

탄소/에폭시 복합재판의 압축강도 두께효과에 대한 연구

공창덕*, 이정환**, C. Soutis**

Thickness Effect on the Compressive Strength of T800/924C Carbon Fibre-Epoxy Laminates

C. Kong, J. Lee and C. Soutis

Key words : Carbon fiber-epoxy laminate, Scaling methods, Fibre waviness, Thickness effect

Abstract

In this study, the effect of laminate thickness on the compressive behaviour of composite materials was investigated through systematic experimental work using the stacking sequences, $[0_4]_{ns}$, $[45/0/-45/90]_{ns}$ and $[45n/0n/-45n/90n]_s$ ($n = 2$ to 8). The stacking sequence effects on failure strength of multidirectional laminates were examined. For this purpose, two different scaling techniques were used; (1) ply-level technique $[45n/0n/-45n/90n]_s$ and (2) sublaminar level technique $[45/0/-45/90]_{ns}$. An apparent thickness effect existed in the lay-up with blocked plies, i.e. unidirectional specimens ($[0_4]_{ns}$) and ply-level scaled multidirectional specimens ($[45n/0n/-45n/90n]_s$). From the investigation of the stacking sequence effect, the strength values obtained from the sublaminar level scaled specimens were slightly higher than those obtained from the ply level scaled specimens. The measured failure strengths were compared with the predicted values

1. 서론

최근 압축하중을 받는 두꺼운 첨단 복합재 구조물에 대한 두께효과에 대하여 연구가 활발히 진행되고 있다. Camponeschi(1), Daniel(2), Soutis(3) 등이 신뢰성 있는 결과를 내기 어려운 압축성거동에 대한 두께 효과 연구를 하였다. 예를 들어 Camponeschi는 그의 실험에서 일방향적층판에서 두께 증가에 따라 압축강도가 35%까지 감소한다고 보고한바있다. 그러나 최근 이런 실험들은 두꺼운 복합재의 압축실험이 어렵고 복잡하기 때문에 정확한 압축특성을 보여주지 못하고 있다. 본 연구에는 연속보강섬유 복합

재판의 적층두께 증가에 따른 효과를 각적층방법에 따른, 즉 $[0_4]_{ns}$ (일방향적층기법), $[45/0/-45/90]_{ns}$ (서브라미네이트레벨기법) 및 $[45_n/0_n/-45_n/90_n]_s$ (플라이 레벨기법)에 대해 실험 및 이론적인방법으로 조사 및 비교하였다.

2. 사용재질과 시편형상

사용된재질은 T800/924C 탄소섬유/에폭시이고 Hexcel사의 0.125mm 두께의 프리프레그(prepreg)테이프가 사용되었다. 프리프레그테이프는 Toray 800 탄소섬유와 Hexcel 924C 에폭시 매트릭스로 만들어졌다.

본 연구에서 오토클레이브(Autoclave) 경화

* 조선대학교 항공우주공학과

**Dep. of Aerospace Engin., Sheffield University, U. K.

방법이 사용되었는데 가열온도 120°C에서 4mm와 6mm시편은 30분간, 8mm시편은 충분한 경화를 허용키 위해 45분을 허용하였다. 적층형상의 종류는, 일방향적층 $[0_n]_{ns}$ 과 엇교차 대칭 적층인, 플라이레벨적층방법 $[45_n/0_n/-45_n/90_n]_s$ 과 서브라미네이트레벨 적층방법인 $[45/0/-45/90]_{ns}$ 로 나누었으며, 이때 두께효과 영향을 조사하기 위해 플라이 수 $n=2, 3, 4, 6, 8$ 로 증가시켜 시편들을 제작하였다. 시편형상은 Airbus사 시험 시편규정 AITM-1.008을 참조하였으며 일방향적층 시편에 경우와 게이지 부위는 $W10mm \times L10mm$ 이고, 준등방성 적층 시편의 경우의 게이지 부분의 크기는 $W30mm \times L30mm$ 로 하였고 시편그립고정을 위한 탭은 유리섬유-에폭시판을 시편양면에 부착하였다.

3. 압축시험

정적압축시험이 200kN 용량의 Zwick 1488 만능시험기가 사용되었고 크로스헤드 속도는 1mm/min를 적용하였다. 그리고 시편 고정치구는 일방향 적층시편에는 ICSTM이, 엇교차 대칭 적층시편고정치구에는 수정된 ICSTM이 사용되었으며, 2mm와 3mm 시편들에는 좌굴방지장치가 사용되었는데, 이장치의 마찰효과를 최소화하기 위해 치구와 시편사이에 Teflon 테이프를 사용하였다. 스트레인 게이지를 시편 양면에 붙여 굽힘현상과 파괴스트레인을 측정하였다. 파단 부분을 잘 관찰하기 위해 Zinc iodide 용제가 사용되었고 관찰은 X-ray radiography에 의해 수행되었다. 각 플라이의 파손위치 및 특성은 'De-ply'기법과 SEM에 의해 조사되었다.

