

금속 몰드를 이용한 금속 분말의 온간 등가압 성형

박 중 구*, 김 기 태†

(2003년 12월 10일 접수, 2004년 4월 20일 심사완료)

Densification Behavior of Metal Powder Under Warm Isostatic Pressing with a Metal Mold

JungGoo Park and KiTae Kim

Densification(치밀화), Finite Element Analysis(유한요소해석), Metal Mold(금속 몰드), Metal Powder(금속 분말), Warm Isostatic Pressing(온간 정수압 성형), Warm Die Pressing(온간 금형 압축)

Abstract

The effect of a metal mold on densification behavior of stainless steel 316L powder was investigated under warm isostatic pressing with a metal mold. We use lead as a metal mold and obtain experimental data of metal mold properties. To simulate densification behavior of metal powder, elastoplastic constitutive equation proposed by Shima and Oyane was implemented into a finite element program (ABAQUS) under warm die pressing and warm isostatic pressing with a metal mold. Finite element results were compared with experimental data for densification and deformation of metal powder under warm isostatic pressing and warm die pressing.

1. 서론

분말 야금(PM: Powder Metallurgy)에 의한 부품 성형은 최종 성형체의 기계적, 재료적 성질을 향상시킬 수 있는 매우 유용한 공정으로 알려져 있다.⁽¹⁻²⁾ 특히 분말 야금 공정으로 성형한 스테인리스강 부품은 내식성, 내산화성, 비자기성 및 경도 등이 우수하여 일반 철이나 강 제품에 비해 그 수요가 증가하는 추세이며, 그 중요성이 확대되고 있다.⁽³⁾

일반적인 분말 야금 공정은 금형 압축, 분말 단조, 분말 사출 성형 등 여러가지 성형 공정으로 성형한 후, 소결이나 기계 가공 등을 거쳐 최종 부품을 생산하게 된다. 그러나 분말 야금에 의한 부품의 성형 시, 금형과 분말 사이의 마찰로 인한

밀도 분포의 불균일은 성형체 내부에 잔류 응력을 생성시키거나, 소결 시 원하지 않는 형상으로의 변형 등의 원인이 된다. 따라서, 밀도 분포의 불균일을 최소화하는 공정의 개발은 분말 야금의 중요한 연구 주제 중의 하나이다.

온간에서의 분말 성형 공정은 낮은 성형 압력으로도 높은 상대 밀도를 얻을 수 있고, 성형 후 강도의 향상, 성형체 내부의 균일한 밀도 분포, 시편 제거의 용이성 등의 장점이 있는 것으로 알려져 있다.⁽⁴⁻⁵⁾ 최근에는 이러한 온간 성형의 장점과 고무 몰드를 이용한 등가압 성형을 결합한 온간에서의 고무 등가압 성형 공정(RIP: Rubber Isostatic Pressing)이 소개된 바 있다.⁽⁶⁾ 이러한 성형 공정은 냉간 등가압 성형 및 열간 등가압 성형 공정에 비해 쉽게 정수압 조건을 구현 할 수 있는 장점이 있다. 그러나 고무 몰드의 성형 온도에 제한이 있고, 고무 몰드와 분말 성형체 사이의 흡착으로 인한 최종 성형체의 파손 등의 문제점이 발생할 수 있어, 그 적용에 한계가 있다.

본 논문에서는 금속 몰드를 이용하여 온간 등가

* 포항공과대학교 대학원 기계공학과

† 책임저자, 회원, 포항공과대학교 기계공학과

Email: korean@postech.edu

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

압 성형 공정 실험을 수행하였다. 금속 몰드를 이용한 분말 성형체의 치밀화 공정은 높은 성형 온도에서 정수압 조건을 만들기 쉽고, 형상 제어를 통한 최종 부품으로의 정밀 정형에 이용될 수 있다. 실험과 유한요소해석에 사용된 금속 몰드는 온갓에서 낮은 유동 응력을 나타내는 납을 사용하였다. 온갓에서 몰드의 낮은 유동 응력은 정수압 조건을 구현하는데 매우 유용하다.⁽⁶⁾

납의 온도에 따른 물성 변화에 대해서는 여러 연구자에 의해 조사되었다. Dai 등⁽⁷⁾은 납-비스무트 합금에 대해 온도에 따른 항복응력, 탄성계수, 압축응력과 변형률의 관계 등의 기계적 특성에 관해 연구한 바 있고, Park 등⁽⁸⁾은 납 모델링 실험을 통해 온갓에서는 납 시편과 금형 사이에는 마찰이 거의 존재하지 않음을 밝힌 바 있다. 실제 실험값을 표기한 문헌에서도 상온에서의 납과 금속의 마찰계수는 0.5~0.8 사이의 값으로 대부분의 금속간 마찰계수에 비해 비교적 낮은 값을 가지고 있음을 알 수 있다.⁽⁹⁾ 이처럼 온갓에서의 낮은 유동 응력과 마찰계수는 금속 몰드를 이용한 분말의 성형 시 정수압 조건의 구현이나 밀도 구배의 감소에 매우 유용할 것으로 기대된다.

실험에서 사용한 금속 분말의 치밀화 및 변형 예측을 위해서는 Shima-Oyane의 구성 모델⁽¹⁰⁾을 사용하였다. 일반적으로 많이 사용되는 온갓 금형 압축의 경우와 금속 몰드를 이용한 온갓 등가압 성형 공정을 다른 온도와 하중 조건을 통해 비교하였고, 또한 온갓 고무 등가압 성형에 의한 결과와 비교하였다. 유한요소해석에 의한 결과는 최종 형상 및 밀도 분포에 대하여 실험 결과와 비교 분석하였다. 금속 몰드의 경우 하중 속도에 따라 그 유동 응력이 다르게 나타나기 때문에 하중 속도에 따른 유동 응력의 차이가 분말 성형체의 치밀화에 미치는 영향에 대해서 조사하였다.

