[논문] 한국소성가공학회지(2001), 제10권 제7호
Transactions of Materials Processing **Vol. 10, No. 7, (2001)**

물리적 모델링을 이용한 알루미늄 발포공정 영향 인자 해석

옥 성 민* · 문 영 훈*

(2001년 10월 5일 접수)

Physical Modeling of Process Parameters for Aluminum-Foam Generation

S. M. Oak and Y. H. Moon

Abstract

An experimental modeling is applied to investigate the formation of forms in molten aluminum. By using a specially designed equipment, the effect of process variables, such as the shape of stirrer, stirring velocity and fluid viscosity, on the formation of foams were studied in the glycerine added water. Bubbles formed in water had various diameter from 1 to 10 mm and the number of bubbles was 0 to 20/㎠. It turned out that among various variables the stirring velocity and fluid viscosity played important roles on the formation of bubbles. The results obtained from the model experiment were proved to be convincible also in the real aluminum foam.

Key Words : Foamed Aluminum, Physical Modeling, Stirring Velocity, Fluid Viscosity, Stirring Height

1. 서 론

발포 금속은 금속을 완전 용융하여 용탕 상태의 금속에 공기, 수소, 아르곤등의 기포를 직접 주입하거나 화학반응에 의해 용융금속의 내부에 기포를 발생시켜 금속의 내부에 기포가 존재하는 다공질의 금속이다. 이러한 발포금속은 우수한 충격·흡음·차음·전자파 차폐효과를 가지며 소재의 재활용이 가능하므로 환경 친화적인 측면에서도 상당히 주목받는 신소재이다.[1] 화학반응에 의해 발생한 기포에 의해 제조되는 발포 금속의 제조기술에는 금속분말과 발포제를 혼합하여 성형 소결하는 분말 야금법과 용융 금속에 적당한 점성과 표면장력 증진능을 부여한 후 점증제와 발포제를 투입하여 잉고트형이나 연속주조판재의 스폰지형 금속 다공질 고형체를 제조하는 주조법이 있다[2,3]. 이렇게 제조되는 발포 금속의 종류에는 비탄성율 및 비강도가 우수하여 초경량 구조재의 적용을 목적으로 기공의 고른 분산과 크기 및 두께의 제어에 대한 연구가 진행중인 폐기공 발포금속(closed cell)[4]이 있으며, 형태적 특성으로부터 filter재료로도 연구되고 있는 개기공 발포금속(open cell)[5]이 있다. 물리적 모델링

* 부산대학교 정밀기계공학과/정밀정형 및 금형가공연구센터

(Physical Modeling)은 실물 또는 축소 모형을 만들어 직접 실험을 하는 방법으로 수학적 모델링에 비해 다소 어려운 점이 있지만 자연계의 비 선형성을 묘사해 낼 수 있는 것과 결과를 눈에 보이는 방법으로 직접 볼 수 있다는 점에서 널리 이용되고 있다[6]. 본 연구에서는 주조법을 이용한 폐기공 발포금속 제조방법을 대상으로 물리적 모델링 해석을 수행하였다. 고온의 용융상태를 묘사하기 위하여 물에 글리세린을 첨가하여 실제 실험에서의 알루미늄 용탕과 근사한 조건의 유체를 만들어 주었다. 실제 발포금속의 제조에서와 유사한 공정 조건을 부여하여 실험을 행함으로써 실제의 실험에서 물리적 모델링 해석결과를 응용하여 최적의 발포 금속을 제조하기 위한 교반기 형상 및 속도, 점성등의 최적 공정 조건을 찾아내고자 하였다.

2. 물리적 모델링

2.1 실험 장치 및 방법

본 연구의 실험장치의 개략도는 Fig. 1과 같다. 실험은 교반기특성과 유체특성이 발포 특성에 미치는 영향에 중점을 두었다. 교반기 자체의 특성평가를 위한 실험 변수는 프로펠러 날개의 크기, 경사 각도, 회전 속도, 유체의 방향성등을 선정하였다. 작동 유체의 점도 및 프로펠러의 작동위치가 기포의 크기, 발생 기포의 수, 기포의 유동 및 분포형태에서 미치는 영향을 관찰하였다. 실험에 사용된 교반기는 위치별 기포의 유동 및 발생효과를 관찰하기 위해 높이조절이 가능한 장치를 사용하였다.

