論文

통계적 유한요소모델을 이용한 발포된 금속기지 복합재료의 인장특성

전성식*+

Tensile Behaviour of Foamed Metal Matrix Composite Using Stochastic FE Model

Seong-Sik Cheon*+

ABSTRACT

In this paper, a modified and representative unit cell model was employed to study the tensile behaviour of closed-cell metallic foams with varying spatial density distribution as well as material imperfections. The density variation was assumed to follow a statistical probability distribution of the Gaussian type. A multiple cell finite element model, utilising the modified unit cell, was developed. The model exhibits deformation patterns similar to those observed in tensile testing. The nominal stress-strain curve obtained from quasistatic tensile of the foam was compared with experimental findings and was found to be in good agreement in the scheme of maximum strength only if the appropriate density distribution and volume fraction of internal imperfections are taken into account. Moreover, maximum tensile strength of the aluminium foam was found to be more sensitive to the volume fraction of imperfection than standard deviation of the density.

초 록

본 연구에서는 폐쇄형 발포금속의 인장 특성을 이해하기 위하여 수정된 단위모델을 제시하였다. 또한 발포금속의 밀도는 가우스 분포에 의거하여 확률적으로 분포한다고 가정하고 본 연구에서 제시된 수정 단위 모델을 조합하여 유한요소 모델을 제안하였다. 이 모델은 실제 인장 시험과 유사한 변형거동을 보이는 것을 확인하였고, 적절한 밀도 분포와 내부 기공을 고려하게 되면, 해석에서 구해진 최대 인장 강도가 근사적으로 실험결과와 일치하는 것을 볼 수 있었다. 또한, 발포 알루미늄의 최대 인장 강도는 밀도 분포의 표준편차보다는 내부 기공 부피분율에 더 민감하게 변하는 것으로 밝혀졌다.

Key Words : 발포금속(metallic foam), 다공소재(cellular material), 내부기공(imperfection)

1. 서 론

발포금속은 구조의 경량화[1]와 충돌시 에너지 흡수가 뛰어나며, 진동 흡수 및 전자기 차폐 등 우수한 특성을 보여주기 때문에 공업적으로 많은 분야에서 이용이 가능하다. 특히 알루미늄이나 니켈 재질의 발포금속은 전 세계적으로 현재 우주항공, 기계, 자동차, 토목 건축 및 전기전자 분야에서 활용되고 있으며, 앞으로 더욱 많은 산업 분야로 확대될 예정이다. 또한 강도를 높이기 위해 세라믹 재질을 첨가하여 금속기지 복합재료를 발포하는 방법도 적용되고 있다. 발포금속은 지금까지 가스 주입법(direct gas infiltration), 분말야금법(powder metallurgy route) 및 인베스트먼트 주조법(investment casting) 등을 포함한 10여 개의 제조법이 개발되어 있으며, 그 중에서도 생산속도가 높고 비용도 비교적 저렴한 가스 주입법이 많이 사용되고 있다. 이 방법에 의해 제조된 발포금속은 폐쇄형 셀 구조(closed-cell structure)를 가지고 냉각속도 및 기체의 분사 특성에 따라서 셀

*+ 공주대학교 공과대학 기계자동차공학부, 교신저자(E-mail:sscheon@kongju.ac.kr)

의 크기 및 셀을 이루는 두께가 위치에 따라 차이가 있으며, 이에 따라 발포금속의 상대밀도가 가우스 분포를 갖는 것으로 알려져 있다[2]. 또한 제조공정의 편차에 따라서 발포금속의 내부 불완전한 기공(internal imperfection) 등이 확률적으로 존재할 수 있다. 이러한 상대밀도의 불균일한 분포나 내부 불완전한 기공 등은 구조재로 사용된 발포금속이 하중을 받을 때 국부 변형(localised deformation) 및 갑작스러운 파괴(catastrophic failure)가 발생할 수 있기 때문에 이에 대한 연구가 시급한 실정이다.

