

Rotating cylinder를 이용한 탄소강의 유동가속부식 평가

박 태 준·이 은 희·김 경 모·김 홍 표[†]

한국원자력연구원 원자력재료개발부

(2012년 10월 18일 접수, 2012년 12월 12일 수정, 2012년 12월 18일 채택)

Evaluation of Flow Accelerated Corrosion of Carbon Steel with Rotating Cylinder

Tae Jun Park, Eun Hee Lee, Kyung Mo Kim, and Hong Pyo Kim[†]

Nuclear Materials Development Division, Korea Atomic Energy Research Institute,
1045 Daedeokdaero, Yuseong-gu, Daejeon 305-353, Republic of Korea

(Received October 18, 2012; Revised December 12, 2012; Accepted December 18, 2012)

Flow accelerated corrosion (FAC) of the carbon steel piping in nuclear power plants (NPPs) has been major issue in nuclear industry. Rotating cylinder FAC test facility was designed and fabricated and then performance of the facility was evaluated. The facility is very simple in design and economic in fabrication and can be used in material and chemistry screening test. The facility is equipped with on line monitoring of pH, conductivity, dissolved oxygen(DO), and temperature. Fluid velocity is controlled with rotating speed of the cylinder with a test specimen. FAC test of SA106 Gr. B carbon steel under 4 m/s flow velocity was performed with the rotating cylinder at DO concentration of less than 1 ppb and of 1.3 ppm. Also a corrosion test of the carbon steel at static condition, that is at zero fluid velocity, of test specimen and solution was performed at pH from 8 to 10 for comparison with the FAC data. For corrosion test in static condition, the amount of non adherent corrosion product was almost constant at pH ranging from 8 to 10. But adherent corrosion product decreased with increasing pH. This trend is consistent with decrease of Fe solubility with an increase in pH. For FAC test with rotating cylinder FAC test facility, the amount of non adherent corrosion product was also almost same for both DO concentrations. The rotating cylinder FAC test facility will be further improved by redesigning rotating cylinder and FAC specimen geometry for future work.

Keywords : flow accelerated corrosion, rotating cylinder, carbon steel, nuclear power plant, dissolved oxygen content

1. 서 론

1986년 미국의 Surry 원자력발전소 (원전) 2호기에서 심각한 2차측 급수배관 파열사고가 발생하여 인명 피해 및 막대한 경제적인 손실을 초래하였다. 이 사고원인은 유동가속부식 (flow accelerated corrosion, FAC)에 의한 배관의 감육현상 때문이라고 밝혀졌으며, 많은 원전에서 이와 유사한 손상사례를 경험한 것으로 나타났다.¹⁾ FAC는 탄소강이나 저합금강 표면의 보호 산화막이 부식성 유체에 의해 용해, 생성이 반복되면서 배관이 점차 얇아지게 되며, 즉 재질 표면의 보호 산화막이 용해되는 속도와 산화막이 새로 생기는 속도가 같아지는 정상상태가 되면 모재의 일정한 부식율이 유지되므로 감육이 계속되어 결국 배관의 파손이 일어나게 되는 현상이다.¹⁾ 2004년 일본의 Mihama 원전 3호기 복수 배관이 파단되어 작업자들이 사상하는 사고가 발생

하였다. 부식과 침식에 의한 배관 감육이 사고의 주 원인으로 알려졌으며 이 사고로 FAC에 대한 경각심을 불러 일으켰다.²⁾⁻³⁾ FAC는 탄소강이나 저합금강 재질을 사용하는 원전 2차측 배관계통에서 단상 (water, single phase) 이나 2상 (water-steam, two phase) 영역에서 주로 발생하는 것으로 알려졌다.⁴⁾ Surry 와 Mihama 원전 사고들은 단상 영역에서 발생하였다. 이 현상은 수화학 환경 인자, 재료 인자, 그리고 유체역학적 인자들에 의해 영향을 받는다. 수화학 환경 인자에는 온도, pH, 용존 산소농도, 불순물 함량 등이 있으며 재료 인자에는 재료들의 화학적 성분 그리고 유체역학적 인자에는 유속과 배관의 기하학적 형상 등이 있다. 원전의 가동 환경조건에서 이러한 인자들의 상호작용에 의해 배관의 FAC가 진행되게 된다. FAC는 오랜 수명기간 동안 운전되는 대부분의 원전에서 매우 중요하며 적절한 구조재료 사용이나 수화학 인자들의 조절에 의해 효과적으로 완화할 수 있다.

