

급속응고 Al-Si계 합금의 단조공정에 대한 유한요소 해석

손현택 · 홍순직 · 김경환 · 김형섭 · 천병선
충남대학교 금속공학과, 급속응고 신소재연구소

Finite Element Analysis for Forging Processes of Rapidly Solidified Al-Si Alloys

Hyeon-Taek Son, Soon-Jik Hong, Kyeong-Hwan Kim, Hyoung-Seop Kim and Byong-Sun Chun

Rapidly Solidified Materials Research Center,
Chungnam National University, Yuseong, Taejon, 305-764, Korea

(Received February 27, 1998)

ABSTRACT The densification behaviors of rapidly solidified Al-Si alloys under high temperature processing were investigated. In general, it was difficult to establish optimum process variables for forging condition through experimentation, because this was costly and time consuming. In this paper, to overcome these problems, we compared the experimental result to the finite element analysis for forging processes of rapidly solidified Al-Si alloys. The results of these simulations helped understand the distribution of relative density during various forging processes. This information is expected to assist in improving rapidly solidified Al-Si alloys forging operations.

1. 서 론

분말단조(powder forging)법이란 소결되어 있지 않거나 또는 소결된 합금분말을 다이안에서 열간으로 성형되는 공정을 말하고, 이 공정은 여러 부품이라든지 완성품에 가까운 성형체를 만들어 내는데 효과적인 기술로 인식되어 왔다.

급속응고된 분말은 급속응고시에 용융금속으로부터 10^4 K/sec 이상의 큰 과냉각과 빠른 응고 속도에 의해 응고 조직이 생성되기 때문에 기존의 서냉응고와는 달리 결정립 미세화,¹⁾ 용질원자의 편석감소,²⁾ 용질원자의 고용한도 증가,³⁾ 조직의 균질성, 비정질과 같은 준안정상의 생성 등 여러 특성이 일어난다. 따라서 급속응고법을 이용하면 기존의 서냉응고법으로는 제조할 수 없는 새로운 합금 설계가 가능하게 된다.

고규소 Al합금을 일반 주조법으로 제조하면 초정 Si의 대대화로 인해 가공성이 저하되며 초정 Si를 미세화시키기 위해 P, Na, Sr, Ni 등을 첨가시켜도 미세화에 한계가 있으므로 가공성의 개선이 어렵다. 기존의 주조법으로는 Fe, Mn 등의 고용도가 낮아 다량의 Fe 및

Mn의 첨가가 어렵기 때문에 급속응고분말제조법으로 초정 Si입자의 미세화 및 균일분포를 기대할 수 있다.

급속응고한 알루미늄합금의 경우, 그 공정이 흔히 압출법으로 사용되어지는데, 이방법은 복잡한 공정을 거쳐야 할뿐더러 단순하지 않은 부품을 생산하기에는 적합하지 않다. 반면에 분말단조법은 짧은 공정을 통해 분말 제품의 완전 치밀화와 동시에 우수한 기계적 성질을 얻을 수 있고 가공처리과정을 생략할 수 있는 단순한 공정과 제품의 중량감소를 통한 에너지 절약 측면에서도 경제성이 크고 복잡한 부품을 생산하는데 적합하다.

그러나 급속응고로 제조된 분말은 두꺼운 산화피막으로 인해 소성유동이 심한 압출을 이용하여 산화피막을 깨뜨릴 수 있었지만 분말단조를 행할 경우 압출에 비해 소성유동이 매우 적으므로 산화피막이 취성을 지니는 고온에서 가공을 해야 한다.

이러한 급속응고된 분말의 성형 및 가공과 단조공정에서 균일하고 강도 높은 제품을 얻기 위해서는 고밀도화 밀도분포의 조절이 매우 중요하다. 또한 가공에 의한 균열을 피하고 우수한 기계적 특성을 갖는

급속응고된 분말의 성형을 위해서는 잔류기공을 최소화 시킬 수 있는 최적 제조공정 및 공정변수의 결정이 필요하다. 이를 위해서는 급속응고 분말 성형공정 중 분말성형체의 치밀화와 밀도 분포가 매우 중요하다. 본 실험에서는 급속응고 분말의 냉간 압축에서는 이러한 치밀화를 크게 향상시킬 수 없으므로 열간 압축성형에 의한 급속응고된 Al-18Si-5Fe-2Cr분말의 치밀화에 관해 기초연구를 하였다.