2. 실험

본 논문에서는 수 분사법으로 제조된 평균 입자 크기가 8 μm 인 스테인리스강 분말 (stainless steel 316L, Pamco Co., Japan)을 사용하여 실험하였다. 분말의 물리적 성질과 화학적 조성은 다른 논문에서 쉽게 찾을 수 있다.⁽¹¹⁾

2.1 납 몰드의 물성 실험

납 몰드의 변형률-응력 곡선을 얻기 위하여 고온 분위기의 진공로(vacuum furnace)와 고온 변위 측정 장치(LVDT)가 장착된 재료 시험기를 이용하여 일축 압축 실험을 수행하였다. 실험에 사용하

는 시험편은 직경 7 mm와 높이 10 mm로 가공하였다. 고온 분위기의 진공로를 이용하여 5°C/min의 승온 속도로 각각 200°C와 300°C까지 가열한 후 시편이 열적 평형상태가 되도록 시험 온도를 약 30 분간 유지하였다. 압축 시 납 시편과 압반 사이의 마찰을 줄이기 위하여 탄탈륨 박판(tantalum sheet)을 삽입하였다. 변위 속도에 따른 유동 응력의 변화를 조사하기 위하여 10⁻¹ mm/s, 10⁻² mm/s, 및 10⁻³ mm/s의 변위 속도에 따라 실험하였다.

2.2 스테인리스강 모재의 온갓 인장 실험

스테인리스강 분말에 대한 유한요소해석을 수행하기 위해서는 모재의 항복 강도와 탄성 계수, 유동 응력과 변형률의 관계 등 기계적 특성에 관한 자료가 필요하다.

스테인리스강 모재의 인장 시편을 제조하기 위한 과정은 다음과 같다. 냉간 정수압 성형기(ABB Autoclave Systems inc.)를 통해 300 MPa의 가압력으로 초기 성형체를 얻은 후, 수소 분위기로써 이용하여 1200°C에서 4 시간 동안 소결하였다. 소결 후 기계 가공을 통해 인장 시편을 얻을 수 있었다. 기계 가공 후 500°C에서 2 시간 동안 어닐링 하였으며, 시편의 최종 상대 밀도는 $D \geq 0.985$ 이다.

스테인리스강 모재 시편의 온갓 인장 실험은 재료 시험기(MTS servo-hydraulic tester)에 고주파 가열 장치(induction heating system)를 장착하여 실험하였다. 가열 장치를 이용하여 10°C/min의 승온 속도로 각각 200°C와 300°C로 가열한 후 시편이 열적 평형 상태가 되도록 시험 온도를 30 분간 유지하였다. 실험은 각각의 온도에서 10⁻³ mm/s의 일정한 변위 속도로 수행하였다.

2.3 온갓 금형 압축 실험

온갓 금형 압축 실험은 가열로가 장착된 MTS 재료 시험기를 이용하였으며, SKD11으로 제작된 직경 26 mm인 금형을 사용하였다. 스테인리스강 분말 70 g을 금형에 충전한 후 상부 펀치와 함께 가열로를 이용하여 5°C/min의 승온 속도로 각각 200°C와 300°C까지 가열한 후 30 분간 유지하였다. 분말과 금형사이의 마찰을 줄이기 위하여 금형 벽면에 흑연 윤활제를 사용하였다. 가압은 1 MPa/s의 일정한 하중 속도로 400 MPa까지 일방향 압축하였다. 일방향 압축에서는 상부 펀치에서 하부 압반으로의 한쪽 방향으로만 힘이 전달된다. 온갓 금형 압축 후 금형에서 시편을 제거하기 쉽게 하기 위하여 6개 요소로 나누어 제작된 금형을 사용하였다. 온갓 금형 압축과 타 성형

공정 후 분말성형체의 상대 밀도는 아르키메데스 비중법으로 구하였다.

2.4 납 몰드를 이용한 온간 등가압 성형 실험

납 몰드를 이용한 온간 등가압 성형 실험은 MTS 재료 시험기에 가열로를 장착한 후 각각 200°C 와 300°C 에서 수행하였다. 실험에 사용된 납 몰드는 외경 43 mm, 두께 5 mm, 높이 50 mm 이며, 내경 43 mm 의 금형 안에 삽입하여 실험하였다. 스테인리스강 분말을 몰드에 충전시킨 직후의 상대 밀도는 0.44 이며, 1 MPa/s 의 일정한 하중 속도로 400 MPa 까지 일방향 압축하였다. 동일한 실험 조건으로 반복 실험을 통해 평균 상대 밀도를 구하여 가압력에 따른 시편의 밀도 변화를 조사하였다. 또한 몰드 두께에 따른 밀도 변화를 조사하기 위하여 두께 10 mm 의 몰드를 사용하여 300°C 에서 같은 하중 조건으로 실험하였다. 금속 몰드는 하중 속도에 따라 유동 응력이 달라지므로 하중 속도에 따른 밀도 변화를 조사하기 위하여 하중 속도를 변화시켜가며 밀도 변화를 측정하였다. 실험은 300°C 에서 10⁻¹ mm/s, 10⁻² mm/s, 및 10⁻³ mm/s 의 변위 속도로 압축하여 각각 다른 하중 속도를 갖도록 하였으며, 400 MPa 까지 일방향 압축하였다.

2.5 고무 몰드를 이용한 온간 등가압 성형 실험

고무 몰드를 이용한 온간 등가압 성형 실험에는 실리콘 고무 몰드를 사용하였다. 실리콘 고무는 다른 고무에 비해 고온 강도, 열적 특성이 우수한 것으로 알려져 있다.⁽¹²⁾

실험은 MTS 재료 시험기에 가열로를 장착한 후 300°C 에서 수행하였다. 내경 43 mm 의 금형 안에 외경 43 mm, 두께 5 mm, 높이 50 mm 의 고무 몰드를 삽입하여 실험하였다. 초기 충전 밀도 0.44 인 스테인리스강 분말을 1 MPa/s 의 일정한 하중 속도로 250 MPa 까지 일방향 압축하였다.

2.6 분말 성형체의 밀도 분포 측정

분말 성형체의 상대 밀도 분포는 경도와 상대 밀도의 관계를 이용하여 간접적으로 구할 수 있으며,⁽¹³⁾ 경도 측정에는 로크웰 경도계(Rockwell FR-3, Future-Tech Corp., Japan)를 주로 이용한다.⁽¹⁴⁻¹⁵⁾ 상대 밀도와 경도의 관계를 구하기 위해 외경 20 mm, 두께 5 mm, 높이 30 mm 인 몰드에 분말을 충전한 후 50 MPa~400 MPa 사이의 다양한 압력으로 온간 성형하여 균일한 밀도 분포를 갖는 시편들을 준비하였다. 준비된 시편을 750°C 에서 2 시간 동안 예비 소결한 후, 다이아몬드 휠(ISOMET low

speed saw, Buehler, U.S.A.)을 이용하여 높이 방향으로 절단하였다. 시편을 500°C 에서 2 시간 동안 어닐링 한 후 단면을 연마하였다. 경도 측정은 1/16 inch 강구 압자로 60 kg 의 하중을 30 초간 가하여 각 시편마다 10 개의 경도 값을 측정하여 평균한 뒤 경도와 밀도사이의 관계를 구하였다.

