

알루미늄과 유리섬유 하니컴 구조의 저속 충격 거동

김진우* · 원천* · 이동우* · 김병선*** · 배성인** · 송정일**†

Low Velocity Impact Behavior of Aluminium and Glass-Fiber Honeycomb Structure

Jin Woo Kim*, Cheon Won*, Dong Woo Lee*, Byung Sun Kim***, Sung In Bae**, Jung Il Song**†

ABSTRACT: In this study, impact behavior of aluminium and glass-fiber structure is studied under low impact velocity. Compression test is carried out to investigate the compressive strength of the specimens. The degree of damage is observed using microscopy and compared with the experimental analysis data. The maximum load capacity, impact strength and elastic energy of glass-fiber honeycomb sandwich panel are more than the aluminium honeycomb sandwich panel.

초 록: 본 연구는 동일한 코어재를 가지는 알루미늄과 유리섬유의 하니컴 샌드위치 판넬의 저속 충격시 발생하는 충격 거동 및 압축 실험을 통하여 압축 강도와 압축 계수를 살펴본다. 저속 충격을 받는 하니컴의 충격 거동을 살펴보기 위하여 중량 낙하식 충격 시험을 실시하며, 충격을 가한 후 데이터 분석 및 현미경을 통하여 전형적인 충격파손모드와 손상정도를 비교 평가하였다. 동일한 충격에너지일 때 유리섬유 하니컴 샌드위치 판넬이 알루미늄 하니컴 샌드위치 판넬보다 최대 하중이 높고, 탄성 에너지가 크며, 충격 강도가 높은 것을 확인할 수 있었다.

Key Words: 중량 낙하식 충격시험(drop weight impact test), 하니컴 샌드위치 판넬(honeycomb sandwich panel), 저속 충격(low-velocity impact)

1. 서 론

하니컴 샌드위치 판넬은 그 자체의 경량, 조직의 안정성, 고강도, 고강성으로 인하여 그 용도가 매우 다양하며 거의 모든 항공기와 유도 병기들은 하니컴 샌드위치 판넬을 사용하고 있고 앞으로의 우주항공, 방위산업, 자동차, 철도, 해상, 통신, 에너지, 스포츠분야에서도 하니컴 샌드위치 판넬의 사용이 필수적이다. 이와 같은 하니컴 샌드위치 판넬은 그 수요가 계속 증가할 전망이며 국내에서도 방위산업 등 우주, 항공, 기타 산업 등의 육성 및 활성화와 관련하여

하니컴 샌드위치 판넬의 수요가 크게 증가하는 시점에 있다. 또한, 하니컴 샌드위치 판넬은 용도상 품질 및 안전이 크게 요구됨에 따라 제품의 품질 검사 및 평가기술의 개발이 주요한 문제로 대두되었다[1].

하니컴 샌드위치 판넬의 충격에 관한 연구는 세계적으로 중량 낙하식 충격시험(Drop weight impact test)나 가스건 혹은 에어건 시험에 의해 다양하게 수행되고 진행되어져 왔다. 그 중에서도 기계구조물의 경량 및 에너지 절약 추세에 따라 복합재료의 사용이 증가하고 있으며, 복합재료-판재와 심재를 가지고 있는 하니컴 샌드위치 판넬에 대해

접수: 2012년 12월 05일, 수정: 2013년 1월 21일, 게재승인: 2013년 1월 22일

*창원대학교 기계공학과 대학원

**†창원대학교 기계공학과 기계공학전공, Corresponding author(E-mail: jisong@changwon.ac.kr)

***한국기계연구원 재료연구소(KIMS)

서 최근 많은 연구결과들이 제시되고 있다[2-6]. 또한, 복합 재료 하니컴 샌드위치 판넬은 구조물에 요구되는 낮은 중량을 유지하면서 높은 강도 및 강성, 고 에너지 흡수, 우수한 피로저항 특성으로 알루미늄 하니컴을 대신하여 다양한 분야에서 응용이 되고 있다. 그리고 시험기의 변화와 셀의 종류에 대한 연구는 많이 이루어 졌으나 충격 위치와 충격체의 무게, 속도에 대한 영향에 대한 연구는 많이 이루어지지 않았다[7].

따라서 본 연구에서는 동일한 코어재를 가지는 알루미늄과 유리섬유의 하니컴 구조에 압축 실험을 통하여 압축 강도와 압축 계수를 살펴보고, 여러 가지 충격 에너지에 대해서 충격을 가한 후 시험편 분석을 통하여 전형적인 충격 파손모드와 손상정도를 비교 평가하였다.

