

섬유강화 복합재료 Box Tube의 Crush거동

Crush Characteristics of the Laminated Composite Box Tubes

강 수 준*, 전 완 주**
S. C. Kang, W. J. Jun

ABSTRACT

This paper presents the results of static crushing test that was conducted to characterize the energy absorption and collapse characteristics of composite box tubes. Fifteen specimens were fabricated with woven fabric prepreg using [0/90] glass/epoxy and were autoclave cured. Quasi-static compression test was performed on them. Collapse mode and energy absorption capacity vary significantly as a function of the thickness and length of a square side of composite box tube.

1. 서 론

자동차의 정면 충돌시 발생하는 충돌에너지를 흡수 및 완화하여 인명을 보호하기 위한 장비중 구조역학적 관점에서 고려될 수 있는 것으로 변퍼와 사이드레일(side rail)이 있다. 이들중 범퍼는 시속 5마일 이하의 저속 충돌시에 탄성 변형에너지로서 충돌에너지를 흡수하는 역할을 하나, 그 이상의 고속 충돌시에는 일반적으로 사이드레일이 충돌에너지의 60~70%를 부재의 연속적인 대변형에 의한 소성에너지에 의하여 흡수한다. 특히, 이때 효율적인 에너지의 흡수가 진행되려면 가능한 안정적 변형상태를 유지해야 한다. 현재 자동차에 사용되고 있는 사이드레일은 압연 철판을 점용접하여 상자형 튜브(Box Tube)

로서 사용하고 있는데, 복합재료의 성질의 우수성을 이용한 대체 가능성이 연비 및 대기오염의 문제로 야기된 자동차의 경량화 요구와 부합하여 활발히 논의되고 있다.¹⁾

금속소재는 일반적으로 연성성질에 의하여 좌굴과 접힘현상의 반복으로 충돌에너지를 흡수한다. 그러나 복합재료는 낮은 파손변형률로 특성지어지는 고유의 취성성질 때문에 압축하중을 받을 때 파괴에 의하여 붕괴가 진행되며^{2,3)}, 만약 안정적인 붕괴가 이루어질 경우 금속소재보다 단위중량당 3배 이상의 충격에너지를 흡수한다.⁴⁾ 그러나 복합재료 상자형 튜브의 붕괴모드는 전체좌굴, 국부좌굴, 파괴붕괴등 다양한 모드를 갖으므로 적절한 안정적 붕괴를 효율적으로 발생시키기 위해서는 단면의 형상, 제작방법, 적층각도, 두께,

* KIST 기전연구부
** 정회원, KIST 기전연구부

크기, 하중의 속도, 섬유 및 기지의 종류, 트리거(trigger) 형태 등의 영향인자들을 적절히 조절해야 한다.^{5,6,7)} 이러한 안정적 붕괴를 발생시키기 위하여 복합재료의 붕괴특성에 관하여 많은 연구가 진행되고 있다.^{8,9,10)} 그러나, 자료의 산란함으로 일관된 결론을 도출시키고 있지 못하고 있으며 특히 사용된 재료에 따라 그리고 실험조건에 따라 영향인자들에 대하여 서로 다른 경향을 나타내고 있다.

본 연구에서는 국내에서 공급이 용이한 유리섬유/에폭시 직조 프리프레그를 사용하여 자동차의 사이드레일을 단순화시킨 정방향(square section) 상자형 튜브를 대상으로 준정적 붕괴실험을 통하여 복합재료의 붕괴특성 및 충격에너지 흡수거동을 조사한다.

2. 실 험

붕괴실험시 부재의 에너지 흡수거동을 평가하기 위하여 본 논문에서는 설계변수로서 시편의 두께(t)에 대한 단면의 한변의 길이(S)의 비 t/S 와 상대밀도(ϕ)를 사용하였고, 부재의 에너지 흡수능력을 평가하는 척도로서 많은 논문^{9,10)}에서 언급하고 있는 비에너지(specific energy)와 평균붕괴하중(mean crush load)을 고려하였다. 상대밀도는 전체 구조물이 차지하는 부피에 대한 부재의 재료만의 부피의 비로서 본 논문에서 사용한 정방향시편의 경우 t/S 와는 근사적으로 다음의 관계식을 갖는다.

$$\phi = 4 \frac{t}{S} \quad (1)$$

한편, 비에너지(E_s)란 부재가 흡수한 에너지를 붕괴된 부분의 질량으로 나눈 값으로 구조물의 단위질량당 흡수할 수 있는 최대에너지이고 다음 식으로 정의된다.⁹⁾

$$E_s = \frac{\int_0^{\delta} P dx}{\rho A \delta} \quad (2)$$

여기서 P 는 붕괴발생 후의 하중, A 는 부재의 단면적, ρ 는 밀도, δ 는 붕괴의 진행거리이다.

