



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](#)

2014년 11월
석사학위논문

한빛6호기 2차계통 부식생성물
저감을 위한 복합아민 수처리
법 적용에 관한 연구

조선대학교 대학원

원자력공학과

홍진표

한빛6호기 2차계통 부식생성물
저감을 위한 복합아민 수처리
법 적용에 관한 연구

A Study on the Application of Mixed amine Treatment to
reduce Iron Corrosion Product for Secondary System of NPP

2015년 2월 25일

조선대학교 대학원

원자력공학과

홍진표

한빛6호기 2차계통 부식생성물
저감을 위한 복합아민 수처리
법 적용에 관한 연구

지도교수 송 종 순

이 논문을 공학 석사학위신청 논문으로 제출함

2014년 11월

조선대학교 대학원

원자력공학과

홍진표

홍진표의 석사학위논문을 인준함

위원장 조선대학교 교수 나 만 균 (인)

위 원 조선대학교 교수 김 진 원 (인)

위 원 조선대학교 교수 송 종 순 (인)

2014년 11월

조선대학교 대학원

목 차

표 목차	ii
그림 목차	iii
ABSTRACT	v
제 1 장 서 론	1
제 2 장 2차계통 수질개선을 위한 pH제어제 선택	3
제 1 절 2차계통에 대한 고찰	3
1. 개요	3
2. 2차계통 주요설비 설명	4
제 2 절 pH제어제의 계통영향 및 환경친화성 평가	10
1. 개량아민 적용현황 및 문제점	10
2. 대체아민 선정	10
3. pH 제어제 선정기준	11
제 3 절 최적아민 선정	13
1. 최적 pH 제어제	13
2. 암모니아 및 에탄올아민의 복합아민 수처리법 채택	13
제 3 장 2차계통 복합아민 적용 및 평가	14
제 1 절 2차계통 복합아민 수처리법 적용	14
1. 개요	14
2. 세부 추진내용	14
3. 시험결과	17
제 2 절 복합아민 최적 pH 및 약품농도 선정	25
제 3 절 복합아민 적용에 따른 경제적, 기술적 효과	26
1. 경제적 효과	26
2. 기술적 효과 및 향후과제	26

제 4 장 결론 28

참고문헌 29

표 목 차

표 1.1 미국 경수로형 원전 적용 아민 종류별 원전 수	2
표 3.1.2-1 한빛6호기 2차계통 초기 복합 SAT의 NaOH 농도 변경	14
표 3.1.2-2 철(Fe) 슬러지 절감목표 : 약 30%임계 여유도(ppm)	15
표 3.1.2-3 단계별 복합아민 최적 pH 및 약품농도 선정계획	15
표 3.1.2-4 단계별 복합아민 최적 pH 및 약품농도 선정내용	16
표 3.1.2-5 복합아민 3단계 계획농도 변경	16
표 3.1.3-1 복합아민 적용시험 수행 내용(급수 기준)	17
표 3.1.3-2 급/복수계통 pH 및 급수계통 철 농도 변화	19
표 3.2 복합아민 최적 pH 및 약품농도 선정	25

그 립 목 차

그림 2.1.1 2차계통 계략도	3
그림 3.1.3-1 급수계통 약품주입량에 따른 계통별 pH 변화	18
그림 3.1.3-2 급/복수계통 pH 및 급수계통 철 농도 변화	19
그림 3.1.3-3 복합아민 주입비율에 따른 철 발생 기여도 변화	21
그림 3.1.3-4 복합아민 시험전·후 각 계통의 $\Delta\text{pH}(t)$ 변화	22
그림 3.1.3-5 계통별 $\Delta\text{pH}(t)$ 변화에 따른 철(Fe) 부식생성량 변화 추세	22
그림 3.1.3-6 복수탈염설비 CBV 교체운전 현황	23
그림 3.1.3-7 2차계통 SG 취출수 Na 농도 변화	24

ABSTRACT

A Study on the Application of Mixed amine Treatment to reduce Iron Corrosion Product for Secondary System of NPP

By Hong, Jin Pyo

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

Department of Nuclear Engineering,

Graduate School of Chosun University

The deposition of iron corrosion products are important elements that affect both the steam generator (SG) integrity and secondary system in pressurized water reactor (PWR) nuclear power plants. Hanbit unit 6 has made strategic plans to maintain its steam generator integrity. One of those strategic plan is high pH operation to inhibit iron corrosion product transportation to the steam generator. Since beginning of 2013, Hanbit unit 6 has been applying mixed amine treatment and uniformly increasing secondary system's at temperature pH to reduce iron corrosion of secondary system. Hanbit unit 6 has pushed forward this study about 9 months. The iron concentration of feedwater has been drastically decreased. The amounts of reduced deposition of iron corrosion products was 187kg/year and according to EPRI PWR water treatment improvements cost benefit analysis, there are benefits of 14,000\$ per kg of reduced deposition of iron corrosion products. So, this study was economic benefit and efficiency growth of operation to Hanbit unit 6. Henceforth, It is necessary to solve increase of the amount of ion exchange resin. There are elements of cost growth. So, from now on we need to study on minimize side effect. Synthetically this study have considerable economic and technical value.

제 1 장 서 론

가압경수로(PWR)의 2차계통(secondary system)과 증기발생기의 철부식생성물(iron corrosion products)은 국부적인 수화학 부식 환경을 조성하며 특히, 증기발생기의 열전달 성능저하를 유발한다. 원자력발전소는 2차계통의 부식생성물 저감을 위하여 다양한 수처리방법을 적용하고 있다. 한빛원자력발전소 6호기에서 2차계통 부식 저감을 위해 약 9개월간 단계별 복합아민 수처리법 적용을 추진하였다. 본 연구는 한빛6호기에서 수행된 복합아민 적용시험 결과를 바탕으로 최적 pH 및 복합아민 농도를 선정하여 2차계통 수질관리에 적용함으로써 계통 재질의 부식방지 및 증기발생기 건전성 향상에 기여하고자 추진하였다.

탄소강 유동가속부식 및 일반부식을 억제하기 위해 1990년대 중반까지 대부분의 가압경수로 원자력발전소는 암모니아(NH₃)를 활용한 전 휘발성 수처리 기술을 활용하였다. 이후, 유동가속부식에 취약한 습증기(wet steam) 영역의 부식억제를 위해 암모니아 수처리기술을 대체하는 개량아민(advanced amine)연구가 활발히 진행되었고 1990년대 중반부터는 미국 가압경수로 원자력발전소를 중심으로 에탄올아민(ETA, C₂H₇ NO) 등과 같은 개량아민이 2차계통 pH 제어약품으로 활용되고 있다. 국내 대 다수 가압경수로 원자력발전소는 2차계통 pH 제어약품으로 에탄올아민을 사용하고 있다. pH를 운전 범위에서 가급적 높게 유지하면 철의 용해도가 저하되어 부식이 억제된다. 그러나 2차계통의 세부계통 운전조건이 상이하어, 전체 계통의 pH를 고르게 상향하는 것은 용이하지 않다. 아울러, 고 pH 운전은 불순성분 제거목적으로 활용되고 있는 이온교환수지의 운전시간을 단축시키고 환경배출 폐기물량을 증대시키므로 pH 상향운전에 제약이 된다. 본 연구에서는 한빛원자력발전소 6호기에서 2차계통 복합아민주입량의 단계별 변화에 따른 pH 변화와 철 농도 저감 효과를 파악 최적방안을 도출하고자 한다.

아민 수처리제는 ETA, Morpholine, MPA 등 100 여종으로 이 중에서 ETA는 국내 경수로원전에, Morpholine은 월성원전에 적용되고 있다. 국내원전은 2차계통 pH 제어를 암모니아에서 에탄올아민으로 변경하기 위한 평가연구를 수행하였으며 이 연구를 기반으로 울진 1,2호기를 제외한 국내 경수로에 대해 '99년 고리1호기를 시작으로 수처리제를 암모니아에서 에탄올아민으로 교체하였다.

기존 수처리법(Ammonia-AVT)으로는 부식생성물의 주요 발생원인인 습증기영역의(MSR Drain, 급수가열기) pH 조절이 어려워, 상대적으로 휘발도가 높으면서, 높은

pH를 유지할 수 있는 아민계통의 약품을 적용하고 있다. 에탄올아민은 상대휘발도가 낮아 증기상태로 존재하는 부위의 pH가 낮게 유지됨에 따라 급/복수 계통의 부식방지에 취약한 사례가 도출었다. 울진2호기가 2011년 2차계통 pH 최적화를 통한 부식생성물 저감을 위해 개선된 수처리법을 적용함에 따라 한빛6호기도 개선된 수처리법 적용 필요성이 증가하고 있다.

전 세계적으로 중수로형원전은 몰포린, 경수로형 원전은 ETA가 가장 널리 적용되고 있다. 아민은 원전 운전조건에서 분해되어 암모니아를 형성하므로(ETA는 1/3 정도까지 분해) 다량의 아민을 주입할 경우 암모니아는 계통수에 항상 존재하나, 복수계통 및 습증기 영역의 pH가 균형있게 증가하지 않을 뿐만 아니라 분해산물인 유기산의 농도가 증가한다. 표 1.1과 같이 미국의 경우 총 55개 경수로형 원전 중 39개 원전에서 ETA를 적용하고 있으며 Surry, Songs, Watts Bar, Seabrook 등 원전은 ETA를 단독 주입하므로 계통수에는 ETA 및 암모니아가 공존한다. 프랑스의 경우 50개 원전에서 몰포린, 8개 원전에서 암모니아를 적용하고 있고 일본의 경우 미하마, 타카하마 원전등에서 ETA를 적용하고 있다.

