



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

2011년 2월
석사학위논문

원자력발전소 2차계통 슬러지
부착 저감방법 연구

조선대학교 대학원

원자력공학과

곽 영 중

원자력발전소 2차계통 슬러지
부착 저감방법 연구

A Study on Method to Reduce the Sludge Attachment of
the Secondary System for Nuclear Power Plant

2011년 2월 25일

조선대학교 대학원

원자력공학과

곽 영 중

원자력발전소 2차계통 슬러지
부착 저감방법 연구

지도교수 이 경 진

이 논문을 공학 석사학위신청 논문으로 제출함

2010년 10월

조선대학교 대학원

원자력공학과

곽 영 중

곽영종의 석사학위논문을 인준함

위원장 조선대학교 부교수 김진원 (인)

위 원 조선대학교 교수 정운관 (인)

위 원 조선대학교 교수 이경진 (인)

2010년 11월

조선대학교 대학원

목 차

ABSTRACT	iv
제 1 장 서 론	1
제 2 장 2차계통 슬러지 부착시 현상 및 원인 검토	2
제 1 절 원전 2차 계통수 관리 개요	2
1. 급수계통 수질 관리	3
2. 2차 계통 수질관리에 사용되는 약품별 특성	6
제 2 절 주요 현상	9
1. 주급수 제어밸브 막힘 및 개도 증가	9
2. 주급수펌프 속도 증가	11
3. 주급수 유량 변동폭 증가에 따른 전기출력 제한	12
4. 급수가열기 배수밸브 막힘 현상	14
5. 계통 배관 및 기기에 이물질 침적	15
제 3 절 원인 검토	16
1. FAC 영향 검토	16
2. 슬러지 종류별 생성가능성 검토	20
3. 해외 원전경험 및 유사사례 검토	28
4. 검토 결과	30
제 3 장 2차계통 슬러지 부착 저감방안 평가 및 결과	32
1. 복수탈염설비 추가운전	32
2. 급수계통 용존산소 증가 방안	33
3. pH 증가 방안	33
제 4 장 결론	37
참고문헌	38

표 목 차

표 2.1	한국표준형 원전의 2차계통 수질관리 기준	3
표 2.2	표준형원전 고압급수가열기 7A/B 배수밸브 규격 및 정비 현황	14
표 2.3	주급수계통의 FAC 변수 비교	20
표 2.4	정상운전중 증기발생기 철분농도 비교	22
표 2.5	정상운전중 주급수계통 철분농도 비교	23
표 2.6	증기발생기 Lancing 슬러지 제거량	24
표 2.7	표준형 원전 밸브 특성 비교	25
표 2.8	SS 합금강 구분과 일반적 특성	25
표 2.9	밸브 정비방법 비교	26
표 2.10	유기물 성분 분석결과	28
표 3.1	발전소별 하이드라진 농도 및 pH 비교	33
표 3.2	하이드라진 농도 증가에 따른 계통 철분 농도 변화	34
표 3.3	pH 농도 변화에 따른 계통 내 철분농도 변화	34

그림 목차

그림 2.1	pH 변화에 따른 탄소강 부식률	4
그림 2.2	암모니아 및 하이드라진 용액의 pH(25℃)	5
그림 2.3	pH 변화에 따른 철의 농도 변화	6
그림 2.4	ETA 농도 변화에 따른 pHt 변화	7
그림 2.5	영광 6호기 DFCV 및 EFCV Cage 막힘사진	9
그림 2.6	영광 6호기 다운콤마 유량 감소 현상	10
그림 2.7	영광 6호기 EFCV 개도 증가 현상	10
그림 2.8	영광 6호기 주급수펌프 출구압력 증가	11
그림 2.9	영광 6호기 주급수펌프 속도 변화	12
그림 2.10	영광 6호기 주급수 유량 변화	12
그림 2.11	영광 5,6호기 EFCV 케이지 형상 및 치수	13
그림 2.12	영광 5, 6호기 주요기기 이물질 침적 사진	15
그림 2.13	탄소강 배관 감육과정	16
그림 2.14	FAC 철부식생성물 생성 및 거동	17
그림 2.15	FAC와 온도의 영향	18
그림 2.16	FAC에서의 용존산소농도 효과	19
그림 2.17	pH 변화에 따른 FAC의 영향	19
그림 2.18	SONGS 2호기 급수계통 철분 농도 분석결과	29
그림 3.1	영광 6호기 복수 및 급수계통 슬러지 농축 상태 비교	32
그림 3.2	수질조건 개선 전·후 변수 비교	35
그림 3.3	영광 6호기 복수 및 습분분리재열기 슬러지 농축 상태 개선	36

ABSTRACT

A Study on Method to Reduce the Sludge Attachment of the Secondary System for Nuclear Power Plant

Kwak, Young Jong

Adviser : Prof. Lee, Goung Jin

Department of Nuclear Engineering

Graduate School of Chosun University

The purpose of this study is to present the method to reduce the sludge attachment of the secondary system through the cases of reduction in electric power by the sludge of the main feed water system of Younggwang(YGN) #5 and #6 Nuclear Power Plant.

In the event of YGN #5 and #6, the clogging phenomenon in the Feed Water Control Valve Cage has continued to have severe changes in the Feed Water Flow, as a result, it has experienced several problems in reduction of electric power at the end of the cycle, loss of power from the increase of speed in Main Feed Water Pump, replacement of the Feed Water Control Valve Cage for each cycle and others.

The Main Feed Water Pump & the Feed Water Booster Pump impeller had the foreign substance deposited and an increasing phenomenon of the Main Feed Water Pump speed and discharge pressure. As a result, there was loss of power due to the increase of the pump rotation speed.

EFCV (Economizer Flow Control Valve) & DFCV (Downcomer Flow Control Valve) Cage had the foreign substance deposited which reduces the DFCV flow and EFCV opening by the increase of flow resistance.

In addition, At approximately 80% opening of the EFCV, it is the zone that enlarges the diameter of the Valve Cage Hole which enlarges the width of change for the Feed Water Flow that is used as an input variable of the plant power to enable the power of the Nuclear Power Plant to approach the licensed power limit, resulting in maintaining the electric power lower than it can.

As a result of increasing the concentration of hydrazine and ammonia step-by-step to heighten the pH of steam and Feed Water, the iron concentration within the system was reduced to improve the feed water flow and opening of the DFCV and EFCV.

As a result of this study focusing on the plan to reduce the generation of iron oxidation substance through the hydro-chemical environment adjustment, the time of clogging up the cage of the Feed Water Control Valve which increases the main feed water pressure and reduces the flow of the DFCV was considered as accelerated after October 2004 when the water treatment method was changed from ammonia to ethanolamine in the secondary system. As a result, it is resolved by optimizing the concentration of the chemical substances(Ethanolamine/ $\text{NH}_3\text{OH}/\text{N}_2\text{H}_4$) as used in the water treatment.

Through this study, optimal hydro-chemical conditions and operation method for minimizing the corrosion in the secondary system of the Pressurized Water Reactor have been prepared, and as a result, it enhances the production efficiency of the electric power and contributes to safe operation and extension in the life cycle of the steam generator.

제 1 장 서 론

본 연구는 영광원자력 5,6호기 주급수계통의 슬러지에 의한 영향으로 전기출력이 감소된 사례를 통해 원전 2차 계통의 슬러지 부착 저감방안을 제시하기 위한 연구이다.

영광 5,6호기의 경우 주급수제어밸브 Cage의 지속적인 막힘 현상으로 주급수펌프 속도증가로 인한 동력손실, 주급수유량 변화폭 증가로 인한 전기출력 감소, 매주기 주급수제어밸브 케이지 교체 등 여러 문제점을 경험하였다. 이 현상은 2차계통 증기사이클을 구성하는 탄소강재질의 배관 등에서 발생하는 유동가속부식(Flow Accelerated Corrosion) 현상에 의해 용출된 철이온과 복수계통 pH 및 하이드라진 농도가 낮게 유지되면서 부식생성물의 증가로 급수계통을 통해 최종적으로 증기발생기로 유입되는 과정에서 일부가 주급수제어밸브 케이지에 침착되어 발생되었다.

원전 2차계통수의 수질관리에 대한 기본방향은 계통재질을 부식으로부터 보호하여 설비의 설계수명 또는 그 이상으로 안전하게 운영하는 것이다. 증기사이클로 구성된 대용량 발전소의 경우 출력운전중 고온·고압의 대유량이 형성되어 유동가속부식으로 인한 철산화물의 생성은 피할 수 없는 현상이지만 재질의 변경 또는 계통 수화학 운전환경의 조절 등을 통해 일부 저감시킬 수 있다.

이 문제를 해결하기 위해서 수질관리방법 검토, 침적물 분석, 주급수제어밸브 개도 증가 및 유량 변동폭 증가원인, 해외 원전 경험사례 등 각 분야별로 다양한 원인 검토 및 운전 조치를 수행하였다. 그 결과 이 현상은 2차계통 수처리 방식을 암모니아에서 에탄올아민으로 변경한 2004년 5월 이후 가속된 것으로 판단, 2차계통수 수질관리에 사용되는 하이드라진, 암모니아, 에탄올아민의 농도를 조절한 결과 이차측 저온영역의 침·부식현상 완화로 밸브 Cage 막힘 현상이 해소되고 주급수펌프 속도 및 압력이 원상태로 회복되면서 주급수 유량 변동폭이 감소되고 전기출력도 정상 회복되었다.

이에 본 연구에서는 원자력발전소 2차 계통수 수질관리방법에 대해 살펴보고, 각 증상별 원인을 검토하기 위해 FAC에 의한 영향 검토, 계통내 유기물 생성에 의한 영향 검토, 철 산화물 생성 원인과 저감방안 평가 등 슬러지 발생가능성과 각 발전소별 밸브 특성 및 정비방법 비교 등 설비특성을 비교 분석하였다. 슬러지 부착저감을 위한 운전조치로 용존산소 농도, 화학제어제 농도를 조절한 결과 밸브 막힘 증상이 해소되었던 경험을 토대로 슬러지 생성원인을 진단하고, 슬러지 저감방안을 제시하였다.

제 2 장 2차계통 슬러지 부착시 현상 및 원인 검토

제 1 절 원전 2차 계통수 관리 개요

원인분석에 앞서 원자력발전소 2차계통수 관리방식과 수처리에 사용되는 약품별 특성 등 2차 계통수 관리 개요에 대해서 살펴보았다. 원자력발전소에서 2차계통수 수질 관리는 1차적으로 원자로냉각재계통과 압력경계를 형성하는 증기발생기 튜브의 건전성 확보로 방사성물질의 환경으로의 방출을 방지하고, 2차적으로 열효율을 최대화하여 전기출력 생산을 극대화하는데 목적이 있다. 증기발생기는 원자로냉각재계통에서 열을 전달받아 포화증기를 생산하는 기기로서 발생한 포화증기는 터빈을 구동시키며 원자로 냉각재계통과 2차계통의 압력경계를 형성한다. 따라서 증기발생기 튜브를 관통하는 손상이 발생하면 원자로냉각재계통과 주증기계통 사이의 분리벽이 손상됨을 의미한다. 증기발생기 튜브가 손상되면 원자로냉각재계통에 포함된 방사성물질이 주증기를 포함하여 2차계통수로 유입되므로 이 방벽의 건전성은 방사선 안전측면에서 매우 중요하다. 증기발생기는 원자력발전소의 핵심설비로 2차계통의 수질관리는 증기발생기의 건전성을 확보하기 위하여 더욱 엄격하게 수행한다고 볼 수 있다.

국내 최초의 가압경수로형 원전인 고리1호기의 2차계통 수처리기술은 불순물을 연질 슬러지로 변형시켜 배출시키는 인산염처리법의 적용을 계획하였으나, 인산이온에 의한 감육부식(Wastage)이 우려되어, 70년대 후반부터 암모니아와 하이드라진과 같은 휘발성약품을 사용한 전휘발성처리법(All Volatile Treatment)으로 변경하였다. 이 방법으로 변경한 이후 80년대 초부터는 덴팅(Denting)과 점식(Pitting)형태의 부식이 발생되었다. 이에 대한 대책으로 수질조건을 더욱 엄격히 제한하고, 해수에 대한 내식성이 우수한 티타늄을 복수기 재질로 선정하여 덴팅과 점식형태의 부식을 현저히 감소시켰다. 이후 90년대 초부터는 슬러지 퇴적부위에서 응력부식균열이 발생되자 슬러지 퇴적을 방지하기 위하여 보다 강한 알칼리성 분위기를 유지할 수 있는 고 pH-AVT법을 적용하였다.

AVT법은 계통수의 pH를 알칼리성으로 유지하여 탄소강이나 합금강의 부식을 방지하는 방법이지만 2차계통 부식발생의 주요 발생부위로 나타나는 습증기 및 고온수영역의 부식방지 효과에는 미흡한 것으로 밝혀지고 있다. 이것은 AVT법에서 사용하는 암모니아의 휘발도가 높아 습증기 및 고온수영역의 부식방지를 위한 적절한 pH를 유지

하기 못하기 때문이다. 따라서 미국의 EPRI(Electric Power Research Institute)를 중심으로 비교적 휘발도가 낮은 아민(Amine)약품을 암모니아의 대체약품으로 선정하여 적용하고 있다. 현재 국내 대부분의 원전에서 에탄올아민(Ethanolamine : ETA)을 이용한 대체아민 처리법을 적용하고 있으나, 휘발도가 낮아짐으로 해서 저온의 증기 및 응축수 영역에서의 pH가 낮아져 부식이 오히려 증가하는 경향이 있어 최근에는 Advanced Amine에 대한 검토가 이루어지고 있다.

1. 급수계통 수질관리

급수계통은 증기발생기의 급수 유입통로로 급수계통에서의 수질관리는 증기발생기에 직접적인 영향을 주기 때문에 상업운전중인 원자력발전소의 2차측 수질관리는 EPRI, CEOG(Combustion Engineering Owner's Group) 및 웨스팅하우스(Westinghouse)사에서 규정한 새로운 수질관리 지침서를 기준으로 하며 급수계통에서 수질이상이 발생하면 3단계 조치준위 개념을 도입한 엄격한 수질관리를 실시하고 있다. 급수계통에서 수질이상시 조치준위를 적용하고 있는 수질관리 항목은 pH, 용존산소, 하이드라진 등이 있다. 표 2.1은 한국표준형 원전의 2차계통 수질관리기준을 나타내고 있다.

