

지지격자 스프링으로 다점 지지된 환형 핵연료봉의 고유 진동 해석

(0)강홍석*, 윤경호*, 김형규*, 송기남*

Vibration Analysis for a Fuel Rod Continuously Supported by a Spacer Grid

Heung-Seok Kang, Kyung-Ho Yoon, Hyung-Kyu Kim, Kee-Nam, Song

Abstract

Estimation for the vibration behavior of a nuclear fuel rod with its supporting structure called spacer grid has been made by the both of experimental and analytical methods in order to compare the supporting performance of two kinds of the spacer grids which have been newly developed. For the analytical method the fuel rod was modeled as a beam continuously supported by the springs of the spacer grid, and ABAQUS computer code was utilized. After a modal testing was performed for the fuel rod supported by five spacer grids, two results has been compared to justify and compensate the both methods. It has been found that the spring design of the spacer grid could give significant effect to natural frequency and vibration amplitude of the fuel rod.

1. 서론

가압 경수로의 핵연료에는 냉각수 유동에 의한 유체유발진동 현상이 발생한다. 이러한 현상은 일종의 열교환기인 핵연료봉 주위로 냉각재인 물이 가압된 상태에서 빠른 속도로 유동하기 때문에 발생한다. 원자로의 냉각재는 핵연료봉의 축방향으로 흐르기 때문에 횡방향으로 흐르는 유동에 의한 진동현상과 구분하기 위하여 축류유체유발진동

이라고 불리운다.

이러한 냉각재 유동에 의해 유발된 진동은 핵연료봉과 핵연료봉을 지지하는 지지 스프링(지지격자 스프링) 사이에 상대운동을 일으키고 이러한 상대운동에 의하여 핵연료봉 표면에 프레팅 마모가 발생하며 심한 마모는 핵연료봉 피복관을 손상시키는 사고를 유발하기도 한다.

한편 원자로 내에는 0-50 Hz 사이의 광대역 진동원이 존재하는것으로 알려져 있다[1]. 핵연료봉은 이런 진동원중 고유진동수 근처의 진동에너지

* 한국원자력연구소

를 마치 대역필터처럼 추출하여 반응한다. 축류유체 유동에 의해 붕에 발생하는 진동에 대한 연구는 크게 세가지로 구분되는데, 첫째 Quinn, Burgreen 등에 의해 주장된 자려진동(self-excited vibration) 모델, 둘째, Reavis, Gorman 등에 의해 주장되어 Chen 등에 의해 꽃을 피운 강제진동(forced vibration) 모델, 그리고 Y.N. Chen 에 의해 주장된 변수여기(parametric excitation) 모델 등이 그것이다. 이러한 세가지 모델중 핵연료봉의 경우는 힘기인 진동모델이 유력한 것으로 판단 된다[2]. 이러한 힘기인 진동 모델은 핵연료봉 주위를 흐르는 냉각재의 유동에 의해 핵연료봉 표면에 형성되는 난류경계층 내의 압력섭동(pressure fluctuation)을 연료봉의 가진력으로 보고 이를 통계적인 방법으로 접근하는 방식으로 개발되었다. 이러한 연구방법은 핵연료봉의 운동방정식 중 유체에 의해 발생하는 힘에 의한 항만을 별도로 분리하여 압력섭동에 관한 데이터를 실험에 의해 직접 얻거나, 앞선 연구자가 제시한 실험데이터를 이용하고, 핵연료봉의 고유치 문제를 따로 풀어서 결합하는 방법을 이용할 수 있어서 편리한 장점이 있다. 이러한 방법은 핵연료부품의 개발단계에서 기존의 유동 데이터를 이용하여 핵연료봉의 대략적인 진동특성을 예측하는데 유용하게 이용할 수 있다. Chen 과 Kanazawa 가 그들의 연구에 이용한 Wambsganss 의 유동 데이터 [3]에 의하면, 붕 표면에 발생하는 PSD 는 Fig.1 과 같이 저 주파수대역에서 상당히 크다.

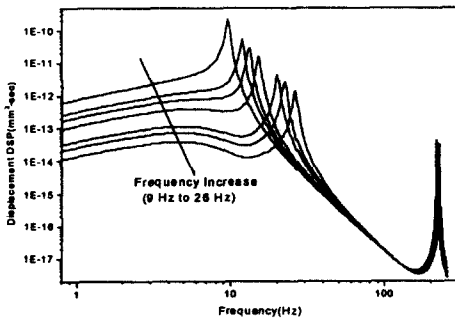


Fig.1 Displacement PSD vs. Frequency (From Test Data[3])

Fig. 1 은 Wambsganss 의 실험 데이터를 붕의 고유진동수 대비로 변환한 후 도시한 그림이다.

