

원자로 노내계측기 안내관의 배열을 위한 간섭검증 Interference Check for Reactor In-Core Instrumentation Guide Tube Routing

조덕상*
Duk-Sang Cho*

<Abstract>

In this study, methodologies for checking the interference between in-core instrumentation (ICI) guide tubes for routing of ICI guide tubes in the reactor coolant system of typical Pressurized Water Reactor under cold and normal operation (NOP) conditions are presented. The closest points of ICI guide tubes under cold condition are calculated by using minimize technique and are used as data for NOP analysis. Movements of ICI guide tubes under NOP condition are performed by the commercial computer code, SUPERPIPE.

Keywords: *in-core instrumentation, normal operation condition, seal table, seal housing, guide tube.*

1. 서론

원자로 하부로부터 배열되는 한국표준형 원자로의 노내계측기 시스템(in-core instrumentation system)은 1개의 밀봉판(seal table), 45개의 밀봉하우징(seal housing) 및 노내계측기 안내관, 그리고 이들을 지지하는 9개의 안내관 지지구조물로 구성되어 있다.

이들 노내계측기 안내관은 밀봉판으로부터 지지구조물들에 설치되어 있는 구형베어링을 통하여 원자로의 하부에 있는 노내계측기 노즐로 연결되며 수직부분 안내관과 동일반경을 갖는 하부부분 안내관으로 구성되어 있다. 노내계

측기 안내관의 양끝은 각각 밀봉하우징과 노내계측기 노즐에 용접되며, 노내계측기 안내관 내부에는 노내계측기 집합체가 설치된다. 원자로 내의 노심의 출력과 온도분포 계측의 정확성을 기하기 위하여 원자로 노내계측기 노즐로부터 밀봉판 상부에 설치되는 밀봉하우징까지의 안내관의 길이는 같아야 한다. 이러한 배열 기준 때문에 하부부분의 노내계측기 안내관들은 동일반경으로 설치되며, 좁은 공간 안에서 여러개의 지지구조물을 통과하면서도 안내관을 설치하는 과정, 즉 상온상태에서 안내관들이 서로 간섭하지 않도록 배열하여야 한다.

노내계측기 안내관과 노내계측기 집합체 사

* 정희원, 영남대학교 공업기술연구소, 工博
영남대학교 대학원 졸업
Tel : (053) 814-4288

* Researcher, Institute of Industrial Technology,
Yeungnam University, Ph.D

이에는 원자로 내압과 같은 1차 압력경계로 내부가 항상 고압의 냉각재(reactor coolant)와 접촉하고 있다. 노내계측기 안내관은 상온상태에서 간섭이 발생하지 않도록 배열해도 정상운전시의 온도 상승에 의한 노내계측기 안내관의 열팽창과 원자로의 열팽창에 의한 노내계측기 노즐의 움직임(anchor movement)으로 인하여 정상운전상태에서 간섭이 발생할 수 있다. 정상운전상태에서 노내계측기 안내관이 서로 간섭한다면 노내계측기 안내관은 미세하지만 냉각재 펌프의 작동으로 인한 가진(excitation)과 원자로 내부의 냉각재 흐름으로 인한 가진 등으로 노내계측기 안내관들이 마모되어 손상될 우려가 있다.

상온상태에서 이러한 노내계측기 안내관들의 간섭을 검증하기 위하여 사용되어온 방법으로는 실제모형 또는 축소모형을 제작해서 간섭을 측정하는 방법⁽¹⁾, 상용코드를 이용해서 간섭을 측정하는 방법, 안내관에 다수의 절점을 부여해서 각 절점의 궤적을 측정하는 방법⁽²⁾이 있으나 이러한 방법들은 각각 막대한 비용과 시간, 사용의 번거로움, 실행시간이 많이 요구될 뿐만 아니라 간섭의 여부는 알 수 있으나 간섭의 정도는 파악할 수 없는 단점이 있다.

따라서 본 연구에서는 노내계측기 안내관이 조밀하게 설치되어 있는 하부부분 안내관에 대해서 상온상태 및 정상운전상태에서 안내관들 사이의 간섭을 검증할 수 있는 효과적인 방법을 제시하였다. 상부부분의 안내관은 완만한 곡선으로 배열되고 2차원적으로 간섭검증이 용이하므로 상부부분의 안내관 간섭검증방법⁽¹⁾은 본 연구에서 다루지 않는다. 상온상태에서 노내계측기 안내관들 사이의 최단거리점은 최소화기법을 이용하여 구하였으며, 이 결과는 정상운전상태에서 노내계측기 안내관의 거동을 조사하기 위한 자료로서 사용된다. 정상운전상태에서 안내관의 거동을 얻기 위하여 상용 전산코드 SUPERPIPE⁽³⁾가 사용되었다. SUPERPIPE 해석모델에는 안내관들 사이의 최단거리를 구하기 위하여 상온상태의 최단거리점 부근에 다수의 절점을 부여하였으며 이러한 절점의 거동을 조사함으로써 정상운전상태에서 안내관사이의 최단거리를 구한다.

