

〈논 문〉

금형압축 하에서 공구강 분말의 1단계 압축거동

김 기 태* · 김 종 성**

(1996년 8월 20일 접수)

Stage 1 Compaction Behavior of Tool Steel under Die Pressing

K. T. Kim and J. S. Kim

Key Words : Die Compaction(금형압축), Stage 1 Compaction(1단계 압축), Single Action Pressing(일방향압축), Double Action Pressing(양단압축), Finite Element Analysis(유한요소해석), Constitutive Equation(구성방정식), Tool Steel Powder(공구강 분말)

Abstract

The stage 1 compaction behavior of tool steel powder under die pressing was studied. The friction effects between the powder and the die wall under different die pressing modes were also investigated. The elastoplastic constitutive equations based on the yield functions by Fleck *et al.* and by Shima and Oyane were implemented into a finite element program to simulate die compaction processes. Finite element calculations were compared with experimental data for densification and density distribution of tool steel powder under single and double action die pressing. Finite element calculations using the yield function by Fleck *et al.* agreed better with experimental data than by Shima and Oyane.

1. 서 론

분말야금법에 의한 성형공정은 추가적 가공이 거의 필요없이 정형(near-net-shape)에 가까운 제품을 생산할 수 있다는 장점이 있다.⁽¹⁻³⁾ 특히 공구강처럼 높은 강도와 경도로 인해 기계적 가공이 어려운 경우는 이러한 분말야금법을 이용해 직접 정형에 가까운 부품을 성형하여 최종 가공공정을 최소화하는 것이 바람직하다.

분말야금법에 의한 성형공정은 먼저 임의의 형상을 갖게 하는 냉간성형후 소결과정과 분말단조 등의 최종 가공을 거쳐 부품을 생산하게 된다. 냉간

성형은 보통 금형에 분말에 넣고 압축하게 되는데, 이 때 금형 벽과 분말 사이의 마찰과 금형의 형상에 기인하여 성형체 내부에 불균일한 밀도분포를 갖게 되며 또한 분말종류와 성형방법에 따라 다른 치밀화 정도를 가지게 된다.

냉간성형후 소결공정이나 분말단조 등의 치밀화 공정을 통해서 최종 부품제조시 생산공정의 적절한 제어를 위해서는 냉간성형시 분말의 치밀화 정도와 성형체 내부의 밀도분포에 대한 예측이 필요하다.^(4,5) 이를 위해 유한요소해석을 이용한 수치모사가 유용하며, 이러한 수치모사를 위해서는 분말의 변형거동을 예측할 수 있는 구성 모델의 개발이 필수적이다. 지금까지 일반하중 하에서 분말의 압축성형시 치밀화 거동을 예측하기 위한 여러 소성 항복조건식들이 개발되어 왔으나⁽⁶⁻¹⁰⁾ 주로 높은 상대밀도를 갖는 분말 성형체의 치밀화 거동을 해석하기 위해

*회원, 포항공과대학교 기계공학과
**포항공과대학교 대학원 기계공학과

개발되어 왔다. 최근에 Fleck 등⁽¹⁰⁾은 분말의 압축 성형중 초기 치밀화단계를 예측하기 위한 소성 항복조건식을 제안하였다.

압축성형 하의 분말의 치밀화는 크게 두 단계의 치밀화과정으로 가정한다. 첫번째 단계는 분말 성형체의 상대밀도가 0.9 이하의 초기 단계를 말하며, 분말 상호접촉 변형에 의한 치밀화가 일어난다. 이 단계에서는 각각의 분말입자가 구별될 수 있으며, 분말입자 사이의 기공들이 서로 연결되어 있는 구조를 가진다. 두번째 단계는 분말 성형체의 상대 밀도가 0.9 이상의 치밀화 거동으로서 분말입자가 심하게 변형됨에 따라 입자 사이의 공극이 고립되어 중공구와 같은 형태를 가진다.⁽¹⁰⁾

최근에 Kwon 등⁽¹¹⁾은 스테인레스 스틸 분말을 사용하여 상온 금형압축성형 하의 분말의 치밀화 거동을 조사하였다. 분말의 치밀화 거동을 예측하기 위한 소성 항복조건식으로 초기 치밀화에 사용 가능한 Fleck 등⁽¹⁰⁾의 식과 높은 상대밀도의 치밀화에 사용 가능한 Gurson⁽⁹⁾의 식을 결합한 Fleck-Gurson 소성 항복조건식과 Shima와 Oyane⁽⁷⁾의 소성 항복조건식 등 두 가지의 소성 항복조건식을 사용하여 실험결과와 비교하였는데, Shima와 Oyane⁽⁷⁾의 소성 항복조건식이 스테인레스 스틸분말의 실험결과와 더 잘 일치함을 보였다.

