

온간 성형 하에서 Al 합금 분말의 정밀정형에 대한 유한요소해석

김기태[†] · 양훈철* · 김종광*

A Finite Element Analysis for Near-net-shape Forming of Al6061 Powder under Warm Pressing

KiTae Kim, HoonChul Yang, JongKwang Kim

Key Words : Rubber Mold (고무 몰드), Near-net-shape Forming (정밀정형), Warm Die Pressing (온간 금형압축 성형), Rubber Isostatic Pressing (고무 등가압 성형), Finite Element Analysis (유한요소해석), Strain Energy Potential (변형률 에너지 포텐셜)

Abstract

A finite element analysis for near-net-shape forming of Al6061 powder was performed under warm pressing. The advantages of warm compaction by rubber isostatic pressing were discussed to obtain parts with better density distributions. To simulate densification and deformed shape of a powder compact during warm pressing, the elastoplastic constitutive equation based on yield function of Shima-Oyane was implemented into a finite element program(ABAQUS). The hyperelastic constitutive equation based on the Ogden strain energy potential was employed to analyze nonlinear elastic response of rubber. Finite element results were compared with experimental data for Al6061 powder compacts under warm pressing.

1. 서 론

일반적인 분말 야금 공정으로는 분말 단조 (Powder Forging), 분말 사출 성형(PIM: Powder Injection Molding), 열간 등가압 성형(HIP: Hot Isostatic Pressing), 금형압축(Die Pressing) 등이 있다. 기계요소는 이러한 공정들을 이용하여 분말을 성형한 후 소결이나 최종가공을 거쳐 생산한다. 최종부품의 기계적 성질은 분말 성형체를 제조하는 과정에서 발생하는 여러가지 요인들에 의해 결정된다. 그 중에서도 가장 중요한 인자중의 하나가 금형벽과 분말의 마찰이다. 이것은 성형체 내부의 불균일한 밀도구배를 발생시키고, 소결된 최종부품의 기계적인 물성저하와 불필요한 가공을 초래한다.

90 년대 이후에는 분말과 금형을 130~150°C 정

도로 가열하여 성형하는 온간 성형 공정법이 여러 연구자들에 의해 개발되었다.^(1~3) 온간 성형은 기존의 성형공정에 비해 높은 성형밀도와 강도, 성형체 내부의 균일한 밀도분포, 자기성질의 향상 및 정밀정형 등의 장점을 가지고 있다.

Rutz 등⁽⁴⁾은 높은 상대밀도를 얻을 수 있는 온간 성형공정을 최초로 제안하였다. Gagne⁽⁵⁾는 윤활제가 첨가된 분말을 150°C 에서 성형하면, 금형과 분말사이의 마찰력이 감소하여 성형체의 밀도를 증가시킬 뿐만 아니라 압축하중도 25~33%까지 감소한다는 것을 증명한 바 있다. Chemlar 등⁽⁶⁾과 Miller 등⁽⁷⁾은 헬리컬 기어와 자동차의 터빈 허브를 냉간 성형한 경우와 온간 성형한 경우에 소결체와 최종부품의 치수를 비교하여 온간 성형된 경우가 냉간 성형한 경우에 비해서 균일한 밀도구배와 형상변화를 갖는다는 결과를 얻었다.

최근에는 자성 재료의 성질을 향상시키기 위해서 RIP(Rubber Isostatic Pressing)공정이 Sagawa 등⁽⁸⁾에 의해 개발되었다. 고무 등가압 성형은 다른 공정에 비해 고무 몰드의 형상을 적절히 제어하여 정밀정형을 할 수 있을 뿐만 아니라 적은 비용과

[†] 포항공대 기계공학과 교수

E-mail : Korean@postech.edu

TEL : (054)279-2164 FAX : (054)279-5899

* 포항공대 기계공학과 대학원

시간으로 성형체 내부의 밀도구배를 줄일 수 있는 장점이 있다. Shima 등⁽⁹⁾은 RIP 공정에 대한 유한요소해석을 수행하여 정밀 정형이 가능한 고무 몰드의 형상을 최적화 하였으며, Kim 등⁽¹⁰⁾과 Yang 등⁽¹¹⁾은 냉간과 온간 하에서 고무 몰드의 특성에 따른 금속 분말의 치밀화 영향을 조사하였다.

