

CANFLEX 연료봉 다발의 진동특성

박진석, 정장환

한국원자력연구소

요 약

CANFLEX 연료봉 다발을 구성하는 우라늄 펠릿이 장전된 핵연료봉의 공기중 진동특성을 진동 실험과 유한요소 해석을 통하여 구하였다. 유한요소 해석 시에는 우라늄 펠릿의 강성은 무시하고 질량은 지르칼로이 튜브에 부가하며, 연료봉 양단의 용접부위를 단순 지지보로 처리하는 모델을 제시하였다. 이 모델로부터 얻은 해석결과를 진동실험에서 구한 측정값과 비교하였다.

1. 서론

600 MWe 중수형 원자로에는 37봉 핵연료 다발(CANDU 6 reference bundle) 12 개가 수평으로 설치된 압력관 내에 장전된다. 압력관 내부에는 연료봉다발 사이를 지나가는 일차 냉각재의 온도는 약 310 ° C 이며 유속은 압력관에 따라 다르나 최대 유속이 발생하는 곳에서 약 10.5 m/s 에 달하게 된다. 즉 연료봉 다발에 장전된 압력관 내에 흐르는 일차 냉각재의 평행류(parallel flow)로 인해 유체유발진동(flow induced vibration)이 생기며 이로 인해 연료봉 스페이스(spacer) 사이의 마모(wear) 및 연료봉 다발의 베어링 패드(bearing pad)와 압력관 사이의 마손을 일으키는 원인이 된다.

Stewart[1]는 Darlington 발전소에서 일어난 핵연료다발의 파손사고와 베어링 패드의 과도한 마모의 발생요인은 일차 열전달 계통 펌프(primary heat transport system pump) 블레이드(blade)를 통과하는 압력파(pressure pulsation)의 주파수가 일차 열전달 계통내의 복잡한 파이프 부품들에 의해 생기는 acoustic 공진으로 판단했으며, 펌프 블레이드의 개수를 5 에서 7 로 바꾸어 실험을 해 본 결과 핵연료 다발의 종운동(axial motion)과 횡운동(transverse motion)의 진폭이 10 배 이상 감소했다는 결과를 발표했다. Smith[2]는 공기와 물이 혼합된 이상유동(two-phase flow)의 축류(axial flow) 내에 있는 43개의 연료봉으로 구성된 CANFLEX의 연료봉(fuel rod)에 대한 진동시험을 수행하였다. 이 실험에서 실제 핵연료 다발 대신에 5개의 연료봉을 모사 하여 그 내부에 있는 1개의 연료봉에서는 CANFLEX 다발의 연료봉이 겪는 동일한 유동조건에서 진동 측정실험을 수행하였다. 그 결과 같은 유동조건에서 CANFLEX 핵연료의 연료봉 진폭이 37봉 핵연료 다발의 연료봉 진폭보다 크다는 보고를 하였다.

한국원자력연구소와 캐나다 원자력공사의 국제 공동연구를 통하여 37봉 핵연료 다발보다 운전 여유도 증가, 임계채널 출력증가, 연료봉의 선 출력 감소, 사용 후 핵연료 부피감소 등의 장점을

가지고 있는 중수로용 개량핵연료인 CANFLEX bundle을 개발하고 있다. CANFLEX 핵연료 다발의 유체유발 진동실험을 현재 원자력연구소의 열유동 연구시설(hot test loop facility)에서 수행되고 있다. 장차 국내에서 개발된 CANFLEX 핵연료 다발을 노내에 장전하기 위해서는 원자로의 압력관과 연료봉의 마모 발생 원인이 되는 핵연료 다발의 진동특성에 대한 연구가 선행되어야 한다. 본 실험에서는 43개의 핵연료 다발의 연료봉에 대한 고유 진동수를 공기중에서 측정하였으며, 유한요소 해석으로 구할 수 있는 모델링을 제시하였다.

2. 핵연료 다발의 고유진동수

CANFLEX 핵연료 다발은 표 1과 같이 두 종류의 연료봉($\varnothing 11.5$ mm, $\varnothing 13.5$ mm)으로 구성되어 있다. 연료봉 진동특성은 공기중과 물 속에서 각각 다르며, 본 연구에서는 먼저 공기중의 진동특성을 진동실험과 유한요소 해석법으로 구하여 비교하였다. 그리고 연료봉은 지르칼로이(zircaloy) 튜브와 그 내부에 장착된 우라늄 펠릿(pellet)으로 구성되기 때문에 펠릿이 장착되지 않은 튜브의 고유 진동수와 연료봉(펠릿이 장착된 튜브)의 경우에 대하여 진동특성을 각각 구하였다. 연료봉의 고유 진동수를 구하기 위한 유한요소 해석 모델과 진동 측정 실험은 다음과 같다.

