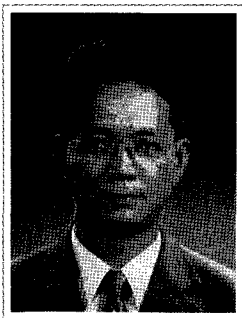


압력 기기 용접부 검사 자동화 시스템

원자로 자동 탐상 시스템 압력 배관 자동 탐상기

김재희

한국원자력연구소 신형원자로기술개발단
종합안전평가팀 책임연구원



관은 그 기기 안에 핵반응 물질이 들어 있다는 점을 고려해 볼 때 그 기기의 건전성 확보는 매우 중요한 일 중의 하나이다.

본고에서는 원자력발전소의 원자로 압력 용기를 비롯하여 압력 배관의 용접부에 대한 결함 탐지에 사용되는 자동 초음파 탐상 기기에 관하여 서술하고자 한다.

주기적으로 엄밀하게 검사해야 한다.

현재까지 가장 보편적인 방법은 원자로 용기에 물을 채운 상태에서 초음파 탐촉자로 용접 부위를 스캐닝하면서 반향된 신호를 판독하여 결함의 유무를 판정하는 것이다.

그런데 작업자가 이 용기 안으로 잠수하여 수중 작업을 수행할 수가 없으므로 초음파 탐촉자를 장착한 기계 장치를 진입시켜 검사를 자동으로 수행한다.

또한 압력 배관의 경우도 작업자의 방사선 피폭을 저감하기 위하여 압력 배관 위를 타고 다니는 자동 스캐닝 장치를 활용하여 배관 용접부에 대한 결함 탐지를 자동으로 수행한다.

압력 기기 검사 자동화

원 자력발전소는 우라늄 핵 연료를 태워서 물을 끓여 증기를 발생시키고 이 고압 증기로 터빈을 돌려 전기를 생산하는데, 이와 같은 일련의 과정은 고압 용기나 배관을 사용하여 가능하게 된다.

이와 같은 고압 용기 및 고압 배

원자로 압력 용기는 일반적으로 환형 구조물과 노즐 파이프들을 서로 용접하여 만들어진다.

그런데 이 용접 부위는 상대적으로 취약하기 때문에 용기의 건전성을 보증하기 위해서는 이 용접 부위에 대하여 결함이 생성되었는지를



국내외 기술 동향

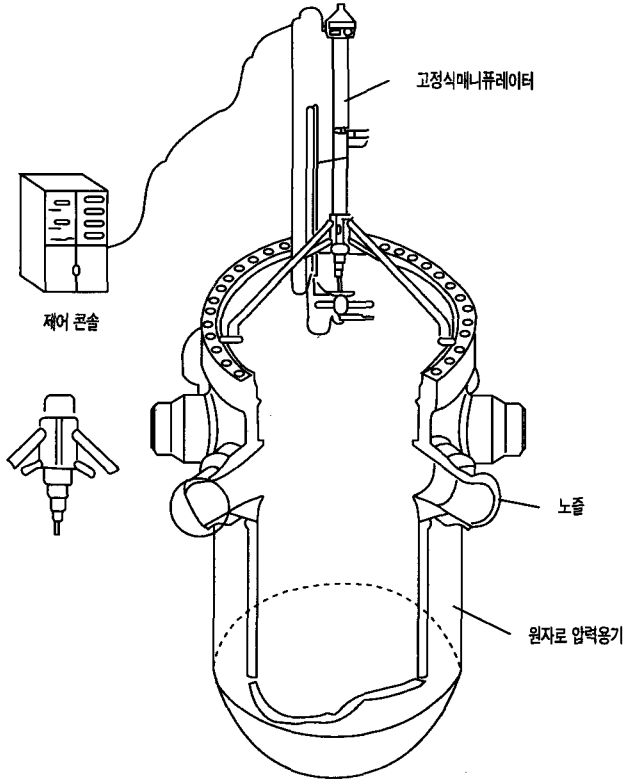
70년대부터 미국을 위시한 여러 선진국에서는 각기 독자적인 방법으로 검사 장치를 개발하여 원자로 압력 용기를 검사해왔다.

