

論文

DOI:10.5139/JKSAS.2011.39.5.391

알루미늄 허니콤의 충격 에너지 흡수 특성 예측

김현덕*, 이혁희*, 황도순**, 박정선***

Prediction to Shock Absorption Energy of an Aluminum Honeycomb

Hyun-Duk Kim*, Hyuk-Hee Lee*, Do-Soon Hwang** and Jung-Sun Park***

ABSTRACT

The purpose of this paper is to predict the shock absorbing characteristics of the aluminum honeycomb in a lunar lander. Aluminum honeycomb has been used for shock absorbers of lunar lander due to its characteristics such as light weight, high energy absorption efficiency and applicability under severe space environments. Crush strength of the honeycomb should have strength to endure during shock energy absorbing process. In this paper, the crush strength, which depends on the shape of honeycomb and impact velocity, is estimated using FEM. Ls-dyna is used for finite element analysis of the honeycomb shock absorber. The unit cells of the honeycomb shape are modeled and used for the finite element analysis. Energy absorption characteristics are decided considering several conditions such as impact velocity, foil thickness and branch angle of the honeycomb.

초 록

본 연구의 목적은 알루미늄 허니콤의 충격에너지 흡수 특성을 예측하는 것이다. 알루미늄 허니콤은 가볍고 에너지 흡수효율이 뛰어나며, 우주환경에서도 사용 가능하여 달착륙선의 충격흡수장치로 사용되고 있다. 충격에너지 흡수용 허니콤의 설계를 위해서는 에너지 흡수 과정에서 일정하게 유지되는 압축강도(crush strength)의 예측이 중요하다. 본 연구에서는 유한요소법을 이용하여 허니콤의 형상 및 충돌속도에 따른 압축강도를 예측하였다. 유한요소해석 프로그램은 Ls-dyna를 이용하였으며, 효율적인 유한요소 해석을 위하여 허니콤의 단위 셀 모델을 선정하였다. 이를 바탕으로 충돌속도 및 허니콤 포일(foil)의 두께 변화, 허니콤의 분기각(branch angle)에 따른 유한요소해석을 수행하여 에너지 흡수 특성을 분석하였다.

Key Words : Aluminum honeycomb shock absorber(알루미늄 허니콤 충격흡수장치), Crush strength(압축강도), Finite element method(유한요소법), Ls-dyna

1. 서 론

허니콤은 대표적인 경량 구조로 항공기, 인공 위성의 샌드위치 패널의 코어뿐만 아니라 충격에너지 흡수용으로 사용된다. 충격에너지 흡수용 허니콤은 유압식 및 전자기 방식의 에너지 흡수장치보다 가볍고 효율이 높으며, 에너지를 흡수하는 동안 힘이 일정히 유지되는 특징이 있다.

† 2011년 1월 26일 접수 ~ 2011년 3월 31일 심사완료

* 정희원, 한국항공대학교 대학원

** 정희원, 한국항공우주연구원

*** 정희원, 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학부
교신저자, E-mail : jungsun@kau.ac.kr
경기도 고양시 덕양구 화전동 200-1

이러한 허니콤의 에너지 흡수 특성에 따라 허니콤은 1960년대부터 에너지 흡수장치에 사용되었으며, 미국 NASA의 달착륙선인 Surveyor와 Apollo의 충격흡수장치에 적용된 바 있다[1, 2].

허니콤은 면외(out of plane) 방향으로 높은 강성을 가지기 때문에 패널 구조의 코어로 사용되지만, 좌굴하중보다 큰 압축력을 받을 경우 허니콤은 압축변형(crush) 된다. 허니콤의 압축변형은 허니콤의 육각 셀을 구성하는 얇은 판이 연속적으로 접히는 과정으로 이때 발생하는 소성변형을 통하여 에너지를 흡수한다. 에너지 흡수용 허니콤의 설계를 위해서는 허니콤을 압축변형시키기 위한 힘인 압축력(crush force)의 예측이 중요하다. 허니콤의 압축력은 허니콤의 면적과, 압축강도에 의해 결정된다. 압축강도는 변형이 진행됨에 따라 변화하는데, 허니콤이 좌굴을 시작한 이후 압축강도가 일정하게 유지되는 구간에서 평균값을 평균압축강도(mean crush strength)라 하며, 좌굴되기 직전의 압축강도의 최대치를 최대 압축강도(peak crush strength)라 한다[3]. 허니콤의 최대압축강도 및 평균압축강도는 에너지 흡수용 허니콤의 주요 물성값으로 에너지 흡수장치 설계를 위해서 이 값의 예측이 중요하다.

허니콤의 압축강도의 예측을 위한 대표적인 해석적 이론은 Bending & Shear Deformation Method[4]와 Wierzbicki Method[5]가 있다. 이 이론들은 압축된 허니콤의 변형형상을 관찰하여 이상적인 변형 모드 가정하고, 이를 이용하여 해석적 방법으로 압축강도를 예측하였다. 하지만 이 해석적 방법들은 실험과의 오차가 크며, 충격 속도에 따른 해석결과를 보여주지 못하는 한계가 있다. 이와 비교하여 유한요소법은 해석적 이론보다 허니콤의 변형을 상세히 묘사할 수 있으며, 재료의 소성 거동 및 변형률 속도에 고려하여 해석적 방법보다 정확하게 압축강도를 예측 가능하기 때문에 유한요소법을 이용한 허니콤의 해석이 활발하게 연구되고 있다[6, 7]. 하지만 충돌 속도 및 다양한 분기각에 대한 에너지 흡수 특성의 비교 및 검증 연구는 수행되지 않고 있다.

