

## P/M법과 유도가열 공정을 이용한 발포용 6061 Al 합금 프리커서 제조

윤성원\* · 강충길\*\*

(2003년 1월 22일 접수)

## Fabrication of Al 6061 Foamable Precursor by Powder Metallurgical and Induction Heating Method

S. W. Youn and C. G. Kang

### Abstract

In the powder compact melting technique, proper precursor fabrication is very important because density distribution after foaming and foamability are determined during precursor fabrication process. The fabrication of the precursor has to be performed very carefully because any residual porosity or other defects will lead to poor results in further processing. In order to evaluate the effect of the compaction parameters on the kinetics of the foaming process, a series of experiments were performed. In this study, aluminium foams with a closed cell structure were fabricated by using both the powder compact method and the induction heating process. A proper induction coil was designed to obtain a uniform temperature distribution over the entire cross sectional area of precursor. To establish the foamable precursor fabrication conditions, effects of process parameters such as the titanium hydride content (0.3~1.5 wt.%), pressing pressure of the foamable precursor (50~150kN) on the pore morphology were investigated.

**Key Words** : Foamable Precursor, Closed Cell Al Foams, Powder Processing, Induction Heating, Compaction Pressure, TiH<sub>2</sub> Quantity

### 1. 서론

Al foam 은 Al 합금 내에 기공을 인위적으로 발생 및 성장시켜 부피를 팽창시킨 다공질의 초경량 소재로서, 비강성이 높고 소음 및 진동감쇄능, 에너지 흡수율, 전자기차폐효과 면에서 우수하다.<sup>(1~2)</sup> 또한, 폴리머 foam

소재에 비해 매우 높은 압축강도를 가지면서 에너지 흡수능이 좋기 때문에 자동차용 범퍼나 crash box와 같은 부품에 응용되고 있다.<sup>(2~3)</sup> 자동차 부품과 같이 3차원 복잡형상의 Al foam 부품 제조에는 기지합금과 발포제의 혼합분말을 예열 및 압축하여 프리커서를 제조한 후 가열시키는 분말-주조법 (Powder compact melting techni

\* 부산대 대학원 정밀기계공학과  
\*\* 부산대 기계공학부

que)이 널리 이용되고 있다.<sup>(4-7)</sup> 최종 Al foam 제품의 밀도구배 및 기공의 배향성은 프리커서 내부의 발포제 분포, 잔류기공 등에 의해 결정되며<sup>(8)</sup>, 기계적 성질에 큰 영향을 미친다.<sup>(9)</sup> 또한, 프리커서 내부에 잔류기공이 존재할 경우 발포시 수소개스의 이동로로 이용되어 기공간 합체 또는 불균일한 기공의 성장을 초래한다.<sup>(4)</sup> 따라서, 잔류기공이 존재하지 않으면서 발포제 입자 분포가 균일한 프리커서를 제조하는 것은 매우 중요하다. 프리커서 제조에 있어서 중요한 공정 인자들로는 발포제 분말의 함량, 혼합분말의 예열온도, 가압력 등이 있다. TiH<sub>2</sub> 분말을 발포제로 사용하여 Al foam을 제조할 경우 적합한 예열온도와 TiH<sub>2</sub> 함량은 각각 450~500℃<sup>(4,10)</sup>와 0.6~1 wt.%<sup>(8,11)</sup>로 각각 보고되고 있다. 그러나 혼합분말을 압축할 때의 가압력에 관한 연구결과는 발견되지 않고 있다. 또한, TiH<sub>2</sub> 함량의 경우 완전히 용해된 지지합금내에 TiH<sub>2</sub>분말을 장입 및 교반시켜 분산시키는 주조법에 의한 연구가 대부분이다. 액상법의 경우 발생된 수소 개스가 교반 중에 용탕 외부로 방출되는 양이 많기 때문에 분말 주조법에 적용시키기에는 부적합하다. 또한, Al foam 제조시 가열공정에는 일반적으로 전기로가 사용된다.<sup>(8)</sup> 그러나 목적 형상이 3차원 복잡형상 일 경우에 부품의 모든 부위에서 균일한 가열속도를 얻는 것은 불가능하다.<sup>(2)</sup> Al foam 부품내부의 불균일한 온도분포는 불균일한 기공크기 분포 및 표피두께의 원인이 되어 기계적 성질의 저하를 초래한다. 유도가열을 이용할 경우 부품의 형상에 따라 적합한 코일을 제작함으로써 제품 내의 온도분포의 불균일을 감소시켜, 기계적 성질을 개선시킬 수 있다. 또한, 유도가열은 재현성, 사이클 타임, 정확도 등이 우수하고 환경친화적인 공정이기 때문에 용접, 어닐링, 접합, 브레이징 등의 영역에서 폭넓게 사용되고 있다.<sup>(13)</sup>

본 연구에서는 혼합분말의 가압력과 TiH<sub>2</sub> 함량을 변화시키면서 발포용 프리커서를 제조한 후, 유도가열하여 6061 Al foam을 제조하였다. 유도가열시 시편의 균일한 온도분포를 얻기 위한 유도코일이 설계되었으며, 제조된 6061 Al foam에 대해서는 공정변수에 따른 기공의 형상학적 (morphological) 변화가 정량적으로 조사되었다.

