

칼슘 첨가량에 따른 발포 알루미늄의 기계적 성질

도복환*, 김주현⁺

(논문접수일 2005. 11. 22, 심사완료일 2006. 1. 16)

Mechanical Properties of the Foamed Aluminum According to the Quantity of Calcium

Bok-Hwan Do*, Joo-Hyun Kim⁺

Abstract

In this work, we observed the changes in mass difference according to Al-foam's amount of Ca contents which depends on the viscosity control of fusion, quality of foamed addition, mixing, temperature tests. These are crucial influencing factors in determining foam-metal's size in the manufacturing process. In order to obtain the specimen, we changed the specific gravity from 0.2 to 0.3 for the study of the light weight, and obtained the optimal values of specific gravity, and then showed the mechanical characteristics of ultra-lightweight metal according to the changing mass. The optimal conditions for aluminum foam is when the addition of Ca content in 1.5wt% ~ 2.0wt%

Key Words : Aluminum foam(발포알루미늄), Mechanical property(기계적 성질), Viscosity(점성제), Foaming(발포제) Density(밀도), Porosity(기공율), Specific gravity(비중)

1. 서론

1947년 Niehyski는 아연을 이용하여 발포금속을 제조하였고, 또한 알루미늄에 5%의 납을 넣어 발포금속을 제조하였다. 1948년 Sosnik이 알루미늄에 수은을 증발 시키는 방법으로 발포 알루미늄을 제조한 이래, 1951년 Elliot에 의해 진보된 방식인 발포 매체체를 용탕에 혼입하는 방법으로 발포금속을 제조하기 시작하였다⁽¹⁾. 현재 발포금속 표면에 여러 가지 합성수지를 입혀 절연과 충격을 방지 할 수 있는 발포금속을 개발하고 있다⁽²⁾.

발포금속은 고체와 기체가 cell상으로 복합된 복합 재료로 제조공정에 따라 cell의 형태, 크기, 분포 및 기공율을 10~95% 정도까지 제어할 수 있는 초경량·고기능 신소재로, 소음제거의 특성이 우수하므로 환경소음 제거용 뿐만 아니라 전기 자동차, 태양열 자동차의 경량화 및 내충격성이 요구되는 경량차에 이르기까지 전 산업분야에서 초경량·내열·내충격 복합합금으로 사용될 수 있는 소재로, 특히 구조용 재료로서 알루미늄판과 발포소재의 조합으로 만든 자동차용 패널은 기존의 철판으로 만든 것보다 무게는 절반이나 10배의 강성(stiffness)을 나타내는 등 구조재로서 우수한 특성을 가

* 국민대학교 자동차공학전문대학원

⁺ 교신저자, 국민대학교 기계자동차공학부 (kim@kookmin.ac.kr)

주소: 136-702 서울특별시 성북구 정릉동 861-1

지고 있다⁽³⁻⁵⁾.

발포금속의 제조 방법은 크게 금속분말과 발포제를 혼합 성형하여 소결하는 분말야금법과 용융 금속에 적당한 점성과 표면 장력을 높이기 위하여 Ca등의 증점제와 TiH₂ 등의 발포제를 투입하여 잉고트형이나 연속주조판재의 스폰지형 금속 다공질 고형체를 제조하는 주조법이 있다⁽⁶⁾.

본 연구에서는 제조 과정에서 발포 금속의 크기에 영향을 미치는 용탕의 점성제어, 발포제 특성, 교반, 온도 등에 관한 연구를 통하여 발포알루미늄 제조의 최적 조건을 성립하고, 비중 차이에 따른 기계적 특성의 변화를 관찰하고자 한다.

2. 발포알루미늄의 제조 방법

발포알루미늄의 제조과정은 용융상태에서 분해가스를 방출하는 방법으로 크게 4가지 공정으로 나눈다. Fig. 1과같이 알루미늄 용탕에 점성을 부여하는 증점공정, 가스를 발생하는 발포제 첨가공정, 기포를 균일하게 분산시키는 발포공정, 발포금속을 냉각응고하는 공정으로 되어 있으며 그 밖에 발포 알루미늄 제품을 절단 가공하는 공정으로 되어 있다.