본 논문에서는 공구강분말을 사용한 상온 금형압축실험을 수행하여 200~800 MPa 범위의 성형 압력에서 양단압축과 일방향압축 등의 성형방법에 따른 성형체의 밀도변화와 마찰의 영향에 의한 성형체 내부의 밀도구배를 조사하였다. 해석에는 Fleck 등⁽¹⁰⁾의 소성 항복조건식과 Shima와 Oyane⁽⁷⁾의 소성 항복조건식을 사용하였고, 이 소성 항복조건식들을 이용한 유한요소해석 결과를 실험결과와 비교하였다.

2. 실험

본 논문에서는 가스분사법으로 제조된 구형의 공구강 분말(D7 Tool Steel, Anval Co., Sweden)을 사용하여 상온 금형압축실험을 수행하였다. Fig. 1(a)는 공구강 분말의 SEM사진이며, 대부분 입자가 구형이다. 분말입자의 평균 크기는 $88.7 \mu\text{m}$ 이다. Fig. 1(b)과 Table 1은 제조회사로부터 구한 공구강 분말의 sieve 해석 결과와 화학적 조성을 나타낸다.



(a)

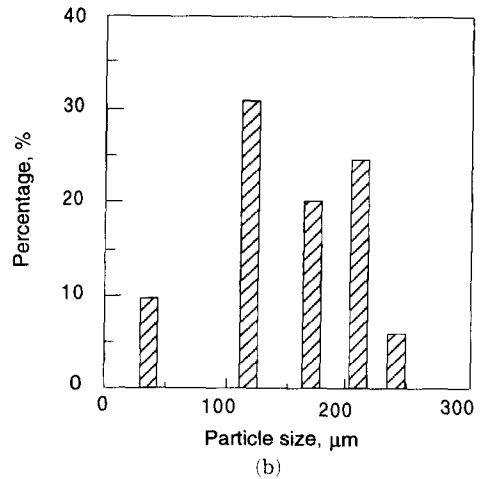


Fig. 1 (a) Scanning electron micrograph and (b) sieve analysis of atomized D7 tool steel powder

2.1 모재 시편의 제조

상온 금형압축성형공정의 이론적 해석을 위해 모재(matrix material)의 탄성계수, 푸아송비, 항복강도, 유동응력 등의 기계적 특성에 대한 자료가 필요하다.

모재는 열간 등가압소결(hot isoelastic pressing, HIP)에 의해 제조되었으며, 제조공정은 다음과 같다. 공구강 분말을 각각 내경 35.5 mm, 두께 1.3 mm인 스테인레스 스틸캔(Seamless 304 stainless steel)에 넣고, 500°C에서 5시간 동안 탈가스(degassing) 작업을 한 후 진공을 유지하면서 밀봉하였다. 진공밀봉된 캔을 열간 등가압 성형기(Kobelco System 30T, Japan)에 넣은 후 1100°C에서 50 MPa의 압력으로 2시간 동안 열간 등가압소결을 하였다. 소결후 캔을 제거하고 모재 시편을 원통형 모양으로 각각 높이 13 mm, 직경 10 mm가 되도록 가공하였다. 가공한 시편은 879°C에서 2시

Table 1 Chemical composition of D7 tool steel powder

										(wt%)
C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	V	n	
2.34	0.50	0.38	0.029	0.025	11.7	0.16	1.27	3.93	0.09	

간 동안 수소분위기에서 어닐링처리(annealing treatment)를 하였다. 시편의 최종 상대밀도는 0.995 이상이었다. 또한 공구강 모재의 이론밀도는 7.6 g/cm^3 이다.

모재의 상온 일축압축실험은 MTS 재료시험기를 사용하여 일정 하중속도(200 N/sec)로 수행하였고, 실험중 마찰의 영향을 줄이기 위하여 시편과 압반 사이에 테프론을 삽입하였다. 항복강도와 탄성계수의 측정을 위하여 시편 표면에 스트레인 게이지를 부착하여 변형률을 측정하였다. 또한 유동응력을 측정하기 위하여 시편을 일정한 하중까지 압축한 후 시편을 꺼내서 압축된 시편의 높이과 직경을 측정한 후 다시 압축하는 실험을 반복수행하였다.

2.2 실험방법과 조건

공구강 분말의 상온 금형압축실험은 하부와 상부 펀치로 분말을 동시에 양단으로 압축하는 양단압축(double action pressing)과 하부펀치를 고정시키고, 상부펀치에 의하여 분말을 상부에서 하부로 압축하는 일방향압축(single action pressing)의 두가지 방법을 사용하였다.

