

원자로 자동 탐상 시스템

김 재 희

한국원자력연구소 신형원자로기술개발단
종합안전평가부 책임연구원

가압 경수로는 원통형의 원자로 용기 안에서 핵물질을 반응시켜 고온·고압의 물을 생성하는데 이 원자로 용기는 환형 구조물들을 서로 용접하여 만들어진다. 이 원자로 용기의 건전성을 확인하기 위해서는 용접 부위에 결함이 발생되었는지를 주기적으로 정확하게 검사해야 한다. 한국원자력연구소는 원자력발전소의 핵심 기기인 원자로 용기의 용접부 결함을 수중에서 자동으로 검사, 탐지할 수 있는 「원자로 자동 탐상 시스템」을 개발하여, 울진 원전 6호기용 원자로 용기에서 실증 실험을 수행하였다. 이 원자로 자동 탐상 시스템은 물방개처럼 생긴 수중 탐상 로봇이 그 핵심으로서, 이 로봇은 원자로 용기의 내벽을 타고 다니면서 수중 초음파 검사를 수행할 수 있는 획기적인 시스템이다. 본고에서는 개발된 원자로 자동 탐상 시스템을 소개하고자 한다.

원자로 자동 탐상 시스템 개요

원자로 압력 용기의 용접 부위에 대하여 결함이 생성되었는지를 검사하기 위한 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 수행

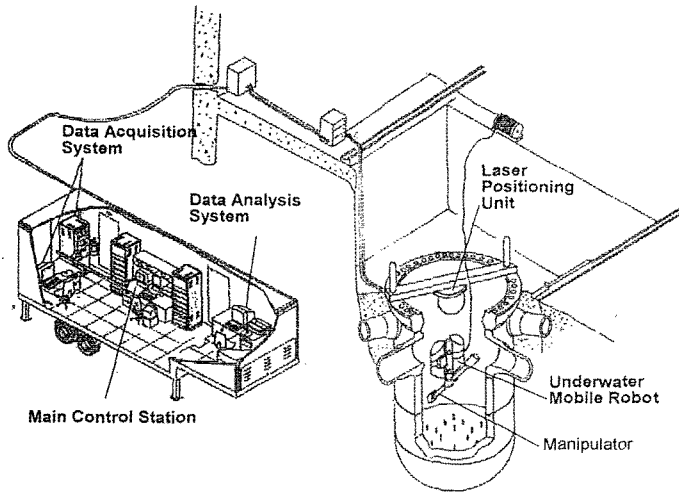
한다. 이 시스템은 가압경수로 원자로 압력 용기의 용접부를 가동전/가동중에 검사하기 위한 자동 초음파 검사 장비로서 일명 Mechanized UT 장비로 널리 알려져 있다.

가압 경수형 원자로는 <그림 1>과 같이 원통형의 모양으로 되어 있는데 Upper Shell에 Inlet 노즐과 Outlet 노즐들이 연결되어 있다. 용접 부위로는 원주상의 접합면, 노즐과 Upper Shell의 접합면, 그리고 플랜지와 Upper Shell의 접합면 등이 있다. 원자로 용접 부위를

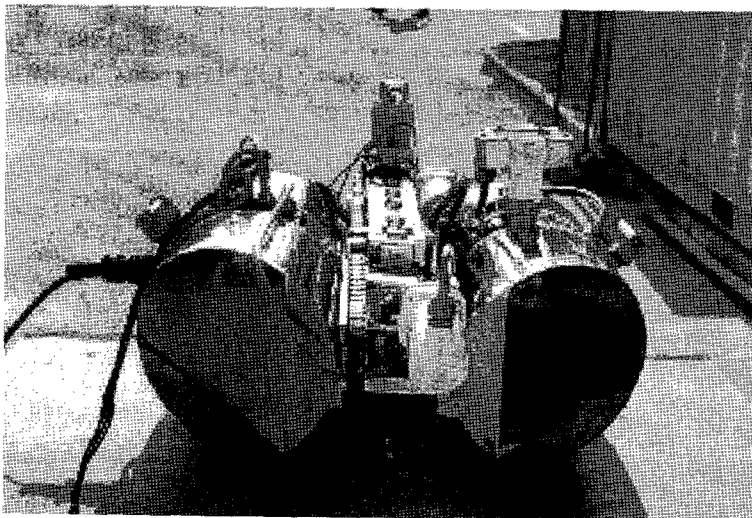
검사할 때는 검사를 효과적으로 수행하기 위해 원자로 헤드와 내부 구조물은 다른 장소로 옮겨진다.