증점제 및 발포제 입자는 이 용탕 외류의 중심에 투입시킨다.

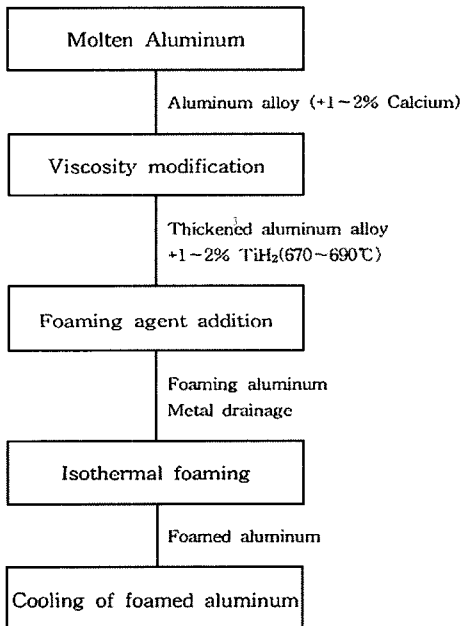


Fig. 1 Fabrication processing of aluminum foam by gas releasing partial decomposition

이 때 토크미터 회전수를 측정하고 동시에 광온계를 사용하여 반응온도를 측정한다. 본 실험에 사용된 순수알루미늄은 공업용 알루미늄으로 순도가 99.9%이고, 증점제는 99%의 Ca으로 평균 입도는 1mm이다. 발포제는 TiH₂로 순도가 99.7%이고, 평균입경이 75 μ m이다.

3. 실험방법

3.1 발포제의 제조

발포제로 사용될 수 있는 재료로는 MgH₂, TiH₂ 등이 있으나, 본 연구에서 사용된 발포제는 공업용 스폰지 티타늄(러시아 경금속, 순도99.9%)을 사용하여 수소화 처리한 후, 파쇄 및 분쇄하여 체분리하고 이를 다시 산화성 분위기에서 노출시켜 표면에 얇은 산화막이 형성되도록 하였다.

제조한 발포제의 화학 성분은 Table 1과 같다^(7,8).

3.2 용융 알루미늄의 점도 측정

용융금속의 점도를 측정하기 위해서는 고온에서 연속적으로 측정이 가능하여야 하며 재현성도 양호하여야 한다. 본 실험에 사용한 점도계는 Fig. 2와 같이 회전 점도계로 측정하였다.

Table 1 Chemical composition of titanium hydride

Component	Ti	Fe	Cl	Mn	Mg	N	C	O
Content(wt%)	99.7	0.08	0.08	0.01	0.04	0.03	0.01	0.05

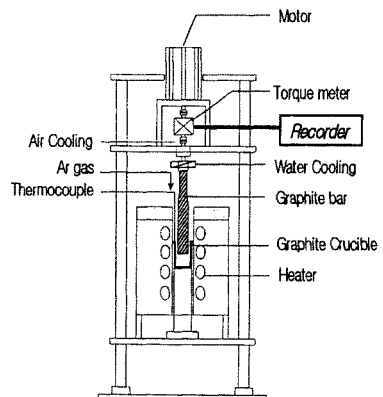


Fig. 2 Schematic diagram of viscosity measurement

점도 측정방법은 전기로 안에 있는 흑연 도가니에 알루미늄 약 5g정도를 넣고 가열하여 용융시킨다. 흑연봉을 아래로 서서히 내리면서 모터로 흑연봉을 회전시킨다(500~1,000rpm). 이때 발생한 회전저항을 토크미터로 측정하여 점도로 환산하였고, 온도변화는 700℃~900℃에 따른 점도 변화를 측정하였다.

