2000 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

칼란드리아관과 원자로정지물질주입관 사이의 간격추정 방법

Gap estimation method between calandria tube and liquid injection nozzle in CANDU reactor

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

요 약

중수로형 원자로의 칼란드리아관은 발전소 운전이력이 늘어남에 따라 열이나 방사선에 의한 크립 등으로 인해 처짐(sagging)현상이 발생하여 원자로 내부의 또 다른 관인 원자로정지물질주입관과 접촉함으로써 발전소의 안전 운전에 지장을 초래할 수가 있다. 따라서 원자로 수명기간동안 원자로 내에서 두 관이 접촉하지 않음을 입증하기 위하여 두 관 사이의 간격을 적절한 방법으로 확인할 필요성이 있다. 본 연구에서는 초음파를 이용한 측정장비로 계측한 특정 위치에서의 두 관 사이의 간격 데이터로부터 전 칼란드리아관과 원자로정지물질주입관 사이의 간격을 추정하는 방법을 제안한다. 두 관을 모두 구조역학적인 beam으로 모델링하고 두 관의 수학적 처짐곡선을 측정 데이터를 이용하여 구함으로써 두 관 사이의 간격을 계산하였으며, 이를 실측 데이터와 비교한 결과 칼란드리아관과 원자로정지물질주입관의 처짐은 beam의 수학적 처짐곡선으로 잘 표현할 수 있음을 확인하였고 따라서 월성 1호기 칼란드리아관과 원자로정지물질주입관 사이의 간격 추정에 성공적으로 적용할 수 있을 것으로 예측된다.

Summary

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, a methodology to estimate the gap between the two tubes utilizing the classical beam theory is proposed. The saggings of the calandria tube and liquid injection tube are modelled as mathematical deflection curves, the coefficient of which is determined by sagging data measured at viewing port by an ultrasonic measurement device. The proposed method was found to be well fitted to some measured data, which means that the method can be applied to Wolsung-1 for the measurement of the gap between calandria tube and liquid injection tube.

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 관과 그 위치는 그림 1에서 보는 바와 같고, 재질과 치수는 표 1과 같다.

이와 같이 수평으로 설치된 CT는 발전소 운전이력이 늘어남에 따라 열이나 방사선에 의한 크립 등으로 인해 처짐(sagging)현상이 발생하여[1,2], 원자로 내부의 또 다른 관인 원자로정지물질주입관(liquid injection nozzle; 이하 LIN)과 접촉함으로써(그림 1 참조) 발전소의 안전 운전에 지장을 초래할 수가 있다. 따라서 원자로 수명기간동안 원자로 내에서 두 관이 접촉하지 않음을 입증하기 위하여 두 관 사이의 간격을 적절한 방법으로 확인할 필요성이 있다.

중수로형 원전의 개발국인 카나다에서는 이를 위하여 일부 발전소에서 원자로의 CT와 하부의 LIN 혹은 HFD(horizontal flux detector: 이하 HFD) 안내관 사이의 간격 측정을 시행하고 있다. 즉 Bruce A 발전소 4호기에서는 1993년 LIN에 직접 초음파 probe를 넣어 직접 두 관의 간격을 측정한 경험이 있으며[3], Pt. Lepreau 발전소에서는 여분의 HFD 안내관에 초음파 probe를 넣어 CT와 HFD 사이의 간격을 측정함으로써[4], CT와 LIN간의 간격을 간접적으로 추정하고 있으나 추정 방법에 대해서는 알려진 바가 없다.

국내에서도 월성 1호기를 대상으로 CT와 LIN 사이의 간격 측정을 위한 여러 가지 방법에 대해 검토하였으나 카나다 Bruce A 발전소 경우와 같은 직접적인 방법은 거의 불가능하여 관측공(VP)을 통한 측정방법을 선정하였다[5].

