2004 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

ANSYS를 이용한 집합체 상세모델 개발에 관한 연구

A Study on the Development of Fuel Assembly Detailed Model using ANSYS

이규석, 전상윤, 서정민, 전경락
한전원자력연료주식회사
대전광역시 유성구 덕진동 493번지

요 약

원자력발전소 지진 및 냉각재 상실사고 등에 의한 핵연료집합체의 건전성을 검증하기 위해 집합체가 허용기준을 만족하고, 집합체 구조의 손상이 발생하더라도 냉각이 가능한 형상을 유지해야 하며, 제어봉 삽입이 가능함을 보여야만 한다. 이러한 내진해석을 위한 노심모델은 단순화된 집합체 스프링-질량 모델로 수립되며, 스프링-질량 모델은 집합체 상세모델로부터 구한다. 지금까지 내진해석을 위한 집합체 상세모델은 웨스팅하우스사 해석코드인 WECAN을 이용하여 왔다. 본 연구에서는 ANSYS를 이용하여 집합체 내진해석 및 응력해석을 위한 기초 모델인 집합체 상세해석 모델을 수립하고, 기존의 WECAN을 이용한 집합체 모드해석 결과 및 집합체 기계적 시험결과와 비교 평가하여, 향후 집합체 내진해석을 위한 집합체 상세모델 생산에 WECAN 코드를 ANSYS로 대체하고자 하였다. 평가결과, ANSYS와 WECAN을 이용한 모드해석 결과의 차이는 약 1%이내로 거의 동일하여, 집합체 내진해석에 사용되는 WECAN 코드를 ANSYS로 대체할 수 있을 것으로 평가되었다.

Abstract

The fuel assembly SSE/LOCA analysis is performed to verify that the fuel assembly is limited to its stress criteria and maintained a coolable geometry and RCCA can be inserted in fuel assembly. The core model for this fuel assembly SSE/LOCA analysis is accomplished by simplified spring-mass model which is established using fuel assembly detailed model. Up to now, the fuel assembly detailed model has been established using WECAN finite element code of Westinghouse Electric Co. In this study, the fuel assembly detailed model using a commercial finite element analysis code, ANSYS was established to replace WECAN code for fuel assembly SSE/LOCA analysis. To verify ANSYS model, fuel assembly modal analysis was performed and the results are compared with the WECAN analysis results and the fuel assembly mechanical test results.

The difference of analysis results between ANSYS and WECAN model is less than 1%, therefore, ANSYS can be used in the fuel assembly Seismic/LOCA analysis.

1. 서 론

원자력발전소 지진 및 냉각재 상실사고 등에 의한 Condition III와 IV의 하중에서 가장 제한적 사고인 SSE/LOCA 하중에 의해 각 부품에서 발생되는 최대 응력은 ASME Section III NG 3000 및 Appendix F (Rules for Evaluation of Service Loading with Level D Service Limits)의 응력한계 또는 각 부품에 대한 허용기준을 만족해야 하며, 집합체 구조의 손상이 발생하더라도 냉각이 가능한 형상을 유지해야 하며, 제어봉 삽입이 가능하여야 한다.[1]

집합체 내진해석을 위한 노심모델은 단순화된 집합체 스프링-질량 모델로 수립되며, 단순화된 집합체 스프링-질량 모델은 집합체 유한요소 상세모델로부터 구한다. 집합체 상세모델은 집합체 구성품에 대한 치수 및 시험 또는 해석 결과를 입력으로 사용하여 웨스팅하우스사 유한요소 해석 코드인 WECAN을 이용하여 생산하여 왔다.

본 연구에서는 집합체 내진해석에 사용되는 WECAN 코드를 ANSYS로 대체하고, 향후 집합체 내진해석에 ANSYS를 활용하고자, 집합체 내진해석 및 응력해석을 위한 기초 모델인 집합체 상세모델을 ANSYS를 이용하여 수립하고, 기존의 WECAN을 이용한 집합체 Modal 해석결과 및 집합체 기계적 시험결과와 비교 평가하였다.

2. 유한요소 해석 및 Modal Analysis 이론

집합체 내진해석에서 사용되는 집합체 상세모델은 집합체 정적해석 및 모드해석이다. 따라서 본 절에서는 집합체에 대한 정적해석을 위한 탄성체 유한요소이론과, 집합체 모드해석을 위한 관련 이론을 간단히 기술하였다.

