

2003 추계학술발표회 논문집  
한국원자력학회

방사선 크립에 따른 중수로내 원자로관의 처짐량 측정 및 예측  
Measurement and Computation for Sag of Calandria Tube Due to  
Irradiation Creep in PHWR

손석만, 이욱륜, 이선기, 이준신, 김태룡  
한전 전력연구원  
대전광역시 유성구 문지동 130-16

나복균, 남궁인  
한국전력기술(주)  
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

중수형 원자로내에는 원자로관과 액체주입노즐같은 수많은 수평관들이 설치되어 있으며 발전소 운전중에 발생하는 방사선으로 인한 크립 성장으로 점점 처지고 있다. 수평관들의 크립 처짐은 서로 다르기 때문에 운전 시간이 지날수록 서로 접촉할 우려가 있다. 특히 원자로관과 그 아래에 위치한 액체주입노즐과의 접촉이 우선적으로 예상된다. 접촉시에는 원전 불시 정지와 같은 심각한 문제를 야기하며 원자로관 손상을 일으키게 된다. 안전성을 확보하기 위해 원자로관과 액체주입노즐의 간격을 주기적으로 측정하고 발전소 수명 기간내 간격을 예측하는 것이 필요하다. 전력연구원에서는 원자로 상부에 있는 관측공을 통해 초음파 프로브를 접근시켜 비접촉식 방식으로 관들의 위치를 측정하는 장비를 개발하여 중수형 원자로에 성공적으로 적용하였다. 또한, 운전 기간중의 원자로관들의 처짐을 예측하는 코드를 개발하고 이를 이용하여 원자로관들의 처짐을 예상하고 처짐 측정치와 비교하여 프로그램을 검증하였다.

Abstract

.Calandria tubes and liquid injection shutdown system(LISS) tubes in a pressurized heavy water reactor(PHWR) are to sag due to irradiation creep and growth during plant operation. When the sag of calandria tube becomes bigger, the calandria tube possibly comes in contact with LISS tube crossing beneath the calandria tube. The

contact subsequently may cause the damage on the calandria tube resulting in unpredicted outage of the plant. It is therefore necessary to check the gap between the two tubes in order to periodically confirm no contact by using a proper measure during the plant life. An ultrasonic gap measuring probe assembly which can be inserted into two viewing ports of the calandria was developed in Korea and utilized to measure the sags of both tubes in the PHWR. It was found that the centerlines of calandria tubes and liquid injection shutdown system tubes can be precisely detected by ultrasonic wave. The gaps between two tubes were easily obtained from the relative distance of the measured centerline elevations of the tubes. Based on the irradiation creep equation and the measurement data, a computer program to calculate the sags was also developed. With the computer program, the sag at the end of plant life was predicted

## 1. 서 론

원통 모양인 중수형 원자로는 많은 핵연료 채널들이 수평으로 배치되어 있다. 각 핵연료 채널은 원자로관(Calandria Tube 이하 CT)과 압력관(Pressure Tube 이하 PT)으로 이루어져 있으며 원자로관은 그림 1과 같이 4개의 스페이스(spacer)로 이루어져 있다. 원자로내에는 그림 2와 같이 CT와 수평으로 교차하는 6개의 액체주입노즐(Liquid Injection Nozzle 이하 LIN)이 비상시 안전 정지를 목적으로 설치되어 있다.

CT와 LIN은 지르칼로이 합금으로 이루어져 있어 원전 운전중에 방사선 크립 성장으로 인해 운전 시간에 따라 점점 처진다.[Fidleris, 1988] CT, PT와 핵연료의 무게에 의해 처질 수 있으나 운전 시간이 오래됨에 따라 방사선 크립의 영향이 더욱 크게 된다. CT의 처짐이 LIN의 처짐에 비해 상대적으로 크기 때문에 CT밑에 위치한 LIN은 상부의 CT와 수명기간내에 접촉할 가능성이 크다. 따라서, 안전 운전을 위해 두 관사이의 간격을 측정하고 CT의 처짐을 예측할 필요가 있다.

CT와 LIN의 간격을 측정하기 위해 다음과 같이 여러 가지 접근 방법을 검토하였다.