관측공(VP)을 통한 측정방법은 월성 1호기에 설치되어 있는 두 개의 관측공(위치는 그림 1 참조)을 통하여 초음파 측정장비를 칼란드리아 내부로 삽입하고 관측 가능한 CT 및 LIN을 측정한 후 이들 데이터를 기초로 관심대상인 CT와 LIN의 간격을 추정하는 방법이다. 여기에 사용되는 초음파 장비는 본 학회의 다른 논문에서 기술한다[6]. 초음파 probe의 사용을 기본으로 하므로 얻은 data의 신뢰도를 확보하면서도 현재 비어있는 VP를 활용함으로써 현장 준비작업이나 기존 발전소 설비에 대한 영향을 최소화 할 수 있다.

월성 1호기는 380개의 CT가 11.25" 간격으로 배열되어 있고, 이들 CT 사이에 LIN이 그림 1에서 보는 바와 같이 CT의 F행과 G행 사이, Q행과 R행 사이에 각 3개씩(원통형상의 칼란드리아 축방향을 따라 중앙 부근에 한 개, 양단 부분에 각 1개씩) 모두 6개가 설치되어 있다. 따라서 측정이 필요한 관심대상 간격은 LIN 축을 따라 상부 F행/Q행 CT 및 하부 G행/R행 CT와의 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.

VP의 위치도 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.

본 논문은 이러한 측정데이터로부터 관심대상인 다른 CT와 LIN 사이의 간격 추정하는 방법에 관한 것으로, 이를 위하여 두 관을 모두 구조역학적인 beam으로 모델링하고 측정 데이터를 이용하여 두 관의 수학적 처짐곡선을 구함으로써 원하는 위치에서 두 관 사이의 간격을 계산하고자 한다. 또 이중 가장 보수적인 값을 이용하여 측정이 불가능한 다른 위치에서의 CT와 LIN 사이의 간격을 추정하고자 한다.

2. CT 처짐에 관한 수학적 모델링

CT의 처짐을 추정하기 위하여 CT를 beam theory에 따라 수학적으로 모델링 한다[7]. CT는 calandria tube sheet(그림 1의 칼란드리아 양단 "A" 및 "C" side 위치)에 의해 양단이 고정되어 있고 칼란드리아 내부에는 아무런 지지점이 없으므로 양단 고정의 보로 설정할 수 있으며, 따라서 처짐 형상은 그림 2와 같이 나타나고 이를 수학적으로 표현하면 다음과 같은 4차 함수로 모델링할 수 있다.

$$y = a_0 + a_1 x + a_2 x^2 + a_3 x^3 + a_4 x^4 \qquad (1)$$

이 때 양단 고정 보에 대한 경계조건은 다음과 같다.

i) at $x = 0,\ y = 0$ (2)

ii) at $x = 0,\ \theta = \frac{dy}{dx} = 0$

iii) at $x = l,\ y = 0$

iv) at $x = l,\ \theta = \frac{dy}{dx} = 0$

위의 경계조건을 이용하여 처짐 곡선의 계수를 구하면 다음과 같다.

$$a_0 = 0,\quad a_1 = 0,\quad a_3 = -\frac{2a_2}{l},\quad a_4 = \frac{a_2}{l^2} \qquad (3)$$

따라서 처짐 곡선의 방정식은 다음과 같다.

$$y = a_2 x^2 - \frac{2a_2}{l} x^3 + a_2 \frac{x^4}{l^2} = a_2 x^2 \left(1 - \frac{x}{l}\right)^2 \qquad (4)$$

처짐 곡선이 식 (4)와 같이 정해지면 임의의 위치 $(x = x_i)$에서 처짐량 y_i를 측정하여 계수 a_2를 결정할 수 있고, 최대처짐량 δ_{max} $(x = 0.5l$ 에서 발생)도 다음과 같이 계산 가능하다.

