
 논문

Foaming 온도에 따른 606X계 발포 알루미늄의 제조 특성

송영환 · 박수한 · 정민재 * · 강광중 * · 허보영 †

경상대학교 공학연구원, *경상대학교 아이큐브 사업단

Effect of Foaming Temperature on Cell Structure of 606X Series Aluminum Alloy Metallic Foams

Yeong-Hwan Song, Soo-Han Park, Min-Jae Jeong*, Kwang-Jung Kang*, and Bo-Young Hur†

ERI center, School of materials science and engineering, Gyeongsang National University, Jinju, 660-701 Korea

*i-cube center, School of materials science and engineering, Gyeongsang National University, Jinju, 660-701 Korea

Abstract

Metal foam is one of the most interesting materials with various multi-functional properties such as light weight, energy absorption, high stiffness and damping capability. Among them, energy absorption property has been interests in the field of automobiles for passenger protection. Nowadays, researches about pore size and porosity control of the foam are increased to correspond them. However, though energy absorption properties are improved, these results are not cost-effective process. In present research, however, as a part of improving the energy absorption property of metallic foams, 606X aluminum alloy was used for cell wall material which has higher strength than pure aluminum. And its morphological features are characterized. As a results, porosity and pore size are uniformity distribution with increasing foaming temperature in the case of 6061 alloy foams. 6063 alloy foam specimens have opposite tendency because of the influence of alloying element and viscosity of the molten melt.

Key words : Aluminum alloy foam, Porosity, Foaming temperature, Direct casting method.

(Received January 24, 2008 ; Accepted March 20, 2008)

1. 서 론

발포금속이란 기능성 금속재료 분야에서 신소재로 경량 고강도, 에너지 흡수능 및 단열, 방열특성 등을 가지는 고기능성, 고부가가치 재료로서 건축자재, 수송기계 부품 등 다방면에 적용 가능한 첨단소재이며, 경량으로 유기 고분자 재료로 제조된 다공질의 재질과 비교하여 고온에서 사용이 가능하며 재활용이 가능한 특성을 가지고 있기 때문에 환경문제를 줄일 수 있는 장점이 있다.

이러한 발포금속은 크게 기공의 형상에 따라 개기공 발포금속과 폐기공 발포금속으로 나누어지며, 제조방법에 따라서는 주조법, 분말법, 입자분해법, sputtering 법의 네 종류로 나눌 수 있다. 그 중 본 연구에 사용된 폐기공 발포금속의 경우 그 제조방법은 금속 Ca를 이용하여 용탕의 점성을 증가시켜 기공을 안정화시킨 후 TiH₂를 이용하여 기공을 생성시키는 직접 발포법을 사용하였다[1~3].

현재 발포금속에 대한 연구는 주로 산업기계, 자동차, 철도, 항공기 등의 소음과 진동을 감소시키고 안전성을 확보하기 위한 목적으로 이루어지고 있으며, 그 추세를 따라 최근 발포금속의 우수한 충격 에너지 흡수 특성에 관한 연구와 응용 또한

활발히 진행되고 있다[4~6]. 그 중에서도 압출재에 발포금속을 주입하여 압출재와 발포금속 각각의 충격에너지 흡수 특성으로부터 더 높은 에너지 흡수량을 얻고자 하는 시도가 이루어지고 있다[7,8]. 제조 방법의 관점에서 연구결과를 살펴보면 롤포밍으로 제조한 강관이나 알루미늄 압출재의 내부에 발포금속을 충전시키는 방법의 경우 분말법을 이용하여 이미 상용화된 사례도 있지만[12] 이 경우 고가의 분말을 사용함으로써, 생산 단가의 문제로 특수한 분야에만 적용이 가능하다. 한편, 주조법을 이용하여 기존의 순알루미늄 발포금속으로 압출재 내부에 주입할 경우 용탕의 냉각속도와 발포 유지속도의 불안정성으로 인하여 용탕을 제어하기 힘들 뿐만 아니라 대부분의 압출재가 현재 상용화된 순수 알루미늄 발포금속과 같은 재질이 아닌 6XXX계나 7XXX계 합금으로 제조되고 있기 때문에 발포금속을 압출재 내부에 곧바로 주입충진 하는데 많은 어려움을 겪고 있다. 따라서 본 연구에서는 이러한 문제점을 해결하기 위한 기초적 데이터를 확보하기 위하여 6061과 6063 알루미늄 합금을 이용하여 높은 기공율과 균일한 기공크기와 분포를 가지는 발포금속을 제조하기 위하여 발포실험을 수행하였으며, 그 결과를 서로 비교·분석 하였다.

