

FE Analysis of Alumina Green Body Density for Pressure Compaction Process

Jong-In Im[†] and Young-Jin Yook

Simulation Center for Fine Ceramics/Electronic Device Team, KICET, Seoul 153-801, Korea
(Received October 16, 2006; Accepted November 9, 2006)

압축성형공정에 대한 알루미나 성형체 밀도분포의 FE 분석

임종인[†] · 육영진

요업(세라믹)기술원 시뮬레이션센터/전자부품팀
(2006년 10월 16일 접수; 2006년 11월 9일 승인)

ABSTRACT

For the pressure compaction process of the ceramic powder, the green density is very different with both the ceramic body shape and the processing conditions. The density difference cause non-uniform shrinkages and deformations, and make cracks in the sintered ceramics. In this paper, Material properties of the alumina powder mixed with binder and the friction coefficient between the powder and the tool set were determined through the simple compaction experiments. Also the powder flow characteristics were simulated and the green density was analyzed during the powder compaction process with Finite Element Method (FEM). The results show that the density distributions of the green body were improved at the optimized processing condition and both the possibility of the forming crack generation and the deformation of the sintered Alumina body were reduced.

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

1. 서 론

세라믹스 분말을 이용하여 관련 소재 및 부품을 제조하기 위하여 압축성형, 열간 압축(Hot Press), 슬립캐스팅(slip casting) 등 다양한 성형방법이 이용되지만 대표적인 성형공정은 압축 성형공정이다. 세라믹스 분말의 압축 성형공정은 다양한 형상의 부품을 최소한의 기계가공 거쳐 저렴하게 양산할 수 있는 장점을 갖는다. 현재 산업체에서는 관련 제품의 생산성과 신뢰성을 증가시키기 위하여 전체 부품 수를 줄이고 부품의 기계적 물성을 증대시키기 위한 많은 노력이 진행되고 있다.^{1,2)}

세라믹스 분말 압축성형을 이용하여 복잡형상을 제조하는 경우, 국부적인 밀도 구배에 의하여 제품불량이 주로 발생한다. 즉, 성형 중 금형 벽과 분말간의 마찰로 인해 균일한 압력으로 성형할 수 없고, 성형체 내부의 밀도가 불 균일하여 성형 크랙 등 결함이 생기기 쉽다. 이러한 성형체의 불 균일한 밀도분포는 이후 소결공정 중 불 균일한 수축을 발생시킬 수 있어 세라믹스 소결체의 변형의 주요 원인으로 작용하고, 세라믹스 제품의 신뢰성 저하시키는 원인으로 작용한다. 그러나 성형체 내부의 밀

도 및 밀도분포를 실험적으로 측정하기가 어려워 불량해결은 대부분 경험에 의존하고 있다. 따라서 산업체 현장에서는 그 동안의 생산경험을 근거한 시행오차적 방식으로 압축 성형공정으로 생산된 제품의 성형체 내부 밀도의 불 균일성과 크랙 발생을 최소화하여 생산성을 증가시키기 위한 많은 노력을 해오고 있다.

일반적으로 분말 압축성형공정 중 성형체 내부의 밀도 구배 및 결함 발생은 분말의 특성을 제외하고도 금형의 형상, 금형의 구성부품인 상부편치, 하부편치, 코아 등의 이동속도와 같은 공정변수에 의해 많은 영향을 받기 때문에 이들에 대한 최적 공정변수를 찾는 것이 중요하다.^{3,4)} 최근, 성형 프레스의 성능이 향상되어 이동속도의 정확한 제어가 가능하게 되었지만 보다 복잡한 형상의 부품을 성형하기 위하여 금형의 단수가 늘어남에 따라 압축 성형 공정 중 제어해야 할 공정변수가 증가하게 되고, 3단 금형이상의 경우, 수많은 공정변수들의 조합이 존재하므로 경험이나 시행오차적인 방법으로 최적의 공정조건을 결정하기 매우 힘든 실정이다.^{2,4)}

본 논문에서는 알루미나 분말의 압축 성형공정 중 발생하는 성형체의 밀도 및 내부 밀도분포를 유한요소법을 이용하여 해석하고, 성형공정의 제조조건을 변화시켜 성형체의 내부 밀도분포에 미치는 영향을 분석하여 균일한 밀도분포를 갖는 성형체의 제조 가능성에 대하여 알아보 고자 하였다.

