

사용후 핵연료의 장기건전성 종합시험 장치를 위한 예비 열해석

신창환, 양용식, 국동학, 인왕기

한국원자력연구원, 대전광역시 유성구 대덕대로 989번길 111

shinch@kaeri.re.kr

1. 서론

원자로내에서 연소를 마친 사용후 핵연료는 습식 저장조로 옮겨진 후 냉각된다. 조밀택 방식의 도입에도 불구하고 사용후핵연료의 습식저장은 저장용량의 한계가 있으므로 이에 대한 해결책으로 건식저장 방식이 유력하다. 이러한 건식저장을 위해서는 사용후 핵연료의 각종 열화기구에 대한 거동을 평가모델 및 코드를 통하여 예측하고, 실제 사용후 핵연료를 사용한 시험분석을 통하여 예측한 값을 검증하고 종합평가하는 일련의 과정을 통해 건전성을 평가하기 위한 기술의 개발이 필요하다.

사용후핵연료 건전성 종합평가시험은 헬륨 가스 분위기의 고온조건에서 사용후핵연료 열화를 가속시켜 건전성을 평가하는 것을 목적으로 하고 있다. 따라서 이를 위한 히터의 설계가 우선적으로 이루어져야 한다. 본 논문에서는 건전성 종합시험에서 요구되는 고온조건에 도달하기 위한 가열부의 사양을 결정하기 위한 열손실 평가 및 기본설계에 의한 연료봉 표면에서 획득할 수 있는 온도분포에 대한 검토를 전산유체해석(CFD)를 통해 해석하였다.

2. 기본설계

2.1 연료봉 배치

사용후핵연료 집합체에서는 일정량의 붕괴열이 존재하기 때문에 실제 건식저장시 핵연료 피복관 온도는 매우 높고 상승하지만, 건식저장 종합시험에서는 사용되는 봉의 개수가 적어 열출력이 거의 존재하지 않기 때문에 시험온도까지 온도를 상승시키기 위해서는 가열기를 사용하여야 하며, 사용후 핵연료봉의 온도를 400 °C 이상의 고온조건으로 장기간 유지할 수 있도록 설계되어야 한다. 현재 계획상 6~7 개의 사용후 핵연료봉에 대한 시험을 수행할 예정이므로 그림 1과 같은 개념을 도입하였다. 개별 온도 제어가 가능한 7개의 환상형 가열기를 설치하고 가열기 내에 사용후 핵연료를 장입한다. 환상형 가열기는 중간에 지지구조물을 삽입하고, 이를 단열재로 감싸는 구조로 압력용기내에 설치되도록 하였다.

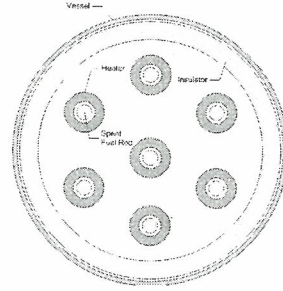


Fig. 1. 사용후핵연료 장기건전성 평가를 위한 용기 개념.

2.2 경계조건

기본설계에서 압력용기의 대략적인 형상 치수들의 결정이 필요하다. 용기는 조사후시험시설내의 수조에 설치되므로 용기외벽은 25 °C 물에 의한 자연대류조건을 갖게 된다. 이때 자연대류에 의한 용기내의 열손실의 계산을 통해 용기내에 일정한 도를 유지하기 위한 최소의 열량 계산이 필요하다.

벽면에서 균일한 열유속이 존재하는 조건에서 자연대류 평균 열전달 계수는 다음과 같은 관계식이 제안되었다 [1,2].

$$Nu=1.25(0.60Gr^* Pr)^{0.2} \quad (\text{층류}) \quad (1)$$

$$Nu=1.136(0.568Gr^* Pr)^{0.22} \quad (\text{난류}) \quad (2)$$

이상의 식으로부터 열전달계수를 구하기 위해서는 열유속의 가정이 필요하다. 열유속변화에 따른 열전달계수의 변화를 그림 2에 나타내었다. 열손실의 평가에서 용기외면을 통한 열손실을 보수적으로 평가하는 것이 바람직하다.

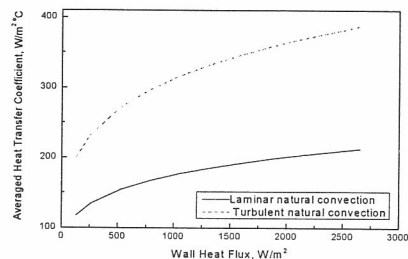


Fig. 2. 열유속에 따른 자연대류 열전달 계수.