Table 1에 물리적 모델링을 위한 실험 변수를 나타내었다. 발포금속의 제조시 각 공정조건별로 실제 용탕내부에서 일어나는 현상을 관찰할 수 없는 문제의 해결을 위해 용탕내부의 가시화가 가능한 투명용기를 사용하였다. 실제 온도변화에 따른 알루미늄 용탕의 점성변화 특성에 대한 상사조건(similarity conditon)[6]을 만족시키기 위해 물에 적정량의 글리세린을 혼합하여 유체의 점도를 조정하였다. 실제 알루미늄 용탕 실험에서 이상적인 점도로 알려진 9CP 와 물리적 모델링의 이점을 살려 고점도에서의 기포의 발생 및 유동에 관한 현상을 관찰하기 위해서 20CP, 40CP로도 실험을 행하였다[7,8,9]. 교반기는 Fig. 2와 같이 유체의 교반효과를 낼수 있는 프로펠러와 시이버 (sieve)형태를 사용하였다. 프로펠러 교반기의 실험 변수로는 날개의 크기, 회전 속도, 교반 높이, 교반기 날개의 경사방향 및 경사도등을 선정하여 각각의 기포형성 및 유동에 대한 영향도를 분석하였다.

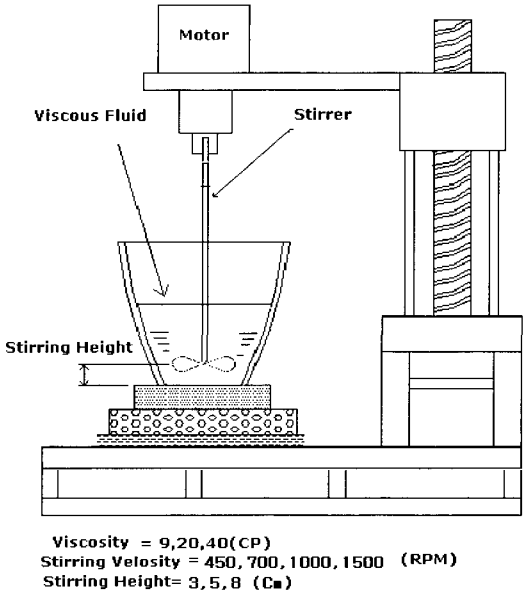


Fig. 1 Experimental setup for physical modeling

Table 1 The experimental Factors

	Factors	Value
Stirrer factors	stirring velocity	450,700,1000,1500 (rpm)
	Size of propeller leaf	①:Length=30,Width=25, ②:Length=20,Width=17(㎜)
	direction of bubbles	①: Right direction ②: Reverse direction
	angle of propeller	30° 60°
Fluid factors	viscosity of fluid	9, 20, 40 (CP)
	Height of stirrer	30, 50, 80 (㎜)

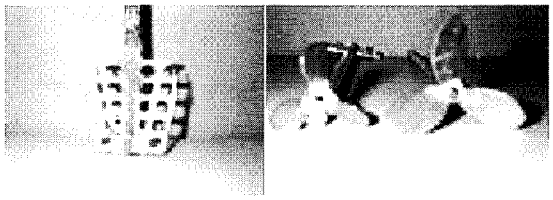
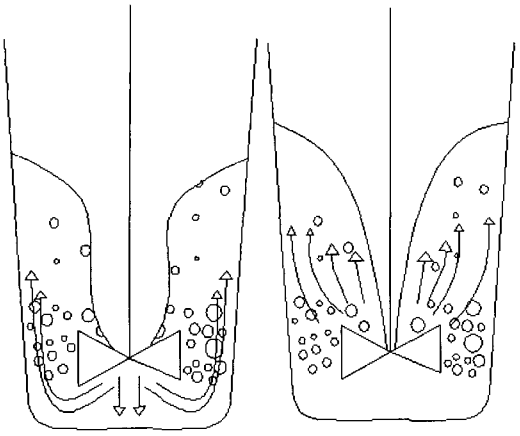


Fig. 2 Photograph showing stirrers (a) sieve type (b) propeller type



(A) (B)

Fig. 3 The flow directions of bubbles and fluid

Fig. 3에서 교반기에 의한 유체의 유동방향은 날개의 기울어진 방향을 조절하여 유체의 유동이 아래로 향하게 하는 방향을 정방향(Right direction:A), 유동이 위로 향하게 하는 방향을 역방향(Reverse direction:B)으로 두어 실험하였다.

