

가압경수로 원자로 압력용기 자동초음파검사

박문호, 김재희
한국원자력연구소

Mechanized Ultrasonic Testing for PWR Reactor Pressure Vessel

Moon Ho Park and Jae Hee Kim
Korea Atomic Energy Research Institute, Taejon 305-600

요 약 가압경수로 원자로 압력용기 비파괴검사를 위해 지금까지 계속 사용하여 온 기존의 고정식 매니플레이터 방식의 원자로 자동초음파검사장비는 최근 급속도로 발전한 전자산업 및 컴퓨터 등으로 인해 기본 설계 개념부터 달리하는 소형·경량화된 수중 이동형 원자로 검사 장비 형태로 바뀌어 가고 있다. 따라서, 본 해설에서는 현재까지 국내의 알려진 각종 소형 원자로 압력용기 자동초음파검사장비 및 고정식 매니플레이터 방식의 원자로 압력용기 자동초음파검사장비를 분석하여 기술하였으며, 현재 국내 원자로 압력용기 용접부검사를 위해 개발중인 RYSIS 장비 및 검사 기술 수준을 진단해보고 앞으로의 방향을 제시하였다.

1. 서 론

국내 원자력발전소는 현재 가동중이거나 건설중인 것이 20여기에 이르고 있으며, 앞으로도 계속 건설이 이루어지는 시점에서 원자력발전소의 주요기기 및 배관 등에 대한 안전 및 건전성 확보는 대단히 중요하다. 이러한 원전의 안전 및 건전성 확보의 일환으로 수행하고 있는 가동중검사 (inservice inspection ; ISI) 및 가동전검사 (preservice inspection ; PSI)는 최근 새로운 비파괴검사기술 및 첨단 검사장비 사용으로 검사자의 방사선 피폭량을 줄이고 검사의 신뢰성을 향상시킬 뿐 아니라, 가동전·중 검사 기간을 단축시켜 발전소 가동을 향상에 크게 기여하고 있다.

미국, 프랑스 및 일본 등과 같은 원자력산업 선진국가에서는 최근 급속도로 발전된 최첨단 전자 장비 및 컴퓨터 등을 이용하여 각종 비파괴검사 장비 및 검사

기술을 자체 개발 및 업그레이드(up grade)하여 사용하고 있으며, 이미 가압경수로 원자로 압력용기 비파괴검사에 계속 사용하여 온 기존의 고정식 매니플레이터 방식의 원자로 자동초음파장비들을 최근에 개발한 각종 기계 및 전자장비들로 교체하면서 장비의 성능을 보강하고 성능을 향상시켜 검사에 사용하고 있다. 이와같은 고정식 매니플레이터 방식의 원자로 압력용기 용접부 자동초음파검사장비들은 대형이고 중량이어서 조립·분해 시간이 오래 걸리고 검사자들이 취급하기가 곤란하다. 따라서, 이러한 기존의 고정식 매니플레이터 방식의 원자로 자동초음파검사장비들의 기본 설계 개념을 벗어나서 최근에는 일본 미쓰비시 중공업사의 advanced UT machine¹⁾ 및 프랑스 프라마토퍼의 URSULA²⁾와 같이 소형·경량화된 장비를 개발하여 취급이 용이하고 검사 기간을 단축시키는 장비들을 설계·제작하고 있다.

따라서 이 해설에서는 지금까지 국내외에 알려진 각종 소형 원자로 압력용기 자동초음파검사장비의 시스템을 개략적으로 기술하고 현재의 국내 원자로 압력용기 검사를 위한 비파괴검사 기술 및 장비 기술을 진단하여 본다.

2. 본 론

원자력발전소의 원자로 압력용기는 고방사선 때문에 검사자가 직접 검사 부위에 접근하여 검사하는 것은 곤란하다. 따라서, 로봇을 이용한 자동장비 등으로 검사자가 원거리에서 장비를 조정하여 ASME (American Society of Mechanical Engineers) Code Section XI이 요구하는 원자로의 용접부 및 비용접부를 검사한다³⁾. 이와같이 검사자가 직접 접근하여 검사하기 곤란한 원자력발전소의 각종 주요 계통 및 부품에 대해서 검사자가 원거리에서 로봇을 이용하여 초음파검사를 수행할 수 있도록 제작된 장치 및 장비들을 automated ultrasonic testing(AUT), 또는 mechanized ultrasonic testing(MUT) 장비⁴⁾라고 한다. 최근에는 이러한 원격 자동초음파검사장비들에 최첨단 전자 장비 및 컴퓨터 등을 부착하여 각종 검사 부위에 대한 정보를 검사 시작전에 컴퓨터에 모두 입력시켜 장비를 전자동으로 구동시킬 수 있도록 설계되어 있으며 신호 수집 및 평가 장비도 신속·정확하게 처리하도록 제작되어 있다.

