

TiAl 금속간 화합물의 미세조직에 따른 고온변형특성

하태권* · 정재영* · 이광석** · 장영원**

High Temperature Deformation Behavior of Ti-Al Intermetallic Compound - Microstructure Effect

T.K. Ha*, J-Y. Jung*, K.S. Lee**, and Y.W. Chang**

Abstract

High temperature deformation behavior of a Ti-Al intermetallic compound has been investigated. Specimens with a near gamma and a lamella structures were obtained by performing heat treatment at 1200 and 1330°C, respectively, for 24 hr and stabilized at 900°C for 4 hr followed by air cooling. A series of load relaxation tests has been conducted on these samples at temperatures ranging from 850 to 950°C to construct flow curves in the strain rate range from 10^{-6} /s to 10^{-3} /s. Strain hardening was observed even at the temperature of 950°C in both the near gamma and the lamella structures. Further aging treatment for 12 hr at test temperatures has found to cause no softening in both microstructures.

Key Words : Ti-Al intermetallic compound, Microstructure, Flow stress, Load relaxation test, Strain hardening.

1. 서론

기존의 Ti 기지합금은 사용온도가 강도와 내산화성의 한계로 600°C로 제한된다.[1] 차세대 항공기의 개발은 초합금보다 더욱 가볍고 기계적 특성과 내산화성은 동등하거나 우수한 신재료를 필요로 한다. 현재, 이러한 요구조건에 가장 큰 가능성을 보여주는 신소재는 γ -Ti-aluminide이다. TiAl 금속간화합물은 1956년에 처음으로 고온 구조용 재료로서의 가능성을 제시했지만 상온 연성 및 파괴인성이 낮고 고온 가공성이 열악하여 그 당

시의 기술로는 특성향상의 여지가 없었다. [2]

실용화를 위한 보다 체계적인 연구는 1970년대에 들어와 미국의 Wright-Patterson 공군연구소에 의해 수행되었다. 그 결과로, 1984년에는 제 1차 고온 금속간화합물 학술대회에서 α_2 -Ti₃Al 기지 금속간화합물을 이용하여 F100 엔진부품을 비롯한 항공기 엔진부품의 시험제작에 성공했다는 보고가 있었다. [3] 하지만, α_2 -Ti₃Al 기지 금속간화합물은 내산화성의 한계로 700°C까지로 적용 범위가 제한된다.

γ -TiAl 기지 금속간화합물의 탄성계수는 니켈기지 초합

* 포항산업과학연구원 재료공정연구센터

** 포항공과대학교 신소재공학과

금에 비해 다소 낮지만, 용융점까지 규칙구조를 유지하므로 고온에서의 탄성유지능력은 더 우수하다. 일반적으로, 규칙화된 합금은 고온 확산속도가 느려 고온에서의 강도유지, 내크립 및 내피로 특성이 우수하다. 따라서, ν -TiAl 기지 금속간화합물의 사용범위는 약 800-950°C로 매우 높다. Ti-aluminide의 장점은 항공기의 중량을 감소시키고 작동온도를 높임으로서 연료효율을 개선하여 출력과 연료절감을 극대화할 수 있다는 것이다

특히, ν 기지 금속간화합물은 높은 고온 비강도, 탁월한 내피로 및 내크립 저항성 등과 같은 우수한 고온 특성을 갖는 고온 구조용 내열재료로 각광받고 있지만, 상온연성과 파괴인성이 열악하다는 단점이 있다[4,5]. 내크립 및 내피로 특성은 온도가 낮은 쪽에서는 duplex조직이 우수한가 하면, 고온 영역에서는 층상조직이 더 우수한 특성을 나타낸다. [4-6] 이러한 사실은 각 응용부위의 요구조건에 따라 특정한 미세조직을 갖는 부품이 사용되어야 함을 나타낸다. 이는 ν -TiAl 기지 금속간화합물의 미세조직 제어가 실용적으로도 얼마나 중요한 의미를 갖는지 단적으로 말해주는 것이다.

본 연구에서는 Ti-45.5Al-2Cr-4Nb-0.4B 합금을 주조하고 열처리를 통해 미세조직을 변화시켰다. 또한, 열처리에 의해 얻어진 미세조직별로 고온 기계적 특성을 측정하고 미세조직과 고온 특성의 상관관계를 규명하고자 하였다.

