논 문

판이 부착된 개포형 발포 알루미늄의 인장특성

강복현 · 부성덕 * · 김기영†

한국기술교육대학교 신소재공학과
*(주)잘만테크

Tensile Properties of Plate Attached Open Cell Aluminium Foams

Bok Hyun Kang, Sung Duk Bu*, and Ki Young Kim†

Dept. of Materials Engineering, Korea University of Technology and Education , 307 Gajeon-ri, Byungchung-myun, Cheonan, 330-708 Korea
*Zalman Tech Co., Ltd, #1007 Daeryung Techno Town , 448 Gasan-dong, Gumchun-gu Seoul, 153-772 Korea

Abstract

Aluminum plates of the same materials as the foam were attached by the casting process inserting the foam as a core to investigate the tensile property of open cell foams. Tensile properties of the open cell 6063 aluminum alloy foam of 10~30 PPI were measured before and after heat treatment. Densities of test specimens were between 0.14 and 0.29 g/cm^3. Tensile strength of the 6063 aluminum foam after heat treatment showed little change. C values were in the range of 0.41~0.87 for as cast foams and 0.11~0.27 for T6 heat treated foams in the eq. of $\sigma^*_{pl}/\sigma_{ys} = C(\rho/\rho_s)^{1.5}$, and increased with increase in the cell size.

Key words : Plate attached open cell foam, Tensile property, 6063 aluminum.

(Received February 10, 2007 ; Accepted March 20, 2007)

1. 서 론

발포금속은 경량구조재, 소음재, 댐퍼, 에너지 흡수재, 휠터, 전극재, 열교환기 등 그 용도가 매우 다양하다[1]. 특히 개포형 발포금속은 상기한 용도에서 우수한 성능을 나타내고 있으나, 실제품에 적용하기 위해서는 다른 부품과의 체결성이 확보되어야 한다. 개포형 발포금속만으로는 기공율이 높아서 체결이 곤란하며, 또한 유체가 흐르는 곳에 사용하기 어렵다.

따라서 개포형 발포금속에 판 또는 파이프를 부착함으로써 이 문제를 해결할 수 있는데, 기존의 방법으로는 용접하여 붙이는 방법, 브레이징하여 붙이는 방법, 접착제를 사용하는 방법 등이 있다. 용접하여 붙이는 방법은 판과 개포형 발포금속의 일부를 녹여서 붙여야 하는데, 발포금속은 체적이 작으므로 부분적으로 녹이는 것이 어렵고, 또한 형상의 제약이 많아서 사실 상 불가능하다. 브레이징도 형상의 제약이 크고 또한 개포형 발포금속의 재질에 따라서 일부만 가능하며, 그 제조 원가가 매우 비싸다. 접착제를 쓰는 방법은 개포형 발포금속의 기공율이 높아서 접착되는 면적이 작고, 또한 고온에서 접합을 유지하기가 어렵다.

이를 해결하기 위해서는 판 또는 파이프가 붙은 개포형 발포금속의 성형 기술이 필요하다. 이에는 두가지 방안이 있는데, 첫 번째는 주조용 모형상태에서 판 또는 파이프와 개포형 발포 수지성형체를 목적하는 형태로 만들어서 용탕을 주입하여 만드는 방법과 두 번째로는 발포금속을 먼저 만든 후 이를 주조에서의 인서트처럼 주형에 미리 넣은 후 용탕을 주입하여 응고시키는 방법[2,3] 등이 있다. 판 또는 파이프가 부착된 개포형 발포금속은 판 또는 파이프에 구멍을 뚫거나, 나사를 내거나 하여 이웃 부품과의 체결을 용이하게 할 수 있다. 한편 개포형 발포금속은 인장시험 시 물림부를 잡게 되면 셀이 찌그러지기 때문에 그 자체만으로는 인장시험이 불가능하다. 즉 인장시험 시에는 시편을 잡기 위한 부분이 필요하므로 이 부분의 변형이 발생하지 않게 하는 방안이 필요하다. 이를 위해서는 알루미늄 판을 접착제로 발포금속에 붙이거나[4], 인장시험편 형태 전체를 발포체로 제작한 후 인장시편이 물리는 부위에 에폭시수지를 채워 넣어서 변형이 가지 않도록 하는 방법[5]도 있으나, 본 연구에서는 인장시편을 발포금속과 동일한 재료로 주조에 의하여 제조하는 방법을 개발하여 인장시편을 제작한 후 인장 시험을 하여 그 특성을 알아보고자 하였다.

