

## 다출력 유도가열 공정을 이용한 다공질 6061 알루미늄 합금의 기공 제어 공정

윤성원\*, 강충길\*\*

(2003년 1월 22일 접수)

### A Process for the Control of Cell Size of 6061 Al foams by Multi-step Induction Heating Method

S. W. Youn and C. G. Kang

#### Abstract

Multi step induction heating process was applied to the powder compact melting technique as a new heating process to achieve pinpoint accuracy, faster cycle time, repeatability, non-contact and energy efficient heat in a minimal amount of time. The objective of this study is the establishment of the input data diagram of multi step induction heating process for automation of the fabrication process of 6061 Al foams with desired density. At first, proper induction coil was designed to obtain a uniform temperature distribution over the entire cross sectional area of specimen. By using this coil, foaming experiments were performed to investigate the multi step induction heating conditions such as capacity, temperature and time conditions of each heating and holding step. On the basis of the obtained multi-step induction heating conditions, relationship between final heating temperature and fraction of porosity was investigated.

**Key Words** : Multi Step Induction Heating, Foaming Process, Closed Cell 6061 Al Foam, Fraction of Porosity, Final Heating Temperature

#### 1. 서론

Al foam은 다공질의 초경량 재료로서, 비강성이 높고 소음 및 진동감쇄능이 뛰어나며, 에너지 흡수율, 전자기 차폐효과 면에서도 우수하다. 또한, 기공의 제어에 의하여 기계적 성질을 조절할 수 있으므로<sup>(1)</sup>, 맞춤형재료(tailor

ed material)로써의 가능성도 기대되고 있다. 그러나, 기계적 성질의 재현성(reproducibility)의 문제는 실제 산업에서의 대량생산에 장애물이 되고 있으며, 이를 개선하기 위한 많은 연구들이 수행되어 왔다.<sup>(2)</sup> Al foam 소재의 방음, 열전도, 기계적 성질은 기공의 형상학적 인자에 지배된다.<sup>(3~4)</sup> 또한, 기공의 형상학적 인자는 가열온

\* 부산대 대학원 정밀기계공학과  
\*\* 부산대 기계공학부

도, 가열속도 등과 같은 발포공정인자에 의해 조절된다.<sup>(5-7)</sup> 따라서, 기계적 성질의 재현성을 향상시키기 위해서는 온도의 정확한 조절이 필연적이다. 일반적으로, Al foam 제조를 위한 가열공정에는 일반적으로 전기로가 사용된다.<sup>(5)</sup> 그러나 목적 형상이 3차원 복잡형상일 경우에 부품의 모든 부위에서 균일한 가열속도를 얻는 것은 불가능하다.<sup>(2)</sup> Al foam 부품내부의 불균일한 온도분포는 기공 크기의 불균일성 및 불균일한 표피두께 분포의 원인이 되어 기계적 성질의 저하를 초래한다. 유도가열을 이용할 경우 부품의 형상을 따라 그 간격이 유지될 수 있게 제작함으로써 제품 내의 온도분포의 불균일을 감소시켜, 기계적 성질의 재현성을 개선시킬 수 있다. 또한, 유도가열은 재현성, 사이클 타임, 정확도 등이 우수하고 환경친화적인 공정이기 때문에 용접, 어닐링, 접합, 브레이징 등의 영역에서 폭넓게 사용되고 있다.<sup>(8)</sup>

본 연구에서는 다출력 유도가열법을 응용하여 새로운 Al foam 발포공정을 개발하고자 하였다. P/M법을 병용하여 발포용 프리커서를 제조한 후, 유도가열 공정 변수별 발포 실험을 수행하여 다출력 유도 가열 조건을 조사하였다. 제조된 6061 Al foam 에 대해서는 공정변수에 따른 기공의 형상학적 (morphological) 변화가 관찰되었으며, 기공율의 변화를 조사하여 목적 기공율의 미세기공 알루미늄을 제조하기 위한 데이터 베이스를 구축하였다.

## 2. 발포용 프리커서(fomable precursor)의 제조

Fig. 1(a)~(c)는 발포용 프리커서의 제조공정을 제조공정을 나타내고 있다.

Fig. 1(a) 는 지지합금분말과 발포제 분말의 혼합단계이고, 분체혼합에 널리 쓰이는 약 30rpm의 V형 균일혼합기를 사용하였다. Fig. 1(b)는 혼합분말의 예열단계이다. 혼합분말을 압축다이의 캐비티 내에 넣고 15kW용량의 고주파 유도가열기를 사용하여 6kW의 출력으로 450℃까지 예열하였으며, 1.6mm 직경의 K type CA 열전대를 사용하여 분말의 중앙과 상부의 온도를 측정하였다. Kresse<sup>(9)</sup>의 TiH<sub>2</sub> 열중량분석 결과에 따르면 500~600℃의 온도범위에서 TiH<sub>2</sub>의 Ti와 H<sub>2</sub>가스로의 환원반응이 급격하게 발생하므로, 급격한 H<sub>2</sub> 가스의 손실을 방지하기 위해서는 500℃보다 낮은 온도에서 예열해야 한다고 제시한바 있다. Fig. 1(c)는 예열된 혼합분말의 압축단계이다. 프리커서 내부의 잔류기공은 발포시 H<sub>2</sub> gas의 이동로로 사용되어 균일한 기공의 성장을 저해하므로<sup>(10)</sup>, 잔류기공이 존재하지 않도록 충분한 가압력으로 압

