

## 알루미늄 소재의 미세 기공 크기가 압축 및 굽힘 강도에 미치는 영향

전용필\*, 강충길\*\*

(2002년 6월 25일 접수)

### The Effects of Cell Sizes on Compression and Bending Strength of Aluminum Material

Y. P. Jeon and C. G. Kang

#### Abstract

Aluminium foam material is highly porous material, which has the complicated cellular structure defined by randomly distributed pores in metallic matrix. This structure gives the characteristic properties which cannot be achieved by any other conventional processes. As the properties of aluminium foam material significantly depend on its porosity, a desired profile of properties can be tailored by changing the foam density. But various defects lead to undesirable effects on the mechanical properties. Mechanical properties are dependent on cell sizes and aspect ratios. Therefore, this paper presents the effects of various processing parameters of various parameters on the mechanical properties. For the sake of this, combined stirring was used to fabricate aluminum foam materials by the parameters. Compression and bending tests were performed to investigate the effects of cell sizes and aspect ratios on the mechanical properties.

**Key Words** : Aluminum, Foam Material, Cellular Structure, Relative Density

#### 1. 서론

알루미늄 발포 소재는 매우 낮은 밀도를 가지면서도 상대적으로 높은 비강성을 가지고, 소음과 진동의 흡수 능력이 우수하며, 재활용이 용이하다는 장점을 가지고 있기 때문에 원소재 개발, 공정변수에 따른 발포 양상 평가, D/B 구축, 그리고 상용화 등에 관하여 연구가 진행

되고 있다.<sup>1~2)</sup>

주조법을 이용한 알루미늄 발포 소재의 제조는 분말법에 비해 상대적인 면에서 경량화, 환경오염 저감 및 가격 경쟁에서 유리한 제품 생산이 가능하다.

알루미늄 발포 소재는 기공의 형태에 따라서 물성치가 크게 변하게 된다. 본 연구에서 제조되는 소재의 형태는 폐기공 형태(Closed cell type)이며 이와 관련되어 현재

\* 부산대 대학원

\*\* 부산대 기계공학부, 정밀정형 및 단형가공 연구소

까지 진행되어 온 연구 내용은 다음과 같다.

Koza<sup>(4)</sup> 등은 알루미늄 발포 소재의 상대밀도와 기계적 성질 사이의 관계를 실험적인 방법을 통하여 연구를 수행하였다. Tan<sup>(5)</sup> 등은 알루미늄 발포 소재의 기공 크기와 형상이 동적 압축 강도에 미치는 영향에 대하여 연구를 수행하였다. Wang<sup>(6)</sup> 등은 알루미늄 발포 소재를 기공의 크기에 따라 준비하여 압축 특성과 에너지 흡수성에 대한 영향을 규명하였다. Dannemann<sup>(6)</sup> 등은 발포소재의 변형을 효과가 파괴된 기공벽을 통한 공기의 유동과 관련이 있으며 기공의 크기 및 형상, 그리고 형상 등에 의해 제어될 수 있음을 실험적으로 분석하였다. Miller<sup>(7)</sup> 등은 발포 소재의 연속체 소성 모델을 구성하여 해석적인 방법으로 소재의 거동을 예측하였다.

유도가열을 통한 발포 소재의 제조에서 유도가열은 전체 발포 공정에 걸쳐서 기공의 성장, 기공의 형상, 기공의 분포 등에 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 필수적이라고 할 수 있을 것이다.

한편, 발포재의 제조공정에 있어서 교반과정은 매우 중요하다. 이는 전 용탕에 TiH<sub>2</sub> 입자를 고루 분산시키는데 결정적인 역할을 하기 때문이다. 이<sup>(8)</sup> 등은 반응용 상태에서 복합교반을 통하여 금속복합재료를 제조하였는데, 복합교반법은 기계식 교반과 전자기 교반이 동시에 이루어지기 때문에 TiH<sub>2</sub> 입자의 균일 분산에 유리하다.

본 연구에서는 용탕의 유동성 때문에 Si의 함유율이 10% 정도 되는 ALDCS8종을 실험소재로 사용하였다. 발포재의 재료 공정을 교반과 발포 과정으로 나누었고 여기서 교반은 복합교반법을 채택하였다.<sup>(8)</sup> 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 시켜서 제조한다. 이러한 과정으로 제조된 발포 소재로 압축 실험과 굽힘 실험을 통하여 다양한 조건에서 제조된 소재의 기공 크기의 변화에 따른 기계적 성질의 영향을 규명하였다.

## 2. 발포 소재의 제조

### 2.1 실험 재료

알루미늄 발포 소재의 제조를 위해 기지재료는 ALDCS8종을 사용하였다. ALDCS8종의 화학 조성을 Table 1에 나타내었다.

Table 1 Chemical composition of ADC12

		Si	Fe	Cu	Mn	Mg
ALDC	min(%)	9.6	1.3	1.5	0.5	0.3
	max(%)	12.0		3.5		
S8		Ni	Zn	Ti	Pb	Sn
	max(%)	0.5	1.0	-	-	0.3

용탕 내부의 기공 발생을 위해 TiH<sub>2</sub>를 사용하였으며, 그 화학 조성을 Table 2와 같이 나타내었다.

