가요성 판상 구조의 증기발생기 세정장비 설계

*김석태[1], 정우태[1], 강덕원[1]
[1] 한국전력공사 전력연구원 원자력발전연구소

Design of Steam Generator Sludge Lancing System with Flexible Inter-tube Lance

*S. T. Kim[1], W. T. Jeong[1], D. W. Kang[1]
[1] Nuclear Power Research Lab. KEPRI.
Key words : Nuclear Steam Generator, Sludge, Lancing

1. 서론

원자력발전소는 핵분열에 의해 원자로에서 발생되는 열에너지가 방사능을 띤 1차 냉각수에 전달되고 다시 2차 냉각수와 열교환이 일어나는데, 이러한 현상은 증기발생기라는 구조물 내에서 일어나 증기를 발생시켜 터빈을 회전시켜 발전을 하게 된다.

원자력발전소의 운전이력이 경과될수록 증기발생기 내부에는 슬러지(sludge)가 쌓이는데, 이는 계통수가 2차 계통을 돌면서 마모를 일으키거나 이물질이 유입되어 증기발생기 내부의 2차측에 슬러지화 되어 쌓인다. 이렇게 쌓이는 슬러지는 크게 2가지로 나뉠수 있는데, 비교적 부드러운 연성 슬러지(soft sludge)와 강도가 비교적 딱딱한 경성 슬러지(hard sludge)로 구분할 수 있다. 연성 슬러지의 경우는 보통 증기발생기의 상층단에 주로 침적되고, 경성 슬러지의 경우는 증기발생기 하층단의 튜브시트(tube-sheet) 위에 침적된 슬러지가 전열관의 뜨거운 열기에 의해 경화되어 딱딱한 슬러지 형태로 침적된다. 이렇게 침적된 슬러지는 증기발생기 세관의 열전달 능력을 저하시켜 열출력 효율이 낮아지게 되며 궁극적으로 발전소의 출력 감발과 직결된다. 해외 원전의 경우는 이로 인한 출력저하로 발전소의 정지사례도 보고된 바 있다. 심할 경우, 증기발생기 전열관의 부식으로 인한 증기발생기의 조기교체로 막대한 경제적 손실을 초래하게 된다.

또한, 증기발생기 내부에는 예기치 못한 이물질이 존재할 수 있는데, 이는 2차 계통의 순환 운전 중 구조물에서 떨어져 나온 이물질이나 정비 중 작업자의 실수에 의해 생기는 이물질이 등이 있다. 이러한 이물질이 증기발생기 내에 존재하면, 냉각수의 강력한 유동에 의해 증기발생기 구조물에 충격을 가할 수 있고 비교적 두께가 얇은 증기발생기의 전열관과 충돌하여 쉽게 손상을 야기할 수 있어 매우 위험하다.

국내 원자력 규제기관인 원자력안전기술원(KINS)은 원자력발전소의 관리자에게 증기발생기의 세정과 이물질을 주기적으로 제거하도록 권고하고 있으며, 이에 따라 원자력발전소에는 주기적으로 실시하는 계획예방정비기간에 증기발생기 세정작업과 이물질 제거작업을 매 예방정비기간 중에 실시해오고 있다.

본 논문에서 소개할 장비는 원자력발전소 증기발생기 내부의 슬러지를 효과적으로 세정할 목적으로 설계하였고, 특히 CANDU(CANada Deuteriumoxide- Uranium, 캐나다형 중수로) 타입의 증기발생기를 대상으로 하며, 우리나라는 월성 원자력발전소의 2. 3, 4호기가 여기에 속한다.