표 2.1 한국표준형 원전의 2차계통 수질관리기준

계 통	항 목	단 위	기 준 값	제 한 값		
				조치1단계	조치2단계	조치3단계
증기발생기 취출수	pH	-	≥ 9.0	< 9.0	-	-
	양이온 전도도	μs/cm	≤ 1.0	-	> 1	> 4
	나트륨이온	ppb	≤ 5	> 5	> 50	> 250
	염소이온	ppb	≤ 10	> 10	> 50	> 250
	황산이온	ppb	≤ 10	> 10	> 50	> 250
급 수	pH	-	8.8~9.6	<8.8 >9.6	-	-
	용존산소	ppb	≤ 5	> 5	> 10	-
	하이드라진	ppb	>8×[DO]	≤8×[DO] 복수≤20ppb	-	-
	철	ppb	≤ 5	> 5		
	구리	ppb	≤ 1	> 1		
복 수	용존산소	ppb	≤ 10	> 10	> 30	-

1.1 급수 pH 제어

가압경수로형 2차계통의 부식발생을 최소화하기 위해서는 pH 제어가 필수적이다. 복수 및 급수계통에서의 탄소강의 부식은 pH 10.0에서 최소가 된다. 실제로 증기발생기에서 부식저감이 매우 중요한 문제로 다루어지고 있는데, 이것은 불용성 철산화물로 구성된 부식생성물 등이 복수 및 급수계통을 통해서 증기발생기 내부로 유입되어 저유속부위(Tube/Tube 지지판, Tube/Tube Sheet Crevice 등)에 부착되기 때문이다. 이러한 부착물질 속에는 Na, Cl과 같은 부식성 이온들이 쉽게 농축되어 강한 부식 환경을 유발한다. 대부분의 증기발생기 부식문제는 이러한 원인과 관련되어 있다. 따라서 증기발생기의 장기간 안전운전 및 수명을 연장하기 위해서 부식생성물의 발생과 유입을 최소화 할 수 있는 기술이 필요하다.

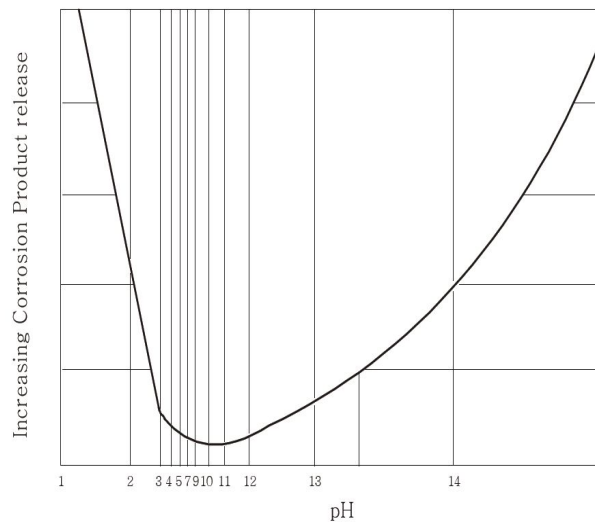


그림 2.1 pH 변화에 따른 탄소강 부식률

정상운전상태의 증기발생기에서는 온도가 증가함에 따라 암모늄이온(NH_4^+)이 암모니아(NH_3) 기체상태로 증기에 분배되므로 암모니아의 휘발성이 증가되어 암모니아의 이온화 경향이 떨어지고 증기발생기의 pH는 항상 급수의 pH 보다 0.2~1.3정도로 낮아진다. 따라서 급수계통의 pH 제어는 증기발생기의 적정 pH 유지를 위해 매우 중요하다. 2차계통의 pH는 암모니아농도 및 이온화 경향, 하이드라진 농도 및 분해속도 등에 의해 지배되며 온도변화에 매우 민감하다.

발전소에서 설비의 부식은 용존산소가 제한치 이내로 제어될 때 pH가 주요 변수로

작용하게 되는데 복수 및 급수의 pH 제어는 전회발처리법을 적용할 경우 암모니아에 의해 조절된다. 그러므로 2차계통의 부식을 최소로 억제하기 위해서 계통의 pH가 정상운전시, 발전소 기동 및 정지기간중에 항상 적정범위내로 유지될 수 있도록 철저한 수질관리를 수행해야 한다.

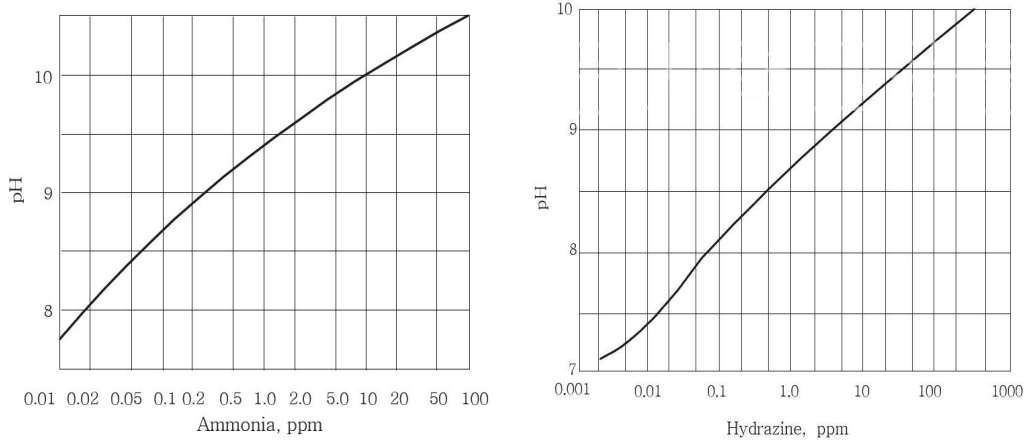


그림 2.2 암모니아 및 하이드라진 용액의 pH(25°C)

1.2 급수 중 용존산소 제어

용존산소는 금속부식의 주요인자로 작용하므로 증기발생기에 공급되는 급수중의 용존산소를 가능한 낮게 유지하여 정상운전 및 저온정지시에도 5ppb 이하로 유지되도록 하이드라진을 투입한다.

일반적으로 하이드라진의 농도는 발전소 설비특성에 따라 다음과 같이 유지한다.

- 1) 정상운전 중 급수의 하이드라진 농도는 100ppb 이상으로 유지하는데, 최근 급수 계통에서 용존산소에 의한 유동가속부식(Flow Accelerated Corrosion) 현상이 증기발생기로 유입되는 슬러지의 주 생성원인으로 판명되어 전기화학전위(Electrochemical Potential) 시험을 통해 환원성 분위기가 유지될 수 있는 운전 조건에서 하이드라진 농도를 낮게 유지하고 있다.
- 2) 복수 및 급수계통의 휴관처리시 하이드라진 농도는 50~200ppm 정도 유지한다.
- 3) 하이드라진은 다음과 같은 반응식으로 수중의 용존산소를 제거한다.



반응율은 온도의 영향을 받는데 온도가 높을수록 반응율이 증가하며 100°F(약 38°C) 미만에서는 반응속도가 매우 느리다.

1.3 급수계통 철, 구리 농도의 제한

급수계통의 철 농도는 5ppb 이하, 구리농도는 1ppb 이하를 적용하고 있으며 2차계통 수질관리가 적합하지 못 할 경우 복수기와 복수 및 급수계통의 구조물 부식이 진행되면서 수중에 철 및 구리가 이온상태나 불용성 상태로 존재, 증기발생기로 유입되어 증기발생기 튜브표면을 오염시키거나 튜브지지판에 침적되어 열전달 장애를 일으키거나 튜브 파손을 초래한다. 따라서 증기발생기의 튜브 보호를 위해서 복수 및 급수계통의 철과 구리의 농도를 제한치 이내로 유지해야 한다. 철은 복수 및 급수계통의 주요 재료로 난용성 물질이지만 환원성 상태에서 극히 일부가 용해된다. 그림 2.3에서와 같이 약간 차이가 있지만 pH가 증가함에 따라 철의 용해도가 감소하는 것을 알 수 있다.

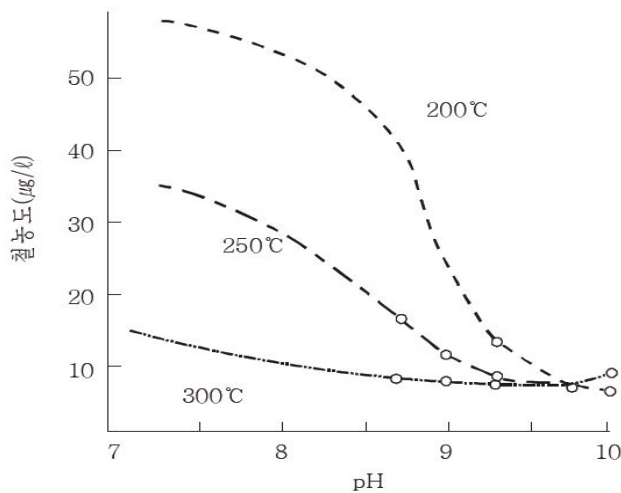


그림 2.3 pH 변화에 따른 철의 농도 변화

2. 2차계통 수질관리에 사용되는 약품별 특성

2.1 에탄올 아민(ETA)

ETA는 휘발도가 낮아 고온영역에서 pH 제어가 용이하며 증기발생기 운전온도에서 분해되지 않는다. 이 약품은 pH 조절제로 널리 사용하는 물포린의 분해물로 염기도가 높고 상대휘발도가 낮기 때문에 습증기영역에서 pH를 증가시켜 탄소강 배관의 마모부식을 저감시킨다. 특히 습분분리재열기 배수계통에서 ETA 1.5ppm은 암모니아 10ppm과 동일한 pH를 나타내며, 증기발생기 철 슬러지 유입량을 기존 암모니아 수처리법에

비해 1/3로 저감되는 것으로 나타났다. ETA는 약품 특성상 운전온도에서 낮은 농도로 높은 pH 유지가 가능하므로 복수탈염설비(CPP : Condensate Polishing Plant)의 부하를 감소시킬 수 있고 양이온 교환수지는 아민모드에서 높은 나트륨이온의 선택도를 가지므로 증기발생기 나트륨이온의 유입을 최소화할 수 있다. ETA 농도 변화에 따른 pH 변화는 그림 2.4와 같다.

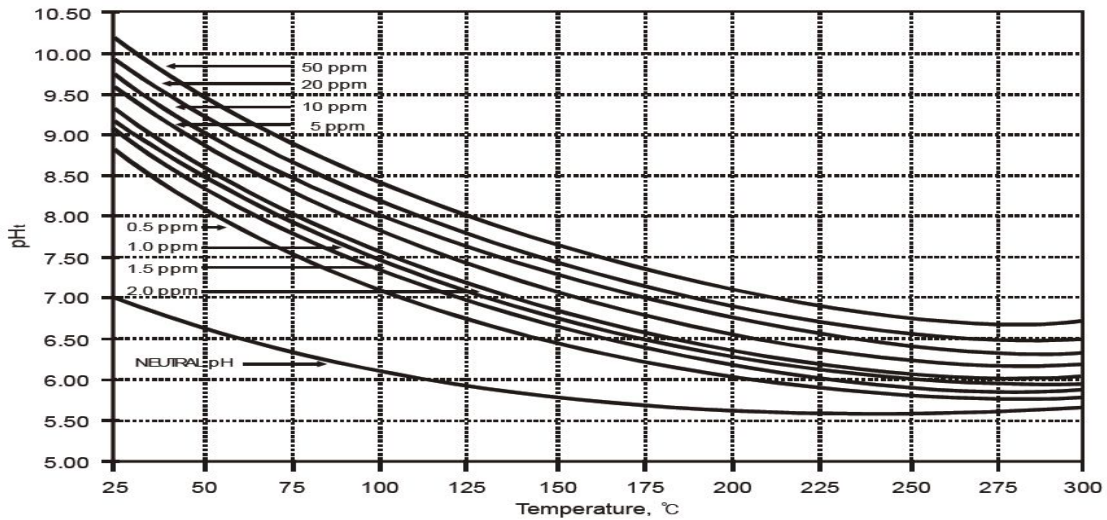
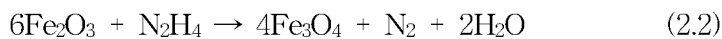


그림 2.4 ETA 농도 변화에 따른 pH 변화

2.2 하이dra진

하이dra진은 용존산소 제거제로 사용되는데 산소와 반응하여 물, 수소, 질소를 형성하는데 이는 반응조건에 따라 달라지며 운전온도에 맞는 적절한 pH를 유지하는 것이 재질부식과 부식생성물의 이동을 최소화 하는데 도움을 주게 되며 증기발생기를 환원성 상태로 유지하게 한다. 반응율은 pH와 하이dra진 과잉량, 온도에 따라 증가하며 산화물 표면의 성질에 의존한다. 증기발생기에서 하이dra진은 분해되어 증기상태의 암모니아로 변환되어 복수기로 유입된다.

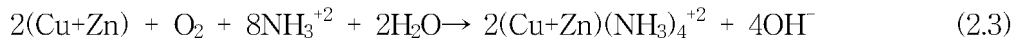
하이dra진은 약 400°F(204.4°C)에서 분해를 시작하여 600°F(315.6°C)에서 92%정도 분해한다. 철산화물인 Hematite(Fe₂O₃)와 반응하여 금속 재질 표면에 부착성이 강하고 치밀한 조직의 보호성 Magnetite(Fe₃O₄)를 형성한다.



습식휴관 처리시 pH 9.8 이상에서 하이드라진은 재질표면에 Magnetite 보호피막을 형성하여 부식의 진행을 억제하는 부식억제제로 작용한다. 저온, 저압에서는 반응속도가 느리지만, 고온에서 분해할 때 부식성 가스를 발생시키지 않을 뿐 아니라 반응 후 용존고형물의 잔류가 적은 장점이 있다.

2.3 암모니아

2차계통 수처리에 암모니아를 사용하는 이점은 물과 함께 증기발생기에서 휘발하여 전 계통을 순환하며 복수로 될 때 수중의 pH를 증가시켜 계통 구성재질의 부식을 억제한다. 그러나 암모니아는 구리부식을 촉진하기 때문에 최근 국내 대부분 원전에서는 2차측 열교환기와 배관재질에 구리합금을 사용하지 않는다. 암모니아는 고온에서 이온화 경향의 감소로 pH 조절이 어렵고 증기발생기 내 용존산소 존재시 구리합금의 부식을 촉진한다.



