

논문

개포형 6063 발포 알루미늄의 압축특성

부성덕* · 강복현 · 김기영†

*(주)잘만테크

한국기술교육대학교 신소재공학과

Compressive Properties of Open Cell 6063 Aluminium Foam

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

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

Abstract

Compressive properties of the open cell 6063 aluminum alloy foams made by the plaster molding process were investigated before and after heat treatment. Loading process was controlled at a displacement rate of 2 mm/min. Compressive strength of 10 PPI foam was the largest of the same density foams. Increase in strength after heat treatment for the bulk material was remarkable, however was not for the 6063 aluminum foam. C values were in the range of 0.39~0.53 for as cast foams and 0.13~0.16 for T6 heat treated foams in the equation of $\sigma_{pl}^*/\sigma_{ys} = C(\rho/\rho_s)^{1.5}$ and increased with cell size.

Key words : Open cell foam, Compressive property, 6063 aluminum.

(Received January 3, 2007 ; Accepted January 20, 2007)

1. 서 론

최근의 구조용 재료는 경량, 고강도화를 목표로 매우 다양한 개발이 진행되고 있다. 강재의 경우는 고강도화를 통하여 두께를 얇게함으로써 경량화를 꾀하고 있고, 한편으로는 중금속에서 경금속으로 재질 교체를 통한 경량화를 시도하고 있다.

발포금속도 그 중 하나로 저밀도, 고비강성, 우수한 충격흡수능력, 유체투과성, 음향흡수능과 낮은 열전도도 및 뛰어난 전기절연성 등의 특성 때문에 새로운 공업재료로 부상하여 세계 각국에서 활발하게 연구개발 및 실용화가 진행되고 있으며, 경량구조재, 소음재, 댐퍼, 에너지 흡수재, 필터, 전극재, 열교환기 등으로 그 용도가 확대되고 있는 중이다[1].

발포금속은 형태상으로는 유체 통과가 가능한 개포형(open cell)과 유체 통과가 불가능한 폐포형(closed cell)의 두 가지로 나누어지고, 재질은 Fe, Ni, Cu, Al, Mg, Ti, 비정질 합금[2] 등 다양하며, 각각의 용도에 맞는 제조 방법이 이용되고 있는데, 이 중 Al에 관한 연구개발이 가장 많이 이루어지고 있다.

발포체의 강도에 관한 연구는 순 Al[5], Al-12.0%Si 합금[5], 6101 합금[6]의 경우에 대한 보고가 대부분인데, 본 연구에서는 구조용 재료로 널리 쓰이고 있는 6063 알루미늄 합금을 정밀주조법을 이용하여 직접 개포형 발포체를 제조한 후 밀도, 셀크기(PPI), 열처리 유무에 따른 압축 특성을 조사하였다.

2. 실험방법

2.1 발포금속제조

단위면적당 기공의 수가 10~30 PPI인 폴리우레탄 폼을 발포 금속 제조를 위한 모형재로 사용하였는데, 폴리우레탄 폼을 원하는 크기(100×100×40 mm)로 열선커터를 이용하여 절단하였다. 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 확보하고, 전기저항로에서 용해한 6063 알루미늄합금 용탕을 주입하였다. 용도가 완료되면 일정시간 방치하였다가 충격을 가하여 외부의 석고를 먼저 털어내고, 워터제트로 내부 셀 사이의 석고를 제거하였다.

2.2 압축시험

압축시험에서는 제작한 개포형 발포알루미늄을 밀도와 PPI에 따라 분류하고, 35×35×40 mm의 크기로 절단한 후, 주방 상태 또는 열처리(T6)를 하여 압축시험을 하였는데, 시험속도는 2 mm/min으로 하였다. 발포금속의 특성상 압축이 가해져도 파단되지 않기 때문에 처음 높이의 50% 지점까지 압축한 후 압축강도를 구하였다. Fig. 1은 PPI별 압축시편 및 압축 후의 시편의 모양이다.

