

분무성형을 통해 제조된 과공정 Al-Si 합금의 기계적 특성

박우진* · 하태권** · 안상호* · 장영원**

Deformation Behavior of Spray-formed Hypereutectic Al-Si Alloys

W. J. Park, T. K. Ha, S. Ahn, and Y. W. Chang

Abstract

Hypereutectic Al-25Si-X alloys, expected to be applied to the cylinder-liner-part of the engine-block of an automobile due to the excellent wear resistance, low density and low thermal expansion coefficient, has been fabricated through a spray forming process. The obtained microstructure of the hypereutectic Al-25Si-X alloy appeared to consist of Al matrix and equiaxed Si particles of average diameter of 5-7 μm . To characterize the deformation behavior of this alloy, a series of load relaxation and compression tests have been conducted at temperatures ranging from RT to 500°C. The strain rate sensitivity parameter (m) of this alloy has been found to be very low (0.1) below 400°C and reached 0.2 at 500°C. During the deformation above 300°C in compression, strain softening has been observed. The diagram of extrusion pressure vs. ram-speed has been constructed, providing the extrusion condition of Al-25Si-X alloys.

Key Words : Spray Forming, Non-Hardening Behavior, Extrusion, Compression, Al-25Si-X Alloy

1. 서 론

자동차 등의 운송기기에 대한 연비절감 연구가 전세계적으로 활발하게 진행되고 있다. 이는 유가의 급등과 화석연료의 고갈 위험 등으로 인한 것으로, 이러한 연비절감연구는 크게 차체구조의 경량화와 엔진효율의 향상을 위한 연구로 대별된다. 특히 자동차의 엔진효율 향상은 엔진실린더의 고효율화와 밀접히 관련되어 있다. 이러한 면에서 자동차 주행시 피스톤과 직접 접촉하는 실린더

라이너 특성은 엔진성능 향상에 있어서 매우 중요한 부분으로 인식되고 있으며, 따라서 실린더 라이너용 소재의 선정이 특히 중요하다 할 수 있다.

엔진작동 시 피스톤과 직접 접촉하는 실린더 라이너에 적합한 소재는 윤활성 및 내마모성이 우수하여야 하며, 동시에 우수한 내열특성을 겸비한 경량합금이어야 한다. 종래에는 주철재 등이 주로 사용되어 왔으나, 최근 들어 과공정 Al-Si-X 합금을 실린더 라이너에 적용하고자 하는 응용연구가 활발히 진행되고 있다. 과공정 Al-Si

* 포항산업과학연구원

** 포항공대 항공재료연구소

-X 합금은 내마모성 및 윤활성이 우수할 뿐만 아니라 비중과 열팽창계수가 작고 뛰어난 주조성으로 인한 저렴한 제조단가로 인해 탁월한 실린더 라이너용 소재로 주목 받고 있다. 실제로 독일의 벤츠사는 PEAK과 공동으로 개발한 과공정 Al-Si-X 합금을 자사의 승용차에 실린더 라이너용 소재로 채택하기에 이르렀으며, 국내의 경우 대우자동차를 비롯한 유수의 자동차 생산업체에서도 Al-Si-X 합금을 실린더 라이너로 이용하고자 하는 연구를 활발히 진행하고 있다.

과공정 Al-Si-X 합금을 분무성형을 통해 제조하면 Si 입자를 미세조직내에 균일하게 분산시킬 수 있어서 우수한 합금제조가 가능하다. 또한 내열성을 향상시키기 위해 첨가하는 천이금속(TM: transition metal)은 일반 주조시에 매우 조대한 금속간 화합물을 형성하지만, 분무성형시에는 이러한 금속간 화합물 역시 물성향상에 유리한 방향으로 그 형상 및 분포를 조절할 수 있다.

본 연구에서는 분무주조 공정을 통해 과공정 조성인 Al-25Si 합금 및 Al-25Si-5Fe 합금을 제조하고 이 합금들이 실린더 라이너 용으로 적용되기 위해 필수적으로 거쳐야 하는 가공공정인 압출조건을 도출하는 것을 목표로 하였다. 이를 위해 상온에서 500°C까지의 온도범위에서 변형을 속도를 변화시켜 가며 압축시험을 행함으로써 온도 및 변형 속도에 따른 항복강도의 변화를 측정하였다. 이를 통해 분무주조 과공정 Al-Si-X 합금의 압출 가능 온도범위 및 기준 압출속도 조건을 도출하고자 하였다.

