

온간 성형 하에서 Al 합금 분말의 정밀정형에 대한 유한요소해석

김종광* · 양훈철* · 김기태†

(2003년 1월 23일 접수, 2003년 9월 1일 심사완료)

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

JongKwang Kim, HoonChul Yang and KiTae Kim

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

Abstract

A finite element analysis for near-net-shape forming of Al6061 powder was performed under warm rubber isostatic pressing and warm die pressing. The advantages of warm compaction by rubber isostatic pressing were discussed to obtain a part with better density distributions. The shape of rubber mold was designed by determining a cavity shape that provides a desired shape of the final powder compact. To simulate densification and deformed shape of a powder compact during 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 die pressing and warm isostatic pressing.

1. 서론

분말 야금(PM: Powder Metallurgy)에 의한 부품 성형공정은 비용과 시간을 절약할 수 있고, 기계적 성질을 향상시킬 수 있다는 장점으로 인하여 많은 연구와 개발이 행해지고 있다. 특히 분말 야금 공정에 의한 알루미늄 합금의 부품은 다른 금속 부품에 비해서 단위 무게당 높은 강도와 내부식성, 정밀 정형 및 가공의 용이성, 우수한 열적 전기적 성질과 경제성 등으로 인하여 여러 분야에서 응용되고 있으며, 현재까지도 널리 사용되는 기계 소재중의 하나이다.

일반적으로 사용되는 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.

90년대 이후에는 분말과 금형을 130~150°C 정도로 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 온

* 포항공과대학교 대학원 기계공학과
† 책임저자, 회원, 포항공과대학교 기계공학과
Email: korean@postech.edu
TEL : (054)279-2164 FAX : (054)279-5899

간 성형공정을 최초로 제안하였다. Gagne⁽⁵⁾는 윤활제가 첨가된 분말을 150°C 에서 성형하면, 금형과 분말 사이의 마찰력이 감소하여 성형체의 밀도를 증가시킬 뿐만 아니라 압출하중도 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 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.

RIP 공정에 의한 정밀정형을 수행하기 위해서는 금속분말과 고무의 기계적 거동을 예측할 수 있는 수치모사가 필수적이다. Lee 등⁽¹²⁾은 삼축 압축 실험을 냉간 하에서 수행하여 알루미늄 합금 분말의 치밀화 거동을 예측하였으며, Peng 등⁽¹³⁾은 고무와 같은 초탄성체에 여러가지 구성모델을 적용하여 기계적 거동을 예측한 바가 있다.

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 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 있으며,⁽¹¹⁾ Fig. 1 은 Al6061 분말의 주사 전자 현미경 사진을 나타낸다.

2.1 알루미늄 합금 분말의 모재 실험

알루미늄 합금 분말의 모재 시편은 열간 등가압 소결에 의해 제조되었다. 모재를 만들기 위하여 알루미늄 합금 분말을 내경 23 mm, 두께 1 mm 및

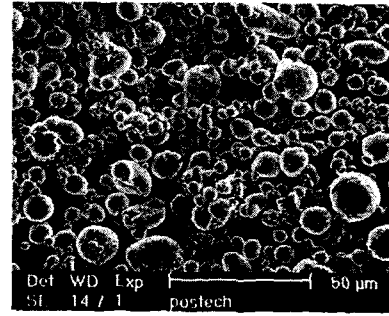


Fig. 1 Scanning electron micrograph of atomized Al6061 powder

길이 80 mm인 구리캔에 넣고 캔 내부의 진공 처리를 위해 외경 8 mm 와 두께 1 mm의 구리 파이프를 용기 상단에 용접하였다. 분말이 담긴 구리 용기는 450°C에서 5시간동안 탈가스(Degassing)작업을 한 후 진공 밀봉하였다. 진공 밀봉된 캔을 열간 등가압 소결기(Kobelco System 30T, Japan)에서 520°C, 100 MPa의 압력으로 2시간동안 열간 등가압 소결을 하여 상대밀도가 거의 1인 시편을 제조하였다. 소결 후 캔을 제거하고 시편을 원주형으로 가공하여 210°C의 아르곤 분위기에서 2시간동안 어닐링(Annealing) 하였다. 시편의 최종 치수는 지름 7 mm 높이 10 mm이며, 상대밀도는 0.995 이상이었다.

2.2 모재 시편의 온간 일축압축 실험

본 논문에서는 알루미늄 합금 모재의 변형률-응력 곡선을 얻기 위하여 아르곤 분위기의 진공로(Vacuum Furnace)와 고온 변위 측정 장치가 장착된 재료시험기(MTS Servo-hydraulic Tester)를 이용하여 일축압축 실험을 수행하였다.⁽¹⁴⁾ 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. 일반적으로 실리콘 고무는 다른 고무에 비해 고온에서의 강도 및 열적 저항성이 매우 우수한 것으로 알려져 있으며,

실리콘 고무에 대한 물리적 및 화학적 특성은 다른 문헌에서 쉽게 찾아볼 수 있다.⁽¹⁵⁻¹⁷⁾

고무에 대한 기계적 특성을 조사하기 위해서 일축인장, 일축압축, 그리고 체적 압축실험을 수행하였다. 일축인장 실험을 수행하기 위하여 고무 시편은 직경 10 mm, 길이 70 mm의 긴 원주형 시편을 제작하였으며, 일축압축과 체적 압축 실험에서는 직경 20 mm, 높이 20 mm의 원주형 시편을 사용하였다. 일축인장 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. 일축압축 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. 또한 고온에서 고무의 변형률 속도에 따른 영향을 조사하기 위해 $10^{-2}/s$, $10^{-3}/s$, 및 $10^{-4}/s$ 의 변형률 속도로 실험하였다. 실험온도는 $300^{\circ}C$ 이며, 고무 시편 내부의 열적 평형을 위하여 승온 속도는 $5^{\circ}C/min$ 으로 하여 1시간동안 유지한 후에 실험하였다.

