

핵연료 피복관 부식생성물 부착에 관한 Ni/Fe 이온 농도비의 영향

백 승 현 · 김 우 철 · 심 희 상 · 임 경 수 · 허 도 행[†]

대전광역시 유성구 대덕대로 989-111, 한국원자력연구원 원자력재료안전연구부
(2014년 6월 5일 접수, 2014년 8월 26일 수정, 2014년 8월 28일 채택)

Effect of Ni/Fe Ion Concentration Ratio on Fuel Cladding Crud Deposition

S. H. Baek, U. C. Kim, H.-S. Shim, K. S. Lim, and D. H. Hur[†]

Nuclear Materials Safety Research Division, Korea Atomic Energy Research Institute,
989-111 Daedeok-daero, Yuseong-gu, Daejeon, Korea

(Received June 5, 2014; Revised August 26, 2014; Accepted August 28, 2014)

The objectives of this study are to investigate the effect of the concentration ratios of Ni and Fe ions on crud deposition onto the fuel cladding surface in the simulated primary environments of a pressurized water reactor. Crud deposition tests were conducted in the Ni and Fe concentration ratios of 20:20 ppm, 39:1 ppm and 1:39 ppm at 325 °C for 14 days. In the case of the same Ni and Fe ion ratio (20:20), nickel ferrite with a polyhedral shape was formed. Nickel oxide deposits with a needle shape were formed in the condition of high Ni to Fe ion ratio (39:1), While polyhedral iron oxide and needle-like nickel oxide formed in the condition of low Ni to Fe ion ratio (1:39). The amount of deposits increased, when Fe oxides were formed. This indicates that Fe rich oxides stimulated Ni oxide deposition.

Keywords : axial offset anomaly, ni and fe ion concentration, crud deposition, primary water chemistry.

1. 서 론

국내외 PWR(Pressurized water reactor) 원자력 발전소의 운전조건이 고연소도 장주기 운전모드로 바뀔에 따라, 노심 축방향으로 출력이 불균일해지는 AOA(axial offset anomaly) 현상 빈도가 증가하고 있다. AOA 현상은 핵연료 피복관 표면에 두껍게 부착된 부식생성물에 기인한다. 핵연료 피복관 표면에 부식생성물이 부착됨에 따라 붕소(B)가 부식생성물 틈새의 빈 공간에 침적되는 현상이 발생하는데, 붕소는 연쇄핵반응을 일으키는 중성자를 흡수하여 이 부분의 핵연료 반응속도를 감소시켜 출력 분포 변이를 일으킨다.

또한, 피복관 표면에 부착된 부식생성물은 냉각수와 피복관 표면의 열전달을 방해하여 피복관 표면온도를 증가시킨다. 이러한 온도증가는 피복관 부식속도 가속화의 원인이 되며, 피복관 표면에서 국부적으로 미포화비등(SNB, sub-nucleated boiling)을 야기시키는 요인이 되고 있다. 미포화비등은 피복관 표면의 부식생성물 부착량을 증가시킬 뿐

만 아니라, 붕소의 침적이 용이한 침상 및 다공성 부식생성물을 형성시켜 AOA 현상을 가속화시킨다. AOA 현상이 심하게 발생할 경우에는 적절한 정지여유도(shutdown margin)를 확보하기 위해 출력을 감소시켜야 하므로 원전의 건전성 및 경제성을 크게 감소시키는 문제점이 있다. 이러한 AOA 현상은 한국을 포함한 외국의 여러 PWR 원전에서 발생하였으며, 그로인해 출력을 감소시키고 운전한 사례가 보고된 바 있다.¹⁻²⁾

핵연료 피복관에 부착되는 부식생성물은 주로 1차계통 냉각수와 접촉하는 증기발생기 전열관과 배관 재료 표면으로부터 용출되는 금속 이온 및 산화물이 계통을 따라 이동하여 부착되는 것이 대부분이며, 그 중 ⁵⁸Ni과 ⁵⁹Co는 원자로 내부로 유입되어 중성자 반응에 의해 각각 ⁵⁸Co와 ⁶⁰Co으로 방사화된다. 이러한 방사화 부식생성물은 정지 운전시 핵연료 피복관 표면에서 떨어져 나와 계통의 방사선량을 증가시키고, 계통을 따라 증기발생기로 이동하여 작업자 피폭의 원인이 된다.³⁾ 따라서, 원전 출력 향상, 방사선량 감소 및 핵연료 피복관 건전성 향상을 위해서는 AOA를 완화시키는 연구가 필요하다.

[†] Corresponding author: dhur@kaeri.re.kr

Table 1. Chemical composition and mechanical properties of the Zirlo cladding tube.

