

## 분무성형을 통한 과공정 Al-Si 합금 제조 및 기계적 특성

하태권\* · 김요섭\* · 박우진\*\* · 이연식\*\* · 안상호\*\* · 장영원\*

### Fabrication of Hypereutectic Spray-formed Al-Si Alloy and Its Deformation Behavior

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

#### Abstract

Hypereutectic Al-25Si alloy, which is expected to be applied to the cylinder-liner-part of the engine-block of an automobile due to its 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 alloy appeared to consist of Al matrix and equiaxed Si particles of average diameter of 5-7  $\mu\text{m}$ . 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 maximum value of about 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. The extrusion has been successfully conducted at the temperatures of 300°C and above with the ratio of area reduction of 28 and 40 in this study.

**Key Words** : Spray Forming, Non-Hardening Behavior, Extrusion, Load Relaxation, Compression

#### 1. 서론

세계 유가의 급등과 화석연료의 고갈 위험 등으로 인해 자동차를 비롯한 운송기기분야에 대한 연비절감 연구가 전세계적으로 활발히 진행되고 있다. 이러한 연비절감연구는 크게 차체구조의 경량화와 엔진효율의 향상을 위한 연구로 대별된다. 특히 엔진효율의 향상을 위한 연구분야에 있어서 엔진실린더 성능의 고효율화는 매우 중

요한 연구분야로 주목 받고 있다. 엔진실린더 부품 중에서도 자동차 주행시 엔진의 피스톤과 직접 접촉하는 실린더 라이너는 엔진성능 향상에 있어서 매우 중요한 부분으로 인식되고 있으며, 그 중에서도 실린더 라이너용 소재의 선정은 특히 중요하다 할 수 있다.

엔진작동 시 피스톤과 직접 접촉하는 실린더 라이너에 적합한 소재는 윤활성 및 내마모성이 우수하여야 하며, 동시에 우수한 내마멸 특성을 겸비한 경량합금이어야 한

\* 포항공대 항공재료연구소

\*\* 포항공대 항공재료연구소

다. 종래에는 주철제 등이 주요 실린더 라이너 소재로 사용되어 왔으나, 최근 들어 과공정 Al-Si-X 합금의 응용이 고려되고 있다. 과공정 Al-Si-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 이르렀다.

과공정 Al-Si-X 합금을 제조하기 위한 합금제조방법으로는 일반주조법이나 급냉용고/분말야금법 등이 응용되어 왔으나, 주조법의 경우에는 특성향상의 한계와 급냉용고/분말야금법의 경우에는 고가의 제조단가로 인해 한계에 도달한 실정이다. 최근 들어 연속주조법 등의 신합금 제조방법을 응용하여 과공정 Al-Si-X 합금을 제조하고자 하는 연구가 활발히 진행되고 있으나, 조대한 초정 Si 입자의 형성으로 인해 첨가 가능한 Si 양이 제한되고 있다. 이에 반해 분무성형 방법은 급냉용고법의 야금학적 잇점과 주조법의 상업적 잇점을 겸비한 신합금 제조방법으로서 철강재와 알루미늄 합금제조에 광범위하게 응용되고 있다. 특히, 과공정 Al-Si 합금을 분무성형법으로 제조하면 Si 입자가 미세조직 내에 균일하게 분산될 수 있어서 우수한 합금제조가 가능하다. 또한, 내열성을 향상시키기 위해 첨가하는 천이금속 (TMC: transition metal)은 주조시 매우 조대한 금속간 화합물을 형성 하지만, 분무성형체에서는 매우 미세하게 분포되므로 일반 주조재에 비해 월등히 우수한 미세조직을 나타낸다.

본 연구에서는 분무주조 공정을 통해 과공정 조성인 Al-25Si 합금을 제조하고 이 합금이 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 변형을 속도에 따른 항복강도의 변화를 측정하였다. 이를 통해 분무주조 과공정 Al-Si합금의 압출 가능 온도범위 및 기준 압출속도 조건을 도출하였으며 아울러 이 합금의 고온변형 거동을 규명하고자 하였다.

