

<학술논문>

DOI:10.3795/KSME-A.2008.32.5.379

금형압축 하에서 구리/철 이종재료 분말의 치밀화 거동

김택의* · 이성철* · 김기태 †
(2007년 3월 6일 접수, 2008년 4월 11일 심사완료)

Densification Behavior of Dissimilar Material Powder during Die Compaction

Taek-Eui Kim, Sung-Chul Lee and Ki-Tae Kim

Key Words : Die Compaction(금형압축), Dissimilar Material(이종재료), Double Action Pressing(양단 압축), Finite Element Analysis(유한요소해석)

Abstract

Densification behavior of dissimilar material powder (copper and pure iron powder) under die compaction was investigated. Experimental data were obtained for copper and pure iron powder compacts with various volume ratios under die compaction. Dissimilar material powder was simultaneously compacted into a jointed cylindrical compact with different powder materials in inner and outer part, respectively. To simulate densification behavior of dissimilar material powder, elastoplastic constitutive equation proposed by Shima and Oyane was implemented into a finite element program (ABAQUS) under die compaction. Finite element results were compared with experimental data for densification, deformed geometry and density distribution of powder compacts under die compaction.

1. 서 론

다른 성질을 가지는 두 재료의 결합으로 인한 장점으로 인해 최근 이종재료의 제조 및 기계적 특성에 대한 연구가 진행되고 있다.⁽¹⁻³⁾ 그러나 물리적, 화학적, 기계적 특성의 차이로 인해 이종재료의 제조는 쉽지 않다. 이종재료를 제조하기 위한 가장 일반적인 방법은 용접에 의한 접합과 열박음이 있다. 용접에 의한 접합은 고비용으로 인해 경제성이 떨어지며, 용접 시 고온에 의해 용접부위의 재료 물성이 변하기 쉽다. 열박음을 통한 이종재료 제조 시 내부 삽입물과 외부재료의 열팽창률의 차이에 의해 재료에 균열이 발생할 수 있는 단점이 있다.

이러한 단점들을 보완하기 위해 최근 분말 야금법에 의한 이종재료 제조 연구가 활발히 진행되

고 있다. Krishna 등⁽¹⁾은 초기 분말 성형체를 소결한 후, 다양한 부피비와 변형률에서의 압출공정을 통해 steel/Cu, Cu/Al 이종금속 튜브를 제조하였다. Durgalakshmi 등⁽³⁾은 구리와 강의 초기 분말 성형체를 소결한 후, 압입하여 이종재료를 제조하였고, 다양한 부피비와 변형률에서 접합부의 강도에 대해 조사하였다. Kazanowski 등⁽⁴⁾은 알루미늄 합금으로 제조된 이종재료 봉에 대해 압출 실험을 한 후 내부 형상 변화를 조사하였고, 유한요소해석을 통한 해석치와 실험치를 비교하였다.

현재까지 이종재료의 분말 성형체의 금형 압축 성형 공정에 대한 연구는 미미한 실정이다. 특히 분말 성형체의 치밀화시 이종재료 내부의 밀도 구배에 대한 실험적, 해석적 연구는 수행된 바가 없다. 따라서 본 논문에서는 구리와 철분말을 사용하여 금형압축하에서 구리/철 이종재료 분말의 부피비와 하중에 따른 성형체 내부의 밀도분포를 연구하였으며, Shima 와 Oyane 의 소성 항복조건식을 유한요소해석에 적용하여 해석치와 실험치를 비교, 검토하였다.

† 책임저자, 회원, 포항공과대학교 기계공학과
E-mail: korean@postech.ac.kr
TEL: (054) 279-2164 FAX: (054) 279-5569

* 포항공과대학교 대학원 기계공학과

2. 이론적 배경

2.1 구성방정식

분말 성형체의 소성항복 거동을 나타낼 수 있는 소성 항복조건식은 일반적으로 다음과 같이 쓸 수 있다.⁽⁵⁾

$$\Phi(\sigma, \bar{\varepsilon}_m^p, D) = \left(\frac{q}{\sigma_m}\right)^2 + \left(\frac{p}{\sigma_m f}\right)^2 - D^{2n} = 0 \quad (8)$$

여기서, p 와 q 는 각각 정수응력($=\sigma_{kk}/3$)과 유효응력($=\sqrt{3\sigma'_{ij}\sigma'_{ij}/2}$)을, σ_m 은 모재의 유효응력을 나타내며, n 은 재료상수, D 는 상대밀도, f 는 상대밀도의 함수를 나타낸다.

Shima 와 Oyane⁽⁵⁾은 구리분말 성형체의 일축압축실험으로부터 f 와 n 을 결정하여 다음과 같이 소성 항복조건식을 제안하였다.

$$\Phi(\sigma, \bar{\varepsilon}_m^p, D) = \left(\frac{q}{\sigma_m}\right)^2 + 2.49^2(1-D)^{1.028} \left(\frac{p}{\sigma_m}\right)^2 - D^5 = 0 \quad (9)$$

2.2 구성방정식의 수치적분

유한요소해석 프로그램 ABAQUS⁽⁶⁾의 사용자 정의 서브루틴인 UMAT 에 Shima 와 Oyane 의 구성방정식을 적용하여 구리/철 이종재료 분말의 소성 변형거동을 해석하였다.

