2004 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

# ANSYS를 이용한 17×17 개량핵연료 집합체 모드해석

## The Modal Analysis of the 17×17 Improved Fuel Assembly

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

**요 약**

원자력발전소 지진 및 냉각재 상실사고 등에 의한 핵연료집합체의 건전성을 검증하기 위해 SSE/LOCA 하중에 의해 집합체에 발생되는 최대응력이 허용기준을 만족하고, 집합체 구조의 손상이 발생하더라도 냉각이 가능한 형상을 유지해야 하며, 제어봉 삽입이 가능함을 보여야만 한다. 이러한 집합체 내진해석을 위한 노심모델은 단순화된 집합체 스프링-질량 모델로부터 수립되며, 스프링-질량 모델은 집합체 내진해석 상세모델로부터 구한다. 지금까지 내진해석을 위한 집합체 상세모델 웨스팅하우스사 유한요소 해석코드인 WECAN을 이용하여 왔다. 본 연구에서는 집합체 내진해석에 ANSYS를 활용하기 위해, ANSYS 및 WECAN를 이용하여 17×17 개량핵연료 집합체에 대한 내진해석 상세모델을 수립하고, 집합체 모드해석 결과와 비교 평가하여 집합체 내진해석에 사용되는 WECAN 코드를 ANSYS로 대체하기 위한 타당성을 얻고자 하였다. 평가결과, ANSYS와 WECAN을 이용한 모드해석 결과의 차이는 약 1%이내로 거의 동일하였으며, 집합체 내진해석에서 ANSYS 적용에 대한 타당성을 얻을 수 있었다.

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 by using WECAN finite element code of Westinghouse Electric Co. In this study, to verify the ANSYS model in fuel assembly SSE/LOCA analysis, the 17×17 improved fuel assembly detailed models were established using the ANSYS and WECAN, and the modal analysis results for these models were compared. The difference of analysis results between ANSYS and WECAN model is less than 1%, therefore, ANSYS can be used in the fuel assembly SSE/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.

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 수립하여 왔다.

참고문헌 [1]에서 집합체 내진해석에 사용되는 WECAN 코드를 ANSYS로 대체하고자 하였으며, 본 연구에서는 참고문헌 [1]의 방법론에 따라, 상용 유한요소 프로그램인 ANSYS를 이용하여 17×17형 개량핵연료 집합체에 대한 내진해석 및 응력해석을 위한 기초 모델인 집합체 상세해석 모델을 수립하고 모드해석을 수행하고, 이들 해석결과를 비교 평가하여, ANSYS를 이용한 집합체 상세모델 해석 결과를 집합체 내진해석에 활용하기 위한 타당성을 얻고자 하였다.

## 2. 유한요소 해석 및 Modal Analysis 이론

집합체 내진해석에서 사용되는 집합체 상세모델은 집합체 정적 해석 및 모드 해석이다. 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 잠재에너지는 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 ∏e는 최소값을 가져야 하므로 다음의 식이 성립되어야 한다.

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

따라서 식(2)는 다음과 같이 된다.

$$K_e u = F_e \quad (3)$$

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

식(3)은 유한요소법에서 한 요소에 대한 강성행렬 방정식이 되며, 전체 구조물에 대한 강성방정식은 각 요소에 대한 강성방정식을 조합하여 구한다.

### 2.2 모드해석 이론

비감쇠 자유진동으로 가정되는 Modal 해석을 위한 구조물의 일반 운동방정식은 다음과 같이 표현된다.

$$M\ddot{u} + Ku = 0 \quad (4)$$

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

$$(K - \omega^2 M)u_o = 0 \quad (5)$$

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

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

여기서 Eigenvalue $\lambda_i$는 고유진동수(Natural Frequency, $\varpi_i = \sqrt{\lambda_i}$ )를, Eigenvector $u_i$는 Mode Shape을 나타낸다.