2. 실험방법

2.1 판부착 발포알루미늄의 제조

판이 부착된 발포알루미늄은 주조법을 이용하여 두가지 방법으로 제작하였다. 첫 번째 방법에서는 10, 20, 30 PPI(Pores Per Inch)인 폴리우레탄 폼을 모형재로 사용하였는데, 폴리우레탄 폼은 목적하는 크기(100 × 100 × 40 mm)로 열선커터를 이

†E-mail : simha@kut.ac.kr

용하여 절단한 후 여기에 스티로폼 판을 접착제로 부착하여 목적하는 형상으로 모형을 제작하였다. 주형으로는 주형용 석고를 사용하였고, 이 주형을 만든 후 상온에서 일정시간 건조시키고, 목적하는 온도로 유지된 소성로에 넣어 일정시간 가열하여 내부의 폴리우레탄 폼을 전부 태워서 용탕이 들어갈 공간을 확보한후, 전기저항로에서 용해한 6063 알루미늄합금 용탕을 주입하여 판부착 발포알루미늄을 일체형으로 제작하였다, 냉각 후 톱으로 목적하는 크기로 Fig. 1과 같이 절단하여 인장시편을 만들었다.

두 번째 방법에서는 발포금속을 먼저 만들고 목적하는 크기(35 × 35 × 40 mm)로 절단한 다음 주조에서의 인서트방법처럼 이를 주형에 미리 넣은 후 발포금속과 동일한 재질의 용탕을 주입하여 판을 부착시키는 방법으로 인장시편을 제작하였다(Fig. 2)

2.2 인장시험

Fig. 1과 Fig. 2의 형상의 인장시편을 밀도와 PPI에 따라 분류하고, 주방 상태 또는 열처리(T6)를 하여 인장시험을 하였는데, 시험속도는 2 mm/min으로 하였다.

일체형주조법으로 판이 부착된 발포금속을 만들면 공정이 한 번에 끝나는 장점이 있으나, 석고주형을 사용하므로 냉각이 느려져서 판의 강도가 떨어지고, 특히 판과 발포금속과의 접합부위의 강도가 충분하지 않은 단점이 있다. 일체형으로 만든 Fig. 1 형상의 인장시험편은 인장시험 시 중간의 단면수축부가 아니고 판과의 접합부위에서 파단이 일어나는 경우가 많아서 데이터의 흩어짐이 심하였다. 반면 인서트방법으로 만든 인장시험편은 인장시험 시에 발포금속과 판의 접합 부위에서 먼저 파단이 일어나는 경우는 거의 나타나지 않았고 대부분 시편의 중간부위에서 파단이 일어났으므로, Fig. 2 형상의 시험편으로 인장시험 데이터를 얻었다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 인장 거동

Fig. 3은 인장시험 시 나타나는 응력-변위 곡선의 전형적인 예를 인장시편의 파단양상과 같이 나타낸 것이다. 그림에서 ①-② 구간은 탄성구간이고, ②-③구간은 소성변형이 시작되는 항복구

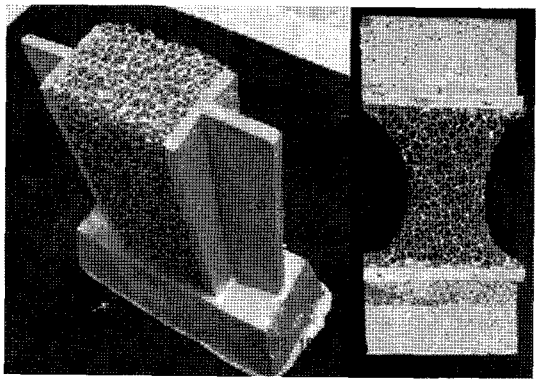

Fig. 1. Plate attached aluminum foam(one piece) and tensile specimen obtained by sawing it.

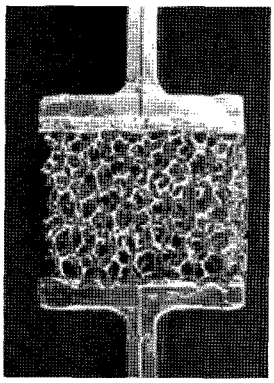

Fig. 2. Attachment of chuck plate for tensile test by insert casting.