본 연구에서는 원전의 가동 환경에서 2차 계통 배관의

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

FAC 현상을 신속하게 평가하기 위해 원전 2차 계통을 모사한 소규모의 FAC 실증 시험 장치를 설계/제작하였다. 발전소 현장에서는 재료(배관)는 고정되어 있고, 유체가 흐르면서 재료의 유체가속부식을 초래하는 데, 본 연구에서는 단시간에 수화학 인자의 영향을 정성적으로 screening하기 위해 유체는 거의 정지한 상태에서 재료를 움직여 유체가속부식을 평가하였다. 재료를 움직이기 위해 rotating cylinder electrode의 개념을 사용하였다. 이 시험 장치는 시편을 회전시킬 수 있는 교반기 (magnedrive)를 장착하여 시편을 회전시켜 유체흐름을 모사할 수 있으며, 이를 사용하여 발전소 운전환경에서 유속에 따른 부식생성물 발생실험을 수행하였다.⁵⁾ FAC 실증 시험 장치를 이용하면 원전에서 수행하기 어려운 시험을 하거나 여러 가지 인자들에 대한 FAC 영향 평가를 신속하게 할 수 있다. 수용액 pH, 전도도, 그리고 용존산소 농도를 실시간으로 측정하기 위해 pH/전도도와 용존산소 농도 측정기를 루프에 장착하였다. 회전 실린더의 회전속도를 선속도로 변환하여 유속으로 사용하였다. 이 실증 시험 장치를 사용하여 국내 원전 2차측 배관재인 탄소강의 FAC 예비시험을 수행하였으며 앞으로 FAC에 영향을 미치는 여러 가지 수화학 인자들에 대한 정성적 screening 평가를 할 예정이다.

2. Rotating cylinder FAC 시험장치 제작 및 성능 검증

2.1 Rotating cylinder FAC 시험장치 제작

전기화학에서 고전적으로 용액의 수력학적 영향 (hydrodynamic effect)을 보기 위해 rotating disc electrode 나 rotating cylinder electrode를 많이 사용하였다. 이 시험 장치에서는 유체 흐름을 모사하기 위해 유체는 거의 정지한 상태에서 시편을 운동시켜 용액의 hydrodynamic effect를 평가하는 것으로 시험장치가 상대적으로 간편하고 제작비용이 저렴한 장점이 있다.⁵⁾ 이 시험 장치는 배관에서 유체가 지나갈 때 FAC에 영향을 주는 열수력 인자 예를 들면 Reynold number등을 정량화하지 못하는 단점이 있다. 하지만 재료적 인자나 수화학 인자의 영향을 정성적으로 단기간에 경제적으로 screening 할 수 있다. 원전 2차 계통을 모사한 FAC 실증 시험 장치를 설계하여 Fig. 1과 같이 제작하였다.⁶⁾⁻⁷⁾ 이 장치는 오토클레이브, 메인 루프, 그리고 제어상자 3 부분으로 나누어져 있다. 1 Gallon 오토클레이브는 스테인레스 스틸 (SS)로 제작되었으며 유체의 선속도를 모사하기 위해 Fig. 2와 같은 회전 장치를 사용하였다. 이 회전 장치는 자기적으로 동작되며 오토클레이브 내부로 이 회전 장치에 연결된 실린더에 시편을 4개 까지 장착할 수 있으며 시편 외면만 유체와 접촉하도록 되어 있다. 메인 루프 부분은 시험용액 탱크 (100 l), 열교환기, back pres-



Fig. 1. Rotating cylinder FAC test loop.

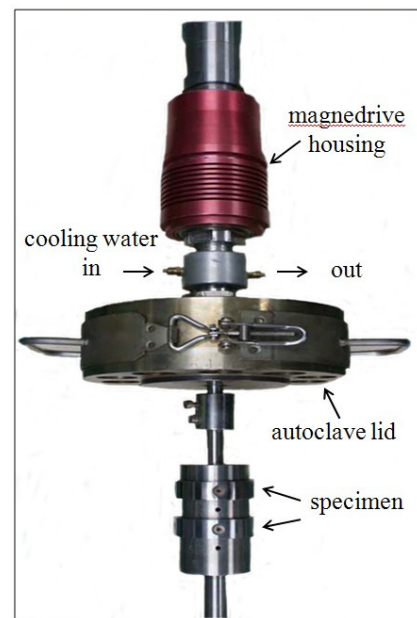


Fig. 2. Rotating cylinder electrode system with test specimens attached on the cylinder.