2.4 온간 고무 등가압 성형 실험

고무 등가압 성형 실험은 MTS 재료 시험기에 특별히 제작된 가열로를 사용하여 $300^{\circ}C$ 에서 수행하였다. 실험은 알루미늄 합금 분말을 고무 몰드 안에 충전한 후 내경이 43 mm인 초경 금형 안에 삽입하여 일축압축하였으며, 고무 몰드와 금형 사이에 마찰을 줄이기 위해 흑연 윤활제를 사용하였다. 충전 직후 분말의 상대밀도는 0.5였으며, 1 MPa/s의 하중속도로 170 MPa에서 성형하였다. 온간 고무 등가압 성형시 승온 속도는 $5^{\circ}C/min$ 으로 하였으며, 고무 몰드와 분말의 열적 평형을 위하여 1시간 동안 온도를 유지한 후 압축하였다.

2.5 온간 금형압축 실험

분말을 가압한 후 이젝트시 분말과 금형의 용이한 분리를 위해 상부와 하부를 6개의 금형 요소로 나누어 제작하였다. 실험은 고무 등가압 성형 실험과 마찬가지로 MTS 재료시험기에 가열로를 장착하여 수행하였다. SKD11로 만든 6개의 금형을 조립하여 18.2g의 알루미늄 합금 분말을 넣어 $300^{\circ}C$ 의 온도에서 금형압축을 하였다. 분말과 금형사이에는 마찰을 줄이기 위해 금형 벽면에 흑연 윤활제를 사용하였으며, 1 MPa/s의 일정한 하중속

도로 170 MPa의 압력에서 압축하였다. 분말과 금형 및 펀치는 동시에 가열하였으며, 승온 속도는 $5^{\circ}C/min$ 으로 하였다. 열적 평형을 위하여 시험 온도를 30분간 유지한 후 상부 펀치에서 하부 펀치로 힘이 전달되는 일방향 압축(Single Action Pressing)을 수행하였다.

2.6 분말 성형체의 밀도 분포

분말 성형체의 밀도 분포는 경도와 상대밀도의 관계를 이용하여 간접적으로 구할 수 있으며,⁽¹⁸⁾ 금속 분말 성형체의 경도 측정에는 로크웰(Rockwell 523T, Wilson, U.S.A)경도계가 주로 이용된다.⁽¹⁹⁾

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 $480^{\circ}C$ 의 진공 분위기에서 소결 전후 밀도의 변화가 없도록 20분간 예비 소결(Pre Sintering)한 후 다이아몬드 휠(ISOMET Low Speed Saw, BUEHLER, U.S.A.)로 중앙단면을 절단하였다. 절단된 시편은 진공 분위기에서 $190^{\circ}C$ 의 온도로 2시간동안 어닐링(Annealing)한 후 단면을 연마하여 1.58 mm(1/16inch) 강구입자(Hardness Steel Ball Indentor)로 15 kg중의 하중을 30초간 가하여 각 시편마다 20개의 경도 값을 측정하였다. 측정된 경도값들을 평균하여 Al6061 분말 성형체의 상대밀도와 로크웰 경도 값의 상관 관계를 구하였다.

온간 등가압 성형과 온간 금형압축한 성형체의 상대밀도 분포를 조사하기 위하여 각각의 성형체 내부에 일정한 간격으로 로크웰 경도를 측정하고 경도와 상대밀도의 상관관계를 이용하여 시편 내부의 상대밀도 분포를 구하였다. 온간 등가압 성형과 온간 금형압축한 성형체의 단면은 각각 3 mm의 간격으로 63개의 경도 값을 측정하였다.

3. 이론

3.1 고무의 구성 방정식

고무의 변형은 등방성의 성질을 갖고 있다고 가정함으로써 초탄성체의 변형률 에너지 함수는 다음과 같은 형태로 나타낼 수 있다.

$$U = f(I_1, I_2, I_3) \quad (1)$$

여기서 U는 변형률 에너지 함수이고, I_1 , I_2 , I_3 는 각각 Cauchy-Green 변형 텐서의 제 1, 2 및 3 불변

량을 의미한다.

식 (1)을 주 연신율의 일반적인 형태로 표현하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$U = u(\lambda_1) + u(\lambda_2) + u(\lambda_3) \quad (2)$$

여기서 λ_i 는 주 연신율을 의미한다.

Ogden⁽²⁰⁻²²⁾은 고무의 거동을 나타내기 위해 변형률 에너지 함수를 다음과 같이 정의하였다.

$$U_0 = \sum_{i=1}^N \frac{2\mu_i}{\alpha_i^2} (\bar{\lambda}_i^{\alpha_i} + \bar{\lambda}_i^{\alpha_i} + \bar{\lambda}_i^{\alpha_i} - 3) + \sum_{i=1}^N \frac{1}{D_i} (J^{\mu_i} - 1 - R)^{\beta_i} \quad (3)$$

여기서 $\bar{\lambda}_i$, J^{μ_i} 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 (3)에서 D_i 는 재료의 압축성을 나타내며, $D_i = 0$ 은 재료가 완전 비압축성임을 의미한다.

