

유한요소법을 이용한 등통로각압출 공정의 마그네슘 분말 고형화 거동 해석: 피복재 효과

윤승채 · 김택수^a · 김형섭^{b,*}
포항공과대학교 항공재료연구소, ^a한국생산기술연구원,
^b포항공과대학교 신소재공학과

Finite Element Analysis of Densification of Mg Powders during Equal Channel Angular Pressing: Effect of Sheath

Seung Chae Yoon, Taek-Soo Kim^a and Hyoung Seop Kim^{b,*}

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

^aDepartment of Echo-Materials and Processing, Korea Institute of Industrial Technology (KITECH),
7-47, Techno-Park Songdo, Yeosu, Incheon 406-130, Korea

^bDepartment of Materials Science and Engineering, Pohang University of Science
and Technology, San 31 Hyoja-dong, Pohang Kyungbuk, 790-784, Korea

(Received January 9, 2009; Revised February 13, 2009; Accepted February 27, 2009)

Abstract Magnesium and its alloys are attractive as light weight structural/functional materials for high performance application in automobile and electronics industries due to their superior physical properties. In order to obtain high quality products manufactured by the magnesium powders, it is important to control and understand the densification behavior of the powders. The effect of the sheath surrounding the magnesium powders on the plastic deformation and densification behavior during equal channel angular pressing was investigated in the study by experimental and the finite element methods. A modified version of Lee-Kim's plastic yield criterion, notably known as the critical relative density model, was applied to simulate the densification behavior of magnesium powders. In addition, a new approach that extracts the mechanical characteristics of both the powder and the matrix was developed. The model was implemented into the finite element method, with which powder compaction under equal channel angular pressing was simulated.

Keywords : Magnesium powder, Densification, Critical relative density constitutive model, Equal channel angular pressing, Finite element method

1. 서 론

최근 차세대 경량 금속으로 마그네슘 소재가 각광을 받고 있다. 마그네슘의 밀도는 약 1.74 g/cm^3 으로서, 대표적인 산업용 경량소재인 알루미늄에 비해 매우 가벼운 금속일 뿐만 아니라 높은 비강도 및 비탄성계수를 가지고 있다. 이와 같은 마그네슘 소재의

우수한 경량 기계적 특성으로 인해 산업 전방에 걸친 적용이 이루어지고 있다. 특히 마그네슘 소재는 구조 재료 중에 가장 가벼운 재료일 뿐만 아니라 비강도, 진동 흡수성, 방열성, 재활용성이 매우 우수하다. 현재 마그네슘의 주로 사용되는 제조 공정은 다이캐스팅이나 주조법이 이용되고 있다. 마그네슘은 조밀육방구조의 미세 구조적 특성으로 인하여 강도

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

와 연신 등의 기계적 성질이 제한적이기 때문에 대부분 사용 중 큰 하중이 가해지지 않는 전자재료의 커버나 케이스로만 활용되어 왔다. 하지만 에너지 절감 효과 및 배출 가스 감소에 큰 효과가 있어 수송기 분야의 적용이 확대되고 있다.

마그네슘 소재는 조밀 육방정 결정구조로 인해 매우 취약한 상온 성형성을 가지고 있으며 이를 개선하기 위해 많은 연구가 전 세계적으로 활발히 이루어지고 있다. 대표적으로 마그네슘 합금의 미세조직과 집합조직을 제어함으로써 기계적 특성의 향상을 달성한 보고가 있으며, 또한 무작위 방위를 형성하는 분말 야금 공정을 통해 마그네슘 소재의 우수한 특성을 이룬 보고가 있다[1-4].

