

분무 주조 과공정 Al-Si 계 합금의 응력이완 및 Creep 천이 거동

김민수¹, 방원규², 박우진², 장영원¹

Load Relaxation and Creep Transition Behavior of a Spray Cast Hypereutectic Al-Si Based Alloy

M. S. Kim, W. Bang, W. J. Park, Y. W. Chang

Abstract

Spray casting of hypereutectic Al-Si based alloy has been reported to provide distinct advantages over ingot metallurgy (IM) or rapid solidification/powder metallurgy (RS/PM) process in terms of microstructure refinement. Hypereutectic Al-Si based alloys have been regarded attractive for automotive and aerospace application, due to high specific strength, good wear resistance, low coefficient of thermal expansion, high thermal stability, and good creep resistance. In this study, hypereutectic Al-25Si-2.0Cu-1.0Mg alloy was prepared by OSPREY spray casting process. High temperature deformation behavior of the hypereutectic Al-Si based alloy has been investigated by applying the internal variable theory proposed by Chang et al. The change of strain rate sensitivity and Creep transition were analyzed by using the load relaxation test and constant creep test.

Key Words : Hypereutectic Al-Si Based Alloy, Deformation Behavior, Load Relaxation Test, Constant Creep Test, Internal Variable Theory

1. 서론

경량 구조용 재료로서 과공정 Al-Si 계 합금은 높은 비강도, 열적 안정성, 우수한 크리프 저항성과 내구성, 낮은 열팽창 계수 등의 기계적 성질을 바탕으로 자동차 및 항공 산업의 널리 사용되고 있다. 특히 자동차 및 운송기기 분야의 연료 절감과 환경 개선의 관점에서 차체 구조의 경량화와 엔진 효율의 향상은 중요한 문제로 작용하고 있으며 과공정 Al-Si 계 합금은 내마모성 및 윤활성이 우수할 뿐만 아니라 비중

과 열팽창 계수가 작고 뛰어난 주조성으로 인한 저렴한 제조 단가로 엔진의 피스톤과 직접 접촉하는 실린더 라이너용 소재로 사용되고 있다. 또한 구조용 재료의 요구 조건이 엄격해짐에 따라 고품질을 유지하면서 저비용이 드는 소재 제조 공정으로 분무 주조 성형 공정이 연구되고 있으며 경량 소재에 대한 관심과 결합되어 과공정 Al-Si 계 합금에 분무 주조 성형 공정을 적용하기 시작하였다. 분무 주조 성형은 기존의 일반 주조법에 비해 편석 등의 결함, 조대한 초정 Si 입자와 금속간 화합물 등의 생성

1. 포항공과대학교 신소재 공학과
2. 포항산업과학연구원 부품·신소재 연구센터
마그네슘 프로젝트팀

을 억제해 보다 균일하고 미세한 조직 특성을 얻을 수 있으며 고비용의 급냉 응고/분말 야금법에 비해 대용량을 저렴한 비용에 공급 할 수 있으며 신합금 제조 방법으로 철강재와 알루미늄 합금 재료에 광범위하게 응용되고 있다[1].

따라서 본 연구에서는 분무 주조된 과공정 Al-Si 계 합금의 고온 변형의 주된 변형 기구를 분석하기 위해 응력이완 시험을 행하였으며 그 결과를 바탕으로 하여 최근 Chang 등의 제안한 비탄성 변형 이론을 적용하여 전위 활주(glide)에 의한 변형 기구와 전위 크리프(climb)에 의한 변형 기구를 정량화하고 각 변형 기구의 재료 상수를 구하였다[2]. 또한 이론적인 해석 결과의 실험적인 검증을 위하여 응력이완 시험에서 얻어진 유동 곡선 구간에서 일정한 응력 조건에서 크리프 시험을 행하여 온도와 변형량에 따른 크리프 거동을 분석하고 비탄성 변형 이론에 의한 해석 결과와 일치함을 규명하고자 하였다.

2. 시험 방법

2.1 분무 주조 과공정 Al-Si 계 합금

본 연구에 사용된 과공정 Al-Si-Cu-Mg 합금은 신합금 개발 목적으로 RIST 에서 OSPREY 형 분무 성형 장치로 이용하여 제조되었으며 시편의 화학적 조성은 다음의 Table 1 과 같다.