유한요소법을 이용한 Shima 와 Oyane 의 구성방정식의 수치적분은 Aravas⁽⁷⁾에 의하여 제안된 후방 오일러법(backward Euler method)과 내연적(implicit) 시간적분법을 사용하여 만들어진 비선형 평형방정식을 Newton-Raphson 반복법에 의해 계산하였다. 후방 오일러법은 다른 수치적분 기법에 비해 안정적인 알고리즘을 가지고 있으며 대변형의 소성 유한요소해석에 적합하다고 알려져 있다.⁽⁷⁾ Newton-Raphson 반복법이 사용되기 위해서는 다음과 같은 선형 모듈(linearization moduli) J 가 필요하다.⁽⁸⁾

$$J = \left(\frac{\partial \sigma}{\partial \varepsilon}\right)_{t+\Delta t} \quad (10)$$

따라서 구성 방정식을 사용자 정의 서브루틴 UMAT 에 적용할 때 선형 모듈 J 값을 계산하여야 하며, 본 논문에서는 Govindarajan⁽⁹⁾에 의하여 유도된 J 값을 사용하였다.

3. 실험

본 연구의 재료로는 분사법으로 제조된 구리분

말과 순철분말이 사용되었다. 순철분말은 평균입자 크기가 $80\mu\text{m}$ 인 구형입자, 구리분말은 크기가 $40\mu\text{m}$ 인 불규칙한 형상의 입자들로 이루어져 있다. 순철분말과 구리분말의 이론 밀도는 각각 7.65 g/cm^3 와 8.94 g/cm^3 이다.

금형압축 하에서 구리/철 이종재료 분말의 치밀화 거동을 해석하기 위해 철분말과 구리분말 모재에 대한 탄성계수, 항복강도 및 유효응력 등의 기계적 물성치가 필요하다. 본 논문에서는 철분말과 구리분말의 모재의 기계적 물성에 대해 각각 Kim 과 Lee⁽¹⁰⁾와 Kim 등⁽¹¹⁾이 구한 실험결과를 사용하였으며, 유효응력과 소성변형률의 관계는 다음과 같다.

$$\text{철 모재: } \sigma_m = 156 + 404.5(\bar{\varepsilon}_m^p)^{0.4885}$$

$$\text{구리 모재: } \sigma_m = 479.97(\bar{\varepsilon}_m^p)^{0.2433} \quad (11)$$

여기서, σ_m 과 $\bar{\varepsilon}_m^p$ 는 각각 모재의 유효응력, 등가 소성변형률을 나타낸다. 이때 순철분말과 구리분말의 항복강도는 각각 156MPa 과 149MPa 이며 탄성계수는 각각 215GPa 과 110.3GPa 이다.

3.1 구리분말과 철분말의 금형압축 실험

금형압축 실험을 위해 구리분말과 철분말 10 g 을 각각 내부직경 11.28mm 의 금형에 충전시킨 후 $100\sim 700\text{MPa}$ 의 다양한 압력을 가하였다. 금형압축 실험은 일방향 압축으로 수행하였다. 압축 시 금형 벽면과 분말사이의 마찰을 줄이기 위해 탄소 윤활제를 금형 벽면에 얇게 칠했다. 일방향 압축으로 성형된 분말 성형체를 금형에서 이젝트한 후 성형체의 직경과 높이를 측정하여 시편의 상대밀도를 측정하였다.

3.2 구리/철 분말의 이종재료에 대한 금형압축 실험

구리/철 이종재료 분말의 초기 분말 성형체를 제조하기 위하여 100MPa 의 압력으로 양단 금형 압축 실험을 수행하였다. 철분말에 대해서는 금형에 철분말을 넣고 탭핑을 통해 초기 충전 밀도 0.47 을 얻은 후 축방향 하중을 가하였다. 축방향 하중을 가하기 전 분말의 높이는 28mm 이며, 하중을 가한 후 성형체의 높이는 20.2mm 이고 평균 상대밀도는 0.645 이었다. 그리고 구리분말에 대해서는 초기 분말 성형체를 제조하기 위해 금형에 구리분말을 넣고 탭핑을 통해 초기 충전 상대밀도 0.414 를 얻은 후 축방향 하중을 가하였다. 축방향 하중을 가하기 전 분말의 높이는 27mm 이며, 하중을 가한 후 성형체의 높이는 17.9mm 이고 평균 상대밀도는 0.62 이었다. 철분말과 구리분말에

