

핵연료집합체 안내관의 하중집중계수 해석

전상윤#, 이영신*

Load Concentration Factor Analysis of Fuel Assembly Guide Thimble

Sang-Youn Jeon #, Young-Shin Lee *

ABSTRACT

The top and bottom nozzles of PWR fuel assembly are connected by guide thimbles and an instrumentation tube that are connected with spacer grids. The fuel rods are inserted into the each cell of spacer grids. The loads acting on the fuel assembly are transmitted to the guide thimbles through the flow plate of top nozzle. The axial loads applied to the fuel assembly are not equally distributed among the guide thimble due to the geometry of the top nozzle flow plate and spacer grid. In this study, the load concentration factors for the 17x17 fuel assembly were calculated. The analytical model for the calculation of the load concentration factor of top nozzle flow plate was developed using ANSYS 5.6. The finite element analyses were performed using the model composed of top nozzle, guide thimble, and spacer grid. And, the analysis results were compared with the test results.

Key Words : PWR(가압경수로), Fuel Assembly(핵연료집합체), Top Nozzle(상단고정체), Guide Thimble(안내관), Spacer Grid(지지격자), Peaking Factor(집중계수), ANSYS

1. 서론

경수로용 핵연료집합체는 Fig. 1 에서와 같이 상부와 하부 끝단에 상단고정체와 하단고정체가 각각 1 개씩 있으며 이들을 안내관과 계측관으로 연결하고 안내관과 계측관의 중간에 일정한 간격으로 지지격자가 고정되어 있으며 지지격자의 각 셀에 연료봉이 삽입되어 있는 형태로 구성되어 있다.¹ 상단고정체 유로판의 기하학적 특성으로 인해 유로판에서 안내관의 위치에 따라 안내관으로 전달되는 하중이 유로판의 중앙부위와 외곽부위에서 서로 다르게 분포된다. 복잡한 구조물의 실제

설계에서는 이러한 기하학적인 형상에 기인하는 하중과 응력의 차이를 하중집중계수의 형태로 고려하고 있다. O'Donnell² 은 다공원판에 대한 응력 및 유효 탄성계수에 대하여 고찰을 하였으며 Mahoney 와 Salerno³ 는 다공원판의 굽힘문제에서 다공판을 등가 강성계수를 가지는 직교이방성 판으로 변환하는 방법을 제시하였다. 김⁴ 등은 실제 구조물과 유사한 원형 홀이 존재하는 사각평판에 대하여 밀도함수법을 적용하여 위상최적화를 수행한 결과를 바탕으로 하여 원형 및 타원 홀의 적절한 형상의 변화를 통하여 구조물의 경량화를 수행하였다. 유⁵ 등은 실험적으로 모드해석을 통하여 인접한 바닥 평판과 물로 연성된 다공 직사각평판의 동특성을 조사하고 그 특성을 분석하였다.