†E-mail : simha@kut.ac.kr

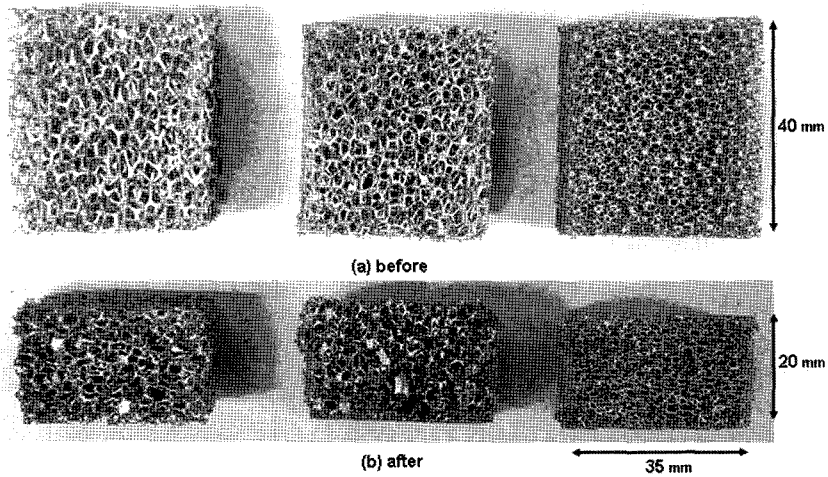


Fig. 1. Specimens before and after compressive test.

발포금속의 강도시험에서는 시편의 한 변의 길이(L)가 발포 금속 셀 한 개의 크기(d)의 7배 이상이 되어야 신뢰할만한 결과가 얻어진다[3]. 이보다 L/d 비가 작으면 단부효과(edge effect) 때문에 모서리의 영향을 무시할 수 없기 때문이다. 본 연구의 발포알루미늄의 셀눈의 평균크기는 10 PPI 시편이 3~4, 20 PPI 시편이 2~3, 30 PPI 시편이 1~2 mm 정도이었다. 그리고 셀벽의 평균 두께는 10 PPI의 경우 0.8, 20 PPI의 경우 0.4, 30 PPI의 경우 0.2 mm이었다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 밀도

제조한 발포금속의 밀도는 셀의 크기 및 셀벽의 두께에 따라서 변화하게 된다. 본 연구에서는 0.14~0.29 g/cm³의 범위에 있었는데, 6063합금의 벌크재의 밀도인 2.63 g/cm³과 비교하면 약 1/19~1/9 정도이다.

동일한 크기의 시편을 비교하여 보면, 셀이 작은(PPI가 큰) 시편의 밀도가 높게 나타났다. 10 PPI 시편의 밀도는 0.14~0.24, 20 PPI 시편의 밀도는 0.16~0.26, 30 PPI 시편의 밀도는 0.17~0.29 g/cm³의 범위에 있었는데, Fig. 2는 제조한 발포 알루미늄의 밀도 측정 결과를 나타낸다.

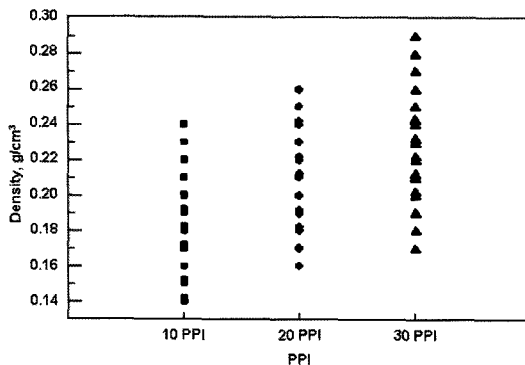
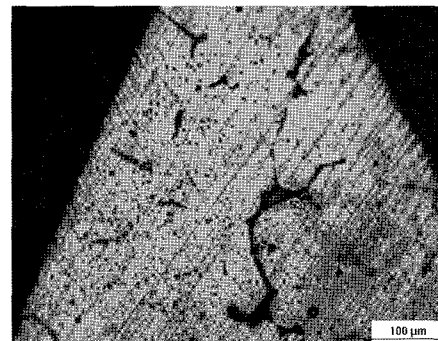
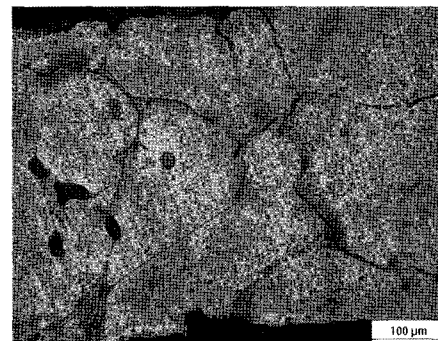