[†]Corresponding author : Jong-In Im
E-mail : jongin@kicet.re.kr
Tel : +82-2-3282-2491 Fax : +82-2-3282-7801

2. 이론적 배경

세라믹스 분말의 압축성형공정에 대한 수치해석을 위한 분말 성형체의 치밀화 및 변형 거동을 예측할 수 있는 구성방정식은 구형의 구리분말에 대하여 제안한 Shima와 Oyane의 구성 모델⁵⁾을 세라믹스 분말과 같은 다른 분말에 대하여 적용할 수 있는 일반적인 형태를 사용한다.

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

여기서, $\bar{\sigma}$ 와 p 는 각각 유효 응력과 정수압을 의미하고, D 는 상대밀도, σ_m 은 모재의 유동 응력을 의미한다. 그리고 α, γ, m 은 재료 상수들로 실험을 통해서 구해야 하는 값들이다.

세라믹스 분말 성형체의 치밀화 및 변형거동 구성방정식에 흐름법칙(associate flow rule)을 적용하면 아래와 같은 응력-변형률 속도 관계를 구할 수 있다.

$$\sigma_{ij} = \frac{\bar{\sigma}}{\dot{\epsilon}} \left(\frac{2}{A(D)} \dot{\epsilon}_{ij} + \frac{1}{3(3-A(D))} \dot{\epsilon}_{kk} \delta_{ij} \right) \tag{2}$$

여기서, $A = \frac{9}{3+\alpha(1-D)^\gamma}$ 이고, 유효응력 $\bar{\sigma}$ 와 유효변형률 속도 $\dot{\epsilon}$ 는 아래와 같이 정의된다.

$$\bar{\sigma} = \left(\frac{A(D)}{2} \sigma_{ij}^2 + \frac{3-A(D)}{3} \sigma_{kk}^2 \right)^{\frac{1}{2}} \tag{3}$$

$$\dot{\epsilon} = \left(\frac{2}{A(D)} \dot{\epsilon}_{ij}^2 + \frac{1}{3(3-A(D))} \dot{\epsilon}_{kk}^2 \right)^{\frac{1}{2}} \tag{4}$$

세라믹스 분말 모재를 가공경화 재료로 가정할 경우, 유동응력은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\sigma_m = a + b\bar{\epsilon}_m^n \tag{5}$$

여기서, m, a, b, n 은 모재의 특성을 나타내는 재료상수이다.

3. 실험 방법

본 연구의 알루미늄 세라믹스 분말의 압축성형공정에 대한 성형체의 치밀화 거동 및 밀도분포를 해석하기 위하여 상용화된 유한요소 프로그램을 사용하였다.

세라믹스 분말의 압축성형공정에 대한 수치해석을 위해서는 먼저 알루미늄 분말과 바인더가 혼합된 성형분말에 대한 식(1)의 재료상수인 α, γ, m 및 식(5)의 재료상수인 a, b, n , 그리고 금형과 분말의 마찰계수 등은 실험적으로 구하여야 한다.

본 연구에서는 재료 물성을 측정하기 위한 방법으로 몇 번의 금형압축 실험만을 필요로 하는 단순화 된 방법²⁾을 사용하였다. 그리고 모재 유동응력의 재료상수 m, a, b 및 n 을 찾기 위해서 분말과 금형과의 마찰 효과를 가급적이면 줄이는 것이 중요하다. 따라서, 실린더 금형 벽면에 윤활제를 바르거나 미량의 분말을 채우고 축하중을 가하여 압축하여 밀도와 압력 데이터를 얻는다. 이 실험 데이터를 커브피팅(curve fitting)하여 가장 잘 일치하는 재료상수 m, a, b 및 n 을 구한다. 그리고, 실린더 금형 벽면의 마찰조건을 실제 공정의 마찰조건과 같도록 하고 이전보다는 많은 양의 분말을 채움으로써 금형 벽면과 분말과의 마찰 효과가 나타나도록 한다. 이렇게 구한 밀도와 압력 데이터를 잘 따라가는 마찰 계수 μ 를 유한요소 해석을 통해서 구하였다.

