

경수로 핵연료집합체의 모드해석 및 유동시험 평가

전상윤, 김용환, 전경락, 김재원
한국원전연료주식회사

요 약

최근 경수로 핵연료 손상 원인 중의 하나인 연료봉 마모(Fretting Wear)가 지지격자의 스프링력 저하뿐만 아니라 원자로 냉각재 유동에 기인한 집합체 진동(Self-excited Fuel Assembly Vibration)에 의해 유발될 수 있는 것으로 밝혀져 해외 연료공급자들은 새로운 연료개발시 집합체 유동시험을 수행하여 냉각재 유동에 의한 집합체 진동 여부를 확인하고 있다. 본 연구에서는 경수로 핵연료집합체에 대한 모드해석 및 진동시험으로부터 고 유진동수 및 진동모드형태를 구하여 모의 집합체 유동시험 결과와 비교 평가하였고 냉각재 유동에 의해 과도한 집합체 진동이 발생됨을 확인하였으며 가연성흡수봉집합체를 삽입한 경우에 대한 유동시험 결과와도 비교하였다. 또한, 이들 집합체의 진동 변위량과 손상 연료의 마모량 분포의 상관성을 비교 평가하였다.

1. 서 론

최근 일부 경수로 원전에서 지지격자와 연료봉의 프레팅 마모에 기인한 연료봉 손상이 발생하고 있어 이에 대한 연구가 국내외에서 진행 중이다[1,2,3,4]. 국내 고리 2호기에서 발생한 연료 손상의 원인규명을 위해 소내저장조검사(PSE)가 수행되었으며 손상의 원인은 지지격자와 연료봉의 프레팅 마모인 것으로 확인되었다[5]. 연료봉 마모 손상의 근본원인으로는 크게 초기 스프링력 미달, 중성자 조사에 의한 스프링력 이완 또는 피복관 크립에 의한 스프링력 저하 등과 같은 지지격자 스프링의 지지력 문제와 냉각재 유동에 의한 연료봉 또는 집합체 진동 유발의 문제로 나눌 수 있다. 고리 2호기와 유사한 브라질의 Angra 발전소에서도 연료 손상 발생 후 지지격자 스프링력을 강화하였으나 2주기 연소 중 다시 손상 징후가 발견되어 연료 손상의 근본원인은 지지격자 스프링의 지지력 문제가 아닌 것으로 판단된다. 더욱이 웨스팅하우스의 설계 방법론에 의하면 주로 상하단 지지격자가 연료봉을 지지하며 중간 지지격자에서는 스프링과 연료봉이 접촉하는 정도만 요구된다. 따라서, 고리 2호기 연료인 16X16 JDFA(Joint Design Fuel Assembly)에서 냉각재 유동에 기인하는 집합체 진동이 발생하는지 여부를 확인하기 위하여 감손 우려높이 장전된 모의 핵연료집합체에 대한 집합체 유동시험을 수행하였다[6].

2. 집합체 모델 및 모드해석

고리 2호기 연료인 16X16 JDFA는 상,하단고정체, 20개의 안내관과 1개의 계측관, 8개의 지지격자, 그리고 235개의 연료봉 등으로 구성되어 있으며 주요 제원은 표 1에 나타내었다. 모드해석을 위하여 298개의 절점과 258개의 요소를 갖는 2차원 격자로 구성된 집합체 모델을 생산하였다. 집합체 모델은 집합체의 동특성을 모사할 수 있도록 상,하단 고정체, 안내관, 연료봉, 지지격자 그리고 지지격자 슬리브 등은 2차원 보요소를 이용하여 구성하였으며 지지격자 스프링과 덤플은 각각 1차원 슬라이드요소와 2차원 마찰요소

를 이용하여 구성하였다. 집합체 모드해석은 웨스팅하우스의 범용 유한요소해석 프로그램인 WECAN[7]을 이용하였으며 집합체 모델에 대한 집합체의 고유진동수와 진동모드형태를 구하였다. 집합체 모드해석은 냉각재 온도가 70°F와 600°F인 경우, 그리고 시험온도인 250°F에 대하여 각각 수행하였으며 발전소 운전주기를 고려하여 집합체 지지격자 스프링력을 주기초 스프링력과 주기말 스프링력으로 구분하여 수행하였다.

