

적층구성 변화에 따른 경량화 구조부재의 에너지 흡수 특성

최주호*, 양인영⁺

(논문접수일 2011. 05. 30, 수정일 2011. 10. 12, 심사완료일 2011. 12. 03)

A Study on Energy Absorption Characteristics of Lightweight Structural Member according to Stacking Conditions

Ju-Ho Choi*, In-Young Yang⁺

Abstract

In this study, one type of circular shaped composite tube was used, combined with reinforcing foam and without foam. Furthermore, CFRP (Carbon Fiber Reinforced Plastic) circular member manufactured from CFRP prepreg sheet for lightweight design. CFRP is an anisotropic material which is the most widely adapted lightweight structural member. The crashworthy behavior of circular composite material tubes subjected to static axial compression under same conditions is reported in this paper. The collapse mode during the failure process were observed and analyzed. The behavior of polymeric foams to the tubes crashworthiness were also investigated.

Key Words : CFRP(Carbon Fiber Reinforced Plastic; 탄소섬유강화플라스틱), Density(밀도), Energy absorption(에너지 흡수), Foam(폼)

1. 서론

자동차 설계에 있어서 주된 목표는 친환경성과 충돌안전성능이다. 이와 더불어 지구환경에 대한 중요성 또한 점점 부각되면서, 특히 차량으로부터 배출되는 CO₂감소 및 차량효율향상이 중요한 과제로 인식되고 있다. 따라서 CO₂ 감소 및 차량효율향상에 직접적으로 연관되는 차량 경량화는 피할 수 없는 과제라는 인식이 보편적으로 자리잡고 있다. 이러한 문제점들을 개선하기 위하여 친환경성 부분에서는 배기가스의 규제와 연비 개선을 위한 경량화를 요구하고 있으나 충돌 안전성능 부분에서는 높은 안전성능, 안전성, 고효율 및 다기능이 요구되고 있다. 따라서 자동차의 설계는 승객을 안전하게 보호할 수 있는 안정성이 우선적으로 확보된 상태에서 차체의 중량을 줄이기

위한 경량화측면으로 이루어져야 한다. 이처럼 차량의 무게를 감소 시키면서 안전성까지 겸비한 재료로 복합재료를 들 수 있다. 자동차에 사용되고 있는 섬유는 다양한 기능을 가진 섬유 소재들의 개발이 활발히 진행되고 있다⁽¹⁻⁶⁾.

따라서 자동차의 설계는 승객을 안전하게 보호할 수 있는 안정성이 우선적으로 확보된 상태에서 차체의 중량을 줄이기 위한 경량화 측면으로 이루어져야 한다. 차량 충돌 시 발생하는 충돌에너지를 차량의 승객이 고스란히 받을 경우 승객의 안전은 매우 위협하게 된다. 이에 대한 대책으로써 충돌 시 발생하는 충돌에너지를 차체구조부재의 변형에 의한 에너지 흡수로 완화시킴과 동시에 승객의 생존공간을 확보할 수 있도록 차실 부분은 견고하면서도 적절한 변형을 갖는 차체구조로 설계되어야 한다. 탄소 섬유를 이용한 플라스틱 복합재료(Carbon Fiber

* 조선대학교 첨단부품소재공학과

+ 교신저자, 조선대학교 기계설계공학과 (iyyang@chosun.ac.kr)

주소: 501-759, 광주광역시 동구 서석동 375번지

Reinforced Plastic: 이하 CFRP)는 금속재료보다 강도가 약 30%이상 우수하고 20~50%정도의 경량화가 가능하여 자동차, 항공기 및 우주 비행체의 구조물에 널리 이용되고 있다.

