



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](#)

2021년 8월

석사학위 논문

원자력발전소 증기발생기 2차측
이물질검사를 통한 전열관 건전성
향상 방안 연구

조선대학교 대학원

원자력공학과

김 병 훈

원자력발전소 증기발생기 2차측
이물질검사를 통한 전열관 건전성
향상 방안 연구

A Study on the Improvement of Tube Integrity through
Foreign Objective Inspection in the Steam Generator
Secondary Side of Nuclear Power Plants

2021년 8월 27일

조선대학교 대학원

원자력공학과

김 병 훈

원자력발전소 증기발생기 2차측
이물질검사를 통한 전열관 건전성
향상 방안 연구

지도교수 김 진 원

이 논문을 공학 석사학위신청 논문으로 제출함

2021년 4월

조선대학교 대학원

원자력공학과

김 병 훈

김병훈의 석사학위논문을 인준함

위원장 조 선 대 학 교 이경진 교수 (인)

위 원 조 선 대 학 교 정운관 교수 (인)

위 원 조 선 대 학 교 김진원 교수 (인)

2021년 5월

조선대학교 대학원

목 차

ABSTRACT	i
제1장 서론	1
제2장 본론	3
제1절 선행 기술 및 운영 현황	3
1. 증기발생기	3
2. 국내 증기발생기 모델별 제원 및 사양	3
3. 국내 증기발생기 구조 및 재질	10
4. 국내 증기발생기 잔류이물질 현황	13
제2절 증기발생기 2차측 정비기술	18
1. Lancing 및 FOSAR	18
2. 잔류이물질 검사기술 동향	33
제3절 검사기술 문제점 및 개선방안	36
1. 검사기술 문제점	36
2. 검사기술 문제점 개선방안	37
제3장 결론	43
참고문헌	45

표 목차

표 1. 국내 증기발생기 모델별 현황	3
표 2. 증기발생기 모델별 전열관 정보	4
표 3. 증기발생기 전열관 열처리 방식 및 효과	12
표 4. 증기발생기 전열관 재질에 따른 특성	12
표 5. 증기발생기 2차측 정비 필요성	13
표 6. 증기발생기 2차측 주요 검사 근거	13
표 7. EPRI SGMP 이물질 분류	14
표 8. 카테고리별 증기발생기 영향	15
표 9. 이물질별 카테고리 분류	15
표 10. 국내 발전소 2차측 정비기술 비교	20
표 11. 증기발생기 검사 (전열관 내부 포함) 장비 비교	32

그림 목차

그림 1. 원자력발전소 개념도	1
그림 2. F 모델 증기발생기 구조	5
그림 3. F 모델 증기발생기 전열관 배열	5
그림 4. F 모델 증기발생기 전열관 간격 및 배치 (Broach-Quatrefoil)	6
그림 5. OPR-1000 모델 증기발생기 구조	7
그림 6. OPR-1000 모델 증기발생기 전열관 배열	7
그림 7. OPR-1000 모델 증기발생기 전열관 간격 및 배치 (Grid-Eggcrate)	8
그림 8. OPR-1400 모델 증기발생기 전열관 배열	8
그림 9. W-△53 모델 증기발생기 구조	9
그림 10. CANDU 모델 증기발생기 구조	10
그림 11. CANDU 모델 증기발생기 전열관 배열	10
그림 12. CE-80 모델 증기발생기 내부 구조 및 2차측 냉각수 흐름	11
그림 13. 미국 원전 이물질 발생 현황 (2010~2014)	16
그림 14. 미국 원전 이물질 발생 현황 (종류별, 2010~2014)	16
그림 15. CECIL 슬러지 랜싱 체계도	18
그림 16. OLAS 슬러지 랜싱 체계도	19
그림 17. OLAS-II 증기발생기 설치 및 세정 모식도	21
그림 18. CECIL-III 관다발 내부 세정 개념도	21
그림 19. KALANS-III의 Barrel Spray 및 Rigid Spray 노즐	22
그림 20. F 모델과 CE-80 모델의 증기발생기 Hand-Hole 구성	22
그림 21. F 모델과 CE-80 모델의 증기발생기 Hand-Hole 이미지	23
그림 22. F 모델과 CE-80 모델의 증기발생기 전열관 배열	23
그림 23. 산업용 비디오스코프 장비 (FOSAR 용)	24
그림 24. CE-80 모델 FOSAR 검사구역	25
그림 25. KTIS, KIIS 장비 검사영역 구분	26
그림 26. KTIS 장비와 KIIS 장비 전열관 검사 수행 모식도	26
그림 27. KTIS, KIIS 장비 Lance	27

그림 28. NTIS, KAIS, CIIS 장비 검사영역 구분 28

그림 29. KAIS 장비 설치 모식도 28

그림 30. CIIS 장비 운전 모습 29

그림 31. CIIS 장비 Lance 29

그림 32. AIVIS 장비 검사영역 구분 30

그림 33. AIVIS 장비 구동 모식도 및 구동 모습 30

그림 34. AIVIS 장비 Lance 31

그림 35. AIVIS 장비 Lance 전열관 손상 실증시험 31

그림 36. 전열관 내부 잔류이물질 검사 구간 32

그림 37. 잔류이물질 제거 도구 33

그림 38. 증기발생기 저온관 (Cold-Leg) 전열관 및 Stay-Rod 배열 33

그림 39. 한전KPS 개선된 Lance 34

그림 40. 수산인더스트리 개선된 Lance 34

그림 41. 앤스코 AIVIS Lance 35

그림 42. 전열관 우측 검사 화면 36

그림 43. 전열관 좌측 검사 화면 36

그림 44. 증기발생기 최외곽 전열관 배치 37

그림 45. 증기발생기 Stay-Rod 전열관 배치 37

그림 46. 개선 전 전열관 검사 Lance 38

그림 47. 개선 전 전열관 모형 검사 화면 38

그림 48. 1/2 가림막 적용 전열관 검사 Lance 39

그림 49. 1/2 가림막 적용 전열관 모형 검사 화면 39

그림 50. 3/4 가림막 적용 전열관 검사 Lance 40

그림 51. 3/4 가림막 적용 전열관 모형 검사 화면 40

그림 52. 조도 조절 전자회로(Dimming Board)와 적용 모습 41

그림 53. 가변저항기와 적용 모습 41

그림 54. 가변저항기 적용 전, 후 오실로스코프 파형분석 42

그림 55. 개선 전, 후 전열관 검사 화면 42

ABSTRACT

A Study on the Improvement of Tube Integrity through Foreign Objective Inspection in the Steam Generator Secondary Side of Nuclear Power Plants

Kim, byung hoon

Advisor : Prof. Jin Weon Kim, Ph.D.

Department of Nuclear Engineering

Graduate School of Chosun University

Steam Generator (SG) of Nuclear Power Plants (NPPs) is a component that generates steam through heat exchange, with pressure boundary between the primary cooling water (reactor coolant water), and the secondary cooling water (feed water), which is formed by a 1mm tube.

At the top of the tube sheet on the secondary side of the SG, foreign objects and impurities entering the steam generator are accumulated and concentrated during the NPPs operation.

During planned overhaul period, the NPPs can inspect and remove impurities in the SG by carrying out primary ECT (Eddy Current Test) and the secondary Lancing and FOSAR (Foreign Object Search and Retrieval). Various equipment are used since SGs have different tube arrangements and intervals for different models. For CANDU and W-F models; FOSAR can be used to operate simultaneously with Lancing, while CE-80 models perform separately due to narrow tube spacing. Thus, CE-80 model's SG has been developed for FOSAR. Moreover, differences in size measurement

in tube intervals and not having the capability to inspect Stay-Rod areas causes difficulties during inspections. In most operations, light interference phenomenon changes don't occur on the surface of SG tubes (physically and chemically), however for new SGs, the impossibilities for SG tube inspection may arise. If the SG tube surface inspections is impossible, it is difficult to secure the integrity from them. Hence, after checking the integrity using ECT's MRPC; a physical and electrical equipment inspection method was devised to improve these problems. As a result, efficient residual material inspection is carried out to secure the integrity of the SG tube through improved microlight adjustable electric tube inspection equipment. To ensure the trustworthiness of the SG tube, the newly developed inspection equipment can alleviate and remove such problems. It will allow efficient residual material inspection.

제1장 서론

원자력발전소에서 증기발생기 (그림 1 참고)는 방사성 유체인 1차측냉각수 (원자로냉각재, Reactor Coolant Water)와 2차측냉각수 (급수, Feed Water)가 열교환하며 터빈회전에 필요한 증기 (Steam)를 만드는 중요한 안전성 기기 중 하나이다.

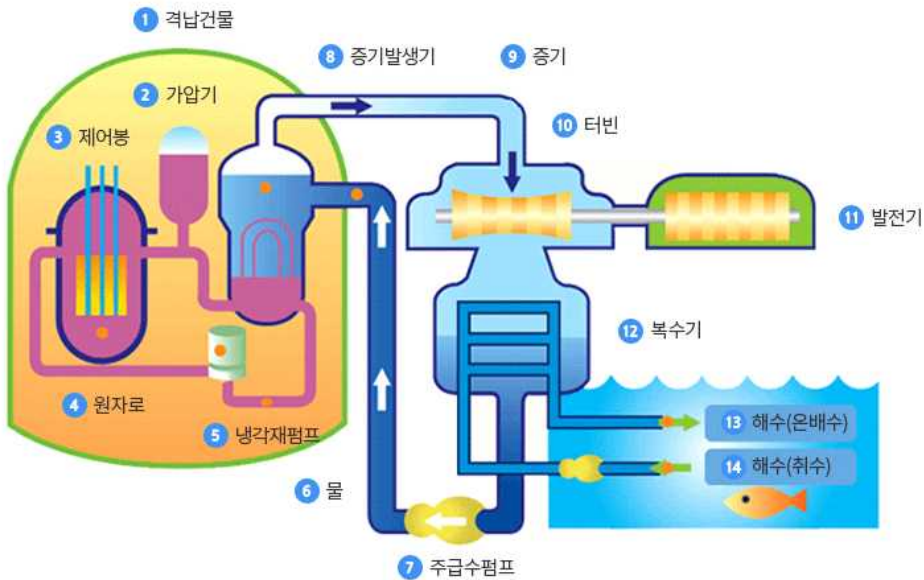


그림 1. 원자력발전소 개념도

증기발생기 2차측 관판 (TS, Tube Sheet) 및 관지지판 (TSP, Tube Support Plate) 상부에는 발전소 운영 중 펌프와 같은 주기기외 배관의 침식, 부식 및 이탈로 발생한 금속성 이물질과 불순물이 누적 및 침적된다. 이러한 이물질들은 양이 적을 때는 문제를 일으키지 않으나 이를 제거하지 않으면 고형화 및 고착되어 여러 가지 문제를 일으킨다.

이러한 슬러지 축적 (Sludge Accumulation) 뿐만 아니라 전열관 재질 (Material), 잔류응력 (Residual Stress), 수질 (Water Quality), 잔류이물질 (Foreign Objects)들은 매우 얇은 두께를 가지고 있는 증기발생기 전열관의 건전성에 치명적인 영향을 미치기 때문에 원자력발전소의 주요 관심 대상 중 하나이다.

국내에서는 2014년을 시작으로 다양한 증기발생기가 교체 또는 교체 예정이다. 교체의 주요 원인은 응력부식균열 (SCC, Stress Corrosion Cracking)에 의한 관막음 증가였다. 증기발생기 교체가 완료되면 국내 원전에 Alloy-600HTMA (High Temperature Mill Annealing) 재질의 증기발생기는 더이상 존재하지 않는다. 그 이유는 구 증기발생기 전열관 재질은 Alloy-600HTMA (Ni-Cr-Fe합금)로 다른 재질에 비해 부식에 취약한 재료였고, 교체 증기발생기 전열관 재질은 Alloy-690TT (Thermal Treatment)로 현재까지 응력부식 결함이 발견되지 않아 건전성이 입증되었기 때문이다.

그러나 잔류이물질에 의한 전열관 손상 가능성은 여전히 문제로 남아 있다. 2017년 8월 국내 A발전소에서는 다수의 이물질이 증기발생기에서 발견되었으며, 이러한 이물질은 증기발생기 전열관의 마모 결함을 발생시키는 등 건전성에 영향을 주었다.

발전소 현장에서는 매 계획예방정비 (O/H)시 증기발생기 1차측 와전류탐상검사 (ECT, Eddy Current Test)와 2차측 랜싱 (Lancing) 및 In-Bundle FOSAR를 포함한 FOSAR (Foreign Object Search and Retrieval) 작업을 수행하여 주기적으로 증기발생기 내 잔류이물질을 검사하고 제거하고 있다. 이러한 노력으로 발견되는 이물질의 대부분은 바로 제거된다. 간혹 제거가 불가능한 경우 계속 운영을 위해 잔류이물질에 대한 영향평가를 수행하고, 전열관이 손상된 경우 관막음 (Tube Plugging)을 통해 안전성을 확보하고 있다. 하지만 가장 좋은 방법은 증기발생기 TS 및 TSP 상부의 모든 구간에 대해서 잔류이물질을 검사하고, 발견 시 잔류이물질을 제거하는 것이다. 따라서, 증기발생기의 건전성 확보를 위해서는 검사 구간의 잔류이물질과 전열관의 건전성을 확인할 수 있는 개선된 검사장비가 필요하다.

