

건식저장 PWR 사용후핵연료 시험장치의 열유동에 대한 전산유체해석

인왕기, 신창환, 전태현, 송근우, 최종원
 한국원자력연구원, 대전광역시 유성구 대덕대로 1045
wkin@kaeri.re.kr

1. 서론

가압경수로(PWR)의 사용후핵연료는 임시저장 수조에 보관후 재처리하거나 영구처분 된다. 국내 원전의 경우 사용후핵연료 처리방식이 아직 결정되지 않아 발전소의 임시저장 시설에 보관하고 있다. 따라서 국내에서는 근래에 사용후핵연료의 중간저장을 위한 건식저장 기술개발의 필요성이 높아지고 있다. 건식저장 방식은 사용후핵연료를 용기에 넣어 보관하는 것을 의미하며 용기내의 유체는 공기 또는 헬륨을 사용한다.

건식저장 용기내 사용후핵연료는 붕괴열(Decay Heat)에 의해 가열되므로 핵연료 손상을 방지하기 위해 핵연료 온도를 제한치 이하로 유지해야 한다. 사용후핵연료에서 발생한 열은 저장용기내 유체(공기, 헬륨 등)의 자연대류열전달 및 복사/전도 열전달에 의해 저장용기 외부로 방출된다. 따라서 사용후핵연료를 안전하게 보관하기 위한 저장용기를 설계하기 위해서는 저장용기 내부 핵연료 온도를 정확하게 예측하는 것이 중요하다. Lombardo 등[1]은 부수로 해석방법을 이용하여 건식저장 용기내 사용후핵연료의 피복관(Cladding) 온도를 예측하였으나 상세한 열유동 해석은 수행되지 못했다. 최근 인왕기 등[2]은 전산유체역학(Computational Fluid Dynamics) 방법을 이용하여 건식저장 용기내의 단일 핵연료집합체에서의 열전달 및 유동 특성을 분석하였다. 선행 CFD 연구는 CFD 해석방법의 적용성을 조사하기 위한 것으로 계산의 단순성을 위해 복사열전달을 무시하였다.

본 연구에서는 CFD 방법을 이용하여 원통형 건식저장 용기내부 PWR 사용후핵연료 시험장치의 열유동 특성을 복사열전달을 포함하여 분석하였다. CFD 방법으로 예측한 축방향 및 반경방향의 핵연료 온도분포를 실험결과와 비교하였다.

2. 본론

2.1 CFD 모델

CFD 해석을 위해 Fig. 1과 같은 원통형 용기내

부 PWR 사용후핵연료집합체(15x15 봉다발)의 시험장치를 모델링하였다. 핵연료 봉 외경과 봉 간격은 각각 10.7mm 와 14.3mm 이며 봉 길이는 3658mm 이다. 핵연료집합체는 204개의 연료봉과 1개의 계측기 안내관 및 20개의 제어봉 안내관으로 구성되어 있다.

시험장치의 대칭성을 이용하여 핵연료집합체와 저장용기의 1/8 영역을 CFD 해석대상으로 설정하였다(Fig. 2). CFD 모델은 저장용기 내부 유체 영역뿐만 아니라 핵연료 소결체(Pellet)와 피복관을 포함하고 있다. 본 CFD 해석에 사용한 전산격자 노드 수는 각각 440만(유체영역), 40만(피복관) 및 77만(소결체) 개다.

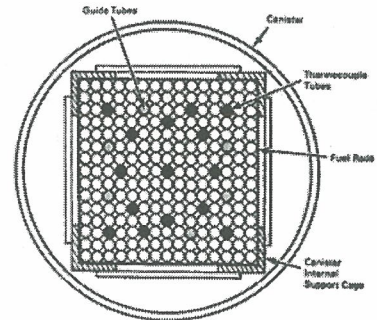


Fig. 1. Cross sectional view of PWR spent fuel test apparatus

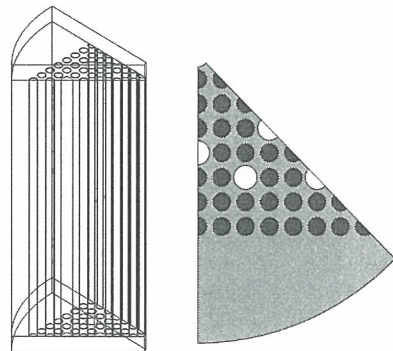


Fig. 2. CFD model for PWR spent fuel test apparatus

2.2 경계조건

시험 집합체의 붕괴열은 1.17 kW이고 반경방향 봉별 출력분포는 실험자료가 없으므로 균일한 것으로 가정하였다. 저장용기 내벽의 온도는 선행 부수로 해석연구[1]에서 사용한 온도분포와 동일하게 적용하였다. CFD 모델의 측면경계는 대칭조건을 설정하였다.