평균붕괴하중(F) 또는 붕괴지지하중(sustained crushing load)은 붕괴가 시작된 후 변동하는 하중의 평균하중을 나타내며 다음 식으로 정의된다.¹⁰⁾

$$F = E_s \rho A \quad (3)$$

2.1 시편제작

본 연구에서 사용한 붕괴실험 대상 시편은 한국화이버㈜의 유리/에폭시 직조 프리프레그(prepreg)를 사용하여 오토클레이브(auto-clave) 성형법으로 제작하였다. 성형을 위한 금형(mandrel)은 그림 1과 같이 성형후 시편의 분리를 쉽게 하기 위하여 테이퍼지게 3부분으로 분할되었고 표면은 다듬질 가공된 $2.5\text{ cm} \times 2.5\text{ cm} \times 40\text{ cm}$ 의 황동제 분할금형을 사용하였다. 오토클레이브 성형을 위한 프리프레그 적층방법은 그림 2와 같이 먼저 성형후 시편과 금형의 분리를 위하여 유공테프론으로 감싼 다음 $[0/90]$ 유리섬유 직조(fabric)를 정해진 횟수 만큼 적층한다. 적층한 위에 테프론과 필플라이(peel ply)를 감은 후에 진공백몰딩(vacuum bag molding)용 필름으로 밀봉한 다음 오토클레이브에서 진공을 가하면서 경화시킨다. 성형된 튜브는 다이아몬드 밀링 커터를 사용하여 약 400rpm 정도로 정해진 치수로 절단한 후 1200번 사포로 45° 베벨트리거를 형성하였다. 충격문제의 동적실험에 있어서 뿐만 아니라 준정적으로 모델링 하는데 있어서도 트리거는 박판 구조물의 초기 최대하중의 크기를 감소시킴으로서 파괴붕괴에 의한 부재의 안정적 붕괴를 일으키게 하기 위하여 반드시 필요한데 베벨트리거 방법

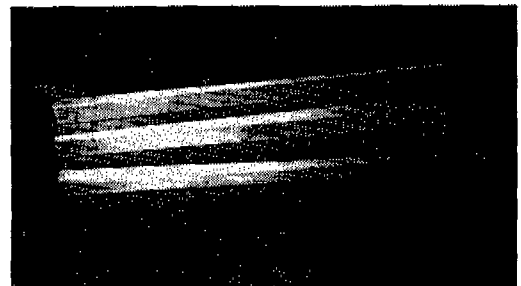


Fig.1 Configuration of Mandrel

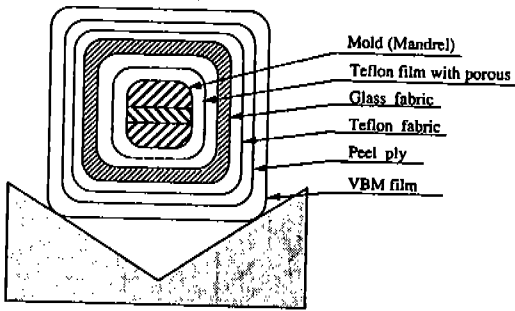


Fig. 2 Figure of Lay-up for Fabrication

Table 1 Dimension of Specimens

layup	width(S)	thickness(t)	length(L)	unit = mm
				relative density
[0/90] ₄	24.94	0.71	75	0.116
[0/90] ₆	25.02	1.02	75	0.164
[0/90] ₈	25.05	1.35	75	0.216
[0/90] ₁₀	24.92	1.48	75	0.236
[0/90] ₁₂	25.15	2.05	75	0.328

