

'95 춘계 학술발표회 논문집  
한국원자력학회

## U-10wt%Zr 합금의 미세조직에 미치는 합금원소 첨가의 영향에 관한 연구

김기환, 안현석, 이종탁, 김창규, 강영호  
한국원자력연구소

백경옥  
한국과학기술원

### 요 약

고연소도 액체금속로용 금속연료를 개발하고자 U-10wt%Zr 합금중 Zr 원소 대신에 X(:Si, Ta, Nb, W, Mo) 원소를 첨가한 U-7wt%Zr-3wt%X(:Si, Ta, Nb, W, Mo) 합금을 제조하여 미세조직에 미치는 합금원소 첨가의 영향을 조사하였다. 그 결과 U-7wt%Zr-3wt%Si 합금을 제외한 모든 U-7wt%Zr-3wt%X(:Ta, Nb, W, Mo) 합금은 Matrix에 있어서 Laminar Structure를 그대로 유지하였다. U-7wt%Zr-3wt%Si 합금을 제외한 모든 U-7wt%Zr-3wt%X(:Ta, Nb, W, Mo) 합금의 주요한 상은 U-10wt%Zr 합금과 마찬가지로  $\alpha$ -U 및  $\delta$ -UZr<sub>2</sub> 상이었다. U-7wt%Zr-3wt%X(:Ta, Nb, W, Mo) 합금은 U-10wt%Zr 합금에 비해 Lamina Thickness가 크게 감소되었다. 특히 U-7wt%Zr-3wt%Mo 합금의 경우에 있어서는 U-10wt%Zr 합금에 비해 1/3배 정도까지 Lamina Thickness가 크게 감소하였다. 이와 같은 합금원소 첨가에 의한 Laminar Structure의 미세화는 액체금속로용 금속연료내 Fission Gas의 Inter-connected Path가 보다 더 잘 형성됨으로 인해 Fission Gas Bubble에 대한 방출속도를 크게 증가시켜서 궁극적으로는 Fission Gas Bubble에 의한 Swelling을 저감시킬 것으로 기대된다.

### 1. 서 론

액체금속로용 금속연료는 높은 고속중성자속을 가지나 낮은 연소도를 나타내기 때문에 경제성에 있어서 세라믹연료에 비해 불리하였다[1]. 그러나 근래에 미국 ANL EBR-

II 에서는 Fission Gas Bubble에 대해 쉽게 Plenum으로 방출할수 있는 미세한 Laminar Structure를 가지기 때문에 19 at% 이상의 Burn-up을 가지는 U-Pu-Zr 합금 Porous Fuel을 개발하여 금속연료가 새롭게 부각되고 있다[2]. 그런데 우라늄합금의 Laminar Structure가 더욱 더 미세하게 되면, 금속연료내 Fission Gas의 Inter-connected Path가 보다 더 잘 형성됨으로 인해 Porous Fuel이 되므로 Fission Gas Bubble에 대한 방출속도를 크게 증가되고 궁극적으로는 Fission Gas Bubble에 의한 Swelling을 저감시킬 수 있다. 본 연구에서는 더욱 더 미세한 Laminar Structure를 가지는 고연소도 액체금속로용 금속연료를 개발하고자 U-10wt%Zr 합금중 Zr원소 대신에 X(:Si, Ta, Nb, W, Mo) 원소를 3wt% 첨가한 U-7wt%Zr-3wt%X 합금을 제조하여 미세조직에 미치는 합금원소 첨가의 영향을 U-10wt%Zr 합금과 비교하면서 조사하였다.

## 2 본 론

### 2.1 실험방법

합금원료는 고순도의 U 금속괴와 Zr Sponge 또는 Bulk 상태의 Si, Nb, W 또는 Powder 상태의 Ta, Mo을 장입하였다. 장입조성은 U-10wt%Zr 또는 U-7wt%Zr-3wt%X(Si, Ta, Nb, Mo, W)으로 하였다.. U-10wt%Zr 합금 또는 U-7wt%Zr-3wt%X(Si, Ta, Nb, Mo, W)합금은 합금원료는 Ø40mm의 Magnesia 도가니에 장입하여 진공유도 용해로를 사용하여 1600℃까지 가열한 다음 노냉하였다. 합금시편은 광학현미경과 주사식 전자현미경을 사용하여 미세조직을 관찰하였으며, XRD(:X-Ray Diffractometer)와 EDS(:Energy Dispersive Spectroscopy)를 사용하여 합금상을 분석하였다.