3.3 기공율 측정

발포알루미늄의 표면상태를 분석하기 위해서 칼라 영상현미경을 사용하였다. 발포알루미늄의 물성을 측정하기 위하여 우선 발포알루미늄의 밀도(비중)를 구하고 아래의 식으로 기포율을 구하였다.

$$\epsilon(\%) = \frac{\rho_{Al}(1-C) + \rho_{Al}C - \rho F}{\rho_{Al}(1-C) + \rho A} \times 100 \quad (1)$$

발포체(발포금속)의 기포율(ϵ)은 용탕의 산화에 의한 비중 변화를 고찰하지 않으면 안되지만 편의상 발포알루미늄 비중(ρF), 순알루미늄 비중($\rho_{Al}=2.7$) 및 발포체(발포금속)의 비중($\rho A=4.5 : TiH_2$), 첨가량 C (점증제:Ca의 량)에서 산출하였다.

기공율은 알루미늄의 밀도(ρ_{Al})를 2.7g/cm³로 하고 발포된 금속의 밀도를 ρF 로 하여 아래의 식과 같이 계산하였다.

$$F = (1 - \rho F / \rho_{Al}) \times 100(\%) \quad (2)$$

3.4 기초적 물성 시험(기계적 특성)

발포알루미늄 적용 범위 범의 경량화 및 충격흡수능의 극대화를 위한 발포 알루미늄의 비중을 선정하기 위하여 발포알루미늄 비중을 0.2, 0.25 및 0.3g/cm³로 변화시켜 제작하였다. KS 0802 규격에 따라 만능재료시험기로 발포알루미늄의 기초물성 인장시험, 압축시험 및 굽힘 시험을 실행하였다.

4. 실험결과 및 고찰

4.1 증점실험

내경 80mm, 깊이 200mm의 흑연도가니에서 알루미늄을 용해하고, 대기중에서 720℃에 보존한 380g(160cm³)의 알루미늄 용탕을 회전수 500rpm으로 교반하면서, 0~2wt%의 Ca을 첨가하고 시간에 따른 점도의 변화를 순Al의 점성에 대해 상대평가로 조사하고 Ca량과 용탕 온도 변화에 따른 발포알루미늄의 Cell Size에 대한 평가 실험을 행하였다.

4.1.1 Ca(칼슘) 첨가에 따른 Al용탕의 증점 특성

Fig. 3은 Ca를 0.2~2wt% 첨가한 알루미늄 용탕의 시간 변화에 따른 교반 저항을 나타내었다.

거의 순 알루미늄의 점도가 약 3cP이기 때문에 본 실험에서의 교반저항 1kg·cm는 점도 21cP에 상당하게 된다. 알루미늄 용탕 중에 Ca을 첨가하면 첨가량에 따라 교반 저항이 조금씩 증가한다. 일정량의 Ca이 첨가된 알루미늄 용탕의 교반 저항은 시간과 함께 증가하지만 그 상승 속도는 순 알루미늄에서는 아주 느리고, Ca 첨가량이 많아짐에 따라 빨라지게 된다.

10분 후의 교반 저항은 Al-0.2wt%Ca에서 순 알루미늄 용탕의 약 2배, Al-2.0wt%Ca에서는 약 4배에 달하고, 대기중에서의 교반에 따른 Al 용탕의 증점에 Ca의 첨가가 현저하게 효과가 있는 것을 알 수가 있다.

Al-1.4wt%Ca 및 Al-2.0wt%Ca의 경우 교반 저항이 약 0.6kg·cm로 포화되고 있다. 이것은 용탕의 점성 증가와 함께 용탕의 유동성이 나빠지게 되고 약 0.6kg·cm의 교반 저항에 대해서 용탕 전체의 유동이 생기지 않게 되고, 도가니 벽에 따라서 통상의 불 유동층이 생기고 이것이 차츰 상부로도 밀려 올라가게 되고 교반 날개와 접촉하는 용탕의 양이 적어지기 때문인 것으로 판단된다. 알루미늄 용탕이 교반에 따라 점도가 증가하는 것은 용탕 표면에 생성한 산화물이 교반에 따라 용탕내로 휩쓸려서 분산하기 때문이다. 순 알루미늄은 용탕 표면에 치밀한 산화막($\gamma-Al_2O_3$)이 생성되고 산화막의 반응생성 속도는 느리다.