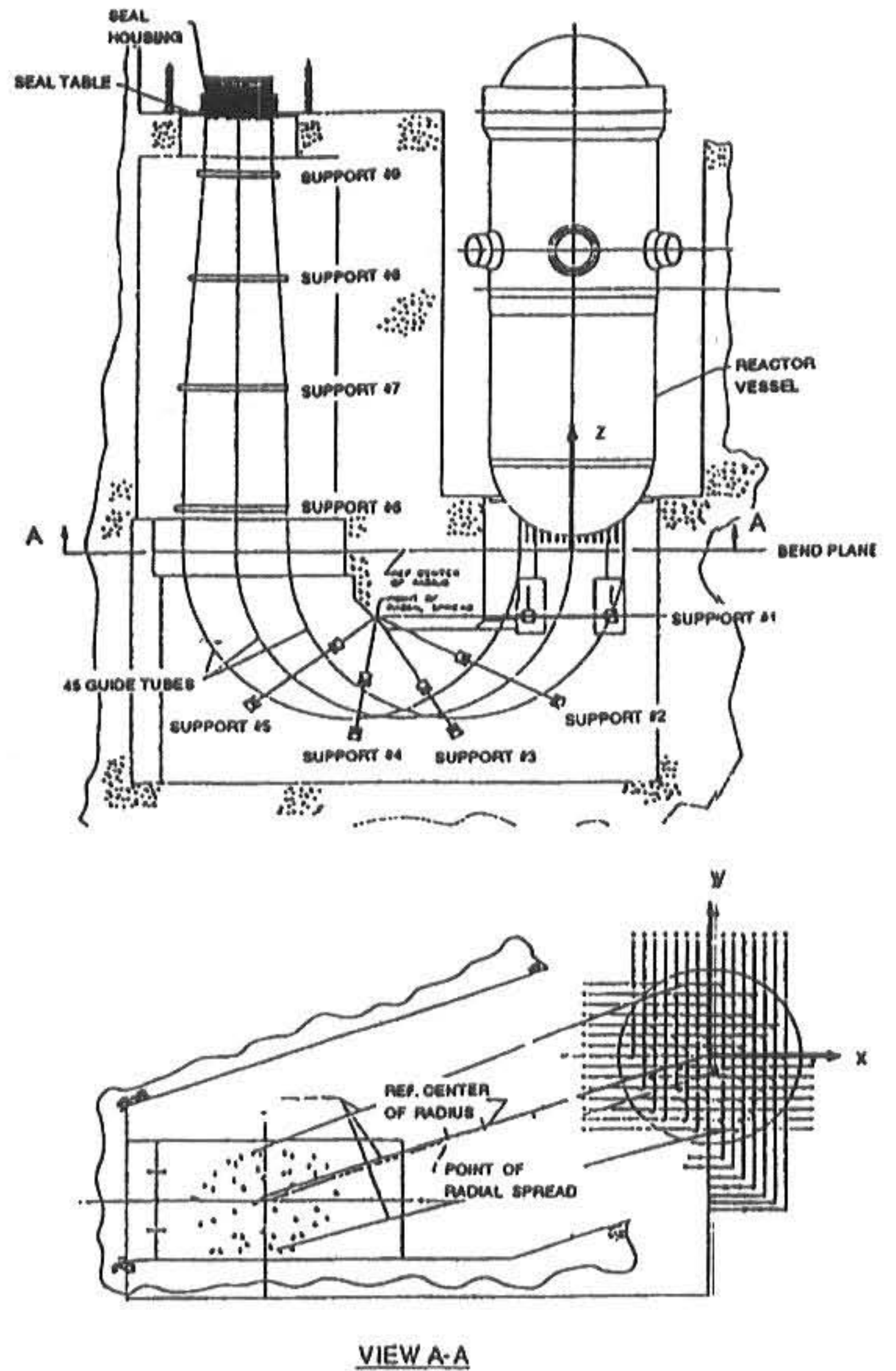


Fig. 1 In-core instrumentation system

2. 노내계측기 안내관의 배열

격납건물(containment building)의 구조적 특성에 의해서 원자로와 밀봉판의 위치가 결정되며 원자로와 밀봉판을 연결하는 노내계측기 시스템의 설치 공간이 결정된다. 원자로 노내계측기 노즐의 위치와 밀봉판에서 노내계측기 안내관의 위치를 연결하는 노내계측기 안내관의 배열기준을 살펴보면 다음과 같다. 노내계측의 정확성을 기하기 위하여 원자로 노내계측기 노즐로부터 밀봉하우징까지 노내계측기 안내관들의 길이는 같아야 하며, 노내계측기 안내관을 설치하는 과정 및 정상운전상태에서 안내관들 사이에 간섭이 없어야 한다. 노내계측기 안내관이 통과하는 각 지지구조물에서 안내관 위치는 구형베어링⁽⁴⁾ 및 구형베어링 고정고리⁽⁵⁾ 설