2.1. 장비의 기본 특성

2.1.1. 기계 구동 장치

원자로 자동초음파검사장비의 기계 구동 장치는 검사에 적용되는 관련 서류 및 코드의 검사 부위를 만족토록 설계·제작되어야 한다. 이러한 장비는 탐촉자가 검사하고자 하는 용접부에 정확히 위치하여 검사 부위의 누락없이 검사토록 제작되어야 하며, 재현성(repeatability)이 좋아야 한다. 또한, 다음과 같은 사항 등이 장비 설계에 반영되어야 한다⁵⁾.

- 1) 장비에는 다중의 안전장치가 강구되어야 한다. 이 장비는 원자로 압력용기내에서 구동하므로 장비로 인한 불의의 사고는 막대한 경제 및 시간적 손실을 초래하므로 각 구동 메카니즘(mechanism)마다 다중의 안전장치가 고려되어야 한다.
- 2) 가볍고 취급이 용이하여야 한다. 이것은 장비 분해

- 및 조립시간을 단축시켜 검사자들의 방사선 피폭량을 줄이고 발전소 가동율을 향상시킬 수 있다.
- 3) 검사 부위에 탐촉자의 접근이 용이토록 장비 mechanism을 단순화시켜야 한다. 이때 수침법에서는 탐촉자 지지 및 각도 조정 장치를 정확하고 정밀하게 제작하고 기어의 backlash가 최소가 되도록 설계되어야 한다.
- 4) 구동장치의 재질은 물에 대한 내식성 및 내구성이 좋아야 한다.
- 5) 수중에서 장비가 구동되므로 물이 구동 장치내로 들어가지 않도록 확실히 밀봉되어야 한다.
- 6) 장비의 신뢰도, 위치의 정확도 및 재현성을 기할 수 있도록 각 구동 부분들이 정밀·정확하게 설계·제작되어야 한다.

이런 기본적인 사양으로 제작된 장비로 국내 가압경수로 원자로 압력용기를 검사할 경우에 ASME Code Section XI에 요구된 검사 부위를 수행토록 되어 있다. 따라서, 이 코드에 명시된 각 검사 부위를 정확하게 검사할 수 있도록 검사전에 초음파 주사 계획서를 작성한 후 모든 정보를 구동 제어 장비의 컴퓨터에 입력시켜 자동 및 반자동으로 검사를 수행한다. 이 때 검사자는 사용 장비의 특성 및 원자로 형상을 철저히 분석하여 검사시 나타나는 각종 실제 및 거짓 신호를 정확히 구분할 수 있어야 한다.

지금까지 국내 원자로 압력용기 검사에 사용해 왔던 매니플레이터 방식의 PaR ISI-2 장비는 장비 구동시 속도가 항상 일정하게 변환할 수 있도록 설계되어 안전하게 장비가 구동할 수 있었으며, 장비의 직선성(linearity) 및 재현성이 정확하여 검사 결과에 신뢰성을 주었다. 한편, 장비 구동 장치 끝단에는 플랜지 등이 있어서 각종 검사 장치 부착이 용이토록 설계되어 있었다. 또한 제어기(controller)에 의해 장비를 상하좌우 및 회전 운동 등을 하면서 각 검사 부위의 접근이 용이하고, 반자동식으로 동일한 부위를 계속 반복 검사 수행토록 설계·제작되었다. 이와같은 특성의 원자로 자동초음파 장비는 접촉법으로서 탐촉자를 모듈에 장착하여 공기 압력 및 용수철 힘으로 검사체 표면에 접촉하도록 하여 검사체의 표면 거칠기 및 형상에 의해 발생하는 반력 등을 흡수토록 하였다.

