

베벨 및 튜립 트리거를 갖는 유리섬유 복합소재 튜브의 에너지 흡수특성 평가

김정석^{a*}

Investigation of Energy Absorption Property of Glass/Epoxy Composite Tubes with Bevel and Tulip Triggers

Jung Seok Kim^{a*}

^a New Transportation Systems Research Center, Korea Railroad Research Institute,
176, Cheoldobangmulgwan-ro, Uiwang, Gyeonggi-do, 16105, Korea

ARTICLE INFO

Article history:

Received	7	June	2017
Revised	4	July	2017
Accepted	25	July	2017

Keywords:

Composite tubes
Trigger
Glass/epoxy
Specific energy absorption
Failure

ABSTRACT

Energy absorption capabilities and failure modes of circular tubes made of glass/epoxy with two trigger mechanisms were evaluated. Three types of glass/epoxy tubes were fabricated using a hand lay-up method with unidirectional and woven fabric prepregs tapes, and a filament winding method. The one end of the fabricated tubes was machined for the bevel trigger and tulip trigger. Then, crush tests were conducted at 10 mm/min loading speed, wherein the glass/epoxy tubes were crushed by a brittle fracturing mode combined with fragmentation and lamina-splaying modes. The UD glass/epoxy tubes with a bevel trigger and the filament wound tubes with a tulip trigger showed the maximum and minimum specific energy absorptions, respectively, with a difference of 9.3%. The tube with a tulip trigger exhibited a maximum reduction of 5.7% in the initial peak load; the tube with a bevel trigger showed a maximum increase of 2.9% in the specific energy absorption.

1. 서론

복합소재는 압괴(crushing)시 점진적인 파손특성(progressive failure) 때문에 우수한 충격에너지 흡수특성을 가지고 있다¹⁻³⁾. 이러한 이유에서 경량화가 요구되는 자동차 및 항공 분야에 확대 적용되고 있다. 자동차의 충격흡수 튜브 및 착륙시 충격흡수가 요구되는 헬기의 랜딩기어에도 복합소재 에너지 흡수튜브가 적용되고 있다. 최근에는 독일 Voith사에서 철도차량용 충돌흡수장치를 유리섬유 복합소재로 개발하여 ICE열차에 적용하였다. 이를 통해 기

존 금속대비 약 60%의 무게를 절감하였다⁴⁾.

따라서, 국내 철도차량분야에서도 복합소재 에너지 흡수 튜브에 대한 기술 개발이 필요한 상황이다. 특히, 유리섬유 복합소재의 경우 경량화 요구조건 및 경제성 측면에서 유리한 소재라고 할 수 있다. 복합소재 에너지 흡수 튜브관련 연구들은 대부분은 복합소재의 물성과 에너지 흡수 특성(specific energy absorption, SEA) 간의 연관성을 규명하는데 집중되었다⁵⁻⁷⁾. 그러나, 복합소재 튜브의 압괴시 초기최대하중(initial peak load)의 감소와 에너지 흡수성 향상을 위한 트리거 메커니즘(trigger mechanism)에 관한 연구

* Corresponding author. Tel.: +82-31-460-5663

Fax: +82-31-460-5038

E-mail address: jskim@krri.re.kr (Jung Seok Kim).

는 상대적으로 적다. 복합소재의 에너지 흡수특성은 소재에 지배적인 영향을 받지만 동일한 소재하에서는 압괴 트리거 메커니즘이 중요한 인자이다. Czaplicki 등은 펄트루전 기법으로 제작된 유리섬유/폴리 에스터와 유리섬유/비닐에스터 사각튜브에 대한 에너지 흡수특성 평가를 통해 튜립형태의 트리거가 기존 베벨(bevel)형태의 트리거 대비 최대 2배정도의 에너지 흡수특성의 향상을 확인하였다⁸⁾. Song 등은 이중 베벨 트리거의 경우 기존 대비 초기최대하중을 약 16% 감소시킴을 확인하였다⁹⁾. Yang 등은 기계적 트리거를 적용하여 직조된 유리섬유/폴리에스터와 탄소섬유/에폭시 튜브에 대한 압괴시험을 통해 기존 대비 각각 12%와 17%의 무게당 흡수에너지 향상을 확인하였다¹⁰⁾. Haung 등은 크라운 트리거(crown trigger)라는 개념을 제안하고 시험을 통해 기존 베벨 트리거 대비 약 21.1%의 무게당 흡수에너지 향상을 확인하였다¹¹⁾. 또한, 형상기억합금을 이용한 트리거 장치를 제안하여 기존 대비 약 37.2%의 에너지 흡수성 향상을 확인하였다¹²⁾.

