

Development of the Vacuum Drying Process for the PWR Spent Nuclear Fuel Dry Storage

경수로 사용후핵연료 건식저장을 위한 진공건조공정 개발

Chang-Yeal Baeg* and Chun-Hyung Cho

Korea Radioactive Waste Agency, 168, Gajeongro, Yuseong-gu, Daejeon, Republic of Korea

백창열*, 조천형

한국원자력환경공단, 대전광역시 유성구 가정로 168

(Received October 7, 2016 / Revised November 28, 2016 / Approved December 8, 2016)

This paper describes the development of a dry operation process for PWR spent nuclear fuel, which is currently stored in the domestic NPP's storage pool, using a dual purpose metal cask. Domestic NNPs have had experience with wet type transportation of PWR spent nuclear fuel between neighboring NPPs since the early 1990s, but no experience with dry type operation. For this reason, we developed a specific operation process and also confirmed the safety of the major cask components and its spent nuclear fuel during the dual purpose metal cask operation process. We also describe the short term operation process that was established to be completed within 21 hours and propose the allowable working time for each step (15 hours for wet process, 3 hours for drain process and 3 hours for vacuum drying process).

Keywords: Dual purpose metal cask, Dry storage, Operation process, Vacuum drying, He backfilling

*Corresponding Author.

Chang-Yeal Baeg, Korea Radioactive Waste Agency, E-mail: baegcy@korad.or.kr, Tel: +82-42-601-5341

ORCID

Chang-Yeal Baeg <http://orcid.org/0000-0001-7586-6501>

Chun-Hyung Cho <http://orcid.org/0000-0001-5258-6646>

본 논문은 국내 원전의 습식저장조에 저장 중인 경수로형 사용후핵연료를 금속겸용용기를 이용해 건식으로 운영하기 위한 운영공정을 개발하는 것이다. 국내 경수로형 원전의 사용후핵연료는 1990년대 초부터 습식으로 소내에서 운반을 한 경험은 많으나 건식으로 운전한 경험은 전혀 없는 실정이다. 이에 따라 금속겸용용기를 운영할 수 있는 세부 운영공정을 개발하였으며 주요 운영공정에서 금속겸용용기의 주요 구성품 및 사용후핵연료의 안전성이 유지됨을 확인하였다. 단기운영공정은 총 21시간 내에 이루어지도록 절차를 수립하였고 단계별로 허용운전 시간(15시간 습식공정, 3시간 배수공정, 그리고 3시간 진공공정)도 제시하였다.

중심단어: 금속겸용용기, 건식저장, 운영절차, 진공건조, 헬륨충진

1. 서론

국내에서 운영되고 있는 24기의 경수로형 원전 중 일부는 2024년부터 사용후핵연료 저장조의 용량포화가 예상되고 있다. 현재, 국내에서 개발 중인 사용후핵연료 수송/저장 시스템 최적화 기술개발과제의 일환으로 사용후핵연료를 건식으로 운반하여 저장할 수 있는 캐니스터 방식의 금속겸용용기(dual purpose metal cask)와 저장 전용인 콘크리트 저장용기(concrete storage cask)를 개발하고 있다. 국내 경수로형 원전의 사용후핵연료는 1990년대 초부터 습식으로 소내에서 운반을 한 경험은 많으나 건식으로 운전한 경험은 전혀 없었다. 사용후핵연료를 습식저장조에서 금속겸용용기에 장전하여 건식저장시설로 운반하기 전까지 사용후핵연료 저장건물 내에서 이루어지는 일련의 작업공정을 단기운영공정(short term operation process)이라 하는데 주요 공정으로는 연료건물 저장수조에서 금속겸용용기에 연료장전, 용기 이동 및 제염조에서 캐니스터 뚜껍용접, 캐니스터 내부 배수, 진공건조 및 불활성 기체 충전 등의 작업공정을 말한다. 이러한 단기운영공정은 공정별로 열전달 모드가 변경되는데 습식공정(특히 캐니스터 뚜껍 용접) 동안 용기내부에서 물이 비등하지 않아야 하고 진공건조공정에서는 사용후핵연료 피복관 온도가 제한기준을 만족하여야 한다. 본 논문에서는 미국의 원자력규제위원회의 규제지침인 NUREG-1536을 참고하여 용기 및 캐니스터의 내부 배수, 진공건조(vacuum drying) 및 매질 충전(backfilling) 등 단기운영공정 시 사용후핵연료 피복관의 온도를 제한규정 이하로 유지토록 하고 운영단계(연료장전, 배수, 진공건조, 내부매질 충전 등)별로 피복관 온도가 제한온도에 도달하기 전까지의 허용시간을

명시하도록 요구하고 있다[1]. 이에 따라 국내 원전의 시설 및 금속겸용용기를 이용한 건식저장 시스템의 특성을 고려하여 세부 운영공정을 개발하였으며 운영단계별로 금속겸용용기의 주요 구성품 및 사용후핵연료의 구조 및 열적 안전성을 평가하였다.