2. 국내 세정장비의 현황

국내 원자력발전소의 증기발생기 세정은 2000년 이전에는 전량 외산 장비에 의존하여 수행해 왔으며 세정비용 역시 매우 비싼 편에 속했다. 그러나 국내에서 세정장비를 개발하기 시작하면서 경쟁체제가 형성되고 외산 장비의 가격인하 현상이 나타나는 등 매우 고무적인 효과를 얻을 수 있었지만, 예비 부품은 여전히 매우 높은 가격을 유지하고 있으며, 장비의 고장이 발생했을 경우, 값비싼 외화를 들여 전문가를 불러 수리하거나 장비를 해외로 반출시켜 수리를 해야 하는 등 장기간의 시간이 소요될 뿐 아니라 적기에 세정을 실시하지 못하여 많은 어려움을 겪어왔다.

하지만 한국전력공사 전력연구원에서 세정장비의 국산화 개발에 성공하여 비교적 저렴한 가격에 원자력발전소에 공급함으로써 외화절감효과뿐만 아니라 장비의 고장발생 시 국내에서 즉각적으로 대처할 수 있어 원자력발전소의 계획예방정비기간 중에 증기발생기 세정작업을 원활히 수행할 수 있게 되었다.

전력연구원에서는 Table 1.에서 보는 바와 같이 총 3개의 세정장비와 1개의 이물질 제거 장비를 개발하다. KALANS-Ⅰ의 경우, 전력연구원에서 처음 개발한 장비로 2000년도에 처음 고리원자력 1발전소에 적용하여 현재까지 매 계획예방정비기간 중 세정작업을 수행하고 있으며, KALANS-Ⅱ는 2004년도에 울진원자력 2발전소의 증기발생기에 적용하여 현재까지 사용 중에 있다. 특히, KALANS-Ⅱ는 한국표준형 원전을 대상으로 개발하여 앞으로 건설될 신고리 및 신월성 원자력발전소의 증기발생기에도 약간의 수정만으로도 바로 적용할 수 있어 활용가능빈도가 높은 장비이다. KALANS-Ⅲ 장비 역시 영광원자력 1발전소에 2004년도부터 적용 중에 있다. KALANS-Ⅳ의 장비는 이물질제거 장비로 현재 현장여건에 맞게 업그레이드 중에 있고 향후 고리 2발전소에 적용할 예정이다.

Table. 1 Distribution of the Lancing Systems in Korea

Table legend	Developer	First Application	NPP	etc
KALANS-Ⅰ	KEPRI	2000. 1	Kori 1	Lancing
KALANS-Ⅱ	KEPRI	2004. 4	Uljin 2	Lancing
KALANS-Ⅲ	KEPRI	2004. 6	Ygn 1	Lancing
KALANS-Ⅳ	KEPRI	Under the upgrade	Kori 2	FOSAR
CECIL-Ⅰ	FMI	1996. 4	Kori 2	Lancing
CECIL-Ⅱ	FMI	2001. 2	Kori 2	Lancing
ABB-CENO	ABB-CE	1996. 12	Ygn 2	Lancing

3. 신 개념의 세정장비 설계

본 논문에서 소개할 세정장비는 증기발생기 내부에 부착되어 있는 슬러지를 고압수를 이용하여 세정하고 튜브시트 상판에 존재하는 이물질을 제거하는 장치로써 T-자 모양의 홈을 가진 레일가이드(rail guide)와 베럴 스프레이(barrel spray) 기능을 가진 T-레일, 내시경 카메라, 에어공급라인(air supply line), 이물질 제거 도구, 고압수 분사 장치가 삽입된가요성 판상 구조의 랜스(lance), 증기발생기의 마주보는 핸드홀(hand-hole) 양쪽에 증기발생기 세정장비의 회전지지 고정을 유도하는 핸드홀 플랜지(flange) 등으로 구성되어 있다.

