



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 2월
석사학위 논문

한국표준형원전 증기발생기
2차측 전장고온화학세정에
대한 고찰

조선대학교 대학원

원자력공학과

김 정 훈

한국표준형 원전 증기발생기
2차측 전장고온화학세정에
대한 고찰

A study on Full Length High Temperature
Chemical Cleaning of Steam Generator
secondary side of KSNP

2015년 2월 25일

조선대학교 대학원

원자력공학과

김 정 훈

한국표준형원전 증기발생기 2차측 전장고온화학세정에 대한 고찰

지도교수 이 경 진

이 논문을 공학 석사학위신청 논문으로 제출함

2014년 10월

조선대학교 대학원

원자력공학과

김 정 훈

김정훈의 석사학위논문을 인준함

위원장 조선대학교 교수 정운관 ㉠

위원 조선대학교 교수 김진원 ㉠

위원 조선대학교 교수 이경진 ㉠

2014년 11월

조선대학교 대학원

목 차

LIST OF TABLES I

LIST OF FIGURES II

ABSTRACT III

제 1 장 서 론

제 1 절 연구배경 1

제 2 절 연구동향 3

제 2 장 연구이론

제 1 절 증기발생기 5

1. 증기발생기 기능 5

2. 설계기준 7

3. 주요 구성기기 9

4. 증기발생기 2차측 슬러지 형태 16

제 2 절 ODSCC 발생원인 및 손상완화 방법 18

제 3 장 전장 고온화학세정의 공정 및 결과분석

제 1 절 전장 고온화학세정의 공정	22
제 2 절 전장 고온화학세정의 결과와 분석	26
1. Free EDTA와 Fe 농도변화	26
2. 슬러지 제거량	27
3. 모재 부식률	28
4. SG 전열관 관지지대 MRPC 결과	29
제 4 장 결 론	31

참고문헌

감사의 글

LIST OF TABLES

Table 1	증기발생기 설계변수	8
Table 2	전장 고온화학세정 약품 조성표	22
Table 3	모재의 무게 감량법에 의한 부식률 세부 측정결과	28
Table 4	화학세정 전·후 TSP별 슬러지 퇴적량 분포 비교 (1~8 단)	29

LIST OF FIGURES

Fig. 1	표준형원전 2차측 개략도	6
Fig. 2	증기발생기 구성도	9
Fig. 3	증기발생기 튜브	10
Fig. 4	튜브 시트	10
Fig. 5	관 지지대	12
Fig. 6	쉬라우드	12
Fig. 7	관관 상단의 슬러지 퇴적 형태	17
Fig. 8	관지지대 유동 특성	17
Fig. 9	응력부식균열 발생 기여인자	19
Fig. 10	SG 고온관측 슬러지 퇴적 영역의 응력부식균열 발생분포	19
Fig. 11	전장 고온화학세정 공정도	23
Fig. 12	Free EDTA 와 Fe 농도	26
Fig. 13	랜싱 후 증기발생기 슬러지 제거량	27
Fig. 14	화학세정 전·후 TSP별 슬러지 퇴적량 비교	29
Fig. 15	MRPC C-SCAN	30

ABSTRACT

A study on Full Length High Temperature Chemical Cleaning of Steam Generator secondary side of KSNP

Jung-Hoon Kim

Advisor : Prof. Goung-Jin Lee, Ph.D.

Dept. of Nuclear Engineering

Graduate School of Chosun University

This study analysed Free EDTA and Fe concentration change, sludge removal amounts, the basic material corrosion rate and tube support plate MRPC result of steam generator secondary side of Hanbit nuclear power plant unit 6 which was performed the full length high temperature chemical cleaning being able to expect plant thermal efficiency improvement effect, life extension and stress corrosion cracking reduce of steam generator. The result is as following.

1. Free EDTA(Ethylene Diamine Tetra acetic Acid) concentration was showed decreasing as typical pattern in accordance with increasing Fe concentration.
2. Sludge removal amounts based on Fe_3O_4 was 3,001kg after performing the full length high temperature chemical cleaning, additionally sludge removal amount through Steam generator Lancing was 201kg.
3. Specimen corrosion rate of the basic metal of steam generator tube, Inconel 600 HTMA, was showed 0 mils which was under 10 mils of EPRI standard.
4. As a MRPC inspection result, sludge deposit amount after performed the full length high temperature chemical cleaning decreased 99.7%. It showed that effectiveness of chemical cleaning was evaluated higher than a leading nuclear power plant. Also, Eggcrate TSP signal as C-SCAN result was showed very sharply and vividly. It was evaluated that sludge of TSP area was removed

completely.

Through the KSNP steam generator secondary side full length high temperature chemical cleaning of the above, it is expected to be able to mitigate damage due to stress corrosion cracking at steam generator heat transfer tube by the sludge removal amount is increased over traditional chemical methods.

제 1 장 서 론

제 1 절 연구배경

원자력발전소의 효율향상과 안정적 운영을 위하여 증기발생기의 건전성 유지는 매우 중요한 관리항목이다. 원전의 가동년수가 증가함에 따라 증기발생기에 유입된 부식생성물은 증기발생기 2차측에 퇴적되어 슬러지 형태로 고착된다. 이로 인해 슬러지는 전열관 부식발생의 원인이 될 뿐 아니라 관지지판(Tube Support Plate; TSP) 사이의 유로를 막음으로 수위 불안정 현상을 유발하는 등 원자력 발전소 안전운전에 커다란 영향을 미치게 된다.

증기발생기의 전열관의 결함은 Tube Sheet에 있어 제조과정에서 폭발확관으로 인한 잔류응력이 존재하게 되고 전열관 틈새가 좁아 슬러지 퇴적 및 경화로 인해 슬러지 제거 효율이 낮아지게 됨으로서 발생하게 된다. 또한 TSP에 있어서는 전열관과 전열관 지지판의 틈새가 존재함으로써 높은 온도와 구조적 특성으로 슬러지 퇴적이 용이하다. 또한 슬러지의 퇴적으로 인한 열전달 감소에 의한 전열관 2차측 표면온도가 상승하게 되고 형성된 틈새에 Na, SO₄ 등 불순 성분이 농축되는 등 국부적인 부식환경이 형성되어 ODSCC(Outside Diameter Stress Corrosion Cracking ; 응력부식균열) 발생환경의 형성과 가속화를 초래하게 된다.

증기발생기의 수명에 영향을 줄 수 있는 슬러지 퇴적을 방지하기 위하여 화학약품 농도 및 pH조절 등을 통한 수질관리의 최적화로 슬러지 유입을 미연에 방지하는 것이 최선의 방안이나 원자력발전소 계통수(급수)의 고온, 비등, 응축 등 부식의 취약조건으로 슬러지 퇴적을 미연에 방지하는 것은 매우 어렵다. 따라서 증기발생기 2차측에 퇴적된 슬러지를 제거하기 위해 매 계획예방정비시마다 슬러지 랜싱 등의 방법을 사용하여 슬러지 제거를 수행하고 있으나, 이는 Tube Sheet 상부 등 일부 지역의 슬러지 제거에 국한되어 있으며, 특히 한국표준형원전(KSNP) 증기발생기의 경우 전열관 틈이 좁아 슬러지 제거 효과가 미흡하여 증기발생기 관관상단 부위에 응력부식 균열의 발생을 억제하지 못하고 있는 실정이다. 이러한 ODSCC의 발생을 억제하기 위해 보다 적

극적인 방법을 사용할 필요성이 있어 최근에는 화학세정 방법으로 슬러지 제거 및 증기발생기 내부의 부식 환경을 저감시키고 있다.

본 논문에서는 한국표준형원전 한빛6호기의 증기발생기 2차측 산화철(Fe_3O_4)슬러지 제거를 위하여 전장 고온 화학세정을 수행하여, 그 결과를 분석하고 응력부식균열의 억제와 증기발생기 수명연장 및 발전소 효율 개선 효과를 달성하고자 한다.

제 2 절 연구동향

원자력발전소 증기발생기 2차측의 ODSCC 발생을 억제하고 손상완화를 위한 대책으로서 전열관 및 전열관 틈새에 대한 세정방법들이 제시되고 있다.