### 2.2 실험결과 및 검토

U-7wt%Zr-3wt%X 합금의 광학현미경 사진을 그림 1에서 나타내었다. 그림 1(a)에서 나타낸 바와 같이 U-10wt%Zr 합금은 Laminar Structure인 Matrix에 대해 Zr-Rich Particle를 가지고 있었다. 그런데 U-7wt%Zr-3wt%Si합금의 미세조직은 그림 1(b)에서 나타낸 바와 같이 Matrix가 Laminar Structure를 가지지 않았다. U-7wt%Zr-3wt%W 뿐만 아니라 그 밖의 모든 U-7wt%Zr-3wt%X(:Ta, Nb, Mo) 합금은 그림 1(c)에서 나타낸 바와 같이 U-10wt%Zr 합금과 마찬가지로 Matrix가 Laminar Structure를 가졌다. 합금시편에 대해 EDS 분석결과 그림 2(a)에 나타낸 바와 같이 U-7wt%Zr-3wt%Si 합금의 Matrix는 거의 전부 Uranium으로 구성되어 있었다. 그러나 U-7wt%Zr-3wt%W 뿐만 아니라 그 밖의 모든 U-7wt%Zr-3wt%X(:Ta, Nb, Mo)합금은 그림 2(b)에서 나타낸 바와 같이 Matrix에 Uranium외에 5wt%Zr 이상을 함유하고 있었다. 이와 같이 특히 U-7wt%Zr-3wt%Si 합금에 대해 Matrix가 Laminar Structure를

가지지 않는 이유는 Zirconium 대신에 Silicon이 치환됨에 따라 U-Si 간의 공정반응( $L \rightarrow \alpha U_{ss} + U_3Si_2$ )이 지배적으로 이루어져서 Matrix가 높은 부피분율을 가지는  $U_{ss}$ 으로 구성되어 있기 때문이라고 생각된다. U-7wt%Zr-3wt%W 뿐만 아니라 그 밖의 모든 U-7wt%Zr-3wt%X(:Ta, Nb, Mo) 합금은 Zr 대신에 첨가되는 Ta, Nb, Mo, W이 Matrix에 대해 Laminar Structure를 파괴하지 않고 대체로 고용 내지 석출되어 있기 때문에 Matrix에 5wt% 이상의 Zr이 함유되어 있다고 생각된다. U-10wt%Zr 합금 및 U-7wt%Zr-3wt%X(:Si, Ta, Nb, Mo, W) 합금에 대한 XRD 분석결과 그림 3(a)에 나타난 U-7wt%Zr-3wt%W 합금의 분석결과와 마찬가지로 주요상은  $\alpha$ -U 및  $\delta$ -UZr<sub>2</sub> 상이었다. 그러나 U-7wt%Zr-3wt%Si 합금의 경우에 있어서는 그림 3(b)에서 나타난 바와 같이  $\alpha$ -U 및  $\delta$ -UZr<sub>2</sub> 외에 U<sub>3</sub>Si<sub>2</sub> 상이 주요상에 포함되어 있었다. Matrix에 대한 U-7wt%Zr-3wt%X 합금의 주사식 전자현미경 분석결과 첨가 합금원소 Zr, Ta, Nb, W 및 Mo에 대해서 Lamina Thickness가 각각 0.34  $\mu$ m, 0.28  $\mu$ m, 0.21  $\mu$ m, 0.16  $\mu$ m 및 0.11  $\mu$ m 정도로 Zr 대신에 합금원소가 첨가됨으로 Laminar Structure가 크게 미세해졌다. 이것은 합금원소가 첨가되면 Lamina 성장속도가 감소된 결과라고 생각된다. 특히 U-7wt%Zr-3wt%Mo 합금의 경우에 있어서는 U-10wt%Zr 합금에 비해 1/3배 정도까지 Lamina Thickness가 크게 감소하였다. 이와 같은 합금원소 첨가에 의한 Laminar Structure의 미세화는 액체금속로용 금속연료내 Fission Gas의 Inter-connected Path가 보다 더 잘 형성됨으로 인해 Fission Gas Bubble에 대한 방출속도를 크게 증가시킬 것으로 예상된다.

