

# 연구로용 시험연료 집합체의 수중 진동특성 실험 및 결과 Under-water Modal Testing and Results of Research Reactor Fuel Test Assembly

이강희† · 강흥석\* · 김재용\* · 임정식\* · 김현중\*

Kanghee Lee, Heungseok Kang, Jaeyong Kim, Jungsik Yim, Hyunjung Kim

## 2. 수중모드 실험

### 1. 서 론

연구로용 연료 집합체는 봉다발의 구조를 갖는 경수로용 상용 핵연료 집합체와는 상이한 기계적 구조를 갖는데, 그림 1과 같이 다수의 얇은 연료관이 좁은 수로를 사이에 두고 나란하게 배치되며, 좌/우 측면 판에 swaging으로 고정되어 판의 상/하부가 연결핀으로 묶이는 구조다.

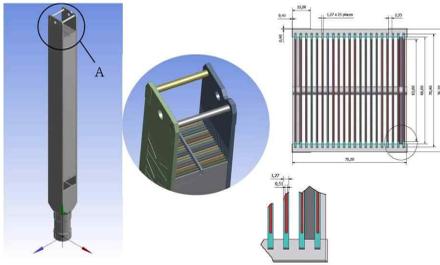
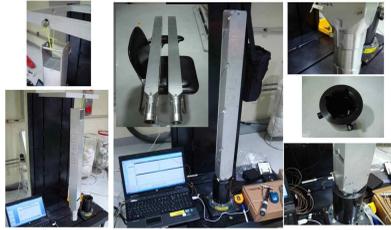


그림 1. 연구로용 핵연료 집합체의 구조

세장비가 크고 얇은 연료관의 구조는 비교적 낮은 각속도 유속에서 유체탄성에 의한 불안정(fluidelastic instability)이 발생할 수 있는데, 이것은 핵연료 설계 인허가를 위하여 실험적으로 확인해야 하는 사항으로 이해되고 있다. 이 때문에, 시험 연료 집합체를 대상으로 하는 상온 상압 노외 유체유발진동 실험(불안정 임계유속의 측정)을 계획하고 있으며, 시험체의 동특성을 사전에 확인하기 위한 목적으로 일련의 동특성 실험이 수행되었다. 수중환경에 얻어진 시험집합체의 동특성 자료는 사고해석 모델의 입력자료로도 활용될 것이다. 본 논문에서는 수중 모드 실험의 주요한 내용과 대표적인 실험결과에 관하여 기술한다.

그림 2는 동특성 실험을 위하여 제작된 두 개의 시험 집합체(DFA, DU-FA: 핵물질 포함)와 공기중 및 수중 진동실험을 위한 test setup(a~c)을 보여주는데, 공기중 모드실험의 경우(a)는 하나의 시험 집합체가 핵물질(Depleted Uranium, 감선우라늄)을 포함하는 연료관으로 제작된 이유로, 방사선 관리구역 내부에 설치된 간이 진동실험 장치를 이용하였다. 특별히, 연구용 원자로 노심 내부의 핵연료 집합체 지지구조물을 모사할 수 있도록 core support bowel을 제작하여, In-reactor support경계조건을 인가하였고, free-free경계조건은 plastic 혹은 metal wire로 시험 집합체를 공기중에 매달아 동특성 실험을 수행하였다. free-free경계조건인 경우는 support wire의 형태나 장력의 크기에 따라서 실험결과가 크게 왜곡될 수 있기 때문에, 같은 실험조건이 유지되도록 유의해야 한다. 수중 실험의 경우(그림2의 b, c)는 비방사능 구역에 위치한 실험실에서, 자체 제작한 수조채널 내부에 물을 채우고 시험집합체를 매달거나(free-free, (b)), 채널 내부에서 core support bowel을 고정한 후(c), 시험집합체를 물이 채워진 채널로 다시 삽입/고정시켜 수중 모드 실험을 수행하였다. 수중 실험의 경우는 방수기능을 갖는 일부 가속도 센서를 이용하거나 충격 신호의 타격을 위하여 수면 위로 노출된 시험집합체의 상부 위치에 일반 소형 가속도 센서를 설치하여 충격응답을 측정하였다. 특별히, 저주파 응답신호의 확인 및 가속도 측정신호와와의 비교를 위하여 레이저 진동계를 이용하여 변위 및 속도응답 신호도 병행하여 측정하였다. 시험집합체의 가진(excitation)은 힘센서가 부착된 충격해머를 이용하였고, 충격해머를 이동하면서 고정된 응답 측정위치들의 주파수 응답함수들을 신호처리를 통하여 얻었다. 그림 3은 수중 실험의 대표적인 주파수 응답함수를 도시한 것이다.

