

증기발생기 슬러지 세정 장비 및 이물질 제거 기술 개발

Development of A Sludge Lancing Equipment and FOSAR Technology

정우태, 최유성, 손선영, 홍승열

한전전력연구원

대전광역시 유성구 문지동 103-16

요 약

1999년 한수원(주) 고리원자력 1발전소 화학부의 장비 개발 요청으로 증기발생기 슬러지 세정장비 개발 계획이 시작되었다. 이 계획에 따라 국내 최초로 고리1발전소용 KALANS[®]-I 장비가 개발되었고, 이어서 한국표준형 원전인 울진2발전소용 장비와 영광 1발전소용 장비 등이 개발되고 있으며, 중수로형 원전인 월성 1,2,3,4호기용 장비의 개발도 2001년부터 추진되고 있다. 증기발생기 내부에 존재하는 이물질을 검사하고 제거하기 위한 자동화 장비도 2002년부터 개발에 착수하였다. 이 장비는 수작업에 의존하던 이물질 검사 및 제거 작업을 자동화하여 작업자의 방사선 피폭 선량을 줄이고 검사 작업을 보다 효율적으로 수행하기 위한 것이다. 그 외에도 초음파를 이용하여 증기발생기 내부를 세정하기 위한 연구가 계획 중에 있으며, 증기발생기 상부 다발 세정 장비 개발이 2003년 5월에 착수되었다. 본 논문에서는 증기발생기 고리1발전소 증기발생기 세정 장비를 중심으로 증기발생기 이물질 검사 및 제거 장비(FOSAR) 개발, 상부다발 세정 장비 개발, 그리고 초음파 세정 장비 개발 관련 기술 개발 현황에 대하여 기술한다.

Abstract

A program for developing steam generator lancing equipment was started in 1999 on the request of the Chemistry Division of KHNP of Kori NPP #1. Based on the program, KALANS[®]-I lancing system was developed firstly in Korea. Lancing equipments for Ulchin NPP #2(KSNP) and Youngkwang NPP #1 have been being developed since 2001. A project for developing FOSAR(Foreign Object Search and Retrieval) equipment has been being developed since 2001. The FOSAR equipment is going to automate the search and retrieval operation which has been manual, thus minimizes radiation exposure and improves the performance of inspection work. Besides, a research to evaluate the feasibility of an ultrasonic cleaning method is also under consideration. A project to develop an upper bundle hydraulic cleaning (UBHC) system was started on May 2003. In this paper, a steam generator lancing system for Kori NPP #1 is presented. A research activities for developing FOSAR(Foreign Object Search and Retrieval) system, UBHC(Upper Bundle Hydraulic Cleaning) system, and ultrasonic

cleaning system are also presented briefly.

1. 서 론

증기발생기 2차측 TS(Tube Sheet) 및 TSP(Tube Support Plate) 상부에는 2차계통을 구성하는 펌프 등 부품들과 관로의 침부식으로 발생한 금속성 이물질이 침적되는데 이것을 슬러지라고 한다. 이 슬러지는 대체로 1~10 마이크론 정도의 크기로서 양이 적을 때는 큰 문제를 일으키지 않으나 이를 제거하지 않으면 점점 증가해 고형화되어 여러 가지 문제를 일으킨다. 초기 증기발생기 설계자들은 이러한 문제점을 알지 못하고 슬러지를 제거할 수 있는 수작업구(Handhole; H/H)를 설치하지도 않았으나, 원자력발전소 상업 운전기간의 증가에 따라 슬러지 제거의 필요성을 인식하게 되었다. 따라서 최근에 제작되는 증기발생기에는 운전중 증기발생기 2차계통에서 다량의 물을 추출하여 함유된 슬러지를 제거하기 위한 장치가 설치되어 있다. 그러나 아직까지는 이러한 방법으로도 슬러지를 효율적으로 제거하기는 어려우며, 별도의 슬러지 세정장비를 이용하는 것이 일반적이다.

증기발생기 2차계통 내부에 침적된 슬러지를 제거하는 방법으로는 노즐을 통해 고압수를 분사하여 제거하는 방법, 초음파 또는 압축과 등을 사용하여 전열관, TS, TSP에 고착된 미세한 슬러지를 분리하여 제거하는 방법, 슬러지를 구성하는 금속 성분을 선별적으로 녹여 제거하는 화학세정 방법 등 여러 가지가 있다. 본 논문에서는 한전전력연구원에서 수행하고 있는 증기발생기 슬러지 세정장비 개발에 관하여 살펴보고 증기발생기 2차계통 건전성 확보를 위해서 개발을 추진하고 있는 증기발생기 이물질 검사 및 제거 장비 개발 현황과 증기발생기 상부 다발 세정 장비 개발 현황 및 초음파 세정 기술 개발 계획에 관하여 소개하고자 한다.

2. 본 론

가. 증기발생기 슬러지 세정장비

1) 증기발생기 세정장비 현황

'01년 3월 현재 국내에는 개발한 고리1호기용 KALANS(Kepco Advanced LANcing System) 장비와 더불어, 고리2,3,4호기 및 영광1,2호기용 CECIL 1호기, 울진1,2호기용 CECIL 2호기, 영광3,4호기용 ABB-CENO 장비, Booy Clean 등 모두 다섯 가지 랜싱장비가 활용되고 있다.

KALANS는 한수원(주)의 위탁으로 한전전력연구원에서 개발한 장비로서 고리 1호기 랜싱을 목적으로 개발하였으나 노즐부 및 제어계통 등 일부 수정을 거쳐 고리2,3,4호기 및 영광 1,2호기에도 사용할 수 있도록 보완되어 활용되고 있다.

CECIL 1호기는 고리원자력 2발전소 화학부에서 관리하고 있으며, '96년 4월경에 도입하였다. CECIL 장비는 '86년 미국 전력업계의 필요에 따라 미국전력연구소(EPRI) 주도로 개발되었다. CECIL 1호기는 CECIL-4 의 기능 중 이물질 제거 기능이 제외된 것

으로 배럴(barrel) 분사, 고착슬러지 제거, 이물질 검사 등에 활용하고 있다. 현재 CECIL 장비의 특허권은 EPRI가 보유하고 있으나 전용실시권은 미국 포스트밀러사에서 가지고 있다. CECIL 2호기는 울진1,2호기 랜싱을 위하여 '01년 2월에 도입한 장비이다. 울진1,2호기의 경우 증기발생기 2차계통 작업구 내부가 유량분배판으로 아래위로 나누어져 있어서 랜싱 장비를 설치할 공간이 매우 협소한 문제점이 있으며, 이를 해결하기 위해 새롭게 설계/제작되었다. 전체적으로 보아 호스 및 케이블 승강 계통은 같으