### 3. 결 론

미세한 Laminar Structure를 가지는 고연소도 액체금속로용 금속연료를 개발하고자 U-10wt%Zr 합금중 Zr원소 대신에 X(:Si, Ta, Nb, W, Mo) 원소를 첨가한 U-7wt%Zr-3wt%X 합금에 대해 미세조직에 미치는 합금원소 첨가의 영향을 조사하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

- 1) U-7wt%Zr-3wt%Si 합금을 제외한 모든 U-7wt%Zr-3wt%X(:Ta, Nb, W, Mo) 합금은 Matrix에 있어서 Laminar Structure를 나타내었다.
- 2) U-7wt%Zr-3wt%Si 합금은 Matrix가 거의 대부분 Uranium으로 이루어져 있었다. 그러나 그 밖의 U-7wt%Zr-3wt%X(:Ta, Nb, W, Mo) 합금은 Matrix가 주로 Uranium 및 Zirconium으로 이루어져 있었다.
- 3) U-7wt%Zr-3wt%Si 합금은 주로  $\alpha$ -U 및  $\delta$ -UZr<sub>2</sub> 및 U<sub>3</sub>Si<sub>2</sub> 상로 이루어져 있었다. 그러나 그 밖의 U-7wt%Zr-3wt%X(:Ta, Nb, W, Mo) 합금의 주요한 상은  $\alpha$ -U 및  $\delta$ -UZr<sub>2</sub> 상이었다.

4) U-7wt%Zr-3wt%X(X: Ta, Nb, W, Mo) 합금은 U-10wt%Zr 합금에 비해 Lamina Thickness를 크게 감소시켰다. 특히 U-7wt%Zr-3wt%Mo 합금의 경우에 있어서는 U-10wt%Zr 합금에 비해 1/3배 정도까지 Lamina Thickness가 크게 감소하였다.

이와 같은 합금원소 첨가에 의한 Laminar Structure의 미세화는 액체금속로용 금속연료내 Fission Gas의 Inter-connected Path가 보다 더 잘 형성됨으로 인해 Fission Gas Bubble에 대한 방출속도를 크게 증가시켜서 궁극적으로는 Fission Gas Bubble에 의한 Swelling을 저감시킬 것으로 기대된다.

## 참 고 문 헌

- 1) J. H. Kittel et. al., J. Nucl. Mat., 204, 1993, pp. 1~13.
- 2) R. G. Pahl, D. L. Porter, C. E. Lahm, and G. L. Hofman, Metallurgical Transaction A, 21A, 1985, pp. 1863-176.