## 3. 집합체 상세모델 및 해석

17×17형 개량핵연료 집합체는 그림 1에서 보는 바와 같이 해체 및 조립이 가능한 상단고정체 1개, 이물질여과 소구경 하단고정체 1개, 유효연료 영역에 혼합날개가 부착된 중간지지격자 6개와 혼합지지격자 5개, 혼합날개가 부착되지 않은 상부 및 하부의 인코넬 지지격자 각 1개, 이물질여과 보호지지격자 1개, 안내관 24개, 계측관 1개 그리고 각 지지격자의 셀에 삽입되어 있는 264개의 연료봉으로 구성되어 있다.

ANSYS를 이용한 17×17형 개량핵연료 집합체 상세모델의 타당성을 얻고, 집합체 내진해석에 이를 활용하기 위해 17×17형 개량핵연료 집합체에 대한 ANSYS 및 WECAN을 이용하여 집합체 상세모델을 수립하였으며, 이에 대한 모드해석을 수행하여 그 해석 결과와 비교하였다.

17×17형 개량핵연료 집합체 상세모델에서 사용되는 유한요소는 안내관, 연료봉, 상하단고정체,

지지격자 등을 Effective Beam으로 모델링하기 위한 Beam Element, 지지격자 스프링/딤플과 연료봉의 접촉 Mechanism과 모사하기 위해 사용되며, 절점간의 접촉, 미끄러짐 등을 해석하기 위해 사용되는 2차원 Node-to-Node Contact Element 그리고 집합체 변형에 의해 지지격자 스프링/딤플과 연료봉 간에 마찰력을 초과하는 하중이 발생할 때의 미끄러짐 현상을 모사하기 위해 사용되는 Sliding Element이다. 집합체 상세모델은 시험 또는 해석을 통해 얻은 집합체 각 부품의 Effective한 특성치들을 계산하여 사용하며, 위의 유한요소를 사용한 17×17형 개량핵연료 집합체 상세모델의 각 절점 및 요소의 구성은 그림 2에서 보는 바와 같이 196개의 절점과 372개의 요소로 구성된다. 또한, ANSYS 및 WECAN의 해석결과를 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, 175 & 176

UY=0 @ node 176

개량핵연료 집합체에 대한 모드해석은 Cold in Air 및 Hot in Water Condition에 대해 수행되었으며, 집합체 상세모델의 각 지지격자와 연료봉 및 안내관을 공유하는 지지격자 중심위치의 절점에 Master DOF를 부여하였고, ANSYS에서 Reduced Modal Analysis Option을 사용하여 해석하였다.

## 4. 해석 결과 및 고찰

집합체 상세모델에 대한 고유진동수 해석 결과는 표 1에서 보는 바와 같이 17×17 개량핵연료 집합체 시험결과와 해석결과와는 약간의 차이가 발생하였다. 이것은 집합체 상세모델의 Real Constant 값에 대해 17×17 RFA 연료의 부품 특성값들이 가정되어 사용되었기 때문으로 17×17 개량핵연료 핵연료 부품 특성시험 결과를 이용하여 집합체 상세모델을 수립할 경우, 해석 결과와 시험결과와의 차이는 감소할 것으로 평가되었다. 또한, 표 1에서 보는 바와 같이, WECAN 및 ANSYS의 고유진동수 해석결과를 비교할 때, 해석결과의 차이는 1%이내로 동일한 결과를 나타냈다. 그림 3 및 4는 17×17 개량핵연료 집합체의 모드형태에 대한 해석 결과의 비교이며, 그림에서 보는 바와 같이, WECAN 및 ANSYS를 이용한 해석 결과는 거의 차이가 없었다.

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

## 5. 결　론

본 연구에서는 상용 유한요소해석 코드인 ANSYS 및 WECAN을 이용하여 17×17 개량핵연료 집합체 내진해석 상세 모델을 수립하고, 이들에 대한 집합체 동특성 해석 결과를 비교 평가하였다. 집합체 모드해석 결과를 비교한 결과, 고유진동수의 경우, ANSYS와 WECAN 코드간의 결과 차이는 1% 이내로 거의 동일하게 나타났으며, 모드형태 해석결과의 경우에도 거의 동일함을 알 수 있

었다. 따라서, 집합체 내진해석에 사용되는 ANSYS의 적용 타당성을 입증할 수 있었다.

