

등통로각압축이 결합된 압출 공정에 의한 알루미늄 분말의 치밀화 거동

윤승채 · 김형섭*
충남대학교 나노소재공학부

Analysis of Aluminum Powder Densification by Continuous Front Extrusion-Equal Channel Angular Pressing

Seung Chae Yoon and Hyoung Seop Kim*

Department of Nano Materials Engineering, Chungnam National University, Daejeon, 305-764, Korea

(Received April 28, 2008; Accepted May 30, 2008)

Abstract Aluminum alloys are not only lightweight materials, but also have excellent thermal conductivity, electrical conductivity and workability, hence, they are widely used in industry. It is important to control and enhance the densification behavior of metal powders of aluminum. Investigation on the extrusion processing combined with equal channel angular pressing for densification of aluminum powders was performed in order to develop a continuous production process. The continuous processing achieved high effective strain and full relative density at 200°C. Optimum processing conditions were suggested for good mechanical properties. The results of this simulation helped to understand the distribution of relative density and effective strain.

Keywords : Powder densification, Finite element method, Continuous processing, Front-extrusion, Equal channel angular pressing

1. 서 론

알루미늄은 경량 소재로써, 열전도성, 전기전도도 및 표면 내식성이 아주 우수한 재료이기 때문에 산업 전반에 걸쳐 많이 사용되고 있으며, 철을 대체하여 자동차 부품 소재 및 구조용 재료로 모색이 시도되고 있다[1-3]. 또한 다양한 산업 전반에 적용하기 위해 여러 알루미늄 합금들이 개발되고 있을 뿐만 아니라 실제 형상에 가까운 구조용 부품 소재를 제조하고 있으며, 특히 경제적 효과 및 비용 절감 측면을 고려하여 알루미늄 소재에 대해 분말야금 공정 연구가 널리 이루어지고 있다[4, 5]. 분말 성형은 기존에 잘 알려진 바와 같이 경제성과 재료 절감의 효과를 극대화시킬 수 있으며 소재의 가공 성형을 통한 우수한 생산 속도 및 제품 특성을 얻을 수 있는 장점이 있어 고강도 제품의 제조에서 많은 각광을 받고 있다[6, 7]. 그러나 이러한 공정을 통해 얻은 분말 소

결체가 이론밀도를 이루지 못하는 경우가 종종 발생되고, 특히 열간 공정시 내부의 미세조직의 성장 또는 분말 소결체 내에 있는 기공으로 인한 기계적 성질의 저하가 야기되고 있다[1, 6, 7]. 이에 분말 성형의 응용을 위해 금속, 고분자 그리고 세라믹과 같은 분말 재료의 치밀화를 이루기 위한 다양한 공정 개발이 이루어지고 있다. 분말 소재를 사용하여 구조용 부품 소재를 제조하는 공정 중에서 압출 가공은 단일 공정에 의해 이론밀도까지의 성형이 가능할 뿐만 아니라 고온등압성형법(Hot iso-static pressing: HIP) 보다 낮은 성형온도에서 완전 치밀화를 이루는 분말성형이 가능하고, 이로 인해 우수한 기계적 성질을 확보하는 동시에 연속적 대량생산에도 유리한 이점을 가지고 있어 많은 연구가 이루어지고 있다[8, 9].

한편, 최근에 분말 고형화를 효과적으로 이루기 위한 또 다른 방편으로 하향식(Top-down) 공정인 강소

*Corresponding Author : [Tel : +82-42-821-6596; E-mail : hskim@cnu.ac.kr]

