2003 추계학술발표회 논문집
한국원자력학회

축하중을 고려한 17X17 개량핵연료집합체의 모드해석

Modal Analysis of 17X17 NGF (Next Generation Fuel) Assembly under Axial Load

전상윤, 박남규, 이규석, 전경락, 김규태

한전원자력연료주식회사
대전광역시 유성구 덕진동 493번지

요 약

웨스팅하우스형 17X17 개량핵연료(NGF)집합체는 현재 상용공급중인 핵연료와 비교하여 고연소 및 열적 성능향상, 집합체 및 연료봉 진동성능과 프레팅마모 저지성능 향상, 그리고 내진성능향상 및 제어봉비정상삽입 방지 등 핵연료의 안전성과 경제성을 향상시키기 위하여 개발되었다. 본 연구에서는 여러가지 성능향상을 위해 개발된 웨스팅하우스형 개량핵연료집합체의 고유진동수와 모드형상에 대한 기계적진동시험 결과를 제시하고 집합체의 유한요소모델을 이용한 해석결과와 비교평가 하였다. 그리고 핵연료집합체에 가해지는 축방향 압축하중(상단고정체 누름스프링력)이 핵연료집합체의 고유진동수에 미치는 영향을 시험결과와 해석결과를 이용하여 평가하였다. 개량핵연료집합체의 고유진동수와 모드형상에 대한 유한요소해석결과와 시험결과를 비교평가하여 집합체모델에 대한 타당성을 입증하였으며 개량핵연료의 고유진동수는 기존연료와 비교하여 중간 및 혼합지지격자와 안내관의 설계변경 등에 의해 진동모드에 따라 1%-6% 증가하였으며 해석결과는 시험결과보다 약 1%-5% 크게 예측하였다.

Abstract

The 17X17 NGF(Next Generation Fuel) assembly design has been developed to improve the high burnup and thermal performance, fuel assembly and fuel rod vibration performance, fretting wear protection performance, and seismic and IRI(Incomplete RCCA Insertion) protection performance compared with the current fuel assembly design. In this study, the mechanical test results for natural frequencies and mode shapes were presented and compared with the analysis results. The effect of axial load on the fuel assembly natural frequency was evaluated using test result and analysis result. The natural frequencies of 17X17 NGF assembly are 1%-6% higher than those of current 17X17 RFA (Robust Fuel Assembly) design according to this study.

1. 서 론

웨스팅하우스형 개량핵연료(NGF)집합체는 상하단고정체 각 1 개, 상하부지지격자 각 1 개, 중간지지격자 6 개 및 혼합지지격자 5 개, 보호지지격자 1 개, 그리고 24 개의 안내관과 1 개의 계측관 등으로 구성되어 있다[1]. 상단고정체는 스프링나사 이탈을 방지하기 위하여 일체형 클램프로 개발되었으며 하단고정체는 이물질여과 성능 향상을 위하여 소구경 유로판 설계를 채택하였으며 보호지지격자도 함께 사용하였다. 상하부지지격자는 각각 주기말 스프링력과 연료봉 휨 방지를 위한 스프링력을 제공하기 위하여 그리고 중간 및 혼합지지격자는 프레팅마모 저지 및 열적성능 향상을 위하여 개발되었다. 개량핵연료집합체는 현재 국내발전소에 상용공급중인 핵연료와 비교하여 고연소 및 열적 성능향상, 집합체 및 연료봉 진동성능과 프레팅마모 저지성능 향상, 그리고 내진성능향상 및 제어봉비정상삽입 방지 등 핵연료의 안전성과 경제성을 향상시키기 위하여 개발되었다. 특히, 프레팅마모 저지성능과 열적성능 향상을 위하여 I-Spring 과 새로운 혼합날개를 갖는 중간지지격자 설계와 5 개의 혼합지지격자를 갖는 설계를 개발하였으며 제어봉 비정상삽입 방지를 위하여서는 증가된 안내관 두께 이외에도 안내관 감쇄(Dashpot) 영역의 설계를 이중튜브를 이용한 Tube-in-Tube 로 개발하였다. 이러한 설계특성을 갖는 개량핵연료(NGF)와 기존연료(RFA)의 주요 설계특성을 표 1 에서 비교하여 나타내었다[1]. 본 논문에서는 열적 및 기계적 성능향상을 위해 개발된 웨스팅하우스형 개량핵연료집합체의 고유진동수와 모드형상에 대한 기계적진동시험결과를 기존연료와 비교하여 제시하였다. 또한, 개량핵연료 집합체에 대한 유한요소모델을 이용하여 모드해석을 수행하였으며 고유진동수와 모드형상에 대한 해석결과와 시험결과를 비교평가 하였다. 그리고 핵연료집합체에 가해지는 축방향 압축하중(상단고정체 누름스프링력)이 핵연료집합체의 고유진동수에 미치는 영향을 시험결과와 해석결과를 이용하여 평가하였다.

2. 축하중에 따른 집합체 고유진동수

단면특성이 균일한 보의 끝단에 인장력 P 가 작용하는 계의 진동은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$EIw_{,xxxx} - Pw_{,xx} + \rho A\ddot{w} = 0 \tag{1}$$

여기서 E, I, ρ, A 는 각각 탄성계수, 단면 2 차 모멘트, 밀도, 단면적을 의미한다. 또한 w 는 횡방향으로의 움직임을 의미한다. 유한요소모델을 고려하기위한 탄성에너지는 변분의 원리에 의해 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\int EIw_{,xx}\delta w_{,xx}dx + \int Pw_{,x}\delta w_{,x}dx \tag{2}$$

따라서 유한요소모델에 의한 고유치 방정식은 식(3)과 같다.

$$\left([K]_1 + p[K]_2\right)\{x\} = \omega^2[M]\{x\} \tag{3}$$

위의 식에서 좌변의 항들은 (2)식과 대응된다. 여기서 $\{x\}$, ω^2 는 모드벡터, 고유치이다. 계가 양치성을 갖는 경우, 탄성 에너지는 항상 0 보다 크며 이것은 다음의 식(4)가 성립함을 의미한다.

