

# 확산과 Power-law 크립을 고려한 압분체 열간정수압압축 공정의 해석

서민홍\* · 김형섭\*

## Analysis of Hot Isostatic Pressing of Powder Compacts Considering Diffusion and Power-Law Creep

M. H. Seo and H. S. Kim

### Abstract

In order to analyze the densification behaviour of stainless steel powder compacts during hot isostatic pressing (HIP) at elevated temperatures, a power-law creep constitutive model based on the plastic deformation theory for porous materials was applied to the densification. Various densification mechanisms including interparticle boundary diffusion, grain boundary diffusion and lattice diffusion mechanisms were incorporated in the constitutive model, as well. The power-law creep model in conjunction with various diffusion models was applied to the HIP process of 316L stainless steel powder compacts under 50 and 100 MPa at 1125 °C. The results of the calculations were verified using literature data. It could be found that the contribution of the diffusional mechanisms is not significant under the current process conditions.

**Key Words** : Hot Isostatic Pressing, Densification, Powder Compacts, Diffusion, Creep

### 1. 서론

열간정수압압축 (HIP, Hot Isostatic Pressing) 공정을 이용한 금속과 세라믹 분말의 고형화 (consolidation) 또는 치밀화 (densification) 거동은 최근에 많은 실험적<sup>1,2)</sup>, 이론적<sup>2-11)</sup> 연구의 많은 관심 대상이 되고 있다. 이의 대표적인 이론적인 해석법이 Ashby의 치밀화기구지도 (Densification Mechanism Map, HIP diagram)<sup>12)</sup>로서 공

정온도, 압력, 시간 등의 공정변수 설정에 많이 이용되고 있으나, 실제문제로서 대두되는 복잡한 형상, 불균질한 밀도분포, 온도분포, 마찰, 재료 물성의 비선형성, 용기효과 등을 고려할 수 있는 유한요소법이 많은 정보를 제공한다. 분말성형공정에서 정형가공 및 재료 성질을 조절하기 위해서 압분체의 형상과 밀도분포를 정확히 예측할 수 있는 압분공정의 이론적인 모사는 매우 중요한 역할을 한다.

\* 충남대학교 금속공학과

분말성형의 변형거동 해석에 사용되는 연속체 역학의 첫 단계는 재료의 변형거동을 기술할 수 있는 구성방정식 (constitutive equation)의 확립이다. 이 연구에서는 최근의 저자에 의해 제안된 분말의 치밀화해석을 위한 구성모델에 power-law크립 기구 뿐 아니라 기존의 결정립계확산 기구, 결정립내확산 기구, 입자경계확산 기구를 고려한 이론적인 해석을 실시하여, Kim과 Jeon의 스테인레스강에 대한 HIP공정 실험결과<sup>6)</sup>와 제안한 구성 모델을 사용한 수치계산 결과를 비교, 고찰하고자 한다.

## 2. 구성모델

본 연구에서 사용한 다공질 재료의 소성항복식은,

$$AJ_2 + BJ_1^2 = \eta\sigma_s^2 = \sigma_{eq}^2 \quad (1)$$

$J_1$ 과  $J_2$ 는 각각 1차, 2차편차응력불변량,  $\sigma_{eq}$ 은 다공질 재료의 겉보기항복응력,  $\sigma_s$ 는 기준 재료의 항복응력이다.  $\eta$ 는 '기하학적 경화'로 상대밀도  $R$ 의 함수이다.  $A$ 와  $B$ 는  $R$ 의 함수이다. 이 연구에서 사용한  $A$ 와  $B$ 는,

$$A = 2 + R^2, B = \frac{1 - R^2}{3} \quad (2)$$

응력벡터의 직교성을 가정한다면,

$$\dot{\epsilon}_{ij} = \frac{\partial \Omega}{\partial \sigma_{ij}} = \frac{\partial \Omega}{\partial \sigma_{eq}} \frac{1}{\sigma_{eq}} \left[ \frac{A}{2} s_{ij} + B\sigma_{kk}\delta_{ij} \right] \quad (3)$$

유효응력  $\sigma_{eq}$ 에 해당하는 유효변형률속도  $\dot{\epsilon}_{eq}$ 는 단위 부피 당 점소성 power  $w$ 가 다공질 재료와 비다공질 재료에서 같다고 보면,

$$w = \sigma_{ij} \dot{\epsilon}_{ij} \equiv R\sigma_{eq} \dot{\epsilon}_{eq} \quad (4)$$