## 2. 분말-주조법(Powder melt compact technique)의 개요

분말형 Al 6061 (325mesh)합금과 TiH<sub>2</sub> 분말(200mesh)이 지지합금과 발포제로써 각각 사용되었다. Fig. 1은 분말-주조법 공정의 개략도 및 장비를 나타내고 있으며,

Table 1은 분말형 6061 Al 합금의 조성을 나타내고 있다.

Table 1 Chemical composition of powdered 6061 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.

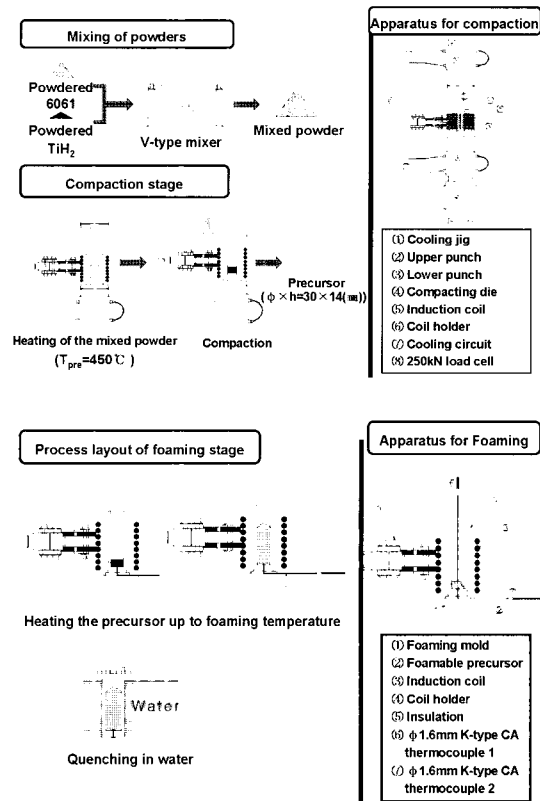


Fig. 1 Process layout of 6061 Al foam fabrication

6061 Al 합금분말(30g)과 TiH<sub>2</sub> 분말(0.1, 0.3, 0.5, 1.2, 1.5wt.%)을 V mixer를 사용하여 30rpm의 속도로 교반시킨 후, 혼합분말을 압축다이의 캐비티 내에 넣고 유도가열기를 사용하여 6kW의 출력으로 450℃까지 예열하였다. 예열온도(T<sub>pre</sub>)는 Kresse<sup>(10)</sup>의 TiH<sub>2</sub>의 열중량 분석 결과에 따라 Ti와 H<sub>2</sub>가스로의 환원반응이 급격하게 발생하지 않는 온도범위 내에서 최대로 설정되었으며, 1.6mm 직경의 K type CA 열전대를 사용하여 분말의 중앙과 상부의 온도를 측정하였다. 예열된 혼합분말을 편치로 압축시킨 후 냉각시키면 φ30×h14(mm) 크기의 발포용 프리커서가 된다. 프리커서 내부의 잔류기공은 발

포시 He gas 의 이동으로 사용되어 기공의 성장에 악영향을 미치므로, 프리커서는 잔류기공이 존재하지 않도록 충분히 고밀화 되어야 한다. 가압력은 50, 70, 90, 120, 150kN 로 설정되었다. 제조된 발포용 프리커서( $d \times h = 31 \times 14\text{mm}$ )를 스테인레스로 제작된 좌우 분할형 몰드에 장입하여 유도가열시켜 6061 Al foam 시편을 제작 하였으며, 프리커서의 정확한 온도조절을 위하여  $\Phi 16\text{mm}$  K형 CA 열전대를 사용하여 프리커서 하부 중앙의 온도를 측정하였다.

### 3. 유도가열 시스템 설계

#### 3.1 유도가열 코일의 설계

Al foam의 제조시 내부의 기공들은 산화나 중력과 같은 실험환경의 영향을 크게 받는다. 따라서, 발포공정시 프리커서는 균일한 온도 분포를 가지면서 가능한 한 빠르게 목표 온도까지 가열되어야 한다.<sup>(4)</sup> 이러한 관점에서, 유도코일의 설계는 매우 중요하다.

