

알루미늄 발포재의 성형공정에서 유도가열법에 의한 점도 제어가 미세 기공에 미치는 영향

전용필*, 강충길**

Effects of Viscosity Control by Induction Heating on Micro Cell in Forming Process of Foamed Aluminum

Yong Phil Jeon*, Chung Gil Kang**

ABSTRACT

Melting method has long been considered difficult to realize because of problems such as the low foamability of molten metal, the varying size of cellular structures and solidification shrinkage. The parameters to solve the problem in electric furnace were stirring temperature, stirring velocity, heating velocity and foaming temperature. It is important to consider the effects of induction heating, because it brings about the inner flow by the temperature gradient. Aspect ratio also depends on the induction heating. Mechanical properties are dependent on cell sizes and aspect ratios. Therefore, this paper presents the effects of these parameters on the cell sizes. For the sake of this, combined stirring process was used to fabricate aluminum foam materials by the above mentioned parameters. Image analysis was performed to calculate the cell sizes, distributions, and aspect ratios at the cross section of foamed aluminum in the direction of height.

Key Words : Viscosity control(점도 제어), Induction heating(유도 가열), Foamed Aluminum(알루미늄 발포재), Molten temperature(용탕 온도), stirring velocity(교반 속도), Heating velocity(가열 속도), Foaming temperature(발포 온도), cell size(기공 크기), Aspect ratio(형상비)

1. 서론

복잡한 격자구조를 가지는 발포소재는 기존의 주조, 단조 등과 같은 제조 방법으로는 얻을 수 없는 다양한 물성을 가지고 있다. 특히, 알루미늄 발포 소재는 매우 낮은 밀도를 가지면서도 상대적으로 높은 비강성을 가지고, 소음과 진동의 흡수능이 우수하며, 재활용이 용이하다는 장점을 가지고 있

기 때문에 원소재의 개발, 공정변수에 따른 발포양상 평가 및 D/B 구축, 상용화 등의 측면에서 연구가 활발히 진행되고 있다^[1-2].

특히, 주조법을 이용한 제조는 분말법에 비해 대형 발포 소재를 적은 비용으로 생산할 수 있으며, 연속제조까지 용이하다는 장점이 있기 때문에 원소재의 사용 절감, 경량화, 환경오염 저감 등이 가능하면서 가격 경쟁력이 있다.

· 2002년 1월 14일 접수
* 부산대학교 대학원 기계공학부
** 부산대학교 기계공학부

주조법을 이용한 알루미늄 발포재의 제조 공정에서 Song^[3]등은 점도에 따른 기공 함유율, 기공의 크기 및 유지시간(holding time)에 따른 발포 양상을 실험적으로 파악하였다. Ma^[4]등은 교반시간에 따른 점도의 영향과 점도의 변화에 따른 기공의 크기 및 분산성에 끼치는 영향을 실험적으로 파악하였다. Yang^[5]등은 알루미늄 합금의 발포과정에서 TiH₂의 특성 및 투입량이 발포에 끼치는 영향에 대한 연구를 수행하였다. Weaire^[6]등은 발포시 발생하는 다양한 양상에 대하여 기공간의 역학 분석을 통하여 이론적으로 발포 현상을 규명하였다.

이상에서 언급한 바와같이 발포 소재의 제조 공정에서 TiH₂의 균일 분산을 위한 유동성의 확보와 분해로 생성되는 H₂ 기체가 대기로 나가는 양을 최소화 할 수 있는 점도의 제어가 매우 중요함을 강조하고 있다. 또한 지금까지 발표된 연구들은 유동성과 점도를 확보하기 위해서 제조 온도를 충분히 높게 한 상태로 Ca 또는 SiC_p 등의 점증제를 첨가하여 기계적 강제 교반을 실시하였다. 그러나, 점증제를 첨가하지 않고 유도가열을 통하여 점성을 제어하고 또한 기계식 교반과 전자기식 교반을 겸용하여 발포재를 제조하는 연구 사례는 아직 보고되지 않고 있다.

유도가열은 전체 발포 공정에 많은 영향을 끼치게 되는데, 그 이유는 전자기 끝단효과로 인하여 용탕 전체의 온도구배를 유발하기 때문이다. 온도구배는 알루미늄 용탕의 유동을 유발하므로 결과적으로 알루미늄 소재의 발포에 영향을 끼치게 된다. 따라서, 발포에 대한 유도가열의 고려는 필수적이다.

발포재의 제조공정에 있어서 교반과정은 매우 중요한데, 이는 전 용탕에 TiH₂입자를 고루 분산시키는데 결정적인 역할을 하기 때문이다. 이^[7]등은 반응용 상태에서 복합교반을 통하여 금속복합재료를 제조하였는데, 복합교반법은 기계식 교반과 전자기 교반이 동시에 이루어지기 때문에 TiH₂입자의 균일 분산에 유리하다.

본 연구에서는 용탕의 유동성 때문에 Si의 함유율이 10%정도 되는 ADC12종을 실험소재로 사용하였다. 발포재의 재료 공정을 교반과 발포 과정으로 분리하여 실험을 수행하였다. 여기서 교반 방법은 복합교반법을 채택하였다^[7]. 복합교반법에 의하여 발포재를 제조하는 실험장치와 용탕온도, 임펠러의 회전수, 발포온도 그리고 발포속도 등에 따른 제조

조건 및 제조 방법을 제시하였다. 그리고, 발포 소재의 교반에 적합한 임펠러로 강제 교반을 한 후에 발포를 시켜 이를 냉각 시킨 후의 제조 결과를 정성적, 정량적으로 분석한 후에 공정 변수에 따른 제조 결과에 대한 영향을 도출하였다.

