

원전 증기발생기 2차측 세정장비(KALANS) 개발 (Development of KALANS to Remove Sludge of Steam Generator)

정우태, 양준석, 유기완, 성기방, 김범년

한전 전력연구원

대전시 유성구 문지동 103-16

요 약

원자력 발전소의 증기발생기 2차 계통 튜브시트(Tubesheet) 상단부에 축적되는 슬러지를 제거하기 위해서 고압수를 직접 슬러지 부위에 분사하는 방법은 원전 선진 각국에서 슬러지 제거를 위해 사용하고 있는 기술이다. 현재 한국전력공사에서는 미국 포스터-밀러사의 CECIL[®]-4 세정 장비를 도입하여 웨스팅하우스형 발전소 즉, 고리 2, 3, 4호기, 영광 1, 2호기에 활용하고 있다. 그러나 고리1호기의 경우 증기발생기 교체로 인해서 세관 배열이 정삼각형 구조인 델타60형으로 바뀌에 따라 세관의 배치형태 및 세관사이의 간격이 달라져 기존의 슬러지 세정장비를 사용할 수 없을 뿐 만 아니라, 도입 비용 또한 고가이며 신속한 정비의 어려움과 높아진 국내 기술 수준, 그리고 장비 개발에 따른 충분한 경제성 등을 감안하여 국내 원자력발전소 증기발생기의 형태와 정비 체제에 적합한 새로운 세정장비(KALANS ; KEPCO Advanced LANcing System)개발에 착수하게 되었다. 따라서 본 논문에서는 현재까지 고압수 세정장비에 대한 선진 외국의 기술 현황을 심층 분석하여, 이를 토대로 KALANS 설계의 핵심이 되는 로봇 및 제어시스템, 노즐 등과 같은 주요 부품의 설계 개념 및 국산화 개발의 방향을 논의하고자 한다.

Abstract

CECIL[®]-4 lancing system by Foster-Miller has been used for the secondary side landing of Westinghouse type steam generators (YGN #1,2 and Kori #1,2,3,4) in Korean nuclear power plants. Shared use of only one lancing system for the 6 nuclear power plants required frequent transportation of the system from Nori to Youngkwang which may cause malfunction of sophisticated control equipment. Sometimes, the overlap in preventive maintenance schedule of nuclear power plants prevented the plant maintenance personnel from doing sufficient lancing work. Purchasing a new lancing system may be a candidate for this problem, but the price tag is surprisingly high. Furthermore, prompt maintenance was another serious problem because the manufacturer is far away in a foreign country. Last year, the steam generator of Kori #1 was changed to Δ60. The difference in the tube arrangement of the new steam generator made it impossible to use the CECIL system. Sufficient technological background of our development team and the conclusion that the development project is economically feasible made us to commence the design and fabrication of "KEPCO Advanced LANcing System - KALANS." This paper presents the state of the art on lancing system and the developed concept and design of KALANS.

1. 서 론

원자력 발전소의 증기발생기 2차측에는 운전 중 2차계통 배관의 이물질과 부식 및 산화로 인하여 발생한 슬러지(성분: Iron, Fe_3O_4 , Cu, NiO, ZnO, etc.)가 비교적 유속이 낮은 튜브쉬트 (Tube Sheet) 상부의 전열관이 밀집된 부분과 전열관 표면에 침적되는 현상이 발생한다. 이 슬러지는 예방정비 한 주기 당 대략 1인치 또는 그 이상이 쌓이게 되는데 이러한 슬러지의 침적 현상은 열전달을 방해하고 증기압을 떨어뜨려 출력을 저하시키는 작용을 한다. 또한 인산이나 염소 등이 슬러지 속에 농축되면 전열관에 부식을 일으켜 전열관 두께를 줄이거나 입자간 응력 부식 균열 (Inter-Granular Stress Corrosion Cracking : IGSCC)을 초래하고 전열관의 국부적인 패임(denting) 현상을 일으키기도 한다.