*** 접수일: 2004 년 2 월 23 일; 게재승인일: 2004 년 12 월 10 일

교신저자: 한전원자력연료(주) 설계기술원

E-mail: syjeon@knfc.co.kr Tel: (042) 868-1182

* 충남대학교 기계설계공학과

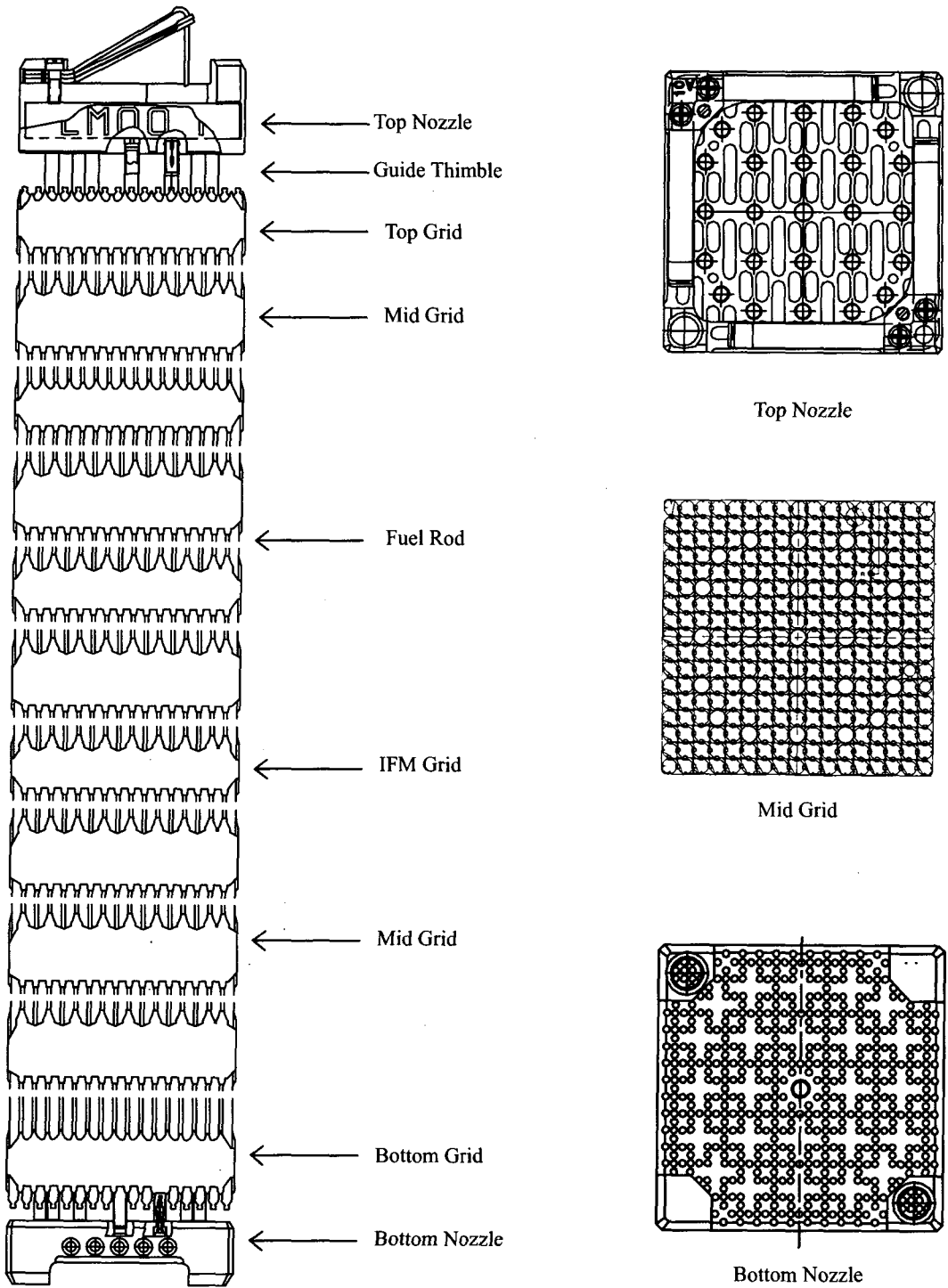


Fig. 1 Fuel assembly and its components

한⁶ 등은 평판 구조물의 좌굴강도에 영향을 미치는 여러 인자 중 점용접 면적비와 거리비를 설계 인자로 선택하여 연구를 수행하여 최대의 보강효과를 갖는 거리비를 선정하고자 하였다. 임⁷ 등은 탄성지지를 받는 사각다공판의 하중분포계수에 관한 연구를 통해 하중에 의한 판의 처짐 및 탄성체의 탄성효과를 고려하여 하중작용점에 나타나는 하중분포계수를 구하였다. 또한, 복잡한 형상을 갖는 다공판의 해석에 유한요소법을 많이 이용하고 있는데 프랑스의 핵연료설계제조회사인 FRAGEMA⁸에서는 핵연료집합체 하단고정체와 같은 사각 다공판에 대해 빔(BEAM)요소를 이용하여 해석을 수행한 바 있다. 이⁹와 김¹⁰은 회전운동을 고려한 개구부가 있는 복합재료 원통셀과 사각 개구부를 갖는 링보강 원통셀의 진동해석 및 최적설계에 대해 연구하였다.

본 논문에서는 이와 같이 유로판의 위치에 따라 서로 다르게 나타나는 하중의 크기를 나타내는 하중집중계수를 17x17 형 핵연료집합체에 대하여 해석적으로 구하고 시험결과와 비교하였다. 또한, 지지격자의 굽힘강성과 집합체에 가해지는 하중의 크기가 하중집중계수에 미치는 영향을 알아보았다.