2.1.2. 데이터 처리 장치

수동검사에서는 검사자가 초음파 신호를 검사 장비

화면(CRT)을 통해 직접 보면서 분석하여 ASME Section XI의 기준에 따라 결함을 평가한다. 그러나, 자동초음파장비는 0°, 45°, 60° 검사 각도 및 1989년도판 ASME Section XI에 의해 추가된 70°의 검사 각도와 같이 검사할 때 한번에 모든 필요한 검사 각도의 수 이상을 할 수 있는 검사를 수행하여야만 검사 시간을 단축시킬 수 있다. 이와같이 여러개의 검사 각도를 장비의 다중 채널을 통하여 수집한 데이터를 신호 수집 장치에 기록·저장하고 필요시 언제든지 평가자가 검사데이터를 신호 수집 장치로부터 불러내어 평가할 수 있다. 이 때에 각종 신호 처리 기술을 응용한 소프트웨어 등을 이용하여 A-scan, B-scan (front view), C-scan 및 D-scan (side view)과 같은 형태의 데이터를 분석·처리할 수 있어야 한다. 이러한 데이터 수집 및 분석 장치는 검사자의 필요에 의해 설정한 기준치 이상의 데이터만을 수집하거나 또는 잡음을 포함하는 모든 데이터를 영구히 기록·저장될 수 있도록 되어 있다. 이때의 초음파 신호 지시값과 탐촉자 위치 등은 검사후 데이터 처리를 위해 디지털 형태로 변환되어 기록·보존된다.

2.2. 국내의 기술 분석

2.2.1. 국내 기술

국내에서는 한국원자력연구소가 최초로 원자로 압력용기 비파괴검사를 위해 Fig. 1과 같이 원자로 플랜지 상부에 장비를 고정시키는 매니플레이터 방식의 원자로 자동초음파검사장비를 1985년도에 미국 SwRI (Southwest Research Institute)로 부터 도입하여 고리 4호기 가동전검사를 시점으로 현재까지 가동전검사 5회 및 가동중검사 15회의 성공적 수행으로 원자로 검사 기술에 대한 국산화를 이룩하였으며, 기존 장비 운영시 발생하는 각종 고장 배제 기술 및 일부 시스템의 부분적 개발로 원자로 압력용기 장비 개발에 대한 기초를 이룩하였다. 이들을 기반으로 하여 향후 지속적인 원자로 압력용기 검사 기술 개발과 장비 자동화 개발에 많은 노력을 기울여 비파괴 관련 종합 기술로 국제 경쟁력을 강화시켜 나가야 할 것이다. 이러한 경쟁력의 일환으로 국내 매니플레이터 방식의 원자로 압력용기 초음파검사장비에 비해 취급이 용이한 소형 수중 이동형 원자로 검사 장비 (reactor inspection system : RYSIS)에 대해 커다란 관심을 가지고 다음과 같이 장비 설계 개념으로 연구·개발에 노력을 기울이고 있다.