본 연구의 목적은 유한요소법을 이용하여 허니콤의 형상 및 충돌 속도에 따른 에너지 흡수 특성을 분석하는 것이다. 유한요소 해석 프로그램은 Dynamic explicit code인 Ls-dyna를 사용하였다. 먼저 효율적인 유한요소 해석을 위하여 4가지의 허니콤 단위 셀 모델에 대한 유한요소 해석으로부터 얻어진 변위-압축강도 곡선을 분석하여 단위 셀 모델을 선정하였다. 이를 바탕으로 충돌 속도 및 허니콤 포일의 두께 변화, 허니콤의

분기각(branch angle)에 따른 유한요소 해석을 수행하여 에너지 흡수 특성을 분석하였다.

II. 허니콤의 유한요소 모델

2.1 허니콤의 단위 셀 유한요소 모델

알루미늄 허니콤은 Fig. 1과 같이 육각형 셀(cell)이 연속적으로 배열된 구조이다. 허니콤의 효율적인 해석을 위해서 적절한 대칭조건을 적용하여 단순화된 유한요소모델을 사용해야 한다. 대표적인 단순화 모델은 Fig. 1의 단위 셀 모델을 들 수 있다. model 1은 허니콤의 해석에서 가장 단순화된 단위 셀 모델이다. model 1의 유효 면적은 점선으로 이루어진 삼각형의 면적이며 육각 셀 면적의 1/2에 해당된다. model 2는 유효면적이 육각형의 면적과 동일하며 x축 및 y축에 대하여 대칭이다. 각 단위 셀 모델의 경계부에는 대칭조건이 적용되며, 이상적인 대칭조건이 적용됨에 따라 단위 셀 모델을 이용한 해석 결과는 다수의 셀을 모델링한 허니콤과 차이가 있을 수 있다. model 3과 4는 단위 셀 모델의 신뢰성 검증을 위한 모델로써, model 3은 육각형 셀을 포함하는 최소의 단위 모델이며 유효면적은 육각 셀 면적의 3배이다. model 3의 유한요소 모델을 Fig. 3에 나타내었다. Fig. 3에서 H는 허니콤의 두께이며, n은 육각 셀 한 변의 요소의 수를 의미한다. model 4는 육각 셀 면적의 10배이다.

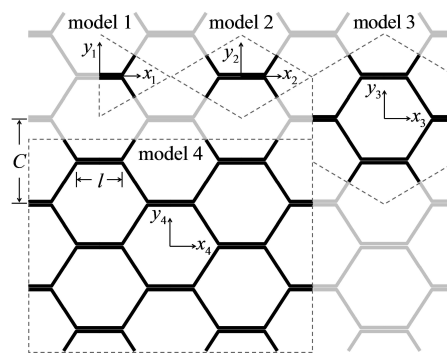


Fig. 1. Unit cell models of Honeycomb

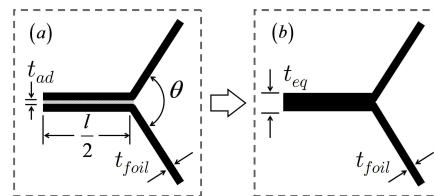


Fig. 2. Parameter of unit cell model 1

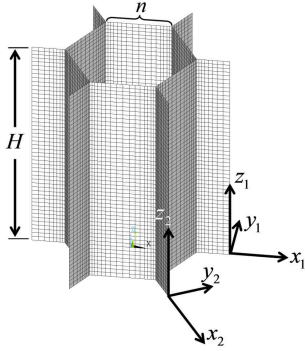


Fig. 3. FE model of unit cell model 3

허니콤은 얇은 판을 접착하여 제작되기 때문에 Fig. 2(a)와 같이 알루미늄 포일이 1 장인 부분과 이들이 접착되어 적층된 부분이 있다. 포일의 두께(t_{foil})가 0.051mm로 제작되는 허니콤의 경우 접착제(adhesive)의 두께(t_{ad})는 약 0.01mm으로 포일 두께의 약 20%이다. 따라서 접착제로 접합된 부분을 $2t_{foil}$ 로 가정할 경우 실제보다 강성이 낮게 평가되는 결과를 가져온다. 본 연구에서는 알루미늄 허니콤의 해석에서 접착제의 효과를 고려하기 위하여 등가 두께 식 (1)을 유도하였다. 허니콤의 등가 두께 t_{eq} 는 Fig. 2(b)와 같이 2겹의 포일과 접착제로 구성된 판의 굽힘강성과 동일한 강성을 가지는 단일 판의 두께로 정의하였다.

$$t_{eq} = \sqrt[3]{(2t_{foil} + t_{ad})^3 + \left(\frac{1 - \nu_{al}^2}{1 - \nu_{ad}^2} \frac{E_{ad}}{E_{al}} - 1 \right) t_{ad}^3} \quad (1)$$

