

# 마이크로 X-ray CT를 활용한 알루미늄 개방형 폼의 형상 및 압축 거동 분석

김영일<sup>1</sup> · 김지훈<sup>1</sup> · 이종국<sup>2</sup> · 김대용<sup>#</sup>

## Analysis of 3D Geometry and Compressive Behavior of Aluminum Open Cell Foam Using X-ray Micro CT

Y. I. Kim, J. H. Kim, J. K. Lee, D. Kim

(Received September 15, 2011 / Revised October 17, 2011/ Accepted October 18, 2011)

### Abstract

The three dimensional geometries of an aluminum open cell foam before and after uniaxial compressive loading were investigated using the X-ray micro CT(computed tomography). Aluminum 6101-T6 open cell foams of 10, 20, 40 ppi (pore per inch) were considered in this work. After the serial sectioning CT images of aluminum foams were obtained from non-destructive X-ray images, the exact 3D structure were reproduced and visualized with commercial image processing program. The relative density ratio was around the 7.0 to 9.0 range, the unit cells showed anisotropic shapes having the different dimensional ratios of 1.1 to 1.3 between the rise and the transverse directions. The yield stress increased with the relative density ratio and the volumetric strain increased proportionally with compressive strain. The plateau stress in the compressive stress-strain curve was caused by the buckling of ligaments.

**Key Words** : Open Cellular Metal, Aluminum Foam, Compressive Behavior, X-ray Micro CT

### 1. 서론

금속 폼(metal foam)은 고 에너지 흡수능을 가졌으며 경량화가 가능하여(Fig. 1) 자동차, 고속철도 차량 등과 같은 수송기기의 강성 및 충돌 부재로 적용 가능성을 높여가고 있다[1]. 금속 폼은 단위 셀의 구조에 따라 폐쇄형(closed)과 개방형(open)으로 나뉘는데, 충돌 흡수능은 폐쇄형이 개방형보다 좋으나, 개방형 금속 폼의 경우 충돌 부재 뿐 만 아니라 기능성 부재에도 사용이 가능하여 각광을 받고 있다. 개방형 알루미늄 폼은 미국 ERG 사가 주도적으로 양산화 개발을 수행한 Duocel[2]이 대표적으로 대략 80~97%의 공극율을 가지고 있다.

개방형 금속 폼은 Fig. 2에서 도시한대로 주로 정밀주조법(investment casting)으로 제조된다. 폴리우레탄과 같은 고분자 폼으로 된 망상 뼈대의 패턴을 만들고 망상 뼈대의 주변을 세라믹과 같은 내열재료의 슬러리로 채워 몰드를 만든다. 망상 뼈대 고분자를 고온에서 녹여 제거하고 금속 주물을 주입하여 응고한 후 세라믹 몰드를 제거하여 제작한다[3].

개방형 금속 폼의 3차원 구조 분석은 의료용 마이크로 X-ray 컴퓨터 단층 촬영(CT, computed tomography) 기술의 발달로 매우 용이하게 되었다[4]. 개방형 금속 폼의 구조 및 압축 거동 분석은 미국 텍사스 대학교의 Kyriakides 교수 그룹에서

1. 한국기계연구원 부설 재료연구소 변형제어연구그룹  
2. 현대자동차 중앙연구소 기반기술연구팀  
# 교신저자: 한국기계연구원 부설 재료연구소 변형제어연구그룹,  
E-mail: daeyong@kims.re.kr

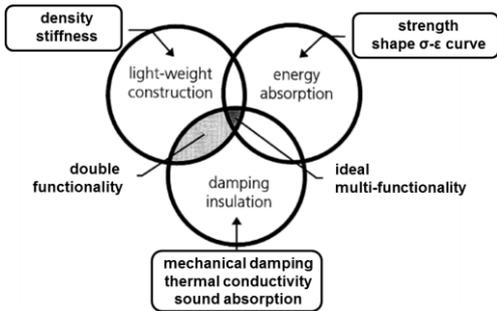


Fig. 1 Main automotive application fields of structural metal foams[1]

진행되었는데, Jang과 Kyriakides은 개방형 폼의 단위셀 구조와 망상 뼈대의 형상을 분석하였으며[5], 망상 구조를 같은 등가 모델을 상정하고 이에 대한 압축 거동에 대한 분석적 해석(analytical analysis)을 수행하였다[6].

