

Comparison of the Finite Element Analysis and Experimental Result for Green Body Density of Alumina Ceramics

Young-Jin Yook and Jong-In Im[†]

Simulation Center, KICET, Seoul 153-801, Korea
(Received March 23, 2007; Accepted April 19, 2007)

알루미나 압축성형체의 성형밀도와 유한요소 시뮬레이션 결과의 비교

육영진 · 임종인[†]

요업(세라믹)기술원 시뮬레이션센터
(2007년 3월 23일 접수; 2007년 4월 19일 승인)

ABSTRACT

For the pressure compaction process of the ceramic powder, the density distribution is very important for the uniform shrinkages at the sintered body. In this paper, we fabricated alumina green body using compaction process and simulated about same condition. Then comparison of simulation and experimental result confirmed that accuracy of simulation. On the average density of top and lower part was each 2.41 g/cm³, 2.27 g/cm³. and deviation at final step was calculated with 0.06 in simulation. Also, experiments show that total density of top and lower part was each 2.59 g/cm³, 2.36 g/cm³, and deviation was 0.09. Conclusion, that was not a difference to the simulation and experimental result. The application using the finite element simulation method is possible optimization of the compressing process, predict generated part of cracks and there is a possibility of getting result of more fast, more accurate than existing experience method.

Key words : Alumina, Pressure compaction process, FEM, Green body density

1. 서 론

세라믹스 분말의 압축성형공정은 복잡 형상의 부품을 최소한의 기계가공을 거쳐 저렴하게 양산할 수 있는 장점 때문에 세라믹스 분야에서 가장 많이 활용이 되고 있다. 일반적으로 분말 압축성형공정 중 성형체 내부의 밀도 구배 및 결함발생은 분말의 특성을 제외하고도 금형의 형상, 금형의 구성부품인 상부편치, 하부편치, 홀더 등의 이동속도와 같은 공정변수에 의해 많은 영향을 받기 때문에 이들에 대한 최적 공정변수를 찾는 것이 중요하다. 현재 산업체에서는 급변하는 부품 형상 및 다양한 성형공정을 최적화하기 위해 많은 노력을 하고 있으며, 경험에 의한 시행오차적 방식의 공정제어, 선진 기술을 보유한 곳으로부터의 기술자문 등을 통해 성형 공정조건을 개선하고 있다. 최근 들어 새로운 기법의 수치해석 알고리즘 개발과 컴퓨터 성능의 향상으로 압축성형 시뮬레이션 분야에 전산모사기법을 활용하는 움직임이 많아지고 있으며, 그 활용성도 커지고 있다.

하지만, 산업적 시각에서 볼 때, 시뮬레이션을 활용한

공정 최적화에 관한 연구보다 경험적 방법을 더 신뢰하고 있으며, 이는 시뮬레이션을 통해 실제 모든 공정변수를 고려하기에 불가능할 것이라는 판단에 의한 것으로 생각되어진다. 따라서 신뢰성 있는 데이터를 확인하기 위한 방법으로 실험적 검증이 무엇보다 필요하다.

본 논문에서는 세라믹스 압축성형에 대한 시뮬레이션 결과와 실험 결과를 비교하여 시뮬레이션 결과의 정확성을 확인하고자 하였다. 이를 위해 실린더형 알루미나 압축 성형체를 제작하여 상부, 하부의 밀도를 측정하였으며, 동일 모델의 형상을 압축성형 시뮬레이션을 통해 해석하여 각각의 결과를 비교하였다.