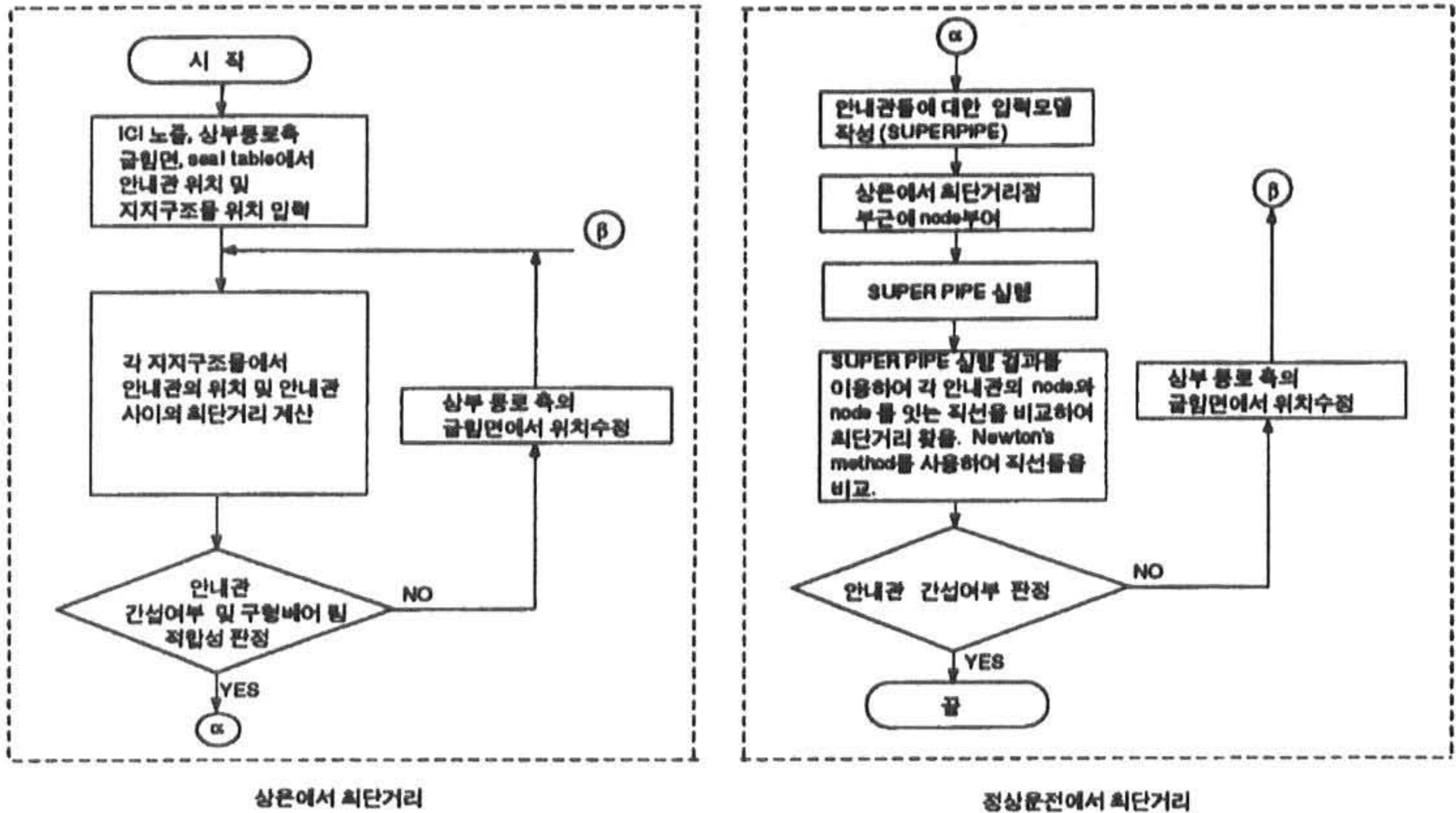


Fig. 2 Flowchart for routing of ICI guide tubes

치시 간섭이 없어야 한다. Fig. 1에서 보여진 것 처럼 굽힘면(bend plane)을 중심으로 윗부분 안내관을 상부부분 안내관, 아랫부분 안내관을 하부부분 안내관이라고 정의한다. 상부부분의 안내관이 주어진 크기의 밀봉판에 배열되기 위해서는 수평방향으로 약간의 편위(offset)를 가지며 7번째 지지구조물과 9번째 지지구조물에 적당한 힘을 가함으로써 밀봉판과 6번째 지지구조물에서 안내관이 수직이 되게 배열한다. 본 연구에서 다루게 되는 하부부분의 안내관은 같은 길이로 좁은 공간을 통과하기 위하여 45개의 안내관이 각각 다른 수직 평면상에 위치하며 동일한 반경으로 배열한다. 45개의 안내관 중에서 가장 인접해 있는 15개 안내관들을 해석모델로 선정하였으며, Fig. 1에 표시된 좌표계에 대한 안내관들의 위치는 Table 1에 표시되어 있다.

3. 해석방법

원자로 내의 노심 구조에 따라서 원자로 노내계측기 노즐의 위치 및 갯수가 결정되며 이러한 노즐로부터 노내계측기 안내관이 조밀하게 설치되는 하부부분 안내관을 배열하는데 있

어서 상온상태와 정상운전상태에서 안내관의 간섭검증을 수행하여야 한다. 상온상태에서 안내관들의 간섭을 피하기 위해서는 원자로의 반대편에 있는 상부 통로측 굽힘면에서 안내관의 위치를 적절히 조정함으로써 안내관들이 서로 간섭하지 않는 안내관 배열을 할 수 있다. 정상운전상태에서 안내관들의 간섭을 피하기 위해서는 상온상태와 마찬가지로 원자로의 반대편에 있는 상부 통로측 굽힘면에서 안내관의 위치를 적절히 조정하고, 다시 상온 및 정상운전상태의 간섭검증을 수행하여야 한다. 이러한 안내관 배열을 위한 해석 흐름도는 Fig. 2에 나타

