

PWR 사용후핵연료 한국형 처분용기 개발

최희주, 이양, 조동진, 주영상, 최종원
한국원자력연구소, 대전광역시 유성구 덕진동 150번지

원자력발전을 통해 발생하는 사용후핵연료는 각국의 특성에 맞추어 직접 처분 혹은 재처리 되고 있다. 미국, 스웨덴, 핀란드, 캐나다 등의 국가는 직접 처분을 고려하고 있으며, 프랑스, 일본, 스위스 등의 국가는 재처리를 하고 있다. 우리나라의 사용후핵연료 관리에 대한 국가 차원에서의 정책은 아직 결정된 바는 없으나, 재처리가 불가능한 현 상황을 고려하여 한국원자력연구소에서는 직접 처분을 대상으로 한국형처분시스템을 개발하고 있다. 고준위폐기물 처분용기는 각국의 처분 방식과 처분환경(지하수화학, 처분심도, 지열구배 등)에 맞추어 설계되고 있으며, 1개의 중량이 수십 톤에 이르고 있고, 1개의 제작에도 많은 시간을 요구하고 있어 외국으로부터의 수입이 쉽지 않다. 현재의 원자력발전 계획을 지속할 경우 예상되는 처분용기 소요량은 약 15,000여개로 추정되며, 처분용기 1개의 제작비용은 2억 원이 넘는 것으로 추산되고 있다.

저자들은 고준위폐기물 한국형처분시스템을 구성하는 공학적방벽의 하나인 처분용기를 개발하고 있다. 우리나라와 같이 직접 처분을 계획하는 국가 중 처분용기 설계 제작에 있어 가장 앞선 곳은 스웨덴이다. 스웨덴은 지하 500 m 깊이의 화강암 암반 내에 처분장을 계획하고 있으며, 이곳의 환경에서 10만 년 동안 부식에 견딜 수 있는 구리와 주철로 구성된 처분용기를 개발하여 실규모 크기의 처분용기를 개발하였다. 처분용기 개발에 늦게 출발한 저자들은 개발 목표로서 안전성 향상과 한국 고유의 처분용기 개발을 설정하였다.

원자력중장기 2단계 연구를 통하여 개발된 처분용기는 2중 구조로 되어 있으며, 직경은 122 cm이다. 사용후핵연료를 포함한 용기의 중량은 대략 39톤에 이르며, 이와 같은 과도한 중량은 처분 시설을 구성하는 취급 시스템의 설계를 매우 어렵게 하였다. 원자력중장기 3단계 연구에서는 처분용기 경량화를 위하여 용기 무게의 대부분을 차지하는 내부구조물(insert)의 크기를 최적화하기 위한 연구를 수행하였다. 처분용기 안전성 향상의 목표로서 동일한 안전계수를 갖는 가벼운 처분용기 개발을 이루고자 하였다. 스웨덴에서는 처분용기 개발을 위하여 지하수압 50 기압, 완충재 팽윤하중 70 기압, 빙하기 도래에 대비한 빙하에 의한 하중 300 기압을 고려하였다. 즉, 우리나라에서 발생 확률이 비교적 적은 빙하 하중을 무시할 경우 스웨덴 처분용기에 비해 직경이 3 cm 적은 KDC-1 처분용기를 개발하였다. 또한, 품질보증시스템을 활용하여 설계 절차(그림 1)를 확립하고, 계산결과에 대한 신뢰도를 향상시켰다. 설계된 처분용기에 대하여 책임계 해석, 방사선 차폐 해석, 구조 해석, 열 해석을 수행하여 안전성을 분석하였다(표 1).

한국 고유 모델 개발을 위하여 내부 구조물의 경우 사용후핵연료 배열 방식을 변형한 KDC-2 처분용기(그림 2)를 개발하고 그 성능을 KDC-1과 비교하였다. 2가지 용기의 성능은 거의 유사한 것으로 나타났으며, KDC-2 처분용기를 이용할 경우 KDC-1 처분용기에 비해 그 직경을 더욱 줄일 수 있을 것으로 판단되었다. 처분용기의 목적은 1,000년 또는 10만 년 동안 사용후핵연료 중에 포함되어 있는 방사성 핵종들의 누출을 억제하는 것이다. 구리의 경우 부식률이 매우 낮아 1 ~ 2 cm 두께만으로도 누출을 억제할 수 있으나 제작상의 어려움 때문에 스웨덴과 핀란드에서는 5 cm 두께의 외부용기를 제작하고 있다. 본 연구에서는 이와 같은 어려움을 고려하여 주철로 제작된 내부구조물 외부에 구리를 코팅하는 방법을 제안하였으며, 1 cm 정도 두께의 구리 코팅을 Cold Spray Coating 방법을 이용하여 성공하였다.