공구강 분말은 다른 금속 분말에 비해 경도와 항복강도가 매우 높으므로 상온에서 성형성이 좋지 않다. 따라서 성형을 용이하게 하기 위해서 폴리비닐 부티랄(Poly Vinyl Butyral, 이하 PVB)을 바인더(binder)로 사용하였다.⁽¹²⁾ PVB 1.0 wt%를 자기 교반기(magnetic stirrer)를 이용하여 에틸알콜에 녹인 후 공구강 분말과 혼합하여 항온기에서 건조하였다. 이와 같은 과정을 거친 공구강 분말 30g을 직경이 20 mm인 초경금형에 넣어 진동기(vibrator)를 이용하여 탭밀도(tap density)를 얻었다. 이때 분말의 상대밀도는 0.64이며, 높이는 19.6 mm이었다. 이 탭밀도의 분말을 양단압축과 일방향압축의 두가지 방법을 사용하여 200~800 MPa의 성형압으로 압축하였다. 금형에서 분말 성형체를 꺼낸 후, 성형체에 있는 바인더의 탈지(debinding)를 위해 수소분위기의 소결로에서

1000°C의 온도로 30분간 두었다. 그리고 탈지된 분말 성형체를 성형체의 밀도가 변하지 않는 온도범위인 1230°C의 온도로 30분간 진공로에서 소결한 후⁽¹²⁾ 밀도측정시 성형체의 기공에 물이 침투하지 않도록 성형체를 파라핀처리를 한 다음 비중법(archimedes method)에 의해서 분말 성형체의 밀도를 측정하였다.

3. 이론적 해석

3.1 구성방정식

전체 변형률 속도성분 $\dot{\epsilon}_{ij}$ 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 탄성변형률 속도성분과 소성변형률 속도성분을 나타낸다. 또한, Hooke의 법칙으로부터 응력성분 σ_{ij} 는 다음과 같이 구할 수 있다.

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

여기서, D_{ijkl}^e 는 4차 탄성계수이다.

소성변형률 속도 $\dot{\epsilon}_{ij}^p$ 는 다음과 같이 정의될 수 있다.

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

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

질량불변의 관계로부터 상대밀도의 변화율 \dot{D} 은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

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

또한, 분말 성형체의 변형에너지가 분말 성형체를 이루는 모재의 변형에너지와 같다고 하면,

$$\sigma_{ij} \dot{\epsilon}_{ij}^p = D \sigma_m \overline{\dot{\epsilon}_{kk}^p} \quad (5)$$

과 같이 쓸 수 있다. 여기서, σ_m 은 모재의 유동응력, $\overline{\dot{\epsilon}_{kk}^p}$ 은 모재의 등가 소성변형률 속도를 나타낸다.

3.2 소성 항복조건식

3.2.1 Fleck 등의 항복조건식

Fleck 등⁽¹⁰⁾은 균일한 크기를 가진 구형분말의 상호접촉하의 소성변형을 해석하여 상대밀도 0.9이하의 낮은 상대밀도를 갖는 분말 성형체의 소성 항복거동을 예측할 수 있는 소성 항복조건식을 다음과 같이 제안했다.

$$\Phi(\sigma, D) = \left(\frac{\sqrt{5}p}{3P_y}\right)^2 + \left(\frac{5q}{18P_y} + \frac{2}{3}\right)^2 - 1 = 0$$

$$P_y = 2.97D^2 \frac{(D - D_0)}{(1 - D_0)} \sigma_m \quad (6)$$

여기서, p 와 q 는 각각 정수응력($= -\sigma_{kk}/3$)과 유효응력($= \sqrt{3\sigma'_{ij}\sigma'_{ij}/2}$)을 나타내며, P_y 는 정수압 상태에서의 항복응력을 나타낸다.