원자로는 검사중 방사능 노출을 최소화하기 위해 Canal 상부까지 물로 채워져 있어서 검사 장비는 수중에서 동작할 수 있어야 한다.

이번에 개발한 원자로 자동 탐상 시스템은 RISYS(Reactor Inspection System)라 불리는데, 이 시스템의 특징은 레이저 유도 방식의 수중 이동 로봇으로서, 자석 바퀴를 장착하여 원자로 벽면에 부착된 채



〈그림 1〉 원자로 자동 탐상 시스템 (RISYS) 구성도



〈그림 2〉 원자로 탐상 로봇(RIROB)

원하는 검사 부위로 이동하면서 검사를 수행한다.

이 시스템은 원자로 탐상 로봇(RIROB: Reactor Inspection Robot), 레이저 위치 지시기(LAPOS: Laser Positioning Unit), 초음파 신호 수집 시스템

(Data Acquisition System), 초음파 신호 해석 시스템(Data Analysis System), 그리고 원격 통합 제어 시스템(MCS: Main Control Station)으로 구성되어 있다.

원자로 수중 탐상 로봇

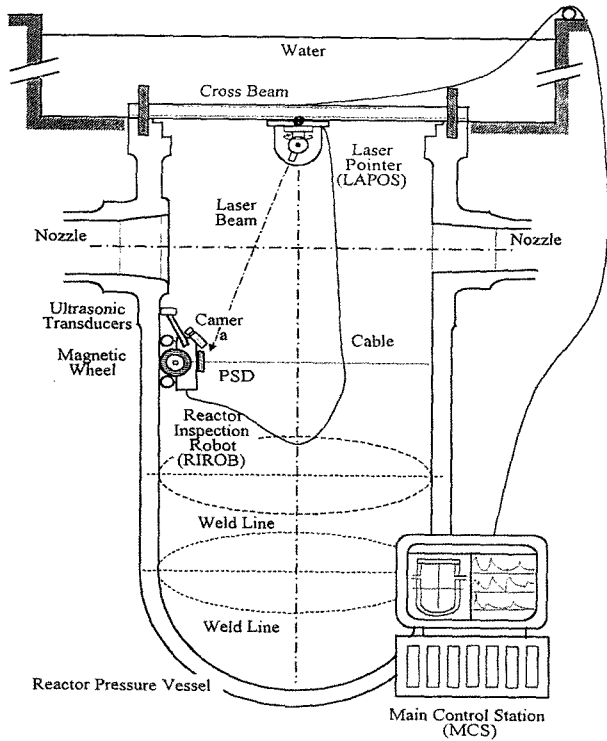
원자로 탐상 로봇(RIROB)은 수중 이동형으로서 공기 중에서 무게가 약 60kg 정도이고 수중에서는 부력재를 장착하여 자신의 무게가 소멸되도록 개발되었다.

대부분의 가압 경수형 원자로 압력 용기는 탄소강으로 구성되어 있고 오스테나이트계 스테인리스강으로 내부가 피복되어 있다.

원자로의 내부 벽을 타고 운동하기 위해 검사 로봇은 4개의 자석 바퀴를 가지고 있다. 자석 바퀴는 환형의 네오다이미움 자석 양면에 순철로 된 원판을 접착하여 원자로 내부 수직 벽면에 최대 접촉력을 가지게 한다. 또 합성 수지로 바퀴를 둘러싸서 수직 벽면에서의 미끄럼을 방지한다.

