

Core-shell 구조를 지니는 하모닉 분말의 성형거동 분석

주수현^a · 박효욱^b · 강수영^c · 이연식^d · 강희수^d · 김형섭^{a,b,*}

^a포항공과대학교 항공재료연구센터, ^b포항공과대학교 신소재공학과
^c인하공업전문대학 금속재료과, ^d포항산업과학연구원 재료공정연구소

Effect of Core-Shell Structure on Compaction Behavior of Harmonic Powder

Soo-Hyun Joo^a, Hyo Wook Park^b, Soo Young Kang^c, Eon Sik Lee^d,
Hee-Soo Kang^d, and Hyong Seop Kim^{a,b,*}

^aCenter of Aerospace Materials, POSTECH (Pohang University of Science and Technology),
Pohang 790-784, Korea

^bDepartment of Materials Science and Engineering, POSTECH (Pohang University of Science and Technology),
Pohang 790-784, Korea

^cDepartment of Metallurgical and Material Engineering, Inha Technical College, Incheon 402-751, Korea

^dMaterials Research Division, RIST, Pohang 790-784, Korea

(Received February 23, 2015; Revised February 25, 2015; Accepted February 26, 2015)

Abstract In this study, effect of core-shell structure on compaction behavior of harmonic powder is investigated. Harmonic powders are made by electroless plating method on Fe powders. Softer Cu shell encloses harder Fe core, and the average size of Fe core and thickness of Cu shell are 34.3 μm and 3.2 μm , respectively. The powder compaction procedure is processed with pressure of 600 MPa in a cylindrical die. Due to the low strength of Cu shell regions, the harmonic powders show better densification behavior compared with pure Fe powders. Finite element method (FEM) is performed to understand the roll of core-shell structure. Based on stress and strain distributions of FEM results, it is concluded that the early stage of powder compaction of harmonic powders mainly occurs at the shell region. FEM results also well predict porosity of compacted materials.

Keywords: Harmonic powder, Finite element method, Shell compaction region, Compaction behavior

1. 서 론

분말야금은 금속 분말을 생산하고 이를 이용하여 치밀한 성형체를 만드는 기술로 복잡한 제품을 대량 생산할 수 있으며 노동력, 재료 및 에너지를 절약할 수 있는 경제적인 방법이다[1]. 이러한 분말야금법의 장점 때문에 최근 자동차, 전자 및 기계 부품의 제조에 널리 적용되고 있지만, 성형체 내부에 기공이 존재하고 불균일한 밀도 분포가 존재 시 소결 도중 제품의 뒤틀림을 유발할 수 있다는 단점도 있다. 소결체의 잔류 기공은 기계적 성질을 크게 저

하시키므로 분말의 압축과 소결 공정 후에 소결체의 균일하고 강도 높은 제품을 얻기 위해서는 밀도 및 밀도 분포의 조절이 매우 중요하다.

분말의 성형성은 가해진 압력에 따른 분말 성형체의 밀도 변화로 나타낼 수 있다. 분말 성형성에 영향을 미치는 요인으로는 분말의 형상, 크기, 분포, 응집력, 화학적 조성, 분말간의 마찰력, 분말과 금형간의 마찰력 등이 있다[2-8]. 일반적으로 분말 형상은 저압 영역에서 성형성에 큰 영향을 미치는 반면에, 분말의 조성은 고압 영역에서 성형성에 큰 영향을 미친다. 강도가 낮은 분말일수록 성형 시 조성

*Corresponding Author: Hyong Seop Kim, TEL: +82-54-279-2150, FAX: +82-54-279-2399, E-mail: hskim@postech.ac.kr

변형이 용이하므로 성형성이 크다. 현재 분말야금에 많이 사용되고 있는 철분말은 성형성을 높이기 위해 탄소가 거의 포함되지 않은 순철분말만 사용하거나[9], 구리, 그래파이트(graphite), 니켈분말을 순철분말과 섞은 후 성형하여 소결 도중 합금원소의 확산을 일으키는 방법이 연구되고 있다.

