

전기전도도를 이용한 Al-Si-Cu-Mg 합금 폼의 기계적 압축 특성 평가

이창훈*·김엄기[†]·하산*·남승훈**·조성석***

Evaluation of Mechanical Compressive Properties of Al-Si-Cu-Mg Alloy Foams Using Electrical Conductivity

Chang-Hun Lee, Amkee Kim, Md Anwarul Hasan, Seung-Hoon Nahm,
Seong-Seock Cho

Key Words: Aluminum foam(알루미늄 폼), Powder metallurgy(분말야금), Plateau stress (플라투 응력), Electrical conductivity(전기 전도도)

Abstract

Electrical conductivity of Al-Si-Cu-Mg alloy foams of various density produced in powder metallurgical method has been measured using two probe electrical conductivity measurement method. Compressive mechanical properties such as elastic modulus and plastic plateau stress of foams were evaluated from electrical conductivity using power law relation and scaling laws of foam properties. Uni-axial compression test was also performed. Experimentally measured elastic modulus and plastic plateau stress were compared with the values evaluated from electrical conductivity. The computed values were in good agreement with the experimental result.

1. 서 론

금속 폼은 인성, 전도도 및 강도에서 금속의 우수한 성질과 초경량의 다공성 재료의 특성을 보여준다. 이러한 특성으로 인하여 금속 폼은 자동차, 철도, 선박 및 항공 산업 같은 다양한 분야에서 기능 또는 구조 설계를 위한 가장 적합한 소재의 하나로 떠오르고 있다.

이를 공학 분야에 적용하기 위해서는 기계적 물성에 대한 특성화가 필요하다. 지난 20년 동안

알루미늄 폼의 기계적 특성에 관한 연구가 수행되어 왔다. E. Andrews 등은 상용 알루미늄 폼을 대상으로 다공성 모델을 이용하여 강도 및 탄성계수를 상호 비교 연구하였다⁽¹⁾. 또한 E. Koza 등은 다공성 구조의 균질성과 시험편 크기, 밀도의 영향을 고려하여 Al-Si10 폼의 압축강도에 대해 연구하였다⁽²⁾. D. Ruan 등은 저 중간 변형률에서 시멧(Cymat) 폐기공 폼의 압축 특성을 연구하였다⁽³⁾. 대부분의 연구에 의하면 알루미늄 폼의 압축 응력 변형률 선도는 세 영역 즉, 초기 탄성 영역, 플라투(plateau) 영역과 조밀화 영역을 나타낸다. 참고문헌에^(4,5) 의하면 압축 탄성계수, 플라투 응력 및 조밀화 변형률은 폼의 밀도와 다음과 같은 관계를 갖는다.

$$\frac{E^*}{E_s} = C_1 \phi^2 \left(\frac{\rho^*}{\rho_s} \right)^2 + C_1 (1 - \phi) \left(\frac{\rho^*}{\rho_s} \right) \quad (1)$$

[†] 공주대학교 기계공학부

E-mail : amkee@kongju.ac.kr

TEL : (041)850-8616 FAX : (041)854-1449

* 공주대학교 기계공학과 대학원

** 한국표준과학연구원 산업측정표준부

*** 충남대학교 신소재공학부

$$\frac{\sigma_{pl}^*}{\sigma_{ys}} = C_2 \phi^{\frac{3}{2}} \left(\frac{\rho^*}{\rho_s} \right)^{\frac{3}{2}} + C_2 (1 - \phi) \left(\frac{\rho^*}{\rho_s} \right) \quad (2)$$

$$\varepsilon_d = 1 - \frac{1}{4} \left(\frac{\rho^*}{\rho_s} \right) \quad (3)$$

여기서 E_s , σ_{ys} 와 ρ_s 는 폼을 구성하고 있는 금속의 탄성계수, 항복강도와 질량 밀도이고, ϕ 는 셀 에지(cell edge)에 내포된 금속의 부피 분율이다. 또한 E^* , σ_{pl}^* , ρ^* 와 ε_d 는 폼의 탄성계수, 플라투 응력, 질량 밀도와 조밀화 변형률이다.