Composition (%)					Mechanical properties at RT		
Sn	Fe	O	Nb	Zr	YS (MPa)	UTS (MPa)	Elong. (%)
1.0	0.1	0.12	1.0	Bal.	448	820	24.6

AOA를 완화하기 위한 방법으로는 피복관 개량법과 표면 처리법, 그리고 초음파 제거 방법과 같은 물리적인 방법과, 1차계통의 냉각수에 의한 영향 인자를 제어하는 수화학적 방법이 있다. 이 중 수화학적 제어방법은 가동 원전에 적용하기 용이하고, AOA의 원인 물질을 근원적으로 제거할 수 있는 장점이 있다. 수화학적 제어 방법을 적용하기 위해서는 무엇보다 부식생성물을 형성하는 수화학적 인자 규명과 부식생성물 형성기구(mechanism)를 이해하는 것이 중요하다. 핵연료 피복관에 부착되는 부식생성물은 1차계통 재료에서 용출된 Ni^{2+} 과 $Fe^{2+,3+}$ 이온 및 Ni과 Fe 산화물들이 pH, 온도 및 용존산소와 같은 수화학적 인자에 의해 영향을 받는 것으로 보고되고 있으며,⁴⁻⁶⁾ 이들에 의한 용해도 변화에 따라 부식생성물은 단일상이 아니라 다양한 형태의 금속 산화물로 부착되고 있다.

핵연료 피복관 표면에서 형성되는 부식생성물은 일반적으로 ZrO_2 층 위에 니켈페라이트($Ni_xFe_{3-x}O_4$), NiO, 보나코다이트(Ni_2FeBO_5)와 같은 Ni계 산화물 형태가 부착된다고 알려져 있으며, 이 중 AOA 현상을 일으키는 부식생성물은 침상 및 다공성 구조를 갖는 NiO와 보나코다이트로 보고되고 있다.^{2,7,8)} 이들은 계통 내에 용출된 이온 농도비에 따라 핵연료 피복관에 부착되는 형태와 종류가 다르고 환경에 따라 특이한 성장패턴을 보이므로,⁹⁾ AOA 현상을 완화하기 위해서는 이들에 대한 분석 및 이해가 필요하다. 그러나 핵연료 피복관에 부착되는 방사화 부식생성물은 취급이 난해하고 취할 수 있는 자료도 제한적이기 때문에 아직까지 부식생성물의 부착거동 및 화학적 특성 규명이 제대로 이루어지지 않은 부분이 많다.

따라서, 본 연구에서는 고온고압의 1차계통 환경을 모사할 수 있는 장치를 이용하여, Ni과 Fe 이온 농도비에 따른 핵연료 피복관의 부식생성물 부착 시험을 수행하였으며 부식생성물의 형태, 조성, 부착량 및 부착 특성에 대해 평가하였다. 각 조건에서 형성된 부식생성물의 형태는 SEM을 이용하여 관찰하였으며, 조성 및 화학적 성분은 STEM-EDS 장비를 이용하여 분석하였다. 또한 Ni과 Fe 이온의 부착 특성을 평가하기 위해 시험중 시험용액을 채취하여 Ni과 Fe 이온 농도 변화를 분석하였으며, 각 조건에서 피복관에 부착된 부식생성물을 단위 면적당 부착량으로 측정하여 비교하였다.

2. 실험방법

본 연구에서 제작한 1차계통 모사 장치의 개략도를 Fig. 1에 도시하였다. 시험장치의 반응기(test section)는 고온 고압의 조건을 고려하여 316L 스테인리스(STS) 재료의 autoclave로 제작하였다. 시험에 사용된 피복관은 상용 핵연료 피복관 재료인 Zirlo를 사용하였으며, 이에 대한 물리적, 화학적 특성을 Table. 1에 나타내었다. 원전 노심의 핵연료 피복관과 유사한 조건을 만들기 위하여 피복관 내부에는 STS 316 재료의 고출력 막대형 가열기(Maximum : 25 W/cm²)를 삽입하여 열원으로 사용하였으며, 피복관(외경 8.7 mm)과 가열기(외경 8.2 mm) 사이 공간(0.5 mm)에는 절연체(MgO)를 채웠다. 이렇게 준비된 피복관 재료는 아세톤, 메탄올, 에탄올, 초순수에서 각각 10분간 초음파로 세척한 후 오븐(60°C)에서 건조하였다.

본 시험에 대한 수화학적 조건 및 변수를 Table. 2에 정리하였다. 시험 용액은 초순수에 수산화리튬(LiOH) 및 붕산(H_3BO_3)을 용해하여, Li과 B의 농도가 각각 3.5 ppm 및 1,500 ppm이 되도록 제조하였다. 이는 현재 EPRI 지침에 따라 국내 원전에서 적용되고 있는 1차계통 pH 조절방법 중 하나로 pH_{325°C}를 7.1로 유지하기 위한 조건이다¹⁰⁾. 금속 이온 소스는 Ni-EDTA(ethylenediaminetetraacetic acid)와 Fe-EDTA를 사용하였으며, Ni과 Fe의 농도를 각각 20:20 ppm, 1:39 ppm 그리고 39:1 ppm으로 시험하였다. 이는 Ni과 Fe 이온 농도차를 크게 두어 금속이온 농도차이에 따른 부식생성물의 부착 특성을 확실하게 알아보기 위함이다. 또한 금속이온 농도의 총량은 40 ppm을 사용하였는데, 40 ppm 이상 주입시 초기 pH_{25°C} 6.4를 크게 벗어나기 때문이다. pH_{25°C}에서 6.4는 pH_{325°C}에서 7.1로 증가한다. 모든 시험에서 계통내 용존산소의 농도는 환원성 분위기를 유지하기 위해 5 ppb 이하로 하였으며, 용존수소의 농도는 5 cc/kg으로 제어하였다.