일축인장과 압축에서는 $\lambda_1 = \lambda_U$, $\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda_U^{-0.5}$ 및 $\lambda_U = 1 + \epsilon_U$ 이므로 변형률 에너지 함수로부터 초탄성체의 공칭 응력-공칭 변형률(nominal stress-nominal strain) 관계는 다음과 같다.⁽²⁰⁻²²⁾

$$\sigma_U = \sum_{i=1}^N \frac{2\mu_i}{\alpha_i} (\lambda_U^{\alpha_i-1} - \lambda_U^{-0.5\alpha_i-1}) \quad (4)$$

체적압축에서는 $\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda_3 = \lambda_V$ 이므로 변형률 에너지 함수로부터 초탄성체의 공칭 응력-공칭 변형률 관계는 다음과 같다.⁽²⁰⁻²²⁾

$$\sigma_P = -\sum_{i=1}^N 2i \frac{1}{D_i} (J-1)^{-i} \quad (5)$$

3.2 분말 성형체의 구성 방정식

금속 분말의 전체 변형률 속도 텐서 $\dot{\epsilon}_{ij}$ 는 탄성 변형률 속도 텐서 $\dot{\epsilon}_{ij}^e$ 와 소성 변형률 속도 텐서 $\dot{\epsilon}_{ij}^p$ 의 합으로 쓸 수 있다.

$$\dot{\epsilon}_{ij} = \dot{\epsilon}_{ij}^e + \dot{\epsilon}_{ij}^p \quad (6)$$

또한, Hooke의 법칙으로부터 응력성분 σ_{ij} 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\sigma_{ij} = D_{ijkl}^e \epsilon_{kl}^e \quad (7)$$

여기서 D_{ijkl}^e 는 4차 탄성계수 텐서이다.

소성 변형률 속도 텐서는 다음과 같이 정의된다.

$$\dot{\epsilon}_{ij}^p = \dot{\lambda} \frac{\partial \Phi}{\partial \sigma_{ij}} \quad (8)$$

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

상대밀도의 변화율은 질량 불변의 관계로부터 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\dot{D} = -D \dot{\epsilon}_{kk}^p \quad (9)$$

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

$$D \sigma_m \dot{\epsilon}_m^p = \sigma_{ij} \dot{\epsilon}_{ij}^p \quad (10)$$

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

상대밀도를 경화변수(Hardening Parameter)로 사용할 경우 금속 분말의 치밀화 거동을 나타내는 항복 함수는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$f(p, q, D) = 0 \quad (11)$$

여기서 p 는 정수응력, q 는 유효응력(Mises stress)을 의미한다. 즉,

$$p = -\frac{1}{3}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) = -\frac{1}{3}\sigma_{kk} \quad (12)$$

$$q = \sqrt{\frac{3}{2} \left(\sigma_{ij} - \frac{1}{3}\sigma_{kk}\delta_{ij} \right) \left(\sigma_{ij} - \frac{1}{3}\sigma_{kk}\delta_{ij} \right)} = \sqrt{\frac{3}{2} \sigma'_{ij} \sigma'_{ij}} \quad (13)$$

여기서 σ'_{ij} 와 δ_{ij} 는 각각 편차응력(deviatoric stress) 및 Kronecker delta 를 나타낸다.

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

$$\Phi(\sigma, \bar{\epsilon}_m^p, D) = \left(\frac{q}{\sigma_m} \right)^2 + 2.49^2 (1-D)^{1.028} \left(\frac{p}{\sigma_m} \right)^2 - D^5 = 0 \quad (14)$$

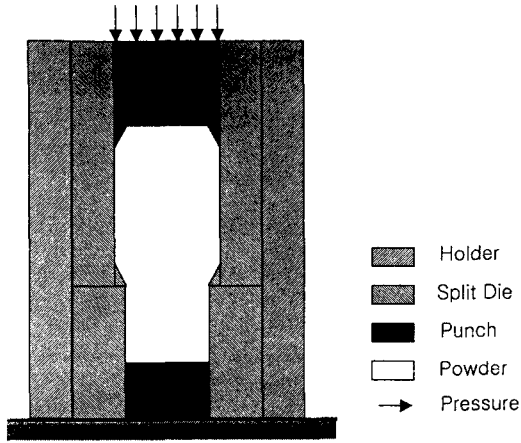


Fig. 2 A split die mold set for single action pressing of Al6061 powder under die pressing

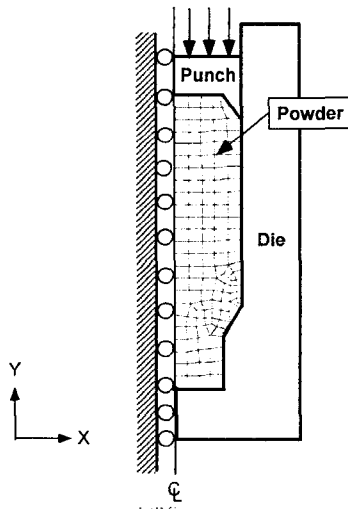


Fig. 3 Finite element meshes and boundary conditions for single action pressing of Al6061 powder under die pressing

금속 분말의 치밀화 거동은 Shima 등⁽²³⁾의 구성 방정식을 ABAQUS⁽²²⁾의 사용자 정의 서브루틴인 UMAT에 적용하여 해석하였다.