위와 같이 동일한 소재에 대한 에너지 흡수특성은 트리거 메커니즘에 상당한 영향을 받음을 확인할 수 있었다. 또한, 튜립 트리거의 경우 베벨 트리거 대비 최대 2배의 무게당 흡수에너지 향상 및 충격하중을 저감할 수 있음을 알 수 있었다. 따라서, 본 연구에서는 일방향(UD), 직조 및 필라멘트 와인딩으로 제작된 유리섬유 복합소재 원형 튜브에 대해 기존 베벨 트리거와 튜립 트리거 적용시의 에너지 흡수특성을 고찰하였다.

2. 복합소재 튜브의 준정적 압괴시험

2.1 복합소재 튜브 제작

본 연구에서는 일방향 유리섬유/에폭시 프리프레그(GU150/RS1222)와 평직으로 직조된 유리섬유/에폭시 프리프레그(K126#/RS1222)를 원형 금속파이프에 랩핑장치(wrapping machine)를 이용하여 감고, 이를 오븐에서 성형하여 긴 복합소재 원형 파이프를 제작하였다. 또한, 필라멘트 와인딩을 통해 제작되는 원형튜브는 유리섬유(1200TAX)와 필라멘트 와인딩용 에폭시 수지(GY6005)를 이용하여 제작하였다. 본 연구에서 제작된 원형튜브는 모두 최외층은 후프(hoop)방향으로 강화섬유가 배열되고 다음층은 튜브의 길이방향으로 배열되도록 하였다. 이것은 최외 90도층에 의해 튜브 중앙부 균열진전 및 단층단발의 굽힘에 대한 저항성을 높여 압괴 에너지를 증가시키기 위해서이다. Table 1은 각 원형튜브의 적층각과 베벨 트리거 및 튜립 트리거 원형 튜브의 중량 및 적층구조를 나타낸 것이다. 베벨 트리거 튜브에 비해 튜립 트리거 튜브의 중량이 평균 약 2.6% 낮았다. Fig. 1은 본 연구에서 사용한 유리섬유/에폭시 원형 튜브의 형상을 나타낸 것이다. 시험에 적용된 원형튜브들의 평균적인 내경은 30 mm이고 길이는 100

Table 1 Informations of three types of glass/epoxy composite circular tubes

Tube types	Stacking sequence	Weight
UD (GU150/RS1222)	[90/0] ₆	34.6 g (33.7 g)
Fabric (K126#/RS1222)	[fill/warp] ₄	33.6 g (32.7 g)
Filament winding (1200TEX/GY6005)	[(90°)/(45°) ₂ /(90°)/(45°)/(90°) ₂] _T	36.7 g (35.7 g)

(): weight of tubes with tulip trigger

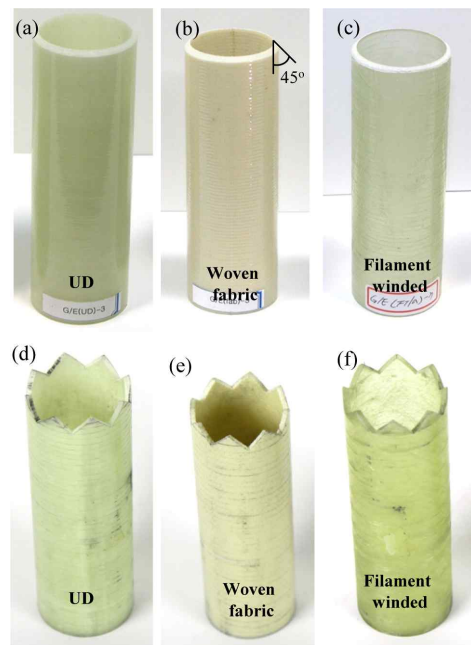


Fig. 1 Glass/epoxy composite circular tubes; (a)-(c) with bevel trigger, (d)-(f) with tulip trigger

mm이다.

제작된 원형튜브의 한쪽 끝단에는 튜브가 압괴될때 초기최대하중(initial peak load)을 낮추고 점진적인 파손(progressive failure)에 의한 안정적인 압괴를 유도하기 위한 두 가지의 트리거 메커니즘을 적용하였다. 첫번째는 Fig. 1(a)와 같이 끝단에 45도로 모서리를 가공한 베벨 트리거와 Fig. 1(b)와 같이 툰니모양의 튜립 트리거를 가공하였다.