핵연료 피복관이 장착되어있는 test section의 냉각수 온도는 1차계통 온도조건인 325°C를 유지시켜 시험하였다. 이때 압력은 가압밸브(BPR, back pressure regulator)를 이용하여 122.9 kgf/cm²로 조절하였으며, 계통내 시험용액의 유속은 60 cc/min로 순환시키면서 14일간 부식생성물 부착시험을 수행하였다. 또한 시험중 금속이온 농도 변

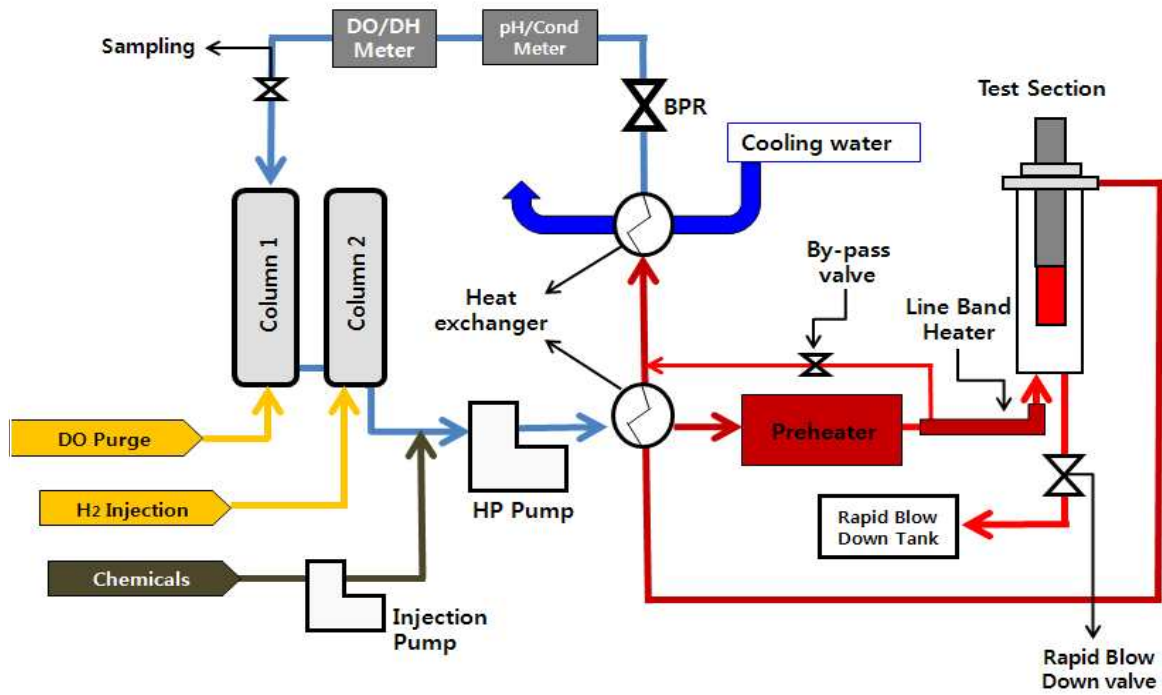


Fig. 1. Schematic drawing of the recirculating system used for deposition tests.

Table 2. Test conditions with the Ni/Fe concentration ratio in EDTA form.

Test	Specimen	Chemicals (ppm)				pH at RT	DH (cc/kg)	DO (ppb)	Exposure time
		Ni	Fe	Li as LiOH	B as H ₃ BO ₃				
B1	Zirlo	20	20	3.5	1500	6.4	5	< 5	14 days
B2		1	39			6.4*			
B3		39	1			6.4			

*pH was controlled to 6.4 by ETA.

화를 측정하기 위하여 정해진 시간에 총 6회에 걸쳐 시험 용액(10ml)을 채취하였다.

시험종료 후, Zirlo 피복관 표면에 부착된 부식생성물의 형태는 SEM을 이용하여 관찰하였고, 각 시험에서 대표성을 갖는 부식생성물을 FIB(Focused ion beam)로 가공한 후 그 단면에 대한 화학적 성분을 STEM-EDS 장비로 분석하였다. 또한 피복관 표면에 부착된 부식생성물의 부착량을 분석하기 위하여 부식생성물이 부착된 피복관 시편을 10 ml 초순수가 담긴 vial에 담아 고출력 초음파와 세척기를 이용하여 부식생성물을 모두 제거한 후 용해시켰다. 그 다음 ICP-AES(inductively coupled plasma-atomic emission spectroscope)를 이용하여 Ni과 Fe의 농도를 분석하였으며 분석된 Ni과 Fe 농도를 단위면적당 부착량($\mu\text{g}/\text{cm}^2$)으로 환산하여 정량화하였다. 시험중 채취한 시험용

액 또한 ICP-AES를 이용하여 분석한 후 시간에 따른 Ni과 Fe 이온 농도 변화를 측정하였다.

