

## 임계상대밀도모델을 이용한 마그네슘분말의 압출공정 치밀화 거동

윤승채 · 채홍준<sup>a</sup> · 김택수<sup>a</sup> · 김형섭<sup>b\*</sup>

포항공과대학교 항공재료연구소, <sup>a</sup>한국생산기술연구원

<sup>b</sup>포항공과대학교 신소재공학과

### Analysis of Densification Behavior of Magnesium Powders in Extrusion using the Critical Relative Density Model

Seung Chae Yoon, Hong Jun Chae<sup>a</sup>, Taek-Soo Kim<sup>a</sup> and Hyoung Seop Kim<sup>b\*</sup>

Center for Advanced Aerospace Materials, Pohang University of Science and Technology,  
San 31 Hyoja-dong, Pohang Kyungbuk, 790-784, Korea

<sup>a</sup>Department of Echo-Materials and Processing, Korea Institute of Industrial Technology (KITECH),  
7-47, Techno-Park Songdo, Yeonsu, Incheon 406-130, Korea

<sup>b</sup>Department of Materials Science and Engineering, Pohang University of Science  
and Technology, San 31 Hyoja-dong, Pohang Kyungbuk, 790-784, Korea

(Received January 7, 2009; Received in revised form February 2, 2009; Accepted February 17, 2009)

**Abstract** Numerical simulations of the powder extrusion need an appropriate pressure-dependent constitutive model for densification modeling of the magnesium powders. The present research investigated the effect of representative powder yield function of the critical relative density model. We could obtain reasonable physical properties of pure magnesium powders using cold isostatic pressing. The proposed densification model was implemented into the finite element code. The finite element analysis was applied to simulation of powder extrusion of pure magnesium powder in order to investigate the densification and processing load at room temperature.

**Keywords :** Magnesium powder, Critical relative density constitutive model, Finite element method, Powder densification

### 1. 서 론

공학의 발전과 산업의 고도화에 따라 부가가치가 높은 생산 공정이 요구됨과 동시에 이에 상응하는 재료의 고성능 및 고기능성 부품 소재 개발이 끊임없이 요구되고 있다. 이에 부합하는 부품소재에 대한 제조 기술의 중요성이 더욱 부각되고 있다. 특히 분말야금을 이용한 부품 소재들은 기존의 재료들이 가지고 있는 문제점 및 한계를 극복할 수 있게 하며, 그에 따른 연구 방향을 제시하고 있다. 무엇보다도 분말야금 공정에 의하면 구현할 수 있는 소재의 고유한 물리적 특성이 존재하기 때문에, 오래전부터 학

연계 및 산업계에서 연구 개발의 대상이 되어 왔다 [1-4].

국내의 분말야금을 이용한 부품소재의 개발은 소형 기계 부품으로부터 시작하여 전자부품 및 고기능 구조 부품 소재 등의 대량 생산 체제를 통해 국제적 가격 경쟁력을 지니고 있다. 특히 분말 성형 기술은 용해와 주조 또는 단조 기술에 비해 성분의 편석이 거의 없고 조성이 균일하며, 분말의 입자크기와 순도 제어에 의해 고청정/초미세의 소재를 제조할 수 있을 뿐만 아니라 이를 통해 우수한 물리적 특성을 얻을 수 있다. 이러한 장점을 사용하여 기계-자동차 등의 소형 기계부품이나 각종 복잡한 형상 제품의 near net

\*Corresponding Author : [Tel : +82-54-279-2150; E-mail : hskim@postech.ac.kr]

shaping이 가능할 뿐만 아니라 기판 산업인 자동차·항공·선박의 소재 및 최첨단 산업인 항공·전자 부품 소재에 이르기까지 광범위하게 연구가 적용되고 있다[5-6].

한편, 현재 산업에서 요구되는 분말성형 부품소재의 특성이 초고강도화, 고기능성화 및 초경량화로 진화하고 있다. 이러한 요구조건을 실현하기 위해서는 분말제조 기술 및 소결 기술 등의 산업화를 성취하는 데에 핵심적 원천 기술이 체계화되어야 하는 문제점을 가지고 있다. 특히 에너지 자원의 고갈과 환경 문제 등으로 인한 수송용 부품 소재의 경량화에 대한 요구가 급증되고 있으며, 이로 인한 마그네슘 합금 소재의 연구가 두각을 나타내고 있다.

