

## 환형 연료봉의 지지조건에 따른 동특성 분석

### Experimental Dynamic Characteristic Analysis of Annular Fuel Rod According to the Support Condition

이강희† · 강홍석\* · 김형규\*

Kang-Hee Lee, Heung-Seok Kang and Hyung-Kyu Kim

#### 1. 서 론

환형연료는 차세대 고연소도 고성능 핵연료의 후보로서 원자력연구원에서 개발 중인 핵연료이다<sup>(1)</sup>. 기존 핵연료 대비 환형 핵연료의 가장 큰 구조적 차이점은 내측 유로를 갖는 것과, 연료봉의 외경이 비약적으로 증가되어 외측 유로를 결정하는 공간간격이 극히 협소하다는 것이다. 이에 따라 구조적인 강성의 변화와 함께, 내측유로의 형성에 따른 봉과 집합체의 감쇠특성 및 동특성 변화, 공간 간격의 협소화에 따른 부가질량과 연성효과의 증가 등을 동반하게 된다. 본 논문에서는 주로 실험적인 방법으로 환형 연료봉의 동특성에 관하여 연구한 내용에 관하여 기술한다. 구체적으로, 단일 이중냉각 연료봉의 진동특성과 동적거동에 영향을 미치는 주요 변수의 영향을 평가하여, 기존 연료봉의 특성과 비교하였고, 지지조건에 따른 동특성 매개변수의 변화에 관하여 분석하였다.

#### 2. 동특성 실험과 결과

##### 2.1 단일스팬 단위 시험봉 기초실험

펠릿이 장입되지 않은 단위 이중냉각 시험봉을 대상으로 구속조건 없이 자유-자유 조건으로 공중에 매달아, 충격하중에 의한 주파수 응답함수 측정하였다. 본 실험은 이중냉각 시험봉 내부 채널의 유체장입 여부에 따른 충격응답이력과 동특성 차이로부터, 내부 채널의 유체점유가 이중냉각 연료봉의 동

특성에 미치는 영향을 간접적으로 분석하기 위한 모사실험이다. 시험봉은 상부 봉단마개 Grip 홈에 실선을 묶어 상단에 고정된 스프링과 연결하였고, 하단의 봉단 마개 내부 채널 입구는 수축성 랩(wrap)과 테이프를 이용하여 밀봉하여 수밀을 유지하였다. 내부채널에는 20℃의 순수를 장입시켰다.

Fig. 1은 양단 자유조건(free-free)으로 공기중에 매달린 이중냉각 시험봉이 내부 채널에 유체를 점유하고 있을 때와 빈 경우에 대한 충격하중 이력, 응답이력, 그리고 Envelop curve의 로그감쇠 fitting함수를 나타내고 있다. 충격 하중신호는 명확하게 중복타격으로 보여진다. 충격 시간폭은 2/100초였으며, 강성이 큰 재질의 hammer tip을 사용할 경우, 충격 시간폭을 감소시킬 수 있었지만, 중복타격의 빈도수는 증가되었다. 단위 임펄스하중을 구조물에 인가할 때, 중복 타격 발생의 문제는 통상 경하고 유연한 구조물을 가진할 때나 경한 tip의 헤머로 가진할 때 주로 발생되는데, 타격과 동시에 구조물의 되튐현상이 발생하기 때문이다. 이것은 대상 구조물의 주파수 응답함수를 왜곡시킬 수 있다. 내부채널 유체점유에 따른 충격응답 측정결과, 내부 채널에 유체가 점유되면, 로그 감쇠율이 감쇠상수를 근거로 할 때 약 7.4 % 정도 증가되며, 이에 따른 감쇠시간(Decay out time)도 점차적으로 빨라짐을 확인할 수 있었다. 아울러, 감쇠비의 증가율과 Decay out time의 가속시간은 유체 점유량에 따라 점진적으로 변화될 것이다. 감쇠비는 통상 동특성 실험에 의해서만 측정이 가능하며, 실제 이중냉각 연료봉에 대한 전체 감쇠비는 내/외부유동에 의한 점성감쇠, 접촉 지지조건에 따른 마찰감쇠, 지지부의 노즐 및 간극(gap)효과에 의한 squeeze film 감쇄 등이 종합적으로 고려되어야 한다. 유동조건에 놓은 구조물의 유동변화에 따른 감쇠특성은 상변화, 구조물의 기하학

