

계면수 변화에 따른 CFRP/Foam 원형부재의 에너지 흡수특성

최주호*, 이길성⁺, 양인영⁺⁺

(논문접수일 2010. 4. 13, 심사완료일 2010. 8. 18)

Energy Absorption Characteristics of CFRP/Foam Circular Members according to Interface Number

Ju-Ho Choi*, Kil-Sung Lee⁺, 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. Test was executed in order to compare the results to the energy absorption and collapse shape. The collapse mode during the failure process were observed and analyzed. The behavior of polymeric foams to the tubes crashworthiness were also investigated. According to the experimental results, specimens filled with foam are higher total energy absorption than the other specimens not filled with the foam.

Key Words : Energy absorption(에너지흡수), CFRP(탄소섬유강화플라스틱), Foam(폼), Interface Number(계면수)

1. 서론

최근 자동차 설계에 있어서 주된 목표는 친환경성과 충돌 안전성능이다. 이와 더불어 지구환경에 대한 중요성 또한 점점 부각되면서, 특히 차량으로 부터 배출되는 CO₂ 감소 및 차량 효율향상이 중요한 과제로 인식되고 있다. 따라서 CO₂ 감소 및 차량효율 향상에 직접적으로 연관되는 차량 경량화는

피할 수 없는 과제라는 인식이 보편적으로 자리잡고 있다. 이러한 문제점들을 개선하기 위하여 친환경성 부분에서는 배기가스의 규제와 연비개선을 위한 경량화를 요구하고 있으나, 충돌 안전성능 부분에서는 높은 안전성능, 안전성, 고효율 및 다기능이 요구 되고 있다. 따라서 자동차의 설계는 승객을 안전하게 보호할 수 있는 안정성이 우선적으로 확보된 상태에서 차체의 중량을 줄이기 위한 경량화 측면으로 이루어져야 한다. 차량

* 조선대학교 첨단부품소재공학과

+ (주)테크 기술연구소

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

주소: 501-759 광주광역시 동구 서석동 375번지

충돌 시 발생하는 충돌에너지를 차량의 승객이 고스란히 받을 경우 승객의 안전은 매우 위험하게 된다. 이에 대한 대책으로써 충돌 시 발생하는 충돌에너지를 차체구조부재의 변형에 의한 에너지 흡수로 완화시킴과 동시에 승객의 생존공간을 확보할 수 있도록 차실부분은 견고하면서도 적절한 변형을 갖는 차체구조로 설계되어야 한다. 따라서 자동차가 충돌할 경우 차체구조부재의 압괴모드 및 에너지흡수특성을 고려한 설계방법이 아주 중요하며 최적의 안전성능을 갖는 부재의 개발이 대단히 중요하다. 특히, 경량화기술은 알루미늄합금의 개발에 의해 비약적인 발전을 이루었고, 이와 더불어 복합재료와 같은 고기능재료의 연구, 개발은 끊임없이 계속 되고 있으며, 새로운 재료가 계속적으로 발명되고 활발히 진행되고 있다.⁽¹⁻⁶⁾

본 연구에서는 이러한 복합재료 중에서도 대표적인 경량화 재료인 CFRP(Carbon Fiber Reinforced Plastic, 이하 CFRP 라 부름)와 Polyurethane Foam을 사용하여 시험편을 제작하여 CFRP/Foam의 경량화 구조부재가 정적압괴 및 충돌하중을 받을 경우를 상정하여 압괴특성을 정량적으로 평가하고자 하였다. CFRP는 적층구성의 변화에 따라 기계적 특성이 변하는 이방성 재료이기 때문에 계면수의 변화와 Foam의 밀도에 따른 CFRP/Foam 원형부재의 압괴모드와 에너지 흡수 특성을 비교분석하여 가장 효율적인 에너지 흡수특성을 갖는 차체구조부재를 설계하는데 유용한 자료를 얻고자 한다.

