論文

필라멘트 와인딩 공법 GFRP 원형 튜브의 에너지 흡수특성에 관한 연구

김거영*, 구정서**+

A Study on the energy absorption characteristics of GFRP circular tubes fabricated by the filament winding method

Geo-Young Kim*, Jeong-Seo Koo**+

ABSTRACT

In this paper, quasi-static crushing tests of composite circular tubes under axial compression load are conducted to investigate the energy absorption characteristics. Circular tubes used for this experiment are glass/epoxy (GFRP) composite tubes which are fabricated by the filament winding method. One edge of the composite tube is chamfered to reduce the initial peak load and to prevent catastrophic failure during crushing process. Energy absorption characteristics vary significantly according to the constituent materials, fabrication conditions, tube geometry and test condition. In tube geometry, according as inner diameter increase, unstable crush mode is caused by local buckling of delamination, but control of the fiber orientation should help composite tubes get stable crush mode.

초 록

본 논문에서는 복합재 원형튜브의 에너지 흡수 특성을 평가하기 위해 준정적 압괴실험을 시행하였다. 사용된 시편은 필라멘트 와인딩 공법으로 제작된 GFRP(유리섬유/에폭시수지) 원형 튜브이다. 복합재 튜브의 에너지 흡수 특성 분석을 위한 파라미터로서 튜브의 트리거메커니즘, t/D, 섬유배향각 등을 고려하여 그 특성을 비교하였다. 튜브의 형상 측면에서 튜브 직경이 커짐에 따라 delamination에 의한 국부좌굴 발생빈도가 증가하게 되어 불안정한 압괴모드가 발생하는데 이러한 현상은 섬유배향각을 조정하여 안정적인 압괴모드를 도출할 수 있었다.

Key Words : 준정적 압괴시험(quasi-static crushing test), 축압력 하중(axial compression load), 트리거 메커니즘(trigger mechanism), 에너지 흡수 특성(energy absorption characteristics), 필라멘트 와인딩 공법(filament winding method), 평균 압괴 하중(mean crush force)

1. 서 론

복합재료는 금속재료에 비해 높은 비강도, 비강성, 내충격강도, 낮은 열팽창률 등의 여러 우수한 기계적 성질을 가지고 있다는 것은 이미 알려져 있다. 그 중 복합재료의 에너지 흡수특성에 관련된 연구는 아직까지도 끊임없이 진행중인데 [1-3], 그 이유는 복합재료의 제조방법, 제조여건, 재료구성 등에 따라 그 기계적 특성의 종류가 헤아릴 수 없이 많도록 설계가 가능하기 때문이다. 본 연구에서 에너지 흡수특성을 분석할 복합재료는 필라멘트 와인딩 공법으로 제작한 GFRP (glass/epoxy) 원형튜브인데, Glass fiber는 가격이 저렴하며 단면이 원형인 튜브가 사각튜브보다 에너지 흡수 능력 면에서 좋은 결과를 보여주고 있다.[4,5]

금속재료는 일반적으로 연성성질에 의하여 좌굴과 접힘현

* 서울산업대학교 철도전문대학원
**+ 서울산업대학교 철도전문대학원, 교신저자(E-mail:koojs@snut.ac.kr)

상의 반복으로 충돌에너지를 흡수한다. 그러나 복합재료는 낮은 파손변형률로 특성 지어지는 고유의 취성성질 때문에 압축하중을 받을 때 파괴와 마찰에 의하여 압괴가 진행된다.[6] 안정적인 압괴가 발생하면 금속재료보다 단위 중량당 3배 이상의 충격에너지를 흡수할 수 있을 뿐만 아니라, 압괴 하중의 변동이 적다.[7]

그러나 복합재료의 압괴모드는 좌굴의 형태에 따라 여러 가지 모드로 분류할 수 있으므로 안정적인 압괴를 효율적으로 발생시키기 위해서는 단면의 형상, 제작방법, 두께, 크기, 하중의 방향과 섬유 배향각, 섬유 및 기지의 종류, 트리거 형태 등의 영향인자들을 적절히 조절해야 한다.[8-10]

Fig. 1.1은 에너지 흡수에 가장 이상적인 압괴거리에 대한 압괴하중 거동을 보여주고 있다. 압괴초기에 하중이 증가하다 재료의 면적이 견디는 한계 하중을 초과하게 되면 재료의 면적에 해당하는 거의 일정한 압괴하중 결과가 나오게 되는데 이러한 상태를 좌굴이 없는 안정적인 압괴라고 하며 이때 에너지를 최대로 흡수할 수 있다. 또한 초기 최대하중을 줄임으로써 열차 충돌시 탑승자들에게 가해지는 가속도를 낮출수록 좋다.

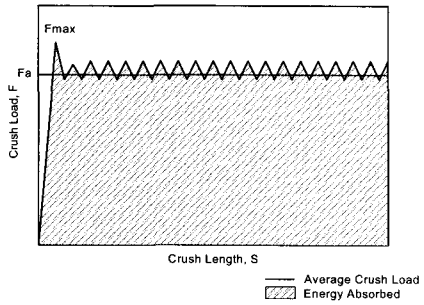


Fig. 1.1 Ideal crush load vs. crush length[5].

현재 철도차량 안전규정에 고시되어 있는 승객 탑승구간 충돌가속도는 상대속도 36km/h 정면 충돌사고각본과 표준변형체 장애물과 110km/h 충돌사고각본에서 최대 7.5g, 평균 5g이하이여야 한다.[11] 그러므로 주요 에너지 흡수 구조에서의 최대 압괴하중에 의하여 충돌가속도가 좌우되기 때문에 (F=ma) Fig. 1.1과 같이 이상적인 압괴커브를 지니는 에너지 흡수재가 필요하다. 또한 열차 충돌 에너지의 대부분이 전두부에서 흡수되기 때문에 현재 충돌 안전도 측면에서 전두부용 에너지 흡수재 개발의 필요성이 대두되고 있다.

지금까지 밝혀진 에너지 흡수특성에 중요한 영향인자를 다음과 같이 요약할 수 있다.

첫째로 튜브의 구성 재료로서 섬유[1,5]와 기지[12]의 종류와 비율[1], 재료의 조합[7,13-16] 그리고 섬유배향각[1,4,14, 17-20]과 layer 적층각도[1]에 따라 에너지 흡수 특성이 다르다.

둘째로 튜브의 시험조건으로써 압괴속도[2,5,16-18] 및 방향[1,13,19] 그리고 환경[3]에 따라 그 특성이 변화한다.

셋째로 튜브의 형상으로써 단면모양에 따라 다르고 [4,5,15,20,21] 일반적으로 직각형 < 정사각형 < 원형 순으로 또한 t/D(두께/직경) 값이 증가할수록 에너지 흡수 능력이 증가하며 국부좌굴의 가능성이 적어진다.[12,22] 또한 트리거 메카니즘을 사용함으로써 초기 하중의 감쇠로 안정적인 압괴를 유도하는데, 그 중 베벨트리거가 제작이 용이하면서 가장 많이 쓰이고 있다.[1,3,18,20,22]

이 외에도 복합재의 여러 성형기법에 따라 에너지 흡수 특성은 달라진다. 또한 초기압괴하중을 완화시켜주는 쐐기(plug initiator)를 사용 시 복합재와 접촉되는 부분의 라운드 크기에 따라 그 특성이 달라진다.[21,23] 이러한 에너지흡수 특성에 영향을 미치는 여러 인자들을 Fig. 1.2에 정리하였다.

