

Ti-10Ta-10Nb 합금의 고온 가공 특성에 관한 연구

반재삼*, 이경원, 유영선(전남대 대학원), 조규중(전남대 기계시스템공학부)

Study on High Temperature Processing of Ti-10Ta-10Nb Alloys

J. S. Ban, K. W. Lee, Y. S. You (Mecha. Eng. Dept., CNU), K. Z. Cho (Mechanical Eng. Dept., CNU)

ABSTRACT

Specimens of Ti-10Ta-10Nb have been hot upset forged after heating to either the $\alpha+\beta$ and β -phase field. The variety temperatures (At 650, 700, 750, 800, 850 $^{\circ}$ C) and strain rates (At 0.001, 0.01, 0.1, 1, 10s $^{-1}$) were used. On the basis of flow stress data obtained as a function of temperature and strain rate in compression, a processing map for hot working has been developed. At strain rates lower than about 0.1s $^{-1}$ and almost temperatures, processing efficiency exhibited high, but at 0.001s $^{-1}$, and temperature 800 $^{\circ}$ C, low because the Shear band has occurred. On the basis of the processing map, the optimum processing routes available for hot working of this material are outlined.

Key Words : Processing map(가공 맵), Instability map(불안정영역 맵), Hot forging(고온단조), Strain rate sensitivity(변형률 민감도 계수), Flow Stress(유동응력)

1. 서론

생체용 재료로서 널리 사용되고 있는 $\alpha+\beta$ Ti 합금의 대표적 금속인 Ti-6Al-4V는 Pure Ti보다 높은 피로 강도, 부식 저항 등의 많은 장점을 가지고 있다. 하지만 Ti-6Al-4V 합금에 대한 최근 연구에 따르면 바나듐(V) 원소가 세포독성이 있다고 보고되고 있으며, 알루미늄(Al) 원소는 알츠하이머 병의 원인이 되다고 알려지고 있다^{1,3)}.

따라서 본 연구에서는 V와 Al를 제외시키고 생체적으로 적합성이 높은 원소만으로 구성된 정형의과 및 치과용 소재로 사용될 금속재료가 절실이 요구됨에 따라 내식성과 피로강도 등이 우수한 합금인 Ti-10Ta-10Nb 합금을 개발하였다.

Ti-10Ta-10Nb 합금의 미세구조는 $\alpha+\beta$ 형 합금이며 Widmanstätten 조직이다. 합금의 제조는 VAR(Vacuum Arc Re-melting)법에 의해 주조되어 β -transus 온도 이상에서 주조 조직 파괴를 위한 1차 단조 공정을 행하였다. 단조 공정은 주조조직의 충분한 파괴를 위하여 원래 직경의 70%까지 압착하여 환봉 형태로 제작 되었으며, 균질화 처리를 거쳐 압축 시험편을 제작하여 재료의 고온 변형 특성을 고찰하였다. Ti-합금에 대한 고온 압축 실험은 실험 온도와 변형률, 변형률 속도에 따라 최종 미세조직이 결정되게

되며 일반적으로 온도가 낮고 변형률 속도가 빠르게 되면 cavities나 Shear band등 다양한 내부 결함들이 생성 및 성장하게 되어 가공 공정 후 품질의 저하를 초래하게 된다¹⁻⁵⁾. 때문에 Ti-합금의 고온 가공 공정 시 보다 우수한 품질의 단조 가공을 위해서는 가공온도, 가공속도, 변형률 속도의 제어 뿐만 아니라 각 가공 변수들의 변화에 따른 미세조직의 변화를 예측하고, 가공 효율을 고려함으로써 최적의 가공 조건을 얻을 수 있다. 따라서 본 연구에서는 Ti-10Ta-10Nb 합금의 고온 변형 특성을 평가하는 것으로, 이를 위하여 고온 변형 가공 시 응력-변형률 거동, 동적 연화나 동적 재결정과 같은 동적 파라메타의 결정, Processing map을 작성하는 것이다.

2. 이론적 배경

Processing map은 동적 재료 모델(Dynamic Materials Model)를 기초로 하여 고온 가공 시 발생하는 재료의 동적 거동을 설명하기 위하여 Wellstead⁶⁾에 의해 제안되었다. 이 모델은 재료의 고온 가공 공정의 메커니즘을 하나의 계로 간주하며 여기서 공작물의 주된 역할은 에너지 분산자로서 간주될 수 있다⁷⁾. Fig.1 에서와 같이 전체 에너지 분산율은 온도 상승 등에 소모되는 G 항과 금속학적 미세구조

를 변화시키는데 소모되는 J 항으로 분리될 수 있다. G 항과 J 항 사이에서 에너지 분산은 변형률 속도 민감도 계수인 m 으로써 구분되어질 수 있다.