4. 강도실험결과

일방향적층시편

각각 2mm, 4mm, 8mm 두께의 시편들의 압축강도시험이 수행되어 양면 스트레인게

이지에 의해 스트레인이 측정되었다. 이때 양면스트레인게이지의 변형을 차이는 두께 2mm 경우 0.1%, 두께 4mm 경우 0.01%, 두께 8mm 경우 0.05%로서, 하중이 축방향으로 똑바로 적용되어 굽힘현상이 최소화되었음을 확인하였다. 이때 압축탄성계수는 0.25% 변형율에서 측정되었는데 각각 평균 167GPa, 164GPa, 161GPa로서 약 4%이하의 차이를 보였다. 압축파손거동은 모두 두께의 시편에서 순간적으로 갑작이 일어났고 소리가 동반되었으나 최종파손에 앞선 cracking 음은 없었다. 파괴되었을 때 $\beta = 5^\circ \sim 30^\circ$ (여기서 $\beta = \text{kink band inclination angle}$) 범위로 전형적으로 경사된 형태의 파괴 단면을 갖는 2부분으로 나뉘었다. 파괴후 시편의 파괴단면이 조사되었는데 그림 3과 같이 소위 빗자루형상('brooming')의 파괴가 하중을 가하는 시편의 끝쪽에서 발생하였다.

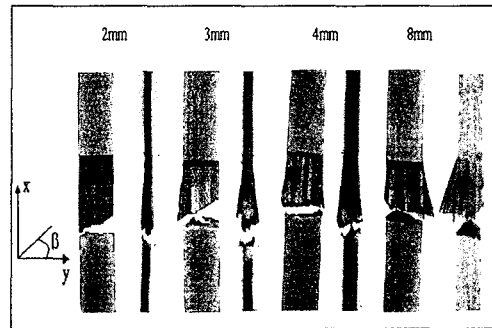


그림 3 Comparison of the post failure mode through the specimen front view and side view according to thickness of the unidirectional specimens

대부분 지배적인 파괴거동은 시편의 위쪽 모퉁이에서 시작하여 시편의 밑과 옆으로 진행되었다. 4mm와 8mm 두께 시편은 확실한 '빗자루형' 파괴 모드였다. 그림 4는 시편의 압축파괴강도를 'scatter bar'를 이용 두께의 함수로서 나타낸 것이다. 그림에서와 같이 두께증가에 대해 압축강도가 급격히 감소함을 알 수가 있다. T800/924C 일방향 적층판의 경우 두께로 2mm에서 8mm

로 증가시키는 경우 강도가 2%에서 36%로 감소됨을 알 수 있다. 8mm 두께 시편의 경우 파괴스트레인의 0.72%이 반면 2mm 두께의 경우 0.97%이었다.

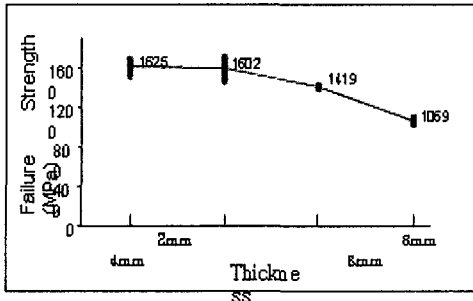


그림 4 Average compressive strength as a function of specimen thickness for T800/924C unidirectional laminates

엇교차 대칭시편

엇교차 대칭시편의 경우에는 서브라미네이트 레벨 적층시편 $[45/0/-45/90]_{ns}$ 와 플라이 레벨 적층시편 $[45_n/0_n/-45_n/90_n]_s$ 으로 나누어 각각 두께 4mm와 6mm 경우에 대하여 압축강도 시험을 수행하였다. 이 경우에도 스트레인 게이지를 시편 양면에 붙여 스트레인을 측정하였는데 앞에서 설명한 일방향 적층시편 보다는 비선형성이 좀 더 컸으며 평균 파괴 스트레인 범위는 1.2%~1.4%정도였다. 탄성계수 역시 0.25%에서 스트레인이 측정되었는데 52~57GPa범위였다.

서브라미네이트 레벨 적층시편의 경우 파괴는 순간적으로 일어났고, 파괴직전 경우에는 파괴가 일어나기전에 어떤 cracking음도 청취되지 않았다. 그림 5는 2~8mm 엇교차 적층 시편들의 파괴 양상들을 보여준다.

