

원자로 노내 계측기안내관 배열에 관한 연구
A Study on Routing of In-Core Instrumentation Guide Tubes from Reactor

조 덕상* 손 용수*
Cho, Duk Sang Sohn, Yong Soo

ABSTRACT

This paper presents a computer design program for In-Core Instrumentation(ICI) guide tube routing and locations on support system, and checking the interference between ICI guide tubes in the reactor coolant system of typical Pressurized Water Reactor. The program, ICITRIC, has been written in FORTRAN language which is available under UNIX environment. Results of this program are compared with those of the commercial code, PATRAN, and both results are almost same. Also the results may provide input data for ICI system static and dynamic analysis performed by the commercial code, SUPER PIPE.

This program can simulate ICI guide tube routing and locations on support system, and checking the interference between ICI guide tubes. Through a process of iteration, the designer can apply initial conditions, and modify the routing until satisfied with the overall system performance.

1 서론

원자로 하부로 부터 배열되는 전형적인 노내계측기 시스템(In-Core Instrumentation System)은 그림 1에 표시된 것과 같이 1개의 Seal Table, 다수의 Seal Housing 및 노내계측기 안내관, 그리고 이들을 지지하는 안내관 지지구조물들로 구성되어 있다. 이들 노내계측기 안내관은 Seal Table로부터 지지구조물들에 설치되어 있는 구형베어링(Spherical Bearing)을 통하여 원자로의 하부에 있는 노내계측기 노즐로 연결되며 수직부분 안내관과 동일반경을 갖는 하부부분 안내관으로 구성되어 있다. 노내계측기의 정확성을 기하기 위하여 원자로 노내계측기 노즐로부터 Seal Table 상부에 설치되는 Seal Housing까지의 안내관의 길이는 같아야 한다. 노내계측기 안내관 배치에서 가장 어려운 점은 하부부분의 다수 노내계측기 안내관이 동일반경으로 Bending되어 좁은공간안에서 여러개의 안내관 지지구조물을 통과하도록 설치되어야 하기 때문에 안내관을 설치하는 과정에서 안내관들이 서로 간섭하지 않도록 배열하여야 한다.

이러한 안내관들의 간섭을 측정하는 방법으로는 실제모형 또는 축소모형을 제작해서 간섭을 측정하는 방법, 상용코드를 이용해서 간섭을 측정하는 방법[7], 그리고 안내관에 다수의 Node를 부

* 한국원자력 연구소 계통기계설계실

여해서 각 Node의 궤적을 측정하는 방법[6]이 있으나 이들은 각각 막대한 비용과 시간, 사용의 번거로움, 실행시간이 많이 요구될 뿐만 아니라 간섭의 여부는 알수 있으나 간섭의 정도는 파악할수 없는 단점이 있다. 따라서 본연구에서는 배열된 노내계측기 안내관의 간섭 정도를 Minimize 기법을 이용한 프로그램을 개발하여 안내관의 간섭을 검증하였으며 검증결과를 상용코드 PATRAN과 비교하였다.