제 2 절 주요 현상

1. 주급수 제어밸브 막힘 및 개도 증가

1.1 증기발생기 주급수 유량제어밸브 구성

1.1.1 DFCV(Downcomer Flow Control Valve)

증기발생기에 급수를 공급하기 위하여 증기발생기 수위제어 신호에 따라 원자로출력 20% 미만에서는 증기발생기에 전 유량을 공급하도록 밸브를 제어하고, 원자로출력 20% 이상에서는 총 급수유량의 10% 유량을 공급하며 이때는 증기발생기 수위제어신호에 의해 26% 개도를 일정하게 유지된다.

1.1.2 EFCV(Economizer Flow Control Valve)

증기발생기에 급수를 공급하기 위하여 증기발생기 수위제어 신호에 따라 원자로출력 20% 이상에서 증기발생기에서 요구되는 전 급수유량의 90% 유량을 수위제어신호에 따라 공급한다.

1.2 주급수 제어밸브 Cage 막힘 현상

1.2.1 DFCV 막힘으로 유량감소 현상 발생

Drilled Type 밸브로 출력 20% 이상에서는 26% 개도를 일정하게 유지하고 있어 밸브 Cage 막힘 현상이 증가될수록 밸브는 고정상태에서 유동저항의 증가로 급수유량이 초기 약 260ton/hr에서 약 120ton/hr로 감소되는 현상이 발생했다.



그림 2.5 영광 6호기 DFCV 및 EFCV Cage 막힘사진

1.2.2 EFCV 개도 증가 현상

Drag Type 밸브로 Cage 막힘 현상이 증가됨에 따라 동일한 개도에서는 유동저항 증가로 급수유량이 감소되어 증기발생기로 공급되는 주급수유량을 공급하기 위해 밸브가 초기상태보다 더 열리며 밸브 막힘 현상이 증가될수록 밸브는 더 개방되어 초기 약 63% 열림 상태에서 약 80% 열림 상태로 증가되었다.

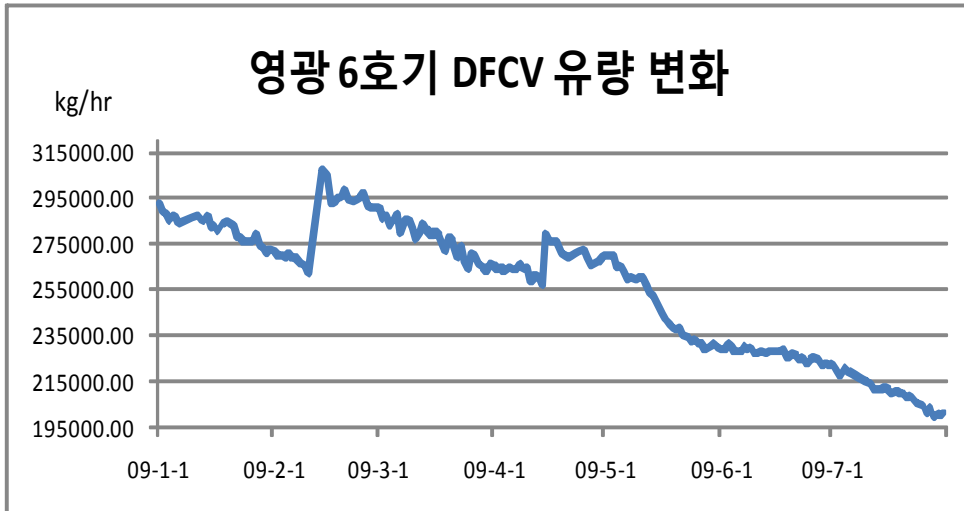


그림 2.6 영광 6호기 다운콤파 유량 감소 현상

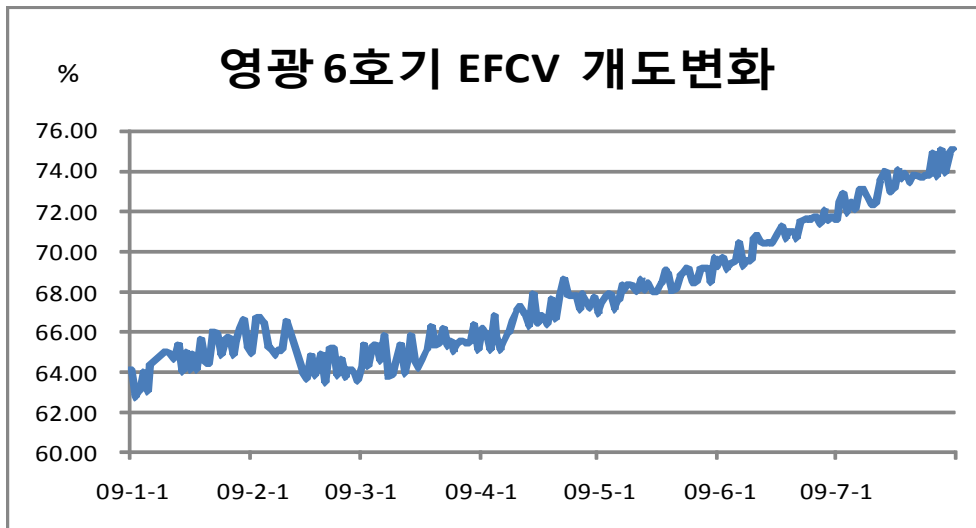


그림 2.7 영광 6호기 EFCV 개도 증가 현상

2. 주급수펌프 속도증가

2.1 주급수 펌프 개요

표준형 원전의 주급수펌프는 2대의 터빈구동 펌프와 1대의 모터구동 펌프로 구성되어 있고 터빈구동 펌프는 터빈에 유입되는 증기량을 조절함으로써 용이하게 속도를 조절할 수 있다. 모터구동 펌프는 유체 커플링을 설치하여 유체의 양을 조절하여 속도를 조절한다. 또한 이 속도를 조절, 펌프 출구유량을 제어함으로써 증기발생기의 수위를 제어하는 수단으로 사용한다. 1대의 최대용량은 전부하의 65%를 감당할 수 있도록 설계되어 있으며 정상운전시는 효율 및 축진동이나 마모 등으로 인한 손상을 고려하여 2대를 각각 50% 부하감당으로 운전한다. 펌프를 구동시키는 터빈은 2개의 증기 공급원을 가지고 있어 40% 이상의 출력에서는 주증기 헤더에서 직접 주증기를 공급받으며 40% 이상의 출력에서는 습분분리재열기(MSR)에서 재열된 재열증기를 공급받는다.

2.2 주급수펌프 터빈 동력소모 증가 현상

2.2.1 주급수펌프 터빈 동력소모 증가 원인

주급수제어밸브(DFCV, EFCV) 케이스 막힘 증상으로 증기발생기로 공급되는 급수가 감소되어 증기발생기 수위감소 → 증기발생기 수위 복구위한 제어요구량 증가로 주급수제어밸브(EFCV) 개도 증가 및 주급수펌프 속도와 출구 압력 증가 → 펌프속도 및 압력증가 위한 재열증기 소모량 증가로 저압터빈으로의 재열증기유량이 감소되어 결과적으로 터빈발전기 출력이 감소되었다.

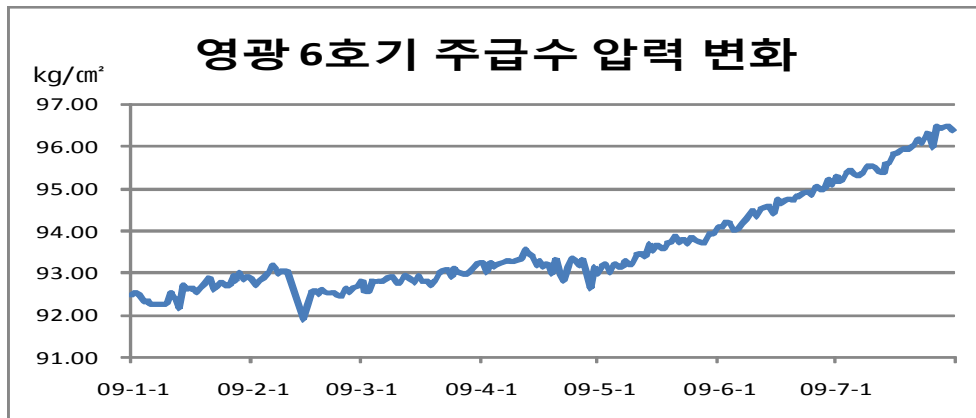


그림 2.8 영광 6호기 주급수펌프 출구압력 증가

2.2.2 주급수헤더 압력 증가에 따른 주급수펌프 소모동력 계산

주급수헤더 압력이 정상압력인 84kg/cm²일 경우 소모동력(2대)은 약 11.5MWe 이고 압력이 최대 103kg/cm²까지 증가했을 때는 약 14.8MWe 로 정상 압력 대비 주급수헤더 압력 증가시 편차가 최대 시간당 약 3.3MWe 발생되어 경제적으로도 많은 손실이 발생하였다.

$$kw = \frac{[(\text{입구중기유량} \times \text{입구중기엔탈피}) - (\text{출구중기유량} \times \text{출구중기엔탈피}) \times 4.18]}{3600} \quad (2.4)$$

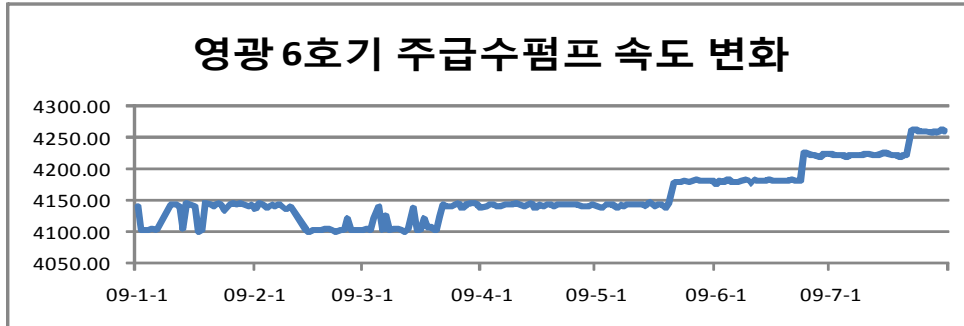


그림 2.9 영광 6호기 주급수펌프 속도 변화

3. 주급수 유량 변동폭 증가에 따른 전기출력 제한

3.1 주급수 유량 변동 폭 증가

DFCV 유량 감소에 따른 EFCV 유량 증가 및 밸브 막힘 현상에 따라 EFCV가 더 개방되었는데(초기 약 63% → 약 80%) EFCV 밸브 특성상 개도 약 80% 위치에서는 케이지 홀 크기가 커지는 지점으로 이 위치에서 주급수 유량 변동폭이 확대되었다.(유량 변동폭 약 100ton → 약 450ton)

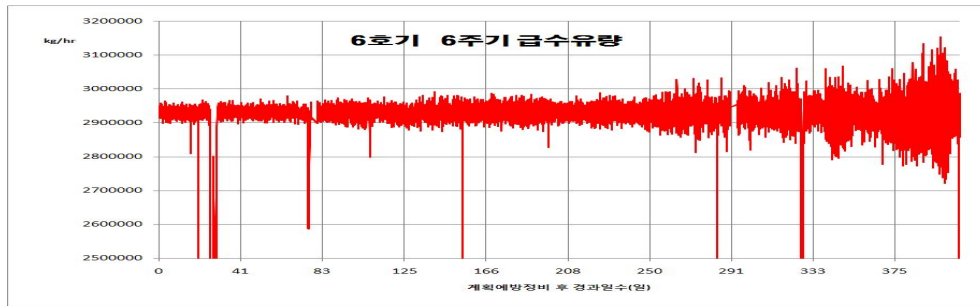


그림 2.10 영광 6호기 주급수 유량 변화

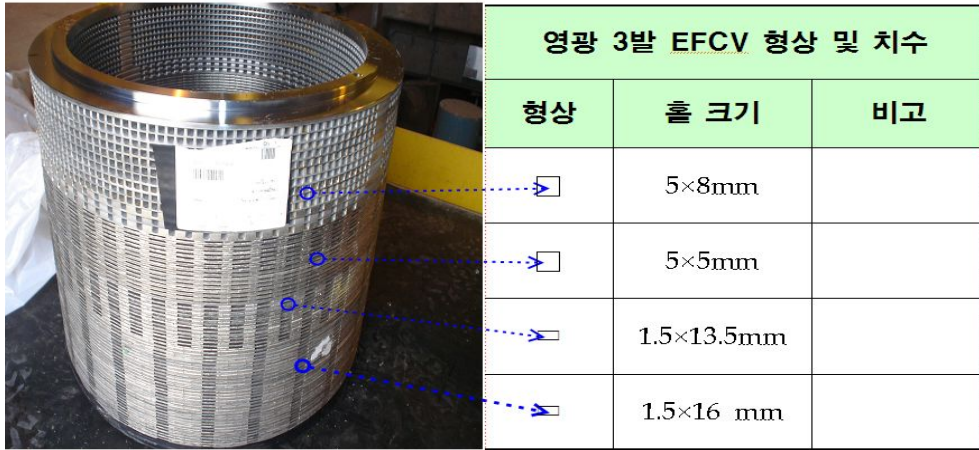


그림 2.11 영광 5,6호기 EFCV 케이지 형상 및 치수

3.2 전기출력 제한

한국표준형 원전에서는 노심 운전 제한치 감시 계통 (Core Operating Limit Supervisory System, COLSS)을 이용하여 인허가 출력(100%)을 초과하지 않도록 감시하는 발전소 기준출력으로 이차측 열출력 (BSCAL)을 사용하고 있다. 이에 1시간 평균 출력이 100%를 초과하거나, 순간 출력이 100.5%를 초과하면 경보를 발생시켜 즉각적인 출력 감소조치를 요구하고 있다. 노심 운전 제한치 감시 계통의 이차측 열출력 (BSCAL)은 증기발생기 주급수유량, 주급수온도, 증기유량 및 증기압력 등의 이차측 자료와 일차 계통의 에너지 손실과 이득을 고려하여 계산된 원자로 출력으로써 발전소 안정상태에서 가장 정확한 발전소 출력이다.

$$BSCAL = \text{주급수 유량} \times (\text{주증기 엔탈피} - \text{주급수 엔탈피}) \quad (2.5)$$

이차측 열출력 계산을 간단하게 나타낸 식(2.5)과 같이 발전소 기준 출력을 계산하는 인자중 주급수유량이 EFCV 개도 약 80% 근처에서 변동폭이 커져 이차측 열출력 변동폭이 확대되었고, 인가출력을 초과하는 것을 방지하기 위해 이차측 열출력을 인위적으로 낮게 유지함에 따라 전기출력이 감소되었다.

