2000 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

초음파를 이용한 중수로 칼란드리아관 처짐도 측정 방법

Ultrasonic measurement method of calandria tube sagging in CANDU reactor

김태룡, 손석만, 이준신
전력연구원
대전시 유성구 문지동 103-16

이종포, 박철훈
(주) 카이텍
대전시 유성구 덕진동 150

요 약

중수로형 원자로(칼란드리아)는 핵연료가 포함된 수많은 압력관으로 구성되어 있으며 칼란드리아관은 압력관을 다시 감싸고 있는 원자로의 구조재로써, 그 재료적 특성 때문에 발전소 운전이력이 늘어남에 따라 열이나 방사선에 의한 크립 등으로 인해 처짐(sagging)현상이 발생하여 원자로 내부의 다른 튜브들과 간섭을 일으킴으로써 발전소의 안전 운전에 지장을 초래할 수가 있다. 따라서 원자로 수명기간동안 원자로 내의 다른 튜브들과 간섭이 발생하지 않음을 확인하기 위하여 칼란드리아관의 처짐도를 적절한 방법으로 계측할 필요성이 있으며, 본 연구에서는 초음파를 이용한 칼란드리아관의 처짐도 측정방법에 대해 검토하고 개발중인 측정장비와 예비 성능시험 결과를 기술한다.

Summary

Calandria tube wrapping each pressure tube is one of the key structural components of CANDU reactor(calandria) which is consisted of many pressure tubes containing nuclear fuel assemblies. As the calandria tube(made of zirconium alloy) is sagging due to its thermal and irradiation creep during the plant operation, it possibly contacts with liquid injection nozzle crossing beneath the calandria tube, which subsequently results in difficulties on the safe operation. It is therefore necessary to check the gap for the confirmation of no contacts between the two tubes, calandria tube and liquid injection tube, with a proper measure during the life of plant. In this study, an ultrasonic measurement method was selected among several methods investigated. The ultrasonic device being developed for the measurement of the gap was introduced and its preliminary performance test results were presented here.

1. 배 경

중수로형 원자로는 경수로와 달리 감속재(중수)가 채워져 있는 원통형상의 대형 원자로(칼란드리아)내에 수평으로 설치된 칼란드리아관(calandria tube: 이하 CT) 속에 다시 압력관(pressure tube: 이하 PT)을 설치하고 그 속에 핵연료를 장전하여 운전한다. 칼란드리아 내부에는 CT 이외에도 많은 튜브들이 수평 또는 수직으로 설치되어 있으며 그 중에서 본 연구와 관련한 튜브는 안전계통의 원자로정지물질주입관(liquid injection nozzle; 이하 LIN)이 있으며, 그 위치는 그림 1에서 보는 바와 같다. 월성 1호기의 경우 380개의 CT가 11.25" 간격으로 배열되어 있고, 이들 배관 사이에 LIN과 수평 및 수직중성자속계측관(horizontal and vertical flux detector; 이하 HFD 및 VFD) 등이 위치하고 있다. 표 1은 칼란드리아 내부의 각종 튜브의 제원을 정리한 것이다.

이와 같이 수평으로 설치된 CT(PT 포함) 및 LIN은 구조 특성상 핵연료 및 자중에 의한 처짐이 있을 수 있으며 또 CT 및 LIN의 재질(지르코늄 합금)의 특성상 운전중 열 및 방사선 조사에 의한 재질내 조직 성장(growth)과 크립(creep) 등으로 인해 처짐이 발생한다. 처짐량과 처짐율은 여러가지 요소의 영향을 받으나, 그 중 각 관의 출력분포(온도), 축적된 방사선 조사량, 하중, 재질 물성치의 영향을 크게 받는다[1,2]. CT와 LIN은 동일한 재질로 제작되어 방사선 조사에 의한 변형 거동이 유사할 것으로 생각되나 해석이나 실측한 결과에 의하면, 칼란드리아관이 LIN보다는 더 많이 처지는 것으로 나타났다. 따라서 LIN과 그 하부 CT 사이의 간격은 점차 커지게 되겠지만 그 상부 CT 사이의 간격은 점차 줄어들고, 원자로 운전년수가 증가함에 따라 원자로의 수명기간 내에 LIN과 그 상부 CT가 서로 닿을 우려가 있음이 지적되었다. 특히 중수로형 원전을 설계하고 가장 많이 보유하고 있는 카나다에서 컴퓨터 계산을 통한 CT와 LIN 사이의 간격 예측결과도 이와 유사한 결론이 있었다[3].

이에 따라 카나다의 일부 발전소들은 LIN 혹은 HFD와 그 상부 CT와의 간격 측정을 시행하였는데 Pt. Lepreau 발전소[4]에서는 HFD 예비 안내관에 초음파 probe를 넣어 정기적으로(`89, `91, `95년) 간격을 측정해 오고 있으며, Bruce 4호기에서는 1993년 LIN에 초음파 probe를 넣어 간격을 측정한 바 있으며, 그 결과를 보면 컴퓨터 계산에 의한 예측과는 달리 상당한 간격을 유지하고 있는 것으로 나타나 컴퓨터 계산이 너무 보수적이었음이 밝혀진 바 있다[5].

