

論文

복합재 적층구조물의 층간분리좌굴과 성장에 대한 실험 연구

경우민* · 김천곤**

An Experimental Study of Delamination Buckling and Growth of Composite Laminated Structures

W.M. Kyoung* and C.G. Kim**

ABSTRACT

The experiments are done for the buckling load and the growth characteristics of graphite/epoxy unidirectional specimens with through-the-width delamination. The influence of geometric configurations, that is, the length and the thickness of upper part of delamination, on the buckling of beam-plate is considered by means of the six different specimens with various delamination configuration and one perfect specimen. Experimental results show good agreement with analytical solutions in the associated paper. In the postbuckling state, the buckling mode and the growth characteristics depending on delamination configuration are also discussed.

초 록

폭방향으로 관통된 층간분리가 있는 graphite/epoxy 일방향 시편에 대해 좌굴하중과 층간분리 성장특성을 관찰하는 실험을 수행했다. 층간분리의 길이와 층간분리위층의 두께가 다른 여섯개의 시편과 층간분리가 없는 시편을 통해 기하학적 조건이 미치는 영향을 살펴보았다. 그리고 실험결과를 관련된 해석과 비교했고, 실험결과는 해석결과와 잘 일치했다. 또 좌굴후 거동에서 층간분리에 따른 좌굴모드의 변화와 층간분리 성장특성을 관찰했다.

기 호

L : 시편의 길이	α : 층간분리층의 상대적 세장비($=\bar{a}/\bar{h}$)
H : 시편의 두께	k : 전단보정계수
a : 층간분리의 길이	s : 전단변형계수
h : 층간분리층의 두께방향 위치	E_x : Young's modulus
\bar{h} : 층간분리층의 두께비 ($=h/H$)	G_{xy} : 전단 강성
\bar{a} : 층간분리층의 길이비 ($=a/L$)	ν_{xy}, ν_{zx} : 포와송비

* 한국과학기술원 항공우주공학과 대학원

** 정희원, 한국과학기술원 항공우주공학과

1. 서 론

섬유강화 복합재료는 최근 구조물의 경량화 추세에 따라 항공기 등에 많이 사용되고 있다. 그러나 여러가지 독특한 성질로 인해 기존의 재료와는 다른 특이한 파손 및 파괴 형태를 나타낸다. 그중에서도 층간분리(delamination)는 복합재 적층구조물에서 가장 흔히 발생하는 파손형태로, 이에 대해 많은 연구가 수행되어왔다. 이는 층간분리가 구조물에 발생하면 상용 하중에서도 국부적인 좌굴이 일어나고 층간분리가 성장함으로써 구조물의 안정성을 크게 해치기 때문이다. 따라서 복합재 적층구조물에 층간분리가 존재할 때 좌굴거동을 해석하는 많은 연구가 이루어지고 있다.

그러나 이러한 해석은 대부분 해석적 방법이나 유한요소법 등을 통해 좌굴하중을 예측하는데 중점을 두었고, 층간분리가 있는 구조물에 대한 전체적인 거동과 성장 특성을 이해하는데 필요한 실험적인 연구는 부족한 상태이다. 실험적인 연구는 Wang[1] 등이 SMC-R50 복합재 보-평판에 대한 좌굴하중을 측정했고, Tracy[2] 등은 AS4/3501-6 복합재의 $[(90/\pm 45/0)_2]_S$ 준등방성 시편에 대해 고차 좌굴하중을 측정했다. Kardomateas[3]는 Kevlar49/epoxy 일방향 시편에 대해 좌굴후 거동과 층간분리 성장을 관찰하고 기하학적 특성과의 관계를 연구했다. Viccini[4] 등은 알루미늄 하니컴 심재와 AS4/3501-6의 $[0/\pm 60]_S$ 적층구조 면재를 갖는 샌드위치보에 일차원 층간분리가 있을 때 에지레플리카와 스트레인 게이지를 이용해서 좌굴하중과 층간분리 성장을 관찰했다.

본 연구에서는 층간분리가 있는 graphite/epoxy 일방향 시편을 이용해서 좌굴하중을 측정하고 좌굴후 거동에서 좌굴형상과 층간분리 성장을 관찰했다. 이때 층간분리의 길이와 깊이가 다른 여섯가지 시편과 층간분리가 없는 시편을 제작해서 좌굴하중, 좌굴형상, 층간분리 성장과 층간분리의 기하학적 특성과의 관계를 관찰했다. 그리고 실험결과를 관련된 해석 결과[5]와 비교해서 해석의 유효성을 검증했다.