RIROB이 가지고 있는 네 개의 바퀴 중 두 개는 캐스터 형태이고, 다른 두 개의 바퀴는 DC 서보 모터로 구동되는데, 이를 이용하여 로봇은 원자로 내부 수직 벽을 어느 방향이든 자유롭게 이동할 수 있다.

로봇의 이동 속도와 이동 방향은 좌우 구동 바퀴 회전 속도의 합과 차에 의해서 제어된다. 로봇의 전후에 설치된 캐스터 형태의 바퀴는 로봇 본체에 연결된 평행사변형 링크에 부착되어 원통형의 벽면에서도 로봇을 항상 벽면과 평행하도록 고안되었다.



〈그림 3〉 레이저 유도 제어 개념도

건이 따르기 때문에 기구적으로 특수하게 고안되어 있다.

수중 레이저 유도 제어

원자로 탐상 로봇은 레이저 위치 지시기에 의해 유도되는데 이 지시기는 원자로 상단 플랜지를 가로지르는 크로스빔 (Cross Beam)의 중앙에 장착되어 있다(그림 3).

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 영으로 만드는 방향으로 움직이도록 만들어졌다.

이 레이저 위치 지시기는 반도체 레이저 (Diode Laser)가 부착된 팬틸트(Pan-tilt) 형태의 장치로서 서보 모터에 의해 0.02 deg/step 이하의 해상도로 정밀하게 제어된다.

종래의 고정식 매니퓰레이터 방식의 원자로 검사 장비는 원하는 검사 부위에 탐촉자를 위치시키는 것이 좌표 연산에 의해서 큰 어려움 없이 가능하다. 그러나 이동 로봇을 사용할 경우 이 로봇의 위치를 정확히 제어하는 것은 핵심적인 과업 중의 하나가 된다.

RISYS는 원자로 플랜지 상단에

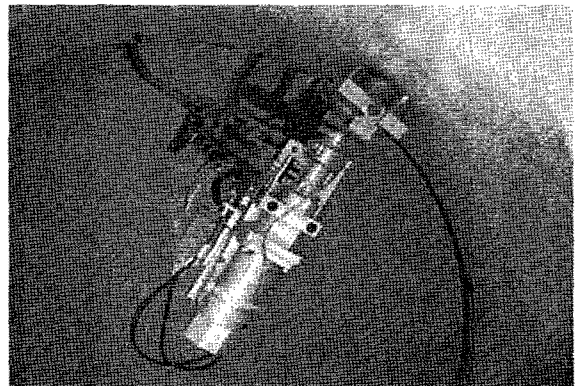
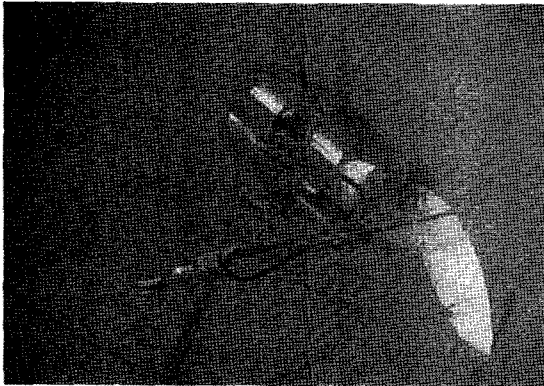


〈그림 4〉 수중 실험

탐상 로봇에는 가볍고 긴 매니퓰레이터가 설치되어 있고 그 끝에 초음파 탐촉자가 부착되어 있다. 매니퓰레이터는 5개의 자유도를 가지는데 직선 이동(Translation), 회전(Rotation), 비틀(Twist), 4단 연속 직선 이동 (Translation), 그리

고 탐촉자 회전(Probe Rotation)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 조



〈그림 5〉 레이저 유도 제어에 의한 노즐 검사

Cross Beam을 설치하고 그 중앙에 레이저 포인터를 장착한 상태에서 이 레이저 빔의 주사 방향을 기준으로 모든 좌표 연산이 이루어진다.