마그네슘 소재는 구조용 금속 중에서 가장 가벼운 금속으로 에너지 절감이 절실한 고유가·고효율 시대에서 가장 주목을 받고 있는 금속재료로 떠오르고 있다. 그러나 마그네슘은 알루미늄 소재에 비하여 강도와 연성이 낮고 슬립계가 적은 조밀육방구조라는 구조적 특성으로 인하여 성형성이 좋지 않다는 치명적인 단점을 가지고 있기 때문에 해결 방안으로는 합금설계 혹은 무작위 방위를 가지는 분말야금 성형법을 채택하는 것이라 할 수 있다. 특히 분말 소재의 압출 공정은 마그네슘 소재의 산업에 적용 가능성의 극대화를 이룰 뿐만 아니라 연속 공정을 이룰 수 있기 때문에 그 응용범위를 확대할 수 있는 방안으로 대두되고 있다[7-9]. 이에 본 연구에서는 경량 소재인 마그네슘 분말에 대한 압출 공정을 연구하는 동시에 치밀화를 통한 내부 기공도를 최소화 및 유효 크기를 가지는 벌크화 성형에 대한 성공적인 결과를 얻기 위해 유한요소법을 사용하여 변형거동을 해석하고 그 결과를 고찰하고자 한다.

## 2. 분말 항복식과 유한요소 조건

### 2.1. 분말 항복식을 이용한 분말 물성 예측

일반적으로 분말 성형의 경우, 압분·소결 공정을 거친 후 분말 단조, 분말 압출, 분말 압연 등의 2차 공정을 통한 소성가공을 이용하여 성형을 실시하게 되는데, 이때 분말 예비 성형체의 실질적인 치밀화 거동을 통해 최종 형상을 얻는다. 이 치밀화 공정 시 여러 공정 변수 설계 기법 등을 이용하여 실험적 연구와 이론적 연구의 조합으로 최적화를 도출하게 된

다. 다공질 소결 금속이나, 분말의 변형 거동을 이론적으로 규정하기 위해서는 거시적 연속체 역학에 입각한 수학적 모델이 필요하다[10-12]. 일반적으로 압력에 의존하여 재료의 소성 항복 함수를 다음과 같이 식 (1)로 표현하였다.

$$AJ_2' + BJ_1^2 = C^2 Y_s^2 = Y_R^2 \tag{1}$$

여기서  $J$ 과  $J_2'$ 은 각각 1차 응력 불변량과 2차 편차응력 불변량이고,  $Y_R$ 은 다공질 금속의 겉보기 항복응력,  $Y_s$ 는 비다공질인 기준 금속의 항복응력이며,  $A$ 와  $B$ 는 상대밀도  $R$ 의 관계 함수이고  $C$ 는 '기하학적 경화' 항이다. 여기서  $J_1 = \sigma_{kk}$ ,  $J_2' = \frac{1}{2} \sigma_{ij} \sigma_{ij}$ 를 대입하여 정리하면 식 (2)를 얻을 수 있다[10-12].

$$(2+R^2)J_2' + \frac{1-R^2}{3}J_1^2 = Y_R^2 \tag{2}$$

식 (2)을 식 (1)과 비교하였을 때, 첫 번째 항은 전단변형에너지가 되고 두 번째 항은 체적변형에너지의 의미를 갖는다. 만약 진밀도의 금속이 비압축성이라고 가정하면, 총변형 에너지는 전단변형 에너지가 되고, 소성 포아송비가 0.5가 되어 식 (2)은 von Mises 항복식을 만족하게 된다. 여기서 상대밀도  $R$ 이 임계상대밀도에 해당하는  $R_c$ 에서 응력 값이 0이라는 것을 의미하며 [10-13], 이처럼 상대밀도에 의존하는 이러한 강화를 '기하학적 강화' 또는 '치밀화 강화'라고 부르고,  $[(R-R_c)/(1-R_c)]$ 의 식으로 표시한다. 또한 기지재료의 변형에 따른 강화는 '변형강화'라고 하는데  $Y_s$ 의 변화로 나타낸다. 따라서 다공질 재료의 총 경화는 기하학적 강화와 변형경화의 곱으로 표시된다. 이후에 Kim은 분말의 낮은 초기 밀도와 낮은 임계상대밀도를 고려하여 분말의 거동을 설명하는 다음과 같은 식을 제안하였다[11].