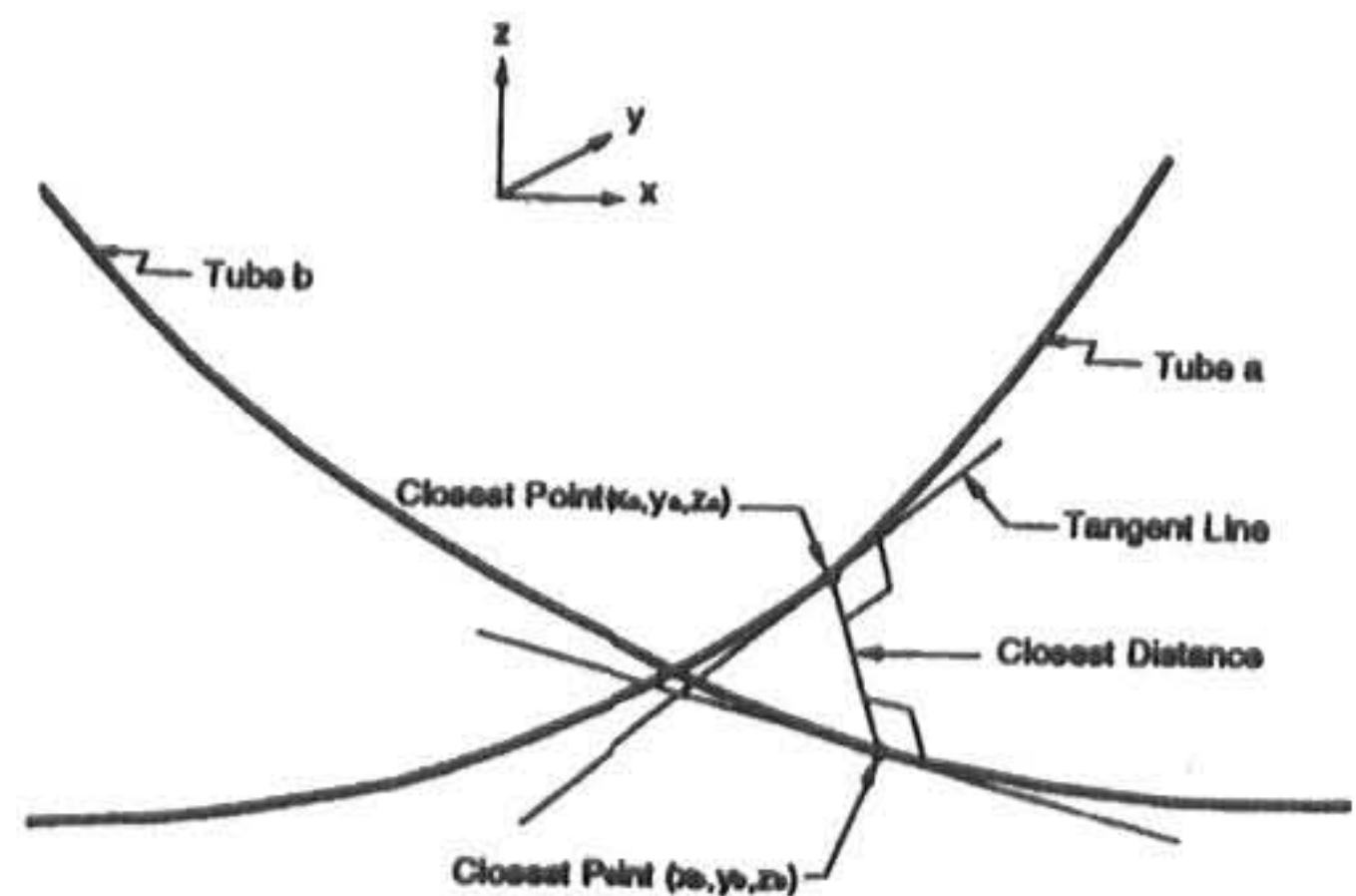


Fig. 3 The closest distance between lower guide tubes under cold condition

나 있으며 상온상태 및 정상운전상태에서 안내관들의 간섭검증방법은 다음과 같다.

3-1 상온상태에서 하부부분 안내관의 간섭 검증방법

하부부분의 안내관은 매우 복잡하게 구성되어 있다. Fig. 3에 보여진 것 처럼 공간상에 있는 두 안내관 사이의 최단거리 및 최단거리점은 임의의 두 점을 잇는 직선과 임의의 점에서 접선들이 서로 직각이 되는 점에서 존재한다. 공간상에 있는 안내관의 임의의 점사이의 거리의 제곱을 목적함수로 취하면 식(1)과 같이 표시된다.

$$f = d^2 = (x_a - x_b)^2 + (y_a - y_b)^2 + (z_a - z_b)^2 \quad (1)$$

위의 식(1)은 공간상의 관계에 의하여 y 및 z 를 x의 함수로 표시해서 2변수 함수로 바꾸면

$$f = (x_a - x_b)^2 + (x_a \tan \alpha_a - x_b \tan \alpha_b + b_a - b_b)^2 + \sqrt{r_b^2 - \left(\frac{x_b - c_b}{\cos \alpha_b}\right)^2} - \sqrt{r_a^2 - \left(\frac{x_a - c_a}{\cos \alpha_a}\right)^2} \quad (2)$$

로 표시된다. 여기서 f는 목적함수, d는 임의의 두점사이의 거리, α_a, α_b 는 x-y 평면에 투영된 안내관이 x축과 이루는 각도, b_a, b_b 는 y축상의 절편값, r_a, r_b 는 안내관의 반경 그리고 c_a, c_b 는 x-z 평면에 투영된 안내관의 반경중심이다. 식(2)가 최소화되기 위한 필

Table 1 Guide tube locations at bend plane under cold condition and anchor movements under normal operation condition (units : mm)