2.2 단위 셀 유한요소모델의 경계조건

허니콤과 같이 동일한 패턴이 반복된 구조는 대칭조건이 적용된 model 1~4의 단위 셀 유한요소 모델을 사용해 해석시간을 단축하여 효율적인 해석을 수행할 수 있다. 또한, 단위 셀 모델을 사용함에 따라 충분히 작은 크기의 요소를 사용하여 유한요소 모델을 구성하기 때문에 정확도 높은 해석을 수행할 수 있다. 허니콤의 각 단위 셀 모델은 Fig. 1과 같이 육각형을 이루는 변의 1/2 지점을 경계로 나누어지며, Fig. 3과 같이 그 하단에 지역좌표계의 원점을 정의한다. 각 지역좌표계의 x축은 허니콤 포일과 평행한 방향으로 정의된다. 단위 셀 모델에 적용되는 경계조건은 각 지역좌표를 기준으로 정의되며 $U_x=0$ 의 경계조건을 적용하였다. 접촉 조건은 self-contact 조건을 사용하였으며, 적용된 마찰계수는 0.3이다.

2.3 재료모델

허니콤은 재료의 소성변형을 이용하여 에너지를 흡수하기 때문에, 유한요소해석에서 재료 물성의 정의는 매우 중요하다. 허니콤이 빠른 속도로 운동하는 물체와 충돌할 경우 허니콤도 빠른 속도로 압축변형 된다. 급속은 변형률 속도(strain rate)가 증가함에 따라 항복응력이 증가하는 재료적 특성이 있다. 이 영향을 고려하기 위해서 식 (2)으로 표현되는 Cowper-Symonds의 구성방정식을 적용하였다[8].

$$\frac{\sigma'_o}{\sigma_o} = 1 + \left(\frac{\dot{\epsilon}}{D} \right)^{\frac{1}{q}} \quad (2)$$

식 (2)에서 σ'_o 는 dynamic flow stress이고 σ_o 는 static flow stress 이며, 여기서 flow stress는 소성 변형이 시작되는 응력으로 정의된다. D와 q는 동하중 시험으로부터 얻을 수 있는 재료 상수이다. 본 연구에서 해석에 적용한 알루미늄의 소성물성과 재료 상수는 Table 1과 같다[9]. 이를 적용한 알루미늄 합금의 strain rate에 따른 응력비의 변화를 Fig. 4에 나타내었다.

Table 1. AA5052 material property

Young's modulus [MPa]	70,000
Tangent modulus [MPa]	500
Yield stress [MPa]	170
Poisson's ratio	0.34
Density [ton/mm ³]	2.68e-9
D [sec ⁻¹]	6500
q	4

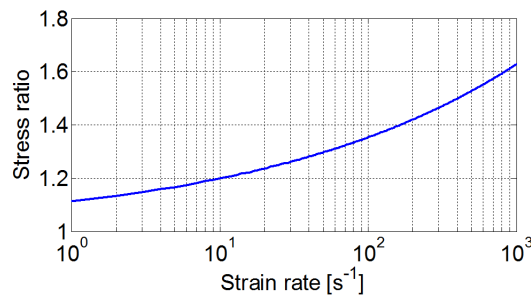


Fig. 4. Cowper-Symonds equation of Aluminum

III. 유한요소 해석을 통한 알루미늄 허니콤의 에너지 흡수 특성분석

3.1 단위 셀 모델의 에너지 흡수 특성

충격하중을 받는 허니콤의 각 단위 셀 모델에 따른 에너지 흡수특성 분석을 위하여 Ls-dyna를 이용하여 model 1~4에 대한 유한요소 해석을 수행하였다. 본 연구에서는 허니콤의 효율적인 해석을 위하여 단위 셀 모델을 이용하여 해석을 수행하였으며, 해석에 사용된 Ls-dyna의 shell 요소는 Belytschko-Tsay[10] shell 이다. 허니콤의 단위 셀 모델을 이용하여 에너지 흡수 해석을 수행할 경우 유한요소 모델을 구성하는 요소의 수를 매우 작게 할 수 있기 때문에, 신뢰도 높은 해석을 할 수 있으며, 단위 셀 모델의 크기에 따라 해석시간을 단축 할 수 있다. 본 연구에서는 해석의 정밀도를 위하여 허니콤 육각형 셀을 구성하는 한 변을 24개의 요소로 분할하였으며, 120°로 나누어지는 포일의 접합부 주위는 상대적으로 크게 변형되므로 주변의 요소보다 1/3작게 모델링 하였다. 해석에 적용된 허니콤의 제원은 Table 2에 나타내었으며, 허니콤에 충격을 가하는 더미의 단위 셀 당 질량은 2kg/cell이며 충돌 속도는 1m/s이다. Fig. 5는 model 4에 대한 해석 결과이며, t=0.01초 일 때의 변형형상이다. Fig. 5에서 section-A의 단면의 변형형상을 Fig. 6에 나타내었다. Fig. 6에서와 같이 충돌 직후 허니콤의 중앙지점에서부터 압축변형을 시작하여 상단이 모두 folding된 후 하단으로 진행되었다.

Fig. 7은 model 4의 해석에서 더미질량의 운동에너지 변화율을 나타낸다. 더미질량의 운동에너지는 충돌 직후부터 점차 감소하는데 이는 허니콤의 소성변형에너지로 변환된다. 허니콤이 에너지를 흡수함에 따라 초기의 운동에너지 KE_0 에서부터 운동에너지는 점차 감소하며 t=0.019초에서 운동에너지는 0이 된다. t=0.019초 이후 허니콤의 스프링-백 효과로 인하여 더미질량은 다시 속도를 얻게 되며, 에너지 흡수 효율이 작을수록 리바운드 속도는 커진다. 충돌 전후의 운동에너지 차이를 이용하여 허니콤의 에너지 효율을 정의할 수 있으며 식 (3)과 같다.

