

핵연료집합체 고유진동수 측정불확도 추정

Measurement Uncertainty Estimation in Natural Frequency of the Nuclear Fuel Assembly

이강희† · 강홍석* · 윤경호*, 김형규*

Kang-Hee Lee, Heung-Seok Kang, Kyung-Ho Yoon and Hyung-Kyu Kim

1. 서 론

지진이나 냉각재 상실과 같은 사고조건에서도 핵연료집합체는 원자로의 정지가 가능하도록 냉각가능한 기하형상 (coolable geometry)을 유지하여야 하는데, 핵연료 제조사들은 해석적인 방법으로 이런 요건과 건전성을 판정한다. 사고 해석모델은 핵연료의 기본적인 동특성 정보를 필요로 하며, 이것은 핵연료집합체에 대한 노외 진동특성시험으로부터 획득될 수 있다. 핵연료 제조사는 진동시험결과를 기반으로 신뢰성 있는 핵연료 집합체의 해석모델을 수립할 수 있다. 핵연료 집합체의 진동특성시험은 원자로 내 핵연료의 동특성을 노외 모사조건에서 확인하기 위한 것으로, 일정한 파형과 크기의 가진력으로 핵연료 집합체를 인위적으로 가진하고, 이에 따른 응답을 측정하여 핵연료 집합체의 고유진동수와 모드형상, 그리고 감쇠비를 계산하는 것이다. 본 논문에서는 핵연료 집합체의 고유진동수를 확인하기 위한 진동특성 시험과 측정불확도 추정방법에 관하여 기술하고, 실제 핵연료집합체 시료를 이용한 불확도 추정 사례를 소개한다.

2. 시험방법과 동특성확인

시험용 핵연료집합체를 경계조건에 따라 시험시설에 설치하고, 가진기와 변위측정용 Linear gauge를 각각의 bracket에 연결·고정한 후, 주파수 변동되는 가진력을 일정한 크기로 유지·작용시키면서 핵연료 집합체의 동적응답을 측정한다. Fig.1은 핵연료 집합체 진동특성 시험중 가진부를 나타낸다. 기록된 변위응답과 가진력을 후처리하여 주파수 응답 함수를 얻고, 모달분석을 통하여 주파수특성, 모드형상, 감쇠비를 얻는다. 후처리과정에서 확인된 고유진동수로 구조물을 가진하여, 집합체의 공진 모드형상을 얻는다(Resonant dwell testing). 시험 집합체의 1차 진동모드에 대응되는 임계 감쇠비를 획득하기 위하여, 집합체를 초기 변위시키고 순간적으로 해중(release)시켜 잔류진동이력을 측정한다

(Pluck testing). 집합체의 경계조건은 축방향 하중인가 및 양단 지지와 외팔지지(자유 직립)의 두 가지를 적용한다.



Fig. 1 Vibration Test Setup(Excitation).

3. 불확도 추정 방법과 사례

3.1 불확도 추정방법

핵연료 집합체의 고유진동수에 대한 불확도 추정은 경계조건 적용, 신호의 측정과 교정, 데이터 저장과 관련된 오차를 포함하여, 신호처리 과정과 후처리 분석에서 적용된 가정에 따른 추정의 한계와 발생가능한 오차를 모두 포함해야 한다. 그러나 오차발생요인과 측정결과인 고유진동수 사이의 함수관계를 정의하기 어렵고 감도계수의 산정이 불가능하기 때문에, 단일 요인들에 대한 불확도를 기초변수의 측정에 따른 불확도와 고유진동수 추정에 따른 불확도로 구분하고, 이들의 기여도를 같은 값으로 정규화하여, 이들을 합성한 후, 최종적인 측정불확도를 아래와 같이 계산하고자 한다. Table 1은 각각 불확도 추정절차와 불확도 요인 및 유형에 따른 분류를 나타낸다. A형 불확도는 반복측정에 의한 불확도를 나타내며, n번 측정된 결과의 평균과 분산, 표준편차를 계산하고, 식(1)과 같이 표준불확도를 계산한다. 단, 자유도는 측정수(n)의 -1 한 값이다. 식(1)에서 s, q은 각각 표준편차, 측정량을 의미한다. B 불확도는 교정과정을 통해 얻어진 장비의 표준 불확도를 의미하며, 불확도 요인의 확률분포 특성에 따라 일정한 형태의 분포유형을 가정하고, 교정서에 제시된 오차범위나 표준편차를 분할수(divider, m)로 나누어 식 (2)과 같이 계산한다. 자유도는 무한대로 보는데, 이것은 무수히 많은 시험에 통해서 얻어진

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

결과로 보는 것이다. 식(2)에서, m은 직사각형 분포인 경우 $\sqrt{3}$, 삼각형 분포인 경우 $\sqrt{6}$ 이 된다. 합성 불확도와 자유도는 개별적인 불확도 요인들에 대한 표준불확도와 감도 계수를 이용하여, 식 (3)와 (4)과 같이 계산된다.