일반적으로 유도가열시 magnetic flux는 시편의 중심에 집중되는 성향이 있으며, 시편의 끝단부에서는 전자장의 왜곡이 발생하여 과열 또는 아열 현상을 야기시킬 수 있다. 따라서 코일의 설계시 위의 현상들을 고려하여 치수 및 형상을 결정해야 한다.<sup>(14-16)</sup>

본 연구에서는 프리커서를 P/M법으로 제조하였기 때문에 몰드 (304 stainless steel)를 가열하여 열전도에 의하여 내부의 소재를 가열시키는 2차 가열 방식을 사용하였다.(Fig. 2)

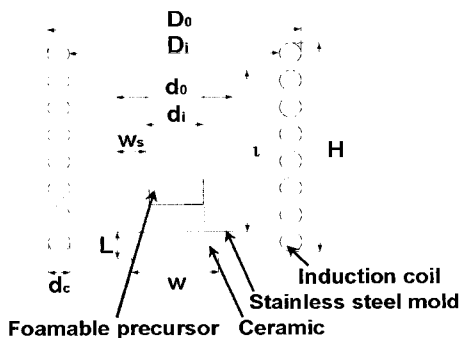


Fig. 2 Schematic illustration of induction heating device

#### 3.2 표피효과(skin effect)를 고려한 주파수(f)의 결정

유도가열시스템의 주파수(f)는 침투 깊이(skin depth,

$\delta$ )를 결정하는 중요한 변수이다.<sup>(17-19)</sup> 유도가열시 유도코일은 시편에 와전류(eddy current)를 발생시키는데, 와전류의 흐름에 대한 물질의 저항(고유저항)에 의해 열이 발생된다. 발생된 와전류의 약 86%가 시편표면에 집중되며, 시편 표면으로부터 내부로의 깊이증가에 따라 감소하게 되는데 다음과 같은 관계를 가진다.

$$I = I_0 \left( \frac{-x}{\delta} \right) \quad (1)$$

여기서  $I$ ,  $I_0$ ,  $x$  그리고  $\delta$ 는 각각 시편에 유도된 전류값(A), 초기전류값(A), 시편 표면에서 내부로의 거리, 그리고 침투 깊이를 나타낸다.

이때 와전류가 36.8%인 시편표면으로부터의 깊이를 침투깊이(skin depth)라 하며 다음과 같은 관계를 가진다.

$$\delta = \sqrt{\frac{2\rho}{\mu_0 \mu_r \omega}} = \sqrt{\frac{2}{\mu_0 \mu_r \omega \sigma}} \quad (2)$$

여기서  $\mu_0$ ,  $\mu_r$ ,  $\rho$ ,  $\sigma$ ,  $\omega$ 는 각각 자유공간의 투자율(H/m), 자유공간에 대한 물질의 상대투자율(H/m), 고유저항(ohm), 전도도(mho/m), 그리고 전원주파수(Hz)를 나타낸다. 이때  $\mu_0$ 와  $\omega$ 는 각각  $4\pi \times 10^{-7}$ (H/m)과  $2\pi f$ 이며, 304 스테인레스 강의 경우 고유저항( $\rho$ )은  $6.897E-7$ (ohm/m)이다. 또한, 304 스테인레스 강의 경우 비자성 물질로 구분되므로 투자율( $\mu$ )은 1이므로, 침투깊이와 주파수의 관계는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\delta = \sqrt{\frac{6.879 \times 10^{-7}}{4 \times 10^{-7} \times 1 \times \pi^2 f}} = 0.418 \sqrt{\frac{1}{f}} \quad (3)$$

주파수(f)의 증가와 더불어 침투깊이( $\delta$ )가 감소하므로, 본 연구에서와 같이 얇은 두께의 몰드를 가열하는 경우에는 비교적 높은 주파수가 적합함을 알 수 있다.

본 실험에서 유도가열기의 주파수(f)는 40000 (Hz)로 설정되었으며, 이때 침투 깊이는 2.1(mm)이다.

#### 3.3 유도코일의 형상 및 치수

유도가열 코일의 형상 및 치수는 주파수(f), 소재, 적용목적, 침투깊이 등을 고려하여 설계되어야 한다.<sup>(20-21)</sup>

Fig. 3 는 설계된 유도코일의 형상을 나타내고 있다.

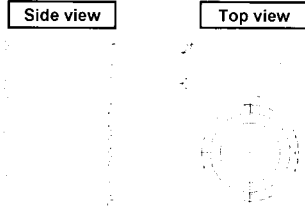


Fig. 3 Multi-turn induction coil with single place

유도가열을 위한 몰드와 코일은 전자기 끝단 효과 (electromagnetic end effect)를 최소화 하기 위해 원형으로 제작하였다. 피가열체와 유도코일간의 거리는 자성의 유무에 따라 결정되는데, 10mm로 설정하였다.<sup>(20)</sup> 유도코일 소재로는 전기전도도가 우수하고 저항이 낮은 구리관 (직경 10mm)가 사용되었으며, 내부에 냉각수가 흐르게 하여 코일의 손상을 방지하였다. 800V이하의 전압에서 사용되었기 때문에 피쉬 테일(fish tail) 형으로 코일 끝부분을 제작하였다.<sup>(21)</sup>

Table 2는 프리커서 가열을 위한 유도가열 장치의 치수를 나타내고 있다.