3.2.2 Shima와 Oyane의 항복조건식

분말 성형체의 소성 항복거동을 예측할 수 있는 소성 항복조건식은 다음과 같은 일반적인 형태로 나타낼 수 있다.⁽⁸⁾

$$\Phi(\sigma, D) = \left(\frac{q}{\sigma_m}\right)^2 + \left(\frac{p}{\sigma_m f}\right) - D^{2n} = 0 \quad (7)$$

여기서, f 는 상대밀도의 함수이며, n 은 재료상수이다. Shima와 Oyane⁽⁸⁾은 구리분말의 일축압축 실험으로부터 f 와 n 을 결정하여 다음과 같이 소성 항복조건식을 제안하였다.

$$\Phi(\sigma, D) = \left(\frac{q}{\sigma_m}\right)^2 + 2.49^2(1 - D)^{1.028} \left(\frac{p}{\sigma_m}\right)^2 - D^5 = 0 \quad (8)$$

4. 실험결과와 해석

Fig. 2는 공구강 모재의 일축압축시 압축 진응력과 소성변형률의 관계를 나타내며, 다음과 같은 관계식으로 나타낼 수 있다.

$$\sigma_m = 574 + 1093(\bar{\epsilon}_m^p)^{0.258} \quad (9)$$

또한, 실험으로부터 구한 모재의 항복강도는 574 MPa이고, 탄성계수는 274 GPa이다.

해석을 위한 구성방정식의 수치적분은 Kwon 등⁽¹¹⁾이 사용한 방법을 이용하였다. 구성방정식들의 수치적분은 Aravas⁽¹³⁾에 의해 제안된 후방오일러법(backward Euler method)을 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS⁽¹⁴⁾의 사용자정의 서브루틴인 UMAT에 적용하여 수행하였다.

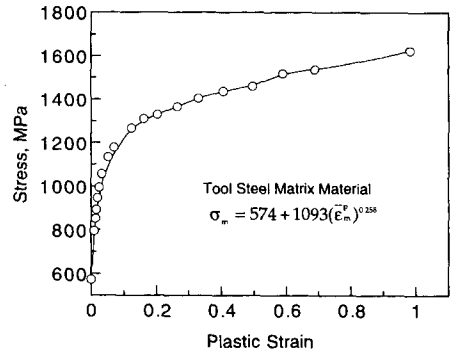
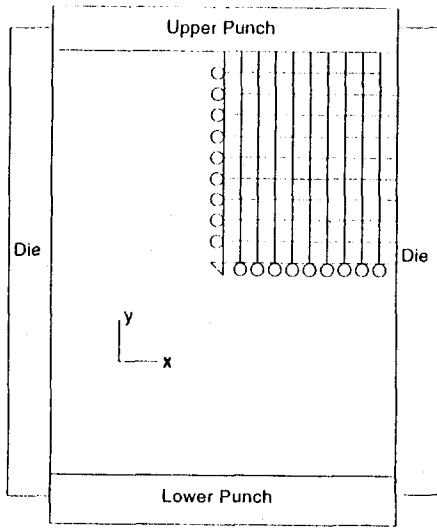


Fig. 2 Uniaxial stress-plastic strain relation for dense tool steel

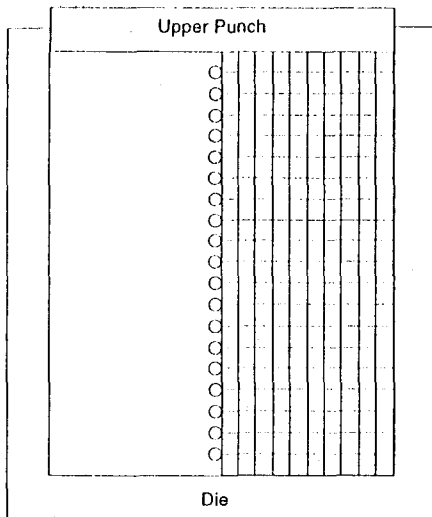
4.1 상온 금형압축

Fig. 3의 (a)와 (b)는 각각 상온 금형압축중 양단압축과 일방향압축에 사용된 200개의 4절점 축대칭 요소로 갖는 유한요소격자 및 경계조건을 나타낸다. 여기서 초경 금형 벽과 상·하부 펀치는 rigid surface를 가정하였고, 양단압축의 경우 금형 벽과 분말 사이의 접촉조건 그리고 일방향압축의 경우 금형벽과 분말 사이의 접촉조건, 바닥과 분말 사이의 접촉조건을 금형압축시 계속 접촉을 유지한다(no separation)는 접촉조건을 가정하여 유한요소해석을 수행하였다. 양단압축 (a)의 경우에는 x축의 대칭조건과 y축의 축대칭조건에 의해 높이 19.6 mm, 직경 20 mm인 시편 단면의 1/4에 대해서 유한요소해석을 하였고, 일방향압축 (b)의 경우는 y축의 축대칭조건에 의해 시편 단면의 1/2에 대해서 해석하였다.

