

알루미늄 하니컴 샌드위치 판넬의 저속충격거동

이현석*·배성인**·함경춘***·한경섭****·송정일**

Low-velocity Impact Behavior of Aluminum Honeycomb Sandwich Panel

H.S. Lee, S.I. Bae, K.C. Ham, K.S.Han and J.I. Song

Key Words: Aluminum honeycomb sandwich panel(알루미늄 하니컴 판넬), Drop weight impact test(중량 낙하식 충격시험기), 3 point bending test(3점 굽힘시험), FEM(유한요소법)

Abstract

Impact behaviors of Aluminum Honeycombs Sandwich Panel(AHSP) by drop weight test were investigated. Two types of specimens with 1/2" and 1/4" cell size were tested by two impactors which are weight of 5.25kg_r and 11.9kg_r. Parametric studies were achieved including the impactor weight and impact sites which consist face, long-edge, short-edge, and point of the specimen. Face one of impact sites was the strongest and short-edge one of impact sites was the weakest. The damaged area of AHSP was enlarged with the increase of impactor weight that is equal to impact energy. After 3 point bending test, fracture modes of AHSP were analyzed with AE counts. Lower facesheet was fractured in the long-edge direction and then separated between facesheet and core. In the short-edge direction after core wrinkled, lower facesheet tear occurred. Impact behavior by FE analysis were increased localized damage in fast velocity because the faster velocity of the impact was, the smaller the stress of core was. Consequently, impactor weight had an effect on widely damaged area, while the impact velocity was caused on the localized damaged area.

1. 서 론

Aluminum Honeycomb Sandwich Panel (AHSP)은 경량, 조직의 안정성, 고강도, 고강성으로 인하여 용도가 매우 다양하며 거의 모든 항공기와 유도 병기들은 Honeycomb Sand Panel를 사용하고 있고 앞으로의 우주항공, 방위산업, 자동차, 철도, 해상, 통신, 스포츠분야에서도 HSP의 사용이 필수적이다.

이와 같은 HSP는 그 수요가 계속 증가할 전망이다이며 국내에서도 방위산업 등 우주, 항공산업 등의 육성 및 활성화와 관련하여 HSP의 수요가 크게 증가하는 시점에 있다. 그러나 제조결함과 충격하중이 발생할 수도 있고, 이러한 충격 손상은 외관상으로는 거의 흔적이 없으나 내부적으로는 강도의 저하를 일으키는 원인이 된다.^[1-3]

하니컴 재료의 충격에 관한 몇몇 연구^[2,3]로는 중량낙하식시험기와 에어건 시험을 통해서 충격시험기의 변화에 따른 변화의 고찰과 충격체의 형상에 따른 변화를 경험적인 수식을 이용하여 비교한 것이 있다. 또한 충격 후의 손상 메커니즘을 형상적인 분석과 초음파 c-scan을 이용하여 손상정도를 평가하였다.^[4-5] 충격 후의 debonding의 결함을 검출하는 방법으로 여러 가지가 있지만 mechanical impedance method를 이용하여 시험 주파수가 하니컴 구조의 공진 주파수보다 작아야 함을 밝혔다.^[6] 복합적층판에 충격을 가한 후 충격에너지 증가에 따라 파손모드가 변하며, 충격에너지 손실률을 이용하여 손상모드의 변화를 이해할 수 있는 변수가 된다고 밝혔다.^[7]

그러나 HSP에 대한 많은 연구가 이루어 졌지만 AHSP관한 연구는 극히 드문 편이다. 그리고 시험기의 변화와 충격체의 형상에 대한 연구는 많이 이루어 졌으나 충격 위치와 충격체의 무게, 속도에 대한 영향에 대한 연구는 많이 이루어지지 않았다.

