 있었다.

후 기

“이 논문은 1994년도 한국학술진흥재단의 공모과제 연구비에 의하여 연구되었음”

참 고 문 헌

1. Wilkins, D. J., J. R. Eisenmann, R. A. Camin, W. S. Margolis and R. A. Benson, "Characterizing Delamination Growth in Graphite/Epoxy", ASTM STP 775, pp. 168~183, 1982.
2. Rankumar, R. L. and J. D. Whitcomb, "Characterization of Mode I and Mixed-Mode Delamination Growth in T300/5208 Graphite/Epoxy", ASTM STP 876, pp. 315~335, 1985.
3. Whitney, J. M., "Stress Analysis of the Double Cantilever Beam Specimen", Composites Science and Technology, Vol. 23, pp. 201~219, 1985.
4. Rybicki, E. F., T. D. Hernandez, J. E. Deibler, R. C. Knight and S. S. Vison, "Mode I and Mixed Mode Energy Release Rate Values for Delamination of Graphite/Epoxy Test Specimens", J. of Composite Materials, Vol. 21, pp. 105~123, 1987.
5. Williams, J. G., "Large Displacement and End Block Effects in the 'DCB' Interlaminar Test in Modes I and II", J. of Composite Materials, Vol. 21, pp. 330~347, 1987.
6. El-Zein, M. S. and K. L. Reifsnider, "Evaluation of G_{IC} of a DCB Specimen

- Using an Anisotropic Solution”, J. of Composites Technology and Research, Vol. 10, No. 4, pp. 151~155, 1988.
7. Hwang, W. and K. S. Han, “Interlaminar Fracture Behavior and Fiber Bridging of Glass-Epoxy Composite Under Mode I Static and Cyclic Loadings”, J. of Composite Materials, Vol. 23, pp. 396~430, 1989.
 8. Hunston, D. L. and W. D. Bascom, “Effects of Lay-up, Temperature, and Loading Rate in Double Cantilever Beam Tests of Interlaminar Crack Growth”, Composites Technology and Review, Vol. 5, pp. 118~119, 1983.
 9. Aliyu, A. A. and I. M. Daniel, “Effects of Strain Rate on Delamination Fracture Toughness of Graphite/Epoxy”, ASTM STP 876, pp. 336~348, 1985.
 10. Mall. S., G. E. Law and M. Katouzian, “Loading Rate Effect on Interlaminar Fracture Toughness of a Thermoplastic Composite”, J. of Composite Materials, Vol. 21, pp. 569~579, 1987.
 11. Smiley, A. J. and R. B. Pipes, “Rate Effects on Mode I Interlaminar Fracture Toughness in Composite Materials”, J. of Composite Materials, Vol. 21, pp. 670~687, 1987.
 12. 심재열, “ENF 실험을 이용한 탄소섬유강화 복합적층판의 층간전단 파괴인성치 특성”, 석사학위논문, 한국과학기술원, 1988.
 13. 심재열, 홍창선, “유한요소법에 의한 수정된 ENF 시험편의 에너지방출을 해석”, 한국복합재료학회지, 제5권, 제1호, pp. 16~26, 1992.
 14. 김형준, “복합재료의 혼합모우드 층간파괴인성치의 실험적 평가”, 석사학위논문, 한국과학기술원, 1989.