

핫셀간 사용후 연료봉 수송용기 설계 및 안전성평가

이주찬, 김동학, 방경식, 신희성, 서기석, 김호동, 정기정

한국원자력연구소, 대전광역시 유성구 덕진동 150번지

sjclee@kaeri.re.kr

사용후핵연료 차세대공정 실증시험 단계로 20 kg의 사용후핵연료 5 batch에 대한 금속전환공정 실증시험을 수행할 예정이며, 본 연구에서는 조사후시험시설(PIEF) 핫셀에 보관중인 PWR 사용후핵연료를 실증시험시설(ACPF) 핫셀까지 안전하게 운반하기 위하여 연료봉 운반캡슐 설계 및 수송용기 안전성 평가를 수행하였다.

사용후핵연료 수송 작업절차는 그림 1과 같이 조사후시험시설의 사용후핵연료 저장조의 연료봉을 인출하여 9404 핫셀에서 감마스캐닝 시험 수행하며, 9405 핫셀에서 연료봉을 절단하고 9406 핫셀로 이동한 후 rear door에 설치된 Padirac adaptor에 RD-15 수송용기를 접속하여 연료봉을 장전하여 실증시험시설 핫셀까지 운반한다.

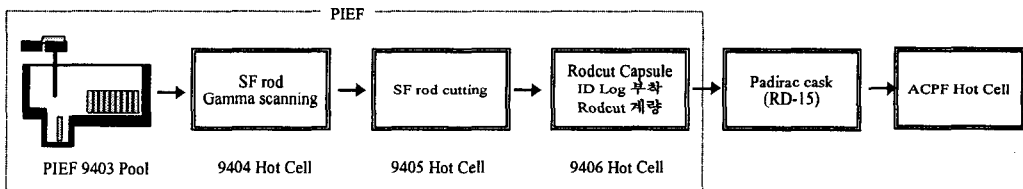


그림 1. 핫셀간 사용후핵연료 수송경로.

실증시험 공정에서는 연소도 35,500 MWd/tU, 냉각기간이 약 18년인 고리 1호기의 G23 핵연료 집합체를 사용할 예정이나, 연료봉 수송을 위한 기준 핵연료는 보수적으로 연소도 43,000 MWd/tU, 냉각기간 10년인 PWR 사용후핵연료를 고려하였다. 실증시험용 연료봉 길이는 핵물질 계량을 고려하여 길이를 25 cm로 결정하였다. 실증시험 단계에서 수행될 20 kg, 5 batch 시험을 위해서는 batch 당 25 cm 길이의 연료봉 130개가 필요하며, 연료봉 운반 시 취급이 용이하고 오염 확산을 방지하기 위하여 연료봉을 밀봉 캡슐에 담아 운반하도록 하였다. 조사후시험시설 핫셀 내 원격조종기의 취급 여건을 고려하여 1개의 캡슐에 25 cm 길이의 연료봉 5개를 담는 것으로 설계하였으며, 1회에 13개의 캡슐을 운반할 수 있도록 하여 batch 당 수송횟수를 2회로 결정하였다. 운반 캡슐은 외경 40 mm, 두께 2 mm의 알루미늄 재질을 사용하여 중량을 최소화하도록 설계하였으며, 캡슐 중량은 5개의 연료봉을 장전할 경우 약 1.2 kg 이다.

연료봉 운반을 위한 수송용기는 RD-15 Padirac 수송용기를 사용할 예정이며, RD-15 수송용기는 B형 용기로서 차폐체로 150 mm의 납이 사용되었으며, 9 m 자유낙하조건 및 800 °C 화재사고 조건 하에서 건전성을 유지하기 위하여 충격완충체로 100 mm의 balsa wood와 단열재로 50 mm의 limestone이 사용되었다. 그림 2는 연료봉 운반을 위한 캡슐, 콘테이너 및 Padirac 수송용기를 나타낸다.

