



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](#)

2015년 11월
석사학위논문

분산제를 이용한 원전 증기발생기 슬러지 제거 방법 개선 연구

조선대학교 대학원

원자력공학과

장 덕 기

분산제를 이용한 원전 증기발생기 슬러지 제거 방법 개선 연구

Study on improvement of removing sludge from steam
generator with dispersant in NPP

2016년 2월 일

조선대학교 대학원

원자력공학과

장 덕 기

분산제를 이용한 원전 증기발생기 슬러지 제거 방법 개선 연구

지도교수 송 종 순

이 논문을 공학 석사학위신청 논문으로 제출함

2015년 10월

조선대학교 대학원

원자력공학과

장 덕 기

장덕기의 석사학위논문을 인준함

위원장 조선대학교 교수 이 경 진 (인)

위 원 조선대학교 교수 김 진 원 (인)

위 원 조선대학교 교수 송 종 순 (인)

2015년 월

조선대학교 대학원

목 차

표 목차	iv
그림 목차	v
ABSTRACT	vii
제1장 서 론	1
제 1 절 연구배경 및 필요성	1
제 2 장 분산제 주입 방법에 대한 고찰	2
제 1 절 원전 2차계통에 대한 고찰	2
1. 2차계통 수화학	2
2. 2차계통 주요 구성 설비	6
가. 증기발생기	7
나. 터빈 설비	9
다. 복수탈염 설비	9
라. 복수기	9
마. 탈기기	10
바. 급수가열기	10
사. 습분분리 가열기	10
아. 증기발생기 취출 및 회수설비	11
제 2 절 증기발생기 전열관 2차측 오염 제거 기술	12
1. 증기발생기 부식물 억제 방법	12
2. 국내원전 슬러지 제거 사례	13
3. 국내원전 슬러지 제거 방법 및 정책	15
가. 운전중 SG 철성분 제거 방법	15
나. 계획예방정비시 SG 랜싱 제거 방법	15
다. 화학세정에 의한 SG 철성분 제거 정책	15
제 3 절 고분자 분산제 종류 및 슬러지 제거 메커니즘	16
제 4 절 원자력발전소 분산제 적용 기술 동향	18

제 5 절 분산제 특성 및 주입기술 고찰	20
1. 분산제 열분해 특성 및 관련 영향 평가	20
가. PAA의 화학적 특성	20
나. PAA의 열분해 특성	23
제 3 장 분산제 현장 적용 연구 결과	31
제 1 절 분산제 주입 설비 및 준비	31
1. H 발전소 6호기 이력	31
가. 일반 사항	31
나. 분산제 주입 및 약품 설치 위치	31
다. 약품 및 주입 설비	32
라. 분산제 주입 탱크와 기존 약품 주입 펌프 배관 연결	33
제 2 절 분산제 적용	34
1. 2차계통 수화학 영향	35
가. 양이온 전도도 변화	35
나. 총 유기탄소 변화	36
다. pH 변화	36
라. 취출수 탈염기 영향	37
2. 증기발생기내 슬러지 제거 효과	38
가. 취출수 탈염기 전단필터 차압 비교	38
나. 증기발생기내 철 성분 추이 변화 평가	39
다. 증기발생기내 분산제 농도 분석 평가	41
라. 열성능 평가	42
제 3 절 개선 사항 및 확대 적용 방안	48
1. 개선 사항	48
2. 국내 PWR 원전 확대 적용 방안	48
가. 표준형 원전	48
나. 웨스팅하우스형 원전	49
다. 분산제 주입 방법 확대 적용 방법	49

제 4 장 결론 51

참고문헌 53

표 목 차

표 2.1	원전 2차계통 부식손상의 수질관리 연계성	3
표 2.2	화학불순물에 의한 증기발생기 전열관 부식영향	4
표 2.3	증기발생기 수질기준	5
표 2.4	급수 수질기준	5
표 2.5	국내 원전 화학세정 수행 현황	14
표 2.6	ANO-2 적용 시 고려한 주안점	23
표 2.7	PAA에서 생성되는 CO ₂ 반응상수	25
표 2.8	고분자 분산제의 시간경과에 따른 열화도	27
표 2.9	50ppm PAA의 온도별 유기산 생성농도	27
표 2.10	50ppm PAA의 SG 유기산 예측농도	28
표 3.1	전열관 파울링 진단 운전변수	43
표 3.2	총괄 파울링계수 변화 사례	46

그 립 목 차

그림 2.1	Capacity loss at US power plants by corrosion	2
그림 2.2	Secondary side of PWR schematic	7
그림 2.3	Steam generator structure	8
그림 2.4	Blowdown recovery process of SG	11
그림 2.5	Quatrefoil 및 Eggcrate 형태 Tube Support Plate	13
그림 2.6	Industrial boiler polymer dispersant	17
그림 2.7	Mechanism of fouling control with PAA at SG	17
그림 2.8	Atomic charge of PAA calculated by HyperChemTM	20
그림 2.9	Molecular formular of PAA	21
그림 2.10	Ionization of PAA at pH(25℃) of 9.5	22
그림 2.11	Log mean iron removal efficiency Vs. PAA concentration in FW	22
그림 2.12	Time-dependent PAA decomposition type	24
그림 2.13	Thermal decomposition mechanism of PAA	25
그림 2.14	Time-dependent CO ₂ production type from PAA	26
그림 2.15	Organic acid production from 50ppm PAA	28
그림 2.16	Total organic carbon Vs. ETA during ANO-2 STT	29
그림 2.17	Total iron Vs. moisture separator pH _t (350°F)	30
그림 3.1	원전 2차계통 화학약품 및 분산제 주입 개략도	32
그림 3.2	약품 주입설비 구성 및 개략도	33
그림 3.3	약품주입펌프 및 배관 연결	34
그림 3.4	유량, 적산설비 및 약품주입펌프 유량조절 밸브	34
그림 3.5	분산제 주입 전·후 양이온 전도도 변화	35
그림 3.6	급수 및 취출수 ETA, TOC 변화	36
그림 3.7	분산제 주입기간 중 pH 변화	37
그림 3.8	취출수 탈염기 양이온 전도도 변화	38
그림 3.9	5, 6호기 증기발생기 필터 차압 변화	39
그림 3.10	고온관 및 Downcomer 철농도 변화	40
그림 3.11	취출수 열교환기 A, B 배수밸브 철농도 변화	41

그림 3.12 증기발생기 취출수 분산제 농도 변화 42
 그림 3.13 주기별 총괄 파울링계수 변화 44
 그림 3.14 8주기 SG B 총괄 파울링계수 변화 44
 그림 3.15 주기별 SG 상부 압력변화 45
 그림 3.16 8주기 SG 상부 압력변화 45
 그림 3.17 8주기 고압터빈 조절밸브 개도 변화 47
 그림 3.18 Candidate dispersant injection location at McGurie 2 50

ABSTRACT

Study on improvement of removing sludge from steam generator with dispersant in NPP

By Jang, Duk Ki

Adviser : Prof. Song, Jong Sun, Ph. D.

Department of Nuclear Engineering,

Graduate School of Chosun University

The sludge in a steam generator is unavoidable product no matter how clean the feed water to steam generator is. As the sludge gets deposited more, the possibility of several troubles gets higher. To solve the problem, nuclear power plants have some methods. First, steam generator blow down system gets rid of the sludge continuously during normal operation. Also SG lancing and high temperature chemical cleaning are methods which are done during an overhaul. Unfortunately, blow down system and SG lancing are not evaluated as the best ways. High temperature chemical cleaning is also a good way to remove the sludge of steam generators but expensive and complicated. Removing the sludge of SG using dispersant has been used in fossil power plants for a long time. In case of nuclear power plants, dispersant could not be used because of sulfur it contained. Recently high quality dispersant has been developed and the result from some nuclear power plants says it is effective.

This study was the first application of dispersant in Korean nuclear power plants. In the study, changes of water quality, differential pressure and thermal effectiveness have been estimated and application methods of other plants have been suggested.

제 1 장 서 론

제 1 절 연구배경 및 필요성

원자력발전소 증기발생기 2차계통에서 고온, 고압의 용수가 연속적으로 높은 유속으로 순환하여 운전되기 때문에 고순수를 사용하고 최적으로 수질관리를 하더라도 구성기기 및 배관으로부터 철산물의 용출을 피할 수 없다. 증기발생기에서는 휘발성 화학약품과 순수한 수분만이 증발하고 고형물은 농축되기 때문에 증기발생기로 유입된 철산화물은 내부의 저유속 및 고온의 전열면에 슬러지 형태로 축적되어 침적된다. 슬러지 침적량이 증가하면 여러 가지 장애를 일으키기 때문에 현재는 일부 취출계통(Blow-down)으로 배출하고 있고 계획예방정비 기간에는 사후 처리법으로써 슬러지 랜싱과 화학세정을 실시하여 제거하고 있다.

고분자 분산제는 오래 전부터 보일러 및 증기발생 설비에서의 경도성분, 실리카, 철산화물 등의 스케일 부착을 방지하기 위해 사용해 오고 있었다. 하지만, 처리제에 함유된 황 등의 불순물 때문에 고순수를 사용하고 수질관리가 엄격한 원자력발전소 증기발생계통에서는 적용되지 못하였다. 최근 황(S) 이나 부식성 이온을 함유하지 않은 고순도 분산제가 개발됨에 따라 국외 원자력발전소를 중심으로 급수계통 적용시 취출수(Blow-down)을 통한 증기발생기 내부 슬러지 저감 효과가 매우 우수한 것으로 보고 되었고, 2009년도에는 미국 전력연구기관(EPRI)에서 발행한 PWR 원전 증기발생기 2차계통 수화학 운영지침에 분산제 처리기술을 표준 기술로써 포함시키고 있다.

본 연구는 국내 PWR 원전에 적합한 분산제 처리기술의 성능, 수질영향 검토 및 현장 적용을 위해 착수되었으며, 연구 기간에 대상 발전소 계통 조사, 분산제 적용 전후 슬러지 배출거동 조사 등이 수행되었다. 본 연구를 통해 국내원전에 분산제가 확대 적용되어 증기발생기 내부 슬러지 제거에 대한 새로운 출발점이 될 수 있길 기대한다.

제 2 장 분산제 주입 방법에 대한 고찰

제 1 절 원전 2차 계통에 대한 고찰

1. 2차계통 수화학

2차계통의 수질관리 목표는 기기의 부식을 최소화 할 수 있도록 계통수질 부식을 억제할 수 있는 상태로 지속 유지함으로써 증기발생기와 다른 2차계통 기기 및 계통의 신뢰도를 확보하고 장기간 발전소 전력생산이 가능토록 하는 것이다. <그림 2.1>은 미국 내 원자력발전소에서 부식으로 인한 발전소 이용율 손실을 나타낸 것으로 수화학 관리기술의 발전 등 효과적인 부식억제가 수행됨으로써 원자력발전소 운영의 경제성과 안전성이 향상될 수 있음을 보여준다.

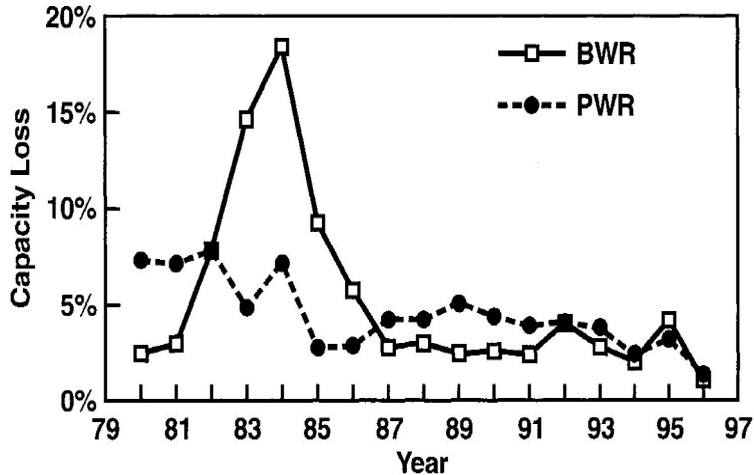


그림 2.1 Capacity loss at US power plants by corrosion

증기발생기를 포함한 2차계통 주요 설비들은 발전소의 안정적 운영에 중요한 역할을 담당하며 특히, 증기발생기는 원자력발전소의 핵심설비로 가압경수로형 원자력 발전소에서 원자로냉각재계통과 증기생산계통 사이의 열전달 공유영역을 형성하는

설비이므로 증기발생기의 전열관의 손상은 1차 계통에서 2차 계통으로 방사능 물질이 누출 등으로 인한 안전성 우려와 가동중지나 출력감발로 인한 전력손실을 초래하게 될 수 있다. <표 2.1>에서 알 수 있는 바와 같이 2차계통 구성 설비와 수질관리는 밀접한 관련성을 가지고 있어 효과적인 수질관리프로그램 이행으로 이들 설비의 부식손상을 억제하고 결과적으로 발전소 신뢰성 확보와 이윤의 향상에도 기여하게 되는 것이다.

손상기구		주요 손상원인	수질관리의 영향
증기발생기 전열관	2차측응력균열부식 /입계부식	고온, 재질, 응력, 국부적인 부식 환경	연계성 강함
	덴팅	탄소강 전열관 지지판, 해수오염(염소화합물)	지배적임
	점식	산성, 산화성 환경	지배적임
	박층화	산성 환경(황산염 오염)	지배적임
배관 및 열교환기 증기발생기 내부구조물	유체가속부식	탄소강 재질 (Cr 함량), 수질(pH 및 환원성환경), 높은 유속	지배적임
터빈 (blade,disc)	응력부식균열	재질 및 설계 특성	미약함
	부식피로		

표 2.1 원전 2차계통 부식손상의 수질관리 연계성

2차계통 수질관리프로그램의 기본개념은 계통 내로 부식성 화학물질의 유입 방지하고 계통 내 유입 부식성 화학물질의 제거와 계통 구성재질의 특성을 고려한 부식억제가 가능한 환경 조성 및 유지로 이루어진다 할 수 있다. 통상 불순물로 분류되는 부식성 또는 부식환경조성 가능 물질들이 2차계통으로 들어올 수 있는 유입원은 건설기간 중 또는 설비 교체 및 점검 시 오염물의 유입, 복수기에서 냉각수로 사용하는 해수의 유입, 운전 중 계통수를 보충하기 위한 보충수 중의 불순물, 부식환경 조성억제를 위해 사용되는 화학물질에 함유되어 있는 불순물과 복수기 등 진공상태를 유지하는 계통으로의 공기 유입 등이 있다. 유입 시에 <표 2.2>와 같이

계통 구성재료의 부식에 영향을 초래할 수 있다[1]. 이들 불순물의 유입을 방지하기 위해 청정도 관리 등의 작업관리와 작업 후 기기 세정, 복수기 전열관의 주기적 검사(ECT)를 통한 건전성 유지 활동, 화학물질을 최대한 제거한 순수를 보충수로 사용과 용수처리약품 중 불순물 함량 제한 등의 조치가 이루어지고 있다.

성분	영향
Pb (As)	<ul style="list-style-type: none"> · 화학적인 존재 상태에 관계없이 다양한 화학환경에서 Alloy 600 및 Alloy 800 전열관의 응력부식균열 유발. · As와 같은 낮은 용융점을 갖는 성분도 유사 작용추정
S	<ul style="list-style-type: none"> · SO₄ 상태는 pH에 영향을 주며 박층화(wastage)를 유발할 수 있으나 직접 응력부식균열을 유발한다는 증거는 없음. · 환원상태의 S(sulfide 등)는 응력부식균열유발 가능.
Cl (F)	<ul style="list-style-type: none"> · 산화성, 산성 환경에서 점식(pitting) 유발. · 스테인리스강의 응력부식균열을 유발할 수 있으나 전열관의 응력부식균열을 유발할 가능성은 매우 낮음. · F는 Cl과 유사한 작용을 하나 효과가 적음.
Cu	<ul style="list-style-type: none"> · CuO 또는 Cu₂O 상태로 산화된 후 다시 환원되면서 전열관의 부식전위를 상승시켜 응력부식균열 촉진.
SiO ₂	<ul style="list-style-type: none"> · 틈새에 Alumino-Silicate가 형성되면서 입계부식을 촉진시키는 환경 조성 가능.
유기물	<ul style="list-style-type: none"> · 아세트산, 포름산 또는 글리콜산과 같은 유기산은 그 자체로서는 부식을 유발하지 않으나 황산 또는 납 오염과 함께 존재할 경우 입계부식/응력부식균열을 유발 가능.
탄산염	<ul style="list-style-type: none"> · 틈새에 농축되는 경우 입계부식을 유발할 수도 있으나 CO₂ 상태로 휘발성이 강하므로 틈새 농축경향이 낮음.

표 2.2 화학불순물에 의한 증기발생기 전열관의 부식 영향

2차계통의 수화학 관리는 증기발생기를 포함하여 2차계통 구성 기기 구조물의 건전성을 유지하고, 양질의 증기를 생산하여 터빈/발전기로 보내주기 위한 것이다. 특히, 증기발생기는 원자력발전소의 핵심설비로 2차계통 수질관리는 증기발생기의 건전성을 보전하기 위하여 수행한다고 볼 수 있다. 증기발생기는 가압경수로형 원자력발전소에서 원자로냉각재계통과 증기생산계통 사이의 열전달 공유영역을 형성하는 설비이므로 증기발생기의 튜브가 부식으로 인한 손상으로 1차계통에서 2차계통

으로 방사능 물질이 누출되어 안전성 확보에 문제를 일으키고 가동중지 후, 유지 및 보수에 따라 가동율을 떨어뜨릴 수도 있으며, 방사능 물질의 오염에 따른 유지, 보수 활동의 지장을 초래하고 증기발생기의 수명이 단축되기도 한다. 국내 원자력 발전소의 최근 정상 운전시 계통 수질 기준은 <표 2.3>과 <표 2.4>와 같으며, 급수의 철(Fe) 농도가 5 ppb 이하의 범위에서, 용존 산소(Dissolved Oxygen)도 5 ppb 전후의 낮은 농도에서 안정적으로 유지하고 있는 등 계통내 불순물은 매우 낮게 관리 된다[2].