Table 2 Chemical composition of TiH<sub>2</sub><sup>(9)</sup>

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

알루미늄 발포 소재의 제조시 기지재에 첨가되는 TiH<sub>2</sub>의 양은 대기 중으로의 손실을 고려하여 충분한 발포를 위해서 기지재 전체 중량의 1wt.%로 하여 주입하였다. TiH<sub>2</sub>의 손실은 용탕의 열기, 용탕과의 접촉과 동시에 일어나는 반응으로 인한 대기로의 유실 그리고 교반시 산소의 유입으로 인하여 발생하는 산화반응을 의미한다.

### 2.2 실험 장치

본 연구를 위한 실험장치에 대한 개략도는 Fig. 1과 같다. 이 실험 장치는 교반기가 부착되어 있는 프레임, 도가니가 있는 유도로, 소재의 가열을 위한 20kW 고주파 유도가열기로 나누어져 있다. 프레임을 통해서 임펠러의 높낮이, 회전수, 그리고 회전방향을 조절할 수 있으며, 고주파 유도가열기를 통해서 소재의 가열 온도 및 가열 속도를 제어할 수 있다. 실제 실험을 위하여 전자기 유도로에 기지재가 담긴 도가니를 넣고 가열하여 완전히 녹인 후에 임펠러로 교반을 실시하면서 TiH<sub>2</sub>를 파이프를 통하여 용탕의 표면 중심에 주입한 후에 발포가 가능하도록 설계하였다.

Fig. 1의 실험장비에서 소재의 가열을 위해서 20kW 고주파 유도 가열기를 사용하였으며, 이 장치를 사용하

여 도가니 주위에 감겨진 유도 코일의 고주파와 지지재 내를 흐르는 와전류에 의해 소재를 원하는 온도까지 신속히 올릴 수 있다. 또한 온도제어가 PID 방식으로 이루어지므로, 발포 소재의 제조를 위한 전체 공정에서 설정 온도를 일정 범위 내에서 유지하기가 용이하다. 그리고, 지지재에 상하 유동을 유발하여 임펠러에 의한 좌우 유동과 적절한 조화를 이루어  $TiH_2$  입자의 분산에 필요한 난류의 형성이 용이하다는 장점을 가지고 있다.  $TiH_2$ 는 주입시 우선적으로 임펠러의 교반력에 의하여 분산되기 때문에 도가니의 중앙 부분으로 주입을 하였다.

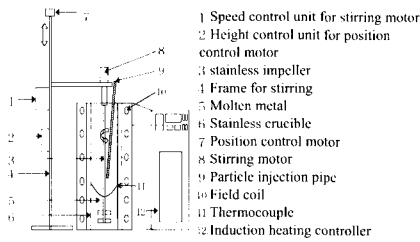


Fig.1 Schematic diagram of fabrication equipment for aluminium foam material

### 2.3 실험 방법

알루미늄 발포 소재의 제조를 위한 실험순서를 살펴보면 다음과 같다.

우선 200~400g 정도의 알루미늄 합금(ALDCS8)을 액상선 온도(595°C)이상으로 가열하여 녹인 후에 설정 온도에 맞도록 유지시킨다. 그 다음에, 교반기를 지지재가 녹아있는 도가니 바닥 근처까지 이동시켰다. 여기서, 그 높이는 10mm로 하였으며, 갑작스런 변형을 막기 위하여 임펠러를 용탕 근처에서 충분히 예열을 시킨 후에 용탕 하부로 내렸다. 이동시킨 임펠러로 용탕의 상태가 균일하도록 5분간 기계식 강제 교반을 실시하였다. 예열된  $TiH_2$ 를 임펠러 중심에 최대한 접근시켜 지지재 총량의 1.0%를 투입하였다.  $TiH_2$ 를 정량 투입하면서 2분정도 교반을 한 후에 교반 시스템을 도가니로부터 제거하였다. 발포온도 제어를 제외한 모든 공정에서 30초가 지난 후에 도가니를 유도도에서 꺼내어 2분정도 공냉을 하여 발포 소재를 안정화시켰다. 발포가 중지된 후에 발포소재에 수냉을 실시한다. 한편, 모든 실험에 걸쳐서 기공 생성을 위한  $TiH_2$ 의 양을 1wt.%로 정한 이유는, 소재 내부에서 생성되는 기공의 양을 관계 하여 기공의 크기만의 함수로 기공함유율과 밀도를 알 수 있기 때문이다.

### 2.4 결함

알루미늄 발포 소재의 결함은 공정 변수가 적절히 제어되지 못하여 발생하는 것으로 그 모양은 Fig. 2와 Fig. 3과 같은 형태로 관찰되었다.