최근 자동차에 적용되는 핵심기술의 개발은 차량의 고안전도 및 편의성 향상기술과 사회적인 측면에서 새로운 해결과제로 부각되고 있는 환경보호를 위한 차량기술로 집약될 수 있다. 따라서 차량 설계적인 측면에서 훨씬 보강된 차체설계가 요구되며 다가능화에 필수적인 여러 가지 부품의 장착은 무게증가의 요인으로 작용되고 있다. 또한, 환경 보호적 측면에서 심각한 환경오염과 자동차 수요의 급격한 증가에 따른 에너지 자원의 고갈로 인해 자동차 연비 및 배기가스의 규제를 한층 심하게 강화하고 있는 실정이며 저공해 자동차 배기 규제를 더욱 강화하고 있다. 특히 소재의 경량화는 엔진효율을 높여 자동차의 성능향상을 극대화시키고 그로 인해 연비향상을 도모할 수 있어서 결국 소재의 경량화는 환경오염방지와 연료절감에 가장 적합하고 효과적인 방법이다⁽¹⁴⁾.

본 연구에서는 이러한 복합재료 중에서도 대표적인 경량화 재료인 CFRP와 Polyurethane Foam을 사용하여 시험편을 제작하였으며 CFRP/foam 시험편의 경량화 구조부재가 정적압괴 및 충돌하중을 받을 경우를 상정하여 압괴특성을 정량적으로 평가하고자 하였다. 또한 CFRP는 적층구성의 변화에 따라 기계적 특성이 변하는 이방성 재료이기 때문에 본 연구에서는 시험편의 계면수와 각도 그리고 foam의 밀도를 달리하여 CFRP/foam 원형부재의 압괴모드와 에너지 흡수 특성을 비교 분석하여 가장 효율적인 에너지 흡수특성을 갖는 차체구조부재를 설계하는데 유용한 자료를 얻고자 한다.

2. 시험편

본 실험에 사용한 시험편은 CFRP 프리프레그 시트를 적층하여 오토클레이브를 사용하여 성형한 후 CFRP 원형 시험편에 Polyurethane Foam의 밀도를 40kg/m³, 60kg/m³으로 충전

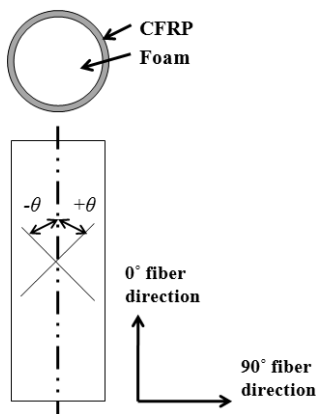


Fig. 1 Configuration of specimen

하여 제작하였다. CFRP 프리프레그 시트는 한국화이버(주)에서 생산한 일방향 Carbon Fiber/Epoxy Resin 프리프레그 시트를 사용하였다. CFRP는 이방성 재료로서 적층구성의 변화에 따라 기계적 특성이 변하는 성질을 가지고 있다. 따라서 본 실험에서는 이러한 특성을 이용하여 시험편의 각도, 계면수와 foam의 밀도에 따른 에너지 흡수특성을 비교·고찰 하고자 각도는 [±45]₄, [0/90]₄, [90/0]₄으로 변화를 주었으며 계면수는 2,3,4 계면으로 변화시켜가며 성형하였다. 또한 CFRP부재와 충전된 foam의 밀도에 따른 에너지 흡수를 조사하기 위하여 밀도는 40kg/m³, 60kg/m³으로 변화를 주었다⁽⁷⁻⁹⁾.

실험에 사용된 시험편의 형상은 Fig. 1에 나타내었으며 시트와 foam의 물성치는 Table 1, 2에 나타내었다. 또한 시험편의 성형은 Photo 1과 같이 오토클레이브를 이용하여 챔버 내부 둘레에 위치한 히터에 의해 경화점 온도 130℃, 경화시간을 90분으로 하여 제작하였으며 성형 시 열 수축 테이프에 의한 압력으로 수지흐름(Resin flow)을 유도하였으며 진공펌프에 의하여

