

유한요소법을 이용한 마그네슘 분말의 냉간정수압 공정시 치밀화 거동 해석

윤승채 · 곽은정 · 최원형 · 김형근 · 김택수^a · 김형섭*
충남대학교 나노공학부, ^a한국생산기술연구원

Densification Behaviour of Magnesium Powders during Cold Isostatic Pressing using the Finite Element Method

Seung Chae Yoon, Eun Jeong Kwak, Won Hyoung Choi, Hyoung Kun Kim,
Taek-Soo Kim^a and Hyoung Seop Kim*

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

^aKorea Institute of Industrial Technology, Incheon 406-840, Korea

(Received November 5, 2007; Accepted November 28, 2007)

Abstract Magnesium and magnesium alloys are promising materials for light weight and high strength applications. In order to obtain homogeneous and high quality products in powder compaction and powder forging processes, it is very important to control density and density distributions in powder compacts. In this study, a model for densification of metallic powder is proposed for pure magnesium. The model considers the effect of powder characteristics using a pressure-dependent critical density yield criterion. Also with the new model, it was possible to obtain reasonable physical properties of pure magnesium powder using cold iso-state pressing. The proposed densification model was implemented into the finite element method code. The finite element analysis was applied to simulating die compaction of pure magnesium powders in order to investigate the density and effective strain distributions at room temperature.

Keywords : Powder compaction, Porous materials model, Finite element method, Critical density yield criterion, Consolidation, Magnesium powder

1. 서 론

마그네슘 및 마그네슘 합금은 낮은 밀도와 높은 비강성 및 친환경 소재로써, 경량 고효율 재료로 많은 연구가 진행되어지고 있다. 특히 진동 및 충격 흡수성 및 전자기 차폐성은 그 특성이 매우 우수하여 고분자 소재를 대체할만한 차세대 산업 부품 소재 각광을 받고 있다¹⁻³. 또한 소재의 경량화를 요구하는 산업 분야의 기본 골조로 마그네슘 및 마그네슘 합금을 사용함으로써 그 경제적 효과의 극대화를 기대하고 있다. 그러나 마그네슘은 가공 온도가 상온일 경우, 기계적 특성 및 그 특유의 육방조밀구조로 인해

제한된 변형 슬립계로 낮은 연성을 나타내기 때문에 그 응용 범위를 넓히는데 어려움을 겪고 있다. 이러한 제한 특성을 극복하기 위해 결정립 미세화 방법을 통해 극복하려는 연구들이 많이 시도 되고 있다^{4,6}.

반면, 나노재료의 벌크화 방식 공정으로는 미세 분말을 제조하여 이것을 벌크화 시키는 Bottom-up 방식과 벌크 소재를 심한 소성 변형으로 내부 구조의 결정립 미세화를 이루는 Top-down 방식으로 구별되는데, 이러한 공정 접근 방법 중 재료 및 에너지의 절감에 효과적이고, 성형 후 가공이 거의 필요 없이 실제 치수에 가까운 형상을 만들어 낼 수 있는 장점으로 인해 분말야금법이 소재 제조에 응용되어 그 적

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

용 가능성을 높이고 있다. 그러나 분말야금 공정의 경우 여러 가지 기술적 어려움이 존재하는데, 대표적인 경우가 나노 결정 분말의 경우, 그 내부 구조의 성장을 최대한 억제하는 동시에 높은 치밀화를 유지하여 산업에 적용 가능한 크기의 유효 벌크시편을 만들어내는 것이라 할 수 있다⁷⁻⁹⁾. 일반적인 분말 야금 공정에 있어서 밀도를 높이려는 많은 연구가 이루어졌으며, 또한 그 특성이 기계적 성질에 미치는 영향에 대한 해석 또한 이루어졌으나, 정량화를 통해 타당도를 높일 필요는 아직 남아있다. 이러한 분말 소재의 경우, 소재의 기계적 특성에 영향을 미치는 치밀화 및 내부 밀도 분포는 분리되어 그 효과를 고찰하기가 어렵다¹⁰⁻¹⁴⁾. 이에 따라 본 연구에서는 분말야금의 가공 성형의 장점을 최대한 활용하여 분말 이론식으로부터 마그네슘 분말의 고유 물성을 측정하고, 제조 공정시 얻을 수 있는 분말 소재 특성을 유한요소법을 이용하여 고찰하고자 한다.