sure regulator, 펌프 (가압, 순환, 용액공급), 이온교환장치, 용존산소 농도 측정기, pH/전도도 측정기, 압력 과 유량 측정기, 그리고 다수의 밸브로 구성되어 있다. 제어상자는 오토클레이브 부분과 메인 루프에 있는 모든 센서와 계측장비를 연결하여 한곳에서 통제할 수 있는 장비이다. FAC 실증 시험 장치는 재순환형으로 되어 있어 시험용액이 계속 순환하므로 같은 수화학 환경에서 시험이 가능하다. 자료를 온라인으로 수집하기 위해 data acquisition system (DAS)을 설치할 예정이다. 국내 원전에서는 용존산소를 제거하기 위해 산소포획제로 사용되고 있는 하이드라진 (hydrazine, N_2H_4)을 주입하고 있으며 pH 조절제로는 에탄올 아민 (ethanol amine, ETA)을 사용하고 있다. 따라서 원전 수화학 환경을 모사한 시험용액을 분석하기 위해 UV/VIS spectrometer를 부착할 예정이다.

2.2 Rotating cylinder를 이용한 FAC 시험장치 성능 검증

Rotating cylinder를 이용한 FAC 시험 장치를 사용하여 용존산소 농도 <1 ppb 와 <1.5 ppm 의 중성용액에서 SA106 Gr. B 탄소강 시편을 사용하여 시험 장치의 성능 검증을 수행하였다. 이 시험은 FAC 실증시험장치의 모든 기기, 계측기, 펌프 등 루프에 부착된 모든 시스템들이 제대로 작동하여 원하는 FAC 시험결과를 낼 수 있는지를 확인 하는 것이다. 용액 탱크의 용존산소 농도는 1 ppb 이하로 질소 가스를 사용하여 충분히 잘 탈기 되었으며 시험기간 중에도 잘 유지 되고 있었다는 것을 Fig. 3에서 잘 보여주고 있다. 용존산소 농도가 1.5 ppm 이하에서 시험한 경우 시험 기간이 55 시간 과 75 시간 경과하는 사이에 문제가 발생하여 용존산소 농도 측정값들이 1.5 ppm 이상 값을 나타냈다. 이것은 시험도중 계측기 교정이나 필터 교체 등으로 루프에 산소가 유입되었기 때문인데 75 시간경과 이후에는 용존산소 농도가 1.5 ppm 이하로 잘 유지되고 있음을 Fig. 3에서 보여준다. 용액의 수질상태에 따른 탄소강의 부식반응을 관찰하기 위해 용존산소 농도 차이가 나는 시험용액을 사용하여 FAC 시험을 수행하였다. Fig. 4는 용존 산소농도

변화에 따른 용액의 pH 변화를 보여준다. 시험용액의 pH 값들이 시험초기의 pH 6.5 보다 높았다. 용존산소 농도가 1 ppb 이하인 경우에 pH 값들이 8~9에 보이고 있으며 용존산소 농도가 1.5 ppm 이하인 경우에는 pH 값들이 6.5~7.5에서 관찰되고 있다. 용존산소 농도가 낮아질수록 FAC 가 증가하므로²⁾ 용존산소가 감소함에 따라 탄소강의 양극 용해반응은 많이 된다. 즉 FAC가 발생함에 따라 양극반응으로 $2Fe \rightarrow 2Fe^{++} + 4e$ 반응이 진행하고, 음극반응으로 $O_2 + H_2O + 4e \rightarrow 4(OH)^-$ 이 진행하여, 시험용액을 연속적으로 정화하지 않으면 시험용액의 pH는 증가한다. 이번 예비시험을 통하여 용존산소 농도가 감소하면 시험용액의 pH는 더 급격하게 증가하는 것과 FAC속도가 증가하는 것과 일치함을 볼 수 있었다.

