

Zr-0.2Sn-0.8Nb 합금의 부식특성에 대한 Si, Mo 및 Mn 원소의 첨가영향

이명호[†] · 최병권 · 정용환

한국원자력연구소 지르코늄합금핵연료피복관개발팀

Effect of Si, Mo, and Mn on the Corrosion Characteristics of Zr-0.2Sn-0.8Nb Alloy

Myung Ho Lee[†], Byung Gwon Choi and Yong Hwan Jeong

Advanced Zr Alloy Development, Korea Atomic Energy Research Institute, Daejeon 305-353

(2001년 11월 27일 받음, 2002년 3월 13일 최종수정본 받음)

Abstract The Zr-0.2Sn-0.8Nb-X(X = 0~200ppm Si, 0~0.4wt.% Mo and Mn respectively) ingots for test specimens were manufactured by a vacuum arc re-melting method to find out the effect of Si, Mo, and Mn on the corrosion characteristics of the Zr-0.2Sn-0.8Nb alloy. After being heat-treated and rolled repeatedly out to be flat materials, they were finally heat-treated at 510°C for three hours and used as the specimens for corrosion tests. The corrosion behavior of the specimens was studied in both 400°C steam for 200 days and in aqueous 70 ppm LiOH solution at 360°C for 90 days. From the study it was found that Si from 80 to 200 ppm contributed to increasing the corrosion resistance of Zr-0.2Sn-0.8Nb alloy in both steam and LiOH solution. This study also showed that Mn from 0.1 to 0.4% caused to go up the corrosion resistance, whereas Mo played a part in improving the corrosion resistance only between 0.05 and 0.2 wt.%.

Key words: Zirconium alloy, Corrosion resistance, Fuel cladding, Alloying elements

1. 서 론

경제적인 전력생산을 위한 고연소도 운전, 냉각재온도 상승 운전, 부하추중운전 등으로 인하여 원자력 발전소들이 부식저항성이 향상된 새로운 핵연료 피복관을 요구하고 있기 때문에 기존의 Zircaloy-4 합금을 핵연료 피복관 소재로 계속 사용하기에는 무리가 따르게 되었다. 따라서 원자력발전소를 운영하고 있는 나라들은 Zircaloy-4 합금보다 내식성이 우수한 ZIRLO¹⁰, M5^{2,3)}, NDA⁴⁾ 및 MDA⁵⁾ 같은 신합금을 개발하여 상업화를 추진하거나 성능 입증에 위한 노내시험을 진행하고 있다. 이와 함께 Zr에 상이한 합금원소를 첨가하고 또 그 첨가량을 조절함으로써 Zr 합금의 부식저항성을 향상시키기 위한 많은 연구가 수행되고 있다.

Zr 합금에 Si원소를 첨가할 경우 0.1wt.% 이내에서 첨가하면 Zr 합금의 부식저항성이 증가한다고 보고된 바⁶⁾가 있다. 그리고 15ppm부터, 90, 600, 700 ppm까지 단계적으로 Zircaloy-2(Zr-1.5Sn-0.15Fe-0.1Cr-0.05Ni) 합금에 Si원소를 첨가시켰을 때 400°C steam 조건에서 첨가량 증가에 따라 천이 후 부식속도가 증가 된다고 보고되어 있다.⁷⁾ 그러나 200ppm 이하의 Si을 Zircaloy-2/4 합금에 첨가 시킬 경우 500°C steam 조건에서는 Si 첨가량 증가

와 더불어 Zircaloy-2/4합금의 부식 저항성이 향상된다고 보고되어 있다⁸⁾. 따라서 Si 함량변화에 따른 Zr-0.2Sn-0.8Nb 합금의 부식거동을 관찰하기 위하여 0, 80, 100, 200ppm의 Si을 실험합금에 첨가하여 실험을 실시하였다.

Zr합금에 Mo원소를 첨가할 경우 고용강화 효과에 의해 Zr합금의 기계특성은 향상된다.⁹⁾ 그리고 Zr-1Nb-1Sn-0.1Fe합금에 0.2wt.% Mo를 첨가한 경우에는 220 ppm LiOH 수용액 분위기에서 합금의 부식저항성은 향상되지만 0.5wt.% Mo를 첨가한 경우에는 β -Zr상 분율을 증가시키므로 β -Zr상이 우선 산화하여 산소이온의 확산을 용이하게 하기 때문에 부식저항성이 저하된다고 보고되어 있다.¹⁰⁾ 또한 Zr-Sn 합금에 Mo를 첨가할 경우 첨가량을 증가시킬수록 부식은 가속되지만 0.21wt.% 첨가할 경우에 가장 좋은 부식 저항성을 갖는다고 보고되어 있다.¹¹⁾ 이와 관련하여 Zr-0.2Sn-0.8Nb합금의 경우에도 똑 같은 현상이 나타나는지를 확인하기 위하여 0, 0.05, 0.1, 0.2, 0.4wt.%의 Mo를 Zr-0.2Sn-0.8Nb합금에 첨가하여 Zr-0.2Sn-0.8Nb합금의 부식저항성에 가장 유리한 최적함량을 찾자 하였다. 그리고 Mn을 Zr합금에 첨가할 경우에도 기계적 성질은 향상되나 부식저항성은 향상되지 못한다고 보고되어 있다.¹²⁾

[†] E-mail: mhlee2@kaeri.re.kr

그러나 Mn도 Mo원소와 함께 β -Zr안정화 원소로 알려져 있어서¹³⁾ Mn 원소도 Mo원소와 같이 0, 0.05, 0.1, 0.2, 0.4wt.%를 Zr-0.2Sn-0.8Nb합금에 첨가하여 Zr-0.2Sn-0.8Nb합금의 부식저항성의 변화를 알아보려고 하였다. 따라서 Zr-0.2Sn-0.8Nb 합금에 Si, Mo 및 Mn을 각각 첨가할 경우 Zr-0.2Sn-0.8Nb 합금의 부식 저항성에 어떤 변화가 있는지를 알아보고 각 첨가원소의 첨가량 변화에 따른 최적 부식저항성을 나타내는 각 합금원소의 함량을 파악하여 Zr합금 설계에 기초자료로 활용하고자 하였다.