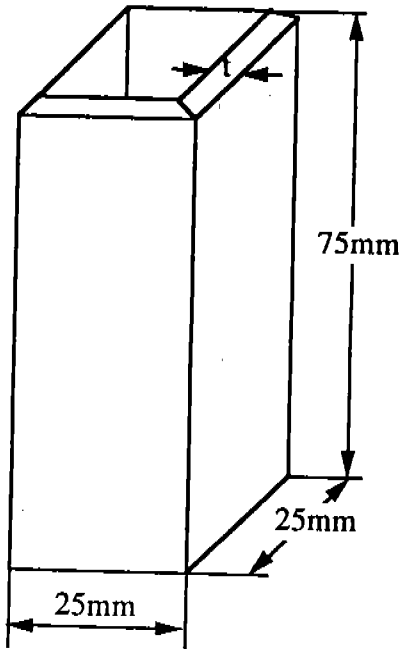


Fig. 3 Test Specimen Geometry

이 트리거를 만들기가 가장 용이할 뿐만 아니라 만족한 결과를 가져온다.⁶⁾ 실험을 위하여 완성된 시편들의 사양은 표 1 과 같고, 시편의 형상은 그림 3 과 같다.

2. 2 실험장치 및 붕괴실험

에너지 흡수 거동을 관찰하기 위한 붕괴실험은 Instron 1350 유압식 재료시험기(10톤)를 사용하였다. 압축하중을 가하는 판은 시편을 항상 축방향으로만 하중을 가하도록 고안하였고 시편은 이 하중판에 의해 단순지지된다. 실험은 변위제어하에서 수행되며 하중은 0.085 mm/sec의 속도로 준정적으로 4 cm 까지 압축하였다. 이때 Cross-head의 변위와 하중은 x-y 기록기를 사용하여 연속적으로 기록하였다. 각 시편의 종류에 대하여 3번씩의 실험을 상온에서 수행하였다.

3. 결과 및 고찰

실험에 사용한 유리섬유/에폭시 직조의 재료상수들은 표 2에 보인 바와 같다. 붕괴실험에서 얻어지는 하중-변위선도와 이로부터 얻어지는 에너지 흡수곡선 및 시편의 붕괴과정을 그림 4~11에 보였다. 그림 4에 [0/90]₁₂의 붕괴실험과정을 나타냈다. 일정하게 붕괴현상이 안정적으로 진행되는 모습은 파괴에 의한 붕괴모드를 의미하는데 이는 무수히 많은 짧은 균열에 의해 형성된 단층묶음(lamina bundle)이 하중을 받음에 따라 굽혀지지만 90°섬유와 변형방향에서의 간섭에 의하여 결국은 파괴가 되는 현상이 반복적으로 일어나는 것이다. 모서리 부분에서는 이에 따라 축방향 분리(axial splitting)가 일어남을 볼 수 있고, 이는 가장 이상적인 에너지 흡수부재의 붕괴진행과정을 나타낸다. 따라서 하중-변위곡선 그림 5는 구형파(square wave)의 형상을 나타내고 에너지흡수곡선 그림 6은 거의 직선으로 나타남으로 에너지 흡수 능력이 양호함을 알 수 있다. 그림 7에 [0/90]₆에 대한 붕괴실험과정을 나타냈다. 이에대한 하중-

Table 2 Material Properties of Glass fabric/Epoxy

density	Modulus of elasticity(E)	Poisson's ratio(v)	Tensile strength	Compressive strength
[Kg/m ³]	[GPa]		[MPa]	[MPa]
1799	24.5	0.14	448	379

변위곡선은 그림 8에 나타냈는데 이 시편의 붕괴모드는 국부좌굴모드와 파괴모드가 혼합된 것으로 고려할 수 있다. 따라서 좌굴모드와 90°방향 섬유와의 간섭으로 축방향으로 일정한 간격을 두고 파괴가 일어난다. 모서리에서는 인접한 면에서 좌굴모드의 변형방향이 반대이므로 꼬임이 일어나지만 축방향 분리가 일어나지는 않는다. 그림 9에 에너지 흡수곡선을 나타냈는데 국부좌굴이 진행될 때 에너

지 흡수량이 미소함을 볼 수 있고, 국부좌굴 후 파괴가 일어날 때마다 계단형을 나타냄을 확인할 수 있다. 그림 10에 $[0/90]_4$ 의 붕괴시험과정을 나타냈다. 이는 전체좌굴(global buckling) 현상을 나타내고 초기결함(imperfection)이 존재하는 부분을 따라 급격한 균열의 진행으로 갑작스러운 붕괴가 일어난다. 이런 모드로는 에너지의 흡수가 거의 불가능함을 하중-변위곡선 그림 11로부터 알 수 있다.