2. 발포 소재의 제조

2.1 실험재료

알루미늄 발포 소재의 제조를 위해 기지재료는 ADC12종을 사용하였다. ADC12종의 화학 조성을 Table 1에 나타내었다.

Table 1 Chemical composition of ADC12

	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Ni	Zn	Ti	pt	Sn
min(%)	9.6		1.5							
max(%)	12.0	1.3	3.5	0.5	0.3	0.5	1.0	-	-	0.3

용탕 내부의 기공 발생을 위해 발포재 역할을 수행하는 TiH₂를 사용하였으며, 그 화학 조성을 Table 2와 같이 나타내었다.

Table 2 Chemical composition of TiH₂ ^[8]

	Si	Fe	H ₂	Mn	Mg	N ₂	O ₂	Ti	Cl	C
max (%)	0.030	0.053	3.8	0.0007	0.0010	0.27	0.35	95	-	-

알루미늄 발포 소재의 제조 시 기지재에 첨가되는 TiH₂의 양은 대기 중으로의 손실을 고려하여 기지재 전체 중량의 1 wt.% 를 주입하였다. 발포 소재의 제조시 TiH₂의 손실은 용탕의 열기와 용탕과의 반응으로 인한 대기로의 유실과 교반시 산소의 유입으로 인하여 발생하는 산화반응을 의미한다.

2.2 실험 장치

본 연구를 위한 실험장치의 개략도는 Fig. 1과 같다. Fig.1의 실험 장치는 교반기가 부착되어있는 프레임, 도가니가 있는 유도로, 소재의 가열을 위한 20kW 고주파 유도가열기로 나누어져 있다. 프레임을 통해서 임펠러의 높이, 회전수, 그리고 회전방향을 조절할 수 있으며, 고주파 유도가열기를 통해서 소재의 가열 온도 및 가열 속도를 제어할 수 있다. 실험을 위하여 전자기 유도로 내에 기지재가 담긴 도가니를 넣고 가열하여 완전히 용해시킨 후 임펠러로 교반을 실시하면서, TiH₂를 파이프를 통하여

용탕의 표면 중심에 주입한 후에 발포가 가능하도록 설계하였다. 임펠러의 크기는 도가니 내경의 0.75배로 하였다. 그 이유는 TiH_2 를 첨가한 용탕은 기공과 액상이 혼재하기 때문이다. 알루미늄 발포 소재를 반응용 소재와 비교했을 때, 발포 소재의 기공을 반응용 소재의 액상에 대응시키면 두 소재의 압축 거동이 비슷하다. 따라서, 반응용 소재의 교반시, 교반이 가장 잘되는 직경을 발포 소재의 교반을 위한 임펠러의 크기로 설계하였다^[9].

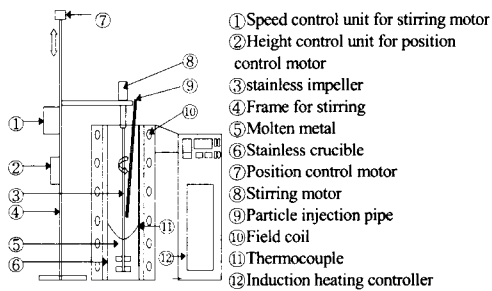


Fig. 1 Schematic diagram of fabrication equipment for aluminum foam material

Fig. 1의 실험장비에서 소재의 가열을 위해서 20kW 고주파 유도 가열기를 사용하였으며, 이 장치를 사용하여 도가니 주위에 감겨진 유도 코일의 고주파와 기지재 내를 흐르는 와전류에 의해 소재를 원하는 온도까지 신속히 올려서 제조 시간을 단축시킬 수 있다.

본 연구에서 사용한 실험장치와 방법은 기지재에 상하 유동을 유발하여 임펠러에 의한 좌우 유동과 적절한 조화를 이루어 TiH_2 입자의 분산에 필요한 난류의 형성이 용이하다는 장점을 가지고 있다.

전기로에서 100℃로 예열된 강화재를 주입하기 위해서 Fig. 1의 ⑨와 같은 파이프를 이용하였다. 그 이유는 2-4g에 불과한 TiH_2 의 입자들을 미량으로 정량 투입할 때, 용탕 자체의 열기에 의하여 상당량이 대기중으로 날아갈 수 있기 때문이다. TiH_2 는 임펠러의 교반력에 의하여 분산되기 때문에 도가니의 중앙 부분에 주입을 하였다.

발포재를 제조하기 위하여 열적 화학적 안정성이 우수한 고순도 흑연을 직경 63mm, 깊이 150mm로 가공한 몰드를 사용하였다.

2.3 실험 방법

알루미늄 발포 소재를 제조하기 위하여 임펠러의 교반 높이를 용탕의 전 영역에 균일 분산시키기 위하여 몰드의 바닥으로부터 10mm로 하였다. Fig. 2, Fig. 3는 각각 유도가열 조건과 발포재의 제조를 위한 공정순서도를 나타낸 것이다.

