

에너지 흡수용 알루미늄 허니컴 재료의 압축거동 분석 및 설계

An Analysis of Axial Crushing Behavior of Energy Absorbing Aluminum Honeycomb and Design of Cell Configuration

김 중 재*, 김 상 범**, 김 현 영***
Joongjae Kim, Sangbum Kim, Heon-Young Kim

ABSTRACT

The mechanical properties of aluminum honeycomb on the direction of axial crushing under quasi-static loading test was investigated. The crushing process was simulated numerically by full-scale finite element models. Simulations reproduce the experimental results both qualitatively as well as quantitatively. From the investigation, we suggested the constitutive model of energy absorbing honeycomb structure for large scale impact analysis. Real impact test of the MDB(Moving Deformable Barrier) was carried and compared with finite element simulation. Constitutive model used in the numerical simulation had a good correlation with experiment. By suggesting the optimizing method for honeycomb cell configuration design, relationship between cell configuration and crush strength is studied.

주요기술용어 : Honeycomb, Axial crushing, Finite element analysis, Constitutive equation, MDB(Moving Deformable Barrier)

1. 서 론

초음속 대형 항공기 등의 출현과 더불어 고속철도, 고속선박등 현대 수송 수단이 고속, 대형화되는 추세에 부응하기 위해서는 고강도 특성과 경량 특성을 나타내는 고분자 복합재료에 대한 요구가 끊임없이 증대되고 있다. 항공산업 및 각종 수송기에 필요한 재료는 기존의 단기적 성능과 형상만을 보는 중저가 복합재료와는 달리 가벼우면서도 매우 높은 기계적 강도와

내피로성, 내열특성 및 장기 사용시 안정성 등을 보장할 수 있어야 한다. 이에 선진국에서는 첨단소재 개발, 응용 기술 등에 집중적인 투자가 진행되고 있다. 이러한 추세는 우주/항공용 구조재 뿐 아니라 초고속 열차, 특수선박, 자동차 등의 각종 운송수단, 교량과 대형 토목 건축물에 이르기까지 광범위하게 응용가능성이 입증되어있다. 국내에서도 이 분야에 있어 많은 연구개발이 요구되는 시점이다. 이들 복합재료 중 허니컴(honeycomb)은 제조기술의 향상으로 현재 항공 우주산업 뿐 아니라 산업 전반에 걸쳐 그 사용이 증가하고 있다.

자동차 산업에 있어서 허니컴은 차량 충격흡

* 회원, 한라대학교 기계공학부

** 회원, 강원대학교 기계공학과 대학원

*** 회원, 강원대학교 기계메카트로닉스 공학부

수용 뿐 아니라 개발 단계에서 충돌 시험과 컴퓨터를 이용한 모사시험시 대차모델로 사용되기도 한다. 예를 들어 신차중은 유럽이나 북미에서 규정하고 있는 정면 오프셋 충돌 및 측면 충돌 시험 법규를 만족시켜야 하는데, 이들 규정에서는 실제 차와 유사한 강성을 갖는 대차를 제작하여 실차와 충돌시켜 새로 개발된 차량의 안전성을 평가하게 된다. 이때 사용되는 대차는 알루미늄 허니컴으로 제작된 것으로서, 에너지 흡수성과 강성의 조절이 용이하다.^{1,2)} 한편, 지난 10여 년간 철도 차량에 대한 허니컴 재료의 사용도 많이 증가하였다. 가장 큰 이유는 경량성 때문이라 할 수 있다. 이것은 방화벽이나 피로 방지, 에너지 흡수재등으로 사용되면서 철도 차량에서 허니컴의 사용은 다른 산업에 비해 더 중요하다고 볼 수 있다. 특히 고속전철 등에서 충돌시 운전자를 보호하기 위해 사용되는 고에너지 흡수성을 지닌 재료로는 허니컴이 거의 유일하다고 볼 수 있다. 이러한 경우에 있어서도 허니컴의 사용은 설계자로 하여금 허니컴 자체의 강성 설계가 가능한 장점이 있다.^{3,4)}

알루미늄 허니컴에 대한 연구는 1963년 McFarland⁵⁾가 아폴로 우주선에 사용되는 알루미늄 허니컴에 대한 축방향 강성을 분석하였으며, 여기에서 몇가지 다른 형태의 셀 구조에 관한 관찰을 통해 대각선 방향의 전단띠(diagonal shear band)에서 국부변형 현상을 발견하였다. Wierzbicki와 Abramowicz⁶⁾는 금속 허니컴의 축방향 붕괴에 대한 이론식을 유도하였으며, 이후 Klintworth와 Strong⁷⁾은 국부변형 효과를 고려하여 면내 변형에 대한 대변형 거동식을 제안하였다. Gibson과 Ashby⁸⁾는 변형에 관한 많은 식을 제안하였으나, 주로 평면내 변형에 관한 것이었으며, Paka⁹⁾ 등도 면내 붕괴특성에 관한 해석과 시험을 수행하였다. Zhao 등¹⁰⁾은 허니컴의 동적 압축시험을 통해 충돌시 허니컴의 거동에 관한 연구를 수행하였다.

본 연구에서는 준-정적 해석을 통해 허니컴

시편의 수직 세 방향에 대한 압축 강도 및 붕괴 특성에 대한 연구를 수행하였으며, 시험결과와 셸(shell)요소의 상세 유한요소 모델을 이용한 해석 결과에 대한 비교를 수행하였고, 해석을 통해 붕괴 양상에 대한 분석을 시도하였다. 변형 특성에 근거하여, 대규모 에너지 흡수부재로 사용되는 허니컴의 충격 해석에 사용 가능한 구성식을 제안하였다. 제안된 재료 구성식을 이용하여 육면체요소 모델의 해석 가능성을 확인하였다. 또한, 에너지 흡수부재의 설계를 위한 셀 구조 최적 설계 프로그램을 제안하였다. 개발된 셀 구조 최적설계 프로그램을 사용하여 셀 구조 최적화를 통해 압축강도 설계가 가능함을 보였다.