지금까지 분말의 성형성을 높이는 기술은 분말의 크기, 혼합분말의 조성을 변화 시키거나 환원조건을 달리하여서 연구가 진행이 됐지만, 분말 내부구조를 변화시키는 연구는 거의 진행이 되지 않았다. 또한, 금형의 수명을 향상시키기 위해 분말표면의 경도를 낮추는 연구는 아직까지 관심이 많지 않았다. 최근 Core-shell 구조를 지니는 분말에 대한 연구가 진행되었지만 분말야금에 관련된 연구보다는 연료전지에 응용하기 위한 연구가 많이 보고 되었다[10]. 본 연구의 목적은 기존 분말야금에서 생기는 문제점을 해결하기 위한 새로운 노력으로 분말 표면층(shell)의 강도가 중심(core)의 강도보다 낮은 Core-shell 구조를 이루는 하모닉 분말을 제조하여 하모닉 분말의 성형거동을 이해하는 것이다. 무전해 도금법을 이용해 순철분말 표면에 구리를 도금하여 하모닉 분말을 제조하였으며 성형성 실험과 유한요소해석(finite element method) 시뮬레이션을 통해 하모닉 분말이 더 낮은 압력에서 원하는 성형밀도에 쉽게 도달할 수 있음을 확인할 수 있었다. 또한, 하모닉 분말의 표면은 원재료보다 더 낮은 경도를 가지므로 금형의 수명을 증가시킬 수 있다고 예상된다.

2. 실험방법

본 실험에서는 Hogan's사의 ASC 100.29 순철분말을 사용하였다. 분말의 입도가 크면 코팅층의 양이 상대적으로 줄어들어 하모닉 구조의 특성을 분석하기 어렵기 때문에 체질(sieving) 이후 45 μm 이하의 분말들만 걸러서 사용하였다. 걸러진 분말의 입도 분포는 Horiba사의 레이저 산란 입도분포 측정장치 LA-950V2장비를 사용하여 측정하였다. 구리코팅은 무전해 도금방법을 이용하여서 순철분말 표면에 증착 시켰으며, 코팅된 하모닉 분말의 단면은 폴리싱 후 Olympus사의 BX51M 광학현미경을 이용해 관찰하였다.

성형성 평가전 금형의 마모를 방지하기 위해 ISO 3927 국제표준화기구에 따라 각각의 분말에 고체 윤활제 아연스테아린산염(Zinc-stearate) 0.6 wt%를 섞어 두 시간동안 불밀링하였다. 성형성 실험은 Instron사의 1361 실험기에서 10 mm 지름의 원통형 지름에 각각의 6 g의 분말을 넣어 600 MPa의 압력을 주어 압분 실험을 하였다. 압축속도는 0.1 mm/s로 일정하게 압축을 하였고, 금형으로부터 성형체를 빼낼 때도 똑 같은 속도로 진행하였다. 실험의 신뢰성을 높이기 위해 3번의 실험을 반복하여 성형성을

판단하였다. 제조된 성형체의 기공은 각 원통시편의 수직 방향 단면을 커팅 후 폴리싱을 통해 매끄럽게 처리하여 광학현미경으로 측면과 중간 부분을 관찰하였고, 이미지 분석기법을 이용해 기공의 면적을 측정하여 상대적인 밀도를 계산하였다. 성형체의 단면에서 순철 부분과 구리의 경도는 비커스 경도기를 이용해서 측정하였다. 이때 하중과 유지시간은 1 g과 5초였다.

실험과 유사한 조건으로 유한요소해석을 수행하여 실험과 비교 분석해 보았다. 실제 3차원 형상의 분말을 이용하게 된다면 계산 시간이 오래 걸리고 오차가 크게 발생할 수 있기 때문에, 분말의 형태는 원형으로 가정하였으며 2D 평면변형 조건을 이용하였다. 다양한 크기의 분말이 초기 밀도 70%로 혼합되어 있는 형태로 압분 실험을 묘사하였다. 분말의 코팅층 두께는 전체분말 두께의 30%로 설정하였다. 순철분말의 유동응력은 IF steel의 인장실험에서 얻어진 데이터를 이용하였으며, 구리 코팅층의 유동응력 또한 실제 실험에서 얻어진 데이터를 이용하였다. 탄성계수는 철, 구리 각각 210 GPa, 117 GPa를 이용하였으며, 탄성과 소성 모두 등방성을 가진다고 가정하고 포아송비는 0.3으로 설정하였다. 유한요소해석에는 탄소성(elastoplastic) 재료의 변형에 널리 사용되는 상용 유한요소해석 프로그램 ABAQUS 6.12를 이용하였고, 요소망 유형은 CPE4R과 CPE3을 혼합하여서 만들었다. 계산시간은 요소망 수가 늘어날수록 급격히 증가하므로 전체 요소망 수를 총 5,000개 정도로 최적화 설정을 하였다. 시뮬레이션에서 금형은 강체(Rigid body) 분말은 탄소성으로 설정하였고, 실제 실험에서 고체 윤활제를 첨가하였고 하모닉 분말의 효과를 중점적으로 관찰하기 위해 금형과 시편 사이의 마찰은 없는 것으로 설정하였다(frictionless).

