

β-열처리시 Nb 첨가량과 냉각속도가 Zr 합금의 상변태에 미치는 영향

최병권 · 김현길[†] · 정용환

한국원자력연구소, 지르코늄신합금 핵연료피복관 개발팀

Effect of Nb-content and Cooling Rate during β-quenching on Phase Transformation of Zr Alloys

B.K. Choi, H.G. Kim[†] and Y.H. Jeong

Zirconium Fuel Cladding Team, Korea Atomic Energy Research Institute, Daejeon 305-353, Korea

Abstract Zr-xNb alloys (x = 0.2, 0.8, 1.5 wt.%) were prepared to study the characteristics of the phase transformation in Zr-Nb system. The samples were heat treated at β-temperature (1020°C) for 20 min and then cooled with different cooling rate. The microstructures of the specimens having the same compositions were changed with cooling rate and Nb content. The Widmanstätten structure was observed on the furnace-cooled sample. The relationship between α-Widmanstätten and β-phase was the {0001}α//{110}β, <11 $\bar{2}$ 0>//<111>. The β-phase in Widmanstätten structure of Zr-Nb alloys containing Nb more than solubility limit was identified as β_{Zr} phase which was a stable phase at high temperature. In the water quenched samples, two kinds of martensite structures were observed depending on the Nb-concentration. The lath martensite was formed in Zr-0.2, 0.8 wt.% Nb alloys and the plate martensite having twins was formed in Zr-1.5 wt.% Nb alloy.

(Received 10 March 2004; accepted 19 July 2004)

Key words: Zr, Zr-Nb, Microstructure, Widmanstätten, Martensite, Phase transformation, Diffusion

1. 서 론

지르코늄합금의 미세조직 특성에 대한 연구는 이 합금의 부식과 기계적 특성을 이해하기 위한 중요 요소이다. 우수한 성능의 핵연료피복관용 지르코늄합금을 개발하기 위하여, 많은 연구자들은 다양한 미세조직을 갖는 Nb 첨가 지르코늄합금의 부식거동에 대하여 연구하여 왔다¹⁻³⁾. 지르코늄합금에 첨가되는 Nb은 β 안정화 원소이며 고용도 이상으로 첨가되면 β상 (β_{Zr}, β_{Nb})을 형성시키는 것으로 알려져 있다⁴⁾. 고용도 이상으로 Nb이 첨가된 Zr-Nb 이원계 합금은 열처리 조건에 따라 다양한 형태의 미세조직이 나타난다. 여러 연구자들은 여러 조건의 열처리 변수를 도입한 Zr-Nb 합금의 미세조직에 대한 분석을 수행하여 왔다⁵⁻¹²⁾. 열처리 조건을 변화시킨 순수한 지르코늄의 미세조직에 대한 연구로부터, Stewart⁵⁾ 등에 의하면 Widmanstätten 구조의 미세조직은 β 영역으로부터 20°C/s 보다 낮은 냉각속도로 냉각시킬 때

형성된다고 하였다. Holt⁶⁾는 Zircaloy-4에서 Widmanstätten 구조의 미세조직은 1100°C에서 공냉시킬 때 형성된다고 하였고, 이때 Widmanstätten 조직의 핵은 β상의 결정립계와 β상 내에 존재하는 석출상으로부터 생성되는 것을 관찰하였다. α-Widmanstätten 조직과 β상은 {0001}α//{110}β, <11 $\bar{2}$ 0>//<111>의 결정학적 관계를 가지고 있는 것이 보고되기도 하였다⁷⁾. 또한, Higgins⁸⁾ 등의 연구에 의하면 Widmanstätten 조직은 Zr-2.5Nb 합금을 β상 영역에서 서냉시킬 때 형성된다고 하였다. Zircaloy-4 합금에서 Widmanstätten 조직의 plate 폭은 산소함량이 증가함에 따라 증가된다고 하였다⁹⁾. 이러한 여러 연구결과에도 불구하고, Nb 함량 변화에 의한 Widmanstätten 조직의 변화와, TEM을 이용한 미세조직 특성 분석은 이루어지지 않은 실정이다.