2. 실험방법

Al, Si, Fe, Cr을 Al-18Si-5Fe-2Cr의 목표조성에 맞추도록 용융도가니에 장입하여 대기중에서 완전히 용해시킨 후 탈가스제를 집어넣고 용탕을 tundish에 장입하여 불활성 N₂가스를 분사시켜 분말을 제조하였다. Al 합금분말의 급속응고조작을 조사하기 위하여 입자크기가 210~177, 90~74, 62~53 μm인 분말의 미세조직을 광학현미경으로 관찰하고, 제조된 합금분말 중 90 μm이하의 분말을 원통형 다이에 장입하여 470℃에서 20분 유지시킨 후 그림 1과 같이 일축압축(single action pressing), 2단압축(2 step pressing),

양축압축(double action pressing)으로 고온압축성형하였다. 이 압축성형체의 분포에 따른 치밀화를 측정하기 위하여 다이아몬드 커터기로 압축방향의 수직 방향으로 절단하여 광학현미경으로 기공분포를 관찰하였고, Image analysis로 정량적으로 기공분포를 측정해 보았다. 또한 상대밀도와 경도가 일정한 비례관계가 있다는 결과를 바탕으로 비커스경도기(압자 1000 g)로 경도분포를 측정하여 간접적으로 상대밀도분포를 측정해 보았다. 이러한 상대밀도분포를 상용 유한요소 프로그램인 ABAQUS의 사용자 서브루틴 UMAT⁴⁾을 적용하여 분말압축공정을 해석하였다.

일반적으로 다공질금속의 항복합수는 전단변형과 부피변형항을 모두 포함하는 다음과 같은 식을 갖는다.

$$AJ_2 + BJ_1^2 = Y_R^2 = \delta Y_0^2 \quad (1)$$

A, B와 δ는 상대밀도의 함수로 표시되고 J₂은 편차 응력의 제2불변량이며, J₁은 응력의 제1 불변량이다. 또한 Y_R은 분말재료의 겉보기 항복응력이고 Y₀는 기지금속의 항복응력이다. 위 항복조건은 정수압 응력의 영향을 포함하고 있고, 대칭성(등방성 조건 J₃=0) 및 항복곡면의 볼록조건을 만족한다. 위 식에서 Y_R을 분말 재료의 인장 또는 압축 항복응력으로 정의 한다면

$$J_2 = \frac{1}{2} \rho_{ij} \rho_{ij} = \frac{1}{6} [(\rho_{11} - \rho_{22})^2 + (\rho_{22} - \rho_{33})^2 + (\rho_{33} - \rho_{11})^2 + \rho_{12}^2 + \rho_{23}^2 + \rho_{31}^2] \quad (2)$$

$$J_1 = \rho_{ii} = \rho_{11} + \rho_{22} + \rho_{33} \quad (3)$$

A, B, η와 상대밀도 R를 관계 맺으려는 제안이 많이 되고 있다.⁵⁻⁷⁾ Gurson⁸⁾은 완전강소성 재료내에 하나의 구형공극이 존재한 경우를 상계해석을 이용하여 아래의 항복식을 유도하였다. 이 중공구 모델은 분말 성형체의 해석에 널리 쓰인다. 이 중공구 모델은 분말 성형체의 해석과 연성파괴의 해석에 널리 쓰인다. 본 계산 해석에서는 아래의 Gurson모델을 사용하였다.

$$J_2 + \frac{2Y_0^2}{3} (1-R) \cosh \left[\frac{J_1}{2Y_0} \right] = Y_0^2 [1 + (1-R)^2] \quad (4)$$

또한, 이때 실험결과와의 비교를 위하여 가스분무법으로 급속응고된 Al-18Si-5Fe-2Cr의 기계적 성질을 측정하여 사용하였으며 측정된 값은 아래와 같다.

$$\text{유동곡선 } \sigma = 128.3 \epsilon^{0.126}$$

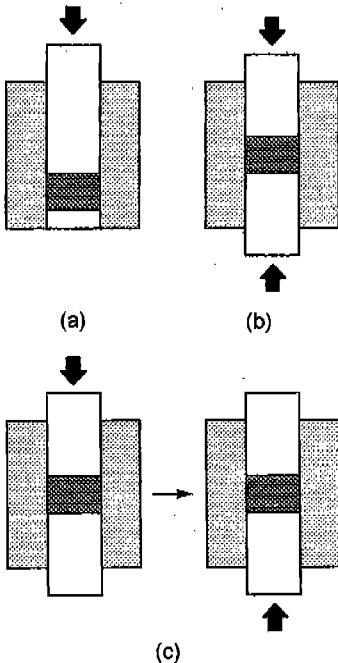


Fig. 1. Schematic diagram of various hot pressing processes. (a) Single action pressing, (b) double action pressing (c) 2 step pressing