2. 실험방법

압축성형 시뮬레이션 결과의 정확성을 실험적으로 확인하기 위해 Fig. 1과 같이 시뮬레이션과 실험을 진행하였다. 먼저 시뮬레이션 해석을 위해 분말의 치밀화 및 변형 거동을 예측할 수 있는 구성방정식은 식 (1), (2)와 같은 Shima와 Oyan의 구성 모델을 사용하였으며,¹⁾

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

$$\sigma_m = a + b\bar{\epsilon}_m^n \quad (2)$$

[†]Corresponding author : Jong-In IM

E-mail : jongin@kicet.re.kr

Tel : +82-2-3282-2491 Fax : +82-2-3282-7801

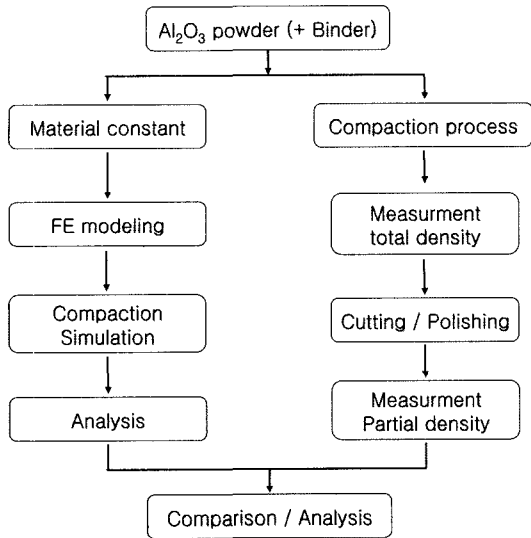


Fig 1. Experimental procedure of density analysis of the alumina sample.

구성 모델에서 재료상수는 알루미나 재료에 대하여 Jong-In Im 등이 계산한 (3), (4), (5)의 값을 인용하였다. (2) (3), (4)에 나타난 값은 식 (1), (2)에 필요한 재료 상수이며, (5)에 나타난 값은 마찰계수이다.

$$\alpha = 6.20, \gamma = 1.028, m = 23.6 \tag{3}$$

$$\sigma_m = 5100 + 6465 \epsilon_m^{0.2} \tag{4}$$

$$\mu = 0.3 \tag{5}$$

Fig. 2와 같이 FE model을 선정하고 각각의 재료상수를 인가하여 압축성형에 대한 시뮬레이션 해석을 수행하였다. 이 때의 모델 형상은 상부펀치, 하부펀치, 외부 홀더 등 금형부분과 내부 분말이 충전되는 Compaction 부분으로 나뉘어 진다. Fig. 2는 축대칭 모델로 Z축 방향을 기준으로 360도 회전된 형상이 3D 모델이다. 이렇게 나타난 Compaction 부분은 실린더형으로 지름 10 mm, 높이 45 mm인 성형체이며, 공정조건으로는 Table 1에 나타난 것과 같이 상부펀치가 10초 동안 아래방향으로 25 mm 이동하게 하여 형상의 높이가 20 mm로 줄어들게 하였다. 시뮬레이션 해석 결과는 실험적 결과보다 간단한 프로그램의 수정을 통해 광범위한 데이터를 얻을 수 있으며, 원하는 부분을 sectioning하여 해당되는 부분의 밀도분포, Velocity vector

Table 1. Loading Schedule of the Uni-Directional Compaction Process

Die	Time [s]	displacement [mm]
Upper punch	10	-25
Low punch	10	0
Holder	10	0

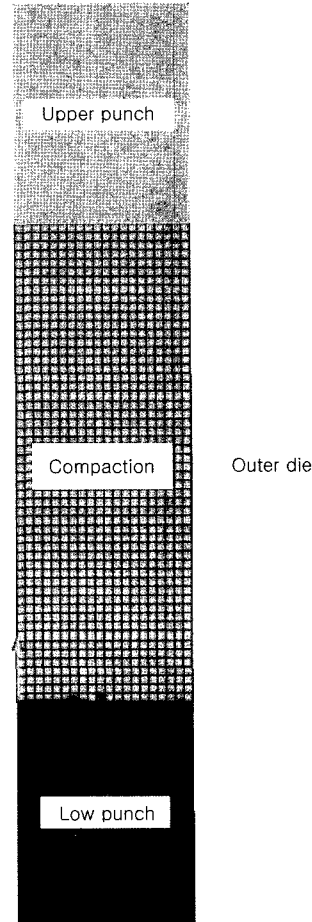


Fig 2. Geometry and finite element model for analysis.