4. 급수가열기 배수밸브 막힘 현상

급수가열기 셀측 수위제어밸브도 금속슬러지 침적에 의한 동일한 막힘 현상이 발생되었고, 이로 인해 운전 중 주기적인 정비를 수행하였다. 급수가열기 셀측 배수는 탈기기를 통해 급수로 공급되므로 급수가열기 배수밸브로 유입된 철산화물이 1차적으로는 급수가열기 배수밸브 케이지에 침적되고 나머지는 탈기기와 주급수승압펌프 등을 통해 주급수제어밸브로 유입되는 것으로 평가되었다. 급수가열기 배수밸브의 경우, 영광 2발전소와 울진 2발전소의 밸브는 과거 슬러지 침적으로 운전중 정비를 빈번하게 수행했으나 현재에는 거의 발생하지 않고 있으며, 영광 3발전소와 울진 3발전소는 지속적으로 밸브 막힘 현상이 발생되어 운전중 정비를 하였다. 막힘 현상이 가장 심한 고압급수가열기 7A/B 배수밸브의 규격 및 정비현황은 표 2.2과 같다. 급수가열기 배수밸브도 주급수제어밸브와 같은 Disk Stack 또는 Cage Hole 형식으로 동일한 재질로 구성되어 있으며, 금속슬러지의 침적형태도 동일한 것으로 확인되었다. 다만 영광 3발전소와 다른 표준형 발전소와 비교시 급수가열기 배수밸브는 유사한 슬러지 막힘 현상이 모든 발전소에서 동일하게 발생되는데 반해, 주급수제어밸브의 슬러지침적은 영광 3발전소만 발생된다는 차이점이 있다.

표 2.2 표준형 원전 고압급수가열기 7A/B 배수밸브 규격 및 정비현황

규격	영광 2발전소	울진 2발전소	영광 3발전소	울진 3발전소
제작사	CCI	Copes-Vulcan	신우	CCI
밸브크기	8"	8"	8"	12"
Trim 형식	Disk Stack	Cage Window	Cage Hole	Disk Stack
홀 크기	5.5×5mm	25(14)×50mm	ø 7mm	8×2mm
막힘에 의한 정비이력	3주기 이후 없음	없음	2004년 이후 5호기 2건 6호기 1건	2005년 이후 5호기 5건 6호기 16건

5. 계통 배관 및 기기에 이물질 침적

계획예방정비 기간중 각 기기상태를 점검한 결과 철산화물질이 배관 및 펌프 임펠러 등에 일정한 두께로 침적되어 있음을 확인하였다. 주급수 승압펌프 임펠러에는 약 0.1 mm 두께로 침착되어 있으며, 고압 급수가열기와 저압급가열기 수실 및 배수배관과 밸브에는 도막형태 침착되었고, 주급수제어밸브 Cage에는 침상형으로, 저압터빈 회전의 및 습분분리 재열기 내부에는 일부 도막 형태로 침착된 것으로 나타났다.

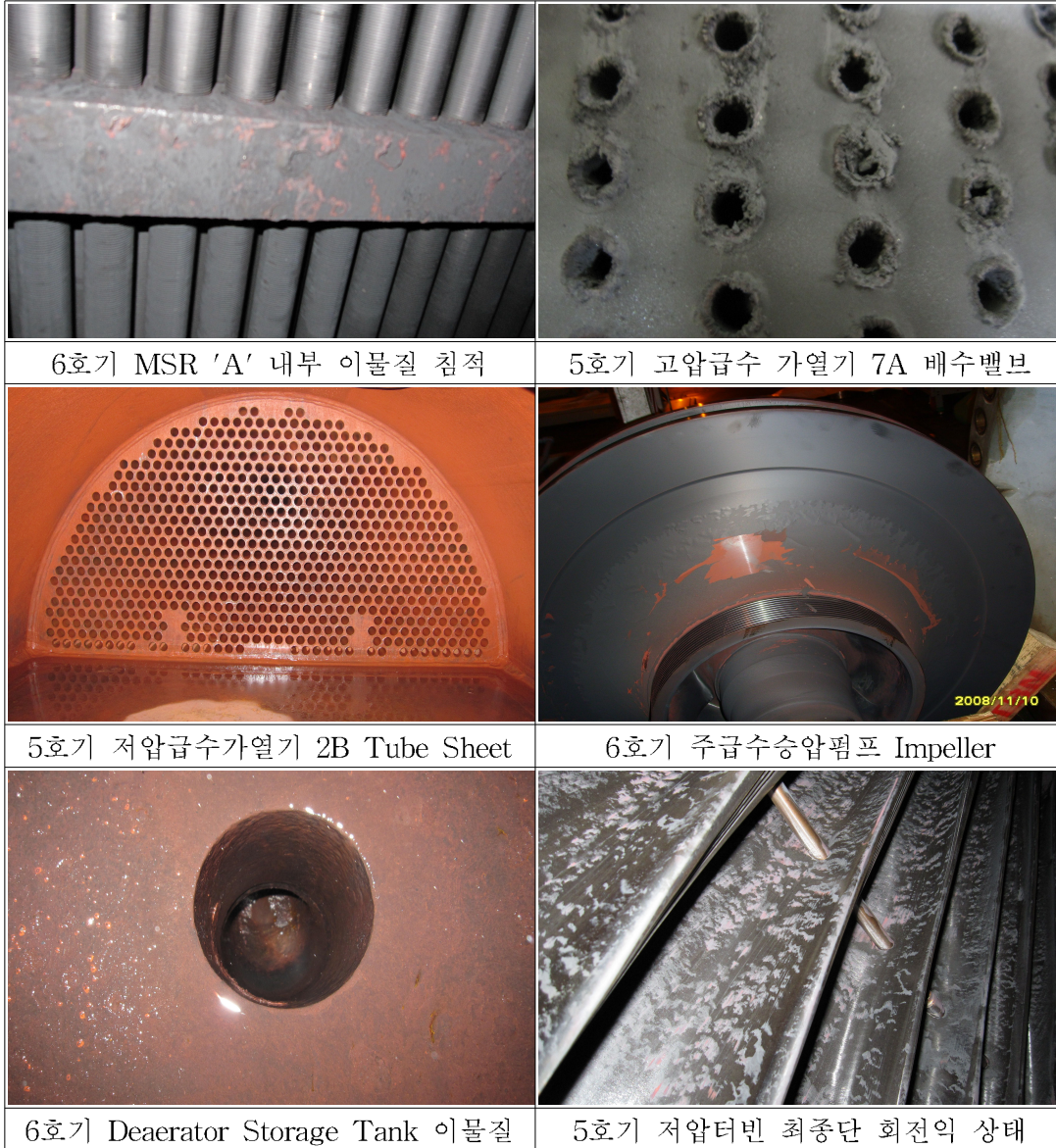


그림 2.12 영광 5,6호기 주요기기 이물질 침적 사진

제 3 절 원인 검토

1. FAC 영향 검토

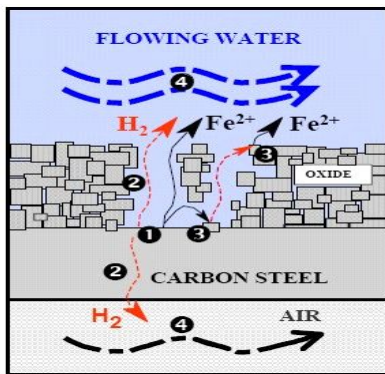
원자력발전소 정상 출력운전 중 급수계통에서 검출되는 불순물질의 대부분은 탄소강 배관에서 유동가속부식(FAC ; Flow Accelerated Corrosion)에 의해 생성되는 철 부식 생성물이다. 탄소강 배관 유동가속부식은 '04년 8월 일본 미하마 원전3호기 복수계통 파열사고와 같이 발전소 안전성을 위협할 뿐만 아니라, FAC에 의한 철 부식생성물이 증기발생기에 슬러지로 유입 및 퇴적되기 때문에 원전 2차 계통의 주된 현안사안으로 간주되고 있다.

FAC 현상은 피막형태로 존재하는 Magnetite(Fe_3O_4)가 철의 산화과정에서 발생된 수소와 반응하여 환원되면서 계통에 용해되고, 용해된 철이온이 농도차 및 유속에 의해 확산되는데 이러한 현상으로 부식진행속도가 증가하게 된다. FAC의 여러 변수 중 온도의 경우 $150^{\circ}C$ 에서 최고의 용해율을 보이고 있으며, 고유속, 난류 환경에서는 철이온의 확산을 가속시키는 작용을 함으로써 부식진행속도가 증가한다.

계통수질의 용존산소농도가 희박할수록 그리고 pH가 감소할수록 FAC가 증가하는 효과가 발생하며, 배관의 기하학적 형상과도 관련이 있어, 난류를 발생하게 되는 곡관부와 밸브 후단 등이 취약부가 될 수 있다.

1.1 FAC 생성 메커니즘

탄소강 배관 감육은 고온의 환원성 환경(Alkalinized Flowing Condition)에서 탄소강의 용해 부식이 증가되는 현상으로 운전조건(온도, 재질, 계통, 유속)에 따라 FAC 발생 정도는 다르게 나타난다. 그림 2.13은 탄소강 배관 감육과정을 나타내고 있다.



[철부식 생성단계]

1. 탄소강과 산화물 표면에서 철 이온 및 Magnetite 형태로 산화
 - $Fe + 2H_2O \Rightarrow Fe^{2+} + 2OH^- + H_2$
 - $3Fe + 4H_2O \Rightarrow Fe_3O_4 + 4H_2$
2. 다공성 산화물을 통한 철성분 및 수소성분의 확산
3. 최외곽 산화물 표면에서 Magnetite 성분의 환원 및 용해
 - $2Fe_3O_4 + N_2H_4 + 12H^+ \Leftrightarrow 6Fe^{2+} + 8H_2O + N_2$
4. 유체 속으로 용존 철 성분 및 수소의 이동, 확산

그림 2.13 탄소강 배관 감육과정

원자력발전소 2차계통에서의 FAC 철부식생성물 생성 및 거동은 그림 2.14와 같다.

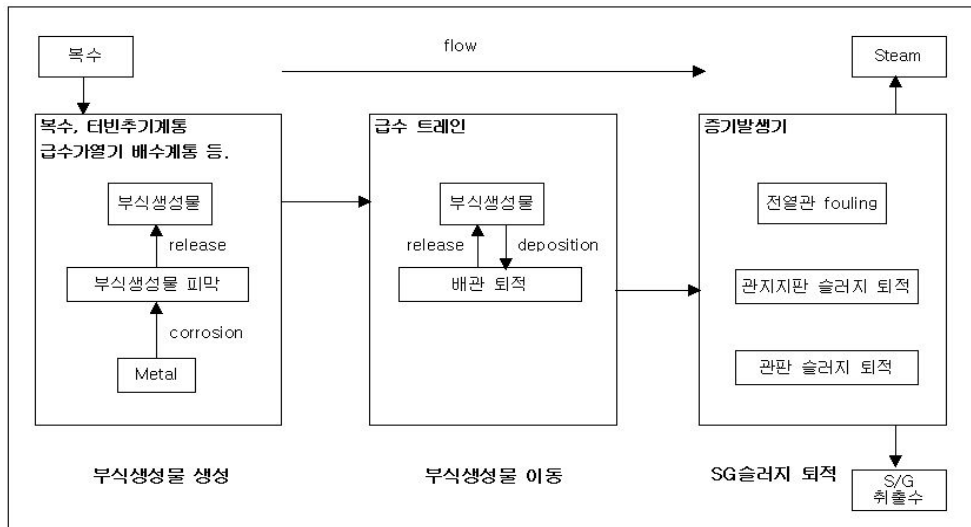


그림 2.14 FAC 철부식생성물 생성 및 거동

1.2 주요 운전조건 영향에 의한 유동가속부식

1.2.1 온도

온도는 탄소강과 저합금강의 FAC에 영향을 미치는 중요한 변수로써 FAC 현상은 주로 100 ~ 280°C 사이에서 발생된다. 온도는 산화 및 환원반응 속도에 영향을 주며, 열물리적 성질에 영향을 미친다. 그림 2.15에서와 같이 온도상승에 따라 감육율(FAC Rate)이 증가하다가 150°C에서 최대 FAC Rate를 보인 후 감소하며 유체온도 60°C 이하에서는 FAC가 거의 발생되지 않는다.

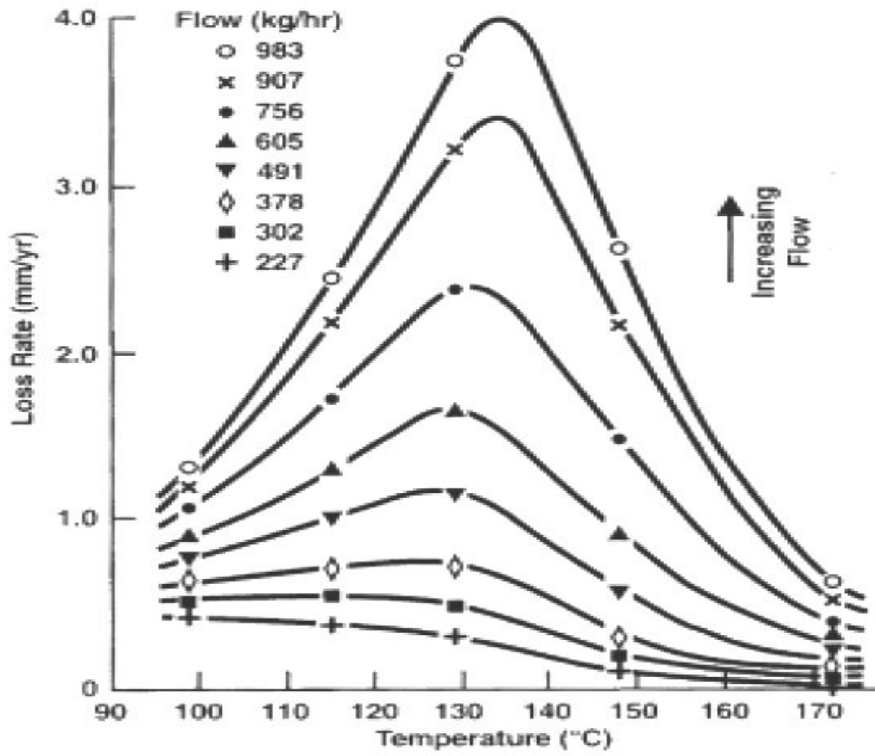


그림 2.15 FAC와 온도의 영향

1.2.2 용존산소 농도

용존산소가 많을수록 배관표면에 치밀한 보호피막을 형성하여 철부식생성물의 용해율을 낮춤으로써 FAC Rate를 감소시킬 수 있다. 용존산소는 Hematite의 생성을 촉진시키며 Hematite는 Magnetite보다 용해도가 낮기 때문에, 용존산소농도가 증가할수록 FAC 속도는 감소하게 된다.