최근에는 마이크로 CT를 이용하여 단위셀의 구조를 촬영하여 이를 격자망화하여 유한요소해석에 적용하고자 하는 연구가 진행되고 있다. Jeon과 Asahina[7]은 폐쇄형 금속 폼에 대하여 금속 폼에 대한 시편 크기에 따른 압축 하중 시 응력-변형을 거동을 비교 분석하였고, 셀 벽의 결함이 압축 거동에 미치는 영향을 분석하였다. 아울러 Jeon 등[8]은 마이크로 CT를 활용하여 폐쇄형 알루미늄 폼의 단위셀의 격자망을 생성하고 유한요소해석을 통해 셀 벽(cell wall)의 기계적 특성을 추적하고, 압축거동을 모사하였다. 또한 Takano 등은 마이크로 CT와 유한요소 해석을 이용하여 개방형 타이타늄 폼의 구조 강도를 예측하였다[9]. 그러나 Duocel 형태의 개방형 금속 폼에 대한 유한요소해석 기술에 대한 연구는 아직 미진한 상태이다.

본 연구는 마이크로 CT를 활용한 개방형 알루미늄 폼의 멀티스케일 유한요소해석 기술 개발을 목적으로 시작되었다. 이를 위하여 본 논문에서는 마이크로 CT를 통하여 개방형 알루미늄 폼의 비파괴 투과 이미지를 측정하고, 그 이미지를 바탕으로 3차원 형상을 재구성하였다. 재구성된 3차원 형상을 통하여 개방형 알루미늄 폼의 압축 전 후의 3차원 구조를 분석하였고, 이를 압축 시험을 통하여 얻어진 압축 하중 거동과 관련 지어 비교하였다.

SOLIDIFICATION IN OPEN CELL MOLD

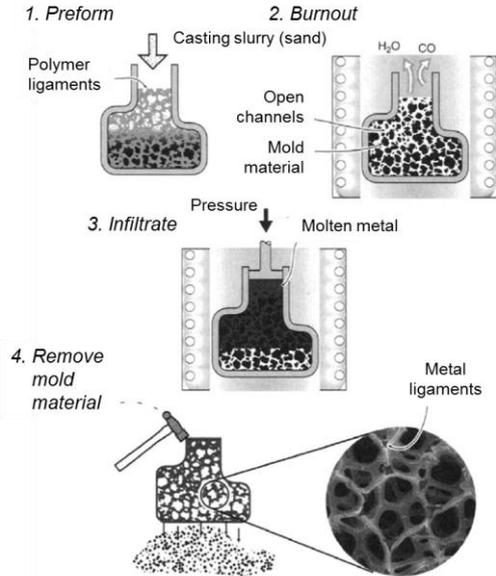


Fig. 2 Investment casting method used to manufacture open cell foams (DUOCEL process)[3]

추후 일련의 연구를 통하여 알루미늄 폼의 유한 요소 모델링 및 해석 방법을 확립하고자 하는데 그 절차는 다음과 같다. 본 연구에서 획득한 3차원 형상을 바탕으로 유한 요소 격자망을 생성하고, 알루미늄 폼의 셀 뼈대(ligament)의 물성을 추가하여 단위 셀의 압축 거동을 해석한다. 더하여 다양한 하중 조건에서 해석하여 얻은 단위셀의 물성을 연속체 기반의 구성방정식과 연계하여 대면적 부품의 성형 또는 충돌 해석에 응용한다.