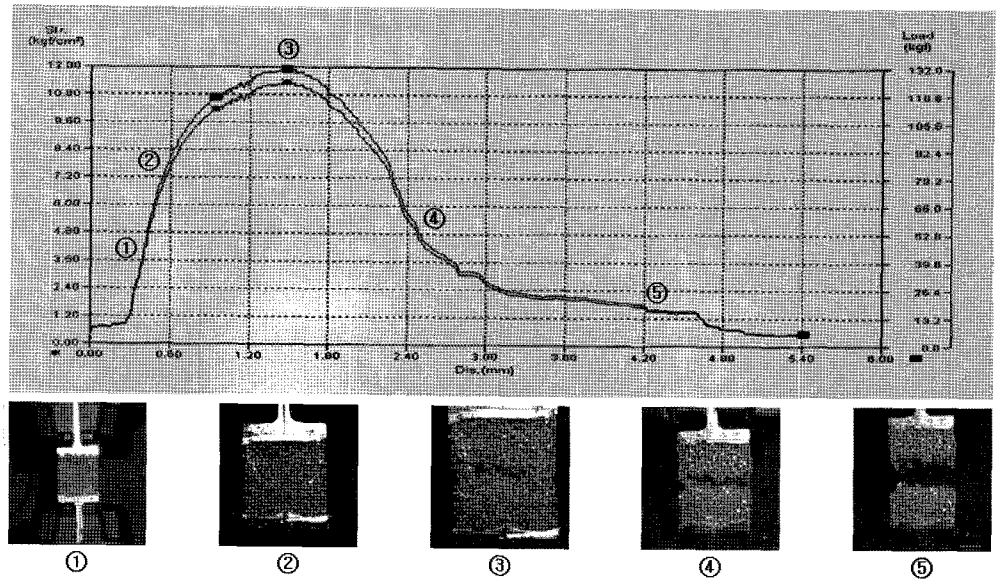

Fig. 3. Typical tensile stress-displacement curve.

간이며, ③은 최대강도를 나타내는 지점으로서 이지점을 지나면서 파단이 시작된다. ③-④구간은 파단이 급격하게 전파되면서 강도가 급속도로 감소하는 구간이며, ④-⑤구간에서 시편이 분리가 일어난다.

Fig. 4는 셀의 크기에 따른 응력-변위 곡선의 일례를 나타낸 것이다. 그림에서 보면 탄성 및 피크점 이전 구간에서는 셀크기에 관계없이 비슷한 양상을 나타내고 있으나, 피크점을 지나면서 강도가 떨어지고 있는데, 셀의 크기에 따라서 그 정도가 다르게 나타나고 있다. 셀의 크기가 크면 감소가 완만하고, 작으면 급격한 감소를 나타내고 있다. 셀벽의 평균 두께는 10 PPI의 경우 0.8 mm, 20 PPI의 경우 0.4 mm, 30 PPI의 경우 0.2 mm이었는데, 두께가 두꺼운 10 PPI 시편에서는 기울기가 완만하며, 두께가 얇은 30 PPI시편에서는 기울기가 급한 것을 알 수 있다. 이는 셀벽 하나의 연신이 연속적으로 다른 셀벽으로 전파되기 때문으로 보인다. 따라서 피크점을 지나 파단이 시작된 후의 변위를 보면 10 PPI시편이 가장 길며, 30 PPI시편이 가장 짧게 나타났다. Table 1을 보면 같은 밀도에서는 인장강도와 연신율은 셀의 크기가 클수록 (PPI가 작을수록) 증가함을 알 수 있는데, 이는 셀의 개수보다는 셀벽의 두께가 강도와 연신율에 많은 영향을 미치기 때문으로 보인다.