2. 이론적 고찰

각 변의 길이가 각각 a와 b 이고 네변에서 단순 지지된 사각판이 균일분포하중 $p(x, y)$ 를 받는 경우를 가정하면 일반적으로 이러한 굽힘문제의 해는 하중과 변형량에 대해 다음과 같은 푸울리에 급수(Fourier series)로 나타낼 수 있다.

$$p(x, y) = \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} p_{mn} \sin \frac{m\pi x}{a} \sin \frac{n\pi y}{b} \quad (1)$$

$$w(x, y) = \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} a_{mn} \sin \frac{m\pi x}{a} \sin \frac{n\pi y}{b} \quad (2)$$

사각판이 균일분포하중 $p(x, y) = p_0$ 를 받고 있으므로 (1)식으로부터 p_{mn} 을 구하고 (2)식과 판의 처짐에 대한 지배방정식을 이용하여 a_{mn} 을 구하여 (2)식에 대입하여 정리하면 처짐량은 다음과 같이 구해진다.¹¹

$$w(x, y) = \frac{16p_0}{\pi^6 D} \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{mn[(m/a)^2 + (n/b)^2]^2} \sin \frac{m\pi x}{a} \sin \frac{n\pi y}{b} \quad (3)$$

$$\text{여기서, } D = \frac{Et^3}{12(1-\nu^2)}$$

상단고정체 유로판관련 치수(폭: 8.404 in., 두께: 0.755 in.)와 집합체 무게의 4 배에 해당하는 하중이 상단고정체에 가해진다고 가정하고 이를 균일분포하중으로 변환하여 식 (3)에 대입하여 계산하면 상단고정체 유로판에 대한 처짐량은 Fig. 2와 같다. 식 (3)은 사각판의 처짐을 나타내는 식으로 그림에서와 같이 상단고정체 유로판의 중앙부보다 바깥쪽의 처짐량이 작으므로 바깥쪽에 위치한 안내판에서의 반력이 더 크게 되어 안내판에 작용하는 하중도 크게 될 것이다. 본 연구에서는 상단고정체 유로판의 위치에 따라 달라지는 처짐량에 따른 하중집중계수를 해석적으로 구하고자 하였다.

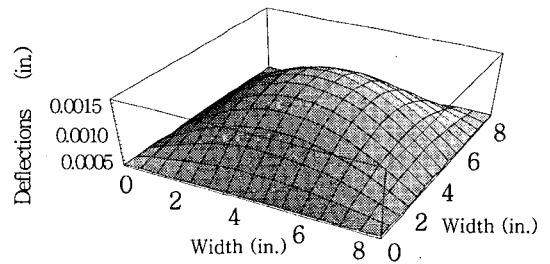


Fig. 2 Deflection of Top Nozzle Adapter Plate

3. 해석모델

경수로용 17x17 형 핵연료집합체는 Fig. 1에서와 같이 상하부에 1 개씩의 상, 하단고정체, 24 개의 안내판과 1 개의 계측관, 11 개의 지지격자, 그리고 지지격자의 각 셀에 삽입되어 있는 264 개의 연료봉 등으로 구성되어 있다. 이러한 핵연료집합체의 구성부품에 대한 주요 재원은 Table 1에 나타내었으며 재료물성치는 Table 2에 나타내었다. 해석을 위해 생산된 상단고정체와 안내판, 그리고 지지격자로 구성된 3차원 모델의 형상은 Fig. 3에

Table 1 Main dimension of components

Components		Dim.	Material
Top Nozzle	Width (in.)	8.404	Stainless Steel
	Height (in.)	3.475	
	Thickness (in.)	0.755	
Guide Thimble	Outer Dia. (in.)	0.482	Zr-4
	Inner Dia. (in.)	0.450	
	Thickness (in.)	0.016	
Top Grid	Width (in.)	8.426	Inconel-718
	Height (in.)	1.522	

Table 2 Material properties

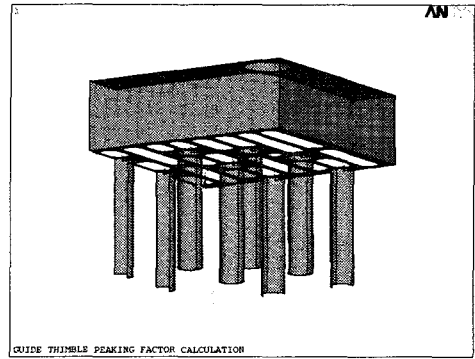
Top Nozzle (Stainless Steel)	
Young's Modulus (at 70°F, psi)	28.92 X 10 ⁶
Posion Ratio	0.26
Guide Thimble (Zr-4)	
Young's Modulus (at 70°F, psi)	14.3 X 10 ⁶
Posion Ratio	0.36
Top Grid (Inconel-718)	
Young's Modulus (at 70°F, psi)	29.02 X 10 ⁶
Posion Ratio	0.29

나타내었다. 해석모델은 대칭성을 고려하여 상단 고정체와 안내관 그리고 지지격자의 1/4 만 모델링 하였으며, 상단고정체를 구성하고 있는 유로판과 두름판, 상부판 그리고 상단고정체의 유로판에 연결되는 안내관과 안내관을 구속하고 있는 지지격자 등에 대하여 4 개의 절점을 갖는 탄성 쉘요소 (SHELL63)를 이용하여 생산하였다.