2. 분말 성형을 위한 소성이론 및 유한요소법

본 연구에 있어서 사용된 분말은 그림 1에서 보는 바와 같은 순수 마그네슘 분말을 사용하였다. 일반적으로 분말 성형의 경우, 압분-소결 공정을 거친 후 분말 단조, 분말 압출, 분말 압연 등을 통한 소성가공을 이용하여 성형공정을 실시하게 되는데, 이때 분말 예비 성형체의 실질적인 치밀화 거동을 통해 최



Fig. 1. Scanning electron micrograph of magnesium powders.

종 형상을 얻는다. 그에 따른 여러 공정 변수 및 설계 변수 등을 이용하여 실험적 연구와 이론적 연구의 조합으로 공정 최적화를 도출하게 된다⁷⁻⁹⁾.

그러나 이러한 연구과정에서 존재하는 여러 변수들을 조절하며 반복 실험을 수행할 경우, 실험의 재현성을 보장할 수 없을 뿐만 아니라 경제적, 정량적 접근을 이루기 힘들게 된다. 따라서 다공질 소결 금속이나, 분말의 변형 거동을 이론적으로 규명하기 위해서는 거시적 연속체 역학에 입각한 수학적 모델이 필요로 한다^{7,8)}. 일반적으로 많은 연구자들은 압력에 의존하여 재료의 소성 항복 함수를 다음과 같이 식 (1)로 표현하였다.

$$AJ'_2 + BJ_1^2 = \eta Y_s^2 = Y_R^2 \quad (1)$$

여기서 J_1 과 J_2 는 각각 1차 응력 불변량과 2차 편차 응력 불변량이고, Y_s 는 다공질 금속의 겉보기 항복응력, Y_R 는 비다공질인 기준 금속의 항복응력이며, η 는 '기하학적인 경화' 항이다. 또한 총변형 에너지가 임계값에 도달하면 항복이 일어난다고 가정할 경우, 단위 체적당의 변형에너지 W 는 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$W = \frac{1}{2} \sigma_{ij} \epsilon_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{1+\nu}{E} \sigma'_{ij} \sigma'_{ij} + \frac{1-2\nu}{3E} \sigma_{kk}^2 \right) \quad (2)$$

이때 항복이 일어나면 응력 상태에 무관하게 이 에너지가 일정하다고 생각하면, $3(1+\nu)\sigma'_{ij}\sigma'_{ij} + (1-2\nu)\sigma_{kk}^2 = K$ 으로 나타낼 수 있으며, 이때 일축응력 상태를 고려하게 될 경우, $3(1+\nu)\sigma_{11}^2 + (1-2\nu)\sigma_{11}^2 = K = 3Y_R^2$ 으로 표현 가능하다. 여기서 $J_1 = \sigma_{kk}$, $J_2 = \frac{1}{2} \sigma'_{ij} \sigma'_{ij}$ 를 대입하여 정리하면 식 (3)을 얻을 수 있다⁷⁻⁸⁾.

$$(2+R^2)J_2 + \frac{1-R^2}{3}J_1^2 = Y_2^2 \quad (3)$$

식 (3)을 식 (1)과 비교하였을 때, 첫째 항은 전단 변형에너지가 되고 두 번째 항은 체적변형에너지의 의미를 갖는다. 만약 진밀도의 금속이 비압축성이라고 가정하면, 총변형 에너지는 전단변형 에너지가 되고, $\nu=0.5$ 가 되어 식 (3)은 von Mises 항복식을 만족하게 된다. 반면, 항복응력의 밀도 의존성, 즉 기하학적 경화는 매개변수 η 를 사용하여 $Y_R^2 = \eta Y_s^2$ 로 표현 가능하다. η 는 다공질 재료와 비다공질 소재의 항복 응력비 (Y_R/Y_s)로서 항복응력은 재료의 밀도가 낮아지면 감소하고 밀도가 진밀도에 도달하면 비다