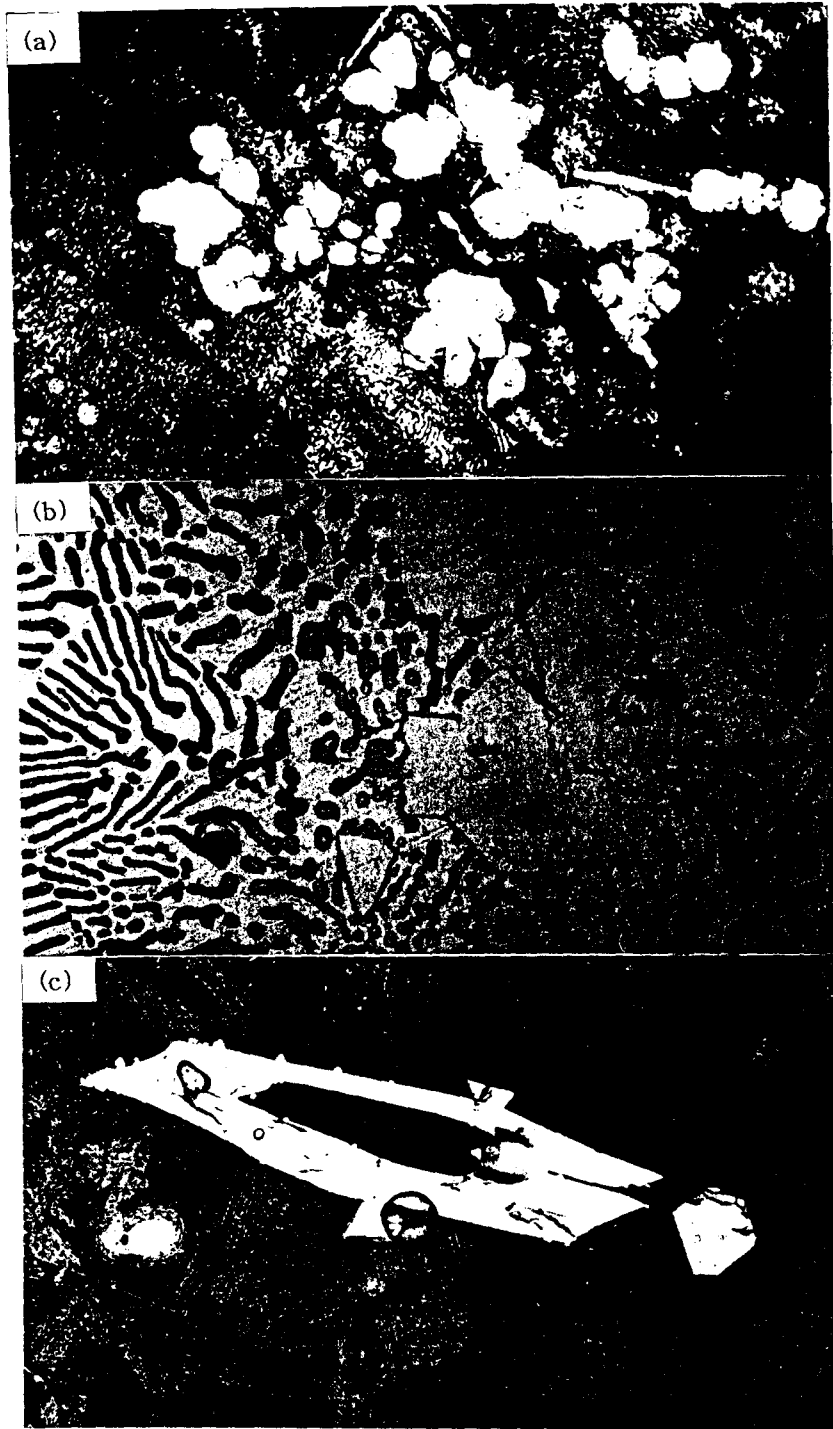
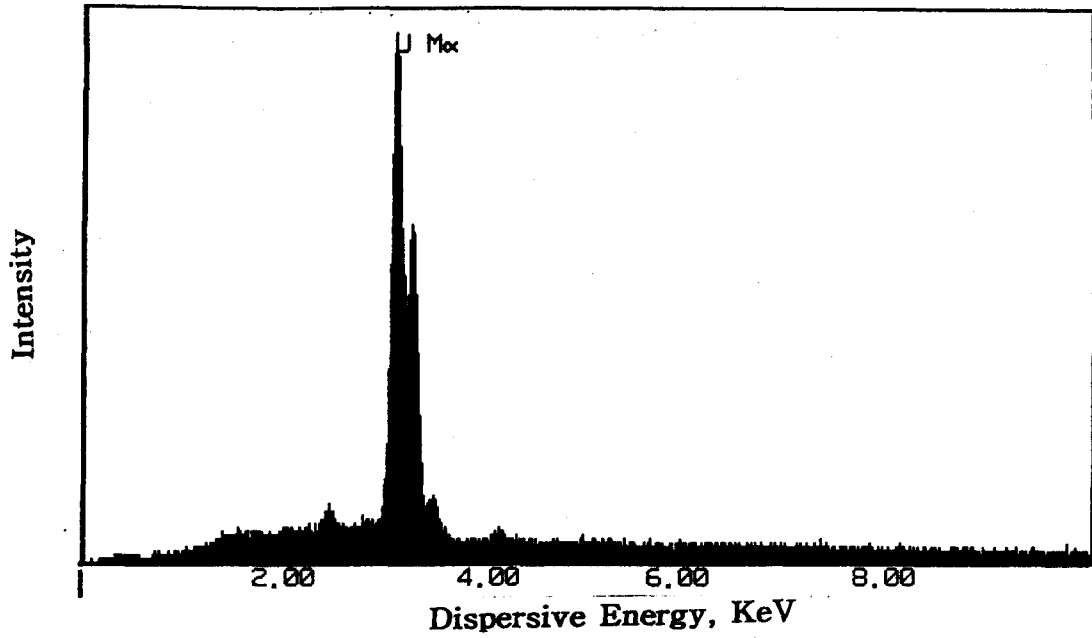