3. 결과 및 고찰

상업적으로 유통되고 있는 Hogan's사의 ASC 100.29 순철분말 체질 후 얻은 입자들을 주사전자현미경(SEM: COXEM CX-200)을 이용해 형상과 크기를 관찰하였다. 수분사법으로 제조된 순철분말은 그림 1(a)와 같이 불규칙적인 형상을 하고 있다. 체질을 하여 걸러진 분말들의 입도 분포는 7.7~44.9 μm 로 평균 입도는 34.3 μm 였다. 그림 1(b)는 무전해 도금법으로 순철분말 표면에 구리도금을 한 하모닉 분말의 단면을 니탈(nital) 용액을 이용해 에칭(etching)한 후 광학현미경으로 관찰한 그림이다. 순철분말 표면에 구리층이 존재하는 Core-shell구조가 완벽하게 형성되었음을 알 수 있다. 구리코팅 평균 두께는 3.2 μm 였고, 순철분말의 결정립 크기는 12 μm 정도로 관찰되었다. 압분 실험을 통해 얻은 하중-변위 곡선에서 하모닉 분말

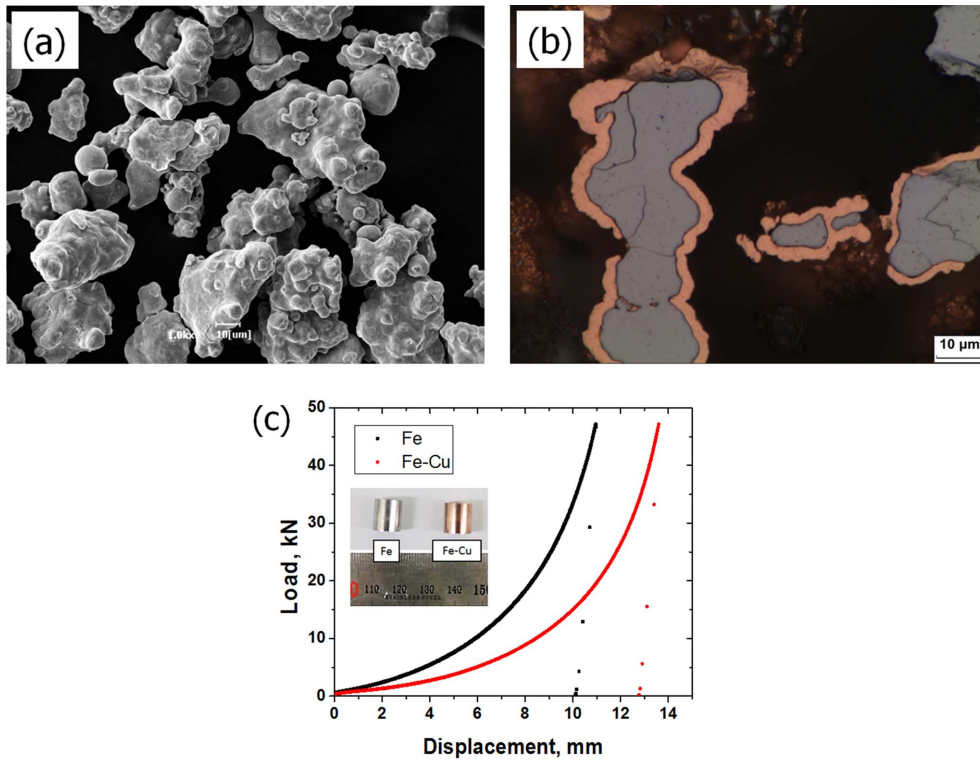


Fig. 1. (a) Scanning electron microscope of Fe powders after sieving, (b) Cu coated Fe powders, (c) load-displacement curves during powder compaction tests.

