

## 분말 ECAP 공정에 미치는 금형 모서리각 효과에 대한 유한요소해석

윤승채 · 복천희 · 팜 광 · 김형섭\*  
충남대학교 나노공학부

### Finite Element Analysis on the Effect of Die Corner Angle in Equal Channel Angular Pressing Process of Powders

Seung Chae Yoon, Cheon Hee Bok, Pham Quang and Hyoung Seop Kim\*

Department of Nano Materials Engineering, Chungnam National University, Daejeon, 305-764, Korea  
(Received January 10, 2007; Accepted February 12, 2007)

**Abstract** Manufacturing bulk nanostructured materials with least grain growth from initial powders is challenging because of the bottle neck of bottom-up methods using the conventional powder metallurgy of compaction and sintering. In this study, bottom-up type powder metallurgy processing and top-down type SPD (Severe Plastic Deformation) approaches were combined in order to achieve both real density and grain refinement of metallic powders. ECAP (Equal Channel Angular Pressing), one of the most promising processes in SPD, was used for the powder consolidation method. For understanding the ECAP process, investigating the powder density as well as internal stress, strain distribution is crucial. We investigated the consolidation and plastic deformation of the metallic powders during ECAP using the finite element simulations. Almost independent behavior of powder densification in the entry channel and shear deformation in the main deformation zone was found by the finite element method. Effects of processing parameters on densification and density distributions were investigated.

**Keywords :** Powder consolidation, Bulk materials, Equal channel angular pressing, Grain refinement, Severe plastic deformation, Process simulation, Finite element method, Densification

#### 1. 서 론

결정립 크기가 100 nm 이하에 해당하는 다결정 재료로 정의되는 나노구조재료가 최근 많은 관심을 받고 있다.<sup>1-6)</sup> 나노구조재료의 제조공정으로는 크게 Top-down 방식과 Bottom-up 방식으로 나눌 수 있으며,<sup>2-8)</sup> 대표적인 나노결정재료를 만드는 공정으로 Bottom-up 방식인 분말야금법이 있다. 제조된 나노미터 크기의 분말은 이후 치밀화 공정을 통하여 벌크 형태로 제조되는데, 나노 분말을 통해 벌크 나노 결정립 소재를 제조하는 공정의 조건은 결정립 크기의 성장을 최소화하는 동시에 실제 산업에 적용 가능한 유효 크기로 제조하는 것이 중요하다. 따라서 분말의 고형화 공정에 대한 연구가 절대적으로 필요하며, 특

히 나노 분말의 벌크화에 대해서는 나노 결정립 크기를 유지하는 동시에 진밀도를 얻을 수 있는 공정 연구가 수행될 필요가 있다.<sup>8-10)</sup>

이에 본 연구에서는 Top-down 방식의 대표적인 공정인 강소성공정 중 하나인 ECAP(Equal Channel Angular Pressing) 공정을 이용하여 분말 고형화 공정을 연구하였다.<sup>8-10)</sup> ECAP 공정은 처음 Segal에 의해 발표된 이후 많은 그룹들에 의해 기술적 발전을 이루었으며, 현재는 공학적으로 많은 응용이 되고 있다.<sup>2-4,7-15)</sup> ECAP 공정은 단면적의 변화 없이 재료에 심한 소성 변형을 가함으로 인해 재료의 결정립 크기를 초미세/나노 결정립으로 만들어내는 대표적인 공정이며, 1회 가공으로 약 1에 해당하는 변형률을 얻을 수 있고 반복 가공을 통하여 변형률 제어가 가

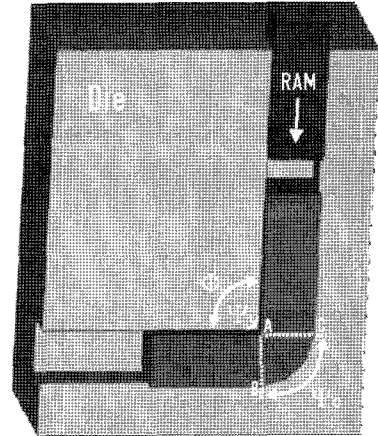
\*Corresponding Author : [Tel : +82-42-821-6596; E-mail : hskim@cnu.ac.kr]