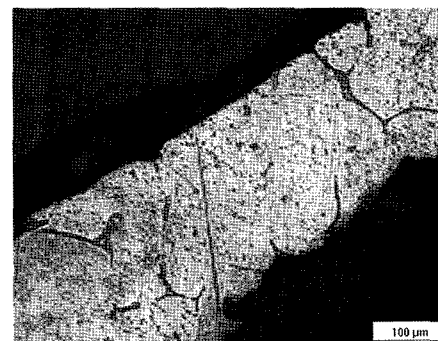
Fig. 2. Distribution of the density of open cell aluminum foams with cell size.



(a) 10 PPI



(b) 20 PPI



(c) 30 PPI

Fig. 3. Micrographs of open cell aluminum foams with various cell sizes : (a) 10 PPI, (b) 20 PPI, (c) 30 PPI.

3.2 미세조직

Fig. 3은 개포형 발포 알루미늄의 미세조직이다. 결정립의 크기가 상당히 조대함을 알 수 있는데, 이는 주입 시 주형의 온도가 용점부근으로 높았고, 주형재료 또한 열전도도가 나쁜 석고를 사용하여 냉각속도가 느려져서 조직이 크게 성장하였기 때문이다. 10 PPI 시편의 경우는 300, 20 PPI 시편의 경우는 200, 30 PPI 시편의 경우는 150 μm 정도이었다.

3.3 압축강도

Fig. 4는 개포형 발포 알루미늄의 전형적인 압축강도-변위곡선이다. 통상적으로 벌크 재료의 경우는 압축이 진행되면 강도가 증가하면서 기울기가 완만해지다가 파괴에 이르는 경우가 많지만, 개포형 발포금속의 경우는 항복점을 지나서 그래프에 약간의 굴곡이 나타나면서 기울기가 완만해진 후, 후반부에 강도가 다시 급격하게 상승한다. 즉 압축 초기에는 강도가 직선적으로 증가하다가 어느 한계에 도달하면 평행부가 나타나는데, 평행부에서는 압축하중이 가해지면 하중에 평행한 셀벽 중 한 개가 하중을 지탱하다가 항복하므로 강도가 감소하고, 다시 그 다음 셀벽이 지탱하므로 강도가 증가하는데, 따라서 압축시편의 셀벽이 전부 항복하여 압착될 때까지 압축강도가 물결 양상을 나타내고서 그 후 강도는 급격히 증가하게 된다. 즉 탄성한계까지 하중이 증가한 후 일정한 하중에서 변형량이 증가해 가는 양상을 나타낸다.

Fig. 5는 압축 후의 시편의 주사전자현미경 조직사진으로 셀 부분에서 크랙이 많이 발생함을 알 수 있다. 부분적으로 셀벽에서 미세한 크랙이 관찰되며, 좌굴(buckling)현상도 나타나고 있다. 압축 초기에는 셀 사이의 공간이 압축되나, 이 공간이 압착되면 셀 자체에 하중이 전달되면서 크랙이 발생하게 된다.

즉 압축하중이 가해지면 하중에 평행한 셀 벽이 하중을 지탱하다가 항복하고, 다시 그 다음 셀벽이 지탱하면서 순차적으로 압착되게 되면서 최후의 셀이 압착된 후에는 강도는 급격히 증가하게 되는데 이때에는 압착된 셀 자체에 하중이 전달되면서 균열이 발생하는 것으로 보인다. 이 과정은 응력계산 소프트웨어를 이용한 계산에서 확인할 수 있었는데, 계산에 관한 세부 사항은 다음과 같다. 셀은 실제로 3차원으로 복잡한 형상이나, 이를 2차원 6각형 형상으로 단순화하였다. 평면 변형량을 가정하였고, 일정한 속도로 압축하였는데, 계산에 사용한 물성치는 Table 1과 같다. 계산은 범용구조해석 코드인 MARC를 사용하였다. Fig. 6은 시간에 따른 변형 양상을 나타내는데, 그림에서 상기한 셀의 변형 및 압착과정을 확인할 수 있다.