Fig. 4는 Ca첨가 10분 후의 교반 저항과 Ca 첨가량의 관계를 보였다. Ca 첨가량이 0.4wt% 까지는 교반 저항이 급속히 증가하지만, 이 이상에서는 증가율이 적고, Ca 첨가의 효과가 거의 둔화하고 있다. 이처럼 소량의 Ca의 첨가로 단지

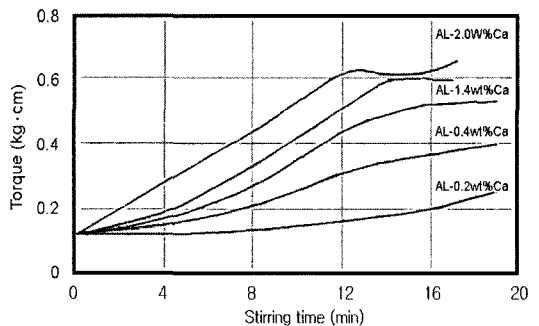


Fig. 3 Relationship between stirring time and apparent viscosity according to Ca content

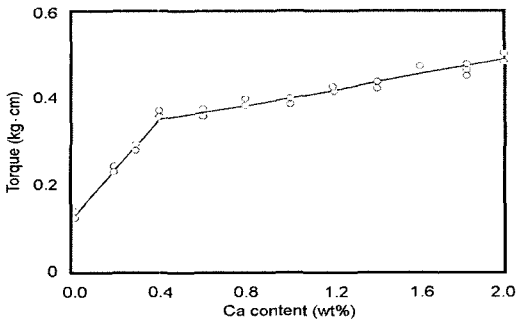


Fig. 4 Relationship between agitation resistance and Ca content

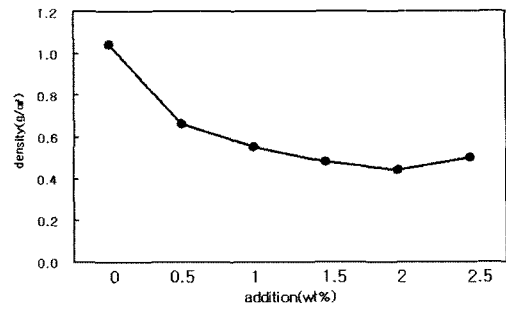
간에 증점됨을 알 수 있다.

4.1.2 Ca 첨가량에 따른 발포금속의 물리적 특성변화

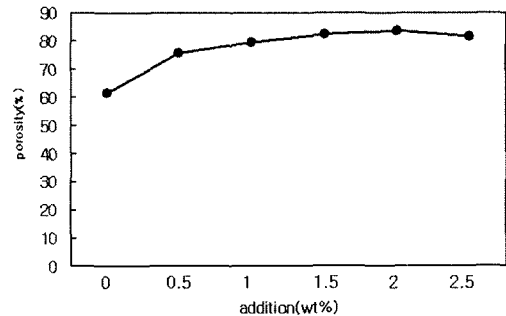
발포제는 1.0wt%로 일정하게 첨가하였고 증점제를 0wt%에서 2.5wt%씩 증가시켜 증점제 양의 변화에 따른 발포금속의 특성의 변화를 조사하여 Fig. 5에 나타내었다. 증점제의 첨가량이 1.0wt% 이상에서 발포되지 않고 응고된 금속이 포함되어 있으므로 겉보기 밀도가 정확하다고는 할 수 없으나, 전체적인 경향은 증점제량이 증가 할수록 밀도는 감소하고, 기포율은 증가하였으며 Fig. 5에서 (a)밀도는 1.04 g/cm³에서 0.5g/cm³로 감소하였고, (b)기포율은 61.5%에서 83.7%로 증가하였으나 발포제가 1.0wt% 정도 첨가된 상태에서는 증점제 1.5wt% 이후에서 대략 82% 전후로 거의 일정한 형태를 유지하고 있었다. 이와 같이 증점제가 알루미늄 중에 첨가되면 점성을 증가시키나 첨가량이 적으면 발포제가 용탕 중에서 열분해하여 수소가스를 발생할 때 점성이 약하여 수소가스가 용탕 밖으로 그대로 배출되기 때문에 용탕이 발포되지 못하고 응고되는 것으로 생각되며, 발포제량이 일정한 경우에는 증점제량을 증가시켜 1.5wt% 이상이 되면 기포율에는 거의 변화가 없음을 알 수 있었다.

