



핵연료집합체 진동 및 내진 성능 평가

박 남 규*

(한전원자력연료 신연료연구실)

1. 머리말

원자력 발전에 필요한 동력의 원천은 핵분열 과정에서 발생하는 열로부터 얻을 수 있으며, 한전원자력연료는 국내 유일의 핵연료(nuclear fuel assembly) 공급사이자 가압경수로용 핵연료 및 중수로용 핵연료 모두를 공급할 수 있는 세계 유일의 회사이다.

원자력 산업은 열전달, 유체역학, 고체역학, 진동학, 피로 등 기계공학의 모든 분야에 대한 지식이 동원되어야 하는 특성상 원자력 산업이야말로 기계공학의 종합예술이라고 감히 말할 수 있다. 특히 핵연료는 원자력 발전에 필요한 에너지 공급원이며, 냉각수와 상호작용에 의한 진동이 존재하므로 기계공학의 일반 지식을 섭렵하고 진동을 전공한 전문 인력이 해야 할 과제가 많이 존재한다. 이 글의 목적은 진동과 관련된 핵연료의 대략적인 설계 및 평가방법을 소개하고, 소음진동을 전공하였으나 핵연료에 대해 생소한 독자를 대상으로 핵연료에 대한 공학적 관심도를 높이고자 함이다.

2. 핵연료 및 노내 환경

원자력발전소는 크게 가압경수로 및 중수로가 있으나, 대부분의 원자력발전소는 가압경수로형

이므로 가압경수로용 핵연료를 중심으로 서술하고자 한다. 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 200개 이상의 핵연료봉 다발이 한 개의 핵연료를 구성하고 있으며, 그림 1은 핵연료집합체의 형상에 대한 예시이며 길이는 약 4 m, 폭은 약 20 cm이다. 경수로 원자로의 형태에 따라 핵연료의 제원과 형상은 서로 상이하지만 공급되는 대부분의 핵연료 그림 1과 유사한 형상이다.

핵연료봉(이하 연료봉) 다발들은 지지격자체(space grid assembly)에 의해 일정간격으로 지지되며, 연료봉은 지지격자체와의 마찰력으로만 지지된다. 따라서 마찰에 의한 비선형 특성이 존재하고, 마찰은 모드해석 및 실험(modal testing)을 어렵게 만드는 주요인중의 하나이다. 노내에 장전된 핵연료는 핵분열시 발생하는 열을 냉각수에 전달하는데, 공급되는 냉각수의 레이놀즈수는 통상 500,000 이상의 강한 난류이다. 핵연료를 통과하는 냉각수 속도는 평균적으로 5 m/s ~ 6 m/s이며, 평균온도와 압력은 약 300 °C 및 150기압이다. 핵연료는 이러한 고온, 고압의 난류 냉각수 상태에서 3주기(약 4.5년) 동안 노출되므로, 구조적 건전성이 충분히 유지되도록 설계하여야

* E-mail : nkpark@knfc.co.kr / Tel : (042) 868-1197

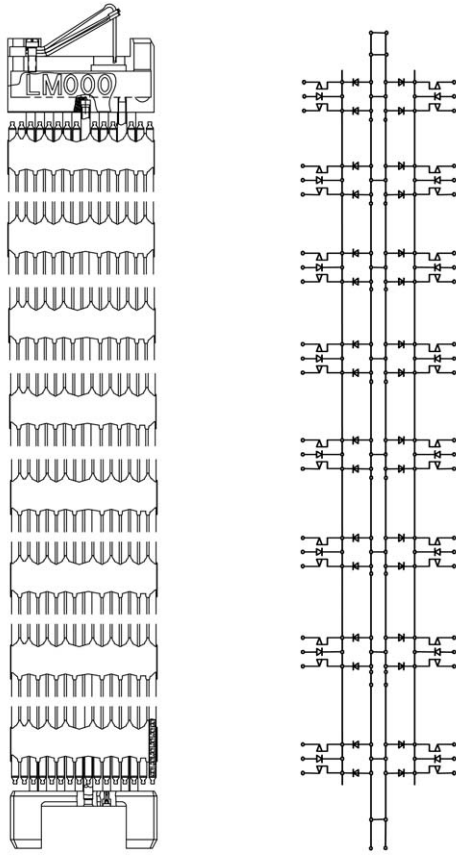


그림 1 핵연료집합체 형상 및 해석모델 예

한다.