통상적으로 벌크재료에서는 연신율이 높게 되면 강도가 낮아지는 현상이 일반적인데, 개포형 발포알루미늄에서는 연신율과 강도가 동시에 증가하는 결과가 얻어졌다. 이 점에 주목하여 범용구조해석 프로그램인 MSC-MARC를 이용하여 간단한 모델에 대하여 인장하중을 가했을 때의 변화를 계산하였는데, 계산에 사용한 물성치는 Table 2와 같고, 셀의 구조와 형상은 2차원 그리고 육각형으로 단순화하였으며, node수는 각각 1330, 2190 개이었다. 같은 밀도에서 셀의 수를 7개(셀벽의 두께 1 mm)와 14개(셀벽의 두께 0.5 mm)로 달리하여 동일한 하중, 속도로 해가 수렴될 때까지 인장한 결과, 셀의 두께가 1 mm인 경우 17.74 mm가 연신되었고, 셀의 두께가 0.5 mm인 경우 8.37 mm가 연신되었는데, 이는 셀벽의 두께가 두꺼울수록 연신율이 증가한 실험결과와 일치한다고 볼 수 있다. 계산 결과인 Fig. 5를 보면 셀벽이 두꺼운 Fig. 5(a)가 더 많이 늘어난 것을 알 수 있다.

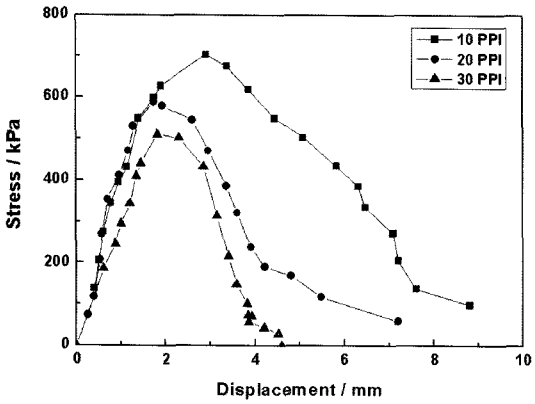

Fig. 4. Stress-displacement curve of foams with the cell size.

Table 1. Tensile properties with the density and cell size(as-cast).

	Density, $\times 10^2$ kg/m^3	Tensile strength, MPa	Elongation, %
10 PPI	1.7	0.9	20.9
	2.0	1.2	19.6
20 PPI	1.7	0.8	14.3
	2.0	1.1	16.3
30 PPI	1.7	0.6	14.1
	2.0	0.8	12.3

Table 2. Physical data used in the simulation.

Young's modulus	68.95 GPa
Poisson ratio	0.33
Density	2.63×10^2 kg/m^3

3.2 인장강도

Fig. 6은 개포형 발포 알루미늄의 주방 상태 시편의 밀도에 따른 인장강도를 나타내고 있다. 그림에서 보면 알 수 있듯이 밀도가 증가함에 따라 강도는 0.5~1.1 MPa까지 증가하고 있으며,

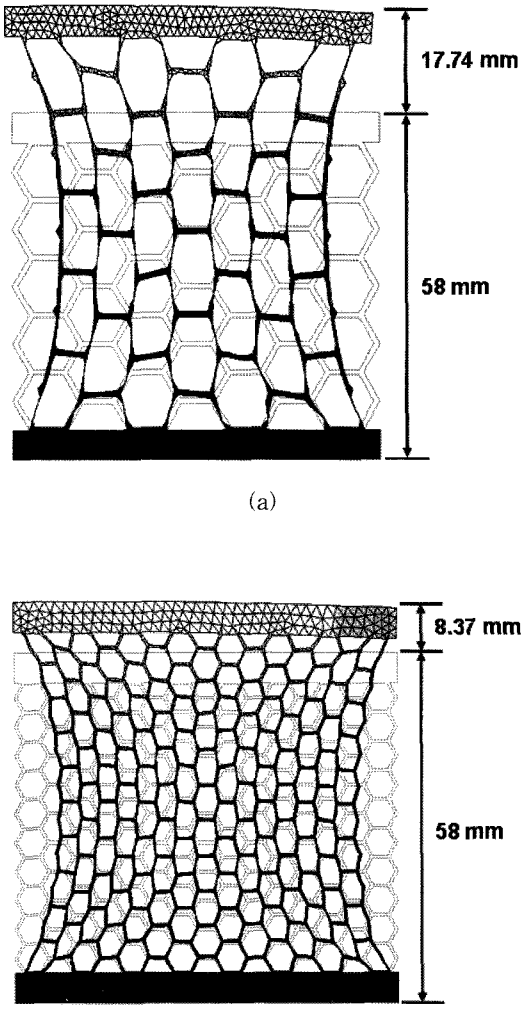

Fig. 5. Result of tension simulation with the cell wall thickness (a) 1 mm (b) 0.5 mm.