2.1 탄성체에 대한 유한요소법 이론

외력이 가해지는 탄성체 구조물의 Potential Energy는 다음과 같이 표시된다.

$$\Pi = \int_{\Omega} \frac{1}{2} \varepsilon^{T} \sigma d\Omega - \int_{\Omega} u^{T} b d\Omega - \int_{\Gamma} u^{T} f d\Gamma \qquad (1)$$

여기서

ε : 변형율(Strain) 벡터, σ : 응력(Stress) 벡터

u : 변형(Displacement) 벡터, b : 체력(Body Force) 벡터

f : 외력(Applied Force) 벡터

탄성체에 대한 응력과 변형율의 관계와 보간함수(Interpolation Function)을 이용하면 식 (1)은 다음과 같이 정리된다.

$$\Pi_{e} = \int_{\Omega} \frac{1}{2} u^{T} (B^{T} D B) d\Omega - \int_{\Omega} u^{T} N^{T} b d\Omega - \int_{\Gamma} u^{T} N^{T} f d\Gamma \qquad (2)$$

탄성구조물이 평형상태를 이루기 위하여 잠재에너지 $\prod_e$는 최소값을 가져야 하므로 다음의 식이

성립되어야 한다.

$$\delta\Pi_e = \frac{\partial \Pi_e}{\partial u} = 0$$

따라서 식(2)는 다음과 같이 된다.

$$K_e u = F_e \tag{3}$$

여기서 $K_e = \int_\Omega (B^T D B) d\Omega$, $F_e = \int_\Omega N^T b d\Omega - \int_\Gamma N^T f d\Gamma$

식(3)은 유한요소법에서 한 요소에 대한 강성행렬 방정식이 되며, 전체 구조물에 대한 강성방정식은 각 요소에 대한 강성방정식을 다음과 같이 Assemble함으로서 얻어진다.

2.2 모드해석 이론

비감쇠 자유진동으로 가정되는 모드해석을 위한 구조물의 일반 운동방정식은 다음과 같이 표현된다.

$$M\ddot{u} + Ku = 0 \tag{4}$$

선형시스템의 경우, 자유진동은 Harmonic Equation으로 표현될 수 있으므로 식(4)로부터 다음과 같은 Eigenvalue Equation을 얻는다.

$$(K - \omega^2 M)u_o = 0 \tag{5}$$

식 (5)가 Non-Trivial 해를 갖기 위해서는 $K-\omega^2M$의 Determinant가 0이 되어야 한다. 즉,

$$\left| K - \lambda M \right| = 0 \qquad \text{여기서, } \lambda = \omega^2 \tag{6}$$

여기서 Eigenvalue λ_i는 고유진동수(Natural Frequency, $\varpi_i = \sqrt{\lambda_i}$)를, Eigenvector u_i는 Mode Shape 을 나타낸다.

3. ANSYS와 WECAN의 비교[2],[3]

범용 유한요소 프로그램인 ANSYS와 웨스팅하우스사에서 개발한 유한요소해석 코드인 WECAN은 Frontal Method를 기본 Solver로 사용하고 있으며 구조물의 탄소성해석 등에 사용되어져 왔다. ANSYS와 WECAN 코드의 차이점을 비교하기 위해 집합체 상세해석 모델에 사용되는 각 코드의 유한요소를 비교하였다. 집합체 상세모델에 사용되는 유한요소는 Beam, Contact 및 Sliding 요소이며, ANSYS 및 WECAN에서 사용되는 이러한 유한요소를 비교하면 다음과 같다.

3.1 Beam Element 비교

집합체 상세모델의 기본구조는 Beam 요소로 구성되며, 안내관, 연료봉, 상하단고정체, 지지격자 등을 Effective Beam으로 모델링하기 위해 사용된다. 이때 Beam 요소는 인장, 압축 및 굽힘 해석에 사용되는 2차원 탄성 단축(Uniaxial) 요소로서 ANSYS와 WECAN에서의 2-D Elastic Beam Element에

대한 Geometry, Nodal Location 및 Coordinate System에 대한 특성은 표 1 및 그림 1과 같다.

3.2 Contact Element 비교

집합체 상세모델 내에서의 Contact Element는 지지격자 스프링/딤플과 연료봉의 접촉 Mechanism을 모사하기 위해 사용되며, 절점간의 접촉, 미끄러짐 등을 해석하기 위해 사용되는 2차원 절점-절점 접촉요소이다. ANSYS와 WECAN에서의 2-D Point-to-Point Contact Element에 대한 Geometry, Nodal Location, Coordinate System에 대한 특성은 그림 2 및 표 2와 같으며, 접촉형태에 따라 다음과 같이 분류 해석된다.