3. 핵연료 진동 성능 평가

위와 같은 조건에 노출된 핵연료의 안정성을 보장하고자 다양한 실증 시험이 수행되며, 수행된 시험결과를 기반으로 적합한 수치해석 모델을 개발하거나 성능평가를 실시한다. 이 절에서는 핵연료 진동과 관련된 몇 개의 실험 및 해석방법에 대해 설명하고자 한다.

난류 조건에 노출된 핵연료의 거동을 평가하고자 그림 2와 같은 소규모의 루프 실험장치를 이용하여 핵연료의 특정 부품에 발생하는 진동을 평가한다. 이것은 핵연료 본체의 일부를 대상으로 수행하는 실험이므로 주로 설계 초기에 대략

적인 거동을 평가할 때 사용된다. 이 실험은 특히 고속의 냉각수가 핵연료를 통과하면서 발생하는 와류(vortex)에 의한 난진동 평가에 유효하다. 핵연료에 축방향으로 입사되는 냉각수는 지지격자 및 연료봉의 진동을 유발하는 가진원이며, 구조물의 선단부(edge)에서 와류를 발생시키는데, 와류의 박리 주파수 및 진동의 크기는 지지격자 형상의 함수이다. 지지격자체의 종류에 따라 다르기는 하지만, 통상적으로 발생하는 박리 주파수는 수천 Hz 이상에서 발견되므로 샘플링 속도의 크기가 충분하여야 한다. 이러한 실험의 결과로부터 냉각수에 의한 진동 특성을 평가하거나 피로 평가를 수행할 수 있으며, 이를 기반으로 모든 조건에서 안전성이 확보된 핵연료 개발에 활용하고 있다.

소규모 단위의 실험으로 얻을 수 있는 정보의 양은 한정되므로 최종설계 단계에서는 실제와 동일한 시험용 핵연료를 제작하여 노내 환경과 유사한 조건을 구현할 수 있는 루프 시험 시설을 활용하여 진동 및 마모성능을 평가한다. 실제와 동일한 시험용 핵연료가 장전되는 시설은 그림 2와 유사한 개념이나, 마모 평가를 위해 장시간 운전이 가능하며 원자로 장입조건의 구현이 가능하고 여러 가지의 계측기가 설치되는 부분이 다르다. 핵연료가 장전되는 루프 장치에서의 실험 수행시 진동 측면에서 보수적인 환경을 조성하기 위해 실제 조건보다 고속의 냉각수를 공급하고 있다. 또한 핵연료가 원자로에서 주기말까지 연소되었을 경우의 기하학적조건을 구현하기 위해 지지격자체와 연료봉 사이의 마찰력을 현저하게 감소시킨 핵연료를 사용하고 있다. 이때 연료봉 또는 핵연료집합체의 진동을 계측하기 위해 고온, 고압용 가속도계가 연료봉 내에 삽입되며, 계측기 내부로의 냉각수 침투 차단을 위해 특별한 실링장치가 사용된다.

한편 핵연료집합체 내의 연료봉 사이의 간격은 약 3 mm 내외이며, 여러 개의 연료봉 사이로 횡방향의 냉각수가 통과할 경우, 냉각수에 의한 유체탄성 불안정성(fluid-elastic instability)이 발생할