$$\{x\}^T\left([K]_1 + p[K]_2\right)\{x\} > 0 \tag{4}$$

이 식에서 보듯이 끝단에 작용하는 하중이 인장력이면 계의 탄성에너지는 증가하며 압축력이면 감소함을 알 수 있다. 특히 압축인 경우 어느 특별한 값에서 이 계는 버클링이 발생하여 불안정한 상태가 된다. 또한 (3)식의 양변에 질량에 대해 정규화된 모드벡터 $\{x\}^T$ 를 곱하고 작용하는 힘에 대해 미분하면 고유치의 미분량이 다음과 같이 얻어진다.

$$\{x\}^T\left(\frac{\partial[K]_1}{\partial p}+[K]_2+p\frac{\partial[K]_2}{\partial p}\right)\{x\}=\frac{\partial\omega^2}{\partial p}+\omega^2\{x\}^T\frac{\partial[M]}{\partial p}\{x\} \qquad (5)$$

여기서 $[K]_1,[K]_2,[M]$는 작용력 P 에 무관하므로 고유치의 미분 증가량은 대략 다음과 같다.

$$\Delta\omega^2\approx\Delta p\{x\}^T[K]_2\{x\} \qquad (6)$$

상기 식은 단면특성이 균일한 보의 끝단에 축하중 P가 작용하는 계에 대해 적용가능한 식으로 핵연료집합체의 경우는 기하학적 형상과 경계조건이 앞에서 제시한 식에서 고려된 균일한 단면을 갖는 보의 경우와 차이가 있다. 핵연료집합체는 양쪽 끝단에 상하단고정체가 있으며 상단고정체와 하단고정체를 안내관으로 체결하고 있다. 상하단고정체에 인접한 상부 및 하부영역을 제외하고는 연료봉이 안내관에 채결된 지지격자의 셀에 삽입된 형태로 횡방향 강성의 대부분을 담당하고 있다. 노내에서 핵연료집합체를 지지하고 있는 상하부노심판과의 경계조건은 단순지지와 고정 경계조건의 조합이라고 할 수 있을 것이다. 따라서, 상기 식은 집합체의 진동문제에 직접 적용할 수는 없으나 상기 식으로부터 집합체의 고유진동수는 축하중의 방향에 따라 제곱근에 비례하여 증가 및 감소하는 것을 알 수 있다. 본 연구에서는 핵연료집합체의 기하학적 형상과 경계조건의 복잡성을 감안하여 상용 유한요소 프로그램인 ANSYS를 이용하여 집합체에 대한 고유진동수와 모드형상을 계산하였으며 계산결과를 집합체기계적 진동시험 결과와 비교하였다.

3. 집합체 기계적진동시험

개량핵연료집합체의 고유진동수, 모드형상, 그리고 감쇄계수 등을 구하기 위하여 공기중에서 핵연료집합체에 대한 기계적진동시험을 수행하였다[2]. 진동시험은 미국 웨스팅하우스사가 보유하고 있은 집합체 기계적시험설비를 이용하여 수행하였으며 집합체를 노내조건과 동일한 경계조건을 갖도록 집합체의 상하부 끝단에 원자로의 상하부노심판을 모사한 치구를 사용하였다. 집합체의 지지격자 위치에서 연속적으로 변위를 측정하기 위하여 각 지지격자 외부격자판의 중앙부에 LVDT(Linear Variable Differential Transformers)를 설치하였으며 모든 모드에 대한 고유진동수와 모드형상을 측정하기 위하여 5번과 4번 지지격자 위치에 가진기(Electrodynamic Shaker)를 번갈아 가면서 설치하여 집합체에 가진을 하였다. 그림 1에서 진동시험을 하기 위해 집합체를 기계적시험설비에 장착한 개략도를 보여주고 있으며 그림 2에서는 진동시험을 위해 개량핵연료집합체와 LVDT 및 가진기 등이 시험장비에 설치된 형상을 보여주고 있다. 진동시험은 집합체의 고유진동수를 구하기 위하여 가진주파수를 증가(2~50Hz)시키면서 Sweep시험을 먼저 수행하고 여기서 구한 각 고유진동수에 대해서 Dwell 시험을 수행하여 각 고유진동수에 대한 모드형상을 측정하였다. 그림 3에서 Sweep 시험시 LVDT에 의해

측정된 스팩트럼 분석결과를 보여주고 있으며 고유진동수에 미치는 축방향 압축하중의 영향을 알아보기 위하여 집합체의 상부에서 상단고정체의 누름스프링을 이용하여 축방향 압축하중을 1,150 lbs와 1,600 lbs에 대하여 각각 수행하였다.

그림 4에서 Sweep 시험으로부터 구한 1차부터 6차까지의 고유진동수를 진폭의 함수로 보여주고 있으며 시험결과로부터 구한 개량핵연료집합체의 고유진동수는 그림 5에서 기존연료인 RFA의 고유진동수 및 해석결과와 비교하여 나타내었다. 그림 6에서는 축방향 압축하중 변화에 따른 집합체 고유진동수 측정결과를 보여주고 있다. 그림 7에서는 진동시험으로부터 구한 모드형상을 나타내었으며 Half-Power Point법을 이용하여 구한 집합체에 대한 구조적 감쇄계수를 그림 8에서 진폭의 함수로 보여주고 있다.

