

## P/M법과 유도가열 공정변수가 6061 알루미늄 합금의 미세기공과 기계적 성질에 미치는 영향

윤성원\*, 강충길#

### Effect of Process Parameters of P/M and Induction Heating on the Cell Morphology and Mechanical Properties of 6061 Aluminum Alloy

Sung Won Youn\* and Chung Gil Kang#

#### ABSTRACT

The purpose of this study is to evaluate the mechanical properties of 6061 Al foams, which were fabricated by P/M and multi-step induction heating method, and to build the database, which is needed for computer aided modeling or foam components design. Aluminium foams, consisting of solid aluminium and large quantities of porosities, is widely used in automotive, aerospace, naval as well as functional applications because of its high stiffness at very low density, high impact energy absorption, heat and fire resistance, and greater thermal stability than any organic material. In this study, 6061 Al foams were fabricated for variation of fraction of porosities (%) according to porosities (%) - final heating temperature ( $T_{d3}$ ) curves. Mechanical properties such as compressive strength, energy absorption capacity, and efficiency were investigated to evaluate the feasibility of foams as crash energy absorbing components. Moreover, effect of the surface skin thickness on plateau stress and strain sensitivity of the 6061 Al foams with low porosities (%) were studied.

**Key Words** : 6061 Al foam (6061 알루미늄 발포재료), Induction Heating (유도가열), Fraction of porosities (기공율), Energy absorption efficiency (에너지 흡수능), Surface skin thickness (표피두께)

#### 1. 서론

Al foam은 Al 합금내에 기공을 인위적으로 발생 및 성장시켜 부피를 팽창시킨 다공질의 초경량 재료이다. 비강성이 높고 소음 및 진동감쇄능이 뛰어나며, 에너지 흡수율, 전자기 차폐효과 면에서도 우수하다. 발포재료의 큰 장점 중의 하나는 원하는

기계적 성질을 가진 재료를 기공의 조절에 의해 제조할 수 있다는 점이다<sup>1</sup>. 이러한 장점에도 불구하고 실제 산업에는 거의 적용되지 않고 있다. 그 원인 중 하나는 기계적 성질의 재현성 (reproducibility) 문제이다<sup>2</sup>. 발포금속이 맞춤형 재료 (tailored material)로서 실제 산업에서 이용되기 위해서는 기공크기나 상대밀도 또는 기공율과 같은 인자와 기계적 성질

.. 2003년 1월 20일 접수  
\* 부산대학교 대학원 정밀기계공학과  
# 교신저자, 부산대 기계공학부, 정밀정형 및 금형가공연구소  
Email : cgkang@pusan.ac.kr, Tel : (051) 510-2335

과의 관계가 정량적으로 정립되어야 한다. 또한, FEM 해석을 위해서는 기계적 성질의 D/B화가 필수적이다. 금속 foam 소재의 경우 기공율이 증가할수록 에너지 흡수재로서의 가용변형율(usable strain)이 증가하기 때문에 일반적으로 사용되는 발포금속은 기공율이 70~90% 정도이다<sup>3</sup>. 따라서, 지금까지의 발포금속의 기계적 성질에 대한 연구는 주로 70% 이상의 기공율을 가진 금속에 대해서 이루어져 왔다. Wan<sup>4</sup>은 (75~85%)의 기공율을 함유한 AlSi7Mg0.45 합금의 압축실험을 통하여 기공율의 변화에 따른 발포재료의 변형거동 및 에너지흡수율을 조사하였다. Yu<sup>5</sup>는 (70~90%) 기공율의 A6061의 압축실험을 통해 압축강도는 상대밀도의 함수이며, 변형률 속도변화에 큰 영향을 받지 않는다고 보고하였다. 그러나, 기공율이 높을수록, 즉 밀도가 낮을수록, 에너지흡수능은 증가하지만 압축강도가 감소하기 때문에 강도가 높은 재료를 접합시킨 샌드위치형 제품이 널리 쓰이고 있다<sup>6</sup>. 그러나 3차원 복잡형상인 경우 이중재료의 접합이 용이하지 않으며, 또한, 맞춤형재료를 사용되기 위해서는 70%이하의 기공율의 발포금속에 대한 기계적 성질의 D/B도 확립되어야 할 것으로 판단된다. 또한, Al foam 제품의 제조시 필연적으로 발생하는 고밀도의 표피(surface skin)는 기계적 성질에 큰 영향을 미친다. 상대밀도가 동일한 Al foam제품일지라도 고밀도의 표피가 있는 경우가 없는 경우에 비하여 훨씬 더 일정하고 긴 plateau 응력 영역을 가진다<sup>7, 8</sup>. 그러나 표피의 두께가 기계적 성질에 미치는 영향에 관한 연구는 아직 발견되지 않고 있다.