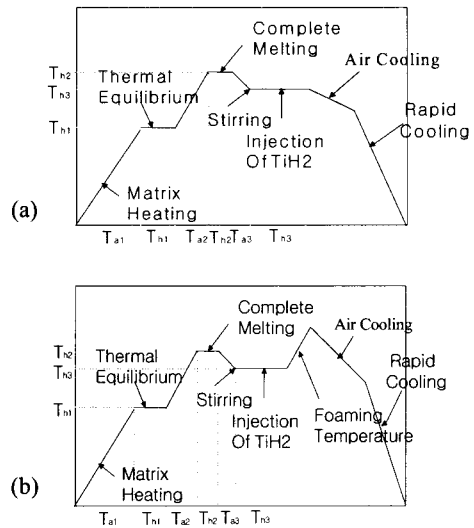


Fig. 2 Schematic diagram of induction heating condition for various temperatures and velocities of impeller(a) and heating and foaming temperatures(b) of ADC12

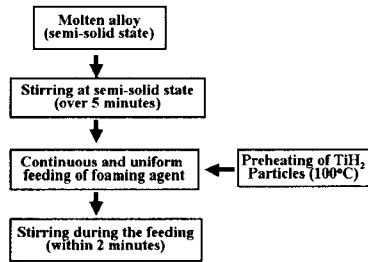


Fig. 3 Flow chart of experimental process of melt-stirring

우선 200~400g 정도의 알루미늄 합금(ADC12)을 액상선 온도(595℃)이상으로 가열하여 용해된 후, 설정 온도에 맞도록 유지시킨다. 교반기를 기지재가 용해되어있는 몰드의 바닥 근처까지 이동시켰다. 여기서, 몰드 바닥에서의 높이를 10mm로 하였

으며, 갑작스런 임펠러의 변형을 막기 위하여 임펠러를 용탕 근처에서 충분히 예열을 시킨 후에 용탕 하부로 이동시켰다. 용탕의 상태가 균일하도록 5분간 기계식 강제 교반을 실시하였다. 예열된 TiH₂를 임펠러 중심에 최대한 접근시켜 기지재 중량의 1.0%를 투입하였다. 여기서, TiH₂에 예열을 시키는 이유는 TiH₂에 함유된 수분을 제거하기 위함이다. 수분이 함유된 TiH₂를 투입하게 되면 용탕내부에 H₂ 가스에 의한 기공외에 수분에 의한 기공이 존재하게 되어 발포재에 좋지 않은 영향을 끼치기 때문이다. 이렇게 준비된 TiH₂를 정량 투입하면서 2분정도 교반을 한 후에 교반 시스템을 도가니로부터 제거하였다. 발포온도 제어를 제외한 모든 공정에서 30초가 지난 후에 몰드를 유도도에서 취출하여 2분정도 공냉을 하여 발포 소재를 안정화시켰다. 발포가 중지된 후에 발포소재를 급냉시켰다. 그 이유는 냉각이 되면서 소재가 팽창하기 시작하는데 공냉 과정 없이 바로 수냉을 시킬 경우에 소재의 비대칭적인 냉각으로 인해 소재가 불안정해져 예측하기 어려운 형태의 급격한 발포 현상이 일어나기 때문이다. 또한, 비대칭적인 발포를 유발하여 기공간의 상호 응집 현상으로 인한 합체 현상을 야기시켜 발포 소재의 제조에 치명적인 영향을 끼치기 때문이다.

Table 3 Various conditions for fabrication of aluminum foam material

Process	PARAMETERS			
	Temp. (°C) T	RPM (rpm) N	Foaming velocity (°C/min), V _h	Foaming Temp. (°C), T _r
Stirring	585~680	1700	20	
	595	700~1700	20	595
Foaming	595	1350	20~50	595
	595	1350	20	595~680

이와 같은 성형공정에서 Table 3에 나타난 성형 공정 변수에 따른 발포양상에 대해 조사하였다. 온도와 관련된 모든 변수에서 다른 온도조건에 비하여 상대적으로 월등히 높은 온도인 680°C에서도 실험을 하였는데, 그 이유는 다른 온도 조건에서 구한 발포특성이 고온에서도 성립되는지의 여부를 확인하기 위해서이다.

2.4 실험 결과 및 고찰

제조된 알루미늄 발포 소재의 제조 결과를 분석하기 위하여 발포 소재를 단면의 수직 방향으로 절단하였다. 절단면을 통하여 발포소재의 전체 높이에 따른 기공의 크기 및 분포 양상을 알아보고, 이에 대한 결과의 정량적인 분석을 위하여 정량 분석을 실시하였다. 정량 분석을 통하여 각각의 조건별로 제조된 발포 소재에서 Fig. 4에서 빗금친 부분에 나타난 기공 크기의 분포, 기공의 구형도, 높이에 따른 기공의 크기 분포 및 기공함유율을 구하였다.

