

## 냉간압축 하에서 지르코니아 분말이 혼합된 알루미늄합금 분말의 치밀화 거동

유현석\* · 이성철\* · 김기태†

(2001년 9월 24일 접수, 2002년 5월 27일 심사완료)

### Densification Behavior of Aluminum Alloy Powder Mixed with Zirconia Powder Inclusion Under Cold Compaction

Hyun Seok Ryu, Sung Chul Lee and Ki Tae Kim

**Key Words :** Densification(치밀화), Composite Powders(혼합 분말), Constitutive Model(구성모델), Cap Model(캡 모델), Hard Inclusion(강성 첨가물), Finite Element Analysis(유한요소해석), Triaxial Compression(삼축압축), Cold Die Compaction(냉간금형압축), Cold Isostatic Pressing(냉간정수압압축)

#### Abstract

Densification behavior of composite powders was investigated during cold compaction. Experimental data were obtained for aluminum alloy powder mixed with zirconia powder inclusion under triaxial compression. The Cap model with constraint factors was implemented into a finite element program (ABAQUS) to simulate compaction responses of composite powders during cold compaction. Finite element results were compared with experimental data for densification behavior of composite powders under cold isostatic pressing and die compaction. The agreements between experimental data and finite element calculations from the Cap model with constraint factors were good.

#### 1. 서론

분말야금법은 우수한 물성을 갖는 기계부품을 추가적인 가공 없이 정형(near-net-shape)에 가깝게 성형할 수 있는 장점을 지닌다. 분말야금법에 의해 성형할 경우, 상온에서 냉간정수압압축이나 금형압축공정을 통해 임의의 형상으로 성형한 후 상압소결이나 단조를 거쳐 제품을 완성하게 된다. 상온에서 분말성형시 분말과 금형사이에 발생하는 마찰은 성형체 내부의 불균일한 밀도구배와 잔류응력을 생성하여, 고온에서 소결이나 단조시 성형체의 균열과 뒤틀림을 초래한다. 특히 자동차 부품, 항공기엔진 부품 등의 복잡한 형상의 제품과

종횡비가 큰 링, 노즐 등의 경우 냉간성형시 성형체 내부의 높은 불균일성(inhomogeneity)때문에 소결이나 단조 후 제품의 형상제어는 쉽지 않다. 따라서 냉간압축 성형공정 중에 발생하는 분말성형체 내부의 불균일성(inhomogeneity)를 최소화하고 최적 형상제어를 위해서 수치모사가 중요하며, 적절한 수치모사를 위해서는 분말의 치밀화 거동을 예측할 수 있는 구성모델이 필수적이다. 최근에는 우수한 물성치를 지닌 합금재료와 복합재료에 대한 주요한 제조방법으로 분말야금법이 대두되면서 혼합분말의 치밀화 거동에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.

현재까지 여러 연구자에 의해 혼합분말에 대한 치밀화 거동을 예측하기 위한 구성모델이 다음과 같이 연구되었다. Jefferson 등<sup>(1)</sup>은 고립된 강성분말 들레를 싸고 있는 연성분말의 치밀화 거동을 연구하였고, Bouvard<sup>(2)</sup>는 동일한 크기로 혼합된 강성분말과 연성분말이 먹수법칙에 따라 변형한다고 가정하고 정수압 하에서 치밀화 거동을 예측할

\* 포항공과대학교 대학원

† 책임저자, 회원, 포항공과대학교 기계공학과

E-mail : korean@postech.ac.kr

TEL : (054)279-2164 FAX : (054)279-5569

수 있는 모델을 제안하였다. Storåkers 등<sup>(3)</sup>은 혼합분말의 크기, 경화 계수 및 크리프 계수가 동일하다는 가정 하에서 분말사이의 치밀화거동을 미시적으로 연구하여 점탄성 모델을 제안하였다. 또한 Bonnenfant 등<sup>(4)</sup>은 비선형 변분 방법(non-linear variational method)을 바탕으로 다양한 크기를 지닌 혼합분말의 치밀화 거동에 대한 모델을 연구하였다. 최근 Kim 등<sup>(5)</sup>은 다른 경화 계수, 동일한 크기를 지닌 혼합분말의 치밀화 모델을 제안하고, 구리와 텅스텐의 혼합분말의 실험치를 제안된 모델의 해석치와 비교한 바 있다. 그러나, 이제까지 열거한 모델들은 혼합분말의 거시적 치밀화 거동 예측에 적용 가능했으나, 혼합분말 성형체 내부의 국부적 치밀화 거동 예측에 대해서는 혼합분말의 항복식 제안과 유한요소해석이 용이하지 않아 적용하기 쉽지 않은 것이 사실이었다.

