

유한요소해석을 이용한 고압비틀림 공정 중의 구리 분말의 치밀화 및 고형화 거동 분석

이동준 · 윤은유*

한국기계연구원 부설 재료연구소 공정실용화센터 소재성형팀

Analyses of Densification and Consolidation of Copper Powders during High-Pressure Torsion Process Using Finite Element Method

Dong Jun Lee and Eun Yoo Yoon*

Materials Deformation Team, Process Commercialization Center, Korea Institute of Materials Science(KIMS)

(Received January 14, 2015; Revised February 1, 2015; Accepted February 10, 2015)

Abstract In this study, the behavior of densification of copper powders during high-pressure torsion (HPT) at room temperature is investigated using the finite element method. The simulation results show that the center of the workpiece is the first to reach the true density of copper during the compressive stage because the pressure is higher at the center than the periphery. Subsequently, whole workpiece reaches true density after compression due to the high pressure. In addition, the effective strain is increased along the radius during torsional stage. After one rotation, the periphery shows that the effective strain is increased up to 25, which is extensive deformation. These high pressure and severe strain do not only play a key role in consolidation of copper powders but also make the matrix harder by grain refinement.

Keywords: High-pressure torsion (HPT), Severe plastic deformation (SPD), Densification behavior, Finite element method

1. 서 론

강소성 공정은 시편의 크기나 모양에 큰 변화를 주지 않은 상태로 반복적으로 또는 한 번에 극심한 변형을 가하여 결정립 크기를 초미세립 또는 나노결정립으로 만드는 방법이다[1-4]. 이렇게 제조된 초미세/나노 결정립의 금속재료는 높은 기계적 특성을 나타내는 것뿐만 아니라, 일반 재료에서는 볼 수 없는 특이한 현상이 나타나는 것으로 보고되고 있어서, 전 세계적으로 많은 연구가 진행되고 있다[5]. 강소성 공정의 종류에는 등통로각압축[3], 고압비틀림[4, 6], 반복접침접합압연[7] 등이 잘 알려져 있다.

강소성 공정을 이용한 분말 치밀화 (densification)는 일반적으로 상온이나 $0.5 T_m$ 보다 낮은 온도에서 이루어지기 때문에, 분자간의 확산에 의한 접합이 아닌, 고압과 소

성변형에 의하여 분말간의 결합을 이끌어 내고, 분말의 치밀화와 고형화(consolidation) 뿐만 아니라 기지의 가공경화가 발생하여, 높은 강도를 가지는 벌크 시편을 제조할 수 있는 장점이 있다[8].

특히 고압비틀림 공정은 디스크 형태의 시편에 높은 압력을 가한 뒤, 압력을 유지한 상태에서 시편에 단순 전단 변형을 가하는 공정으로 높은 정수압의 상태에서 변형이 가해지는 공정이므로, 취성의 재료에 대한 변형뿐만 아니라, 분말 재료의 치밀화나 고형화에 대해서도 연구가 진행되고 있다. 고압비틀림을 통한 분말의 치밀화 연구는 철, 구리, 마그네슘 합금과 같은 분말의 치밀화 및 고형화에 대한 연구뿐만 아니라[9-12], 탄소나노튜브[13]나 다이아몬드[14] 등과의 혼합을 통하여 금속복합재의 제조에 대해서도 연구가 되고 있다. 특히, 다른 강소성 공정에 비해 높은 정수압이 공정 중에 가해지므로, 높은 압력으로 인한

*Corresponding Author: Eun Yoo Yoon, TEL: +82-55-280-3437, FAX: +82-55-280-3499, E-mail: eyyoon@kims.re.kr

분말의 치밀화는 더욱 잘 일어나게 된다. 따라서, 이렇게 제조된 벌크체는 대부분 진밀도에 가깝게 치밀화가 일어나고, 우수한 기계적 특징을 보인다.

본 연구에서는 고압비틀림 공정 중의 분말의 치밀화 거동을 유한요소법을 이용하여 해석하였다. 특히, 시편의 밀도의 변화뿐만 아니라, 가해지는 변형량과 정수압의 크기에 대한 고찰을 통하여 분말의 치밀화 및 고형화 거동에 대해서 분석하고자 한다.