2. 실험방법

2.1 빌렛제조

본 연구에서는 과공정 Al-25Si 및 Al-25Si-5Fe 합금을 분무성형법으로 제조하였다. 그림1에 나타낸 바와 같이 합금 빌렛 제조에 사용된 분무성형장치에는 왕복주기 운동할 수 있도록 고안된 가스분사노즐과 회전 및 상하 이동이 가능한 기판이 장착되어 있다. 위 아래의 직경이 일정한 끝은 빌렛을 제조하기 위해서는 액적의 적층위치가 기판의 중심으로부터 적당히 벗어나야하며, 또한, 스펬범위(span)내에서 균일한 액적분포를 얻기 위해서는 span의 안쪽보다 바깥쪽에 spray cone이 더 오랫동안 머무르도록 cam 운동이 제어되어야 한다. 이와 같은 방법으로 빌렛을 제조하면 단위시간당 기판 위에 적층되는 액적의 분포를 일정하게 제어할 수 있지만, 빌렛 내부의 불균일한 온도분포는 피할 수 없으며 이때 초래되는 빌렛 내부의 온도분포는 표면에서부터 내부로 갈수록 증가

하는 경향을 보인다. 본 연구에서는 빌렛 제조를 위한 주요 공정변수로 용탕온도와 가스노즐/기판간 거리는 각각 850°C 그리고 570mm로 조절되었다.

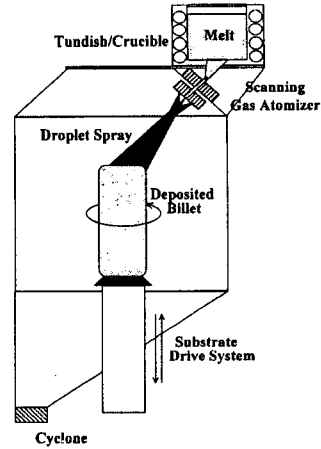


Fig. 1 Schematics of spray forming process.

2.2 열간 압출조건 도출

분무주조 빌렛의 열간 성형성 및 열간 성형조직을 평가하기 위해 소형 분무성형 빌렛의 중심부에서 80mm 직경을 갖는 봉상시편을 채취하여 이로부터 고온 용력이 완 및 압축시험을 위한 시험편을 제작하고 또한 열간 봉상압출을 실시하였다. 인장 및 압축 시험용 시편의 규격은 각각 3mm×4mm×27mm와 4mm×4mm×6mm이었다. 압축시험 결과를 이용하여 열간 압출시에 필요한 온도별 압출압력-압출속도 관계를 얻어 실제 압출에 적용하였다.

2.3 미세조직 관찰

광학 현미경과 주사전자 현미경을 이용하여 분무성형 빌렛, 압출재의 미세조직을 관찰하였다. 분무성형 빌렛의 미세조직을 관찰하기 위해 빌렛의 중심부를 상하방향으로 절단한 후 그 절단면의 중심부와 측면 가장자리에서 시편을 채취하였으며, 부위별 밀도를 측정하였다. 현미경 시편은 연마된 표면을 불산용액으로 부식시켜 관찰하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 분무성형 빌렛

그림 2에 본 연구에서 분무성형을 통해 제조한 직경 180 mm 빌렛의 형상과 밀도분포를 나타내었다. 빌렛의

하단부에 약간의 기공이 관찰되나 중단 및 상단부는 99% 정도의 밀도를 보이는 건전한 성형체임을 확인 할 수 있었다. 변형특성 및 압출조건 도출을 위한 기계적 시험용 시험편들은 그림 2(a)에 표시된 부분에서 채취하였다. 그림 3은 분무성형 빌렛의 광학 미세조직을 나타낸 것으로 비교를 위해 일반적인 주조법으로 제조된 같은 조성의 합금의 미세조직을 함께 나타내었다. 앞서 언급한 바와 같이 주조법으로 제조된 과공정합금의 경우에는 조대한 초정 Si 입자와 금속간 화합물이 관찰되나 분무성형 합금의 경우에는 균일한 Si 입자들과 필름형태의 금속간 화합물이 관찰된다.