본 연구의 알루미늄 분말 압축성형에 사용한 금형은 상부 펀치(P1), 하부 펀치(P2), 코어 로드 및 외부 다이로 구성되어 있고, 2차원 축대칭 금형 형상을 Fig. 1에 나타내었다. 금형의 상부 펀치 및 하부 펀치는 서로 반대방향으로 움직이도록 설계되어 있고, 다이와 코어로드는 고정되어 있다. Fig. 2은 일반적인 압축 성형조건과 유한요소해석을 통해 최적화시킨 압축 성형 조건을 나타낸 것이다. 알루미늄 분말 압축성형에 대한 두 가지 성형조건을 정리한 것은 Table 1과 같다.

4. 결과 및 고찰

4.1. 알루미늄 분말의 재료상수

본 연구에서 진행하고자 하는 알루미늄 분말의 압축 성

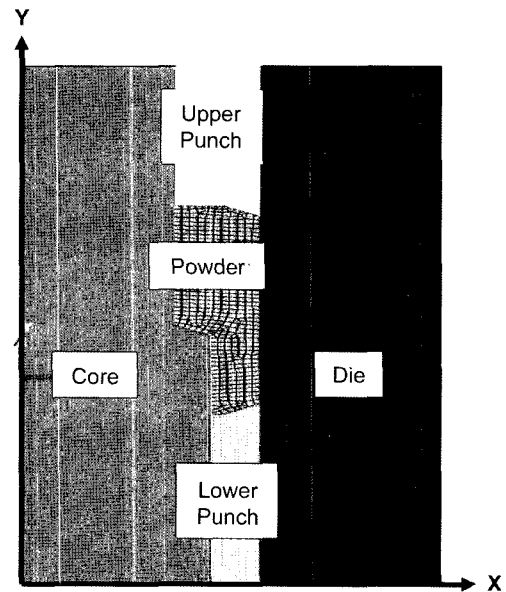


Fig. 1. Configuration of the forming mold and the alumina body shape.

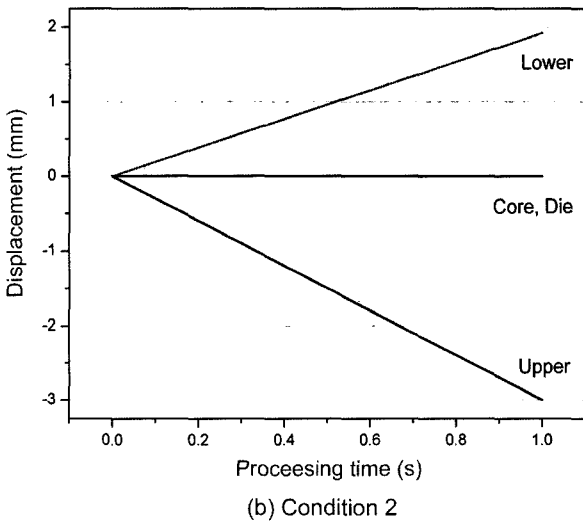
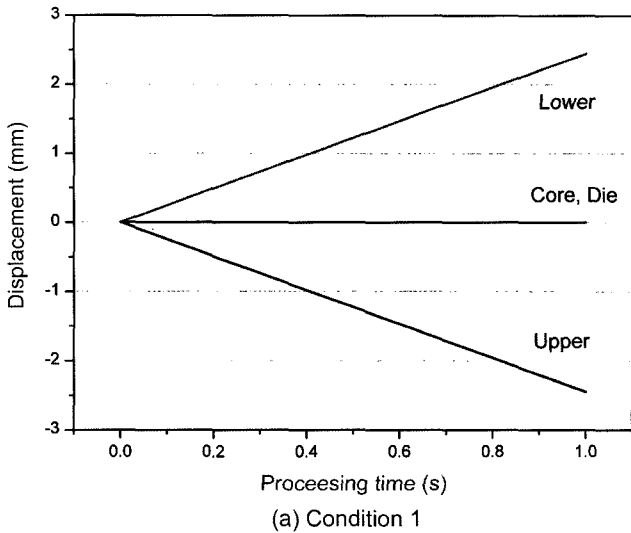


Fig. 2. Loading schedule of the compaction tool set for the alumina green body.