본 연구에서는 증기발생기 종류별 구조 및 특성을 확인하고, 제조사별 증기발생기 세정 및 이물질 검사장비의 특성을 확인하고, 기존 이물질 검사장비에 대한 문제점 개선을 통해 증기발생기 전열관의 건전성을 향상하고자 한다.

제2장 본론

제1절 선행 기술 및 운영 현황

1. 증기발생기

원자력발전소의 증기발생기는 화력발전소의 증기발생기와 달리 유체를 직접 가열하는 방식이 아니기 때문에 과열증기를 만들지 못하고, 포화증기가 만들어지게 된다. 따라서 증기발생기에서 생성되는 증기의 질은 발전소 운영에 큰 영향을 미칠 만큼 중요하며, 증기발생기의 성능은 곧 발전소 성능과 직결이 된다. 증기발생기는 발전소 노형과 세대별로 다양한 모델이 존재하며, 지속적인 개선을 통해 열교환 효율성을 향상하고 있다.

국내 원자력발전소에는 다양한 모델의 증기발생기가 존재하지만, 증기발생기 고유 역할인 1차측 냉각수 (원자로냉각재, Reactor Coolant Water)와 2차측 냉각수 (급수, Feed Water)의 열교환을 통해 급수를 포화증기로 만들어 터빈에 공급하는 것은 동일하다.

2. 국내 증기발생기 모델별 제원 및 사양

국내 원자력발전소의 증기발생기는 5가지 모델 68기가 있으며(표 1 참고), 각 모델별 전열관 재질 및 수량은 동일 모델이라도 차이가 있다(표 2 참고).[13] 각각의 모델은 각 발전소에 맞춰 건도 99.75% 이상의 증기를 생산한다.

표 1. 국내 증기발생기 모델별 현황

증기발생기 모델	제작사	S/G 수량
W-F	Westinghouse	14
OPR-1000 (CE System 80)	Korea Heavy Industry	2
	Doosan	22
APR-1400	Doosan	12
W-△(Delta)53	Doosan	6
CANDU	B&W	12

표 2. 증기발생기 모델별 전열관 정보

증기발생기 모델	전열관		
	재질 (Alloy)	간격 (mm)	수량 (개)
W-F	600TT	5.4	5,626
W-F	600TT	7.4	5,626
OPR-1000 (CE System 80)	600HTMA	2.9	8,214
	690TT	2.9	8,340
APR-1400	690TT	2.9	13,102
W-△(Delta)53	690TT	5.4	4,689
CANDU	800	5.2	3,530

가. F 모델

F 모델 증기발생기 (그림 2와 3 참고)는 미국의 Westinghouse 社가 설계 하였으며, 초기 발전소에는 2대, 나머지 발전소에는 각각 3대씩 설치되어 있다. 각 증기발생기는 수직형 재순환식으로 ‘n’형태의 전열관이 설치되어 있다. 각 증기발생기에는 5,626개의 ‘n’자형 전열관이 있으며, 전열관의 재질은 열처리 (Thermally Treated)된 Ni-Cr-Fe합금의 Alloy-600으로 제작되었다. 전열관 간격은 5.7mm와 7.4 mm로 사각배열 (그림 4 참고)되어 있다.

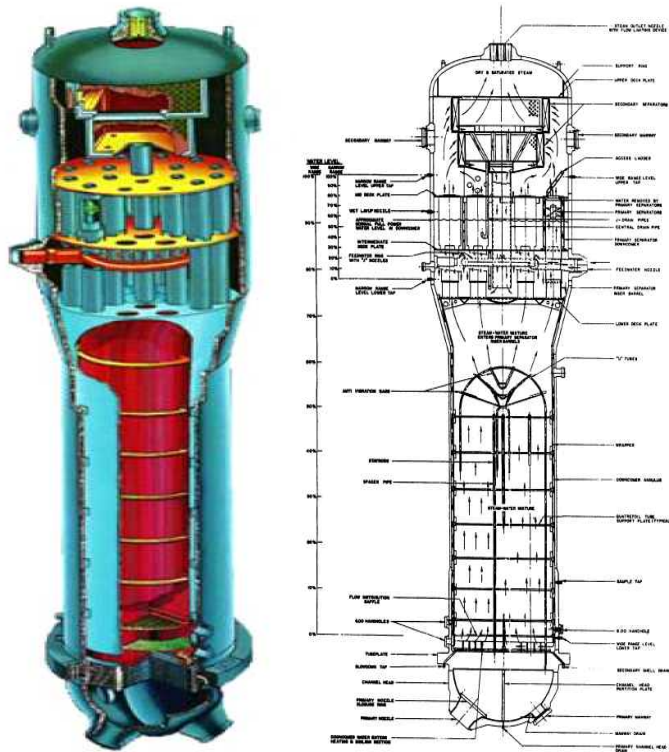


그림 2. F 모델 증기발생기 구조

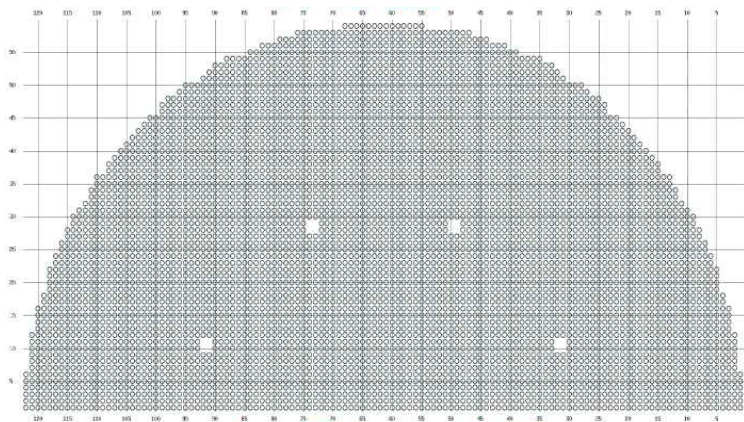


그림 3. F 모델 증기발생기 전열관 배열

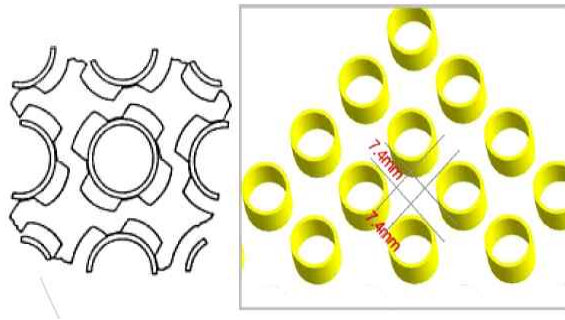


그림 4. F 모델 증기발생기 전열관 간격 및 배치 (Broach-Quatrefoil)

나. OPR-1000 (CE System 80)

국내 대표 모델인 OPR-1000 모델 증기발생기 (그림 5와 6 참고)는 미국의 CE (Combustion Engineering)사의 CE System 80 증기발생기를 축소 설계한 것이다. 증기발생기는 발전소 호기별 2대씩 설치되어 있고, 증기발생기는 수직형 재순환식으로 ‘ \cap ’형태와 ‘ \sqcap ’형태의 전열관이 설치되어 있다. CE 모델 증기발생기는 미국 Palisades 원전 (1971년 12월 상업운영)에 최초로 적용되었으며, 국내에는 2000년대 이후 증기발생기 전열관 재질을 개선 (Alloy-600HTMA에서 Alloy-690TT)하여 적용하였다. 증기발생기가 개선되며 열교환의 효율 향상을 위해 기존의 증기발생기 (Alloy-600HTMA)의 전열관 수 8,214개에서 개선 증기발생기 (Alloy-690TT)의 전열관 수는 8,340개로 증가하였다. 전열관 간격은 2.9 mm 삼각배열 (그림 7 참고)되어 있다.

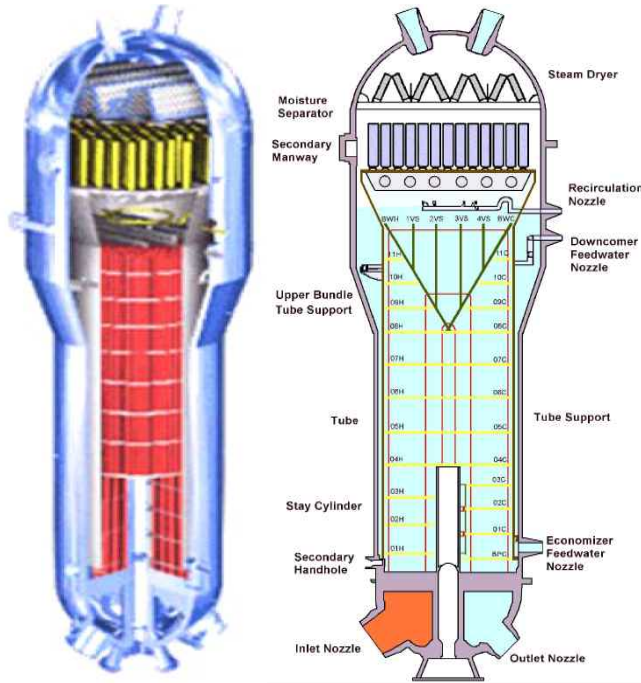


그림 5. OPR-1000 모델 증기발생기 구조

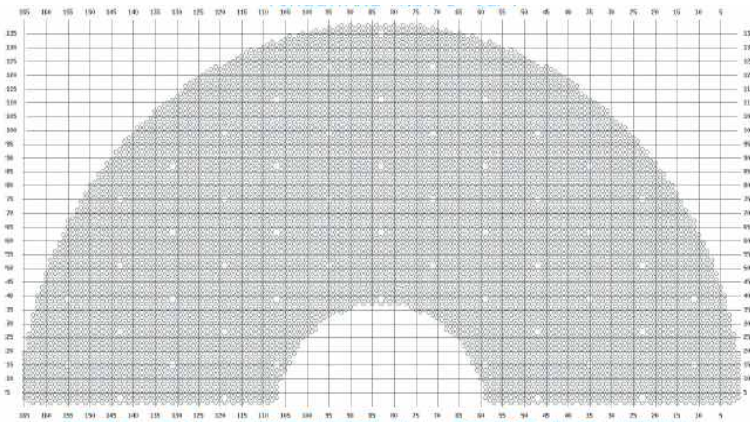


그림 6. OPR-1000 모델 증기발생기 전열관 배열

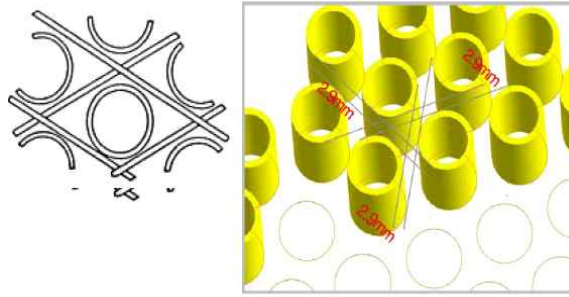


그림 7. OPR-1000 모델 증기발생기 전열관 간격 및 배치 (Grid-Eggcrate)

다. APR-1400

국내 수출형 모델인 APR-1400 증기발생기는 OPR-1000 증기발생기를 개선한 모델로 출력향상을 위해 전열관 수를 13,102개로 확장하였다(그림 8 참고). 증기발생기는 호기별 2대씩 설치되어 있고, 각 증기발생기는 수직형 재순환식으로 ‘n’형태와 ‘m’형태의 전열관이 설치되어 있다. 전열관의 재질은 열처리 (Thermally Treated)된 Ni-Cr-Fe합금의 Alloy-690TT로 제작되었다. 전열관 간격은 2.9 mm 삼각배열 되어 있다.

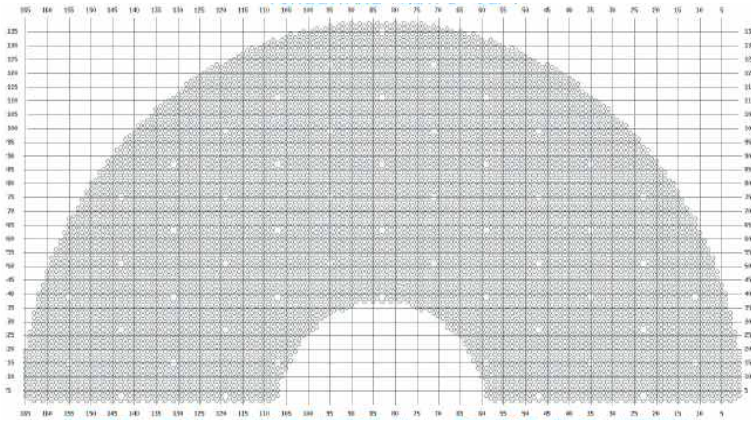


그림 8. APR-1400 모델 증기발생기 전열관 배열

라. W-△53

국내 W-△53 모델의 증기발생기(그림 9 참고)는 미국의 Westinghouse 사의 설계를 기준으로 두산중공업(주)에서 제작하였으며, 증기발생기는 호기별

각각 3대씩 설치되어 있다. 각 증기발생기는 수직형 재순환식으로 ‘n’형태의 전열관이 설치되어 있다. 각 증기발생기에는 4,689개의 ‘n’자형 전열관이 있으며, 전열관의 재질은 열처리 (Thermally Treated)된 Ni-Cr-Fe합금의 Alloy-690TT로 제작되었다. 전열관 간격은 5.4 mm 삼각배열 되어 있다.