본 논문에서는 알루미늄 합금 분말의 온간에서의 고무 등가압 성형을 수행하여 성형체 내부의 밀도구배를 최소화하고, 유한요소해석을 통한 최적화된 고무 몰드를 이용하여 베벨기어 형태의 부품을 성형하였다. 또한 일반적으로 가장 널리 사용되는 금형압축에 의한 성형 방법과 비교하여 부품 성형시의 가공성 및 성형성을 평가하였다.

2. 실험

본 논문에서는 가스 분사법으로 제조된 평균 입자의 크기가 15 μm 인 Al6061 분말을 사용하였다. 분말의 물리적 성질과 화학적 조성은 다른 논문에서 쉽게 찾을 수 있다.⁽¹¹⁾

2.1 알루미늄 합금 분말의 모재시편

알루미늄 합금 분말의 모재시편을 만들기 위하여 분말을 진공 밀봉하여 열간 등가압 소결기(Kobelco System 30T, Japan)에서 520°C, 100 MPa의 압력으로 2 시간동안 열간 등가압 소결을 하여 상대밀도가 거의 1 인 시편을 제조하였다. 소결 후 캔을 제거하고 시편을 원주형으로 가공하여 210°C의 아르곤 분위기에서 2 시간동안 어닐링하였다. 시편의 최종 치수는 지름 7 mm 높이 10 mm 이며, 상대밀도는 0.995 이상이었다.

2.2 모재 시편의 온간 일축 압축 실험

압축 실험은 고온 분위기의 진공로에서 10°C/min의 승온 속도로 300°C 까지 가열한 후 시편이 열적 평형상태가 되도록 시험 온도를 30 분간 유지하였으며, 0.1 MPa/s의 일정한 하중속도로 200 MPa의 응력 범위에서 하중을 가하였다. 또한 SiC 압반과 압축시편 사이의 마찰을 줄이기 위하여 접촉면에 탄탈륨 박판($t=0.01\text{mm}$)을 삽입하였으며, 시편의 압축된 변위는 LVDT(Linear Variable Displacement Transducer)로 측정하였다.

2.3 고무의 물성 실험

온간 등가압 성형을 위하여 고무 몰드 재료는 실리콘 고무를 사용하였다. 고무에 대한 기계적 특성을 조사하기 위해서 일축 인장, 일축 압축, 그리고 체적 압축실험을 수행하였다. 일축 인장 실험을 수행하기 위하여 고무 시편은 직경 10 mm, 길이 70 mm의 긴 원주형 시편을 제작하였으며,

일축 압축과 체적 압축 실험에서는 직경 20 mm, 높이 20 mm의 원주형 시편을 사용하였다. 일축 인장 실험에서는 고무의 큰 연신율로 인한 수축율이 매우 크기 때문에 시편의 미끄러짐을 방지하기 위해 그립(Grip)을 특별히 제작하였으며, 고무 시편에 하중을 천천히 증가시키면서 신장량을 측정하는 방법으로 실험치를 구하였다. 일축 압축 실험은 압축시 고무 시편과 압반사이의 마찰을 줄이기 위하여 테프론 박판(Teflon Sheet)을 삽입하였다. 체적 압축실험은 고무 시편의 외경과 같은 치수의 금형안에 삽입하여 실험을 수행하였다.

2.4 온간 고무 등가압 성형 실험

고무 등가압 성형 실험은 MTS 재료 시험기에 특별히 제작된 가열로를 사용하여 300°C에서 수행하였다. 실험은 알루미늄 합금 분말을 고무 몰드안에 충전한 후 내경이 43 mm인 초경 금형안에 삽입하여 일축 압축하였으며, 고무 몰드와 금형 사이에 마찰을 줄이기 위해 흑연 윤활제를 사용하였다. 충전 직후 분말의 상대밀도는 0.5였으며, 1 MPa/s의 하중속도로 170 MPa에서 성형하였다.