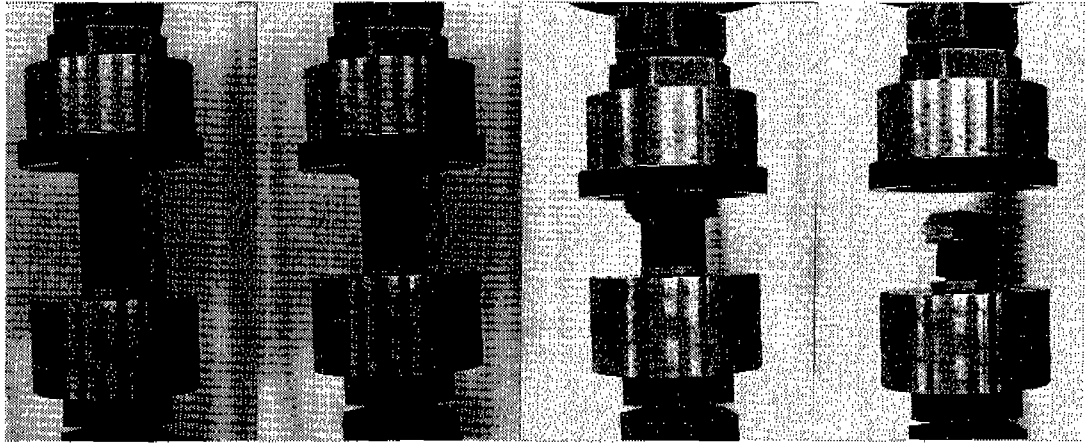


Fig. 4 Crush Sequence for Glass Fabric/Epoxy $[0/90]_{12}$ Box Tube

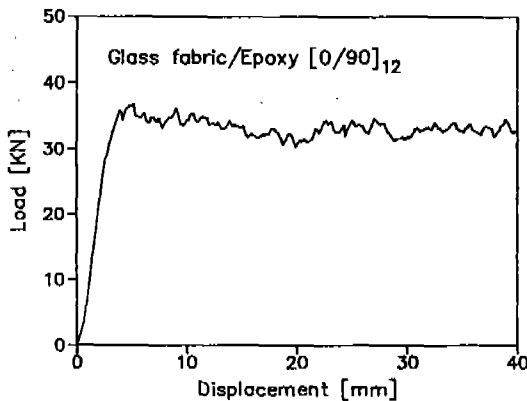


Fig. 5 Crushing Load vs. Displacement Curve for $[0/90]_{12}$ Box Tube

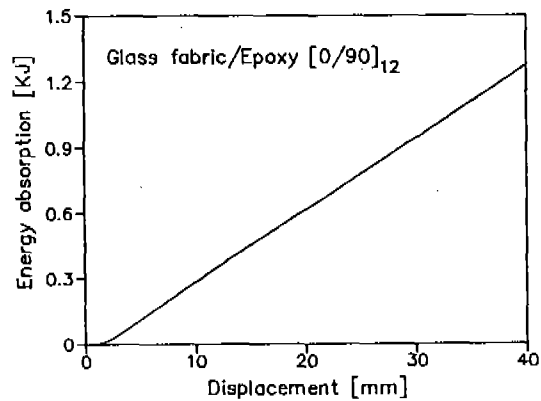


Fig. 6 Energy Absorption vs. Displacement Curve for $[0/90]_{12}$ Box Tube

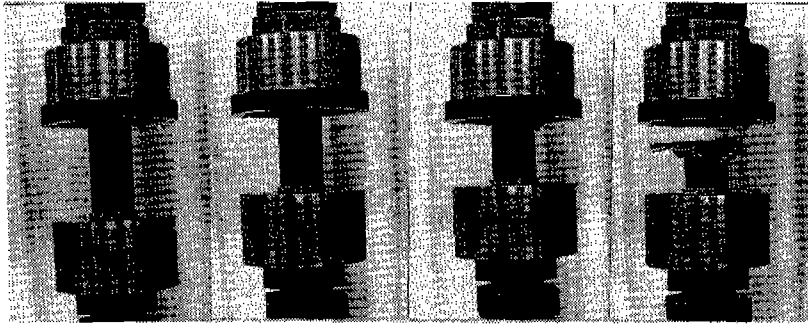


Fig.7 Crush Sequence for Glass Fabric/Epoxy [0/90]₈ Box Tube

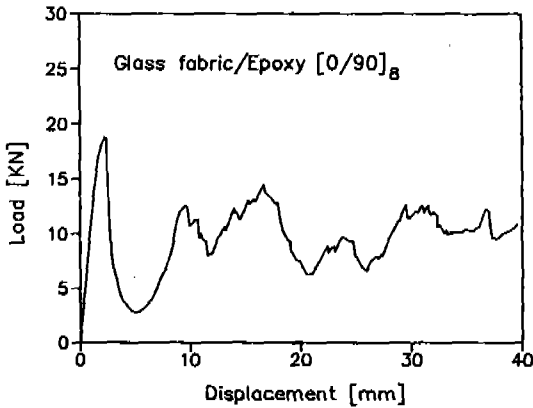


Fig. 8 Crushing Load vs. Displacement Curve for [0/90]₈ Box Tube

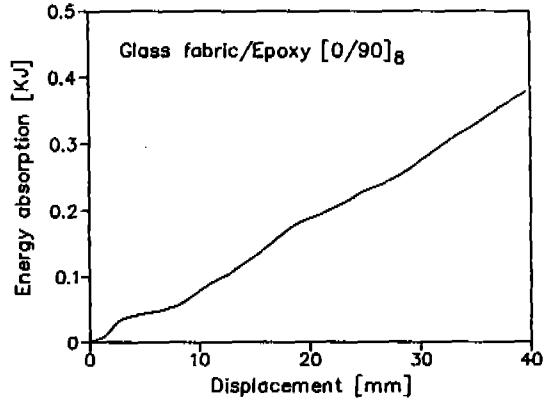


Fig. 9 Energy Absorption vs. Displacement Curve for [0/90]₈ Box Tube