2. 시험편

본 실험에 사용된 시험편은 CFRP 프리프레그시트를 적층하여 오토클레이브를 사용하여 성형한 후 원형 CFRP 부재에 Polyurethane foam을 충전하여 제작하였다. CFRP 프리프레그 시트는 한국화이버(주)에서 생산한 일방향 Carbon Fiber/Epoxy Resin 프리프레그 시트를 사용하였으며 CFRP 부재에 충전된 Foam은 (주)우진산업개발에서 제작한 밀도 40kg/m³로 충전하였다. 실험에 사용된 시험편의 형상은 Fig. 1에 나타내었으며 프리프레그 시트와 Foam의 물성치는 Table 1, 2에 나타내었다. CFRP 원형부재의 에너지 흡수는 적층조건에 따라 영향을 받기 때문에 계면수 변화에 따른 에너지흡수특성을 비교 고찰하고자 계면수를 변화(2,3,4,6,7)시켜가며 성형하였으며 CFRP 부재와 충전된 Foam의 밀도에 따른 에너지 흡수를 조사하기 위하여 밀도는 40kg/m³으로 변화를 주었다.⁽⁷⁻⁹⁾

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 유도 하였으며

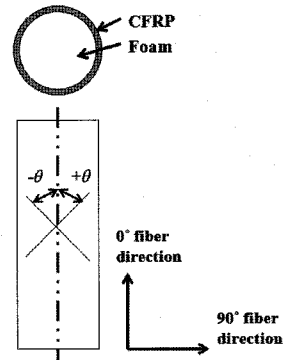


Fig. 1 Configuration of Specimen

Table 1 Material properties of CFRP prepreg sheet

	Fiber (Carbon)	Resin (Epoxy #2500)	Prepreg sheet
Density [kg/m ³]	1.83 × 10 ³	1.24 × 10 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 [N/cm ²]	Compressive strength [N/cm ²]
40	0.020	30	13

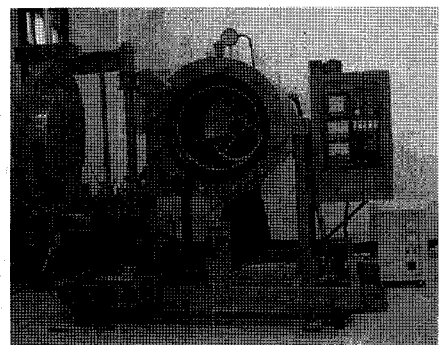


Photo. 1 Autoclave

진공펌프에 의하여 진공팩 속을 10^1Pa 까지 진공시킨 후 압축기에 의하여 진공팩의 외측으로부터 $3 \times 10^5\text{Pa}$ 까지 가압시켜 제작하였다. 또한 모든 시험편은 단부효과가 나타나지 않고 좌굴이 생기지 않으면서 주기적으로 반복적인 압제가 일어나도록 하기 위하여 다이아몬드 커터기를 사용하여 120mm의 길이로 절단 하였다. CFRP의 취약한 문제점은 취성문제로 인해 층간 및 층내 크랙이 성장하게 되어 초기압제하중 이후 흡수에너지가 낮아지는 것을 방지하기 위하여 한쪽 끝단에 45° 의 트리거를 주어 순차적으로 압제를 유도하여 높은 에너지 흡수 특성을 갖게 하였다.⁽¹⁰⁻¹²⁾

3. 압제실험

정적압제실험은 만능재료시험기(UTM)을 사용하여 10mm/min의 변형률 속도로 제어하면서 균일한 압축하중이 가해지도록 축 방향 압제 실험을 행하였고, 전체길이(120mm)의 58.3% (70mm)까지 변위를 제어하면서 연속적으로 압제실험을 행하였다. 시험편에 흡수된 에너지 흡수량의 계산은 Fig. 2와 같은 압제실험에서 얻은 하중-변위 선도의 면적이 시험편에 흡수되는 에너지라 생각하여, 하중-변위선도를 식(1)과 같이 적분하여 부재내에 흡수된 에너지 특성을 평가하는데 이용하였다. Photo. 2는 압제실험 시 시험편의 압제과정을 나타내고 있다.

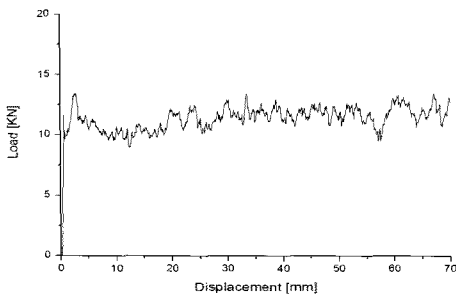


Fig. 2 Load-Displacement curve of $[0/90]_{2s}$

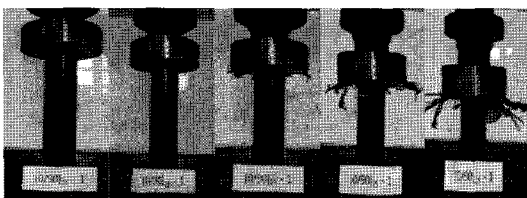


Photo. 2 Collapsed processing of $[0/90]_{2s}$

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

여기서 E_a 는 흡수에너지, P 는 압제하중, S 는 압제과정 중의 시험편의 변형량을 각각 나타낸다.