Fig. 4에서는 공구강 분말의 상온 금형 일방향압축 하에서 가압력에 따른 상대밀도의 변화에 대한 실험치와 Fleck 등⁽¹⁰⁾의 소성 항복조건식과 Shima와 Oyane⁽⁷⁾의 소성 항복조건식을 이용하여 구한 계산치를 비교했다. 실선은 금형과 분말이 마찰이 없는 경우($\mu=0$)의 계산치를 나타내며, 점선은 마찰이 있는 경우($\mu=0.2$)의 계산치를 나타낸다. 여기서 분말 성형체의 상대밀도의 계산치는 각 요소의 상대밀도 계산치를 전체적으로 평균낸 값을 사용하였다. Fig. 4에서 Fleck 등⁽¹⁰⁾의 소성 항복조건식에 의한 계산치는 실험치를 비교적 잘 예측하나 Shima와 Oyane⁽⁷⁾의 소성 항복조건식에 의한 계산치는 실험치보다 높게 상대밀도를 예측하였다. 또한 Fleck 등⁽¹⁰⁾의 소성 항복조건식에 의한 계산치에 대해서 마찰이 없는 경우에는 계산치가 실험



(a) Double action die pressing



(b) Single action die pressing

Fig. 3 Finite element meshes and boundary conditions

치보다 높게 상대밀도를 예측했으며, 마찰이 있는 경우($\mu=0.2$)에서는 계산치가 실험치보다 다소 낮게 예측하였다.

Fig. 5는 공구강 분말 성형체가 각각 상대밀도가 0.70과 0.75인 경우에 대해서 Fleck 등⁽¹⁰⁾의 소성 항복조건식과 Shima와 Oyane⁽⁷⁾의 소성 항복조건식으로부터 구한 항복곡선들과 마찰이 없는 경우의 일방향 금형압축시 분말 성형체의 응력궤적을 나타낸다. 여기서, 상대밀도가 0.75인 경우에는 Fleck

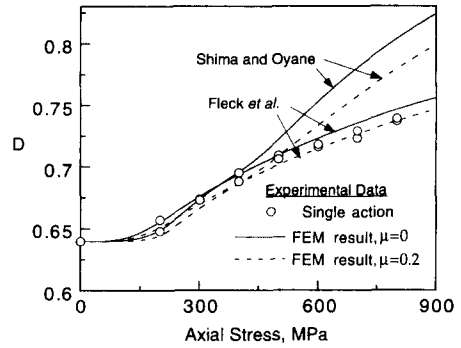


Fig. 4 Comparisons between experimental data and calculated results for the variation of relative density with axial stress of tool steel powder during die compaction

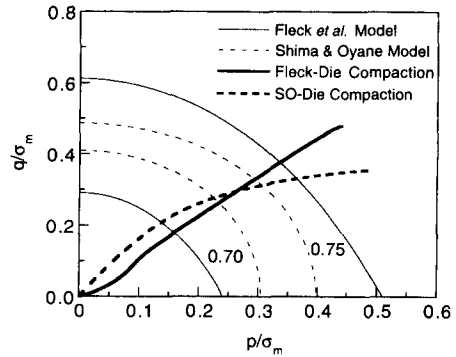


Fig. 5 Stress paths during frictionless single action die pressing of tool steel powder and the yield surface of Fleck et al. (solid curves) and of Shima and Oyane (dashed curves) at relative densities 0.70 and 0.75

등⁽¹⁰⁾의 항복곡선이 Shima와 Oyane⁽⁷⁾의 항복 곡선보다 더 큰 항복강도를 예측하고 있으나 상대밀도가 초기 밀도에 가까운 상대밀도인 0.7인 경우에는 Shima와 Oyane⁽⁷⁾의 항복곡선이 Fleck 등⁽¹⁰⁾의 항복곡선보다 더 큰 항복강도를 예측하고 있다. 또한, 일방향 금형압축시 Fleck 등⁽¹⁰⁾의 소성 항복조건식으로부터 구한 응력궤적(굵은 점선)과 Shima와 Oyane⁽⁷⁾의 항복조건식으로부터 구한 응력궤적(굵은 실선)은 다소 차이를 보였는데, Fleck⁽¹⁰⁾의 항복조건식을 사용한 경우에는 정수압응력과 유효응력의 비율이 상대밀도의 증가에 따라 거의 선형으로 변화했으나 Shima와 Oyane⁽⁷⁾의 항복조건식을 사용한 경우에는 정수압응력과 유효응력의 비율

이 일정하지 않고 상대밀도에 따라 달라짐을 보였다.