국내의 경우, 월성 1호기 도입 당시에는 이러한 우려가 없었으나 현재까지 15년 이상 운전해 왔으므로 이러한 문제에 대한 우려를 불식하기 위하여 CT와 LIN의 간격측정을 위한 대책을 종합적으로 검토하는 연구가 진행 중에 있다[6].

2. 간격측정 방법 선정

앞에서 설명한 바와 같이 CT는 11.25" 간격으로 배열되어 있고, 이들 관사이에 LIN, HFD 등이 위치하고 있어 CT의 처짐에 따른 CT와 LIN 사이의 간격, CT와 HFD 사이의 간격의 변화를 보면 LIN의 직경이 HFD 보다 더 크므로(표 1참조) 원자로 내에서의 튜브들 간의 접촉은 CT와 LIN 사이의 간격만 고려하면 됨을 알 수 있다.

월성 1,2,3,4호기의 경우, LIN은 CT의 F행과 G행사이, Q행과 R행사이에 각 3개씩(원통형상의 칼란드리아 축방향을 따라 중앙 부근에 한 개, 양 끝부분에 각 1개씩) 모두 6개가 설치되어 있다. 따라서 측정이 필요한 관심대상 간격은 LIN 축을 따라 상부 F행/Q행 CT 및 하부 G행/R행 CT

와의 간격이다. 한편 CT의 처짐은 CT의 길이 방향으로 볼 때 중앙위치에서 가장 많이 발생하리라 예측되고, 또 칼란드리아 정면에서 볼 때 외곽지역보다는 출력분포가 높은 중심지역에서 더 많은 처짐이 발생할 것으로 예상되므로, CT와 LIN의 접촉 가능성은 가운데 부분에 위치한 LIN-2와 LIN-5의 중앙지역에서 가장 높을 것이다. 또한 AECL이 발전소 운전경험 및 개발된 전산코드를 활용하여 예측한 바에 따르면, 만약 처짐정도가 예상보다 심각하여 CT와 LIN 사이에 접촉이 발생한다면 CT F행 5열부터 16열사이에서 LIN-2가, Q행 3열부터 18열 사이에서 LIN-5가 접촉할 가능성이 있다고 제시하였다.

본 연구에서는 이러한 LIN과 CT와의 간격을 직접 또는 간접으로 측정할 수 있는 방법 선정을 위해 다음 3가지 안을 대상으로 검토를 수행하였다.

- LIN을 통한 측정 방법
- HFD를 통한 측정 방법
- 관측공을 통한 측정 방법

여기서 관측공(viewing port: 이하 VP)은 칼란드리아에 수직방향으로 두 군데에 건설초기에 칼란드리아 내부 관찰용으로 이용하고 운전 시작 시에 neutron source를 포함한 start-up unit를 삽입하였던 구멍으로 그 이후에는 용도가 없는 곳이다.

(1) LIN을 통한 측정방법

LIN은 발전소 비상시 원자로를 긴급 정지시키기 위해 gadolinium nitrate를 원자로 내부로 주입하는 안전정지계통의 한 부분이다. LIN과 CT들은 모두 수평 구조물로 서로 90°의 방향을 유지한다 (그림 1 참조). CT와 LIN의 주위는 중수 감속재로 채워져 있으며, LIN의 경우 개방되어 있는 injection hole 때문에 내부도 중수 감속재로 채워져 있다.

본 측정방법은 초음파 탐촉자로 구성된 측정 probe를 LIN에 설치된 flange를 통하여 LIN 내부로 삽입, 노즐을 따라 전진 또는 후진하며 LIN 상, 하부에 위치한 CT들과의 간격을 측정하는 직접적인 방법이다. 탐촉자는 CT의 축에 대해 수직방향으로 초음파를 발사하게끔 3차원적으로 배열되어 있으며, 이 위치로부터 최대 편차는 2-3도를 초과할 수 없다. 만약 이 각도를 초과하면 CT로부터 반사되는 신호는 LIN을 통과해 버리거나 LIN 표면에서 재 반사되어 탐촉자에 수신되지 않게 된다. 또한 LIN 내면으로부터의 반사를 감소시키기 위해 탐촉자는 약 25°의 입사각을 가지도록 설치된다. 그림 2는 측정 원리와 방법을 나타낸 것이다.

카나다 Bruce A 발전소 4호기는 480개의 핵연료 채널을 갖는 중수로형 원자력발전소로 '79년 가동을 시작한 이후 '93년 11월 측정 시까지 약 14년의 운전이력을 가지고 있었으며, 본 측정방법을 적용하여 CT와 LIN과의 간격을 실측한 바 있다[5]. 측정 결과 CT의 처짐상태는 예상했던 것만큼 심각한 상태는 아니었으며 그 결과로 Bruce 발전소는 '95 '96년 중에 실시할 예정으로 진행중이던 LIN의 교체계획을 중단함으로써 상당한 경제적 이득을 본 것으로 알려져 있다. 이때 측정에 사용한 초음파 장비는 카나다 Research Productivity Council (RPC) 연구소에서 개발한 것이다[7].

