

유한요소법을 이용한 분말야금 공정 해석 및 설계

정석환[#], 권영삼¹, 이민철², 정성택²

Analysis and Design of Powder Metallurgy Process using Finite Element Method

S. H. Chung, Y. S. Kwon, M. C. Lee, S. T. Chung

Abstract

Though the history of finite element analysis in field of powder metallurgy is not short, industrial engineer is still being dependent on the trial and error approach based on engineer's experience in selecting process conditions. This problem is mainly due to the difficulty in establishing models for the behavior of a powder compact during compaction and sintering as well as finding material parameters for the models and the absence of CAE software with which industrial engineer can easily investigate the effect of process conditions on the quality of product. Therefore, we established very simple and cheap procedure to find material parameters for powder compaction behavior and implemented it in self-developed commercial CAE software for powder metallurgy, PMSolver. Basically, the development strategy of PMSolver lies on simplification and convenience so as for industrial engineers to use it with least training. Using PMSolver, optimal process conditions were found for some geometry and powders. Prior to process condition design, the accuracy of finite element analysis was verified

Key Words : Powder Metallurgy, Constitutive Model, Material Parameters, Finite Element Analysis, Optimal Design

1. 서 론

금형압축 후 소결 공정은 금속이나 세라믹 분말을 이용하여 복잡한 형상의 부품을 제조하기 위해서 가장 보편적으로 사용되는 분말야금 공법이다. 복잡한 형상의 제품을 정형가공하기 때문에 타공정에 비해서 가공단가 측면에서 강점을 가지고 있으며, 소재의 제약이 적어서 세라믹이나 초경 같은 소재의 정형 가공이 가능하다. 또한, 부품의 경량화 측면에서 유리하기 때문에 자동차 부품 제조공정으로서의 비중이 계속 증대되고 있다.

그러나, 공정의 특성상 금형압축 후 분말성형

체에서의 밀도의 불균일은 피할 수 없는 문제이다. 밀도구배의 편차가 큰 경우 소결시 뒤틀림 변형을 일으키게 되며 소결시 뒤틀리는 양을 감안하여 금형을 수정하거나, 소결 후 사이징을 통해서 문제를 해결한다. 그리고, 금형압축 공정 조건 선정시 분말성형체에서의 크랙방지가 대단히 중요한 문제이다. 이외에도 적용가능 형상에 제약이 있는 관계로 소형이고 복잡한 형상의 제품에 대해서는 분말사출성형공정이 대안으로 이용되고 있으나, 제조 단가측면에서 금형압축성형 공정의 경쟁력은 계속 유지될 것으로 전망된다.

공정조건 선정시 문제해결을 위해서는 CAE

1. ㈜ 세타텍

2. 경상대학교 기계항공공학부

교신저자: ㈜세타텍, E-mail:shchung@cetatech.com

소프트웨어를 활용하는 것이 대단히 효과적이다. 따라서, 사출, 단조, 주조등의 공정에서는 CAE 소프트웨어의 사용이 보편화되어 가고 있는 추세이나, 분말야금 업계에서는 아직까지도 경험에 의존한 시행오차적인 방법에 의존하고 있는 실정이다.

본 연구에서는 분말재료의 물성을 간편하게 구하는 방법과 자체 개발된 분말야금 공정 전용 CAE 소프트웨어인 PMSolver를 활용하여 몇가지 공정에 대한 해석 및 최적의 밀도 구배를 얻을 수 있는 공정조건을 설계하였다.

2. 이론적 배경

2.1 구성 모델

수치해석을 위해서는 분말야금 공정시 분말성형체의 치밀화 및 변형 거동을 예측할 수 있는 구성모델의 개발이 선결과제이다. 많은 연구자들이 다양한 구성모델에 대해서 연구해 왔는데, 본 연구에서는 Shima 와 Oyane 가 제안한 구성모델[1]의 일반화된 형태를 이용하였다.

$$\Phi = \left(\frac{\bar{\sigma}}{\sigma_m} \right)^2 + \alpha(1-\rho)^\gamma \left(\frac{p}{\sigma_m} \right)^2 - \rho^m \quad (1)$$

여기서, α , γ , m 은 재료 상수들로 실험을 통해서 구해야 하는 값들이다.