Table 1. Displacement of the Compaction Tool Set for the Alumina Ceramic Powder at the end of Loading Schedule

Tool Part	Upper punch ¹⁾	Lower punch ²⁾	Core	Outer die
Condition 1	2.45 mm	2.45 mm	0	0
Condition 2	2.78 mm	1.92 mm	0	0

¹⁾Downward directional displacement

²⁾Upward directional displacement

형공정 중 발생하는 성형체의 밀도 및 내부 밀도분포를 분석하기 위해서는 먼저 알루미나 분말에 대한 재료상수를 측정하고, 성형조건을 변화함에 따라 밀도분포를 해석하는 것이 필요하다.

본 연구에서 사용한 알루미나 세라믹스 분말에 대하여

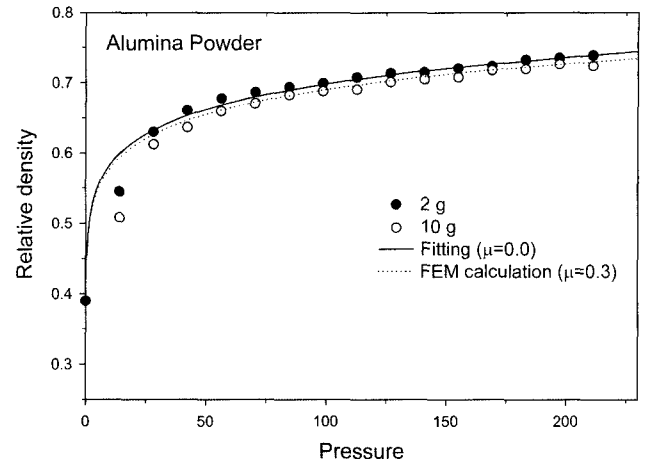


Fig. 3. Variation of relative green density of the alumina powder with the forming pressure during die compaction.

직경이 15 mm인 원통형 초경금형을 이용한 분말 압축실험을 통해 측정된 인가 압력에 따른 상대밀도의 변화를 측정하고, 그 결과를 Fig. 3에 나타내었다. 여기서, 마찰의 영향이 매우 적은 경우(●)의 실험치는 금형 벽면에 윤활제를 바른 후 2g의 분말을 사용하여 압축 성형하여 구하였다. 또한, 실제 공정과 마찬가지로 금형 벽면에 윤활제를 바르지 않고 분말량을 10g 사용하여 구한 실험결과(○)이다.

본 연구에서는 Shima와 Oyane가 구리분말에 대하여 구한 재료상수가 다른 금속 분말에 대한 금형압축 공정 해석결과에도 비교적 정확한 것으로 알려져 있어^(6,7) 분말 재료에 따라서 크게 민감하지 않는 α 와 γ 를 다음과 같이 알루미나 분말에 대해서도 동일하다고 가정하였다.

$$\alpha = 6.20, \quad \gamma = 1.028 \quad (6)$$

그리고 본 연구에서 사용한 알루미나 분말을 성형압에 따라 상대밀도 변화를 측정하여 알루미나 분말의 재료상수들을 결정할 수 있다. Fig. 3의 마찰의 영향이 매우 적은 경우(●)의 측정결과로부터 알루미나 분말의 재료상수 m , a , b 및 n 을 구하였다. 그리고 실제 공정과 유사한 제조조건인 금형 벽면에 윤활제를 바르지 않고 실험한 결과(○)로부터 마찰계수 μ 를 구하였다. 이렇게 측정된 알루미나 분말의 재료상수들을 다음과 같다.

$$m = 23.6, \quad \sigma_m = 5100 + 6465\bar{\epsilon}_m^{0.20}, \quad \mu = 0.3 \quad (7)$$

