

## Zr, Zircaloy-4, Zr-Nb 합금의 미세조직 및 재결정 거동에 관한 연구

이명호 · 최병권 · 백종혁 · 정용환  
한국원자력연구소 키르코늄 신합금 핵연료피복관 개발팀

### A Study on the Recrystallization Behavior and Microstructure of Zr, Zircaloy-4 and Zr-Nb Alloys

M.H.Lee, B.K.Choi, J.H.Baek and Y.H.Jeong  
Advanced Zr-Alloy Development, Korea Atomic Energy Research Institute

(1999년 10월 1일 받음, 2000년 5월 17일 최종수정본 받음)

**초 록** Zr합금의 재결정 거동 및 미세조직 변화에 미치는 열처리 온도 및 시간의 영향을 조사하기 위하여 순수 Zr과 Zircaloy-4, Zr-0.8Sn-0.4Nb-0.4Fe-0.2Cu, Zr-1Nb 합금을 냉간가공한 후 400°C~900°C에서 각각 30분~5000분 동안 열처리하였다. 열처리 온도에 따른 Zr합금의 경도, 미세조직 및 석출물 특성을 미소경도기, 광학 현미경 및 투과 전자 현미경을 이용하여 조사하였다. 냉간 가공재는 400°C에서 600°C 범위에서 재결정이 일어났는데 합금원소가 증가함에 따라 재결정온도가 상승했고 결정립 성장이 억제되었다. 그리고 합금원소 증가에 따른 경도증가 영향이 재결정 이후에도 지속되었다. 열처리 온도 및 시간에 비례하여 재결정 이후 결정립 크기는 증가한 반면 경도변화는 상대적으로 미미하였다. Fe나 Cu가 Zr에 첨가될 경우 회복중 경도증가가 수반되는 데, 이는 회복중 석출물 생성과 관련이 있는 것으로 사료된다.

**Abstract** To investigate the effect of annealing temperature and time on the recrystallization behavior and microstructure of Zr-based alloys, the specimens of Zr-0.8Sn-0.4Nb-0.4Fe-0.2Cu, Zr-1Nb, Zircaloy-4, and unalloyed Zr were cold-worked and annealed at 400, 500, 600, 700, 800, 900°C for 30 to 5000 minutes. The hardness, microstructure and precipitate of the specimens were investigated by using micro-hardness tester, optical microscope and transmission electron microscope, respectively. The recrystallization of Zr-based alloys occurred between 400°C and 600°C. As the content of alloying elements increased, the hardness and recrystallization temperature of the alloys increased though the grain sizes after recrystallization decreased. It was supposed that the hardness of Zr-based alloy with Fe or Cu increased during recovery by the formation of Fe or Cu precipitates.

**Key words** : Zr-based alloys, Zircaloy-4, Zr-Nb alloys, recrystallization, grain growth, microstructure, annealing

### 1. 서 론

Zr합금은 중성자 흡수가 적고 고온에서 강도, 크립 특성 및 내부식성 등이 우수하여 오랫동안 원자로내의 핵연료 피복재 및 구조재료 사용되어 왔다.<sup>1)</sup> 특히 피복관 재료의 내식성 및 기계적 특성 향상을 위한 많은 연구결과 1960년대 초에 개발된 Zircaloy-4 (Zr-1.5wt.%Sn-0.2wt.%Fe-0.1wt.%Cr) 합금은 현재까지 원자로의 핵연료 피복관 재료로서 커다란 문제없이 사용되고 있으나, 핵연료의 연소도를 증가시키기 위한 고연소도 (high burnup) 핵연료 사용, 열효율 향상을 위한 원자로 고온 가동, 원자로 1차 계통의 방사선량 감소를 위한 고 pH 운전 등으로 원자로의 운전 조건이 가혹해짐에 따라 Zircaloy-4합금보다 내식성 및 기계적 특성이 우수한 핵연료 피복관용 신합금 개발이 진행되고 있다.

공업용 소재는 일반적으로 미세조직에 따라 기계적 특성이 다르고 소재의 미세조직은 화학적 조성 및 가공공정에 따라 변한다. 신합금 개발을 위해서 합금설계, 용해 등, 여러

단계의 가공 및 열처리 과정을 거쳐야 한다. 특히 합금마다 재결정 온도가 다르기 때문에 열처리도 합금마다 다르게 적용되어야 한다. 또한 신합금의 내식성 및 기계적 특성이 합금의 열처리 정도에 따라 상당한 차이가 있기 때문에 신합금의 재결정 온도 및 재결정에 따른 조직 변화를 체계적으로 조사하는 것은 신합금을 개발하는데 있어서 매우 중요하다.<sup>2,3)</sup> 따라서 본 연구에서는 프랑스에서 개발하여 시험중인 Zr-1Nb형 (M5형) 신합금<sup>4)</sup>과 부식 및 강도에 대한 Sn의 상반된 영향과 부식특성에 대한 Nb의 민감성을 고려하여 KAERI에서 설계하여 연구중인 Zr-0.8Sn-0.4Nb-0.4Fe-0.2Cu(K04) 신합금의 재결정 거동 및 미세조직에 영향을 미치는 열처리 온도 및 시간의 영향을 순수 Zr 및 Zircaloy-4와 함께 조사하여 신합금의 제조공정 설정에 필요한 재결정 온도 조건 및 열처리 공정수립에 대한 기초자료를 얻고자 하였다.

Table 1. Chemical composition of Zr-based alloys.

