

## 원자력발전소 2차측 습증기계통 주요지점별 부식 발생현황 분석

이 경 희<sup>1,2,†</sup> · 한 호 석<sup>2</sup> · 신 성 용<sup>2</sup> · 성 기 방<sup>2</sup> · 이 영 우<sup>1,†</sup>

<sup>1</sup>충남대학교 응용화학공학과, 대전광역시 유성구 대학로 99

<sup>2</sup>한국수력원자력 중앙연구원, 대전광역시 유성구 유성대로 1312번길 70

(2019년 7월 8일 접수, 2019년 7월 29일 수정, 2019년 7월 29일 채택)

## Analysis on Formation of Corrosion Products in Secondary Steam-Water System of Nuclear Power Plant

Kyunghee Lee<sup>1,2,†</sup>, Hoseok Han<sup>2</sup>, Sungyong Shin<sup>2</sup>, Kibang Sung<sup>2</sup>, and Youngwoo Rhee<sup>1,†</sup>

<sup>1</sup>Department of Chemical Engineering and Applied Chemistry, Chungnam National University, 99, Daehak-ro, Yuseong-gu, Daejeon, Korea

<sup>2</sup>Central Research Institute, Korea Hydro & Nuclear Power Co., Ltd., 70, Yuseong-daero, 1312beon-gil, Yuseong-gu, Daejeon, Korea

(Received July 08, 2019; Revised July 29, 2019; Accepted July 29, 2019)

Pipes and components of the secondary system in the pressurized water reactor (PWR) are mainly comprised of manufactured carbon steel. Thus, the generated carbon steel corrosion products are transported into the steam generator and deposited, thereby deteriorating the integrity of the steam generator. Environmental condition in the secondary system of the PWRs differs across different locations. So, the corrosion rate and types of corrosion products depend on specific locations in the secondary system. In this study, the quantity and chemical compositions of corrosion products generated in various locations that vary in different temperatures and chemistry conditions were investigated. As a result of evaluating the PWR “Unit A” that is in current operation, the amount of corrosion products generated in the section of high temperature feedwater system was identified as the largest source in the secondary system. Major components of corrosion products were iron oxides such as magnetite, hematite, and lepidocrocite.

**Keywords:** Carbon steel, Corrosion products, Iron oxides, Magnetite, Hematite

### 1. 서론

원자력발전소 2차측 습증기계통 수질관리에 있어 가장 중요한 목표는 증기발생기로의 이온성/입자성 불순물 및 부식생성물의 유입을 최소화하는 것이다. 2차계통 배관재질로부터 기인한 부식생성물이 증기발생기 내부에 다량 침적될 경우 전열관의 열전달 감소와 유로 막힘 등으로 인해 출력 편차를 유발하거나, 부식환경을 조성하여 증기발생기의 건전성을 저해시킨다.

발전소 2차계통은 설비 위치별 수력학적, 수화학적 및 금속학적 조건이 매우 다르기 때문에 위치에 따라 부식양상도 달라지게 된다. 원전 2차계통은 주로 철계합금으로 구성되어있어 부식생성물 또한 철산화물의 형태이며 부식환경

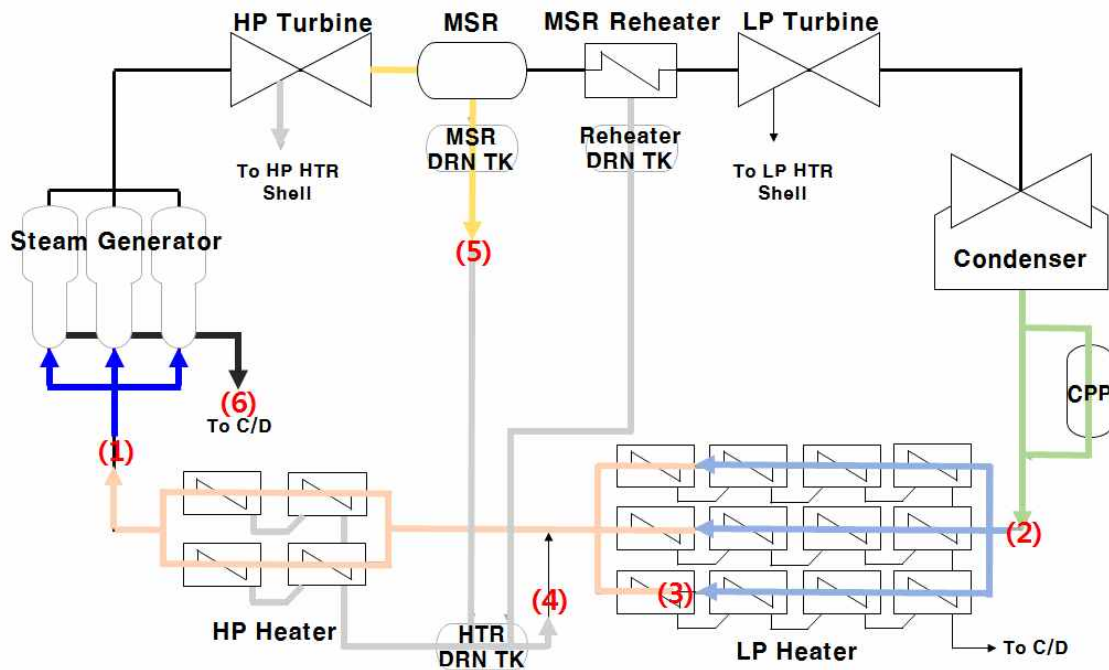
에 따라 화학적 조성을 달리한다. 따라서 2차계통의 부식생성물 생성을 저감하기 위해서는 구성설비의 지점별 환경조건에 따른 부식생성물 발생 양상을 파악하고, 이에 따른 최적화된 점검, 운영, 정비 등의 관리전략을 구상하는 것이 필요하다. 특히 수력학적 및 금속학적 조건은 발전소 설계 단계에서 이미 결정되어지기 때문에 정해진 조건하에서 부식환경을 개선하기 위해서는 최적의 수화물관리가 매우 중요하다. 그 중에서도 모재(철)의 용해도를 낮추고 표면에 보호성 산화피막을 조성하기 위하여 적절한 pH와 산화환원전위를 유지하는 것이 매우 효과적인 방법일 것이다 [1]. 본 논문에서는 국내 운전 중인 950 MW급 웨스팅하우스형 가압경수로 발전소 A호기를 대상으로 운전환경이 다른 2차계통의 주요지점을 선정하여 지점별 부식생성물 발생현황을 분석하였다. 이를 통해 A호기 2차계통에서 가장 부식이 활발히 진행되고 있는 부식 취약개소를 파악하고 2차계