## 감사의 글

본 연구는 과학기술부 원자력연구개발 중장기계획사업인 웨스팅하우스형 원전용 개량연료개발과제로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

## 참고 문헌

[1] 이규석, 전상윤, 서정민, 전경락, "ANSYS를 이용한 집합체 내진해석 상세모델 개발에 관한 연구", 2004 한국원자력학회 춘계학술발표회.

[2] WECAN User's Manual

[3] ANSYS User's Manual

표 1.  17×17형 개량핵연료 집합체 Natural Frequency 결과 비교

| MODE | Cold in Air | | | | Hot in Water | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Test | WECAN | ANSYS | Ratio | WECAN | ANSYS | Ratio |
| 1 | 3.69 | 3.82 | 3.82 | 1.000 | 3.29 | 3.29 | 1.000 |
| 2 | 8.08 | 8.18 | 8.18 | 1.000 | 7.04 | 7.05 | 0.999 |
| 3 | 12.93 | 13.24 | 13.25 | 0.999 | 11.40 | 11.40 | 1.000 |
| 4 | 18.81 | 19.63 | 19.64 | 0.999 | 16.87 | 16.88 | 0.999 |
| 5 | 24.61 | 26.11 | 26.12 | 1.000 | 22.42 | 22.42 | 1.000 |
| 6 | 32.30 | 38.17 | 38.16 | 1.000 | 32.76 | 32.75 | 1.000 |