서브라미네이트 레벨 적층시편들의 파괴후 검사에서 두께가 증가함에도 불구하고 유사한 파괴 특성을 보였다. 0° 플라이에서는 미세좌굴(microbuckling), 0° 과 ±45° 층 사이는 층간분리(delamination), 0° 과

±45° 플라이들의 섬유방향을 따라 쪼개짐 현상을 보였고, 90° 플라이에서는 매트릭스 크래킹(cracking)과 크러싱(crushing)이 일어났다. 그러나 플라이레벨적층시편에서는 거시적인스케일(macro-scale)로 파괴양상을 보였는데, 0° 와 ±45° 플라이에서 좀 더 분명한 쪼개짐현상과 0° 와 ±45° 층사이에서 좀더 분명한 층간분리와 90° 층에서는 좀더 분명한 크래킹과 크러싱이 발생하였다.

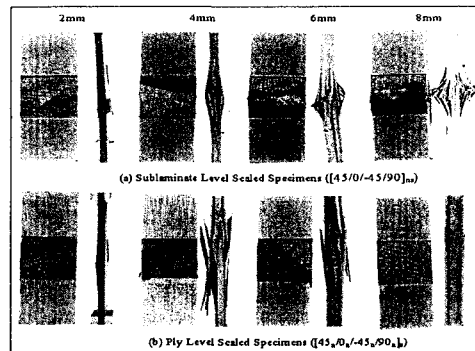


그림 5 Comparison of the overall failure mode of the multidirectional specimens. Front view and side view are shown for different thicknesses.

'kind band' 각 β 는 0° 적층방법이 다른데도 불구하고 0° 층에서 발견된것처럼 0° 층 플라이에서 10° 에서 30° 이었다. 그런데 8mm 두께 시편의 파괴 양상과 강도는 얇은 시편에 비해 매우 다르게 나타났다. 그림6은 측정된 극한 압축강도를 두가지 방법의 적층 시편에 대해 'scatter bar'를 이용 두께의 함수로 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와같이 서브라미네이트 레벨 적층 시편의 경우 두께의 변화에도 불구하고 일정한 압축강도로 보여 소위 두께효과가 존재하지 않음이 확인되었다. 그러나 플라이레벨 적층 시편의 경우는 두께 4mm에서 6mm 로 증가할 때 10% 정도의 압축강도가 감소했고, 두께 8mm 로 증가시에는 아주 크게 강도가 감소함을 보여 압축강도의 두께 효과가 분명히 존재함을 보여주었다.

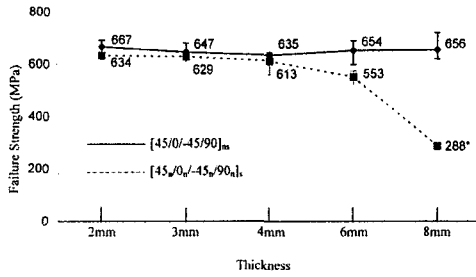


그림 6 Average compressive strength as a function of specimen thickness for T800/924C multidirectional laminates

5. 강도의 예측

본 연구에서는 가정된 초기섬유 굴곡도 (waviness)와 면내 전단 특성을 기초로한 Budanskly(4)가 제안한 섬유굴곡모델(fibre kink model)이 압축강도를 예측하는데 적용되었다.

종방향 압축강도 σ 는 다음과같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$\sigma = \frac{\tau_y^*}{\phi_0 + \gamma_y} \quad (1)$$

$$\tau_y^* = \tau_y \left[1 + \left(\frac{\sigma T_y}{\tau_y} \right)^2 \tan^2 \beta \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

여기서 ϕ_0 는 초기 섬유굴곡각, γ_y 는 항복 전단스트레인, τ_y 는 면내전단항복강도, β 는 kinkband 경사각이다.

예측 압축강도는 매트릭스에 지배적이고 초기 섬유 굴곡도 (waviness)와 면내 전단응력-변형률 특성에 따라 달라진다. 그림7과 같이 일방향적층시편의 예측압축강도가 측정된 실험치와 비교되었다.