1) Closed and Stuck

$\mu F_n > F_s$

여기서 μ: Friction Coefficient, F_n: Normal Force, F_s: Sliding Force

2) Closed and Sliding

$\mu F_n = F_s$

3) Open : No Contact

3.3 Sliding Element 비교

Sliding 요소는 집합체 변형에 의해 지지격자 스프링/딤플과 연료봉 간에 마찰력을 초과하는 하중이 발생할 때의 미끄러짐 현상을 모사하기 위해 사용된다. 이 요소는 2개의 절점, 2개의 스프링 상수, 댐핑 계수, 질량, Gap Size 및 한계 미끄러짐력으로 정의되며, ANSYS와 WECAN에서 Sliding 요소에 대한 Geometry, Nodal Location 및 Coordinate System 등의 요소 특성에 대한 비교는 그림 3 및 표 3과 같다.

상기의 집합체 상세모델에서 사용되는 ANSYS와 WECAN간의 유한요소의 특성을 비교하였으며, 비교 결과, ANSYS의 유한요소는 WECAN의 유한요소에 비해 더 많은 자유도 및 Real Constant를 가지고 있으므로 ANSYS는 집합체 상세모델 수립을 위해 WECAN을 충분히 대체할 수 있는 것으로 평가된다.

4. 집합체 상세모델 및 해석

본 연구에서는 WECAN을 이용한 집합체 상세해석 모델을 ANSYS 상세해석 모델로 대체하고 이를 비교 평가하기 위해 17×17형 RFA 집합체에 대한 ANSYS 상세모델을 수립하였으며, 이에 대한 모드해석을 수행하여 집합체 시험 결과 및 WECAN을 이용한 해석 결과와 비교하였다. 이러한 평가를 위해 먼저 기존의 WECAN을 이용한 집합체 상세모델을 분석한 후, 이 모델을 기반으로 ANSYS를 이용하여 집합체 상세모델을 수립하였다.

17x17 RFA 연료는 그림 4에서 보는 바와 같이 해체 및 조립이 가능한 상단고정체 1개, 이물질 여과 소구경 하단고정체 1개, 유효연료(Active Fuel) 영역에 혼합날개가 부착된 중간지지격자 6개와

혼합지지격자 3개, 혼합날개가 부착되지 않은 상부 및 하부의 인코넬 지지격자 각 1개, 이물질 여과 보호지지격자 1개, 안내관 24개, 계측관 1개 그리고 각 지지격자의 셀에 삽입되어 있는 264개의 연료봉으로 구성되어 있다.

집합체 상세모델은 시험 또는 해석을 통해 얻은 집합체 각 부품의 Effective한 특성치들을 계산하여 사용한다. 집합체 상세모델에 사용된 유한요소는 3절에서 기술한 바와 같이 Beam, Contact 및 Sliding 요소가 사용되며, 17×17형 RFA 집합체 상세모델의 각 절점 및 요소의 구성은 그림 5에서 보는 바와 같이 156개의 절점과 304개의 요소로 구성된다. 또한, ANSYS 및 WECAN 해석결과의 비교 평가를 위해 ANSYS 및 WECAN 집합체 상세모델을 동일한 물성치, Real Constant, 절점 위치 그리고 경계조건으로 모델링하였다.

해석의 경계조건을 위해 상하단고정체 각 끝 절점을 다음과 같이 구속하였다.

UX=0 @ node 2, 4, 151 & 152

UY=0 @ node 152

집합체 모드 해석은 대기중 상온 상태에 대해 수행되었으며, 집합체 상세모델의 각 지지격자와 연료봉 및 안내관을 공유하는 지지격자 중심위치의 절점에 Master DOF를 부여하였고, ANSYS에서 Reduced Modal Analysis Option을 사용하여 해석하였다.

5. 해석 결과 및 고찰

상기에서와 같이 ANSYS와 WECAN을 이용하여 생산한 집합체 상세모델에 대한 모드해석이 수행되었다. 표 4에서는 ANSYS와 WECAN을 이용한 17×17형 RFA 집합체의 고유진동수 해석결과를 시험결과와 비교하여 나타내었으며, 표 5에서는 17×17형 RFA 집합체의 모드형태를 ANSYS와 WECAN의 해석결과를 비교하여 나타내었다.

