2002 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

액체 금속로용 모의 핵 연료봉의 수중 진동 특성에 관한 연구

In - Water Vibration Characteristics Analysis of a KALIMER Fuel Rod Mock - up

박진호, 이정한, 김봉수
한국원자력연구소
대전시 유성구 덕진동 150

요 약

KALIMER 핵연료봉의 수중 고유 진동수에 대한 실험과 해석을 수행하는데 있어 유체 GAP의 크기에 따른 부가 질량 효과와 간극선재의 인장효과가 모의 핵연료봉에 미치는 영향을 규명하였다. 수중에서 모의 핵연료봉의 고유진동수는 2.4Hz로서 유체의 부가질량 효과로 인해 공기중의 기본 고유진동수 6.5Hz에 비해 작은 것을 알 수 있었으며, 유체의 간격이 클수록 부가질량의 효과는 증가하여 모의 핵연료봉의 고유진동수가 최대 37% 정도 감소하였다. 또한 간극선재에 작용하는 인장력과 질량은 모의 핵연료봉의 각각에 대한 진동모우드에 대해 큰 영향이 없음을 알 수 있었다.

Abstract

In - water vibration characteristics of a fuel rod in KALIMER(Korean Advanced LIquid MEtal Reactor) have been estimated through experiment and 3 - dimensional finite element analysis. It has been confirmed that in - water natural frequencies of the fuel rod are lower than in - air ones due to the added mass effect of the fluid filled inside the outer cylinder and they further decreases as the gap between the outer surface of the fuel rod and the inner side of the cylinder increases, namely the added mass effect increases as the gap increases. It has been also shown that the wire wrap mass and its pre - tension do not affect the non - dimensional natural frequency(in - water natural frequency/in - air one) corresponding to each vibration mode.

1. 서 론

원자력 발전소의 원자로 내부구조물에는 그 내부를 흐르는 고온 고압의 냉각수에 의해 유체유발진동(flow induced vibration)이라 부르는 진동현상이 발생한다. 이 유체유발진동은 열수력적인 현상과 구조동역학적인 현상이 서로 연계되어 일어나는 현상으로, 원자로 내부 구조물 뿐만 아니라 원전의 각종 구조물이나 기기 등에 격렬한 진동을 야기시킴으로써 기계적 손상의 가능성을 내포하고 있다.[1,2] 유체유발진동 현상에 의한 원자로 내부구조물의 구조적인 건전성을 입증하기 위해서는 기본적으로 수중에서의 동특성(고유진동수, 댐핑 및 모드 형상)에 대한 정확한 평가가 필요하다.

액체금속 원자로의 경우 정상적인 운전조건 하에서 유체유발진동에 의한 핵연료봉의 동적 구조건전성을 평가하기 위해서는 핵연료봉의 유체 내 동특성에 대한 정확한 해석이 수행되어야 한다. 원자로 노심 내부에서 핵연료봉의 진동거동은 내부유체의 유속에 의하여 크게 영향을 받으므로 유체 유동에 의한 핵연료봉의 진동응답을 예측하기 위해서는 먼저 유체의 영향을 고려한 핵연료봉의 동특성 연구가 필요하다.

본 연구에서는 모의 핵연료봉의 공기중 및 수중에서의 동특성에 대한 유한요소해석 모델 개발과 모델 검증을 위한 실험을 수행하였으며, 개발된 유한요소해석 모델을 이용하여 수중에서의 핵연료봉의 동특성은 주로 유체의 부가질량 효과에 의하여 지배되는데, 모의 핵연료봉 및 외부실린더사이의 간격의 크기를 변화시킴으로써 유체간격의 크기에 따른 동특성 변화를 진동모드별로 시뮬레이션하였고, 간극선재가 핵연료봉의 진동특성에 미치는 영향을 살펴보았다.