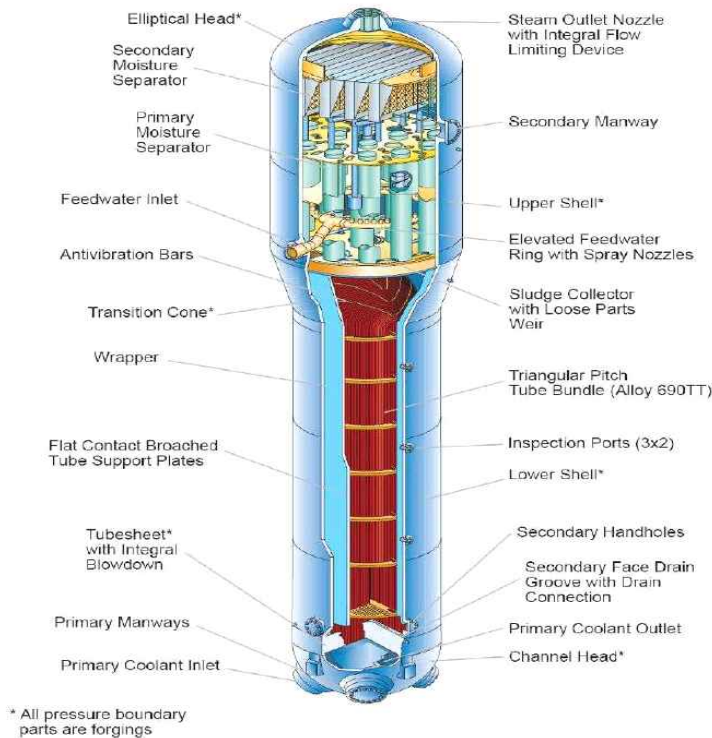


그림 9. W-Δ53 모델 증기발생기 구조

마. CANDU

CANDU 모델의 증기발생기 (그림10와 11 참고)는 Babcock & Wilcox 社가 설계하였으며, 각 호기당 4대의 증기발생기가 설치되어 있다. 각 증기발생기는 수직형 재순환식으로 3,530개의 ‘n’자형 전열관이 있으며, 전열관의 재질은 Ni-Cr-Fe 합금의 Alloy-800으로 제작되었다. 전열관 간격은 5.2 mm로 삼각배열 되어 있다.

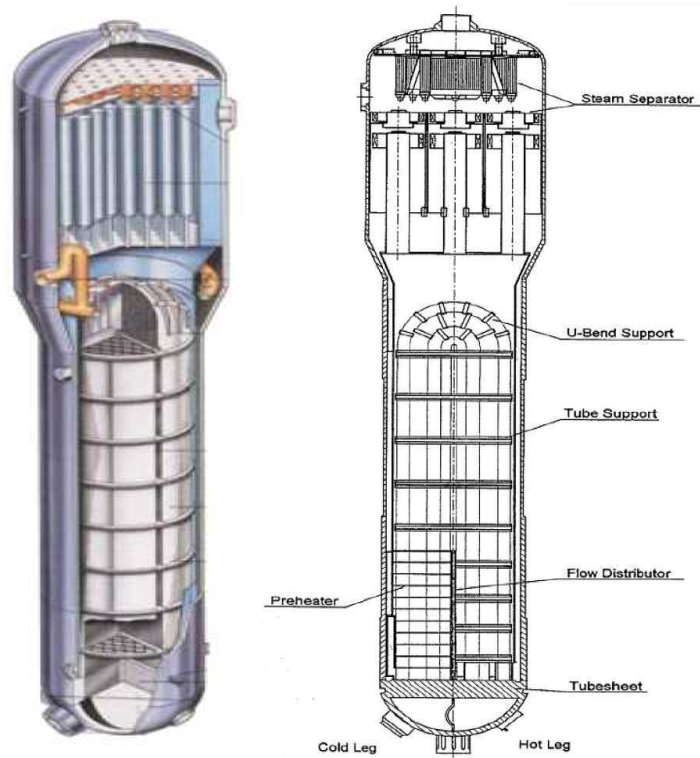


그림 10. CANDU 모델 증기발생기 구조

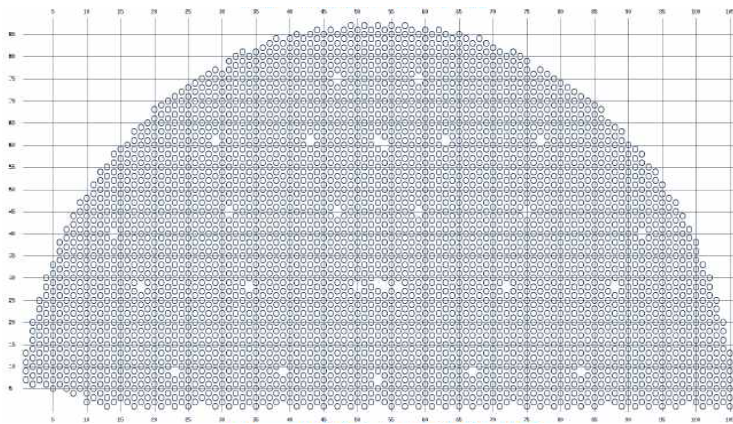


그림 11. CANDU 모델 증기발생기 전열관 배열

3. 국내 증기발생기 구조 및 재질

증기발생기의 급수배관을 통해 들어온 2차측 냉각수는 급수상자 (Water Box)를

통해 하향 유로가 형성되고, 이후 유량분배판을 통해 상향 유로로 전환되어 전열관속의 1차측 냉각수와 열교환을 하게 된다. 이러한 유로 형성과정에서 비중이 높은 이물질은 관상부에 잔류하게 되며, 유속에 의해 진동을 하며 전열관을 마모시키기도 한다. 또한 급수 공급 배관의 반대편에서는 고온의 1차측 냉각수와 열교환을 통해 2차측 냉각수의 비등이 일어나게 되고, 증기발생기에 2차측 냉각수의 이물질이 농축 및 응집된다(그림 12 참고).[12]

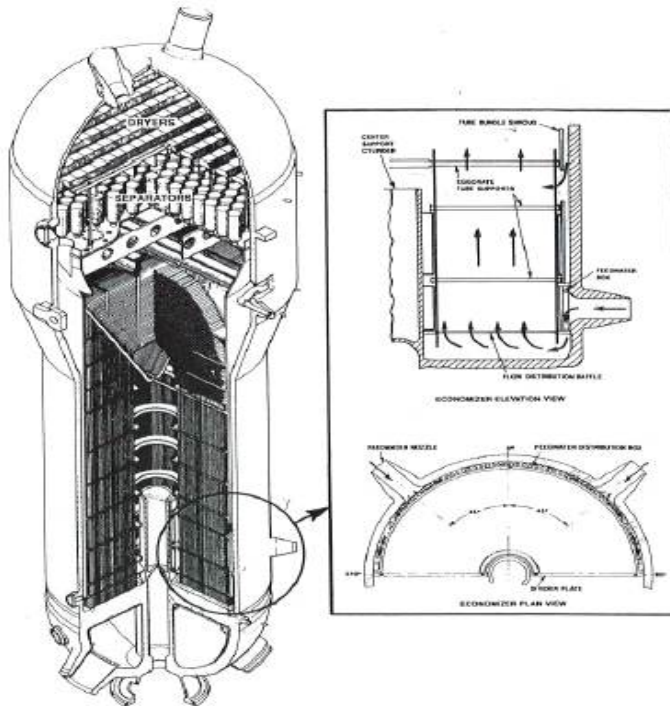


그림 12. CE-80 모델 증기발생기 내부 구조 및 2차측 냉각수 흐름

이러한 유량의 흐름 속에 증기발생기 결함 메카니즘은 Thinning (두께 얇아짐) → Denting (국부적 눌림) → Pitting (점식) & SCC (응력부식균열) → SCC (응력부식균열) → 구조물 (이물질) 마모로 변화되었다. 이러한 변화는 증기발생기의 전열관 재질에도 큰 영향을 미쳤다. 2000년대 이후 기존의 Alloy-600HTMA 재질에서 내부식성이 강화된 Alloy-690TT 재질로 설비개선 된 것이 대표적인 예이다(표 3와 4 참고).[7][8][13]

표 3. 증기발생기 전열관 열처리 방식 및 효과

재질	열처리 방식	효과
HTMA	High Temperature Mill Annealing 1. 1,000°C ~ 1,040°C, 2분정도 열처리 2. 진공분위기, Water Quenching 처리	○ 결정립이 조대 → 낮은항복강도 ○ 결정입계와 결정입내에 Cr 탄화물이 불연속적 석출 → SCC 저항성 증가
TT	Thermal Treatment 1. 고온 고용화 처리 후 약 700°C에서 15시간 정도 열처리 - 600TT: 고용화 처리(920°C) 후 5시간 유지(700°C) - 690TT: 고용화 처리(950°C) 후 15시간 유지(700°C) - 800: 고용화 처리(870~1,040°C) 후 열처리(1,120~1,180°C) 2. 진공분위기, Air Cooling처리	○ HTMA와 동일 효과

표 4. 증기발생기 전열관 재질에 따른 특성

구분	특성
기계적 성질	Alloy 600HTMA ≈ Alloy 690TT(Alloy 800 조금 더 무름)
열 전달율	Alloy 800 < Alloy 690TT < Alloy 600
내부식성	Alloy 600HTMA < Alloy 600TT < Alloy 800 < Alloy 690TT

증기발생기는 전열관만으로 압력 경계를 유지하며 발전소의 안전 운영에 큰 영향을 미치기 때문에 발전소는 증기발생기 건전성을 유지하기 위해 많은 노력을 해

왔다. 증기발생기에 문제가 생기면 발전정지뿐만 아니라 튜브를 통한 누설로 2차측 냉각수가 오염이 될 수 있기 때문이다. 국내에서는 미국의 ‘NEI 97-06’[1]을 기준으로 하여 2005년 SGMP (Steam Generator Management Plan)[4]를 만들었고 증기발생기의 운영과 정비를 위한 절차와 규정 (표 5와 6 참고)을 마련하였다.

표 5. 증기발생기 2차측 정비 필요성

구분	문제점
발전정지	Sludge에 의한 TSP Quatrefoil Blockage
	증기발생기 Level Oscillation
	증기발생기 열 출력 감소
	이물질에 의한 발전정지
ODSCC	Sludge에 의한 부식 환경 조성으로 ODSCC 원인제공

표 6. 증기발생기 2차측 주요 검사 근거

구분	근거
해외	미국 NRC 97-06: 증기발생기 2차측 구조물 건전성 확보 지침(1997년) 미국 NEI 97-06: 증기발생기 1,2차측 관리 Program(1999년부터 시행) 미국 Westinghouse: Steam Generator Maintenance Guide Lines
국내	SGMP: 국내 전호기를 대상으로 증기발생기 관리프로그램 실행(2005년) - SGMP 기준: 미국 NEI 97-06 - SGMP 통합지침서: 증기발생기 운영과 정비를 위한 제반 절차, 기준규정

4. 국내 증기발생기 잔류이물질 현황

증기발생기 이물질은 EPRI 보고서[2]에 의해 크게 표 7과 같이 10가지로 분류

되며, 증기발생기에 미치는 영향에 따라 크게 3가지 카테고리로 구분된다(표 8 참고). 이물질 종류별로 카테고리 분류 기준은 표 9와 같다. 이물질은 대부분 현장에서 제거조치가 이루어지나 제거가 불가능한 이물질에 대해서는 각각의 카테고리 따라 잔류 이물질 영향평가를 통해 적절한 조치가 취해져야 한다.

