한국소음진동공학회 2013년 추계학술대회논문집, pp. 874~875

핵연료 건전성 평가시험 및 내진해석 방법

Nuclear Fuel Structural Integrity Test and Seismic Analysis

박남규† · 서정민* · 전경락*

Nam-Gyu Park, Jung-Min Suh and Kyeong-Lak Jeon

1. 서 론

경수로용 핵연료는 원자력 발전에 필요한 핵분열이 가능한 우라늄 소결체(pellet)가 장입된 수백 개의 가느다란 지르코늄 합금으로 제작된 핵연료봉(nuclear fuel rod) 및 여러 부품으로 조립된 골격체로 구성된다. 통상 200 개 이상의 핵연료봉 다발이 한 개의 핵연료를 구성하고 있으며, 길이는 약 4 m, 폭은 약 20 cm의 사각기둥 형상이다. 경수로형 원자로의 형태에 따라 핵연료의 제원과 배열은 서로 다르지만 국내에서 공급되는 대부분의 경수로형 핵연료는 유사한 형상이다.

노내에 장전된 핵연료는 핵분열시 발생하는 열을 냉각수에 전달하는데, 공급되는 냉각수의 레이놀즈수는 통상 500,000 이상의 강한 난류이다. 또, 원자로 내의 냉각수 평균온도와 압력은 약 300°C 및 150기압이다. 핵연료는 이러한 고온, 고압의 난류 냉각수 상태에서 장시간 노출되므로[1], 구조적 건전성이 충분히 유지되도록 설계하여야 한다.

상기와 같은 가혹한 조건에 노출된 핵연료의 안정성을 보장하고자 다양한 노외 실증 시험이 수행되며, 수행된 시험결과를 기반으로 적합한 수치해석 모델을 개발하거나 성능평가를 실시한다. 여러 가지의 실증시험이 있으나, 본 연구에서는 핵연료 진동과 관련된 건전성 평가 시험을 기술하고자 한다. 또한 진동학적 관점에서 가상사고에 대비한 핵연료 내진해석을 위한 평가 방법 및 절차에 대해 소개하고자 한다.

2. 핵연료 건전성 시험

† 교신저자; 정회원, KEPCO NF
E-mail : nkpark@knfc.co.kr
Tel : 042-868-1197, Fax :042-868-1147
* KEPCO NF

2.1 부품 시험

핵연료는 원자로에 장전되어 고온 고압의 냉각수에 노출되므로 유체유발 진동에 의한 설계건전성을 평가할 필요가 있다. 핵연료의 모든 부분이 냉각수에 노출되어 있지만, 특히 연료봉은 세장비가 크므로 과도한 진동이 발생할 확률이 높다. 따라서 여러 개의 지지격자를 이용하여 연료봉을 여러 위치에서 지지할 수 있도록 설계하고 있다.

만일 연료봉에 작용하는 냉각수가 특정 모드를 가진 할 경우, 진동에 취약한 상황이 발생할 수 있다. 따라서 불안정한 진동을 유발할 수 있는 임계속도에 대한 유효속도의 비를 이용하여 설계건전성을 평가한다. 한편, 연료봉 모델의 신뢰성 향상을 위해 연료봉에 대한 진동시험이 수반된다[2]. 연료봉은 세장비가 크며, 여러군데 지지격자가 설치되므로 가진기의 입력 신호가 마찰력을 제공하는 지지격자를 통과하면서 신호의 강도가 점점 감소한다. 따라서, 전 범위에 걸쳐 고르게 전파되지 않으므로 출력신호에 잡음이 많이 수반된다. 이를 극복하기 위하여 여러 개의 가진기를 사용한다.

연료봉을 지지하는 지지격자는 0.5mm 이하의 얇은 판이며, 격자형태로 조립된다. 따라서 빠른 유속의 냉각수가 유입될 경우, 판진동이 발생할 수 있으나 조립된 상태의 지지격자는 그 진폭이 매우 작다. 지지격자는 연료봉 지지역할 뿐 아니라 냉각수의 혼합작용에도 기여하므로 유동의 난진동을 유발한다. 따라서 냉각수에 노출된 환경을 구성하여 냉각수에 의한 진폭을 측정하여 진동 및 진동피로에 의한 설계건전성을 평가하고 있다[3].