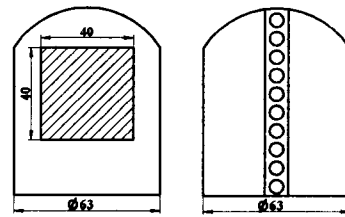


Fig. 4 Positions of measuring for image analysis of the distributions of particle sizes, aspect ratios in hatched area(a), and of the particle sizes about the height of the material(b)

2.4.1 용탕 온도

Fig. 5은 용탕온도의 변화에 따른 발포도의 양상을 나타낸 것이다. Fig. 5에서 용탕의 온도가 증가함에 따라서 기공의 크기가 증가함을 알 수 있다. 위의 원인은 기지재의 온도가 증가할수록 점도가 감소하여 TiH₂의 열분해로 발생하는 기공의 표면 장력이 감소하기 때문인 것으로 사료된다. Fig. 5(b)는 Fig. 5(a)에 비해서 용탕이 상대적으로 적은 점성을 가져 기공 성장이 잘 일어났고, Fig. 5(b)가 Fig. 5(c)~(d)에 비해 점성이 높아 용탕 교반시, 합체현상(coalescence) 및 자유표면을 통한 H₂기체의 유출이 적었기 때문이라고 사료된다. Fig. 5(c)~(d)는 Fig. 5(b)에 비해서 기공의 크기는 증가하였으나 기공의 형상 유지 측면에서 좋지 않음을 알 수 있었다. 기공의 형상이 초기에는 구형이었다가 그 형상이 다각형 구조(polyhedral structure)로 바뀌게 되면 그 부위에 응력 집중이 발생하여 기계적 성질에 좋지 않은 영향을 끼치게 된다^[10]. 따라서, 용탕 온도의 변화에 따른 적절한 점성이 필요함을 알 수 있었다.

Table 4는 Fig. 5(a)~(d)의 기공 함유율에 대한 발포도와 정량 분석 결과를 나타낸 것이다. 발포도

와 정량 분석 결과를 따로 구한 이유는 정량 분석에서는 반영할 수 없는 실험 공정상의 문제점을 발포도에서 설명해주기 때문이다. 발포도에서는 Fig. 5(b)에서 최대값을 보여주었다. 그 이유는 Fig. 5(c)~(d)에서 합체 현상이 여러 곳에서 일어났고, 소재의 하부에서 거의 발포 되지 않았기 때문이다. 따라서, 높은 기공함유율을 가지는 양질의 소재를 얻기 위해서는 용탕의 점성을 일정수준으로 유지시켜주는 것이 중요함을 Table 4로부터 알 수 있었다. Table 4의 결과에서 보여주는 바와 같이 기공함유율이 서로 다름을 알 수 있었다. 그 이유는 이론적으로 계산한 소재의 높이가 원기둥의 높이를 나타내는데 실제로 측정된 높이는 완전한 형태의 원기둥이 아니기 때문이다. Fig. 5에서 보여주는 바와 같이 윗부분이 불룩하게 솟아있는 상태에서 측정된 높이로써, 원기둥에 해당되지 않은 영역이 기공으로 간주되어 계산된 결과이기 때문이다. Table 4에서 계산식에 의한 값이 소재 전체부피에 대한 결과인데 반하여 이미지 분석에 의한 경우는 소재 단면 일부분으로 얻은 결과이므로 다소간의 차이가 있지만 소재의 높이를 원기둥일 경우의 등가높이로 환산한다면 이미지 분석에 의한 결과에 더욱 근접하게 될 것이다.



(a) T=585°C (b) T=595°C (c) T=615°C (d) T=680°C
 Fig. 5 Foamed aluminums at various temperatures of molten Aluminium (N = 1700rpm, V_h = 20°C/min, T = T_f)

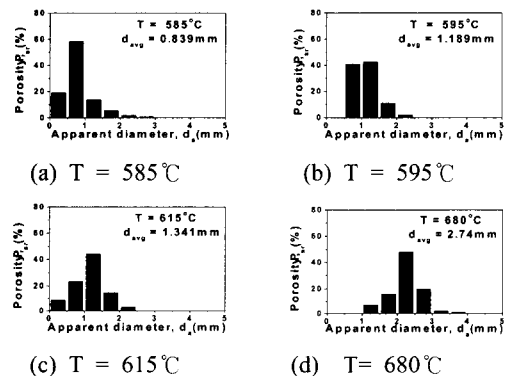
Table 4 Foaming results at various temperature

	P(%) by case 1	P(%) by case 2
(a)	66	50
(b)	73	59
(c)	70	64
(d)	69	70

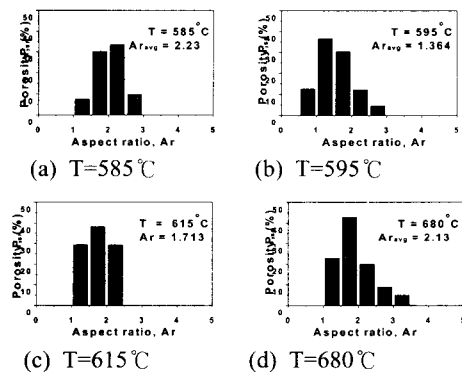
case 1: The results by theoretical calculation
 case 2: The results by image analysis

$$(\% (P, Porosity))_{theo.} = \frac{H - H_0}{H} \times 100, \quad H_0 : \text{Initial height of the melted metal, H: Height of foamed aluminum, P : \% of Porosity}$$

