

2상 타이타늄 합금의 저온/고속 초소성

박찬희¹ · 이종수[#]

Low-temperature/high-strain rate superplasticity of two-phase titanium alloys

C. H. Park, C. S. Lee

Abstract

The current understanding for phase/grain boundary sliding and low-temperature/high-strain rate superplasticity of two-phase titanium alloys is summarized. The quantitative analysis on boundary sliding revealed increased sliding resistance on the order of $\alpha/\beta \ll \alpha/\alpha \approx \beta/\beta$ boundary, hence, led to the conclusion that approximately 50 % alpha(or beta) volume fraction and/or grain refinement is beneficial for obtaining large superplastic elongation at low temperature and/or high strain rate. To predict the temperature for 50% alpha volume in various alpha/beta Ti, artificial neural network was applied. Finally, much enhanced superplasticity was achieved through grain refinement utilizing dynamic globularization.

Key Words: Titanium, Superplasticity, Artificial Neural Network, Severe Plastic Deformation, Dynamic Globularization

1. 서론

2상(two phase) 타이타늄 합금은 우수한 비강도, 내식성, 고온강도 등의 특성을 가지고 있기 때문에 항공기 구조용 소재로 광범위 하게 사용되고 있다. 특히, 높은 고온 연신율을 바탕으로 한 초소성 성형 및 확산 접합은 부품의 무게 및 제조 비용의 감소를 가능하게 하므로 산업적 잠재력이 크다. 그러나 일반적으로 초소성은 성형은 850 °C 이상의 높은 가공온도 또는 10^{-3} s^{-1} 이하의 느린 가공속도에서만 가능하므로[1], 부품 제조의 순환이 느리고 다이(die) 비용과 에너지의 소비가 크다는 단점이 있다. 그러므로 750 °C 이하의 저온 또는 10^{-2} s^{-1} 이상의 고속 초소성 성형 기술이 요구되고 있다.

한편, 2상 타이타늄 합금은 단상(single phase) 소재와 달리 α/α , β/β , α/β 의 계면적이 결정립 크기 및

온도에 따라 변화하므로, 저온/고속 초소성을 위해서는 우선 이러한 미세조직적 인자가 초소성의 주 기구인 결정립계 미끄러짐 현상에 미치는 영향이 규명되어야 한다. 이를 위해 Kim 등[2]은 2상 타이타늄의 각 계면이 상경계/결정립계 미끄러짐(phase/grain boundary sliding, P/GBS)에 미치는 영향을 정량적으로 파악했다.

한편, Reddy 등[3]은 온도에 대한 상분율의 변화를 예측했으며, Ko 등[4] 및 Park 등[5]은 강소성 가공 및 동적 구상화를 이용해 결정립을 미세화시킨 후 저온/고속 초소성을 보였다.

본 연구에서는 2상 타이타늄의 P/GBS에 미치는 각 계면의 영향을 정리한 후 미세조직 변화 예측 및 제어를 통한 저온/고속 초소성 특성을 체계적으로 고찰하고자 하였다.

2. 본론

1. 포항공과대학교 신소재공학과

교신저자: 포항공과대학교 신소재공학과,

E-mail: cslee@postech.ac.kr

2.1 P/GBS에 대한 각 계면의 영향

2상 타이타늄 합금은 그 특성상 α/α , β/β 의 결정립계(grain boundary) 및 α/β 의 상계계(phase boundary)를 가지고 있는데, 초소성 구간에서는 온도의 증가에 따라 베타 상분율이 증가 하므로 이에 따라 각 계면의 비율도 변화한다. 그러므로 초소성 특성 향상을 위해서는 초소성의 주 기구인 P/GBS에 유리한 계면을 파악하는 것이 중요하다.

Kim 등[2]은 Ti-6Al-4V 합금에 대해 Peters 등[6]에 의해 제안된 열처리법을 사용하여 결정립 크기를 $\sim 3 \mu\text{m}$ 로 미세화 시키고 875, 900, 925 °C에서 추가 열처리를 통해 베타상 분율을 각각 34 %, 48 %, 64 %로 제어한 후 800 °C에서 응력 이완 및 인장 실험을 실시해 각 계면이 P/GBS에 미치는 영향을 분석하였다. 우선 응력 이완 실험결과를 Ha 등[7]이 제안한 내부변형 변수 이론을 바탕으로 분석한 결과 48 %의 베타 상분율을 가지는 경우 계면 미끄러짐 현상에 대한 마찰 저항력이 가장 낮은 것으로 밝혀 졌고 이는 α/β 상계면이 P/GBS에 가장 유리함을 의미한다. 또한 인장 실험 후 전체 변형에 대한 각 계면의 분율을 측정 한 결과 역시 α/β 의 상계면 미끄러짐이 α/α , β/β 의 결정립계 미끄러짐 보다 우세함을 보였다(Fig. 1).