식 (3), (4)와,  $s_{ij}s_{ij} = 2J_2, \delta_{ij}\delta_{ij} = 3$ 의 관계를 이용하면

$$\frac{\partial \Omega}{\partial \sigma_{eq}} = R \dot{\epsilon}_{eq} \quad (5)$$

식 (5)로부터 식 (3)을 다음 식 (6)과 같이 쓸 수 있다.

$$\dot{\epsilon}_{ij} = \frac{R \dot{\epsilon}_{eq}}{\sigma_{eq}} \left[ \frac{A}{2} s_{ij} + B\sigma_{kk}\delta_{ij} \right] \quad (6)$$

완전 치밀한 재료의 일축변형으로부터 점소성 치밀화 거동을 기술하는 일반적인 power-law 관계식은,

$$\dot{\epsilon}_{eq, pl} = \dot{\epsilon}_0 (\sigma_{eq} / \sigma_0)^n \quad (7)$$

식 (6)과 식 (7), 식 (2)를 결합시키면,

$$\dot{\epsilon}_{ij, pl} = \frac{R\dot{\epsilon}_0\sigma_{eq}^{n-1}}{\sigma_0^n} \left[ \frac{2+R^2}{2} s_{ij} + \frac{1-R^2}{3} \sigma_{kk}\delta_{ij} \right] \quad (8)$$

HIP 공정에서 정수압  $P$ 를 가할 때에 발생하는 응력과 변형률의 성분은 다음과 같다.

$$\sigma_{11} = \sigma_{22} = \sigma_{33} = -P, \sigma_{12} = \sigma_{23} = \sigma_{31} = 0 \quad (9)$$

$$\epsilon_{11} = \epsilon_{22} = \epsilon_{33} = \epsilon, \epsilon_{12} = \epsilon_{23} = \epsilon_{31} = 0 \quad (10)$$

$s_{ij} = 0$ 이므로, 식 (8)은 다음과 같이 된다.

$$\dot{\epsilon}_{pl} = \frac{R\dot{\epsilon}_0\sigma_{eq}^{n-1}}{\sigma_0^n} \left[ \frac{1-R^2}{3} (-P) \right] \quad (11)$$

식 (11)은  $R, P, \dot{\epsilon}$ 가 상호 연계된 비선형방정식이므로, 오일러법으로 풀 수 있다.

본 연구에서는 분말의 치밀화기구로서 power-law 크립과 더불어 입자간확산, 결정립계확산, 결정립내확산을

Table 1 Densification rate equation by various mechanisms<sup>(12)</sup>

Mechanism	Rate equation	Condition
Interparticle boundary diffusion	$\dot{R} = 43 \frac{(1-R_0)^2}{(R-R_0)^2} \frac{(\delta D_b + r D_v)}{k T r^3} \Omega P$	$R < 0.9$
Grain boundary diffusion	$\dot{R} = 54 \frac{\Omega(\delta D_b + r D_v)}{k T r^3} \sqrt{1-RP}$	$R > 0.9$
Lattice diffusion	$\dot{R} = 24.9 \frac{\Omega}{k T G^2} (R^2 R_0)^{1/3} \frac{1}{\sqrt{3}} \left( \frac{R-R_0}{1-R_0} \right)^{1/2} \frac{\pi \delta D_b}{G} \frac{P(1-R)}{R^2(R-R_0)}$	$R < 0.9$
Grain boundary diffusion	$\dot{R} = 31.5 \frac{\Omega}{k T G^2} (1-R) \frac{\pi \delta D_b}{G} P$	$R > 0.9$
Lattice diffusion	$\dot{R} = 24.9 \frac{\Omega}{k T G^2} (R^2 R_0)^{1/3} \frac{1}{\sqrt{3}} \left( \frac{R-R_0}{1-R_0} \right)^{1/2} D_v \frac{P(1-R)}{R^2(R-R_0)}$	$R < 0.9$
Grain boundary diffusion	$\dot{R} = 31.5 \frac{\Omega}{k T G^2} (1-R) D_v \frac{P(1-R)}{R^2(R-R_0)}$	$R > 0.9$

고려하였는데, 이들 치밀화기구의 밀도증분 관계식을 표 1에 요약하여 나타내었다. 표에서  $R_0$ 는 압분체의 초기 상대밀도,  $\delta D_b$ 는 결정립계확산계수와 결정립계두께의 곱,  $D_b$ 는 부피확산계수,  $r$ 는 분말입자의 반지름,  $k$ 는 볼츠만상수,  $T$ 는 절대온도,  $\Omega$ 는 원자의 부피이다.