2. 알루미늄 허니컴 압축특성

2.1 알루미늄 허니컴 재료의 압축 시험

에너지 흡수재로 사용되는 알루미늄 재료의 허니컴은 Fig. 1과 같은 형상으로 방향에 따라 T(Thickness), W(Width), L(Length)과 같이 세 방향의 서로 다른 축을 가지며, 각각의 방향에 대하여 다른 압축 강도와 서로 다른 모우드로 붕괴되는 것으로 알려져 있다. 알루미늄 허니컴의 세 방향에 대한 붕괴 특성을 시험을 통하여 관찰하기 위하여 Fig. 2와 같은 크기의 허니컴 시편을 제작하였다. 시편의 크기는 T, W, L 세 축에 대하여 각각 25mm, 40.2mm, 52.5mm의 크기를 갖는다. 허니컴 시편의 단위셀 형상은 정육각형 형태이며, 두께는 0.04mm이다. 유압프레스를 사용한 정적 압축시험을 수행하였으며, 시험시 압축 속도는 10mm/min이다. 허니컴 시편의 압축 시험을 위해 변위 제어 방식의 유압프레스를 사용하여 허니컴 시편을 두 강체 평판 사이에서 압축시켰다. 시험에 사용된 시편은 횡방향 9개, 종방향 6개의 셀을 가지고 있다.

T 방향에 대하여 두께 0.04mm인 허니컴의 압축 시험 결과로 구해진 최종 변형모습은 Fig. 3과 같으며, 반력대 변위관계는 Fig. 4와 같다.

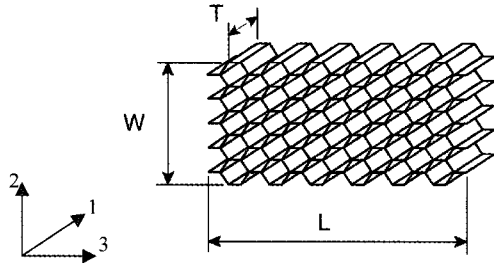


Fig. 1 Honeycomb block configuration

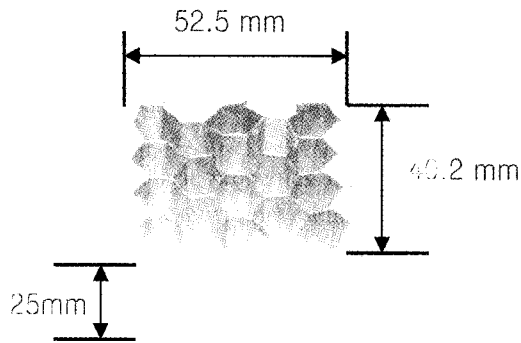


Fig. 2 Dimension of honeycomb block

기울기 변화를 통해 압축 특성을 분석해 보면, 초기 허니컴의 변형은 탄성영역에 해당되는 힘-변위 기울기를 갖고 있다. 탄성역이 끝나는 부분까지 급격한 하중증가를 보이다가 정점을 지난 후 다시 급격하게 하중이 감소한다. 이때 허니컴 셀에서 소성흔지가 발생하고 허니컴의 연속적인 붕괴가 시작된다. 일단 이러한 국부 변형이 발생하고 나면 붕괴 모우드는 이웃하고 있는 셀로 확대된다. 모든 셀이 붕괴되고 나면 다시 하중이 급격히 증가하는 부분이 발생한다. 일반적으로 비록 시편마다 하중이 일정하게 유지되는 동안 붕괴 양식(pattern)이 다르지만, 허니컴 셀의 붕괴기구는 모든 시편에 대해 공통적인 것으로 알려져 있다. 붕괴 양식이 다른것은 형상의 초기 불완전과, 시편의 크기 등에 의해 나타난다.⁹⁾

면내(in-plane)방향, 즉 L방향 및 W 방향으로 같은 조건에서 압축시험을 수행하였다. Fig.

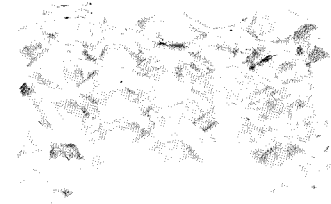


Fig. 3 Deformed shape along T-Direction

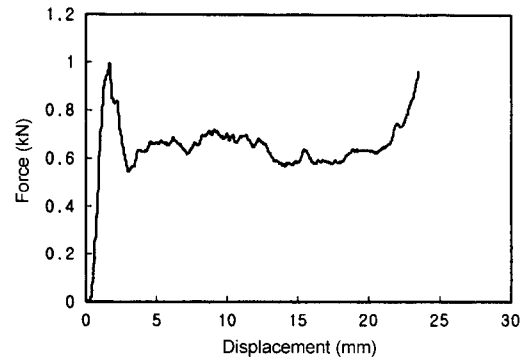


Fig. 4 Force-displacement relationship (T-Direction)

5와 Fig. 6은 L 방향으로 압축하였을 때 소성변형으로 인한 최종 변형양상과 이때의 힘-변위 선도를 나타내며, Fig. 7과 Fig. 8은 W방향에 대한 특성을 나타낸다. 셀이 소성변형을 일으키기 전 탄성구간이 보이며 T방향에 비해서는 완만한 것을 알 수 있다. 셀이 붕괴되어 전체적으로 확장되면서 일정한 하중을 보이고 셀이 완전히 붕괴되면 응력이 급격히 증가하여 모든