등 다양한 정보를 얻을 수 있는 장점을 가진다.

시뮬레이션 해석 결과의 정확성을 확인하기 위하여 동일한 재질, 형상 및 조건으로 실험을 하였다. 재료는 알루미나에 바인더가 혼합된 것으로 재료상수 측정 분말과 동일한 분말을 사용하였으며, 관련 데이터는 Jong-In Im 등이 제시한 데이터를 인용하였다.²⁾ 금형은 일반적인 실린더형 샘플을 제작할 수 있는 금형을 사용하였으며, 압축성형기는 30 Ton까지 성형압을 조절할 수 있는 장비를 사용하였다. 시뮬레이션에서 수행한 인가조건과 동일하게 하기 위하여 압력을 조절하는 것보다 상펀치의 이동거리를 조정하여 성형을 하였다. 이 때의 성형압력은 5 Ton이었으며, 성형시간은 10초였다. 이렇게 만들어진 샘플의 밀도를 평균밀도라고 하였으며, 이후 Fig. 3에 나타난 바와 같이 샘플의 중앙을 Cutting하여 위, 아래 5 mm만 남기고 Polishing을 한 후 각각의 밀도를 측정하여 그 결과를 시뮬레이션 결과와 비교하였다.

3. 결과 및 고찰

성형시간 동안의 밀도변화와 표준편차의 변화를 Fig. 4

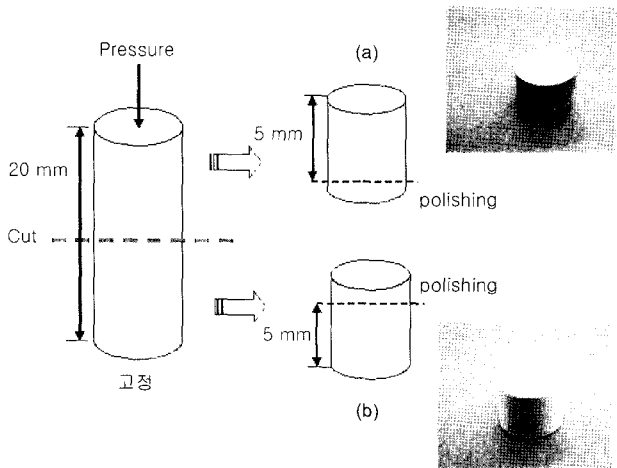


Fig 3. The schematic diagram of cutting sample for density measurement: (a) top part and (b) lower part.