$$\delta_{max} = \frac{1}{16} a_2 l^2 \qquad (5)$$

3. LIN 처짐에 관한 수학적 모델링

월성 1호기의 LIN의 고정방식은 그림 1의 칼란드리아 "D" side 쪽에서 삽입되어 "B" side에 기준비되어 있는 locator bracket에 끼워져서 설치되는 방식으로 상세 도면은 그림 3과 같다. LIN의 처짐도 beam theory에 따라 수학적으로 모델링 하면 양단 경계조건이 CT와는 달리 나타난다. 즉 LIN에 대한 수학적 모델링상의 경계조건은 "D" side 쪽의 경계조건은 고정으로 할 수 있으나 "B" side 쪽의 경계조건은 locator bracket에 끼워져 고정되어 있으므로 이는 그림 4에서 보는 바와 같이 단순지지와 고정의 사이에 있을 것으로 판단된다. 이 중 CT와 LIN 사이의 gap의 측면에서 보수적인 결과를 주는 것으로 LIN의 수학적 모델로 선정하기로 한다.

각 경계조건에서의 최대처짐량은 고전적인 beam 이론으로 간단히 계산할 수 있으며 현재 관심의 대상이 되고 있는 CT와 LIN 사이의 간격은, 원자로의 운전 경년에 따른 CT의 처짐이 LIN의 처짐보다 크게 나타나기 때문에, LIN과 상부 CT사이의 간격이라 할 수 있다. 그런데 CT의 처짐량은 LIN의 경계조건에 관계없으므로 상부 CT와 LIN사이의 간격은 그림 4에서 알 수 있듯이 '고정-고정' 경우의 간격(Δ_2)이 '단순지지-고정'의 간격(Δ_1)보다 작게 나타날 것이다. 즉,

$$\Delta_2 \leq \Delta_1$$

LIN의 처짐량이 작게 추정되는 것이 CT와 LIN 사이의 간격 측면에서는 보수적인 결과를 주게 되므로 월성 1호기의 LIN 경계조건은 '고정-고정'으로 하고 처짐 곡선의 추정식은 CT의 경우처럼 식(4)를 사용하기로 한다. LIN의 경계조건을 '고정-고정'으로 함으로써 부가적으로 CT의 처짐 곡선에서와 같이 한 지점에서 측정한 처짐량 데이터만으로 전체 곡선을 추정할 수 있는 장점이 있다.

4. CT/LIN 간격 추정 방법

월성 1호기에서 관심의 대상인 CT와 LIN 사이의 간격은 다음과 같다.

- LIN-2 와 상부 CT (F3 F20) 사이의 간격
- LIN-2 와 하부 CT (G2 G21) 사이의 간격
- LIN-5 와 상부 CT (Q2 Q21) 사이의 간격
- LIN-5 와 하부 CT (R3 R20) 사이의 간격

이들 중 본 연구에서 채택한 관측공(VP)을 통한 측정법에서 직접 측정이 가능한 간격은 다음과 같다.

- VP-1: LIN-2 와 상부 F3 사이의 간격 및 하부 G2, G3 사이의 간격
- VP-1: LIN-5 와 상부 Q2, Q3 사이의 간격 및 하부 R3 사이의 간격
- VP-2: LIN-2 와 상부 F16, F17 사이의 간격 및 하부 G16, G17 사이의 간격
- VP-2: LIN-5 와 상부 Q16, Q,17 사이의 간격 및 하부 R16, R17 사이의 간격

이외에도 VP를 통한 측정에서는 다음과 같은 CT에 대한 처짐량을 관측할 수 있으며 이 데이터를 이용하여 직접 측정이 불가능한 위치에서의 CT와 LIN 사이의 간격을 추정한다.

- VP-1: G2 Q2, E3 S3
- VP-2: B16 V16, B17 V17

VP를 통한 측정으로 CT와 LIN 사이의 간격을 추정하기 위하여 처짐량과 간격과 사이의 관계

를 보면 다음과 같다(그림 5 참조).

$$\Delta_1 = \Delta_0 - (\delta_{CT} - \delta_{LIN}) \quad (6)$$

$$\Delta_2 = \Delta_0 + (\delta'_{CT} - \delta_{LIN}) \quad (7)$$

여기서 상부 CT와 하부 CT는 바로 인접한 튜브이므로 처짐량이 거의 같다고 가정하면(즉, $\delta_{CT} = \delta'_{CT}$), 초기 간격 Δ_0는 상/하부 CT의 측정된 간격 데이터 합의 절반이 된다.

