

운반용기의 단기운영공정 열전달 해석 방법론

김형진^{1*}, 이동규², 강경욱¹, 조천형¹

¹한국원자력환경공단, 대전광역시 유성구 가정로 168

²(주)코네스코퍼레이션, 서울특별시 서초구 명달로 65

*hjkim@korad.or.kr

1. 서론

건식 용기를 사용한 운반 및 저장 시, 사용후핵연료 다발의 회수성 및 건전성을 유지하기 위해서 핵연료 피복관 온도는 400°C 이내를 유지해야 한다[1-2]. 이러한 온도 제한 조건은 사용후핵연료 다발을 운반 용기에 장전하는 과정인 단기운영공정에도 적용된다[3]. 따라서 해당 제한 조건을 만족하도록 각 공정의 열전달을 평가하고 이를 바탕으로 작업 제한 시간을 결정해야 한다.

단기운영공정(short-term operations)이란 사용후핵연료의 운반 용기 장전에서부터 용기를 운반하기 전까지 사용후핵연료 건물에서 발생하는 일련의 작업공정을 의미한다. 단기운영공정은 내부 매질에 따라 습식공정, 진공건조공정 및 건식공정의 3가지로 구분할 수 있다. 습식공정은 사용후핵연료 장전, 제염조로 용기 이동, 캐니스터(canister) 뚜껑 용접 등을 포함하며, 용기 내부가 물로 채워져 있는 공정이다. 진공건조공정은 용기 내부 환경을 건식으로 만들어 주기 위하여, 용기 내부의 물을 배수하고 잔여 수분을 제거하기 위한 공정으로 내부 환경이 진공인 상태이다. 건식공정은 진공건조공정 이후 용기 내부를 헬륨으로 충전하여 건식 환경이 조성된 공정이다. 각 공정은 매질 차이로 인해서 열전달 환경 및 열전달 모드가 변경되므로, 온도 분포는 공정별로 다른 경향을 보인다. 습식공정은 물에 의한 대류, 전도 및 복사 열전달이 발생하며, 진공건조공정은 매질 부재로 인해서 복사 열전달만이 발생한다. 또한 건식공정의 경우 충전 기체(헬륨)가 존재하므로 모든 열전달 현상이 발생한다.

습식공정의 열전달 평가 및 이에 따른 작업시간 결정 시, 용기 내부에 존재하는 물의 국부적인 비등이 발생하지 않도록 작업 시간을 결정해야 한다. 국부적 비등으로 인하여 용기 내부압력이 급격하게 증가하여 압력 제어가 어려워지고, 사용후핵연료와 매질(물)간 열전달이 감소하여 사용후핵연료의 온도 증가를 유발하기 때문이다. 또한 진공건조공정은 매질 부재로 인하여 외부 환경으로 열전달이 가

장 나빠지는 공정이며, 이로 인하여 용기 내부의 온도 증가가 빠르게 진행되므로 이에 대한 상세한 분석이 요구된다.

이와 같이 단기운영공정을 구성하는 공정들은 다른 매질과 열전달 환경을 가지고 있다. 따라서 단기운영공정 열전달 해석은 각 공정별로 해당 공정의 특성에 맞는 매질 및 해석모형을 적용하여, 작업시간에 대한 과도상태 열전달 해석을 수행해야 한다.

본 논문에서는 단기운영공정 시 운반 용기의 안전성 평가를 위하여 각 공정별 열전달 특성 파악 및 해석 방법론을 제시하였다.

2. 열전달 해석 방법 분석

2.1 공정에 따른 용기 내부의 매질 특성

작업공정에 따라 캐니스터 내부 매질이 변경되기 때문에, 단기운영공정은 각 공정별로 다른 열전달 환경을 갖는다. 따라서 공정별로 작업 시간에 따른 온도이력 변화가 발생하고, 경우에 따라서는 사용후핵연료 피복관의 건전성을 위해 외부 냉각 장치에 의한 냉각을 필요로 한다.

습식공정은 사용후핵연료 장전, 제염조로 용기 이동, 캐니스터 뚜껑 용접 등의 공정을 포함하며, 캐니스터 내부가 물로 채워져 있는 공정이다. 따라서 캐니스터 내부의 열전달 모드는 물에 의한 대류 및 전도이며, 복사는 물의 특성상 발생하지 않거나 매우 미미할 것이다.

진공건조공정은 캐니스터 내부 환경을 건식환경으로 만들어 주기위한 전 단계로 캐니스터 내부의 물이 배수되고 잔여 수분을 제거하기 위한 공정이다. 따라서 내부 매질이 존재하지 않기 때문에, 캐니스터 내부의 열전달은 주로 복사에 의해서 이루어질 것이다. 매질 부재로 인하여 진공건조공정은 단기운영 공정 중 가장 열악한 열전달 환경이므로 온도 증가가 빠르게 이루어진다. 사용후핵연료에서 발생하는 붕괴열의 정도에 따라 외부로부터의 냉각수 주입에 의한 냉각이 필요할 수도 있는 공정이다.