위와 같은 에너지 흡수특성에 따라 제작된 복합재는 여러 차량산업에 적용되어 왔으나, 열차의 경우 국내 틸팅열차의 차체가 복합재로 제작이 되면서부터 경량화 및 에너지 흡수 특성 측면에서 우수한 복합재 도입이 시도되고 있다.

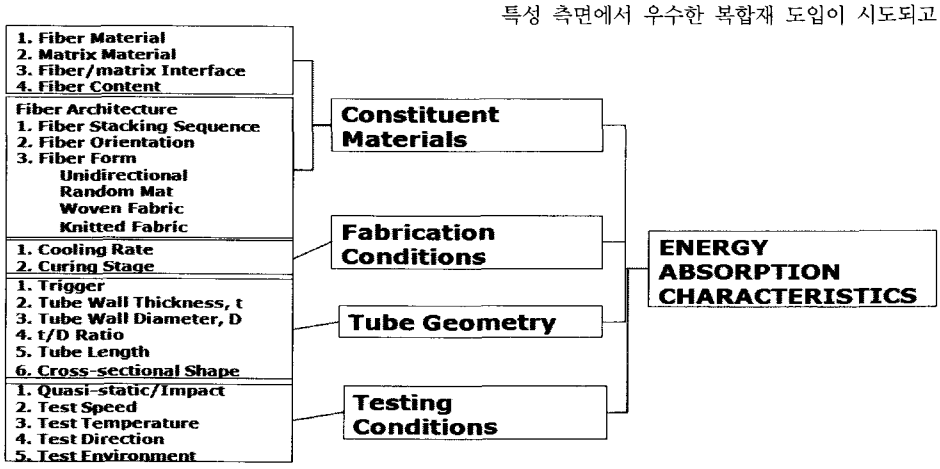


Fig. 1.2 Parameters for energy absorption characteristics.

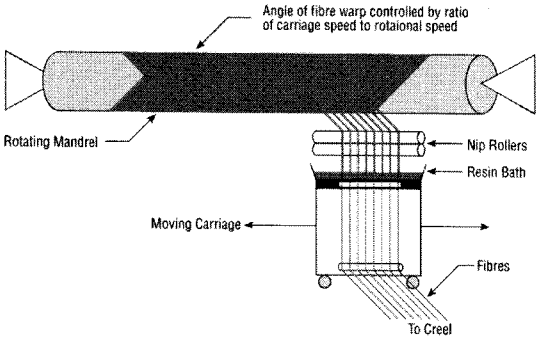


Fig. 2.1 Filament winding method.

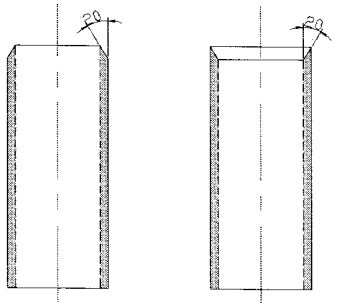


Fig. 2.2 Trigger mechanism.

Table 2.1 Mechanical properties[24]

Properties		E-Glass fiber	Epoxy matrix	Glass/Epoxy composite
Density	ρ (g/cc)	2.0	1.1	
Longitudinal modulus	E_{11}(GPa)	75.52	3.2	36.60
Transverse modulus	E_{12}(GPa)			5.40
Shear modulus	G_{12}(GPa)	29.721	1.25	4.085
Poisson's ratio	ν_{12}	0.33	0.28	0.30
Volume fraction	v_f (%)			47.6
Longitudinal strength	X^L(MPa)			618.90
Transverse strength	X^T(MPa)			14.00
Shear strength	τ_0 (MPa)			28.00

따라서 본 논문에서는 필라멘트 와인딩 공법으로 제작된 GFRP 원형 튜브에 준 정적인 축 압축 하중이 가해질 때 안정적이고 순차적인 압괴가 일어나도록 하기 위하여 위에서 언급한 영향인자들 중 섬유배향각과 t/D 값, 트리거메커니즘 등 복합재 튜브의 형상을 변경하여 비교 평가하고 이를 통해 열차의 완충 차막이와 전두부용 에너지흡수 설계용량인 평균압괴하중 20ton, 50ton에 맞는 복합재 사양을 도출하는 연구를 수행하였다.

2. 복합재 튜브 준정적 압괴 실험

2.1 시편 및 쐐기 제작

본 연구에서 사용한 준정적 압괴실험 대상 시험편은 (주)화성산업의 glass/epoxy의 FRP CORE 602 제품으로 필라멘트 와인딩 성형법에 의해 제작되었다. 필라멘트 와인딩 성형법은 기지를 함침한 섬유를 축 방향으로부터 일정한 각도로 감는 방법으로 축대칭 구조물을 섬유의 끊어짐 없이 성형 가능하여 축방향의 섬유체적율이 일정함으로써 축방향 압괴하중의 변동이 적어 에너지 흡수재로 효과적이다. 본 연구에서 사용된 튜브는 에폭시 수지를 함침한 유리섬유를 ±88°, ±70°, ±55° 로 감아 내경과 두께를 변화시켜 제작하였다. 제작공정은 Fig. 2.1과 같고 시험편 튜브의 물성치는 Table 2.1에 정리하였다.

충격문제의 동적실험에 있어서 뿐만 아니라 준정적 실험에 있어서도 트리거는 초기 최대하중의 크기를 감소시킴으로써 파괴에 의한 부재의 안정적 압괴를 일으키게 하기 위하여 반드시 필요한데 가장 제작하기 용이하면서 널리 사용되고 있는 베벨트리거 방법을 사용하였다.[1,3,18,20,22] 일반적으로 베벨트리거 방법이라 하면 튜브의 바깥쪽을 모따기한 경우인데 이번실험에서는 기존에 다루지 않았던 내측 모따기까지 고려하여 2가지 경우로 분류해서 제작하였다. 그 이유는 압괴시 원주방향으로 찢어진 튜브 잔여물이 튜브 안팎으로 압괴에 영향을 미치는지를 확인하기 위함이다. 모따기는 다이아몬드커터로 Fig. 2.2와 같이 튜브의 축 방향을 기준으로 20°로 하여 바깥쪽 모따기 (external Bevel trigger)와 안쪽 모따기 (internal Bevel trigger)로 분류하였다. 또한 튜브와 닿는 면이 라운드로 가공된 쐐기를 사용하여 안정적인 압괴를 도출하는데 어떠한 영향을 미치는지에 대해서도 평가하였는데 쐐기의 치수 및 형상은 Fig. 2.3과 같다.

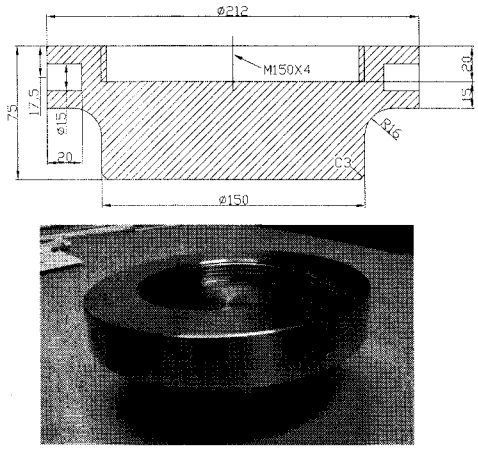


Fig. 2.3 Plug initiator mechanism.