성공정(Severe plastic deformation: SPD)이 응용되고 있다[9-11]. 이는 기존의 높은 성형온도를 낮추는데 용이할 뿐만 아니라 고밀도에 도달하는데 효과적이므로 산업 전반에 걸친 적용 범위를 넓히는데 유용하나, 공정의 연속성에 있어서 많은 한계를 가지고 있어 대부분 실험실 규모의 연구만이 이루어지고 있는 실정이다. 이에 본 연구에서는 강소성공정의 높은 변형률과 압출 공정의 연속성이 결합된 Front Extrusion-Equal Channel Angular Pressing(FE-ECAP) 공정에 대해서 분말 치밀화 및 밀도 분포 해석을 수행하고자 한다[12]. 본 FE-ECAP 공정은 압출 공정이 가지고 있는 연속성을 고려하여 제시한 공정으로써, 연속 공정으로 경제적 효과를 높일 수 있을 뿐만 아니라, 일반 압출이나 ECAP 공정보다도 더 높은 변형률을 제어함으로써 분말 고형화 공정에 매우 효과적으로 사료된다. 또한 분말 소재의 거동에 대해서는 일반적으로 치밀화 및 고형화에 영향을 미치는 요인으로 합금 조건, 금형 형상, 온도 및 압력 등과 같은 것들이 있는데, 특히 가공의 치밀화 및 입자의 조밀화는 소재의 물리적 특성과 연관되어지기 때문에 공정상 발생하는 응력 및 밀도 분포 해석은 필수적으로 선행되어야 한다[13, 14]. 즉 본 공정상 나타날 수 있는 변형 특성에 대한 연구를 통한 이론적 접근에 의거하여 공정 최적화를 설계함으로써 최종 부품에서 우수한 물성을 얻을 수 있게 된다. 현재 많은 금속 재료에 대하여 소성이론에 기초한 해석들이 이루어지고 있으며 이를 최적화를 이루기 위해 유한요소법이 수행되어, 그 타당성 및 신뢰도를 높이고 있다 [15, 16]. 따라서, 본 연구에서는 알루미늄 분말에 대한 FE-ECAP 공정시 발생하는 소재의 고형화 및 변형률 분포에 대해 유한요소법을 통해 공정을 고찰하고자 한다.

2. 분말 성형을 위한 소성이론 및 계산 조건

분말성형에 대한 유한요소법을 수행하기 위해서는 다공질 재료의 변형에 대한 구현 가능한 항복이론식이 필요한데, 본 연구에서는 이를 위해 Shima-Oyane 항복식 모델을 사용하였다[17, 18]. 많은 연구자들은 압력에 의존하는 일반적인 재료의 소성항복 함수로서 식 (1)을 사용한다.

$$AJ_2' + BJ_1^2 = \eta Y_s^2 = Y_R^2 \quad \text{식 (1)}$$

이는 가공 공정을 이해하고 각 재료의 변수를 이론적 배경 위에서 그 타당성을 검증하기 위한 것으로서, J_1 은 1차 응력 불변량, J_2' 은 2차 편차응력 불변량에 해당하고, 여기서 Y_s 는 겉보기 항복응력이며, Y_R 은 비다공질 기준 금속의 항복응력이다. 또한 η 는 상대밀도의 함수인 기하학적인 항이 된다[6, 17]. 매개변수 A와 B는 상대밀도의 함수로 표현이 가능하며 여기서 주목할 점은 A와 B는 상대밀도가 1에 근접할수록 재료의 비다공질 특성인 von Mises 재료가 되는 것으로서 A는 3에 B는 0으로 수렴하게 된다. 또한 본 식은 1축 응력 상태에서도 만족되어야 함으로 $J_1 = Y_{11}$, $J_2' = Y_{11}^2/3$, $Y_R = Y_{11}$ 로 나타낼 수 있으며, 본 계산에 사용된 Shima-Oyane 모델은 분말재료의 실험적 검증을 바탕으로 $A = 3, B = 2.49^2/9(1-R)^{1.028}$ 으로 제안하였다. 또한 η 항을 상대밀도와 밀접한 관계가 있음을 밝히고, 식 (2)와 같이 구현하였다[17, 18].

$$3J_2' + \frac{2.49^2}{9}(1-R)^{1.028} J_1^2 = R^5 Y_s^2 \quad \text{식 (2)}$$

위 식은 철과 알루미늄 소결체에서 잘 일치하므로 소성 역학 분야에서 많이 사용되고 있으며, 이에 본 연구에서는 Shima-Oyane 항복조건식을 고려한 상용 유한요소 Code인 DEFORM-2D로 계산을 수행하였다.

분말치밀화를 위한 물성은 기존에 잘 알려진 Al1100의 물성으로 이는 DEFORM Software에서 제공한 물성 Database를 사용하여 그 분말 거동을 계산하였다[19]. 본 공정의 압출 공정은 단면적을 폭 13 mm에서 5 mm로 감소시켰으며, ECAP 공정의 변형 채널각은 90°, 내부와 외부 모서리각은 각각 0°로 설계하였다. 총 5000개의 4절점 요소를 사용하였으며, 실제 분말치밀화 공정임을 고려하여 약 200 °C의 변형 거동을 고려하였다[12]. 또한 계산의 효율성을 높이기 위해 두께 방향 변형률이 0인 평면변형 상태를 가정하였으며, 변형 속도는 변형에 의한 열 발생을 최소화하기 위해, 느린 속도 0.2 mm/s로 일정하게 유지하였다. 또한 기존의 냉간가공에서 사용되는 마찰은 일반 단조의 경우 약 0.1에 해당하나, 온간가공에서 일반적으로 사용되는 약 0.25에 해당하는 마찰계수 값을 사용하였으며 초기 밀도는 50%의 상대밀도로 하여 공정상 발생하는 변형 및 밀도 분포를 해석하고자 하였다. 추후 본 공정을 이용하여 얻