4. 집합체 모드해석

개량핵연료집합체의 고유진동수 및 진동모드를 해석적으로 구하기 위하여 집합체에 대한 유한요소모델을 ANSYS Ver. 7.0[3]을 이용하여 그림 9에서와 같이 생산하였다. 유한요소해석을 위한 모델은 264개의 연료봉과 24개의 안내관을 2개의 유효강성(Effective Stiffness)을 갖는 BEAM 요소로 모델링하였으며, 상하단고정체와 지지격자도 유효강성을 갖는 BEAM 요소로 모델링하였다. 각 지지격자의 스프링 및 딤플은 SPRING 요소로 모델링하여 연료봉을 지지하도록 모사하였으며, 혼합지지격자 딤플의 경우 GAP 요소를 이용하여 연료봉과 딤플과의 간격을 모사하였다. 핵연료집합체에 대한 모드해석을 위한 집합체모델을 216개의 절점과 372개의 요소로 구성하였으며 각 집합체 부품의 완성품 상태와 동일한 조건에서 구한 부품의 물성치들이 사용되었다. 또한, 노심에서 상하부노심판과의 경계조건을 위해 하단고정체 하부에 대해서는 횡방향 및 종방향의 변위를 상단고정체 상부면에서는 횡방향의 변위를 구속하였으며, 집합체 누름스프링에 대해 종방향의 강제변위를 부여하여 집합체에 가해지는 축방향 압축하중(상단고정체 누름스프링력)이 핵연료집합체의 고유진동수에 미치는 영향에 대한 해석을 수행하였다. 개량핵연료집합체에 대한 모드해석결과인 고유진동수는 그림 5와 그림 6에서 시험결과와 비교하여 나타내었으며 진동모드는 그림 10에 나타내었다. 또한, 집합체에 가해지는 축방향 압축하중에 따른 고유진동수 해석결과를 그림 11에 나타내었다.

5. 결과 및 토의

17X17형 개량핵연료집합체에 대한 Sweep 시험으로부터 구한 1차부터 6차까지의 고유진동수를 진폭의 함수로 그림 4에 나타내었으며 기존연료인 17X17형 RFA (Robust Fuel Assembly) 연료 및 해석결과와 비교하여 그림 5에 나타내었다. 그림 4에서 집합체의 고유진동수는 진폭이 증가함에 따라 감소하는 것으로 나타났으며, 그림 5에서 개량핵연료에 대한 고유진동수가 기존연료인 RFA보다 진동모드에 따라 약간 차이는 있지만 1%-6% 정도 증가하였으며 이는 개량연료의 증가된 지지격자의 높이와 5개의 혼합지지격자, 그리고 안내관의 강성 증가등에 기인한 것으로 평가되었다. 고유진동수에 대한 해석결과는 시험결과와 비교하여 약 1%-5% 정도 크게 나타나 집합체 모델에 대한

타당성을 보여 주었다. 그림 6에서는 축방향 압축하중에 따른 고유진동수 시험결과를 비교하여 나타내었으며, 압축하중의 증가에 따라 고유진동수는 감소하는 경향을 보였다.

Dwell 시험으로부터 구한 모드형상은 5개의 혼합지지격자를 갖는 개량핵연료와 3개의 혼합지지격자를 갖는 기존연료가 모두 유사한 모드형상을 나타내었다. 해석결과인 고유진동수와 모드형상은 시험으로부터 구한 고유진동수와 모드형상과 잘 일치하여 복잡한 집합체 구조물에 대한 진동특성을 해석적으로 모사 할 수 있었다. 시험으로부터 구한 개량핵연료에 대한 감쇄계수는 그림 8에 나타나 있으며 진폭에 따른 고차모드의 감쇄계수 변화가 저차모드의 감쇄계수의 변화보다 작은 것으로 나타났다. 이는 핵연료집합체가 횡방향의 진동을 하는 경우 진폭이 작은 고차모드에서는 연료봉과 지지격자 스프링과의 슬립(Slip)에 의한 비선형성의 영향을 적게 받으며, 반대로 진폭이 큰 저차모드에서는 이러한 비선형성의 영향을 많이 받는데 기인하는 것으로 평가되었다. 또한, 집합체 축방향 압축하중에 따른 집합체 고유진동수 해석결과는 그림 11에 나타내었으며 해석결과가 시험결과를 잘 예측하는 것으로 나타나 핵연료집합체에 대한 동특성 해석 모델에 대한 타당성을 입증할 수 있었다.

6. 결 론

웨스팅하우스형 개량핵연료집합체의 고유진동수, 모드형상, 그리고 감쇄계수 측정을 위해 기계적진동시험을 수행하였으며, 유한요소모델을 이용하여 모드해석을 수행하여 고유진동수와 모드형상에 대한 해석결과와 시험결과를 비교평가한 결과 아래와 같은 결론을 얻었다.

- ▣ 개량핵연료의 고유진동수는 기존연료와 비교하여 중간 및 혼합지지격자와 안내관의 설계변경등에 의해 1%-6% 증가하였으며 해석결과는 시험결과보다 약 1%-5% 크게 예측하였다. 또한, 압축하중의 증가에 따라 고유진동수는 감소하는 경향을 보였다.
- ▣ 고차모드에서의 진폭에 따른 감쇄계수의 변화는 저차모드에서의 변화보다 작은 것으로 나타났으며 이는 집합체의 지지격자 스프링과 연료봉사이의 슬립(Slip)에 의한 비선형성의 영향이 고차모드에서는 작은 것에 기인하는 것으로 평가되었다.
- ▣ 개량핵연료집합체의 고유진동수와 모드형상에 대한 유한요소해석결과 시험결과를 잘 모사할 수 있는 것으로 나타나 집합체모델에 대한 타당성을 입증하였다.

본 연구는 과학기술부 원자력연구개발 중장기계획사업인 웨스팅하우스형 원전용 개량핵연료개발 과제의 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

[1] 17X17 NGF Design and Manufacturability Review Package, 2002, KNFC/Westinghouse
[2] 17NGF Final Verification Fuel Assembly Mechanical Test Report - 17X17 NGF I-Spring Mid Grids and NGF IFM Grids, 2003, KNFC/Westinghouse
[3] ANSYS Ver. 7.0, Swanson Analysis System Inc.