채성기 등은 원전 증기발생기 2차측 화학세정을 위한 전기화학 실험과 슬러지 용해 실험을 통하여 제동공정 중에 어떤 인자들이 중요한 역할을 하는지 확인하였고 외국에서 개발한 두 가지 제동공정에 대하여 안전성 측면에 슬러지 제거효과를 비교 평가하여 38°C에서 EDTA NH₄OH EDA를 사용하는 제동공정에 있어서 H₂O₂는 슬러지 제거에 적합한 전위구역으로 구리의 전위를 높여주는데 매우 효과적이었음을 확인하였다.⁽¹⁾

하태근은 증기발생기 열화에 직·간접으로 영향을 미치는 증기발생기내의 퇴적 슬러지에 대하여 생성 및 퇴적과정을 조사하고, 퇴적된 슬러지가 급수 중의 용해성 불순물을 농축하는 특성을 분석하고, 슬러지 저감화 대책 방안을 제시하였다. 증기발생기에 퇴적되는 슬러지량을 최소화하기 위해서는 증기순환 계통의 순환수 pH 범위를 9.5이상 유지하고 외부에서 유입되는 염분, 산소, 유기물 등의 불순물을 최소화 할 필요가 있으며, 증기발생기에 퇴적된 슬러지는 발전소를 정기적으로 보수하는 기간 중에 고압수를 이용한 세정 (Sludge Lancing)을 매년 시행하여 제거하고 수년간의 장기 운전으로 고형화된 슬러지는 화학약품에 의한 세정으로 제거함이 매우 효율적인 방법으로 제시하였다.⁽²⁾

허도행 등은 원전 증기발생기 2차측 제철 화학세정을 기존의 93°C 표준공정보다 고온인 125°C에서 검증시험을 수행하였다. 원전증기발생기를 125°C에서 화학 세정한다는 가정아래 현장세정 조건을 결정하고 이를 다시 모사하여 3ℓ 용량의 소형 검증시험 조건을 설정하여, 1 gallon 용량의 316 스텐레스강 압력용기를 반응용기로 사용하는 화학세정 시험 장치에서 검증시험을 수행하였으며, 슬러지 용해거동, 모재 부식률, 세정제 화학조성 변화거동 등을 정하였다. 125°C 검증시험 결과에서 93°C 표준공정보다 세정시간을 절반이하로 단축시키고도 더 효율적인 세정효과를 얻을 수 있을 뿐만이 아니라 2차측 모재의 부식률도 감소함을 확인하였다.⁽³⁾

황일순 등은 1994년 고리 1호기 증기발생기의 전열관 누설에 대한 원인 조사결과, 손상원인은 2차측 ODSCC로 밝혔으며, 이에 따른 단기적인 손상완화대책으로 TiO₂와 보론산을 첨가한 틈새 세정과 TiO₂를 첨가한 하이dra진 담금, Na/Cl 몰비 조절, 용존 산소 제거, 고온부 온도저하법 등을 선정하였다.⁽⁴⁾

김석곤 등은 원자력발전소 증기발생기 세관 세정용 로봇의 고정밀 DC모터 제어에 대한 연구에서 LM628 모터제어기를 이용하여 증기발생기 튜브 하부에 누적되어 있는 슬러지를 제거하는 로봇의 제어특성에 대하여 고찰하였다.⁽⁵⁾

김민선은 원자력 발전소의 배관 세정 특허 기술 분석에서 세정 기술로서 기계/물리적 방법, 전기/화학적 방법, 화학적 방법 등을 분석하였다.⁽⁶⁾ 김창수 등은 보빈코일 와전류신호를 이용하여 원자력발전소 증기발생기 세관 외면에 부착된 스케일 두께와 와전류신호 진폭 간의 상관관계를 분석하였고, 이를 바탕으로 스케일의 두께를 정량적으로 평가하는 기법과 대량의 와전류 데이터를 평가할 수 있는 프로그램을 개발하였다.⁽⁷⁾

이한철과 성기방은 원전 증기발생기 관관 상단 화학세정 결과 분석에서 증기발생기 2차측 부식분위기 저감과 함께 전열관의 응력부식균열의 발생을 억제하기 위하여 부분 화학세정을 실시하여, 슬러지 제거량은 259.2kg이고, 퇴적 슬러지 높이는 0.71인치에서 0.34인치로 낮아졌으며, 부식율은 최대 2.34mils 로서 EPRI 권고사항인 10mils 이내로 만족한 결과를 나타내었다.⁽⁸⁾

제 2 장 연구이론

제 1 절 증기발생기

1. 증기발생기 기능

한국표준형원전의 증기 발생기는 Fig. 1과 같이 수직 U-tube형 열교환기로서 관 내측(Tube Side)에는 원자로 냉각재가, 동체측(Shell Side)에는 급수가 흐르면서 열 교환이 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 열전달이 이루어지도록 설계되어 있다.

증기 발생기는 정상 전 출력 운전 중 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 나

는다. 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 동반한 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 주름 잡힌 판형의 건조기를 통과함으로써 최종 건조가 된다.

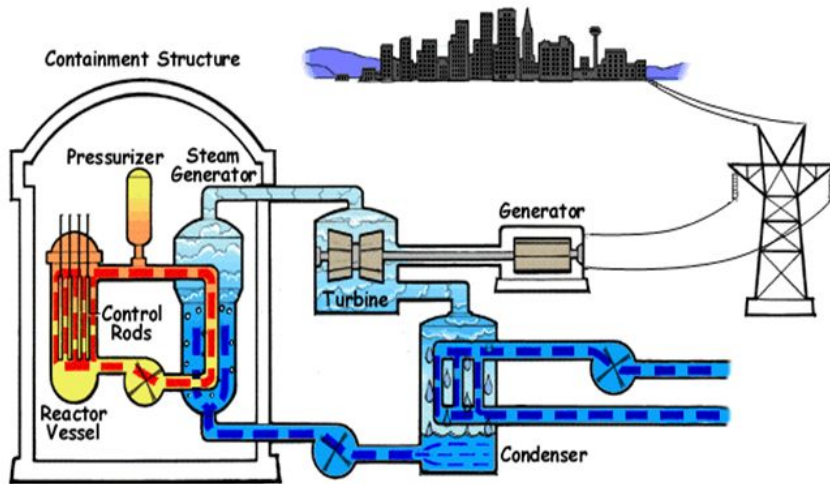


Fig. 1 표준형원전 2차측 개략도

2. 설계기준

한국표준형원전의 증기발생기 1차측과 2차측의 주요설계변수는 Table. 1과 같으며, 이에 대한 설계기준은 다음과 같다.

- 1) 증기 발생기에 2차측 급수 온도 450°F(232.2°C)로 공급시 1070 psia(75.2 kg/cm²A) 압력 상태에서 두 대의 증기발생기로부터 12.72×10⁶ lb/h(5.769×10⁶ kg/h)의 포화 증기를 생산하도록 총 2825 MWt의 열출력 용량으로 설계되어 있다. 증기발생기는 정상 전출력 운전중 증기 발생기 몸통(Shell)에 설치된 습분 분리기 및 증기 건조기에 의해 증기 중 습분 함유량을 0.25w/%로 제한한다.
- 2) 전열관을 포함하여 증기발생기는 원자로냉각재계통의 과도조건을 만족하도록 설계하여 사이클수에 대한 ASME 코드 Sec.III의 허용응력 한계를 넘지 않도록 하고 있다. 모든 과도조건은 지원계통 설계능력을 고려하여 운전조건을 보수적으로 가정하여 수립되었다.
- 3) 증기발생기는 임계진동주파수가 정상운전 및 비정상 조건 중에 예측되는 범주에서 충분히 벗어나 있다는 것을 보장하도록 설계되었다.
- 4) 전열관 및 전열관 지지물은 2차측 유동에서 기인하는 진동과 원자로 냉각재 펌프에서 기인하는 진동을 고려하여 설계 및 제작된다.
- 5) 2개의 급수노즐 중 어느 하나가 파단 되는 경우에도 견딜 수 있도록 설계된다. 두 사고가 동시에 발생하는 것으로는 고려하지 않는다.
- 6) 증기발생기 전열관은 외경 3/4 inch(19.1mm)의 Ni-Cr-Fe 합금으로 구성되어 있다. 증기발생기 전열관의 파열사고란 원자로냉각재계통 및 주증기계통 사이의 분리벽이 파괴되었음을 의미한다. 원자력발전소의 증기발생기 운전경험에서 볼 때 전열관이 완전 파단될 가능성은 거의 없다. 양단 파단사고는 본 설계하의 증기발생기에서는 한 번도 발생하지 않았다. 발생가능성이 더 높은 파손 형태는 작은 관통부위를 생성하는 것으로, 여기서는 핀홀 혹은 전열관에서의 작은 균열이나 전열관과 튜브시트 사이에 밀봉 용접부에서의 균열 발생이 포함된다.

Table 1. 증기발생기 설계변수

설계변수		값	설계변수		값
1차측	설계압력	175kg/cm ² a	2차측	설계압력	89.3 kg/cm ² a
	설계온도	343.3 °C		설계온도	301.7°C
	입구온도	327.3 °C		증기압력	75.2 kg/cm ² a
	출구온도	295.8 °C		증기유량/노즐	1.442×10 ⁶ kcal/hr
	RCS 유량/SG	27.56×10 ⁶ kcal/hr		급수온도	232.2 °C
	RCS 체적/SG	51.9 m ³		증기노즐	2개/24.125 " 내경
	Tube 외경	19.1 mm		Economizer 급수노즐	2개/12 " 내경
	Tube 두께(공칭)	1.07 mm		Downcomer 급수노즐	1개/6 " 내경
				1차측 입구노즐	1개/42 " 구경
		1차측 출구노즐	2개/30 " 구경		

3. 주요 구성기기

가압 경수로형 원자로 발전소에 사용되는 증기 발생기는 Fig. 2와 같이 수직형 자연 순환식 보일러로 원통형의 상·하부동체와 하부의 관판과 채널헤드로 구성되어 재열 영역 및 증발기 부분에는 U-튜브군과 지지판이 내장되고 상부동체에는 습분 분리장치가 내장된다. 증기발생기 1차측과 2차측 주요기기는 다음과 같다.