2. 실험 방법

본 연구수행을 위해 Zr-0.2Sn-0.8Nb합금에 Si, Mo 및 Mn을 첨가하여 VAR (Vacuum Arc Re-melting) 방법으로 약 200g인 button 형태의 Table 1.과 같은 Zr합금 주괴를 제조하였다. 약 10^{-7} torr의 고진공 상태의 용해로에 Ar가스를 주입한 후 합금 원소들이 용해되는 동안 불순물이 편석되거나 합금조성이 불균질하게 분포되는 것을 막기 위하여 4회 반복하여 용해하여 주괴를 제조하였다. 제조된 주괴는 합금조성을 균일하게 하기 위하여 1020°C에서 30분간 유지한 후 수냉 β 열처리를 실시한 다음 590°C에서 30분간 가열한 뒤 압하율 60%로 열간 압연한 후 590°C에서 3시간동안 균질화 열처리를 실시하였다. 그리고 열간 압연된 주괴를 1차 70%, 2차 60%, 3차 40%의 압연율로 각각 냉간압연 하였다. 냉간압연 조직을 재결정화 하기 위하여 1차 및 2차 냉간압연 후 각각 590°C에서 2시간 동안 중간 열처리를 실시하고 3차 압연 후 3시간 동안 510°C에서 각각 냉간압연재를 최종 열처리하여 부식시편으로 사용하였다. 이때 중간 열처리는 약 10^{-5} torr의 고진공 열처리로를 이용하여 수행하였다.

부식특성을 평가하기 위해서 $15 \times 25 \times 0.9\text{mm}^3$ 로 시편을 가공하였다. 가공된 시편의 표면상태가 부식에 미치는 영향을 최소화 하기 위하여 1200번 SiC 연마지로 부식시편을

최종 연마한 후 HF 5%, HNO₃ 45%, H₂O 50%의 혼합용액으로 산세 (pickling) 하였다. 이렇게 준비된 각 시편은 400°C 수증기 분위기 (1,500psi)의 autoclave 속에서 200일간 부식시험을 실시하였고, 360°C LiOH 70ppm 수용액 분위기 (2,750psi)의 autoclave 속에서도 90일간 부식시험을 수행하였다. 그리고 시험기간에 따른 단위 면적당 무게 변화를 측정하여 부식특성을 평가하였다. 최종 열처리한 각 시편의 미세조직은 편광 광학현미경과 TEM을 사용하여 관찰하였다. 광학현미경 관찰용 시편은 에폭시를 이용하여 mounting하고 부식시험 시편과 같이 1200번 SiC 연마지로 최종 연마한 후 HF 10%, HNO₃ 45%, H₂O 45%의 용액으로 식각 (etching)하여 준비하였다. 또한 TEM 관찰용 시편은 최종 열처리 시편을 약 70-80 μm 까지 기계적으로 연마한 후 3mm disk로 만들어 jet polisher에 장착한 다음 약 15 V, 0.01mA를 통전 시키고 약 -45°C로 유지한 ethanol 90%, perchloric acid 10%의 혼합용액을 시편에 분사하여 천공된 박막을 미세조직 관찰에 사용하였다. TEM으로 관찰된 석출물 일부는 TEM에 부착된 EDS를 이용하여 그 성분을 분석하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 부식특성에 미치는 첨가원소의 영향

Fig. 1 (a)는 Zr-0.2Sn-0.8Nb 합금에 각각 0, 80, 100 및 200ppm의 Si를 첨가한 새로운 실험합금을 400°C의 수증기 분위기에서 200일간 부식 시험한 결과를 나타낸 것이고 Fig. 1 (b)는 동일합금을 360°C LiOH 70ppm 용액분위기에서 90일간 시험한 결과를 나타낸 것이다. Fig. 1 (a), (b)에서와 같이 80ppm 이상 200ppm까지 Si를 첨가한 경우 Si함량 증가와 더불어 부식저항성이 증가하였다. 실험결과로 보아 200ppm 이상의 Si를 함유한 Zr합금에 대한 추가적인 실험이 필요할 것으로 생각된다. Zircaloy-2/4에 200ppm이하의 Si를 첨가 시킬 경우 Si 첨가량 증가

Table 1. The chemical composition of Zr-0.2Sn-0.8Nb-X alloys

Element X=	Sn (wt.%)	Nb (wt.%)	Si (ppm)	Mo (wt.%)	Mn (wt.%)	Balance
80ppm Si	0.25	0.7	76	-	-	Zr
100ppm Si	0.25	0.7	115	-	-	Zr
200ppm Si	0.25	0.7	220	-	-	Zr
0.05wt.% Mo	0.25	0.7	-	0.06	-	Zr
0.1% Mo	0.25	0.7	-	0.09	-	Zr
0.2% Mo	0.25	0.7	-	0.16	-	Zr
0.4% Mo	0.25	0.7	-	0.36	-	Zr
0.05% Mn	0.25	0.7	-	-	0.05	Zr
0.1% Mn	0.25	0.7	-	-	0.10	Zr
0.2% Mn	0.25	0.7	-	-	0.17	Zr
0.4% Mn	0.25	0.7	-	-	0.33	Zr

