

경수로 핵연료 내진해석 절차 및 평가

Seismic Analysis Procedure and Evaluation of PWR Fuel Assembly

하동근† · 박남규* · 서정민* · 전경락*

Dong Geun Ha, Nam Gyu Park, Jung Min Suh and Kyeong Lak Jeon

1. 서 론

국내 원자력 발전소는 신고리 1호기를 포함 총 21기가 운영되고 있으며, 4기의 중수로 발전소, 8기의 웨스팅하우스형 경수로 발전소 그리고 9기의 한국표준형 발전소로 구성된다. 이중 경수로 발전소에 장전되는 핵연료는 다수의 연료봉과 골격체로 구성된다. 골격체는 상하단고정체, 다수의 안내관과 1개의 계측관 그리고 연료봉을 지지하는 지지격자로 구성된다. 현재 건설중인 한국표준형 APR1400 노형을 제외하고 국내 원전의 내진설계 기준은 지반가속도로 0.2g이다. 본 논문에서는 웨스팅하우스형 핵연료를 기준으로 지진 해석 절차를 설명하고 평가 내용을 소개하고자 한다.

2. 지진해석 모델 및 평가

2.1 노심판 운동

발전소 지진해석을 위해서는 원자로 내부 구조물의 해석 모델(RESM: Reactor Equipment System Model)이 필요하다. 핵연료는 보(beam)와 Rotary Spring으로 구성된 단순 모델로 구성하여 RESM의 RPV(Reactor Pressure Vessel) 모델에 삽입한다. 지진해석 시 RESM에 작용하는 지진하중은 최종안전성분석보고서(FSAR)에 기술된 안전정지지진 설계응답 스펙트럼에 근거한다. 설계응답 가속도 스펙트럼을 시간에 대한 함수로 변환하여 RESM 모델에 입력하고 그 출력으로 시간에 대한 RPV 내 노심판의 변위를 생성한다. 이렇게 생성된 시간-변위 함수가

노심판 운동(CPM: Core Plate Motion)이며, 이를 노심모델에 입력하여 핵연료 집합체의 건전성을 평가한다.

2.2 핵연료 집합체 상세모델

2개의 등가 안내관과 등가 연료봉으로 핵연료 집합체 상세모델을 생성한다. 이때 안내관 등가 간격은 평행축 정리(Parallel axis theorem)를 이용하여 결정한다. 지지격자의 각 격자(Cell)에는 Fig. 1과 같이 1개의 스프링과 2개의 딥플(Dimple)이 한 평면상에 위치하여 연료봉을 지지한다. 이들 스프링과 딥플은 접촉(Contact)요소로 구성하고 수직면에 존재하는 스프링/딥플과 연료봉의 간섭은 미끄럼접촉(Sliding)요소로 모사한다. 안내관, 연료봉 상하단고정체 등은 보요소로 모델링한다. 상기와 같이 보, 접촉, 미끄럼접촉 요소로 구성된 핵연료 집합체 상세모델은 Fig. 1과 같다. 상세모델은 핵연료 집합체 횡방향 모드시험 및 정적 하중-변위시험 결과와 비교하여 검증한다.

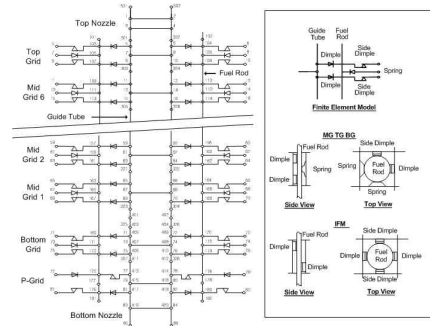


Fig. 1 Fuel Assembly Detail Model

2.3 핵연료 집합체 질량-스프링 모델

핵연료 집합체 상세모델은 많은 수의 동적 자유

† 교신저자; 하동근, 한전원자력연료
E-mail : dgha@knfc.co.kr
Tel : 042-868-1181, Fax : 042-868-1149
* 한전원자력연료