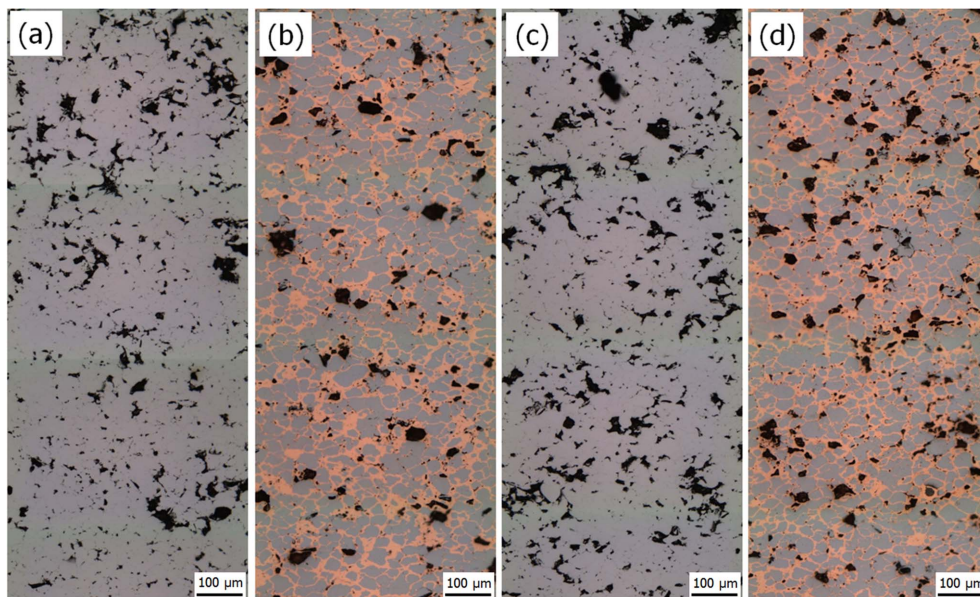


Fig. 2 Optical microscope images of compacted powders (a) center region of Fe powders, (b) center region of harmonic powders, (c) edge region of Fe powders and (d) edge region of harmonic powders.

은 동일한 압력하에서 더 큰 변위를 보여주고 있으므로 (그림 1(c)), 하모닉 분말이 순철분말 보다 더 우수한 성형성을 지닌 것을 간접적으로 알 수 있다.

그림 2과 그림 3은 성형체의 단면을 관찰한 광학현미경 사진과 이미지를 분석해서 얻은 기공 분율이다. 순철분말의 기공은 측면과 중심부에서 각각 14.8%와 17.3%였으며,

하모닉 재료는 각각 10.3% 그리고 12.9%로 측정되었다. 본 연구에서 제조된 하모닉 분말이 약 4% 정도 낮은 기공도를 보여주기 때문에 순철분말보다 성형성이 더 높은 분말이 제조되었다고 할 수 있다. 기존의 분말야금에서 분말의 성형성에 영향을 미치는 요인으로는 분말의 형상, 크기, 분포, 응집력, 화학적 조성, 분말간의 마찰력, 분말과

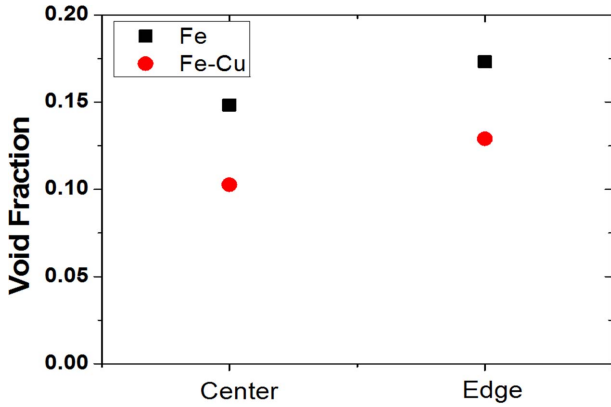


Fig. 3. Void fraction obtained from image analysis.