은 소재의 물리적 특성 평가를 진행하고자 한다.

3. 결과 및 고찰

그림 1은 FE-ECAP의 전체적인 개략도로서, 위에서 설명한 바와 같은 구조의 금형 설계를 가지고 있으며, 전체적인 유효변형율은 대략적으로 3에 해당하

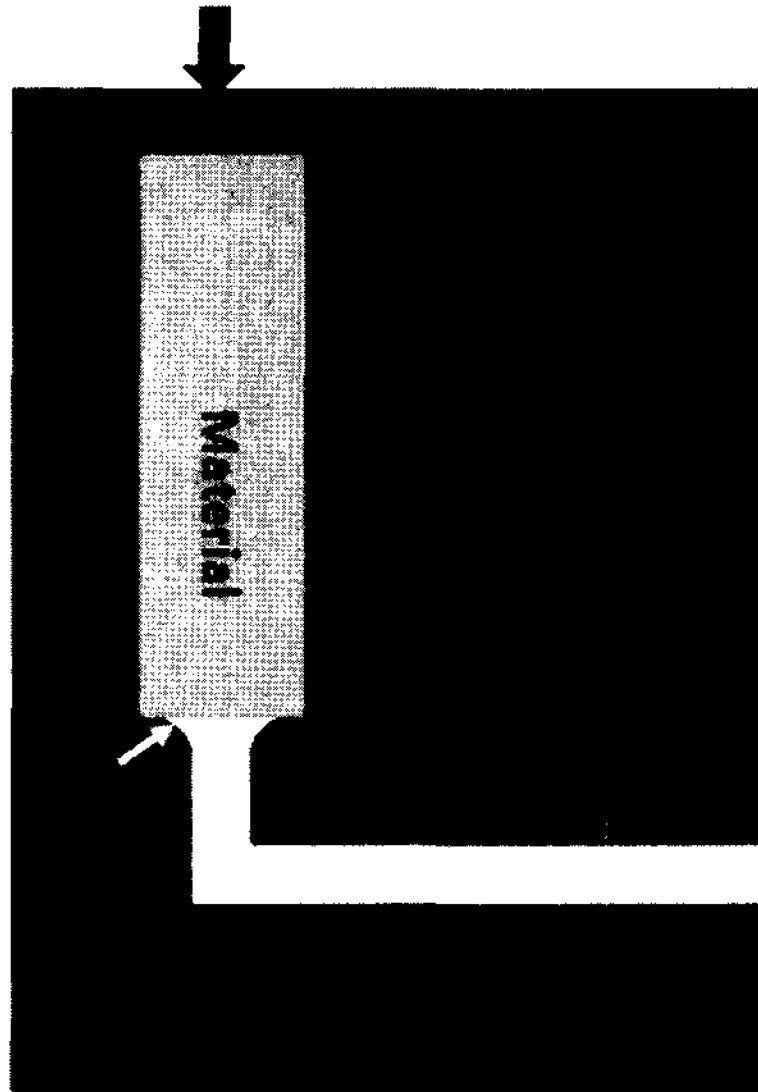


Fig. 1. Schematic of front extrusion - equal channel angular pressing system. (extrusion die curvature: 3 mm, channel angle: 90°, outer and inner corner angles: 0°)