그 검사 장치들의 일반적인 특성은 원자로 용기가 원통형이라는 것을 감안하여 원자로 용기 중심에 전봇대 같은 큰 기둥을 세우고 그 기둥 안에 자동차의 안테나처럼 직선하향 운동을 하는 매니퓰레이터를 장착하고 그 하단에 원자로 용기의 벽면까지 뺄 수 있는 팔을 부착하였다. 그리고 이 팔 끝에 초음파 탐촉자들을 장착하여 용접 부위를 차례 차례 스캐닝하면서 검사를 수행하는 원리이다. <그림 1>은 이같은 방식의 대표적인 경우를 보여주고 있다.

이와 같은 원리로 선진 각국의 여러 회사에서는 매니퓰레이터의 설치와 운동 방식은 약간씩 다르지만 매니퓰레이터가 원자로 용기 상단에 고정되었다는 점에서 고정식 검사 장비로 분류한다.

미국의 SwSI, Westinghouse, 독일의 Kraftwert Union, 프랑스의 Intercontrol 및 스웨덴의 TRC 등이 대표적인 업체이다.

한국원자력연구소에서도 역시 원자로 검사를 위해 이러한 장비를 도입하여 85년부터 사용해왔다. 그 당시에는 원자로 압력 용기를 검사



<그림 1> 고정식 매니퓰레이터 방식의 원자로 검사 장비

하는 데 이러한 형태의 장비가 최선이였다.

하지만 이 장비는 크기가 5미터가 넘고 무게가 10톤이 넘어 원자력발전소 현장으로 이 장비를 운반하는 데 많은 노력이 들고 또 매니퓰레이터를 발전소 격납 용기 내부로 옮겨서 원자로 위에까지 운반하는데 현장의 polar crane을 계속적으로 사용해야만 한다.

한편 검사 장비의 운송·조립·설치 및 해체에 많은 시간이 소요되

고 검사를 수행하는 시간 또한 많이 걸려 검사를 위한 발전소의 정지 기간이 많이 소요된다.

이러한 문제점을 개선하기 위하여 최근 일본의 미쓰비시 중공업과 미국의 FTI사에서는 로봇 분야의 최신 기술을 응용하여 고성능의 진보된 수중 로봇 검사 장비를 개발하고 있으며, 그 일부는 이미 실용화되어 현장에 적용되고 있다.

또한 국내에서는 한국원자력연구소에서 그간의 원자로 검사 경험과

로봇 분야의 최신 기술을 기반으로 레이저 유도 방식의 자석바퀴식 소형 로봇 검사 장비를 개발하였다.

이 검사 장비는 소형 경량의 수중 이동 로봇 방식으로 운반 설치 및 해체가 간편하고, 두 대의 로봇을 원자로 내부에 동시에 사용하는 방법으로 전체 검사 시간을 획기적으로 줄일 수 있는 장점이 있다.

본 장에서는 한국원자력연구소에서 개발하여 현재 실용화중인 소형 수중 이동형 원자로 검사 시스템(RISYS : Reactor Inspection SYStem)에 관하여 소개하고자 한다.

가압 경수형 원자로는 <그림 2>와 같이 원통형의 모양으로 되어 있는데 Upper shell에 inlet 노즐과 outlet 노즐들이 연결되어 있다.

용접부위는 원주상의 접합면, 노즐과 upper shell의 접합면, 그리고 플랜지와 upper shell의 접합면 등이 있다.

원자로 용접부위를 검사할 때는 검사를 효과적으로 수행하기 위해 원자로 헤드와 내부 구조물은 다른 장소로 옮겨진다.

원자로는 검사중 방사는 노출을 최소화 하기 위해 canal 상부까지 물로 채워져 있어서 검사 장비는 수중에서 동작할 수 있어야 한다.

RISYS는 레이저 유도 방식의 수중 이동 로봇으로, 자석 바퀴를 장착하여 원자로 벽면에 부착된 채 원

<표 1> 원자로 압력 용기 검사 장비 비교

형식	고 정 식						이동 로봇식		
	SwRI	Westing-house	Inter-control	KWU	ABB-TRC	Tecnom SA	KAERI	Mitsubishi	Framatome Technology Inc
제작사									
제작 국가	U.S.A	U.S.A	France	Germany	Sweden	Spain	Korea	Japan	France
기계 구동 장치	PaR Program med and Remote	RV ISI Tool Reactor Vessel	MIS In-Service Inspection Machines	ZMM4	PWR Mast Manipulator	PaR Program med and Remote	RISYS Reactor Inspection System	A-UT Advanced UT Machine	URSULA
신호 수집 장치	EDAS	ISI Tool UDRPS-2	RTEA O/S	DEA 5	I/MC-UK	SUMIAD	Tomo-Scan/SV	EDAS	ACCU-Sonex
검사 방법	접촉법	접촉법	접속수치법 (gamma graphy)	접촉법	접촉법	접촉법	접촉법	접촉법	접촉법

하는 검사 부위로 이동하면서 검사를 수행하는데, 원자로 검사 로봇(RIROB : Reactor Inspection Robot), 레이저 위치 지시기(LAPOS : Laser Pointer), 그리고 원격 통합 제어 시스템(MCS : Main Control Station) 등으로 구성되어 있다.