이러한 모델의 한계를 극복하고자, Kim 과 Cho<sup>(6)</sup>는 혼합분말사이의 접촉수에 따라 연성분말과 강성분말의 항복식을 혼합한 모델을 제안하여 냉간 압축하에서 혼합분말 성형체 내부의 국부적이고 불균일한 치밀화 거동을 예측하였다. 그러나, 세라믹이 첨가된 혼합분말의 경우, 세라믹은 소성변형이 거의 없으므로 항복식 혼합이 용이하지 않아 Kim 과 Cho<sup>(6)</sup>의 모델은 세라믹이 혼합된 혼합분말의 치밀화 거동 예측에 적합하지 않았다.

최근 Lee 와 Kim<sup>(7)</sup>은 제안된 Cap 모델을 통해 일반화중 하에서 알루미늄합금분말의 치밀화 거동을 잘 예측하였으며, Storåkers 등<sup>(3)</sup>은 단일분말과 혼합분말사이의 거시적 응력관계를 구속계수(constraint factor)로서 표현할 수 있음을 보였다. 따라서 구속계수가 도입된 Cap 모델<sup>(7)</sup>은 세라믹분말이 첨가된 혼합분말의 거시적 치밀화 거동 뿐 아니라 국부적 치밀화 거동 예측에 효과적일 수 있다.

본 논문에서는 알루미늄합금 분말에 지르코니아 분말을 첨가한 혼합분말에 대해 상온압축실험시 치밀화 거동을 관찰하였다. 또한 알루미늄합금 분말에 적용된 Cap 모델<sup>(7)</sup>에 Storåkers 등<sup>(3)</sup>이 제안한 구속계수를 도입한 후 냉간압축공정을 유한요소해석하여 실험결과와 비교하였다.

## 2. 이론적 배경

### 2.1 구성방정식

전체 변형률 속도성분  $\dot{\epsilon}_{ij}$ 는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\dot{\epsilon}_{ij} = \dot{\epsilon}_{ij}^{(el)} + \dot{\epsilon}_{ij}^{(in)} \quad (1)$$

여기서,  $\dot{\epsilon}_{ij}^{(el)}$ 와  $\dot{\epsilon}_{ij}^{(in)}$ 는 각각 탄성변형률 속도성

분과 비탄성변형률 속도성분을 나타낸다. 탄성변형에 대해서 후크의 법칙을 적용하면 응력 성분  $\sigma_{ij}$ 는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\sigma_{ij} = C_{ijkl}^{(el)} \epsilon_{kl}^{(el)} \quad (2)$$

여기서,  $C_{ijkl}^{(el)}$ 는 4 차 탄성계수이다.

비탄성 거동은 실험으로 구한 항복함수에 조합 유동법칙(associated flow rule)을 적용하여 해석하였다. 따라서, 비탄성 변형률 속도 성분  $\dot{\epsilon}_{ij}^{(in)}$ 는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\dot{\epsilon}_{ij}^{(in)} = \dot{\lambda} \frac{\partial f}{\partial \sigma_{ij}} \quad (3)$$

여기서  $f$ 는 항복함수이며,  $\dot{\lambda}$ 는 양의 스칼라양이다.

질량 불변의 관계로부터 상대밀도의 변화율  $\dot{D}$ 은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\dot{D} = -D\dot{\epsilon}_{kk}^{(in)} \quad (4)$$

### 2.2 Cap 모델과 구속계수

Lee 와 Kim<sup>(7)</sup>은 알루미늄합금 분말의 삼축압축 실험을 통해 다음과 같은 Cap 모델을 제안하였다.

$$q + A(D) \cdot \cosh\{B(D) \cdot p\} = C(D) \quad (5)$$

여기서  $p$ 는 정수응력,  $q$ 는 편차응력,  $D$ 는 상대밀도를 나타내며, 계수들은 다음식으로 나타낼 수 있다.

$$A(D) = 67.136 \cdot D^{3.9429}, \quad B(D) = 0.0052114 \cdot D^{-7.3903} \\ C(D) = 401.027 \cdot D^{3.8420} \quad (6)$$

또한 분말의 재배열에 의한 치밀화 기구가 지배적인 초기밀도구간에서 Lee 와 Kim<sup>(7)</sup>은 다음의 Cap 모델<sup>(8)</sup>을 적용하였다.

$$q + \cosh\{A(D) \cdot p\} = B(D) \quad (7)$$

여기서,

$$A(D) = 0.0079144 \cdot D^{-8.3183} \\ B(D) = 1322.4 \cdot D^{8.8093} \quad (8)$$

유한요소해석시 서로 다른 항복함수를 사용하여 계산할 때의 급격한 변화를 피하기 위해 다음과 같은 혼합법칙(mixed rule)을 사용하였다.

$$f = \left(\frac{D_2 - D}{D_2 - D_1}\right) f_1 + \left(\frac{D - D_1}{D_2 - D_1}\right) f_2 = 0 \quad (9)$$

여기서,  $f_1$ 은 식 (7)을 사용한 항복함수이며,  $f_2$

는 식 (5)의 항복합수를 나타낸다.  $D_1$  과  $D_2$  는 각각 혼합법칙이 적용되는 구간이 시작되는 상대 밀도와 끝나는 상대 밀도를 나타내며 본 논문에서는  $D_1=0.715$  와  $D_2=0.74$  를 사용하였다.

