대한기계학회 2001년도 춘계학술대회논문집 D pp. 834~839 KSME 01S683

초음파를 이용한 중수로내 칼란드리아관과 원자로 정지물질 주입관과의 간격 측정

손석만*·김태룡*·이준신*·이영희**·박철훈***

Ultrasonic Measurement of Gap between Calandria Tube and Liquid Injection Nozzle in CANDU Reactor

Sohn Seok-Man, Kim Tae-Rong, Lee Jun-Sin, Lee Young-Hee, Park Chul-Hun

Key Words: nuclear power plant, ultrasonic wave, creep, radioactive

Abstract

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. The gap between LIN and CT at site was measured using by this ultrasonic device at site.

기호설명

PT : pressure tube

CT : calandria tube

LIN : Liquid Injection Nozzle

HFD : Horizontal Flux Detector, 이하

1. 서 론

중수로형 원자로는 Figure 1에서 보이는 바와 같이 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 CT이외에도 많은 튜브들이 수평 또는 수직으로 설치되어 있으며 특히 안전계통의 원자로정지물질주입관(liquid injection nozzle: 이하 LIN)이 있으며 그 위치는 Figure 2와 같다. 월성 4호기의 경우 Figure 3과 같이 380개의 칼란드리아관(CT)이 11.25″ 매트릭스로 정렬되어 있고, 이들 관사이에 수평 중성자속 검출기(Horizontal Flux Detector, 이하 HFD라 함) 안내관, LIN 등이 위치하고 있다.

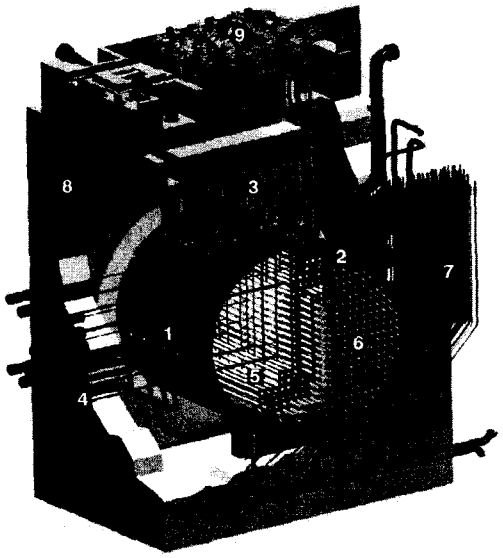
운전중 이들 관들은 응력(stress), 방사선 조사 등에 의한 재질내 조직성장(growth)과 크립(creep) 등으로 인해 어느 정도 처짐이 발생한다. 따라서 원자로 운전년수가 증가함에 따라 CT와 LIN 혹은 HFD 안내관 사이의 간격은 줄어들어 궁극적으로는 서로 닿을 우려가 있다. 처짐량과 처짐율은 여러 가지 요소의 영향을 받으나, 그중 각 관의 출력분포(온도), 축적된 방사선 조사량, 하중, 재질 물성치의 영향을 크게 받는다. CT와 LIN, HFD 안내관은 동일한 재질(지르코늄 합금)로 제작되어 방사선 조사에 의한 변형 거동이 유사할 것으로 생각되나 해석이나 실측한 결과에

* 한국전력공사 전력연구원
** 한국수력원자력 월성원자력본부
*** (주)카이텍

의하면, 칼란드리아관이 LIN이나 HFD 안내관보다는 더 많이 처지는 것으로 나타났다. 따라서 CT와 LIN이나 HFD 안내관 상부사이의 간격은 줄어들고 하부사이의 간격은 늘어나며, 또한 LIN과 HFD 안내관중 LIN의 직경이 HFD 안내관보다 더 크므로 결국 CT는 하부에 위치한 LIN 상부와 먼저 닿게 된다는 결론을 얻을 수 있다.

이에 따라 카나다 일부 발전소들은 LIN 혹은 HFD와 그 상부 CT와의 간격 측정을 시행하였는데 Pt. Lepreau발전소에서는 HDF 예비 안내관에 초음파 probe를 넣어 정기적으로 간격을 측정해 오고 있으며, Bruce 4호기에서는 1993년 LIN에 초음파 probe를 넣어 간격을 측정한 바 있다.

국내의 경우, 초기 중수로형 원자로 도입 당시에는 이러한 우려가 없었으나 현재까지 15년 이상 운전해 왔으므로 이러한 문제에 대한 우려를 불식하기 위하여 CT와 LIN의 간격 측정을 위한 대책을 종합적으로 검토하는 연구를 수행하였다.