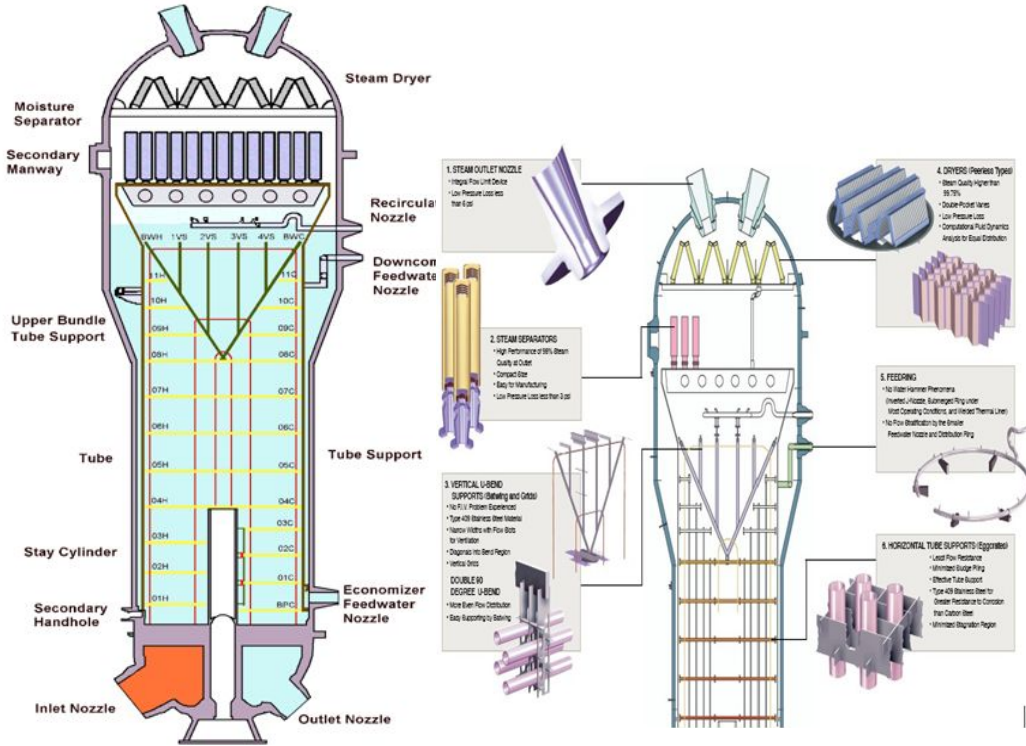


Fig 2. 증기발생기 구성도

1) 1차측 주요 기기

증기 발생기 1차측 경계는 용기의 하부헤드, Fig. 3과 같이 8,214개의 튜브와 관판으로 구성된다.

(1) 관판(Tube Sheet)

관판은 Fig. 4와 같이 관다발(Tube Bundle)과 함께 1차측과 2차측의 경계가 되는 부분으로 546mm 두께의 저탄소강 합금으로서 1차측 냉각재와 접촉되는 부위는 최소 5mm 두께의 Ni-Cr-Fe합금으로 용접 피복 되어 증기 발생기 헤드와 하부 셀에 용접 조립된다.



Fig. 3 증기발생기 튜브



Fig 4. 튜브 시트

(2) 관다발(Tube Bundle)

U-형 관다발의 재질은 Alloy-600(Ni-Cr-Fe 합금)이며, Fig. 3과 같이 총 8,214개의 튜브로 균일한 격자 모양으로 배열 되어있으며 관 관에 폭발 팽창 형태로 조립하여 관 관 하부에 밀봉 용접되어 있다.

전열관 재료의 국부적인 부식으로 인하여 몇몇 운전중인 원자력발전소에서 증기발생기 전열관 누설이 있었다. 누설을 일으킨 전열관 결함을 검사해본 결과 두 가지의 손상기구가 누설의 주요 원인임이 밝혀졌다. 이들 국부적인 부식의 원인은 응력부식균열(stress assisted caustic cracking)과 웨이스티지(wastage) 혹은 튜브두께 얇아짐(Tube wall thinning)이다. 이들 두 형태의 부식은 인산염을 포함하는 화학 성분하에서 운전되는 증기발생기와 관련이 있다.

국부 웨이스티지 혹은 Thinning은 수질화학 관리계획을 통해 인산염을 제거시킴으로써 발생을 방지한다. 증기발생기의 Alloy 600 전열관은 제작동안에 고온 소둔과정(High Temperature Mill-annealing Process)으로 열처리되었다. 이러한 전열관 재질은 일차냉각수 응력부식균열(PWSCC)에 민감하지 않다. 8%의 전열관 관막음 여유는 증기발생기 설계시 관막음의 필요성을 위하여 포함되어 있다.

(3) 입 · 출구 수실

증기 발생기 하부채널은 인코넬-600으로 피복된 탄소강으로 구조된 반구형의 수실부분으로서 원자로 냉각재 입구 노즐(42", 1066.8mm) 1개, 출구 노즐(30", 762 mm) 2개 및 4개의 1차측 계기 노즐, 2개의 1차측 배수 노즐이 용접 되어있다.

2) 2차측 주요 기기

증기 발생기 2차측 경계는 관관, 상·하부동체, 원추형 동체, 상부헤드로 구성된다. 증기발생기 급수노즐에서 증기출구 노즐간 압력강하는 급수예열기를 포함하여 약 40 psi(2.81 kg/cm²)이다.

(1) 관 지지대 및 쉬라우드

관 지지대는 물/증기 흐름에 의한 진동으로 부터 관다발을 지지하는데 Fig. 5와 같이 수평 방향은 Eggcrate 형태 지지대에 의해 수직 방향은 Tierod 형태 지지대에 의해 지지되며 튜브 지지대 외측단에는 Fig. 6과 같은 쉬라우드가 설치되어 튜브 다발을

통한 급수의 상향 이동, 쉬라우드와 외측단 동체 사이의 재순환 경로 및 하향 수로의 경로를 제공한다. 관 지지대 및 쉬라우드의 재질은 스테인레스 강판이다. 전열관 지지구조물 설계와 2차측 냉각수 화학성분에 대한 적절한 조절이 함께 고려된 이러한 재료는 피팅(pitting)과 덴팅(denting)에 의한 전열관 결손(degradation)을 최소화 할 수 있다. 2차측 고용량 취출계통은 적절한 냉각수 화학성분을 유지할 수 있도록 한다. 증기 발생기 튜브시트 윗 부분에 있는 2차측 점검구(shell-side hand holes)는 점검이 필요할 경우 발전소 수명기간 동안 튜브시트 윗 부분에 쌓여있는 찌꺼기를 제거하기 위하여 사용된다. 증기발생기 상부 수직전열관 지지구조물은 U형태로 굽어진 부위에서 전열관의 유체유발 마모를 방지하도록 설계되었다.

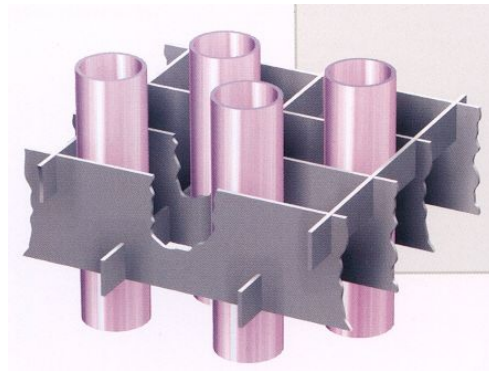


Fig. 5 관 지지대



Fig. 6 쉬라우드

(2) 진동 방지대(AVB : Antivibration Bar)

관 다발의 상부측 곡관부에서 발생하는 유체 흐름에 의한 진동을 방지하기 위해 4개의 진동 방지대에 의해 관 다발을 지지하고 있다.

(3) 급수 예열기(Economizer)

급수 예열기는 증기 발생기의 U-튜브 저온관을 이용하여 1차측 냉각재 변화 없이 증기 발생기 열효율을 향상시키는 목적으로 설치되어 있다.

즉, 가열면 증가 없이 증기 발생기를 고압으로 운전할 수 있도록 하고 있다. 기존의 증기 발생기와 다른 점은 급수가 두 군데로 유입되는데 하나는 기존의 증기 발생기와 동일하게 급수링을 통하여 하향 수로로 유입되고, 다른 하나의 유로는 급수 예열기 하단부 2개의 노즐을 통해 공급된다.

예열기에 유입되는 급수는 예열기 하단부 저온관 관다발측 2개의 노즐로 유입, 수실과 유량 분배관을 거쳐 예열기 부분을 통하면서 예열되어 증발기 영역으로 유입된다. 급수예열기 영역과 증발영역은 분리판(Divider Plates)에 의해 구분이 되며 이 분리판은 증기발생기 동체 및 증기발생기 내부 중앙에 설치된 원통형 지지대(Center Support Cylinder)에 의해 고정된다.

급수예열기 부분은 운전과도조건, 발전소기동 및 대기운전조건, 그리고 급수상실사고 및 급수관과단과 같은 사고조건을 충분히 고려하여 설계된다. 각 부품에 대한 구조설계는 ASME 코드 Sec.III 부록 G의 설계규칙과 적절한 하중분류법에 따라 다양한 조건에서 열하중 및 압력 하중을 견디는데 적합하도록 되어있다. 급수예열기 부분은 급수관 파단시 취출(blowdown)에 의하여 발생하는 일차응력을 고려하여 설계된다. 2차측의 증발기부분과 급수예열기 영역을 분리하는 분리판은 용기셸과 튜브쉬트 중심에 용접되어 있는 원통형 지지물로 지지된다. 분리통의 크기는 그다지 무게가 있는 것은 아니지만 일차 튜브쉬트 스테이 원통의 연장으로 급수예열기 높이까지 뻗어있다. 전열관지지/유량 격막 판은 용기 셸, 분리 통 및 튜브쉬트로 부터 일련의 지지봉을 통하여 지지된다.

(4) 습분 분리 장치

관다발에서 생성된 증기는 2단계의 습분 분리 장치를 통과하면서 거의 완전한 건 증기가 된다.