Table 1 Chemical composition of a Al-Si alloy (wt.%)

Al	Si	Cu	Mg
Bal.	25.0	2.0	1.0

2.2 응력이완 시험

분무 주조 과공정 Al-Si 계 합금의 온도와 변형량 축적에 따른 고온 변형 특성을 알아 보기 위해 다양한 온도 범위에서 응력이완 시험을 행하였다. 먼저 온도에 따른 고온 변형 특성을 알아보기 위해 300~500 °C에서 10^{-2} 의 변형을 속도로 2% 인장 변형을 가한 후 cross-head 를 정지 시켜 시간에 따른 응력의 감소를 관찰하였다. 또한, 변형량 축적에 따른 유동 응력 곡선의 변화를 알아보기 위해서 500 °C에서 예비변형량(prestrain)을 2~8% 까지 증가 시키면서 응력이완 실험을 수행하였다.

2.3 크리프 시험

온도에 의한 크리프 경향을 알아 보기 위해

300~500 °C의 온도 범위에서 각각 전위 크리프에 의해 변형이 예상되는 구간의 유동 응력을 정하고 변형량을 증가 시키면서 크리프 시험을 행하여 최소 크리프 속도(Min. Creep rate)를 구하였으며 변형량 축적에 따른 크리프 경향을 알아 보기 위해 각 온도에서 전위 활주 성분과 전위 크리프 성분의 응력 구간을 정하고 동일한 방법으로 크리프 시험을 수행하였다.

3. 시험 결과

3.1 응력이완 시험 결과

응력이완 시험을 통해 얻어진 유동 응력 곡선 Fig.1(a) 와 같고 이를 분석해보면 고온으로 갈수록 낮은 응력 및 빠른 변형을 속도 영역으로 유동 응력이 이동하는 것을 알 수 있으며 변형 속도가 낮은 부분에서 급격하게 응력이 낮아짐을 알 수 있다. 또한 Fig.1(b)와 같이 소성 변형율이 전위 활주와 크리프 성분으로 분리되는 것을 확인할 수 있다.

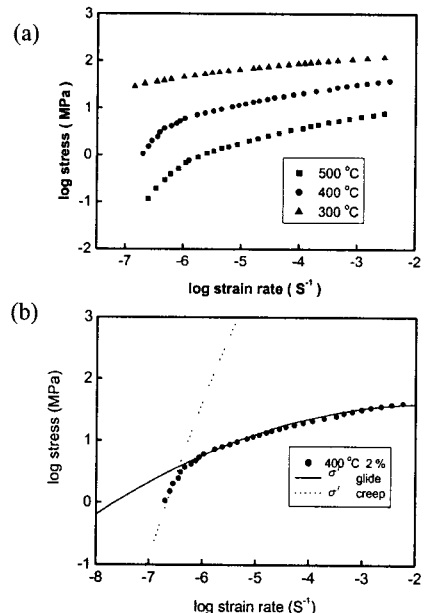


Fig.1 (a) Flow curve obtained from load relaxation test at various temperature (b) resolution of glide and creep components

위의 유동 응력 곡선을 바탕으로 비선형 회귀 분석법(nonlinear regression method)을 이용하여 구성 방정식내의 각 재료상수를 구하여 Table 2 에 나타내었다.

Table 2 Constitutive parameter of various temperature

Temp. (°C)	Dislocation Glide			Dislocation Creep		
	Logσ* _α	Logα*	P _α	Logσ* _β	Logβ*	P _β
300	2.17	-3.70	0.15	10.3	1.95	0.15
400	1.85	-3.21	0.15	9.47	2.36	0.15
500	1.38	-2.09	0.15	8.95	2.60	0.15

또한 Fig.2 와 같이 변형량이 증가할수록 낮은 변형을 속도 영역에서의 유동 응력이 높은 변형을 속도 구간에서 보다 급격하게 증가하는 것을 알 수 있으며 이는 변형량 축적에 의해서는 전위 크리프 성분만이 가공경화 효과가 일어나 유동 응력이 증가하는 것으로 설명할 수 있다.