Fig. 2는 발포 공정에서 나타날 수 있는 다양한 결함들을 보여주고 있다. Fig. 2(a)는 알루미늄 발포 소재의 함침(sinkage)을 나타낸 것이다. 소재의 상부에서 기공의 과도한 성장 및 기공의 표면장력 감소로 인하여 인접한 기공들끼리 합체하여 액상인 상부를 지지할 수 있는 힘이 부족하여 소재가 무너짐으로써 나타나는 현상이다.

Fig. 2(b)는 발포소재에서 기공의 저성장을 나타낸 것이다. 온도 제어가 일정 범위 내에서 그 값이 변화하여 반응용 상태의 소재에 큰 폭의 점도 변화를 야기시켜 기공의 제어 및 성장에 좋지 않은 영향을 끼치게 된다.

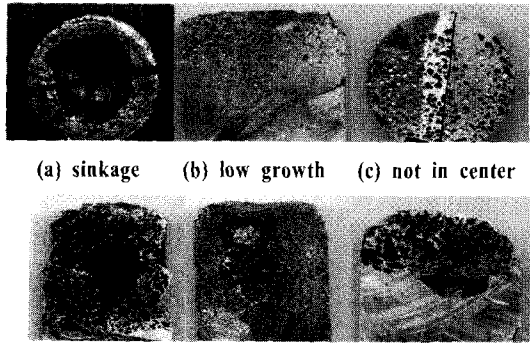
Fig. 2(c)는 임펠러가 중심에 있지 않을 경우의 발포 결과를 나타낸 것이다. 기공 분산은 임펠러의 회전수에 좌우되며, 이 회전은 교반력을 부여하기 때문에 교반 공정에서 임펠러가 도가니의 중심부에 있지 않으면 교반력이 미치지 않는 영역이 발생할 수 있음을 알 수 있었다.

Fig. 2(d)는 기공들의 합체 현상을 나타내고 있다. 여기서, Fig. 2(a)와는 달리 소재의 상부가 아닌 중심 부분에서 합체가 일어남을 알 수 있었다. 위의 원인은 용탕의 상부를 제외한 도가니 측면에서 발생하는 과도한 가열로 인하여 용탕의 유동이 용탕의 중심 방향으로 일어나고 기공의 유지에 필요한 표면장력의 감소로 인하여 기공들이 서로 합치는 경향이 증대되기 때문이다.

Fig. 2(e)는 공동 현상을 나타낸 것이다. 이 현상은  $TiH_2$ 가 다량 투입되어 용탕 내부에서 연쇄 폭발이 일어나므로써 생기게 되는 것으로 사료된다. 미량으로 정량 주입을 하지 않으면 소재 곳곳에서 폭발 현상이 발생할 소지가 있으므로 균일한 발포를 위해서는  $TiH_2$ 의 투입 방법에 대한 연구가 중요하다.

Fig. 2(f)는  $TiH_2$ 의 비균일 분산을 나타낸 것이다. 소재의 하부에서 교반이 전혀 이루어지지 않았음을 확인할 수 있었다. 그 이유는 임펠러의 마모로 인하여 교반력이 감소하여  $TiH_2$ 를 하부로 밀어내지 못했기 때문인 것으로 사료된다.

그 외에도 냉각시 급냉으로 인하여 발포 중인 소재가 도가니 외부로 유출되는 현상이 관찰되었다. 위의 원인은 급냉이 일어나는 동안 도가니 측면에서는 수축이 일어나므로써 급냉이 이루어지지 않는 소재의 상부로 그 에너지가 집중되어 갑작스럽게 팽창하였기 때문이다.



(a) sinkage (b) low growth (c) not in center  
(d) coalescence (e) porosity by explosion (f) not in stirring  
Fig. 2 Defects of aluminium porous metal

2.5 결함 방지 대책

알루미늄 발포 소재의 결함은 앞에서 언급한 바와 같이 과열, TiH<sub>2</sub>의 불균일 주입, 임펠러의 마모 등 다양한 원인에 의해 발생한다. 이러한 원인들은 발포 소재의 제조 공정을 교반 공정과 발포 공정으로 나누어서 생각했을 때, 전 공정에 걸쳐서 결함을 야기시킴을 알 수 있다. 따라서, 결함을 줄이기 위해서는 발포 소재 제조 공정을 교반 공정과 발포 공정으로 나누어 논의할 필요가 있다.

교반 공정에서는 소재가 유도가열에 의하여 일정 상태로 유지되고 있고, 임펠러로 용탕을 교반하고 있으며, TiH<sub>2</sub>가 주입된다. 교반 공정은 TiH<sub>2</sub>의 분산을 통한 기공의 균일 분포에 그 목적이 있으므로, 임펠러를 교반력을 일정하게 유지 시키기 위하여 임펠러의 상태를 일정하게 해주는 것이 중요하다. 또한, TiH<sub>2</sub>를 용탕 내부로 정량 투입하는 방법을 개선해야 할 것으로 사료된다.