1 Calandria Shell　2 Feeder Pipe
3 Thimble　4 LIN/HFD
5 Calandria Tube　6 Calandria End
7 Feeder Pipe　8 Structure
9 Reactivity Mechanism

Fig 1. Inner Shape of Calandria (Heavy Water Nuclear Reactor)

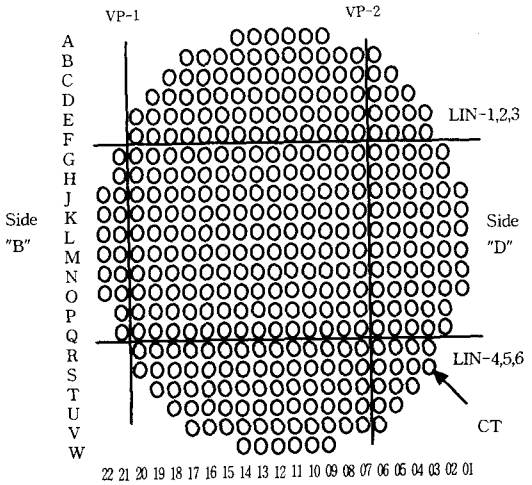


Fig 2. Location of Calandria Tube (A side)

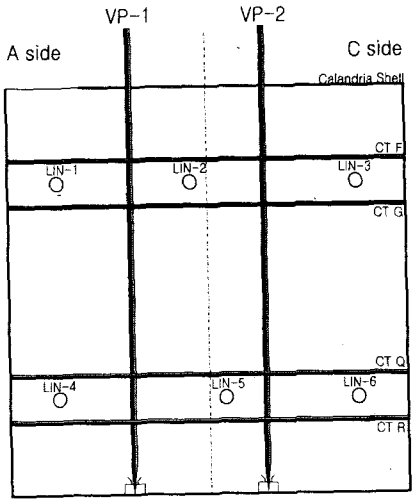


Fig 3. Location of LIN (D side)

2. 간격 측정 방법 개발

앞에서 설명한 바와 같이 CT는 11.25"간격으로 배열되어 있고, 이들 관사이에 LIN, HFD등이 위치하고 있어 CT의 처짐에 따른 CT와 LIN 사이의 간격, CT와 HFD사이의 간격의 변화를 보면 LIN의 직경이 HFD보다 더 크므로 원자로내에서의 튜브들 간의 접촉은 CT와 LIN 사이의 간격만 고려하면 됨을 알 수 있다.

LIN은 칼란드리아관(CT) F행과 G행사이, Q행과 R행사이에 각 3개씩(중앙 부근에 한 개, 양 끝부분에 각 1개씩) 모두 6개가 설치되어 있다. 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.

카나다 설계기관이 발전소 운전경험 및 개발된 전산코드를 활용하여 예측한 바에 따르면, 만약 처짐 정도가 예상보다 심각하여 CT와 LIN 사이에 접촉이 발생한다면 CT F행 5열부터 16열 사이에서 LIN-2가, Q행 3열부터 18열사이에서 LIN-5가 접촉할 가능성이 있다고 제시하였다.

2.1 간격 측정 방법 선정

이러한 LIN과 CT와의 간격을 직접 또는 간접으로 측정할 수 있는 방법 선정을 위해 다음 4가지 안을 대상으로 검토를 수행하였다.

- LIN을 이용하는 방법
- HFD을 이용하는 방법
- 수직중성자속검출기를 이용하는 방법
- 관측공(Viewing Port)을 이용하는 방법

여기서 관측공(Viewing Port: 이하 VP)은 칼란드리아에 수직방향으로 두 군데에 건설초기에 칼란드리아 내부 관찰용으로 이용하고 운전 시작시에 neutron source를 포함한 start-up unit를 삽입했던 구멍으로 그 이후에는 용도가 없는 곳으로 위 4가지 방법을 종합적으로 검토한 결과 VP를 통한 방법이 현장 설계변경이나 중성자속 검출기 교체와 같은 부수 작업을 최소화하면서도 직접 측정이 가능한 부분이 있기 때문에 측정 작업의 편리성, 작업수행을 위해 요구되는 준비업무의 효율성과 경제성, 얻어지는 data의 대표성 및 신뢰성등의 측면에서 가장 적합한 방법으로 판단되어 CT와 LIN사이의 간격 측정 방법으로 선정되었다.