† 이강희 ; 정회원, 한국원자력연구원  
E-mail : leekh@kaeri.re.kr  
Tel : 042-868-2298, Fax : 042-863-0565

\* 한국원자력연구원

적 형상에 따른 차이, 실제 경계조건과 실험조건의 차이 등으로 일반적인 경향을 보이지 않는 것으로 알려져 있고, 실험적인 측정 또한 난해하다

Fig. 2 는 충격가진으로부터 얻어진 단위 시험봉의 내부 채널 유체 점유 여부에 따른 주파수 응답함수를 나타내고 있다. 공기중에서 측정된, 1차, 2차, 3차 모드(Green curve)는 실험적 모드해석결과, 시험봉의 1차~3차 모드에 해당되며, 이것은 자유단 경계조건을 갖는 단순보의 해석적 동특성 분석결과와도 일치하고 있다<sup>2)</sup>. 내부 채널에 장입된 유체로 인하여 시험봉의 단위 길이당 질량이 증가되면, 고유진동수가 일정한 비율로 감소되고 있고, 고차 모드로 갈 수록의 변화폭이 증가된다. 흥미로운 점은 중주파수 대역에 존재하던 복잡한 주파수 응답들이 내부 채널에 유체가 장입됨에 따라, 비교적 단순로운 응답파형으로 변화되었는데, 이것은 가진력의 인가와 응답측정을 접근이 가능한 외측 피복관에서 수행하기 때문인 것으로 판단된다. 즉, 가진과 동시에 내부채널의 점유 유체로 가진 에너지가 소산됨에 따라, 외측에 위치한 응답센서로 내측 피복관의 반응 응답이 미처 전달되지 못했던 것으로 생각된다. 아울러, 내부채널에 유체가 장입되지 않은 시험봉의 공기중 시험에서 확인되었던 중주파수 대역에 위치한 내부 피복관의 개별적인 굽부 모드들이 내부채널에 장입된 유체를 매개로 연성되고 있음을 보여주는 결과라고 사료되지만, 중북대역 때문에 발생한 문제일 가능성도 배제할 수 없다.

## 2.2 다점지지 단위 시험봉 동특성

5개의 4x4 외팔형 및 반구형 조합 지지격자체로 지지되고 각 스펀이 380, 580, 580, 580 mm로 일정하게 유지된, 단위 이중냉각 시험봉에 대하여 수

2) 자유-자유 조건을 일 때, 단위 시험봉의 해석적

$$\text{인 고유진동수는 } f_i = \frac{\lambda_i^2}{2\pi L^2} \sqrt{\frac{EI}{m}}, \lambda_i=4.73,$$

7.8532, 10.9956으로 결정되며,  $m$ 은 시험봉의 단위길이당 질량을 나타낸다. 참고로, 시험봉의 굽힘강성(EI)을 외부 피복관에 대한 값(236.037 Nm<sup>2</sup>) 만으로 가정하면(단,  $m=0.4153$  kg/m), 공기중일 때 3차까지의 고유진동수는 84.9, 234, 458.8Hz가 되며, 내측관에 물이 충전되어 단위 길이당 질량(0.47kg/m)이 증진된 시험봉의 고유진동수는 80.0, 220.0, 236.0 Hz가 된다.

직 모달실험장치를 이용하여 내부 채널 유체점유 여부에 따른 주파수응답함수를 측정하였다. 본 실험의 목적은 다점지지된 이중냉각 연료 시험봉의 내부 채널이 유체로 채워짐에 따른 동특성의 차이를 확인하기 위함이다. 응답의 측정은 일반목적의 소형 가속도 센서를 이용하여, 각 스펀의 1/4 및 3/4 위치에서 측정되었고, 가진력은 medium과 soft tip을 장착한 충격헤머로 인가하였다.