공질 재료의 항복응력과 같아지므로 $R_c \leq R \leq 1$ 의 범위에서 $0 \leq \eta \leq 1$ 의 값을 가지게 된다. 여기서 R_c 는 재료의 강도를 잃어버리는 임계상대밀도이다. 또한 R 을 이용하여 η 의 표현이 가능하며 다음과 같은 관계로 나타낼 수 있다.

$$\eta = a_1 R^2 + a_2 R + a_3 \quad (4)$$

$$\eta = \begin{cases} \frac{(R-R_c)}{1-R_c}(aR-a+1), & R_c < R \leq 1 \\ \eta_{\min} & , R \leq R_c \end{cases}$$

밀도 R 이 임계상대밀도에 해당하는 에서 응력 값이 0이라는 것을 의미한다. 이처럼 상대밀도에 의존하는 이러한 강화를 ‘기하학적 강화’ 또는 ‘치밀화 강화’라고 부르며 $[(R-R_c)/(1-R_c)]$ 의 식으로 표시될 수 있다. 또한 기지재료의 변형에 따른 강화는 ‘변형 강화’라고 하는데 Y_s 의 변화로 나타낸다. 따라서 다공질 재료의 총 강화는 기하학적 강화와 변형강화의 곱으로 표시된다. 이후에 Kim¹⁵⁾은 분말의 낮은 초기 밀도와 낮은 임계상대밀도를 고려하여 분말의 거동을 설명하는 다음과 같은 식을 제안하였다.

$$(2+R^2)J_2' + \frac{1-R^2}{3}J_1^2 = Y_R^2 = \left(\frac{R-R_T}{1-R_T}\right)^{0.85} Y_s^2 \quad (5)$$

여기서 R 는 변형 후의 밀도, R_T 는 분말의 두드림 밀도이며, 또한 기지재료의 변형강화 항을 포함한 Y_s 로 서 고려될 수 있다.

이에 본 연구에서는 재료가 냉간정수압 P압력의 상태에 있으면, 응력과 변형률의 관계는 식 (6)과 같이 되며, 또한 부피는 변하나 질량은 보존되기 때문에 변화된 밀도 식 (7)로 나타낼 수 있다⁹⁾.

$$\sigma_{11} = \sigma_{22} = \sigma_{33} = -P, \quad \sigma_{12} = \sigma_{23} = \sigma_{31} = 0$$

$$\epsilon_{11} = \epsilon_{22} = \epsilon_{33} = \epsilon, \quad \epsilon_{12} = \epsilon_{23} = \epsilon_{31} = 0 \quad (6)$$

$$R = R_0 e^{-(\epsilon_{11} + \epsilon_{22} + \epsilon_{33})} \quad (7)$$

위와 같은 식들을 이용하여 식 (5)으로부터 밀도와 압력의 관계를 기술할 수 있다. 또한 식 (5)에서 분말 성형 조건이 정수압 상태이기 때문에 $J_2' = 0$ 이며, J_1 만 존재하게 되어, 압력과 응력의 관계는 식 (8)과 같이 기술할 수 있다[그림 2].

$$\frac{1-R^2}{3}J_1^2 = Y_R^2 \quad (8)$$

냉간정수압의 3축에서 모두 P의 압력이 작용하기 때

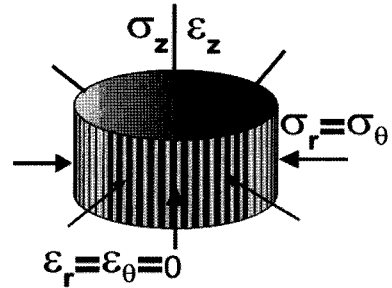


Fig. 2. Schematic showing the stress and strain function during cold iso-state pressing processing.

문에 식 (8)은 다음과 같은 식으로 기술될 수 있다.

$$P = \sqrt{\frac{\left(\frac{R-R_T}{1-R_T}\right)^{0.85} Y_s^2}{3(1-R^2)}} \quad (9)$$

여기서 분말의 항복응력 Y_R 는 치밀화 강화 $[(R-R_T)/(1-R_T)](0.85/R_T)$ 와 가공경화항인 Y_s 를 포함하며, 이에 따라 정수압에 의해 치밀화를 나타내는 거동을 기술할 수 있다. 또한 위와 같이 기술한 분말 이론 모델을 상용 유한요소 Code 인 DEFORM2D에 모델을 적용하여 분말 모델에 따른 결과를 고찰하였다.