한편, 마그네슘 소재에 Equal Channel Angular Pressing(ECAP) 공정을 적용할 경우, 결정립 미세화가 다른 금속과 같이 효과적으로 발생되지만, 강도는 오히려 저하되면서 가공경화능이 향상되어 연성이 원 소재에 비해 향상되는 결과를 이룬바 있다. 이는 제한된 수의 슬립계를 갖는 조밀육방정구조의 마그네슘 소재에서 일어나는 기저면 슬립계 집합 조직의 변화와 관련이 있다. 특히 상온에서는 기저면 슬립계만이 작동되는데, 슬립이 일어나기 힘든 형태의 기저면 슬립계 집합조직이 ECAP 공정 중 슬립이 용이하게 일어날 수 있는 방향을 회전하게 되면서 강도 저하 현상이 발생된다[5-6]. 이로 인해 기저면 뿐만 아니라 다른 슬립계 및 쌍정 등이 작동이 가능하게 되어 가공경화능이 향상되고 이에 따라 연성의 증가하는 현상이 발생되어기 때문에 마그네슘 소재의 미세조직 및 집합조직 제어가 매우 중요하게 인식되고 있다[7-10]. 특히 ECAP 공정은 소재의 단면 크기와 형상의 변화 없이 전단소성변형을 주어 금속계 초미세나노 소재를 얻을 수 있는 간단한 공정으로서 각광을 받고 있으며, 또한 다단의 반복 공정을 통해 소재에 부여할 수 있는 변형률을 제어할 수 있는 큰 장점을 가지고 있다. 특히 분말야금 공정에 ECAP 가공을 적용할 경우, 지속적인 전단 변형에 의한 전위 증식 및 효과적인 분말 치밀화를 이룰 수 있을 뿐만 아니라 마그네슘 분말의 미세조직 및 집합조직 조절 측면에서도 효과적인 것이다. 그러나 마그네슘 합금의 ECAP 공정 해석에 관하여는 많은 연구가 되어 있지 않아, 성공적인 소재 제조를 위해서는 분말 성형 소재 공정시 하중압력과 밀도와의 관계에

대한 더 많은 연구가 이루어져야 한다[11-14].

일반적으로 분말 야금법을 이용한 공정을 진행할 경우 분말 밀도의 효과적인 제어를 위하여 분말의 외곽부에 피복재를 사용하여 공정을 수행하게 된다. 피복재를 사용할 경우, 추후 피복재를 제거해야 하는 공정이 더해지고 시편의 유효크기가 작아지는 단점이 있는 반면 분말 성형체의 유지, 분말-금형간의 마찰을 감소 및 성형체의 형상을 쉽게 유지할 수 있는 장점이 있다. 이에 본 연구에서는 마그네슘 분말의 압출 공정 중의 치밀화 거동을 확인하기 위해 벌크화 성형에 영향을 미치는 피복재 효과에 대해 유한요소법을 이용하여 고찰하고자 한다[15].

2. 유한요소해석

분말 소재 성형은 기존의 가압성형-소결 공정을 거친 후 분말 단조, 분말 압출, 분말 압연 등의 공정을 사용하게 되는데, 이때 분말 예비 성형체의 실질적인 치밀화 거동을 통해 최종 형상을 얻게 된다. 일반적으로 변수가 많은 공정에 대한 연구는 여러 공정 변수 및 설계 변수 등을 이용하여 실험적 연구와 이론적 연구의 조합으로 공정 최적화를 도출하게 된다. 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 규정하기 위해서는 거시적 연속체 역학에 입각한 수학적 모델이 필요하며 본 연구에서는 임계상대밀도 모델을 사용하여 구현하였다[16-18].

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

여기서 J_1 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, R 은 상대밀도 그리고, R_T 탭핑 밀도에 해당한다[16-18]. 이와 같은 분말 거동 이론적 기초가 임계상대밀도 모델을 상용 유한요소 프로그램인 DEFORM2D ver. 9.1을 사용하여 계산 수행을 하였는데[19], 초기 요소의 개수는 3,000개로 하였고, 채널각과 모서리각은 가장 효과적인 변형이 가능하도록 각각 90°와 0°로

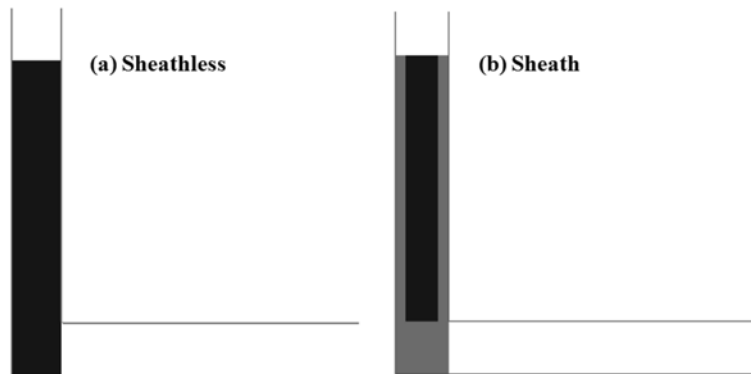


Fig. 1. Initial geometry condition of powder ECAP.