한편, 핵연료봉은 대체적으로 8 개에서 11 개의 지지격자 스프링으로 연속 지지된 원형보의 형태로 원자로 내에 놓여지게 된다. 일반적으로 수용되는 핵연료봉의 모델은 Fig.2 와 같다.

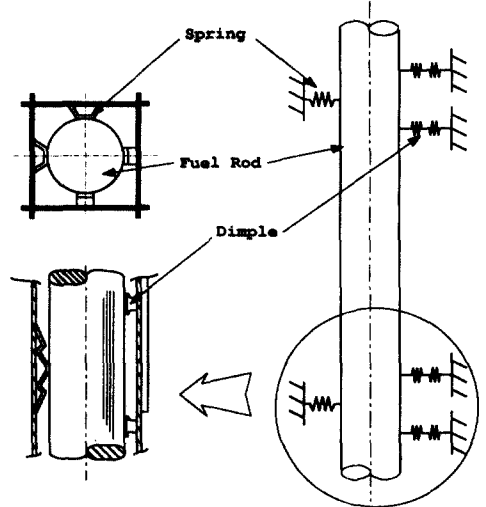


Fig.2 Fuel Rod Supported by Grid Springs

핵연료봉은 자신을 지지하는 지지격자 스프링의 설계에 따라 진동특성이 상당히 변할 수 있다는 연구 결과가 있다[4]. 이러한 핵연료봉의 진동 연구에 Wambsganss 의 유동연구를 함하여 추론하면 지지격자 스프링의 설계에 따라 핵연료봉의 유체유발진동 특성이 달라진다고 예측할 수 있고, 이러한 예측을 지지격자 개발단계에서 반영하면 개발단계에 있는 지지격자 스프링 설계들의 비교우위를 평가할 수 있다.

본 연구는 현재 당 연구소에서 진행중인 지지격자 개발과제 수행 중 최근에 고안된 새로운 2 가지형의 지지격자에 대하여 이론적으로 유한요소 해석을 수행하고, 동시에 실제 시편을 제조하여 진동특성시험을 수행한 결과에 관한 것이다. 본 진동 시험 전 우선 고안된 두 가지형의 지지격자 스프링만을 따로 떼내어 스프링 특성시험을 수행

하고, 그 결과를 핵연료봉의 유한요소 진동모델에 반영하였다. 실험적인 해석을 위하여 모의 시험봉과 지지격자 시편을 제조한 후, 동일한 지지격자로 5 곳에서 지지된 모의 핵연료봉의 진동 시험을 수행하였다. 진동시험은 지지격자 스프링의 비선형성을 고려하여 가진력에 변화를 주어가며 통상적으로 기존 연구자들이 주장하는 핵연료봉 최대 진동 진폭 0.2mm가 반영되도록 하였다. 그리고 실제 두 가지 모델의 지지성능 비교우위를 가름하기 위하여 동일한 가진력을 가한 후 최대변위를 측정하였다. 이론과 실험적인 해석을 별도로 수행한 후 각 해석결과를 비교 분석하여 이론모델의 타당성을 검증하고, 동시에 진동실험의 타당성을 검증하고자 하였다.

2. 유한요소해석

유한요소해석은 잘 알려진 ABAQUS[5]코드의 3-D pipe 요소를 이용하여 수행하였다. 상온 및 고온(80°C) 수중해석은 그 온도에서 물의 밀도만을 적용하여 통상적인 부가질량만을 고려하였다. 유한요소해석을 위한 모의 연료봉은 Fig.3과 같다.

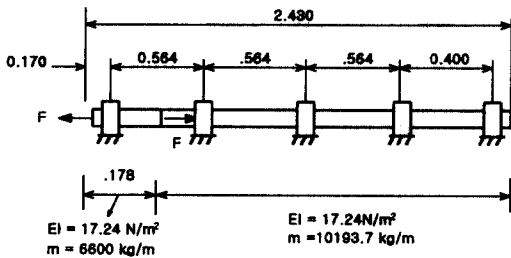


Fig.3 Analysis Model for Fuel Rod in Air

이론해석에 사용된 지지격자 스프링 상수는 상온에서 M 형이 444000 N/m, 그리고 D 형이 142200 N/m 이었다. M 형은 하나의 지지격자에서 상,하 각 1 군데에서 상대적으로 강한 스프링으로 지지하는 구조이며, D 형은 지지격자 상,하부 2곳에서 여러 개의 유연한 스프링으로 지지하는 구조이다.