축하여야 하며 이를 위하여 본 연구에서는 120kN로 설정되었다. 압축된 혼합분말을 압축 다이로부터 취출하여 냉각시키면  $\Phi 30 \times h14$ (mm) 크기의 프리커서가 된다. 분말형 Al 6061(325mesh)합금과 TiH<sub>2</sub> 분말(200mesh)이 지지합금과 발포제로써 각각 사용하였다. Table 1과 Table 2는 6061 Al 합금의 조성 및 프리커서 제조조건을 나타내고 있다.

Table 1 Chemical compositions of powdered A6061 alloy

Cr	Cu	Fe	Mg	Mn	Si	Ti	V	%Al
0.07	0.25	0.25	0.89	0.03	0.65	0.02	0.01	Bal.

Table 2 Fabrication conditions of foamable precursor (Inner diameter of compaction die : dia. 30mm)

Quantity of 6061 alloy (W <sub>m</sub> , g)	Quantity of TiH <sub>2</sub> (C <sub>f</sub> , wt.%)	Preheating temp. of mixed powder (T <sub>pre</sub> , °C)	Compaction load (kN)
30	0.3	450	120kN

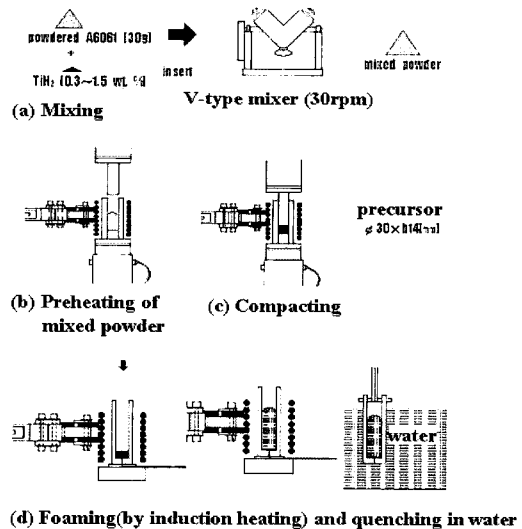


Fig. 1 Fabrication process layout of 6061 Al foams

## 3. 다출력 유도가열법을 응용한 발포공정

### 3.1 발포공정(Foaming process)의 개요

발포(Foaming)란 지지합금 내에 인위적으로 기공을 균일분산 시켜 체적을 증가시키는 공정이다.

Fig. 1 (d)는 본 연구에 사용된 발포공정의 개략도를

나타내고 있다. 제작된 프리커서를 발포용 몰드에 넣고 기지합금의 고액공존구간 이상의 온도로 가열 시키면, TiH<sub>2</sub>의 환원반응에 의해 발생된 수소가스의 팽창으로 인해 부피가 팽창하게 된다. 온도의 측정은 발포 전에는 프리커서의 상부와 하부의 중심부를 측정하였고 발포시작온도 이후부터는 하부온도만을 측정하였다. 고주파유도가열시 필연적으로 수반되는 표면부와 중심부의 온도구배를 줄이기 위해 발포시작 직전의 온도에서 시편의 상하부의 온도가 동일해질 때까지 유지하였다. 발포재료를 몰드에서 취출하는 과정에서 발생하기 쉬운 붕괴에 의한 최종형상의 변화를 최소화하기 위하여 몰드체로 수냉하였다.

Fig. 2는 발포공정 장비의 개략도를 나타내고 있다.

가열속도를 측정하기 위해 K type CA 열전대를 사용하여 얻은 온도데이터를 Data Logger를 사용하여 기록하였다.

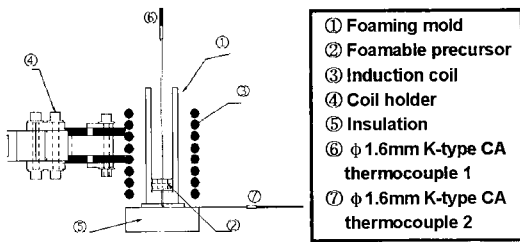


Fig. 2 Schematic illustration of foaming device

### 3.2 발포공정을 위한 다출력 유도가열조건의 조사

다출력 유도가열법을 발포공정에 적용시키기 위해서는 기공의 균일한 성장을 위한 유도가열기의 출력 (Q), 각 단계별 가열조건(가열시간 (t<sub>a</sub>), 가열온도 (T<sub>a</sub>), 온도유지시간(t<sub>h</sub>)) 등이 우선적으로 조사되어야 한다.