2. 충격 이론

2.1 저속 충격시 변위, 속도 에너지 측정

충격 변위, 속도, 에너지는 반구형 충격체가 받는 힘은 중력과 시편이 받는 힘의 합이라 할 수 있다. 이를 식으로 나타내면 다음과 같다.

$$f(t) = mg - p(t) \quad (1)$$

따라서 가속도, 속도, 변위는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$a(t) = \frac{f(t)}{m} = g - \frac{p(t)}{m} \quad (2)$$

$$v(t) = \int_0^t a(t)dt = gt - \frac{1}{m} \int_0^t p(t)dt \quad (3)$$

$$x(t) = \int_0^t v(t)dt = \frac{1}{2}gt^2 - \frac{1}{m} \int_0^t \int_0^t p(t)dt \quad (4)$$

반구형 충격체를 이용하였을 경우 관통시에 소요되는 일을 이용하여 흡수에너지를 구하면 다음과 같이 나타낸다.

$$E(t) = K(t) + V(t) + E_a(t) = \text{constant} \quad (5)$$

여기서, $K(t)$: 운동 에너지

$V(t)$: 위치 에너지

$E_a(t)$: 흡수 에너지

$t = 0$ 에서의 $V(t)$ 와 $E_a(t)$ 는 0이므로 $K(0)$ 와 $E_a(0)$ 는 상수이며 식 (5)은 다음과 같이 나타내어진다.

$$\begin{aligned} E_a(t) &= K(0) - K(t) - V(t) \\ &= \frac{1}{2}m(V_0^2 - V^2) + mgh(t) \end{aligned} \quad (6)$$

2.2 흡수 에너지

Reddy는 충격체를 이용한 충격에 경험적인 수식을 이용하여 반구형 충격의 결과를 유추하였다[8]. 미소 요소의 원

주길이 $2\pi r$, 판에 충격이 가해졌을 때 립을 발생시키는데 소요된 전체적인 일은[9]

$$W = \int_0^{R_0} 2\pi t_0 \sigma_y r \ln \frac{R_0}{r} dr = \frac{1}{2} \pi R_0^2 t_0 \sigma_y \quad (7)$$

이다.

반구형 충격체를 이용하였을 경우 형상계수인 λ 를 사용하여 관통시에 소요되는 일을 이용하여 흡수에너지를 구할 수 있다.

$$W = \lambda \frac{1}{2} \pi R_0^2 t_0 \sigma_y \quad (8)$$

여기서, 관통에 소요되는 전체에너지는

$$E_t = E_k + E_p + E_a \quad (9)$$

흡수에너지(Absorbed Energy)는

$$\begin{aligned} E_a &= mgh + \frac{1}{2}m(V_0^2 - V^2) \\ &= \lambda \frac{1}{2} \pi R_0^2 t_0 \sigma_y = W \end{aligned} \quad (10)$$

3. 실험 방법

3.1 실험 재료

본 실험에 사용된 재료는 중국의 Liming Honeycomb Composites사에서 제작한 하니컴 샌드위치 판넬로써 면재의 재료는 A3003H12와 유리섬유이며, 심재로 사용된 재료는 A3003H12이다[10]. 접착제는 Bondex를 사용하였다. Table 1은 하니컴 샌드위치 판넬의 종류와 적층방법, 그리고 두께에 대한 표이다.

Table 1. The types of honeycomb sandwich panel

Skin materials	Core materials	Core size (inch)	Thickness (mm)
Glass- fiber/Epoxy	Aluminum honeycomb (A3003H12)	1/2"	1.0/4.0/1.0
Aluminum			

Table 2. Material property of A3003H12 and Glass-fiber

Material	A3003H12	Glass-fiber
Density [kgm ⁻³]	2730	1700
Poisson's Ratio	0.33	0.14
Young's Modulus [GPa]	68.9	15.5
Yield Strength [MPa]	124	-
Ultimate Strength [MPa]	131	152

Table 2는 인장시험을 통하여 얻은 A3003H12와 유리섬유의 물성표이다. 유리섬유 하니컴의 경우 제조방법은 Glass-fiber/Epoxy 프리프레그(Prepreg)를 적층하여 경화시켜 면재를 제조하는 방법을 사용하였다.

3.2 압축 실험

압축 시험의 실험 조건은 ASTM C365/C365M, D7336/D7336M에 의거하여 시험편 치수를 $50\text{ mm} \times 50\text{ mm} \times 10\text{ mm}$ 로 결정하였으며, 시험에 사용된 실험 장비는 Instron사에서 제작한 만능재료시험기를 사용하였으며, 실험은 0.5 mm/min 의 속도에서 압축 강도 및 압축 계수를 구한 후 30 mm/min 의 속도에서 시험을 통하여 얻은 하중-변위의 그래프 면적에서 압축 에너지를 계산하여 충격 실험에 적절한 에너지를 정한다.

3.3 충격 실험

충격 시험의 실험 조건은 ASTM D7136/D7136M, D7766/D7766M에 의거하여 시험편 치수를 $150\text{ mm} \times 100\text{ mm} \times 10\text{ mm}$ 로 결정하였으며, Table 3과 같은 실험 조건에서 충격 시험을 실시하였다. Fig. 1과 같이 충격 시험 장비는 Imatek사에서 제작한 IM10T-20 충격시험기를 사용하여 하니컴 샌드위치 판넬에 반구형 충격체를 떨어뜨리는 방식의 중량 낙하식 실험을 실시하였는데 이때, 낙하추의 무게와 충격

Table 3. Impact height and impact velocity of impactor

Impact weight	Height (cm)	Velocity (m/s)	Energy (J)
95N	5.27	1.02	5
	10.53	1.44	10
	15.80	1.76	15