납 몰드와 고무 몰드를 이용한 온간 성형 시편의 밀도 분포를 측정하기 위하여, 경도 측정 시간섭이 생기지 않도록 가로 세로 방향으로 각각 3 mm 의 간격으로 총 80 개의 격자를 생성한 후 격자들의 적분점에서 경도를 측정하였다. 온간 금형 압축 시편에 대해서도 3 mm 의 간격으로 60 개의 격자를 생성하여 격자들의 적분점에서 경도를 측정하였다.

3. 이론

3.1 금속 분말의 구성 방정식

금속 분말의 전체 변형률 속도 성분 $\dot{\epsilon}_{ij}$ 는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\dot{\epsilon}_{ij} = \dot{\epsilon}_{ij}^e + \dot{\epsilon}_{ij}^p \quad (1)$$

여기서 $\dot{\epsilon}_{ij}^e$ 와 $\dot{\epsilon}_{ij}^p$ 는 각각 탄성 변형률 속도 성분과 소성 변형률 속도 성분을 나타낸다. 또한, Hooke의 법칙으로부터 응력성분 σ_{ij} 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\sigma_{ij} = D_{ijkl}^e \epsilon_{kl}^e \quad (2)$$

여기서 D_{ijkl}^e 는 4 차 탄성계수 텐서이다.

소성 변형률 속도 텐서는 다음과 같이 정의된다.

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

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

질량 불변의 관계로부터 \dot{D} 은 다음과 같이 쓸 수 있다.

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

상대밀도를 경화변수(hardening parameter)로 사용할 경우 금속 분말의 치밀화 거동을 나타내는 항복함수는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$f(\sigma_{ij}, D) = 0 \quad (5)$$

또한 금속 분말이 등방성을 가질 경우 항복함수 f 는 3 개의 응력 불변량으로 나타낼 수 있으나, 제 3 응력 불변량을 무시할 경우 항복함수는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$f(p, q, D) = 0 \quad (6)$$

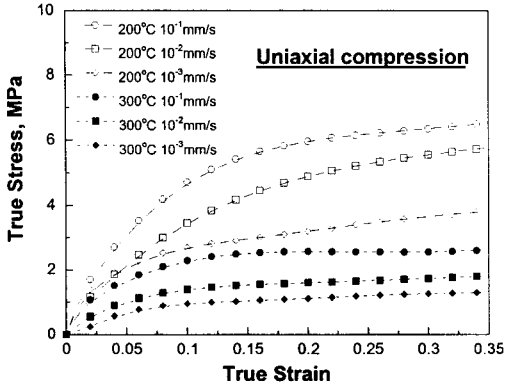


Fig. 1 Uniaxial compression stress-strain relation of lead mold for the variation of pressure rate at 200°C and 300°C

여기서 정수응력 p 와 편차응력 q 는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$p = -\frac{\sigma_{kk}}{3}, \quad q = \sqrt{\frac{3\sigma'_{ij}\sigma'_{ij}}{2}} \quad (7)$$

Shima 와 Oyane 은 금속 분말을 위한 항복합수를 다음과 같이 제안하였다.⁽¹⁰⁾

$$\Phi(\sigma, \bar{\epsilon}_m^p, D) = \left(\frac{q}{\sigma_m}\right)^2 + 249^2(1-D)^{1.028} \left(\frac{p}{\sigma_m}\right)^2 - D^5 = 0 \quad (8)$$

여기서 p, q, σ_m 및 $\bar{\epsilon}_m^p$ 은 각각 분말 재료에 가해지는 정수 응력과 유효 응력, 모재의 유동 응력과 유효 소성 변형률이다.

금속 분말의 치밀화 거동은 Shima-Oyane⁽¹⁰⁾의 구성 방정식을 ABAQUS⁽¹⁶⁾의 사용자 정의 서브루틴인 UMAT 에 적용하여 해석하였다.

4. 실험 결과 및 해석

분말이 충전된 납 몰드가 금형 내에서 구속된 상태로 가압되기 때문에 납 몰드의 압축시 기계적 특성을 고려해야 한다. 따라서 압축시 생기는 변형 특성을 파악하고 유한요소해석에 적용하기 위해 납 몰드의 일축 압축 실험을 수행하였다. 금형 압축 및 납 몰드를 이용한 온갖 성형시 금형과 납 몰드 및 분말 성형체는 균일한 온도 분포로 가정하였다.

4.1 납 몰드의 기계적 성질

Fig. 1 은 납 몰드의 변위 속도와 온도에 따른 일축 압축 하의 진변형률에 따른 진응력의 변화를

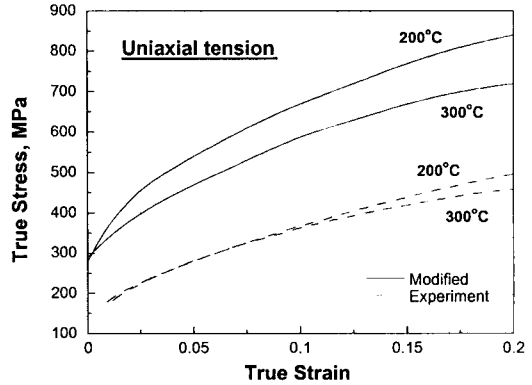


Fig. 2 Uniaxial stress-strain relation for dense stainless steel 316L at 200°C and 300°C

나타내고 있다. 납 몰드의 거동은 변위 속도에 따라 달라짐을 알 수 있고, 변위 속도가 클수록 높은 응력 분포를 나타낸다. 온도가 높을수록 변형에 필요한 유동 응력이 낮게 나타남을 확인할 수 있고, 이를 통해 성형 온도가 높을수록 분말의 등가압 성형에 필요한 하중이 낮아지게 됨을 알 수 있다. 납 모재의 탄성 계수는 압축 응력과 소성 변형률 곡선의 0.2% offset 으로 구하였고, 프와송 비는 문헌⁽¹⁷⁾의 값을 인용하였다. 즉, 200°C 에서 $E=35.20$ GPa, 300°C 에서 $E=14.35$ GPa 이며, 프와송비는 0.45 를 사용하였다.

