

## 미세기공 알루미늄 소재의 기계적 성질

윤성원\*(부산대 대학원 기계공학부), 이승후\*, 강충길\*\*(부산대 기계공학부)

### Mechanical Properties of Aluminium Alloy with Cellular Structure.

S. W. Youn(Mech. & Precision Eng. Dept., PNU), S. H. Lee, C. G. Kang(Mech. Eng. Dept., PNU)

#### ABSTRACT

Induction heating process is one of the most efficient heating process in terms of temperature control accuracy and heating time saving. In the past study, fabrication process of cellular 6061 alloys by powder metallurgical route and induction heating process was studied. To supplement the foaming conditions that studied in past study, effect of induction heating capacity and holding time at foaming temperature were investigated. Under the achieved foaming conditions, foamed 6061 alloys were fabricated for variation of foaming temperature, and porosities(%) - foaming temperature curves were obtained by try-error experimental method. Uniaxial compression tests were performed to investigate the relationship between porosities(%) and stress-strain curves of foamed 6061 alloy. Also, energy absorption capacity and efficiency were calculated from stress-strain curves to investigated. Moreover, dependence of plateau stress on strain rate was investigated in case of cellular 6061 alloy with low porosities(%)

**Key Words** : Closed cell cellular material(폐쇄형 미세기공 소재), Mechanical properties(기계적 성질), Fraction of porosity(기공율), Induction heating capacity(유도가열출력), Strain rate sensitivity(변형율 속도 민감도),

#### 1. 서론

미세기공 알루미늄 소재는 Al 합금내에 기공을 인위적으로 발생 및 성장시켜 부피를 팽창시킨 다공질의 초경량재료이다. 비강성이 높고 소음 및 진동감쇄능이 뛰어나며, 에너지 흡수율, 전자기 차폐 효과 면에서도 우수하다.

미세기공 소재의 큰 장점 중의 하나는 원하는 기계적 성질을 가진 재료를 기공의 조절에 의해 제조할 수 있다는 점이다[1]. 이러한 장점에도 불구하고 실제 산업에는 거의 적용되지 않고 있다. 그 원인 중 하나는 기계적 성질의 재현성(reproducibility) 문제이다[2]. 미세기공 알루미늄 소재가 맞춤형 재료(tailored material)로서 실제 산업에서 이용되기 위해서는 기공크기나 상대밀도 또는 기공율과 같은 인자와 기계적 성질과의 관계가 정량적으로 정립되어야 한다.

또한, 제품의 재현성을 개선시키기 위해서는 발포공정에서 정확한 온도제어가 필수적이다.

저자는 전 연구에서 발포금속의 가열시간을 단축시키고 온도를 정확하게 제어하기 위하여 유도가열법을 응용한 미세기공 알루미늄 소재의 제조공정

시 기공의 제어방법에 대해서 연구하였다[3]. 미세기공금속의 경우 기공율이 증가할수록 에너지 흡수 재료로서의 가용변형율(usable strain)이 증가하기 때문에 일반적으로 사용되는 미세기공 합금소재는 기공율이 70~90%정도이다 [4]. 따라서, 지금까지의 미세기공 합금소재의 기계적 성질에 대한 연구는 주로 70%이상의 기공율을 가진 소재에 대해서 이루어져 왔다. Wan [5]은 (75~85)%의 기공율을 함유한 AlSi7Mg0.45 합금의 압축실험을 통하여 기공율의 변화에 따른 미세기공재료의 변형거동 및 에너지흡수율을 조사하였다. Yu [6]는 (70~90)% 기공율의 A6061 의 압축실험을 통해 유동응력은 상대밀도의 함수이며, 변형율 속도변화에 큰 영향을 받지 않는다고 보고하였다. 그러나, 맞춤형재료로서 사용되기 위해서는 70%이하의 기공율의 미세기공금속에 대한 기계적 성질의 데이터베이스도 확립되어야 한다.