2.2 간격 측정 원리

센서가 먼저 관측공을 통해 내려감에 따라 그 열에 해당하는 CT들의 위치를 감지한다. 위치감지는 CT에 다다르면 펄스가 튀기 시작하여 CT의 중심점에서는 가장 큰 펄스가 튀게 된다.(Figure 4 참조) 이 때를 기준으로 구동부의 encoder를 통해 센서의 현재 위치를 알아낸다. 현재 위치를 감지한 후 90° 방향으로 회전하여 LIN의 위치를 CT와 같은 방법으로 탐지한다. 이를 바탕으로 LIN과 CT의 간격을 계산한다. 전체적인 간격 측정 흐름도는 Figure 5와 같다.

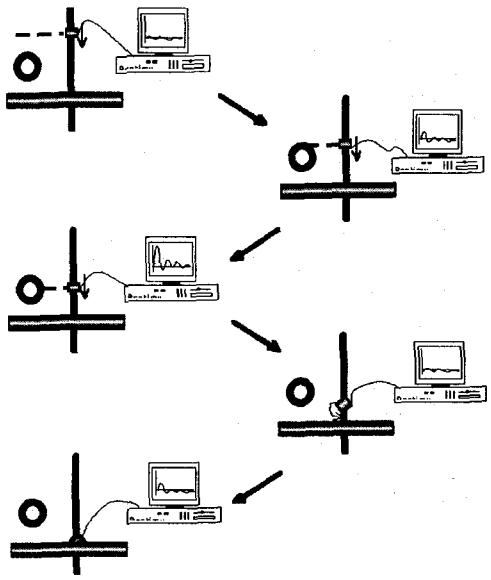


Fig 4. Method of Measurement

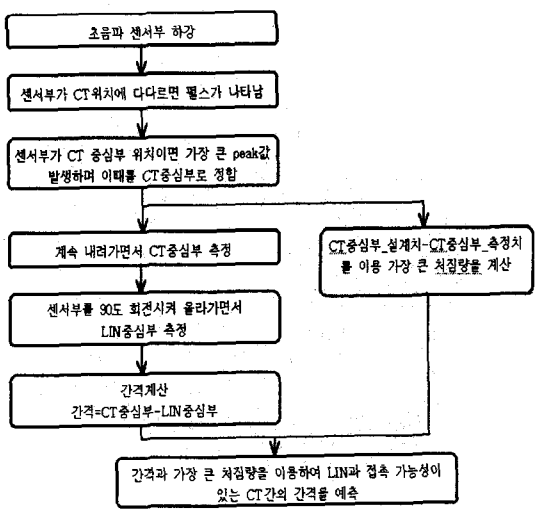


Fig 5. Flowchart of Measurement

3. 간격 측정 장비 개발

3.1 간격 측정 장비

VP를 통한 CT와 LIN사이의 간격을 측정하기 위해 초음파를 이용하는 장비를 개발하였으며 Figure 4는 개발한 초음파 측정장비 전체 구성도이다. 측정장비의 기계구동부와 컴퓨터를 RM

Deck에 설치한 후 Guide Tube를 이용하여 관측공에서 초음파 처짐도 측정 장비를 칼란드리아 내부로 하강시켜 관의 처짐도를 측정한다. 2채널의 초음파 탐촉자로부터 동시에 초음파 정보를 받는다.

측정장비는 Figure 6에서와 같이 초음파를 이용하여 CT 및 LIN의 중심선을 찾아내는 초음파 탐촉자와 원자로 내부를 육안으로 확인하는 카메라부, 이들을 구동하는 Drive Mechanism부, 그리고 초음파 탐촉자와 카메라부의 신호를 처리하는 분석시스템으로 구성된다.

초음파 탐촉자는 칼란드리아관 처짐 측정에 있어서 중요한 부품으로 원자로 냉각재 속에 잠겨서 가동되어야 하므로 수침법으로 사용되는 보통 5~10MHz의 고주파를 사용하고 있으나 월성 1호기의 CT 및 LIN의 경우에는 거리가 상당히 떨어져 있는 관계로 신호의 감쇠를 고려하여 가장 널리 사용하는 2.25MHz로 선정하였다. Table. 1은 탐촉자의 사양을 나타내고 있다.