Table 1 Material properties of CFRP prepreg sheet

	Fiber (Carbon)	Resin (Epoxy #2500)	Prepreg sheet
Density [kg/m ³]	1.83x10 ³	1.24x10 ³	-
Poisson's ratio	-	-	0.3
Young's modulus [GPa]	240	3.60	132.7
Tensile strength [GPa]	4.89	0.08	0.3
Resin content [%Wt]	-	-	33

Table 2 Material properties of Foam

Density [kg/m ³]	Thermal conductivity [W/m·K]	Bending strength [Pa]	Compressive strength [Pa]
40	0.020	0.003	0.0013
60	0.020	0.0037	0.0015

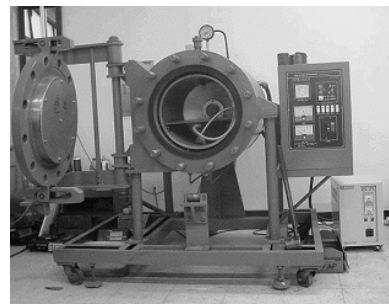


Photo 1 Autoclave

진공백 속을 10^{-1} Pa까지 진공시킨 후 압축기에 의해서 진공백의 외측으로부터 3×10^5 Pa까지 가압시켜 제작하였다. 또한 모든 시험편은 단부효과가 나타나지 않고 좌굴이 생기지 않으면서 주기적으로 반복적인 압축이 일어나도록 하기위해 다이아몬드 커터기를 사용하여 120mm의 길이로 절단 하였다. 또한, CFRP의 가장 취약한 문제점은 취성문제이며 압축초기에 최대 하중이후 급격한 파괴가 진행되어 하중이 급격히 떨어지게 되고, 이로 인해 층간 및 층내 크랙이 성장하게 되어 초기 압축하중 이후 흡수에너지는 낮아지게 된다. 따라서 한쪽 끝단에 Initiator 또는 트리거를 주어 순차적으로 압축을 유도하여 높은 에너지 흡수특성을 갖게 하였다. 본 연구에서는 하중이 작용하는 부분에 45° 모따기 하여 트리거가 있는 시험편을 제작하였다^(10~12).

3. 압축실험

정적압축실험은 만능재료시험기를 사용하여 10mm/min의 변형률 속도로 제어하면서 균일한 압축하중이 가해지도록 축 방향 압축 실험을 행하였고, 전체길이 120mm의 58.3%인 70mm 까지 변위를 제어하면서 연속적으로 압축실험을 행하였다. 시험편에 흡수된 에너지 흡수량의 계산은 Fig. 2와 같은압축실험에서 얻은 하중-변위 선도의 면적이 시험편에 흡수되는 에너지라 생각하여, 하중-변위 선도를 식 (1)과 같이 적분하여 부재내에 흡수된 에너지 특성을 평가하는데 이용하였다. Photo 2는 압축실험시 시험편의 압축과정을 나타내고 있다.

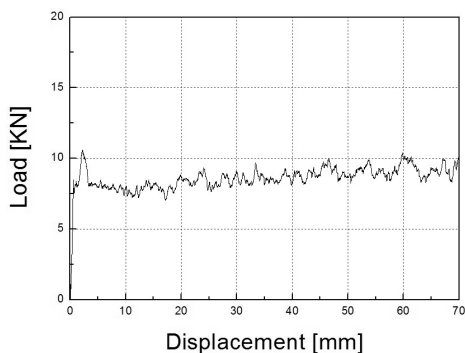


Fig. 2 Load-displacement curve of [0/90]_{2s}

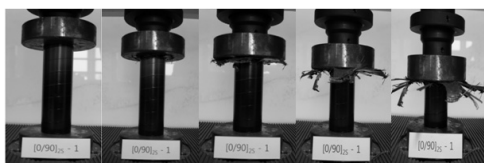


Photo 2 Collapsed processing of [0/90]_{2s}

$$E_a = \int_0^\delta Pds \quad (1)$$

여기서, E_a 는 흡수에너지, P는 압축하중, S는 압축과정중의 시험편의 변형량을 각각 나타낸다.