$$\Delta_0 = \frac{\Delta_1 + \Delta_2}{2} \quad (8)$$

이제 VP를 통한 측정으로 CT와 LIN 사이의 간격을 추정하는 방법에 대해 요약하면 그림 6의 흐름도와 같다. 즉, 먼저 VP를 따라 내려가며 양편의 CT 및 LIN의 중심선 위치를 측정하고 이를 CT 및 LIN의 설치 위치 데이터와 비교하여 CT의 처짐량(δ_{CT}) 및 LIN의 처짐량(δ_{LIN})을 계산한다. 다음으로 VP의 위치 (그림 1의 $x = x_i$)와 CT의 처짐량 (δ_{CT})으로 식 (4)에서 상수를 결정함으로써 처짐곡선을 완성한다. 처짐곡선으로부터 LIN 위치에서의 CT의 처짐량을 다시 계산하고 이 값과 LIN의 처짐량을 이용하여 두 관사이의 간격을 계산한다.

LIN에 대해서도 같은 방법을 적용하여 LIN 처짐곡선을 구함으로써 원자로내의 어떤 위치에서도 CT와 LIN의 간격을 추정할 수 있다.

CT의 처짐량과 처짐율은 여러가지 요소의 영향을 받으나 그 중 각 관의 출력분포(온도)의 영향을 크게 받는 것으로 알려져 있다[1,2] 그러므로 VP를 따라 내려가면서 CT의 처짐량은 서로 다를 것이며 월성 1호기의 출력분포(그림 7 참조)를 볼 때 M, N, O행의 16 및 17행의 CT에서 최대 처짐량이 측정될 것으로 예상된다. 이러한 최대 처짐량이 구해지면 이를 측정하지 못한 CT에 적용함으로써 실제 원하는 CT와 LIN 사이의 간격을 보수적으로 구할 수 있게 된다.

5. 실측 데이터에의 적용

본 연구에서 칼란드리아관과 원자로정지물질주입관 사이의 간격 추정을 위하여 제안한 수학적 처짐곡선 방법을 실측 데이터에 적용하여 그 신뢰성을 확인하였다. 실측데이터는 현재 국내 중수로에 관한 데이터가 없으므로 카나다의 Bruce A 발전소의 데이터를 활용하였다[3].

Bruce A 4호기는 CT의 수가 월성 1호기 보다 많은 480개로 900MW급의 중수로이다. 1979년에 상업운전을 시작하여 1993년 CT와 LIN의 간격을 측정할 때까지 14년간 운전한 상태였다. 측정은 LIN 관으로 초음파 측정장비를 삽입하여 상부 CT (P01 P19)와 하부 CT (Q01 Q19) 사이의 간격을 직접 측정하였으며 측정 결과는 표 2에 정리하였다.

본 연구에서 제안한 방법을 적용하기 위하여 Bruce A 4호기의 VP-2 위치에서의 데이터로 CT 및 LIN의 처짐곡선을 구하고 이를 이용하여 다른 CT 위치에서의 간격을 추정한 결과 표 2에 정리한 바와 같이 오차 범위 10% 이내로 추정이 가능하였다.

6. 결론

수평으로 설치된 수많은 칼란드리아관(CT)과 기타 안전성 관련 많은 튜브들로 구성된 중수로형 원자로의 안전 운전을 보장하기 위해서는 원자로 수명기간동안 원자로 내에서 크립으로 인해 처짐이 발생한 CT와 안전정지계통인 원자로정지물질주입관(LIN)이 접촉하지 않음을 입증할 필요성이 있다. 이를 위해서 본 연구에서는 초음파를 이용한 측정장비로 계측한 특정 위치에서의 두 관 사이의 간격 데이터로부터 전 칼란드리아관과 원자로정지물질주입관 사이의 간격을 추정하는 방법을 제안하였다. 지금까지의 결과를 종합하면 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

(1) CT 및 LIN의 처짐은 모두 beam의 수학적 처짐곡선으로 잘 표현할 수 있다.