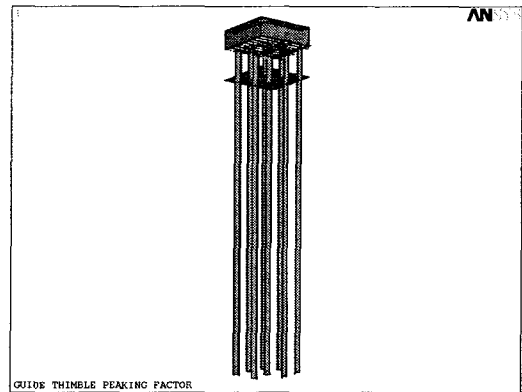
4. 하중집중계수 계산을 위한 해석

상단고정체 유로판의 각 안내관 위치에서의 하중과 응력의 차이를 계산하기 위해 앞에서 생산된 상단고정체-안내관 모델과 상단고정체-안내관-지지격자 모델을 이용한 유한요소해석을 범용코드인 ANSYS 를 이용하여 수행하였다. 유한요소해석은 모델에서 안내관의 최하부를 고정하고 상단고정체의 상부에서 축방향의 압축하중을 가하였으며 대칭이 되는 두 면에 대해서는 대칭 경계조건을 적용하였다. Fig. 4 에서 상단고정체-안내관 모델 과 상단고정체-안내관-지지격자 모델에 대한 해석결과인 상단고정체 유로판, 안내관, 그리고 지지격자의 변형모양을 보여주고 있으며 Fig. 5 에서는 작

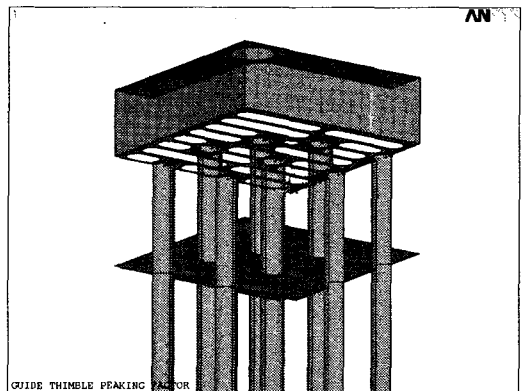
용하중에 대한 각 구성품들의 응력분포를 보여 주고 있다. Fig. 4 의 변형모양에서 상단고정체의 외곽에 위치한 안내관의 변형량이 중앙부에 위치한



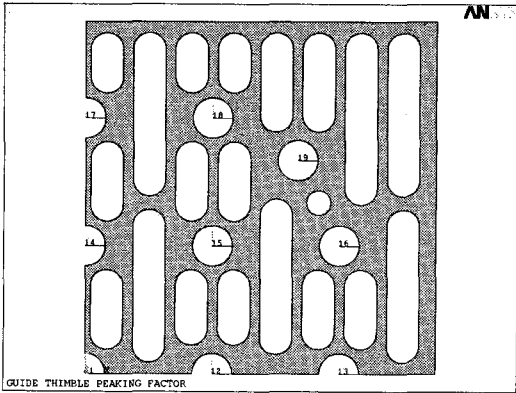
(a) Top nozzle - guide thimble model



(b-1) Top nozzle - guide thimble - top grid model



(b-2) Top nozzle - guide thimble - top grid model
[enlarged figure of (b-1)]



(c) Guide thimble location in top nozzle flow plate

Fig. 3 Analysis model of top nozzle, guide thimble, spacer grid

안내관의 변형량보다 더 많아서 하중이 외곽에 위치한 안내관에 집중됨을 알 수 있다. 또한, Fig. 5의 응력분포도에서도 상단고정체의 중앙부보다 외곽에 위치한 안내관에 응력이 집중되고 있음을 알 수 있다. 각각의 안내관에 대한 하중집중계수는 집합체의 각 안내관에서 발생하는 평균변형율에 대한 해당 안내관의 변형율의 비로서 계산 되었으며 다음과 같이 구하였다.