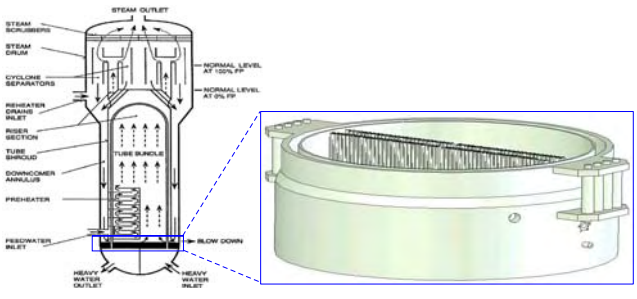

Fig. 1 CANDU steam generator

CANDU 원전의 증기발생기는 Fig. 1에서 보는 것과 같이 튜브

시트 위쪽 내부 중앙에 직사각형 모양으로 길게 형성된 무전열관 영역(no-tube lane)을 지닌 비교적 작은 핸드홀(약 2.5inch)이 마주 보는 장소에 위치해 있으며 이 홀을 이용하여 설치하기 때문에 세정장비의 설계가 매우 제한적이었다.

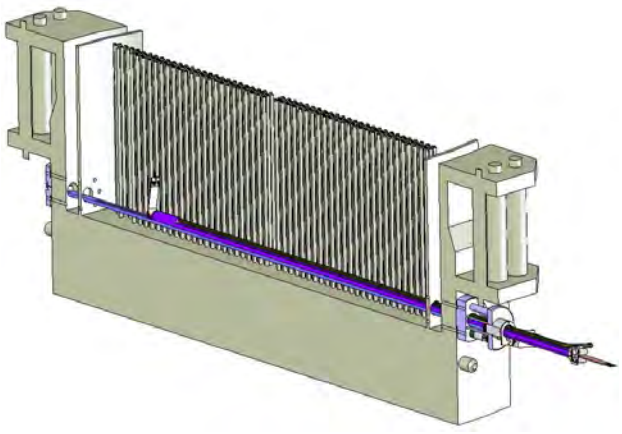

Fig. 2 Installation of the flexible inter-tube lancing system

Fig. 2는 증기발생기에 가요성 판상 구조의 증기발생기 세정장비가 설치된 부분 단면도로써 증기발생기 하부의 튜브시트 상판의 중간부분을 잘라 무전열관 영역에 세정장비가 설치된 모습을 보여주고 있다.

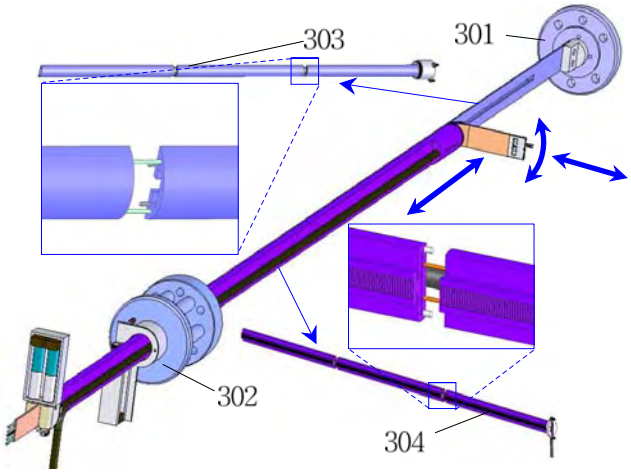

Fig. 3 Mechanism of the flexible inter-tube lancing system

Fig. 3은 가요성 판상 구조의 증기발생기 세정장비의 모습으로 세정장비의 메커니즘을 보여주고 있다. Fig. 3의 레일가이드 지지플랜지(301)와 구동부 지지플랜지(302)를 증기발생기의 핸드홀에 각각 고정시킨 후 레일가이드(303)를 구동부 지지플랜지의 구멍을 통해 증기발생기 내부로 넣어 레일가이드 지지플랜지에 고정시킨다. 여기서 레일가이드는 3개의 분절로 되어 있어 설치 시 공간 활용을 극대화하였다. 레일가이드가 설치된 후 T-레일(304)를 레일가이드의 T-자 모양의 홈을 통해 설치하며 T-레일 역시 3개의 분절로 되어 있어 공간 활용에 편리하게 설계하였다.