Storåkers 등<sup>(9)</sup>은 혼합 분말과 단일 분말이 같은 경로로 변형할 때 혼합분말성형체의 거시응력,  $\sigma_{II}^I$  과 단일분말성형체의 거시응력  $\sigma_{II}^M$  의 관계를 다음과 같이 제안하였다.

$$\sigma_{II}^I = K_c \sigma_{II}^M \tag{10}$$

여기서,  $K_c$  는 구속계수(constraint factor)로서 다음과 같이 정의 된다.

$$K_c = \frac{D_c Z_c (f_1 + f_2 \rho^2)}{D_o Z_o (f_1 + f_2 \rho^3)(f_1 + f_2 \rho)} \left[ \frac{(f_1 + f_2 \rho)(f_1 + f_2 \rho^2)}{(f_1^2 + 2f_1 f_2 \rho \gamma_{12} + f_2^2 \rho^2 \gamma_{22})} \right]^{\frac{2-M-N}{2}} \tag{11}$$

여기서,  $D_c$  와  $Z_c$  는 혼합분말의 초기 상대밀도와 분말의 접촉수이고  $D_o$  와  $Z_o$  는 단일분말의 초기 상대밀도와 분말의 접촉수이며,  $f_1$  과  $f_2$  는 각각 알루미늄합금분말과 지르코니아분말의 부피분율,  $\rho$  는 분말의 크기 비율( $\frac{r_2}{r_1}$ ),  $\gamma_{12}$  와  $\gamma_{22}$  는 분말의 장도의 비율에 따른 변수,  $M$  은 경화지수,  $N$  은 크립 지수를 나타낸다.

지르코니아 분말의 부피분율이 작을 경우, 알루미늄합금 분말의 이론초기밀도 0.64 에 상대적으로 크기가 매우 작은 지르코니아 분말이 알루미늄합금 분말사이로 충전된다고 가정하였다. 이 때  $D_c$  는 다음과 같이 구할 수 있다.<sup>(9)</sup>

$$D_c = \frac{0.64}{f_2} \tag{12}$$

### 2.3 구성 방정식의 수치 적분

유한요소해석 프로그램인 ABAQUS 의 사용자 정의 서브루틴 UMAT 을 사용하여 금형압축과 냉간정수압 하에서의 혼합 분말의 치밀화 거동을 해석하였다.<sup>(10)</sup> 유한요소법에 적용하는 구성방정식의 수치적분은 다른 논문에서 찾을 수 있으므로 본 논문에서는 언급하지 않았다.<sup>(11,12)</sup>

## 3. 실험

본 논문에서는 알루미늄합금(Al6061, Valimet inc., U.S.A.) 분말과 지르코니아 분말(HSY-3.0, Daiichi-

**Table 1** Physical property and chemical composition of Al6061 powder

Average size [ $\mu\text{m}$ ]	55
Chemical composition	
[wt%]	
Cr	0.07
Cu	0.25
Fe	0.25
Mg	0.89
Mn	0.03
Si	0.65
Ti	0.02
V	0.01

**Table 2** Physical property and chemical composition of HSY-3.0 zirconia powder

Specific surface area [ $\text{m}^2/\text{g}$ ]	6.4
Average particle size [ $\mu\text{m}$ ]	0.53
Chemical composition	
[wt%]	
ZrO <sub>2</sub>	94.06
Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5.41
CaO	0.02
NaO	0.01
Loss of ignition	0.13

**Table 3** Mechanical properties of Al6061 powder

Theoretical density [ $\text{g}/\text{cm}^3$ ]	2.70
Young's Modulus [GPa]	69.7
Poisson's ratio	0.33

**Table 4** Mechanical properties of HSY-3.0 zirconia powder

Theoretical density [ $\text{g}/\text{cm}^3$ ]	6.08
Young's Modulus [GPa]	206
Poisson's ratio	0.31

Kigenso Kagaku Kogyo Co. Ltd., Japan)을 사용하였다. 분말들의 물리적 성질과 화학적 조성을 Table 1 과 2 에 나타내었으며 기계적 물성치는 Table 3 과 4 에 나타내었다.