4. 결과 및 고찰

본 연구에서는 CFRP시험편의 적층각도와 계면수변화(2,3,4 계면) 그리고 시험편 내부에 충전된 Polyurethane foam의 밀도(40kg/m^3 , 60kg/m^3)에 따른 정적압축 실험을 행하여 얻어진 하중-변위 선도로부터 총 흡수에너지를 구하였다. 압축실험을 행한 결과 대부분의 시험편이 한쪽 끝단에 트리거를 준 부분에서 압축이 시작되어 최대하중에 이르게 되었다. 다만 적층각이 $[\pm 45]_4$ 인 시험편의 경우 순차적으로 압축이 이루어지다 일정시간이 지난 후에는 일부섬유가 끼어들어가지 못하고 combination mode의 형태로 시험편의 파괴가 일어났다.

4.1 압축모드

적층각 $[\pm 45]_4$ 의 7계면으로 제작된 시험편의 경우 Photo 3과 같이 하중을 가했을 때 시험편 길이의 20%까지는 일정하게 압축을 진행하다가 그 이후부터는 하중을 견디지 못하고 중간부분부터 섬유의 방향으로 파단 되는 조합모드(combination mode)의 형태로 압축 되었다. 또한 0° 와 90° 로 조합된 시험편의 경우 섬유가 부재의 외측으로 확장되고 파단 되면서 압축되는 파쇄확장 모드(fragmentation and splaying mode)의 형태로 압축되었



(1) CFRP/Foam circular member according to stacking angle, Foam density(40)



(2) CFRP/Foam circular member according to stacking angle, Foam density(60)

Photo 3 The Collapsed shape of CFRP/Foam circular member according to Stacking angle and foam density

다. 파쇄 확장 모드는 축방향 0°의 섬유가 부재의 외측으로 확장되어 foam과 분리되려 하지만 90°의 섬유의 영향으로 확장되면서 90°의 섬유와 함께 파단 되면서 압괴된다. 밀도 40kg/m³과 60kg/m³으로 채운 모든 시험편의 경우는 40kg/m³으로 채운 경우 비교적 안정적으로 압괴가 진행되다가 40mm가 지난 후에 foam을 채우지 않은 시험편과 같이 섬유방향으로 파괴가 이루어졌다. 반면에 60kg/m³으로 채운 경우 foam을 채우지 않은 시험편과 같이 일정시간동안 하중을 견디다 섬유방향인 45°방향으로 파괴가 이루어져 에너지를 흡수하지 못하였다.

4.2 에너지흡수 특성

Fig. 3~4는 0°와 90°로 조합된 2,3,4 계면의 최외각층각도와 foam의 밀도에 따른 시험편의 총 흡수에너지지를 나타낸 그래프이다. Fig. 3은 시험편의 최외각 층 각도가 0°일 때 계면수와 foam의 밀도에 따른 총 흡수에너지지를 나타내었는데 그래프에서 보여 지듯이 계면수가 증가함에 따라 총 흡수에너지지도 선형적으로 증가하는 모습을 볼 수 있었다. 이것은 CFRP의 주요 에너지 흡수 메커니즘은 크랙진전이며, 크랙은 크게 층간크랙(interlaminar crack), 층내크랙(intralaminar crack) 및 중심크랙(central crack)으로 나눌 수 있다. 따라서 계면수가 증가한다는 의미는 층간크랙을 유발 시킬 수 있는 경우의 수가 증가하여

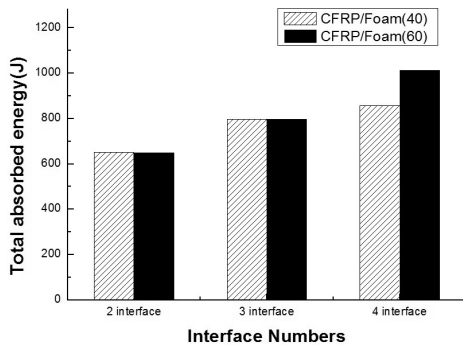


Fig. 3 Relationship between total absorbed energy and interface number of foam density(outer angle 0°)