발포 공정에서는 교반 시스템이 제거되고, 용탕이 다양한 조건에 따라서 가열된다. 발포 공정은 용탕 내부의 기공의 성장 및 용탕 상태를 안정시키는 것이 주목적이므로 교반 시스템의 제거 과정과 용탕 온도의 제어가 주관건이 된다. 교반 시스템은 용탕의 유동 상태를 고려하면서 제거되어야 한다. 그 이유는 교반시스템이 제거되면서 임펠러가 있던 공간에 기공이 함유된 용탕이 유입되는데, 이 과정에서 기공간의 합침 현상이 일어날 수 있기 때문이다. 용탕 온도의 경우에는 유도가열에 의해서 제어가 이루어지는데, 과도한 가열속도에서는 용탕의 온도 분포에서 용탕 내부와 몰드 벽 주변의 온도차가 커져 발포에 좋지 않은 영향을 끼친다. 또한, 원하는 발포 온도까지 지속적으로 가열하면, 지속적인 내부 유동으로 인해 기공의 형상 및 안정성에 좋지 않은 영향을 준다.

3. 기계적 성질의 조사

3.1 압축 실험

실험에 필요한 발포소재의 제조과정과 기공의 관계는 저자가 연구한 내용을 이용하였다.<sup>(10)</sup> 알루미늄 발포 소재의 기계적 성질을 조사하기 위하여 Fig. 3와 같이 알루미늄 발포 소재의 내부를 원기둥 형상으로 시험편을 제작하였다. 그 다음에, 각 시험편의 기공의 크기를 측정하였다.<sup>(10)</sup> 기공의 크기의 변화에 대한 물성의 경향성을 파악하기 위해 기공의 평균 지름과 소재 전체의 분산성이 일정하다고 가정하였다.<sup>(10)</sup>

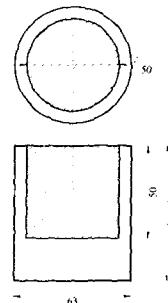


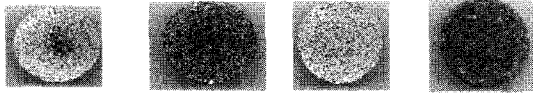
Fig. 3 Position of specimens for compression tests under various conditions

Fig. 4~7은 압축 실험을 위하여 원기둥 모양의 시험편으로 절단한 모습을 보여주고 있다. 제작된 시험편을  $\dot{\epsilon} = 0.01/sec$ ,  $V_p = 0.05mm/sec$ 로 압축 실험을 실시하였다. 여기서,  $\dot{\epsilon}$ 과  $V_p$ 는 각각 변형률 속도와 피스톤의 압축속도를 나타낸다. 그리고,  $T$ 는 용탕의 온도,  $d_{avg}$ 는 기공의 평균직경,  $N$ 은 임펠러의 회전속도,  $V_h$ 는 가열속도,  $T_f$ 는 발포를 위한 온도를 나타낸다.



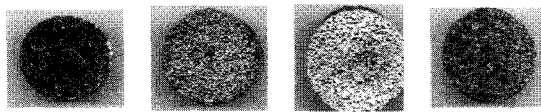
(a)  $T = 585\text{ }^\circ\text{C}$  (b)  $T = 595\text{ }^\circ\text{C}$  (c)  $T = 615\text{ }^\circ\text{C}$  (d)  $T = 680\text{ }^\circ\text{C}$   
 $d_{avg} = 0.839mm$   $d_{avg} = 1.189mm$   $d_{avg} = 1.341mm$   $d_{avg} = 2.740mm$

Fig. 4 Specimens at various processing temperatures for compression test  
( $N = 1700rpm$ ,  $V_h = 20\text{ }^\circ\text{C}/min$ ,  $T = T_f$ )



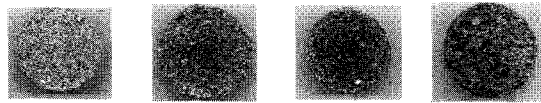
(a)N=700rpm (b)N=1000rpm (c)N=1350rpm (d)N=1700rpm  
 $d_{avg}=0.692mm$   $d_{avg}=0.913mm$   $d_{avg}=1.236mm$   $d_{avg}=1.189mm$

Fig. 5 Specimens at various velocity of impeller for compression test  
 (T = 595 °C,  $V_h = 20$  °C/min, T = T<sub>f</sub>)



(a) $V_h=20$  °C/min(b) $V_h=30$  °C/min(c) $V_h=40$  °C/min(d) $V_h=45$  °C/min  
 $d_{avg}=1.236mm$   $d_{avg}=1.720mm$   $d_{avg}=2.042mm$   $d_{avg}=2.900mm$

Fig. 6 Specimens at various heating velocity for compression test  
 (T = 595 °C, N = 1350rpm, T = T<sub>f</sub>)



(a)T<sub>f</sub>=595 °C (b)T<sub>f</sub>=605 °C (c) T<sub>f</sub>=625 °C (d)T<sub>f</sub>=680 °C  
 $d_{avg}=1.236mm$   $d_{avg}=1.341mm$   $d_{avg}=2.194mm$   $d_{avg}=2.444mm$

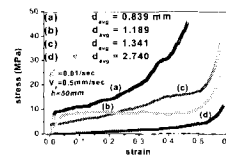
Fig. 7 Specimens at various foaming temperature for compression test  
 (T = 595 °C, N = 1350rpm,  $V_h = 20$  °C/min)