2. 시편제작

층간분리가 있는 시편을 이용해서 좌굴하중을 측정하고 층간분리 성장을 살피는 실험을 한다. 실험에서 사용한 시편은 (주)한국카아본 제품인 graphite/epoxy 프리프레그로 제작하였고 재료상수는 표 1과 같다. 한 층의 두께는 0.125mm로 모두 16층을 0°

Table 1. Material properties of laminate.

pregreg	E_1 [GPa]	E_2 [GPa]	G_{12} [GPa]	ν_{13}
Graphite/Epoxy	135.4	9.6	4.8	0.31

방향으로 적층했고, 그림 1에 나타난 성형사이클을 따라 성형하였다. 성형후 두께는 약 1.8mm였다. 층간분리를 시편에 미리 주기 위해 기하학적 조건에 따라 두께가 0.15mm인 테프론 필름(Teflon film)을 적층할때 넣어서 성형한다. 성형된 복합적층판에 두께가 1.0mm인 유리섬유/에폭시 탭을 FM-123

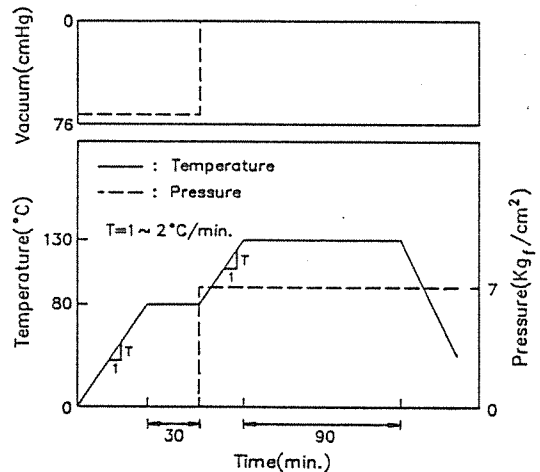


Fig. 1. Typical curing cycle for graphite/epoxy.

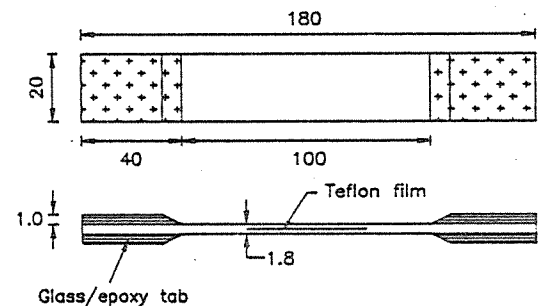


Fig. 2. Test specimen configuration.

접착제로 붙였다. 완성된 시편의 크기와 형상을 그림 2에 보였다.

시편의 기하학적 특성을 나타내기 위한 무차원 변수를 다음과 같이 정의한다.

$$\bar{a} = \frac{a}{L}, \quad \bar{h} = \frac{h}{H}, \quad \alpha = \frac{\bar{a}}{\bar{h}} \dots\dots\dots (1)$$

$$s = \frac{4\pi^2 D_1}{k G_{xy} H L^2} = \frac{\pi^2}{3(1-\nu_{xz} \nu_{zx})} \frac{E_x}{k G_{xy}} \left(\frac{H}{L} \right)^2 \dots\dots\dots (2)$$

\bar{a} 는 층간분리의 길이, \bar{h} 는 층간분리의 두께방향 위치를 나타내고, α 는 층간분리층의 상대적 세장비를 나타내는 변수로, 상대적으로 층간분리길이가 작고 표면에서 깊게 위치할수록 값이 작고, 층간분리층이 길고 표면에 가까이 나타날 수록 커진다. s 는 전단 변형계수로서 횡전단변형이 고려되는 정도를 나타낸다.

시편의 종류는 층간분리의 길이와 두께방향 위치에 따라 일곱가지로 변화시켜서 만들었다. 층간분리가 두께방향으로 가운데 있는 시편($\bar{h}=0.5$)과 층간분리층의 두께가 얇은 시편($\bar{h}=0.125$)에 대해 각각 층간분리 길이를 20mm($\bar{a}=0.2$), 50mm($\bar{a}=0.5$), 80mm($\bar{a}=0.8$)로 해서 여섯가지를, 그리고 층간분리가 없는 시편을 제작했다. 따라서 시편의 α 값은 0.6에서 6.4까지 변한다. $\bar{h}=0.5$ 인 시편은 여덟번째와 아홉번째층 사이에, $\bar{h}=0.125$ 인 시편은 두번째와 세번째층 사이에 테플론 필름을 삽입하여 제작했다.