표 7. EPRI SGMP 이물질 분류

구분	이물질 종류
1	Wire
2	Rod(Similar to a wire in shape but with a larger diameter and not flexible)
3	Rectangular Metal Objects
4	Machine Turning
5	Gasket Material
6	Machining Remnant
7	Sludge Rock
8	Balls
9	Scale
10	Wire Bristles(small diameter, typically ~ 0.79 mm or less)

표 8. 카테고리별 증기발생기 영향

구분	증기발생기 영향	조치
카테고리 1	1~2주기 내에 전열관 벽(두께) 손상 40% 초과를 야기하는 이물질	반드시 제거 또는 안전성 대책 제시
카테고리 2	다음 검사까지 전열관 벽(두께) 손상 40% 초과를 야기하지 않는 이물질	대책 수립 필요
카테고리 3	심각한 손상을 야기하지 않는 이물질	그대로 둘 수 있음

표 9. 이물질별 카테고리 분류

구분	이물질 종류	카테고리2 (허용가능 크기, mm)	카테고리3 (허용가능 크기, mm)
1	Wire	63.5(long)×1.59 dia	44.45(long) × 1.59 dia
2	Rod	50.8(long)×3.18 dia	38.1(long) × 3.18 dia
3	Rectangular Metal Objects	12.7 × 3.18 × 3.18	6.35 × 3.18 × 3.18
4	Machine Turning	12.7 × 3.18 × 3.18	6.35 × 3.18 × 3.18
5	Gasket	44.45(long) × 6.35 × 3.18	31.75(long) × 6.35 × 3.18
6	Machining Remnant	12.7 × 3.18 × 3.18	6.35 × 3.18 × 3.18
7	Sludge Rock	25.4 × 6.35 × 6.35	19.05 × 6.35 × 6.35 Or any size if soft or crumbles
8	Balls	12.7 Dia	9.53 Dia
9	Scale	-	Any size if soft or crumbles
10	Wire Bristles	76.2 mm Long 0.79 dia. -if small number found (no clumping found)	50.8 mm Long 0.79 dia. -if small number found (no clumping found)

운영 중 배관을 통해 증기발생기까지 유입이 되는 이물질 중 추세를 보면 Wire와 Gasket이 전체의 50%를 차지할 만큼 비중이 크다(그림 13와 14 참고).

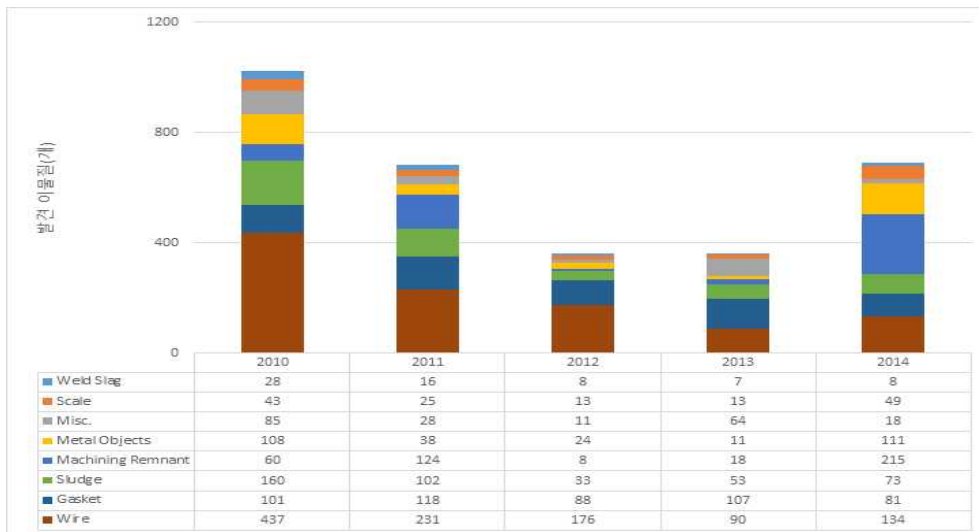


그림 13. 미국 원전 이물질 발생 현황 (2010~2014)

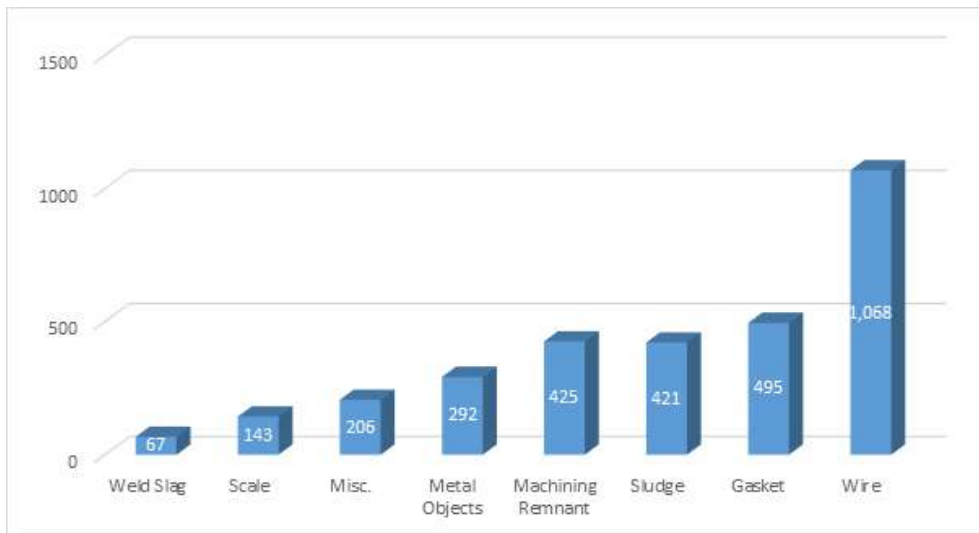


그림 14. 미국 원전 이물질 발생 현황 (종류별, 2010~2014)

해외 발전소에서는 2005년 급수 가열기 케이블이 손상돼 1,800여 개의 이물질이 증기발생기로 유입된 사례가 있었으며, 국내 발전소에서는 2015년 표준형 증

기발생기 전열관 검사 중 Mesh 재질의 Strainer의 손상으로 추정되는 Wire가 증기발생기에서 다량 발견되어 계획예방정비가 지연되는 사례도 있었다. 이와같이 이물질은 증기발생기로 유입되어 전열관에 손상을 주면 발전소 안전 운영에 미치는 영향이 크기 때문에 유입되지 않게 관리하는 것이 가장 중요하고, 다음으로는 유입된 이물질을 가능한 빠른시간 내에 제거하는 것이 중요하다.

제2절 증기발생기 2차측 정비기술

1. Lancing 및 FOSAR

가. 슬러지 랜싱

증기발생기 슬러지 랜싱은 그림 15와 16에서 나타낸 것과 같이 증기발생기 관판상부에 침적된 슬러지를 고압의 세정수로 제거하는 기계적 세정기술이다. 고압의 세정수로 슬러지를 제거하면 슬러지에 가려져 있던 잔류이물질의 확인이 가능하다.

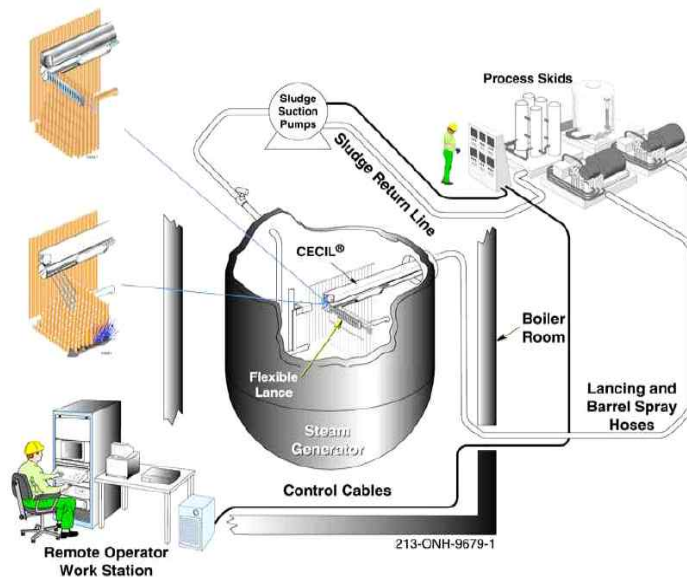


그림 15. CECIL 슬러지 랜싱 체계도

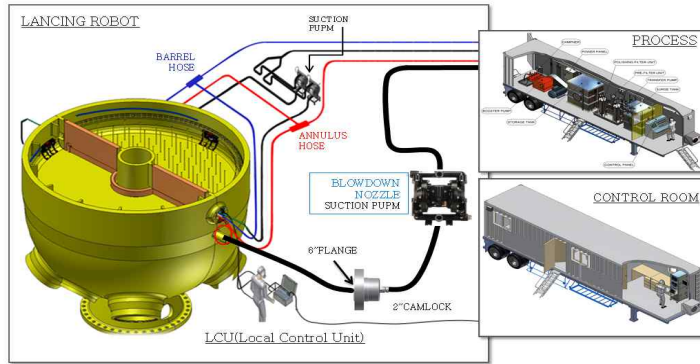


그림 16. OLAS 슬러지 랜싱 체계도

EPRI 보고서는 관판 상단 슬러지를 제거하는 기계적 세정기술을 일반 슬러지랜싱 (Conventional Sludge Lancing)과 관다발 슬러지랜싱 (In-Bundle Sludge Lancing)기술로 구분하고 있다.

일반 슬러지랜싱 (Conventional Sludge Lancing)은 가장 오래된 기계적 세정방법으로, 증기발생기 환형공간 또는 중앙통로부에 장비를 설치 후 고압수를 이용하여 세정을 수행한다. 이러한 슬러지랜싱을 통해 제거되는 슬러지는 주로 연성슬러지 (Soft Sludge)로 경성슬러지 (Hard Sludge)의 감소량은 미비한 수준이다.

관다발 슬러지랜싱은 일반 슬러지랜싱과 더불어 관다발 내부의 슬러지를 제거하기 위해 랜스를 접근하여 고압수를 직접 분사하는 방식이다. 이 방법은 연성슬러지 뿐만 아니라 경성슬러지도 제거가 가능하고 슬러지 제거효율 또한 높다. 다만, 관다발 내부에 랜스를 접근해야 하기 때문에 시간과 비용이 다른 방법에 비해 많이 소요된다는 단점이 있다.

국내 원자력발전소는 노형별 다양한 종류의 랜싱장비를 보유하고 있으며, 활용하고 있다. Barrel Spray 방식은 일반 슬러지랜싱으로 OLAS장비 (그림 17 참고)를 사용하여 환형공간에 설치된 랜스가 관다발 내부로 고압수를 분사하여 슬러지를 제거하고 있다. Barrel & Rigid Spray 방식은 CECIL장비 (그림 18 참고)를 사용하여 일반 슬러지 랜싱 및 관다발 슬러지랜싱을 수행하고 있다. 세정 장비 중 CECIL-III는 세정 후 잔류이물질 검사 및 제거가 가능한 장비이다. KLANS장비도 Barrel & Rigid Spray 방식으로 일반 슬러지 랜싱을 수

행하고 있다.

표 10. 국내 발전소 2차측 정비기술 비교

증기발생기 모델	전열관 간격(mm)	세정 장비(제작사)	세정방법	설치위치
W-F	5.4	New KALANS- I (KOMEK)	Barrel & Rigid Spray	중앙통로부
W-F	7.4	FOLAS- I (KOMEK)	Barrel & Rigid Spray	중앙통로부
W-F	7.4	KALANS-III(KEPRI)	Barrel & Rigid Spray	중앙통로부
OPR-100 APR-1400	2.9	OLAS- II / III / IV (KOMEK)	Barrel Spray	환형공간
W-△53	5.4	CECIL-IV (QinetiQ North America)	Barrel & Rigid Spray	중앙통로부
CANDU	5.2	CECIL-III (Foster-Miller)	Barrel & In-Bundle (FOSAR 가능)	중앙통로부

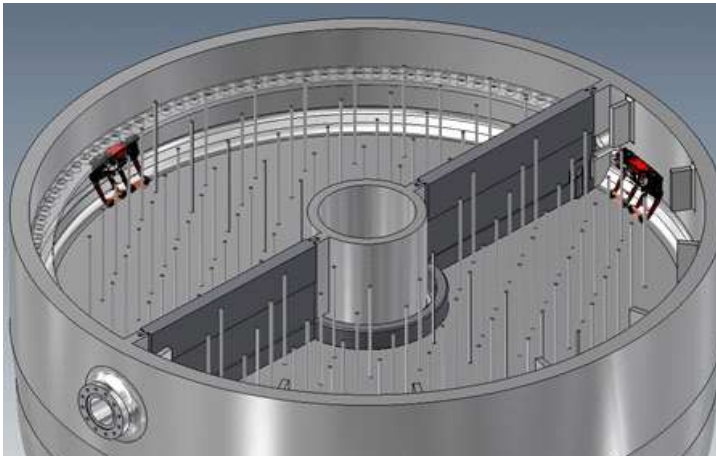


그림 17. OLAS-II 증기발생기 설치 및 세정 모식도

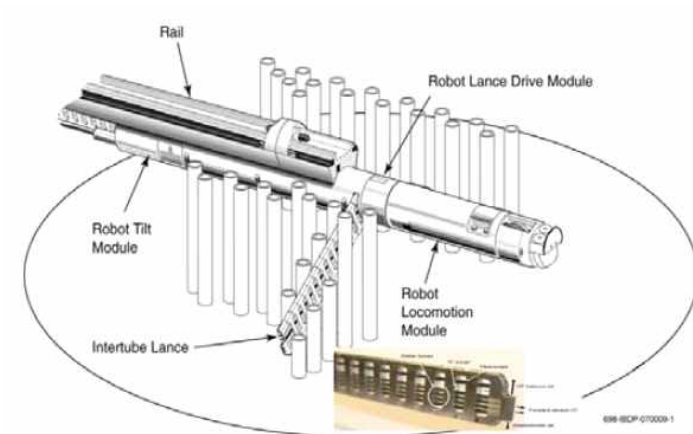


그림 18. CECIL-III 관다발 내부 세정 개념도

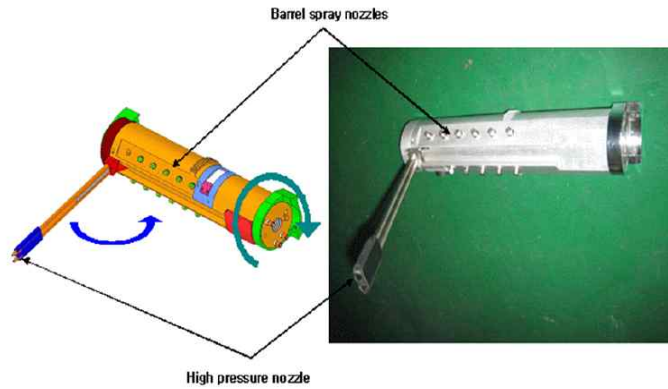


그림 19. KALANS-III의 Barrel Spray 및 Rigid Spray 노즐

랜싱장비는 증기발생기 2차측 Hand-Hole에 설치 및 운영이 가능하다. F 모델과 CE-80 모델 (OPR-1000, APR-1400)은 핸드홀과 전열관 배치 그리고 파티션 (Divider Plate) 설치 여부의 차이가 있다. 이러한 차이로 인해 F 모델은 랜싱장비를 SG 중앙통로부에 설치하고, CE-80 모델은 환형공간에 설치하여 운영한다.