†E-mail : hurby@gnu.ac.kr

Table 1. Chemical composition of 6061 and 6063 aluminum alloys ingots (wt%)

Element (wt%)	Mg	Si	Cu	Fe	Mn	Cr	Zn	Ti	Al
Al 6061	0.80~1.20	0.40~0.80	0.15~0.40	0.70	0.15	0.04~0.35	0.25	0.15	Bal.
Al 6063	0.45~0.90	0.20~0.60	0.10	0.35	0.10	0.10	0.10	0.10	Bal.

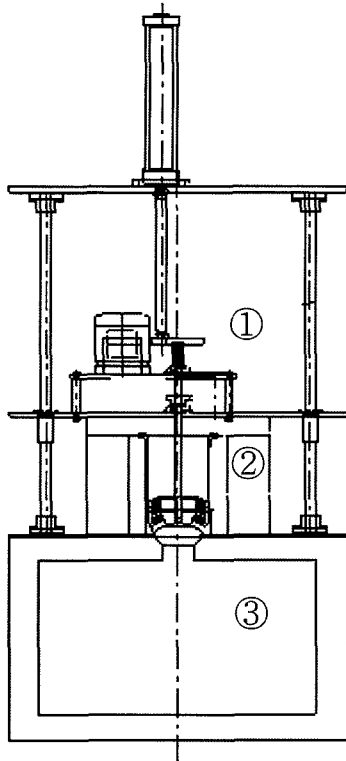


Fig. 1. Schematic diagram of apparatus for making metallic foams: (1) stirrer (2) mixing furnace, (3) holding furnace

2. 실험방법

본 연구에 사용된 606X계 알루미늄 합금은 Al-Mg-Si계 합금으로 조성은 Table 1과 같다. 발포금속의 제조는 전기로를 이용하여 미리 용해한 606X계 알루미늄 합금을 Fig. 1에서 보여주는 자체 제작된 발포금속 제조장치로 이송한 후, 본 장치를 이용하여 제조하였다. 장비는 용탕의 점증과 발포제의 교반을 위한 교반장치와 용융금속을 점증·교반하기 위한 교반로, 발포제가 첨가된 용탕을 안정적으로 기공을 생성하면서 성장·유지할 수 있는 온도로 유지시켜주는 유지로로 구성되어 있다.

발포금속의 제조공정은 용해, 점증, 발포, 유지, 냉각의 5단계로 이루어져 있다. 용해공정에서는 고주파로를 이용하여 606X계 알루미늄 합금을 용해시키고, 점증 공정에서는 점증제를 첨가한 후 교반 임펠러를 사용하여 회전수 약 600 rpm으로 교반하면서 점도를 증가시켰다. 발포알루미늄의 제조공정에서는 적절한 점도와 표면장력을 얻기 위해 주로 금속 Ca이 첨가되는데, 용탕표면에 생성된 산화물과 Ca첨가에 의해 생성되는 산화물이 교반에 의해 용탕내에 혼입, 분산되어 용탕의 점도를