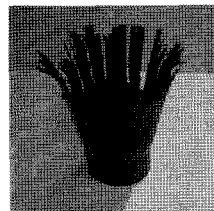
4. 결과 및 고찰

본 연구에서는 CFRP/Foam원형부재의 계면수와 밀도에 따라 정적압제실험을 행하여 얻어진 하중-변위 선도로부터 흡수에너지(E_a), 최대하중(P_{max}), 평균압제하중(P_{avg})을 구하였다. 평균압제하중은 흡수에너지를 시험편의 변형량으로 나눔으로써 구하였다. 정적압제실험을 수행한 결과 시험편의 대부분은 트리거가 있는 쪽으로부터 초기변형이 시작되었으며, 그 후 순차적으로 압제가 시작될 때에 최대하중에 이르게 된다.

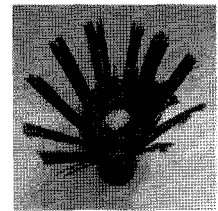
4.1 압제모드

CFRP원형 부재에 폼을 충전한 시험편과 충전하지 않은 시험편들에 대하여 정적 압제실험을 실시한 후 다음과 같은 압제모드를 관찰할 수 있었다.

실험에 사용된 시험편은 폼을 충전시킨 시험편과 폼을

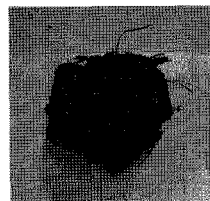


(a) CFRP

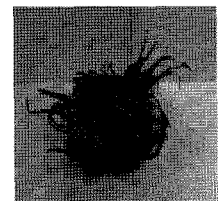


(b) CFRP/Foam

(1) Outer Angle 0° CFRP & CFRP/Foam of 2 Interface



(a) CFRP



(b) CFRP/Foam

(2) Outer Angle 90° CFRP & CFRP/Foam of 2 Interface

Photo. 3 The Collapsed shape of CFRP and : CFRP/Foam(40) according to Outer Angle

충진 시키지 않은 시험편 모두 최외각층이 0°일 경우 Photo 3의 (1)과 같이 시험편의 최외각층 플라이 섬유 방향의 확장으로 인한 확장형 스플라인모드가 나타났으며 시험편의 내부에서는 최외각층 90°에서 보였던 파괴와 굽힘이 혼합되는 취성 파괴의 모드를 관찰할 수 있었다. 최외각층이 90°일 경우 Photo 3의 (2)와 같이 최외각층 플라이 섬유 방향의 파단에 의해 높은 압축특성을 나타내는 파쇄형 모드와 최외각층 섬유의 굽힘이 혼합되는 취성파괴모드를 관찰할 수 있었다. 다만 시험편에 폼을 충진시키지 않은 시험편의 경우 내부에서 발생하는 파괴와 굽힘으로 인한 잔류물이 시험편의 빈 공간으로 들어가 최외각층의 섬유가 좀더 모여있는 반면 폼을 충진시킨 시험편의 경우는 내부로 들어가는 잔류물을 공간을 메우고 있는 폼으로 막음으로써 최외각층이 좀더 퍼져있는 것을 알 수 있었다.