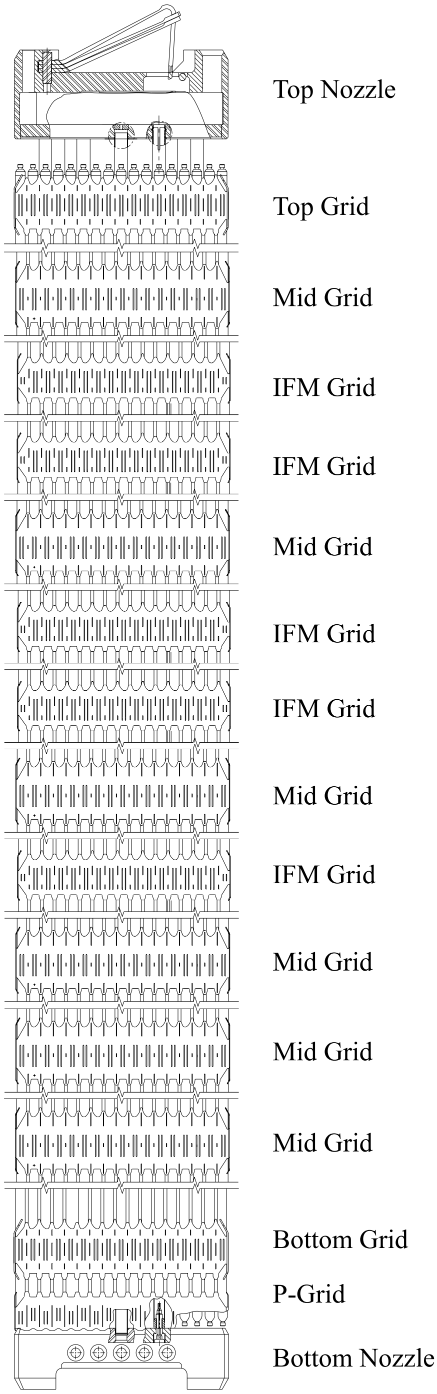



그림 1. 17×17 개량핵연료 집합체 개략도

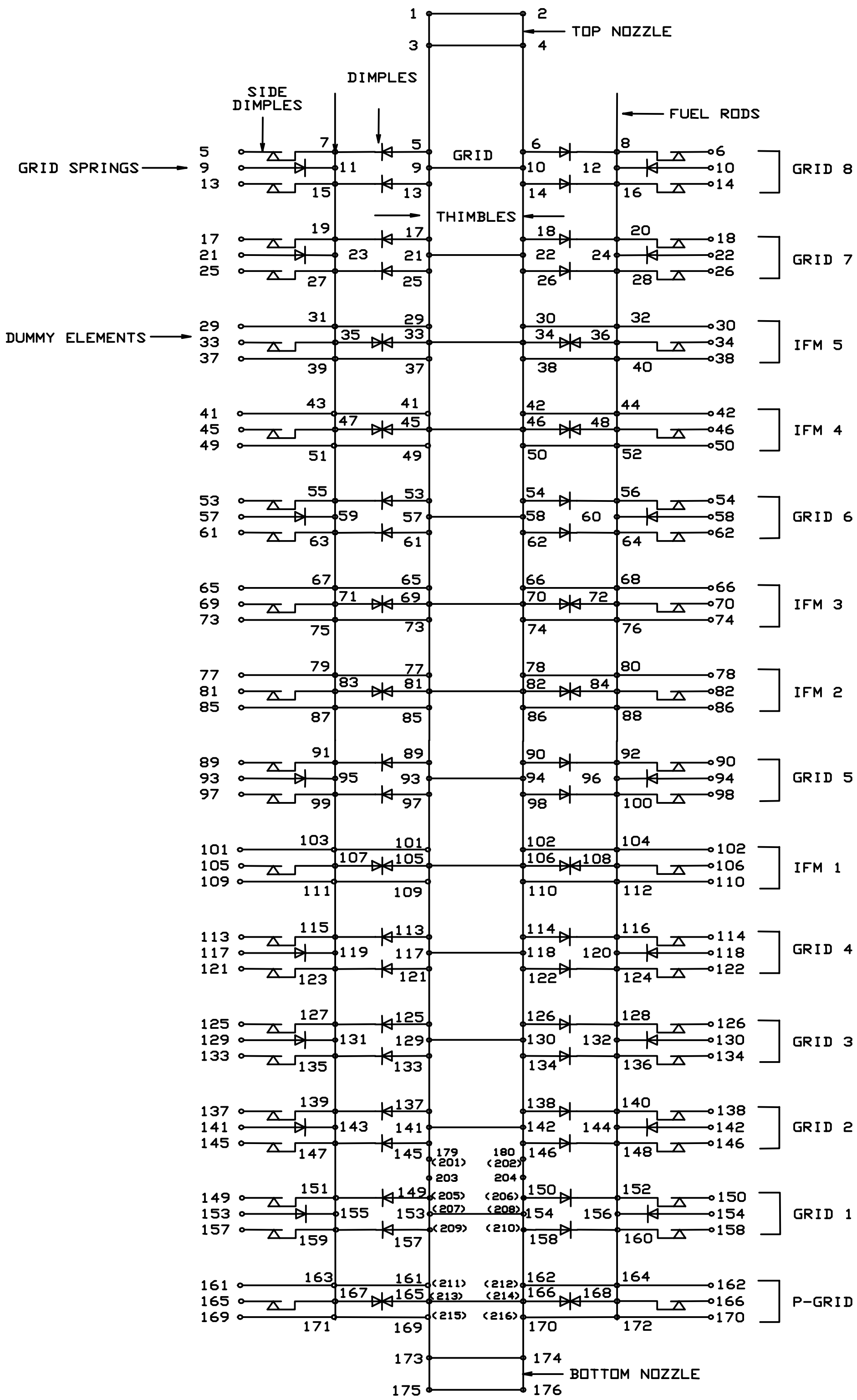
