

# 큰 외경을 갖는 튜브집합체의 삽입형 지지체 설계

김재용<sup>†</sup>·김형규\*·윤경호\*·이영호\*·이강희\*

## Design of Insert type supports for a tube bundle of a large diameter

Jae-Yong Kim, Hyung-Kyu Kim, Kyung-Ho Yoon, Young-Ho Lee, Kang-Hee Lee

**Key Words:** Tube bundle of a large diameter(큰 외경 튜브집합체), Supporting structure(지지체), Characteristic analysis(스프링특성해석)

### Abstract

A supporting structure for a long tube bundle of a large diameter is considered in this paper. The primary purpose of the present study is to develop a spacer grid structure for a so-called "dual cooled nuclear fuel", which has been being studied for a nuclear power uprate. The outer diameter of the fuel rod increases considerably from the conventional one. So a completely new shape of the supporting structure (spacer grid) needs to be developed. One of the challenges is to insert a supporting tube into the cross points of the grid straps. To meet a supporting performance, the load vs. displacement characteristics should be obtained. So the present study focuses on the finite element analysis technology to evaluate the characteristics through a parametric study. As a result, major influencing parameters are investigated for an optimized spacer grid design.

### 1. 서 론

국제유가의 상승으로 대체 에너지개발의 필요성이 대두되고 있는 가운데 여러 대체 에너지원 중에서도 대기오염물질의 배출이 적으며 원자재의 가격이 상대적으로 적은 원자력발전에 대해서 여러 가지 연구들이 진행되고 있다. 그 중에서도 고효율, 고출력 핵연료 개발의 일환으로 이중냉각핵연료(dual cooled nuclear fuel)에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다. 이중냉각핵연료는 기존

핵연료봉(nuclear fuel rod)의 중심부에 내부유로를 형성시키고 냉각수를 흘려줌으로써 냉각수로의 열전달면적을 늘림과 동시에 핵연료봉 내부온도를 낮춰 고효율, 고출력의 핵연료를 개발하는 것을 목적으로 하고 있다. 현재 연구 중인 이중냉각 핵연료는 가동 중인 한국형원자로 OPR-1000에서 이용이 가능하도록 외형치수와 격자배열 특히, 제어관(guide tube) 및 계측관(instrumentation tube)의 위치는 기존의 핵연료와 동일하도록 설계하고 있다. 그러나 핵연료봉에 내부유로가 형성됨에 따라 현재의 핵연료봉에 비해 외경이 증가하게 되어 핵연료봉과 지지판(strap)사이의 간극(clearance)이 상당히 줄어들었다. 그러므로 현재까지의 핵연료봉을 지지하는 방식인 수직판(vertical strap)과 수평판(horizontal strap)을 서로 교차시켜 지지격자를 형성한 후 각 셀의 지지판 중심위치에서 핵연료봉 방향으로 수직하게 지지체(스프링, 덤플)를 스탬핑하여 형성시키는 방법

† 한국원자력연구원(KAERI)

E-mail : kjykjy@kaeri.re.kr

TEL : (042)868-2255 FAX : (042)863-0565

\* 한국원자력연구원(KAERI)

을 사용하기 어렵다. 이에 본 논문에서는 큰 외경의 튜브집합체를 지지할 수 있는 방법에 대하여 연구하였으며 여러 가지 방법 중에서 특히 수직판과 수평판의 교차위치에 삽입물을 이용하여 핵연료봉의 4분점위치에서 지지하던 방식을 4분점에서 45°씩 회전된 핵연료봉의 대각선위치에서 지지하는 방법에 대하여 연구하였다. 이때 삽입물 자체가 큰 외경의 튜브집합체를 지지하는 지지체 역할을 하는데 지지체가 적절한 강성을 가질 수 있도록 삽입물의 형성인자들이 지지체의 하중-변위 특성곡선에 주는 영향에 대하여 parametric study를 수행하였다.