도를 가지고 있어, 많은 해석 시간이 요구되는 동적 해석에는 적합하지 않으므로 유효절점질량과 유효 스프링-감쇠를 갖는 단순화된 질량-스프링 모델을 수립하여 해석한다. 단순화된 질량-스프링 모델의 특성방정식은 식 (1)과 같다.

$$\lambda_i [M] \{\Phi_i\} = [K] \{\Phi_i\} \quad (1)$$

여기서 $[M]$: 대각 질량 행렬, $[K]$: 대칭 강성 행렬

상세모델로부터 핵연료 집합체 고유진동수 및 모드형상을 구하고 각 부품의 기하학 요소들로부터 유효절점의 질량을 구할 수 있으므로, 스프링 강성은 모드 형상과 고유진동수, 질량의 관계를 이용하여 구할 수 있다. 이때 핵연료 집합체 단순모델을 구성하는 스프링 수(N)는 자유도 수로부터 식 (2)와 같이 결정된다.

$$N = n(n + 1) / 2 \quad (2)$$

여기서 n : 단순모델의 자유도 수

이렇게 결정된 매개변수를 이용한 핵연료 집합체 단순 질량-스프링 모델은 Fig. 2와 같다.

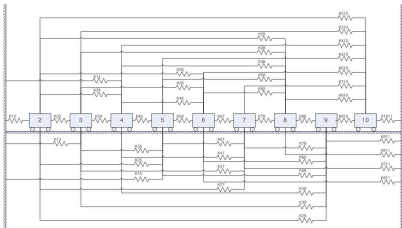


Fig. 2 Simplified Lumped Mass-Spring Model

2.4 노심모델

핵연료가 장전된 노심모델은 Fig. 3과 같다. 핵연료 집합체는 단순 질량-스프링 모델을 바탕으로 구성된다. 간격(Gap)요소는 집합체-집합체 및 집합체-Baffle 간격에 기인한 비선형성을 모사하기 위해서 사용하며, 핵연료 집합체 지지격자는 간격, 강성(Kg), 감쇠(Cg) 요소로 모델링 된다. 이때, 핵연료 집합체 노내 거동은 Newmark-Beta 법⁽¹⁾을 이용하여 해석한다.

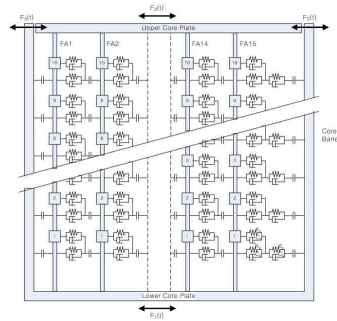


Fig. 3 Reactor Core Model

2.5 평가기준

지진등의 사고시에도 원전의 안전성을 확보하기 위해서는 핵연료 집합체의 냉각성능을 유지하는 것이 가장 중요하다. 이를 위해 핵연료는 발전소 비상정지가 가능하도록 제어봉의 자유낙하를 보장하여야 하며, 이는 지지격자의 충격강도 및 핵연료 집합체 거동을 분석하여 평가할 수 있다. Fig. 4는 지진발생 시 지지격자에 발생하는 충격하중을 평가한 것이다. 평가결과 좌굴강도 이하의 하중이 지지격자에 작용하는 것을 확인하였다.

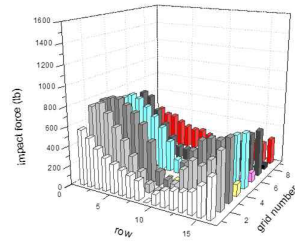


Fig. 4 Grid Impact Force

3. 결 론

지진 발생 시 원자력 발전소 지반가속도를 기반으로 한 경우로 핵연료 집합체의 내진해석 절차를 집합체 등가 모델과 함께 설명하였다. 그리고 지진 등의 사고발생 시 원자로 냉각성능을 유지하기 위한 핵연료 건전성 평가 결과를 제시하였다.

참 고 문 헌

(1) N. M. Newmark, 1962, A Method of Computation for Structural Dynamics.