2. 실험 과정

2.1 소재 준비

본 연구에서 사용된 금속 폼 소재는 미국 ERG 사로부터 공급받은 Duocel® 개방형 AlMgSi 알루미늄(6101-T6) 폼이다. 알루미늄 6101-T6의 화학성분을 Table 1에 정리하였다. 알루미늄 폼의 공극(pore) 크기에 따라 10, 20, 40 ppi (pore per inch)의 시편을 사용하였다. 각 소재에 대해 방전 와이어 커팅 기를 이용하여 Fig. 3과 같이 10×10×10(mm<sup>3</sup>)

Table 1 Chemical composition of 6101-T6 (wt %)[2]

Al	B	Cr	Cu	Fe	Mg	Mn	Si	Zn
Bal.	<0.060	<0.030	<0.10	<0.50	0.35-0.80	<0.030	0.30-0.70	<0.10

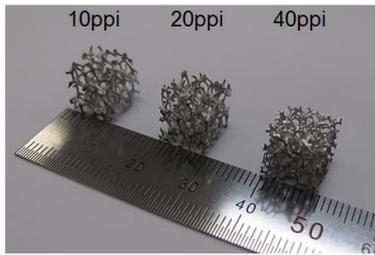
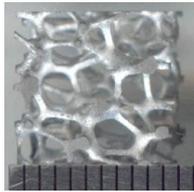
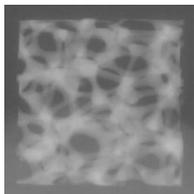


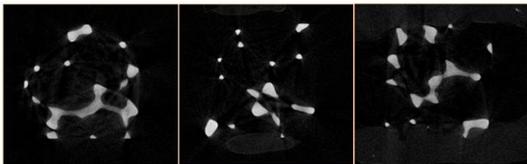
Fig. 3 The representative specimens of Al open cell foam with different pore density



(a)

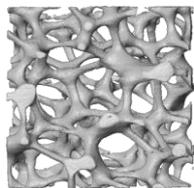


(b)



Bottom surface → Top surface

(c)



(d)

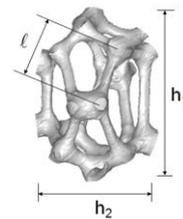
Fig. 4 (a) A photos of specimen 10-1, (b) X ray images in micro CT, (c) tomographic slicing images and (d) reconstructed model

크기의 시편을 각각 3개씩 제작하고, 각 시편을 공극크기-시편번호와 같이 명명하였다. 시편의 크

Table 2 Geometric parameters of 6101-T6 foams

Exp. No.	$\frac{\rho^*}{\rho}$ (%)	$h_1$ (mm)	$\lambda = \frac{h_1}{h_2}$	$\ell$ (mm)
(a) 10 ppi				
10-1	8.75	5.99	1.32	1.73
10-2	8.66	6.77	1.17	1.70
10-3	8.82	6.19	1.29	1.61
Ref. [7]	8.23	4.68	1.27	1.78
Ref. [10]	7.60	2.22	1.54	1.36±0.42
(b) 20ppi				
20-1	7.28	4.31	1.05	1.51
20-2	7.35	4.37	1.37	1.32
20-3	7.11	4.53	1.36	1.32
Ref. [7]	7.50	3.57	1.24	1.22
Ref. [10]	7.50	1.88	1.59	0.94±0.41
(c) 40ppi				
40-1	7.45	3.71	1.32	1.09
40-2	7.30	3.37	1.13	1.07
40-3	7.42	4.36	1.34	1.05
Ref. [7]	7.54	2.93	1.18	1.04
Ref. [10]	7.80	1.51	1.58	0.69±0.22

Relative density ratio =  $\frac{\rho^*}{\rho}$ ,  $\rho = 2,690\text{kg/m}^3$



기는 마이크로 X-ray CT에서 측정 가능한 작은 크기로 선정하였다.