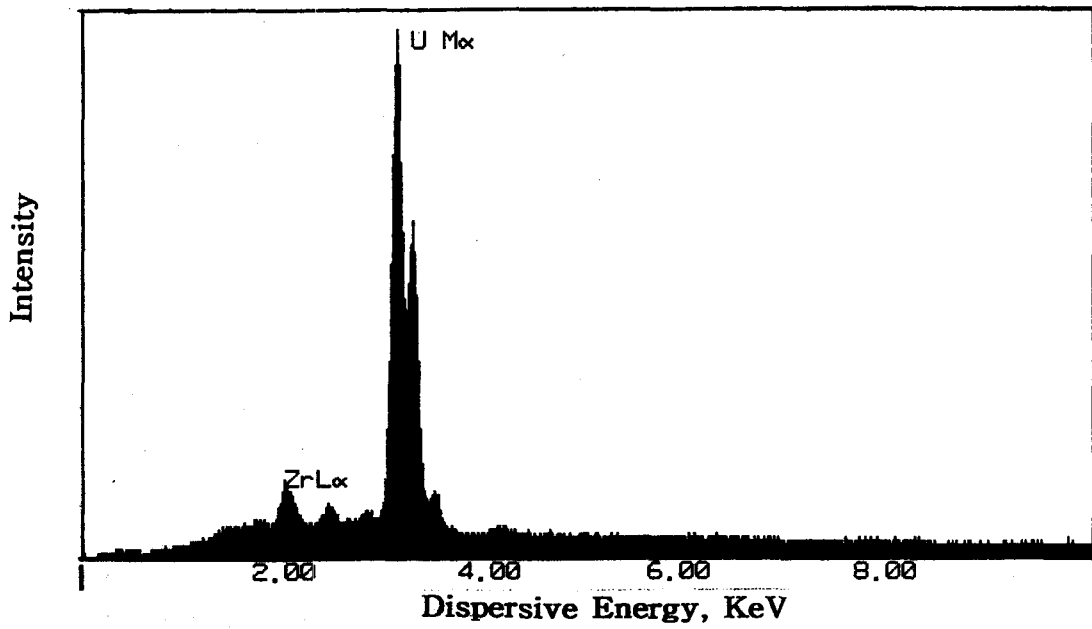