3. 연구결과 및 고찰

3.1 부식생성물 부착 형태 및 조성에 관한 Ni과 Fe 이온 농도비의 영향

Fig. 2는 Ni과 Fe 이온 농도비에 따라 형성된 부식생성물의 형태를 SEM을 이용하여 관찰한 사진이다. Ni과 Fe의 이온 농도를 각각 20:20 ppm으로 주입한 조건(B1)에서 크고 작은 다면체 형태의 산화물이 부착되었으며, Ni과 Fe 이온 농도 1:39 ppm 조건(B2)에서는 다면체 형태의 산화물과 함께 특정 부분에서 침상 형태의 산화물이 관찰되었다. 그리고 Ni과 Fe 이온 농도를 39:1 ppm 조건(B3)으로 하였

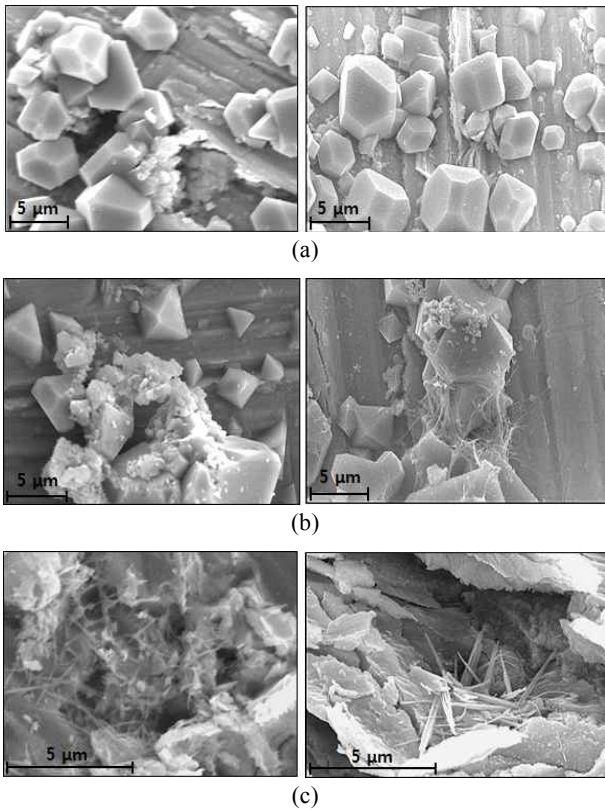


Fig. 2. SEM photographs of corrosion products formed at Ni/Fe ion concentration of (a) Ni/Fe 20:20 ppm, (b) Ni/Fe 1:39 ppm and (c) Ni/Fe 39:1 ppm.

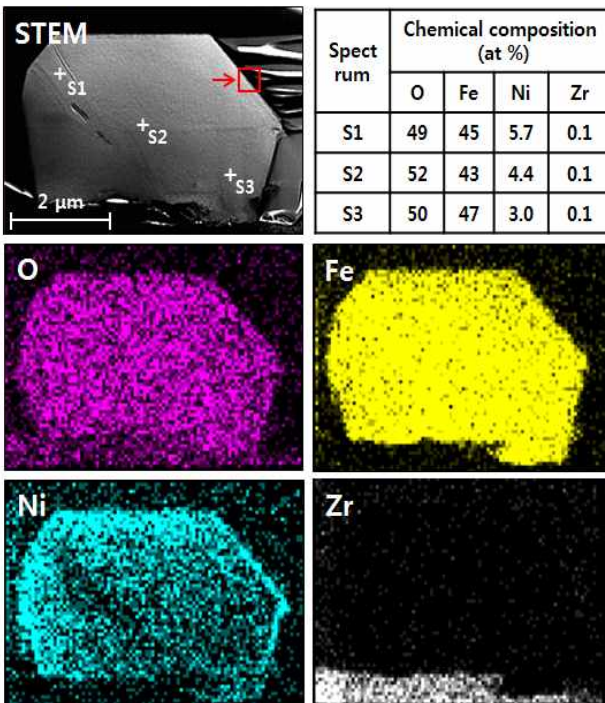


Fig. 3. STEM-EDS analysis on the polyhedral oxide formed at Ni/Fe concentration ratio 20:20 ppm.