Load Concentration Factor =

$$\frac{\text{Guide Thimble Strain (\%)}}{\text{Average Guide Thimble Strain (\%)}}$$

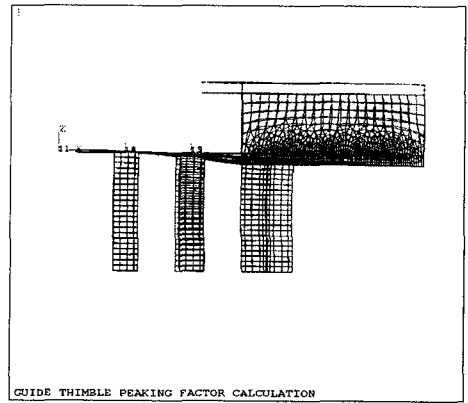
여기서, $\text{Average Guide Thimble Strain (\%)} = \frac{100}{24}$

$$\text{Guide Thimble Strain (\%)} = \frac{\epsilon_{GT}}{\epsilon_{TOTAL}} \times 100$$

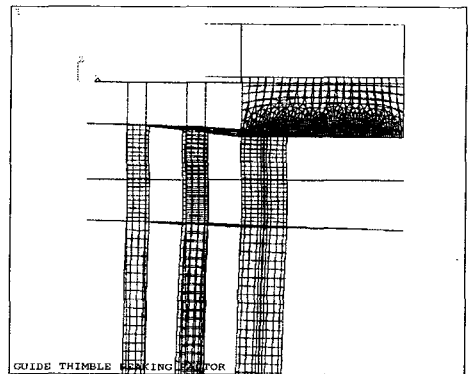
$$\begin{aligned} \epsilon_{TOTAL} = & 2(\epsilon_{GT12} + \epsilon_{GT13} + \epsilon_{GT14} + \epsilon_{GT17}) \\ & + 4(\epsilon_{GT15} + \epsilon_{GT16} + \epsilon_{GT18} + \epsilon_{GT19}) \end{aligned}$$

상단고정체-안내관 모델과 상단고정체-안내관-지지격자 모델을 이용한 해석결과인 각 안내관에 대한 변형율을 이용하여 계산된 하중집중계수를 Table 3에 나타내었다. 상단고정체-안내관-지지격자 모델

에 대한 해석은 지지격자 두께가 하중 집중계수에 미치는 영향을 알아보기 위하여 수행하였으며 지지격자 두께 변화에 대한 하중집중계수 변화를 Fig. 6에 나타내었다.



(a) Top Nozzle - Guide Thimble Model



(b) Top Nozzle-Guide Thimble-Top Grid Model

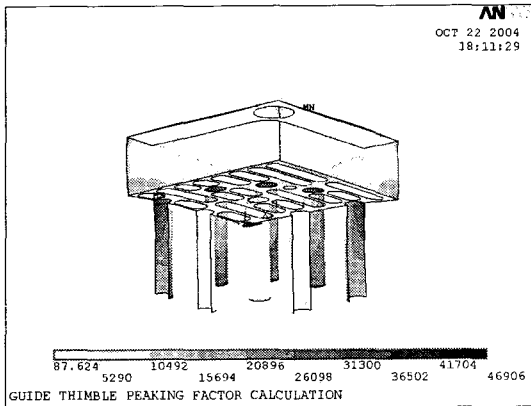
Fig. 4 Deformed shape of top nozzle, guide thimble, spacer grid

또한, 집합체에 가해지는 하중의 크기가 하중집중계수에 미치는 영향을 알아보기 위하여 하중의 크기를 변화시키면서 해석을 수행하였으며 그 결과를 Fig. 7에 나타내었으며 Fig. 8에서는 시험결과와 비교하기 위한 해석결과를 나타내었다.