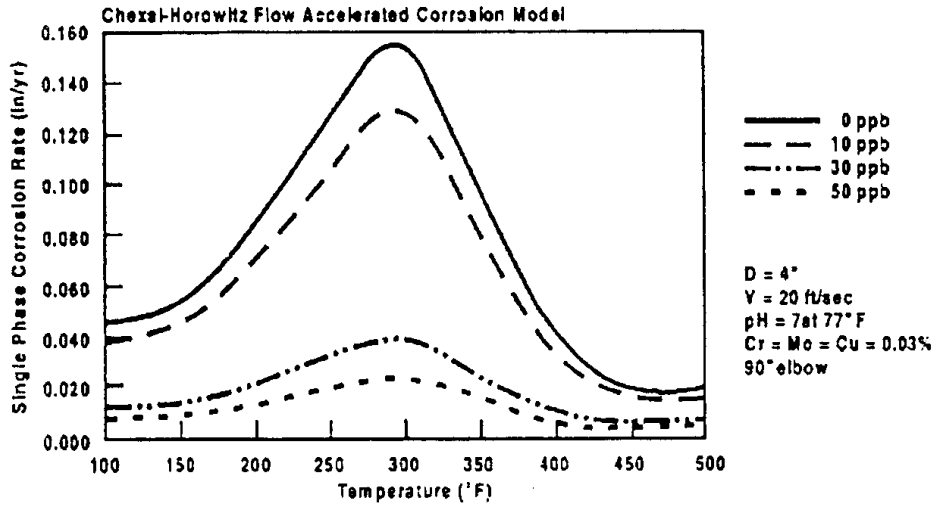


그림 2.16 FAC에서의 용존산소농도 효과

1.2.3 pH

부식율은 금속표면에서의 수용성 이온의 용해 정도에 달려 있어 금속이온의 용해도를 좌우하는 중요한 요소인 pH가 증가하게 되면 OH⁻ 이온의 농도가 증가되어 FAC Rate는 감소된다.

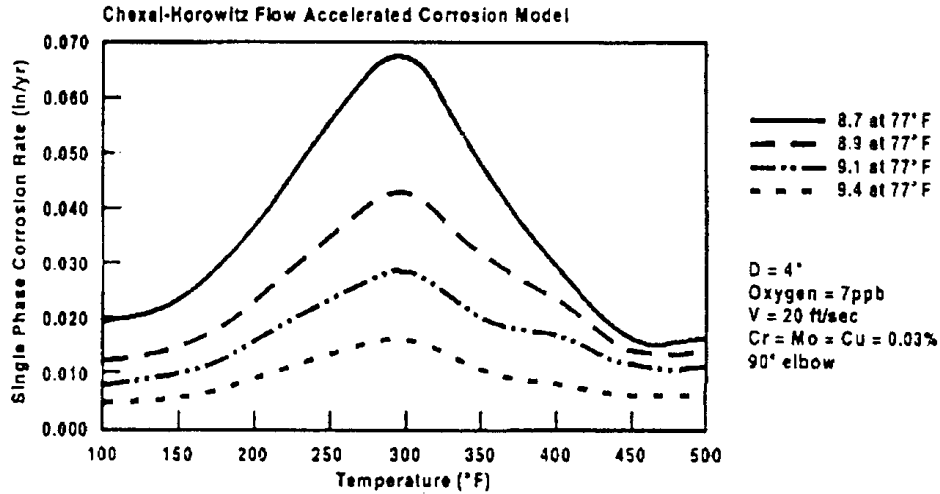


그림 2.17 pH 변화에 따른 FAC의 영향

1.3 영광 5, 6호기 FAC 변수 분석결과

계통수질의 용존산소 농도가 희박할수록 그리고 pH가 감소할수록 FAC가 증가하는 효과가 발생하며, 배관의 기하학적 형상과도 관련이 있어 난류를 발생하는 배관 곡관부와 밸브 후단 등이 취약부가 될 수 있다.

표 2.3 주급수계통의 FAC 변수 비교

항 목	FAC 주요 작용변수	주급수계통 운전조건
pH	9.3 이하	9.2 ~ 9.6
온도	100 ~ 275 °C	35 ~ 230°C
용존산소	10 ppb 이하	0.1 ~ 0.4 ppb
유동	난류 고속	밸브 등에서 고속 난류 발생

2. 슬러지 종류별 생성가능성 검토

2차계통 내 슬러지 발생에 대해 유기물 생성에 의한 영향, 철분 생성에 의한 영향 등 슬러지 생성가능성을 정상운전기간과 정비기간 등 각 운전 조건별로 검토하였다.

2.1 유기물 생성영향 검토

정상운전중 2차계통 수질관리에 사용되는 화학 수처리제(ETA), 복수탈염설비 수지 재생 화공약품, 주급수 약품주입계통, 이온교환수지 누출, 복수시료채취펌프의 다이어프램을 통한 유분유입 가능성이 있으며, 계획예방정비 기간중 2차 계통의 각종 펌프, 밸브, 탱크의 분해 정비에 사용되는 방청제, 세정제 및 침투유 등에 함유된 유기물이 발전소 기동초기 응결현상으로 Cage Hole에 침적될 가능성이 있는 것으로 평가되었으며 각 유기물 발생원은 다음과 같다.

2.1.1 화학제어제(ETA)

고온에서 분해되면 미량의 C, H 성분 유기산이온이 생성되어 양이온전도도를 상승시킬 수 있으나 대부분 복수탈염설비에서 제거된다. 영광 5,6호기 수질을 분석한 결과 계통수에서 양이온전도도 증가현상이 나타나지 않음에 따라 ETA에 의한 영향은 없는 것으로 판단된다.

2.1.2 재생 화공약품

복수탈염설비의 이온교환수지 재생약품으로 사용하는 황산, 가성소다에는 미량의 유기물이 포함되어 있으나 재생 후 세정과정에서 배출된다. 분석결과 복수탈염설비 운전 후 수질에 변동 사항이 나타나지 않았다.

2.1.3 이온교환수지 누출 경우

복수탈염설비의 누설 또는 손상이 발생할 경우 이온교환수지가 계통내로 유입될 수 있으며 이 경우 양이온전도도 및 SO_4 이온이 급격히 증가하나, 조사결과 증가현상이 없었다.

2.1.4 급수 약품주입계통

급수계통의 수처리 약품으로 사용하는 용존산소 제거제인 N_2H_4 에 유기물이 존재할 수 있으나, 동 약품사용으로 인한 수질변동 사항이 관찰되지 않았다.

2.1.5 기타 유기물 영향

계획예방기간 중 사용된 방청제 및 세정제 등에 함유된 잔류물이 열분해 되어 발전소 기동 초기 주급수계통의 저유량 상태에서 유기물과 슬러지의 응결현상이 반복되면 미량의 슬러지가 입자로 성장하여 Cage Hole에 침적될 수 있는 것으로 평가되었다.

2.2. 철산화물 생성 원인 검토

2.2.1 철산화물 침적물 생성원인

주급수제어밸브 케이지 및 주급수승압펌프 임펠러, 주급수관 Venturi 내면 등에 침적 또는 도포된 물질은 철산화물(Magnetite, Fe_3O_4)이 주성분인 것으로 분석되었다. 이 철산화물은 2차계통 증기사이클을 구성하는 탄소강재질의 배관 등에서 발생하는 FAC 현상에 의해 용출된 철이온이 석출, 침착되어 생성된다.

2.2.2 철산화물 생성원

한국표준형 원전의 증기사이클을 구성하는 배관중 고압터빈 추기증기배관, 급수가 열기 배수 유량제어밸브 후단, 주급수제어밸브 후단 등 일부 영역을 제외한 대부분의 배관에서 FAC에 의한 철산화물이 생성될 수 있다. 2차계통 배관재질의 구성은 탄소강

이 87%, 저합금강이 13%(고압터빈 추기증기 배관 8%, 제어밸브 후단 5%)로 구성되어 있다.

2.2.3 철산화물 이동경로

저압터빈 추기 및 배수계통에서 생성된 철산화물은 복수기를 거쳐 복수계통에서 생성된 철산화물과 합해져서 급수 탈기기로 유입된다. 고압터빈 추기 및 배수계통과 습분분리재열기(MSR) 배수계통에서 생성된 철산화물은 탈기기로 바로 유입된다. 탈기기로 유입된 철산화물은 급수계통에서 생성된 철산화물과 합해져서 증기발생기로 유입되어 증기발생기 관판 상단에 침적되며, 증기발생기 취출수계통을 통해 제거되거나 계획예방정비 기간 중 세정에 의해 제거된다. 이 과정에서 영광 5,6호기의 경우는 증기발생기로 유입되기 전 DFCV와 EFCV Cage에 일부 철산화물이 침적된 것으로 판단된다.

2.2.4 각 발전소별 철분농도 비교 결과

2차계통에서의 철분 유입에 따른 수질 조건을 확인하기 위해 정상운전상태에서의 영광 5,6호기와 동일 노형 발전소의 주급수계통 및 증기발생기 철분농도를 최근 3주기 평균으로 비교 검토한 결과 영광 5,6호기 증기발생기 및 주급수계통 철분 농도가 다른 발전소 평균보다 낮게 유지되었다. 이는 계통내에서 유동중인 철분이 증기발생기나 주급수계통 수중에 용해된 상태로 있는 것이 아니라 계통 기기나 구조물 및 밸브 Cage 등에 흡착되어 증기발생기와 주급수계통의 철분농도가 낮게 나타난 것으로 판단된다.

2.2.4.1 증기발생기 철분농도 비교

영광 5,6호기 평균농도는 0.8 ppb로 다른 발전소 평균인 1.2 ppb 보다 낮은 것으로 나타났다.

표 2.4 정상운전중 증기발생기 철분농도 비교

(단위 : ppb)

구분	영광5	영광6	영광3	영광4	울진3	울진4	울진5	울진6	비교
2006	1.45	1.81	0.64	0.62	2.70	2.41	0.65	0.71	
2007	0.81	0.28	0.62	0.70	2.19	2.17	0.91	0.99	
2008	0.28	0.25	0.63	0.66	2.27	2.15	1.58	1.64	
평균	0.85	0.78	0.63	0.66	2.38	2.24	1.04	1.11	1.21

2.2.4.2 주급수계통 철분 농도 비교

모든 발전소의 철분 농도가 EPRI 기준농도($\leq 5\text{ppb}$)를 충분히 만족하고 있으며, 영광 5,6호기 평균농도는 0.83/0.80 ppb로 다른 표준형 발전소 평균농도 1.07 ppb 보다 낮은 것으로 나타났다.

표 2.5 정상운전중 주급수계통 철분농도 비교

(단위 : ppb)

구분	영광5	영광6	영광3	영광4	울진3	울진4	울진5	울진6	비고
2006	1.15	1.77	1.05	1.07	2.69	2.68	0.17	0.14	
2007	0.84	0.33	1.11	0.99	2.25	2.27	0.16	0.18	
2008	0.49	0.31	0.62	0.66	2.10	2.31	0.20	0.18	
평균	0.83	0.80	0.93	0.91	2.34	2.42	0.18	0.17	1.07

2.3 슬러지 특성에 따른 침적 경로 검토

2.3.1 발전소 기동기간 중 슬러지 용해도 저하로 침적

발전소 정지시점에서는 열교환기 휴관처리를 위하여 200°F에서 신속히 배수 후 작업용 압축공기를 이용한 건식휴관처리를 하고 있다. 발전소 기동기간에는 증기발생기에 유입되는 슬러지를 최소화 하기위해 발전소 가열운전 약 2일 전부터 복수탈염설비를 이용한 수질정화운전을 수행하여 2차계통수의 수질을 최적화하고 있으나, 습분분리 재열기를 포함한 증기 배관과 급수가열기 배수계통에서 유입되는 슬러지는 제거할 수단이 없다. EPRI 보고서에 따르면 이러한 구조적인 문제로 한 주기 동안의 증기발생기 슬러지 침적량 중 약 절반 정도는 발전소 기동기간 중 생성되는 것으로 보고됐다.

발전소 기동기간 중 용존산소가 높은 산화 분위기가 조성된 상태에서 산화피막 형태로 존재하는 Fe_2O_3 형태의 산화철은 기동기간 중 저유속과 용해도 저하로 저항이 많은 밸브 Cage 등에서 침적이 가속된다. 즉, 2가 철인 환원철(Magnetite)은 용해성이 높으나 3가인 산화철은 용해도가 낮아 침적되어 붉은 철 스케일을 생성한다. 용해도 저하 원인은 발전소 기동시 낮은 온도 조건에서 과잉 용존산소가 존재할 경우 전기화학 전위가 상승하여 용해도가 낮아지면서 밸브 Cage에 침착이 증가되는 것으로 평가되었다.

2.3.2 유기물 유입 시 응결현상으로 침적

기기 분해 정비 중 사용한 오일이나 세정제 등에 함유된 유기물이 발전소 기동초기 응결현상으로 Cage Hole에 침적되고 유기물 콜로이드가 계통수 매질에서 전하를 형성하여 슬러지와 밸브 Cage 표면에 흡착되어 전기적으로 음극 또는 양극 대전되는 제타 포텐셜(Zeta-Potential)을 형성하여 상호 흡착되어 응결될 수 있다.