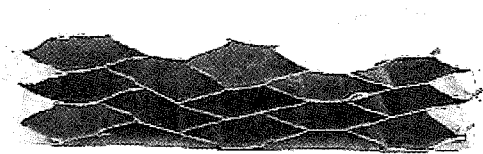


Fig. 5 Deformed shape along L-direction

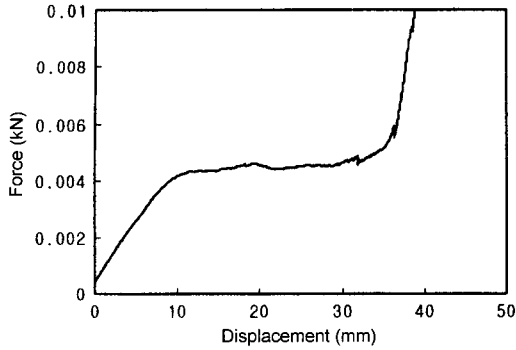


Fig. 6 Force-displacement relationship (L-Direction)

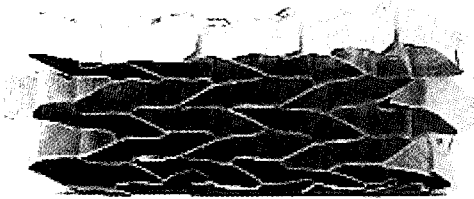


Fig. 7 Deformed shape along W-direction

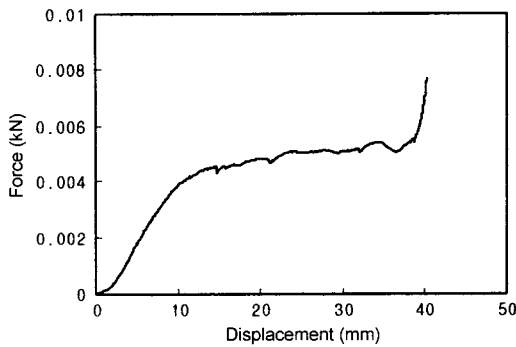


Fig. 8 Force-displacement relationship (W-Direction)

방향에 대해서 비슷한 양상으로 붕괴되는 것을 알 수 있다.

2.2 허니컴 셀모델의 유한요소해석

시험에 사용된 시편과 동일한 크기의 시편을 유한요소 해석에 사용하기 위하여 Fig. 9와 같이 모델링 하였으며 단품 층돌해석에 사용할 수 있는 유한요소 해석 코드를 개발하였다. 요소의 크기는 1.5mm이며, 총 요소의 수는 19,200

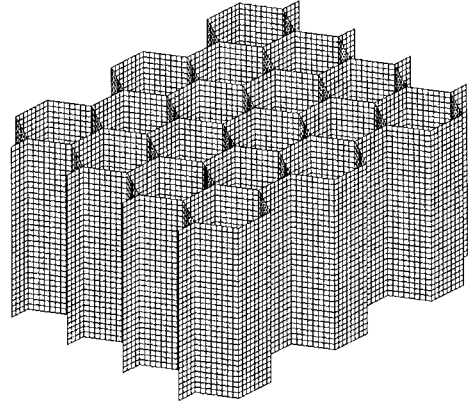


Fig. 9 F.E. Model of honeycomb block

개이다. 해석에서 허니컴 시편을 압축하는 속도는 1m/s로 설정하였으며, 초기 관성력을 최소화하기 위해 부가 하중은 초기에 서서히 증가하도록 하였다. 해석시 허니컴 셀의 벽과 벽 사이에 발생하는 칩투를 막기 위해 전체적으로 자체 접촉(self-contact)을 지정하였다.

T방향에 대한 압축해석 후 변형 모습은 Fig. 10과 같으며, 하중과 변위 관계는 Fig. 11에 보였다. T 방향에 대한 압축 해석은 초기 불완전(initial imperfection)의 영향을 많이 받기 때문에 그림과 같이 좌굴이 진행되기 전까지의 초기 하중이 시험에 비해 크게 나타나는 것을 볼 수 있다⁹⁾. 초기 2mm 변위 이후 시험과 해석 결과



Fig. 10 Deformed shape along T-direction

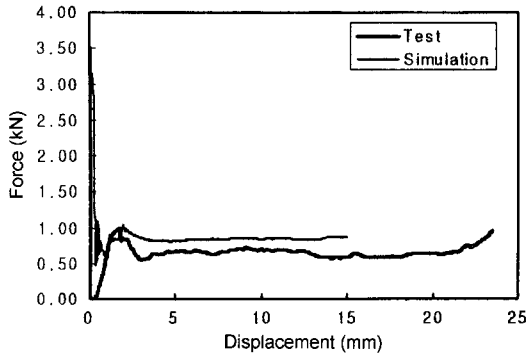


Fig. 11 Comparison of force-displacement curve between test and simulation

는 비슷한 하중을 나타냄을 알 수 있다.

동일한 유한요소 모델을 사용하여 L 방향에 대하여 압축해석을 수행하였으며, 이때 해석에 사용된 모델은 횡방향으로 4개의 셀과, 종방향으로 5개의 셀로 이루어져 있다. 일반적으로 셀의 갯수는 허니컴의 강도에 영향을 미치지 않는 것으로 알려져 있다.⁹⁾ 압축은 강제벽을 사용하여 아래를 고정하고, 상단면을 1mm/msec 속도로 이동하였다. Fig. 12는 단계별 변형양상을 나타낸다.