따라서, 본 연구에서는 AHSP에 여러 가지 충격에너지에 대해서 충격을 가한 후 시험편 분석을 통하여 전형적인 충격파손모드와 손상정도를

* 한중 DCM(주) 기술부

** 창원대학교 기계공학과

*** 인하공업전문대학 기계설계과

**** 포항공과대학교 기계산업공학부

평가하고 음향방출법을 3점 굽힘실험에 접목시켜 AE counts를 이용하여 굽힘시의 파손과정을 충격거동과 비교하였다. 그리고 초음파와 c-scan을 이용하여 충격손상면을 관찰하였으며 상용구조해석 프로그램인 ANSYS 5.5를 이용하여 판재와 심재에 작용하는 충격응력에 대해서 비선형 충격해석을 실시하였다.

2. 실험방법 및 유한요소해석

2.1 실험재료 및 장치

본 충격실험에 사용된 재료는 한국 화이바에서 제작한 Aluminum Honeycomb Sandwich Panel(AHSP)로써 facesheet(판재)로 사용된 재료는 A3003H14이며, core(심재)로 사용된 재료는 A3003H14이며, 접착제는 항공기용으로 제조된 bondex를 사용하였다. 각각의 기계적 물성은 Table. 1에 나타나 있다.

충격시험에 2가지 종류의 시험편이 사용되었다. 첫 번째 시험편은 100mm×100mm×6mm의 치수를 가지고 있으며, 상부 판재의 두께는 1mm, 하부 판재의 두께는 0.5mm, 그리고 심재의 높이는 4.5mm, 심재의 두께는 0.0762mm (0.003in), cell size는 1/2" 이다. 두 번째 시험편은 동일한 치수에 cell size만 1/4" 이다.

Table.1 Mechanical Properties of Aluminum Plate(A 3003H14) and tup(SS400)

	σ_u (MPa)	σ_{ys} (MPa)	ϵ (%)	E (GPa)	ρ (g/cm ³)
A 3003H14	150	145	16	69	2.73
SS400	400	235	20	210	7.85

그리고 판재와 심재를 접착제에 의해서 견고히 결합시키고 있다. 기초 물성실험인 3 point bending test를 실시하였다.

2.2 실험방법

충격모드를 고찰하기 위해서 3 점 굽힘시험을 1/2" cell에는 long-edge와 short-edge 방향에 대해서 1/4" cell에는 edge에 관계없이 실험을 실시하였다. 이는 1/4" cell은 심재가 작으므로 edge 방향을 구별하지 않았다. 그리고 음향방출법을 이용하여 굽힘시 발생하는 AE신호를 받아 분석하여 하니컴 판넬의 굽힘 거동을 평가하였다.¹ 사용된 실험조건은 ASTM 393-94에 의거하여 시험편 치수를 250mm×70mm×6mm로 결정하였으며, span의 길이를 200mm로 결정하였다. 실험장비는 MTS사에서 제작한 만능재료시험기

(Material Test System 810)를 사용하였다.

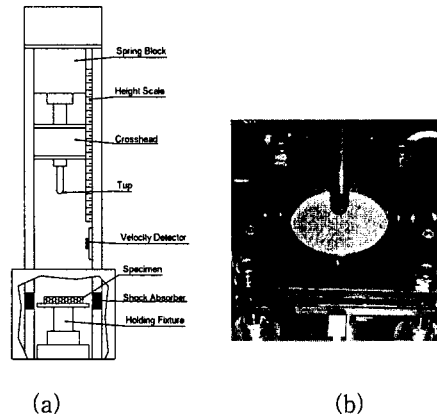


Fig. 1 Drop weight impact test and fixture

그리고 충격실험은 Fig. 1(a)의 Instron사에서 제작한 Dynatup GRC8250 충격시험기를 사용하여 AHSP에 반구형 tup을 떨어뜨리는 방식의 중량 낙하식 실험(Drop Weight Test)을 실시하였는데 이때, 낙하추의 무게와 충격높이를 변화시켜 충격에너지의 크기에 따른 AHSP의 충격 거동을 조사하였다. Fig. 1(b)에서 충격을 가하는 부분의 tup의 직경은 12.7mm(1/2")인 반구형 강철막대이며, clamp는 중앙에 지름이 75mm의 원형의 구멍이 있고 구멍주위에 12.7mm의 고정단을 경계조건을 가지는 fixture를 사용하였다.