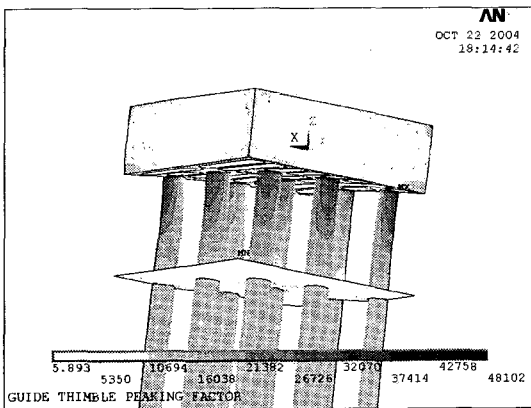
5. 지지격자 굽힘강성시험 및 해석

상단고정체-안내관 모델을 이용한 해석 결과 하중

집중계수는 최외곽 안내관에 대하여 1.48 로 집합체의 안내관에 스트레인게이지를 부착하여 측정 한 하중집중계수인 1.33 과 비교하여 약 11% 정도 큰 것으로 나타났다. 하중집중계수 측정을 위한 시험은 Fig. 1 의 핵연료집합체를 시험용 구조물에 고정시키고 상단고정체에 축방향 압축하중을 가하면서 안내관에 부착된 스트레인게이지를 이용하여 각 안내관에 작용하는 변형율을 측정하였다. 해석결과와 시험결과와의 차이는 Fig. 3 의 (a)에 나타난 상단고정체-안내관 모델에서 안내관 하부 끝단을 고정하므로써 실제 집합체에서의 상부지지격자에 의한 영향이 고려되지 않은 것에 기인하는 것으로 평가되었다. 상부지지격자가 하중집중계수에



(a) Top Nozzle - Guide Thimble Model



(b) Top Nozzle-Guide Thimble-Top Grid Model

Fig. 5 Stress Intensity Contour of top nozzle, guide thimble, spacer grid (unit : psi)

미치는 영향을 고려하기 위하여 Fig. 3 의 (b)에서와 같이 상부지지격자를 고려한 모델을 이용하여 해석을 수행하였으며 상단고정체-안내관-지지격자 모델의 경우 Fig. 6 에서와 같이 지지격자 모델에 대한 셀요소의 두께에 따라 하중집중계수가 변하는 것으로 나타나 상단고정체-안내관-지지격자 모델에서 셀요소의 두께를 결정하기 위하여 상부지지격자를 이용한 굽힘강성시험을 수행하였다.

Table 3 Load concentration factor for top nozzle-guide thimble model and top nozzle-guide thimble-spacer grid model

R (in.)	Guide Thimble Location								
	12	13	14	15	16	17	18	19	
Top nozzle-guide thimble model									
-	0.23	1.22	0.19	0.15	1.44	1.33	1.48	1.46	
Top nozzle-guide thimble-spacer grid model									
0.1	0.81	1.08	0.80	0.84	1.10	1.08	1.10	1.09	
0.2	0.65	1.17	0.64	0.67	1.19	1.18	1.19	1.13	
0.3	0.49	1.25	0.49	0.58	1.26	1.27	1.25	1.16	
0.4	0.33	1.30	0.34	0.49	1.32	1.33	1.32	1.22	
0.5	0.19	1.32	0.20	0.40	1.38	1.36	1.38	1.30	

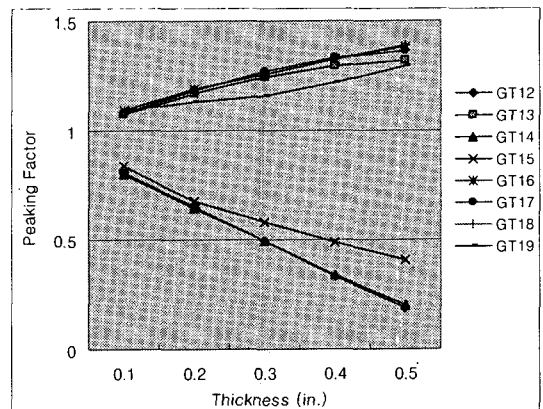


Fig. 6 Load concentration factor as a function of grid thickness

지지격자에 대한 굽힘강성시험은 Roell & Korthaus 사의 재료강도시험기(RKM100)를 사용하였으며, Fig. 9 에서와 같이 지지격자 가장자리 4 군대를 지지하고 중앙에 집중하중을 가하면서 하중-변위 곡

선을 구하였다. 지지격자에 대한 시험결과로부터 지지격자와 등가한 굽힘강성을 갖는 단순화 된 지지격자 판모델을 결정하기 위하여 지지격자 굽힘강성시험과 동일한 경계조건을 이용하여 해석을 수행하였으며 해석모델과 변형모양을 Fig. 10에 나타내었다. 해석결과 단순화 한 지지격자 모델과 실제 지지격자와 등가한 굽힘강성을 갖는 지지격자 모델에 대한 셀요소의 두께는 0.2 in.로 나타났으며 이 값을 상단고정체-안내관-지지격자 모델에서 지지격자 모델에 대한 셀요소 두께로 사용하였다.