<sup>†</sup>Corresponding author: kyunghee.lee@khnp.co.kr

<sup>†</sup>Corresponding author: ywrhee@cnu.ac.kr

**Table 1** Sampling locations and evaluation scope

No.	Sampling point	Sources of corrosion products
1	Final feedwater(FW)	Whole secondary system
2	Condensate polishing plant(CPP) outlet	Condenser to Condensate water supply line
3	Low pressure(LP) heater outlet	Low temperature feedwater supply line
4	Heater drain tank(HDT) drain	High pressure extraction steam lines
5	Moisture seperator&reheater(MSR) drain	HP Turbine to MSR drain line
6	Steam generator(SG) blowdown	Deposit discharged from SG



**Fig. 1** Locations of evaluation points in secondary system at PWR unit A.

통 지점별 운전환경에 따른 부식생성물의 생성특성을 조사하였다.

## 2. 연구방법

### 2.1 평가지점 선정

A 호기 2차계통의 부식생성물 생성특성 평가를 위하여 Table 1에 나타난 바와 같이 운전환경이 다른 대표지점을 선정하였다. 발전소 2차계통은 계통수와 증기가 연속적으로 흐르는 폐순환시스템이므로 구조재료로부터 발생한 부식생성물은 유체 흐름을 따라 이동하여 최종 급수를 통해 증기발생기로 유입된다. 이에 따라 증기발생기로 유입되는 부식생성물의 양을 감시하기 위하여 발전소에서는 주기적

으로 최종급수에서 철 (Fe) 농도를 분석·관리하고 있다. 하지만 최종급수는 2차계통 전체에서 발생된 부식생성물이 모이는 지점이기 때문에 이러한 단일지점의 평가만으로는 실제 계통의 지점별 부식 발생현황을 판명하기 곤란하다. 따라서 본 연구에서는 유체의 상 (액체, 기체, 또는 습증기) 및 운전환경이 다른 5개 지점을 추가로 선정하고 2차계통 전체를 세분화하여 부식생성물 발생량을 평가하였다. 우선 최종급수 (1번)와 증기발생기 취출수 (6번)의 경우 2차계통에서 발생하는 부식생성물의 총량을 파악하고 증기발생기 내부에 침적되는 양을 평가하기 위해 유입부와 유출부를 선정하였다. 다음으로 복수탈염설비 출구측 (2번)은 발전소 2차계통에서 가장 큰 2상 영역인 복수기로부터 발생되어 이송되는 부식생성물 양을 파악하고자 하였으며, 현장에서

**Table 2 Main piping materials at PWR unit A**

System		Piping materials	
Main steam(MS)	MS to HP TBN	Carbon Steel	SA-155 Gr.KCF70
	MSR to LP TBN	Carbon Steel	SA-516 Gr.60
Condensate & Feed water		Carbon Steel	SA-106 Gr.B
Extraction steam	LP TBN ext. to Heater #1/2	Low Alloy Steel	SA-155 Gr.2-1/4 Cr
	LP TBN ext. to Heater #3	Low Alloy Steel	SA-155 Gr.2-1/4 Cr
		Low Alloy Steel	SA-335 Gr.P22
	LP TBN ext. to Heater #4	Carbon Steel	SA-106 Gr.B
HP TBN ext. to Heater #5/6		Low Alloy Steel	SA-335 Gr.P22

**Table 3 Chemical composition(%) of piping materials**

Materials	C	Mn	P	S	Si	Cu	Ni	Cr	Mo	V
SA-155 Gr.KCF70	max.0.28	0.85-1.2	max.0.025	max.0.025	1.15-0.40	-	-	-	-	-
SA-516 Gr.60	max.0.21	0.60-0.90	max.0.025	max.0.025	1.15-0.40	-	-	-	-	-
SA-106 Gr.B	max.0.30	0.29-1.06	max.0.035	max.0.035	min.0.10	max.0.40	max.0.40	max.0.40	max.0.15	max.0.08
SA-155 Gr.2-1/4 Cr	0.05-0.15	0.30-0.60	max.0.025	max.0.025	max.0.50	-	-	2.00-2.50	0.90-1.10	-
SA-335 Gr.P22	0.05-0.15	0.30-0.60	max.0.025	max.0.025	max.0.50	-	-	1.90-2.60	0.87-1.13	-

시료채취 가능지점을 점검한 결과 해당 지점이 선정되었다. 저압급수가열기 출구측 (3번)은 저온 급수계통과 고온 급수계통의 발생량을 나누어 살펴보고자 선정하였다. 특히 추기계통의 부식생성물 발생량과 구분하여 평가하기 위해서 이의 합류점 (4번) 이전을 기준으로 선정하였다. 급수가열기 배수탱크 배수측 (4번)은 고압터빈 추기 응축수와 습분분리기 배수가 급수가열기 배수탱크를 거쳐 급수계통으로 합류되기 직전 지점이다. 이를 통해 습증기계통의 부식생성물 발생량을 평가하고자 하였다. 마지막으로 습분분리재열기의 배수측 (5번)의 경우 고압터빈 출구에서 습분분리재열기로 연결되는 배관에서 국부적인 감육이 많이 발생한다고 알려져있기 때문에 [2] 해당 지점을 별도로 선정하였다. 이를 통해 Fig. 1과 같이 세분화된 2차계통 구간별 부식생성물 발생량을 파악하였다.

A 호기 계통별 배관의 주요 구성재질은 대략적으로 Table 2와 같다. 주로 탄소강 재질이며, 저압터빈 및 고압터빈 추기계통의 경우 저합금강 재질의 배관으로 구성되어 있다. 참고로 ASTM 표준규격에 명시된 해당 배관 재질별 화학성분 및 함량은 Table 3과 같다.

## 2.2 부식생성물 채취 및 분석방법

추가로 선정된 5개 지점에서 부식생성물 시료를 채취하기 위하여 누적시료채취기 (Corrosion products sampler; CPS)를 설치하였다. 1개 지점 (최종급수)은 기존 발전소에 설치된 채취기를 사용하였다. 누적시료채취기는 ASTM D6301 [3]에 따라 Fig. 2와 같은 유로로 구성되어 있으며, 계통수 시료를 필터에 연속적으로 흘려줌으로써 계통수 중의 부식생성물을 누적시켜 포집할 수 있다.

