

사용후핵연료 금속저장체의 열해석 평가

이주찬, 신영준, 민덕기, 노성기
한국원자력연구소

요 약

본 연구에서는 PWR 핵연료집합체를 금속 전환시켜 형성된 금속저장체에 대한 온도분포를 계산하였다. 해석모델은 PWR 핵연료집합체 2개 및 4개를 1개의 금속저장체로 전환한 경우로 하였다. PWR 핵연료를 금속 전환할 경우 금속전환 과정에서 Sr과 Cs를 선택적으로 제거함으로써 냉각부하를 약 1/2로 줄일 수 있고 체적을 약 1/4로 줄일 수 있는 잇점이 있다. 열해석 결과 2 PWR 핵연료 금속저장체에서 저장시스템 주변 공기의 온도가 50 °C인 경우, 금속 연료봉의 최고온도는 164 °C로 나타났다. 또한, 4 PWR 핵연료 금속저장체의 경우 금속 연료봉의 최고온도는 사각형 저장체에서 193 °C, 육각형 저장체에서 183 °C로 나타났다. 따라서 건식 저장에서 연료봉의 온도를 낮게 하기 위해서는 저장 밀도를 높일 수 있는 연료봉 밀집화 (rod consolidation) 방식이 경제성 측면뿐만 아니라 열안전성 측면에서도 유리한 것으로 나타났다.

1. 서 론

원자력연구소에서는 사용후핵연료 관리기술 개발을 위하여, 자원으로써 가치가 있는 PWR 사용후핵연료를 건식 개질함으로써 그 관리부피를 초기대비 1/4로 줄이고 관리 안전상에 문제를 일으키는 고 방열성 핵종인 세슘과 스트론튬을 선택적으로 제거하여 냉각부하를 1/2로 줄일 수 있는 사용후핵연료 차세대관리 공정개발 연구를 수행하고 있다[1].

사용후핵연료의 저장방식에는 냉각재로 물을 사용하는 습식과 공기를 사용하는 건식저장 방식이 있으며, 건식저장에서는 냉각재인 유체의 낮은 대류열전달 특성 때문에 핵연료봉의 온도가 높게 올라가는 단점이 있다. 따라서 핵연료에 대한 열안전성 평가가 무엇보다 중요하다.

2. 2 PWR 금속저장체에 대한 열해석

연소도 45,000 MWD/MTU, 냉각기간 5년인 PWR 핵연료집합체 2개를 금속전환 시킨 저장체에 대한 온도분포를 COBRA-SFS[2] 전산코드를 이용하여 계산하였다. 핵연료를 금속 전환하는 과정에서 스트론튬과 세슘을 선택적으로 제거함으로써 붕괴열이 약 1/2로 줄어들어 PWR 핵연료집합체 2개에 상당하는 금속저장체의 붕괴열을 1,400 W로 가정하였다.

표 1은 PWR 핵연료집합체 2개를 금속전환하였을 때 생긴 저장체의 개요를 나타내고 있으며, 금속저장체는 직경 30 mm, 길이 3,485 mm의 금속연료봉 19개로 구성되고 캐니스터

는 8 mm 두께의 스테인레스강으로 이루어져 있다. 금속저장체가 수직으로 세워져 있고 캐니스터 내부에 헬륨기체가 채워져 있는 조건에 대하여 열해석을 수행하였다. 해석모델은 19개의 연료봉과 42개의 부수로로 구성되며, 19개의 연료봉에서 방출되는 붕괴열은 모든 연료봉에서 일정한 것으로 하였다.

Table 1. Description of Canister for Metallized Fuel Storage of 2 PWR Spent Fuel Assemblies

Items	Description
Loading capacity	2 PWR assemblies / canister
Rod array	Triangular pitch (19 rods)
Rod diameter	30 mm
Length	3485 mm
Decay heat	1,400 W
Canister	stainless steel (8 mm)
Environment inside canister	helium atmosphere

캐니스터 외부 표면에서는 대류 및 복사열전달이 일어나며, 경계조건을 다음과 같은 관계식으로 정의된다[3].

$$q_{boundary} = H_{nc}(T_s - T_a) + \sigma \epsilon (T_s^4 - T_a^4) \text{----- (1)}$$

여기에서,

H_{nc} : Natural convection coefficient

σ : Stefan-Boltzmann constant

ϵ : Surface emissivity

T_s, T_a : Canister surface and ambient temperatures

캐니스터 표면에서의 대류열전달계수는 실험식을 이용하여 다음과 같이 얻었다.