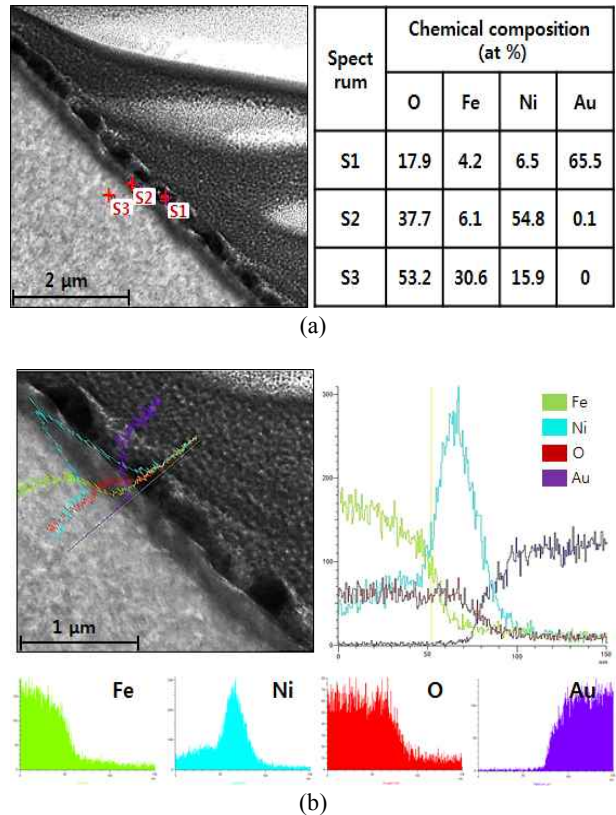
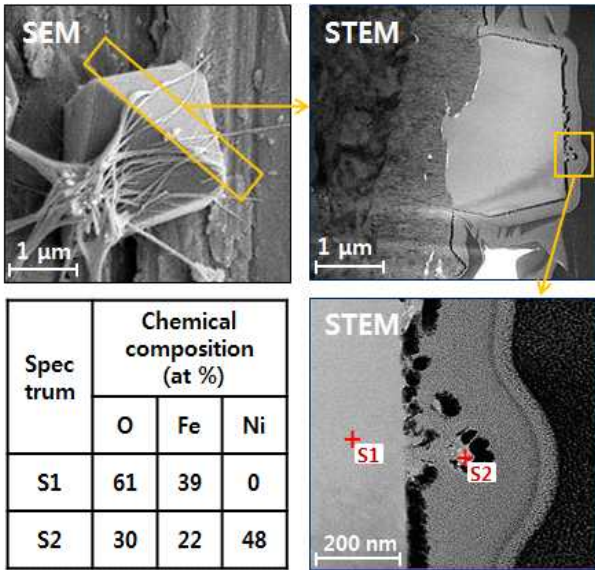


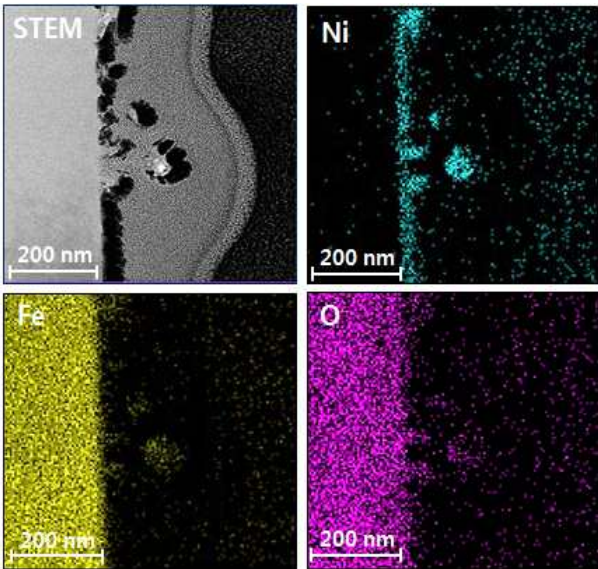
Fig. 4. STEM-EDS analysis of (a) point and (b) element line scans on the polyhedral oxide formed at Ni/Fe concentration ratio 20:20 ppm.

을 때는 다면체 형태의 산화물은 관찰되지 않았으며 침상 형태의 산화물이 관찰되었다.

이 부식생성물의 조성 및 화학적 성분을 분석하기 위하여 각 조건에서 대표성을 갖는 다면체 및 침상 형태의 부식생성물을 FIB로 가공 후 STEM-EDS를 이용하여 분석하였다. Fig. 3은 B1(Ni 20 ppm, Fe 20 ppm) 시험 조건에서 형성된 다면체 형태 산화물의 단면을 분석한 결과이다. Point 성분분석 결과, 이 다면체 산화물은 소량의 Ni 성분과 함께 Fe와 O성분이 주로적으로 검출된 것으로 보아 니켈페라이트라고 판단된다. 이 다면체 산화물에서 주목할 점은 Element mapping 분석 결과에서 다면체 외각에서의 Ni 성분이 다면체 내면에 비하여 농축되어 있음이 관찰되었다. 이는 다면체 외면에 Ni 산화물이 부착되었다고 추정되므로 이 부분에 관해 좀 더 정밀한 분석을 수행하였다. Fig. 4는 Fig. 3의 STEM 사진에서 네모로 표시한 부분을 확대하여 STEM point 성분 분석(a) 및 element line scan(b) 결과이다. Point 성분 분석을 수행하였을 때, 다면체의 가장 바깥쪽(S1)은 STEM 분석을 위해 전처리한 Au 성분이 주로 검출되었고 다면체 내면(S3)은 $Ni_{1.03}Fe_{1.97}O_4$ 의 조성비를 갖는 니켈페라이트로 분석되었다. 그리고 Ni 산화물이 흡착되었



(a)