먼저, 충격 실험은 충격체의 무게에 대한 영향을 고려하기 위해서 crosshead와 tup의 무게를 합하여 5.25kg, 11.9kg를 사용하였다. 그리고 충격위치에 대한 판재와 심재의 영향을 관찰하기 위해서 Fig. 3처럼 충격위치를 4가지로 선정하였는데 첫째는 face, 둘째는 long-edge, 셋째는 short-edge, 넷째는 point의 순으로 실시하였다. 그리고 각각의 위치에 43J, 32J, 19J, 10J의 서로 다른 충격에너지를 가지고 충격을 가하였다.

2.3 유한요소해석

Aluminum honeycomb sandwich panel(AHSP)의 충격에 대한 비선형 유한요소해석을 실시하였다. Fig. 2(a)는 mesh model로써 1/4 Symmetric Boundary Condition이며, Fig. 2(b)는 tup은 y방향으로 충격이 가해지므로 y방향을 제외한 모든 방향으로 구속이며 AHSP에는 clamp에 의해 고정되므로 x, y, z가 구속되는 조건을 가지고 있다. Contact analysis는 target surface와 contact surface가 존재하는데 target surface는 AHSP의 상부 facesheet, contact surface는 tup의 바깥 표면을 선택했으며, Elastic-plastic analysis에서는

Table. 1처럼 tup과 AHSP의 σ_{ys} , σ_u 와 tangent module를 입력치로 적용시켰다. 충격체 무게가 11.9kg_r와 5.25kg_r이며 1/2" face의 경우를 AHSP에 접촉한 상태에서 초기속도 $v_0 = \sqrt{2gh}$ 를 가지고 상용해석 프로그램인 ANSYS 5.5로 해석하였다. 그리고 충격 후 facesheet가 항복응력을 지나는 시간과 그때의 core에 대한 응력을 각각의 impact energy에 대해서 비교하였다.

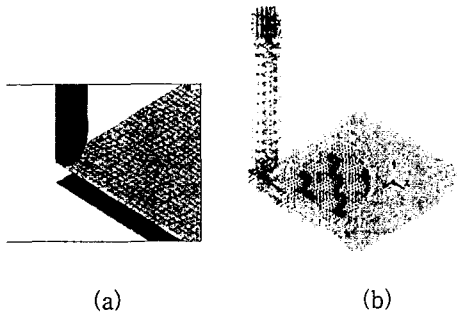


Fig. 2 1/4 symmetric Mashed model and boundary condition of AHSP

4. 실험 결과 및 고찰

4.1 굽힘 실험

Fig. 3의 short-edge direction은 0~1.5sec에서는 전단에 의한 심재의 찌그러짐이 확산되어 낮은 신호를 방출하며, 1.5~3.5sec에서는 찌그러진 심재사이에서 심재가 찢어지고 상부 판재 내부에 debonding이 발생하면서 몇 개의 돌발형 신호가 발생한다. 그리고 3.5~5.5sec에서는 shear에 의해서 본격적으로 심재가 찢어지기 시작하며 상부 판재와 하부 판재가 접촉하면서 마찰에 의해서 연속적인 돌발형 신호가 발생한다. 5.5~7.5sec에서는 3.5~5.5sec에서 하부 판재가 찢어지면서 신호가 발생한다. Long-edge direction은 0~1.5sec에서는 하부 판재의 파단에 의해 돌발형 신호가 발생하고, 1.5~3.5sec에서는 심재와 심재의 접촉부는 떨어지지 않았지만 심재가 찢어져 큰 신호가 발생하였다. 3.5~5sec에서는 심재가 판재에서 떨어져 나가는 debonding이 발생하기 시작하고, 5~7sec에서는 심재가 본격적으로 판재에서 이탈되기 시작한다. 전체적으로 shear에 의한 심재의 손상영역은 관찰되지 않았다. 1/4" cell은 1/2" cell 의 long - edge 방향의 굽힘 시험결과와 유사하게 나타났다.