$$H_{nc} = 5.20 \times 10^{-6} (6.38 \times 10^4 (T_s - T_a))^{0.25} \text{ [W/m}^2\text{C]} \text{----- (2)}$$

캐니스터 표면에서의 복사열전달은 식(1)에서와 같이 방사율에 영향을 받게되며, 캐니스터의 재료인 스테인레스강의 방사율을 0.3으로 취했다. 캐니스터 내부에서 핵연료봉과 핵연료봉 그리고 핵연료봉과 캐니스터 벽면 사이의 복사형태계수는 COBRA-SFS의 보조 프로그램인 RADGEN[4]으로 산출되었으며, 보수적인 관점에서 금속 우라늄의 방사율을 0.25로 취했다[5]. 모든 부수로에서 표면 마찰저항에 의한 손실계수로는 $f = 40/Re$ 값을 사용하였고, 삼각형 배열에서 유체에 의한 연료봉과 벽표면 사이의 대류열전달계수를 다음 식으로부터 계산하였다[6].

$$Nu = \frac{D_h}{\Delta x} \text{----- (3)}$$

$$\Delta x = 0.5(p/\cos 30) - 0.5d \text{----- (4)}$$

$$D_h = 4(0.5p^2 \sin 60 - 0.5(\pi d^2/4))/0.5\pi d \text{----- (5)}$$

여기에서,

Nu : Nusselt number

D_h : Hydraulic diameter of the channel

p : Rod pitch

d : Rod diameter

위의 식(3~5)를 이용하여 캐니스터 내부 유체를 통한 대류열전달계수 $Nu = 1.8$ 을 얻었다.

경계조건으로 저장시스템 내부의 캐니스터 주변온도를 50 ℃에서 100 ℃로 변화시켜 가면서 해석을 수행하였다. 표 2는 주변온도에 따른 캐니스터 및 연료봉의 온도 값을 나타내며, 주변온도에 비례하여 캐니스터 및 연료봉의 온도가 증가함을 알 수 있다. 주변온도 50 ℃인 경우 캐니스터 온도는 125 ℃ 그리고 연료봉의 최고 온도는 164 ℃로 나타났고 주변온도 100 ℃의 경우에는 연료봉 최고온도가 203 ℃까지 상승하는 것으로 나타났다.

Table 2. Temperature Profiles inside Canister for Metalized Fuel Storage of 2 PWR Spent Fuel Assemblies

Environment Temperature.(℃)	Calculated Temperature (℃)		
	Canister Surface	Min. Rod Temp.	Max. Rod Temp.
50	125	148	164
65	138	160	176
80	151	172	188
100	168	189	203

3. 4 PWR 금속저장체에 대한 열해석

PWR 핵연료집합체 4개를 1개의 금속저장체로 전환했을 때를 가정하여 그에 대한 온도분포를 계산하였다. 해석모델을 사각형 및 육각형 캐니스터 저장체등 두가지 경우로 하였으며, 설계기준 핵연료로는 연소도 43,000 MWD/MTU, 냉각기간 5년인 PWR 핵연료집합체를 기준으로 하였으며, 표 3은 금속저장체의 개요를 나타낸다.

Table 3. Description of Canister for Metalized Fuel Storage of 4 PWR Spent Fuel Assemblies

Items	Description	
	Square Canister	Hexagonal Canister
Loading Capacity	4 PWR ass'y/canister	4 PWR ass'y/canister
Rod Array	14 x 14 square array	consolidated 169 rods
Rod Diameter	12.567 mm	13.534 mm
Rod Pitch	17.57 mm	13.53 mm
Length	3,805 mm	3,805 mm
Decay Heat	2,268 W	2,268 W
Canister	10 mm(stainless steel)	10 mm(stainless steel)
Inside Canister	helium atmosphere	helium atmosphere

3.1 사각형 캐니스터 저장체

사각형 캐니스터 저장체는 PWR 핵연료집합체 4개를 금속연료봉으로 전환한 저장체로 사각형 배열을 갖는 정사각형 형태의 구조를 가지며, 표 3에서 보는 바와 같이 캐니스터는 14 x 14 배열의 금속연료봉으로 구성되며, 직경 12.567 mm, 피치 17.57 mm 그리고 길이 3,805 mm의 연료봉 196개가 된다.