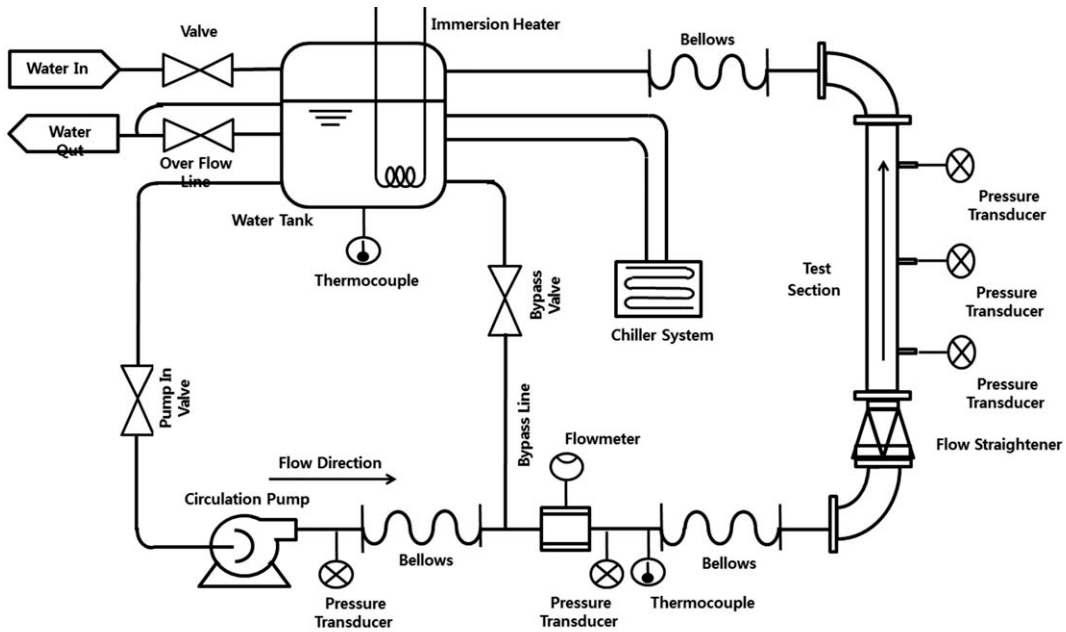


그림 2 소규모 루프 실험장치 배관 및 계장도

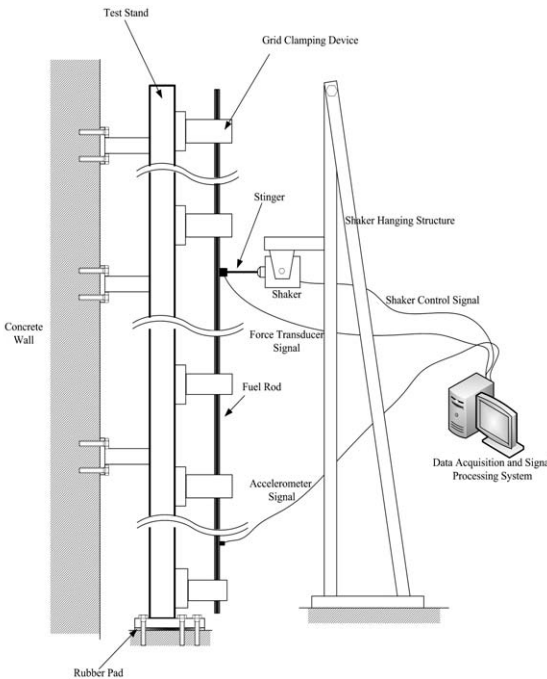


그림 3 연료봉 진동 특성 실험 장치

수 있다. 이와 관련하여서는 1970년 웨스팅하우스의 H.J. Connors에 의해 실험결과가 발표된 이

후로 상당히 많은 연구결과가 보고되었고 이론적으로도 거의 정립된 상태이다. 유체탄성 불안정성을 평가하기 위해서는 연료봉의 진동 실험 및 해석적 결과가 필요하며, 실험 및 해석적 결과에 근거하여 냉각수에 의한 연료봉의 구조적 건전성을 평가한다. 연료봉 진동 평가를 위한 수치해석 모델의 검증은 실험결과를 근거로 수행되며, 그림 3은 연료봉 진동 특성 평가를 위한 실험 장치의 개략도이다. 이 밖에도 핵연료의 주요부품을 대상으로 진동에 의한 피로 평가, 진동 특성 실험을 수행하여 핵연료의 성능평가를 수행하거나 각종 설계자료로 사용하고 있다.