### 2.2 3차원 형상 측정

준비된 개방형 알루미늄 시편에 대하여 마이크로 X-ray 컴퓨터 단층 촬영(CT, computed tomography) 기술을 이용하여 망상 뼈대 구조를 3차원 형상화 하였다. 사용된 마이크로 X-ray CT는 SkyScan 사의 1172 모델로 20-100kV 와 10W의 X-ray 소스를 가지며 50mm FOV(field of view) 카메라를 장착하여 최소 분해능 단위 픽셀(pixel) 크기는 2.5 $\mu\text{m}$ 이다. 알루미늄 폼의 단층 촬영을 위해서 설정된

단위 픽셀 크기는 21.87 $\mu\text{m}$ 으로 하였다. 단층 촬영 사진을 이용하여 3차원 형상을 재구성하기 위해서 상용 프로그램 Amira를 사용하였으며, Amira에서 생성된 표면 격자망 정보를 상용 프로그램 Hyperworks에서 불러들여 3차원 형상의 구조를 분석 하였다. Fig. 4(a)는 10-1 시편의 형상의 사진을 나타내며 Fig. 4(b)는 시편을 360도 회전시키면서 찍은 비과괴 투과 X-ray 촬영 사진 중 하나를 보여 준다. Fig. 4(c)는 X-ray 사진으로부터 얻어진 회색조의 단층 사진을 보여준다. Fig 4(d)는 단층 사진으로부터 재구성 3차원 형상이다. Fig. 4(a)와 (d)를 비교하면 개방형 알루미늄 폼의 구조를 비교적 잘 구현해 줌을 확인할 수 있다.

압축 후 구조의 변화를 비교하기 위하여 각 시편에 대하여 마이크로 CT 촬영한 이후 압축 시험을 수행하였으며, 압축 시험을 수행한 후 압축된 시편을 마이크로 CT로 재 촬영하였다.

### 2.3 압축 시험

압축시험은 알앤비 사 Unitech를 이용하여 0.0005/s 속도로 수행하였으며 압축 변형 양에 따른 구조 변화와 같은 압축 거동을 분석하기 위하여 각 시편 별로 압축 변형 율을 달리하여 수행하였다. 알루미늄 폼의 경우 Fig. 5과 같이 60% 이상 변형율의 경우 소재가 압착이 일어나기 시작하여 구조분석에 의미가 없으므로 20, 40, 60% 변형율에 대해서 압축시험을 수행하였다. 압축 방향은 셀 구조의 너비가 작은 횡단방향(transverse direction) 쪽으로 선택하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 3차원 형상

상대 밀도 비(relative density ratio)와 셀의 크기 비 및 셀 뼈대의 길이와 같은 알루미늄 폼을 정의하는 기하변수를 각 시편 별로 측정하여 Table 2에 정리하였다. 아울러 동일 공극 크기를 갖는 알루미늄 폼의 기하변수를 문헌 값[1, 13]을 참고하여 비교하였다. 본 연구에서 사용된 개방형 알루미늄 폼의 상대 밀도 비는 7.0~9.0 사이의 값을 가지며, 상대 밀도 비는 10ppi > 40ppi > 20ppi 순으로 크다. 셀의 너비의 비는 1.10~1.30 값을 가지므로 생성방향(rise direction)이 횡단방향(transverse direction)보다 길쭉한 셀의 형상이며, 이는 셀 구조가 방향에 따라 다른 이방성 특성을 가짐을 유