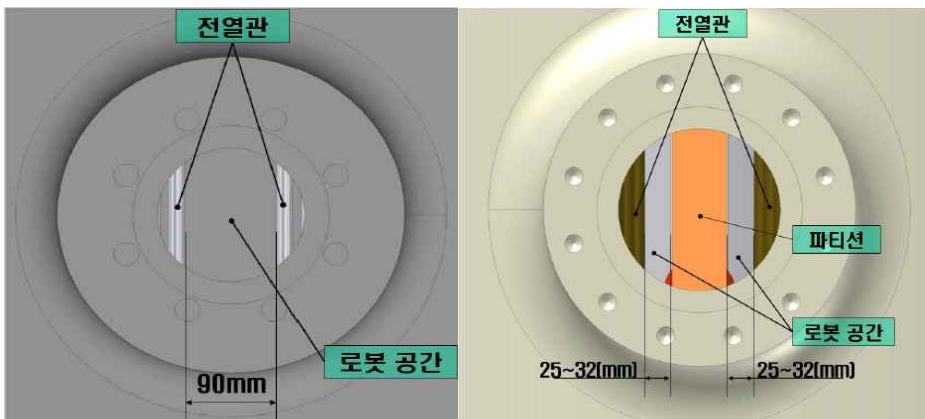


그림 20. F 모델과 CE-80 모델의 증기발생기 Hand-Hole 구성



그림 21. F 모델과 CE-80 모델의 증기발생기 Hand-Hole 이미지

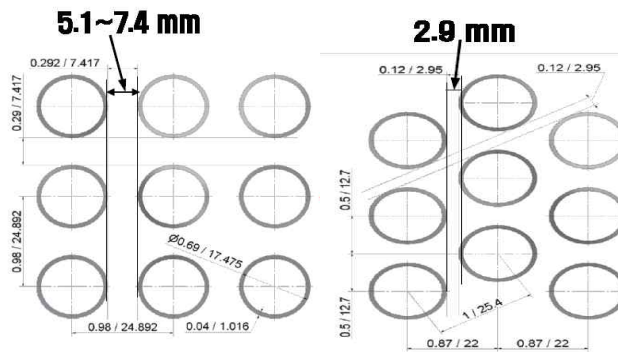


그림 22. F 모델과 CE-80 모델의 증기발생기 전열관 배열

국내·외 기술규격에 슬러지 랜싱에 대한 검사주기 및 범위 등이 구체적으로 명시되어 있지 않지만, 국내 원자력발전소는 SGMP (Steam Generator Management Plan) 통합지침서[4]를 통해 아래와 같이 랜싱주기를 제시하고 있다.

Alloy 690TT 및 800 SG 전열관: 1회/4주기

Alloy 600TT SG 전열관: 1회/2주기

Alloy 600HTMA SG 전열관: 매 주기

국내 원자력발전소는 위의 랜싱주기를 기본으로 하여 탄력적인 운영을 하

고 있었으나, 2015년 규제기관의 잔류이물질 검사 강화 요구로 대부분의 발전소에서 매 주기 랜싱을 수행하고 있다.

나. 잔류이물질 검사(FOSAR)

증기발생기 잔류이물질로 인한 전열관 손상사례가 다수 발생함에 따라 EPRI는 잔류이물질에 관한 다양한 정보를 제공하고 있다. 하지만 증기발생기 내부 잔류이물질에 의한 전열관 손상을 예측하기 어렵기 때문에 구체적인 지침서(Guideline)는 제시하지 못하고 있다.

EPRI 증기발생기 건전성 평가지침서[3]는 “증기발생기 랜싱이 수행될 때마다 FOSAR를 수행하여야 한다”라고 명시하고 있으며 이외 사항은 별도로 제시하지 않고 있다. 국내 원자력발전소 SGMP 통합지침서[4]에서는 EPRI의 조건을 반영하였으며, SG ECT 검사에서 잔류이물질 신호 (PLP, Possible Loose Part)가 확인되면 FOSAR를 통해 잔류이물질을 확인하고 제거하도록 명시되어 있다.

슬러지 랜싱 장비와 달리 FOSAR 장비는 용역사가 보유한 장비를 활용한다. 기본적으로 산업용 비디오스코프 장비를 기반으로 검사하지만, CECEL 랜싱 장비는 FOSAR 도구를 연결하여 활용할 수 있다.



그림 23. 산업용 비디오스코프 장비 (FOSAR 용)

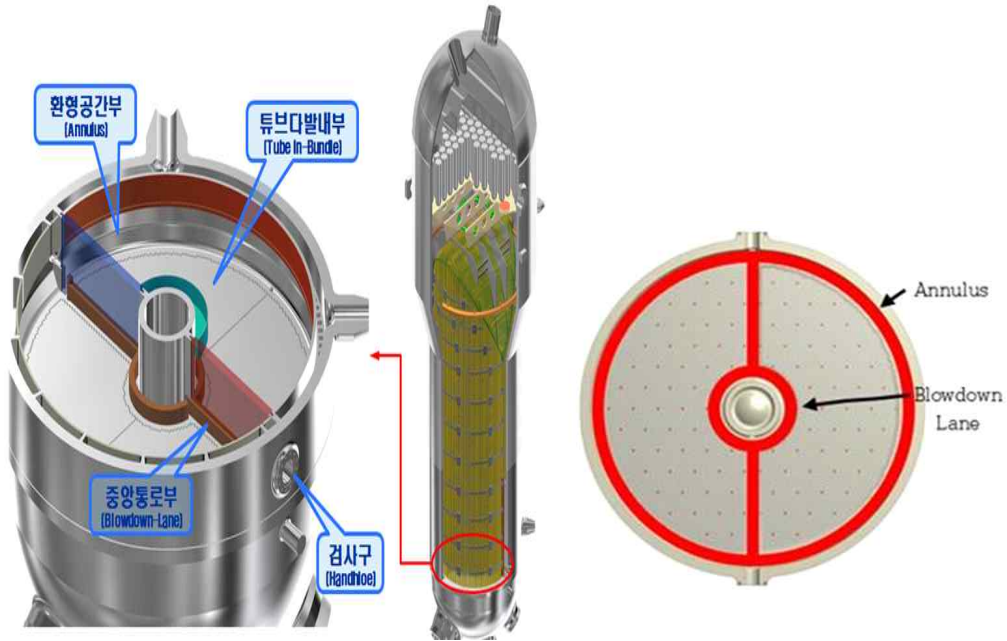


그림 24. CE-80 모델 FOSAR 검사구역

지금까지 FOSAR 범위는 SG 특성 및 모델을 고려하여 설정되었다. 랜싱과 마찬가지로 관다발 내부검사가 용이한 F 모델의 SG는 관다발 내부 전체영역과 7단 관지지판 검사를 포함하여 FOSAR를 수행하고, 나머지 CE-80 모델의 SG는 협소한 관다발 내부 공간으로 인해 중앙통로부와 환형 공간만 검사하였다. 이후 2015년 전 원전 SG 잔류이물질 검사 및 제거가 증기발생기 현안으로 부각되어 CE-80 모델 전체에 대하여 관다발 내부 잔류이물질 검사가 시작되었고, 검사주기 또한 단축 또는 ECT 검사 범위를 확대·강화하였다.

CE-80 모델의 전열관 내부검사 장비는 한전KPS, 수산인더스트리, 앤스코 순으로 개발하였고, 순차적으로 국내 원자력발전소 증기발생기 전열관 내부 육안검사를 수행하고 있다.

한전KPS는 KTIS와 KIIS 2가지 장비를 보유하고 있으며, KTIS 장비를 Hand-Hole에 연결하여 중앙의 Stay-Cylinder 부분까지 검사를 수행하며 중앙의 Stay-Sylinder 부분은 Hand-Hole을 통해 KIIS 장비를 환형공간에 부착하여 검사를 수행한다(그림25와 26 참고). KIIS 장비는 랜싱 장비와 마찬가

지로 자력으로 증기발생기 벽에 부착되어 이동하는 장비로 단일 100% 검사도 가능하다.

한전KPS는 검사 장비를 보유하고 있는 업체 중에 가장 먼저 적용하였으며, 특허를 받은 ARC-Shaped Flexible Plate (그림 27 참고)를 사용하여 두께 문제를 해결하였다. CE-80 모델 (OPR-1000)과 APR-1400 전열관 내부를 모두 검사한 실적을 가지고 있다.

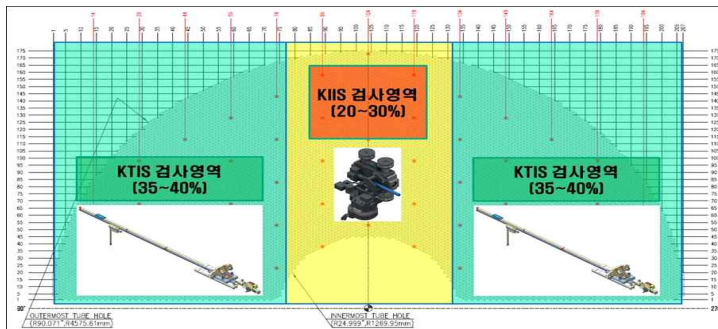


그림 25. KTIS, KIIS 장비 검사영역 구분

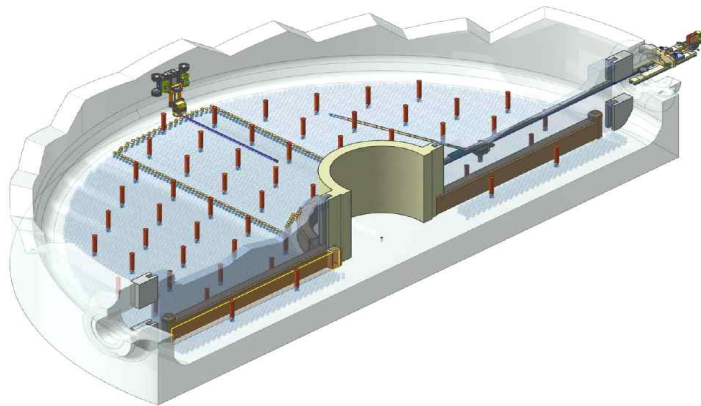


그림 26. KTIS 장비와 KIIS 장비 전열관 검사 수행 모식도

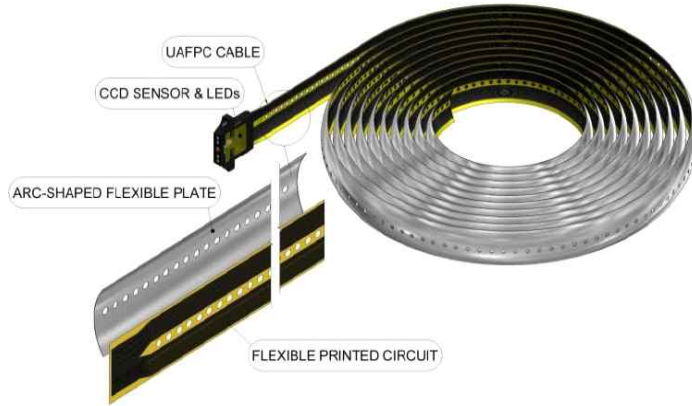


그림 27. KTIS, KIIS 장비 Lance

수산인더스트리의 전열관 내부검사 장비는 한전KPS 다음으로 국내 원자력 발전소에 적용된 장비로 KAIS와 CIIS, NTIS 3가지 장비를 보유하고 있으며, NTIS 장비는 Hand-Hole에 연결하여 중앙의 Stay-Cylinder 부분까지 검사를 수행한다. 그림 28에 나타낸 것과 같이 중앙의 Stay-Sylinder 부분은 Hand-Hole을 통해 KAIS 장비 (그림 29 참고)의 Guide Rail을 환형공간을 따라 설치하거나, CIIS 장비 (그림 30 참고)를 환형공간에 부착하여 검사를 수행한다. CIIS 장비는 자력으로 증기발생기 벽에 부착되어 이동하는 장비로 단일 100% 검사도 가능하다.