4.2 모재의 온간 일축 인장

스테인리스강 모재 시편을 200°C 와 300°C 에서 일정한 변위 속도로 일축 인장하여 인장 응력과 소성 변형률의 관계를 구하였다. Fig. 2 는 각각의 온도에서 구한 인장 응력과 소성 변형률 관계와 이를 유한요소해석을 통해 수정한 결과를 나타낸다. 수정 된 인장 응력과 소성 변형률의 관계는 금형 압축 시 유한요소해석 결과가 실험치를 잘 예측 할 수 있도록 유동 응력의 크기를 계산하여 구한 값이다. 이러한 실험식과 수정식은 다음과 같은 Ludwik 의 식으로 잘 나타낼 수 있다. 즉, 200°C 에서

$$\sigma_m = \begin{cases} 112.48 + 964.06(\bar{\epsilon}_m^p)^{0.57569} & (9) \\ 279.28 + 1377.3(\bar{\epsilon}_m^p)^{0.54997} & (10) \end{cases}$$

300°C 에서

$$\sigma_m = \begin{cases} 60.652 + 805.19(\bar{\epsilon}_m^p)^{0.4285} & (11) \\ 285.98 + 1214.4(\bar{\epsilon}_m^p)^{0.61821} & (12) \end{cases}$$

로 나타낼 수 있다. 식 (9)와 (11)은 실험식을 나

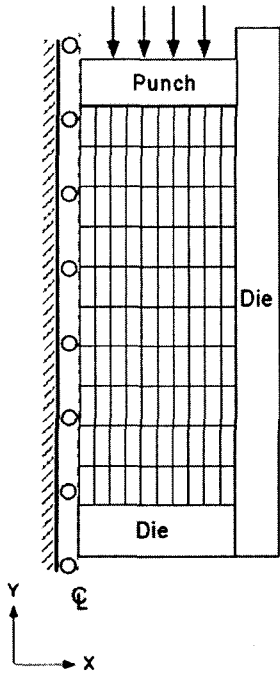


Fig. 3 Finite element meshes and boundary conditions for warm die pressing

타내고 (10)과 (12)는 유한요소해석을 통해 수정된 식을 나타낸다.

스테인리스강 분말의 금형 압축 및 납 몰드를 이용한 온간 성형 시 가압력 증가에 따른 치밀화를 해석하기 위하여 200°C와 300°C에서의 스테인리스강 모재의 유동 응력에 대한 식 (9)~(12)를 Shima-Oyane의 구성 모델⁽¹⁰⁾에 적용하였다. 유한요소해석을 위한 탄성 계수 및 항복 강도는 인장 응력과 소성 변형률 곡선의 0.2% offset으로 구하였으며, 프와송 비는 문헌⁽¹⁷⁾의 값을 인용하였다. 즉, 200°C에서 $E=80.15$ GPa, 300°C에서 $E=64.25$ GPa이며, 프와송비는 0.33을 사용하였다.

4.3 온간 금형 압축

Fig. 3은 스테인리스강 분말의 온간 금형 압축에 사용된 유한요소 격자와 경계 조건을 나타낸다. 축 대칭 조건으로부터 전체 단면의 1/2만을 해석하였으며, 분말 성형체는 100개의 4절점 2차 축대칭 요소인 CAX4(4-node axisymmetric quadrilateral, biquadratic displacement)와 금형으로는 25개의 축대칭 강요소인 RAX2(axisymmetric rigid element)를 사용하였다.⁽¹⁶⁾ 금속 분말의 변형 거동을 위해서는 Shima-Oyane의 구성 모델⁽¹⁰⁾을 사용하였으며, 금형과 분말 성형체 사이의 마찰 계수는 0.17로 가정하였다.⁽²¹⁻²²⁾ 시편의 치수는

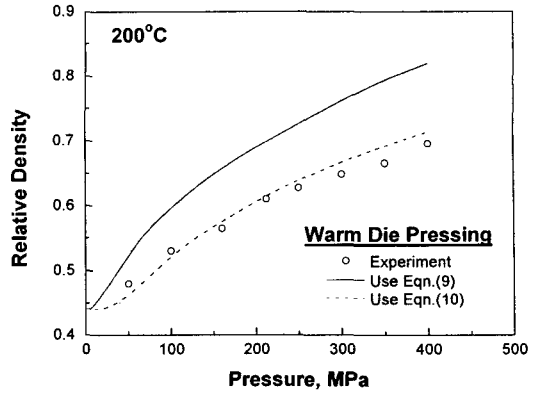


Fig. 4 Comparison between experimental data and finite element results for the variation of relative density with axial stress during warm die pressing at 200°C

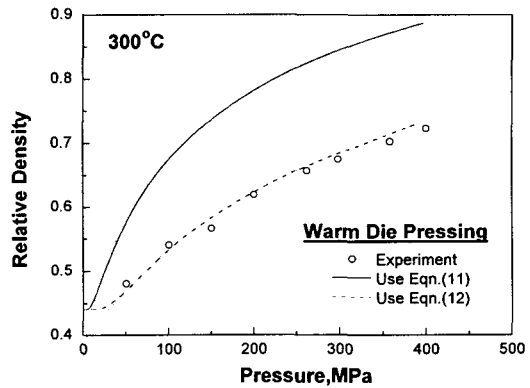


Fig. 5 Comparison between experimental data and finite element results for the variation of relative density with axial stress during warm die pressing at 300°C

높이 50 mm, 지름 26 mm이며, 시편의 초기 밀도는 실험을 통해 구한 0.44를 사용하였다.