2.2 실험 결과 및 고찰

Physical Modeling을 통한 실험에서 관찰된 정성적인 현상인 기포의 크기, 기포의 수를 정량적으로 수치화하여 표현하기 위해 다음 Table 2와 같이 정의하였다.

기포의 분포상태를 관찰하여 Fig. 4 ~ Fig. 6의 3가지의 유동 현상을 정의하였다. 기포가 발생이 된 후 빠르게 소멸이 되는 현상(Fig. 4), 기포가 생성된 후 교반기 근처에서 국부적으로 분포하였다가 소멸이 되는 현상(Fig. 5)과 기포가 비이커의 전부분에 고르게 분포되는 현상(Fig. 6)의 3가지현상으로 정의하였다. 생성기포의 분포 상태에 대한 그림이 도식도와 함께 표시되었다.

Table 2 The size and Number of generated bubbles

	Size(mm)	Number(cm^{-2})
1	0~2mm	0~5
2	2~3mm	5~10
3	3~4mm	10~15
4	4~5mm	15~
5	5mm~	

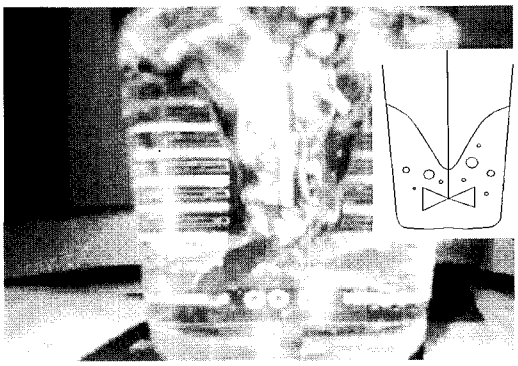


Fig. 4 Instantaneous generation and extinction

Fig. 5 Local generation (stirrer side)

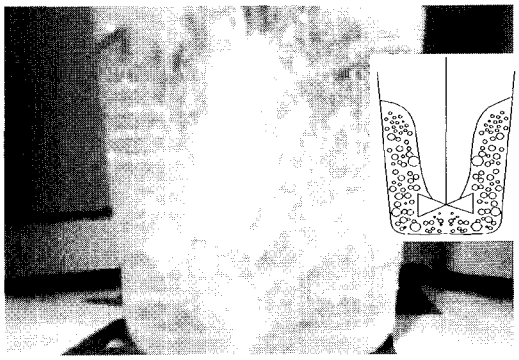


Fig. 6 Uniform generation (whole inner space)

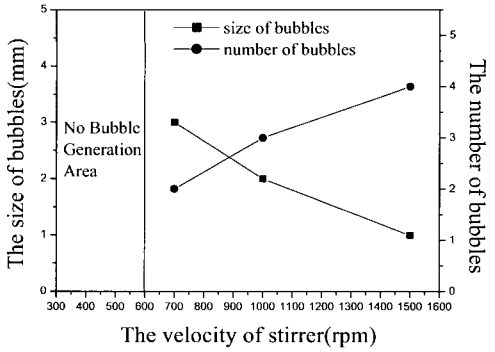


Fig. 7 Effect of string velocity on the size and number of bubbles

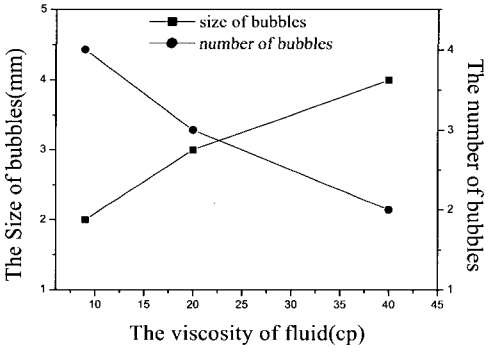


Fig. 8 Effect of fluid viscosity on the size and number of bubbles

교반 속도에 따른 기포의 크기와 수량을 나타낸 Fig 7에서는 실험의 첫 450rpm에서는 생성되는 기포가 없었으며 속도가 증가하면서 기포가 발생되기 시작하여 저속(700rpm이하)에서는 상대적으로 큰 기포가 발생하였다. 속도가 증가하면서 기포의 크기가 줄어들어 다량의 기포가 용기의 전면에 고르게 분포하였다.