(a)는 초기 상태의 형상이며, (b)는 1.8mm에서 변형 모습을 보여주고 있다. 이 영역은 Fig. 13의 힘-변위 그래프에서 초기 좌굴 이전의 탄성역 내의 변형이며, 전체적으로 셀에서의 소성변형으로 볼 수 있는 좌굴현상은 아직 발생하지 않은 것을 볼 수 있다. (a)에서 (b)의 변화를 보면 초기 형상에 비해 전체적으로 좌, 우로 조금 확장된 것을 알 수 있다. (c)에서는 강제 와 접촉하고 있는 상단부의 셀 벽이 좌우로 꺾이면서 제 1열에 있는 셀에 좌굴이 발생하는 것을 볼 수 있다. 이때 하중 변위 특성을 보면 하중이 감소함을 볼 수 있다. (d)-(e)-(f) 상태를 지나면서 셀의 좌굴이 전체적으로 확장되어 전체 시편에서 변형이 발생함을 볼 수 있다. 전체적으로 좌굴되는 상태에서의 일반적인 힘-변위 특성은 Fig. 13에서 보는 것과 같이 하중이 일정하게 유지되는 양상을 보인다.

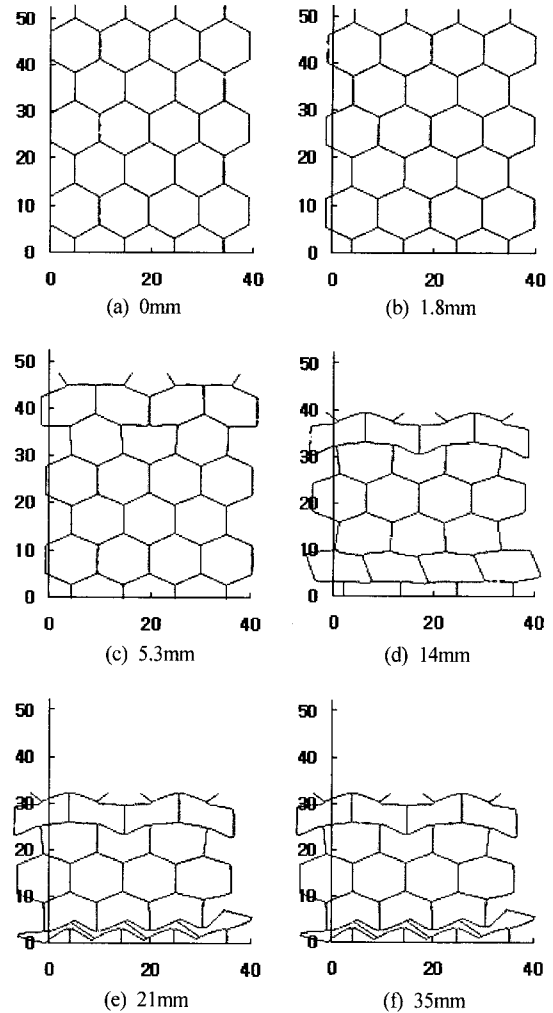


Fig. 12 Deformed shapes by finite element simulation along L-direction

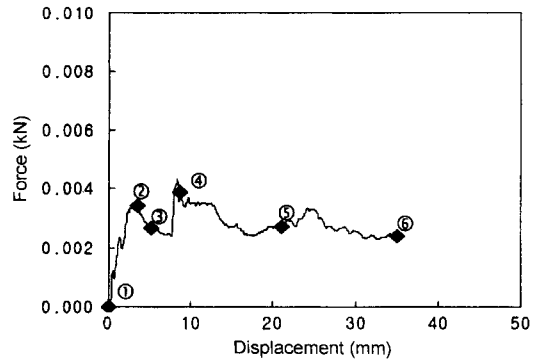


Fig. 13 Force-displacement relationship along L-direction

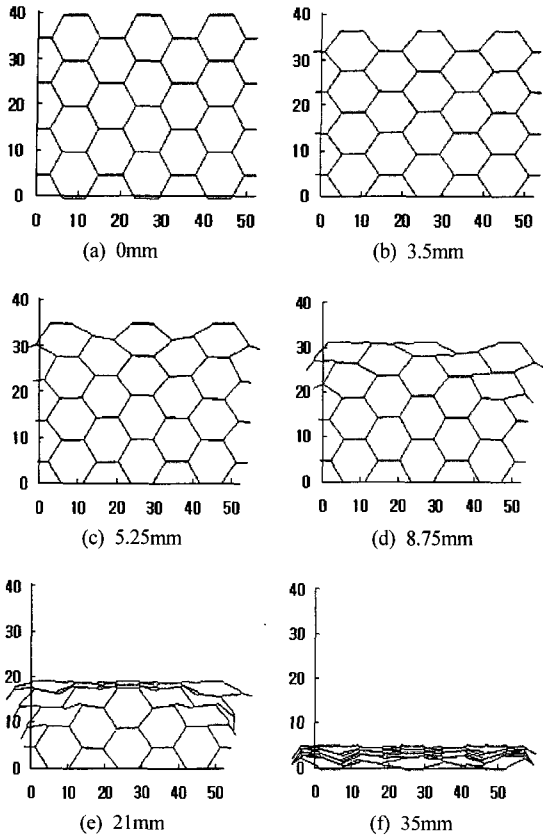


Fig. 14 Deformed shapes by finite element simulation along W-direction

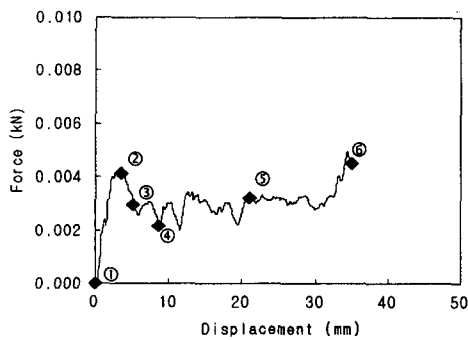


Fig. 15 Force-displacement relationship along W-direction

3. 압축거동 구성식 연구

3.1 구성식

몇 개의 단위셀로 이루어진 샘플 모델에 대

해서는 상세 셀모델을 이용한 유한요소해석이 어느 정도 가능하지만, 전체모델 해석시 단위 셀의 국부좌굴 변형을 고려하기 위하여는 상당한 시간이 요구된다. 그러므로 육면체 요소를 이용하여 허니컴 셀의 국부변형을 표현하기 위하여는 새로운 구성식이 필요하다. 본 연구에서 수행된 허니컴 재료에 대한 해석과 시험을 통해 분석한 허니컴 재료의 압축특성에 의하여 허니컴 재료는 시편의 크기에 관계없이 Fig. 16과 같은 단순화한 응력-변형선도로 가정할 수 있다. 이때의 응력-변형선도는 두개의 기울기를 갖게 되며, 이것은 초기 항복이 발생하기 전 탄성영역에서의 기울기와 완전히 압축된 상태에서 갖는 기울기로 이루어져 있다. 두 기울기 사이에 발생하는 재료의 탄성계수는 두 기울기 사이의 선형적 변화를 갖는 모델로 가정하였을 때 허니컴은 압축방향에 대하여 식(1)과 같이 표현가능하다.

$$E_{11} = E_{11u} + \beta(E - E_{11u}) \quad (1)$$

$$\beta = \max \left[\min \left(\frac{1 - \nu}{1 - \nu_f}, 1 \right), 0 \right] \quad (2)$$