2. 금속겸용용기 운영특성

금속겸용용기는 경수로형 사용후핵연료 21다발을 건식(용기 및 캐니스터 내부의 물을 제거하고 불활성 기체인 헬륨을 채움)으로 운반 및 저장을 겸용으로 할 수 있도록 설계되었으며 사용후핵연료가 장전된 금속겸용용기는 저장시설의 저장용 패드 위에 수직으로 저장된다. Fig. 1에서 보는 바와 같이 금속겸용용기는 단조 탄소강의 두꺼운 벽 두께를 갖는 원통형 용기로 이루어지며 용기뚜껍은 단조 스테인리스강으로 제작된다. 용기 뚜껍에는 금속 재질의 이중 오링(o-ring)이 설치되며 40개의 육각 볼트로 용기본체와 체결된다. 용기 뚜껍의 배기포트(vent port)와 용기 하부의 배수포트(drain port)는 금속 오링을 갖는 포트커버(port cover)로 기밀을 유지한다. Fig. 2에서 보는 바와 같이 캐니스터는 바스켓 집합체와 이를 지지하는 디스크(disc), 지지봉(support rod), 캐니스터 셸(canister shell), 캐니스터 바닥판(canister baseplate), 캐니스터 뚜껍(canister lid), 밀폐 링(closure ring)으로 구성되며, 사용후핵연료 21다발이 장전된 내부공간의 자유체적은 약 6.5m³로 진공건조 후 헬륨 가스(He gas)를 채운다. 캐니스터를 이용한 금속겸용용기의 취급에 관한 주요 공정별 개략적인 특성 및 운영절차는 아래와 같다[2].

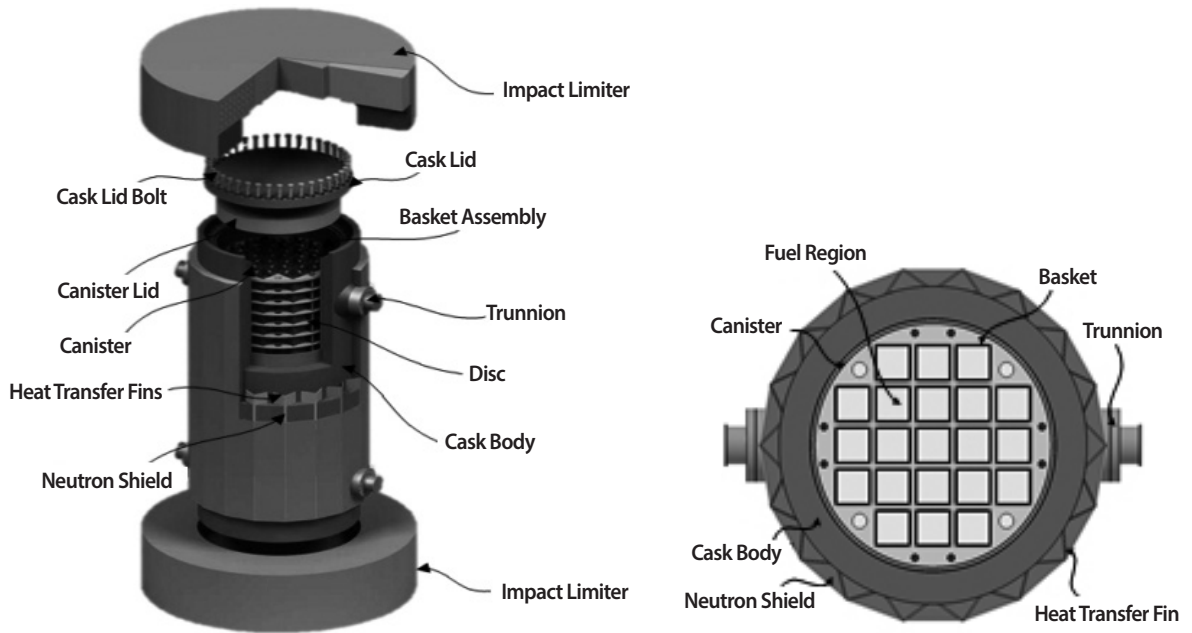


Fig. 1. Configuration of dual purpose metal cask.