3. FAC 시험

3.1 시험방법

3.1.1 용액과 시편이 정지한 상태에서 부식시험

FAC에 대한 기준자료로 활용하기 위해 유속이 영(zero) 일 때 재료 부식속도를 측정하였다. 부식시험을 static autoclave에서 탈기된 pH 8, 9, 10 용액에서 수행하였다. 시험재료는 국내 원전 2차측 배관재인 SA106 Gr. B 탄소강을 사용하였으며 그 화학 성분은 표 1과 같다.⁸⁾ Fig. 5는 시험 시편을 나타낸다. 이 시편은 압력(배)관 형태의 모재에서 절단하여 35 x 12.8 x 1.5 mm 판상의 시편으로 가공한 후 사포 (SiC paper)로 연마하였다. 연마가 끝난 시편은 아세톤으로 초음파 세척 후 증류수로 이차 세척하였다. 완전히 건조한 후 전자저울을 사용하여 시험 전 무게를 측정하였

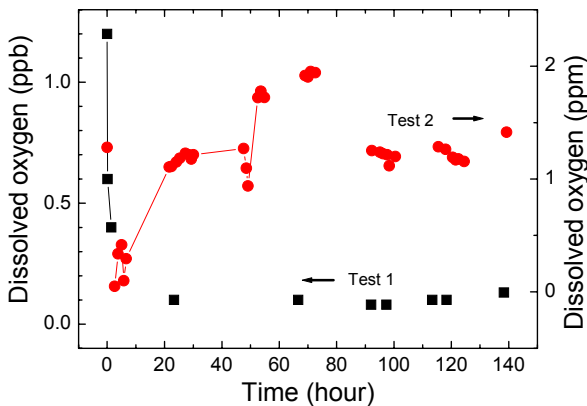


Fig. 3. Variation of DO in rotating cylinder FAC facility with time.

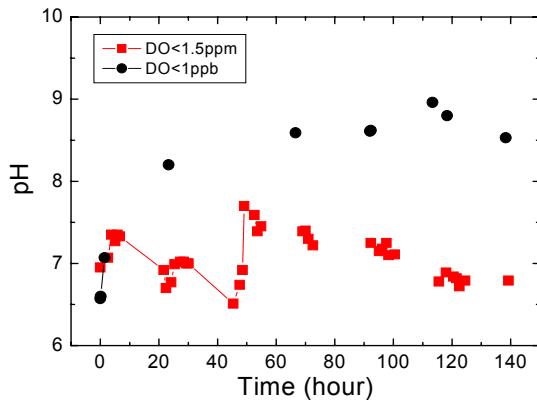


Fig. 4. Variation of pH in rotating cylinder FAC facility with time.

Table 1. Chemical composition of material (wt.%)

material	C	Mn	P	S	Si	Cr	Ni	Mo	Cu	Al
SA106 Gr. B	0.20	1.08	0.012	0.006	0.24	0.01	0.01	<0.01	0.01	0.032

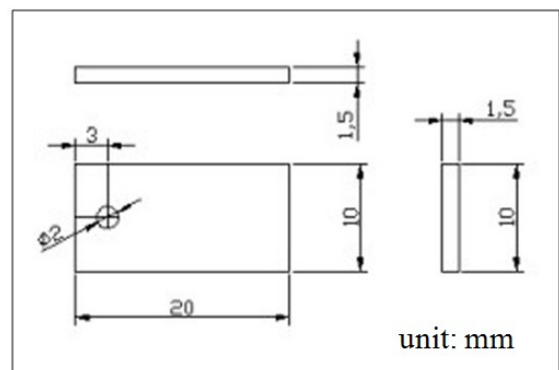


Fig. 5. Schematic of the specimen for static corrosion test.

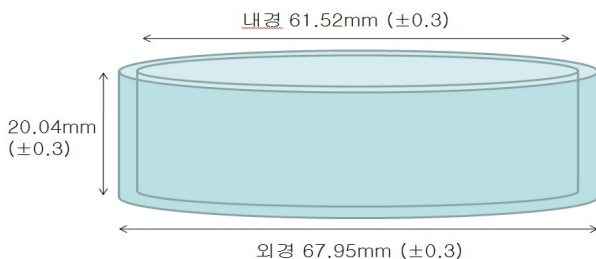
Table 2. Water chemistry conditions of corrosion test at 150 °C for 30 days