2. 실험 방법

2.1 용해

본 연구에 사용된 Ti-45.5Al-2Cr-4Nb-0.4B 합금은 고순도 Ar 분위기하의 진공아크 용해로에서 button 형태로 주조되었다. 이들 합금은 고순도 sponge Ti, granular Al(99.99%), flake Nb(99.9%), lump Cr(99.9%)과 TiB₂(99.5%)를 사용하여 cigar 형상의 잉곳을 제조되었다. 합금주괴는 조성 균일성을 보장하기 위하여 적어도 4-5회씩 반복 용해되었다. 최종적으로 제조된 cigar 형상의 잉곳들은 50x110mm의 사각형 잉곳으로 재용해되어 시편이 준비되었다.

2.2 미세조직 및 열처리

합금 주괴는 석영관에 장입되어 약 10⁻⁴ torr의 진공을 얻은 후에 고순도 Ar을 채워 진공 봉합하였다. 표 1은

열처리 조건을 정리하여 나타낸 것이다. 열처리에 의한 주조조직 변화는 단상영역 또는 (α + ν) 이상영역에서 24시간 동안 유지한 후에 유냉한 시편을 이용하여 관찰되었다. 제조된 합금은 방전가공을 통해 응력이완시험용 인장시험편으로 가공하였다.

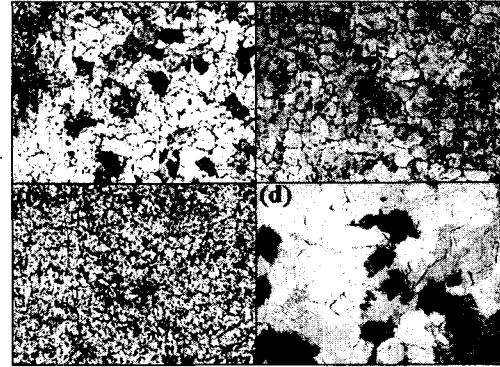


Fig. 1. Optical micrographs showing typical microstructure of Ti-Al specimen (a) A, (b) B, and (c) C together with that of (d) as-cast specimen.

Table 1. Heat treatment conditions for Ti-Al alloys.

Name	Treatment	Microstructure
A	1330°C(24h)→900°C(4h)→AC	Lamella
B	1280°C(24h)→900°C(4h)→AC	Lamella
C	1200°C(24h)→900°C(4h)→AC	Near ν

응력이완을 위한 봉상 시편은 직경 4 mm, 표점 길이 25 mm로 하여 제작하였다. 응력이완시험에 앞서 모든 시편은 석영관(quartz tube)에 진공 밀봉한 상태에서 열처리 되었으며, 각각의 열처리 조건과 그에 따른 시편명을 표 1에 나타내었다. 시편 A, B, C는 각각 1330°C, 1280°C 1200°C에서 주어진 시간동안 열처리함으로써 그림 1에 나타낸 것과 같이 각각 층상조직(lamella structure)과 ν 단상에 가까운 조직(near ν structure)을 갖도록 하였다. 그림 1(d)는 아크 용해 직후의 as-cast 조직이다. 미세조직은 광학현미경을 사용하여 관찰하였다. 광학현미경 관찰시 부식액은 8% HF + 26% HNO₃ + 66% H₂SO₄ 용액을 사용하였다.

2.3 응력이완시험

응력이완 시험은 높은 강성을 갖는 인장 시험기인 Instron 1361 모델을 사용하여 시행하였다. 응력이완 시험은 미세조직의 변화 없이 아주 적은 소성 변형을 가하여 넓은 범위의 변형률 속도 데이터를 얻을 수 있는데, 본 연구에서는 각 시험 당 0.4-2.0 % 정도의 소성 변형을 가하였다. 모든 경우 최초 하중을 가할 때의 변형률 속도는 $10^{-2}/s$ 로 하였다.

비탄성 변형률 속도에 따른 유동응력은 Lee와 Hart [7]에 의해 제안된 방법을 이용하여 변환 하였다. 응력이완시험은 각각의 상구조에 대하여 850°C, 900°C, 그리고 950°C에서 행하였으며, 가공경화 및 변형률속도 민감도, 그리고 시험온도에서의 시효효과 등을 평가하였다.