Fig. 8는 다양한 공정 변수에 따른 압축 강도의 변화 양상을 나타내고 있다. Fig. 8(a)는 용탕온도의 변화에 따라서 제조한 발포 소재의 압축 강도의 변화를 나타낸 것이다. Fig. 8(a)에서 용탕의 온도가 증가할수록 압축강도가 감소함을 알 수 있었다. 이는 용탕온도가 증가함에 따라서 기공의 크기와 기공 함유율이 증가하였기 때문인 것으로 사료된다. 특히, 용탕의 온도가 680°C인 경우에는 압축 강도가 현저하게 감소함을 알 수 있는데, 그 이유는 기공이 발생 초기에 구형(spheroid)이었던 것이 기공이 성장하면서 액상 유출에 의한 영향으로 다각형(polyhedral)모양으로 변하여 발포 소재에 응력 집중을 유발하기 때문인 것으로 사료된다.

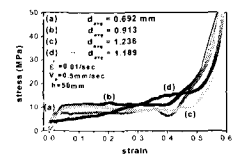
Fig. 8(b)는 회전수의 변화에 따른 압축 강도의 양상을 나타낸 것이다. 700rpm과 1000rpm일 경우를 비교하였을 때, 기공함유율이 상대적으로 더 높은 1000rpm에서 제조

된 소재가 더 높은 압축 강도를 보임을 알 수 있었다.

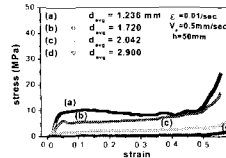
그 이유는 700rpm에서 제조된 소재의 기공 크기가 1000rpm에서 제조된 소재의 기공보다 더 작지만, 저속 회전으로 인하여 발생된 큰 기공이 소재 내부에 존재하기 때문이다. 큰 기공이 존재하는 부위에서는 응력집중 현상을 보이면서 낮은 압축강도를 보이게 되는 것으로 사료된다. 한편, 1350rpm과 1700rpm일 경우를 비교하면 변형 초기에는 1350rpm일때에 더 높은 압축 강도를 보이다가 변형율이 0.3이상에서는 1700rpm일 경우에 가 더 높게 된다. 그 이유는 1700rpm일 경우는 1350rpm처럼 다량의 기공이 발생하고 기공 성장 측면에서도 유리하지만 과도한 회전수로 인하여 대기로부터 공기 유입으로 인하여 큰 기공들이 발생하여 결정적으로 탄성영역에서 기계적 성질이 저하되었기 때문이다.



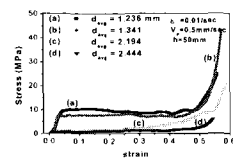
(a) Temperature of molten Al



(b) Velocity of stirrer



(c) Heating velocity



(d) Foaming temperature

Fig. 8 Compressive stress-strain curves of aluminum foam specimens for variety of molten temperatures, velocities of impeller, heating velocities, and foaming temperatures

Fig. 8(c)는 가열속도의 변화에 따른 압축 강도의 양상을 나타낸 것이다. Fig. 8(c)에서 가열속도가 증가함에 따라서 압축강도가 감소함을 알 수 있었다. 그 이유는 가열속도가 증가함에 따라서 점도의 감소가 빠르게 진행되어 기공의 성장을 촉진하게 되기 때문이다. 한편, 가열 속도의 경우에도 일정 수준 이상이 되면 용탕온도를 변수로 했을 때와 마찬가지로 압축 강도가 큰 폭으로 감소함을 알 수 있었다.

Fig. 8(d)는 발포온도의 변화에 따른 압축 강도의 양상을 나타낸 것이다. Fig. 8(d)에서 발포온도가 증가함에 따라서 압축강도가 감소함을 알 수 있었다. 그 원인은

발포온도가 증가함에 따라서 점도가 감소하여 기공이 크기가 증가하기 때문인 것으로 사료된다. 발포 온도가 증가할수록 유도가열에 의한 소재 내부에서 발생하는 온도 구배의 불균일로 인하여 내부 유동과 용탕의 팽창, 그리고 용탕의 자중에 의한 액상 유출 현상이 더욱 활발해진다. 그 효과로 기공 사이의 거리가 감소하고 기공의 표면 장력이 감소하게되어 기공이 서로 합체될려는 경향을 야기시키게 된다. 압축강도가 625℃ 이상에서 현저하게 감소하는 것으로 보아서 이러한 경향은 발포온도가 증가함에 따라서 현저해짐을 알 수 있었다.

### 3.2 굽힘 실험

굽힘 실험은 Fig. 9과 같이 시험편을 준비하여 각 제조 조건별로 실험을 수행하였다. 압축실험 외에도 이와 같은 굽힘실험을 실시한 목적은 굽힘강도의 제가능성을 알아보기 위해서이다. Fig.9의 시편은 선반 가공을 통하여 압축시편과 같은 원기둥 형상으로 만든 후에 밀링가공을 하여 제작되었다. 제작된 굽힘 시편은 3점 굽힘 시험법으로 실험을 행하였으며, 편치의 변위를 시험편 두께의 10%에 해당되는 지점까지 주어서 측정을 실시하였다. 굽힘 변위를 시험편 두께의 10%로 정한 이유는 10%이상에서는 소재에 작용하는 굽힘력이 선형성을 띄며 증가하기 때문이다.