2.2 집합체 시험

핵연료집합체는 후술할 내진해석용 모델이 필요하다. 신뢰성 있는 해석결과를 도출하기 위해서는 시험결과를 근거로 실제에 거의 근접하는 핵연료 모델을 개발하여야 한다. 따라서 핵연료 모델 개발에 필요한 여러 종목의 시험을 수행하며, 이중에는 핵연료의 진동 특성을 평가하기 위한 진동 실험

(modal testing)도 포함된다.

한편, 연료봉의 교환 및 수리를 위해 지지격자는 마찰력만으로 연료봉을 구속하고 있다. 따라서 연료봉과 지지격자 사이에는 비선형이 강한 마찰이 존재하므로 랜덤가진을 이용하면 신호대 잡음비가 매우 심하다. 따라서 핵연료의 진동 실험에서는 정현파 가진(sine sweep)의 방법을 사용한다. 실험으로부터 구한 핵연료의 특성자료는 모델수립 및 검증에 활용된다.

또한, 핵연료 집합체가 냉각수에 노출된 상태로 수행하는 시험을 통해 핵연료의 전반적인 진동거동에 대한 평가를 실시할 수 있다. 이때, 핵연료가 장입되는 대형 루프가 필요하며, 고온 고압의 냉각수가 공급되어 냉각수에 의한 유체유발 진동을 계측할 수 있다. 또한 핵연료를 냉각수에 장시간 노출시켜 핵연료 피복관에 발생하는 마모수준을 평가한다.

3. 내진해석 방법

원자로의 안전성을 입증하기 위해 지진과 같은 가상 사고조건을 반영한 평가결과도 필요하다. 지진에 의한 지반의 움직임으로 원자로 내의 핵연료는 이웃하는 핵연료 및 원자로의 부속 구조물들과 충돌할 수 있다. 이와 같은 가상사고의 결과에서도 원자로가 안전하게 정지하기 위해서는 원자로 내의 제어봉이 핵연료에 삽입될 수 있어야 하므로, 어떠한 조건에서도 핵연료는 제어봉의 수용이 가능한 형상을 유지하고 있어야 한다.

사고조건을 수행하기 위해서는 신뢰성 있는 핵연료의 수학적 모델이 필요하며, 상기에서 언급한 핵연료 모델 개발에 필요한 여러 종목의 시험이 수행된다. 핵연료가 장전된 핵연료 내진해석용 노심 해석 모델은 노심판과 여러 개의 배열을 갖는 핵연료로 구성된다. 강제진동 해석의 신뢰성과 효율성을 동시에 고려하기 위해, 단순화된 핵연료는 실제의 동특성 및 충격 특성이 보존되도록 생성되어야 한다[(4)].

지반의 진동은 건물 및 원자로를 거쳐 핵연료에 전달되며, 각 프로세스에 적합한 유한요소 모델을 사용해 지진에 의한 응답을 구할 수 있다. 최종적인 핵연료 건전성과 관련하여, 핵연료가 장전되는 노심판(core plate) 등의 움직임을 입력으로 하여 해석된 결과로부터 핵연료 집합체의 충격력과 변위 등을 구할 수 있다.

한편, 강제진동을 받는 노심 모델의 해석결과는 제어봉 및 핵연료 각 부품의 응력해석을 위한 추가적인 자료로 사용된다. 또 다른 가상사고 조건인 냉각재 상실(loss of coolant)을 가정한 상태에서도 지진해석과 동일한 절차를 거쳐 핵연료의 거동을 평가한다.

참고문헌

(1) N.G. Park, J.M. Suh, K.L. Jeon, 2011, Dynamic Response of a Nuclear Fuel Rod Impacting on Elastoplastic Gapped Supports, Nuclear Eng. & Deign 241, pp.4862-4873.

(2) N.G. Park et al., 2009, Modal Testing and Model Updating of a Real Scale Nuclear Fuel Rod, Nuclear Eng. & Technology 41(6), pp.51-58.

(3) K.H. Kim, N.G. Park, K.J. Kim, J.M. Suh, 2012, The Grid strap Vibration Characteristics of the 5x5 Nuclear Fuel Mock-up, Trans. KSNVE 22(7), pp.619-626.

(4) N.G. Park, K.J. Kim, K.J. Kim, J.M. Suh, 2013, A Computational Technique to Identify the Optimal Stiffness Matrix for a Discrete Nuclear Fuel Assembly Model, Nuclear Eng. & Deign 255, pp.51-58.