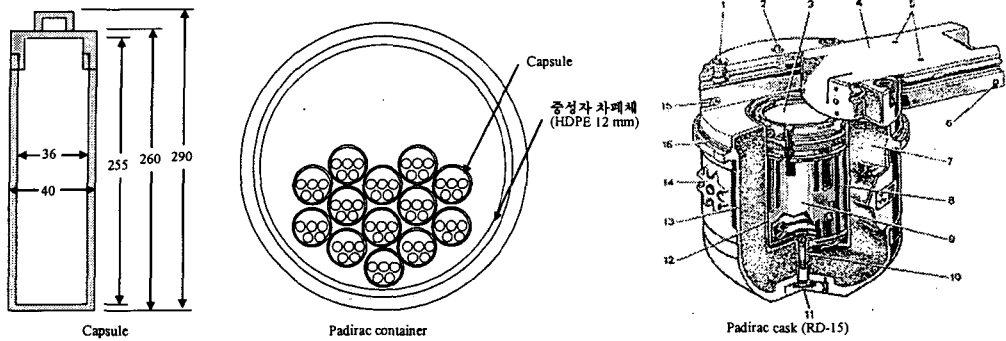


그림 2. 연료봉 캡슐, 컨테이너 및 Padirac 수송용기.

Padirac 수송용기를 이용하여 사용후핵연료를 운반할 경우에는 방사능 및 발열량 특성 변화에 따른 방사선차폐 및 열안전성 평가가 필요하다. 기존의 Padirac 수송용기는 방사성폐기물 수송용기로 중성자 차폐체가 없으므로, 차폐해석에서는 중성자 차폐체가 없는 경우와 12 mm 두께의 폴리에틸렌을 컨테이너 내부에 삽입한 경우에 대한 해석을 수행하였다. 차폐해석 시 5개씩의 연료봉이 장착된 13개의 캡슐이 수송용기 컨테이너의 한쪽 방향을 쏠린 것으로 가정하여 보수적인 해석을 수행하였다. 차폐해석 결과 중성자 차폐체를 고려하지 않을 경우 용기 표면 선량율은 중성자에 의한 선량율이 0.942 mSv/h, photon에 의한 선량율이 0.116 mSv/h로 계산되었다. 또한, 중성자 차폐체로 12 mm 두께의 폴리에틸렌을 고려할 경우에는 중성자 및 photon에 의한 선량율이 각각 0.675 mSv/h, 0.017 mSv/h로 계산되었다. 수송용기 내부 컨테이너에 중성자 차폐체를 적용할 경우 용기 표면 선량율이 약 40 % 정도 감소되었으며, 모든 경우에 있어서 수송법규에서 규정하는 표면 허용선량율 2 mSv/h 보다 낮게 나타나 방사선차폐 안전성이 입증되었다.

열전달해석은 법규에서 규정하고 있는 정상운반조건 및 화재사고조건을 적용하였으며, 정상조건은 대기온도 38 °C에서 최대 태양열이 유입되는 경우이며, 화재사고조건은 정상조건하에서 800 °C 화재가 30분 동안 진행된 후 자연 냉각되는 조건을 고려하였다. 25 cm로 절단된 핵연료봉 65개에서 발생하는 붕괴열은 16 W로 하였고, 용기 표면에 유입되는 태양열 유속은 400 W/m²을 고려하였다. 그림 3은 수송용기의 온도분포를 나타내며, 정상 및 화재사고조건에서 연료봉의 온도는 각각 113 °C, 117 °C로 계산되었고, 납 차폐체의 온도는 각각 83 °C, 89 °C로 계산되어 납의 용융온도 327 °C보다 훨씬 낮게 나타났다. 따라서 RD-15 수송용기로 연료봉을 운반할 경우 수송용기의 안전성이 충분히 유지될 것으로 판단된다.

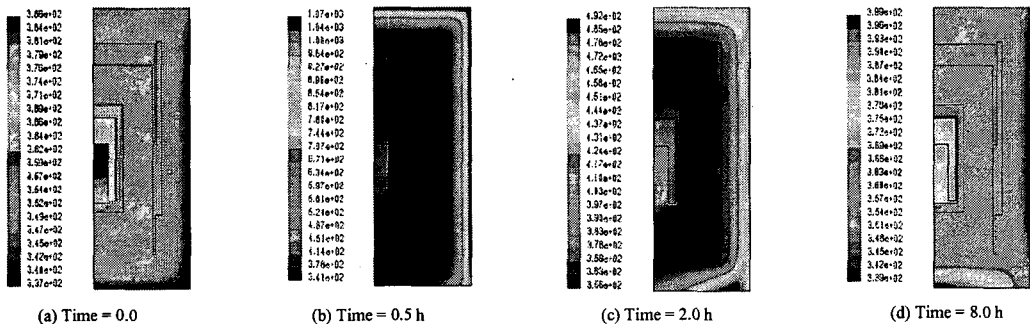


그림 3. RD-15 수송용기의 화재사고조건에 대한 온도분포.