유한요소모델과 수치해석에 의한 이중냉각 시험봉 동특성 예측은 시험봉 내부의 장입질량이나 지지점이 갖는 비선형성 등으로 인하여 다소의 오차를 갖기 때문에, 실험적인 방법으로 직접 주파수 응답함수를 측정하였다. 해당 시험모델은 이중냉각 연료 시험봉 부분집합체를 구성하는 단위 구성 시험봉들에 대한 지지조건을 그대로 모사하고 있다. 시험모델은 14개의 절점으로 구성된 보 연결요소로 표1과 같이 정의하였고, 가진위치는 중심부의 3개 절점으로 선정하였다. 시험방법은 헤머로 단위충격하중을 가진하고, 입력하중과 응답가속도를 측정하였다. 가로 세로 4개의 셀을 갖는 지지격자 체에서 하단 두 셀이 시험대에 고정되고, 상단에 위치한 한 셀에 시험봉을 삽입시켜 시험하였다.

Fig. 3는 동일한 위치를 충격가진 하여 얻은, 두 시험봉의 서로 다른 주파수 응답함수를 나타내며, 동일한 주파수 축을 기준으로 상호 비교한 것이다. 시험결과, 두 주파수 응답함수는 주요한 고유진동수의 값과 피크 응답의 밴드폭에 있어서 전체적으로 상당히 유사한 특성을 보여주며, 내부 채널에 유체가 장입된 시험봉의 주요한 주파수 응답성분들이 주파수축의 왼쪽으로 편위(shift)하고 있음을 관찰할 수 있다. 두 응답함수의 차이는 내부 채널에 유체가 장입됨에 따라 발생된 질량의 차이로 인하여 시험봉의 동특성이 변화되어 발생된 것으로, 조밀하게 근접하여 복수개로 위치하던 진동모드가 Fig. 3의 'A'와 같이 모드 축약(mode contraction)되기도 하며, 그림의 'B'와 'D'와 같이 비교적 잘 분리된(well separated) 독립모드가 두 개의 근접모드(closely-spaced mode)로 분할되어 나타나기도 한다. 아울러, Fig. 3의 C와 E, F, G에서와 같이 상이한 주파수 응답특성을 나타내기도 한다. Fig. 4은 A의 주파수 응답성분에 대응되는 모드들을 서로 비교한 것이다. 내부 채널에 유체가 장입된 시험봉의 77.1

Hz 모드는 빈 시험봉의 80.2 Hz와 동일한 모드이나, 70.8 Hz의 모드는 빈 시험봉의 67 Hz 및 75 Hz 모드와 3번째 스펠의 상대변위 진폭과 위상에서 근소한 차이를 갖는 상이한 모드로 판단된다.

### 2.3 지지점 이완에 따른 동특성 분석

핵연료 지지격자 체는 원자로 노심 내부의 핵분열 열과 방사능에 의해서 변형(팽창) 및 성장(irradiation growth)하고 피복관과 함께 크립(Creep)을 일으키기 때문에, 연료봉의 중간 지지점에는 간극이 발생될 수 있다<sup>(2)</sup>. 이러한 지지격자와 피복관의 열 및 조사변형은 노심 출력분포, 연소기간, 재료적인 특수성, 냉각재 유동조건 등에 의존적으로 변화되므로, 간극의 크기와 거동(주로 발생시점)은 예측하기 어렵다. 그러나, 연료봉의 동적특성과 거동은 지지점의 지지조건에 따라 크게 변화되므로, 실험적인 방법으로 지지점의 간극변화나 스프링력의 이완에 따른 동특성의 변화를 분석할 필요성이 있다.