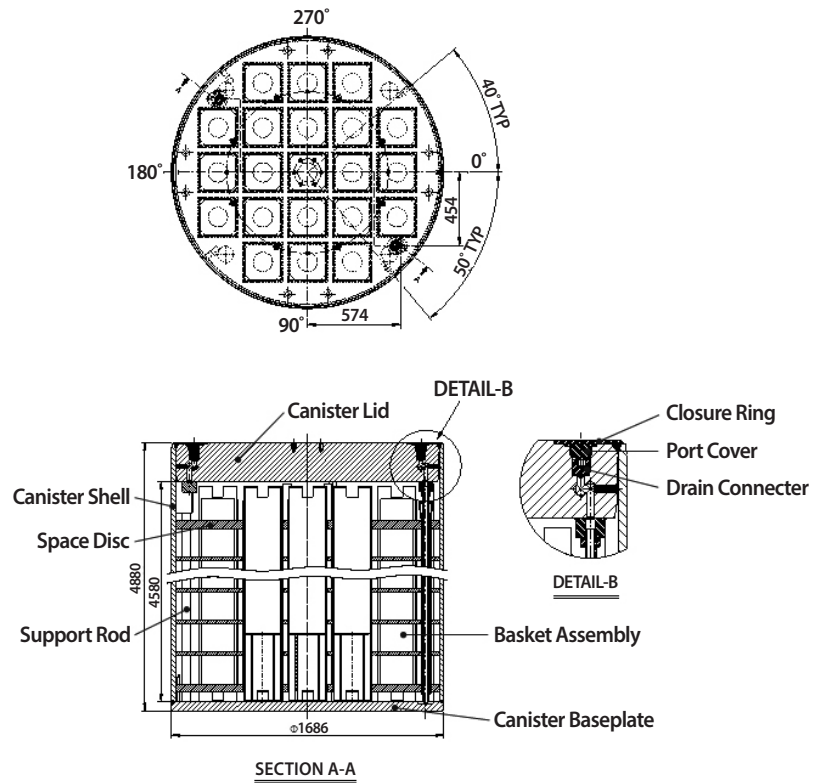


Fig. 2. Cross section of canister and port details.

2.1 사용후핵연료 장전

사용후핵연료를 장전하기 위해서는 금속검용용기 및 캐니스터에 대한 인수검사 및 모의시험을 수행하여 이상이 없음을 확인한 후 원전 연료건물 제염조에서 금속검용용기와 캐니스터의 뚜껑을 분리한다. 금속검용용기 내부 셸과 캐니스터 외부 셸 사이의 환형 공간(annulus space)에 탈염수를 채우고 환형 공간 상부에 지정된 위치에 환형 공간 씬(seal)을 장착한다. 환형 공간 씬은 사용후핵연료 저장조의 탈염수 유입을 차단하여 캐니스터 외부 표면의 방사능오염을 방지한다.

용기 인양장치를 사용하여 캐니스터를 포함한 금속검용용기를 장전조 내로 이동시키고 장전조를 충수한다. 충수가 완료되면 미리 선별된 사용후핵연료를 캐니스터 바스켓에 장전하며 장전된 사용후핵연료의 이력을 확인 및 기록한다.

2.2 금속검용용기 이송

사용후핵연료의 장전이 완료된 후 수중에서 캐니스터 뚜껑을 안착하고 적절히 장착되었는지 확인한다. 캐니스터 뚜껑 장착이 완료된 후 장전조의 물을 배수하고 인양장치를 원격으로 금속검용용기 트리니언에 연결하여 금속검용용기를 작업자가 접근 가능한 높이까지 인양하고 금속검용용기 및 캐니스터 상부표면의 방사선량을 측정한다. 금속검용용기가 장전조에서 제염조로 이송되기 전에 금속검용용기 표면에 탈염수를 살수하여 오염물질을 제거한다.

2.3 진공건조

사용후핵연료를 저장한 금속검용용기를 제염조로 이송하여 캐니스터 뚜껑 및 금속검용용기 표면을 제염한다. 환형 공간 씬을 제거하고 환형 차폐체를 설치한다. 이는 환형 공간의 방사선에 대한 추가적인 차폐와 이물질 유입을 방지한다. 캐니스터 내부의 물을 약간 배수하고 캐니스터 뚜껑을 캐니스터 셸에 용접절차에 따라 자동용접을 수행하며 용접부에 대한 비파괴 검사(액체침투탐상검사)를 수행한다. 캐니스터 뚜껑에 설치된 배수 라인을 이용해 캐니스터 내부 배수를 완료하고 진공건조장치(vacuum drying equipment)를 사용하여 캐니스터 내부를 충분히 건조시킨 후 헬륨 가스로 채워 캐니스터 내부의 열전달 성능을 보장하고 불활성 환경을 형성한다.

2.4 금속검용용기 마감

캐니스터 뚜껑부위의 이중 밀봉을 위해 포트커버 용접 후 밀폐 링 설치 및 용접을 수행하며 비파괴 검사를 수행한다. 캐니스터 상부의 오염물질 제거 및 표면오염도 검사를 수행한다. 금속검용용기의 뚜껑을 설치되고 규정된 토크에 따라 볼트를 체결한다. 진공건조장치를 이용하여 환형 공간을 포함한 용기 내부를 진공건조 시키고 헬륨을 채워 불활성 환경을 형성한다.