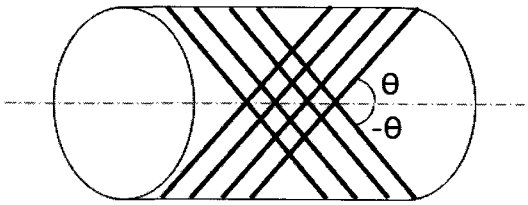


Fig. 2.4 Fiber orientation.

2.2 이론적 배경 및 실험방법

에너지 흡수특성을 관찰하기 위한 준정적 압괴실험은 최대하중이 500kN, 1000kN 인 유압식 서보재료시험기인 MTS-810 material test system을 사용하였다. 실험은 12°C에서 0.2mm/sec로 변위제어를 통하여 균일한 압축하중이 가해지도록 준정적 압괴실험을 행하였다. 이 때 트리거 부분이 윗 로드셀 방향으로 향하고 실험 시 편심하중이 작용하지 않도록 로드셀과 시험편의 수평을 맞추었으며, 여러 번의 예비실험을 거쳐 실험결과의 재현성이 좋도록 하였다.

또한 시험편 전체 축 방향 길이(200mm)의 60%(120mm)까지 변위를 제어하면서 연속적으로 압괴실험을 행하였다. 로드셀의 출력 데이터 갭은 0.2sec이며 한 시험편 당 600sec의 압괴시간이 걸렸다. 그리하여 한 시험편 당 총 3000개 의 데이터를 얻어 이를 종합/분석/비교 하였다.

준정적 압괴실험에서 복합재 튜브의 에너지 흡수 능력을 평가하는 척도로서 여러 논문[5,13]에서 언급하고 있는 비에너지(specific energy), 평균압괴하중(mean crush load) 그리고 안정적인 압괴모드를 평가하는 척도로서 측정된 최대하중을 평균압괴하중을 나눈 값을 사용하여 압괴하중의 변동을 비교하였다.

비에너지(E_s)란 튜브가 흡수한 에너지(E_{abs})를 압괴된 부분의 질량($m_{destroyed}$)으로 나눈 값으로 튜브의 단위질량당 흡수할 수 있는 최대에너지이고 다음 식으로 정의된다.

$$E_s = \frac{E_{abs}}{m_{destroyed}} = \frac{\int_0^{\delta} P\,dx}{\rho A \delta} \tag{1}$$

여기서 P는 압괴발생 후의 하중, A는 튜브의 단면적, ρ는 밀도, δ는 압괴된 거리이다.

평균압괴하중(F_{avg})은 압괴가 시작된 후 변동하는 하중의 평균하중을 나타내며 다음 식으로 정의된다.

$$F_{avg} = \frac{\int_0^{\delta} P\,dx}{\delta} = E_s \rho A \tag{2}$$

Fig. 2.4는 필라멘트 와인딩 성형시 에폭시 수지를 함침한 유리섬유를 감을 때 생기는 축 방향에 대한 섬유배향각인데 ±88°, ±70°, ±55° 3가지로 제작하여 압괴모드를 비교하였다. Table 2.2에 실험시편을 나열하였고 시편ID는 시편치수를 알 수 있도록 내경과 두께, 트리거 방향, 섬유배향각과 쐐기의 사용유무를 명시하였다. 또한 단면적과 t/D 값에 따른 압괴하중을 알기 위하여 튜브의 직경과 두께를 변화하여 제작하였다. 그리하여 총 24개의 시편 실험을 통해서 규명하고자하는 특성인 트리거 메커니즘과 쐐기사용유무, t/D 값, 섬유배향각에 따른 복합재의 준정적 에너지흡수특성을 비교분석 하였다.

F_{ratio}는 최대압괴하중을 평균압괴하중으로 나눈 값으로 안정적인 압괴모드를 평가하는 수치로 사용하였다.

$$F_{ratio} = \frac{F_{peak}}{F_{avg}} = \frac{F_{peak}}{E_s \rho A} \tag{3}$$

2.3 실험 결과

본 연구는 필라멘트 와인딩 공법으로 제작한 GFRP 원형튜브의 효율적인 트리거메커니즘을 규명하고 t/D값과 섬유배향각의 변화에 따른 에너지 흡수 능력 및 압괴모드를 고찰하고자 준정적 압괴실험을 행하였다. 실험을 수행한 결과, 대부분의 시험편은 트리거가 있는 쪽에서 초기압괴가 시작되었으며, 그 후 순차적으로 압괴가 일어났으나 일부 시험편은 트리거부 초기압괴 이후 튜브의 중반부에서 층간분리(delamination)에 의한 국부좌굴이 발생하였다.

준정적 압괴실험으로부터 얻어진 결과는 Fig. 2.5~2.28과 Table 2.2에 종합적으로 분석하였다.

2.3.1 트리거 메커니즘 분석

내측과 외측 베벨트리거를 비교하기 위하여 Table 2.2의 시편 No. 2~7의 하중-변위 실험결과를 사이즈별로 Fig 2.5~2.7에 정리하였다.

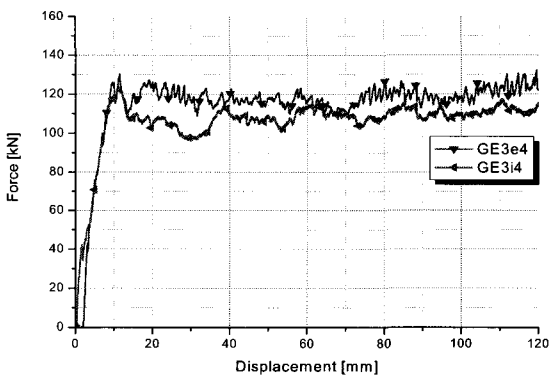


Fig. 2.5 Force and displacement curves by quasi-static test.

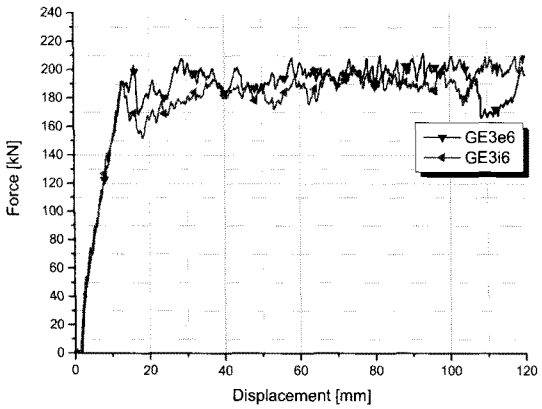


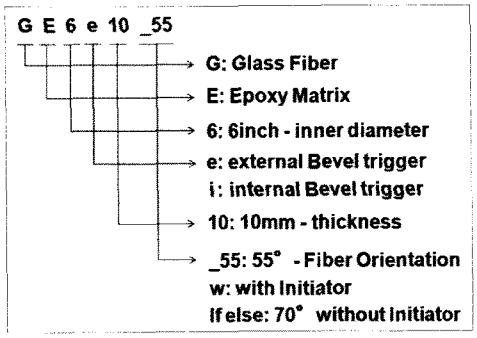
Fig. 2.6 Force and displacement curves by quasi-static test.