본 측정방법의 월성 1호기에의 적용 가능성을 검토한 결과, 월성 1호기는 Bruce 4호기와 달리

LIN의 칼란드리아 바깥부분에 flange가 없이 L형 elbow의 용접연결로 되어 있어, 측정장비를 삽입하기 위해서는 안전정지계통의 부분인 LIN의 설계변경이 요구되는 방법이다.

(2) HFD를 통한 측정 방법

LIN을 통한 측정방법과 동일한 방법으로 HFD 내부에 중성자속 검출기가 설치되어 있지 않은 상태에서 초음파 probe를 삽입하여 CT과 HFD 사이의 간격을 측정한다. 본 방법은 특정 HFD와 상, 하부 CT와의 간격은 직접 측정할 수 있으나, 관심의 대상인 LIN과 그 상, 하부 CT의 간격은 실측할 수 없는 간접적인 방법이다.

카나다 Pt. Lepreau 발전소에서 예비 HFD를 통해 1989년, 1991년, 1995년에 CT와 HFD 사이의 간격을 측정한 바 있다[4].

월성 1호기는 Pt. Lepreau 발전소와 달리 예비 HFD가 없어 측정을 위해서는 새로 안내관을 설치하거나 아니면 기존의 검출기가 장착되어 있는 HFD 하나를 선정하여 수행하여야 한다. 그러나 본 측정작업을 위해 새로운 안내관을 설치한다는 것은 현실적으로 불가능하고, 기존의 HFD는 내부에 장착되어 있던 중성자속 검출기를 빼내야 하는데 일단 빼내면 재사용이 불가능한 단점이 있다.

(3) VP를 통한 측정방법

이 방법은 현재 용도가 없는 관측공(VP)를 통하여 초음파 probe 안내관을 칼란드리아 바닥의 locater까지 집어넣어 고정시키고 안내관을 따라 초음파 probe를 삽입하여 하강시키면서 CT의 중심선 위치를 측정하고 다시 CT와 직각으로 교차하는 LIN의 중심선 위치를 측정하여 간격을 계산해 내는 방법이다 (그림 3참조).

VP를 통한 CT와 LIN사이의 간격을 측정한 예는 아직 없으나 현장 설계변경이나 중성자속 검출기 교체와 같은 부수작업을 최소화하면서도 HFD를 통한 방법에 비해서는 직접 측정이 가능한 부분이 있기 때문에 LIN을 통한 방법을 선정하지 못할 경우 대안으로 활용할 수 있으므로 카나다의 원자력공사(AECL)에서 개념적인 검토가 수행된 바 있다[8].

VP의 위치는 그림 1에 보이는 바와 같이 VP-1은 CT 2열과 3열 사이, 원통형 칼란드리아 센터라인으로부터 한쪽 단면(A사이드)쪽으로 80㎝가량 떨어져 위치해 있으며 VP-2는 CT 16열과 17열 사이, 센터라인으로부터 다른 쪽 단면(C사이드)쪽으로 60㎝ 가량 떨어져 위치해 있다. 따라서 VP를 통한 측정은 2열과 3열, 16열과 17열에 있는 CT와 LIN-2 및 LIN-5가 될 것이며, 관심 대상인 CT와 LIN의 간격 중에는 LIN과 상부 CT(F3, F16, F17, Q2, Q3, Q16, Q17) 및 하부 CT(G2, G3, G16, G17, R3, R16, R17)와의 간격이 직접 측정 가능하다. 측정데이터로부터 관심대상인 다른 CT와 LIN 사이의 간격 추정 방법에 대해서는 본 학회의 다른 논문에서 기술한다[9].

초음파 probe의 사용을 기본으로 함으로써 얻어지는 data의 신뢰도를 확보하면서도 현재 비어있는 VP를 활용함으로써 현장 준비작업이나 기존 발전소 설비에 대한 영향을 최소화 할 수 있다. 또 칼란드리아 상하방향으로 약 20열의 CT 처짐을 측정할 수 있고, VP-2가 원자로 내에서 고출력영역(16, 17열)을 지나고 있어 원자로 내에서 처짐 정도가 가장 심각할 것으로 판단되는 고중성자속, 고온 영역 가운데 한 부분의 CT 처짐 상태를 알아낼 수 있는 이점도 있다.

이외에도 VFD를 통한 측정방법도 있을 수 있으나 관측공을 통한 방법과 같이 수직방향인 점과 간접 측정방법인 점이 같지만 내부의 중성자속 검출기를 빼내야 초음파 측정장비를 삽입할 수 있는 불리한 점이 있으므로 제외하였다.