먼저 집합체 상세모델에 대한 고유진동수 해석 결과는 표 4에서 보는 바와 같이 17×17 RFA 집합체의 시험결과, WECAN 및 ANSYS 해석결과와 비교할 때, 거의 동일한 결과를 나타냈으며, ANSYS와 WECAN의 고유진동수 해석결과 차이도 1%이내에서 동일하게 나타났다. 또한 집합체 모드 형태에 대한 해석 결과도 표 5에서 보는 바와 같이 ANSYS와 WECAN이 거의 동일한 결과를 나타냈다. 또한, 그림 6은 ANSYS의 17×17 RFA 집합체에 대한 차수별 모드형태를 나타내고 있다.

상기의 해석 결과에서 나타난 바와 같이, ANSYS를 이용한 17×17 RFA 집합체 상세모델은 WECAN을 이용한 집합체 상세모델을 충분히 대체할 수 있는 것으로 평가되었다.

6. 결 론

본 연구에서는 상용 유한요소해석 코드인 ANSYS를 이용하여 집합체 내진해석 모델 및 집합체 응력해석을 위한 기초 모델인 집합체 상세해석 모델을 수립하고, 기존의 집합체 내진해석에 사용되는 WECAN 코드를 ANSYS로 대체하기 위해 ANSYS를 이용한 집합체 동특성 해석 결과와 기존

의 WECAN을 이용한 해석결과 및 집합체 기계적 시험결과에 대해 비교 평가하였으며, 평가 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 집합체 상세모델에서 사용되는 ANSYS와 WECAN 코드의 각 유한요소들의 특성은 서로 동일하며, ANSYS의 경우, WECAN의 유한요소가 갖는 특성을 충분히 모사할 수 있는 것으로 평가되었다.
(2) 집합체 고유진동수 해석 결과를 비교한 결과 ANSYS와 WECAN 코드간의 결과 차이는 1% 이내로 거의 동일함을 알 수 있었다.
(3) 집합체 모드형태 해석결과의 경우에도 ANSYS와 WECAN 코드간의 결과 차이는 거의 동일하게 나타남을 알 수 있었다.

따라서, 집합체 내진해석에 사용되는 WECAN 코드를 ANSYS로 충분히 대체할 수 있으며, 향후 집합체 내진해석모델 수립에 ANSYS를 활용할 수 있을 것으로 평가되었다.

감사의 글

본 연구는 산업자원부 전력산업 연구개발사업인 가동원전 출력증강 기술개발 과제로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

[1] STANDARD REVIEW PLAN SECTION 4.2 APPENDIX A, Evaluation of F/A Structural Response to Externally Applied Forces, USNRC
[2] WECAN User's Manual
[3] ANSYS User's Manual
[4] KNF-TR-FA2-04001, Rev.00, "ANSYS를 이용한 내진해석용 집합체 상세모델 개발", KNFC

표 1. BEAM Element 특성 비교

Item	WECAN	ANSYS	Remark
Element Name	STIF3	BEAM3	
Node	I, J	I, J	
Degree of Freedom	UX, UY, ROTZ	UX, UY, ROTZ	
Real Constants	AREA, IZZ, DEPTH	AREA, IZZ, HEIGHT, SHEARZ, ISTRN, ADDMAS	

표 2. Contact Element 특성 비교

Item	WECAN	ANSYS	Remark
Element Name	STIF12	CONTAC12	
Node	I, J	I, J	
Degree of Freedom	UX, UY	UX, UY	
Real Constants	ϕ_{slide}, KN, Initial Interference, Initial KTYPE, KS	THETA, KN, INTF, START, KS	

표 3. Sliding Element 특성 비교

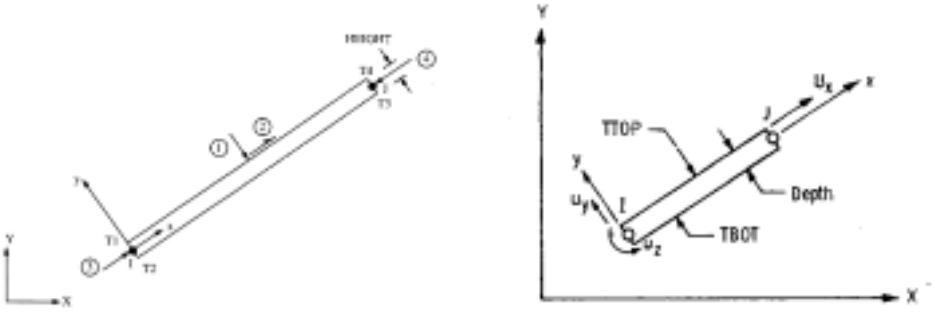
Item	WECAN	ANSYS	Remark
Element Name	STIF39	CMBIN40	
Node	I, J	I, J	
Degree of Freedom	UX	UX, UY, UZ, ROTX, ROTY, ROTZ, PRES, TEMP	
Real Constants	F_{slide}, D_{slide}	K1, C, M, GAP, F_{slide}, K2	