2.3 CFD 해석방법

본 CFD 해석시 두 개의 고체영역(소결체와 피복판)에서는 전도 열전달을 모의하고 유체영역에서는 자연대류(층류) 열전달 해석을 수행하였다. 특히 유체영역에서는 복사열전달을 계산하기 위해 등방성 복사열전달 모델(P1 모델)을 사용하였다. 저장용기내의 유체는 헬륨이다. 모든 지배방정식의 RMS 잔차가 10^{-5} 이하이고 고체영역과 유체영역의 온도변화가 0.1 °C 보다 작을 때까지 반복계산을 수행하였다.

2.4 CFD 해석결과

Fig. 3은 CFD 방법으로 예측된 핵연료 온도분포를 나타낸 것으로 핵연료의 상하부에서 온도가 낮고 중간영역에서 높은 온도를 보이고 있다. 사용후핵연료 중간높이(183 cm)에서 예측된 핵연료 단면 온도분포는 핵연료집합체 중앙영역의 온도가 외곽연료봉의 온도보다 약 4 °C 이상 높은 것으로 나타났다.

Fig. 4는 시험 핵연료집합체 중앙 계측기 안내관(봉 36)의 축방향 온도분포를 비교한 것이다. CFD 예측온도는 실험결과에 비해 현저히 낮게 나타났으나 포물선 모양의 축방향 온도변화의 특성은 실험결과와 잘 일치하고 있다.

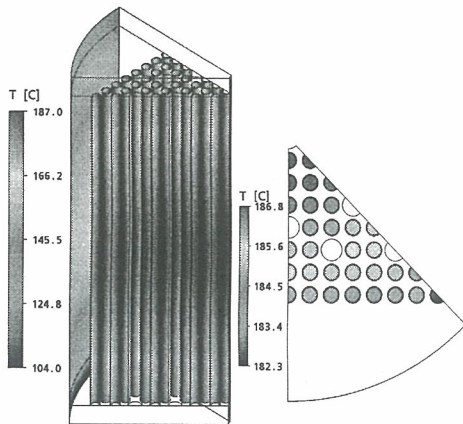


Fig. 3. Fuel temperature distributions

Fig. 5는 축방향 높이 185 cm에서 반경방향의 온도분포를 비교한 것이다. 중앙에서 외곽으로 갈수록 온도계측기 안내관(봉 36, 27, 16)의 측정온도는 20 °C 이상 낮아지지만 CFD 예측결과는 약 2 °C 로 매우 작은 감소를 보이고 있다. 이는 본 CFD 해석에서 반경방향의 연료봉 출력분포를 균일하게 가정했기 때문인 것으로 판단된다.

3. 결론

CFD 방법은 사용후핵연료의 온도분포의 특성을 비교적 잘 나타냈으나 실험결과에 비해 현저히 낮은 온도변화를 예측하였다. 향후 반경방향의 출력분포를 고려한 CFD 해석이 필요하다.

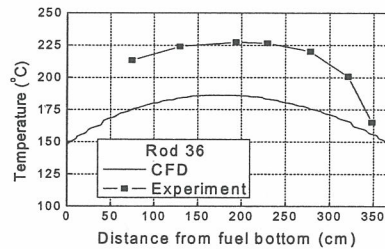


Fig. 4. Axial temperature profile for rod no. 36

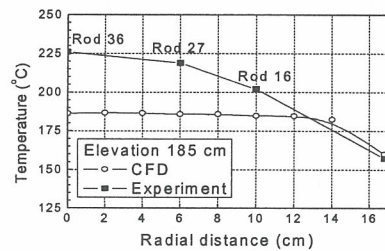


Fig. 5. Radial temperature profile at elevation 185 cm

4. 감사의 글

본 연구는 방사성폐기물관리기술개발사업의 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

5. 참고문헌

- [1] N. J. Lombardo et al., COBRA-SFS: A Thermal-Hydraulic Analysis Computer Code, Vol. III, Validation Assessments, PNL, December 1986.
- [2] 한국방사성폐기물학회, 2009년 추계학술발표회 논문요약집, pp.476-477, 2009.