시료채취 지점	관리항목	단위	기준값	제한값		
				조치1단계	조치2단계	조치3단계
증기 발생기 취출수 고온관	pH	-	≥ 9.0	< 9.0	-	-
	양이온전도도	μs/cm	≤ 1.0	-	> 1	> 4
	나트륨이온	ppb	≤ 5	> 5	> 50	> 250
	염소이온	ppb	≤ 10	> 10	> 50	> 250
	황산이온	ppb	≤ 10	> 10	> 50	> 250

표 2.3 증기발생기 수질기준

시료채취 지점	관리항목	단위	기준값	제한값		
				조치1단계	조치2단계	조치3단계
7단 고압 급수 가열기 후단	pH	-	8.8~10.0	< 8.8 > 10.0	-	-
	용존산소	ppb	≤ 5	> 5	> 10	-
	하이드라진	ppb	> 8×[DO]복수 (최소>20ppb)	≤ 8×[DO]복수 또는 ≤ 20ppb 중 높은값	-	-
	철	ppb	≤ 5	> 5	-	-
	구리	ppb	≤ 1	> 1	-	-

표 2.4 급수 수질기준

증기발생기의 문제는 방사능 누출은 물론이고 상당한 기간 동안 가동중지나 출력 감발로 인한 가동율 감소문제를 일으키고 심한 경우에는 증기발생기를 교체하게

되어 상당한 비용과 장시간의 가동중지로 인한 전력손실을 초래하게 된다. 따라서 계통내에 불순물과 부식생성 입자의 유입 방지, 계통 구성 기기의 부식방지 및 부착방지, 유입된 불순물 및 부식생성물을 제거함으로 증기발생기 및 2차계통 기기의 건전성 확보를 위해 적절한 2차계통의 수화학 관리가 요구된다.

따라서 2차계통수 수화학 관리는 계통재질을 부식으로부터 보호하여 설비를 설계 수명 또는 그 이상으로 안전하게 운영하는 것이다. 2차계통 수질관리는 계통내 불순물의 거동과 각각의 발생 원인을 파악하여 불순물의 유입억제 및 제거대책을 수립하고 적절한 화학 제어제를 사용하여 증기발생기를 비롯한 2차계통 구조물의 건전성을 유지하는 것이다. 본 보고서에서는 이러한 2차계통 배관 및 증기발생기에서 축적되는 슬러지를 제거하여 파울링을 저감하기 위한 방안으로 고분자분산제(PAA) 주입시 2차계통 수화학에 미치는 영향을 검토하였다. 먼저 본 절에서는 연구대상 발전소인 H발전소 6호기의 2차계통 구성하는 계통의 현황 조사하였다.

2. 2차계통 주요 구성 설비[3]

<그림 2.2>의 2차계통 개략도에 나타난 바와 같이 증기발생기에서는 온도가 일정한 상태에서 1차측의 열에너지를 2차측으로 전달받아 증기를 발생시키며, 발생된 증기는 터빈에서 운동에너지로 변환되고 복수기에서 등온 응축이 일어나게 된다. 응축된 물은 펌프와 가열기에서 가온 및 가압되어 증기발생기로 보내지는 순환계를 구성하게 되는데 이 순환계를 연결하는 유체로서 증발잠열이 큰 특성이 있는 물을 사용하며, 계통 내를 흐르는 물은 전해질의 역할과 에너지를 갖는 유체로서 작용하게 되므로 이 유체의 수화학환경이 계통 구조물의 부식에 직접적인 영향을 초래할 수 있게 된다.

가압경수로형 원자력발전소 2차계통 냉각계통에서는 구조재의 부식억제를 위해 pH 처리, 탈산소처리 및 불순물을 관리 한다. 급수처리는 pH 조절제로 암모니아, 탈산소제로 하이드라진을 이용하고 있으며 불순물 관리로는 보충수 탈염설비 및 복수탈염설비를 이용 고순도의 물을 공급하고 있어 계통내 부식 가능성은 매우 작아지고 있다. 하지만, 증기 발생기 2차측 틈새, 저압 터빈 건습증기 혼합구간, 복수

기 공기 추출부 등에서는 계통 수중 불순물 혹은 pH 조정제인 암모니아가 농축되어 부식 환경이 형성될 수 있다. 또한 원자력발전소의 2차계통 수질 사양은 초임계압을 사용하는 화력발전소보다 엄격하게 관리하고 있으며, 이를 위하여 계통내 불순물의 정화 혹은 유입 방지를 위하여 복수탈염장치, 증기발생기 Blowdown 회수 설비 등의 정화설비를 가지고 있다.

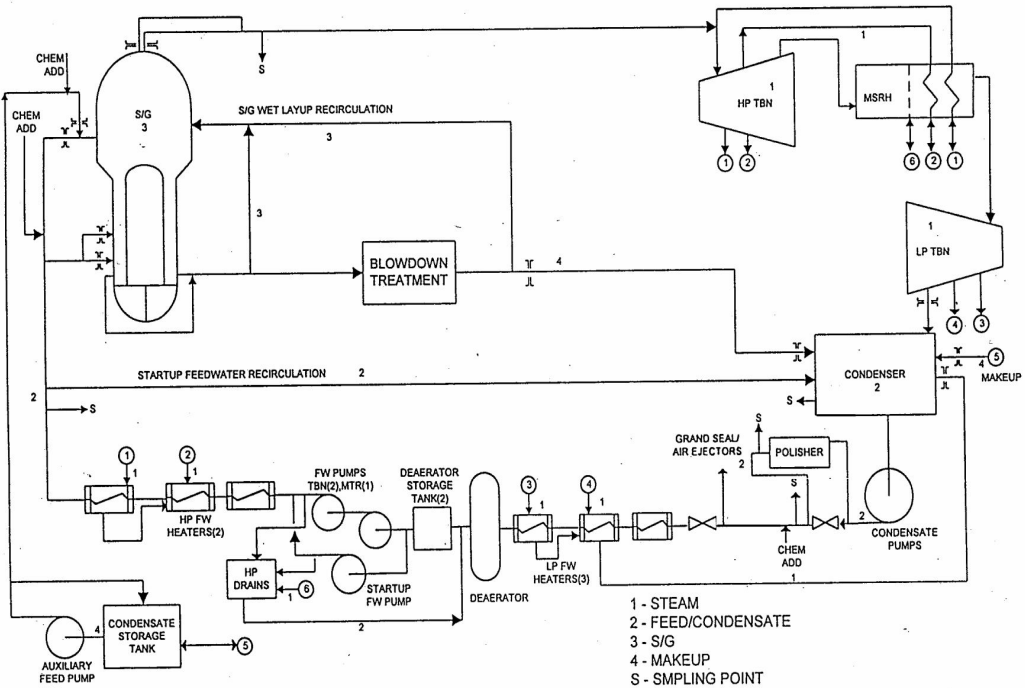


그림 2.2 Secondary side of PWR schematic

가. 증기발생기

증기발생기의 구조는 그림 3-3과 같이 U자관 재순환식 열교환기이다. 증기발생기는 1차측 수실, U자형 전열관, 2차측 증발부 및 기수분리장치부로 구성 된다. 1차측 수실은 칸막이 판에 의해 입구수실과 출구수실로 나누어지고 1차측각재는 입구수실에서 U자관을 지나 2차측에 열을 전달한 후 출구수실로 들어와 출구 노즐을 통해 유출 된다. 증기 발생기 2차측으로 공급되는 급수는 전열관다발 상부에 설치된 급수 링을 통해서 급수 된다. 급수는 전열관다발을 둘러싸고 있는 반원통형과 증기 발생기 중앙의 선실의 환상 수로를 하강하여 관판에서 위쪽으로 전열관 다발

내를 상승하고 그 사이 1차냉각재와 열교환을 실시해 증기를 발생 한다. 상승하는 증기-물 혼합류는 기수분리기내에 있는 vane에 의해 회전이 주어져 원심력에 의해 증기와 물로 분리된다. 분리된 물은 다시 급수와 혼합되어 재순환 한다. 한편, 분리된 증기는 습분분리기에서 습분이 제거되어 증기 발생기 출구 노즐을 통해 터빈으로 보내진다.

증기발생기는 원자로냉각재압력경계재료로 제작시 사용하는 압력경계 코드 요건으로는 ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section III, Nuclear Power Plant Components, Class 1을 만족하도록 설계, 제작되어야 한다. 증기발생기 전열관을 튜브시트에 고정하는 방법은 ASME Code Sec. III 및 IX의 요건을 준수하였다. 전열관 재료인 인코넬 600 합금은 제작 기간 동안 고온소둔 과정(high temperature annealing process)으로 열처리되었다. 또한 H발전소 6호기 증기발생기 2차측 전열관 지지구조물의 재료는 스테인리스강을 사용하였다.

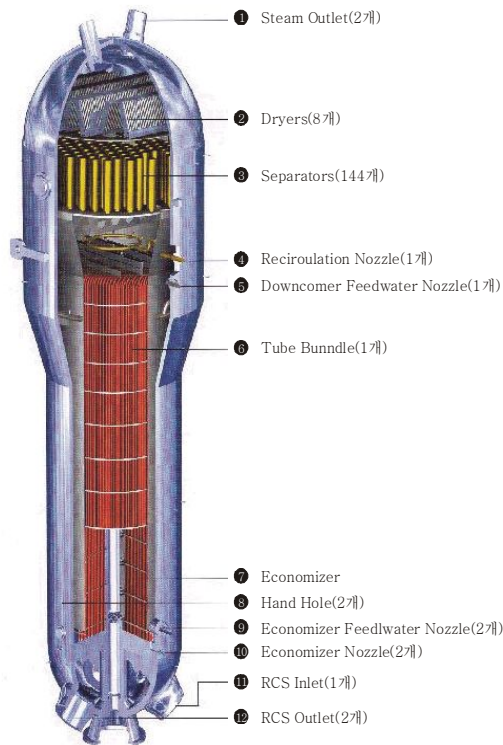


그림 2.3 Steam generator structure

나. 터빈

원자력발전소 터빈은 증기 온도는 약 300℃이하, 압력 약 70 kg/cm² 이하에서 운전되며, 증기량의 증가를 위해 고압 터빈과 저압 터빈 입구에 습분분리 가열기가 갖추어져 있지만 터빈 각부의 대부분이 습기 상태로 운전된다. 이와 같이 원자력발전소 터빈으로 사용되는 재료는 대형 부재로서의 신뢰성 향상과 침식에 대한 고려가 필요하다. 터빈에 있어서의 부식은 습증기 환경에서의 부식이며 원자력발전소 터빈의 사용 증기 온도대에 있어서의 부식 현상으로는 응력부식균열, 부식 피로, 침식 등이 있다. 응력부식균열과 부식 피로의 원인은, 증기중에 포함되어 있는 염소이온이나 황산이온이라고 하는 불순물이 터빈 부재의 틈새 등에 농축되는 것에 기인하는 것으로 일반적으로 생각되고 있다. 이러한 부식은 저압터빈의 건증기와 습증기 경계 부근에서 발생하는 경우가 많다. 터빈 재료의 회전자(rotor)와 동익(blade)은 대부분 탄소강과 스테인리스강으로 구성되어 있다.

다. 복수탈염설비

복수탈염설비는 복수기 누설 및 계통 오염 시 오염물질 또는 부식생성물 등이 증기발생기 내로의 유입을 방지하기 위해 복수기 후단에 설치되며, 복수 중에 존재하는 용해성, 불용성 불순물을 제거하여 고순도의 급수를 유지하고, 복수기 누설 등의 수질 비정상시 오염물질 및 계통의 부식생성물들이 증기발생기로 유입되는 것을 차단하여 증기발생기 및 터빈의 건전성을 최상의 상태로 유지하기 위함이다. 또한 설비의 기능으로는 실리카 및 휘발성 물질 제거, 증기발생기 취출수량 감소, 복수기 소량 누설 시 계속 운전 가능, 보충수 순수처리설비가 정상적인 기능을 못할 때, 용해성염 및 이물질 제거, 복수기 공기누설에 따른 CO₂ 제거, 복수기 누설 시 누설 복수기 수질 격리시간 및 순차적인 발전소 정지 이용 등이 있으며 구성설비로는 강산성 양이온 수지가 들어 있는 양이온 탈염기와 강산성 양이온 수지 및 강염기성 음이온 수지가 혼합된 혼상이온 탈염기로 구성되며, 이온교환수지를 재생하기 위한 재생설비로 구성되어 있다.

라. 복수기

복수기는, 증기 터빈의 배기를 응축해, 증기발생기 급수로 재이용과 함께 터빈배압

을 아주 낮게(진공) 유지해 증기에너지의 유효 활용을 꾀하는 기기이며 본체, 냉각관, 관관, 수실 등에 의해 구성되어 있다. 냉각관은 증기와 열교환을 하기 위해서 하부 본체에 관다발로서 배열해 관내 부에 냉각수를 통수한다. 그 재질은 사용 냉각수에 내식성이 증시되고 우리나라에서는 냉각수로서 해수를 사용하고 있어 최근에는 내식성이 뛰어난 티타늄관이 많이 이용되고 있다. 관관은 하부 본체와 수실을 나누는 것으로 티타늄 및 티타늄 클래드 등이 이용된다. 관관의 관배열에 따라 냉각관을 단다. 냉각관과 관관과의 고정은 구리합금의 냉각관의 경우는 확관고정, 티타늄관에 대해서는 용접 또는 확관고정을 시공하고 있다. 수실은 강관 용접 구조이며 내부는 네오프렌 고무 라이닝 또는 타르에폭시 코팅을 시공하고 있다

마. 탈 기 기

탈기기는 터빈 추기증기와 급수를 직접 접촉시켜 급수중의 산소 및 탄산 가스등의 불응축성 가스를 분리·제거한다. 즉 탈기기는 기기의 부식 손상을 방지할 목적으로 설치되어 있다. 탈기기는 탈기실과 저장탱크로 구성되고, 탈기실에는 급수 분사 밸브 탈기트레이가, 저장탱크는 탈기 된 급수를 저장한다. 탈기기의 주요 재료로 탈기실의 탈기트레이 및 분배트레이는 오스테나이트계의 스테인리스강(SUS 304) 이, 저장탱크는 탄소강 사용되고 있다

바. 급수 가열기

급수 가열기는 터빈추기증기를 이용해 복수 및 급수를 가열하여 터빈열소비율을 향상시키는 목적으로 설치되어 있다. 급수 가열기는 본체 및 내부 구조물, 가열관, 관관, 수실 및 부속 부품으로 구성되어 있다. 급수 가열기는 급수가 고압이 되기 위해 관식 열교환기가 채용되어 관내에 급수를 관외에 추기증기 및 그 응축수를 유동시켜 열교환을 실시한다. 급수 가열기 주요부분으로 본체, 수실, 버팀 목관 및 관관은 탄소강이 이용되고 있다. 가열관은 부식 방지의 관점에서 스테인리스강관이 사용되고 있다

사. 습분분리 가열기

습분분리 가열기는 고압 터빈 배기 중의 습분을 습분분리기로 기수 분리해 건조 증기로 한 후 주증기 혹은 고압 터빈추기를 가열원으로 하는 가열기에 의해 가열

된 증기를 저압 터빈으로 보내는 기능을 가진다. 이 재열방식 채용에 의해 저압 터빈의 증기 습도를 저감 할 수가 있으므로 터빈 효율이 향상한다. 습분분리 가열기를 형성하는 동판 내장물은 주로 탄소강을 사용하고 습분분리기에는 스테인리스강을 사용하고 있다. 또, 가열관에는 전열성, 내식성 및 고 pH 운용 등을 고려해 페라이트계 스테인리스강관을 사용하고 있다.

아. 증기발생기 취출 및 회수 설비

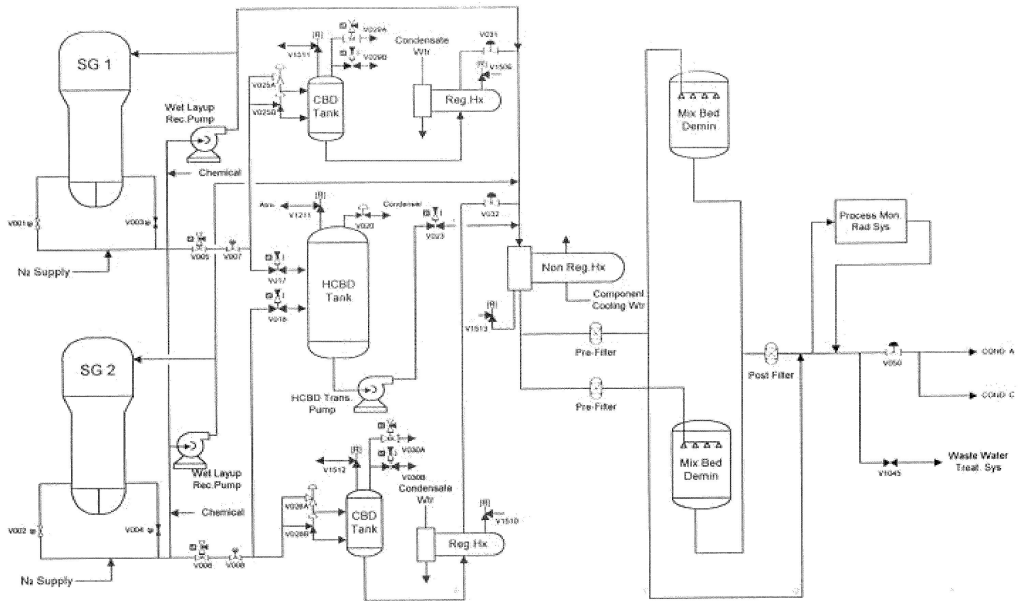


그림 2.4 Blowdown recovery process of SG

증기발생기 취출 및 회수설비는 취출계통(Blowdown System)과 습식보관계통(Wet Layup System)으로 구성되어 있으며, 정상운전 중에는 연속적인 취출을 수행하여 증기발생기내 2차측 급수의 화학성분을 조절한다. 또한 취출수는 정화되어 재사용하며 취출수가 보유한 열은 일부 급수의 예열에 이용된다. 고유량 취출은 일시에 많은 물을 방출시켜 증기발생기 바닥에 침전된 각종 이물질 제거하는 기능을 수행한다. 한편 발전소 정지 중에는 증기발생기 습식 보관계통을 이용하여 충수 및 화학처리를 수행하고, 건식보관을 원할 경우 증기발생기 내의 급수를 배출시키는 습식 보관계통을 이용하여 배출후 건식 보관한다.