일반적으로 마르텐사이트 조직은 급랭에 의한 무확산 변태에 의해 생성되는 것으로 알려져 있다. 지르코늄 합금에서의 무확산변태에 대한 연구로부터 Ms

[†]E-mail : ex-lover@kaeri.re.kr

온도는 Nb 첨가량이 증가하면 내려가고 산소나 Sn의 함량이 증가되면 올라가는 것으로 보고되었다¹⁰⁾. Nb 함량에 따른 마르텐사이트조직의 특성은 Nb 함량이 적으면 슬립 변형으로 쌍정의 형성이 어렵지만, Nb 함량이 증가된 지르코늄 합금에서는 슬립에 의한 변태보다는 쌍정에 의한 변태가 주로 발생한다¹¹⁾. Nb이 첨가된 지르코늄 합금의 미세조직에 대한 연구에서 마르텐사이트 조직은 Nb의 첨가량에 따라 lath(massive)와 plate(acicular) 형태로 나타난다고 하였고, plate 마르텐사이트의 쌍정의 common plain은 $\{10\bar{1}0\}$ 이고 habit plane은 $\{334\}$ 또는 $\{344\}$ 면이 될 수 있다고 하였다¹²⁾. Srivastava¹³⁾ 등은 lath 마르텐사이트의 계면이 쌍정의 계면과 유사한 관계가 있다고 보고하였다.

이와 같은 연구 결과를 보면 Zr-Nb 합금에서 일부 조성에 대한 상변태 거동에 대한 많은 연구는 있지만 냉각속도와 같은 열처리 변수와 Nb 함량변화에 대한 복합적인 연구는 수행되지 않았다. 따라서 본 연구에서는 Nb 함량변화 및 냉각속도 변화에 따른 미세조직변화 특성을 TEM을 이용하여 분석하고자 하였다.

2. 실험방법

열처리와 Nb 함량에 의한 미세조직특성을 연구하기 위하여, Zr-xNb ($x=0.2, 0.8, 1.5$ wt. %) 조성의 잉곳을 진공 아르곤해방법으로 제조하였다. 300 g의 중량을 갖는 button 형태의 잉곳은 열간 압연과 냉간 압연을 도입하여 약 2 mm 두께의 판재시편으로 제조하였다. 제조된 판재시편은 15×20 mm²의 크기로 절단한 후 석영관내에 진공 봉입하여 β 영역(1020°C)에서 20분 유지 후 다른 냉각속도를 적용하여 냉각하였다. 냉각속도는 Chromel-Alumel 열전대로 연결된 응답속도가 빠른 x-y 기록계를 이용하여 측정하였다. 냉각속도는 표 1과 같이 측정되었는데 노냉을 수행하면 $0.1^\circ\text{C}/\text{sec}$ 의 냉각속도가 얻어졌고 수냉을 수행하면 $1200^\circ\text{C}/\text{sec}$ 의 냉각속도가 얻어졌다.

열처리된 합금의 미세조직은 TEM으로 분석하였다. TEM 분석을 위한 얇은 박막의 시편은 약 70 μm 두께까지 기계적으로 연마한 후 90 vol. %의 에탄올과 10 vol. %의 과염소산 용액을 -35°C 로 냉각

Table 1. Heat treatment condition of Zr-xNb alloys with cooling rate.

Specimens	Heat treatment	Cooling rate
Zr-xNb alloys ($x=0.2, 0.8, 1.5$ wt. %)	1020°C , 20 min	(a) Furnace cooling ($0.1^\circ\text{C}/\text{s}$) (b) Water quenching ($1200^\circ\text{C}/\text{s}$)

시킨 조건에서 twin-jet polisher를 이용하여 제작하였다. 합금에서 생성된 제 2상은 TEM에 부착된 energy dispersive X-ray spectrometer(EDS)와 selected area diffraction(SAD)를 이용하여 분석하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 β -열처리 후 미세조직 특성

그림 1은 Nb이 첨가된 지르코늄 합금에서 냉각속도를 변화시켰을 때의 미세조직을 TEM으로 관찰한 것으로서, 합금의 미세조직은 Nb의 함량과 냉각속도에 따라 다르게 관찰되었다. 냉각속도가 $0.1^\circ\text{C}/\text{sec}$ 인 노냉에 의해 형성된 시편의 미세조직에서 Zr-0.2