따라서, 본 연구에서는 저자가 연구한 복합성형법에 의한 미세기공 알루미늄 소재의 제조방법을 이용하여 목적 기공율을 가진 시험편을 제작하였다.

고주파 유도가열법에 의해 제조된 미세기공 알루미늄합금의 기공율에 따른 응력-변형율 선도 데이터 베이스를 구축하였다. 또한, 기공율에 따른 에

너지 흡수율 및 에너지흡수효율을 조사하였으며, 저기공율(53, 59, 66%)의 미세기공 알루미늄소재에 대해서는 기계적 성질의 변형율속도에 대한 민감도를 조사하였다.

## 2. 실험

실험에서 사용한 기지합금은 Valimet Aluminium Spherical Alloy Powder 6061(325mesh)이고 발포제로서는  $TiH_2$  분말(200mesh)을 사용하였다.

프리커서의 제조 조건은 저자의 전 연구의 결과를 사용하였다[3]. 프리커서는 6061 합금분말의 양  $W_m=30g$ , 발포제의 양 0.1~0.3 wt.%  $TiH_2$ , 혼합분말의 예열온도  $T_{pre}=450^\circ C$ , 가압력  $P=150kN$  에서 제조되었다.

프리커서의 가열온도변화에 따른 실험을 통해 조사한 기공율-발포온도 선도를 이용하여 50~75%의 기공율을 가진 미세기공금속을 제조하여 압축실험을 하여 기공율변화에 따른 응력-변형율 선도를 조사하였다. 기공율이 50~76%인 미세기공알루미늄의 에너지흡수율의 변화를 조사하였다. 유동응력 및 plateau stress의 변형율속도에 대한 민감도를 관찰하기 위해 변형율 속도 0.01, 10  $sec^{-1}$  로 압축실험을 하였다.

또한, 미세기공금속의 기계적 성질의 기공율에 의존도를 조사하기 위해 0.1% 와 0.3%의 다른  $TiH_2$  함량의 프리커서를 동일한 기공율을 가지도록 발포시킨 후 압축실험을 하였다.

## 3. 실험결과

### 3.1 기계적 성질의 기공율 의존도

미세기공재료의 기계적 성질에 영향을 미치는 인자는 기공의 크기, 분포, 기공벽의 두께, 표피(surface skin)의 두께, 상대밀도 등이 있다. 기공이 작고 균일하게 분산된 경우에는 기공보다 상대밀도가 기계적 성질에 더 큰 영향을 미친다[7].

본 실험에서는 기공율이 동일한 경우 기공의 개수나 크기가 기계적 성질에 미치는 영향을 조사하기 위해서 압축실험을 하였다. Fig. 6 (a), (b)는 0.1 wt.% 와 0.3 wt.%  $TiH_2$  함량의 프리커서를 57~58%의 기공율을 가지도록 발포시킨 것이다.  $TiH_2$ 의 양이 0.3 wt.%인 경우 0.1 wt.%인 경우에 비해 발포제의 양이 많기 때문에  $10^\circ C$  낮은  $680^\circ C$ 에서 58% 기공율의 미세기공 6061 합금을 얻을 수 있었다.

Fig. 6에서 알 수 있는 바와 같이, 0.3 wt.%  $TiH_2$ 인 미세기공 6061 합금의 기공은 0.1 wt.%인 경우보다 크기가 작고 개수가 많음을 관찰할 수 있다.

Fig. 7은 Fig. 6 (a), (b)의 시편을  $0.01sec^{-1}$ 의 변형율 속도에서 80% 압축했을 때의 응력-변형율 선도이다.  $TiH_2$  함량이 0.1 wt.%일 때와 0.3 wt.%일 경우에 응력-변형율 선도사이에 차이는 거의 없었다.

따라서, 미세기공알루미늄의 기계적 성질에는 기공의 크기나 개수보다 기공율이 더 큰 영향을 미침을 알 수 있었다.