결론적으로 Kim 등[2]의 연구에 의하면 P/GBS를 위해서는 α/β 계면의 분율이 높을 수록 유리하다는 것을 알 수 있다. 이를 근거로 판단할 때 초소성 특성을 향상시키기 위해서는 다음의 2가지

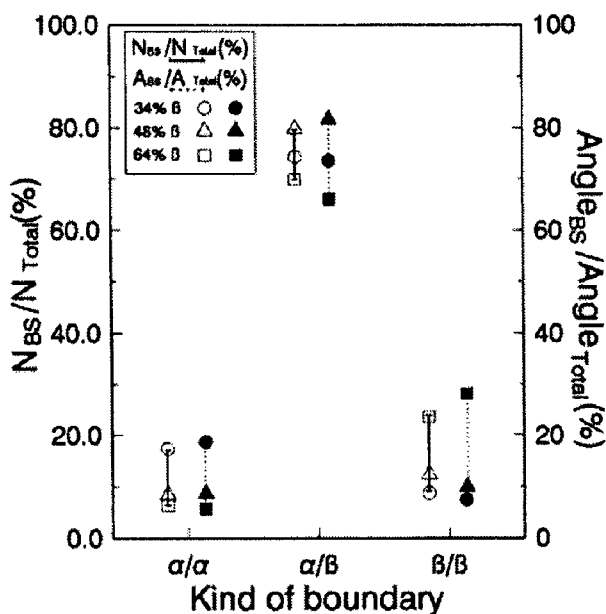


Fig. 1 The amount of boundary sliding measured in the specimens elongated up to 30 % [2].

방법이 효과적이다. 첫번째는 동일한 결정립 크기 하에서 알파와 베타 상분율을 5:5로 하는 것이고 동일한 알파/베타 상분율에서는 결정립 크기를 작게 하는 것이다.

2.2 인공신경망을 활용한 초소성 최적화

Reddy 등[3]은 2상 타이타늄 합금의 온도에 대한 상분율 변화가 알파 및 베타 안정화 원소의 첨가량에 의해 결정된다는 사실에 기인하여 인공신경망(artificial neural network)을 이용해 2상 타이타늄 합금의 상분율 변화를 효과적으로 예측 하였고, 본 연구에서는 이를 통한 초소성 최적화를 소개 하고자 한다. Kim 등[2]의 결과에 따르면 동일한 결정립 크기하에서는 알파와 베타의 상분율이 5:5인 경우 α/β 계면적이 가장 커지므로 초소성에 유리하다. 그러나 2상 타이타늄 합금의 종류는 다양할 뿐만 아니라 Ti-6Al-4V 합금과 같은 동일한 합금을 제조 할지라도 합금원소 첨가량은 달라지므로 초소성 최적화를 위해서는 각 소재에 대하여 일일이 온도에 대한 상분율 측정이 필요하다. 그러나 인공신경망 기법을 활용하여 소모적

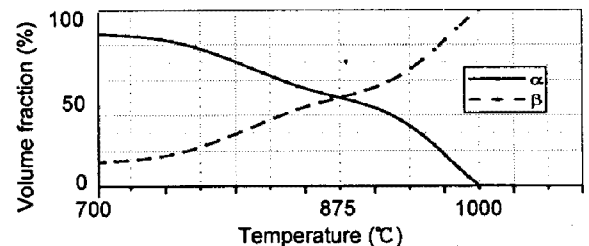


Fig. 2 Predicted phase volume fraction of Ti-6Al-4V alloy using artificial neural network.

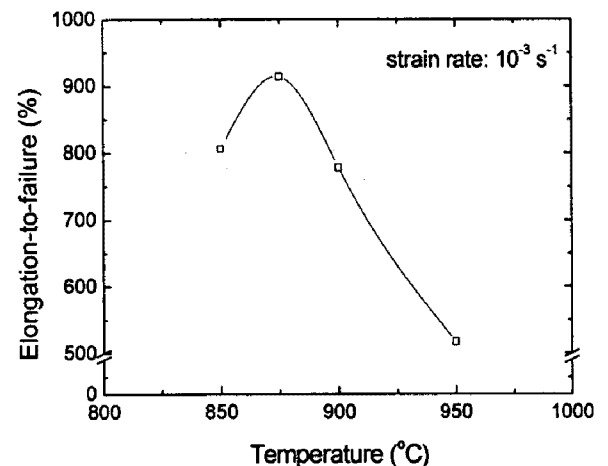


Fig. 3 Total elongation of Ti-6Al-4V alloy with variation of test temperature.