Hanssen 등[3,4]은 해석 및 실험적 방법으로 발포재로 내부를 채운 구조에 관한 특성을 평가하였다. Baumeister 등[5]은 충돌시 에너지 흡수를 높이기 위한 차체구조로 발포재료의 응용을 강조하였다. Hučko와 Faria[6]는 다공질 소재의 기계적 특성을 대표하는 점탄성 모델을 제시하였다. Sugimura 등[7] 및 Grenestedt[8]는 발포재의 셀 구조가 기본적인 특성인 강성, 항복강도와 파손방지 등에 영향을 미치는 것과 관련한 평가를 수행하였다. Ford와 Gibson[9]은 다공소재의 인장 및 압축 특성을 평가하기 위한 미시적 모델(microstructural model)을 제시하였다. Overaker 등[10]은 벌집구조 및 정육각 형태의 모델의 탄성거동을 이해하기 위한 2차원 모델을 제안하였다. Santosa[11]와 Wierzbicki[12]는 셀 구조를 표현하는 3차원 모델을 제안하고 이에 관한 발포재의 기계적 특성에 관한 연구를 수행하였다. Fortes 등[13]은 Gibson과 Ashby[14]가 제안한 모델을 이용하여 다공소재의 접촉현상을 해석하였다. Paul 등[15]은 폐쇄형 발포 알루미늄에 노치를 주고 인장 강도 시험을 수행하였다. Harte [16]은 발포 알루미늄에 주기적인 인장 및 압축 하중을 가했을 때 특성을 평가하였다. Miller[17]는 발포 금속의 소성특성에 관한 항복면(yield surface)을 제안하였다. Deshpande와 Fleck[18]은 변형률속도가 $5000s^{-1}$ 이하일 때 발포 알루미늄의 정·동적 특성에는 거의 변화가 없음을 발견하였다. Batawros 등[19] 및 Meguid와 Xue[20]는 디지털 이미지 프로세싱을 이용하여 폐쇄형 발포 알루미늄의 변형거동을 평가하였다. Gutiérrez와 Borst[21]는 통계적 방법으로 유한요소 해석의 신뢰도를 높일 수 있음을 보여주었다. Meguid 등[2]은 통계적 방법을 통하여 발포 알루미늄의 국부적인 파손에 관한 특성을 평가하였다.

이와 같이 전 세계적으로 발포금속에 관한 연구가 활발히 진행중이나, 압축 하중에 대한 연구가 대부분이며, 인장 특성에 대한 연구는 상대적으로 많이 이루어지지 않고 있다. 따라서, 본 연구에서는 밀도가 가우스 분포를 따르는 유한요소모델을 제시하고, 해석과 실험을 병행하여 발포금속의 인장 특성을 평가해 보았다.

2. 통계적 유한요소모델

2.1 수정된 단위 모델

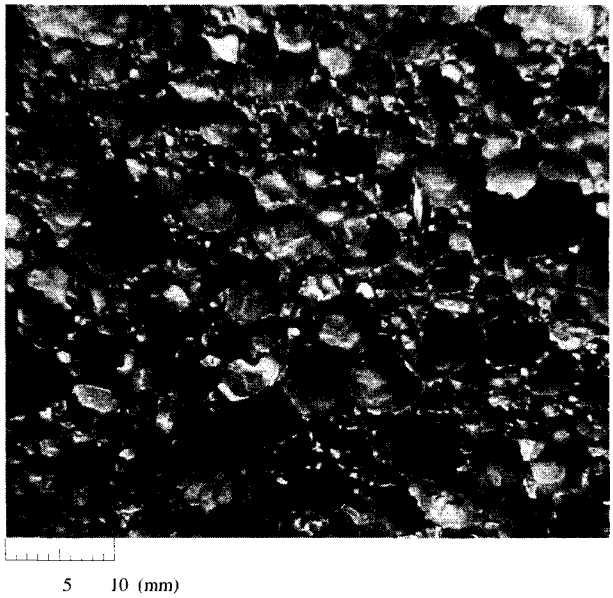

Fig. 1 Surface of closed-cell aluminium foam.

Table 1 Ingredients in aluminium foam

Ingredients	Weight ratio(%)
Si	8.5-9.5
Fe	0.2
Cu	0.2
Mg	0.45-0.65
Ti	0.2
Miscellaneous	0.02

본 발포 알루미늄의 재질은 Si성분의 세라믹이 주성분으로 첨가된 금속기지 복합재료를 용융하여 가스주입법으로 제조한 상대밀도 10%의 폐쇄형 구조로서, Fig. 1은 Norsk Hydro사에서 제조된 발포 알루미늄의 표면이다.