Alloys	Chemical composition(wt.%)					Zr
	Sn	Fe	Cr	Nb	Cu	
Unalloyed Zr	-	-	-	-	-	Bal.
Zircaloy-4	1.5	0.2	0.1	-	-	
K04	0.8	0.4	-	0.4	0.2	
M5 type	-	-	-	1.0	-	

## 2. 실험 방법

### 2-1. 시편제작

본 연구를 위하여 K04 신합금과 M5형 신합금 시편을 설계하여 판재시편으로 제작하였는데, 본 연구에서 사용한 여러 가지 Zr합금의 조성은 표1에 나타났다. 우선 이들 합금은 VAR(Vacuum Arc Remelting) 방법을 이용하여 각각 200g의 button형태의 주괴로 제조하였다.  $10^{-7}$  torr의 진공 상태에서 Ar가스를 주입한 후 합금원소들이 용해되는 동안 불순물이 편석되거나 합금 조성이 불균질하게 분포되는 것을 막기 위해 4회 반복 용해하여 약 12mm 두께의 주괴를 제조하였다. 제조된 K04 신합금의 평균화학 조성은 설계된 바와 같이 Zr를 기제로 하여 0.8%Sn, 0.4%Nb, 0.4%Fe, 0.2%Cu이었고 M5형 신합금은 Zr를 기제로 하여 1%Nb이었다. 또 제조된 주괴의 합금조성을 균일하게 하기 위하여  $\beta$ 상 영역인 1040°C에서 K04 신합금은 40분간, M5형 신합금은 20분간 열처리한 후 수냉하였다. 그리고 균질화 처리된 주괴를 600°C에서 K04 신합금은 60분간, M5형 신합금은 580°C에서 60분간 유지한 후 압하율 71%로 열간 압연을 실시하였다. 열간 압연 후 냉간 압연 시에 시편이 깨지는 것을 방지하고 시편의 응력을 제거하기 위하여 K04 신합금은 610°C에서 3시간동안, M5형 신합금은 590°C에서 11시간 동안 진공 열처리한 후 다음과 같이 냉간 압연하여 시편을 판재로 만들었다. 우선 압하율 50%로 1차 냉간 압연한 후 시편의 응력 제거를 위해 K04 신합금은 580°C에서 2.5시간동안 M5형 신합금은 590°C에서 4시간동안 열처리한 다음 압하율 50%로 2차 냉간 압연을 실시하고 K04 신합금은 580°C에서 2.5시간동안 M5형 신합금은 590°C에서 4시간 동안 재열처리한 후 압하율 70%로 3차 냉간 압연하여 시편의 최종두께가 균일하게 약 1.5mm가 되도록 하였다. 그리고 순수 Zr과 Zircaloy-4는 상용품을 각각 55% 및 60%로 냉간압연하여 두께가 각각 약 0.7mm와 1mm가 되도록 하고 최종 냉간 압연된 각 시편을 10mm×15mm의 크기로 절단하여 최종 열처리 시편으로 사용하였다.

### 2-2. 열처리 및 미세조직 관찰

최종 냉간 압연후 절단한 각 시편을 석영관에 넣어 고진공으로 밀봉하여 400, 500, 600, 700, 800, 900°C의 온도에서 각각 30, 60, 180, 600, 1200, 5000분간 최종 열처리하였다. 400, 500, 600, 700°C에서의 열처리는 3-zone 관상로에서 실시하고, 800, 900°C에서의 열처리는 고온로에서 실시한 후 공냉하였다. 열처리된 시편은 압연방향에 수

직한 면을 관찰할 수 있도록 mounting한 다음, 220번과 1200번 SiC연마지로 연마한 후 HF 10% + HNO<sub>3</sub> 45% + H<sub>2</sub>O 45% 용액으로 etching하여 200배 광학현미경을 사용하여 미세조직을 관찰하고 HMV-2경도기를 이용하여 동 시편에 대한 미소경도를 측정하였다. 경도 측정은 하중 100g, 유지시간 10초로 하였으며 경도값의 오차를 줄이고 자 압흔축이 보다 많은 결정립을 포함할 수 있도록 좌우로 넓게 퍼진 Knoop 압흔축을 사용하였다. 기계적 이방성을 갖는 재료에서 Knoop경도를 측정할 때 경도값이 시편방위에 크게 영향을 받기 때문에 동일한 시편 방위를 갖도록 시편을 배열하여 압연방향과 수직인 면에 대하여 경도를 측정하였다. TEM시편은 두께 60~80 $\mu$ m, 지름 3mm의 원형판 시편을 제작한 후 Twin Jet Polisher를 사용하여 화학연마하였다. 화학연마시 에탄올(90%)과 과염소산(10%)를 혼합한 용액을 사용하고, 약 -40°C~-50°C의 온도에서 12~17V의 전압으로 약 0.01mA의 전류를 통전하였다. 이와 같이 제작된 시편의 미세조직은 JOEL사의 200kV 전압의 TEM으로 관찰하였고 TEM에 부착된 EDS 장비를 사용하여 석출물의 성분을 분석하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3-1. 열처리 온도변화에 따른 경도 변화

그림 1은 순수 Zr, Zircaloy-4합금과 M5형 및 K04 신합금을 400, 500, 600, 700, 800, 900°C에서 각각 60분 동안 열처리하였을 때의 Knoop 경도( $H_k$ ) 분포를 나타낸 것이고, 그림 2는 같은 온도에서 각각 30, 60, 180, 600, 1200, 5000분 동안 열처리하였을 때의 각 합금의 Knoop 경도( $H_k$ ) 분포를 나타낸 것이다. 상온에서 약 400~500°C까지는 가공상태의 경도값이 거의 유지되는 회복 단계, 약