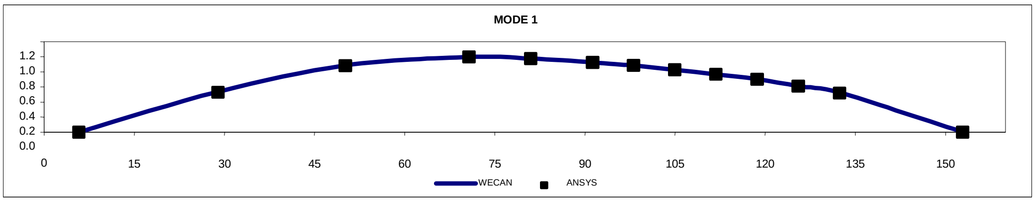
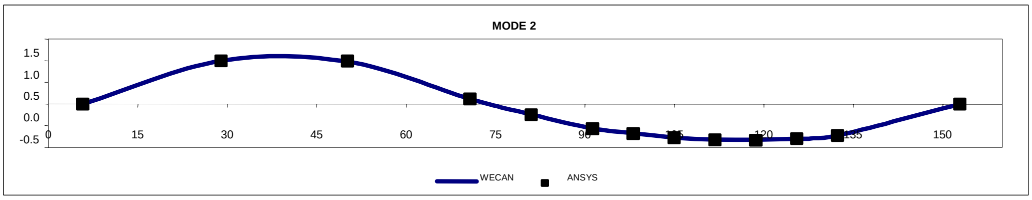