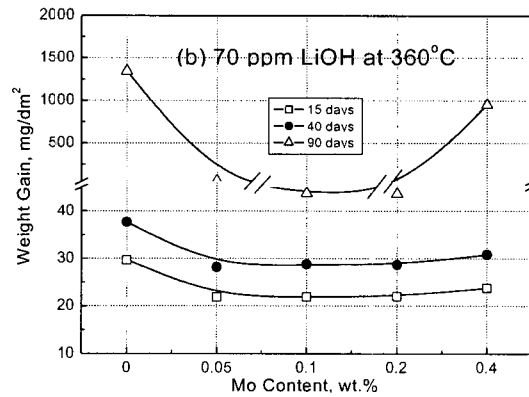
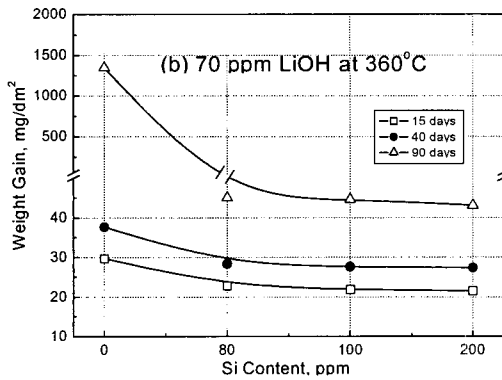
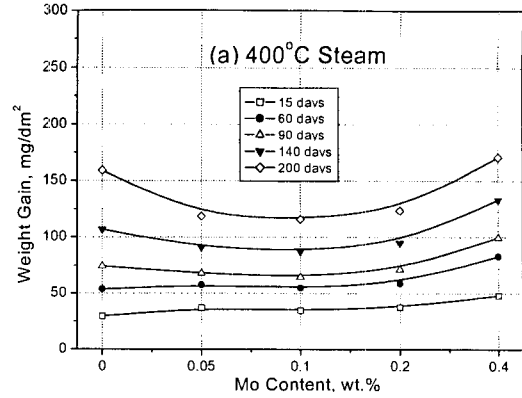
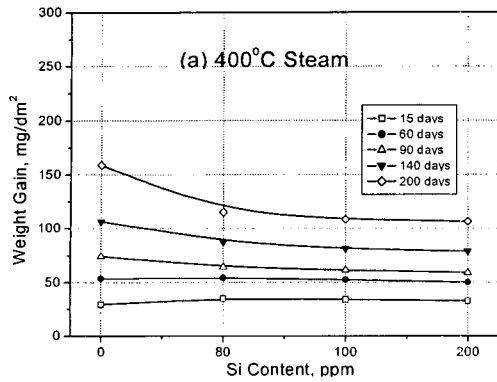


Fig. 1. The effect of Si element on the corrosion of Zr-0.2Sn-0.8Nb-xSi alloy in (a) 400°C steam and (b) LiOH 70ppm solution at 360°C.

Fig. 3. The effect of Mo element on the corrosion of Zr-0.2Sn-0.8Nb-xMo alloy in (a) 400°C steam and (b) LiOH 70ppm solution at 360°C.

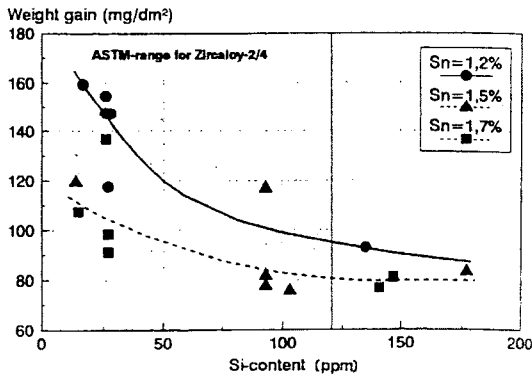


Fig. 2. The effect of silicon and tin on the corrosion of Zircaloy-4 in BWR after four cycles exposure in water test rods.⁸⁾

와 더불어 그 부식 저항성은 Fig. 2와 같이 향상된다는 Garzarolli의 보고⁸⁾와 본 실험결과가 일치한다고 볼 수 있음으로 Si 첨가에 따른 실험합금의 부식거동은 Zircaloy 합금의 부식거동과 유사하다고 할 수 있다. 그러나 0.62wt.% 까지 다량의 Si를 Zr합금에 첨가할 경우에는 부식저항성이 떨어진다고 보고되어 있다.¹⁴⁾ 따라서 U.S Patent 3097094에서도 불순물로서 Si의 함량을 0.015%~0.3%로 제한¹⁵⁾하고 있는 듯하다.

Fig. 3(a)는 0, 0.05, 0.1, 0.2 및 0.4wt.%의 Mo를 Zr-0.2Sn-0.8Nb 합금에 각각 첨가한 실험합금을 400°C의 수증기 분위기에서 200일간 부식 시험한 결과를 나타낸 것

이다. 그리고 Fig. 3(b)는 동일한 합금을 360°C LiOH 70ppm 용액분위기에서 90일간 시험한 결과를 나타낸 것이다. Fig. 3(a), (b)에 나타난 바와 같이 Mo를 0.05에서 0.2wt.%까지 첨가했을 경우 부식저항성이 우수함을 알 수 있다. Zr합금에 Mo를 0.5~1.0wt.% 첨가 시킬 경우 400~600°C 온도범위에서는 부식저항성에 좋은 영향을 미치나 250~350°C 온도범위에서는 부식저항성에 악영향을 미친다고 보고된 바^{14,16)}가 있는가 하면, Zr-1.0Nb-1.0Sn-0.1Fe 합금에 0.2wt.% Mo를 첨가했을 경우 220ppm LiOH용액에서 합금의 부식저항성에 긍정적인 영향을 보이고¹⁰⁾, Zr-Sn합금에 0.21wt.% Mo를 첨가할 경우 가장 좋은 부식저항성을 보인다고 보고된 바도 있다.¹¹⁾ 또한 Zr-1.0Sn-0.2Fe-0.1Cr-0.2Nb 합금에 Mo를 첨가시켰을 경우 Fig. 4에서 보듯이 Mo함량 증가에 따라 부식속도는 증가하나 0.2%에서 포화된다.¹⁷⁾ 이처럼 Zr합금에 Mo를 첨가할 경우 Zr합금의 부식 저항성에 대한 효과는 연구자에 따라 상반된 결과를 보여주고 있는 것은 합금 성분만 아니라 합금의 열처리 상태, 시험조건 등이 상이하였기 때문이었을 것으로 추측되나 합금성분만 고려할 경우 대체적으로 0.2wt.% Mo를 첨가할 경우 Zr합금의 부식저항성이 향상된다고 생각할 수 있다. 본 연구에 이용된 실험합금의 경우도 대개의 연구결과와 일치하나 수증기 및 LiOH 분위기 모두를 고려할 경우 0.1wt.%가 가장 우수한 부식저항성을