인 실험을 생략하고 합금원소의 첨가량만으로 초소성 최적화 온도를 예측 할수 있다. Fig. 2는 5.83 Al, 3.87 V, 0.09 Fe, 0.11 O, 0.013 C, Bal. Ti의 화학조성을 가지는 Ti-6Al-4V 합금에 대한 상분율 변화를 인공신경망을 활용하여 예측한 결과이고, Fig. 3은 인장 실험결과이다. 본 소재의 경우 875 °C에서 5:5의 상분율을 가지고 결과 역시 동일 온도에서 최대의 연신율을 보였다.

결론적으로 인공신경망을 활용하여 5:5의 상분율을 가지는 온도를 예측한 후 기존의 방법에 비해 효과적으로 초소성을 최적화 할수 있다.

2.3 강소성 가공을 활용한 초소성 향상

Ti-6Al-4V 나 Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo-0.1Si와 같은 대표적인 2상 타이타늄 합금은 700 °C이하에서 약 90 %의 일정한 알파 상분율을 가진다. 이러한 경우 계면 미끄러짐에 유리한 α/β 계면적을 증가 시키기 위해서는 결정립 미세화가 효과적이다.

Ko 등[4]은 강소성 가공의 하나인 ECAP(equal-channel angular pressing)를 사용하여 난가공 소재로 알려진 Ti-6Al-4V 합금의 결정립 크기를 초기 11 μm 에서 0.3 μm 까지 미세화 시켰다. 이후 초기 조직과 미세화된 조직에 대해 600 ~ 700 °C, $5 \times 10^{-5} \sim 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ 의 구간에서 인장실험을 실시 한 결과 미세화된 경우 300 % 이상의 연신율을 가지며 저온 초소성 특성을 보였다(Fig. 4). 이러한 결과는 동일한 조건하에서 초기 미세조직과 비교할때 약 3배 이상 향상된 것이다.

한편, 변형율속도 민감도지수(strain rate sensitivity, m)를 계산한 결과 초기 조직은 변형율속도에 상

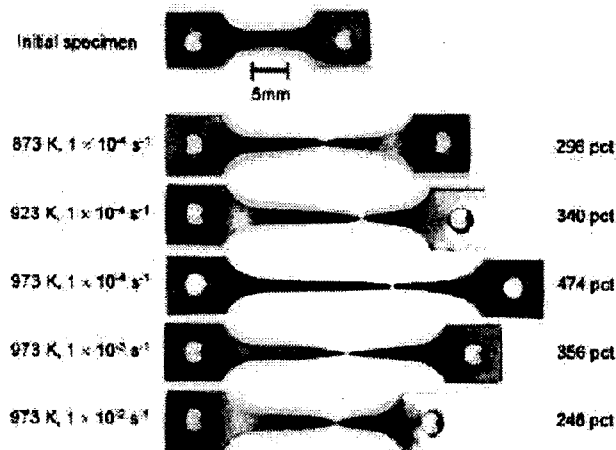


Fig. 4 Tensile elongation of the ECAPed Ti-6Al-4V alloy test at 600 ~ 700 °C[4].

관없이 약 0.11의 동일한 값을 보인 반면 미세화된 조직은 구간 I, II, III의 3부분으로 구분 되었으며 높은 연신율을 보이는 구간 II에서의 m 값은 0.34였다. 이러한 m의 증가는 결정립 미세화에 의한 α/β 계면적의 증가가 상경계 미끄러짐 현상을 원활히 하기 때문이라 판단된다. 또한 이에 대한 정량적인 연구 결과, 초기 소재의 경우 전체 변형량에 대한 P/GBS로 인한 변화가 약 10 % 이하인 반면 미세화된 소재의 경우 그 비율이 약 45 %로 증가했다.

2.4 동적 구상화를 활용한 초소성 향상

동적 구상화는 타이타늄 합금의 대표적인 결정립 미세화 방법중 하나로 초기조직을 층상조직으로 유도한 다음 변형을 가하여 층 구조를 미세한 등축조직으로 분절시키는 방법이다. Peters 등[5]은 마르텐사이트 조직의 부분적인 동적 구상화 이후 추가적인 어닐링을 통하여 미세한 등축조직(3 μm)을 제어한 바 있다.