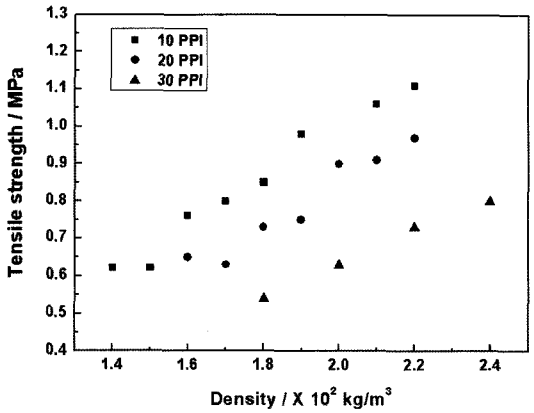

Fig. 6. Tensile strength plotted against density for as cast 6063 aluminum foams.

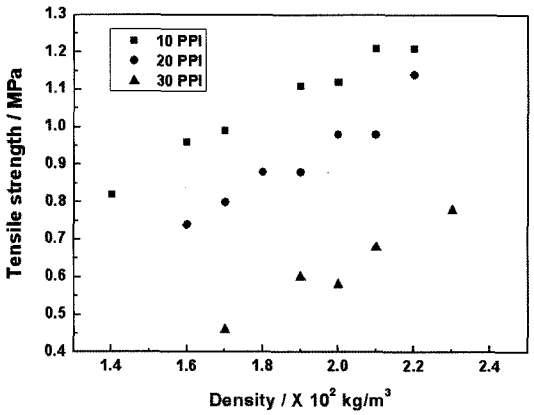

Fig. 7. Tensile strength plotted against density for T6 treated 6063 aluminum foams.

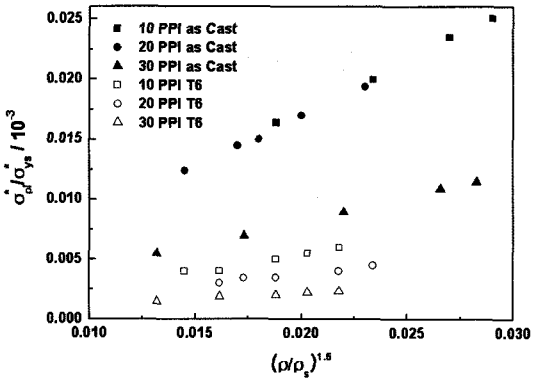

Fig. 8. Relative tensile strength plotted against relative density for as cast and T6 treated 6063 aluminum foams.

같은 밀도에서는 셀의 크기가 클수록 강도가 증가하고 있다.

Fig. 7은 개포형 발포 알루미늄의 열처리(T6) 시편의 밀도에 따른 인장강도를 나타내고 있다. 열처리한 시편의 인장강도는 0.4~1.2 MPa의 범위에 있는데, 열처리를 하여도 주방상태와 비교하여 강도의 증가는 현저하지 않으며, 주방상태와 마찬가지로 밀도가 증가함에 따라 강도는 증가하고, 같은 밀도에서는 셀의 크기가 클수록 강도가 증가하고 있다.

Table 3. C values with the cell size in the tensile test ($\sigma^*_{pl}/\sigma_{ys}=C(\rho/\rho_s)^{1.5}$).

Cell size	As cast	T6
10 PPI	0.87	0.27
20 PPI	0.85	0.19
30 PPI	0.41	0.11

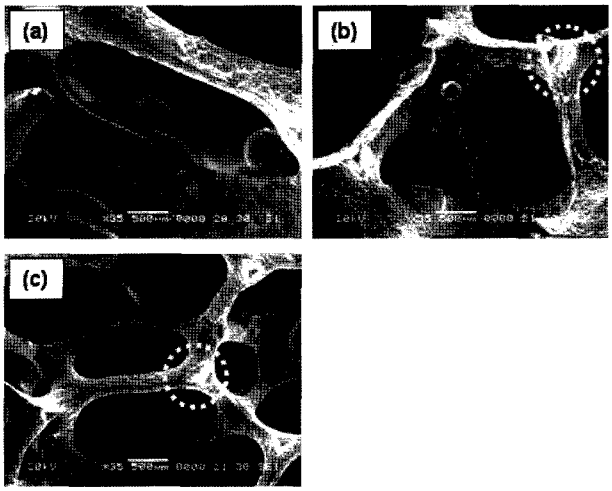

Fig. 9. SEM micrographs of open cell aluminium foams after tension, showing struts that has necked. The cell size are (a) 10 PPI, (b) 20 PPI, (c) 30 PPI.