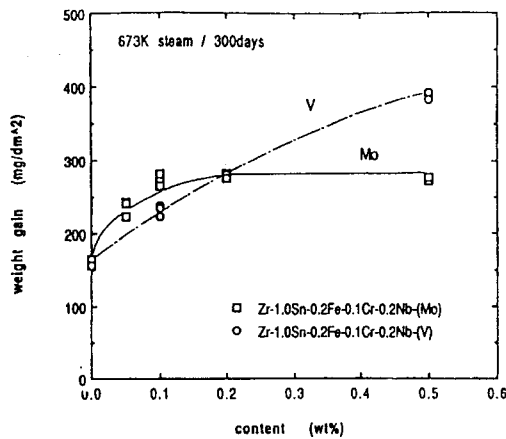


Fig. 4. Weight gains as a function of either Mo or V content at 673 K for 300 days.¹⁷⁾

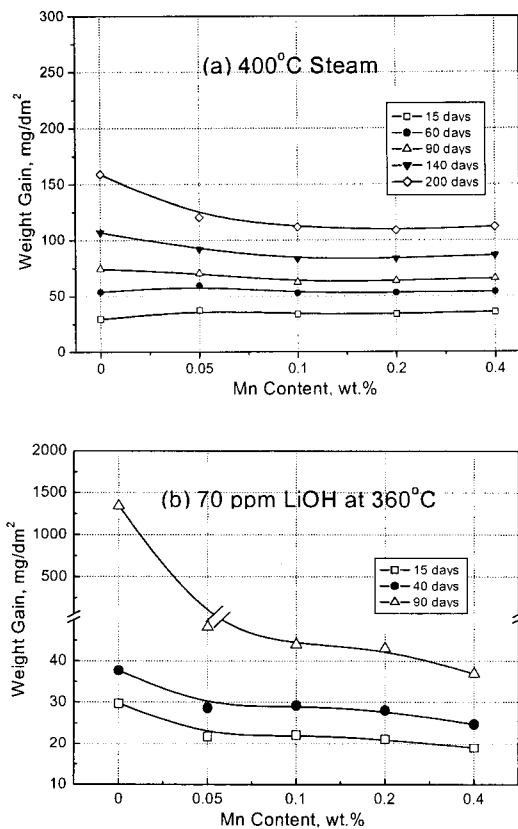


Fig. 5. The effect of Mn element on the corrosion of Zr-0.2Sn-0.8Nb-xMn alloy in (a) 400°C steam and (b) LiOH 70ppm solution at 360°C.

보인다고 볼 수 있다.

Fig. 5 (a)는 Zr-0.2Sn-0.8Nb 합금에 0, 0.05, 0.1, 0.2 및 0.4wt.%의 Mn을 각각 첨가한 새로운 실험합금을 400°C의 수증기 분위기에서 200일간 부식 시험한 결과를 나타낸 것이고 Fig. 5 (b)는 동일한 합금을 360°C LiOH 70ppm 용액분위기에서 90일간 시험한 결과를 나타낸 것이다. Fig. 5 (a)에 나타난 바와 같이 0.1wt.%에서 0.4wt.%까지 Mn을 첨가했을 경우가 Mn을 첨가하지 않은 경우보다 부식저항성이 우수함을 알 수 있다. Zr합금에 Mn을 첨가할

경우 Mn은 Zr합금의 부식저항성 향상에 기여하지 못한다고 보고된 바¹²⁾ 있지만 200일간 부식실험을 실시한 실험합금의 경우 Mn을 0.2wt.% 첨가한 합금의 부식저항성이 가장 우수하였다. 더욱이 Fig. 5 (b)에서 보듯이 LiOH 분위기에서는 Mn 첨가량을 증가시킬수록 부식저항성이 우수하였다. 따라서 Mn을 Zr합금에 첨가할 경우 Zr합금의 부식저항성 변화에 대한 확인연구가 더 필요할 것으로 보인다.

본 연구에서 모든 합금의 경우 수증기 분위기에서 보다 LiOH 수용액 분위기에서 부식이 가속되는 현상이 발생하였다. LiOH 분위기에서 Zr 합금의 부식이 가속되는 원인에 대한 많은 가설이 제시되어있으나 아직 일반화된 설명은 없는 듯하다. N. Ramasubramanian의 연구^{18~20)}에 의하면 LiOH이 표면에 고착된 Zr-OLi 그룹을 형성하여 재결정화를 지연시켜 산소가 많이 확산한 결정립계 면적을 크게 유지하거나 기공을 생성함으로써 산화가 가속되거나, LiOH 용액 (특히 고온의 LiOH 용액)이 처음 생성된 t-ZrO₂를 용해하여 산화막에 기공을 형성하고 이 기공을 통하여 산화물과 금속 계면으로 산소 이동이 촉진되어 산화가 가속된다. 그리고 Y. Ding²¹⁾의 보고에 의하면 LiOH가 우선적으로 결정립계를 공격하여 산화를 지연시키는 t-ZrO₂ 피막을 파괴하여 균열 및 기공을 형성함으로써 산화가 가속된다. 일단 산화가 발생하면 산화막으로 인해 응력이 집중되는 부위가 생기고 가장 큰 응력이 생성되는 곳에서 부식을 가속시키는 산화막 균열이 개시되어 부식이 가속될 것으로 생각된다. 그런데 산화반응으로 형성되어 LiOH 용액 중에 존재하게 되는 Li⁺이 Zr합금 중 Zr⁴⁺와 치환함으로써 발생하는 음이온 공공이 증가하여 격자 내에 확산함으로써 부식이 가속된다고 할 경우 실험합금에 첨가된 Si, Mo, Mn 원소가 일정한 wt.% 범위에서 음이온 확산을 지연시키기 때문에 부식진행 또한 지연된다고 추측된다.