2.5 운반 및 저장

금속검용용기를 운반차량에 상차하고 충격완충체 및 보호용 후드를 설치한 후 규제기관의 운반검사를 받고 지정된 건식저장시설로 운반하여 저장한다.

3. 단기운영공정 안전성 평가

단기운영공정이란 사용후핵연료를 금속검용용기에 장전하고부터 운반하기 전까지 원전의 사용후핵연료 건물에서 이루어지는 일련의 작업공정을 의미한다. 이러한 단기운영공정에는 연료건물에서 용기에 사용후핵연료 장전, 캐니스터 뚜껑 용접, 캐니스터 내부 배수, 진공건조 및 헬륨 충전 등의 공정을 포함한다. 이러한 단기운영공정은 공정별로 열전달 환경과 열전달 모드가 변경되므로 시간이력 온도분포는 각 공정별로 서로 다른 경향을 보이게 된다. 특히, 진공건조 공정은 사용후핵연료에서 발생한 열이 외부로 제거되는 능력이 가장 떨어지는 공정이므로 이에 대한 상세한 분석이 요구된다. 또한 단기운영공정은 시간에 따라 정해진 단계를 거치므로 어느 공정 하나에 초점을 맞춰 열전달해석을 수행하기가 난해하기 때문에 연료장전에서부터 시간에 따른 온도이력을 추적해야 한다. 이에 따라 본 장에서는 단기운영공정에 대한 열전달 안전성평가를 수행하고 그 결과를 제시하였다.

3.1 안전성 평가 기준

본 안전성 평가에 적용한 미국의 규제지침인 NUREG-1536 (Standard Review Plan for Dry Cask Storage Systems)에

의하면 용기의 내부건조 및 매질 충전 공정을 포함한 단기 운영과정 시 사용후핵연료 피복관 온도는 400℃ 이하로 유지되도록 규정하고 있다. 또한 단기운영과정별로 사용후핵연료 피복관의 온도가 제한온도에 도달하기까지 허용되는 시간을 명시하도록 요구하고 있다[1].

- 정상운전 및 단기운영조건에서 사용후핵연료 피복관의 제한온도(400℃)는 45 GWd/MTU 이내의 저연소도 사용후핵연료에 적용되며, 피복관에서 90 MPa 이내의 hoop stress가 예측되는 온도이다.

또한 NUREG-1536에서는 본 안전성 평가의 대상인 단기 공정 중 잔류 수분 및 불순물을 제거하는 방법으로 진공 펌프를 이용한 건조방법을 허용하는데 장기간 건식저장 중 피복관의 열화에 영향을 주지 않고 건전성이 보장되는 건조 조건으로 진공건조공정에서 규정 진공도(압력)인 3 torr에서 30분간 유지 시 압력 변화가 없어야 한다고 규정하고 있다.

3.2 공정별 열전달 특성

단기운영과정 열전달 특성은 작업공정에 따라 캐니스터 내부 매질이 변경되기 때문에 공정에 따라 열전달 환경이 변한다. 따라서 공정별 시간에 따른 온도이력 변화가 심하게 발생하고 경우에 따라서는 사용후핵연료 피복관 건전성을 위해 외부 냉각장치에 의한 냉각을 필요로 한다.

3.2.1 습식공정

사용후핵연료 저장작업 중 습식으로 수행되는 주요 공정은 사용후핵연료 장전, 제염조로 용기 이동, 캐니스터 뚜껑용접 등의 공정으로 금속검용용기와 캐니스터 내부 매질이 물로 채워져 있는 공정이다. 따라서 캐니스터 내부에서의 열전달은 물에 의한 대류 및 전도 열전달이 발생하며 복사열전달은 내부 매질인 물의 특성상 발생하지 않거나 매우 미미하다. 이러한 습식공정에서는 사용후핵연료 피복관의 온도제한뿐만 아니라 내부 매질인 물의 비등이 발생하지 않도록 작업시간이 결정되어야 한다.

3.2.2 진공건조공정

진공건조공정은 캐니스터 내부 환경을 건식환경으로

만들어주기 위한 전 단계로 캐니스터 내부에 존재하는 물이 배수되고 잔여 수분을 제거하기 위한 진공건조공정으로 내부 환경이 진공인 상태를 의미한다. 따라서 캐니스터 내부에서의 열전달은 내부 매질이 존재하지 않으므로 유일하게 복사열전달만 일어나게 된다. 진공건조공정은 단기운영 공정 중 가장 열악한 열전달 환경이 만들어지므로 온도증가가 가장 빠르게 발생하는 공정이다.