표 1. 17X17형 연료집합체 주요설계특성 비교

구 분	17X17 RFA	17X17 NGF
중간지지격자 높이 (in.)	1.500	1.950
중간지지격자 스프링설계	Diagonal Spring	I-Spring
혼합지지격자 높이 (in.)	0.475	0.475
혼합지지격자 개수 (EA)	3	5
안내관 두께 (in.)	0.020	0.020
안내관 감쇄영역설계	Swaged Type	Tube-in-Tube

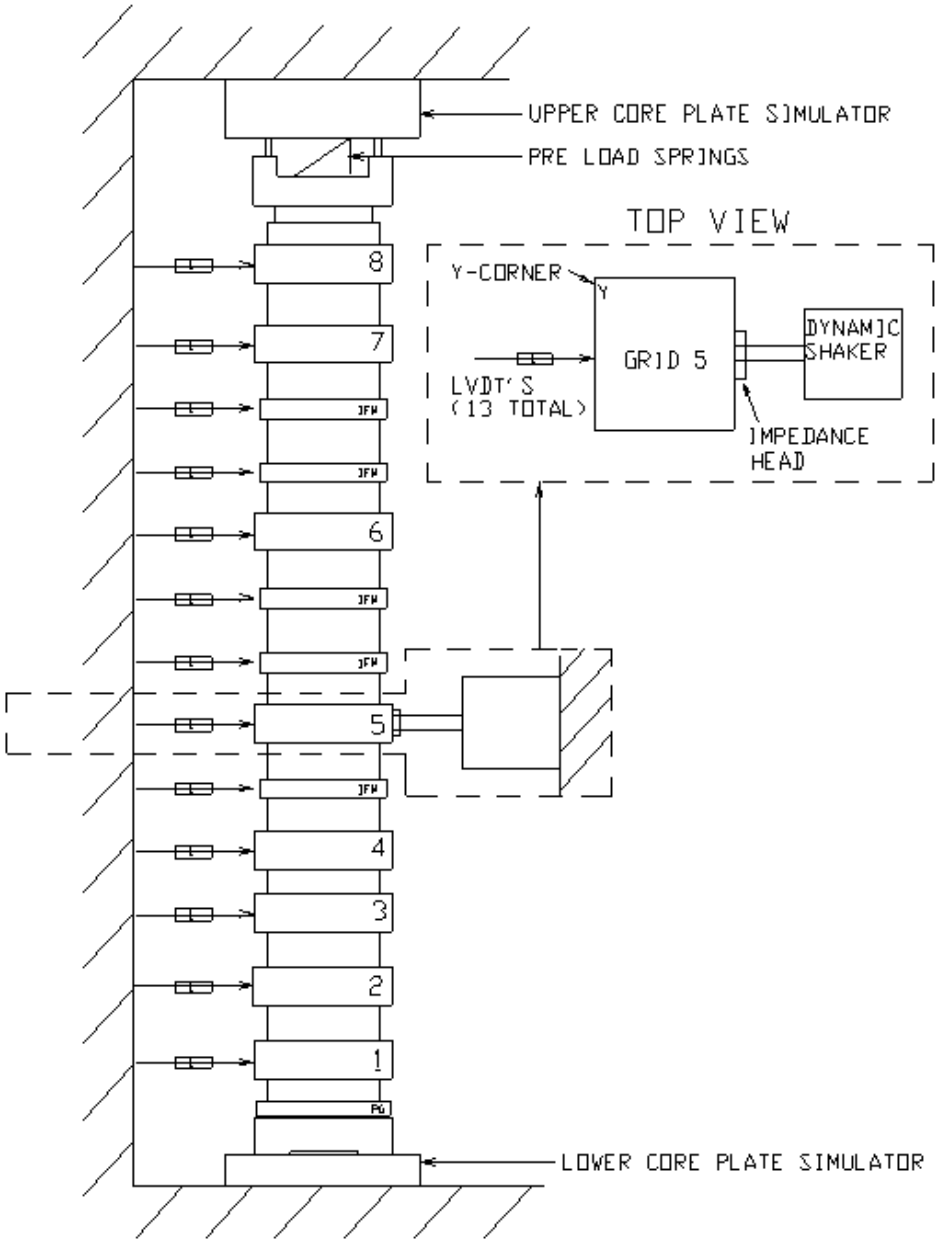
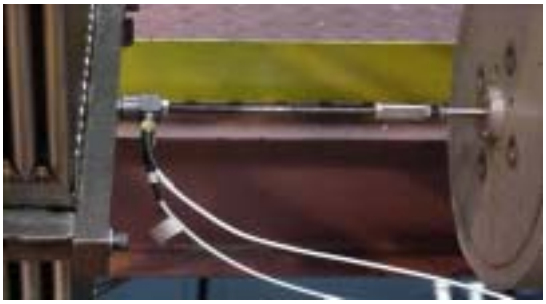


