

내진해석용 핵연료집합체 상세 모델에 대한 연구

Sensitivity Evaluation of the Detailed Fuel Assembly Model for Seismic Analysis

남윤석† · 박남규* · 이규석* · 장영기*

Yun-seog Nam, Nam-gyu Park, Kyou-seok Lee and Young-ki Jang

1. 서 론

국내 원자력발전소는 크게 중수로발전소, 웨스팅하우스형 경수로발전소와 OPR1000 및 APR1400형(이하, 표준형) 경수로발전소로 구성된다. 중수로발전소에 사용되는 핵연료와 달리 경수로발전소에서 사용되는 핵연료는 다수의 연료봉, 다수의 안내관, 1개의 계측관, 연료봉을 지지하는 다수의 지지격자와 핵연료 양끝 단의 상·하단고정체로 구성된다. 본 논문에서는 표준형 경수로발전소 지진해석 시 핵연료집합체 거동에 따른 건전성 평가를 위해 유한요소방법을 이용한 핵연료집합체 상세모델을 개발하고 이를 평가하였다.

2. 핵연료집합체 상세모델 및 평가

2.1 핵연료집합체 지진해석 절차 및 방법

원자력발전소는 그 규모와 복잡성 때문에 부분구조합성법(Substructure Synthesis Method)을 이용하여 발전소 및 그 구성품들에 대한 지진해석을 수행한다. 그 중 핵연료집합체 지진해석은 핵연료가 장전된 노심모델 결과 중 지지격자 충격강도와 핵연료집합체 거동을 분석하여 평가하며, 핵연료집합체 거동 평가는 핵연료집합체 상세모델을 이용한다.

2.2 핵연료집합체 상세모델 개발

핵연료집합체 상세모델은 다수의 안내관과 연료봉들을 모두 고려할 수 없으므로, 전체 안내관 및 연료봉의 특성을 반영한 소수의 안내관과 연료봉들로 구성된다. 이 때 안내관과 연료봉의 등가 간격은 평

행축 정리(Parallel Axis Theorem)를 이용하여 결정된다.

본 논문에서는 핵연료집합체 상세모델 해석결과와 시험결과 비교를 위해 2개의 등가 안내관, 1개의 계측관과 안내관 내외에 위치하는 4개의 등가 연료봉을 보 요소로 구성하였다. 그 외 지지격자 각 셀의 한 평면 상에서 연료봉을 지지하는 1개의 스프링과 2개의 덤플을 접촉요소로 구성하고, 수직면에 존재하는 덤플과 연료봉의 간섭을 미끄럼요소로 모사하였다⁽¹⁾.

보, 접촉 및 미끄럼 요소들의 구성 시 고려할 수 있는 영향인자들을 도출하여 7개의 핵연료집합체 상세모델을 생성하여, 각 상세모델들에 대한 해석 결과들을 시험결과와 비교하였다. 그리고, 핵연료집합체가 중성자 조사를 받게 되면 지지격자 스프링의 조사이완으로 인해 접촉강성이 감소할 것으로 예상되므로, 조사 조건 모사를 위해 일부 상세모델의 접촉강성 감소에 따른 특성 변화를 비교하였다.

2.3 핵연료집합체 상세모델 평가

표준형 핵연료집합체 상세모델들에서 적용할 지지격자 각 셀에서의 접촉 및 미끄럼요소 절점 구성, 지지격자 위치에서의 회전스프링 적용 여부, 연료봉 요소의 수와 마찰 적용 여부를 Table 1에 요약하였으며, Model 1 구성을 대표적으로 Figure 1에 나타내었다.

각 Model들의 고유진동수를 시험결과와 일치시킨 후, 중앙 Span에서의 굽힘 변형률과 하중-변위 결과를 도출 후, 시험결과와 비교하여 Figure 2에 나타내었다. 그리고 1.6 inch 변형 시, 각 Model들에 대한 핵연료집합체 중앙에 위치한 지지격자 하부에서의 안내관과 연료봉 응력을 Model 1의 결과와 비교하여 Figure 3에 나타내었다.