는 값을 얻을 수 있음을 알 수 있다. 본 공정은 전체적으로 3 단계로 분말 치밀화 공정이 이루어짐을 알 수 있는데(그림 2), 첫 번째 단계는 분말의 치밀화가 이루어지는 단계로서 전체적인 밀도가 급격히 증가하는 단계라 할 수 있다. 두 번째 단계는 전방 압출이 이루어지는 단계로 압출 공정에 의한 변형이 진행되어지며, 세 번째 단계는 출구 방향의 ECAP 공정으로써, 전체적인 전단 변형이 ECAP 주변형대에서 이루어지는 공정으로 설명할 수 있다. Al1100 소재는 가공경화형 소재로써 단속 ECAP 공정상 큰 모서리 틈을 발생시키므로 변형에 영향을 주는 기존 연구와는 달리, 본 공정의 경우 압출 공정으로 인해 전체적인 변형량 증가로 가공경화율이 작아지는 효과와 높은 마찰의 중복된 효과로 인하여 FE-ECAP 공정시 모서리틈이 발생되지 않게 된다[20]. 분말 고형화를 위해 사용되는 전단변형을 제어하는 공정은 분말 소재가 가지고 있는 산화막에 대해 효과적인 전단변형과 열 효과로 인해 분말 계면간의 결합을 높일 뿐만 아니라, 지속적인 전위 증식으로 인한 결정립 성장을 억제하는 큰 장점이 있다[2, 10, 11].

그림 3은 변형 후 상대밀도 변화와 전체적인 전단 변형 분포를 나타낸 것이다. 상대밀도의 경우 시편 머리 부분의 불균일 상태를 제외하고는 전체적인 영역에서 균일 밀도를 얻을 수 있었고, 유효변형률의 경우는 온간 가공시 사용된 마찰값으로 인해 소재 표

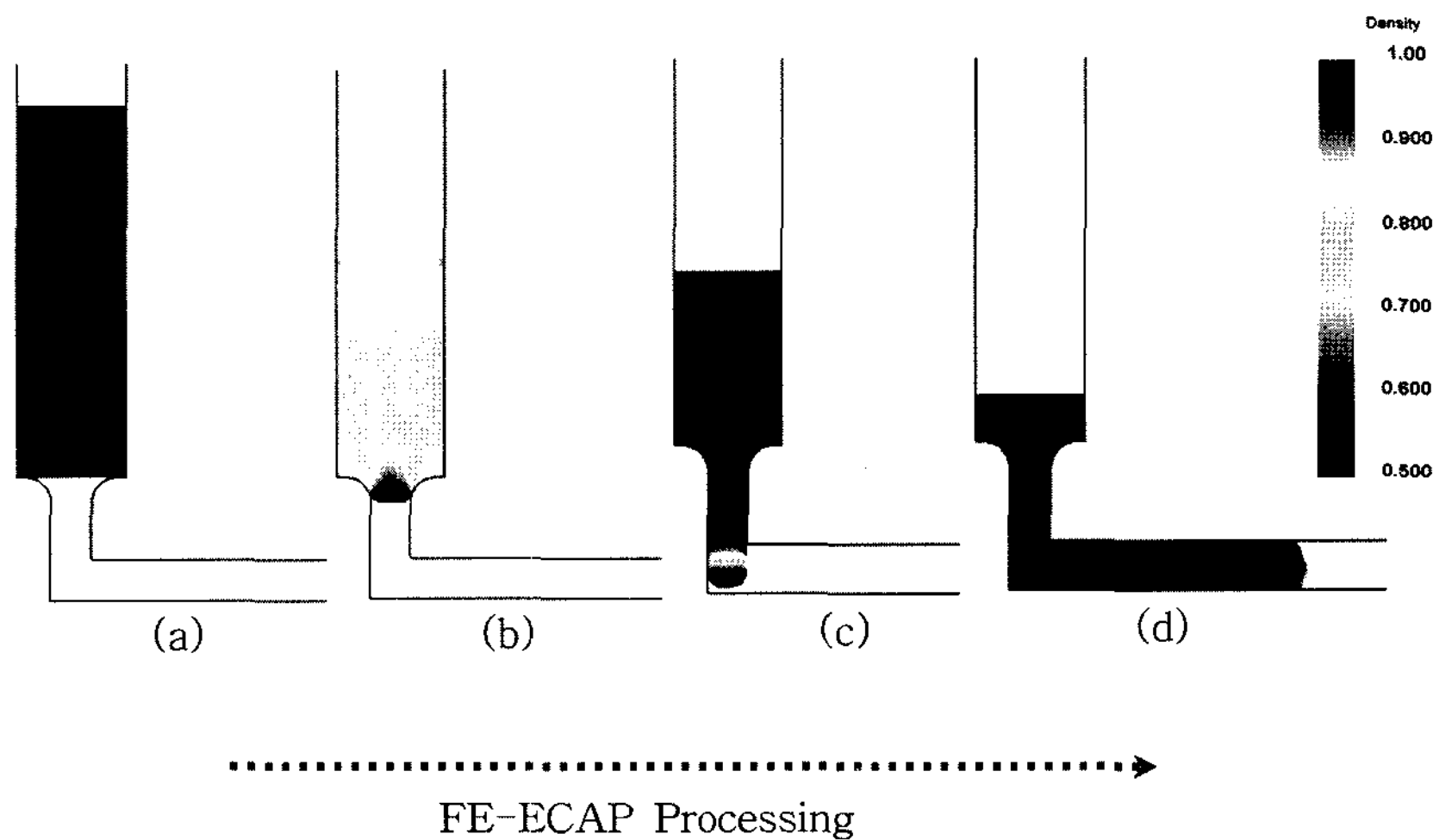
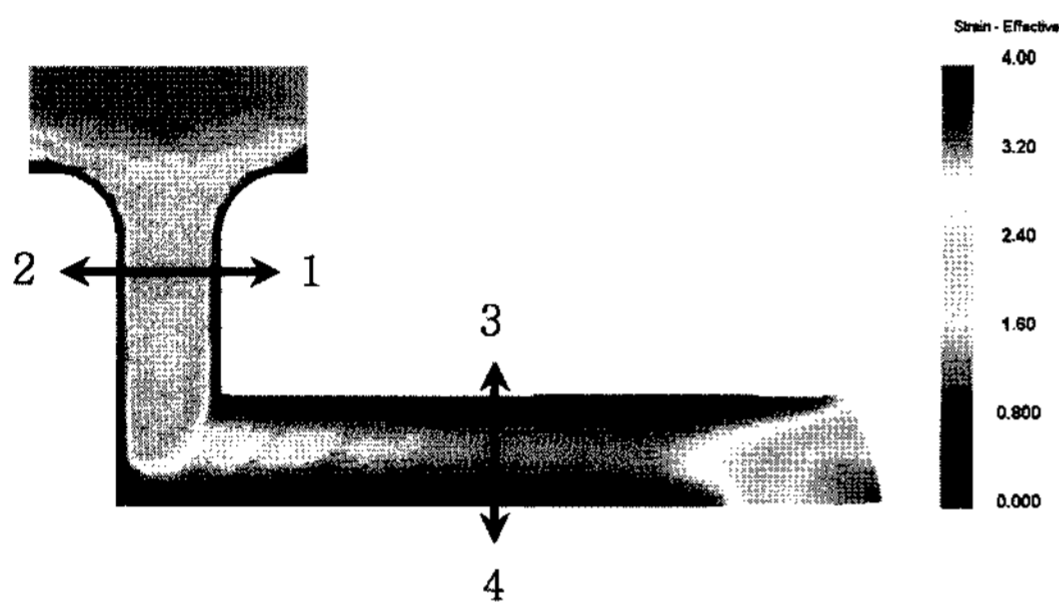