탄성계수=960 MPa

항복응력=72 MPa

Poisson비=0.3

3. 실험결과 및 고찰

3.1. 분말과 고온압축재의 미세구조

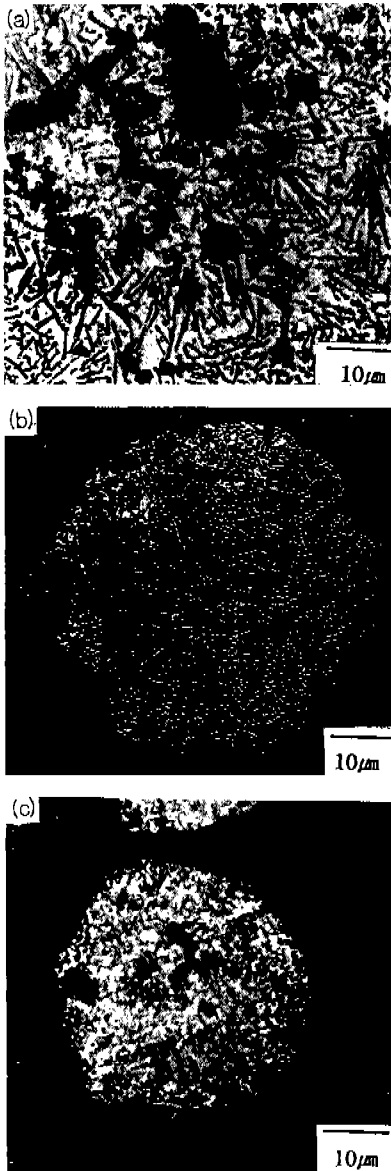


Fig. 2. Optical micrographs of gas atomized Al-18Si-5Fe-2Cr alloy powder with three different sizes: (a) 210~177 μm , (b) 90~74 μm , (c) 62~53 μm .

그림 2는 질소가스를 냉매로하여 급속응고 분무장치에 의해 제조한 Al-18Si-5Fe-2Cr합금분말 중 210~177, 90~74, 62~53 μm 의 분말을 채취한 후 연마한 다음 keller 시약으로 부식하여 관찰한 미세조직으로 α -Al, 조대한 초정 Si, 작은 크기의 공정 Si 및 침상형의 석출상으로 혼합되어 있음을 알 수 있다. 이것은 분말의 비표면적이 증가되어 냉각속도가 증가하였기 때문이며, 일반적으로 Al합금분말에서 분말크기가 150 μm 에서 50 μm 로 감소할 때 냉각속도는 2×10^4 에서 6×10^4 K/s로 증가한다고 알려져 있다.⁹⁾ 또한 분말의 크기가 감소할수록 구형의 형태를 유지하고 있는데 이것은 큰 입자일수록 응고시간이 많이 소요됨으로 구형으로의 복원력이 감소하며 표면 산화막의 두꺼운 형성으로 인하고, 또한 챔버내의 비행중에 액상이나 반액상태에서 다른 분말과의 충돌 등에 의해 불규칙한 형상을 나타낸다고 사료된다.

그림 3은 고온압축(Hot pressing)에 의한 압축재의 미세조직을 나타낸 것이다. 일반적으로 압축성형시에는 초정 Si과 금속간화합물이 심한 소성유동으로 인하여 작은 입자로 분쇄되어 균일한 분포가 형성된다.