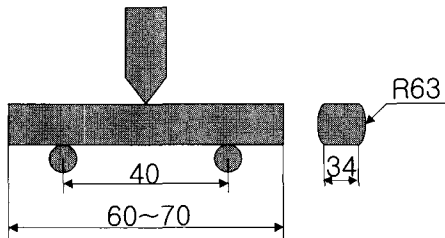


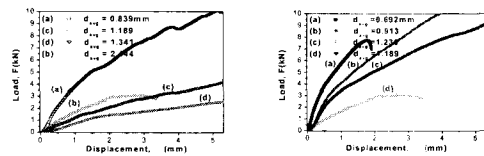
Fig. 9 Position of specimens for bending tests under various conditions (unit: mm)

Fig. 10은 3점 굽힘법으로 실험한 결과를 하중-변위 선도로 나타낸 것이다.

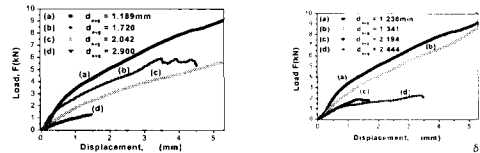
Fig. 10(a)는 용탕온도의 변화에 따른 굽힘 강도의 양상을 나타낸 것이다. Fig. 10(a)에서 기공의 크기가 증가할수록 굽힘강도가 감소함을 알 수 있었다. 이는 압축 실험에서와 마찬가지로 용탕온도가 증가함에 따라서 기공의 크기와 기공 함유율이 증가하였기 때문이다.

Fig. 10(b)는 회전수의 변화에 따른 굽힘 강도의 양상을 나타낸 것이다. 압축실험에서와는 달리 회전수가 증

가할수록 굽힘 강도는 감소하였음을 알 수 있었다. 700 rpm에서도 굽힘강도가 가장 높게 나왔지만 굽힘 실험 도중에 파단되었음을 알 수 있었다. 굽힘강도가 700rpm에서 가장 높게 나오는 이유는 기공함유율이 가장 적어 기공에 의한 굽힘강도의 강하가 상대적으로 적었기 때문인 것으로 사료된다.



(a) Temperature of molten Al (b) Velocity of stirrer



(c) Heating velocity (d) Foaming temperature

Fig. 10 Bending load-displacement curves of aluminium foam specimens for variety of molten temperatures, velocities of impeller, heating velocities, and foaming temperatures

Fig. 10(c)는 가열속도의 변화에 따른 굽힘 강도의 양상을 나타낸 것이다. Fig. 10(c)에서 기공의 크기가 증가함에 따라서 굽힘강도가 감소함을 알 수 있었다. 이는 압축 실험에서와 마찬가지로 가열속도가 증가함에 따라서 점도가 빠른 속도로 감소하여 기공이 급격히 성장하였기 때문이다.

Fig. 10(d)는 발포온도의 변화에 따른 굽힘 강도의 양상을 나타낸 것이다. Fig. 10(d)에서 기공의 크기가 증가함에 따라서 압축강도가 감소함을 알 수 있었다. 그러나, 625℃와 680℃의 경우에는 큰 온도차이에 도 불구하고 굽힘 강도면에서는 큰 차이를 보이지 않았다. 그 이유는 압축 실험에서 언급한 바와 같이 불안정한 기공의 변형 때문인 것으로 사료된다.

특이한 점은 굽힘시험에서 그래프 값이 증가되는 도중에 끊어지는 현상들이 발견되었는데 이는 균일하지 못한 부분에서의 응력 집중 현상으로 인하여 발생하는 것으로 압축시험에서 나타나지 않았던 것이 굽힘시험에서 나온 것으로 보아서, 반드시 불균전한 발포 소재의 제조를 의

미하는 것은 아니며, 굽힘 하중을 받는 발포 소재의 제조에서는 더욱 세밀한 조건의 제어가 이루어져야 됨을 의미하는 것이라 사료된다. 이와같은 압축시험과 굽힘시험의 결과를 통하여 두 물질이 모두 기공의 크기에 반비례하는 특성을 보였으며, 기공의 크기 제어를 통하여 이 두 물성을 제어 할 수 있음을 알 수 있었다.

### 3.3 이론해석

#### 3.3.1 압축실험에 대한 이론해석

발포 소재는 압축시 3단계 과정으로 변형이 일어난다. 이와 같은 현상을 개략적으로 도시하면 Fig. 11과 같다.