2.5 온간 금형압축 실험

SKD11로 만든 6개의 금형을 조립하여 18.2g의 알루미늄 합금 분말을 넣어 300°C의 온도에서 금형압축을 수행하였다. 분말과 금형사이에는 마찰을 줄이기 위해 금형 벽면에 흑연 윤활제를 사용하였으며, 1 MPa/s의 일정한 하중속도로 170 MPa의 압력에서 압축하였다. 분말과 금형 및 펀치는 동시에 가열하였으며, 승온 속도는 5°C/min으로 하였다. 열적 평형을 위하여 시험 온도를 30 분간 유지한 후 상부 펀치에서 하부 펀치로 힘이 전달되는 일방향 압축(Single Action Pressing)을 수행하였다.

2.6 분말 성형체의 밀도 분포

경도와 상대밀도의 상관 관계를 얻기 위하여 냉간 정수압 성형기(ABB Autoclave Systems inc.)를 이용하였으며, Al6061 분말을 길이 25 mm, 외경 15 mm, 두께 2 mm인 고무 몰드안에 충전하고 진공 밀봉한 후 50~300 MPa의 정수압을 가하여 다양한 밀도를 갖는 Al6061 분말 성형체를 성형하였다. 성형된 시편은 480°C의 진공 분위기에서 소결 전후 밀도의 변화가 없도록 20 분간 예비 소결한 후 다이아몬드 휠(ISOMET Low Speed Saw, BUEHLER, U.S.A.)로 중앙단면을 절단하였다. 절단된 시편은 진공 분위기에서 190°C의 온도로 2 시간동안 어닐링(Annealing)한 후 단면을 연마하여 1.58 mm(1/16inch) 강구입자로 15 kg 중의 하중을 30 초간 가하여 각 시편마다 20개의 경도 값을 측

정하였다. 측정된 경도값들을 평균하여 Al6061 분말 성형체의 상대밀도와 로크웰 경도 값의 상관관계를 구하였다. 온간 등가압 성형과 온간 금형 압축한 성형체의 상대밀도 분포를 조사하기 위하여 각각의 성형체내부에 일정한 간격으로 로크웰 경도를 측정하고 경도와 상대밀도의 상관관계를 이용하여 시편 내부의 상대밀도 분포를 구하였다.

3. 이론

3.1 고무의 구성 방정식

고무의 변형은 등방성의 성질을 갖고 있다고 가정함으로써 초탄성체의 변형률 에너지 함수로 나타낼 수 있다. Ogden⁽¹²⁻¹⁴⁾은 고무의 거동을 나타내기 위해 변형률 에너지 함수를 다음과 같이 정의하였다.

$$U_o = \sum_{i=1}^N \frac{2\mu_i}{\alpha_i^2} (\bar{\lambda}_i^{\alpha_i} + \bar{\lambda}_2^{\alpha_i} + \bar{\lambda}_3^{\alpha_i} - 3) + \sum_{i=1}^N \frac{1}{D_i} (J^{el} - 1 - R)^{2i} \quad (1)$$

여기서 $\bar{\lambda}_i$, J^{el} 과 N 은 각각 편차 주 연신율 ($\bar{\lambda}_i = J^{-1/3} \lambda_i$), 탄성 체적비와 재료상수를 나타낸다. 또한, μ_i , α_i 와 D_i 는 온도에 의존하는 재료상수이다. 식 (1)에서 D_i 는 재료의 압축성을 나타내며, $D_i = 0$ 은 재료가 완전 비압축성임을 의미한다.

3.2 분말 성형체의 구성 방정식

금속 분말의 소성 변형률 속도 텐서는 다음과 같이 정의된다.

$$\dot{\epsilon}_{ij}^p = \dot{\lambda} \frac{\partial \Phi}{\partial \sigma_{ij}} \quad (2)$$

여기서 Φ 와 $\dot{\lambda}$ 는 각각 분말 재료의 항복 함수와 양의 스칼라 양이다.

상대밀도의 변화율은 질량 불변의 관계로부터 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\dot{D} = -D \dot{\epsilon}_{kk}^p \quad (3)$$

또한 분말 성형체의 변형에너지가 모재의 변형에너지와 같다고 가정하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$D \sigma_m \dot{\epsilon}_m^p = \sigma_{ij} \dot{\epsilon}_{ij}^p \quad (4)$$

여기서 σ_m 은 모재의 유동응력, $\dot{\epsilon}_m^p$ 은 모재의 등가 소성 변형률 속도를 나타낸다.