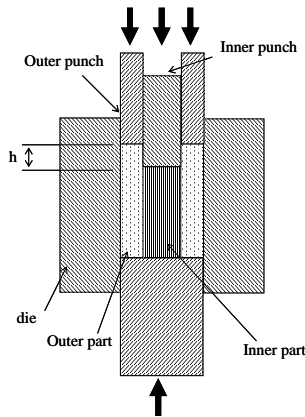


Fig. 1 A schematic drawing of a fixture for double action pressing

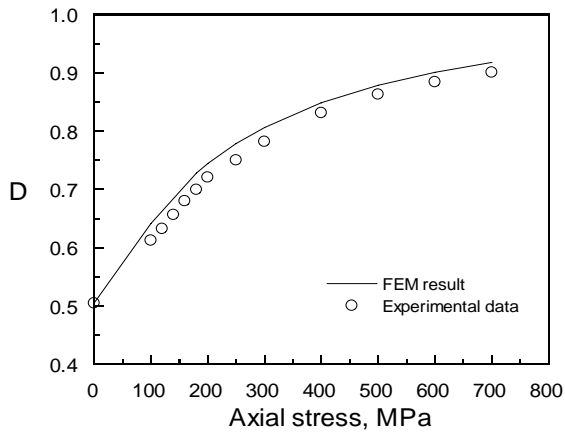


Fig. 2 Variation of relative density with axial stress for Cu powder under die compaction

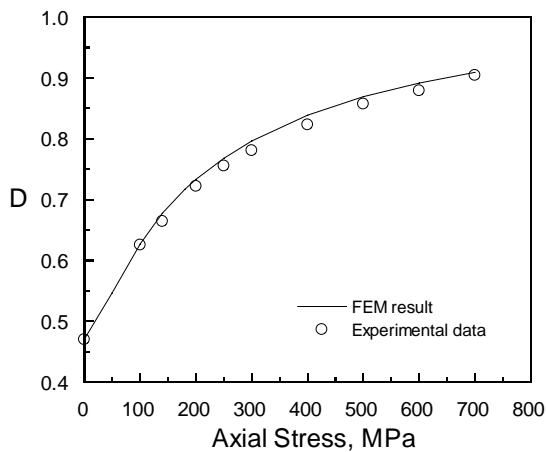


Fig. 3 Variation of relative density with axial stress for pure iron powder under die compaction

대해 양단 금형압축을 통해 제작된 초기 분말 성형체를 내부 직경 20mm 의 금형에 고정시킨 후 철 및 구리분말을 채워넣고 100~600 MPa 의 다양

Table 1 Experimental condition of Cu/pure iron dissimilar material for die compaction

| h(mm) | Inner Part : Cu(g) | Outer Part : Iron(g) |
|-------|--|----------------------|
| 2 | 10 (A preform by double action pressing under axial stress of 100MPa) | 13.8 |
| 4 | | 15.1 |
| 6 | | 16.4 |
| 8 | | 17.7 |

| h(mm) | Inner Part : Iron(g) | Outer Part : Cu(g) |
|-------|--|--------------------|
| 2 | 10 (A preform by double action pressing under axial stress of 100MPa) | 17.7 |
| 4 | | 19.3 |
| 6 | | 20.9 |
| 8 | | 22.5 |

한 축방향 하중을 가하였다. 외부 분말의 부피에 따른 이종재료의 치밀화 경향을 조사하기 위하여 외부 분말의 부피를 다양하게 변화시켜 실험을 수행하였다. 이때 초기 분말 성형체가 철과 구리인 경우 외부에 각각 구리와 철분말을 충전하였다. Fig. 1 은 구리/철 이종재료 분말 압축 실험을 위한 개략도를 나타낸다. 축방향 하중을 가할 시, 먼저 외부 펀치에 의해 외부 분말이 압축되고, 외부 및 내부 펀치의 위치가 같아진 후 외부 펀치와 내부 펀치가 동시에 하중이 가해지게 된다. 이때 내부 펀치는 내부의 초기 분말 성형체에 하중을 가하게 되고, 외부 펀치는 외부 분말에 하중을 가하게 된다.

3.3 밀도분포측정 실험

분말 성형체의 밀도 분포는 경도와 상대밀도의 관계를 이용해서 간접적으로 측정할 수 있다. 금속분말 성형체의 경도측정에는 로크웰(Rockwell) 경도계가 주로 사용된다.⁽¹²⁻¹⁴⁾

본 논문에서는 구리/철 이종재료의 상대밀도 분포를 구하기 위해 우선 금형압축으로 성형된 철분말 성형체와 구리분말 성형체를 소결 전과 상대밀도의 차이가 나지 않도록 700°C에서 1 시간 동안 소결 후