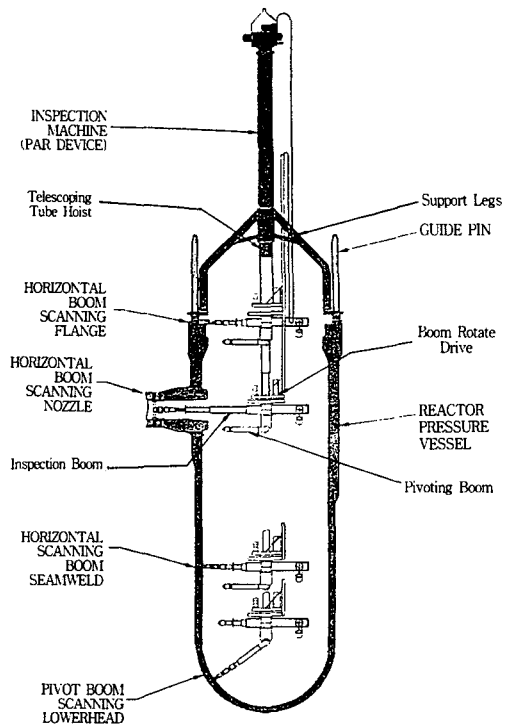


Fig. 1. Reactor inspection robot of fixed manipulator type

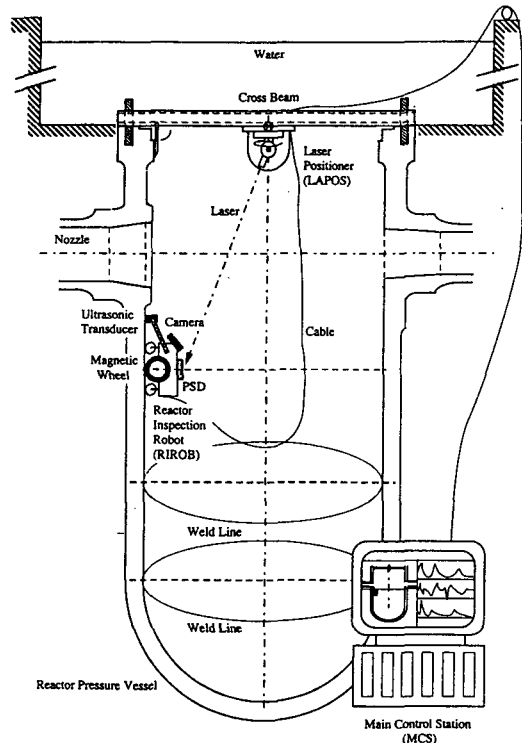


Fig. 2. Reactor inspection robot of submarine type

(a) 소형 수중 이동형 원자로 검사 장비 (RISYS) 가압 경수로 원자로 압력용기 용접부 검사는 지금까지 대부분 고정식 매니플레이터 방식의 원자로 자동초음파검사장비를 사용하여 수행되어 오고 있으나, 최근에는 Fig. 2와 같이 경량·소형화된 장비로 원자로 검사를 수행하는 곳도 있다. 이러한 소형 수중 이동형 원자로 검사 시스템은 개발 회사에 따라 특성의 차이가 있다. 여기서는 국내에서 개발에 착수한 소형 수중 이동형 원자로 검사장비 시스템을 크게 원자로검사 로봇 (reactor inspection robot : RIROB), 레이저 위치기 (laser positioner : LAPOS) 및 원격통합시스템 (main control station : MCS) 등으로 나누어 살펴보았다.

1) 원자로 검사 로봇 (RIROB)

RIROB은 수중형 이동 로봇으로 공기중에서는 무게가 약 30kg 정도이고 수중에서는 floater을 사용하여 장치의 무게가 0kg이 되도록 설계하였다. 또한, 원자로 내벽을 상하 좌우로 자유롭게 이동할 수 있도록 네오다이미움(neodymium) 재질의 자석 바퀴 4개를 가지고 있다. 이들 자석은 12.9 kgauss의 residual induction과 318 kJ/m³의 최대에너지 product를 가지고 2개는 캐스터 형태이고 2개는 DC 서보 모터로 구동되는 구동용 바퀴로 구성되었다. 이러한 고리 형태의 자석 바퀴는 원자로 내벽 집착력 향상을 위해 철로된 원판을 부착시켜 구동토록 하였으며, 이동시 미끄럼 방지를 위해 바퀴에 고무를 감았다. 또한, 이 검사 로봇에 장착되어 있는 초음파 탐촉자가 검사 부위에 정확히 위치할 수 있도록 Fig. 3과 같이 translation, rotation 및 4단 연속 translation을 가지는 3개의 자유도 매니플레이터가 설치되어 있으며 최대 길이가 100cm까지 움직일 수 있도록 설계되어 있다. 소형 로봇에 이와같은 매니플레이터를 부착되면 처짐현상 등으로 여러 문제가 발생할 수 있으므로 무게가 가볍고 크기가 작은 매니플레이터를 설계하는 것이 기구학적으로 쉽지 않다. 한편, 로봇의 전면부에는 수중 카메라와 수중 램프를 부착하여 장비 구동시 원자로내 형상 및 부착물들과 충돌로 발생할 수 있는 안전 문제를 사전에 예방할 수 있도

록 하였다. 그리고, 로봇의 경사를 측정할 수 있는 경사계로 로봇의 자세를 제어하고, 수압 센서로 수압 측정과 고도를 계산토록 되어 있다.

2) 레이저 위치지시기 (LAPOS)