그림 1. 집합체 진동시험 개략도

(a) Top nozzle

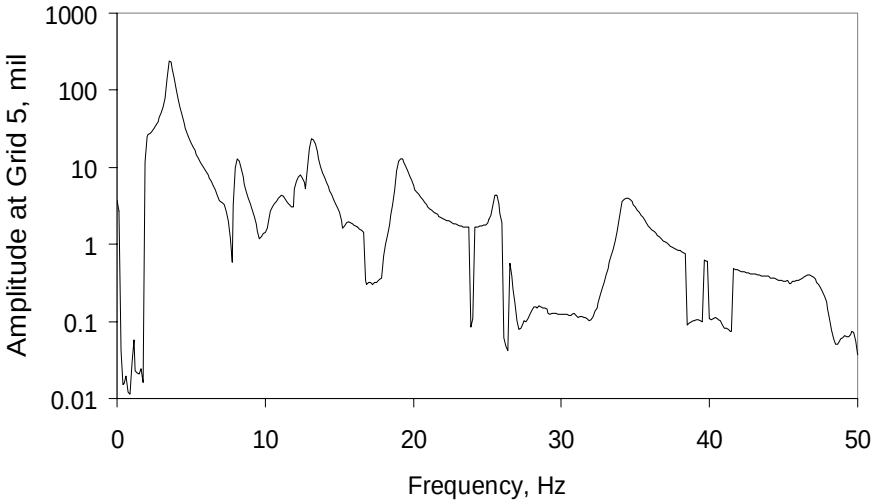
(b) LVDT and mid grids



(c) Load cell and shaker

(d) Bottom nozzle

그림 2. 집합체 진동시험 Set-Up



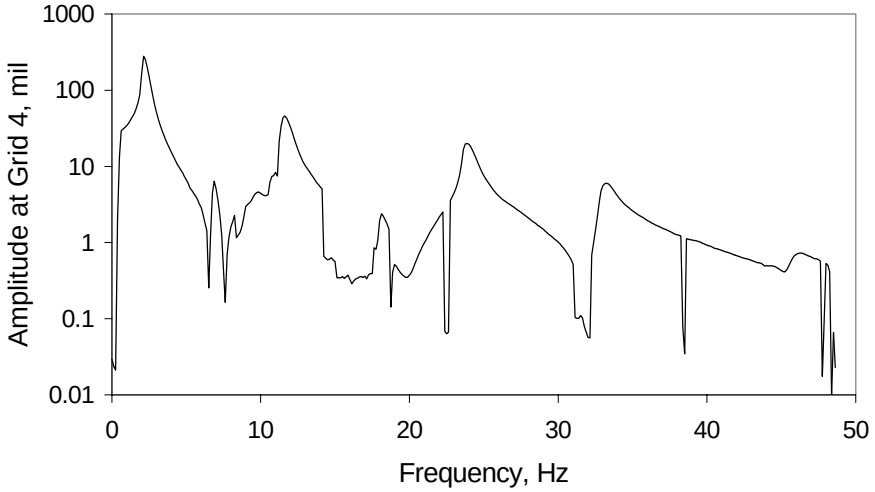


그림 3. LVDT 측정결과에 대한 스팩트럼 분석결과 (지지격자 4번, 5번)