4.2. 압축 성형조건에 따른 알루미나 성형체의 밀도분포

알루미나 세라믹스 분말과 Fig. 2에 나타난 금형을 이용하여 다양한 압축 성형공정 중 일어나는 분말의 유동 특성 및 성형체의 밀도변화를 분석하고, 그 결과를 Figs. 4부터 6까지 나타내었다. Fig. 4는 분말 성형과정 중 일어

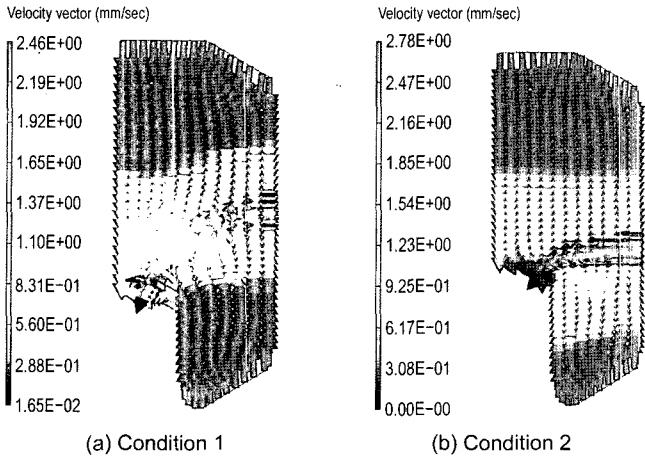


Fig. 4. Flow velocity distributions of the alumina powder with the loading schedule during the compaction process.

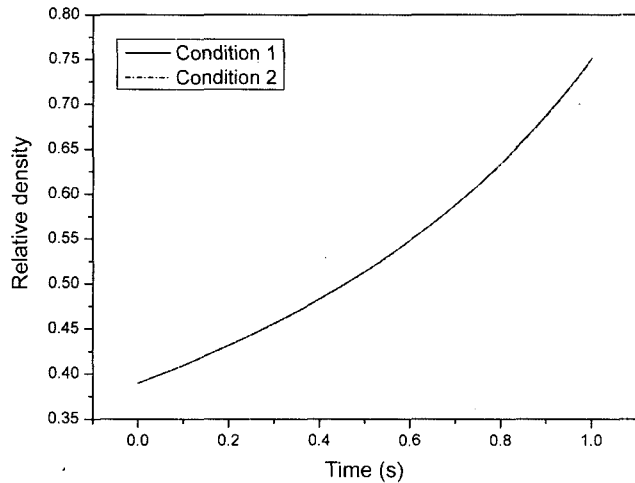


Fig. 5. Relative density variations of the alumina green body with the loading conditions during the compaction process.

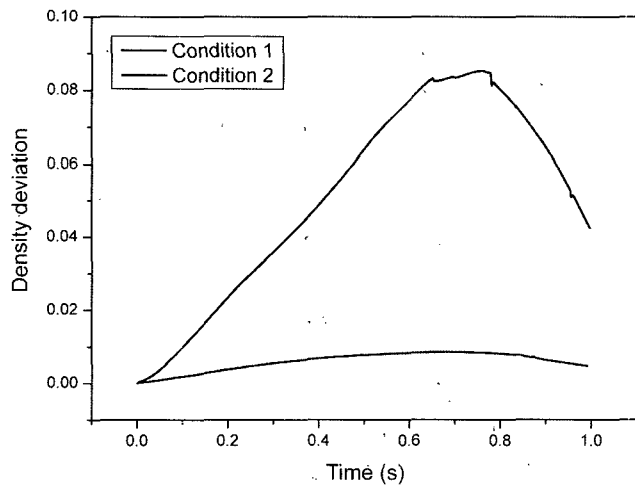


Fig. 6. Density deviations of the alumina green body with the loading conditions during the compaction process.

나는 알루미늄 분말의 유동속도 분포를 나타낸 결과이고, Fig. 5의 결과는 압축성형 과정 중 알루미늄 분말 성형체의 평균 상대밀도 변화를 나타낸 결과이다. 그리고 Fig. 6의 결과는 압축 성형공정 과정 중 성형체의 밀도편차 시간을 따라 나타낸 결과이다.