3. 실험 방법

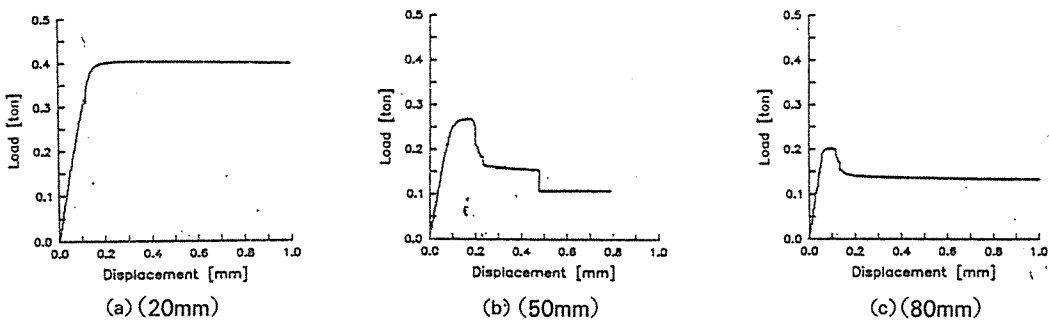


Fig. 3. Load-displacement curve for various delamination length ($\bar{h}=0.5$)

시편을 INSTRON(model 1350)에 Friction wedge grip으로 시편을 고정시키고 변위제어(0.2mm/min)로 하중을 가하면서 시편의 좌굴하중과 층간분리성장을 관찰하였다. 이때 하중과 변위를 X-Y 기록계와 A/D converter를 통해서 PC에 계속 기록했다.

$\bar{h}=0.5$ 인 시편은 좌굴하중이 크고, 전체좌굴모드(global buckling mode)로 좌굴이 일어나므로 하중-변위 선도를 통해서 좌굴하중을 결정할 수 있다. 층간분리성장은 일정한 시간간격과 하중변화에 따라 에지레플리카(edge replica)로 시편표면을 본떠내어 관찰했다. 그런데 $\bar{h}=0.125$ 인 시편은 하중을 가하면 매우 작은 하중 상태에서 층간분리 위층에만 좌굴이 일어나는, 국부좌굴모드(local buckling mode)로 좌굴이 일어나므로 하중-변위 선도로는 전혀 좌굴하중을 찾을 수 없다. 따라서 층간분리 위층에 스트레인 게이지를 부착해서 하중-변형을 선도를 얻어서 이를 통해 좌굴하중을 찾는다. 하중-변형을 선도를 얻기위해 스트레인 게이지에서 나오는 스트레인 신호를 증폭기(amplifier)로 증폭해서 INSTRON에서 나오는 하중과 함께 X-Y 기록계에 기록하고, 변위까지 모두 A/D Converter를 통해서 PC로 받아 데이터를 처리했다. 층간분리성장은 시편 측면에 종이자를 접착해서 하중을 가하면서 계속 층간분리성장을 측정했다.

4. 실험결과 및 분석

4-1. 좌굴하중과 좌굴모드

층간분리가 시편 두께방향으로 가운데에 위치할 때는 층간분리의 길이에 따라 그림 3과 같은 하중

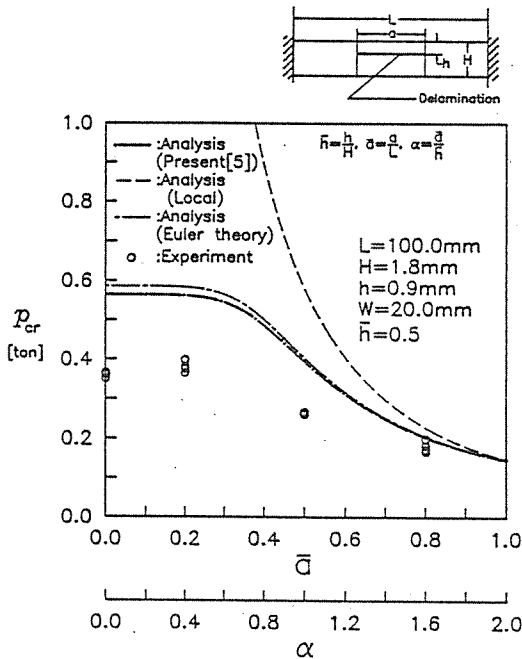


Fig. 4. Comparison of calculational and experimental results ($\bar{h}=0.5$).