1. 원자로 검사 로봇(RIROB)

RIROB(Reactor Inspection ROBot)은 수중형 이동 로봇인데 공기 중에서 무게가 약 50kg 정도 이고 수중에서는 부력재(float)을 장착하여 자신의 무게가 소멸되도록 개발되었다.

대부분의 가압 경수형 원자로 압

력 용기는 탄소강으로 구성되어 있고 오스케나이트계 스테인리스강으로 내부가 피복되어 있다.

원자로의 내부 벽을 타고 운동하기 위해 검사 로봇은 네 개의 자석 바퀴를 가지고 있다. 자석바퀴는 환형의 네오다이미움 자석 양면에 순철로 된 원판을 접착하여 원자로 내부수직 벽면에 최대 접착력을 가지게 한다. 또 합성 수지로 바퀴를 둘러싸서 수직 변덕에서의 미끄럼을 방지한다.

RIROB이 가지고 있는 네 개의 바퀴 중 두 개는 캐스터 형태이고 DC 서보 모터로 구동되는 다른 두 개의 바퀴는 로봇 구동용인데 이를 이용하여 로봇은 원자로 내부 수직

벽을 어느 방향이든 자유롭게 이동할 수 있다.

로봇의 전후에 설치된 캐스터 형태의 바퀴는 <그림 3>과 같이 로봇 본체에 연결된 평행사변형 링크에 부착되어 원통형의 벽면에서도 로봇을 항상 벽면과 평행하도록 만들어 준다.

검사 로봇에는 가볍고 긴 매니퓰레이터가 설치되어 있고 그 끝에 초음파 탐촉자가 부착되어 있다.

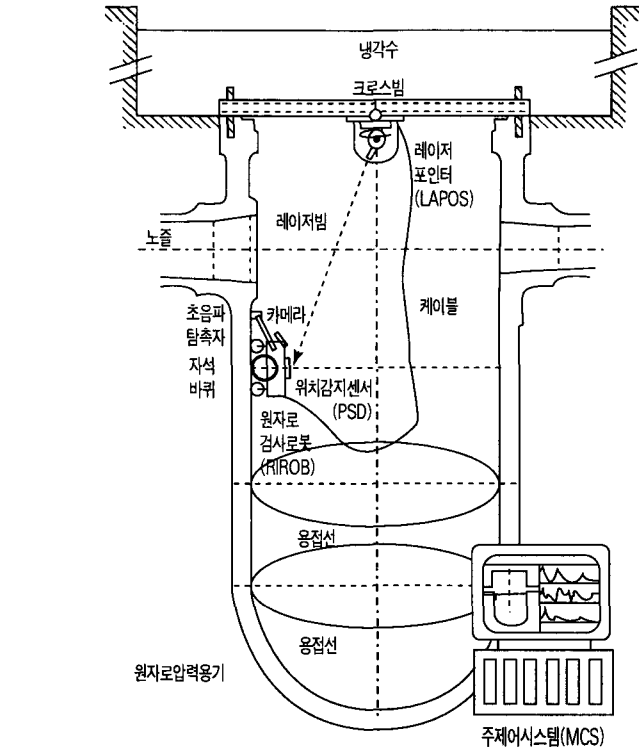
매니퓰레이터는 세 개의 자유도를 가지는데, 직선 이동(translation), 회전(rotation), 그리고 4단 연속 직선 이동(translation)이 그것이다.

매니퓰레이터는 4단 연속 직선 이동 링크를 이용하여 120cm 거리까지 닿을 수 있다. 소형 로봇에 이와 같은 긴 매니퓰레이터를 부착하려면 가볍고 크기가 작아야 하는 조건이 따르기 때문에 기구적으로 잘 설계되어야 한다.

로봇의 전방에는 카메라와 램프가 부착되어 있는데 이 카메라에 입력되는 영상 신호는 원격 통합 제어 시스템에 전송되어 나타내진다.