Fig. 2는 튜립 트리거 메커니즘의 상세한 치수를 나타낸 것이다. 툰니부사이의 각은 90°이고 총 8개의 툰니가 생성되었고, 튜립부의 높이는 6.3 mm이다.

2.2 압괴시험

본 연구에서 수행된 준정적 압괴시험은 100 kN 용량의 유압식 만능시험기를 이용하였다. 원형튜브를 압괴하기 위한 상하 하중판(load platens)은 시험전에 평형을 확인하였다. 그리고 모든 튜브

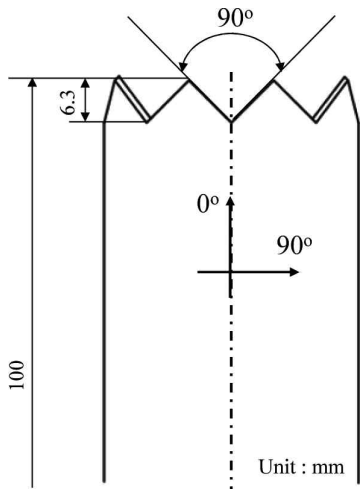


Fig. 2 Schematic diagram of the tulip trigger mechanism

는 10 mm/min의 속도로 압괴하였다. 시험시 하중과 크로스헤드의 변위를 기록하였으며 각 소재별 3개의 튜브를 시험하여 결과를 평균하였다.

3. 결과분석

3.1 하중-변위 선도

일반적으로 복합소재는 금속재와 달리 취성거동을 보인다. 또한, 수지균열, 섬유파단 및 섬유와 수지간 분리등과 같은 미소파단모드가 압축거동 및 에너지 흡수능력을 결정하는 요인이다^[13]. 이러한 복합소재는 압축하중하에서 일반적으로 극한파괴거동을 보이는데, 극한파괴는 에너지 흡수측면에서는 적합하지 못하다. 극한파괴의 경우 초기최대하중(initial peak load)과 후하중(post-failure load)의 차이가 커서 많은 충격에너지를 흡수할 수 없고, 초기최대하중이 클 경우 가속도의 증가로 충격흡수부재로서 부적합하다.

따라서, 이러한 파손거동을 점진적인 파손모드로 변환하기 위해 트리거 메커니즘이 도입되었다. 트리거 메커니즘 도입시에는 극한파괴와 달리 초기최대하중을 감소시키고, 초기최대하중과 후하중의 차이가 적어 많은 에너지를 흡수할 수 있다. Fig. 3은 트리거 메커니즘 도입을 통해 복합소재에 유도된 점진적인 파단시 전형적인 하중-변위선도를 나타낸 것이다.

하중-변위선도의 각 단계별 특성은 다음과 같다.

- I 단계 (선형탄성영역) : 압괴하중이 원형튜브에 가해지면서 하중이 선형적으로 증가하는 영역으로 트리거 부위에 응력집중이 발생한다. 여기서 발생하는 최대하중값은 트리거부의 최대 압축강도이다.
- II 단계 (점진적 파손영역) : 압괴하중이 트리거부의 압축강도를 초과하여 파손이 발생되기 시작하는 영역으로 균열진전 및

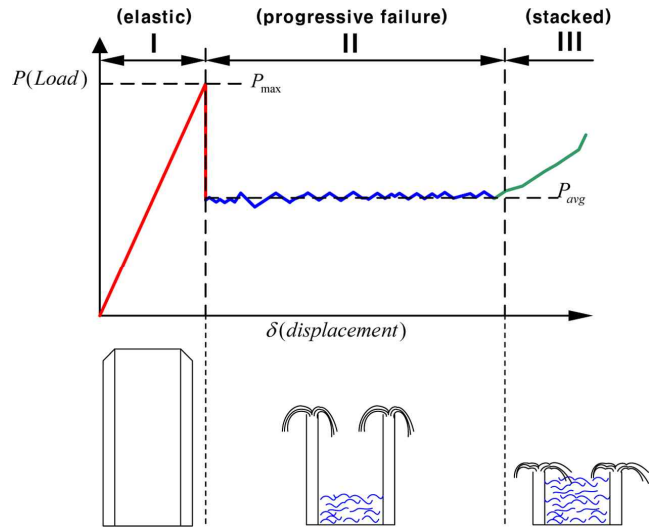


Fig. 3 Typical load-displacement curve for the progressive failure of composite tubes^[13]

정지 를 반복하면서 점진적인 파손거동을 보인다. 균열이 진전하면서 단층다발(lamina bundle)이 파단되어 튜브의 내외부에 쌓이며 대부분의 에너지를 흡수하는 영역이다.