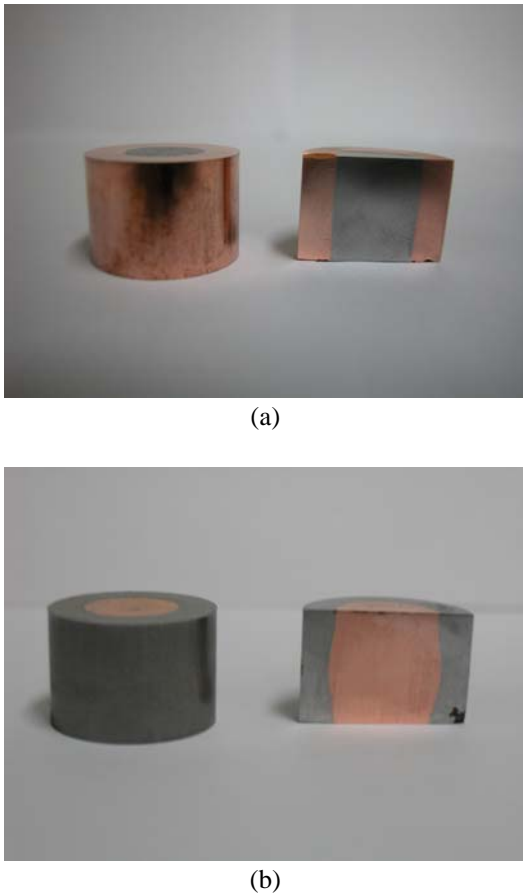


Fig. 4 Photographs for specimens of (a) Inner part : pure iron, Outer part : Cu (b) Inner part : Cu, Outer Part : pure iron

중양단면을 절단하였다. 그리고 로크웰 B형 경도계 (Rockwell 523T, Wilson, U.S.A.)를 사용하여 1.58 mm (1/16 inch) 강구압자(hardened steel ball indenter)로 15 N의 하중을 30 초간 가하여 각 시편마다 9 개의 경도값을 측정하였다. 측정한 각 시편의 경도값들을 평균하여 상대밀도와 로크웰 경도와의 상관 관계를 구하였다. 이 상관 관계를 이용하여 구리/철 이종재료의 1/2 단면에 대해서는 2mm 간격으로 전체 40 개의 경도값을 측정하였다.

4. 실험 및 유한요소해석 결과의 비교

4.1 구리분말과 철분말의 금형압축 실험 및 해석

금형압축 실험은 Shima 와 Oyane 의 소성 항복조건식이 다양한 하중 하에서 구리분말과 철분말의 치밀화 거동을 잘 예측하는지 살펴보기 위해 수행되었다. Figs. 2 와 3 은 각각 구리분말과 철분말의 금형압축 시 축방향 하중에 대한 상대밀도의 실험치와 해석치를 나타낸다. Figs. 2 와 3 에서

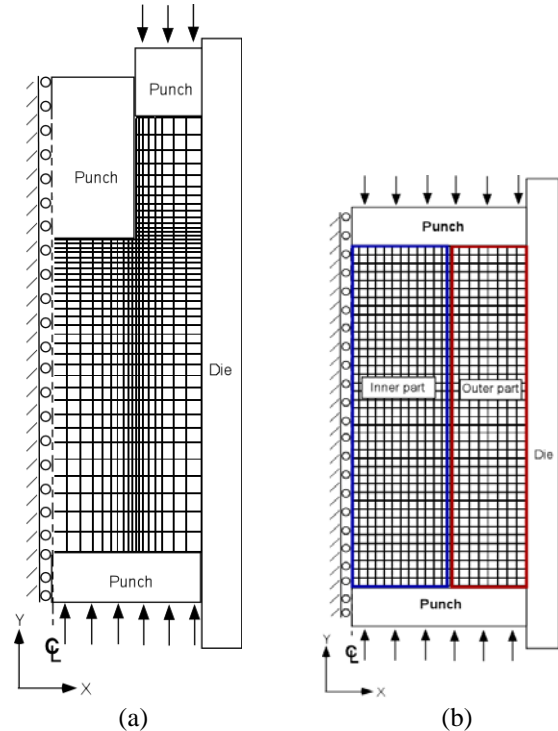


Fig. 5 Finite element meshes and boundary conditions of double action pressing for (a) outer part and (b) outer part and inner part

Shima 와 Oyane 의 소성 항복조건식을 적용하여 구한 구리분말과 철분말의 상대밀도 계산치가 실험치와 잘 일치함을 알 수 있다. 따라서 Shima 와 Oyane 의 소성 항복조건식이 다양한 하중하에서 분말의 치밀화 거동을 잘 예측하므로 구리/철 이종재료 제조를 위한 금형압축 공정의 유한요소 해석에 적용이 가능함을 확인할 수 있었다.

4.2 구리/철 분말의 이종재료에 대한 금형압축 실험 및 해석

Fig. 4 는 금형압축 실험으로 제조된 구리/철 이종재료 분말 성형체의 형상을 나타낸다. Table 1 은 구리/철 이종재료 분말의 금형압축 실험에 대한 각각의 조건을 나타낸다. Fig. 5 는 구리/철 이종재료 분말의 금형압축 실험에 사용된 유한요소 격자 및 경계조건을 각각 나타낸다. Fig. 5(a)는 내부펀치와 외부펀치가 동일해지는 위치까지 압축되는 공정으로 내부 초기 분말 성형체의 경우 300 개의 4 절점 축대칭 요소를 갖는 유한요소격자를 사용하였고, 외부 분말은 분말의 부피에 따라 272~336 개의 4 절점 축대칭 요소를 갖는 유한요소격자를 사용하였다. Fig. 5(b)는 내부 초기 분말 성형체와 외부 분말이 동시에 압축되는 공정으로 내부 및 외 성형체의 경우 각각 480, 320 개의 4 절

