

달착륙선 충격흡수장치용 알루미늄 허니콤의 Crush Strength에 관한 연구

김 신* · 이혁희* · 김현덕* · 박정선** · 임재혁*** · 황도순****

Study of Crush Strength of Aluminum Honeycomb for Shock Absorber of Lunar Lander

Shin Kim* · Hyuk-Hee Lee* · Hyun-Duk Kim* · Jung-Sun Park** · Jae-Hyuk Im***
· Do-Soon Hwang****

ABSTRACT

Understanding the crushing behaviour of aluminum honeycombs under dynamic loading is useful for crash simulations of vehicles and for design of impacting energy absorbers. In the study of honeycomb crushing under quasi-static, dynamic loading, the most important parameter is crush strength. Crush strength is indicated to energy absorption characteristic of aluminum honeycomb. In this study, Using Finite Element Analysis carried out crush strength of hexagonal aluminum honeycomb then the results was compared with Quasi-static test. Consequently, Crush strength is different in quasi-static loading and dynamic loading about 16%

Key Words: Crush Strength, Crush Force, Aluminum Honeycomb, Shock absorb, Plastic deformation, Collapse

1. 서 론

허니콤 구조는 오늘날 다양한 분야에서 사용되어지고 있다. 허니콤 구조는 1845년 처음 나무로 만든 허니콤을 코어로 하여 샌드위치 패널(Panel)을 만들어 사용한 이후 1,2차 세계 대전을 치루면서 항공기에 발사나무로 만든 허니콤 코어를 사용하였다. 그리고 종전 후 알루미늄으로 만든 허니콤을 개발하여 항공기에 사용하였

다. 알루미늄 허니콤은 복합재료 또는 발사나무로 만들어진 허니콤 보다 무겁지만 강도가 매우 높으며 다른 구조 부재들에 비해 무게 대비 압축 강도가 좋은 장점이 있다.

알루미늄 허니콤은 달착륙선인 1960년대 NASA에서 개발된 서베이어호[1], 아폴로11호[2]의 충격흡수 장치로 사용되는 것을 시작으로 경량 에너지흡수 메커니즘으로서 많은 연구가 이루어졌으며 이후 Viking, Mars polar, Phoenix 등 화성 착륙선에도 사용되어 우주환경에 가장 적합한 고성능 경량 충격흡수 장치임을 검증하였다. 이러한 착륙선에 사용된 알루미늄 허니콤은

* 학생회원, 한국항공대학교 대학원생

** 정회원, 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학부

*** 정회원, 한국항공우주연구원

**** 연락처, E-mail: Jungsunpark@kau.ac.kr

Out of plane 방향으로 전달된 하중에 의하여 허니콤이 붕괴되면서 허니콤을 구성하는 얇은 알루미늄들이 소성변형하게 되고 이 과정에서 에너지를 흡수한다. 본 연구에서는 Out of plane 방향 충격흡수 특성을 결정하는 허니콤의 Crush Strength 을 알아보기 위해 동적 충격흡수 시험에 앞서 정적 시험과 동적 유한요소해석 결과와 비교하여 동적시험환경 환경에서 알루미늄 허니콤의 Crush Strength 가 어떻게 변하는지에 대해 알아볼 것이다.

2. 알루미늄 허니콤의 일반적 특성

알루미늄 허니콤의 특징은 에너지 흡수량 조절이 용이하며 많은 양의 충격에너지흡수가 가능하고 간단한구조이다. 그리고 에너지 흡수율이 일정하다는 특징을 가지고 있다. Fig. 1에서 알 수 있듯이 처음 피크 하중이 작용할 때를 제외하고는 일정하게 에너지를 흡수 하는 것을 알 수 있다. 에너지를 일정하게 흡수 할 때의 힘을 Crush Force라고 하며 면적으로 나눈 값을 Crush Strength라고 하며 이는 허니콤의 셀의 크기와 두께에 따라 달라지는 허니콤 물성치로 정의된다.

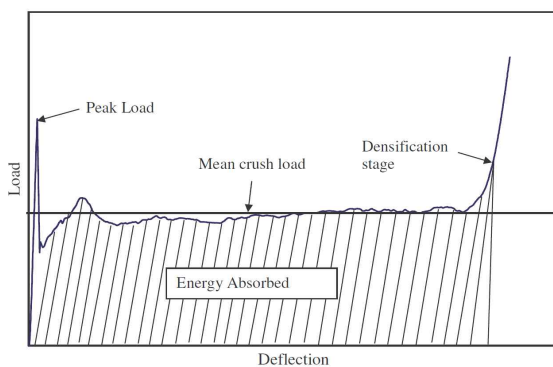


Fig. 1 Force-displacement curve [3]