- III 단계 (쌓임영역) : 튜브내부공간에 파단조각들이 쌓여 더 이상 압괴되지 않고 하중이 급격히 증가하는 영역이다.

Figs. 4-6은 일방향(UD), 직조 및 필라멘트 와인딩으로 제작된 유리섬유/에폭시 복합소재 원형 튜브의 압괴시험에서 얻어진 전형적인 하중-변위 선도이다. 일방향 튜브의 경우 Fig. 4에서 알 수 있듯이 초기 최대하중이후 점진적인 파손영역에서는 거의 유사한 거동을 보였고 거의 일정한 하중을 유지하면서 압괴하였다. 베벨 트리거를 갖는 튜브의 경우 약 2.6 mm 압괴지점에서 26.6 kN의 초기최대하중을 보였고 튜립트리거의 경우 약 9.2 mm 압괴지점에서 25.4 kN의 초기최대하중을 보였다. 따라서, 튜립 트리거 적용시 일방향 유리섬유/에폭시 복합소재 튜브의 경우 베벨 트리거 대비 초기최대하중이 약 4.5% 감소함을 알 수 있었다.

Fig. 5는 직조된 튜브에 대한 하중-변위선도로 전반적인 거동이 일방향 튜브와 유사했다. 이 경우 베벨 트리거를 갖는 튜브의 경우 약 2.6 mm 압괴지점에서 26.4 kN의 초기최대하중을 보였고 튜립 트리거의 경우 약 7.3 mm 압괴지점에서 24.9 kN의 초기최대하중을 보였다. 따라서, 튜립 트리거 적용시 베벨 트리거 대비 초기최대하중이 약 5.5% 감소함을 알 수 있었다. 필라멘트 와인딩으로 제작된 튜브의 경우 Fig. 6에서 알 수 있듯이 베벨 트리거를 갖는 튜브의 경우 약 2.6 mm 압괴지점에서 27.0 kN의 초기최대하중을 보였고 튜립 트리거의 경우 약 7.7 mm 압괴지점에서 27.3 kN의 초기최대하중을 보였다. 이경우는 튜립 트리거가 베벨 트리거보다 대비 초기최대하중이 약 1.1% 높은 값을 보였다.