앞에서 설명한 각 노심조건에서의 16X16 JDFA의 2차원 집합체 모델에 대한 모드해석을 수행하여 구한 진동모드별 고유진동수를 표 2에 요약하였으며 16X16 STD에 대한 공기 중에서의 진동시험 결과로부터 구한 고유진동수와 비교하였다. 그림 1에는 16X16 JDFA 및 16X16 STD에 대한 각 진동모드형태를 비교하였다. 표 2와 그림 1에서 보인 시험값은 16X16 JDFA 연료와 구조적으로 거의 동일한 연료인 웨스팅하우스 16X16 STD 연료에 대한 진동시험 결과로서 모드별 집합체 고유진동수와 진동모드형태는 유사하게 나타났다. 각 진동모드에서 집합체의 변위형태는 상,하단고정체와 근접해 있는 상,하부 지지격자에 해당하는 절점들의 변위는 거의 없으며 중간 지지격자에 해당되는 절점들이 주요 진동모드를 형성하고 있으며, 특히 모드 6에서 각 절점이 서로 반대 방향의 변위를 가지는 특유의 진동모드형태를 보인다. 한편, 모드해석 결과 생산된 집합체 진동모드형태는 유동시험에서 집합체의 전 진동모드를 감지하고 상대적으로 큰 변위를 측정할 수 있도록 지지격자 변위 측정 위치를 설정하는데 이용되었다. 노심조건(600°F, EOL)에서의 해석 결과로부터 얻은 집합체 진동수와 시험조건에서의 집합체 진동수의 비는 시험조건과 원자로 운전조건에서의 집합체 진동특성 차이를 보정하기 위한 값으로서 집합체 유동시험 결과 평가를 위한 노심유량과 시험유량에 대한 보정인자로 사용되었다.

3. 집합체 유동시험

고리 2호기 손상연료에 대한 원인규명을 위해 수행된 소내저장조검사(PSE) 결과, 고리 2호기 연료의 연료봉 손상은 중간 지지격자 위치에서의 지지격자와 연료봉의 프레팅 마모로 확인되었으며 근본 원인이 냉각재 유동에 의한 집합체 진동에 기인한 것으로 추정됨에 따라 16X16 JDFA의 집합체 진동 여부를 확인하기 위하여 집합체 유동시험을 수행하였다. 집합체 유동시험은 집합체의 노내 상태를 잘 모사할 수 있도록 하우징을 제작하여 유량을 원진 정상운전 범위를 포함하는 800 gpm에서 2,250 gpm까지 증가시키면서 수행하였으며 냉각재 온도는 250°F를 유지하였다. 시험 온도와 노내 온도의 차이, 시험조건과 노심조건에서의 집합체 진동특성 차이, 그리고 노심조건과 시험조건에서의 집합체 간격 차이 등을 보정하기 위하여 집합체 모드해석 결과 등을 이용하여 시험유량을 보상하였다. 그리고, 집합체 모드해석 결과로부터 전 진동모드를 감지할 수 있도록 하기 위하여 그림 2에서와 같이 3, 4, 5번 지지격자 위치의 0° 면 및 270° 면에 각각 2개씩의 Fiber Optic Probe를 장착하여 집합체 진동변위를 측정하였다[6].

그림 3은 16X16 JDFA에 대한 집합체 유동시험 결과 중 4번 Probe 위치에서의 유량에 따른 진폭을 나타낸다. 그림에서 보면 진동수 27 Hz 부근의 특정 유량 범위에서 과도한 진폭의 진동이 발생되고 있음을 알 수 있으며 보정계수를 이용하여 유량을 보상하였을 때 원자로 정상 운전시의 유량 1,686 gpm에 해당하는 시험유량 1,916 gpm에서 거의 최대 진폭을 이루고 있다. 또한, 댐퍼가 집합체 진동에 미치는 영향을 알아 보기 위하여 16X16 JDFA에 12개의 봉으로 구성된 가연성 흡수봉 집합체(PYREX)를 삽입하여 집합체 유동시험을 수행하였다. 그림 4에서 보는 바와 같이, 동일한 시험조건에서 댐퍼가 없는 그림 3의 경우와 비교하여 진폭이 현저하게 감소하고 최대 진폭에 해당하는 진동수도 약간 감소하여 댐퍼가 냉각재 유동에 의해 유발되는 집합체 진동을 상당히 약화시켰으나

16X16 STD의 경우와 비교하면 여전히 진동이 존재함을 알 수 있다.