4. 유한요소해석 및 실험결과

4.1 유한요소해석

4.1.1 온간 금형압축

Fig. 2는 Al6061 분말 성형체의 제조에 사용된 금형압축 실험 장치의 개략도를 나타낸다. 치형

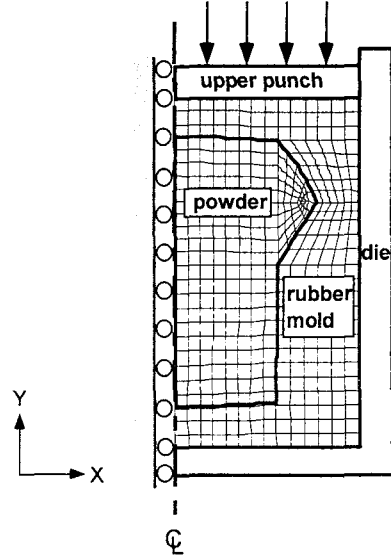


Fig. 4 Finite element meshes and boundary conditions for an Al6061 powder compact in a silicone rubber mold under rubber isostatic pressing

부분의 강도를 높게 하기 위해서 금형은 치형 부근을 상부방향으로 가압하도록 설계를 하였다.

Fig. 3은 유한요소해석에서 사용된 온간 금형압축의 유한요소 격자와 그 경계조건을 나타낸다. y 축의 축대칭 조건으로 부터 전체 단면의 1/2만을 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.⁽²²⁾ 유한요소해석에서의 평균 상대밀도는 다음의 관계식으로부터 구하였다.

$$D_{avg} = \frac{\sum_{j=1}^M D_j V_j}{\sum_{j=1}^M V_j} \quad (15)$$

여기서 D_j , V_j 및 M 은 각각 j번째 요소의 상대밀도, 체적 및 전체 요소의 개수를 나타낸다. 한편 분말과 금형 내부 및 펀치 사이의 마찰 계수 $\mu = 0.17$ 로 가정하였다.⁽²⁴⁾

4.1.2 온간 고무 등가압 성형

Fig. 4는 온간 고무 등가압 성형에 사용된 유한요소 격자와 경계조건을 나타낸다. y 축의 축대칭 조건으로 부터 전체 단면의 1/2만을 해석하였으며, 분말 성형체의 요소는 온간 금형압축과 동일한 요소인 210개의 CAX8 요소를 사용하였다.

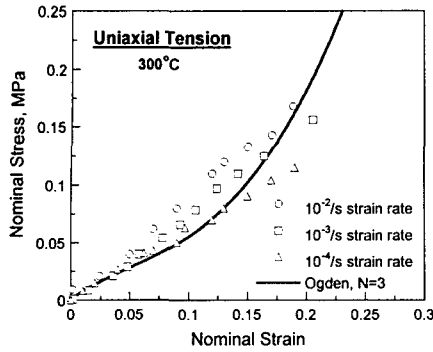


Fig. 5 Variation of nominal stress with nominal strain for silicone rubber under uniaxial tension at 300°C

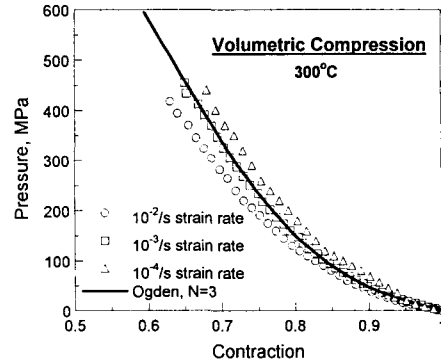


Fig. 7 Variation of pressure with contraction for silicone rubber under volumetric compression at 300°C

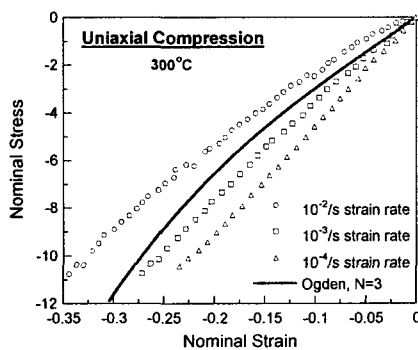


Fig. 6 Variation of nominal stress with nominal strain for silicone rubber under uniaxial compression at 300°C

고무 물드를 위해서는 230개의 8절점 2차 축 대칭 하이브리드 요소인 CAX8H(8-node Axisymmetric Quadrilateral, Biquadratic Displacement, Hybrid with Linear Pressure)를 사용하였다.⁽²²⁾ 분말과 고무 사이는 완전 접합으로 가정하였으며, 실리콘 고무 물드와 금형 사이의 마찰계수 $\mu = 0.18$ 을 사용하였다.⁽²⁵⁾

4.2 실험결과

4.2.1 고무의 기계적 성질

Yang 등⁽¹¹⁾에 의하면 Ogden⁽²⁰⁻²²⁾모델에 의한 해석치가 실험치를 가장 잘 예측했기 때문에 본 논문에서는 고무의 거동을 예측하기 위해 Ogden⁽²⁰⁻²²⁾ 모델만을 사용하였다. 실리콘 고무를 300°C의 온도에서 실험을 하게 되면 매우 작은 하중으로도 쉽게 변형이 발생하기 때문에 여러번의 반복 실험을 통하여 평균값을 사용하였다.