Table 2. Property of Honeycomb

Material	AA5052
Cell size [mm]	6.35
Foil thickness [mm]	0.051

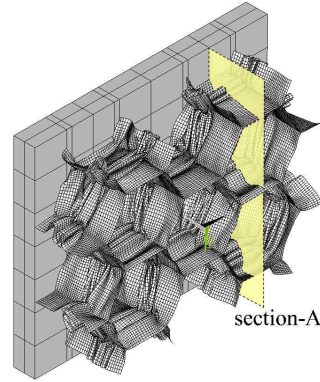


Fig. 5. Deformation of model 4 (t=0.01)

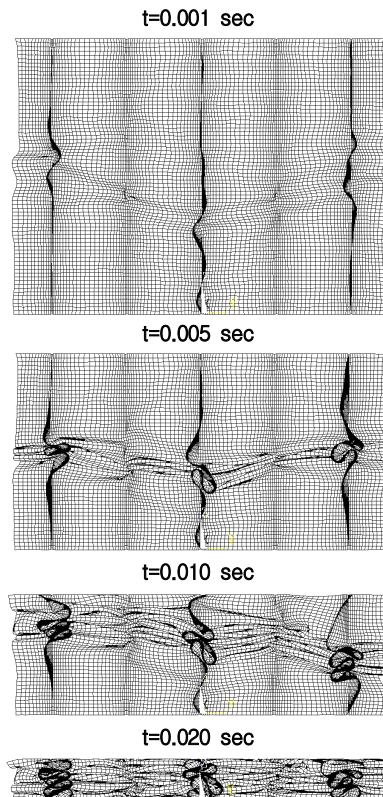


Fig. 6. Deformation of section-A (model 4)

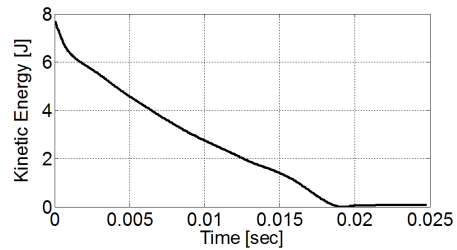


Fig. 7. Time-Kinetic Energy of model 4

Table 3. FEA results of each reduced models

Reduced models	Mass [kg]	V _z [m/s]	CS _{peak} [MPa]	CS _{mean} [MPa]	η _E
model 1	0.8	1.0	6.262	1.6487	99.02
model 2	1.6	1.0	6.205	1.5071	98.87
model 3	4.8	1.0	6.215	1.5254	98.90
model 4	16	1.0	6.215	1.5248	99.03

$$\eta_E = \frac{KE_0 - KE_f}{KE_0} \times 100 [\%] \quad (3)$$

Table 3의 η_E는 각 단위 셀 모델의 에너지 흡수 효율을 계산한 결과로, 단위 셀 모델의 종류에 따른 오차는 매우 작은 것을 확인할 수 있다.

허니콤의 각 단위 셀 모델의 유한요소 해석을 통해 계산된 최대압축강도(CS_{peak})와 평균압축강도(CS_{mean})를 Table 3에 나타내었다. Fig. 8에서와 같이 허니콤은 압축이 진행됨에 따라 압축강도가 변화한다. CS_{peak}는 허니콤이 면의 방향으로 압축을 받아 좌굴되기 직전의 최대압축강도이다. CS_{mean}는 압축이 진행되는 동안 일정히 유지되는 강도로 그 값의 평균값을 계산하는 구간의 정의에 따라 차이가 발생한다. CS_{mean}의 계산을 위해서는 평균압축강도의 정의에 따라 압축 초기의 높은 강도가 발생하는 구간과, 허니콤이 85% 이상 압축되어 압축강도가 증가된 구간을 제외해야 한다. 높은 압축강도가 유지되는 구간은 허니콤의 형상 및 충돌속도에 따라 변화하는 Fig. 8과 같은 변위-압축강도 그래프를 통하여 그 구간을 결정할 수 있다. Table 3의 CS_{mean}는 변위구간 2~10mm에 대한 평균 압축강도이다.

Fig. 8은 각 단위 셀 모델에 변위-강도 곡선으로 model 1의 경우 압축이 진행됨에 따른 압축강도가 비교적 큰 폭으로 변화하지만 model 4와 같이 다수의 육각 셀이 사용된 모델은 변위에 대하여 압축강도가 일정히 유지 된다. model 3과 model 4로 계산된 허니콤의 CS_{mean}의 차이는 0.04%로 매우 유사한 값을 보였으며, model 2는 1.16%의 오차를 나타냈다. 하지만 model 1의 CS_{mean}는 다른 단위 셀 모델과 비교하여 큰 차이를 보였으며, model 4와 차이가 8.13%로 계산되었다. model 1은 Fig. 8의 model 1의 그래프와 같이 변위에 따른 압축강도의 진폭이 크기 때문에 CS_{mean}의 예측에서 상대적으로 신뢰도가 낮다. 따라서 model 1을 이용하여 CS_{mean}를 예측할 경우 변위의 범위에 따라 오차를 동반할 수 있다. model 3과 model 4는 비교적 신뢰도 높은