증기발생기 내부는 운전 중 금속 재료의 부식을 방지하기 위하여 약 알칼리 상태로 유지할 필요가 있으며 이를 위하여 인산을 투입한다. 그런데 이 인산은 철 산화물들을 결합시켜 입자가 큰 고형 슬러지를 형성시킨다. 현재는 AVT(All Volatile Treatment-Ammonia or Hydrazine) 수화학 처리를 통해 약 알칼리를 유지하도록 하며 이 환경하에서 슬러지 특성은 조밀하며 쉽게 제거가 가능한 상태로 증기발생기 튜브쉬트 상단부에 침적된다. 증기발생기 내에 슬러지 침적이 심화되면 고형화된 슬러지 조각의 유동에 의하여 증기발생기 U자관을 마모시키거나 발전소 2차 계통의 증기터빈에 유입되어 문제를 일으킬 가능성을 배제할 수 없게 된다. 증기발생기 전열관의 손상에 의한 1차 냉각수의 유출은 방사능 피폭의 위험성 증대와 plugging에 의한 열효율 저하 등의 문제를 야기하게 된다. 증기발생기 제작사에서는 이를 방지하기 위해 취출수 계통을 설치하여 운전 중에도 증기발생기의 2차계통 튜브쉬트 상단부에서 일정한 유량을 취출하여 정화시킬 수 있도록 하고 있다. 그러나 금속 산화물인 슬러지는 비교적 비중이 커서 이러한 방법으로도 완전히 제거되지 않고 계속 침적되며 방치할 경우 고화되어 전열관의 건전성을 해치게 된다. 또한 화학 세정 방법을 사용할 경우에는 화학 세정액으로 인한 전열관의 부식 우려가 있고, 전열관이 밀집된 부분까지 깊숙히 세정액이 침투되기 어려우며, 2차적인 방사성 폐기물을 다량 생성시킨다는 문제점들이 지적된다. 따라서 오랜 기간에 걸쳐 고착되어 형성된 고형 슬러지는 증기발생기 취출수 계통이나 화학세정 방법으로는 쉽게 제거되지 않아 현재 고압수를 이용한 기계적 슬러지 세정이 세계 각국에서 널리 이용되고 있다.

각사별 세정장비 현황을 살펴보면, 미국의 경우 EPRI 주도하에 포스트밀러(사)가 CECIL(Consolidated Edison Combined Inspection and Lancing)를 개발하였으며 개발 장비에 대한 지적재산권은 EPRI에서 소유하고 있다. CECIL[®]의 기본적인 개념은 2차측 작업구를 통해 Guide Rail과 세정 이송기를 중앙 Tie Rod와 2차측 작업구 사이에 위치시키고 튜브 사이에 BdL(Blow down Lane)로부터 90도로 고압 살수기를 집어넣어 슬러지를 제거하는 개념이다. ABB-CE(사)는 '80년대 초반부터 튜브쉬트 상면에 쌓이는 슬러지를 제거할 수 있는 장비 개발 프로그램을 진행시켜 왔으며 증기발생기 벽면과 가장 바깥쪽에 위치한 튜브 다발 사이의 환형 공간에 슬러지 세정 장비를 집어넣어 이물질 검사와 고압수 분사를 동시에 수행하는 방법을 채택하였다. 웨스팅하우스(사)의 경우 CECIL 장비와 거의 유사한 개념으로 고압 살수기에서 분사되는 제트가 휘젓는 형태 즉, 진동하며 물을 분사하는 구조를 가지고 있어서 튜브 칼럼과 튜브 쉬트 사이에 끼어있는 슬러지를 효율적으로 제거할 수 있도록 한 것이 특징이다.

한국전력공사에서는 미국 포스터-밀러사의 CECIL[®]-4 세정 장비를 도입하여 웨스팅하우스형 발전소(영광 1,2호기 고리 2, 3, 4호기)에 활용하고 있다. 그러나 고리1호기의 경우 증기발생기 교체 (인코넬 690)로 인해서 세관 배열이 정삼각형 구조인 델타60형으로 바뀜에 따라 세관의 배치형태 및 세관사이의 간격이 달라져 기존의 세정장비를 사용할 수 없을 뿐 아니라, 도입 비용 또한 고가이며 신속한 정비의 어려움과 높아진 국내 기술 수준, 그리고 장비 개발에 따른 충분한 경제성 등을 감안하여 국내 원전 증기발생기의 형태와 정비 체제에 적합한 새로운 세정장비(KALANS; KEPCO Advanced LANCing System)개발에 착수하게 되었다. 따라서 본 논문에서는 현재까지 고압수 세정장비에 대한 외국의 기술 현황을 심층 분석하여, 이를 토대로 KALANS 설계의 핵심이 되는 로봇 및 제어시스템, 노즐 등과 같은 주요 부품의 설계 개념 및 개발의 방향을 논의하고자 한다.