2. 모의 핵연료봉의 동특성 해석

모의 핵연료봉의 진동특성을 알아보기 위해서 유체의 영향을 고려한 자유진동해석을 수행하였다. 자유진동해석은 상용코드인 ANSYS를 사용하여 유한요소법으로 해석하였다. 모의 핵연료봉은 길이가 약 3600mm이고 직경이 7.4mm인 모의 연료봉으로써, 지지레일에 XZ방향으로 Hinged - Free, YZ방향으로는 Guided - Free의 경계조건을 가지며 위에서 아래로 매달려 있는 모델로 가정하여 해석을 수행하였다.(그림 1 참조)

2.1 모의 핵연료봉과 유체의 모델링

모의 핵연료봉은 지지 레일에 조립될 keyway부분과 모의 핵연료(납), 모의 핵연료를 감싸고 있는 피복관 그리고 피복관 덮개로 구성되어 있으며 Keyway부분과 피복관 덮개 부분에 간극선재의 양 끝이 고정되어 있다. 모의 핵연료봉의 피복관은 4절점 shell요소

(SHELL63)로 모델링하였고, 나머지는 8절점 요소(SOLID45)로 모델링 하였다. 모의 핵연료봉 주위에 있는 유체 부분은 8절점 유체요소(FlUID80)로 모델링하였으며, 그 결과는 그림 1에 나와 있다.

본 연구에서 이용한 ANSYS의 3차원 유체요소는 전단계수가 0이고 적절한 체적탄성계수에 근거하여 3차원 고체요소(3-D structure solid element)로부터 개발된 요소(FLUID80)로서 압축성, 점성, 중력의 영향을 고려할 수 있는 요소이다. 이 3차원 유체요소는 특히 유체와 구조물 상호관계를 잘 나타낼 수 있어 용기 내에 유체흐름이 없는 구조물-유체 상호효과를 해석하는데 사용가능하며, sloshing 문제와 같은 유체의 영향도 적절히 고려할 수 있다. 유체를 유체요소로 모델링 할 때, Z축은 수직방향으로 위치한다. 유체요소의 자유수면은 Z=0에 위치하고 다른 유체요소들은 모두 Z=0보다 아래에 위치하여야 한다. 유체요소의 형상은 해석 결과의 신뢰성을 높이기 위해 최대한 사각기둥(brick shaped)을 유지하였다.[3]

2.2 유체 간격 변화에 따른 고유진동모드 해석

본 연구에서 모의 핵 연료봉의 물속에 잠긴 상태의 고유진동 모드해석을 위해서는 구조물과 유체의 탄성효과를 고려할 수 있도록 유체요소도 유한요소 모델링을 해야한다. 그리고 유체요소는 전단강성을 제외한 고체요소로부터 간단히 유도되었기 때문에 사실상 자유진동 모드가 불합리한 변위현상(spurious zero energy mode)이 되는 것을 피하기 위하여 약간의 전단 강성계수 값을 넣어야 한다. 이러한 경우 일반적으로 전단강성계수는 체적탄성계수의 10^{-9} 배 값을 사용한다.[7] 또한 구조물과 유체의 경계면에서 접선방향으로 상대적인 미끄러짐을 허용하고 직각방향으로 구조물요소와 유체요소의 절점이 동일한 변위를 가질 수 있는 구속조건도 만족하여야 하며, 구조물과 유체의 경계면에서 구속시킬때는 사용좌표계에 주의하여야 한다. 즉, 구조물과 유체의 경계면에서 구조물요소에 해당하는 절점과 유체요소에 해당하는 절점들을 모두 원통좌표계로 정의해야하며 구조물과 유체의 경계면에 직각인 변위만 구속하였다.

상기 유한 요소해석 결과를 이용하여 무차원고유진동수$\left(f_{water} / f_{air}\right)$를 유체 간격 변화에 따른 모드 형상별 무차원고유진동수 변화율을 다항 회귀 곡선(polynomial regression)방법을 사용하여 그림 2와 같이 나타내었다. 1차 모드에 대한 무차원고유진동수$\left(f_{water} / f_{air}\right)$는 대부분 0이 나오며 이것은 강체운동이므로 고려하지 않았다. 강성이 없는 연속체 구조물인 유체가 모의 연료봉의 고유치를 감소시키는 역할을 함을 알 수 있었다. 각 모드별 무차원 고유진동수 값의 간격 증가에 대한 기울기 변화는 거의 동일함

을 발견할 수 있었다. 즉 간극선재에 작용하는 인장력은 무차원 해석시 영향을 미치지 못함을 알 수 있었다.