## 2. 실험 방법

### 2.1 빌렛제조

본 연구에서는 과공정 Al-25Si 합금을 분무성형법으로 제조하였으며, Fig.1에 나타낸 바와 같이 합금빌렛 제

조에 사용된 분무성형장치에는 왕복주기운동할 수 있도록 고안된 가스분사노즐과 회전 및 상하이동이 가능한 기판이 장착되어 있다. 빌렛제조를 위한 주요 공정변수로 용탕온도와 가스노즐/기판간 거리는 각각 850°C 그리고 570mm로 조절되었다.

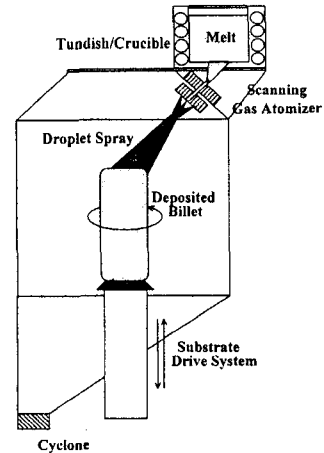


Fig. 1 Schematics of spray forming process

### 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. 용력이완 및 압축 시험용 시편의 규격은 각각 3mm×4mm×27mm와 4mm×4mm×6mm 이었다. 압축시험과 용력이완 시험을 통해 고온 성형성의 지표가 될 수 있는 변형율속도 민감도 계수(m)를 구하고 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, 압출재는 압출방향과 평행한 면과 수직인 면을 연마하여 미세조직을 관찰하고 부위별 밀도를 측정하였다. 현미경 시편은 연마된 표면을 불산용액으로 부식시켜 관찰하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 분무성형 빌렛

Fig. 2에 본 연구에서 분무성형을 통해 제조한 직경 180 mm의 Al-25Si 빌렛의 형상과 밀도분포를 나타내었다. 빌렛의 하단부에 기공이 관찰되나 중단 및 상단부는 97% 이상의 밀도를 보이는 건전한 성형체임을 확인 할 수 있었다. 변형특성 및 압출조건 도출을 위한 기계적 시험용 시험편들은 Fig. 2(a)에 표시된 부분에서 채취하였다. Fig. 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.

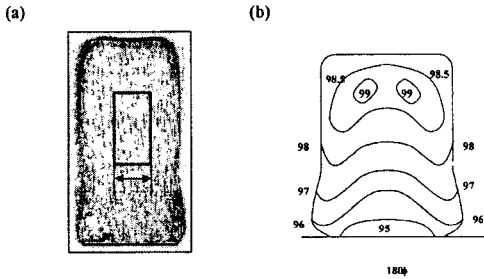


Fig. 2 The appearance (a) and density distribution (b) of the spray-formed billet

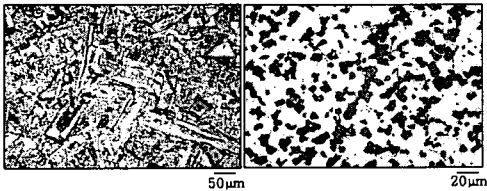


Fig. 3 Typical microstructures of Al-25Si alloys produced by IM (a) and spray forming (b)

#### 3.2 응력이완시험 결과

상온에서 500°C 범위의 온도에서 행한 응력이완 시험 결과 얻은 유동곡선을 Fig. 4에 나타내었다. 300°C까지는 곡선의 기울기가 0.1이하로 매우 낮으나 그 이상의 온도에서는 급격히 증가하여 500°C에서는 최대 0.2정도의 값을 가짐을 알 수 있다. 유동곡선의 기울기는 변형 속도를 민감도 계수(m)로 잘 알려져 있으며 고온 연신을 및 성형성의 지표로 널리 사용되어져 왔다. 500°C의 유동곡

선은 변형율속도에 따라 서로 다른 m값을 보이는 두 영역으로 나뉘어짐을 알 수 있는데, 이는 각각의 영역에서의 변형기구가 서로 다를 수 있음을 의미한다.