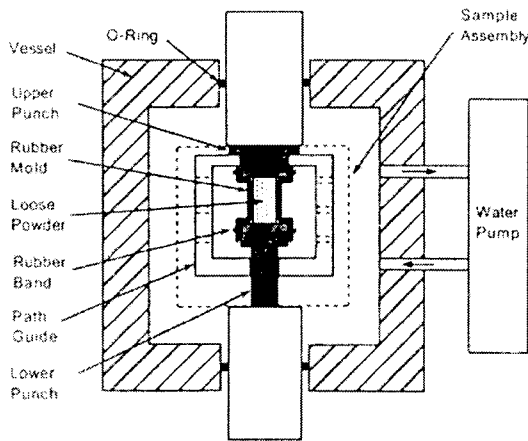


Fig. 1 A schematic drawing of the triaxial compression test apparatus

3.1 시편의 준비

알루미늄합금 분말과 지르코니아 분말의 균일한 혼합을 위해 다음과 같이 수행하였다. 먼저 부피분율 5%, 10%, 20%의 혼합분말을 각각 3시간 이상 중력혼합기(gravity mixer)를 이용하여 혼합하였다. 세라믹 분말은 응집된 상태로 존재하기 때문에 혼합된 분말을 볼밀(ball mill)하였다. 그 후 다시 중력 혼합기로 약 1시간 동안 혼합하였다.

3.2 삼축압축시험과 정수압시험

본 논문에서는 혼합분말이 든 실리콘고무몰드에 일정한 구속압력을 주고 축 하중을 가하는 표준삼축압축(standard triaxial compression)시험장치를 사용하였다.

삼축압축 시험에 쓰이는 시편은 다음과 같이 제조하였다. Fig. 1 처럼 1 mm 두께의 실리콘고무몰드 아래부분을 하부압반으로 밀봉시키고, 혼합분말을 직경 11.28 mm, 높이 20 mm의 부피의 고무몰드에 충전시켰다. 진공펌프를 이용하여 실리콘고무몰드내의 공기를 빼고 윗부분도 상부압반으로 밀봉시켰다.

냉간정수압압축기(CIP, ABB Autoclave Systems Inc.)로 10~300 MPa 범위의 구속압력( $P_c$ , confining pressure)을 가한 후, MTS 재료 시험기로 0~250 kN 범위의 축 하중을 가하였다. 하중을 가하는 압축 펀치의 속도는 0.02 mm/s 로 일정하게 실험하였다. 정수압시험은 축하중이 제거된 상태에서 구속압력만 가해 이루어졌다. 분말성형체의 밀도는 아르키메데스의 비중법을 이용하여 측정하였다.

3.3 냉간금형압축 실험

혼합분말의 냉간금형압축 실험은 일방향 압축

(single action pressing)으로 하였다. 호칭으로 제조된 내부 직경 20 mm의 금형에 약 14~16 g의 혼합분말을 채운 후 50~350 MPa의 축 압력을 가하여 압축하였다. 압축된 성형체는 상부에서 하부 방향으로 이젝트하였으며, 시편의 질량, 직경 및 높이를 측정하여 상대밀도를 구하였다.

3.4 밀도분포측정

본 논문에서는 로크웰경도와 상대밀도와의 상관관계를 구하기 위해 냉간금형압축을 가하여 시편을 성형하였다. 성형된 시편은 소결전과 상대밀도 차이가 나지 않도록 520°C에서 20분간 소결 후 중앙단면을 절단하였다. 절단된 시편은 190°C에서 1.5시간 어닐링 한 후 1.58 mm(1/16inch) 강 구압자(hardened steel ball indenter)로 15 kgf의 하중을 30초간 가하여 각 시편마다 10개의 경도값을 측정하였다. 측정한 각 시편의 경도값들을 평균하여 상대밀도와 로크웰경도의 상관관계를 구하였다.

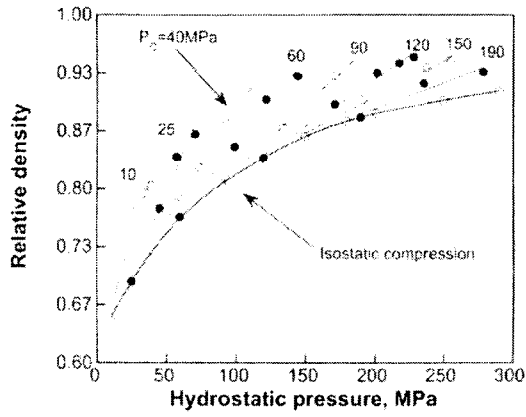
실험에서 구한 상관관계를 이용하여 분말성형체 단면에서 측정된 로크웰 경도값으로부터 시편내의 상대밀도분포를 구하였다. 경도측정시 전체의 1/2 단면에 대하여 2.5 mm 간격으로 28 (4x7)개의 격자를 만든 후 적분점(integral point)을 따라 경도값을 측정하였다.