Table. 1 Specification of Ultrasonic Probe

Frequency	Bandwidth (6dB)	Size
2.25 MHz	20%, 24%, 33%	15.6 mm

카메라부는 초음파 측정의 보조수단으로써 칼란드리아 내부의 CT 및 LIN의 접촉여부를 육안으로 관찰하기 위해 CCD 셀(1/3" Sony CCD, 27만 화소, 해상도 400TV-Line)을 사용하였다. 칼란드리아 내부는 조명시설이 전혀 없고, 방사선 준위가 매우 높기 때문에 영상 정보를 획득할 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 AC 서보모터와 볼스크류를 이용하여 원자로 건물 외부에서 조이스틱으로 가동·정지할 수 있도록 하였으며, 앤코더를 설치하여 초음파 반사신호에 의한 CT 및 LIN 중심선의 위치 정보를 분석시스템으로 입력할 수 있도록 하였다. 분석시스템은 초음파 탐촉자와 엔코더(encoder)의 신호를 산업용 PC에서 받아들여 처리할 수 있도록 하드웨어 및 소프트웨어를 구성하였다.

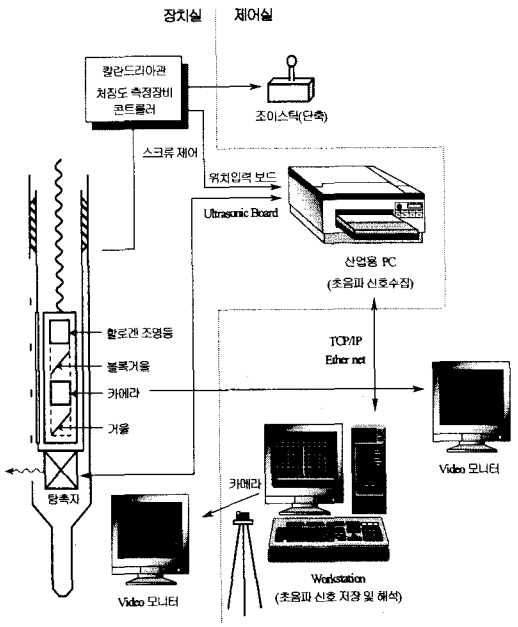


Fig 6. Configuration of Measurement System

3.2 성능 시험

본 장비를 실제와 같이 실험하려면 높이가 20m정도 필요하지만 현 여건상 5m이내의 높이에서 실험을 해야 하므로 Figure 7과 같이 원자로는 2m, Thimble 1m, 상부 작업공간은 2m로 잡아서 원 설비의 수치에서 길이 부분만 축소시켜 설계하였다. 구동부를 300mm 이동시켜 분석시스템상에서 나오는 위치정보와 수직 버니어 캘리퍼스로 측정한 결과 오차는 0.1mm로 분석 시스템상의 encoder에서 나오는 신호 오차가 0.2mm임을 감안할 때 정밀도는 오차 범위내에 있음을 확인하였다.

간격 측정 장비에 대해 성능 시험한 결과는 Table 2에 나타내었으며 CT의 경우 최대오차는 1.0mm, LIN의 경우는 0.6mm로 설계요건상의 오차인 2.0mm이내를 만족시켰다. Figure 8은 구동부 이동거리에 따른 초음파신호의 최대값을 그린 그래프로 CT 및 LIN의 중심이 뚜렷하게 나타나 중심위치에 따른 간격을 추정이 매우 정확함을 알 수 있다.

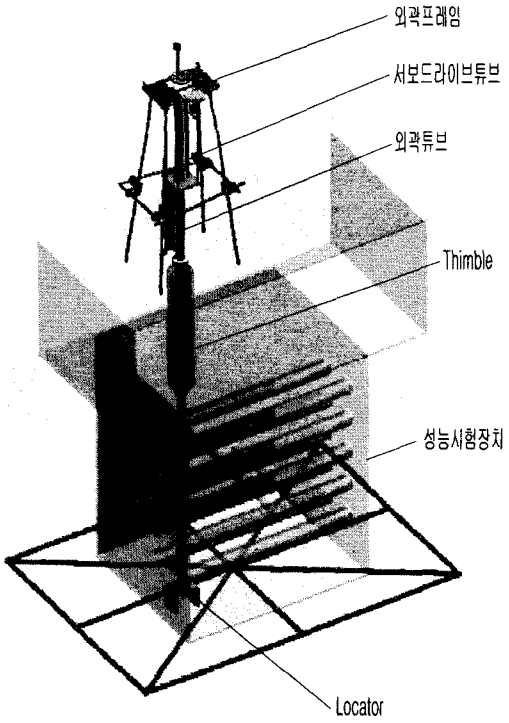


Fig 7. Performance Test Equipment

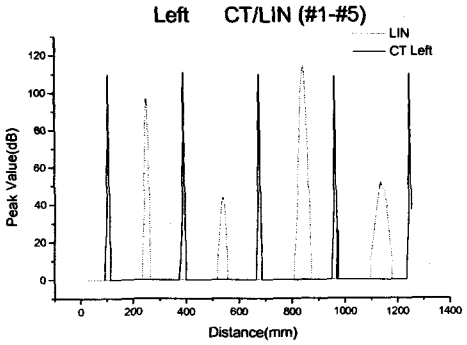


Fig 8. Maximum Ultrasonic Signal Value along Location
(CT #1 ~ #5, LIN #1 ~ #4)