가. 1단계 습분 분리 장치

12개의 소용돌이 날개(Spinner Blade)를 갖는 원통형의 습분분리기로서 관다발 상부에 위치한 외피관 덮개에 144개가 장착되어 있다. 분리기 상단에는 출구 직경이 작은 9층의 오리피스 Mesh Wire가 설치되어 분리된 물방울의 유출을 저지시키며 분리된 습분은 외측단으로 유입되어 재순환수로서 재열 영역으로 보내진다.

나. 2단계 습분 분리 장치

1단계 습분분리기 상부에 설치되어 분리기로 유입되는 물, 증기 혼합물로부터 습분을 제거하는 고용량 날개(High Capacity Vane)로 구성되어 있다. 2단계 습분 분리 장치를 통과한 증기는 건도 99.75% 이상의 건증기가 되며 2단계 습분 분리기에서 제거된 물은 배수관(26개, 2.5")을 통해 관다발 외피관 덮개로 흘러 하향통로로 유입되어 다시 급수와 혼합된다.

(5) 유량 제한기

증기발생기 출구 노즐에 벤츄리 노즐 형태인 유량 제한기가 설치되어 주증기 관 파열 사고시 증기 유동 면적을 70% 감소시키는 기능을 수행하여 격납용기내 최고 압력, 온도를 제한한다. 유동단면적의 감소에 따라 유량률은 줄어들고 유속은 음속 이하로 제한된다.

이 유량제한기를 설치함으로써 얻는 보호측면의 이점은 다음과 같다. 격납건물 압력의 갑작스런 증가를 방지하며, 원자로냉각재로 부터의 열제거율을 허용범위안에 둘 수 있고, 주증기관에서의 추력을 줄인다. 그리고 중요한 것으로는 증기발생기 내부구조물(특히, 튜브시트와 전열관)에 미치는 응력이 제한된다. 이 유량제한기는 정상 운전중 이 제한기를 통과할 때 발생하는 압력손실을 최소화하도록 설계된다. 구조적 적합성을 보장하기 위해 유량제한기 설계에 대해 충분히 분석하였다.

설계유량 3.18×10^6 lb/hr(1.44×10^6 kg/hr)이 흐를 때 유량제한기를 통한 압력감소는 유량제한기에서 약 5 psi(0.35 kg/cm²)이며 증기발생기 증기 돔 영역에서 유량제한기 출구노즐까지는 약 6 psi(0.42 kg/cm²)이다. 유량제한기의 구조, 재질 및 제작은 ASME 코드 Section III, 1 등급을 따른다.

(6) 취출수 계통

증기발생기 수질개선을 하는 계통으로서 증기발생기에서 발생하는 용해성, 비용해성

불순물 및 부식 생성물을 제거하는 기능을 수행한다. 정상 전출력 운전시 취출수 유량은 12,720 lb/hr로 전체 증기 유량의 0.2%(약 47gpm)에 해당하며, 최대 연속 취출수 유량은 63,600 lb/hr로 증기 유량의 1%(약 230gpm)에 해당된다.

(7) 재 순환 노즐 및 스파이저 링

증기 발생기 쉬라우드에 설치된 재 순환 노즐 및 스파이저 링은 취출수 계통에 연결되어 증기발생기 습식 보관 상태시 화학 및 수위 제어를 한다.

(8) 지지설비

가. 하부

Conical Skirt가 부착된 Sliding Base는 RCS의 열팽창을 제한하지 않도록(허용하도록) 마찰이 적은 베어링 위에 설치되어 있으며, RCS 수축, 팽창동안에 증기발생기의 움직임을 안내할 Key와 Sliding Base Mate의 Keyway가 있고 LOCA와 지진 동안에 증기발생기의 움직임을 제한하기 위한 Stop 장치와 Anchor Bolt가 있다.

나. 상부

RCS 수축 및 팽창동안 증기발생기의 상부의 움직임을 안내하기 위해 Steam Drum 부위에 Key와 Snubber가 설치되어 있으며, 증기관 파열이나 LOCA에 따른 사고나 지진동안에도 지지할 수 있다. 또한 Hydraulic Shock Strut Assemblies가 설치되어 있다. Shock Absorber, Snubber는 정상운전 동안 저항을 최소화하여 움직임을 허용하나 동적 부하시에는 재 움직임을 일으켜 다른 설비로부터의 과응력을 방지하도록 한다.

4. 증기발생기 2차측 슬러지 형태

증기발생기 세관의 바깥쪽에는 이차계통에서 생성된 산화철이 유입되어 Fig. 7과 같이 관판(tube sheet) 상단에 슬러지(sludge)로 쌓이게 되며, 관지지판(tube support plate)에도 쌓이게 된다⁽⁹⁾. 원전의 가동연수가 증가함에 따라 Fig. 8과 같이 증기발생기로 유입된 슬러지가 2차측의 유체흐름을 따라 상부로 이동하면서 유체비등과 난류에 의하여 세관 외면에 스케일 형태로 고착된다⁽⁹⁻¹²⁾. 증기발생기의 슬러지와 스케일은 세관 내부의 열을 외부로 전달하지 못하게 방해하여 세관 외면의 온도를 증가시키고, 유해한 화학성분을 농축시켜 부식결함이 발생하기 쉬운 환경을 조성한다⁽¹³⁾.

원전 운영자는 세관의 건전성을 확보하기 위하여 증기발생기로 산화물이 유입되지 않도록 예방하고, 생성된 스케일을 효과적으로 제거하기 위하여 화학세정 등의 정비작업을 수행한다. 따라서 세관의 상태를 진단하여 화학세정 등의 정비전략을 수립하기 위하여 세관 외면에 쌓인 스케일의 두께를 측정하는 것이 중요하다. 원전의 계획예방정비 기간에 증기발생기 세관에 대한 와전류검사를 수행한다. 와전류검사는 보빈코일과 회전코일을 이용하며, 보빈코일의 저주파수 채널을 이용하여 스케일의 두께를 측정할 수 있다.

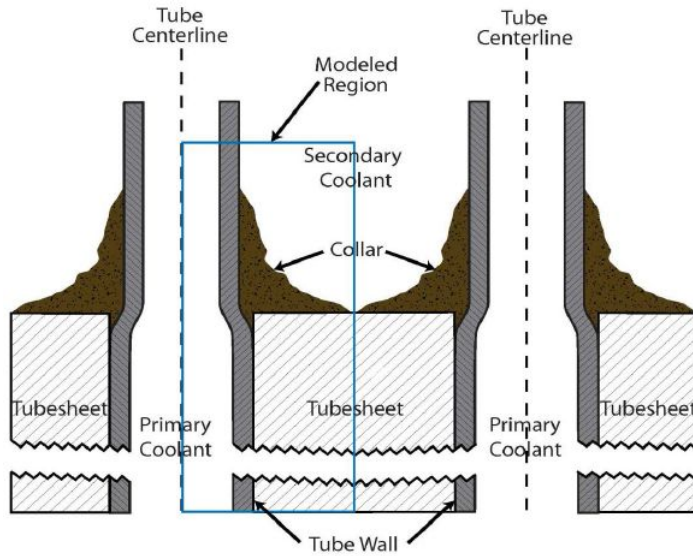


Fig. 7 관관 상단의 슬러지 퇴적 형태

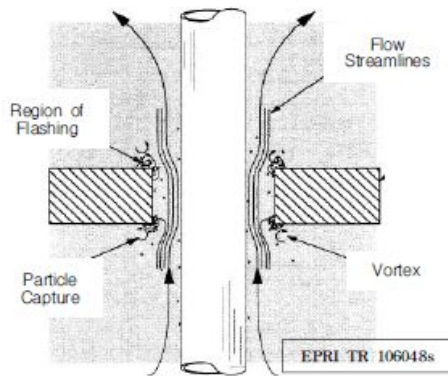


Fig. 8 관지지대 유동 특성

제 2 절 ODSCC 발생원인 및 손상완화 방법

SCC 발생 원인은 연성금속이나 합금이 Fig. 9와 같이 인장응력이 존재할 때 부식 환경에서 취성파괴(Brittle Failure)가 일어나는 현상으로 Alloy 600 전열관을 사용하는 증기발생기는 SCC 결함에 취약한 특성을 가지고 있다. 또한 결함이 발생하면 부식이 빠르게 증가하는 양상을 보이고 있다. 특히 증기발생기 관판상단의 응력부식균열 발생분포는 Fig. 10과 같이 고온관측 슬러지 퇴적 영역에서 집중적으로 발생하고 있다. 이와 같이 고온관측 슬러지를 제거하기 위한 방법들은 다음과 같다.

1) 틈새 세척

전열관의 손상원인에 따르면 ODSCC 발생부위는 주로 경성 슬러지 상단의 끝단 틈새부위이며, 틈새에서의 나트륨(Na) 농축으로 나타나고 있다. 나트륨은 출력감발시 일부 방출되지만 틈새가 치밀하여 상당량이 잔류할 수 있으며, 이미 생성된 미세균열 속에서도 유사한 현상이 나타난다. 따라서 기동전에 약산을 사용하여 나트륨을 중화하거나 세척할 필요가 있다.⁽⁴⁾ 한편 ODSCC 완화제인 TiO₂의 사용 방법은 미국의 Lumsden⁽¹⁴⁾에 의해 개발되어 실험실 효과를 확인되었으며, 1993년 6월과 8월에 미국 Prairie Island 1호기 및 Point Beach 2호기에 각각 적용되었다. 틈새 세정시 TiO₂의 적용은 관판상부에 균열이 집중된 경우에 적합하다.