Fig. 8에서 비이커 내부 유체의 점도변화에 따른 기포의 크기와 수를 나타내었다. 점성이 증가하면서 기포의 크기가 증가하는 양상을 띄었으며, 점성이 높아질수록 생성기포의 수량은 줄어들었다[10,11]. 기포의 분포상태는 저점도(9CP)의 유체에서 고른 분포상태를 나타내었고, 점성이 증가할수록 기포의 생성이 잘 되지 않았으며, 교반기 근처에서 일시적으로 생성되어 소멸되는 현상을 나타내었다.

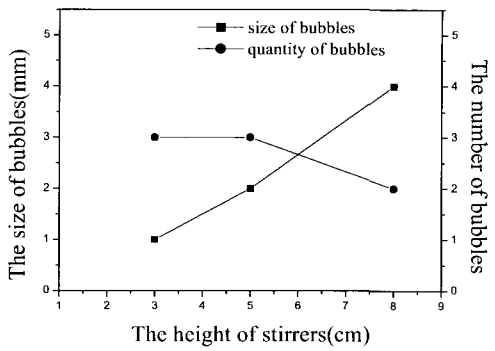


Fig. 9 Effect of the stirrer height the size and number of bubbles

Fig. 9에서는 용기 내에서의 교반기의 교반 높이에 따른 기포의 크기와 수량을 나타낸 것으로 교반 높이가 바닥에서부터 높을수록 기포의 크기들은 커졌으며, 생성되는 기포의 수량은 낮은 위치일수록 유체내에 많은 기포가 생성되어 존재하는 것을 알 수 있었다. 기포들의 분포상태 면에서 교반 높이가 높을수록 기포들이 표면이나 vortex면을 통해 많이 빠져 나갔으며 실험 용기내의 표면부에서만 생성되어 바닥까지 분포가 되지를 못했다. 그리고 실제 실험에서도 반응된 수소기포들을 많이 함유하도록 하기 위해서 최대한 낮은 위치에서의 교반이 필요함을 알 수 있었다.

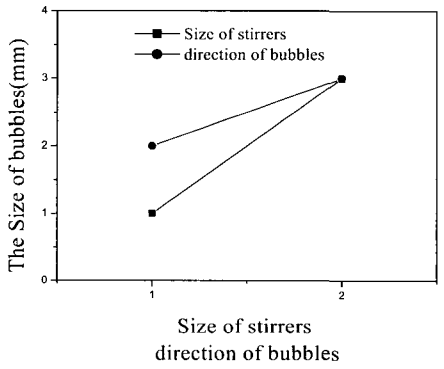


Fig. 10 The size of bubbles with respect to the size of stirrers & direction of bubbles