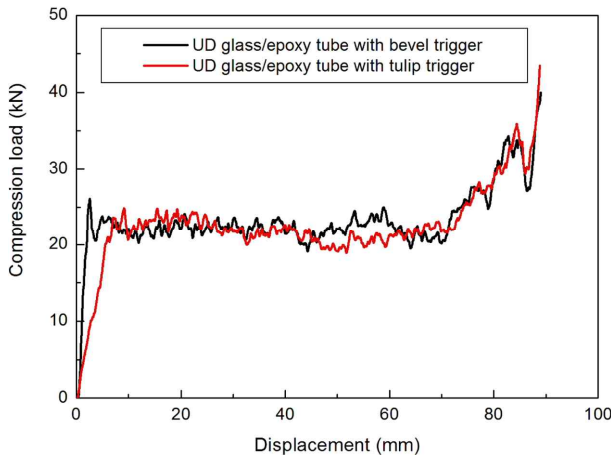


Fig. 4 Compression load-displacement history of UD glass/epoxy tubes

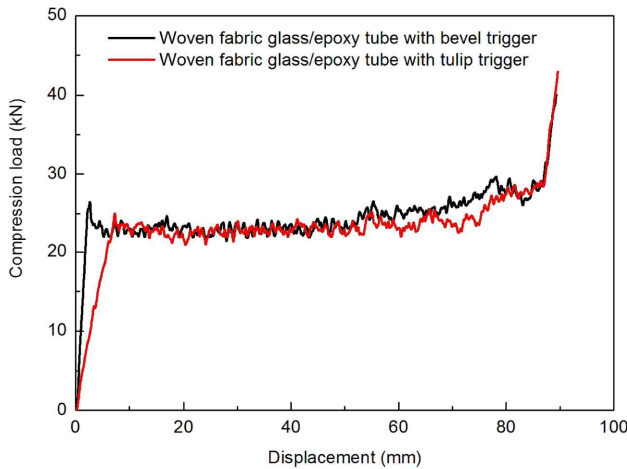


Fig. 5 Compression load-displacement history of woven fabric glass/epoxy tubes

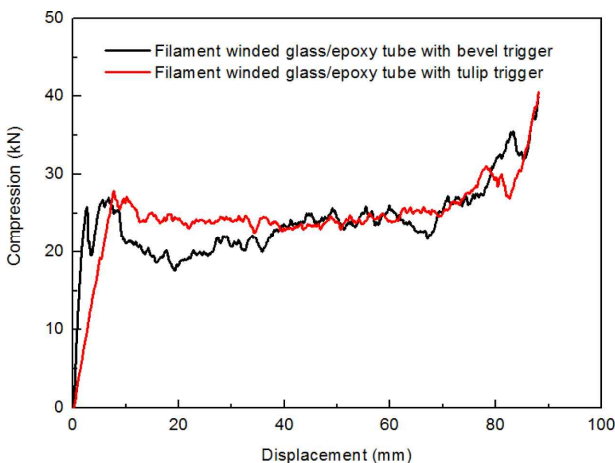


Fig. 6 Compression load-displacement history of filament wound glass/epoxy tubes

3가지 튜브들에 대한 하중-변위선도 분석에서 필라멘트 와인딩으로 제작된 튜브의 초기최대하중이 가장 높았다. 이것은 일방향과

Table 2 Measured energy absorption parameters.

Types	Trigger	Initial peak load (kN)	Mean load (kN)	SEA (kJ/kg)
UD	Bevel	26.6	19.2	48.1
	Tulip	25.4	19.0	48.4
Woven fabric	Bevel	26.4	20.1	51.4
	Tulip	24.9	19.5	50.7
Filament winding	Bevel	27.1	20.9	48.0
	Tulip	27.3	20.1	46.6

직조된 튜브의 경우 [90/0]의 적층구조를 갖지만 필라멘트와인딩으로 제작된 튜브의 경우 제작의 특성상 [90/45]의 적층구조를 갖기 때문이다. 또한, 모든 경우에서 베벨 트리거 적용 튜브의 초기 압축강성이 상대적으로 많은 부분이 절단된 튜립 트리거 적용 튜브들에 비해 약 3.5배 정도 높았다.

3.2 에너지 흡수특성

본 연구에서는 각 튜브별 에너지 흡수능력을 평가하기 위해 초기최대하중, 평균하중 및 무게당 흡수에너지(specific energy absorption, SEA)를 계산하여 비교하였다. 무게당 흡수에너지는 식 (1)과 같이 원형튜브에서 실제 흡수에 기여한 무게(crushed weight)만을 고려하였다.

$$SEA = \frac{E_{total}}{W \frac{L_t}{L_c}} = \frac{\int_0^{L_c} Pd\delta}{W \frac{L_t}{L_c}} \quad (1)$$

여기서 E_{total} 는 총 흡수된 에너지, W 는 원형튜브의 전체무게, P 는 압괴하중, δ 는 압괴변위, L_c 는 압괴된 거리(에너지 흡수에 기여한 거리), L_t 는 튜브의 총길이를 의미한다. Table 2는 측정된 각 튜브별 에너지 흡수특성을 정리한 것이다. Table 2에서 알 수 있듯이 전반적인 에너지 흡수특성은 베벨 트리거와 튜립 트리거가 유사하였다. 에너지 흡수측면에서 필라멘트 와인딩으로 제작되고 튜립 트리거를 갖는 튜브가 가장 낮은 SEA값을 보였고, 베벨 트리거를 갖는 직조된 유리섬유/에폭시 튜브가 가장 높은 SEA값을 보였다. 이때 두 튜브사이의 에너지 흡수특성 차이는 약 9.3% 정도였다.

3.3 압괴거동

본 시험에서 적용된 유리섬유/에폭시 튜브들의 경우 압괴시 분쇄 모드(fragmentation mode) 및 단층 벌림 모드(lamina splaying mode)가 혼합된 취성파괴모드(brittle fracturing mode)의 형태로 압괴되었다. 분쇄 모드는 여러개의 층간 및 축방향 균열(interlamina and intralamina crack)을 갖는 썩기형태의 적층판

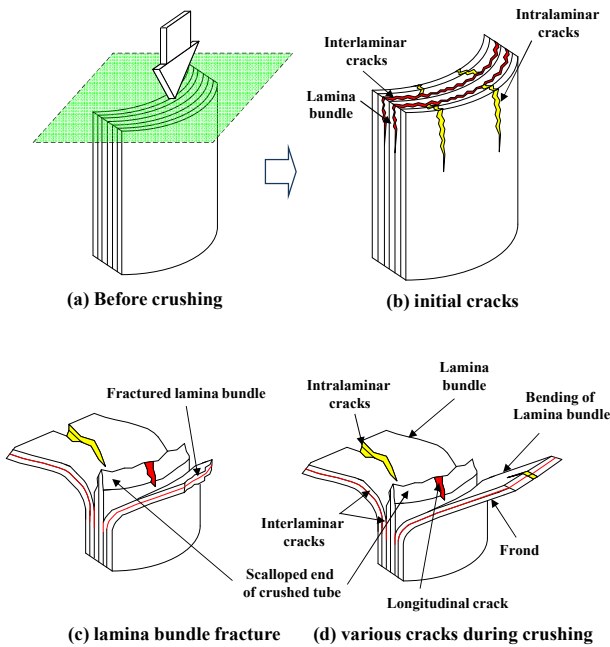


Fig. 7 Schematic diagram of brittle fracturing mode

단면으로 나타나며 취성 섬유에서 발생한다.

