

Fe-Al 금속간 화합물의 고온변형거동에 미치는 Cr 첨가의 효과

방원규* · 임현태** · 하태권* · 송진화*** · 장영원*

Effect of Cr Addition on the High Temperature Deformation Behavior of Fe-Al Intermetallics

W. Bang, H. T. Lim, T. K. Ha, J. H. Song and Y. W. Chang

Abstract

High temperature deformation behavior of Fe-28Al-5Cr alloy has been investigated, known to show anomalous temperature dependence of yield strength. Specifically, the effect of Cr addition has been examined. A series of tensile and load relaxation tests have been carried out to obtain the flow behavior of Fe-28Al-5Cr alloy at the elevated temperatures. The flow curves have then been analyzed using the inelastic deformation theory recently proposed. Firstly, high temperature flow stress of iron aluminides can be resolved into internal stress and frictional stress. Secondly, the temperature corresponding to peak strength gets higher level at faster strain rate, which presumably due to the increased contribution of internal stress in observed flow stress. And thirdly, the alloying of Cr seems to cause solid-solution strengthening of frictional stress level and the elevation of 2nd order transition temperature. In this analogy, Fe-28Al-5Cr exhibits better strength especially at relatively higher temperature and lower strain rate than Fe-28Al.

Key Words : Iron Aluminide, Intermetallics, Anomalous Yield, Solid Solution Strengthening, Friction Stress, Load Relaxation

1. 서 론

Fe₃Al 및 FeAl 등의 철계 금속간화합물은 다른 알루미늄이드계 금속간화합물과 마찬가지로 낮은 비중과 우수한 내산화성, 내황화성과 내식성을 가지며, Ti-, Ni-계 합금과 비교할 때 비전력 원소인 Fe를 사용하여 값이

비교적 싸기 때문에 새로운 구조재료 및 스테인레스강의 대용재료로서도 기대를 모으고 있다^(1,2). 우수한 비강도는 부품 제조시 같은 수준의 강도를 가지고 있는 스테인레스강을 사용할 때에 비해 약 30%정도의 중량 감소 효과를 얻을 수 있으나, 상온연성이 부족하고, 600°C 이상에서 강도와 크립 저항성이 급격히 저하되기 때문에 실용

* 포항공과대학교 항공재료연구센터

** (주) 삼성테크윈

*** 포항산업과학연구원 금속·코팅연구팀

화가 지연되어 왔다. 취약한 상온연성의 원인은 수소에 의한 환경취화(environmental embrittlement)로 알려져^(3,4) 있으며, 이러한 기계적 물성의 취약점을 개선하기 위해 여러가지 합금 원소의 첨가가 시도되고 있다.

항복강도 이상거동은 온도가 증가함에 따라 강도가 오히려 증가하는 현상으로 다양한 금속간화합물에서 보고되고 있다^(5,6). Fe-Al 금속간화합물에서의 항복강도 이상거동을 설명하기 위해 여러가지 기구가 제안되었으나 넓은 변형률속도 범위에 걸쳐 일관적으로 유동곡선의 변화를 설명할 수 있는 이론은 없는 실정이다.⁽⁷⁻¹¹⁾ 본 연구에서는 Chang 등에 의해 최근 제안된 비탄성 변형 이론을 도입하여 항복강도이상거동을 중심으로 한 Fe-28Al-5Cr의 고온변형거동을 해석하고, 내부변수에 대한 Cr 첨가의 효과를 알아보려고 하였다.⁽¹²⁻¹⁴⁾

2. 비탄성 변형이론

Chang 등에 의해 제시된 비탄성변형모델⁽¹⁵⁾은 소성변형의 기본단위인 전위운동에 기초한 모델로서, 각각의 변수들이 재료 내부의 변형상태에 대응하는 상태변수이기 때문에 보다 물리적 근거가 충실하다는 장점을 가지고 있으며, 이전의 연구를 통하여 구조적 초소성변형거동의 해석에 성공적으로 적용된 바 있다⁽¹⁶⁻¹⁸⁾.