현재 APR-1400에 대해서는 실증실험만 수행하였으며, 증기발생기 이물질 검사 및 제거는 OPR-1000에 대해서만 수행하였다.

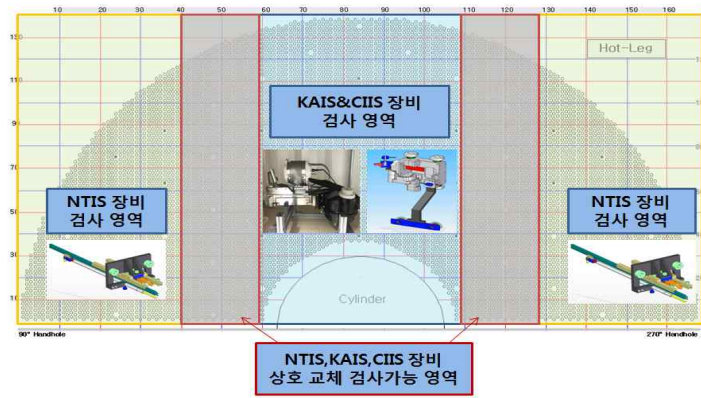


그림 28. NTIS, KAIS, CIIS 장비 검사영역 구분

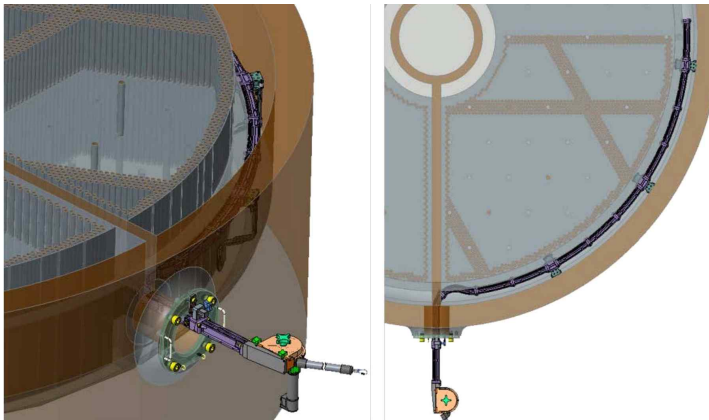


그림 29. KAIS 장비 설치 모식도

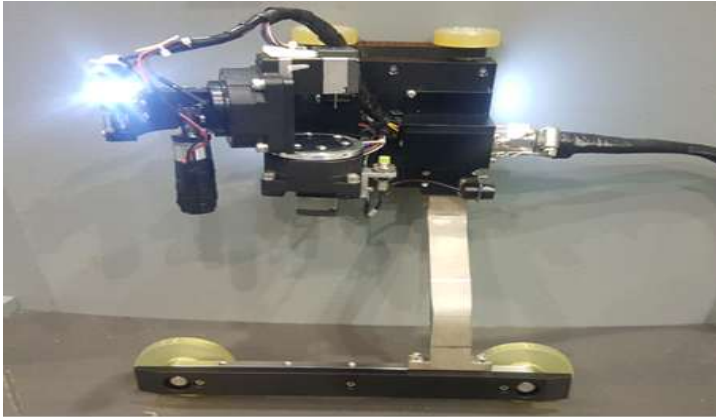


그림 30. CIIS 장비 운전 모습



그림 31. CIIS 장비 Lance

앤스코의 검사장비는 가장 최근에 도입이 되었으며, 아직 국내 원자력발전소 현장에는 적용되지 못하였다. AIVIS 단일 사용하며, 장비를 환형공간에 부착하여 검사를 수행한다. AIVIS 장비는 자력으로 증기발생기 벽에 부착되어 이동하는 장비로 Hand-Hole의 방향에 따라 단일 100% 검사를 수행한다. 그림 32와 33은 AIVIS 장비를 이용한 검사영역과 장비의 구동 모습을 나타낸 것이다.

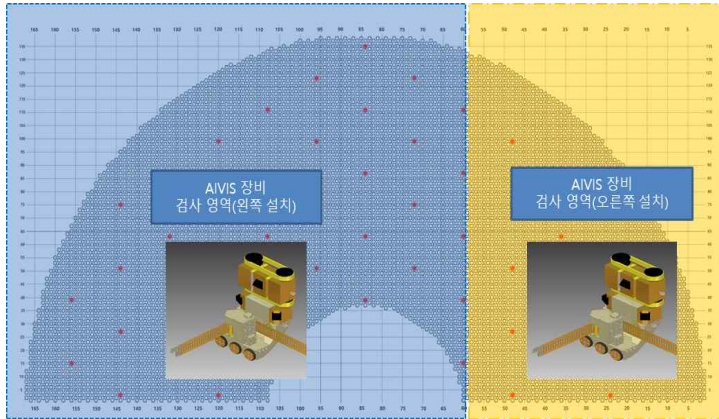


그림 32. AIVIS 장비 검사영역 구분

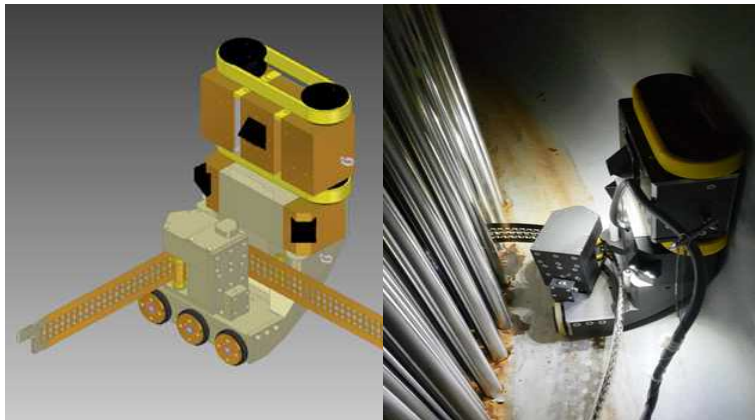


그림 33. AIVIS 장비 구동 모식도 및 구동 모습

AIVIS 장비는 스테인리스강 재질의 돌출형 구조 (그림34 참고)로 전열관에 영향을 미칠 수 있다는 우려 때문에 사전에 전열관 손상 실증실험을 수행하였고, 실험 결과 전열관 건전성에는 영향을 미치지 않았다.



그림 34. AIVIS 장비 Lance



그림 35. AIVIS 장비 Lance 전열관 손상 실증시험

CE-80 모델과 APR-1400의 잔류이물질 검사 순서는 전열관 내부검사 장비가 도입되기 전에는 랜싱 전/후 FOSAR를 통해 환형공간 (Annulus)과 중앙통로부(Blowdown Lane)의 잔류이물질을 검사하였다. 전열관 내부검사 장비가 도입된 이후로는 FOSAR 이후 전열관 내부 잔류이물질 검사 수행 후 환형공간(Annulus)과 중앙통로부 (Blowdown Lane) 잔류이물질 검사를 한번 더 수행함으로써 증기발생기의 건전성 (최외곽 전열관 건전성 확인 및 증기 발생기 잔류이물질 최소화)을 다시한번 확인한다.

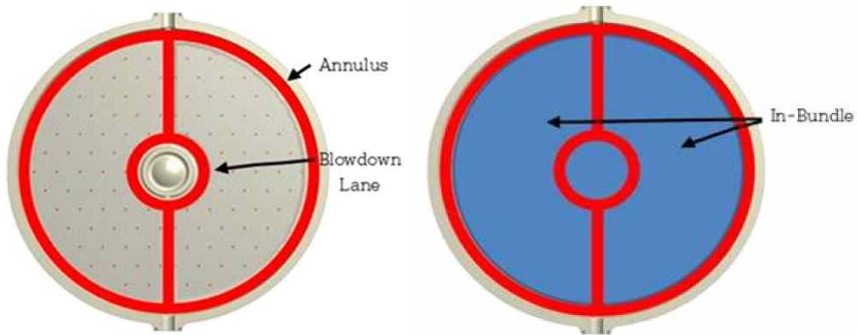


그림 36. 전열관 내부 잔류이물질 검사 구간

표 11. 증기발생기 검사 (전열관 내부 포함) 장비 비교

제작사	장비명	검사구간	카메라 센서
한전KPS	KIIS	100%	CCD
	KTIS	Tube Lane	
수산인더스트리	KAIS	100%	CMOS
	CIIS	100%	
	NTIS	Tube Lane	
앤스코	AIVIS	100%	CMOS
Foster-Miller	CECIL	100%	Fiberscope
QinetiQ North America			
KEPRI	KALANS	100%	Fiberscope

검사장비는 업체별, 제작사별 차이는 있지만 잔류이물질을 육안으로 확인하는 기능은 동일하다. 이와 별개로 잔류이물질을 제거하는 도구는 이미 상용화가 되어, 잔류이물질의 종류에 따라 집게형이나 고리형 그리고 자성체의 경우 자석으로 구성된 도구를 선택하여 사용하여 잔류이물질을 제거하고 있다.

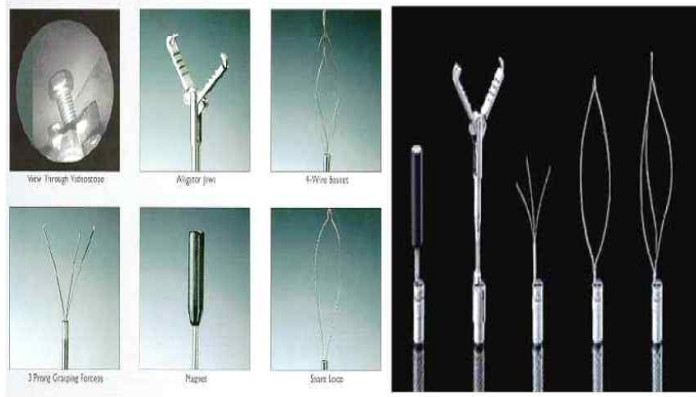


그림 37. 잔류이물질 제거 도구

2. 잔류이물질 검사기술 동향

증기발생기 저온관 (Cold-Leg)에는 2차측 급수가 공급되는 배관이 파단이 되었을 때 증기발생기의 붕괴를 막아주는 Stay-Rod가 있고, 급수가 가열되는 고온관 (Hot-Leg)에도 Stay-Rod가 있다. 이러한 Stay-Rod는 증기발생기 내의 전열관보다 직경이 크기 때문에 기존의 검사장비로는 Stay-Rod 뒤의 잔류이물질 검사는 불가능했다.

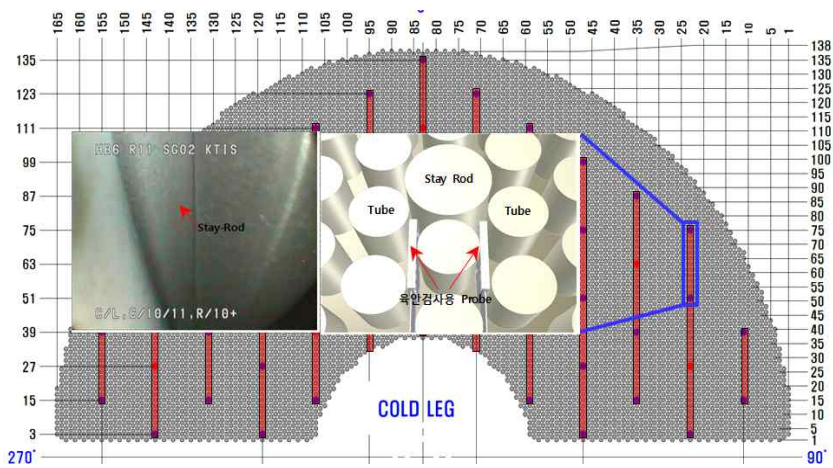


그림 38. 증기발생기 저온관 (Cold-Leg) 전열관 및 Stay-Rod 배열

이러한 문제점을 개선하기 위해 그림 39-41에 나타낸 것과 같이 Lance의 측면에 빛을 비출 수 있는 광원 (LED)과 카메라 센서를 추가로 설치하여 Stay-Rod로 인해 검사가 어려운 지역을 최소화하였다. Stay-Rod 뒤쪽의 전열관을 검사하고자 할 때는 Stay-Rod 열 좌, 우로 1열씩 옆으로 이동하여 측면을 볼 수 있도록 카메라를 설치하여 검사를 수행한다.