이러한 균열들은 단층다발(lamina bundle)을 형성하고 이것들은 압괴하중에 저항하는 지지대 역할을 한다. 압괴하중이 가해질 때 층간균열은 단층다발 지지대의 뿌리부분이 파단되어 썰기형태의 단면(edge of lamina bundle)을 형성할 때까지 진전한다. 이러한 복합소재 원형튜브의 압괴시 주 에너지 흡수메커니즘은 단층다발들의 파괴(lamina bundle fracture)이다.

단층 벌림 모드는 원형튜브 벽이 내외부로 쪼개져서 잎모양(fron)으로 벌어지는 모드로 취성 섬유에서 발생한다. 주 에너지 흡수메커니즘은 하중 부과판과의 마찰, 단층간의 마찰 및 수지균열의 성장이다. Fig. 7은 분쇄모드와 단층 벌림 모드가 혼합된 취성 파괴모드의 도식도이다.

Figs. 8~9는 베벨 트리거와 튜립 트리거를 갖는 일방향 유리섬유/에폭시 튜브의 압괴과정을 나타낸 것이다. 하중측정을 위한 로드셀은 상부하중판 위에 설치되었다. Fig. 8~9에서 알 수 있듯이 일방향 유리섬유/에폭시 튜브의 거시적 파손메커니즘은 분쇄모드와 단층 벌림 모드의 혼합모드인 취성파괴모드였다. 압괴하중이 가해지면 원형튜브벽면 중앙부에 균열이 발생하고, 압괴하중이 증가하게 되면 원주방향 인장응력(hoop stress)에 의해 튜브의 길이방향으로 찢어짐(axial splitting)이 발생하여 진전하였다. 이러한 중앙부 균열과 축방향 찢어짐에 의해 여러 개의 내외부 잎구조가 형성되었다. 하중이 점점 증가함에 따라 굽힘응력에 의해 외부잎구조는 바깥방향으로 굽혀지고 내부잎구조는 튜브안쪽으로 말려들어가서 내부에 쌓였다.