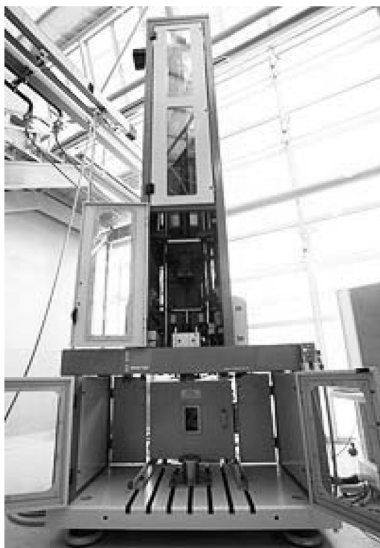


Fig. 1. Drop weight impact testing machine (IM10T-20).

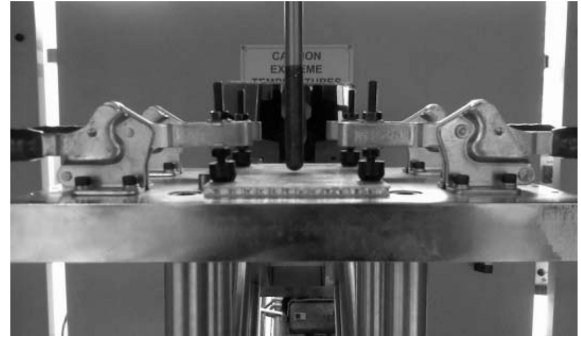


Fig. 2. Specimen fixture of drop weight impact test.

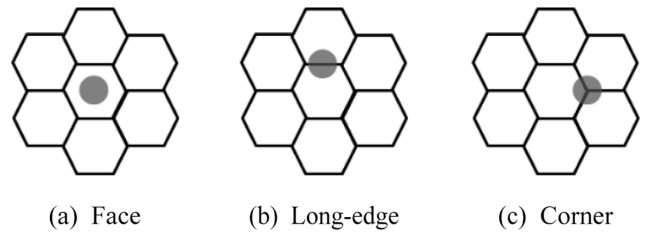


Fig. 3. Location of drop weight impact.

높이를 변화시켜 충격에너지의 크기에 따른 하니컴 샌드위치 판넬의 충격 거동을 조사하였다. 충격 하에서 재료가 보이는 충격거동은 재료가 받은 충격하중과 변형정도, 재료가 흡수한 에너지 등을 통해 파악할 수 있다. Fig. 2에서 충격을 가하는 부분의 충격체의 직경은 $12.7\text{ mm}(1/2")$ 인 반구형 강철막대이며, 클램프는 중앙에 지름이 $125\text{ mm} \times 75\text{ mm}$ 의 사각형의 구멍이 있고 구멍주위에 4개의 고정단의 경계조건을 가지는 고정 장치를 사용하였다.

먼저, 저속충격 실험은 충격체의 무게에 대한 영향을 고려하기 위해서 크로스헤드와 충격체의 무게를 합하여 9.689 kg 을 사용하였다. 그리고 충격위치에 대한 판재와 심재의 영향을 관찰하기 위해서 Fig. 3에서처럼 충격위치를 3가지로 선정하였는데 첫째는 Face, 둘째는 Long-edge, 셋째는 Corner의 순으로 실시하였다. 심재의 형태를 예상하여 정확한 충격위치를 고려하기 위해서 시험편 단면의 형상을 가지고 판재에 심재의 형상을 그렸다. 그리고 압축 시험을 통하여 얻은 압축 에너지를 토대로 충격을 가한 후 육안손상개시 에너지를 결정하였다.

4. 실험 결과 및 고찰

4.1 압축 강도

Fig. 4는 알루미늄 하니컴 샌드위치 판넬의 압축 실험 결과로 (a)는 속도 0.5 mm/min , (b)는 속도 30 mm/min 에서 측정한 결과이다. 최대하중은 2.5 kN 으로 변위 $0.05\sim 0.1\text{ mm}$ 에서 발생하였으며, Fig. 4(a)에서 볼 수 있듯이 압축 강도

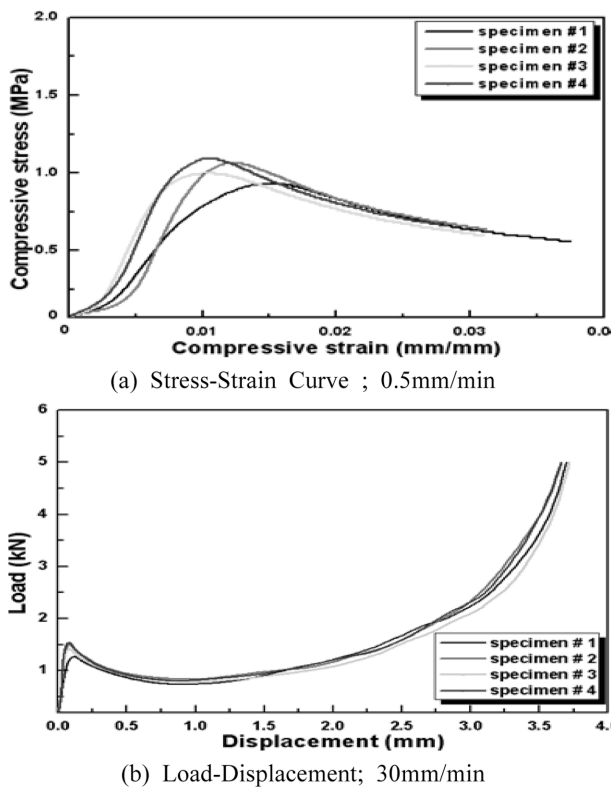


Fig. 4. The results of the compression tests of aluminum honeycomb.