해석결과를 정리하면 다음의 Table 1 ~3과 같다.

Table 1. FEM Analysis Results (In-Air, Hz)

Mode Type	1	2	3	4	5
M	30.3	39.6	53.1	72.6	121.3
D	41.1	48.4	57.6	87.0	131.9

Table 2. FEM Analysis Results (Cold Water, Hz)

Mode Type	1	2	3	4	5
M	29.0	37.9	50.8	69.3	116.2
D	39.2	46.1	54.9	83.0	125.7

Table 3. FEM Analysis Results (80 °C Water, Hz)

Mode Type	1	2	3	4	5
M	28.2	36.9	49.4	67.4	113.0
D	38.1	44.8	53.4	80.7	122.2

일차 고유진동수의 경우 모든 시험조건에서 D 형 지지격자가 대략 10 Hz 정도 큰 값을 나타내었다.

3. 모드 시험

3.1 모드 시험장치의 구성

실제 모드시험을 위하여 유한요소해석에 이용한 모델과 동일한 조건을 만들기 위하여, 그리고 실제 연료봉에 장입되는 UO₂ 소결체의 질량을 고려하여 납으로 채워진 모의 연료봉을 제작하였다. 고안된 지지격자는 지르칼로이 판재를 사용하여 5X5 배열의 시편으로 제작되었다. 제작된 M 형 및 D형 지지격자의 형상은 Fig. 4와 같다.

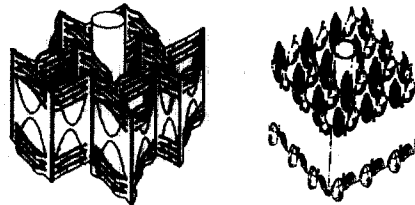


Fig. 4 Type M and D Grid

모드시험은 5 개의 동일한 지지격자를 고정치구에 Fig.3 과 같은 간격으로 고정한 후 모의 핵연료봉을 삽입한 후 수행되었다. 핵연료봉의 주파수 응답함수를 구하고자 지지격자 한 구간의 1/4 와 3/4 위치에 2 개의 가속도계, 그리고 변위계 위치에 1 개를 합한 총 9 개를 부착하였다. 가속도계는 시험봉의 진동특성에 영향을 주지않게 하고자 무게 2g 의 작은 것으로 선정하였다. 핵연료봉의 진동특성이 비선형인 것을 감안하여 입력수준을 일정하게 유지할 수 있도록 전자기 가진기와 가진기 조절장치를 사용하였고, 시험중 연료봉의 변위를 측정하고자 레이저 변위계를 설치하였다. 시험은 상온 대기중, 수중 및 섭씨 80 °C 수중환경에서 각각 수행하였다. Fig. 5 는 시험장치의 개략도이다.

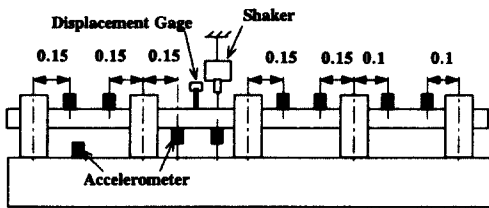


Fig. 5 Test Equipment Setup

진동시험은 10Hz 에서 140Hz 까지 Sine 파를 계속적으로 부가하면서 지지격자별 주파수 응답함수, 고유진동수 및 최대변위를 측정하였다. 부가력은 원자로내 핵연료봉의 최대변위라고 주장되는 0.2mm 를 고려하고, 각 지지격자의 응답을 감안하여 0.5N 부터 5N 까지 사용하였다.

(가) 상온 대기중 시험

Table 4 는 상온대기 환경에서 측정된 지지격자 종류에 따른 모의 연료봉의 고유진동수를 비교한 것이다. 연료봉의 동적거동에 가장 크게 영향을 주는 1 차 고유진동수의 경우 지지격자 형태가 달라짐에 따라 10Hz 정도의 차이를 나타내었다. 측정된 최대변위는 Fig.6 에 도시된 바와 같이 0.5N 부가력에서 M 형 지지격자의 경우 약 0.11mm

의 변위를 나타내었으나, D 형 지지격자의 경우 0.03mm 이하로 비교적 작은 변위를 나타내었다.