3.2. 고온압축(hot pressing) 공정의 치밀화거동

그림 4의 (a), (b), (c)는 각 공정 즉, 일축압축(single action pressing), 2단압축(2 step pressing), 양축압축(double action pressing)시 변위(displacement) 변화에 따른 응력(stress)의 변화를 나타낸 것이다. 그림에서 볼 수 있듯이 변위가 증가함에 따라 완만하게 증가하다가 어느 부분의 변위가 되면 응력값이 급격하게 증

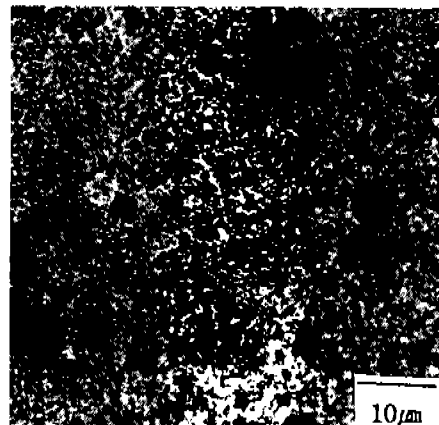


Fig. 3. Optical micrograph of hot pressed compact at 470 $^{\circ}\text{C}$.

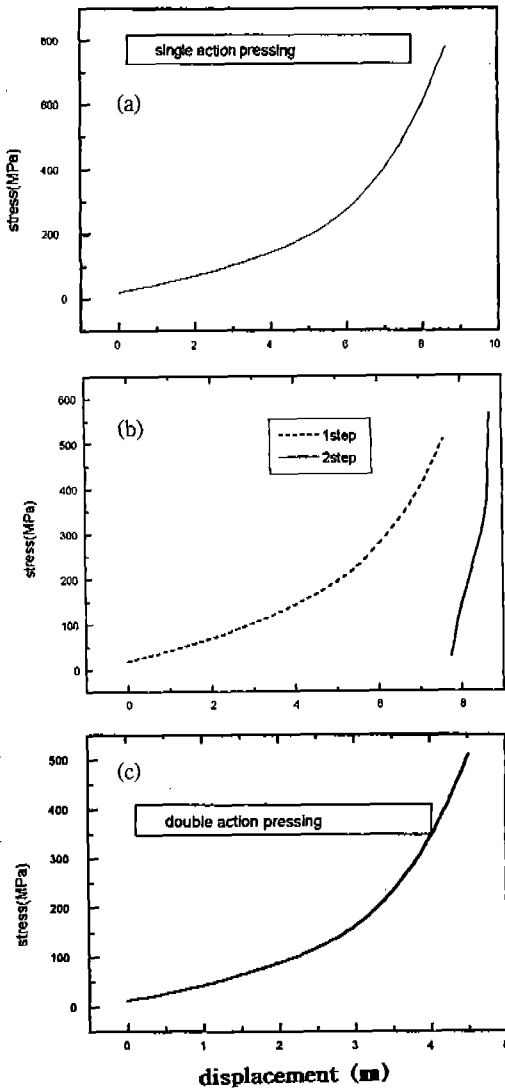


Fig. 4. Variation of stress with displacement during hot pressing. (a) Single action pressing, (b) 2 step pressing, (c) double action pressing.

가함을 볼 수 있다. 금속분말의 치밀화 단계는 크게 두 단계로 고려할 수 있다. 첫 번째 단계는 상대밀도가 대략 0.9이하인 경우의 치밀화 거동을 나타내며 이 범위에서는 주로 분말입자의 상호간의 접촉변형에 의하여 치밀화가 되는 단계이다. 이 단계에서 분말입자는 근접한 다른 입자들과 접촉면적을 넓혀가면서 치밀화가 진행되며 입자 사이의 기공들은 서로 연결되어 있는 구조를 가지고 있다. 그림에서 완만하게 응력값이 변하는 부분이 이 단계에 속한다. 두 번