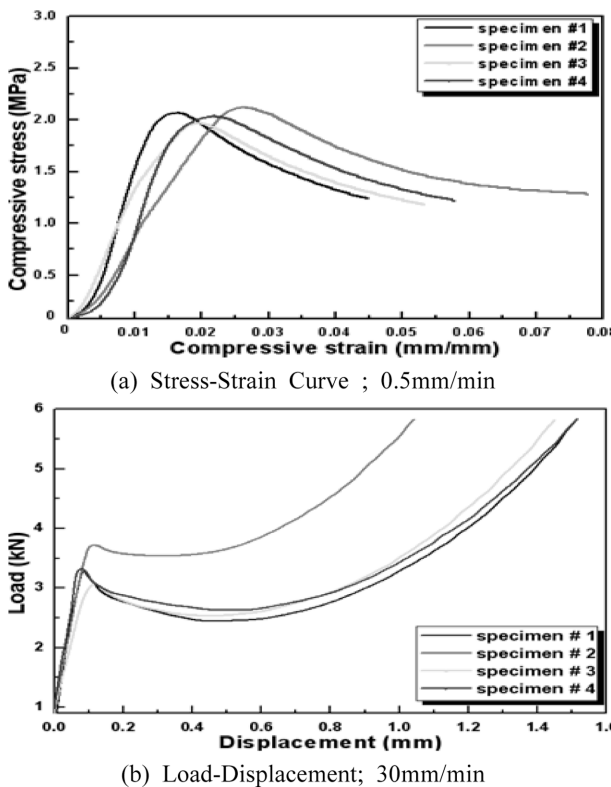


Fig. 5. The results of the compression tests of glass-fiber honeycomb.

는 각 0.9 MPa, 1.1 MPa, 1.0 MPa, 1.1 MPa이며, 압축 계수는 각 108.8 MPa, 177.9 MPa, 180.9 MPa, 197.9 MPa로 1번 시편을 제외하고 유사 값을 얻을 수 있었다. Fig. 4(b)의 그래프에서는 압축을 하는 순간 최대하중 1.5 kN이 발생, 시편이 하니컴 코어부분이 압축되는 과정에서 최대하중 이후 변위 1.0 mm까지 하중이 감소하다가 하니컴 면재인 윗면과 아랫면이 만나는 순간 다시 하중이 증가하는 현상을 확인할 수 있었으며, 압축 에너지는 5.7 J, 5.9 J, 5.6 J, 5.8 J로 나타났다. Fig. 5는 유리섬유 하니컴 샌드위치 판넬의 압축 실험 결과로 (a)는 속도 0.5 mm/min, (b)는 속도 30 mm/min에서 측정한 결과이다. 그래프의 형태는 Fig. 4(a)와 유사한 형태이며, 5.1 kN의 변위 0.1~0.2 mm에서 각 시험편의 최대 하중이 발생하며, Fig. 5(a)의 그래프에서 압축 강도가 각 2.1 MPa, 2.1 MPa, 2.0 MPa, 2.0 MPa이고, 압축 계수가 각 245.4 MPa, 116.8 MPa, 160.2 MPa, 203.8 MPa이다. Fig. 5(b)의 그래프에서는 전체적으로 압축을 하는 순간 최대하중 3.5 kN이 발생하고, 최초 하중이 가해지는 구간에서는 탄성영역이 보이지만 직선적이지 않고 기울기가 낮게 나왔으며, 압축 에너지는 10.6 J, 11.2 J, 10.3 J, 10.4 J로 알루미늄 하니컴 샌드위치 판넬보다 압축 에너지가 높다. 또한, 압축 속도 30 mm/min의 실험에서 유리섬유 하니컴이 알루미늄 하니컴 샌드위치 판넬보다 압축 하중이 3배정도 높은 결과를 보였으며, 이 결과가 압축 에너지의 결과에 영향을 미친 것으로 보인다.

4.2 충격 거동

충격에 의한 충격하중의 데이터는 충격하중-시간의 이력에 관계되는 곡선으로 충격하중-처짐 곡선은 유사한 경향을 나타낸다고 연구되어지고 있다[11]. Fig. 6은 1/2" 셀의 알루미늄 하니컴 샌드위치 판넬에 9.689 kgf의 충격을 가했을 때 충격 하중 그래프이다. (a), (b), (c)는 각각 5 J, 10 J, 15 J의 충격 에너지에서 얻은 하중 그래프로 3곳의 충격위치를 고려해 볼 때 거의 동일한 결과를 얻을 수 있었다. 하지만 각 충격 에너지의 최고점에서의 하중은 비슷하지만, 충격을 가했을 때 충격에너지가 증가할수록 최대 충격하중에 도달하는 시간은 5 J에서는 11.5 msec, 10 J에서는 7.5 msec, 15 J에서는 5.0~6.5 msec로 줄어들었다. 최대 하중은 1300 N이며, 15 J에서 충격체가 시편을 관통하는 현상을 확인할 수 있었다.