표1 국내 보유 증기발생기 랜싱 및 FOSAR 장비 현황

모델명	제작사	개발 혹은 도입 시기	용도	관리부서	활용 발전소	기타
KALANS-I	KEPRI	2000. 10	랜싱	고리1발전소	고리 1	개발완료 /활용중
KALANS-II	상 동	2004. 7	랜싱	영광1발전소	영광1,2	개발중
KALANS-III	상 동	2004. 7	랜싱	울진2발전소	울진3,4	개발중
KALANS-IV	상 동	2004. 7	FOSAR	고리2발전소	고리3,4	개발중
미 정	상동	2006. 4	상부세정	한전기공	고리2,3,4 영광1,2	개발중
CECIL 1호기	Foster- Miller Co.	1996. 4	랜싱	고리2발전소	고리2,3,4 영광1,2	외국산 도입
CECIL 2호기	Foster- Miller Co.	2001. 2	랜싱	울진1발전소	울진1,2	외국산 도입
ABB-CENO	ABB -CE	1996.12	랜싱	영광2발전소	영광3,4 울진3,4	외국산 도입
Booy Clean	Booy Clean	1987.	랜싱	영광1발전소	영광1,2	2003년 폐기

나 배럴 분사 장치와 스케일 제거 장치를 별도로 제작하여 장비의 크기를 줄인 것이 특징이다.

ABB-CENO 장비는 ABB-CE에서 개발한 장비로서 한국표준형 원전인 영광3,4호기와 울진3,4호기의 랜싱 작업에 활용하고 있다. 한국표준형 원전의 증기발생기의 경우 전열관이 삼각형 모양으로 배열되어 있어서 장비를 증기발생기의 외곽 가장자리 쪽으로 투입하여 노즐이 전열관 사이로 향하도록 조정한 다음 고압수를 분사하여 슬러지를 제거하는 방식을 사용한다. 이 방식은 장비 이동, 노즐 정렬 등 모든 작업을 수작업에 의존하므로 작업자의 방사선 피폭량이 상대적으로 많다는 단점이 있으나, 장비가 비교적

적 간단하여 정비가 용이하다는 장점도 있다.

Booy Clean 장비는 가장 오래된 장비로서 기능적으로 매우 단순하지만 여타 랜싱 장비가 고장 등으로 인하여 사용할 수 없을 때 대체장비로서 활용되다가 폐기되었다.

'00년 3월 현재 한수원(주)에서 활용하고 있는 랜싱 장비를 요약 정리하면 표1과 같다.

2) 세정 로봇 시스템

랜싱 장비 설계에 있어서 가장 중요시한 점은 안전성이다. 안전성 측면에서 장비 설계 시 고려한 요건들은 1) 어떠한 경우에도 장비가 증기발생기 내부에서 고장이 나 장비를 제거할 수 없는 상황이 발생하여서는 안 됨, 2) 고압수가 분사될 때 증기발생기 전열관에 수직으로 분사되어 전열관이 손상되는 일이 없어야 함, 3) 장비 구성 부품이 장비에서 분리되어 증기발생기 내부에 이물질로 남는 경우가 없어야 함, 4) 고압수를 분사하여도 서보모터 등 정밀 제어 장비의 작동에는 문제가 발생하지 않아야 한다는 것 등이었다. 아래에서는 고리1호기 증기발생기 세정을 위해 전력연구원에서 개발한 KALANS 장비에 대하여 기술한다.

증기발생기 내부에서 장비가 고장이 나더라도 꺼낼 수 있도록 하기 위하여 특수한 안전 장치를 고안하고 특수 공구를 제작하였다. 랜싱 로봇은 두 대의 서보 모터와 기어, 스프링 등 수많은 부품으로 구성되어 있는데 로봇을 움직이는 구동 모터의 경우 큰 힘을 내기 위하여 감속비가 989:1이나 된다. 따라서 구동시에 큰 힘을 낼 수 있다는 것은 좋으나, 고장 시에 아무리 큰 힘으로 로봇을 당겨도 로봇이 랙기어에 물려 움직이지 않는 경우가 발생한다. 따라서 갑작스런 정전 및 고장 시에 로봇을 증기발생기 밖으로 제거하기 위하여 특별한 장치가 필요하다. 본 시스템에서는 90도 방향으로 동력을 전달하기 위하여 사용한 한 쌍의 베벨 기어가 서로 분리될 수 있는 구조로 하여 이 문제를 해결하였다.

로봇 시스템은 핸드홀을 통해 쉽게 진입시킬 수 있도록 하며, 로봇이 전진하면서 증기발생기 내부 구조물인 차단판(blocking device)의 간섭을 받지 않고 고압수를 분사할 수 있도록 한다. 로봇의 작동 범위는 핸드홀 입구에서 중앙부 타이로드(tie rod)까지가 된다. 설치의 편의성을 고려하여 레일은 두 부분으로 분리되도록 설계/제작하였으며 조립한 다음 핸드홀을 통해 설치하도록 한다(그림1).

로봇 시스템은 로봇 안내 레일, 로봇 케이스, 구동 서보 모터 및 엔코더, 동력 전달장치 등으로 구성된다. 로봇 몸체는 구동모터에 의해서 안내 레일을 따라 랙-피니언으로 전후진이 가능하게 하면서 바퀴가 V-홈을 따라서 직진하도록 설계하고 다른 쪽은 평평한 바퀴 및 레일로 하여 로봇이 정확히 레일과 수평한 자세로 무리 없이 이동할 수 있게 하였다. 고압수 분사는 노즐 다기관을 회전시키는 별도의 틸트(tilt) 모터에 의해서 구동된다. 모터의 구동력은 기어 비에 의해서 결정되는데 고압수 분사 시 발생하는 반력에 의해서 모터의 작동에 지장이 없도록 사양을 결정하였다. 고압수는 BdL과 수직 방향에 위치한 전열관 다발 사이를 향해 분사된다.

로봇을 구성하는 두 개의 구동 모터는 정밀 제어 특성, 유지보수성, 경량화 등을 고

려하여 광학식 엔코더를 장착한 소형 직류 서보 모터로 채택하였다. 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 설



그림1 증기발생기 모형에 설치된 세정장비

계를 통해 고장시 수 분 이내에 각 모터부의 교체가 가능하도록 하였다.

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 구성하였다. 주제어 시스템은 펜티엄II 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 제어토록 하였다.