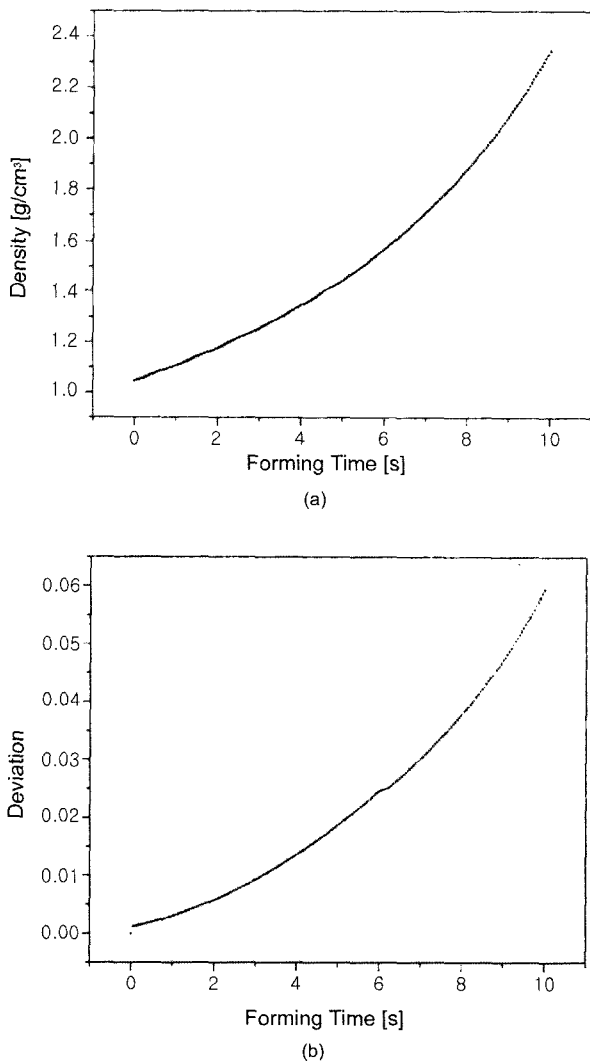


Fig 4. The change of (a) density and (b) deviation with forming time of the alumina green body on simulation.

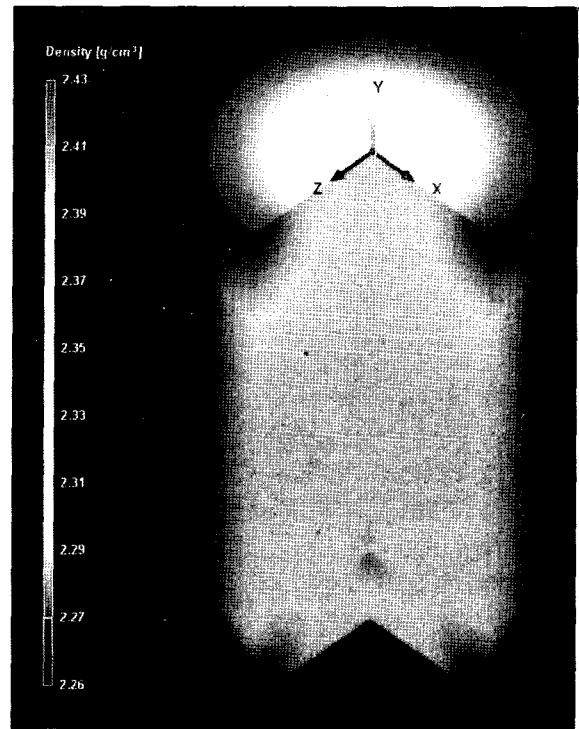


Fig 5. 3D density distribution of the alumina green body on simulation.

에 나타난 바와 같이 성형시간이 증가될 수록 평균밀도와 표준편차의 값은 지수함수적으로 증가함을 알 수 있다. Fig. 4에 성형 시뮬레이션의 시간에 따른 평균밀도 및 편차 결과를 데이터로 나타내었으며, 시간에 따라 평균밀도는 2.3 g/cm³, 표준편차는 0.06까지 올라감을 알 수 있다. 본 시뮬레이션의 조건이 일축 성형에 의한 해석이기 때문에 밀도 및 편차 기울기가 지수함수적으로 증가하는 경향이 나타났지만, 복잡 형상의 다축성형이라면 기울기 변화가 클 것으로 예상되며, 밀도가 높고 편차가 낮은 점을 최적 공정으로 선택할 수 있을 것이다. 유한요소방법을 이용하여 성형 시뮬레이션을 한 결과 3D 밀도분포는 Fig. 5에 나타냈으며, 2D 단면의 밀도분포는 Fig. 6에 나타내었다. 유한요소방법을 이용하여 해석하면 성형체 내부의 밀도를 격자점에 따라 얻을 수 있기 때문에 원하는 부분의 밀도를 계산할 수 있는 장점을 가지고 있다. 성형 조건이 일축성형으로 상부펀치만 내려오기 때문에, 압력을 많이 받는 성형체 윗부분의 밀도가 아랫부분의 밀도보다 더 높게 나타났으며, 성형체 윗부분의 5 mm에 해당되는 부분의 평균 밀도가 2.41 g/cm³으로 계산되었으며, 성형체 아랫부분의 5 mm에 해당되는 부분의 평균 밀도가 2.27 g/cm³로 계산되어 성형체 윗부분의 밀도가 아랫부분의 밀도보다 0.14 g/cm³ 더 높았다. 또한 실린더형의 윗부분 중에서 외곽부분의 밀도가 더 높았으며, 아랫부분 중에서 중심부분의 밀도가 더 높았다. 이런 결과를 비추

