

원자력 발전설비 정비기술 개발 현황

이 글에서는 원전의 노후화 및 출력 증강에 따른 주요 기기의 운영 및 관리에 필수인 정비 기술 및 자동화 시스템 개발 등 정비를 위한 최신의 주요 기술개발 현황에 대해 소개하고자 한다.

최상훈 한전 KPS 기술연구원, 수석연구원
김경섭 한전 KPS 기술연구원, 책임연구원
조홍석 한전 KPS 기술연구원, 책임연구원
김동일 한전 KPS 기술연구원, 선임연구원

e-mail : shchoi2@kps.co.kr
 e-mail : kskim@kps.co.kr
 e-mail : chs@kps.co.kr
 e-mail : pontoon@kps.co.kr

최근 정부에서 우리나라의 원전기술을 새로운 수출산업으로 본격 육성한다는 '원자력발전 수출산업화 전략'의 발표에 의해 원자력발전에 대한 관심이 고조되고 있다.

한전KPS는 화력, 원자력, 수력, 복합, 내연발전소 등 다양한 발전설비와 송변전설비에 대한 정비를 수행하는 세계 유일의 발전설비 종합정비 전문회사이다.

그동안 한전KPS에서는 보다 나은 정비서비스를 위하여 지속적으로 기술을 축적하고 정비 기술개발을 추진해 왔다. 이러한 노력은 국내 원자력발전 평균 이용률이 세계 제1위라는 기록을 달성하는 데 크게 기여를 하는 등 그 기술력을 국내외에서 인정받고 있다.

이 글에서는 원자로, 증기발생기 등 원전 핵심설비 정비를 위한 최신의 주요 정비기술개발 현황에 대해 소개하고자 한다.

개발 기술 내용

원자로 헤드 단순화(SHA¹⁾)기술

이 기술은 핵연료재장전 및 원자로헤드 정비 시 각 부품을 22단계의 절차를 거쳐 분해/조립 하도록 설

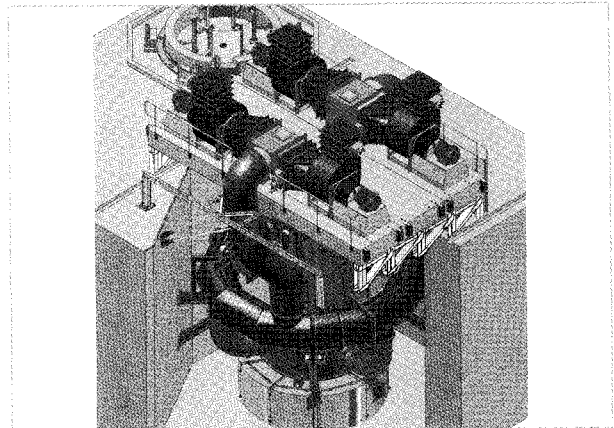


그림 1 SHA 전

치된 복잡한 원자로 헤드의 상부구조물을 5단계로 분해/조립이 가능하도록 단순화하는 기술로서 정비기간 단축, 작업자 방사선 쏘임량 감소, 안전성 향상 등을 목적으로 하고 있다.

원자로 헤드의 상부구조물은 그림 1에서 보는 바와 같이 인양설비, 비래 방호설비, 원자로 제어봉 구동장치냉각설비, 내진지지설비, 케이블 브릿지 등의 구조물이 복잡하게 설치되어 있어 정비 시마다 각 부품을 개별적으로 분해/조립하는 과정을 반복하여야 한다. 이렇게 복잡한 구조물을 그림 2에서 보는 바와 같이 일체