2. 各社別 세정장비 개발 현황

해외에서 증기발생기 세정 장비를 개발하여 판매하는 회사로 포스터밀러(Foster-Miller), ABB-CE Nuclear Power, 웨스팅하우스 Nuclear Service, Bobcock & Wilcox, Framatome Technologies 등이 있다. 특히 포스터밀러는 EPRI 주도하에 CECIL장비를 개발하였으며 개발 장비에 대한 지적재산권은 EPRI에서 소유하고 있다. 조사한 바에 의하면 포스터밀러는 세정장비 개발 및 세계시장 점유율에서 거의 독점적인 위치를 굳히고 있는 것으로 나타났다. 국외 주요 업체의 기술개발 동향을 살펴보면 다음과 같다.

가. EPRI 및 포스터밀러社

미국의 경우 EPRI 주도하에 포스트밀러(사)가 CECIL(Consolidated Edison Combined Inspection and Lancing)을 개발하였으며 본 장비는 CE형 증기발생기 내에 굽힘성 있는 고압 살수기를 집어 넣어 검사와 세정을 동시에 수행할 수 있도록 하였으며, Calvert Cliffs 1호기에서 '96년 핵연료 재장전 중에 작동 시험을 수행하였다^[1]. CECIL[®]의 기본적인 개념은 핸드홀을 통해 Guide Rail과 세정 이송기를 중앙 Tie Rod와 2차측 작업구 사이에 위치시키고 튜브 사이에 BdL(Blow down Lane)로부터 90도로 고압 살수기를 집어넣어 슬러지를 제거하는 개념이다. 슬러지 제거는 저압살수 다기관, 고품 슬러지 제거용 고압 살수기, shadow 영역용 살수기를 이용하여 이루어지며, 원격 구동 이송기 장치로 작동된다. 각 고압 살수기의 끝단 중앙부에는 내시경을 이용하여 검사가 가능하도록 되어 있고 고압 호스를 통하여 공급되는 물분사 노즐이 장착되어 있다. 이송기는 회전이 가능하여 고압 살수기 팁의 각도를 조절할 수 있고 고압 살수기는 이송기 내부에서 뺄어나올 수 있도록 되어 있어 원하는 부위로 고압 살수기 팁을 움직일 수 있다. 원격 구동 이송기 내에는 세 개의 직류 구동 모터가 장착되어 이의 움직임을 통해 세정작업이 되도록 한다. 즉 레일을 통한 이송기의 수평 이동, 스포킷의 작동에 의한 고압 살수기의 움직임, 배럴 자체의 회전 구동과 제어를 위해 3개의 직류전기 모터 및 전위차계를 가지고 있다.

나. ABB-CE Nuclear Power 社

ABB-CE는 '80년대 초반부터 튜브쉬트 상면에 쌓이는 슬러지를 제거할 수 있는 장비 개발 프로그램을 진행시켜 왔으며 증기발생기의 annulus 검사, BdL 검사, loose part retrieval 등의 활동을 활발히 수행하고 있다^[2]. ABB-CE(사) 기본적인 개념은 세정 이송기가 annulus에 설치된 레일을 따라 이동하면서 다수의 노즐이 전열관 사이로 고압수를 분사한다. 노즐의 고압수 분사 각도는 증기발생기 외부에서 제어할 수 있다. 즉, 증기발생기 벽면과 가장 바깥쪽에 위치한 튜브 다발 사이의 환형 공간에 슬러지 세정 장비를 집어넣어 이물질 검사와 고압수 분사를 동시에 수행하는 방법이다. 여기서 튜브쉬트 상단면에 쌓이는 슬러지들은 슬러지 흡입 장치를 BdL에 삽입하여 제거한다.