안내관 번호	상온상태 (21.0 °C)						정상운전상태 (300.0 °C)					
	노내계측기 노즐의 위치 (z=0.0000)		상부통로측 굽힘면에서 안내관위치 (z=0.0000)		밀봉판에서 안내관 위치 (z=12184.8880)		노내계측기 노즐의 앵커변위			밀봉판의 앵커변위		
	x	y	x	y	x	y	Δx	Δy	Δz	Δx	Δy	Δz
2	207.7720	1454.4040	-8474.9386	-1866.9000	-8655.0500	-2311.4000	5.3010	0.7569	-22.4511	0.0000	0.0000	0.0000
4	-207.7720	1246.6320	-8958.0212	-1892.3000	-9061.4500	-2311.4000	4.5441	-0.7569	-22.9286	0.0000	0.0000	0.0000
5	415.5440	1246.6320	-8323.2752	-1924.0500	-8451.8500	-2311.4000	4.5441	1.5138	-22.8219	0.0000	0.0000	0.0000
6	831.0880	1246.6320	-7893.2786	-1964.0550	-8350.2500	-2438.4000	4.5441	3.0277	-22.3723	0.0000	0.0000	0.0000
9	-207.7720	831.0880	-9009.1006	-2162.1750	-8858.2500	-2311.4000	3.0277	-0.7569	-23.5966	0.0000	0.0000	0.0000
11	831.0880	831.0880	-7972.8822	-2154.5550	-8147.0500	-2438.4000	3.0277	3.0277	-23.1038	0.0000	0.0000	0.0000
12	-1038.8600	623.3160	-9876.4344	-2260.6000	-9569.4500	-2438.4000	2.2708	-3.7871	-23.0353	0.0000	0.0000	0.0000
14	-1246.6320	415.5440	-10064.9532	-2527.3000	-9671.0500	-2565.4000	1.5138	-4.5441	-22.8219	0.0000	0.0000	0.0000
21	623.3160	207.7720	-8274.0500	-2486.6600	-8451.8500	-2565.4000	0.7569	2.2708	-23.8150	0.0000	0.0000	0.0000
22	-1454.4040	0.0000	-10331.3484	-2760.9800	-9772.6500	-2692.4000	0.0000	-5.3010	-22.4892	0.0000	0.0000	0.0000
23	0.0000	0.0000	-8886.1900	-2730.5000	-8858.2500	-2565.4000	0.0000	0.0000	-24.1148	0.0000	0.0000	0.0000
33	0.0000	-623.3160	-8880.4242	-3373.0946	-8959.8500	-3200.4000	2.2708	0.0000	-23.8455	0.0000	0.0000	0.0000
35	-415.5440	-831.0880	-9321.9016	-3495.6496	-9264.6500	-3327.4000	3.0277	-1.5138	-23.5001	0.0000	0.0000	0.0000
42	207.7720	-1246.6320	-8756.9294	-3707.7396	-8858.2500	-3327.4000	4.5441	0.7569	-22.9286	0.0000	0.0000	0.0000
44	-207.7720	-1454.4040	-9238.4118	-3661.3846	-9061.4500	-3327.4000	5.3010	-0.7569	-22.4511	0.0000	0.0000	0.0000

Table 2 Comparison of the closest distances using minimize technique and PATRAN

안내관 번호	안내관 a와 b 사이의 최단거리 (mm)								
	a	b	최소화기법(뉴턴법)			PATRAN			
			최단거리	$x_a - x_b$	$y_a - y_b$	$z_a - z_b$	최단거리	$x_a - x_b$	$y_a - y_b$
2	4	45.8106	2.2871	-44.7722	-9.4249	45.8108	2.2871	-44.7728	-9.4242
5	12	35.8443	0.8495	-35.6745	-3.3789	35.8441	0.8495	-35.6743	-3.3792
6	14	45.3248	1.3255	-45.2196	-2.7872	45.3248	1.3256	-45.2196	-2.7871
9	14	35.5061	-0.5963	35.4912	0.8391	35.5063	-0.5963	35.4914	0.8391
11	22	34.1334	0.2093	-34.0953	-1.5992	34.1351	0.2094	-34.0970	-1.5991
21	23	35.7278	0.4320	35.7105	-1.0241	35.7271	0.4320	35.7099	-1.0240
33	35	33.0630	0.4387	32.9052	3.1959	33.0635	0.4387	32.9057	3.1963
42	44	33.1424	-1.5432	-31.8067	-9.1853	33.1440	-1.5432	-31.8084	-9.1851

요조건과 충분조건은 다음과 같다.

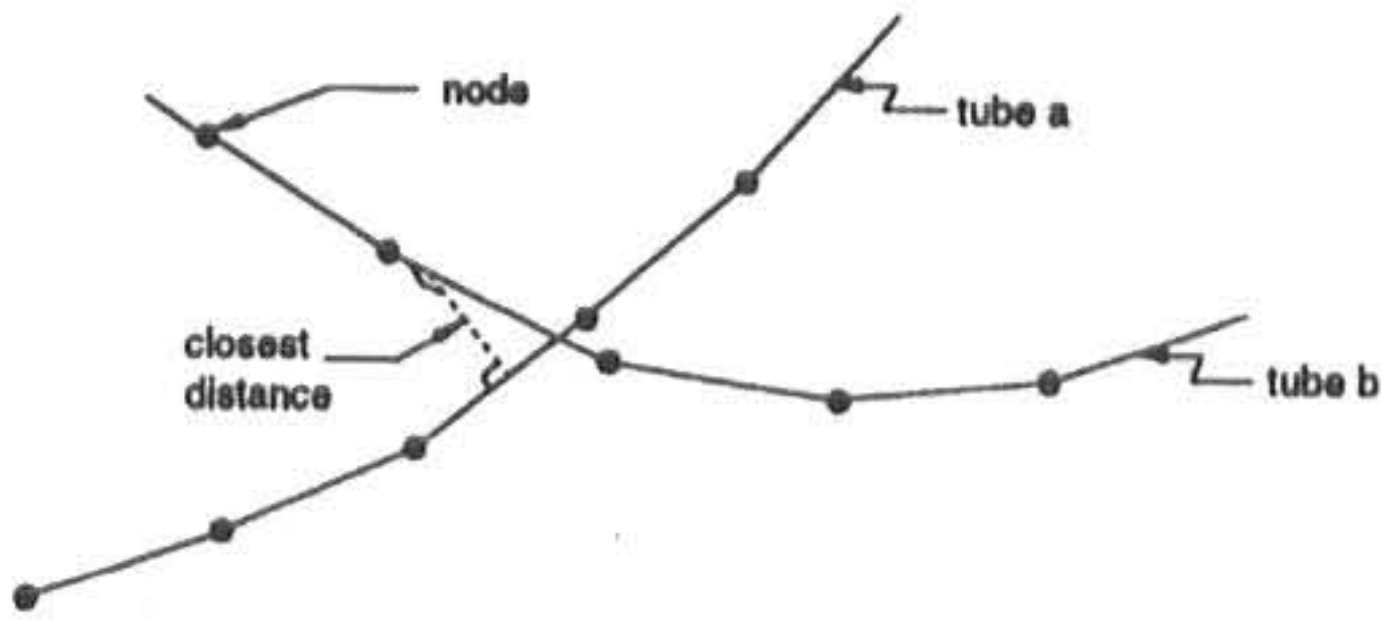


Fig. 4 The closest distance between lower guide tubes under normal operation condition

$$\frac{\partial f}{\partial x_a} = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial f}{\partial x_b} = 0$$