ETA	N ₂ H ₄	O ₂	pH
pH 조절제	25 ppb	<1 ppb	8, 9, 10

다. 시편과 시편 홀더와의 갈바닉 부식을 방지하기 위해 SS 와이어를 열수축 테프론 튜브로 싸서 열처리한 후 시편걸이를 만들어 시편을 시편홀더에 장착하였다. 부식시험에 사용된 시험용액의 수화학 조건은 표 2와 같다. 국내 원전에서 pH 조절제와 산소포화제로 사용되고 있는 에탄올아민과 하이드라진으로 시험용액의 pH를 8, 9, 10으로 조절하였다. 제조된 용액을 2 l autoclave에 넣은 후 고순도 99.999% 질소를 사용하여 2500 cc/min 속도로 3 시간 동안 탈기하여 산소를 제거하였다. 나머지 용존 산소는 하이드라진에 의해 완전히 제거될 것이다. 시험은 150 °C에서 수행되었으며 30일 동안 계속하였다. 시편들의 무게를 0.1 mg까지 측정된 다음에 시편들을 아세톤 용액에 넣어서 5 분간 초음파 세척하여 비부착성 산화물 (non adherent oxide)을 제거하였다. 이 시편들을 데시케이트에 넣고 24 시간 건조한 후 2차 무게를 측정하였다. 시험시편 일부는 scanning electron microscope/energy dispersive X-ray spectrometry (SEM/EDS) 기기를 사용하여 산화막 검사를 수행하였다.

3.1.2 Rotating cylinder를 이용한 FAC 시험

Rotating cylinder를 이용한 FAC 시험 장치를 이용하여 4 m/sec의 유속에서 수화학 인자의 영향을 평가하였다. 시험재료는 SA106 Gr. B 탄소강을 사용하였으며, 시편은 압력(배)관 형태의 모재에서 채취하였으며 Fig. 6에 나타낸 바와 같이 내경 61.52 mm, 외경 67.95 mm, 높이 20.04 mm 크기의 cylinder 시편으로 가공하여 사포로 연마하였다. 연마가 끝난 시편은 아세톤으로 초음파 세척 후 증류수로 이차 세척하였다. 완전히 건조한 후 시편의 무게를 측정된 다음 회전 장치 외부에 볼트로 시편 2개를 고정하였다. 시편 1개는 산화막과 표면 측정용이며 다른 하나는 부식속도 측정용이다. 100 l 시험용액 탱크에는 증류수 (>17 MΩ cm)를 70 l 채웠으며 예비시험에서는 시험용액의 pH는

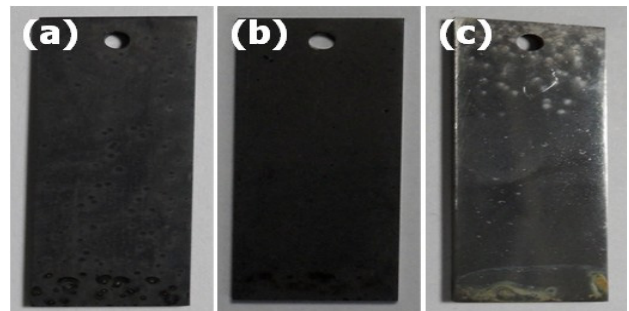
**Fig. 6.** Schematic of the specimen for FAC test.

조절하지 않았다. 시험용액은 99.999% 고순도 질소를 사용하여 1000 cc/min 속도로 탈산소 하였다. 수화학 인자중에서 용존산소 농도 1 ppb 이하와 가혹한 분위기를 모사한 1.5 ppm 이하 두 종류를 변수로 사용하였다. 유속은 회전 장치의 회전속도 (rpm)를 선속도 (m/s)로 변환하여 사용하였으며 우선 4 m/s로 결정하였다. 시험은 FAC가 단상영역에서 가장 심하게 일어나는 온도인 150 °C에서 140 시간 동안 수행되었다. 시험기간 동안 용존산소 농도, pH, 전도도, 유속, 그리고 온도를 주기적으로 관찰하여 기록하였다. 시험이 끝난 시편은 static autoclave 시험시편과 같은 방법으로 처리하였다.