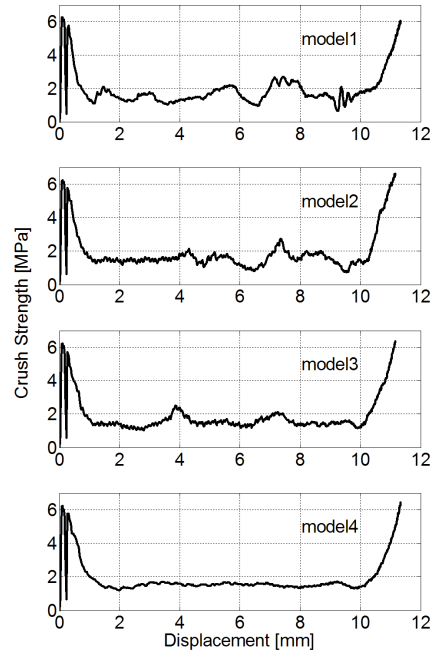


Fig. 8. Displacement-Strength graph

해석을 할 수 있지만 상대적으로 긴 해석시간을 요구하기 때문에, 본 연구에서는 효율적인 에너지 흡수 특성을 분석하기 위한 유한요소 모델로 model 2을 사용하여 해석을 수행하였다.

3.2 충돌속도 및 포일의 두께에 따른 에너지 흡수 특성

에너지 흡수용 허니콤은 주로 1.0m/s 이상의 고속 충돌환경에 적용된다. 만능재료시험기를 이용하여 허니콤의 준 정적 거동에서의 CS_{peak} 및 CS_{mean}를 계산할 수 있지만, 이를 고속 충돌환경에 사용되는 허니콤 설계에 적용하기 위해서는 충돌속도에 따른 에너지 흡수 특성이 고려되어야 한다. 본 연구에서는 알루미늄 허니콤의 충돌속도에 따른 에너지 흡수 특성 분석을 수행하였으며, 속도와 함께 허니콤 포일의 두께에 따른 영향도 함께 고려하였다.

해석에 적용한 허니콤은 Hexcel Composites사에서 생산되는 형상으로, 셀의 크기(Fig.1의 C)는 6.35mm이며, 알루미늄 포일의 두께는 Table 4와 같다[11]. 허니콤의 단위 셀 모델은 효율적인 해석을 위하여 model 2를 적용하였으며, 코어의 두께는 25.4mm이다. 허니콤 모델의 해석을 수행한 충돌 속도의 크기는 0.5m/s, 1.0m/s, 2.0m/s이며, 충돌하는 질량의 초기속도(V₀)에 따른 해석과 등속(V_c) 압축해석으로 나누어 수행하였다.

Table 4. Hexweb honeycomb properties

Material	AL5052				
Cell size [mm]	6.35				
Foil thickness [mm]	0.018	0.025	0.038	0.051	0.064
CS _{mean} [MPa]	0.28	0.52	1.03	1.59	2.31
CS _{peak} [MPa]	0.62	1.31	2.34	3.45	4.76

Table 5. Mass of the dummy of each velocity

Velocity [m/s]	Mass per unit cell [kg/cell]	Kinetic energy [J]
0.5	1.6	0.2
1.0	0.4	0.2
2.0	0.1	0.2

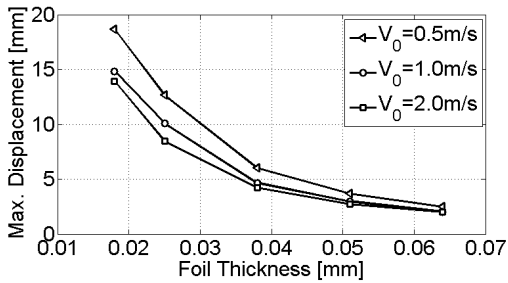


Fig. 9. Foil Thickness-Displacement graph

초기속도 V_0 에 대한 해석에서 더미질량의 무게는 각 속도별로 동일한 운동에너지 적용을 위한 값으로 설정하였으며, Table 5에 나타내었다. 동일한 운동에너지를 적용할 경우 각 속도에 따른 에너지 흡수특성 및 최대 변위를 효과적으로 비교할 수 있다. 초기속도에 대한 해석결과를 Fig. 9~Fig. 11에 나타내었다.

Fig. 9를 보면 허니콤에 동일한 운동에너지를 적용하였을 경우 낮은 충돌속도에서 더 큰 변위가 발생함을 알 수 있다. 이는 Fig. 10과 Fig. 12에서와 같이 낮은 속도에서 평균압축강도가 더 약하기 때문이다. Fig. 10의 0.5m/s의 그래프를 보면 준정적 시험보다 빠른 충격속도에도 불구하고 CS_{mean}가 더 낮게 계산됨을 보였다. 이 이유는 CS_{mean}는 압축강도가 일정히 유지되는 구간의 평균값을 계산하게 되는데, 압축강도는 변위에 따라 변화하는 값으로 압축강도의 평균을 계산하기 위해서는 충분히 긴 압축변위에 대하여 계산된 압축강도 데이터가 필요하다. Fig. 9와 같이