Table 4. Natural Frequency obtained by Test (In-air, Hz)

Mode Type	1	2	3	4	5
M	30.4	37.5	45.4	82.3	104.6
D	41.4	46.1	50.7	106.7	130.4

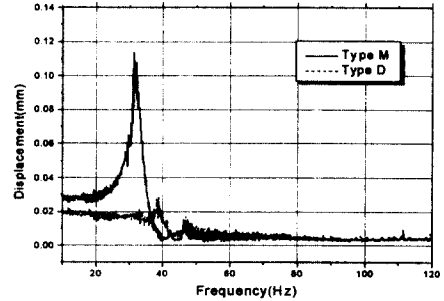


Fig.6 Displacement vs. Frequency (In-air test)

한편, 가진력의 크기가 커짐에 따라 고유진동수가 낮아지는 기존의 연구결과[6]도 확인할 수 있었다.

(나) 상온 수중 시험

Table 5 는 상온 수중에서 측정된 지지격자 종류에 따른 모의 연료봉의 고유진동수를 비교한 것이다. 수중환경의 경우, 물의 부가질량에 의해 전체적으로 고유진동수가 낮아지는 경향을 보이고 있고 그 경향도 공기중의 경우와 대체적으로 일치한다.

Table 5. Natural Frequency obtained by Test (20 °C Water, Hz)

Mode Type	1	2	3	4	5
M	28.7	37.4	43.9	77.6	98.9
D	41.2	45.0	49.8	102.7	130.6

물속에서 측정된 최대변위는 Fig.7 에 도시된 바와 같이 M 형 지지격자의 경우 약 0.13mm,

고 D 형의 경우 약 0.03mm 를 나타내었다. 수중에서 측정된 값들은 공기중에서 측정된 값보다 약간 크게 나타났다.

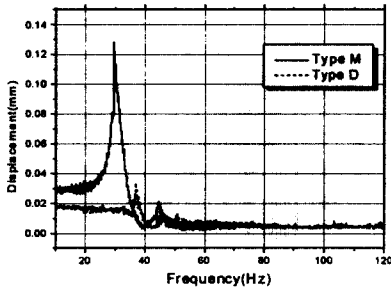


Fig.7 Displacement vs. Frequency (Cold water test)

(다) 80 °C 수중 시험

대기중 고온 수중 시험은 물이 이상(Two Phase)유체가 되는 것을 배제하면서 온도영향을 확인하기 위한 방편으로 80 °C 에서 수행하였다. 시험은 수조의 가열된 물속에서 상온 시험과 동일한 방법으로 수행되었다. 시험결과는 다음의 Table 6 과 같다. 고온수중에서의 시험은 레이저 변위계 렌즈에 증기가 서려 가진력 대비 진동진폭의 측정이 불가능하였다

Table 6. Natural Frequency obtained by Test (80 °C Water, Hz)

Mode Type \	1	2	3	4	5
M	28.7	36.9	44.4	76.9	102.2
D	40.1	46.6	49.6	99.7	125.1

온도가 높아진 상태에서의 시험 결과는 상온수중에서의 시험결과와 별 차이를 나타내지 않았다. 이런 결과는 부가질량의 미소한 감소, 지지 스프링의 강성감소, 모의 연료봉의 밀도감소, 그리고 등적 팽창에 의한 봉내압의 증가 등의 미세한 변화가 서로 상충되어 진동특성을 크게 바꿀 정도로 영향을 미치지 않는 것으로 판단된다.

4. 해석 모델과 시험모델의 비교

유한요소 해석결과와 실험으로 얻은 결과는 FEMtools[7]로 비교, 분석되었다. 먼저 FEM 해석결과와 실험결과에서 얻어진 모드들간의 MAC(Modal Assurance Criteria)값을 계산하였다. 잘 알려진 바와 같이 MAC 은 비교하고자 하는 두 벡터의 방향여현을 의미하므로 동일한 벡터의 비교에서는 일(1)을, 전혀 유사성이 없는 벡터의 비교에서는 영(0)을 나타낸다. 세가지 다른 환경에서 계산한 MAC 값과 고유진동수를 정리하면 Table 7 ~ 8 과 같고, MAC 값을 도시하면 다음의 Fig. 8 ~ 9 와 같다.