Table 2.2 Configuration of specimens

No	Specimen ID	Inner diameter [inch]	Thick-ness [mm]	Tube length [mm]	t/D	Fiber ori-entation
1	GE3e2.5	3	2.5	200	0.0328	70°
2	GE3i4	3	4	200	0.0526	70°
3	GE3e4	3	4	200	0.0526	70°
4	GE3i6	3	6	200	0.0789	70°
5	GE3e6	3	6	200	0.0789	70°
6	GE6e5	6	5	200	0.0328	70°
7	GE6i7	6	7	200	0.0460	70°
8	GE6e7	6	7	200	0.0460	70°
9	GE6e8	6	8	200	0.0526	70°
10	GE6e9	6	9	200	0.0592	70°
11	GE6e10	6	10	200	0.0657	70°
12	GE6e10w	6	10	200	0.0657	70°
13	GE6e10_55	6	10	200	0.0657	55°
14	GE6e10_88	6	10	200	0.0657	88°
15	GE6e11	6	11	200	0.0723	70°
16	GE6e11w	6	11	200	0.0723	70°
17	GE6e11_55	6	11	200	0.0723	55°
18	GE6e11_88	6	11	200	0.0723	88°
19	GE6e12	6	12	200	0.0789	70°
20	GE6e12w	6	12	200	0.0789	70°
21	GE6e12_55	6	12	200	0.0789	55°
22	GE6e12_88	6	12	200	0.0789	88°
23	GE6e13	6	13	200	0.0855	70°
24	GE6e13w	6	13	200	0.0855	70°

Fig. 2.8은 압괴거리에 따라 로드셀에 측정된 하중곡선 Fig. 2.5~2.7을 평균압괴하중으로 계산하여 내측과 외측 트리거 메커

Table 2.3 Definition of the specimen ID



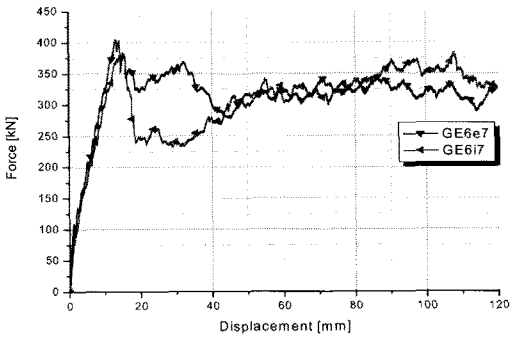


Fig. 2.7 Force and displacement curves by quasi-static test.

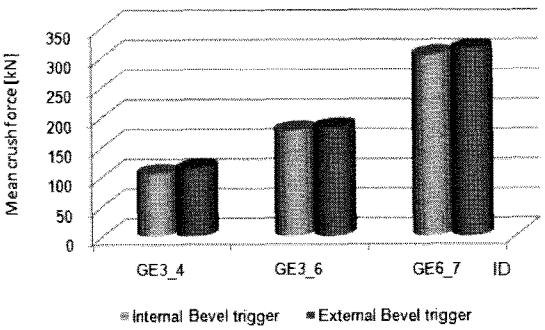


Fig. 2.8 Mean crush forces with respect to trigger mechanism.

니즘에 따른 평균압괴하중을 비교한 것이다. 본 논문에서 사용된 원형튜브의 경우 내측베벨트리거보다 외측베벨트리거가 3~8% 높은 평균압괴하중을 보이고 있다. Fig. 2.9는 압괴하중의 변동을 평가하는 수치인 F_{ratio} 값을 비교한 그래프인데 6인치 시편의 경우 size effect로 인한 debonding 및 delamination이 발생하여 3인치 시편보다 크게 측정되었으며 F_{ratio}은 내측, 외측 트리거 모두 2.5% 이내로 큰 차이가 없다.

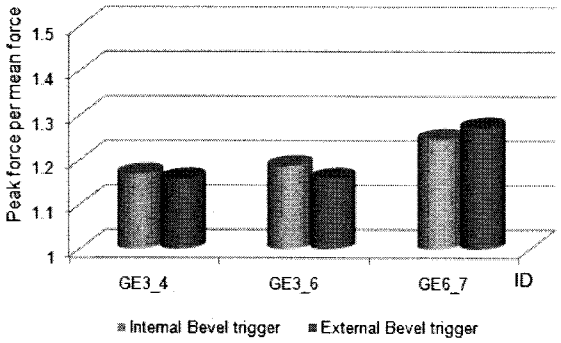


Fig. 2.9 F_{ratio} with respect to trigger mechanism.

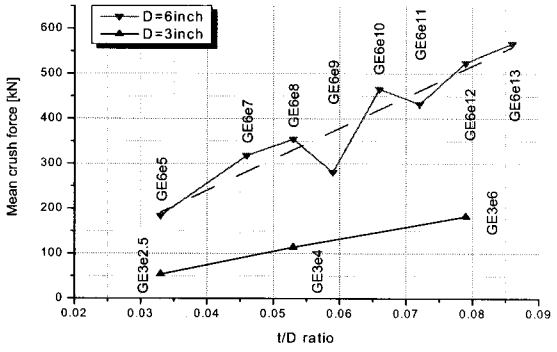


Fig. 2.10 Mean crush forces with respect to t/D ratio.

2.3.2 t/D 값에 따른 비교 분석

t/D 값에 대한 평균압괴하중을 비교하기 위하여 동일한 섬유배향각(70°)인 Table 2.2의 시편 No. 1~11, 15, 19, 20의 시험결과를 Fig. 2.10에 정리하였다. 낮은 압괴하중 영역에 분포하는 내경 3인치 시편은 t/D 값에 비례하는 선형적인 분포를 이루고 있으나 높은 압괴하중 영역에 분포하는 내경이 큰 6인치 시편들은 일부시편에서 예상보다 훨씬 낮은 압괴하중이 측정되었는데 이는 시편 사이즈의 증가로 인하여 시편의 균일도가 낮아짐으로써 층간분리에 의한 국부좌굴이 발생하였기 때문이다.

Fig. 2.10에 정리된 시편들의 비에너지를 비교해 보면 Fig. 2.11에서 보는 것과 같이 3인치 시편들이 단위 질량당 흡수한 에너지가 6인치 시편들보다 높게 측정 되었으며 F_{ratio} 또한 Fig. 2.12과 같이 3인치 시편들이 좋은 결과를 보여주고 있다.

또한 Fig. 2.13~2.15는 t/D 값이 각각 0.033, 0.053, 0.079로 동일한 시편들을 내경 사이즈 별로 비교한 것이다. Fig. 2.16은 비에너지를 비교한 것인데 내경이 작은 3인치 시편에서 높게 나왔고 Fig. 2.17은 압괴하중의 변동수치인 F_{ratio}를 비교한 것인데 역시 내경이 작은 3인치 시편들에서 안정된 압괴를 보여주고 있다.

