저연소도 사용후핵연료 국내 수송을 위한 구조건전성 평가 기술현안

이강희*, 강흥석, 신창환, 양용식, 양재호
한국원자력연구원, 대전광역시 유성구 대덕대로 989번길 111
*leekh@kaeri.re.kr

1. 서론

국내 사용후 핵연료 임시저장조의 포화 시기는 2024년으로 예측되며[1], 이를 위한 현실적인 대안으로써 사용후핵연료 건식저장을 통한 중간저장이 논의되고 있다. 사용후 핵연료의 건식저장은 영구적인 처분결정 이전에 수행되는 중간저장을 의미하며, 허가된 저장기간 종료 후에 최종적인 처분을 위한 수송, 재활용 후처분 및 직접 처분 등을 고려하여 사용후 핵연료의 회수성과 건전성을 보장하기 위한 검증된 평가기술과 관련 시험자료의 확보가 우선 필요한다.

국내 사용후핵연료의 약 80%이상은 45 GWd/MtU 연소도 이하의 것이며 발전소 내 습식저장을 통해 충분히 냉각되어 건식저장 적용이 타당하다. 한편, 저연소도 사용후핵연료의 초기 특성 평가와 건식저장 조건에 따른 사용후핵연료의 열화거동을 미리 예측하고, 핵연료 집합체의 구조적인 건정성 평가를 위한 체계를 구축하는 국비 지원 연구개발 과제가 국내에서 수행되고 있다. 본 논문에서는 국내 원자력 발전소나 저장시설에서 습식 혹은 건식 분위기로 장기 저장해왔던 사용후 핵연료를 국가의 관리정책과 관계 법령이 정하는 집중된 건식 저장시설로 수송함을 전제로 하여, 보수적인 최대 이송거리와 해상과 육상을 포함한 다양한 수송방식을 가정하고, 사용후 핵연료 모사 시료에 대한 수송중/후 구조건전성을 평가하는 기술에 관하여 주로 시험평가 기술을 중심으로 기술하고자 한다.

2. 본론

철도나 트럭과 같은 육상수송이나 해상수송 모두 수송차량 혹은 선박이 이동과정 중에 도로의 노면(수직방향, 비교적 높은 주파수)이나 해수면의 파동(수평방향, 낮은 주파수)에 의해서 받게 되는 반복하중에 의해서 수송용기 내부에 보관된 사용후 핵연료에 지속적으로 혹은 간헐적으로 충격이 발생될 수 있다. 이로인해 특별히 조사 취화된 상태로 장기간 저장된 사용후 핵연료의 구조 건전성이 위협받을 가능성이 크다. 이러한 문제는 구조 비선형성과 충격현상, 마찰을 동반한 복잡한 물리적 거동으로 특별히 실험적인 방법으로 우선 연구될 필요성이 있다. 통상의 실험은 복잡한 물리현상을 가장 직관적으로 이해할 수 있는 효과적인 방법이 된다. 이를 위해서 먼저 각 수송 모드에 따른 운반차량(선박포함)의 속도 제한치나 경로를 가정하고, 이에 따른 예상 하중(크기, 형태, 주기 등)과 이력(지속시간 등)에 대한 정보 수집이 선행되야 한다. 필요에 따라 예상 하중의 표준화를 위한 노력과 핵물질 육상 수송사나 해상운반 해운사(혹은 해외 수송용기 제조사 등)의 수송 이력 데이터를 공유하는 것과 같은 공동의 협력체계가 필요하다. 상기 수송모드나 경로에 관한 가정은 핵물질 수송에 관한 법적기준과 심사지침에 따라 결정되어야 한다.

사용후핵연료의 수송에 따른 구조건전성을 평가하기 위해 필요한 시험의 항목으로는 우선, 부품 및 분할된 집합체 단위 시료를 대상으로, 수송조건을 모의하는 환경에서, 반복충격을 일정시간 인가해 보고, 결과적인 시료의 손상여부를 판단하는 내구성시험과 건전성 위배 조건에 대한 판단기준 마련이 또한 필요하다(실험유형1)[2,3]. Fig.1 은 실험유형1에 대한 개념도를 보여준다.

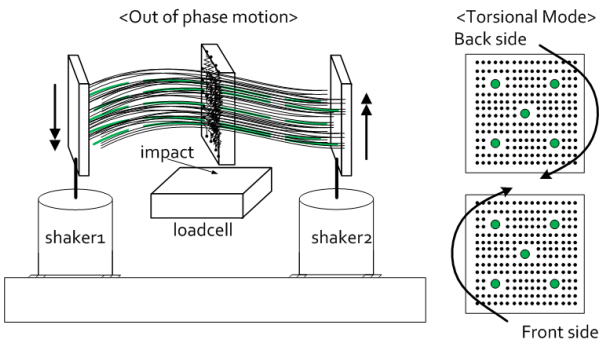

Fig. 1. Vibro-impact fatigue experiment schematics for grid integrity evaluation using two-span pent fuel section.