원자로 압력용기 플랜지 상부에 설치되어 있는 레이저 위치지시기는 다음에 위치할 검사

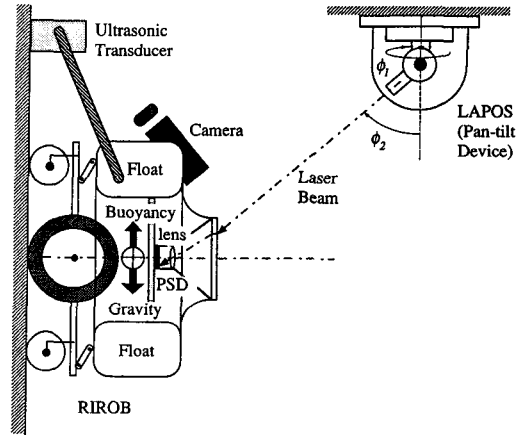


Fig. 3. Reactor inspection robot and laser positioner

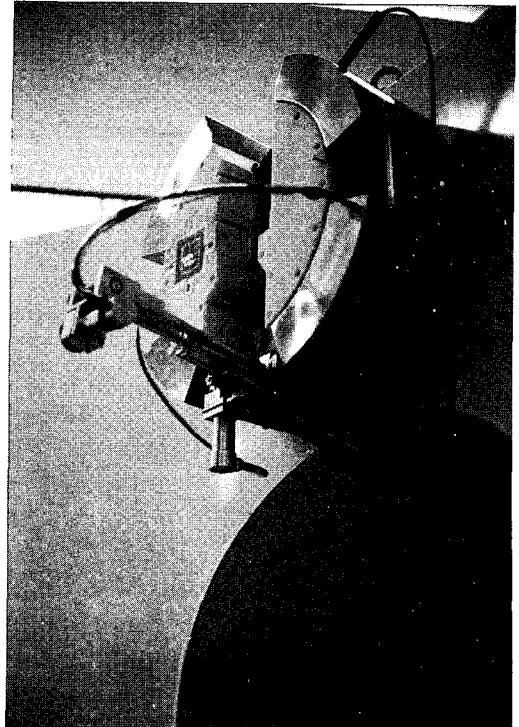


Fig. 4. Moving inspection robot in reactor vessel mock-up

로봇의 지점을 향해 레이저 빔을 송신하여 장비를 이동토록 설계되었다. 이것은 로봇 상부에 부착되어 있는 수광 센서 (position sensitive detector : PSD)를 이용해 PSD의 중심과 현재의 레이저 빔 위치와의 편차를 계산하여 이를 영으로 만드는 방향으로 움직이도록 되어 있다. 이 레이저의 위치지시기는 diode laser가 부착된 펜틸트 (pan-tilt) 형태의 장치로서 0.01deg/step 이하의 해상도를 가진 step motor에 의해 정밀하게 제어되고, 레이저 빔의 회절 방지 및 방수를 위해 반구형 플라스틱 캡으로 싸여져 있다.

3) 원격 통합 제어시스템 (MCS)

원격 통합 제어시스템은 IBM PC 486급을 이용하여 검사용 로봇, 레이저 위치지시기 및 초음파 신호 수집 장치를 원격에서 종합 관리·제어하는 시스템으로 국내 가압경수로 원자로 압력용기의 제원 및 정보들이 모두 입력되어 다음과 같은 역할을 하도록 설계되어 있다.

- 원자로 압력용기 검사를 위한 검사 계획서 작성 및 3차원 그래픽 시뮬레이션
- 검사중 로봇의 검사 경로 및 매니플레이터의 동작 명령을 생성해서 전달해 주며 동시에 로봇의 현재 위치와 자세를 그래픽으로 묘사함
- 수중 카메라의 영상 신호 수신

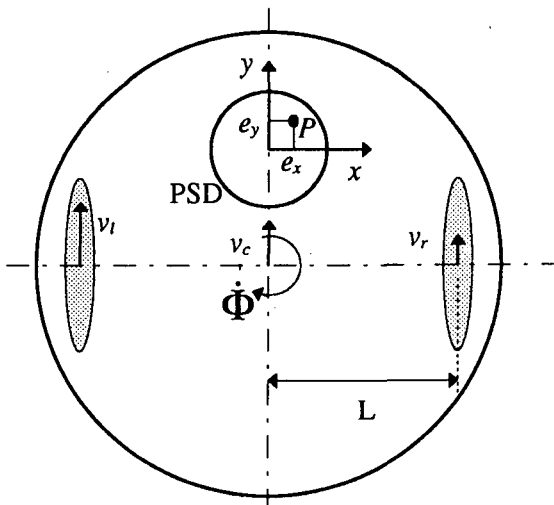


Fig. 5. Position sensitive detector(PSD) and robot motion control

- 검사후 검사한 자료를 이용한 검사 보고서 작성

만약에 MSC에 고장이 발생하여 동작하지 않을 경우에는 수동 모드에서 로봇 운전을 할 수 있도록 설계되었다.