다. 웨스팅하우스 Nuclear Service社

웨스팅하우스 장비의 구조는 EPRI에서 개발한 것과 유사하며, 한 대의 컨테이너 박스에 슬러지 처리 계통 및 제어 계통을 함께 장착한 것이 특징이다^[3]. 고압 살수기 노즐 블록의 위치는 컴퓨터로 조종되며 고압 살수기는 진동하며 물을 분사하는 구조를 가지고 있어서 분사되는 제트가 휘젓는 형태로 되어 튜브 칼럼과 튜브쉬트 사이에 끼어있는 슬러지를 효율적으로 제거할 수 있도록 한 것이 특징이다. 저압으로 공급되는 물은 대략 35/55gpm으로 튜브다발의 외곽에서 각 방향으로 살수된다. 이 살수 작업에 의해 슬러지를 구조물에서 흘러내리도록 하여 흡입펌프로 이송되도록 한다. 슬러지 처리계통은 트레일러 내부에 설치되어 이송이 간편하도록 하였다. 주조종실은 슬러지 처리계통이 설치되어 있는 트레일러의 후미에 칸막이로 분리되어 있으며 증기발생기 내부의 세정작업을 원격조종할 수 있도록 되어있다. 이를 통해 볼 때 웨스팅하우스에서 개발한 세정장비는 CECIL장비와 매우 유사하다.

3. KALANS 개발 개요

KALANS의 기본 개념은 그림 1에서 보여준 바와 같이 증기발생기 2차측 작업구를 통해 Guide Rail과 세정 로봇을 중앙 Tie Rod와 2차측 작업구 사이에 위치시키고 Blow down Lane (BdL)으로부터 정삼각형 구조로 되어있는 세관 배열에 따라 세정 로봇의 고압 살수 다기관을 통해 90도, 30도 및 150 각도로 고압수를 분사 할 수 있는 개념이다. 고압 살수 다기관 끝단 중앙부에는 내시경이 장착되어 튜브 사이 이물질 검사가 가능하고, 고압호스를 통하여 공급되는 물분사 노즐의 위치를 선정한다.

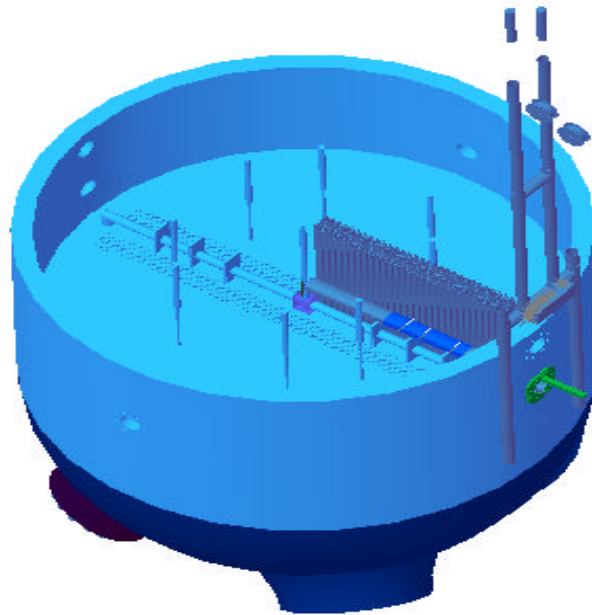


그림 1 델타60형 증기발생기에 설치된 세정장비 개념도

KALANS 기본 장비는 증기발생기의 BdL을 따라 주행할 수 있는 로봇 및 고압살수 노즐 다기관, 로봇 제어 및 감시시스템, 슬러지 처리 계통으로 구분한다. 제어 및 감시시스템과 슬러지 처리계통은 콘테이너에 장착되어 증기발생기에 설치된 세정로봇을 원격제어·감시 가능한 구조이며 슬러지 여과 처리 후 폐용수를 격납용기내로 회송하는 구조이다^[4].