방정식 (1) ~ (3)은 알루미늄 폼의 기계적 특성을 지배하는 중요한 변수가 폼의 밀도임을 나타낸다. 그러나 폼의 생산 과정에서 국부적으로 발생하는 밀도의 비 균질성은 일정하지 않은 온도 분포, 기공형태의 이방성과 구조적 결점으로 인하여 제거되기 어렵다⁽²⁾. 이러한 이유로 알루미늄 폼의 기계적 특성은 국부적 밀도의 관점에서 판단할 필요가 있다. 그러나 연속적으로 생산되거나 복잡한 형태의 제품을 생산하는 경우에 국부적 밀도의 측정은 기술적인 어려움을 수반하게 된다.

전기 전도도는 이런 경우에 밀도를 측정하는데 적당한 대체 기술로 사용 가능하다. 이 방법의 유용성은 알루미늄 폼의 상대 밀도와 유효 단면적과의 관계로부터 쉽게 이해 할 수 있다. 즉 폼의 밀도가 증가하면 기공 사이의 간격이 조밀하게 되어 연결된 유효 단면으로 전기 전도도가 증가하게 되고, 반대로 저 밀도의 폼은 기공이 차지하는 공간의 증가로 인하여 전기 전도도가 감소하게 된다.

Yi Feng 등이 연구한 결과와 Ashby 에 의해 제시된 지수 법칙 관계는 위 개념과 일치한다. Yi Feng 등은 알루미늄 폼이 여과 이론(percolation theory)에 따른 상대 밀도와 전기 전도도의 관계를 지수 법칙을 이용하여 다음 방정식으로 나타내었다.

$$\frac{\lambda}{\lambda_s} = \left(\frac{\rho^*}{\rho_s} \right)^{\frac{3}{2}} \quad (4)$$

식 (4)를 방정식 (1) ~ (3)에 대입하면 다음과 같은 식으로 압축 특성은 나타낼 수 있다.

$$\frac{E^*}{E_s} = C_1 \phi^2 \left(\frac{\lambda}{\lambda_s} \right)^{\frac{4}{3}} + C_1 (1 - \phi) \left(\frac{\lambda}{\lambda_s} \right)^{\frac{2}{3}} \quad (5)$$

$$\frac{\sigma_{pl}^*}{\sigma_{ys}} = C_2 \phi^{\frac{3}{2}} \left(\frac{\lambda}{\lambda_s} \right) + C_2 (1 - \phi) \left(\frac{\lambda}{\lambda_s} \right)^{\frac{2}{3}} \quad (6)$$

$$\varepsilon_d = 1 - \frac{1}{4} \left(\frac{\lambda}{\lambda_s} \right)^{\frac{2}{3}} \quad (7)$$

여기서 λ 는 폼의 전기 전도도이고, λ_s 는 폼을 구성하고 있는 알루미늄의 전기 전도도를 나타낸다.

따라서 알루미늄 폼의 기계적 압축 특성들은 방정식 (5) ~ (7)을 이용하여 전기전도도 측정을 측정하여 용이하게 얻을 수 있다.

본 논문에서는 서로 다른 밀도의 알루미늄 폼을 분말 야금법으로 제조하여 기계적 압축 특성과 전기 전도도의 관계에 대하여 연구하였다.

2. 실험

2.1 재료 및 시험편

입자크기가 150 - 900 μm 인 Table 1과 같은 화학조성을 갖는 알루미늄 합금 분말을 원심 분사 방식을 이용하여 제조하였다.

99 wt.%의 알루미늄 합금 분말과 1 wt.%의 TiH_2 발포제를 30분 동안 300 rpm의 속도로 V-혼합기에서 회전하며 혼합하였다. 혼합물은 4 MPa의 압력으로 냉간 압축 된 후 430 $^{\circ}\text{C}$ 의 온도에서 단일 축 방향 압출기로 120 mm \times 12 mm 단면의 직사각형 막대로 열간 압출 되었다. 이때 압출비는 20 : 1로 하였다.