두께 2mm의 측정된 압축강도가 1625 MPa는 초기 섬유굴곡도 $\phi_0 \cong 1.17^\circ$ 예측결과와 같은데, 이는 Bardorf 와 Ko(5)에 의해 제안된 도식적 방법 $\phi_0 \cong 1.15^\circ$ 의해 결정된 결과와 유사하다. 8mm 두께 시편의 경우 측정된 압축강도는 1087 MPa 이었는데 이는 초기 섬유 굴곡도 $\phi_0 \cong 2.31^\circ$ 의 경우에 해당한다. 여기서 섬유 굴곡도 (waviness)는 제작 경험에 의한 것으로

Yugartis (6) 방법

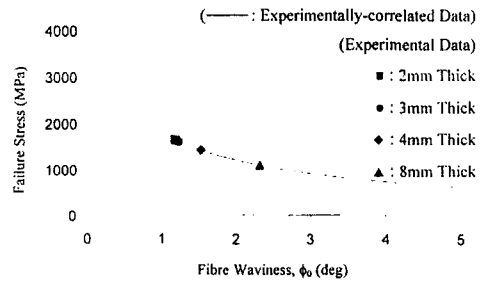


그림 7 Variation of longitudinal compressive strength with initial fibre waviness for a T800/924C unidirectional composite laminate.

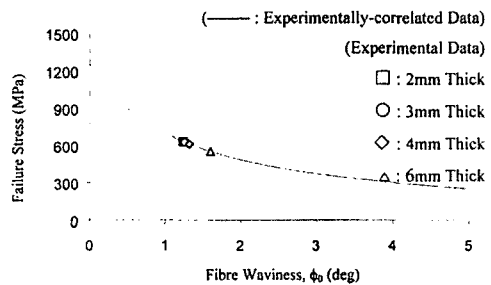


그림 8 Variation of predicted longitudinal compressive strength with initial fibre waviness for the multidirectional composite laminate (T800/924C [45n/0n/-45n/90n]s)

에 따르면 섬유 두께 증가에 따라 섬유 misalignment가 증가하는데, 이에 따라 나타나는 현상으로 일방향적층방법이나 플라이 레벨 엇교차 적층방법 경우에 두께에 따라 증가하나, 서브라미네이트 경우는 두께변화에 따라 큰 변화로 보이지 않음이 확인되었다. 그림 8은 초기 섬유 굴곡도의 함수로 구한 플라이레벨 적층시편의 파괴압축강도와 압축강도를 비교한 것이다. 두께 2mm의 경우 측정 압축강도는 634MPa로 초기 섬유굴곡각 $\phi_0 \cong 1.24^\circ$ 에 해당하고 두께 4mm의 경우 측정 압축강도 553MPa로 $\phi_0 \cong 1.6^\circ$ 에 해당한다. Yugartis 방법으로 측정된 waviness는 두께 2mm 일 때 0.81° 두께 6mm 일 때 1.33° 이었다. 그러나 서브라미네이트레벨 엇교차 대칭 적층의 경우는 초기 섬유굴곡각의 변화가 거의

없어 두께효과는 존재하지 않았다.

Composites", Composite Science and Technology, Vol. 30 (4), 1987, pp. 279-293.

6. 결 론

복합재판 적층판의 두께 효과가 있음을 보여주기 위해, 정적압축시험을 단일 적층판과 엇교차 대칭 적층판에 대해 2mm ~ 8mm로 두께로 변화시켜 수행하였다. 일방향 적층시편 ($[0_4]_{ns}$)과 플라이레벨 적층시편 ($[45_n/0_n/-45_n/90_n]_s$)에 두께효과가 존재함이 입증되었다. 압축강도의 두께효과를 일으키는 주요 파라미터는 섬유 굴곡각(waviness) 본 연구를 통해 확인되었다. 이는 적층 방법에 따라 민감하게 나타나나 서브라미네이트 레벨 적층시편 ($[45/0/-45/90]_{ns}$)에는 나타나지 않았다.

참고문헌

- 1) Camponeschi, E. T., "Compression Testing of Thick-Section Composite Materials", Composite Materials: Fatigue and Fracture (Third Volume), ASTM STP 1110, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1991, pp. 439-456.
- 2) Daniel, I. M. and Hsiao, H. M., "Is There a Thickness Effect on Compressive Strength of Unnotched Composite Laminates?", International Journal of Fracture, 1999, Vol. 95 (Special Issue), pp. 143-158.
- 3) Soutis, C., Lee, J. and Kong, C., "Size Effect on Compressive Strength of T300/924C Carbon Fibre-Epoxy Laminates", Plastics, Rubber and Composites, 2002, Vol. 3 (8), pp. 364-370
- 4) Budiansky, B. "Micromechanics", Computers and Structures, 1983, Vol. 16 (1-4), pp. 3-12.
- 5) Soutis, C., "Compressive Behaviour of Composites", Rapa Review Reports, 1997, Report 94, Vol. 8, No. 10.
- 6) Yugartis, S. W., "Measurement of Small Angle Fibre Misalignments in Continuous Fibre