Table 1에서는 용융 알루미늄에 함유된 성분들의 종류 및 비율을 보여준다.

Santosa[11]와 Wierzbicki[12]의 단위모델은 발포 알루미늄의 셀 부분을 모사하기 위하여 속이 빈 피라미드로 표현했으나, 알루미늄이 발포된 후 냉각 과정중 높은 표면장력을 고려해 본다면, 삼각형 보다는 원형이 셀 형태를 더욱 잘 모사할 수 있으며, 열역학적으로도 더 안정적인 것으로 사료되었다.

따라서 본 연구에서는 Santosa[2]와 Wierzbicki[22]의 모델에서 피라미드 부를 속이 빈 반구형으로 교체한 수정된 단위 모델을 사용하였다.

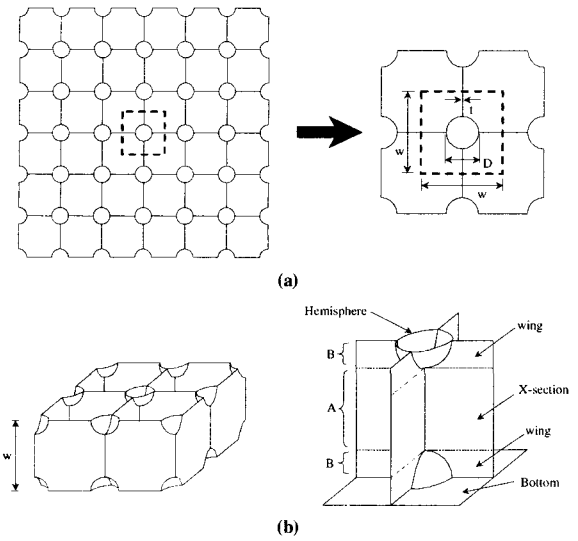

Fig. 2 Modified unit cell model: (a) orthogonal view, (b) oblique view.

수정 단위 모델은 초기에 외부 압축 하중을 지지할 때는 선형 구간을 표현하게 되고, 이후에 X-section의 변형이 생기기 시작할 때부터 반구들이 서로 닿기 직전까지는 플라토 구간(plateau region)을 나타내며, 반구들이 서로 닿은 후 변형은 덴시피케이션(densification) 구간을 표현한다. 수정된 단위 모델의 상대밀도를 계산하기 위한 식은 다음과 같다.

$$\frac{\rho_{foam}}{\rho_{solid}} = 3\left(\frac{t}{w}\right) + \frac{\pi}{4}\left(\frac{t}{w}\right)\left(\frac{D}{w}\right)^2 \tag{1}$$

여기서 Fig. 2에서 표시된 바와 같이 t는 셀의 두께, w는 단위 폭, D는 반구의 지름이다.

또한, 압축하중시 덴시피케이션이 시작하는 공칭변형률은 다음과 같이 표시될 수 있다[2,12].

$$\varepsilon_d = 1 - 0.6\frac{D}{w} \tag{2}$$

2.2 수정 단위모델의 검증을 위한 압축특성 평가

실제로 수정된 단위 모델이 발포재의 특성인 선형-플라토 구간(plateau region) 및 덴시피케이션을 잘 나타낼 수 있는 지 여부를 유한요소해석을 통하여 평가해 보았다. 이를 위해 인장과는 반대로 압축 특성을 먼저 해석해 보았다. 상용 외연적 유한요소 해석 프로그램 중 하나인 LS-DYNA를 이용하였다. 해가 정확하면서도 상대적으로 계산효율이 높은 Belytschko-Tsay 쉘을 사용하였고, 두께방향으로 3개의 적분점을 적용하였다[23]. Table 2에서는 유한요소해석에서 사용된 쉘 요소의 물성치를 보여준다.