표 1.1 미국 경수로형 원전 적용 아민 종류별 원전 수

ETA				MPA		몰포린	
단독	DMA 비용	MPA 비용	몰포린 비용	단독	DMA 비용	단독	DMA 비용
31	3	4	1	9	2	3	2

제 2 장 2차계통 수질개선을 위한 pH제어제 선택

제 1 절 2차계통에 대한 고찰

1. 개요

2차계통은 1차측에서 생성된 열에너지를 증기발생기를 통하여 급수계통에서 흡수하여 증기로 상변환 되어 터빈구동력을 제공하고 해수에 의한 열제거로 복수가 되고 다시 증기발생기로 급수가 공급되는 사이클을 구성한다.

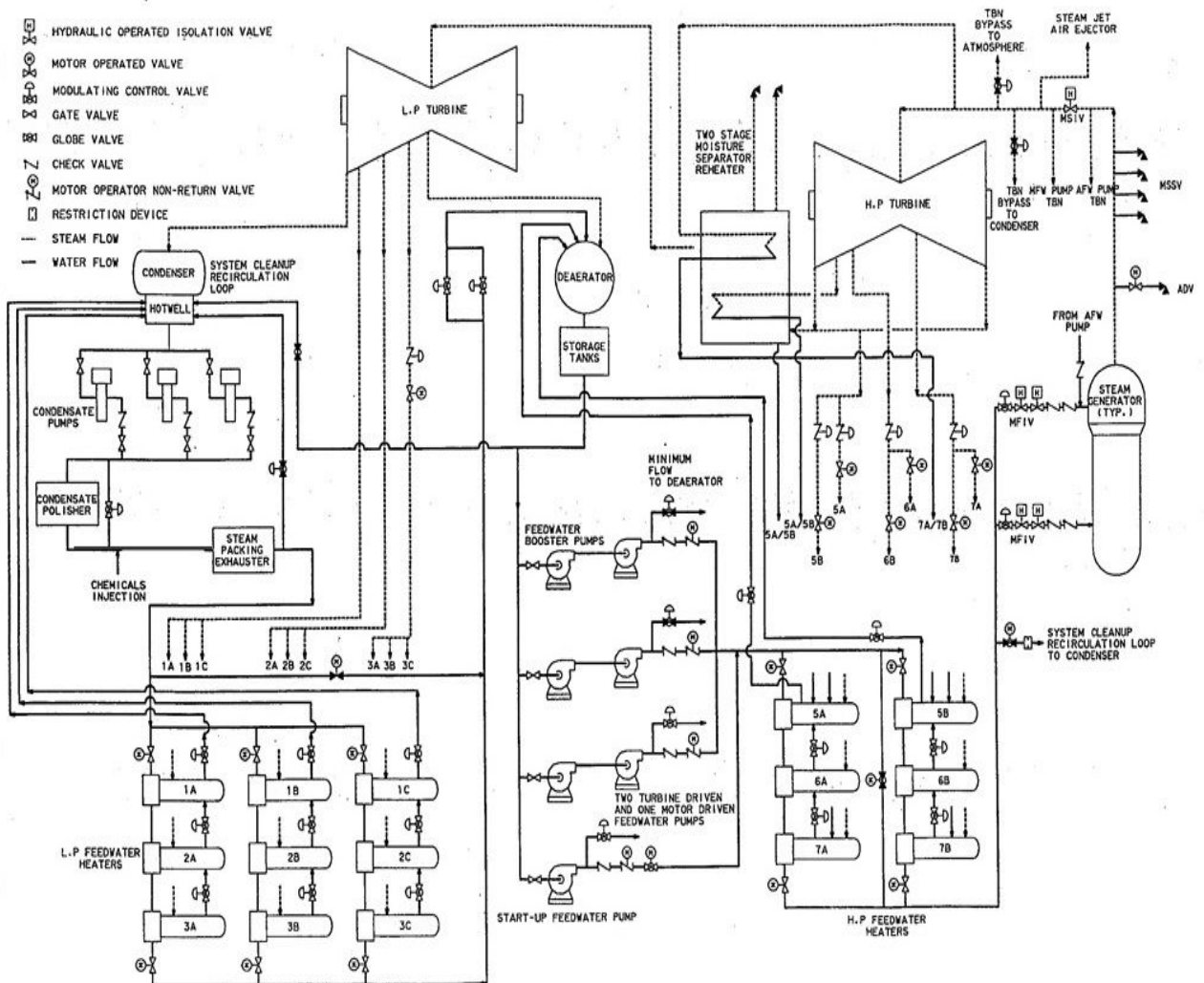


그림 2.1.1 2차계통 계략도

2. 2차계통 주요설비 설명

가. 증기발생 설비

증기 발생기는 수직 U-tube형 열교환기로서 관내측(Tube Side)에는 원자로 냉각재가, 동체측(Shell Side)에는 급수가 흐르면서 열교환이 이루어지며 원자로 냉각재 각 루프당 1대씩 설치되어 원자로 노심에서 발생된 열을 1차측 냉각재를 통해 2차측 냉각재에 전달하여 터빈-발전기의 구동력을 제공해 주는 역할을 한다. 즉 1, 2차측 경계 역할 및 에너지 전달 매체 역할을 하고 있다. 증기 발생기 각각은 증기 발생기에 2차측 급수 온도 450°F(232.2°C)로 공급시 1070 psia(75.2 kg/cm²A) 압력 상태에서 6.359×10⁶ lb/h(2.885×10⁶ kg/h)의 포화증기를 생산하기 위해 1차측에서 2차측으로 1413.4 MWt(증기 발생기 취출수량 0.2%시)의 열 전달이 이루어지도록 설계되어 있다.

증기 발생기는 정상 전 출력 운전중 증기 발생기 몸통(Shell) 상부에 설치된 습분 분리기 및 증기 건조기에 의해 습분 함유량을 0.25w/% 로 제한한다.

증기 발생기는 예열기(Economizer)를 보유하고 있는 수직 재순환 U-튜브 구조물로서 예열기 영역과 증발기 영역으로 구분된다.

U-튜브 재질은 인코넬 600이며, 튜브 8,214개가 튜브 지지판에 폭발 팽창 조립되어 튜브지지판 하부에 용접되어 U-튜브는 일정한 간격으로 설치된 수평 지지판에 의해 지지되고 튜브 상부는 진동 방지대가 있어 냉각수 흐름에 의한 진동을 억제한다.

증기 발생기의 수직 분리판이 증기발생기 1차측 헤드에 설치되어 입구/출구 공동부를 분리하고 있어 원자로 냉각재는 원자로 용기 고온관 으로부터 증기 발생기 1차측 헤드에 설치된 입구 노즐로 유입되어 U-튜브를 통과하면서 2차측 급수에 열전달을 한 후 증기 발생기 2개의 출구 노즐을 거쳐 원자로 냉각재 펌프에 의해 원자로 용기로 보내진다.

수직의 분리판은 냉각재 헤드(primary head)를 입구 및 출구 플레넘(plenum)으로 나눈다. 2차측 급수는 증기발생기 상부로 공급되는 하향수로와 하부로 유입되는 예열 급수로 구분된다.

상부로 공급되는 하향수로는 하향통로를 통하여 U-튜브 외측으로 흘러 1차측 예열 영역에서 예열 급수와 혼합되어 포화상태로 비등하면서 습분을 동

반한 상태로 되었다가 습분분리기를 통과하면서 99.75%이상의 건포화 증기로 변환되어 터빈에 공급된다. 일체형 급수예열기가 장착된 증기발생기는 많은 부분에서 이전의 전열관 재순환 증기발생기와 유사하다. 근본적인 차이점은 급수를 하향유로 채널(downcomer channel)내의 재순환수류와 혼합시키기 위해 단순히 분사기(sparger)를 통하게 하는 것 대신에 급수의 일부를 증기발생기 내의 별도의 부분으로 보낸다는 것이다. 전열관의 저온관 및 고온관 전열관 다발로 구성된 반원통형 부분이 수직 분리관으로 전열관 다발의 나머지 부분과 나뉘어 있다. 급수는 직접 이 부위로 들어가서 증발기 부위로 방출되기 전에 예열된다. 증발기의 하부에서 하향유로 채널부위는 증기발생기 단면 중 한쪽 절반을 차지한다. 이러한 비대칭성의 영향은 재순환 비율 및 내부유량 계산시와 전열관 지지구조물 설계시에 고려된다. 수직으로 세워져 있는 전열관의 열전달면에서 생성된 증기-습기 혼합물은 습분분리기의 원심운동에 의하여 증기와 수분입자로 분리된다. 수분은 습분분리기 몸체의 미세 구멍을 통해 빠져 나와 하향유로 채널을 통해 순환을 계속하게 된다. 증기는 주름잡힌 판형의 건조기를 통과함으로써 최종 건조가 된다.

나. 주증기계통 설비

주증기계통은 증기발생기에서 생성된 증기를 발전을 위해 터빈 발전기계통과 보조계통으로 공급한다. 이 계통은 증기를 증기발생기에서 터빈발전기계통으로 보낸다. 이 계통은 주증기배관, 주증기 대기방출밸브, 주증기 안전밸브, 주증기격리밸브 및 터빈 우회밸브들로 구성되어 있다.