Table 7 Natural Frequencies and MAC for M Type Grid

Envir.	No.	FEA (Hz)	EMA (Hz)	Error (%)	MAC (%)
In-Air	1	30.3	30.4	-0.44	96.4
	2	39.6	37.5	5.60	80.5
	3	53.1	45.4	16.92	96.3
	4	72.6	82.3	-11.73	91.4
	5	121.3	104.6	15.33	18.4
Cold Water	1	29.0	28.7	0.93	97.4
	2	37.9	37.4	1.36	87.2
	3	50.8	43.9	15.72	96.6
	4	69.3	77.6	-10.73	91.5
	5	116.2	98.9	17.5	38.5
Hot Water	1	28.2	28.7	-1.88	98.0
	2	36.9	36.9	-0.06	91.2
	3	49.4	44.4	11.10	96.9
	4	67.4	76.9	-10.03	93.2
	5	113.0	102.2	10.59	32.9

깨끗한 응답을 얻기 어려웠다.

Table 8 Natural Frequencies and MAC for D Type Grid

Envir.	No.	FEA (Hz)	EMA (Hz)	Error (%)	MAC (%)
In-Air	1	41.1	41.4	-0.54	96.1
	2	48.4	46.1	4.93	11.8
	3	57.6	50.7	13.6	97.9
	4	87.0	106.6	-18.36	50.9
	5	131.9	130.4	1.18	33.8
Cold Water	1	39.2	41.2	-4.90	96.4
	2	46.1	45.0	0.89	15.3
	3	54.9	49.8	10.28	97.5
	4	83.0	102.7	-19.14	61.8
	5	125.7	130.6	-3.74	28.3
Hot Water	1	38.1	40.1	-4.96	96.0
	2	44.8	46.6	-3.83	68.3
	3	53.4	49.6	7.49	94.1
	4	80.7	99.7	-19.05	2.2
	5	122.2	125.1	-2.35	12.9

Table 7 및 Fig. 8 에서 확인할 수 있는 바와 같이 M 형 지지격자로 지지된 모의 연료봉의 경우, 4 차모드까지 거의 정확하게 일치하고 있다. 반면 D 형 지지격자로 지지된 연료봉의 경우는 모든 시험환경에서 일차와 삼차를 제외하곤 잘 맞지않았다. 특히 공기중 2 차와 고온 수중 4 및 5 차 모드의 경우는 측정 데이터로 고유모드의 판별이 어려울 만큼 noise 가 심한 데이터를 얻었다. M 형에 비하여 D 형은 배치된 스프링의 수가 많은 반면 일정각도 돌아간 상태에서 핵연료봉을 지지하는 독특한 설계 때문에 가진방향과 지지방향이 달라

Nodal Assurance Criterion

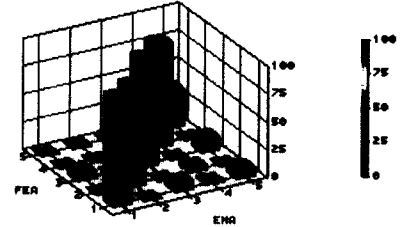
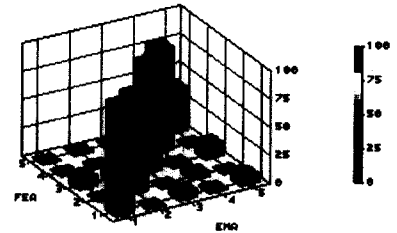
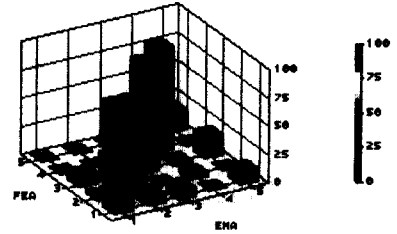


Fig.8 MAC for the Rod with M Type Grid

5. 결론 및 고찰

개발중인 두가지 지지격자의 핵연료봉 지지 성능 분석을 위하여 FEM 해석과 모드시험을 수행하였다. 각각의 해석은 공기중, 상온 수중 및 80 °C 수중과 같은 세가지 다른 환경조건이 적용되었다. FEM 해석결과와 모드시험결과는 저차 모드에서 비