Table 2 Dimensions of induction heating device (f=40kHz, 304 SS mold) [unit : mm]

Coil inner diameter (D <sub>i</sub> )	Mold inner diameter (d <sub>0</sub> )	Mold outer diameter (d <sub>i</sub> )	Coupling distance (W <sub>s</sub> )
80	30	70	10
Coil length (H)	Mold length (l)	Coil wall thickness (l)	
150	130	10	

#### 4. 가압력 및 TiH<sub>2</sub> 함량이 기공의 성장에 미치는 영향

##### 4.1 가압력 (P<sub>c</sub>)이 시편 밀도에 미치는 영향

혼합분말의 압축시 압력에 따른 시편의 고밀화 경향을 관찰하기 위하여 450℃로 예열된 혼합분말(30.5g)을 150 kN으로 압축하여 가압력-높이감소를 곡선을 조사하였다.(Fig. 4) 60kN이상에서는 혼합분말이 어느 정도 압축되어 시편의 높이 감소율곡선의 기울기가 완만해 짐을 알 수 있다. 가압력이 발포 후의 시편에 미치는 영향을 더 자세하게 관찰하기 위하여 50, 70, 90, 120, 150kN의 가압력으로 제조된 프리커서를 동일한 온도(640℃)로 가열한 후 수냉하였다.

Fig. 4(a)~(c)에서 관찰할 수 있듯이 가압력이 50, 70,

90kN인 경우에는 시편의 부피증가율이 낮고 기공의 분포가 매우 불균일 하였다. 또한 압축방향에 수직으로 조대한 crack과 같은 기공이 관찰되었다. 이것은 불충분한 가압력에 의해 제조된 프리커서 내부의 잔류기공이 수소 개스의 통로로 이용되었기 때문으로 판단된다. 120kN과 150kN의 경우에는 거의 동일한 기공의 크기 및 형상의 분포를 나타내었다.(Fig. 4 (d)~(e))

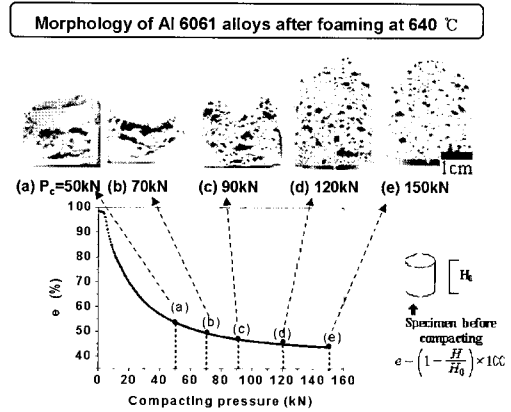


Fig. 4 Effect of the compaction pressure (P<sub>c</sub>) on the pore morphology of the 6061 Al foams

#### Optical observation points of precursor (A~D)

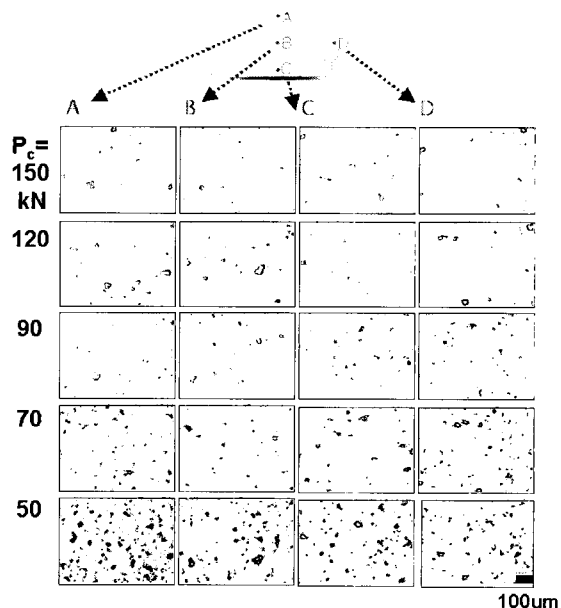


Fig. 5 Microstructures of precursors fabricated for variation of compaction pressure (T<sub>pre</sub>=450 °C, C=1.5 wt. % TiH<sub>2</sub>)

Fig. 5는 Fig. 4에 표기된 가압력조건(Fig. 4(a)~(e))에서 제조된 프리커서를 수직으로 이등분 한 면의 부위별 미세조직( $\times 100$ ) 사진이다. 150kN과 120kN의 가압력 조건에서 제조된 프리커서들은 잔류기공이 존재하지 않는 양호한 조직을 나타내고 있다. 90kN의 가압력 조건에서 제조된 프리커서에서는  $TiH_2$  입자와 형상 및 크기가 유사한 잔류기공이 관찰되었다. 이 기공은 미세조직관찰을 위한 시편의 절단과 연마과정 중에  $TiH_2$  입자가 분리됨으로써 생성된 것으로 사료되며 120kN이상의 가압력으로 제조한 프리커서에서는 관찰되지 않았다. 70kN과 50kN 프리커서에서는 다수의 잔류기공이 관찰되었는데, 발생원인은  $TiH_2$  입자와 기지합금과의 분리현상과 가압력의 부족으로 인한 혼합분말의 불충분한 고밀화로 판단되었다.