증기발생기 취출수 계통은 2개의 연속 취출계통과 1개의 고유량 취출계통(2개의 증

기발생기에 공동으로 사용)으로 구성되어 있으며 연속 취출계통은 증기발생기 최대 증기의 1%까지를 취출 할 수 있고 고유량 취출계통은 16.7%까지 취출 시킬 수 있다. <그림 2.4>는 증기발생기 취출수 계통 전체 개략도를 보여주고 있다.

제 2 절 증기발생기 전열관 2차측 오염 제거 기술

1. 증기발생기 부식생성물 억제 방법

증기발생기 내부의 부식생성물량을 줄이기 위해 30년 이상 발전소에 2가지 기본 방식이 채택되어 왔다. 첫 번째 방식은 부식방지 수화학 환경을 조성하여 부식을 방지하는 방식이고, 다른 방법은 증기발생기 내부에 축적되어 있는 부식생성물을 제거하는 방식이다.

첫 번째 방식은 다음 방법 중에 하나 또는 그 이상을 수반하는 방법으로 대다수의 발전소에서 첫 번째 방식이 적용하고 있으며, 정상상태의 급수 철분 농도를 1980년 도에는 5~10 ppb로 유지하였고 현재는 2~3 ppb 수준으로 유지하고 있다.

- 2차계통의 특정 부위에 아민을 이용한 pH를 조절 및 부식 억제 환경 조성
- 냉각기 튜브를 티타늄으로 대체하는 등 부식생성물의 주요인을 2차 계통에서 배제하는 방법
- 저농도 (1~10 ppb)의 산소를 복수에 주입하여 보호 산화피막을 입히는 방법
- pH를 증가시키기 위해 복수 탈염기를 우회하는 방법

두 번째 방식은 증기발생기 재순환 운전하는 대부분의 발전소가 튜브시트 상단 (TTS)에 침적물을 제거하기 위해 물리적인 방법을 사용하여 전열관 부식 가능성을 경감시키고 있다. 금속 산화물과 다른 성분의 부식생성물이 이미 증기발생기로 유입된 경우, 일부 발전소에서 부식생성물 침전물이 벌크로 유입된 튜브표면에 쌓이는 것을 줄이는 또 다른 방법을 사용하고 있다. 이 경우 화학세정, 스케일 제어 용 침투제(ASCA), 튜브 고압세척, 상부다발 물세척 (UBHC), 상부다발 수세 등 방법이 사용된다. 이 같은 방식은 단독으로나 조합해서 증기발생기 내에 존재하는 침전물량을 성공적으로 저감시키거나 유지하여 왔다. 그러나 이러한 방법도 제한성을

갖고 있다. 즉 급수중 철 농도의 하한선이 실질적으로 실행 가능 한계가 있고, 세정방식은 틈새가 있는 특정 부위에서는 100% 효과를 기대할 수 없고 비싼 비용을 감수해야 한다.

제 3 방식은 단독으로나 다른 방식과 조합해서 시도될 수 있는데, 고분자 분산제를 온라인상에 주입하여 급수에 의해 유입된 부식생성물이 증기발생기 내부 표면에 침적되는 것을 방지하는 기술이다. 분산제를 급수에 주입하여 부식생성물을 부유시켜 침전을 방지하고 취출수(blowdown)를 통해 제거함으로써, 증기발생기로부터 효과적인 부식물 제거를 유도할 수 있다. 이 방법은 이미 수십 년간 화력발전소 및 산업체 증기발생 설비에서 적용하고 있으나, 고분자 중합반응에 사용되는 무기질 개시제로 인해 황이나 다른 불순물이 발생하므로 원자력발전소 증기발생기 오염을 방지하는 용도로는 사용되지 못했다. 최근에서야 불순물 기준을 만족하는 고분자 분산제가 개발되어 원자력발전소에 적용이 가능하게 되었다.

2. 국내원전 슬러지 제거 사례

국내원전에서는 K-1호기에서 최초로 1990년 11월에 부분 저농도 화학세정(제동, 제철 공정)을 시행하여 약 461 kg의 슬러지를 제거한 이후 총 18회에 걸쳐 시행되었다. (표 3.3 참조) 화학세정 수행 시기를 보면 1990년, 1993년에 수행된 K-1,2호기는 슬러지 성분에서 구리성분이 많이 존재하여 전열관의 건전성을 위해하여 이를 시급히 제거하고자 하였다. 이후 한동안 화학세정 실적이 없었으나, 2007년 K-4호기에서 제 17주기에서 증기발생기 수위 불안정 현상이 발생한 이후 국내에서는 처음으로 저농도 화학세정인 ASCA 화학세정을 실시하였다.

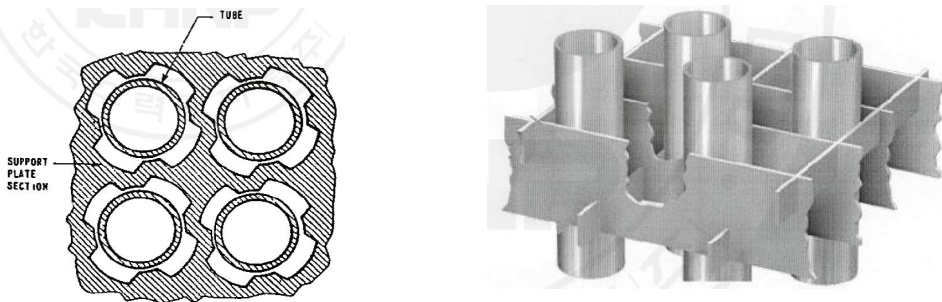


그림 2.5 Quatrefoil 및 Eggcrate 형태 Tube Support Plate

2007년 이후 지금까지 실시된 화학세정을 보면 WH형 증기발생기에서는 모두 ASCA 세정이며, OPR 1000 증기발생기에는 모두 약 20% EDTA를 사용하는 고온 화학세정(EPRI/SGOC)을 시행하였다. 화학세정 방법의 차이는 증기발생기 전열관의 지지판의 모양, 즉 Quatrefoil 형태의 TSP 형태이나, Eggcrate 형태의 TSP 형태이나에 따라 결정되고 있다.

표 2.5 국내 원전 화학세정 수행 현황

년도	발전소	세정방법
'90.11	K-1	SGCC(TTS + 50cm)
'93.11	K-2	SGCC(TTS 상단)
'07. 7	K-4(R17)	ASCA
'08. 5	K-3(R18)	ASCA
'08.10	H-3(R11)	SGCC(TTS 상단)
'08.12	K-4(R18)	ASCA
'09. 9	K-2(R23)	ASCA
'09.10	H-4(R11)	SGCC(TTS 상단)
'10. 9	H-1(R19)	ASCA
'11. 3	U-3(R10)	SGCC
'11. 9	H-2(R19)	ASCA
'11. 9	U-4(R10)	SGCC
'12.08	K-3(R21)	ASCA
'12.10	H-3(R14)	SGCC
'13.02	K-4(R21)	ASCA
'13.11	H-4(R14)	SGCC
'14.05	H-6(R09)	SGCC
'14.08	H-(R10)	SGCC

WH의 Quatrefoil 형태에서는 저농도의 화학세정 약품으로도 침적된 슬러지의 결합 연결 고리를 끊어내어 슬러지를 증기발생기 2차측 바닥인 TTS 부위로 떨어트린 후 슬러지랜싱 장비를 사용하여 제거할 수 있다. 그러나 Eggcrate 형태의 TSP 에서는 저농도 화학약품으로는 Eggcrate 내부 깊숙이 침적된 슬러지 제거가 쉽지 않아서 고농도의 철성분 용해제인 EDTA를 사용하여 고온으로 비등시켜 가면서 제거하고 있다.

3. 국내원전 슬러지 제거 방법 및 정책

가. 운전중 SG 철성분 제거 방법

원전 2차계통에서 운전중에 발생된 철성분 부식생성물은 대부분 증기발생기로 유입된다. 유입과정에서 철성분의 농도가 수 ppb 정도임에도 불구하고 H-6호기, U-3,4호기 및 SK-1호기에서 경험한 바와 같이 주급수 유량밸브의 스택형 케이지에 철성분이 침적되어 정상 운전에도 영향을 주고 있다. 이러한 철성분이 증기발생기로 유입되면 철성분이 농축되면서 대부분 철성분으로 증기발생기 전열관이나 유량 흐름이 적은 TSP 접촉부위에 침적되며, 불순물 제거용 취출수 계통으로 배출되는 철성분은 측정결과를 근거로 할 때 정확하게 측정하기가 어려운 것이 현실이다.

나. 계획예방정비시 SG 랜싱 제거 방법

국내 원전에서는 계획예방정비시 증기발생기 하부에 침적된 슬러지를 제거하기 위해 대부분 매주기마다 슬러지 랜싱 작업을 시행하고 있다. 그러나 OPR 1000 증기발생기의 경우에는 전열관이 삼각형으로 배열되어 있어서 고압수가 전열관 사이를 쉽게 관통할 수 없어서 화학세정후 제거된 슬러지량을 근거할 때 매주기 침적되는 U발전소 3,4호기 300~400kg의 슬러지량에 비해 제거되는 슬러지량은 평균 10 kg 정도(2.5~3.3%)로 슬러지 제거효율은 크지 않다.

다. 화학세정에 의한 SG 철성분 제거 정책

화학세정은 많은 인력과 비용이 소요되며, 화학세정후 폐액을 처리하는데도 많은 비용이 소요된다. 그럼에도 증기발생기의 건전성 확보를 위해 증기발생기 형태별로 화학세정 수행의 필요성이 증대되어서 한국수력원자력(주)에서는 중장기 SG화학세

정 계획을 수립하여 시행중이며, 주요내용은 다음과 같다.

1) 저농도 화학세정 시행

○ 조건

- SG내 슬러지 누적침적량이 1,000kg 초과시
- SG(모델 F) 유로 흐름힘 60% 이상시
- SG광역수위 증가율이 1.5%/주기 이상시

○ 주기(발전소 사정에 따라 유동적 적용)

구분	세정주기	비고
W 형 발전소	매 7주기(9년)	K-2,3,4 H-1,2 U-1,2
표준형 발전소	매 5주기(7년)	H-3,4,5,6 U-3,4,5,6
단주기 발전소	매 10주기(10년)	K-1
중수로 발전소	매 10주기(13년)	W-1,2,3,4

나. 고온 화학세정 시행

○ 조건

- SG(I-600 HTMA재질) 전열관 응력부식균열(SCC), 마모발생 급증 예상시
- 관지지원 인접 전열관에서 SCC가 예상되는 경우
- SG(I-600 TT재질) SCC 발생 또는 계속운전을 위해 필요한 경우

○ 주기 : 사안 발생시에 한해 시행

제 3 절 고분자 분산제 종류 및 슬러지 제거 메커니즘

분산제는 입자 분리와 침전과 응집을 방지하기 위해 현탁액 특히 콜로이드에 투입하는 계면활성제나 비계면 활성제이다. 분산제는 한 가지 또는 여러 가지 계면활성제로 구성된다. 산업용 보일러에 사용되는 고분자 분산제는 <그림 1.1>과 같이 polyacrylate, polyacrylamide, polymethacrylate 등이 주로 사용되고 있다.

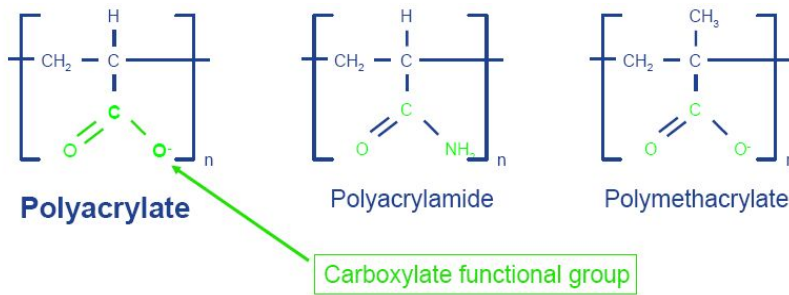


그림 2.6 Industrial boiler polymer dispersant

원자력발전소 2차 계통에 사용 가능한 Polyacrylic acid (PAA)는 acrylic acid가 단량체로써 분자식은 $(\text{C}_3\text{H}_4\text{O}_2)_n$ 으로 표시되며 암모니아나 에탄올 아민으로 중화하여 사용한다. 따라서 중화된 PAA는 수용액 중에서 중성을 나타내며 PAA의 많은 결사슬이 양성자를 잃고 음전하를 띄게 된다. <그림 1.2>는 분산제의 증기발생기 내부 오염의 억제과정을 보여준다. 음전하를 띤 분산제 PAA는 양으로 하전된 부식 생성물 입자 표면 또는 슬러지 침전물 표면에 흡착하고 상호 전기적 반발력이 형성되어 용수 중에 부유함으로써 슬러지의 침전 과정을 방지한다.

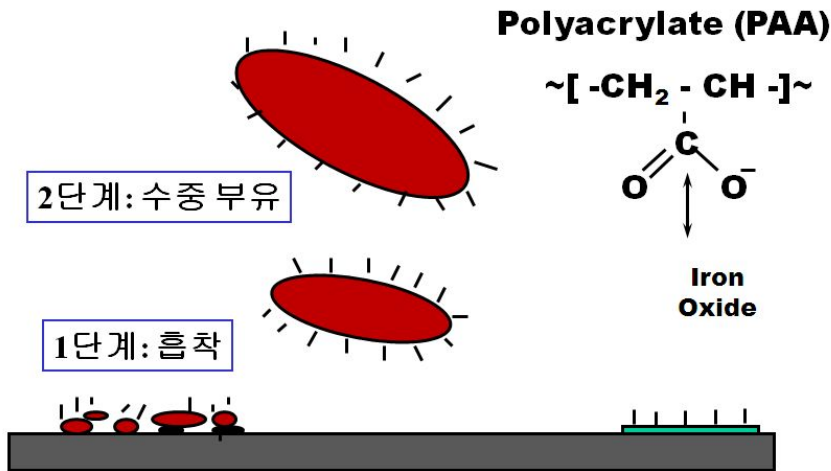


그림 2.7 Mechanism of fouling control with PAA at SG

제 4 절 원자력발전소 분산제 적용 기술 동향

1990년 중반 Atomic Energy of Canada (AECL)과 Babcock and Wilcox (B&W)에서 각자 PWR 발전소 2차 계통에 PAA를 첨가제로 사용하여 분산제 역할을 안전하고 효과적으로 할 수 있을 지를 검토하기 위해 다양한 실험실 규모의 연구가 수행되었다. AECL은 시판되고 있는 합성 후 정제한 분자량이 작은 PAA를 사용하여 분산제의 효력과 부식에 대한 PAA의 영향 등을 수행하였고, 반면에 B&W는 GE-Betz(현:GE Waters & Process Technologists)에서 생산한 고순도, 분자량이 큰 PAA를 MPA로 중화하여 사용하여 증기발생기와 부속설비(BOP)의 부식율에 대한 PAA 영향을 중심으로 수행하였다. 이러한 GE-Betz의 PAA는 일반 시판용 PAA와 달리 SO_4^{2-} 등의 불순물이 없도록 전 과정이 유기합성법으로 생산되며, 분자량은 160,000 MW으로 사용 후 분자량이 1,000 MW 이하가 되면 분산력의 활성이 사라지게 된다.

AECL에 의한 시험결과를 1998년 산업용 제품의 적용 가능성을 EPRI 회의에 보고하였고, 1998년 이후 EPRI와 발전소의 공동연구 형식으로 PAA 사용을 검증하는 단 기간 현장 시험이 증기발생기 교체가 예정된 Arkansas Nuclear One Unit 2 (ANO-2)에서 2000년 초에 시험적으로 3개월 시도되었다. 이 결과 PAA 사용 후 취출수를 통한 철 제거율이 10배 이상 증가함을 확인하였다. ANO-2 시도 후 증기발생기 튜브를 Alloy 690으로 교체하고, 추가적인 검증 시험이 비교적 긴 기간인 6~9개월간 같은 장소에서 이루어졌다. 검증은 재료/화학 평가, 그리고 증기발생기 열 성능 분야에 중점적으로 이루어졌다. 장기간에 걸친 재료/화학 평가 결과 증기발생기나 보조설비 재질에 미치는 영향이 없으며, 증기발생기의 모든 후보 설계들도 장기간 적용시 발생할 수 있는 열전달 성능 효율 감소를 상쇄할 수 있는 충분한 열 여유분이 있음을 열성능 분석으로 확인되었다.

계속된 분산제 관심 속에 2004년 Duke Power의 McGuire Unit 2에서 본격적인 장기간 적용을 계획하여 2005년 8월부터 2006년 9월 중에 실질적으로 12개월간 원자력 발전소 2차계통의 급수관 상단에 PAA를 0.25 ppb에서 4 ppb의 농도로 주입하였다. 분산제 점도가 133 cp인 고점도로 인한 주입펌프 선정과 PAA와 무관한

일시 정지등의 문제점에도 불구하고 성공적인 적용이 이루어졌다. 부식생성물 제거 효율이 5%에 불과하던 것이, PAA 사용으로 45~50%로써 10배 증가하였으며, PAA 주입으로 열성능도 미세하지만 증가하였고, 2차계통 화학 매개변수에 미치는 영향은 없는 것으로 확인되었다. McGuire 적용시험 결과는 증기발생기 공급자에게 장기간 분산제 사용의 기술적 근거자료로 사용되고 있다.

이 밖에도 장기간 분산제 적용을 계획한 발전사로는 Exelon Nuclear에서 Byron Unit 1에 2009년 4월에 영구적인 PAA를 주입을 최초로 시작하였고, 2009년 후반 기에는 Byron Unit 2, Braidwood Unit 1, Braidwood Unit 2에도 확대 적용하였다.