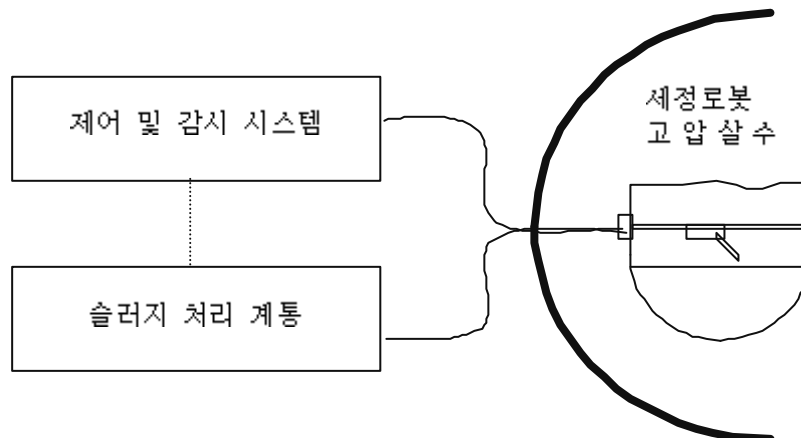


그림 2. 장비구성 개념도

가. 델타60형 증기발생기

고리 1호기 제17차 예방정비기간('98.6.19-'98.9.26) 사이에 교체된 새로운 증기발생기는 그림 3에서와 같이 세관 배열이 정삼각형 구조인 델타60형으로 6개의 핸드홀이 있으며 핸드홀 직경은 6인치이다. 튜브쉬트 상면에서 유량조절판 사이의 간격은 20인치이고 핸드홀 중심에서 튜브쉬트 상면까지는 14.1인치가 된다. Blowdown 파이프는 좌우 3개씩 높이 11 인치, 폭 5.62 인치, 두께 0.75 인치의 blocking 판에 의해서 고정되어 있다. 이 blocking 판의 목적은 blowdown시 유량 흐름에 의한 배관의 진동을 방지하기 위해서 설치된 것이다. 새로이 설계되는 로봇 시스템은 핸드홀을 통해 쉽게 진입시킬 수 있어야 하며, 로봇이 전진하면서 blocking 판의 간섭을 받지 않고 고압수를 분사할 수 있도록 하여야 한다. 로봇의 작동 범위는 핸드홀 입구에서 중앙부 tie rod까지가 된다. 따라서 KALANS 개발시 로봇의 작동 시험과 슬러지 제거 능력 확인을 위해서 그림 4에서 보여준 바와 같이 대칭성을 고려하여 증기발생기 실물의 1/4 단면 모형만을 제작하였다.