위 식에 의하여 현재 변형상태에서 탄성계수 E_{11} 은 요소가 완전히 압축될 때까지 체적이 변함에 따라 E_{11u} 에서 E 까지 선형적으로 변하게 된다. 이때 E_{11u} 는 셀이 압축되기전의 탄성영역에서의 탄성계수이며, E 는 완전히 압축된 상태

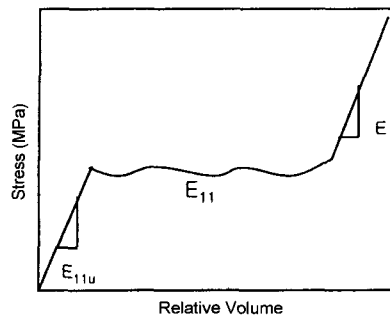


Fig. 16 Generalized stress-strain characteristics of energy absorbing honeycomb

에서의 계수를 나타낸다. V_f 는 허니컴이 완전히 압축되었을 때의 상대 체적이다.

계산된 탄성계수 E_{11} 으로부터 다음식을 이용하여 시험응력(trial stress)을 계산한다.

$$\sigma_{11}^{n+1\,trial} = \sigma_{11}^n + E_{11} \Delta \epsilon_{11} \quad (3)$$

완전히 압축된 재료는 탄성-완전소성(elastic-perfectly plastic)으로 가정하여 응력을 계산할 수 있다.

$$s_{ij}^{trial} = s_{ij}^n + 2G \Delta \epsilon_{ij}^{dev\,n+1/2} \quad (4)$$

여기서, 편차 변형률증분은 다음과 같다.

$$\Delta \epsilon_{ij}^{dev} = \Delta \epsilon_{ij} - \frac{1}{3} \Delta \epsilon_{kk} \delta_{ij} \quad (5)$$

유효응력을 계산하여 항복응력 σ_y 를 초과하는지 알아본다. 이때 재료의 항복 여부를 알기 위하여 허니컴의 응력-변형 특성그래프와 비교한다.

$$s_{eff}^{trial} = \left(\frac{3}{2} s_{ij}^{trial} s_{ij}^{trial} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

만약 초과하면 다음 식을 이용하여 간단히 항복 곡면으로 되돌리게 된다.

$$s_{ij}^{n+1} = \frac{\sigma_y}{s_{eff}^{trial}} s_{ij}^{trial} \quad (7)$$

여기에서 체적계수(bulk modulus) K 를 사용하여 압력이 계산된다.

$$p^{n+1} = p^n - K \Delta e_{kk}^{n+1/2} \quad (8)$$

이 식으로부터 Cauchy 응력을 얻을 수 있다.

$$\sigma_{ij}^{n+1} = s_{ij}^{n+1} - p^{n+1} \delta_{ij} \quad (9)$$

3.2 구성식 검증해석

제안된 허니컴의 압축거동식을 검증하기 위하여 본 연구에서 개발된 충돌해석 유한요소 해석프로그램을 사용하였으며, 재료 데이터 입력은 허니컴블럭의 압축시험 결과를 사용하여

Table 1 및 Fig. 17같은 단순화한 응력-변형률선도를 사용하였다. Fig. 18은 시험에 사용된 허니컴과 같은 크기로 모델링된 유한요소 모델과 변형양상을 보여준다. 이때 사용된 모델은 100개의 육면체요소로 구성되어 있다. Fig. 19와 Fig. 20은 각각 T방향과 L, W 방향으로의 하중-변위 그래프로서, 시험과 해석을 비교하였다. 제안된 구성식을 이용한 유한요소해석은 시험 결과를 잘 근사함을 알 수 있다.