본 연구에서는 기공율에 따른 기계적 성질의 변화를 조사하였으며, 표피의 두께가 기계적 성질에 미치는 영향을 고찰하였다. 또한, 저기공율(53, 59, 66%)의 6061 Al foam에 대해서는 기계적 성질의 변형률속도에 대한 민감도를 조사하였다.

## 2. 기공율에 따른 6061 Al foam 압축시편 제작

6061 Al foam 소재의 기계적 성질을 측정하기 위하여 1축 압축실험을 수행하였다. 압축시편을 위한 Al foam 시편은 P/M법과 다출력 유도가열법을 이용하여 제작하였으며, 분말형 Al 6061 (325mesh) 합금과 TiH<sub>2</sub> 분말(200mesh)이 지지합금과 발포제로써 각각 사용되었다. Table 1은 6061 Al 합금의 조성을, Fig. 1~Fig. 2는 Al foam시편의 제조공정 및

장비를 나타내고 있다. 시험에 사용된 장비의 치수 및 규격, 제조회사는 Table 2 과 Table 3에 정리하였다.

Table 1 Chemical composition of powdered A6061

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.

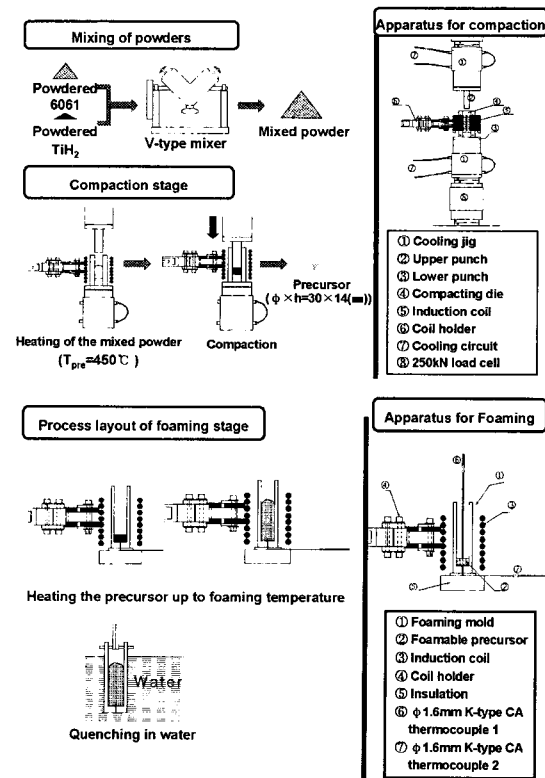


Fig. 1 Process layout of 6061 Al foam fabrication

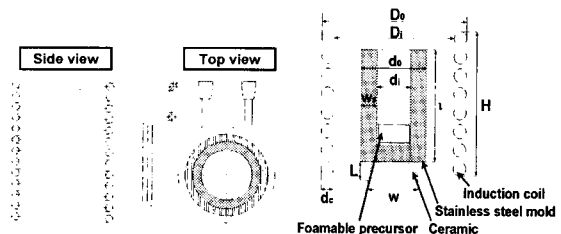


Fig. 2 Schematic illustration of coil and induction heating device

Table 2 Specifications of equipment for experiment

compaction and compression test	Material testing system, Max. load 250kN, 1300°C (MTS, USA)
Heating (foaming)	Induction heating system 25kW, 40kHz, (Solid industrial Co., Korea)

Table 3 Dimensions of induction heating device [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 (d <sub>c</sub> )	
150	130	10	