2.3.3 증기발생기 Lancing 슬러지 제거량 비교 결과

계획예방정비 기간 중 증기발생기 슬러지 제거량은 영광 5,6호기가 약 5.0 kg로 다른 표준형 평균 12.2 kg에 비해 적은 양이다. 이는 밸브 Cage 막힘에 따라 증기발생기에 침적되어야 할 슬러지가 밸브 Cage에 침적되는 현상으로 평가되었다. 표 2.6은 각 발전소별 최근 3주기 증기발생기 슬러지 제거량을 비교한 결과이다.

표 2.6 증기발생기 Lancing 슬러지 제거량

(단위 : kg)

구분	영광5	영광6	영광3	영광4	울진3	울진4	울진5	울진6	비고
2005	4.31	3.44	9.4	5.9	13.4	12.9	18.4	7.1	
2007	4.85	5.33	16.1	13.9	8.51	5.81	6.8	10.1	
2008	4.88	6.21	98.7 ¹⁾	26.9	12.4	12.8	5.0	10.0	
평균	4.70	5.0	41.4	15.5	11.4	11.2	10.0	9.1	

1) 영광 3호기는 S/G 관관상부 화학세정('08.10)으로 제거량이 증가됨

2.4 재질특성에 의한 영향

영광 3발전소 및 표준형 원전의 DFCV와 EFCV의 형태, 규격, 재질 등 밸브 형식을 비교 검토 하였다. 영광 3발전소와 울진 3발전소의 DFCV 재질인 400 CRES (Corrosion Resistant Engineered Solutions) SS 합금강의 자성유무와 내식, 내산화성 등 일반적 특성과 계획예방정비 기간중 EFCV와 DFCV의 정비방법을 비교 하였다.

2.4.1 밸브 특성

표 2.7 표준형 원진 밸브 특성 비교

발진소 기기 제원		영광 2발	울진 2발	영광 3발	울진 3발
		EFCV	케이지 재질	400 CRES SS	400 CRES SS
케이지 홀크기(최소)	4.9×1.8mm		4.5×1.5mm	13.5×1.5mm	13.5×1.5mm
DFCV	케이지 재질	CB7CU, 17-4PH SST	SA564 S17400 H1075	400 CRES SS	400 CRES SS
	케이지 홀크기	Ø 6.5 mm	Ø 6.5 mm	Ø 3.0 mm	Ø 3.0 mm

영광 3발진소와 울진 3발진소에 설치된 DFCV와 EFCV의 규격, 재질, 제조사(CCI co.)가 동일한 규격이다. 밸브 Cage 재질인 400 CRES SS는 Martensite계 합금강으로 일반적인 스테인레스강 304SS, 316 SS과는 특성이 다르며 일반 탄소강과 비슷한 특성으로 자성이 있고 녹이 발생할 수 있다. SS합금강 구분과 일반적 특성은 다음과 같다.

- 1) 400 CRES SS는 410 SS와 동일한 종류로 미국에서는 ASTM A36 으로 분류되며 자성이 있어 탄소강에 가까우며 산화 녹이 발생할 수 있다.
- 2) 일반적으로 사용되는 304계열 스테인레스강은 자성이 없으며 고온에서 Cr 탄화물을 형성하며 증기발생기 슬러지에서 검출된다.

표 2.8 SS 합금강 구분과 일반적 특성

조직 분류	대표 강종	기본 조성	일반적 주요특성				비 고
			자성	내식, 내산화	강도, 내마모성	충격	
Martensite	410 SS	13Cr-0.1C	유	보통	우수	저하	영광 3발, 울진 3발
Ferrite	430 SS	18Cr-0.1C	유	우수	보통	저하	
Austenite	304L SS, 316L SS	18Cr-8Ni	무	양호	보통	양호	일반적 합금강

2.4.2 특성별 영향 검토

2.4.2.1 크기에 따른 검토

DFCV Cage는 Hole Size가 6.5mm인 발전소에서는 막힘 현상이 나타나지 않고 있으나, 크기가 3.0mm인 영광 3발전소 기동초기 저유량 상태에서 계통수에 노출된 밸브 하부부분에서 막힘 현상이 나타나고 있다. EFCV Cage도 막힘이 진행되나 원자로 출력 20% 이상에서 운전되므로 슬러지 유입영향이 적게 나타나는 것으로 판단된다.

2.4.2.2 조직특성에 따른 검토

400계열 SS는 자성체이나 스스로 Fe을 흡착하지는 못하고 주변에 높은 자기장이 있어 자화될 경우 흡착이 가능 하므로 Cage 막힘 원인이 될 수 있다. 발전소 기동시 철분 형태인 산화철(Hematite)은 자성이 없어 자화력으로는 흡착이 안 되나 환원철인 Magnetite는 자성체로써 흡착이 가능한 것으로 평가되었다.

2.5 정비방법 비교

세척은 솔벤트 등 휘발성약품으로 세척 후 재사용하는 방식이고, 화학세정은 약산성인 Metal Brite(인산염 40~70%함유)세정제와 물을 1 : 1로 희석하여 가열상태(약80℃)로 약 3시간 유지 후 공기와 순수로 20~30분간 세정제 성분이 완전히 없어지도록 세척 후 조립하는 방식이다.

표 2.9 밸브 정비방법 비교

발전소 \ 형식	DFCV	EFCV
영광 2발전소	화학 세정	화학세정
영광 3발전소	세척 후 사용	신품 사용
울진 2발전소	세척 후 사용	세척 후 사용
울진 3발전소	화학 세정	화학세정

2.6 Cage 슬러지 및 유기물 함유 검토

DFCV, EFCV Cage에서 채취한 부착 슬러지 조성분석으로 구성성분, 생성경로, 특성조사 및 계통 슬러지와 비교 검토하고 영광 5,6호기 정상운전중 계통에서 유기물 함유가능성을 점검하였다.

2.6.1 슬러지 분석

영광 5호기 주급수 제어밸브 Cage Hole에서 채취한 슬러지, 주급수계통 Orifice 피막, 주급수 송압펌프 임펠러 스케일 슬러지를 전력연구원에서 분석한 결과는 다음과 같다.

- 1) 주급수 제어밸브 Cage 부착 슬러지 : 산화철(99.5%), 기타 0.5%(Fe, Al, Cr, Ti)
- 2) 주급수 송압펌프 임펠러 : 얇게 도포된 미세 Scale은 강한 자성을 띠고 제어밸브 Cage에 흡착성분과 동종으로 추정
- 3) 급수계통의 Orifice 미세 피막 : 대부분 철분(Magnetite)으로 분석됨

2.6.1.1 유분 유입원 점검결과

정상운전중 계통으로 유분유입 가능성은 매우 희박하다. 유입 가능성은 복수계통 시료채취펌프 다이어프램이 손상되거나 약품주입 계통을 통한 유입을 고려할 수 있으나 평가결과 유입가능성이 없었다.

2.6.1.2 유입원 추정

계획예방정비 기간 중 기기 세정 후 잔존물이 유입될 수 있으며 기기에 부착되어 있던 윤활유 또는 그리스가 운전 중에 습분분리재열기 또는 급수가열기 배수계통으로 유입되어 서서히 유화되면서 산화철과 결합하여 저항이 큰 곳에 침적될 수 있는 것으로 평가되었다.

2.6.6.2 유기물 함유 가능성 확인

계통수 중의 유기물을 확인 및 평가하기 위해 주급수 시료 600ℓ를 농축시료 포집기 미세필터(0.45 μ m)로 96시간을 통과 시켜 농축 시킨 후 분석한 결과는 표 2.10과 같다. 여과 슬러지에 함유된 포집유기물량이 매우 소량으로 유기물 또는 오일성분인지 여부에 대한 정확한 진단이 어려워 분석 신뢰도 확보를 위하여 분석기관에서 재시료 채취를 요구하였다.

분석기관인 원자력 연구원 평가의견에 따르면 분자량이 크고 점성이 큰 불용성 유기물(유분)은 비 특이성 접착력을 가지고 있어서 미세한 산화철입자를 흡착하고 금속표면(펌프임펠러, 유량조절밸브 등)에 부착되어 성장하는 것으로 진단하였다.

표 2.10 유기물 성분 분석결과

(단위 : Wt% as 유기물)

구 분	주급수계통	복수계통
영광 5호기	0.083	-
영광 6호기	0.024	0.013

3. 해외 원전경험 및 유사사례 검토

3.1 San Onofre Nuclear Generating Station (SONGS) 사례

SONGS 2,3호기는 1982년 상업운전을 시작한 CE형 1070 MWe 발전소로 각 발전소의 11주기 운전을 마치고 급수계통의 배관과 급수가열기 내부를 조사한 결과, 2호기 급수배관에는 80~100 mils, 3호기 급수배관에는 30~40 mils 두께의 부식생성물이 침적되어 있었고, 급수가열기에는 2, 3호기 모두 1~4 mils 두께로 부식생성물이 침적되어 있는 것이 확인되었다. 급수배관을 9주기 운전 후 교체하였기 때문에 배관 및 급수가열기에 침적된 부식생성물은 자체 발생 되었다기보다는 다른 곳으로부터 이동되면서 침적된 것으로 추정되었으나 부식생성물이 결집, 침적되는 정확한 메커니즘은 아직까지 규명되지 않았다. SONGS 2,3호기는 슬러지침적물을 제거하기 위해 11차 계획예방정비시 급수가열기를 약 900 psig 고압수로 세척을 수행하였으며, 접근 가능한 급수계통 배관도 동일한 작업을 수행하고 12차 계획예방정비시에는 14,000psig 고압수로 급수가열기에 대한 세정(Hydrolazing)작업을 수행하였다. 고압수를 이용한 세정결과 SONGS 2호기의 경우, 12차 계획예방정비시 급수배관에서 1,000 lbs, 급수가열기에서 500 lbs 침적물을 제거했으며, 13차 계획예방정비시에는 급수가열기에서 2,600 lbs의 침적물을 제거하여 총 4,100 lbs의 침적물을 제거하였으며, SONGS 3호기의 경우 총 3,250 lbs의 침적물을 제거하였다.

SONGS 발전소의 급수계통 철분농도 분석결과를 보면 급수가열기 및 배관의 침적물을 제거한 후에 철분농도가 일시적으로 증가하는 현상이 발생하였고 이전의 안정된 상태의 철분농도에 비하여 크게 낮아지지 않은 것을 볼 때 부식생성물의 이동에 따른 침적정도와 수질분석상의 철분농도가 밀접하게 비례하지는 않은 것으로 평가되었다.

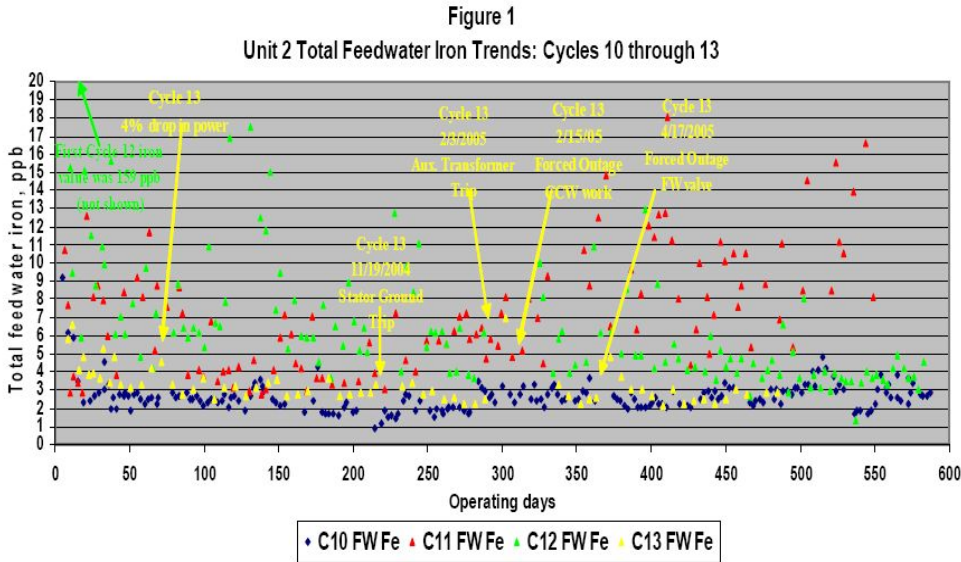


그림 2.18 SONGS 2호기 급수계통 철분 농도 분석결과

SONGS 발전소는 급수가열기 튜브재질이 구리합금이므로 급수계통 수질관리시 pH를 상대적으로 낮게 유지함으로써 FAC에 의한 부식생성물이 많이 발생되었다.

2차계통 설비에 구리합금재질을 사용하게 되면 암모니아와의 화학반응에 의한 부식생성이 진행되어 pH를 높게 유지할 수 없는 운전환경이므로 구리합금재질의 설비가 없는 영광 3발전소와 직접 비교할 수는 없으나, 급수계통의 pH가 부식생성물의 침적에 중요한 인자로 작용한다는 점을 확인할 수 있었다.

3.2 Callaway 발전소와 TVA Watts Bar 발전소

Callaway 발전소(WH형 1,125 MWe, 1984년 상업운전)와 TVA Watts Bar 발전소(WH형 1,125 MWe, 1996년 상업운전)에서도 유사한 밸브 막힘 현상이 발생했었다. Callaway 발전소의 경우, 급수계통에서 배수밸브 케이싱 막힘 현상 및 Fouling 현상이 지속되어 왔으며, 복수기 세관을 구리합금에서 니켈합금으로 교체하고 pH를 이전보다 높게 유지함으로써 밸브 케이싱에 부식생성물이 침적되는 문제를 해결하였다.

Watts Bar 발전소도 급수가열기 배수계통에서 동일한 밸브 케이싱 막힘현상이 있었으나 습분분리재열기 튜브를 구리합금에서 구리가 함유되지 않은 재질로 변경, 급수계통의 pH를 높인 결과 밸브 케이싱의 철산화물 막힘 현상이 해소되었다.

3.3 유사사례

3.3.1 2차계통 용존산소 최적화

미국 Comanche Peak, Seabrook, Salem, Sequoyah, Surry 원전 등은 2차계통 용존산소가 증가하였을 때 급수 철성분 농도저감을 경험하였다. 독일 Philipsburg 원전 등은 용존산소 주입으로 습분분리재열기(MSR)의 FAC 현상을 억제하였다. EDF와 EPRI가 공동으로 FAC에 대한 산화환원 환경시험결과 용존산소 1ppb 이상 조건에서 FAC 성장속도가 급속히 저감됨을 확인하였다. 용존산소 최적화방법을 이용하여 철부식생성물 농도를 저감하기 위해서는 증기발생기 2차측의 환원성환경 확보가 전제되어야한다.

