한국소음진동공학회 2009년 춘계학술대회논문집, pp.571~572

진동 테스트에 근거한 핵연료봉 모델 평가

Evaluation of a Nuclear Fuel Rod Model Based on Modal Testing Results

박 남 규† · 서 정 민* · 전 경 락*

Nam-Gyu Park, Jung-Min Suh and Kyeong-Lak Jeon

1. 서 론

원자로에 장전된 핵연료는 냉각수에 의한 영향으로 유체유발 진동이 발생한다. 냉각수는 매우 심한 난류이며, 핵연료에 장입된 연료봉과 이를 지지하는 지지격자의 상대운동으로 인하여 마모가 발생할 수 있다. 연료봉의 표면에 발생하는 마모 정도는 연료봉 표면 상태, 지지격자 스프링의 세기, 지지격자 셀 간격, 난류의 세기 등에 의해 달라질 수 있다. 연료봉은 우라늄 소결체를 일차적으로 보호하는 구조물이며, 핵연료의 전 수명기간동안 우라늄이 외부에 노출되어 방사능이 유출되지 않도록 하여야 한다. 따라서 피복관의 마모는 일정 수준 이하로 유지되어야 하며, 핵연료의 건전성 측면에서 매우 중요한 요인이다. 통상적으로 핵연료봉의 마모에 대한 건전성 확인은 실험적인 방법을 통해 수행되며, 연료봉의 동적 거동이 중요하므로 이를 예측하기 위한 여러 방법들이 시도되었다.

연료봉의 거동을 예측하기 위해서는 연료봉의 외력조건인 난류 가진력의 규명이 필요하다. 난류 가진력을 규명하기 위해서는 연료봉의 응답과 전달 특성이 먼저 규명되어야 하며, 연료봉의 동적 특성은 진동시험(modal testing)을 통해 구할 수 있다. 연료봉의 응답은 원자로 시뮬레이터내의 연료봉에 가속도계 등의 계측기를 삽입하여 측정할 수 있으며, 연료봉의 진동 특성은 진동 시험을 통해 구한 고유 진동수, 모드형상, 감쇠 등의 모드 매개변수를 이용하여 수학적 모델을 수립 할 수 있다. 이 논문은 연료봉의 수학적 모델 수립에 필요한 매개변수를 규명하기 위한 진동 테스트 결과 및 그 결과를 이용하여 개발한 연료봉의 수학적 모델에 대한 연구이다. 기존 연구의 경우, 축소된 길이의 연료봉을 이용한 시험이 수행되었으며, 이 연구는 상용 원자로에 공급되는 동일한 사양의 연료봉을 대상으로 실험을 수행하였다.

† 교신저자; 한전원자력연료㈜
E-mail : nkpark@knfc.co.kr
Tel : (042) 868-1197, Fax : (042) 868-1149
* 한전원자력연료㈜

2. 연료봉 진동 시험 및 결과

연료봉의 모달테스팅(modal testing)을 수행하기 위하여 가진기(Modal50A) 및 연료봉을 지지할 수 있는 약 4.5m 길이의 시험대를 제작하였다. 11 개의 6x6 크기의 지지격자를 시험대에 고정하였고, 납펠렛이 장입된 연료봉과 연료봉 피복관 각 1 개씩을 지지격자에 장입하였다. 현 시험시설은 방사능 물질의 취급이 허가되지 않은 시설이므로, 우라늄 소결체(pellet) 대신 납펠렛을 장입하였다. 납펠렛의 크기는 우라늄 소결체의 무게와 유사한 정도로 가공되었으며, 평균 지름은 약 7.78mm 이다. 연료봉의 외경은 9.5mm 이며, 내경은 8.35mm 이므로 연료봉과 펠렛 사이에는 약 0.57mm 의 간극이 존재한다.

11 개의 지지격자는 약 400mm 간격을 유지하고 있으며 가진기는 하부에서 6 번째와 7 번째 지지격자 사이의 중간 지점에 설치되었고, 랜덤 가진 하였다. 연료봉은 원주형 구조물이므로 가진기와 연결된 힘 측정 센서(force transducer)는 연료봉의 표면에 지그를 설치하여 센서가 안정적으로 작동하도록 하였으며, Fig.1 에 지그 위에 나사로 체결된 센서의 개략도를 도시하였다.

각 스팬의 1/4, 2/4, 3/4 지점에서 주파수 응답 함수를 측정하였다. 가진기에서 거리가 멀어질수록 약한 신호가 계측되었는데, 연료봉의 끝 지점에서 계측된 신호의 크기는 배경 잡음(background noise)과 뚜렷이 구분할 수 없는 구간이 존재하였다. Fig.2 는 측정된 신호 및 배경 잡음이다.