6061 Al 합금분말(30g)과 TiH<sub>2</sub> 분말(0.3 wt.%)을 V mixer를 사용하여 30rpm의 속도로 교반시킨 후, 혼합분말을 압축다이의 캐비티 내에 넣고 유도가열기를 사용하여 6kW의 출력으로 450°C까지 예열하였다. 예열온도 (T<sub>pre</sub>)는 Kresse<sup>9</sup>의 TiH<sub>2</sub>의 열중량 분석 결과에 따라 TiH<sub>2</sub>의 Ti와 H<sub>2</sub>가스로의 환원반응이 급격하게 발생하지 않는 최적설정 온도범위 내에서 제작되었으며, K type CA 열전대(ø 1.6)를 사용하여 분말의 중앙과 상부의 온도를 측정하였다. 예열된 혼합분말을 펀치로 압축시킨 후 냉각시키면 d30× h14(mm) 크기의 발포용 프리커서가 된다. 프리커서 내부에 존재하는 잔류기공은 발포시 수소 개스의 이동로로 사용되어 기공의 균일 성장을 저해한다<sup>10</sup>. 따라서, 내부에 잔류기공이 존재하지 않는 프리커서를 제조하기 위하여 혼합분말을 450°C로 예열한 후 120kN의 가압하중으로 압축하였다<sup>11</sup>. 발포에는 스테인레스로 제작한 좌우 분할형 몰드가 사용되었으며, 프리커서의 정확한 온도조절을 위하여 K type CA 열전대 (ø 1.6)를 사용하여 프리커서 하부 중앙의 온도를 측정하였다. 제조된 발포용 프리커서 (d× h=31× 14mm)를 다출력 유도가열 공정을 이용하여 발포시켰다. Fig.3 와 Table 4는 다출력 유도가열의 조건을 나타내고 있으며, 실험적으로 측정된 최종가열온도 (T<sub>a3</sub>)에 따른 Al foam의 기공율 (%) 변화 곡선(Fig. 4)을 이용하여 기공율 별로 시편을 제작하였다.

Table 4 Input-data of multi-step induction heating process

Mold	Heating time t <sub>a</sub> (sec)			Heating temperature T <sub>a</sub> (°C)			Holding time t <sub>h</sub> (sec)		
	t <sub>a1</sub>	t <sub>a2</sub>	t <sub>a3</sub>	T <sub>a1</sub>	T <sub>a2</sub>	T <sub>a3</sub> =T <sub>f</sub>	t <sub>h1</sub>	t <sub>h2</sub>	t <sub>h3</sub>
304 SS	208	34	Var.	590	640	Var.	120	70	Var.

Capacity of the induction heating system, Q (kW)

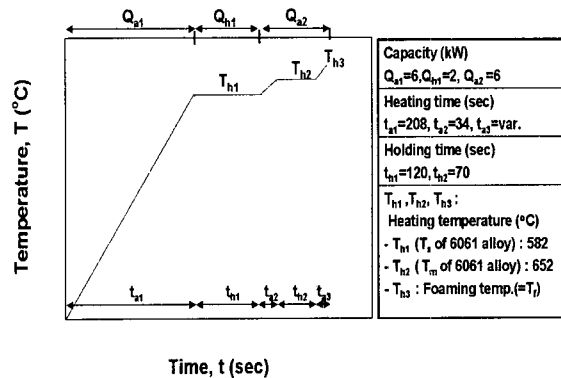


Fig. 3 Proposed input data diagram of multi-step induction heating

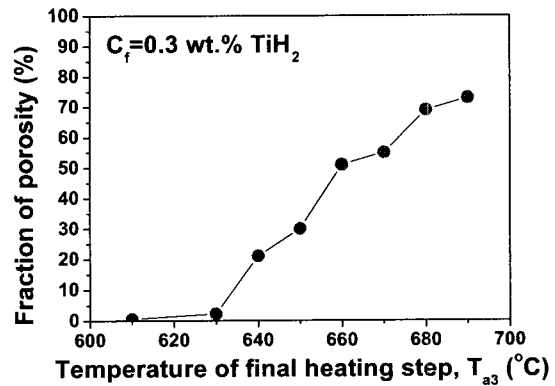
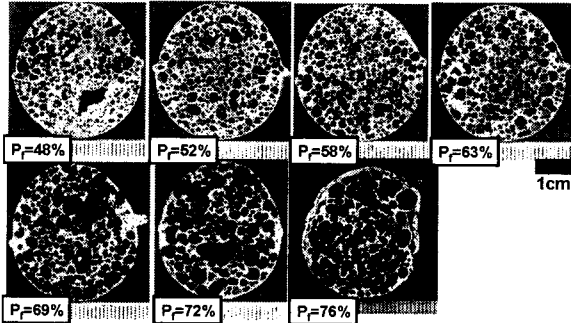


Fig. 4 Temperature of the final heating temperature (T<sub>a3</sub>) - fraction of porosity (%) curve<sup>11</sup>



(a) Surface appearance of 6061 Al foam specimens



(b) Cross section of Al foam specimens

Fig. 5 Morphology of 6061 Al foams fabricated for variation of fraction of porosity