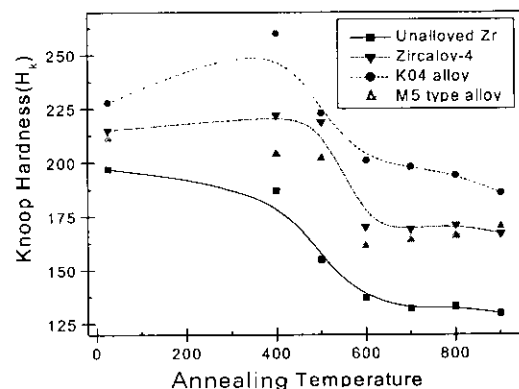


Fig. 1. Variation of knoop hardness of Zr-based alloys after annealing for one hour at 400, 500, 600, 700, 800 and 900°C.

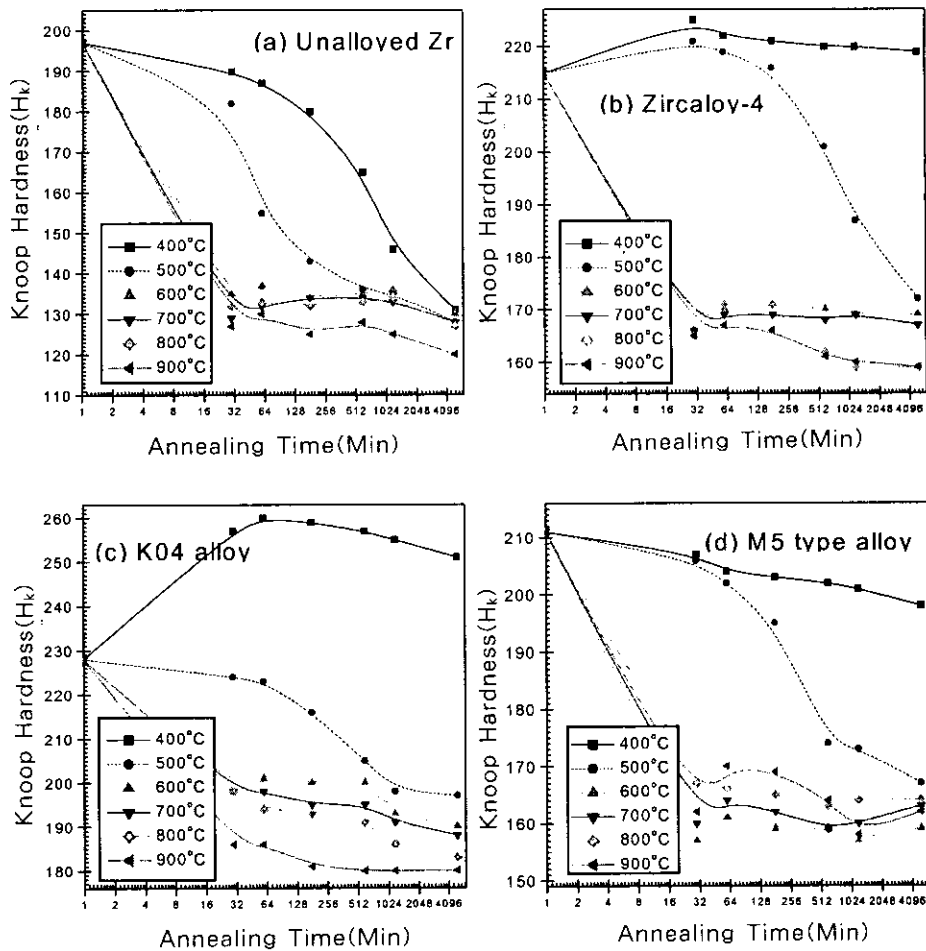


Fig. 2. Variation of Knoop hardness of Zr-based alloys with annealing time and temperature.

Table 2. Activation energy for the recrystallization of Zr-based alloys.

Alloys	Unalloyed Zr	Zircaloy-4	K04	M5 type
Activation Energy (KJ/Mole)	107.2	227.2	138.6	163.5

500°C ~ 600°C 사이에서는 경도값이 급격히 감소하는 재결정 단계, 600°C 이상에서는 경도값이 비교적 일정하게 유지되는 결정립 성장단계를 나타내고 있다. 따라서 본 연구에 이용된 Zr 합금은 회복, 재결정, 결정립 성장의 3단계를 거치는 일반적인 합금의 재결정 거동을 따르고 있음을 알 수 있다. 그림 1에서 보는 바와 같이 첨가된 합금 원소가 증가할수록 초기 경도값도 증가하고 재결정도 지연됨을 알 수 있으며, 재결정 이후에도 첨가된 합금원소가 증가할수록 경도값이 높게 유지됨을 볼 수 있다. 이러한 결과는 재결정 후에도 합금원소 증가에 따른 고용강화 효과가 그대로 유지된다는 것을 의미하는 것으로서 재결정에 의해서는 단지가공에 의해 도입된 축적에너지가 소멸되는 것임을 알 수 있다. 그리고 합금원소 첨가로 인한 고용강화와 냉간 가공 중 내부에 도입된 전위, 공공 같은 결함으로 내부응력이 크게 증가하여 초기 경도값이 높게 나타나는 것으로 볼 수 있

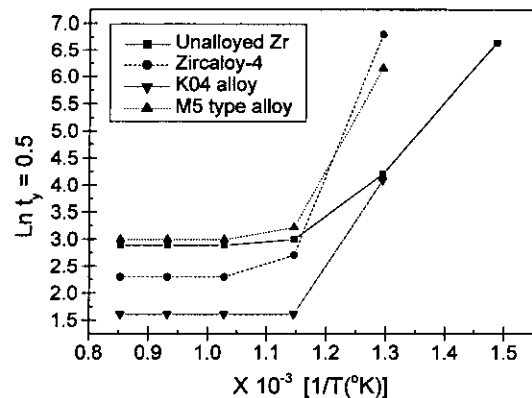


Fig. 3. Time required for the half-recrystallization of the Zr-based alloys at different temperature.

