

# 중수로 사용후핵연료 장기 열전달 특성 평가

이성용<sup>1\*</sup>, 이동규<sup>1</sup>, 박제호<sup>1</sup>, 정성환<sup>2</sup>

<sup>1</sup>(주)코네스코퍼레이션, 서울특별시 서초구 명달로 65 5층

<sup>2</sup>한국수력원자력(주) 중앙연구원, 대전광역시 유성구 유성대로1312번길 70

\*sylee@kones21.com

## 1. 서론

중수로 사용후핵연료의 장기 건전성을 평가하기 위해서는 저장기간 동안 온도변화 이력이 무엇보다 중요하다. 따라서 중수로 사용후핵연료 저장 바스켓 내부에 적용 가능한 열해석 모델을 개발하기 위해서는 중요한 열전달 메커니즘이 특성화되어야 하고 검증되어야 한다. 그리고 나서 검증된 모델을 적용하여 저장기간에 따른 사용후핵연료 온도이력을 도출할 수 있으며 이러한 온도이력은 바스켓 열출력의 함수로 일반화시키는 것이 필요하다.

따라서, 본 연구는 중수로 사용후핵연료 장기 건전성을 평가하기 위한 온도이력을 도출하기 위해 콘크리트 사일로 건식저장시설의 바스켓 내부 열전달 특성에 대한 평가를 수행 하였다.

## 2. 본론

### 2.1 사용후핵연료 및 바스켓 제원

중수로 사용후핵연료의 피복관은 지르칼로이이며, 다발 당 37개의 연료봉으로 구성된다. 사용후핵연료의 외경은 10.24 cm이며 길이는 49.53 cm이다. 사용후핵연료는 습식 저장조에서 최소 6 년간 냉각되며 연소도가 7,800 MWD/MTU이다. 중수로 사용후핵연료 건식저장시설인 콘크리트 사일리에 저장된 사용후핵연료 저장 바스켓은 Fig. 1에 나타난 것처럼 304 L 스테인리스강으로 제작 되었으며, 외경이 1.06 m이고 높이가 0.56 m인 원통형으로 중수로 사용후핵연료 60 다발을 장전할 수 있다.

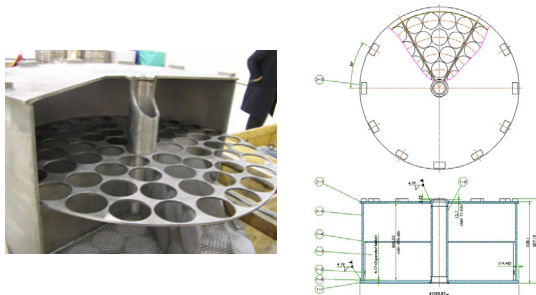


Fig. 1. Fuel Basket Structure.

### 2.2 열해석 모델

바스켓 내부 열전달을 평가하기 위해 상용 CFD 코드인 FLUENT 13.0을 사용하여 3차원 열유동 해석을 수행하였다. 해석모델은 Fig. 2에 제시한 것처럼 사용후핵연료를 구성하는 37개의 연료봉 각각을 모델링 하였으며 대칭성을 고려하여 1/12 모델을 적용하였다. 경계조건으로 열원은 사용후핵연료 다발 당 6.08 W에 해당하도록 37개의 연료봉 각각에 대해서 적용하였고 라이너표면 온도는 시험 조건인 96°C로 일정하게 적용하였다.

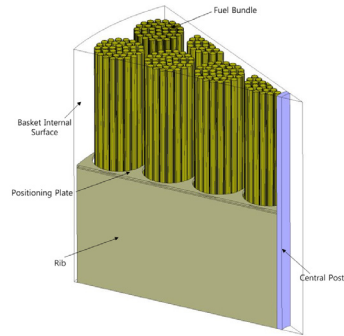


Fig. 2. Thermal Analysis Model for Fuel Basket.

### 2.3 열해석 모델 검증

바스켓 내부 열전달 해석 모델의 해석결과 검증을 위해서 AECL이 Whiteshell Research Lab.에서 수행한 바스켓 내부 열전달 시험결과와 해석결과를 비교하였다. 검증결과, Fig. 3에 제시한 것처럼 열해석 모델과 시험결과는 0.5%의 상대오차를 갖고 일치하였으며 바스켓 내부 열전달 예측을 위한 해석모델은 타당한 모델인 것으로 판단된다.

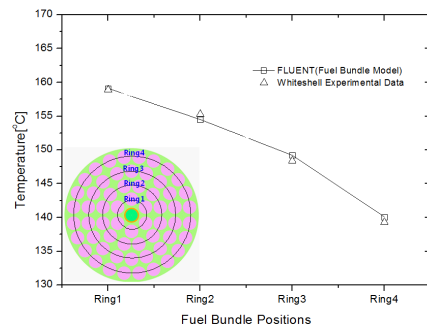


Fig. 3. Validation Results of the Heat Transfer Model for the Basket.