- 1) LIN관에 초음파 프로브를 이용하여 LIN과 상부 CT와의 직접 간격을 측정한다.[Abucay, 1995]
- 2) 수평 중성자속 측정용 안내관(Horizontal Flux Detector Guide Tube)를 이용하여 상부 CT와의 간격을 측정한다.[Goszczyński, 1996]
- 3) 수직 중성자속 측정용 안내관(Vertical Flux Detector Guide Tube)을 이용하여 LIN과 상부 CT와의 간격을 측정
- 4) 관측공(Viewing Port)을 이용하여 LIN과 CT의 간격을 측정한다.[김태룡, 2000]

LIN을 통한 CT와 LIN의 간격을 직접적으로 측정하는 것이 가장 잇점이 있으나 LIN이 플랜지에 의해 설치되어야만 장비를 삽입할 수 있다는 단점이 있어 측정 대상 중수로내 LIN이 곡관으로 설치되어 있어 측정 장비의 LIN내 삽입이 불가능하여 LIN을 통한 직접 측정은 불가능하였다.

삽입 절차, 현장 작업편리성, 경비, 작업자 피폭량등 여러 문제점들을 검토한 결과 가장 편리한 측정 방법으로 원자로 상부에 위치한 관측공을 통해 초음파를 이동시켜 간격을 측정하기로 결정하였다. CT와 LIN사이의 간격을 측정할 새로운 초음파 프로브 및 장비를 개발하고 이를 관측공을 통해 원자로내로 이동시켜 간격을 성공적으로 측정하였다. [박, 2000] 한국에서의 성공적인 측정후 캐나다에서 AECL(Atomic Energy Canada Limited)도 유사한 방법으로 Pt. Lepreau에서 측정하였다.[Eijsemian, 2001]

처짐 계산과 관련하여서 Pettigrew에 의해 크립에 의한 핵연료 채널의 처짐이 계산되었고, 이 코드를 AECL과 OPG(Ontario Hydro)에서는 더욱 발전시켜 CDETH(Creep Deformation Evaluation Program) 코드를 개발하였다. CDETH 코드는 PT에 대해서는 CRNL-4003을 CT에 대해서는 CRNL-4001의 크립 방정식을 사용하였으며 PT와 CT를 FEM으로 모델링하여 설계시 사용된다.

## 2. 초음파를 이용한 측정

초음파 기술은 첫 번째로 중수형 원자로는 중수로 채워져 있어서 초음파 전달이 매우 잘되고 둘째로 초음파 프로브가 원자로내 고방사선의 영향을 거의 받지 않는다는 잇점 때문에 CT 처짐 측정에 매우 효과적인 방법이다.

CT와 LIN의 간격을 측정하기 위해 새로운 초음파 프로브가 개발되었다. 원자로 상부의 관측공을 통해 초음파 프로브가 수직으로 내려가면서 초음파를 원자로관에 조사하여 관에 반사되고 나온 신호를 비교하여 신호가 가장 크게 감지되는 프로브의 위치를 현재 원자로관의 중심 위치로 결정하게 된다.

### 2.1 초음파 프로브와 기계 구동 메카니즘

측정 시스템은 그림 3과 같이 초음파 프로브와 기계구동 시스템, 안내관, 신호 획득 및 분석 시스템으로 이루어져 있다. 초음파 프로브는 이머전(immersion)형으로 2.25MHz로 사용된다. 초음파 프로브 어셈블리는 AC 서보 모터에 의해 안내관안에 있는 볼 스크류를 따라 이동한다. 모터위의 엔코더는 1회전당 720회의 카운터 신호를 발생시켜 현재의 프로브의 위치를 인식시키고 초음파 프로브의 초음파 신호는 CT와 LIN의 실제 간격을 계산하기 위해 AC변환기를 통해 분석 컴퓨터로 전송된다.

## 2.2 데이터 획득 및 분석 하드웨어와 소프트웨어

데이터 획득 시스템은 초음파 펄서/리시버와 AC 변환기로 이루어져 있다. 신호 획득을 위한 주요 프로그램은 사용자 윈도우 환경을 지원하기 위해 X/Motif 윈도우 환경을 사용하였고 실시간 신호 획득 및 모션 컨트롤을 위해 Lynx OS를 사용하여 개발하였다. 사용자는 적절한 화면과 모션 컨트롤 시스템을 선택할 수 있고 pull-down 메뉴 방식으로 개발된 주 프로그램은 초음파 캘리브레이션, 초음파 검사, 신호 해석, 처짐 해석, 시스템 유틸리티로 이루어져 있다. TCP/IP 프로토콜을 이용하여 LAN으로 신호 획득 컴퓨터에서 신호 분석 컴퓨터로 데이터를 전송하도록 하였다. 초음파 신호는 실시간으로 하드디스크에 저장하고 동시에 화면상에서 신호 위치 및 초음파 신호가 보이도록 하였다.

본 신호 획득 및 분석 프로그램의 특징은 다음과 같다.