2) 몰비 조절

운전 중의 전열과 외부표면 틈새 및 균열 내부의 염기도 증가를 막기 위하여 증기발생기 2차측 내부 수질을 조절하는 것이 바람직하다. 틈새 염기도를 결정하는 불순물, 즉 나트륨과 염소(Cl) 사이의 휘발성이 다르므로 비등환경에서 나트륨 등의 양이 온이 편향적으로 농축되는 현상을 고려하여 조절하여야 한다. 이 분야의 기술은 미국의 9개 발전소 및 일본의 많은 발전소에서 이 방법을 채택하였다. 틈새 몰비는 방출수 몰비에 비해 약 2~3 배 높게 나타나므로, 틈새 몰비를 1.0(중성)으로 유지하기 위해서는 방출수의 몰비를 0.3~0.5로 조절하여야 한다. 그러나 몰비가 0.3 이하로 감소하면 산성화가 될 수 있으며, 미국의 몰비 목표치는 약 0.3이며 일본의 경우에는 약 0.7이다.⁽⁴⁾

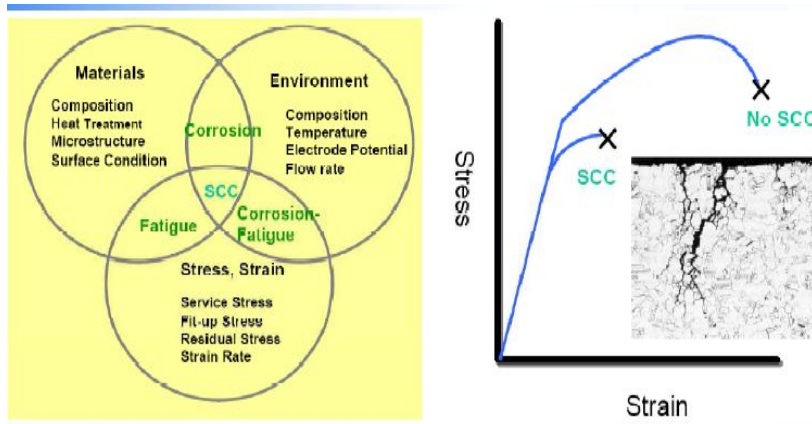


Fig. 9 응력부식균열 발생 기여인자

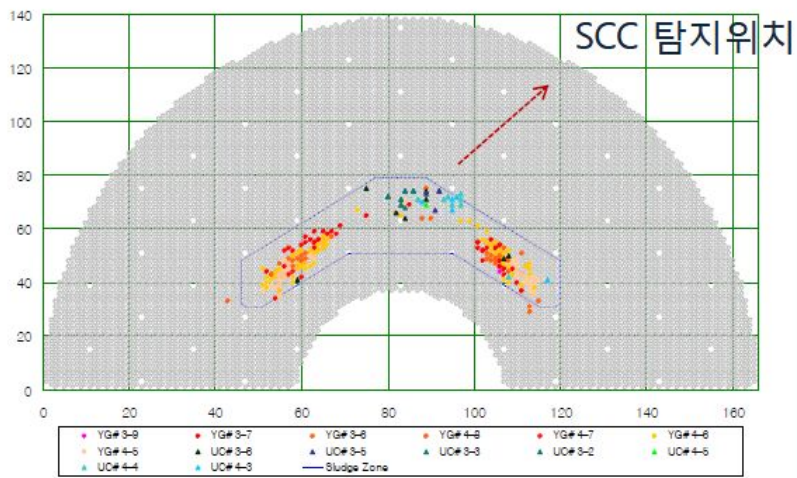


Fig. 10 SG 고온관측 슬러지 퇴적 영역의 응력부식균열 발생분포

3) 붕산 주입

해외의 발전소 운전 경험에 의하며 붕산을 약 5~10 ppm (방출수 기준)을 주입하면 ODSCC의 성장속도가 완화되는 것으로 알려져 있으며, 대부분의 일본 PWR에서는 붕산을 주입하고 있다. 또한 붕산을 주입하는 발전소에서는 급격한 ODSCC의 발생이 보고되지 않고 있다. 붕산의 ODSCC 억제 효과는 틸새 중화작용에 의한 것으로 알려져 있지만 정확한 이론은 아니다. 한편 붕산을 주입할 경우에는 증기 응축수의 산화 및 관련 배관의 침식/부식 손상이 촉진될 가능성이 있다.⁽⁴⁾

4) 하이dra진 담금 및 용존산소 제거

증기발생기 전열관 표면에서 채취된 슬러지의 주성분은 구리로 밝혀졌다.⁽¹⁵⁾ 이와 같은 전열관 표면구리가 증기발생기 보수 기간 중이나 기동시 산소 분위기에 노출되면, 산화되어 Cu_2O 및 CuO 로 변환되어 산화전위를 높이는 역할을 하게 된다.⁽¹⁶⁾ 인출전열관의 균열내부 및 전열관 표면에 다량의 금속성 구리와 Fe_3O_4 가 관찰되고, 기동전에 하이dra진을 활성화 시킨 후 기동 중 및 정상운전 시 환원성 분위기를 유지하는 것이 필요하다.⁽⁴⁾

5) 고온부 온도저하법

해외의 유사한 ODSCC 손상으로 인한 운전정지 사례에 의하면, 출력을 약 80%로 감발 운전하였을 경우에는 추후의 보수정지가 발생하지 않았으나, 100% 출력을 유지할 경우에는 몇 개월마다 보수정지가 반복되는 것으로 알려졌다. 즉 출력감발에 따른 고온부 온도(T_{hot})의 감소로 ODSCC 손상이 감소되었음을 나타낸다. 또한 고온부 온도 저하대책으로 1차측 응력부식균열(PWSCC ; Primary Stress Corrosion Cracking)에 의한 전열관 손상을 방지할 수 있음은 널리 알려져 있다.^(4, 17)

6) 기타 완화방법

(1) 예방 관재생

이미 취약해진 관상부 슬러지 부위의 전열관이 지속적으로 높은 손상 진전율을 보일 가능성에 대비한 완화책이다. 1차측 및 2차측 응력부식균열은 주로 Banana Zone의 전열관에서 발생하므로, 이 지역의 전열관을 모두 관재생하는 것도 바람직하다. 그러나 이에 대한 결정은 전열관에 대한 ECT 검사를 정밀하게 수행한 후에 수

행 여부를 결정하는 것이 바람직한 것으로 알려져 있다.⁽⁴⁾

(2) 화학세정

증기발생기 2차측 슬러지 제거를 위한 최적약품 선정 및 조성을 결정하여 세정을 실시하는 화학세정은 저농도 화학세정인 ASCA (Advanced Scale Conditioning Agent) 세정, 세정부위를 전열관 관관 상단 부위에만 하는 관관상단 화학세정(a Top-of-Tubesheet Chemical Cleaning), TSP, TTS, Full-bundle Bulk Iron Deposit 등 전체 증기발생기에 퇴적된 슬러지를 효과적으로 제거하는 고온 전장 화학세정이 있다. 세정 방법에 따른 증기발생기 모재 부식율을 평가하기 위하여 QT(Qualification Test : 특성 평가)를 실시한다. QT에서는 증기발생기의 상태 및 운전이력에 따른 슬러지량의 산출, 슬러지 침적형태 예측결과에 따른 세정공정 중 적합한 약품 및 선정시험을 포함하고 있으며, 결과로 부식율 평가를 제공하여 현장적용 공정, 세부절차서 작성의 기초자료로 활용할 수 있게 한다⁽¹⁸⁾.

(3) 랜싱(Lancing)

일반적인 Hydro-lancing 방법과 틈새 세척을 겨냥한 Cecil-lancing 방법 등이 있으며, 문제가 되는 관관 상부 경성슬러지 상단의 치밀한 틈새 분위기를 개선하기에는 충분치 않은 것으로 알려져 있다.⁽⁴⁾

제 3 장 전장 고온화학세정의 공정 및 결과분석

제 1 절 전장 고온화학세정의 공정

세정공정에는 EPRI/SGOG(Electric Power Research Institute/Steam Generator Owners Group)공정과 KWU (Framatome ANP사의 KWU/Kraftwerk Union) 공정이 있다⁽⁷⁾. 본 공정에는 EPRI/SGOG를 사용하였다. 적용공정은 다음과 같다. 증기발생기 2차측 퇴적된 철산화물 등의 슬러지를 화학약품을 사용하여 용해하여 제거한다. 세정방법에서 온도는 121℃, 세정범위는 관판상단 45cm, 세정액의 주요 약품은 세정제로 Ammonium-EDTA, 부식억제제로 CCI-801을 사용하며, 하이dra진을 사용하여 증기발생기 전열관 외표면과 Tube Sheet에 부착된 스케일을 제거하고 전열관과 TSP(Tube Support Plate) 사이 Crevice에 침적된 슬러지를 제거한다. 화학세정에 사용약품으로는 Table 2와 같으며⁽⁸⁾, 약품과 산화철의 반응식은 다음과 같다.

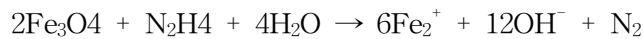


Table 2. 전장 고온화학세정 약품 조성표

Chemical	Concentration	Function
EDTA	10~20%	Cleaning
N ₂ H ₄	1%	Reducing
CCI-801	1%	Inhibitor
NH ₄ OH	-	pH Control

화학세정공정은 Fig. 11과 같이 Checkout Rinse Step, TTS Crevice Cleaning, Iron Removal Step, TSP Crevice Cleaning, Low Volume Rinse Step, Full Volume Rinse 을 거쳐서 실시하고 각 단계별 구체적인 사항은 다음과 같다.