3.2 산화막 조직분석 및 수소흡수성 측정

Si, Mo, Mn이 첨가된 실험합금의 경우 Fig. 1, 3, 5와 같은 부식거동을 나타내는 원인을 조사하고자 small angle diffraction XRD (40Kv, 126mA) 방법으로 400°C 수증기 분위기에서 형성된 약 30mg/dm²의 동일 무게증가량을 가지는 시편의 산화막에 대한 결정구조 분석결과를 Fig. 6에 나타내었다. Zr합금이 부식될 때 금속과 산화막의 계면 사이에 발생하는 높은 압축응력이 점차 인장 응력으로 바뀌어서 보호성 준안정상인 t-ZrO₂ 산화막이 비보호성 안정상인 m-ZrO₂ 산화막으로 상변태가 일어남으로써 부식이 가속되게 된다.²²⁾ Fig. 6에서 보듯이 실험합금의 (101) t-ZrO₂ 산화막 peaks가 (111) 및 (200) m-ZrO₂ 산화막 peak에 비하여 intensity가 상대적으로 매우 낮음으로 실험합금의 부식 저항성이 저하되었을 것으로 생각된다. 첨가 원소 함량과 실험합금의 부식저항성과의 관계를 알아보고자 mono-ZrO₂에 대한 t-ZrO₂분율의 차이를 알아보려고 하였으나 (101) t-ZrO₂ 산화막 peaks가 너무 낮아서 신뢰할 만한 결과를 얻지 못하였다.

Zr 합금은 물과 반응하여 부식이 진행됨과 더불어 수소를 흡수한다. 따라서 부식시험 전 · 후 Zr합금의 수소 흡수

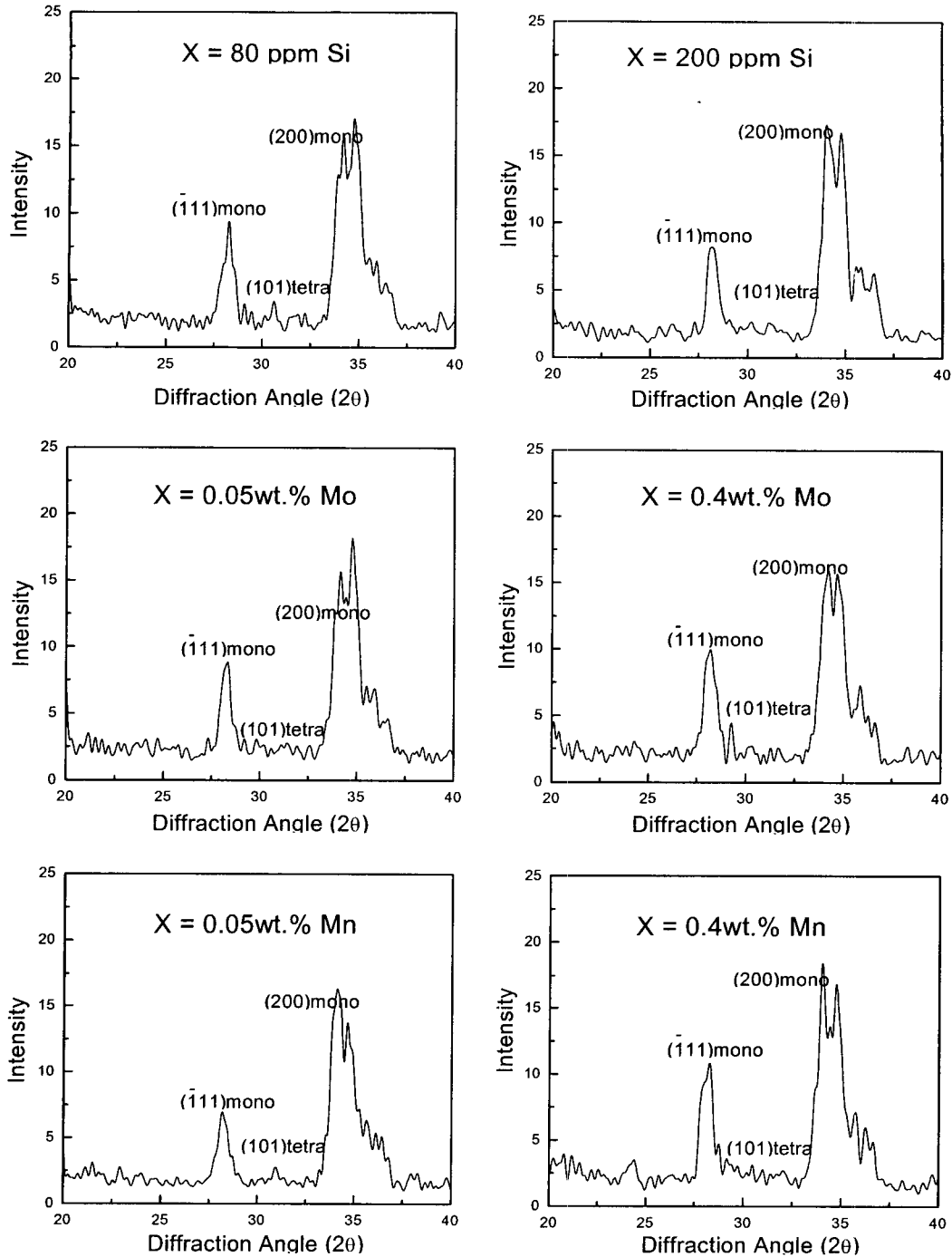


Fig. 6. The diffraction patterns of oxides having about 30mg/dm² in weight gain on Zr-0.2Sn-0.8Nb-X specimens corroded in 400°C steam.