따라서 VP를 통한 방법이 현장 설계변경이나 중성자속 검출기 교체와 같은 부수작업을 최소화하면서도 직접 측정이 가능한 부분이 있기 때문에 측정작업의 편리성, 작업수행을 위해 요구되는 준비업무의 효율성과 경제성, 얻어지는 data의 대표성 및 신뢰성 등의 측면에서 가장 적합한 방법으로 판단되어 월성 1호기의 CT 및 LIN 간격측정 방법으로 선정하였다.

3. 초음파 측정장비 및 시험

(1) 장비 구성

월성 1호기에 대하여 VP를 통한 CT와 LIN 사이의 간격을 측정하기 위하여 초음파를 이용하는 장비를 개발 중에 있으며 그림 4는 본 연구에서 개발중인 초음파 측정장비 전체 구성도이다. 측정장비는 그림 3과 같은 방법으로 초음파를 발사하여 CT 및 LIN의 중심선을 찾아내는 초음파 탐촉자와 내부를 육안으로 관찰할 수 있는 카메라부, 이들을 칼란드리아 내부로 삽입/인출하는 drive mechanism 부, 그리고 초음파 탐촉자와 카메라부의 신호를 처리하는 분석시스템 등으로 구성되어 있다.

초음파 탐촉자는 본 측정장비에서 가장 중요한 부품으로 원자로 냉각재(중수) 속에 잠겨서 작동되어야 한다. 이와 같이 수침법으로 사용할 경우 보통 고주파(5-10MHz)를 사용하나 월성 1호기 CT 및 LIN 측정의 경우에는 대상 물체가 탐촉자로부터 상당히 떨어져 있는 관계로 신호의 감쇠를 고려하여 가장 널리 사용되는 주파수를 선정하였다. 표2는 선정한 탐촉자의 사양으로 제작한 3개의 탐촉자의 bandwidth 는 각각 20%, 24%, 33%로 중간정도였다.

카메라부는 초음파 측정의 보조수단으로써 칼란드리아 내부의 CT 및 LIN의 접촉여부를 육안으로 관찰하기 위해 설치하였으며, CCD 셀 (1/3" Sony CCD, 27만 화소, 해상도 400TV-Line)을 사용하였다. 칼란드리아 내부는 전혀 조명시설이 없고 방사선 준위가 매우 높기 때문에 영상 정보를 취득할 수 있도록 조명장치도 같이 설계하였으며 또 CCD 보호를 위하여 납차폐와 납유리를 사용하였다. 영상정보는 내부 동기방식으로 처리하고 원자로건물 외부의 모니터에서 볼 수 있도록 하였다.

초음파 탐촉자와 카메라부를 칼란드리아 내부로 삽입/인출하는 drive mechanism은 DC servo motor와 볼스크류를 이용하여 원자로건물 외부에서 joystick으로 기동/정지할 수 있도록 하였으며, encoder를 설치하여 초음파 반사신호에 의한 CT 및 LIN 중심선의 위치 정보를 분석시스템으로 입력할 수 있도록 하였다. 그림 6은 개발 중인 초음파 측정장비의 분석시스템부를 제외한 사진이다.

분석시스템은 초음파 탐촉자와 encoder의 신호를 산업용 PC에 받아들여 처리할 수 있도록 하드웨어 및 소프트웨어를 구성하였다.

(2) 성능시험장치

개발중인 초음파 측정장비를 월성 1호기에 투입하여 실제 CT 및 LIN의 간격을 측정하기 전에 작동 및 성능시험을 수행하였다. 이를 위하여 성능시험장치를 설계, 제작하였으며 그림 5는 그 전체 구성도를 보인 것이다. 성능시험장치는 현장 조건과 가능한 한 같은 조건이 될 수 있도록 칼란드리아의 부분적인 모델과 RM(reactivity mechanism) deck, 그리고 그 사이의 VP 안내관, 이외에 칼란드리아에 물을 채울 수 있는 배관시스템으로 구성하였다.

초음파 측정장비는 실물크기로 제작할 경우 성능시험을 수행할 공간이 없으므로 동일한 설계로 하되 길이만 짧게 제작하여 성능시험이 가능하도록 하였다.

칼란드리아의 부분 모델에는 실제와 직경이 똑같은 CT 10개를 11.25″간격으로 배치하였으며, LIN도 역시 실제와 같은 직경으로써 실제 상황에서의 LIN과 탐촉자와의 거리를 감안하여 4개(40cm, 60cm, 80cm, 100cm)를 설치하였다. 또 하부에 VP 안내관을 고정할 수 있는 locator도 실제 상황과 같이 설계, 제작, 설치하였다. 그림 7은 본 연구에서 제작한 칼란드리아 부분 모델 사진이다.