증기발생기 핸드홀 부근은 공간이 매우 협소하여 핸드홀로부터 차폐벽까지의 최단거리가 75cm밖에 되지 않는 반면 증기발생기는 반경이 약 1.8m 나 되어 로봇이 증기발생기 내부를 주행할 수 있도록 하는 레일은 두 부분으로 분리하여 제작하되, 공간이 넓은 쪽에서 장착하도록 하였다. 증기발생기의 안쪽에 설치되는 레일에는 별도의 받침대는 설치되지 않고 조립된 레일의 중앙 부분에 위치한 홈이 타이로드에 고정되는 구조로 하였다.

고압수를 분사하는 노즐은 좌우 4개씩 8개를 배치하였으며, 노즐의 직경은 1.1mm로 하였다. 노즐을 통해 분사되는 고압수는 필터에서 걸러지는 입자의 크기에 따라서 수명이 크게 좌우된다. 현장에서의 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 고려 사항들은 물분사에 의한 침식 효과(물의 상태, 물분사 시간, 분사 속도), 필터의 성능 평가, 노즐의 형상에 따른 슬러지 제거 특성 평가 등이 주요 인자가 된다.

호스 승강기는 장탈착이 편리하며 이동이 간편하고 이송기 후단에 연결되는 고압호스, 전력 및 제어 케이블, 내시경 등이 일정한 장력을 유지하도록 한다. 이를 위해서 스프링 방식과 중력방식으로 나눌 수 있는데 중력을 이용하는 방식이 상대적으로 간단하고 편리한 것으로 판단되어 세정장비 개발에 응용하기로 하였다.

두 개의 파이프 안에는 납추를 넣고 이를 강선을 이용하여 폴리에 연결시킨다. 폴리의 위치는 호스가 증기발생기의 단열재를 감싸는 강판에 마찰이 일어나지 않도록 설계하였다. 폴리의 직경은 호스와 광섬유의 최소 반경을 고려하여 반경을 8인치로 하였고 폴리의 폭은 2인치로 하여 한 폴리에 고압호스 두 가닥이 동시에 들어갈 수 있도록 하였다. 폴리 또는 납추의 이동거리는 증기발생기 직경의 1/4정도가 되어 대략 80cm 정도 움직인다. 폴리가 이동하는 거리는 핸드홀에서 약 70cm 상방으로부터 위로 움직이도록 하고 파이프의 길이는 상하부 각각 50cm정도 여유를 두어 전체 파이프의 길이는 2.5m로 하였다.

3) 슬러지 처리 계통

슬러지 처리 계통은 크게 1) 흡입 펌프, 2) 정화 계통, 3) 가압 계통, 4) 펌프 제어 계통, 5) 흡입 노즐, 6) 저장 탱크 및 배관 등으로 구성되어 있다. 흡입 펌프는 증기발생기 인근에 설치되어 증기발생기 내부에 장착된 흡입 노즐로부터 흡입된 슬러지를 정화 계통으로 보내주는 기능을 한다. 이물질, 공기 등이 흡입되어도 무리 없이 보낼 수 있도록 하기 위하여 흡입 펌프로 공기압 이용 방식을 선정하였다. 흡입 펌프에 의해 정화 계통으로 보내진 슬러지는 10미크론 백필터(bag filter) 및 2미크론 카트리지필터(cartridge filter)를 통과하면서 정화되어 가압계통으로 보내진다. 10미크론 및 2미크론 필터 하우징은 각각 두 셀이 설치되어 운전중에 필터 교체가 가능하도록 하였다. 또한 필터 전후단에는 투명창을 설치하여 정화되기 전후의 물의 탁도를 항상 관찰할 수 있도록 하였다. 가압계통은 460기압 및 720기압의 두 대의 피스톤 펌프로 구성되어 정화된 물을 고압으로 다시 증기발생기 내부로 보낸다. 이렇게 슬러지를 흡입하여 정화시킨 후 증기발생기 내부로 다시 보내는 순환 과정을 통해 침적물이 제거된다.

슬러지 처리계통 설계는 이송기 및 고압 살수기에서 요구되는 압력 및 유량을 만족시킬 수 있도록 설계되고, 슬러지 처리계통 설비로부터 증기발생기까지 약 100m의 연결 호스로 연결되므로 압력에 미치는 영향 및 연결 호스에 발생하는 동적 특성을 설계시 검토하였다. 설계성과물은 대별하여 P&ID, 자재 및 기기 구매 기술규격서, 제작도면, 설치도면, 시방서등을 발행하고, 이러한 성과물은 다음의 계통 설명에 보인 조건들을 만족한다.

슬러지 처리 계통은 적정유량의 고압수를 세정장비에 공급하여 증기발생기내의 슬러지를 분리시키고 물과 슬러지의 혼합수를 증기 발생기에서 회수하여 슬러지를 걸러내며, 저장탱크에 정화된 물을 저장하고 다시 재순환시킬 수 있도록, 다섯 가지의 주요기능을 갖는 이동식 스킴드로 구성되며 긴 호스를 통해서 격납 용기 내부의 증기 발생기에 장착되는 랜싱 장비와 연결된다.

세정작업을 수행하기 위해 모든 호스들의 연결이 끝나면 발전소 내의 순수저장탱크로부터 슬러지 처리계통에 여과된 순수를 채워 놓도록 한다.

슬러지 처리 계통은 크게 세척을 위한 가변적인 유량과 압력을 제공하는 역할을 하는 저압 살수 계통과 고압 펌핑 계통, 그리고 흡입과 여과를 수행하는 계통 등 크게 세 가지 하부 계통으로 나누어진다. 흡입과 여과 계통은 증기 발생기 속으로 들어간 물을 흡입하고 물과 슬러지를 처리계통으로 보내어 부유 고형물들을 여과시키며 작업의 계속적인 수행을 위해 용수를 저장한다.

증기발생기 내부로 분사된 모든 물을 회수하기 위하여 증기발생기 핸드홀 안으로 흡입 노즐을 장착시킨다. 이 노즐은 TS 상부면에 직접 흡입할 수 있도록 위치하고 세정 작업 중에 TS 위에 남아있는 잔류수를 최소화시키도록 한다. 흡입 노즐은 굽힘성이 있는 호



그림2 트레일러에 설치되어 있는 슬러지 처리계통

스로 증기발생기 아래에 위치한 공기구동 다이아프램 펌프와 연결된다. 이 흡입 펌프는 물과 슬러지를 굽힘성 있는 호스를 통해 여과계통으로 보낸다.

