

## 심지층 처분 방법 해석

장철웅, 이정성, 김신  
 제주대학교, 제주도 제주시 아라1동  
 cifdnd1125@nate.com

### 1. 서론

에너지경제연구원에서의 보고서에 따르면 2010년 국제유가는 상반기 \$70 초중반 수준 강보합세(襁褓合勢)를 보이고, 하반기 이후 본격적인 경기 회복에 따라 추가 상승이 전망된다고 밝혔다.[1] 따라서 비교적 안정적인 동력원으로 고려하고 있는 원자력에너지에 대한 관심이 높아지고 있는 추세이며, 이러한 원자력 에너지의 활용과 이로부터 고준위 폐기물 관리에 있어서 안전성은 매우 중요하다.

고준위 폐기물은 일반적으로 지하 수백 미터의 건전한 암반에 처분하는 것이 가장 안전한 방법으로 고려되고 있다.

PWR에서 나오는 사용 후 핵연료가 HWR에서 나오는 사용 후 핵연료보다 많으면서 더 많은 열량을 방출한다. 따라서 본 연구는 PWR에 초점을 맞췄다.

본 연구에서는 사용 후 핵연료 즉, 고준위 폐기물의 처분 방식인 심지층 처분 방식에서 처분 공에 설치된 완충재의 성능 저하를 방지하기 위한 온도 제한치를 넘지 않는지 확인하고, 완충재의 열전도도에 따라 완충재 온도의 변화를 분석하였다. 또한 처분 후 냉각기간을 분석하여 안전성에 대해서 검토하였다.

### 2. 본론

#### 2.1 다중방벽 개념

안전성에 대한 확고한 신뢰를 구축하기 위하여 공학적 방벽 개념을 도입하고 있으며, 이는 처분 대상이 되는 사용 후 핵연료 또는 고준위 폐기물, 처분용기, 완충재, 뒷채움재 등으로 구성된다.

공학적 방벽의 구성요소로 처분용기를 둘러싸고 있는 완충재는 처분용기를 보호하고 핵종의 이동을 지연시켜야 하는데, 이를 위해 완충재는 수리전도도와 핵종의 이동성이 암반보다 작아야 하며, 온도는 100℃ 이하로 유지되도록 열전도도가 커

야 한다. 이러한 완충재의 온도요건은 지하 처분 구역 배치에 있어서 주요한 제한요건이 된다.

#### 2.2 지배 방정식

$$\nabla^2 T + \frac{\dot{q}}{k} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial \tau} \quad (1)$$

여기서,

$\dot{q}$  = 단위체적당 발생된 에너지 [W/m<sup>3</sup>]

$c$  = 물질의 비열 [J/(kg×℃)]

$\rho$  = 밀도 [kg/m<sup>3</sup>]

$\tau$  = 시간 [s]

$T$  = 절대 온도 [K]

$\alpha$  = 열확산 계수 [k/ρc]

$k$  = 열전도 계수

이다.

시간의 변화에 따른 붕괴열량의 변화를 처분장의 열 분포 해석의 열원항으로 사용하기 위하여 C.M.Malbrain[2]이 사용한 식을 다음과 같은 추정식으로 변환하였다.

$$\dot{q}(t) = C_1 \times t^{-C_2} \quad (2)$$

$$(30 \leq t \leq 10^6 \text{ year})$$

상기 추정식을 기준으로 기준 사용후 핵연료의 시간에 따른 붕괴열 값을 SAS 통계 프로그램을 이용하였다. [Table 1]은 회귀분석을 수행한 결과 얻어진 추정식의 계수이다.[3]

Table 1. coefficient

	t [year]	C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>
PWR45	30~10 <sup>6</sup>	14545.68	0.75756

본 연구에서 고려된 사용 후 핵연료는 가압형경수로(PWR)형 17 × 17 핵연료 봉이며, 방출연소도는 PWR45(45,000MWD/MTU)이다. 따라서 핵연료봉의 시간에 따른 열 발생률은 식 (4)와 같으며, 사용 후 핵연료는 40년간 냉각된 후 처분된다.

$$\dot{q} = 14,545.68 \times t^{-0.75758} [Watt/m^3] \quad (4)$$

여기서,

$$t = \text{시간 [year]}$$

이다.