Fig. 4와 Fig. 5는 각각 200°C와 300°C에서 금형 압축 시 스테인리스강 시편의 가압력에 따른 상대 밀도 변화를 나타내는 실험치와 Shima-Oyane의 구성모델⁽¹⁰⁾에 의한 유한요소해석 결과의 비교를 나타내고 있다. 식 (9)와 (11)을 사용한 유한요소해석 결과는 실험치보다 조금 높은 밀도 분포로 예측하였다. 수소 소결 공정으로 얻은 모재 ($D \geq 0.985$)의 유동응력은 이상적 모재 ($D=1$)의 경우보다 작으므로 해석결과는 실험치와 차이를 보였다. 따라서, 유한요소해석을 이용한 스테인리스강 분말 성형체의 정확한 거동 예측을 위해서는 모재

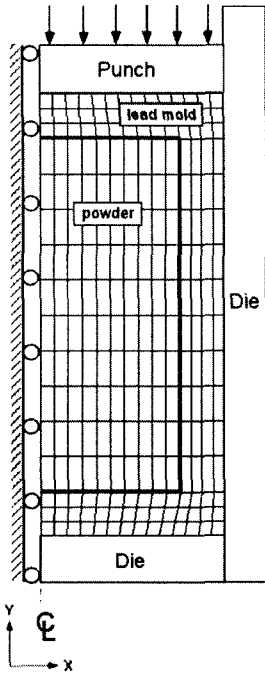


Fig. 6 Finite element meshes and boundary conditions for a powder compact in the metal mold isostatic pressing

의 유동 응력식을 (10)과 (12)로 수정하여 사용해야 하며, 이를 금형 압축 및 납 몰드를 이용한 온갓 성형에 적용하였다. 스테인리스강은 열처리나 가공조건에 따라 유동 응력의 범위가 비교적 큰 금속이기 때문에 항복 함수에 의한 분말 성형체의 정확한 치밀화 해석을 위해서는 적절히 수정된 유동 응력식이 필요하게 된다.

4.4 납 몰드를 이용한 온갓 성형

Fig. 6 은 납 몰드를 이용한 스테인리스강 분말의 온갓 성형에 사용된 유한요소 격자와 경계 조건을 나타낸다. 축 대칭 조건으로부터 전체 단면의 1/2 만을 해석하였으며, 분말 성형체와 납 몰드는 각각 100 개와 128 개의 4 절점 2 차 축 대칭 요소인 CAX4(4-node axisymmetric quadrilateral, biquadratic displacement) 를 사용하였고, 금형을 위해서 25 개의 축 대칭 강 요소인 RAX2(axisymmetric rigid element)를 사용하였다.⁽¹⁶⁾ 금속 분말의 변형 거동을 위해서는 Shima-Oyane 의 구성 모델⁽¹⁰⁾을 사용하였으며, 스테인리스강 분말과 납 몰드 사이의 마찰 계수는 0.17 로 가정하였다.^(12,18) 시편의 치수는 높이 50 mm, 외경 43 mm 이며 두께는 5 mm 로 하였다. 시편의 초기 밀도는 실험을 통해 구한 0.44 를 사용하였다.

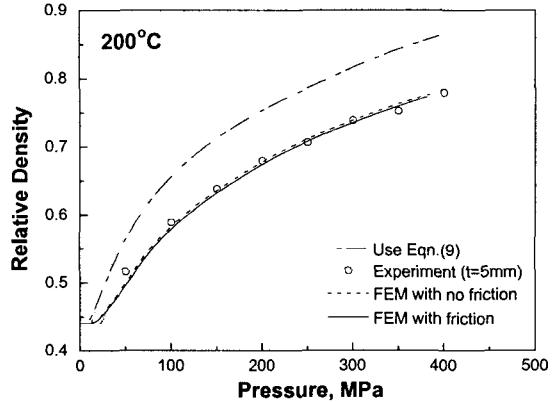


Fig. 7 Comparison between experimental data and finite element results for the variation of relative density with axial stress during metal mold warm isostatic pressing at 200°C

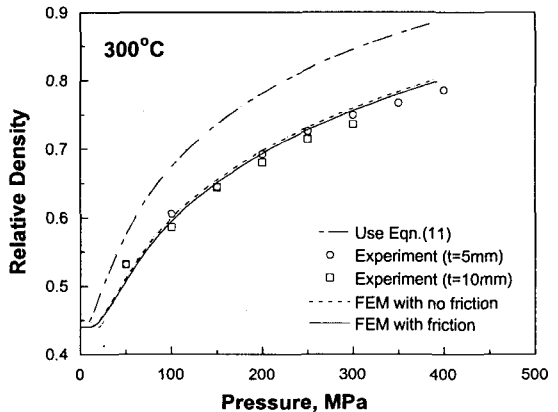


Fig. 8 Comparison between experimental data and finite element results for the variation of relative density with axial stress during metal mold warm isostatic pressing at 300°C

Fig. 7 과 Fig. 8 은 각각 200°C 와 300°C 에서의 납 몰드를 이용한 온갓 성형시 스테인리스강 분말의 가압력에 따른 상대 밀도의 변화를 나타내는 실험치와 유한요소해석 결과와의 비교를 나타낸다. 금형 압축을 통해 수정된 식 (10) 및 (12)를 이용한 유한요소해석 결과가 수정전의 식 (9)와 (11)을 이용하는 것보다 실험치를 잘 예측하고 있으며, 300°C 에서는 납 몰드와 금형 사이의 마찰을 고려한 경우와 고려하지 않은 경우의 해석 결과는 거의 차이가 없음을 알 수 있다. 또한 Fig. 8 은 300°C 에서 몰드의 두께가 10 mm 일때의 밀도 변화도 나타낸다. 몰드의 두께가 두꺼우면 밀도가

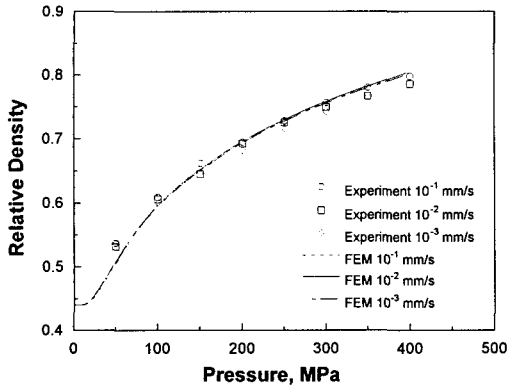


Fig. 9 Comparison between experimental data and finite element results for the variation of relative density with pressure rate during metal mold warm isostatic pressing at 300°C

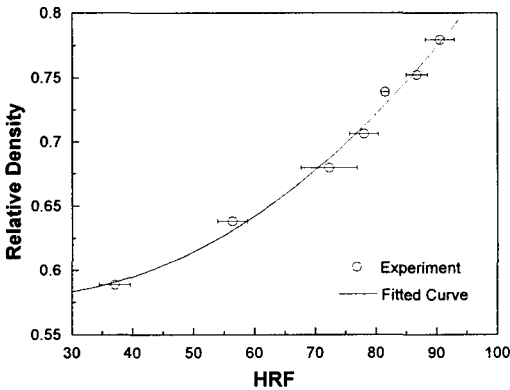


Fig. 10 Variation of relative density with Rockwell hardness for stainless steel 316L powder compacts

약간 감소하는 경향이 있으나, 그 차이는 그리 크지 않았다.