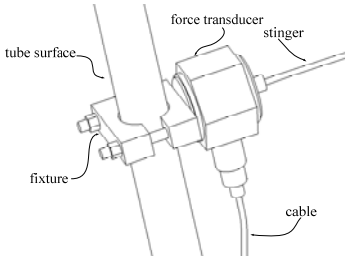

Fig. 1 Side view around the force transducer

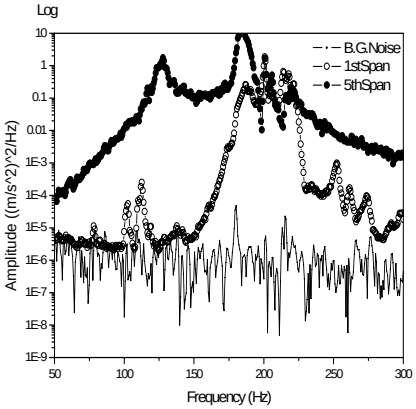

Fig.2 Measured noise and signals

전술하였듯이 납 펠렛이 장입된 연료봉은 납 펠렛과 연료봉 사이에 유격이 존재하므로 펠렛의 밀도가 연료봉 밀도에 어느 정도 기여하는지 알 수 없으므로 수학적 모델을 수립하는데 어려움이 있다. 한편 납 펠렛이 장입된 연료봉과 펠렛이 없는 연료봉 피복관은 구조물의 밀도 조건을 제외하면 모든 조건이 동일하다고 볼 수 있다. 따라서 두 구조물의 고유진동수는 밀도차이에 의한 변화가 지배적이며, 밀도는 고유진동수와 역의 관계에 있다. 또한 피복관의 밀도가 알려져 있고, 계측된 고유진동수를 이용하면 펠렛이 장입된 연료봉의 밀도를 유추할 수 있다. Table 1 은 측정된 두 구조물의 고유진동수 및 각 고유진동수의 비(ratio)이다.

Table 1 Measured natural frequencies (Hz)

Mode number	1	2	3	4
Fuel tube (Ω_t)	125	181	193	203
Fuel rod (Ω_r)	83	95	103	108
$(\Omega_t/\Omega_r)^2$	2.26	3.59	3.29	3.6

3. 연료봉 유한 요소 모델 수립 및 평가

유한요소 모델 수립에 필요한 변수는 지지격자의 강성, 연료봉 제원, 횡방향 강성(flexural rigidity) 및 밀도이다. 지지격자는 연료봉을 탄성적으로 지지하는 스프링 구조로 볼 수 있으며, 스프링의 강성은 정적인 테스트로부터 구할 수 있다. 횡방향 강성을 결정짓는 Young 계수는 펠렛의 강성에 대한 기여도가 매우 낮음을 가정하여 연료봉 피복관의 계수만을 반영하여 사용할 수 있다. 실제로 펠렛의 길이가 10mm 이내이며, 또 펠렛과 피복관 사이의 간극을 고려하면 연료봉의 휨에 대한 기여는 거의 없다고 할 수 있다. 밀도의 경우 전절에서 기술한 바와 마찬가지로 측정된 두 구조물의 고유진동수비와 피복관의 밀도를 이용하여 역산 할 수 있다. Table 2 는 제안된 방법으로 구한 연료봉의 밀도를 입력으로 한 경우의 해석결과이다. 반면 피복관의 밀도와 펠렛의 밀도를 단순히 더한 경우는 고유진동수가 과하게 예측되었음을 알 수 있다.

한편 파동의 전파 속도를 이용하여 제시한 방법으로 구한 밀도에 대한 타당성을 검증할 수 있다. 즉 굽힘 파(bending wave)가 전달되는 속도는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$c_b = \sqrt{\omega} \cdot \sqrt[4]{E\kappa^2/\rho}$$

여기서 E, ω, ρ, κ는 각각 Young 계수, 주파수(radian frequency), 밀도, 회전 반경을 뜻한다. 상기의 식으로부터 83Hz 에서 굽힘파의 속도 및 길이를 계산하면 약 713mm 이다. 이는 지지격자간 거리인 400mm 의 2 배에 약간 작은 길이이다. 83Hz 에서의 모드형상은 각 지지격자를 노드(nodal point)로 하는 굽힘 파형임을 고려하면, 상기와 같이 계산된 결과는 굽힘 파형의 형상을 설명할 수 있는 파장 거리임을 알 수 있다.

Table 2 Predicted natural frequencies (Hz)

	1st	2nd	3rd	4th
Measured	83	95	103	108
Predicted 1 *	91	103	107	116
Predicted 2 **	83	94	97	105

* : linear summation, ** : proposed

4. 결 론

이 연구에서는 핵연료봉의 진동 테스트 결과를 이용하여 핵연료봉의 거동을 구현하는데 유용한 유한요소 모델을 수립하였고 그 타당성을 검증하였다. 원자로에 장전되는 핵연료는 냉각수에 노출되어 연료봉 피복관이 진동하게 되며, 심한 경우 연료봉의 건전성에 영향을 줄 수 있다. 원자로에 장전된 핵연료는 초기에는 피복관과 펠렛 사이에 유격이 존재하여, 펠렛의 밀도가 연료봉 밀도에 기여하는 영향을 직접적으로 판단하기가 어렵다. 본 연구를 통하여 유격이 존재하는 연료봉의 밀도를 간접적으로 측정하였으며, 초기 연료봉의 운동을 예측하는데 유용한 모델을 제시할 수 있었다.

후 기

이 연구는 지식경제부가 지원하는 과제(과제번호:R-2005-1-39) 결과물의 일부이며, 저자들은 관계자 여러분께 감사 드립니다.