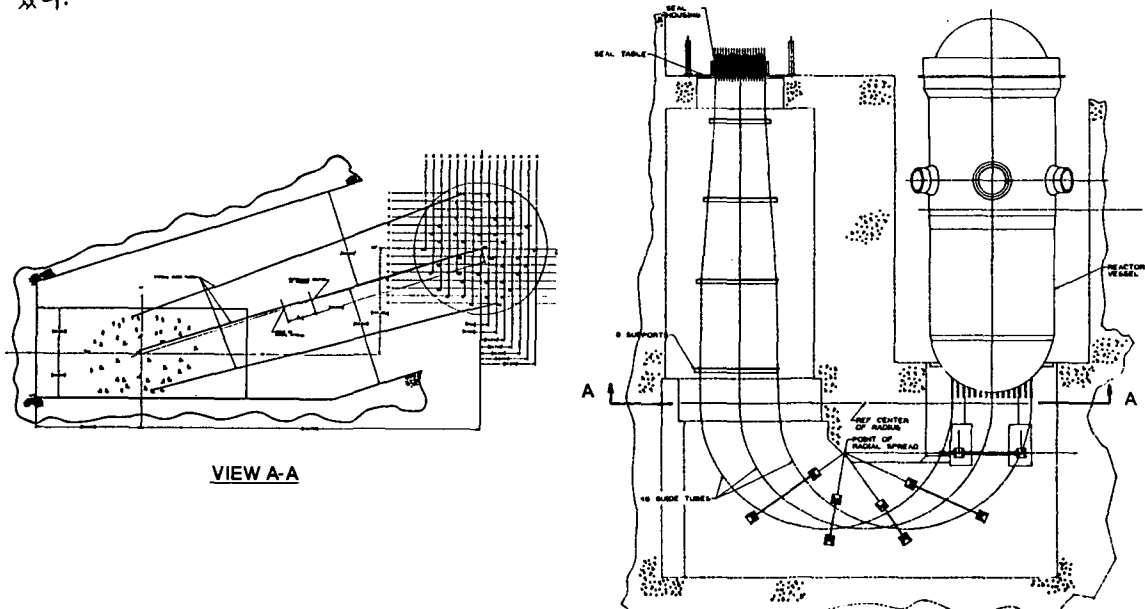


그림1 노내계측기 시스템 구조

2 노내계측기 안내관 배치 기준

- 1) 원자로 내에 설치되는 핵연료 집합체(Fuel Assembly)의 구조적 특성에 따라 원자로 노내계측기 노즐의 위치가 결정되므로 원자로 노내계측기 노즐 위치는 고정한다.
- 2) Seal Table의 위치는 격납건물(Containment Building)의 기기배치도에 의하여 결정되고 Seal Table의 크기는 Seal Housing의 크기에 의해서 결정되므로 Seal Table의 위치 및 크기는 변경하지 않는다.
- 3) 노내계측의 정확성을 기하기 위하여 원자로 노내계측기 노즐로부터 Seal Housing까지 여러개의 노내계측기 안내관의 길이는 같아야 한다.
- 4) 임의의 단면에서 노내계측기 안내관의 간섭은 없어야 한다.
- 5) 노내계측기 안내관이 통과하는 임의의 지지구조물 위의 안내관 위치는 구형베어링[4][5] 설치시 간섭이 없어야 한다.
- 6) 하부의 노내계측기 안내관은 좁은 공간을 통과 하기 때문에 임의의 수직평면상에 위치해야 하며 하부부분 안내관의 길이를 같게 하기위해서 동일한 반경으로 배치 한다.

3 노내계측기 안내관 및 지지구조물 위치 설정 방법

- 1) 지지구조물의 위치

지지구조물은 상부부분 지지구조물과 하부부분 지지구조물로 구분되며 상부부분 지지구조물은 그림 1에서 처럼 수평으로 놓여지며, 하부부분 지지구조물은 Radial Spread점으로 부터 방사형으로 설치된다. 이러한 지지구조물의 위치는 ICITRIC의 입력자료로 사용되므로 임의로 변경이 가능하다.

2) 하부 수평지지구조물의 안내관 위치

하부 안내관은 서로 다른 원점과 비틀어짐을 가지고 있다. 경사진 각 지지구조물에서 안내관의 위치를 찾기 위하여 수직 평면상에 각 안내관을 투영을 하였으며 투영된 각 안내관의 방정식이 만들어 진다. 이 방정식을 지지구조물의 경사각 만큼 좌표전환 (Coordinate Transformation)[3]을 해서 각 지지구조물에서 안내관 위치를 구한다.

3) 상부 수직 지지구조물의 안내관 위치

상부 수직부분의 안내관은 그림1 에서 보여진 것과 같이 6번째 지지구조물과 Seal Table에서 안내관이 Offset 되어있다. 이 안내관의 배치를 하기 위해서는 7번째 지지구조물과 9번째 지지구조물에서 적당한 힘을 가하므로써 Seal Table 과 6번째 지지구조물에서 안내관의 각도가 각각 수직이 되는 탄성선의 미분 방정식[1][2]을 풀이함으로써 각 지지구조물에서 안내관 위치를 구한다.