Shima 등⁽⁹⁾은 분말의 소성 항복 거동을 나타내는 조건식을 다음과 같이 제안하였다.

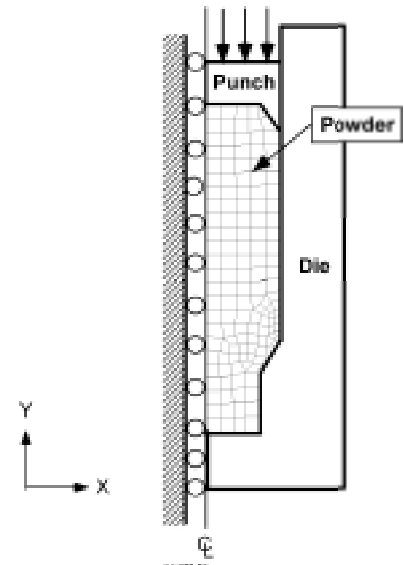


Fig. 1 Finite element meshes and boundary conditions for single action pressing of Al6061 powder under die pressing

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

$$-D^5 = 0$$

금속 분말의 치밀화 거동은 Shima 등⁽¹⁵⁾의 구성 방정식을 ABAQUS⁽¹⁴⁾의 사용자 정의 서브루틴인 UMAT에 적용하여 해석하였다.

4. 결과 및 고찰

4.1 유한요소해석

4.1.1 온간 금형압축

Fig. 1은 유한요소해석에서 사용된 온간 금형압축의 유한요소 격자와 그 경계조건을 나타낸다. y 축의 축대칭 조건으로 부터 전체 단면의 1/2 만을 해석하였다. 시편의 초기 상대밀도 $D_0 = 0.5$ 로 사용하였으며, 격자는 145개의 8절점 2차 축대칭 요소인 CAX8(8-node Axisymmetric Quadrilateral, Biquadratic Displacement) 요소와 53개의 축대칭 강요소인 RAX2(2-node Linear Axisymmetric Rigid Rink) 요소를 사용하였다.⁽¹⁴⁾ 분말과 금형 내부 및 펀치 사이의 마찰 계수 $\mu = 0.17$ 로 가정하였다.⁽¹⁶⁾

4.1.2 온간 고무 등가압 성형

Fig. 2는 온간 고무 등가압 성형에 사용된 유한요소 격자와 경계조건을 나타낸다. y 축의 축대칭 조건으로 부터 전체 단면의 1/2 만을 해석하였으며, 분말 성형체의 요소는 온간 금형압축과 동

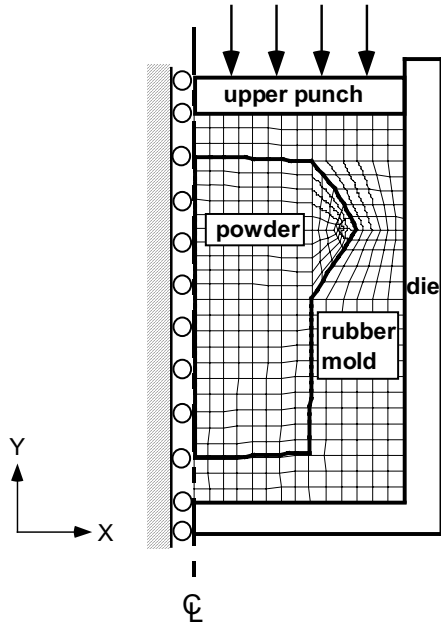


Fig. 2 Finite element meshes and boundary conditions for an Al6061 powder compact in a silicone rubber mold under rubber isostatic pressing