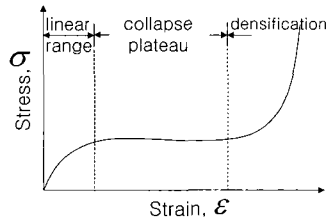


Fig. 11 Stress-Strain curve of Al foam specimen

첫 번째 단계로 탄성변형(linear elasticity)이 있는데, Hooke의 법칙에 따라 거동을 한다. 그 다음에 붕괴영역(collapse plateau)에서는 소성변형과 파괴가 동시에 발생하는데, 이 영향으로 항복점 이후의 변형에서 응력의 증가가 없는 유동변형 거동을 나타낸다. 알루미늄 발포 소재의 기계적 성질은 기공의 종류(closed cell or open cell), 기공의 구형도(aspect ratio), 기공의 크기, 균일분포정도, 그리고 발포율 등에 따라서 달라진다. 그러나, 발포 소재의 제조시 결함이 존재하고 형상규칙(morphological rules)에 의하여 응력-변형률 선도에서 응력강하 및 이에 따른 주기적 변형대를 형성하게 된다.<sup>(11)</sup> 마지막 단계로 치밀화(densification) 현상이 발생하는데, 이때부터 일반 소재와 같은 거동을 가지게 된다.

발포 소재의 압축 거동에서 Gibson과 Ashby는 밀도의 변화에 따른 강도비와 탄성계수를 다음과 같이 제안하였다.<sup>(12)</sup>

$$\sigma_f/\sigma_s = 0.65 (\phi \rho_f/\rho_s)^{3/2} + (1-\phi)(\rho_f/\rho_s) \quad (1)$$

$$E_f/E_s = C_1 \phi^2 (\rho_f/\rho_s)^2 + C_2(1-\phi)(\rho_f/\rho_s) \quad (2)$$

여기서,  $\rho_f$ 는 밀도,  $C_1$ ,  $C_2$ 는 비례상수,  $\phi$ 와  $s$ 는 발포 소재와 고체금속을 각각 나타낸다. 그리고,  $\rho_f/\rho_s$ ,  $\sigma_f/\sigma_s$ 는 상대밀도와 상대압축강도를 각각 나타낸 것이다.  $\phi$ 는 형상계수(structural parameter)로서 이상적인 경우에 개기공 형태(open cell type)이면 1, 폐기공 형태(closed cell type)이면 0이 된다.<sup>(11)</sup> 알루미늄 발포 소재의 이론 해석을 위해서는 모델의 설정이 매우 중요하다. 그 이유는 실제로 기공의 형상 및 분포가 발포 소재의 전 부위에 걸쳐서 동일하다고 볼 수 없기 때문이다. 또한 기공이 구형에서 변형된 형태이기 때문에 기공을 육면체(square prism)로 가정했을 때 수행한 해석 결과와는 차이가 있다. 그러나, 육면체 모델이 압축 양상을 비교적 정확히 반영한다는 점에서 볼 때 이러한 형상 차이를 고려한 강도식을 제안함으로써 제조된 소재에 대한 기계적 성질을 예측하려고 한다.

밀도 변화에 따른 강도의 변화 양상을 알기 위해서는 이 두 물성치를 구해야 한다. 식(3)은 밀도를 기공함유율에 대한 변수로 나타낸 것인데 기공함유율 데이터는 정량 분석을 통해 구한 값을 사용하여 밀도비를 구하였다. 그러나, 이 경우에는 발포 소재 전체의 기공 크기 및 분포가 일정하다는 가정이 포함되어야 한다. 필요한 값을 구하기 위하여 Table 3에 있는 물성치를 이용하였다.

$$\rho_f/\rho_s = 1 - P_f/100 \quad (3)$$

Table 3 Mechanical properties of ADC12 in solid state(at gravity casting)

Alloy Material	Density $\rho_s$ (g/cm <sup>3</sup> )	Young's modulus $E_s$ (GPa/m <sup>2</sup> )	Yield strength $\sigma_{ys}$ (MPa/m)
ALDCS8	2.70	72	20

Fig. 12은 실험을 통하여 구한 밀도비에 대한 강도비와 이 값들을 수식화한 것에 대한 그래프를 나타낸다. Fig. 13에서 나타난 실험결과를 통해서 상대 항복 강도는 상대 밀도에 비례함을 알 수 있었다. 그러나, 상대밀도가 0.4이하에서 소재의 강도가 큰 폭으로 감소함을 알 수 있었다. 그 원인은 기공이 커짐에 따라서 기공의 형상이 변하기 쉬워져 이러한 상태에서 내부유동 및 액상 유출 등의 영향으로 기공의 모양이 구형에서 다각형으로 변하여 응력 집중에 의한 파괴 때문인 것으로 사료된다.