표 4. 17×17형 RFA 집합체 Natural Frequency 결과 비교

Mode	Frequency (Hz)			Remark
	Test Result	WECAN Result	ANSYS Result	
1	3.65	3.66	3.67	
2	7.80	8.07	8.08	
3	12.30	12.84	12.84	
4	17.70	19.09	19.10	
5	24.20	24.93	24.93	
6	30.50	33.49	33.48	

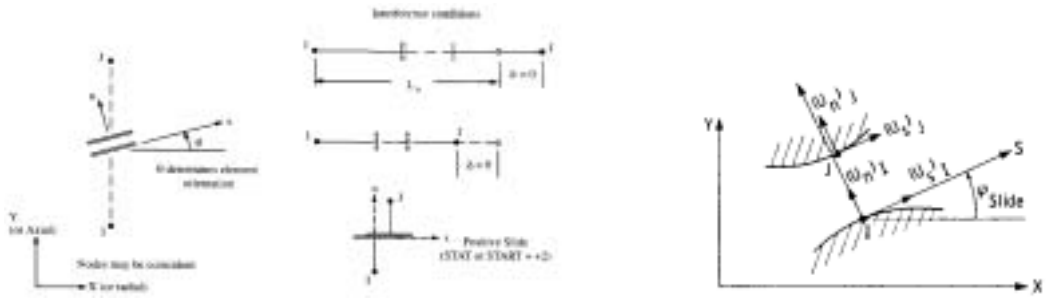
표 5. 17×17형 RFA 집합체 Mode Shape 결과 비교

Part (Node)	Mode Shape											
	1		2		3		4		5		6	
	WEC	ANS	WEC	ANS	WEC	ANS	WEC	ANS	WEC	ANS	WEC	ANS
TN (2)	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Grid-8 (9)	0.010	0.010	-0.015	-0.015	0.021	0.021	0.027	0.027	-0.032	-0.032	0.033	0.033
Grid-7 (21)	0.455	0.455	-0.729	-0.730	0.984	0.984	0.916	0.918	-0.849	-0.848	0.587	0.587
IFM-3 (33)	0.614	0.614	-0.855	-0.856	0.890	0.889	0.454	0.454	-0.042	-0.041	-0.362	-0.362
Grid-6 (45)	0.753	0.753	-0.883	-0.883	0.571	0.570	-0.223	-0.224	0.797	0.797	-0.917	-0.917
IFM-2 (57)	0.859	0.859	-0.751	-0.751	0.016	0.015	-0.723	-0.724	0.708	0.707	0.092	0.092
Grid-5 (69)	0.943	0.943	-0.540	-0.540	-0.544	-0.545	-0.885	-0.886	0.118	0.117	1.000	1.000
IFM-1 (81)	0.985	0.986	-0.231	-0.230	-0.881	-0.881	-0.349	-0.348	-0.608	-0.608	0.203	0.203
Grid-4 (93)	1.000	1.000	0.112	0.114	-0.995	-0.994	0.362	0.364	-0.887	-0.886	-0.807	-0.807
Grid-3 (105)	0.883	0.882	0.924	0.926	0.059	0.061	1.000	1.000	1.000	1.000	0.447	0.447
Grid-2 (117)	0.580	0.579	1.000	1.000	1.000	1.000	-0.995	-0.998	-0.551	-0.552	-0.175	-0.176
Grid-1 (129)	0.032	0.031	0.028	0.027	0.073	0.072	-0.072	-0.070	-0.060	-0.058	-0.007	-0.005
P-Grid (141)	0.013	0.013	0.008	0.007	0.029	0.029	-0.025	-0.024	-0.021	-0.020	0.001	0.002
BN (152)	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000



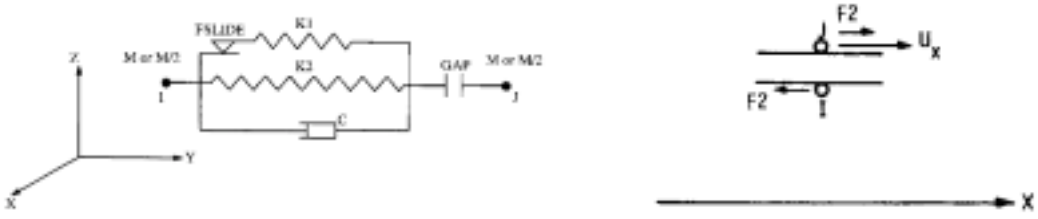
(a) ANSYS BEAM3 Element (b) WECAN STIF3 Element