검사 로봇은 또한 경사계를 가지고 있어 이동 로봇의 경사를 측정할 수 있고 이를 이용하여 로봇의 자세를 제어한다. 수압의 측정과 로봇의 현재 고도를 계산하는 데 사용하기 위해 수압 센서가 장착되어 있다.

2. 레이저 위치 지시기(LASPO)



<그림 2> RISYS의 구성도

로봇은 레이저 위치 지시기에 의해 유도되는데, 이 지시기는 원자로 상단 플랜지를 가로지르는 크로스빔(Cross Beam)의 중앙에 장착되어 있다.

이 장치는 항상 로봇이 다음에 가야 할 위치를 향해 레이저 빔을 내보내도록 되어 있는데 로봇은 등에 부착된 수광 센서(PSD : Position Sensitive Detector)를 이용해 PSD의 중심과 현재의 레이저 빔 위치와의 편차를 찾아내어 이를 영

만들어졌다.

이 레이저 위치 지시기는 반도체 레이저(diode laser)가 부착된 팬틀트(pan-tilt) 형태의 장치로서 서보 모터에 의해 0.01deg/step 이하의 해상도로 정밀하게 제어된다.

레이저 빔을 내보내 로봇을 다음 위치로 유도하는 이 장치는 레이저 빔의 회절 방지와 방수를 위해 반구형의 플라스틱 캡으로 싸여져 있다.

3. 원격 통합 제어 시스템(MCS)

원격 통합 제어 시스템은 검사용 로봇, 레이저 위치 지시기, 그리고 초음파 신호 수집 장비를 원격에서 종합 관리·제어하는 장비로서 IBC-PC 486급에 구현 되었다.

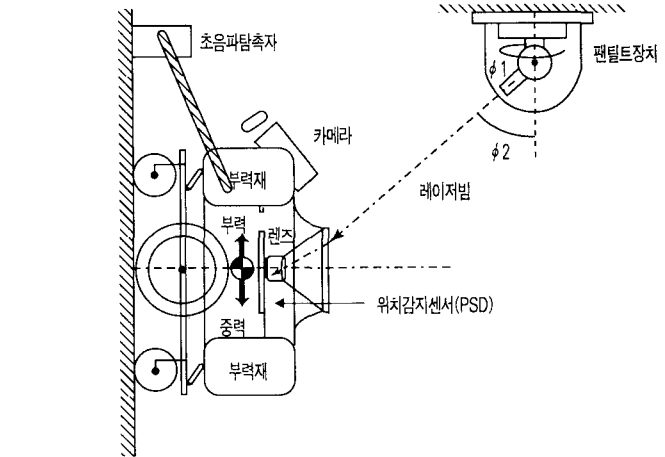
여기에는 현재 우리 나라에 있는 모든 원자로의 기하학적 정보가 들어 있어 이를 이용하여 3차원 그래픽 시뮬레이션과 검사 계획 수립을 할 수 있게 되어 있다.

검사중에는 RIROB의 검사 경로와 매니퓰레이터의 동작 명령들을 생성해서 전달해 주며 동시에 로봇의 현재 위치와 자세를 그래픽으로 나타내고, 또 로봇의 전방에 설치된 카메라로 입력되는 영상 신호를 보여줄 수 있다. 검사가 끝난 후에는 검사한 자료를 이용하여 검사 보고서를 작성해 주는 기능도 가지고 있다.

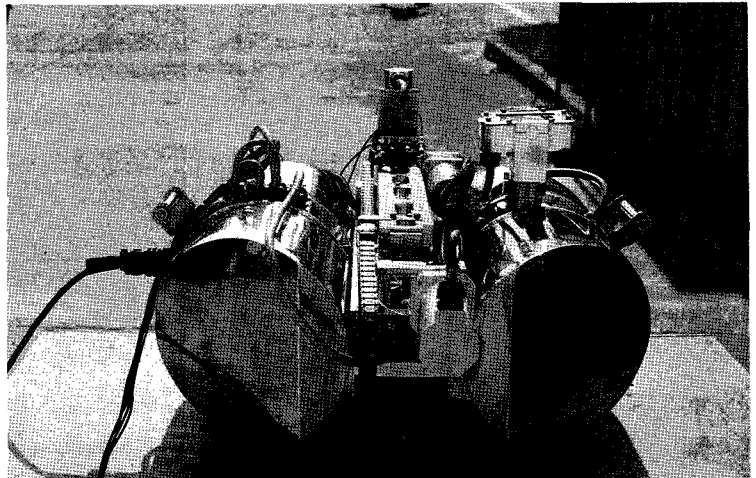
MCS에는 또한 컴퓨터 제어가 실패할 경우를 대비해서 수동 모드의 운전도 지원할 수 있다. 초음파 신호 수집 장비는 초음파 탐촉자를 구동하여 반사된 신호를 수집하고 표시하며 저장하는 기능을 가진다.