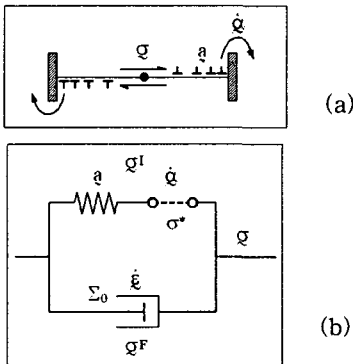


Fig. 1 Models for inelastic deformation: (a) dislocation model, (b) rheological model

Fig.1(a)의 모식도에 보인 바와 같이, 재료의 비탄성 변형이란 장애물(결정립계, 개재물 등)을 포함하고 있는 재료 내에서 경쟁적으로 일어나는 전위의 축적(accumulation)과 이의 유출(leakage)과정의 결과로 나누어 생각할 수 있으며, 이것이 비탄성변형이론의 근본적인 변형기구가 된다.

이때 소성변형을 일으키는 전위활주에 대한 저항은 전위와 결정격자의 상호작용에 의해 국부적으로 작용하는 마찰저항을 극복하는데 사용되는 마찰응력(σ^F)과 장애물에 집적된 전위간의 상호작용에 의해 발생하는 내부응력(σ^i)의 향으로 나눌 수 있으며, 전술한 전위모델에 물리적 보존법칙을 통해 유도한 관계와 연관지어 fig.1(b)와 같은 유변학적 모델로 표현할 수 있다.

이때 집적된 전위들 중 선단전위가 장애물을 극복하고 방출되어 소성변형으로 나타나는 과정은 물리적으로 내부응력에 대한 기계적 활성화(mechanical activation)의 과정으로 볼 수 있으며, 전위가 결정격자 내부를 통과하는 과정은 동적인 마찰력에 의한 점성저항(viscous drag)를 받는 과정으로 설명할 수 있으며, 열적 활성화를 고려하여 다음 식(2), (3)과 같은 관계식으로 각각 나타낼 수 있다^(4, 5).

$$\begin{aligned} (\sigma'/\sigma^i) &= \exp(\dot{\alpha}'/\dot{\alpha})^p \\ \dot{\alpha}' &= v^i (\sigma'/G)^n \exp(-Q'/RT) \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} (\dot{\epsilon}/\dot{\epsilon}_0) &= (\sigma^F/\Sigma_0 - 1)^{1/n} \\ \dot{\epsilon}_0 &= v^F (\Sigma_0/G)^n \exp(-Q^F/RT) \end{aligned} \quad (3)$$

3. 실험방법

3.1. 시편제작

본 연구에서는 Fe₃Al 화학양론조성보다 Al농도가 높은 Fe-27.8Al-4.95Cr 및 Fe-27.6Al합금을 사용하였다. 순도 99.99% 전해철과 알루미늄, 99.9%크롬을 진공유도 용해하였으며, 1000°C에서 5시간 동안 진공분위기 중에서 균질화처리 후 열간압연시 열충격으로 인해 표면에 발생되기 쉬운 균열을 방지하기 위해 cladding 압연을 실시하였다. 열간압연은 가열온도 1000°C, 마무리 압연온도 800°C, 압하율 75%의 조건으로 실시하였다.

압연후 956°C에서 2시간동안 재결정 소둔을 실시하였으며 각각의 시험온도에 해당하는 평형 규칙도를 최대로 확보하기 위해 시험온도와 동일한 온도에서 규칙화 열처리를 실시하였다. fig.2는 압연 후 재결정된 시편의 광학현미경 조직사진으로 평균 결정입도가 700~800 μ m인 조대한 등축정의 조직을 보여주고 있다.

3.2. 기계적 시험

인장시편과 응력이완시편은 방전가공기를 이용하여 열간 압연판으로부터 압연방향에 평행하게 채취하여 재결

정 소둔 및 규칙화 열처리를 실시 후 시험에 사용하였다. 비교적 넓은 변형율속도 범위에서 유동곡선을 구할 수 있는 방법으로 알려진 응력이완시험을 300°C~900°C까지 실시하여 유동곡선을 구하였고 비탄성 변형이론을 이용하여 분석하였다.