## 2. 삽입형 지지체

### 2.1 삽입형 지지체

삽입형 지지체(insert type supports)는 삽입물의 형태에 따라 사각형, 원형 등으로 지지하는 방식에 따라 삽입물 자체강성, 삽입물에 형성된 지지체(스프링, 덤플)강성을 이용하는 것으로 분류할 수 있다. 본 연구에서는 특히 원형 삽입물로 자체강성을 이용한 지지체에 대해서 고려하였다. Fig. 1은 원형 삽입형 지지체의 하나의 셀을 나타내며 지지체 형성인자에 대하여 나타낸다.

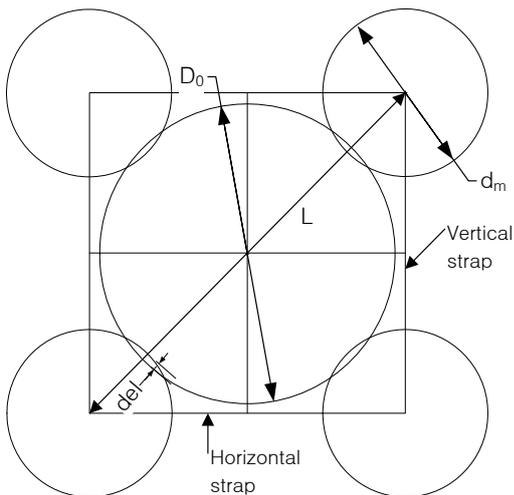


Fig. 1 Schematic drawing of a circular insert type supports.

### 2.2 형성인자 및 관계식

원형 삽입형 지지체를 형성하기 위해서는 다음과 같은 여러 개의 형성인자의 치수결정이 필요

하다.

- $D_0$  : 지지하고자 하는 튜브의 외경 (mm)
- $d_m$  : 원형 삽입물의 중경 (mm)
- $t_s$  : 원형 삽입물의 두께 (mm)
- $h$  : 원형 삽입물의 축 방향 높이 (mm)
- $L$  : 한 셀(unit cell)의 대각선 길이 (mm)
- $del$  : 원형 삽입물과 튜브 사이의 초기 간극 (mm)

이들 각 형성인자사이에는 식 (1)과 같은 관계식이 존재한다.

$$del = \frac{1}{2}(D_0 + d_m + t - L) \quad (1)$$

여기서,  $D_0$ ,  $L$ 은 상수이며  $d_m$ ,  $t_s$ ,  $h$ 는 지지체의 강성(stiffness)을 결정하는 변수이다. 적절한 강성을 가지는 원형 삽입형 지지체의 설계를 위해서 각 변수가 지지체의 강성에 미치는 영향에 대하여 구조해석방법을 이용하여 연구하였다.

## 3. 스프링특성해석

### 3.1 구조유한해석모델

Parametric study의 대상은  $d_m$ ,  $t_s$ ,  $h$ 로 총 3개이며 각 변수에 대해서 다음과 같이 총 9개의 해석모델을 구성하였다. Model 1부터 3까지는  $d_m$ 의 영향을 확인하기위해서 8.2 mm에서 8.6 mm까지 원형 삽입물의 중경(middle diameter)을 0.2 mm씩 증가시킨 모델이며, model 4부터 6까지는 원형삽입물의 두께를 0.3 mm에서 0.7 mm까지 0.2 mm씩 증가시킨 것이다. 마지막으로 model 7부터 10까지는 원형 삽입물의 높이를 20 mm에서 40 mm까지 10씩 증가시켜서 삽입물의 높이가 지지체의 강성에 주는 영향에 대하여 검토하였다. 표 1은 전술한 총 9개의 해석모델에 대하여 각 형성변수의 치수를 정리한 것이다. 구조해석은 상용해석프로그램인 ABAQUS/standard V.6.8-1[1]을 이용하였으며 지지판과 삽입물의 물성치는 Zircaloy-4 합금에 대하여 uni-tensile test를 통하여 구한 탄소성실험값을 이용하였다.

