

경수로 사용후핵연료 금속저장용기의 용기간 인접거리 영향 평가

이성용^{1*}, 이동규¹, 박제호¹, 강경욱², 김형진², 조천형²

¹(주)코네스코퍼레이션, 서울특별시 서초구 명달로 65 5층

²한국원자력환경공단 기술연구소, 대전광역시 유성구 가정로 168

*sylee@kones21.com

1. 서론

사용후핵연료 금속저장용기는 용기 내부에 저장된 사용후핵연료에서 방출되는 붕괴열을 용기 벽체를 통해 자연대류 및 복사 열전달에 의해 피동적으로 제거되어야 한다. 자연대류는 용기간 유동 공간만 제공된다면 배열과는 상관이 없으나, 복사 열전달은 금속저장용기 배열의 기하학적 배치에 의한 인접용기의 음영영향(Shading Effect)으로 단일용기일 때 보다 저하된다. NUREG-1536 4.5.4.1장에 의하면 저장용기가 배열로 설치될 때 외부환경과의 형상계수(View Factor)가 1보다 작을 경우, 배열된 용기들 사이의 열전달 상호작용을 고려해야 한다고 언급하고 있다.

따라서, 본 연구는 금속저장용기 배열시 복사열전달에 미치는 용기간 인접거리 영향을 평가하기 위해, 금속저장용기 배열에 따른 외부 환경과의 형상계수를 산출 하였으며, 금속저장용기 정상조건에 대해 형상계수를 적용한 열해석을 수행 하였다.

2. 본론

2.1 금속저장용기 제원

한국원자력환경공단과 개발중인 KORAD21 금속저장용기는 높이 약 5.3 m, 직경 약 2.4 m로 용기 본체 내에 캐니스터를 저장하는 방식이다. 용기 내부에 저장되는 사용후핵연료는 연소도 45,000 MWD/MTU 이하, 최소 냉각기간 10 년으로 금속저장용기당 21 다발을 저장할 수 있다.

2.2 형상계수 해석 모델

금속저장용기기간의 형상계수 해석을 위해 2×9의 배열을 고려하였으며, 금속저장용기의 인접 이격거리를 약 0.24 m부터 4.77 m 까지 8가지 경우에 대해 CFD 전처리 프로그램인 csimsoft사의 Trelis Pro를 이용하여 각각 모델링 하였다.

형상계수 해석은 ANSYS FLUENT에 내장된 복사 모델 중 S2S(Surface to Surface) 모델을 사용

하였다. S2S의 주된 목적은 정반사 및 복사 에너지들의 난반사 산란 모두 임의의 형상에서 두 표면 사이의 실제 복사 교환 인자를 생성하는 것이다. 따라서 금속저장용기와 인접한 용기간의 형상계수를 S2S 모델을 이용하여 계산하고 금속저장용기와 외부 환경과의 형상계수를 산출 하였다.

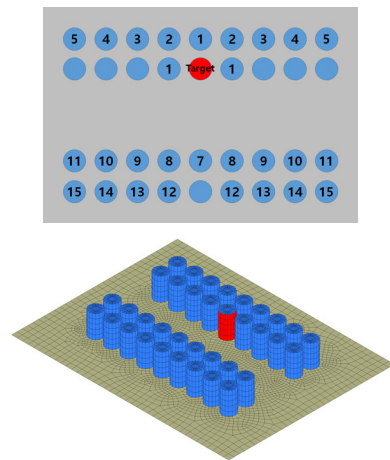


Fig. 1. View Factor Analysis Model.

2.3 금속저장용기 열해석 모델

금속저장용기의 정상조건은 국내 연평균 최대온도인 외기 22°C, 최대붕괴열, 곡면 200 W/m² 및 수평면 400 W/m²의 24 시간 평균 일광량을 적용해야 하는 조건으로 단일용기 평가 시 환경과의 형상계수는 1.0을 가정한다. 그리고 용기표면의 방사율은 스테인리스강의 최소 방사율인 0.36을 고려하여 평가하며 표면에서의 복사열전달은 다음과 같이 계산된다.

$$Q = \epsilon_{\text{cask}} \sigma A_{\text{cask}} (T_{\text{cask}}^4 - T_{\text{ambient}}^4) \quad (1)$$

그러나 배열로 설치되었을 경우, 금속저장용기와 환경과의 형상계수는 1.0 보다 작다. 이러한 결과는 실제로 단일용기로 평가했을 때보다 용기 표면에서 복사열전달이 감소하여 용기 구성품의 온도는 증가하게 된다. 이에 따른 형상계수를 반영한 복사열전달 관계식은 다음과 같다.

$$Q = \frac{\sigma A_{\text{cask}} (T_{\text{cask}}^4 - T_{\text{ambient}}^4)}{\frac{1}{F} + \left(\frac{1}{\epsilon_{\text{cask}}} - 1 \right)} \quad (2)$$

따라서 이러한 영향을 평가하기 위해 용기 표면 방사율을 형상계수 영향이 고려된 표면 방사율로 재 산출하였으며 단일용기 해석모델에 적용하여 열 해석을 수행 하였다.