증가시키는 매커니즘을 이용한 것이다[9]. 점증이 끝난 용탕에 발포제를 첨가하여 기공을 생성하게 된다. 이때 교반기의 속도를 1000 rpm으로 높여 발포제의 분산이 용이하도록 하였다. 또한 발포온도는 용탕의 점성과 직접적으로 관련이 있으며, 점도의 증가와 감소는 발포제를 첨가하였을 때 혼합 용탕 내부 기공과 기공 사이의 용탕 흐름을 생성시키기 때문에 기공벽의 두께를 증가시키고 기공율이 감소하는 원인이 된다. 이러한 요인들을 고려하여 발포 온도와 점증제의 첨가량에 따른 606X합금의 제조특성을 관찰하기 위하여 연구를 수행하였으며, 실제 실험에 앞서 제조 조건에 대한 기초 데이터를 확보하기 위하여 6061 알루미늄 합금을 이용하여 실험에 적합한 온도와 점증제 첨가량의 변화에 대한 제조특성을 관찰하였다. 먼저 실험에 적합한 온도를 알아보기 위하여 680°C, 730°C, 780°C의 50°C 간격 3구간에서 발포금속 제조 실험을 실시하였다. 이때 점증제와 발포제의 투입량에 의한 변화를 최소화하기 위하여 모든 조건에서 동일한 양의 점증제와 발포제를 투입하였다. 그리고 기공이 안정하게 유지, 성장할 수 있는 용탕의 점성 조건을 갖추기 위한 점증제 투입량을 조사하기 위하여, 6061알루미늄 합금 용탕에 순 알루미늄의 적정 점증제 첨가량인 1.5 wt%와 유사범위인, 1 wt%와 1.5 wt% 그리고 2 wt%의 Ca을 첨가하여 제조특성을 관찰하였다. 이때 실험 조건은 온도의 영향을 배제하기 위하여 점증제 투입온도를 670°C, 발포제투입온도를 680°C로 고정하여 실험을 실시하였다. 이러한 기초실험을 바탕으로 실제 606X계 발포금속의 제조실험에서는 점도의 영향을 최소화하기 위하여 모든 실험은 점증제 첨가량에 따른 발포금속의 제조특성 실험결과를 고려하여 일정한 양의 Ca을 점증제로 첨가하였으며, 발포제 투입량을 2 wt%로 고정한 후 발포온도에 따른 제조특성을 관찰 하였으며, 기공율과 밀도, 기공 크기의 분포를 조사하여 비교하였다. 밀도 및 기공율 측정은 시편의 길이와 무게를 측정하여 계산산출 하였으며, 기공율은 측정된 시편의 밀도와 알루미늄 합금의 이론 밀도로부터 계산하였으며, 계산식은 아래와 같다[10].

$$P = \frac{\rho_s - \rho_f}{\rho_s} \times 100(\%) \quad (1)$$

여기서 ρ 는 기공율, ρ_s 는 발포금속 원소재의 밀도, ρ_f 는 발포금속 시편의 밀도이다. 시편의 부위별 기공율의 변화와 결함의 존재에 의한 오차를 줄이기 위하여, 전체 시편을 3 cm × 3 cm × 3 cm로 가공하여 겹보기 오차가 큰 샘플을 제외한 후, 내부 결함이 존재하지 않는 8개의 시편을 선택하여 그 평균값을 얻었다. 그리고 기공의 크기는 각 시편의 전체 거시조직 사진을 영상분석기(I-solution, Korea)를 사용하여 평균 직경을 측정하여 평균값과 분포를 얻었다.

3. 실험결과 및 고찰

3-1. 6061 합금 발포금속의 점증제 첨가량과 발포온도의 영향

Fig. 2는 1.0 wt%, 1.5 wt%, 2.0 wt%에서 제조한 6061 알루미늄 합금 발포금속의 단면 사진을 보여주고 있다. 실험결과 Ca를 1.0 wt% 첨가한 경우에는 시편의 중심부에 기공들이 병합되어 큰 기공이 생성된 것을 관찰 할 수 있으며 기공의 크기도 균일하지 않았다. 그 이유는 첨가한 1.0 wt%의 Ca이 용탕을 안정한 점도 조건을 만들기엔 충분하지 않기 때문에 기공 사이에 중력에 의한 용탕의 흐름이 발생하여 시편의 상부에는 큰 기공을 발생 시키고, 하부에는 기공벽의 두께를 증가 시켰기 때문이다. 반면, Ca를 1.5 wt% 첨가한 경우에는 중심부에 크게 병합된 기공이 관찰되지 않았으며 전체 단면에 균일하게 기공들이 분포하는 것을 볼 수 있다. 또한 2.0 wt%의 Ca를 첨가한 경우에 1.5 wt%를 첨가한 경우보다 시편의 발포 높이가 큰 경향을 보였지만, 시편의 중심부에 병합된 기공들이 다수 존재하는 것을 볼 수 있다. 이러한 6061알루미늄 합금 발포금속의 제조 경향이 순 알루미늄과 다르게 나타난 이유는 6061합금 내부에 존재하는 Mg과 Si 등 합금원소의 영향으로 더욱 많은 산화물들이 형성되어 1.5 wt%의 Ca첨가량으로도 순 알루미늄에 2.0 wt%의 Ca를 첨가했을 경우[11]와 유사한 값을 나타내었기 때문인 것으로 사료된다. 이러한 결과

를 바탕으로 606X계 알루미늄 합금의 제조 실험 시 Ca의 첨가량은 1.5 wt%가 합당하다고 판단된다.