압출제를 폼으로 만들기 위하여 압출제를 금형 (250 mm \times 50 mm \times 50 mm) 안에 넣고 700 $^{\circ}\text{C}$ 의 가열로에서 15분 동안 유지한 후 꺼내었다. Fig. 1은 제조된 알루미늄 합금 폼의 셀 구조를 나타낸 것이다. 폼 밀도는 금형 안에 넣는 압출 막대의 양에 의하여 조절된다.

제조된 폼 샘플은 직육면체 (35 mm \times 35 mm \times 40 mm)의 시험편으로 제작되었다. 시험편의 한 변의 길이가 최소 기공의 7배 이상이 되도록 하여 압축 강도 및 탄성 계수 측정에 미치는 시험편 크기 효과를 최소화 하였다⁽¹⁾.

Table 1 Composition of Al-Si-Cu-Mg alloy powders

| Composition (wt.%) | Si | Cu | Mg | Al |
|-----------------------|----|----|----|----|
| Alloy 322 | 3 | 2 | 2 | 93 |

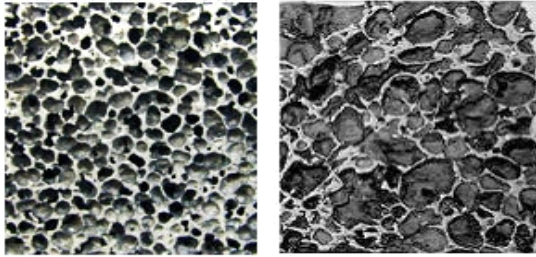


Fig. 1 Cellular structure of produced alloy 322 foam

(a) $\rho / \rho_s = 0.30$, (b) $\rho / \rho_s = 0.09$.

2.2 전기 전도도

폼의 전기 전도도는 2개의 탐침봉(2-탐침법)을 이용하여 측정하였다. 측정 장치의 개략도를 Fig. 2에 나타내었다.

이 방법은 일정한 전류를 i - i 단말 사이에 위치한 직육면체 모양의 시험편의 두 끝을 통해 공급하고, 시험편 표면 중심 부분 X와 X'에서 전압을 측정하는 것이다. 전기 전도도는 다음 방정식을 사용하여 계산된다.

$$\rho = (R_s w d / D) (V_P / V_S) \quad (8)$$

$$\lambda = \frac{1}{\rho} \quad (9)$$

여기서 ρ = 전기 비저항, R_s = 표준저항의 저항값, D = 두 탐침봉 사이의 거리, w 와 d 는 시험편의 폭과 두께이고, V_S 는 표준저항을 가로질러 측정된 전압이다. 한편 V_P 는 탐침봉 간의 전압이고, λ 는 시험편의 전기 전도도이다. 4개의 탐침봉을 이용한 저항 측정법(4-탐침법) 역시 측정에 사용할 수 있으나 4-탐침법에서는 일직선상에 같은 간격으로 4개의 탐침봉을 시험편 표면에 접촉 유지해야 하는데 알루미늄 폼의 표면이 작은 셀 구조로 되어 있어 시험 조건을 충족시키기에 어려움이 있기 때문에 본 연구에서는 2-탐침법만을

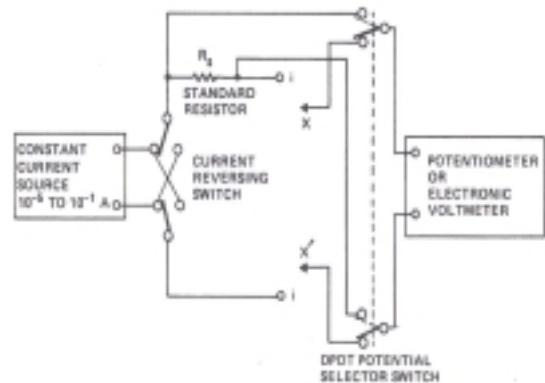


Fig. 2 Schematic diagram of the apparatus used in two-probe resistivity measurement method.

사용하였다.