Fig. 8은 개포형 발포 알루미늄의 벌크재와 발포재의 인장강도와 상대밀도를 나타낸 것이다. 발포금속의 강도시험에서 벌크재와 발포재의 강도와 밀도 사이의 관계식[6]은 $\sigma^*_{pl}/\sigma_{ys}=C(\rho/\rho_s)^{1.5}$ (여기서 C는 상수, σ^*_{pl}는 발포재의 소성 붕괴 강도, σ_{ys}는 벌크재의 항복강도, ρ는 발포재의 밀도, ρ_s는 벌크재의밀도)인데, 그래프에서 구한 C값(Table 3)은 주방상태의 경우는 10, 20, 30 PPI 시편이 각각 0.87, 0.85, 0.41이었고, 열처리한 경우는 10, 20, 30 PPI 시편이 각각 0.27, 0.19, 0.11이었다. 셀의 크기가 클수록(PPI가 작을수록) C값은 크고, 열처리 후보다는 주방상태가 더 크게 나타났다. 본 연구에서 구한 C값은 타 연구자[6]들의 발표한 범위 내에 있었고, 압축시험에서와 마찬가지로[7] 주방 상태가 열처리한 경우보다 C값이 큰 이유는 발포 알루미늄의 경우 열처리한 시편의 강도가 주방 상태에 비해서 월등하게 높아지지 않기 때문으로 보인다.

Fig. 9는 인장시험 후의 파단면을 나타낸 것으로, 셀이 상하로 연결된 스트럿 부위(그림에서 흰원으로 표시)에서 연신 후 파단이 일어난 것을 보여주고 있는데, 마디의 곳곳에서 미세한 균열이 관찰되고 있어서 스트럿부위의 상하로의 파단이 진행되면서 옆 방향으로도 균열이 전파되고 있음을 알 수 있다.

4. 결　론

1) 개포형 발포알루미늄의 인장 시 거동은 항복점을 지나 피크점에서 셀의 파단이 시작되며, 그 후 다른 셀로 균열이 전파되면서 강도가 급격히 감소하였다.

2) 개포형 발포 알루미늄의 인장강도는 주방상태 및 열처리 시편 모두 밀도가 증가함에 따라 증가하였는데, 같은 밀도에서는 셀크기가 클수록(PPI가 낮을수록) 높은 인장강도를 나타내었으며, 열처리 시편 또한 같은 결과를 나타내었는데, 이는 셀 벽의 두께의 영향이 큰 것으로 보인다.

3) 벌크재와 발포재의 강도와 밀도에 관한 식 $\sigma^*_{pl}/\sigma_{ys} = C(\rho/\rho_s)^{1.5}$ 에서 C값은 주방상태의 경우는 0.41~0.87, 열처리한 경우는 0.11~0.27의 범위에 있는데, PPI가 낮을수록 크고, 열처리 후보다는 주방상태가 더 크게 나타났다.

참 고 문 헌

[1] Ashby et al : Metal Foams, Butterworth & Heinemann(2000).

[2] Ingo Wagner, Christoph Hintz and Peter R. Sahm : Metal Matrix Composites and Metallic Foams EUROMAT-Volume 5, "Precision Cast Near Net Shape Components Based on Cellular Metal Materials", (2000) 41-45

[3] Richard Kretz and Helmut Kaufmann : Metal Matrix Composites and Metallic Foams EUROMAT-Volume 5, "Fabrication of Squeeze Castings with Permanent Aluminum Foam Cores", (2000) 63-67

[4] E. W. Andrews et al: Mechanical Sciences, "Size effects in ductile cellular solids. Part II : experimental results", 43(2001) 701-713

[5] E. W. Andrews and L. J. Gibson: Scripta Materalia, "The Influence of Crack-Like Defects on the Tensile Strength of an Open Cell Aluminum Foam" 44(2001) 1005-1010

[6] L. J. Gibson: Annu. Rev. Mater. Sci., "Mechanical Behavior of Metallic Foams", 30(2000) 191-227

[7] S. D. Bu, B. H. Kang and K. Y. Kim: J. of KFS, "Compressive Properties of Open Cell 6063 Aluminium Foams", 27(2007) 36-41