4) RIROB 제어 및 성능

Fig. 3과 Fig. 4에 보여주는 것처럼 PSD는 RIROB의 본체에 장착되어 있다. 레이저 빔이 Fig. 5와 같이 PSD 표면의 한점 P를 가리키면 센서는 PSD 중심으로 부터 P점까지의 편향 (e_x, e_y)을 계산해 낸다. 제어 목표는 입사한 레이저의 위치가 항상 RIROB의 중앙에 오도록 즉, 다음 조건을 충족시키도록 움직이게 한다.

$$e_x = 0, e_y = 0 \dots\dots\dots(1)$$

RIROB 중심의 이동 속도는 v_c 는 y 축의 편향 e_y 와 관계가 있고 방향각속도 $\dot{\Phi}$ 는 X축 편차 e_x 와 밀접한 관계가 있음을 착안하여 다음과 같은 제어 법칙을 제안하여 사용하고 있다.

$$v_c = K_{py}e_y + K_{dy}\dot{e}_y \dots\dots\dots(2)$$

$$\dot{\Phi} = (K_{px}e_x + K_{dx}\dot{e}_x)/L$$

여기에서 K_{ij} 는 해당 컨트롤 게인이고 L 는 로봇의 중심과 각 바퀴 사이의 거리이다. 최종적으로 로봇의 이동 속도와 방향은 두 개의 구동 바퀴에 구현되는데 왼쪽 바퀴의 속도 v_l 과 오른쪽 바퀴의 속도 v_r 은 다음과 같이 된다.

$$\begin{aligned} v_l &= v_c + \dot{\Phi}L \\ &= K_{py}e_y + K_{dy}\dot{e}_y + K_{px}e_x + K_{dx}\dot{e}_x \\ v_r &= v_c - \dot{\Phi}L \dots\dots\dots(3) \\ &= K_{py}e_y + K_{dy}\dot{e}_y - K_{px}e_x - K_{dx}\dot{e}_x \end{aligned}$$

이 제어법칙의 안정성은 Liapunov function을 사용하여 증명되었고, 제어 성능은 일련의 실험을 통해 입증하였다⁶⁻⁸⁾

2.2.2. 국외 기술

비파괴검사 기술 및 장비 자동화에 있어서 미국, 프랑스 및 일본 등 여러 선진국가들은 Table. 1과 같이 다종의 원자로 자동검사장비를 개발하여 계속 성능 및 기능을 보강시켜 매니플레이터 방식의 기존 장비들을 업그레이드(up grade)하여 사용하거나, 또는 소형·경량화된 장비를 개발하여 사용하고 있다⁹⁻¹⁶⁾. 이렇게 업그레이드 또는 개발된 장비들의 공통적인 특징은 각종 최신 전자 장비와 컴퓨터를 이용하여 구동 장치를 전자동으로 제어하고, 초음파 신호

를 신속·정확하게 수집, 저장하며, 이를 다종의 소프트웨어 등으로 처리 및 분석할 수 있도록 설계·제작하여 검사 기간 단축 및 검사 신뢰성을 향상을 도모하였다.

최근 고정식 매니플레이터 방식의 원자로 자동초음파검사장비의 설계 개념을 벗어나서 소형·경량화된 수중 이동형 원자로 검사장비를 개발하여 사용하고 있는 프랑스 프라마톰사 (Framatome Technology Inc.)의 URSULA와 일본 미쓰비시 중공업 (Mitsubishi Heavy Industries)사의 advanced UT machine의 장비 특징 및 설계 개념을 살펴보았다.

Table1. Comparison of characteristics in mechanized ultrasonic testing equipment

제작사 내용구분	Rolls-Royce (England)	SwRI (U.S.A)	Westinghouse (U.S.A)	Intercontrol (France)	KWU (Germany)	ABB TRC (Sweden)	Mitsubishi (Japan)	Framatome Technology (France)	Tecnom, S.A (Spain)
기계구동 장치	Main Mast Manipulator (MMM)	Programmed and Remote (PaR)	Reactor Vessel ISI Tool (RV ISI Tool)	In-Service Inspection Machines (MIS)	ZMM4	PWR Mast Manipulator	Advanced UT Machine	URSULA	Programmed and Remote (PaR)
데이터 수집 및 분석 장치	Micropulse 2	EDAS	UDRPS - 2	RTEA O/S	DEA 5	I/MC-UX	EDAS	ACCUSONEX	SUMIAD
검사방법	접촉법	접촉법	접촉법	집속수침법 gammagraphy	접촉법	접촉법	접촉법	접촉법	접촉법

(a) Advanced UT Machine (Mitsubishi Heavy Industries)

일본내에 가압 경수로 공급업체인 미쓰비시 중공업의 원자력부에서는 약 10년전부터 수중 이동식 로봇을 원자로 압력용기 용접부 검사에 활용하기 위해 개념 설계에 착수하여 현재 상용화하여 원자력발전소 가동전검사 2회 및 가동중검사 2회에 사용하였다. 이 장비는 Fig. 6에서 보는 바와 같이 7축 매니플레이터를 장착한 주몸체, 자동 위치기 및 제어 시스템으로 구성되어 있으며 무게는 공기중에서 약 300kg 이고 수중에서는 자체 부력으로 인하여 0kg이 되도록 설계·제작되었다. 수중에서의 장비 이동은 주몸체의 6개의 프로펠러 구동에 의하여 원자로 내벽에 장비 고정은 흡착 빨판을 이용한다. 그리고 검사 부위 검사는 주 몸체 매니플레이터 끝단에 장착되어 있는 UT 탐촉자에 의해 수행토록 제작되었다.