4. 레이저 유도 제어 및 성능 시험

총래의 고정식 매니퓰레이터 방식의 원자로 검사장비는 원하는 검사 부위에 탐촉자를 위치시키는 것이 좌표 연산에 의해서 큰 어려움없이 가능하다.



〈그림 3〉 레이저 유도 방식의 수중 이동 로봇(RIROB)



수중 탐상 로봇(RIROB)의 외관

그러나 이동 로봇을 사용할 경우 이 로봇의 위치를 정확히 제어하는 것은 핵심적인 과업 중의 하나가 된다.

RISYS는 원자로 플랜지 상단에 Cross Beam을 설치하고 그 중앙

에 레이저 포인터를 장착한 상태에서 이 레이저 빔의 주사 방향을 기준으로 모든 좌표 연산이 이루어진다.

레이저 포인터로부터 발사된 레이저 빔을 인식하는 레이저 수광 센

서(PSD)는 RIROB의 본체에 장착되어 있다.

레이저 빔이 <그림 3>에서 보는 바와 같이 PSD 표면의 한 점에 입사되면 로봇은 PSD의 중심에서부터 입사점까지의 편향(Deviation)을 계산해 낸다. 그리하여 입사한 레이저의 위치가 항상 PSD의 중앙에 오도록 좌우 바퀴를 구동하여 로봇을 움직인다.

이와 같은 원리로 레이저 유도 제어 기능을 완비하고 주변의 모든 기능을 완성한 후 종합적인 로봇의 경로 추종 시험을 수행하는데 이 성능 시험에 관하여 소개하기로 한다. 원자로 이용 내에서 수중 실험을 수행하기 위하여는 여러 가지 부대 설비가 필요하다. 우선 원자로 용기의 모형이 있어야 하고 이 모형에 검사 장비를 운반할 수 있는 크레인설비, 그리고 모든 장비를 조작하고 운전할 수 있는 콘트롤 하우스를 실제 발전소 현장과 같이 갖추어야 한다.

실험 목표는 위치 정확도 및 위치 반복도가 정해진 검사 요건을 만족하는가를 평가하고 내구성을 시험하는 것이다.

본 시스템의 최종 장치인 초음파 탐촉자의 위치 정밀도는 3mm 이내를 만족하는 것을 목표로 하고 있다.

이 최종 위치는 레이저 위치지시기의 정확도, 검사 로봇의 정확도, 로봇에 탑재된 매니퓰레이터의 정

확도가 누적된 결과로 나타난다.

레이저 팬틸트 장치의 회전 각도는 미리 결정된 로봇의 경로에 의해 계산된다.

레이저 팬틸트 장치가 움직이기 시작하면 RIROB은 전절에서 설명된 제어 법칙으로 결정된 동작 신호들에 의해 움직인다.

장기간에 걸친 성능 시험의 결과로 RISYS는 검사에 필요한 핵심 기능을 갖추게 되었다. 이제는 이 시스템의 실용화를 위하여 추가적인 개발을 계속하고 있다.

압력 배관 자동 탐상기(PIROT) 개발

한국원자력연구소는 원자력발전소 압력 배관을 비롯한 파이프 형태의 다양한 배관의 용접부에 대한 결함을 초음파를 이용하여 자동으로 탐지할 수 있는 소형 검사 장치를 개발하고 있다.

파이프라인 자동 스캐닝 장치는 초음파 탐상 검사의 자동화 및 검사 결과의 신뢰성 향상에 필수적인 것으로서, 파이프를 타고 다니면서 검사할 위치로 자유로이 이동하는 파이프 스캐닝 로봇과 초음파 탐촉자로부터 수집된 신호를 처리하여 결함을 판정케 하는 신호 처리기로 구성되어 있다.

파이프 스캐닝 로봇을 자석바퀴를 이용하여 파이프의 표면에 붙어

서 이동하는데, 초음파 탐촉자를 움직이는 2축의 매니퓰레이터가 부착되어 있으며 자유 곡선 센싱 및 실시간 추종 제어 기능을 갖추고 있다.

초음파 신호 처리기는 그 내부에 초음파 발생 장치 및 신호 변환기 등의 하드웨어를 내장하고 이를 동작시킬 수 있는 소프트웨어로 구성되어 있다.