Fig. 5는 제조된 6061 Al foam 시편들을 나타내고 있다. Fig. 5 (a)에서 알 수 있듯이 결함이 없는 양호한 표피상태를 관찰 할 수 있다. 시편의 기공율을 측정하기 위하여 발포방향의 수직단면에 대해서 Leica에서 제작한 Leica M/W를 사용하여 화상분석(Image analysis)를 수행하였다. 압축시편은  $d \times H=31 \times 25$  (mm)크기로 가공되었으며 Al foam의 제조과정에서 필연적으로 발생하는 고밀도의 표피부분은 제거되지 않았다. 표피는 Al foam 부품의 압축강도 및 plateau 응력과 같은 기계적 성질을 현저히 향상시키므로 일반적으로 제거되지 않는다. 압축시험은 만능기계시험기(Material testing system, Max. 250kN)를 사용하여 수행되었으며 변형률 속도는  $0.01 \text{ sec}^{-1}$ 로 설정되었다. 압축시험시 변형률 속도는 압축편치의 속도조절에 의해 변화되었다. 변형률 속도는  $\dot{\epsilon} = V_p/H_0$ 로 정의되며,  $V_p$ 와  $H_0$ 는 각각 편치속도와 시편의 초기높이를 나타낸다.

### 3. 기공율에 따른 6061 Al foam의 기계적 성질

#### 3.1 기공율에 따른 응력-변형률 선도의 변화

Fig. 6은 기공율에 따른 6061 Al foam 소재의 응력-변형률 선도를 나타내고 있다. 기지합금으로 단조용 알루미늄 합금소재가 쓰였기 때문에 압축시험시 기공의 굽힘현상이 지배적으로 발생하여 기복이 없는 응력-변형률 선도를 얻을 수 있었다. 반면에 주조용 합금을 기지 소재로 사용할 경우에는 압축시험시 기공의 굽힘현상보다는 파단현상이 지배적일 발생하여 변형의 증가에 따른 응력의 기복이 많

은 것으로 보고되고 있다<sup>12</sup>. 전체적으로는(Fig. 6 (a)-(f)) 기공율의 감소와 더불어 압축강도가 상승하며, 에너지 흡수재로서의 가용 변형율(usable strain), 즉 plateau 구간이 감소하고 있음을 알 수 있었다. 이상적인 에너지 흡수재(absorber)는 일정한 응력상태를 유지하면서 소성변형이 진행되는데, 이 응력을 plateau 응력이라 부른다. 이론적으로 발포금속은 변형 시 소성변형과 기공벽의 굽힘이나 파괴가 동시에 일어나며, 따라서 항복점 이후 응력의 증가 없이 변형이 진행되는 유동변형 거동을 나타낸다. 그러나, Fig. 6에서 알 수 있는바와 같이 항복점 이후에 변형율의 증가와 더불어 응력이 완만하게 증가하고 있다. 기공율이 작은 시편일수록 plateau 구간이 감소하는데, 이는 기공율이 낮을수록 기공벽의 두께가 두꺼워져 벌크재와 같은 변형거동을 하기 때문이다. 또한, 결함, 기공의 형상규칙(morphological rules), 주기적 변형대, 또는 불균일한 기공분포 등도 Al foam의 변형거동에 영향을 미칠 수 있다고 보고되고 있다<sup>13</sup>.

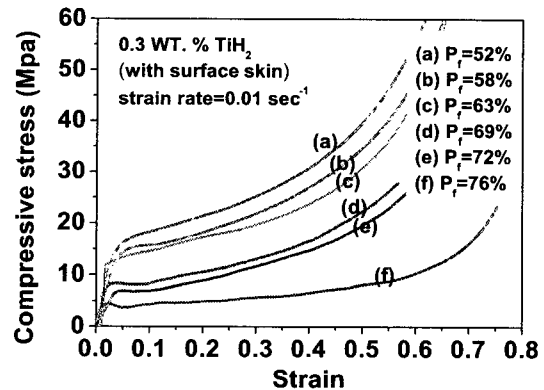


Fig. 6 Relationship between stress and strain for 6061 Al foams with various porosities (%)

Fig. 6 (f)의 경우를 예를 들어 설명하면, 초기 변형시에는 기공벽의 탄성변형에 의해 변형율의 증가와 더불어 응력이 선형적으로 증가하다가,  $\epsilon = 0.02$ 에서 기공벽의 항복 또는 파단이 발생하여 변형율의 증가와 더불어 응력이 소폭 감소하고 있다.  $\epsilon = 0.05$ 부터는 변형율 증가와 더불어 기공벽의 굽힘현상에 의한 응력감소와 시편의 소성변형에 의한 응력의 증가현상이 동시에 발생하면서 응력이 거의 일정하게 유지되고 있다.  $\epsilon = 0.58$ 부터는 기공벽의

굽힘이나 항복이 완료되어 변형율의 증가와 더불어 시편의 조밀화에 의해 응력이 급속히 증가하고 있다.