Fig. 7은 1/2" 셀의 유리섬유 하니컴 샌드위치 판넬에 9.689 kgf의 충격을 가했을 때 충격 하중 그래프이다. 유리섬유 하니컴 샌드위치 판넬의 경우 5 J, 10 J에서는 3곳의 충격위치를 고려해 볼 때 거의 동일한 결과를 보이고 있지만 15 J에서는 충격하중의 결과가 다르게 나타났다. 낮은 충격 에너지 5 J에서는 유리섬유 하니컴 판넬에 면재에만 손상을 주었으며, 10 J에서는 상부 면재와 심재에 손상을 주면서 하부 면재에도 약간의 손상을 주었다. 하지만, 5 J과 10 J

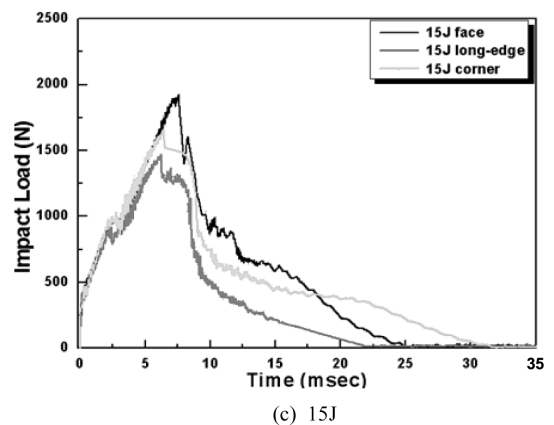
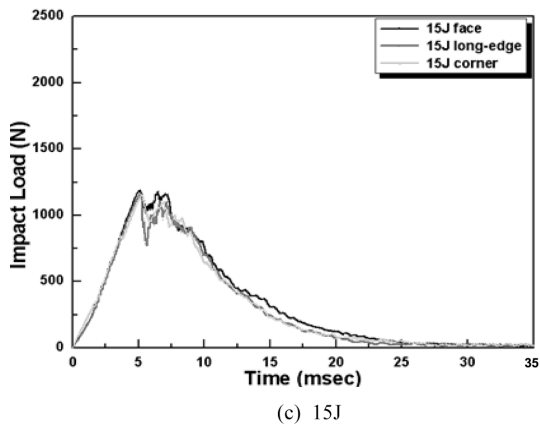
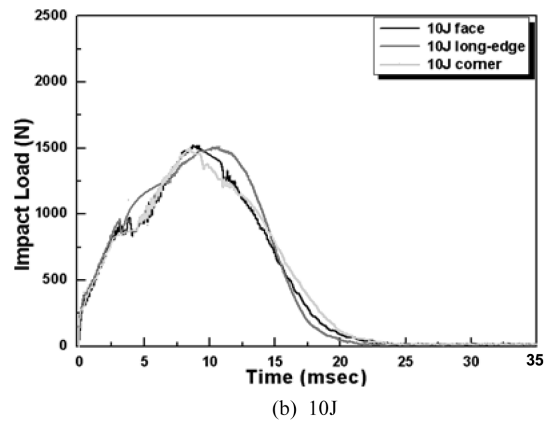
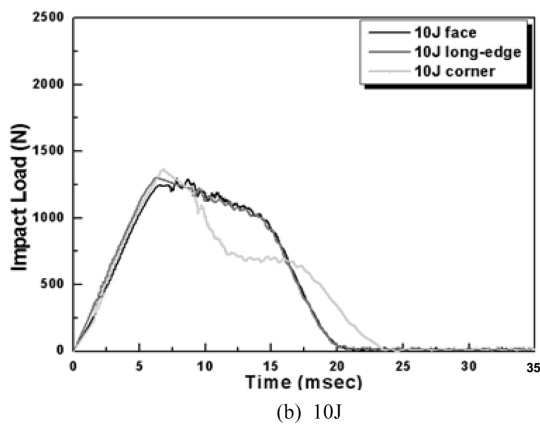
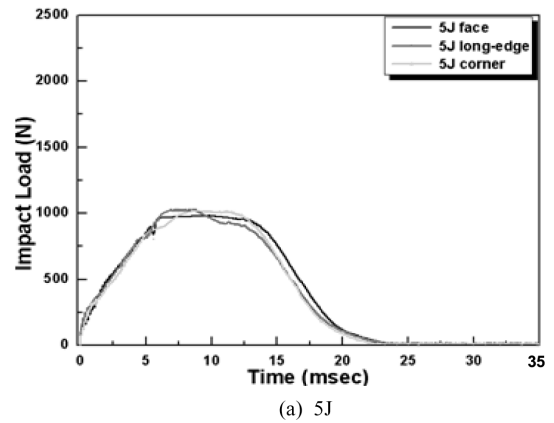
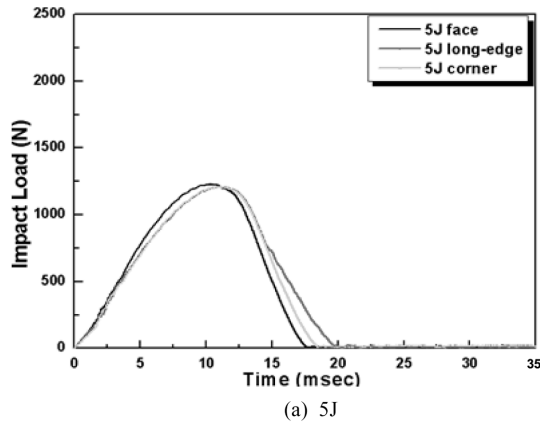