주증기배관은 총 정격부하 증기유량 5.77×10^6 kg/hr(12.72×10^6 lb/hr)를 2대의 증기발생기 2차측으로부터 고압터빈으로 이송한다. 증기발생기에 연결된 각 주증기배관은 격납건물 벽에 고정되어 있고, 열팽창을 고려하여 격납건물 안팎에서 충분한 유연성을 갖는다. 주증기배관의 증기 발생기 취부 설계는 증기발생기의 운전중이나 정지 시 노즐의 허용 부하 모멘트와 응력을 고려하여 설계된다. 모든 배관 및 지지대의 설계는 정상운전, 과도현상 또는 배관 파단에 의한 모든 정적, 동적 부하, 응력 및 모멘트를 고려하여 설계된다. 각 주증기배관은 4개의 스프링작동 안전밸브, 1개의 주증기 대기방

출 밸브와 1개의 주증기 격리밸브를 포함한다. 이 밸브들은 모두 격납건물 밖에 위치하며 가능한 격납건물 벽에 가까이 설치된다. 터빈우회 분기관 연결부는 주증기 격리밸브와 터빈발전기 정지밸브 사이의 주증기 모관에 위치한다. 또한 주증기 배관에는 증기발생기의 질소 가압을 위한 연결부가 제공된다. 또한 시료채취 연결부가 증기 건도 결정을 위해 증기발생기 노즐의 후단에 위치한다. 주증기 분기관은 습분분리재열기, 터빈증기 밀봉계통, 주급수 펌프 터빈, 보조급수펌프 터빈, 공기추출기, 보조증기계통 및 터빈우회 계통에 증기를 공급한다. 각 주증기배관의 낮은 부분에 배수배관이 연결되어 있으며 적절한 배수를 돕기 위해 경사져 있다. 드립 포트와 수위 제어설비가 주증기배관 낮은 부분에서 연속적인 배수를 위해 배수배관에 설치되어 있다. 터빈우회 분기관의 주증기배관 낮은 부분에 연속적인 배수를 위해 오리피스가 설치되어 있다.

다. 주급수설비

복수계통으로부터 복수를 공급받아 고압 급수가열기를 거쳐 증기발생기로 급수를 공급하여 1차측의 열을 흡수함으로써 증기로 상변화를 한다. 급수계통은 탈기기 저장탱크로부터 정격온도, 압력 및 유량으로 급수를 2대의 증기발생기로 공급하는 기능을 갖는다. 기동, 정지 및 고온대기 상태에서는 전동기구동 기동용 급수펌프가 증기발생기에 급수를 공급한다.

정상 출력 운전중 2대의 전동기구동 급수승압 펌프와 2대의 터빈구동 주급수펌프가 정격 급수유량을 증기발생기에 공급한다. 나머지 1대의 급수승압 펌프와 전동기구동 주급수 펌프는 후비용으로서 대기상태를 유지한다. 각 급수승압펌프와 주급수펌프는 최대 65%의 급수를 공급할 수 있다.

일반적인 급수유로는 탈기기저장탱크→급수승압펌프→주급수펌프→고압급수가열기→급수제어밸브→급수차단밸브→증기발생기로 형성된다. 각 증기발생기에 하나의 급수제어계통이 설치된다. 각 급수제어계통은 최대 2대의 주급수펌프를 제어할 수 있도록 설계된다. 즉 하나의 급수 제어계통이 3대의 주급수펌프를 동시에 제어할 수 없다. 증기발생기로 급수를 공급하기 전 복수와 급수의 정확화를 위해 복수기로 순환시킬 수 있는 3개의 세정용 재순환

배관이 설치되어 있다.

하나의 세정용 재순환 배관은 복수세정용으로 급수승압펌프 흡입배관에서 분기되어 복수기로 연결되고 나머지 2개의 세정용 재순환 배관은 급수세정용으로 주증기 배관 격실 이코노마이저 급수배관에서 분기되어 복수기에 연결된다. 복수계통 세정은 복수펌프를 운전하여 증력에 의해 복수저장탱크로부터 복수기로 이송함으로써 수행되고 급수계통 세정은 급수 승압 펌프를 운전함으로써 수행된다. 기동 및 정상 운전 중 급수 화학 요구치를 만족시키기 위해 화학제는 복수계통에 주입되고 또한 기동중 용존산소와 PH제어를 위해 다운콤마 급수배관에 연결된 화학 주입 배관을 통해서도 주입된다. 연속적인 급수 화학분석을 위해 각 고압 급수가열기 7A, 7B 후단에서 시료를 채취한다. 주급수펌프는 각각의 터빈에 직접 연결되고 전동기구동 주급수펌프는 유체커플링을 매개로 전동기와 연결된다. 주급수펌프 및 전동기구동 급수펌프는 속도변환용으로서 설계된다. 터빈과 유체커플링은 급수제어계통으로부터 입력되는 펌프속도 설정 요구신호에 자동으로 응답한다. 정지기간 후 기동용 급수펌프는 증기발생기 건식 보관 및 배수에 따른 재충수용 으로서 운전되며 급수계통 이용 불능시 보조급수펌프가 운전 된다.

라. 복수설비

복수계통은 증기사이클의 일부로서 해수를 통하여 증기를 응축하여 이를 복수기 온수조에 수집하고 급수계통에 이송하는 기능을 갖는다. 관련설비로는 복수기, 복수펌프 탈기기 등으로 구성되어 있다.

복수기는 단일 압력, 단일 유로, 표면 냉각식으로 3개의 셸로 구성된다. 각각의 셸은 각각의 저압터빈 아래에 위치하며 셸 내부 튜브의 방향은 터빈발전기 축과 수직한다. 복수기 셸은 분할된 수실을 갖는다. 각각의 셸은 수실과 연결되는 2개의 관다발을 갖는다. 각각의 셸은 분할판에 의해 길이방향으로 분리된 2개의 온수조를 갖는다. 이 온수조는 복수펌프의 흡입조가 된다. 복수기 셸은 터빈건물 운전층 아래에 위치하며 터빈건물 기초 위에 지지된다. 각각의 터빈배기구와 복수기 셸 증기유입부는 신축 이음관으로 연결되며 각각의 복수기 목 부분에는 2개의 저압급수가열기가 설치된다. 3개의 셸의 증기

영역은 압력 평형관으로 연결된다. 복수기에는 온수조 수위제어 및 복수 시료채취를 위한 배관이 설치된다.

정상운전중에 저압터빈 배출증기는 터빈 케이싱 하부에 있는 배기구를 통해 복수기로 직접 하향 유입되어 응축된다. 또한, 복수기는 급수가열기 배기 및 배수, 급수펌프 터빈 배출증기, 터빈증기밀봉계통 배수와 같은 기타 배기 및 배수도 받아들인다.

복수펌프는 주복수기 온수조에서 복수를 흡입하여 탈기기로 공급한다. 복수펌프는 공통 입출구 모관에 3대의 전동기 구동, 50%용량의 원심 펌프로 구성되어, 정상운전시 2대의 펌프가 운전되며 1대의 복수펌프 비상 정지시에 대기 펌프가 자동으로 기동한다. 복수펌프는 주복수기 온수조에서 복수를 흡입하여 복수정화계통, 증기식 공기추출기 중간 및 후단 냉각기, 증기 패킹 배출기 및 저압급수가열기를 통해 탈기기 및 탈기기저장탱크로 복수를 공급한다. 1번 및 2번 저압급수가열기는 주복수기 목(neck)안에 설치되며, 3번 가열기는 가열기 베이에 수평으로 설치된다. 탈기기를 제외한 모든 저압 급수가열기는 폐쇄형으로 일체형 배수 냉각기를 가지고 있으며 탈기기는 직접 접촉식 탈기형 급수 가열기이다. 1, 2 및 3단 저압급수가열기는 3개의 저압급수가열기 계열로 배열되며 이들 저압급수가열기 계열에는 전동기구동차단밸브가 설치된다. 3번 저압 급수가열기 쉘의 배수는 2번 및 1번 저압 급수가열기 쉘을 통해 주복수기로 보내진다. 또한 각 저압급수가열기는 주복수기로 직접 배수할 수 있는 비상 배수관을 가지고 있다. 주복수기로부터 저압급수가열기 및 탈기기를 통과한 복수는 급수승압펌프로 보내어 진다.