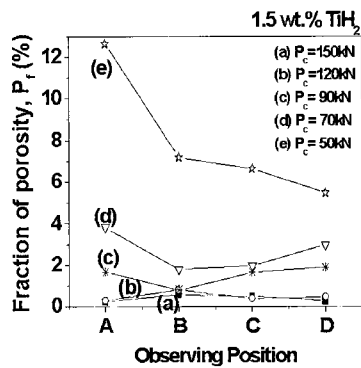


Fig. 6 Density distribution of precursors fabricated for variation of compacting pressure ( $T_{pre}=450^\circ C$ ,  $C=1.5$  wt. %  $TiH_2$ )

Fig. 6은 Fig. 5의 조직사진들을 Image analyzer를 이용하여 정량적으로 분석한 것이다. 120kN과 150kN의 경우에는 기공율이 1% 미만으로 거의 동일하였다. 90kN의 조건에서 제조된 프리커서의 기공율은 2% 미만이었으며 부위별 밀도구배가 관찰되었다. 70kN 시편은 2~4%의 기공율 분포를 보이고 있으며, 50kN의 경우에는 6~12%로 급격히 증가되었다. 또한 Fig. 6(e)에서 알 수 있듯이 가압력이 감소할수록 시편의 A 부분(Fig. 5)의 기공율이 증가하고 있음이 관찰되었다.

#### 4.2 $TiH_2$ 함량 ( $C_f$ )이 시편 밀도에 미치는 영향

Fig. 7은  $TiH_2$  함량이 다른 프리커서를 동일  $640^\circ C$ 까지 가열시킨 시편의 수직절단면을 나타내고 있다. Fig. 7(a)~(c)의 경우에는 주로 직경방향으로의 이방성을 띤

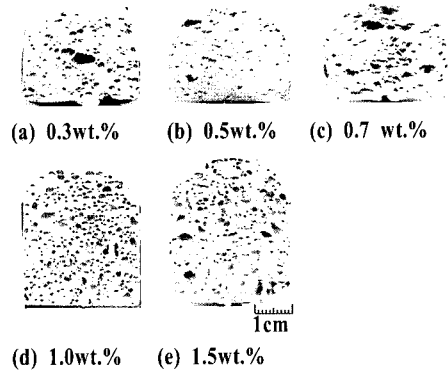


Fig. 7 Effect of the  $TiH_2$  content on pore morphology of the 6061 Al foams, which were foamed at the same temperature

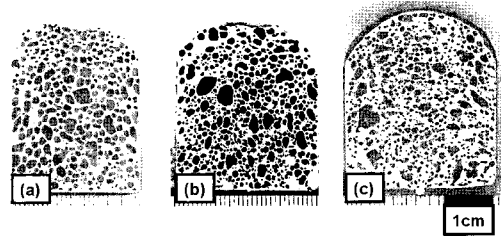


Fig. 8 Effect of the  $TiH_2$  content on pore morphology of the 6061 Al foams, which were expanded at the same height

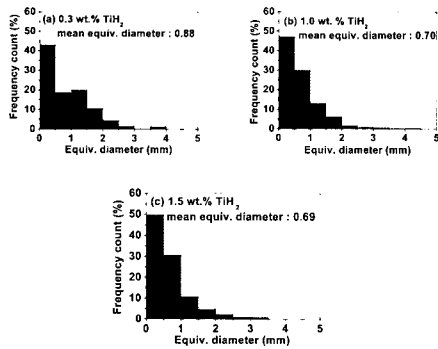
기공들이 관찰되었고, Fig. 7(d)~(e)에서는 비교적 등방성의 기공들이 관찰되었다. Fig. 8은  $TiH_2$  함량이 다른 프리커서를 동일한 부피로 팽창시킨 시편을 나타내고 있다. 기공과 기공벽의 명확한 관찰을 위해서 기공내부를 후색 그라파이트로 도포 하였다. 최종가열온도( $T_f$ )를 조절하여 같은 높이의 시편을 제조하였으며, Fig. 8(a), (b), (c)의 제조조건은 각각  $660^\circ C$ ,  $640^\circ C$ ,  $640^\circ C$  였다.  $TiH_2$  함량이 10wt.% 와 1.5wt.% 시편은 약  $640^\circ C$ 에서 얻을 수 있었다.

분말 주조법을 이용한 Al foam 부품의 제조시 필연적으로 발생되는 표피는 압축강도를 및 plateau stress 영역을 증가시키므로<sup>(22)</sup> 반드시 고찰되어야 한다.  $TiH_2$  함량에 관계없이 시편의 표피(surface skin)는 결함이 없는 양호한 상태였다. 그러나 1.0, 1.5wt.%  $TiH_2$  시편의 경우 조대화 된 기공들에 의한 밀도구배가 발생했음을 알 수 있었다. 이 조대화 된 기공들은 기공의 핵이 되는  $TiH_2$ 의 함량이 많기 때문에 합체(Coalescence)에 의해 생성되는 것으로 사료된다.

