

論文

새로운 압축시험편의 해석 : 소형 샌드위치보

염영진* · Ran Y. Kim** · A.S. Crasto**

Analysis of a Novel Compressive Specimen :
Miniature Sandwich Beam

Young Jin Yum*, Ran Y. Kim**, A.S. Crasto**

ABSTRACT

Finite element stress analysis was performed for the various factors which affect the stress to optimize the dimensions of the newly proposed miniature sandwich beam specimen which is designed to minimize the buckling and alleviate the stress concentration that occurs in the conventional composite compressive specimen. Remarkable decrease of the maximum compressive stress was found from the result. The effect of thickness of core, skin and tab on the stress concentration factor was found to be negligible, however, the effect of tab material and tapered angle was considerable. Experimental results showed good agreement with the numerical results.

초 록

복합적층판의 압축실험에 있어서 기존 시험편에서 발행하는 문제점들인 시험편의 좌굴을 최소화하고 응력집중을 완화시키도록 새로이 제안된 miniature sandwich 시험편의 최적규격화를 위하여 응력에 영향을 미치는 여러 요소들의 값을 변화시키면서 유한요소법으로 응력해석을 하였다. 해석 결과 최대 압축응력값이 기존 시험편보다 현저히 감소함을 확인할 수 있었다. Core, skin과 탭의 두께는 응력집중계수에 거의 영향을 미치지 않았고 그 반면 탭재료와 테이퍼 각도는 큰 영향을 미침을 알 수 있었다. 또한 miniature sandwich 시험편을 제작하여 압축실험을 한 결과 실험결과와 수치결과가 거의 일치함을 알 수 있었다.

* 정회원, 울산대학교 기계공학과

* University of Dayton Research Institute, Dayton, Ohio, U.S.A.

I. 서 론

복합적층판에 대한 기본적인 재료시험으로 인장, 압축, 전단등 세 가지가 있는데 그 중에서 압축 시험은 시험 시 가장 주의를 요하고 결과에 대한 신뢰도도 낮은 시험이다. 복합적층판의 압축시험 방법으로는 straight coupon, sandwich coupon, radial-loading ring 등의 시험편에 대하여 흔히 Celanese 고정구와 IITRI(Illinois Institute of Technology Research Institute)고정구를 이용하여 [0], [90] 또는 cross-ply 적층판의 압축시험을 한다. 하지만 시험방법에 따라 압축강도가 크게 다르고 대부분의 방법이 일방향 복합재료의 압축강도를 정확히 측정하지 못한다[1-3]. 기존의 대부분의 압축시험 방법은 시험시 시편의 파단이 너무 빨리 일어나서 길이 방향 압축강도를 과소평가하게 된다. 이러한 파단은 주로 편심하중과 그에 따른 시편의 좌굴, 또는 측정부위 끝부분의 응력 집중에 의해 야기된다. 시편의 좌굴은 시편을 두겹게 함으로써 방지할 수 있으나 이 또한 정확한 압축강도를 구하는데 있어서 어려운 점이 있다. 따라서 복합재료의 압축 물성치를 신뢰도 있게 측정하기 위해서 이러한 시편의 불안정성을 최소화하거나 제거하도록 설계된 시편이 요구된다. 최근에 Crasto와 Kim[4]은 miniature sandwich 시편을 복합적층판의 압축시험에 사용할 것을 제안하였다. 이 시편은 기존의 sandwich시편을 변형시킨 것으로 시편 중앙부(core)의 honeycomb을 실험하려는 복합재료의 기지(matrix)와 유사한 순수 수지(resin)로 대체한 것이다. 이렇게 하면 바깥 부분(skin)의 복합재료와 중앙부의 수지 층 사이의 Poisson비의 차이가 작아져서 결과적으로 기존 sandwich 시편에서 흔히 발생하는 중앙부와 바깥 부분의 분리현상을 줄일 수 있게 된다. Tan[5]은 miniature sandwich 시편에 대하여 혼합법칙(rule of mixture)과 유한요소법으로 응력해석을 하여 다른 압축시험 때보다 훨씬 큰 압축강도를 얻을 수 있음을 보였다. 이러한 장점을 갖고 있는 miniature sandwich 시편은 규격이 아직 표준화되어있지 않다.

따라서 본 연구에서는 복합적층판 압축시험에 있어서 하나의 유력한 모델인 miniature sandwich 시

편의 규격을 최적화하기 위하여 유한요소법을 이용하여 시험 결과에 영향을 미치는 요인들인 skin과 core의 두께, Tab 재료, 두께, 테이퍼 각도 등을 변화시키면서 그 영향을 응력 집중의 관점에서 해석하려고 한다. 또한 기존 all composite 시편과의 결과를 비교하고 복합재료 miniature sandwich 시편의 압축실험을 통하여 수치 계산 결과와 비교하려고 한다.