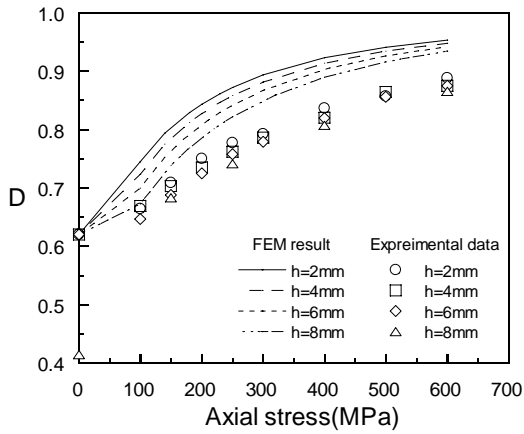


Fig. 6 Variation of relative density with axial stress for Cu powder in the dissimilar material (Inner part : Cu, Outer part : pure iron) under die compaction

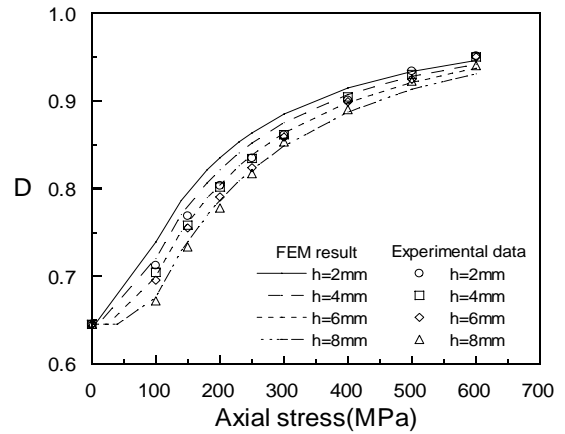


Fig. 9 Variation of relative density with axial stress for pure iron powder in the dissimilar material (Inner part : pure iron, Outer part : Cu) under die compaction

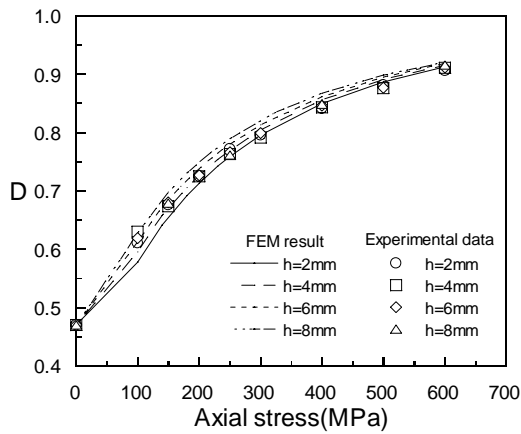


Fig. 7 Variation of relative density with axial stress for pure iron powder in the dissimilar material (Inner part : Cu, Outer part : pure iron) under die compaction

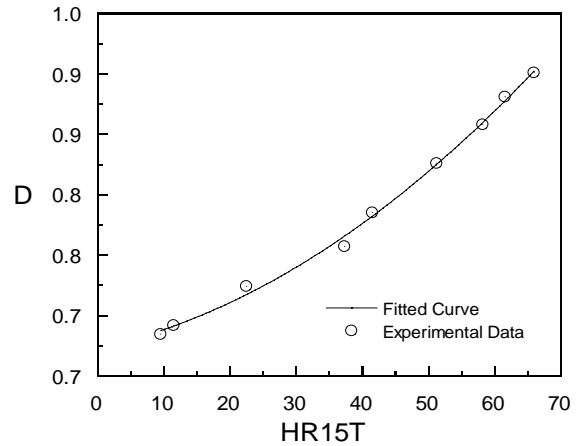


Fig. 10 Variation of relative density with Rockwell hardness for pure iron powder

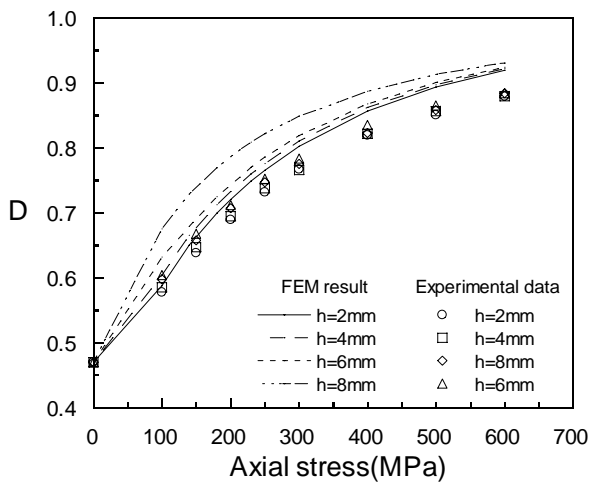


Fig. 8 Variation of relative density with axial stress for Cu powder in the dissimilar material (Inner part : pure iron, Outer part : Cu) under die compaction

