

충격 하중을 받는 폼 코어 샌드위치 빔의 파괴 모드 연구

임태성* · 이창섭* · 이대길**

Failure modes of foam core sandwich beams under impact loads

Tae Seong Lim, Chang Sup Lee and Dai Gil Lee

Key Words: composite sandwich structures, impact failure mode map, impact test, impact energy absorption.

ABSTRACT

Recently, sandwich structures have been widely employed in load bearing structures due to their high specific stiffness and high specific strength. Some sandwich structures are subjected to not only static loads but also impact loads which might induce failure of structures at far less load than expected. Since sandwich structures can fail in various modes, estimation of the impact energy absorption is difficult. In this work, the impact failure modes and the impact energy absorption characteristics of the sandwich beams were predicted by the FE analysis and confirmed by the impact test. From the analytic and experimental results, the impact failure mode map was constructed with respect to non-dimensional parameters.

1. 서 론

샌드위치 구조는 비강성, 비강도가 높고 소음 차단, 단열 및 충격에너지 흡수능이 우수하여 다양한 구조에 적용되고 있다. 복합재료 샌드위치 빔은 강성, 강도가 우수한 얇은 복합재료 면재와 전단력을 지지하기 위한 경량의 심재 재료로 구성된다 [1, 2]. 심재 재료로는 폼 (foam), 하니컴 (honeycomb), 발사 우드 (balsa wood) 등이 사용되고 있다.

샌드위치 빔은 정적 하중뿐만 아니라, 고속 운송용 구조와 같이 충격하중을 받는 구조에도 적용이 되고 있다. 효율적인 충격 흡수 구조 설계를 위해서는, 충격 파괴 모드와 충격에너지 흡수능에 대한 연구가 필요하며, 설계 방안 제시를 위한 파괴 모드 맵 등에 대한 연구가 요구된다.

정적 하중을 받는 복합재료 샌드위치 구조의 경우, 이론 및 실험적 방법으로 파손 하중 및 파괴 모드 맵에 관한 연구가 활발히 진행되어 왔다 [3]. 반면에, 충격하중을 받는 복합재료 샌드위치 빔의 거동에 대한 연구는 주로 실험적으로 수행되었다 [4-8]. 그러나, 기존 연구에서는 충격 하중을 받는 샌드위치 빔의 거동 및 파괴 모드 연구에 한정되어 있으며, 충격 파괴 모드 맵이나 충격 에너지 흡수능에 관한 연구는 거의 없는 실정이다.

본 연구에서는 유한요소해석과 충격 시험을 바탕으로, 파괴 모드 맵과 충격에너지 흡수능에 대한 연구를 수행하였다.

2. 유한요소해석

복합재료 샌드위치 빔의 충격 거동시, 응력파의 전달 및 시편의 관성 등의 영향으로 인해, 파괴 모드를 이론적으로 예측하는 것이 힘들다. 본 연구에서는 유한요소해석을 수행하여 파괴 모드를 예측하였다.

* 한국과학기술원 대학원

** 한국과학기술원 교수

2.1 재료 및 유한요소 모델링

본 연구에서 사용된 샌드위치 빔의 면재는 주자직 유리섬유 에폭시 프리프레그 (crowfoot satin woven glass fiber epoxy prepreg, GEP 215, SK chemicals, Korea)를 사용하였으며, 심재는 PVC 폼 (Divinycell HT grade, DIAB Inc.m Sweden)을 사용하였다. 면재와 심재의 물성은 ASTM D 1621, ASTM D 3410, ASTM D 3518 등의 규정에 의거하여 측정되었으며, Table 1에 각각의 물성을 나타내었다. 복합재료 샌드위치 빔의 시편 형상은 ASTM D 5942를 참고하여 결정하였다. 폼의 두께는 10 mm로 고정시켰으며, 스패 (span)과 전체 길이는 각각 90, 150 mm로 하였다.

파괴 모드의 유한요소해석을 위하여, 상용 패키지인 ABAQUS explicit (HK & S, USA)를 사용하였다. Fig. 1과 같이, 대칭 경계 조건을 사용하여 전체의 1/4만 모델링 하였으며, jig와 tup은 강체로 가정하였다. 면재와 심재는 8-node 3차원 요소를 사용하였으며, 심재의 물성은 탄성-완전 소성을 가정하였다. 파괴 모드를 결정하기 위해서 최대 변형률 파손 이론을 적용하였으며, 각 재료의 파괴 변형률은 Table 2에 나타내었다.