상기와 같은 이유로, 지지스프링이 미리 정의된 크기만큼 이완된 지지격자체를 이용하여 다점지지 이중냉각 시험봉의 동특성 실험을 수행하였다. 이완의 정도는 경험치를 근거로 결정하였는데, 시험봉의 공칭 외경보다 각각 0.25 mm, 0.5 mm 큰 외경의 STS 시험봉을 삽입한 후, 일정한 시간동안 고온 Baking 처리하였고, 공기중에서 냉각시켰다. 베이킹 온도 350°C에서 3시간 동안 가열로 내부에 보관하였으며, 냉각 후에 cell clearance setting용 금속봉을 제거하였다. STS 봉의 열팽창계수(13.6E-6)로부터, 간극설정용 봉의 열팽창량은 0.07 mm로, 최종적인 간극설정 기대값은 0.32 mm 및 0.57 mm가 될 것으로 추정된다. 참고로, 지르코늄 합금인 지지격자체의 재결정 온도는 대략 600°C정도이다. Fig. 5은 기변형 지지점 간극을 형성시키기 위해 제작된 지지격자 체와 시험봉, 고온 Baking 기기(가열로), 그리고 고온처리가 종료된 중간지지격자를 각각 나타내고 있다. 기변형을 통한 지지점 이완 셀의 위치는 하단 고정부로부터 떨어진 상단 및 중간 셀(cell)의 열에 대하여, 4x4 셀 내부에서 상호 인접에 따른 영향을 최소화하는 곳으로 선정하였다

실험결과, 중간 지지점의 pre-sized cell clearance 크기 증가에 따라, 기저 고유진동수가 점

차 감소되며, 주요한 주기응답 성분들의 자기 주파수 band 폭과 sharpness의 정도가 각각 넓어지고, 둔감해지는 경향을 보인다. 이러한 경향은 이중냉각 시험봉의 내부 채널에 유체를 점유하고 있는 경우가 더욱 심하게 나타나고 있다. 고유진동수가 감소되는 근본적인 원인은 중간 지지점의 간극형성에 따른 지지강성의 감소로 볼 수 있으며, 내부 채널에 유체를 점유한 경우는 유체의 부가질량과 기여 감쇠특성의 증가로 이러한 경향이 더욱 가속화되어 나타나는 것이다. 다만, 시험봉은 3차원적인 다점 지지조건을 갖기 때문에, 시험봉의 축 정렬상태에 다소의 오차가 개입될 수 있으며, 지지격자의 cell 치수공차와 cell clearance setting 공차가 예상되었던 것보다 컸던 관계로, 측정결과에 이러한 오차가 포함될 수 있는 가능성을 배제할 수 없다. 이 때문에 실험결과와 정도확보와 정량적인 분석은 차후의 과제로 남겨둔다.

### 2.4 스펠거리에 따른 진동특성

기존 노심에 적용되어야 할 이중냉각 핵 연료봉의 횡방향 굽힘강성 증가로, 연료봉의 고유진동수가 비약적으로 증가될 것으로 예상되고 있다. 이에 따라, 초기노심 핵연료 배치 설계의 경우, 인접한 집합체의 충격면 제공에 대한 핵연료 설계요건을 만족하는 범위에서, 지지점의 수를 감소시켜 연료봉의 고유진동수를 기존 연료봉의 고유진동수에 근접하도록 낮추는 설계방안이 제기된바 있다<sup>(3)</sup>. 이처럼 핵연료봉의 지지점 수와 이에 따른 스펠간격은 충격면 제공이라는 핵연료 설계요건을 만족시키는 범위이기는 하지만 핵연료의 설계조건에 따라 가변적으로 변화될 수 있으며, 이 경우 핵연료의 동특성(주로 주파수 특성)은 큰 변화를 경험하게 된다. 이러한 관점에서 내부 채널이 빈 이중냉각 연료 시험봉과 내부 채널이 상온의 물로 채워진 시험봉을 대상으로, 수직방향 진동시험대를 이용하여, 스펠거리에 따른 주파수 응답함수를 측정하였다. 응답의 측정은 시험봉 스펠거리의 1/4 및 3/4에 접촉악스와 고정치구(U홈 가공)를 이용하여 부착한 가속도 센서를 이용하였고, 가진력은 medium과 soft tip을 장착한 충격헤머(B&K8202)로 각각 인가하였다. 실험수행의 편의를 위하여 내부 채널이 빈 시험봉은 지지격자체의 좌측 상단에 설치하고, 내부 채널이 물로 채워진 시

험봉은 지지격자체의 우측 상단에 각각 설치하여 독립적으로 실험을 수행하였다. 스펀거리는 상단 지지격자의 위치를 고정된 상태에서, 하단 지지격자의 위치만을 변경한 후, 시험봉의 중심이 스펀 중심에 오도록 위치조정하고, 센서 위치를 변경하는 순서로 진행되었다. 총 5회 가진하고, 측정된 입력과 가진력 신호를 신호처리하여 해당 시험봉의 주파수 응답 함수를 얻었다. 그림 1는 실험에 사용된 수직시험대와 실험 setup을 나타낸다