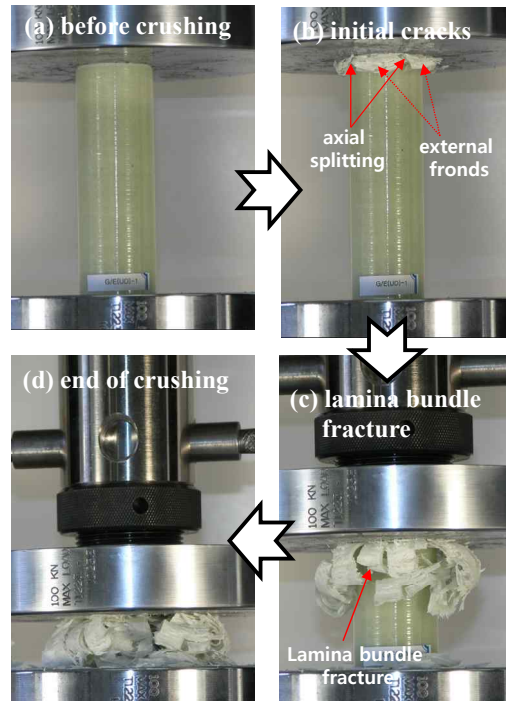


Fig. 8 Crushing process of UD glass/epoxy tube with the bevel trigger

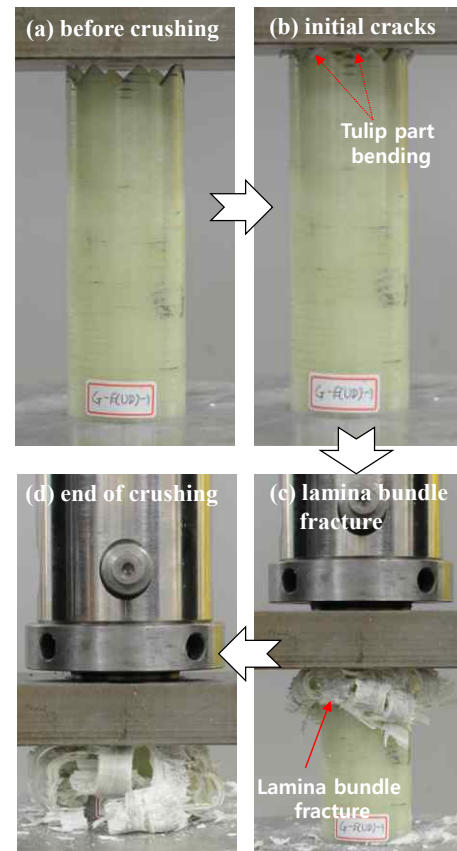


Fig. 9 Crushing process of UD glass/epoxy tube with the tulip trigger

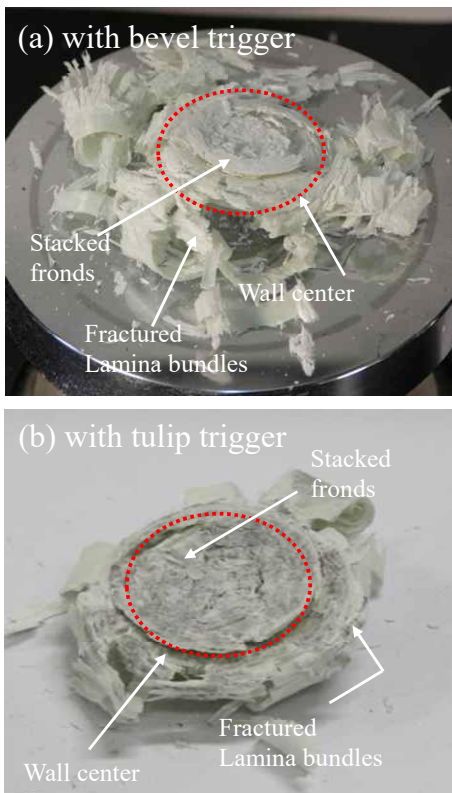


Fig. 10 Crushed UD glass/epoxy tubes

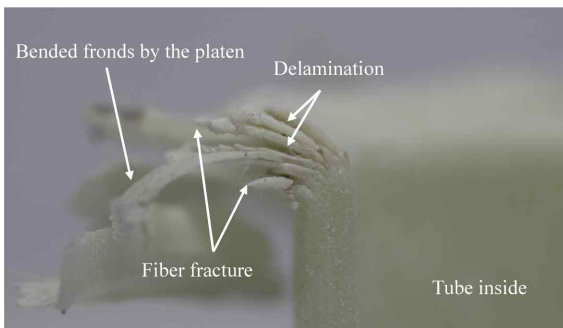


Fig. 11 Cross sectional view of the crushed UD glass/epoxy tube

두 트리거 메커니즘간의 차이는 압괴 초기 베벨 트리거의 경우 원주방향을 따라 균일하게 하중을 지지하기 때문에 원주방향 전체에서 단층별립 모드가 발생하지만, 튨립 트리거의 경우 Fig. 9에서 알 수 있듯이 튨니 모양의 튨립부에서 초기 하중을 감당하기 때문에 초기 강성과 초기 최대하중이 감소하게 된다. 또한 압괴초기에 튨립부 굽힘이 생기면서 압괴되지만 압괴가 진행되면서 베벨 트리거 적용 튨브와 동일한 압괴 거동을 보였다.

Fig. 10은 일방향 유리섬유/에폭시 원형튜브의 시험 후 압괴된 모습이다. 두 튨브에서 유사한 최종 압괴 거동을 확인할 수 있었고, 단층이 튨브의 내외부로 벌어지면서 압괴되어 내부에도 파단된 단층다발들로 채워져 있는 것을 확인할 수 있었다.

Fig. 11은 압괴 후 베벨트리거를 갖는 유리섬유/에폭시 튨브의

단면을 절단하여 확대한 것이다. Fig. 11에서 알 수 있듯이 튨브벽면이 압괴되면서 층간분리 및 섬유파단이 발생한 것을 확인할 수 있었다. 이러한 섬유파단 및 층간분리를 복합소재 튨브가 에너지를 흡수하는 주요 인자임을 확인할 수 있었다.