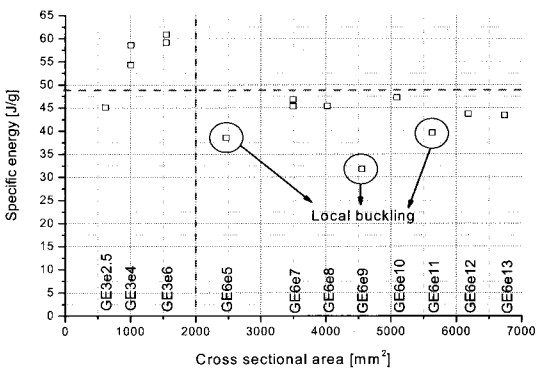


Fig. 2.11 Specific energy with respect to cross sectional area

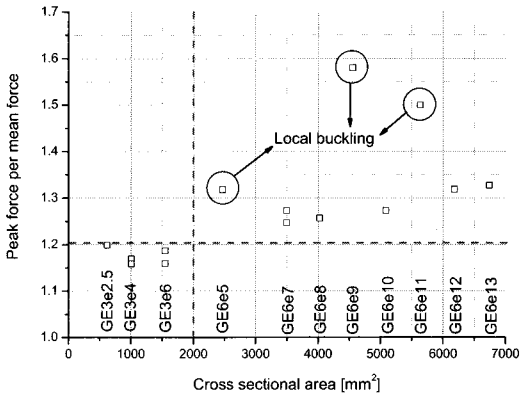


Fig. 2.12 F_{ratio} with respect to cross sectional area

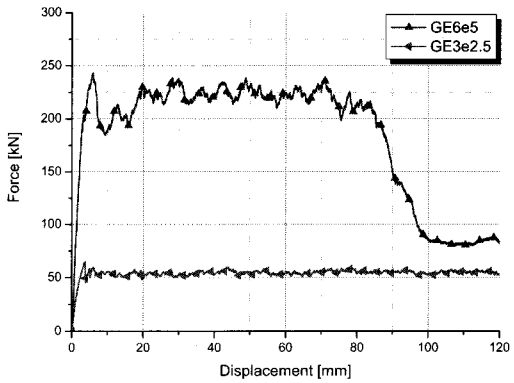


Fig. 2.13 Force and displacement curves by quasi-static test

이로써 동일한 조건에서 시편사이즈를 증가하였을 때 delamination에 의한 국부좌굴의 발생확률이 높아지고 동일한 t/D값일 경우에도 사이즈가 작은 경우 에너지 흡수특성이 우수하다는 것을 알 수 있었다.

2.3.3 쐐기 사용 유무에 따른 비교 분석

또 다른 트리거 메커니즘 하나로서 쐐기를 사용하여 에너지흡수 특성을 비교하여 보았다. 쐐기는 압괴하중을 낮추어 안정적인 압괴모드를 도출하는데 효과가 있다는 기존 연구결과를 토대로 불안정한 압괴모드가 일어나는 6인치 시편에 적용하여 실험을 하였고 Table 2.2의 시편 No. 11, 12, 15, 16, 19, 20, 23, 24 8개의 시험결과를 Fig. 2.18~2.21에 정리하였다.

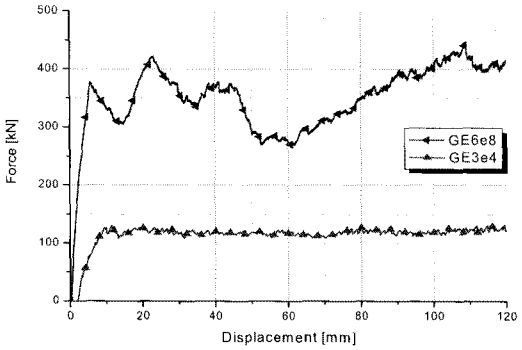


Fig. 2.14 Force and displacement curves by quasi-static test.

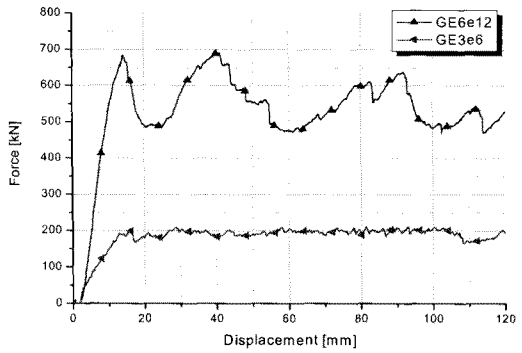


Fig. 2.15 Force and displacement curves by quasi-static test.

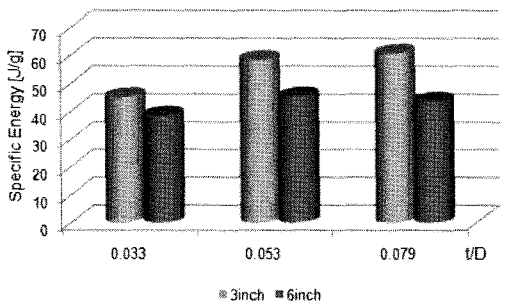


Fig. 2.16 Specific energy with respect to t/D ratio.

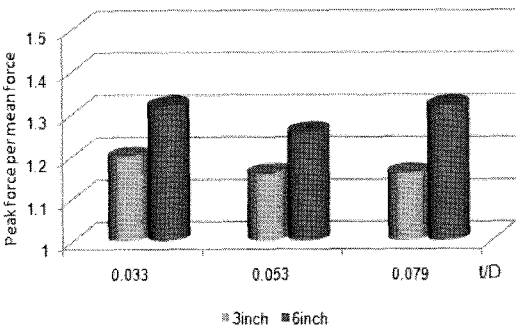


Fig. 2.17 F_{ratio} with respect to t/D ratio.

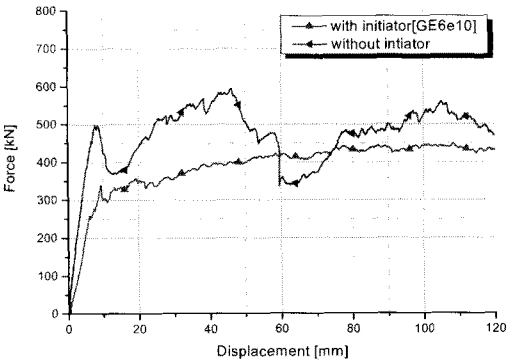


Fig. 2.18 Force and displacement curves by quasi-static test.

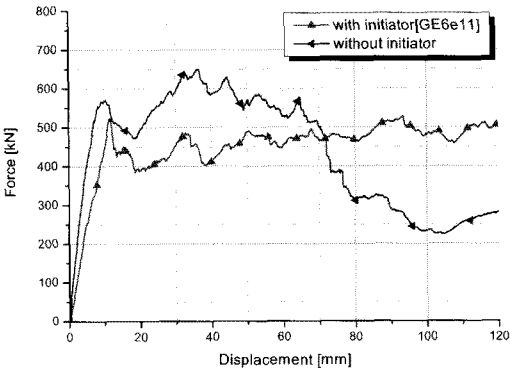


Fig. 2.19 Force and Displacement curves by quasi-static test.

Fig. 2.18, 2.19, 2.21 경우 쐐기를 사용한 시편에서 압괴하중의 변동이 상당히 완화되는 것을 확인할 수 있다. 그러나 Fig. 2.20에서는 오히려 쐐기를 사용한 시편에서 국부좌굴이 발생하였다. 쐐기가 압괴하중의 변동을 완화시키는 효과를 확인할 수 있었으나 쐐기외에도 추가적으로 국부좌굴 억제를 위한 대책이 필요하다.