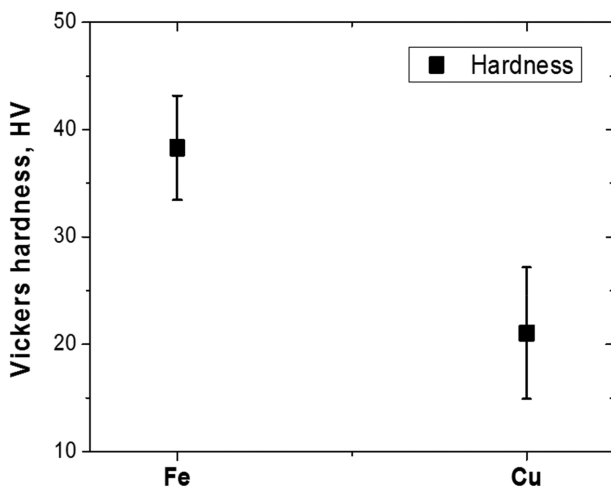


Fig. 4. Vickers hardness results.

금형간의 마찰력 등이 있다. 하모닉 분말에서의 성형성은 표면부의 강도와 분율이 큰 영향을 미칠 것으로 판단해 성형체의 단면의 순철 부분과 구리 부분의 경도를 비커스 경도기를 이용해 측정하였다. 순철 부분의 경도는 38.3 Hv 구리 부분의 경도는 21.0 Hv로 압분 성형 도중에 받는 변형에 의한 경도 변화와 경도 실험 시 다른 상에 영향을 미치는 응력분포를 고려하더라도 하모닉 분말의 core와 shell의 강도는 큰 차이를 보여주고 있다. 이를 통해 더 낮은 강도를 가지는 표면층(shell)의 영향으로 하모닉 분말의 성형성이 크게 좋아진 것을 확인할 수 있다.

하모닉 분말의 성형거동을 더 자세히 이해하기 위해 본 연구에서는 유한요소해석을 이용하였다. 그림 5는 유한요소해석에 이용한 분말과 금형 형상을 나타낸 그림이다. 각 분말의 표면에 두께 30%의 분율로 표면층을 만들었으며, 구리 분말, 순철 분말 그리고 하모닉 분말에 대한 압분성형 시뮬레이션을 실시 하였다. 그림 6(a), (b) 그리고 (c)는 각각 구리 분말, 순철 분말 마지막으로 하모닉 분말의 응력분포를 나타낸 유한요소해석 결과이다. 구리 분말이 가장 낮은 응력상태를 보여주고 있으며, 순철 분말이 가장

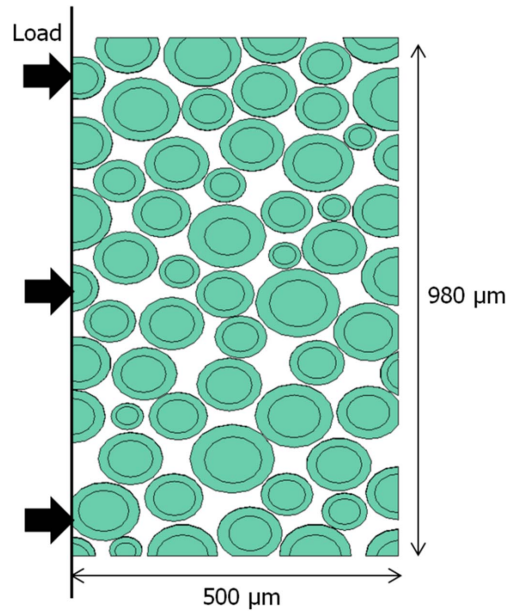


Fig. 5. Schematic diagram of finite element method.

높은 응력상태를 나타냈다. 그림 6(d), (e) 그리고 (f)는 각각 구리분말, 순철 분말 그리고 하모닉 분말의 변형량분포를 나타낸 유한요소해석 결과이다. 구리 분말과 순철 분말의 경우 초기 분말의 분포와 위치에 따라 변형량 분포가 불규칙적인 것을 알 수 있다. 하지만 하모닉 분말의 경우 모든 분말에서 강도가 낮은 표면층(shell)에 변형이 집중이 되는 것을 관찰 할 수 있다.