Fig. 6, Fig. 7은 Fig. 4(a)의 빗금친 부분에서 이미지 분석을 통하여 얻은 등가직경(equivalent diameter)과 형상비(aspect ratio)를 나타낸 것이다. 그래프에서 d_a는 이미지 분석에서 인식된 기공을 구형으로 가정했을 때 환산된 등가 직경을 의미한다. 그리고, Ar는 세로직경에서 가로 직경으로 나눈 값을 의미한다. 각각의 조건에 따른 기공의 크기 분포를 살펴보면 알 수 있듯이 특정 범위에 속하는 기공이 다수 존재하면서도 다양한 크기를 가지는 기공이 존재함을 알 수 있다. 또한 대부분 구형이 아닌 상태로 존재함을 알 수 있었다. 그 이유는 액상유출의 영향으로 소재의 상부에서 하부로 갈수록 기공의 크기가 작아졌기 때문이다. 점도가 상대적으로 낮을 경우에 용탕 하부에 존재하는 소재의 평



(a) T = 585°C (b) T = 595°C
 (c) T = 615°C (d) T = 680°C
 Fig. 6 Distribution of the particle sizes under various temperature of molten metal (N=1700rpm, V_h=20°C/min, T=T_f)

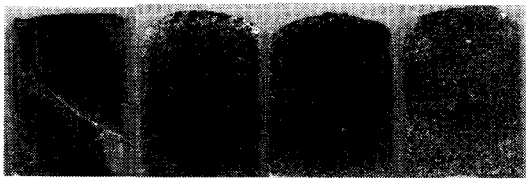


(a) T=585°C (b) T=595°C
 (c) T=615°C (d) T=680°C
 Fig. 7 Distribution of the aspect ratios under various temperature of molten metal (N = 1700rpm, V_h = 20°C/min, T = T_f)

균 크기 이하의 기공들은 액상유출 현상으로 인하여 소재의 하부로 내려오는 용탕에 의하여 그 크기가 더욱 작아지거나 소멸된다.

2.4.2 교반 회전수

Fig. 8는 교반기의 회전수 변화에 따른 소재의 발포양상을 나타낸 것이다. 회전수가 1350rpm과 1700rpm인 Fig. 8(c)~(d)에서 700rpm과 1000rpm인 Fig. 8(a)~(b)에 비해서 상대적으로 많은 양의 기공이 고루 분포되어 있음을 육안으로 쉽게 확인할 수 있다. 그 이유는 회전수가 높아 질수록 기공이 많이 발생하기 하기 때문이다. 그러나, Fig. 8(d)의 1700rpm가 1350rpm일 때 보다 용탕 내부에 작은 기공들이 많이 발생함에도 불구하고, 상대적으로 큰 기공이 다수 발견되었다. 그 이유는 과도한 회전속도로 인하여 대기 중의 공기가 용탕 내부로 유입됨에 따라서 TiH₂에 의해 발생된 기공과 공기와 혼재하게 되어 결과적으로 발포에 좋지 않은 영향을 끼치기 때문이다. 따라서, 발포재의 성형에서 임펠러에 적절한 회전수를 부여하여 공기가 용탕 내부로 유입되는 것을 억제하면서 TiH₂가 균일하게 분산 되도록 하는 것이 매우 중요하다. Table 5는 Fig. 8(a)~(d)의 기공 함유율에 대한 발포도와 이미지 분석 결과를 나타낸 것이다. Table 5에서 나타난 결과를 통해서 육안으로 확인한 발포 상태와 거의 일치함을 알 수 있었다. 회전수가 증가함에 따라서 기공 함유율이 증가하지만 과도한 회전수에 의한 다량의 기공생성 및 외부 공기의 유입으로 기공함유율이 감소할 수 있음을 알 수 있었다.



(a) N=700rpm (b) 1000rpm (c) 1350rpm (d) 1700rpm

Fig. 8 Foamed aluminums at various velocity of impeller (T=595 °C, V_h=20 °C/min, T=T_f)

Fig. 9, Fig. 10은 Fig. 4(a)의 빗금친 부분에서 이미지 분석을 통하여 얻은 등가직경과 형상비를

Table 5 Foaming results at various stirring velocity

	P(%)by case 1	P(%) by case 2
(a)	60	47
(b)	61	51
(c)	66	57
(d)	67	59

나타낸 것이다. 각각의 조건에 따른 기공의 크기를 보면 1350rpm까지 증가하다가 1700rpm효과에 에서는 오히려 감소한 것을 알 수 있다. 그 이유는 임펠러의 회전으로 인한 원심력으로 상대적으로 작은 크기의 기포들이 많이 발생하였으며, 교반 시스템을 제거한 후의 유지시간동안 발생하는 액상 유출의 영향을 받기 때문인 것으로 사료된다. 회전수가 증가할수록 기공의 크기 분포와 형상비 면에서는 좋아지지만 공기의 유입에 의한 결함도 발생할 소지가 있기 때문에 이에 대한 고려가 필수적이다.