한편, Park 등[5]은 ELI급 Ti-6Al-4V 합금을 마르텐사이트 조직으로 유도한 다음 동적 구상화 분율 및 동적 구상화 후 결정립 크기에 미치는 변형량, 변형율속도, 변형온도 등의 영향을 정량적으로 파악한 후 최적의 가공 조건을 변형온도 800 °C, 변형율속도 10^{-1} s^{-1} , 변형량 1.4로 설정했다. 최적의 가공 조건에서 동적 구상화를 시킬 경우 후 어닐링의 생략이 가능했으며, 인장 실험 결과 동적 구상화 후 추가 어닐링을 생략한 미세 조직은 Peters 등[6]에 의한 방법과 비교해 향상된 초소성 특성을 보였고, 특히 875 °C, 10^{-1} s^{-1} 에서 1000 % 이상의 고속 초소성을 보였다. 또한 Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo-0.1Si 합금에 대해서도 동일한 조건에서 동적 구상화를 통해 결정립을 미세화 할수 있었으며 초기 조직(13 μm)과 비교하여 동적 구상화 이후 조직(2.2 μm)은 2.5배 향상된 저온 초소성을 보였다(Fig. 5).

추가 어닐링을 생략하고 동적 구상화 만으로 조직을 미세화 시킬때는 이전 방법과 비교하여 구상화 후 결정립 성장을 억제할수 있으며 결정립계 주위의 높은 전위 밀도로 인한 결정립계 확산계수 증가에 의해 P/GBS시 삼중점에서의 응력 집중을 효과적으로 수용할수 있다. 또한 베타상이 분절되어 알파상 주위에 존재하게 되므로 α/β 계면적을 증가시켜 초소성 향상을 가져오는 것으로 판단된다.

참고 문헌

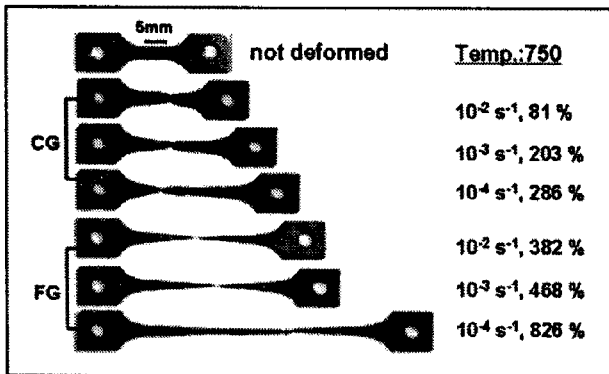


Fig. 5 Tensile elongation of initial(coarse-grained, CG) and dynamically globularized(fine-grained, FG) Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo-0.1Si alloy.

3. 결론

2상 타이타늄 합금의 P/GBS에는 α/β 상계면이 α/α , β/β 결정립계면 보다 유리하므로 결정립 크기가 동일할 경우 알파와 베타 상분율이 5:5인 온도가 초소성에 적합하며 인공신경망 기법을 이용해 소모적인 실험 없이 초소성 온도를 최적화 할수 있었다. 한편, 상분율이 동일할 경우 결정립 미세화는 α/β 상계면 증가에 효과적이며 ECAP 또는 동적 구상화를 통한 결정립 미세화는 저온/고속 초소성을 가능하게 했다.

4. 후 기

본 연구에 도움을 주신 경북대학교 신소재공학과 김지식 교수님, 영남대학교 신소재공학과 고영건 교수님, 포항공대 철강대학원 N. S. Reddy 박사님께 감사 드립니다.

- [1] M. T. Cope, D. R. Evetts, N. Ridley, 1986, Superplastic deformation characteristics of two microduplex titanium alloys, *J. Mater. Sci.*, Vol. 21, pp. 4003~4008.
- [2] J. S. Kim, Y. W. Chang, C. S. Lee, 1998, Quantitative analysis on boundary sliding and its accommodation mode during superplastic deformation of two-phase Ti-6Al-4V alloy, *Metall. Mater. Trans.*, Vol. 29A, pp. 217~226.
- [3] N. S. Reddy, C. S. Lee, J. H. Kim, S. L. Semiatin, 2006, Determination of the beta-approach curve and beta-transus temperature for titanium alloys using sensitivity analysis of a trained neural network, *Mater. Sci. Eng. A*, Vol. A434, pp. 218~226.
- [4] Y. G. Ko, C. S. Lee, D. H. Shin, S. L. Semiatin, 2006, Low-temperature superplasticity of ultra-fine-grained Ti-6Al-4V processed by equal-channel angular pressing, *Metall. Mater. Trans.*, Vol. 37A, pp. 381~391.
- [5] C. H. Park, Y. G. Ko, J.-W. Park, C. S. Lee, 2008, Enhanced superplasticity utilizing dynamic globularization of Ti-6Al-4V alloy, *Mater. Sci. Eng. A.*, Vol. A 496, pp. 150~158.
- [6] M. Peters, G. Lutjering, G. Ziegler, 1983, Control of microstructures of (alpha plus beta)-titanium alloys, *Z. Metall.*, Vol. 74, pp. 274-282.
- [7] T. K. Ha, Y. W. Chang, 1998, An internal variable theory of structural superplasticity, *Acta Mater.*, Vol. 46, pp. 2741~2749.