(1) 유한요소 해석 모델

유한요소 해석 프로그램은 ANSYS를 사용하였으며 beam4 요소로 연료봉을 모델링 하였다. 이때 사용된 요소 개수는 17 개이다. 연료봉의 재료(zircaloy-4) 물성치는 다음과 같다.

탄성계수 (Young's modulus) : 97 GPa

포아송비 (Poisson's ratio) : 0.36

밀 도 (Density) : 6670 kg/m³

Beam4 요소의 입력자료는 재료의 물성치와 요소 형상에 따라 달라지는 면적, 관성모멘트가 입력되며, 연료봉에는 베어링 패드가 있는 부분과 없는 부분으로 나누어진다. 유한요소 해석으로 구조물의 고유 진동수를 구할 때 경계조건에 따라 실험에서 구한 값과 많은 차이를 나타낸다. 특히 연료봉의 양단은 양단 접합판(end support plate)에 저항용접으로 고정되며, 연료봉이 진동할 때 양단 접합판도 같이 진동하기 때문에 유한요소 해석시 연료봉 양단 각 지지점에서 변위는 고정하고 회전을 허용하는 단순지지보의 경계조건을 적용하였다. $\varnothing 11.5$ mm 연료봉에서 축방향을 x-방향이라 할 때 베어링 패드가 없는 곳과 있는 곳에서의 y-방향 및 z-방향 관성모멘트를 구분하여 입력하였다(표 2 참조). 그리고 $\varnothing 13.5$ mm의 연료봉도 마찬가지로 베어링 패드의 유무에 따라 다른 관성모멘트를 입력하였다. 연료봉 내에 있는 펠릿은 연료봉이 진동할 때 튜브와 함께 운동함으로써 펠릿의 모든 질량을 연료봉에 부가하여야 하지만 펠릿 자신은 굽힘강성을 가지지 않기 때문에 펠릿이 연료봉에 미치는 강성은 무시하였다.

(2) 연료봉의 진동신호 측정

진동신호 측정용 연료봉 다발을 제작하여 지르칼로이 튜브와 연료봉의 진동신호를 측정하

였다. 연료봉의 표면은 원형이고 가속도계(B&K 4375)의 표면은 평면이기 때문에 가속도계를 직접 연료봉 표면에 부착할 수 없으므로 가속도계 부착을 위한 마운트를 제작하였다. 그리고 CANFLEX 연료봉 다발의 $\varnothing 13.5$ mm 연료봉은 $\varnothing 11.5$ mm 연료봉으로 둘러쌓여 있어 가속도계를 부착할 수 없기 때문에 가속도계를 부착할 수 있는 있는 실험용 연료봉 다발을 별도로 제작하여 진동신호를 측정하였다. 연료봉 표면에 가속도계를 부착한 후 연료봉에 충격 가진으로 연료봉에 발생하는 진동신호는 신호처리용 보오드(DT3801-G)를 내장한 퍼스널 컴퓨터로 입력하여 실시간(real time) 기록하고 신호 분석은 PDAAS를 사용하였다. 지르칼로이 튜브의 진동신호 측정은 1.6 kHz의 주파수 범위 내에서 5 번 평균하였고 연료봉의 진동신호는 펠릿의 질량부가로 고유진동수가 낮아지므로 400 Hz의 주파수 범위 내에서 5 번 평균하여 진동신호를 채집하였다. 신호처리용 보오드로 진동신호를 시간 축에 따른 가속도의 변화 기록과 이 신호를 FFT(fast fourier transformation)처리하여 고유진동수를 측정하였으며, 기록되는 신호의 신뢰성을 나타내는 coherence를 기록하였다.