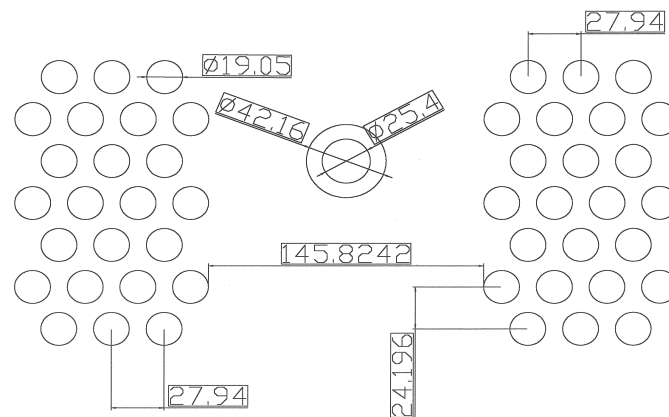


그림 3 델타60형 증기발생기 튜브쉬트 상단 중앙부 전열관 배열

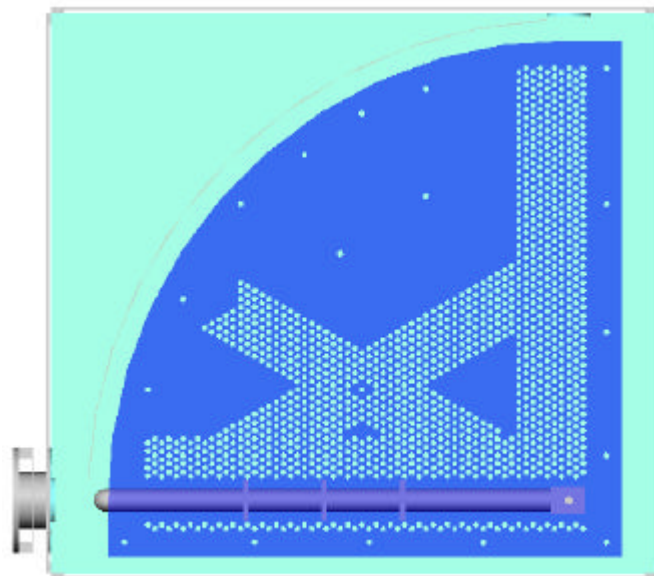


그림 4 델타60형 증기발생기 1/4 모형

나. 로봇 및 제어시스템

로봇 시스템은 로봇 가이드 레일, 로봇 casing, 구동 서보모터 및 엔코더, 동력 전달장치 등으로 구성된다^[4]. 로봇 몸체는 구동 서보모터에 의해서 가이드 레일을 따라 한쪽 레일로는 랙-피니언으로 전후진이 가능하게 하면서 바퀴가 V-홈을 따라서 직진하도록 설계하고 다른 쪽은 평평한 바퀴 및 레일로 하여 로봇이 정확히 레일과 수평한 자세로 무리없이 이동할 수 있게 한다 (그림5). 고압수 분사는 노즐 다기관을 회전시키는 별도의 tilt motor에 의해서 구동된다. 모터의 구동력은 기어비에 의해서 결정되는데 고압수 분사시 발생하는 반력에 의해서 모터의 작동에 장애가 있어서는 안되도록 모터를 선택한다. 고압수 분사는 blowdown lane을 따라서 직각으로 전열관 다발 속을 향해 분사되는데 분사각을 30도와 150도로 바꿀 수 있게 노즐 다기관이 회전되도록 한다.

로봇을 구성하는 세 개의 구동 모터는 정밀 제어, 유지보수성 향상, 로봇 전체 무게의 경량화 등을 고려하여 광학식 엔코더를 장착한 무브러쉬 소형 직류 서보 모터로 채택한다. 증기발생기의 핸드홀 주변은 비교적 강한 방사선 방출 구역으로서 장비의 무게 및 유지 보수 편의성이 작업자의 방사선 피폭량에 큰 영향을 미친다. 따라서 장비의 경량화와 함께 모듈화 설계를 통해 고장시 수 분 이내에 각 모터부의 교체가 가능하도록 한다.

로봇 주제어 시스템은 원자로 격납용기 밖에 위치한 콘테이너 속에 설치하여 증기발생기 내부에 설치되는 보조 제어 시스템과 메모리 공유 방식을 통해 실시간으로 로봇을 제어할 수 있도록 구성한다. 주 제어 시스템은 펜티엄III CPU를 기반으로 한 컴퓨터 시스템을 중심으로 아날로그 및 디지털 입출력 기기, 비디오 입출력 기기 등을 통해 서보 모터 앰프, 로봇에 부착된 카메라, 그리고 수처리 계통 등을 총괄적으로 제어한다. 보조 제어 시스템은 아주 소형의 컴퓨터 및 서보 모터 앰프 등으로 구성되어 주 제어 시스템의 지시에 따라 로봇을 직접 구동하는 역할을 한다.

증기발생기 핸드홀 부근은 공간이 매우 협소하여 핸드홀로부터 차폐벽까지의 최단 거리가 55cm밖에 되지 않는 반면 증기발생기는 반경이 약 1.5m 나 되어 로봇이 증기발생기 내부를 주행할 수 있도록 하는 레일은 세 부분으로 분리하여 설계한다. 증기발생기의 안쪽에 설치되는 레일에는 받침대가 달려 있어서 이것이 중앙 tie rod에 고정되는 구조로 설계한다.