1) Simplified Head Assembly

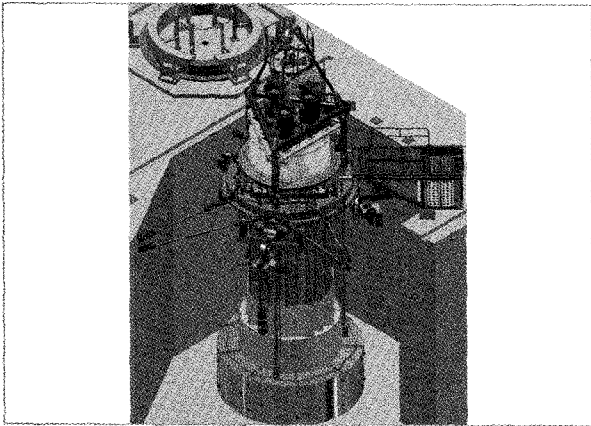


그림 2 SHA 후

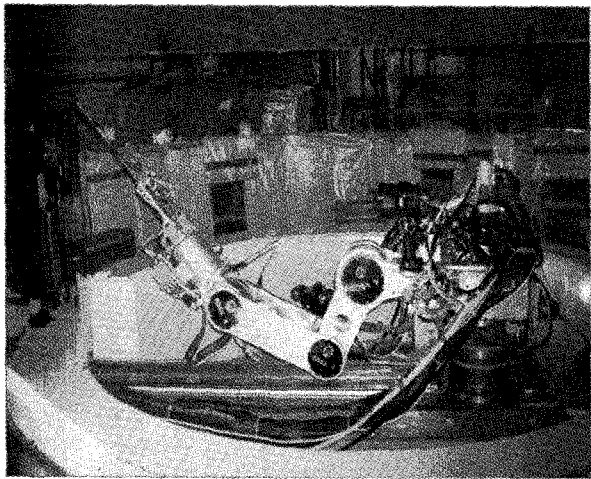


그림 3 ROHIS

형구조물로 단순화하여 분해/조립 과정을 최소화하는 기술을 확보하였다.

이 기술에는 계통설비 설계, 내진/구조/열 등의 복합응력 해석과 각종 엔지니어링 기술 등 종합적인 고도의 기술이 접목되었다.

가동 중인 국내 모든 원전에 적용할 수 있으며 기대효과는 약 48시간 정도의 공기단축, 획기적인 방사선 쏘임선량 저감 및 이에 따른 호기당 연간 20억 정도의 경제적인 이득을 가져다 줄 것으로 판단된다.

원자로 헤드 관통관 검사기술

원자로 헤드에는 제어봉 구동장치를 위한 수십

여 개의 관통관이 용접되어 있다. 이 관통관은 일정한 주기마다 용접부의 건전성 확인을 위한 비파괴 검사를 수행하고 있다. 그러나 원자로 헤드는 고방사화로 인해 작업자가 직접 검사를 수행하기가 곤란하기 때문에 원격 제어에 의한 자동화 시스템을 이용하여야 한다.

원자로 헤드 관통관 검사기술인 ROHIS²⁾는 '원자로 헤드 관통관 용접부의 건전성 검사를 위한 원격 제어 비파괴 검사시스템'이다.

ROHIS는 그림 3에서 보는 바와 같이 매우 정밀하고 초소형인 부품들로 구성된 Robot Arm과 자동 초음파 기술이 접목된 메카트로닉스 기술의 산물이다.

개발 후 2005년부터 국내 원전뿐만 아니라 일본에까지도 기술을 수출한 매우 우수한 성능을 갖춘 기술로 평가받고 있다.

국내·외 원전에서 사용되고 있으며 현재까지 약 100억 원 이상의 매출을 기록하고 있다.

원자로 스테드 홀 원격 자동화 클리닝 시스템

원자로로는 원자로 용기와 원자로 헤드가 수십 개의 스테드 볼트로 체결·고정되어 있으며, 원자로의 안전성은 이들 스테드 볼트 체결의 건전성에 의해 일차적으로 유지되고 있다. 따라서 매 주기마다 스테드와 더불어 스테드 홀에 대해서도 엄격한 검사와 적합한 품질 유지는 필수적이다. 이 때문에 스테드 홀의 나사산 건전성을 확보하기 위해 반드시 깨끗하게 청소되고 세밀한 검사를 수행하여야 한다. 그러나 원자로로는 고선량을 띄고 있어 청소와 검사를 수행하기가 매우 곤란하다.

원자로 스테드 홀 원격 자동화 클리닝 시스템인 그림 4의 SCAI³⁾는 '원자로 용기의 플랜지 면에 가공된 스테드 홀 나사산의 클리닝 작업, 육안검사 및 건전성 이력 관리를 원격 제어에 의해 수행하는 원격 자동화시스템'이다.