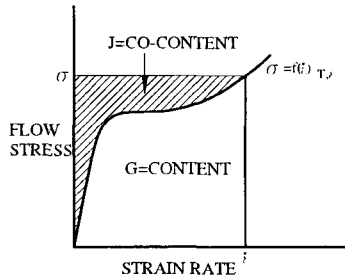


Fig. 1. Schematic representation of G content and J co-content

따라서 J 항은 다음과 같이 정의 될 수 있고,

$$J = \int_0^{\sigma} \dot{\epsilon} d\sigma = \frac{\sigma \dot{\epsilon} m}{m+1}$$

가공 효율 η 는 J 항의 최대값과 순간 J 값과의 비율에 따라 결정될 수 있다.

$$\eta = \frac{J}{J_{\max}} = \frac{2m}{m+1}$$

3. 실험 방법 및 결과

3.1 실험 방법

고온 소성 실험용 시편은 Ti-10Ta-10Nb 합금으로서, 주조 조직을 파괴하기 위하여 T_{β} 온도 이상에서 1 차 가공을 행한 이후 응력 제거를 위하여 1050°C에서 1hr 동안 열처리를 하였다. 고온 압축 시편의 직경은 5.5mm 이고 길이는 8.75mm 인 환봉으로 가공하였다. 실험온도 범위는 650-900°C 까지 각 50°C 간격으로 진변형률 1.2 까지 압축하였으며, 이때의 변형률 속도는 0.001, 0.01, 0.1, 1, 10 s^{-1} 로 수행하였다.

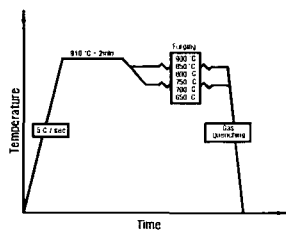


Fig. 2 Schematic diagram of thermal-mechanical test conditions

실험 시 승온 속도는 5°C/sec 로 910°C 까지 상승시킨 후 실험 온도가 되었을 때 시편 전체에 균일한 온도에 이르게 하기 위하여 2 분간 유지한 후 압축 시험을 수행하였다. 실험 방법은 Fig. 2 에 나타내었다.

3.2 실험 결과

Fig. 3 에는 각 온도에 따른 진응력-진변형률 곡선을 나타내었다. 낮은 온도의 경우는 변형 초기에 급격히 최대응력까지 상승 한 이후 변형률이 증가함에 따라 감소하는 경향을 나타내며, 고온의 경우는 점진적인 증가 후 안정한 유동 영역으로 진행해가는 경향을 볼 수 있다. 이러한 이유는 낮은 온도의 경우, 고온 소성가공에 따른 회복과정이 느리고 교차슬립과 전위상승이 어려워 연화 속도가 매우 늦기 때문에 가공경화는 동적 회복만으로는 균형을 이루지 못하고, 전위밀도는 변형률과 함께 점진적으로 증가하여 결국 변형 동안 동적 재결정이 시작된다. 때문에 가공 연화는 동적 회복과 동시에 동적 재결정에 의해 발생하기 때문에 최고 응력 후 급격한 유동응력 현상을 겪게 된다.

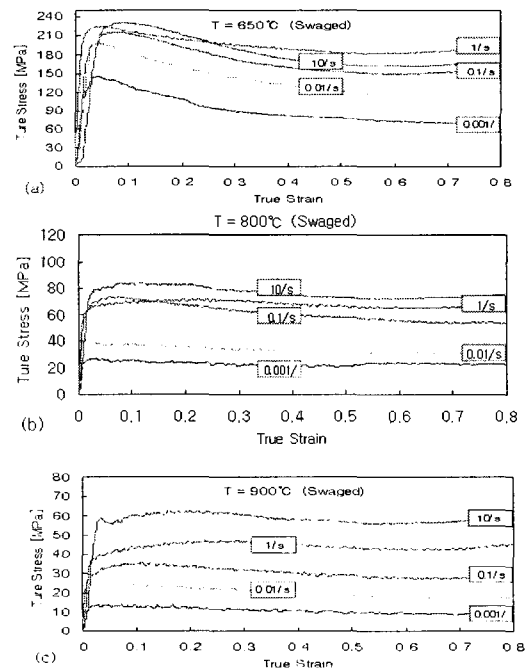


Fig. 3. True stress-true strain curve of Ti-10Ta-10Nb alloy at different strain rates and temperatures.