2.3.4 섬유 배향각에 따른 비교 분석

국부좌굴이 발생한 시편의 경우 섬유배향각 방향으로 섬유와 모재가 debondig 및 delamination이 발생함을 알 수 있었다. 이는 섬유배향각에 따른 섬유와 모재의 접착강도가 주원인으로 볼 수 있다. 이를 분석하기 위해 압괴하중의 변동이 큰 6인치 시편을 대상으로 섬유배향각별로 제작하여 실험하였고 Table 2.2의 시편 No. 11, 13~15, 17~19, 21, 22의 9개의 실험결과를 비교하였다. 섬유배향각은 70°를 기준으로 상하 15°씩 각각 55°, 90°(제작상의 문제로 88°로 함)로 제작하여 에너지 흡수특성을 비교하여 보았다.

Fig. 2.24~2.26는 섬유배향각 별로 측정된 하중-변위 결과이다. 평균압괴하중을 계산하여 Fig. 2.27에 정리하였다. 섬유

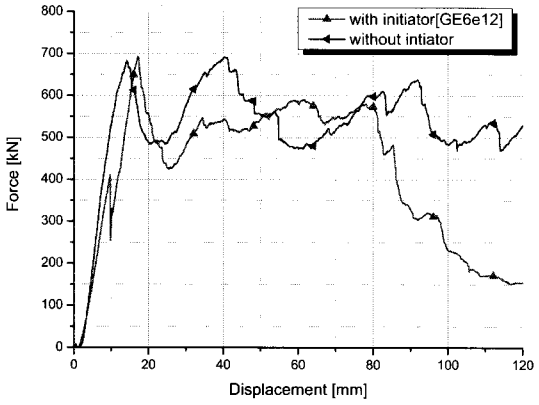


Fig. 2.20 Force and displacement curves by quasi-static test.

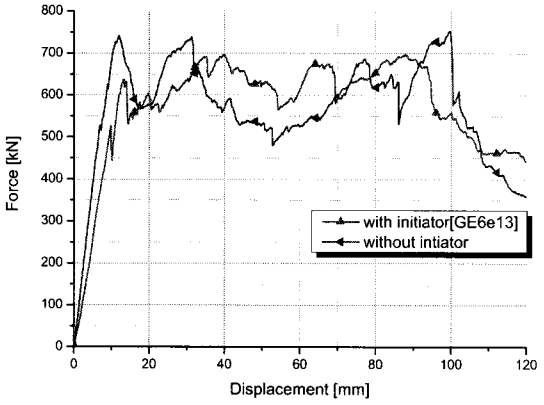


Fig. 2.21 Force and Displacement curves by quasi-static test.

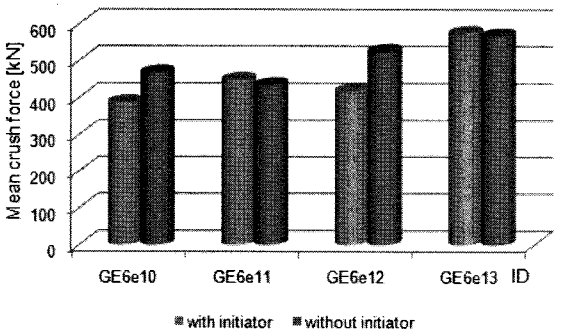


Fig. 2.22 Mean crush forces with respect to w or w/o plug initiator.

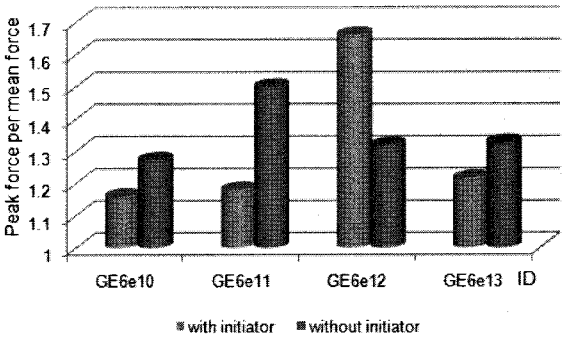


Fig. 2.23 F_{ratio} with respect to w or w/o plug initiator.

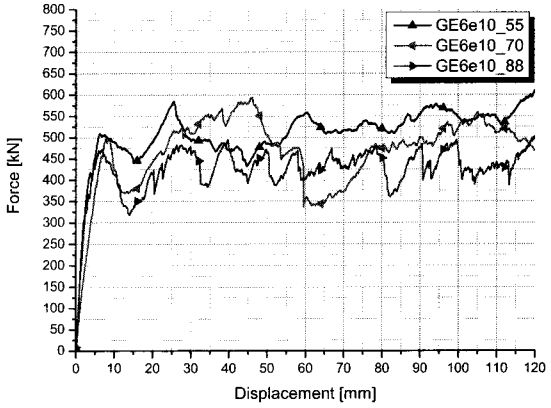


Fig. 2.24 Force and Displacement curves by quasi-static test.

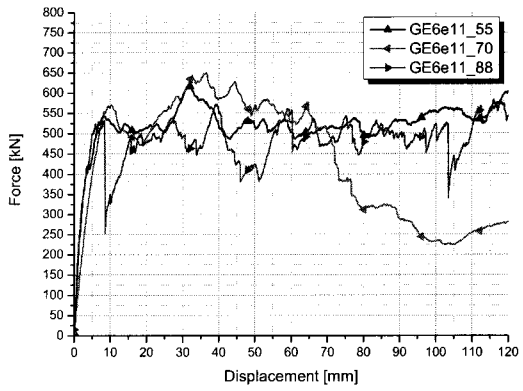


Fig. 2.25 Force and Displacement curves by quasi-static test.

배향각이 작을수록 평균압괴하중이 크게 측정되었고, 또한 Fig. 2.28처럼 섬유배향각이 가장 낮은 시편에서 압괴하중의 변동치도 비교적 양호하게 측정되었다.

이로서 섬유배향각이 낮을수록 에너지흡수특성이 우수하다는 것을 확인하였다.

2.3.5 튜브 단면적에 따른 비교 분석

Fig. 2.29 은 섬유배향각이 70°로 동일한 Table 2.2의 No. 1~11,

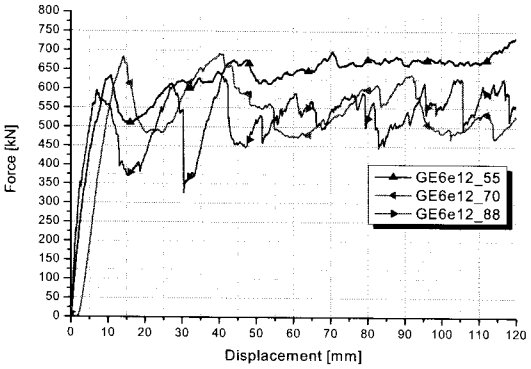


Fig. 2.26 Force and displacement curves by quasi-static test.

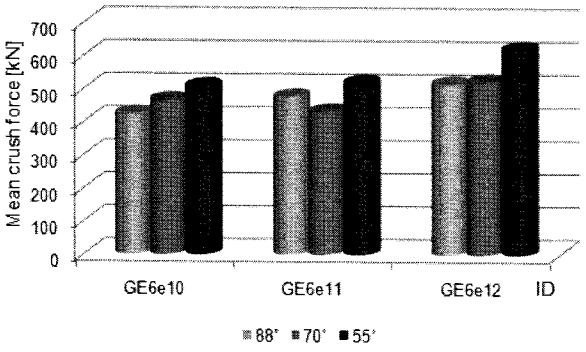


Fig. 2.27 Mean crush forces with respect to fiber orientation.