6. 해석결과 및 평가

상단고정체 유로판과 안내관에서의 하중집중계수를 구하기 위하여 상단고정체-안내관 모델과 상단고정체-안내관-지지격자 모델을 이용하여 해석을 수행하였다. 상단고정체 유로판에서 바깥쪽에 위치하는 안내관(GT13, GT16, GT17, GT18, GT19)에 대한 하중집중계수는 지지격자의 굽힘강성이 증가함에 따라 증가하고 안쪽에 위치하는 안내관(GT12, GT14, GT15)에 대한 하중집중계수는 지지격자의 굽힘강성이 증가함에 따라 감소하는 경향을 보였다. 이는 지지격자의 두께가 증가함에 따라 바깥쪽에 위치하는 안내관에 대한 반력은 증가하고 안쪽에 위치하는 안내관에 대한 반력은 상대적으로 감소하기 때문인 것으로 평가되었다. 17x17 핵연료집합체에 대한 하중집중계수는 지지격자에 대한 셀요소의 두께가 0.2 in.인 경우이므로

Table 3 과 Fig. 6 으로부터 1.2 임을 알 수 있다. 해석결과인 이 하중집중계수는 해석에 사용된 집합

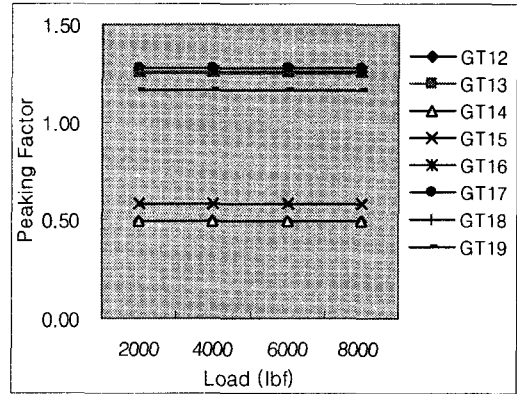


Fig. 8 Load concentration factor as a function of load (Analysis Results)

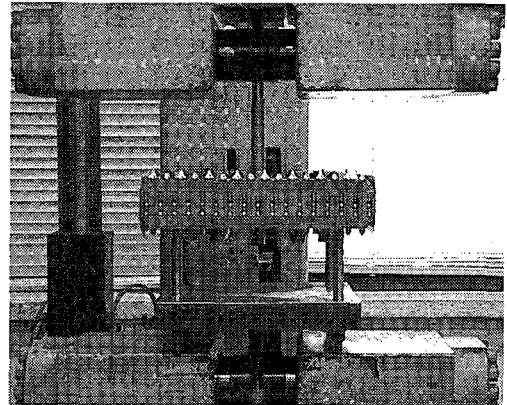


Fig. 9 Grid flexibility test setup

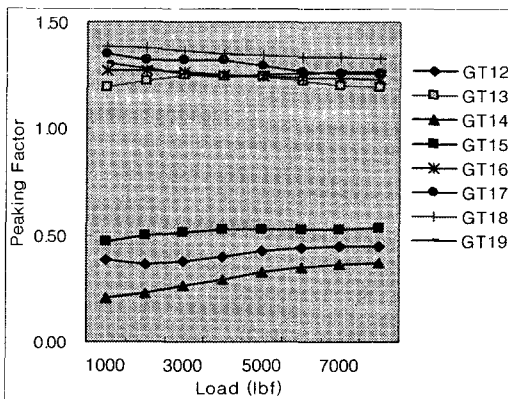
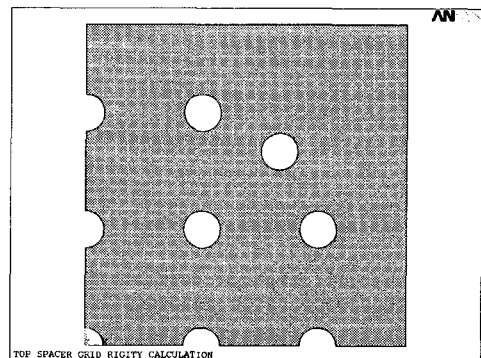
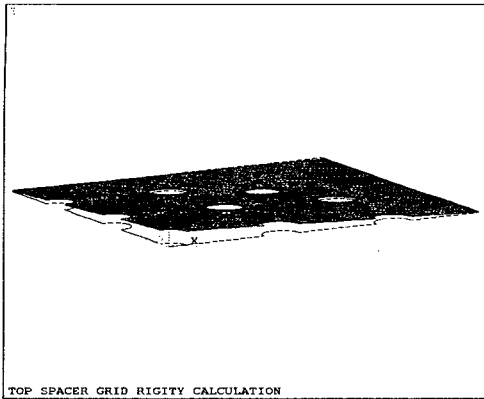