3. 결과 및 고찰

본 실험에서 냉간정수압 공정을 사용하여 순 마그네슘 분말의 임계상대밀도를 예측할 수 있다. 여기서 예측된 임계상대밀도를 기초로 냉간정수압 공정에서 얻어진 압력과 그에 따른 상태를 고려하여 식 (9)의 분말성형 모델식으로부터 마그네슘 분말의 재료의 물성 (Y_s)을 계산해 낼 수 있다. 이와 같은 접근 방식을 통해 그림 3은 실제 정수압 공정을 통해 얻은 실험 결과 (○: circle symbol)와 식 (9)의 분말성형 모델을 이용하여 얻은 수치적 결과(—: curve)를 비교하여 나타내었다. 초기의 낮은 치밀화이지만, 압력이 높아짐에 따라 밀도가 천천히 증가하고 있는 전형적인 치밀화 곡선이다. 실험결과와 이론치가 정성적 및 정량적으로 모두 잘 일치하는 경향임을 알 수 있다.

전 절에서 기술한 수치적 계산방법을 통해, 그림 3의 치밀화 곡선으로부터 그림 4와 같이 본 분말성형 이론 모델을 사용하여 마그네슘의 분말 물리적 특성을 얻을 수 있다. Kim의 연구⁹⁾에서 알 수 있는 바와 같

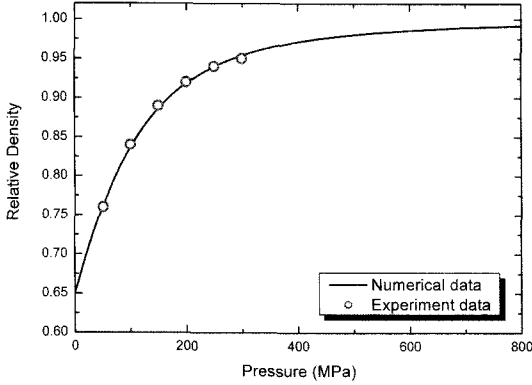


Fig. 3. Comparison of numerical data and experiment data by cold iso-state pressing curves. (relative density vs. pressure) Symbol is experiment values and the curve correspond to the numerical results.

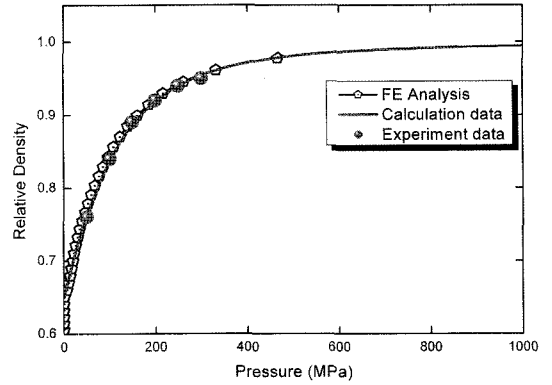


Fig. 5. Comparison of finite element analysis and numerical values and experiment data during cold iso-state pressing.

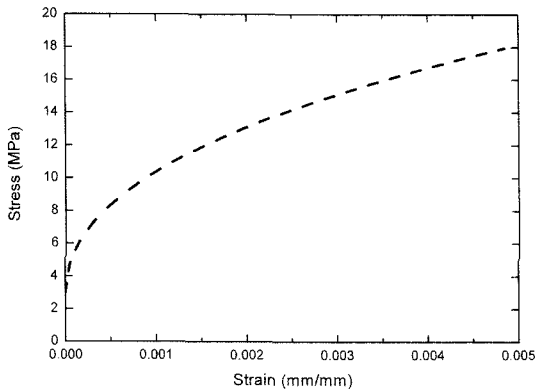


Fig. 4. Pure magnesium physical property using critical yield criterion of powder model.