을 비교하면 해당 합금의 산화정도 및 산화경향을 알 수 있다. 수소흡수 분율은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\text{수소흡수 분율 HP\%} = (\Delta C_H \times d \times \rho_{Zr}) / (1.25 \times 10^{-2} \times \Delta W)$$

$$\Delta C_H = C_H - C_0$$

C_H : 200일 부식실험 후 실험시편의 수소 함량

C₀ : 부식실험 전 실험시편의 수소 함량

d : 실험시편의 두께

ρ_{Zr} : Zr의 밀도

ΔW : 일정기간 부식실험 후 실험시편의 무게 증가량

Fig. 7은 증기 분위기에서 200일간 부식 시험한 각 합금 원소의 함량에 따른 수소 흡수분율을 나타낸 것이다. 대략적으로 Fig. 1, 3, 5의 부식거동과 일치함을 알 수 있다. 즉, Mo를 0.4% 함유한 실험합금의 경우 수소흡수 분율이 다른 실험합금에 비하여 높다. 따라서 일반적으로 알려진 바와 같이 수소흡수 분율이 보다 큰 Zr 합금이 그렇지 않은 Zr합금에 비해 부식저항성이 떨어진다고 볼 수 있다.

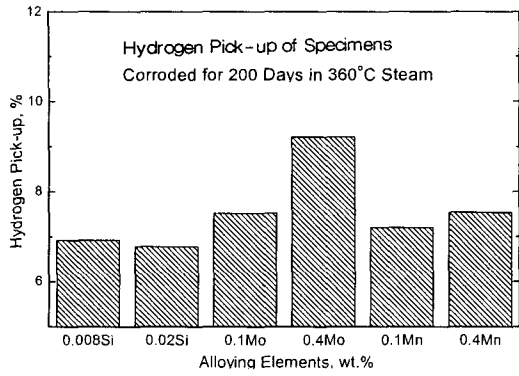


Fig. 7. The hydrogen pick-up of the specimens corroded for 200 days in 400°C steam.

3.3 미세조직 특성

Fig. 8은 실험합금에 대한 200배 광학 현미경사진을 나타낸 것이다. Si, Mo 및 Mn이 상대적으로 많이 첨가된 합금의 경우 결정립이 더 미세하고 치밀함을 보이고 있다. Zr 및 Zr-1Nb의 경우 400°C 증기분위기에서 결정립이 작을수록 부식저항성이 좋다고 보고 되었다.²³⁾ 그러나 본 실험의 경우 Mo를 보다 많이 첨가하여 결정립이 작은 합금의 부식저항성이 Fig. 3과 같이 감소하고 있다. 이는 Mo 첨가에 의해 부식저항성을 열화시키는 β-Zr상 생성에 기여했을 것으로 생각된다.

Fig. 9는 Si, Mo, Mn의 함량이 다른 실험합금의 TEM 사진을 나타낸 것이고 Table 2는 이들 TEM 사진에 나타난 석출물들을 EDS로 분석한 평균조성을 나타낸 것이다.