또한, 고온의 경우 동적 재결정의 영향을 크게 받지 않기 때문에 변형률 속도의 변화에 따라 유동응력은 분명한 차이를 보이고 있으나 저온의 경우,

특히 동적 재결정 형성이 보다 쉬운 조건이 높은 변형률 속도일수록 유동응력이 비슷한 값을 갖는 경향을 나타내고 있다.

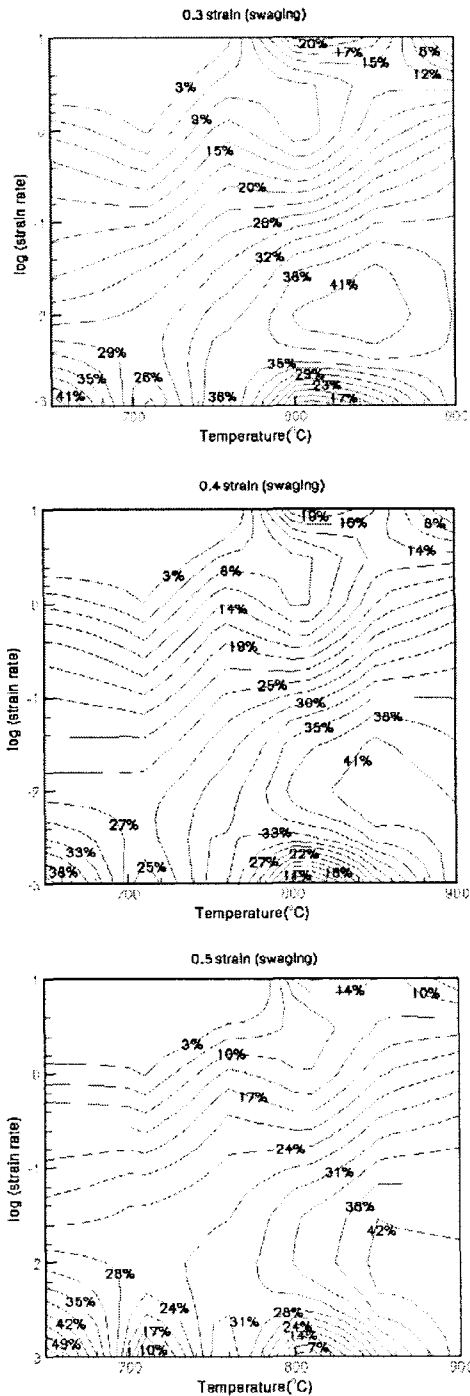


Fig. 4. Processing map of Ti-10Ta-10Nb at different strains

금속재료의 압축시험 공정 시 재료 외부에서 가해지는 변형일은 재료의 변형저항에 기인한 열로 전환되어지는데, 변형률 속도가 점차적으로 빨라짐에 따라 소성 변형에 기인하는 열은 외부로 전달할 시간이 충분히 갖지 못하게 되어 재료의 소성 유동 응력에 변화를 초래하게 된다. 이로 인하여 실제 유동응력은 감소하기 때문에 상승 온도에 대한 보상이 요구되며 이를 식으로 나타내면 다음과 같이 나타낼 수 있다⁸⁾.

$$\Delta T = \frac{\psi}{\rho c} \int \sigma d\varepsilon$$

여기서, ρ : 밀도, ψ : 변형열에 대한 효율, σ : 유동응력, ε : 변형률을 각각 나타낸다.