이, 냉간정수압 공정에서는 분말의 회전이나 이탈이 거의 없다. 따라서, 치밀화 곡선으로부터 구한 임계밀도 및 기지재료의 응력-변형률 곡선에 대한 이론적 내용과 실험의 결과가 잘 일치한다. 이에 따라 본 기법은 분말까지의 물성을 얻기 위한 직접적인 고형화 방법을 사용하지 않고도 냉간정수압 공정만으로 분말의 물리적 특성을 규명하는 효과적인 이론적 접근 방법일 뿐만 아니라^{7-9,15)}, 그 신뢰도는 또한 높다고 할 수 있다.

이러한 이론적 접근으로 얻어진 순 마그네슘 분말 재료의 물성과 임계 상대 밀도 값을 상용 유한요소 Code에 적용하여 실제적인 공정 분석 및 타당도를 검증할 수 있다. 그림 5는 본 분말 성형 모델을 적용하여 유한요소법을 통한 냉간정수압 계산 결과와 그림 3의 결과를 비교한 것으로써, 매우 잘 일치하는 치밀화 곡선 결과임을 알 수 있다. 이를 통해 분말 성

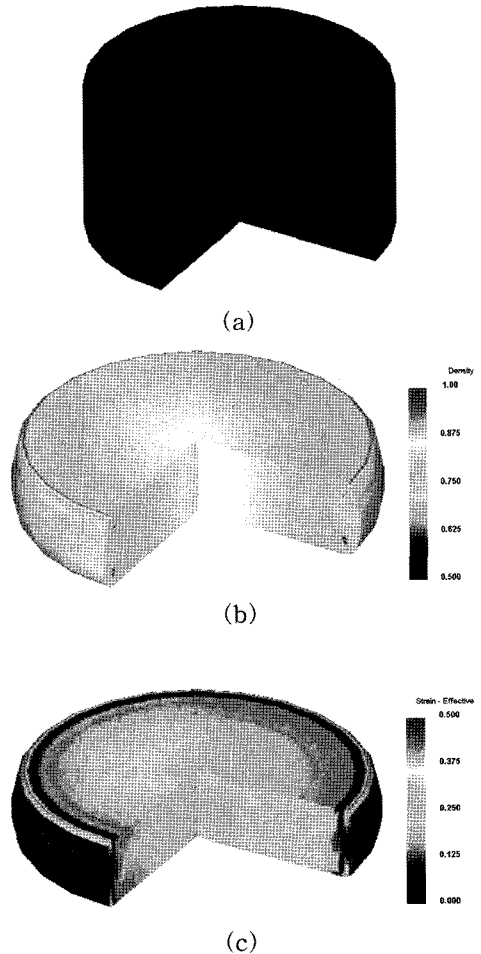


Fig. 6. The calculated distribution during compaction by the finite element method. (a) initial state, (b) relative density and (c) effective strain.

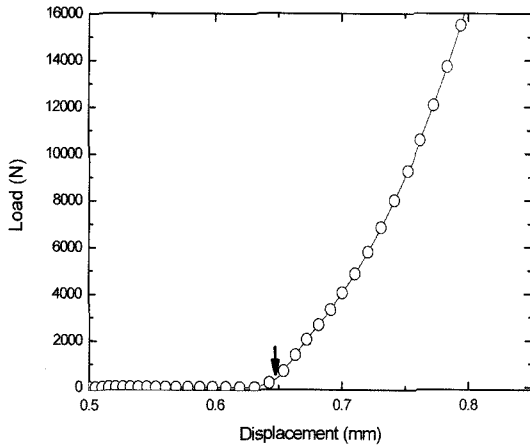


Fig. 7. Compaction curve of magnesium powder during upsetting process by calculation. The arrow is theoretical critical relative density position.

형 모델 및 이론적 접근을 통해 얻은 분말의 물리적 특성이 매우 타당성 있는 결과임을 알 수 있다. 이러한 바탕으로 얻어진 결과에 기초하여 마그네슘 분말 압분 거동을 유한요소를 통한 계산을 수행하였다.