마. 터빈설비

터빈은 증기발생기에서 공급되는 고온 고압의 증기를 팽창시켜 기계적 에너지로 변환하는 장치이며 그 에너지로 발전기를 회전시켜 전기를 만든다. 터빈에서의 에너지 변화는 증기가 가지고 있는 열에너지가 회전력, 즉 기계적 에너지로 변화하고 증기가 터빈을 통과하여 지나갈 때 증기의 압력은 감소하고 체적과 속도는 증가하게 된다. 이 고속도의 증기는 많은 양의 운동에너지를 갖게 되며 터빈 회전자에 붙어 있는 날개들에 에너지를 전달하여 기계적 에너지(회전력)를 얻

는다. (날개들은 증기의 운동에너지를 기계적인 움직임으로 바꿀 수 있는 형태로 만들어져 있다) 복류형(Double Flow)으로 한 대의 고압(HP) 터빈과 3대의 저압(LP) 터빈이 직렬로 설치(Tandem Compound)되며, 습분 분리 재열기(MSR)는 터빈과 병렬로 설치되어 있다. 고압 터빈과 저압 터빈은 모두 순수한 충동(Impulse) 터빈은 아니지만, 반동도가 5%로 적기 때문에 충동 터빈이라 해도 무방하다. 증기 발생기에서 발생된 고압의 증기는 고압 정지 밸브(MSV)와 제어밸브(CV)를 통하여 고압 터빈의 중앙 부분으로 유입된다. 고압 터빈 중앙 부분(HP Section)에 들어온 증기는 Nozzle Box에 의하여 서로 상반된 2개의 방향(터빈측-TE, 발전기측-GE)으로 갈라져서 각각 7단(Stage)의 회전익(Bucket)에 속도 에너지를 전달하며 회전익은 이를 받아 회전자를 회전(즉, 기계적인 에너지로 변환됨)시킨다. 온도와 압력이 감소한 고압 터빈 배출 증기는 습분 분리 재열기로 보내져서 습분 분리기를 거치며 습분이 제거되고, 고압 터빈 3단 추기 및 주증기에 의해 재열되어 과열 증기가 된다. 이 과열 증기는 6개의 저압 터빈 정지 및 조절 밸브(Combined Intermediate Valve : CIV)를 거쳐 3개의 저압 터빈 중앙 부분(LP Section)으로 유입된다. 저압 터빈 중앙 부분에 유입된 증기는 고정익(Diaphragm)에 의해 양분 되어 각각 TE, GE 방향으로 각각 7단의 회전익을 경유하면서 저압 터빈 회전을 회전시킨 후 복수기로 하향 배출된다. 점검 및 정비를 위하여 증기 통로에 접근할 수 있도록 모든 셸(Shell)과 후드(Hood)의 수평면 연결부는 볼트 체결되어 있으며 이 연결부는 증기가 새지 않도록 하기 위해서 정밀 기계 가공된 금속면 대 금속면 접촉(Metal to Metal Contact)으로 되어 있다. 또한, 모든 증기관 및 고압 터빈, 습분 분리 재열기 등 고온부는 열 손실을 막기 위해 보온재가 설치되어 있다.

제 2 절 pH제어제의 계통영향 및 환경친화성 평가

1. 개량아민 적용현황 및 문제점

원전 2차계통 수질관리는 증기발생기 내부로 불순물이 유입/퇴적되어 건전성이 훼손되는 현상을 억제하기 위하여 급수, 복수, 가열기 배수계통에서 부식을 최소화하여 철등의 불순물이 증기발생기로 적게 유입되는 수화학조건을 유지해야 한다. 원전 2차 계통의 부식을 최소화하기 위하여 약 염기 및 환원성분위기를 유지하고 있으나, 계통재질에 따라 pH 및 산화환원 전위가 다르고, pH 제어제의 종류에 따라 부식에 미치는 영향이 다르다. 따라서 재질의 부식을 유발하지 않는 약품을 선정하고, 2차 계통 모든 위치에서 최적의 pH 에 해당하는 농도를 유지하여야 한다. 과거 EPRI가 권고하는 적정 pH는 철재질의 경우 9.2~9.6, 구리가 사용된 경우 8.8~9.2이었으나, 현재는 발전소 조건에(부식생성물 이동, 수지탑 수명 및 비용) 맞는 최적 pH를 유지할 것을 권고하고 있다. 부식제어 측면에서 고 pH 가 바람직하나 CPP 및 SGBD 수지탑 채택 유무뿐만 아니라 수지재생방법을 고려하여 국내의 원전은 9.0~10.2 범위의 pH를 유지하고 있다. 경수로형 원전 2차 계통 pH 제어는 인산염 처리에서 70년대에 암모니아를 사용하는 전회발치리로 전환된 후, 80년 후반부터 다양한 아민이 적용되고 있다. 인산염은 퇴적된 슬러지에 의해 증기발생기 전열관 손상을 심하게 초래하고 암모니아는 열교환 설비에서 습분분리기(Moisture Separator and Reheater) 및 급수가열기 배수계통의 pH 가 낮아 유체유동가속부식을 유발한다. 암모니아는 복수의 pH 증가, ETA는 습분분리기 및 가열기 배수계통의 pH 증가, 몰포린은 기체 및 액체에 균등 분배되므로 습분분리기 및 복수기의 pH 를 증가시킬 수 있다. 암모니아는 습분분리기 배수 pH가 낮으며, pH 를 높일 경우 증기발생기 취출수 탈염기에 부하과중이 될 수 있다. 몰포린은 염기의 세기가 너무 낮아, pH를 높일 경우 복수 및 증기발생기취출수 탈염기의 부하가 과중되며, 열분해율이 높다. 국내 원전에서 ETA 채택이후 기동기 ETA를 주입하더라도 pH 가 상승하지 않고, 양이온전도도가 증가하고, 증기발생기 취출수 수지탑의 운전기간이 단축되고, 일부 발전소에서 급수조절밸브의 부분적인 막힘 현상과 같은 단점이 나타나고 있다.

2. 대체아민 선정

원전2차계통의 물-증기 순환계통은 온도범위가 30~300℃이며 물과 증기간 상 전환이 증기발생기 MSR, 가열기 및 복수기 등에서 발생하며, 다양한 화학적 현상 즉 산염기,

산화환원, 침전용해, 착화반응 등이 복합적으로 발생한다. 더구나 물 또는 증기가 매우 빠른 유속으로 순환하므로 물리화학적으로 매우 제어하기 어렵다. 원전 2차 계통수는 약 30℃인 복수기로부터 약 300℃인 증기발생기를 매우 빠른 유속으로 순환할 때 온도 및 압력변화가 심할 뿐만 아니라 물과 증기간의 상변화를 수반하므로 증발 및 응축현상이 발생한다. 또한, pH 및 산소제어를 위해 염기성인 아민과 환원성인 하이드라진을 주입하므로 산염기, 산화환원, 침전용해, 착염형성, 및 재질의 부식반응이 복합적으로 발생한다. 급수는 고온의 증기발생기에서 물은 취출수계통으로 배수되고, 발생한 증기는 터빈계통의 습분분리기로 유입되어 증발/응축현상을 통해 물은 배수되어 가열기배수탱크로, 증기는 복수기로 유입되고 물로 전환되어 2차 계통을 순환한다. 즉, 복수는 두 번 증발된 증기가 응축된 물, MSR의 배수는 증기발생기에서 기화된 증기가 응축된 물, 증기발생기 취출수는 증기발생기에서 기화되고 잔류하는 물이므로 복수 및 급수계통에서 주입된 pH 및 산소 제어제의 존재 비율은 휘발성 세기에 따라 현저히 다르다. 따라서 주입하는 약품의 휘발도에 따라 증기발생기 취출수, MSR 및 급수가열기 배수, 복수에서 존재하는 양이 다르고 또한 염기도에 따라 pH가 결정되므로 2차 계통 전체를 최적의 pH로 유지하기 어렵다. 또한 복수 및 증기발생기 취출수는 각각 수지탑에서 정화되므로, 휘발성이 낮은 약품은 증기발생기취출수 수지탑, 휘발성이 높은 약품은 복수탈염설비 수지탑의 부하를 과중시킨다.

가. pH제어제 선정시 고려할 아민의 물리화학적 특성

원전 2차계통 재질의 건전성을 재고하기 위해 pH를 제어하므로 최적아민 선정시 가장 중요한 고려 요소는 부식 및 증기발생기 오염제어이며, 복수 및 증기발생기취출수 탈염기 운전 및 폐기물 처리, 약품 구입 비용 및 확보용이성, 취급용이성 등을 무수적으로 고려하여야 한다.

나. 원전 2차 계통 pH 제어제로서 후보 아민

EPRI에서 1992년 및 2002년 후보로 고려한 아민과 전세계적으로 후보 아민으로 간주되었거나 pH 제어제로 사용중인 Ammonia, MPH(Morpholine), ETA(Ethanolamine), MPA(3-methoxypropylamine) DMA(Dimethylamine)등을 고려하였다.

3. pH 제어제 선정기준

가. FAC 및 증기발생기 오염측면

FAC(Flow Assisted Corrosion) 및 증기발생기 오염측면에서 FAC는 정상적으로 형성

된 보호산화막이 탈기된 알칼리성 분위기에서 빠르게 흐르는 유체에 용해되는 현상이다. 증기발생기 오염은 입자가 증기발생기로 유입되어 전열관/전열관 지지판 또는 축적된 슬러지층에 화학적으로 부착되는 현상으로 FAC에 의해 증기발생기 오염이 결정된다. FAC는 주로 pH에 영향을 받으므로 pH 제어제로 사용되는 아민의 종류에 따라 최대 FAC가 다르고, 이때의 온도도 변화하는 것으로 보고되고 있다. FAC는 환원 및 알칼리성 분위기에서 형성된 다공성 magnetite가 용해되는 현상으로 pH가 저하되면 용해현상은 가속되므로 pH를 높게 유지해야 할 뿐만 아니라 완충용량이 충분히 확보되어 pH 저하를 억제할 수 있는 아민을 pH 제어제로 채택할 필요가 있다.

나. 구입용이성 및 비용

암모니아 ETA 등은 산업분야에서 널리 사용하고 있으므로 구입하기 용이하고 비용이 저렴하나 MPA나 DMA에 비해 염기성이 약해 다량 필요하다. AMP, MPA, DMA는 산업용 사용처가 암모니아 및 ETA보다 제한적이다.

다. 사회와 환경

취급 용이성은 휘발성이 강한 암모니아, DMA, MPA는 대기로 방출되므로 호흡에 주의할 필요가 있으며, 휘발성이 약한 AMP, ETA는 방류되면 COD의 증가를 유발한다. 또한 고순도 ETA는 폭발위험성이 있다.