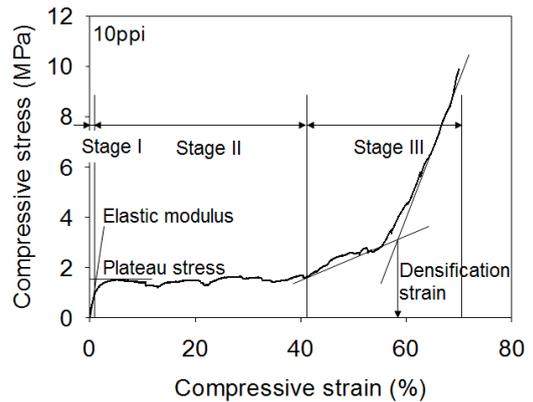


Fig. 5 Typical compressive yielding behavior of 10ppi open cell aluminum foam

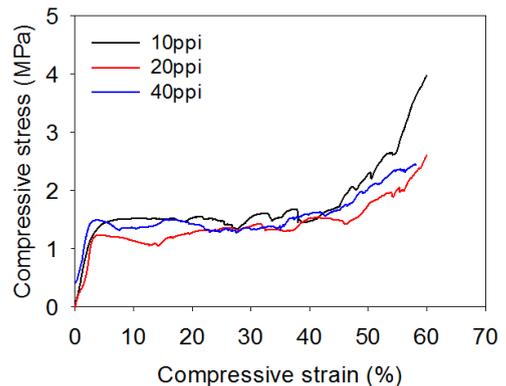


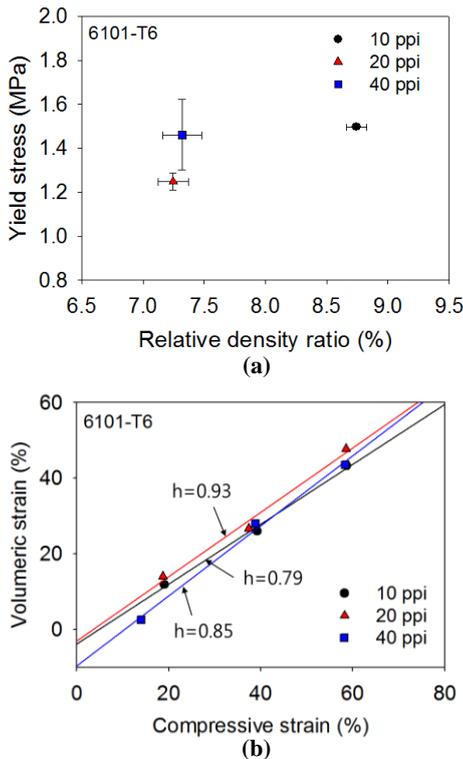
Fig. 6 Compressive response for different cell sizes

추할 수 있다.

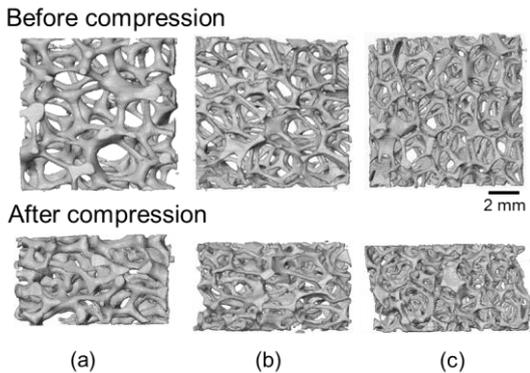
### 3.2 압축 거동

통상적인 개방형 알루미늄 폼의 압축 응력 선도를 Fig. 5에 도시하였다. 압축 변형율이 매우 작은 구간(stage I)에서는 셀 뼈대의 미세 굽힘과 신장에 의하여 선형 탄성 거동을 보인다. 이후 40~50%까지의 변형율 구간에서는 셀 뼈대의 소성 좌굴 변형이 일어나 응력이 거의 일정한 평탄 부(stage II)가 존재하는데, 이 영역에서 금속 폼 소재의 에너지 흡수 특성이 발휘 된다. 이후 각 셀 뼈대가 맞붙고 뼈대 소재 자체가 변형되어 응력이 급격히 증가하는 치밀화 부(stage III)가 존재한다.

Fig. 6은 각 시편의 압축 응력 선도를 보여 준다. 전형적인 개방형 알루미늄 폼의 압축 응력 선도의 형태를 띠며, 압축 응력 선도의 형태는 공극의 크기에 상관없이 유사하다.