3. 동특성 실험

일반적으로 동특성 파라미터(고유진동수, 감쇠율, 진동모우드 형상) 추출을 위한 가진 장치로는 대상 구조물의 크기 및 감쇠율 고유진동수의 주파수 간격 등에 따라 매우 다양하다. 그러나 대체적으로 널리 사용되는 가진장치로는 i) 충격가진, ii) Electro-mechancal 가진, iii) Hydraulic 가진 등 3가지가 있다.[8] 본 실험에서는 모의 핵연료봉이 비교적 단순하고 선형성이 뛰어나므로 충격가진을 채택하였다. 충격가진에 의한 주파수 응답함수의 측정방법은 모의 핵연료봉을 지지레일에 의해 지지시킨 후 임펙트 헴머를 이용하여 가진점을 직접이동 시켜가며 가속도계로부터 주파수응답함수를 구하였다. 실험장치 개략도는 그림 3에 나타내었다.

충격가진을 통하여 측정된 가진 및 응답신호는 I-DEAS TDAS 소프트웨어를 사용하여 Agilent VXI 시스템의 front end input 모듈(VXI 1432)로 입력된다. 입력된 신호들은 FFT 변환 및 평균화되어 주파수응답함수로 계산되어진다. 측정주파수 범위는 100Hz로 하였으며 샘플링 시간간격은 1/4096초로 하였다. 이때 주파수응답함수를 구하기 위하여 필요한 FFT의 데이터 개수는 8192개로 하였다. 동특성 매개변수(고유진동수, 감쇠율, 모우드형상) 추출 역시 I-DEAS TDAS 소프트웨어를 사용하여 구하였다.
표 1에서와 같이 공기중과 수중에서의 기본 고유진동수는 각각 6.5Hz와 2.4Hz로 나타났으며, 그림 4는 수중실험에서 모의 핵연료봉의 주파수응답함수이다.

4. 해석결과와 실험결과의 비교

본 연구에서 유한요소해석 결과와 실험결과가 15%정도의 차이가 발생하는데 이것은 실험상의 오차와 해석시 모델의 단순화과정에서 발생하는 오차에 의한 것으로 보인다. 그러나 실험 및 유한 요소 해석의 경향이 서로 잘 일치함을 알 수 있었다. 따라서 본 연구에서 개발한 유한요소해석 모델링을 이용하여 유체-구조물의 간격에 따른 진동모우드를 시뮬레이션하는데 이용하였다.

표 1은 공기중 및 수중에서의 모의 핵연료봉의 유한요소 해석 및 실험으로 구한 모우드별 고유진동수를 나타내며, 그림 5는 충격가진으로 구한 모의 핵연료봉에 대한 주파수응답함수와 해석결과와 비교를 나타내었다.

표 1. 모의 핵연료봉의 유한요소해석&실험에 대한 고유진동수

[단위 : Hz]

Mode number	In-Air		In-water	
	FEM Analysis	Experiment	FEM Analysis	Experiment
2	6.83	6.5	1.9	2.4
3	14.86	12.75	4.36	5.25
4	25.81	20	6.87	7.75
5	38.26	31.75	9.05	10.5
6	55.2	44	18.25	20.5
7	73.52	57	32.72	36.36

3. 결 론

모의 핵연료봉의 공기중과 수중에서의 해석과 실험을 통해 해석 모델의 단순화에도 불구하고, 실험결과와 잘 일치했으며, 개발된 유한요소해석 모델을 이용하여, 시뮬레이션한 결과 다음과 같은 결과를 얻었다.

(1) 모의 핵연료봉의 기본 고유진동수는 각각 공기중의 경우 6.5Hz, 수중의 경우 2.4Hz 이다.
(2) 공기중에 비하여 수중에서 모의 핵 연료봉의 고유진동수가 낮아지는 것으로 보아 유체의 부가 질량 효과를 확인할 수 있었다.
(3) 유체의 간격이 증가함에 따라 모의 핵 연료봉의 고유 진동수가 감소 하였다. 이것은 유체의 부가 질량 효과가 간격이 증가함에 따라 더욱 증가함을 정량적으로 확인 할 수 있었다.
(4) 모의 핵연료봉의 무차원 고유진동수(수중 고유진동수 / 공기중 고유진동수)는 간극선재의 인장력(0~3kgf 범위에서)에 의한 영향이 없다는 것을 알 수 있었다.
(5) 간극선재의 질량은 모의 핵연료봉의 동특성에 영향을 미치지 않는다.

