

월성 사용후핵연료 건식저장계통 열화관리방안

정성환*, 정운창

한국수력원자력(주) 중앙연구원, 대전광역시 유성구 유성대로 1312번길 70

*sunghchung@khnp.co.kr

1. 서 론

월성 사용후핵연료 건식저장시설은 수명기간 및 중간저장시설 또는 처분장으로 사용후핵연료를 인도할 때까지 안전하게 운영되어야 하고, 저장구조물의 건전성과 운반을 위한 연료회수성이 유지되어야 하므로 장기저장을 위한 건전성 유지는 중요하다. 원전의 주기적 평가지침은 원전시설 위주로 되어 있어 건식저장시설에 직접 적용하기 위해서는 건식저장시설의 특성에 적합한 방안을 마련하는 것이 바람직하다. 여기서는 월성 콘크리트 사일로 건식저장계통에 적합한 장기 건전성 평가방안을 도출하기 위하여 미국 NRC의 10CFR72, NUREG-1927을 분석하고, 미국 ANL 보고서(ANL-13/15)를 참조하여 적합한 열화관리방안을 수립하고자 하였다.

2. 본 론

건식저장계통의 열화감시는 건식저장계통의 상태를 판단하고 지속적으로 성능을 유지하는 것을 검증하기 위하여 중요하다. 미국 ANL-13/15에서 건식저장계통에 적용한 열화관리방안(AMA)인 시간제한 열화분석(TLAA) 및 열화관리프로그램(AMP)를 Table 1에 나타내었다. 월성 콘크리트 사일로와 유사한 건식저장계통인 NAC의 MAGNASTOR에 적용한 AMA(TLAA, AMP)를 살펴보면(ANL-13/15 v.4.1.4), TLAA 적용항목으로 구성품의 반복하중에 의한 피로와 전기기기의 열화로 인한 환경검증을 제시하였으며, AMP 적용항목은 S1(균열, 부식 등 콘크리트 구조물 감시), M1(SCC, 부식 등 기계구성품 외부표면 감시), M3(SCC, 부식 등 캐니스터 용접부 감시), M5(온도영향 등 내부구조물 건전성 감시)를 제시하였다. Table 1에 나타난 건식저장계통 AMA 적용항목에서 콘크리트 사일로에 적용 가능한 AMA를 추론하면 일반 TLAA 및 구조(S1,S2) 2가지, 기계(M1,M3,M5) 3가지 AMP로 분류할 수 있다. 사일로의 열화감시를 위하여 구성품별로 적용 가능한 AMA를 Table 2에 나타내었다. 내부구성품(탄소강 라이너 및 바스켓)에 대한 감시방안이 필

요할 것으로 여겨지나 사일로 구조물 특성상 용접 밀봉상태이므로 사일로의 내부감시는 어렵다.

Table 1. AMA for concrete dry storage system of ANL

구 분		적용대상
TLAA	일반 TLAA	피로(금속/콘크리트 구성품)
		부식(금속구성품)
		중성자흡수재 열화
		차폐체 열화
		전기기기 환경검증
부지고유 TLAA		
AMP	S1	콘크리트 구조물 감시
	S2	탄소강 구조물 보호코팅 감시
	M1	기계구성품 외부표면 감시
	M2	환기계통 감시
	M3	캐니스터 용접부 감시
	M4	캐니스터 볼트밀봉 감시
연료 회수성		저장연료 감시

Table 2. AMA for Wolsong concrete silos

구 분		적용대상
TLAA	일반 TLAA	콘크리트 구조물
		내부라이너
		바스켓
AMP	S1	콘크리트 구조물
	S2	내부라이너
	M1	내부라이너 표면
	M3	바스켓 표면
	M5	바스켓 용접부
연료 회수성		내부구조물 구조/기능 건전성
		연료/바스켓 격납계통

○ 콘크리트 구조물 감시(S1)

범위는 균열(동결융해, 부식성 화학성분, 접착력 상실, 골재팽창 등), 재료박락 및 접착력 상실(부식성 화학물질, 철근부식 등), 수밀성 및 강도 상실(부식성 화학물질, 중성화, 온도 등), 기초강도저하(상대침하, 기초콘크리트 부식 등) 등이다.

- 원전 구조물 열화현상 점검절차서 활용
- 콘크리트 패드 감시 : 사일로와 패드가 철근으로 연결되었기에 지진등 외부하중 작용시 상호 작용을 하면서 동시거동을 하므로 안전에 중요한 구조물로 감시 필요
- 우수침투방지장치 설치 : 사일로 상부의 콘크리트 박리 및 접착력 상실을 방지하고, 동결융해에 의한 수분침투 방지

- 열해영향 평가 : 저장시설이 해안 가까이 위치하므로 평가가 중요하며, 규제기관도 평가 권고
- 보수보강방안 : 외관육안검사 결과에 따른 열화 부분에 대한 보수보강방안 제시
- 콘크리트 비파괴강도 평가 : 비파괴시험과 함께 콘크리트 코어를 추출하여 압축강도시험을 실시하여 강도추정식 도출 필요

○ 탄소강 구조물의 보호코팅 감시(S2)

사일로 내부 탄소강 라이너의 보호코팅에 대한 건전성을 감시하기 위하여 배수관과 배기관을 이용한 간접적인 방법으로 수행한다.

