

셀의 형상비에 따른 미세기공 재료의 유한요소해석

윤성원*(부산대 대학원 정밀기계공학과), 이정우*, 강충길**(부산대 기계공학부)

Finite Element Analysis of Cellular Material According to Aspect Ratio of Cell

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

ABSTRACT

This study is focused to predict the behavior of Al foam with closed-cell structure during the 3 point bending test and the upsetting test according to aspect ratio. We calculated characters of aluminum foams with closed-cell structure and took the simulation. The effects on the aspect ratio of the cell was investigated parametrically. The analysis was carried out on two models, First, the bending test in elasticity of the rectangular beam, and Second, the upsetting test in plasticity of the circular cylinder. In the analysis, the deformation of the beam and the cylinder was influenced by the aspect ratio of the cell. Further, We assumed that the geometry of foamed aluminum cell change the stress and strain in the test.

Key Words : Cellular aluminium(미세기공 알루미늄), Closed-cell(폐쇄형 기공), Aspect ratio(종횡비), 3 point bending test (3점 굽힘시험), Upsetting test(압축시험)

1. 서론

최근에는 폐쇄형 미세기공 알루미늄 소재와 같은 금속성 다공질 재료의 제작에 대한 연구가 활발하게 이루어지고 있다. 특히 미세기공 알루미늄 합금은 중량감소와 안전성을 고려하는 자동차, 철도, 우주산업 등에서 그 활용가치가 높다[1]. 또한 음향이나 충격 에너지 흡수성도 높아 기능적으로 사용될 수 있는 재료이다 [2].

본 연구의 목적은 유한요소해석을 이용하여 미세기공급속으로 이루어진 구조물이 기공의 형상에 어떤 영향을 받는지를 역학적으로 예측하는 것이다.

미세기공 알루미늄 합금의 기계적 성질은 기공의 형상 인자에 지배적으로 영향을 받고, 기공의 형상이나 크기, 분포 등은 발포공정에서 조절 될 수 있다 [1,3].

따라서, 형상인자의 변화에 따른 미세기공알루미늄의 변형 거동의 변화를 예측하기 위하여 셀의 높이 밀면의 길이로 나눈 형상비(aspect ratio, $A_r : A_r=h/l$)를 변수로 하여 ANSYS S/W를 이용하여 3점 굽힘시험과 단순압축시험을 하였다.

3점 굽힘 시험에서는 형상비가 탄성에 미치는 영향을 조사하는 것이 목적이므로 소성변형을 고려하지 않았으나, 단순압축시험에서는 소성변형을 고려하여 시뮬레이션 하였다.

기공의 형상모델을 설정하는데 필요한 치수 데이터를 얻기 위하여 분말법과 유도가열법을 응용한 복합가공법을 이용하여 미세기공알루미늄을 제조하였다 [4].

2. 유한요소 해석 모델링 및 조건 설정

시뮬레이션을 위해서 시험에 사용될 미세기공급속은 모든 방향에서 동일한 기공구조를 가지며, 형상은 사각기둥형상이라고 가정되었다 [1].

변수로는 기공의 기둥높이변화에 따른 형상비를 변수로 사용하였다. Fig. 1은 폐쇄형 기공의 기하학적 모양을 나타내고 있다.

Fig. 1과 같은 기공의 형상모델을 설정하기 위해 미세기공알루미늄이 제조되었다.

Fig. 2는 분말법과 유도가열법을 응용한 복합가공법으로 제조된 72% 기공율의 미세기공 알루미늄

소재이다.

기공의 형상모형을 설정하기 위하여 몇 개의 기공을 선택(circles 1-3 in Fig. 2)하여 치수를 측정한다. 다음 평균값을 기준 셀의 치수로 설정하였다.

Table. 1에 각 기공의 치수와 평균값을 나타내었고, 미세기공 알루미늄 소재의 모든 기공은 그 평균값과 같은 치수와 형상을 가진다고 가정되었다.