Fig. 2. Relative density distribution during front extrusion - equal channel angular pressing processing. (a) Initial step, (b) Densification step, (c) Front extrusion step, and (d) Equal channel angular pressing step.



(a) Relative density distribution



(b) Effective strain distribution

Fig. 3. Distributions of relative density and effective strain in front extrusion - equal channel angular pressing.

면상에 높은 변형 상태가 발생됨을 알 수 있다. 그림 3에서 압출 영역과 ECAP 영역의 정상상태에 해당하는 부분의 유효변형률을 그림에서 보는 바와 같은 경로를 따라 그림 4에 표시하였다. 압출 공정의 경우 열간 공정의 높은 마찰값으로 인해 표면은 큰 변형이 발생됨을 알 수 있으나, 실제 부품 및 구조용 소재로 사용되는 중심 부분은 이론적 계산값과 매우 유사한 변형률을 얻을 수 있었으며, 시편 내부 위치 1~4에 해당하는 위치에서는 전반적으로 균일 변형이 이루어졌음을 알 수 있다. 반면, ECAP 공정이 이루어지는 단계의 정상상태 영역에서는 전반적으로 높은 변형률이 발생됨을 알 수 있으며, 내부 중심 부분은 대략 3.1에 해당하는 큰 유효변형률을 얻을 수 있었다. 또한 전방 압출 공정과 유사한 변형 형태를 나타내나, 내부 균일 영역이 내부 위치 1.5~3.5에 해당하는 것을 알 수 있으며, 공정이 진행되어짐에 따라 마찰로 인한 불균일 변형이 표면에서 많이 발생되어짐을 알 수 있다. 이를 통해 확인되는 바와 같이 가공시 발생하는 마찰을 제어하는 것이 필요하며, 이를