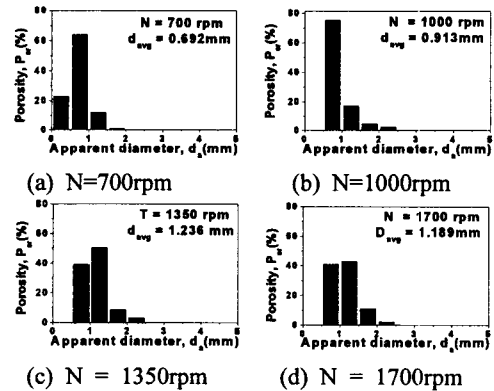


Fig. 9 Distribution of the particle sizes under various velocities of molten metal (T=595 °C, V_h=20 °C/min, T=T_f)

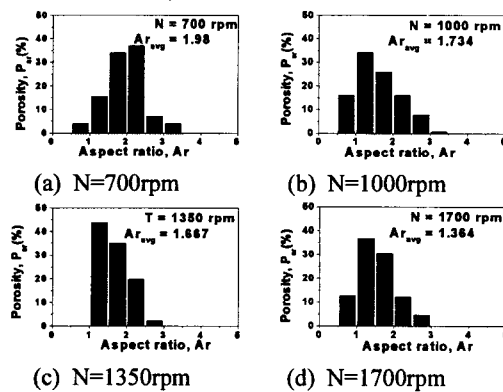
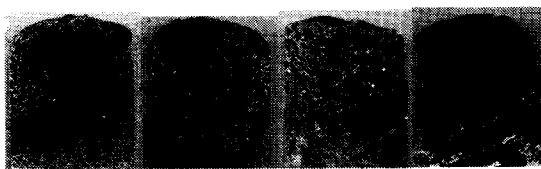


Fig. 10 Distribution of the aspect ratios under various velocities of molten metal (T=595 °C, V_h=20 °C/min, T=T_f)

2.4.3 가열속도

Fig. 11는 발포속도에 따른 소재의 발포양상을 나타낸 것이다. 가열속도가 증가할수록 기공의 사이즈는 증가하지만, Fig. 11(c)~(d)의 경우에는 기공의 왜곡(distortion) 현상을 발견할 수 있었다. 그 이유는 순간적인 온도상승으로 점도가 감소함에 따라서 표면장력이 감소하여 기공이 크기가 순간적으로 증가하였기 때문이다. 유도가열의 특성상 끝단 효과에 의해서 용탕의 가장자리와 용탕의 하부 온도가 먼저 증가하므로 용탕 내부에서 밀도차이가 발생하게 된다. 그 결과로 별도의 교반 없이도 내부 유동이 생성되고 이 유동은 가열속도가 증가함에 따라서 더욱 격렬하게 일어난다. 높은 가열속도 때문에 용탕 내부에 존재하는 기공의 변형을 유발하고, 난류유동이 일어나는 영역에서는 기공들이 서로 합체하여 큰 기공이 생성되는 것으로 사료된다. 기공의 변형 양상을 Fig. 11(c)로부터 확인할 수 있었다. Fig. 11(d)에서 과도한 가열속도에 따른 기공의 합체 현상을 쉽게 확인할 수 있었다. 가열속도의 변화가 기공의 크기와 형상에 영향을 미치고 있음을 Fig. 11(c)~(d)으로 부터 알 수 있었다.

Table 6는 Fig. 11(a)~(d)의 기공 함유율에 대한 발포도와 정량 분석 결과를 나타낸 것이다. Table 6의 정량 분석에 의한 결과를 통해서 알 수 있듯이 가열속도가 높을수록 기공함유율이 증가함을 알 수 있었다. 그러나, 실험에 의한 체적 함유율을 살펴보면 기공의 크기는 증가하지만 기공함유율은 오히려 감소하고 있다. 위의 원인은 가열속도가 증가함에 따라서 발포양상이 불안정해서 기공의 함유율이 감소하기 때문이다. 따라서, 발포시 가열속도의 제어를 통하여 합침현상을 방지하는 것이 중요하다.



(a) $V_h=20^\circ\text{C}/\text{min}$ (b) $30^\circ\text{C}/\text{min}$ (c) $40^\circ\text{C}/\text{min}$ (d) $45^\circ\text{C}/\text{min}$
Fig. 11 Foamed aluminums at various heating velocity
($T = 595^\circ\text{C}$, $N = 1350\text{rpm}$, $T=T_f$)

Table 6 Foaming results at various foaming velocity

	P(%) by case 1	P(%) by case 2
(a)	66	57
(b)	64	60
(c)	76	66
(d)	72	70

Fig. 12, Fig. 13은 Fig. 4(a)의 빗금친 부분에서 이미지 분석을 통하여 얻은 결과를 나타낸 것이다. Fig. 12, 13의 정량적인 결과로부터 가열속도가 높아질수록 기공의 왜곡 현상이 증가함을 알 수 있었다. 이러한 왜곡 현상은 발포소재 제조에 장애요인이 되므로, 왜곡현상의 최소화를 위하여 적절한 가열속도의 설정이 필요하다.