이 시스템은 배관 용접부를 자동으로 검사할 수 있도록 컴퓨터 제어 방식으로 운용되는데, 구동부의 자동 제어 프로그램과 초음파 송수신 모듈의 처리 및 운영을 위한 프로그램이 통합되어 있다.

구미 선진국에서는 일찍이 초음파 검사 자동화하여 이 초음파 검사 영역을 넓혀왔다. 이러한 초음파 검사의 자동화는 검사 결과를 객관적으로 나타내기 때문에 검사의 신뢰성을 향상시킬 뿐만 아니라 전산화와 더불어 결과의 보존성을 높이는 상황에 이르렀다.

이러한 자동 검사 장비는 영국·독일·미국·일본 등에서 매우 활성화되어 있으며, 최근 일본의 비파괴 검사 업체들은 이러한 자동 검사를 위한 자주식 로봇을 매우 활발하게 개발하고 있으며, 또한 여러 가지 간단한 자동 주사 장치를 활용한 검사 장치 개발을 시도하고 이를 보급하고 있는 실정이다.

외국의 대학과 연구 기관에서는

초음파 신호를 신경회로망에 적용하여 결함의 종류 및 크기 위치를 판정하는 소프트웨어 개발에 착수하여 초음파 검사 장비가 스스로 결함의 종류·크기·형태, 그리고 위치 등을 스스로 판정하는 시스템을 개발하기 위한 연구가 진행중에 있다.

현재 국내에서는 잦은 안전 사고의 발생으로 인하여 정부에서도 국가적 시설 안전의 차원에서 원자력 발전소 및 화학 플랜트를 비롯한 위험 시설에 대한 안전 검사를 법적으로 강화하고 있는 검사 장비의 수요는 날로 증가하고 있으나, 국산 기술에 의한 제품이 전무하여 평균 30만 달러 정도 하는 초음파 검사 시스템을 전량 외국 기업에 수입 의존하고 있다.

이로 말미암아 선진국에서는 해마다 장비의 성능을 개선하여 가격을 올려 받는 실정이라서 기술 종속이 영원히 반복되고 있으며, 장비의 고장시 이를 수리하기 위하여 해외로 반송하여 수리 기간 동안 검사 용역에 차질을 초래하고 있다.

최근(99년 7월 12일) 일본 후쿠이(福井)현 쓰루가(敦賀)시에 있는 쓰루가 원자력발전소 2호기에서 방사능을 띤 냉각수가 60톤 정도 유출되었는데 냉각수가 유출된 것은 체적 제어 계통의 압력 배관이었다.

본 연구에서 개발된 파이프라인 자동 스캐닝 장치는 이와 같은 압력 배관의 안전성 검사에 직접 활용되



올진 4호기에서 수중 초음파 탐상중인 RIROB

는 것으로서, 국내의 원전에 투입될 경우 국내 원전 안전성에 일층 기여하게 될 것이다.

한국원자력연구소는 앞으로 산업체와 공동으로 원자력발전소의 압력 배관과 석유 운송 파이프와 같은 산업체 구조물의 용접부를 자동으로 검사하는데 이 시스템을 실용화할 계획이다.

맺음말

본고에서는 최근 국내외 여러 기관에서 개발중이거나 개발 완료되어 사용되는 원자로 압력 용기 검사 자동화 시스템에 관하여 소개하였다.

비록 미국을 위시한 구미 선진국들이 원자력산업의 침체로 인하여 타산업에 비하여 신기술 투자가 미미한 실정임에도 불구하고, 원전의

운영 효율을 증진시키기 위한 일련의 노력은 꾸준히 계속되고 있다.

과거 고정식 매니플레이터 방식을 탈피하고 장비의 운송 조립 해체 시간 단축뿐 아니라 검사 기간 단축을 통한 경제적 이득 효과를 가능케 하는 수중 이동형 검사 장비의 개발은 기술 발전의 자연스런 귀결이며 이러한 추세는 앞으로도 계속될 것으로 판단된다.

우리는 국내의 기술 동향을 적시에 파악하고 이에 대한 현명한 대처를 견지해야 국제 경쟁력 있는 원전 운영을 도모할 수 있을 것으로 사료된다.

아울러 기술 종속의 악순환의 고리를 차단하기 위하여 전략 부분에 대하여 합리적인 연구 개발과 투자를 게을리해서는 안될 것으로 생각된다. ☞