Fig. 1. TEM micrographs of Zr-xNb alloys with different cooling rate; (a) furnace cooled ($0.1^\circ\text{C}/\text{s}$) (b) water quenched ($1200^\circ\text{C}/\text{s}$).

wt.% Nb 합금은 조대하게 성장된 결정립이 관찰되었고 Nb의 함량이 증가된 Zr-0.8, 1.5 wt. % Nb 합금은 Widmanstätten 형태를 가진 층상 조직이 관찰되었다. 이 때 형성되는 Widmanstätten 조직은 확산 및 무확산 변태의 특성을 모두 가지고 있는 것으로 알려져 있다. 냉각속도가 같을지라도 합금의 미세조직은 첨가되는 Nb량에 의해 다르게 나타났는데, 이는 Widmanstätten 조직의 형성이 Nb의 특정한 첨가량에 영향을 받은 것으로 생각된다. Zr-Nb 합금에서 Nb 함량이 0.2 wt. %로 첨가되면 Widmanstätten 조직은 관찰되지 않았는데, 이는 Zr에 첨가되는 Nb량이 고용도 이하로 매우 적기 때문으로 생각된다. 층상 조직이 형성되려면 α 상과 β 상이 공존하여야 하는데 첨가된 Nb이 모두 α 상 내에 고용되었기 때문에 β 상이 생성되지 않았고 이로 인하여 Widmanstätten 조직이 나타나지 않은 것으로 사료된다. 그러나 이러한 결과는 Stewart⁵⁾ 등에 의한 순수한 지르코늄의 미세조직에서 Widmanstätten 조직의 형성되는 것과는 일치하지 않았는데 이는 냉각속도의 차로 인한 것으로 생각된다. 본 실험에서는 Stewart가 수행한 실험보다 냉각속도가 200배 정도로 매우 느리기 때문에 확산 시간이 충분하여 재결정된 미세조직이 생성된 것으로 사료된다. Zr-Nb 합금에서 Nb의 첨가량이 고용한도보다 많은 0.8 wt. % 이상으로 첨가된 합금에서 관찰되는 Widmanstätten 조직은 α 상 내에 β 상이 길게 늘어져 있는 형태로 관찰되었다. 노냉조건에서 결정립 성장을 위한 충분한 시간이 있어도 α 상이 생성되면서 고용도 이상의 Nb 원소가 확산하여 β 상을 형성하고, 형성된 β 상이 α 상의 성장을 억제하기 때문에 층상 조직이 계속 유지되는 것으로 생각된다. 이와 같은 결과로 Nb 첨가 Zr 합금에서 냉각속도가 매우 느린 노냉의 열처리를 실시하였을 때 Widmanstätten 조직이 생성되는 조건은 고용도 이상으로 Nb이 첨가되는 경우인 것으로 나타났다. 또한 이 합금계에서 Widmanstätten 조직이 형성되는 경우 plate의 폭은 Nb의 첨가량이 증가되면 감소하였고, α 상 사이에 형성되는 β 상의 분률은 Nb의 첨가량이 증가되면 증가하였다.