Fig. 7은 10 PPI 시편의 경우 L/d(L: 시편의 크기, d: 셀 한 개의 직경)비에 따른 압축강도의 변화를 나타낸 것이다. 주방 상태에서는 이 비가 7이상에는 큰 변화가 없어 보이나, 열처리한 상태에서는 이 비가 증가하면 압축강도가 증가하고 있는데, 이는 열처리에 의하여 셀벽의 강도가 증가하고, 시편의 부피가 증가하여 셀 수가 많아지므로 전체 하중이 증가함에 기인한 것으로 보인다.

Fig. 8은 주방상태 시편의 밀도에 따른 압축강도를 나타낸 것으로 10 PPI시편은 0.5~1.7, 20 PPI시편은 0.8~1.5, 30 PPI시편은 0.8~1.3 MPa의 범위에 있는데 밀도가 증가함에 따라 강도는 증가하고 있으며, 동일한 밀도인 경우 셀의 크기가 큰

Table 1. Physical data used in the simulation.

Young's modulus	68.95 Gpa
Poisson ratio	0.33
Density	2.63 g/cm ³

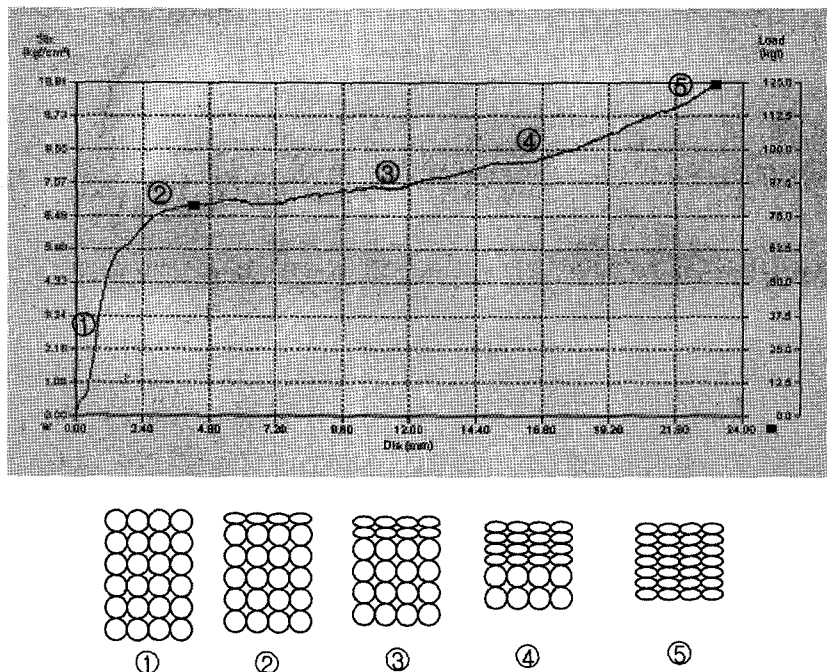


Fig. 4. Typical compressive stress-displacement curve.