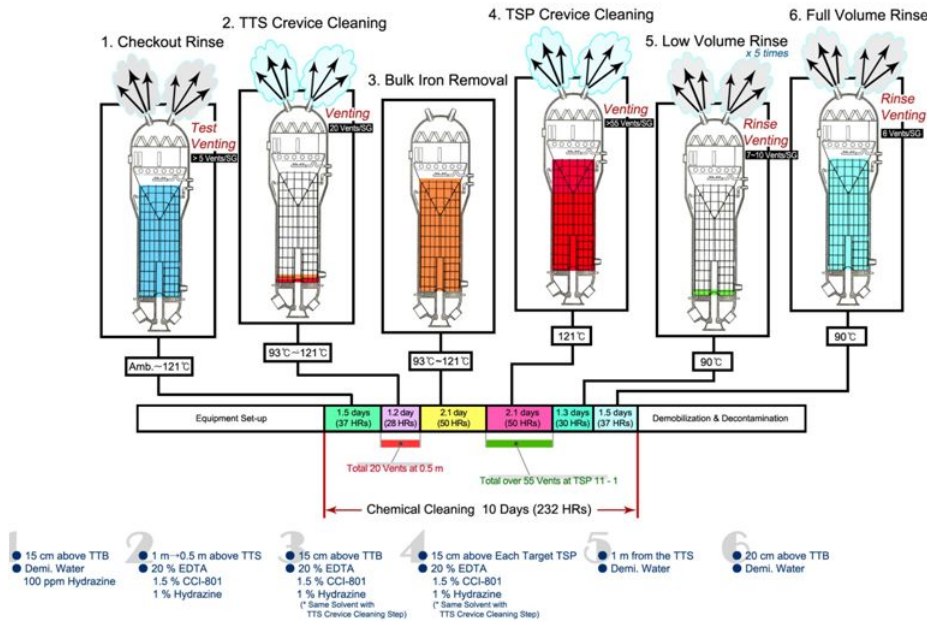


Fig. 11 전장 고온화학세정 공정도

1) 준비공정(Equipment Set-up)

세정장치 설치 및 부분 성능점검하며 격납건물(CV, Containment Vessel) 밖 장치 설치 및 성능점검을 실시한다. 격납건물 내부 장치 설치로는 CV Free access 조건 후 비상출입문을 통해 반입하여 장치와 증기발생기를 연결한다. 증기발생기 배수를 완료한 후 Hand-hole 등을 열어 장치를 연결한다. 연결지점으로는 Blow-down, Secondary drain, Secondary-manway 이다.

2) 점검세정공정(Checkout Rinse Step)

증기발생기에 세정수를 주입하기 이전에 세정장치의 기능별 운전 상태를 확인하고, 세정장치를 통한 가온과 냉각을 통하여 배관연결 상태 등 누수 여부를 점검하는 공정이다. 순수와 하이드라진(N_2H_4) 100ppm을 혼합한 약품을 TTB 상부 15cm까지 주입하여 93°C 까지 가온하고 질소가압 및 감압(3bar→2bar) 한 후, 다시 121°C까지 가온하여

시험배기를 5회 수행한다. 이 후 질소감압 및 75℃ 이하로 냉각하고 재가온(93℃)하여 누설부위를 점검하고 필요시 재조임 수행 완료 후 완전배수를 한다.

3) 관관상단 틈새 세정(TTS Crevice Cleaning)

EDTA 20%, N_2H_4 1%, 부식방지제(CCI-801) 1.5%를 혼합한 약 93℃로 가온되어진 세정액을 관관상단의 약 1m 까지 주입하여 순환한 후, TTB 상부 약 0.5m까지 부분 배수하고 121(±5)℃로 가온한 뒤 MSADV(Main Steam Atmosphere Dump Valve : 주증기대기덤프밸브)와 MSADIV(Main Steam Atmosphere Dump Isolation Valve : 주증기대기덤프격리밸브)를 개방하여 관관상단 및 전열관 사이에 퇴적된 슬러지를 용출시키는 공정이다.

4) 제철공정(Iron Removal Step)

증기발생기 TTB(Top of Tube Bundle : 튜브다발 상부)의 15cm 상부까지 주입된 세정액의 온도를 약 93(±5)℃로 유지 및 순환시키면서 증기발생기 TTS, Free Span 및 TSP에 퇴적된 슬러지를 용해시키는 공정이다.

5) 관지지대 틈새세정공정(TSP Crevice Cleaning)

증기발생기에 주입된 세정액의 온도를 약 121(±5)℃로 가온·유지하면서, 증기발생기 TSP 11단에서 1단까지 각 단수별로 수위를 낮춰가며 벤팅을 약 5회씩 실시하여 경성슬러지 및 Collar형 슬러지를 제거해내는 공정이다.

6) 저수위 수세공정(Low Volume Rinse)

순수를 증기발생기의 약 1m까지 주입하고 일정시간 후 배수하여 증기발생기 관관상단 상부의 잔여 세정액을 배출하기 위한 공정(총 5회 실시)이다.

7) 최종수세공정(Full Volume Rinse)

증기발생기의 약 TTB 20cm 까지 순수를 주입하여 약 121℃로 가온 및 순환(벤팅 6회 포함) 후 이온교환수지탑을 이용하여 증기발생기 내부와 장치 배관의 잔여 세정액품을 완전히 제거하는 공정이다.

이와 같은 공정에 의해 화학세정을 수행하였으며, 선행호기 화학세정 경험을 반영하

여 화학세정 공정을 7시간 증가시켜 총 232시간동안 진행하였다. 그리고 슬러지 탈리 낙하(rain fall)로 인한 TTS 슬러지 퇴적량이 증가되는 것을 방지하기 위해 세정공정 중 슬러지 용해량 증가를 위한 제철공정을 51시간 유지하였으며, 제철공정시 $93\pm 3^{\circ}\text{C}$ 에서 $121\pm 3^{\circ}\text{C}$ 까지 순환시키며 13시간동안 온도를 유지하였다. 점성 슬러지(Sticky sludge) 감소를 위한 조치로서 관지지대 틈새세정을 완료한 후 저수위 수세공정 착수 시 신속히 수세수를 주입하여 완전건조(dryout) 방지를 통한 슬러지 고형화를 저지하였으며, 저수위 수세공정 수세수의 온도를 90°C 이상 사전 가온 후 주입시켰다.

증기발생기 내 잔존 세정약품 최소화를 위해 저수위 수세공정 시 질소(N_2) sparging 을 수행하여 잔존약품의 용출을 개선하였으며, 저수위 수세공정 시 venting 공정(7회)을 추가 수행하였다. 최종수세공정 수세수 충수시 열교환기를 통과시켜 수세수 온도를 60°C 이상 증가시켜 잔존 세정약품 용출이 용이하도록 조치하였으며, 수세수 주입 후 121°C 까지 가온 순환하여 증기발생기 내 잔존 약품을 최대한 제거하였다. 아울러 Economizer 급수배관으로 유입된 세정수를 venting하기 위해 급수배관에 순수와 질소로 세척하는 공정과 S/G Secondary Manway로 질소가스 가압 후 MSADV, MSADIV를 개방하는 venting 공정(Popping-up 효과)을 추가하였다.

화학세정 전 ECT(Eddy Current Test : 와전류탐상시험) 검사결과를 관지지대 틈새 세정 공정에 반영하여 슬러지 침적량 데이터에 기반으로 venting 횟수를 조정하며 수행하였으며 과거보다 효과적인 관지지대 틈새세정을 수행할 수 있었다. 그리고 슬러지 침적량이 많은 TSP 9단~5단은 venting 횟수를 기존 5회에서 7회로 증가시켰으며, 상대적으로 슬러지 침적량이 적은 TSP 11단, 10단, 3단, 2단, 1단은 벤팅 횟수를 기존 5회에서 3회로 줄였다.

제 2 절 전장 고온화학세정의 결과와 분석

1. Free EDTA와 Fe 농도변화

한빛6호기의 화학세정 공정수행 동안 Fig. 12와 같이 Fe농도가 증가함에 따라 Free EDTA(Ethylene Diamine Tetra acetic Acid) 농도가 감소하는 전형적인 양상을 보였다.

TTS Crevice Cleaning 공정부터 Crevice Cleaning 공정까지 Fe 농도 최고치는 SG1 14,556ppm, SG2 14,668ppm으로 확인되었다. 이는 한빛4호기 화학세정 수행 당시 Fe 농도 최고치(SG1 24,335ppm, S/G2 24,265ppm) 대비 낮은 이유는 한빛6호기는 한빛4호기에 비해 상업운전 기간이 짧아 슬러지 로딩량이 적기 때문인 것으로 판단된다. 그리고 한빛4호기 경험을 반영하여 Iron Removal 공정에서 세정액을 121℃로 가온한 뒤 13시간 동안 수행함으로써, 미 용해 슬러지 발생을 최소화하여 세정 후 증기발생기 관관상단에 슬러지가 쌓이는 현상(Rain down) 최소화에 기여하는 것으로 사료된다.