○ 바스켓 표면감시(M1) 및 용접부 누설감시(M3)

스테인리스강으로 된 바스켓 표면 및 용접부에 대한 누설을 감시하기 위한 것으로서 탄소강 구조물의 보호코팅 감시(S2)와 동일하게 격납감시를 수행하여 간접적으로 평가한다.

- 방사선감시계통에 의한 바스켓의 방사성물질 누설감시
- 휴대용 선량률감시기에 의한 콘크리트 구조물에 대한 방사선량률 감시
- 펜스경계에 설치된 TLD에 의한 저장구역 경계의 방사선량률 감시
- 집수정의 지표수 및 관정의 지하수 시료에 대하여 감마동위원소와 삼중수소를 분석하여 방사성 물질 누출 확인

○ 내부구조물의 구조/기능적 건전성 감시(M5)

AMP가 적용되는 부분은 사일로 내부의 스테인리스강 바스켓과 바스켓 내부의 사용후핵연료이며, 고온 및 방사선에 의한 열전달, 방사선차폐, 지지구조 기능의 저하에 대한 감시 등이 포함(온도 및 방사선으로 인한 사용후핵연료와 바스켓 건전성, 연료 회수성, 운반성 영향 등 포함)된다. 그러나 사용후핵연료의 장기건식저장에 대한 건전성을 확인하는 것은 중요하므로 건식저장상태의 실제 중수로 사용후핵연료를 대상으로 하여 열화특성분석을 위한 실증시험이 필요하다고 판단된다.

○ 시간제한 열화분석(TLAA)

설계수명 종료시점에서의 열화특성을 TLAA를 이용하여 도출하고, 이러한 열화특성을 반영하여 장기건전성 평가를 수행하였다. 현재까지 20여년이 경과한 시점에서의 사일로에 대한 압축강도 추정치와 설계수명 종료시점에서의 압축강도 추정치를 입력자료로 활용하여 구조해석을 수행하여 구조적 건전성을 평가하였다. 또한 콘크리트, 스테인리스강, 탄소강 시편을 대상으로 방사선 조사영향에 따른

강도시험을 수행하여 구한 열화특성 물성치를 해석에 반영하였다. 차폐해석은 사일로의 균열이 시간에 따라 폭 및 깊이가 증가한다고 가정하고, 설계수명 종료시점에서의 영향을 분석하기 위하여 콘크리트 균열모사시험 및 균열의 크기와 진전에 따른 차폐영향을 실험을 통하여 콘크리트 사일로의 차폐성능을 확인하였으며, 방사선적 위해가 발생하지 않는 것으로 나타났다. 설계기준 연소도를 초과하는 연료가 장전된 바스켓이 있는 사일로를 기준으로 열화에 의하여 내부라이너의 표면상태가 변화되고 표면방사율이 변화하는 경우를 가정하여 열해석을 수행하고 콘크리트 사일로의 온도분포 및 온도이력에 미치는 영향을 평가하였으며, 설계수명 종료시점에서 열적 문제는 없는 것으로 평가하였다. 이외에도 상용전산해석코드를 이용한 열화물이온 침투해석과 미국 ACI에서 개발한 전용프로그램을 이용하여 열해영향을 평가하여 콘크리트의 잔존내구수명을 평가하였다.

3. 결론

월성 콘크리트 사일로 건식저장계통의 장기저장 건전성에 대한 안전성 확보를 위하여 건식저장계통 및 사용후핵연료에 대한 열화관리방안을 분석하여 건식저장시설의 특성과 현장의 여건에 부합되는 현실적인 장기관리프로그램을 수립하여 시행하는 것이 필요하다. 국내실정에 적합한 건식저장계통의 열화관리방안을 마련하기 위하여 국내 원자력안전 법령, 미국의 건식저장시설 인허가연장 관련 규정과 기술기준, 안전성분석보고서 및 기존의 원전절차서를 분석하였으며, 또한 건식저장계통의 열화관리를 위한 점검항목별로 최신의 기술현황을 분석하여 향후 열화관리에 적용할 수 있는 기술을 분석하였다. 현재 미국에서 인허가를 받아 운영중인 콘크리트 건식저장계통에 적용한 열화관리방안(AMA)을 분석하여 월성 콘크리트 사일로 건식저장계통에 적용할 수 있는 열화관리방안을 도출하였다.

4. 참고문헌

[1] USNRC NUREG-1927, SRP for Renewal of SF Dry Cask Storage System Licenses and C of C.
 [2] ANL-13/15, Managing Aging Effects on Dry Storage Cask Systems for Extended Long-Term Storage and Transportation of UF, 2013.
 [3] ANL-13/16, Dry Cask Storage Inspection and Monitoring, 2012.