Fig. 3은 발포온도의 변화에 따른 6061알루미늄 합금 발포금속의 제조특성을 보여주고 있다. 일반적으로 순 알루미늄 발포금속의 경우는 액상선 직상에서 가장 높은 기공율을 보인다고 알려져 있지만, 알루미늄 합금의 경우 액상선 직상에서는 낮은 온도의 영향으로 시편의 하부에 기공이 없는 고상 기지구역이 발생하며, 온도가 너무 높을 경우에도 용탕의 배수와 기공의 과도한 성장으로 인해 불균일한 기공분포와 고상 기지구역의 발생을 초래할 수 있다[12]. 이러한 경향과 유사하게 발포 및 유지 온도가 6061알루미늄 합금의 경우 온도가 증가 할수록 기공의 크기가 증가하는 경향을 보였으며, 특히 780°C에서는 시편 내부에 크게 성장한 기공이 발생하며, 시편의 하부에는 기지구역이 발생하는 것을 관찰할 수 있었다. 이러한 결과는 606X계 합금의 경우 780°C에서는 규칙적인 기공 분포를 가지는 발포금속의 제조가 어렵다는 것을 보여주며 따라서 실제 제조 실험에서는 680°C와 730°C를 발포온도로 선택하였다.

3-2. 발포온도에 따른 6061, 6063 합금 발포금속의 제조

점증제의 첨가량에 따른 제조특성과 발포제첨가 및 유지온도에 따른 제조실험을 바탕으로, 점증제의 첨가량은 1.5 wt%, 발포제 첨가온도는 발포제 투입 온도에 따른 발포특성 실험결과를 바탕으로 680°C와 730°C로 설정한 후 제조실험을 진행하

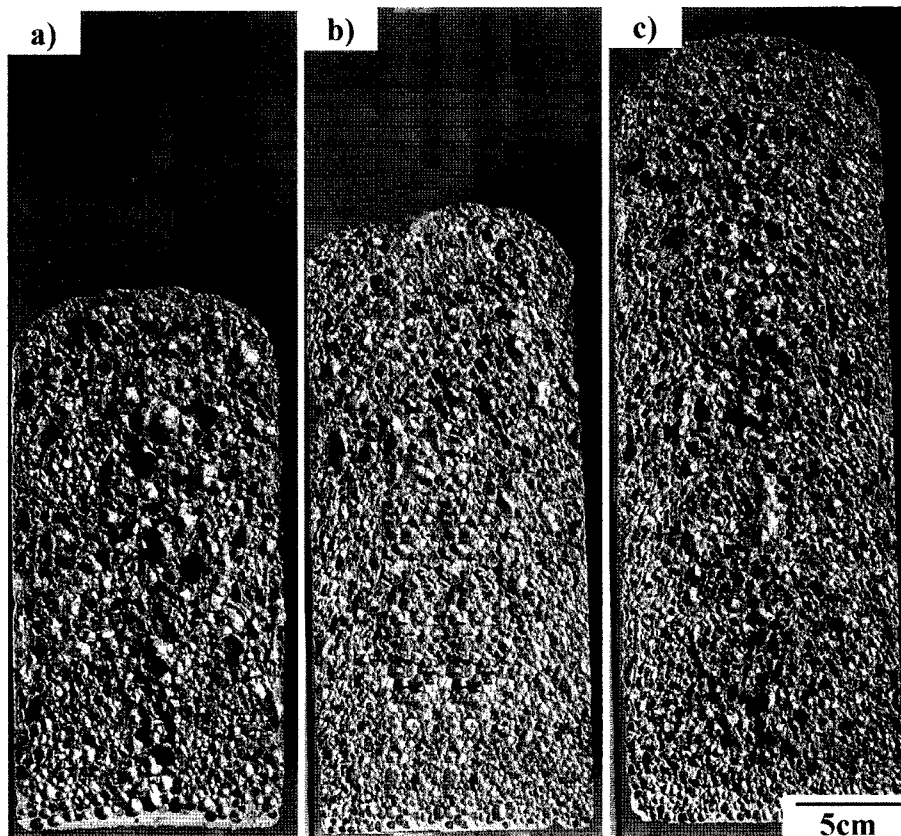


Fig. 2. The representative 6061 aluminum alloy metallic foam specimens foamed at 680°C with addition of (a) 1.0 wt% Ca, (b) 1.5 wt% Ca and (c) 2.0 wt% Ca