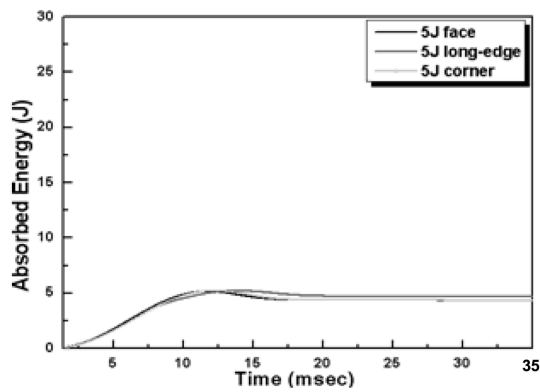
Fig. 6. Behavior of impact load vs. time of 1/2" cell Aluminum honeycomb with 6 mm thickness after impacting of 9.689 kg, impactor; (a) 5 J, (b) 10 J and (c) 15 J.

Fig. 7. Behavior of impact load vs. time of 1/2" cell Glass fiber honeycomb with 6 mm thickness after impacting of 9.689 kgf impactor; (a) 5 J, (b) 10 J and (c) 15 J.

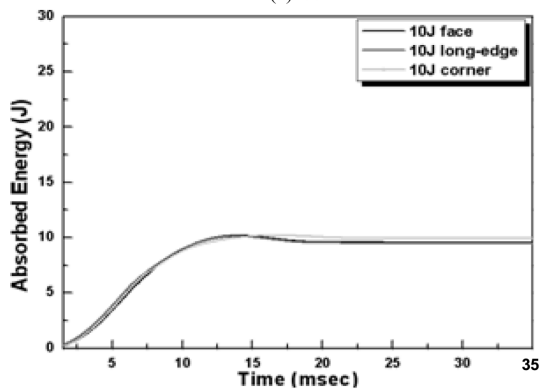
의 3곳의 충격위치에 대한 영향은 크게 없다. 15 J에서는 Face, Corner, Long-edge 순으로 충격하중이 나타났다. 또한 충격 에너지 5 J, 10 J, 15 J에서의 최대 하중이 900 N, 1500 N, 2000 N이며, 15 J에서 시편이 관통되었다. 최대하중에 도달하는 시간은 5 J에서는 10.0 msec, 10 J에서는 9.5 msec, 15 J에서는 6.0 msec로 충격 에너지가 증가할수록 충격하중은 증가하고 최대 충격하중까지 걸리는 시간은 짧아지는 경향을 보인다.

4.3 흡수 에너지

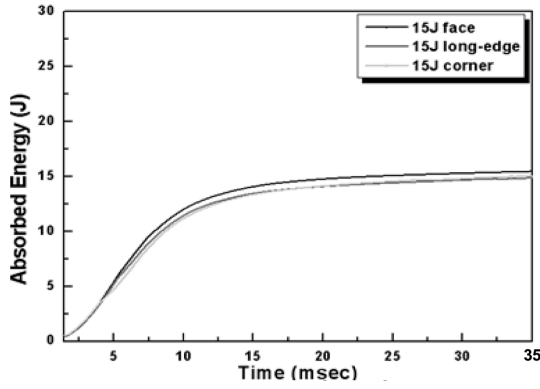
흡수에너지는 곡선은 최대 흡수에너지(E_a)에 도달한 후 하니컴 샌드위치 판넬에 손상을 만들기 위한 에너지 손실량(EL)과 남아 있는 탄성에너지(E_e)로 나타낼 수가 있다. Fig. 8은 알루미늄 하니컴 샌드위치 판넬의 흡수에너지의 그래프이다. 알루미늄 하니컴 샌드위치 판넬은 5 J과 10 J에서는 에너지 손실량과 탄성에너지 영역이 나타난다. 5 J에서는 상부 판재에 충격체의 형상이 발생하고, 10 J에서는 상