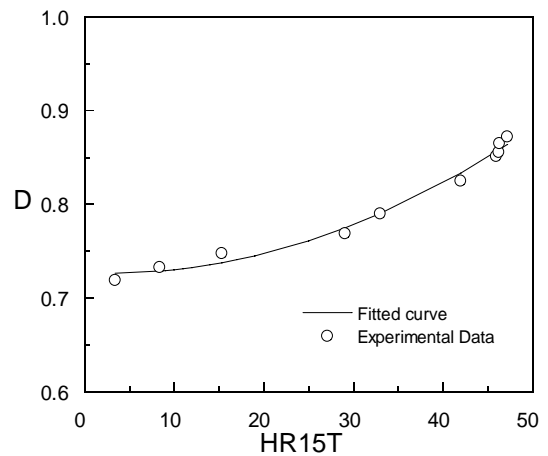


Fig. 11 Variation of relative density with Rockwell hardness for Cu powder

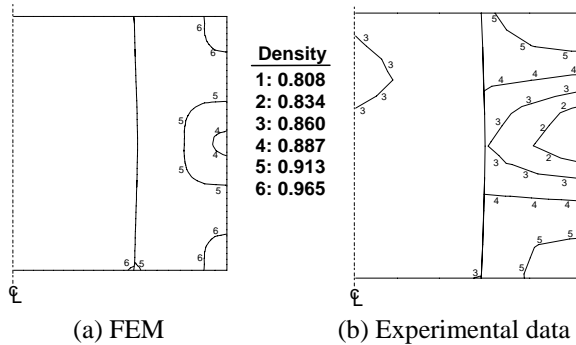


Fig. 12 Comparisons between (a) finite element calculations and (b) experimental data for relative density contour plots of an Cu/pure iron dissimilar material powder compact by double action pressing under axial stress of 600MPa (h=8mm, Inner part : Cu, Outer part : pure iron)

점 축대칭 요소를 갖는 유한요소격자를 사용하였다.

분말 성형체와 금형, 분말 성형체와 펀치 사이의 마찰계수는 0.2로 가정하였다. Fig. 6과 Fig. 7은 구리 분말 성형체 외부에 철분말을 채워 넣고 양단 압축할 때 구리분말과 철분말의 상대밀도에 대한 실험치와 해석치들을 나타낸다. 또한 Figs. 8과 9는 철 분말 성형체 외부에 구리분말을 채워 넣고 양단 압축할 때 철분말과 구리분말의 상대밀도에 대한 실험치와 해석치들을 각각 나타낸다. 실선은 Shima와 Oyane의 소성 항복조건식을 적용하여 유한요소해석으로 구한 해석치들이며, 유한요소해석에서의 분말 성형체의 상대밀도는 다음의 관계식을 사용하여 구한 분말 성형체의 체적에 대한 평균치이다.

$$D_{avg} = \frac{\sum_{j=1}^M D_j V_j}{\sum_{j=1}^M V_j} \quad (12)$$

여기서, D_j, V_j 및 M 은 각각 j 번째 요소의 상대밀도, 체적 및 전체 요소의 개수를 나타낸다. Fig. 6에서 금형압축 시 유한요소해석을 통해 얻은 구리 분말 성형체의 평균 상대밀도에 대한 해석치가 실험치보다 다소 높게 예측하고 있음을 알 수 있다. Fig. 7에서는 철분말 성형체의 평균 상대밀도에 대한 해석치가 실험치를 비교적 잘 예측하고 있음을 알 수 있다. Figs. 8과 9에서도 Figs. 6과 7과 마찬가지로 철분말 성형체의 평균 상대밀도에 대한 해석치는 실험치를 비교적 잘 예측하지만 구리분말 성형체의 평균 상대밀도에 대한 해석치는 실험치보다 다소 높게 예측하고 있음을 알 수 있다. 외부분말의 높이 h

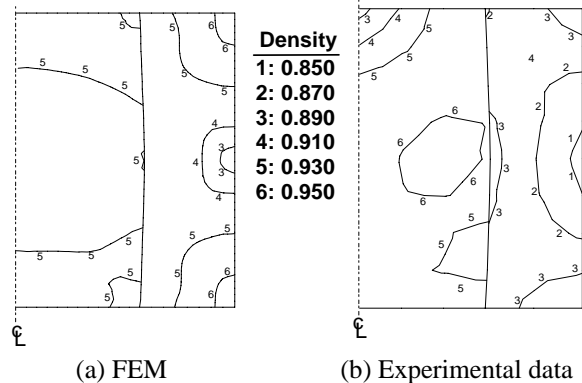


Fig. 13 Comparisons between (a) finite element calculations and (b) experimental data for relative density contour plots of an Cu/pure iron dissimilar material powder compact by double action pressing under axial stress of 600MPa (h=8mm, Inner part : pure iron, Outer part : Cu)

를 2~8mm 높이의 조건으로 100~600MPa의 하중을 통해 금형압축 실험 및 유한요소해석 결과 외부분말 높이에 관계없이 하중이 증가할수록 상대밀도는 일정해짐을 확인할 수 있었다.