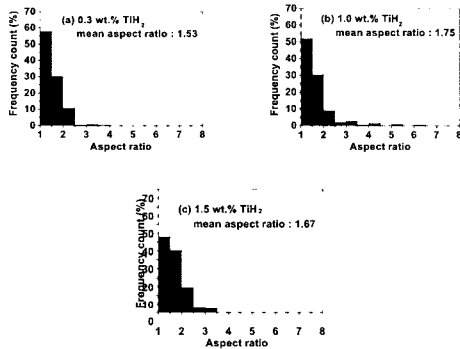
기공의 크기 및 형상은 Al foam의 기계적 성질에 큰 영향을 미치므로<sup>(23)</sup>, Fig. 8의 시편사진을 Image analyzer

**Table 3 Effect of TiH<sub>2</sub> content on morphology of 6061 Al foams**

Analysis result	0.3 TiH <sub>2</sub> T <sub>f</sub> =660 °C	1.0 TiH <sub>2</sub> T <sub>f</sub> =640 °C	1.5 TiH <sub>2</sub> T <sub>f</sub> =640 °C
Height expansion ratio (H/H <sub>0</sub> )	2.6	2.6	2.8
Mean aspect ratio	1.49	1.75	1.67
Mean equiv. diameter (mm)	0.92	0.70	0.69
Fraction of porosity (%)	53	54	50



**Fig. 9 Effect of the TiH<sub>2</sub> content on pore size of the 6061 Al foams, which were expanded at the same height**



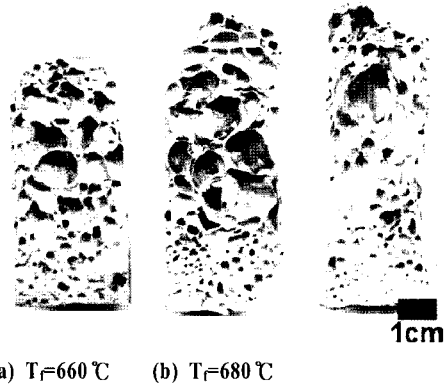
**Fig. 10 Effect of the TiH<sub>2</sub> content on pore shape of the 6061 Al foams, which were expanded at the same height**

를 이용하여 정량분석 하였다.(Table 3, Fig. 9~10)

Fig. 9는 분석결과를 기공직경-기공의 빈도수(%) 곡선으로 나타낸 것이다. Al foam 내부의 기공의 크기 분포의 영역이 매우 넓기 때문에, 평형직경을 1mm 단위로 분류하였다. 또한, Al foam 시편내부의 기공형상이 완벽한 구상이 아니기 때문에 등가직경 (D<sub>equiv.</sub>, equivalent diameter (mm))으로 나타내었다. 등가직경이란 분석되는 기공과 같은 면적을 가지는 원의 직경을 의미한다. 발포

도가 동일할 때는 TiH<sub>2</sub> 함량이 적을수록 기공의 크기가 증가함을 알 수 있었다. 기공의 평균크기: TiH<sub>2</sub> 함량이 0.3, 1.0, 1.5wt.% 일 때 각각 0.92, 0.70, 0.69 였다. 기공의 크기 차이는 최종가열온도(T<sub>f</sub>)의 차이 때문에 발생된 것으로 판단되는데, 기공의 성장거동은 온도조건에 절대적인 영향을 받기 때문이다.<sup>(1~2,4)</sup> 즉, TiH<sub>2</sub> 함량이 0.3 wt.%일 때 기공의 크기가 가장 큰 이유는 최종가열온도가 가장 높았기 때문이다. 1.0, 1.5wt.% 의 경우 TiH<sub>2</sub>함량의 차이는 크지만 최종가열온도가 T<sub>f</sub>=640°C로 동일하였기 때문에 거의 같은 기공크기를 보여주고 있다. 그러나, 이러한 경향은 기공의 크기가 더 증가하여 인접기공간의 합체에 의한 조대화가 시작되면 현저히 바뀔 것으로 판단된다.

Fig. 10은 분석 결과를 종횡비-기공의 빈도수(%) 곡선으로 나타낸 것이다. 0.3wt.% TiH<sub>2</sub> 함량일 때 종횡비가 1에 가까운 값을 가진 기공이 58%정도로 가장 많이 존재함을 알 수 있었다. 인접한 기공들의 합체에 의한 조대화를 고려하기 위하여, 0.3wt.% 와 1.5wt.% TiH<sub>2</sub> 프리커서를 최종가열온도(T<sub>f</sub>)를 변수로 하여 가열시켰다. Fig. 11은 TiH<sub>2</sub> 함량이 1.5wt.%일 때의 시편을 보여주고 있다.