- 초음파 신호는 두개의 초음파 프로브를 이용해 두 채널을 통해 전달된다.
- 획득 신호는 실시간으로 하드디스크에 저장되며 오프라인으로 해석될 때 사용된다.
- 초음파 프로브 위치 정보와 초음파 신호 데이터는 신호 획득과 동시에 화면에 보여진다.
- 획득 신호는 오프 라인으로 분석되고 평가된다.

## 2.3 성능 시험

초음파 측정 시스템의 성능을 검증하기 위해 중수형 원자로내 원자로관들의 설치위치 및 치수를 조사하여 성능 검증 장치를 설계 제작하였다. 10개의 원자로관과 4개의 LIN이 설치되었으며 10개의 원자로관은 285.75mm의 피치로 평행하게 수직으로 5개씩 2열로 설치하였다. 성능 시험 장치의 상부에는 실제 장비 투입시 모의 시험을 위해 deck을 설치하였으며 축소 timble을 설치하여 현장 상황과 유사토록 제작하였다. 4개의 LIN은 각각 CT사이에 설치되어 관측공과 각각 40cm, 60cm, 80cm, 100mm씩의 거리를 두어 프로브와의 거리에 따른 감쇠 및 거리의 오차를 측정할 수 있도록 하였다. CT와 LIN의 위치는 초음파 측정 장치를 이용하여 측정되어 실제 캘리퍼스로 측정한 값과 비교하였다. mock-up 시험 결과, 위치 오차는  $\pm 1\text{mm}$  이내로 나타나 실제 CT와 LIN의 현장 측정시에 필요한 충분한 정밀도를 나타내었다.

## 2.4 관측공을 이용한 처짐 측정

이 연구에서 개발된 초음파 측정 장비를 사용하여 운전연한 18년이 된 월성 1호기에서 CT와 LIN의 간격을 측정하였다. 방사선 크립에 기인한 초기 CT 처짐을 측정하기 위해 1998년에 상업운전을 시작한 월성 4호기에서도 같은 방법으로 CT와 LIN의 간격을 측정하였다.

중수형 원자로는 285.75mm 피치로 380개의 CT를 가지고 있으며 그림 2와 같이 CT "F"와 "G"열 사이에 3개의 LIN을 CT "Q"와 "R"열 사이에 3개의 LIN이 설치되어 있다. 원전 운전 초기에 사용되었지만 현재는 사용하고 있지 않는 발전소 원자로 상부에 설치된

두개의 관측공을 이용하여 초음파 측정 장비를 설치하였다. 그림 2에서 보이는 바와 같이 관측공 #1(VP-1)은 CT "20"과 "21" 행 사이에 관측공 #2는 CT "6"과 "7" 행 사이에 위치하고 있다. 관측공 #1(VP-1)을 통해서 24의 CT(E20~S20,G21~Q21)와 LIN #1, #2, #4, #5가 측정되고 관측공 #2(VP-2)를 통해 40개의 CT (B06~V06, B07~V07)과 LIN #2, #3, #5, #6가 측정된다.

관측공을 통해 측정되는 초음파 신호는 수직으로 2mm간격으로 CT와 LIN의 반사파 신호를 측정한다. CT와 LIN의 중심에서 반사파의 피크치가 그림 4와 같이 확연히 나타난다. CT와 LIN의 처짐은 현재 위치와 초기 설치 위치를 비교하여 계산된다. CT와 LIN의 초기 설치 위치는 건설시 원자로내 기준점과 설계값을 사용하여 계산된다. 그러므로 CT와 LIN의 설치 공차가 처짐 측정 결과에서 고려되어야 한다.

월성 1호기와 4호기에서의 측정된 처짐량은 표 1로 요약된다. 측정된 CT 처짐은 월성 1호기에서는 41~48mm정도이고 월성4호기에서는 4~11mm이다. LIN 처짐은 월성 1호기에서는 16~21mm이고 월성4호기에서는 -4.0~0.7mm이다. LIN 처짐이 음의 값을 보이는 이유는 건설 초기의 설치 공차에 기인한 것이다. 월성 4호기에서 CT의 처짐율이 월성1호기에 비해 상대적으로 더욱 크게 나타났다. 이것은 운전 초기에 정하중에 의한 CT 처짐이 크립에 의한 처짐보다 상대적으로 크기 때문이다. 예측한 대로 LIN의 처짐은 CT에 비해 훨씬 적은 것으로 나타났다. 이는 LIN이 CT에 비해 낮은 방사선 지역에 위치하고 있기 때문이다.