마르텐사이트 조직은 1200°C/sec의 빠른 냉각속도로 수냉시킨 모든 합금에서 관찰되었는데 마르텐사이트

트의 미세조직도 첨가되는 Nb의 함량에 따라 다르게 나타났다. 전위가 주로 관찰되는 lath 마르텐사이트 조직은 Nb이 0.2, 0.8 wt. %로 첨가된 합금에서 관찰되었고, twin이 주로 관찰되는 plate 마르텐사이트 조직은 Nb의 함량이 1.5 wt. %로 첨가된 합금에서 관찰되었다. Nb의 첨가량에 의해 변화되는 마르텐사이트 조직의 특성은 여러 연구자들에 의해 보고되었다^{12, 14)}. 마르텐사이트의 미세조직은 불균질한 lattice invariant shear (LIS)의 특성에 영향을 받는 것으로 연구¹¹⁾되었으며 또한 lath, plate 마르텐사이트 조직의 하부구조는 합금의 조성과 결정학적 특성에 연관이 있는 것으로 보고되었다¹⁵⁻¹⁸⁾. Zr-Nb 합금에서의 마르텐사이트 미세조직 차이는 Nb 함량 변화에 의한 Ms 온도¹⁰⁾에 따라 좌우되는데, Nb의 첨가량이 증가된 합금에서는 Ms 온도의 감소로 인하여 slip 기구에 의한 변태가 발생하지 않고 twin 기구에 의한 마르텐사이트 변태가 일어난다¹¹⁾. Banerjee 등의 연구결과에 의하면 순수한 지르코늄과 Zr-0.8Nb 합금에서는 massive 마르텐사이트 조직이 형성되고 특히 순수한 지르코늄에서 형성된 plate-plate의 경계면은 직선적이지 않다고 하였다. 그러나, 본 연구에서 관찰된 Zr-0.2 wt. % Nb 합금에서 plate 마르텐사이트의 경계면은 직선적인 것으로 나타났다. 이는 TEM에 의하여 관찰되는 영역이 너무 제한적이기 때문에 나타나는 현상으로 생각된다. 전체적으로 빠른 냉각속도를 위해 수냉시킨 합금에서, 0.2, 0.8 wt. %의 Nb를 첨가한 Zr 합금에서는 slip 기구에 의한 massive 마르텐사이트의 미세조직이 관찰되었고 Nb의 함량이 1.5 wt. %로 첨가된 합금에서는 twin 기구에 의한 plate 마르텐사이트 조직이 형성되었는데 이러한 결과는 Banerjee 등의 연구결과와 유사하다.

Nb 첨가 지르코늄 합금에서 노냉과 수냉과 같은 다른 냉각속도로 열처리하면 이 합금의 미세조직은 Nb 첨가량에 의해 크게 의존되었다. 층상 형태의 Widmanstätten 조직은 Nb의 첨가량이 Zr 합금에 고용도 이상일 때 형성되었고, 기지조직의 하부구조가 twin으로 형성되는 plate 마르텐사이트 조직은 Nb의 첨가량이 고용도 보다 높은 함량인 0.8 wt. %를 초과하여만 형성되었다. 이는 생성되는 상이 확산 또는 무확산 변태 중에 어느 쪽에 몰속되는가에

Fig. 2. TEM micrographs of furnace cooled Zr-0.8Nb alloy; (a) bright field image, (b) dark field image and SAD, (c) EDS spectrum of β_{Zr} .

따라 미세조직에 영향을 미치는 Nb의 함량도 다르게 나타나는 것으로 사료된다.

3.2 Widmanstätten 생성상 및 마르텐사이트의 결정학적 특성

그림 2는 0.8 wt. % Nb이 첨가된 지르코늄합금을 노냉하였을 때 형성된 Widmanstätten 조직 내의 β 상을 관찰한 것이다. β 상은 그림 2의 (b)와 같이 bcc 결정구조를 갖고 그림 2의 (c)와 같이 Nb의 함량이 약 15 wt. %인 β_{Zr} 상으로 분석되었다. 또한 1.5 wt.% Nb이 첨가된 지르코늄 합금에서도 동일한 β_{Zr} 상이 형성되었다. 냉각속도가 0.1°C/sec인 노냉을 수행하면 Zr-Nb 합금계에서 안정상인 β_{Nb} 상은 형성되지 않고 준 안정상인 β_{Zr} 상이 형성되었는데 이는 β_{Nb} 상이 형성될 정도의 충분한 시간이 되지 않았기 때문으로 볼 수 있다.

지르코늄에서 α 상과 β 상의 결정학적인 방향관계는 $\{0001\}\alpha//\{110\}\beta$, $\langle 11\bar{2}0 \rangle\alpha//\langle 111 \rangle\beta$ 인 것으로 연구되었다⁷⁾. 본 연구에서도 노냉에 의해 형성된 Widmanstätten 조직에서 α 기지와 β_{Zr} 상과의 방위

Fig. 3. TEM micrographs of furnace cooled Zr-1.5Nb alloy; (a) bright field image, (b) dark field image, and (c) SAD pattern.