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

여기서  $R_T$ 는 분말의 탭핑 밀도이며, 또한 기지재료의 변형강화 항을 포함한  $Y_s$ 로서 고려될 수 있다. 냉간 정수압의 3 축에서 모두  $P$ 의 압력이 작용하기 때문에 식 (3)은 다음과 같은 식으로 기술될 수 있다 [12-13].

$$P = \sqrt[3]{ \frac{ \left( \frac{R-R_T}{1-R_T} \right)^{\frac{0.85}{R_T}} Y_s^2 }{ 3(1-R^2) } } \tag{4}$$

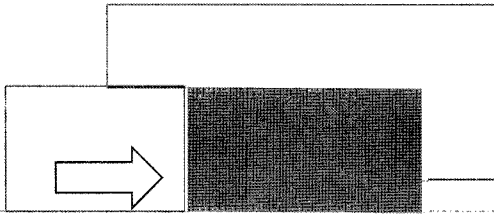


Fig. 1. Mesh and geometry conditions for the finite element analysis.

## 2.2. 임계상대밀도 모델을 이용한 유한요소 조건

본 연구 수행에서는 임계상대밀도 모델을 상용 유한요소코드 DEFORM의 사용자 서브루틴을 이용하여 압출 분말 성형을 모사하였다. 분말 성형에 대한 효과적인 고형화 거동을 고찰하기 위해 본 연구에서는 직접 압출에 대해 계산 수행을 하였다. 압출비는 15:1로 하였으며, 초기 요소의 개수는 5,000개로 하였고, 압출을 이루는 작은  $90^\circ$  하였다. 시편의 반지름을 15 mm로 설정한 축대칭변형을 고려하였다. (그림 1). 금형과 소재와의 마찰은 분말 소재의 표면 거칠기로 인해 0.2로 하였으며, 초기 상대밀도는 0.5로 설정하였다. 또한 등은 상태를 유지하기 위해 속도는 느린 1 mm/s로 일정하게 하였으며, 피복재는 사용하지 않았다. 압출거동에 따른 분말 거동을 고찰하기 위한 것임으로 상온 계산 수행을 하였다.

## 3. 결과 및 고찰

마그네슘 분말의 항복응력은 식 (4)에서 치밀화 경화항 C와 경화항인  $Y_s$ 를 포함하며, 이에 따라 마그

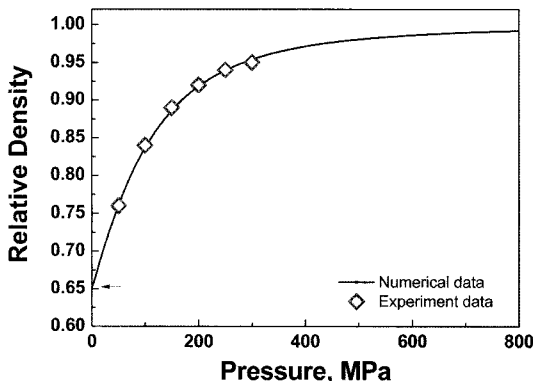


Fig. 2. Predicted and experimental densification curves during cold isostatic pressing.

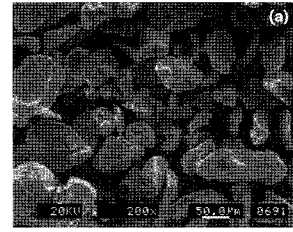


Fig. 3. (a) Initial Mg Powders and (b) geometries after different cold isostatic pressing.

네슘 분말의 물리적 특성을 나타내는 거동으로 기술할 수 있다[14]. 그림 2는 냉간 정수압 공정을 통하여 얻은 마그네슘 분말 상대 밀도를 얻은 그래프로써, 실험을 통한 결과와 식 (4)를 통해 얻은 값을 나타내었다. 본 연구에서 약 99.8%의 순도를 가지는 마그네슘 분말은 그림 3에 나타내었으며, 평균 분말 크기는 약 50 이고, 또한 냉간 정수압 결과 그림 3 (b)와 같은 형상을 얻을 수 있었다. 이를 통해 순 마그네슘 분말 물성을  $R_f=0.65$ , 그리고 Hollomon 식에서의 재료강도계수는 133 MPa, 가공경화지수는 0.385 얻을 수 있으며, 이는 분말 실험과 매우 잘 일치하고 있음을 알 수 있다[14,16].