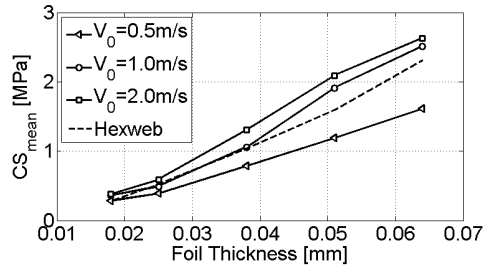


Fig. 10. Foil Thickness-CS_{mean} graph

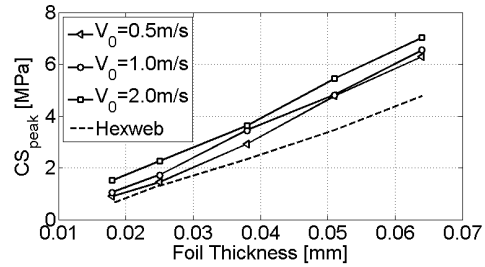


Fig. 11. Foil Thickness-CS_{peak} graph

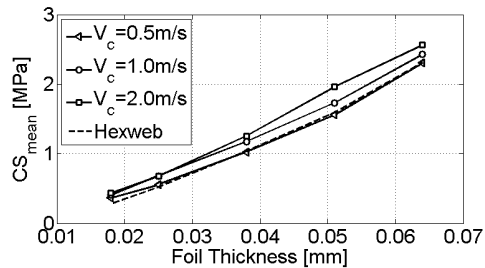


Fig. 12. Foil Thickness-CS_{mean} graph (V_c : Constant press velocity)

동일한 충돌에너지가 가해진 허니콤 포일의 경우 두께가 두꺼울수록 압축변위가 짧기 때문에 이 변위구간에서 구해진 평균값(Fig. 10의 CS_{mean})의 경우 그 신뢰도가 낮다. 따라서 속도에 따라 신뢰도 높은 CS_{mean}를 계산하기 위해서는 보다 긴 압축변위에 대하여 계산할 필요성이 있다. 본 연구에서는 각 속도에 따른 평균압축강도 계산을 위한 충분한 변위를 적용하기 위하여 등속 압축 해석을 수행하여 Fig. 12에 나타내었으며, 최대압축변위는 20mm를 적용하였다. Fig. 12에서와 같이 등속압축에 대한 해석을 통해 얻어진 CS_{mean}는 속도에 따른 산포가 적으며, 속도가 증가함에 따라 평균압축강도가 증가함을 보였다. 시험 결과와의 비교에서는 압축속도 0.5m/s에서 압축강도가 정적시험을 통해 측정된 압축강도와 매우 유사하게 나타남을 확인할 수 있었다.

CS_{peak}는 Fig. 11과 같이 두께 및 속도와 함께 증가하는 것으로 계산되었으며, 빠른 충돌속도로 인하여 Hexcel Composites사의 정적 시험으로 측정된 CS_{peak}의 값과 비교하여 9.8%~47.6%크게 계산되었다. 이는 에너지 흡수용 허니콤을 이용한 충격흡수장치 설계 시 충돌속도에 따라 최대 압축강도가 증가되는 효과를 고려해야 함을 알 수 있다.

3.3 육각 셀의 분기각에 따른 분석

알루미늄 허니콤은 종종 전개공정으로 제작된다. 전개공정으로 제작되는 알루미늄 허니콤은 다른 공정과 비교하여 생산비용이 저렴하며, 전개공정 전 부피가 작은 상태에서 운반가능하기 때문에 많은 산업분야에서 사용되고 있다. 전개공정으로 제작된 허니콤의 전개 후 각 셀의 분기각이 $\theta=120^\circ$ 가 되기까지 전개 시켜야 하지만 제조 공정 특성상 모든 셀의 분기각이 $\theta=120^\circ$ 가 되는 것은 불가능 하며 어느 정도의 오차를 동반한다. 본 연구에서는 허니콤의 분기각에 따른 해석을 통하여 분기각에 따른 에너지 흡수 특성을 분석하고자 한다.

Fig. 2(a)와 같이 1장으로 이루어진 포일 사이의 각 θ 를 분기각이라 할 때 Fig. 13과 같이 θ 는 전개를 진행함에 따라 변화한다. 허니콤 제조를 위하여 전개공정이 진행되기 이전인 블록상태에서는 $\theta=0$ 이다. 전개공정이 진행됨에 따라 분기각이 증가하여 Fig. 13(b)와 같이 $\theta=120^\circ$ 일 때 허니콤 셀의 모양은 정육각형이 되며 이때 허니콤의 면적은 최대가 된다. 이를 초과하여 계속 전개를 진행하면 θ 가 180° 가 될 때 허니콤 셀이 Fig. 13(c)와 같이 직사각형이 된다. 허니콤의 분기각의 변화에 따른 에너지 흡수 특성을 분석하기 위하여 각 분기각에 대한 유한요소해석을 수행하였으며, Table 2의 허니콤의 셀의 크기 및 포일의 두께를 적용하였다. 허니콤에 충격을 가하는 더미의 단위 셀 당 질량은 5kg/cell이며 충격속도는 1m/s이다.