이 시스템은 세척액과 브러시 등을 이용한 클리닝장치, 고해상도 소형 카메라를 이용한 육안검사 및 검사데이터 저장 등을 자동으로 수행할 수 있는 메카트로닉스 기술의 집약체이다.

2) Remotely Operated Head Inspection System
3) Stud bolt Cleaning and Inspection system

또한 자동으로 원격 제어되므로 방사선 조임선량을 획기적으로 저감할 수 있을 뿐만 아니라 신뢰도 높은 클리닝 효과 및 검사를 기대할 수 있다. 현재 울진 3,4,5,6호기 및 영광 5,6호기에 보급되어 사용되고 있으며 해외 원전으로 판매를 추진하고 있다.

원자로 하부관통관 검사 기술

원자로 하부 관통관은 원자로 노내 계측 라인을 외부와 연결하기 위한 관통부로서 원자로 용기와 용접되어 있다. 이 관통관도 헤드 관통관과 마찬가지로 일정한 주기마다 용접부의 건전성을 확인하기 위해 비파괴 검사를 수행하여야 한다.

원자로 하부관통관 검사 시스템인 BMI⁴⁾는 '원자로 하부 관통관 용접부의 건전성 검사를 위한 원격 제어 비파괴 검사 장치'이다.

그림 5에서 보는 바와 같이 매우 정밀하고 초소형인 부품들로 구성된 Robot Arm과 자동초음파 기술이 접목된 메카트로닉스 기술의 산물이다.

AgPd 합금의 고온용볼트 윤활코팅기술

주기적으로 분해/조립하는 고온에서 사용하는 볼트의 경우, 잦은 분해와 조립 또는 다른 원인에 의해 마모, Galling과 같은 손상이 발생할 수 있다. 볼트 손상의 주요 요인은 유사한 화학 조성 및 기계적 물성, 결합부의 높은 하중, 고온(원자력의 경우 약 325℃), 접촉면의 단단한 입자, 정체시간의 증가, 금속학적으로 깨끗한 표면, 반복 토크체결 등이 있다.

볼트 손상을 줄이기 위하여 서로 접촉하는 면 사이의 금속학적인 차이점을 갖는 면이 있어야 하고, 움직이는 접촉면에서 단단한 입자가 없어야 한다.

LUCOS⁵⁾는 'PVD(Physical Vapour Deposition)의 마그네트론 스퍼터링법(Magnetron Sputtering Method)을 이용하여 윤활층으로 Ag/Pd 박막을 증착하는 시스템(그림 6)'이다.

이 기술은 윤활성 및 내부식성이 우수한 윤활 소재를 볼트에 증착하여 볼트 손상을 감소시키고 자체 윤활기능을 갖고 윤활제의 반복사용을 방지하여 고착