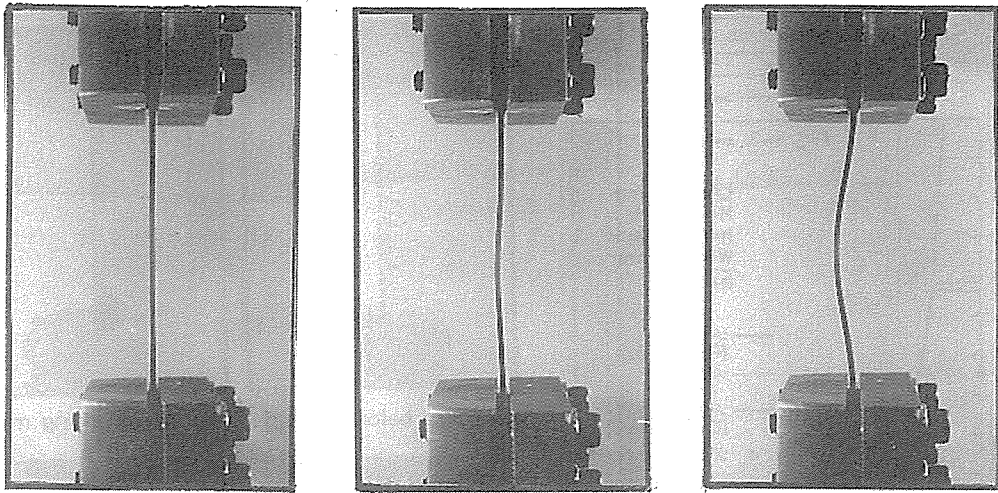
-변위 선도를 얻을 수 있다. 여기서 얻은 좌굴하중을 그림 4에 나타냈다. 그림 4에는 해석을 통해 얻은 전단변형을 고려한 좌굴하중과 층간분리 위층만의 국부좌굴하중을 함께 나타냈다. 각 시편에서 좌굴하중은 계산치에 비해 최고 약 30% 정도의 오차를 나타냈고, 오차는 층간분리가 길어질수록 줄어드는 경향을 나타냈다. 이 오차는 시편 양단에서 탭에 준 테이퍼때문에 양단이 완전히 고정단이 되지 못했고, 또 시편의 초기 결함, 치수오차, 그림때문에 생긴 초기 결함등으로 인한 것이다. 층간분리가 길어질수록 좌굴하중이 감소하는 경향은 계산결과와 잘 일치하고 있다. 이 시편의 경우 전단변형계수 s 가 약 0.0363이므로 전단변형의 효과가 그리 크지 않을 것이다. 실제 계산에서도 전단변형을 고려하면 전단변형을 고려하지 않은 Euler이론에 의한 경우에 비해 층간분리가 짧을때도 좌굴하중이 약 4% 정도 밖에 차이가 나지않고 층간분리가 길어지면 그 차이는 거의 사라진다.

계산결과에 따르면 실험시편의 좌굴하중은 층간

분리층만의 국부좌굴하중(층간분리의 위층에만 좌굴이 일어나는 하중으로 길이와 두께를 층간분리위층의 치수로 대입해서 층간분리가 없는 경우로 계산해서 얻은 하중)보다 작기때문에 모두 전체좌굴모드로 좌굴이 일어나야 한다. 따라서 좌굴모드는 층간분리가 없는 시편과 같은 형태로 나오게 된다. 그러나 층간분리가 긴 경우는 국부좌굴하중과 거의 비슷해지기 때문에 층간분리층에서만 국부좌굴이 일어날 수도 있다. 실험에서 Perfect 시편과 층간분리가 20mm, 50mm인 시편은 첫번째 모드의 좌굴형태로 층간분리 위층과 아래층이 한방향으로 휘어진 비대칭 좌굴을 나타냈고(그림 5a), 80mm인 시편은 비대칭좌굴이 일어났고, 층간분리 위, 아래층이 반대방향으로 휘어진 대칭좌굴이 일어난 경우도 있다(그림 5b).