첫 번째 스킴드에서의 슬러지와 물의 처리 과정은 다음과 같다. 먼저 슬러지 귀환 호스로부터 유입되는 슬러지는 이중 바구니형의 거름 장치를 통과한 후 1.0mm^3 의 서지 탱크에 저장된 다음 모터 구동 원심 펌프에 의해서 여과 단계로 보내진다. 증기 발생기를 통과한 물과 슬러지는 거름 장치를 지나면서 비교적 큰 이물질은 서지 탱크에 들어가기 전에 걸러진다. 서지 탱크에는 수위 스위치가 있어서 탱크 안에 있는 내용물을 후속 여과단계에 보내기 위한 이송펌프를 자동적으로 작동시키고 정지시킨다. 서지 탱크에 모인 물과 부유물의 여과는 두 번째 스킴드에 있는 여과장치에서 두 단계의 여과 과정을 거친다. 첫 번째 단계는 10μ 이하의 비교적 큰 이물질들을 제거하며, 두 번째 단계에서는 1μ 이하의 슬러지 물질들을 제거한다. 이러한 두 단계 여과기를 운전 중 여과포 교체가 가능하도록 2 셀을 병렬로 구성한다. 계통의 최대 유량은 annulus 세척 유량을 정하는 베럴 스프레이를 실시할 때 발생하며, 계통의 최대 유량은 450LPM이다. 여과되어 깨끗해진 물은 세 번째 스킴드에 있는 2.0mm^3 저장탱크로 들어간다. 이 스킴드에는 450LPM 유량을 갖는 모터구동 원심형 Annulus Washing 펌프가 장착되어 고압펌프, 저압살수 펌프, 그리고 annulus flush 노즐로 여과수를 공급한다. annulus 세척 노즐은 증기 발생기annulus에 임시로 설치되어 유동성 슬러지나 이물질들을 쓸어내리기 위한 역할을 한

다.

탱크에 부착된 수위 스위치는 annulus세척과 이송펌프를 제어하고, 고수위/저수위 설정에 따라 물넘침 방지를 위해 펌프 동작을 멈추게 한다. 슬러지 처리 계통의 주요 부분에는 전기 제어 장치가 설치되어 슬러지 처리계통의 각 장치에 대한 정보(펌프에 공급되는 유량, 압력, 펌프의 작동상태, 비상 정지 스위치, 등)를 작업자가 쉽게 인지할 수 있다. 슬러지 처리계통은 수동 및 자동 모드에서 작업이 가능하도록 옵션을 두며, 수동 작업시 필요에 따라 작업자가 육안으로 계기를 확인 후 조치가 가능하다. 전기, 제어 패널은 펌프류와 격리하여 설치함으로써 패널을 보호하고, 작업자를 소음으로부터 보호하도록 하였다.

완성된 슬러지 처리계통은 적절한 크기의 컨테이너에 설치하고 이동이 가능하도록 견고하게 트레일러에 장착된다. 컨테이너는 작업자가 쉽게 오르내릴 수 있도록 하였다(그림2).

4) 고압분사용 노즐

장비 개발에 있어서 기술적으로 가장 어려운 분야의 하나가 노즐 설계이다. 노즐 설계 기본 개념은 출구에서 분사되는 고압, 고속의 분출수가 작은 입자 형태로 나누어져 안개처럼 되지 않고 멀리 떨어져 있는 슬러지에 강한 운동에너지를 전달하여 슬러지가 증기발생기의 가장자리 쪽으로 이동되도록 하는 것이다. 이를 위하여 노즐 내부 형상을 특수하게 설계하였으며 가장 적합한 노즐 형상을 찾기 위하여 여러 가지 형상의 노즐을 제작하여 고압 분사 실험을 수행하였다. 실험 결과 노즐의 형상은 입구 쪽이 넓고 출구쪽으로 갈수록 점점 좁아지는 형태의 노즐이 랜싱 장비용으로 가장 적합한 것으로 결정되었다.

노즐 설계에 있어서 또 하나의 중요한 인자는 노즐 표면의 경도이다. 노즐은 물을 분사하는 데 사용되므로 녹슬지 않는 재질로 되어 있으면서 경도가 높을 필요가 있다. 따라서 스테인레스강 계열이면서 열처리를 통해 경도를 올릴 수 있는 특수 재질을 선정하여 사용하였다. 열처리 방법 또한 특별히 지정한 절차에 따르도록 하여 물 속에 함유된 입자들로 인한 마모를 줄일 수 있도록 하였다.

초속 200미터 이상의 빠른 속도로 방출되는 분출수는 여러 가지 요인으로 인하여 분무 형태로 진행됨을 관찰하였다. 물이 빠른 속도로 노즐에서 분사될 때 노즐 주변의 공기도 같이 흡입하면서 나아가므로 노즐 출구부분의 형상이 분무화 정도에 많은 영향을 미침을 관찰할 수 있었다. 노즐 출구 부분도 정밀하게 가공하여 미세한 가공 결함으로 인하여 분출수가 몇 부분으로 나누어 진행되는 등의 결함을 방지하였다.

본 연구를 위하여 플랜저방식의 고압펌프(사용압력: 200 kg/cm^2 , 15 HP, 11kW, 토출유량 $Q : 30\text{ l/min}$)를 이용하여 수조로부터 물을 흡입하여 고압탱크(내압 300 bar)에 가압을 한다. 가압된 물이 노즐에 균일하고 맥동(pulsation)현상의 발생을 감소시킬수 있도록 노즐챔버를 둔다. 이 노즐챔버를 통과한 물은 노즐을 통과하여 정지대기 상태의 공기중에 수평방향으로 분사된다. 분사된 분무액적들에 의하여 형성된 측정체적에 PDPA의 계측에 의하여 축방향 및 반경방향의 분포로부터 얻어진 모든 데이터들은 실시간으로 컴퓨터에 입력된다. 또한 그림4는 실험장비의 사진을 보여주고 있다.

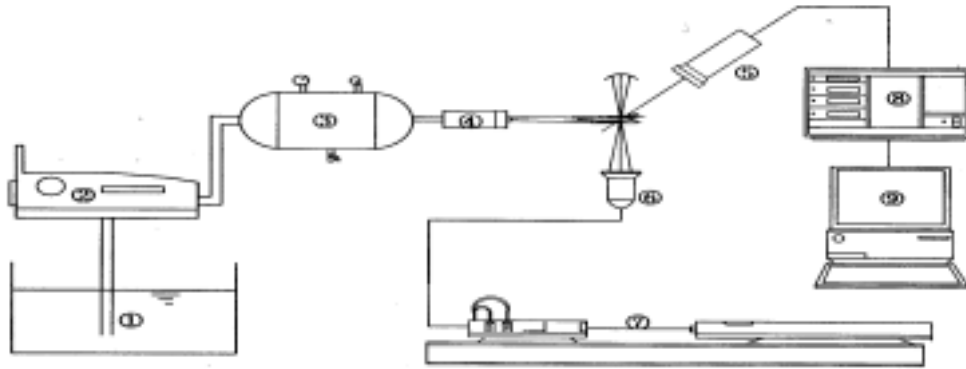


그림 3 ① 수조 ② 고압펌프 ③ 고압탱크 ④ 챔버 및 노즐
 ⑤ PDPA 수광부 ⑥ PDPA 송광부 ⑦ Laser source ⑧ 신호처리기
 ⑨ 데이터 처리용 컴퓨터



그림4 실험장비 사진

노즐 출구로부터의 분류 속도가 크지 않을 때, 대기로 분출된 분류는 주위 대기와 활발히 상호 작용을 하지 않는다. 또한 제트를 발생시키는 노즐로부터 어느 정도 떨어진 축방향 위치에서 액적으로 분열되기 시작할 때까지 제트는 분명한 액주의 형태로 나타나며 이러한 현상은 고압분사보다 저압시에 더욱 분명히 나타난다.