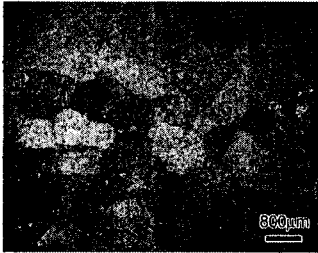


Fig. 2 Optical micrograph of recrystallized Fe-28Al-5Cr alloy

3. 결과 및 고찰

3.1. 고온유동특성

응력이완시험의 결과로 구한 응력-변형율속도의 관계를 fig.3에 나타내었다. 상태도와 유동곡선의 개형에 따라 실험 온도 영역을 D03 규칙화 구조를 가지는 300°C~500°C의 저온영역, D03-B2 변태온도 또는 그보다 높은 550°C~650°C의 중간온도영역, B2규칙화 구조를 가지는 700°C 이상의 고온영역의 3구간으로 나눌 수 있다.

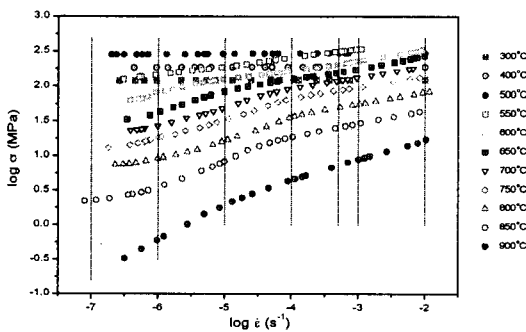


Fig. 3 Flow curves obtained from the load relaxation tests at various temperatures for Fe-28Al-5Cr

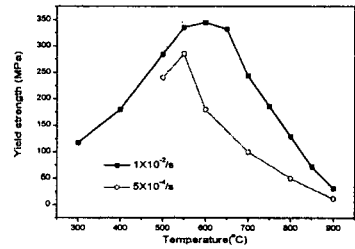
저온영역은 변형율속도에 관계없이 거의 일정한 유동응력을 나타내며, 중간온도 및 고온영역은 변형율속도가 느려질수록 유동응력이 점차 감소하는 전형적인 S자 형태의 곡선을 갖는다.

매우 빠른 혹은 느린 변형율속도구간에서 유동응력이

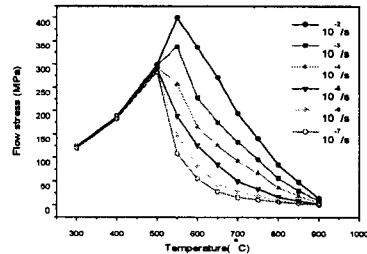
각각 최대 또는 최소임계치로 수렴한다. 이 값은 비탄성 변형이론에서 재료 고유의 물성으로 기술되는 마찰응력 (Σ_0)과 내부응력(σ^*)에 각각 대응되는 값으로, 온도가 낮아질수록 낮은 변형율속도에서의 임계응력 수준이 증가하는 것은 전체유동응력에 대한 마찰응력의 기여도의 증가를 나타낸다고 볼 수 있다.

3.2. 항복강도 및 유동응력 이상거동

Fig.4은 항복강도와 유동응력의 온도에 따른 변화를 도시한 것이다. 그림에서 볼 수 있듯이 변태부근인 600°C까지 항복강도가 계속적으로 증가하는 항복강도 이상거동을 관찰할 수 있었다.



(a)



(b)

Fig. 4 Temperature dependence of yield strength and flow stress at various strain rates

또한 변형율속도가 증가할수록 최대 강도를 나타내는 피크점이 높은 온도로 이동해 가는 경향을 보인다. 이는 유동응력에 대해서도 마찬가지로 유동응력 이상거동과 변형율속도가 높아질수록 최대유동응력을 보이는 피크점이 높은 온도로 이동해가는 경향을 보인다. 300°C~500°C에 대해서는 변형율속도에 상관없이 거의 같은 유동응력 값을 가지며, 550°C 이상에서는 변형율속도에 따른 유동응력 값은 큰 차이를 보이다가 다시 그 차는 점차 감소하여 900°C에서는 다시 변형율속도에 관계없이 비슷한 값을 가진다.