4. 결과 및 고찰

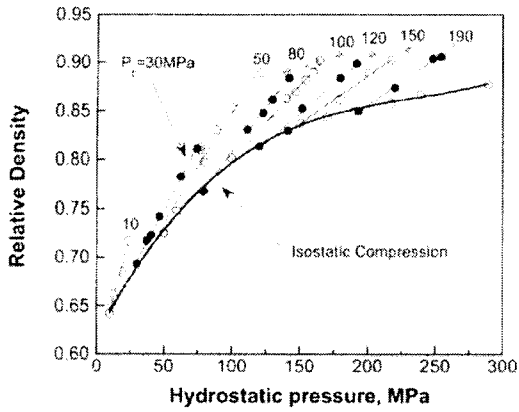
4.1 삼축압축시험

Fig. 2는 10~190 MPa의 여러 구속압력에서 축 하중을 가하였을 때 지르코니아 부피분율 5%, 10%, 20%의 혼합분말성형체의 상대밀도 변화를 나타낸다. 정수압만을 가했을 때보다 전단응력을 추가하여 삼축압축 형태로 하중을 가할 때 상대밀도가 크게 증가하며, 구속압력이 낮을수록 가해진 전단응력이 분말성형체의 치밀화에 미치는 영향이 큼을 알 수 있다.

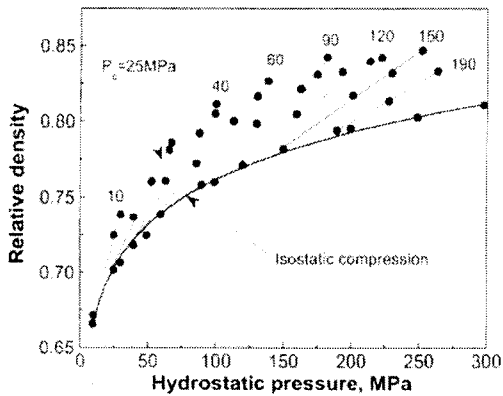
Fig. 3은 여러 구속압력에서 축 하중을 가하였을 때 지르코니아 부피분율 5%, 10%, 20%의 혼합분말성형체의 등밀도 실험치와 구속계수를 이용한 항복곡선을 나타낸다. 구속계수  $K_c$ 의 계산시 분말크기의 비율인  $\rho$ 는 0.009636의 값을 갖으며, 세라믹 분말인 지르코니아 분말은 소성변형이 일어나지 않는다고 가정하였을 때 분말 강도의 비율인  $k$ 는  $\infty$ 의 값을 갖는다. 알루미늄 합금 모재의 경화지수,  $M$ 의 값으로 0.13346을 사용하였고<sup>17)</sup>, 상온에서 크리프현상은 없다고 가정하고  $N=0$ 의 값



(a)



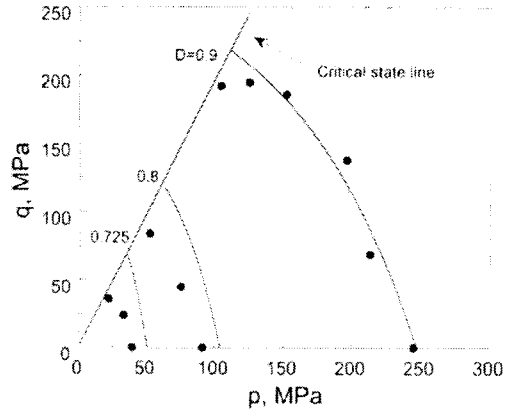
(b)



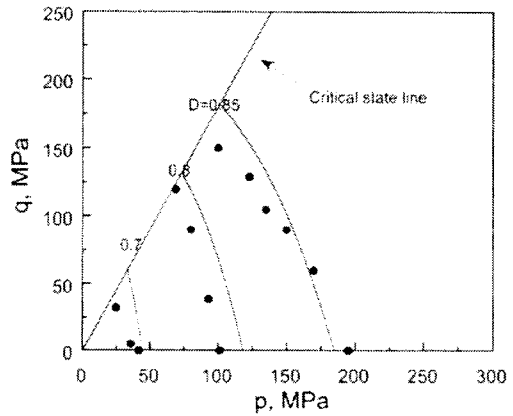
(c)

Fig. 2 Variation of relative density of (a) 5 vol% (b) 10 vol% (c) 20 vol% of Al alloy composite powder with hydrostatic pressure at various confining pressures ( $P_c$ ) during triaxial compression

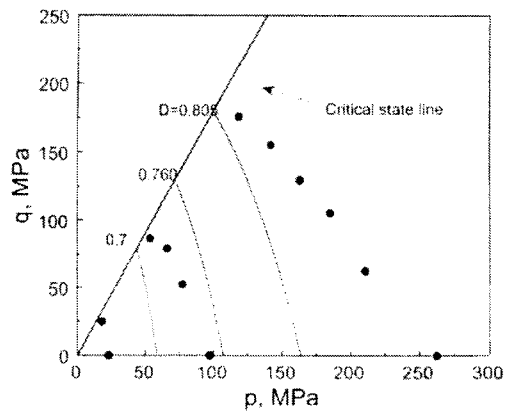
을 대입하였다.  $Z_c=12D_c$ ,  $D_0=0.64$ ,  $Z_0=12D_0$ ,  $D_c$  는 식 (12)의 초기이론밀도를 적용하였다. 항복곡선은 지르코니아 부피분율 5%, 10% 혼합분말의 삼축



(a)



(b)



(c)