Fig. 9는 하중 속도에 따른 밀도의 변화를 나타내고 있다. Fig. 1에서도 볼 수 있듯이 금속 몰드는 같은 온도 조건에서도 하중 속도에 따라서 몰드의 유동 응력의 차이가 크게 나타난다. 그러나 몰드의 유동 응력이 작은 값을 가지면서 차이를 보이고 있기 때문에 분말 성형시 밀도 변화에는 거의 영향을 주지 않는 것으로 해석할 수 있다. 각각의 하중 속도에서도 유한요소해석 결과는 실험치를 잘 예측하고 있다.

4.5 분말 성형체의 밀도 분포

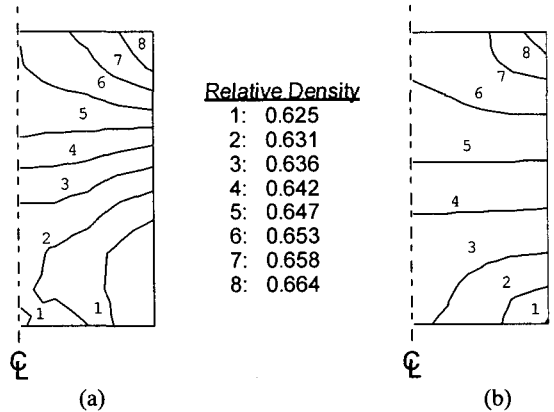


Fig. 11 Comparisons between (a) experimental data and (b) finite element result for relative density distribution under 250 MPa during warm die pressing at 200°C

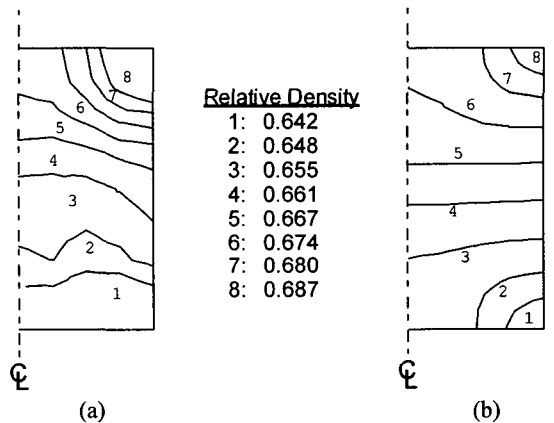


Fig. 12 Comparisons between (a) experimental data and (b) finite element result for relative density distribution under 250 MPa during warm die pressing at 300°C

4.5.1 경도와 상대 밀도와의 관계

Fig. 10은 스테인리스강 분말 성형체의 상대 밀도와 로크웰 경도의 관계를 나타낸다. 에러바(error bar)는 균일한 밀도 분포를 갖는 표준 시편의 경도 측정 값들의 표준 편차(standard deviation)를 나타낸다. 실험치를 이용하여 다음과 같은 식으로 표현 할 수 있다.

$$D = 0.5559 + 0.00174355 \cdot HRF + 1.8094 \times 10^{-5} \cdot HRF^2 \quad (13)$$

4.5.2 금형 압축에 의한 온간 성형

Fig. 11의 (a)와 (b)는 200°C에서 250 MPa의 하중으로 성형한 시편의 상대 밀도 분포에 대한 실험치와 유한요소해석 결과의 비교를 나타낸다.

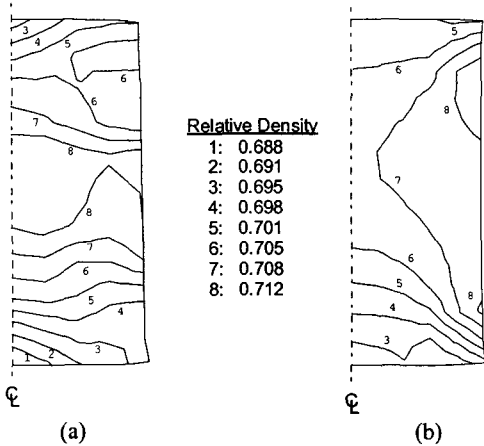


Fig. 13 Comparisons between (a) experimental data and (b) finite element result for relative density distribution under 250 MPa during metal mold isostatic pressing at 200°C

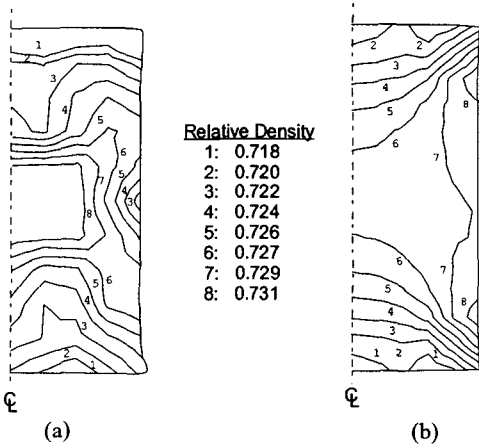


Fig. 14 Comparisons between (a) experimental data and (b) finite element result for relative density distribution under 250 MPa during metal mold isostatic pressing at 300°C

Fig. 11의 실험치는 식 (13)의 관계식과 경도 분포의 측정치로부터 구하였다. 금형과 분말 사이의 마찰력이 상대적으로 크게 작용하여 모서리 부분에서 가압력이 작게 나타나고, 이는 상부 펀치 부분의 밀도가 하부 다이 부분의 밀도보다 높게 나타나는 원인이 된다. Fig. 12의 (a)와 (b)는 300°C에서의 금형 압축 시편과 유한요소해석 결과와의 비교를 나타낸다. 200°C의 경우보다 높은 상대 밀도 분포를 나타내지만 밀도 구배는 감소를 보이지 않는다. 이는 소결 등의 후처리 공정 시 성형체의 불균일한 변형을 발생시키는 원인이 된다. Fig. 11과 Fig. 12에서 확인 할 수 있듯이 수정된