4. 핵연료 내진 성능 평가

앞 절에서 서술한 내용은 주로 원자로에 장전된 통상운전 조건에 노출된 핵연료의 성능평가를 위해 필요한 내용이다. 한편 원자로가 최악의 상황에 노출된 경우의 안전성을 입증하기 위해 지진과 같은 가상 사고조건을 반영한 평가결과도 필요하다. 지진에 의한 지반의 움직임으로 원

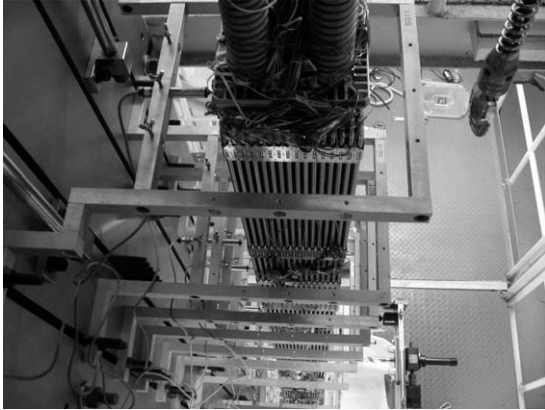


그림 4 핵연료집합체 실험장면

자로 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. 이 절에서는 핵연료의 내진성능 평가와 관련된 내용을 서술하고자 한다.