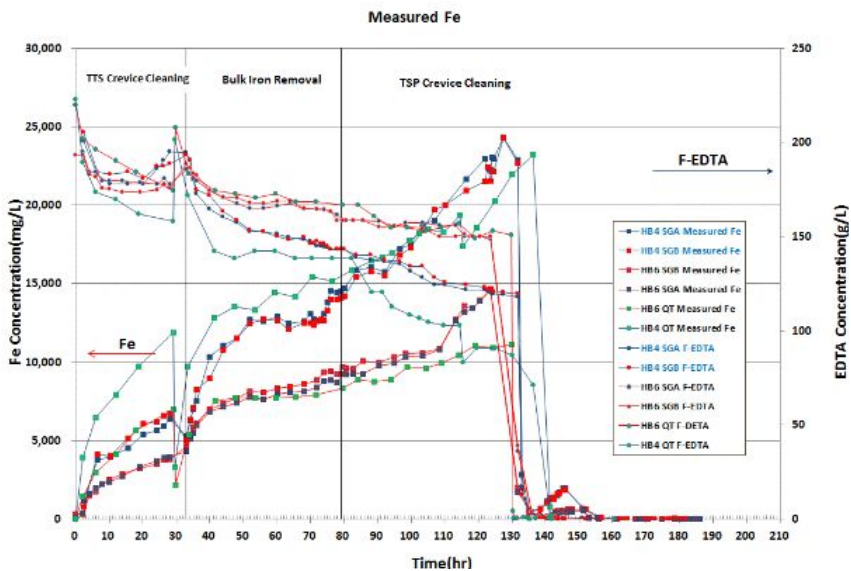


Fig. 12 Free EDTA 와 Fe 농도

2. 슬러지 제거량

한빛6호기의 전장 고온화학세정에 대한 실증시험 후 분석결과, 대부분의 슬러지는 제철공정에서 용해(75.7%)되었으며, 관판상단 틈새세정공정과 관지지판 틈새세정공정에서 약 20.2%의 슬러지가 제거되었다. 그리고 실증시험을 통해 100%의 슬러지 용해되었음을 확인할 수 있었으며, 압력용기 내부에 장착된 슬러지의 무게감량에 의해 계산한 슬러지 제거량도 100%로 계산되었다. 한빛6호기 실증시험에서 관찰된 슬러지 제거 수준은 이전 수행된 EPRI/SGOG 공정의 실증시험 결과와 부합하는 수준이었으며, 특히 모사 관지지판 틈새 퇴적물의 제거 또한 100% 달성되었다. 이는 전장 고온화학세정이 관지지판 틈새세정에 효과적이라고 판단된다. 관판상단 Collar형 슬러지의 용해는 68%에서 100% 사이의 범위였고 평균적으로 92%가 제거되었다.

한빛6호기의 9차 계획예방정비(9주기) 기간에 증기발생기 2차측의 전장 고온화학세정을 실시한 후 슬러지 제거량(Fe_3O_4 기준)은 3001kg이었으며, 추가적으로 랜싱작업을 통한 슬러지 제거량은 200.1kg이었다. 이는 Fig. 13과 같이 8주기 대비 약 30배가 증가한 양이며, 한빛5호기의 슬러지 제거량보다 약 24배가 증가하였다.

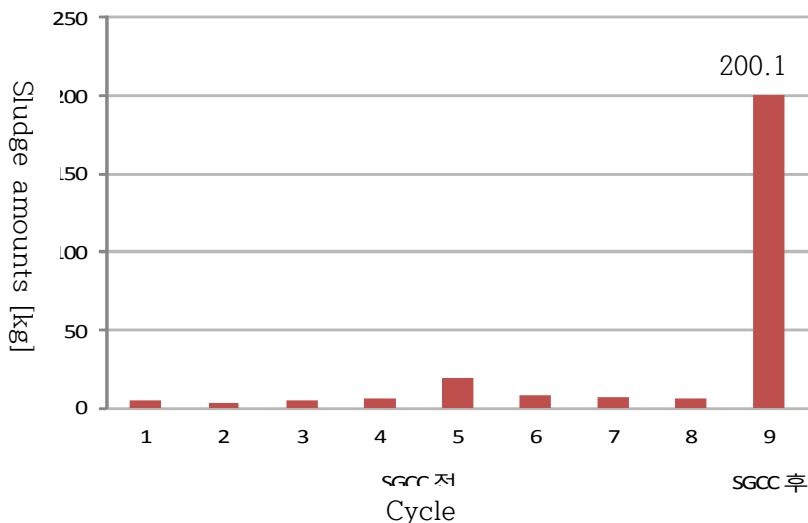


Fig. 13 랜싱 후 증기발생기 슬러지 제거량

3. 모재 부식률

SG 2차측 전장 고온화학세정 후 무게감량법(공인방법)에 의해 모재의 부식률을 분석하여 Table. 3에 표시하였다. 전기화학법의 Free는 일반적인 단일금속의 부식률을 나타내며, Galvanic은 이종금속간의 부식률을 나타낸다.

한빛6호기의 전장 고온화학세정 후 SG 세관의 재질인 Inconel 600 HTMA의 시편 부식률은 0 mils로 부식이 발생하지 않았으며, 모재의 최대부식률은 이종금속(galvanic)의 경우 계량법에 따라 한빛4호기에 비해 다소 낮았으며, EPRI 기준치인 10 mils 이하로 나타났다. 또한 전장 고온화학세정 실증시험(QT) 시 예상된 최대 모재부식율인 5.34mils에 대비하여 고온화학세정 후의 최대 모재부식률은 3.59mils로 측정되어 예상치에 부합하는 양호한 결과를 보였다.

Table 3. 모재의 무게 감량법에 의한 부식률 세부 측정결과(단위 : mils)

종 류	구 분	한빛4호기		한빛6호기	
		SG 1	SG 2	SG 1	SG 2
	Galvanic	3.88	3.97	3.59	3.54
	Inconel 600	0.00	0.00	0.00	0.00

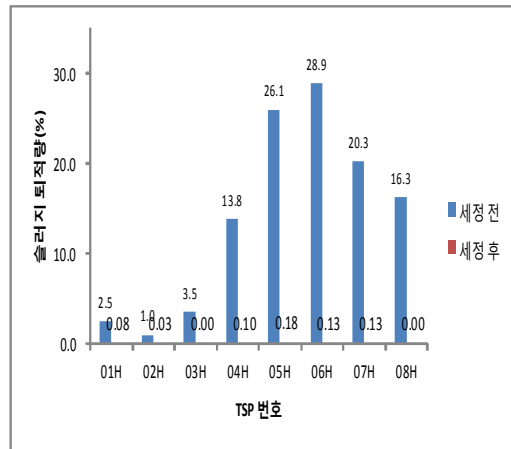
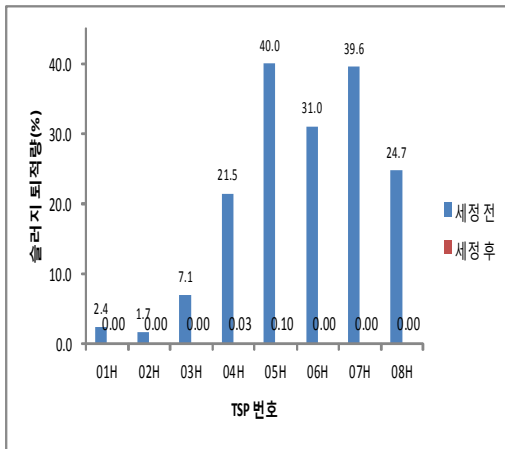
4. SG 전열관 관지지대 MRPC 결과

SG 2차측 전장 고온화학세정 전·후 SG 전열관 100개(TSP 1~8 단)에 대해 ECT MRPC(Motorized Rotating Pancake Coil) 검사를 수행하였다. Table. 4 및 Fig. 14와 같이 검사결과 화학세정 후 슬러지 퇴적량이 99.7% 감소하여 선행호기에 비해 화학세정 효과가 매우 큰 것으로 평가되었으며, C-SCAN 결과도 Fig. 15와 같이 Eggcrate TSP 신호가 선명하고 피크도 예리하게 나타나 TSP 주변의 슬러지가 깨끗하게 제거 된 것으로 평가되었다.

Table 4. 화학세정 전·후 TSP별(1~8 단) 슬러지 퇴적량 분포 비교(단위 : %)

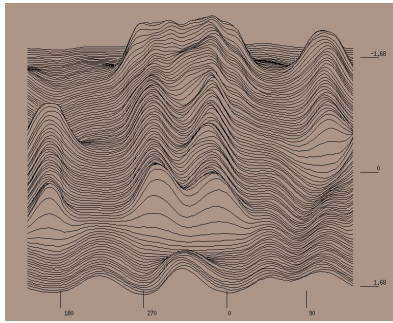
(주) 100개 전열관 TSP에 대해 화학세정 전/후 각각 1~8단 MRPC 검사

TSP 단수 SG 번호		01단	02단	03단	04단	05단	06단	07단	08단
01	세정전	2.4	1.7	7.1	21.5	40.0	31.0	39.6	24.7
	세정후	0.00	0.00	0.00	0.03	0.10	0.00	0.00	0.00
02	세정전	2.5	1.0	3.5	13.8	26.1	28.9	20.3	16.3
	세정후	0.08	0.03	0.00	0.10	0.18	0.13	0.13	0.00

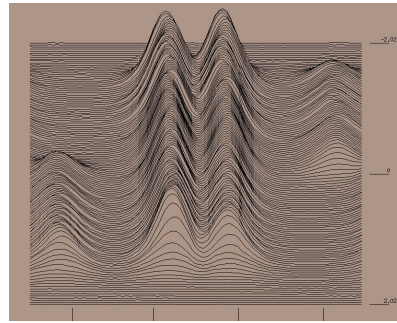


(a) 화학세정 전·후 TSP 슬러지 비교(SG01) (b) 화학세정 전·후 TSP 슬러지 비교(SG02)

Fig. 14 화학세정 전·후 TSP별 슬러지 비교



(a) 화학세정 전 TSP MRPC C-Scan



(b) 화학세정 후 TSP MRPC C-Scan

Fig. 15 MRPC C-SCAN

제 4 장 결 론

본 논문에서는 응력부식균열의 억제와 증기발생기 수명연장 및 발전소 효율 개선 효과를 기대할 수 있는 전장고온화학세정을 수행한 한국표준형원전 한빛6호기의 증기발생기 2차측의 Free EDTA와 Fe 농도변화와 슬러지 제거량, 모재부식률 및 전열관 관 지지대 MRPC 결과를 분석하였다. 그 결과는 다음과 같다.