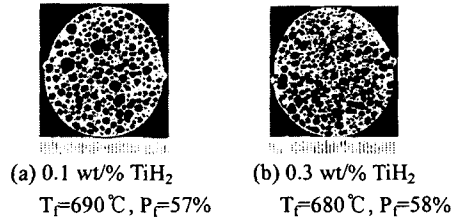


Fig. 6 Comparison of morphology of foamed 6061 alloys fabricated with different additions of  $TiH_2$  ( $0.01sec^{-1}$ )

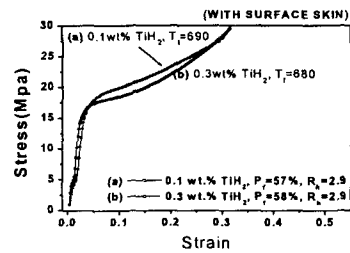


Fig. 7 Comparison of stress-strain curve for foamed 6061 alloys fabricated by different additions of  $TiH_2$  ( $0.01sec^{-1}$ )

### 3.2 기공율에 따른 기계적 성질의 변화

기공율-기계적성질 선도를 얻기 위해서는 우선 기공율-발포온도 곡선이 조사되어야 한다. 따라서 위에서 얻어진 발포조건을 이용하여 시행착오 실험 방법으로 발포온도-기공율 선도를 조사하였다. Fig. 8은 실험결과에서 얻어진 발포온도-기공율 선도이다.

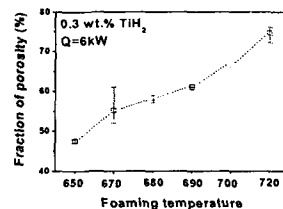
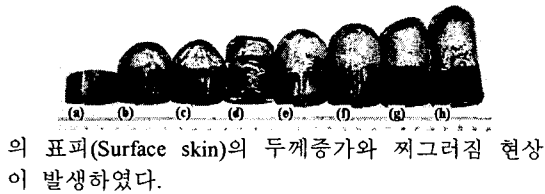


Fig. 8 Relationship between fraction of porosity and foaming temperature for 6061 alloys.

기공율 변화에 따른 기계적성질을 조사하기 위해 Fig. 8의 발포온도-기공율 선도를 이용하여 시편을 제작하였다. Fig. 9는 발포 후 시편사진과 발포방향에 수직으로 절단한 면을 보여주고 있다. 표시된 기공율은 상분석기에 의해 정량분석 되었다. Fig. 9(a)에서와 같이 발포초기에 관찰되는 압축방향에 수직으로의 이방성을 가지는 큰 기공은 어느 정도의 발포 후에는 소멸된다[8].

$T_f=700^\circ\text{C}$  이상의 발포온도에서 제조된 미세기공재료의 경우에는 합체에 의한 기공의 조대화가 급격히 진행되어 개수가 현저히 감소하고 있다.  $T_f=720^\circ\text{C}$  인 경우 발포도 및 기공율의 범위는 각각 4.2~5.4, 72~76%였다. Fig. 9에서 관찰할 수 있는 바와 같이 기공율이 76%인 경우에는 미세기공재료



의 표피(Surface skin)의 두께증가와 찌그러짐 현상이 발생하였다.

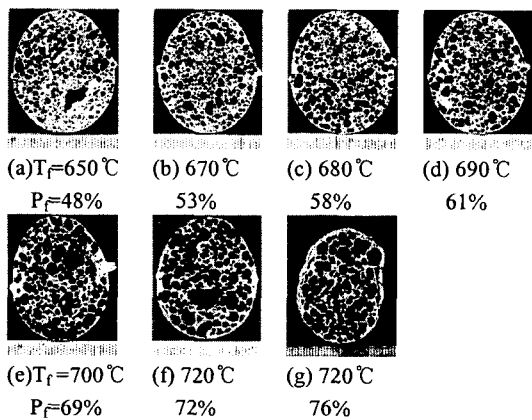


Fig. 9 Morphology of 6061 alloys fabricated for variation of fraction of porosity