내부 채널이 빈 시험봉의 무게는 0.4129 kg (PP 봉단마개) 및 0.415.3 kg(테프론 봉단마개)이었고, PP(폴리프로필렌) 봉단마개 하나의 무게는 3.8 g, 내/외 피복관의 무게는 405.3 g이었다. 참고로, 테프론 봉단 마개 하나의 무게는 각 5 g이었다. 내부 채널이 물로 채워진 시험봉의 무게는 467.5 g이었고, 내부 채널에 채워진 물기둥의 무게는 53.0 g에 해당된다. 따라서, 내부 채널이 빈 시험봉의 단위길이당 질량은 0.413 kg/m이며, 내부 채널이 물로 채워진 시험봉의 단위 길이당 질량은 측정치를 기준으로 0.4675 kg/m이다. 상기의 값과 외측관의 굽힘강성 (236.037 Nm<sup>2</sup>)을 근거로, 단위 길이당 질량은 동일 (0.413 kg/m)하지만 지지점 길이(L=0.9, 0.7, 0.5)가 다른 양단-단순지지 시험봉의 해석적 고유진동수를 계산해 보면, 각각 46.36, 76.64, 150.2 Hz가 된다. 참고로, 고유치 상수는  $\lambda_i = i\pi$ 를 사용하였다

Fig. 6는 내부 채널이 빈 이중냉각 연료 시험봉과 내부 채널이 상온의 물로 채워진 시험봉의 스펀거리에 따른 주파수 응답함수를 나타낸다. 실험결과에서 중요한 사실은, 지지점의 스펀거리가 감소될수록, 시험봉의 기저 고유진동수가 일정하게 증가되고 있다는 것이다. 이것은 이론적으로 자명한 결과이기는 하나, 증가되는 기저 고유진동수의 주파수 변화량과 고차모드의 주파수 응답 변화가동은 일률적이지 않다. 흥미로운 점은 내부 채널에 물이 충전된 시험봉의 주파수 응답가동은 내부 채널이 빈 시험봉의 그것에 비하여, 전체적인 주파수 응답함수의 변화양상이 크지 않은데(전체적으로 유사한 경향을 보이는데), 이것은 실험이 나름대로 일관된 방식으로 수행되었다는 것과 함께, 내부가 물로 채워진 이중냉각 시험봉의 경우는 외부적인 외란이나 지지조건의 변화 등에 의해서 동특성이 교란되거나 변화되는 정도가 상대적으로 크지 않고, 둔감하다는 것으로 보여

주는 것이라고 생각된다. 필요에 따라, 진동해석모델 등을 이용하여, 지지점 거리 변화에 따른 이중냉각 연료봉의 고유치 변화 민감도 해석이 필요하며, 이를 이용하여 여러 가지 조건과 목적에 따른 지지점 위치 및 설계 최적화를 수행할 수 있다. 다만, 연료봉의 유체유발진동 문제에 대한 최적화 문제는 완전하게 해석적인 방식으로 수행되기 어려운 관계로, 실험적인 방법과 병행하여 설계문제를 구성하고 최적 해를 찾을 수 있는 대안적인 방법도 있겠다.