2.2 재료상수 결정

유한요소 해석을 위해서는 식 (1)에서 보인 재료 상수외에 모재의 유동응력에 대한 재료상수 및 마찰 계수를 찾아야 한다. 지금까지 재료상수를 찾기 위해서 사용된 실험방법은 3 축압축 실험, 열간등방압성형공정으로 만든 시편을 이용한 일축압축실험, 금형압축실험등의 실험들을 필요로 하고 있다. 이러한 실험방법들은 산업현장에서 사용하기에는 거의 불가능한 방법들이기 때문에 본 연구에서는 간단한 금형압축실험만을 이용해서 재료상수를 찾는 방법을 이용하였다.[2]

2.3 최적화 알고리즘

금형압축성형 후 분말 성형체에서 밀도구배의 편차를 줄이기 위한 공정조건을 찾기 위해서 설계민감도를 이용한 최적화 기법을 사용하였다.[2] 본 연구에서 사용한 목적함수는 아래와

같다.

$$\Phi = \int_{\Omega_f} (\rho - \bar{\rho})^2 d\Omega, \quad \bar{\rho} = \frac{\int_{\Omega_f} \rho d\Omega}{\int_{\Omega_f} d\Omega} \quad (2)$$

여기서, Ω_f 는 최종 상태에서의 해석영역을 의미하고, ρ 는 상대밀도를 의미한다. $\bar{\rho}$ 는 평균 상대밀도를 나타낸다.

3. 분말야금 공정 해석 및 최적화

3.1 싱크로허브 형상 해석 및 최적화

PMSolver 를 이용한 금형압축 성형 공정 해석의 정확성을 검증하기 위해서 최근 유럽 PM modnet 에서 사용했던 Part 34 의 공정조건에 대해서 그 결과를 비교하였다[3]. 우선, 사용된 Distaloy AE 분말의 재료물성을 구하기 위한 실험을 수행하였는데 상세한 내용은 참고문헌 [2] 에 설명된 바와 같다. Fig. 1 은 실험 데이터와 모델식을 비교한 그림이며, 곡선적합방식으로 구한 재료물성은 식 (3)에서 보인 바와 같다.

$$m = 20.8, \sigma_m = 5100 + 4310\bar{\epsilon}_m^{0.16}, \mu = 0.1 \quad (3)$$

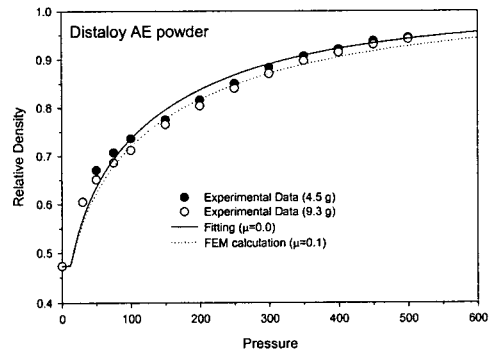


Fig. 1 Finding material parameters by simple cylindrical die compaction

식 (3)에서 보인 재료물성을 이용해서 PM solver 를 이용해서 금형압축 성형 공정 해석을 수행하였다. Fig. 2 는 금형압축 후 분말성형체에서의 밀도 분포를 보여준다.

해석결과를 검증하기 위해서 참고문헌 [3]에서 보인 실험치와 비교하였다. Fig. 3 은 밀도를 비교한 영역을 보여준다.