2.2 해석 결과

해석으로부터 구해진 변형률의 분포를 Fig. 2에

Table 1 Mechanical properties of face and core materials

Material	Density, ρ (kg/m ³)	Comp. modulus, E (MPa)	Shear modulus, G (MPa)	Comp. strength, X (MPa)	Shear strength, S (MPa)
Face GEP215	2050	17.2×10^3	3.7×10^3	480	60
HT 70	70	45	26	1.1	0.90
Core HT 90	97	67	35	1.8	1.4
HT 110	117	84	42	2.3	1.7

Table 2 Failure strains of the face and core materials

Material	Comp. failure strain	Shear failure strain
Face GEP215	0.017	-
HT 50	-	0.14
HT 70	-	0.17
Core HT 90	-	0.22
HT 110	-	0.26

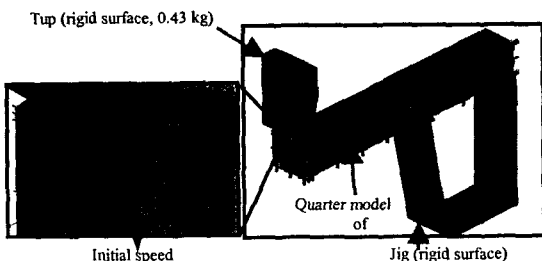


Fig. 1 FE mesh, boundary, and initial condition of foam core composite sandwich beam for ABAQUS explicit.

나타내었다. 면재의 최대 변형률은 tup의 접촉 지점에서 발생하였으며, 심재는 tup과 jig사이의 중앙부에서 최대 변형률을 보였다. Fig. 3은 충격 지속 시간 동안의 면재와 심재의 파괴 지수를 보여주며, 심재 전단 파손이 발생하는 경우이다.

충격 속도에 따른 파괴 모드의 변화를 살펴보기 위하여, 충격 속도를 3-20 m/sec로 변화시켜 해석을 수행하였다. 해석 결과 충격 속도에 따른 파괴 모드의 변화가 거의 나타나지 않았다. 이후의 해석에서는 충격 속도를 10 m/sec로 하여 해석을 수행하였으며, 이 충격 속도는 변형률 속도 10-200 sec⁻¹에 해당하는 것으로, 차량 등의 운송 구조의 충돌시의 변형률 속도 범위에 해당된다.

면재 두께에 따른 파괴 모드의 변화를 관찰하기 위해 밀도가 70, 97, 117 kg/m³인 3종류의 폼에 대해, 면재의 두께를 0.6-1.8 mm로 변화시켜 해석을 수행하였다. 폼 밀도가 70 kg/m³, 117 kg/m³인 경우는 두께에 상관없이 각각 폼 전단 파괴와 면재 압축 파괴 모드로 나타났다. 폼 밀도가 97 kg/m³인 경우는 Fig. 4와 같이 면재 두께 0.73 mm에서 파괴 모드의 변화가 발생하였다.

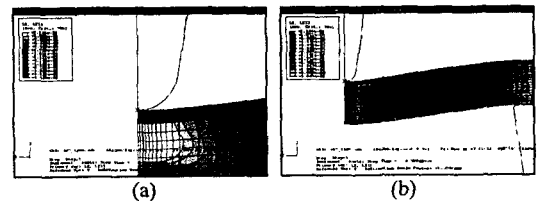


Fig. 2 Strain distribution calculated by FE analysis (initial velocity = 10 m/sec, foam density = 97 kg/m³, face thickness=1.0 mm): (a) compressive strain, (b) shear strain.

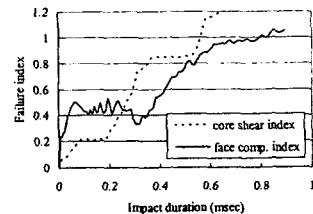


Fig. 3 Failure indices of the face and the core materials with respect to the impact duration.

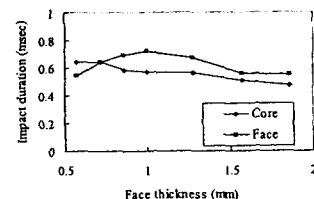


Fig. 4 Impact durations of each failure mode with respect to the face thickness when the core density is 97 kg/m³.

면재의 두께가 1 mm로 고정되었을 때, 폼 밀도에 따른 파괴 모드의 변화는 Fig. 5에 나타내었다. 폼 밀도가 높은 경우 면재 파손이 발생하였으며, 100 kg/m³ 부근에서 파괴 모드의 변화가 예측되었다.

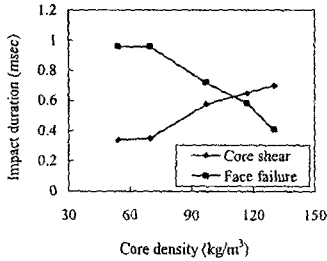


Fig. 5 Impact duration of each failure mode with respect to the core density.

3. 충격 시험 결과

유한요소해석으로부터 파악된 파괴 모드를 검증하고, 복합재료 샌드위치 빔의 충격에너지 흡수 특성을 파악하기 위해서 충격시험을 수행하였다.