관계를 그림 3과 같이 분석하였다. β_{Nb} 의 첨가에 의해 안정화된 β_{Zr} 상과 α 기지의 방위관계는 이전의 연구와 일치하였는데, 이는 (0001) α 와 (110) β 의 결정학적 상호관계가 Burgers에 의해 제안된 이론¹¹⁾과 유사하다는 것을 의미한다. 서냉되는 동안 이러한 Burgers 관계를 만족하면서 초기의 β 상에서 α 상이 핵 생성 후 특정한 방향으로 성장하기 때문에 층상의 Widmanstätten 조직이 얻어지는 것으로 생각된다. α 상의 폭은 첨가된 Nb이 증가되면 감소되지만 형성된 β 상 내에서 Nb의 농도는 변화되지 않았는데 이러한 특성으로 인하여 Nb 함량이 증가되면 생성되는 β 상의 분율이 증가하였다.

그림 4는 수냉된 Zr-0.2 wt. % Nb 합금의 미세조직에 대하여 마르텐사이트 결정학적 특성을 분석한 것이다. Packet 내에 형성된 lath 마르텐사이트는 주위의 조직과 거의 평행하게 형성되었고, 인접한 laths 들과는 결정경계가 작은 각을 가지는 면간 관계를 유지하고 있었다. 이는 lath-lath 결정경계가 twin 경계과 유사한 결정경계의 특성을 갖는 것으로 SAD 분석결과 나타났다. Srivastava¹³⁾ 등 언급한

Fig. 4. TEM micrographs of water quenched Zr-0.2Nb alloy; (a) bright field image, (b) dark field image, and (c) SAD pattern.

바와 같이 packet 내 각각의 lath 결정경계는 twin 변형과 유사한 전단기구에 의해 나타난다는 보고와 일치하였다. 그러나 본 연구의 결과는 Srivastava의 연구와는 달리 매우 저농도의 Nb 첨가 지르코늄합금에서도 twin과 유사한 lath-lath 경계의 특성이 고농도의 Nb 첨가합금(Zr-2.5 wt. % Nb)뿐만 아니라 이러한 결정학적 특성이 나타날 수 있음이 확인되었다. 마르텐사이트의 하부조직은 매우 복잡한 형태의 혼합조직이 나타난다. 따라서 미량의 0.2 wt.% Nb 이 첨가된 지르코늄합금에서도 일부의 조직에서는 twin과 유사한 lath-lath 경계가 관찰될 수 있을 것으로 생각된다.

그림 5는 0.8 wt. %의 Nb이 첨가된 수냉된 합금을 관찰한 결과로서 이 합금의 미세조직은 거의 비슷한 간격을 갖는 전위들이 평행하게 배열되어 있는 lath-lath의 경계가 관찰되었다. 고 배율에서 lath 경계에 많은 전위들이 관찰되었기 때문에 이는 lath 경계가 전단기구에 의해 쉽게 형성되는 전위 그룹의 형성으로 볼 수 있다. 전위들 사이의 간격이 약 12

Fig. 5. TEM micrographs of water quenched Zr-0.8Nb alloy; (a) bright field image, (b) bright field image, and (c) SAD pattern.

nm로 측정되었고, 각각 전위의 길이는 110에서 190 nm로 측정되었으며, 또한 전위들은 $(\bar{1} 101)$ 면에서 형성되었다. β 영역에서 급랭한 Zr-Nb 합금의 미세조직을 TEM으로 관찰한 결과 전위가 도입된 lath 마르텐사이트와 twin이 도입된 plate 마르텐사이트의 두 가지 다른 형태의 조직이 형성된 것이 관찰되었다. Lath 마르텐사이트 조직은 가장자리의 변형 영역을 최소화 하기 위한 self-accommodation에 의해 얻어진다고 보고되었다¹³⁾. 본 연구에서는 lath(massive) 마르텐사이트는 Zr-Nb 합금에 Nb의 함량이 0.8 wt. % 까지 함유된 합금에서 형성된 것이 관찰되었고, packet 내 lath의 폭은 고용된 Nb의 함량이 증가함에 따라 감소되었다. 이는 마르텐사이트 변태를 위한 전단변형 에너지가 기지 내에 고용된 Nb에 의해 영향을 받는 것으로 생각될 수 있다. 따라서, lath 마르텐사이트의 특성을 갖는 0.2, 0.8 wt.% Nb의 합금에서 다른 형태의 lath 결정립 형태가 관찰되는 것으로 생각된다.

Nb의 함량이 0.8 wt. % 이상으로 첨가된 합금에

Fig. 6. TEM micrographs of water quenched Zr-1.5Nb alloy; (a) bright field image and (b) SAD pattern.