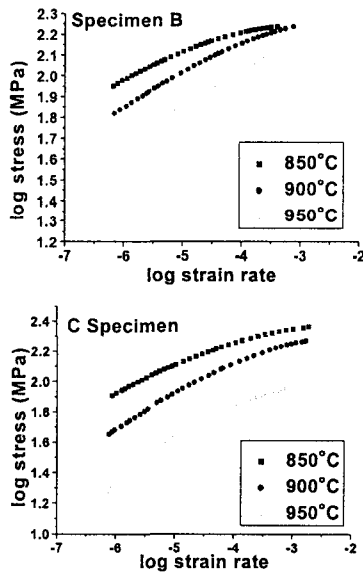


Fig. 2. Flow curves obtained from load relaxation tests at various temperatures.

3. 결과 및 고찰

3.1 온도 및 미세조직의 영향

그림 2는 세 가지 다른 미세조직을 가진 시편들에 대하여 850, 900, 950°C에서 행한 응력이완 시험 결과로부터 얻어진 응력-변형률 속도 관계를 나타낸다. 모든 유동곡선이 $10^{-3}/s$ 에서 $10^{-6}/s$ 까지의 넓은 범위의 유동정보를 제시하고 있음을 알 수 있다. 시험온도가 증가함에 따라 유동응력이 현저하게 낮아지는 것을 알 수 있고,

특히 층상 조직의 경우 변형온도에 따라 유동곡선의 기울기가 증가하면서 빠른 변형률 속도 영역으로 유동곡선이 이동하는 경향을 명확히 나타낸다.

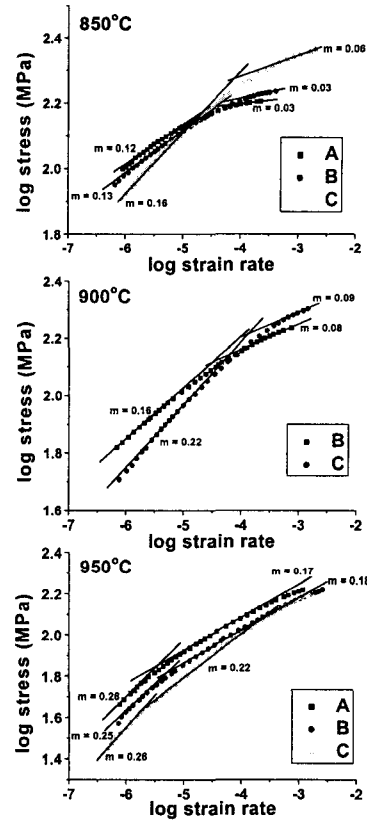


Fig. 3. Temperature effect and the evaluation of strain rate sensitivity.

그림 3은 각 시험온도에서 미세조직의 변화에 따른 유동곡선을 정리한 것이다. 흥미롭게도 850°C에서 유동응력이 빠른 변형률 속도하에서는 near ν 조직(C)이 가장 높고 1280°C 층상조직(B), 층상조직(A)의 순으로 나타났으나, $5 \times 10^{-5}/s$ 를 기점으로 역전되는 것을 알 수 있다. 900°C에서는 이러한 역전현상이 $10^{-4}/s$ 근처의 보다 빠른 변형률 속도에서 나타나며, 950°C에서는 관찰되는 전 범위의 변형률 속도 영역에서 유동응력이 1330°C 층상조직, 1280°C 층상조직, near ν 조직의 순서로 나타난다. 이러한 현상은 각 변형온도에서 상이한 미세구조를 갖는 시편들의 유동응력의 변형률 속도에 대한 민감도, 즉 변형률 속도 민감도 계수 (strain rate sensitivity parameter), m 값이 상이하기 때문에 나타나는 현상이다. 그림 3에 나타낸 각각의 유동곡선의 기울기가 바로

변형을 속도 민감도 계수 값을 의미한다. 변형을 속도 민감도 계수 값을 기준으로 할 때, 각각의 유동곡선은 크게 두 영역으로 나뉘어 짐을 알 수 있다. 일반적으로 m 값이 다른 영역은 상이한 변형기구에 의해 소성변형이 일어난다고 알려져 있고, m 값은 어떠한 재료의 고온변형 특성을 규정짓는 매우 중요한 척도로 사용되고 있고 이에 대한 보다 체계적인 연구가 필요하며 현재 진행되고 있다.