† 교신저자: 남윤석, 한전원자력연료

E-mail: yunseog@knfc.co.kr

Tel: 042-868-1198, Fax: 042-868-1149

* 한전원자력연료

Table 1 Summary of Detailed Model Characteristics

	Contact & Sliding Element	Rotation Spring	No. of FR Beams	Friction
Model 1	i-FR, j-GT	X	4	O
Model 2	i-GT, j-FR	X	4	O
Model 3	i-FRi, j-GT i-GT, j-FRo	X	4	O
Model 4	i-FRi, j-IT i-FRo, j-GT	X	4	O
Model 5	i-FR, j-GT	O	4	O
Model 6	i-FR, j-GT	X	2	O
Model 7	i-FR, j-GT	X	4	X

i (Element i-node), j (Element j-node)
 GT (Guide Tube), IT (Instrumentation Tube),
 FR (Fuel Rod), FRi (inner FR), FRo (outer FR)

Figure 2에서 보듯이 중앙 Span에서의 굽힘 변형률과 하중-변위 결과는 접촉 및 미끄럼요소의 절점 구성을 다르게 적용한 Model 2와 3의 결과가 시험 결과 대비 각각 약 40%와 80%정도로 나타났을 뿐, 나머지 Model들은 시험결과와 유사하게 나타났다. 그리고, 핵연료집합체 중앙에 위치한 지지격자 하부에서의 안내관과 연료봉 응력은 굽힘 변형률과 하중-변위 결과와 마찬가지로 Model 2와 3의 결과만이 차이가 있을 뿐, 나머지 Model들은 Model 1의 결과와 유사하게 나타났다.

그러므로 핵연료집합체 상세모델을 구성할 때, 동일한 고유진동수여도 접촉 및 미끄럼요소의 절점 구성에 따라 결과가 다르게 나타났고, 그 외 지지격자 위치에서의 회전스프링 적용, 연료봉 요소 수 변화 및 마찰 적용 여부에 따른 차이는 미미한 것으로 평가되었다. 단, 회전스프링 적용의 경우에는 고유진동수를 시험결과에 정확하게 생성할 수 있었다.

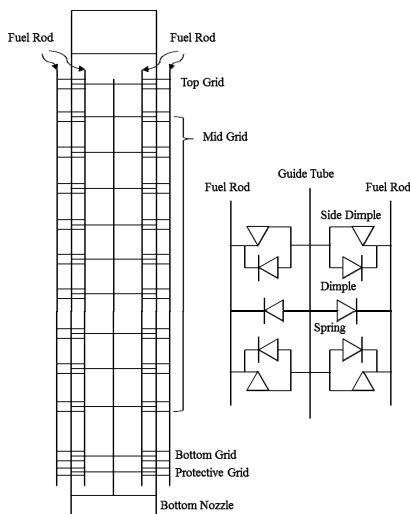


Figure 1 Detailed Fuel Assembly Model (Typical)

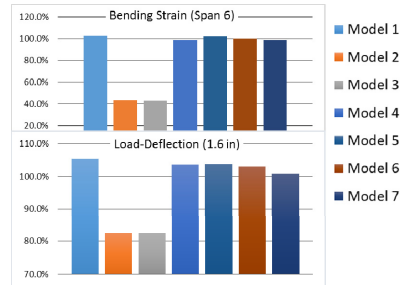


Figure 2 Comparison (Test vs. Analysis)

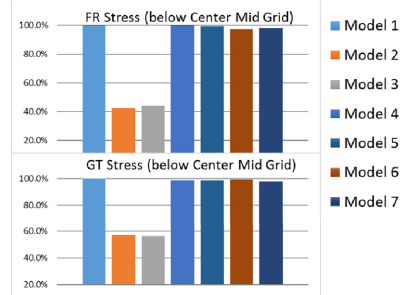


Figure 3 Guide Tube/Fuel Rod Stress Comparison

시험과 유사한 경향을 보인 Model 1, 4, 5, 6 및 7에 대하여 접촉요소의 강성값 조정에 따른 1차 고유진동수와 안내관 및 연료봉 응력 변화를 살펴보았다. 상기 Model들 모두 접촉강성이 50%, 75%, 90%, 99% 감소하는 동안, 고유진동수는 각각 약 6%, 12%, 20%, 30% 감소하는 것으로 평가되었다. 접촉강성값 변화 시 앞선 평가와 동일한 위치에서의 안내관과 연료봉 응력을 살펴본 결과, 접촉강성이 90% 감소까지는 응력 차이가 없었지만 99% 감소에서는 약 16%정도 감소하는 것으로 평가되었다.

3. 결 론

지진 발생 시 핵연료집합체의 건전성을 평가를 위해 다양한 변수를 고려하여 핵연료집합체 상세모델을 수립하였다. 핵연료집합체 시험결과와 비교했을 때, 접촉 및 미끄럼요소의 절점 구성에 따라 차이가 나타났고, 그 외의 변수들은 유사한 결과를 나타내었다. 그리고 수명 말에서의 중성자 조사 효과를 확인하기 위하여 접촉요소의 강성값을 99%까지 감소시킨 결과, 고유진동수는 약 30%, 안내관 및 연료봉의 응력은 16%정도 감소하는 것으로 평가되었다.

참고 문헌

- (1) D.G. Ha, 2011, 경수로 핵연료 내진해석 절차 및 평가, 2011 추계 소음진동 학술대회