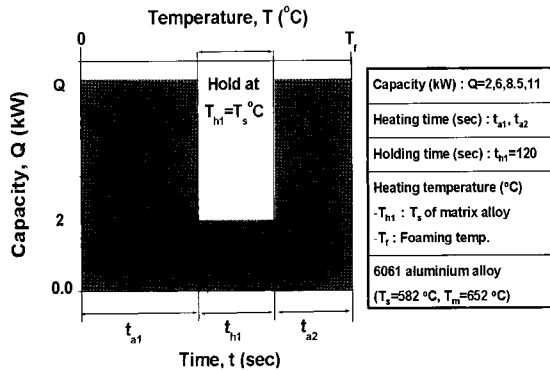


Fig. 3 Capacity (Q) profile of induction heating for foaming process

균일 기공 성장에 적합한 유도가열기의 출력(Q) 조건을 조사하기 위하여 Fig. 3의 가열조건으로 발포실험을 수행하였다. 0.3wt.% TiH<sub>2</sub> 함량의 프리커서를 Q=2, 6, 8.5, 11kW의 조건에서 680°C까지 가열 시켰다. 기공의 성장이 시작되는 온도(약 600°C)보다 낮은 590°C에서 2분간 유지시켜 프리커서의 온도 구배를 최소화 시켰다.

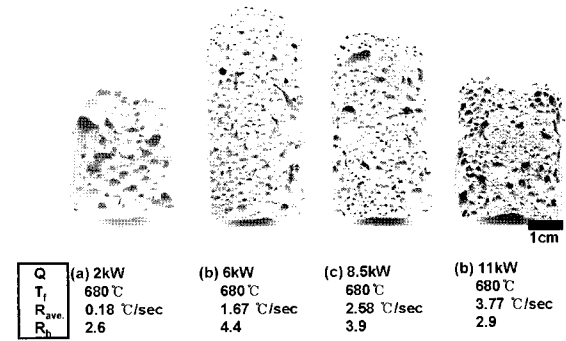


Fig. 4 Effect of the capacity (Q) of the induction heating system on the cell morphology of 6061 Al foams (C<sub>F</sub> = 0.3 wt.% TiH<sub>2</sub>, T<sub>r</sub>=680 °C)

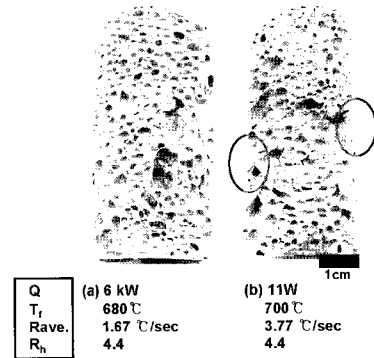


Fig. 5 Effect of the capacity (Q) of the induction heating system on the pore morphology of 6061 Al foams (C<sub>F</sub> = 0.3 wt.% TiH<sub>2</sub>, R<sub>h</sub>=4.4)

Fig. 4와 Fig. 5는 유도가열기의 출력이 (Q) 기공의 성장에 미치는 영향을 나타낸 것이다. Fig. 4는 모든 시편을 동일한 온도 (680°C)까지 가열시킨 경우이고, Fig. 5는 시편의 높이 팽창율 (R<sub>h</sub>)가 동일하게 될 때까지 가열시킨 경우이다. 표기된 평균가열속도 (R<sub>ave</sub>)는 최종가열 온도를 전체가열시간으로 나눈 값이다.

Q=2kW (Fig. 4 (a))인 경우 너무 느린 가열속도로 인해 기공은 조대화 되었으나 시편 전체의 부피는 증가하지 않았다. 이는 기공의 조대화가 주로 인접한 기공들의 합체에 의해서 이루어졌기 때문이다. 이는 시편의 표면에 발생하는 산화가 주 원인으로 사료된다. 기공의 표면에

에 발생하는 산화는 기지합금의 점도를 감소시켜 기공의 균일 성장을 저해한다. 그밖에 특이한 점은 시편의 하부보다도 측면에 더 두꺼운 층이 형성된 점이다. 일반적으로 전기로를 사용하여 제조된 Al foam의 경우 중력에 의한 drainage 현상에 의하여 시편 하부에 기공이 없는 고밀도의 두꺼운 층이 발생된다.<sup>(6)</sup> 이러한 차이는 유도가열시 발생된 표면효과에 의해 시편 측면의 온도가 높기 때문으로 사료된다. Fig. 4 (b) (Q=6kW)는 기공크기 분포와 높이팽창율( $R_h$ )의 측면에서 양호한 시편을 보여주고 있다. Q=8.5kW(Fig. 4 (c))인 경우에는 Q=6kW에 비해 높이팽창율이 다소 감소하였다. 이는 불충분한 기공의 성장시간에 기인하는 것으로 사료된다. Q=11kW(Fig. 4 (d))의 경우는 기공의 성장시간의 감소로 인해 높이팽창율이 더욱 감소하였다. Q=8.5, 11kW시편에서는 측면 부위의 기공의 조대화가 관찰되는데, 이는 전자기 유도가열시 발생하는 표면효과(skin effect)<sup>(11)</sup>로 인해 표면부가 중심부에 비해 과열되었기 때문이다.