$\bar{h}=0.125$ 인 시편에서 하중-변형률 선도를 통해서 얻은 좌굴하중을 그림 6에 나타냈다. 층간분리가 50mm, 80mm인 경우는 계산결과와 잘 일치했으나 20mm 시편은 큰 오차를 나타냈다. 이는 시편에 스트레인 게이지를 붙일때 시편 표면을 연마한 영향으로 층간분리 위층의 두께가 줄어들었기 때문에 생긴 오차이다. 현미경을 통해서 두께를 측정해서 계산한 결과 좌굴하중이 0.1207 ton으로 실험결과와 잘 일치하는 것을 알 수 있다. 층간분리위층이 길어지면(50mm, 80mm) 스트레인 게이지를 부착하는 부분의 비율이 상대적으로 작아지므로, 이러한 오차는 사라지게 된다.

이 시편은 층간분리 위층이 더 가늘어 졌기때문에 $\bar{h}=0.5$ 인 시편보다 전단변형의 효과가 크지 않을 것이다. 그림 6에서 보면 \bar{a} 가 0.2보다 커지면 전단변형을 고려한 해와 Euler 이론해가 일치하고 있다. 즉, 층간분리가 아주 짧은 구간에서만 전단변형의 효과가 나타나고 길어지면 전단변형의 효과가 급격하게 없어진다. 또한, 이 시편은 좌굴하중이 국부좌굴하중과 거의 일치하기 때문에 좌굴모드는 층간분리 위층에서 국부좌굴로 일어나게 된다. 실험에서 관찰한 결과 세 시편 모두 층간분리 위층에서 국부좌굴이 먼저 일어나고, 하중이 증가함에 따라 전체적인 좌굴이 함께 일어나는 혼합좌굴모드(mixed buckling mode)를 나타냈다(그림 7).

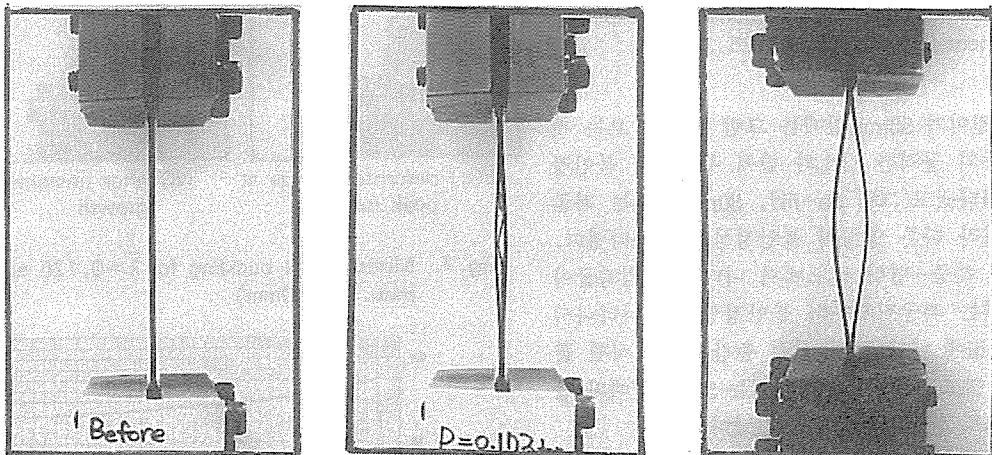


i. before loading

ii. at critical load

iii. after unstable growth

(a) unsymmetric mode ($a=50\text{mm}$)



i. before loading

ii. at critical load

iii. after unstable growth

(b) symmetric mode ($a=80\text{mm}$)

Fig.5. Buckling mode for $\bar{h}=0.5$ specimen.

4-2. 층간분리성장

관련된 해석[5]을 통해 층간분리의 위층이 짧고 두꺼운 경우(α 가 작을때)는 에너지 방출률이 커지지 않아 층간분리성장이 없을 것으로 예측했다. 실제로

$\alpha=0.4$ 인 시편($\bar{h}=0.5$, $\bar{a}=0.2$)은 층간분리성장이 나타나지 않았다.