누적시료채취기를 통과하는 시료 유량은 EPRI 수질관리 지침 [1]에 50 ~ 200 ml/min, ASTM D6301에는 80 ~ 200 ml/min로 제시되어 있다. 본 평가에서는 시료 유량을 약 100 ml/min으로 하여 7일 동안 약 1,000 L의 시료를 필터에 여과시켜 부식생성물을 포집하였다. 부식생성물 포집 필터는 2종류를 사용하였다. 우선 입자성 철을 포집하기 위하여 0.45 micron의 필터를 장착하였으며, 입자성 필터로는 잡히지 않는 이온성 및 양전하의 콜로이드성 철을 포집하기 위하여 양이온 필터 (RX-1)를 입자성 필터 아래에 장착하였다.

채취한 부식생성물 포집 필터는 산 용해 (진한 염산 10 ml + 진한 질산 10 ml → 90 °C, 30~60분 동안 가열) 후

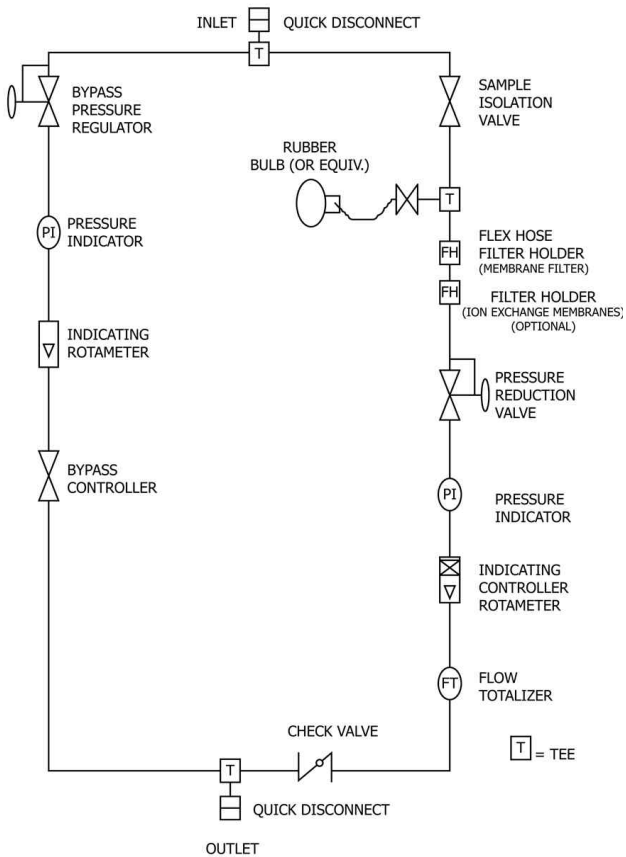


Fig. 2 Simplified flow diagram of corrosion products sampler [3].

원자흡광광도계 (Atomic absorption spectrometer; AAS) 를 사용하여 철 (Fe) 농도를 분석하였다. 또한 필터에 포집된 입자성 부식생성물에 대하여 X선 회절 분석 (X-ray diffraction; XRD) 을 통해 철산화물의 결정구조를 분석하였으며, 주사전자현미경 및 에너지 분산형 분광기 (Scanning electron microscopy-Energy dispersive X-ray spectrometry; SEM-EDS) 를 사용하여 입자의 형상 및 원소 조성을 살펴 보았다.

2.3 부식생성물 존재형태

원자력발전소 2차계통 배관 및 기기는 탄소강, 저합금강 과 같은 철계합금으로 제작되어 있다. 발전소 운전조건에서 배관 표면에는 모재의 부식으로부터 용출된 철 이온이 마그 네타이트와 같은 철산화물이 되어 보호성 산화피막을 형성 한다. 적절하게 형성된 피막은 모재의 추가적인 부식을 방 지하지만 고온, 고압, 고속의 유체 조건에서 보호피막의 생 성이 방해받거나 불균일하게 조성될 경우 침식, 일반부식 및 유동가속부식으로 인해 배관이 감육되고 부식률이 증가 될 수 있다.

수용액 중의 철은 온도, pH, Electrochemical poten-

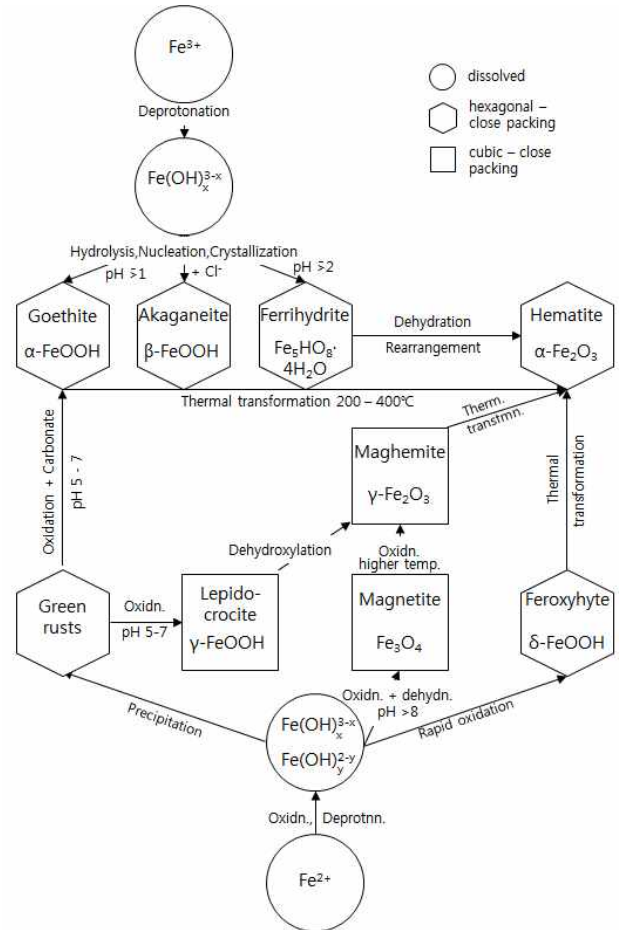


Fig. 3 Schematic of frequent formation and transformation pathways of common iron oxides together with the approximate formation conditions [4].

tial(ECP) 등 환경조건에 따라 Fig. 3과 같이 다양한 종류의 철산화물로 존재한다. 발전소 2차계통은 계통 지점별 온도, 압력 등 운전조건이 다르며 액체영역, 기체영역 및 습증기영역 등 유체의 상도 변화한다. 따라서 계통 지점별 다양한 종류의 철산화물이 부식생성물로 발생하게 된다.