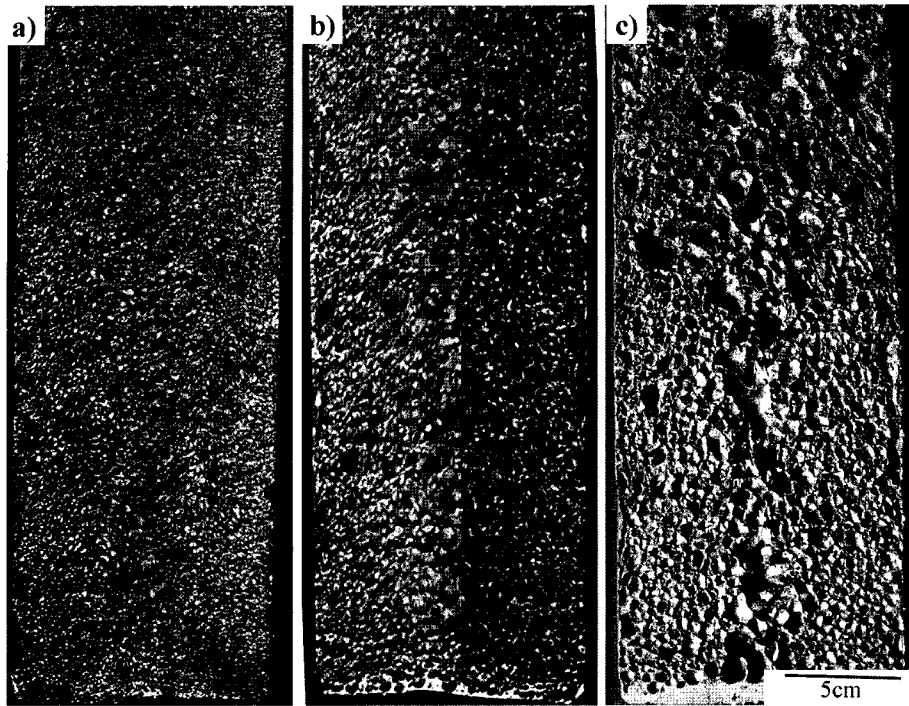


Fig. 3. The representative 6061 aluminum alloy metallic foam specimens which foamed at (a) 680°C and (b) 730°C and (c) 780°C