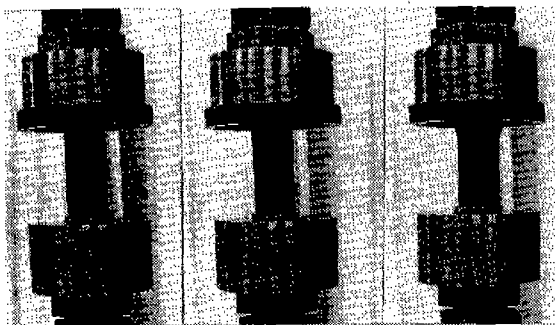


Fig.10 Crush Sequence for Glass Fabric/Epoxy [0/90]₄ Box Tube

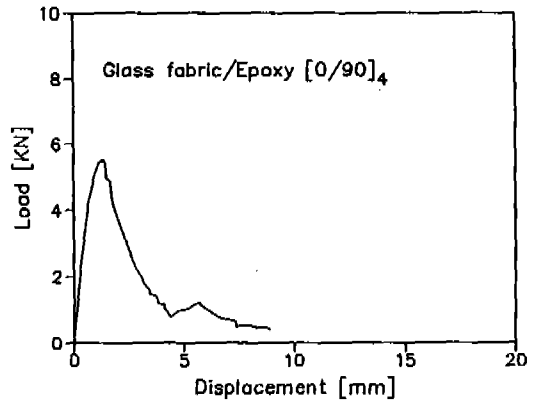


Fig.11 Crushing Load vs. Displacement Curve for [0/90]₄ Box Tube

지금까지의 상자형 튜브의 붕괴실험의 결과를 요약하여 표 3에 나타내었는데, 본 논문에서 사용한 [0/90] 유리섬유/에폭시 직조의 경우 약 10장 정도의 적층상태에서 불안정한 붕괴와 안정한 붕괴의 경계를 이룸을 알 수 있다. 그림 12에서는 상대밀도에 따른 초기최대응력(initial peak stress)을 상자형 튜브에 대한 좌굴응력 관계식¹¹⁾으로부터 Thornton⁹⁾에 의하여 유도된 붕괴응력(collapse stress, σ_b) 예측식 식(4)와 비교하여 나타내었다.

$$\sigma_b = \frac{4\pi^2 E}{\sqrt{12(1-\nu^2)}} \left(\frac{t}{S}\right)^2 \cong 0.2 E\phi^2 \quad (4)$$

여기서, E 는 재료의 주축방향의 탄성계수이고 ν 는 포아송의 비이다.