Fig. 6에서는 공구강 분말의 양단압축과 일방향 압축 하에서 가압력에 따른 상대밀도변화에 대한 실험치와 Fleck 등⁽¹⁰⁾의 소성 항복조건식을 이용하여 구한 계산치를 비교하였다. 실험치(○)는 양단 압축실험으로 구한 결과이며, 실험치(□)는 일방향 압축실험으로 구하였다. 실선은 마찰이 없는 경우에 대한 계산치이며, 점선과 일점쇄선은 각각 마찰을 고려한 양단압축과 일방향압축에 대한 계산치를 나타낸다. 분말 성형체와 초경 금형과의 마찰계수는 계산치가 실험치를 가장 잘 예측하는 마찰계수 ($\mu=0.16$)를 사용하였다. 여기서, 계산치가 실험치를 가장 잘 예측하는 마찰계수($\mu=0.16$)는 Fig. 5를 통한 0에서 0.2사이의 값중 실험치에 대한 계산치의 표준오차가 가장 작은 값을 선택하였다. Fig. 6에서 동일한 압력하에서 일방향압축 하에서 보다 양단압축에서 다소 큰 상대밀도를 얻을 수 있음을 보인다.

분말 성형체와 금형과의 마찰에 의한 성형체 내부의 밀도분포는 경도와 상대밀도의 관계를 이용하여 간접적으로 측정할 수 있다.⁽¹⁵⁾ 공구강 분말 성형체의 경도와 상대밀도의 관계를 구하기 위해 본 논문에서는 로크웰 B형 경도계를 사용하여 1.58 mm(1/16 inch) 강구압자(hardened steel ball indenter)로 100 Kg의 하중을 30초간 가하여 경도를 측정하였다.⁽¹⁶⁾ Fig. 7은 공구강 분말 성형체의 상대밀도와 로크웰 B형 경도치(HRB)와의 관계를 나타내며, 이 실험치들을 보간하여 다음과 같은 관

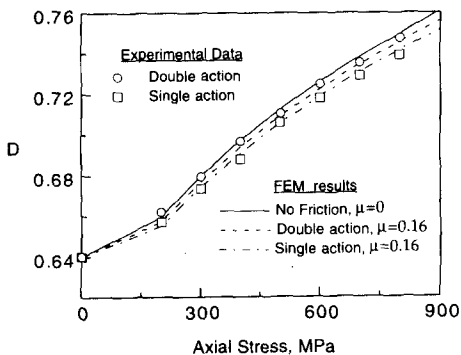


Fig. 6 Comparisons between experimental data and theoretical predictions for the variation of relative density with axial stress of tool steel powder during die compaction

계식을 구하였다.

$$D = 2.178 \times 10^{-3} \text{HRB} + 0.667 \quad (10)$$

Fig. 8에서는 공구강 분말의 일방향압축시 가압력이 600 MPa인 경우에 성형체 오른쪽 절반 단면의 상대밀도분포에 대해서 실험결과와 유한요소해석의 결과를 비교했다. 실험치는 단면을 로크웰 경도계로 경도를 측정할 후, 식 (10)을 사용하여 구했으며 유한요소해석은 Fleck 등⁽¹⁰⁾의 소성 항복조건식에 마찰($\mu=0.16$)을 고려하여 계산하였다. Fig. 8(a)에서 성형체가 금형 및 펀치와 닿는 상부 모서리부분이 가장 큰 상대밀도를 보였으며, 금형 및 바닥과 닿는 하부 모서리부분이 가장 낮은 상대밀도를 보였다. 이러한 밀도분포를 보이는 이유는

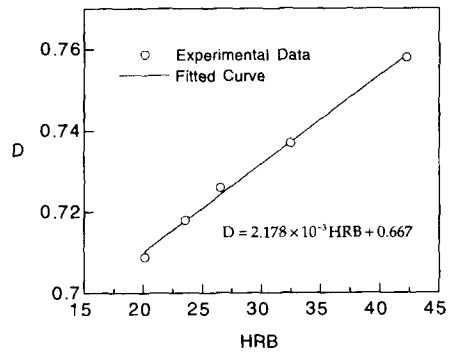


Fig. 7 Variation of relative density with Rockwell hardness (HRB) for tool steel powder compacts

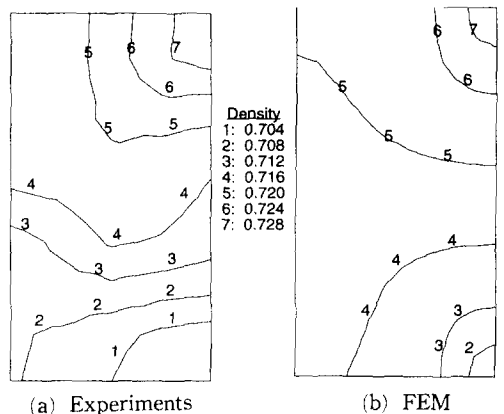


Fig. 8 Comparison between experimental data and finite element calculations for relative density contour plots of a tool steel powder compact by single action pressing under axial stress of 600 MPa