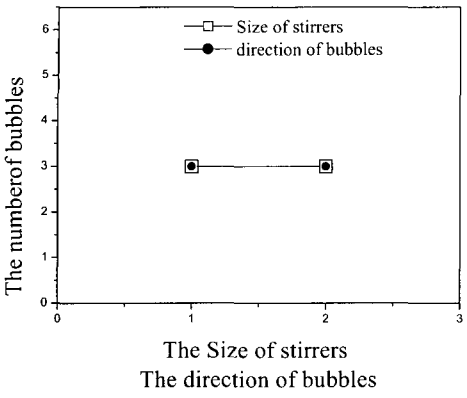


Fig. 11 Effect of stirrer size and bubble direction on the number of bubbles

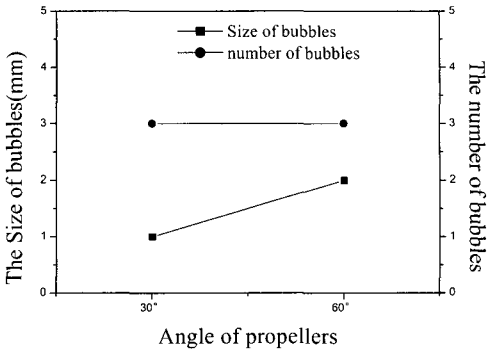


Fig. 12 Effect of various peipeller angles on the size and number of bubbles

Fig. 10 ~ Fig. 12에서는 Table. 1에서 공정인자로 채택한 교반기의 크기, 프로펠러의 경사방향, 프로펠러의 경사각도가 생성된 기포의 크기와 수량에서 작용한 데이터들을 그래프로 나타내었다. Fig. 10의 그래프는 교반기의 크기가 커지고 프로펠러의 경사방향이 역방향이 될수록 생성되는 기포의 크기는 커짐을 알 수 있다. Fig. 11에서는 위의 각인자들에 대한 생성되는 기포의 수에 대한 결과들을 그래프로 나타내었다. 기포의 크기에서와는 달리 교반기의 크기, 프로펠러 경사방향이 생성된 기포의 수량에는 영향을 미치지 못함을 알 수 있다. 생성된 기포의 분포효과를 높이기 위해서는 교반기의 크기가 크고 경사각도가 큰 교반기를 이용하여 기포의 분포가 역방향으로 발생하도록 실험을 행하는 것이 더욱 고른 분포상태를 보였다. Fig. 12에 나타난 것처럼 프로펠러 교반기의 경사 각도가 큰 조건에서 생성되는 기포의 크기가 컸다. 생성기포의 수적인 측면에서는 프로펠러 날개의 경사방향이 거의 영향을 미치치 못하였다. 생성기포의 균일 분포면에서도 프로펠러의 경사각도가 거의 영향을 미치지 못하였다.

Fig. 13, Fig. 14는 물리적 모델링에서의 공정인자들을 알루미늄 발포 실험에 적용한 실 예들이다. 고속회전 일수록 기포의 분포효과는 뛰어났으며, 기포의 크기는 작고 단위 면적당 차지하는 기공의 수량은 많아지는 경향을 띄었으며, 저속 교반에서의 소재는 발포재의 응집현상으로 불균일적인 기공들이 발생함을 알 수 있다. 물리적 모델링의 공정인자에서 중요도가 높은 점성을 실제 실험에 적용시키기 위해 알루미늄 용탕의 온도를 조절하여 실험을 행하였다. 실제 발포 알루미늄의 제조에서는 610℃와 650℃ 두 지점에서의 결과들을 비교하였다. 고온의 용탕에서 실험이 기포의 크기는 작으며, 소재의 전면에 고르게 분포되어 물리적 모델링의 실험 결과와 유사한 경향의 유동을 보임으로 물리적 모델링의 실제 발포실험에의 적용이 뛰어남을 알 수 있었다.

교반기의 교반 높이는 낮을수록 생성된 시편의 아래 부분에서부터 많은 기공들이 형성됨을 알 수 있었다. 반면에 교반 높이가 높아질수록 생성되어진 기포들이 생산 소재의 윗 부분에서만 존재하게 되었으며, 생산 소재의 아래 부분에서는 발포되지 않은 알루미늄소재를 그대로 산출하게 되었다.

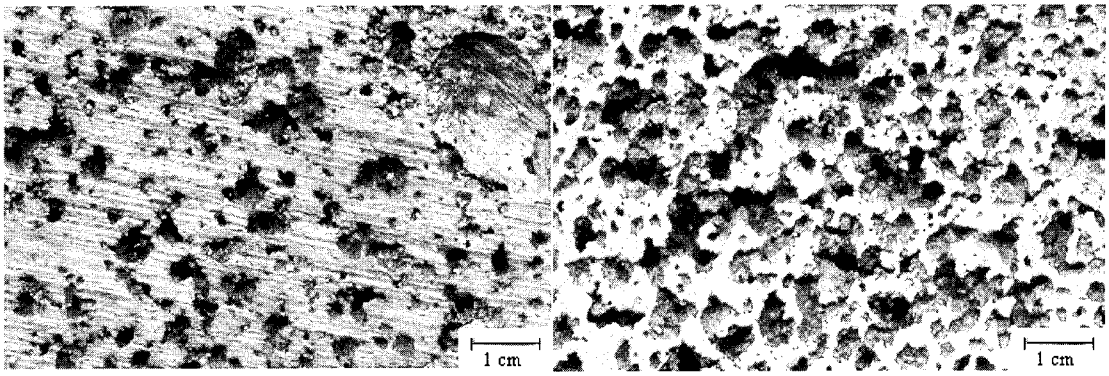
4. 결 론

본 연구에서는 물리적 모델링을 통하여 실제 발포 금속 제조를 위한 공정인자들을 연구 분석하였다. 물리적 모델링은 실제 실험에의 적용도가 뛰어났으며 실제 실험의 비가시적인 측면을 가시화 함으로써 다양한 공정변수들에 대한 현상을 규정지을 수 있었다.

물리적 모델링에서 관찰된 결과들을 요약하면 다음과 같다.