그림 12와 실험의 결과에서 알 수 있듯이 좌굴응력보다 작은 초기최대응력을 갖는 시편은 전체좌굴로 붕괴하나 큰 초기최대응력을 갖는 경우는 파괴모드를 나타낸다. 그림 13에서는 평균붕괴응력(σ_m)의 변화를 나타냈는데 의미가 없는 전체좌굴이 발생한 경우를 제외 한 후 최소자승법으로 근사화한 결과 지수함수 형태로 증가함을 알 수 있다. 그림 14에서는 초기최대응력(σ_i)과 평균붕괴응력(σ_m)과의 차이를 나타냈는데 국부좌굴이 발생한 경우보다 전체좌굴이 발생한 경우에 그 차이가 크며, 특히 파괴모드로 붕괴가 일어나는 경우가 상당적인 0의 값에 접근한다. 그림 15에서는 비에너지(E_s)의 변화를 나타냈는데 상대밀도에 대하여 거의 선형적으로 변화함을 볼 수 있다. 그림 16에 본 실험에서 나타난 전형적인 불안정적 붕괴(unstable collapse) 형태와 안정적 붕괴(stable collapse) 형태를 보였다.

Table 3 Results of Crush Test

lay-up	relative density	Initial Peak Load(KN)	Mean Crush Load(KN)	Mean Crush Stress(MPa)	Collapse Mode
[0/90] ₄	0.116	5.8	0.7	10	Global Buckling
[0/90] ₆	0.164	9.7	4.9	48	Local Buckling
[0/90] ₈	0.216	18.7	9.3	69	Local Buckling
[0/90] ₁₀	0.236	23.1	13.1	89	Local Buckling
[0/90] ₁₂	0.328	35.0	31.5	153	Fracture

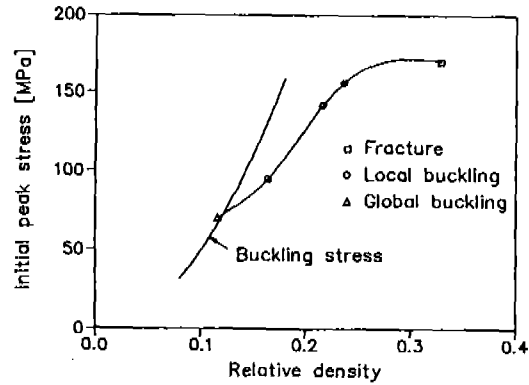


Fig.12 Variation of Initial Peak Stress according to Relative Density

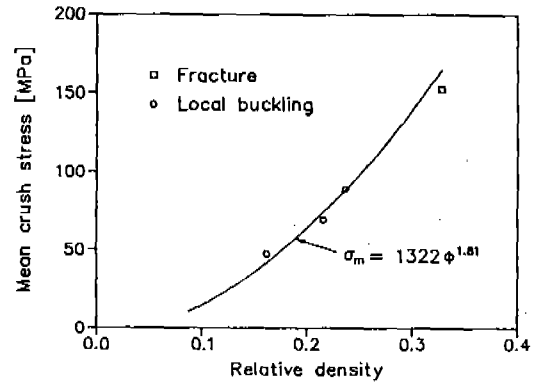


Fig.13 Variation of Mean Crush Stress according to Relative Density

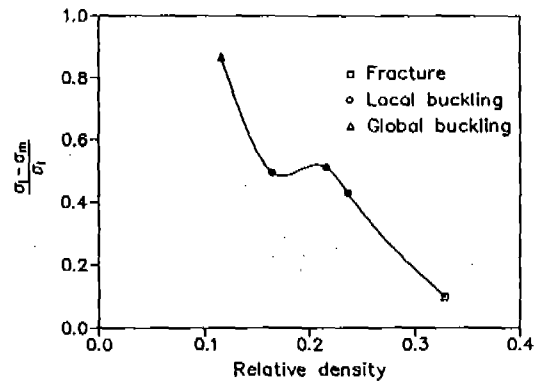


Fig.14 Variation of Normalized Difference between Initial Peak Stress and Mean Crush Stress according to Relative Density