4 간섭 검증 방법

1) 하부 수평부분 안내관

하부 수평부분의 안내관은 매우복잡하게 서로 엉켜져 있다. 두 안내관 사이에 최소거리 및 최소거리점들 (Closest Points) 은 임의의 두점을 잇는 직선과 임의의 점들의 접선들이 서로 직각이 되는 점에서 존재한다. 공간상에 있는 안내관의 임의의 점사이의 거리는 식(1)과 같이 표시된다.

$$f = d^2 = (x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2 + (z_1 - z_2)^2 \tag{1}$$

위의 식(1)은 공간상의 관계에 의하여 y 및 z를 x의 함수로 표시해서 2변수 함수로 바꿀수 있으며, 최소화 되기위한 필요조건은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial f}{\partial x_1} &= 0 \\ \frac{\partial f}{\partial x_2} &= 0 \end{aligned} \tag{2}$$

식(2)의 해를 구하기 위하여 Newton Method를 이용하였다.

2) 상부 수직부분 안내관

상부 수직부분의 안내관은 그림2 에서 보여진 것과 같이 6번째 지지구조물과 Seal Table사이의 안내관을 수평 평면에 투영시켜서 간섭을 검증한다

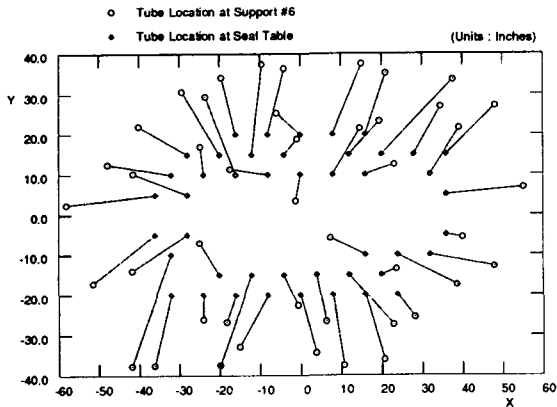


그림2 상부안내관의 간섭검증

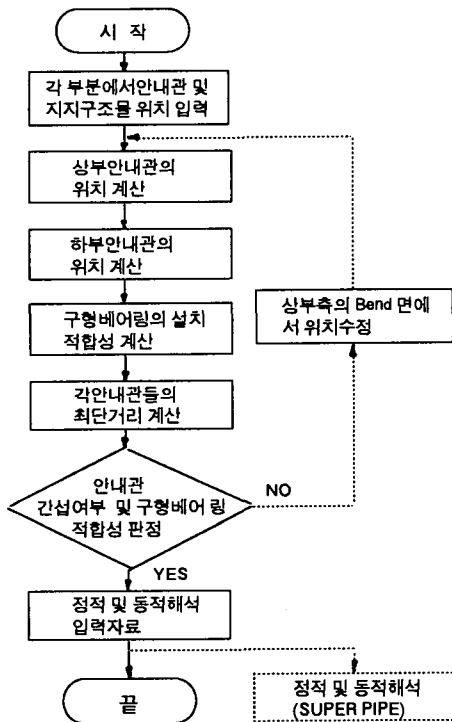


그림 3 프로그램 흐름도

1) 입력 자료

안내관에 대한 직경, 탄성계수, 구형베어링 직경, 각 지지구조물의 위치와 Seal Table 및 각 Bend 면에서 안내관의 위치가 입력자료로 들어간다. 결과 검증을 위한 프로그램의 입력자료는 프로그램 입력을 위한 가상적인 값이며 지면 관계상 표1에는 Seal Table 및 두 Bend 면에서 안내관의 위치만을 예시하였다.

5 Simulation 프로그램

본 연구에서는 원자로 노내 계측기안내관 배열을 위해서 Simulation 프로그램, ICITRIC(In-Core Instrumentation Tube Routing and Interference Check), 을 FORTRAN으로 작성하였으며 프로그램 흐름도 (Flow Chart)는 그림3 에 표시되어있다.