다.<sup>5,6)</sup> 또한 합금원소 첨가로 격자에 뒤틀림이 유발되어 냉간 가공시 도입된 전위나 공공의 이동이 방해받게 됨으로 재결정의 핵생성을 위한 원자이동 활성화에너지를 상승시키기 때문에 합금원소 첨가는 결국 재결정을 지연시키게 된다.<sup>6)</sup>

재결정이 완료된 후 600°C 이상의 고온에서 순수 Zr, Zircaloy-4 및 K04합금의 경도는 약간씩 감소하는 경향을 보이지만 M5형 합금의 경우에는 반대로 약간씩 경도가 증

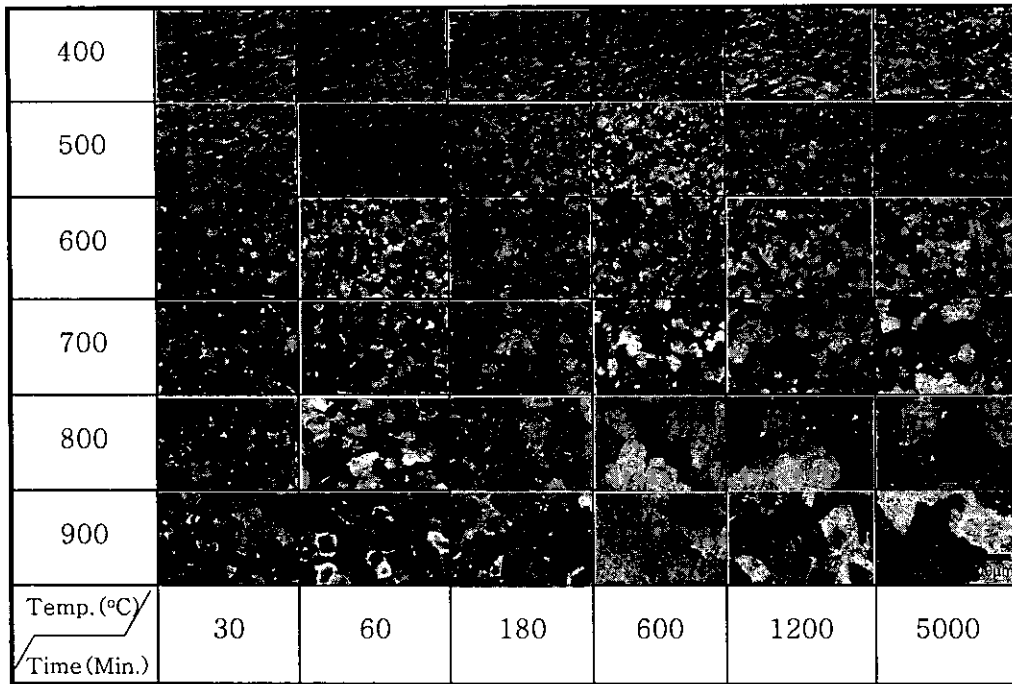


Fig. 4. Optical microstructures of unalloyed Zr.

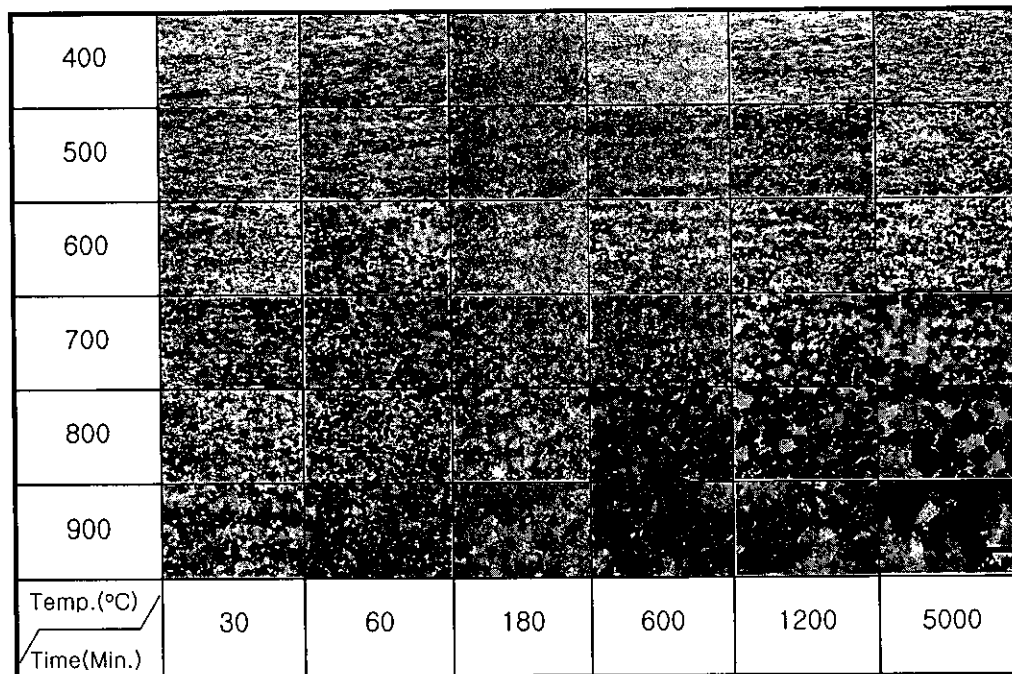


Fig. 5. Optical microstructures of K04 alloy.