Fig. 3 Experimental iso-density data of (a) 5 vol%, (b) 10 vol% (c) 20 vol% of Al alloy composite powder and iso-density curves fitted with Equation (5.7) considering constraint factors

압축실험치와 전반적으로 잘 일치하였다. 부피분율 20%의 경우  $D=0.805$ 의 등밀도 실험치에서 다소 차이가 발생하였다. Lange 등<sup>[13]</sup>은 일반적으로

첨가물 부피분율 20%부근에서 첨가물이 외부하중을 지지하여 치밀화를 방해하는 침투망(percolation network)이 시작됨을 연구하였다. 또한 Bouvard와 Lange<sup>14)</sup>는 첨가물 분말크기가 작고 부피분율이 증가할수록, 침투망이 쉽게 생성됨을 수치모사하였다. 따라서 Fig. 3(c)의 부피분율 20%에서 높은 정수압 가압시 침투망에 의한 하중지지효과는 치밀화 속도 감소의 중요요인으로 설명될 수 있다. 그러나 구속계수는 침투망 효과를 고려하지 못하므로 부피분율 20%에서  $D=0.805$ 의 항복곡선은 항복응력을 낮게 예측하였다.

4.2 냉간압축실험과 유한요소해석 결과의 비교

냉간정수압압축 시에는 x 축과 y 축에 대하여 대칭이므로 전체 단면의 1/4에 대해서 해석을 하였으며 냉간금형압축시 분말 성형체는 y 축에 대하여 대칭이므로 전체 단면의 1/2에 대해서 해석을 하였다. Fig. 4는 냉간금형압축 공정을 해석하기 위한 유한요소 격자와 경계조건을 나타낸다.

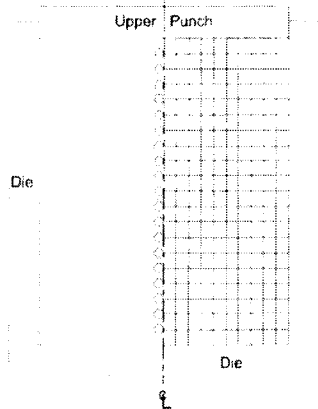


Fig. 4 Finite element meshes and boundary conditions for single action pressing of composite powder

유한요소 격자는 4 절점 축대칭 요소(CAX4R)와 4 절점 축대칭 개면요소를 사용하였다.

Fig. 5는 혼합분말의 냉간정수압압축의 실험결과와 유한요소해석결과를 나타낸다. 전체적으로 같은 정수압하에서 지르코니아 부피분율이 증가함에 따라 상대밀도는 낮아지지만, 단일분말의 치밀화 거동과 비교할 때 낮은 압력조건에서 급격한 치밀화를 보이고 상대밀도가 증가함에 따라 치밀화 속도는 상대적으로 감소함을 알 수 있다. 이는 초기에 상대적으로 크기가 작은 지르코니아 분말이 알루미늄합금 분말의 사이에 채배열되므로 분말의 상대밀도는 크게 증가했지만, 치밀화가 진행됨에 따라 지르코니아 분말이 치밀화에 가해지는 외부압력을 분담하여 치밀화를 방해하기 때문이다. 유한요소해석 결과는 각 부피분율에 따른 실험치를 비교적 잘 예측하였으나, 200 MPa 이상 정수압 가압시 부피분율 20%의 실험치를 다소 높게 예측하였다.

Fig. 6은 정수압 50 MPa를 가했을 때, 혼합분말

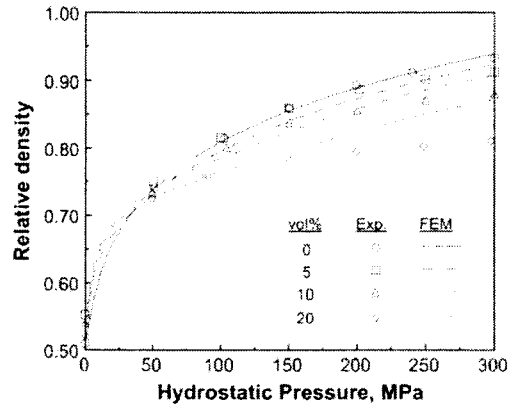


Fig. 5 Comparison between experimental data and FEM results using the Cap model with constraint factors in Al alloy composite powder during cold isostatic pressing at various volume fractions of zirconia