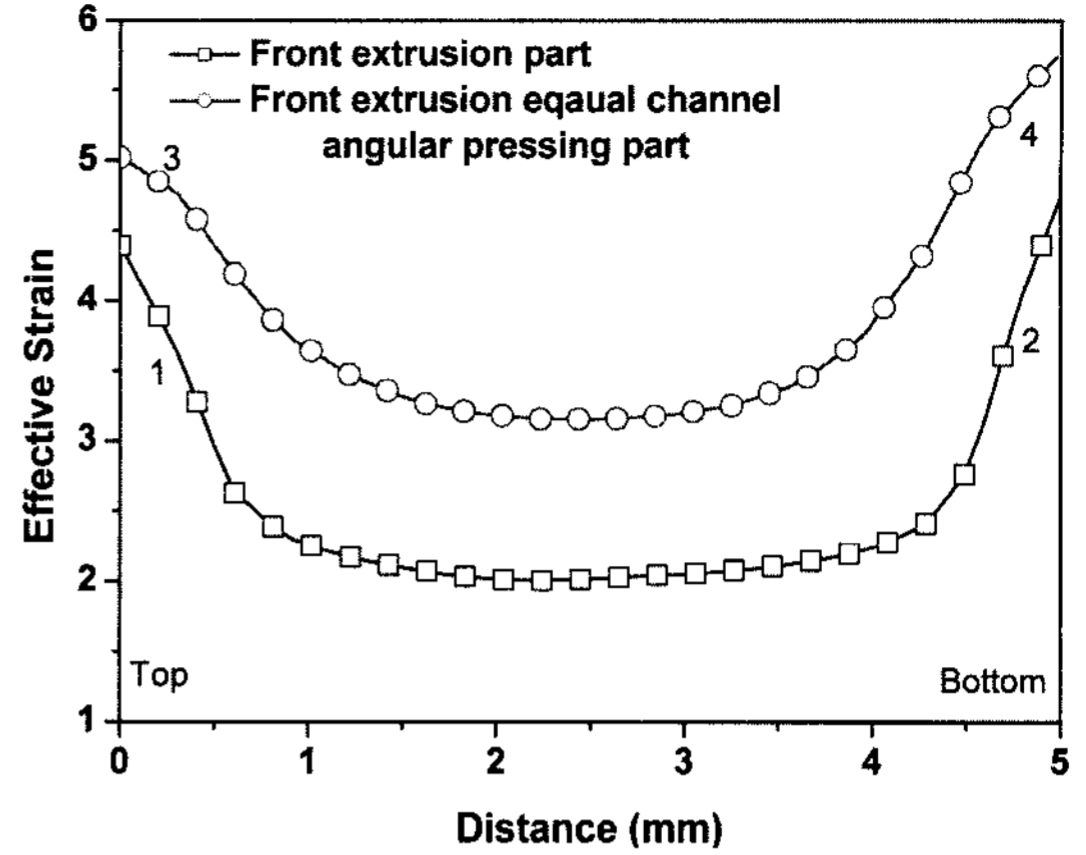


Fig. 4. Effective strain path plot in steady state regions of the workpiece.