레이저 포인터로부터 발사된 레이저 빔을 인식하는 레이저 수광 센서(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.

본 연구 개발에서는 종래의 방식을 획기적으로 개선한 이동식 검사 시스템 개념을 창안하고, 모형 원자로에서의 실험을 통하여 기본 원리 입증하였다. 〈그림 4〉는 수중 실험을 위하여 원자로 탐상 로봇이 원자로 안으로 진입하는 모습을 보여주고 있으며, 〈그림 5〉는 원자로 탐상 로봇이 수중에서 노즐 용접부를 검

사하는 장면을 보여주고 있다.

주제어 컴퓨터 시스템

주제어 컴퓨터 시스템(MCS)은 원자로 탐상 로봇, 레이저 위치 지시기, 그리고 초음파 신호 수집 장비를 원격에서 종합 관리·제어하는 장비로서 IBM 펜티엄 산업용 PC 300MHz에서 구현되었다.

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

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

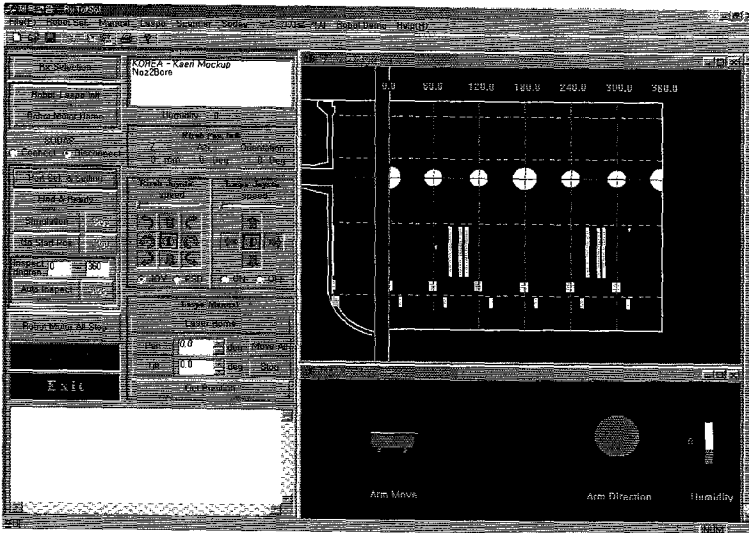
MCS에는 또한 컴퓨터 제어가 실

패할 경우를 대비해서 수동 모드의 운전도 지원할 수 있다. 초음파 신호 수집 장비는 초음파 탐촉자를 구동하여 반사된 신호를 수집하고 표시하며 저장하는 기능을 가진다.

주제어 컴퓨터는 이러한 복잡한 기능을 수행하기 위하여 여러 가지 모듈을 제공하는데, 사용자의 편의를 위하여 모두 그래픽 사용자 인터페이스로 구현되었다.

주제어 컴퓨터는 원자로의 제작 데이터 입력, 검사 대상 원자로 선택, 자동 검사 파일 생성, 검사 항목 선택, 시뮬레이션, 자동 검사 기능을 제공하는 한편, 수중 탐상 로봇과 레이저 위치 지시기의 운영 프로그램 다운 로드 및 매뉴얼 제어, 그래픽 화면을 이용한 검사 시뮬레이션 및 검사 현황 디스플레이, SODAS 구동 확인 기능 등 검사에 필요한 모든 기능을 제공한다.

원자로 데이터 입력 모듈은 검사 대상 원자로에 대한 제작 데이터를 입력하여 저장할 수 있는 환경을 제공한다. 여기에서는 전 세계 모든 원자로의 제작 데이터를 입력하여



〈그림 6〉 주제어 컴퓨터의 메인 화면

프로그램과 직접 연결하여 사용할 수 있게 하였으며, 새로운 원자로의 건설 후에는 그 원자로에 대한 연결 정보를 프로그램에서 추가해 주어야 한다.