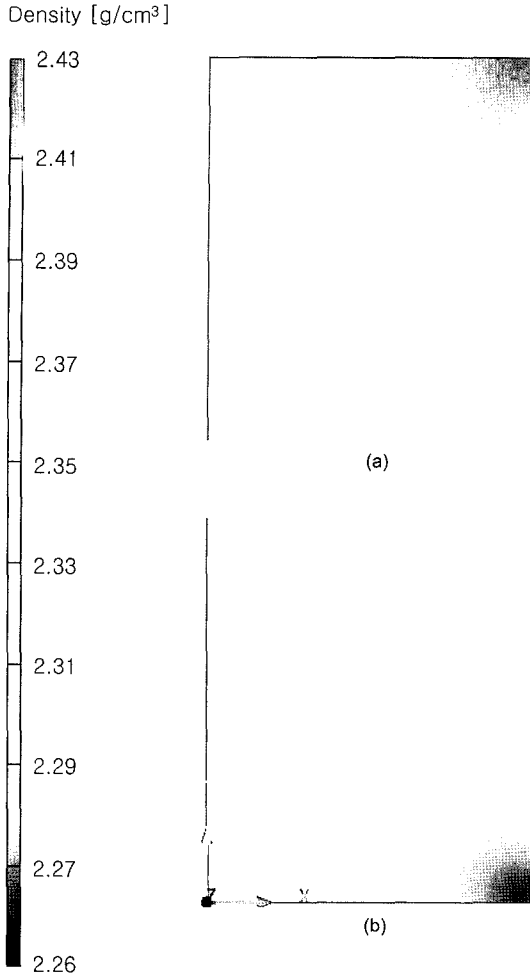


Fig 6. Density distribution of 2D partial cross section for the alumina green body: (a) top part and (b) lower part.

이 동일한 재료와 형상을 성형하고 소결했을 시 성형체의 윗부분과 아랫부분에 Ring cap이 발생할 우려가 있다. 동일한 모델의 실험적 확인을 위해 실린더 형태의 금형에 알루미늄 분말로 압축성형을 하였다. 성형조건은 시뮬레이션 조건과 동일하게 하기 위해 알루미늄 분말을 금형에 45 mm 높이로 채워 일축성형을 하였으며, 상부편치가 아랫방향으로 25 mm 내려오게 하여 지름 10 mm, 높이 20 mm 실린더 형상의 샘플을 제작하였다. 이 때의 성형체 밀도를 측정된 결과 2.45 g/cm³이었다. 이 성형체의 중심 부분을 자르고 Polishing을 통해 샘플의 두께를 각각 윗부분 5 mm, 아랫부분 5 mm로 맞추었다. 이렇게 만들어진 상,하부 샘플의 밀도측정 결과 Table 2와 같이 윗부분의 밀도는 2.59 g/cm³, 아랫부분의 밀도는 2.36 g/cm³로 측정되어 윗부분과 아랫부분의 차이는 0.23 g/cm³으로 계산되었다. 또한 표준편차는 0.09로 나타났다. 시뮬레이션 결과와 실험 결과를 비교하면, Table 2와 같은 결과를 얻을 수 있으며 시뮬레이션 결과값이 실험값과 약 4% 정도의 오차율을 보이지만, 비교적 잘 일치됨

Table 2. Comparison of Experimental and Simulation Analysis of the Green Density

	Total density [g/cm ³]	Top part [g/cm ³]	Lower part [g/cm ³]	Deviation [%] ¹⁾
Simulation	2.35 (Δ 0.17) ²⁾	2.41 (Δ 0.06)	2.27 (Δ 0.05)	5.9%
Experimental	2.45 (± 0.4) ³⁾	2.59 (± 0.5)	2.36 (± 0.3)	9.4%
Error	4.1%	6.9%	3.8%	-