그림 1. U-10wt%Zr 합금시편(a)(x1000) 및 U-7wt%Zr-3wt%Si 합금시편(b)(x400) 그리고 U-7wt%Zr-3wt%W 합금시편(c)(x400)의 미세조직을 보여주는 광학 현미경 사진.

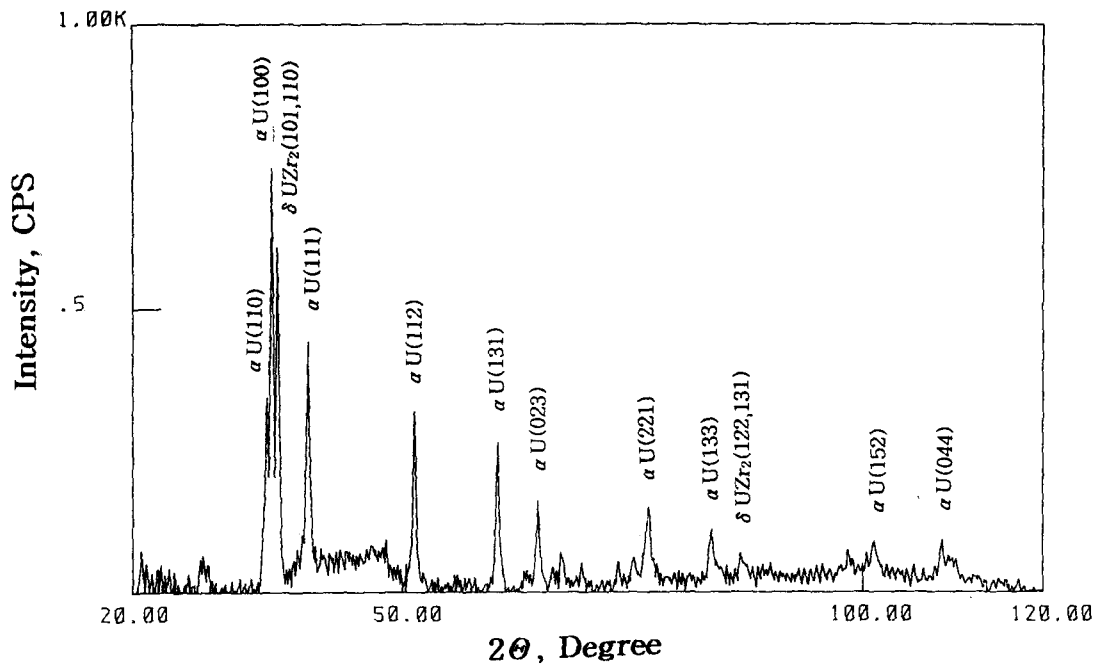


(a)

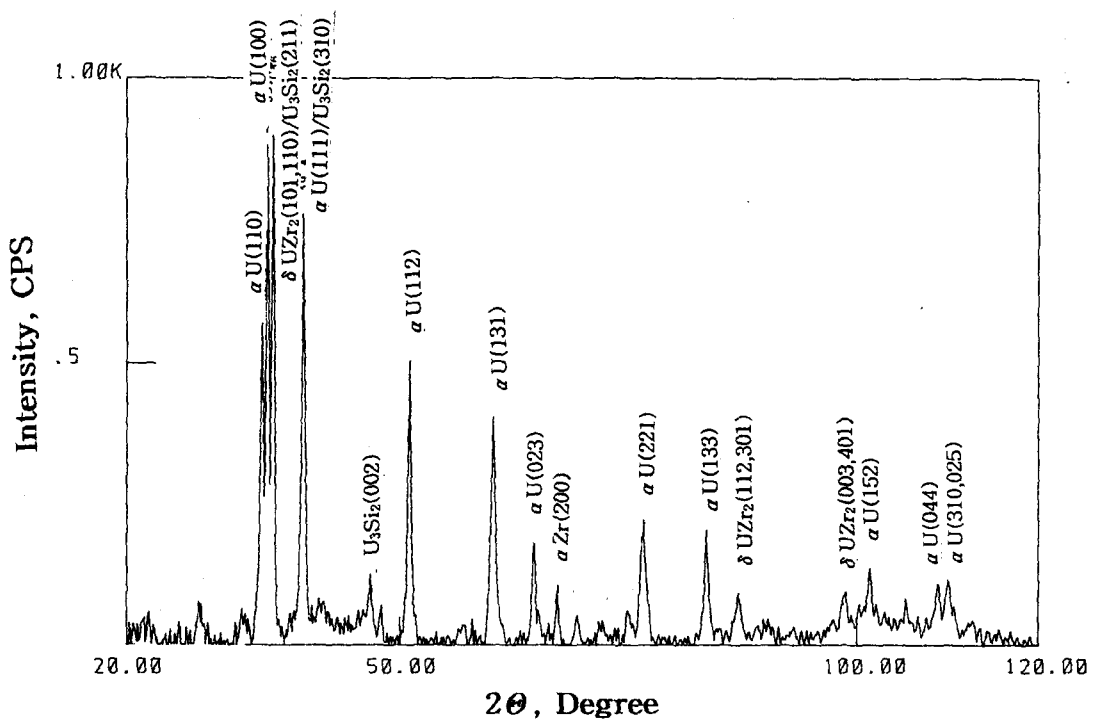


(b)

그림 2. Marix에 대한 U-7wt%Zr-3wt%Si 합금시편(a) 및 U-7wt%Zr-3wt%W 합금시편(b)의 EDS 분석결과.