공기중에 분사된 낮은 속도의 물분사는 불안정하여 정맥류형의 불안정성 때문에 분열한다. 이러한 현상은 점성의 영향을 포함시킨 Rayleigh와 Weber(1977)에 의해 이론적으로 연구되어 왔다. 이들 조건을 고려하여 분열되기 전의 제트의 길이 L 은 주로 제트의

직경 d 의 항으로 정리된 Weber수 We ($We = U_o^2 \rho d / \sigma$)에 따라 변하며, 다소 Reynolds 수 R ($Re = U_o d / \nu$)에 따라 변한다. 여기서 U_o 는 노즐에서 제트의 속도이며, ρ 와 ν 는 각각 분사되는 유체의 밀도와 동점성을 나타내고 σ 는 공기와 유체의 상호 접촉면의 표면장력이다(Grant and Middleman, 1966).



그림5 저압분사 분류 가시화

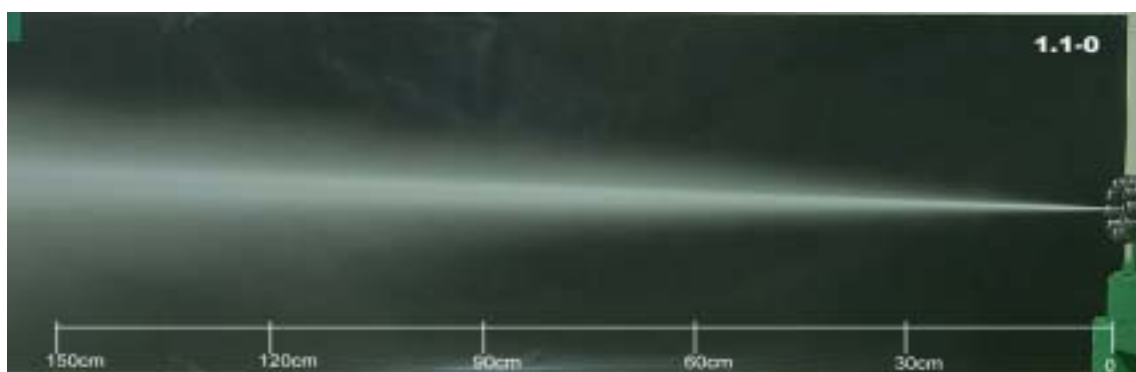
그러나, 그림5의 저압 분사와는 달리 그림 6의 경우처럼 고압수의 경우 노즐을 떠나는 물분사의 속도가 매우 클 때(약 100m/s 이상), 제트는 주위 대기와 활발하게 서로 작용하며 분류가 축방향으로 진행됨에 따라 반경방향으로 더욱 확산현상이 분명해진다. 고속 물분사의 경우, 주위 공기와의 동력학적인 상호작용에 의해 조장되는 축대칭 표면파는 나선형상의 불안정한 형상으로 성장하여 사인파형의 분열메카니즘을 따르게 된다(Hoyt and Taylor, 1977).

그림 6과 같이 노즐출구에서의 속도가 대략 100-200m/s 범위에 있는 물분사를 고려하면, 제트가 노즐을 떠난 직후 주위 공기와의 강한 상호작용 때문에 곧 바로 확산하거나 팽창하며 반경방향으로 퍼져 나간다(Abramovich, 1963, Rajaratnam, 1976). 고속 물분사에서는 확산된 제트에 주위 공기의 유입 현상에 의하여 움직이는 환형모양의 물입자가 뿌연구름이나 안개와 같은 모습으로 둘러싸인 고속의 Coherent 코어가 있음을 알 수 있었다.



그림6 고압분사 분류 가시화

그림7은 출구 직경이 1.1mm인 노즐의 분류특성을 파악하기 위하여 노즐의 형상비 (l/d_0)를 0, 1, 2, 3까지 변화시켰다. 여기에서 알 수 있는바와 같이 수평방향으로 분류가 계속 직진하고 있어, 실험시 설정한 타겟 지점까지는 분류가 수직방향으로 기울지 않고 있음을 알 수 있다. 특히, (a) 와 (b)의 경우 분류가 노즐출구를 떠나 어느 정도의 거리를 지나면서 분류가 넓게 퍼지고 있음을 보여준다. 이는 분류의 확산현상이 다른 두 경우보다 빠르게 진행되고 있으며, 직진이 진행됨에 따라 미립화가 가속이 되어 주변 공기 속으로 유입되는 현상을 알 수 있다. 또한, 이때 발생한 작은 입자들은 주변공기와의 마찰에 의하여 일부는 분류속으로 유입되거나, 일부는 공기중에 부유하고 있음을 볼 수 있다. 이러한 현상은 결국 모멘텀을 약화시켜 증기 발생기 전열관에 침적되어있는 이물질 제거에 부정적인 영향을 가져올 것으로 사료된다.