3.2 결과 및 고찰

3.2.1 용액과 시편이 정지한 상태에서 부식

총 부식량은 부식시험 중에 이온이나 산화물 형태로 용액으로 침출된 것과 시편 표면에 비부착성 산화물로 존재하는 것과 그리고 비부착성 산화물 아래에 존재하는 부착성 산화물의 합이다. 본 연구에서는 부식량을 산정하는데 시험용액으로 이온이나 산화물 형태로 침출된 것을 무시하였다. 부식 시험 후 초음파 세척을 하여 비부착성 산화물의 양을 측정하였다. 비부착성 산화물의 양은 pH 8에서 0.3 mg, pH 9에서 0.3 mg 그리고 pH 10에서 거의 0.2 mg 이었다. 비부착성 산화물의 양은 pH에 거의 무관하였다. Fig. 7 시편들은 시험이 끝난 다음 초음파 세척을 하여 비부착성 산화물을 제거한 후의 모습을 나타낸다. Fig. 7 (a)는 pH 8 용액에서 시험한 시편으로 표면에 부식 산화물의 흔적으로 보이는 얼룩점들이 있으며 검은색 산화막으로 덮여 있다. Fig. 7 (b)는 pH 9 용액에서 시험한 시편으로 표면이 검은색 산화막으로 덮여 있는 모습을 보이고 있다. Fig. 7 (a) 와 (b) 시편은 시험 후 인출하여 표면의 산화물을 초음파 세척으로 제거하였기 때문에, 표면의 검은색 산화물은 부착성 산화물들이다. pH 9 용액에서 시험한 시편을 초음파 세척하여 비부착성 산화물을 제거한 후 클라크 용액으로 부착성 산화물을 제거하여 부착성 산화물의 양을 측정하였다. 부착성 산화물은 약 0.9

**Fig. 7.** Specimen surface appearances after corrosion test in deaerated solutions at (a) pH 8, (b) pH 9 and (c) pH 10.

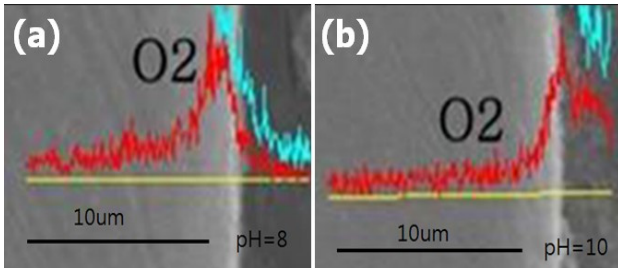


Fig. 8. EDS spectra of the specimens showing oxide thickness after corrosion test in deaerated solutions at (a) pH 8 and (b) pH 10.

mg 이었다. pH 10 용액에서 시험한 시편의 표면을 Fig. 7 (c)에 나타냈는데, 시편표면의 모습은 시험 전 후에 거의 동일하였다. Fig. 7 (c) 시편에서 비부착성 산화물을 제거하면 시편 표면은 시험전의 표면 모습과 거의 같았으며, 부착성 산화물이 없었다. 따라서 pH 10에서 철의 부식은 pH 8이나 9에 비해 훨씬 적은 것을 알 수 있다. 이것은 시험조건의 pH 범위에서 (pH 8-10) pH가 증가함에 따라 철의 용해도가 감소하고 철의 용해도가 감소하면 철의 부식속도가 감소하는 것과 일치한다. 좀 더 정밀한 부식경향을 알기 위해 시험 기간의 증가와 측정 방법의 개선이 필요하며 후속 연구에서 이것을 반영할 예정이다.

Fig. 8은 침지시험이 끝난 시편을 마운팅한 후 SEM/EDS로 산화막을 분석한 것이다. 시편들의 표면 산화막은 두께가 균일하며 표면 가까에서 산소 성분 피크가 높게 나타났다. Fig. 8 (a)는 pH 8 용액에서 시험한 시편인데 산화막의 두께는 3.5 μm 이었다. Fig. 8 (b)는 pH 10 용액에서 시험한 시편인데 산화막의 두께는 1.7 μm 정도 이었다. 용액의 pH가 증가할수록 산화막의 두께는 감소하였는데 이것은 pH가 증가할수록 부식이 감소되기 때문이다.