능하다. 본 분말 ECAP 공정은 일반적으로 사용되는 분말고형화 공정과 달리 낮은 가공 온도에서 높은 압력 및 전위의 미끄러짐에 의한 소성 변형을 이용하여 기공을 채우는 공정으로 분말 결합이 매우 우수한 특성을 얻을 수 있으며, 이로 인해 결정립 성장을 최대한 억제하는 동시에 진밀도를 얻을 수 있다.<sup>8-10)</sup>

대부분의 경우 ECAP 공정에서 중요한 가공 변수들은 실험에 의존하고 있다. 특히 재료 거동에 있어서 금형 형상에 따라 변형률 및 변형 양상이 크게 다르게 발생되는데, 금형 모서리각의 변화에 따라 유효변형률이 최대 1.15에서 최소 0.907까지 다르게 나타나게 된다. 또한 소재의 균일 변형 측면에 있어서도 모서리각이 증가되어짐에 따라 불균일 변형 분포가 나타남과 동시에, 전체적인 평균 유효변형률 역시 감소되는 요인으로 작용하게 된다.<sup>11)</sup> 즉, 금형 모서리각이 증가하게 되면, 유효변형률이 낮아지고 국부적 변형률 증가로 인해 불균일 변형이 발생되므로, ECAP 공정에서 금형 모서리각은 소재 전체적인 거동에 영향을 미치는 매우 중요한 변수임이 발표된 바가 있다.<sup>11,12)</sup> 그러나 분말 ECAP 공정의 경우 이러한 금형 형상에 따른 분말 거동의 균일성, 치밀화 및 제어변수에 대한 연구는 매우 미흡한 실정이다. 또한 분말 소재에 있어도 물리적/기계적 특성이 가공 중의 변형 경향에 의존되기 때문에, 분말 고형화를 위한 ECAP 공정 적용을 위해서는 변형 양상에 큰 의존도를 갖는 금형 모서리각에 대한 연구가 필수적으로 이루어져야 한다. 따라서 본 연구에서는 유한요소법을 이용하여 분말 고형화 및 치밀화를 이루는 ECAP 공정에서 금형 모서리각의 형상에 따른 거동에 대해 언급하고자 한다.

## 2. 분말 고형화 공정을 위한 유한요소해석 방법

그림 1은 ECAP 가공 공정의 개략도를 보여주고 있다.<sup>8-9)</sup> ECAP 공정에 있어서 재료의 거동에 영향을 주는 변수들로 마찰, 변형속도, 가공경화 등을 거론할 수 있으며, 가장 큰 변수는 금형 형상으로서 모서리각  $\psi$ 와 통로각  $\phi$ 에 따라 재료의 변형률이 다르게 나타낸다.<sup>11-15)</sup> Segal<sup>16)</sup>과 Iwashashi<sup>17)</sup> 등은 ECAP 가공 공정에 있어서 재료의 변형 거동이 단순전단변형이라고 가정하고 금형의 기하학적인 형상으로부터 전단변형률을 식 (1)과 같이 제안하였다.



- φ: Channel angle
- ψ<sub>i</sub>: Inner corner angle
- ψ<sub>o</sub>: Outer corner angle
- ΔABC: Main Deformation Zone(MDZ)

Fig. 1. Schematic illustration of ECAP die.

$$\epsilon = \frac{1}{\sqrt{3}} \left[ 2 \cot\left(\frac{\psi}{2} + \frac{\phi}{2}\right) + \psi \operatorname{cosec}\left(\frac{\psi}{2} + \frac{\phi}{2}\right) \right] \quad (\text{식 1})$$

식 1을 기초로 하여 재료에 가장 효과적인 변형은  $\phi$ 는  $90^\circ$ ,  $\psi$ 는  $0^\circ$ 가 될 때임을 알 수 있다. 벌크 소재의 경우 가공경화 효과로 인해 금형과 시편 사이의 모서리틈이 발생되고, 그 모서리틈이 채워질수록 매우 높은 변형률 및 균일 변형이 가능함이 알려져 있다.<sup>11)</sup> 이에 본 연구에서 분말 소재의 ECAP 공정에서 금형 모서리각의 영향을 해석하기 위해 상용 Code인 DEFORM2D를 사용하여 변수 해석에 접근하였다. 본 해석을 위해 사용된 분말 항복식 이론은 Shima-Oyane의 항복식 이론을 사용하였다.<sup>18)</sup> 식 2는 많은 연구자들에 의해 압력에 의존하는 일반적인 재료의 소성 항복항수를 나타낸 것이다.