Table 2 Material properties of shell elements[2,12]

Properties	Modified unit cell	Rigid platen
Specific gravity	2.77	7.8
Young's modulus	69 GPa	200 GPa
Yield stress	87 MPa	n/a
Poisson's ratio	0.3	0.33

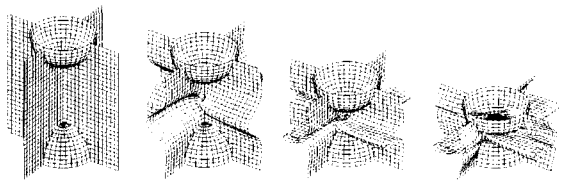

Fig. 3 Compressive deformation of modified unit cell FE model: (a) ε=0.1%, (b) 25%, (c) 50% and (d) 75%.

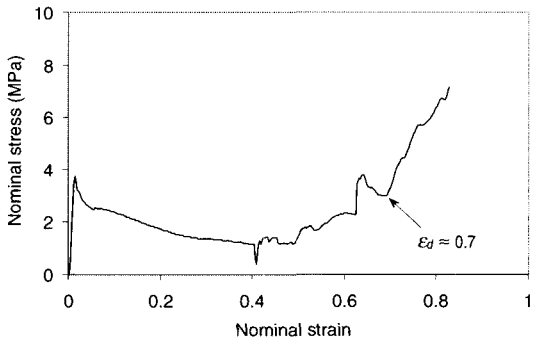

Fig. 4 Nominal stress-strain curve of modified unit cell.

자가 접촉(self contact)을 허용하여, 변형시 요소사이의 접촉이 해석에 고려되도록 하였다. Fig. 3은 수정 단위모델의 변형모습을 보여주고 있고, Fig. 4에서는 수정 단위모델의 공칭 응력-공칭 변형률 선도를 보여준다.

Fig. 4에서 보여지듯이 수정된 단위모델은 발포재의 선형-플라토-덴시피케이션 구간의 특성을 우수하게 모사하는 것으로 밝혀졌다. 변형률이 0.41 정도에서 발생하는 날카롭게 응력이 감소했다가 증가하는 것은 반구의 스냅 좌굴(snap-through buckling)에 의해 발생한다.

Table 3 Number of finite elements

Relative density(%)	Probability(%)	Number of elements
less than 1.4	0.0009	-
1.5- 2.4	0.0064	1
2.5- 3.4	0.0412	5
3.5- 4.4	0.2075	24
4.5- 5.4	0.8178	94
5.5- 6.4	2.5222	290
6.5- 7.4	6.0887	700
7.5- 8.4	11.5057	1,323
8.5- 9.4	17.0209	1,957
9.5-10.4	19.7131	2,267
10.5-11.4	17.8747	2,056
11.5-12.4	12.6891	1,459
12.5-13.4	7.0519	811
13.5-14.4	3.0679	353
14.5-15.4	1.0447	120
15.5-16.4	0.2784	32
16.5-17.4	0.0581	7
17.5-18.4	0.0095	1
more than 18.5	0.0011	-
Total	99.9998	11,500

2.3 상대밀도의 불균일 분포

가스 주입법으로 제조된 발포 금속은 주조 및 응고 과정을 거치면서 냉각 속도의 차이에 의해 셀의 크기 및 셀을 이루는 두께가 약간씩 차이가 생기게 된다. 이로 말미암아, 상대밀도는 위치에 따라서 불균일하게 분포하게 되고, 더욱이 내부에 기공(imperfection)이 생길 수도 있어서 압축 하중시 국부 변형(localised deformation)의 원인이 되기도 한다.

따라서 본 연구에서는 상대밀도가 가우스 분포를 갖는다고 가정하고, 이에 따라서 표준편차의 변화 및 내부 기공에 따른 인장특성의 변화를 평가해 보았다.