초음파 측정장비는 발전소 예방정비기간중 원자로의 정지상태에서 운전원들의 접근이 가능한 원자로건물내의 RM deck상에 설치하도록 되어 있으므로 이와 같은 환경을 만들기 위하여 칼란드리아 부분모델 상부에 실제 상황과 같이 thimble과 RM deck을 설치하고 그 위에 초음파 측정장비를 설치하도록 하여 성능시험 장치에서 초음파 측정장비의 설치 모의 훈련도 가능하도록 하였다.

(3) 시험결과

성능시험용 초음파 측정장비를 이용하여 칼란드리아 부분모델 내의 10개의 CT와 4개의 LIN 위치를 측정하였다. 초음파는 0.5mm 간격으로 주사하였다. 위치의 정밀도를 확인하기 위하여 초음파 측정 전에 미리 버니어 캘리퍼로 각 튜브들의 위치를 계측해 두었다. 표 3은 측정결과로써 오차범위 1mm이내에서 각 튜브의 중심선 위치를 측정할 수 있음이 확인되었다.

4. 결론

중수로형 원자로의 CT는 발전소 운전이력에 따라 열이나 방사선에 의한 크립 등으로 인해 처짐(sagging)현상이 발생하여 원자로 내부의 다른 튜브들과 간섭을 일으킴으로써 발전소의 안전운전에 지장을 초래할 수가 있다. 따라서 원자로 수명기간동안 원자로 내의 다른 튜브들과 간섭이 발생하지 않음을 확인하기 위하여 CT의 처짐도를 적절한 방법으로 계측할 필요성이 있으며, 본 연구에서는 초음파를 이용한 CT의 처짐도 측정방법에 대해 검토하여 적절한 방법을 선정하고, 측정장비를 개발하여 예비 성능시험을 수행하였다.

먼저 CT의 처짐도 측정 방법으로 관측공(VP)를 통한 방법을 선정하였는데 이 방법은 현장 설계변경이나 중성자속 검출기 교체와 같은 부수작업을 최소화하면서도 직접 측정이 가능한 부분이 있기 때문에 측정작업의 편리성, 작업수행을 위해 요구되는 준비업무의 효율성과 경제성, 얻어지는 data의 대표성 및 신뢰성 등의 측면에서 가장 적합한 방법으로 판단되었다.

이에 따라 월성 1호기에 대하여 VP를 통한 CT와 LIN 사이의 간격을 측정하기 위하여 초음파를 이용하는 장비를 개발하였으며, 이 장비는 초음파를 발사하여 CT 및 LIN의 중심선을 찾아내는 초음파 탐촉자와 내부를 육안으로 관찰할 수 있는 카메라부, 이들을 칼란드리아 내부로 삽입/인출하는 drive mechanism 부, 그리고 초음파 탐촉자와 카메라부의 신호를 처리하는 분석시스템 등으로 구성하였다.

개발된 초음파 측정장비를 이용하여 칼란드리아 부분모델 내의 CT와 LIN 위치를 측정한 결과 오차범위 1mm이내의 정밀도로 각 튜브의 중심선 위치를 측정할 수 있음이 확인되었다.

본 장비는 향후 월성 1호기의 발전소 예방정비기간 중에 초음파 측정장비를 실제 투입하여 CT 및 LIN의 중심위치를 측정하고 간격을 확인함으로써 발전소의 안전운전에 크게 기여할 것으로 예상된다.

참고 문헌

[1] V. Fidleris, "The Irradiation Creep and Growth Phenomena," J. of Nuclear Materials, vol. 159, 1988, pp22-42.

[2] A. R. Causey, F. J. Butcher and S. A. Donahue, "Measurement of Irradiation Creep of Zirconium Alloys Using Stress Relaxation," J. of Nuclear Materials, vol. 159, 1988, pp101-113.

[3] AECL Letter to KEPCO, Wolsung Unit 2,3,4 Prevention of CT/LIN Contact, Calandria Tube and LISS Clearance Measurement Made at Bruce, 1997.1.17

[4] J. Goszczynski and A. B. Mitchell, "Development of Ultrasonic Measurement of Calandria Tubes/Horizontal Flux Monitor Guide Tube Proximity in CANDU Nuclear Reactors," Internal report in RPC

[5] R. C. Abucay, K. S. Mahil and J. Goszczynski, "Recent Experience in Ultrasonic Gap Measurement between Calandria Tubes and Liquid Injection Shutdown System Nozzle in Bruce Nuclear Generating Station," Proc. of 13th Int. Conf. on NDE in the Nuclear and Pressure Vessel Industry, Kyoto, Japan, 1995.5

[6] 김태룡, 이준신, 손석만, 칼란드리아관 처짐도 측정 및 예측기법개발, 1차년도 중간보고서, 한전 전력연구원, 1999.6

[7] R. C. Abucay, J. Goszczynski and A. B. Mitchell, "Special Tooling for the Measurement of Calandria Tube to LISS Proximity at Bruce NGS-A," Proc. of 2nd Int. Conf. on CANDU Maintenance, Toronto, 1992.11.22-24