제 3 절 최적아민 선정

1. 최적 pH 제어제

최적 pH 제어제는 2차 계통수 pH를 9.5로 유지할 경우 아래와 같은 조건을 만족해야 한다

- 계통 온도 범위에서 기상 및 액상에 균등 분배될 거
- 분자량이 작을 뿐만 아니라 탄소/질소 성분이 작을 것
- 분해율이 낮을 것
- Na에 대한 수지 선택도가 높을 것

최적 조건을 만족시키는 단일 아민은 존재하지 않는다. AMP는 휘발성이 낮고, 분해율이 높으며, MPA는 고온에서 휘발성이 높고 탄소/질소 성분 비율이 높아 유기산의 발생량이 높다. DMA는 휘발성이 높고 복수계통에서 완충용량이 낮으며, 분해율 및 유기물 용해능이 높고 금속산화물에 대한 흡착성이 강하다. 암모니아 대신 DMA 또는 MPA를 ETA와 복합 주입할 경우, 분해율 및 유기물 용해능이 높아지고 저온에서 완충용량이 감소한다. 암모니아 및 ETA 복합 수처리법은 암모니아 수처리법보다 습증기 영역의 pH를 높게 유지한다.

2. 암모니아 및 에탄올아민의 복합아민 수처리법 채택

본 수처리법 채택 시 다음과 같은 장점이 있다. 저 휘발성 ETA 및 고 휘발성 암모니아는 MSR 등 습증기 영역 및 복수기 응축수의 pH를 동시에 높게 유지할 수 있으므로 상 변화 시 기상 및 액상에 균등 배분되어 적정 pH를 유지할 수 있다. 증기발생기로 유입되는 MSR 배수계통, 급수가열기 배수탱크 및 저온 급수계통에서 FAC를 억제할 수 있는 완충용량을 확보할 수 있다. 암모니아 및 ETA 가 pH(25℃) 9.25~9.5에서 최대 완충용량을 유지하므로 부식환경이 조성되더라도 pH저하를 최대로 억제할 수 있어 부식반응에 의한 산성분위기 형성 시 완충용량을 확보할 수 있다. 다른 아민과 비교하여 탄소 성분이 적으므로 분해 시 유기산 생성률이 낮으므로 부식분위기를 조성하는 아민 분해물질 발생을 최소화할 수 있다. 암모니아는 복수 ETA는 증기발생기취출수에서 더 많이 분배되므로 하나의 탈염기만 부하가 가중되지 않아 복수탈염기 및 증기발생기 취출수 탈염기 부하의 균형을 이룰 수 있다. 아울러 복수탈염설비 수지 재생폐역 중 탄소 및 질소성분이 적어 방류수 중 COD 및 T-N을 최소화할 수 있다.

제 3 장 2차계통 복합아민 적용 및 평가

제 1 절 2차계통 복합아민 수처리법 적용

1. 개요

한빛3발전소는 2차계통 부식방지 및 건전성 제고를 위해 pH 제어제로 6호기는 '04.4부터 에탄올아민을 사용하고 있다. 에탄올 아민은 상대휘발도가 낮아 증기상태로 존재하는 부위의 pH가 낮게 유지됨에 따라 급/복수 계통의 부식방지에 취약하다. 따라서, 2차계통 pH 최적화를 통한 부식생성물 저감을 위해 pH 제어제를 복합아민(에탄올아민 + 암모니아)으로 변경 적용하고자 함

2. 세부 추진내용

가. 복합아민 적용계획 수립

- 초기 복합아민 적용
 - 적용시점 : 13. 1월

표 3.1.2-1 한빛6호기 2차계통 초기 복합아민 적용농도

구분		현행	초기농도	울진2호기 적용농도
복합아민	에탄올아민	2,000 ppb	2,000 ppb	1,800 ppb
	암모니아	(500 ppb)	1,100 ppb	1,000 ppb
하이드라진		150 ppb	150 ppb	100 ppb
pH(계산값)		(9.45)	(9.55)	(9.53)

※ 초기농도 선정 배경

- 울진2호기 복합아민 주입 최적농도 및 현 운전 농도 반영
- 전 계통에서 pH(at 25℃) 9.5 이상으로 유지될 수 있는 농도 선택
- ETA/NH3 농도 조절(pH 약품 보충시마다)

- 시험단계 최적 pH 및 약품농도 선정

표 3.1.2-2 철(Fe) 슬러지 절감목표 : 약 30%

구분	적용 전(현재농도)	적용 후(목표값)
pH	9.45	9.65
철(Fe) 농도	약 3.0 ppb	약 2.2 ppb

※ 적용전/후 철 농도는 계통 pH에 따른 철농도 계산값 임(EPRI 자료 참조)

○ 복합아민 최적 pH 및 약품농도 선정시험 수행

- 시험기간 : '13. 1 ~ '13. 9(단계별 3개월)

- 시험방법 : 급수계통 pH(at 25℃)를 3단계로 상향하면서 시험 수행

표 3.1.2-3 단계별 복합아민 최적 pH 및 약품농도 선정계획

구분	pH (계산값)	pH 조절제(ppm)		하이드라진 (ppb)	유지기간
		ETA	암모니아		
초기단계	9.55	2.0	1.1	150	기동~1단계
1단계	9.60	2.4	1.3	150	'13. 1 ~ 3
2단계	9.65	2.9	1.6	150	'13. 4 ~ 6
3단계	9.70	3.5	1.9	150	'13. 7 ~ 9

※ 약품농도는 급수계통 고 pH 운전 및 울진2호기 시험결과 최적 농도비(ETA:NH₃=1.8:1)에 따라 약품농도 선택

※ 계산 pH 및 약품농도는 EPRI Plant Chemistry Simulator를 이용

□ 시험결과 평가 및 적용

○ 평가기간 : '13. 10 ~ '13. 12

○ 평가방법

- 시험 단계별 계통 철 슬러지 변화 평가

- 철 슬러지 저감목표 달성 및 각종 탈염기 이온부하 검토

- 한국수력원자력(주) 중앙연구원과 기술협의 후 최적 pH 및 약품농도 선정

○ 발전소 적용

나. 복합아민 적용시험 수행

- 복합아민 적용시험 수행내용
 - 시험대상 : 한빛6호기
 - 시험기간 : '13.1.10~9.30

표 3.1.2-4 단계별 복합아민 최적 pH 및 약품농도 선정내용

구 분	수행일정	pH (계산값)	ETA (ppm)	NH ₃ (ppm)	하이드라진 (ppb)
초기단계	1.10~1.31	9.55	2.0	1.1	150
1단계	2.1~5.2	9.60	2.4	1.3	150
2단계	5.3~8.7	9.65	2.9	1.6	150
3단계	8.8~9.30	9.65	2.6	1.7	150

- 복합아민 적용시험은 초기 준비단계 및 pH별 3단계로 구분하여 추진하였으며 각 단계별로 2~3개월 동안 유지하였음
- 시험 전 기간동안 각 계통별 pH 및 약품농도를 분석하여 모든 계통에서 예측된 농도값을 유지하는지 확인하였으며, 단계별로 철(Fe) 농도 분석을 통해 복합아민 적용에 따른 효과를 점검하였음
- 복합아민 시험단계 농도 변경 적용
 - 사유 : 1~2단계 시험결과 철 슬러지의 감소목표 달성에 따라 pH 유지 및 에탄올아민 과 암모니아 농도변화를 통한 변화 확인 목표 설정

표 3.1.2-5 복합아민 3단계 계획농도 변경

항 목	변 경 전	변 경 후
pH(25℃)	9.70	9.65
ETA	3.5ppm	2.6ppm
NH ₃	1.9ppm	1.7ppm

복합아민 수처리법 적용시험 완료 : '13.9.30

복합아민 적용 최종평가 : '13.10

○ 내용 : 복합아민 적용시험 결과 최적 pH 및 약품농도 제시

3. 시험결과

가. 복합아민 수행실적 요약

급수계통 pH(25℃) 변화 : 9.5(적용전) → 9.7(3단계)

급수계통 철(Fe) 부식생성물 저감

○ 적용 전 대비 약 78% 저감 : 4.69ppb → 1.0ppb(3단계)

CPP CBV 교체주기 : 8일(적용전) → 3일(3단계)

SGBD 탈염기 교체주기 : 8~9개월 → 4~5개월

표 3.1.3-1복합아민 적용시험 수행 내용(급수 기준)

구 분	복합아민(ppm)		pH		철(Fe)농도 (ppb) ^(b)	CPP CBV 채수량(m ³)
	ETA	NH ₃	계산값	실측값		
적용전	2.0	(0.5) ^(a)	9.45	9.5	4.69	150,000
초기단계	2.0	1.1	9.55	9.6	3.8	130,000
1단계	2.4	1.3	9.60	9.65	2.5	90,000
2단계	2.9	1.6	9.65	9.7	2.0	75,000
3단계	2.6	1.7	9.65	9.7	1.0	60,000

(a) : 적용전 암모니아 농도는 하이드라진 분해 반응으로 생성된 값임

(b) : 철(Fe)농도 값은 적용 단계별 평균값임 (누적시료 분석)