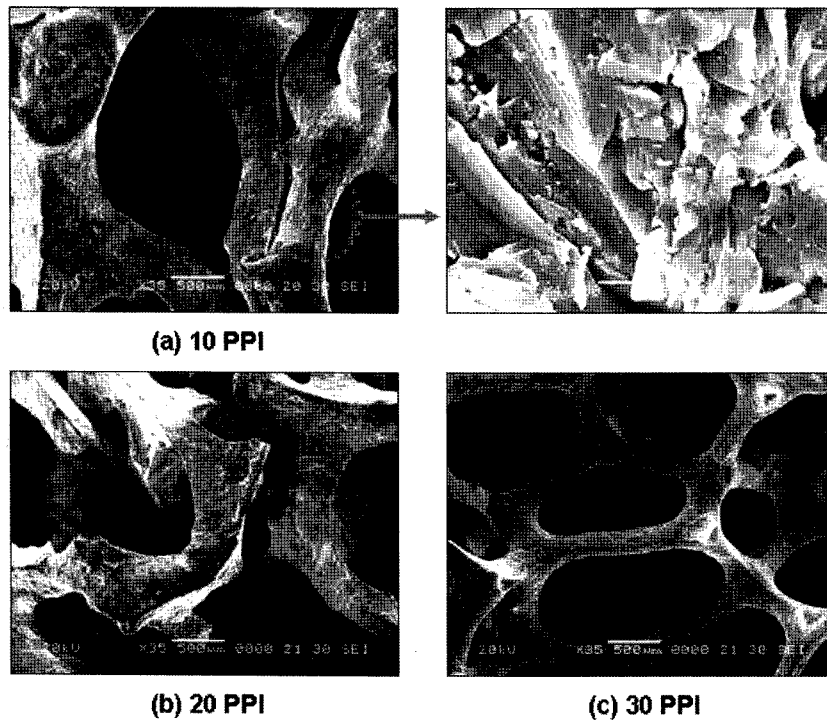


Fig. 5. SEM micrographs of open cell aluminium foams with the cell size after compressive test.

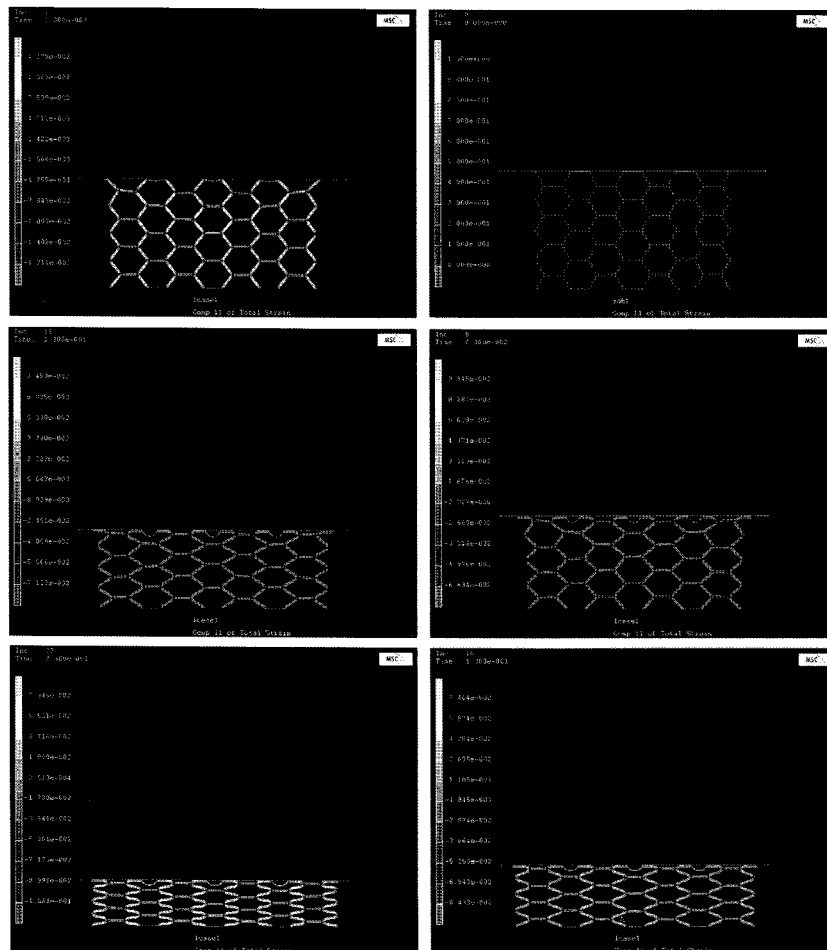


Fig. 6. Simulation on the collapse of cell during compressive test.