Table 1. 불확도 추정절차(상), 불확도 요인과 유형(하)

불확도요인 추정 및 유형결정 → 표준불확도 계산 → 합성불확도 계산 → 확장불확도 산출 및 불확도 표현		
대분류(요인)	소분류(요인)	유형
응답변위 추정	변위센서	B
	교정기 불확도	B
	데이터 변환 및 저장장치	B
가진력 측정	가진력 센서	B
	교정기 불확도	B
	데이터 변환 및 저장장치	B
	가진장치 설치 조건에 따른 불확도	A
고유진동수 추정	FFT 변환기 신호처리 오차	B
	Peak 주파수 반복선택에 따른 요인	A

식 (3)과 (4)에서 c 는 감도계수를 나타내는데, 불확도 요인들과 측정량 사이의 함수관계를 수학적으로 기술하거나 실험적으로 규명하기 어려운 관계로 감도계수는 1로 가정한다. 최종적으로, 확장 불확도는 합성표준 불확도와 포함인자(k)를 곱하여 식(5)과 같이 계산된다. 포함인자는 유효 자유도와 신뢰도 수준(95%)에 따라, student t분포 표에서 값을 선택하여 사용하지만, 유효 자유도가 10 이상이 되면, 통상 2를 사용한다. 끝으로, 측정값에 대한 표현은 “[측정값]±(확장불확도) (신뢰수준 약 95%, k=2)”로 표현한다.

$$u_A(x_i) = \frac{s(q_k)}{\sqrt{(n)}} , u_B(x_i) = \frac{s(q_k)}{m} \quad (1), (2)$$

$$u_c(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^k (c_i u(x_i))^2} = \sqrt{\sum_{i=1}^k (u_i)^2} \quad (3)$$

$$\nu_{eff} = \frac{u_c(y)^4}{\sum_{i=1}^k (c_i u(x_i))^4 / \nu_i} = \frac{u_c(y)^4}{\sum_{i=1}^k (u_i)^4 / \nu_i} \quad (4)$$

$$U = u_c \times k \quad (5)$$

3.2 불확도 추정사례

(1) 변위응답 측정에 따른 불확도

Descriptions	u_i (mm)
변위센서, B형, 직사각형 분포, 0.09 % 측정 오차	0.01299
교정기 불확도, B형, 직사각형 분포, 0.003 % of reading(full span 25mm)	0.000433
데이터 변환 및 저장장치, B형, 직사각형 분포, 0.1 % of reading	0.0144

※ 변위 측정에 따른 합성 표준 불확도(%) : 0.00775 %

(2) 입력 가진력 측정에 따른 불확도

Descriptions	u_i (N)
가진력센서, B형, 직사각형, 0.2%오차	0.116
교정기 불확도, B형, 직사각형 분포, 0.003 % of reading	0.00172
데이터 변환 및 저장장치, B형, 직사각형 분포, 0.1 % of reading	0.0578
가진장치 설치조건 및 반복측정에 따른 요인, A형, 동일한 가진력(20 N)에 대하여, 반복 측정된 rms값을 읽음. 총 10회 반복측정(평균: 20.23N, 표준편차: 0.4855)	0.154

※ 가진력 측정에 따른 합성 표준불확도(%) : 0.201 %

(3) 고유진동수 Peak 측정에 따른 불확도

Descriptions	u_i (Hz)
FFT변환에 따른 불확도, B형, 직사각형, 0.1% of FFT	0.0578
고유진동수 Peak 반복측정에 따른 불확도, A형, 독립적인 시험수행으로부터 추정된 각 시험의 모드별 측정 평균과 표준편차로부터 계산함. $u = s/\sqrt{n}^{1/2}$, n : 시험반복회수	0.000433

Table 2 고유진동수 모드별 표준불확도 추정결과

N	1회	2회	3회	4회	5회	ave. (Hz)	s_i (Hz)	u_i (%)
1	3.645	3.612	3.580	3.608	3.668	3.629	0.0233	0.288
2	8.652	8.720	8.693	8.618	8.679	8.686	0.0481	0.248
3	13.47	13.536	13.402	13.432	13.495	13.469	0.0670	0.222
4	19.303	19.371	19.342	19.37	19.331	19.339	0.0341	0.079
5	25.143	25.107	25.076	25.105	25.169	25.125	0.0255	0.045

(4) 고유진동수 측정결과 및 불확도 표현

Mode	평균(Hz)	확장불확도(%)	불확도 표현
1	3.629	0.800	(3.629 ± 0.029) Hz
2	8.686	0.688	(8.686 ± 0.060) Hz
3	13.469	0.618	(13.469 ± 0.083) Hz
4	19.339	0.219	(19.339 ± 0.042) Hz
5	25.125	0.126	(25.125 ± 0.032) H

단, 신뢰도 수준 95%, k=2.78

4. 결론

본 논문에서는 핵연료 집합체의 고유진동수를 확인하기 위한 진동특성 시험과 측정불확도 추정방법에 관하여 기술하고, 실제 핵연료집합체 시료를 이용한 불확도 추정 사례를 소개하였다. 사고해석모델과 해석결과의 신뢰성은 실험적으로 결정된 동특성 자료의 정확도에 의존하게 되므로, 측정불확도 저감을 위한 노력이 필요하다.

후 기

이 논문은 교육과학기술부의 재원으로 시행하는 한국과학재단의 원자력기술개발사업으로 지원받았습니다(연구과제 관리 코드: M20706020005-08M0602-00510).