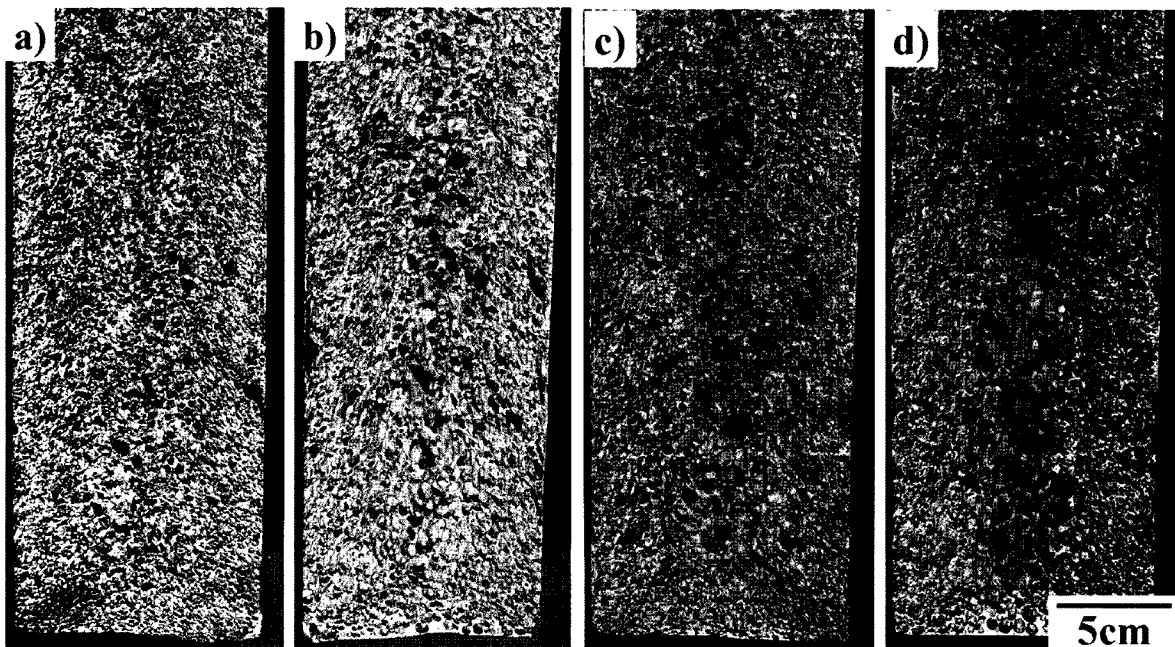


Fig. 4. The representative 6061 and 6063 aluminum alloy metallic foam specimens with different foaming temperature; (a) Al 6061, 680°C, (b) Al 6061, 730°C, (c) Al 6063, 680°C, (d) Al 6063, 730°C

였다. Fig. 4는 각각의 제조 조건에서 제조되어진 6061, 6063 알루미늄 합금 발포금속의 단면 사진을 보여주고 있다. 사진 (a)와 (b)는 각각 680°C와 730°C에서 발포되어진 6061 발포 금속 시편이며, (c)와 (d)는 같은 조건에서 발포되어진 6063 발포금속 시편이다. 먼저 6061 발포금속 시편의 기공분포를 살펴보면 680°C에서 발포한 경우가 730°C에서 발포한 경우보다

더 균일하게 기공이 분포하고 있는 것을 볼 수 있으며, 발포 온도가 증가할수록 기공의 크기가 증가하는 것을 볼 수 있다. 6063 알루미늄 합금 발포금속의 경우 6061에 비해 전체적으로 기공 크기가 불균일한 특성을 보였다. 또한 730°C에서 발포제를 첨가한 경우에는 시편의 하부에 미세하지만 고상 기지구역이 형성된 것을 볼 수 있으며, 이는 6063 알루미늄 합금 용탕이

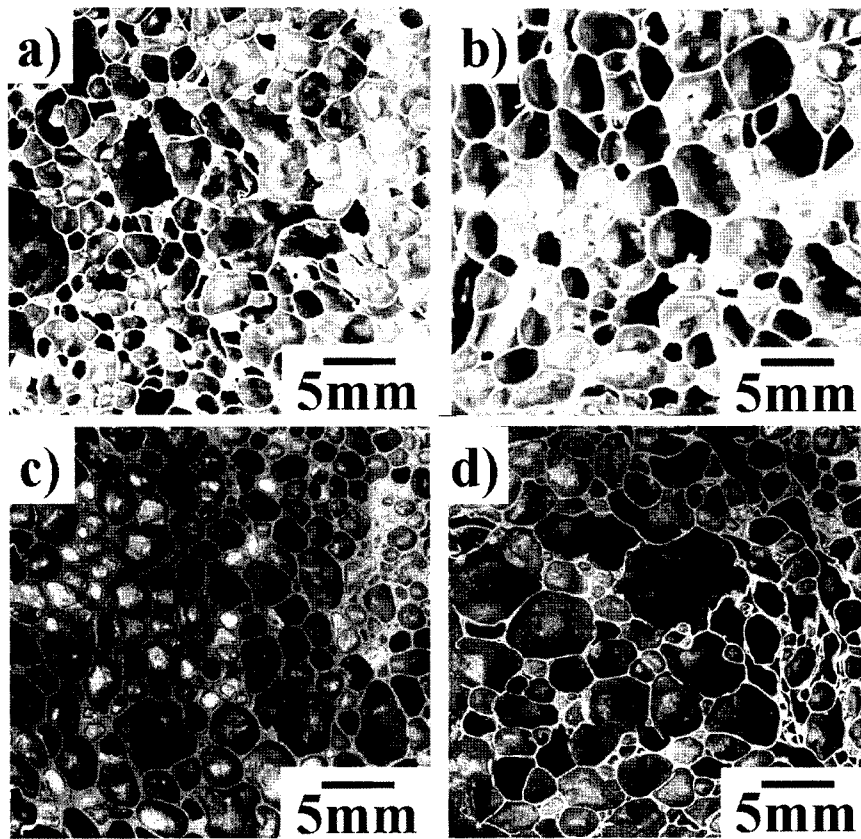


Fig. 5. Macroscopic view of 6061 and 6063 aluminum alloy metallic foam specimens with different foaming temperature; (a) Al 6061, 680°C, (b) Al 6061, 730°C, (c) Al 6063, 680°C, (d) Al 6063, 730°C