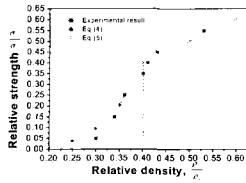


Fig. 12 Yield strength ratio for varieties of relative density in compression test

이러한 실험 결과를 근거로 하여 제안한 유도가열에 의한 알루미늄 발포 소재의 강도식을 다음과 같이 제안한다.

$$0 \leq \rho_f/\rho_s \leq 0.4, \quad \sigma_f/\sigma_s = K(\rho_f/\rho_s)^n \quad (K=39.1, n=5) \quad (4)$$

$$0.4 \leq \rho_f/\rho_s \leq 1, \quad \sigma_f/\sigma_s = K'(\rho_f/\rho_s)^n \quad (K'=1, n=1) \quad (5)$$

(If  $\rho_f/\rho_s = 0, \quad \sigma_f/\sigma_s = 0, \quad \text{sequence}$ )

(If  $\rho_f/\rho_s = 1, \quad \sigma_f/\sigma_s = 1, \quad \text{sequence}$ )

여기서, K는 응력비와 밀도비의 관계에 따른 비례상수이며, n은 유도가열법에 의해 발포된 기공의 특성을 나타내는 값이다. 기공의 특성이란, 기공의 형상과 개기공과 폐기공으로 나뉘어지는 기공의 형태를 의미한다. 앞에서 언급했던 식(1)과 (2)에 있는 형상계수와 그 맥락을 같이 하며, 실제로 발포 소재의 제조시, 완전한 폐기공이나 개기공처럼 이상적인 형태로 제조되지 않기 때문에 이러한 점을 고려한 값을 나타낸다. 강도식을 식 (4), (5)로 나눈 이유는 알루미늄 발포 소재의 강도의 변화 양상이 기공함유율이 60% 전후에서 달라지기 때문이다. Fig. 12를 보면 알 수 있듯이 제안된 식에 의한 결과와 실험치가 비슷한 값을 가짐을 알 수 있다.

#### 4. 결 론

알루미늄 발포소재의 제조시 발생하는 결함 양상과 기공의 크기에 따른 기계적 성질에 대한 연구 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 알루미늄 발포 소재 제조 공정에서 발생하는 결함들은 과열, TiH<sub>2</sub>의 불균일 주입, 임펠러의 마모 등 다양한 원인에 의해 발생한다.

(2) 다양한 원인에 의해 발생한 결함들은 소재 내부에서 함침(sinkage), 기공의 저성장, 함침, TiH<sub>2</sub> 폭발 등의 형태로 나타나게 된다.

(3) 압축 강도는 기공의 크기가 증가할수록 감소하였다.

는데, 기공의 크기가 2mm보다 작을 경우에는 항복강도가 선형적으로 변하지만, 기공의 크기가 2mm보다 큰 경우에는 기공의 형상이 구형에서 다각형으로 변형되어 그 값이 큰 폭으로 감소하였다.

#### 참 고 문 헌

- (1) T.Miyoshi, M.Itoh, S.Akiyama, A.Kitahara, 1999, "Aluminum foam, "ALPORAS": The Production Process, Properties and Applications", Metal Foams and Porous Metal Structures MIT Verlag, pp. 125 ~ 132.
- (2) H.P. Degischer, 1997, "Innovative Light Metals : Metal Matrix Composites and Foamed Aluminium", Materials & Design, Vol.18, Nos.4/6, pp. 221 ~ 226.
- (3) E. Koza, M. Leonowicz, 2001, "Relationship between structure and mechanical properties of aluminium foam", Metal Foams and Porous Metal Structures MIT Verlag, pp. 273 ~ 276.
- (4) P.J. Tan, J.J. Harrigan, S.R. Reid, 2001, "Influence of cell size and morphology on the dynamic compressive strength of aluminium alloy foams", Metal Foams and Porous Metal Structures MIT Verlag, pp. 345 ~ 350
- (5) Wang Bin, He Deping, shu Guangji, 2001, "Compressive properties and energy absorption of foamed Al alloy", Metal Foams and Porous Metal Structures MIT Verlag, pp. 351 ~ 354.
- (6) Kathryn A. Dannemann, James Lankford Jr., 2000, "High strain rate compression of closed-cell aluminium foams", Material Science and Engineering A293, pp. 157 ~ 164.
- (7) Ronald E. Miller, 2000, "A continuum plasticity model for the constitutive and indentation behaviour of foamed metals", International Journal of Mechanical Sciences 42, pp. 729 ~ 754.
- (8) 이동건, 강충길, 2001, "복합교반법에 의한 금속복합재료의 제조공정에 따른 강화제의 분산성 검토", 한국복합재료학회, 10월, 제 14권, 제 5호, pp. 1 ~ 11.
- (9) Robert Kresse, 1999, "Characteristics and Handling of Titanium Hydride", Metal Foams and Porous Metal Structures MIT Verlag, pp. 109 ~ 112.
- (10) 전용필, 강충길, 2002, "알루미늄 발포재의 성형공정



- 에서 유도가열법에 의한 점도제어가 미세기공에 미치는 영향”, 한국정밀공학회, 6월, 제19권, 제6호, pp. 136~144
- (11) Lorna J. Gibson and Michael F. Ashby, 1997, "Cellular solids", 2nd edition.
- (12) Michael F. Ashby, Anthony Evans, Norman A. Fleck, Lorna J. Gibson, John W. Hutchinson, and Haydn N.G. Wadley, 2000, "Metal foams, a design guide", Butterworth-Heinemann.