(a) 노즐출구 직경(d_0): 1.1mm, 형상비(l/d_0): 0



(b) 노즐출구 직경(d_0): 1.1mm, 형상비(l/d_0): 1

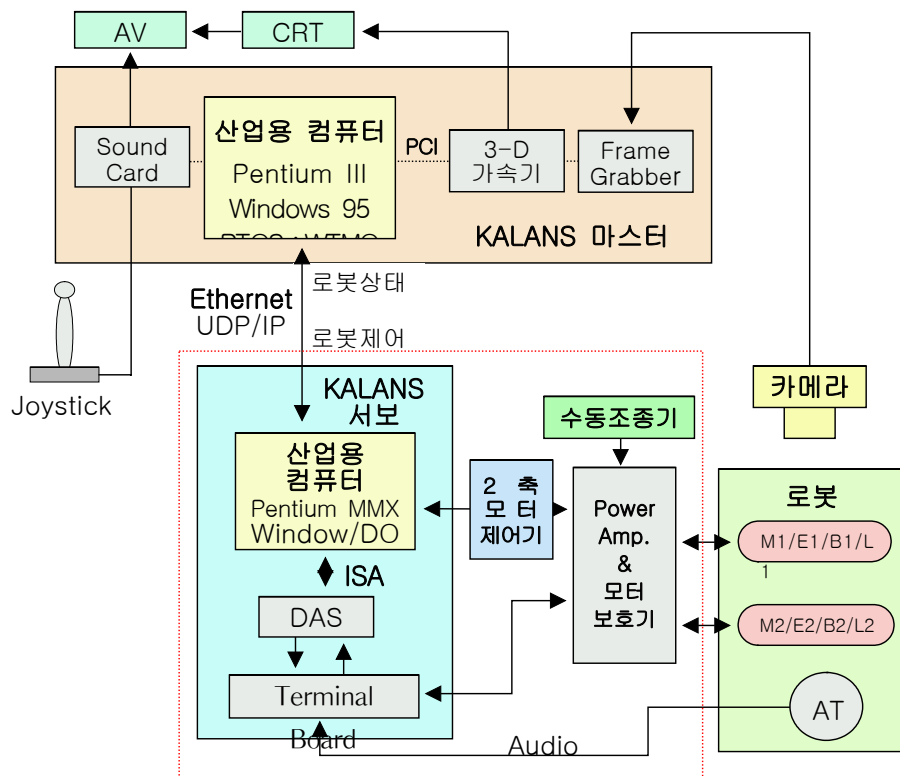
그림7 노즐출구 직경이 1.1mm인 경우 전단면 가시화

5) 제어 및 감시계통

KALANS 장비의 제어계통은 윈도우환경을 기반으로 하는 최근의 동향에 따라 모든 프로그램을 Visual C++ 환경하에서 개발하였다. 제어 시스템은 두 대의 서보 모터를 제어하도록 구성하였으며, 조작 장치는 조이스틱 형태로 설계하여 작업편의성을 도모하였다. 예측하지 못한 상황에서도 증기발생기 내부에 투입된 랜싱 로봇으로 인한 사고가 일어나지 않도록 하기 위하여 서보 모터에 공급되는 전류를 실시간으로 감시하고 있다

가 기준치 이상으로 전류가 공급되면 자동으로 전원 공급이 차단되게 하였다. 컴퓨터 화면에는 현재 작업 진행 상황을 가상현실 형태로 3차원 그림으로 보여주도록 하였으며, 별도의 아날로그 모니터에는 내시경에서 전달된 화상 신호를 나타내게 하였다. 따라서 컴퓨터 모니터상의 3차원 그림과 아날로그 모니터 상의 실제 영상이 일치되는지 감시하여 기기의 이상을 조기에 발견할 수 있도록 하였다. 랜싱 로봇 내부에는 소리 감지 센서를 부착하여 기어, 모터 등 기계부품의 오동작 여부, 고압수 분사 상태, 기기의 충돌 여부 등을 작업자가 소리로 감지할 수 있도록 하였다. 이렇게 다양한 안전 장치를 준비한 이유는 증기발생기 내부에서 고압수가 전열관에 수직으로 장시간 분사되어 마모로 인해 전열관에 구멍이 생기는 최악의 상황을 피하기 위해서이다. 또한 최악의 경우 장비가 제어 불능이 되더라도 이로 인해 사고가 발생하지 않도록 유의하였다.

KALANS 제어/감시시스템은 크게 증기발생기 세관 세정로봇을 원격으로 제어 및 감시하는 KALANS 마스터와 로봇을 구동하는 KALANS 서보로 구성된다. KALANS 마스터는 격납용기 외부의 컨테이너에 KALANS 서보는 격납용기 내부에 각각 위치하고 이들은 UDP/IP컴퓨터 통신에 의해 정보를 교환한다. KALANS 마스터는 Pentium III급 산업용 컴퓨터와 이와 호환성이 있는 입출력 카드로 구성되어 로봇제어와 감시환경을 제공하고, KALANS 서보는 2축 모터제어기와 모터 구동장치인 Power Amplifier, 모터 과전류 보호기 및 로봇을 수동으로 조작할 수 있는 수동조종기로 구성된다. KALANS 제어/감시시스템의 전체 구성은 아래의 그림8과 같다.



註) M: Motor, E: Encoder, B: Braker, L: Limit Switch,
AV: Audio/Video System, AT: Acoustic Transmitter

그림8 KALANS 시스템 구성

이 시스템의 구축에는 단지 각종 Electronics를 통합하는 하드웨어적인 작업 이외 이

를 운용하기 위한 소프트웨어적인 면에서의 작업이 포함되어 있고, 로봇을 필요한 목적에 효율적으로 적용하기 위한 사용자 인터페이스를 구성하기 위해 조이스틱, 3-D 가속기, Frame Grabber 등의 하드웨어가 활용되었다.

가) KALANS 마스터 제어/감시 시스템의 구성

KALANS 제어/감시 시스템은 기존의 획일적인 랙 마운트 방식을 벗어나 사용자 편의성을 향상시킨 Desk Top방식의 작업환경을 제공하도록 제작되어 있다. 따라서, 작업자는 책상에서 컴퓨터 작업을 수행하는 것과 같이 로봇작업에 임하게 된다.

작업환경은 KALANS 마스터와 AV(Audio/Video) 시스템으로 구성되고, 마스터 컴퓨터에 조이스틱제어기와 TFT 패널 및 키보드와 마우스가 접속된다. 아래의 그림9는 시스템의 작업환경을 보이고 있다.