표1 입력 자료

TUBES	ON SEAL TABLE		ON BEND PLANE		ON SV TCI NOZZLE	
	X	Y	X	Y	X	Y
1	-12.0000	15.0000	-9.4480	37.5000	-14.3600	57.2600
2	14.0000	20.0000	15.0910	37.5000	8.1800	57.2600
3	-16.0000	20.0000	-19.5530	34.4500	-24.5400	49.0800
4	-8.0000	20.0000	-3.9280	34.5000	-8.1900	49.0800
5	14.0000	20.0000	21.0420	35.2500	14.3600	49.0800
6	20.0000	15.0000	37.9910	33.4750	32.7200	49.0800
7	-20.0000	15.0000	-29.3300	30.7500	-32.7200	40.9000
8	-14.0000	10.0000	-23.5040	29.5900	-24.5400	32.7200
9	0.0000	20.0000	-5.9590	25.8750	-8.1800	32.7200
10	12.0000	15.0000	19.6790	22.7500	14.3600	32.7200
11	28.0000	15.0000	34.8570	26.1750	32.7200	32.7200
12	-28.0000	15.0000	-40.0860	22.0000	-40.9000	24.5400
13	34.0000	15.0000	49.2420	27.1250	49.0800	24.5400
14	-32.0000	10.0000	-47.5098	13.5000	-49.0800	16.3600
15	-24.0000	10.0000	-25.0070	17.8000	-24.5400	16.3600
16	-4.0000	15.0000	-0.3650	17.4750	9.0000	16.3600
17	8.0000	10.0000	14.9460	20.8000	14.3600	16.3600
18	32.0000	10.0000	39.2620	21.6200	40.9000	16.3600
19	-28.0000	5.0000	-41.8740	11.2500	-40.9000	8.1800
20	-8.0000	10.0000	-17.5270	11.8750	-14.3600	8.1800
21	14.0000	10.0000	23.0800	13.1000	24.5400	8.1800
22	-32.0000	5.0000	-37.9960	2.3000	-57.2600	0.0000
23	0.0000	10.0000	-1.1000	3.5000	0.0000	0.0000
24	34.0000	5.0000	55.1770	6.7500	57.2600	0.0000
25	-20.0000	-18.0000	-25.0930	-6.4990	-24.5400	-8.1800
26	14.0000	-10.0000	7.4100	-5.7490	8.1800	-8.1800
27	34.0000	-5.0000	40.0910	-5.6240	40.9000	-8.1800
28	-28.0000	-5.0000	-41.6470	-13.9990	-40.9000	-16.3600
29	20.0000	-18.0000	23.1700	-11.9990	24.5400	-16.3600
30	32.0000	-10.0000	47.9900	-12.8740	49.0800	-16.3600
31	-34.0000	-5.0000	-51.3070	-17.3240	-49.0800	-24.5400
32	-24.0000	-20.0000	-24.0770	-25.9990	-24.5400	-24.5400
33	-4.0000	-15.0000	-0.8730	-21.7990	0.0000	-24.5400
34	24.0000	-10.0000	38.7010	-17.4990	40.9000	-24.5400
35	-14.0000	-20.0000	-18.2540	-24.6240	-14.3600	-32.7200
36	4.0000	-15.0000	6.0700	-25.8990	8.1800	-32.7200
37	12.0000	-15.0000	22.5710	-24.3740	24.5400	-32.7200
38	-32.0000	-10.0000	-41.8140	-18.0240	-40.9000	-40.9000
39	24.0000	-20.0000	27.3330	-24.5990	32.7200	-40.9000
40	-32.0000	-20.0000	-35.8100	-18.8990	-32.7200	-49.0800
41	-12.0000	-15.0000	-19.8760	-37.3740	-14.3600	-49.0800
42	0.0000	-20.0000	3.9890	-34.9740	8.1800	-49.0800
43	14.0000	-20.0000	20.4530	-35.9990	24.5400	-49.0800
44	-8.0000	-20.0000	-14.9670	-33.1490	-8.1800	-57.2600
45	8.0000	-20.0000	10.4710	-37.4990	14.3600	-57.2600

2) 출력 자료

각 지지구조물에서 안내관의 위치, 지지구조물판에서 구형베어링의 기울어짐, 상부 지지 구조물에 작용되는 반력, 굽힘에 의한 상부안내관의 길이변화량, 구형 베어링구멍들 간의 최단 거리, 정적 및 동적해석을 위한 상용코드 SUPER PIPE입력자료, 그리고 각 안내관 사이의 최단거리가 출력으로 나온다. 그림4 에 보여진 것 처럼 하부부분 지지구조물 중에서 4번째 지지구조물이 가장 조밀하게 구형 베어링이 설치되며, 표2 에는 4번째 지지구조물에서 구형베어링 선단 간의 최 단거리를 표시되어 있다.