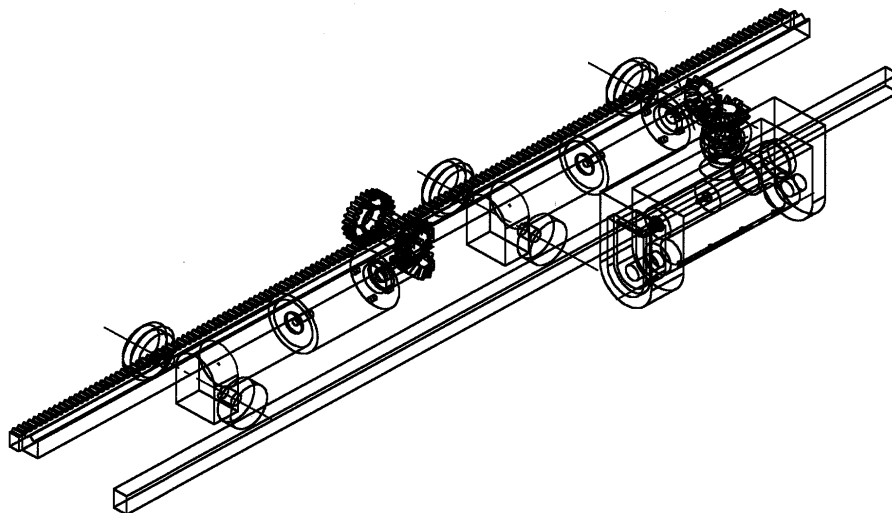


그림 5 델타60형 증기발생기 세정 로봇 개념도

다. 노즐

노즐 다기관에는 4개의 노즐이 장착되어 앞쪽 두 개씩 노즐은 680bar의 고압펌프에서 공급되며 뒤쪽 두 개의 노즐은 170bar의 압력으로 물을 분사하게 된다. 노즐은 로봇 진행방향에 대해 30도, 90도 150도 방향으로 회전한 상태에서 세관 사이로 고압수를 분사 할 수 있도록 하여 세관 뒤에 있는 슬러지도 제거할 수 있도록 한다. 노즐 형상은 지름 약 1mm정도의 원형이며, 분사 시 고압에 의한 물의 퍼짐 현상을 막을 수 있도록 노즐 내부 형상을 입구에 비해서 출구를 작게 한 단공 orifice 형태로 한다.

노즐을 통해 분사되는 고압수는 필터에서 걸러지는 입자의 크기에 따라서 수명이 크게 좌우된다. 현장에서 장비 운전 경험을 통해 볼 때 필터의 성능을 1미크론으로 하였을 때가 그 이상으로 하였을 때에 비하여 노즐의 교환 주기가 크게 향상되는 것으로 나타났다. 노즐을 통한 물 분사 시험시 주요 고려사항들은 물분사에 의한 침식효과(물의 상태, 물분사 시간, 분사 속도), 필터의 성능 평가, 노즐의 형상에 따른 슬러지 제거 특성 평가 등이 주요 인자가 된다.

4. 결 론

본 논문에서는 원전 수명관리에 있어서 중요 관건인 증기발생기의 건전성 유지를 위한 2차측 슬러지 제거 기술 및 해외 장비 현황과 국내에서 이를 개발하기 위한 설계 조건을 검토하였다. 2000년 하반기로 예정되어 있는 고리1호기 19차 예방정비 기간 중 사용할 수 있는 슬러지 세정 장비의 개발을 위해 '99. 4에 개발에 착수하고 현재 상세설계 및 시제품 제작을 추진하고 있다. 기존 세정 장비에 비해 성능 및 작업 편의성을 개선하기 위해 선행 개발 업체인 포스터밀러, ABB-CE, 웨스팅하우스 등이 개발한 세정 장비를 검토한 결과 전열관과 튜브쉬트 바닥에 쌓여있는 슬러지 부위에 고압수를 직접 분사하여 슬러지를 제거하는 방법이 가장 효율적이라는 결론을 내리고 고압수 분사 방식의 장비 개발로 방향을 설정하였다. 이들 3사에서 개발한 장비는 형태는 다르지만 물 분사용 노즐 이송기, 수처리 시스템, 제어 시스템으로 구성되어 있다는 측면에서 공통점이 있다.

장비 설계에 있어서 가장 중요한 인자로 고려하고 있는 점은 안전 확보, 세정 효과, 작업 편의성, 작업자 방사선 피폭량 저감, 유지 보수성 향상 등이다. 이를 위해 정밀 제어 장비의 활용, 시각 감시 기능 추가, 효율적인 노즐의 형태 및 분사 방식 결정, 설치 시간 단축, 내 방사능 부품의 사용, 모듈화 설계 등을 개발의 기본 원칙으로 하고 있다.

본 장비가 계획대로 성공적으로 개발되어 현장에 투입되면 외화 절약은 물론 향후 원자력용 정밀 고가 장비의 국산화에 새로운 전기가 될 것이다.

참고 문헌

1. CECIL Development Program for Combustion Engineering Steam Generators, EPRI TR-106854, April 1997.
2. Steam Generator Sludge Lancing Management, J. C. Lowry, ABB-CE.
3. Westinghouse/KPS Technology Transfer - Sludge Lancing.
4. 증기발생기 세관 검사 및 세정 장비 개발, TMM08.R1998.43, 전력연구원.