[8] Personal Communication to AECL

[9] 김태룡, 이준신, 손석만, "칼란드리아관과 원자로정지물질주입관 사이의 간격추정 방법," 한국원자력학회 2000 춘계학술발표회 논문집, 2000. 5. 26-27, 고리 원자력연수원

표 1 월성 1호기 칼란드리아 내부의 각종 튜브의 치수 및 재질

종류	수량	길이(mm)	내경(mm)	두께(mm)	재질
PT	380	A: 6185.6 B: 6170.4 C: 6155.2	104.8	4.19	Zr 2.5%-Nb
CT	380	5944	128.96	1.37	Zircaloy-2
LIN	6	7320	50.8	2.79	Zircaloy-2
HFD	7	12530	2.73/1.65/0.34	6.22/0.50/0.2	Zircaloy-2/SS/Al
VFD	26	14300	3.04/2.20/0.34	7.11/1.65/0.2	Zircaloy-2/SS/Al

표 2 사용한 탐촉자의 사양

주파수	Bandwidth (6dB)	진동자 크기
2.25 MHz	20%, 24%, 33%	15.6 mm

표 3 초음파에 의한 측정 결과

튜브	위치(mm), 캘리퍼	위치(mm), 초음파	오차(mm)
좌측 CT 1	104.0	104.0	0.0
CT 2	389.3	390.0	0.7
CT 3	674.6	676.0	1.4
CT 4	959.7	960.5	0.9
CT 5	1245.1	1246.0	1.0
우측 CT 1	103.0	103.0	0.0
CT 2	388.3	389.0	0.7
CT 3	673.6	674.0	0.4
CT 4	958.7	959.5	0.9
CT 5	1244.1	1244.5	0.5
LIN 1	247.1	247.0	0.1
LIN 2	533.0	534.1	1.1
LIN 3	819.1	818.5	0.6
LIN 4	1102.7	1103.7	1.0