Fig. 5는 다양한 변형률 속도를 이용하여 일축인장시 실리콘 고무에 대해 공칭 변형률에 따른 공

칭응력과의 관계를 나타내는 실험치와 Ogden⁽²⁰⁻²²⁾ 모델을 사용한 유한요소해석 결과의 비교를 나타낸다. Ogden 모델을 사용한 유한요소해석 결과는 실험치를 비교적 잘 나타내고 있지만 변형률이 증가함에 따라 실험치와의 차이가 증가하며, 변형률 속도에 따라 인장 강도도 약간 변화였다.

Fig. 6은 일축압축 하에서 공칭 응력과 공칭 변형률에 대한 유한요소해석 결과와 실험치의 비교를 나타낸다. 일축압축 실험은 인장 실험결과와 마찬가지로 변형률이 증가하면서 실험치와 해석치와의 차이가 증가하며, 변형률 속도에 따른 영향이 비교적 크게 나타났다.

Fig. 7은 실리콘 고무를 체적 압축 실험하여 얻은 부피 수축량과 축 응력과의 실험치와 유한요소해석 결과와의 비교를 나타낸다. 체적 압축 실험은 일축인장 및 압축 실험에 비해 상대적으로 변형률 속도에 대한 영향이 작으며, Ogden⁽²⁰⁻²²⁾ 모델을 사용한 유한요소해석 결과는 비교적 실험치를 잘 예측하였다. 하지만, Ogden 모델은 변형률 속도에 무관한 구성방정식이기 때문에 실제 금형압축시 고무의 변형률 속도를 고려한 실험치를 이용하여 재료상수를 구해야 한다. 여기서는 10⁻³/s 변형률 속도의 실험치를 기준으로 고무의 재료상수를 구하였기 때문에 Fig. 5-7에서의 다른 변형률 속도에서의 실험치와 차이가 다소 크게 나타나는 것이다. 그러나 실제 RIP공정시 고무의 압축변형은 1 MPa/s의 하중속도로 10⁻³/s 변형률 속도와 근사하게 변형되기 때문에 이를 이용한 해석치는 RIP공정시 고무의 변형을 잘 예측할 것이다.

유한요소해석을 위한 Ogden⁽²⁰⁻²²⁾모델의 재료 상수는 다음과 같다.

$$\alpha_1 = -5.895, \alpha_2 = -5.308, \alpha_3 = -6.482$$

$$\mu_1 = -296.9 \text{ MPa}, \mu_2 = 137.1 \text{ MPa}, \mu_3 = 160.2 \text{ MPa}$$

$$D_1 = 0.5504 \times 10^{-2} \text{ MPa}^{-1}, \quad D_2 = 0.3729 \times 10^{-3} \text{ MPa}^{-1}, \\ D_3 = -0.2320 \times 10^{-3} \text{ MPa}^{-1}$$

4.2.2 모재의 온간 압축

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 구하였다. Fig. 8 은 300°C 의 온도에서의 실험치와 유한요소해석 결과 및 수정된 해석 결과의 압축 응력에 대한 소성 변형률의 관계를 나타내고 있다. 실험치는 다음의 Ludwick⁽²⁶⁾의 실험치로 잘 나타낼 수 있다.

$$\sigma_m = 57.637 + 42.164(\bar{\epsilon}_m^p)^{0.62865} \text{ MPa} \quad (16)$$

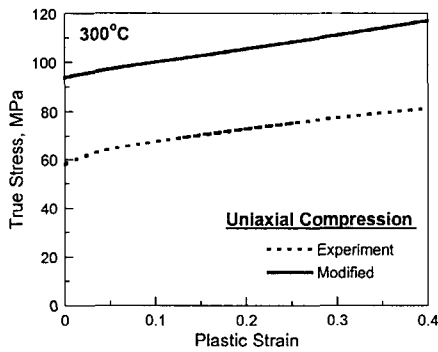


Fig. 8 Uniaxial stress-strain relation for dense Al6061 at 300°C

한편 식 (16)을 이용하여 해석을 수행한 유한요소해석 결과는 실험치보다 상대밀도를 높게 예측하였다. 따라서 변형 및 상대밀도에 대한 실험치를 가장 잘 예측하도록 수정된 압축응력과 소성변형률의 관계를 다음과 같이 제안하였다.

$$\sigma_m = 94.244 + 55.98(\bar{\epsilon}_m^p)^{0.99397} \text{ MPa} \quad (17)$$

온간 금형압축 및 온간 고무 등가압 성형에 대한 해석시 수정된 식 (17)를 Shima-Oyane⁽²³⁾의 소성항복식에 적용하여 알루미늄 합금 분말의 치밀화 거동 및 형상변화를 예측하였다. 한편 실험결과로부터 얻은 탄성계수 E= 2.35 GPa이며, 포아송비 $\nu = 0.33$ ⁽²⁷⁾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 현상을 줄이기 위해서는 고무 몰드 및 분말 성형체의 거동을 정확히 예측할 수 있는 유한요소해석을 수행하여 고무 몰드의 형상을 최적화 할 필요가 있다.⁽⁹⁾

본 논문에서는 Fig. 9(c)에서 보는 바와 같이 베벨기어 형태의 부품을 유한요소해석에 의해 최적화된 고무 몰드를 사용하여 온간 고무 등가압 성형을 하였다. 또한 온간 금형압축을 수행하여 고무 등가압 성형한 것과 비교 분석하였다.