### 2.3 초기 조건, 물성치, 및 경계조건

처분장 열 해석을 위한 본 해석의 대칭적 모델에 따른 온도 분포는 지표 하 지하수대의 온도를 15°C로 가정하여 이를 기준으로 지하 100m 깊이마다 3°C씩 상승하는 것으로 초기조건을 설정하였다.[3] [Table 2]는 열적 거동 분석에 입력된 Canister, 완충재 블록, 뒷채움 물질 및 암반의 물성자료를 나타내고 있다. [Table 3]은 Boundary Condition을 나타내고 있다.

Table 2. Thermal properties for simulation

	Density [kg/m <sup>3</sup> ]	Thermal Conductivity [W/(m×°C)]	Specific Heat [J/(kg×°C)]
Fuel	2000	0.135	2640
Cast Insert	7200	52	504
Outer Shell	8900	386	383
Buffer	1970	1.7	1380
Rock	2650	3.2	815
Back fill	2270	2	1190

Table 3. Boundary Condition

	Boundary Condition
Fuel	$k_1 \nabla T_1 = k_2 \nabla T_2$
Cast Insert	$k_1 \nabla T_1 = k_2 \nabla T_2$
Outer Shell	$k_1 \nabla T_1 = k_2 \nabla T_2$
Buffer	$k_1 \nabla T_1 = k_2 \nabla T_2$
Rock	T=30°C
Back fill	T=30°C

### 3. 결론

본 연구 결과 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

- (1) 사용 후 핵연료는 약 300년까지는 급격하게 온도가 감소하지만 10000년 이후가 되면 심지층의 온도와 비슷해진다는 것을 알 수 있었다.

- (2) Canister와 심지층 표면의 초기 온도차를 보면 사용 후 핵연료의 온도보다 약 37.7% 감소한다는 것을 알 수 있었다. 따라서 완충재가 사용 후 핵연료에서 나오는 열의 대부분을 차폐한다는 것을 판단 할 수 있다.

- (3) 본 연구에서는 한국형 고준위 폐기물 심지층 수직처분시스템에서 사용되어진 완충재는 적절하다는 것을 판단 할 수 있었다.

- (4) 완충재의 Conductivity가 높을 수록 열전도가 증가하여 온도가 빨리 감소하는 것을 판단 할 수 있다. 완충재의 Conductivity가 50[W/(m\*°C)] 이상이 되면 100년 이후에 바로 주변의 온도와 비슷하게 되는 것을 볼 수 있었다. 하지만, Conductivity가 50[W/(m\*°C)] 이상이 되면 금속류에 속하기 때문에 시간이 지나면 지하수와 반응이 일어나 부식이 일어날 가능성이 있기 때문에 완충재로 사용 할 수 없다. 본 연구에서는 완충재의 Conductivity를 1.0[W/(m\*degC)]으로 계산을 수행하였는데, 완충재의 능력을 잃지 않는 한에서 Conductivity를 증가 시켜 사용하면 더 나은 다중방호 시스템이 될 것이라고 예상된다.

원자력 발전으로 인하여 발생하고 있는 사용 후 핵연료의 영구처분은 현재와 미래의 인간과 자연을 보하는 유일한 방법으로 생각된다. 따라서, 사용 후 핵연료를 영구 처분할 수 있는 심지층 처분 방법을 연구를 지속적으로 하여 심지층 처분이 보다 안전하게 운영될 수 있도록 해야겠다.

### 4. 감사의 글

본 연구를 할 수 있도록 지원을 해주신 원자력 대학생논문연구회에 감사의 말을 전합니다.

### 5. 참고문헌

- [1] 2010년 국제 원유시황과 유가 전망(2010, 이문배, 이철용, 노남진)
- [2] Analytical Approximations for the Long-term Decay Behavior of Spent Fuel and High-level Waste, Nuclear Technology, Vol. 57 (1982, C.M. Malbrain and R.K.Lester)
- [3] 고준위 폐기물 처분기술개발 (2006, 한국원자력연구원)