나머지 시편은 모두 α 값이 1보다 큰 경우로, 층간분리가 하중에 따라 안정성장이나 불안정성장을 나타낼 것으로 예측했다. $\bar{h}=0.5$ 인 시편의 경우,

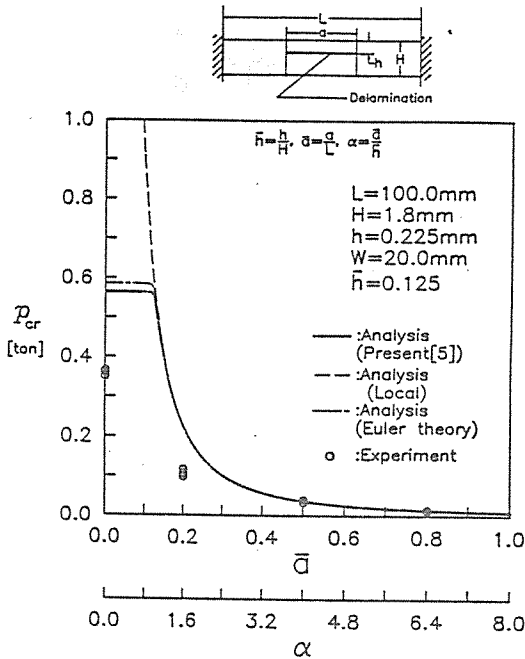


Fig. 6. Comparison of calculational and experimental results ($\bar{h}=0.125$).

층간분리길이가 50mm일때는 그림 3b에서 보는 것처럼 하중의 급격한 감소와 함께 두차례의 불안정 성장을 나타냈고(그림 5a-iii), 80mm일때는 좌굴 모드에 따라 다른 양상의 불안정 성장을 나타냈다. 그림 3c의 하중-변위 선도에서 나타낸 대칭좌굴이 일어날 때는 좌굴직후부터 불안정 성장이 나타나서 그림 5b-iii에 나타낸 것 처럼 층간분리가 시편 끝까지 성장했고, 비대칭좌굴 일때는 50mm일때와 같은 양상으로 불안정 성장이 나타났다.

$\bar{h}=0.125$ 인 시편은 층간분리가 20mm인 시편에서 불안정 성장을 나타냈다. 하중-변위선도(그림 8)에서 보는 것처럼 최고하중 이후 하중은 계속 일정하게 떨어지고, 이때 층간분리는 층간분리선단 양쪽을 번갈아가면서 성장했다. 그러나 층간분리가 50mm, 80mm인 시편에서는 층간분리가 아래와 위쪽으로 한꺼번에 시편 끝까지 전파하는 불안정 성장이 나타났다. 좌굴후 층간분리가 성장한 모습을 그림 7d에 나타냈다.

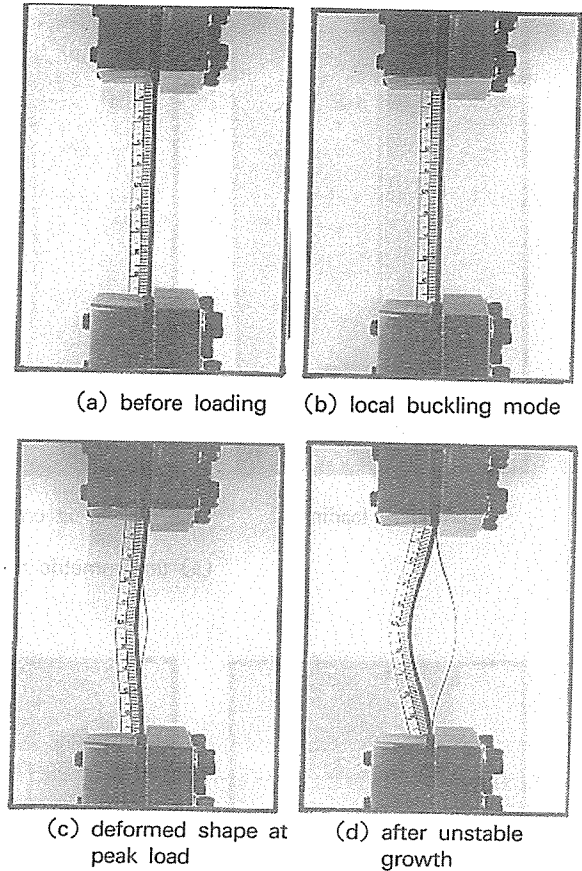


Fig. 7. Mixed mode buckling for $\bar{h}=0.125$ specimen. ($a=50\text{mm}$)