### 3. 계산

저자가 기존에 제안한 power-law 구성 모델과 표 1에 나타난 여러 가지 확산크립기구식을 사용하여 문헌 [6]의 316L 스테인레스강 분말 압분체의 HIP 공정 시 치밀화 거동을 해석하였다. Kim과 Jeon의 실험에 의한 316L 분말에 대한 크립 매개변수<sup>6)</sup>는,  $n=2.02$ ,  $\dot{\epsilon}_0/\sigma_0^n = 4.98 \times 10^{-7}$ 이다. HIP 공정의 온도는 1125 °C이다. 압분체의 초기밀도는 압력이 50 MPa일 경우 0.72, 압력이 100 MPa일 경우 0.79이다.

확산크립의 계산에 사용된 물성값들은 참고문헌 [12]에서 인용하였다.

여러 치밀화기구에 의한 총밀도의 증가율 ( $\dot{R}$ )는, 매 계산 단계에서 각 치밀화기구에 의한 각각의 밀도 증분율의 합으로 계산하여 구하였다. 즉,

$$\dot{R} = \dot{R}_{pl} + \dot{R}_{ld} + \dot{R}_{bd} + \dot{R}_{pd} \quad (13)$$

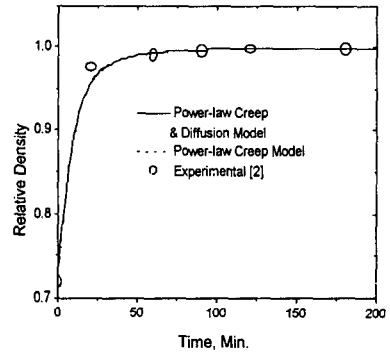
위에서, 하첨자 pl, ld, bd, pd 는 각각 power-law크립 기구, 입내확산 기구, 입계확산 기구, 분말입자간확산 기구를 나타낸다.

### 4. 결과 및 고찰

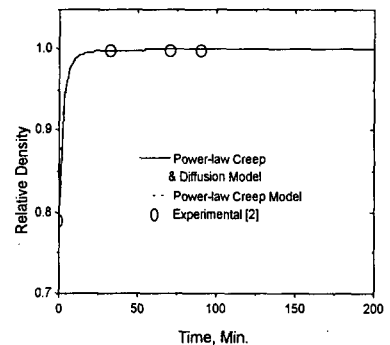
Fig. 1은 316L 스테인레스강 분말에 대하여 1125 °C에서 (a) 50 MPa과 (b) 100 MPa의 압력으로 HIP 공정을 수행한 결과의 상대밀도 변화를 보였다. 원형표시는 실험결과이고, 실선은 여러 치밀화 기구를 모두 고려한 이론적인 해석의 결과, 점선은 power-law크립만을 고려하여 계산한 해석결과이다. (a)의 50MPa의 압력에서 power-law크립만을 고려한 계산결과가 확산기구들도 고려하여 계산한 결과와 거의 일치한다. 즉, 1125 °C에서 316L 스테인레스강 분말의 HIP 공정에서는 확산기구는 전체적인 치밀화에 기여가 거의 없음을 의미한다. 가압력이 증가하면 power-law크립 기구의 기여도가 다른 확

산기구의 기여보다 더욱 증가하므로 (b)의 100 MPa의 압력에서도 확산기구를 고려한 계산결과는, power-law크립 기구만을 계산한 결과와 거의 같음을 알 수 있다.

전체 치밀화 양에 미치는 각 치밀화 기구들의 기여도를 Fig.2에 나타내었다. 50 MPa의 압력에서도 power-law크립 기구에 의한 치밀화속도는 확산기구에 의한 치밀화속도보다 1000배 이상 빠르며, 100 MPa의 가압력에서는 확산기구의 기여도가 더욱 작아진다. 확산기구 중에서는 결정립계 확산에 의한 치밀화가 결정립내확산속도보다 더 빠른데 이는 1 μm로 설정한 미세한 결정립도 (2차수지상팔간격)때문으로 볼 수 있다.