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial^2 f}{\partial x_a^2} & \frac{\partial^2 f}{\partial x_a \partial x_b} \\ \frac{\partial^2 f}{\partial x_b \partial x_a} & \frac{\partial^2 f}{\partial x_b^2} \end{bmatrix} = \text{양정행렬} \quad (4)$$

무제약 최소화 문제를 풀기 위하여 본 연구에서는 수렴속도가 빠른 뉴턴법⁽⁷⁾을 이용하였으며 뉴턴법의 수렴기준은 1.0×10^{-7} 으로 주었다. 또한, 최단거리점이 노내계측기 노즐 또는 상부통로측 굽힘면 근처에 존재하면 해는 발산한다. 즉 이때 얻어진 x_a, x_b 는 $x-z$ 평면상에 투영된 안내관 위치에서의 값이 아니다. 이러한 발산을 막기 위하여 x_a, x_b 는 $x-z$ 평면상에 투영된 안내관에 가까운 점을 초기값으로 재 설정하였다.

Table 1에 표시된 노내계측기 노즐의 위치와 상부통로측 굽힘면에서 안내관들의 위치에 대해서 최소화기법의 결과와 기존에 사용되어온 상용 프로그램인 PATRAN⁽⁷⁾을 이용한 결과를 Table 2에 나타내고 있다. PATRAN에서 1개의 분절(segment)로 180° 곡선을 모델링할 경우 1.83 퍼센트의 최대오차를 수반하기 때문에 180°의 안내관을 10개의 분절(0.000036퍼센트 이하의 최대오차)로 나누어서 모델링 하였다. 한 안내관의 10개의 분절과 다른 안내관의 10개의 분절사이의 최단거리들 중에서 가장 작은 값을 선택해서 안내관들 사이의 최단거리를 찾

았다. 최소화기법을 이용한 결과와 PATRAN을 이용한 결과는 거의 일치하고 있다.

3-2 정상운전상태에서 하부부분 안내관의 간섭검증방법

정상운전상태에 도달하면 원자로의 온도가 약 300°C로 올라가며, 이때 안내관의 내부는 원자로 내부와 동일한 1차 압력경계이므로 안내관 자체가 열팽창을 한다. 아울러 원자로 하부에 붙어 있는 노내계측기 노즐은 열팽창으로 인하여 앵커(anchor) 변위가 발생하며 안내관들의 거동에 영향을 미친다. Fig. 4에 보여진 것처럼 정상운전상태에서 열팽창에 의한 안내관의 거동을 조사하기 위하여 상온상태에서 최단거리점 전후에 25.4mm 간격으로 각각 10개의 절점(node)을 부여하였으며, 한 안내관의 절점과 절점을 잇는 직선들과 다른 안내관의 절점과 절점을 잇는 직선을 비교함으로써 최단거리

Table 3 ICI guide tube properties

노내계측기 안내관의 재질	SA213 TP316
노내계측기 안내관의 중량	3.0748 kg/m
하부부분 안내관의 굽힘 반경	4648.2000 mm
안내관의 외경	26.6700 mm