3.3.2 선택적 Amine 주입을 통한 pH 제어

미국 SONGS 원전은 급수가열기 추기배관에 ETA를 직접 주입하여 일부 철 농도를 저감시키는 효과를 얻었으나 현재는 적용하고 있지 않다. Palo Verde 원전은 암모니아를 급수가열기 2차측에 직접 주입하였으며 이를 통해 급수가열기 배수계통의 철성분 농도를 저감시킨 경험이 있는 것으로 조사되었다.

3.3 비교 결과

위와 같이 해외원전 경험사례에서 확인한 결과 계통 구성 재질이 달라서 영광 3발전소와 직접 비교하기는 어려우나 밸브 케이지의 설계특성과는 무관하게 급수계통의 용존산소 농도나 pH 조절 등 수질관리방법을 변경함으로써 문제를 해결한 것으로, 철산화물에 의한 밸브 케이지 침적현상의 원인이 계통수질의 개선과 관련되고 있음을 의미한다. 잔류 방청제, 세정제에 의한 유기물이 발전소 기동 초기 Cage 슬러지 퇴적을 촉진 시킬 수 있는 것으로 보고되고 있으나, 해외 원전의 운전경험 또는 EPRI 보고서 등을 통해 현재까지 확인된 사례는 없었다.

4. 검토 결과

종합적인 검토결과 Cage 슬러지 막힘 현상은 대부분 발전소 기동기간 중에 형성되며 부착원인은 FAC에 의한 철분 생성, Cage 재질적인 특성, 정비방법, 정비작업 중 잔류유기물 함유, 고용존산소에 의한 슬러지의 용해도 저하 등 복합적 요인으로 침적이 진행되는 것으로 판단되며 각 운전조건별로는 다음과 같다.

4.1 정상운전기간

정상운전 중 계통 수질에서 유기물, 오일 성분은 검출이 되지 않았으며, 계통 철분농도는 낮게 양호한 수준으로 관리되고 있어 수질에 의한 영향은 없는 것으로 판단된다. 또한 운전 중 계통으로 오일 등 유기물이 유입될 경우 온라인 종합감시설비에서 즉각 감지가 가능하도록 되어있다.

4.2 Cage 재질의 자성에 의한 자화 현상

밸브 Cage 재질인 400계열 SS 강은 자성체로서 주변 자화환경에 따라 철분을 흡착할 수 있다. 밸브 Cage 스스로 철분을 흡착하지는 못하나 주변에 높은 자기장이 있어 자화될 경우 흡착할 수 있어, 막힘 원인으로 작용할 가능성이 있다.

4.3 계획예방정비 기간

계획예방정비 기간 중 2차 계통의 각종 펌프, 밸브 등 기기의 분해 정비과정에서 방청, 세정, 침투유 등의 유기물이 계통수로 유입 후 분해되어 슬러지와 응결하여 Cage Hole에 침적될 가능성이 있는 것으로 평가되었다.

4.4 발전소 기동기간

발전소 기동기간중 용존산소가 높은 경우 산화분위기 조성으로 슬러지 용해도를 저하시켜 침적이 증가될 수 있다. 산화피막 형태로 존재하는 Fe_2O_3 (Hematite)형태의 산화철이 기동시 저유량의 급수와 용해도 저하로 저항이 많은 Cage 등에 침적되어 붉은 철 스케일을 형성할 수 있다.

제 3장 2차계통 슬러지 부착 저감방안 평가 및 결과

1. 복수탈염설비 추가 운전

복수 및 급수계통 수질개선 목적으로 복수탈염설비(Condensate Polishing Vessel) 체적에 해당하는 입자성 물질을 제거하기 위해 복수탈염설비를 2계열에서 4계열까지 순차적으로 추가 투입 운전하고 포화시 정지하여 계통수 슬러지 농축상태를 점검하였다. 수행결과 DFCV 및 EFCV의 유량 및 개도 개선효과는 확인할 수 없었으며, 계통수 슬러지 농축상태를 검토한 결과 복수탈염설비는 2계열 운전시가 최적상태로 판단되었다. 또한 NH_4OH 와 N_2H_4 농도 최적화로 계통 내부 이물질 분리현상이 발생할 경우 계통수 정화에 도움이 될 것으로 평가되었다.

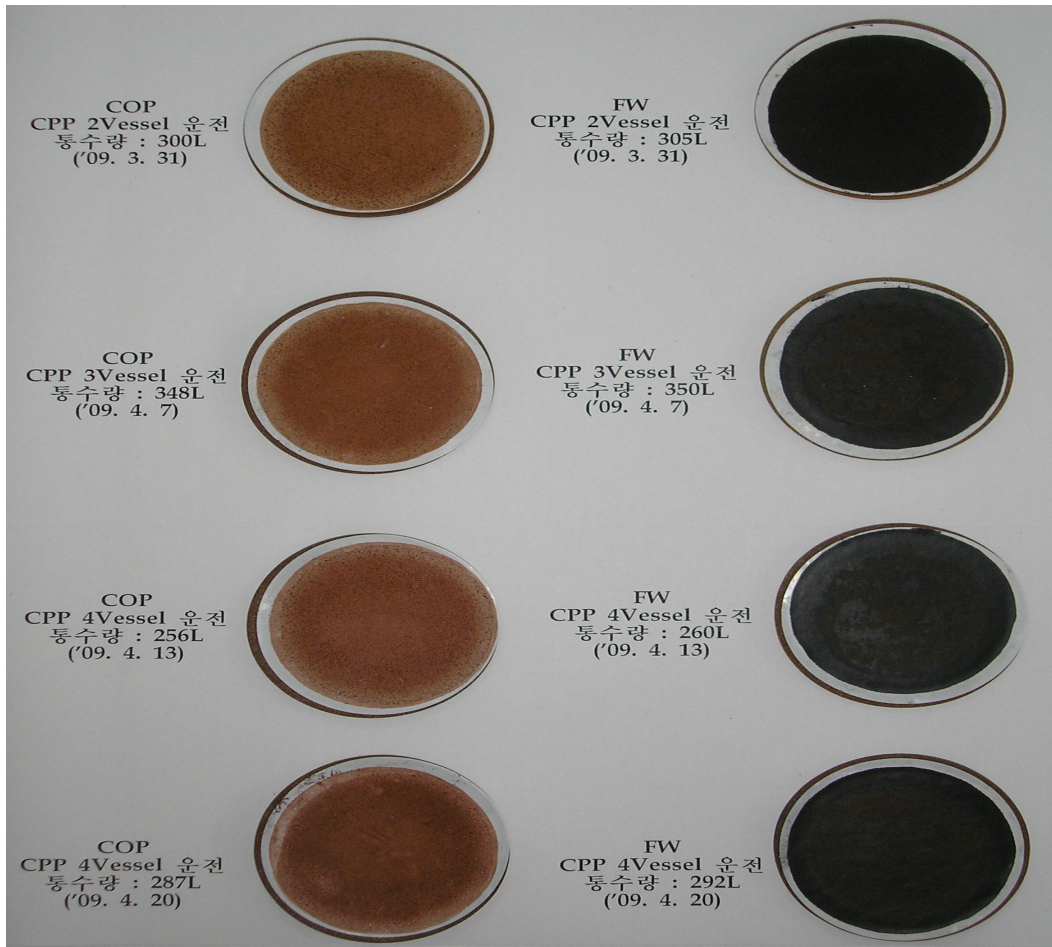


그림 3.1 영광 6호기 복수 및 급수계통 슬러지 농축 상태 비교

2. 급수계통 용존산소 증가 방안

2차계통의 FAC를 저감시키기 위해 급수계통의 용존산소 농도가 0.2ppb 이하인 상태에서 EPRI 회원사에서 시행 후 제시한 용존산소 농도 수준인 1~2ppb로 높이기로 결정하였다. 영광 6호기를 대상으로 급수계통의 용존산소농도를 높이기 위해 복수계통에 공기 주입량을 단계적으로 조절하여 용존산소 농도 변화를 확인한 결과 하이드라진 농도를 최소값으로 유지한 상태(약 20ppb)에서 용존산소 농도를 조절할 경우 영향이 미미하였다. 이는 복수펌프 입구로 주입되어 FAC가 심한 습분분리재열기 후단까지 산소가 침투하지 못한 것으로 판단된다. 해외 사례의 경우 습분분리재열기 후단으로 별도의 설비를 통해 주입하고 있는 것으로 조사되었다.

3. pH 증가 방안

3.1 하이드라진 농도 조절

각 발전소별 수질조건을 비교한 결과 영광 3발전소의 복수계통 pH와 하이드라진 농도가 낮게 유지되고 복수기 내부 산화물 제거량이 많은 것으로 나타났다. 이 영향으로 부식생성물이 증가된 것으로 평가되었다.

표 3.1 발전소별 하이드라진 농도 및 pH 비교

발전소	pH		용존산소(ppb)		하이드라진 농도(ppb)	복수기 내부 산화물 제거량	pH 조절제
	복수	급수	복수	급수			
영광 1	9.2	9.4	1	0.1	60~80	20kg	ETA
영광 2	9.4	9.5	1	0.7	120	20kg	ETA
영광 3	9.15	9.45	1	0.2	30~35	80kg	ETA
울진 1	9.5	9.44	3	0.7	60	20kg	암모니아
울진 2	9.33	9.44	3	1	110	5kg	ETA
울진 3	9.3	9.4	2	0.1	50~60	30kg	ETA
고리 1	9.3	9.5	1~2	0.5~0.7	80~100	5kg 미만	ETA
고리 2	9.2	9.4	1~2	0.1	30	5kg 미만	ETA
월성 1	9.6	9.6	2	1	100	10kg	물포린
월성 2	9.8	9.8	5	0	80~100	5~10kg	물포린

하이드라진 농도 30ppb 상태에서 50ppb 단위로 증가시켜 150ppb까지 증가시킨 후 변화상태를 관찰하였다. 주급수계통의 ETA 농도는 2,000ppb 수준을 유지한 상태에서 하이드라진 농도 증가에 따른 복수 및 급수계통 철분농도 변화는 표 3.2와 같다.

표 3.2 하이드라진 농도 증가에 따른 계통 철분 농도 변화

구 분		N ₂ H ₄		
		50 ppb	100ppb	150ppb
pH	복수	9.17	9.27	9.33
	급수	9.45	9.50	9.52
Fe	급수	3.50	3.30	2.80

3.2 암모니아 및 ETA 농도 조절

복수계통 및 급수계통은 암모니아와 ETA가 혼합되어 운전중이며 복수계통 pH가 약 9.15로 급수계통 pH 약 9.6보다 상대적으로 낮아 산화에 취약한 것으로 판단하였다. 하이드라진 농도를 50ppb 수준으로 유지한 상태에서 암모니아와 ETA 농도 조절을 통한 pH 조절 결과는 표 3.3과 같다.

표 3.3 pH 농도 변화에 따른 계통 내 철분농도 변화

암모니아/ETA(ppb)		400/1,900	600/2,000	800/2,200
pH	복수	9.41	9.44	9.46
	급수	9.52	9.55	9.57
Fe	급수	2.71	2.50	2.96
	습분분리재열기	3.23	2.75	2.87

급수에서 ETA 농도는 2,000ppb, 암모니아 농도는 600ppb, pH는 9.55 수준에서 철분 농도가 2.5ppb 정도로 가장 낮게 나타났다. 하이드라진 농도를 약 100ppb 정도 유지하는 것이 미량의 용존산소(1~1.5ppb) 잔류로 FAC 저감에 효과적인 것으로 판단된다. 그 결과 그림 3.2와 같이 DFCV 유량이 밸브 막힘 현상 이전상태(120ton/hr → 260ton/hr)로 회복되었고, EFCV의 개도 역시 감소(약 80% → 약 65%)되면서 주급수 유량 변동폭이 감소(약 450ton → 100ton)되고 주급수펌프 속도가 이전상태(4,255 → 4,100rpm)로 감소되어 전기출력이 원상태로 회복되었다. 이는 2차 계통수의 수화학적 환경개선으로 부식생성물의 감소와 침적된 이물질의 탈락에 의한 현상으로 판단된다.