그림 1. ANSYS 및 WECAN의 2-D Elastic Beam Element



(a) ANSYS CONTAC12 Element (b) WECAN STIF12 Element

그림 2. ANSYS 및 WECAN의 Contact Element



(a) ANSYS COMBIN40 Element (b) WECAN STIF39 Element

그림 3. ANSYS 및 WECAN Sliding Element

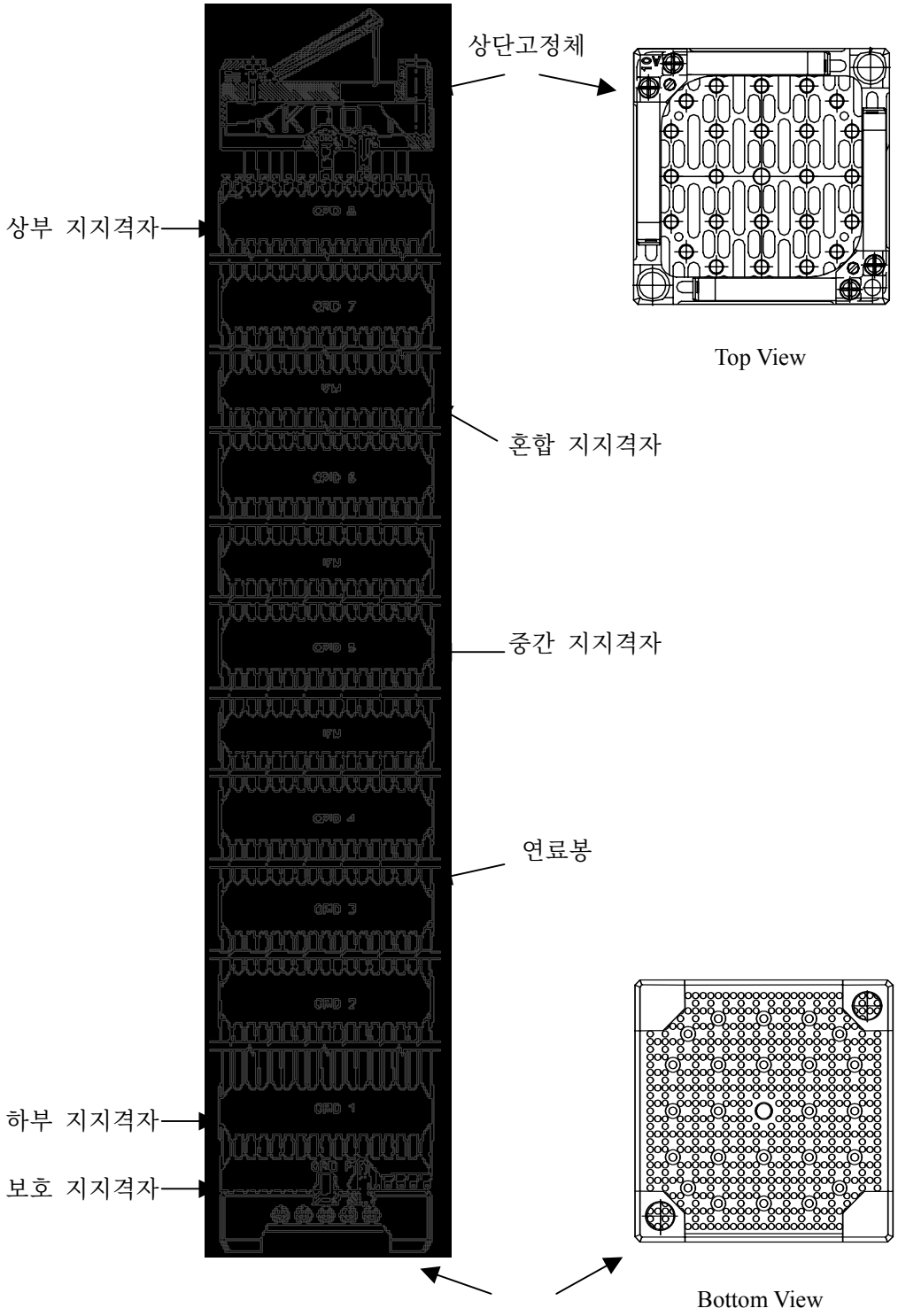


그림 4. 17×17 RFA 핵연료 집합체

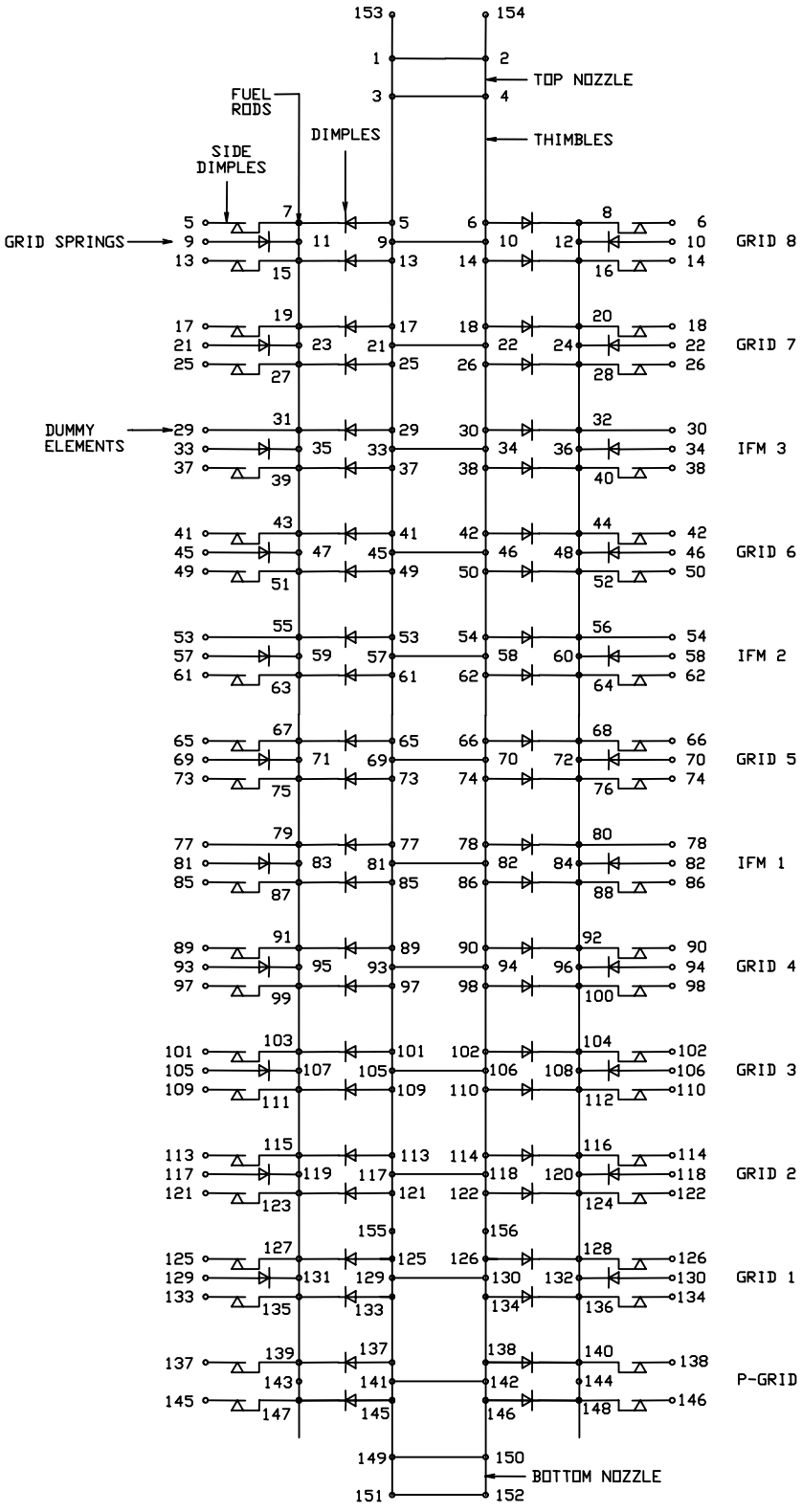
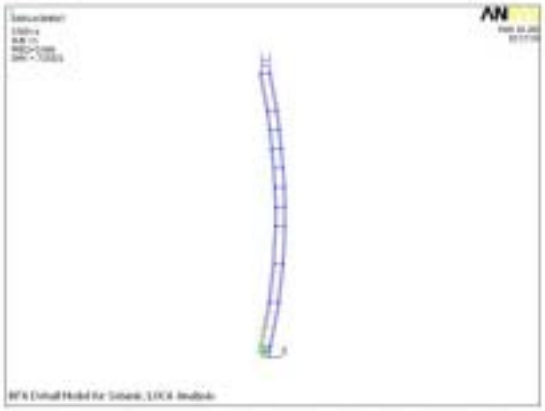
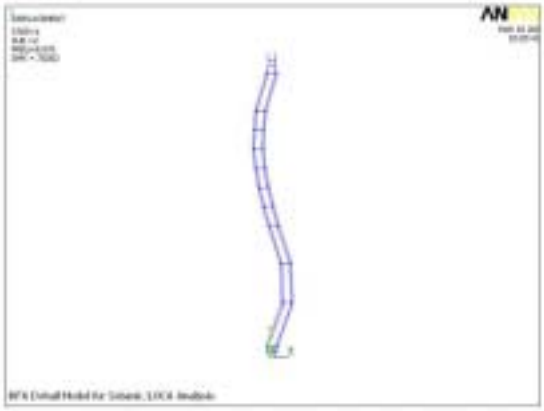