**Fig 7 (a) Yield stress vs. relative density ratio and (b) volumetric strain vs. compressive strain**



**Fig. 8 Deformed configurations at 40% compression with respect to different cell sizes: (a) 10, (b) 20 and (c) 40 ppi**

Fig. 7(a)에서 각 시편의 압축 항복 응력을 상대 밀도 비와 연관 지어 비교 하였다. 상대 밀도비가 커짐에 따라 압축 항복 응력 비가 커짐을 알 수 있다. 이는 Jang과 Kyriakides의 연구 결과와 유사하다[5]. 단, 20ppi의 경우 다소 경향을 벗어나는데

이는 시편간 불균일에 의한 산포에 따른 것으로 판단된다. Fig. 7(b)는 압축 변형율에 따른 부피 변화율을 보여준다. 금속 폼은 압축성(compressible) 소재로 압축 변형율이 증가함에 따라 비례하여 부피 변화율이 커짐을 알 수 있는데, 압축 변형율과 부피 변화율의 기울기는 상대 밀도 비가 커짐에 따라 작아진다. 따라서 본 연구에서 사용된 알루미늄 폼의 공극 크기가 다르더라도 상대 밀도 비가 유사하면 압축 변형율에 따른 압축 응력 곡선 형상과 부피 변화율이 유사해 질 것으로 유추할 수 있다.

공극 크기별 시편의 압축 전 후의 3차원 형상 변화를 Fig. 8에 도시하였다. 공극의 크기가 작을수록 압축 시험 시 전단띠(shear band)에 의한 기울어짐 현상이 보다 잘 나타난다. 알루미늄 폼의 압축 시험 시 전단띠에 의한 기울어짐 현상이 나타나는 것이 일반적이나[11], 10ppi 시편의 경우 시편 크기에 들어가는 단위 셀의 양이 적어 전단띠에 의한 기울어짐 현상이 잘 나타나지 않는 것으로 판단된다. 또한, 같은 공극 크기를 갖는 시편들이더라도 공극 크기 분포 분산에 따른 미세 구조의 불균일성으로 인하여 전단띠에 의해 기울어지는 양상이 시편마다 일정하지 않고 상이하였다.

압축 변형율에 따른 변형 거동을 살펴보기 위하여 40ppi 알루미늄 폼에 대하여 20%, 40%, 60% 압축 시 압축 응력 곡선과 압축 전 후 시편의 3차원 형상을 비교하였다. Fig. 9은 각 시편의 압축 응력 곡선을 보여 주며, Fig. 10에서는 각 시편의 압축 전 후 3차원 형상을 비교하였다. 압축 변형율 20%와 40%에서는 셀 뼈대의 국부적 좌굴(buckling)의 진전이 일어나고 이에 의한 압축 응력 선도 상에서의 응력 평탄부(plateau stress)가 유도된다. 압축 시 셀 뼈대의 좌굴 이외의 단락(fracture)은 일어나지 않는다. 압축 60%에서는 좌굴된 셀 뼈대 간의 접촉이 일어나 좌굴의 진전을 방해하고 셀 뼈대 소재의 자체의 압축이 시작하여 압축 응력 선도 상에서 응력이 상승한다.

#### 4. 결론

마이크로 X-ray CT를 활용하여 개방형 알루미늄 폼의 3차원 구조와 압축 하중 거동을 분석한 본 연구를 통하여 알루미늄 6101-T6 개방형 폼에 대하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

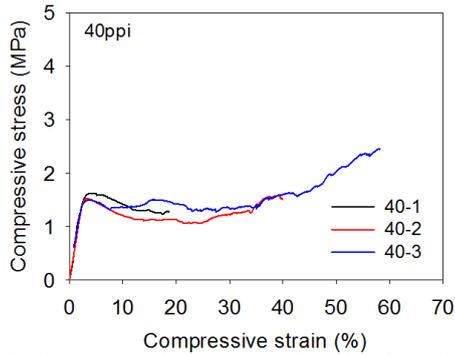


Fig. 9 Compressive response for 40 ppi specimens

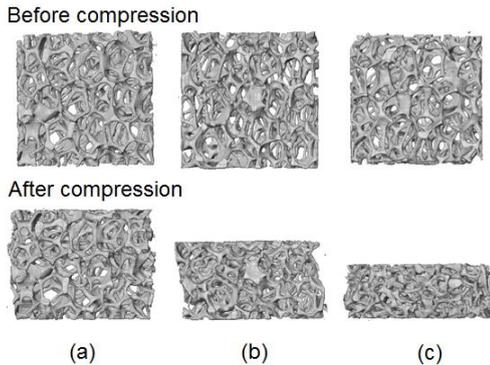


Fig.10 Deformed configurations of 40 ppi specimen with respect to different compressive strains: (a) 20, (b) 40 and (c) 60%

(1) 마이크로 X-ray CT로 비파괴 투과 이미지를 촬영한 후 이를 3차원 형상 구조로 재구성 함으로써 3차원 구조를 획득하고 분석할 수 있다.