비교를 위해 Q=11kW의 조건으로 Q=6kW (Fig. 4 (b)) 시편과 동일한 높이팽창율 ( $R_h$ )을 가지도록 시편을 제조 하였다.(Fig. 5) Fig. 5 (b)의 시편사진에서 관찰할 수 있듯이 표면효과로 인해 시편의 표면(surface skin)부에 결함이 발생되고 있다.

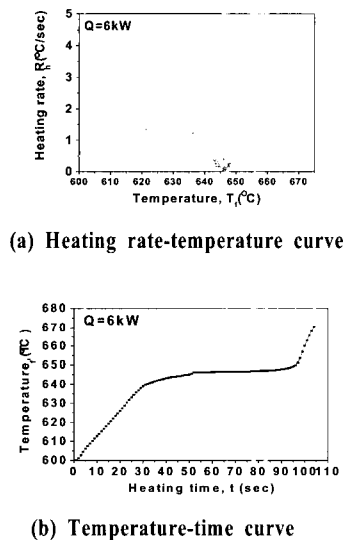


Fig. 6 Relationship between temperature and heating time recorded during induction heating of the precursor at the capacity of 6 kW

다출력 유도가열을 위한 입력데이터를 조사하기 위하여 Q=6kW의 조건에서 프리커서 (0.3wt.% TiH<sub>2</sub>)를 가열 시 시간에 따른 온도변화를 측정하였다.

Fig. 6은 측정된 온도-시간 및 가열속도 시간 곡선을 나타내고 있다. 0~600°C의 구간에서 가열속도는 2.88°C/sec로 유지되었으나, 약 600°C에서 기공의 성장이 시작되면서 급격히 증가하였다. 따라서, 600~670°C 온도영역을 확대해서 나타내었다. Fig. 6 (a)에서 관찰할 수 있는 바와 같이, 600~640°C 구간에서는 가열속도가 1.3°C/sec로 감소하였고, 기지합금의 용점(652°C)부근인 640~650°C구간에서는 0.1~0.25°C/sec로 감소하였다. 645°C부근에서는 온도의 변화 없이 60~70 초 정도 유지되었으며 (Fig. 6 (b)), 용점을 전후하여 (650~670°C) 2°C/sec정도로 가열속도가 급격히 증가하였다. 이러한 급격한 가열속도의 변화로 인해 온도의 조절에 어려움이 있었다. 0~670°C까지의 전체구간에 대한 평균가열속도( $R_{ave.} = \text{foaming temp./total heating time}$ )는 2°C/sec였다.

0~670°C까지의 온도변화를 Table 3에 정리하였다.

Table 3 Variation of heating rate during foaming process

Temp. range (°C)	0 ~600	600 ~640	640 ~645	645 ~650	650 ~670	$R_{ave.}$
Heating rate (°C/sec)	2.88	1.33	0.25	0.1	2	2

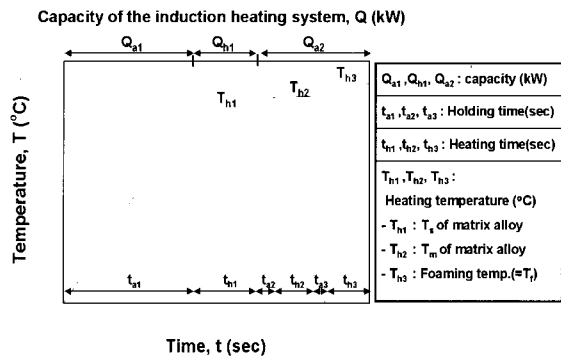


Fig. 7 Input data diagram of the multi-step induction heating process

Table 4 Input data of multi-step induction heating process

Mold material	Heating time $t_a$ (sec)			Heating temperature $T_a$ (°C)			Holding time $t_h$ (sec)		
	$t_{a1}$	$t_{a2}$	$t_{a3}$	$T_{a1}$	$T_{a2}$	$T_{a3}=T_f$	$t_{h1}$	$t_{h2}$	$t_{h3}$
304 SS	208	34	Var.	590	640	Var.	120	70	Var.

유도가열기의 출력변화에 대한 연구와 가열시간에 따른 온도변화 데이터로 참고로 하여 3단계 다출력 유도가

열을 위한 입력 데이터 선도를 제안하였다.(Fig. 7) Table 4는 1, 2 단계 유도가열의 입력 데이터를 나타내고 있다. 1단계 온도유지시간( $t_{h1}$ )의 목적은 프리커서의 표면부와 중심부의 온도편차를 최소화하기 위한 것이고, 2단계 온도유지시간( $t_{h2}$ )은 Table 3에서 알 수 있듯이 640~650°C 구간에서의 급격한 가열속도 감소를 고려하여 설정하였다. 온도유지구간에서 유도가열기의 출력(Q)은 2kW로 설정하였다.