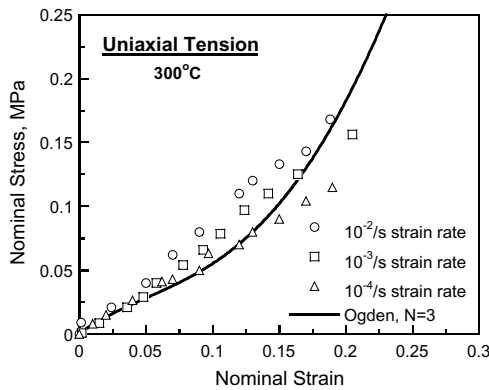


Fig. 3 Variation of nominal stress with nominal strain for silicone rubber under uniaxial tension at 300°C

일한 요소인 210 개의 CAX8 요소를 사용하였다. 고무 몰드를 위해서는 230 개의 8 절점 2 차 축 대칭 하이브리드 요소인 CAX8H(8-node Axisymmetric Quadrilateral, Biquadratic Displacement, Hybrid with Linear Pressure)를 사용하였다.⁽¹⁴⁾ 분말과 고무 사이는 완전 접합으로 가정하였으며, 실리콘 고무 몰드와 금형 사이의 마찰계수 $\mu = 0.18$ 을 사용하였다.

4.2 결과의 고찰

4.2.1 고무를 기계적 성질

Fig. 3 은 다양한 변형률 속도를 이용하여 일축 인장시 실리콘 고무에 대해 공칭 변형률에 따른 공칭응력과의 관계를 나타내는 실험치와 Ogden⁽¹²⁻¹⁴⁾모형을 사용한 유한요소해석 결과의 비

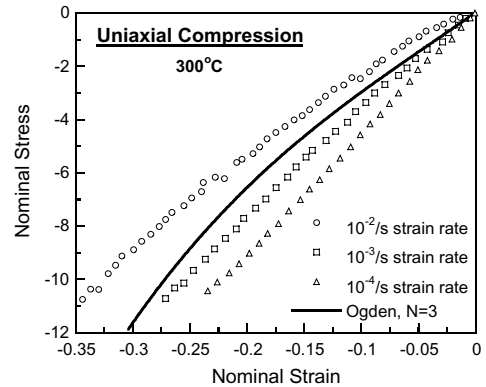


Fig. 4 Variation of nominal stress with nominal strain for silicone rubber under uniaxial compression at 300°C

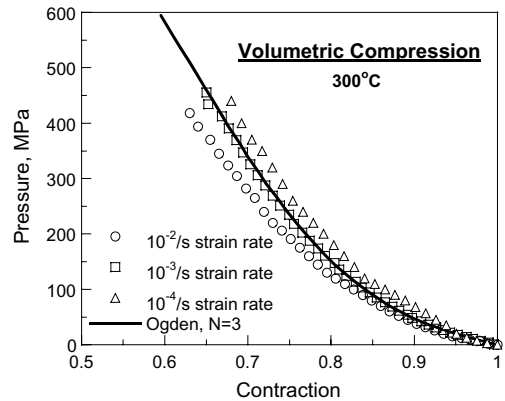


Fig. 5 Variation of pressure with contraction for silicone rubber under volumetric compression at 300°C

교를 나타낸다. Ogden 모형을 사용한 유한요소해석 결과는 실험치를 비교적 잘 나타내고 있지만 변형률이 증가함에 따라 실험치와의 차이가 증가하며, 변형률 속도에 따라 인장 강도도 약간 변화하였다.

Fig. 4 는 일축 압축 하에서 공칭 응력과 공칭 변형률에 대한 유한요소해석치와 실험결과의 비교를 나타낸다. 일축 압축은 인장 실험결과와 마찬가지로 변형률이 증가하면서 실험치와 해석치와의 차이가 증가하며, 변형률 속도에 따른 영향이 비교적 크게 나타났다.

Fig. 5 는 실리콘 고무를 체적 압축 실험하여 얻은 부피 수축량과 축 응력과의 실험치와 유한요소해석 결과와의 비교를 나타낸다. 체적 압축 실험은 일축 인장 및 압축 실험에 비해 상대적으로 변형률 속도에 대한 영향이 작으며, Ogden⁽¹²⁻¹⁴⁾모형을 사용한 유한요소해석 결과는 비교적 실험치를 잘 예측하였다.