하였다. 특히 본 연구에서는 분말 치밀화와 소성변형에 미치는 피복재 효과를 고찰하기 위해서, 그림 1과 같이 시편의 크기 10×10×60 mm의 평면변형 상태(조건 1)와 두께가 2 mm인 순 알루미늄 피복재를 이용하여 분말 ECAP 공정을 하는 상태(조건 2)를 고려하여 계산을 수행하였다. 소재의 물성은 임계상대밀도 모델을 적용하여, 초기의 순 마그네슘 분말의 상대밀도는 두 조건 모두 0.5로 설정하였고, 실험을 통한 정수압에 따른 밀도 변화를 구한 후 마그네슘 분말의 물성을 얻을 수 있었다. 금형과 소재와의 마찰은 분말 소재의 표면 거칠기로 인해 0.2로 하였다. 등은 상태(상온 변형)를 유지하기 위해 속도는 1 mm/s로 일정하게 유지하였다[15].

3. 결과 및 고찰

그림 2는 마그네슘 분말의 냉간 정수압 공정을 통해 얻은 상대밀도 값으로서, 사용된 분말은 크기는 약 50 μm에 해당하며 순도는 약 99.8%에 해당하고 [20], 실험 결과와 이론적 모델을 이용한 값을 나타내었다. 본 그래프에서 임계상대밀도모델을 다음과 같이 식 (2)를 통해 마그네슘 분말의 물성을 고려할 수 있으며, 본 모델에서 기지의 물성은 Hollomon 식을 사용하여 재료강도지수는 133 MPa, 가공경화지수는 약 0.385의 값을 얻을 수 있었다[16-18, 20].

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

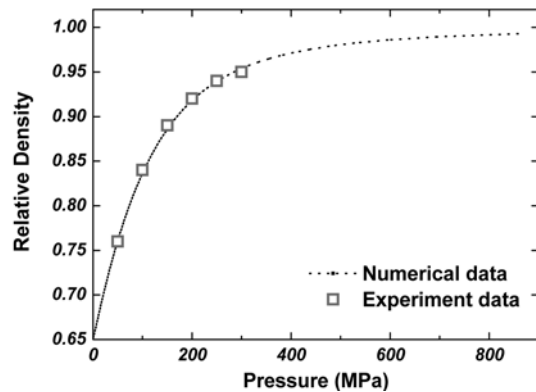


Fig. 2. Predicted and experimental densification during cold isostatic pressing.