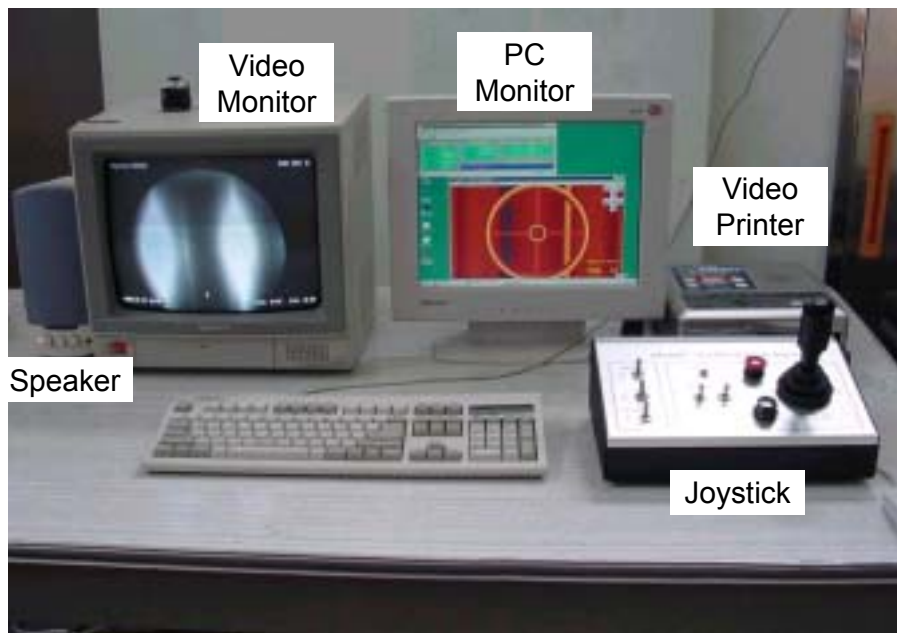


그림9 KALANS 제어/감시 시스템의 작업환경

KALANS 마스터를 좀더 자세히 보이면 사진 3-2와 같다. KALANS 마스터는 Video 프린터, Panasonic VTR (AG-5710)와 P-III 500MHz 산업용 컴퓨터 및 시스템 전원을 관리하고 서보와 조이스틱의 입출력신호를 처리하는 마스터 제어기로 구성된다. 3차 PRM에서 제시된 슬러지 처리 프로세스의 원격감시 및 제어를 위해 배럴살수펌프의 4개의 점점출력과 경보창 10개를 읽기 위한 로직입력 포인트와 2개의 차압계 신호를 읽기 위한 아날로그 입력 및 질소 공급 밸브와 이를 제어하는 회로를 추가로 설치하였다.

AV(Audio/Video) 시스템은 Panasonic사의 고 해상도 Video CRT (WV-CM1470)와 4개의 화면을 동시 또는 선택적으로 디스플레이 할 수 있는 Panasonic Video switcher(WJ-MS424)로 구성된다. 이들 시스템의 외함은 FRP로 제작되었으며, 8개의 모퉁이에 충격을 흡수하는 댐퍼가 설치되어 있어 기기가 설치되어 있는 랙을 지지하

로 이동시의 충격을 완화 할 수 있도록 제작하였다. 앞면과 뒷면에는 커버가 있어 밀폐된 상태로 이동과 보관이 가능하고, 측면에는 손잡이가 있어 이동이 간편하다(그림10).



그림10 KALANS 마스터

나) KALANS 서보시스템의 구성

KALANS 서보시스템은 격납용기 내부에 설치되어 로봇을 제어/감시하는 기능을 담당한다. KALANS 서보는 방사선 오염의 염려가 있고 고온 다습한 환경에 설치되는 특성상 외부온도가 40도에서도 견디도록 통풍 및 대류가 고려되었고, 노이즈에 대한 대책으로 전원선은 물론 각종 신호선에도 필터를 설치하였다. 그림11(a)는 서보시스템 내부를 보이고 있다. 이 시스템은 컨테이너에 있는 마스터 제어기와 데이터 교환을 위한 컴퓨터 통신장치, 모터 보호기, Power Amp., 모터 2개를 동시에 제어할 수 있는 모터제어기와 컴퓨터로 구성된다. 컴퓨터에는 Disk On Chip이 내장되어 있어서 별도의 하드디스크 없이 시스템 운영체제인 DOS와 로봇감시/제어 프로그램인 KeproRobot를 설치할 수 있다. DOS 배치파일을 이용하여 KALANS 서보가 부팅되면 자동으로 KeproRobot이 실행되도록 설정하였다. CPU는 Intel사의 MMX 266Mhz이고 주위온도 섭씨 60도에서 MTBF (Mean Time Between Failure)가 10만 시간 이상이다.



(a) 서보 내부



(b) 서보 뒷면

그림11 KALANS 서보

그림11(b)에 보인 서보의 뒷면은 통풍 팬들과 각종 커넥터 및 전원스위치와 Fuse들로 구성되어 있다. 입구 팬에는 필터가 붙어 있고 탈착이 가능하여 방사선에 오염되면 필터를 제거할 수 있다. 이에 대한 상세한 내용은 시스템 설계 분야에서 다루기로 한다.

6) 현장 적용

고리1호기에는 증기발생기가 2기 있으며, 랜싱 작업은 증기발생기 상부 슬러지 콜렉터(collector) 세정 작업과 하부 TS 랜싱 작업으로 나누어진다. 먼저 슬러지 콜렉터 세정 작업부터 착수하였다. 별도 제작한 연결부를 통해 콜렉터에 10기압 정도의 물을 보내면서 슬러지를 흡입하여 정화계통으로 보내니 정화계통 전단의 투시창에 시커먼 슬러지가 흡입됨을 확인할 수 있었다. 약 하루동안 이 작업을 계속적으로 수행하여 상부 세정 작업을 완료하였다.

다음날 증기발생기 아래 부분으로 장비를 옮겨 하부 튜브시트 랜싱 작업에 착수하였다. 그러나 작업 도중 작업을 계속 진행할 수 없는 문제가 발생하였다. 장비의 눈이라고 할 수 있는 내시경에 이상이 생긴 것이다. 장비 제어실에서 내시경을 통해 입력되는 화면만으로는 장비의 위치를 제대로 파악할 수 없었다. 장비 특성상 전열관의 위치를 내시경으로 보면서 초기 위치를 설정토록 되어 있었으므로 이 문제는 더 이상 작업을 진행할 수 없는 심각한 상황이었다. 따라서 새로 내시경을 장비에 구입/장착하고 랜

싱 작업에 착수하였다. 제어실에서 관찰되는 화면은 완벽하였다. 새 내시경은 CCD 타입으로서 해상도가 월등하고 기존 내시경과는 달리 화면이 모니터 전체에 내시경 화면이 나와서 작업하기에는 아주 좋았다. 이 내시경이 장비에 장착되고 나서는 모든 작업이 계획대로 진행되었다. 과제팀에서는 슬러지 처리계통으로 흡입되는 시커먼 흡입수가 깨끗하게 정화되어 다시 증기발생기 내부로 공급되는 것을 지켜보면서 마음의 여유를 가질 수 있었다.

과제 결과물의 현장 적용을 통해 느낄 수 있었던 것은 현장 적용성 장비 개발 과제의 경우 충분한 현장 적용 시간을 가질 필요가 있다는 것이었다. 하지만 원자력계의 특성상 짧은 기간 내에 모든 작업이 완료되어야 하며, 시행착오를 거칠 시간이 없다는 것이 가자 큰 어려움이었다.