4.2 에너지 흡수특성

최외각층각도의 변화에 따른 CFRP/Foam부재의 정적압력 실험으로부터 총흡수에너지와 평균하중 모두 최외각층의 영향을 많이 받는다는 것을 알 수 있었다. Fig. 3~8은 각각 최외각층이 0°, 90°일 때 Foam이 없는 CFRP원형부재와 Foam이 있는 CFRP 원형부재의 총흡수에너지, 평균하중, 최대하중을 나타내고 있다. Fig. 3에서 볼 수 있듯이 먼저 최외각층이 0°일 경우, 계면수가 증가함에 따라 총에너지 흡수가 증가하다 6계면에서 감소하고 다시 증가하는 경향을 보였으며 최외각층이 90°일 경우는 Fig. 4에서 알 수 있듯이 0°일 때와는 반대로 계면수가 증가함에 따라 흡수에너지 및 평균에너지가 감소하다가 다시 증가하는 경향을 보였다. 최외각층 90°에서 2계면의 경우 폼을 충진하지 않은 시험편의 총흡수에너지가 높게 나온것은 시험편 제작시의 문제로 생각된다. Fig. 3, 4에서 알 수 있듯이 Foam이 있는 경우가 Foam이 없는 경우보다 흡수에너지가 30~40%정도 높게 나타났으며 최외각층이 0°인 경우 계면수가 증가할수록 Foam이 충진된 경우가 흡수에너지가 크게 나타났다. Fig. 5, 6은 최외각층이 0°인 경우와 90°인 경우의 계면수에 따른 평균하중의 변화 관계를 나타냈다. Fig. 5, 6으로부터 Foam을 충진한 부재가 Foam을 충진하지 않은 부재보다 평균하중에서는 20~25%정도 높게 나타남을 알 수 있었다. 또한 Fig. 7, 8에는 Foam을 충진한 경우와 충진하지 않은 경우의 최외각층각도 및 계면수의 변화에 따른 최대하중을 나타냈는데 마찬가지로 위의 경우들과 비슷한 경향을 나타내고 있음을 알 수 있었다. 이는 시험편의 적층순서에 따라 최외각층

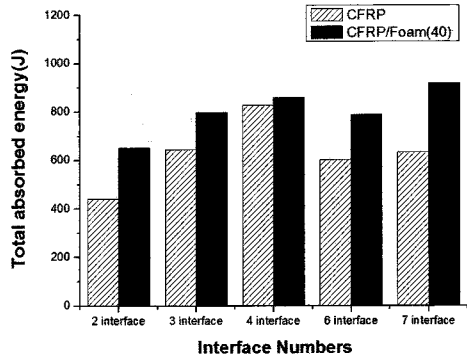


Fig. 3 Relationship between total absorbed energy and variation interface number of foam density(outer angle 0°)

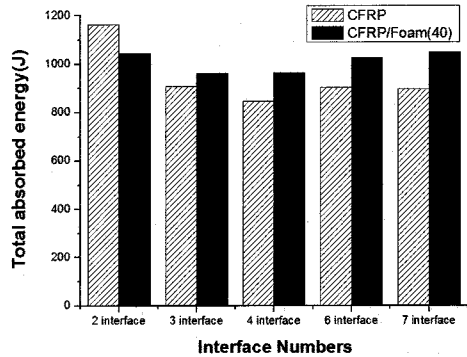


Fig. 4 Relationship between total absorbed energy and variation interface number of foam density(outer angle 90°)

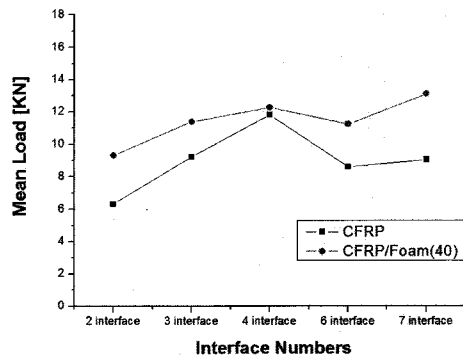


Fig. 5 Relationship between mean load and variation interface number of foam density(outer angle 0°)

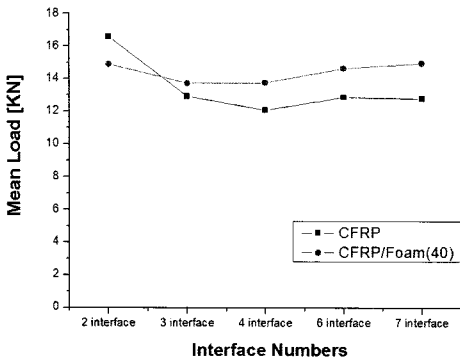


Fig. 6 Relationship between mean load and variation interface number of foam density(outer angle 90°)