3. 알루미늄 허니콤의 정적시험

3.1 시편 제작

알루미늄 허니콤의 제작방법에는 Expanded 제작방법, Corrugated 제작방법 두 가지 방법이 있다. Expanded 제작방법은 Fig. 2와 같이 알루미늄 호일을 적층하여 적층된 판을 잡아 당겨 허니콤을 만드는 방법이다. 이 방법은 제작이 쉽고 원하는 크기로 가공하기 용이한 장점이 있다. 그러나 적층판을 펼쳤을 때 허니콤의 육각형 형성률이 Corrugated 제작 방법보다 떨어지는 단점이 있다. 그리고 Corrugated 제작 방법은 Fig. 3과 같이 알루미늄 호일을 육각형으로 가공하여 붙이는 방법이다. Corrugated 제작 방법은 육각형 형성률이 높으며 Corrugating roll을 통해 여러 가지 모양의 허니콤을 만들 수 있는 장점이 있지만 제작이 어렵고 원하는 크기의 가공이 어려운 단점이 있다[4].

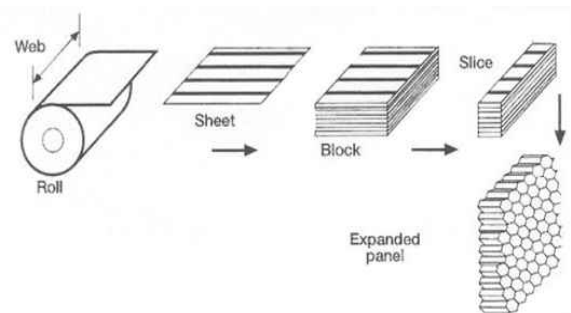


Fig. 2 Expanded manufacture process

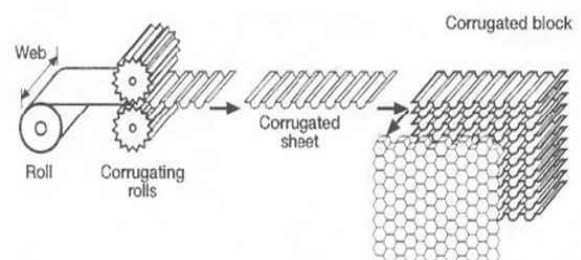


Fig. 3 Corrugated manufacture process

본 연구에서는 여러 가지 크기로 가공이 쉬운 Expanded 제작방법의 허니콤을 사용하였다. 그리고 시편의 크기는 미국의 Military Standard

를 따랐으며 상세사양과 시편은 Table 1과 Fig. 4와 같다.

Table 1 Specification of specimen

Cell Size	6.35 mm
Foil Thickness	0.05 mm
Length	66.5 mm
Width	66.5 mm
Height	100 mm

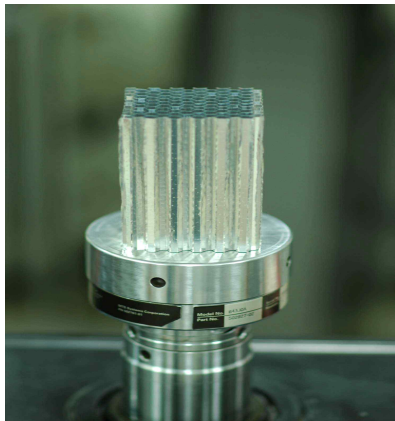


Fig. 4 Honeycomb Specimen

3.2 정적시험

시험은 만능재료시험기를 이용하여 시험하였다. 시험은 ASTM C 365 에서 명시한 알루미늄 허니콤 코어 정적시험법을 준수 하여 Fig. 5와 같이 실시하였다. 5번의 반복 시험을 통해 알루미늄에 대한 Crush strength 그래프를 Fig. 6과 같이 구하였다. 본 시험을 통해 계산된 평균 Crush strength는 1.17 MPa 이다.



Fig. 5 Quasi-static test

4. Analytical Crush Strength 예측 이론

4.1 Bending & Shear Deformation Energy Method

Bending & Shear Deformation Energy Method 는 알루미늄 허니콤이 붕괴될 때 굽힘 변형과 전단 변형만 일어난다는 가정을 가지고 있다.