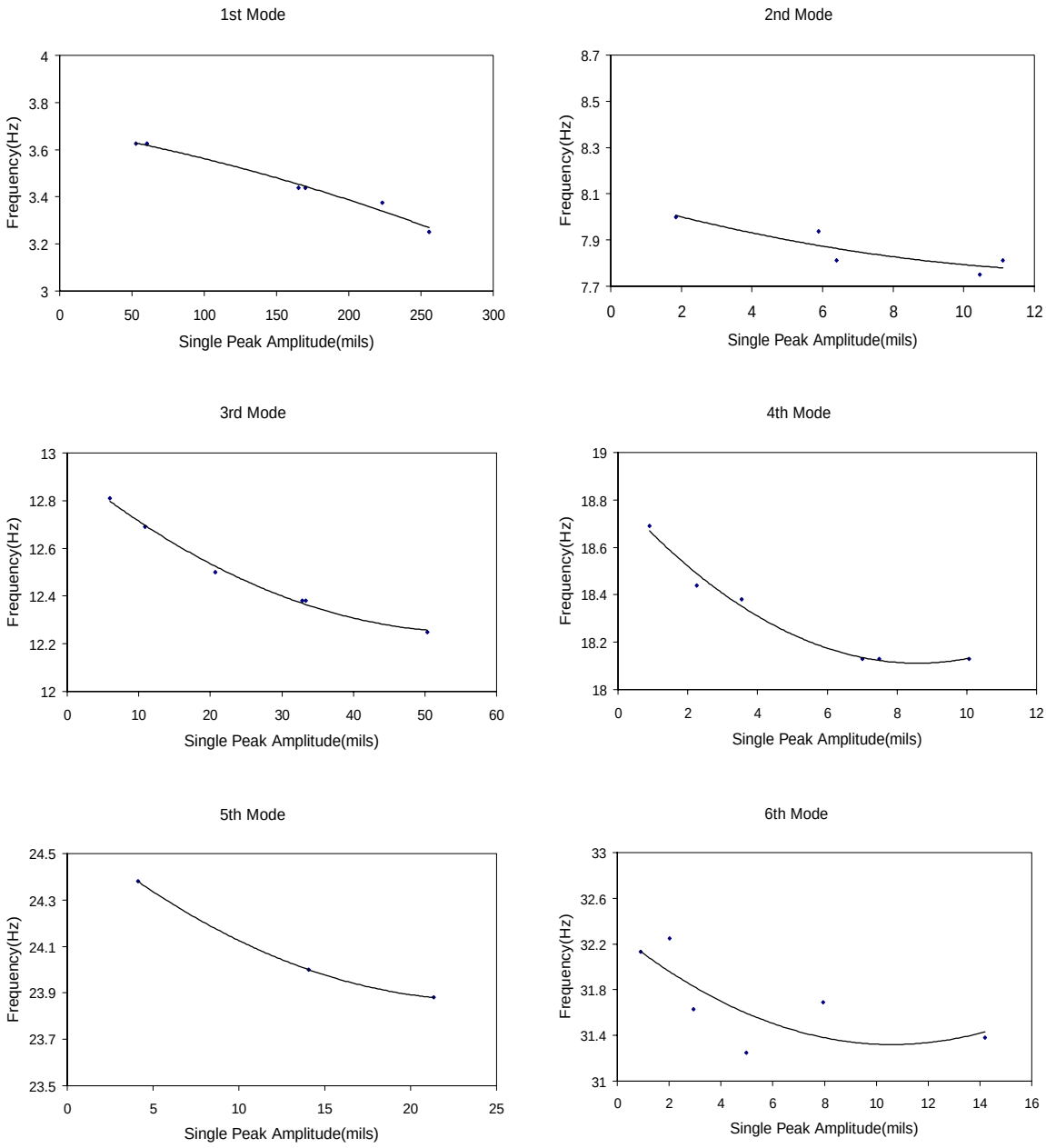


그림 4. 진폭에 따른 고유진동수 변화

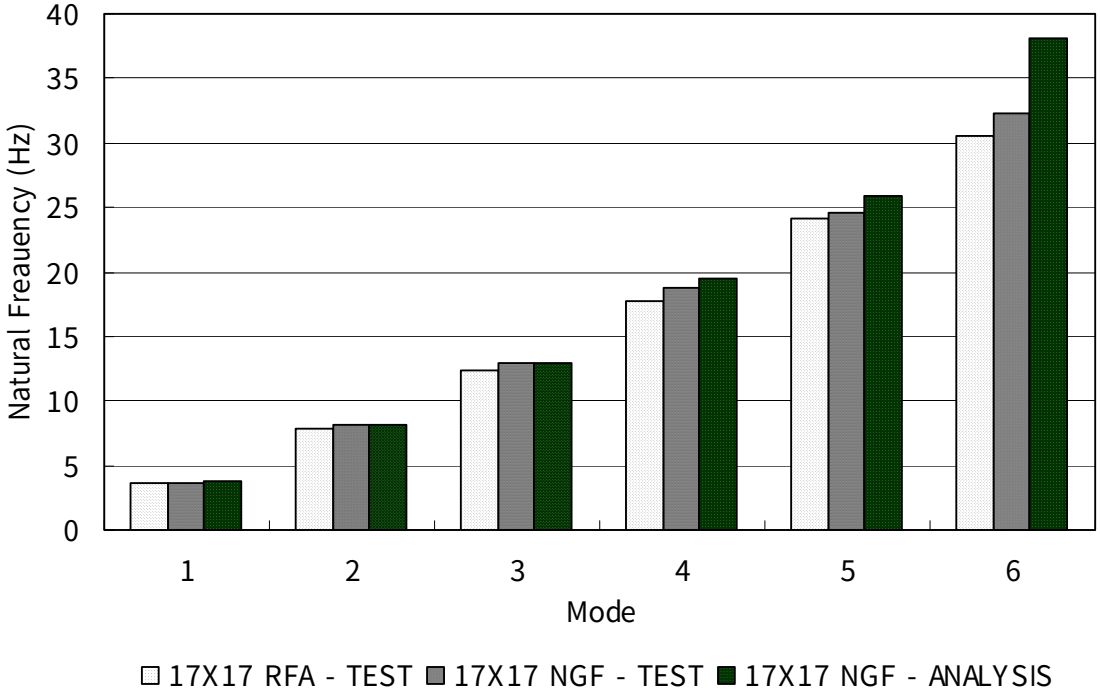


그림 5. 고유진동수 비교 (시험결과 및 해석결과)