이와 별개로 EPRI에서는 기동 전 급수 시스템의 긴 재순환 계통의 정화를 위해 분산제 사용을 평가하고 있다. 운전정지 후, 기동 시 2차계통에서 증기발생기로 유입되는 부식생성물은 총 부식생성물 유입량의 20%에 이른다. 이 시기의 분산제 사용은 증기발생기 정화를 촉진하고, 제거될 부식생성물량을 증가시킬 수 있다. 이 연구는 이러한 적용에 분산제의 효능을 결정하고 향후 발전소 실증을 위한 검증목표로 하고 있다. 전형적인 PWR인 Byron Unit 1, Three Mile Island (TMI) Unit 1, Millstone Unit 2에서 적용 타당성 조사가 시행되었다.

EPRI에서 또다른 접근법으로 2009년에 증기발생기 습식 휴관처리(wet lay-up) 기간에 분산제 적용을 평가할 계획을 수립하였다. 이 연구는 PAA를 사용하는 화학처리법이 어떻게 발전소 정지시 침전물 제거를 촉진할 수 있는지를 평가하는 데 우선순위를 두고 있다. 이와 같이 미국 내에서 가압경수로 원전 적용을 위한 폭넓은 PAA 검증 시도와 노력은 10년 이상 진행되고 있다.

제 5 절 분산제 특성 및 주입기술 고찰

1. 분산제 열분해 특성 및 관련 영향 평가

가. PAA의 화학적 특성

PAA(polyacrylic acid)는 acrylic acid($\text{CH}_2=\text{CH}-\text{COOH}$)를단위체(monomer)로 하여 용액중합에 의해 합성되며, 중합개시제로는 persulfate를 사용한다[4]. 일반적으로 중합개시제는 중합이 완결된 후에 최종생성물로부터 분리하게 되며, 그 정도에 따라서 고분자 중합체의 순도가 결정된다.

화력발전소에서 이미 오래전부터 철 화합물의 분산제로 사용되고 있는 PAA는 원자력발전소에서는 2000년도를 전후해서야 그 적용이 시도되고 있다. 원전에서 적용이 늦어지게 된 이유 중의 하나는, PAA의 중합개시제 persulfate가 함유하는 황(sulfate) 성분이 일부 제거되지 않았을 경우에 원전 2차측 수화학계통 재질의 부식에 심각한 영향을 주기 때문이다. 따라서 원전 2차측 수화학계통에서 사용할 경우에는 완벽하게 제거하여야 한다.

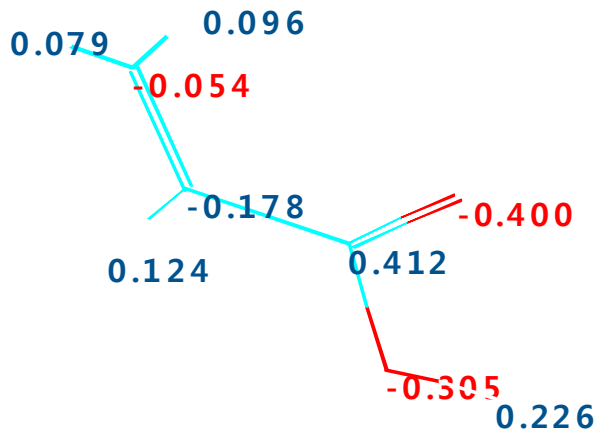


그림 2.8 Atomic charge of PAA calculated by HyperChem™(PM3 mode)

단위체인 acrylic acid는 분자량이 72.06 인 부식성 액체로서, 매서운 냄새가 나는 증기(fume)를 내기 때문에 취급할 경우에 주의하여야 한다. 아울러, 산소가 존재하는 환경에서는 쉽게 중합을 일으키기 때문에, 보관 시에도 유의하여야 한다. 그 분자를 구성하는 각 원자가 지닌 하전(charge)을 화학분자 모델링용 소프트웨어인 HyperChem™으로 PM3 모드에서 계산하여 도시하면 <그림 2.7>과 같다.

이러한 acrylic acid로 중합된 PAA는 색깔과 냄새가 없는 고분자 화합물로서 <그림 2.8>과 같은 분자식을 갖으며, 이를 분석하는 방법으로는 NMR과 Raman 및 FTIR 그리고 molecular dynamic modeling이 있다.

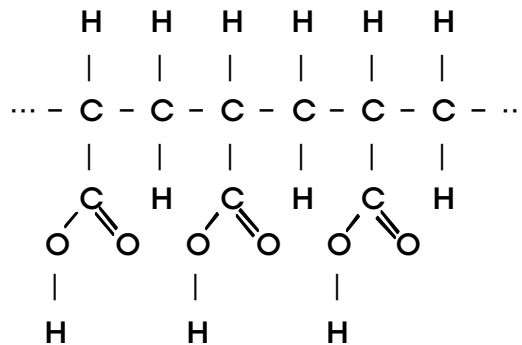


그림 2.9 Molecular formula of PAA

이러한 구조를 지닌 PAA는 착화(chelation) 및 분산(dispersion) 기능을 동시에 갖는다. 즉, PAA의 음전하를 띠는 부위는 외부물질의 양전하를 띠는 부위와 정전기적으로 결합하여 착화합물을 이루게 하며, 결합된 외부물질을 PAA의 긴 분자사슬이 3차원으로 둘러싸아서 그 외부물질이 또 다른 물질이나 화학환경을 차단하여 대해서 물리적 또는 화학적 상호작용을 못하도록 분산시킨다. 이 이중기능은 PAA 분자량이 50,000부터 70,000까지일 경우에 철 이온의 분산을 크게 한다.

PAA가 원전 2차계통수의 알칼리용액 환경(pH > 9.5)에서 <그림 2.9>의 반응식과 같이 쉽게 이온화하는 한편, 그 분자량이 크기 때문에, PAA의 휘발도는 매우 낮게 된다. 따라서 PAA는 원전 2차계통 증기발생기 내에서 거의 휘발하지 않기 때문에 증기상으로 이동하는 양은 무시할 수 있다.

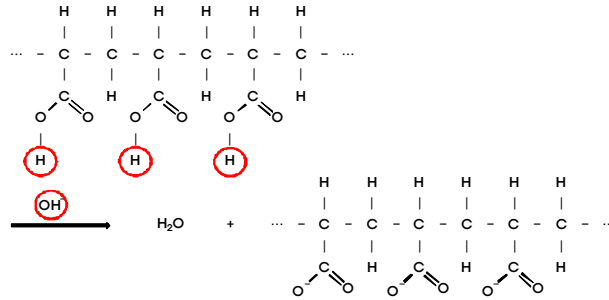


그림 2.10 Ionization of PAA at pH(25℃) of 9.5

이러한 화학적 특성을 지닌 PAA는 2차계통수 내에 용출되는 철 화합물과 효율적으로 착화하고 분산시키는데, 미국 ANO-2 원전에서 단기간 적용시도 중에 보여준 분산제의 분산제거 효율성은 <그림 2.11>과 같다[5].

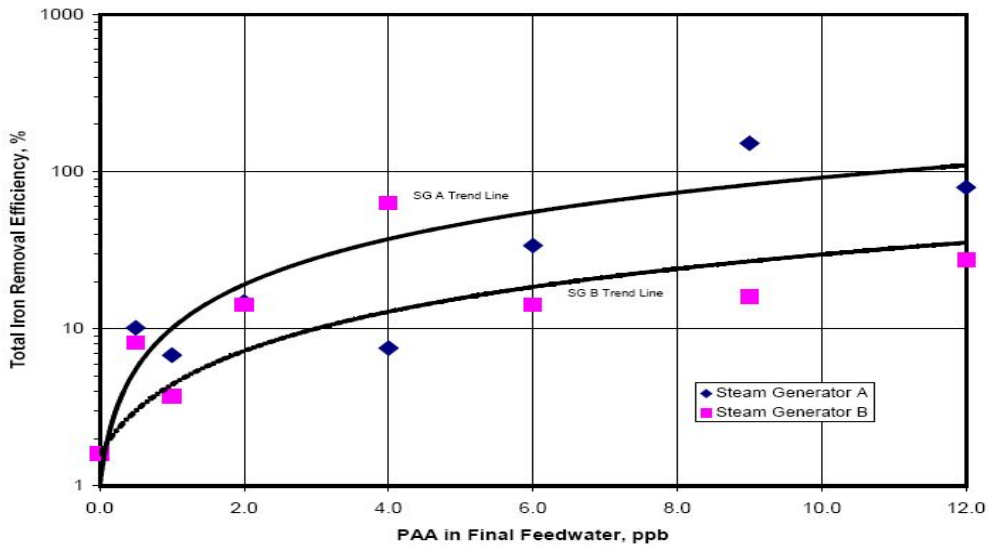


그림 2.11 Log mean iron removal efficiency Vs. PAA concentration in feedwater

나. PAA의 열분해 특성

PAA는 고온에서 열분해하기 때문에, 이를 분산제로 사용할 경우에는 그 분해특성을 고찰할 필요가 있다. ANO-2 원전이 PAA를 적용하기 위해 정리한 열분해 특성 항목들(표 2.6의 빨간 박스로 표시된 부분)에서는 PAA의 반감기(half-life), 이산화탄소(CO₂) 생성, 유기산(organic acids) 생성 및 지방족(aliphatic) 화합물 생성 등이 제시되어 있으며, 이를 정리하면 아래와 같다[6].

표 2.6 ANO-2 적용 시 고려한 주안점

Effect of Dispersant on BOP Materials	Resins Elastomers MSR Materials Turbine Materials Feedwater Piping General Assessment of Metals
Effect of Dispersant on SG Materials	Egg Crate FAC Internals Pressure Boundary Tube Corrosion
Effect of Dispersant on Normal Chemistry	<div style="border: 2px solid red; padding: 2px;">Dispersant Half-life</div> <div style="border: 2px solid red; padding: 2px;">pH_r Effects</div> <div style="border: 2px solid red; padding: 2px;">CO₂ Production</div> <div style="border: 2px solid red; padding: 2px;">Organic Acid Production</div> Cation Conductivity <div style="border: 2px solid red; padding: 2px;">Aliphatic Decomposition Products</div> Crevice Chemistry Increased Blowdown Iron Analysis for dispersant concentration
Effect of Dispersant on Corrosion Product Deposition	Adsorption Capacity Deposition Rate under Flow Boiling Conditions
Effect of Dispersant on Crevice Hideout	Sodium Chloride Hideout/Release Crevice and Bulk ECP
Environmental Considerations	Experience with polyacrylic acid in cooling water State Environmental Authorization
Trial Preparation	Trial scenarios and contingencies

(1) 반감기(half-life)

PAA는 다양한 분해 기구(mechanism)에 의해 여러 분해생성물을 생성한다. 이들을 추정하기 위해서는 속도상수(rate constant)들이 필요한데, 이들 속도상수들은 대개 모-화학종(parent species)에 대해 1차(first order) 반응에 준하지만, 원전 고유의 특성인자에 따라 현저하게 변한다. PAA의 열분해는 계통 pH와 부식생성물 재고 및 합금 성분에 의해 크게 영향을 받는다.

PAA의 반감기는 산소가 없는 270°C의 수용액에서 대략 45분이다. 이에 준해서 PAA의 분해도가 시간에 따라 변하는 형태는 <그림 2.11>과 같이 나타난다.

이와 같이 270°C 근처에서 PAA의 열분해가 일어나는 속도가 만만하지 않기 때문에, 비록 PAA가 철 산화물 등과 더불어 착화하면서 그 주위를 둘러쌓아서 계통표면에 침적하지 않도록 분산시킨 후에 취출수계통(blowdown)으로 부분적으로 제거되지만, 그 제거되는 양 이외에도 열분해가 되는 양을 고려하여 필요한 만큼 PAA를 주기적으로 공급하여야 할 것이다.

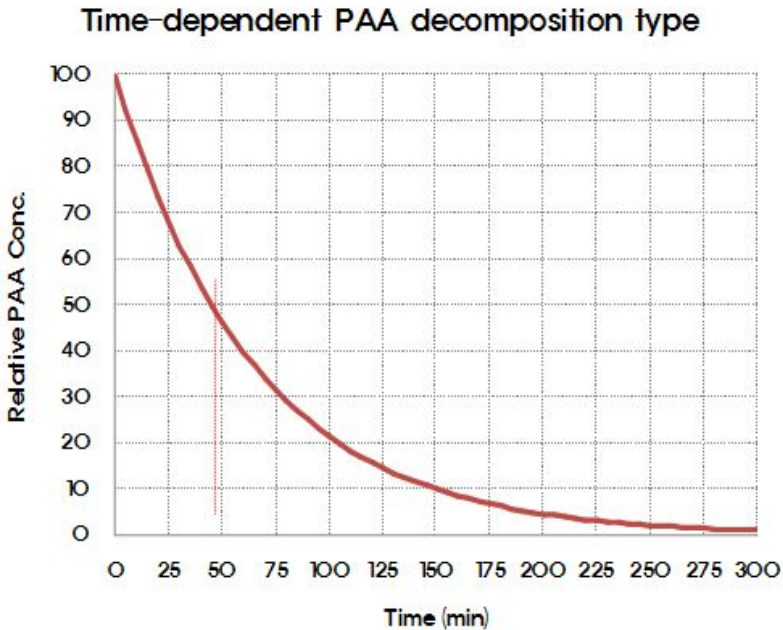


그림 2.12 Time-dependent PAA decomposition type

(2) 탈-카르복실화(de-carboxylation)

PAA가 분해되는 주요한 반응기구 중에는, 그림 4-6과 같이, PAA에 붙어있는 카르복실기가 떨어져 나오는 탈-카르복실화 반응이 있다. 이 탈-카르복실화 반응의 최종생성물들은 수소(H₂)와 이산화탄소(CO₂)이다.

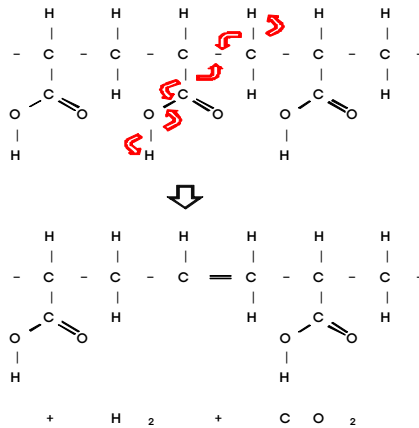


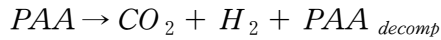
그림 2.13 Thermal decomposition mechanism of PAA

이 분해반응에 의해 생성되는 이산화탄소의 생성은, ANO-2 원전의 단기간 PAA 적용시험 결과에 따르면, 시간에 따라 표 4-2와 같이 된다.

표 2.7 PAA에서 생성되는 CO₂ 반응상수

Run Grace Dearborn (4/30/96)	pH (25°C)	Duration	Recovery	Rate Constant (h ⁻¹)
1	9.5	2	78	0.12
2	10.5	2	70	0.18
3	9.5	2	79	0.12
4	9.5	4	34	0.27
5	9.5	4	50	0.17
6	9.5	4	37	0.25
Average				0.18

이 결과에서 제시된 평균 속도상수는 $0.18h^{-1}$ 이다. 이 이산화탄소가 생성되는 반응차수를 1차식으로 가정하여 아래와 같은 식 (1)~(3) 으로 시간에 따른 추세를 도시하면 그림 4-7과 같이 나타난다.



$$[PAA]_t = \frac{[PAA]_0}{10^{\frac{kt}{2.303}}}$$

$$[CO_2] = [PAA]_0 - [PAA]_t$$

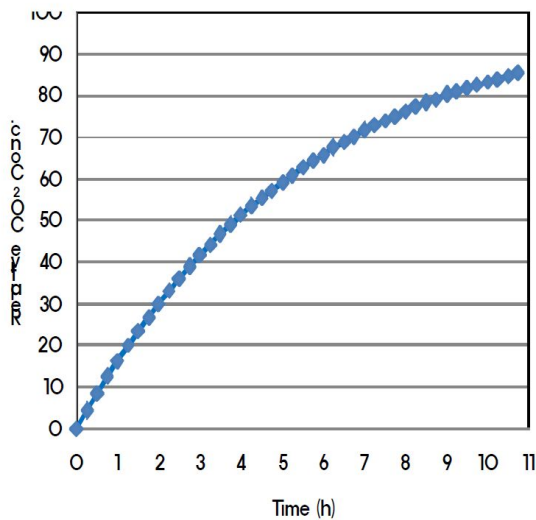


그림 2.14 Time-dependent CO₂ production type from PAA

이렇게 생성되는 이산화탄소는 그 일부가 계통 수용액 내에서 탄산으로 바뀌며 계통수 pH에 약간의 영향을 미치게 되는 동시에, 대부분은 복수기 공기배출계통 (condenser air ejection system)에서 제거된다.

한편, 원전 분산제 후보물질들의 열화 정도를 비교한 자료는 <표 2.7>과 같으며, PAA는 다른 분산제들에 비해 그 분해가 오히려 긍정적인 분산효과를 보여준다는 특징이 있다[7]. 결론적으로, PAA의 고온 열분해에 의해 생성되는 이산화탄소는 2차계통 운전의 심각한 영향을 미치지 않는다고 볼 수 있다.

표 2.8 고분자 분산제의 시간경과에 따른 열화도

polymer	M _n loss	de-carboxylation	effectiveness loss
PAA	23%	9.5%	-9%
PMAA	13%	16.1%	11%
PMA	27%	25.9%	59%

This table shows Masler' s results for three different polymers subjected to 250°C for 18 hours. PAA is polyacrylic acid; PMAA is polymethacrylic acid; and PMA is polymaleic acid.

(3) 유기산(organic acids) 생성

PAA가 열분해하여 생성하는 최종생성물 중에는 유기산들이 있으며, 주된 유기산 음이온으로는 acetate와 formate 및 glycolate가 있다. 이는 pH 제어제로 사용되는 ETA(ethanolamine)의 분해생성물들과 같다.