2개의 탐침봉 사이의 거리는 20 mm이고 1 Amp 전기가 공급되었다. 전기전도도 측정을 위한 총 시험편의 개수는 30개였다. 각 시험편의 전기 전도도는 20에서 30개의 서로 다른 위치에서 측정되었고, 측정된 값의 평균값이 사용되었다. 입력 전류의 극성은 열전 효과의 영향을 줄이기 위해 측정하는 동안 서로 바꾸며 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

알루미늄 322 합금 폼의 전기 전도도와 상대 밀도의 관계를 Fig. 3에 나타내었다. 여기에서 상대 밀도(ρ^* / ρ_s)는 시험편의 밀도(ρ^*)를 알루미늄 합금(322 합금 : $\rho_s = 2.79 \text{ g/cm}^3$)의 밀도로 나눈 것이다. 그림에서 지수 법칙 식 (4)는 Al-Si-Cu-Mg 합금 폼의 상대적 밀도와 전도도 사이의 상관관계를 잘 나타낸다. 실험 데이터 값에 대하여 식 (4)를 피팅(fitting)하여 얻은 지수 값 $n = 1.49$ 는 Gibson 과 Ashby가 제시한 1.50 값에 매우 근접한다. 실험 데이터의 흐트러짐은 폼을 구성하고 있는 불규칙한 셀 벽의 곡률과 주름 형태, 불순물 및 훼손된 셀 벽의 영향으로 인한 것이다⁽⁶⁾.

Fig. 3에서 저 밀도를 갖는 폼의 경우, 실험값이 지수 법칙 식에 의한 예측 값 보다 작게 나타나고 있다. 이것은 저 밀도의 폼이 전기 전도도를 감소시키는 다량의 훼손된 셀 벽으로 구성되어 있음을 의미한다.

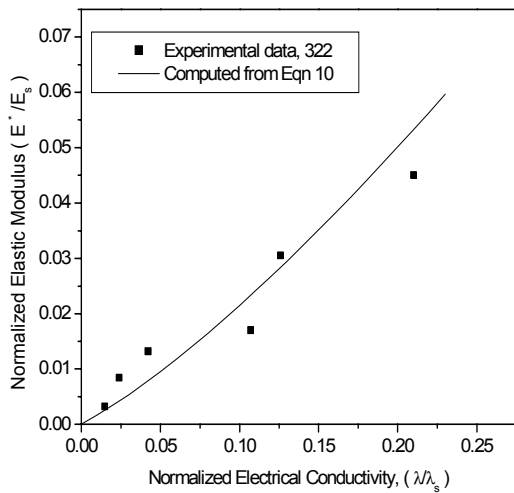


Fig. 3 Electrical conductivity versus relative density in case of 322 alloy foam.

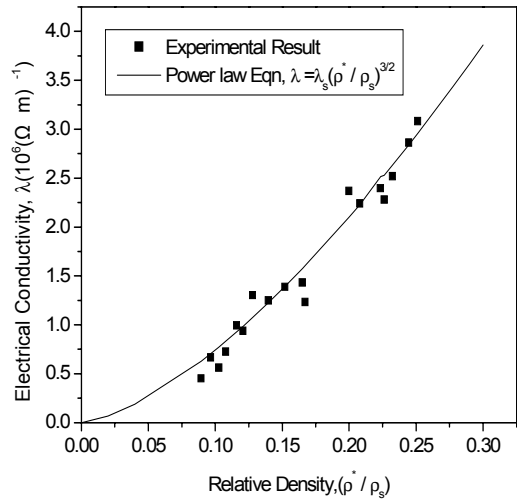


Fig. 4 Normalized elastic modulus versus normalized electrical conductivity in case of alloy 322 foam

Figs. 4와 5는 실험으로부터 얻어진 폼의 전기 전도도와 탄성 계수 및 플라투 응력 값의 관계를 각각 나타낸 것이다. 탄성 계수는 0.2%의 변형률에서 제하(unloading)하여 얻은 것이고, 플라투 응력은 10% ~ 50%의 변형률 범위에서의 평균 응력이다. 식 (1)과 (2)를 $\phi=0.60$ 으로 가정하고 실험 데이터 값에 대하여 피팅(fitting)하면 상수 $C_1=0.23$ 와 $C_2=0.25$ 이 된다. 이 상수들을 식 (5) 와 (6)에 대입하면 다음과 같은 식을 얻게 된다.