4. 결과 평가

가. 집합체 고유 진동수 및 변위 형태

16X16 JDFA에 대한 집합체 모드해석 및 유동시험 결과, 진동수 27 Hz 부근의 특정 유량 범위에서 과도한 진폭의 진동이 발생되어 냉각재 유동이 모드 6에 해당하는 집합체 진동을 유발하는 것으로 추정된다. 그림 5에는 16X16 JDFA, 가연성 흡수봉 집합체를 삽입한 16X16 JDFA, 16X16 STD 각각에 대한 집합체 유동시험에서 그림 2의 각 Probe 위치에서 측정된 최대 진폭과 16X16 JDFA의 모드해석 결과로부터 얻은 모드 6에 해당하는 진동변위를 비교하였다. 유동시험에서 16X16 JDFA의 지지격자 3, 4, 5번 위치에서 측정된 최대 진폭들과 모드해석에서 얻어진 진동변위가 유사한 경향을 보이고 있으며 가연성 흡수봉 집합체를 삽입한 16X16 JDFA의 경우 각 위치에서의 진동변위형태는 비슷하나 진폭이 약 20% 수준으로 감소하였으며 16X16 STD의 경우는 거의 진동이 발생하지 않았다. 가연성흡수봉집합체를 삽입한 16X16 JDFA의 경우 진동변위형태는 유사하지만 가연성흡수봉집합체에 의한 집합체 진동특성 변화와 감쇄효과에 의해 집합체 진동이 매우 약화된 것으로 보이며 발전소 유량에 해당하는 시험유량인 1,916 gpm 에서는 16X16 STD 연료와 마찬가지로 집합체 진동이 발생되지 않았다.

나. 집합체 진동과 연료봉 마모

집합체 진동과 연료봉 마모와의 상관관계를 알아보기 위하여 집합체 모드해석과 집합체 유동시험에서 나타난 진동변위형태, 그리고 고리 2호기 손상 연료에 대한 소내저장조 검사 결과 얻어진 연료봉 마모량 분포를 비교하였다. 그림 5에 고리 2호기 손상연료의 지지격자 위치별 연료봉 마모량 분포와 집합체 모드 6에 해당하는 집합체 진동변위, 그리고 유동시험에서 측정된 진폭을 나타내었다. 그림에서 지지격자 3,4,5 위치에서의 연료봉 마모량 분포와 모드해석으로부터의 진동변위, 그리고 유동시험에서 측정한 진폭 등의 분포가 유사한 경향을 보이고 있음을 알 수 있다. 한편, 집합체 유동시험에서 냉각재 유동에 의한 진동변위가 그림 2의 진동변위 측정 면 중에서 한쪽 방향으로만 발생하였는데 이는 16X16 JDFA의 중간 지지격자 혼합날개의 방향성에 기인한 것으로 생각된다.

5. 결 론

16X16 JDFA, 가연성 흡수봉 집합체(PYREX)를 삽입한 16X16 JDFA 및 웨스팅하우스의 16X16 STD에 대한 집합체 유동시험 및 모드해석으로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 16X16 JDFA에 대한 모드해석 및 집합체 유동시험에서 얻어진 진폭과 손상 연료의 연료봉 마모량 분포 등을 비교 평가한 결과, 냉각재 유동이 집합체 진동모드 6에 해당하는 과도한 집합체 진동을 유발하여 연료봉 마모를 일으킨 것으로 보인다.
- 가연성흡수봉집합체를 삽입한 집합체 유동시험에서 집합체 진동특성 변화와 감쇄효과에 의해 집합체 진동이 약 20% 수준으로 감소하였으며 발전소 유량에 해당하는 시험유량에서는 16X16 STD 연료와 마찬가지로 집합체 진동이 발생하지 않았다.
- 집합체 유동시험에서 진동변위가 한쪽 방향으로만 발생하였는데 이는 16X16 JDFA의 중간 지지격자 혼합날개의 방향성에 기인한 것으로 보인다.
- 집합체 모드해석 결과로부터 유동시험에서 집합체 전 진동모드를 감지하고 상대적으로 큰 변위를 측정할 수 있도록 변위 측정위치를 설정할 수 있었으며 노심조건과 시험조건의 집합체 진동수 비는 노심유량과 시험유량에 대한 보정인자로 사용되었다.