분절된 레일가이드와 T-레일은 Fig. 4에서 보는 것과 같이 각각의 조임 장치(tensioning device)로 마치 하나의 막대기와 같이 된다. 또한 Fig. 4에서 보는 바와 같이 3곳에 모터를 장착하여 Fig. 3에서 세정장비의 끝단(end effector)을 3자유도를 가질 수 있도록 설계하여 증기발생기 내부를 자유롭게 검사, 세정 및 이물질 제거작업 등을 수행할 수 있다.

가요성 판상 구조의 증기발생기 세정장비의 랜스는 우레탄 재질로서 적층 가공하여 내부에는 매우 가는 고압호스들과 이물질 제거 툴(removal tool)과 내시경이 삽입되어 있다. 또한, 고압수를 분사할 수 있는 노즐들이 증기발생기 전열관 배열에 맞게 배치되어 있어 상하로도 고압수를 분사하여 튜브시트 상판에 존재하는 슬러지를 제거할 수도 있다.

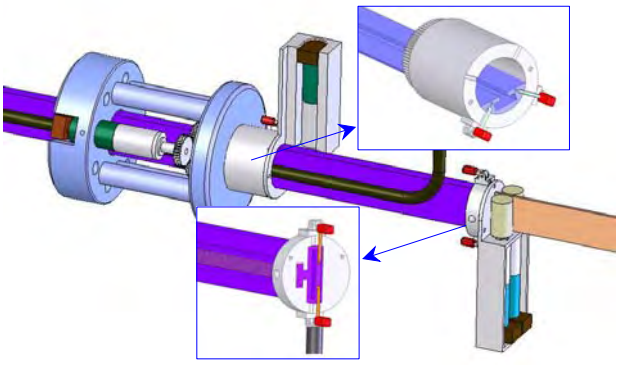

Fig. 4 Tensioning device of the T-rail and rail guide

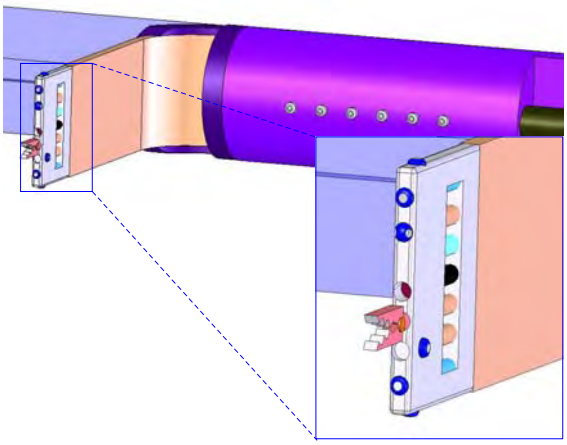

Fig. 5 End effector of the flexible inter-tube lancing system

4. 결론

본 논문에서 소개한 가요성 판상 구조의 증기발생기 세정장비는 세정작업과 이물질 제거를 동시에 수행할 수 있는 신 개념의 세정기술로 기존의 방식보다 작업시간 단축이 가능하며 또한 이물질 제거 툴로 제거할 수 없는 이물질은 고압수를 분사하여 증기발생기의 환형부 바깥쪽으로 밀어낸 후 제거할 수 있도록 설계하였기 때문에 제거효율 역시 향상될 수 있을 것으로 기대하고 있다.

참고문헌

1. Woo-Tae Jeong, Seok-Tae Kim, Sung-Yull Hong, "Development of Sludge Lancing System for Youngkwang #1, #2 and Ulchin #3, #4 Steam Generators", Internal Technical Report, pp.17-29, KHNP, 2004
2. Woo-Tae Jeong, Seok-Tae Kim, Sung-Yull Hong, "Development of a Sludge Lancing System for Uljin NPP#2", Proceedings of ICAPP '05 Seoul, KOREA, May 15-19, 2005
3. 김석태, 정우태, 홍승열, "모델 F형 증기발생기 슬러지 세정장비 개발", 2004추계학술발표회 논문집