3.1 시험장비

복합재료 샌드위치 빔의 충격시험을 위해 공압식 충격시험기를 설계, 제작하였다. 공압 실린더를 이용하여 충격체가 발사되는 구조로 제작되었으며, 최대 30 m/sec의 충격 속도를 낼 수 있도록 설계하였다. 충격 속도를 측정하기 위한 광센서 (E32-T11L and E3X-F21, Omron, Japan)를 장착하였으며, 하중 이력을 측정하기 위해서 압전식 하중 변환기 (piezoelectric force transducer, Isotron 2311-1, Endevco, USA)를 사용하였다.

3.2 시험결과

충격 시험에 사용된 샌드위치 시편의 재료와 형상은 유한요소해석과 동일하며, 오토클레이브를 사용하여 복합재료와 폼을 동시경화법으로 접합하였다. 충격 시험 속도는 10 m/sec로 하였으며, 시험 변수로는 면재의 두께 (0.57, 0.72, 0.86, 1.0 mm)와 심재의 밀도 (54, 70, 97, 117 kg/m³)로 하였다.

Fig. 6은 고속카메라 (Ektapro 1000, Kodak)로 관찰된 파괴 모드로, Fig. 2의 해석 결과와 같은 지점에서 면재 압축과 심재 전단 파괴가 발생함을 확인할 수 있었다. Fig. 7(a)는 심재 밀도가 97 kg/m³인 경우 면재 두께에 따른 파괴 모드의 변화를 보여주는 파괴된 시편의 사진이며, Fig. 7(b)는 면재 두께가 1 mm인 경우 심재 밀도에 따른 파

괴 모드의 변화를 나타낸 것이다. 이 결과는 Fig. 4와 Fig.5의 해석결과와 잘 일치한다.

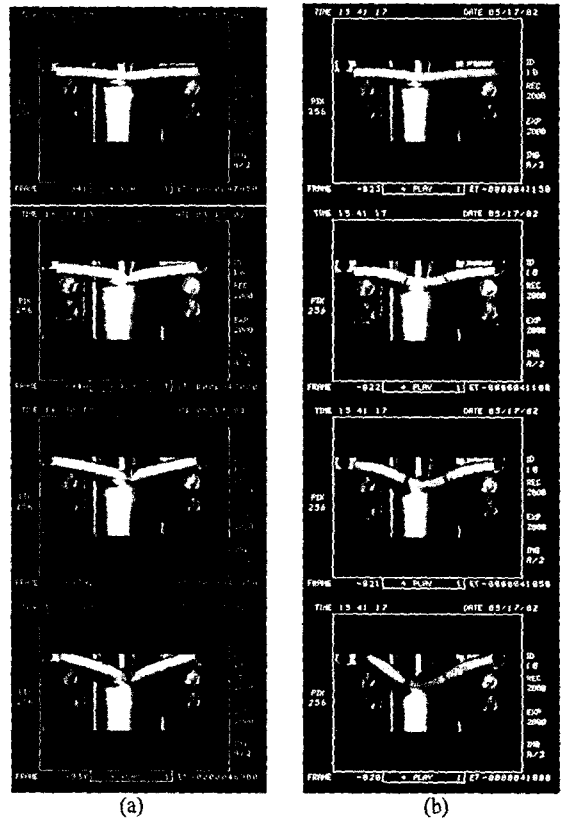


Fig. 6 Photograph captured sequentially by the high speed camera for observing failure modes of sandwich beams: (a) face failure, (b) core shear failure.

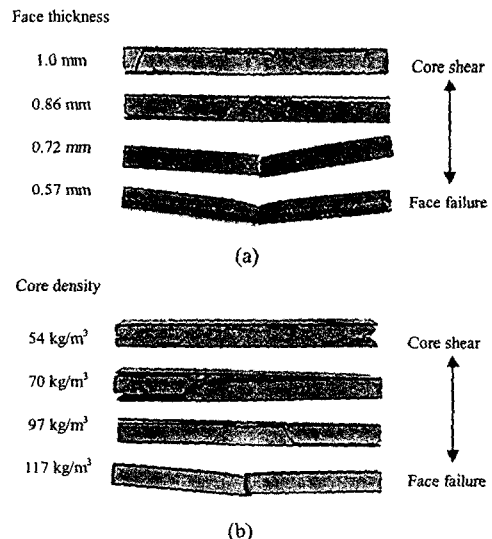


Fig. 7 Experimental result of impact failure modes with respect to: (a) face thickness, (b) core density.

