

급속응고 Al-Si-Fe 합금의 압출거동 및 유한요소 해석

정기승 · 손현택 · 김택수 · 천병선
충남대학교 급속응고 신소재연구소

Extrusion Behavior and Finite Element Analysis of Rapidly Solidified Al-Si-Fe Alloys

Ki-Seung Joung, Hyeon-Taek Son, Taek-Soo Kim and Byong-Sun Chun
Rapidly Solidified Materials Research Center, Chungnam National University,
Yuseong, Taejon 305-764, Korea
(Received January 9, 1999)

Abstract The plastic deformation behaviors for powder extrusion of rapidly solidified Al-Si-Fe alloys at high temperature were investigated. During extrusion of Al-Si-Fe alloys, primary Si and intermetallic compound in matrix are broken finely. Additionally, during extrusion metastable δ phase(Al_4SiFe_2) intermetallic compound disappears and the equilibrium β phase(Al_5FeSi_2) is formed. In general, it was difficult to establish optimum process variables for extrusion condition through experimentation, because this was costly and time-consuming. In this paper, in order to overcome these problems, we compared the experimental result to the finite element analysis for extrusion behaviors of rapidly solidified Al-Si-Fe alloys. This information is expected to assist in improving rapidly solidified Al-Si alloys extrusion operations.

1. 서 론

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 Al 합금을 일반 주조법으로 제조하면 초정 Si의 조대화로 인해 가공성이 저하되며 초정 Si를 미세화시키기 위해 P, Na, Sr, Ni 등을 첨가시켜도 미세화에 한계가 있으므로 가공성의 개선이 어렵다. 또한, 기존의 주조법으로는 Fe, Mn 등의 고용도가 낮아 다량의 Fe 및 Mn의 첨가가 어렵기 때문에 급속응고 분말제조법으로 초정 Si 입자의 미세화 및 균일분포를 기대할 수 있다. 또한 Fe 첨가시 고온에서 안정한

침상형의 δ - Al_4SiFe_2 상의 금속간화합물이 형성되어 고온강도 및 내열성을 향상시킬 수 있다. 특히, 급속응고 Al-Si-Fe 합금을 분말압출시 큰 소성유동으로 인하여 초정 Si 및 정출상을 미세화시킬 수 있는 장점을 가지고 있다.

이와 같은 분말성형의 가장 일반적인 성형방법인 분말의 압출 기술은 가해진 전단응력에 의한 소성변형을 포함한다. 분말압출은 분말 입자표면의 산화층이 파괴되고, 분말입자가 기계적으로 결합하는 성형 방법이며,⁴⁾ 단일공정에 의해 이론밀도까지 성형이 가능하고 고온등압성형법(HIP)보다 낮은 성형온도에서 완전한 치밀화가 가능하므로 분말을 성형하였을 경우, 우수한 기계적 성질을 나타낼 뿐만 아니라 대량 생산에 더 유리한 잇점이 있다. 분말압출에 영향을 미치는 요인으로서는 합금조성, 금형구조, 압출온도, 압출압력, 압출속도 등을 들 수 있고, 이 소재가 분말재이므로 기공의 치밀화와 입자의 조밀화 및 성형이 동시에 이루어지기 때문에 응력분포에 따른 밀도분포가 최종제품에 결정적인 영향을 미친다. 따라서 공

정중의 정확한 밀도 분포와 응력해석이 필수적이다.

따라서, 본 연구에서는 Al-Si-Fe 합금 분말을 열간 압출하여 봉상의 형태로 제조하고, 압출시의 소성유동 거동과 미세조직 미세화 거동에 대해 검토하였다.

2. 실험방법

Al, Si, Fe를 Al-20 wt.%Si-5wt.%Fe의 목표조성에 맞도록 고주파유도로의 흑연도가니에 장입하여 대기 중에서 용해시키고, 탈가스제를 첨가한 후 용탕을 텀퍼에 장입하여 가스를 분사시켜 분말을 제조하였다. 이때 사용된 가스는 불활성 N₂ 가스를 사용하였다. 분말의 미세조직은 분말을 Keller 시약으로 부식시킨 후, 광학현미경(Olympus PME-3)으로 관찰하였다. 제조된 분말은 6061 알루미늄합금으로 제작된 캔에 장입하여 150톤 프레스를 사용하여 상대밀도가 약 75%가 되도록 냉간압분한 후, 673 K에서 1시간 동안 탈가스 처리를 한 후 밀봉하였다. 압출은 탈가스와 동일한 조건으로 예열한 후 350톤의 수평형 압출기를 사용하여 컨테이너 온도를 673 K, 압출비를 23:1, 램 스피드를 60 mm/sec, 압출다이각을 2θ=120°로 하여 열간압출 하였다. 또한 분말과 압출재의 미세조직의 상분석을 위해 XRD 분석을 행하였다. 특히, 압출성형시 분말의 소성유동 및 금속간화합물의 변형을 관찰하기 위하여 성형공정이 반 정도 진행되었을 때 이를 중지하고, 압출된 부분과 아직 성형이 이루어지지 않은 나머지 부분을 압출방향에 수직하게 잘라 연마한 후 거시 조직 및 미세 조직을 관찰하였다. 또한 압출시에 발생하는 소성유동, 상대밀도분포, 응력분포는 상용 유한요소 프로그램인 DEFORM을 사용하여 해석하였다.