2. 실험 방법

분말 성형에 대한 유한요소해석을 수행하기 위하여, 다공질 재료의 항복식인 Shima-Oyane 항복식[15]을 고려한 유한요소 code인 DEFORM-3D 를 이용하여 고압비틀림 공정을 해석하였다. 본 해석에 사용한 구리의 유동응력은 600°C에서 두 시간 어닐링하여 평균 결정립 크기가 약 10 μm인 상용 순 구리의 인장 시험을 통해 얻은 응력-변형률 곡선(항복응력은 100 MPa, 균일 연신을 40%)을 고려하였다[16, 17]. 고압비틀림 공정을 통한 분말의 치밀화 방법

은 먼저 분말의 일축 압축을 통하여 상대밀도가 약 70%인 디스크 형태의 선다짐 성형체(pre-compact)를 제조한 뒤, 그림 1 처럼 이를 홈이 파여진 두 금형 사이에 넣고 2.5 GPa의 압력을 가한 후 하부 금형을 수 회, 회전시켜 시편에 전단변형을 가한다[11]. 따라서 유한요소해석에 사용한 초기시편은 지름이 19 mm, 높이가 3 mm, 초기 상대밀도가 0.7인 시편을 정의하였다. 고압비틀림 공정에서 상, 하부 금형에 있는 홈의 크기는 지름이 20 mm, 깊이가 0.25 mm이고, 시편을 다이 중심에 위치시킨 후, 상부 금형을 이용하여 약 2.5 GPa(800 kN)의 압력을 가하는 압축단계 후에, 이 압력을 유지시키면서 하부 다이를 1 회전시켜 시편에 전단변형을 가하였다. 시편과 다이 사이의 마찰력은 sticking 조건을 사용하였다.

3. 결 과

고압비틀림 공정 중 상대밀도의 변화는 그림 2에서 볼 수 있듯이, 압축단계에서는 시편의 중심부분부터 치밀화가 발생하고, 압축 단계가 끝나면(800 kN) 시편의 대부분이 진밀도에 가까운 치밀화가 발생하는 것을 알 수 있다. 그림 3(a)를 보면 압축 단계에서 상대밀도의 변화는 시편의 중심부분($r=0$ mm)이 시편의 중간부분($r=5$ mm)보다 더 먼저 치밀화가 발생하여, 인가하중이 약 200 kN에서 진밀도에 도달하게 된다. 이렇게 압축 단계에서 진밀도에 이른 후 회전단계에서도 계속하여 진밀도를 유지하는 것을 그림 3(b)를 보면 확인할 수 있다.

공정 중의 유효변형률(effective or equivalent strain, ϵ_{eq})의 변화는 그림 4에서 확인할 수 있듯이, 시편 중심에서부터 가장자리로 갈수록 점점 증가하는데, 이는 단순회전 변형식인 식 (1)에서 계산한 값과 유사한 값을 가진다는 것을 알 수 있다[4, 6].

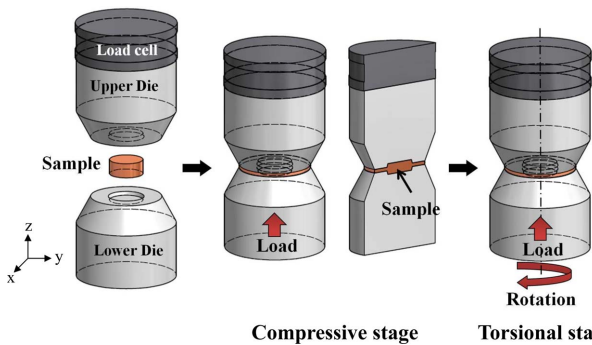


Fig. 1. Schematic illustration of the high-pressure torsion device.

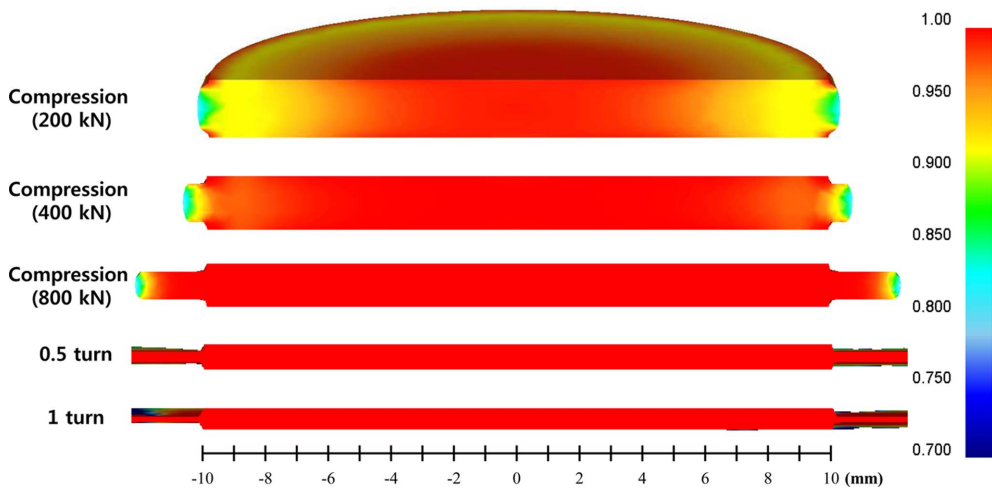


Fig. 2. Relative density distribution during high-pressure torsion.