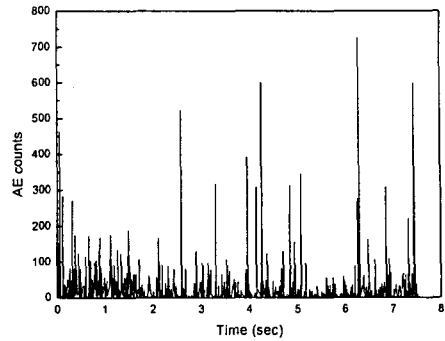


Fig. 3 1/2" Cell AE counts of short-edge direction

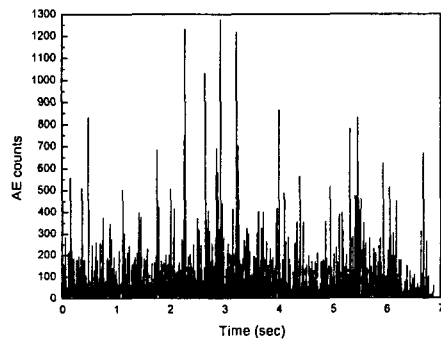
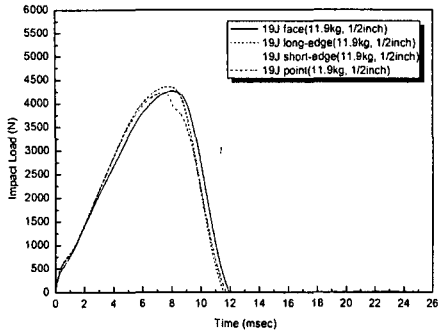


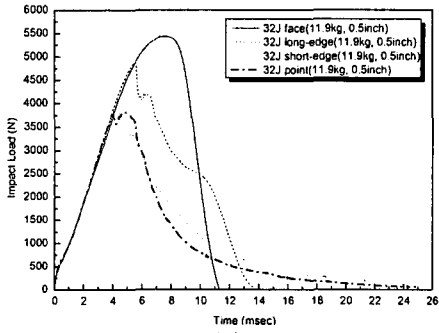
Fig. 3 1/2" cell AE counts of long-edge direction

4.2 충격시험

Fig.4에서 1/2" 의 AHSP에 11.9kg_r의 충격을 가했을 때 충격에너지가 증가할수록 충격하중은 증가하는 경향을 보인다. Fig.4(a)처럼 10J 과 19J에서는 충격위치와 관계없이 거의 동일한 결과를 보이고 있다. 32J, 43J에서는 충격하중의 결과가 다르게 나타났다. 낮은 충격에너지인 10J과 19J에서는 AHSP에 크게 손상을 주지 못하기 때문에 4곳의 충격위치에 대한 영향은 크게 없다. 하지만 32J에서는 face, long-edge순으로 충격하중이 크고 point와 short-edge는 거의 동일한 값을 보이고 있다. 43J에서는 face가 가장 크고 나머지는 거의 동일한 경향을 나타낸다. 왜냐하면 32J 충격 후 판재가 만입되면서 심재에게 전단력을 전달하게 되는데 이 때 face의 경우는 심재가 파손되면서 아랫부분의 판재를 찢어짐 손상을 주지 않고 전단력을 인접 심재로 충분히 전달한 후 되 튕기기 때문에 가장 높다. 하지만 edge나 point는 심재가 전단력을 받아 심재에 buckling을 발생시키면서 심재가 인접 심재로 충분히 전달하기 이전에 심재에 의해서 상부 또는 하부 판재에 찢어짐을 발생시키기 때문이다.