3. 연료봉의 고유 진동수 측정 결과 및 고찰

연료봉 및 지르칼로이 튜브의 고유 진동수는 유한요소 해석과 진동실험을 통해서 구하였으며, 작은 직경($\varnothing 11.5$ mm)과 큰 직경($\varnothing 13.5$ mm) 각각의 경우로 나누어 고유 진동수를 구하였다. 지르칼로이 튜브의 고유 진동수 측정을 위한 유한요소 모델 설정시 양단의 경계조건은 단순지지보로 하였으며 그 해석결과는 진동시험에서 구한 값과 매우 잘 일치하였다(표 3, 표 4 참조). 특히 저차 고유 진동수가 경계조건에 민감하다는 사실을 고려할 때 유한요소 해석에서 구한 1 차 고유진동수(ω_1)는 96 Hz로 실험에서 얻어진 94 Hz와 매우 근접한 것은 단순지지보로 모델링한 것이 잘 설정되었음을 말한다. 연료봉의 고유 진동수를 구하기 위한 유한요소 모델 설정시 연료봉 내에 장전된 펠릿의 질량은 지르칼로이 튜브에 부가하고 펠릿의 강성은 무시하였다. 이 유한요소 모델로 구한 ω_1 은 실험에서 구한 ω_1 과 잘 일치하였다. 그러므로 펠릿의 질량은 지르칼로이 튜브에 부가하고 강성은 무시한 유한요소 모델이 잘 설정 된 것임을 나타낸다.

그림 1과 그림 2는 각각 작은 직경과 큰 직경 지르칼로이 튜브의 시간 축에 따른 진동신호 형태와 주파수 응답 함수를 나타낸다. 진동실험에서 구한 $\varnothing 11.5$ mm 연료봉의 고유 진동수를 저차 순서대로 나열하면, 29 Hz, 109 Hz 이고 $\varnothing 13.5$ mm 연료봉은 36 Hz, 129 Hz 그리고 267 Hz 이었다(표 3 참조). 그림 3과 그림 4는 진동실험에서 구한 $\varnothing 11.5$ mm 연료봉과 $\varnothing 13.5$ mm 연료봉의 시간 축에 따른 진동신호 형태와 주파수 응답 함수를 보여주고 있다. 그림 5는 지르칼로이 튜브와 연료봉의 고유 진동수 변화를 나타낸다. 유한요소 해석으로 구한 연료봉의 ω_1 은 27 Hz로, 실험에서 구한 값과는 7 % 정도 낮게 예측되었다(표 4 참조). 이와 마찬가지로 진동실험에서 구한 $\varnothing 13.5$ mm 연료봉의 고유 진동수를 저차 순서대로 나열하면, 36 Hz, 129 Hz 그리고

267 Hz 이었고 유한요소 해석으로 구한 ω_1 은 30 Hz로 실험에서 얻어진 것 보다 17 % 정도 낮게 예측되었다. 그러나 작은 직경과 큰 직경 연료봉의 2 차 고유 진동수(ω_2)는 모두 5 % 이내의 예측 범위 내에 있다.

4. 결론

연료봉의 진동실험을 통하여 CANFLEX 핵연료 다발의 진동해석에서는 지르칼로이 튜브 내에 장전된 펠릿의 강성은 무시하고 질량은 지르칼로이 튜브에 부가하였으며, 연료봉의 양단을 단순지지로 하는 유한요소 해석 모델은 진동 실험결과를 비교적 잘 예측하였다. 직경이 11.5mm 연료봉인 경우 ω_1 은 실험에서 구한 값의 7% 정도 오차가 있으나 ω_2 는 1% 정도의 오차가 있고 직경이 13.5mm 연료봉인 경우 ω_1 은 실험에서 구한 값의 약 17% 정도 오차가 있으나 ω_2 는 5% 정도의 오차가 있었다. 제시된 유한요소 모델에 유체로 인한 부가질량을 고려하여 수중에 있는 연료봉의 고유진동수를 예측하는데 이용할 수 있으며, 연료봉의 수중 진동실험으로 구한 고유진동수와 비교할 수 있을 것으로 기대된다.

References.

1. W. B. Stewart, "Darlington Fuel Damage Investigation," CNS Bulletin B [3] , 1992 Fall.
2. B. A. W Smith "Vibration Behaviour of CANFLEX Fuel Element in Axial Air/Water Flow," CANFLEX-048, AECL/KAERI proprietary, August, 1994.
3. Donald L. Hagrman et al., "MATPRO-Version II, A Handbook of Materials Properties for Use in the Analysis of Light Water Reactor Fuel Behavior,' NUREG/CR-0479, EG&G Idaho, Inc., 1981.