Fig. 4(a)의 결과에서 알 수 있듯이, Fig. 2(a)의 성형조건과 같이 금형의 상부 및 하부 펀치가 동일하게 이동한 경우, 압축성형 과정에서 전체적인 알루미늄 분말의 유동이 불균일하고, 분말 유동이 일어나지 않는 부분이 외측 하단 모서리부분에서 우측 측면부분으로 사선방향으로 존재하는 것으로 분석되었다. 그러나 Fig. 2(b)와 같이 상부 및 하부 펀치 이동거리를 다르게 하여 성형한 경우, 분말 유동이 일어나지 않는 부분이 거의 수평으로 나타나는 것으로 분석되었다. 이 결과로부터 압축 성형조건에 의해서 분말 유동특성이 아주 많이 변경됨을 확인할 수 있었고, 지금까지 추측만 하고 있었던 사항을 가시화하여 보여준 결과라 할 수 있다.

알루미늄 분말의 압축 성형공정 중 평균 밀도변화를 나타낸 Fig. 5의 결과에서 알 수 있듯이, 성형조건을 변화 시킴에 따라 성형체의 상대 평균밀도는 동일하게 변화됨을 알 수 있고, 성형종료 후 이론밀도의 약 75%에 도달하는 것으로 분석되었다. 이 결과로부터 성형조건 변화에 시켜 전체 성형체의 밀도를 측정하는 경우, 성형조건이 변화하여도 밀도가 변화하지 않는 것으로 잘못 판단할 수 있는 것으로 분석된다. 그러나 성형공정 중 성형체의 밀도 분포를 근거로 최대 및 최소의 밀도편차를 분석한 Fig. 6의 결과에서 알 수 있듯이, 동일한 평균밀도를 보이더라도 내부의 밀도편차는 성형조건에 따라 아주 많이 차이가 나는 것으로 분석되었다. 즉, 성형조건 1의 경우, 성형체 내부의 밀도편차가 0.09 정도의 최대치에 이르다가 종료 시점에 0.05 정도로 감소한다. 반면 성형조건 2의 경우, 성형체 내부의 밀도편차는 0.01 미만의 아주 적은 밀도편차를 보이고 있는 것으로 분석되었다.

이상의 결과로부터 성형조건에 변화가 압축 성형공정 중 알루미늄 분말의 유동특성에 많은 영향을 주고, 이러한 분말 유동특성변화로부터 성형체 내부의 밀도편차를 발생시킨다고 판단된다.

Fig. 7의 결과는 알루미늄 분말의 압축성형 종료 후, 성형체의 상대 밀도분포를 나타낸 결과이다. 이 결과에서 알 수 있듯이, 성형체의 우측 하부 밀도가 상부 보다 다소 높고, 우측 하단부에서 좌측 하단부로 휘어지는 모서리 곡면부분이 가장 밀도가 낮은 것으로 나타났다. 또한 성형조건이 변화됨에 따라 성형체 내부의 밀도변화가 판이하게 달라지고, 밀도분포 차이도 크게 변화하는 알 수 있다. 즉, 성형조건 1의 경우, 성형체 내부의 상대밀도는 약 20%정도 차이가 나고, 성형조건 2로 변경할 경우, 성형체 내부의 상대밀도는 약 10% 이내의 분포를 보이고

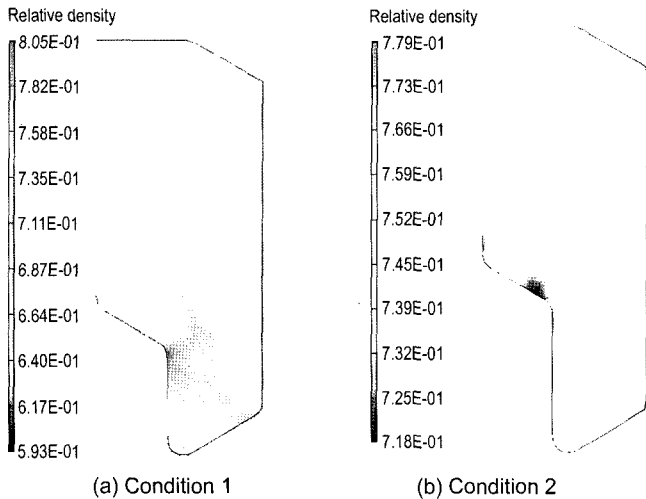


Fig. 7. Comparison of the relative density distribution of the alumina green body at the end of compaction process.