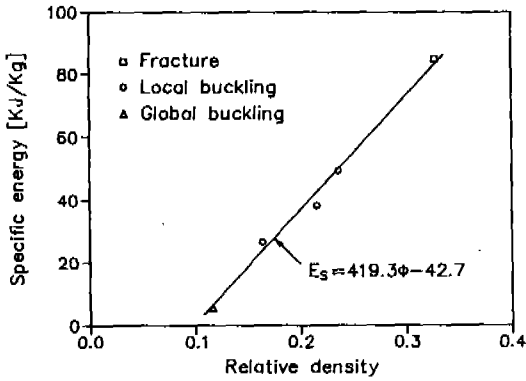
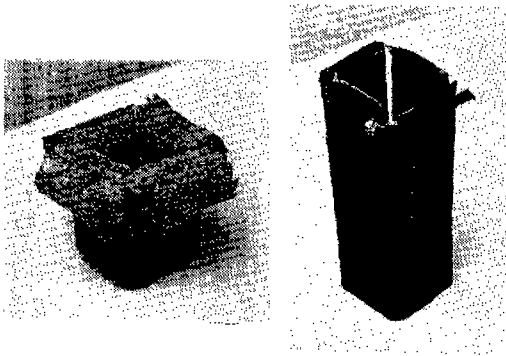


Fig.15 Variation of Specific Energy according to Relative Density



(a) Stable Collapse (b) Unstable Collapse

Fig.16 Typical Collapse Mode of Composite Box Tube

4. 결 론

유리섬유/에폭시 직조 정방형 튜브의 두께를 변화시키면서 준정적 압축실험을 수행하여 붕괴모드에 따르는 에너지흡수거동을 조사하였다. 실험결과로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 두께가 증가함에 따라 전체좌굴 붕괴로부터 국부좌굴 붕괴를 거쳐서 파괴모드로 붕괴거동이 변화였다. 그리고 전체좌굴 붕괴시에는 붕괴현상을 지속시키지 못하는 불안정한 붕괴모드가 나타났고 파괴모드에서는 초기최대하중과 평균붕괴하중의 차이가 거의 없는 안정한 붕괴모드를 나타냈다.

2) 취성복합재료의 상대밀도와 평균붕괴용력과의 관계는 안정한 붕괴상태에서는 지수

함수적으로 나타낼 수 있고, 비에너지는 붕괴모드와 무관하게 거의 선형적으로 비례한다.

3) 에너지 흡수재로서 사용될 부재는 반드시 안정적 붕괴가 일어나도록 제작되어야 하는데, 유리섬유/에폭시 직조 박스형 튜브의 경우 상대밀도가 약 0.3 정도(t/S 는 0.075) 이상이면 이상적인 에너지 흡수재의 거동을 나타내므로 이를 실제 에너지 흡수부재의 설계시 설계기준으로 고려할 수 있다.

후 기

본 연구는 과학기술처에서 수행한 출연연구사업의 일환으로 수행되었음을 밝히며 이에 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

1. P.H. Thornton and R.A. Jeryan, "Crash Energy Management in Composite Automotive Structures", Int. J. Impact Engng, Vol. 7, No. 2, pp. 167-180, 1988.
2. P.H. Thornton, "Metal and FRP Composite Energy Absorbing Structures", Proc. Advd Composites Conf. ASM/ESD, Dearborn, Michigan, pp. 17-25, 1985.
3. P.H. Thornton, J.J. Harwood and P. Beardmore, "Fiber-reinforced Plastic Composites for Energy Absorption Purpose", Comp. Sci. Tech., Vol. 24, pp. 275-298, 1985.
4. J.M. Margolis, Advanced Thermoset Composites, Van Nostrand Reinhold Co., 1986.
5. G.L. Farley, "Effect of Specimen Geometry on the Energy Absorption Capability of Composite Materials", J. Comp. Mat., Vol. 20, pp. 390-400, July 1986.
6. P.H. Thornton, "Effect of Trigger Geometry on Energy Absorption in Composite Tubes", Proc. 5th Int. Conf. Comp. Mat. ICCM, San Diego California, pp. 1183-1199, 1985.
7. G.L. Farley, "Effect of Fiber and Matrix

- Maximum Strain on the Energy Absorption of Composites Materials”, J. Comp. Mat., Vol. 20, pp. 322-333, 1986.
8. P.H. Thornton, “Energy Absorption in Composite Structures”, J. Comp. Mat., Vol. 13, pp. 247-262, 1979.
 9. P.H. Thornton and P.J. Edwards, “Energy Absorption in Composite Tubes”, J. Comp. Mat., Vol. 16, pp. 521-545, 1982.
 10. G.L. Farley, “Effect of Specimen Geometry on the Energy Absorption Capability of Composite Materials”, J. Comp. Mat., Vol. 20, pp. 390-400, 1986.
 11. S.P. Timoshenko and J.H. Gere, Theory of Elastic Stability, 2nd Ed., McGraw-Hill, New York, 1961.