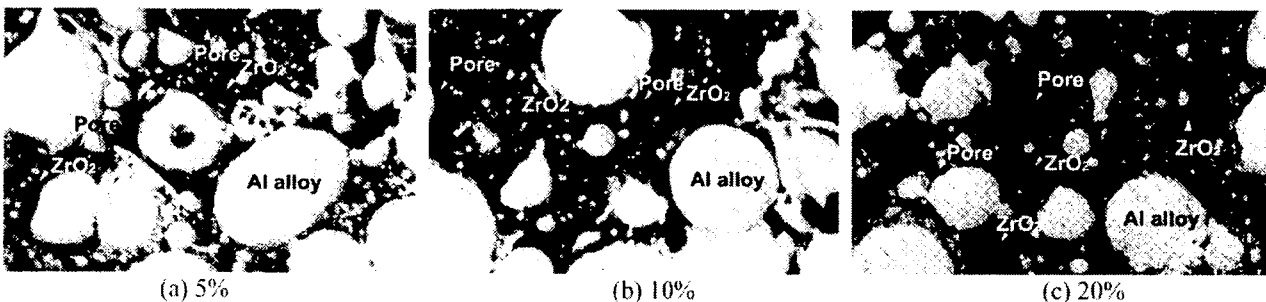


Fig. 6 Optical micrographs of mixed powder compacts of various zirconia vol% under cold isostatic pressing under 50 MPa

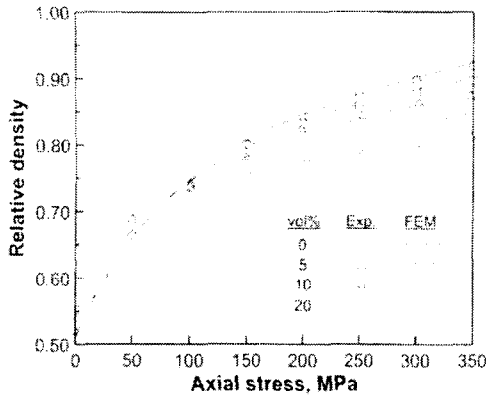


Fig. 7 Comparison between experimental data and FEM results by using the Cap model with the constraint factor for Al alloy composite powder during cold die compaction at various volume fractions of zirconia

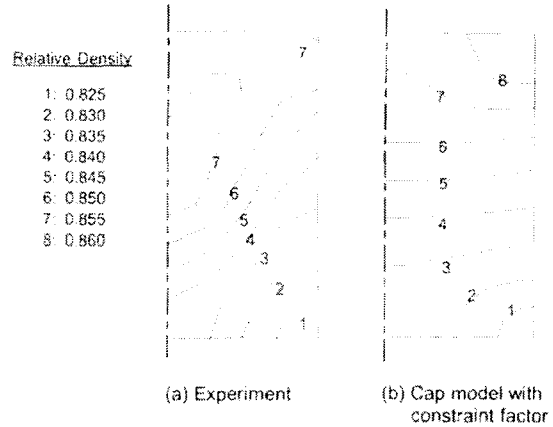


Fig. 9 Comparison between experimental data and finite element result for relative density contour plot of a Al alloy composite powder compact mixed with 10 vol% of zirconia powder by single action pressing under axial stress of 250 MPa

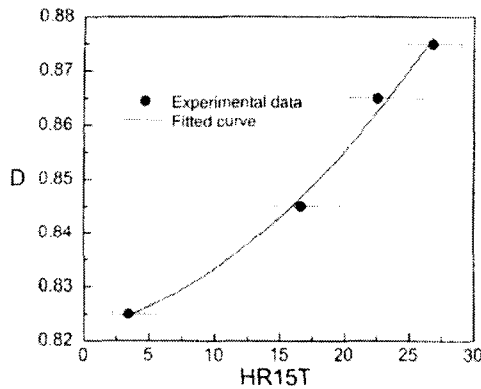


Fig. 8 Variation of relative density with Rockwell hardness for Al alloy composite powder compacts mixed with 10 vol% of zirconia powder

Fig. 7 은 혼합분말의 냉간금형압축실험의 결과와 유한요소해석 결과를 나타낸다. 금속과 세라믹 분말의 냉간금형압축시 분말성형체와 금형벽면 사이에 마찰력이 작용하는데 마찰계수 0.24 를 적용하여 유한요소해석을 하였다<sup>17)</sup>. 해석치는 지르코니아 부피분율 0~20%의 실험치를 잘 예측함을 알 수 있다. 혼합분말의 실험결과에서 정수압압축실험결과와 같이 지르코니아 분말의 첨가에 의해 초기 치밀화는 향상되지만 말기 치밀화 속도가 감소되며 지르코니아 분말의 부피분율이 증가함에 따라 감소되는 정도가 커짐을 알 수 있다.

Fig. 8 은 지르코니아 부피분율 10% 혼합분말 성형체의 로크웰경도 값과 상대밀도의 관계를 나타내며 식은 다음과 같다.

$$D = 0.822 + 5.69 \times 10^{-4} \cdot (HR15T) + 5.365 \times 10^{-5} \cdot (HR15T)^2 \quad (13)$$

Fig. 9 는 부피분율 10%의 알루미늄합금 분말을 250 MPa의 가압력으로 일방향 냉간금형압축한 후 하부에서 상부방향으로 이젝트하였을 때 분말 성형체 내부의 상대밀도분포를 나타내는 실험치와 유한요소해석결과를 나타낸다. 해석결과는 시편 내부의 상대밀도 구배를 비교적 잘 예측하고 있음을 알 수 있다.