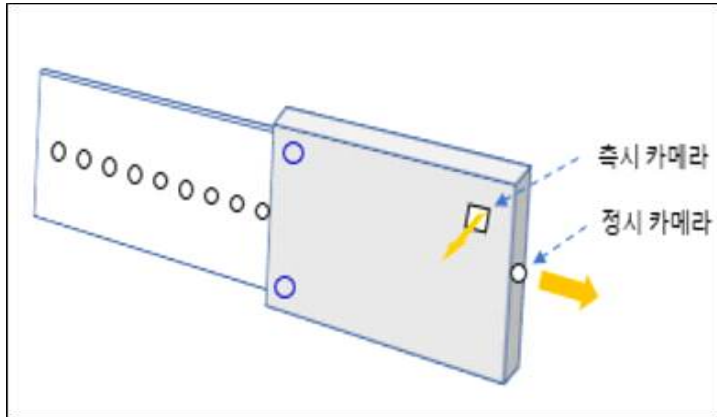


그림 39. 한전KPS 개선된 Lance

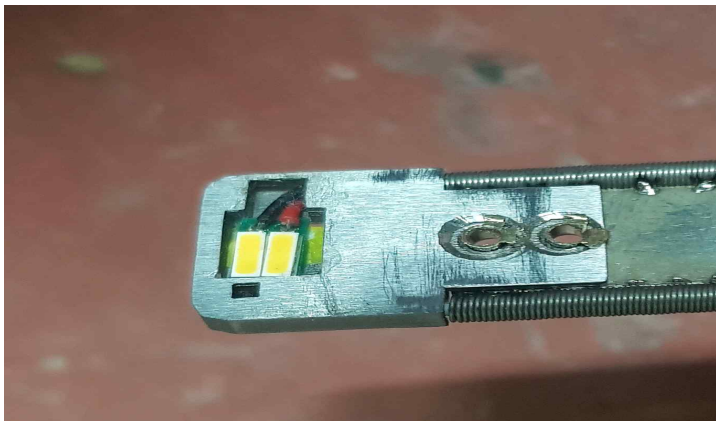


그림 40. 수산인더스트리 개선된 Lance

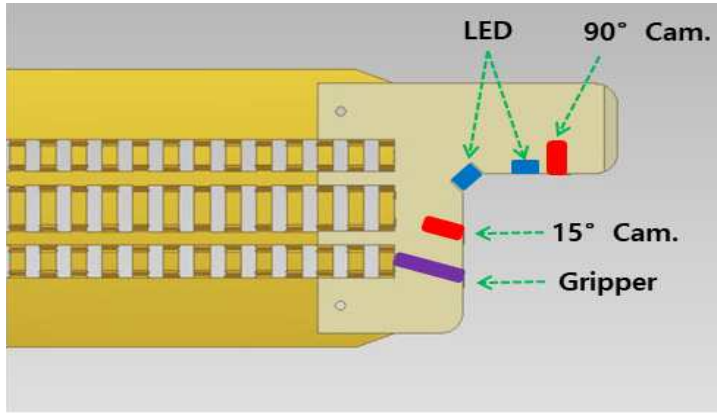


그림 41. 앤스코 AIVIS Lance

제3절 검사기술 문제점 및 개선방안

1. 검사기술 문제점

가동 중 증기발생기 전열관의 경우에는 운영 중 표면의 변화 (물리적, 화학적)로 인해 자체 빛 흡수가 발생하여 잔류이물질 검사시 전열관 표면에서 빛의 간섭 현상이 발생하지 않았다. 그러나, 전열관 재질을 변경 (Alloy-600HTMA에서 Alloy-690TT로)한 발전소에서 신규 증기발생기 전열관 내부 잔류이물질 검사 중 빛 반사로 인한 전열관 표면 검사가 어려운 문제가 있었다 (그림 42과 43 참고).

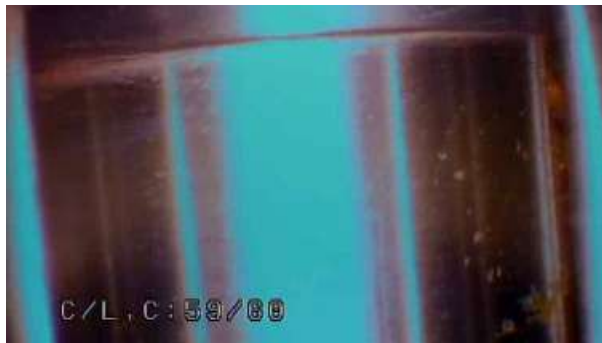


그림 42 전열관 우측 검사 화면



그림 43. 전열관 좌측 검사 화면

이로 인해 전열관 표면 검사가 불가능한 구역인 최외곽 튜브 486개 (그림44 참고)와 Stay-Rod 라인 13개 중 5개 열의 전열관 308개 (그림45 참고)에 대해서는

ECT (Eddy Current Testing)검사기법 중 하나인 MRPC (Motorized Rotating Pancake Coil)를 적용하여 전열관의 건전성을 재확인하였다.

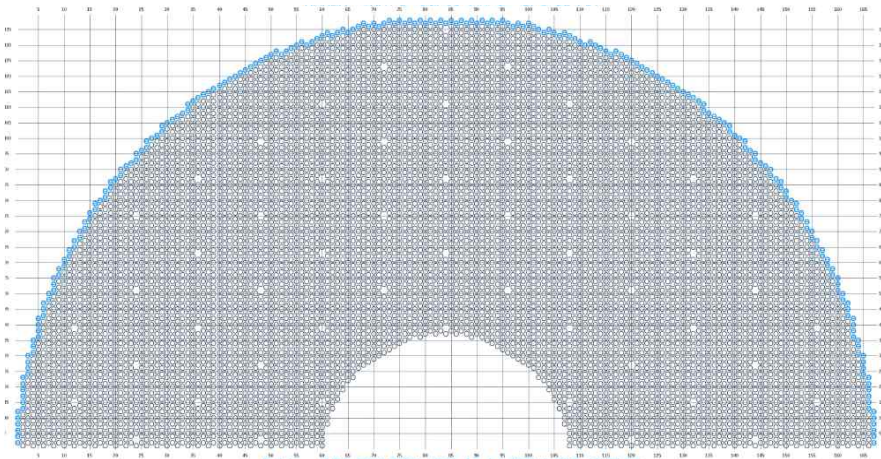


그림 44. 증기발생기 최외곽 전열관 배치

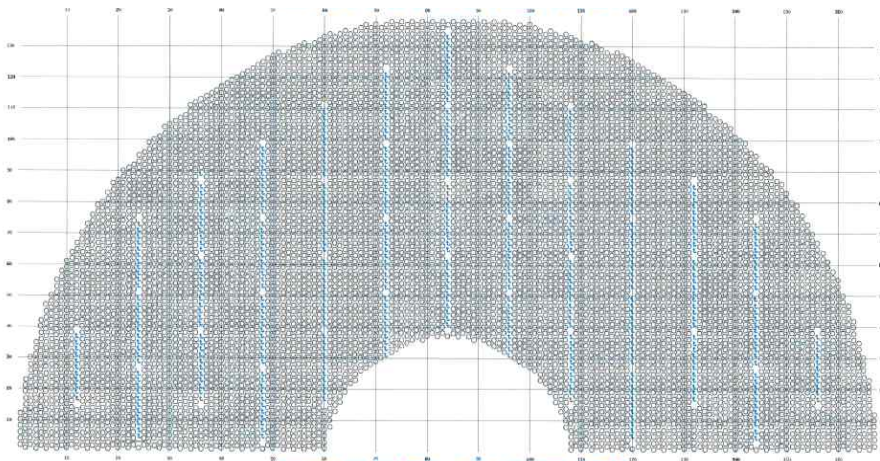


그림 45. 증기발생기 Stay-Rod 전열관 배치

2. 검사기술 문제점 개선방안

가. 광량의 물리적 조절 실험 및 결과

증기발생기 전열관의 빛 반사 문제를 제어하기 위해 광원 (LED)을 차단하

는 방법을 적용하고자 하였다. 그림 46는 기존에 사용하던 방식의 Lance로 전방에 4개의 LED 광원이 있고, 측면에 검사를 할 수 있는 카메라가 부착되어 있다. 이러한 Lance를 통해 검사를 수행하면 그림 47과 같이 빛 반사 문제점을 유발하는 것으로 확인되었다.

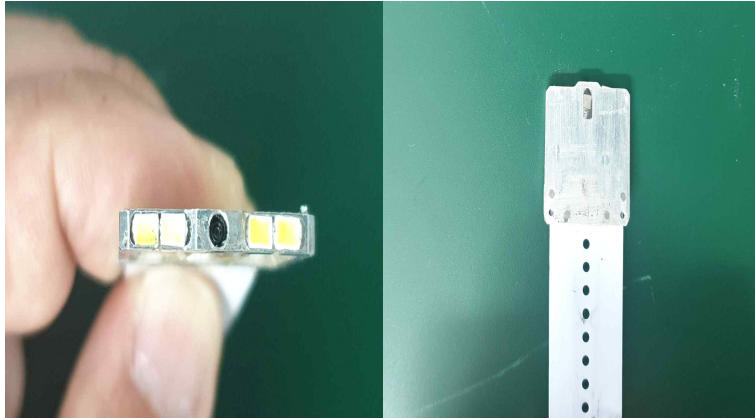


그림 46. 개선 전 전열관 검사 Lance

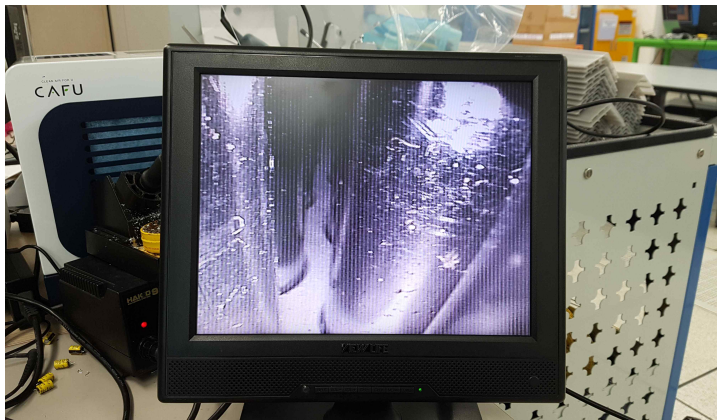


그림 47. 개선 전 전열관 모형 검사 화면

광원을 효과적으로 차단하기 위해 그림 48과 같이 LED의 1/2에 대하여 가림막을 설치하여 검사를 수행하는 방법을 적용하였다. 그림 49에 나타낸 것과 같이 1/2 가림막 설치 후 검사 화면에서는 기존 검사 화면에 비해 개선된 모습을 확인할 수 있었다. 하지만 1/2 가림막 또한 빛 반사 문제를 해결하기

에는 여전히 광원의 양이 많음을 확인할 수 있었다.

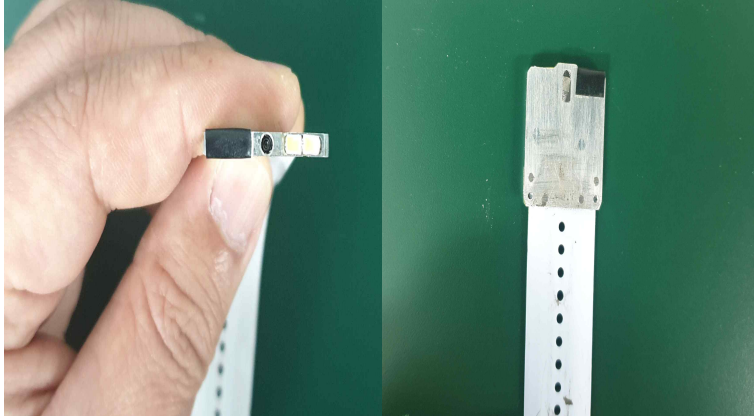


그림 48. 1/2 가림막 적용 전열관 검사 Lance



그림 49. 1/2 가림막 적용 전열관 모형 검사 화면

마지막으로 그림 50와 같이 LED의 3/4에 대하여 가림막을 설치하여 검사를 수행하는 방법을 적용하였다. 3/4 가림막 설치 후 검사 화면에서는 1/2 가림막 검사 화면에 비해 더욱 개선된 모습을 확인할 수 있었으며 (그림 51 참고), 분해능 및 조도 기준 (50fc)을 만족하였다. 하지만 3/4 가림막 또한 빛 반사를 해결하기에는 광원의 양이 많음을 확인할 수 있었다. 광원을 모두 차단한 경우 분해능 및 조도 기준 (50fc)을 만족하지 못하기 때문에 적용이 불가능 하였다.

이와 같은 가림막 설치 방법은 임시 조치로 가림막이 Lance에서 이탈하면 또 다른 이물질로 작용하므로 실제 적용에 적절하지 않은 방법으로 판단하였다.