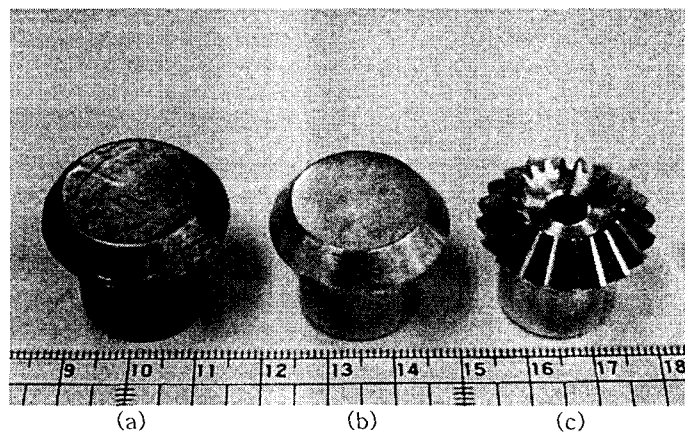


Fig. 9 Samples obtained by (a) warm rubber isostatic pressing, (b) warm die pressing and (c) final part

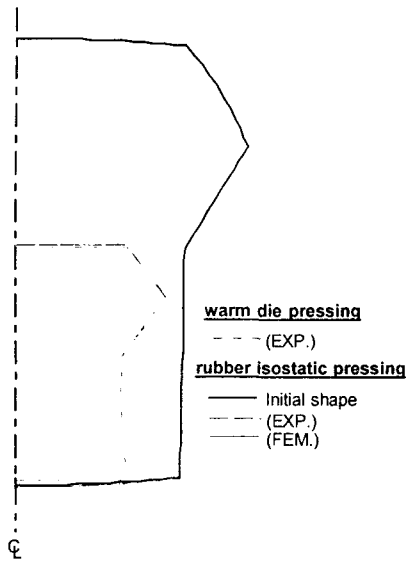


Fig. 10 Comparison between experimental data and FEM results for deformation of an Al6061 powder compact pressed under 170 MPa by rubber isostatic pressing and die pressing at 300°C

Fig. 9는 온간 고무 등가압 성형과 금형압축 성형 및 최종 가공된 시편의 형상 비교를 나타낸다. 온간 RIP에 의한 분말 성형체는 금형압축 성형체에 비해 표면 조도가 매끄럽지 못하기 때문에 최종 표면가공이 필요하다. 따라서 실제 부품 제조시 유한요소해석에 의해 고무 몰드를 최적화함으로써 가공후 수반되는 재료손실을 최소화할 필요가 있다.

Fig. 10은 온간 고무 등가압 성형 및 온간 금형압축 성형시 유한요소해석과 실험결과에 대한 변형 형상을 나타낸다. 변형된 형상의 상부 부근에서는 유한요소해석과 실험결과의 차이는 거의 없으나 유한요소해석에 의한 하부 부근의 끝단 모서리 부근에서는 심한 변형이 발생하였다. 이것은 실제 고무 몰드의 상부와 하부가 분리된 점을 유한요소해석에서 정확하게 고려하지 못한 것에서 비롯된 것이라 할 수 있다.

4.2.4 분말 성형체의 응력 및 밀도 분포

Fig. 11은 300°C의 온도와 170 MPa의 압력 하에서 온간 고무 등가압 압축에 의해 성형된 분말 성형체 내부의 Mises 응력과 정수 응력의 분포를 나타낸다. 하부 끝단의 모서리 부근과 상부 모서리 부근에서는 상대적으로 높은 편차 응력 분포를 보이나, 전체적으로 30 MPa 이하의 낮은 편차 응력이 작용하는 것을 알 수 있다. 또한, 150~160 MPa 정도의 정수응력이 비교적 균일하게 작용함

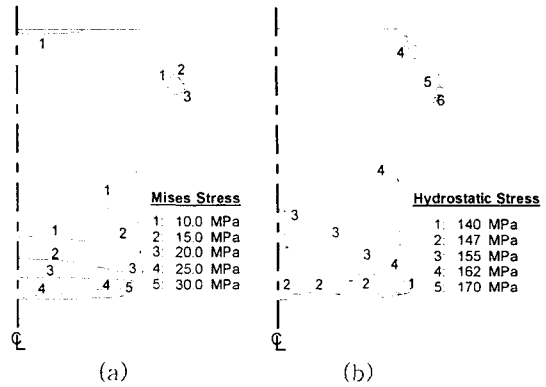


Fig. 11 FEM results for the distribution of (a) Mises and (b) hydrostatic stress in an Al6061 powder compact pressed under 170 MPa by rubber isostatic pressing at 300°C

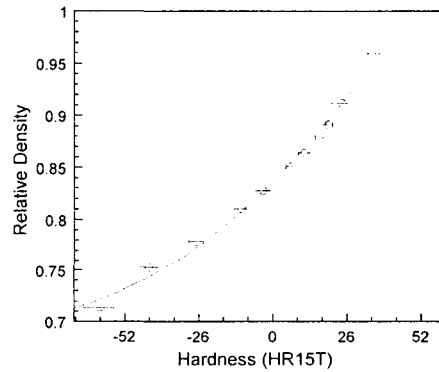


Fig. 12 Variation of relative density with Rockwell hardness for Al6061 powder compacts

을 알 수 있다. 이것은 300°C에서의 가압시 고무 몰드에 의한 영향으로 정수압이 효과적으로 작용했다는 것을 나타낸다.