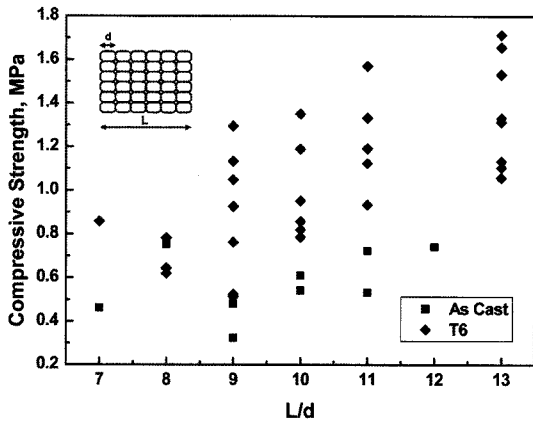


Fig. 7. Compressive strength of 10 PPI foams plotted against normalized size, L/d.

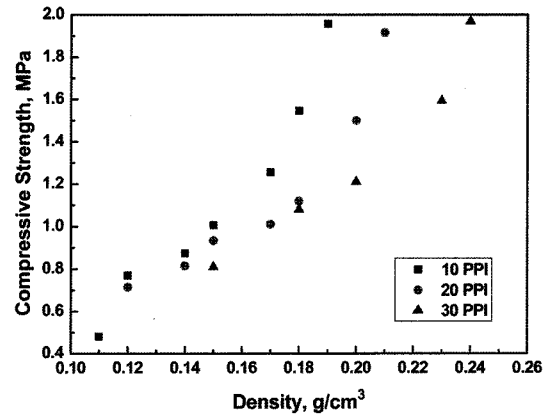


Fig. 9. Compressive strength of T6 treated 6063 aluminium foams plotted against density.

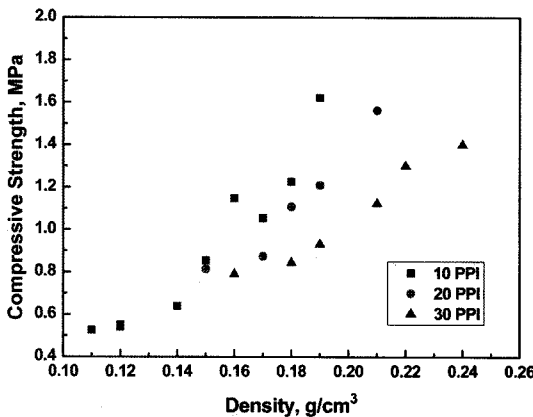


Fig. 8. Compressive strength of as cast 6063 aluminium foams plotted against density.

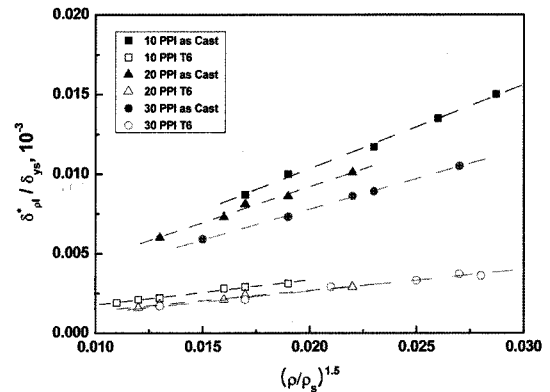


Fig. 10. Compressive strength of 6063 aluminium foams normalized by the yield strength of the solid aluminium, $\sigma_{pl}^*/\sigma_{ys}$ plotted against relative density, $(\rho/\rho_s)^{1.5}$.

10 PPI 시편의 압축강도가 높게 나타났다.

Fig. 9는 T6 열처리 후의 밀도에 따른 압축강도를 나타낸 것으로 10 PPI 시편은 0.9~2.1, 20 PPI 시편은 0.8~1.2, 30 PPI 시편은 0.8~1.9 MPa의 범위에 있는데 주방상태와 마찬가지로 밀도가 증가함에 따라 강도는 증가하고 있으며, 동일한 밀도인 경우 셀의 크기가 큰 10 PPI 시편의 압축강도가 역시 높게 나타났다.