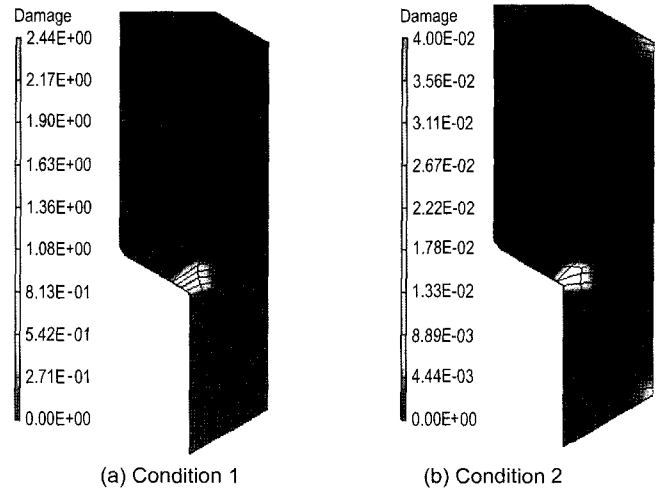


Fig. 8. Crack generation possibility analysis results of the alumina green body with the loading schedule of the compaction process.

있는 것으로 분석되었다.

4.3. 알루미늄 성형체의 결함 및 소결체 변형 가능성 분석

일반적인 세라믹스 소재 및 부품을 생산하는 산업체에 성형체의 결함 및 변형을 성형과정 혹은 종료 후 판단하기가 무척 어렵고, 소결 후에야 제품의 결함이 파악할 수 있다. 그러나 이 단계에서 제품의 결함을 발견하기 까지 많은 시간이 소요되고, 발견된 결함이 성형과정에서 발생한 것인지 아니면 소결과정에서 발생한 것인지 판단하기 어렵다는 것이 큰 애로 사항이다.

본 연구에서는 이러한 산업체의 애로사항을 해소하는데 조금이나마 도움이 될 수 있을까 하여 불완전하지만 성형체의 결함 가능성 및 소결 후 변형을 예측할 수 있는 결과에 대하여 제시하고자 한다.

Fig. 8의 결과는 압축 성형공정의 성형조건을 변화시킴에 따라 인가압력에 따른 유효 응력분석 결과로부터 성형체 내부의 결함발생 가능성을 해석하여 나타낸 결과이다. 이 결과는 성형체 소재의 유효 응력이 Drucker-Prager 결함표면에서 떨어진 거리로부터 결함발생 가능성을 유추한 결과이다.

Fig. 8의 결과에서 알 수 있듯이, 성형체 결함의 발생 가능성이 가장 높은 부분은 성형체의 내부 밀도변화가 가장 크게 나타나는 우측 하단부에서 좌측 하단부로 휘어지는 모서리 곡면부분인 것으로 분석되었다. 그리고 성형조건 1의 경우, 성형결함 가능성은 약 2정도이지만 성형조건 2로 변경할 경우, 성형결함 발생 가능성은 약 0.025 정도로 크게 감소하는 것으로 분석되었다. 이 결과에서 성형결함 가능성을 나타내는 수치의 절대값보다 성형조건 1의 변경에 따라 상대적인 값의 변화가 더 의미를 두는 것이 타당하다고 사료된다. 따라서 성형조건 2를 사용할