3.2.3 건식공정

건식공정은 캐니스터 내부를 진공건조 후 불활성 기체인 헬륨을 채운 건식환경으로 열전달은 내부 매질인 헬륨에 의한 전도 및 대류가 발생하며 캐니스터 내부에서 복사열전달이 일어난다.

3.3 안전성 평가

3.3.1 습식공정

습식으로 운영되는 주요 공정은 원전 연료건물 장전조에서 사용후핵연료를 장전하고 용기를 이송하여 제염조에서 캐니스터 뚜껑용접 공정 등을 포함한다. 이러한 공정에서 금속검용용기 캐니스터의 내부는 물로 채워진 상태이다. 장전조에서 사용후핵연료를 캐니스터 내부에 장전하는 과정에서 열전달은 습식저장조 물의 온도와 평형을 이루므로 장전조에서의 공정에 대한 열전달 해석은 생략하였으며 제염조로 이동한 후 공정에 대한 열전달 해석을 수행하였다. 제염조에서의 주요 공정은 캐니스터 뚜껑을 용접하는 공정으로 금속검용용기 외부표면은 원전 연료건물 내부 환경과 복사 및 대류 열교환이 발생한다. 그리고 캐니스터 내부의 물과 장전된 사용후핵연료는 시간이 지남에 따라 온도가 상승한다. 이러한 열전달을 평가하기 위해서 보수적으로 캐니스터 내부에서의 자연대류는 무시하고 전도에 의한 열전달만을 고려하였다. 습식공정에 대한 열전달 해석을 위한 해석모델은 3차원 모델은 적용하고 해석 코드는 FLUENT 13.0을 사용하였다. 3차원 모델은 금속검용용기 각 구성요소를 포함하고 수직설치 상태에 대한 모델을 적용하였다. 열전달 해석은 공정작업시간을 고려한 과도상태 해석을 요하며 초기조건은 NUREG-1536에 제시된 46℃로 열평형 상태로 적용하였다. 습식공정에서 평가해야 할 주요 항목은 캐니스터 내부에 물이 채워져 있기 때문에 캐니스터 내부에서 물의 비등이

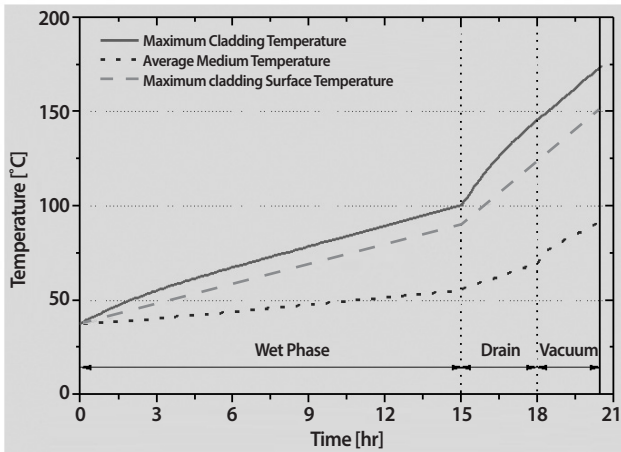


Fig. 3. Temperature distribution during the short term operation process.

발생하지 않도록 해야 하고 최대 허용운전시간을 제시해야 한다.

3.3.2 진공건조공정

진공건조공정은 캐니스터 내부의 물이 배수되고 잔여 수분을 제거하기 위해서 캐니스터 내부를 진공상태로 만들어 주는 공정이다. 캐니스터 내부가 진공상태로 유지됨에 따라 내부 열전달은 급속하게 감소하게 된다. 즉, 캐니스터 내부에 매질이 존재하지 않기 때문에 매질에 의한 전도열전달 및 대류열전달이 발생하지 않게 된다. 이러한 조건에 대한 열전달 성능은 매우 낮기 때문에 캐니스터 내부 온도는 급격하게 증가하고 사용후핵연료 피복관 제한 온도를 초과할 수 있다. 그러므로 필요에 따라서 캐니스터 외부와 용기내부 사이의 환형 공간을 통해 냉각을 할 필요성이 발생한다. 국외 상용 저장용기 중 HI-STORM100, MAGNASTOR 등 일부는 환형 공간을 통한 냉각을 한다. 그러나 해석대상인 금속겸용용기는 붕괴열이 낮은 편이어서 캐니스터 외부와 용기내부 사이의 환형 공간을 통한 냉각은 필요하지 않은 것으로 판단된다. 그러나 캐니스터 내부의 환경변화에 따른 온도 증가가 예상되므로 사용후핵연료 피복관 온도를 평가할 필요가 있다. 진공환경에 대한 열전달 평가를 위한 해석모델은 습식공정 모델과 동일하며 해석 코드는 또한 동일한 코드를 사용하였다. 다만, 캐니스터 내부는 진공상태이므로 매질이 존재하지 않아 복사열전달만이 발생하게 된다.