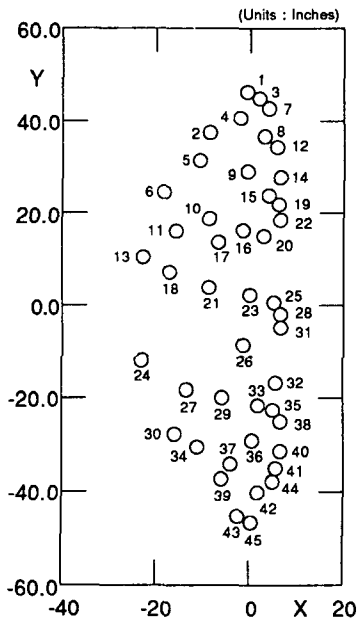


그림4 4번째 지지구조물에서 구형베어링

표3 4번째 지지구조물에서 구형 베어링 선단간의 최단거리

SPHERICAL BEARING HOLE TO HOLE MINIMUM CLEARANCE FOR SUPPORT # 4		
BETWEEN HOLES	1 AND 3	0.0631
BETWEEN HOLES	2 AND 5	3.5237
BETWEEN HOLES	3 AND 7	0.0193
BETWEEN HOLES	4 AND 1	2.8654
BETWEEN HOLES	5 AND 2	3.5237
BETWEEN HOLES	6 AND 11	5.9490
BETWEEN HOLES	7 AND 3	0.0193
BETWEEN HOLES	8 AND 12	0.5871
BETWEEN HOLES	9 AND 15	3.3916
BETWEEN HOLES	10 AND 17	2.5384
BETWEEN HOLES	11 AND 10	4.6374
BETWEEN HOLES	12 AND 8	0.5871
BETWEEN HOLES	13 AND 18	3.4397
BETWEEN HOLES	14 AND 15	1.7110
BETWEEN HOLES	15 AND 19	0.0398
BETWEEN HOLES	16 AND 20	1.6875
BETWEEN HOLES	17 AND 10	2.5384
BETWEEN HOLES	18 AND 13	3.4397
BETWEEN HOLES	19 AND 15	0.0398
BETWEEN HOLES	20 AND 16	1.6875
BETWEEN HOLES	21 AND 23	5.9575
BETWEEN HOLES	22 AND 19	0.2669
BETWEEN HOLES	23 AND 25	2.4649
BETWEEN HOLES	24 AND 27	0.5733
BETWEEN HOLES	25 AND 28	0.0305
BETWEEN HOLES	26 AND 31	4.0116
BETWEEN HOLES	27 AND 29	4.8430
BETWEEN HOLES	28 AND 31	0.0097
BETWEEN HOLES	29 AND 27	4.8430
BETWEEN HOLES	30 AND 34	2.6498
BETWEEN HOLES	31 AND 28	0.0097
BETWEEN HOLES	32 AND 35	2.9581
BETWEEN HOLES	33 AND 35	0.4626
BETWEEN HOLES	34 AND 30	2.6498
BETWEEN HOLES	35 AND 32	0.0227
BETWEEN HOLES	36 AND 40	3.5444
BETWEEN HOLES	37 AND 39	0.7995
BETWEEN HOLES	38 AND 35	0.0227
BETWEEN HOLES	39 AND 37	0.7995
BETWEEN HOLES	40 AND 41	0.8676
BETWEEN HOLES	41 AND 44	0.0018
BETWEEN HOLES	42 AND 44	1.0884
BETWEEN HOLES	43 AND 45	0.2680
BETWEEN HOLES	44 AND 41	0.0018
BETWEEN HOLES	45 AND 43	0.2680