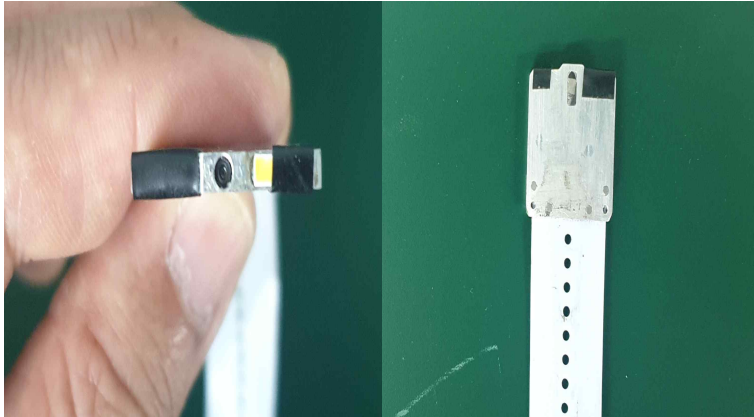


그림 50. 3/4 가림막 적용 전열관 검사 Lance



그림 51. 3/4 가림막 적용 전열관 모형 검사 화면

나. 광량의 전기적 조절 실험 및 결과

광원의 문제를 물리적으로 해결하기에는 한계가 있어 이를 전기적으로 해결하는 방법을 시도하였다. 기존 광원 (LED)은 단순 가변저항으로 광량을 조절할 수 있다. 그러나, 단순 가변저항을 연결하여 광량을 조절하는 방법은 광량의 정교한 조절이 어려워 적정 조도를 선택하기 어려운 단점이 있었다.

또한, 신규 증기발생기와 유사한 환경의 전열관 검사 수요를 고려하여 그림 52과 같이 광량을 조절할 수 있는 조도 조절 전자회로 (Dimming Board)와 조합하여 적용하고자 하였다.

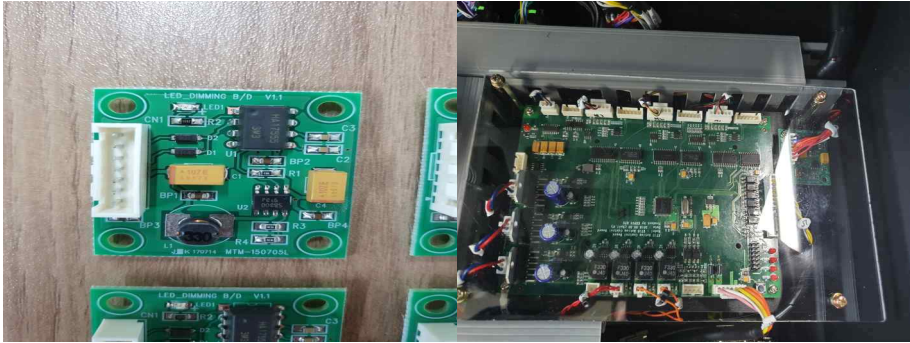


그림 52. 조도 조절 전자회로(Dimming Board)와 적용 모습

조도 조절 전자회로(Dimming Board)는 Dimming 회로를 구성하는 역할을 하며 주파수 대역 조정 및 노이즈 개선 효과가 있다. 이를 포함하여 조도 미세 조절 장치를 제작하고 이 장치를 검사장비 (LCU, Local Control Unit)에 적용하였다.

Dimming Board 적용과 더불어 가변저항기를 그림 53와 같이 Dimming 회로에 조합하여 적용하였다. 가변저항기는 검사 화면으로 오는 노이즈를 개선하는 역할을 한다.

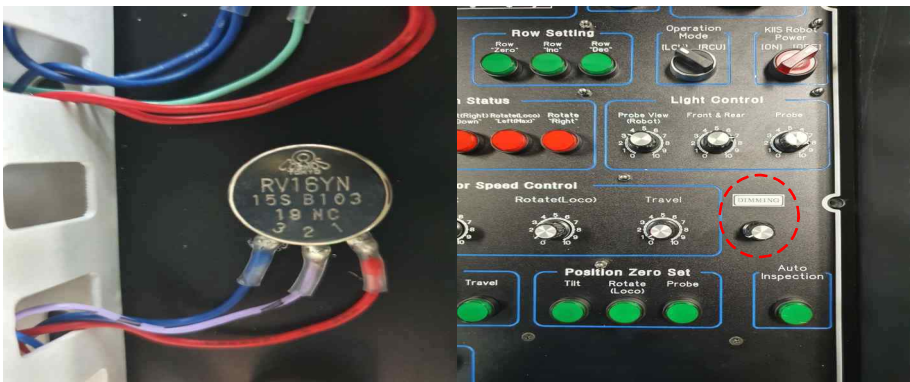


그림 53. 가변저항기와 적용 모습

기존의 주파수 대역이 높아 고주파에 의한 노이즈 발생 현상이 그림 54와 같이 가변저항 (50k Ω)을 이용하여 구동하는 방식을 통해 주파수 대역 하향 및 노이즈 발생이 저감되었다.

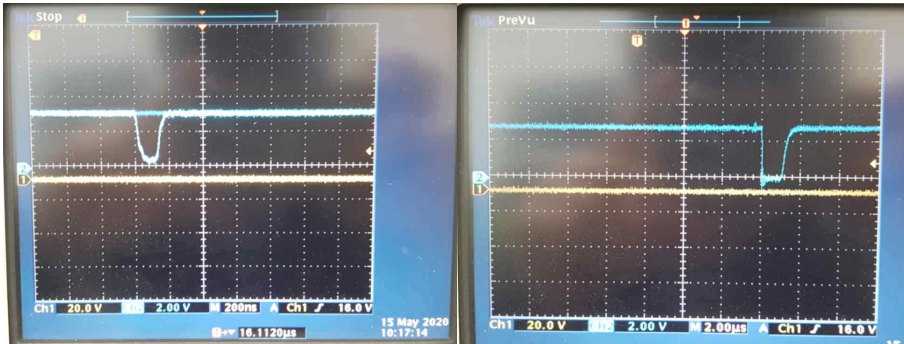


그림 54. 가변저항기 적용 전, 후 오실로스코프 파형분석



그림 55. 개선 전, 후 전열관 검사화면

개선을 통해 정교하게 조도 조절이 가능해졌으며, 빛 간섭으로 인한 미검사 구역을 최소화하였다. 조도 개선 전, 후의 차이는 그림 55에서 확인이 가능하며, 개선 후의 검사에서도 검사 기준인 최소조도 50fc와 분해능을 모두 만족하였다.

제3장 결론

원자력발전소의 증기발생기는 0.042 inch(1.06mm)의 두께로 약 85 kg/cm²의 차압을 견디며 물을 증기로 바꾸는 중요 설비이다. 따라서 매 계획예방정비 (O/H) 마다 다양한 방법으로 건전성을 점검한다. 1차측에서는 와전류탐상검사 (ECT)를 통해서 전열관의 건전성을 확인하고 필요시 관막음 조치를 수행하게 된다. 2차측에서는 카메라를 통한 간접 육안검사로 운영 중 증기발생기 전열관의 손상 여부와 잔류이물질을 검사한다.

증기발생기 관판 (Tube Sheet) 상단은 발전소 운영 중 2차측 냉각수의 불순물이 농축되고 침적된다. 이 침적물에 고압의 세정수를 분사하여 침적물을 물리적으로 제거하고 있다. 세정수는 증기발생기 중앙통로부 (Blowdown Lane) 또는 환형공간 (Annulus)에 장비를 설치하여 전열관 방향으로 분사한다. 세정 이후에 증기발생기 중앙통로부와 환형공간의 잔류이물질을 검사한다.

그동안 CE-80 모델 증기발생기는 전열관 사이의 간격이 매우 협소 (2.9mm)해서 내부 이물질 검사가 불가능했었다. 하지만 증기발생기 잔류이물질에 대한 사회적 이슈로 관련 기술이 2011년 개발되어 CE-80 모델의 증기발생기 내부 전열관도 잔류이물질 검사가 가능해졌다. 이로 인해 보지 못했던 전열관 사이의 이물질도 검사가 가능해졌지만 Stay-Rod라는 전열관 보다 큰 직경의 지지물로 인해 미검사 구간이 존재했었다. 이는 측면을 볼 수 있는 카메라를 통해 미검사 구간을 최소화하였다. 이후 다양한 기술개발을 통해 현재는 국내 모든 발전소의 전열관 내부 잔류이물질 검사가 가능하다.

기존의 증기발생기는 운영중 전열관 표면의 변화(물리적, 화학적)로 인해 검사시 문제가 없었다. 하지만 신규 증기발생기의 경우, 전열관 표면의 변화가 없기 때문에 검사장비의 광원이 그대로 전열관 표면에 반사되어 검사가 불가능했다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 물리적인 조절 방법과 전기적인 조절 방법을 고안하였다.

물리적인 조절 방법은 광원에 가림막을 설치하여 광량을 조절하는 방법이었으나, 이는 또 다른 이물질을 유발하기 때문에 절절하지 않다고 판단하여 실제 적용하지는 않았다. 전기적인 조절 방법은 조도 조절 장치를 이용하여 광량을 조절하는 방법이다.

전기적인 조절 방법 적용 후 화면의 노이즈 문제가 추가로 발생하였고, 이를 개선하기 위해서 가변저항기를 회로에 조합하여 적용하였다. 그 결과 화면의 빛 반사가 되었던 광원의 조도 개선과 더불어 검사화면의 노이즈도 개선되었다.

본 연구 결과는 증기발생기 교체 또는 신규 원자력발전소의 증기발생기 검사의 문제점을 발견하고 대응하여 해결한 것이 가장 큰 특징이다. 이를 통해서 광범위하게 수행했던 와전류탐상검사 범위를 기존 증기발생기 검사범위로 한정할 수 있기 때문에 시간과 비용 측면에서 많은 절감을 이룰 수 있었다. 개선 방법은 장비를 새로 제작하는 것이 아닌 기존의 장비에 모듈을 추가하여 구성하는 것이기 때문에 타 업체에서도 바로 적용이 가능할 것으로 판단된다.

향후에는 관판상부의 뿐만 아니라 증기발생기 상부의 전열관 구조물 세정장치 및 잔류이물질 검사/제거 장치 개발을 통해 증기발생기 전체에 대한 건전성 확보할 수 있는 방안을 모색해야 한다.

참고문헌

- [1] NEI 97-06 : Steam Generator Program Guide lines, Rev.2, 2005
- [2] EPRI 1020989 : Foreign Object Prioritization Strategy for Triangular Pitch Steam Generators, 2010
- [3] EPRI 1019038 : Steam Generator Management Program: Steam Generator Integrity Assessment Guidelines Revision 3, 2009
- [4] 한국수력원자력 : 증기발생기 관리프로그램 통합지침서, Rev.3, 2014
- [5] 한국수력원자력 : 증기발생기 2차측 잔류이물질 Handbook, 2015
- [6] 한국수력원자력 : 증기발생기 침적물 관리 동향 분석 보고서, 2016
- [7] 한국수력원자력 : 증기발생기 부식관리 교안, 2020
- [8] 한국수력원자력 : 증기발생기 슬러지 랜싱 포사 교안, 2020
- [9] 한국수력원자력 : 증기발생기 구조 교안, 2020
- [10] 한국수력원자력 : 증기발생기 2차측 잔류이물질 검사 및 제거 절차서, 2020
- [11] 두산중공업주식회사 : 원전 증기발생기 2차측 건전성 확보, 2005
- [12] Gerard C. Fink et al : CE-System 80 Steam Generator Internal Flow Characterization During Various Blowdown Conditions, The Third International Topical Meeting on Nuclear Power Plant Thermal Hydraulics and Operations, 1988
- [13] 제 116회 원자력안전위원회 : 원자력이용시설 건설 및 운영 변경허가(안), 2020
- [14] 울진뉴스 : 울진원자력발전소 2호기, 증기발생기 교체 작업 진행 중, 2011,
<http://www.uljinnews.com/m/page/view.php?no=4969&codex=>
- [15] 이영희 : 증기발생기 내부 이물질 영향 및 제거 방안, 2018
- [16] Gyung Sub Kim et al : Remote Visual Inspection System For The Tube Sheet In-Bundle Of CE80 Steam Generator, 2017
- [17] 김경섭 외 : 증기발생기 2차측 이물질 제거 방안, 원자력안전기술 정보회의, 2015
- [18] 김경섭 외 : 증기발생기 2차측 이물질 검사장비 운영현황 및 개선 계획, 원자력 안전규제 정보회의, 2016
- [19] 이병의 : 가동원전 SG 운영현황 및 관리계획, 원자력안전규제 정보회의, 2016
- [20] 유동현 외 : Production and utilization of side view endoscope to reduce radiation exposure when inspecting foreign materials in steam generators of domestic nuclear power plants, 한국방사선학회 2020년 온라인총계종합학술대회 논문집, 2020
- [21] 수산인더스트리 : APR-1400 증기발생기 실증시험 보고서, 2020
- [22] 수산인더스트리 : In-Bundle FOSAR 장비 현장 적용 보고서, 2019

- [23] 앤스코 : 표준형 증기발생기 In-Bundle FOSAR 장비 현장 시험, 2019
- [24] 앤스코 : 증기발생기 2차측 In-Bundle FOSAR 장비 성능시험 계획, 2019
- [25] 한전원자력연료 : 알림마당, 원자력발전개념도, 2020, <https://www.knfc.co.kr>
- [26] 정우태 외 : 증기발생기 슬러지 세정 장비 및 이물질 제거 기술 개발, 한국원자력학회 2003 추계학술발표회 논문집, 2003