Table 1 Material property along T-direction

Young's modulus	Yield stress	Maas density
68,950MPa	0.35MPa	1.6kg/m ³

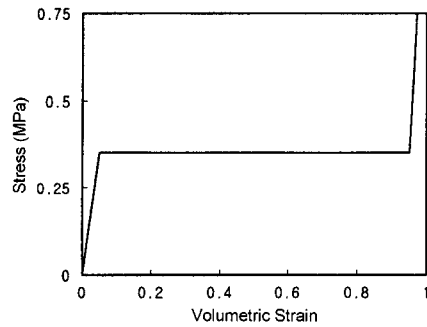


Fig. 17 Simplified volumetric stress-strain relationship

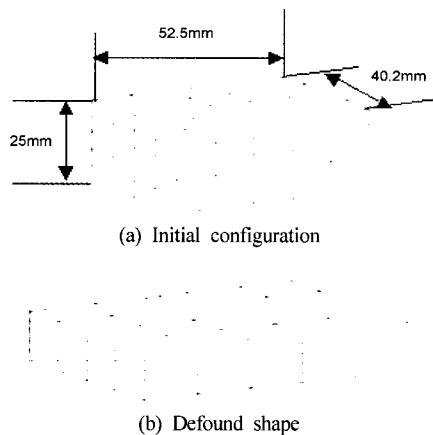


Fig. 18 Finite element analysis using hexahedral block elements

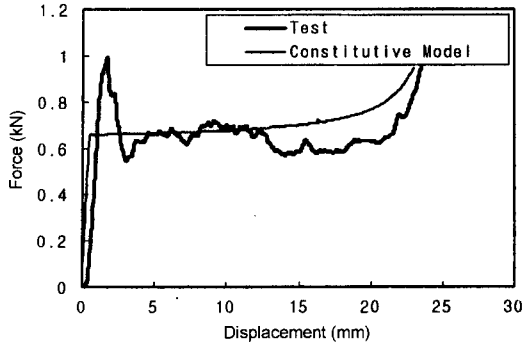
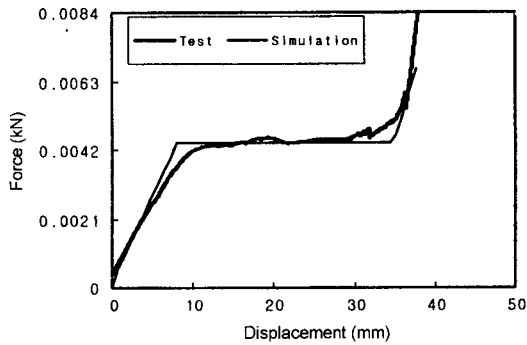
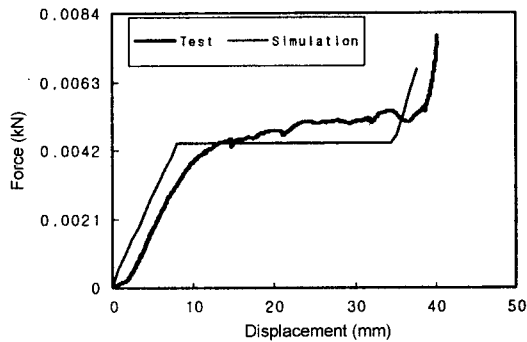


Fig. 19 Comparison of force-displacement relationships along T-direction



(a) L-direction



(b) W-direction

Fig. 20 Comparison of in-plane force-deflection relationships

3.3 MDB(Moving Deformable Barrier) 변형해석

MDB는 측면충돌상황을 재현하기 위해 시험 차량에 대하여 충격을 가하는 것으로, 전면부에 에너지 흡수 허니컴을 장착한 대차를 말한다.

(Fig. 21) MDB의 사양은 FMVSS(Federal Motor Vehicle Safety Standard) 214-D¹¹⁾에 의하여 규정된다. FMVSS 214-D에서는 MDB의 크기 뿐만 아니라 MDB의 무게 및 압축강도를 규정하고 있다.

Fig. 22는 측면과 정면에서 본 것으로서 MDB의 충격흡수부의 크기에 대한 규정이다. 에너지흡수부는 실제 차량과 유사한 강성을 나타내기 위하여 두 부분으로 이루어져 있으며, 이들은 각각 차량의 범퍼에 해당하는 강도와 범퍼를 제외한 나머지 부분의 강도를 갖도록 설계되어 있다. 이들의 강도는 각각 1.689MPa과 0.310 MPa로 규정되어 있다. 해석에 사용되는 허니컴의 물성 데이터는 FMVSS에서 규정하고 있는 강성을 갖도록 항복응력을 설정하여 Table 2와 같은 데이터를 사용하였고, 구성식에 적용되는 응력-변형을 관계는 Fig. 17과 같다. Fig. 23은 MDB를 59.85km/hour의 속도로 강체벽에 충돌시키는 해석을 수행하였을 때의 변형 양상을 보여준다. 제안된 구성식을 사용한 MDB의 힘-변위선도를 시험 결과와 비교함으로써 제안된 구성식의 적절함을 확인할 수 있다.(Fig. 24)

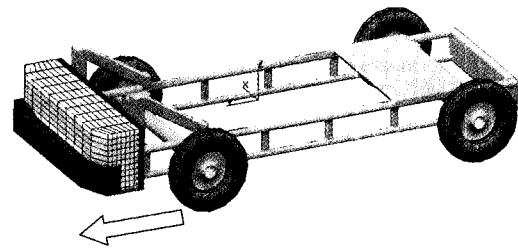


Fig. 21 MDB(Moving Deformable Barrier)

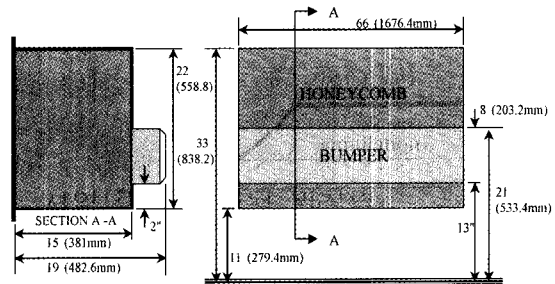
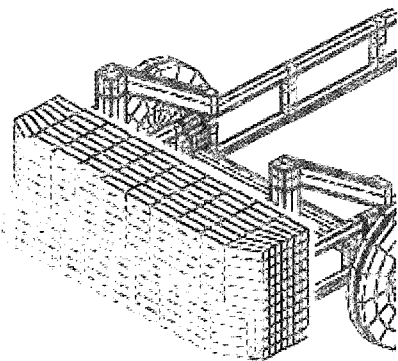