분말 성형체의 상대밀도 분포는 경도와 상대밀도의 관계를 이용하여 간접적으로 측정할 수 있다. Fig. 12는 로크웰 경도 값과 상대밀도의 관계를 나타내며, 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$D = 0.8365 + 0.002751 \cdot HR15T + 1.4115 \times 10^{-5} \cdot (HR15T)^2 \quad (18)$$

Fig. 13은 온간 금형압축시 분말 성형체 내부의 상대밀도 분포에 대한 실험결과와 유한요소해석 결과를 나타낸다. 금형압축에 의한 성형체내부에는 상대밀도 분포가 0.85~0.995까지 크게 변화하는 것을 알 수가 있다. 따라서 금형압축에 의한 성형

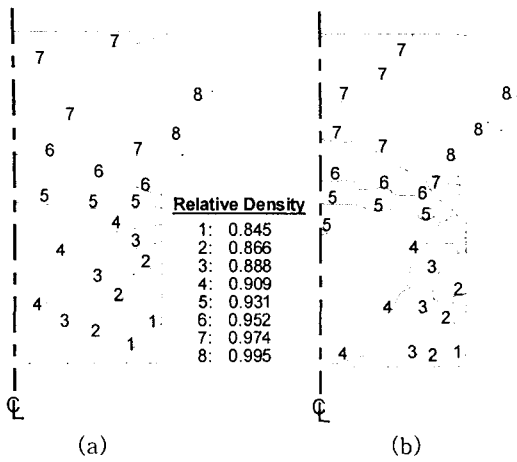


Fig. 13 Distributions of relative density of an Al6061 powder compact by die pressing under 170 MPa at 300°C by (a) experiment and (b) FEM

체의 강도가 낮은 하부 부근에서는 기계가공이 매우 어렵기 때문에 직접 제품으로 사용하기에는 부적절할 것이다. 한편 유한요소해석 결과는 이러한 불균일한 밀도 분포를 비교적 잘 예측하였다. Fig. 14는 300°C의 온도에서 170 MPa의 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 보여 온간 금형압축 성형에 비하여 기계적 성질이 좋은 분말 성형체를 얻을 수 있다. 하지만, Fig. 14의 RIP에 대한 밀도 분포는 실험치의 상대밀도 값이 정도와 상대밀도 관계의 예러 범위에 포함되어 있어서 밀도 분포를 비교하는 데는 한계가 있었다. 또한 유한요소해석시 고려하지 않았던 고무 몰드와 분말의 마찰도 실험치를 예측하는데 중요한 요인으로 작용했을 것이다.

5. 결론

본 논문에서는 알루미늄 합금 분말을 이용한 RIP 성형과 온간 금형압축 성형을 통하여 베벨기어 형태의 부품을 제조하였다. 금속 분말에 대한 Shima-Oyane⁽²³⁾의 구성방정식과 고무에 대한 Ogden⁽²⁰⁻²²⁾의 변형률 에너지 포텐셜을 유한요소해석에 적용하여 초기 고무 몰드의 형상을 최적화 하였다. 상대밀도 분포 및 형상 변화에 대하여 실험치와 비교 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 제안된 모델 및 최적화된 재료상수에 의한 유한

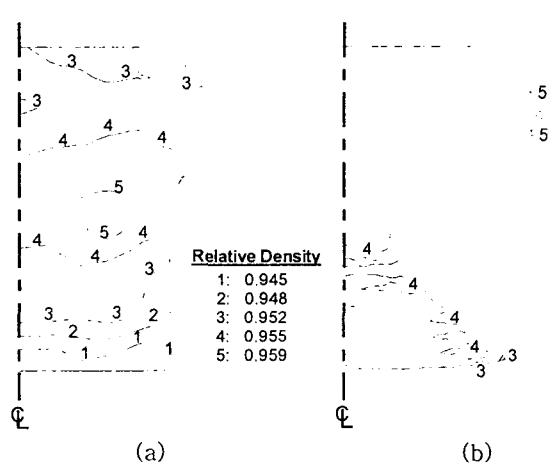


Fig. 14 Distributions of relative density of an Al6061 powder compact by rubber isostatic pressing under 170 MPa at 300°C by (a) experiment and (b) FEM

요소해석 결과는 RIP 및 온간 금형압축시 분말 성형체의 형상변화 및 밀도 분포를 비교적 잘 예측하였다.

(2) 유한요소해석에 의해 고무 몰드를 최적화한 후 이를 이용한 RIP 공정은 기존의 온간 금형압축 성형 공정에 비해 더 높고 균일한 밀도를 갖는 최종 분말 성형체를 제조할 수 있어서 추후 정밀성형 공정으로 매우 유용하게 사용될 수 있을 것이다.