교적 잘 일치한다고 판단되었다. 두 가지 지지격자 모델 중 비교적 지지방법이 간단한 M형의 경

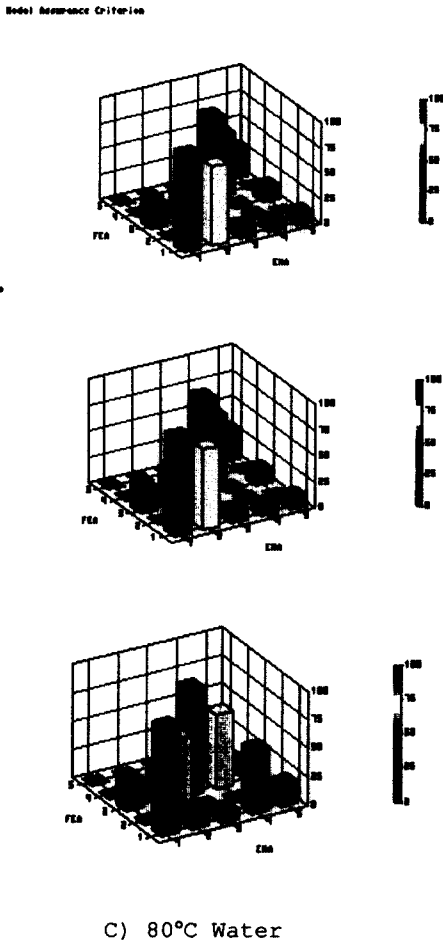


Fig.9 MAC for the Rod with D Type Grid

우는 일차에서 사차모드까지 이론해석과 실험 결과가 거의 일치하였다.

고유진동수의 경우 상대적으로 복잡한 형상과 많은 지지점을 갖는 D형으로 지지한 경우 M형의 경우보다 대략 10 Hz 정도 컸다. 이러한 차이는 세가지 다른 환경에서도 그대로 유지되었다. 동일한 가진력을 작용시키고 스펙의 중앙부위에서 측정된 진동변위는 고유진동수가 큰 D형의 경우 0.03mm 내외로 M형의 0.12mm 내외보다 상당히 작

게 측정되었다.

원자로 내의 냉각재 유동에 의한 압력섭동이 핵연료봉에 가진력으로 작용할 때, 지지격자의 성능에 따라 핵연료봉에 발생하는 유해한 진동을 억제하는 정도가 다를 것이라는 사실을 직시한다면 본 연구와 같은 진동해석 및 시험 결과에 중요한 의미를 부여할 수 있겠다. 이러한 시험 결과는 앞서 언급한 Wambsganss의 데이터에서 인용된 결과와 동일한 것이다. Stoller 보고서[1]에서 주장된 바와 같이 원자로내에 존재하는 50Hz 정도까지의 진동원과 Wambsganss의 데이터를 함께 고려한다면 핵연료봉의 진동은 일차모드가 지배적일 것이므로 핵연료봉의 일차 모드를 높이는 방향으로 지지격자의 설계방향이 맞추어져야 할 것으로 판단된다. 본 연구에서 비교된 두 가지 지지격자중 D형이 상대적으로 우수한 지지성능을 나타내었다.

후기

본 연구는 과학기술부의 원자력연구개발 사업의 일환으로 수행되었음.

참고문헌

- [1] Stoller Report, "A study of grid-to-rod fretting wear in PWR fuel assemblies," SMSC, Vol.1 April, 1995.
- [2] 강홍석 외 3인, "축방향 유동에 의한 핵연료봉의 유체유발진동 기구," KAERI/TR-1124/98, 한국원자력연구소, 1998.
- [3] M. W. Wambsganss and P. Zaleski, "Measurement, Interpretation and Characterization of Near-field Flow Noise," Proceedings Conf. On Flow-Induced Vibrations in Reactor System Components, Argonne, May 14-15, ANL-7685, pp. 112-140, 1970.
- [4] H.S.Kang, "A Study on the

Vibrational Behavior of the Fuel
Rods Continuously Supported by a
Rotary and Bent Spring System, "소
음진동공학회 1998 춘계학술대회 논문집, pp.
454-460,

[5] User's Manual, HKS, ABAQUS Ver.5.8,
1999.

[6] 우성현 외 3 인, " 핵연료봉 지지구조물의 모
드해석 및 유한요소 모형 개선," 한국소음진
동공학회 1999 년도 추계학술대회논문집, pp.
876-883, 1999.

[7] User's Manual, Dynamic Design
Solution, FEMtools Ver.2.0, 2000.