소형 처분용기 제작을 통하여 제작성 검토 및 향후 개발 계획을 수립하였다. 처분용기 제작 경험이 풍부한 스웨덴의 경우 20개의 내부구조물, 34개의 구리용기를 제작한 경험을 갖고 있다. 본 연구를 통하여 1/10 규모의 처분용기 2개를 제작하였으며, 이를 바탕으로 직경 1/2, 길이 1/5 규모

의 KDC-1/KDC-2 처분용기 내부구조물을 구상후연주철을 이용하여 주조를 통해 각각 제작하였다. 제작된 KDC-1 내부구조물은 물리적 특성 등을 측정하기 위하여 절단 후 시편을 채취하고 인장시험, 재료표면 특성, 비파괴 검사 등을 수행하였다. KDC-2 내부구조물은 구리용기 제작을 위하여 이용하였다. 구리용기 제작에 있어 가장 중요한 인자인 용접 시험을 위하여 직경 20 cm, 길이 20 cm 구리용기를 제작하고 마찰교반용접을 시험하였다.

본 논문 목적의 하나는 고준위폐기물 처분용기의 개발을 통하여 확보한 경험과 자료를 근거로 향후 한국형 처분용기의 개발 계획을 수립하는 것이다. 비록 소규모지만 자체 설계한 용기를 제작한 결과, 내부구조물은 제작 상 어려움은 없었으며, 관련 기술의 대부분이 국내에 확보되어 있었다. 단지 주조 중 발생한 기포를 확인하기 위한 비파괴장비의 개발은 필요하다고 판단되었다. 스웨덴 형식의 구리용기의 제작은 투입된 비용과 비교하여 의미가 적은 것으로 사료되며, 본 연구에서 제안한 내부구조물 외부에 구리를 코팅하는 방식은 고유용기 개발을 위하여 필요한 것으로 판단되었다.

표 1. KDC-1 처분용기에 대한 구조적 안전성 평가 결과

조건		Max. von Mises stress (MPa)	Safety factor
처분	정상조건	74.9	3.13
	극한조건	111.9	2.10
	암반움직임-1	53.6	4.38
	암반움직임-2	23.1	10.17
운전	정상 취급	12.6	4.76
	취급장비고장	25.2	2.38
	낙하 사고	0.762	307

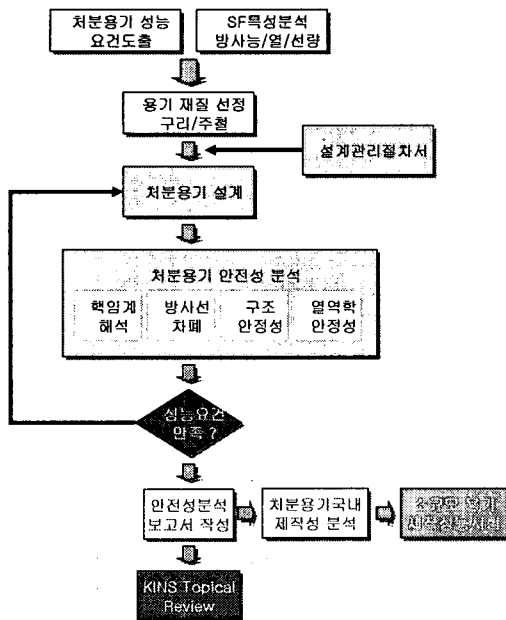


그림 1. 처분용기 개발 절차.

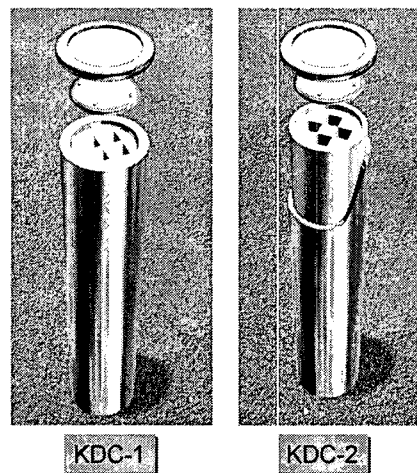


그림 2. 처분용기 개념도.