Fig. 7은 압축실험 후의 Al foam 시편의 절단면을 나타내고 있다. 단조용 합금이 기지합금으로 사용되었기 때문에 기공의 굽힘과 비틀림 현상에 의한 시편의 변형이 관찰되며, 파단현상은 거의 관찰되지 않는다. 또한, 변형이 시편의 높이방향으로 수직중앙 사인곡선형태로 집중되어 있음을 관찰할 수 있다. 이는 시편내의 기공의 크기 및 기공벽의 두께분포가 균일하지 않음을 보여주고 있다.

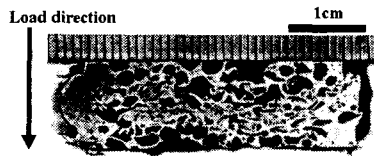


Fig. 7 Cross sectional area of 6061 Al foam with 69% porosities after compression test (height reduction 80 %)

기공율에 따른 에너지흡수 특성을 조사하기 위해 에너지흡수량 (C)과 효율 (E(ε))을 계산하였다. 에너지 흡수 양과 효율은 다음과 같은 식에 의해 계산되었다<sup>4</sup>.

$$C = \int_0^{\epsilon_m} \sigma d\epsilon \quad (1)$$

(C: energy absorbed by foamed metal, σ: stress, ε: strain)

$$E(\epsilon) = \frac{\int_0^{\epsilon_m} \sigma d\epsilon}{\delta\epsilon} \quad (2)$$

(E(ε) : energy absorption efficiency)

Fig. 8은 기공율에 따른 에너지 흡수량 (C)의 변화를 나타낸 것이다. 에너지 흡수량은 기공율의 증가와 더불어 감소하고 있었으며, 이러한 경향은 변형율의 증가와 더불어 증가하고 있음을 알 수 있었다.

Fig. 9는 Fig. 6의 응력-변형율 선도를 이용하여 에너지 흡수 효율을 계산한 것이다. Fig. 9 (a)~(e)에

서 알 수 있듯이, 에너지 흡수효율은 변형율의 증가와 더불어 초기에는 증가하다가 다시 감소하고 있다. 또한, 형태에너지 흡수효율의 peak 값은 기공율에 비례하고 있음을 알 수 있었다.

P<sub>f</sub>=52, 63, 69%인 경우의 에너지 흡수 효율-변형율 곡선은 P<sub>f</sub>=72, 76 %인 경우에 비해 넓고 완만한 최대값 영역 (peak zone)을 보여주고 있다. P<sub>f</sub>=76%인 경우에는 (Fig. 9 (e)) 0.2~0.3 변형율 구간에서 변형율 증가와 더불어 에너지 흡수효율이 급격히 감소하다가 유지되고 있다. Fig. 7에서 관찰한 바와 같은 시편내에 존재하는 국부적인 밀도 불균일 영역도 한 원인으로 판단된다.

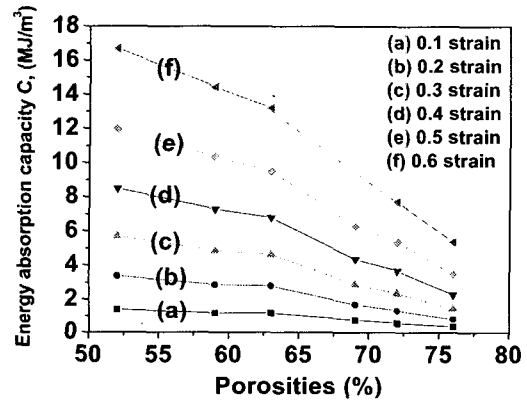


Fig. 8 Energy absorption capacity (C) of 6061 Al foams as a function of fraction of porosity (%)

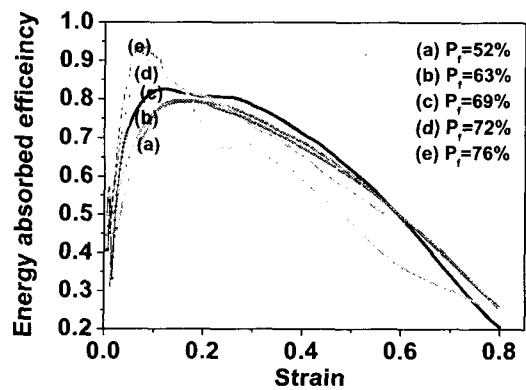


Fig. 9 Energy absorption efficiency (E(ε)) of 6061 Al foams as a function of porosity (%)

### 3.2 표피두께(surface skin thickness)가 plateau 응력에 미치는 영향

Al foam 제품의 제조 시 필연적으로 발생하는 고밀도의 표피는 기계적 성질에 큰 영향을 미친다. 상대밀도가 동일한 Al foam 제품일지라도 고밀도의 표피가 있는 경우가 없는 경우에 비하여 훨씬 더 일정하고 긴 plateau 응력 영역을 가진다<sup>7,8</sup>. 본 연구에서는 표피의 두께가 plateau 응력에 미치는 영향을 조사하기 위하여 동일한 기공율과 다른 표피두께를 가진 시편이 제작하였다(Fig. 10).