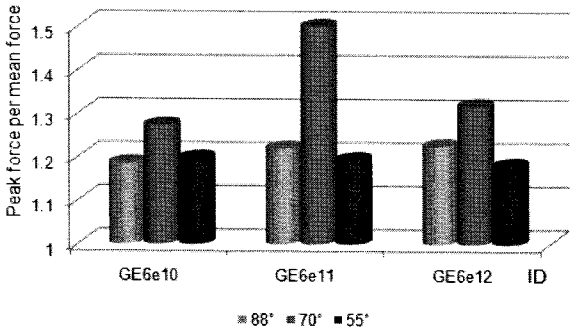


Fig. 2.28 F_{ratio} with respect to fiber orientation.

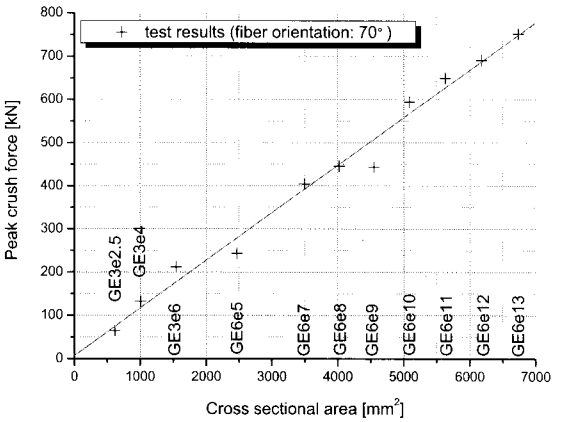


Fig. 2.29 Peak crush forces with respect to cross sectional area.

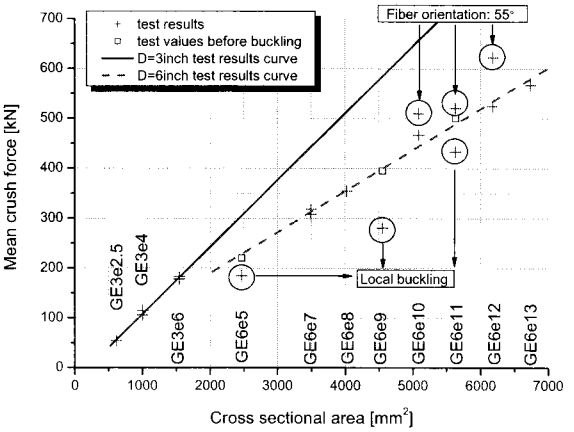


Fig. 2.30 Mean crush forces with respect to cross sectional area.

15, 19, 23의 14개 시편의 준정적실험 결과를 단면적에 대한 최대압괴하중으로 나타낸 것인데 대부분 선형적인 분포를 이루고 있으나 Fig. 2.30와 같이 평균압괴하중을 비교할 경우 내경이 3인치인 시편보다 단면적이 큰 내경이 6인치 시편에서 낮게 분포되고 있다. 이는 6인치 시편에서 압괴하중의 변동치인 F_{ratio}가 높게 나와 평균압괴하중을 감소시켰기 때문이다. 또한 6인치 시편에서 t/D 값과 무관하게 층간분리에 의한 국부좌굴이 발생하였음을 알 수 있다.[13] 내경이 증가하는 치수효과에 의한 이러한 불안정한 압괴 모드는 섬유 배향각을 낮춤으로써 완화시킬 수 있다. 시편 GE6e10, GE6e11, GE6e12 경우 섬유배향각이 55°일 때가 70°일 때보다 9%, 18%, 20% 높은 평균압괴하중을 보여주고 있다.

Fig. 2.31은 쐐기를 사용한 GE6e10w 시편을 촬영한 사진으로 시편들 중 가장 안정적인 압괴 모드를 보여주고 있고, Fig. 2.32는 쐐기를 사용한 GE6e12w 시편을 촬영한 사진으로 좌굴이 일어나는 불안정적인 압괴 모드를 보여주고 있다.

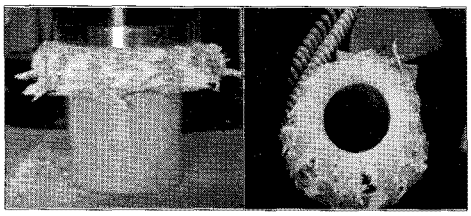


Fig. 2.31 Stable crush mode for GE6e10w.

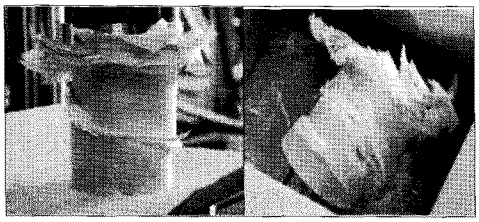


Fig. 2.32 Unstable crush mode for GE6e12w.

Table 2.3 Test results

Specimen ID	Cross Sectional area (A) [mm2]	t/D ratio	Mean crush force (F_{avg}) [kN]	Specific Energy (E_s) [J/g]	$\frac{F_{peak}}{F_{avg}}$ (F_{ratio})
GE3e2.5	616.5	0.033	53.99	45.14	1.198
GE3i4	1005	0.053	105.7	54.23	1.169
GE3e4	1005	0.053	114.2	58.55	1.158
GE3i6	1545	0.079	177.3	59.14	1.187
GE3e6	1545	0.079	182.5	60.89	1.159
GE6e5	2466	0.033	184.4	38.55	1.318
GE6i7	3496	0.046	307.6	45.34	1.247
GE6e7	3496	0.046	317.7	46.83	1.273
GE6e8	4021	0.053	354.1	45.39	1.256
GE6e9	4552	0.059	280.4	31.75	1.580
GE6e10	5089	0.066	466.4	47.24	1.273
GE6e10w	5089	0.066	386.4	39.14	1.159
GE6e10_55	5089	0.066	509.4	51.59	1.197
GE6e10_88	5089	0.066	424.8	43.03	1.186
GE6e11	5632	0.072	432.9	39.61	1.500
GE6e11w	5632	0.072	447.3	40.93	1.180
GE6e11_55	5632	0.072	519.9	47.57	1.194
GE6e11_88	5632	0.072	478.2	43.76	1.220
GE6e12	6182	0.079	524.3	43.71	1.318
GE6e12w	6182	0.079	417.4	34.80	1.661
GE6e12_55	6182	0.079	622.2	51.88	1.181
GE6e12_88	6182	0.079	517.0	43.10	1.226
GE6e13	6738	0.086	567.1	43.38	1.327
GE6e13w	6738	0.086	573.7	43.88	1.216

준정적 압괴실험결과는 Table 2.3에 종합적으로 정리하였다. 두께가 증가할수록 단면적이 증가하여 평균압괴하중이 증가하는 것을 알 수 있고, 내경이 6인치인 시편에서는 3인치 시편에서 볼 수 없었던 층간분리에 의한 국부적으로 좌굴이 발생하였다. 이러한 현상은 섬유 배향각을 축소 조절함에 따라 복합재 튜브의 압괴하중이 안정화되는 것을 알 수 있었다.