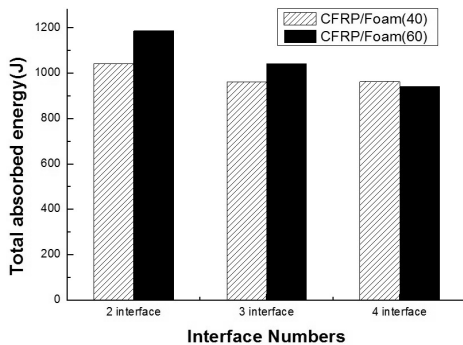


Fig. 4 Relationship between total absorbed energy and interface number of foam density(outer angle 90°)

에너지 흡수에 효과적인 것으로 나타났다.¹³⁾ Fig. 4는 최외각층 각도가 90°일 때 계면수와 foam의 밀도에 따른 총 흡수에너지를 나타내고 있다. 최외각 층 각도가 90°일 때는 0°일 때와는 정반대로 계면수가 적을 경우 더 높은 에너지를 흡수한다는 걸 알 수 있었다. 이는 시험편의 마지막 ply의 각도가 90°일 경우 0°를 포함한 내부의 시험편이 외부로 퍼져나가는걸 억제시킴으로서 좀 더 높은 에너지 흡수를 보이고 있다. 외각 0°, 90°모두 foam을 충전 하지 않은 시험편의 경우 계면수가 변함에 따라 증가나 감소가 큰 폭으로 차이가 나는 것이 보이나 40kg/m³, 60kg/m³으로 foam을 충전한 경우 CFRP원형부재 때보다 증가나 감소 폭이 크게 차이가 나지 않는다는 것을 알 수 있었다.

또한, Fig. 5는 시험편의 적층각도에 변화를 준 그래프의 모습을 나타내고 있다. [±45]₄, [0/90]₄, [90/0]₄ 각도에 따른 총 흡수에너지를 나타내고 있다. 45°일 때와 0°와 90°로 조합을 이룬 시험편은 에너지 흡수 측면에서 큰 차이를 보여 준다는 걸 그래프를 통해 알 수 있었다. 위에서 수직으로 압괴를 진행할 때 0°와 90°로 조합된 시험편의 경우 45°로만 적층된 시험편이 하중을 받는 중간에 시험편이 파괴되어 하중을 견디지 못하는데 반해 하중을 견디는 힘이 더 크기 때문에 에너지 흡수 면에서도 더 높게 나타났다고 사료된다.

5. 결론

본 연구에서는 시험편의 계면수와 적층각도가 다른 CFRP 원형부재에 foam을 충전 하지 않은 시험편과 foam의 밀도를 40kg/m³, 60kg/m³으로 변화를 주어서 충전한 다음 정적압괴 실험을 행하였다. 그 결과 시험편의 초기 압괴는 폼의 충전 여부, 계면수 및 적층각도와 상관없이 시험편 모두 트리거를 준 부분에서 초기 압괴가 진행되었다. 또한 시험편의 적층각도를 0°, 90°방향을 조합하여 제작한 시험편의 경우가 45°만으로 이루어진 시험편보다 더 높은 에너지 흡수를 보임을 관찰할 수 있었다. 또한 같은 0°, 90°로 제작된 시험편이라 할지라도 최외

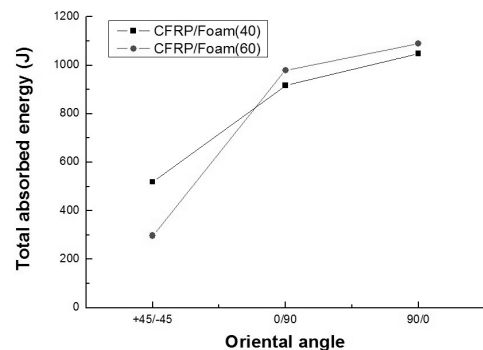


Fig. 5 Relationship between total absorbed energy and oriental angle of foam density

각 층이 0°일 경우 계면수 증가에 따라 에너지흡수가 증가하는 반면 90°일 경우는 계면수가 증가할수록 에너지 흡수가 낮아지는 것을 알 수 있었다. 0°/90°로 적층된 시험편이 45°로만 적층된 시험편보다 총 흡수에너지 부분에서는 75%에서 많게는 253% 정도까지 높게 나타남을 알 수 있었다.