그림 4에 임계상대밀도모델이 고려된 유한요소법을 이용한 마그네슘 분말의 압출 거동 결과에서 상대밀도 분포를 나타낸 것이다. 초기에 약 0.5의 상대 밀도를 가지는 분말 성형체를 초당 1 mm/s의 속도로 압출하는 동안의 각 단계의 상대밀도 분포를 나타내었는데, 두 단계 구간으로 나누어지고 있음을 고찰할 수 있다. 첫 번째 단계는 0~15 초 구간으로 분말의 상대밀도가 후방 압출 램에 의해 증가하는 단계와 두 번째 단계는 15~25 초 구간으로 분말 압출 거동이 이루어지는 구간이며, 이를 통해 분말 결합 및 고밀도 상황에서의 지속적인 밀도 증가가 이루어지는 것임을 알 수 있다[15-16]. 압출 공정이 진행되는 동안의 마그네슘 압출재 머리 부분의 상대밀도가 낮은 상태로 존재하게 되며 이러한 영역은 공정이 추가되더라도 증가되는 현상이 발생되지 않으며, 이는 소재 전체의 평균상대밀도를 낮추게 되는 요소로 작

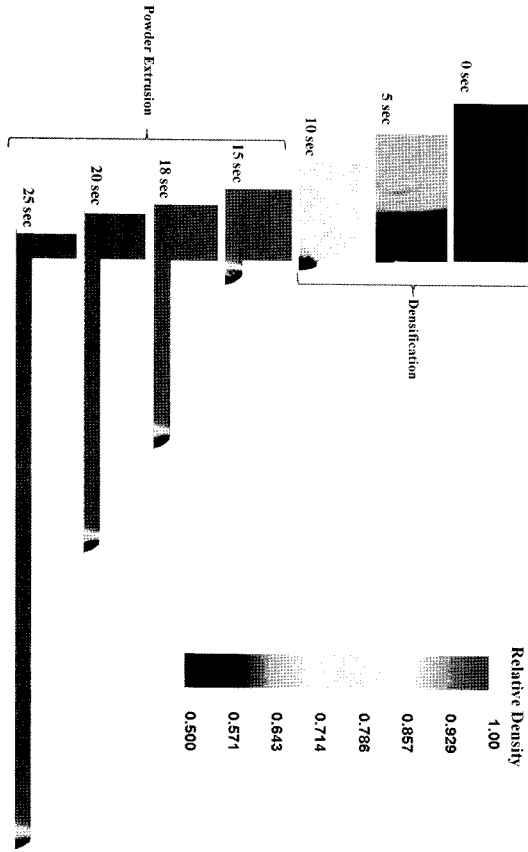


Fig. 4. Mg powder extrusion simulation results of relative density distribution.

용한다. 또한 이와 같이 낮은 상대밀도를 가지는 영역은 시편 머리에서 약 3.8 mm 정도의 존재하는 것으로 평가된다. 이와 같은 압출 공정 중에 발생하는 끝단 현상을 줄이기 위해 피복재를 사용하는 것이 가장 효과적일 것으로 사료된다[17-18]. 또한 그림 5는 유한요소법을 통해 얻은 Flow net을 구형의 형태로 표시하였고 압출 공정이 이루어지는 동안 분말 형상의 변화를 관찰하여 실제 실험에서의 결과와 비교하였다. 그림 5(a)에 압출전의 형태를 나타낸 것이고, (b)는 압출 후 형태를 표기한 것인데, 공정 초기의 구형 형상 Flow net이 압출 공정 이후에는 압출 방향으로 긴 변형 양상을 나타내고 있음을 알 수 있으며 이와 같은 현상은 실제 실험에서도 동일한 변형 경향을 띠고 있다[17].

반면, 압출 공정 중에 발생하는 평균 상대밀도의 변화를 고찰하였는데, 이를 통해 분말 고형화 거동을

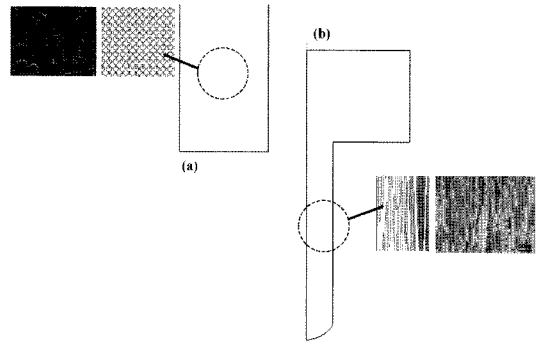


Fig. 5. Comparison between flow net and experimental results [17]. (a) initial condition and (b) extrusion condition.