건식공정은 진공건조공정 후 캐니스터 내부를 건식환경으로 만들어 주기 위해서 헬륨을 충전한 이후의 공정이다. 따라서 캐니스터 내부 환경은 건식환경을 유지하며, 열전달 모드는 헬륨에 의한 전도, 대류와 복사이다.

2.2 공정별 열전달 해석 방법

습식공정에 대한 열전달 해석 시, 사용후핵연료를 캐니스터에 장전하는 과정은 고려하지 않았다. 사용후핵연료를 장전하는 과정은 습식저장조 물과 캐니스터 내부가 열평형 상태이기 때문이다. 사용후핵연료 장전 후 작업은 캐니스터 뚜껑 용접이며 제조소에서 수행된다. 해당 공정 동안 운반 용기 표면과 연료건물 내 환경사이에서는 열교환이 이루어지며, 캐니스터 내부 물과 장전된 사용후핵연료는 시간이 지남에 따라 온도가 상승한다. 이러한 열전달을 평가하기 위해서 보수적으로 캐니스터 내부의 전도만을 고려한다. 습식공정에 대한 열전달 해석을 위한 해석모델은 금속 운반 용기 각 구성요소를 포함해야 하고 수직설치 상태에 대한 모델을 적용한다. 열전달 해석은 공정 작업시간을 고려한 과도상태 해석을 요하며 초기조건은 46°C 열평형 상태[3]를 적용한다.

진공건조공정은 캐니스터 내부에 매질이 존재하지 않기 때문에 열전달 성능이 좋지 않다. 따라서 캐니스터 내부 온도가 급격하게 증가하고, 이로 인하여 사용후핵연료 피복관이 제한 온도를 초과할 수 있다. 그러므로 필요에 따라서 캐니스터 외부와 용기내부 사이의 환형공간(annulus)을 통해 냉각을 해야 할 필요성이 있다. HI-STORM100 및 MAGNASTOR 용기는 환형공간을 통한 냉각을 필요로 한다. 이러한 용기는 내부 붕괴열에 따라 냉각 방법을 달리 하거나 시간제한을 둔다. 해석 대상인 운반 용기의 붕괴열이 상대적으로 낮을 경우, 환형공간을 통한 냉각은 필요하지 않을 것으로 판단된다. 그러나 캐니스터 내부의 환경변화에 따른 온도 증가는 발생할 것이므로, 사용후핵연료 피복관 온도를 평가할 필요성은 있다.

건식공정은 캐니스터 내부가 헬륨으로 충전되어 있는 상태이다. 따라서 열전달 모드는 전도, 대류 및 복사 전부를 적용한다. 이러한 상황은 용기가 수평 방향으로 설치되는 정상운반조건과 동일한 상황이다. 즉 정상운반조건의 해석결과가 건식공정의 결과를 포함할 수 있을 것이다.

단기운영공정 열전달해석을 위해서는 공정별 작

업시간을 결정해야 한다. 이를 위해서 국외 건식용기인 HI-STORM100과 NUHOMS 시스템의 작업시간[4-5]을 참고하였다. 두 시스템의 작업시간을 고려하여 보수적으로 습식공정 15 시간, 배수공정 3 시간, 진공건조공정 3 시간으로 설정한다.

3. 결론

원자력발전소 연료 건물 내에서 연료 장전을 포함한 단기운영공정시 사용후핵연료 피복관 온도는 400°C이하를 유지하도록 권고하고 있다[3]. 이에 단기운영공정을 습식공정, 진공건조공정 및 건식공정으로 구분한 열전달 해석방법론을 제시하였다. 각 공정별 열전달 및 매질 특성을 분석하였으며, 이를 개발 중인 운반 용기를 평가하는데 활용이 가능할 것이다.

4. 감사의 글

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구과제입니다(No. 2014171020173A).

5. 참고문헌

- [1] US Government, Licensing Requirements for the Independent Storage of Spent Nuclear Fuel and High Level Radioactive Waste and Reactor-Related Greater than Class C waste. 10 CFR 72 (2014).
- [2] US Nuclear Regulatory Commission (NRC), Standard Review Plan for Spent Fuel Dry Storage Facilities. NUREG-1567 (2000).
- [3] US Nuclear Regulatory Commission (NRC), Standard Review Plan for Dry Cask Storage Systems. NUREG-1536 (2009).
- [4] Holtec International Inc., Final Safety Analysis Report for the HI-STORM 100 Cask System, Rev.9 (2010).
- [5] AREVA Inc., Final Safety Analysis Report for the NUHOMS Horizontal Modular Storage System for Irradiated Nuclear Fuel (2010).