### 3. 결 론

이상과 같이, 이중냉각 시험봉의 동특성은 내부 채널의 유체로 인하여, 자유-자유 조건으로 공중에 매달린 경우, 감쇠비는 약 7.4% 증가되었고, 기저 고유진동수는 내부 채널의 부가질량(유체점유 질량)에 따라 4.4 % 정도 감소됨을 알 수 있었다. 시험봉의 외측관이 다점 지지되는 경우는 주요한 주파수 응답성분들이 주파수축의 왼쪽으로 편위(shift)하고 있음을 관찰할 수 있는데, 이것은 대부분 내부 유체 장입에 따른 질량차이로 발생된 것이며, 조밀하게 근접하여 복수개로 위치하던 진동모드가 모드 축약(mode contraction)되기도 하고, 비교적 잘 분리된(well separated) 독립모드가 두 개의 근접모드(closely-spaced mode)로 분할되어 나타나기도 하지만, 고차모드의 변화양상은 일률적이지 않다. 지지점 간극을 인위적으로 부여하거나 조정된 경우, 유체의 부가질량과 감쇠특성의 기여도 증가로 주파수 변화(혹은 변동)를 가속화 시키며, 스펀거리에 따른 특성 변화에서 기저 고유진동수를 감소시키고, 스펀거리 변화에 따른 외란에 둔감한 주파수 응답특성을 보여 준다. 상기와 같이, 시험용 부분 집합체의 단위 구성 시험봉에 대한 기초 동특성을 측정/획득하였고, 내부 채널에 유체가 장입됨에 따른 동특성 차이를 확인하였다. 상기의 측정결과는 부분 집합체의 모드 특성과 동특성을 분석하고, 실험결과를 검증하는데 활용된다.

## 참고문헌

(1) Kim, H.-K., et al, 2009, Final Report of development of design technology for Dual-cooled fuel, KAERI/RR-3088/2009.

(2) Lee, K. -H., et al, 2009, Initial Core Vibration Design of Dual-Cooled Annular Fuel Element : Number of Support, Proceedings of WRFP, Paris, France, Sept. 6-10, paper number 2088.

(3) Lee, K. -H., et al, 2009, Vibration Analysis of Dual-Cooled Fuel Rod Applicable to the Transition Reactor Core, Proceedings of the National Congress on Fluids Engineering, Busan, Korea.

## 후 기

이 논문은 교육과학기술부의 재원으로 시행하는 한국과학기술재단의 원자력기술개발사업으로 지원받았습니다(연구과제 관리코드: M20706020005-08M0602-00510).

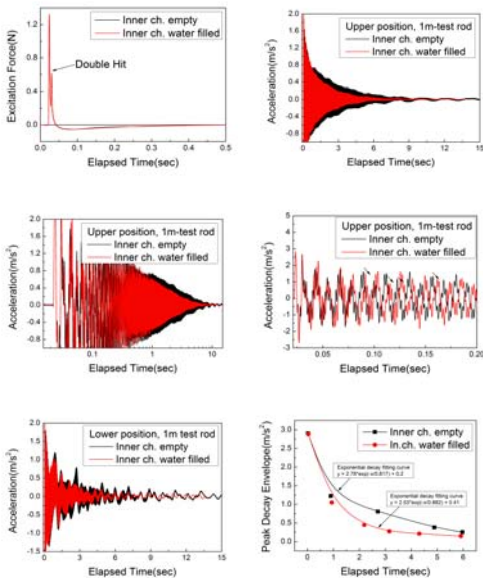


Fig. 1. Impact force, decay response 1, logarithmic response plot, detailed response plot, decay response 2, decay response envelop curves of the free-free, single-span, annular test rod with or without inner channel fluid.

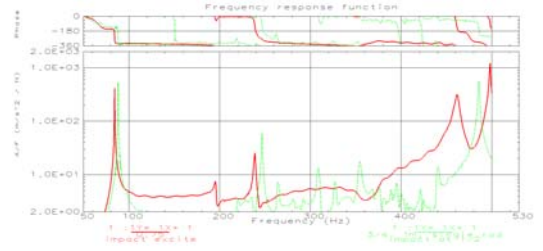


Fig. 2. FRF of annular test fuel rod with and without the inner channel fluid

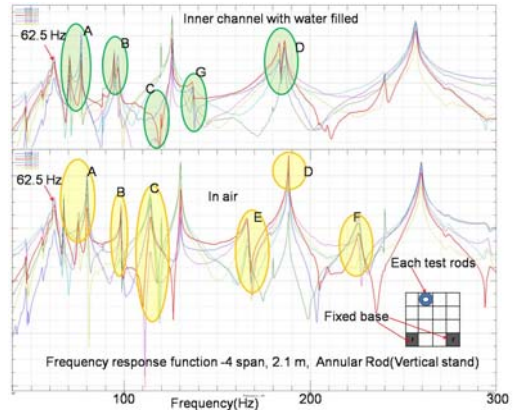


Fig. 3. FRF comparisons of multi-span annular test rod according to the inner channel fluid addition.