(3) 본 연구의 RIP 공정에 의한 분말 성형체는 전체적으로 0.95 이상의 상대밀도값을 보여 최종 제품으로의 가공시 용이하였으나 온간 금형압축의 경우에는 금형벽의 마찰로 인해 시편하부에 낮은 밀도분포로 보여 가공 및 최종 소결시 형상변화를 초래하였다.

후 기

본 논문은 부산대학교 ERC(정밀정형 및 금형가공 연구소)에서 지원된 연구비로 수행 되었으며, 이에 감사 드립니다.

참고 문헌

- (1) Engström, U. and Johansson, B., 1995, "Improved Properties By Warm Compaction," *Powder Metallurgy*, Vol. 38, pp. 172-173.
- (2) Ariffin, A. K., Mujibur Rahman, Md. and Muhamad, N., Sahari, J., 2001, "Thermal-Mechanical Model of Warm Powder Compaction Process," *J. Mater. Pro. Tech.*, Vol. 116, pp. 67-71.
- (3) Lin, T. et al., 2000, "Warm Compaction Behavior of Metal Powders," *PM Tech.*, Vol. 18, pp. 261-264.

- (4) Rutz, H. G. and Hanejko, F. G., 1995, "High Density Processing of High Performance Ferrous Materials," *Int. J. Powder Metall.*, Vol. 31, pp. 9~17.
- (5) Gagne, M., 1997, "Behavior of Powder Mix Constituents During Cold and Warm Compaction," *International Conference on Powder Metallurgy and Particulate Materials*, Chicago, IL.
- (6) Chemlar, J., Nelson, B., Rutz, H., Lutz, M. and Porter, J., 1994, "An Evaluations of the ANCORDERSE Single Compaction Process and HPP Processing Technique on Fine Pitched Spur and Helical Gears," *Advances in Powder Metallurgy and Particulate Materials*, Vol. 5, 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., 2000, "Rubber Isostatic Pressing (RIP) of Powder for Magnets and other Materials," *Materials & Design*, Vol. 21, pp. 243~249.
- (9) Shima, S., Sakamoto, Y. and Kotera, H., 2002, "Simulation of Rubber Isostatic Pressing and Shape Optimization of Rubber Mold," *Int. J. Mech. Sci.*, Vol. 44, pp. 1603~1623.
- (10) Kim, H. G., Lee, J. W. and Kim, K. T., 2001, "The Effect of Rubber Mold on Densification and Deformation of a Metal Powder Compact During Cold Isostatic Pressing," *Mat. Sci. Eng.* A318, pp. 174~182.
- (11) Yang, H. C., Lee, J. W. and Kim, K. T., 2001, "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) Lee, S. C. and Kim, K. T., 2002, "Densification Behavior of Aluminum Alloy Powder under Cold Compaction," *Int. J. Mech. Sci.*, Vol. 44, pp. 1295~1308.
- (13) Peng, S. H. and Chang, W. V., 1997, "A Compressible Approach in Finite Element Analysis of Rubber Elastic Materials," *Computers & Structures*, Vol. 62, pp. 573~593.
- (14) Kim, J. H., Han, D. B. and Kim, K. T., 1996, "High Temperature Creep Behavior of Cr_3C_2 Ceramic Composite," *Mat. Sci. Eng.* A212, pp. 87~93.
- (15) Noll, W., 1968, "Chemistry and Technology of silicones," 2Ed., Academic Press, New York, pp. 305.
- (16) Morton, M., 1987, "Rubber Technology," 3Ed., Van Nostrand Reinhold Company, New York, pp. 375~409.
- (17) Mark, J. E., Erman, B. and Eirich, F. R., 1994, "Science and Technology of Rubber," 2Ed., Academic Press, New York, pp. 1~510.
- (18) Cho, H. K., Suh, J. and Kim, K. T., 1994, "Densification of Porous Alloy Steel Preforms at High Temperature," *Int. J. Mech. Sci.*, Vol. 36, No. 4, pp. 317~328.
- (19) Boyer, H. E., 1987, "Hardness Testing," ASM Int., pp. 31~55.
- (20) Yeoh, O. H., 1993, "Some Forms of the Strain Energy Function for Rubber," *Rubber Chem. Tech.*, Vol. 66, pp. 754~771.
- (21) Ogden, R. W., 1984, "Non-linear Elastic Deformation," Wiley, New York, pp. 73~520.
- (22) *ABAQUS User's I, II and III Manual*, Ver. 6.3, 2003, H. D. Hibbitt, I. Karlsson and E. P. Sorenson, USA.
- (23) Shima, S. and Oyane, M., 1976, "Plasticity Theory for Porous Metals," *Int. J. Mech. Sci.*, Vol. 18, pp. 285~291.
- (24) Han, H. N., Lee, Y. G., Oh, K. H. and Lee, D. N., 1996, "Analysis of Hot Forging of Porous Metals," *Mat. Sci. Eng.* A206, pp. 81~89.
- (25) Kim, J. K., Yang, H. C. and Kim, K. T., 2003, "Rubber Isostatic Pressing and Cold Isostatic Pressing of Metal Powder," *Transactions of the KSME*, A27, No. 7, pp. 1076~1086.
- (26) Ludwick, P., 1909, "Element der Technologischen Mechanik," Springer, Berlin.
- (27) Hatch, J. E., 1995, *Aluminum Properties and Physical Metallurgy*, ASM, Metals Park, Ohio, pp. 684~687.