서 나타나는 twin 마르텐사이트의 미세조직적인 특징은 β 결정립에서 초기의 마르텐사이트 plate의 형성과 plate 내에 형성되는 여러 다양한 방향을 가지는 하부구조의 형태로 볼 수 있다. 그림 6은 1.5 wt. %의 Nb이 첨가된 Zr-Nb 합금을 수냉하였을 때 형성된 twin(plate) 마르텐사이트 구조를 관찰한 것이다. 수냉된 1.5 wt.% Nb 첨가 합금의 미세조직은 대부분 twin 마르텐사이트 조직이 형성된 것이 확인되었다. Twin 마르텐사이트의 plate는 $\{10\bar{1}0\}$ 의 내

부 twin이 존재하는 상태였다. 이러한 twin 면은 그림 6의 (b)에 나타난 바와 같이 SAD 분석으로 알 수 있다.

지르코늄 합금에서 M_s 온도가 650~700°C 이하일 경우에는 주로 plate 형태의 마르텐사이트가 형성되는 것으로 연구¹²⁾되었는데, 이러한 마르텐사이트 변태 특성은 합금에 첨가되는 Nb 함량증가에 의해 M_s 온도가 감소되고 이로 인하여 변태 기구가 slip 보다는 twin에 의하여 일어나기 때문으로 볼 수 있다. 이런 결과로 1200°C/sec의 냉각속도를 적용하여 합금을 냉각시키면, Nb의 함량이 1.5 wt. % 이상이 되어야만 M_s 온도가 700°C 이하로 감소되고 twin 마르텐사이트가 얻어지는 것으로 볼 수 있다. Williams and Gilbert¹⁴⁾의 보고에 의하면 Nb의 함량이 지르코늄 합금에 고용도 이상인 0.6 wt. % 이상이면 twin 마르텐사이트가 형성되고 고용도 이하로 첨가되면 slip 마르텐사이트가 형성된다고 하였다. 그러나, Banerjee와 Krishnan¹²⁾에 의하면 순수한 지르코늄과 Zr-Nb 합금에서 Nb의 함량이 0.8 wt. % Nb까지는 massive 마르텐사이트가 형성되고, Nb 함량이 그 이상으로 첨가되면 acicular 마르텐사이트가 형성된다고 하였다. 본 연구결과에서 Nb 함

Table 2. Summary of microstructure in Zr-xNb alloys with cooling rate

	furnace cooled (0.1 °C/s)	water quenched (1200 °C/s)
0.2Nb	<ul style="list-style-type: none"> recrystallized large grain 	<ul style="list-style-type: none"> lath (massive)-martensite : twin related laths interface
0.8Nb	<ul style="list-style-type: none"> Widmanstätten : parallel plate of α and β_{Zr} $(0001)\alpha//\{110\}\beta$ 	<ul style="list-style-type: none"> lath (massive) -martensite : lath-lath interface composed of many dislocations $\langle 2113 \rangle_H$ type dislocations : inhomogeneous shear by slip
1.5Nb	<ul style="list-style-type: none"> Widmanstätten : parallel plate of α and β_{Zr} $(0001)\alpha//\{110\}\beta$: smaller width α between β_{Zr} than 0.8Nb alloy 	<ul style="list-style-type: none"> plate (acicular)-martensite : mainly parallel twins (1010) internal twins $\{334\}$ habit plane : inhomogeneous shear

량에 의한 마르텐사이트의 조직학적 특성은 Banerjee의 연구결과와 같이 나타났다. 이러한 차이는 합금 내에 불순물로 유입된 다른 합금원소나 또는 냉각속도의 차이에 의해 나타난 것으로 생각된다. 따라서 마르텐사이트의 미세조직을 결정하는 주요 원인으로서는 Nb 함량뿐만 아니라 냉각속도의 영향도 고려해야 한다. 다른 결과가 나타나는 또 다른 요인은 마르텐사이트의 미세조직이 매우 복잡한 조직으로 혼합되어 나타나기 때문에 관찰된 부위에 따라 다를 수 있다는 것이다.