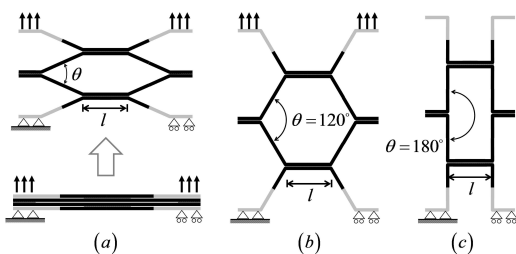


Fig. 13. Expansion Process of Honeycomb

Fig. 14~16은 허니콤의 분기각이 각각 60° , 120° , 180° 인 모델에 대하여 시간에 따른 변형률 (von-Mises total strain) 및 변형 형상이다. 허니콤의 변형의 시작은 허니콤의 상단인 더미질량과의 접촉부에서 먼저 좌굴이 시작되어 순차적 알루미늄 포일이 접혀지는 것을 확인할 수 있다. 허니콤 포일이 접혀지는 동안 압축된 허니콤의 최대 von-Mises 변형률은 Fig. 14~16에서와 같이 1.242~1.681로 각각 계산되었다. Fig. 14~16의 해석에 대한 변위에 따른 압축강도를 Fig. 17에 나타내었다.

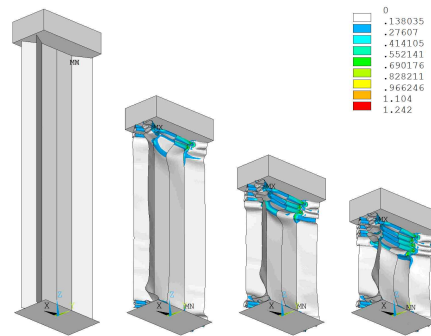


Fig. 14. Plastic deformation(strain) at $\theta=60^\circ$

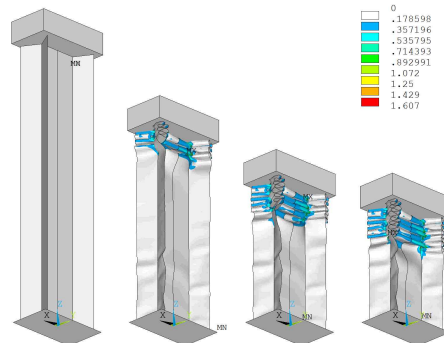


Fig. 15. Plastic deformation(strain) at $\theta=120^\circ$

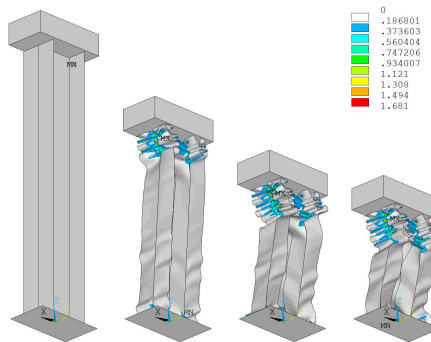


Fig. 16. Plastic deformation(strain) at $\theta=180^\circ$

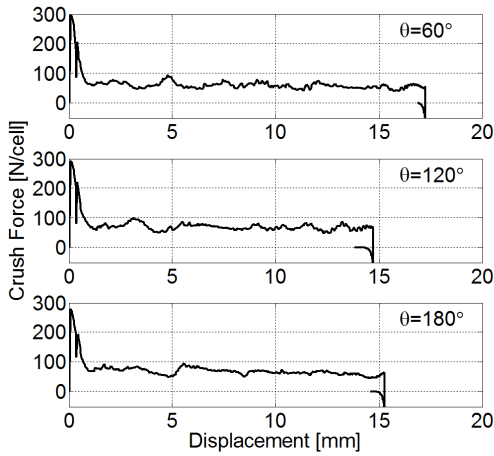


Fig. 17. Displacement - Crush Force graph

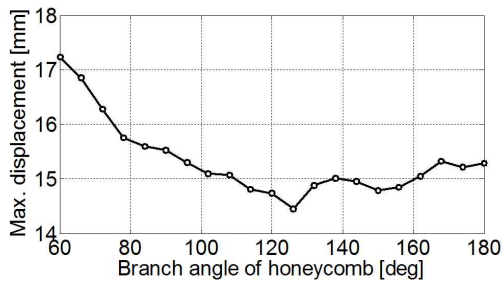


Fig. 18. Branch Angle-Displacement

Fig. 18은 분기각에 따른 최대압축변위를 보여 준다. 분기각에 따른 압축 변위는 $\theta=60^\circ$ 부근에서 가장 크며, 분기각에 따라 크게 변화하지만 $\theta=100^\circ$ 이상에서는 완만하게 변화함을 알 수 있다. 또한, $\theta=120^\circ$ 부근에서 최대압축강도를 가지기 때문에 압축변위는 최소로 나타났다.

분기각이 증가함에 따라 허니콤의 면적이 변화하는데, 이때 허니콤의 면적은 에너지 흡수 특성에 큰 영향을 준다. 먼저 허니콤 면적의 변화를 고려하지 않고 단위 셀 당 작용하는 힘을 비교해야 한다. Fig. 18은 분기각에 따른 압축력의 변화를 나타낸 그래프로 CF_{peak} 는 최대압축력으로 최대압축강도(CS_{peak})와 대응되는 변수이며, CF_{mean} 는 평균압축력으로 평균압축강도(CS_{mean})와 대응되는 변수이다.