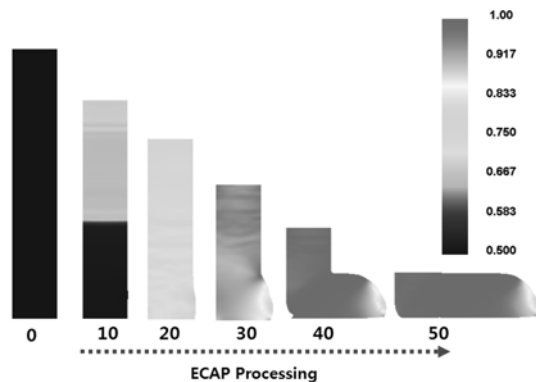
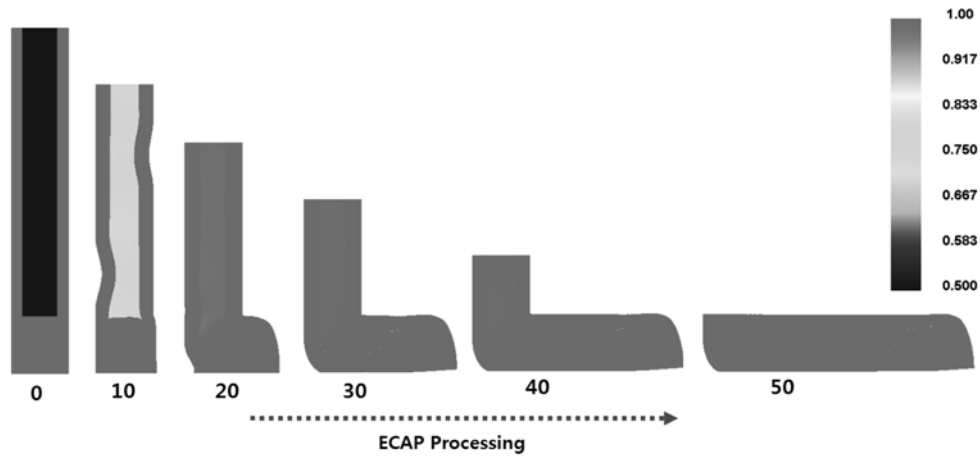
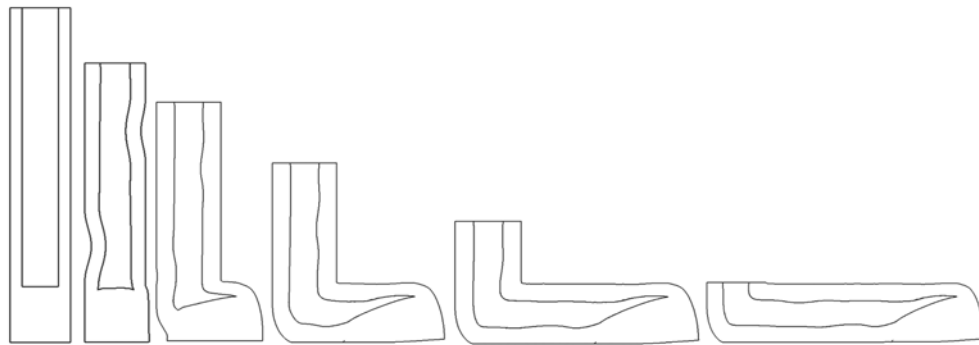


Fig. 3. Sheathless powder ECAP simulation results of relative density distribution.

여기서 얻은 물성과 분말 항복식을 상용 유한요소 코드인 DEFORM2D 사용자 정의 서브루틴 설계를 통해 마그네슘 분말의 ECAP 공정시 치밀화 거동에



(a) Relative density distribution with sheath



(b) Geometries with sheath

Fig. 4. Powder ECAP with sheath simulation results.

대하여 살펴보았다.

먼저 그림 3은 피복재를 사용하지 않은 분말 ECAP 공정(조건 1)으로서, 각 단계에서의 분말 상대 밀도의 변화 분포를 나타낸 것이다. 이는 기존의 연구에서 발표된 바와 같이 0~30초 구간에서는 분말 치밀화가 효과적으로 이루어지는 구간으로 설명할 수 있으며, 30~50초 구간에서는 분말 결합의 증가로 인한 밀도 증가로 사료될 수 있다[21]. 이는 기존의 분말 성형을 위한 ECAP 실험공정과 매우 일치하는 결과라 할 수 있다[13-15, 21]. 반면 그림 4(a)의 경우는 피복재를 사용하여 분말 ECAP 공정(조건 2)를 수행한 것으로서, 조건 1 보다 분말 치밀화와 분말 결합으로 나누어지는 구간이 다른 경향을 나타내고 있음을 알 수 있다. 즉 조건 2에서는 0~20초 구간에서 분말 치밀화로 인한 밀도 증가가 발생되며,

20~50초 구간은 심한 진단 변형에 의한 분말 결합에 의한 상대밀도 증가를 이루는 경향을 나타내고 있다. 이는 피복재 사용으로 인하여 분말 치밀화가 충분히 이루어지기 이전에 피복재 변형으로 인하여 시편의 앞 부위가 ECAP 금형의 주변형대를 먼저 통과하는 영향과 분말-금형 마찰보다 작은 피복재-금형 간의 마찰효과로 인한 것으로 사료된다. 또한 그림 4(b)에서 관찰할 수 있는 것과 같이 약 10초의 시편 형상이 내부 밀도가 낮은 영향으로 인해 굽음 결함(Buckle defect)가 발생하는 것을 확인할 수 있는데, 이는 내부의 낮은 상대밀도 때문에 발생하며 상대밀도가 높을수록 발생량이 적게 때문에 분말 고형화 속도외도 매우 밀접한 연관이 있음을 알 수 있다 [15]. 또한 상대 밀도가 낮을 경우 본 굽음 효과로 인해 피복재가 분말 성형체 안으로 파고 들어가는 현