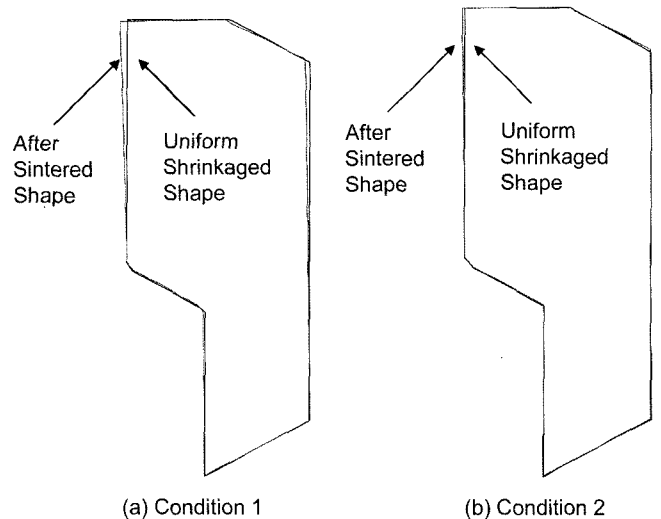


Fig. 9. Deformed shape analysis results of the sintered alumina body with the loading schedule of the compaction process.

경우, 성형결함 발생 가능성은 약 1/10정도로 감소한다고 판단되고, 이 결과는 성형체 내부의 밀도분포 분석결과와도 일치하는 결과라고 판단된다.

Fig. 9의 결과는 평균밀도로부터 균일하게 수축한 경우와 성형체의 내부 밀도분포의 분석 결과로부터 성형체 내부가 100% 상대밀도가 도달한 경우를 가정하여 단순히 외부 형상변형을 비교한 결과이다. 이 결과로부터 성형조건 1에서 성형조건 2로 변경될 경우, 소결 후 성형체 상단부 변형이 많이 감소하는 것으로 예측되므로 최종적으로 제품의 가공처리를 최소화할 수 있을 것으로 판단된다.

5. 결 론

본 논문에서는 알루미나 분말의 압축 성형과정 중 발생하는 성형체의 밀도 및 내부 밀도분포를 유한요소법을 이용하여 해석하고, 성형공정의 제조조건을 변화시켜 성형체의 내부 밀도분포에 미치는 영향을 분석하여 균일한 밀도분포를 갖는 성형체의 제조 가능성에 대하여 조사하였다.

본 연구의 결과, 금형 압축실험을 통하여 알루미나 분말의 재료상수 및 유한요소법 해석을 통하여 알루미나 분말의 금형 마찰계수를 구하였다. 그리고 알루미나 분말의 압축 성형과정 중 발생하는 분말의 유동형태 및 성형체의 내부 밀도분포를 분석할 수 있었고, 성형조건을 변경함에 따라 밀도변화를 분석함으로써 성형체 내부의 밀도 균일화를 달성할 수 있었다. 또한 이러한 성형체 밀도분포로부터 성형결함 발생 가능성 및 소결 후 변형 정도를 예측하고, 균일한 내부 밀도분포를 갖도록 성형조건을 최적화하게 되면 성형결함 및 소결 변형을 현저히 줄일 수 있음을 알 수 있었다.

REFERENCES

1. R. M. German, "Powder Metallurgy Science, Second Edition," *Metal Powder Industries Federation*, Princeton, NJ, 1994.
2. Y. S. Kwon, S. H. Chung, H. I. Sanderow, K. T. Kim, and R. M. German, "Numerical Analysis and Optimization of Die Compaction Process," *PM2TECH*, **4** 37-50 (2003).
3. J. Kergadallan, G. Puente, P. Doremus, and E. Pavier, "Compression of an Axisymmetric Part with an Instrumented Press," *Grenoble*, 277-85 (1997).
4. P. M. Modnet Computer Modeling Group, "State of the Art Review : Comparison of Computer Models Representing Powder Compaction Process," *Powder Metallurgy*, **42** [4] 301-11 (1999).
5. S. Shima and M. Oyane, "Plasticity Theory for Porous Metals," *Int. J. Mech. Sci.*, **18** [6] 285-91 (1976).
6. Y. S. Kwon, H. T. Lee, and K. T. Kim, "Analysis for Cold Die Compaction of Stainless-Steel Powder," *ASME J. Eng. Mater. Tech.*, **119** [4] 366-73 (1997).
7. S. C. Lee and K. T. Kim, "Densification Behavior of Metal Powder Under Cold Compaction," *KSM(A)*, **26** 95-104 (2002).