4.2.2 모재의 온간 압축

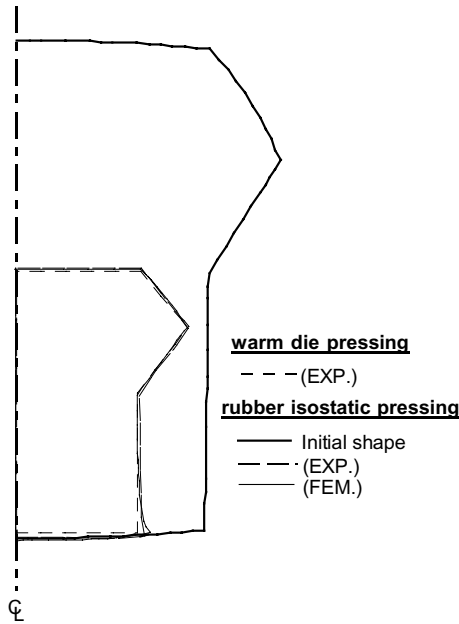


Fig. 6 Comparison between experimental data and FEM results for deformation of an Al6061 powder compact pressed under 170 MPa by rubber isostatic pressing and die pressing at 300°C

열간 등가압 소결로 제조한 알루미늄 합금 분말 모재 시편은 300°C 의 온도에서 일정한 하중속도인 0.1 MPa/s 를 가하여 압축 응력과 소성변형률의 관계를 다음과 같이 구하였다.

$$\sigma_m = 94.244 + 55.98(\bar{\epsilon}_m^p)^{0.99397} \text{ MPa} \quad (6)$$

온간 금형압축 및 온간 고무 등가압 성형에 대한 해석시 식 (6)을 Shima-Oyane⁽²³⁾ 의 소성항복식에 적용하여 알루미늄 합금 분말의 치밀화 거동 및 형상변화를 예측하였다. 한편 모재의 압축결과로부터 얻은 탄성계수 E= 2.35 GPa 이며, 포아송 비 $\nu = 0.33^{(17)}$ 이었다.

4.2.3 변형 형상의 예측

Yang 등⁽¹¹⁾ 은 온간 고무 등가압 성형시 원주형 형상의 알루미늄 분말 성형체에 대한 유한요소해석을 수행한 바 있다. 일반적으로 고무 몰드 내부를 실린더 형상으로 제조할 경우 압축된 성형체는 양 끝단 모서리 부근에서 심한 변형이 발생하게 된다. 따라서 이러한 변형을 방지하기 위해서는 고무 몰드 및 분말 성형체의 거동을 정확히 예측할 수 있는 유한요소해석을 수행하여 고무 몰드의 형상을 최적화할 필요가 있다.⁽⁹⁾

본 논문에서는 베벨기어 형태의 초기부품을 유한요소해석에 의해 최적화된 고무 몰드를 사용하여 온간 고무 등가압 성형을 하였다. 또한 온간 금형압축 성형을 수행하여 고무 등가압 성형한 것과 비교 분석하였다.

Fig. 6 은 온간 고무 등가압 성형 및 온간 금형

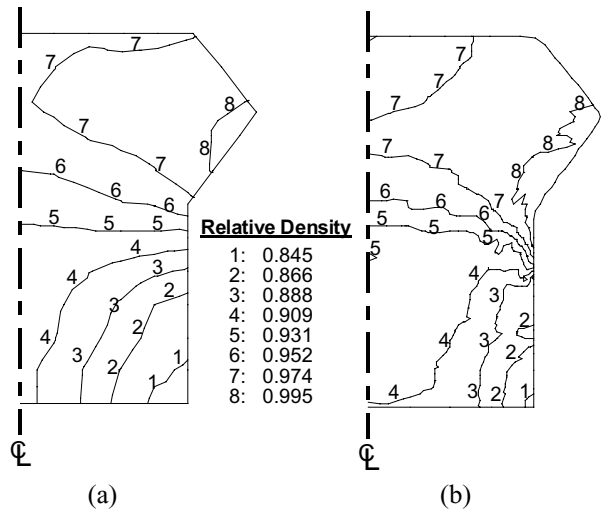


Fig. 7 Distributions of relative density of an Al6061 powder compact by die pressing under 170 MPa at 300°C by (a) experiment and (b) FEM

압축 성형시 유한요소해석과 실험결과에 대한 변형 형상을 나타낸다. 변형된 형상의 상부 부근에서는 유한요소해석과 실험결과의 차이는 거의 없으나 유한요소해석에 의한 하부 부근의 끝단 모서리 부근에서는 다소 큰 변화가 발생하였다. 이것은 실제 고무 몰드의 상부와 하부가 분리되기 때문인데 유한요소해석에서 이점을 단순화하여 하나의 고무몰드로 고려하여 차이가 발생한 것이다.