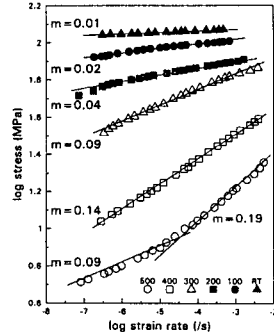


Fig. 4 Flow curves constructed by load relaxation tests

#### 3.3 압축시험 결과

Fig. 5는 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 가공경화의 경향이 관찰된다는 것이다. 압축시험 결과를 이용하여 구한 변형 속도를 민감도 계수 값을 Fig. 6에 도시하였다. 응력이완시험으로 구한 m값에 비해 약간 낮으나 전체적으로 거의 유사한 것으로 알 수 있다.

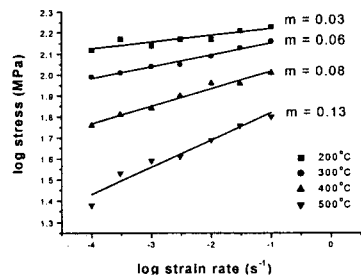


Fig. 5 True stress-true strain curves obtained from compression tests

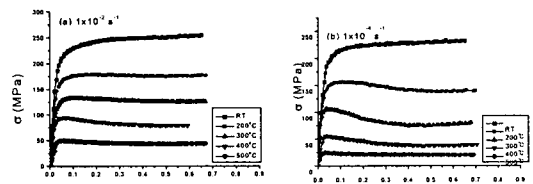


Fig. 6 Strain rate sensitivities estimated from compression test results

### 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.

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

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

여기서  $\sigma_y$ (MPa)는 재료의 항복응력,  $r$ 은 압출비,  $D$ 는 압출빌렛의 초기 직경,  $\theta$ 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 Fig. 7에 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 압출재를 얻을 수 있었다. 압출비 28, 압출온도 400℃로 압출한 후 Si 입자의 분포는 균일하지만 크기가 약 2 $\mu$ m 정도로 미세화 되었음을 알 수 있었다.

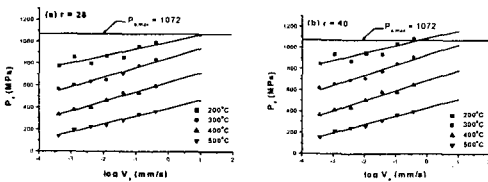


Fig. 7 Extrusion pressure-extrusion velocity relations

## 4. 결론

직경 180 mm의 과공정 Al-25Si 합금을 분무성형 방법으로 제조하였다. 분무성형체의 하단부를 제외하고는 기공이 관찰되지 않았으며, 밀도는 이론밀도의 97% 이상이고 Si 입자들이 ~6  $\mu$ m의 균일한 크기와 분포를 가지고 있는 것으로 나타났다. 압출조건을 도출을 위한 기

계적 시험결과 변형률 속도 민감도 계수  $m$  값이 300℃에서부터 크게 증가하기 시작하여 500℃에서는 최대값인 0.2를 보였다. 압축시험에서 얻은 진응력-진변형률 곡선을 관찰한 결과 상온에서부터 가공경화가 거의 없는 것으로 나타났다. 압축시험결과를 이용하여 압출압력-압출속도 관계를 도출하였으며 이를 근거로 300℃ 이상에서 압출비 28 및 40에 대하여 성공적인 압출재를 얻을 수 있었다. 압출 후에 Si 입자는 그 크기가 약 2  $\mu$ m로 미세화 된 것을 알 수 있었다.

## 후 기

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

## 참 고 문 헌

- (1) J. Zhou, J., Duszczyc, 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 Duszczyc, 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.