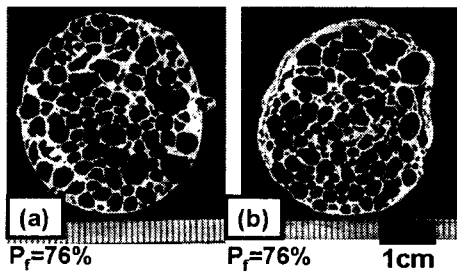


Fig. 10 6061 Al foams with different surface skin thickness

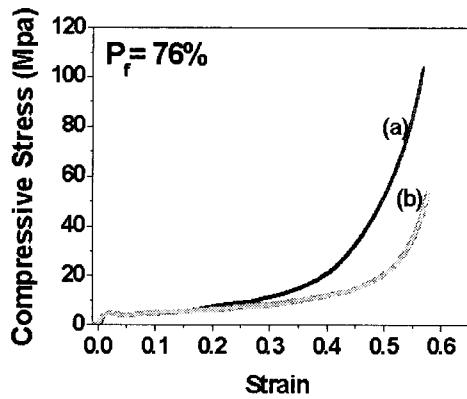


Fig. 11 Effect of the surface skin thickness on the plateau stress

Fig. 11은 압축시험 후의 결과를 나타내고 있다. 표피가 두꺼운 경우(Fig. 11 (b))가 훨씬 더 길고 평평한 plateau 응력 구간을 나타내고 있으나, 압축강도는 두 시편의 경우가 동일하였다. Fig. 11 (b)의 경우 표피부분에 찌그러짐(distortion)이 있었으나 기계적 성질에는 큰 영향을 미치지 않는 것으로 판단된다.

### 3.3 저기공율 6061 Al foam의 변형을 속도 민감도

금속기지 foam 소재는 폴리머 foam 소재에 비해 매우 높은 압축강도를 가지면서 에너지 흡수능이 좋기 때문에 에너지 흡수소재로써 널리 쓰인다<sup>6,8,14</sup>. 에너지 흡수소재로써 사용되기 위해서는 plateau 응력의 변형을 속도에 대한 민감도가 낮아야 한다. 많은 연구에서 상용 foam 소재와 같이 70 Vol.% 이상의 기공율을 가진 폐쇄형 기공의 발포 알루미늄의 plateau 응력은 변형률 속도 변화(<math><1\text{m/s}</math>)에 큰 영향을 받지 않는다고 보고하였다<sup>6</sup>. 그러나 상용 Al foam 소재의 밀도보다 낮은 기공율을 가진 foam 소재에 대한 연구는 아직 매우 미흡한 실정이다. 변형률 속도변화가 저기공율 6061 Al foam의 기계적 성질에 미치는 영향을 조사하기 위하여 Fig. 3의 기공율(%) - 최종가열온도( $T_{a3}$ ) 선도를 이용하여 동일한 기공율을 가진 시편을 2개씩 제조하였다. 제조된 시편의 발포방향의 수직단면에 대해서 화상분석을 하여 기공율을 측정하였다.