(2) 상대 밀도 비는 7.0~9.0 사이의 값을 가지며, 10ppi > 40ppi > 20ppi 순으로 크다. 셀의 너비의 비는 1.10~1.30 값을 가지며 생성방향이 횡단방향보다 길쭉한 셀의 형상을 가진다.

(3) 압축 응력 선도 형태는 전형적인 개방형 알루미늄 폼의 형태를 띄며, 공극의 크기에 상관없이 유사하다. 상대 밀도비가 커짐에 따라 압축 항복 응력 비가 커지며, 압축 변형율이 증가함에 따라 비례하여 파괴변화율이 커진다.

(4) 셀 뼈대의 좌굴에 의해서 압축 응력 선도에서 응력 평탄부가 나타난다.

본 연구에서 얻어진 3차원 이미지 형상화 기술은 향후 개방형 알루미늄 폼의 유한 요소 해석을 위해서 유용하게 이용될 것이다.

## 참 고 문 헌

- [1] J. Banhart, 2001, Manufacture, Characterization and Application of Cellular Metals and Metal Foams, Prog. Mater. Sci., Vol. 46, No. 6, pp. 559~632.
- [2] ERG Inc., 1996, ERG: Materials and Aerospace Coporation, <http://www.ergaerospace.com>
- [3] M. Ashby, T. Evans, N. A. Fleck, J. W. Hutchinson, H. N. G. Wadley, L. J. Gibson, 2000, Metal foams: A design guide, Butterworth Heinemann, Oxford.
- [4] J. Ohser, K. Schladitz, 2009, 3D images of materials sturctures: Processing and analysis, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim.
- [5] W. Y. Jang, S. Kyriakides, 2009, On the Crushing of Aluminum Open-cell Foams: Part I. Experiments, Int. J. Solids Struct., Vol. 46, No. 3~4, pp. 617~634.
- [6] W. Y. Jang, S. Kyriakides, 2009, On the Crushing of Aluminum Open-cell Foams: Part I. Experiments, Int. J. Solids Struct., Vol. 46, No. 3~4, pp. 635~650.
- [7] I. Jeon, K. Katou, T. Sonoda, T. Asahina, K. J. Kang, 2009, Cell Wall Mechanical Properties of Closed-cell Al Foam, Mech. Mater., Vol. 41, No. 1, pp. 60~73.
- [8] I. Jeon, T. Asahina, K. J. Kang, S. Im, T. J. Lu, 2010, Finite Element Simulation of the Plastic Collapse of Closed-cell Aluminum Foams with X-ray Computed Tomography, Mech. Mater., Vol. 42, No. 3, pp. 227~236.
- [9] N. Takano, K. Fukazawa, K. Nishiyabu, 2010, Structural Strength Prediction for Porous Titanium based on Micro-stress Concentration by Micro-CT Image-based Multiscale Simulation, Int. J. Mech. Sci., Vol. 52, No. 2, pp. 229~235.
- [10] B. V. Krishna, S. Bose, A. Bandyopadhyay, 2007, Strength of Open-cell 6101 Aluminum Foams under Free and Constrained Compression, Mat. Sci. Eng. A, Vol. 452~453, pp. 178~188.
- [11] A. M. Harte, N. A. Fleck, M. F. Ashby, 1999, Fatigue Failure of an Open Cell and a Closed Cell Aluminum Alloy Foam, Acta. Mater., Vol. 47, No. 8, pp. 2511~2524.