일반적으로 다공질 금속의 항복함수는 전단변형과 부피변형항을 모두 포함하는 다음과 같은 식을 갖는다.

$$AJ_2' + BJ_2^2 = Y_R^2 = \delta Y_0^2 \quad (1)$$

A, B와 δ는 상대밀도의 함수로 표시되고 J₂'은 편차 응력의 제 2불변량이며, J₁은 응력의 제 1불변량이다. 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.

여기서

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

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

많은 연구자가 A, B, δ를 상대밀도 R로 관계를 맺으려는 연구가 많이 진행되고 있으며,⁵⁻⁷⁾ Shima와 Oyane⁸⁾는 다음과 같은 식에 의해 항복함수를 제한하였으며, 본 계산에서도 아래의 Shima와 Oyane 모델을 사용하였다.

$$F = J_2' + \frac{2.49^2}{27} (1 - R)^{1.028} J_1' - \frac{Y_0^2}{3} R^5 \quad (4)$$

여기서, F는 항복함수이다.

또한, 이때 실험결과와의 비교를 위하여 가스분무법으로 급속응고된 Al-20Si-5Fe 합금의 기계적 성질을 측정하여 사용하였으며 측정된 값은 아래와 같다.

- 유동곡선 σ=355.3E^{0.126}
- 탄성계수=3420 MPa
- 항복응력=171 MPa
- Poisson 비=0.3
- 램 스피드=60 mm/sec
- 압출비=23:1
- 초기 상대밀도=0.75

3. 결과 및 고찰

그림 1은 Al-20Si-5Fe 합금분말의 미세조직으로 과공정 Al-Si-Fe 합금의 대표적인 조직인 구형의 초정 Si 및 비평형상으로 존재하는 침상형의 δ-Al₄FeSi₂가 생성되어 분포됨을 알 수 있다. 이 조직에서 초정 Si와 δ-Al₄FeSi₂ 금속간화합물을 제외한 흰 부분은 Al 기지이며, 회색의 점들이 연결되어 있는 것처럼 나타나는 조직은 공정 Si이다. 이때 초정 실리콘의 크기는 평균 8 μm이고, 침상형의 금속간화합물의 크기는 침상형의 길이방향으로 평균 33 μm를 나타내고 있다.

그림 2는 램 속도 60 mm/sec, 압출비 23:1, 압출 온도 673 K에서 압출시의 압출시간에 따른 압출압력 곡선으로 처음 압출이 시작될 압력이 증가되고, 분말 압분체가 다이 밖으로 빠져 나오게 되면 압출압력이

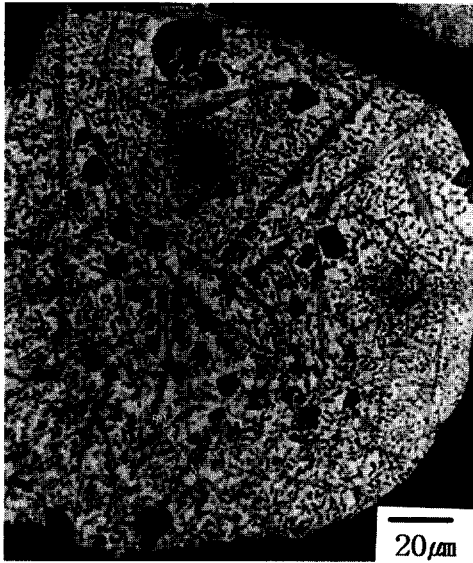


Fig. 1. Optical micrograph of gas atomized Al-20Si-5Fe alloy powder.