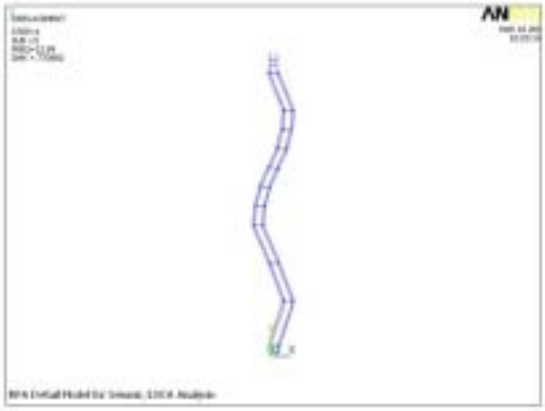
그림 5. 17×17형 RFA 집합체 상세모델



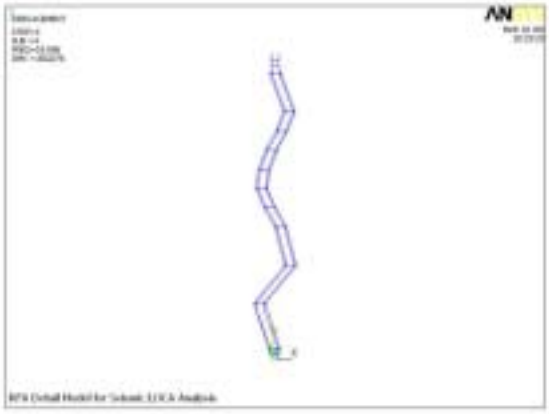
(a) 1st Mode



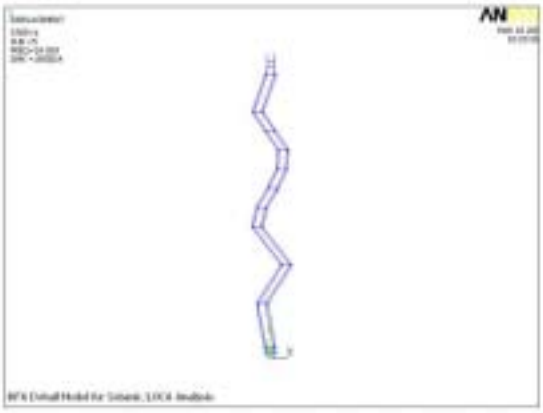
(b) 2nd Mode



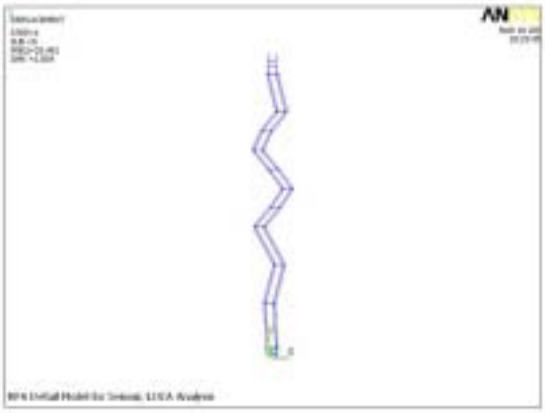
(c) 3rd Mode



(d) 4th Mode



(e) 5th Mode



(f) 6th Mode

그림 6. 17×17형 RFA 집합체 ANSYS Modal 해석 결과