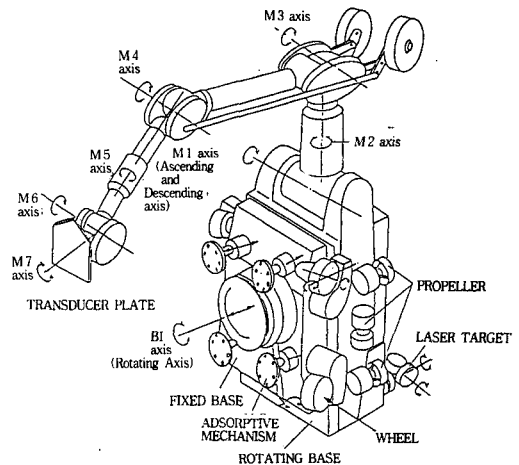


Fig. 6. Advanced UT machine (Mitsubishi Heavy Industries : Japan)

(b) URSULA (Framatom Technology Inc.)

프랑스의 프라마토사는 최근에 그동안 합작회사로 운영하였던 미국의 BWNT (Babcok & Wilcox Nuclear Technology)사를 인수하여 FTI (Framatome Technology Inc.)로 개명한 후 원자로 압력용기의 비파괴검사를 보다 신속하고 편리한 검사를 위하여 URSULA라는 수중로봇을 개발하였다. 이것은 원자로 압력용기 검사를 위해 원자로 내벽을 걸어 다닌다는 개념으로 출발하였다. 이 장비로 4회의 자동중검사를 수행한 경험이 있으나 일본의 미쓰비시와 이동형이라는 점에서 유사하지만 그 구조와 형상은 다르다. URSULA는 Fig. 7에서 보는 바와 같이 베이스부, 제어부, 추진부, 6자유도의 로봇팔과 UT tool로 구성되어 있다. 이 장비는 검사 시작전에 크레인 줄에 매달려 원자로 압력용기 내부로 이동된 후 프로펠라를 추진하여 원자로 내벽으로 이동시켜 3개의 흡착 빨판으로 내벽에 부착한다. 그리고 나서 레이저 위치 제어 시스템을 가동하여 현재의 위치를

파악하여 이를 기준으로 로봇 팔이 움직여야 할 경로를 산출하고 초음파 탐촉자가 부착되어 있는 팔을 구동하여 검사한다. 한 부분의 검사가 끝나면 빨판을 떼고 다른 곳으로 베이스를 옮긴다. URSULA는 두개의 inspection head를 장착할 수 있으며, 각각의 inspection head는 2*2 array multi element 탐촉자를 장착하고 있다.

이들의 검사 장비외에 Westinghouse에서도 수중 이동형 원자로 압력용기 검사 장비를 개발하고 있는 것으로 알려져 있으며, 기존의 고정식 매니플레이터 방식을 개선하여 검사 시간을 단축시켜 사용하고 있는 미국 Southwest Research Institute나 스페인의 Technatom 등 해외의 많은 관련 산업체 및 국립연구소에서 검사 장비 성능 향상에 노력을 기울이고 있다.

3. 결론

국내 원자력발전소 주요기기 및 배관 등의 건전성 확보를 위해 수행되는 원전 가동전·중검사는 검사 기간 단축 및 검사 신뢰성을 향상을 위해 비파괴검사 기술 국산화와 함께 검사 장비 개발로 이어져야 한다. 따라서, 국내에서도 지금까지 축적하여 온 원자로 압력용기 비파괴검사 기술 및 현장 경험을 바탕으로 필요한 비파괴검사 기술 개발 및 신장비 개발에 최선을 다하여야 할 것이다. 이러한 장비 개발은 각종 국내의 최신헌비 특성을 철저히 분석하여 설계·제작하고, 이것에 관련된 각종 소프트웨어 개발도 병행하여 추진되어야 할 것이다. 이렇게 하여 개발된 국내 비파괴검사 기술 및 검사 장비만이 국제경쟁에서 기술력 우위를 확보할 수 있다. 따라서, 국내 원전의 안전 및 건전성은 국내에서 개발된 검사 장비 및 검사 기술, 숙련된 검사원 및 평가자로부터 우리손으로 확보될 것이다.