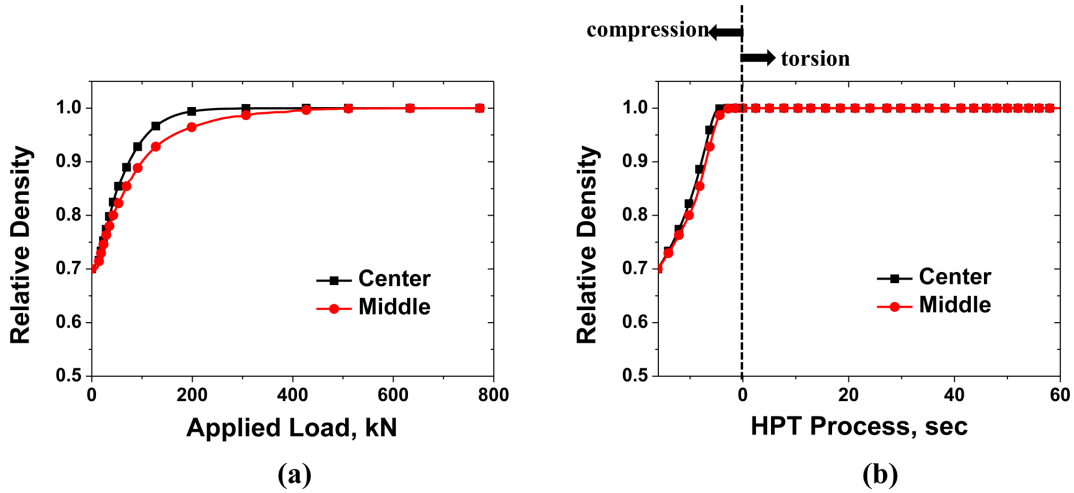


Fig. 3. Relative density distributions at the center ($r=0$ mm) and middle ($r=5$ mm) of the disk specimen (a) according to the applied load during compression stage and (b) whole high-pressure torsion process.

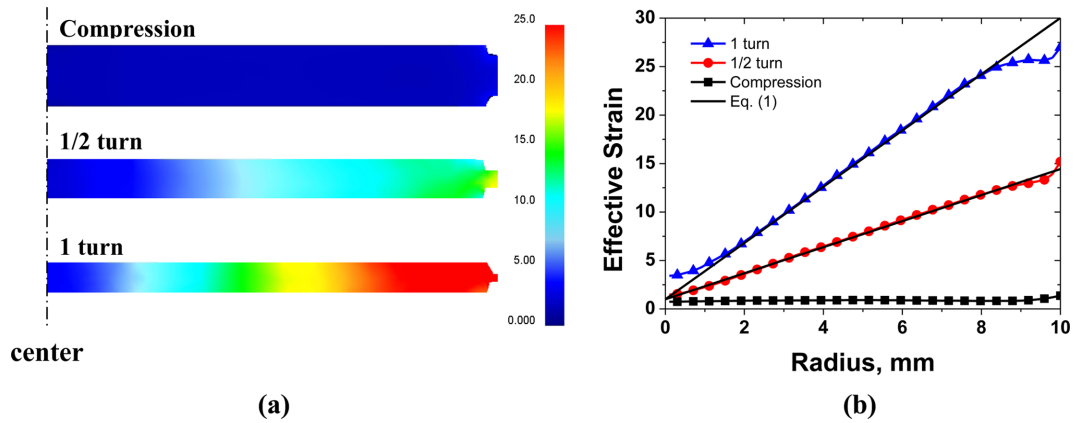


Fig. 4. (a) Distributions and (b) plots of the effective strain after compression, 1/2 turn and 1 turn.

$$\varepsilon_{eq} = \frac{r\theta}{\sqrt{3}h} \quad (1)$$

여기서 r 은 시편 중심에서부터의 거리, θ 는 회전각도, h 는 시편의 두께가 된다. 이 식에 따르면 시편 중심에서는 회전에 의한 유효변형률은 0이고, 시편 압축에 의한 변형률만 존재하게 되는데 반해, 유한요소해석 결과에서는 시편 중심에서 유효변형률이 약 3~4 정도 보이게 된다. 이는 앞선 논문[6, 18, 19]에서 설명한 바와 같이, 압축단계에서 발생하는 변형과 3차원 해석에서 오는 메쉬효과라 할 수 있다. 또한 시편의 가장자리 부분에서 유효변형률의 증가가 달라지는 이유는 비변형영역 (dead metal zone)[18, 19]이 가장자리에서 발생하기 때문이다.