1. Fe농도가 증가함에 따라 Free EDTA(Ethylene Diamine Tetra acetic Acid) 농도가 감소하는 전형적인 양상을 보였다.
2. 전장 고온화학세정을 실시한 후 슬러지 제거량(Fe₃O₄ 기준)은 3001kg이었으며, 추가적으로 랜싱작업을 통한 슬러지 제거량은 200.1kg이었다.
3. SG 세관의 재질인 Inconel 600 HTMA의 시편 부식률은 0 mils로 부식이 발생하지 않았으며, EPRI 기준치인 10 mils 이하로 나타났다.
4. MRPC 검사결과 화학세정 후 슬러지 퇴적량이 99.7% 감소하여 선행호기에 비해 화학세정 효과가 매우 큰 것으로 평가되었으며, C-SCAN 결과도 Eggcrate TSP 신호가 선명하고 피크도 예리하게 나타나 TSP 주변의 슬러지가 깨끗하게 제거 된 것으로 평가되었다.

위와 같은 한국표준형원전 증기발생기 2차측의 전장고온화학세정을 통하여 기존 세정방법보다 슬러지 제거량이 증가함으로써 ODS_{CC}에 의한 전열관 손상을 완화할 수 있을 것으로 기대된다.

참고문헌

1. K. S. Chae, W. C. Kim, D. H. Hur, H. S. Jung, G. G. Park, J. P. Kim, "Electrochemical and Sludge Dissolution Behavior During a Copper Removal Process for Chemical Cleaning on the Secondary Side of Nuclear Steam Generators", Nuclear Engineering and Technology, Vol. 24, No. 2, pp. 154-162 (1992).
2. T. G. Ha, "Study on the Characteristics and Volume Reduction of Accumulated Sludge in Steam Generator", M. S Thesis. Soongsil University, Korea (1993).
3. D. H. Hur, E. H. Lee, H. S. Jung, W. C. Kim, "High Temperature Application of Iron Removal Chemical Cleaning Solvent in the Secondary Side of Nuclear Steam Generators", Nuclear Engineering and Technology, Vol. 26, No. 1, pp. 140-148 (1994).
4. 황일순, 박인규, 황세기, 이상학, 이계용, 김봉수, 홍영완, "고리1호기 증기발생기 전 열관의 2차측 응력부식균열 Part II : 손상완화대책", 한국원자력학회 '95 추계학술대회 논문집, pp. 217-219 (1995).
5. S. G. Kim, K. H. Kim, J. H. Kim, B. H. Cho, "High Precision DC Motor Control of the Lancing Robot for Steam Generator Tube in Nuclear Power Plant", 2000년도 전력전자학술대회, pp. 721-724 (2000).
6. M. S. Kim, "Patents analysis of cleaning technologies for piping system of nuclear power plants", M. S Thesis. Chungnam National University, Korea (2012).
7. Chang-Soo Kim, Ki-Soo Um, Jae-Dong Kim, "Scale Thickness Measurement of Steam Generator Tubing Using Eddy Current Signal of Bobbin Coil", Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing, Vol. 32, No. 5, pp. 545-550 (2012).
8. Han-Chul Lee, Ki-Bang Sung, "Analysis of Chemical Cleaning for the Top of-Tubesheet of NPP's Steam Generator", Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society, Vol. 14, No. 4, pp. 2043-2048 (2013).
9. EPRI TR-106048s "Characterization of PWR steam generator deposits," pp. 2-81-2-84 (1996).

10. C. S. Kim, W. B. Kim and Y. H. Lee, "Evaluation Techniques of SG TSP Flow Hole Blockage Rate," Transactions of KPVP, Vol. 3, No. 1, pp 36-41 (2007).
11. H. D. Kim, J. Y. Kim, A. S. Chung and T. R. Kim, "Evaluation of Tube Support Plate Blockage of Model F Steam Generator," Transactions of KPVP, Vol. 3, No. 2, pp 88-93 (2007)
12. EPRI TR 1022824 "Development of predictive models for deposit accumulation and corrosion on secondary side of steam generators-phase 2," pp. 6-2~6-5 (2011)
13. KHNP, "Steam Generator," pp. 140-141 (2005)
14. J. B. Lumsden, "Mechanism of SCC of Alloy 600 in Caustic Solution with Dissolve Hydrogen", presented at Alloy 600 Expert Meeting, Airlie, VA U.S.A. (1993).
15. 박인규, 황일순 등 "고리 1호기 증기발생기 전열관 손상원인분석", 원자력학회 '95 추계 학술발표회 논문집 (1995).
16. A. Kishida, et al., "The Causes and Remedial Measure of Steam Generator Tube Intergranular Attack in Japanese PWR", Proc. Conf. Env. Deg. Mater. in Nuclear Power System - Water Reactors, pp. 465-471. (1987).
17. 박인규, "증기발생기 튜브의 1차수 응력부식균열 손상과 관막음 기준 평가", 전력 기술 제3권 제3집, pp. 59-66. (1987).
18. KHNP-CRI, "Chemical Cleaning Handbook", pp.157-185 (2011).

감사의 글

2013년 조선대학교 원자력공학과 석사과정을 시작한지 벌써 2년이란 시간이 흘러갔습니다. 처음에 시작할 때는 언제 2년이란 시간이 지나 졸업을 할 수 있을까, 과연 직장을 다니면서 학업을 동시에 수행하는데 어려움이 있지는 않을까 많은 고민들을 했었는데 어느덧 그런 과정들을 모두 마치고 이렇게 감사의 글을 쓸 수 있음에 만감이 교차합니다. 제가 이렇게 직장과 학업이라는 두 마리의 토끼를 잡을 수 있었던 것은 주위의 관심과 배려가 있지 않았다면 결코 이루지 못했을 거라고 생각하며 지금의 결과물이 나올 수 있도록 도움을 주셨던 모든 분들에게 이 글을 빌어 진심으로 감사의 마음을 전합니다.

먼저 정말 바쁘신 와중에도 저에게 지금의 논문이 나오기까지 많은 가르침과 격려를 아끼지 않으신 이경진 교수님께 머리 숙여 감사드립니다. 또한 항상 수업을 위해 먼길 달려와 열정적인 강의를 해주신 조선대학교 원자력공학과 정운관 교수님, 김진원 교수님, 나만균 교수님, 송종순 교수님께도 정말 감사드립니다. 또한 2년이라는 시간동안 제가 학업을 중단하지 않고 꾸준히 이 길을 갈 수 있도록 옆에서 함께 해주신 우리 한빛원자력본부 원자력공학과 동료분들께도 이 글을 빌어 감사의 말씀을 드립니다. 이 글을 쓸 수 있도록 어려운 분야임에도 자세한 설명과 자료를 제공해 주신 한빛원자력 본부의 이만길 차장님께도 진심으로 감사드립니다. 그리고 제가 공부할 수 있는 환경과 많은 조언을 해주신 조선이공대학의 김창오 선배님께 진심으로 감사드립니다. 김창오 선배가 옆에서 함께 해주지 않았었다면 이 논문을 마치기 정말 힘들었다는 것을 알기에 더욱 감사드립니다. 마지막으로 아들의 대학원 입학 소식에 크게 기뻐하시며 행복해하시던 부모님과 제가 학업을 계속 수행할 수 있도록 곁에서 늘 응원해주고 사랑으로 우리 아들들, 영우와 성민이를 잘 키워준 나의 사랑스런 아내 민애진에게 이 논문을 바칩니다.

2014년 11월 김정훈 드림

저작물 이용 허락서

학 과	원자력공학과	학 번	20137248	과 정	석사
성 명	한글 김 정 훈	한문 金 廷 勳	영문 Kim Jung-Hoon		
주 소	광주광역시 남구 양림동				
연락처	E-mail : kasajal@naver.com				
논문제목	한글 : 한국표준형원전 증기발생기 2차측 전장고온화학세정에 대한 고찰				
	영문 : A study on Full Length High Temperature Chemical Cleaning of Steam Generator secondary side of KSNP				
<p>본인이 저작한 위의 저작물에 대하여 다음과 같은 조건 아래 조선대학교가 저작물을 이용할 수 있도록 허락하고 동의합니다.</p> <p style="text-align: center;">- 다 음 -</p> <ol style="list-style-type: none"> 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. <p style="text-align: center;">동의여부 : 동의(○) 반대()</p> <p style="text-align: center;">2015 년 2 월</p> <p style="text-align: right;">저작자: 김정훈 (인)</p> <p style="text-align: center; font-size: 1.2em;">조선대학교 총장 귀하</p>					