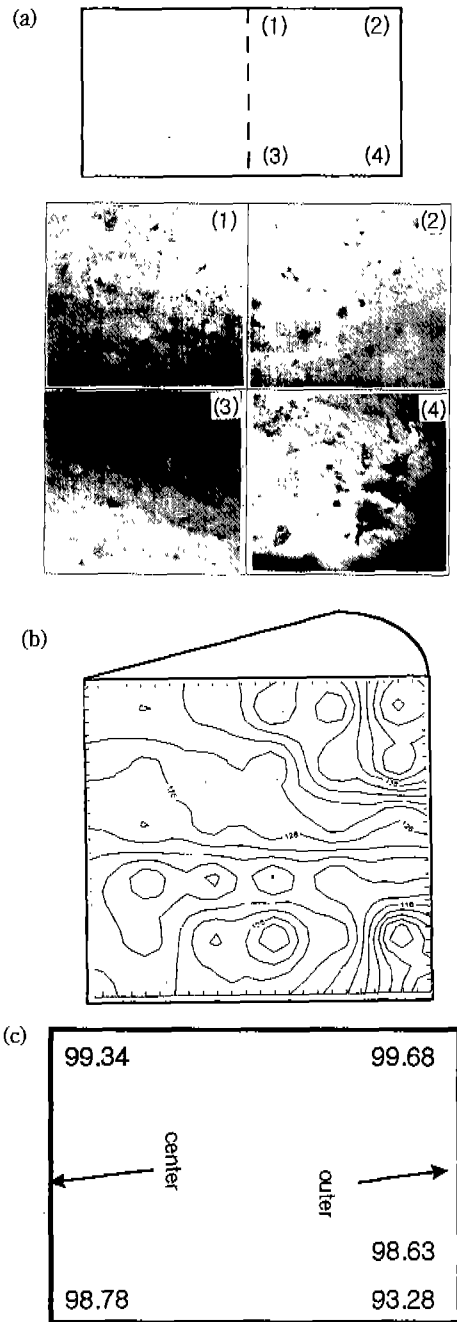


Fig. 5. (a) Pore, (b) hardness and (c) RD (Image analysis) distribution of single action pressed compact.

째 단계는 상대밀도가 0.9 이상인 경우의 치밀화 거동을 의미하며 분말입자가 심하게 변형됨에 따라 분말입자 사이의 기공은 고립되어 중공구와 같은 형태

로 변형되며 이러한 중공구의 수축에 따라 치밀화가 일어나는 단계이다. 그림에서 갑자기 응력값이 변하는 부분이 이 단계에 해당한다.¹⁰⁾

열간압축시 거의 전밀도가 될 때의 응력값은 일축 압축의 경우 779 MPa, 2단압축의 경우 565 MPa, 양축압축의 경우 509 MPa로 양축압축 공정이 제일 낮은 응력이 걸림을 알 수 있다.

3.2.1. 일축압축(single action pressing)의 치밀화 거동

그림 5의 맨 윗 그림은 치밀화거동을 관찰한 부분을 나타낸 것이고, 그림 5(a)는 470°C에서 일축압축에 의한 성형체의 시편의 단면을 절단하여 광학현미경으로 기공의 분포를 나타낸 것이고, 그림 5(b)는 비커스 경도기로 시편의 경도분포를 구한 것이다. 또 그림 5(c)는 Image analysis를 통하여 시편의 각 부분별 기공치를 나타낸 것이다. 그림 5(a)에서 압력의 영향을 가장 크게 받는 성형체 윗부분의 바깥부분에서는 금형과 성형체사이의 마찰의 영향에 의한 큰 전단응력에 의해 분말의 소성변형이 일어나 상대밀도가 가장 높음을 알 수 있다. 반면 성형체 밑부분의 바깥부분은 금형과의 마찰로 인하여 전단응력이 작용하지만 압력이 윗부분의 바깥부분보다 작게 받아 상대밀도가 가장 낮음을 알 수 있다. 또한 그림 5(b)에서 경도값도 성형체 윗부분의 바깥부분에서 가장 크며 밑부분의 바깥부분에서 가장 낮음을 알 수 있다. 그림 5(c)에서의 Image analysis에 의한 상대밀도 값은 윗부분의 바깥부분에서 99.68%, 밑부분의 바깥부분에서는 95%미만으로 상당히 낮음으로 실제 부품의

성형시 취약한 부분으로 남을 수 있다. 그림 6은 고온 일축압축에 의한 상대밀도분포의 유한요소 해석결과로서 실험값과 잘 일치함을 알 수 있다.

3.2.2. 2단압축(2 step pressing)의 치밀화 거동

일축압축한 성형체의 위부분의 바깥부분과 밑부분의 바깥부분의 밀도분포차가 매우 큼으로 이러한 문제점을 보완하기 위하여 1단(1 step)까지 압축한 다음 상대밀도가 낮은 밑부분에서 다시 압축하였다.