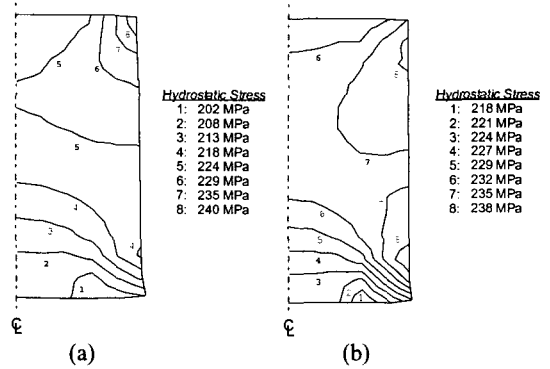


Fig. 15 FEM results for the distribution of hydrostatic stress in a stainless steel 316L powder compact pressed under 250 MPa during metal mold isostatic pressing at (a) 200°C and (b) 300°C

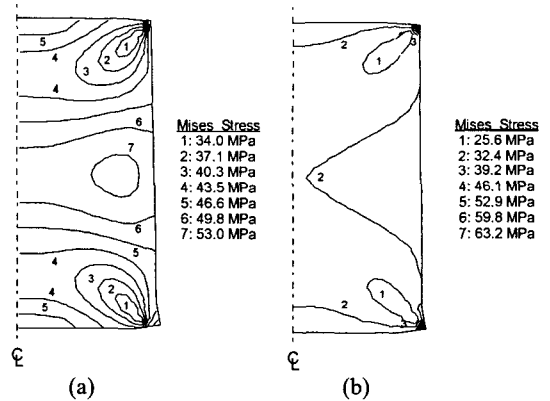


Fig. 16 FEM results for the distribution of Mises stress in a stainless steel 316L powder compact pressed under 250 MPa during metal mold isostatic pressing at (a) 200°C and (b) 300°C

식 (9)와 (11)을 사용하면 유한요소해석 결과는 실험치를 잘 예측하였다.

4.5.3 납 몰드를 이용한 온간 성형

Fig. 13의 (a)와 (b)는 200°C에서 금속 몰드를 사용하여 250 MPa의 가압력으로 성형한 시편의 실험치와 유한요소해석 결과의 비교를 나타낸다. Fig. 11의 금형 압축 결과보다 균일한 밀도 분포를 나타냄을 알 수 있다. 유한요소해석 결과는 이러한 경향을 잘 보여주고 있다. 몰드와 금형 사이의 마찰이 작용하여 실험 결과와의 비교에서도 볼 수 있듯, 상하의 밀도 구배가 대칭의 형상이 아님을 알 수 있다. 200°C에서는 납 몰드와 금형 사이의 마찰을 무시 할 수 없으며, 실험치를 가장 잘 예측 할 수 있는 마찰 계수를 적용하여

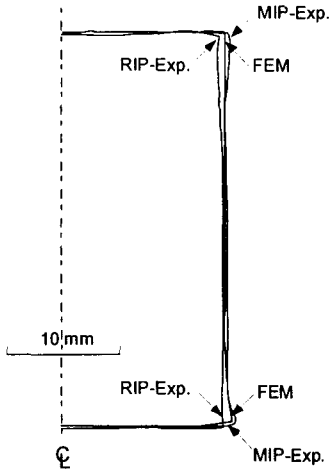


Fig. 17 Comparisons between experimental data of warm isostatic pressing by using a metal mold and rubber mold and finite element result of deformation under 250 MPa at 300°C

무마찰 조건과 비교하였다. 무마찰 조건보다 마찰계수 0.3 을 적용한 유한요소해석 결과가 비교적 실험치를 정확히 예측하였다. 마찰 계수는 4~5 번의 시행 착오를 거쳐 실험 결과를 가장 잘 예측하는 값으로 결정하였다. 유한요소해석 결과는 실험 결과를 잘 예측하고 있음을 알 수 있다.

Fig. 14 의 (a)와 (b)는 300°C 에서 금속 몰드를 사용하여 250 MPa 의 가압력으로 성형한 시편의 실험치와 유한요소해석 결과의 비교를 나타낸다. 200°C 의 경우와 같이 균일한 밀도 분포를 나타내며, 중앙 부분의 상대 밀도가 가장 높으면서 상하 대칭의 경향을 보여주고 있다. 유한요소해석 시 금형과 몰드 사이의 마찰을 무시하였고,⁽⁸⁾ 이는 실험 결과와 비교를 통해서도 타당함을 알 수 있다. 또한, 온도의 증가에 의해 스테인리스강과 납 몰드의 유동성이 증가하여 300°C 에서의 실험에서 상대 밀도가 더 높게 나타나고, 밀도 분포도 더욱 균일함을 볼 수 있다.

Fig. 15 는 200°C 와 300°C 에서의 정수응력 분포를 나타낸다. 모서리 부분을 제외하면 비교적 균일한 정수응력이 작용하고 있음을 알 수 있다. 성형 온도가 높을수록 더 크고 균일한 정수응력 분포를 가지게 됨을 볼 수 있다.

Fig. 16 은 200°C 와 300°C 에서의 편차응력 분포를 나타낸다. 전체적으로 작은 편차응력을 가지며, 이는 금속 몰드를 이용한 온간 성형에서 정수압에 가까운 압력 조건을 조성한다는 것을 보여 준다. 그리고 성형 온도가 높을수록 낮은 편차응력 분포를 보여 정수압 구현이 더 용이함을 알 수

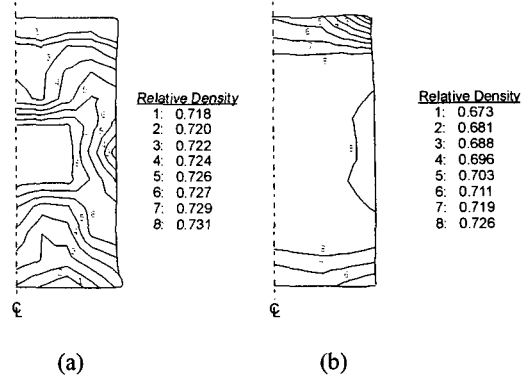


Fig. 18 Comparisons between measured relative density distribution of a compact during (a) metal mold isostatic pressing and (b) rubber mold isostatic pressing under 250 MPa at 300°C

있다.