3.3 Processing map

Fig.4 에는 변형율 0.3, 0.4, 0.5 일 때 각각의 Processing map 은 나타내었다. Map 의 전체적인 형상은 600°C, 650°C 등, 낮은 온도영역에서 변형률 속도에 따른 변화를 크게 나타내고 있다. 즉 낮은 온도 높은 변형률 속도에서는 3%이하의 매우 낮은 효율을 가지며, 낮은 온도 낮은 변형률 속도에서는 비교적 높은 효율을 보임에 따라 낮은 온도영역에서는 매우 극단적인 효율 변화를 나타냄을 알 수 있다. 이는 가공 온도가 낮을수록 변형률 속도의 영향이 큰 요소로 작용함을 알 수 있다. 또한 전체적으로 높은 효율은 변형율이 증가함에 따라 고온 쪽으로 이동해 가는 형상을 관찰할 수 있다. 이는 변형율이 증가 할수록 전위 밀도의 상승을 유발시키며 이럴 경우 낮은 온도에서는 전위의 확산을 원활하게 이루어질 수 있는 활성화 에너지를 갖지 못하게 되어 효율이 저하되는 것으로 판단된다. 비교적 높은 효율을 갖는 낮은 변형률 속도 영역 중에서의 800°C, 0.001S⁻¹ 과 800°C, 0.001S⁻¹ 의 경우는 10% 내외의 낮은 효율을 갖는다. 이러한 영역은 가공 불공정 영역으로 분류 되어질 수 있으며, 이런 경우 재료 내부에서는 Shear band나 Edge crack 등이 발생되었음을 의미한다. Fig.5 는 800°C, 0.001S⁻¹ 의 변형률 속도에서 나타나는 가공 후 미세조직 사진이다. 낮은 변형률 속도로 인해 동적 재결정은 발생하지 않았으나 grain 들이 불 균일하게 변형되어 있는 형상을 볼 수 있으며 국부적인 Shear band 가 발생 되었음을 볼 수 있다.



Fig. 5. The microstructure of sample forged at 800°C, 0.001s⁻¹.

4. 결론

의료용 소재로 개발된 Ti-10Ta-10Nb 합금을 진공도 10⁻²Torr 에서 고온 압축 변형 실험을 통하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

1. 실험 온도 범위는 650~900°C까지이며, 진공력-진변형률 곡선을 고찰해 보면, 낮은 온도의 경우는 고온 소성가공에 따른 회복과정이 느리고 교차슬립과 전위상승이 어려워 연화 속도가 매우 낮기 때문에 가공경화는 동적 회복만으로는 균형을 이루지 못하고 동적 재결정이 발생하나 고온의 경우는 최대 응력까지 유연하게 상승된 후 큰 유동응력 감소없이 안정적인 응력상태로 진행하게 된다.
2. 750°C 이상의 높은 온도에서는 0.001, 0.01, 0.1s⁻¹ 까지 완만한 가공 효율을 나타내고 있는 반면 낮은 온도 영역에서는 높은 변형률 속도에서는 매우 낮은 효율을, 그리고 낮은 변형률 속도에서는 비교적 높은 효율을 보임에 따라 매우 극단적인 효율 변화를 나타냄을 알 수 있다. 이는 가공 온도가 낮을수록 변형률 속도의 영향이 큰 요소로 작용하기 때문에 낮은 영역에서 소성가공을 하기 위해서는 적절한 변형률 속도를 선정해야 함을 의미 한다.
3. 변형율이 증가함에 따라 높은 효율은 고온 쪽으로 이동해 가는 현상을 관찰할 수 있다. 이는 변형율이 증가 할수록 전위 밀도의 상승을 유발시키며 이럴 경우 낮은 온도에서는 전위의 확산을 원활하게 이루어질 수 있는 활성화 에너지를 갖지 못하게 되어 효율이 저하되는 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 한국과학재단의 2001 년 목적 기초 연구비의 지원을 받아 수행되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사를 드립니다.

참고문헌

1. J Gail V. W. Johnson and Richard S. Jope, "Aluminum impairs glucose utilization and cholinergic activity in rat brain in vitro", *Toxicology*, Vol 40, Issue 1, pp. 93-102. 1986.
2. J A. Lione. "The prophylactic reduction of aluminium intake", *Food and Chemical Toxicology*, Vol 21, Issue 1, February pp.103-109, 1983
3. S. K. Agarwal, L. Ayyash, C. S. Gourley, J. Levy, K. Faber and C. L. Hughes Jr., "Evaluation of the Developmental Neuroendocrine and Reproductive Toxicology of Aluminium", *Food and Chemical Toxicology*, Vol 34, Issue 1, pp. 49-53, 1996.
4. S.L. Semiatin, V. Seetharaman, I. Weiss, "Hot workability of titanium and titanium aluminide alloys-an overview", *Mat. Sci. Eng. A243*, pp. 1-24, 1998.
5. T. Seshacharyuly, Steve C. Medeiros, William G. Frazier, Y.V.R.K. Prasad, "Unstable flow during supratransus working of Ti-6Al-4V, *Materials Letters.*, pp.133-139. 2001.
6. P.E. Wellstead "Introduction to Physical system modeling", Academic Press, New York, NY, pp. 9-44, 1979.
7. S.L. Semiatin, G.D. Lahoti, "Deformation and unstable flow in hot forging of Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo-0.1Si", *Mat. Trans.*, pp.1705-1717, 1981.
8. "Metals Handbook" ASM, 9th Ed, vol. 9, pp. 458.