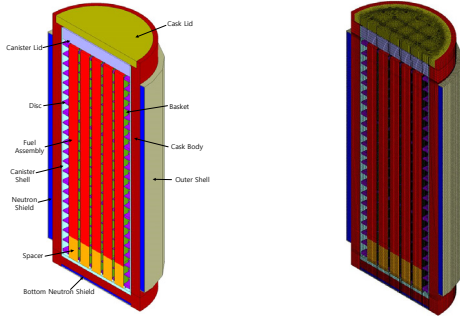


Fig. 2. Metal Storage Cask Thermal Analysis Model.

2.4 해석 결과

2.4.1 외부 환경과의 형상계수

외부 환경과의 형상계수 산출결과, 용기간 인접 거리가 멀어질수록 환경과의 형상계수는 증가하며 단일 금속저장용기 해석에 적용한 형상계수 1.0에 근접한다. 용기간 이격거리가 1 m일 경우, 형상계수 값은 약 0.5로 단일용기로 설치되었을 때 보다 복사열전달이 약 50% 감소함을 의미 한다.

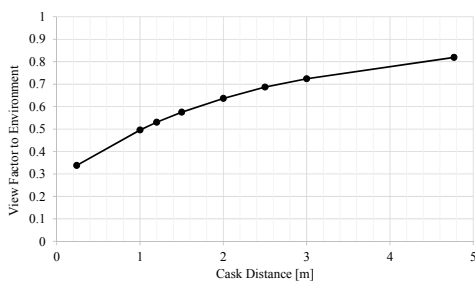


Fig. 3. View Factor to Environment in the Target Cask.

2.4.2 금속저장용기 정상조건 열해석

열해석 결과, 용기간 이격거리가 1 m인 경우 사용후핵연료 온도는 단일용기 해석 결과 보다 약 3.1°C 증가하였고 표면온도는 5.3°C로 다른 요소보다 가장 크게 증가하였다. 이격거리가 멀어질수록 단일용기 해석결과와의 차이는 감소하였으며 2.5 m 이상의 이격거리일 때 단일용기 해석결과와 유사한 결과를 보인다.

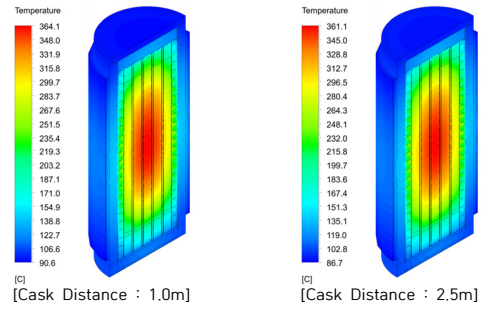


Fig. 4. Temperature Distribution in the Cask Distance.

Table 1. Maximum Component Temperatures

Components	Maximum Temperature [°C]					
	Single Cask	1	1.2	1.5	2	2.5
Outer Surface	113	118.3	116.7	115.9	114.7	113.8
Fuel Cladding	361	364.1	363.1	362.5	361.7	361.1

3. 결론

본 논문에서는 금속저장용기가 배열로 설치된 상황을 고려하여 인접용기 간 환경과의 형상계수 평가를 위해 CFD 해석코드인 FLUENT 내 S2S 복사 모델을 이용한 계산 방법을 제시하였다. 그리고 금속저장용기 정상조건에 대해 형상계수를 적용한 열 해석을 수행하였다. 열해석 결과, 용기간 인접거리가 2.5 m 이상일 경우, 용기간 복사 열전달 영향은 거의 없으며 1 m 이하로 근접할 경우 용기 배열 형상에 대한 형상계수를 금속저장용기 열해석 시 고려해야 한다.

4. 감사의 글

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (No.2014171020173A)

5. 참고문헌

- [1] US NRC, NUREG-1536, "Standard Review Plan for Spent Fuel Dry Storage Systems at a General License Facility", Revision 1, (2010).
- [2] Ansys. Inc, "ANSYS FLUENT User's Guide", ANSYS Release 16.1, (2015).
- [3] Computational Simulation Software, LLC., "Trelis User's Manual", ver. 15, (2014).
- [4] R. W. Carlson, et. al., "Radiant Heat Transfer from Storage Cask to the Casks to the Environment", ASME Pressure Vessels and Piping Conference, (1999).