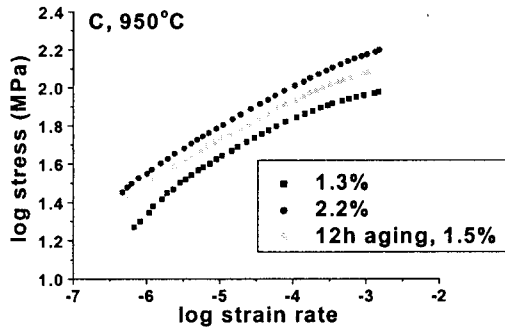


Fig. 4. Effect of strain hardening and subsequent aging on the flow behavior of the specimen with the near gamma structure.

3.2 가공경화 및 시효거동

그림 4는 near γ 조직(C)의 시편에 대하여 950°C에서 두 번 반복해서 응력이완 시험을 행함으로써 가공경화의 효과를 관찰하고 난 후, 같은 시편에 대하여 그 온도에서 12 시간 시효처리하고 다시 응력이완 시험한 결과를 나타낸다. 가공경화가 일어나다가 12시간의 시효에 의해 초기의 강도보다 약간 높은 상태로 되돌아가는 시효에 의한 연화가 일어남을 알 수 있었다. 시효처리 후에는 유동곡선의 기울기가 약간 감소하는 경향을 보이는 것을 알 수 있다. 850°C에서 연성이 부족하여 응력이완 시험도중 파단이 일어나 시효처리에 의한 효과를 확인할 수 없었으나 900°C에서는 시효에 의한 연화현상이 관찰되지 않았다. 층상조직의 시편들에서도 거의 비슷한 경향을 관찰할 수 있었다. 가공에 의한 경화와 시효에 의한 연화는 소재가 사용온도에서 피할 수 없는 미소한 변형을 받았거나, 장시간 운전한다고 하더라도 지속적으로 사용가능한지 여부를 판단할 수 있는 중요한 정보이다. 본 연구에서 제조하여 사용한 Ti-Al계 합금의 경우에는 850-950°C의 온도범위에서 신뢰성 있게 장시간

사용할 수 있다고 판단할 수 있다

4. 요약

미세구조별 유동응력은 850°C에서 빠른 변형을 속도 하에서는 near γ 조직(C)이 높으나, 5×10^{-5} /s를 기점으로 역전되었다. 900°C에서는 이러한 역전현상이 10^{-4} /s 근처의 보다 빠른 변형을 속도에서 나타나며, 950°C에서는 관찰되는 전 범위의 변형을 속도 영역에서 층상조직의 유동응력이 높은 것으로 나타났다. 850°C-950°C의 온도범위에서는 미세구조에 관계없이 모두 가공에 의한 경화현상이 관찰되며, 각 온도에서 12시간의 시효처리 후에도 연화가 일어나지 않거나 일어난다고 하더라도 그 정도가 가공경화에 의한 강도증가분을 초과하지 않았다.

참고 문헌

- (1) Bania, P., J. Metals, 40(3) (1988) 2.
- (2) McAndrew, J.B., and Kessler, H.D., Trans. AIME, 206 (1956) 1348.
- (3) Lipsitt, H.A., "High-Temperature Ordered Intermetallic Alloys," C.C.Koch, C.T.Liu, and N.S.Stoloff (Ed.), MRS Symp., Pittsburgh, PA, 39 (1985) 35.
- (4) Kim, Y-W., J. Metals : 41(7) (1989) 24.
- (5) Kim, Y-W., and Dimiduk, D.M., J. Metals, 43(8) (1991) 4.
- (6) Huang, S.C. and Shih, D.S., "Microstructure Property Relationships in Titanium Aluminides and Alloys," Y-W.Kim and R.R.Boyer (Ed.), TMS, Warrendale, PA, (1991) 10.
- (7) Lee, D., and Hart, E. W., Metall. Trans., 2A (1971) 1245