표준편차의 변화가 크게 되면, 생산 공정 제어가 제대로 이루어지지 않는 것이기 때문에, 본 연구에서는 발포 알루미늄의 상대밀도의 평균이 10%, 즉 270kg/m^3 로 맞추고, 표준편차는 상대 밀도의 30% 이하로 가정하였다. 표준편차가 30%보다 커지게 되면, 음의 상대밀도 부분을 무시함에 의한 오차가 누적되어 무시할 수 없게 되나, 음의 상대밀도는 물리적으로 불가 하므로, 표준편차의 최대 변화는 상대밀도의 30%로 가정하게 되었다. 또한 가우스 분포는 연속적인데 반해 유한요소 모델은 이산적이므로, 이산화(discretisation)과정을 거쳐야 유한요소 모델에 반영할 수 있게 된다. Table 3에서는 표준편차가 상대밀도의 20%일 때 이산화된 유한요소개수를 보여주고 있다. 본 연구에서는, 상대밀도의 10%, 20% 30%의 표준편차에 대한, 각각의 내부기공 부피분율이 0-30% 사이를 5%씩 증가하는 경우에 관한 모델링을 수행하였다. 서로 다른 밀도를 갖는 쉘의 분포는 랜덤값을 발생시켜서 위치를 정하였다.

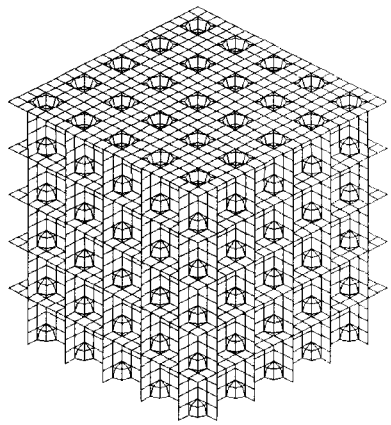

Fig. 5 FE model for aluminium foam using modified unit cell.

수정된 단위 모델을 가로, 세로 및 높이 방향으로 5개씩 사용하여 총 요소개수는 11,500개이며, 단위 모델의 해석 때와 마찬가지로 두께 방향으로 3개의 적분점을 갖는 Belytschko-Tsay 쉘을 이용하였고, 발포 알루미늄은 취성이 강하여 변형률이 0.6%에 도달하면 요소를 없애도록 하였다. 또한, 자가 접촉을 허용하여, 변형시 요소사이의 접촉이 해석에 고려되도록 하였다. Fig. 5에서 해석에 사용된 유한요소모델을 보여준다.

3. 유한요소해석 및 실험 결과 비교

Fig. 6에서는 상대밀도가 10%, 표준편차는 상대밀도의 30%, 내부기공 부피분율이 30%일 때의 인장 방향 변형을 보여주고 있다. Instron 4206으로 분당 3mm의 속도로 인장시험을 수행하였다. 인장시험 시편(가로×세로×높이, 50×50×50mm^3)은 정육면체 형태로, 표면을 편평하게 가공하고, 인장방향의 하중을 받을 시편의 상단과 하단의 두 면을 평판 형태의 지그에 접착제로 접합하여 시험을 수행하였다.

인장 시험시 내부 불균일한 기공 및 밀도의 불균일 분포에 따라 상대적으로 취약한 부분에서부터 균열이 발생하여 파괴가 일어나며, 세라믹 성분을 포함하고 있기 때문에 취성이 강한 특성을 볼 수 있었다. 아울러서 상대밀도의 표준 편차와 내부 기공 부피분율에 따른 최대 인장 강도의

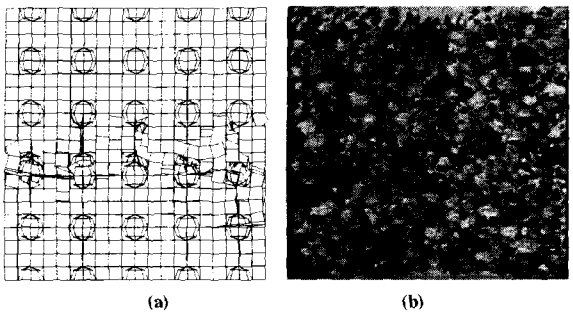

Fig. 6 Tensile deformation of aluminium foam: (a) FE analysis, (b) experiment.