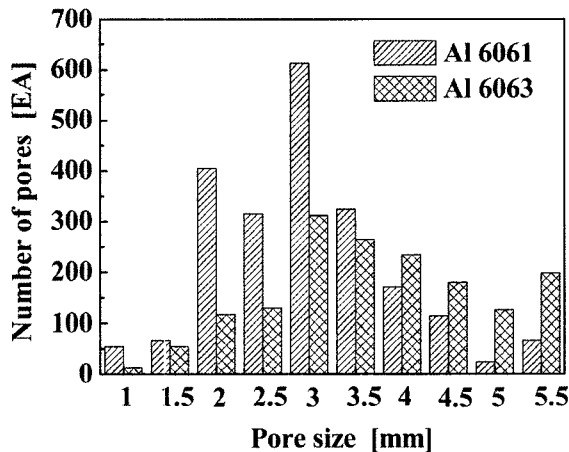


Fig. 6. The cell size distribution of 6061 and 6063 aluminum alloy metallic foam specimens

6061알루미늄 합금과 동일한 조건으로 용해하였을 때의 용탕이 낮은 점성을 가짐을 의미한다. 그 이유는 6063알루미늄 합금이 강도와 용접성 대신 우수한 표면처리를 목적으로 개발되어 Mg 과 Si등의 합금원소 첨가량이 6061 알루미늄 합금보다 약간 적기 때문에 용탕 내부에 생성된 산화물의 양이 적고 Cu, Fe, Zn등 중금속의 미량 원소들의 양이 적어 Cell 벽내의 흐름이 적기 때문인 것으로 사료된다.

Table 2. Comparison of morphological features for 6061 and 6063 aluminum alloy metallic foams with different foaming temperature

Material	Foaming Temperature (°C)	Cell wall thickness (μm)	Porosity (%)	Density (g/cm ³)
Al 6061	680	88.2	87.6	0.33
Al 6061	730	83.4	87.4	0.34
Al 6063	680	132.6	91.2	0.24
Al 6063	730	157.4	81.8	0.49

기공 벽 구조를 더욱 자세히 살펴보고 기공 크기 분포를 측정하기 위하여 Fig. 5와 같이 시편의 중심부를 잘라 표면을 연마하여 단면을 관찰 한 후, 기공의 크기 분포를 회상해석프로그램으로 측정하여 그 결과를 Fig. 6에 정리하였다. Fig. 5의 6061알루미늄 합금 발포금속의 거시조직을 살펴보면, 680°C에서 발포한 경우 기공의 형상이 구형을 띠는 것을 볼 수 있지만, 730°C의 경우에는 기공의 성장으로 인해 기공벽이 소실된 부분과 각형의 기공들이 많이 존재하는 것을 볼 수 있다. 또한 측정되어진 기공크기의 분포도 대부분의 기공크기가 1.6~3.5 mm의 범위에서 분포하며, 전체 발포기공 분포를 볼 수 있는 거시조직 사진과 유사한 경향을 보이는 것을 확인할 수 있었다. 반면 6063 알루미늄 합금의 경우에는 6061 알루미늄