가하는 경향을 보이는 데, 이는 600 °C 이상에서 β-Zr상의 석출이 증가하여 결정립 성장을 지연시키기 때문으로 보이며, 높은 온도에서는 고용강화보다 석출강화가 더 지배적이기 때문에 나타나는 현상으로 생각된다.<sup>7)</sup> 다른 합금의 경우 회복중 현저한 경도 증가 현상이 관찰되지 않으나, K04 신합금의 경우 회복과정에서 경도가 상당폭 증가하는 특이한 현상이 관찰되었다. 따라서 열처리에 따른 경도변화를 그림 2에서 보는 바와 같이 좀더 관찰하였다. 순수 Zr 경우에는

400 °C에서 5000분 열처리하면 재결정이 완료되는 거동을 보이며 500 °C에서는 600분 열처리시 재결정이 완료되지만 600 °C 이상의 온도에서는 30분 이내에 모두 재결정이 완료됨을 알 수 있다. 그러나, Zircaloy-4의 경우는 400 °C에서 5000분 열처리해도 경도변화가 거의 일어나지 않고 오히려 초기에 약간의 경도증가 현상을 보이며 500 °C에서 5000분 열처리시 재결정이 완료되는 것을 알 수 있고 K04 신합금의 경우에는 400 °C에서 열처리시 경도가 상당히 증가하는

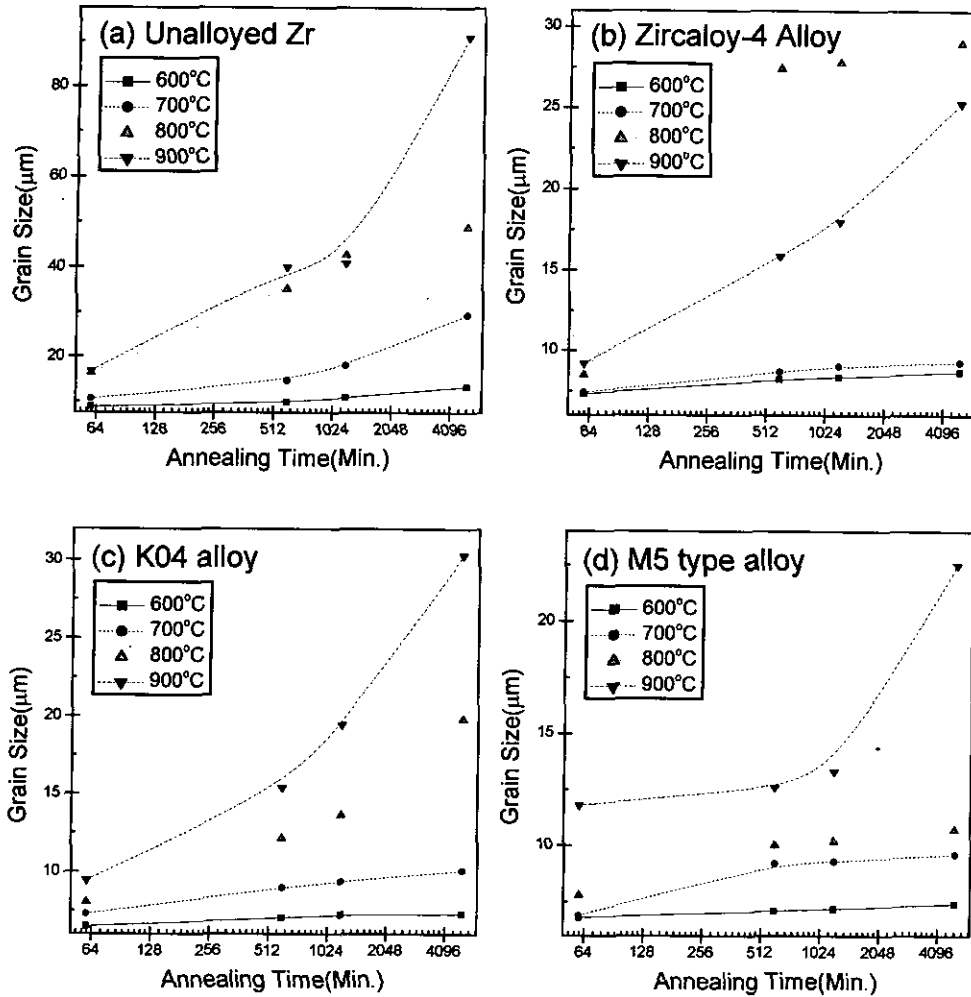


Fig. 6. Variation of grain sizes of Zr-based alloys with time and temperature.