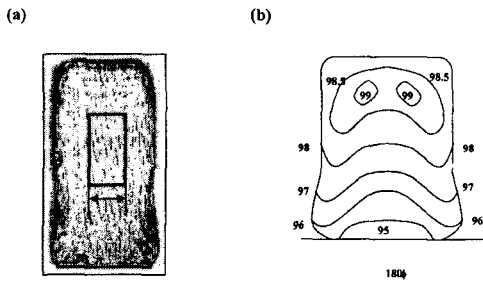


Fig. 2 The appearance (a) and density distribution (a) of the spray-formed billet

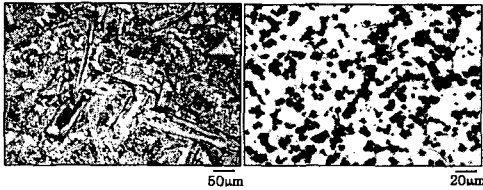


Fig. 3 Typical microstructures of Al-25Si alloys produced by IM (a) and spray forming (a)

3.3 압축시험 결과

그림 4는 상온에서 500°C의 온도 범위에서 행한 압축 시험 결과의 일부분을 나타낸 것이다. 흥미로운 것은 분무성형 과공정 Al-25Si 합금은 상온에서도 가공경화가 거의 없으며 온도가 올라감에 따라, 그리고 변형속도가 느려짐에 따라 가공연화의 경향이 관찰된다는 것이다. 압축시험 결과를 이용하여 구한 변형률 속도 민감도 계수 값을 그림 5에 도시하였다.

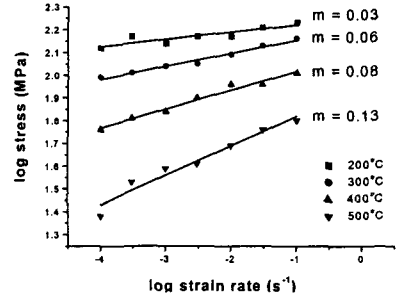


Fig. 4 True stress-true strain curves obtained from compression tests

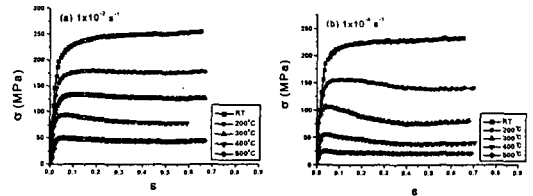


Fig. 5 Strain rate sensitivities estimated from compression test results

3.4 압출조건 도출

분무성형 과공정 Al-25Si 합금과 같이 가공경화가 거의 없는 재료에 적용할 수 있는 압출압력(P_e)-압출속도(V_e) 관계식이 Johnson에 의해 다음과 같이 제안된 바 있다.

$$P_e = \sigma_y (A + B \ln r) \quad (1)$$

$$V_e = \frac{\dot{\epsilon} D}{6 \ln r \tan \theta} \quad (2)$$

여기서 σ_y (MPa)는 재료의 항복응력, r 은 압출비, D 는 압출빌렛의 초기 직경, θ 는 압출다이의 경사각을 의미하며 압출속도는 mm/s로 표시된다. 재료상수인 A 와 B 는 본 연구에서와 같이 가공경화가 없는 재료에 대해서 각각 0.8과 1.5로 알려져 있다. 이상의 식 (1)과 식 (2)를 이용하여 구한 압력-속도 관계를 그림 6에 도시하였다. 그림에서 $P_{e,max}$ 로 표시된 선은 본 연구에서 사용한 압출기의 최대 용량을 나타내고 그 아래의 영역이 압출 가능한 공정조건을 의미하게 된다. 통상적인 압출속도를 1~

10mm로 할 때, 압출비 28의 경우에는 200℃ 그리고 압출비 40의 경우에는 300℃부터 압출이 가능함을 알 수 있다. 본 연구에서는 실제로 300℃ 이상의 온도에서 압출비 28 및 40의 조건으로 건전한 압출체를 얻을 수 있었다. 압출비 28, 압출온도 400℃로 압출한 후 Si 입자의 분포는 균일하지만 크기가 약 2 μ m 정도로 미세화 되었음을 알 수 있었다. 그림 7에 보인 바와같이 압출 후에는 인장강도 및 연신율이 현저하게 향상되는 것을 볼 수 있는데 이는 압출 시에 입자와 모재사이의 계면이 밀착되어 파단에 대한 저항성이 증가하기 때문이다.