검사 대상 선택 모듈은 크게 두 가지로 구분된다. 이 모듈에서는 국가별 보유 원자로에 대한 선택을 하는 기능과 선택된 검사 대상 원자로의 현재 검사 항목 선택 기능이 지원된다.

여기에는 원자로를 보유한 전세계 국가의 원자로에 대한 선택이 가능하며, 검사 대상 항목에 대해서는 노출, 원주심 등과 같은 큰 분류 및 각 항목에 대한 세부 검사 방법 설정이 지원된다.

자동 검사 명령어 생성 모듈에서는 입력된 원자로 데이터를 이용하여 원자로의 그래픽 표현과 검사 전 항목에 대한 자동 검사 계획을 자동

으로 생성해 준다. 이 모듈은 앞의 검사 대상 원자로 선택이 완료되면 검사 항목을 선택하기 전에 자동으로 수행된다.

이 자동 검사 계획에 따라 원자로에서의 RIROB·이동을 레이저 표시기를 이용하여 자동으로 수행하며, 검사 위치로 이동한 RIROB은 계획에 정해진 절차에 따라 초음파 신호 수집을 위한 매니퓰레이터 운동을 하게 된다.

이 검사 계획 데이터를 이용하여 RIROB, 레이저 위치 지시기, 초음파 신호 처리 시스템의 운영을 중앙 제어하고, 서로간의 통신을 제어하는 부분이 자동 검사 제어 모듈이다.

자동 검사 제어 모듈은 선택된 검사 항목에 대한 검사 계획 파일을 읽어 RIROB의 검사 준비 단계부터 자동 검사 완료까지 전 과정을

제어하게 된다.

또한 이 모듈에서는 검사 전 검사 시뮬레이션과 검사 중 현황 디스플레이 정보를 그래픽 처리 모듈에 전달하여 그래픽으로 검사에 대한 모든 상황을 볼 수 있도록 한다.

성능 실험

이와 같은 원리로 레이저 유도 제어 기능을 완비하고 주변의 모든 기능을 완성한 후 종합적인 로봇의 경로 추종 시험을 수행하였다. 1998년 1월과 6월 울진 원자력발전소 4호기 원자로 압력 용기에서 핵심 기능에 대한 Field Test를 수행하여 실용화 가능성을 확인하였다.

실험 목표는 위치 정확도 및 위치 반복도가 정해진 검사 요건을 만족하는가를 평가하고 내구성을 시험하는 것이다. 본 시스템의 최종 장치인 초음파 탐촉자의 위치 정밀도가 3mm 이내를 만족하는 것을 목표로 하고 있다.

이 최종 위치는 레이저 위치 지시기의 정확도, 검사 로봇의 정확도, 로봇에 탑재된 매니퓰레이터의 정확도가 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. 성능

시험의 결과로 RISYS는 검사에 필요한 핵심 요건을 만족하게 되었다.

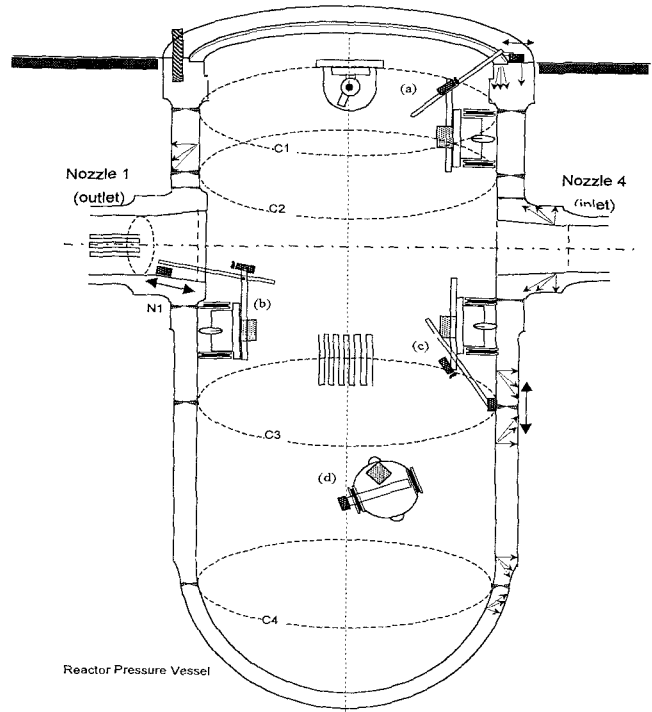
이후 초고속 초음파 신호 처리 시스템을 포함하는 원자로 종합 검사 시스템 개발이 완성되어 두산중공업이 제작한 울진 원자력발전소 6호기용 원자로 용기에서 실증실험을 수행하였다.