$$A \dot{J}_2 + B \dot{J}_1^2 = \eta \sigma_s^2 = \sigma_R^2 \quad (\text{식 2})$$

여기서  $J_1$ 는 1차 응력 불변량,  $J_2$ 는 2차 편차응력 불변량이고,  $\sigma_R$ 는 다공질 금속의 겉보기 항복응력,  $\sigma_s$ 는 비다공질 기준의 금속의 항복응력이다. 또한  $\eta$ 는 기하학적인 경화항으로 상대밀도 R의 함수로 표현된다. 매개 변수 A와 B, 또한 상대밀도 R의 함수인데 Shima와 Oyane은 철과 구리 분말의 실험을 바탕으로 매개 변수 A와 B를 식 3과 같이 표현하였다.

$$A=3, B=\frac{2.49^2}{9}(1-R)^{1.028} \quad (\text{식 } 3)$$

이를 기초로 하여 유한요소해석으로 변형거동을 계산하기 위한 모재의 물성으로는 50 μm에 등축 결정립을 가지는 어닐링된 Cu 재료를 사용하였다. 일반적인 인장 실험으로는 본 계산에서 발생되어지는 유효변형률 1 이상의 대변형률에 대한 결과를 얻기 어려우므로, 전위셀의 진화 모델을 이용한 이론 응력-변형률 곡선을 사용하였다.<sup>19)</sup> 초기의 시편 형상은 10×10×60 mm<sup>3</sup>로 설계하였으며, 두께 방향 변형률이

0인 평면변형 상태를 가정하였고, 금형과 소재와의 마찰은 0.2로 하였는데, 이는 소재의 표면이 매우 거칠기 때문이다. 모서리각 ψ은 0~90° 까지 다양한 변형을 주었으며, 통로각 φ=90°로 고정하였다. 계산을 위해 사용된 요소는 총 1000개이다. 모서리각의 곡률은 각각 0, 1, 2, 3, 5 그리고 10 mm으로 설정하였는데 이는 0, 9, 18, 27, 45 그리고 90°의 모서리각에 해당한다. 소재의 초기 밀도는 냉간 정수압압축 공정을 통해 얻을 수 있는 0.5의 상대밀도를 사용하였다.<sup>20)</sup>

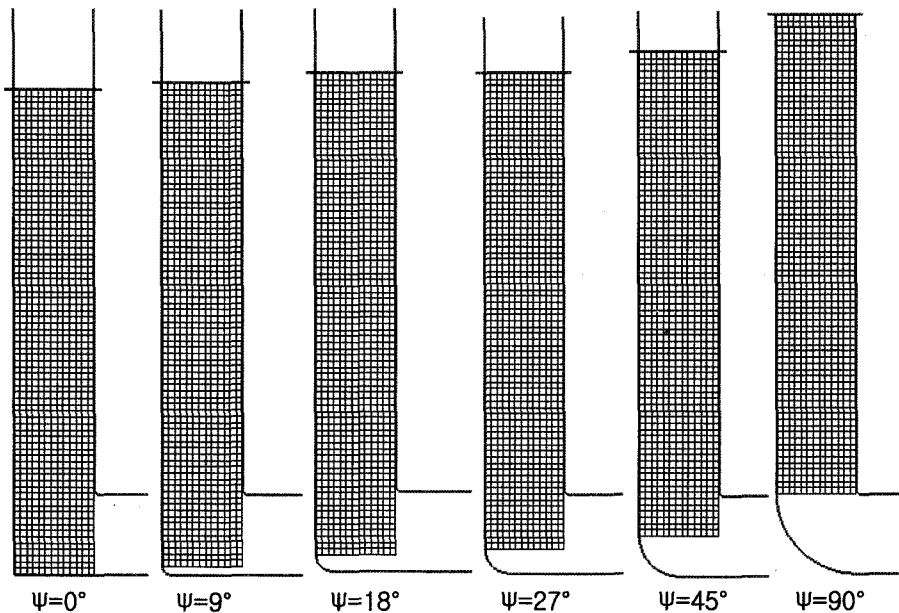


Fig. 2. The finite element method meshes with each different corner angles.