$$\frac{E^*}{E_s} = 0.08 \left(\frac{\lambda}{\lambda_s} \right)^{4/3} + 0.09 \left(\frac{\lambda}{\lambda_s} \right)^{2/3} \quad (10)$$

$$\frac{\sigma_{pl}^*}{\sigma_{ys}} = 0.12 \left(\frac{\lambda}{\lambda_s} \right) + 0.10 \left(\frac{\lambda}{\lambda_s} \right)^{2/3} \quad (11)$$

식 (10)과 (11)은 Figs. 4와 5에서 나타낸 것과 같이 전기 전도도와 탄성 계수 및 플라투 응력의 밀접한 상관관계를 나타내고 있다. 이로부터 알루미늄 합금 폼의 기계적 특성(탄성계수와 플라투 응력) 평가를 위한 전기 전도도의 유용성이 확인된다.

4. 결론

알루미늄 322 합금 폼의 압축 기계적 특성을

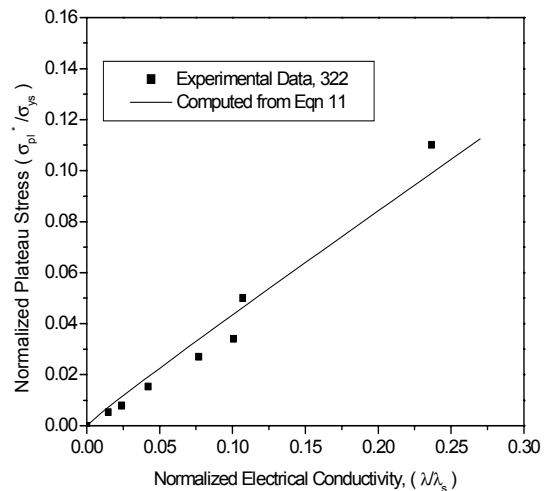


Fig. 5 Normalized plastic plateau stress versus normalized electrical conductivity in case of alloy 322 foam.

0.09 ~ 0.25의 상대 밀도 범위에서 전기 전도도와 함께 연구하여 다음 결론을 얻었다.

측정된 전기전도도와 상대 밀도의 관계는 Gibson과 Ashby가 제안한 지수 법칙으로 나타낼 수 있었으며, 탄성 계수 및 플라투 응력은 식 (10)과 (11)을 사용하여 예측했을 때 실험값과 일치된 결과를 나타내었다. 따라서 알루미늄 합금 폼의 전기 전도도는 기계적 특성들을 평가하는데 유용한 파라미터라고 판단된다.

후 기

본 연구과제는 한국과학재단 목적기초연구 R01-2002-000-00093-0 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. Andrew E., Sanders W. and Gibson L. J., 1999, "Compressive and Tensile Behaviour of Aluminum Foams," *Mat. Sci. and Engineering*, Vol. 270, pp.113~124
2. Koza E., Leonowicz M., Wojciechowski S. and Simancik F., 2003, "Compressive Strength of Aluminium Foams," *Materials Letters*, Vol. 4612, in press.
3. Ruan D., Lu G., Chen F. L. and Siros E., 2002, "Compressive Behaviour of Aluminium Foams at Low and Medium Strain Rates," *Composite Structures* Vol. 57, pp.331~336.
4. Banhart J. And Baumeister J., 1998, *Journal of Material Science*, Vol. 33, pp.1431~1447.
5. Gibson L. J., 2000, "Annu. Rev.", *Material Science*, Vol. 30, pp.191.
6. Feng Yi, Zheng. H., Zhu Z. and Zhu F., 2002, "The Microstructure and Electrical Conductivity of Aluminum Alloy Foams", *Materials Chemistry and Physics*, Vol. 78: pp.196~201.