이들 유기산 생성에 대한 시험결과는 <표 2.8> 및 <표 2.9>와 같이 제시되었다[6]. 이를 도시하면, <그림 2.15>와 같다. 가장 잘 알려진 PAA 분해생성물은 이와 같은 저분자량의 유기산들이며, 그 중에서 acetic acid가 우세하며, 이 화합물의 높은 열적 안정도와 물리적 성질에 의해 약 1 μS/cm의 양이온전도도(cation conductivity)를 계통수에 추가하게 된다. PAA 자체는 이 양이온전도도에 상대적으로 거의 기여하지 않는다.

표 2.9 50 ppm PAA의 온도별 유기산 생성농도 (ppm)

Specie	220°C 140 hr	240°C 143 hr	260°C 168 hr
Acetate	765	416.5	1124.5
Formate	256	185.5	222.5
Glycolate	67.5	32.5	84.5

표 2.10 50 ppm PAA의 SG 유기산 예측농도 (ppb)

Specie	220°C 140 hr	240°C 143 hr	260°C 168 hr
Acetate	10.5	5.6	12.9
Formate	3.5	2.5	2.5
Glycolate	0.9	0.4	1

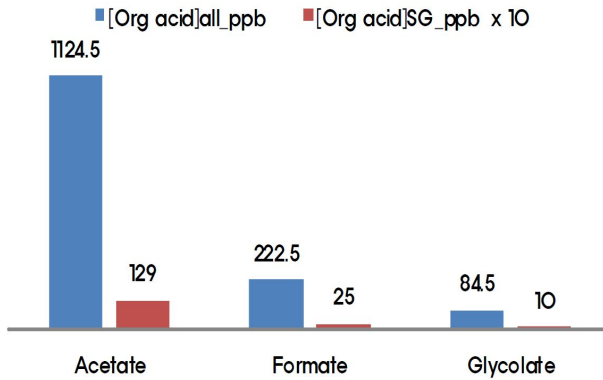


그림 2.15 Organic acid production from 50ppm PAA

일반적으로, PAA-가속 부식(PAA-accelerated corrosion)은 이들 저분자량의 유기산 및 다른 PAA 분해생성물들에 기인한다고 볼 수 있으나, 이 중에서도 acetic acid에 의한 것이 전형적이라고 할 수 있다. 아울러, 계통 재질 중에서 증기발생기 내부의 405형 스테인리스강은 배관의 탄소강보다 PAA-가속 부식에 대해 저항성이 더 크다고 볼 수 있다[8].

(4) 지방족 화합물(aliphatic compounds) 생성

PAA의 열분해 기구 중의 하나는 그 구조의 탄수화물 골격(backbone)을 이루는 탄소-탄소 결합들의 절단(scission)이다. 이 절단은 역시 탈 카르복실화를 통해서 순수한 유기화합물인 더 작은 분자량 화학종을 생성한다.

아무런 작용기들을 지니지 않은 이 순수한 유기물들은 어떤 계통들에서 다루기 쉽지 않을 수도 있다. 아주 낮은 누출 수준(levels of leakage)(makeup)으로 가동되는

이 계통들은 비이온성(non-ionic), 비휘발성(non-volatile) 화학종들에 대해 한정된 제거경로(limited removal pathway) 만을 지니고 있을 것이다. 이들 설비들에 대해, 이 비이온성 화학종들의 농도는 계통화학에 영향을 줄 수도 있는 수준까지 축적될 것이지만, 심각한 영향은 없을 것으로 본다. 이들의 3차수(orders) 보다 더 큰 농축인자(concentration factor)가 쉽게 도달될 수 있는데, 다수의 원전에서 한정된 암모니아 제거의 조건들 하에서 암모니아에 대해 유사한 농축인자들이 관찰되고 있다. ANO-2 원전의 STT(short term trial, 단기간 시험) 동안에 PAA에 기인한 TOC(total organic carbon, 총 유기탄소량)에서의 증가는 없었다. 급수(feedwater) 및 취출수계통(blow down) 내에서의 TOC 측정은, 이 측정결과와 대부분을 이루는 40%의 탄소를 지닌 ETA의 농도로 잘 설명된다. <그림 2.16>은 ANO-2에서 측정된 급수 및 취출수 내에서의 ETA 농도와 TOC의 관계를 보여주고 있다.

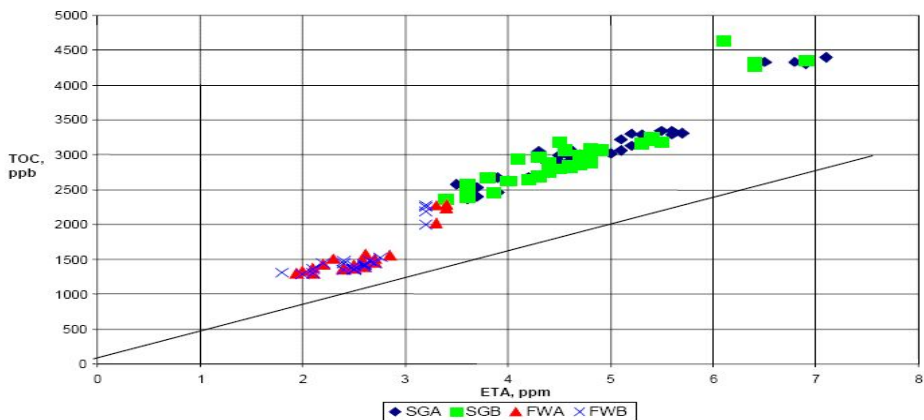


그림 2.16 Total organic carbon vs. ETA during ANO-2 STT

(5) pHt 변화의 FAC에 미치는 영향[5]

계통수 pHt가 FAC(flow-accelerated corrosion)에 미치는 영향은 <그림 2.17>과 같다. <그림 2.17>은 Catawba 원전의 습분분리기(moisture separator) pHt에 따른 총 철농도(total iron)를 보여준다. ANO-2 원전의 장기간 분산제 시험 중에, 이 파라미터에 대한 PAA의 영향은 BOP(the balance of plant)에 잠재적으로 불리하게 영향을 미칠 수도 있는 가장 심각한 요인이다. 그러나 PAA는 ppb 단위로 주입되

기 때문에 (유기 아민이 ppm 단위로 첨가되는 반면에) PAA에 의한 pHt의 감소는 매우 작으며, FAC에 대한 그 영향이 아주 작게 측정될 것이다.

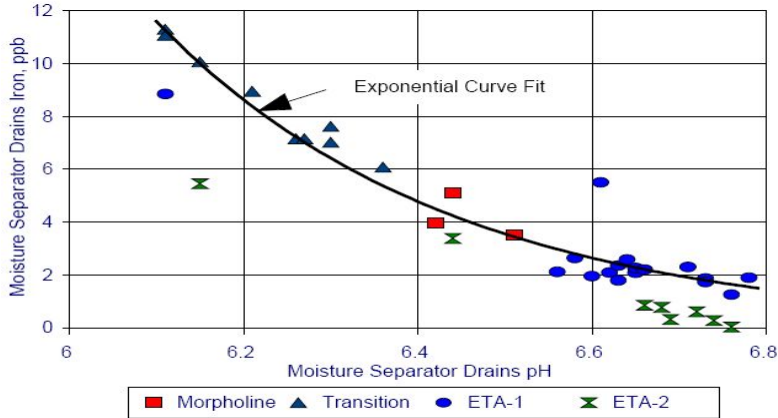


그림 2.17 Total iron versus moisture separator pH_T (370°F)

(6) 열분해 특성에 대한 요약[6]

분산제로 사용되는 PAA는 아래와 같은 열분해 특성을 보인다.

- ① PAA의 열분해 반감기(half-life)는 270°C의 탈산소 조건에서 대략 45분으로 측정된다.
- ② PAA 열분해에 의해 생성되는 이산화탄소(carbon dioxide)는 응축기 공기배출 계통(condenser air ejection system)으로 제거되며, 계통운전에 심각한 영향을 주지 않을 것이다.
- ③ PAA 열분해에 의해 생성되는 저분자량의 유기산들 (organic acids)은 ETA 분해 최종생성물과 동일하며, 계통 pH나 양이온전도도(cation conductivity)에 심각한 영향을 주지 않는다..
- ④ PAA 열분해에 의해 생성되는 지방족 화합물들(aliphatic compounds)은 ETA로부터 생기는 정상 취출수 TOC(total organic carbon, 총 유기탄소)보다 크기 때문에, TOC/TIC(total inorganic carbon, 총 무기탄소량) 감시가 권고된다. 월성 1,2호기 성능기준 설정 프로세스는 정비효과감시 프로그램 지침서에 따라 이루어진다. 감시대상 기능에 대한 안전 중요도가 결정 후에 성능기준 설정이 이루어지게 된다.

제 3 장 분산제 현장 적용 연구결과

제 1 절 분산제 주입 설비 및 준비

H발전소 6호기 증기발생기 B에 분산제 주입을 위하여 다음과 사항을 고려하였다.

- 분산제 혼합물 유량, 농도, 저장용량, 보충계획안 확인
- 주입펌프 신뢰성 문제 고려, 예비펌프 포함
- FAC에 강한 배관(SS)으로 구성
- 주입전 주입 탱크 및 혼합탱크, 배관 세척
- 탱크 게이지와 유량계 조합(분산제 과대 주입 주의)
- 분산제 주입 탱크 설치 위치 및 가능 용량 산정

1. H발전소 6호기 이력

가. 일반사항

H원자력발전소의 NSSS는 열출력 2,825 MWt이다. NSSS는 2개의 독립된 원자로 냉각재 루프를 포함하고 있으며, 각각은 2개의 원자로냉각재펌프와 증기발생기를 갖고 있다. H발전소 6호기는 2002년 상업운전을 시작하였고, 증기발생기 재질은 Alloy 600 HTMA를 사용하고 있으며 현재까지 교체 이력은 없다.

나. 분산제 주입 및 약품 설치 위치

H발전소 6호기는 2개의 증기발생기를 가지고 있으며 분산제는 2개 중 1곳만 주입하여 슬러지 제거 효과를 분석하였다. 본 보고서에서는 분산제를 주입하지 않은 증기발생기를 A, 분산제를 주입한 증기발생기는 B라 편의상 명명하였다. 분산제 주입 위치는 2차년도 연구결과를 토대로 증기발생기에 최대한 가까운 곳을 고려하였고, 그 주입지점은 증기발생기 6호기 B의 급수 라인이다. <그림 3.1>은 분산제 주입 위치를 나타내었다.

이 주입지점은 계획예방정비시 증기발생기의 부식을 방지하기 위해 습식휴관처리할 때 약품을 주입하는 곳이다. 따라서, 본 연구에서 자체 제작한 설비는 약품 혼

합 탱크, 약품 주입 탱크와 약품 주입 펌프와 연결되는 배관이다. 약품 주입 탱크는 약품 주입 펌프룸에 임시적으로 설치하였으며, 공간이 협소하여 따로 약품 혼합 탱크를 제작하였다.

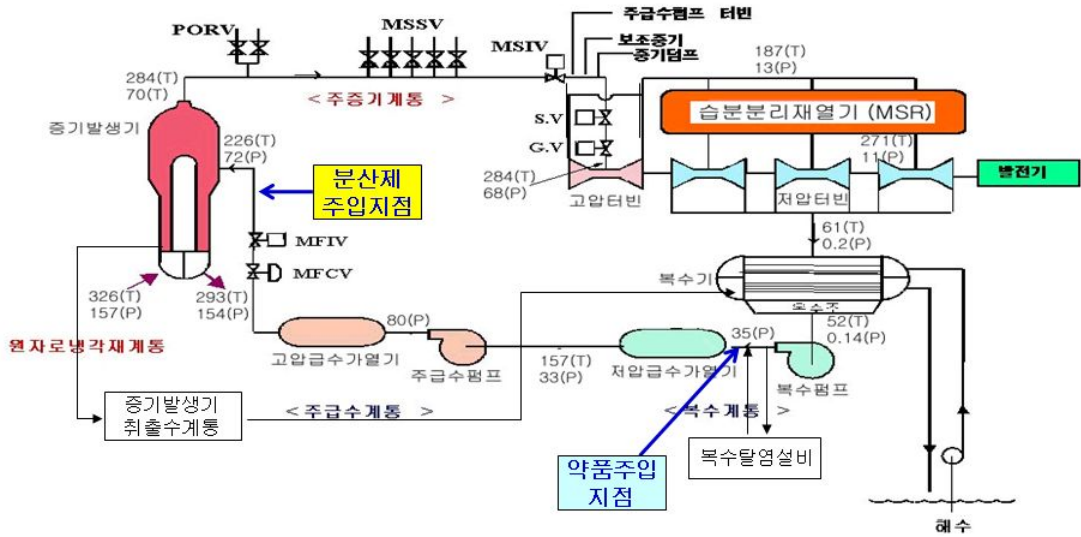


그림 3.1 원전 2차계통 화학약품 및 분산제 주입 개략도

다. 약품 및 주입 설비

분산제로 사용한 약품은 아래와 같다.

- 약품명 : GE Optispere PWR6600
- pH : 약 8.5
- 비중 : 1.063
- 점도 : 133 cps at 21°C
- 특징
 - Ethanolamine으로 중화 처리된 10%의 PAA 수용액
 - 고 순수로 희석된 상태
 - 중합반응 개시제(무기물)을 함유하고 있지 않음(Sulfate염이나 Chloride염 없음)

<그림 3.2>는 약품 주입 설비 주입 개략도이다. 약품주입 설비는 약품주입 탱크 및 탱크 수위계, 저수위 경고등 그리고 약품주입 펌프 등이 기존 주급수 계통에 임

시로 연결하여 시험을 수행하였다. 약품 주입펌프는 항상 가동하여 일정하게 분산제가 주입될 수 있도록 하였다. 설치된 분산제 주입 탱크와 혼합 탱크는 설치 전에 이미 세척작업이 되었지만, 여분의 불순물을 제거하기 위해 설치된 후 현장 탈염수를 이용하여 세척 및 잔류 불순물 검사를 수행하였다.

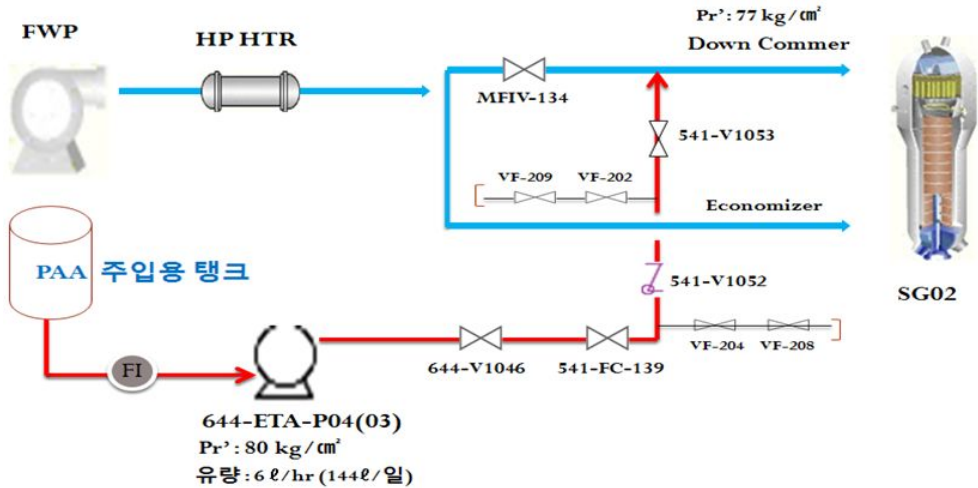


그림 3.2 약품 주입 설비 구성 및 개략도

라. 분산제 주입 탱크와 기존 약품 주입 펌프 배관 연결

기존 약품 주입 펌프를 이용하여 분산제를 주입하기 위해 분산제 주입 탱크와 약품 주입펌프 사이를 연결할 수 있도록 배관 작업을 따로 수행했다. 배관 재질 및 분산제 주입 탱크, 혼합 탱크는 분산제에 의해 부식이 발생하지 않도록 하기 위해 내부식성 재질인 SUS 316을 사용하였다. 약품 주입 펌프의 끝단과 배관 끝단의 배관은 유연한 배관을 사용하였다. 또한, 분산제 주입 유량 및 총 주입량을 알 수 있도록 장비를 따로 설치하였다. 초기에 분산제는 농도는 일정하게 하고, 주입펌프의 유량을 조절함으로써 급수에 들어가는 분산제 농도를 맞추려고 하였다. 하지만, 현장상황을 고려하여 약품 주입 유량은 일정하게 하고 분산제 농도를 다르게 하여 급수 농도를 맞췄다. <그림 3.3>은 배관과 약품주입펌프와 배관 끝단이 연결된 모습이며, <그림 3.4>는 분산제 주입 유량 및 적산 표기 설비와 약품 주입 유량 조절 밸브이다. 모든 설비가 설치된 후, 약 1주일간 약품 주입 유량 검증과 설비의 안전성을 확인하기 위해 시운전하였다.



그림 3.3 약품주입펌프 및 배관 연결



그림 3.4 유량, 적산설비(a) 및 약품주입펌프 유량 조절 밸브(b)

제 2 절 분산제 적용

본 연구과제에서 분산제 현장 적용시 가장 중점적으로 고려해야할 사항은 크게 두 가지이다.

첫째로, 분산제를 주입함으로써 발생할 수 있는 2차계통 수화학의 영향이다. 현장에 적용된 분산제(PAA)는 에탄올아민(ETA) 중화의 acrylic acid 단량체이기 때문에 증기발생기 내 환경에서 분해가 된다. 분해된 분산제는 2차 계통 수질에 영향을 미칠 수 있고, 이는 2차계통 설비 건전성에 영향을 줄 수 있다. 따라서 분산제 주입 기간과 주입 이후에 2차계통 수화학 모니터링 및 평가를 수행하였다.

두 번째로 실제 분산제가 주입되었을 때 얼마나 증기발생기내의 슬러지를 제거하는지의 효과 측정이다. 이것은 증기발생기 취출계통의 필터 차압이나, 철농도 변화 그리고 증기발생기 열성능 등으로 평가하였다.