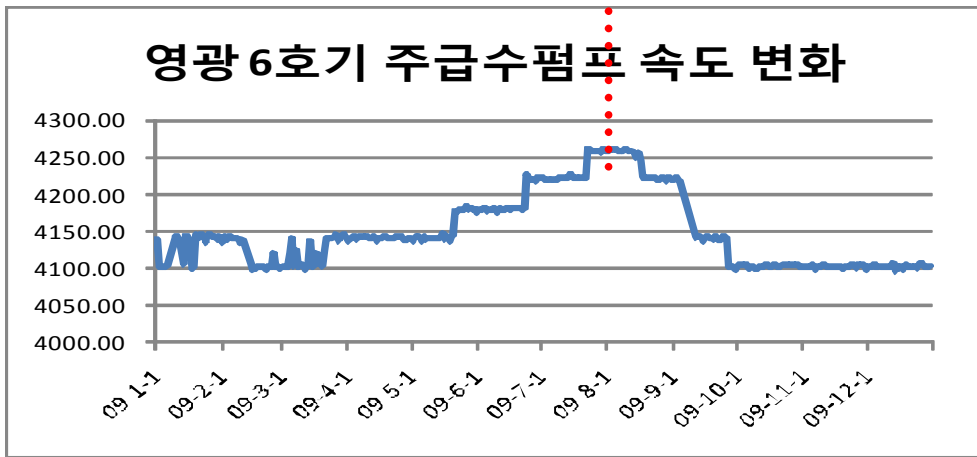
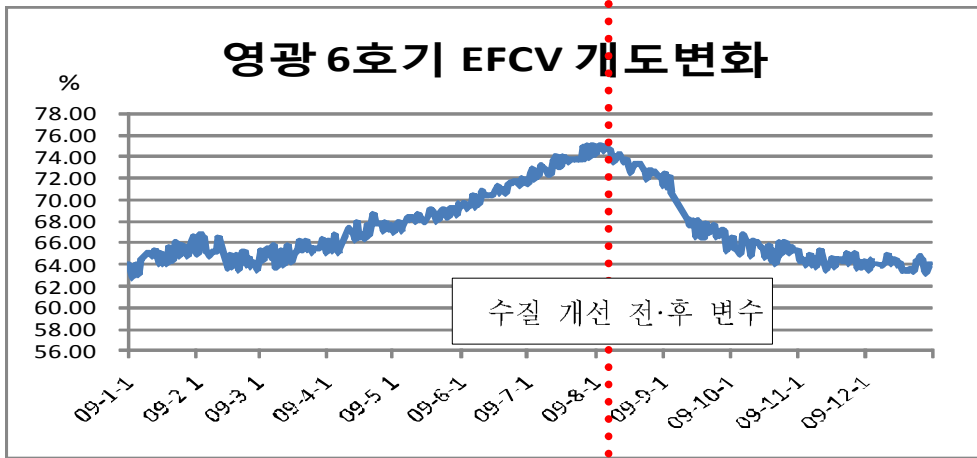
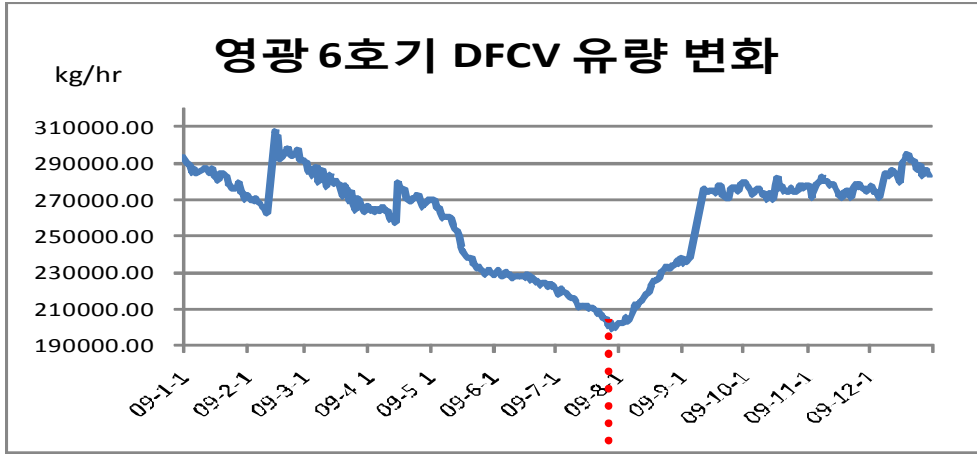


그림 3.2 수질조건 개선 전·후 변수 비교

또한 복수계통에서는 pH가 증가됨에 따라 슬러지 누적량이 감소되고 색이 옅어졌으며 습분분리재열기(MSR)의 슬러지 농축상태 옅은 갈색에서 진한 갈색으로 변화(Hematite → Magnetite)되었다.

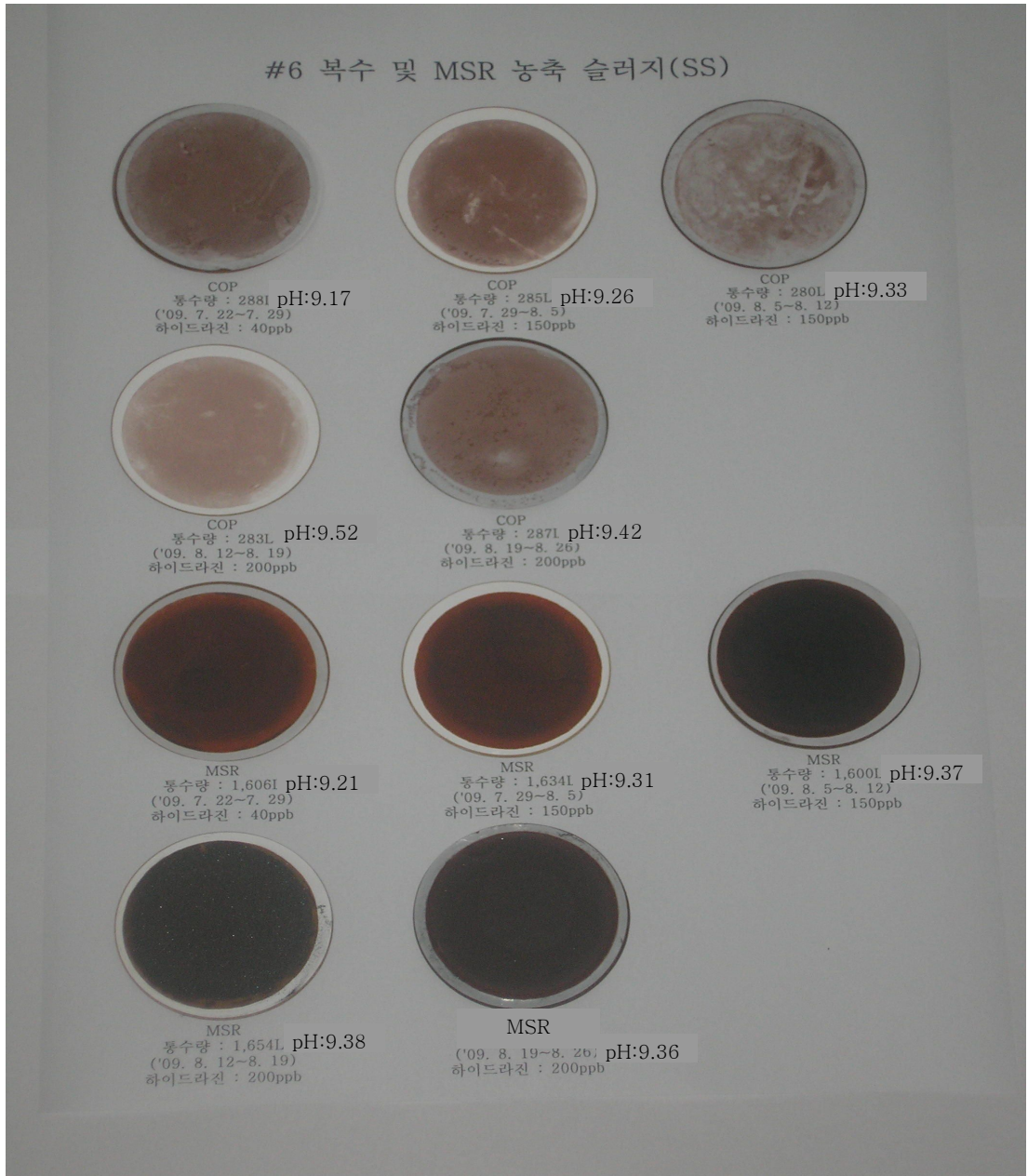


그림 3.3 영광 6호기 복수 및 습분분리재열기 슬러지 농축 상태 개선

제 4 장 결론

영광 5,6호기 주급수제어밸브 막힘 현상은 슬러지가 계통내에서 순환하면서 주급수 제어밸브 케이지에 침착되어 밸브 유동저항 증가로 주급수압력 및 주급수펌프 속도를 증가시키고 주급수유량 변동폭이 확대되어 결과적으로 전기출력 감소를 유발하였다.

영광 5,6호기 2차계통 슬러지 생성원인은 다음과 같이 분석되었다.

- 1) 복수계통 pH 및 하이드라진 농도가 다른 발전소 평균보다 낮게 유지되면서 부식 생성물의 증가로 급수계통을 통해 최종적으로 증기발생기로 유입되는 과정에서 일부가 각종 제어밸브 케이지에 침적되었다.
- 2) 기기 정비과정에서 방청, 세정, 침투유등의 잔여 유기물이 계통수로 유입 후 분해되어 슬러지와 응결하여 Cage Hole에 침착이 가능한 것으로 평가되었다.
- 3) 발전소 기동기간중 용존산소가 높은 경우 산화분위기 조성으로 슬러지 용해도를 저하시켜 침적이 증가되는데 산화피막 형태로 존재하는 Hematite 형태의 산화철이 기동시 저온 및 저유량의 급수조건에서 용해도 저하로 저항이 많은 밸브 케이 지 등에 침적되는 것으로 평가되었다.

본 연구결과 급수계통에서 ETA 2,000ppb, 암모니아 600ppb, 하이드라진 100ppb, pH 9.55에서 철분농도가 가장 낮게 나타났다. 따라서 운영측면에서는 2차계통 슬러지 저감을 위한 최적수질조건을 유지하고, 정비측면에서는 밸브 Cage 자화 억제 가능한 Metal Brite 세정을 수행하고, 정비중 이물질 유입방지 및 유분을 포함한 화학물질을 통제함으로써 슬러지 생성을 방지할 수 있다.

향후 설비개선 분야로 계통 내 철성분 제거를 위해 복수펌프와 주급수 승압펌프 입구 Strainer 재질에 자성을 부여하여나, 복수기 내부에 자석필터를 설치하는 등의 슬러지 제거설비를 추가 설치하는 방안이 있다.

이상과 같이 본 연구에서는 원자력발전소 2차계통 수질관리의 기본원칙인 계통으로의 슬러지 유입을 방지하고, 유입된 슬러지를 효과적으로 제거함은 물론, 구성기기의 부식억제 및 슬러지 생성을 방지함으로써 가압경수로 2차계통의 부식 발생을 최소화하기 위한 최적의 수화학적 조건 및 운영방법을 도출하였으며 그 결과 원자력 발전소의 전기출력 생산 효율을 높이고 증기발생기의 안전운전 및 수명연장에 기여하게 되었다.

참고문헌

- [1] “영광 5,6호기 주급수계통 현안 해결 TF 최종보고”, 2010.7, 영광원자력 제3발전소
- [2] “영광 5,6호기 주요계통 pHT 평가“ 기술지원 보고서, 2009. 11, 원자력발전기술원
- [3] “영광 3발 주급수계통 주급수제어밸브” 기술지원 보고서, 2009. 4, 원자력 발전기술원, KHNP-MET-2009-002
- [4] “주급수제어밸브 슬러지 막힘관련 계통 수질 종합분석”, 2008. 11, 영광원자력 제3발전소
- [5] “영광 5,6호기 2차계통 밸브 침적물생성원인 분석” 기술지원 보고서, 2008. 11, 한전전력연구원 원자력발전연구소
- [6] “영광 5,6호기 주급수조절밸브 Disk Cage 슬러지 부착원인 검토”, 2008. 11, 한국수력원자력(주), 74705-05100517-2733
- [7] “영광5호기 주급수 제어밸브 이물질 침착저감” 기술지원 보고서, 2008. 10, 원자력발전기술원
- [8] “2차 계통수 수질관리”, 원자력교육원

감사의 글

2008년 조선대학교와 영광원자력 본부의 산학 협력을 계기로 대학원에 등록한지 2년, 돌이켜 보면 즐거웠던 추억과 함께 많은 공부를 할 수 있었던 좋은 계기였다. 직장 생활을 하면서 뒤늦게 대학원공부를 하는 게 쉬운 일은 아니지만 막상 결심하고 시작해보니 잘한 선택이란 생각이 든다. 주위에서 많은 분들이 도움을 주셔서 어렵지 않게 마무리를 할 수 있었으며 특히, 많은 관심과 지도로 논문을 마칠 수 있게 도와주신 이경진 지도교수님께 감사드린다. 또한 2년간 훌륭한 강의를 해 주신 조선대학교 김진원 교수님, 김승평 교수님, 정운관 교수님, 나만근 교수님, 송종순 교수님과 영광원자력 본부 내 강재열 본부장님, 김대겸 소장님, 양연석 실장님, 양창호 실장님, 장영균 전소장님께도 진심어린 감사를 드린다.

바쁘단 핑계로 가정에 소홀해도 묵묵히 지켜봐주고 아낌없이 격려해준 나의 영원한 후원자이자 인생의 동반자인 사랑하는 아내에게 미안하고 고마운 마음을 전한다. 아빠가 많이 놀아주지 않는다고 투정부리던 귀염둥이 민서와 사춘기 긴 터널의 막바지에 있는 큰아들 도은이에게 이제 더 많은 시간을 같이 하겠노라고 약속한다.

2년 동안 함께 소중하고 즐거운 추억에 함께 하신 신영화, 정병호, 조영보, 김한점, 김인기, 정운영, 최진오, 이동우 학우들과, 논문 준비 잘하라고 전폭적인 지원을 해주신 반봉진 팀장님과 부서 직원들, 많은 자료수집에 도움을 준 장덕기과장, 풍부한 기술자문을 아끼지 않으신 유기봉차장님 그리고 좋은 수업을 받을 수 있도록 많은 애를 써주신 김준섭 차장님께도 감사를 드린다.

2010년 11월

곽영중

저작물 이용 허락서

학 과	원자력공학	학 번	20087489	과 정	석사
성 명	한글 : 곽 영 종 한문 : 郭 永 鍾 영문 : KWAK YOUNG-JONG				
주 소	전남 영광군 홍농읍 상하리 한수원사택 28동 502호				
연락처	e-mail : kyjok1012@khnp.co.kr				
논문제목	원자력발전소 2차계통 슬러지 부착 저감방법 연구				
	A Study on Method to Reduce the Sludge Attachment of the Secondary System for Nuclear Power Plant				


본인이 저작한 위의 저작물에 대하여 다음과 같은 조건 아래 조선대학교가 저작물을 이용할 수 있도록 허락하고 동의합니다.

- 다 음 -

1. 저작물의 DB구축 및 인터넷을 포함한 정보통신망에의 공개를 위한 저작물의 복제, 기억장치에의 저장, 전송 등을 허락함.
2. 위의 목적을 위하여 필요한 범위 내에서의 편집과 형식상의 변경을 허락함. 다만, 저작물의 내용변경은 금지함.
3. 배포·전송된 저작물의 영리적 목적을 위한 복제, 저장, 전송 등은 금지함.
4. 저작물에 대한 이용기간은 5년으로 하고, 기간종료 3개월 이내에 별도의 의사 표시가 없을 경우에는 저작물의 이용기간을 계속 연장함.
5. 해당 저작물의 저작권을 타인에게 양도하거나 출판을 허락을 하였을 경우에는 1개월 이내에 대학에 이를 통보함.
6. 조선대학교는 저작물 이용의 허락 이후 해당 저작물로 인하여 발생하는 타인에 의한 권리 침해에 대하여 일체의 법적 책임을 지지 않음.
7. 소속 대학의 협정기관에 저작물의 제공 및 인터넷 등 정보통신망을 이용한 저작물의 전송·출력을 허락함.

동의여부 : 동의() 반대()

2010년 10월

저작자 : 곽 영 종  (인)

조선대학교 총장 귀하