(2) 구해진 처짐곡선을 이용하여 관심의 대상인 CT와 LIN 사이의 간격을 추정할 수 있으며 이를 실측데이터에 적용한 결과 매우 잘 일치하고 있는 것으로 나타났다.

(3) CT와 LIN 사이의 간격에 대한 추정에서 상부 CT의 처짐량은 크게, 하부 CT의 처짐량은 작게, 그리고 LIN의 처짐량은 작게 가정하는 것이 보수적인 결과를 얻는 것으로 나타났으며,

(4) 원자로의 출력 분포상 관측공(VP-2)를 통하여 CT의 최대처짐량이 측정되는 것으로 예상되므로 월성 1호기의 CT와 LIN 사이의 간격 측정에 본 연구에서 제안한 방법을 충분히 적용할 수 있음을 알았다.

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] 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

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

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

[6] 김태룡, 이준신, 손석만, 이종포, 박철훈 “초음파를 이용한 중수로 칼란드리아관의 처짐도 측정방법,” 한국원자력학회 2000 춘계학술발표회 논문집, 2000. 5. 26-27, 고리 원자력연수원

[7] R. J. Roark and W. C. Young, Formulas for Stress and Strain, 5th ed. McGraw-Hill 1975.

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 측정치와 계산치(VP-2위치의 데이터 이용)의 비교 (Bruce A 4호기)

	P (상부) gap			Q (하부) gap		
	측정치	계산치	오차(%)	측정치	계산치	오차(%)
P01/Q01	23.92	18.04	-24.6	59.52	65.40	9.9
P02/Q02	21.87	19.25	-12.0	61.57	64.19	4.3
P03/Q03	22.55	21.31	-5.5	62.26	63.51	2.0
P04/Q04	23.92	22.05	-7.8	59.52	61.39	3.1
P05/Q05	23.92	24.53	2.6	61.57	60.97	-1.0
P06/Q06	23.92	25.58	6.9	60.89	59.24	-2.7
P07/Q07	25.97	26.53	2.2	58.16	57.61	-0.9
P08/Q08	25.28	27.66	9.4	58.84	56.46	-4.0
P09/Q09	28.02	29.31	4.6	57.47	56.19	-2.2
P10/Q10	28.71	30.40	5.9	57.47	55.78	-2.9
P11/Q11	29.39	29.55	0.5	54.06	53.91	-0.3
P12/Q12	29.39	29.80	1.4	54.06	53.66	-0.7
P13/Q13	30.76	30.83	0.2	54.75	54.69	-0.1
P14/Q14	30.76	30.92	0.5	55.43	55.28	-0.3
P15/Q15	28.71	29.04	1.1	54.75	54.42	-0.6
P16/Q16	28.71	27.95	-2.6	54.06	54.83	1.4
P17/Q17	29.39	29.38	0.0	58.16	58.18	0.0
P18/Q18	28.02	28.92	3.2	60.89	60.00	-1.5
P19/Q19	23.24	23.87	2.7	58.16	57.53	-1.1