Fig. 10은 구리분말 성형체의 로크웰 경도값(HR15T)과 상대밀도의 관계를 나타내며, 실험치를 보간하면 다음 식과 같이 분말 성형체의 로크웰 경도치와 상대밀도의 관계를 얻을 수 있다.

$$D = 0.72665 - 3.4961 \times 10^{-4} (HR15T) + 6.8908 \times 10^{-5} (HR15T)^2 \quad (13)$$

Fig. 11은 구리 분말 성형체의 로크웰 경도값(HR15T)과 상대밀도의 관계를 나타내며, Fig. 10과 마찬가지로 Fig. 11의 실험치를 보간하면 다음 식과 같이 구리분말 성형체의 로크웰 경도치와 상대밀도의 관계를 얻을 수 있다.

$$D = 0.72665 - 3.4961 \times 10^{-4} (HR15T) + 6.8908 \times 10^{-5} (HR15T)^2 \quad (14)$$

Figs. 12와 13은 구리와 철 분말 성형체 외부에 각각 철과 구리 분말을 높이 h 가 8mm 되도록 충전하여 600MPa의 하중으로 금형 압축한 후, 성형된 분말성형체의 변형된 형상과 내부의 상대밀도 분포에 대한 실험치와 해석치를 나타낸다.

철분말의 상대밀도 분포는 내부성형체일 경우 0.93~0.95, 외부성형체일 경우 중간 부근을 제외하고 0.89~0.96으로 유한요소해석 결과는 실험치를 비교적 잘 예측함을 알 수 있다. 구리분말의 경우 상대밀도 분포는 내부성형체일 경우 유한요소해석 결과는 0.91~0.97이고, 실험치는 0.83~0.86으로 유

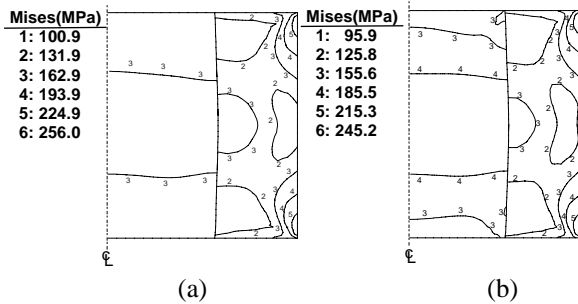


Fig. 14 Finite element calculations for the Mises stress distribution of an Cu/pure iron dissimilar material powder compact by double action pressing under axial stress of 600MPa (h=8mm) (a) Inner part : Cu, Outer part : pure iron (b) Inner part : pure iron, Outer part : Cu

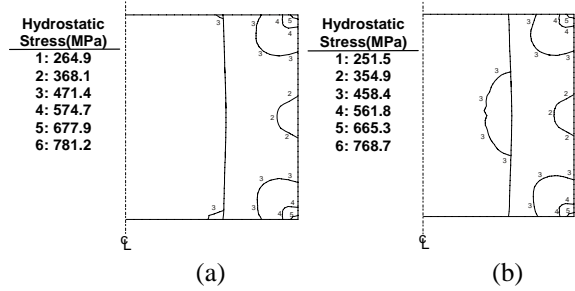


Fig. 15 Finite element calculations for the hydrostatic pressure distribution of an Cu/pure iron dissimilar material powder compact by double action pressing under axial stress of 600MPa (h=8mm) (a) Inner part : Cu, Outer part : pure iron (b) Inner part : pure iron, Outer part : Cu

한요소해석 결과는 실험치보다 다소 높게 예측함을 알 수 있다. 마찬가지로 외부성형체일 경우 유한요소해석 결과 상대밀도는 0.89~0.95, 실험치는 0.85~0.89 로 유한요소해석 결과가 실험치보다 다소 높게 예측함을 알 수 있다. 구리/철 이종재료 내부의 구리와 철분말 성형체는 균일한 밀도 분포를 보이고 있음을 확인할 수 있었다. 이것은 성형하중이 높아질수록 내부의 구리와 철분말 성형체에 낮은 편차응력과 균일한 정수응력 분포가 나타나기 때문이다. 또한 분말 성형체와 금형, 분말 성형체와 펀치의 마찰로 인해 구리/철 이종재료 외부의 구리와 철분말 성형체의 상대밀도는 단면의 상하 모서리 부근에서 가장 높고, 전체 성형체 중간 부근의 바깥쪽에서 가장 낮게 예측되고 있다.