그림 7(a)는 유한요소해석에서 얻어진 하중-변위 곡선을 보여주고 있다. 표면층이 없는(shell:0%) 순철 분말의 경우 압분이 진행됨에 따라 하중이 급격하게 증가하는 분포를 보여주고 있다. 구리 분말은 가장 낮은 하중을 항상 보여주고 있고, 하모닉 분말의 하중-변위 곡선에서 중요하게 관찰해야 할 점은 초기 압분거동에서의 하중이 구리 분말의 하중곡선을 동일하게 따라간다는 점이다. 이러한 초기 성형거동은 하모닉 분말의 표면부(shell)에서만 압분이 일어나기 때문으로, 75 μm 변위에서의 하모닉 분말의 변형률 분포 결과를 관찰하면 표면부에만 변형이 응집되어 있고 순철 부분인 중심부(core)에서는 변형이 거의 없는 것을 확인 가능하다(그림 7(b)). 600 MPa의 압력으로 압분한 실험결과와 유한요소해석 결과를 비교하면 구리의 분율이 실제 실험에서는 28%로 시뮬레이션조건(구리 분율 36%)과 차이는 나지만 기공도가 시뮬레이션 결과와 비슷한 것을 알 수 있다. 실험과 유한요소해석에서 나타나는 오차는 하모닉 분말의 실제 형상, 각 상의 정확한 물성 그리고 마찰력이 상세하게 고려되지 않았기 때문이지만, 유한요소해석을 이용해 하모닉 분말의 성형거동을 명확하게 이해하고 표면층 압분 구간(shell compaction region)이 존

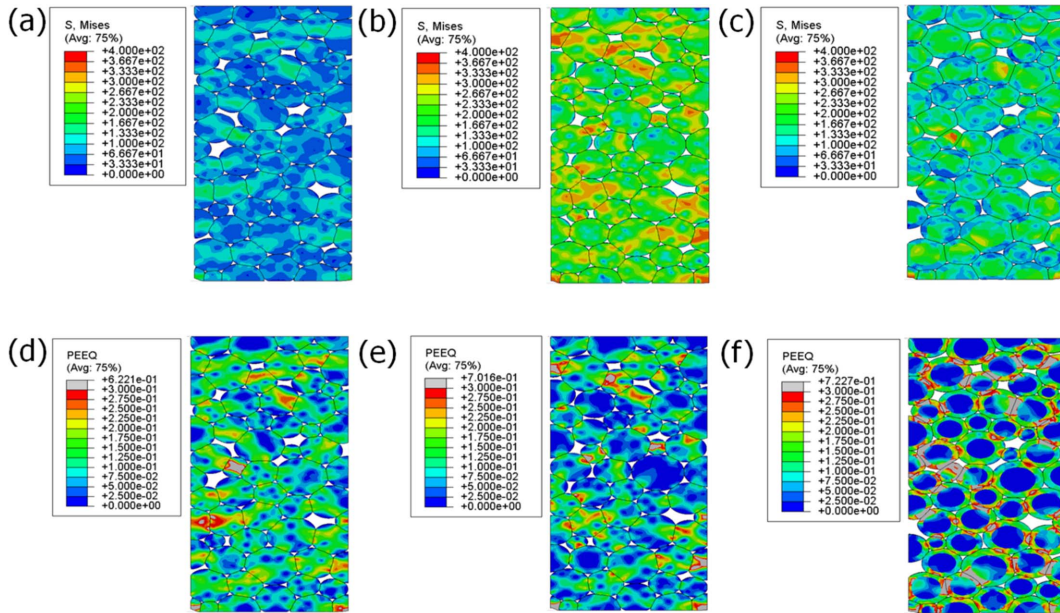


Fig. 6. Mises stress distributions of (a) Cu powders, (b) Fe powders and (c) Harmonic powders; plastic strain distributions of (d) Cu powders, (e) Fe powders and (f) Harmonic powders.