### 3. 처짐 계산 프로그램

관측공을 통해 측정할 수 없는 CT와 LIN의 간격을 예측하고 설계수명기간동안의 CT와 LIN의 간격을 예측하기 CTSAG(Calandira Tube SAGging computation program) 코드를 개발되었다.[Kim, 2001]. CTSAG 코드는 CT, PT의 빔 모델과 방사선 크립 방정식에 기초하여 프로그램되었다.

#### 3.1 모델링

CT는 내압과 굽힘 모멘트, 축 하중을 받는 얇은 관이고 지르칼로이 합금의 이방성 때문에 복잡한 방사선 크립의 영향을 받는다. CT의 방사선 크립에 의한 처짐을 계산하기 위해서는 수학적 모델을 세우는 것이 필요하다.

PT는 한쪽은 고정되어있고 다른 한쪽은 자유롭게 팽창할 수 있기 때문에 한쪽은 고정으로 다른 한쪽은 슬라이딩으로 모델링되어지고 CT는 양단이 단단히 고정되어 있어 양단 고정으로 모델링된다.

PT가 CT의 안에서 4개의 스페이서에 의해 지지되어 있다.

PT, CT, LIN의 크립은 다음 인자에 의해 영향을 받는다

- 관 위치에 따른 중성자속
- 관 위치에 따른 온도 분포
- 정하중, 부력을 포함한 관에 가해지는 하중
- 지르칼로이 합금의 이방성을 포함하는 재료적 특성

### 3.2 크립 처짐 해석

크립은 시간에 따라 변하는 소성 문제이고 지르칼로이 합금은 이방성 재료이기 때문에 Hill에 의해 제안된 이방성 재료의 von Mises 항복식이 사용되어진다. 굽힘 모멘트를 받는 CT 크립에서 응력-변형률식은 다음과 같이 사용된다.

$$\dot{\epsilon}_{bz} = \dot{C}(x,t)\sigma_{bz} \quad (1)$$

$\sigma_{bz}$ 는 중심에서  $z$ 거리에서의 굽힘 응력이고,  $\dot{C}(x,t)$ 는 CT와 PT의 크립율이다.

크립과 굽힘 모멘트에 의한 CT와 PT의 처짐을 얻기 위해서 곡률  $K$ 에 대한 방정식을 다음과 같이 세우는 것이 필요하다.

$$\frac{\partial Y^2}{\partial^2 x} = \kappa_{Creep}(x,t) + \kappa_{Elastic}(x,t) = \frac{M(x,t)}{EI} + \int \frac{\dot{\epsilon}_{bz}}{z} dt \quad (2)$$

식(2)의 이중 적분으로 크립 처짐  $Y$ 를 식(3)과 같이 얻을 수 있다.

$$Y(x,t) = \int_0^x \int_0^x [M(x,t)/EI + \int_0^t (\dot{C}(x,t)M(x,t)/I) dt] \delta x \delta x \quad (3)$$

여기서,  $M$   $E$   $I$ 는 굽힘 모멘트, 영의 계수, 관성 모멘트이다.  $x$ 는 CT와 PT의 길이방향 좌표계이다.  $t$ 는 시간에 따른 크립 변형을 계산하기 위한 시간항이다.

굽힘 모멘트  $M(x,t)$  과 크립율  $\dot{C}(x,t)$ 를 알면 처짐량  $Y(x,t)$ 는 식(3)으로부터 쉽게 얻을 수 있다. CT와 PT의 크립율인  $\dot{C}_c(x,t)$ 와  $\dot{C}_p(x,t)$ 는 다음 식으로부터 얻을 수 있다.[Pettigrew, 1979]

$$\dot{C}_c(x,t) = F \cdot 1.16 \times 10^{-27} \Phi_{mc} \cdot (\sin \pi \cdot x/l)^{0.8} \quad (4)$$

$$C_p(x,t) = F \cdot [3 \times 10^4 t^{-2/3} + 6 \times 10^{-23} \Phi_{mp} \cdot (\sin \pi x/l)^{0.8}] \cdot e^{-470T} \quad (5)$$

여기서,  $\Phi_{mc}$ 와  $\Phi_{mp}$ 는 CT와 PT의 중성자속 최고치를 나타낸다.  $l$ 은 CT와 PT의 전체 길이이다.  $T$ 는 절대 온도이고,  $F$ 는 보상값이다.