II. Miniature Sandwich시편

Miniature sandwich 시편은 Fig.1과 같이 수지로 이루어진 중심부(core), 시험하려는 복합적층판인 바깥 부분(skin), 그리고 탭의 세 부분으로 구성되어 있다. Fig.2에는 압축시험에 흔히 쓰이는 Celanese

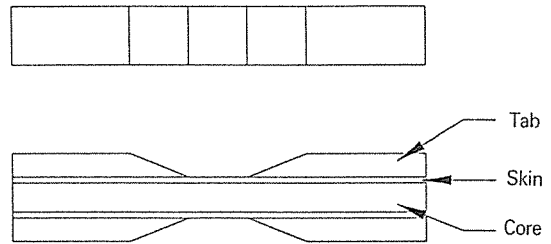


Fig. 1. Geometry of Miniature Sandwich Specimen

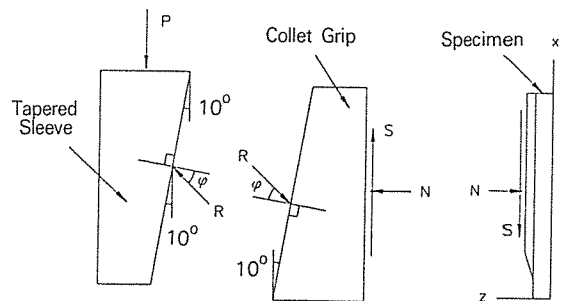


Fig. 2. Geometry of Celanese Fixture

고정구의 모양이 나타나 있는데 P는 압축시험시 가하는 하중이고 R은 경사면에 수직한 방향과 ϕ 의 각도를 이루는 반력을 나타낸다. Steel과 steel 사이의 마찰계수를 0.58로 취하면 마찰각 ϕ 는 $\phi =$

$\tan^{-1}(0.58) = 30.11 \text{ deg}$ 가 되고 sleeve 부분에 대한 수직방향의 평형조건으로부터 $R = P/\sin(10+\phi)$ 이 된다. Collet Grip에 대한 평형조건으로부터 시편의 탭부분에 미치는 수직력 N 과 전단력 S 는 각각 $S = R \sin(10+\phi) = P$, $N = R \cos(10+\phi) = 1.187P = 1.187S$ 가 된다. IITRI 고정구는 Celanese 고정구에 쓰이는 원추꼴 썬기 grip 대신 사다리꼴 썬기 grip을 사용하지만 N 과 S 의 비는 거의 같다고 볼 수 있다.

III. 수치해석

Fig.1과 같은 miniature sandwich 시편의 유한 요소 응력해석을 위해 시편의 모양이 대칭형이므로 전체의 1/4만 고려하여 요소 수 1,285, 절점 수 1,378개의 4절점 사각형 isoparametric 요소로 분할하였다. 사용한 유한요소 프로그램은 MAGNA[6]이고 AS4/3501-6 복합재료와 탭재료의 물성치는 Table 1에 나와있다. 우선 core 두께 3.18mm, skin

Table 1. Properties of Miniature Sandwich Specimen

	AS4 / 3501-6	3501 -6	Glass/ Epoxy	Adhesive
$E_{11}(\text{GPa})$	139.0	4.48	41.69	2.08
$E_{22}(\text{GPa})$	11.1	4.48	12.99	2.08
$G_{12}(\text{GPa})$	4.79	1.67	3.39	0.79
ν_{12}	0.27	0.34	0.30	0.30

두께 2ply, 탭 재료 glass/epoxy, 탭 두께 1.59mm인 miniature sandwich 시편과 전체 두께 24 ply이고 나머지 치수는 동일한 기존 all composite 시편과의 결과를 탭의 테이퍼 각도가 15°와 90°인 두 경우에 대하여 응력해석을 하였다. 응력 σ_x 와 τ_{xz} 는 압축 강도에 영향을 미치지 않을 정도로 낮은 값이었고 최대 압축응력 σ_x 는 두 시편 모두 시편 바깥쪽 gage section의 끝에서 발생하였다. Skin 바깥쪽 부분의 x 방향을 따라 응력집중계수를 구한 결과가 Fig.3과 4에 나와있다. 이때 응력집중계수는 각 점의 응력 σ_x 를 시편 중앙 skin 부분의 평균응력으로 나눈 값