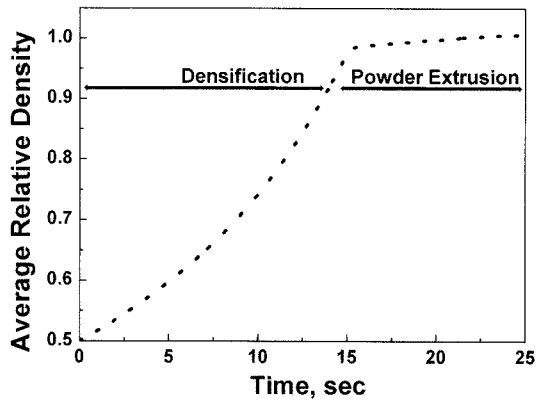


Fig. 6. Average relative density vs. time curve during Mg powder extrusion.

명확히 고찰할 수 있다. 특히 그림 6은 공정이 진행됨에 따라 평균 상대밀도의 값이 증가하는 곡선을 나타내었고, 여기서 약 0~15 초 구간에서 상대 밀도가 급격히 증가하는 치밀화 구간, 그리고 이후에 분말의 압출 공정이 진행됨으로 인한 밀도 증가 및 압출 구간으로 구분됨을 확인할 수 있다. 치밀화 구간에서 상대밀도의 증가율이 급격히 증가를 이루나 약 95% 이상의 고밀도를 이룬 이후에는 그 증가율이 감소하는 것을 관찰할 수 있다. 특히 하중-그래프-시간(그림 7) 역시 15 초 구간을 기준으로 분말 상대밀도 증가 구간과 압출 구간으로 나누어지는 것을 확인할 수 있는데, 상대밀도 R이 임계상대밀도에 도달하는 과정에서 나타나는 현상으로 순 마그네슘 분말의 압출 공정이 임계상대밀도 이전일 때, 1 mm/s 후방 램의 변화에 대해 낮은 하중 증가율을 나타내지만, 임계상대밀도에 도달한 이후의 하중변화는 후방 램

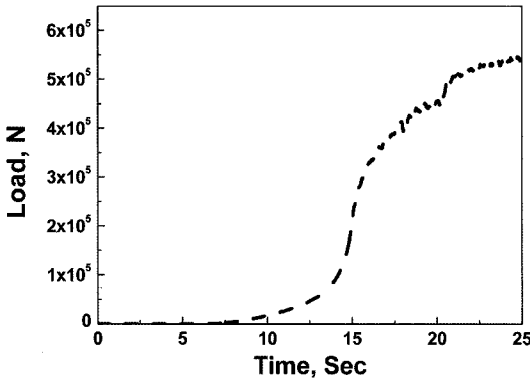


Fig. 7. Processing load-time curve of Mg powder extrusion by the finite element method.

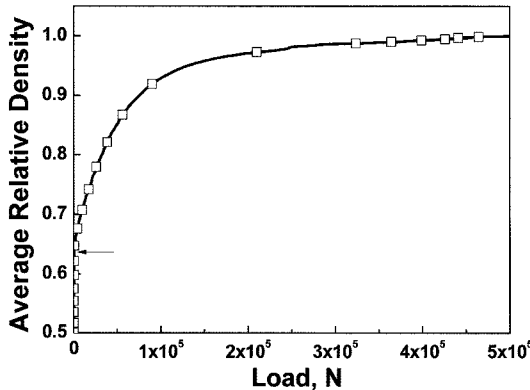


Fig. 8. Processing load curve of Mg powder during powder extrusion predicted by the finite element method. The arrow is the theoretical critical relative density.

속도에 따라 S-형태로 증가함을 알 수 있다. 이는 벌크 소재의 하중 변화와는 달리 압출 초기 분말 치밀화로 인해 급격히 증가를 이루고 압출 공정이 진행되는 구간에서도 지속적인 고밀도를 이루는 데 하중이 소요되기 때문에 하중 증가 경향을 나타는 것으로 사료된다. 그림 8에 상대 밀도의 변화에 따른 하중 곡선을 나타낸 것으로서, 화살표로 표시한 임계상대밀도 이후에 하중 증가 값이 발생됨을 알 수 있으며, 고밀도를 얻기 위한 압출 가공 하중을 평가할 수 있다[13-14]. 추후 마그네슘 분말의 피복재 사용 여부와 압출각에 따른 효과를 고찰하고자 한다[18].