2.3 열손실의 평가

열손실의 평가는 중심부에 600 °C의 가스가 존재하고, 단열재와 용기로 형성되어, 용기 외벽을 통해 25 °C의 물에 의해자연대류가 되는 조건으로 열저항에 의해 용기내부온도와 수조온도 차에 의한 열손실은 용기의 크기 및 두께, 단열재의 두께 등에 의해 평가하였다. 용기의 재료는 스테인레스 계열의 금속재를 사용함으로 두께에 의한 효과는 거의 미미하다. 원통형 단열재 내부 직경과 단열재 두께에 의한 효과는 그림 3과 4에 비교하였다. 용기의 내부직경변화에 대하여 열손실은 선형적으로 변화하므로, 용기의 크기는 가능한 작게 설계되어야 한다. 그림 4에는 단열재의 두께에 따른 열손실에 대한 평가이다. 단열재의 두께는 실험후 폐기물의 총량의 증가를 유발하므로, 최소한의 단열재를 사용하여 설계할 필요가 있다. 따라서 이상의 평가로부터 300 mm의 용기크기를 고려하는 경우 최대 열손실은 500 W정도임을 알 수 있다.

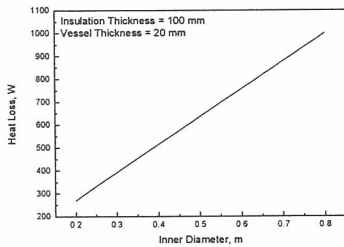


Fig. 3. 용기 내부직경에 대한 열손실.

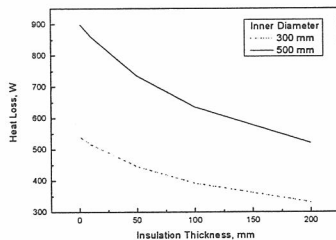


Fig. 4. 단열재 두께에 대한 열손실.

2.4 전산해석

이상의 열손실 평가로부터 설계된 용기내에 7개의 가열봉을 배치하고, 이들의 열출력을 각각 0.5 kW로 하는 경우 내부에 장입된 핵연료봉 표면의 온도를 전산해석을 통해 평가하였다. 현재의 해석에서는 보수적인 접근을 위해 단열재와 용기

의 두께는 고려하지 않았다. 전산해석은 상용코드인 CFD-ACE [3]를 사용하였다.

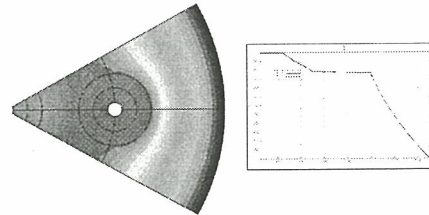


Fig. 5. 수치해석에 의한 단면 온도분포.

용기단면에서의 온도분포는 그림 5에 나타내었다. 용기에 단열과 개별 가열기의 단열을 고려하지 않은 상태에서 중심에 배치된 히터에서 626 °C로 설계요건을 만족하고 있다.

3. 결론

사용후 핵연료의 건식저장 장기건진성 평가를 위한 종합시험에 사용할 시험장비에 대한 예비열 해석을 수행하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- 용기외부의 물에 의한 자연대류 열전달계수는 보수적인 평가를 통해 최대 400 W/m² °C로 예측하였다.
- 열손실 평가를 통해 용기의 크기는 최소화하고, 단열재의 두께는 두껍게 하는 것이 유리하다. 하지만 단열재 두께의 경우 시험후 폐기물의 양을 증가시키게 된다.
- 전산해석을 통해 예비설계의 용기와 가열봉 출력에서 얻을 수 있는 핵연료봉 최대온도는 626 °C로 평가되었다.

4. 참고문헌

- [1] Vliet, G. C., and Liu, C. K., "An Experimental Study of Natural Convection Boundary Layer," J. Heat Transfer, 91C, pp. 517-531, 1969.
- [2] Vliet, G. C., "Natural Convection Local Heat Transfer on Constant-Heat-Flux Inclined Surface," J. Heat Transfer, 91C, pp. 511-516, 1969.
- [3] CFD-ACE, Version 2003, CFD Research Corporation, Huntsville, Alabama.