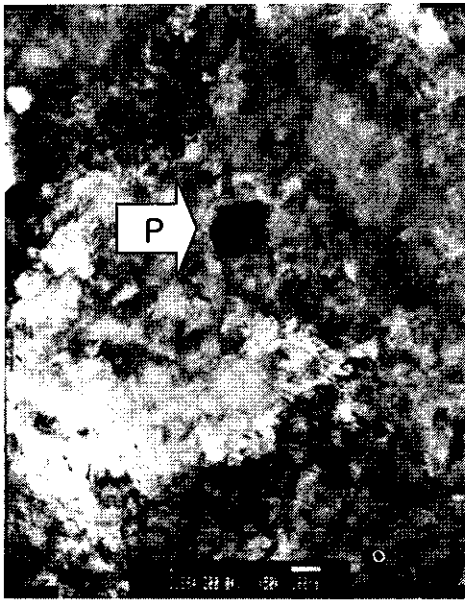
것을 볼 수 있는데, 이는 그림 1에서 보인 결과와 일치하는 것이다. 그리고 M5형 신합금은 400°C에서 경도 증가현상은 나타나지 않으나 점진적으로 경도가 감소하는 회복현상을 보인다. K04 신합금의 거동을 좀더 살펴보면 K04 신합금에는 약 0.4wt.%의 Fe와 약 0.2wt.%의 Cu가 함유되어 있다. Fe가 Zr속에 함유될 경우 Zr의 자기 확산이 빠르게 된다.<sup>9)</sup> 그리고 400°C에서 Cu의 자기 확산 속도는  $1.2 \times 10^{-16} \text{cm}^2/\text{s}$  정도로 매우 빠르기<sup>9)</sup> 때문에 K04 신합금은 400°C에서 열처리시 원소들이 빨리 확산하여 Fe와 Cu 원소가 함유된  $\text{ZrCu}_2$  또는  $\text{Zr}_2(\text{Fe}, \text{Cu})_3$ 로 추정되는 석출물이 출현하여 경도를 증대시키는 것으로 추측된다. 그리고 본 연구에서는 관찰되지 않았지만 400°C에서 고용한도를 벗어난 Nb이  $\beta\text{-Nb}$ 으로 석출되어 경도 증가에 기여할 수도 있을 것이다. Zircaloy-4의 경우에는 Fe 원소가 일부 함유되어 있어서 400°C에서 열처리시 초기에 경도가 약간 증가하는 것으로 사료된다.

일반적으로 변태속도는 절대온도의 역수와 활성화 엔탈피의 지수함수에 관련됨으로 활성화 에너지의 지수함수로 변태속도를 나타낼 수 있다. 그리고 변태속도 측정에 필요

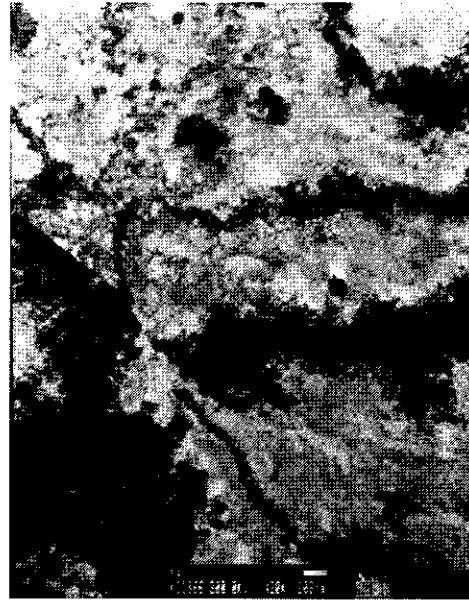
한 원자이동 활성화 에너지는 주어진 온도에서 일정한 분율의 변태에 걸리는 시간의 자연 대수값 ( $\ln t_r$ ) 과 재결정온도의 역수 ( $1/T$ ) 에 대한 직선기울기로부터 구할 수 있다. 본 실험에서는 각 온도에서 50% 변태시 걸리는 시간을 그림 1로부터 구한 다음 ( $\ln t_r=0.5$ ) 와 ( $1/T$ ) 관계를 그림 3과 같이 표시하였다. 그림 3의 직선기울기로부터 구한 재결정에 필요한 원자이동 활성화 에너지는 표 2에서 보는 바와 같이 K04 신합금이 Zircaloy-4나 M5형 신합금보다 낮음을 알 수 있다. 또한 본 연구에서 시험한 4종의 금속 모두 그림 2에서 보듯이 500°C 이상에서 열처리 온도가 높을수록 그리고 열처리 시간이 길수록 재결정 및 결정립 성장이 빠르게 진행되어 경도값이 낮아지는 것을 볼 수 있고 600°C 이상에서는 결정립 성장시 Zr 합금의 경도가 현저히 감소하지 않는 것을 볼 수 있다. 이는 석출물이 생성되어 결정립계 이동이 억제되는 현상이 결정립 성장에 따른 결정립계 면적의 감소로 인한 경도 감소효과를 많이 상쇄시키기 때문인 것으로 보인다.