최종가열단계인 3단계 유도가열 조건을 조사하기 위하여 발포실험을 수행하였다. 일반적인 발포공정에서는 기지합금 용점의 약 10°C 이상으로 가열된 전기로 내에 프리커서를 장입하여 온도 유지시간을 변수로 하여 Al foam을 제조한다. 그러나, 본 연구에서는 용점부근에서 온도를 유지시키는 방법 대신 목적하는 시편의 높이 팽창율을 얻을 때까지 연속가열 시키는 방식을 채택하였다. 이 방법은 기존 방식에 비해 제조시간을 단축시킬 수 있다는 장점이 있으나 과열로 인해 몰드의 수명이 단축된다는 단점이 있다. Al foam의 제조에 있어서 특이한 점은 프리커서를 기지합금의 용점 이상으로 가열해도 용해에 의한 붕괴가 일어나지 않는다는 점이다. 이는 기공의 성장 시 발생하는 산화막과 수소개스의 팽창력 때문으로 보고되고 있다.<sup>(5)</sup>

Fig. 8은 전술한 두 가지 방법을 비교하기 위한 실험 결과이다.

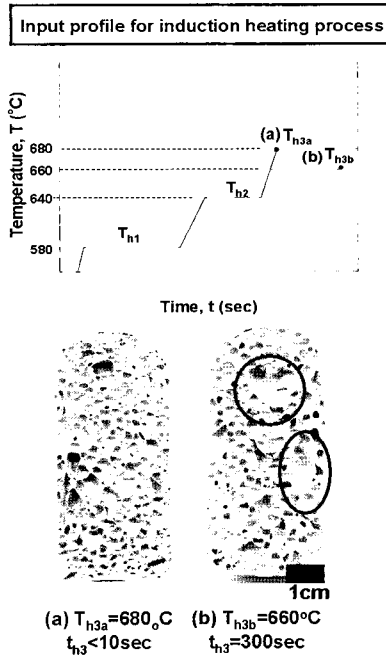


Fig. 8 Investigation of the proper temperature ( $T_{h3}$ ) and holding time ( $t_{h3}$ ) for the final heating step

Fig. 8(a)는 6061 Al 합금을 680°C까지 연속가열한 시편이고, Fig. 8(b)는 용점부근인 660°C에서 온도를 300sec간 유지시킨 시편이다. Fig. 8(a), (b)의 전체 가열 시간은 각각 430sec와 730sec였다. Al foam소재의 기공 성장거동은 중력이나 산화와 같은 환경의 영향을 크게 받기 때문에 제조시간이 짧을수록 좋다.<sup>(6,13)</sup> 연속가열시킨 시편 (Fig. 8(a))이 기공크기 분포의 균일도나 제조시간 측면에서 더 적합함을 알 수 있다.

Fig. 9는 동일한 높이팽창율( $R_h$ )조건에서 내부 기공의 크기만을 조절하기 위한 실험의 결과이다. 3개의 0.3 wt.% TiH<sub>2</sub> 프리커서를 680°C까지 가열한 후  $t_{h3}$ =10, 120, 240 sec로 온도를 유지시켰다. 기공의 크기가 현저하게 증가했음에도 불구하고, 시편의 높이는 더 이상 증가하지 않았으며,  $t_{h3}$ =240sec인 경우 오히려 약간의 감소하였다. 이는 기공의 조대화가 인접 기공들의 합체(Coalescence)에 의해 발생했음을 나타낸다.

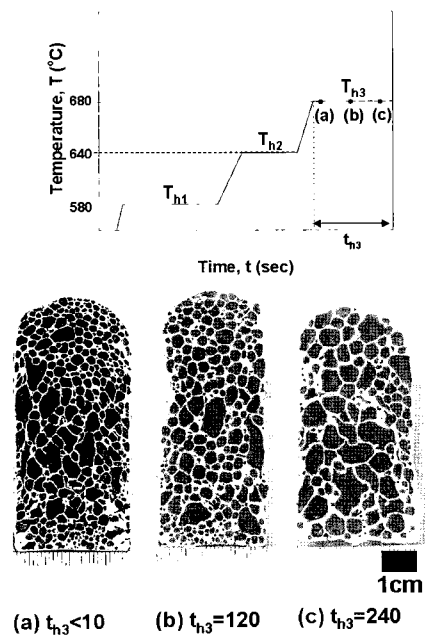
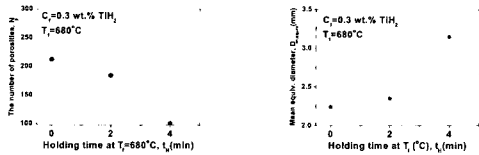


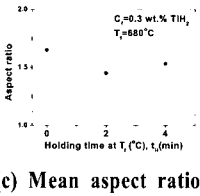
Fig. 9 Effect of the holding time of the final step ( $t_{h3}$ ) at 680°C ( $T_{h3}$ ) on the cell morphology

Fig. 10~12는 Fig. 9의 시편을 정량적으로 분석하기 위하여 Image analysis를 한 결과이다. Fig. 10(a)는 3단계 온도유지시간 ( $t_{h3}$ )가 기공의 개수에 미치는 영향을 나타내고 있다. 최종가열온도 유지시간 ( $t_{h3}$ )의 증가와 더불어 기공의 수가 감소하였고,  $t_{h3}$ =2~4min 구간에서 가장 급격히 감소하고 있다. Fig. 10(b)와 Fig. 11은 최종