1) Deviation[%]=(Top density - Lower density)/Total density *100(%)
 2) Δ density difference (maximum value - minimum value)
 3) Deviation of 5 times measurement

을 알 수 있다. 이는 시뮬레이션에서 사용된 재료상수 값들이 실제로 사용된 분말을 가지고 실험을 하여 각각의 재료상수를 측정하였기 때문으로 판단된다. 하지만 실험을 통한 밀도측정 결과가 시뮬레이션 결과보다 약간 높게 측정되었으며, 편차도 크게 측정되었다. 이러한 원인으로서는 실험용 압축성형기의 공정이 수작업으로 이루어졌으며, 또한 압력으로 조작용 할 수 있는 성형기를 이동거리로 조작하면서 약간의 오차가 발생된 듯하다.

이상의 결과를 종합해 볼 때, 알루미늄 재료를 사용하여 실린더 형태의 압축성형체에 대한 시뮬레이션 결과와 실험적 결과는 동일한 경향을 나타내고 있으며, 국부적인 밀도나 편차의 값도 유사함을 알 수 있었다.

따라서, 본 연구에 활용된 형상은 단순한 실린더형 모델이었지만, 좀 더 복잡한 모델에 대한 시뮬레이션 결과도 실험 결과와 유사할 것이라 생각할 수 있다. 이를 바탕으로 세라믹 압축 성형공정에서 공정조건 최적화 및 불량 예측이 가능하리라 판단된다.

4. 결 론

본 논문에서는 유한요소법을 이용하여 실린더형 세라믹스 분말 압축성형체 밀도분포를 해석하고, 제조한 동일형상 성형체의 상부 및 하부의 밀도측정 결과와 비교분석함으로써 시뮬레이션 해석 결과의 정확성을 검증 하였다. 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

첫째, 실린더형 알루미늄 압축성형체의 전체 평균밀도는 2.35 g/cm³이고, 상부 및 하부의 밀도는 각각 2.41 g/cm³ 및 2.27 g/cm³으로 해석되었다. 성형체의 밀도분포에 대한 시뮬레이션 결과의 편차는 5.9%로 분석되었다.

둘째, 동일한 형상으로 제조한 성형체의 평균 밀도 및 상부, 하부의 밀도는 각각 2.45 g/cm³, 2.59 g/cm³, 2.32 g/cm³로 측정되었다. 성형체의 밀도분포에 대한 실험결과와 편차는 9.4%로 분석되었다.

셋째, 밀도분포에 대한 시뮬레이션 결과와 실험결과

상부 밀도는 약 7% 정도의 편차를 보이고, 하부 밀도는 약 4%의 편차를 보이고 있는 것으로 분석되었다. 그리고 전체 평균 밀도의 경우, 시뮬레이션 결과는 실험치와 약 4%정도의 편차를 보이고 있는 것으로 분석되었다.

본 연구의 결과, 유한요소법으로 해석한 밀도가 실제 실험치보다 다소 낮게 분석되는 경향은 있지만 실험 결과와 비교적 잘 일치함을 알 수 있었다. 그리고 본 연구결과를 좀 더 복잡한 형상의 성형체 제조에 활용할 경우, 기존 경험에 의한 방식보다 빠르게 압축 성형공정을 최적화함으로써 조기 제품 생산에 기여할 수 있을 것으로 판단된다.

REFERENCES

1. S. Shima and M. Oyane, "Plasticity Theory for Porous Metals," *International Journal of Mechanical Sciences*, **18** [6] 285-91 (1976).
2. J.-I. Im and Y.-J. Yook, "FE Analysis of Alumina Green Body Density for Pressure Compaction Process," *J. Kor. Ceram. Soc.*, **43** [12] 859-64 (2006).
3. Y. S. Kwon, S. H. Chung, H. I. Sanderow, K. T. Kim, and R. M. German, "Numerical Analysis and Optimization of Die Compaction Process," pp. 4-37, PM2TECH Conference, 2003.