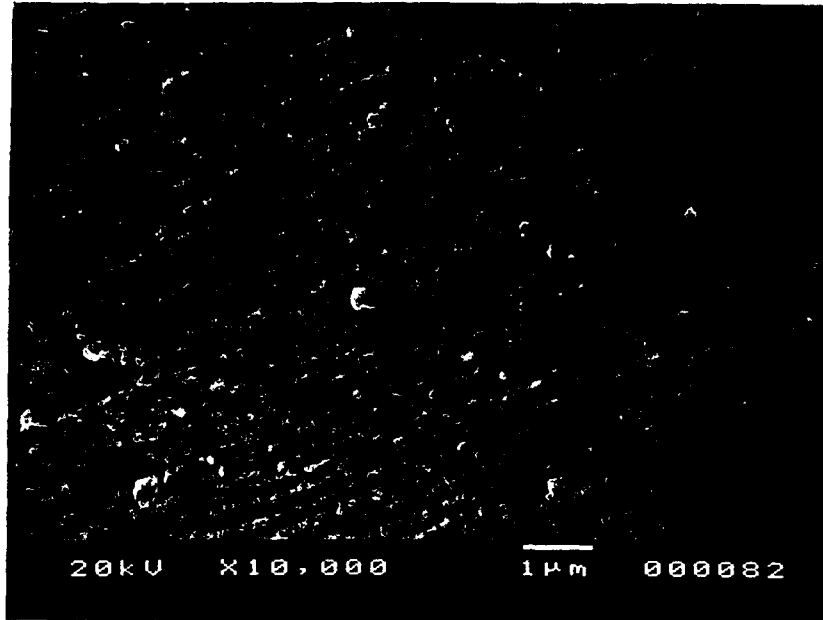


(a)

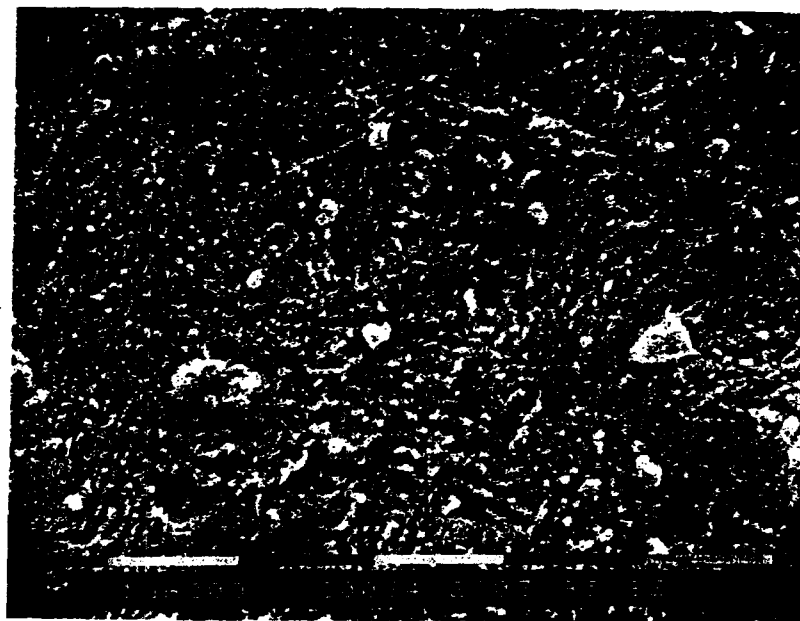


(b)

그림 3. U-7wt%Zr-3wt%W 합금시편(a) 및 U-7wt%Zr-3wt%Si 합금시편(b)의 X-Ray Diffraction Pattern.



(a)



(b)

그림 4. U-10wt%Zr 합금시편(a)(x10000) 및 U-7wt%Zr-3wt%Mo 합금시편(b) (x20000)의 Laminar Structure를 보여주는 주사식 전자현미경 사진.