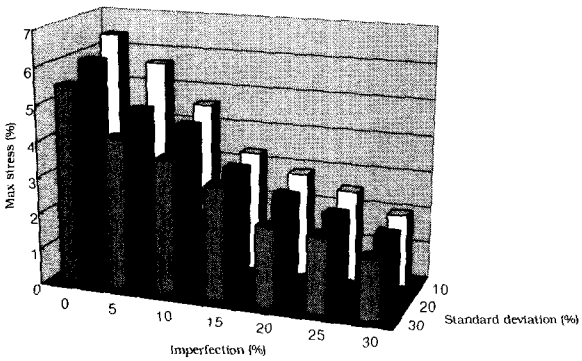

Fig. 7 Tensile strength distribution of aluminium foam.

변화를 살펴보았고, Fig. 7에 나타나 있다. Fig. 7에서 보이는 바와 같이, 상대 밀도의 표준편차가 상대밀도의 30% 이하 구간에서, 인장강도의 감소가 표준 편차가 증가함에 따라 최대 26% 이하로서 크게 변하지 않는 반면에, 내부기공 부피분율은 5%만 증가하더라도 최대 24%까지 인장강도가 감소하였으며, 내부 기공부피분율이 30%에서는 최대 70%까지도 인장강도가 감소하는 것을 볼 수 있었다. 따라서, 약 25% 이하의 인장강도 감소를 허용하는 오차 한도 내에서 발포 알루미늄을 생산한다면, 내부 기공은 5% 이내로 제어해야한다.

Fig. 8에서는 공칭 응력-공칭 변형률 선도를 보여주고 있다. 유한요소해석은 밀도의 표준편차가 상대밀도의 30%이고, 내부 기공 부피분율이 18%일 때의 결과이다. 실험시편은 Fig. 1에서 나온 바와 같이 Norsk Hydro사에서 가스주입법으로 제조한 상대밀도 10%의 폐쇄형 발포 알루미늄의 인장시험을 Fig. 6(b)와 같이 수행하여 얻은 곡선이다.

실험에서는 발포 알루미늄 뿐 아니라, 접착제의 변형이 같이 고려되기 때문에 해석에 비해 상대적으로 강성이 떨어지는 것으로 사료된다.

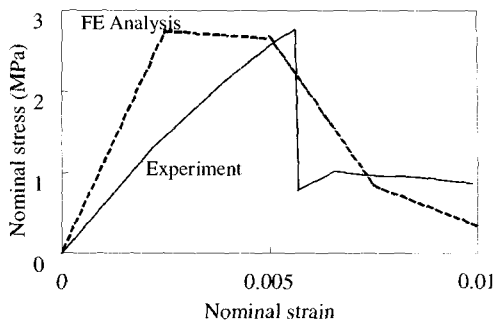

Fig. 8 Nominal stress-strain curve from the FE result.

결 론

발포된 알루미늄 기지 복합재료의 인장 특성을 해석하기 위하여, Santosa & Wierzbicki가 제시한 단위모델보다, 제작 공정중 발생하는 표면 장력 효과를 고려하고 또한 열역학적으로 더욱 안정적인 수정 단위모델을 제시하였다. 또한 발포 알루미늄의 기계적 특성은 상대밀도 및 내부 기공이 가우스 분포에 따른다고 가정하고 유한요소 해석을 수행하였으며, 이를 인장시험 결과와 비교하였다.

해석 결과, 인장 특성은 상대밀도의 표준 편차보다도, 내부 기공의 양에 크게 민감하며, 약 25% 이내의 인장강도 감소를 허용하는 오차 한도 내에서 발포 알루미늄을 생산한다면, 내부기공 부피분율이 약 5% 이하가 되도록 제어해야 할 것으로 사료된다.

후 기

본 연구는 과학기술부에서 지원받아, 과제번호 M102DB 010002-04D0201-00213로 수행되었으며 지원에 감사드립니다.

참고문헌

1) Chang, S.H. and Lee, D.G., "Robust Design of a Composite Air Spindle," *Polymer Composites*, Vol. 23, No. 3, 2002, pp. 361-371.

2) Meguid, S.A., Cheon, S.S. and Abbasi, N-El, "FE Modelling of Deformation Localization in Metallic Foams," *Finite Elements in Analysis and Design*, Vol. 38, 2002, pp. 631-643.

3) Hanssen, A.G., Langseth, M. and Hopperstad, O.S., "Static Crushing of Square Aluminium Extrusions with Aluminium

Foam Filler," *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 18, 1996, pp. 949-968.