나. 단계별 복합아민 주입 및 pH 변화

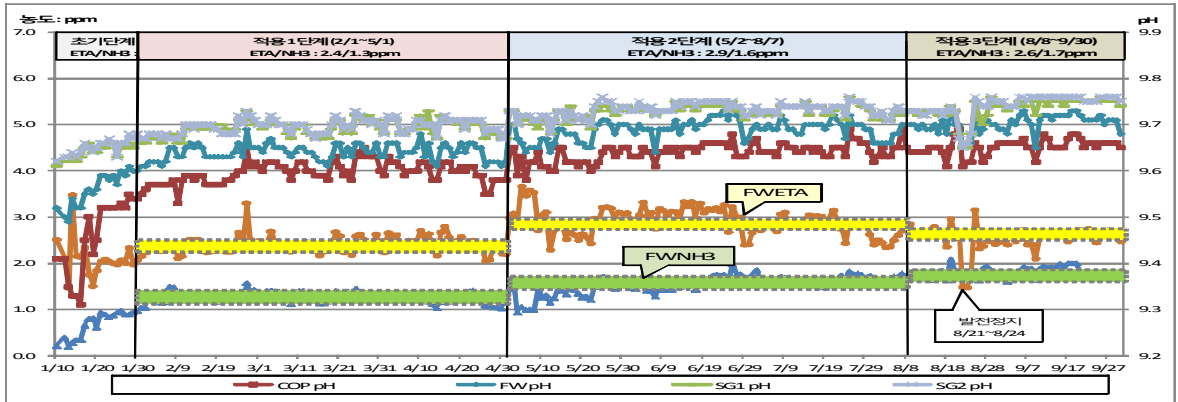


그림 3.1.3-1 급수계통 약품주입량에 따른 계통별 pH 변화

□ 초기단계

- 복합아민 주입시험 수행을 위한 준비 단계였음
- 시험 초기 복합아민 농도 유지에 어려움이 있었으나, 시간 경과에 따라 안정된 값을 유지하였음

□ 적용 1단계

- 계획에 따라 ETA 2.4ppm, NH₃ 1.3ppm을 안정적으로 유지하였으며 계통별 pH(25℃)는 9.6~9.7 수준에서 안정된 값을 유지함
- 1단계 유지기간은 계획(2개월)보다 1개월 연장된 3개월을 유지하였으며 이는 시험 초기 복합아민 적용에 따른 개선효과를 평가하기 위해서는 3개월 정도 유지하는 것이 유리할 것으로 판단되었기 때문임

□ 적용 2단계

- 2단계 초기 약품주입량 상향에 따라 일정기간 농도가 흔들렸으나 이후 ETA 2.9ppm, NH₃ 1.6ppm에서 안정된 농도를 유지하였음
- 약품농도 상향에 따라 계통별 pH(25℃)는 9.65~9.75 수준을 유지하였음

□ 적용 3단계

- 3단계에서는 ETA 2.6ppm, NH₃ 1.7ppm을 안정적으로 유지하였으며 수행과정

에서 발전정지(8/21~8/24)에 따른 약품농도 변화가 있었음

- 약품주입 비율 변화에 따라 COP pH가 일부 증가하여 계통별 pH(25°C)는 9.68~9.75 수준을 유지하였음

다. 주급수 철농도 저감 효과 평가

□ pH 상승에 의한 급수 철농도 저감 효과 : 4.69ppb → 1ppb 수준

□ 복합아민 적용에 따른 철 농도 변화

- pH 상승으로 인한 계통 철(Fe) 농도 저감 추세를 확인함
- 적용 초기 및 1단계까지 지속적인 감소추세 유지 후 2단계 이후부터 1~2ppb 의 낮은 농도에서 안정된 값을 유지함

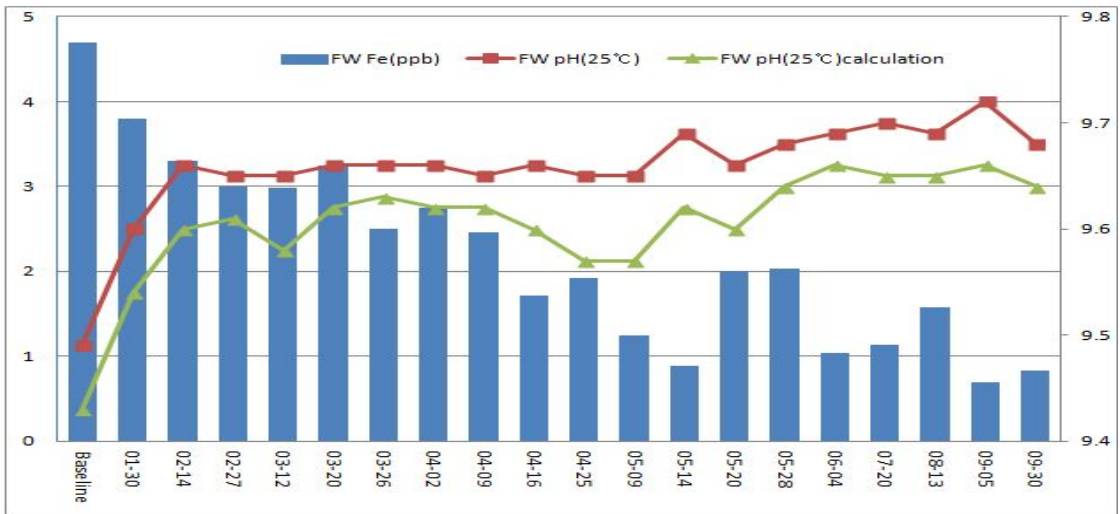


그림 3.1.3-2 급/복수계통 pH 및 급수계통 철 농도 변화

표 3.1.3-2 급/복수계통 pH 및 급수계통 철 농도 변화

준비단계 ~ 1단계	2단계	3단계
4→2ppb 감소	1~2ppb 유지	약 1ppb 유지

- 2단계에서 목표로 하는 철 농도에 도달하여 3단계는 pH는 유지하고 약품농도 조절을 통하여 구간별 철 농도 감소 및 기여도를 파악하고자 하였다.

라. 2차계통 철(Fe) 부식생성물 기여도 변화 평가

□ 2차계통 철(Fe) 슬러지 거동

- 2차계통의 고압측(MSR, HP HR Drain 등) 및 저압측(LP HTR Drain, 복수기 등)에서 발생된 철(Fe) 부식생성물은 탈기기에 모여 최종 급수배관을 통해 증기발생기로 유입
- 증기발생기로 유입된 철슬러지중 대부분은 증기발생기 내부에 침적되고 일부가 주증기나 취출수를 통해 배출됨
- 따라서, 증기발생기로 유입되는 철 슬러지를 줄이기 위해서는 기여도가 높은 유입원에 대한 맞춤형 수질관리가 필요

□ 시험전·후 측정된 SG 철(Fe) 부식생성물의 생성원 평가

- 복합아민 시험전 (FW Fe : 4.69ppb)
 - SG 유입 철(Fe) 부식생성물 기여율은 고압보다 저압 사이클에서 미세하지만 큰 것으로 평가됨(고압 및 저압사이클 기여율 = 43% : 57%)
- 복합아민 2단계 적용후 (FW Fe : 1~2ppb)
 - pH 상향운전으로 증기발생기로 유입되는 철(Fe) 부식생성물의 절대량은 적용전에 비해 대폭 감소함
 - 고압/저압측의 부식생성물 기여도 평가결과 복합아민 적용전과 동일한 수준으로 평가됨(고압 및 저압사이클 기여율 = 43% : 57%)
- 복합아민 3단계 적용후 (FW Fe : 약 1ppb)
 - 3단계에서는 저압측 pH를 상향하여 부식생성물을 저감하기 위해 약품주입 비율을 변경함 (ETA : NH₃ 주입비율 = 1.8 : 1 → 1.5 : 1)
 - 변경결과 저압측의 부식생성물 발생량이 크게 감소함에 따라 부식생성물 기여도가 변화됨 (고압 및 저압사이클 기여율 = 63% : 37%)

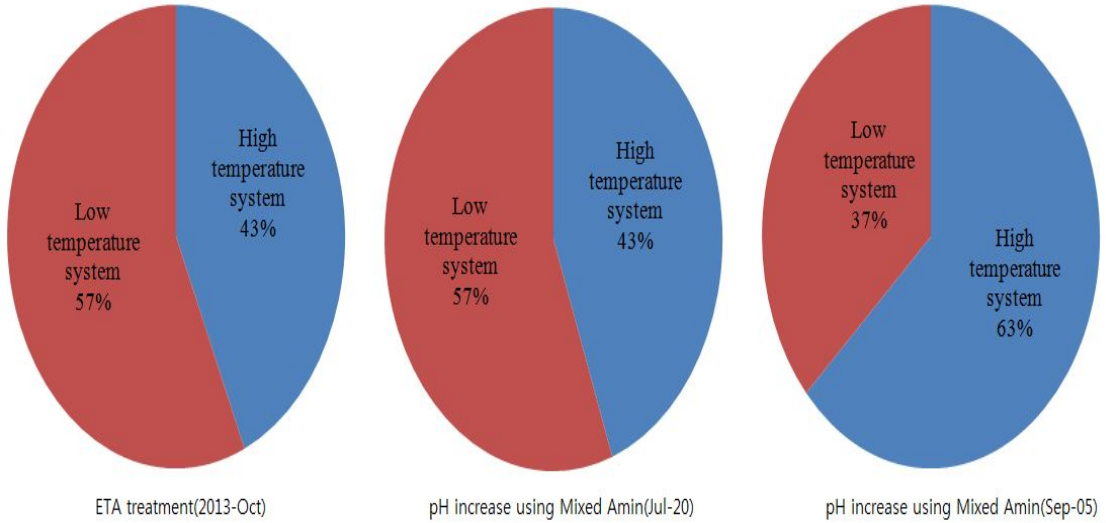


그림 3.1.3-3 복합아민 주입비율에 따른 철 발생 기여도 변화

마. 복합아민 농도 변화에 따른 pH(t) 변화

□ pH(t) 평가 필요성

: pH(25℃)는 추세 예측은 가능할 수 있으나, 실제 FAC 수화학 조건을 반영하지 못함. 따라서 각 세부계통의 FAC 영향을 정확히 진단하기 위해서는 pH(t) 해석이 필요함.