Figs. 14 와 15 는 구리와 철 초기 분말 성형체를 통해 구리/철 이종재료 제조시 외부분말의 높이 h 가 8mm 이고, 하중이 600MPa 일 때 각각의 경우에 대해 정수응력과 유효응력 분포를 보여주는 유한요소해석의 결과이다. 내부 분말 성형체의 경우 유효응력은 156~186MPa, 정수응력은 460~470MPa 정도로 비교적 균일한 응력분포를 보이지만, 외부 분말 성형체의 경우 유효응력은 126~225MPa, 정수응력은 355~678MPa 정도로 다소 불균일하게 나타난다. 이는 내부 분말 성형체의 경우 외부 분말이 성형되면서 정수압이 작용하여 균일한 응력분포를 나타내지만, 외부 분말 성형체의 경우 성형체와 금형, 분말 성형체와 펀치의 마찰로 인해 분말 성형체 단면의 상하 모서리 부근에서는 정수응력과 유효응력의 분포가 다소 불균일한 반면 내부 분말 성형체와의 경계면 부근에서는 정수압이 작용하여 비교적 균일한 분포를 나타낸다.

5. 결론

본 논문에서는 구리/철 이종재료의 금형압축 공정에 대한 연구를 수행하였다. 금형압축 실험 결과와 구리 및 철분말 소성변형 거동을 예측할 수 있는 소성 항복조건식을 사용한 유한요소해석 결과로부터 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 구리/철 이종재료에 대하여 철분말의 경우 유한요소해석 결과는 금형압축 실험치를 비교적 잘 예측하였으나, 구리분말의 경우 실험치에 비해 다소 높게 예측되었다.

(2) 성형 하중이 높아질수록 내부의 구리와 철분말 성형체에 낮은 편차응력과 균일한 정수응력 분포가 나타나게 되어 구리/철 이종재료 내부의 구리와 철분말 성형체는 균일한 밀도 분포를 보이고 있음을 알 수 있었다.

(3) 유한요소해석 결과 분말 성형체와 금형, 분말 성형체와 펀치의 마찰로 인해 구리/철 이종재료 외부의 구리와 철분말 성형체의 상대밀도는 단면의 상하 모서리 부근에서 가장 높고, 전체 성형체 중간 부근의 바깥쪽에서 가장 낮게 예측되고 있다.

(4) 구리/철 이종재료의 유한요소해석 결과 정수응력과 유효응력은 내부 분말 성형체의 경우 비교적 균일한 응력분포를 보이지만, 외부 분말 성형체의 경우 분말 성형체와 금형, 분말 성형체와 펀치의 마찰로 인해 분말 성형체 단면의 상하 모서리 부근에서는 다소 불균일한 분포를 보이고 있다.

참고문헌

- (1) Krishna, B. V., Venugopal, P. and Rao, K. P., 2005,

- “Co-extrusion of Dissimilar Sintered P/M Performs-an Explored Route to Produce Bimetallic Tubes,” *Materials Science and Engineering A*, Vol. A407, pp. 77~83.
- (2) Krishna, B. V., Venugopal, P. and Rao, K. P., 2005, “Analysis of Deformation during Simultaneous Plastic Deformation of Dissimilar Powder Metallurgical Performs,” *Powder technology*, Vol. 146, pp. 137~146.
- (3) Durgalakshmi, D., Krishna, B. V., Venugopal, P. and Achar, D. R. G., 2003, “Studies on Cold State Joining of Dissimilar Powder Metallurgical Performs,” *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 132, pp. 293~304.
- (4) Kazanowski, P., Epler, M. E. and Misiolek, W. Z., 2004, “Bi-metal Rod Extrusion-process and Product Optimization,” *Materials Science and Engineering A*, Vol. 369, pp. 170~180.
- (5) Shima, S. and Oyane, M., 1976, “Plasticity Theory for Porous Metals,” *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 18, pp. 285~291.
- (6) *ABAQUS User's I and II Manual*, Hibbitt, Karlsson, and Sorensen, 1998.
- (7) Aravas, N., 1987, “On The Numerical Integration of A Class of Pressure-Dependent Plasticity Models,” *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, Vol. 24, pp. 1395~1416.
- (8) Lush, A. M., Weber, G. and Anand, L., 1989, “An Implicit Time-integration Procedure for A Set of Internal Variable Constitutive Equations for Isotropic Elasto-Viscoplasticity,” *International Journal of Plasticity*, Vol. 5, pp. 521~549.
- (9) Govindarajan, R. M., 1992, *Deformation Processing of Porous Metals*, Doctoral thesis, University of Pennsylvania, U. S. A.
- (10) Kim, K. T. and Lee, H. T., 1998, “Effect of Friction Between Powder and a Mandrel on Densification of Iron Powder during Cold Isostatic Pressing,” *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 40, pp. 507~519.
- (11) Kim, K. T., Cho, J. H. and Kim, J. S., 2000, “Cold Compaction of Composite Powders,” *Journal of Engineering Materials and Technology*, Vol. 122, pp. 119~128.
- (12) Boyer, H. E., 1987, *Hardness Testing*, ASM International, pp. 31~55.
- (13) Song, M. C., Kim, H. G. and Kim, K. T., 1996, “Creep Densification of Copper Powder Compact,” *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 38, No. 11, pp. 1197~1208.
- (14) Kwon, Y. S., Lee, H. T. and Kim, K. T., 1997, “Analysis for Cold Die Compaction of Stainless Steel Powder,” *Journal of Engineering Materials and Technology*, Vol. 119, pp. 366~373.