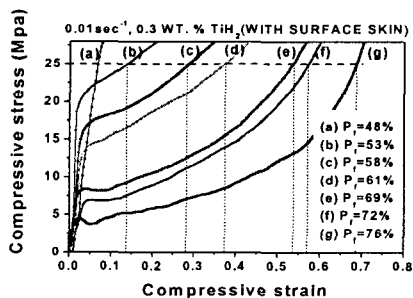


Fig. 10 Relationship between stress and strain for 6061

alloys recorded during compression test ( $=0.01\text{sec}^{-1}$ )

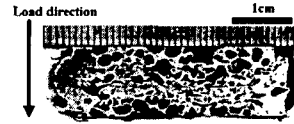


Fig. 11 Macrographs of cross sectional area of foamed 6061 alloy after compression test (height reduction 80%)

Fig. 10은 기공율에 따른 미세기공재료의 기계적 성질을 나타낸 것이다. 전체적으로는(Fig. 10(a)~(g)) 기공율이 낮을수록 압축강도가 상승하며, plateau 구간이 감소되어 가용 변형율(usable strain) 구간이 감소하고 있음을 알 수 있었다.

기공율이 48%인 경우인 Fig. 10(a)는 기공의 양이 작아서 항복점 이후에도 변형율의 증가와 더불어 응력은 계속 증가하고 있다. 이것은 기공량의 감소로 인하여 기공벽의 굽힘현상에 의한 응력의 감소현상보다는 소재의 치밀화에 의한 응력의 증가현상이 지배적으로 발생하기 이기 때문이다 [9]. 기공율이 53%~58%인 경우에서는 짧은 plateau 구간이 관찰된다. 기공율이 69~76%인 경우에는 Fig. 10(d)~(f)에서 알 수 있는 바와 같이 일반적인 연성 미세기공금속의 변형거동을 나타내고 있다. Fig. 10(f)의 경우를 예를 들어 설명하면, 초기변형시에는 변형율의 증가와 더불어 응력이 증가하지만,  $\epsilon=0.02$  부터는 변형율의 증가와 더불어 응력이 소폭 감소하고 있다. 위의 원인은 단조용 미세기공 알루미늄 합금의 경우 기공벽의 굽힘과 버클링 현상에 의해 응력이 감소하기 때문이다 [10].  $\epsilon=0.05$  부터는 기공벽의 굽힘현상에 의한 응력감소와 시편의 소성변형에 의한 응력의 증가현상이 동시에 발생하면서 응력이 완만하게 증가하고 있다.  $\epsilon=0.58$  부터는 시편이 어느 정도 조밀화 되어 고체의 변형시와 같이 응력이 급속히 증가하고 있다. 이론적으로 미세기공 소재는 변형 시 소성변형과 기공벽의 굽힘이나 파괴가 동시에 일어나며, 따라서 항복점 이후 응력의 증가 없이 변형이 진행되는 유동변형 거동을 나타낸다. 이론과 실제의 차이가 나는 원인은 결함과 기공의 형상규칙(morphological rules)에 의한 응력강화 또는 주기적 변형대의 발생, 또는 불균일한 기공 분포로 인한 국부항복에 의해 발생하는 0.1% 이하의 탄성역을 가지는 변형강화를 들 수 있다 [11]. 또한, 표피(surface skin)의 치밀화에 의한 응력의 상승도 원인으로 판단된다.

Fig. 11은 압축실험 후의 미세기공재료의 압축방향에 수평으로의 절단면을 보여 주고 있다. 굽힘과 버클링 현상에 의해 변형된 기공과 두꺼워진 표피를 보여주고 있다.

### 3.4 저기공율 미세기공 알루미늄 소재의 plateau stress 의 변형을 속도 민감도

에너지 흡수재로서 사용되기 위해서는 plateau stress 의 변형률속도에 대한 민감도가 낮아야 한다. 70%이상의 기공을 가진 폐쇄형 미세기공 알루미늄 소재의 plateau 응력은 변형률 속도 변화(<math>1\text{m/s}</math>)에 큰 영향을 받지 않는다 [11, 12]. 본 실험에서는 그보다 낮은 기공율(52, 59, 66%)의 미세기공 소재의 기계적 성질에 미치는 변형률 속도의 영향을 조사하였다. Fig. 8 의 기공율-발포온도 선도를 이용하여 동일한 기공율을 가진 시편을 2 개씩 제조하였으며, 기공율의 차이는 약 1%정도였다. 표피(surface skin)의 두께는 모든 시편이 균일하였다.