3.3.3 건식공정

진공건조 공정 이후의 공정은 헬륨이 충전되고 용기 뚜껑이 설치되는 건식공정이 수행된다. 이러한 공정에서의 열전달 모드는 내부 충전 매질인 헬륨에 의한 대류열전달, 캐니스터 내부 복사열전달 및 전도열전달이 발생한다. 이러한 상황은 설치방향만 다를 뿐 정상운반조건과 동일한 상황이다. 따라서 사용후핵연료 피복관 건전성 관점에서 보면 정상운반조건 해석결과가 건식공정 결과를 포괄한다.

3.4 평가 결과

사용후핵연료 21다발을 운반하여 저장하기 위한 금속겸용용기에 대한 단기운영공정 열전달 해석은 최대 연소도 45,000 MWd/MtU의 최대 열부하 16.8 kW 조건을 기준으로 수행하였으며 캐니스터 내 매질 조건에 따라 습식공정, 배수공정 및 진공건조공정으로 분리하여 과도상태 열전달 해석을 수행하였고 그 결과를 Fig. 3 및 Table 1의 단기운영공정 시간이력 온도분포에 제시하였다. 단기운영공정 중 습식공정은 원전 연료건물의 장전소에서 21다발의 사용후핵연료를 용기 내에 장전하고 제염조로 이동하여 캐니스터 용기 뚜껑을 용접하는 공정을 포함한다. 이러한 공정은 캐니스터 내부가 물로 채워져 있는 상태이며 물의 비등이 발생하지 않도록 해야 한다. 습식공정은 15시간을 고려한 과도상태 열해석을 수행하였으며 해석결과 캐니스터 내부에 채워져 있는 물의 온도는 69.7°C 피복관 표면 최대온도는 90.6°C로 비등은 발생하지 않는다. 또한 각 구성요소의 최대사용온도는 허용 온도 이내로 건전성이 확보되는 것으로 평가되었다. 건식공정을 위한 배수공정은 진공건조공정을 수행하기 전 캐니스터 내부에 있는 물을 배수하고 건식환경을 제공하기 위한 공정이다. 실제로 캐니스터 내부에 채워져 있는 물을 배수하기 위해서는 캐니스터 상부에서 헬륨을 충전하면서 이루어진다. 그러나 열전달해석은 보수적으로 헬륨이 충전된 상태에서 수행하였다. 작업시간을 3시간으로 고려하였으며 해석결과, 사용후핵연료 피복관 최대온도는 145.8°C로 제한온도인 400°C 미만으로 평가되었으며 또한 각 구성요소의 최대온도는 허용온도 이내로 열적 건전성이 확보되는 것으로 평가되었다. 진공건조공정은 헬륨을 충전하기 전 캐니스터 내부의 수분을 제거하기 위한 공정으로 캐니스터 내부 환경이 진공상태이다. 이러한 진공상태는 열전달 성능이 가장 취약한

Table 1. Maximum temperature of the major components during the short term operation process

Major Components		Max. Temperature [°C]		Allowable Temperature [°C]
		Drain Process	Vacuum Drying Process	
Cask Body	Forged Carbon Steel SA-350 Grade LF3	41.9	43.3	371
Canister Shell	Stainless Steel SA-240 Type 316L	45.6	48.1	427
Neutron Shield	Resin NS-4-FR	41.1	42.4	148
Neutron Absorber	B ₄ C + Aluminum	122.8	160.0	399
Fuel Cladding	Zircaloy	145.8	173.8	400

공정이므로 캐니스터 내부 온도는 급격하게 증가하게 된다. 진공건조공정 열전달 해석을 위해 작업시간은 3시간을 고려하였으며 과도상태 열전달 해석을 수행하였다. 진공건조공정 해석결과, 사용후핵연료 피복관 최대온도는 173.8°C로 제한온도인 400°C 미만으로 평가되었으며 또한 각 구성요소의 최대온도는 Table 1에서 보는 바와 같이 허용온도 이내로 열적 안전성이 확보되는 것으로 평가되었다[3-5].

4. 운영공정 개발

본 장에서는 금속겸용용기에 사용후핵연료가 장전된 상태에서 캐니스터 뚜껑을 용접하고 캐니스터 내부를 배수, 진공건조 및 헬륨 충전하여 저장시설로 운반하기 전까지 원전에서 수행되는 세부 운영절차를 기술하였다. 용기의 환형 공간에 환형 차폐체(annulus shield)를 장착하고, 자동용접기 받침판을 장착하여 추가적인 방사선 차폐를 수행한다. 캐니스터 뚜껑은 자동용접기에 의해 용접되며, 용접 열에 의한 캐니스터 내부 탈염수의 비등(boiling)을 방지하기 위해 용접 전 탈염수의 일부를 배수한다. 용접 완료 후, 캐니스터 내부의 모든 탈염수를 배수하고 진공건조하며 내부를 헬륨으로 충전하여 건식환경을 조성한다. 특히, 캐니스터 내부 배수 및 진공건조 시 규정절차와 운전시간을 준수하여 캐니스터 내부의 비등에 주의하여 운전하여야 한다. 이에 따른 공정별 세부 운영절차를 Fig. 4와 같이 기술하였다.