사고조건을 수행하기 위해서는 신뢰성 있는 핵연료의 수학적 모델이 필요하다. 따라서 핵연료 모델 개발에 필요한 여러 종류의 시험이 수행하

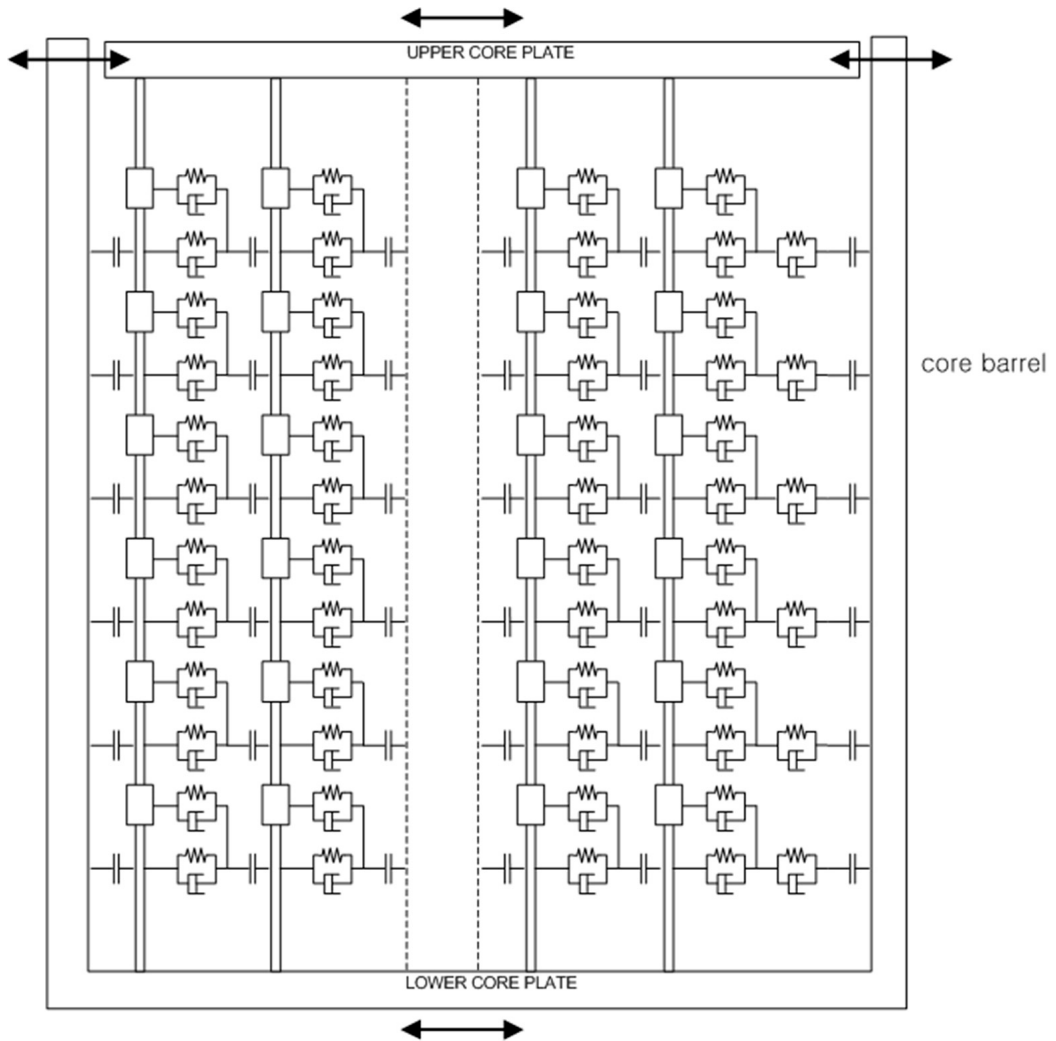


그림 5 지진 해석용 노심 모델

며, 이 중에는 핵연료의 진동 특성을 평가하기 위한 진동 실험(modal testing)도 포함된다. 핵연료의 구조에서 언급하였듯이, 연료봉과 지지격자 사이에는 마찰이 존재하므로 랜덤가진을 이용하면 신호대 잡음비가 상당히 심하므로 핵연료의 진동 실험에서는 정현파 가진(sine sweep)의 방법을 사용한다. 그림 4는 핵연료를 대상으로 진동 및 기계적 특성 평가시험을 수행하기 위한 각종 기기가 설치된 장면이다. 실험으로부터 구한 핵연료의 특성자료는 모델수립 및 검증에 활용되며, 그림 1의 우측면과 같은 핵연료 해석용 모델을 생성할 수 있다. 해석용 모델은 비선형 특성을 모사하기 위한 요소들로 구성된다.

지진파의 크기는 통상 중력 가속도의 몇 배인 지로 구분하며, 국내의 경우 영주기 가속도(zero period acceleration)가 0.3 g의 크기를 갖는 지진에 대해 안정적임을 입증하여야 한다. 주기(period)는 진동수와 반비례 관계에 있으므로 영주기(zero period)는 고주파진동을 의미한다. 지진파의 주파수 범위는 통상 100 Hz 미만에서 주요 성분이 존재하며, 핵연료의 강제진동 해석에 사용되는 원자로의 운동(core plate motion)은 저주파 성분에 의한 영향이 지배적이다.

그림 5는 핵연료가 장전된 핵연료 내진해석용 노심 해석용 모델이며, 핵연료가 장전되는 노심 판(core plate) 등의 움직임을 입력으로 하여 해석된 결과로부터 핵연료 집합체의 충격력과 변위 등을 구할 수 있다. 한편 그림 5의 노심판 내부에 있는 핵연료의 모형은 그림 1의 우측에 있는 모델을 단순화하여 사용한다. 강제진동 해석의 신뢰성과 효율성을 동시에 고려하기 위해, 단순화된 핵연료는 실제의 동특성 및 충격 특성이 보존

되도록 생성되어야 한다. 강제진동을 받는 노심 모델의 해석결과는 제어봉 및 핵연료 각 부품의 응력해석을 위한 추가적인 자료로 사용된다. 또 다른 가상사고 조건인 냉각재 상실을 가정한 상태에서도 지진해석과 동일한 절차를 거쳐 핵연료의 거동을 평가한다.

5. 맺음말

핵연료는 원자력 발전에 필요한 에너지의 공급 원이며, 모든 상황에 대해 구조적으로 충분히 건전함을 확인하기 위해 검증된 실험 및 해석적 방법을 사용하여 건전성을 입증하고 있다. 핵연료가 노출된 노내의 진동환경은 일반적인 상황과 다르므로 충분히 보수성을 확보하도록 설계하고 있으며, 지진 환경에서도 구조적으로 건전한 핵연료를 구현하기 위한 설계방법을 채택하고 있다. 지난해 일본에서 발생한 원자력 사고가 발단이 되어 세간의 이목이 원자력으로 많이 집중되고 있으나, 미국의 경우 원자로 및 플랜트에 견고한 보강재를 설치하여 0.83 g의 지지조건에서도 충분히 견딜 수 있는 원자로를 운영하고 있으며 국내에서도 원자력 안전과 관련된 설비와 기준들을 대폭 강화해 나가고 있다. 핵연료는 모든 안전장치가 완비된 원자로 내에 있고, 한전원자력연료는 모든 상황에서 구조적 건전성을 만족할 수 있는 핵연료를 설계 공급하고 있다. 이 글에서는 핵연료와 관련된 진동 평가 분야에 대한 내용에 대해 대략적으로 소개하였으며, 진동을 전공한 공학인들이 핵연료와 관련된 주제로 심도 있는 연구를 할 수 있는 계기가 되었으면 한다. **KSNVE**