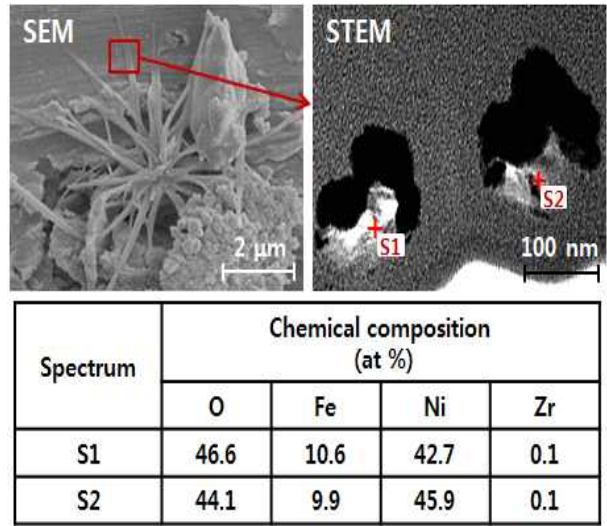


(b)

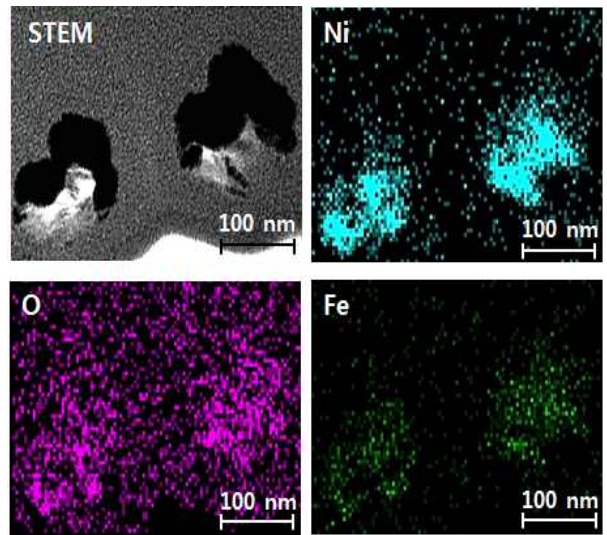
Fig. 5. STEM-EDS analysis of (a) point and (b) element mapping on the needle and polyhedral oxide formed at Ni/Fe concentration ratio 1:39 ppm.

다고 추정되는 다면체 외각에 형성된 층(S2)은 Ni과 O이 주도적으로 검출되었으며, 특히 Ni이 전체 조성의 50% 이상을 차지하였다. 또한 element line scan 분석 결과에서 다면체 내면은 주로 Fe, Ni, O가 차지하였으며, 다면체 외면으로 갈수록 Fe 성분이 감소한 반면 Ni 성분은 큰 폭으로 증가한 모습을 볼 수 있다. 따라서 이 분석결과로 보아 안정한 다면체 상태의 니켈페라이트 외각에 Ni 산화물이 흡착되었으며, Ni 산화물은 다면체 산화물 외각에 용이하게 흡착된다고 판단된다.

Fig. 5는 B2(Ni 1 ppm, Fe 39 ppm) 시험에서 관찰된



(a)



(b)

Fig. 6. STEM-EDS analysis of (a) point and (b) element mapping on the needle oxide formed at Ni/Fe concentration ratio 39:1 ppm.

다면체 산화물과 그 위에 형성된 침상 형태 산화물에 대한 FIB 가공 전 SEM 사진과 가공한 후 그 단면을 point 성분 분석(a) 및 image mapping(b)을 수행한 결과이다. 이 다면체 산화물(S1)은 B1시험에서 형성된 니켈페라이트와 달리, Ni을 전혀 포함하지 않는 Fe₂O₃ 조성의 Fe 산화물로 분석되었으며, 침상의 산화물(S2)은 Fe와 Ni의 원자비가 대략 1:2를 갖는 Ni 산화물로 나타났다. 그리고 image mapping 분석 결과에서 볼 수 있듯이 B1 시험 결과와 마찬가지로 이 다면체 산화물 외면에 Ni 산화물 층이 형성되어 있음을 관찰하였다.

마지막으로 B3(Ni 39 ppm, Fe 1 ppm) 시험에서 형성된 침상 형태의 산화물을 분석하여 Fig. 6에 나타내었다. 이 침상 형태의 산화물 역시 B1, B2 시험의 분석과 동일한 방