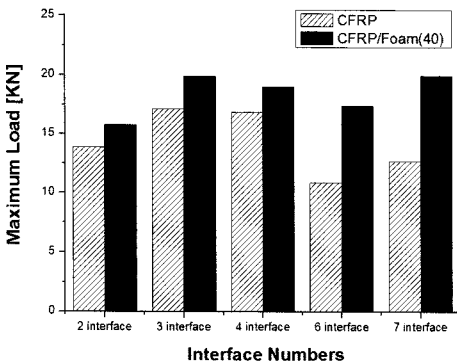


Fig. 7 Relationship between maximum load and variation interface number of foam density(outer angle 0°)

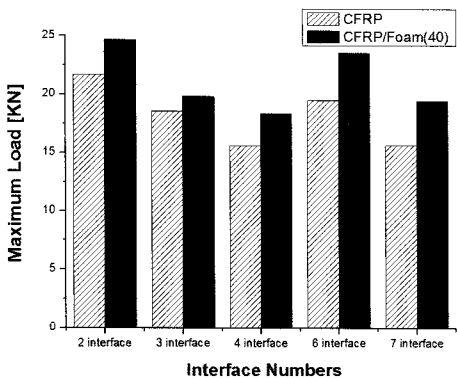


Fig. 8 Relationship between maximum load and variation interface number of foam density(outer angle 90°)

이 0°일 때는 압궤 시 시험편이 스플라인 모드를 보이면서 하중을 견뎌내는 힘이 분산되어 에너지의 흡수가 감소하나 최외각층이 90°일 때는 축방향 0°의 섬유가 부재의 외측으로 확장하려하지만 외측의 90°섬유가 확장을 억제시키면서 하중을 견뎌냄으로써 더 많은 에너지를 흡수 하는 것으로 보여진다. 또한 축 방향과 직교하는 90°섬유의 ply수가 두껍고 90°섬유 사이에 0°섬유가 많이 포함되어 질수록 에너지 흡수도 높아진다는 걸 알 수 있었다.

5. 결론

본 연구는 CFRP원형부재에 Foam을 충전한 복합구조부재를 차량 경량화를 위한 구조부재로 적용하기 위하여 정적 축 압궤실험을 행하였다. 복합구조부재에 대하여 최외각층 각도의 차이와 CFRP섬유의 계면수의 차 및 충전한 Foam의 밀도에 따른 정적실험을 행하여 시험편의 계면수의 변화와 밀도에 따른 에너지 흡수 특성과 압궤모드에 대하여 비교 고찰하였다.

- (1) 시험편은 트리거를 준 방향에서 압궤가 시작되었으며 최외각층의 영향을 많이 받는다는 것을 알 수 있었다. 또한 섬유적층 시 내부 첫 섬유의 방향이 90°일 때 90° 섬유의 ply수가 두꺼울수록 에너지 흡수능력이 향상된다는 걸 알 수 있었다.
- (2) 최외각층이 0°일 때 계면수의 증가에 따라 흡수에너지가 증가하는 반면 90°일 때는 이와는 정반대로 계면수의 증가에 따라 흡수에너지가 감소하다가 다시 증가하는 것을 볼 수 있었다.
- (3) 실험결과 CFRP원형부재의 압궤 시 내부의 빈 공간을 Foam으로 충전함으로써 Foam을 충전한 시험편의 총 흡수에너지는 30~40%, 평균하중은 20~25%정도 증가하는 것을 알 수 있었다.

후 기

이 논문은 2010학년도 조선대학교 학술연구비의 지원을 받아 연구되었음.

참 고 문 헌

- (1) Abramowicz, W., 1981, "Simplified Crushing Analy-

- sis of Thin-walled Column and Beams,” *Engineering Transactions*, Vol. 29, No.1, pp. 5~26.
- (2) Wierzbicki, T. and Abramowicz, W., 1983, “On the Crushing Mechanics of Thin-walled Structures,” *Journal of Applied Mechanics*, Vol. 50, pp. 727~733.
- (3) John, F., 1996, *Handbook of Vehicle design analysis*, Society of Automotive Engineers, Inc., New York, pp. 9~12.
- (4) Donald, F. A., 1990, “*Test Methods For Composite Materials: Seminar Notes*,” Technomic Publishing Company, New York.
- (5) Farley, G. L. and Jones, R. M., 1991, “Prediction of Energy-Absorption Capability of Composite tubes,” *Journal of Composite Materials*, Vol. 26, 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/CFR 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, and D. G., 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.