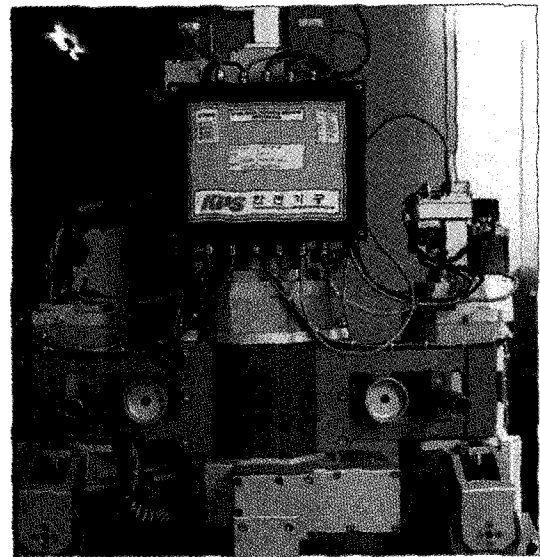


그림 4 SCAI

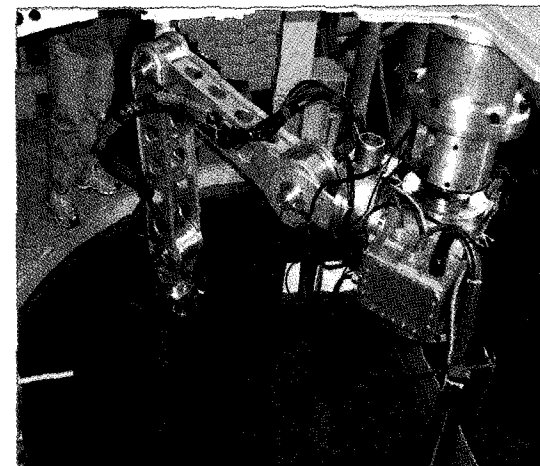


그림 5 BMI 검사시스템

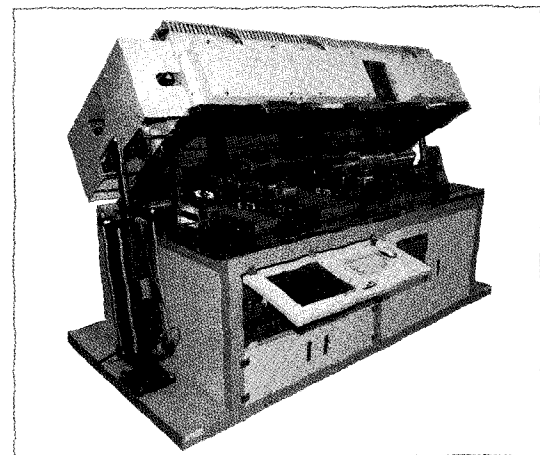


그림 6 고온용 볼트 윤활코팅 시스템

4) Bottom Mount Inspection system

5) Lubricating Coating System

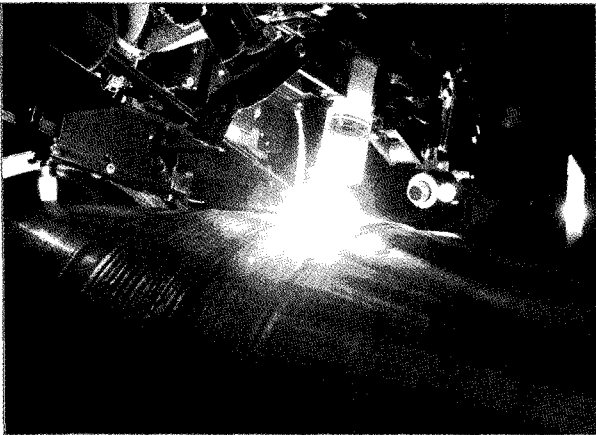


그림 7 Weld Overlay 정비기술

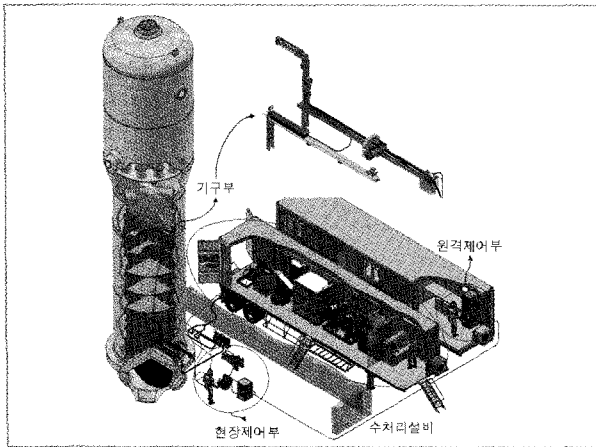


그림 8 KULAN

방지 및 볼트의 건전성을 확보하는 표면처리기술로서 원전의 원자로 및 증기발생기 스테드 볼트, 터빈 볼트, 펌프 및 밸브 스테드 볼트 등 여러 분야의 설비에 적용해 분해와 조립이 용이하고 Galling 손상을 현저히 감소시켜 기기수명을 연장하고 운전 및 정비비용을 절감할 수 있다. 현재 월성 3,4호기 증기발생기 2차측 맨웨이 스테드 볼트에 현장 적용하였다.