3. 연구결과 및 고찰

3.1 부식생성물 물질수지 평가

앞서 선정된 A 호기 2차계통의 6개 지점에서 누적시료채 취기를 사용하여 Fig. 4와 같이 부식생성물을 필터에 포집 하였다. 각 평가지점당 약 100 ml/min의 시료 유량으로 7일 동안 약 1,000 L의 시료를 필터에 여과시켰으며, 총 6회 반복수행하여 지점당 6개의 필터 시료를 채취하였다.

이를 용해시켜 철 농도를 분석한 결과, 6회 모두 ⑥ SG BD > ① FW > ② CPP Out > ③ LP HTR > ⑤ MSR Drain > ④ HDT Drain 순으로 높게 나타났다. ⑥번 시료의

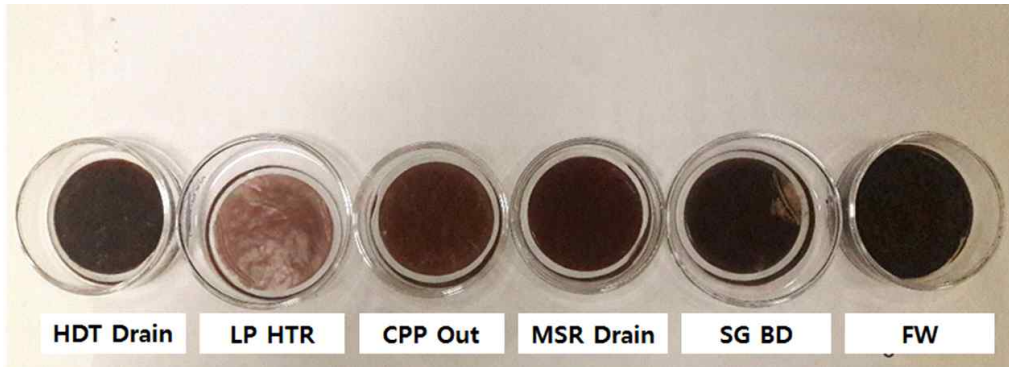


Fig. 4 Corrosion products collected from each sampling location.

경우 증기발생기 내부 침적물이 취출유로를 통해 연속적으로 배출되는 구간으로써 농축된 계통수이므로 높게 관찰되었으며 이의 배출량은 클수록 침적물 저감측면에서 이점이 있다. SG BD를 제외한 나머지 계통 중에서는 2차계통 전체의 부식생성물이 모여 증기발생기로 유입되기 직전인 최종급수가 가장 높게 측정되었다.

총 6회의 철 농도 분석 평균값과 이를 equation (1)을 통해 평가지점별 시간당 철 발생량을 산정한 결과, Table 4와 같다.

$$\text{Fe (g/day)} = \text{Fe conc. } (\mu\text{g/L}) \times \text{System flow (ton/hr)} \times 10^3 \text{ L/ton} \times 10^{-6} \text{ g}/\mu\text{g} \times 24 \text{ hr/day} \quad (1)$$

상기 결과를 통해 2차계통의 지점별 부식생성물 발생량을 철 원소를 기준으로 다음과 같이 구분할 수 있다 (Fig. 5).

- i) 복수기부터 복수탈염설비 출구 구간[②]  
= 131.5 g/day (Fe)
- ii) 복수탈염설비부터 저압급수가열기 구간[③-②]  
= (-)8.2 g/day (Fe)
- iii) 고압터빈부터 습분분리기 배수 구간[⑤]  
= 16.4 g/day (Fe)
- iv) 고압추기증기(재열기 배수구간 등 포함) 구간[④-⑤]  
= 30.4 g/day (Fe)
- v) 저압급수가열기 출구부터 최종급수 구간[①-i)-ii)-iii)-iv)] = 371.1 g/day (Fe)

상기 결과를 계통별 발생 비율로 산정하였을 때 (Fig. 6), A 호기는 2차계통 총 부식생성물 발생량 (①=541.2 g/day as Fe)의 68% 이상이 고온 급수 (저압급수가열기 출구부터 최종급수 구간 (v)=371.1 g/day as Fe)에서 발생하는 것으로 평가되었다.

저압급수가열기 구간의 경우 부식생성물 발생량이 음(-)의 값으로 산정되었다 (ii). 이는 복수탈염설비 출구

(②)와 저압 급수가열기측 (③)의 철 농도 분석값이 총 6회의 분석에서 모두 오차범위 이내로 차이가 없었기 때문에 해당 저온 급수 구간의 부식생성물 발생량은 “0”에 가까운 것으로 판단된다. 고압추기계통 및 고압터빈~습분분리기 구간 또한 고온 급수 구간 대비 상대적으로 낮은 부식 발생량을 나타냈다.

유동가속부식 (Flow-accelerated corrosion; FAC)은 복수, 급수, 가열기 배수, 추기증기, 습분분리기 등 거의 모든 계통에서 발견된다. A 호기의 경우 특히 FAC에 취약하다고 알려진 증기계통, 추기증기계통 등의 부식생성물 발생량이 2차계통 총 발생량의 10% 이내에 불과했다. A 호기의 추기계통 배관은 대부분은 Cr 함량이 약 2 wt% 이상인 저합금강 (ASTM A-335 Gr.P22, ASTM A-155 Gr.2-1/4Cr) 재질로 구성되어있다. FAC 발생에 있어 재질의 크롬 (Cr) 함량은 매우 큰 영향을 미치며 Cr 함량이 1 wt% 이상이면 FAC 발생률이 무시가능한 수준으로 저감된다 [2]. 따라서 A 호기는 습증기영역의 FAC 발생을 저감시키기위하여 추기계통이 저합금강 재질로 구성되어있으며 이로써 부식생성물 발생량 또한 매우 낮은 것으로 판단된다.