1. 2차계통 수화학 영향

가. 양이온전도도(Cation conductivity) 변화

<그림 3.5>는 증기발생기 A, B의 분산제를 주입 전, 후 변화한 양이온 전도도 변화이다. 증기발생기 A의 경우에는 양이온 전도도가 변화가 크게 없었다. 하지만 증기발생기 B의 경우, 분산제 주입 농도에 따라 양이온 전도도가 약간 증가하는 경향을 보였으며, 이 증가한 값은 증기발생기 취출수 계통의 기준인 1uS/cm의 20% 미만이었다.

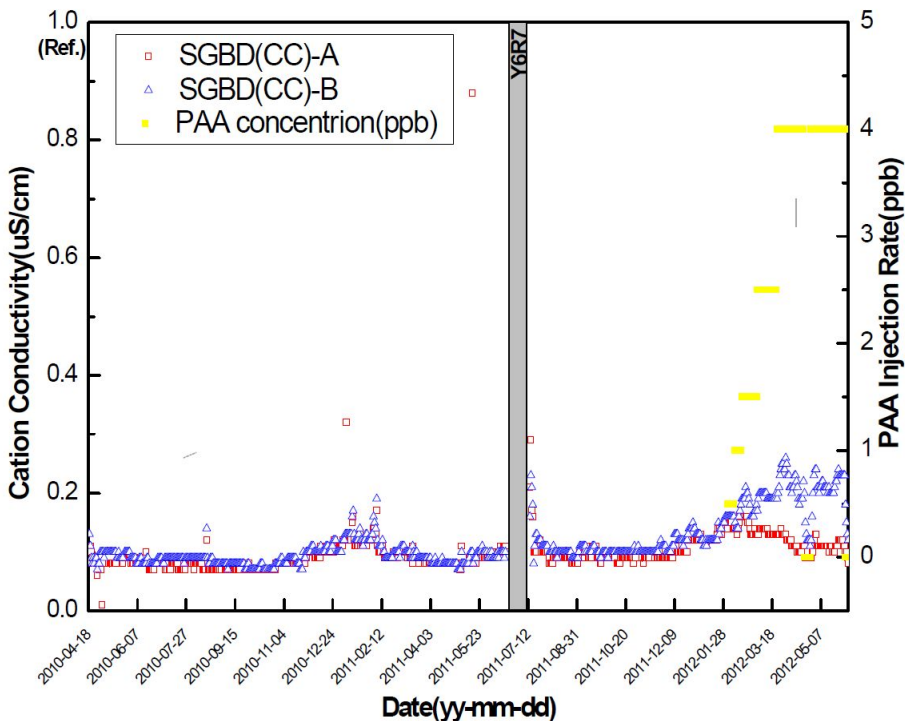


그림 3.5 분산제 주입 전·후 양이온 전도도 변화

나. 총 유기탄소(TOC) 변화

2차계통에 비이온성 화합물이 축적되면 수화학에 영향을 준다. 따라서 분산제 주입 동안에 매일 TOC를 측정하여 분산제에 의해 2차계통 수화학에 미치는 영향을 분석할 필요가 있다. <그림 3.6>은 급수에 있는 ETA의 농도와 취출수 계통의 ETA 농도, 분산제 주입기간에 측정된 TOC를 나타내고 있다. 그림에서 TOC의 농도는 급수에 포함되어 있는 ETA의 농도에 따라 변하는 것을 확인할 수 있었고, 주입된 분산제와는 연관이 없었다. 이러한 결과는 EPRI의 연구내용과 일치하였다.[4]

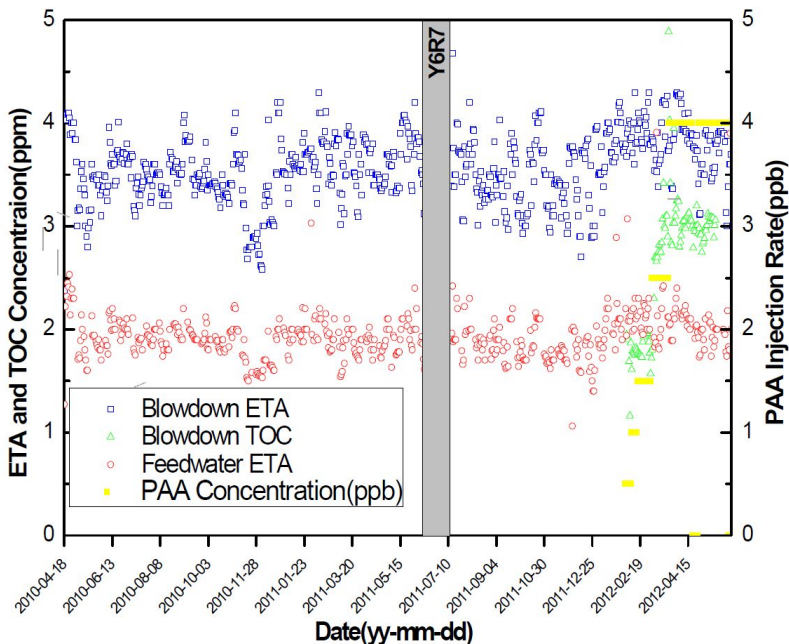


그림 3.6 급수 및 취출수 ETA, TOC 변화

다. pH의 변화

분산제는 분해되면 유기산을 생성한다. 분산제의 분해 생성물 중 저분자량의 유기산들 중에 acetic acid가 많이 생성되며, 이러한 유기산은 pH에도 영향을 미칠 것을 판단되었다. <그림 3.7>은 분산제 주입 기간 전, 후의 pH 변화를 나타낸 그림이다. 분산제 주입기간에 변화한 pH를 추이를 보면 2차계통에 미치는 영향을 미미한 것으로 보이며, 오히려 급수중 ETA의 농도에 영향을 많이 받는 것으로 판단된다. 또한 증기발생기 A, B를 비교하여 보면 분산제에 의해 pH는 크게 영향을 주지 않는 것을 보인다.

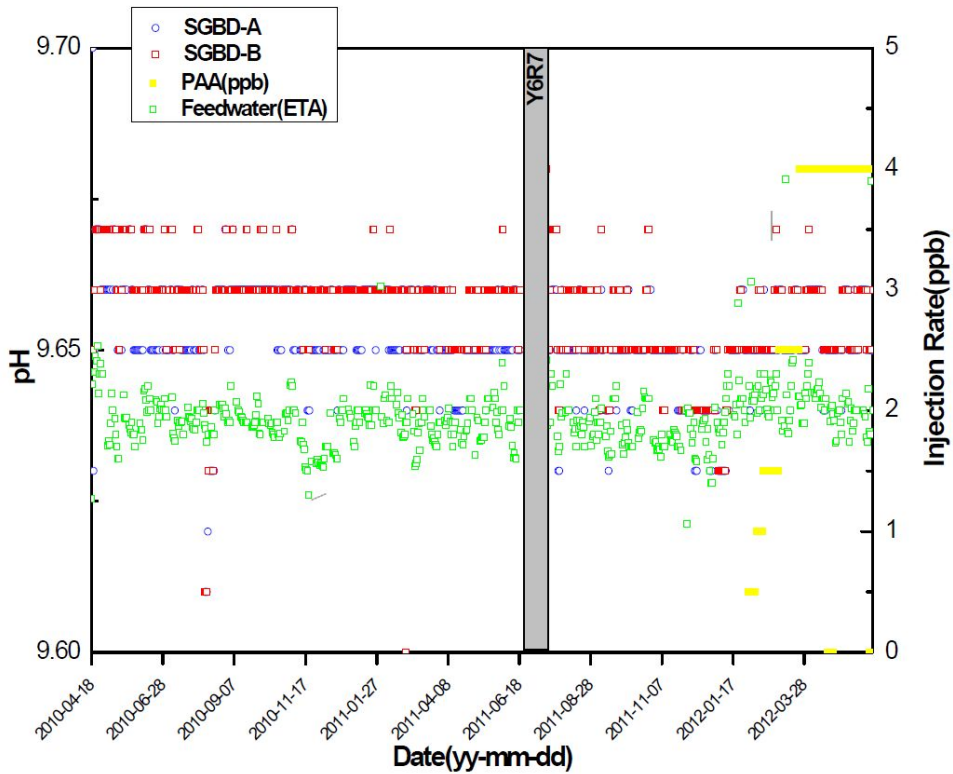


그림 3.7 분산제 주입기간 중 pH 변화

라. 취출수계통 탈염기 영향

증기발생기에 분산제를 주입하게 되면 슬러지와 분산제의 반응메커니즘에 따라 슬러지는 취출수계통으로 많이 배출될 것으로 판단하였다. 배출된 슬러지는 탈염기 전단 필터(FT16)에서 걸러지고 일부는 탈염설비에서 제거될 것이라고 판단하였다. 따라서, 분산제의 일부는 탈염설비에 영향을 주게 될 것이다. <그림 3.8>은 취출수 탈염기 출구 시료의 양이온 전도도를 나타내며 분산제에 의해 취출수 탈염기에는 영향이 없는 것으로 판단된다.

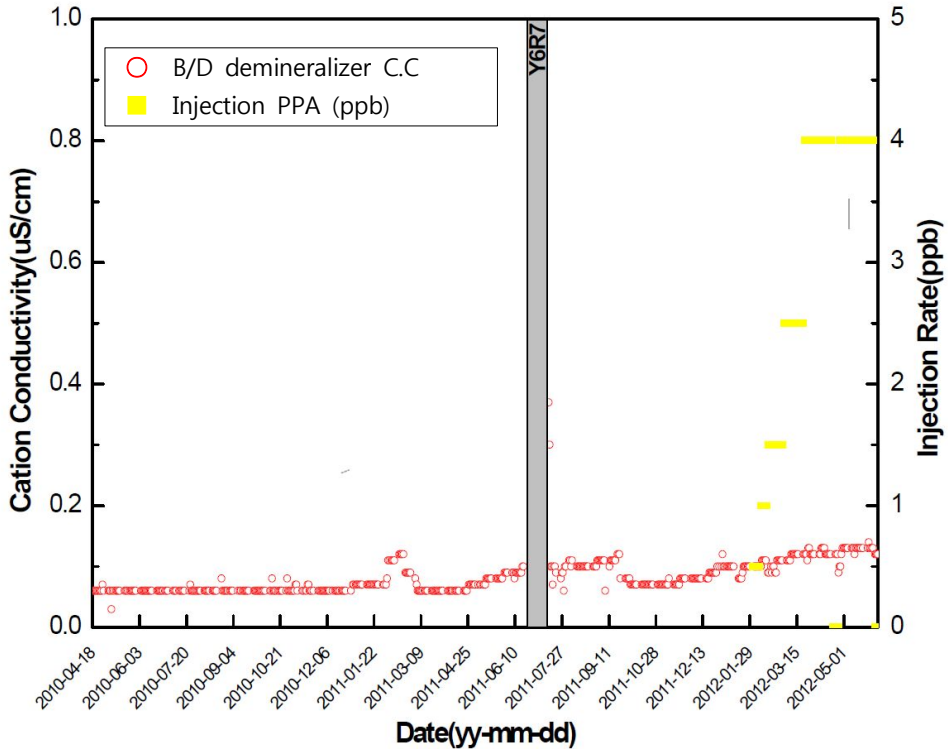


그림 3.8 취출수 탈염기 양이온 전도도 변화

2. 증기발생기 내 슬러지 제거 효과

가. 취출수 탈염기 전단필터(FT16) 차압 비교

분산제를 주입하게 되면 증기발생기 내 슬러지와 결합하여 취출수계통으로 나오게 되고 이러한 슬러지는 전단필터에 걸리게 될 것이다. 따라서, 분산제에 의한 슬러지 제거 효과를 파악하기에는 전단 필터 차압이 변하는 것으로 그 제거 효과를 알 수 있다. <그림 3.9>은 같은 기간에 H발전소 5호기와 6호기의 필터 차압 변화 추이를 나타낸 것이다. 분산제에 의해 슬러지 제거 효과는 6호기 증기발생기 A, B의 차압을 비교하면 좋지만 취출수계통에서 제거되는 슬러지는 하나의 필터를 사용하기 때문에 비교할 수 없었다. 따라서, 운전이력 및 수화학이 비슷한 5호기와 상대 비교하였다. 그림에서 분산제를 주입하는 시기부터 필터의 차압이 급격하게 상승되었음을 확인할 수 있었고, 이것으로 분산제는 증기발생기 내 슬러지를 제거하는 데 효과가 있는 것으로 판단된다.

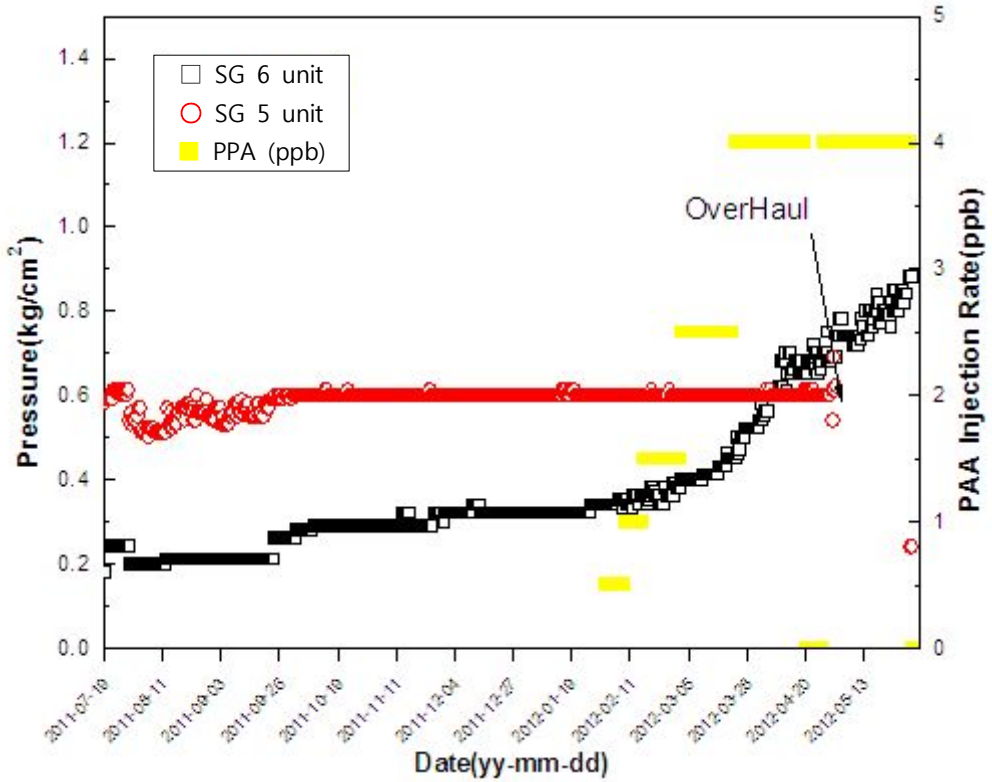


그림 3.9 5, 6호기 증기발생기 필터 차압 변화

나. 증기발생기 내 철 성분 추이 변화 평가

분산제 주입에 따른 슬러지 제거 효과를 평가하기 위해 분산제 주입 전에 증기발생기 6호기 B의 3곳에서 슬러지를 채취하였다. 시료 채취점의 첫 번째 위치는 취출수계통과 동일한 라인에 있는 고온관(취출수계통의 슬러지 농도와 같다고 가정)이며, 두 번째는 증기발생기로 유입되는 철의 농도를 파악하기 위해 분산제가 주입되는 위치보다 전단에 위치한 급수계통 시료채취라인이다. 세 번째로는 분산제가 주입되고 증기발생기 내부 계통수와 접촉하는 지점으로 이 지점은 습분분리기에서 응축된 물과 Economizer에서 가열로 인해 농축된 철이 상승하는 부분인 Downcomer이다. 그림 3.10은 분산제 주입 전, 후 고온관과 Downcomer에서 분석된 철의농도 추이를 보여주고 있다. 분산제 주입 전에는 고온관에서 분석된 철의 평균농도는 1.45 ppb이고 Downcomer에서 분석된 철의 평균농도는 3.63 ppb이다.

분산제 주입 후에는 고온관의 평균 철의 농도는 7.29 ppb이고 Downcomer에서는 23.30 ppb로 분석되었다.