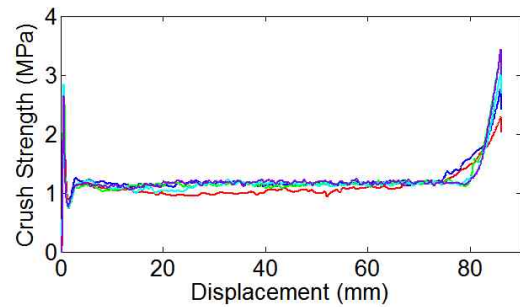


Fig. 6 Crush strength curve

이러한 가정을 바탕으로 굽힘 변형에너지와 전단 변형에너지를 통해 충격에너지를 흡수하는 이론으로 식 (1)과 같이 나타낸다[5].

$$f_{total} = \frac{\sigma_y}{K} \frac{t^2}{S^2} [4.75 + 28.63K] + 0.64\sigma_y \frac{t}{S} \quad (1)$$

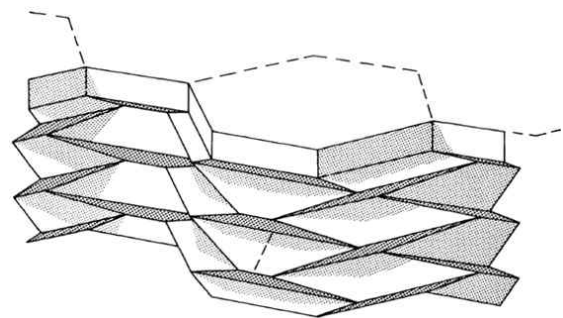


Fig. 7 Bending shear deformation energy method collapsed shape

4.2 Wierzbicki's Method

Wierzbicki's Method 는 1983년 Wierzbicki가 고안한 방법으로 허니콤이 붕괴 될 때 반복적 패턴을 가진 형상 가지며 붕괴된다고 가정하였다. 이 때 소성변형이 일어나며 충격에너지가

소성변형 에너지로 변하면서 에너지 흡수를 하는 이론으로 식 (2)와 (3)으로 나타낼 수 있다 [3].

$$\sigma_0 = \frac{\sigma_y + \sigma_u}{2} = \text{flow stress} \quad (2)$$

$$f_w = 16.56\sigma_0 \left(\frac{t}{S} \right)^{\frac{5}{3}} \quad (3)$$

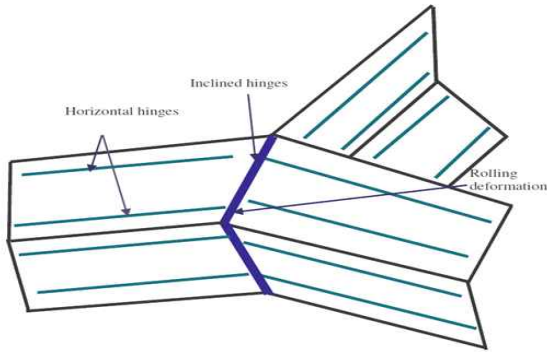


Fig. 8 Wierzbicki's method collapsed shape

5. 알루미늄 허니콤 유한요소 해석

본 연구의 해석은 Abaqus Explicit 코드를 이용하여 해석을 수행 하였다. Explicit 코드는 정적 시험과 같은 긴 시간동안의 해석에서는 Time-step 이 작아져 매우 오랜 시간이 필요하게 된다. 이러한 이유로 유한요소 해석은 동적 시험조건에 맞추어 해석을 수행 하였다.

5.1 유한요소 해석모델

유한요소모델은 Fig. 9와 같으며 정적시험에 사용된 시편과 동일하게 모델링 하였다. 요소의 크기는 0.5mm X 0.5mm 이며 총 요소 수는 30만 개 이다. 요소 크기 선정 시 허니콤이 붕괴될 때 Folding 되는 부분이 구현될 수 있는 충분히 작은 크기여야 한다. 그리고 허니콤은 셀 요소로 구성하였으며 제조공정상 두께가 2배가 되는 부분은 알루미늄 호일의 두께를 0.1mm 로 구현 하였다. $\rho = 2690 \text{ kg/m}^3$, $E = 69 \text{ GPa}$

$\nu = 0.34$ 이며 해석에 필요한 소성물성치는 알루미늄 허니콤과 동일한 재료인 AA3104를 사용 하였다. 충격을 가하기 위하여 허니콤 위쪽에 강체 판을 생성하여 4m/s 속도를 가하였으며 허니콤 아래에는 허니콤을 지지하는 다른 강체 판을 생성하였다.

5.2 유한요소 해석

경계조건은 허니콤 위쪽 강체 판은 수직방향 변위를 제외하고 모두 구속하였으며 아래쪽 판은 변위와 모멘트 모두를 구속하였다. 해석시 허니콤은 판과 닿는 부분부터 붕괴됨을 알 수 있고 대부분의 힘은 붕괴되는 부분이 받는 것을 알 수 있다. 유한요소해석을 통해 구해진 Crush strength는 1.36 MPa 이다.