가열온도 유지시간 ( $t_{h3}$ )의 변화에 따른 기공크기의 변화를 나타내고 있다.  $t_{h3}$ 의 증가와 더불어 기공크기는 증가하였고, 인접 기공들과의 합체(Coalescence)에 의해 기공의 수가 현격히 감소하는  $t_{h3}=2\sim 4\text{min}$  구간에서 급격



(a) The number of porosities (b) Mean diameter



(c) Mean aspect ratio

Fig. 10 Morphology of cellular 6061 alloys fabricated as a function of the holding time ( $t_{h3}$ ) at 680 °C

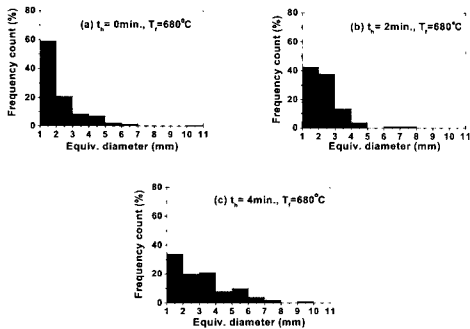


Fig. 11 Equivalent diameter-frequency (%) graphs for 6061 Al foams fabricated for variation of the final holding time ( $t_{h3}$ ) at  $T_{a3}=680\text{ }^{\circ}\text{C}$

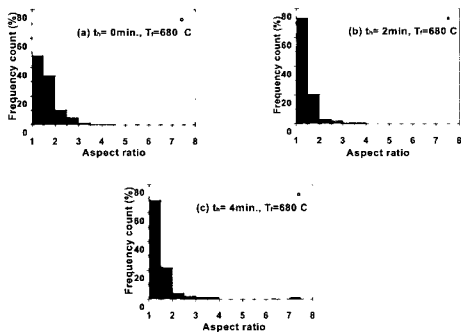


Fig. 12 Aspect ratio - frequency (%) graphs for 6061 Al foams fabricated for variation of the final holding time ( $t_{h3}$ ) at  $T_{a3}=680\text{ }^{\circ}\text{C}$

히 증가하고 있다. Fig. 10(c)와 Fig. 12는 기공의 형상의 변화를 조사하기 위하여 종횡비의 변화를 나타내고 있다.  $t_{h3}=2\text{min}$  인 경우의 기공이 가장 구상에 가까움을 관찰 할 수 있다. 위의 정량분석 결과로부터 적절한 온도 유지시간의 설정으로 등방성 기공을 얻을 수 있으나, 그 이상의 유지시간에서는 조대화가 발생함을 알 수 있었다. 이상과 같은 실험결과를 토대로 하여 최종가열단계인 3단계 유도가열 조건을 결정하였다.

Fig. 13은 최종적으로 수정된 3단계 다출력 유도가열을 위한 입력 데이터 선도이다.

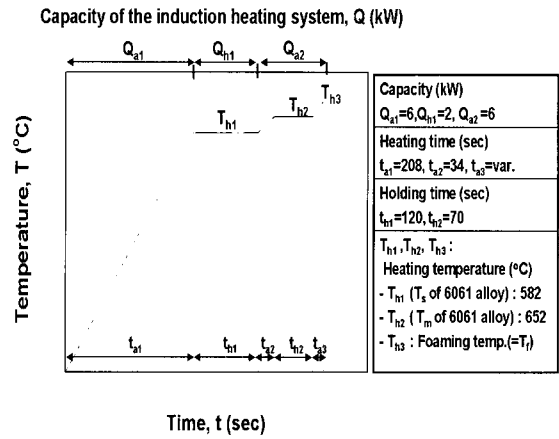


Fig. 13 Final input data diagram of multi-step induction heating

### 3.3 최종가열온도( $T_{a3}$ )-기공율 곡선

Al foam이 맞춤형재(tailored material)로 사용되기 위해서는 원하는 기계적 성질의 제품을 제조할 수 있는 데이터베이스가 확립되어야 한다.

이러한 관점에서, 최종가열온도( $T_{a3}$ )에 따른 기공율의 변화를 D/B화 하기 위하여 Fig. 13의 3단계 다출력 유도가열을 위한 입력 데이터를 이용하여 발포실험을 하였다.