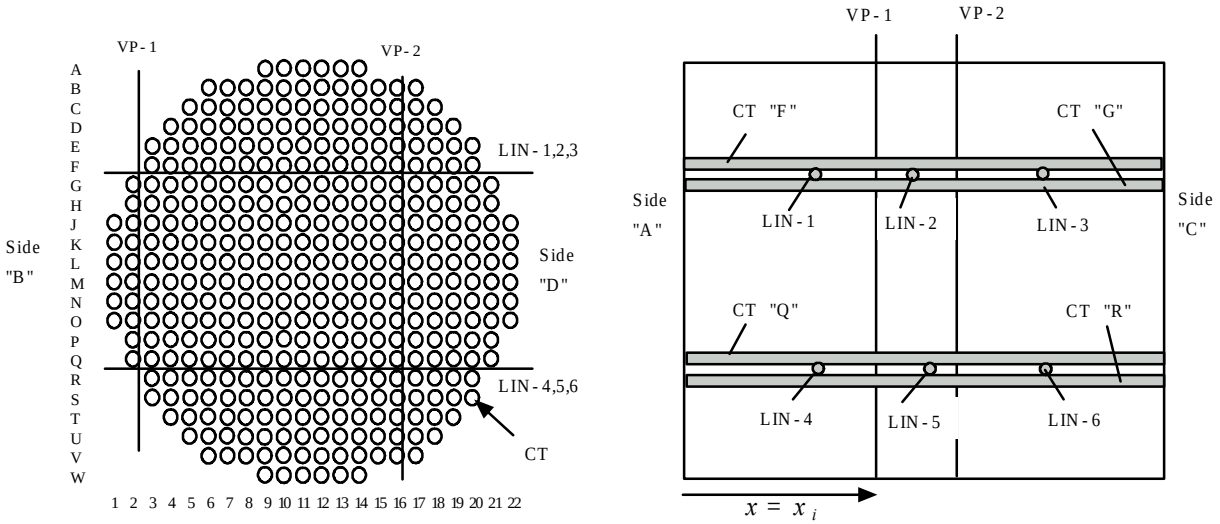


그림 1 월성 1호기 원자로(칼란드리아) 구성도

그림 2 CT의 처짐곡선 모델

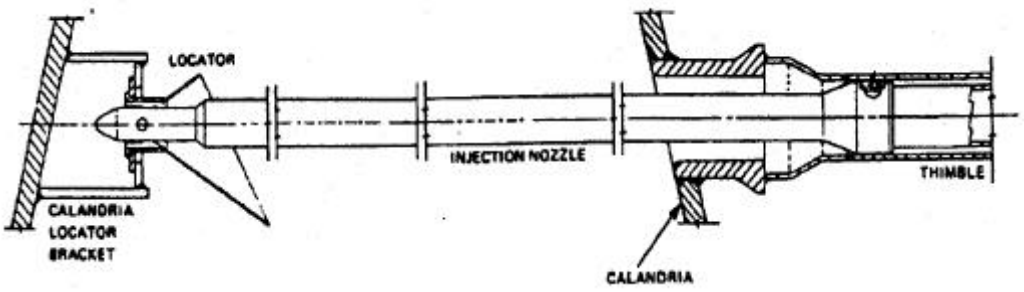
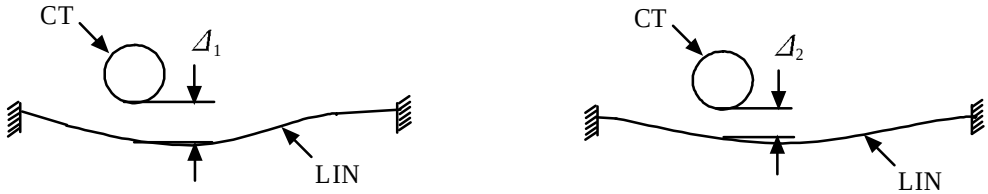
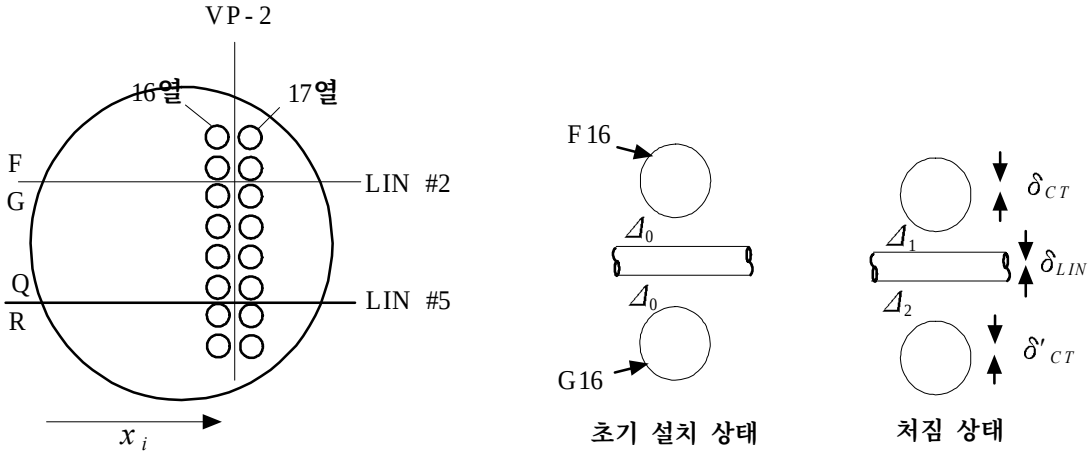