해외 평가사례를 살펴보면 2002년 미국 SONGs 원전에

Table 4 Fe Concentration and mass of each sampling location at PWR unit A

Sampling Point	Fe conc. ( $\mu\text{g/L}$ )	System flow rate (ton/hr)	Fe mass (g/day)
① FW	3.80	5,934	541.2
② CPP Out	1.36	4,028	131.5
③ LP HTR	1.29	3,983	123.3
④ HDT Drain	1.00	1,950	46.8
⑤ MSR Drain	1.25	545	16.4
⑥ SG BD	4.99	54	6.5

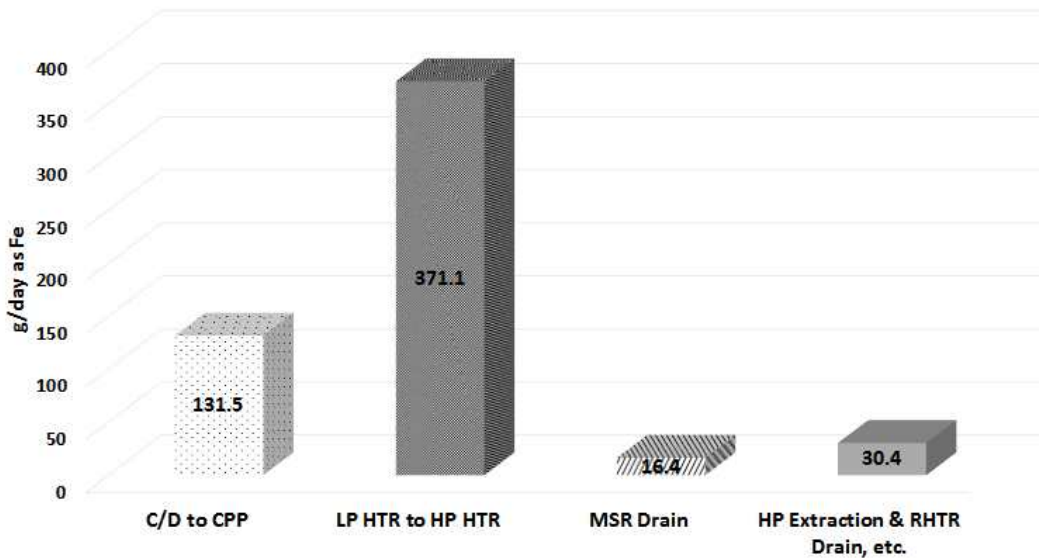


Fig. 5 Amount of corrosion products (Fe) generated by each location

서 11주기 운전 중 평가한 결과가 A 호기와 유사한 경향을 나타냈다 [5]. 당시에도 고압급수가열기 구간의 부식생성물 발생량이 매우 높게 나타났으며, 이는 운전연한이 오래된 발전소에서 고압급수가열기측 배관 표면에 부식생성물이 침적되어 있다가 (Build-up) 유속조건에서 지속적으로 유출되는 현상으로 추정된다. SONGs 원전은 급수배관 내부검사를 통해 해당 부위의 부식생성물 침적을 확인하고 고압수를 분사하여 물리적 세정작업을 수행한 바 있다.

금번 평가결과 2차계통 배관 등으로부터의 부식생성물 이동으로 인한 A 호기의 한 주기 증기발생기 (1대당) 내부 부식생성물 침적량은 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> (Magnetite) 환산량으로 약 112 kg에 달할 것으로 평가된다. 이의 계산과정은 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 & \text{Fe}_3\text{O}_4 \text{ accumulation in each SG} & (2) \\
 & = \text{mass of Fe inside SG} [\text{①FW} - \text{⑥SG BD}] \times \\
 & \quad \text{Operating days per cycle} \times \text{Molecular weight} \\
 & \quad \text{ratio of Fe}_3\text{O}_4/3\text{Fe} \div \text{Number of SG} \\
 & = (541.2 \text{ g/day} - 6.5 \text{ g/day}) \times 548 \text{ day/cycle} \times \\
 & \quad 10^{-3} \text{ kg/g} \times 191.535 \text{ g/mol} \div (3 \times 55.845) \\
 & \quad \text{g/mol} \div 3 \\
 & = 112 \text{ kg/cycle}
 \end{aligned}$$

이로써 산출된 A 호기의 2차계통 부식생성물 (Fe) 물질수지는 Fig. 7과 같다.

### 3.2 부식생성물 종류

XRD 장비를 사용하여 분석한 결과, A 호기의 2차계통 부식생성물은 대부분 Magnetite (Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>), Hematite (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), Goethite ( $\alpha$ -FeOOH), Lepidocrocite ( $\gamma$ -FeOOH)로 존재하였다 (Fig. 8).

A 호기의 경우 복수펌프 출구의 용존산소 농도가 3~4 ppb이며, 복수탈염설비 출구측에 ETA와 하이드라진을 약품처리하여 저압급수가열기에서 고압급수가열기를 거쳐 증기발생기로 공급되기 직전인 급수에서는 pH가 9.6 이상, 용존산소는 1 ppb 미만을 유지하고 있다. 부식생성물 시료 채취 당시 측정된 각 지점별 pH 및 약품농도는 Table 5와 같다.

Lepidocrocite, Goethite 등의 경우 저온에서 존재하는 철산화물의 형태로 온도가 높아지면 탈수산화되어 Hematite로 전환되며, Lepidocrocite는 염기성 환경에서 환원되어

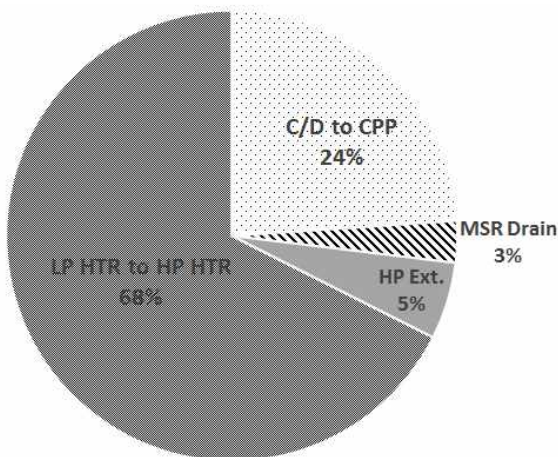


Fig. 6 Percentage of corrosion products (Fe) generated by each location.

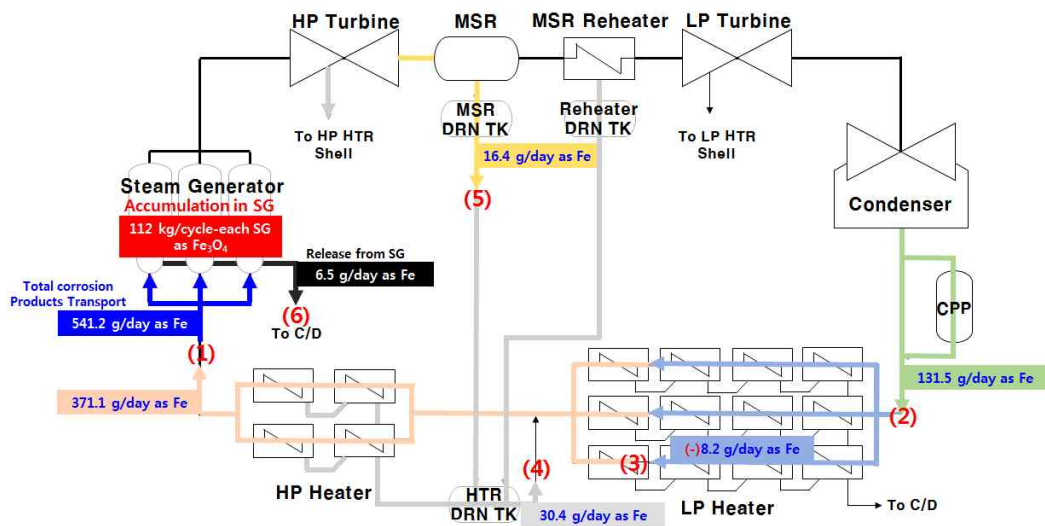


Fig. 7 Fe mass balance at PWR unit A.