3.3. 비탄성 변형의 상태방정식

넓은 온도 범위에 걸쳐 전체 유동응력은 마찰응력에 의한 비탄성 상태방정식과 내부응력에 의한 소성 상태방정식의 합으로 잘 기술될 수 있었다. Table.1에 제시한 상태방정식의 각 변수값을 나타내었다. 비탄성 변형 및 소성 변형의 기준 변형률속도 $\dot{\epsilon}_0$, $\dot{\alpha}^*$ 는 온도증가에 따라 증가하며, 전위활주를 일으키기 위한 최소의 정적 마찰응력 Σ_0 는 온도증가에 따라 감소하는 일반적인 경향을 따르는 반면 전위의 활주를 방해하는 장애물의 내부장도 σ^* 는 온도증가에 따라 증가하다가 감소하는 내부장도 이상거동을 보인다.

Table 1 Constitutive parameters determined from load relaxation test results⁽¹²⁾

Alloy	Tem p. (°C)	Inelastic deformation			Plastic deformation		
		Σ_0 (MPa)	$\log \dot{\epsilon}_0$	M	σ^* (MPa)	$\log \dot{\alpha}^*$	p
Fe-28Al-5Cr	600	11.0	-9.21		265.5	-4.11	
	700	5.4	-7.98		355.6	-2.46	
	800	3.6	-5.51	0.14	210.9	-1.72	0.15
Fe-28Al	600	13.9	-7.60		544.5	-3.20	
	700	4.7	-6.57		378.4	-2.51	
	800	2.4	-4.22		225.4	-1.78	

소성 상태방정식의 재료상수 p 및 비탄성 상태방정식의 재료상수 M은 전 온도구간에 걸쳐 각각 0.15, 0.14로 나타났다. 이로부터 구성방정식의 재료상수는 온도에 상관없이 재료 자체의 유동 특성을 나타내는 상수로 생각할 수 있으며, 본 연구에서 제시된 구성방정식은 재료 내부의 상태를 효과적으로 기술할 수 있는 상태방정식임을 확인할 수 있었다. 재료상수 p값은 결정립계를 통한 전위의 투자율로써 해석 결과치 0.15는 본 연구실에서 입방정계를 가지는 여러 합금계를 대상으로 한 이전의 연구에서 보고된 값과 일치한다⁽¹⁶⁻¹⁸⁾. 장애물 선단에서 전위의 투자율은 재료의 구조적 특성에 의존하는 것으로 생각되어지고 있으며, Fe-Al계 금속간화합물의 경우에도 규척상이라는 차이는 있으나 기본적으로 같은 입방정계에 속하기 때문에 타 불규척상 구조용 합금과 같은 값을 나타낸다고 보여진다.

마찰유동의 점성특성을 나타내는 M값은 0.14로 나타났다. 이 값은 304 스테인레스 강에서 보고된 0.08보다 크다⁽¹⁹⁾. 이는 결정격자에 의한 마찰저항이 크다는 것을 의미하는 것으로 규척구조 내에서 이동하는 초격자 전위의 단위 벡터가 불규척구조에 비해 2배의 크기를 갖는다는 구조적인 특성에 기인하는 것으로 볼 수 있다.

3.4. Cr 첨가의 효과

Fig. 5는 Fe-28Al-5Cr 과 Fe-28Al 합금의 유동응력을 비교한 그래프로서, 전체적으로 유사한 경향을 가진다. 하지만, 느린 변형률속도에서 유동응력의 증가를 볼 수 있으며, 이는 Table.1에서 보듯이 정적 마찰응력의 증가에 기인한다고 할 수 있다. 특히 850°C에서의 유동응력 거동에서, Fe-28Al 합금은 3×10^{-5} /s이하의 변형률속도 하에서 지속적인 유동응력 감소를 보이는 반면, Fe-28Al-5Cr 합금의 경우는 800°C 이하의 온도와 같이 1×10^{-7} /s 이하의 변형률속도에서 최소 유동응력을 가진다. 이로부터 850°C 이상의 고온 및 느린 변형률속도 하에서의 크립저항성이 향상되었음을 알 수 있다.