4. 결론

이상의 연구를 통해 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

베벨 트리거와 튨립 트리거를 갖는 유리섬유/에폭시 튨브의 하중-변위선도 분석에서 모든 튨브는 초기최대하중 이후 점진적인 파손영역에서 거의 일정한 흡수특성을 보여, 충격에너지 흡수용 소재로 적합한 것을 확인할 수 있었다. 에너지 흡수특성 분석에서는 전반적인 흡수특성은 트리거 형태에 관계없이 유사한 값을 보였다. 필라멘트 와인딩으로 제작되고 튨립 트리거를 갖는 튨브가 가장 낮은 무게당 에너지 흡수값을 보였고, 직조되고 베벨 크리거를 갖는 튨브가 가장 높은 에너지 흡수값을 보였다. 이때 두 튨브사이의 무게당 흡수 에너지의 차이는 약 9.3% 정도였다. 파손모드 측면에서는 초기 압괴시 모드는 베벨 트리거를 갖는 튨브는 원주방향의 모든 부분이 동시에 압괴되었으나, 튨립 트리거의 경우 튨니모양의 튨립부만 하중을 받아 압괴되어 낮은 초기 강성과 압괴하중 값을 보였다. 그러나, 압괴가 진행되면서 두 트리거는 거의 유사한 모드로 압괴되었다. 본 연구에서는 튨립 트리거 적용시 베벨 트리거 대비 유사한 무게당 에너지 흡수 능력을 보였으며, 베벨 트리거 대비 낮은 초기 최대 하중값을 보여 충격 흡수부재로서 적합한 것을 알 수 있었다. 그러나, 이전 연구에서 언급한 바와 같이 울립 트리거 적용시 무게당 에너지 흡수특성의 급격한 향상은 관찰되지 않았다.

최종 압괴된 튨브시편의 파단면 관찰을 통해 두 가지 튨브의 튨브벽면이 압괴되면서 층간분리 및 섬유파단이 발생한 것을 확인할 수 있었고, 이러한 섬유파단 및 층간분리를 복합소재 튨브가 에너지를 흡수하는 주요 인자임을 확인할 수 있었다.

후기

본 연구는 한국철도기술연구원 주요사업의 연구비 지원으로 수행되었습니다.

References

- [1] Thornton, P. H., 1979, Energy Absorption in Composite Structures, J. Composite Structures, 13 247-262.
- [2] Bannerman, D. D., Kindervator, C. M., 1987, Crash Impact Behavior of Simulated Composite Fuselage Element, Vertica.

- [3] Kim, J. S., Yoon, H. F. Shin, K. B., 2011, A Study on Crushing Behaviors of Composite Circular Tubes with Different Reinforcing Fibers, *Int. J. of Impact Eng.*, 38 189-207.
- [4] Gardiner, G., 2014, viewed 4 August 2014, Voith to introduce new composites for rail, <<http://www.compositesworld.com/blog/post/voith-to-introduce-new-composite-applications-for-rail-vehicles>>.
- [5] Thornton, P. H., Edwards, P. J., 1982, Energy Absorption in Composite Tubes, *Journal of Composite Materials*, 16 521-544.
- [6] Farley, G. L., 1983, Energy Absorption of Composite Materials, *Journal of Composite Materials*, 17 267-279.
- [7] Farley, G. L., 1986, Effect of Fiber and Matrix Maximum Strain on the Energy Absorption of Composite Materials, *Journal of Composite Materials*, 20 322-334.
- [8] Czaplicki, M. J., Robertson, R. E., Thornton, P. H., 1991, Comparison of Bevel and Tulip Triggered Pultruded Tubes for Energy Absorption, *Composite Science and Technology*, 40 31-46.
- [9] Song, H. W., Du, X. W., Zhao, G. F., 1991, Energy Absorption Behavior of Double-Chamfer Triggered Glass/Epoxy Circular Tubes, *Journal of Composite Materials*, 13 247-262.
- [10] Yang, Y., Nakai, A., Hamada, H., 2011, A Study on Crushing Behaviors of Composite Circular Tubes with Different Reinforcing Fibers, *International Journal of Impact Engineering*, 38 189-207.
- [11] Huang, J., Wang, X., 2010, On A New Crush Trigger For Energy Absorption Of Composite Tubes, *International Journal of Crashworthiness*, 15:6 625-634.
- [12] Huang, J., Wang, X., 2010, Effect of the SMA Trigger on the Energy Absorption Characteristics of CFRP Circular Tubes, *Journal of Composite Materials*, 44:5 639-651.
- [13] Kim, J. S., Yoon, H. J., Lee, H. S., Choi, K. H., Kwon, T. S., 2009, Effects of Reinforced Fibers on Energy Absorption Characteristics under Quasi-static Compressive Loading of Composite Circular Tubes, *Journal of the Korean Society for Composite Materials*, 22 32-38.