열해석 모델은 196개의 연료봉과 225개의 부수로로 구성되며, 196개의 연료봉에서 방출되는 총 붕괴열은 2,268 W로 하였다. 모든 부수로에서 표면 마찰저항에 의한 손실계수는 사각 형태의 배열을 가진 PWR 핵연료에서 일반적으로 사용하는 $f = 100/Re$ 값을 사용하였다. 유체에 의한 연료봉과 벽표면 사이의 대류열전달계수는 원형튜브에서 일정한 온도와 완전히 발달된 층류 유동에서 일반적으로 적용되는 $Nu = 3.66$ 값을 고려하였다.

저장시스템내의 외부 공기유입 온도를 50 °C로 가정하였으며, 그림 1은 사각 캐니스터에 대한 열해석 결과를 나타내고 있다. 캐니스터 표면온도는 105 °C로 나타났으며, 본 결과에서 보는 바와 같이 캐니스터가 좌우 대칭구조를 가지므로 온도분포도 중심부의 연료봉을 기준으로 좌우 대칭으로 나타났고 이때 연료봉의 온도는 최소 113 °C에서 최고 191 °C의 분포를 보이고 있다.

3.2 육각형 캐니스터 저장체 열해석

육각형 캐니스터 저장체는 PWR 핵연료집합체 4개를 금속연료봉으로 전환한 것으로 삼각형 배열을 갖는 연료봉 밀집화(rod consolidation) 형태의 구조를 갖는다. 표 3과 같이 저장체는 직경 13.534 mm, 길이 3,805 mm의 금속 연료봉 169개로 구성된다. 금속저장체 1다발에서의 붕괴열은 사각형 캐니스터의 경우와 마찬가지로 2,268 W로 가정하였고 저장시스템 내부로 유입되는 외부공기의 온도를 50 °C로 가정하였다.

그림 2는 육각형캐니스터 저장체에 대한 열해석 결과이며, 캐니스터의 표면온도는 134 °C, 연료봉의 온도는 최저 144 °C에서 최고 183 °C의 온도분포를 보이고 있다.

표 4에는 사각형 캐니스터 및 육각형 캐니스터 저장체에 대한 온도를 비교하여 나타내었다. 두가지 해석조건에서 열원 및 유입되는 공기의 온도 조건이 동일하나 캐니스터의 표면온도는 사각 캐니스터의 경우 105 °C, 육각 캐니스터의 경우에는 134 °C로 큰 차이를 보이고 있다. 이처럼 육각 캐니스터의 경우 사각 캐니스터보다 캐니스터 표면온도가 약 30 °C 정도 높게 나타난 것은 육각 캐니스터 표면적이 사각 캐니스터보다 훨씬 작아 그만큼 열전달면적이 작아서 나타난 결과이다. 캐니스터 표면온도는 육각 캐니스터의 경우, 더 높게 나타났지만 연료봉의 최고온도는 오히려 사각 캐니스터에서 약 10 °C 정도 높게 나타났다. 이것은 육각 캐니스터의 경우 연료봉이 밀집되어 있어 내부 공간이 사각 캐니스터보다 훨씬 작음으로써 열전달이 더 잘되어 나타난 결과이다. 따라서 건식 저장에서 금속 연료봉의 온도를 낮게 하기 위해서는 가능한 한 캐비티의 체적을 작게 하는 것이 유리하다. 따라서 건식 저장 밀도를 높일 수 있는 연료봉 밀집화(rod consolidation) 방식이 열안전성 측면뿐만 아니라 저장밀도를 높임으로써 경제성 측면에서도 유리할 것으로 믿어진다.

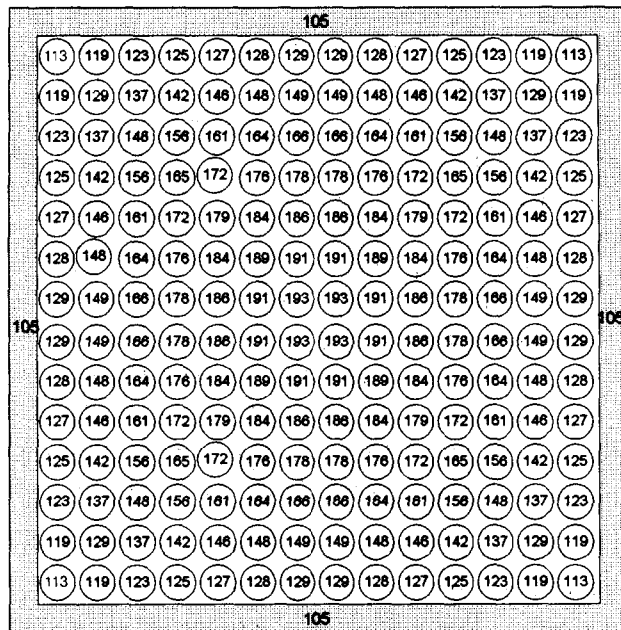


Fig. 1. Fuel Rod Temperatures for Square Canister Model (°C).