Table 1 Moment of Inertia

Fuel Rod	Location at Circular Tube		Location at Bearing Pad	
	I _y	I _z	I _y	I _z
∅ 11.5 mm	$180 \times 10^{-12} \text{ m}^4$	$180 \times 10^{-12} \text{ m}^4$	$182 \times 10^{-12} \text{ m}^4$	$313 \times 10^{-12} \text{ m}^4$
∅ 13.5 mm	$321 \times 10^{-12} \text{ m}^4$	$321 \times 10^{-12} \text{ m}^4$	$323 \times 10^{-12} \text{ m}^4$	$499 \times 10^{-12} \text{ m}^4$

Table 2 Characteristics of CANFLEX Fuel Bundle

	Weight of Tube	Weight of UO ₂	NO.	Total Weight
∅ 11.5 mm Fuel Rod	44.56 g	0.45 kg	35	17.31 kg
∅ 13.5 mm Fuel Rod	56.4 g	0.64 kg	8	5.57 kg
43 Fuel Bundle	2.01 kg	20.87 kg	1	22.88 kg

Table 3 Natural Frequency of Fuel Rod(∅ 11.5 mm)

Mode	ω_n (Tube)		ω_n (Tube + Pellet)	
	Experiment	FEM	Experiment	FEM
1	94	96	29	27
2	364	386	109	108
3	836	850	×	237
4	1408	1520	×	424

Table 4 Natural Frequency of Fuel Rod(∅ 13.5 mm)

Mode	ω_n (Tube)		ω_n (Tube + Pellet)	
	Experiment	FEM	Experiment	FEM
1	110	113	36	30
2	431	456	129	122
3	954	1007	267	270
4	×	1796	×	481

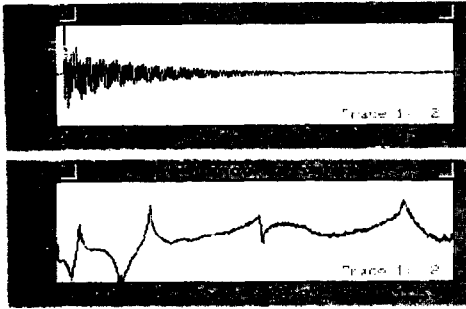


Fig. 1 Time Signal and Frequency Response Function of Zircaloy Tube(ϕ 11.5 mm)

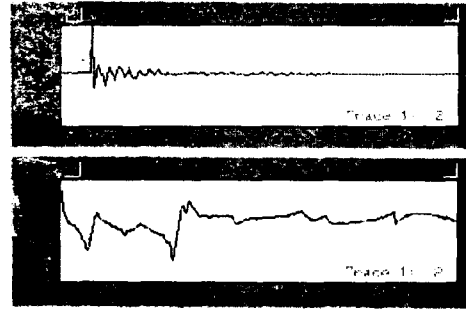


Fig 4 Time Signal and Frequency Response Function of Fuel Rod(ϕ 13.5 mm)

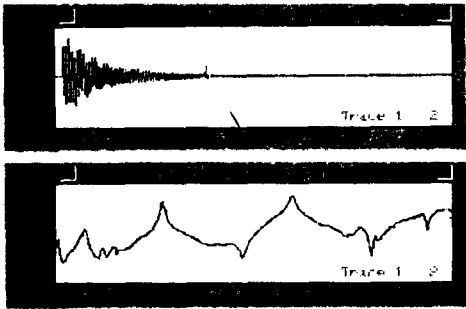


Fig 2. Time Signal and Frequency Response Function of Zircaloy Tube(ϕ 13.5 mm)

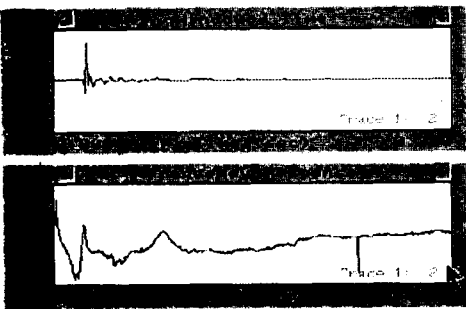


Fig 3 Time Signal and Frequency Response Function of Fuel Rod(ϕ 11.5 mm)

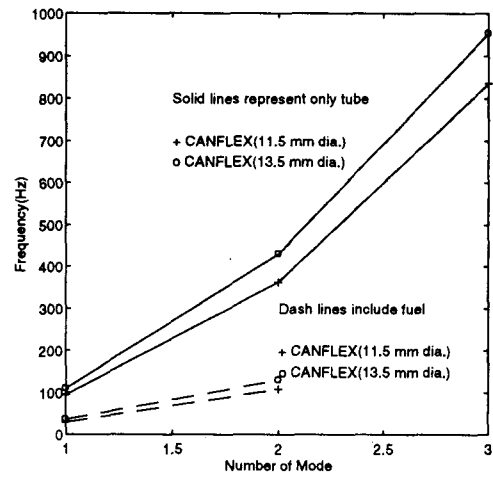


Fig. 5 Natural Frequency of ϕ 11.5 mm and ϕ 13.5 mm