본 연구를 통해 모의 핵연료봉의 유체 진동에 대한 유한요소 모델을 개발하였고, 실험을 통해 모의 핵연료봉에 대한 유체의 부가질량 효과를 재검증하여 유체와 구조물의 간

격에 따른 시뮬레이션 결과를 얻을 수 있었다.

후 기

본 연구는 과학기술부의 원자력 중장기 연구개발 기금으로 수행되었음

참 고 문 헌

1. Chertock, A. J., " Wire - Wrap Bundle Compression Characteristics Study Phaes I, " DOE/SF/77011 - T4, U.S. Department of Energy, Jun. 1974
2. Kaplan, s., " Wire - Wrap Assembly Engineering Phase I Mechanical Test Result, " DOE/SF/77011 - T2, U.S. Department of Energy, Mar. 1976
3. ANSYS User ' s Manual for Revision 5.0 Volume III, IV Swanson Analysis Systems, Inc., 1992.
4. M. I. Friswell, J. E. Mottershead , Finite Element Model Updating in Structural Dynamics , 1996
5. Singiresu. S. Rao, " Mechanical vibration " Addison - Wesley Publishing Company, 1990
6. D. J. Ewins, Modal Testing: Theory and Practice, Research Studies Press Ltd.,1984
7. J. W. Leonard, H. U. Ahmed, J. A. Swanson, " Application of ANSYS Fluid Elements in Fluid - Structural Interaction Problems ", Paper B 4/6, 5th SMIRT, 1979
8. SDRC Proposal, " Test Plan for Experimental Modal Analysis of the YGN 3 CEA Shroud ", No. 17663 - R1, 1991

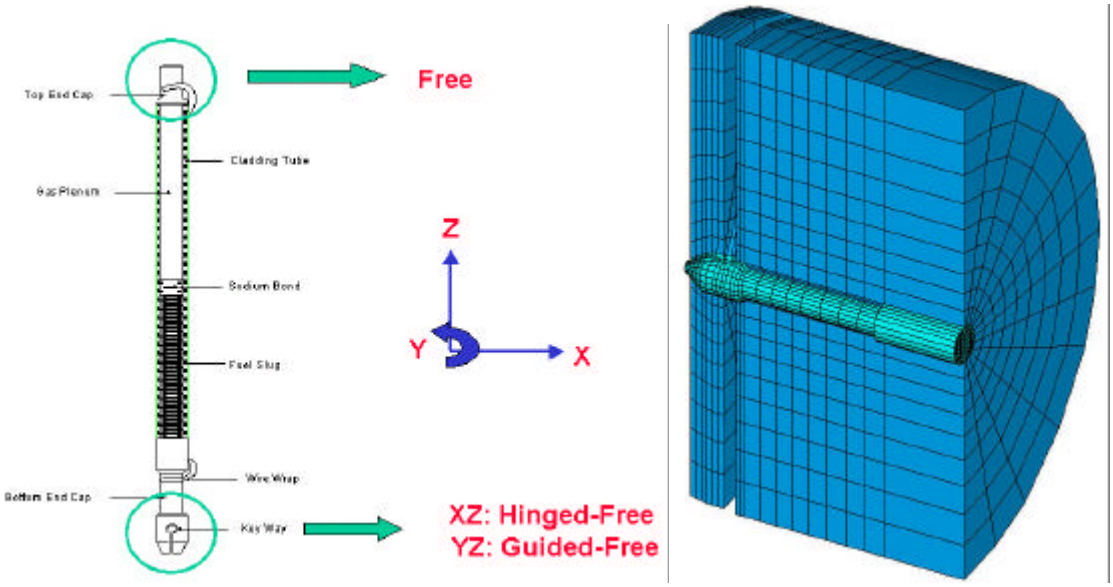
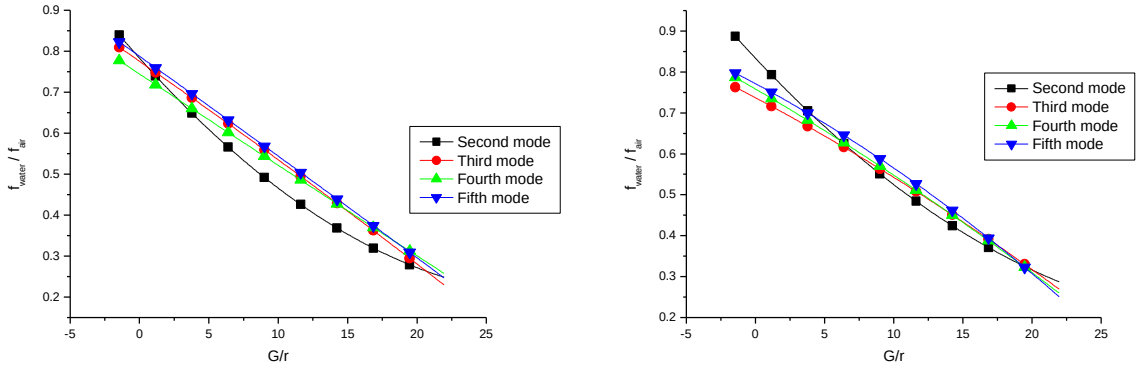