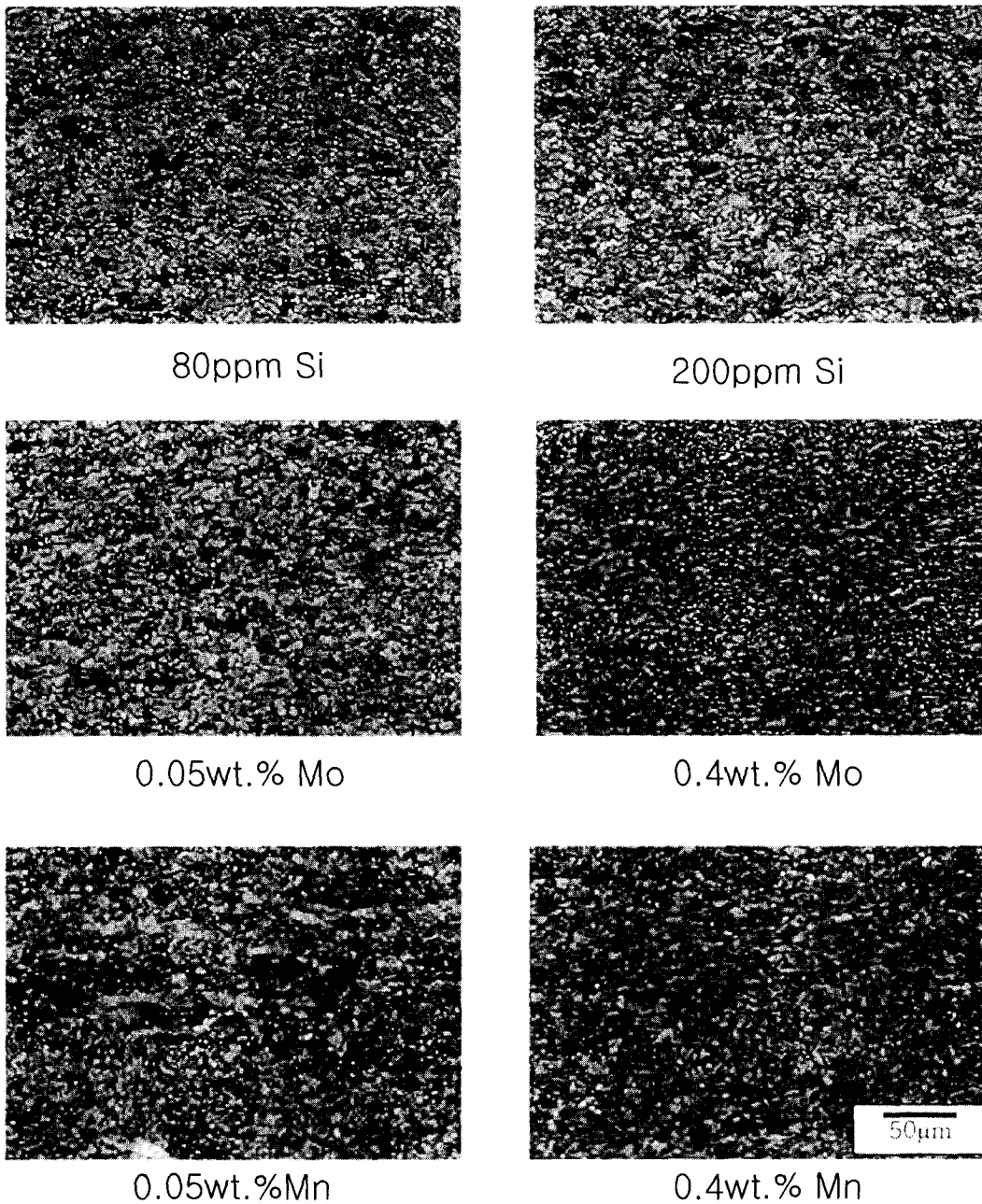


Fig. 8. The optical micrographs of the specimens from Zr-0.2Sn-0.8Nb-X(X=Si, Mo, Mn) alloys.

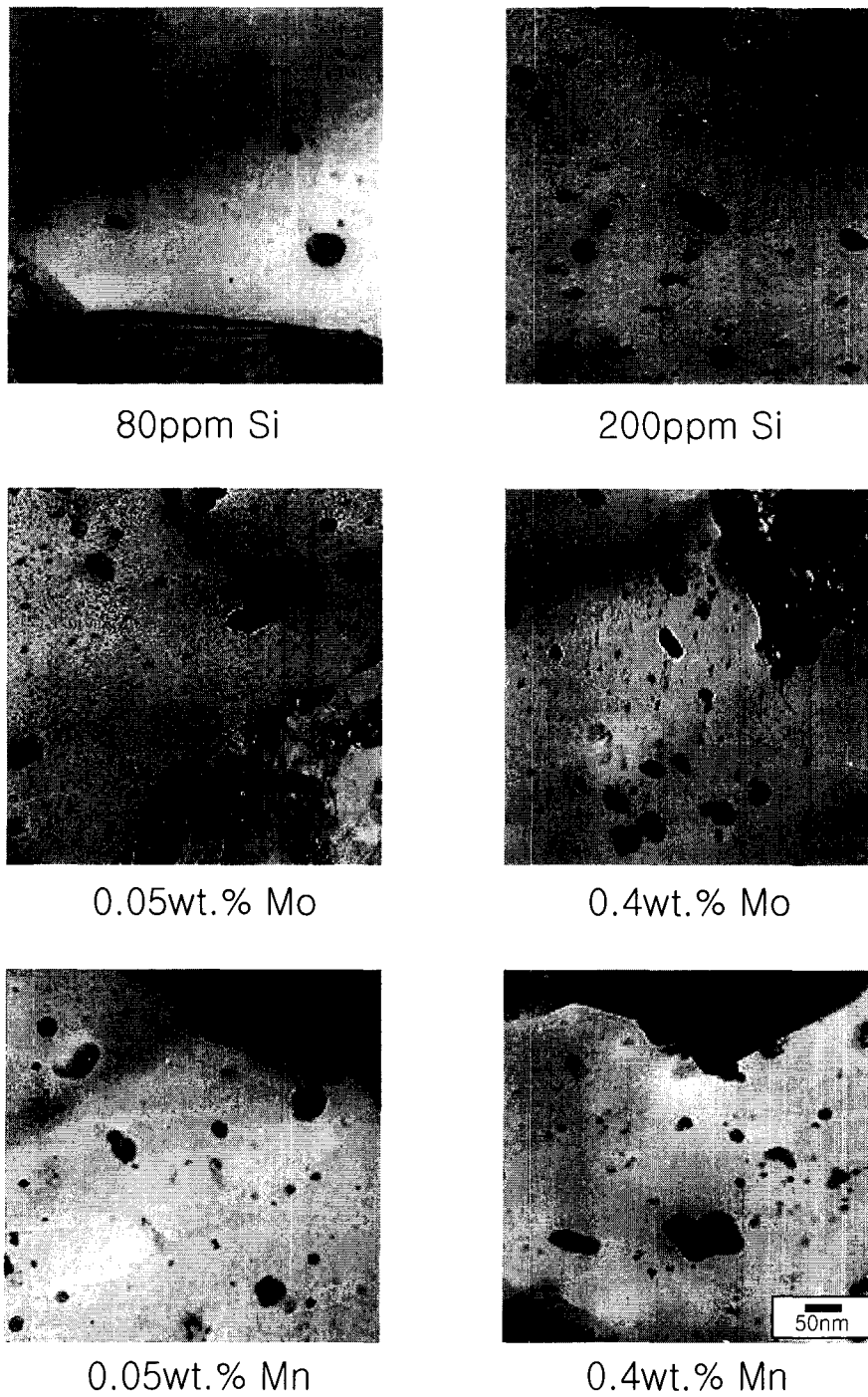


Fig. 9. The TEM micrographs of the specimens from Zr-0.2Sn-0.8Nb-X(X=Si, Mo, Mn) alloys.

Table 2. The chemical composition of precipitates formed in Zr-0.2Sn-0.8Nb-X alloys

Precipitates (at.%) X=	Nb	Cu	Si	Mo	Mn	Zr
80, 20 ppm Si	38.5	6.88	5.01	-	-	Bal.
0.05, 0.4wt.% Mo	58.88	8.10	-	-	-	Bal.
0.05, 0.4wt.% Mn	34.76	6.25	-	-	5.98	Bal.