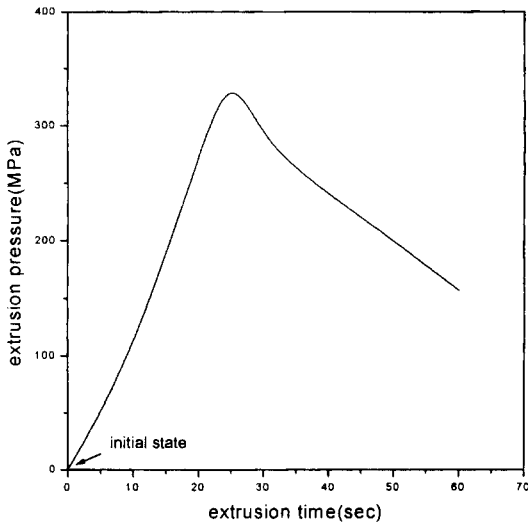


Fig. 2. Extrusion pressure curve during powder extrusion.

감소됨을 관찰할 수 있었다. 초기에 압출압력이 증가하는 것은 압분체가 다이와의 마찰에 의한 압력의 증가와 분말 압분체의 치밀화에 따른 압력의 증가로 사료된다.

그림 3은 압출과정 중 컨테이너 빌렛부분을 꺼내어 축방향으로 절단하여 각 부분의 마크로 조직을 광학현미경으로 관찰한 것이다. 초기 상대밀도 0.75에

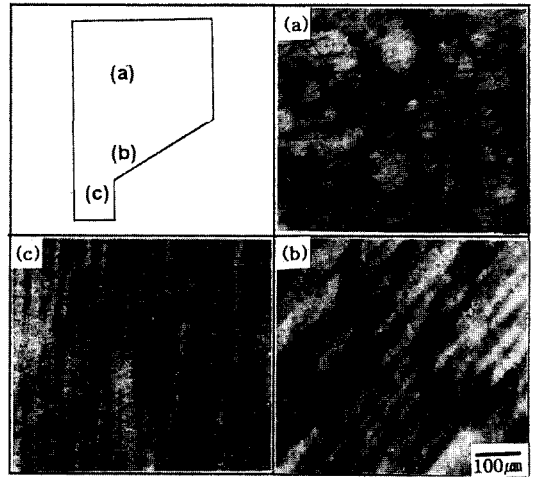


Fig. 3. Macrostructure for metal flow of rapidly solidified Al-20Si-Fe extrudate.

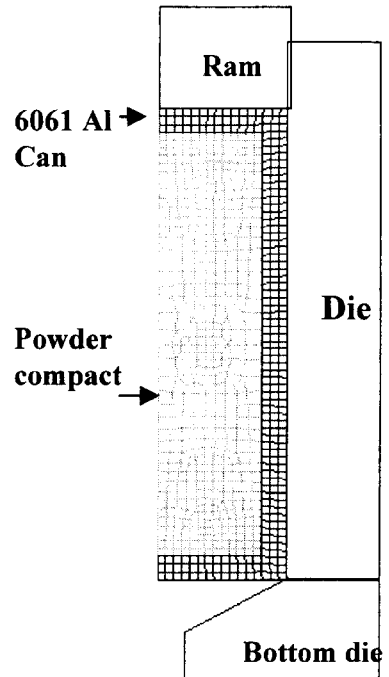


Fig. 4. Initial mesh of rapidly solidified Al-Si-Fe extrudate by finite element method.

서 시간이 지남에 따라 다이의 각진 부분과 시편 중심부를 중심으로 치밀화가 진행되어 감을 알 수 있다. 그림의 가운데 밑부분 (a)는 압출되기 전에 분말의 형태를 그대로 간직하고 있고, 오른쪽 밑부분 (b)

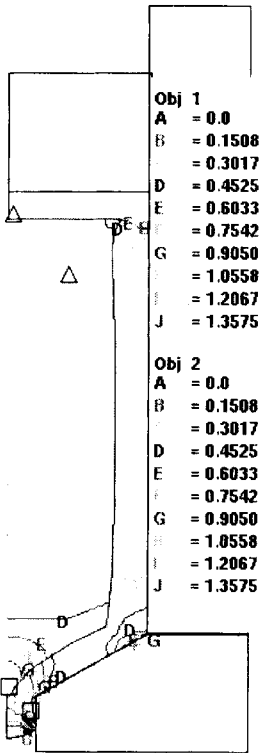


Fig. 5. Effective strain distribution of rapidly solidified Al-20Si-Fe extrudate by finite element method.

는 압출다이 부분에 재료가 접근하면서 다이와의 전단응력에 의해 심한 소성변형으로 인해 분말의 형태가 압착되는 것을 관찰할 수 있고, 압출에 의해 빠져나온 부분 (c)는 다이 부분에서의 큰 변형과 23:1의 압출비로 인해 기공이 거의 없어지고, 분말표면의 산화막이 깨어져 분말의 형상이 압출방향으로 방향성을 갖는 소성유동현상을 볼 수 있다.