원자로 검사 부위는 <그림 7>과 같이 C1, C2, C3, C4의 원주 방향 용접부와 N1, N2, ..., N6의 노즐 용접부로 나눌 수 있고, 미리 프로그램된 원자로 자동 검사 알고리즘을 바탕으로 하여 RIROB이 여러 각도의 탐촉자 모듈을 이송하여 원자로 검사를 수행하게 된다.

따라서 본 실증 실험에서는 원자로 벽면 C1, C2, 그리고 Inlet 노즐한 개를 검사 대상으로 선택하여 실증 실험을 수행하였다. 이 실험은 개발된 원자로 자동 초음파 검사 장비를 사용하여 수동 검사 데이터와 비교함으로써 그 성능을 입증하는데 목적을 두었다.

RISYS의 검사 알고리즘은 RIROB 찾기, 검사 초기 위치로 이동하기, 자동 검사 시작의 순서로 진행되도록 구성되어 있으며, 검사를 완벽하게 수행했음을 증빙하기 위해서는 무엇보다도 입수된 신호에 대한 평가가 중요하다.

이 신호의 수집 및 평가 시스템은 각 검사의 검사 구간에 따라 원자로 원주 방향 거리에 맞게 세팅을 하여



<그림 7> 원자로 검사 항목 및 탐상기 자세

데이터를 입수하였으며, 실증 검사 동안 검사 전문가는 검사 신호 입수에 있어 RISYS가 정확한 데이터를 수집하고 있음을 판정해 주었다.

본 검사에 사용된 탐상의 주사 감도는 Calibration시의 기준 감도에서 14dB를 높여 검사를 수행하였다. 이는 20%를 80%로 증대하여 결함 검출을 쉽게 하고, 검사 속도를 빠르게 하기 위함이다.

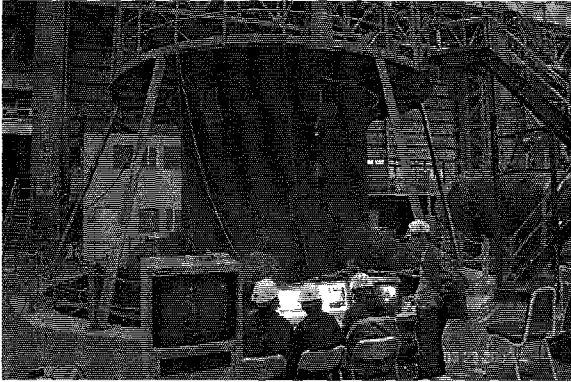
종파인 0°와 횡파 45°, 60° 사각빔을 이용하여 용접선과 나란한 결함들을 검사하였으며, 용접선을 중심으로 양편에서 모두 수행하였다. 노즐 용접부는 5°, 45°를 사용하였다. 또한 용접선에 대해 수직 방향으로 존재하는 결함을 검출하기 위해 시계 및 반시계 방향으로 검사를 수행하였다. <그림 9>는 원자로 용

접부에 대한 검사 데이터를 나타내고 있다.