Fig. 12 는 저 기공율 (52, 59, 66%) 미세기공 알루미늄 소재의 변형률 속도에 대한 민감도를 조사한 결과이다. 기공율이 낮은 경우에도 변형률 속도에 대한 민감도는 무시할 정도임을 보여주고 있다.

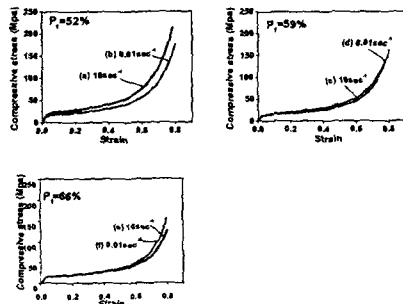


Fig. 12 Stress-strain curves for foamed 6061 alloy with various fraction of porosities at two strain rates.

### 4. 결론

유도가열법을 이용한 발포실험 및 기계적 성질 평가들을 통해서 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 발포제 함량에 따른 실험을 통해 미세기공 알루미늄 소재의 기계적 성질은 기공의 크기보다 기공율에 더 크게 의존함을 알 수 있었다.
- (2) 기공율이 증가할수록 유동응력은 증가하였고, plateau 구간은 증가하였다.
- (3) 발포온도-기공율 선도를 조사하였으며, 기공율에 따른 응력-변형률 선도를 조사하여 원하는 기계적 성질을 가진 미세기공 알루미늄 소재를 제조할 수 있는 데이터 베이스 를 구축하였다.
- (4) 저기공율(52, 59, 66%)의 미세기공 알루미늄 소재의 경우에도 변형률 속도 민감도가 낮음을 알 수 있었다.

### 참고문헌

1. Simansik, F., Rajner, W. and Laag, R., "Alulight-

Aluminium Foam for Lightweight Constructor", SAE 2000 World Congress, Detroit, Michigan, Mar. 6-9, 2000

2. Simansik, F., "Reproducibility of Aluminium Foam Properties," 1999, Proc. of the 1st Int. Conf. on Metal Foams and Porous Metal Structures, MIT-Publishing, Bremen, 14-16 June, pp. 235, 1999
3. Youn, S.W., "Control of Cell Morphology of Al Foams fabricated by P/M Method and Induction Heating," J. of Korean Society for Technology of Plasticity, in press, 2002
4. 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, 18-20 June, pp. 31, 2001
5. 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, 18-20 June, pp.351, 2001
6. 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, 14-16 June, pp. 235, 1999
7. Simancik, F., Kovacik, J., and Minarikova, N., "Deformation and Fracture Mechanism of Aluminium Foams", PM World Congress, Oct. 1998, Granada, Spain, pp.245, 1998
8. Duarte, I. and Banhart, J., "A study of Aluminium Foam Formation - Kinetics and Microstructures", Acta mater., 48 92000), pp. 2349, 2000
9. Kovasik, J. and Simansik, F., "Comparison of zinc and aluminium foams in Deformation and Fracture", Deformation and Fracture in Structural PM Materials DF PM '99, vol I, IMR SAS, Kosice, pp.106, 1999
10. Simancik, F, Jerz, J., Kovacik, J., Minar, P., "Aluminium Foam - A new Light-Weight Structural Material", Kovove Materialy, 35, C4, pp. 265, 1997
11. 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 (5), pp. 419, 1998
12. Ashby, M. F. Evans, A., Fleck, N. A., Gibson. L. J., Hutchinson, J. W., Wadley, H. N. G., "Metal Foams-A Design Guide", pp. 161