### 3-2. 재결정에 따른 미세조직 변화

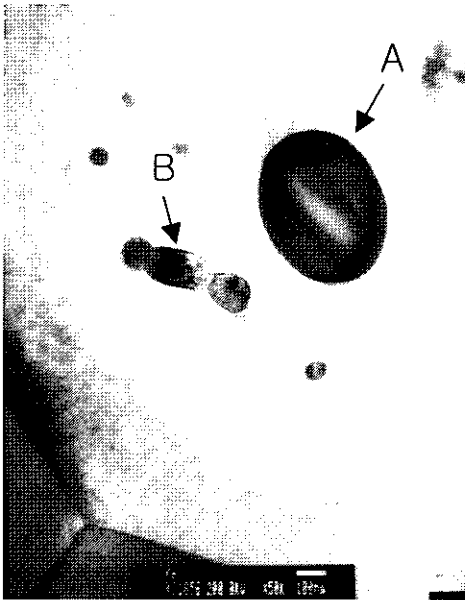
그림 4와 5는 열처리 온도 및 시간에 따른 순수 Zr과



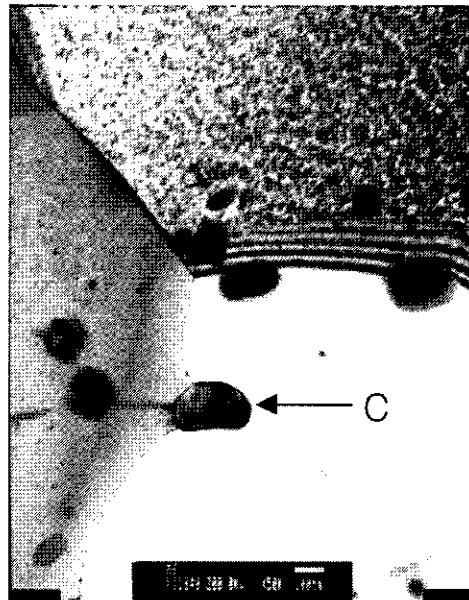
(a) K04 400°C



(c) M5 400°C



(b) K04 600°C



(d) M5 600°C

Fig. 7. TEM micrographs of K04 and M5 type alloys after annealing at 400 and 600°C for one hour.

K04 신합금의 미세조직을 광학현미경으로 관찰한 결과이며, 그림 6는 본 연구에서 수행한 4종의 합금에 대해서 600, 700, 800, 900°C에서 각각 60, 600, 1200 및 5000 분 열처리시 결정립 크기의 변화를 나타낸 것이다. 낮은 온도에서 열처리 시간이 짧을수록 가공조직이 그대로 유지되며, 온도가 높고 열처리 시간이 길수록 결정립이 크게 성장함을 볼 수 있다. 열처리 온도 및 시간 변화에 따른 미세조직 변화는 그림 1과 2의 경도 변화와 매우 잘 일치하는 경향을 보이고 있다. 순수 Zr의 경우 결정립 성장을 억제하는

합금원소가 첨가되지 않았을 뿐만 아니라 표 2에서 보는 바와 같이 원자이동 활성화 에너지가 작아서 400°C에서 재결정이 시작되어 500°C에서 거의 완료된다고 볼 수 있다. 결정립 성장도 매우 빨라서 700°C에서 30분 정도 열처리시 결정립 평균직경이 약 10 $\mu$ m까지 성장하고 1200분 이상 열처리할 경우 성장이 가속된다. 특히, 900°C에서 1200분 열처리시 결정립 성장이 급가속되어 결정립 평균직경은 약 90 $\mu$ m에 이른다. Zircaloy-4합금의 경우 500°C에서 600분 열처리시 재결정이 진행되어 600°C에서 60분정도 열처리

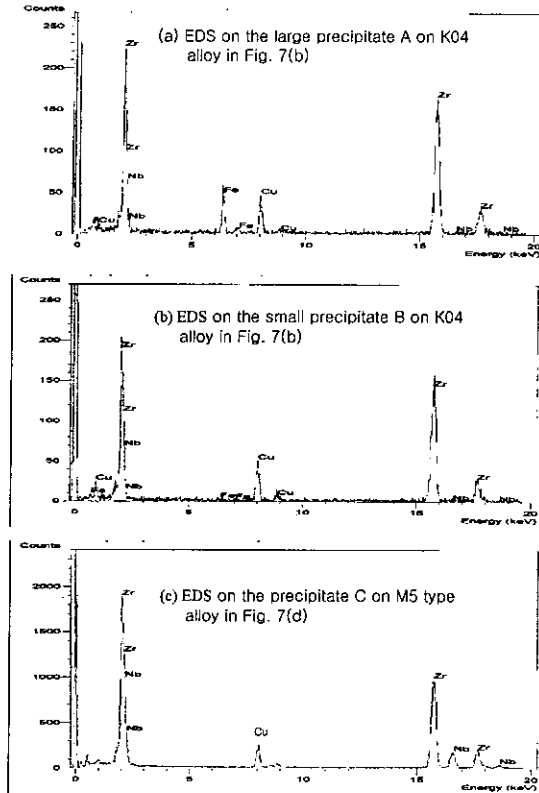


Fig. 8. EDS spectra of precipitates in K04 and M5 type alloys after annealing at 400 and 600°C for one hour.

하면 재결정이 완료된다. 800°C 이상에서 결정립 성장이 빠르다. 또한 800°C에서 180분 이상 열처리시 제 2차 재결정이 발생하여 100 $\mu$ m 이상 성장한 과대 결정립도 관찰된다. 그러나, 900°C에서 열처리시 과대 결정립은 관찰되지 않는 대신 60분 열처리했을 때 결정립의 평균 직경은 약 9 $\mu$ m 정도이나 열처리시간이 더 길어짐에 따라 점점 커져 5000분간 열처리했을 때 24 $\mu$ m 정도까지 성장한다. 결정립 성장이 이처럼 열처리 온도와 시간에 크게 의존하는 것은 온도가 상승하면 열진동 에너지가 상승하여 작은 결정립계에서 큰 결정립으로 원자 확산이 가속되기 때문으로 추측된다. K04 신합금의 경우 400°C에서 1200분 이상 열처리시 그리고 500°C에서 60분 이상 열처리시 재결정이 진행되어 600°C에서 60분정도 열처리시 재결정이 완료됨을 알 수 있다. 700°C에서 5000분 열처리까지는 결정립 평균직경이 10 $\mu$ m 이내로 결정립 성장이 비교적 느리나 800°C에서 600분 이상 열처리시와 900°C에서 60분 이상 열처리시 결정립은 평균직경이 10 $\mu$ m 이상으로 비교적 빨리 성장하고 900°C에서 5000분 열처리시 결정립 평균직경은 약 30 $\mu$ m 까지 성장한다. M5형 신합금의 경우 400°C에서는 가공조직이 거의 그대로 유지되지만 500°C에서 180분 열처리시 재결정이 시작되어 600°C에서 60분 열처리시 거의 완료된다. 그리고 800°C에서 5000분간 열처리해도 결정립 평균 직경은 약 10 $\mu$ m 정도이나 900°C에서 1200분 이상 열처리시 결정립 평균 직경은 약 12 $\mu$ m에서 급격히 증가하고 5000분 열처리시 22 $\mu$ m 이상으로 성장한다. 그림 7은 400°C 및 600°C에서 1시간 열처리한 K04 및 M5형 신합금의