Table 2. Result of Performance Test

unit(mm)

	위치(자)	위치(초음파)	오차(mm)
CT #1	1338.0	1338.0	0.0
#2	1623.5	1624.0	0.5
#3	1908.9	1909.5	0.6
#4	2193.5	2194.5	1.0
#5	2479.2	2479.5	0.3
#6	1337.7	1337.5	-0.2
#7	1622.9	1623.5	0.6
#8	1908.5	1908.5	0.0
#9	2194.2	2194.5	0.3
#10	2478.7	2479.0	0.3
LIN #1	1481.1	1481.0	0.0
#2	1767.0	1767.0	0.0
#3	2053.1	2052.5	0.6
#4	2336.7	2337.0	-0.3

4. 현장 적용

중수로형 발전소중 2개소에 본 과제에서 개발된 장비를 투입하여 CT와 LIN의 간격을 측정하였다. 이중 한 개 발전소에 본 장비로 LIN-5와 CT Q06, Q07 사이의 간격을 측정한 결과는 Table 3과 같다. 이 표는 운전이력이 2년이 안된 발전소에서 측정한 결과이다. 초기 설치 간격이 55mm에서 현재(전출력운전 1.4년) 40.1mm정도로 나타나 초기 간격 변화가 15mm정도로 상당히 많이 생김을 알 수 있었고 이는 일반적인 크립에서 초기에 과도 처짐을 일으킴을 보여준다.

Table. 3 Gap between LIN-5 and CT Q

unit(mm)

초기 설치 간격 (03열 기준)	측정 간격			
	CT Q06		CT Q07	
	측정간격	간격변화	측정간격	간격변화
55.0	42.7	12.3	40.1	14.9

5. 결론

중수로형 원자로의 CT는 발전소 운전이력에 따라 열이나 방사선에 의한 크립등으로 인해 처짐(sagging)이 발생하여 원자로 내부의 다른 튜브들과 간섭을 일으킴으로써 발전소의 안전 운전에 지장을 초래할 수가 있다. 따라서 원자로 수명기간동안 원자로내의 다른 튜브들과 간섭이 발생하지 않음을 확인하기 위하여 CT의 처짐도를 적절한 방법으로 계측할 필요성이 있으며, 본 연구에서는 초음파를 이용한 CT의 처짐도 측정 방법에 대해 검토하여 적절한 방법을 선정하고, 측정장비를 개발하여 예비 성능시험을 수행하였다. 먼저 CT의 처짐도 측정방법으로 관측공(VP)을 통한 방법을 선정하였는데 이 방법은 현장 설계변경이나 중성자속 검출기 교체와 같은 부수 작업을 최소화하면서도 직접 측정이 가능한 부분이 있기 때문에 측정작업의 편리성, 작업 수행을 위해 요구되는 준비업무의 효율성과 경제성, 얻어지는 data의 대표성 및 신뢰성 등의 측면에서 가장 적합한 방법으로 판단되었다. 이에 따라 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, 그리고 초음파 탐촉자와 카메라부의 신호를 처리하는 분석시스템등으로 구성하였다. 개발된 초음파 측정자비를 이용하여 칼란드리아 부분모델내의 CT와 LIN 위치를 측정한 결과 오차범위 1mm이내의 정밀도로 각 튜브의 중심선 위치를 측정할 수 있음이 확인되었다. 본 장비를 중수로형 발전소 예방정비기간 중에 초음파 측정장비를 실제 투입하여 CT 및 LIN의 중심위치를 측정하고 간격을 확인함으로써 발전소의 안전 운전에 크게 기여하였으며 본 장비의 우수성을 입증하였다.

참고문헌

(1) 김태룡, 이준신, 손석만, 2001. 5, "칼란드리아관 처짐도 측정 및 예측기법 개발 최종보고서", 한전 전력연구원

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

(3) R. C. Abucay, J. Goszczynski and A.B. Mitchell, 1992. 11. 22 - 24, "Special Tooling for the Measurement of Calandria Tube to LISS proximity at Bruce NGS-A", Proc. of 2nd Int. Conf. on CANDU Maintenance, Toronto

(4) V. Fidleris, 1988, "The Irradiation Creep and Growth Phenomena", J. of Nuclear Materials, vol. 159, p22-42