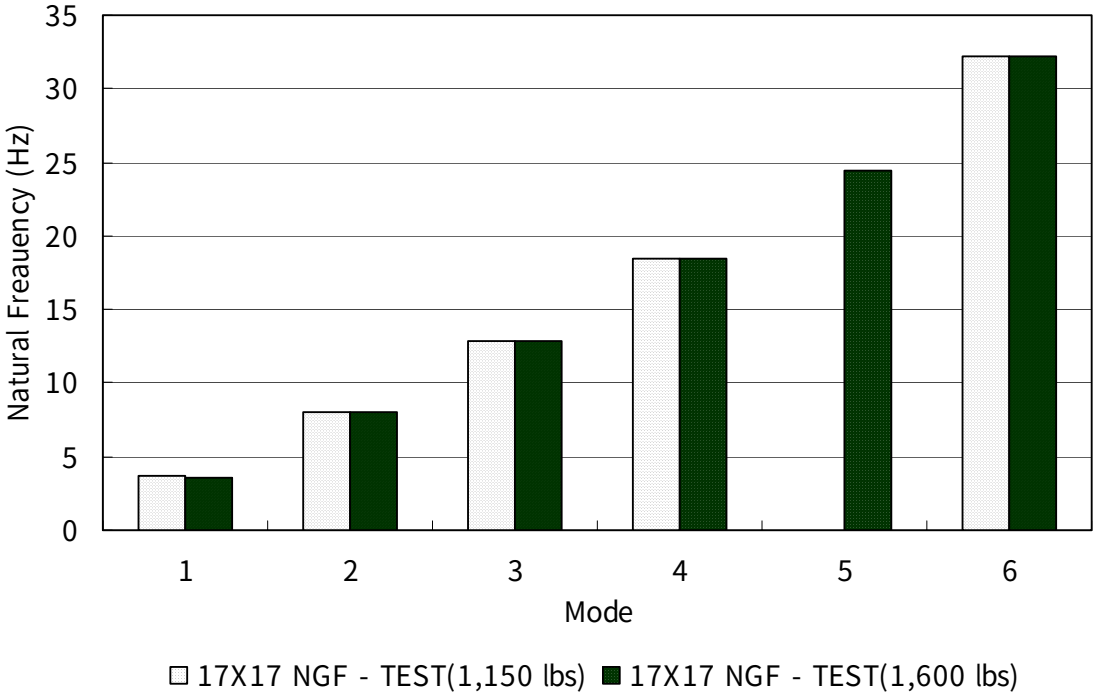


그림 6. 축방향 압축하중에 따른 고유진동수 비교

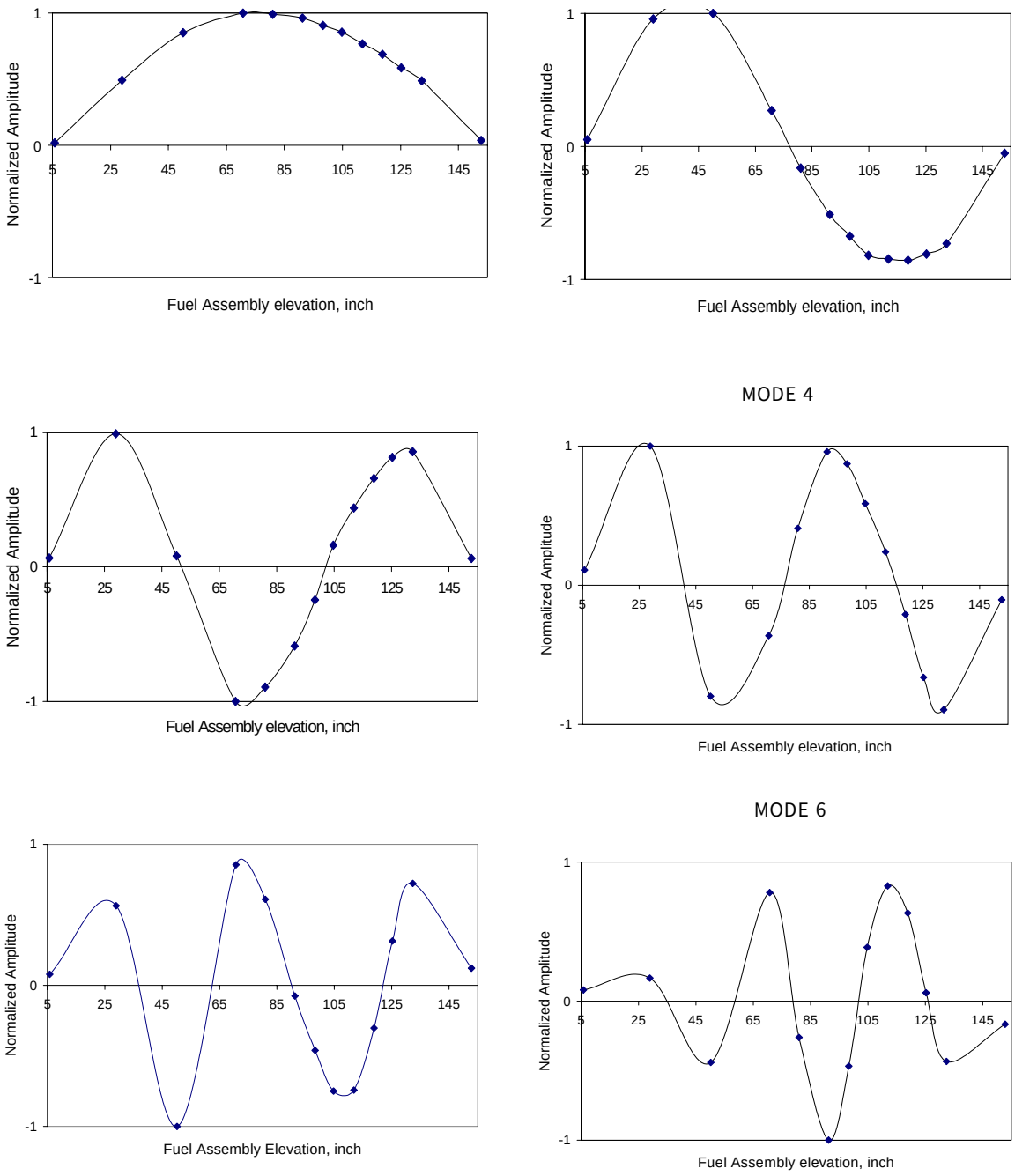


그림 7. 개량핵연료의 모드형상 (시험결과)