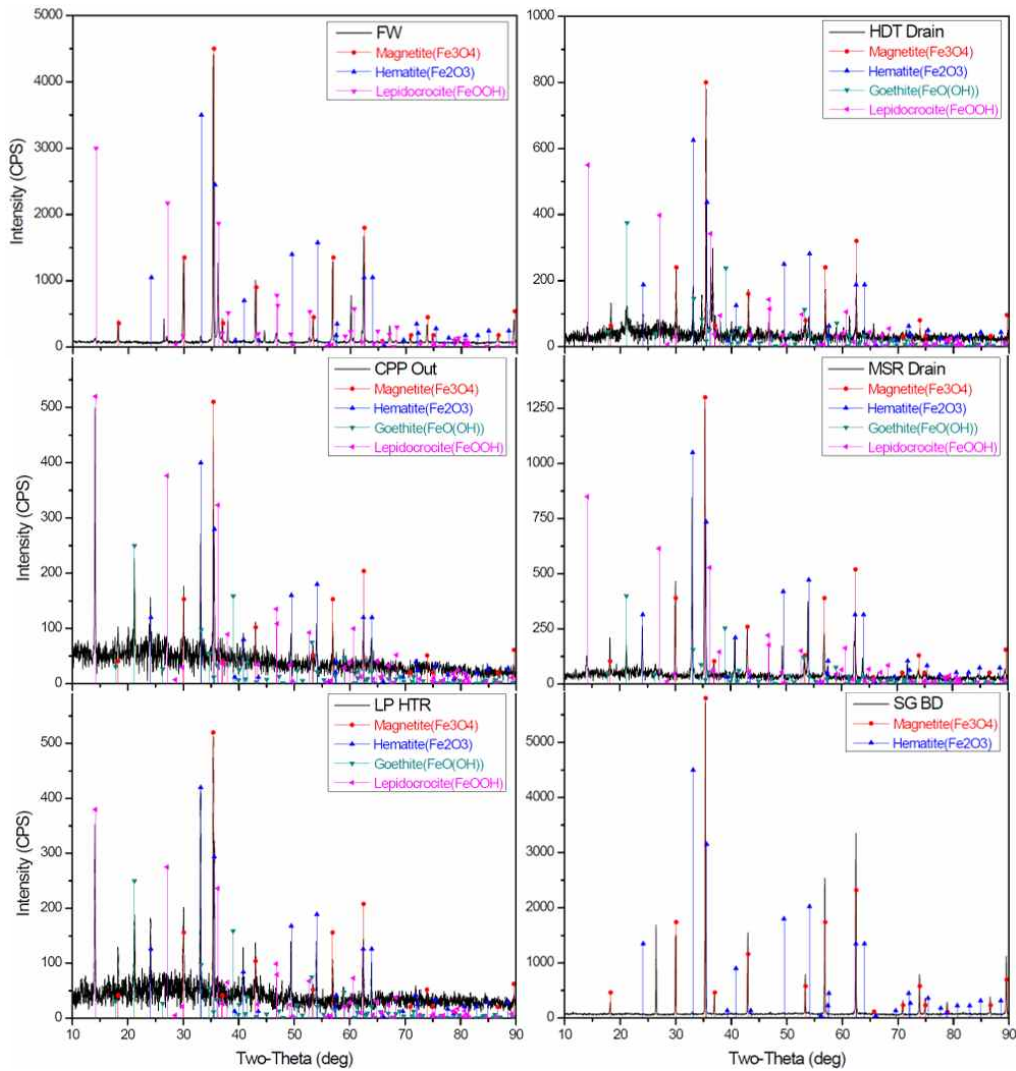


Fig. 8 XRD pattern in each sampling location.

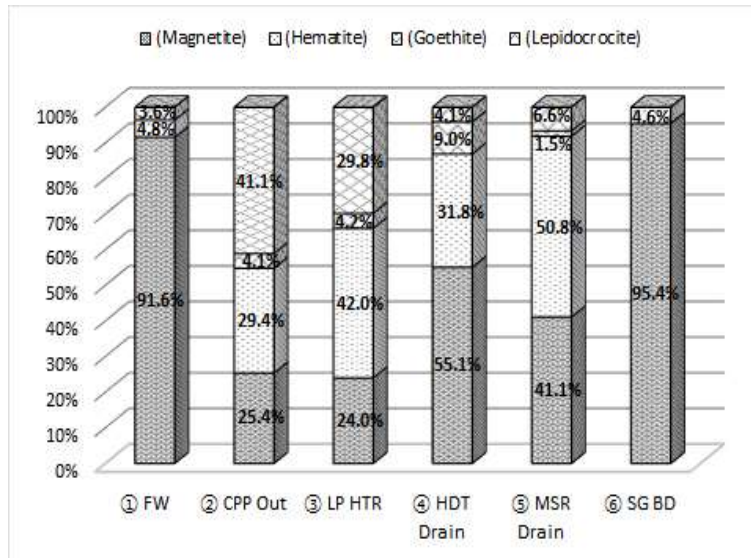
**Table 5 pH & chemical distribution of each sampling location at PWR unit A**

Sampling Point	pH <sub>25°C</sub>	TC (μS/cm)	ETA (ppm)	NH <sub>3</sub> (ppb)	N <sub>2</sub> H <sub>4</sub> (ppb)
① FW	9.66	9.32	4.77	278.5	56
② CPP Out	9.42	6.36	2.39	320.7	74.7
③ LP HTR	9.39	7.07	2.25	300	71.5
④ HDT Drain	9.81	12.46	6.89	207.1	45.5
⑤ MSR Drain	9.94	20.4	16.0	46.9	100.2
⑥ SG BD	9.83	13.66	9.78	151	50.3