그림 4는 분말압출의 유한요소해석을 위한 초기요소망을 나타낸 그림이다. 축대칭을 고려하여 1/2만을 계산하였다.

기공의 압착은 분말압출공정에서 치밀화를 말하므로 치밀화와 유효변형률은 밀접한 관계가 있음을 알 수 있다. 그림 5는 압출시의 캔과 분말압분체의 유효변형률 분포를 나타낸 것이다. 다이 입구를 통과하는 빌렛의 중심부와 다이 입구를 중심으로 가장 큰 변형률이 발생하는데, 이는 그림 3의 빌렛이 치밀화되는 양상과 같은 분포임을 알 수 있다.

그림 6은 분말압출시의 상대밀도분포를 나타낸 것

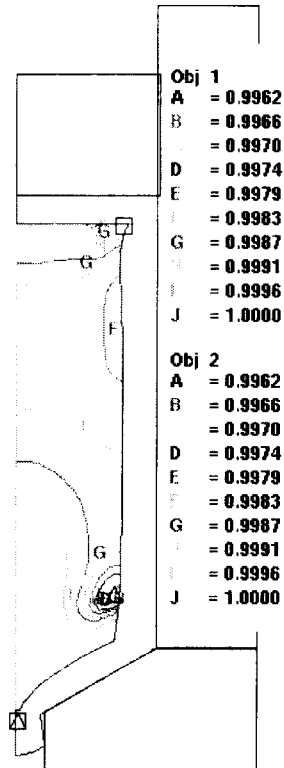


Fig. 6. Relative density distribution of rapidly solidified Al-20Si-Fe extrudate by finite element method.

이다. 초기밀도 0.75에서 시간이 지남에 따라 다이의 각진 부분과 시편 중심부를 중심으로 치밀화가 진행되어 감을 알 수 있다. 상대밀도 분포 곡선에서 알 수 있듯이 압분체 시편과 램, 다이와의 마찰로 인한 국부적인 밀도 불균일 현상을 제외한 모든 부분에서 거의 진밀도에 이르렀음을 알 수 있고, 분말의 치밀화는 다이안에서 이미 완료되어 다이 밖으로 빠져나옴을 예측할 수 있다.

그림 7은 압출성형시 초정 Si 및 금속간화합물이 변형되는 거동을 직접 관찰하기 위하여 압출성형 중인 압분체의 단면을 관찰한 것이다. 그림 7의 (a)는 다이와의 접촉이 거의 일어나지 않아 소성변형이 거의 이루어지지 않은 부분으로 분말형상이 그대로 유지되어 있는 것을 볼 수 있다. 그림 7의 (b)는 다이와의 마찰에 의한 전단응력의 발생으로 분말입자간의 접합이 이루어지고, 분말입자들이 압출방향으로 연신되는 과정에서 큰 소성변형과 정출상간에 충돌이 일어남으로써 서로 분쇄되는 것을 확인할 수 있었다.

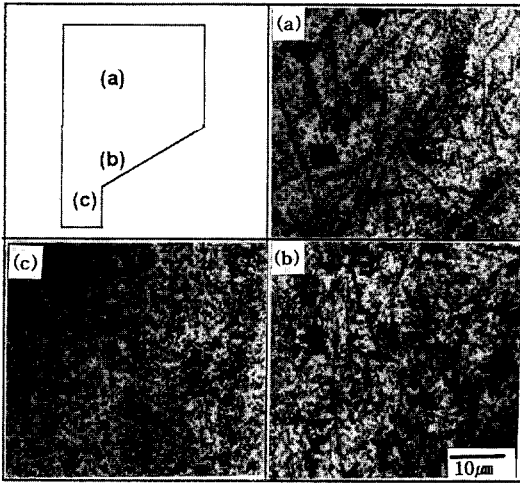


Fig. 7. Microstructure of rapidly solidified Al-20Si-Fe extrudate during powder extrusion.

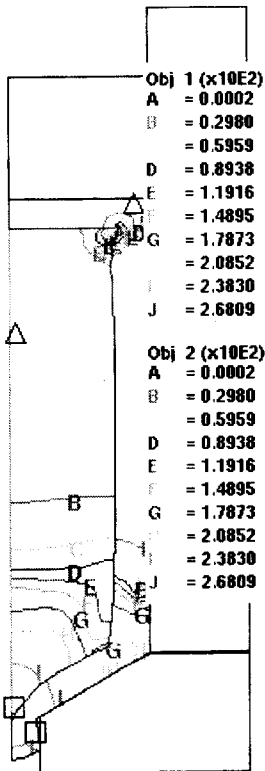


Fig. 8. Effective stress distribution of rapidly solidified Al-20Si-Fe extrudate by finite element method.