4.2 발포 실험

용탕의 점성과 발포 금속의 영향을 조사하기 위한 실험으로 용탕 온도는 680℃, 720℃로 일때, 증점제는 0~3%로 변화시키면서 점성 증가 시간은 5분으로, 발포제는 0.5~2.5%로 변화시키면서 발포 유지시간을 0~7.5분, 증점 교반속도는 500rpm으로, 발포 교반속도는 1000rpm으로 하여 발포 상태를 조사하였다.



(a) density



(b) porosity

Fig. 5 The quality change according to viscosity quantity change (foaming : 1.0wt%)

4.2.1 발포제 첨가에 따른 발포금속의 물리적 특성 변화

증점제 양이 1.5wt% 이상이 되면 전체 용융 금속이 발포됨을 알 수 있었으나, 발포 크기를 조절하기 위하여는 발포제 양을 변화시켜야 할 것이다.

먼저 위에서와 같은 방법으로 밀도와 기포율을 조사하여 Fig. 6에 나타내었다. 이 (a)그림에서 알 수 있듯이 증점제가 1.5wt% 첨가되고 발포제가 1.0wt% 이상 첨가되면 밀도는 0.5% 첨가하였을 때 0.68에서 0.30g/cm³으로 감소하며 (b) 그림에서 기포율은 첨가량의 증가에 따라 증가하여 1.5wt% 이상에서 대략 89% 정도의 기포율을 나타내었다.

4.2.2 발포금속의 기공 크기 변화

발포금속의 기공 크기는 흡음성에 미치는 영향이 크므로 균질하고 비교적 큰 크기의 발포 기공을 제조하는 것이 필요하다. 따라서 균질한 크기의 발포 조직을 얻기 위하여 교반 날개 및 용탕온도를 변화시켜 실험을 행하였다.

먼저 교반 날개에 대한 실험으로는 교반 날개를 3조 1개

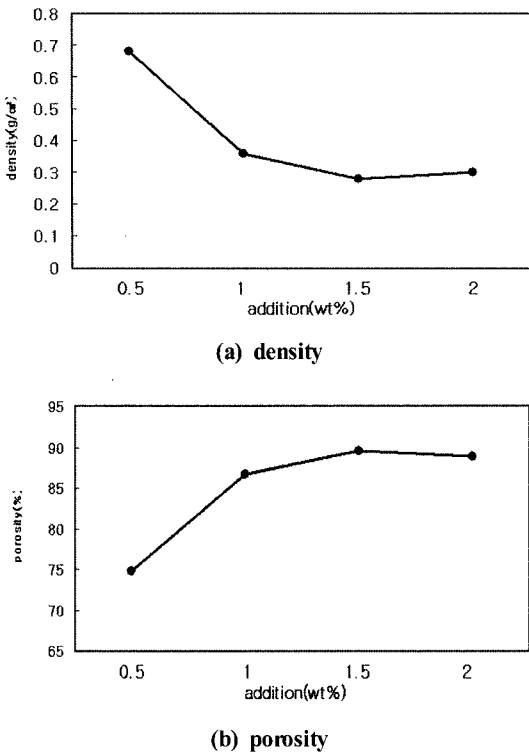


Fig. 6 The quality change according to foaming quantity change (viscosity : 1.5wt%)