Fig. 14는 발포후 6061 Al foam 시편을 보여주고 있다. 약 610 °C 에서부터 기공의 미소한 성장을 육안으로 확인할 수 있으며 (Fig. 14 (a)), 가압방향에 수직방향으로 이방성 (anisotropy)을 가진 기공이 크랙과 같은 형태로 발달하고 있다. Duarte<sup>(6)</sup>는 시편의 팽창초기에 발생하는 이방성 기공은 기공의 성장 중에 소멸된다고 보고 하였다. 최종가열온도의 증가와 더불어 이방성을 가지던 기공들이 점차 원형으로 변해가고 있음을 관찰 할 수 있다.(Fig. 14 (c)~(e)) 일반적으로 구상으로 변한 기공을

캐비티 (cavity)라고 한다. 시편의 직경과 높이가 동일할 때 기공이 가장 구상에 근접함을 관찰 할 수 있다.(Fig. 14 (e)) 기공의 성장이 진행되면서 이번에는 시편의 높이 방향으로의 이방성(anisotropy)을 가진 형태로 성장하고 있다.(Fig. 14 (f), (g)) 성장한 기공이 얇은 벽면을 경계로 인접한 기공과 접촉하면서 점차 다각형의 형태를 띄게 되었고 (Fig. 14 (f)) 시편의 중앙부분은 가압력에 수평방향으로 발달하였다. 비교적 큰 이 다각형의 기공은 셀(cell)이라 한다. 성장이 계속되면 기공벽면의 파괴로 인해 합체에 의한 조대화가 발생함을 알 수 있다. (Fig. 14 (g))

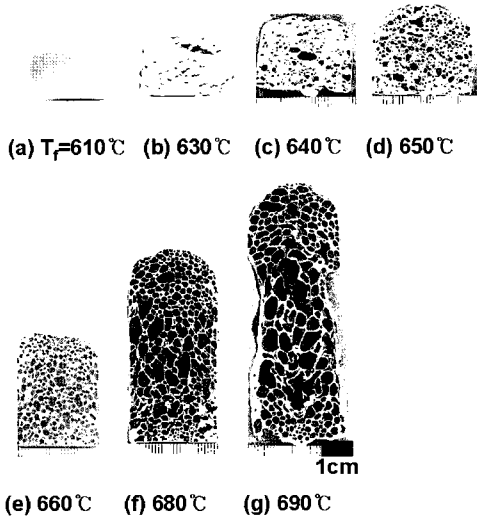


Fig. 14 Morphology of 6061 Al foams fabricated for variation of final heating temperature ( $T_{a3}$ )

Fig. 15와 Fig. 16은 Fig. 14의 시편을 화상분석(Image analysis)를 통해 분석한 결과를 나타낸 것이다. Fig. 15 (a)는 최종가열온도에 따른 기공율의 변화를 나타내고 있다. 시편의 팽창이 감지되는 610°C에서 630°C까지는 완만한 기공증가율을 보였다. 이것은 기지합금내의 고상율이 높아 발포에 충분한 점성이 얻어지지 않았기 때문이다. A6061의 액상선 온도인 652°C의 전후부근에서 기공율은 급속히 증가하였다. Al foam 시편의 높이팽창을 실시간으로 측정하기 위해 사용되는 Expandometer<sup>(10)</sup>의 결과와 비교하기 위해서 최대높이팽창율 ( $H_{t,max}/H_0$ )도 계산하였다.(Fig. 15 (b)) Fig. 15 (c) 와 Fig. 16은 최종가열온도의 증가와 더불어 기공의 크기가 증가하고 있음을 보여주고 있다. Fig. 15 (d)는 기공의 형상적인 면을 고려하기 위해 분석한 중형비 빈도수 (%) 곡선이다. 최종가열온도의 증가와 더불어 기공은 점점 구상으로 변하고 있었으며,  $T_{a3}=660^\circ\text{C}$ 조건에서 가장 구형에 가까운 기

공이 많은 시편이 제조되었다. 그러나  $T_{a3}=660^\circ\text{C}$ 이상은 다시 중형비가 커지고 있다. Fig. 14의 시편사진을 관찰해 보면, 시편의 직경과 높이가 동일한 경우에 가장 구상인 기공이 관찰된다. 반면에 시편의 직경이 높이보다 큰 경우에는 가로방향으로의 이방성을 가진 기공이, 높이가 직경보다 큰 경우에는 세로방향으로의 이방성을 가진 기공이 각각 관찰된다. 따라서 Al foam 소재 내부의 기공형상은 제품형상에 큰 영향을 받는 것으로 사료된다.

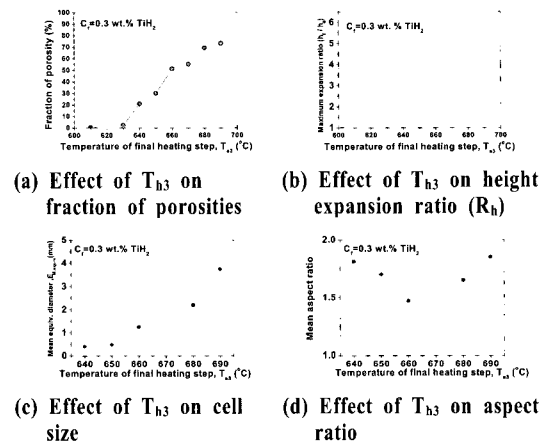


Fig. 15 Effect of the final heating temperature ( $T_{a3}$ ) on the morphological properties of 6061 Al foams