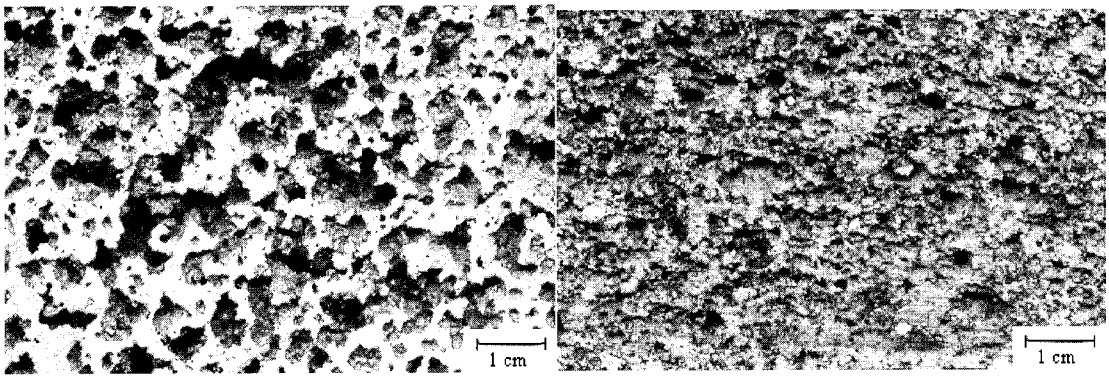
(1) 물을 이용한 물리적 모델링 실험이 실제 발포 금속 제조 실험에 잘 적용되었다.

(2) 교반 속도, 유체의 점성과 생성된 기포의 방향성이



660rpm *1200rpm*

Fig. 13 Microstructure showing effect of stirring velocity



610 ℃ *650 ℃*

Fig. 14 Microstructure showing effect of melt temperature

교반기의 크기, 교반기의 경사각도와 교반위치에 비해 기포의 크기, 기포의 수와 생성된 기포의 분포에 더 큰 영향을 끼쳤다. 유동과 교반기의 크기가 클수록, 교반기 날개의 경사각도가 클수록 큰 기포가 생성됨을 알 수 있다. 큰 기포가 생성되는 조건들에서 생성된 기포의 분포가 교반기 근처에서 국부적으로 생성되었으며, 작은 기포가 생성되는 조건에서의 기포의 분포들은 기포가 생성되기는 하지만 생성이 된 후 빠르게 소멸되는 현상을 나타내었다.

(3) 다량의 기포생성을 위해서는 저점도의 유체에서 고속 교반이 필요하다

(4) 큰 기포의 생성을 위해서는 고점도의 유체에서 역방향의 경사도를 가진 교반기로써 저속 교반이 필요하다.

(5) 생성된 기포들은 저점도의 유체에서 역방향의 경사도를 가진 교반기로써 고속으로 교반을 행함으로 비이커의 전면에 고르게 분포함을 알 수 있다.

참 고 문 헌

(1) H. Fusheng, Z. Zhengang, 1999 "The mechanical behavior of foamed aluminum", Journal of Materials Science 34 pp. 291~299.

(2) J. C. Elliot, 1956 US Patent No. 2, 751, 289.

(3) H. Ueno, S. Akiyama, 1987 Light Metal 37 42, (in Japaness).

(4) L.J. Gibson and M.F. Ashby, 1997, "Cellular Solids", Cambridge University Press, Cambridge, U.K., 2nd ed.

(5) T.J. Lu, H.A. Stone and M.F. Ashby, 1998, Acts Mater., to be published.

(6) B.J.Kim, S.M.Oak, Y.H.Moon, 2000 "Physical Modeling of foam generation in molten

aluminum", Proceeding of the 2nd Cross Symposium on Material, Energy an Enviroment al Science, pp.99~100.

(7) H.Fusheng, Z.Zhengang, 1999 "Mechanical behavior of foamed aluminum", Journal of Materials Science, Volume 34, pp. 291~299.

(8) Zhen-lun Song, Jin-song Zhu, Li-qun Ma, De-ping He, 2001 "Evolution of foamed aluminum structure in foaming process", Material Science and Engineering A298 pp.137~143.

(9) "Gas-Releasing Particle Decomposition in the PM Experimental Research in Virginia Univ.

(10) C.C. Yang, H. Nakae, 2000 "Foaming Melt", Intelligent Processing of Material Laboratory, characteristics control during of aluminum alloy foam", Journal of Alloy and Compounds, 313, pp.188~191.

(11) Song, Zhen-Lun; Ma, Li-Qun; Wu, Zhao-Jin; He, De-Ping, 2000 "Effects of viscosity on cellular structure of foamed aluminum in foaming process", Journal of Materials Science, Volume 35, Issue 1, pp. 15~20.