□ 계통별 pH(t) 변화 평가

○ 복합아민 시험전 각 계통 pH(t)와 복합아민 주입시험 기간 중 각 계통별로 측정된 pH(t)와의 차를 $\Delta\text{pH}(t)$ 로 표현

: $\Delta\text{pH}(t)$ 값이 클수록 탄소강 유동가속 부식억제 측면에서 유리

○ ETA, NH_3 농도를 상향함에 따라 각 계통의 ΔpH 가 균등하게 증가함

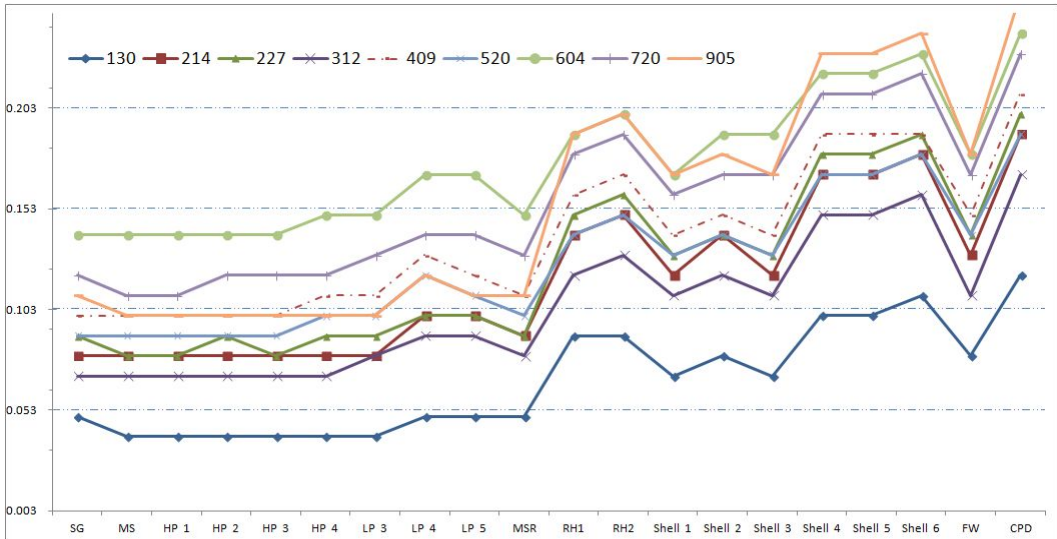


그림 3.1.3-4 복합아민 시험전·후 각 계통의 $\Delta pH(t)$ 변화

□ 계통별 pH(t)와 급수 철농도 변화 평가

- 복합아민 투입 및 아민농도 상향에 따라 각 계통의 $\Delta pH(t)$ 가 증가하였고 이에 따라 급수의 철농도가 감소됨
- 급수 철농도 저감 측면에서는 아래 그래프의 6월 4일 및 9월 5일 수질조건이 유리한 것으로 판단됨

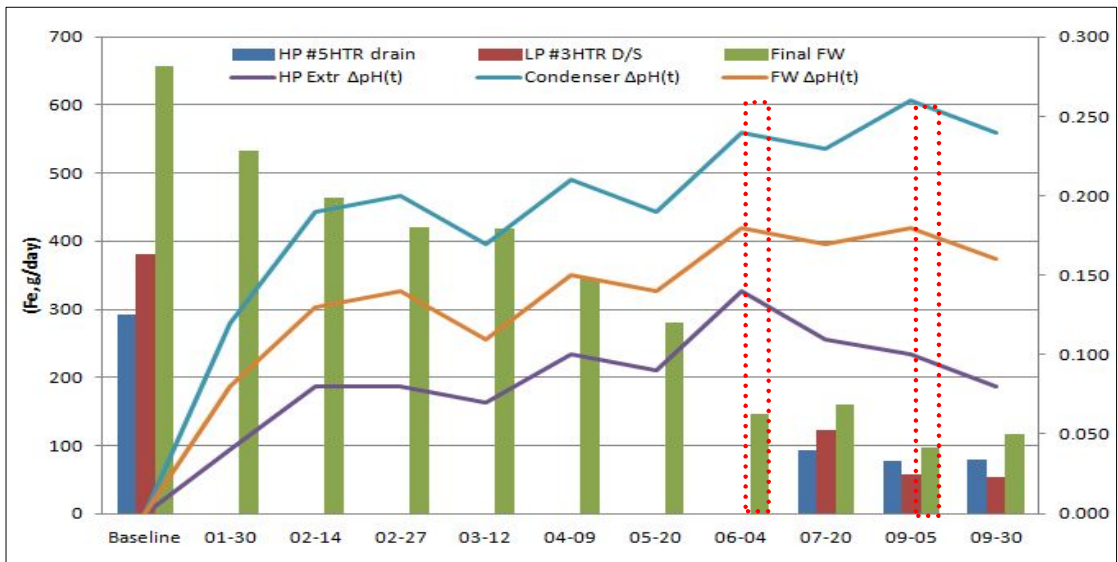


그림 3.1.3-5 계통별 $\Delta pH(t)$ 변화에 따른 철(Fe) 부식생성량 변화 추세

바. 탈염탑 운전부하 및 수질영향 분석

□ 복수탈염설비 운전부하 평가

- 복합아민 적용 및 약품농도 증가에 따라 복수탈염설비 양이온탈염기의 교체주기가 지속적으로 단축되어 복합아민 적용전 약 8일에서 3단계 적용이후 매주 2회 정도의 교체 및 재생운전을 수행하고 있음
- 양이온탈염기의 잦은 교체운전에 따라 혼상탈염기의 교체주기도 단축되는 경향이 있음

그림 3.1.3-6 복수탈염설비 CBV 교체운전 현황

□ 증기발생기 취출수 탈염기 운전부하 평가

- 복합아민 적용이후 증기발생기 취출수계통 탈염기의 Na 이온 제거능 감소로 탈염기 교체주기 단축
 - 복합아민 적용전/후 탈염기 교체주기 : 8~9개월 → 4~5개월
- 취출수 탈염기 교체주기 증가에 따라 증기발생기 Na 농도 변화폭이 증가함
- 복합아민 적용 및 약품농도 증가에 따라 복수탈염설비 양이온탈염기의 교체주기가 지속적으로 단축되어 복합아민 적용전 약 8일에서 3단계 적용이후 매주 2

- 회 정도의 교체 및 재생운전을 수행하고 있음
- 양이온탈염기의 잦은 교체운전에 따라 혼상탈염기의 교체주기도 단축되는 경향이 있음

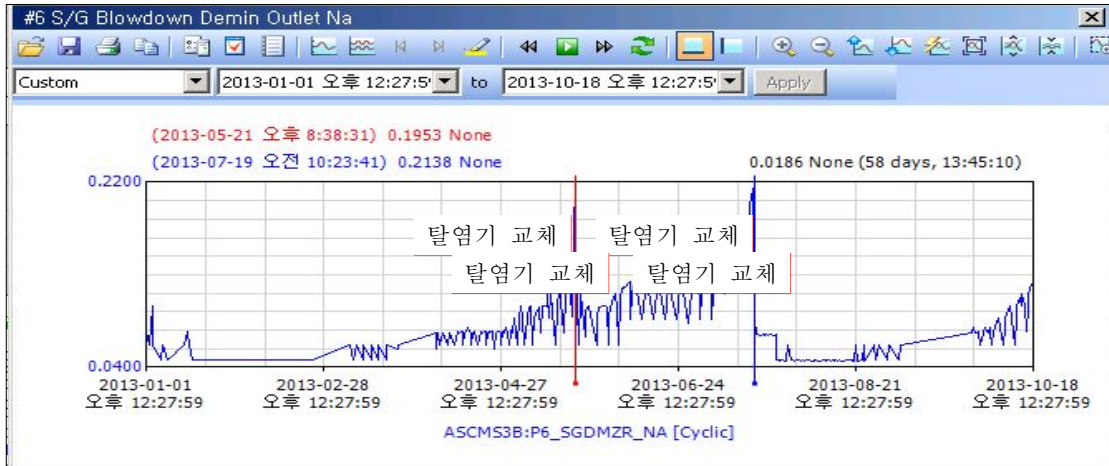


그림 3.1.3-7 2차계통 SG 취출수 Na 농도 변화

제 2 절 복합아민 최적 pH 및 약품농도 선정

표 3.2 복합아민 최적 pH 및 약품농도 선정

항 목		농 도	비 고
최적 pH(25℃)		9.65	이론값
복합아민 최적농도	ETA	2.6±0.2ppm	혼합비율 ETA:NH ₃ = 1.5 : 1
	NH ₃	1.7±0.2ppm	

선정사유는 복합아민 적용시험 결과 이론 pH(25℃) 9.65 정도에서 급수 철(Fe) 부식생성물 농도가 가장 낮게 유지되었다. 한국수력원자력 주식회사 중앙연구원 최종 기술지원 결과에서는 2단계인 철슬러지 저감효과가 가장 큰 6월4일과 3단계 조건인 9월5일 수질조건을 제시하였다. 동일한 pH에서 수행한 2, 3단계 수행결과 약품농도 비율을 변경 적용한 3단계에서의 효과가 큰 것으로 판단하였다. 따라서, 위의 내용 검토 결과 2차계통 철 부식생성물을 효과적으로 줄이면서도 탈염기 운전부하 등을 종합적으로 감안하여 복합아민 최적농도를 선정하였다.