그림 6은 냉간 분말압분 실험의 결과인데, 그림 6(a)는 초기 상태로써, 초기 밀도는 50%로 설정하였으며, 압축률은 50% 그리고 마찰은 0.1로 정하였을 뿐만 아니라 변형 속도는 1 mm/s로 일정하게 하였다. 그림 6(b)는 압분 결과 얻어진 상대밀도의 값으로써, 압축된 결과 압축력이 크게 작용하는 내부의 경우 높은 상대밀도를 얻을 수 있는 반면, 외부의 경우, 낮은 상대밀도를 나타내는 것을 통해 밀도 변화에 대해 예측 가능하며, 또한 그에 따른 분말 성형체의 유효변형률을 얻을 수 있다(그림 6(c)).

그림 7은 본 유한요소법을 통해 예측되어지는 금형의 이동-하중 값을 나타내는 그래프이다. 이론적으로 금형의 무게가 고려되지 않고 마찰만 고려된 경우, 본 실험을 통해 얻어진 임계 상대밀도(화살표)에서부터 분말 성형체의 하중이 증가하는 것을 통해 공정시 하중 거동과 필요한 하중을 계산할 수 있다. 추후 본 모델을 이용하여 여러 공정에서 발생하는 분말 성형 공정시의 변수들을 고려하고자 한다.

4. 결 론

마그네슘 및 마그네슘 합금의 소재는 최근 경량

금속으로 소재 성형되어지고 있는데, 산업 응용에 적합한 공정 및 경제성을 고려하여 분말야금을 통한 많은 소재 제조가 이루어지고 있다. 이에 본 연구에서는 마그네슘 분말의 이론적 성형 모델에 근거한 접근을 시도하였으며, 그에 따른 분말 성형의 타당도를 높이고자 하였다. 이를 위해 냉간정수압을 이용하여 임계 상대밀도를 측정하였고, 이를 통해 얻어진 값을 통해 이론적 모델식을 근거로 마그네슘 분말의 물리적 특성을 측정할 수 있었다. 또한 상용 유한요소 code에 임계 상대 밀도 분말 모델 적용하여, 이론적으로 얻어진 분말 특성을 통해 분말 단조에서의 상대밀도 및 분포를 합리적으로 얻을 수 있었다.

감사의 글

이 논문은 2007년도 과학기술부의 재원으로 한국 과학재단의 국가 지정 연구실 사업으로 수행된 연구입니다(No. R0A-2007-000-s).

참고문헌

1. S. Y. Chang, S. W. Lee, K. M. Kang, S. Kamado and Y. Kojima: Mater. Trans., **45** (2004) 488.
2. S. Y. Chang, H. Tezuka and A. Kamio: Mater. Trans., **38** (1997) 526.
3. M. Mabuchi, H. Iwahashi, K. Yanase and K. Higashi: Scripta Mater., **36** (1997) 681.
4. S. R. Agnew, J. A. Horton, T. M. Lillo and D. W. Brown: Scripta Mater., **50** (2004) 377.
5. D. W. Brown, S. R. Agnew, M. A. M. Bourke, T. M. Holden, S. C. Vogel and C. N. Tome: Mater. Sci. Eng. A, **399** (2005) 1.
6. Y. Wei and L. Anand: Acta Mater., **55** (2007) 921.
7. H. S. Kim and D. N. Lee: J. Kor. Inst. Met. Metal., **30** (1992) 37 (Korean).
8. H. S. Kim: J. Kor. Inst. Met. Metal., **38** (2000) 817 (Korean).
9. S. C. Yoon, H. S. Kim and C. K. Lee: J. Kor. Powder Metall. Inst., **11** (2004) 341 (Korean).
10. C. Suryanarayana: Ins. Mater. Rev., **40** (1995) 41.
11. K. Lu: Mater. Sci. Eng. Rep. R, **16** (1996) 161.
12. R. W. Siegel: Nanostruct. Mater., **4** (1994) 121.
13. R. Birringer, H. Gleiter, H. P. Klein and P. Marquardt: Phys. Lett. A, **102** (1984) 365.
14. S. C. Yoon, S. J. Hong, M. H. Seo, Y. G. Jeong and H. S. Kim: J. Kor. Powder Metall. Inst., **11** (2004) 233 (Korean).
15. H. S. Kim: Mater. Sci. Eng. A, **251** (1998) 100.