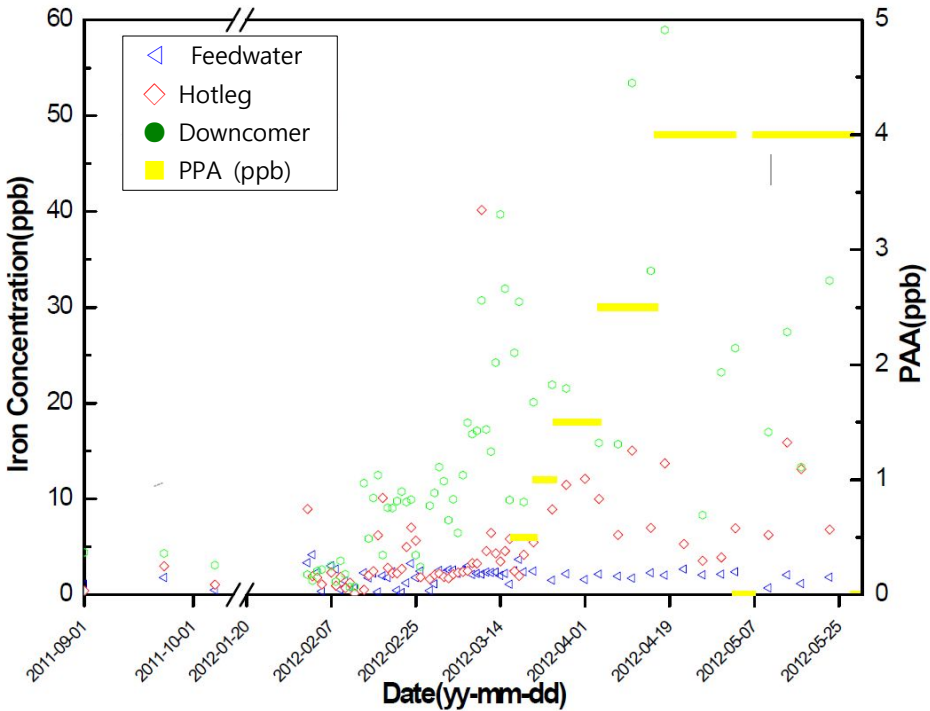


그림 3.10 고온관 및 Downcomer 철 농도 변화

이는 고온관의 경우 약 5.04배 철이 많이 배출되었고, Downcomer의 경우에는 6.42 배이다. 또한 고온관에서 분석된 철의 농도는 분산제의 주입 농도에 따라 변함을 확인할 수 있었다. 분산제 주입 초기에는 급격한 슬러지 제거로 인해 수화학 및 2차계통에 영향을 줄 것으로 판단하였다. 따라서 각 분석항목의 주기를 하루단위로 수화학 및 2차계통에 미치는 영향을 분석하였다. 하지만 어느 정도 일정 시간이 흐른 뒤 각 항목 분석결과, 수화학 및 계통에 미치는 영향이 크지 않는 것으로 판단되어 분석주기를 3~5일 간격으로 늘렸다. 또한 분산제 농도를 2.5ppb까지 상향 조절했음에도 불구하고 예상만큼 슬러지 제거 효과가 없었다. 그 이유는 다음과 같다고 판단된다. 분산제는 증기발생기 내에 슬러지와 반응하여 취출수계통으로 나오게 되어 있다. 하지만, 본 과제에서 수행한 취출수계통의 슬러지 분석은 고온관으로 대체하여 분석을 하였다. 하지만, 분산제와 반응한 슬러지는 지름이 작은 고온관 시료 채취라인으로 유입되기는 확률적으로 떨어지게 되어 있다. 따라서 시료 채취

부위 한 곳을 분산제 주입 중에 추가하였다. 추가된 시료 채취 부위는 증기발생기 취출수계통 재생열교환기 배수 부분이며, 1주일에 한번씩 수행하였다.

<그림 3.11>는 급수에 유입되는 철 농도 대비 고온관(취출수계통)과 취출수계통 재생열교환기 배수 부분에서 제거되는 철의 효율을 나타내었다. 고온관에서 철농도 제거 효율 분석시 최대 18%까지 제거가 되는 것으로 분석되었다. 취출수계통 재생열교환기 배수 부분에서는 제거 효율이 100%가 넘어가는 경우가 있는데, 이러한 현상은 증기발생기 내부에 침적되어 있는 슬러지가 일시적으로 많이 배출되었기 때문으로 판단된다. 이 현상은 해외원전에서도 비슷한 경향을 경험한 바 있다.

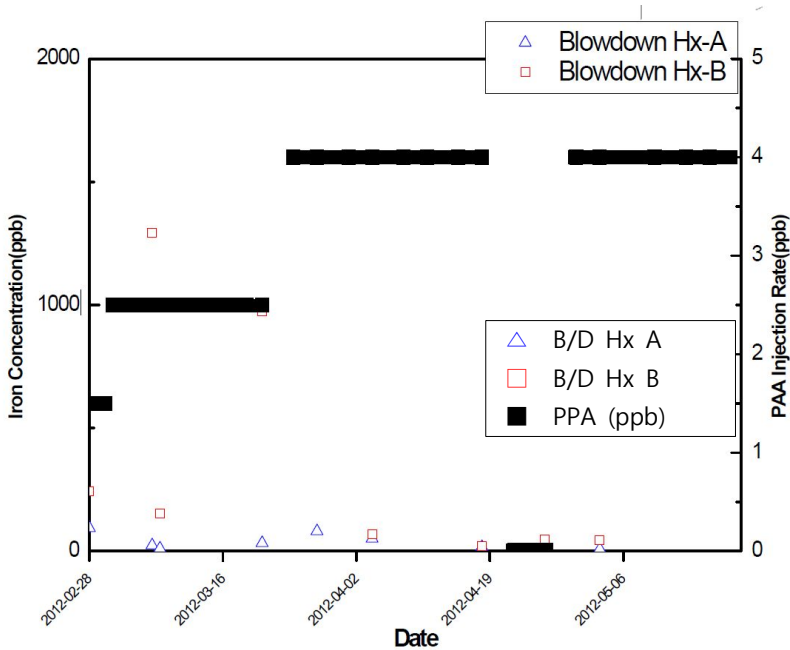


그림 3.11 취출수계통 열교환기 A,B 배수밸브 철농도 변화

다. 증기발생기 내 분산제 농도 분석 평가

<그림 3.12>는 주입된 분산제 농도에 따라 증기발생기 내에 존재하는 순수 분산제의 농도를 나타내고 있다. 초기에는 분산제가 검출되지 않다가 분산제 농도 2.5 ppb에서 처음 검출이 되었으며, 분산제 농도 4 ppb에서는 매회 검출이 되었다. 하지만, 증기발생기 6호기의 수질에서 분산제가 검출되는 시간과 겹치는 부분이 발생

하여 분산제 농도 4 ppb에서 예상보다 높은 농도로 분석되는 경우도 발생하였다. 이는 pH 조절제로 쓰이는 ETA가 분해되면서 생성되는 유기산이 분산제 농도 분석에 영향을 미치는 것으로 판단된다.

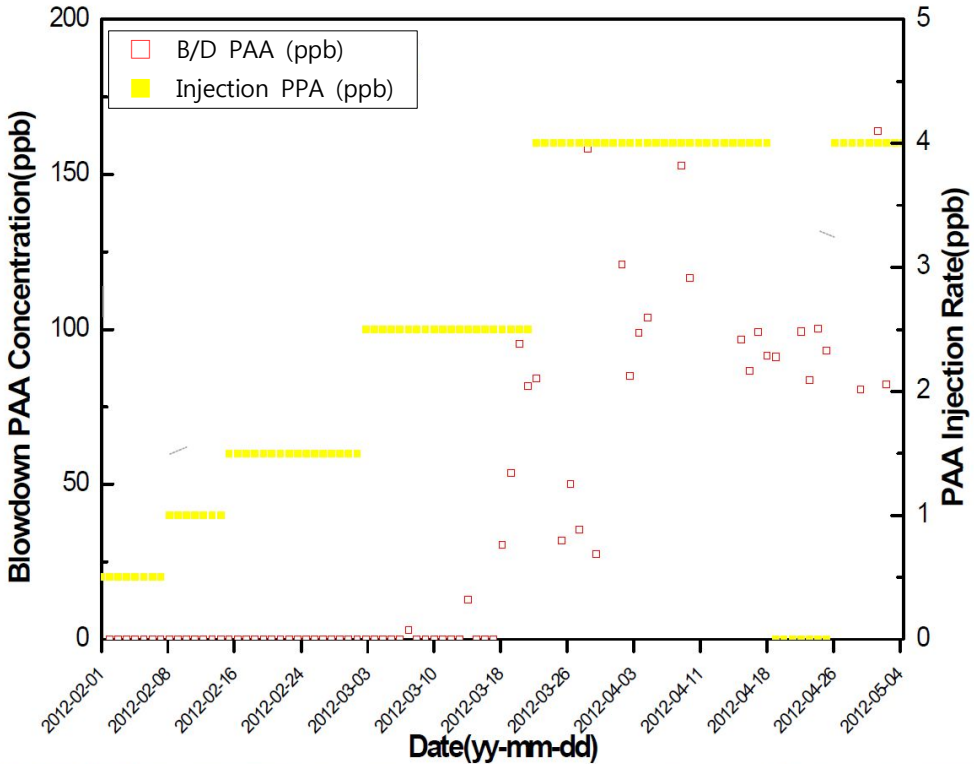


그림 3.12 증기발생기 취출수 분산제 농도 변화

라. 열성능 평가

(1) 열성능 분석 개요

증기발생기 전열관 표면 및 유로등에 퇴적된 슬러지는 스케일을 형성하여 전열관의 1,2차측 열전달을 방해한다. 열전달 성능 변화는 1, 2차측 운전변수를 취득하여 SG 전열관 총괄 열전달 계수(U) 및 총괄 파울링계수(R)를 계산함으로써 분석이 가능하며, 통상적으로 상업운전 초기부터 현 운전시점까지의 운전변수 수집을 통해

전체 운전주기의 열성능 변화를 감시하는 것이 일반적이나, 화학세정, ASCA세정 등, 2차측 퇴적환경에 급격한 변화가 있을 경우에도 변화추세 분석이 가능하다.

(2) 열성능 변화관련 운전변수 취득

- 운전변수 취득기간 : '04.04(2주기 초) ~ '12.05(8주기 분산제 주입종료)
- 초기 파울링 기준 : '04.04.07 파울링계수 계산결과를 0 으로 가정
- 주요 취득변수는 아래 표와 같다.

표 3.1 전열관 파울링 진단 운전변수

1. 냉각재 유량(m_{po} , kg/s)	2. 냉각재 고온관 온도(T_{ho} , °C)
3. 냉각재 저온관 온도(T_{co} , °C)	4. 냉각재 압력(P_{pzro} , MPa)
5. 증기발생기 급수유량(m_{fwo} , kg/s)	6. 증기발생기 급수온도(T_{fwo} , °C)
7. 증기발생기 출구 증기압력(P_{eo} , MPa)	8. 증기발생기 압력(P_{so} , MPa)
9. 증기발생기 연속취출유량(m_{bdo} , kg/s)	10. 증기발생기 열전달율(Q_{so} , kW)
11. 증기발생기 열전달 면적(A_o , m ²)	12. 총괄 열전달 계수(U_o)
13. 증기발생기 출구노즐 압력감소(P_{do})	14. 증기출구 건도(x_o)
15. 전열관 정비 이력(관막음)	16. 출력증강 이력(설계 변경)

(3) 열성능 변화분석

□ 총괄파울링 계수

주기별 총괄 파울링 계수(Rf, global fouling factor, m²×°C/kw)는 변화는 아래 <그림 3.13>과 같다. 운전주기가 경과됨에 따라 총괄 파울링계수는 값은 증가하는 경향을 보인다. 주기초 총괄 파울링 계수가 급격히 상승하였다가, 주기말에 약간 감소하는 경향을 보이거나, 운전주기가 경과됨에 따라 전반적으로 상승하였다.

8주기 운전 중에는 이전 주기와 다른 경향을 보이는데, SG A에 비해 SG B 파울링 감소속도가 좀 더 빠른 것으로 나타났다.

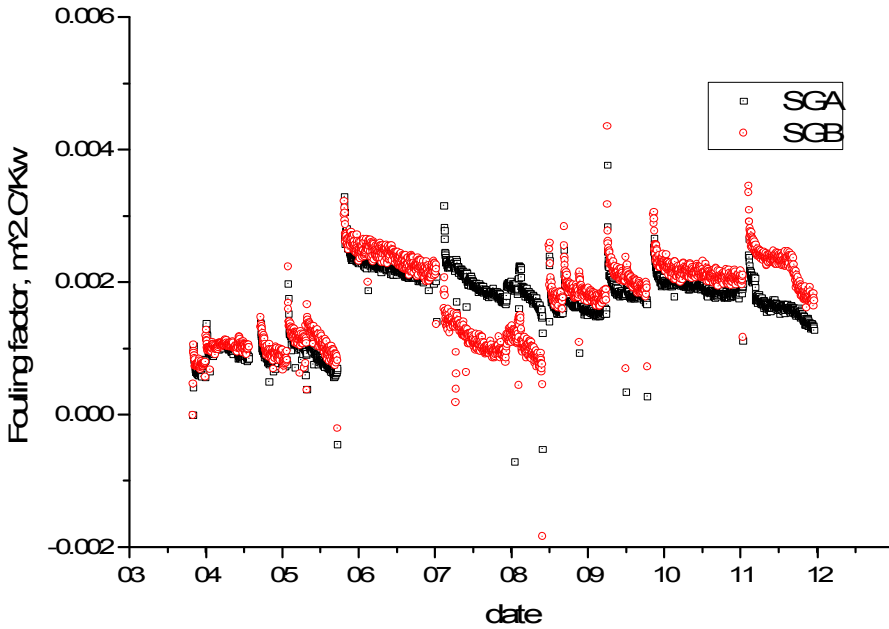


그림 3.13 주기별 총괄 파울링계수 변화

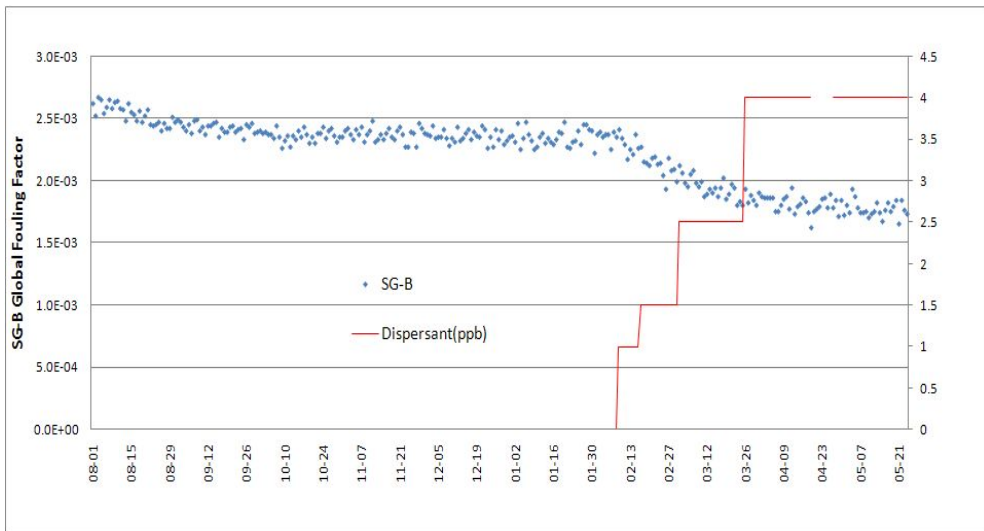


그림 3.14 8주기 SG B 총괄 파울링계수 변화

SG A와 달리 SG B의 경우, '12.02월부터 분산제가 주입되었으며, 총괄 파울링계수의 변화시점이 분산제 주입시점과 일치하였다.

분산제 주입으로 인해 전열관 퇴적 스케일의 일부가 제거되거나 또는 스케일 퇴적 형상 변화 등으로 인해 열성능이 개선되었을 가능성이 있다.

□ 증기발생기 다발상부 압력

증기발생기 출구노즐 배관에서 측정된 게이지 압력을 이용하여 증기발생기 다발상부(dome)의 압력으로 환산하였다.

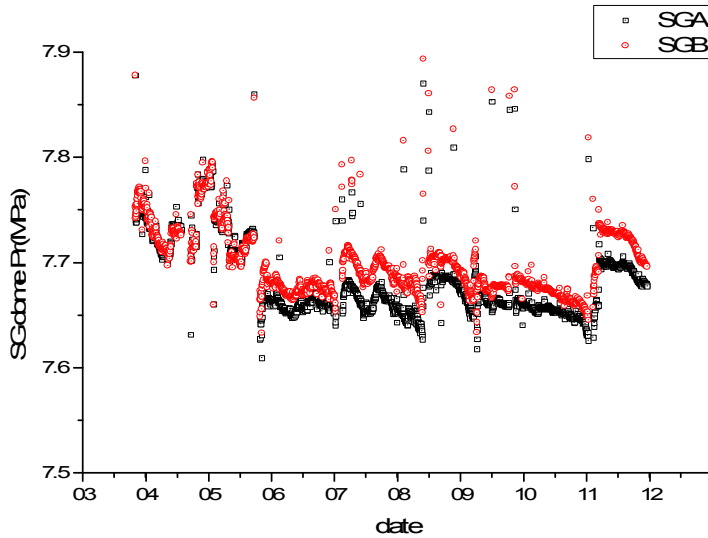


그림 3.15 주기별 SG 상부 압력변화

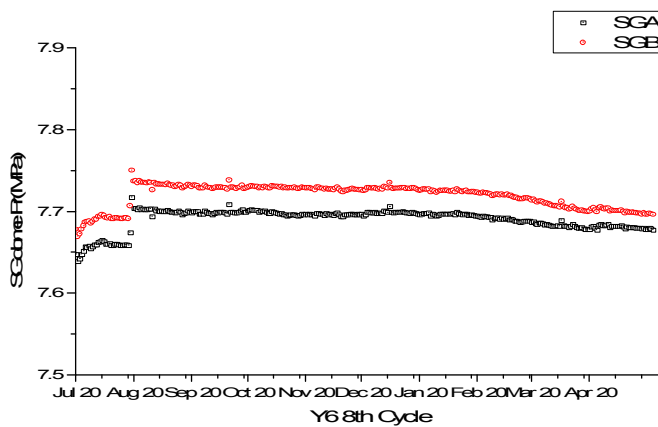


그림 3.16 8주기 SG 상부 압력변화

□ 분산제 주입관련 열성능 영향평가

총괄 파울링계수 변화폭과 열성능은 <그림 3.14> 및 <표 3.2>와 같이 주입 전에 비해 향상된 것으로 평가된다. 분산제 주입 및 ASCA 세정으로 인한 총괄 파울링 변화사례는 <표 3.2>와 같은데, ANO의 STT 경우와 McGuire 에서의 LTT 결과는 퇴적물 제거로 인해 열성능이 감소될 수도 있고 증가될 수도 있는 사례를 보여주며 이러한 것은 전열관 슬러지 퇴적구조와 관련이 있는 것으로 알려졌다.

표 3.2 총괄 파울링계수 변화 사례

호기	증감폭 (m ² -°C/kw)	열성능 증감	비 고
H-6 SG B	-6.172E-04	증가	'12년 분산제 주입전후('12.01월 대비)
ANO #2	+2.4E-03	감소	'00년 분산제 단기주입시험(STT)
McGuire #2	-5.2E-04	증가	'05,06년 분산제 장기주입시험(LTT)
K-4 SG-C	-3E-03	증가	'07년 ASCA 세정전후
Tomari 1 SG	-4.4E-03	증가	'06년 일본 토마리 ASCA 세정전후

□ 증기압력 변화

분산제 주입전과 후의 증기압력 변화는 '12년 1월 평균 대비 약 -0.03MPa이다. 열 전달 성능이 향상될 경우에는 증기압력이 미세하게 증가하는 것이 통상적이나 측정된 결과로는 오히려 증기압력이 감소된 것으로 평가되었다.