건전성에 대한 판단기준은 일반적인 피로시험 결과의 산포 특성을 감안할 때, 반복시험과 누적된 데이터의 통계분석을 통해서 다분히 경험적으로 결정해야 할 것으로 생각된다. 그러나 한편으로, 반

복된 충격에 의한 피로손상이라 하여도, 결국에는 동적인 이벤트가 불규칙한 상태로 반복되거나 지속되어 나타나는 현상이므로, 근본적으로 대상과 현상, 단위 동적거동을 fundamental하게 이해하는 관점에서 개별 개체 혹은 구성요소 및 집합체 단위의 동특성 확인실험이 우선적으로 수행되어야 한다(실험유형2)

한편, 충격진동이 발생될 때, 해당 문제의 해석적인 예측을 위한 모델링에는 반드시 비선형 특성과 비선형의 유형, 비선형의 크기 등을 수학적인 형태로 모형화하는 일이 필요하다. 충격 진동이 급격한 상태로 일어날 때, 특별히 육상수송 중에 차량이 장애물에 부딪이거나, 용기가 수송차량에서 수직 낙하하는 경우, 해상 수송 시 큰 파도에 선박이 순간적으로 큰 조파하중을 받을 때 등을 감안하여 shock 응답해석에 의한 취약부의 순간적 응력의 peak값이 재료의 응력한도(취화된 지르코늄)를 넘지 않는지에 대한 강도평가가 또한 필요하다. 이를 위해 shock 하중조건에서 사용후 핵연료 취약부의 peak 응력을 실험적으로 측정하고 모의하는 실험(실험유형3)이 수행되어야 한다.

끝으로, 사용후 핵연료는 건식저장을 위해서 일정기간 동안 일정한 조건으로 1차적인 processing을 거치며, 또는 2차적인 저장를 위해서는 용기를 열고 필요에 따라 장기저장을 위한 추가의 처리를 하는 것으로 가정할 때, 이러한 처리 과정에서 갑작스런 지진사고에 의한 연료의 낙하, 횡방향 충돌이 발생되는 경우에도, 유사한 조건으로 하중을 모의하고, 시료에 발생되는 응력상태와 충격 후 시편의 상태를 확인하여 구조건전성을 평가할 필요성이 있다(실험유형 4). 이상의 예상되는 시험평가 항목과 평가의 기준을 Table 1과 같이 정리하였다.

3. 결론

회수가능한 사용후 핵연료의 수송과 건식저장을 위해서 외부하중 특히 시간에 따라 변화되는 동적하중으로 수송 및 보관용기 내 핵연료의 건전성과 동적특성에 대한 시험자료의 확보가 필요하다. 이러한 연구는 저장 및 수송 중 사용후 핵연료 집합체의 구조 건전성을 평가하기 위한 기술기반과 평가체계를 갖추는 일을 우선적인 목표로 보고 있다. 이를 위해서 앞으로 다양한 실험 프로그램이 개발되고 실험수행의 근거가 마련되어야 하며, 해당 프로그램을 구체화 시키는 실험 장치의 설계와 구축이 시급히 필요하다. 하나의 예로, 동적하중 모사 시험 장치는 제어장치를 통하여 입력된 다양한 형태의 시간이력 하중(지진 또는 이송/수송이력)을 컨트롤러를 통하여 공급 및 분배 장치로 진동대를 이용하여 구현하고 진동대 위에 놓여진 모사 핵연료 시료에 부과 해주어 사용후핵연료 동적특성을 평가할 것으로 기대된다.

Table 1. Anticipated experimental programs for integrity evaluation of spent fuel transportation and dry storage

Type	Description	Remarks
1,Fatigue	내구성 시험 및 반복하중 피로시험	fatigue life
2.Vibration	동특성시험, 비선형 크기/유형 확인시험 포함, 특성시험	frequency, damping, nonlinarity
3.Impact	단위 충격에 의한 첨점응력 측정시험	Stress limit
4, Drop & Impact	처리중 지진사고에 의한 횡방향 충격 및 낙하에 따른 건전성 평가시험	Strain/Stress limit

4. 감사의 글

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (No. 2014171020166A)

5. 참고문헌

[1] 사용후핵연료 공론화 위원회, 사용후핵연료 관리에 대한 최종 권고안, https://www.pecos.go.kr(2015).

[2] Nicholas Klymyshyn, et al, fuel assembly shaker and truck test simulation, Test report, FCRD-UFD-2014-000328, PNNL-23688 (2014).

[3] Steven B. Ross, et al, used fuel rail shock and vibration testing options analysis, Test report, FCRD-UFD-2014- 000327, PNNL-23709 (2014).