나. 증기발생기 이물질 검사 및 제거 장비

증기발생기 2차계통 내부(튜브시트, 유량분배판, 튜브지지판 포함)를 검사하여 이물질의 존재 여부를 검사하고 필요할 경우 이물질을 제거할 필요가 있다. 이물질도 종류에 따라 그대로 두어도 전열관 등 증기발생기 내부 구조물에 손상을 주지 않는 경우도 있으나 볼트 등 금속이 이물질로 존재하는 경우 전열관을 보호하기 위해 이를 제거하여야 한다. 기존 이물질 검사 및 제거 방법은 주로 증기발생기 튜브시트 상부를 대상으로 이루어 졌으며, 그 방법도 내시경, 안내 튜브 등을 이용한 수동 조작에 의존하였다. 그런데 증기발생기 인근은 고 방사선 구역으로 작업자가 장시간 체류함으로 인해 과도한 방사선을 쏘이게 되는 등 문제점이 대두되었고 유량분배판 상부 등은 접근이 불가능하여 이물질 신호가 감지되어도 육안검사가 불가능하였다. 따라서 증기발생기 튜브시트 상부는 물론이고 유량분배판 상부에 있는 이물질도 자동으로 검사하여 제거할 수 있는

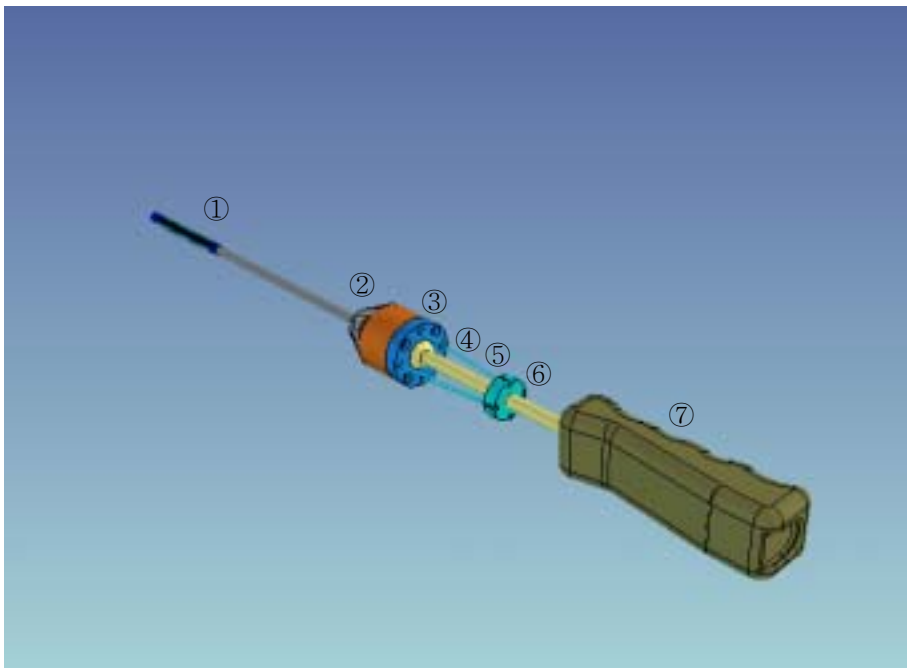


그림12 이물질 제거 공구

원격 자동화 장비의 개발을 2002년 7월에 시작하였다. 현재까지의 개발 상황은 핵심 부품인 이물질 검사할 수 있는 직경 4.5mm 비디오스코프를 선정/구입하고 각종 이물질 검사용 특수 공구를 설계/제작하였다. 그림12에서는 설계/제작한 이물질 제거용 특수 공구를 보여주고 있다. 이 공구는 핸들(7)의 조작으로 공구의 끝 부분(1)이 상하 좌우로 자유롭게 굽혀지도록 한 것으로 전열관에 투입된 공구의 끝 부분(1)이 이물질에 쉽게 접근할 수 있도록 고안된 것이다.

다. 증기발생기 상부 다발 세정 장비

증기발생기 세정 작업은 작업 영역이 주로 튜브시트 상부로 국한된다. 그런데 증기발생기 검사 결과 튜브지지판 상부에도 상당히 많은 양의 슬러지가 침적되고 있음을 확인할 수 있었으며, 심할 경우 튜브지지판과 전열관 사이의 홈이 막혀 2차계통의 냉각수가 원활하게 유동되지 못하는 경우도 발생한다. 이 상태를 방치하면 전체 발전소의 출력이 심하게 변동되는 현상이 발생하기도 하며 심지어는 발전소를 정지시켜야 하는 경우도 발생한다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 2003년 5월부터 증기발생기 상부다발 세정 기술의 개발에 착수하였으며, 1년간의 조사 분석을 거쳐 2004년도에는 장비의 설계/제작을 할 계획으로 있다.

라. 초음파 세정 기술 개발

고압수 분사 방식의 증기발생기 내부 세정 방식에 더불어 증기발생기 내부에 슬러지가 침적되는 현상을 근본적으로 줄일 수 있는 연구도 계획되고 있다. 그 연구의 하나로 초음파를 이용하여 2차계통 냉각수에 캐비테이션이 발생하게 하고 이로 인한 미세한 충격파가 슬러지를 미립화하고, 슬러지가 튜브, 튜브시트, 튜브지지판 등에 부착되지 못하도록 하여 전열관의 열전달 특성을 향상시키고 수명을 연장하기 위한 연구를 계획하고 있다. 이 연구는 앞에서 설명한 고압수 분사 방식의 증기발생기 세정 방식의 단점을 상당 부분 보완할 수 있는 것으로 기대된다. 현재 초음파 세정기를 설계/제작하여 스케일 제거 특성을 연구하는 단계에 있다.

3. 결 론

1999년 고리1호기 증기발생기 슬러지 세정장비 개발로 시작된 증기발생기 분야의 특수 장비 개발 계획은 지난 5년간의 연구개발 과정을 통해 국내 기술 자립 단계에 접어들었다. 그 동안 고리원자력발전소 1,2호기에 사용할 수 있는 KALANS[®]-I 장비의 개발에 이어 울진원자력발전소 3,4호기용 및 영광1,2호기용 세정 장비가 개발 완료 단계에 있다. 기타 증기발생기 이물질 검사 및 제거를 원격 자동화 할 수 있는 장비도 2004년 7월이면 개발이 완료될 예정이다. 이 외에도 지금까지는 세정이 불가능하였던 증기발생기 상부를 세정하기 위한 기술 및 초음파 등 새로운 방식의 증기발생기 세정 방법도 연구 개발 중에 있다.

참고문헌

- [1] S/G Tube 세정장비 기술요건 조사연구, TM.98NP01, 1998, 전력연구원
- [2] CECIL Unit No. for KEPCO Process System Training Program, 1995, Foster-Miller, Inc.