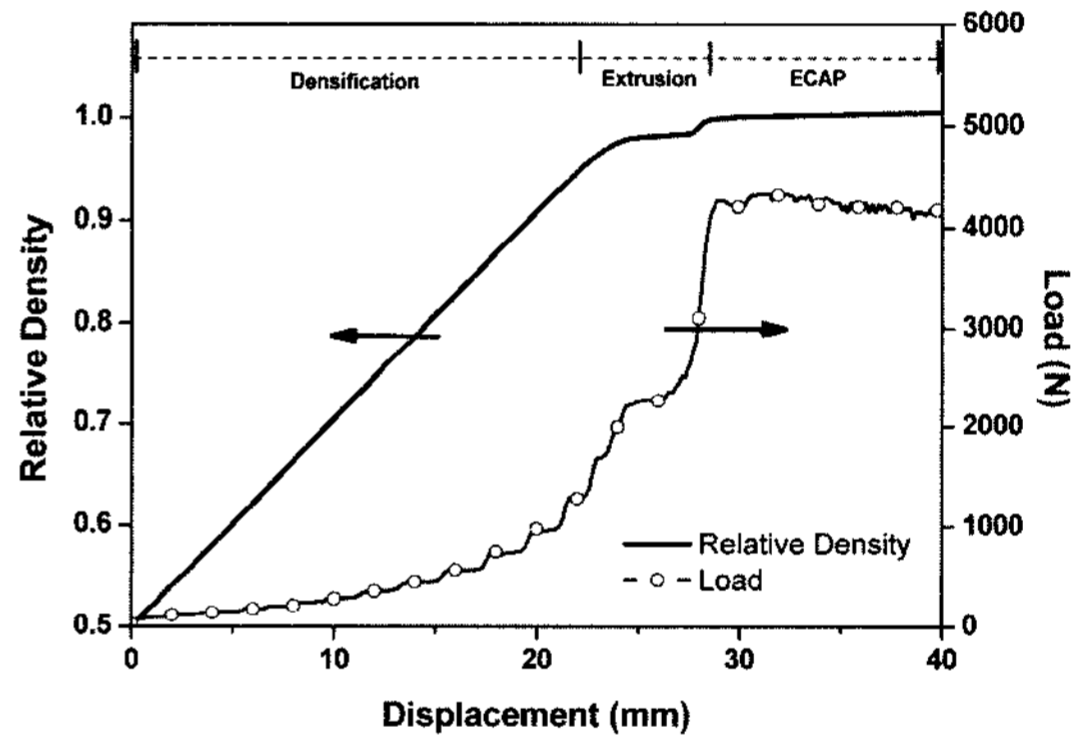


Fig. 5. Load and relative density as a function of displacement curves in front extrusion - equal channel angular pressing.

제어하기 위해 피복재를 사용하여 가공 후 피복재 제거를 통해 표면 불균일 영역을 제거하는 방법들을 제시할 수 있으며, 마찰 영향에 의한 내부 균일 변형 정도는 추후 논의하고자 한다.

그림 5는 전체적인 평균 상대밀도와 가공 하중을 후송 램 이동에 따라 나타낸 것으로써, 이는 전체적인 변형 양상과 상대 밀도 변화와의 밀접한 관계가 있음을 알 수 있다. 유한요소해석 계산에서 얻어지는 부피 변화에 따른 초기 상대밀도를 고려하여 공정 변화에 따른 전체적인 상대밀도 변화를 얻을 수 있다. 이에 전체적인 평균 상대밀도의 경우 약 0~20초 구간에서는 선형적으로 증가하는 것을 알 수 있는데, 이는 위에서 설명한 치밀화 단계임을 알 수 있으며, 이에 해당하는 하중 증가가 이루어짐을 알 수 있다.

압출 단계의 경우 전체적인 평균이 높은 상대밀도 상태를 나타내지만, 시편 머리 부분의 상대밀도가 다소 낮음을 관찰할 수 있다. 그러나 그림 3에서 확인되는 바와 같이 전방 압출 공정의 정상상태 영역에서는 진 밀도 분포를 나타낼 수 있으며, 또한 압출에 의한 가공 하중의 증가가 이루어짐을 알 수 있다. ECAP 공정 단계에서는 시편 머리 부분의 상대밀도 증가로 인해 전체적인 상대밀도는 증가하게 되며, 하중의 경우 급격한 증가가 발생한다. 반면 기존의 벌크 재료의 가공하중의 이력곡선과 달리 과하중 상태가 발생되지 않는데, 이는 벌크 재료의 경우 시편 머리에 접힘 결함 (Fold Defect)으로 발생되어지나 분말 성형의 경우 시편 머리의 저밀도 인해 과하중이 발생되지 않고 상대밀도가 충전되는 양상을 나타내기 때문으로 사료된다[21]. 이에 본 공정은 기존의 단속적으로 이루어지던 분말 강소성 공정에 대해 연속 공정의 특성을 부여함으로써 경제적, 시간적으로 큰 효과를 얻을 수 있는 장점이 있으며, 본 공정 연구를 통해 금형 특성상 발생하는 역응력으로 인한 상대밀도 증가를 높일 수 있을 뿐만 아니라 특히 높은 변형률을 얻을 수 있어 분말 결함의 방지에 유용한 공정이라 할 수 있다. 추후 본 공정을 이용하여 얻은 소재의 기계적 특성 연구를 통해 실험적 결과를 논의하고자 한다.