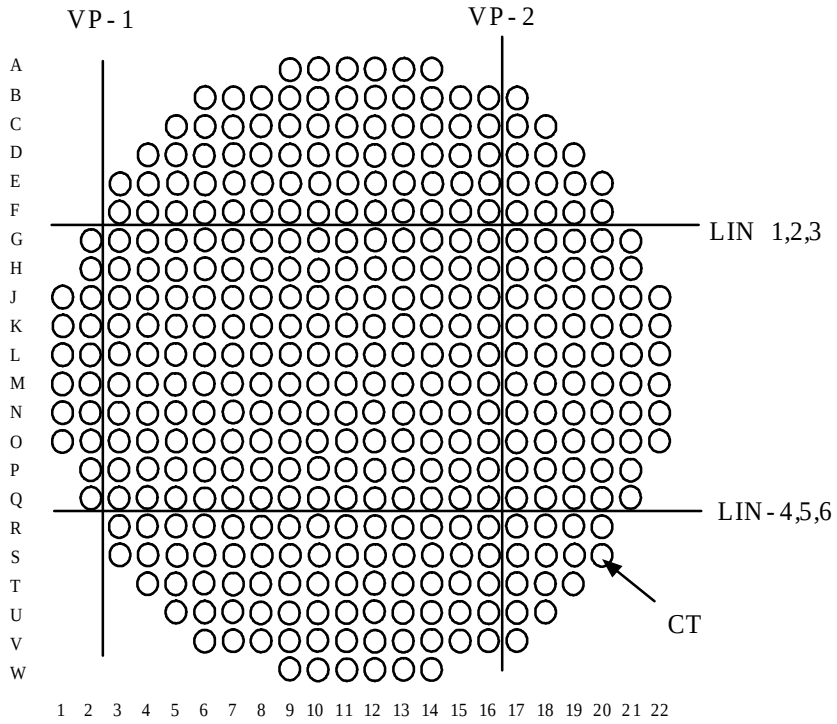

그림 1 월성 1호기의 CT 및 LIN, VP의 노심내 배치도

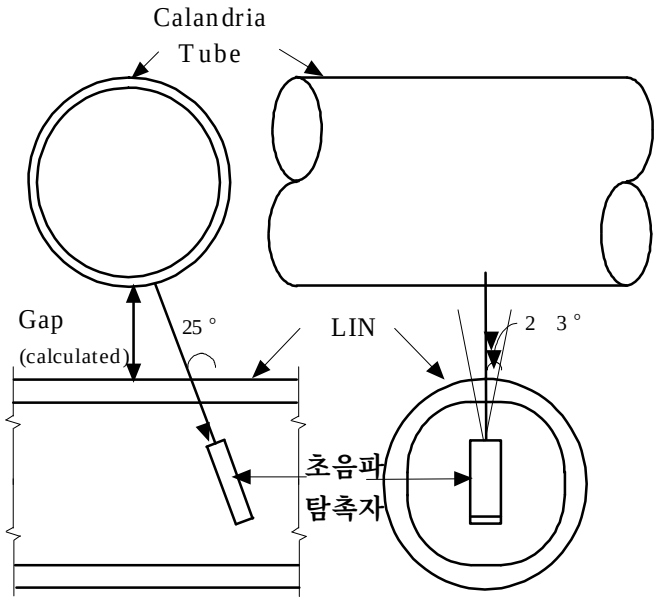

그림 2 초음파 탐촉자로 간격을 측정하는 개념도

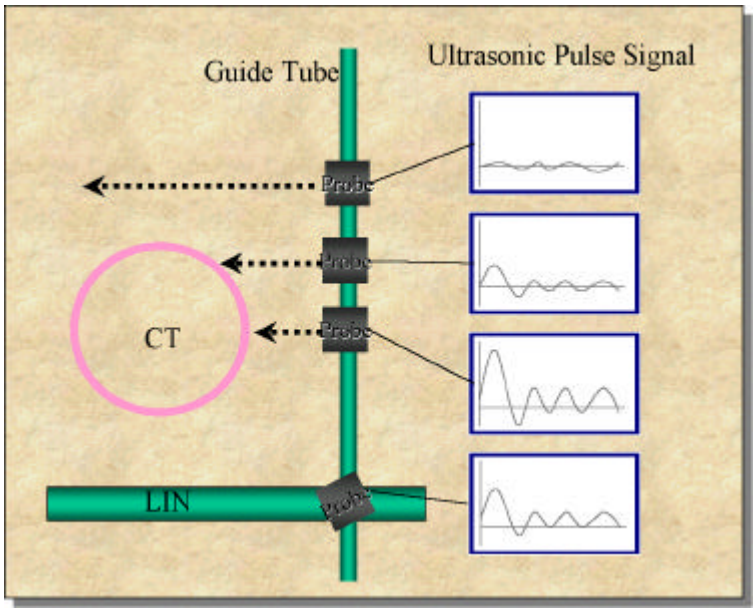

그림 3 초음파를 이용한 CT 및 LIN 측정 원리