상부 모서리부분의 경우에는 분말에 가해지는 성형 압력중 마찰력에 의해 상쇄되는 크기가 가장 작아 실제로 이 부분에 전달되는 압력이 가장 크기 때문이며, 하부 모서리부분의 경우에는 가해지는 성형 압력중 마찰력에 의해 상쇄되는 크기가 가장 커서 실제로 이 부분에 전달되는 압력이 가장 작기 때문이다. Fig. 8(b)의 유한요소해석 결과는 실험결과를 비교적 잘 예측함을 알 수 있다. 그러나 Fig. 8에서 실험결과와 계산치가 정확히 일치하지는 않았는데, 이러한 원인들로는 유한요소해석을 위한 Fleck 등⁽¹⁰⁾의 모델에서 가정된 동일한 크기의 완전 구형의 분말과 실제로 실험에서 사용된 여러 가지 크기의 불완전한 구형의 분말과의 차이, 경도 측정시 발생할 수 있는 실험적 오차 그리고 바인더의 분말 사이에서 윤활제 역할 등이 고려될 수 있다.

Fig. 9에서는 공구강 분말의 양단압축시 성형체 오른쪽 절반 단면의 상대밀도분포에 대해서 실험결과와 유한요소해석의 결과를 비교했다. Fig. 8의 일방향압축과 동일한 방법으로 실험치와 계산치를 구했다. Fig. 9(a)에서 성형체가 금형 및 상, 하부 펀치와 닿는 모서리부분이 가장 큰 상대밀도를 보였으며, 금형벽과 접촉하는 성형체의 중간부분이 가장 작은 상대밀도를 보였고, 또한 x축에 대해서도 대칭인 밀도분포를 보였다. 이러한 밀도분포의 원인은 일방향압축과 동일하며, Fig. 9(b)의 유한요소해석 결과는 이러한 실험결과를 대체로 잘 예측함을 알 수 있다. Fig. 8과 Fig. 9를 비교했을 때 양단압축의 결과가 일방향압축의 결과에 비해 더 작은 밀도구배를 보임을 알 수 있다.

Fig. 10은 공구강 분말을 600 MPa의 가압력으로 일방향압축 후, 분말 성형체를 성형체의 하단부에서 상단부 방향으로 금형에서 이젝트하였을 때 성형체 내부에 존재하는 잔류 유효응력과 잔류 정수응력 분포를 나타내는 유한요소해석 결과이다. 유한요소해석은 Fleck 등⁽¹⁰⁾의 소성 항복조건식에 마찰($\mu=0.16$)을 고려하여 수행하였다. 잔류 유효응력의 경우, 성형체의 상부와 하부 모서리에서 가장 큰 값을 보였고 잔류 정수응력의 경우는 성형체의 중심부에서는 거의 없으며, 성형체의 상단부와 하단부에서 4~5 MPa의 값을 보였다. Fig. 10의 해석결과로부터 압축후 이젝트에 의해 성형체에 존재하는 잔류응력의 크기는 가압력의 크기에 비해 매우 작음을 알 수 있다.

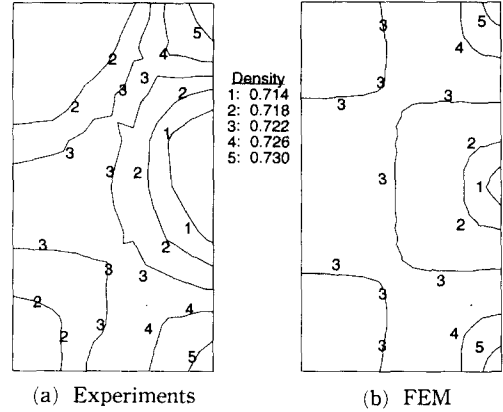


Fig. 9 Comparison between experimental data and finite element calculations for relative density contour plots of a tool steel powder compact by double action pressing under axial stress of 600 MPa

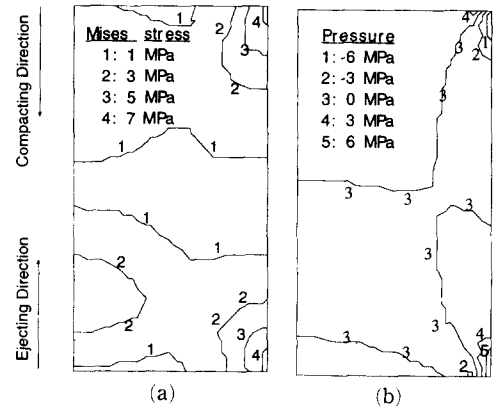


Fig. 10 Finite element calculations for distribution of (a) residual effective stress and (b) residual hydrostatic stress of a tool steel powder compact ejected from the die after compressed by 600MPa under single action die pressing