(a)



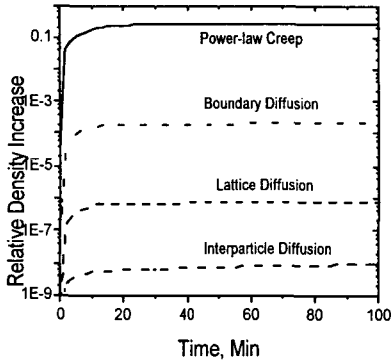
(b)

Fig. 1 Comparison of calculated and experimental relative densities in 316 stainless steel powder compact deformed under (a) 50 and (b) 100 MPa during HIP at 1125 °C

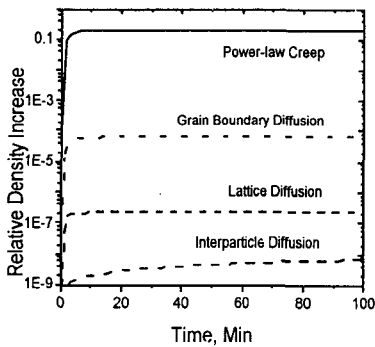
계산의 조건에서는 확산기구들은 power-law크립에 비하여 무시할 만 함을 알 수 있었다.

### 참 고 문 헌

- (1) Matteazzi, P. and Wolf, F., 1998, *Mater. Sci. Eng.*, Vol. A248, p. 19.
- (2) Bhattacharya, S., Jakusi, K. and Grosse, I., 1997, *J. Mater. Sci.*, Vol. 32, p. 6183.
- (3) Nohara, A., Nakagawa, T., Soh, T. and Shinke, T., 1999, *Int. J. Numer. Methods Eng.*, Vol. 25, p. 213.
- (4) Shima, S. and Oyane, M., 1976, *Int. J. Mech. Sci.*, Vol. 18, p. 285.
- (5) Abouaf, M., Chenot, J. L., Raison G. and Baudin, P., 1988, *Int. J. Numer. Methods Eng.*, Vol. 25, p. 191.
- (6) Kim, K. T. and Jeon, Y. C., 1998, *Mater. Sci. Eng.*, Vol. A245, p. 64.
- (7) Kim, K. T. and Jeon, Y. C., 1998, *Acta Mater.*, Vol. 46, p. 5745.
- (8) Kuhn, L. T. and McMeeking, R. M., 1992, *Int. J. Mech. Sci.*, Vol. 34, p. 563.
- (9) Sofronis, P. and McMeeking, R. M., 1992, *J. App. Mech.*, Vol. 59, p. s88.
- (10) Doraivelu, S. M., Gegel, H. L., Gunasekera, J. S., Mats, J. C. and Morgan, J. T., 1984, *Int. J. Mech. Sci.*, p. 527.
- (11) Lee, D. N. and Kim, H. S., 1992, *Powder Metall.*, Vol. 35, p. 275.
- (12) Frost, H. J. and Ashby, M. F., 1982, *Deformation mechanisms maps, The plasticity and creep of metals and ceramics*, Pergamon Press, Oxford, p. 62.
- (13) Kim, H. S. and Lee, D. N., 1999, *Mater. Sci. Eng.*, Vol. A271, p. 424.
- (14) Ashby, M. F., 1990, "HIP6.1" Software and operating manual, Cambridge University, Engineering Department.
- (15) Flinn, J. E., Korth, G. E. and Wright, R. N., 1987, *Proceedings of structural metals by rapidly solidification*, F. H. Froes and S. J. Savage ed., ASM International, Orlando, p. 459.
- (16) Liu, J., Liu, Y., Lal, A. and German, R. M., 1999, *Scripta Mater.*, Vol. 40, p. 1221.



(a)



(b)

**Fig. 3** Theoretical densification contributions (i.e. relative density increase) by power-law creep, volumetric (lattice) diffusion, grain boundary diffusion and interparticle diffusion mechanisms with time in 316L stainless steel powder compact deformed under (a) 50 and (b) 100 MPa during HIP at 1125 °C

### 5. 결 론

고온에서 압력에 의존하는 분말압축 시 치밀화 거동을 기술하기 위하여 power-law크립, 결정립내확산, 결정립계확산, 분말입자간확산을 고려한 구성 모델을 이용하였다. 제안된 power-law크립 및 확산모델을 1125 °C에서 50 MPa과 100 MPa을 가한 HIP 공정에서 316L 스테인레스강 분말의 치밀화 거동 해석에 적용하였다. 계산된 상대밀도-시간 결과는 문헌의 결과와 잘 일치하였다. 본