그림 1 연료봉과 유체의 모델링 및 경계조건



(a) 인장력이 있는 경우 (b) 인장력이 없는 경우

그림 2 Hinged - free에 대한 무차원 고유진동수

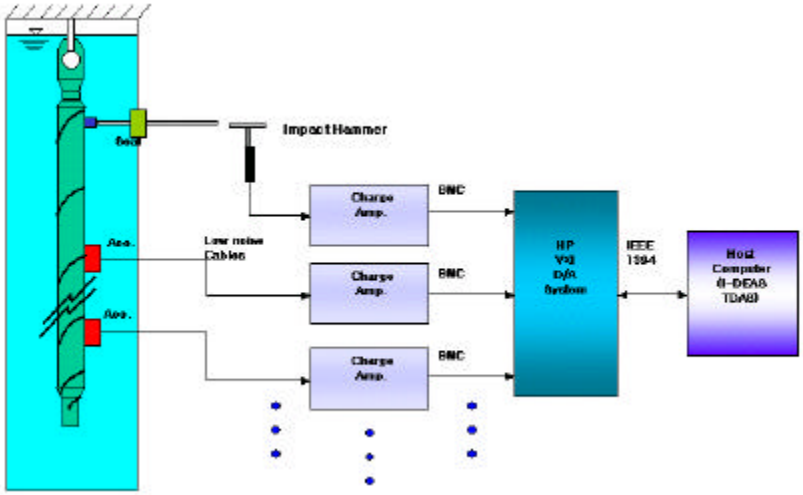
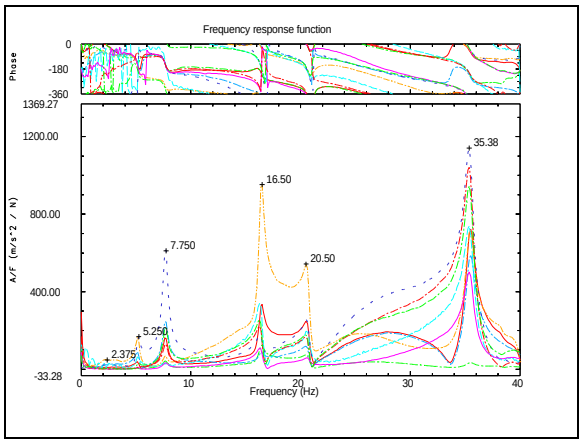


그림 3 실험장치 개략도



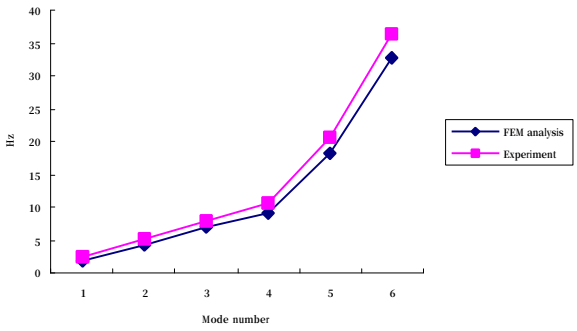


그림 4 수중실험에서 모의 연료봉의 FRF

그림 5 고유진동수의 해석치와 실험치 비교