6063합금 벌크재의 경우는 주방상태에서 항복강도는 48 MPa, 압축강도가 90 MPa정도이고, 열처리 후는 항복강도는 214 MPa, 압축강도가 241 MPa정도로 열처리 후의 강도 증가가 현저하나, 발포금속의 경우는 열처리 후의 압축강도의 증가는 비교적 작은 편이었다.

발포금속의 강도시험에서 벌크재와 발포재의 강도와 밀도 사이에 다음의 관계식이 알려져 있다[4].

$$\sigma_{pl}^*/\sigma_{ys} = C(\rho/\rho_s)^{1.5}$$

여기서, C는 상수, σ_{pl}^* 는 발포재의 소성 붕괴 강도, σ_{ys} 는 벌크재의 항복강도, ρ 는 발포재의 밀도, ρ_s 는 벌크재의 밀도이다.

위식에서 발포재의 강도는 원소재인 벌크재의 강도와 밀접한 관계가 있고, 발포재의 밀도에 비례함을 알 수 있다. 6063 합

Table 2. C values with the cell size in the compressive test.

Cell size	As cast	T6
10 PPI	0.53	0.16
20 PPI	0.45	0.13
30 PPI	0.39	0.13

$$\sigma_{pl}^*/\sigma_{ys} = C(\rho/\rho_s)^{1.5}$$

금 발포체에 대한 실험데이터를 위 식에 넣어서 계산한 것이 Fig. 10이다. 그림을 보면 셀의 크기가 작은 것이 상대강도가 크고, 또한 주방상태의 시편이 열처리한 시편보다 상대강도가 큼을 알 수 있다. 앞식의 상수인 C값은 개포형 발포금속에 대한 발표 자료를 보면 0.3정도인데, 본 연구에서의 결과는 Table 2와 같다. 표를 보면 셀의 크기가 클수록(PPI가 작을수록) C값은 크게 나타나고 있으며, 주방과 열처리를 한 시편을 비교하면 열처리한 시편의 C값이 상대적으로 작는데, 이는 벌크재의 경우 T6열처리 후의 강도는 주방 상태와 비교하여 통상적으로 대략 400% 정도 강도가 상승하나, 발포재의 경우는 T6 후의 강도가 주방 상태와 비교하여 강도 상승이 대략적으로 30~50%이기 때문에 C값이 작아진 것으로 보인다.

4. 결 론

1) 본 연구의 발포알루미늄의 밀도는 $0.14\sim 0.29\text{ g/cm}^3$ 의 범위에 있었는데, 6063합금의 벌크재의 밀도인 2.63 g/cm^3 와 비교하면 약 1/19~1/9 정도였다.

2) 주방상태와 열처리 후의 압축강도는 동일한 밀도인 경우 셀의 크기가 큰 10 PPI 시편의 압축강도가 높게 나타났고, 벌크재의 경우는 열처리 후의 강도 증가가 4배 이상이나, 발포금속의 경우는 열처리 후의 압축강도의 증가는 현저하지 않았다.

3) 압축시험시 $\sigma_{pi}^*/\sigma_{ys} = C(\rho/\rho_s)^{1.5}$ 의 식에서 C값은 주방상태의 경우 셀의 크기에 따라 0.39~0.53, 그리고 열처리한 경우 0.13~0.16이었으며 셀이 클수록 증가하였다.

참고문헌

- [1] Ashby et al.: Metal Foams, Butterworth & Heinemann (2000).
- [2] A. H. Brothers and D.C. Dunand: Scripta Materialia, "Amorphous metal foams", 54 (2006) 513-520
- [3] E. W. Andrews et al: Mechanical Sciences, "Size effects in ductile cellular solids. Part II: experimental results", 43 (2001) 701-713
- [4] L. J. Gibson: Annu. Rev. Mater. Sci., "Mechanical Behavior of Metallic Foams", 30 (2000) 191-227
- [5] C. San Marchi et al.: Acta materialia, "Uniaxial deformation of open-cell aluminum foam: the role of internal damage", 52 (2004) 2895-2902
- [6] J. Zhou et al.: Mechanics of materials, "Mechanisms and mechanics of compressive deformation in open-cell Al foams", 36 (2004) 781-797