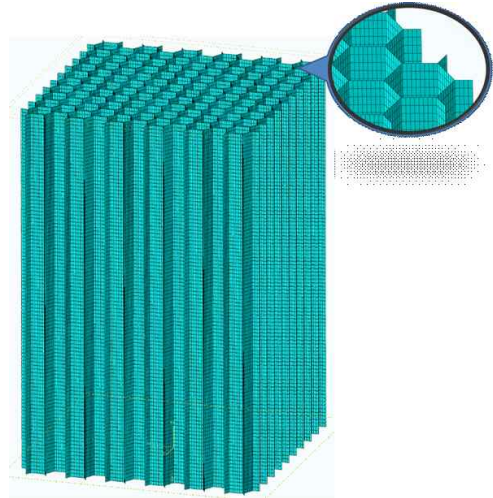


Fig. 9 Finite element model

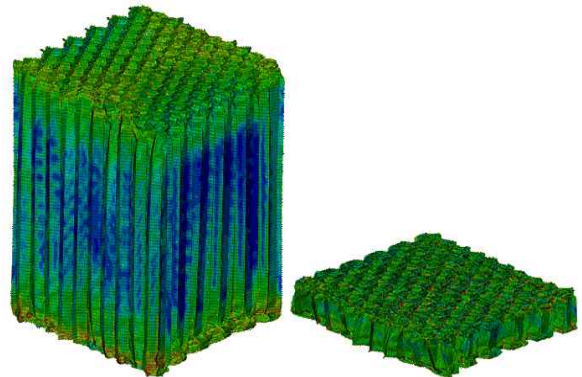


Fig. 10 Finite element analysis

5.3 정적 시험과의 비교

정적 시험과 유한요소 해석에서 구한 Crush strength 값은 Fig. 11과 같다. 정적시험과 해석모델과 16% 정도의 차이가 있으며 이런 차이는 Strain rate 에 의한 flow stress 변화 때문이다.

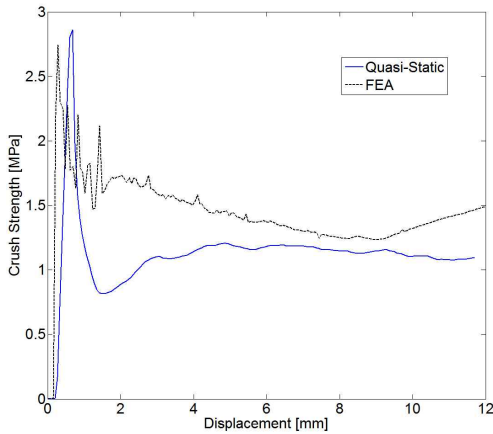


Fig. 11 Comparison of results

Flow stress 란 소성변형이 일어나는 물체가 소성변형을 지속시키기 위해 필요한 응력으로 정의된다[6]. 이 strain rate에 의한 효과는 다음 식 4 과 같이 나타낼수 있다.

$$\frac{\sigma_0'}{\sigma_0} = 1 + \left(\frac{\dot{\epsilon}}{D} \right)^{1/q} \quad (4)$$

σ_0' 는 Dynamic flow stress 이며 σ_0 는 Static flow stress 이다. $\dot{\epsilon}$ 는 strain rate 이며 D,q는 재료상수 이다[7].

6. 결 론

본 연구의 목적은 알루미늄 허니콤의 에너지 흡수특성 예측을 위한 해석기술을 확립하여 실험과 비교하는 것에 목적이 있다. 허니콤의 에

너지 흡수 특성예측 기술을 이용하면 허니콤의 실험에 앞서 다양한 허니콤의 형상과 속도에 미리 시험결과를 짐작함으로써 시험을 효율적으로 수행할 수 있다. 허니콤의 동적 실험을 하기에 앞서 유한요소 해석을 통해 얻은 Crush strength가 정적시험에서 얻은 Crush strength와 16% 차이가 있음을 알 수 있으며 이 차이는 동적거동에서 발생하는 Strain rate 에 의한 효과이다. 시험과 해석을 통해 구해진 Crush strength는 다소 차이가 있지만 허니콤이 붕괴될 때 일정한 Crush strength를 가지는 것을 알 수 있다. 앞으로 알루미늄 허니콤의 동적 시험을 통한 데이터와 현재의 해석 값과 비교를 통한 검증은 해야 할 것이다.

참 고 문 헌

- [1] NASA, "Surveyor program result" ,NASA SP-184.
- [2] William F. Rogers, "Apollo experience report- lunar module landing gear subsystem", NASA, 1972, pp.8.
- [3] Vinof Meshach Aaron Jeyasingh, "Analytical modeling of metallic honeycomb for energy absorption and validation with FEA", Wichita state Univ., 2005.
- [4] Hexcel corporation "Honeycomb attributes and properties" .
- [5] R. K. Mcfarland, "A limit analysis of the collapse of hexagonal cell structures under axial load", NASA JPL, 1961.
- [6] G. M. Pittala, "Flow stress determination in orthogonal cutting process combining the primary and the secondary shear zones", Int. J. Material forming.
- [7] Norman Jones, Structural impact, Cambridge university press, 1989.