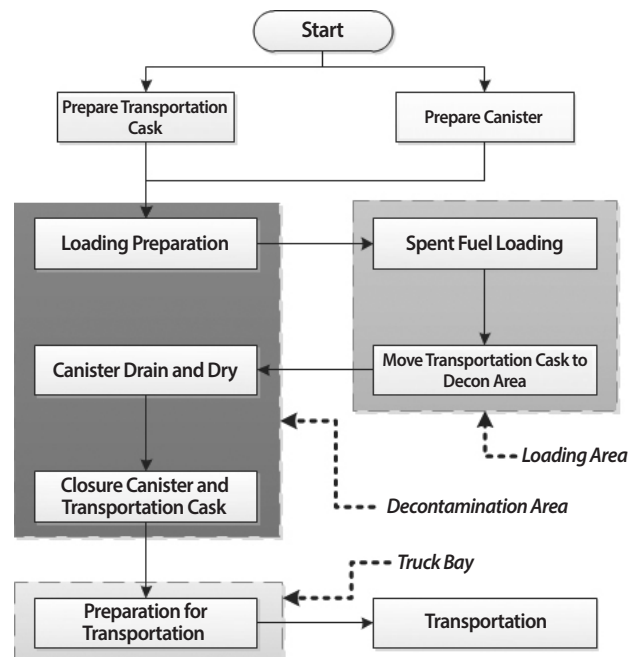


Fig. 4. Operation process for the dual purpose metal cask.

4.1 습식공정

- 1) 금속겸용용기 측면하단 배수 커넥터에 배수장치(water pump)를 연결하여 환형 공간의 탈염수를 일부 배수한다.
- 2) 환형 공간 씌에 주입된 공기를 빼고 환형 공간 씌를 분리한다.

- 3) 환형 차폐체를 장착한다.
 ※ 참고: 환형 차폐체는 환형 공간의 추가 차폐와 이물질 유입을 방지한다.
- 4) 캐니스터 뚜껑 상부의 배수포트 및 배기포트에 캐니스터용 배기/배수 커넥터(vent/drain connector)를 장착한다.
- 5) 배수 커넥터에 배수장치를 연결하고 배기 커넥터에 헬륨공급 장치를 연결한다.
- 6) 배수장치를 가동하여 캐니스터 내부의 탈염수 일부를 배수하고, 헬륨을 채운다.
 ※ 참고: 캐니스터 뚜껑 자동용접시 용접열에 의한 캐니스터 내부 탈염수의 비등을 방지하기 위하여 탈염수 일부를 배수하며, 배수량은 자동용접기 제원에 따라 별도로 최소의 배수량을 선정하여 배수한다. 단, 장전된 사용후핵연료가 공기 중에 노출되어 산화되거나 손상을 입지 않도록 주의하여야 한다.
- 7) 취급장비를 이용하여 자동용접기를 캐니스터 상부에 장착한다.
- 8) 용접 열에 의해 탈염수의 비등이 일어나지 않도록 주의하여 캐니스터 뚜껑 용접을 수행한다.
- 9) 용접이 완료된 후, 용접부의 용접검사 및 압력시험을 수행한다.
- 10) 캐니스터 내부 가스를 제거하기 위해 방사성폐기물 배기계통 라인을 캐니스터 상부 배기 커넥터에 연결하고 탈염수를 주입하여 가스를 배기한다.
- 11) 방사성폐기물 배기계통 라인 및 탈염수 주입장치를 분리한다.

4.2 진공건조공정

- 1) 헬륨공급 장치를 캐니스터 상부 배기 커넥터에 연결하고, 배수장치를 배수 커넥터에 연결하여 헬륨을 주입하며 캐니스터 내부의 탈염수를 배수한다.
- 2) 배수공정 완료 후, 헬륨공급 장치 및 배수장치를 분리한다.
- 3) 진공건조장치(vacuum drying system)를 배기/배수 커넥터에 연결한 후 가동하여 캐니스터 내부의 결빙에 주의하며 압력을 단계적으로 3 torr까지 낮춘다.
 ※ 참고: 캐니스터 내부의 압력이 3 torr가 되면 배기계통의

밸브를 잠그고 30분 동안 관찰한다. 이때 압력에 변화가 없으면 내부가 건조된 것이고 만일 압력이 증가하면 건조작업을 반복하여 수행한다[1].