최종적으로 성형다이를 통과하여 압출재로 제조되어 나오는 그림 7(c)에서는 초정 Si는 5 μm 이하의 크기

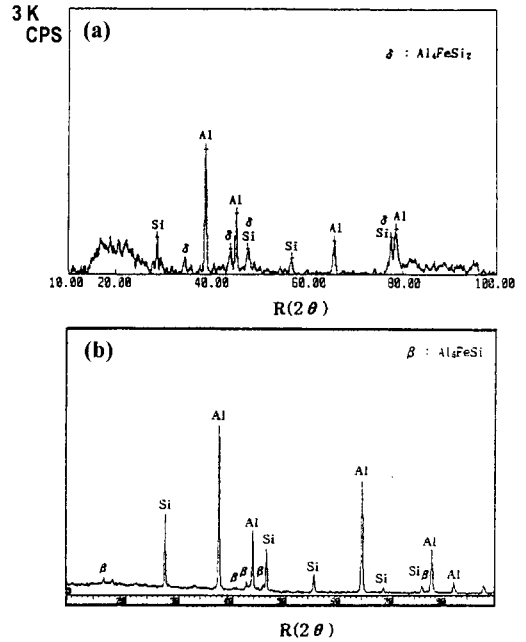


Fig. 9. XRD analysis of Al-20Si-5Fe alloy; (a) powder, (b) extrudate.

로, 금속간화합물은 공정 Si와 구별할 수 없을 정도로 파괴되어 미세하게 분산된 것을 볼 수 있다. 위와 같이 압출성형시 초정 Si와 금속간화합물은 큰 소성 유동에 의해 미세하게 분쇄되어지나 초정 Si보다 금속간화합물의 미세화 효과가 더 큼을 알 수 있다. 이러한 압출성형시의 금속간화합물의 파괴에 의한 미세한 분산은 기지 강화에 큰 효과를 가져올 것으로 기대된다.

그림 8은 분말압출시의 유효 응력 분포를 나타낸 것으로 압분체가 다이 밖으로 빠져 나올 때 238 MPa의 응력이 발생함을 볼 수 있다. 다이 입구를 중심으로 가장 큰 응력이 발생하는데, 그림 7(b), 각진 다이 부분의 주위에서 금속간화합물의 파괴와 비교해 볼 때, 금속간화합물의 파괴는 약 150 MPa 이상이 되어야 함을 예측할 수 있다.

그림 9는 Al-20Si-5Fe 합금분말과 압출재의 X-ray 회절도형으로 분말(그림 (a))의 경우 Al, Si 및 비평형 상인 δ-Al₄FeSi₂ 상이 나타남을 확인할 수 있고, 압출재(그림 (b))의 경우 탈가스 온도 및 열간 압출에 의해 δ-Al₄FeSi₂ 상이 안정상인 β-Al₃FeSi 상으로 변화됨을 알 수 있다.

4. 결 론

급속응고 Al-20Si-5Fe 합금의 일축압축, 압출거동과 정수압을 고려한 다공성 금속의 소성이론을 바탕으로 유한요소법으로 해석한 결론은 다음과 같다.

1. 급속응고 Al-20Si-5Fe 합금 분말은 탈가스 온도 및 열간 압출에 의해 $\delta\text{-Al}_4\text{FeSi}_2$ 상이 안정상인 $\delta\text{-Al}_5\text{FeSi}$ 상으로 변화 됨을 알 수 있다.
2. 급속응고 분말 압출 가공 중 압출재는 압출 초기에 이미 치밀화가 완성됨을 알 수 있다.
3. 분말압출시 큰 소성유동이 발생하는 다이 입구 부분 주위에서 초정 Si 및 급속산화합물이 파쇄되고, 균일하게 분포하여 기계적 성질이 크게 향상될 것으로 기대된다.
4. 실험결과와 유한요소법에 의한 계산결과가 잘 일치하며, 정확한 실험자료와 분말재의 소성항복식을 이용하여 기공을 포함한 급속응고 분말금속의 압출공정을 이론적으로 모사할 수 있다.

본 논문을 문인형 교수님의 회갑을 기념하여
봉정합니다.

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. M. A. Zaidi and T. Sheppard: *Powder Metall.*, **27** (1984) 22.
5. V. Tvergaard: *Int. J. Fracture.*, **18** (1982) 237.
6. S. M. Doraivelu, 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. S. Shima and M. Oyane: *Int. J. Mech. Sci.*, **18** (1976) 285.