후 기

이 논문은 2011학년도 조선대학교 학술연구비의 지원을 받아 연구되었음.

참 고 문 헌

- (1) Abramowicz, W., 1981, "Simplified Crushing Analysis of Thin-Walled Column and Beams," *Engineering Transaction*, Vol. 29, No, pp. 5~26.
- (2) Abramowicz, W., and Wierzbicki, T., 1986, "On the Crushing Mechanics of Thin-walled Structure," *J. Appl. Mech.*, Vol. 50, No, pp. 157~174.
- (3) John, F., 1996, *Handbook of Vehicle Design Analysis*, Society of Automotive Engineers, Inc, pp. 9~12.
- (4) Donald F. Adams., 1990, *Test Methods For Composite Materials: Seminar Notes*, Technomic Publishing Company, USA.
- (5) Farley, G. L., and Jones, R. M., 1991, "Prediction of Energy-Absorption Capability of Composite Tubes," *Journal of Composite Materials*, Vol. 26, No, pp. 388~404.
- (6) Farley, G. L., 1992, "Relationship between Mechanical-Property and Energy-Absorption Trends for Composite Tubes," *NASA Technical Paper*, OMB 0704-0188.
- (7) Lee K. S., Cha C. S., and Yang I. Y., 2005, "A Study on the Axial Crushing Behavior of Aluminum CFRP Circle Members for Light Weight," *Transaction of KSAE*, Vol. 13, No. 5, pp. 50~56.
- (8) Yang I. Y., Lee K. S., Kim Y. N., Chung J. O., and Cha C. S., 2006, "Axial Crushing Behavior and Energy Absorption Capability of Al/CFRP Square Tubes for Light Weight," *Key Engineering materials*, Vol. 306~308, pp. 297~302.
- (9) Mamalis, A. G., Manolakos, D. E., Ioannidis, M. B., Chronopoulos, D. G., and Kostazos, P. K., 2009, "On the Crashworthiness of Composite Rectangular Thin-Walled Tubes Internally Reinforced with Aluminum or Polymeric Foams: Experimental and Numerical Simulation," *Composite Structure*, Vol. 89, Issue. 3, pp. 416~423.
- (10) Wang, Q., Fan, Z., and Gui, L., 2007, "Theoretical Analysis for Axial Crushing Behavior of Aluminum Foam-Filled Hat Section," *Int.J. Mech. Sci.*, Vol. 49, pp. 515~521.
- (11) Yang, Y. J., Yang, I. Y., and Sim, J. K., 2009, "Collapse Characteristics of CFRP Hat Shaped Members under the Hygrothermal Environment According to Stacking Angle," *Journal of KSMTE*, Vol. 18, No. 5, pp. 507~513.
- (12) Yang, Y. J., Cha, C. S., and Yang, I. Y., 2009, "Collapse Characteristics of CFRP Hat Shaped Members according to Variation of Interface Numbers under the Hygrothermal Environment," *Journal of KSMTE*, Vol. 18, No. 3, pp. 241~247.
- (13) Mamalis, A. G., Manolakos, D. E., Demosthenous G. A., and Johnson, W., 1991, "Axial Plastic Collapse of Thin Bi-Material Tubes as Energy Dissipating System," *International Journal of Impact Engineering* Vol. 11, Issue 3, pp. 185~196.
- (14) Choi, J. H., Lee, K. S., and Yang, I. Y., 2010, "Energy Absorption Characteristics of CFRP/Foam Circular Members according to Interface Number," *Journal of KSMTE*, Vol. 19, No. 5, pp. 603~608.