## 2.4 열해석 결과

### 2.4.1 저장기간 동안 온도이력

바스켓 내부에서 발생하는 열은 대부분 반경방향으로 소산되기 때문에 바스켓 반경방향의 온도분포가 매우 중요하다. 바스켓 반경방향으로 온도구배를 형성하게 되고 이러한 온도구배는 주로 사용후 핵연료의 장전형태, 바스켓 설계 그리고 사용후 핵연료를 지지하기 위한 구조물에 의해 결정된다. 열해석 결과, 초기 저장 시 사용후 핵연료의 최대온도는 159.3°C로 온도구배가 가장 크게 나타났으며 저장기간이 길어짐에 따라 이러한 온도구배는 감소하였다. 바스켓 가장 내부에 위치에 있는 사용후 핵연료와 가장 외곽에 위치해 있는 연료와의 온도차는 저장 초기에 19°C로 나타났으며 저장 50년 후에는 11.5°C로 나타났다. Fig. 4에 나타났듯이 시간이 지남에 따라 온도구배가 감소함을 알 수 있다.

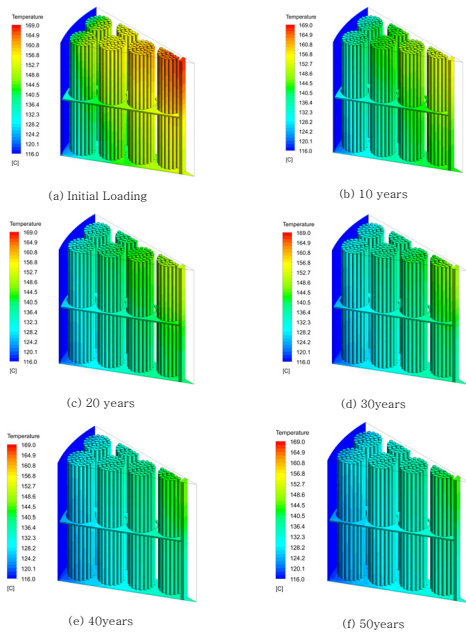


Fig. 4. Temperature Distribution with Dry Storage Periods.

### 2.4.2 바스켓 내부 온도구배 상관식

바스켓 내부 발생열에 대한 바스켓 외부 벽면과 사용후 핵연료 사이의 온도 구배 관계는 지수함수형태로 적용하였다.

Fig. 5에 연료바스켓 출력의 함수로 표현된 사용후 핵연료와 바스켓 라이너(벽면)사이의 온도 구배 및 상관식을 나타내었으며 온도구배 상관식은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$T_{fuel} - T_{liner} = 1.725Q_b^{0.651} \quad (1)$$

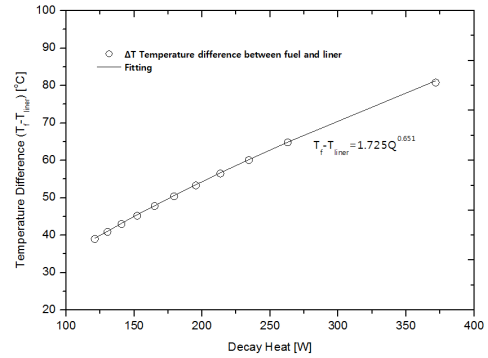


Fig. 5. Temperature Gradient between Fuel bundle and Liner.

## 3. 결론

본 논문에서는 콘크리트 사일로에 저장된 사용후 핵연료의 장기 열화거동 분석을 위해 바스켓 내부 사용후 핵연료의 열적 특성을 평가하기 위한 CFD 모델을 제시하였다. 해석모델은 실험결과와의 비교를 통해 검증하였다. 그리고 자연대류열전달 및 복사열전달을 고려한 열전달 해석 결과를 반영하여 저장 기간 동안 연료바스켓 내부 열 발생량의 함수로 온도구배 상관식을 도출하였다.

## 4. 참고문헌

- [1] D. W. Patterson, M. L. Swanson, "Thermal analysis of the spent fuel storage basket AECL Technical Document", AECL (1990).
- [2] ANSYS, Inc., "ANSYS FLUENT User's Guide", (2010).
- [3] D. W. Patterson, "Storage basket heat transfer assessment of the MACSTOR/KN-400 storage module AECL Technical Document", AECL (2002).
- [4] M. H. Chun, Y. H. Ryu, "Thermal analysis of a simulated CANDU 37-element spent fuel bundle with air backfill", Nuclear Engineering and Design 199, 85-89 (2000).