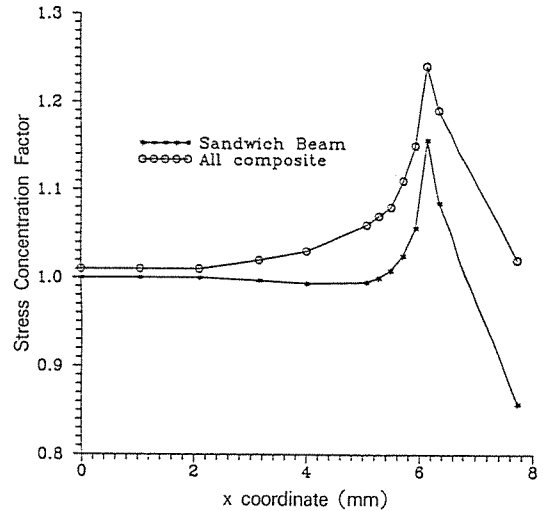


Fig. 3. Stress Concentration Factors of Sandwich Beam and All Composite Specimen for 15° Taper

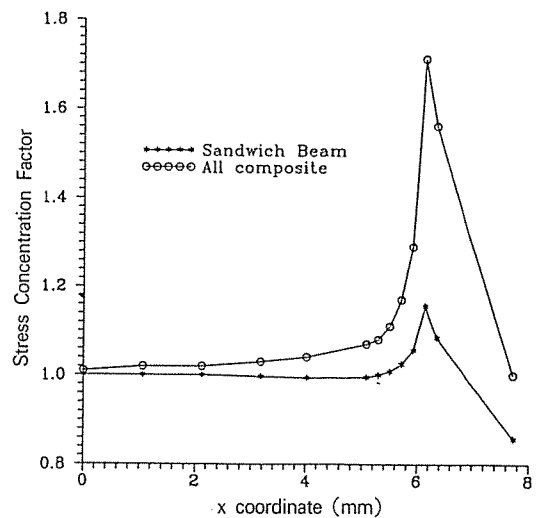


Fig. 4. Stress Concentration Factors of Sandwich Beam and All Composite Specimen for 90° Taper

으로 취했다. 테이퍼 각도가 90°일 때의 응력집중 계수가 15°일 때보다 훨씬 크고 두 경우 모두 miniature sandwich 시편의 응력집중계수가 낮은 값을 보였다. 따라서 miniature sandwich 시편이 기존 all composite 시편보다 압축시험에 적합함을 알 수 있

었다.

Miniature sandwich 시편의 응력에 미치는 여러 요인들의 영향을 알아보기 위해 core 두께는 3.18 mm, 4.83mm, skin의 두께는 2ply, 4ply, 탭 재료는 glass/epoxy, Steel, Aluminium, 탭 두께는 3.18 mm, 1.59mm, 0.79mm, 탭의 테이퍼 각도는 15°, 30°, 90°로 변화시켜 수치결과를 구하였다. Fig.5와 6에 각각 core와 skin의 두께에 따른 응력집중계수의

변화가 나타나 있는데 탭의 끝부분에서 응력집중이 크게 되지만 core와 skin의 두께에 따른 변화는 거의 없음을 알 수 있다. Fig.7,8,9에 보인 탭 재료, 두께, 테이퍼 각도에 따른 결과를 보면 탭 재료가 glass/epoxy, Al, St일 때의 응력집중계수가 각각 1.156, 1.367, 1.522로 Al, St 탭일 경우 glass/epoxy 탭의 경우보다 응력집중계수가 각각 18.2%, 31.7%의 큰 증가를 보였다. 탭 두께는 응력집중계수에 거의 영