고압비틀림 공정 중의 압력의 분포는 그림 5와 같이, 시편 중심 부분에 높은 압축 응력을 보이는 것이 특징이다 [6]. 특히 압축단계 후에 압력의 분포는 축방향의 주응력인 σ_{zz} 가 다른 성분보다 더 높은 압축 응력을 보이고, 약

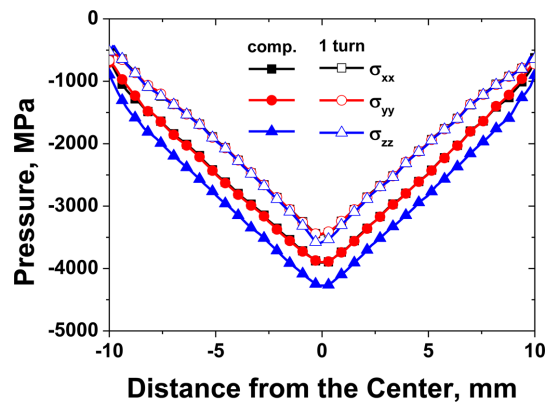


Fig. 5. Principal stress distribution after compression and 1 turn.

4 GPa의 압력이 시편 중심 부분에서 작용하는 것을 알 수 있다. 회전단계의 압력은 압축단계의 압력보다 그 크기가 줄어들었지만, σ_{xx} , σ_{yy} , σ_{zz} 가 모두 같은 값을 가지는 정수압 상태인 것을 알 수 있다.

4. 고 찰

압력 분포를 통해서 알 수 있듯이, 공정 중 시편 중심에서 높은 압축응력이 발생하므로, 그림 2와 3에서 확인할 수 있는 것처럼, 시편 중심에서 먼저 치밀화가 발생하는 것을 알 수 있다. 하지만, 앞서 보고된 연구에 의하면 [9, 11], 구리 분말의 고형화(벌크화)는 시편의 중심보다 가장자리에서 먼저 일어나는 것을 알 수 있다. 특히, 시편의 고형화를 위해서는 1회전보다는 더 많은 회전 공정이 필요한데, 이는 분말의 고형화를 위해서는 압력뿐만 아니라 변형률의 양이 더 높은 영향을 미친다는 것을 알 수 있다. 즉, 시편의 치밀화 (densification)는 고압비틀림 공정 중 압축단계에서 거의 진밀도에 가깝게 일어나지만, 상온 또는 $0.5 T_m$ 이하에서 행해지는 공정의 특성상 고형화 (consolidation)가 일어나기 위해서는 극심한 분말의 변형이 동반되어야 한다. 그림 4에서 확인하였듯이, 고압비틀림 공정에서 유효변형률은 1회전 시 시편의 가장자리에서 약 25의 변형률을 보였는데, 수회전 후 시편의 고형화가 가장자리에서부터 발생하는 것을 통하여, 높은 변형률에 의하여 상온에서도 분말의 고형화가 발생하게 되는 것이다.

강소성 공정을 통한 분말의 치밀화 및 고형화 과정에서 유효변형률이 분말 고형화의 주요 요인이지만, 정수압이 높을 수록, 분말과 분말 사이의 마찰력이 커지게 되므로, 변형을 가했을 시에 나타나는 분말들 사이에서 미끄러짐을 방지하게 되고, 분말의 높은 변형을 유발하게 된다. 따라서 고압비틀림 공정은 높은 압력과 큰 유효변형률을 동시에 가할 수 있는 공정이므로, 분말의 치밀화 및 고형화에 효과적인 공정이라 할 수 있다.

본 연구의 유한요소해석에서 분말 재료의 치밀화 거동에 대한 해석을 수행하였으나, 실제 분말과 분말 사이에서 발생하는 마찰에 대한 고려하지 않고, 시편 전체를 다공질 재료로 가정하여 해석을 수행하였다. 따라서, 결과에서 볼 수 있듯이, 시편에 가해지는 하중이 증가함에 따라, 시편 전체가 완전 치밀화가 이루는 계산 결과를 얻을 수 있지만, 실험에서는 단순 압축만으로 진밀도에 가까운 완전 치밀화를 이루지 못하는 것이 일반적인 현상이다. 하지만, 고압비틀림 공정 중 회전단계에서는 분말의 극심한 변형과 높은 압력을 동시에 가할 수 있으므로, 앞선 연구결과 [9]에서와 같이, 진밀도에 가까운 치밀화가 발생하게 되는 것이다.