CF_{peak} 는 분기각이 증가함에 따라 소폭 감소하는 반면에, CF_{mean} 은 소폭 증가한다. 허니콤의 면적을 고려할 경우 분기각에 따른 최대압축강도 및 평균압축강도를 비교해야 하며, 이에 해당하는 결과를 Fig. 19에 나타내었다. CS_{mean} 는 Fig. 18의 CF_{mean} 과 같이 분기각의 변화에 따라 큰 변

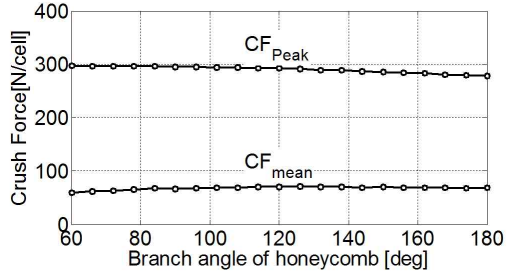


Fig. 19. Branch Angle - Force graph

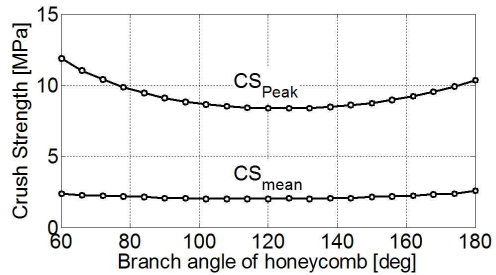


Fig. 20. Branch Angle-Strength graph

화가 없는 반면 CS_{peak} 는 분기각의 변화에 따라 상대적으로 큰 폭으로 변화하였다.

Fig. 20에서와 분기각 $110^\circ \sim 130^\circ$ 의 구간에서는 분기각에 따른 최대압축강도 및 평균압축 강도의 변화가 매우 작은 것을 볼 수 있다. 따라서 전개 공정으로 제작된 허니콤의 경우 부분적으로 분기각이 120° 가 되지 않더라도 오차가 $\pm 10^\circ$ 내외라면 에너지 흡수 특성에 큰 영향을 주지 않는 것을 알 수 있다.

V. 결 론

본 연구에서는 충격흡수용 알루미늄 허니콤의 설계 시 고려해야할 알루미늄 허니콤의 에너지 흡수 특성을 분석하기 위하여 유한요소법을 사용하였다. 효율적인 유한요소 해석을 위하여 여러 모양의 단위 셀 모델을 이용한 최대압축강도 및 평균압축강도의 계산을 통하여 효율적인 유한요소 모델로 model 2를 선정하였다. model 2는 유효면적이 육각 셀의 면적인 단순화된 모델이지만 model 2를 통해 예측된 허니콤의 에너지 흡수 특성은 다수의 육각 셀을 가진 허니콤과 유사함을 확인하였다. Ls-dyna를 이용하여 예측한 허니콤의 압축강도의 신뢰도를 확인하기 위하여 Hexweb honeycomb의 시험결과와의 비교하여 그 신뢰도를 검증하여, 유한요소법이 허니콤을

이용한 충격흡수 장치 설계에 잘 활용될 수 있음을 확인하였다.

끝으로 충돌 속도 및 허니콤의 형상에 대한 유한요소 해석을 수행하여, 허니콤의 평균압축강도 및 최대압축강도는 허니콤 포일 두께와 같이 허니콤의 형상뿐만 아니라 충돌속도에도 영향을 받을 수 있었으며, 빠른 속도에서 압축강도가 더 크기 때문에 에너지 흡수용 허니콤 설계 시 속도에 따른 압축강도가 증가되는 효과를 반영해야 함을 알 수 있었다. 허니콤의 분기각의 변화에 대한 유한요소 해석을 통하여 120°에서 가장 큰 압축강도를 가지며 분기각 110°~130°의 구간에서는 최대압축강도 및 평균압축 강도의 차이는 매우 적음을 확인할 수 있었다.

참고문헌

- 1) NASA technical report, *Surveyor program result*, NASA SP-184, 1969.
- 2) F. R. William, Apollo experience report-lunar module landing gear subsystem, NASA, 1972.
- 3) J. K. Paik, A.K. Thayamballi and G.S. Kim, "The strength characteristics of aluminum honeycomb sandwich panels," *Thin-Walled Structure*, Vol.35, 1999, pp. 205 - 231.
- 4) R. K. Mcfarland, *A limit analysis of the*

collapse of hexagonal cell structures under axial load, NASA JPL, 1961.

5) V. M. Aaron Jeyasingh, *Analytical modeling of metallic honeycomb for energy absorption and validation with FEA*, Wichita state Univ., 2005.

6) M. Yamashita, M. Gotoh, "Impact behavior of honeycomb structures with various cell specifications – numerical simulation and experiment," *International journal of Impact Eng.*, Vol. 32, 2005, pp. 278-306.

7) L. Aktay, A. F. Johnson and B. H. Kroplin, "Numerical modelling of honeycomb core crush behaviour," *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 75, 2008, pp. 2616-2630.

8) P. S. Symonds and N. Jones, "Impulsive loading of fully clamped beams with finite plastic deflections and strain rate sensitivity," *International journal of mechanical sciences*, Vol. 14, 1972, pp. 49-69.

9) F. Ozturk, S. Toros and S. Kilic, "Evaluation of tensile properties of 5052 type aluminum-magnesium alloy at warm temperatures," *Archives of Materials Science and Engineering*, Vol. 34, 2008, pp. 95-98.

10) J. O. Hallquist, *LS-DYNA Theoretical manual*, Livermore Software Technology Corp., 2005.

11) Hexcel Corp., *HexWeb Honeycomb Attributes and Properties*, Hexcel Corp., 2009.