그림 3 LIN의 칼란드리아내 support 형상



(a) 단순지지-고정 (b) 고정-고정

그림 4 경계조건에 따른 LIN의 처짐 곡선과 상부 CT와의 간격



Δ_0 : 설치 초기시의 gap
Δ_1 : 상부 CT와 LIN 사이의 gap
Δ_2 : 하부 CT와 LIN 사이의 gap
δ_{CT} : 상부 CT의 처짐량
δ'_{CT} : 하부 CT의 처짐량
δ_{LIN} : LIN의 처짐량

그림 5 CT/LIN의 처짐량과 간격의 관계도

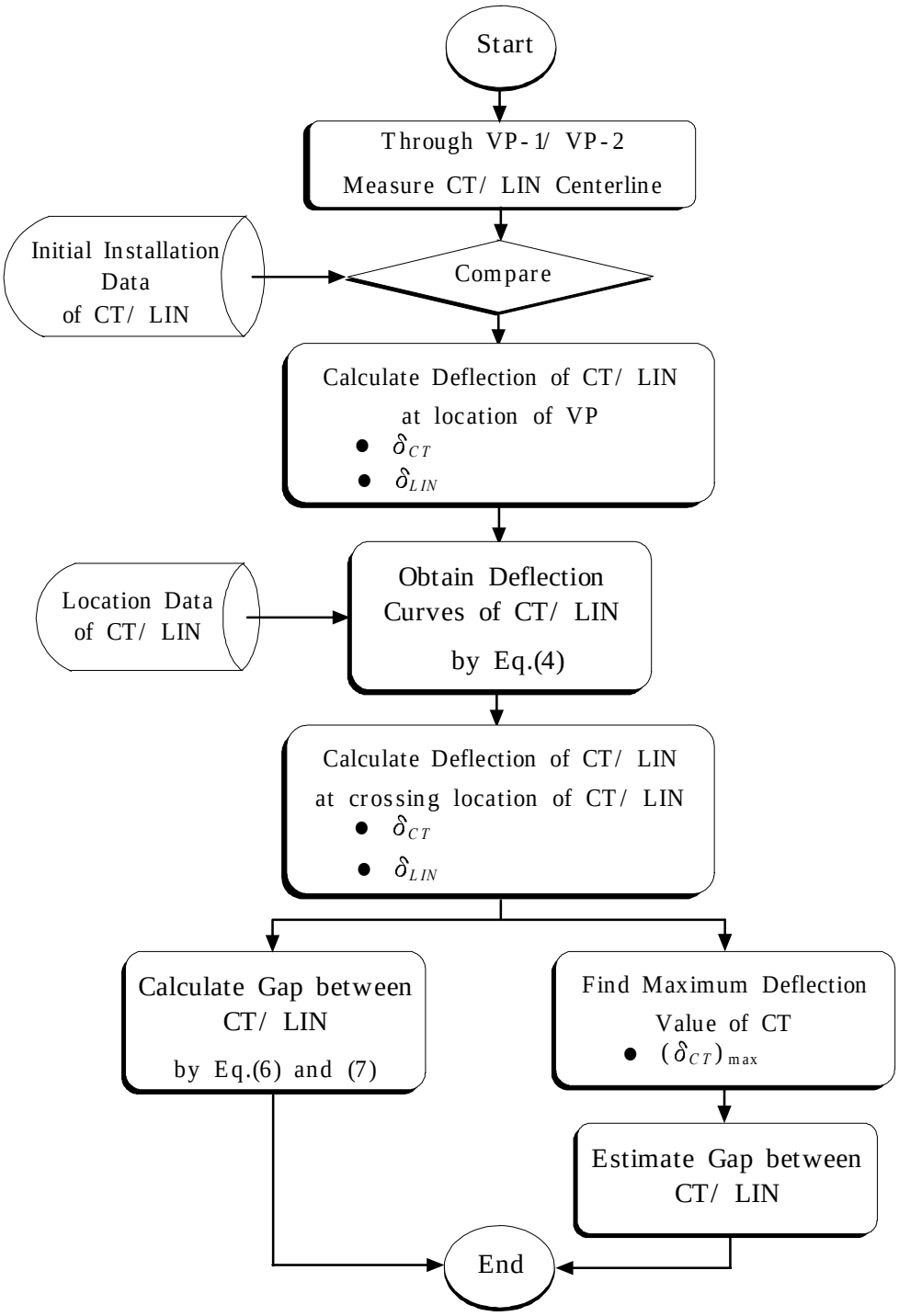


그림 6 CT**와** LIN **사이의 간격 추정 흐름도**

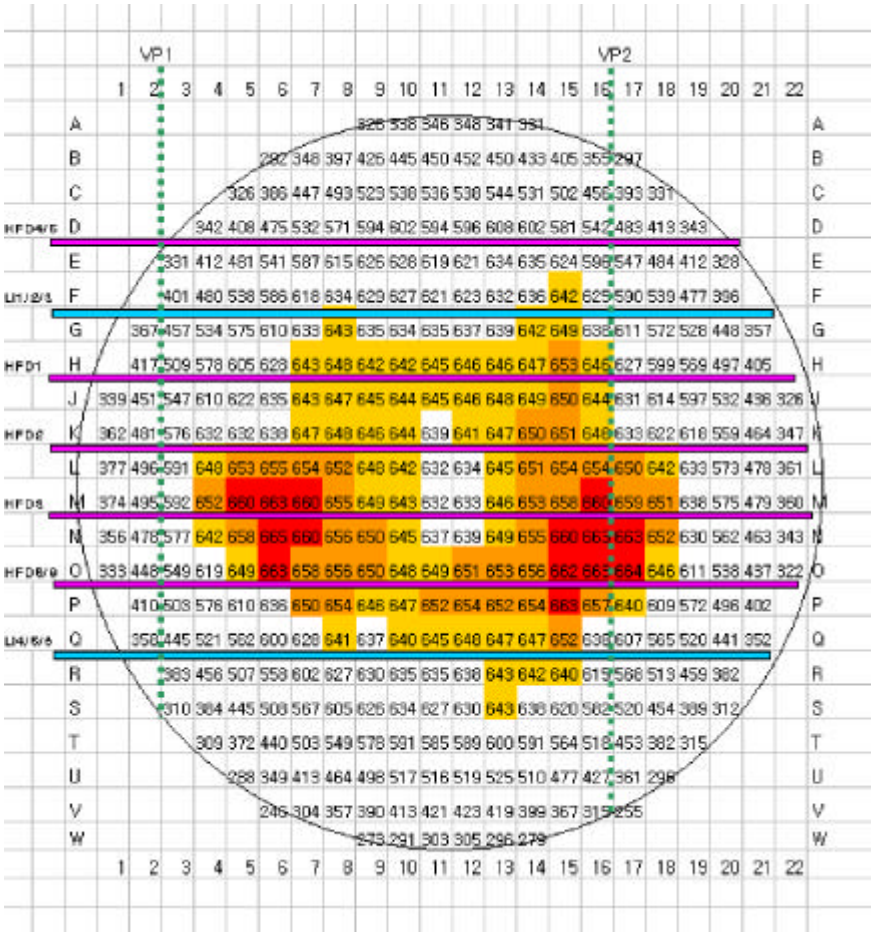


그림 7 월성 1호기의 원자로내 출력분포