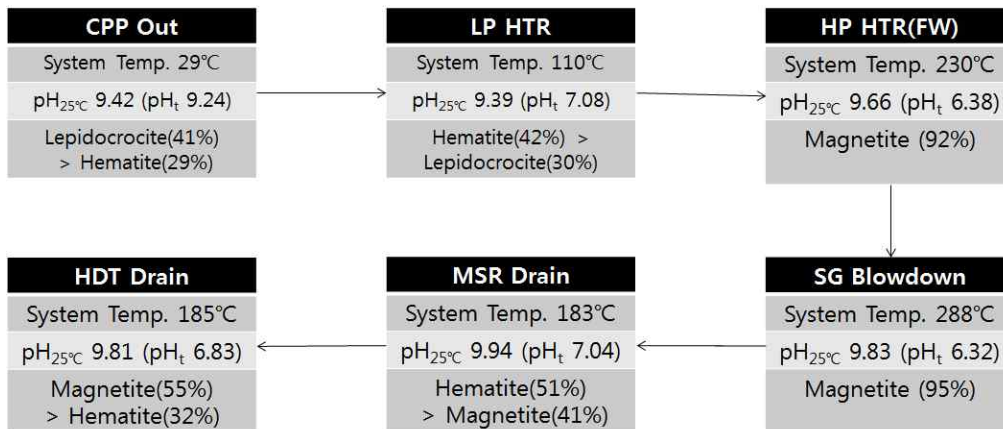
Magnetite로 전환된다 [6].

A 호기의 2차계통 지점별 환경조건과 부식생성물 종류를

비교해보면 Fig. 9 및 Fig. 10과 같다. 복수탈염설비 출구측의 경우 저온 생성 철산화물인 Lepidocrocite가 지배적으로 존재하였으며 이후 하이드라진이 주입됨에 따라 저압급수가열기에서는 Hematite의 함량이 증가하기 시작하였다. 뒤이어 고압급수가열기를 거치면서 고온의 염기성 환원환경에서 Magnetite의 비율이 증가하여 최종급수 및 증기발생기의 경우 Magnetite가 90% 이상인 것으로 나타났다. 따라서 복수기로부터 저압급수가열기, 최종급수, 증기발생기로 이동할수록 pH가 증가하고 환원환경이 더욱 우세해짐에 따라 철의 산화수가 보다 낮은 Magnetite의 존재비가 점차적으로 증가함을 알 수 있다. 고온 습증기영역인 추기계통측 시료 (습분분리기 배수 및 고압 급수가열기 배수)의 경우 Magnetite와 Hematite의 존재비가 각 30% 이상으로 모두 높게 관찰되었다.



**Fig. 9 Iron oxides composition ratio (weight %).**



**Fig. 10 Iron oxide forms of each sampling location at PWR unit A.**



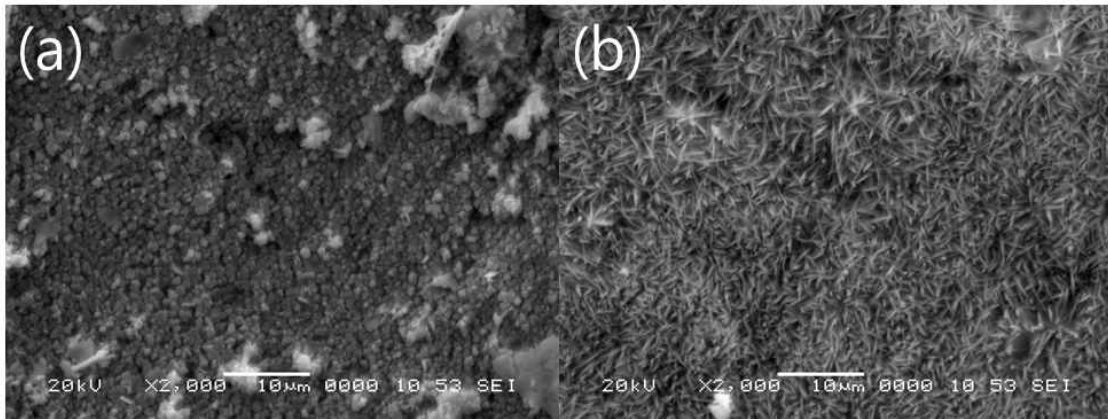


Fig. 11 Shape of corrosion products obtained from feed water ; (a) spherical form and (b) acicular form.

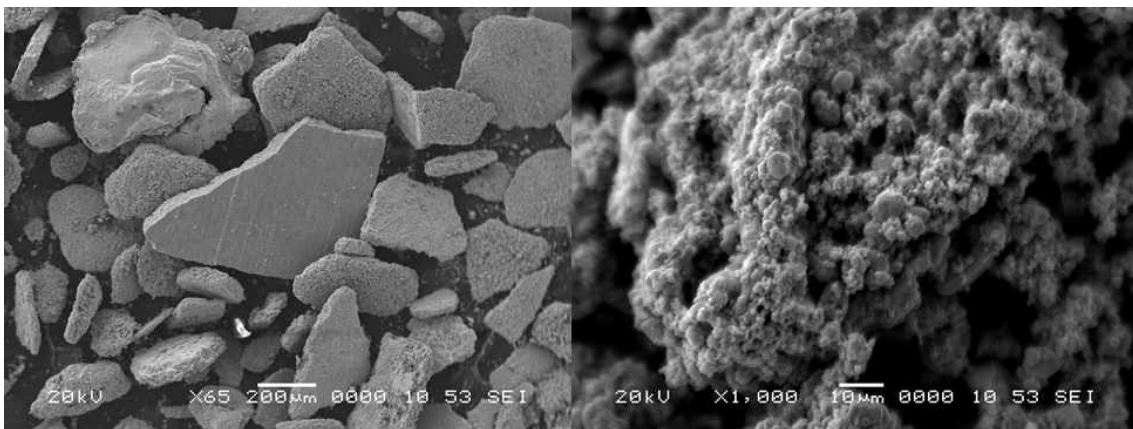
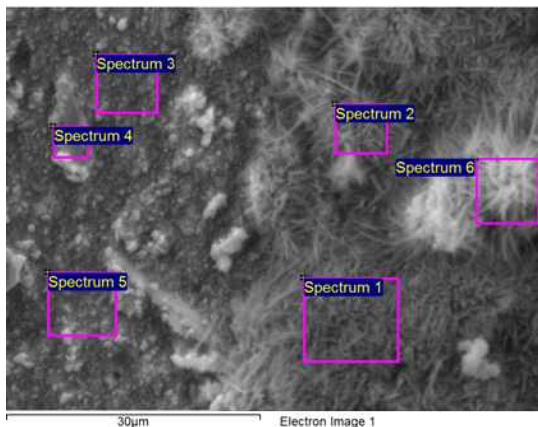


Fig. 12 Shape of corrosion products obtained from SG blowdown.