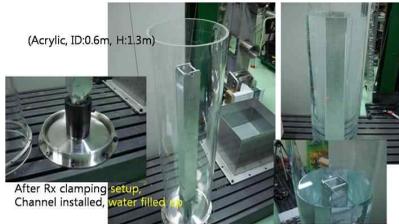
† 교신저자; 정회원, 한국원자력 연구원  
E-mail : leekh@kaeri.re.kr  
Tel : 042-868-2298, Fax :042-863-0565  
\* 한국원자력연구원, 경수로핵연료기술부



(a) 시험집합체 및 공기중 모드특성 실험



(b) 수중 free-free 경계조건



(c) 수중 In-reactor Support 경계조건

그림 2. Test Configuration

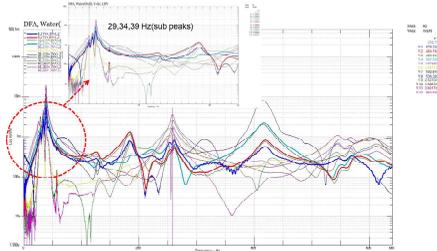


그림 3. 주파수 응답함수(DFA, 수중, 연료판 방향)

### 3. 실험결과 및 결론

표 1은 단위 연료판에 대한 고유진동수 확인실험의 결과를 보여준다. 단위 판에 대한 동특성 실험은 핵물질이 포함된 실제 연료판을 대체할 수 있는 모사 시험연료 판을 개발하기 위한 목적으로 수행되었고, 최종적으로 텅스텐과 알루미늄 분말을 섞어 만든 모사 연료판이 실제 연료판과 동일한 동특성을 가짐을 실험적으로 확인하였다<sup>(1)</sup>. 표 2와 3은 각각 두 시험연료

에 대한 공기중 및 수중 동특성 실험결과(물의 체널 내 충전 비율에 따른 고유진동수)를 보여준다. 시험연료가 수중에 잠기면 모드에 따라 다르지만 기저 모드를 기준으로 대략 40 %정도 고유진동수가 부가질량 효과에 의해서 감소되는 것으로 생각된다. 동일한 모델과 조건으로 유한요소해석 한 결과, 유사한 해석결과를 얻어낼 수 있었으며, 이에 대한 내용은 별도의 지면으로 다루고자 한다.

Table 1 단위 시험용 연료판 고유진동수(Free조건)

M/ID	DU	Al	Pb	W	Diff(%)
1	13.25	15.3	11.85	12.8	3.40
2	35.14	41.2	31.52	34	3.24
3	68.78	81.3	62.3	67.4	2.01
4	74.13	-	-	75.1	1.31
5	112.2	134.5	103.	108.6	3.18
6	149.3	163.7	127.6	150	0.46

Table 2 DFA 고유진동수(공기중 Free, Rx-고정조건 )

Mode	DFA, Free	DFA, Rx	DU-F A,Free	DU-F A,Rx	Diff. (%)
1	369	47.5	391	42.1	5.63
2	426	50.45	407	46	-4.67
3	628.7	272	649	259.2	3.13
4	638	284.4	732	270	12.84
5	780.5	318.2	792	367	1.45
6	845.5	478.0	878.6	533	3.77

Table 3 DFA 수중 고유진동수(Free, Rx-고정조건 )

m.	Air	Water (full)	¼ filled (% Diff)	Half filled	Quarter filled
1	55	34	37	51.3(6.8)	54.3(1.3)
2	61	39	45(26.2)	53.4(12.5)	59.6(2.3)
3	280	126	139(50.4)	141(49.6)	162(42.1)
4	328	183	201(38.7)	206.8(37)	229(30.2)
5	382	260	280(24.6)	288(24.6)	338(11.5)
6	605	416	548(9.4)	570(5.8)	582(3.8)

### 후 기

본 논문은 2013년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(사업명, No.2013M2A8A5013146)

### 참고문헌

(1) Kanghee Lee, et al, 2013, Experimental Dynamic Compatibility Testing for Simulated Test Fuel Plate, Transactions of the Korean Nuclear Society Spring Meeting, Gwangju, Korea, May 30-31, 2013.