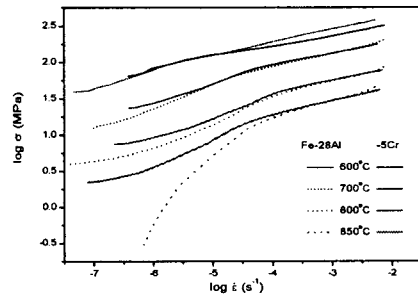


Fig. 5 The flow curves of Fe-28Al-5Cr and Fe-28Al alloys at various temperatures⁽¹²⁾

4. 결론

본 연구에서는 D03 와 B2 규척상 간의 2차 변태를 가지는 Fe-28Al 및 Fe-28Al-5Cr 금속간화합물의 고온변형거동을 인장시험 및 응력이완시험을 실시하여 조사하였으며, 유동곡선의 해석을 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 고온변형의 전체 유동응력을 마찰응력과 내부응력의 합으로 효과적으로 기술할 수 있다.

(2) Fe-28Al-5Cr 금속간 화합물의 항복강도 및 유동응력 이상거동은 고변형을 속도영역에서 피크응력이 관찰되는 온도가 높아지는 것으로 나타났으며, 이는 내부응력의 역온도의존성과 저변형을 속도에서는 마찰응력의 영향이 커지는 결과로부터 설명할 수 있다.

(3) Cr의 첨가는 낮은 변형률 속도에서의 강도 향상을 가져오며, 이는 합금원소의 첨가로 마찰응력 수준이 상승하여 생기는 일종의 고용강화효과로 생각된다.

참 고 문 헌

- (1) Krishna Vedula, *Intermetallic Compounds: Vol.2, Practice*, Ed. J. H. Westbrook and R. L. Fleisher, Chap. 9 (1994)
- (2) C. G. McKamey, *Physical Metallurgy and processing of Intermetallic Compounds*, Ed. N. S. Stoloff and V. K. Sikka, Chap. 9 (1994)
- (3) C. G. McKamey, J. H. DeVan, P. F. Tortorelli and V. K. Sikka, *J. Mater. Res.*, 6 (1991) 1779
- (4) C. T. Liu and E. P. George, *Mater. Res. Soc. Symp. Proc.*, 213 (1991) 527
- (5) C. T. Liu, E. H. Lee and C. G. McKamey, *Scripta Metall.*, 23 (1989) 875
- (6) C. T. Liu, C. G. McKamey and E. H. Lee, *Scripta Metall.*, 24 (1990) 385
- (7) N. S. Stoloff and R. G. Davies, *Acta Metall.* 12 (1964) 473
- (8) H. Inouye, *High Temperature Ordered Intermetallic Alloys*, Ed. C. C. Koch, C. T. Liu and N. S. Stoloff, MRS, Pittsburgh, Pennsylvania, 345 (1985)
- (9) Y. Umakoshi, M. Yamaguchi, Y. Namba and K. Murakami, *Acta Metall.*, 24 (1976) 89
- (10) D. G. Morris, *Phil. Mag.*, A71 (1995) 1281
- (11) E. P. George and I. Baker, *Phil. Mag.*, A77 (1998) 737
- (12) J. H. Song, A Study on the Anomalous Temperature Dependence of Yield Strength in Fe₃Al-Based Intermetallic Alloys, Ph. D. dissertation, Pohang University of Science and Technology (2000).
- (13) H. J. Jun, Deformation Mechanism for the Anomalous Yield Behavior of Fe₃Al Intermetallic Alloys, M. S. dissertation, Pohang University of Science and Technology (2000)
- (14) K. A. Lee, Study on the Yield Stress anomaly of b-CuZn Ordered Alloy by Load Relaxation Tests, Ph. D. dissertation, Pohang University of Science and Technology (1999)
- (15) Y. W. Chang and E. C. Aifantis, "Constitutive Law's for Engineering Materials", Ed. C. S. Desai, Elsevier Science Publishing Co.(1987) 293
- (16) T. K. Ha and Y. W. Chang, *Scripta Metall.*, 32 (1995) 808
- (17) Y. N. Kwon, The effect of Grain Size, Test Temperature and Strain Accumulation on the Superplastic Deformation Behavior of a 7075 Al Alloy, Ph. D. dissertation, Pohang University of Science and Technology, (1999)
- (18) W. K. Bang, Microstructural Study on the Superplastic Deformation Behavior of Quasi-Single Phase Alloy, M. S. dissertation, Pohang University of Science and Technology (1998)
- (19) H. J. Lee, Load Relaxation Behavior of Strip Cast 304 Stainless Steel., M. S. dissertation, Pohang University of Science and Technology (1994)