Zr-Nb 합금의 미세조직적인 특징은 표 2에 요약하였다. 0.1°C/sec의 냉각속도를 적용하면, Nb 첨가합금의 미세조직은 재결정된 조대한 조직과 Widmanstätten의 두 가지 형태로 관찰되었다. 층상 형태의 Widmanstätten 조직의 형성은 Zr-Nb 합금에서 Nb의 함량이 고용도보다 높게 첨가되는 것이 중요한 역할을 하는 것으로 나타났다. 1200°C/sec의 빠른 냉각속도를 적용하면, 합금의 미세조직은 lath와 plate 마르텐사이트 형태로 나타났다. Lath 마르텐사이트 조직은 Zr-Nb 합금계에서 Nb의 함량이 0.8 wt. %까지 첨가되면 형성되었고, 그 이상으로 Nb이 첨가되면 plate 마르텐사이트가 형성되었다.

4. 결 론

동일한 조성을 갖는 Zr-Nb 합금에서 미세조직은 Nb 첨가량과 냉각속도에 따라 다르게 나타났다. 이들 2원계 합금에서 재결정된 조직과 Widmanstätten 조직은 노냉에 의해서 형성되었고 lath 및 plate 마르텐사이트 조직은 급랭에 의해 형성되었다. 이들 조직의 특징은 Nb 첨가량에 의해 결정되었다.

Widmanstätten 조직은 Nb의 첨가량이 0.8 wt. % 이상일 때 형성되었기 때문에, Zr-Nb 합금에서 Widmanstätten 조직이 형성되려면 Nb의 함량은 고용도 이상으로 첨가 되어야 한다.

Lath와 plate와 같은 마르텐사이트의 조직학적 특성도 Nb의 첨가량에 의해 변화되었는데 Nb 첨가량이 0.8 wt. % 보다 높아야만 plate 마르텐사이트가 형성되었다. 마르텐사이트의 조직학적 특성은 Nb 첨

가량 증가에 의한 Ms 온도에 의한 영향을 받는 것으로 나타났다.

감사의 글

본 연구는 한국원자력연구소의 지르코늄신합금개발과제의 일환으로 수행되었으며 이에 감사 드립니다.

참고문헌

1. G. P. Sabol, R. J. Comstock, and U. P. Nayak, Zirconium in the Nuclear Industry, ASTM STP. **1354** (2000) 525.
2. V. F. Urbanic and M. Griffiths, Zirconium in the Nuclear Industry, ASTM STP. **1354** (2000) 641.
3. Y. H. Jeong, K. O. Lee, and H. G. Kim, J. Nucl. Mater., **302** (2001) 9.
4. B. Cox, C. E. Lundin, Proceedings of the USAEC Symposium on Zirconium Alloy Development, Castlaewood, Pleasanton, California, Nov. **12-14** (1962) p. 9.
5. D. Stewart, B. A. Hatt, and J. A. Roberts, Brit. J. Appl. Phys., **16** (1965) 1081.
6. R. A. Holt, J. Nucl. Mater., **35** (1970) 322.
7. W. G. Burgers, Physica **1** (1934) 591.
8. G. T. Higgins and E. E. Banks, Isothermal Promonotectoid Transformation, Vol. 4, No 7~8 p. 341.
9. O. T. Woo and K. Tangri, J. Nucl. Mater., **79** (1972) 82.
10. C. E. L. Hunt and P. Niessen, J. Nucl. Mater., **38** (1971) 17.
11. Nishiyama, Martensitic Transformation, Academic Press, New York, San Francisco, London (1978) 6.
12. S. Banerjee and K. Krishnan, Acta, Metallurgica, **19** (1971) 1317.
13. D. Srivastava, Madangopal K., S. Banerjee, and S. Ranganathan, Acta metal. Mater., **41** (1993) 3445.
14. C. D. Williams and R. W. Gilbert, Trans. Japan Inst. Metals **9**, Suppl., (1968) 625.
15. Z. Nishiyama, in: M.E. Fine, M. Meshii, C.M. Wayman (Eds.), Martensitic Transformation, Academic, New York, 1988.
16. J. W. Christian, Theory of Transformations in Metals and Alloys, Pergamon Press, Oxford, 1965.
17. G. Krauss, A. R. Marder, Metal. Trans., **2** (1971) 2343.
18. S. Banerjee, R. Krishnan, Metal. Trans., **4** (1973) 1811.