만을 사용하여 교반을 시킨 결과 발포제에 의해 발포가 시작 되면 부피가 증가하여 교반 날개 1개만으로는 전체 발포된 용탕을 균질하게 교반시킬 수가 없었다. 따라서 발포가 시작 되면 교반 날개를 상하로 이동시키는 것이 용이하지 않을 뿐만 아니라 설비가 복잡해지는 단점이 있어 교반 날개를 3개 붙여 상하로 이동하지 않고도 균질한 발포 용탕을 얻을 수 있도록 하였다.

한편, 용탕의 온도가 점성에 미치는 영향을 조사하기 위하여 용탕의 온도를 680 ~ 720°C 까지 변화시켜 실험을 행한 결과 발포조직에 미치는 영향이 Table 2에서와 같이 밀도에 서나 기공율에 있어서는 큰 차이가 없었다.

이와 같이 균질한 발포 조직을 얻기 위한 변수는 Fig. 3, 4에서 보는 것과 같이 교반의 영향이 있음을 알 수 있었으며, 발포제와 증점제를 동시에 변화시켜 실험한 결과 Table 3에서와 같이 증점제와 발포제가 동시에 일정하게 증가하면 밀도나 기공율이 거의 유사한 값을 나타냄을 알 수 있었다.

Table 2 The change of physical characteristics according to temperature (viscosity : 1.5wt%, foaming : 1.0wt%)

temperature(°C)	density(g/cm³)	porosity(%)
680	0.27	90.0
720	0.28	89.6

Table 3 The change physical according to viscosity and foaming

addition(wt%)	density(g/cm³)	porosity(%)
viscosity 1.5 foaming 1.0	0.32	88.1
viscosity 2.0 foaming 1.5	0.27	90.0

이상의 실험들을 통하여 현재까지 얻은 결과로는 증점제가 2.0wt%, 발포제가 1.5wt%일 때 최적의 발포알루미늄을 얻을 수 있었다.

4.3 비중의 차이에 따른 물성 평가

비중을 0.2, 0.25 및 0.3g/cm³의 변화에 따른 인장시험, 압축시험, 굽힘시험 변위 하중 곡선을 나타내었다.

Fig. 7의 인장시험 변위곡선에서 0.25g/cm³ 발포 알루미늄과 0.30g/cm³ 발포 알루미늄의 최대하중 값의 증가량이 0.2g/cm³ 발포 알루미늄과 0.25g/cm³ 발포 알루미늄의 최대하중값 보다 2배이상 큼을 알 수 있다. 즉, 비중이 높은 발포 알루미늄의 경우 최대하중이 크게 증가함을 알 수 있다.

Fig. 8의 압축시험 변위곡선에서 0.25g/cm³ 발포 알루미늄과 0.30g/cm³ 발포 알루미늄의 최대하중 값의 증가량이 0.2g/cm³ 발포 알루미늄과 0.25g/cm³ 발포 알루미늄의 최대 하중 값이 훨씬 큼을 알 수 있다. 즉, 비중이 높은 발포 알루미늄의 경우 최대하중이 크게 증가함을 알 수 있다.

Fig. 9의 굽힘시험변위곡선에서 0.25g/cm³ 발포 알루미늄과 0.30g/cm³ 발포 알루미늄의 최대하중 값의 증가량이 0.2g/cm³ 발포 알루미늄과 0.25g/cm³ 발포 알루미늄의 최대 하중 값이 훨씬 큼을 알 수 있다. 인장시험, 압축시험과 마찬가지로 비중이 높은 발포 알루미늄이 최대하중이 크게 증가함을 알 수 있다.