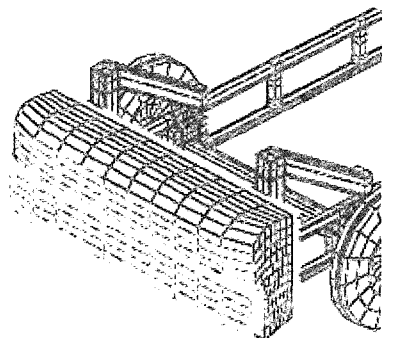
Fig. 22 Dimension of MDB crushable barrier face

Table 2 Material property of MDB face

	Young's modulus	Yield stress	Mass density
Bumper	68,950MPa	1.689MPa	1.6kg/m ³
Honeycomb	68,950MPa	0.310MPa	1.6kg/m ³



(a) Initial state



(b) at 20 msec

Fig. 23 Deformed Shape of MDB face

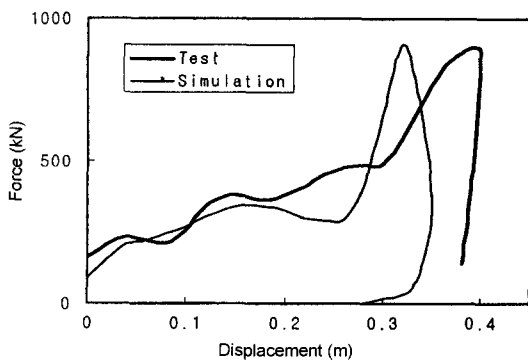


Fig. 24 Comparison of force-displacement relationships

4. 허니컴 셀 구조 설계

제안된 허니컴 구성식을 통한 강도 해석결과로 외형설계가 이루어진 허니컴의 실제 제작을 위한 허니컴 셀 형상 설계 시스템을 개발하였다. 여기에서는 최적화 기법을 사용하여 허니컴 코어의 크기를 결정하게 되며, 최적화 과정동안 강도 평가는 허니컴 시편과 동일하게 유한요소 모델링한 시편을 사용하여 해석을 수행한다. 허니컴 코어의 형상설계 프로그램은 유한요소생성 프로그램과 유한요소해석 프로그램 및 최적화 프로그램으로 구성되어 있다. 유한요소해석 프로그램을 사용한 압축해석결과의 최적화 프로그램에의 적용 과정은 Fig. 25와 같다. 사용된 최적화 알고리즘은 DAVIDSON-FLETCHER-POWELL(DFP) 방법과 Broyden-Fletcher-Shanno (BFS) 방법을 바탕으로 한 것이다. 구성된 최적화 프로그램을 검증하기 위해 Fig. 26와 같이 코어의 크기를 변수화 하여 최적의 강성을 갖는 변수에 관하여 최적화를 수행하게 된다. 일단 형상 파라미터들이 선택되면 목적함수를 설정하고 그 함수를 최소화하는 파라미터 값을 찾는다. 본 연구에서 사용된 목적함수는 다음과 같다.

$$\Psi = wt(1)(k_x - k_x^{des})^2 + wt(2)(k_y - k_y^{des})^2 + wt(3)(k_z - k_z^{des})^2 \quad (10)$$

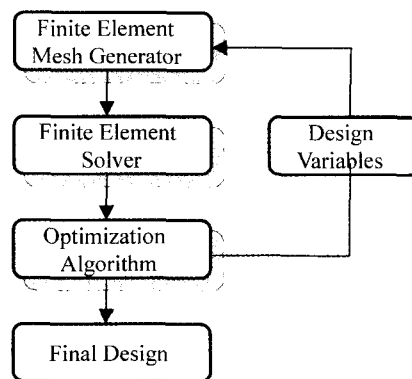


Fig. 25 Optimization routine for core design

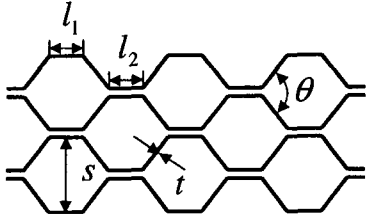


Fig. 26 Design parameter of cellular structure

식(10)에서 $wt(1)$, $wt(2)$, $wt(3)$ 은 가중치이며 k_x , k_y , k_z 는 각각의 방향에 대한 강성값이다. 위첨자 des 는 목표값을 나타내는 것이다. Fig. 27, 28은 각각 초기 코어의 크기 S 를 15mm로 하고, 두께 0.04mm인 허니컴에 대하여 강성값 목표치를 700kPa로 정하였을 때, 목표값에 접