그림 7은 2단압축(2 step pressing)에 의한 성형체

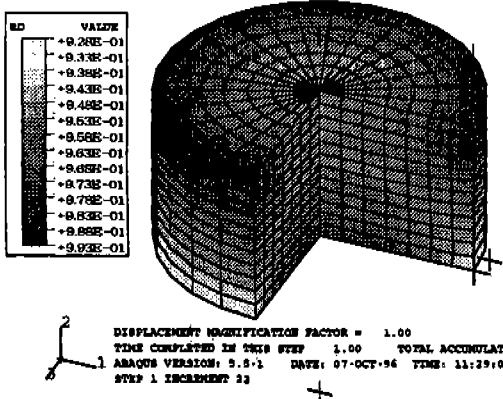
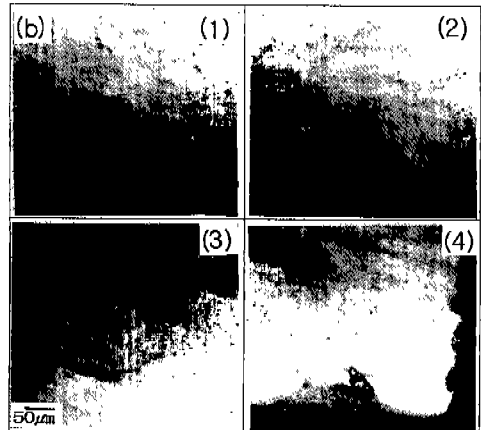
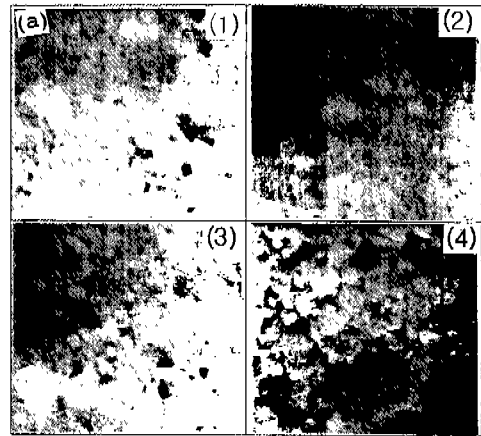
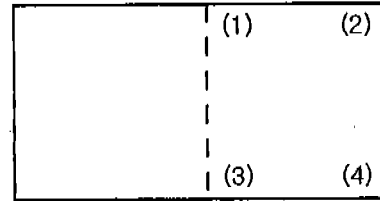


Fig. 6. Relative density distribution of single action pressed compact by computer simulation.

Fig. 7. Pore distribution of 2 step pressed compact: (a) 1 step and (b) 2 step.

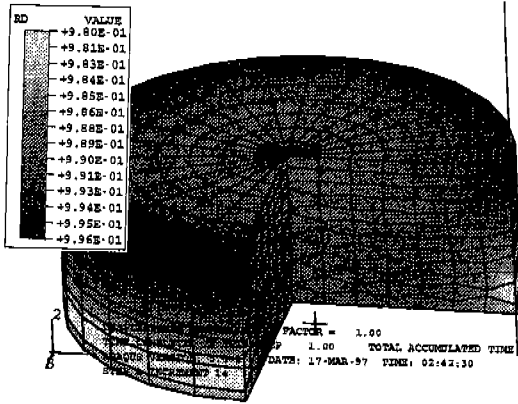


Fig. 8. Relative density distribution of 2 step pressed compact by computer simulation.

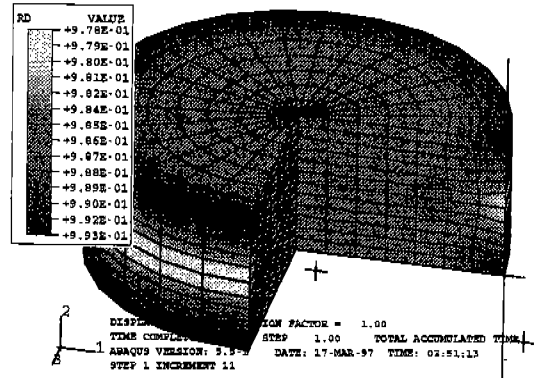


Fig. 10. Relative density distribution of double action pressed compact by computer simulation.

의 OM사진으로서 그림 7(a)은 1 step, 그림 7(b)은 2 step 압축시의 기공분포를 나타낸 것이다. 그림 7에서 볼 수 있듯이 1 step에서 2 step으로 진행됨에 따라 전체적인 성형체의 상대밀도는 높아지고 있음을 볼 수 있으며, 일축압축에서의 밀부분의 바깥부분에서 상대밀도가 현저하게 낮은 값을 가지는데 반하여 2단압축에서의 성형체는 전체적으로 균일한 상대밀

도 분포를 나타내고 있음을 알 수 있다. 그림 8은 2단 압축에 의한 유한요소해석결과로서 전체적으로 상대 밀도가 균일하게 나타남을 알 수 있다. 이러한 균일한 상대밀도는 실제부품의 성형시 기계적성질이 우수할 것으로 사료된다.