NOTE: ***** TWO SPHERICAL BEARINGS HAVE INTERFERENCE

6 Simulation 결과 및 고찰

본 논문에서 개발한 프로그램의 정확도를 확인하기 위하여 가상 자료 [표1]를 입력으로 프로그램을 실행하였으며 그 결과 안내관들의 최소거리의 정확도를 확인하기 위해서 PDA Engineering[7]에서 개발한 상용 프로그램인 PATRAN으로 모델링된 안내관들 사이에서 최소값을 구하여서 서로 비교하였다. PATRAN에서 Curve를 만들기 위해서 Cubic Polynominal을 사용하므로 180°의 Curve를 1개의 Segment로 모델링할 경우 1.83퍼센트의 Maximum Error를 수반하기 때문에 안내관에 10개의 Segment (0.000036퍼센트 이하의 Maximum Error)를 부여해서, 한 안내관의 10개의 Segment와 다른 안내관의 10개의 Segment 사이의 거리들 중에서 가장 작은 값을 선택해서 안내관들 사이의 최단거리를 찾았다. 본 논문에서 개발한 프로그램 ICITRIC의 결과와 상용코드 PATRAN을 이용한 결과는 표4에 표시되어 있으며, 그 값들은 최대 0.0001"의 차이를 나타내고 있다.

표 4 ICITRIC과 PATRAN의 결과 비교

안내관 번호		안내관 A와 B 사이의 최단거리 (inches)							
		ICITRIC				PATRAN			
A	B	최단거리	DX	DY	DZ	최단거리	DX	DY	DZ
1	3	1.9915	-0.0720	1.9259	0.5015	1.9914	-0.0721	1.9261	0.5007
4	7	1.7824	0.0586	-1.7792	-0.0886	1.7824	0.0586	-1.7793	-0.0885
16	20	1.6021	0.0118	1.5976	0.1194	1.6021	0.0118	1.5976	0.1194
27	32	2.0451	-0.0032	-2.0442	0.0628	2.0450	-0.0031	-2.0442	0.0628
37	41	1.5236	0.0394	1.5200	0.0961	1.5236	0.0394	1.5200	0.0961
39	44	1.6639	0.0957	1.6541	0.1521	1.6638	0.0957	1.6541	0.1518
43	45	2.2033	0.1488	2.0781	0.7168	2.2032	0.1489	2.0780	0.7168

7. 결론

본 논문에서는 원자로 하부로 부터 배열되는 노내계측기시스템의 안내관 배열, 지지구조물의 설치 및 안내관들의 간섭을 검증 하기 위한 지원 설계프로그램 ICITRIC를 개발하였다. 이 프로그램 ICITRIC은 UNIX 환경 하에서 사용 가능한 FORTRAN으로 일반성 있게 작성되어 있다. ICITRIC의 정확도를 입증하기 위하여 상용코드 PATRAN과 비교하였으며 비교결과는 표4에 표시된 것 처럼 거의 일치하였다.

ICITRIC 통하여 노내계측기 시스템의 안내관의 배열, 지지구조물의 설치 가능 위치 및 안내관들의 간섭을 예측할 수 있어서 설계 상에 소요되는 막대한 시간을 절약 할 수 있고, 설계자가 설계 요구조건에 부합되는 노내계측기 안내관의 배열 및 지지구조물 설치에 대한 자료를 반복적인 방법으로 쉽게 얻을 수 있으므로 설계상의 효율을 증대시킬 수 있다. 또한 노내계측기 시스템의 안내관 및 지지구조물의 정적 및 동적 해석을 위한 상용코드 SUPER PIPE의 입력 자료를 ICITRIC의 출력으로 작성할 수 있으므로 후속업무 진행의 효율을 향상시킬 수 있다.

8. 참고 자료

- [1] W.C. Young, ROARK'S Formulas for Stress & Strain, 6th Edition, 1989
- [2] S.Timoshenko, D.H.Young, Elements of Strength of Materials, 5th Edition, 1968
- [3] J.J. Tuma, Engineering Mathematics Handbook, 2nd Edition. McGraw-Hill
- [4] KAMATICS Bearing Assembly Spherical, KSC506317GP, Kaman Compony
- [5] WALDES TRUARC, Retaining Rings and Assembly Tools, 20th Printing, Waldes Kohinoor, Inc.
- [6] 조덕상, 손용수, 박성호, 노내계측기 안내관 배치 및 지지구조물 설치를 위한 컴퓨터 지원 설계, 한국원자력학회 '92 추계 학술발표회 논문집.
- [7] PDA Engineering, PATRAN Release 2.4, 1990
- [8] J.S. ARORA, Optimum Design, International Editions, McGraw-Hill Co., 1982