$t = t_n$ 에서 굽힘 모멘트  $M(x,t)$ 은 전통적인 빔 이론을 사용해서 힘의 향으로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned}
M_p(x, t_n) &= M_p(0, t_n) + F_p(0, t_n) \cdot x + \sum_{i=1}^4 F_g(i, t_n) \cdot \langle x - L_{gp}(i) \rangle \\
&\quad - W_p \cdot \frac{x^2}{2} - P_p(t_n) \cdot Y_p(x, t_{n-1}) \\
M_c(x, t_n) &= M_c(0, t_n) + F_c(0, t_n) \cdot x - \sum_{i=1}^4 F_g(i, t_n) \cdot \langle x - L_{gc}(i) \rangle \\
&\quad - W_c \cdot \frac{x^2}{2} - P_c(t_n) \cdot Y_c(x, t_{n-1})
\end{aligned} \tag{6}$$

여기서,  $W_c$ ,  $W_p$ 는 CT와 PT의 분포하중이다.

방사선 크립에 의한 CT와 PT의 처짐은 식(4), (5), (6)을 식(3)에 적용함으로써 계산되어지고, 경계조건은 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
Y_p(L_p, t_n) &= 0 \\
Y_c(L_c, t_n) &= 0 \\
\dot{Y}_p(L_p, t_n) &= \dot{Y}_p(L_p) \\
\dot{Y}_p(L_c, t_n) &= \dot{Y}_c(L_c)
\end{aligned} \tag{7}$$

### 3.4 프로그램 흐름도

식(3)을 이용하여 크립 변형을 계산하기 위해서 먼저 초기( $t=0$ )에 정하중에 의한 핵연료 채널의 탄성 처짐을 계산하여야 한다. 그 결과를 크립 처짐 계산의 초기 입력 자료로 사용한다.

$t = t_n$ 에서 선형 시스템의 방정식은 다음과 같이 취해진다.

$$AX = B \tag{8}$$

벡터  $X$ 는 식(6)과 같이 2개의 모멘트와 6개의 반력으로 구성된다.

행렬  $A$ 는  $t = t_n$ 에서 관성 모멘트, 중성자속, 온도, 크립율, 스페이서의 위치가 포함된  $8 \times 8$  행렬이다.

벡터  $B$ 는  $t = t_{n-1}$ 에서의 CT와 PT의 축하중, 균일 분포 하중, 양끝단에서의 기울기, 스페이서위치에서 PT와 CT사이의 간격, PT와 CT의 모멘트를 포함하고 있는 8개의 항으로 이루어져 있다.

$A$ 와  $B$ 를 규명한후에  $t = t_n$ 에서 벡터  $X$ 의 모멘트와 힘을 계산한다. 계산된  $X$ 와 식(3)을 사용하여 CT의 처짐과 기울기를 계산한다.  $t = t_n$ 에서 계산이 완료된 후에 식(8)을 이

용하여  $t = t_{n+1}$ 에서의 계산을 반복한다. 크립 처짐 계산의 흐름도는 그림 6과 같다.

### 3.5 계산 결과

CTSAG 코드를 검증하기 위해, CT와 PT의 처짐이 월성1호기를 대상으로 계산되었다. 코드 검증 대상은 측정값이 존재하는 핵연료 채널 F06, F07, Q06, Q07로 선택하였다.

핵연료 채널의 크립 처짐을 계산하기 위해 사용된 재료 물성치와 설계치는 표 3과 4에 나타내었다. 식(2)와 (3)의 크립을 보상치 F는 핵연료 채널 Q06의 측정된 처짐치와 일치하도록 조정하였다. 표 5에서 보이듯이 계산된 다른 지점의 CT 처짐은 측정치와 매우 잘 맞고 있다. 그러므로, 측정할 수 없는 지점에 있는 CT의 처짐은 CTSAG 코드를 이용하여 예측할 수 있다. CT와 PT의 처짐은 핵연료 채널의 위치와 EFPH에 따라 계산된다. 그림 7에 전형적인 굽힘 곡선이 CT Q08에 대해 보여지며, PT도 CT와 유사한 굽힘 곡선을 보이고 있다. 핵연료 채널 Q08이 원자로 설계시 가장 높은 출력(6MW)를 보이며, Q08에서 설계 수명 기간(30years)중에 70mm에 도달할 것으로 보여진다.

## 4. 원자로관 처짐의 예측

운전에 따른 CT의 크립 처짐은 그림 8에서 보여지며, 운전 초기에는 높은 크립 처짐율이 보여진다. 이는 크립 특성중의 하나로 월성 4호기 측정값에서 확인된다. 초기의 높은 크립 처짐율을 보이고 후에 일정한 크립 처짐율로 CT는 처진다.

중수형 원자로 설계 수명(210,000EFPH) 말기의 최대 크립 처짐은 CT Q06에 대해 70mm로 예측된다.

## 5. 결론

중수형 원자로내 CT와 LIN의 처짐을 측정하기 위해 세계 최초로 관측공을 통한 초음파 측정 시스템을 개발하였다. 초음파 측정 시스템은 한국내 운전중인 중수형 원자로에 적용되어 CT와 LIN의 처짐을 성공적으로 측정하였다.