3.2.3. 양축압축(double action pressing)의 치밀화 거동

그림 9는 양방향에서 동시에 압축을 가하는 공정 즉, 양축압축(double action pressing)에 의한 OM 사진으로 기공의 분포를 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 성형체가 전체적으로 거의 진밀도에 가깝게 나타나고 있으며, 모든 부분에서 균일한 상대밀도 분포를 나타내고 있음을 알 수 있다. 그림 10은 양축 압축에 의한 성형체의 상대밀도분포를 유한요소해석한 결과로서 성형체의 중앙 바깥부분에서 상대밀도가 가장 낮으며, 윗부분과 아래부분의 바깥부분에서 상대밀도가 가장 높고 상대밀도의 차이는 일축압축에 의한 상대밀도 차이보다 상당히 작음을 알 수 있다.

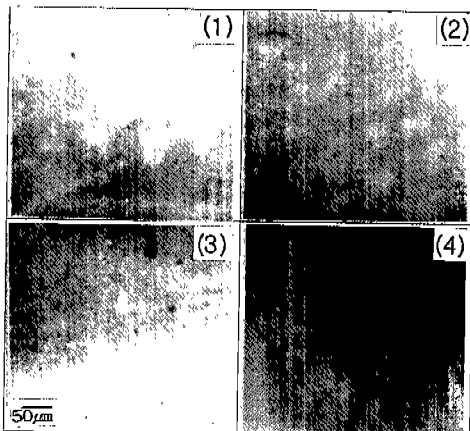
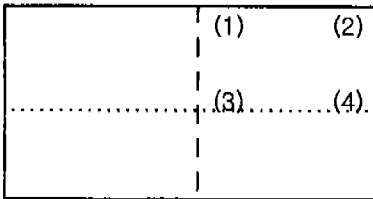


Fig. 9. Pore distribution of double action pressed compact.

4. 결 론

금속용고 Al-18Si-5Fe-2Cr합금의 일축압축, 2단압축, 양축압축의 공정의 치밀화 거동과 정수압을 고려한 다공성 금속의 소성이론을 바탕으로 탄소성 유한요소법으로 해석한 결론은 다음과 같다.

1. 분말의 입자크기가 감소할수록 초정 Si과 침상형의 석출물이 미세하게 분포되어 있으며 고온압축한 성형체의 조직은 미세하게 분포됨을 알 수 있다.

2. 2단압축과 양축압축이 일축압축보다 압축시 응력이 적게들며 특히, 양축 압축이 가장 낮은 응력이 든다.

3. 일축압축의 경우 성형체 내의 상대밀도 분포 차이가 매우 크나 2단압축과 양축압축을 행할 경우 균일한 상대밀도 분포를 얻을 수 있다.

4. 실험결과와 유한요소법에 의한 계산결과가 잘 일치하며, 정확한 실험자료와 분말재의 소성향복식을 이용하여 기공을 포함한 급속응고 분말금속의 압축공정을 이론적으로 모사할 수 있다.

참 고 문 헌

1. G. Thomas and R. H. Willens; *Acta Metall.*, **12** (1964) 191.
2. M. C. Flemings: *Solidification Processing*, McGraw-Hill inc.
3. M. J. Aziz: *J. Appl. Phys.* **53** (1982) 1158.
4. Hibbit, Karlsson and Sorensen, Inc.: *ABAQUS User's Manual* (1994).
5. V. Tvergaard: *Int. J. Fracture.* **18** (1982) 237.
6. S. M. Doraiavelu, H. L. Gegel, J. S. Gunasekera, J. C. Malas, J. T. Morgan, and J. F. Thomas: *Int. J. Mech. Sci.* **26** (1984) 527.
7. D. N. Lee and H. S. Kim: *Powder Metall.* **35** (1992) 275.
8. A. L. Gurson: *J. Eng. Mater. Tech.*, **99** (1977) 2465.
9. Y. Odani and K. Akechi: *Metal Powder Report* (1983) 186.
10. Ashby, M. F., University of Cambridge Engineering Department, Trumpington St., Cambridge CB2 1PZ, U.K (1990).