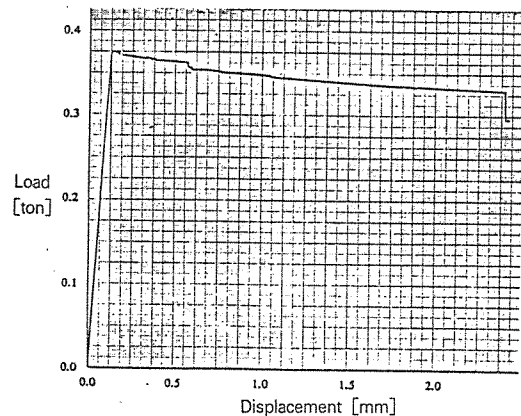


Fig. 8. Load-displacement curve for unstable growth specimen ($\bar{h}=0.125$, $\bar{a}=0.2$).

4. 결 론

층간분리가 폭방향으로 관통해서 존재하는 graphite/epoxy 일방향 적층보에 대해 좌굴하중을 측정하고, 좌굴후 거동에서 좌굴모드와 층간분리성장을 관찰하므로써 다음과 같은 결론을 내릴 수 있었다.

첫째로, 해석을 통해 얻은 좌굴하중과 층간분리의 형상과의 관계를 확인할 수 있었다. 층간분리가 짧고 두꺼울 수록 좌굴하중은 온전한 보의 좌굴하중에 가까웠고, 층간분리가 가늘고 길수록 좌굴하중은 작은 값을 나타냈다.

둘째로, 좌굴후 거동에서 좌굴모드는 층간분리의 형상에 따라 다르게 나타났다. 층간분리층이 짧고 두꺼운 경우는 층간분리가 없는 경우와 같은 형상으로 전체 좌굴모드로 좌굴이 일어났다. 반대로 층간분리층이 가늘고 길어지면 층간분리층에서 국부 좌굴이 먼저 일어났고 하중이 가해짐에 따라 전체 좌굴이 함께 일어나는 혼합좌굴모드로 좌굴이 진행되었다.

세째로, 좌굴후에 하중이 가해짐에 따라 층간분리성장이 일어나 시편이 완전히 파손되었다. 그러나 층간분리층이 짧고 두꺼운 경우는 성장이 일어나지 않았다.

네째로, 위와 같은 현상을 통해 층간분리가 어느 한계 이상으로 발생했을때만 구조물의 안정성에 영향을 나타낼 수 있었다.

본 실험에서는 기본적인 이해와 해석의 유효성을 검증하기 위해 일방향 적층 시편으로 실험을 수행했다. 그러나, 실제 층간분리는 각 층간의 강성이 방향에 따라 다르기 때문에 나타나는 현상으로, 본 실험으로 층간분리의 특징적인 현상을 묘사하기 어

려운 점이 있다. 따라서 적층각의 효과를 고려한 해석과 실험이 앞으로 수행되어야 하고, 해석에서 고려된 전단변형의 효과를 검증하기 위해서는 시편의 종류와 치수를 달리해서 실험을 계속해야 할 것이다. 그리고, 실험의 정밀성을 위해서 실험치구나 시편의 정밀성에 더욱 유의해야 할 것이다.

참 고 문 헌

1. Wang, S.S., Zahlan, N.M., and Suemasu, H., "Compressive Stability of Delaminated Random Short-Fiber Composites, Part II-Experimental and Analytical Results," *Journal of Composite Materials*, Vol.19, No.7, 1985, pp.317-333.
2. Tracy, J.J., and Pardoan, G.C., "The Effect of Delamination of the Fundamental and Higher Order Buckling Loads of Laminated Beams," *Journal of Composite Technology & Research*, Vol.11, No.3, Fall 1989, pp.87-93.
3. Kardomateas, G.A., "Postbuckling Characteristics in Delaminated Kevlar/Epoxy Laminates: An Experimental Study," *Journal of Composite Technology & Research*, Vol.12, No.2, Summer 1990, pp.85-90.
4. Vizzini, A.J., and Lagace, P.A., "An Elastic Foundation Model to Predict the Growth of Delaminations," *Journal of Composite Technology & Research*, Vol.11, No.3, Fall 1989, pp.81-86.
5. 경우민, 김천곤, "복합재 적층판의 층간분리 좌굴과 성장해석," 한국복합재료학회 '92년도 추계 학술대회 초록집, pp.177-181, 1992.