#### 4. 결 론

본 연구에서는 임계상대밀도모델을 이용하여 순 마

그네슘 분말의 압출 거동에 필요한 마그네슘 분말의 물성을 예측하였고, 공정 변수 및 물성은 냉간 정수 압 공정을 통해 얻을 수 있었다. 또한 마그네슘 분말의 압출 거동은 두 단계로 거쳐서 고형화가 이루어지는 것을 고찰할 수 있었는데, 이는 상대밀도 R이 임계상대밀도에 도달하는 구간을 중심으로 나누어지는 현상과 압출공정의 복합적인 요인이 고려되어 공정이 수행되는 동안 약 15 초 구간을 중심으로 치밀화 구간과 압출 구간으로 구분될 수 있다. 또한 압출 시편의 머리의 약 3.8 mm 구간에는 0.5~0.8에 해당하는 낮은 상대밀도영역이 존재하였으며, 분말 압출 시편의 내부 형상의 Flow net과 실험에서 공정 이후 압출 방향으로 길게 변형되는 양상을 나타내고 있으며, 또한 하중 증가는 임계상대밀도에 도달하였을 때 S-자 형태의 증가 경향을 나타냄을 알 수 있었다.

#### 감사의 글

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

#### 참고문헌

- [1] J. R. Groza and R. J. Dowding: Nanostructured Mater., 7 (1996) 749.
- [2] P. L. Chen and I. W. Chen: J. Am. Ceram. Soc., 79 (1996) 3129.
- [3] H. S. Kim, M. H. Seo, W. S. Ryu, S. C. Yoon and C. K. Rhee: J. Metastable Nanocryst. Mater., 15-16 (2003) 235.
- [4] S. C. Yoon, S.-J. Hong, S. I. Shong and H. S. Kim: Mater. Sci. Eng. A, 449-451 (2007) 290.
- [5] W. J. Kim and Y. K. Sa: Scripta Mater., 54 (2006) 1391.
- [6] B. H. Lee, K. S. Shin and C. S. Lee: Mater. Sci Forum, 475-479 (2005) 2927.
- [7] S. Y. Chang, S. W. Lee, K. M. Kang, S. Kamdo and Y. Kojima: Mater. Trans., 45 (2004) 488.
- [8] T. Mukai, M. Yamanoi, H. Watnabe and K. Higashi: Scripta Mater., 45 (2001) 89.
- [9] M. Nishida, Y. Kawamura and T. Yamamoto: Mater. Sci. Eng. A., 375 (2004) 1217.
- [10] H. S. Kim and D. Y. Lee: J. Kor. Inst. Met. Metal., 30 (1992) 37 (Korean).
- [11] H. S. Kim: J. Kor. Inst. Met. Metal., 38 (2000) 817.

- (*Korean*).
- [12] S. C. Yoon, H. S. Kim and C. K. Rhee: *J. Kor. Powder Metall. Inst.*, **11** (2004) 341 (*Korean*).
- [13] S. C. Yoon, E. J. Kwak, W. H. Choi, H. K. Kim, T. S. Kim and H. S. Kim: *J. Kor. Powder Metall. Inst.*, **14** (2007) 362 (*Korean*).
- [14] S. C. Yoon, E. J. Kwak, T. S. Kim, B. S. Chun and H. S. Kim: *Mater. Trans.*, **49** (2008) 967.
- [15] S. C. Yoon and H. S. Kim: *Mater. Sci. Forum*, **503-504** (2006) 221.
- [16] C. H. Bok, J. H. Yoo, S. C. Yoon, T. S. Kim, B. S. Chun and H. S. Kim: *J. Kor. Powder Metall. Inst.*, **15** (2008) 365 (*Korean*).
- [17] H. J. Chae: *Master's Thesis*, Hanyang University, (2008) (*Korean*).
- [18] S. C. Yoon, P. Quang, S. C. Chun, H. R. Lee and H. S. Kim: *J. Kor. Powder Metall. Inst.*, **13** (2006) 415 (*Korean*).