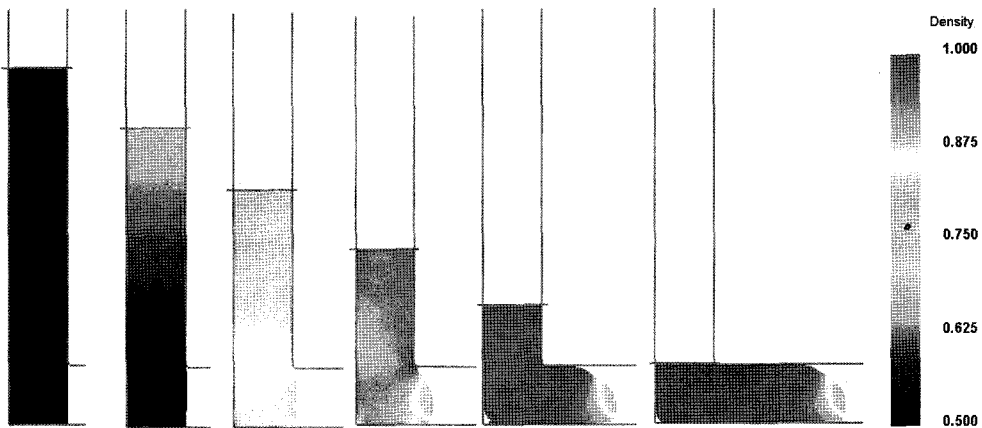


Fig. 3. Evolution of relative density during equal channel angular pressing at the corner angle ψ=0°.

### 3. 결과 및 고찰

그림 3은 ECAP 가공 공정 중에 모서리각  $\Psi=0^\circ$ 인 경우에 상대밀도의 변화를 나타낸 것으로써, 가공공정이 진행됨에 따라 부피가 감소하는 동시에 밀도가 증가하는데, 가공이 진행됨에 따라 부피의 변화가 현저함을 알 수 있다. 벌크 재료의 경우 ECAP 금형의 모서리각이  $0^\circ$  일 때 주변형태에서 재료가 금형을 따라 이동할 때 단순전단변형에 의해 강소성변형을 받게 된다. 그러나 분말재료의 경우 압축응력으로 인한 부피변화가 발생되어져, ECAP 분말 가공 공정에서는 벌크재료의 경우와 같이 단순한 변형의 공정이 아님을 알 수 있다. 즉, 분말의 ECAP 가공 공정은 치밀화 공정과 전단변형 공정의 2 단계로 이루어진다. 첫 번째 공정인 치밀화 공정은 입구채널에 압축응력이 작용함으로 분말의 치밀화가 가속적으로 이루어지게 된다. 두 번째 공정은 전단변형이 발생하는 기구인데, 전단변형은 분말 자체나 혹은 분말 결합을 방해하는 분말 표면의 산화막을 깨뜨림으로써 분말 결합을 증가시키는 효과가 있다. 입구채널에서 시편은 거의 진밀도에 가깝게 밀도가 상승하지만, 이에 반해 시편 머리 부분은 약 75% 이하의 낮은 상대밀도를 유지하게 된다. 벌크 소재의 경우에는 재료 가공 시 발생하는 가공경화로 인하여 ECAP 금형 형상의 모서리각 보다 실제 모서리틀이 더 크게 나타나서, 시편 내부에서의 국부적인 불균일 변형이 발생하고 전체적인 유효변형률이 감소한다. 그러나 분말의 경우 소재의 거친 표면으로 인한 마찰 증가와 초기 상대밀도의 차이로 인해 비교적 금형 형상을 따라 변형이 진행되는 것을 알 수 있다.