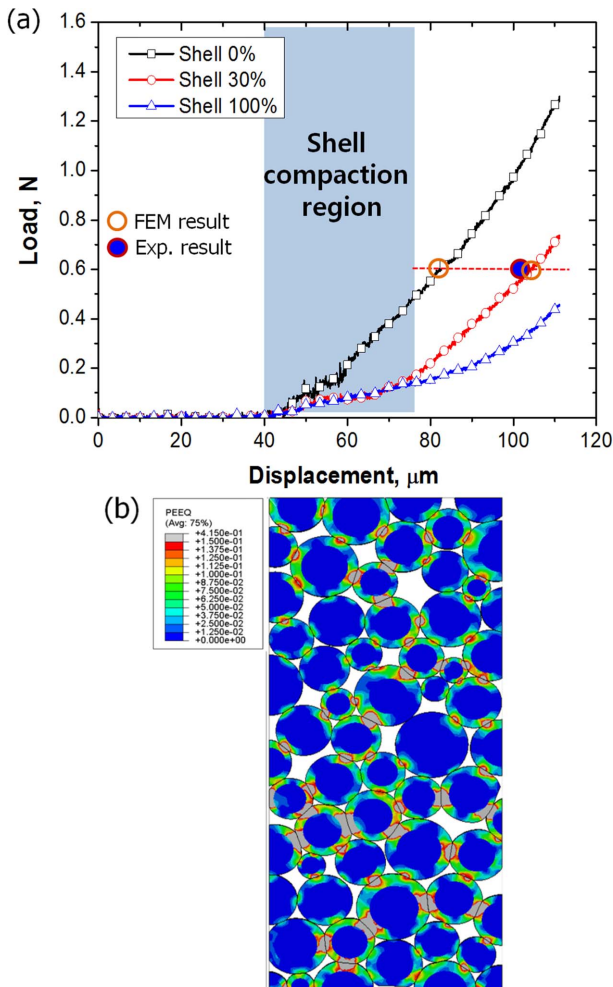


Fig. 7. (a) Load-displacement curves obtained from finite element method, (b) plastic deformation distribution of Harmonic powders at 75 μm displacement.

재하는 것을 확인하였다. 이러한 하모닉 분말의 성형거동을 이용하여 본 실험에서는 순철분을 이용하였지만 차후의 실험에서는 합금분말의 성형성을 순철분말의 수준으로 증가시킬 수 있을 것으로 기대한다. 또한, 다양한 방법을 이용하여 core-shell 구조를 가지는 하모닉 분말 제조를 상용화 한다면, 기존의 순철분과 성형성이 동일하지만 강도가 높은 중심부(core)의 영향으로 고강도 분말야금제품을 생산할 수 있을 것으로 예상 한다.

4. 결 론

본 연구에서는 중심부(core)보다 낮은 강도의 표면층(shell)을 가지는 하모닉 분말의 성형거동을 분석하기 위해 순철분말의 표면에 구리 코팅을 제조 후 압분실험을 실시하였다. 제조된 하모닉 분말은 순철 분말에 비해 더 우수한 성형성을 보여주었고 이는 낮은 경도를 가지는 구리층에 의한 영향인 것을 알 수 있다. 유한요소해석을 이용한 분석에서는 초기 성형거동에서 표면층에서만 성형이 일어나는 표면층 압분 구간이 있는 것을 확인 할 수 있었으며, 실험결과와 거의 일치하는 기공도를 예측할 수 있었다.

References

- [1] H. S. Kim and D. N. Lee: J. Kor. Inst. Met. *Metal.*, **30** (1992) 37 (Korean).
- [2] R. M. German: Powder Metallurgy of iron and Steel, John Wiley & Sons, Inc. New York (1998) 128.
- [3] A. Salak: Ferrous powder metallurgy, CISP, Cambridge,

- UK (1996) 62.
- [4] J. S. Hirschhorn, G. M. Maxwell and A. V. Nadkarni: Powder Tech., 5 (1971) 72.
- [5] I. Nikolakakis and N. Pilpel: Powder Tech., **56** (1988) 95.
- [6] D. Poquillon, J. Lemaitre, V. Baco-Carles, Ph. Tailhades and J. Lacaze: Powder Tech., **126** (2002) 65.
- [7] D. Poquillon, J. Lemaitre, V. Baco-Carles, Ph. Tailhades and J. Lacaze: Powder Tech., **126** (2002) 75.
- [8] H. S. Kim and J. S. Lee: J. Korean Powder Metall. Inst., **11** (2004) 301 (*Korean*).
- [9] R. M. German: Powder Metallurgy of iron and Steel, John Wiley & Sons, Inc. New York (1998) 152.
- [10] J.-W. Jang, J.-H. Kim, J. Hwang, T. Y. Lim, J.-H. Lee and M.-J. Lee: Korean J. Met. Mater., **52** (2014) 391.