4) Hanssen, A.G., Langseth, M. and Hopperstad, O.S., "Static and Dynamic Crushing of Square Aluminium Extrusions with Aluminium Foam Filler," *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 24, 2000, pp. 347-383.

5) Baumeister, J., Banhart, J. and Weber, M. "Aluminium Foams for Transport Industry," *Materials & Design*, Vol. 18, 1997, pp. 217-220.

6) Hu ko, B. and Faria, L., "Material Model of Metallic Cellular Solids," *Computers & Structures*, Vol. 62, 1997, pp. 1049-1057.

7) Sugimura, Y., Meyer, J., He, M.Y., Bart-smith, H., Grenestedt, J.L. and Evans, A.G., "On the Mechanical Performance of Closed Cell Al Alloy Foams," *Acta Materialia*, Vol. 45, 1997, pp. 5245-5259.

8) Grenestedt, J.L., "Influence of Wavy Imperfections in Cell Walls on Elastic Stiffness of Cellular Solids," *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, Vol. 45, 1998, pp. 29-50.

9) Ford, C.M. and Gibson, L.J., "Uniaxial Strength Asymmetry in Cellular Materials: An Analytical Model," *International Journal of Mechanical Science*, Vol. 40, 1998, pp. 521-531.

10) Overaker, D.W., Cuitiño, A.M. and Langrana, N.A. "Effects of Morphology and Orientation on the Behavior of Two-dimensional Hexagonal Foams and Application in a Re-entrant Foam Anchor Model," *Mechanics of Materials*, Vol. 29, 1998, pp. 43-52.

11) Santosa, S. and Wierzbicki, T., "Crash Behavior of Columns Filled With Aluminum Honeycomb or Foam," *Computers and Structures*, Vol. 68, 1998, pp. 343-367.

12) Santosa, S. and Wierzbicki, T., "On the Modeling of Crush Behavior of a Closed-cell Aluminium Foam Structures," *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, Vol. 46, 1998, pp. 645-669.

13) Fortes, M.A., Colaço, R. and Vaz, M.F., "The Contact Mechanics of Cellular Solids," *Wear*, Vol. 99, 1999, pp. 2301-2310.

14) Gibson, L.J. and Ashby, M.F., *Cellular Solids*, Pergamon Press, 1998.

15) Paul, A., Seshacharyulu, T. and Ramanurty, U., "Tensile Strength of a Closed-cell Al Foam in the Presence of Notches and Holes," *Scripta Materialia*, Vol. 40, 1999, pp. 809-814.

16) Harte, A.M. Fleck, N.A. and Ashby, M.F., "Fatigue Failure of an Open Cell and a Closed Cell Aluminium Alloy Foam," *Acta Materialia*, Vol. 47, 1999. pp. 2511-2524.

17) Miller, R.E., "A Continuum Plasticity Model for the Constitutive and Indentation Behaviour of Foamed Metals," *International Journal of Mechanical Science*, Vol. 42, 2000, pp. 729-754.

18) Deshpande, V.S. and Fleck, N.A., "High Strain Rate Compressive Behaviour of Aluminium Alloy Foams," *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 24, 2000, pp. 277-298.

19) Bastawros, A-F, Bart-smith, H. and Evans, A.G., "Experimental Analysis of Deformation Mechanisms in a Closed-cell Aluminium Alloy Foam," *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, Vol. 48, 2000, pp. 301-322.

20) Meguid, S.A. and Xue, H., "On the Use of "SDDIS" for Measuring Deformation Localization in Cellular Materials," *Proceedings of the Third International Conference on Mechanics and Materials in Design*, Orlando USA, 2000, p. 187.

21) Gutiérrez, M.A. and Borst, R.D., "Stochastic Aspects of Localized Failure: Material and Boundary Imperfections," *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 37, 2000, pp. 7145-7159.

22) Cheon, S.S. and Meguid, S.A., "On the Study of Crush Behaviour of Metallic Foams for Passenger Car Design," *International Journal of Automotive Technology*, Vol. 5, 2004, pp. 47-53.

23) *LS-DYNA Theory manual.*