그림 4는 모서리각의 변화에 따른 상대밀도 분포를 나타낸 것이다. 모서리각이 증가되어짐에 따라 각 상대밀도 분포가 점차적으로 불균일을 이루며, 또한 시편 머리 부분의 부피가 충분히 충전되지 못하여 시편의 길이가 상대적으로 길어지는 것을 나타내고 있다. 특히,  $\Psi=90^\circ$ 인 경우에는 치밀화되는 영역이 상대적으로 매우 적을 뿐만 아니라 시편 형상이 구부러지는 현상이 전체적으로 나타나고 있어 재료의 형상이 좋지 않은 상태이다. 이는 벌크재료와 비교하여서도 비슷한 결과인데, 즉 벌크 소재의 ECAP 공정에서 금형의 모서리각이 증가될수록 재료의 불균일 변형을 나타내지만, 가공 하중은 낮게 나타난다.<sup>11)</sup> 또

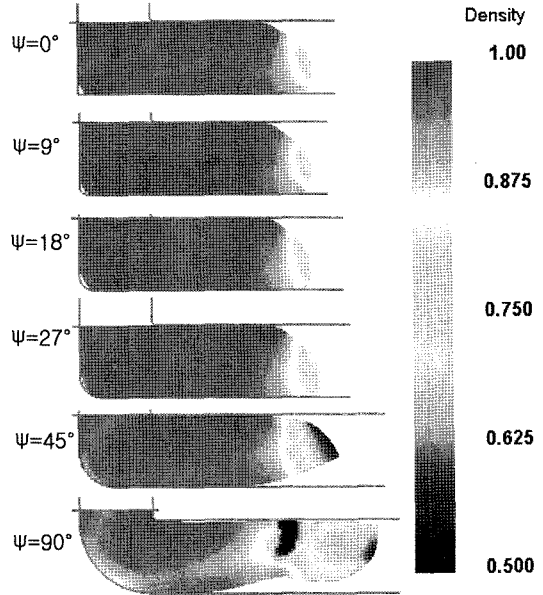


Fig. 4. The schematic of relative density on equal channel angular pressing of different corner angles.

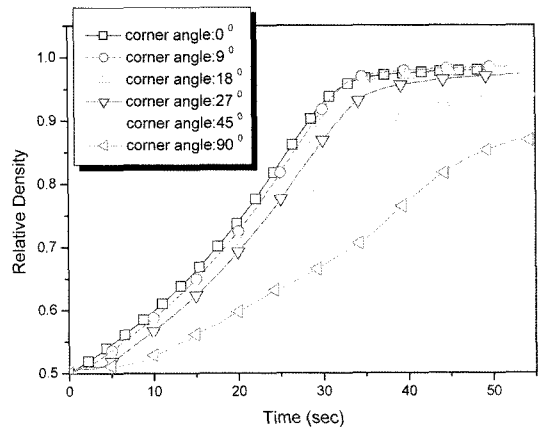


Fig. 5. The relative density vs. time curve with each different corner angles.

한 그림 5는 가공에 따른 평균상대밀도 변화를 나타낸 것으로, 모서리각이 작을수록 빨리 진밀도에 도달하는 것을 알 수 있으며, 모서리각이  $45^\circ$ (모서리 곡률이 5 mm) 이상인 경우에는 상대밀도가 약 90%의 낮은 값을 나타내었다. 따라서 ECAP 가공 공정 중 모서리각이 너무 클 경우에는 분말 치밀화와 균일 변형에 방해됨을 알 수 있다. 또한 상대밀도가 97% 이상 도달하는 시간이 모서리각이  $0^\circ, 9^\circ, 18^\circ$  일 때는 약 34~35 초이나,  $27^\circ$ 의 경우에는 약 45초에 해

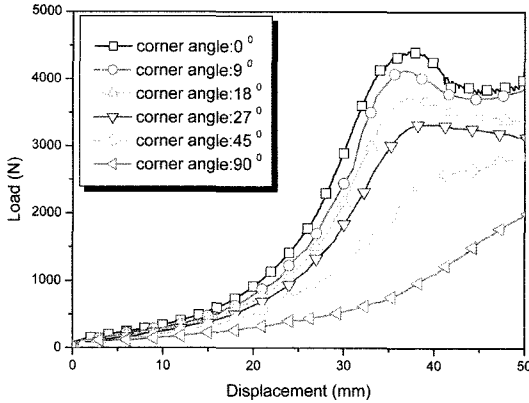


Fig. 6. The processing load vs. displacement curve with each different corner angles.