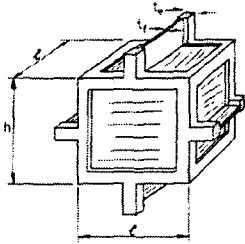


Fig 1. A cubic cell model for a closed-cell foam[1]
(t_c : edge thickness, t_f : face thickness)

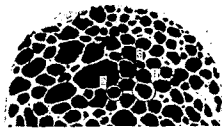


Fig. 2. Section structure in the aluminum foams

Table 1. Dimension of selected cell and mean value

Cell No in Fig. 2	1	2	3	mean
구분				
t_c	0.81	0.45	0.35	0.54
t_f	0.27	0.15	0.17	0.20
l	2.27	1.50	2.23	2.00

Table 2. Mechanical properties of solid aluminum [1]

Density $\rho_s(Mg/m^3)$	Young's modulus at 20°C $E_s(GPa)$	Yield strength $\sigma_{ys}(MPa)$	Fracture strength $\sigma_B(MPa)$
2.7	69	40	200

미세기공 금속은 기공으로 이루어진 구조이지만, 모델을 단순화하기 위해서 하나의 고체라 가정하였다. Table. 2는 알루미늄 금속의 기계적 성질을 나타내고 있다. 미세기공금속의 기계적 성질을 구하는 공식들[1]에 Table. 1. 과 Table. 2의 값들을 대입하면 미세기공 알루미늄 소재의 기계적 특성을 구할 수 있다.

Table 3. Mechanical properties of foamed aluminium with variation of A_r value

A_r	Young's modulus $E_s(GPa)$	Yield strength $\sigma_{ys}(MPa)$	Poissons ratio
0.5	80	15	0.33
1	45	11	"
1.5	36	9.9	"
2	31.5	9	"

A_r 값의 변화에 따른 미세기공 알루미늄 소재의 기계적 성질의 변화값을 Table. 3에 나타내었으며, 이 데이터를 이용하여 3점 굽힘 시험과 단순 압축시뮬레이션을 하였다. 시뮬레이션시 단순압축시험에서는 소성과 마찰계수를 고려하였지만, 3점 굽힘시험에서는 소성을 고려하지 않고, 단지 형상비가 탄성에 어떤 영향을 미치는지의 여부를 조사하였다 [5].

Fig. 3은 3점 굽힘시험의 기하학적 모델을 나타내고 있다. 빔은 50×50 mm의 정사각형 단면을 가지고 300 mm의 길이를 가지는 다공질 재료로 설정되었다. 양쪽 지지점(빔 하부면의 끝 부분)은 완전히 고정을 시켜 마끄러지지 않게 하였다. 또한 빔 상부면 중앙선에서 균일하중을 받으며 중앙선의 전 노드가 5 mm의 처짐(deflection)이 있도록 하였다. 이 때 처짐에 따른 하중은 중앙선의 센터노드에서 측정되었다.

1500개의 요소와 2046개의 노드로 이루어진 사각 메쉬로 빔을 메싱 한다. 특히 빔의 윗면은 정확성을 높이기 위하여 옆면보다 더 많이 메쉬를 나누었다. Fig. 4는 메쉬가 나누어진 빔을 나타내고 있다.

l 은 2mm로 고정시키고 h 를 1, 2, 3, 4로 변화시켜서 A_r 이 0.5, 1, 1.5, 2의 값을 가지게 하였다.

이 시험에서는 소성변형을 전혀 고려하지 않았으며 단지 셀의 형상비에 따른 탄성회복만을 고려하였다.

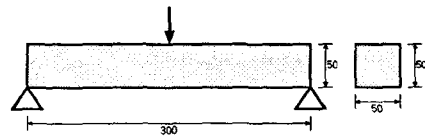


Fig 3. Three points bending test model



Fig 4. The meshing beam

3. 결과 및 고찰

3.1 3점 굽힘 시험

단순압축 시뮬레이션을 위한 시편은 실린더형상의 미세기공 소재라고 가정되었다. 단순압축시험은 3점 굽힘시험과는 다르게 소성변형을 고려하여, 폼 재료가 등소성 알고리즘을 따르는 탄소성 재료라 가정하였고, 시편이 압축되어질 때 마찰계수 μ 는 0.3으로 설정하였다.