4. 결 론

기존에 단속적으로 이루어지는 분말 치밀화 공정의 효율성을 높이는 동시에 단속 공정의 문제를 극복하고 우수한 연속성을 부여하기 위해 Front extrusion-equal channel angular pressing(FE-ECAP) 공정을 제안하였으며, 본 공정에 대한 변형 및 밀도 분포에 대한 유한요소해석을 수행하였다. 해석에 사용된 소재로는 산업적 이용 가치가 큰 Al 재료로 하였다. FE-ECAP 공정의 경우, 전체적인 공정이 치밀화, 압출 및 ECAP 공정의 3 단계로 이루어지고 있으며, 이에 따른 밀도 및 하중의 변화가 발생됨을 알 수 있었다. 소재의 표면은 높은 마찰로 인하여 공정이 진행됨에 따라 시편의 전체적인 균일도가 감소되는 형태로 나타나기 때문에 추후 실제 실험에서 사용되는 분말 피복재를 통한 해석의 수행으로 표면에 발생하는 불균일 변형을 효과적으로 제어할 수 있을 것

으로 사료된다. 반면 벌크재에서 ECAP 공정시 발생하는 과하중은 시편 머리의 저밀도 인하여 나타나지 않은 것으로 사료된다. 본 공정은 분말 치밀화의 효율성을 높이며, 연속 공정의 특성을 충분히 활용할 수 있는 것으로 고찰된다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부의 21세기 프론티어 연구개발사업의 일환인 '차세대소재성형기술개발사업단'의 연구비 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

- [1] E. S. Kim, B. S. Chun and H. S. Kim: J. Korean Powder Metall. Inst., **3** (1996) 260 (Korean).
- [2] S. C. Yoon, C. H. Bok, M. H. Seo, S. J. Hong and H. S. Kim: J. Korean Powder Metall. Inst., **15** (2008) 31 (Korean).
- [3] V. S. Srivastava, R. K. Mandal and S. N. Ojha: Mater. Sci. Eng. A, **383** (2004) 14.
- [4] F. Tang, H. Meeks, J. E. Spowart, T. Gnaeupel-Herold, H. Prask and I. E. Anderson: Mater. Sci. Eng. A, **386** (2004) 194.
- [5] I. V. Alexandrov, Y. T. Zhu, T. C. Lowe, R. K. Islamgaliev and R. Z. Valiev: Nanostructured Mater., **10** (1998) 45.
- [6] H. S. Kim and D. N. Lee: Mater. Trans., **45** (2004) 1829.
- [7] S. C. Yoon, H. S. Kim and C. K. Rhee: J. Korean Powder Metall. Inst., **11** (2004) 341 (Korean).
- [8] S. J. Hong, T. S. Kim, H. S. Kim, W. T. Kim and B. S. Chun: Mater. Sci. Eng. A, **271** (1999) 469.
- [9] S. J. Hong and B. S. Chun: Mater. Res. Bulletin, **38** (2003) 599.
- [10] S. C. Yoon and H. S. Kim: Mater. Sci. Forum, **503-504** (2006) 221.
- [11] R. Lapovok, D. Tormus and C. Bettles: Scripta Mater., **58** (2008) 898.
- [12] M. H. Paydar, M. Reihanian, E. Bagherpour, M. Sharifzadeh, M. Zarinejad and T. A. Dean: Mater. Lett., **62** (2008) 3266.
- [13] S. C. Yoon, D. M. Nghiep, S. I. Hong, Z. Horita and H. S. Kim: Key Eng. Mater., **345-346** (2007) 173.
- [14] S. C. Yoon, P. Quang, S. I. Hong and H. S. Kim: J. Mater. Proc. Tech., **187-188** (2007) 46.
- [15] H. K. Oh and J. K. Lee: J. Mech. Working Tech., **11** (1985) 53.
- [16] H. K. Oh and J. W. Park: J. Mech. Working Tech., **15**

- (1987) 119.
- [17] S. Shima and M. Oyane: *Int. J. Mech. Sci.*, **18** (1976) 285.
- [18] K. Mori, S. Shima and K. Osakada: *Bull. JSME*, **23** (1980) 516.
- [19] SFTC, Deform2D ver. 9.0, www.deform.com
- [20] H. S. Kim, M. H. Seo and S. I. Hong: *Mater. Sci. Eng. A*, **291** (2000) 86.
- [21] S. C. Yoon, M. H. Seo and H. S. Kim: *Scripta Mater.*, **55** (2006) 159.