참고문헌

- [1] P. L. Ko, "Wear of Zirconium Alloys Due to Fretting and Periodic Impacting", The International Conference on Wear of Materials, 1979.
- [2] P. L. Ko, R. J. Rogers, "Analytical and Experimental Studies of Tube/Support Interaction in Multi-Span Heat Exchanger Tubes", Nuclear Engineering and Design, P399-409, 1981.
- [3] Y. H. Kim, S. Y. Jeon, J. W. Kim, "Fretting Wear of Fuel Rods due to Flow Induced Vibration", Proceedings of Korean Nuclear Society Spring Meeting, Cheju, Korea, May 1996.
- [4] K. T. Kim, H. K. Kim and K. H. Yoon, "Development of a Methodology for In-Reactor Fuel Rod Supporting Condition Prediction", Journal of Korean Nuclear Society Volume 29, 1996.
- [5] J. P. Kim, P. O. Kim, H. J. Kim, "Results and Evaluation of Poolside Examination of KOR1 #2 Failed Fuels", KNFC TR-026, 1994.
- [6] Y. H. Kim, S. Y. Jeon, "FACTS Loop Vibration Test for PWR Fuel Assembly", Proceedings of Korean Nuclear Society Spring Meeting, 1995.
- [7] WECAN User's Manual, Westinghouse, 1989

표 1. 집합체 구성품 치수

구 분	상부 안내관	하부 안내관	연료봉	지지격자 슬리브
재 질	Zr-4	Zr-4	Zr-4	Zr-4
외경 (in.)	0.4709	0.4709	0.3740	0.5197
내경 (in.)	0.4350	0.3831	0.3236	0.4764
두께 (in.)	0.0179	0.0439	0.0252	0.0217
단면적 (in. ²)	0.0255	0.0589	0.0276	0.0339
관성모우멘트 ((in. ⁴)	0.00065	0.00136	0.00042	0.00105

표 2. 집합체 고유진동수

진동모드	고 유 진 동 수 (Hz)					진동수비
	CASE 1 (70°F, AIR)	CASE 2 (600°F, BOL)	CASE 3 (600°F, EOL)	CASE 4 (250°F, 시험)	16X16 STD (70°F, AIR)	
1	3.73	3.27	3.12	3.44	3.40	0.91
2	7.88	6.90	6.59	7.27	6.90	0.91
3	12.64	11.04	10.57	11.65	10.90	0.91
4	18.09	15.74	15.18	16.66	16.20	0.91
5	24.24	20.97	20.47	22.29	21.40	0.92
6	30.07	25.83	25.60	27.59	27.50	0.93