Fig. 7 Load concentration factor as a function of load (Test Results)



(a) Analysis Model



(b) Deformed Shape

Fig. 10 Analysis model and deformed shape of equivalent plate model for spacer grid

체에 대한 시험결과인 1.33 과 비교하여 약 9% 정도 작은 값이다. 이는 해석시 고려된 집합체모델에서 상단고정체로부터 첫번째 지지격자와 두번째 지지격자 사이에 대한 연료봉의 축방향 지지효과와 횡방향 강성효과를 고려하지 않은 것에 기인하는 것으로 판단되며 상단고정체 유로판과 안내관에 대한 더 정확한 하중집중계수를 구하기 위해서는 연료봉의 축방향 지지효과와 횡방향 강성효과를 고려하여야 할 것으로 판단되었다.

7. 결론

경수로형 17x17 핵연료집합체의 상단고정체 유로판, 안내관, 그리고 지지격자 해석모델을 이용하여 상단고정체 유로판 및 안내관의 응력해석을 위한 하중집중계수를 계산한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 탄성셀요소로 구성된 3 차원 모델을 이용하여 상단고정체 유로판과 안내관에 대한 하중집중계수를 구하였으며, 하중집중계수는 1.2 로서 시험결과와 비교하여 약 9% 정도 작게 나타났으나 3 차원 모델을 이용한 하중집중계수 계산에 대한 타당성이 입증되었다.
- 상부지지격자의 굽힘강성이 상단고정체 유로판과 안내관에 대한 하중분포에 영향을 미치는 것으로 나타나 하중집중계수 계산시 이를 고려하여야 하는 것으로 평가되었다.

- 상부지지격자의 굽힘강성시험결과와 그 결과로부터 구한 단순화된 등가 판모델을 하중집중계수 계산에 적용할 수 있었다.

참고문헌

1. Fuel Design Report for 17x17 Fuel Assembly, KNFC, 1994.
2. O'Donnell, W. J., "Further Theoretical Treatment of Perforated Plate with Square Penetration Pattern," WRC Bulletin, No. 151, 1970.
3. Mahoney, J. B., L. Salerno, L., "Stress Analysis of Circular Plate Containing a Rectangular Array of Holes," WRC Bulletin, No. 151, 1975.
4. Kim, H. J., Kwon, Y. S., Park, J. H., Ahn, C. W. and Kim, H. S., "A Study on the Shape Optimal Design of Perforated Plate," Proc. of KSPE, pp. 731-734, 2001.
5. Yoo, G. H., Lee, M. G., Jeong, K. H. and Lee, S. C., "Experimental Modal Analysis of Perforated Rectangular Plates Coupled with Fluid," Proc. of KSPE, pp. 900-903, 2002.
6. Han, G. J., Ahn, S. C., Shim, J. J., Lee, H. C. and Jang, H. S., "The Effect of the Area Ratio and Change of Location on the Buckling Stress of Two Rectangular Plates Spot-welded," J. of KSPE, Vol. 18, No. 12, pp. 54-59, Dec. 2001.
7. Yim, J. S., Lee, Y. S., "A Study on the Load Distribution Factor in the Perforated Square Plate with Elastic Support at Four Corners," J. of KSME, Vol. 13, No. 4, pp. 563-571, 1989.
8. FRAGEMA, "Mechanical Design Report for 17x17 Assembly"
9. Lee, Y. S., Kim, Y. W., "Study on Structural Vibration Analysis and Design Optimization of Rotating Composite Cylindrical Shells with Cutout," J. of KSNVE, Vol. 8, No. 3, pp. 467-476, 1998.
10. Kim, Y. W., Lee, Y. S., "Vibration Analysis of Ring Stiffened Cylindrical Shells with a Rectangular Cutout," J. of KSME, Vol. 23, No. 11, pp. 2040-2049, 1999.
11. Ugural, A. C., "Stresses in Plates and Shells," pp. 59-73, McGraw-Hill Book Company, 1981.