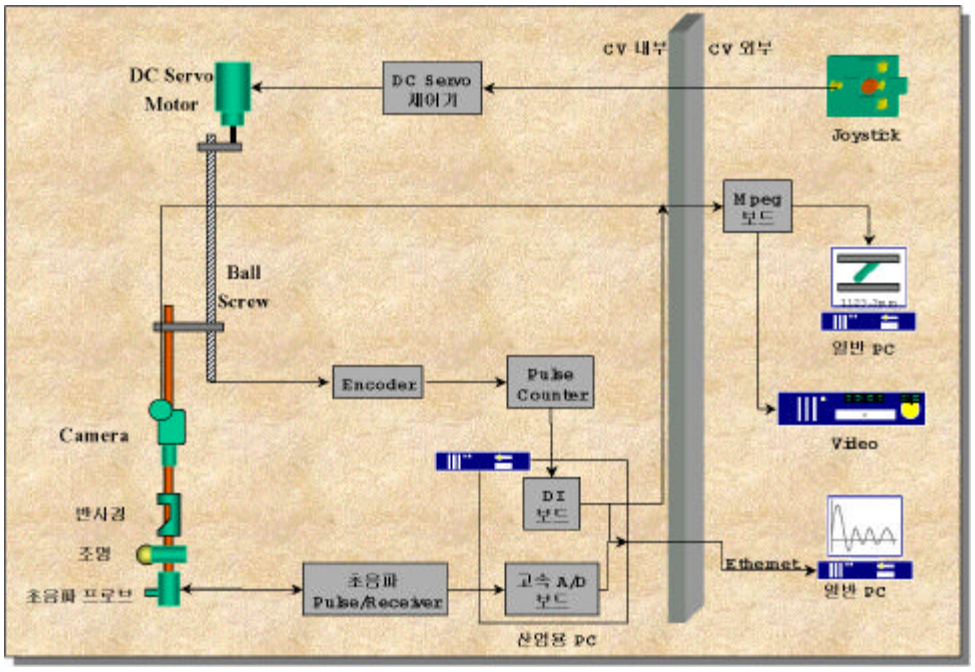

그림 4 초음파 측정장비 구성도

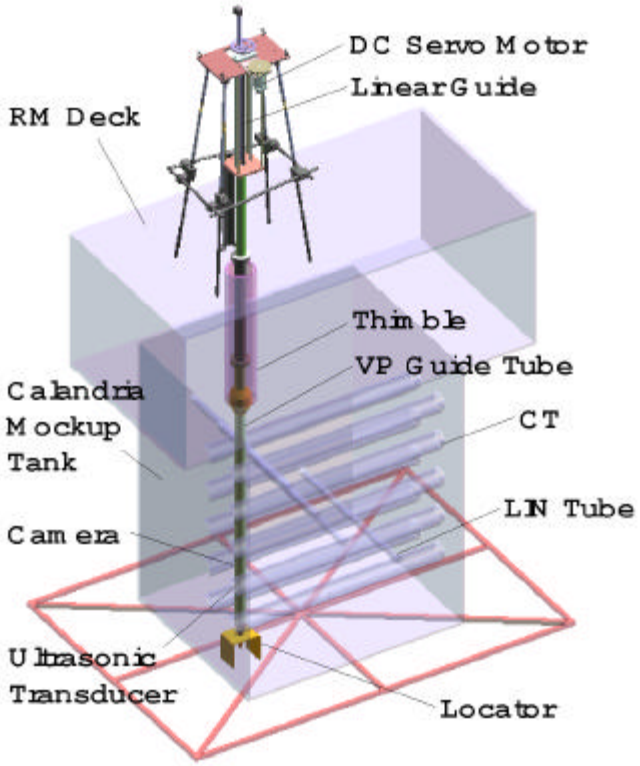

그림 5 초음파 측정장비의 성능시험 장치도

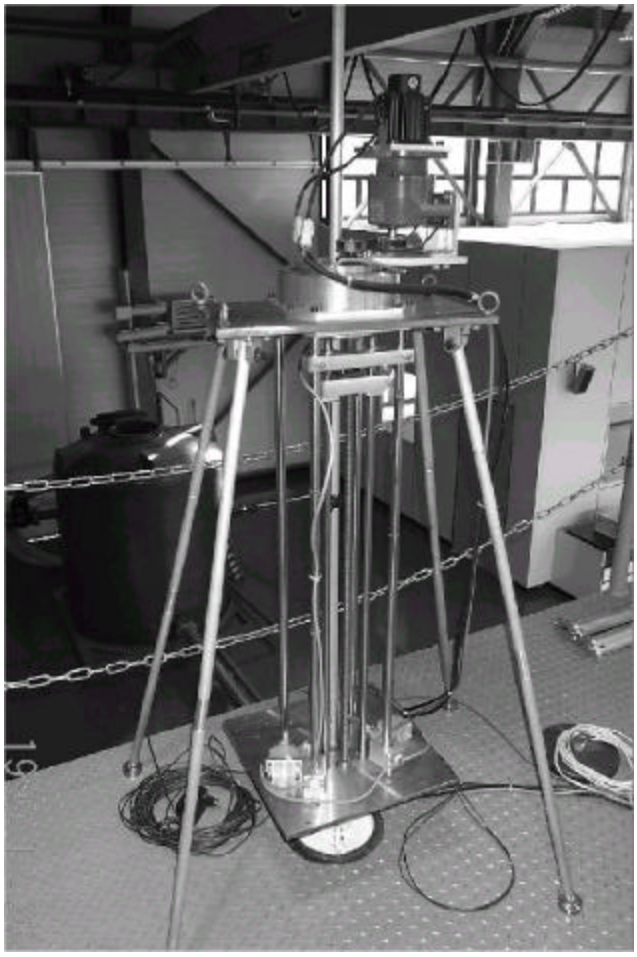

그림 6 개발중인 초음파 측정장비 사진

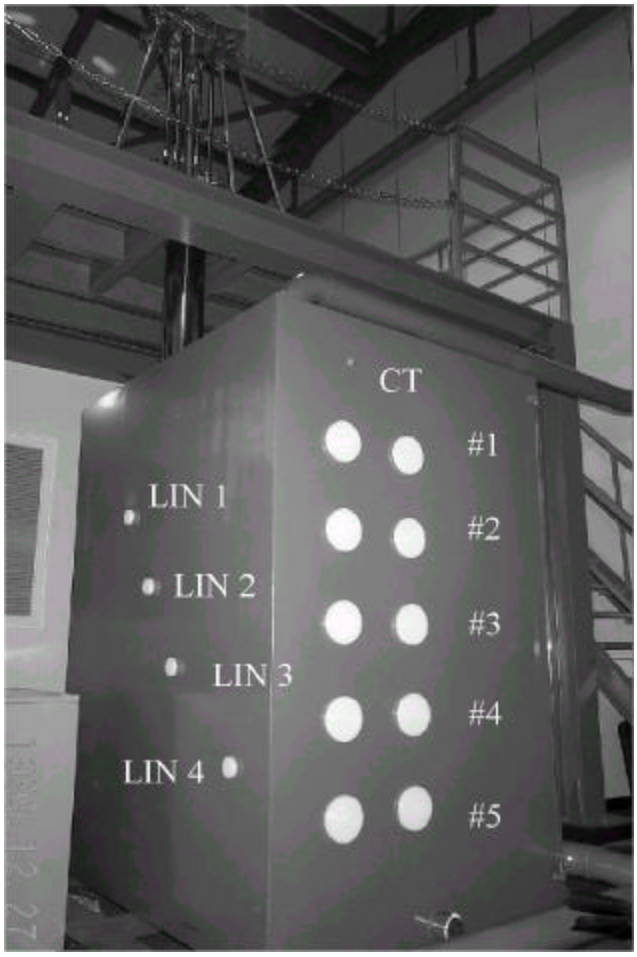

그림 7 칼란드리아 부분 모델 사진