Fig. 8은 면재 두께가 1mm인 경우에 각각의 폼 밀도에 대해 측정된 하중 시간 선도이며, 평균 충격에너지 흡수량은 Fig. 9에 나타내었다. 실험 결과, 충격에너지 흡수량은 파괴모드에 영향을 받으며, 심재의 밀도는 충격에너지 흡수량에 직접적인 영향을 주지 않음을 알 수 있었다. 충격에너지 흡수능을 향상시키기 위해서는 면재 압축 파손이 발생하도록 설계하는 것이 바람직하다.

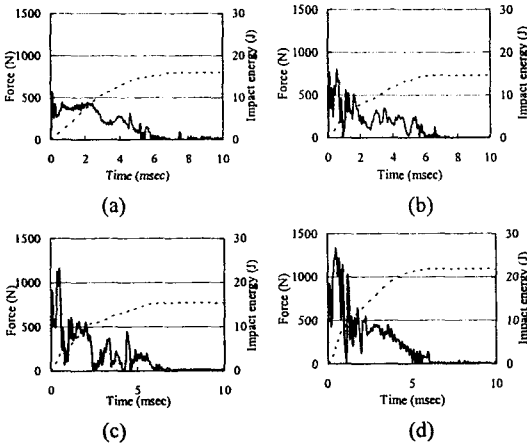


Fig. 8 Measured load-time history and energy data with respect to the core density: (a) core density of 54 kg/m³, (b) core density of 70 kg/m³, (c) core density of 97 kg/m³, (d) core density of 117 kg/m³.

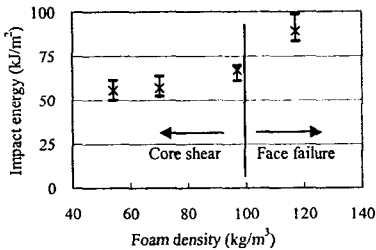


Fig. 9 Average impact energy absorption of sandwich specimens with respect to core density.

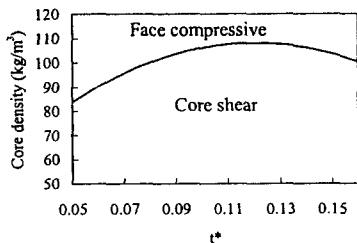


Fig. 10 Impact failure mode map of sandwich beams with respect to t^* ($= t_f / t_c$) and ρ (core density) when $L^* = L / t_c = 9$.

3.3 파괴모드맵

유한요소해석과 충격시험 결과로부터 파괴모드맵을 작성하였다. Fig. 10은 L^* ($= \text{span/core thickness}$)가 9인 경우, t^* ($= \text{face thickness/core thickness}$)와 심재의 밀도에 따른 파괴 모드맵을 나타낸 것이다. 이 충격 파괴 모드 맵으로부터 심재 전단 파괴 모드를 피하고, 충격에너지 흡수 특성을 향상시키는 설계가 가능하다.

4. 결론

본 연구에서는 복합재료 샌드위치 빔의 충격 파괴 모드 및 충격에너지 흡수 특성 파악을 위해 유한요소해석과 충격시험을 수행하였다. 시험 결과로부터 복합재료 샌드위치 빔의 충격에너지 흡수능 향상을 위해서는 면재 파손이 발생하도록 설계해야 함을 규명하였다. 또한, 해석과 충격시험 결과로부터 파괴 모드 맵을 작성하여 충격에너지 흡수능 향상을 위한 설계 방안을 제시하였다.

후기

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구 (R 01-1998-000-00024-0) 지원으로 수행되었음.

참고문헌

- (1) Zenkert, D. (1997). *The Handbook of Sandwich Construction*. Engineering Materials Advisory Service, Ltd.
- (2) Vinson, J.R. (1999). *The Behavior of Sandwich Structures of Isotropic and Composite Materials*. Technomic Publication Co., Inc.
- (3) Triantafillou, T.C. and Gibson, L.J. (1987). Failure mode maps for foam core sandwich beams. *Materials Science and Engineering*, **95**: 37-53.
- (4) Shih, W.K. and Jang, B.Z. (1989). Instrumented impact testing of composite sandwich panels. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, **8**: 270-298.
- (5) Kim, C.G. and Jun, E.J. (1992). Impact resistance of composite laminated sandwich plates. *Journal of Composite Materials*, **26**: 2247-2261.
- (6) Mines, R.A.W., Worrall, C.M. and Gibson, A.G. (1998). Low velocity perforation behavior of polymer composite sandwich panels. *International Journal of Impact Engineering*, **21**: 855-879.
- (7) Anderson, T. and Madenci, E. (2000). Experimental investigation of low-velocity impact characteristics of sandwich composites. *Composite Structures*, **50**: 239-247.
- (8) Hazizan, M.A. and Cantwell, W.J. (2002) The low velocity impact response of foam-based sandwich structures. *Composites: Part B*, **33**: 193-204.