이종금속 용접부 정비기술

원전 1차 계통의 탄소강과 스테인리스강 이종금속(dissimilar metal)의 접합에 사용된 고니켈합금(Alloy 600/82/182) 용접부의 열화손상을 정비 및 예방하기 위한 기술로 단관교체(spool piece replacement), 구조적 용접 덧씌움(structural weld

overlay, weld inlay), 기계적 가압에 의한 잔류응력개선(mechanical stress improvement process), 레이저 피닝(laser peening) 등의 기술이 있다.

이 중에서 단관교체기술과 구조적 용접덧씌움기술은 이미 개발 완료 하였으며, 특히 구조적 용접덧씌움기술은 국내 최초로 고리 1호기 가압기 노즐에 적용하여 지난 1월에 성공적으로 공사를 완료한 바 있다. 그동안의 기술개발 및 현장적용 경험을 활용하여 향후에도 지속적으로 다양한 이종금속 용접부 정비기술개발을 적극 추진할 예정이다.(그림 7)

고압수를 이용한 증기발생기 2차측 상부다발 세정 기술

증기발생기는 수천에서 수만 개의 전열관을 경계로 내부로는 원자로를 거쳐 나오는 뜨거운 물이 흐르고 외부에는 증기로 변환되는 물이 흐르면서 전열관 벽을 통해 열교환이 이루어져 증기를 발생시킨다. 여기서 전열관은 전열관 벽을 경계로 내부에는 방사능 물질이 외부에는 비방사능 물질이 흐르고 있어 열교환의 본래의 목적 외에 방사능 물질의 격리기능을 한다. 따라서 전열관의 손상은 방사능 누설을 의미하기 때문에 어떠한 경우에도라도 전열관 손상을 방지하여야 한다.

가동 연수가 증가함에 따라 증기발생기 전열관 상부 다발의 경우 바닥으로부터 약 7m 높이까지의 부식 생성물 침적이 발생하므로 주기적인 세정이 필요하다.

KULAN⁶⁾은 '증기발생기 내부에 설치하여 상부다발로 접근하고 고압수를 분사하여 세정하는 원격 제어 세정시스템'이다. 그림 8에서 보는 바와 같이 증기발생기의 내부로 설치되어 상부다발의 전열관 틈새에 침적된 부식생성물을 세정할 수 있는 시스템이다. 시스템 구성은 헤드와 헤드를 이송하는 실린더로 구성된 기구부, 고압수에 의해 세정된 부식생성물을 흡입하여 부식생성물과 세정수로 여과하여 세정수를 재활용 할 수 있도록 하는 수처리설비, 원격 및 현장에서 기구부와 수처리설비를 제어하는 제어설비 등으로 구성되어 있다.

KULAN은 증기발생기 상부다발로부터 전열관 손상의 원인이 되고 있는 부식생성물을 효율적으로 제

6) KULAN : KPS Upper-bundle Lancing System

거함으로써 증기발생기의 건전성과 원전의 안전성 향상에 크게 기여할 것으로 기대된다.

이 시스템은 웨스팅하우스 F형 증기발생기가 있는 고리 2,3,4호기 및 영광 1,2호기에 적용 가능하며 영광 1,2호기에서 성공적으로 수행하였다. 또한 해외 원전에서의 사업화를 위해 해외기업과 기술제휴를 체결하여 기술수출을 추진하고 있다.

OPR1000형 증기발생기 2차측 Tube Sheet 상부다발 원격육안 검사기술

증기발생기 2차측의 Tube Sheet는 전열관 다발이 고정되어 있는 가장 하부에 위치한 바닥을 의미한다. 이 바닥에는 다양한 경로를 통해 이물질 및 부식생성물 등이 끊임없이 유입되고 전열관 틈새에 침적되어 전열관을 손상시킬 수 있다. 이러한 문제를 해소하기 위하여 주기적으로 Tube Sheet 상부 전열관다발 틈새에 대한 육안검사를 수행해야 하나 OPR1000형 증기발생기의 경우 전열관 틈새가 너무 협소해 기존의 육안검사 장비로는 검사가 불가능하다.