운전에 따른 처짐을 예측하기 위해, 측정값과 방사선 크립을 방정식에 기초하여 예측 코드를 개발하였다. CTSAG는 스페이서의 위치, 기울기, 모멘트, 양단의 힘들을 고려할 수 있다. CTSAG를 사용하여 발전소 수명 말기의 처짐량을 예측하였으며 측정할 수 없는 지점에 위치하는 CT의 처짐이 계산되었다.



## 참고문헌

Abucay, R. C., Mahil, K. S. and Goszczynski, J., 1995. 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.

Eijsemian, L. et al., 2001, Pt Lepreau - Calandria Tube to LISS Nozzle Proximity Measurement, AECL Inspection Report.

Fidleris, V., 1988. The Irradiation Creep and Growth Phenomena. J. of Nuclear Materials, vol. 159, pp. 22-42.

Goszczynski, J. and Mitchell, A. B., Development of Ultrasonic Measurement of Calandria Tubes/ Horizontal Flux Monitor Guide Tube Proximity in CANDU Nuclear Reactors.

Kim, T. R. et al., 2000. Ultrasonic Measurement of Sagging of Calandria Tubes and Liquid Injection Shutdown System Tubes using Newly Developed Device. 15th World Conference on NDT, Rome, Italy

Kim, T. R. et al., 2001. Development of Measurement and Prediction Methods for Calandria Tube Sagging, Final Report, KEPRI

Park, C. H. et al., 2000. Development of Ultrasonic Measurement Device for the Sag of Calandria Tubes and Liquid Injection Shutdown System Tubes. 15th World Conference on NDT, Rome, Italy

Pettigrew, M. J. and Lambert, S. B., 1979, Creep Deflection Analysis of Fuel Channels in CANDU Nuclear Reactors, Trans. of 5th Int. Conf. On SMiRT, Berlin

Causey, A. R, Norsworthy, A. G. and Schulte, C. W, 1985, Factors Affecting Creep Sag of Fuel Channels in CANDU-PHW Reactors, Canadian Metallurgical Quarterly, Vol. 24, No. 3, pp 207-214

Kim, T. R. et al., 2001. Ultrasonic measurement of gap between calandria tube and liquid injection shutdown system tube in PHWR, Nuclear Engineering and Design, 207 pp 125-135