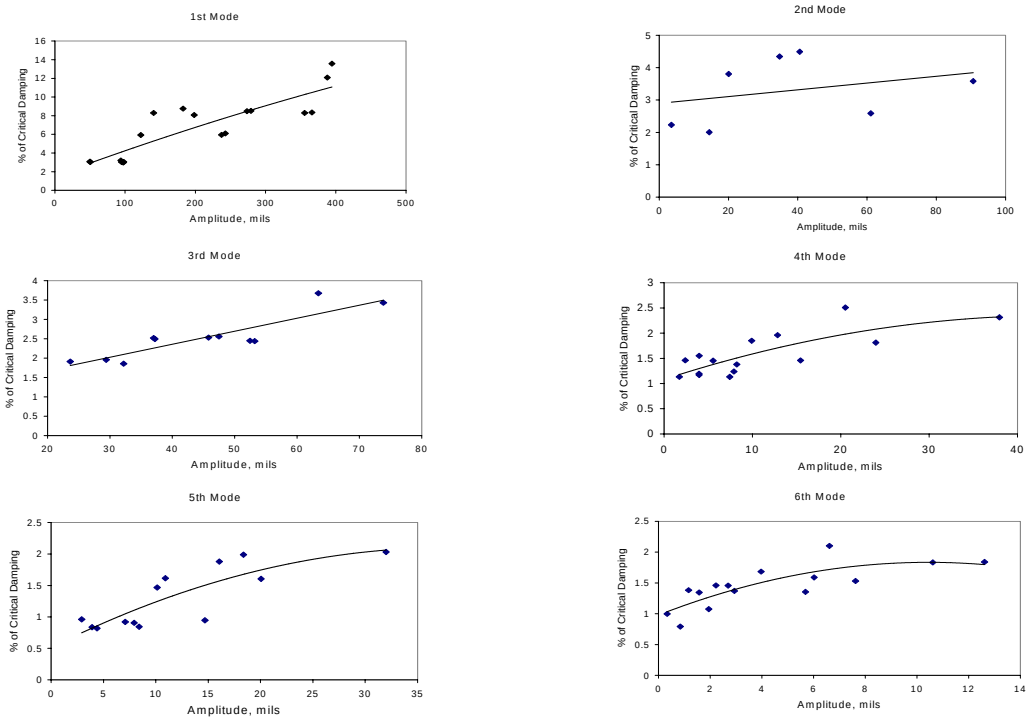


그림 8. 진폭에 따른 감쇄계수 변화

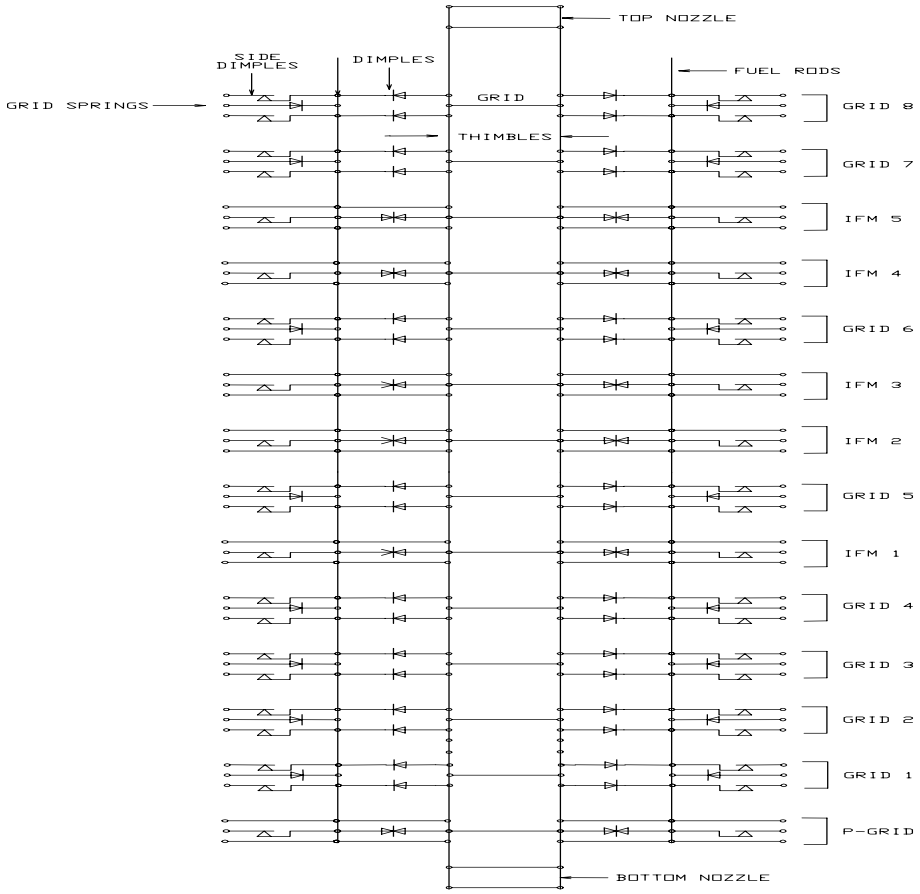


그림 9. 유한요소해석 모델

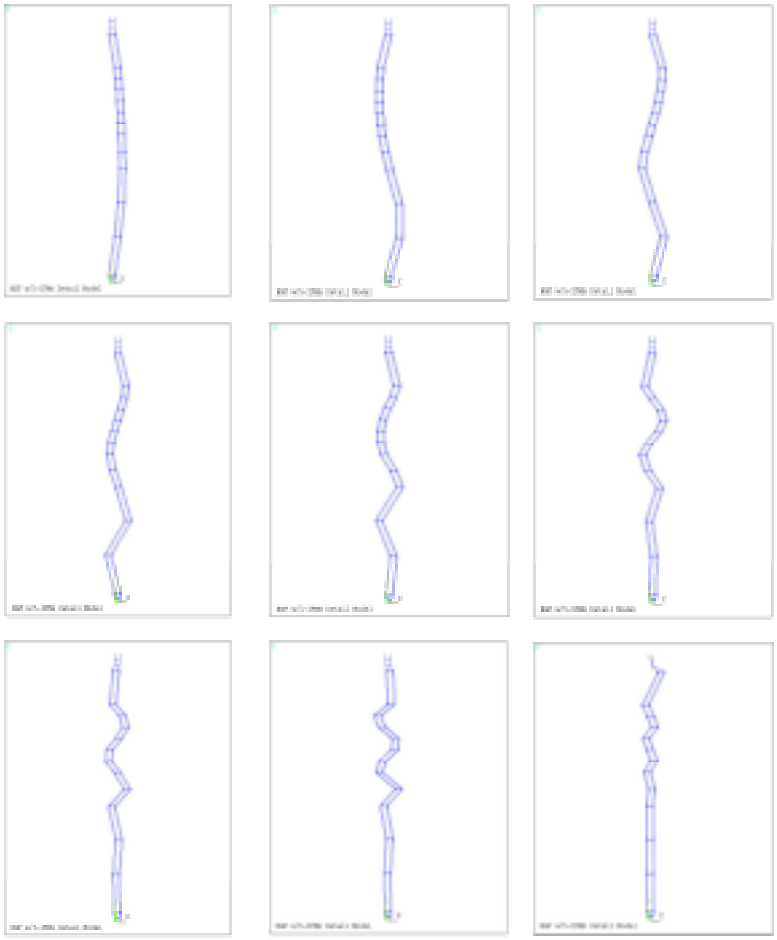


그림 10. 개량핵연료의 모드형상 (해석결과)

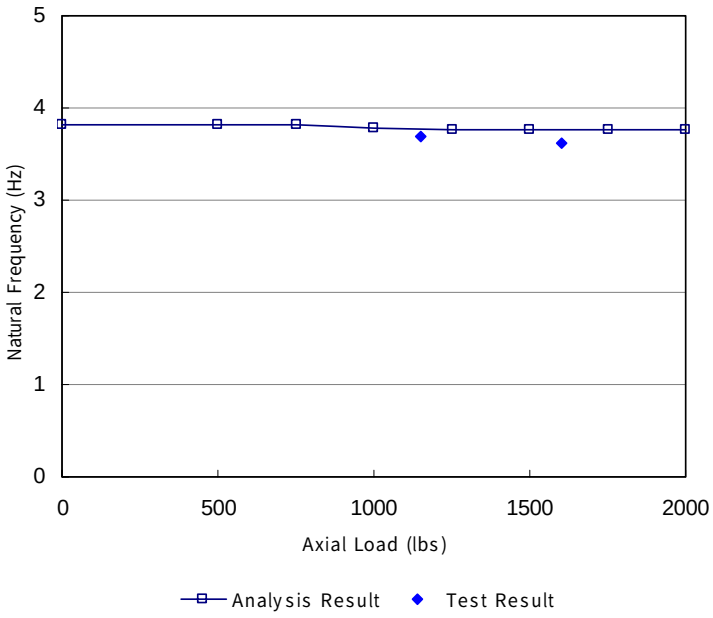


그림 11. 축하중에 따른 집합체 고유진동수 변화