미늄 합금과는 달리 2.5 mm이상의 범위에서 각각의 크기를 가지는 기공이 균일한 모양으로 분포하는 것을 알 수 있었다. 각 조건에서 제조되어진 6061과 6063 알루미늄 합금 발포금속 시편의 밀도와 기공벽의 두께 그리고 기공율을 정리한 것을 보면, Table 2에 나타내었다. Table 2와 같이 6061 알루미늄 합금의 경우 발포온도가 증가할수록 발포제의 분해 속도 및 분해량은 많아져서 내부 기공의 국부적인 성장에 의해 기공벽의 두께가 얇아지고, 온도가 증가함에 따라 점도의 감소로 용탕이 Cell 내부 벽면을 따라 하부로 흐르는 배수현상으로 인해 전체적으로 유사한 Cell벽 두께가 감소하는 것으로 나타났다. 반면 6063 알루미늄 합금의 경우에는 6061 합금과 비교하여 산화물의 생성량이 적기 때문에 발포온도가 증가할수록 용탕의 점성의 저하 현상이 상대적으로 낮아져서 병합된 기공의 숫자가 증가하고, 기공벽의 두께가 두꺼워졌으며, 이로 인해 기공율이 감소하고 밀도가 높아지는 것으로 나타났다. 위의 제조실험을 바탕으로 제조특성을 평가하자면, 같은 조건에서 합금원소의 양이 적고 열전도도가 비교적 높은 6063 알루미늄 합금이 6061 알루미늄 합금의 경우 보다 온도 변화에 따라 용탕의 유동성이 변하므로 적은 온도감소에도 6061합금보다 더욱 빠른 속도로 응고와 냉각이 일어나고, Cell 안정화 요소인 산화물의 양 또한 적기 때문에 기공이 안정하게 성장하기 위한 시간이 충분하지 못하여 불규칙적인 기공분포를 가지는 것으로 사료된다.

4. 결 론

606X계 알루미늄 합금을 제조하기 위하여 발포온도를 변화시켜 제조 하였으며 그 결과는 다음과 같다.

(1) 6061 알루미늄 합금은 680°C에서 균일한 기공크기와 분포를 가진 발포금속을 제조 할 수 있었고 발포온도가 증가할수록 기공의 분포가 불균일해지는 경향을 보였다.

(2) 6063 알루미늄 발포금속의 경우 같은 조건에서 내부에 병합된 기공들이 6061 합금에 비해 많은 것을 확인할 수 있었고 합금원소의 미량원소의 양이 적고 열전도도가 비교적 높은 6063 알루미늄 합금이 6061 알루미늄 합금의 경우 보다 온도 변화에 따라 용탕의 유동성이 민감하게 반응하였다.

(3) 6061과 6063 두 합금을 사용하여 모두 80% 이상의 기공을 가지면서도 발포 온도에 따른 기공 형상과 균일도의 차이가 크지 않은 발포금속을 제조 할 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 산업자원부와 한국산업기술재단의 지역혁신 인력양성 사업으로 수행된 연구 결과임.

참 고 문 헌

- [1] John Banhart, Metal foam production and stability, *Advanced Engineering Materials*, 9 (2006) pp.781-794.
- [2] G Kaptay, Interfacial criteria for stabilization of liquid foams by solid particles, *Colloid Surface A: Physicochemical and Engineering Aspects*, Vol. 230, (2004) pp.67-80
- [3] J. Banhart, Manufacture, Characterisation and application of cellular metals and metal foams, *Prog. Mater. Sci.* 46, (2001) pp.559-632
- [4] Gibson LJ, Ashby MF, *Cellular solids*, 2nd ed. Cambridge University Press; (1997).
- [5] Dirk Lehmuhs, John Banhart, Properties of heat-treated aluminum foams; *Materials Science & Engineering A*, 349 (2003) pp.98-110
- [6] Roberto Montanini, Measurement of strain rate sensitivity of aluminum foams for energy dissipation, *Inter. J of Mechanical Sciences*, Vol. 47, (2005) pp.26-42.
- [7] Halit Kavi, A.Kaan Toksoy, Musrafa Guden; Predicting energy absorption in a foam filled thin-walled aluminum tube based on experimentally determined strengthening coefficient, *Materials and Design*, Vol. 27 (2004) pp.263-269.
- [8] Yanru Luo, Sirong Yu, Wen Li, Jiaan Liu, Ming Wei, Compressive behavior of SiCp/AlSi9Mg Composite foams, *J of Alloys and Compounds*, (2007) in press
- [9] S.S. Sreeja Kumari, R.M. Pillai and B.C. Pai, Role of calcium in aluminum based alloys and composites, *International Materials Reviews* Vol. 50, No.4, (2005) pp.126-238.
- [10] Hans-Peter Degischer, Brigitte Kriszt, *Handbook of Cellular Metals*, WILEY-VCH (2002)
- [11] S.H.Park, Y.S.Um, C.H.Kum and B.Y.Hur, Thermophysical Properties of Al and Mg alloys for Metal Foam Fabrication, *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, Vol. 263 (2005) pp.280-283
- [12] C.C. Yang, H. Nakae, Foaming characteristics control during production of aluminum alloy foam, *Journal of Alloys and Compounds* Vol. 313 (2000) pp.188-191