5. 결 론

본 연구에서는 유한요소해석을 통하여 고압비틀림 공정 중 구리 분말의 치밀화와 변형률, 압력 분포에 대해서 분석하였다. 공정 중 압력의 분포는 시편 중심이 가장자리에

비해 높은 압축응력이 가해지는데, 이로 인하여 압축단계에서 시편의 중심부분에서 먼저 치밀화가 발생한다는 것을 알 수 있다. 또한, 수 GPa의 압력이 가해지기 때문에 압축단계에서 분말의 상대밀도는 진밀도의 가까운 수치를 나타낸 것으로 확인되었으나, 회전에 의한 유효변형률이 높은 가장자리가 먼저 고형화가 발생하게 된다. 이러한 높은 압력과 큰 변형률이 동시에 작용하는 공정의 특성으로 인하여, 분말의 치밀화에 효과적이라 할 수 있다.

감사의 글

본 연구는 방위사업청의 지원으로 수행한 민군겸용기술사업(UM13020RD1)의 지원을 받아 수행되었으며 이에 감사드립니다.

Reference

- [1] R. Valiev: Nat. Mater., **3** (2004) 511.
- [2] R. Z. Valiev, R. K. Islamgaliev and I. V. Alexandrov: Prog. Mater. Sci., **45** (2000) 103.
- [3] R. Z. Valiev and T. G. Langdon: Prog. Mater. Sci., **51** (2006) 881.
- [4] A. P. Zhilyaev and T. G. Langdon: Prog. Mater. Sci., **53** (2008) 893.
- [5] M. A. Meyers, A. Mishra and D. J. Benson: Prog. Mater. Sci., **51** (2006) 427.
- [6] D. J. Lee, E. Y. Yoon, D.-H. Ahn, B. H. Park, H. W. Park, L. J. Park, Y. Estrin and H. S. Kim: Acta Mater., **76** (2014) 281.
- [7] Y. Saito, N. Tsuji, H. Utsunomiya, T. Sakai and R. C. Hong: Scripta Mater., **39** (1998) 1221.
- [8] K. Xia: Adv. Eng. Mater., **12** (2010) 724.
- [9] E. Y. Yoon, D. J. Lee, D.-H. Ahn, E. S. Lee and H. S. Kim: J. Mater. Sci., **47** (2012) 7770.
- [10] E. Y. Yoon, D. J. Lee, H. N. Kim, H.-S. Kang, E. S. Lee and H. S. Kim: J. Korean Powder Metall. Inst., **18** (2011) 411 (Korean).
- [11] D. J. Lee, E. Y. Yoon, S. Y. Kang, J. H. Lee and H. S. Kim: J. Korean Powder Metall. Inst., **19** (2012) 333 (Korean).
- [12] E. Y. Yoon, D. J. Lee, T.-S. Kim, H. J. Chae, P. Jenei, J. Gubicza, T. Ungar, M. Janecek, J. Vratna, S. Lee and H. S. Kim: J. Mater. Sci., **47** (2012) 7117.
- [13] E. Y. Yoon, D. J. Lee, B. Park, M. R. Akbarpour, M. Farvizi and H. S. Kim: Met. Mater. Int., **19** (2013) 927.
- [14] E. Y. Yoon, D. J. Lee, T.-S. Kim and H. S. Kim: J. Korean Powder Metall. Inst., **19** (2012) 204 (Korean).
- [15] S. Shima and M. Oyane: Int. J. Mech. Sci., **18** (1976) 285.
- [16] Y. Song, E. Y. Yoon, D. J. Lee, J. H. Lee and H. S. Kim: Mater. Sci. Eng. A, **528** (2011) 4840.
- [17] D. J. Lee, E. Y. Yoon, S. Lee, S. Y. Kang and H. S. Kim: Rev. Adv. Mater. Sci., **31** (2012) 25.
- [18] D. J. Lee, E. Y. Yoon, L. J. Park and H. S. Kim: Scripta Mater., **67** (2012) 384.
- [19] D. J. Lee, J. M. Jung, M. I. Latypov, B. Lee, J. Jeong, S. H. Oh, C. S. Lee and H. S. Kim: Comp. Mater. Sci., **100** (2015) 2.