Fig. 5는 단순압축시험에서 사용할 모델을 나타낸다. 실린더형상의 미세기공재로는 축대칭 형상을 가지므로 축대칭 중 반쪽부분만을 해석하였다. Fig. 6은 실린더형 시편 단면의 반쪽부분만을 잘라 메싱한 것이다. 따라서 대칭축인 y축은 x방향으로는 움직일 수 없도록 x축 고정을 하였으며(단 y축 방향으로는 움직일 수 있음) x축은 반대로 y방향으로 움직일 수 없도록 y축 고정을 하였다. Fig. 6에 표시된 삼각형은 이 축이 x나 y방향으로 고정되었음을 나타낸다.

본 시험에서 사용한 탄소성 데이터는 A6061 알루미늄을 압축시험하여 구한 탄소성 데이터를 참고하였다 [6]. 그러나 탄성영역까지의 기울기는 공식 [1]을 이용하여 구한 탄성계수를 참고하여, 시험에 사용할 폼 재료에 맞도록 탄성한계를 수정하였다.

Fig. 7은 A_r 이 1일때, 즉 h 와 l 이 2일 때 수정된 압축시험곡선을 나타내고 있다. 3점 굽힘시험과 마찬가지로 단순압축시험에서도 A_r 에 따른 거동을 조사하였다.

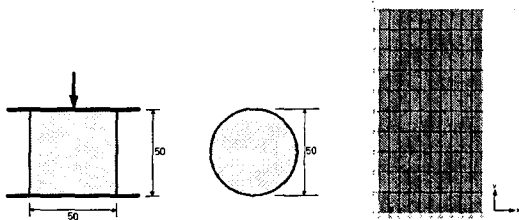


Fig 5. Upsetting test model

Fig 6. The meshing cylinder

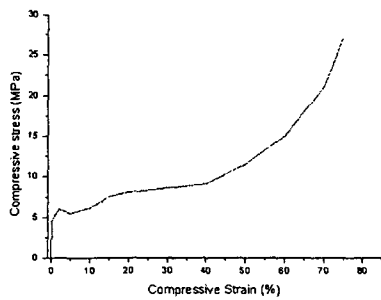


Fig 7. Modified stress-strain curve ($A_r=1$)

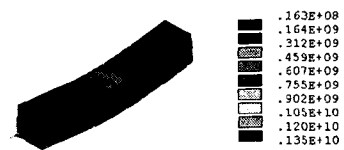


Fig 8. Von Mises stress distribution ($A_r=1$)

Fig. 8은 A_r 이 1일 때($h=2$, $l=2$ mm) 빔의 Von Mises 응력 분포를 나타내고 있다. 본 연구에서는 응력분포보다는 형상비에 따른 탄성회복력에 중점을 두었기 때문에 A_r 이 1일 경우만 참고로 나타내었다.

Fig. 9는 빔의 중앙에서 처짐에 따른 힘의 응답을 나타낸다. 미세기공 금속 소재의 기공 형상비에 따른 탄성회복 경향을 파악하는 것이 목적이었기 때문에 빔의 소성변형 및 탄성한계는 고려하지 않았다.

Fig. 9에서 A_r 이 감소할수록, 즉 h 가 작을수록 기울기가 증가함을 알 수 있다. 반면에 A_r 이 증가할수록, 즉 h 가 클수록 기울기는 감소하고 있다. h 가 작으면 그만큼 셀이 조밀해지고 고체 상태에 가까워지며, 고체가 가지고 있는 탄성회복력에 근접해 지지만 소재의 무게가 증가한다. 따라서 가벼운 구조물로 사용되어야 할 경우 셀이 조밀한 것보다는 셀의 크기를 크게 하는 것이 적합하나, 그만큼 탄성회복력 및 강도가 떨어지므로 적당히 조절하여야 한다.