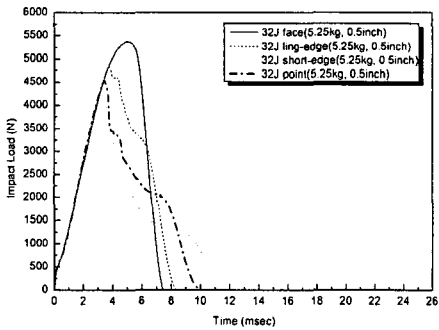


(a)

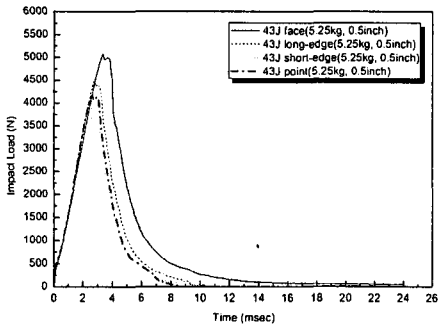


(b)

Fig. 4 Impact load of AHSP with 1/2" cell size by 11.9kg_f impactor (a)19J, (b)32J



(a)



(b)

Fig. 5 Impact load of AHSP with 1/2" cell size by 5.25kg_f impactor (a)32J, (b)43J

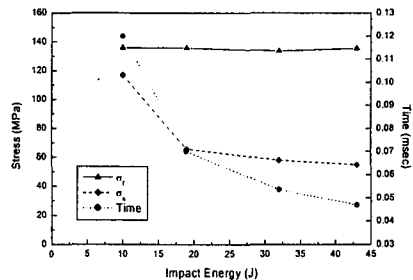
Fig. 4와 Fig. 5를 비교하면 11.9kg_f의 충격체를 사용했을 때 최대 충격하중에 도달하는 시간은 10J에서는 8.5msec, 19J에서는 8msec, 32J에서는 4~8msec, 43J에서는 4~6msec이지만, 5.25kg_f의 10J에서는 5.5msec, 19J에서는 4~6msec, 32J에서는 3~5msec, 43J에서는 2.5~3.5msec로써 5.25kg_f의 충격이 훨씬 빠르다. 이는 충격속도가 느리면 최대 충격하중까지 도달하는 시간이 오래 걸리므로 변형에너지가 크게되고 손상영역 역시 넓게 발생한다. 그러므로 충격은 무게와 속도의 함수이지만 속도보다는 무게가 더 지배적임을 알 수 있다. 1/4" cell size 1/2" 시험편과 전체적으로 유사한 결과를 나타내고 있다.

4.3 유한요소해석

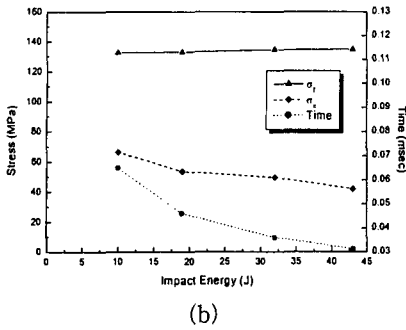
1/2" 의 11.9kg_f와 5.25kg_f의 충격체를 이용한 각 충격에너지에 대한 비선형해석을 실시하였다. 1/2" 시험편에 11.9kg_f, 32J의 충격시 tup이 접촉되는 판재에 최대응력 약 133.8MPa이 발생한다. 11.9kg_f, 32J의 충격일 때 심재에 작용하는 응력은 약 58.1MPa이 작용한다. 충격이 face에 작용할 때 edge와 edge의 연결부에서 큰 응력이 작용하고 인접 심재로 응력이 전파되고 있다.

Fig. 6은 충격에너지가 클수록 판재에서 최대 응력(σ_f)이 발생하는 시간은 빨라지지만 심재를 통해 전파되는 응력(σ_c)은 작아진다. 이는 충격속도가 빠를수록 국부적으로 응력이 집중됨을 의미하며 손상이 전파되기 이전에 충격 위치에서 국부적으로 발생함을 의미한다. 그리고 Fig. 6(a), (b)를 비교해보면 core에 발생하는 응력은 동일한 충격에너지에 대해서 11.9kg_f이 더 크다. 이는 앞에서 언급했던 실험적 데이터와 c-scan image에서 보았던 것처럼 무거운 충격체가 더 큰 손상을 준다는 것을 다시 확인시켜 주었다.