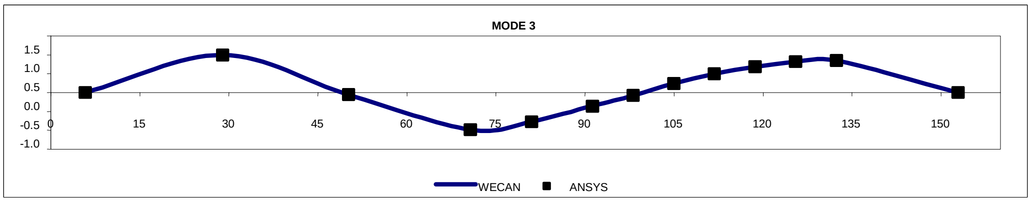

그림 2. 17×17 개량핵연료 집합체 상세모델



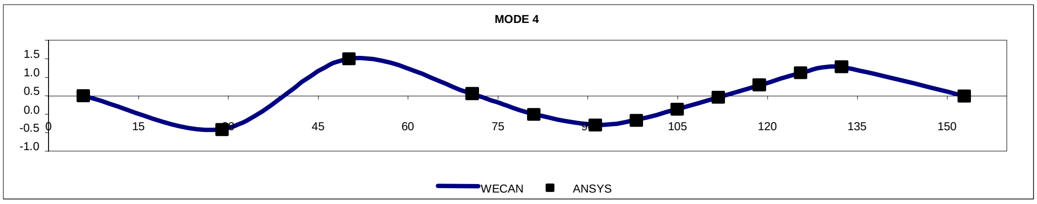

(a) 1st Mode



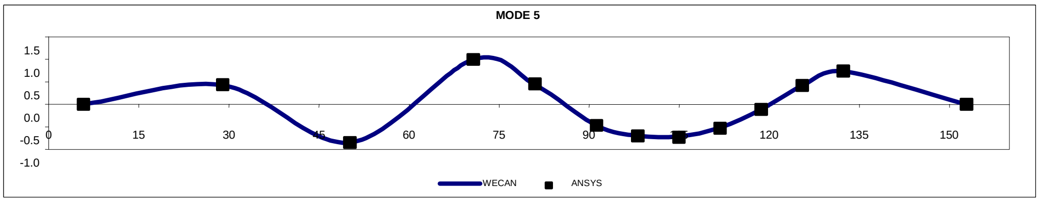

(b) 2nd Mode



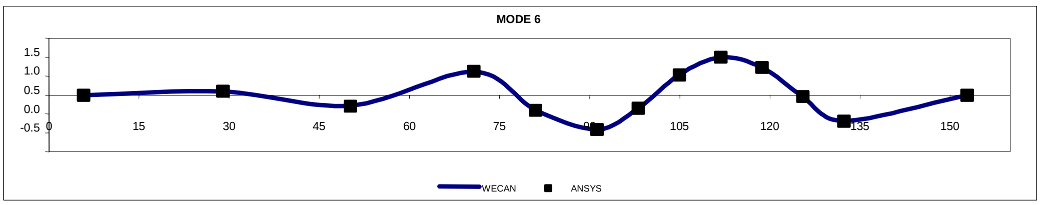

(c) 3rd Mode




(d) 4th mode

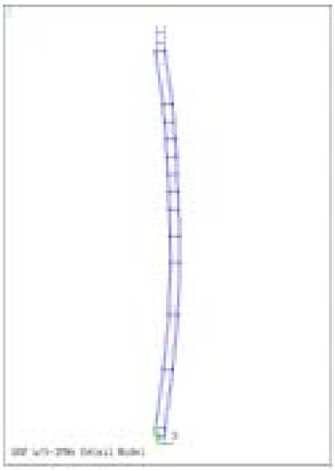



(e) 5th Mode

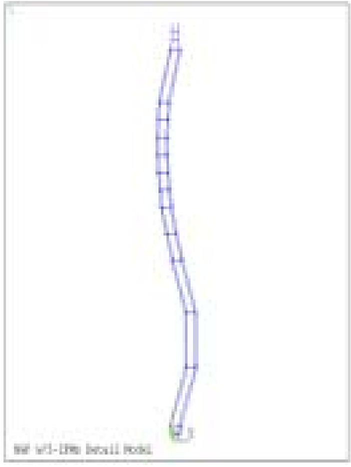



(f) 6th Mode

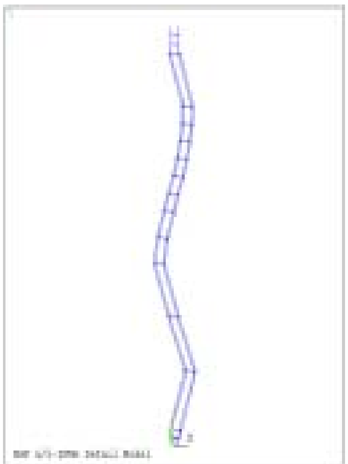
그림 3. 17×17형 개량핵연료 집합체 Mode Shape 결과 비교



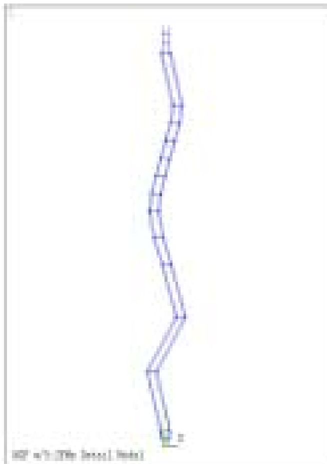
(a) 1st Mode



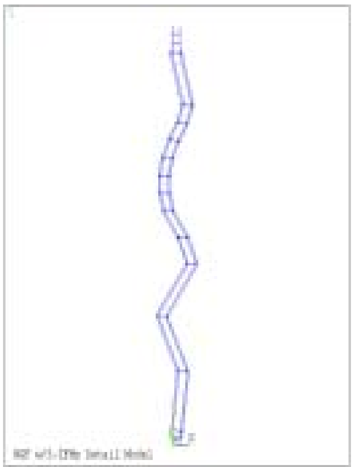
(b) 2nd Mode



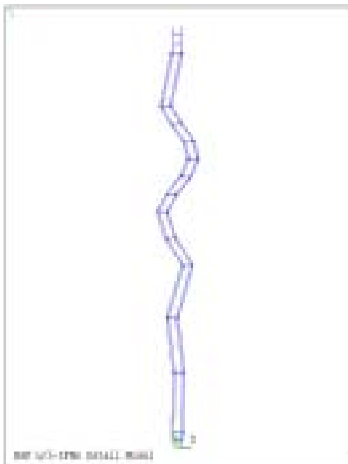
(c) 3rd Mode



(d) 4th Mode



(e) 5th Mode



(f) 6th Mode

그림 4. 17×17형 개량핵연료 집합체 ANSYS 모드해석 결과