KIIS⁷⁾는 ‘OPR1000형 증기발생기 2차측 Tube Sheet 상부 바닥의 전열관 틈새 내 이물질 및 부식생성물의 상태를 확인하기 위한 육안검사와 이물질을 제거할 수 있는 원격 제어 검사시스템’이다.

그림 9에서 보는 바와 같이 소형로봇은 증기발생기 내부의 벽면에 설치되고 원격 제어에 의해 벽면을 타고 주행한다. 초소형 CCD 카메라가 장착된 검사용 프로브가 전열관 다발 틈새로 삽입되어 육안검사가 이루어지고 이물질이 발견되었을 경우 제거할 수 있는 원격 컴퓨터 제어기반의 소형 로봇이다.

이 시스템은 증기발생기 전열관 틈새가 좁은 영광 3,4,5,6, 울진 3,4,5,6 및 신고리 1,2호기에 적용할 수 있다.

주기적인 육안검사 및 이물질 제거를 통해 증기발생기의 건전성 확보에 크게 기여하고 해외 기술 수출이 유망할 것으로 기대한다.

W-F형 증기발생기 Tube Sheet 상부원격 육안 검사기술

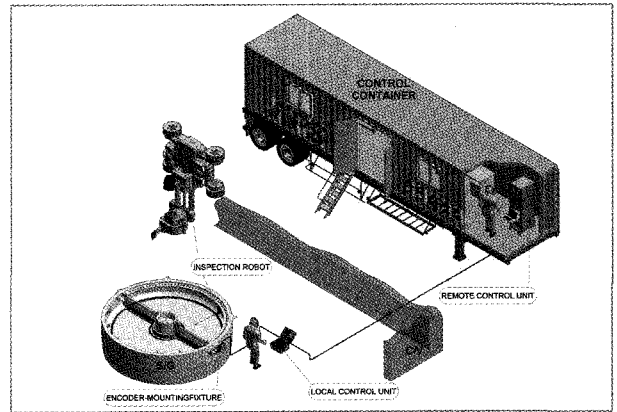


그림 9 KIIS

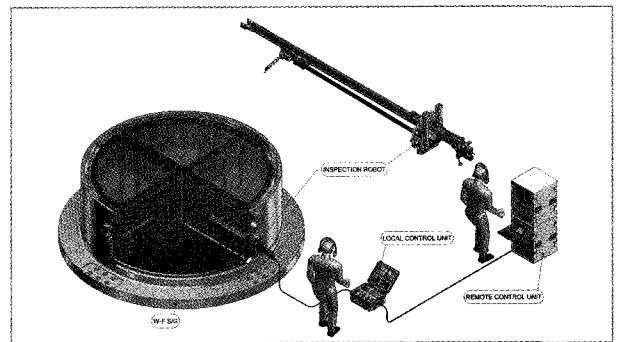


그림 10 KTIS

현재의 W(웨스팅하우스)-F형 증기발생기 2차측 육안검사 및 이물질 제거기술은 고방사선 구역임에도 불구하고 산업용 내시경 장치를 이용하여 작업자가 수작업으로 수행함에 따라 작업자의 방사선 쯤임선량이 높다.

KTIS⁸⁾는 ‘W-F형 증기발생기 관상 상부의 전열관 다발 내부의 전열관 틈새에 대한 원격 육안검사 및 이물질을 제거하는 시스템’이다.

그림 10에서 보는 바와 같이 육안검사 및 이물질 제거장치가 내장된 헤드를 증기발생기 내외부로 이송시켜주는 가이드레일에 설치하여 원격 제어로 헤드를 구동시키고 전열관 틈새로 내시경 장치를 삽입 육안검사를 수행하고 이물질이 발견될 경우 수동 조작에 의해 이물질을 제거할 수 있다.

기존의 검사 방법은 산업용 내시경 카메라를 사용하므로 관상상부에 대해서만 육안검사를 수행할 수 있었으나, 이 시스템을 적용할 경우 관상상부뿐만 아니라 그동안 사각지대로 알려져 있던 확산판 영역까지 검사가 가능하다.

7) KIIS : KPS In-bundle Inspection System

8) KTIS : KPS Tubesheet Inspection System