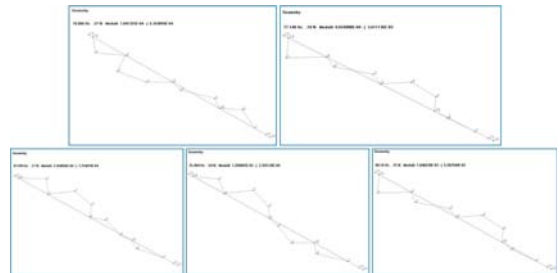


Fig. 4. Vibration mode of multi-span test rod.

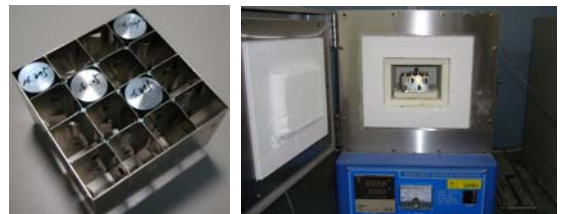
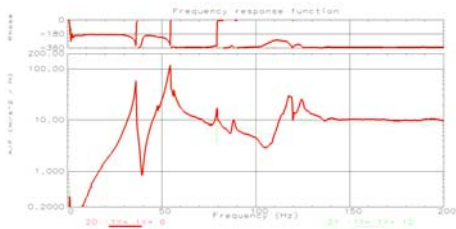
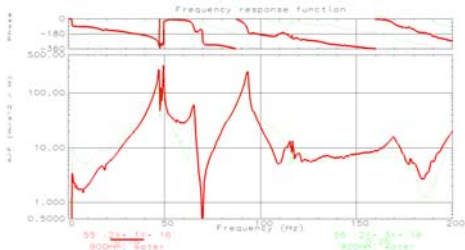


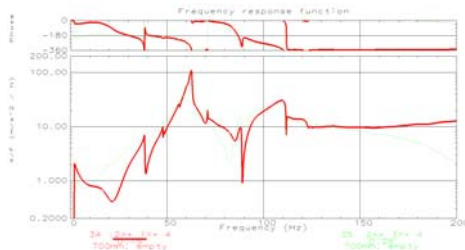
Fig. 5. Pre-sized cell clearance setting 지지격자, Baking furnace(1 hour heat up time, 3 hours steady-baking at 350 °C, 2 hours cooling in ambient air).



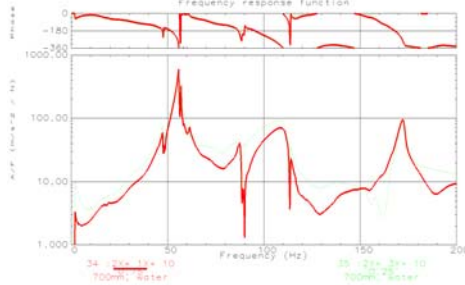
(a) empty test rod, span length 900 mm



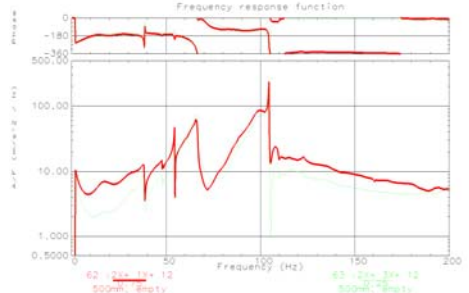
(b) water filled test rod, span length 900 mm



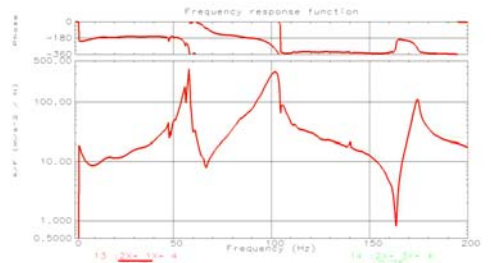
(c) empty test rod 시험봉, span length 700 mm



(d) water filled test rod, span length 700 mm



(e) empty test rod, span length 500 mm



(f) water filled test rod, span length 500 mm

Fig. 6. FRF of annular fuel test rod according to the span length