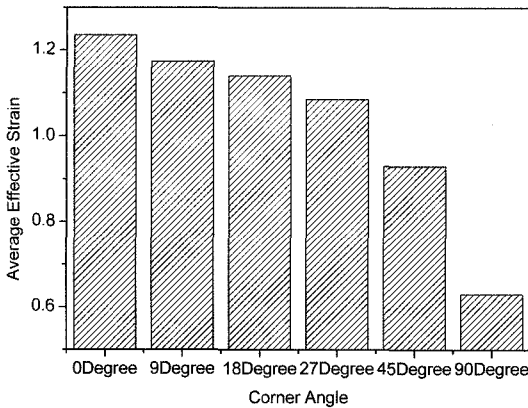


Fig. 7. Average effective strain at each different corner angles.

당하며, 45°와 90°는 90% 내외의 상대밀도를 나타내는데, 이처럼 진밀도에 이르는 시간도 점차 길어지는 것을 알 수 있다.

그림 6은 가공 공정에 나타나는 가공 하중을 나타낸 것으로서, 기존에 알려진 벌크 소재의 가공 단계에 따른 하중 변화와 유사한 것을 알 수 있으며,<sup>21)</sup> 초기에 분말 치밀화에 필요한 초기 하중 증가 구간이 상당히 나타나고, 모서리각이 작을수록 최고 가공 하중이 점차적으로 높아지고 있다. 모서리각이 45° 이상의 경우, 시편의 머리 부분이 쉽게 주변형대를 통과함으로 분말 치밀화를 위한 충분한 하중이 작용하지 않아 고형화에 매우 유리하지 않음을 알 수 있다. 이에 본 연구에서는 분말 치밀화를 충분히 이룰 수 있는 동시에 가공 하중을 가능한 낮출 수 있는 모서리각 18°가 분말 고형화를 위한 분말 ECAP 공

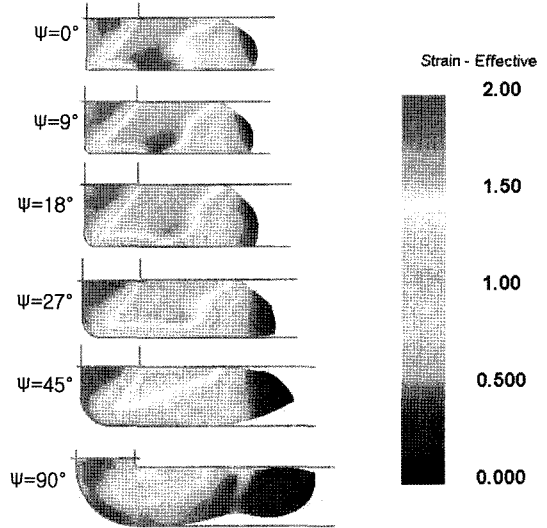


Fig. 8. The schematic of effective strain on equal channel angular pressing of different corner angles.

정의 최적화된 각으로 사료된다.

그림 7은 여러 모서리각을 갖는 분말 ECAP 공정 시 나타나는 평균 유효변형률로써 모서리각이 증가됨에 따라 벌크재료에서와 같이 변형률 평균값이 떨어지는 것을 관찰할 수 있으며,<sup>11)</sup> 그림 8에서 모서리각이 증가되어짐에 따라 분말 ECAP 공정에서도 불균일 변형이 이루어짐을 알 수 있다. 따라서 분말 고형화를 위한 ECAP 공정 적용에 있어서 급형의 모서리각 형상이 균일변형 및 유효변형율을 결정하는 중요한 변수로 작용됨을 알 수 있다.