제 3 절 복합아민 적용에 따른 경제적, 기술적 효과

1. 경제적 효과

□ 효과

- 약 27억/년, 호기(철슬러지 저감효과 - 운영비용)
 - 2,879,800,000원 - 193,980,000원 = 2,685,820,000원
 - 2개호기 기준: 약 54억/년
- 슬러지 저감 비용
 - SG 철 슬러지 저감량 : 187kg/년 · 호기(약 78%저감)
 - 철슬러지 1kg 저감을 위한 부담비용 : 14,000 \$/kg(EPRI¹⁾ 보고서 기준)
 - 효과비용 : 187kg/년 × 14,000 \$/kg × 1,100원/\$ = 2,879,800,000
- 복합아민 적용에 따른 운영비용(약 1억9398만원/년, 호기)
 - SGBD 수지 교체비용 : 약2,790만원/년, 호기
 - 교체횟수 증가 : 호기당 1.5회/년
 - 1회 교체시 수지비용 : 18,644,800원
 - 수처리 약품 소요량 증가분 : 약 3,830만원/년, 호기
 - ETA, 암모니아, 하이드라진 약품 증가량 반영
 - 복수탈염설비 재생운전 비용 : 약 12,778만원/년, 호기
 - 재생횟수 증가 : 주1회 → 주2회(년52회)
 - CBV 1회 재생시 소요비용 : 2,457,454원/회

2. 기술적 효과 및 향후 과제

복합아민 주입농도 증가에 따라 2차계통 전 계통에서 pH(t)가 고르게 증가하는 것을

1) Electric Power Research Institute, 미국 전력연구센터

확인하였으며, 또한 급수계통으로 유입되는 철(Fe) 부식생성물 발생량이 현격히 감소하는 것을 확인함(급수계통 철(Fe) 농도 변화 : 4.69ppb → 1ppb 수준(약 78% 감소)) ○ 복합아민 주입농도 비율에 따라 고압측 및 저압측의 pH 변화가 있었으며, 철(Fe) 부식생성물 발생기여도 변화를 확인하였다.

- ETA : NH₃ = 1.8 : 1의 경우 저압측의 철 부식생성물 발생기여도가 큼
- ETA : NH₃ = 1.5 : 1의 경우 고압측의 철 부식생성물 발생기여도가 큼

pH 상향운전으로 탈염탑 운전수명 저하, 약품소모 비용 증가 및 폐기물량 발생 증가 등의 부정적 영향이 발생한 것으로 보이나 철(Fe) 부식생성물 저감으로 인한 증기발생기 건전성 향상 등 기대효과가 부정적 영향을 상회할 것으로 판단됨 (수지 및 재생약품 추가비용 : 약 2억원/년,호기) 탈염기의 잦은 교체는 계통수의 수질 변동폭을 증가시키는 결과를 초래하므로 수질 변동폭을 감소시킬 수 있는 방안 검토가 필요하다.

제 4 장 결 론

본 연구를 통하여 알 수 있었던 내용은 원자력발전소 2차계통의 pH 제어제를 에탄올아민에서 복합아민(에탄올아민+암모니아)으로 변경 적용함으로써 2차계통의 철부식 생성물이 획기적인 수준으로 저감한 것으로 알 수 있다. 즉, 복합아민 농도 증가에 의한 2차계통 pH의 고른 증가로 급수 철농도가 시험 전 4.69ppb에서 시험 기간 중 1ppb 수준으로 획기적으로 저감된 것을 한빛6호기의 연구를 통하여 확인할 수 있었다. 복합아민 시험전 철부식생성물은 고압 및 저압 사이클에서 거의 대등한 수준으로 발생하는 것으로 평가되었으나 복합아민의 혼합비율에 따라 발생기여도에 미세한 변화를 보였다. 시험전에 비해 ETA 농도 보다 암모니아 농도비가 비교적 크게 증가하였고, 고압 터빈추기 등 FAC 민감 계통에 설치되어 있는 FAC 저항성 배관으로 인해 고온·고압 계통의 FAC 저감효과가 복수계통 등의 FAC 저감효과보다 크지 않았던 것으로 판단된다. 덧붙여, pH 상향운전과 관련하여 증기발생기 운전성능에는 특별한 영향이 없는 것으로 판단되나, 향후 Fe ALARA 수질관리가 지속될 경우에는 파울링 증가속도가 pH 상향 전에 비해 완화될 것으로 예측된다. 탈염기 등 설비 운영 최적화 측면에서 살펴보면, pH 상향운전으로 탈염탑 운전수명 저하, 약품소모 비용 증가 및 폐기물량 발생 증가 등의 부정적 영향이 발생한 것으로 보이나 철부식생성물 저감으로 인한 증기발생기 건전성 향상, 정비비용 절감 및 운영효율 향상 등을 감안하면 부정적 영향을 충분히 상회할 경제적 효과가 달성됨을 알 수 있다. pH 상향운전에 따른 약품농도 증가로 탈염기 수지교체 및 재생운전에 따른업무량은 pH 상향운전 전에 비해 2~3배 증가하였다.

따라서, 최적 약품농도선정 및 적용이후 정화탈염기의 운전부하 등을 검토하여 제시된 약품농도를 기준으로 탄력적인 운영이 필요하다. 아울러 9개월간의 적용시험은 짧은 기간으로 판단되며 향후 지속적인 복합아민 적용효과를 검증하기 위하여 관련계통에 대한 주기적인 시료채취 및 철(Fe) 농도 분석수행이 필요하다. 마지막으로 효과는 극대화하고 문제점을 보완하기 위하여 탈염탑 운전수명 연장, 약품소모량 감소 등을 위한 연구가 지속적으로 요구된다.

참고문헌

- [1] 원전 2차계통 Advanced Amine 수화학 적용기술 개발, 최종보고서, 주관기관 순천향대학교, 참여기관 한수원(주)(2011.09)
- [2] Dong-Man Shin, Nam-Yong Hur, and Wang-Bae Kim, Study on Increasing High Temperature pH(t) to Reduce Iron Corrosion Products, KHNP Central Research Institute, Daejeon (2011)
- [3] 영광원자력본부 영광훈련센터 교재-계통 설명서
- [4] 영광 5,6호기 운영기술지침서 및 운영기술지침서 기술배경서
- [5] 영광 5,6호기 계통운전절차서
- [6] 영광 5,6호기 비상운전절차서
- [7] pH, 온도에 따른 에탄올아민 및 암모니아 흡착 및 이온교환 특성 연구, 안현경, 대한환경공학회 (2006)
- [8] ETA의 물리화학 및 이온교환 특성, 정현준, 순천향대학교 (2007)
- [9] “Final Safety Analysis Report for Yonggwang Units 5,6,” KHNP
- [10] ETA 채택에 따른 COD 및 N 방출저감 연구, 이인형, 순천향대학교 (2008)

감사의 글

설레임을 안고 학업을 다시 시작하기 위해 학교를 간 첫날이 아직도 선명합니다. 2년의 시간이 지나 마무리를 앞두고 있는 지금, 얼굴에는 미소와 함께 부족함에 대한 아쉬움이 공존함을 느낍니다.

직장과 학업을 병행하는 일이 결코 쉽지만은 않았지만 저에게 애정을 쏟아 주시는 많은 분들의 도움으로 인해 이렇게 무사히 마무리할 수 있었다고 생각합니다. 이 좁은 지면을 통해 일일이 감사의 뜻을 전하지는 못하지만 그 분들의 도움이 아니었다면 힘들었을 것입니다. 모든 과정을 마치고 논문의 마지막을 감사의 글로 남기려고 하니 멘티의 역할에서 이제는 멘토가 되어 다가오는 모든이에게 나눔에 대한 책임감이 어깨에 느껴집니다. 먼저, 본 논문을 지도해 주시고 한량없는 열정과 자상함으로 끝까지 이끌어 주신 송종순 교수님께 진심으로 깊은 감사의 말씀 올립니다.

논문 심사과정과 평소 학교생활을 통하여 변함없는 애정과 관심으로 격려해 주신 김진원 교수님, 나만균 교수님, 이경진 교수님 그리고 밤낮으로 학과 일에 온갖 정열을 바치시는 학과장 정운관 교수님께 깊은 감사를 드립니다. 또한 끊임없는 질문에 대하여 성심을 다하여준 정인영조교에게 지면을 통해 고마움을 남깁니다.

아울러 오늘의 결실이 있기까지 집에 소홀해 짐에도 불구하고 아낌없는 지원을 해준 아내와 두딸에게 본 지면을 통해 감사의 마음을 전해 드립니다.

2014년 11 월

홍진표

저작물 이용 허락서

학 과	원자력공학과	학 번	20137253	과 정	석사
성 명	한글 : 홍 진 표 한문 : 洪 鎭 杓 영문 : Hong Jin Pyo				
주 소	전남 영광군 홍농읍 상하리 한수원 사택 105동 202호				
연락처	E-mail : jaegalh@khnp.co.kr				
논문제목	2차계통 부식생성물 저감을 위한 복합아민 수처리법 적용에 관한 연구				
	A Study on the Application of Mixed amine Treatment to reduce Iron Corrosion Product for Secondary System of NPP				

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(O) 반대()

2014년 11 월

저작자: 홍 진 표 (인)

조선대학교 총장 귀하