3.2.2 Rotating cylinder를 이용한 FAC 시험

Rotating cylinder FAC 시험 장치를 이용하여 용존산소가 FAC에 미치는 영향을 평가하였다. 용존산소는 1 ppb 이하와 1.5 ppm (± 0.2 ppm)의 두 조건이었다. DO < 1 ppb 용액에서 시험한 시편들은 부식이 심하지 않았다. Fig. 9 (a)는 시험하기 전 시편의 모습이고, Fig. 9 (b)와 9 (c)는 용존산소가 1 ppb 이하인 용액과 1.5 ppm 용액에서 FAC 시험 후 초음파로 아세톤에서 비부착성 산화물을 제거한 후의 모습이다. 용존산소가 1 ppb 이하인 용액에서 비부착성 산화물의 양은 각각 10 mg 과 20 mg 이었다. 용존산소가 1.5 ppm 용액에서 비부착성 산화물의 양은 70 mg 과 20 mg 이었다. 용존산소가 1.5 ppm 용액에서 시험한 시편들은 Fig. 9 (c)와 같이 시편 표면이 적갈색의 부식 산화물로 덮여있다. 시험용액에 산소가 많아서 철이 헤마타이트로 산화된 것이다. 용존산소 농도에 관계없이 비부착성 산화물의 양은 큰 차이를 보이지 않았다. 시험 결과 시험시



Fig. 9. Specimen appearance (a) after polishing, (b) tested in DO < 1 ppb and then cleaning with ultrasonic, (c) tested in DO = 1.5 ppm and then cleaning with ultrasonic.

편의 무게 조절, 시편 안쪽의 부식문제, 중성 용액의 pH 상승, 계측기 교정, 배관 누설 등 여러 가지 문제점들이 확인되었다. 이러한 문제점들을 분석 평가하여 원전 2차 측 탄소강 배관재를 사용하여 여러 가지 수화학 인자들에 의한 FAC 실증시험을 할 계획이다.

4. 결 론

FAC는 원전 2차 계통 재료 열화의 핵심 현안으로 원전 가동 환경에서 2차 계통 배관의 FAC 현상을 신속하게 평가하기 위해 rotating cylinder FAC 시험 장치를 설계 제작하였고 성능 검증을 수행하였다. Rotating cylinder FAC 시험 장치는 재료와 수화학 인자를 신속하고 경제적으로 screening할 수 있다. 수용액 pH, 전도도, 그리고 용존산소 농도를 실시간으로 측정하기 위해 pH/전도도와 용존산소 농도 측정기를 루프에 장착하였다. 회전 실린더의 회전속도로 유속을 만들었다. Rotating cylinder FAC 시험 장치를 사용하여 국내 원전 2차측 배관재인 탄소강의 FAC 시험을 수행하였다. FAC의 기본 자료로 활용하기 유속이 없는 조건에서 pH 변수에 따른 부식시험을 수행하였다. 유속이 없는 조건의 pH (8-10) 범위에서 비부착성 산화물의 양은 거의 일정하였으나, 부착성 산화물은 pH가 증가함에 따라 감소하였고, 이것은 pH가 증가함에 따라 철의 용해도가 감소하는 것과 일치하였다. Rotating cylinder FAC 시험 장치를 이용한 산소영향 시험에서도 비부착성 산화물의 양은 용존산소에 크게 의존하지 않은 것을 볼 수 있었다. 후속적으로 rotating cylinder FAC 시험에서 시험시편의 무게 조절, 시편 안쪽의 부식문제, 중성 용액의 pH 상승, 계측기 교정, 누설 등의 문제를 보완할 예정이다.

참 고 문 헌

1. J. H. Han, D. H. Hur, E. H. Lee, H. S. Jung, and U. C. Kim, *J. of Korean Nuclear Soc.* **26**, 312 (1994).
2. T. Satoh, Y. Shao, W. G. Cook, D. H. Lister, and S. Uchida, *Corrosion*, **63**, 770 (2007).
3. K. S. Kang, *Korea Atom Ind Forum*, **24**, 4 (2004).
4. J. H. Moon, H. H. Chung, K. W. Sung, U. C. Kim, and J. S. Rho, *Nucl. Eng. Technol.*, **37**, 375 (2005).
5. S. H. Kim, I. S. Kim, and K. J. Lee, *J. Korean Radioactive*

- Waste Soc.*, **3**, 31 (2005).
6. N. Y. Lee, S. G. Lee, K. H. Ryu, and I. S. Hwang, *Nucl. Eng. Des.*, **237**, 761 (2007).
 7. K. H. Ryu, T. H. Lee, J. H. Kim, I. S. Hwang, N. Y. Lee, J. H. Kim, J. H. Park, and C. H. Sohn, *Nucl. Eng. Des.*, **240**, 468 (2010).
 8. P. J. King, J. M. Jevic, R. H. Pelger, and F. H. Hua, *11th Int. Conf. Environmental Degradation of Materials in Nuclear Systems*, p. 717 Stevenson, WA (2003).