### 5. 결론

지르코니아가 첨가된 알루미늄 합금 혼합분말의 삼축압축실험, 냉간정수압압축실험 및 냉간금형압축실험을 수행하였다. 캡 모델에 이론충진밀

성형체 내부의 광학현미경 사진을 나타낸다. 알루미늄합금 분말사이에 채워져 있는 지르코니아 분말의 크기가 상대적으로 매우 작으므로, 지르코니아 분말사이에 생성된 배제부피(excluded volume)안으로 알루미늄합금 분말이 적게 소성변형함을 확인할 수 있다. 부피분율이 5 %인 분말성형체의 경우 10%, 20%에 비해서 지르코니아 분말사이에 기공이 적게 존재하고 분말의 재배열이 잘 이루어져 정수압 50 MPa에서 실험치가 높았음을 확인할 수 있다. 또한 Fig. 6(c)에서 부피분율 20% 경우 알루미늄합금 분말이 고립될 경우가 많으므로 지르코니아 분말들이 쉽게 침투망을 생성함을 예측할 수 있다.

도를 이용한 구속계수를 도입하여 유한요소해석을 한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 유한요소해석결과는 지르코니아 부피분율 5%와 10% 및 20%의 혼합분말에 대한 삼축압축 실험치를 비교적 잘 예측하였다.

(2) 유한요소해석의 결과는 혼합 분말의 냉간정수압압축과 냉간금형압축시 거시적, 국부적 실험치를 비교적 잘 예측하였다.

(3) 혼합분말의 부피분율이 높고 첨가물 분말 크기가 상대적으로 작을수록 압입에 의한 혼합분말사이의 변화량 이외에도 침투망에 의한 하중지지 효과의 고려가 필요하다.

## 후 기

본 논문은 2000년도 한국학술진흥재단의 지원(KRF-2000-041-E00025)에 의해서 연구되었으며 이에 감사드립니다.

## 참고문헌

(1) Jefferson, G., Bassani, J. L., Xu, J. and McMeeking, R. M., 1994, "Densification by Plastic Deformation around Spherical Inclusions," *Int. J. Solids Structures*, Vol. 31, No. 22, pp. 3059-3077.  
 (2) Bouvard, D., 1993, "Modelling the Densification of Powder Composites by Power Law Creep," *Acta Metal. Mater.*, Vol. 41, No. 5, pp. 1413-1420.  
 (3) Storåkers, B., Fleck, N. A. and McMeeking, R. M., 1999, "The Viscoplastic Compaction of Composite Powders," *J. Mech. Phys. Solids*, Vol. 47, pp. 785-815.  
 (4) Bonnenfant, D., Mazerolle, F. and Suquet, P., 1998,

"Compaction of Powders Containing Hard Inclusion: Experiments and Micromechanical Modeling," *Mechanics of Materials*, Vol. 29, pp. 93-109.  
 (5) Kim, K. T., Cho, J. H. and Kim, J. S., 2000, "Cold Compaction of Composite Powders," *ASME J. Eng. Mat. Tech.*, Vol. 122, pp. 119-128.  
 (6) Kim, K. T. and Cho, J. H., 2001, "Densification Behavior of Mixed Metal Powder Under Cold Compaction," *Int. J. Mech. Sci.*, Vol. 43, pp. 2929-2946.  
 (7) Lee, S. C. and Kim, K. T., 2001, "Densification Behavior of Aluminum Alloy Powder under Cold Compaction," *Int. J. Mech. Sci.*, Submitted for Publication.  
 (8) Kim, K. T., Choi, S. W. and Park, H., 2000, "Densification Behavior of Ceramic Powder Under Cold Compaction," *ASME J. Eng. Mat. Tech.*, Vol. 122, No. 4, pp. 238-244.  
 (9) Zok, F. and Lange, F. F., 1991, "Packing Density of Composite Powder Mixtures," *J. Am. Ceram. Soc.*, Vol. 74, No. 8, pp. 1880-1885.  
 (10) *ABAQUS user's manual*, 1998, Habbitt, Karlsson and Sorensen.  
 (11) Aravas, N., 1987, "On the Numerical Integration of A Class of Pressure-Dependent Plasticity Models," *Int. J. Num. Meth. Engrg.*, Vol. 24, pp. 1395-1416.  
 (12) Govindarajan, R. M., 1992, "Deformation Processing of Porous Metals," *Doctoral thesis*, University of Pennsylvania, U.S.A.  
 (13) Lange, F. F., Atteraa, L., Zok, F. and Porter, J. R., 1991, "Deformation Consolidation of Metal Powders Containing Steel Inclusions," *Acta Metal. Mater.*, Vol. 39, pp. 209-219.  
 (14) Bouvard, D. and Lange, F. F., 1991, "Relation between Percolation and Particle Coordination in Binary Powder Mixtures," *Acta Metal. Mater.*, Vol. 39, No. 12, pp. 3083-3090.