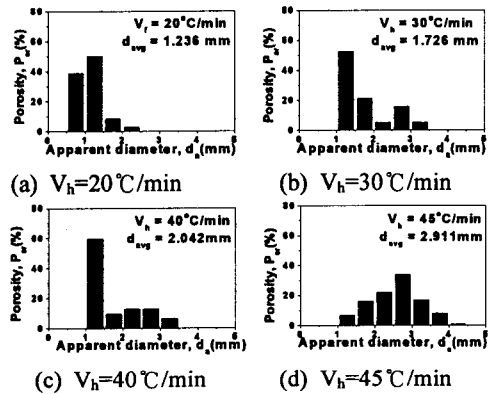


Fig. 12 Distribution of the particle sizes under various heating velocities of molten metal($T=595^\circ\text{C}$, $N=1350\text{rpm}$, $T=T_f$)

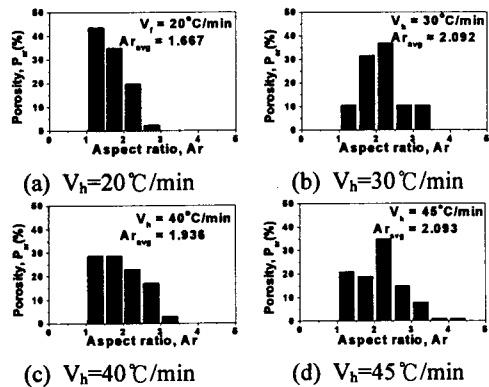
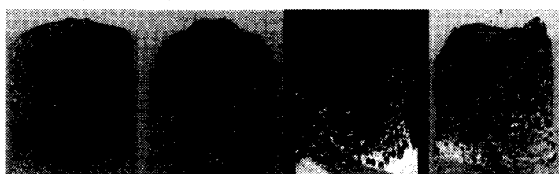


Fig. 13 Distribution of the aspect ratios under various heating velocities of molten metal($T=595^\circ\text{C}$, $N=1350\text{rpm}$, $T=T_f$)

2.4.4 발포온도

Fig. 14는 발포온도의 변화에 따른 기공 생성 양

상을 나타낸 것이다. Fig. 14에서 보여주는 바와 같이 발포온도가 증가함에 따라서 기공의 크기는 증가하지만 전체적인 기공 형상 유지 측면에서는 불안정해짐을 알 수 있었다. 그 이유는 용탕이 일정 시간이상 가열이 되면 기공의 사이즈가 증가하더라도 과도한 팽창으로 인하여 자중 및 유도가열에 따른 불균일 가열에 의하여 기공들이 서로 합체되기 때문이다. Fig. 14(c)~(d)에서 보여주는 바와 같이 움푹패인 부분을 통해서 기공들이 합체현상을 일으킨다는 사실을 확인할 수 있었다. 이를 통해서 발포온도는 기공의 성장 및 형상의 유지 측면에서 중요한 변수임을 알 수 있었다. Table 7은 Fig.14(a)~(d)의 기공 함유율에 대한 발포도와 정량 분석 결과를 나타낸 것이다.

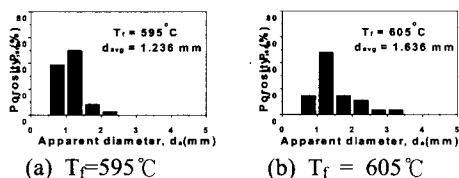


(a) $T_f=595^\circ\text{C}$ (b) 605°C (c) 625°C (d) 680°C
 Fig. 14 Foamed aluminums at various foaming temperature($T=595^\circ\text{C}$, $N=1350\text{rpm}$, $V_f=20^\circ\text{C}/\text{min}$)

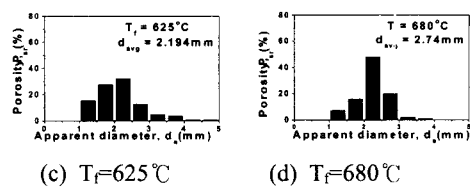
Table 7 Results at various foaming temperature

	P(%) by case 1	P (%) by case 2
(a)	66	57
(b)	69	60
(c)	74	65
(d)	68	72

Fig. 15, Fig. 16은 Fig. 4(a)의 빗금친 부분에서 정량 분석을 통하여 얻은 결과를 나타낸 것이다. Fig. 14(a)~(d)를 보면 알 수 있듯이 발포 온도가 증가할수록 기공 크기가 증가하지만, 구형도를 통해서 알 수 있듯이 기공의 형상 유지 측면에서 불안정해짐을 알 수 있었다.

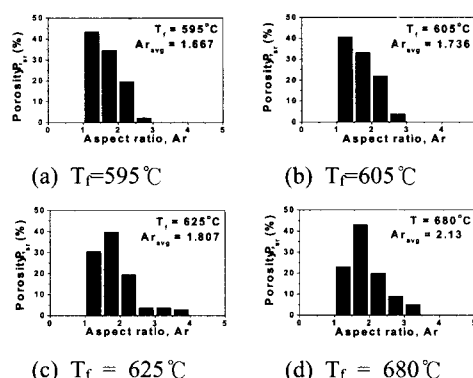


(a) $T_f=595^\circ\text{C}$ (b) $T_f = 605^\circ\text{C}$



(c) $T_f=625^\circ\text{C}$ (d) $T_f=680^\circ\text{C}$

Fig. 15 Distribution of the particle sizes under various foaming temperature of molten metal ($T=595^\circ\text{C}$, $N=1350\text{rpm}$, $V_f=20^\circ\text{C}/\text{min}$)