그리고 동일한 충격에너지에 대해서 속도가 빠른 5.25kg_f이 더 짧은 시간에 의해서 판재에 항복 응력을 발생시킴을 알 수 있다.



(a)



(b)
Fig. 6 Stress and time of impact energy by 5.25kg_r and 11.9kg_r impactor

5. 결론

Aluminum Honeycomb Sandwich Panel (AHSP)의 충격시 발생하는 판재와 심재의 충격 거동과 음향방출법을 이용한 굽힘실험 결과 그리고 유한요소해석에 대한 결론은 다음과 같다.

1. AE count를 이용하여 3 점 굽힘 실험시의 파손모드를 분석하였다. 그 결과 short-edge방향에서는 초기에 심재에 의해서 굽힘하중을 지탱하다가 하부 판재의 찢어짐이 발생하고, long-edge는 초기에 하부 판재가 찢어진 후에 심재와 판재의 분리가 이루어진다. 그러므로 굽힘하중을 많이 받는 하니컴 구조물에는 short-edge방향으로 제조해야 한다.
2. AHSP의 충격은 낮은 충격에너지에서는 AHSP의 위치에 대한 충격거동은 유사하나, 높은 충격에너지에서는 AHSP의 face, long-edge, point, short-edge으로 위치에 따른 차이를 보였으며 face가 충격에 가장 강하였다. 그러므로 edge시험편의 상,하부 판재의 tear를 방지하기 위해서는 판재의 두께를 더 두껍게 해야한다.
3. 동일한 충격에너지일 때 무거운 충격체가 가벼운 충격체를 사용하였을 때보다 최대충격하중까지 도달하는 시간이 더 느리므로 변형에너지 (strain Energy)가 훨씬 크고, c-scan image로 더 넓은 손상면을 확인하였다. 이는 속도보다는 무게의 영향이 지배적임을 확인하였다.
4. 유한요소 해석을 통하여 충격거동을 해석한 결과 속도가 빠를수록 최대응력에 도달하는 시간은 짧아지고 국부적인 손상을 증가시킨다. 이는 무게는 넓은 손상면을 발생시키는데 지배적인 변수이고, 속도는 국부적인 손상을 발생시키는 변수가 된다.

- (1) David M. McGowan and Damodar R. Ambur., "Damage Characteristic and Residual Strength of Composite Sandwich Panels Impacted with and without a Compression Loading", Materials Conference and Exhibit and AIAA/ASME/AHS Adaptive Structures Forum - PART 1, pp. 713-723, 1998
- (2) S. Santosa and T. Wierzbicki., "Crash behavior of box columns filled with aluminum honeycomb or foam", Computers & Structures, Vol. 68, pp. 343-367, 1998
- (3) T. Y. Reddy, H. M. Wen, S. R. Reid and P. D. Soden., "Penetration and Perforation of Composite Sandwich Panels by Hemispherical and Conical Projectiles," Journal of Pressure Vessel Technology, Vol. 120, pp. 186-194, 1998
- (4) S. D. Papka, S. Kyriakides and S. Kyriakides., "Experiments and Full-Scale Numerical Simulations of In-Plane Crushing of a Honeycomb," Elsevier Science, Vol. 46, pp. 2765-2776, 1997
- (5) A.N. Palazotto, "Low Velocity Impact Damage Characteristics of Z-fiber Reinforced Sandwich Panels - An Experimental Study," Proceedings of the 38th AIAA/ASME/ASCE /AHS/ASC Structures, Part 3 ,P.3-9 ,1997
- (6) M. K. Lim, S. C. Low, L. Jiang and K. M. Liew., "Dynamic Characteristics of Disbonds in Honeycomb Structures," Engineering Structures , Vol. 17, pp. 27-38, 1995
- (7) Beomkeun Kim, Richard M. Christensen., "Basic two-dimensional core types for sandwich structures," International Journal of Mechanical Science, Vol. 42, pp. 657-679, 2000