Model 1과 4, 7은 동일하므로 총 7개의 해석모델을 구성하였으며 Fig. 2와 같이 원형 삽입물과 수직/수평 지지판은 deformable shell element(S3R,

S4R)를 이용하여 구성하였고 가중봉(loading rod)은 하중을 주는 방향의 반대쪽에 위치한 원형 삽입물로 부터의 영향이 없도록 반원(half circle)의 rigid plate로 모델링하였다.

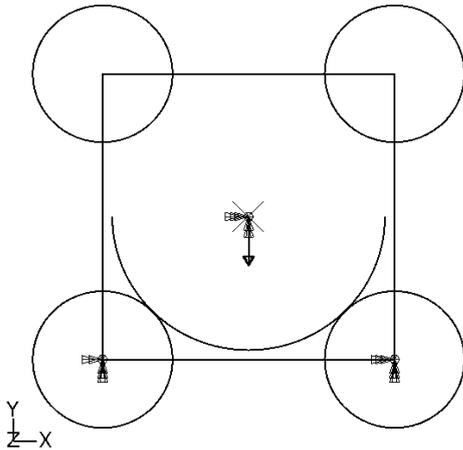


Fig. 2 A finite element model for parametric study.

구속조건은 전체 격자모델의 조건을 묘사하기 위해서 하중을 주는 방향쪽 수평판 네 꼭지점에 강체운동을 하지 않도록 주었다. 해석은 두 개의 과정으로 이루어지는데 먼저 원형 삽입물과 튜브 사이의 간극(initial interference)만큼 즉, del 값만큼 스프링을 눌러주는 shrink fit 과정을 진행한 후 0.4 mm 만큼 튜브를 아래방향으로 진행시키면서 아래쪽 두 개의 삽입물로부터 받는 반력을 구하는 loading 과정을 진행한다[2].

Table 1 Parametric values of all FE models

Model	D <sub>0</sub>	d <sub>m</sub>	t <sub>s</sub>	h	del
1	16	8.2	0.3	40	0.14
2	16	8.4	0.3	40	0.24
3	16	8.6	0.3	40	0.34
4	16	8.2	0.3	40	0.14
5	16	8.2	0.5	40	0.24
6	16	8.2	0.7	40	0.34
7	16	8.2	0.3	40	0.14
8	16	8.2	0.3	30	0.14
9	16	8.2	0.3	20	0.14

\* unit : mm

### 3.2 해석결과

각 형성인자가 지지체 강성에 주는 영향을 비교하기 위해서 튜브의 외경으로 각 형성인자의 값을 나누어서 무차원화하였다. 표 2는 무차원화된 각 형성인자의 변화율(variation rate)에 대한 지지체 강성의 변화율을 정리한 것이다. 변화율은 식 (2)을 이용하여 계산된다. 이때 지지체 강성은 각 해석모델에 대하여 하중-변위 곡선을 구해낸 후 탄성영역에서의 곡선의 기울기를 이용하여 구하는데 Origin V7.5[3]의 linear curve fitting 기능을 이용하여 correlation coefficient가 99.9 %보다 큰 구간을 선형탄성영역으로 채택하였다. 이렇게 구해낸 지지체 강성은 기존의 지지체와 달리 수직/수평 지지판의 교차점에 위치하기 때문에 튜브를 이용하여 가중할 때 하중을 주는 쪽 방향에 위치하는 두 개의 지지체로부터 반력을 받게 된다. 이때 실제하중-변위는 해석으로 얻은 하중-변위와 식 (3)과 같은 관계를 갖는다.

$$V.R. \text{ of } N.D.P. = \frac{(P/D - P_0/D)}{P_0/D} \quad (2)$$

여기서,

- V.R. : variation rate
- N.D.P. : non-dimensional parameter's value
- P : parameter's value
- P<sub>0</sub> : original parameter's value
- D : diameter of a fuel rod