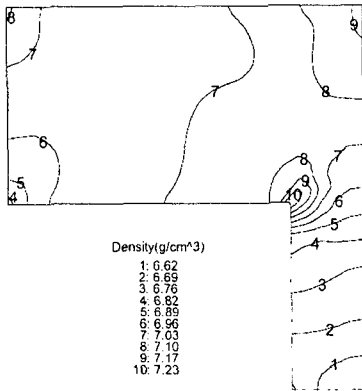


Fig. 2 Density distribution after die compaction of synchro-hub shape with process conditions used by PM modnet group

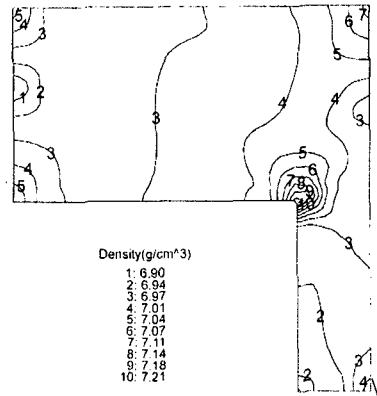


Fig. 4 Density distribution after die compaction of synchro-hub shape with optimal process conditions

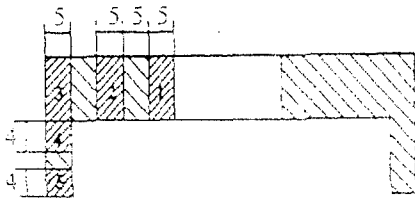


Fig. 3 Section description for density comparison

Table 1은 Fig. 3에서 구분한 영역에서의 밀도를 비교한 표인데, 해석결과가 실험치와 대단히 잘 일치하는 것을 알 수 있다.

Table 1 Comparison of density distribution

Block	실험치	해석결과 (편차)	PM Modnet (편차)
1	6.97	6.99 (0.02)	6.97 (0.00)
2	7.02	7.02 (0.00)	7.03 (0.01)
3	7.04	7.09 (0.05)	7.06 (0.02)
4	6.83	6.89 (0.06)	6.83 (0.00)
5	6.78	6.64 (0.14)	6.73 (0.05)

검증된 해석결과를 바탕으로 2.3 절에서 설명한 최적화기법을 활용하여 밀도 구배를 최소화할 수 있는 최적 공정조건을 찾았다. Fig. 4는 최적공정조건을 이용하는 경우의 밀도 구배를 보여준다. Fig. 2와 Fig. 4의 결과를 비교해 볼 때, 최적화 반복계산을 통해서 밀도 구배가 많이 개선되었음을 알 수 있다.

3.2 초경공구 팁 성형공정 최적화

초경공구의 경우 소결 후 가공이 어렵기 때문에 밀도구배에 의한 뒤틀림을 최소화 할 수 있는 공정조건 선정이 대단히 중요하다. 본 연구에서는 Fig. 5에서 보인 바와 같은 3 차원 형상을 갖는 초경공구 팁 성형 공정을 최적화하였다. 초경 분말의 재료물성을 찾기 위한 실험방법은 3.1 절에서와 같다.

Fig. 5는 초경 공구업체에서 시행오차적인 방법에 의해서 찾은 공정조건과 최적화 계산을 통해서 구한 공정조건에서의 밀도 분포 차이를 보여준다. 그림에서 보듯이 최적 공정조건을 사용하는 경우 분말 성형체의 밀도 구배가 상당히 개선되는 것을 알 수 있다. 특히, 모서리 부분에서 크랙생성이 문제가 되는 공정인데 기존 공정조건인 경우 모서리 부분에서 밀도 구배가 상당히 크게 나타나지만 최적 공정조건에서는 모서리에서의 밀도 구배도 많이 개선된 것으로 나타나는 바 크랙 방지도 효과가 있음을 알 수 있다.

3.3 세라믹 부품 해석

밀도 구배에 따른 소결시 뒤틀림 효과를 확인하기 위해서 Fig. 6에서 보인 것과 같은 세라믹 부품에 대해서 금형압축 해석 및 소결 해석을 수행하였다. 해석에 사용된 분말은 알루미늄 분말이었다.