(a) 5J



(b) 10J

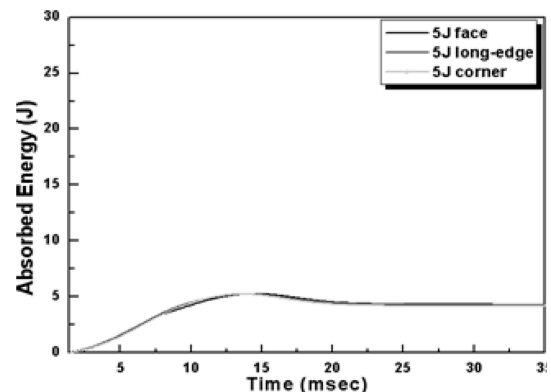


(c) 15J

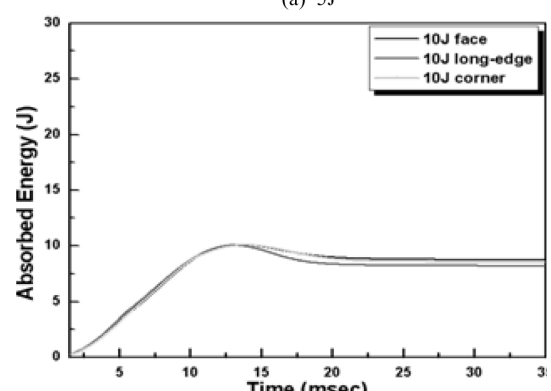
Fig. 8. Behavior of absorbed energy vs. time of 1/2" cell Aluminum honeycomb with 6 mm thickness after impacting of 9.689 kg_f impactor; (a) 5 J, (b) 10 J and (c) 15 J.

부의 판재가 찢어지고 심재는 전단력에 의해 좌굴이 발생하였다. 하부의 판재에도 손상을 미치면서 3방향으로 찢어지는 현상을 확인할 수 있었으며, 15 J에서는 하부의 판재까지 관통을 하였다.

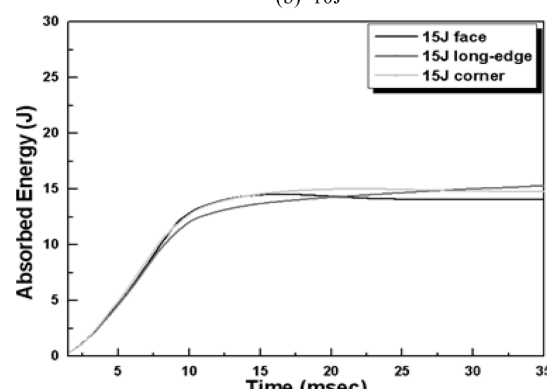
또한, Fig. 9는 유리섬유 하니컴 샌드위치 판넬의 흡수 에너지의 그래프이다. 유리섬유 하니컴 판넬은 5 J과 10 J에서는 에너지 손실량과 탄성에너지 영역이 나타난다. 5 J에서는 상부 판재에 충격체의 형상이 발생하고, 10 J에서는 상부의 판재가 찢어지고 심재는 전단력에 의해 좌굴이 발생하였다. 15 J에서는 long-edge의 에너지 값이 face와 corner



(a) 5J



(b) 10J



(c) 15J

Fig. 9. Behavior of absorbed energy vs. time of 1/2" cell Glass fiber honeycomb with 6mm thickness after impacting of 9.689 kg_f impactor; (a) 5 J, (b) 10 J and (c) 15 J.

의 값보다 낮음을 알 수 있으며, 하부의 판재까지 관통을 하였다.

Fig. 10은 광학 현미경을 이용하여 알루미늄과 유리섬유 하니컴 샌드위치 판넬의 충격 에너지 10 J에 대해서 충격 표면 및 손상 영역을 확인하였다. (a)의 알루미늄 하니컴은 Face에 충격을 가한 시험편으로 상부의 면재는 3방향으로 찢어지는 현상을 보이고 심재가 붕괴되면서 하부의 면재에 좌굴이 발생하였다. (b)의 유리섬유 하니컴은 Face에 충격을 가한 시험편으로 상부 면재는 찢어짐이 발생하였고, 심재에 많은 충격을 받으면서 하부 면재까지 영향을 미쳤다.

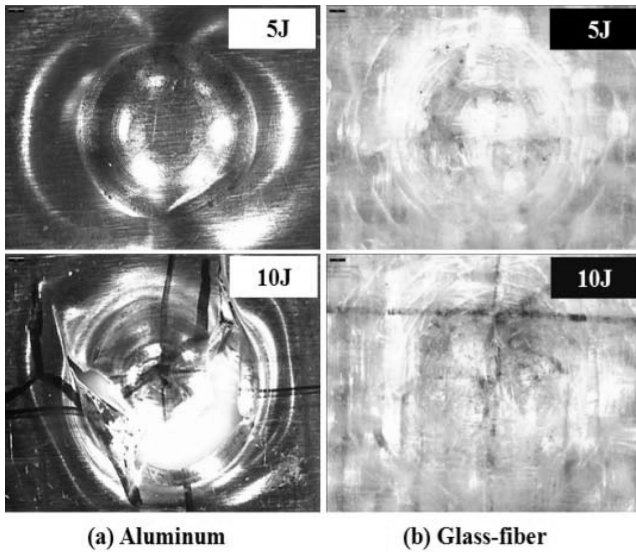


Fig. 10. Visible damage of each specimen.