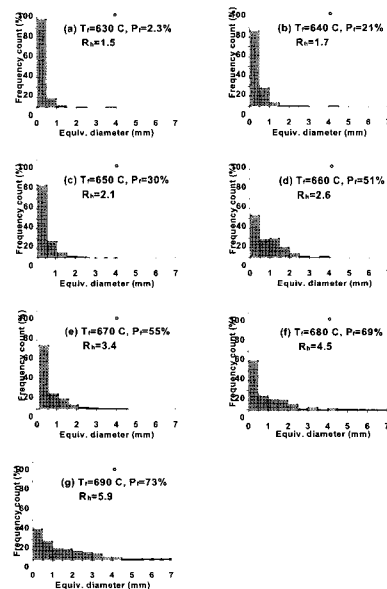


Fig. 16 Relationship between equivalent diameter and frequency count for 6061 Al foams fabricated for various final heating temperature ( $T_{a3}$ )

#### 4. 결론

P/M법과 다출력 유도가열법을 응용한 6061 Al foam 제조실험을 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 유도가열 출력(Q)이 6kW인 경우 기공크기 및 분포의 균일도 측면에서 가장 적합한 6061 Al foam이 제조되었다.

(2) 6061 Al foam 제조를 위한 3단계 다출력 유도가열 선도가 제안되었다.

(3) 유도가열의 이용한 발포공정에서는 목적 이팽창율을 얻을 때까지 연속가열시키는 것이 기지합금의 용점에서 온도유지시간을 변수로 하여 제조하는 경우에 비해 제조시간, 기공의 크기 및 분포의 균일도 면에서 우수함을 알 수 있었다.

(4) 6061 Al foam 시편의 직경과 높이의 치수비가 1에 근접할수록 구상에 가까운 기공을 얻을 수 있었다.

(5) 프리커서 (0.3wt.% TiH<sub>2</sub>)의 최종가열온도(T<sub>3</sub>)의 변화에 따른 기공율 (%) 선도를 조사하여 목적 기공율의 발포급속을 제조하기 위한 데이터 베이스를 구축하였다.

#### 후 기

본 연구는 부산대학교 정밀정형 및 금형가공 연구센터(ERC/NSDM)를 통한 한국과학재단 우수연구센터의 지원에 의한 연구비와 부산대학교 기성희 재원 연구비의 지원으로 이루어 졌음.

#### 참 고 문 헌

- (1) F. Simansik, W. Rajner, and R. Laag, 2000, "Alulight Aluminium Foam for Lightweight Constructier", SAE 2000 World Congress, Detroit, Michigan, SAE technical paper series 02, p. 0337.
- (2) F. Simansik, 1999, "Reproducibility of Aluminium Foam Properties", 1st Int. Conf. on Metal Foams and Porous Metal Structures, Bremen, Germany, 14 16 June. p. 235.
- (3) Y. Sugimura, J. Meyer, M.Y. He, H.B. Smith, J. Grenstedt, and A.G. Evans, 1997, "On the Mechanical Performance of Closed Cell Al Alloy Foams", Acta Mater, Vol. 45, p. 5245.
- (4) L.J., Gibson and M.F., Ashby. 1997, "Cellular Solids: Structure and Properties", Second editions., Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- (5) J. Banhart, 2001, "Manufacture, Characterization and Application of Cellular Metals and Metal Foams", Progress in Materials Science, Vol. 46, p. 559.
- (6) I. Duarte and J. Banhart, 2000, "A Study of Aluminium Foam Formation Kinetics and Microstructure", Acta Materialia, Vol.48, p. 2349.
- (7) Th. Wuebben, S. Odenbach, and J. Banhart, 2001, "Study of Lead Foams under Microgravity", 2nd Int. Conf. on Metal Foams and Porous Metal Structures, Bremen, Germany, 18 20 June. p. 83.
- (8) URL: [www.ameritherm.com/overview\\_heating.html](http://www.ameritherm.com/overview_heating.html).
- (9) R. Kresse, "Characteristics and Handling of Titanium Hydride", 1st Int. Conf. on metal foams and porous metal structures, Bremen, Germany, 14 16 June. Bremen, 1999, p. 31.
- (10) I. Duarte, P. Weigand, and J. Banhart, 1999, "Foaming Kinetics of Aluminium Alloys", Proc. of the 1st Int. Conf. on Metal Foams and Porous Metal Structures, Bremen, 14 16 June, p. 97.
- (11) H.K. Jung and C.G. Kang, 1999, "An Induction Heating Process with Coil Design and Solutions Avoiding Coarsening Phenomena of Al 6pctSi 3 Pct Cu, 1 Pct Mg Alloy for Thixoforming", Metallurgical and materials transactions A, 30A, p. 1.
- (12) C.G. Kang, S.W. Youn, and P.K. Seo, 2002, "Reheating Process of Metal Matrix Composites for Thixoforming and Their Inductive Coil Design", Journal of Materials Engineering and Performance, Vol. 11 (2), p. 152.
- (13) M.F. Ashby, A. Evans, N.A. Fleck, L.J. Gibson, J.W. Hutchinson, and H.N.G. Wadley, 2000, "Metal Foams A Design Guide", Butterworth Heinemann.