5. 결 론

공구강 분말의 상온 금형압축실험과 금속 분말의 제1단계 압축에서 소성변형거동을 예측할 수 있는 구성방정식들을 사용한 유한요소해석의 계산치의 비교 연구를 통해 공구강 분말의 상온 금형압축공정을 해석하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 금속의 상온 금형압축공정을 해석하기 위해

사용된 항복조건식들 중 초기 치밀화의 구성 모델인 Fleck 등의 소성 항복조건식이 Shima와 Oyane의 소성 항복조건식보다 공구강 분말의 상온 금형 압축 실험치를 더 잘 예측하였다.

(2) 공구강 분말의 냉간금형압축시 금형과 성형체의 마찰력으로 인해 성형체 내부에 밀도 구배가 발생하였으며, 일방향압축의 경우에는 상부 모서리부분이 가장 큰 상대밀도를, 하부 모서리부분이 가장 작은 상대밀도를 보였고 양단압축의 경우에는 모서리부분이 가장 큰 상대밀도를, 금형벽과 접촉하는 성형체의 중간부분이 가장 작은 상대밀도를 보였다. 그리고 Fleck 등의 모델을 이용한 유한요소해석은 이러한 실험치를 비교적 잘 예측하였다.

참고문헌

- (1) Lenel, F. V., Powder Metallurgy-Principles and Applications, Metal Powder Industries Federation, Princeton, New Jersey, U. S. A.
- (2) German, R. M., 1984, Powder Metallurgy Science, Metal Powder Industries Federation, Princeton, New Jersey, U. S. A.
- (3) Kuhn, H. A. and Ferguson, B. L., 1990, Powder Forging, Metal Powder Industries Federation, Princeton, New Jersey, U. S. A.
- (4) Lewis, R. W., Jinka, A. G. K and Gethin, D. T., 1993, "Computed-Aided Simulation of Metal Powder Die Compaction Processes," *Powder Metall. Int.*, Vol. 25, No. 6, pp. 287~293.
- (5) Gethin, D. T., Tran, V. D., Lewis, R. W. and Ariffin, A. K., 1994, "An Investigation of Powder Compaction Processes," *Int. J. Powder Metall.*, Vol. 30, No. 4, pp. 385~398.
- (6) Kuhn, H. A. and Downey, C. L., 1971, "Deformation Characteristics and Plasticity Theory of Sintered Powder Metal Materials," *Int. J. Powder Metall.*, Vol. 7, pp. 15~25.
- (7) Shima, S. and Oyane, M., 1976, "Plasticity Theory for Porous Metals," *Int. J. Mech. Sci.*, Vol. 18, pp. 285~291.
- (8) Gurson, A. L., 1977, "Continuum Theory of Ductile Rupture by Void Nucleation and Growth -Part 1. Yield Criteria and Flow Rules for Porous Ductile Media," *ASME, J. Eng. Mat. Tech.*, Vol. 99, pp. 2~15.
- (9) Doraivelu, S. M., Gegel, H. L., Gunasekera, J. S., Malas, J. C. and Morgan, J. T., 1984, "A New Yield Function for Compressible P/M Materials," *Int. J. Mech. Sci.*, Vol. 26, pp. 527~535.
- (10) Fleck, N. A., Kuhn, L. T. and McMeeking, R. M., 1992, "Yielding of Metal Powder Bonded by Isolated Contacts," *J. Mech. Phys. Solids*, Vol. 40, No. 5, pp. 1139~1162.
- (11) Kwon, Y. S., Lee, H. T. and Kim, K. T., 1996, "금속분말의 냉간금형압축 해석," 대한기계학회 논문집 (A), 제20권, 제6호, pp. 1893~1902.
- (12) Choi, H. H., Jeon, Y. C. and Kim, K. T., 1996, "공구강 분말 성형체의 고온 치밀화 성형공정," 대한기계학회논문집 (A), 제20권, 제7호, pp. 2182~2195.
- (13) 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.
- (14) ABAQUS Users I and II Manual, 1995, Hibbitt, Karlsson and Sorensen.
- (15) 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.
- (16) Boyer, H. E., 1987, *Hardness Testing*, ASM International.