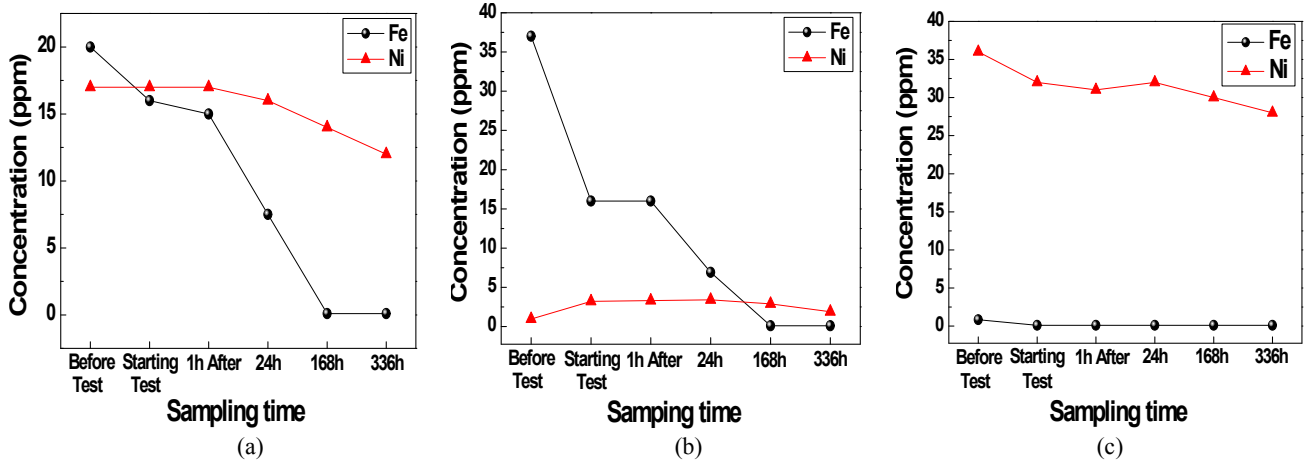


Fig. 7. Ni and Fe concentration of sampled solution (a) Ni/Fe 20:20 ppm, (b) Ni/Fe 1:39 ppm, (c) Ni/Fe 39:1 ppm.

법으로 침상의 단면을 FIB로 가공하여 STEM-EDS로 분석하였다. 이 침상의 부식생성물은 대략 1:1의 Ni과 O의 원자비를 갖는 소량의 Fe를 포함한 Ni 산화물로 분석되었으며, B2 시험에서 형성된 침상 형태의 Ni 산화물과 비교하였을 때 Fe의 함량이 더 적게 나타났다.

이러한 분석 결과로부터, Ni과 Fe 이온 농도비에 따라 핵연료 피복관 표면에 부착되는 부식생성물의 형태와 조성이 다름을 알 수 있었다. 즉, Ni과 Fe 이온 농도비가 각각 20 ppm으로 같을 경우 다면체 구조의 니켈페라이트가 형성되며 그 외면으로 Ni 산화물이 부착되는 특성을 보였다. Fe 이온 농도가 Ni 이온 농도보다 높을 경우(Ni/Fe 농도비 = 1:39)에는 Ni을 포함하지 않는 다면체의 Fe₂O₃ 산화물 외면에 침상의 Ni 산화물이 부착되었다. 그리고 Ni 이온 농도가 Fe 이온 농도보다 높을 경우(Ni/Fe 농도비 = 39:1), Fe 이온 소스 부족으로 인하여 안정한 형태의 다면체 산화물은 형성되지 않았으며 침상 형태의 Ni 산화물이 형성되었다.

AOA 현상이 발생한 것으로 보고된 국내 PWR 발전소의 부식생성물 입자를 건조시켜 SEM-EDS로 분석한 결과에 의하면 침상 형태를 갖는 입자들의 조성은 Fe와 Ni의 함량이 대부분을 차지하고 있으며, Zr 함량이 적은 반면 Ni이 전체 조성의 50% 이상을 차지하는 것으로 분석된바 있다¹¹⁾. 본 시험에서는 이와 유사한 Ni 함량이 높은 침상 형태의 Ni 산화물과 원전 운전조건에서 가장 작은 용해도 값을 갖기 때문에 안정한 화합물로 평가되고 있는 니켈페라이트를 관찰할 수 있었다.

3.2. 부식생성물 부착 거동 및 부착량 평가

시험 중 Ni과 Fe 이온 농도 변화는 이들이 반응에 참여하여 산화물을 형성했다는 것을 의미한다. 따라서 시험이 진행되는 동안 Ni과 Fe 이온 농도 변화를 분석하여 부식생성물의 부착 거동을 알아보았다. Fig. 7은 각 시험중 정해진

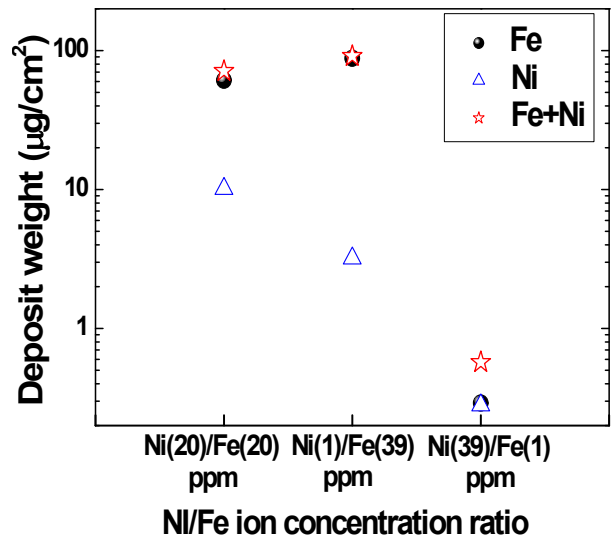


Fig. 8. Effect of Ni/Fe concentration ratio on the amount of deposit.