#### 4. 결 론

압축공정으로 분말치밀화를 이루며, 전단변형으로 분말 결합을 이룰 수 있는 분말 ECAP 가공 공정에서, 급형 모서리각의 변화에 따른 변형거동에 대하여 유한요소해석을 실시하였다. 해석을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 가공 단계는 두 단계로 설명할 수 있는데, 첫 번째 단계로는 분말이 치밀화가 이루어지는 압축단계이며, 이때 상대밀도가 크게 증가하게 된다. 두 번째 단계는 재료가 ECAP 공정의 주변형대를 통과함으로 전단변형을 받게 되는 단계로써, 분말이 전단변형을 받게 되어 분말 결합을 이루는 단계이다.

2) 가공 변수 중 중요한 금형의 모서리각에 대해 변화를 주어 계산을 수행하였는데, 모서리각이 증가함에 따라 상대밀도가 감소하는데, 이는 모서리각이 증가할수록 시편의 머리가 용이하게 주변형대를 빠져나가므로, 분말이 고형화되는데 충분한 압축력을 받지 못하기 때문이다. 또한 모서리각이 90°인 경우는 재료 형상의 구부러짐이 나타났으므로, 모서리각이 증가함에 따라 재료의 균일 변형에 좋지 못한 영향을 미침을 알 수 있다.

3) 금형모서리각이 증가함에 따라, 시편 변형이 용이하여 가공 하중이 점차 낮아지는 것을 관찰할 수 있었으며, 계산 수행 결과 상대밀도를 높이는 동시에 가공 하중을 낮추는 18°의 모서리각을 가지는 금형이 최적화된 각으로 사료된다.

4) 모서리각이 증가되어짐에 따라 불균일 변형 증가와 낮은 평균 유효변형률이 관찰되므로, 고형화 및 균일 변형에 있어서 금형 모서리 형상이 매우 중요한 변수임을 알 수 있다.

## 후 기

이 논문은 2006년도 충남대학교 학술연구비의 지원에 의하여 연구되었으며, 또한 BK21 사업단의 지원에 감사드립니다.

## 참고문헌

1. R.W. Siegel and B. Kear: Applications: Consolidated Nanostructures, Nanotechnology Research Directions, IWGN, (1999) 97.
2. R.Z. Valiev, R.K. Islamgaliev and I.V. Alexandrov: Prog. Mater. Sci., **45** (2000) 103.
3. R. Z. Valiev and I. V. Alexandrov: Ann. Chim. Sci. Mat., **27** (2002) 3.
4. R. Z. Valiev: Mater. Sci. Eng. A, **234** (1997) 59.
5. H. S. Kim and Y. Estrin: Acta Mater., **53** (2005) 765.
6. H. S. Kim: Mater. Sci. Forum, **534-543** (2007) 2816.
7. D. H. Shin, J. J. Park, S. Y. Chang, Y. K. Lee and K. T. Park: ISIC Int., **42** (2002) 1490.
8. 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).
9. S. C. Yoon and H. S. Kim: Mater. Sci. Forum, **503-504** (2006) 221.
10. J. Robertson, J. T. Im, I. Karaman, K. T. Hartwig and I. E. Anderson: J. Non-Cryst. Solids, **317** (2003) 144.
11. H. S. Kim, M. H. Seo and S. I. Hong: Mater. Sci. Eng. A, **291** (2001) 86.
12. H. S. Kim, S. I. Hong and M. H. Seo: J. Mater. Res., **16** (2001) 856.
13. H. S. Kim: Mater. Trans., **42** (2002) 536.
14. H. S. Kim: Mater. Sci. Eng. A, **315** (2001) 122.
15. B. S. Moon, H. S. Kim and S. I. Hong: Scripta Mater., **46** (2002) 131.
16. V. M. Segal: Mater. Sci. Eng., A **197** (1995) 157
17. Y. Iwahashi, J. Wang, Z. Horita M. Nemoto and T. G. Langdon: Scripta Mater., **35** (1996) 143.
18. S. Shima and M. Oyane: Int. J. Mech. Sci., **18** (1976) 285.
19. Y. Estrin, L. S. Toth, A. Molinari and Y. Brechet: Acta Mater., **46** (1998) 5509.
20. S. C. Yoon, H. S. Kim and C. K. Lee: J. Kor. Powder Metall. Inst., **11** (2004) 241 (Korean).
21. S. C. Yoon, M. H. Seo and H. S. Kim: Scripta Mater., **55** (2006) 159.