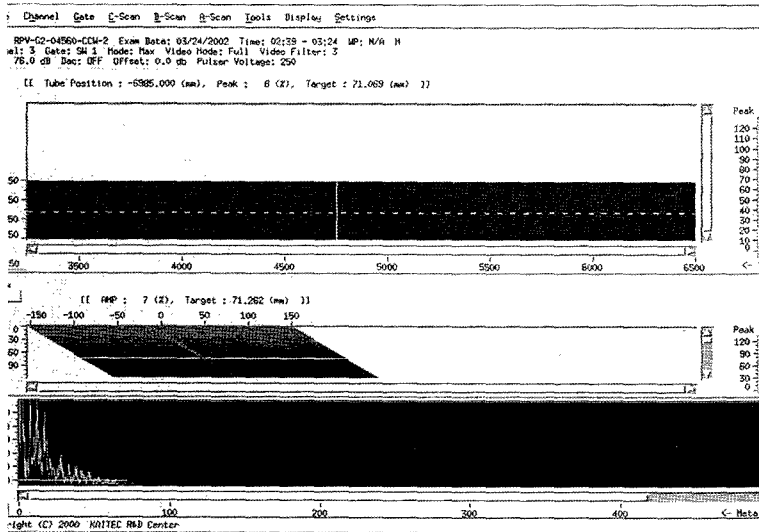
검사서에서 얻어진 화면의 상단 그림은 원자로 용접부를 주사한 C-Scan 화면 (신호의 크기를 평면도상에 색표시)으로써 가로 좌표와 세로 좌표는 원자로 용접부에서 탐촉자가 움직인 위치의 좌표를 나타내고 색깔은 탐촉자가 있는 위치에서의 반사체로부터 얻어진 신호크기를 나타낸 것이다.

화면의 중간 그림은 초음파 빔이 실제 용접부 내부를 진행하여 반사체로부터 얻어진 신호 크기를 색깔로 나타낸 것으로 가로 좌표는 상단 그림의 가로 좌표와 같고, 세로 좌표는 빔이 진행하는데 걸린 시간, 즉 빔이 진행한 거리이다.

화면의 하단 그림은 실제 탐촉자



〈그림 8〉 실증 시험(두산중공업)



〈그림 9〉 초음파 신호 분석 컴퓨터 화면

가 놓인 위치에서의 신호를 나타낸 것으로, 가로 좌표는 신호가 나온 위치까지의 거리 또는 빔이 진행하는 데 걸린 시간이며 세로 좌표는 신호의 크기를 나타낸다.

자동 초음파 검사를 위한 데이터 수집은 검사 부위 용접부에서 일정 거리만큼 떨어진 곳에서 RIROB이 검사를 수행하였다. 검사 수행 결과는 하드디스크에 저장되었고, 수록된 데이터는 Software에 의한 다

양한 화상 처리를 통해 결함 지시를 평가하였다.

울진 6호기에 투입되어 본 검사 장비가 검사한 결과, 용접부 G2와 노즐 N3는 관련규격의 허용치를 초과하는 결함은 검출되지 않았다.

맺음말

본 기고에서는 최근 연구 개발된 원자로 자동 탐상 시스템에 관하여

소개하였다. 국내 원자력발전소는 현재 운전중이거나 건설중인 것이 20여기에 이르고 있으며 앞으로도 계속 건설이 이루어질 것이다. 이에 따라 가동전·가동중 검사 업무도 따라서 늘어날 것이며 검사 장비의 수요 역시 증가될 것으로 예측된다.

본 시스템이 실용화 과정을 거쳐 제품화되면 종래의 원자로 자동 검사 시스템에 비하여 크기와 무게가 획기적으로 축소되어 운반 조립 운전에 관련된 비용이 저렴하고 검사 시간을 단축하게 된다.

또한 본 연구 개발을 통하여 레이저 유도식 수중 탐상체 기술, 초고속 대용량 초음파 신호처리 기술 등 원자로 압력 용기 검사 자동화 기술 확립하고, 압력 배관 용접부 초음파 검사, 와전류 탐상, 선박 수중 검사, 극한 환경 협곡 지역 검사 등 관련 산업에의 파급 효과가 매우 크게 되었다. 이 기고를 통하여 본 시스템 개발에 여러모로 배려해 주신 한국전력과 두산중공업 관계자 여러분께 감사드립니다. ☎