4.2.4 분말 성형체의 밀도 분포

분말 성형체의 상대밀도 분포는 경도와 상대밀도의 관계를 이용하여 간접적으로 측정할 수 있다.

$$D = 0.8365 + 0.00275 \cdot \text{HR15T} + 1.41 \times 10^{-5} \cdot (\text{HR15T})^2 \quad (7)$$

Fig. 7 은 온간 금형압축시 분말 성형체 내부의 상대밀도 분포에 대한 실험결과와 유한요소해석 결과를 나타낸다. 금형압축에 의한 성형체내부에는 상대밀도 분포가 0.85~0.995 까지 크게 변화하는 것을 알 수가 있다. 따라서 금형압축에 의한 성형체의 밀도가 낮은 하부 부근에서는 기계가공이 매우 어렵기 때문에 직접 제품으로 사용하기에는 부적절할 것이다. 한편 유한요소해석 결과는 이러한 불균일한 밀도 분포를 비교적 잘 예측하였다.

Fig. 8 은 300°C 의 온도에서 170 MPa 의 압력으로 고무 등가압 성형한 경우 알루미늄 합금 분말 성형체 내부의 상대밀도에 대한 실험결과와 유한요소해석 결과를 나타낸다. 온간 고무 등가압 성형에 의해 성형된 경우는 전체적으로 0.95 이상의 비교적 높고 균일한 상대밀도 분포를 보이며, 온간 금형압축 성형에 비해 기계적 성질이 상당히 향상될 것이라고 예측할 수 있다. 한편 실험결과와 유한요소해석 결과의 차이가 다소 발생하는 것을 알 수 있는데 이는 실험치의 상대밀도 분포가

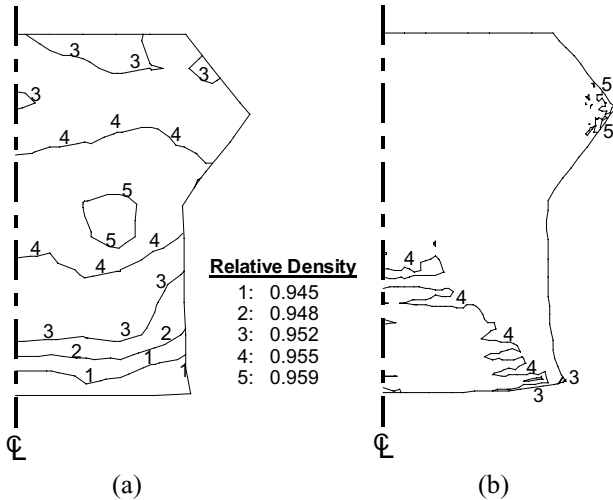


Fig. 8 Distributions of relative density of an Al6061 powder compact by rubber isostatic pressing under 170 MPa at 300°C by (a) experiment and (b) FEM

경도와 상대밀도 관계의 예러 범위에 포함되기 때문에 시편내의 밀도 분포를 정확히 구하는 데는 한계가 있기 때문이다. 또한 유한요소해석시 고려하지 않았던 고무 몰드와 분말의 마찰도 실험치를 예측하는데 중요한 요인으로 작용했을 것이라고 판단된다.

5. 결론

본 논문에서는 금속 분말에 대한 Shima-Oyane⁽¹⁵⁾의 구성방정식과 고무에 대한 Ogden^(12~14)의 변형률 에너지 포텐셜을 유한요소해석에 적용하여 초기 고무 몰드의 형상을 최적화 하였으며, 상대밀도 분포 및 형상 변화에 대하여 실험결과와 비교 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 온간 고무 등가압 성형에 의한 유한요소해석 결과는 실험치의 형상변화를 비교적 잘 예측하였지만 분말 성형체 내부의 밀도 분포는 조금 높게 예측하였다.