시간에 채취한 용액의 농도를 ICP-AES 장비를 이용하여 분석한 그래프이다. 모든 시험 조건에서 Fe 이온 농도는 168시간 이내에 0.1 ppm 이하까지 급격히 감소하는 반면, Ni 이온 농도는 서서히 감소하는 경향을 보였다. 특히 Ni과 Fe 이온 농도를 20 ppm으로 같은 농도로 주입했을 경우, Fe 농도가 0.1 ppm 이하까지 감소한 후 Ni 이온 농도가 점차적으로 감소하는 모습을 보였다. 여기서 Fe 이온 농도가 우선적으로 감소하였다는 것은 Fe 이온이 Ni 이온보다 먼저 산화물을 형성하여 고갈되었음을 의미한다. 또한, Fe 이온이 고갈되었을 때 Ni 이온 농도 감소폭이 큰 것으로 보아, Fe 산화물은 Ni 이온 및 산화물의 부착을 촉진시킨다고 판단된다. 이는 피복관 표면에 부착된 부식생성물의 부착량 분석결과에서 확인되었다.

Fig. 8은 각 시험 조건에서 피복관 표면에 형성된 부식생

성물을 고출력 초음파를 이용하여 제거한 후 용해시켜 부식 생성물에 포함된 Ni과 Fe의 농도를 단위면적당 부착량으로 정량화시킨 결과이다. Fe 산화물이 형성된 조건에서는 Ni의 부착량이 많았고 Ni과 Fe의 부착 총량 또한 높게 분석되었으나, Fe 산화물이 형성되지 않은 조건에서는 Ni 이온 소스가 많았음에도 불구하고 Ni의 부착량 및 Ni과 Fe 부착 총량이 적었다. 이러한 결과로부터 325°C 고온 환경에서 Fe 이온은 Ni 이온보다 피복관 표면에 우선적으로 부착되며, Fe 산화물은 Ni의 부착을 촉진시킨다는 사실을 알 수 있었다.

4. 결론

본 연구에서는 증기발생기 및 1차계통 재료 표면으로부터 주로 용출되는 Ni과 Fe 이온의 농도비를 변화시켜 핵연료 피복관에 부착되는 부식생성물을 평가하였다. 부식생성물은 Ni과 Fe 이온 농도비에 따라 형태 및 조성, 그리고 부착량에 차이를 보였다. Ni과 Fe 이온 농도비를 각각 20 ppm으로 같게 주입한 시험에서 다면체의 니켈페라이트가 부착되었고 그 외면에 Ni 산화물이 부착되었으며, Fe의 농도가 주도적일 경우(Ni/Fe 농도비 = 1:39) Fe₂O₃ 산화물 외면으로 Ni 함량이 높은 Ni 산화물이 부착되었다. 그리고 Ni의 농도가 주도적일 경우(Ni/Fe 농도비 = 39:1), 다면체 산화물은 관찰되지 않았으며 주로 침상 형태의 Ni 산화물이 부착되었다. 시험 중 채취한 샘플의 이온농도 분석 결과에서 Fe 이온은 Ni 이온보다 먼저 고갈되는 특성을 보였으며, Fe 산화물이 형성된 조건에서 Ni의 부착량 및 부착된 총량이 증가하였다.

감사의 글

본 연구는 미래창조과학부의 원자력기술개발사업 재원으로 한국연구재단(NRF)의 지원을 받아 수행한 연구결과입니다.

References

1. W. Y. Maeng, *Proceedings of the Int'l Conference on Water Chemistry of Nuclear Reactor Systems*, NPC, Jeju (2008).
2. W. Byers, *Proceedings of the Int'l Conference on Water Chemistry of Nuclear Reactor Systems*, NPC, Jeju (2006).
3. H. Ocken, Cobalt reduction guidelines, EPRI Report NP-6737, EPRI, Palo Alto, CA (1990).
4. A. Tigras and E. Decossin, *Proceedings of the Int'l Conference on Water Chemistry of Nuclear Reactor Systems*, p. 1661, NPC, San Francisco (2004).
5. J. Henshaw, *Proceedings of the Int'l Conference on Water Chemistry of Nuclear Reactor Systems*, NPC, Jeju (2006).
6. K. G. Turnage, *Proceedings of the Int'l Conference on Water Chemistry of Nuclear Reactor Systems*, p. 204, NPC, San Francisco (2004).
7. P. Bennett, *Proceedings of the Int'l Conference on Water Chemistry of Nuclear Reactor Systems*, NPC, Jeju (2006).
8. B. Beverskog, *Proceedings of the Int'l Conference on Water Chemistry of Nuclear Reactor Systems*, NPC, Jeju (2006).
9. H. Kawamura, *Proceedings of the Int'l Conference on Water Chemistry of Nuclear Reactor Systems*, NPC, Berlin (2008).
10. K. Fruzzetti, *Pressurized Water Reactor Primary Water Chemistry Guidelines*, EPRI Report TR-1014986, Vol. 1, Rev. 6, p. 2-1, EPRI (2007).
11. I. K. Choi, *Development of Analytical Techniques for Characteristics of CRUD*, KAERI Report CR-270, p. 49, KAERI (2007).