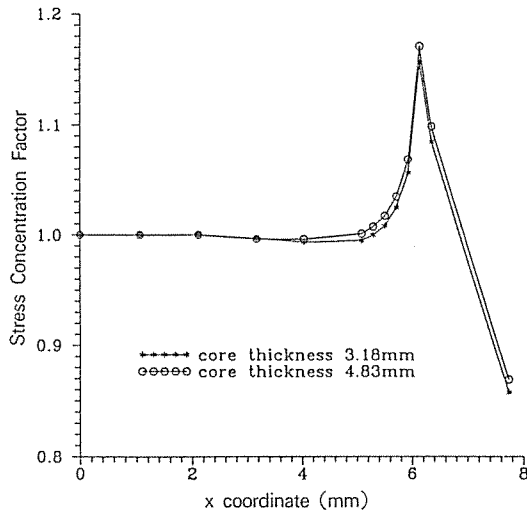


Fig. 5. Stress Concentration Factors of Sandwich Beam for Core Thickness

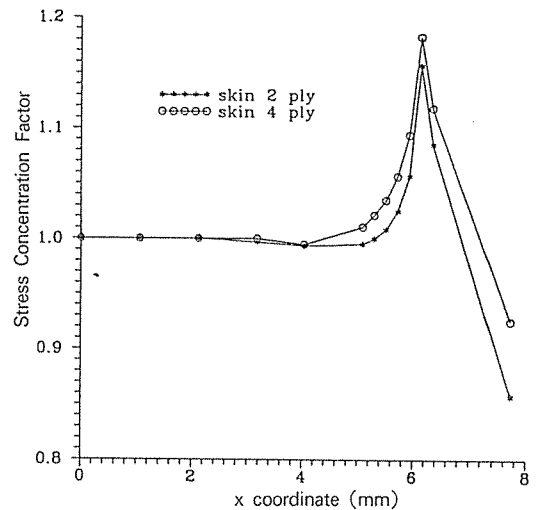


Fig. 6. Stress Concentration Factors of Sandwich Beam for Skin Thickness

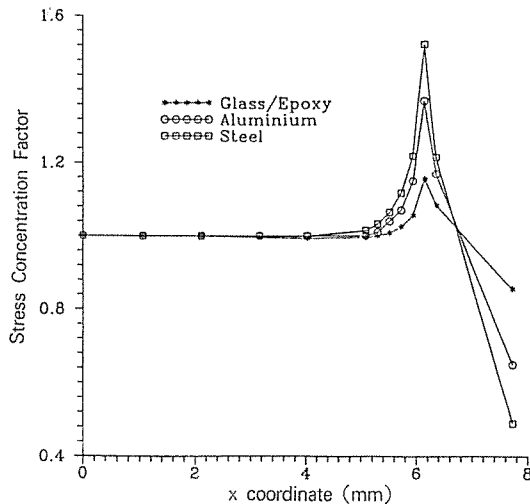


Fig. 7. Stress Concentration Factors of Sandwich Beam for Tab Materials

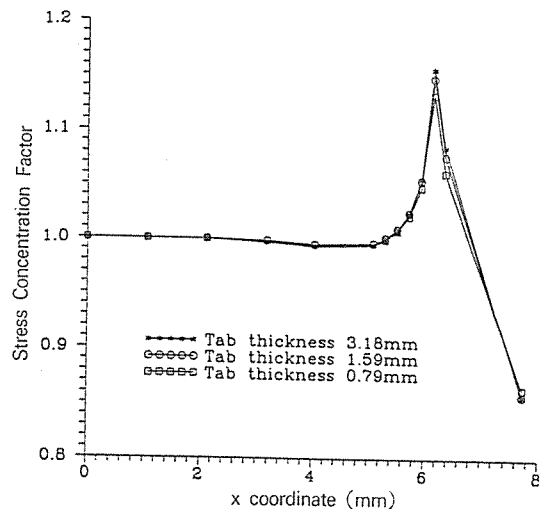


Fig. 8. Stress Concentration Factors of Sandwich Beam for Tab Thickness

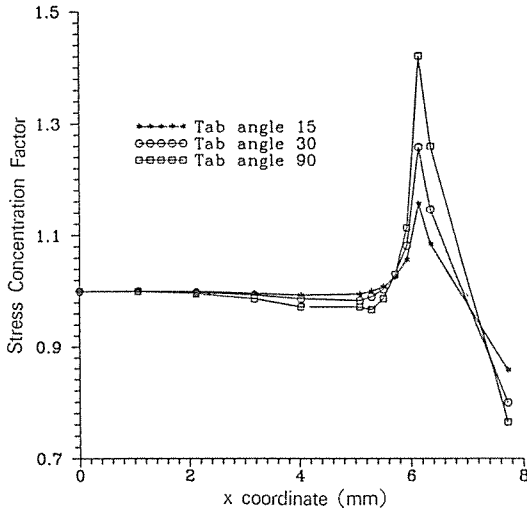


Fig. 9. Stress Concentration Factors of Sandwich Beam for Tab Taper Angles

향을 미치지 않고 테이퍼 각도가 커짐에 따라 응력 집중이 커져서 90°일 때의 응력집중계수는 15°일 때보다 22.8% 정도 증가하였다.