압력의 감소는 총괄 파울링계수 변화와 상반된 결과로서 분산제 주입에 의해 증기압력이 감소하였기 보다는 출력의 변화 등 운전변수의 미세한 변화에 의해 증기압력이 변한 것으로 판단됨.

□ 터빈 거버너 밸브 개도변화(%),

출력의 증감발 등으로 인해 증기발생기 출구압력이 변화될 경우, 고압터빈입구의 거버너 밸브 개도가 변동하게 된다. 8주기 운전기간 동안 고압터빈 거버너 밸브 개도는 아래 <그림 3.17>과 같이 일정하게 유지된다. 분산제 주입기간 전후 고압터

빈 밸브개도에 영향을 줄 만한 열성능 변화는 없었던 것으로 판단된다.

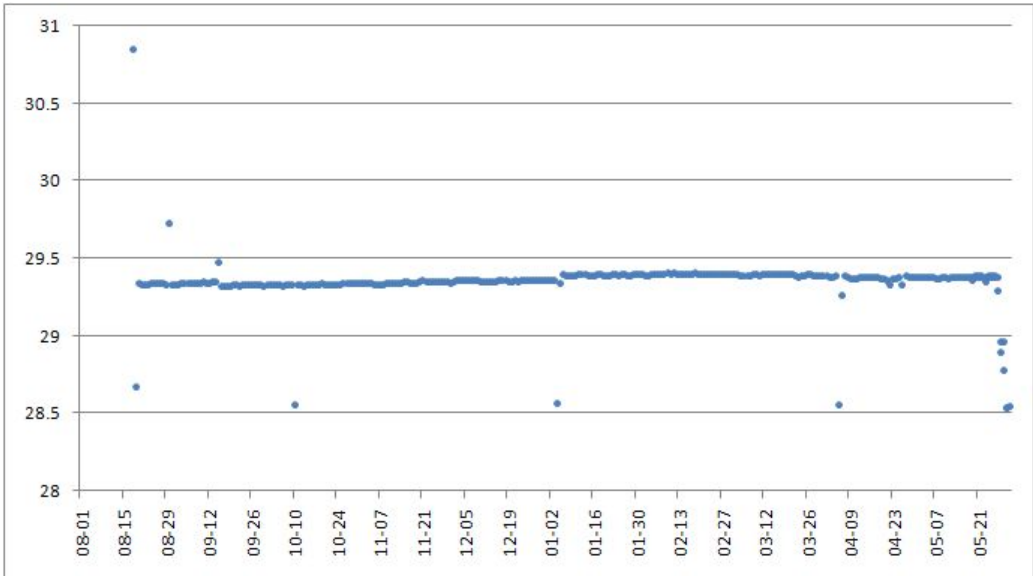


그림 3.17 8주기 고압터빈 조절밸브 개도변화

분산제 주입에 의한 증기발생기 성능검토 결과는 다음과 같이 요약할 수 있다.

- 분산제 주입후 SG B의 열성능변화는 주입전에 비해 개선된 것으로 평가되나 증기발생기 취출수를 통한 철 제거효과가 제한적(최대 6.3배)으로 유입된 철부식생성물의 상당량은 SG 내에서 잔존할 것으로 예상되며,
- 증기압력이 미세하게 감소하였으며 고압터빈 입구 거버너밸브의 개도에 특이한 변화가 없었던 점 등을 감안하면, 전체 열성능 향상에는 크게 기여하지 못한 것으로 판단된다.
- 분산제 주입으로 인해 열성능에 부정적인 영향은 없었으며, 미세하게 열성능 향상에 기여할 것으로 예상된다.

제 3절 개선 사항 및 확대 적용 방안

1. 개선 사항

국내 원전 최초로 분산제를 주입하면서 개선할 사항 다음과 같다.

첫째, 분산제 효과평가를 위해서는 증기발생기내로 유입되는 철성분 량에 대한 정확한 평가가 필요하나 철성분이 입자와 이온으로 존재하기 때문에 빠르고 정확한 분석결과를 얻기가 어려웠다. 따라서 철성분 분석방법의 개선이 필요하다.

둘째, 시료채취 위치에 따라 철성분의 농도가 크게 차이가 났으며, 이는 시료채취의 기술개발이 필요하다고 판단된다. 즉 비교적 긴 시료채취 라인으로 나오는 미량의 철성분을 분석하다 보니 시료채취 라인내 곡관 부위 등에 있던 미량의 철성분이 비 주기적으로 방출되는 점이나, 또는 이온성분과 다르게 철성분이 전체 계통에 골고루 균질하게 있지 않게 때문에, 일정량의 시료가 전체 계통수의 대표시료가 되기 어려운 점 등이 저농도의 철성분의 농도 분석할 때 분석의 부정확도를 높이는 원인이라고 볼 수 있다.

셋째, 증기발생기내 분산제농도 측정방법은 현재 이온크로마토그래피와 UV 검출기를 이용하고 있으며, 이 분석방법에 의한 재현성이 높지 않았다. 이유는 유기물인 분산제와 pH조절제인 ETA가 같은 유기물계열이며, ETA의 분해물도 유기산 성분으로 되어서 순수 분산제만의 농도를 감시하기가 쉽지 않았다.

넷째, 이온크로마토그래피로 ETA와 분산제를 분리하여 분석하여야 하는데, 이온크로마토그래피의 검출 피크 위치가 유사하여 피크 분리가 어려웠으며, 이는 분산제의 농도 신뢰도를 떨어졌다. 따라서 이에 대한 개선 방안 강구되어야 할 것이다.

2. 국내 PWR 원전 확대 적용 방안

가. 표준형 원전

증기발생기 전열관 지지판(TSP) 부위에 침적된 철 슬러지 제거가 쉽지 않으며, 증기발생기 2차측의 탄소강 재질의 부식을 최소화하기 위한 ASCA 화학세정도 쉽지

않다. 따라서 관지지원 부위에서 응력부식균열의 발생이 예상되는 시기에 고온화학세정을 실시하게 된다. 이러한 환경에서 분산제를 활용할 경우(4 ppb 주입기준) 철성분의 배출효율을 5배 이상 높일 수 있고, 주급수의 철성분 농도(약 1.3 ppb)를 근거할 때 실제 SG 내부 슬러지량이 약 50kg 정도에 불과한 점을 보완하여 실제 증기발생기에 유입되는 슬러지 량이 350 kg 정도임을 보상하는 인자로 활용할 때, 증기발생기 취출계통을 통해 배출되는 철 성분 배출효율은 D/C 시료를 기준으로 4.8% 정도에서 30% 수준으로 향상되었다. 이를 철산화물(마그네타이트)로 환산시 연간 약 53 kg 정도 되는 것으로 평가되었으며, 이는 매주기 시행중인 슬러지 랜싱 작업에 의한 제거량인 10 kg 정도보다 5배정도 높게 평가되었다. 즉, 표준형 원전에서는 분산제 주입이 철성분 제거에 효과가 충분한 것으로 평가되므로 전체 표준형 원전을 대상으로 분산제주입 운전이 필요하다고 판단하였다.

나. 웨스팅하우스(WH) 형 원전

WH 형 원전은 증기발생기 전열관 지지판에 철성분 슬러지가 상대적으로 덜 축적되고, 저농도화학세정(ASCA)로도 용이하게 많은 량의 슬러지를 제거하는 것으로 나타났다. 또한 국내 WH형 증기발생기에는 분산제를 시범적용해 보지 않았으므로 확대적용 방안을 제시하긴 성급할 수 있다. 따라서 WH 형 원전에의 분산제 확대 적용 판단은 발전소별로 정상운전중 SG취출계통을 통한 슬러지 배출량 평가, SG 슬러지 랜싱 실적, 최종적으로 중장기적으로 시행예정인 ASCA 화학세정 작업 등을 고려하여 종합적으로 판단하는 것이 적합하다고 본다.

다. 분산제 주입 방법 확대 적용 방법

(1) 화학약품 주입계통 개선안 - 1안

H발전소 6호기에 적용한 방법은 증기발생기 습식보관시에만 사용하는 하이드라진약품 주입펌프를 임시설계변경하여 활용하였다. 이 약품주입계통은 안전성이 확보된 것이기 때문에 추가 설비인 분산제 약품탱크와 연결 배관 등의 몇 가지 부속설비만 추가하면 된다.

(2) 해외사례 적용안 - 2안

미국 McGuire 2호기에서 적용한 방법으로 분산제 주입설비를 설계변경 후 계통 설비처럼 설치하였다. EPRI보고서 문헌에 나타난 주입설비 설계도 및 주입설비 사진, 주입절차서 등을 참고하여 분산제 주입설비를 제작하여 반영구적으로 분산제를 주입하는 것도 좋을 것이다. 주입장치에 관한 설계도면 및 사진은 다음과 같다.

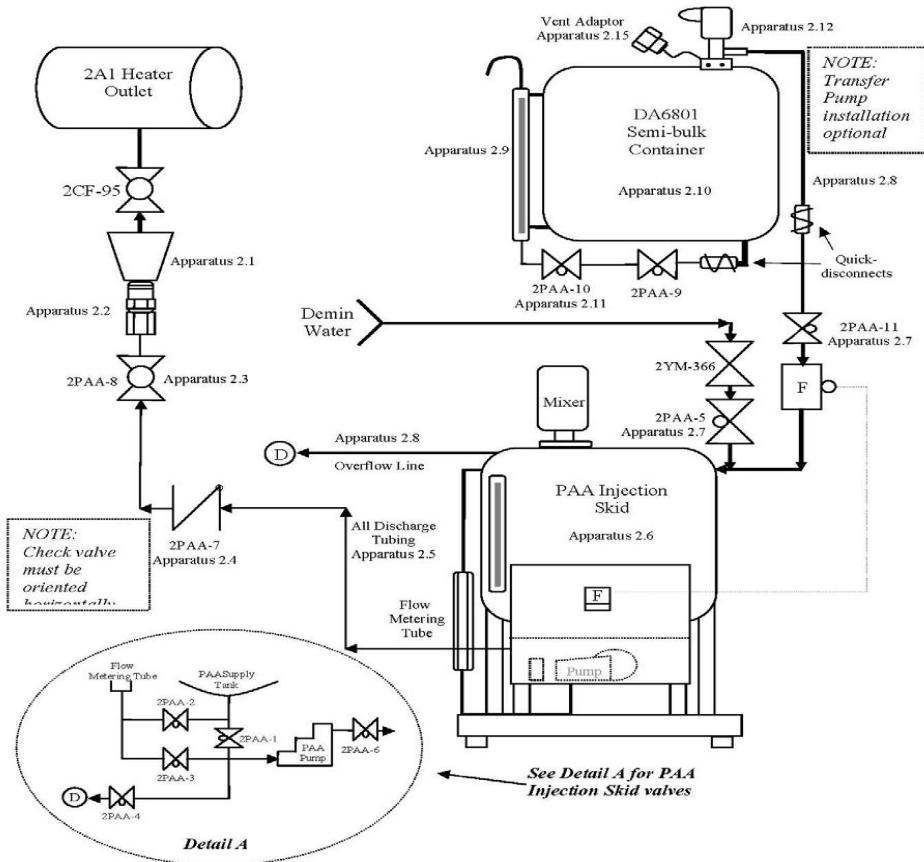


그림 3.18 Candidate Dispersant Injection Locations at McGuire 2

제 4 장 결 론

본 연구과제에서 분산제 현장 적용시 가장 중점적으로 고려해야할 사항은 크게 두 가지인데, 분산제를 주입함으로써 발생할 수 있는 2차계통 수화학의 영향과 분산제 주입 효과이다. 분산제를 적용한 해외원전의 경우 부식생성물의 제거 효율이 약 10배 증가(5%에서 50%로 증가)하였고, 열성능도 미세하지만 증가된 것으로 확인되었다. 국내에서는 H발전소 6호기에 적용한 결과, 철성분의 제거효율은 약 5배 증가하였고 2차측 수질은 양이온전도도가 조금 증가하였으나 전체적인 영향은 적은 것으로 나타났다. 전체 평가결과를 요약하면 다음과 같다.

첫 번째 2차계통 수화학에 미치는 영향이다. 분산제 주입시 양이온 전도도는 분산제 주입하기 전 양이온 전도도는 평균 0.11 uS/cm에서 분산제 주입농도에 따라 양이온 전도도는 상승하였다. 양이온 전도도의 최대값 0.22 uS/cm로 약 2배 상승하였지만, 증기발생기 취출수 기준값인 ≤ 1 uS/cm의 20% 수준이었다.

총 유기탄소(TOC)는 급수에 포함되어 있는 ETA의 농도에 따라 변하는 것을 확인할 수 있었고, 분산제의 분해에 의한 유기산의 영향으로 pH에 미칠 영향을 살펴보았으나 분산제 주입기간에 변화한 pH를 추이를 보면 2차계통에 미치는 영향을 미미했으며, 오히려 급수중 ETA의 농도에 영향을 많이 받는 것으로 판단된다. 취출수계통 탈염기에 미치는 영향을 살펴본 결과, 탈염기 전단필터에서 입자성분이 제거되고, 불순물 이온제거 성능지표인 양이온전도도에는 큰 변화가 없었다.

두 번째로 철 슬러지 제거 효과이다. 분산제를 주입하는 H발전소 6호기와 분산제를 주입하지 않는 H발전소 5호기의 필터 차압을 비교했을 때 H발전소 6호기의 필터차압이 빠르게 증가하는 것으로 나타나서 분산제가 슬러지 배출에 기여했음을 보여주었다.

이러한 현상은 주입한 분산제와 증기발생기 내 슬러지와 반응 후 부유하였고 부유된 슬러지는 취출수계통으로 배출이 효과적으로 이뤄진다고 판단된다. 또한 분산제에 의해 제거되는 슬러지의 효율이 높아지는 근거로는 분산제 주입 전,후 고온관과 취출수 계통 배수에서 분석된 철의 농도이다. 분산제 주입 전, 고온관에서의 평균 철의 농도는 1.4 ppb로 분석되었고 분산제 주입 후에는 평균 철의 농도가 7.3 ppb

로 약 5.1배 높아졌음을 확인할 수 있었다. 분산제를 주입한 해외원전의 경우에 슬러지 효율이 높아졌을 뿐만 아니라 열성능 향상되었다는 보고가 있다. 따라서, 본 연구에서도 분산제를 주입한 증기발생기의 열성능 평가를 수행하였으며 그 결과 열성능이 약간 좋아졌음을 확인하였다. 결론적으로 분산제 주입은 2차계통 수화학 영향에 부담을 크게 주지 않았으며, 증기발생기 내 슬러지 제거에는 큰 효과가 있는 것으로 판단된다.

참고문헌

- [1] K. Fruzzetti, EPRI TR-1016555 Pressurized Water Reactor Secondary Water Chemistry Guidelines Revision 7 (2009)
- [2] 영광 5,6호기 최종안전성분석보고서
- [3] 영광원자(본), “영광 5,6호기 표준형 계통설명서” 개정판1, 영광원전 2000-001, (2000)
- [4] Polyacrylic Acid (Poly-A) as a Chelant and Dispersant, Debasish Kuila et al., Journal of Applied Polymer Science, Vol. 73, 1097-1115 (1999)
- [5] P. Robbins, P. Frattini, “Dispersants for Tube Fouling Control, Volume 2 : Short-Term Trial at ANO-2”, EPRI 1003144, Final Report (2001)
- [6] K. Fruzzetti, “Dispersants for Tube Fouling Control, Volume 3 : Qualification for a Long-Term Trial in a Replacement Steam Generator Tubed with Alloy 690 TT”, EPRI 1002774, Final Report (2002)
- [7] W. F. Masler, “Characterization and Thermal Stability of Polymers for Boiler Treatment,” 43rd International Water Conference, Paper 37, Pittsburgh (1985)
- [8] Craig, B. D. and D.S. Anderson, eds. 1995. Handbook of Corrosion Data, ASM International, Materials Park, OH

감사의 글

2015년 올해는 제가 원자력분야에 근무한지 10년차 되는 해입니다. 그 10년은 저에게 생소했던 원자력분야를 알기 위해 나름 고군분투했던 시간이었습니다. 어느 사람과 마찬가지로 저 또한 원자력을 공부하면 할수록 또는 경험이 쌓이면 쌓일수록 자신의 지식과 경험이 부족함을 느꼈음을 고백하지 않을 수 없습니다. 저의 이런 부족함에 대한 아쉬움이 결국 제가 석사과정을 시작한 동기가 되었고 어느새 졸업을 앞두고 되었습니다.

지난 2년간의 과정을 돌아보면 감사할 일이 많지만 무엇보다도 광주에서 영광까지 직접 오셔서 늦은 밤까지 열강을 해주신 조선대학교 원자력학과 교수님들께 가장 먼저 감사의 마음을 전하고 싶습니다. 특히 바쁘신 와중에도 논문을 처음 시작할 때부터 하나하나 꼼꼼하게 검토해 주시고 조언을 아끼지 않으셨던 송중순 교수님께 깊은 감사의 마음을 전합니다. 교수님 덕분에 막연히 어렵게만 느껴졌던 논문 작성을 순조롭게 잘 마무리 할 수 있었습니다. 또한 묵묵히 저의 공부를 지지해 주고 응원해준 저의 아내에게도 감사의 마음을 전합니다.

지식에 대한 목마름을 채우기 위해 시작했던 석사과정은 아직도 배워야 할 더 많은 지식이 있다는 것을 알게 되었다는 것에서 의미를 찾아야 할 듯합니다. 지난 2년간 원자력 선배님들의 많은 도움으로 석사과정과 논문 작성을 무사히 마칠 수 있었다 생각합니다. 저 또한 석사과정을 통해 배운 지식을 바탕으로 원자력분야 발전에 미약하나마 일조 할 수 있길 소망해 봅니다.