그림 1. 진동모드별 변위형태

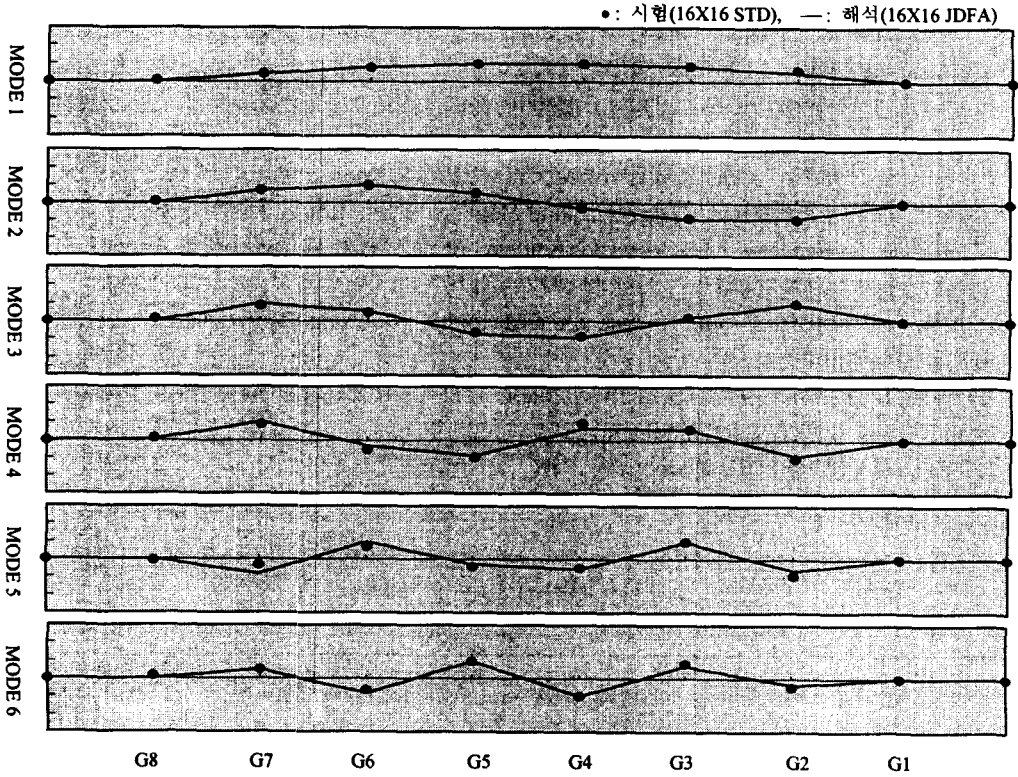


그림 2. 집합체 진동변위 측정 위치

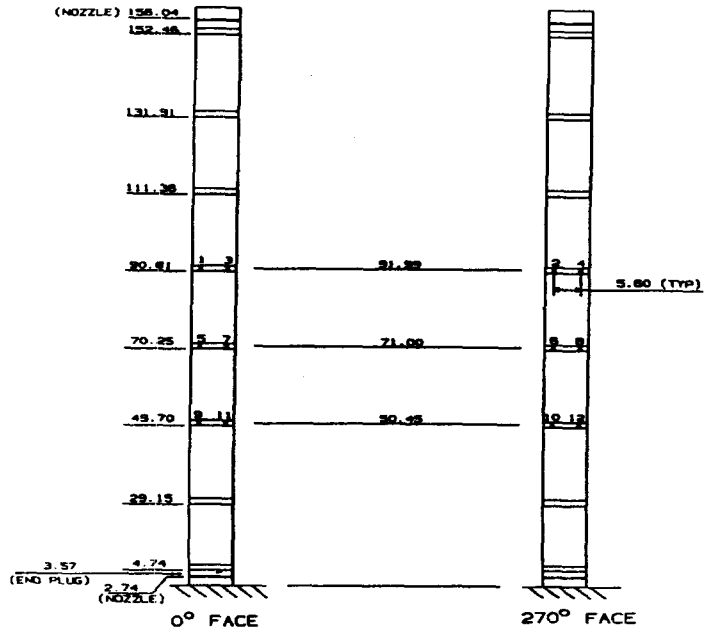


그림 3. 집합체 진동시험 결과 (w/o Damper)

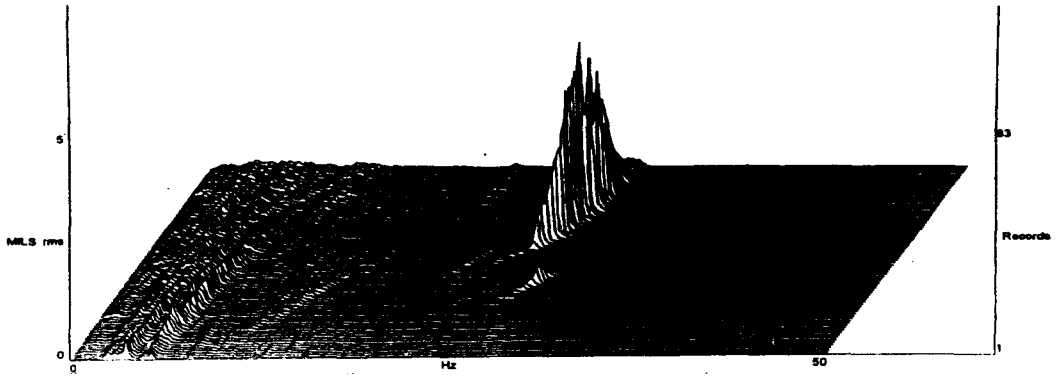


그림 4. 집합체 진동시험 결과 (w/ Damper)

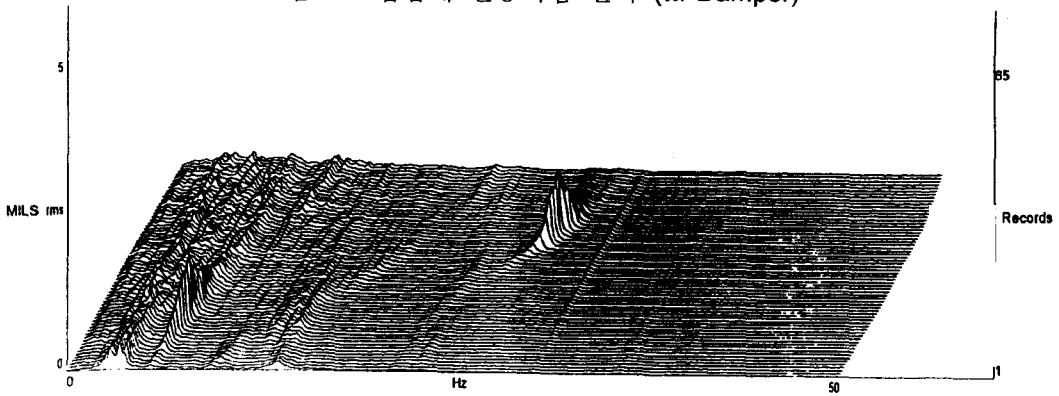


그림 5. 집합체 진동변위형태와 연료봉 마모량 분포