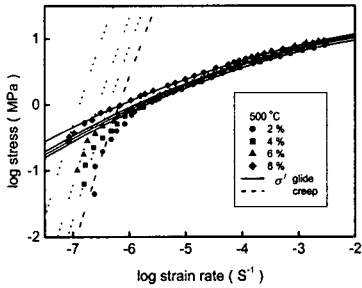


Fig.2 Flow curve obtained from load relaxation test At various pre-strain

또한 동일한 방법으로 재료 상수를 구하여 Table 3 에 나타내었으며 크리프 성분에 해당하는 재료 상수 만이 변화가 뚜렷함을 알 수 있다

Table 3 Constitutive parameter of various pre-strain

ε _{pre} (%)	Dislocation Glide			Dislocation Creep		
	Logσ* _α	Logα*	P _α	Logσ* _β	Logβ*	P _β
2	1.38	-2.09	0.15	8.95	2.60	0.15
4	1.39	-2.18	0.15	9.24	2.52	0.15
6	1.40	-2.30	0.15	9.45	2.41	0.15
8	1.42	-2.59	0.15	9.73	2.07	0.15

3.2 크리프 시험 결과

앞의 응력이완 시험 결과에서 보듯이 300 °C 이상의 고온에서 낮은 변형을 속도 구간에서 급격하게 응력이 낮아지는 크리프 유동이 발생할 것으로 예상되고 500 °C에서 변형량 축적에 따라 전위 크리프 성분의 구간에서 유동 응력의 증가가 현저하므로 낮은 변형을 속도 구간에서 크리프 저항성이 보다 크게 증가할 것으로 예상된다.

다음의 Fig.3 은 크리프 실험한 결과로 온도가 증가할수록 변형 구간의 최소 크리프 속도가 증

가함을 알 수 있으며 예비 변형량이 증가할수록 최소 크리프 속도가 감소함을 알 수 있다.

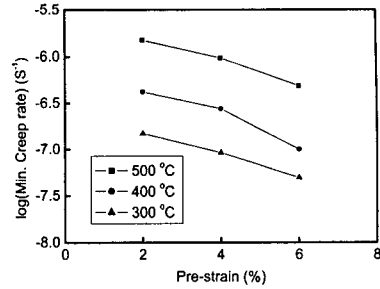


Fig.6 Min. creep rate at temperature and prestrain

Fig.4 는 변형량 축적이 크리프 거동에 미치는 영향을 도시한 그래프로, 400 °C와 500 °C에서는 변형량이 증가할수록 전위 활주 성분 응력 구간의 최소 크리프 속도의 감소량보다 전위 크리프에 의한 변형 구간에서 최소 크리프 속도의 감소량이 현저하게 커짐을 알 수 있으며 이는 변형량 축적에 따라 낮은 응력 구간에서 가공 경화에 의한 크리프 저항성이 증가함을 알 수 있다.

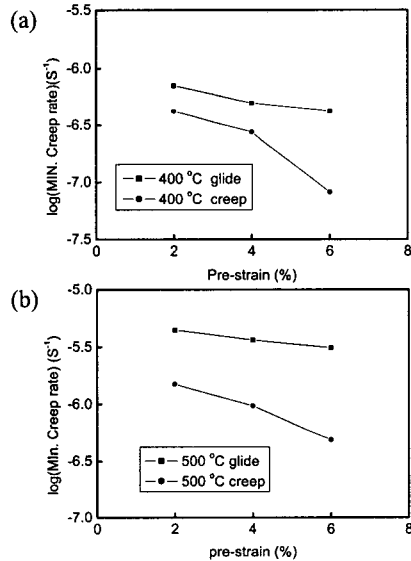


Fig.4 Comparison of Minimum creep rate at glide and creep component at (a) 400 °C, (b) 500 °C

4. 고찰

온도 변화와 변형량 축적에 따른 유동 응력 곡선을 살펴보면 비탄성 변형 이론의 적용을 통하여 전위 활주와 전위 크리프의 성분으로 정량적인 분석이 가능하며, 온도가 증가함에 따라 Table2

의 재료 상수를 보면 전위의 활주를 방해하는 내부장애물의 강도를 나타내는 σ_{α}^* 와 climb 과 같은 비활주를 방해하는 재료 내부의 강도를 나타내는 σ_{β}^* 도 온도가 상승할수록 그 값이 감소하였다. 따라서 온도가 상승함에 따라 재료 내부의 강도는 감소하여 전반적으로 유동 응력 곡선이 낮은 응력 및 빠른 변형을 속도 구간으로 이동한다.