(2) 온간 고무 등가압 성형에 의한 시편은 전체적으로 0.95 이상의 균일한 상대밀도 분포를 보여 최종 제품으로의 가공이 용이하였으나, 온간 금형압축 성형에 의한 시편은 하부 부근에서의 낮은 밀도 및 불균일한 밀도구배를 보였다.

참고문헌

- (1) Engström, U. and Johansson, B., "Improved Properties By Warm Compaction," *Powder Metallurgy*, Vol. 38, 1995, pp. 172~173.
- (2) Ariffin, A. K., Mujibur Rahman, Md. and Muhamad, N., Sahari, J., "Thermal-Mechanical Model of Warm Powder Compaction Process," *J. Mater. Pro. Tech.*,

Vol. 116, 2001, pp. 67~71.

- (3) Lin, T. et al., "Warm Compaction Behavior of Metal Powders," *PM Tech.*, Vol. 18, 2000, pp. 261~264.
- (4) Rutz, H. G. and Hanejko, F. G., "High Density Processing of High Performance Ferrous Materials," *Int. J. Powder Metall.*, Vol.31, 1995, pp. 9~17.
- (5) Gagne, M., "Behavior of Powder Mix Constituents During Cold and Warm Compaction," International Conference on Powder Metallurgy and Particulate Materials, 29 June to 2 July 1997, Chicago, IL.
- (6) Chemlar, J., Nelson, B., Rutz, H., Lutz, M. and Porter, J., "An Evaluations of the ANCORDENSE Single Compaction Process and HPP Processing Technique on Fine Pitched Spur and Helical Gears," *Advances in Powder Metallurgy and Particulate Materials*, Vol. 5, 1994, pp. 73~89.
- (7) Miller, T. and Hanejko, F., "Development of a Warm Compacted Automatic Transmission Torque Converter Hub," Paper 970428, Society of Automotive Engineers.
- (8) Sagawa, M., Nagata, H., Watanabe, T. and Itatani, O., "Rubber Isostatic Pressing (RIP) of Powder for Magnets and other Materials," *Materials & Design*, Vol. 21, 2000, pp. 243~249.
- (9) Shima, S., Sakamoto, Y. and Kotera, H., "Simulation of Rubber Isostatic Pressing and Shape Optimization of Rubber Mold," *Int. J. Mech. Sci.*, Vol. 44, 2002, pp. 1603~1623.
- (10) Kim, H. G., Lee, J. W. and Kim, K. T., "The Effect of Rubber Mold on Densification and Deformation of a Metal Powder Compact During Cold Isostatic Pressing," *Mat. Sci. Eng.* A318, 2001, pp. 174~182.
- (11) Yang, H. C., Lee, J. W. and Kim, K. T., "The Effect of a Rubber Mold on Densification and Deformation of Metal Powder during Warm Isostatic Pressing," *EURO PM2001*, Vol. 3, pp. 172~177.
- (12) Yeoh, O. H., "Some Forms of the Strain Energy Function for Rubber," *Rubber Chem. Tech.*, Vol. 66, 1993, pp. 754~771.
- (13) Ogden, R. W., "Non-linear Elastic Deformation, Wiley, New York. 1984, pp. 73~520.
- (14) *ABAQUS User's I, II and III Manual*, Ver. 6.2, H. D. Hibbitt, I. Karlsson and E. P. Sorenson, U. S. A.
- (15) Shima, S. and Oyane, M., "Plasticity Theory for Porous Metals," *Int. J. Mech. Sci.*, Vol. 18, 1976, pp. 285~291.
- (16) Han, H. N., Lee, Y. G., Oh, K. H. and Lee, D. N., "Analysis of Hot Forging of Porous Metals," *Mat. Sci. Eng.* A206, 1996, pp. 81~89.
- (17) Hatch, J. E., *Aluminum Properties and Physical Metallurgy*, ASM, Metals Park, Ohio, 1995, pp. 684~687.