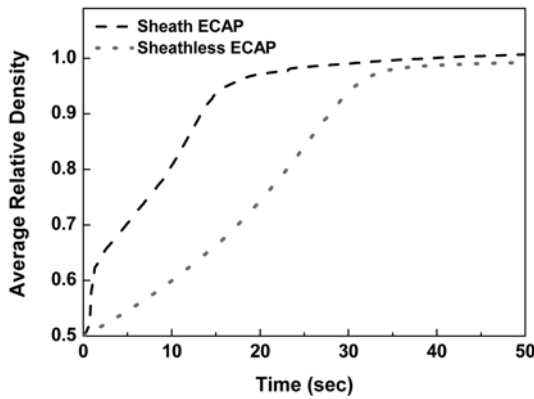


Fig. 5. Average relative density-time curves during powder ECAP processing.

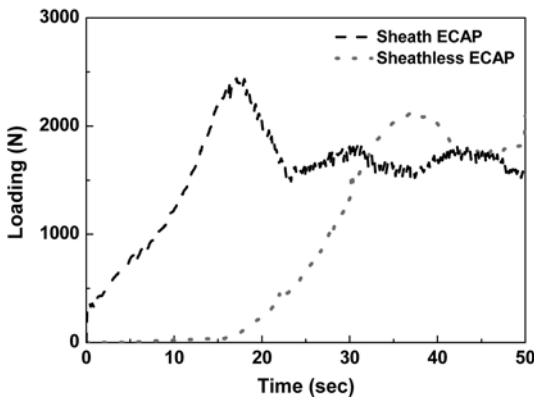


Fig. 6. Load-time curves of Mg powder during powder ECAP by the finite element method.

상이 발생되어 유효 크기가 작아지기 때문에 조건 2 성형 공정에서는 내부 상대밀도를 높이는 것이 효과적인 분말 성형을 위한 중요한 공정 변수라 할 수 있다 [15].

이와 같은 경향은 그림 5의 시간-상대밀도 변화 곡선을 통해서 더욱 명확히 확인할 수 있다. 즉, 조건 1과 조건 2를 비교하였을 경우, 조건 2의 경우가 높은 상대밀도에 먼저 도달하여 유지되는 것을 관찰할 수 있다. 이는 분말 성형체의 머리 부분에 피복재의 변형으로 인한 상대밀도 증가 효과를 얻을 수 있고, 또한 시편 머리 부분의 상대밀도 증가가 평균 상대밀도 증가에 영향을 주기 때문에 조건 1의 경우보다 단 시간에 높은 치밀화를 얻을 수 있다.

그림 6은 시간에 따른 하중곡선으로서, 조건 1의 경우는 앞에서 설명한 바와 같이 30초 구간을 기준

으로 치밀화 단계와 분말 결합 단계로 나누어지는 경향을 나타낼 수 있으며, 임계상대밀도 이하에서는 물리적 하중이 증가되는 현상이 발생되지 않는 경향을 확인할 수 있다. 또한 조건 2의 경우는 조건 1보다 앞선 20초 구간을 기준으로 높은 하중 경향을 나타내는데, 이는 피복재로 사용된 순 알루미늄의 변형에 의한 것으로 분말소재와 결합된 벌크 소재 변형의 형태로 하중 곡선에 나타나고 있음을 알 수 있다. 또한 조건 2의 경우 임계상대밀도 이하의 구간임에 불구하고 피복재의 변형으로 인해 초기부터 하중 증가 형태를 나타내고 있음을 알 수 있다. 이로 인해 조건 2의 시간-하중 곡선은 조건 1에 비해 전체적으로 높은 하중 경향을 나타내고 있음을 알 수 있다[22].

조건 1 공정의 경우 소재의 가용한 유효크기가 크며, 추가 피복재 제거 가공이 필요하지 않을 뿐만 아니라 다소 낮은 하중에서 변형이 가능함을 확인할 수 있었다. 조건 2 공정은 소재의 효과적인 치밀화를 얻을 수 있는 장점이 있으나, 피복재 변형이 포함됨으로 인한 하중 증가와 추후 피복재를 제거해야 하는 공정상의 문제점을 가지고 있다. 추후 피복재를 사용하지 않은 동시에 효과적인 역응력 제어를 통한 ECAP공정 시 마그네슘 분말 치밀화를 연구하고자 한다.