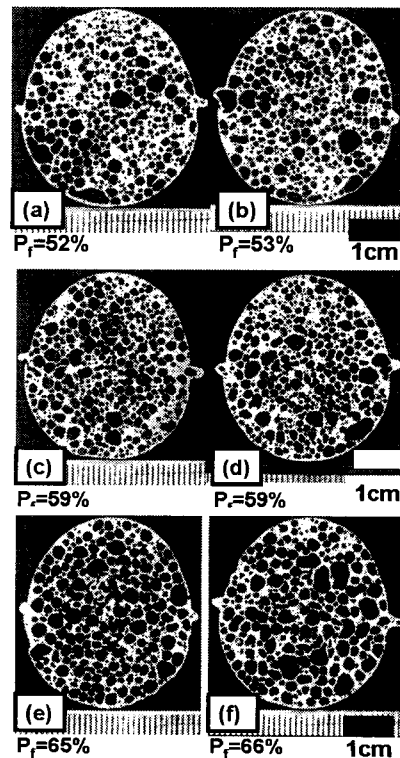


Fig. 12 6061 Al foam specimens with various fraction of porosities

Fig. 12는 압축시험에 사용된 시험편을 나타내고 있으며, 기공율이 측정되었다. 시험편은 Fig. 5의 시험편과 동일한 공정으로 제조되었다. 각 시험편의 기공율의 차이는 약 1%였으며, 표면의 두께는 균일하였다. 압축시험은  $10 \text{ sec}^{-1}$  과  $0.01 \text{ sec}^{-1}$ 의 변형률 속도 조건에서 수행되었다.

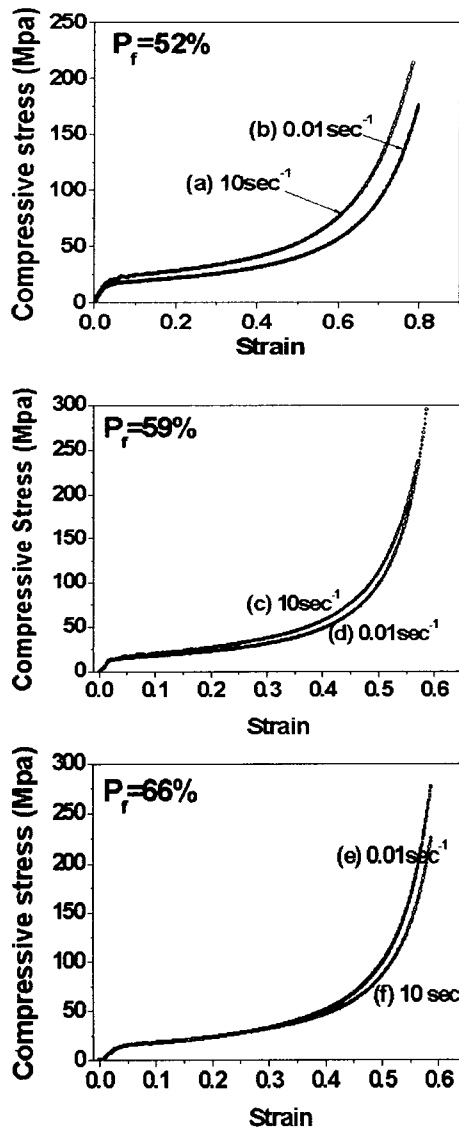


Fig. 13 Stress-strain curves for foamed 6061 alloy with various fraction of porosities at two strain rates

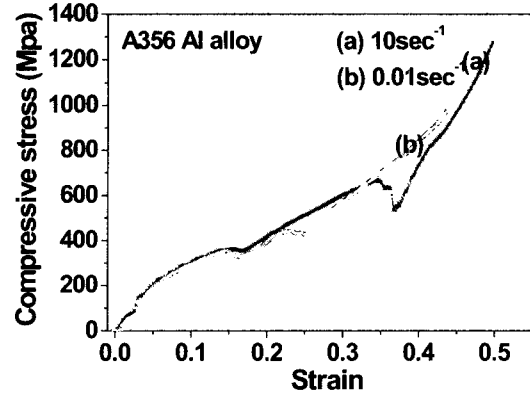


Fig. 14 Stress-strain curves of raw A356 Al alloys with different strain rate

Fig. 13은 압축실험을 통해 얻어진 6061 Al foam의 응력-변형률 곡선이다. 기공율이 59, 66%인 경우 압축강도, plateau 응력의 길이와 기울기 측면에서 현저한 차이는 관찰되지 않았다(Fig. 13 (c)~(f)). 그러나  $P_f=52\%$ 인 경우에는 변형률 속도가  $10 \text{ sec}^{-1}$ 가  $0.01 \text{ sec}^{-1}$ 에 비해 약 5 MPa 높은 압축강도를 나타내고 있다. Foam 소재와 비교를 위해서 발포를 시키지 않은 raw A356 Al 합금의 변형률 속도 민감도를 조사하였다.

Fig. 14는 A356 Al 소재의 변형률 속도변화에 따른 응력-변형률 곡선을 나타내고 있다. 일반적으로 알려진 바와 같이 변형률 속도의 변화에 따른 응력-변형률 선도의 변화는 관찰되지 않았다.

#### 4. 결론

P/M법과 유도가열법을 응용한 복합가공법에 의하여 제조된 미세기공 재료의 기계적 성질 평가를 통해서 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 기공율의 증가와 더불어, 압축강도는 감소하였고 응력-변형률 선도에서 plateau 응력 영역이 증가하였다.