결론적으로, 국내에서도 가압경수로 원자로 압력용기 검사를 위해 기존의 고정식 매니플레이터 방식의 원자로 자동초음파검사장비 설계 개념을 벗어나서 소형·경량화된 수중 장비 및 신속·정확한 신호 수집·분석 장비를 개발하여 우리의 원전 검사에 대한 신뢰성 향상 및 검사 시간 단축에 기여하여야 할 것이다.

참고 문헌

1. MHI Nuclear Services, A Listing of Integrated Services & Products to Improve Plant Performance & Reliability, PS-93034 (Aug. 1993)

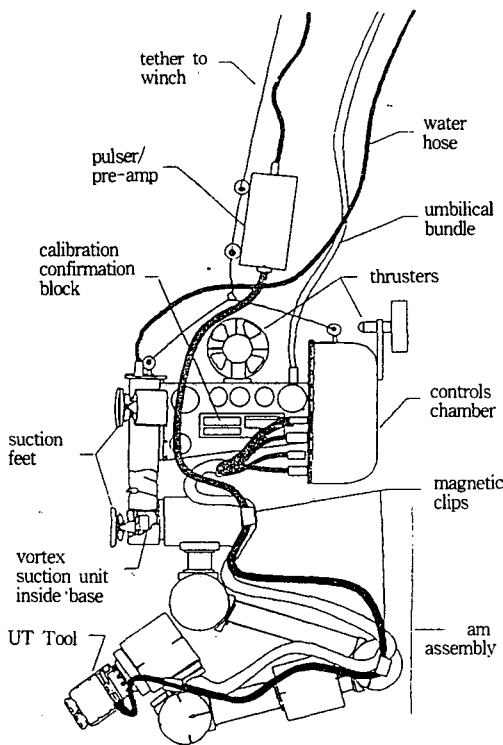


Fig. 7. URSULA underwater robot (Framatome Technology Inc : France)

2. J. B. Fallen, S. B. Shooter, S. W. Reiholtz and S. W. Glass "ULSULA : Design of an Underwater Robot for Nuclear Reactor Vessel Inspection", Proceeding of American Society of Civil Engineers, Specially Conference on Robots for Challenging Environments, Albuquerque, NM, (Feb. 1994)
3. American Society of Mechanical Engineers Section XI, Boiler and Pressure Vessel Code, (1989)
4. 박문호 외 3명, "국내 PWR 원자로 압력용기의 원격자동초음파 검사 기술", 한국비파괴검사학회, 제 6권 제 2호 (1987)
5. Operation and Maintenance Manual, Inservice Inspection Positioning System, Model ISI-2, GCA/ISG Job No. 01601
6. J. H. Kim, "Robot Based Reactor Vessel Inspection Technology at KAERI", Proceedings of 3rd KAIF/FAF Round Table Conference, Seoul, Korea (July 1995)
7. J. C. Lee and J. H. Kim "Path Tracking Control of a Wheeled Mobil Robot Using Position Sensitive Detector", Proceedings of the Korean Automatic Control Conference, Seoul, Korea (October, 1994)
8. K. R. Kim, J. C. Lee and J. H. Kim "Dead Reckoning of Two Wheeled Mobil Robot on a Curved Plane", Proceeding of the IEEE Conference on Robots and Automation, Mineapolic, Minesota (Apr. 1996)
9. Westinghouse, Technical Description for Reactor Vessel Inservice Inspection Tool for Korea (1992)
10. Intercontrole, A Proposal for MIS Equipment (1991)
11. A Proposal for Mechanized Ultrasonic System for RPV for KAERI, Siemens, Poser Generation KWU (1991)
12. ABB AMDATA INC. and ABB Tekniska Rotgcentralen (TRC), Proposal for Reactor Vessel Inspection System for KAERI, Proposal #92-266 (1992)
13. Mitsubishi Nuclear Services, Mitsubishi Heavy Industries, Ltd. (1995)
14. Rolls-Royce and Associates Limited, Rolls-Royce Industrial Power Group, Pre-qualification for Supply of PWR RPV In-service Inspection Equipment to KAERI (1992)
15. SwRI, A Proposal for Inservice Inspection Equipment for Pressurized Water Reactors, SwRI Proposal No. 17-11696 (1991)
16. SwRI, A Proposal for ISI System Upgrade, SwRI Proposal No. 17-9301 (1989)