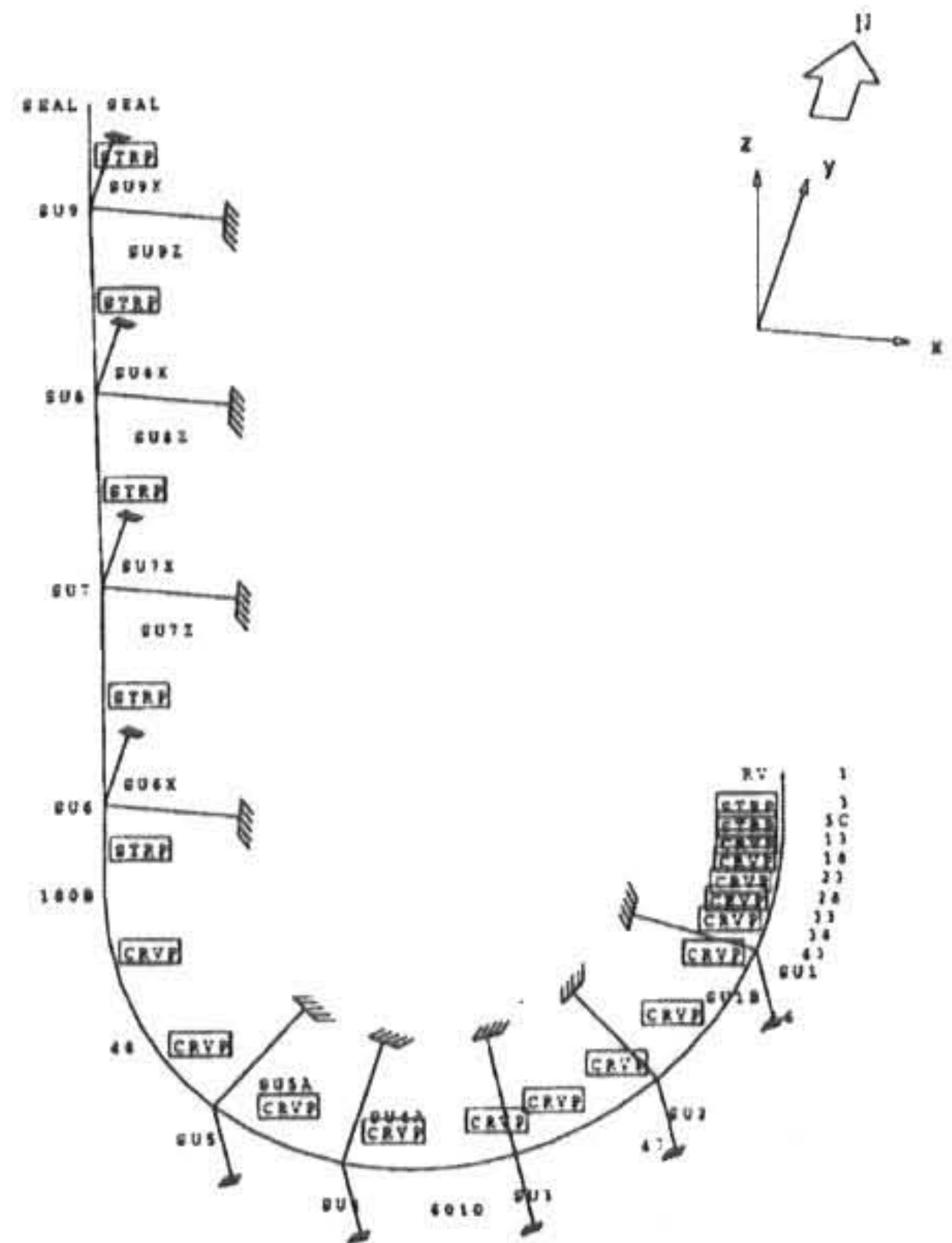


Fig.6 SUPERPIPE analysis model for No.2 guide tube

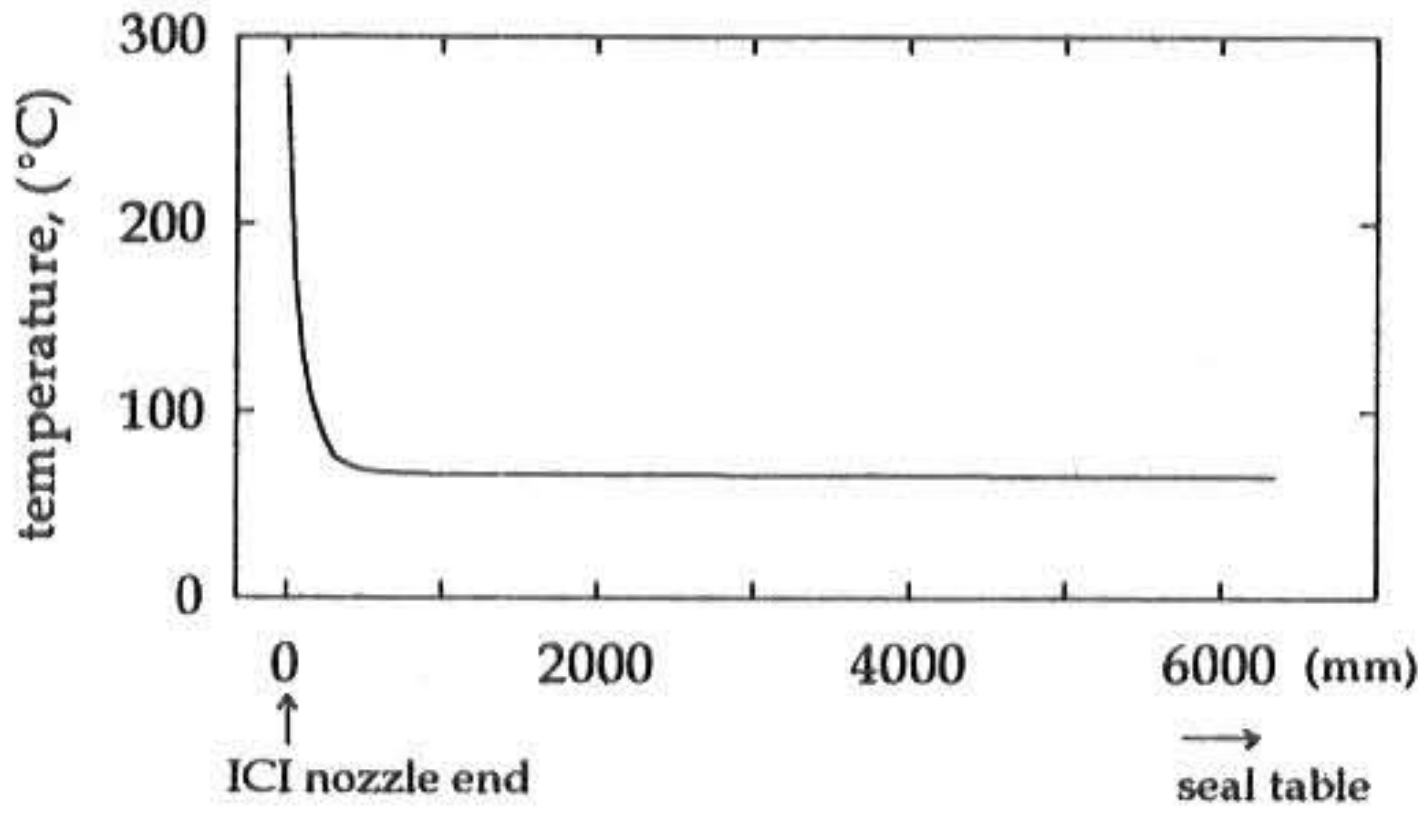


Fig. 5 Temperature gradient along guide tube under normal operation condition

를 구한다. 상온상태에서 안내관들의 최단거리 점 전후에 25.4mm 간격으로 절점을 부여할 경우 0.01735mm 미만의 오차를 수반한다. 정상운전상태에서 이러한 절점들의 거동을 조사하기 위하여 파이프전용 유한요소해석 코드인 SUPERPIPE를 이용하였다. 안내관에 대한 SUPERPIPE 해석모델에는 각 절점 및 지지구조물의 위치를 곡선의 점점으로부터 각도로 표시하였고, 안내관의 재질, 직경, 중량[Table 3], 상온에서 각 부분에서 안내관의 위치, 정상운전상태에서 노내계측기의 열팽창에 의한 앵커변위[Table 1], 그리고 안내관 길이에 따른 온도구배[Fig. 5]가 모델링 자료로써 사용되었다. 온도구배가 약 760mm까지 급하게 내려가는 이유는 원자로 하부의 노내계측기 노즐 부근에서 단열(insulation)을 하기 때문이다.

각 절점과 절점을 잇는 직선들의 비교는 수렴속도가 빠른 뉴턴법을 이용하여 구한다. 그 결과 정상운전상태에서 안내관들의 최단거리는 Table 4에 나타나 있다. 정상운전상태에서 안내관의 최단거리는 Table 2에 표시된 상온상태에서 안내관의 최단거리에 비하여 0.5517mm (상온상태의 최단거리의 1.66%)가 줄어들고 있다. 노내계측기 안내관의 배열은 상온상태에서 안내관의 설치를 용이하게 하기 위하여 안내관들 사이에 간섭이 없어야 하며, 정상운전상태에서 안내관들 사이의 접촉에 의한 마모를 피하기 위하여 안내관들 사이의 간섭이 없어야 한다. Table 2와 Table 4에 표시되어 있는 최단거리값은 안내관의 중심선들 사이의 값이므로 실제로 안내관사이의 최단거리는 중심선들 사이의 최단거리에서 안내관의 외경 (outside diameter)

Table 4 Closest distances between lower guide tubes under normal operation condition

안내관 번호		정상운전상태에 안내관 a와 b사이의 최단거리				최단거리차 (정상운전상태-상온상태)
a	b	최단거리	$X_a - X_b$	$Y_a - Y_b$	$Z_a - Z_b$	
2	4	45.4889	2.3292	-44.3052	-10.0457	-0.3217
5	12	35.4584	0.8306	-35.2908	-3.3325	-0.3859
6	14	45.1053	1.3411	-44.9986	-2.7635	-0.2195
9	14	35.5038	-0.6198	35.5625	0.8738	0.0742
11	22	33.7820	0.2286	-33.7464	-1.5494	-0.3514
21	23	35.6870	0.4394	35.6641	-1.1659	-0.0408