조직을 투과전자현미경(TEM)으로 관찰한 결과이다. 400°C에서 열처리의 경우 K04 및 M5형 신합금 모두 많은 전위가 관찰되나 K04합금의 경우 전위 밀도가 낮은 아결정립이 M5형 합금보다 발달해 있고 석출물(P)이 형성되었음을 볼 수 있다. 따라서 회복 진행중 석출물이 생성되고 있음을 알 수 있다. 600°C에서 열처리할 경우 그림 7-(b)(d)에서 보듯이 K04 및 M5형 신합금 모두 전위가 거의 사라지고 비교적 큰 석출물이 관찰된다. 그림 8은 석출물에 대한 EDS 분석결과를 나타낸 것이다. 그림 7-(b) 상의 큰 석출물(A) 평균조성은  $Zr_2(Fe, Cu)_3$ 로 추정되고 작은 석출물(B) 평균조성은  $ZrCu_2$ 로 추정된다. 그리고 M5형 신합금에 대한 그림 7-(d) 상의 석출물(C) 평균조성은  $\beta$ -Zr로 추정된다. M5형 신합금에 대한 그림 8-(c) 상에 출현한 Cu peak은 시편 holder에서 기인한 것으로 보인다. 따라서 K04 신합금의 경우  $ZrCu_2$ 로 추정되는 석출물이 먼저 생성된 후 성장하면서 Fe가 추가된  $Zr_2(Fe, Cu)_3$ 로 추정되는 석출물로 성장하는 것으로 추측된다.

#### 4. 결 론

1) Fe, Cu 원소가 순수 Zr에 많이 첨가될 경우 재결정에 앞서 경도가 증가하는 현상이 나타났는데 이는 원자의 빠른 확산으로 Fe나 Cu가 함유된 석출물의 생성과 관련이 있는 것으로 보인다.

2) 석출물의 특성을 분석한 결과 K04 신합금은  $ZrCu_2$ 으로 추정되는 석출물이 먼저 생성된 후 석출물 성장중 합금원소 Fe로 인하여 원자 확산이 가속되어  $Zr_2(Fe, Cu)_3$ 로 추정되는 석출물이 생성되는 것으로 추측된다. 그리고 Nb가 함유된 석출물도 K04 합금에서 출현할 것으로 예상되었으나 이번 연구에서는 Nb를 함유한 석출물이 K04합금에서 관찰되지 않았다. 그러나 M5형 합금의 경우 600°C에서  $\beta$ -Zr 석출물이 생성되었음을 확인하였다.

3) Zr에 첨가하는 합금원소가 증가할수록 재결정은 늦어지나, Fe나 Cu는 K04 합금의 재결정을 위한 활성화 에너지를 낮추는 효과가 있는 것으로 추측된다.

#### 감사의 글

본 연구는 과학기술부의 원자력연구개발사업인 "지르코늄 신합금 핵연료 피복관 개발" 과제의 일환으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

#### 참고 문헌

1. Y.H.Jeong, KAERI Report, "Development of Cladding Materials for High Burn-up Fuel", KAERI/RR-1580/95 (1995).
2. Y.H.Jeong and C.H.Kim, J. Kor. Inst. Met. & Mater., **33**(1995) 682.
3. Y.H.Jeong and K.H.Kim, J. Corros. Sci. Soc. of Korea, **25**(1996) 160.
4. J.P.Mardon et al., "Proceedings of the 1997 International Topical Meeting on LWR Fuel Perform-

- ance", Portland, Oregon, March 2-6 (1997), 405.
5. S. H. Bush, R. S. Kemper, D. L. Gray, "Recovery and Recrystallization of Zirconium and It's Alloys", PART 1, HW-69678, UC-25, Metals, Ceramics and Materials, (TID-4500, 16th Ed.), Hanford Atomic Products Operation, Richland, Washington, U.S. AEC, May (1961) 5.
  6. P. Cotterill, P. R. Mould, "Recrystallization and Grain Growth in Metals", Halsted Press Book, John Wiley & Sons, New York (1976) 15.
  7. Y.S.Lim, Y.J.Choi, H.G.Kim, Y.H.Jeong and M.Y. Wey, J. Kor. Inst. Met. & Mater., **37** (1999) 910.
  8. A.D.King, G.M.Hood and R.A.Holt, J. of Nuclear Materials **185**(1991) 174.
  9. G.V. Kidson, "A Review of Diffusion Processes in Zirconium and Its Alloys", Electrochemical Technology, **4** (1966) 193.