4. 결 론

최근 에너지 절감과 환경적 고효율을 위한 송수기 부품 소재로 각광을 받는 마그네슘 분말에 대한 고형화 공정으로 대표적인 Top-down 방식의 ECAP 공정을 통해 분말 성형에 대해서 유한요소법을 통해 고찰하였다. 특히 본 연구에서는 피복재 사용 여부에 따른 분말 상대 밀도 증가 및 하중 경향이 매우 다른 양상을 나타내고 있음을 확인하였다. 피복재를 사용하지 않은 ECAP 공정은 시편의 유효 크기가 비교적 큰 시편을 얻을 수 있으나 상대밀도증가율이 비교적 낮은 양상을 띠고 있음을 알 수 있었다. 분말이 금형사이에 끼이는 역응력 상태가 없다는 가정 하에서 매우 낮은 하중에서도 가공이 가능할 것으로 예상된다. 반면 피복재를 사용한 ECAP 공정에서는 비교적 빠른 상대밀도 증가율을 얻을 수 있으나 하중 증가 경향이 피복재인 순 알루미늄으로 인하여 비교

적 높아지는 양상을 나타나고 있음을 알 수 있었는데, 이는 피복재의 변형이 추가됨으로 하중 증가가 높은 경향이 발생된 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 포항공과대학교 신규부임교수정착연구비의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

- [1] S. Y. Chang, S. W. Lee, K. M. Kang, S. Kamado and Y. Kojima: Mater. Trans., **45** (2004) 488.
- [2] S. R. Agnew, J. A. Horton, T. M. Lillo and D. W. Brown: Scripta Mater., **50** (2004) 377.
- [3] 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.
- [4] J. Cai, G. C. Ma, Z. Liu, H. F. Zhang and Z. Q. Hu: J. Alloy. Comp., **422** (2006) 92.
- [5] J. K. Kim, H. K. Kim, J. W. Park and W. J. Kim: Scripta Mater., **53** (2005) 120.
- [6] S. C. Yoon, C. H. Bok, M. H. Seo, T. S. Kim and H. S. Kim: Mater. Trans., **49** (2008) 963.
- [7] A. Yamashita, Z. Horita and T. G. Langdon: Mater. Sci. Eng. A, **300** (2001) 142.
- [8] S. R. Agnew, J. A. Horton, T. M. Lillo and D. W. Brown: Scripta Mater., **50** (2004) 377.
- [9] 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.
- [10] S. R. Agnew, P. Mehrotra, T. M. Lillo, G. M. Stoica and P. K. Liaw: Acta Mater., **53** (2005) 3135.
- [11] H. S. Kim, M. H. Seo and S. I. Hong: Mater. Sci. Eng. A, **291** (2000) 86.
- [12] Y. C. Chen, Y. Y. Huang, C. P. Chang and P. W. Kao: Acta Mater., **51** (2003) 2005.
- [13] 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).
- [14] S. C. Yoon and H. S. Kim: Mater. Sci. Forum, **503-504** (2006) 221.
- [15] S. C. Yoon, P. Quang, B. S. Chun, H. R. Lee and H. S. Kim: J. Kor. Powder Metall. Inst., **13** (2006) 415 (Korean).
- [16] H. S. Kim and D. N. Lee: J. Kor. Inst. Met. Metal., **30** (1992) 37 (Korean).
- [17] H. S. Kim: J. Kor. Inst. Met. Metal., **38** (2000) 817 (Korean).
- [18] H. S. Kim, M. H. Seo, W. S. Ryu, S. C. Yoon and C. K. Rhee: J. Metastable Nanocryst. Mater., **15-16** (2003) 235.
- [19] SFTC: <http://www.deform.com>
- [20] S. C. Yoon, E. J. Kwak, T. S. Kim, B. S. Chun and H. S. Kim: Mater. Trans., **49** (2008) 967.
- [21] 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).
- [22] S. C. Yoon, M. H. Seo and H. S. Kim: Scripta Mater., **55** (2006) 159.