Table 2 The variation rate of N.D.P. and stiffness

Model	Par.	V.R. of N.D.P. (%)	V.R. of stiffness (%)
1	d <sub>m</sub>	Basis	0
2		2.44	- 27.62
3		4.88	- 68.32
4	t <sub>s</sub>	Basis	0
5		66.67	- 24.61
6		133.33	- 45.63
7	h	Basis	0
8		- 25	- 23.61
9		- 50	- 48.68

\* Par. : parameter, V.R. : Variation rate

$$\delta = \delta_1 \sin 45^\circ = \delta_2 \sin 45^\circ \quad (3)$$

$$RF = RF_1 \sin 45^\circ + RF_2 \sin 45^\circ = 2RF_1 \sin 45^\circ$$

여기서,

- $RF, \delta$  : 해석을 통해서 구해진 하중, 변위
- $RF_1, RF_2, \delta_1, \delta_2$  : 각 지지체에서의 하중, 변위

각 형성인자와 지지체의 강성간의 관계를 알기 위해서 해석을 통해서 구해진 강성 변화율 값을 무차원화 된 각 형성인자의 변형율 값에 대해서 나타내면 Fig. 3과 같다. 원형 삽입형 지지체의 경우 지지체를 설계하기 위해서  $d_m, t_s, h$ 의 총 3개의 형성인자가 존재하며 각 인자와 지지체 강성사이에는 거의 선형적인 관계가 존재하였다. 특히,  $d_m$ 가 다른 인자에 비해서 강성에 큰 영향을 주었으며 그 다음으로  $h, t_s$  순이었다. 또한  $d_m, t_s$ 가 작아질수록  $h$ 가 커질수록 지지체의 강성 값이 증가하였다.

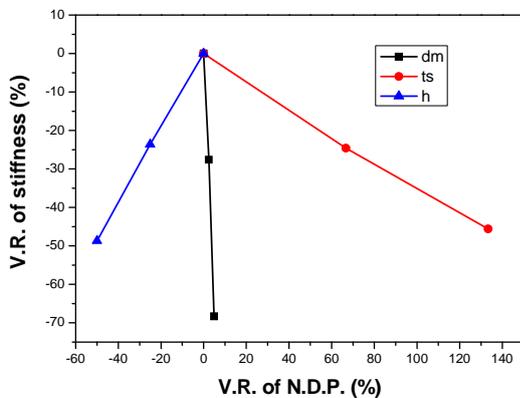


Fig. 3 V.R. of N.D.P. versus V.R. of stiffness.

#### 4. 결 론

큰 외경을 가지는 튜브집합체를 지지하는 방법 중에서 원형 삽입물의 자체강성을 이용하는 지지체의 설계를 위해서 총 9개의 해석모델을 구성하여 각 형성인자가 지지체의 강성에 주는 영향에 대하여 연구하였다. 여기서 원형 삽입물의 중경과 원형 삽입물의 두께가 작아질수록 지지체의 강성값이 증가하였으며 원형 삽입물의 축 방향 높이가 커질수록 지지체의 강성이 증가하는 것을

알 수 있었다. 형성인자와 지지체의 강성은 거의 선형적인 관계를 가지고 있음을 알 수 있었으며 원형 삽입물의 중경변화가 지지체 강성변화에 가장 민감하게 작용하는 것을 알 수 있었다.

#### 후 기

본 연구는 교육과학부의 원자력연구개발사업인 이중냉각핵연료 구조설계기술개발의 일환으로 수행되었다.

#### 참고문헌

- (1) H.D.Hibbit, G.I. Karlsson and E.P. Sorensen, 2006, "Analysis User's Manual (version 6.8)," USA.
- (2) Kim, Jae-Yong, Yoon, Kyung-Ho and Kim, Hyung-Kyu, 2008, "Realistically Improved Finite Element Analysis of Spring Supports in a Nuclear Fuel Spacer Grid," *Proceedings of the ICONE-16*.
- (3) Rexsoft, 1999, "Origin User's Manual (version 6.1)".