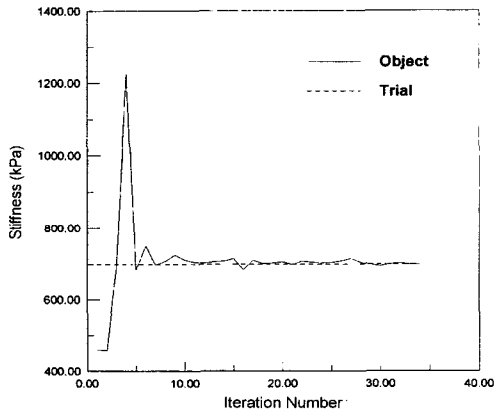


Fig. 27 Optimization of honeycomb core strength

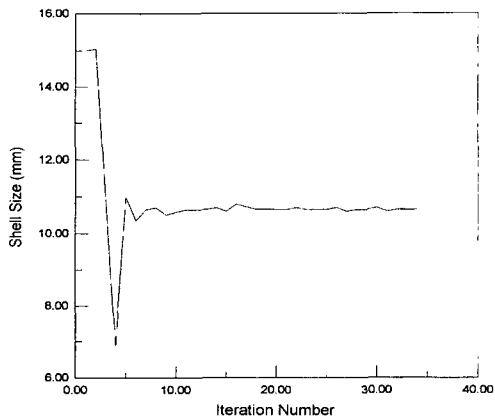


Fig. 28 Change of cell size during optimization

근해 가는 과정과, 그때 코어의 크기의 변화를 나타낸 것이다. 최적화 과정동안 코어의 크기는 초기 15mm에서 약 10번의 iteration 과정을 거쳐 최적 크기를 찾아가는 것을 볼 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 에너지 흡수재료로 사용되는 알루미늄 허니컴에 대하여 시험과 해석적인 방법을 사용하여 압축 특성에 대한 분석을 수행하였으며, 구성식을 제안하고, 셀구조 설계 시스템을 개발하였다.

1) 허니컴 재료에 대하여 3방향에 대한 독립적 압축거동 특성을 분석하기 위해 가로와 세로 방향으로 각각 4개와 5개의 셀로 구성된 허니컴 시편을 제작하였다. 주요 하중지지 방향인 T, W, L 방향으로 압축하였을 때 초기 항복까지 급격한 하중 증가를 보이다가 좌굴이 발생한 이후 안정상태까지 하중이 감소하고 이후 일정하중을 유지하였다. 압축이 완료된 80-90% 체적변형률 이후 하중이 다시 급격히 증가되는 양상을 나타내었다.

2) 셀요소를 이용한 상세 유한요소 모델을 사용하여 허니컴의 붕괴 과정에 관한 해석을 수행하였다. T방향 압축시 초기 불완전(initial imperfection)의 영향으로 초기 붕괴하중에 차이를 보였으나, 초기 탄성변형영역 이후 시험과 해석 결과는 비슷한 하중-변위관계를 나타내었다.

3) 알루미늄 허니컴 시편에 대한 시험과 상세 셀모델의 유한요소해석결과를 분석하여, 알루미늄 허니컴에 대한 구성식을 제안하였다. 3차원 육면체요소를 이용하여 T, W, L 각각의 방향으로 변형해석을 수행하였으며, 힘-변위관계를 비교하였다. 제안된 구성식은 국부좌굴을 나타내는 허니컴재료의 변형해석에 효과적으로 이용될 수 있음을 알 수 있다

4) 제안된 구성식과 육면체요소를 실제 자동차 측면충돌시 사용되는 MDB 충격해석에 적용하였다. 변형양상과 힘-변위관계를 시험결과

와 비교하였으며, 제안된 구성식이 실제 형상의 유한요소해석에 유용하게 이용될 수 있음을 입증하였다.

(5) 허니컴 셀의 밀도, 즉 단위 크기당 허니컴 셀의 크기가 압축강도에 영향을 끼치는 성질을 이용하여 요구되는 압축강도를 갖는 허니컴 설계가 가능한 최적화 설계 과정을 제시하였으며, 최적화 프로그램을 개발하였다.

향후 3 방향에 대한 독립적인 특성 이외에 발생할 수 있는 종속적 특성에 대한 연구를 수행하여 임의의 방향에서의 충돌상황에 대한 변형예측이 가능한 구성식 모델을 제안하고, 셀 구조설계과정에 해석모델을 도입하여 해석시간을 단축하는 연구를 수행할 계획이다.

후 기

본 논문은 학술진흥재단 연구비 지원(1998-018-E00066)에 의하여 수행되었습니다. 지원에 깊이 감사드립니다.

참 고 문 헌

- 1) L. E. Schwer, R. G. Whirley, "Lessons Learned in Modeling a Moving Deformable Barrier Impacting a Rigid Wall", Journal of Crashworthiness, 1996.
- 2) D. G. Zimcik & J. G. Gietz, "Development of Low Distortion Tooling for High Precision Space Components", SAMPE Journal, May/

- June, p.11, 1987.
- 3) A. Wiortz, "New Application for Honeycomb in the Rail Car Industry", 35th International SAMPE Symposium, 1990.
- 4) M. Bandak and T. Bitzer, "Honeycomb, A Lightweight Energy Absorbing Material", 22nd International SAMPE Technical Conference, 1990.
- 5) R. K. McFarland, "Hexagonal Cell Structures under Post-Buckling Axial Load", AIAA Journal, Vol.1, No.6, pp.1380-1385, 1963.
- 6) W. Abramowicz and T. Wierzbicki, "Axial Crushing of Multicorner Sheet Metal Columns", ASME Journal of Applied Mechanics Vol.56, pp.113-120, 1989.
- 7) J. W. Klintworth and W. J. Stronge, "Plane Punch Indentation of a Ductile Honeycomb", Int. J. Mech. Sci., pp.359-378, 1989.
- 8) L. J. Gibson, M. F. Ashby, "Cellular Solids Structure and Properties", Cambridge University Press, 1997.
- 9) S. D. Paka and S. Kyriakides, "Experiment and Full-scale Numerical Simulations of In-plane Crushing of a Honeycomb", Acta Mater., Vol.46, No.8, pp.2765-2776, 1998.
- 10) H. Zhao and G. Gary, "Crushing Behavior of Aluminum Honeycomb under Impact Loading", Int. J. Impact Engng, Vol.12, No.10, pp.827-836, 1998.
- 11) TP-214D-03, Side Impact Protection (Dynamic) - Passenger Cars, US Department of Transportation, National Highway Traffic Safety Administration, Laboratory Test Procedure for FMVSS 214-D.