이상의 수치해석 결과를 볼 때 miniature sandwich 시편은 좌굴을 거의 완전히 방지할 수 있고 기존 all composite 시편보다 응력집중계수가 낮아서 보다 안정된 복합재료 압축시험에 적합하다는 것을 알 수 있다. 또한 miniature sandwich 시편의 응력집중계수에 미치는 여러 요인들의 영향을 알아 본 결과 core, skin, 탭 등의 두께는 거의 영향을 미치지 않았고 탭 재료와 테이퍼 각도 등은 큰 영향을 미침을 알 수 있었다. 따라서 기존 all composite 압축시편 규격인 ASTM D3410[7]에 나온 규격을 miniature sandwich 시험편에 그대로 사용하면 기존 all composite 시편을 사용했을 때보다 훨씬 안정되고 신뢰도있는 결과를 얻을 수 있다고 생각된다.

IV. 실험

수치결과를 실험결과와 비교하기 위해 AS4/3501-6 miniature sandwich 시편과 all composite 두 가지 시편들을 ASTM D3410 표준규격으로 만들어 IITRI 고정구를 사용하여 압축실험을 하였다. Miniature

sandwich 시편은 부분적으로 경화된 수지층 양면에 프리프레그 테이프를 적층시키고 이것을 주어진 경화 싸이클에 따라 autoclave에서 성형한 후 diamond cutter로 절단함으로써 얻어진다. 시편의 형상은 Fig. 10과 같고 strain gage를 시편 중앙과 gage section 끝 부분에 부착하여 압축실험을 하였다. z방향 응력은 x방향 응력에 비해 매우 작으므로 이때 측정된 스트레인의 비는 그 점들에서의 응력비와 같다고 볼 수 있다. 결과가 Table 2에 나와 있는데 탭부분의 테이퍼 각도가 15°, 90°일 때의 두 경우 모두 수치 결과와 실험결과가 매우 잘 일치함을 알 수 있었다.

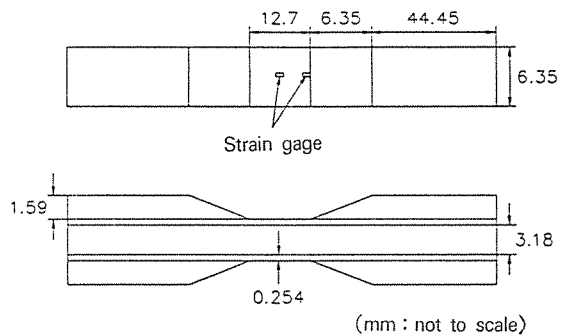


Fig. 10. Miniature Sandwich Compressive Specimen

Table 2. Stress Concentration Factors at the End of Tab

Taper angle	Miniature sandwich		All Composite	
	FEM	Experiment	FEM	Experiment
15	1.06	1.06	1.12	1.16
90	1.20	1.20	1.38	1.37

V. 결 론

복합재료 압축시편으로 제안된 miniature sandwich 시편의 응력해석 결과 기존의 all composite 시편보다 응력집중계수가 훨씬 낮은 값을 보임에 따라 복합재료 압축시험에 있어서 보다 안정되고 신뢰성있는 결과를 얻을 수 있는 하나의 유력한 모델이라고 생각된다. 응력에 미치는 여러 요인들 중

core, skin, 탭 등의 두께는 거의 영향이 없었고 탭 재료와 테이퍼 각도 등은 큰 영향을 미침을 알 수 있었다. 또한 수치결과와 실험결과도 일치함을 확인하였다.

VI. 참고문헌

1. Woolstencroft, D.H., A.R. Curtis and R.I. Haresceugh, "A Comparison of Test Techniques Used for the Evaluation of the unidirectional Compressive Strength of Carbon Fibre-Reinforced Plastic", *Composites*, pp.275-280, 1981.
2. Clark, R.K. and W.B. Lisagor, "Compression Testing of Graphite/Epoxy Composite Materials", *Test Methods and Design Allowables for Fibrous Composites*, ASTM STP 734, American Society for Testing and Materials, pp. 34-53, 1981.
3. Kim, R.Y. and S.W. Tsai, "A Compressive Test Method for Ring Specimens", 33rd International SAMPE Symposium, pp.1159-1168, March, 1988.
4. Crasto, A.S. and R.Y. Kim, "Compression Strengths of Advanced Composites from a Novel Mini-Sandwich Beam", *SAMPE Technical Conference*, Boston, 1990.
5. Tan, S.C., "Analysis of Mini-Sandwich Compression Specimen", Private Communication.
6. Brockman, R.A., "MAGNA : A Finite Element Program for the Materially and Geometrically Nonlinear Analysis of Three Dimensional Structures Subjected to Static and Transient Loading", AFWAL-TR-80-3152, Jan., 1981.
7. "Standard Test Method for Compressive Properties of Unidirectional or Crossply Fiber-Resin Composites", American Society for Testing and Materials, ASTM D3410-87.