변형량 축적에 따른 유동 응력 곡선의 변화를 보면 예비변형량이 증가함에 따라 높은 응력 구간의 전위 활주 성분은 유동 응력의 증가량이 아주 작은 반면에 낮은 응력 구간의 전위 크리프 성분은 유동응력이 집중적으로 증가함을 알 수 있다. 이는 변형량 축적에 의해 전위 크리프 성분에 집중적으로 가공 경화가 일어나고 소량의 소성 변형을 거친 소재의 경우 크리프 저항성이 증가하는 크리프 천이가 발생함을 알 수 있다. 이때의 전위 활주 성분의 재료 내부강도를 나타내는 σ_{α}^* 의 값은 증가가 매우 작으나 낮은 응력 구간의 전위 크리프 성분의 내부강도를 나타내는 σ_{β}^* 는 변형량이 축적될수록 증가량이 현저하게 커짐을 알 수 있다. 또한 입내변형율의 내부 응력에 대한 전위 투자율을 나타내는 P_{α} 와 P_{β} 의 값을 살펴보면 온도와 변형량 축적에 상관없이 모두 일정한 값인 0.15 를 나타내었다. 이는 내부 응력에 대한 전위 투자율 값이 온도, 변형을 등의 외부적인 환경 변수와는 무관한 변형기구의 특성을 나타내는 기구화적인 상수임을 알 수 있다[3].

일반적으로 분무 주조 과공정 Al-Si 계 합금의 경우 크리프 거동은 크게 전위 활주(viscous glide)와 전위 크리프(climb)에 의해 지배되는 부분으로 크리프 천이가 발생한다. 위의 크리프 시험을 바탕으로 온도 의존성으로부터 활성화 에너지(Q)를 Fig.5 와 같이 구할 수 있는데 크리프의 자기 확산 활성화 에너지 값으로 일반적으로 보고되는 140 KJ/mol 의 값과 일치함을 알 수 있다[4].

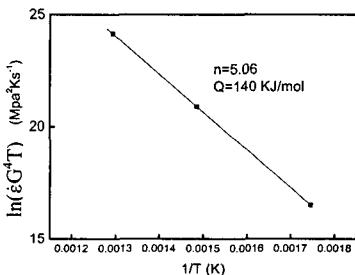


Fig.5 Calculation of the activation energy for creep 또한 분무 주조 과공정 Al-Si 계 합금의 변형량

축적이 크리프 저항성을 현저하게 증가시키는 현상은 다음과 같이 해석 가능하다. 분무 주조 과공정 Al-Si 합금은 soft 한 Al-matrix 에 hard 한 Si 입자가 균일하게 분포되어 있는 형태로 변형량이 축적 될수록 전위 밀도가 증가하고 이러한 분산상이 전위 이동 시 장애물로 작용하게 되고 분산상과 전위 사이에 상호 작용이 발생하게 된다. 또한 변형량이 증가 할수록 damage accumulation 에 의해 분산상들의 균열이나 파쇄, void 생성 및 성장, matrix 와 Si 입자의 계면 debonding 등의 미세 결합이 발생하고 크리프 저항성이 증가한다[5].

5. 결론

본 연구에서는 분무 주조 과공정 Al-Si 계 합금의 고온 변형 거동을 알아 보았으며 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 분무 주조 과공정 Al-Si 합금의 고온 변형 거동은 변형을 속도 민감 지수의 천이가 발생하며 내부 변수를 도입한 비탄성 변형 이론을 적용하여 유동 곡선을 전위 활주(glide)와 전위 크리프(climb) 성분으로 정량적인 해석이 가능하다.

(2) 응력이완 시험 결과 예비변형량(prestrain) 축적됨에 따라 전위 크리프 성분만 현저하게 유동 응력이 증가하는 쪽으로 이동하였다.

(3) 고온 크리프 시험 결과 분무 주조 과공정 Al-Si 계 합금의 크리프 저항성은 온도에 의존하나 예비변형량(prestrain) 축적에 의한 가공경화에 보다 크게 의존함을 알 수 있었다.

(4) 고온에서 낮은 응력 구간의 크리프 활성화 에너지는 140 KJ/mol 이었다.

참고 문헌

- [1] T. K. Ha, W. J. Park, S. Ahn, Y. W. Chang, 2002, J. Mat. Proc. Tech. 103-131, pp. 691.
- [2] T. K. Ha and Y. W. Chang, 1998, Acta Mater, 46, pp. 2741.
- [3] 하태권, 1996, "내부 변형 변수를 이용한 PbSn 공정 합금의 초소성 변형 특성", 포항공대 박사학위논문.
- [4] S. Spigarelli, E. Evangelista, S. Cucchieri, 2004, Mat. Sci. Eng. A
- [5] A. Madgwick, C. Ungpinitpong, T. Mori, P. J. Withers, 2004, Mat. Sci. Eng A 342, pp. 201-206