Table 6 Elemental composition of corrosion products obtained from feed water



Element	Acicular form			Spherical form		
	S1	S2	S6	S3	S4	S5
(Wt%)						
C K	4.9	5.9	7.9	5.3	4.5	4.4
S K	-	-	1.2	-	-	-
Mn K	0.6	0.4	0.7	0.4	0.4	0.4
Fe K	62.6	60.1	51.5	61.8	64.2	64.4
Ni K	0.5	0.5	0.7	0.5	0.5	0.4
O	31.4	33.1	38.0	32.0	30.5	30.4
Totals	100	100	100	100	100	100

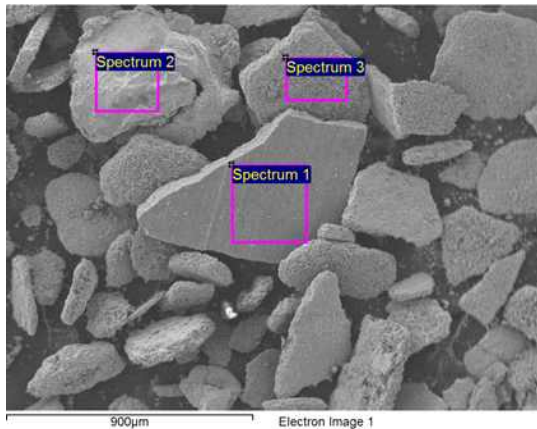
### 3.3 부식생성물 형상 및 성분 분석

①번 최종급수에서 포집한 부식생성물을 SEM을 이용하여 결정체의 형상을 관찰한 결과, 원형과 침상형(바늘모양)의 모습이 동시에 관찰되었다 (Fig. 11). 성분 분석결과 (Table 6) 두 형태의 결정체의 조성은 Fe가 51 ~ 64 wt%,

O가 30 ~ 38 wt%로 거의 동일하였다. 이를 통해 급수계통의 부식생성물이 다양한 형태로 존재함을 추론해볼 수 있었다.

⑥번 증기발생기 취출계통에서 포집한 시료의 경우, flake형의 부식생성물이 대거 관찰되었다. 특히 Fig. 12와 같이 증기발생기 전열관 표면에서 박리된 형태의 매끈한 면을 지닌 조각들이 많이 보였으며, 철 산화물이 응집되어

Table 7 Elemental composition of corrosion products obtained from SG blowdown



Element (Wt%)	S1	S2	S3
C K	1.6	4.7	1.3
Al K	0.4	0.4	-
Cr K	1.2	-	-
Si K	-	0.2	-
Mn K	0.7	0.5	0.3
Fe K	60.5	62.2	73.5
Ni K	9.6	0.9	0.3
Zn K	0.5	-	-
O	25.5	31.2	24.6
Totals	100	100	100

성장한 형태의 모습도 관찰되었다. 증기발생기 부식생성물을 EDS로 성분 분석한 결과 (Table 7), 주로 Fe가 60 ~ 74 wt%, O가 25 ~ 31 wt%인 철 산화물이었다.

부식생성물 시료에서는 Fe, O 외에도 Ni, Mn, Al, Cr 등이 1 wt% 이내로 미량 검출되었다. Ni, Mn 등의 금속원소는 배관 및 구성기기 재료에서 용출된 것으로 보이며, Al, Si 등은 보충수, 약품 등의 불순물로 2차계통에 유입된 것으로 추정된다.

#### 4. 결론

본 논문에서는 국내 운전 중인 PWR 발전소 A 호기를 대상으로 2차계통 주요지점별 부식생성물 발생현황을 시료 채취 및 분석을 통해 알아보았다.

A 호기 2차계통에서 가장 부식에 취약한 위치는 고온 급수계통인 고압급수가열기 구간으로 나타났으며, 급수가열기 튜브재질은 부식저항성이 강한 스테인리스강이므로 탄소강 재질로 장구간 이어지는 급수계통 배관이 주요 발생원으로 파악된다. 이에 비해 저온 급수 구간은 부식생성물 발생량이 거의 없었으며, 특히 발전소 2차계통에서 유동가속 부식 (FAC)에 취약하다고 알려진 습분분리기 배수측 및 고압터빈 추기증기배관 또한 부식생성물 발생량이 적은 것으로 평가되었다. 평가지점별 채취한 부식생성물의 화학조성을 분석한 결과 철산화물의 일종인 Magnetite, Hematite 및 Lepidocrocite가 주성분이었으며, 고온의 염기성 환원

환경이 우세한 계통일수록 Magnetite의 비율이 지배적인 것으로 나타났다.

본 조사결과는 국내 원전 2차계통의 구성, 수환경 및 부식 현황에 대한 기초자료로 활용될 수 있으며, 더 나아가 2차계통 부식 저감기술 (pH 상향, 산소주입, Film-Forming Amines 등) 적용에 있어 사전 분석자료로 활용될 수 있을 것이다.

#### References

1. K. Fruzzetti, Pressurized Water Reactor Secondary Water Chemistry Guidelines, Rev. 8, p. 2-1, Product ID #3002010645, Electric Power Research Institute, Palo Alto (2017).
2. R. Wolfe, Flow-Accelerated Corrosion in Power Plants, Rev. 2, p. 6-11, 3-23, Product ID #3002008071, Electric Power Research Institute, Palo Alto (2016).
3. ASTM D6301-13, Standard Practice for Collection of On-Line Composite Samples of Suspended Solids and Ionic Solids in Process Water (2013).
4. U. Schwertmann and R. M. Cornell, *The Iron Oxides in the Laboratory - Preparation and Characterization*, 2nd ed., p. 11, WILEY-VCH (2000).
5. K. Fruzzetti, Proceedings: 2002 Workshop on Pressurized Water Reactor Elevated Feedwater Iron Transport, pp. 2-1 - 2-30, Product ID #1003586, Electric Power Research Institute, Palo Alto (2002).
6. R. M. Cornell and U. Schwertmann, *The Iron Oxides - Structure, properties, Reactions, Occurrences and Uses*, 2nd ed., p. 366, WILEY-VCH (1996).