6. 결 론

본 연구에서는 동일한 코어재를 가지는 알루미늄과 유리섬유의 하니컴 샌드위치 판넬의 압축 강도 및 압축 에너지의 결론과 저속 충격시 발생하는 판재와 심재의 충격거동에 대한 결론은 다음과 같다.

압축 거동 결과 알루미늄 하니컴 샌드위치 판넬보다 유리섬유 하니컴 샌드위치 판넬의 압축 강도 및 압축 에너지가 더 높은 것을 확인할 수 있었고, 속도 0.5 mm/min에서는 하중이 2배정도 높았으며, 30 mm/min에서는 하중이 3배 정도 높음을 그래프를 통해서 확인할 수가 있다. 30 mm/min의 속도에서 얻은 하중과 변위 그래프에서 얻은 면적이 곧, 압축 에너지이므로 하중과 변위가 압축에너지에 영향을 미친다.

충격 거동 결과 알루미늄 하니컴 샌드위치 판넬의 경우 충격 에너지 5 J, 10 J, 15 J에서는 3곳의 충격 위치에 대한 충격 거동은 유사하며, 각 충격 에너지의 최대 하중은 비슷하지만, 충격을 가했을 때 충격에너지가 증가할수록 최대 충격하중에 도달하는 시간은 줄어드는 것을 그래프를 통하여 확인할 수 있었다. 유리섬유 하니컴 샌드위치 판넬의 경우 5 J, 10 J에서는 3곳의 충격 위치에 대한 충격 거동은 유사하나, 15 J에서만 Face, Corner, Long-edge 순으로 충격하중이 나타났다. Face가 최대 하중이 높은 이유는 충격시 6개의 인접 심재로 충분하게 하중전달을 하기 때문이다.

또한, 흡수 에너지에서 알루미늄 하니컴 판넬의 경우 위치와 관계없이 에너지의 값이 유사하나 유리섬유 하니컴의 경우 충격에너지 5 J의 경우 충격 위치에 대한 충격 거동은 유사하나, 15 J에서는 충격 하중에서 확인한 결과와 동일하게 Long-edge의 에너지 값이 Face와 Corner의 에너지 값보다 낮음을 확인할 수 있었다.

동일한 충격에너지일 때 유리섬유 하니컴 샌드위치 판넬이 알루미늄 하니컴 샌드위치 판넬보다 최대 하중이 높고, 탄성 에너지가 크며, 충격 강도가 높은 것을 확인 할 수 있었다.

후 기

본 논문은 2012년도 한국연구재단의 지원으로 수행되었으며(NO. 2012-0009455), 저자 중 일부는 두뇌한국 21(BK21) 사업 지원을 받은 것으로 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. Jang, H.K., "Development of Nondestructive Evaluation Techniques for Honeycomb Sandwich Structure (I)," *Korea Institute of Machinery and Materials*, 1990, pp. 19-33.
2. Lee, S.K., Jo, J.D., Jo, J.W., and Bang, S.W., "In-plane Characteristics of Al Foam Core and Al Honeycomb Core Sandwich Composites with an Indented Damage," *Korean Society for Composite Materials*, 2011, pp. 226-227.
3. Kong, C.D., Bak, H.B., and Lee, S.H., "A Study on Residual Strength of Carbon/Epoxy Face Sheet and Honeycomb Core Sandwich Composite Structure after Quasi Static Indentation Damage," *Journal of Korean Society for Composite Materials*, Vol. 22, No. 2, 2009, pp. 24-29.
4. Song, J.I., and Bae, S.I., "Low-velocity Impact Behavior of Aluminium Honeycomb Sandwich Panel," *Engineering Research and Technology*, Vol. 3, 2003, pp. 69-77.
5. Lee, I.T., Shi, Y., Afsar, A.M., Ochi, Y., Bae, S.I., and Song, J.I., "Low Velocity Impact Behavior of Aluminum Honeycomb Structures," *Advanced Composite Materials*, Vol. 19, 2010, pp. 19-39.
6. Santosa, S., and Wierzbicki, T., "Crash Behavior of Box Columns Filled with Aluminum Honeycomb or Foam," *Computers & Structures*, Vol. 68, 1998, pp. 343-367.
7. Kwon, S.C., Im, C.M., Choi, B.K., Lee, S.W., Han, J.W., and Kim, Y.H., "A Study on the Analysis of Causes & Minimizing of Defects at Composite Materials Sandwich Aircraft Structure in Autoclave Processing," *Journal of the Korean Society for Composite Materials*, Vol. 14, No. 1, 2001, pp. 22-29.
8. Reddy, T.Y., Wen, H.M., Reid, S.R., and Soden, P.D., "Penetration and Perforation of Composite Sandwich Panels by Hemispherical and Conical Projectiles," *Journal of Pressure Vessel Technology*, Vol. 120, 1998, pp. 186-194.
9. Johnson, W., "Impact Strength of Materials," Edward Arnold, London, 1972, pp. 138-146.
10. Liming Honeycomb Composites Co., Ltd., www.hycomb.cn.
11. Thwaites, S., and Clark, N.H., "Non-destructive Testing of Honeycomb Sandwich Structures Using Elastic Wave," *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 187, No. 2, 1995, pp. 253-269.