(2) 52~76%의 기공율을 가진 미세기공 6061 합금의 경우, 에너지 흡수량은 기공율의 증가와 더불어 감소하고 있었으며, 이러한 경향은 변형률의 증가와 더불어 증가하고 있음을 알 수 있었다. 또한, 0.1~0.2

변형을 구간에서 에너지 흡수 효율이 최대임을 알 수 있었다.

(3) 표피두께 (surface skin thickness)의 증가와 더불어 plateau 응력 영역은 증가하였으나, 항복강도는 변하지 않았다.

(4) 저기공율 6061 Al foam의 경우  $P_f=59$ , 66% 시편은 변형을 민감도가 매우 낮았으나,  $P_f=52$  시편은 변형율 속도가  $10\text{sec}^{-1}$ 일 때  $0.01\text{sec}^{-1}$  일 때에 비하여 5MPa 높은 압축강도를 나타내었다.

### 후 기

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

### 참고문헌

1. Evans, A. G., Hutchinson, J. W., Ashby, M. F., "Multifunctionality of Cellular Metal Systems," Progress in Materials Science, Vol. 43, pp. 171-221, 1999.
2. Simansik, F., "Reproducibility of Aluminium Foam Properties Metal Foams and Porous Metal Structures," In: Banhart J, Ashby MF, and Fleck NA, editors, 1st Int. Conf., Bremen, Germany, Bremen: MIT Press-Verlag, pp. 235, June 14-16, 1999.
3. Geyer, K. E., "A New Front Buffer for Suburban Railcars," Proc. of the 2nd Int. Conf. on Metal Foams and Porous Metal Structures, MIT-Publishing, Bremen, p. 31, June 18-20, 2001.
4. Wang, B., He, D. P. and Shu, G., "Compressive Properties and Energy Absorption of Foamed Al Alloy," Proc. of the 2nd Int. Conf. on Metal Foams and Porous Metal Structures, MIT-Publishing, Bremen, p. 351, June 18-20, 2001.
5. Yu, C. J., Claar, T. D., Eifert, H. H., Hall, I. W., Franz, R. E., Leighton, K. T., Hasson, D. F., "Deformation Energy Absorption of Metal Foams at High Strain Rates," Proc. of the 1st Int. Conf. on Metal Foams and Porous Metal Structures, MIT-Publishing Bremen, pp. 235, June 14-16, 1999.
6. Ashby, M. F., Evans, A., Fleck, N. A., Gibson, L. J., Hutchinson J. W., and Wadley, H. N. G., "Metal Foams-A Design Guide," Butterworth-Heinemann, 2000.
7. Simansik, F., Kovacik, J., Minarikova, N., "Deformation and Fracture Mechanism of Aluminium Foams," 1998 PM World Congress, Porous Materials, Granada, Spain, p. 245, 1998.
8. Gibson, L. J., Ashby, M. F., "Cellular Solids: Structure and Properties," Second editions., Cambridge University Press, Cambridge, UK, 1997.
9. Kresse, R., "Characteristics and Handling of Titanium Hydride," Proc. of the 1st Int. Conf. on Metal Foams and Porous Metal Structures, p. 31, 1999.
10. Duarte, I., Banhart, J., "A Study of Aluminium Foam Formation Kinetics and Microstructure," Acta Mater., Vol. 48, p. 2349, 2000.
11. Youn, S. W., Lee, S. H., Kang, C. G., "The Effect of Process Parameters on Cell Morphology in Cellular Aluminium Alloy Fabricated by Powder Compression and the Induction Heating Process," Proc. Inst. Mech. Engrs. part B-Journal of Engineering Manufacture, Vol. 217, No. 2, pp. 201-211(11), 2003.
12. Kavasik, J., Simansik, F., "Comparison of Zinc and Aluminium Foams in Deformation and Fracture," In : Parilak L, Danninger H, editors, Deformation and Fracture in Structural PM Materials DF PM '99, Vol. I, IMR SAS, Kosice, p. 106, 1999.
13. Kim, S. K., Hong, T. W., Cho, S. H. and Kim, Y. J., "Current and Future Applications of Metallic Foams," J. of Korean Foundrymen's Society, Vol 18, No. 5, p. 419, 1998.
14. Gradinger, R., Simancik, F., Degischer, H. P., "Determination of Mechanical Properties of Foamed Metals," Welding Technology, Materials and Materials Testing, Fracture Mechanics and Quality Management, Vol. 2, p. 701, 1997.