33	35	33.2537	0.4547	33.1140	3.0048	0.1907
42	44	32.5907	-1.5519	-31.2547	-9.1034	-0.5517

을 빼주어야 한다. 즉, 정상운전상태에서 안내관 42번과 44번 사이의 최단거리는 5.9207 (=32.5907-26.6700[Table 3])mm 이다.

아울러서 상온 및 정상운전상태에서 안내관들사이의 간섭을 피하기 위한 안내관의 배열에 있어서 고려하여야 할 사항은 노내계측기 안내관 및 지지구조물의 설치공차(installation tolerance)이다.

4. 결 론

본 연구에서는 원자로 하부로부터 배열되는 노내계측기 시스템의 안내관의 배열시 상온 및 정상운전상태에서 안내관들의 간섭을 검증할 수 있는 효율적인 방법을 제시하였다. 상온상태에서 노내계측기 안내관들사이의 최단거리점은 최소화기법을 이용하여 손쉽게 구할 수 있으며 이 결과는 정상운전에서 노내계측기 안내관의 거동을 조사하기 위한 자료로서 사용된다. 정상운전상태에서 안내관의 최단거리는 상온에서 안내관의 최단거리점 부근에 다수의 절점을 부여해서 이들 절점의 거동을 조사함으로써 찾을 수 있다. 정상운전상태에서 안내관들의 거동해석은 상용 전산코드 SUPERPIPE를 이용하여 수행하였다. 노내계측기 안내관의 열팽창에 의해서 상온과 정상운전상태에서 노내계측기 안내관들의 최단거리차는 최대 0.5517mm (상온에서 최단거리의 약 1.66%)이며 노내계측기 안내관이 상온상태로부터 정상운전상태까지 위치변화량이 작음을 알 수 있다. 정상운전상태에서 안내관의 배열은 해석상 많은 시간을 필요로

하기 때문에 정상운전상태에서 열팽창에 의한 최단거리차를 상온상태의 안내관 배열시 설계 여유로 부여할 수 있는 차후 연구가 기대된다.

참고 문헌

- 1) 조덕상, 원자로 노내계측기 안내관 배열에 관한 연구, KAERI/선임-58/93, 한국원자력 연구소, (1993).
- 2) 조덕상 외 2인, 노내계측기 안내관 배치 및 지지구조물 설치를 위한 컴퓨터 지원 설계, 한국원자력학회 '92 추계학술발표회 논문집, 59-64, (1992).
- 3) SUPERPIPE User's Manual, Version 22E, ABB Impell Corporation, (1990).
- 4) KAMATICS Bearing Assembly Spherical, KSC506317GP, Kaman Compony, (1988).
- 5) WALDES TRUARC, Retaining Rings and Assembly Tools, 20th Printing, Waldes Kohinoor Inc., (1982).
- 6) J.S. Arora, Introduction to Optimum Design, International Editions, McGraw-Hill Co., (1989).
- 7) PDA Engineering, PATRAN Release 2.4, (1990).

(2000년 2월 14일 접수, 2000년 8월 18일 채택)