- 4) 진공건조 완료 후, 진공건조장치를 분리하고 배기 커넥터에 헬륨공급 장치를 연결한다.
- 5) 헬륨 공급밸브를 개방하여 캐니스터 내부에 헬륨을 대기압으로 채운다.
- 6) 헬륨 공급 이후, 헬륨공급 장치와 캐니스터 배기/배수 커넥터를 분리한다.

4.3 캐니스터 및 운반용기 마감

- 1) 캐니스터 배기 및 배수포트 상부에 각각 포트커버를 장착하여 용접을 수행하고 용접검사 및 헬륨 누설시험을 수행한다.
- 2) 캐니스터 상부에 밀폐 링을 장착하여 용접을 수행하고 용접검사를 수행한다.
- 3) 캐니스터 뚜껑 표면 방사선량을 측정한다.
- 4) 취급장비를 이용하여 자동용접기와 자동용접기 받침판과 환형 차폐체를 분리한다.
- 5) 용기 뚜껑 취급장비를 이용하여 뚜껑을 장착하고 뚜껑 볼트를 일정 토크까지 균일 분포식(star pattern)으로 조인다.
- 6) 배수장치를 용기 측면하단 배수 커넥터에 연결하여 환형 공간의 탈염수를 완전히 배수한다.
- 7) 용기 뚜껑 배기포트에 배기 커넥터를 장착하고 진공건조장치를 배기 커넥터 및 용기 측면하단 배수 커넥터에 연결한다.
- 8) 진공건조장치를 가동하고 용기 내부 압력을 단계적으로 3 torr까지 배기시킨다.
- 9) 진공건조 완료 후, 진공건조장치를 분리하고 용기 뚜껑에 위치한 배기 커넥터에 헬륨공급 장치를 연결하여 헬륨을 대기압으로 채운다.
- 10) 용기 측면하단 배수 포트커버와 뚜껑 배기 포트커버를 장착하고 누설검사를 수행한다.
- 11) 용기 뚜껑에 대한 누설시험을 수행한다.
- 12) 보조 차폐체를 분리하고 용기 표면의 오염검사 및 온도 측정을 수행한다.

4.4 운반 및 저장

금속검용용기를 운반차량에 상차하고 충격완충체 및 보호용 후드를 설치한 후 지정된 건식저장시설로 운반하여 저장한다. 금속검용용기는 별도의 규정된 절차에 따라 인수검사가 수행되며, 운반 후 최초 저장검사가 수행되고 저장기간 중 주기적 검사 및 감시를 수행한다.

5. 결론

국내 경수로형 원전의 사용후핵연료는 1990년 초부터 습식으로 소내에서 운반한 경험은 많으나 건식으로 운전한 경험은 없었다. 원전의 사용후핵연료를 습식저장조에서 금속검용용기에 장전하여 건식저장시설로 운반하기 전까지의 공정 중 사용후핵연료 저장건물 내에서 이루어지는 일련의 단기운영공정은 공정별로 열전달 환경 및 모드가 변경되므로 시간이력 온도분포는 각 공정별로 서로 다른 경향을 보이게 되는데 습식공정 동안 용기 내부에서 물이 비등하지 않아야 하고 건식공정에서는 사용후핵연료 피복관 온도가 제한기준을 만족하여야 한다. 미국의 규제지침인 NUREG-1536을 참고하여 금속검용용기를 이용한 건식저장 시스템의 운영특성에 맞도록 세부 운영절차를 개발하였으며 주요 공정별로 용기의 주요 구성품 및 사용후핵연료의 구조 및 열적 안전성도 확인하였다. 단기운영공정은 총 21시간 내에 이루어지도록 절차를 수립하였고 단계별로 허용운전 시간(15시간 습식공정, 3시간 배수공정, 그리고 3시간 진공공정)도 제시하였다.

감사의 글

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)가 주관하는 산업기술혁신사업의 방폐물관리기술개발과제(201171020001A)의 일환으로 수행되었음.

REFERENCES

[1] U.S. Nuclear Regulatory Commission (NRC), Stan-

dard Review Plan for Dry Cask Storage Systems, NUREG-1536, Revision 1 (2010).

[2] Korea Radioactive Waste Agency (KORAD), Technology Development of Optimization for Spent Nuclear Fuel Storage and Transportation System, 2nd stage evaluation report (2014).

[3] American Society of Mechanical Engineers (ASME), Containment Systems and Transport Packagings for Spent Nuclear Fuel and High Level Radioactive Waste, ASME Boiler and Pressure Vessel Code Section III, Division 3 (2010).

[4] Electric Power Research Institute (EPRI), Qualification of METAMIC® for Spent-Fuel Storage Application, EPRI Technical Report 1003137 (2001).

[5] U.S. Nuclear Regulatory Commission (NRC), Cladding Considerations for the Transportation and Storage of Spent Fuel, Interim Staff Guidance-11, Revision 3 (2003).