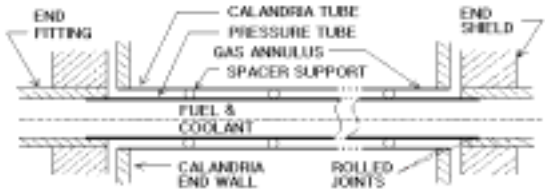


Fig. 1 Fuel channel configuration of PHWR

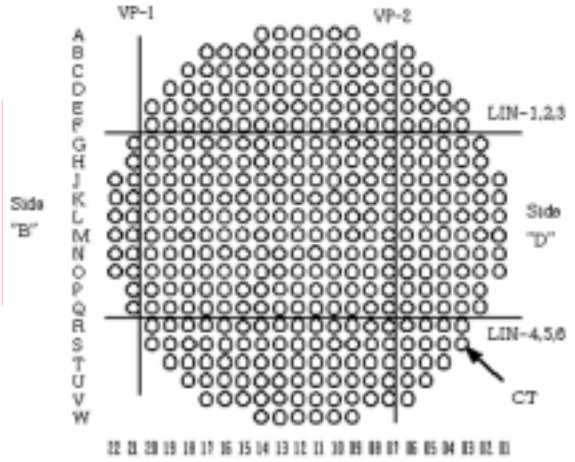


Fig. 2 Schematic diagram of a PHWR (700MW) calandria

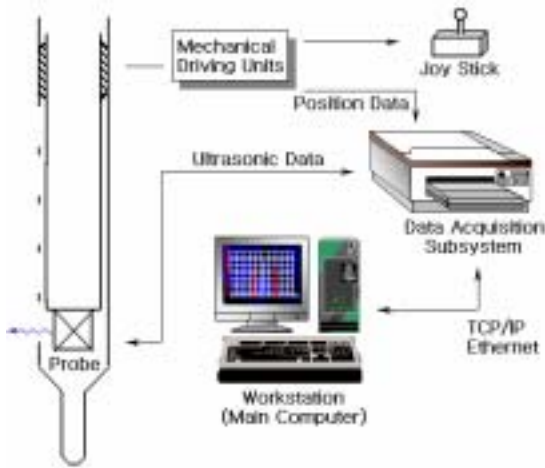


Fig. 3 The diagram of ultrasonic sag and gap measuring systems

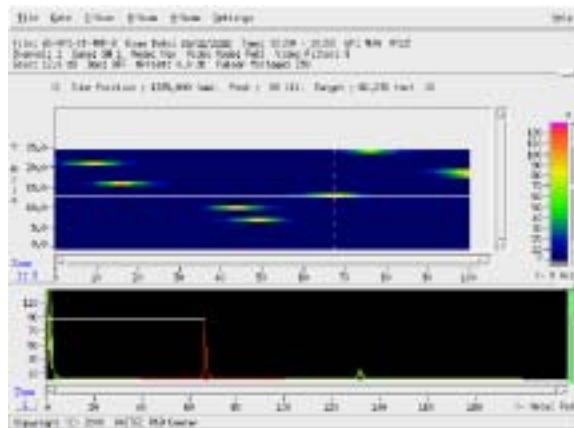
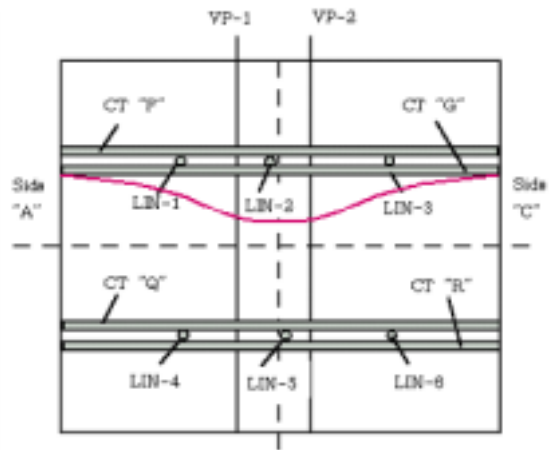