실험합금에 함유되지않은 Cu가 Table 2에 같이 석출물에 출현한 것은 석출물에 대한 TEM 관찰시 Cu 시편 holder를 사용하였기 때문이다. Table 2와 같이 Si, Mn을 각각 포함한 실험합금에서는 Si, Mn이 포함된 석출물이 출현하였으나 Mo을 포함한 실험합금에서는 Mo이 포함된 석출물이 출현하지 않았다. 이는 실험합금의 최종열처리 온도인 510°C에서 Mo은 α -Zr에 약간 고용되나 Si나 Mn은 거의 고용되지 않기 때문²⁴⁾으로 생각된다. 따라서 Si 및 Mn를 함유한 실험합금의 경우 과포화된 Si, Mn원소가 대부분 석출물 형성에 기여하여 부식저항성에 향상에 기여한 것 같고 Mo를 함유한 합금의 경우 과포화된 Mo원소가 matrix에 남아 있기 때문에 부식저항성이 상대적으로 떨어졌을 것으로 추측된다.

4. 결 론

핵연료 피복관 소재용 Zr 신합금 개발을 기초 자료확보를 위해 Zr-0.2Sn-0.8Nb 합금의 부식거동에 대한 Si, Mo 및 Mn의 영향을 조사하였다. 이를 위하여 400°C 수증기 및 LiOH 70ppm 수용액 분위기에서 각각 200일 및 90일간 Si, Mo 및 Mn이 일정량 포함된 실험합금을 제조하여 부식 시험한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) Zr-0.2Sn-0.8Nb 합금에 다음의 합금원소를 첨가한 실험합금 경우 첨가원소의 첨가 함량증가와 함께 400°C 수증기 및 LiOH 70ppm 수용액 분위기 모두에서 실험합금의 부식저항성이 증가하였다.

(1) 80ppm에서 200ppm까지 Si원소

(2) 0.05wt.%에서 0.4wt.%까지 Mn원소

2) 0.05wt.%에서 0.4wt.%까지 Mo원소를 Zr-0.2Sn-0.8Nb 합금에 첨가한 실험합금의 경우 400°C 수증기 및 LiOH 70ppm 수용액 분위기 모두에서 0.05wt.%에서 0.2wt.% 범위에서 실험합금의 부식저항성이 증가하였다.

3) Si, Mo 및 Mn원소가 Zr-0.2Sn-0.8Nb 합금에 일정량 첨가된 실험합금의 경우 부식저항성이 향상되는 현상은 실험합금에 대한 이들 첨가원소의 고용한도와 관련되어 해당합금의 부식속도가 달라지기 때문일 것으로 추측된다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부의 원자력 연구개발 사업인 지르코늄 신합금 핵연료피복관 개발 과제 수행의 일환으로 수행되었으며 이에 감사 드립니다.

참 고 문 헌

- R.J. Comstock, G. Schoenberger and G.P. Sabol, ASTM STP 1295, 710-725 (1996).
- J.P. Mardon, D. Charquet and L. Senevat, ASTM 1354, 505-524 (2000).
- J.T. Willse, G.L. Garner, Proceedings of the 2000 ANS International Topical Meeting on LWR Fuel Performance, Park City, Utah, April 10-13, 1-4-1 (2000).
- K. Goto, S. Matsumoto, T. Murata, T. Miyashita, H. Anada, H. Abe, Proceedings of 2000 ANS International Topical Meeting on LWR Fuel Performance, Park city, Utah, April 10-13, 1-8-1 (2000).
- Yasuhiro Iriasa, Sigemitsu Suzuki, Kenji Murai, R. Sabate, Ken Goto, J.M. Alonso, Proceedings of 2000 ANS International Topical Meeting on LWR Fuel Performance, Park city, Utah, April 10-13, 1-7-1 (2000).
- Ambattsumyan. R.S. et al., Proceedings of the Second International Conference on the Peaceful Uses of Atomic Energy, Geneva, Vol. 5., 2044 (1958).
- S. Kass, J.D. Grozier and F.L.Shubert, Effect of Silicon, Nitrogen and Oxygen on the Corrosion and Hydriding Absorption of Zircaloy-2, Corrosion. Vol. 20, 350 (1964) and U.S. Report WAPDD-283, Nov. (1963).
- Garzarolli, F., Schumann, R. et al, ASTM STP 1245, 709-723 (1994).
- Y.B. Chun, S.K. Hwang, M.H. Kim, S.I. Kwun, Y.S.Kim, JNM 265, 28-37 (1999)
- J.H. Lee, S.K. Hwang, M.H. Kim and S.I. Kwun, J. Kor. Inst. Met. & Mater. Vol. 38(6), 745 (2000).
- Ivanov. O.S and V.K. Grigorovich, Proceedings of the Second International Conference on the Peaceful Uses of Atomic Energy. Geneva., Vol. 5, 2046 (1958)
- B.G.Parfenov, V.V.Gerasimov, and G.I. Venediktova, Corrosion of Zirconium and Zirconium Alloys. A Symposium Presented at the Winter Meeting. Nov 20, 13 (1963).
- Derek O. Northwood and Daniel T. Lim: Canadian Metallurgical Quarterly, Vol. 18, 441-467 (1979).
- Bibb, A.E. et al, KAPL-M-AEB-8, (1960).
- Rubenstein, L.S. et al., US Pat.3097094, Class 77-17, 6 Sept. (1960).
- J.N. Wanklyn, Report UK AERE-R3768, Part II, (1961)
- Isobe. T. and Matusuo. et al, ASTM STP 1132, 346-367 (1991).
- Ramasubramanian, N., Balakrishnan, P.V.: ASTM STP 1245, 378 (1994).
- Ramasubramanian, N., Precoanin, N., Ling. V.C.: ASTM STP 1023, 187 (1989).
- Ramasubramanian, N., ASTM STP 1132, 613 (1991).
- Ding, Y., Northwood, D.O., J. Nucl. Mater. 202, 180-192 (1993).
- J. Godlewski: ASTM 1245, 663 (1994).
- H.C. Kim, M.H.Lee, S.Y. Park and Y.H.Jeong: J. Kor. Inst. Met. & Mater. Vol. 37(12), 1527 (1999).
- B. Lustman and F. Kerze, Jr., The Metallurgy of Zirconium, 1st Edition, Mcgraw-hill book company, inc., 463-471 (1955).