**Fig. 11 Morphology of 6061 Al foams with 1.5 wt.% TiH<sub>2</sub>**

발포도가 커질수록 합체(Coalescence)에 의한 조대화와 밀도구배가 심하게 발생할 수 있었다. 발포도가 높은 시편일수록 기공의 수가 증대되고, 기공의 수가 현저히 줄어들고 있다. 특이한 점은 6061 합금의 용점이 652°C인데 그 보다 높은 온도에서 붕괴(collapse)가 되지 않은 점이다. 발포온도가 690°C인 경우에도 시편의 상부 부분만이 붕괴가 이루어지고 있고 나머지 부분은 아직 양호했다. 위의 원인은 발포도중 발생한 산화막과 수소 개스의 팽창력의 영향 때문이다.<sup>(4)</sup>

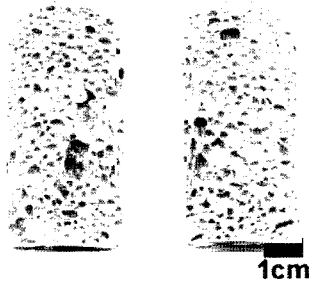


Fig. 12 Morphology of 6061 Al foams with 0.3 wt.% TiH<sub>2</sub> (T=680°C)

Fig. 12의 두 시편은 0.3wt.% TiH<sub>2</sub> 프리커서를 680°C로 가열했을 때의 시편으로, Fig. 11의 1.5wt.% 시편에 비해 기공의 크기 분포 측면에서 양호한 결과를 보여주고 있다.

#### 4.3 TiH<sub>2</sub> 함량에 따른 기계적 성질의 변화

위의 실험들을 통해 동일한 부피로 팽창된 foam 소재라 할지라도 TiH<sub>2</sub> 함량에 따라 기공의 크기가 다를 수 있었다. 동일한 부피 즉, 동일한 기공율일 때 기공의 크기가 기계적 성질에 미치는 영향을 조사하기 위하여 압축실험을 하였다. 최종가열온도를 조절하여, 동일한 높이로 팽창된 0.1 과 0.3wt.% TiH<sub>2</sub> Al foam 압축시편을 제작하였다.(Fig. 13) 압축강도나 plateau stress에 큰 영향의 미치는 표피(surface skin)<sup>(22)</sup>는 두께가 동일하였다.

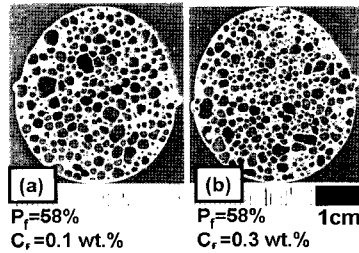


Fig. 13 Effect of the TiH<sub>2</sub> content on pore morphology of 6061 Al foams ( $\dot{\epsilon}=10^{-2}\text{sec}^{-1}$ )

Table 4 Effect of TiH<sub>2</sub> content on morphology of 6061 Al foams

Analysis results	0.1 TiH <sub>2</sub>	0.3 TiH <sub>2</sub>
Mean aspect ratio	1.48	1.64
Mean equiv. diameter (mm)	1.22	1.08
The number of pores	280	336

Table 4는 각 시편의 기공율 및 종횡비를 정량분석한 결과를 보여주고 있다. 0.3wt.% TiH<sub>2</sub>인 발포 6061합금의 기공은 0.1wt.%인 경우보다 크기가 작고 개수가 많음을 관찰할 수 있다. 이는 0.1wt.% TiH<sub>2</sub> 시편이 0.3wt.% 시편보다 10°C 높은 온도까지 가열되어 기공의 성장이 더 되었기 때문이다.

Fig. 14는 압축실험결과를 나타내고 있다. 0.1wt.% TiH<sub>2</sub> 시편이 0.3wt.% 시편보다 약 3MPa 높은 압축강도를 나타내고 있는데, 이는 Table 4의 기공의 평균 종횡비에서 알 수 있듯이 0.1wt.% TiH<sub>2</sub> 시편의 기공이 더 구상에 가깝기 때문으로 사료된다.

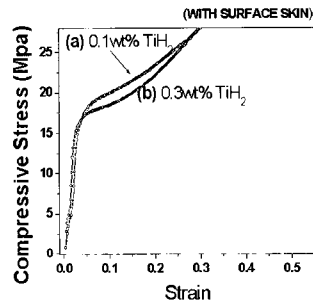


Fig. 14 Effect of the TiH<sub>2</sub> content on mechanical properties of 6061 Al foams ( $\dot{\epsilon}=10^{-2}\text{sec}^{-1}$ )

## 5. 결론

P/M법과 유도가열법을 이용한 6061 Al foam의 제조 실험을 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 프리커서의 잔류 기공율이 1% 미만 일 때 균일한 기공 성장거동을 보였고, 혼합분말의 예열온도 T<sub>pre</sub>=450°C, 가압력 P=120kN의 조건에서 잔류기공율이 1% 미만인 프리커서를 얻을 수 있었다.

(2) 기공의 크기나 형상을 변화시키는 가장 큰 인자는 온도조건이며, 프리커서의 가열시 시편의 부피팽창 속도는 TiH<sub>2</sub>의 함량과 더불어 증가하였다.

(3) 1.5wt.% TiH<sub>2</sub> 시편의 경우 높이팽창율 (H/H<sub>0</sub>)이 4 이상일 때 기공의 합체에 의한 급격한 기공의 조대화 현상 및 밀도구배가 관찰되었다.

(4) 0.3~1.5wt.% TiH<sub>2</sub> 함량의 프리커서를 동일한 체적으로 팽창시킨 경우, TiH<sub>2</sub> 함량의 감소와 더불어 기공의 크기는 감소하였고, 형상은 구상에 접근하였다.