온간 금형 압축에 의한 Fig. 11 및 Fig. 12 의 결과와 금속 몰드를 이용하여 온간 성형한 Fig. 13 및 Fig. 14 의 결과로부터, 금속 몰드는 분말 성형체의 밀도 분포에 영향을 주며, 정수압에 가까운 하중 조건을 조성하여 균일한 내부 밀도 분포를 얻을 수 있음을 알 수 있다. 따라서 이러한 금속 몰드를 이용한 온간 성형 공정은 균일한 밀도 분포를 가지는 분말 성형체 제조를 위한 새로운 성형 공정으로 용이하게 활용될 수 있을 것이다.

4.5.4 고무 몰드를 이용한 온간 성형과의 비교

Fig. 17 은 납 몰드와 고무 몰드를 이용하여 300°C 에서 250 Mpa 의 성형 압력으로 온간 성형한 스테인리스강 분말 성형체의 형상과 유한요소해석 결과를 비교하고 있다. 형상은 전체 단면의 1/2 만을 비교하였으며 유한요소해석 결과는 납 몰드를 이용한 온간 성형 시편의 최종 형상을 비교적 잘 예측하고 있음을 알 수 있다. 고무 몰드를 이용한 경우는 금속 몰드를 이용한 경우와 달리 가운데 표면 부분에 배불림 현상이 나타나고 있으며, 이는 Kim 등의 연구 결과와도 일치하는 경향을 보인다.⁽¹²⁾ Fig. 18 의 (a)와 (b)는 금속 몰드를 이용한 경우와 고무 몰드를 이용한 경우의 밀도 분포를 비교하고 있다. 고무 몰드를 이용한 경우는 어느 정도 균일한 밀도 분포를 보이지만 금속 몰드를 이용한 경우에 비해 전체적인 밀도 구배가 크게 나타난다.

5. 결 론

본 논문에서는 스테인리스강 분말의 금형 압축

시 금속 분말의 치밀화와 금속 몰드를 이용한 온간 성형 공정에 대한 연구를 수행하였다. 실험 결과와 Shima-Oyane의 구성모델⁽¹⁰⁾에 의한 유한요소해석 결과로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) Shima-Oyane의 구성 모델⁽¹⁰⁾을 사용하여 유한요소해석을 수행한 결과는 스테인리스강 분말의 납 몰드를 이용한 온간 성형과 온간 금형 압축에서의 치밀화 경향과 최종 형상을 비교적 잘 예측하였다

(2) 온간 금형 압축시 납 몰드의 사용은 몰드와 분말의 낮은 유동 응력, 금형과 몰드 사이의 낮은 마찰 계수로 인해 성형체 내의 밀도 구배를 최소화하는 새로운 정수압 성형 공정으로 활용할 수 있을 것이다.

(3) 몰드의 두께와 하중 속도가 증가 할수록 같은 온도 조건에서는 밀도가 다소 낮아지는 경향이 있으나 그 차이는 그리 크지 않았다.

참고 문헌

- (1) Arbstedt, P., 1986, "Developments in Iron and Steel Powder Production," *Metal Powder Reports*, Vol. 41, No. 1, pp. 64~67.
- (2) Whittaker, D., 1995, "PM Routes to High Performance Parts," *Metal Powder Reports*, Vol. 50, No. 1, pp. 14~24.
- (3) Davis, J. R., 1994, *Stainless Steels*, Materials Park, OH : ASM International.
- (4) St Laurent, S. and Chagnon, F. 1999, "Behaviour of steel powder mixtures processed by warm compaction," *Metal Powder Report*, Volume 54, Issue 3, pp. 42.
- (5) Wahnschaffe, J., 1998, "New compaction approaches to higher density PM: warm or cold," *Powder Metallurgy*, Vol. 41, No. 4, pp. 250~252.
- (6) Yang, H. C., Lee, J. W. and Kim, K. T., 2003, "Rubber Isostatic Pressing of Metal Powder under Warm Temperatures," *Powder Technology*, accepted.
- (7) Dai, Y., Barbagallo, F. and Groeschel, F., 2003, "Compression properties of lead-bismuth," *Journal of*

- Nuclear Materials*, Vol. 317, Issues 2-3, pp. 252~255.
- (8) Park, C. Y., Yang, D. Y., Lee, K. H. and Eun, I. S., 1994, "Process Development of the Large size Dome Shape Forging-Products Using the Incremental and Combined Forming Method," *Transactions of KSME*, A18, No. 7, pp. 1685~1696.
- (9) *Friction and Wear Testing Source Book: Selected References from ASTM Standards and ASM Handbooks*, The Materials Information Society, 1997.
- (10) Shima, S. and Oyane, M., 1976, "Plasticity Theory for Porous Metals," *Int. J. Mech. Sci.*, Vol. 18, pp. 285~291.
- (11) Kwon, Y. S., Chung, S. H., Ahn, H. K., Chung, S. T., Park, S. J., Yoon, T. -S., Choi, J. Y., Kim, K. T., Park, L. J. and Kim, J. H., 2001, "CAE Analysis For Sintering Stage of Powder Injection Molding," *2001 International Conference on Powder Metallurgy & Particulate Materials*, New Orleans, pp. 140~152.
- (12) Kim, J. K., Yang, H. C. and Kim, K. T., 2003, "Rubber Isostatic Pressing and Cold Isostatic Pressing of Metal Powder," *Transactions of KSME*, A27, No. 7, pp. 1076~1086.
- (13) Yang, H. C., and Kim, K. T., 2000, "Densification Behavior of Ti-6Al-4V Powder Compacts by Hot Isostatic Pressing," *Transactions of KSME*, A24, No. 2, pp. 394~402.
- (14) Abe, O., Kanzaki, S., Ohashi, M. and Tabata, H., 1987, "Influence of size and shape on homogeneity of powder compacts formed by cold isostatic pressing (part 1): Press forming of thick cylinders," *International Journal of High Technology Ceramics*, Vol. 3, Issue 3, pp. 257~258.
- (15) Kim, J. H., Han, D. B. and Kim, K. T., 1996, "High temperature Creep Behavior of Cr₃C₂ Ceramic Composite," *Mat. Sci. Eng. A*, A212, pp. 87~93.
- (16) ABAQUS User's I, II and III Manual, 2001, Ver. 6.2, H.D. Hibbitt, I. Karlsson and E.P. Sorenson, USA.
- (17) ASM Handbook Properties and selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials, 1998, Vol. 2, Tenth edition.
- (18) Altan, T., Oh, S. I. and Gegel, H. L., 1983, *Metal Forming: Fundamentals and Application*, American Society for Metals, Metals Park, Ohio, pp. 1~353.