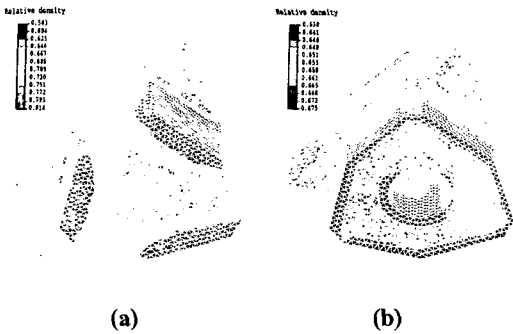


Fig. 5 Comparison of relative density distribution after die compaction of a tungsten carbide cutting tool tip; (a) industry process condition, (b) optimal process condition

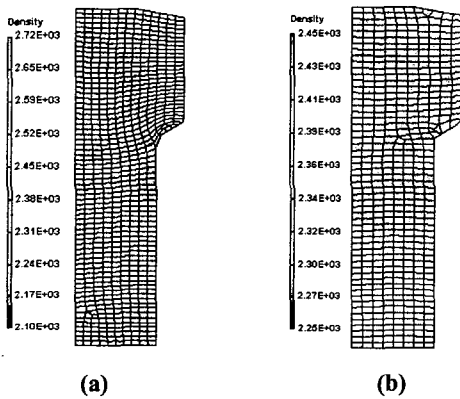


Fig. 6 Comparison of relative density distribution after die compaction of a ceramic part; (a) initial guess, (b) optimal

임의로 선정된 성형조건과 최적화를 통해서 구한 성형조건에 대해서 금형압축 후 밀도 구배를 Fig. 6 에서와 같이 구하였고 이를 초기 밀도 구배로 이용해서 소결해석을 수행하였다. 소결 해석 위해서 McMeeking 과 Kuhn 이 사용한 크립 변형모델을 이용하였다.[4] Fig. 7 은 소결 후 변형된 형상을 균일수축된 형상과 비교한 그림으로, 금형압축 후 밀도 구배가 소결 후 변형에 미치는 영향을 확연히 보여준다.

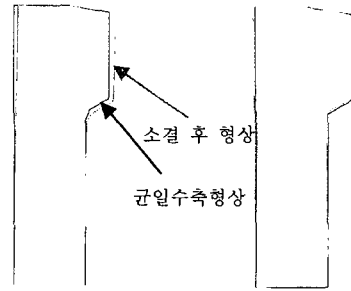


Fig. 7 Comparison of distorted shape after sintering; (a) initial guess, (b) optimal

4. 결론

본 연구에서는 PMSolver 를 이용하여 다양한 분말재료에 대한 금형압축성형 공정 및 소결 공정을 해석하였으며, 최적화 기법을 통해서 최적 공정조건이 선정되었다.

밀도 구배를 제어하기 위한 최적 공정조건 선정이 중요함을 알 수 있었으며, 분말야금 분야에서도 CAE 해석의 이용이 가능함을 보였다.

참고 문헌

- [1] S. Shima and M. Oyane, 1976, Plasticity theory for porous metals, Int. J. Mech. Sci., Vol. 18, pp. 33 ~ 50.
- [2] Y. S. Kwon, S. H. Chung, H. I. Sanderow, K. T. Kim, R. M. German, 2003, Numerical analysis and optimization of die compaction process, PM2TEC, Las Vegas.
- [3] PM Modnet Computer Modeling Group, 1999, Comparison of computer models representing powder compaction process, Powder Metall. Vol. 42, pp. 301-311.
- [4] R. M. McMeeking, L. T. Kuhn, 1992, A diffusional creep law for powder compacts, Acta Metall. Mater., Vol. 40, pp. 961 ~ 969.