3. 결 론

본 연구에서는 필라멘트 와인딩 공법 GFRP (glass/epoxy) 원형튜브의 에너지 흡수 특성을 고찰하여 열차 충돌사고시 에너지 흡수용 복합재 튜브 설계용량을 도출하기 위해 준정적압괴실험을 행하였다. 시험결과로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) GFRP 튜브의 경우 내측보다 외측베벨트리거 메커니즘이 3~8% 정도 높은 에너지흡수능력을 가지고 있었다.
2) 두께가 증가하면 단면적과 t/D 값이 증가하고 이와 거의 비례적으로 평균붕괴하중이 증가하며 안정적인 붕괴모드가 된다. 그러나 튜브직경이 일정이상 증가하게 되면 t/D 값과 무관하게 size effect로써 debonding 및 delamination에 의한 국부좌굴이 발생하며, 국부좌굴 압괴시에는 초기최대하중을 지속시키지 못하는 불안정한 붕괴모드가 된다.
3) 필라멘트 와인딩 공법의 복합재 튜브의 경우 섬유 배향각이 작을수록 국부좌굴의 발생이 적어지며 안정적인 붕괴가 일어나 효율적인 에너지 흡수능력을 얻을 수 있다.
4) 안정적인 붕괴가 일어나면 t/D 값과 무관하게 붕괴가 발생한 재료의 양에 비례하여 에너지가 흡수되었으며, 이로부터 원하는 평균압괴하중의 GFRP 튜브를 설계할 수 있다.

본 연구의 시험 결과로부터 GE3e6, GE6e10_55 튜브가 별도의 쐐기가 없이도 열차의 완충 차막이 및 전두부 설계요구사양인 20ton, 50ton의 평균압괴하중을 안정적으로 얻을 수 있었다. 본 연구의 결과는 GFRP의 압괴에너지 흡수튜브의 초기설계에 활용할 수 있다.

후 기

본 연구는 국토해양부에서 지원하여 한국철도기술연구원에서 진행 중인 철도종합안전기술개발사업의 연구결과로서 관계자들께 감사드립니다.

참고문헌

1) S. Ochelski, P. Gotowicki, "Experimental assessment of energy absorption capability of carbon-epoxy and glass-epoxy composites," *Composite Structures,* Vol. 87, pp. 215-224, 2009.

2) X. W. Zhang, H. Su, T. X. Yu, "Energy absorption of an axially crushed square tube with a buckling initiator," *International Journal of Impact Engineering,* Vol. 36, pp. 402-417, 2009.

3) J. Daniel, D. Melo, A. Luiz, S. Silva, J. Edward, N. Villena, "The effect of processing conditions on the energy absorption capability of composite tubes," *Composite Structures*, Vol. 82, pp. 622 - 628, 2008.

4) C. S. Cha, K. S. Lee, J. O. Chung, H. K. Min, S. B. Pyeon and I. Y. Yang, "Energy absorption characteristics in square or circular shaped aluminum/CFRP compound tubes under axial compression," *International Journal of Automotive Technology*, Vol. 6, No. 5, pp. 501-506, 2005.

5) M. R. Schultz, "Energy absorption capacity of graphite-epoxy composite tubes," M. D. Thesis, Faculty of the Virginia polytechnic Institute and State University, 1998.

6) Thornton P. H., "The Crush of Fiber-Reinforced Plastics," *Handbook of Ceramics and Composites-Synthesis and Properties*, New York, Vol. 1 p. 307-337, 1990.

7) M. Guden, S. Yu ksel, A. Tas demirci, M. Tanoglu, "Effect of aluminum closed-cell foam filling on the quasi-static axial crush performance of glass fiber reinforced polyester composite and aluminum/composite hybrid tubes," *Composite Structures*, Vol. 81, pp. 480-490, 2007

8) J. M. Starbuck, G. C. jacob and S. Simunovic. 2000. "Test Methodologies for Determining Energy Absorbing Mechanisms of Automotive Composite Material Systems," Doc. No. 2000-01-575, *Future Car Congress*, Crystal City, VA, USA, April 2000.

9) A. G. Mamalis, D. E. Manolakos, G. A. Domosthenous, W. Johnson, "Axial Plastic Collapse of Thin Bi-Material Tubes as Energy Dissipating System," *Int. J. Impac Eng.*, Vol. 11, No. 2, p. 185-96, 1991.

10) C. M. Kindervater, and H. Georgi, "Composite strength and Energy absorption as an aspect of structural crash resistance," Vol. 6, pp. 189-235, 1993.

11) 철도차량 안전기준에 관한 지침(2007), 건설교통부고시 제2007-278호, 2007.7.9

12) Hong-Wei Song, Xing-Wen Dub, "Off-axis crushing of GFRP tubes," *Composites Science and Technology*, Vol. 62, pp. 2065-2073, 2002.

13) A. E Ismail, "Energy absorption of foam-filled steel extrusion under quasistatic oblique loading," *International Journal of Engineering and Technology*, Vol. 5, No. 1, pp. 11-24, 2008.

14) Halit Kavia, A. Kaan Toksoy, Mustafa Guden, "Predicting energy absorption in a foam-filled thin-walled aluminum tube based on experimentally determined strengthening coefficient," *Materials and Design*, Vol. 27, pp. 263-269, 2006.

15) J. M. Babbage, P. K. Mallick, "Static axial crush performance of unfilled and foam-filled aluminum - composite hybrid tubes," *Composite Structures*, Vol. 70, pp. 177-184, 2005.

16) Hong-Wei Song, Zi-Jie Fan b, Gang Yu a, Qing-Chun Wang b, A. Tobota c, "Partition energy absorption of axially crushed aluminum foam-filled hat sections" *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 42, pp. 2575-2600, 2005

17) Hong-Wei Song, Zhi-Min Wan, Zhi-Min Xie, Xing-Wen Du, "Axial impact behavior and energy absorption efficiency of composite wrapped metal tubes," *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 24, pp. 385-401, 2000

18) Hong-Wei Song, Xing-Wen Du, Gui-Fan Zhao, "Energy absorption behavior of double-chamfer triggered glass/epoxy circular tubes," *Journal of Composite Materials*, Vol. 36, No. 18, pp. 2183-2198, 2002.

19) Hong-Wei Songa, Xing-Wen Dub, "Off-axis crushing of GFRP tubes," *Composites Science and Technology*, Vol. 62, pp. 2065-2073, 2002.

20) M. A. Jimenez, A. Miravete, E. Larrod e, D. Revuelta, "Effect of trigger geometry on energy absorption in composite profiles," *Composite Structures*, Vol. 48, pp. 107-111, 2000.

21) S. J. Beard, F-K Chang, "Energy absorption of braided composite tubes," *International Journal of Crashworthiness*, Vol. 7, No. 2, pp. 191-206, 2002.

22) N. A. Warrior, T.A. Turner, E. Cooper, M Ribeaux, "Effects of boundary conditions on the energy absorption of thin-walled polymer composite tubes under axial crushing," *Thin-Walled Structures*, Vol. 46, pp. 905-913, 2008.

23) A. G. Mamalis, D. E. Manolakos, G. A. Domosthenous, W. Johnson, "Axial Plastic Collapse of Thin Bi-Material Tubes as Energy Dissipating System," *Int. J. Impac Eng.*, Vol. 11, No. 2, p. 185-96, 1991.

24) A. F. Hamed, M. M. Hamdan, B. B. Sahari and S. M. Sapuan, "Experimental Characterization of filament wound Glass/epoxy and Carbon/epoxy Composite Materials," *Asian Research Publishing Network*, Vol. 3, No. 4, 2008.