(5) 기공율이 동일한 경우(58%), 0.1TiH<sub>2</sub> 시편은 0.3 TiH<sub>2</sub> 시편에 비해 3MPa 높은 압축강도를 보였으며, 이는 구상에 가까운 기공이 더 많이 분포하기 때문이다.

## 후 기

본 연구는 부산대학교 정밀의 정형 및 급형가공 연구센터(ERC/NSDM)를 통한 한국과학재단 우수연구센터 지원에 의한 연구비와 와 부산대학교 기성회 재원 연구비의 지원으로 이루어 졌음.

## 참 고 문 헌

- (1) Ashby, M.F., Evans, A., Fleck, N.A., Gibson, L.J., Hutchinson, J.W., and Wadley, H.N.G., 2000, "Metal Foams: A Design Guide", Butterworth Heinemann.
- (2) Gibson, L.J. and Ashby, M.F., 1997, "Cellular Solids: Structure and Properties", Second editions., Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- (3) Gradinger, R., Simancik, F., and Degischer, H.P., 1997, "Determination of Mechanical Properties of Foamed Metals", Welding technology, Vol.2, p. 701.
- (4) Duarte, I. and Banhart, J., 2000, "A Study of Aluminium Foam Formation Kinetics and Microstructure", Acta Mater., Vol. 48, p. 2349.
- (5) Markaki, A.E., and Cline, T.W., 2001, "The Effect of Cell Wall Microstructure on the Deformation and Fracture of Aluminium-based Foams", Acta mater, Vol. 49, p. 1677.
- (6) Banhart, J., Baumeister, J., and Webber, M., 1998. "Metal Powder Technologies and Applications", In: ASM handbook, Vol. 7. Materials park, USA: ASM International, p. 1043.
- (7) Baumgartner, F. and Gers, H., 1999, "Industrialization of P/M Foaming Process", Proc. of the 1st Int. Conf. on Metal Foams and Porous Metal Structures, MIT Publishing, p. 73.
- (8) Banhart, J., 2001, "Manufacture, Characterisation and Application of Cellular Metals and Metal Foams", Progress in Mater. Sci., Vol. 46, p. 559.
- (9) Kriszt, B., Foroughi, B., Faure, K. and Degischer, H.P., 1999, "Deformation behavior of aluminium foam under uniaxial compression (a case study)", Proc. of the 1st Int. Conf. on Metal Foams and Porous Metal Structures, MIT Publishing, p. 241.
- (10) R. Kreese, 1999, "Characteristics and Handling of Titanium Hydride", Proc. of the 1st Int. Conf. on Metal Foams and Porous Metal Structures, MIT Publishing, p. 31.
- (11) Baumeister, J., 1990, German Patent, DE 40 18 360.
- (12) 이제건, 1996, "실부 고주파 가열", 진영사.
- (13) URL: [www.ameritherm.com/overview\\_heating.html](http://www.ameritherm.com/overview_heating.html).
- (14) Jung, H.K. and Kang C.G., 1999, "An Induction Heating Process with Coil Design and Solutions Avoiding Coarsening Phenomena of Al 6pctSi 3 Pct Cu0.1 Pct Mg Alloy for Thixoforming", Metall. and mater. trans. A, Vol 30A, p. 1.
- (15) Kang, C.G., Jung, H.K., and Jung, Y.J., 1999, "Coil Design of Inductive Heating and Reheating Process of Aluminium Alloys for Thixoforming", Advanced Technology of Plasticity, Vol III, Proc. of the 6th ICTP, p. 1689.
- (16) Kang, C.G., Youn, S.W., and Seo, P.K., 2002, "Reheating Process of Metal Matrix Composites for Thixoforming and Their Inductive Coil Design", J. Mater. Eng. & Perform, Vol.11(2), p. 152.
- (17) Kapranos, P., Gibson, R.C., Kirwood, D.H., Sellars, C.M., 1996, "Induction Heating and Partial Melting of High Melting Point Thixoformable Alloys", Proc. of 4th Int. Conf. on Semi solid Processing of Alloys and Composites, Sheffield, p. 148.
- (18) Boo Lee Therm Co. Ltd.(South Korea), Induction Heating Technical Report Data, 1994. (in Korean).
- (19) Davies, E.J., 1990, "Conduction and Induction Heating", Peter Peregrinus, London.
- (20) Zinn, S. and Semiatin, S.L., 1988, "Coil Design and Fabrication: Part 2, Specialty Coils", Heat Treating, August, p. 29.
- (21) Zinn, S. and Semiatin, S.L., 1988, "Coil Design and Fabrication: Part 3, Fabrication Principles", Heat treating, October, p. 39.
- (22) Simansik, F., 1999, "Reproducibility of Aluminium Foam Properties", Proc. of the 1st Int. Conf. on Metal Foams and Porous Metal Structures, MIT Publishing, p. 235.
- (23) Song, Z.L., Zhu, J.S., Ma, L.M., and He, D.P., 2001, "Evolution of Foamed Aluminium Structure in Foaming Process", Mater. Sci. & Eng., Vol. A298, p. 137.