천이금속을 첨가한 과공정 Al-25Si-5Fe 합금에 대해서도 압축시험을 통해 압출조건을 도출한 결과 모재(matrix)의 강도향상에 의한 압출압력이 급격히 증가하는 것으로 나타났다.

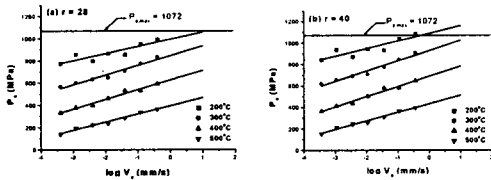


Fig. 6 Extrusion pressure-extrusion velocity relations

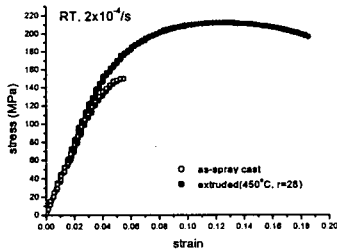


Fig. 7 Tensile test results before and after extrusion

4. 결론

직경 180 mm의 과공정 Al-25Si 및 Al-25Si-5Fe 합금을 분무성형 방법으로 제조하였다. 분무성형체의 하단부를 제외하고는 기공이 관찰되지 않았으며, 99% 정도의 상대밀도를 보였으며 Si 입자들이 ~6 μ m의 균일한 크기와 분포를 가지고 있는 것으로 나타났다. 압축시험에서 얻은 진응력-진변형률 곡선을 관찰한 결과 상온에서부

터 가공경화가 거의 없는 것으로 나타났다. 압축시험결과를 이용하여 압출압력-압출속도 관계를 도출하였으며 이를 근거로 300℃ 이상에서 압출비 28 및 40에 대하여 성공적인 압출체를 얻을 수 있었다. 압출 후에 Si 입자는 그 크기가 약 2 μ m로 미세화 된 것을 알 수 있었다. 이원계 합금의 경우 압출 후의 강도 및 연신율이 현저히 향상되었으며, 천이금속이 첨가된 다원계 합금의 경우에는 모상의 강화에 의해 압출압력이 급격히 증가되는 것으로 나타났다.

후기

이 연구는 과기부 중점국가연구개발과제를 통한 연구비 지원에 의해 이루어 졌으며 이에 감사드립니다.

참고 문헌

- (1) J. Zhou, J., Duszczkyk, J., and Lorevaar, B. M., 1991, *J. Mater. Sci.*, Vol. 26, p.5275.
- (2) Sano, H., Tokinano, N., Ohkubo, Y. and Sibue, K., 1993, *Powder Metallurgy*, Vol. 36, p.250.
- (3) Samuel, A. M., Samuel, F. H., and Doty, H. W., 1996, *J. Mater. Sci.*, 31, p.5529.
- (4) Lee, J.-S., and Ra, H., 1996, *J. Korean Inst. of Met. & Mater.*, Vol. 34, p. 1346.
- (5) Park, W.-W., You, B.-S., and Kim, N. J., 1996, *Mater. & Design*, Vol. 17, 5/6, p. 255.
- (6) Satoh, T., Okimoto, K., and Nishida, S., 1997, *J. Mater. Pro. Tech.*, Vol. 68, p.221.
- (7) Estrada, J. L., and Duszczkyk, J., 1990, *J. Mater. Sci.*, Vol. 25, p. 1381.
- (8) Wu, Y., Cassada, W. A., and Lavernia, E. J., 1995, *Metall. Mater. Trans. A*, Vol. 26A, p.1235.
- (9) Hart, E. W., 1979, in *Stress Relaxation Testing*, A. Fox ed., ASTM, Baltimore, Md., p. 5.
- (10) Lee, D., and Hart, E. W., 1971, *Metall. Trans.*, Vol. 2A, p. 1245.
- (11) Sherby, O. D., and Wadsworth, J., 1989, *Prog. Mater. Sci.*, Vol. 33, p. 169.
- (12) DeLo, D. P., and Semiatin, S. L., 1999, *Metall. Mater. Trans. A*, Vol. 30A, p. 1391.
- (13) Johnson, W., 1956, *J. Inst. Metals*, Vol. 85, p. 403.
- (14) Wilcox, R. J., and Witton, P. H., 1958, *J. Inst. Metals*, Vol. 87 (1958), p. 403.