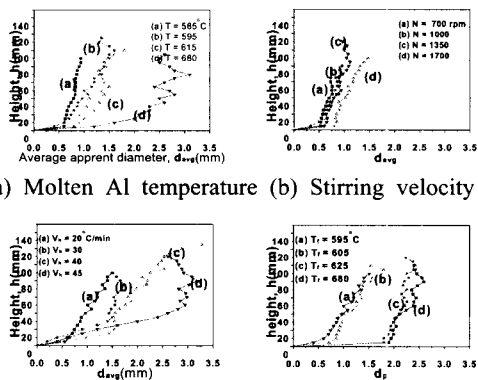


(c) $T_f = 625^\circ\text{C}$ (d) $T_f = 680^\circ\text{C}$

Fig. 16 Distribution of the aspect ratios under various foaming temperature of molten metal ($T=595^\circ\text{C}$, $N=1350\text{rpm}$, $V_f=20^\circ\text{C}/\text{min}$)

2.4.5 기공 분포

Fig. 17는 알루미늄 발포소재의 높이에 따른 기공의 크기 분포를 나타낸 것이다. Fig. 17에서 보여주는 바와 같이 소재의 높이가 증가할수록 기공의 크기가 커짐을 알 수 있다.



(a) Molten Al temperature (b) Stirring velocity
 (c) Heating velocity (d) Foaming temperature
 Fig. 17 Size distribution of foamed aluminium in height direction

Fig. 18는 발포시 기공의 벽을 따라 기지재가 하부로 흘러가는 현상을 나타낸 것이다. 이는 발포소재의 제조시 중력에 의하여 공통적으로 발생하는 현상으로서, 상부에서 하부로 갈수록 기공의 크기가 작아지는 것과 매우 밀접한 관계가 있다. 그 이유는, 기지재가 흘러가는 양이 상부에서 하부로 갈수록 증가하여 기공의 성장을 억제하는 효과가 있기 때문이다. 액상 유출 현상은 발포과정에서 빠른 속도로 진행되며 일정 시간 이후에서는 거의 일어나지 않는 특징을 가지고 있다^[11].

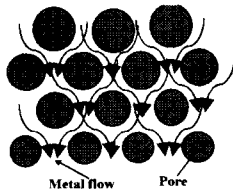


Fig. 18 Gravitational drainage evolving toward foams of thin foam films

3. 결론

알루미늄 발포소재의 성형 공정 인자가 기공 제어에 미치는 영향에 대한 연구결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 발포 성형의 전 공정에서 용탕온도가 증가할수록 발포 소재의 기공의 크기 및 함유율이 증가한다.

(2) 교반시, 임펠러의 교반 회전수가 증가할수록 기공의 발생량이 증가하고 분산효과도 향상되지만, 1700rpm과 같은 과도한 회전수에서는 공기의 유입으로 인하여 발포소재의 제조에 나쁜 영향을 미치게 된다.

(3) 발포 속도가 증가함에 따라서 기공의 크기 및 함유율은 증가하지만 40℃/min이상의 과도한 속도로 가열하면 용탕의 내부 유동을 유발하여 기공의 크기 및 기공의 형상에 나쁜 영향을 미치게 됨을 알 수 있었다.

(4) 발포 온도가 증가할수록 기공의 크기 및 기공의 함유율은 증가한다. 그러나, 625℃ 이상에서는 가열에 의한 부피의 팽창 및 액상유출의 영향으로 발포시 기공의 형상을 변화시키는 원인이 됨을 알 수 있었다.

참고문헌

1. Hintz, C, Wagner, I., Sahm, P.R., and Stoyanov, P., "Investment Cast Near-Net-Shape Components Based on Cellular Metal Materials," Metal Foams and Porous Metal Structures MIT Verlag, pp. 153-158, 1999.
2. Banhart, J., "Manufacture, characterisation and application of cellular metals and metal foams," Progress in Materials Science 46, pp. 559-632, 2001.
3. Song, Z., Ma, L., Wu, Z., and He, D., "Effects of viscosity on cellular structure of foamed aluminum in foaming process," Journal of Materials Science 35, pp. 15-20, 2000.
4. Ma, L. and Song, Z., "Cellular structure control of aluminium foams during foaming process of aluminium melt," Scripta Materialia, Vol.39, No.11, pp. 1523-1528, 1998.
5. Yang, C.C. and Nakae, H., "Foaming characteristics control during of aluminum alloy foam," Journal of Alloy and Compounds, 313, pp. 188-191, 2000.
6. Weaire, D. and Huntzler, S., "The Physics of Foams," Oxford University Press, 1st Edition, pp. 21-27, 1999.
7. 이동건, 강충길, "복합교반법에 의한 금속복합재료의 제조공정에 따른 강화재의 분산성 검토," 한국복합재료학회, 10월, 제14권, 제5호, pp. 1-11, 2001.
8. Kresse, R., "Characteristics and Handling of Titanium Hydride," Metal Foams and Porous Metal Structures MIT Verlag, pp. 109-112, 1999.
9. 日本機械工業連合會, "金屬の半凝固加工プロセスに關する調査報告書," pp. 72-73, 1988.
10. Miyoshi, T., Itoh, M., Akiyama, S., and Kitahara, A., "Aluminum foam, "ALPORAS": The Production Process, Properties and Applications," Metal Foams and Porous Metal Structures MIT Verlag, pp. 125-132, 1999.
11. Podual, K., Kumar, R., and Gandhi, K.S., "A new model for drainage of static foams," Chemical Engineering Science, Vol. 51, No. 9, pp. 1393-1403, 1996.