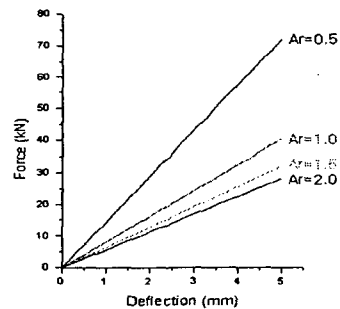


Fig 9. Force-deflection response curves of beams

3.2 단순압축실험

Fig. 10은 A_r 값이 각각 0.5와 2일 때의 응력분포를 나타내고 있고, Fig. 11은 압축 시뮬레이션을 통해 얻은 A_r 값에 따른 힘-변위 곡선을 나타내고 있다.

Fig. 11에서 알 수 있는 바와 같이 동일한 변위에서 형상비(A_r)가 감소할수록 힘은 증가하고 있다. 위는 형상비가 작을수록 더 많은 에너지를 흡수 할 수 있고, 강도가 높아짐을 의미한다.

또한, A_r 값이 감소할수록 탄성한계가 증가하고 있는데, 이것은 앞서 빔에서의 결과와 같이 탄성계수가 커지기 때문으로 사료된다.

A_r 이 감소할수록 셀의 위치가 y축, 즉 상하 방향으로 조밀하게 분포되어 더 많은 에너지를 흡수 할 수 있기 때문이다. 또한, 단순압축시험에서 A_r 이 작을수록 소성변형의 발생 시점이 늦어지고, 동일한 변형율에서 좀더 많은 힘을 받을 수 있음을 알 수 있었다.

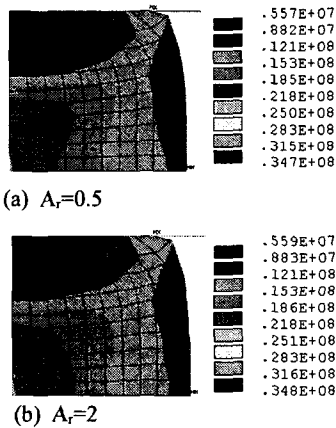


Fig 10. Effect of A_r value on Von Mises stress distribution

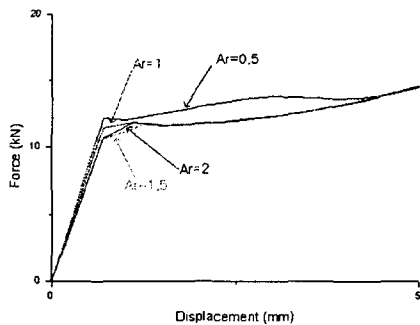


Fig 11. Force-Displacement response curves

4. 결론

미세기공 알루미늄 소재의 3점 굽힘시험과 단순

압축시험의 시뮬레이션을 통해 기공의 형상비(A_r)값이 감소할수록 탄성계수의 증가로 인해 탄성한계가 증가함을 알 수 있었다. 또한, 형상비 값이 감소할수록 소성변형의 발생 시점이 늦어지고, 동일한 변형율에서 좀더 많은 힘을 받을 수 있었다. 그러나 강도의 증가와 더불어 미세기공금속의 밀도가 높아져 단위체적당 무게가 증가하게 된다.

따라서, 원하는 강도와 무게를 지닌 재료를 제조할 수 있도록 제조공정상의 적절한 제어가 중요함을 알 수 있었다.

참고문헌

- Gibson, L.J., and Ashby, M.F., "Cellular solids: Structure and properties" second ed, Cambridge University Press, Cambridge, UK, 1997
- Itoh, M., Nishikawa, T., and Morimoto, K. J. Japan. Inst. Met. 26, pp. 311, 1987
- Song, Z.I., Zhu, J.S., Ma, L.Q., and He, D.P., "Evolution of foamed aluminum structure in foaming" *Materials Science and Engineering*, A298, pp. 137-143, 2001
- Roberts, A.P., and Garboczi, E.J., "Elastic modulus of model random three-dimensional closed-cell cellular solids" *Acta Materiala*, 49, No.2, pp. 189-197, 2001
- 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
- Saenz, E., Villate, A., Garuz, I. Irisarri, A.M., Rausch, G., and Weber, M., "Failure mechanism of aluminium foams under compressive loads", *Proc. of the 1st Int. Conf. on Metal Foams and Porous Metal Structures*, MIT-Publishing, Bremen, 14-16 June, pp. 269-276, 1999