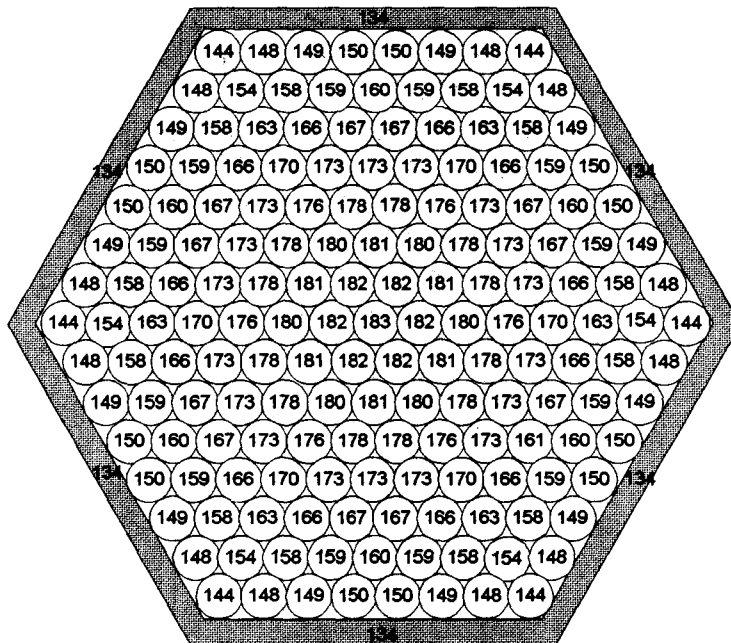


Fig. 2. Fuel Rod Temperatures for Hexagonal Canister Model (°C)

Table 4. Temperature Profiles inside Canister for Metalized Fuel
Storage of 4 PWR Spent Fuel Assemblies

Location	Calculated Temperature (°C)	
	Square Canister	Hexagonal Canister
Canister Surface	105	134
Minimum Temp. Rod	113	144
Maximum Temp. Rod	193	183

4. 결론

PWR 사용후핵연료집합체를 금속 전환시킨 금속저장체에 대한 온도분포를 계산하였다. 해석모델로는 PWR 핵연료집합체 2개를 1개의 금속저장체로 전환한 경우와 PWR 핵연료집합체 4개를 1개의 금속저장체로 전환한 경우를 택하였다. 2 PWR 핵연료 금속저장체에서 캐니스터 주변온도가 50 °C의 경우, 금속 연료봉의 최고온도는 164 °C로 나타났다. 또한, 4 PWR 핵연료 금속저장체에 대한 열전달해석 결과 금속 연료봉의 최고온도는 사각형 저장체인 경우 193 °C, 육각형 저장체인 경우는 183 °C로 나타났다. 따라서 건식 저장에서 연료봉의 온도를 낮게 하기 위해서는 저장 밀도를 높일 수 있는 연료봉 밀집화 (rod consolidation) 방식이 열안정성 측면뿐만 아니라 저장밀도를 높임으로써 경제성 측면에서도 유리할 것으로 판단된다. 본 연구를 통하여 얻어진 연료봉 온도는 금속저장체의 장기적 건전성 평가를 위한 기본자료로 활용할 예정이다.

참고문헌

- [1] 노성기 외, "사용후핵연료 저장기술 개발", 한국원자력연구소 KAERI-NEMAC/RR-166/96 (1996).
- [2] D. R. Rector et al., "COBRA-SFS : A Thermal Hydraulic Analysis Computer Code," PNL-6049, Vol.II, UC-85, 1986.
- [3] J. P. Holman, "Heat Transfer", International Student Edition 5th Ed. (1985).
- [4] D. R. Rector, "RADGEN : A Radiation Exchange Factor Generator for Rod Bundles," PNL-6342, UC-85 (1987).
- [5] E. G. Rouh, "Work Function, Ionization Potential, and Emissivity of Uranium," ANL-5534 (1986).
- [6] N. J. Lambardo et al., "A Thermal Hydraulic Analysis Computer Code : Vol. III. Validation Assessments," PNL (1986).