Fig. 4 Typical C-scan and A-scan display in measurement

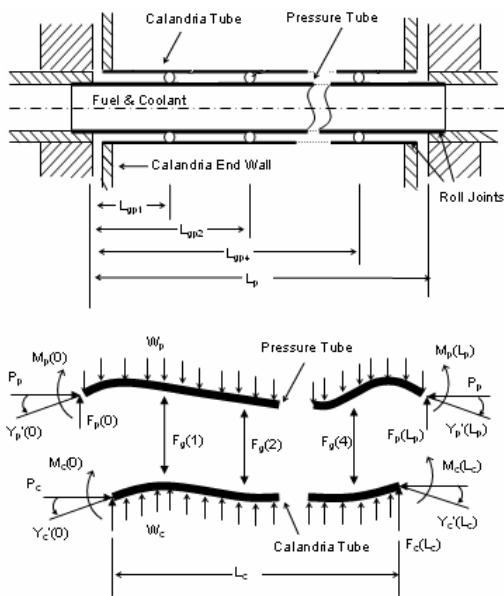


Fig. 5 Fuel channel modeling

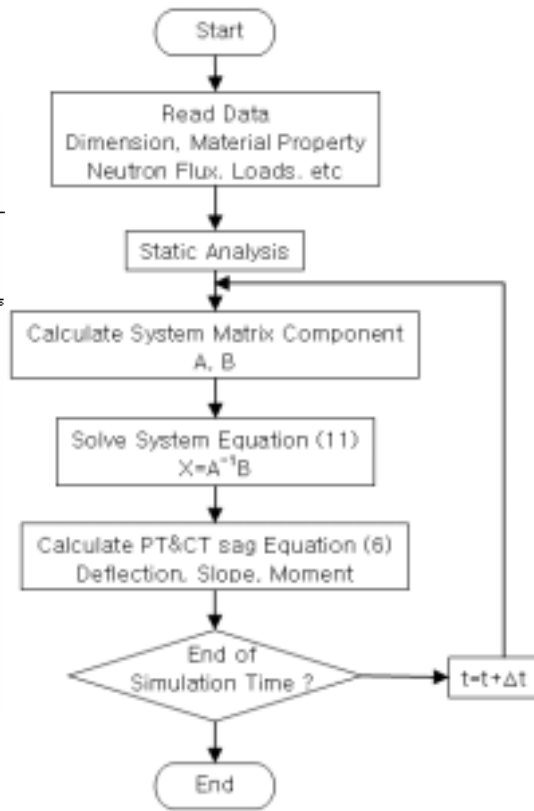


Fig. 6 The flow chart of CT sag computation

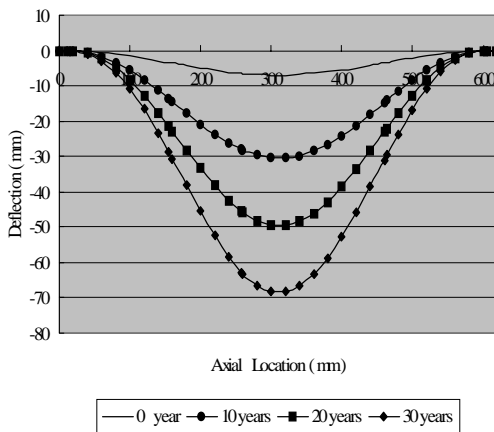


Fig. 7 Deflection of CT Q08 as to axial location

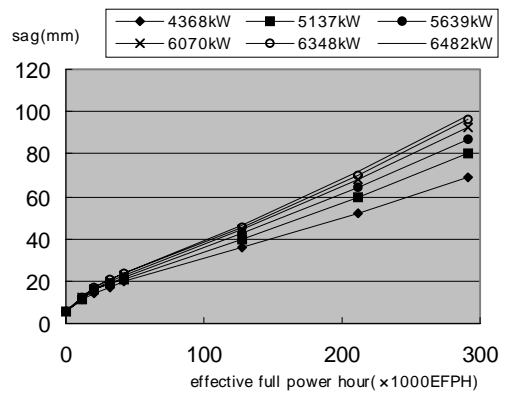


Fig. 8 Sag of CT as to EFPH

Table 1. Sags of some CT/LIN measured at VP-2

| CT or LIN | Wolsong-1(18years) |                         | Wolsong-4 (1.8years) |                         |
|-----------|--------------------|-------------------------|----------------------|-------------------------|
|           | Measured Sag (mm)  | Avg. Sag Rate (mm/year) | Measured Sag (mm)    | Avg. Sag Rate (mm/year) |
| CT F06    | 34.9               | 1.94                    | 8.8                  | 4.89                    |
| CT G06    | 34.5               | 1.92                    | 8.9                  | 4.94                    |
| CT Q06    | 40.3               | 2.24                    | 12.1                 | 6.72                    |
| CT R06    | 33.8               | 1.88                    | 12.3                 | 6.83                    |
| LIN-2     | 3.6                | 0.20                    | -                    | -                       |
| LIN-5     | 8.3                | 0.46                    | 4.9                  | 2.72                    |

Table 2 Summary of sags and gaps

|        | Wolsong-1(18years) |          | Wolsong-4(1.8years) |          |
|--------|--------------------|----------|---------------------|----------|
|        | Sag (mm)           | Gap (mm) | Sag (mm)            | Gap (mm) |
| CT Q06 | 40.3               | 11.8     | 12.1                | 42.7     |
| LIN-5  | 8.3                | -        | 4.9                 | -        |
| CT R06 | 33.8               | 79.3     | 12.3                | 56.1     |

Table 3. Material and dimension of CT and LIN

| Tube                                 | CT         | LIN        |
|--------------------------------------|------------|------------|
| Number                               | 380        | 6          |
| Length (mm)                          | 5,944      | 7,320      |
| Inner Diameter (mm)                  | 128.96     | 50.8       |
| Thickness (mm)                       | 1.37       | 2.79       |
| Material                             | Zircaloy-2 | Zircaloy-2 |
| Young's Modulus(kN/m <sup>2</sup> )  | 97         | 80.61      |
| Weight (kg)                          | 25.4       | 61.4       |
| Flexural Rigidity(kNm <sup>2</sup> ) | 113        | 165        |
| Distributed Load(kgf/m)              | -10.16     | 58.71      |

Table 4. Material and dimension of the others

| Fuel Bundle                                  |         |
|--|---------|
| Weight                                       | 23.5kg  |
| Bundle Length                                | 495.3mm |
| Number                                       | 12      |
| Spacer Location                              |         |
| Lp1  | 1.54m   |
| Lp 2   | 2.58m   |
| Lp 3   | 3.60m   |
| Lp 4   | 4.64m   |
| Temperature of Coolant                       |         |
| Inlet  | 266.5C  |
| outlet                                       | 321.3C  |
| Inclined rate $\dot{Y}(L)$ at both tube ends |         |
| PT   | 0.003   |
| CT   | 0.003   |

Table 5. Comparison between computation and measurement of CT

| CT  | Computed | Measured | Computed Method |
|-----|----------|----------|-----------------|
| F06 | 35.4mm   | 34.9mm   | CTSAG           |
| F07 | 37.3mm   | 35.3mm   | CTSAG           |
| Q06 | 40.3mm   | 40.3mm   | CTSAG           |
| Q07 | 42.1mm   | 41.9mm   | CTSAG           |