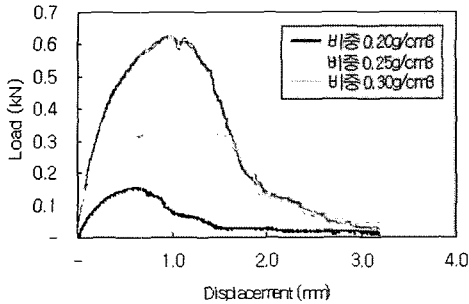


Fig. 7 Tension test displacement - load curve

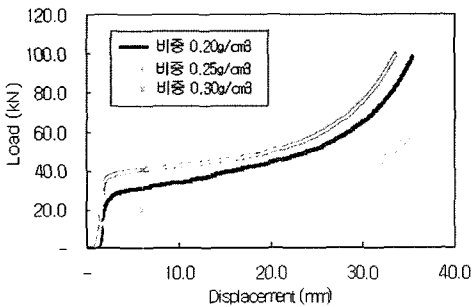


Fig. 8 Compression test displacement - load curve

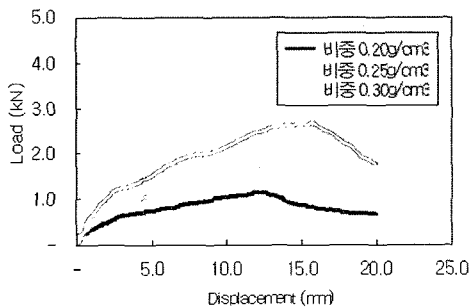


Fig. 9 Bending test displacement - load curve

4. 결론

발포알루미늄의 제조과정에서의 증점제와 발포제의 첨가량에 따른 특성을 파악하고 발포알루미늄의 비중 차이에 대한 기계적 성질에 대한 연구 결과이다.

(1) 소량의 Ca의 첨가로 증점이 되어 교반저항이 급속히 증

- 가하지만, 어느 이상이 되면 Ca의 첨가 효과가 둔화 되었다.
- (2) 온도변화에 따른 증점의 영향은 거의 없으며 균질한 발포 조직을 얻기 위해서는 교반에 있음을 알 수 있었다.
 - (3) 증점용 칼슘의 첨가량이 1.5wt%~2.0wt%에서 발포가 가장 양호하였고, 유지시간은 4~6분에서 발포가 가장 양호하였다.
 - (4) 발포알루미늄의 비중 값이 증가하면 최대하중값이 증가하고 기공율이 증가하면 최대하중값은 감소하는 것으로 나타났다.

참고 문헌

- (1) Shigeru, A., Hidetoshi, U., Koji, I. and Akira, K., 1987, "Foamed metal and method of producing same," Agency of Industrial Science and Technology, Patents No. 4, 713, 277.
- (2) Leonard, M. N. and Chester, P. J., 1974, "Method of Making Metal Foams by Sequential Expansion," Ethyl Coporation Richmond Va, Patents No. 3, 790, 365.
- (3) Chester, P. J. and Leonard, M. N., 1974, "Plastic Coated metallic foams," Ethyl Coporation Richmond Va, Patents, No 3, 839,080.
- (4) Leonard, M. N., 1974, "Aluminulead metal foams," Ethyl Coporation Richmond Va, Patents No. 3, 790, 367.
- (5) Chen, C. P. and Lakes, R. S., 1990, "Design of viscoelastic impact absorbers," *Int. J. Solids Structures*, Vol. 26, No. 12, pp. 1313~1328.
- (6) Wilfried, K., 1999, "Foamable metal articles," Th Goldschmidt AG, Patents No. 5, 972,285.
- (7) Cheng, Z. H., Mackey, G. R., Small, D.A. and Dunlap, R. A., 1999, "Phase development in titanium by mechanical alloying under hydrogen atmosphere," *J.Phys. D.Phys.*32, pp. 1934~1937.
- (8) Bryan J. B., 1981, "Thermal storang material and process for making," Boardman Energy System Inc, Patents No 4, 268,558.
- (9) Park. S. O., 2004, "Fatigue Life of FRP Composites under Uniaxial Tension and Pure Torison Loadings," *KSMTE*, Vol. 13, No. 6, pp. 64~73.