고준위폐기물 처분형태에 따른 처분장 내 대기온도 예측에 관한 수치해석 연구

윤찬훈, 권상기, 김진*
한국원자력연구원, 대전시 유성구 대덕대로 1045
*인하대학교, 인천 남구 용현동 253
chyoon@kaeri.re.kr

1. 서론

고준위 방사성 폐기물 처분장의 경우 처분 터널 하부에 밀봉되는 처분용기는 밀봉 후 고준위 폐기물의 방사성 붕괴에 의해 상당기간 동안 발열을 하게 되며(완충재 사용 유무에 따라 100℃~150℃), 암반을 통한 열전달, 암반 표면으로부터의 대류, 지하수 유입에 의한 열전달 등에 의해 처분터널의 대기온도 상승에 큰 역할을 하게 된다.[1] 그리고 이러한 대기온도의 상승은 폐기물의 운반 및 저장, 처분장 내 작업 환경 및 처분된 고준위 폐기물의 안전성에 악영향을 미치게 된다. 그러므로 수치해석을 이용하여 처분장 내 대기온도를 예측하고, 이에 부합되는 적절한 환기시스템을 확보하는 것은 매우 중요하다. 이에 본 연구에서는 한국원자력연구원 내 위치한 지하처분연구시설(KAERI Underground Research Tunnel, KURT)에서 실험을 통해 결정된 열전달계수를[2] 바탕으로 수치해석을 통해 사용후핵연료 처분 형태에 따른 처분장 내 대기온도를 예측하고자 하였다.

2. 본론

2.1 처분시스템

본 연구에서는 처분장 내 대기의 온도를 예측하는 것이 목적이므로 수치해석 시 수직처분의 개념은 한국형 기준 처분개발 시스템(Korean Reference Disposal System, KRS)을 사용하였으며, 수평처분의 개념은 사용후핵연료 컨테이너를 처분터널 바닥에 일정한 간격으로 거치하는 방식을 이용하여 수치해석 하였다.

2.2 사용후핵연료(PWR)의 열 방출량

수치해석에 사용된 처분용기는 집합체 1개당 461kg의 우라늄으로 구성되어 총 665kg의 무게를 가지며 하나의 처분용기에 4개의 집합체가 포함되어 있다. 수치해석에 사용한 기준 열 방출량은 식(1)에 의해 결정하였다.[3]

$$q(t) = 14545.7 \times (40+t)^{-0.75756}\ W/MTU \quad \cdots\cdots (1)$$

식(1)에서 40은 냉각시간, t는 지하에 처분되는 기간을 의미한다. 본 연구에서는 처분용기 1개에서 발생되는 열량을 PWR 집합체 1개가 포함된 우라늄 0.46톤에서 발생되는 열량으로 가정하여 수치해석에 적용하였다.

2.3 처분시스템 구성요소의 물성

수치해석에 필요한 열전달계수 h는 KURT 현장실험 결과인 자연대류 조건에서 4.73 $W/m^2 \cdot K$를 초기조건으로 설정하였다. 그리고 수치해석에 이용된 처분터널 주변 암반의 물성은 KURT 암반의 수치를 사용하였다. 또한 처분시스템의 구성요소의 물성은 표 1에 나타냈다.

Table 1. Property of repository system component

Material	Property	Dimension
PWR	Density [kg/m^3]	2000
	Thermal conductivity [W/m· ℃]	0.135
	Specific heat [J/kg· ℃]	2640
Canister insert	Density	7200
	Thermal conductivity	52
	Specific heat	504
Outer shell	Density	8900
	Thermal conductivity	386
	Specific heat	383
Buffer	Density	1970
	Thermal conductivity	1.0
	Specific heat	1380

2.4 수치해석 조건 및 형상

처분장 내 대기온도의 분석을 위해 사용된 해석코드는 PHOENICS (Parabolic Hyperbolic Or Elliptic Numerical Integration Code Series)로서 영국에서 개발된 상용 CFD 유체 유동 시뮬레이션 프로그램이다. 해석은 비정상상태로 100년을 10단계로 나누어 실

행하였으며 세부적인 초기조건은 표 2에 나타냈다.

Table 2. The condition of simulation

Simulation program	PHOENICS 2009-FLAIR
Domain material	Ideal gas(30℃)
Grid	Basic : 35 × 31 × 55
Turbulence model	LVEL Model
Convergence	Residual ≤ 0.01%
Iteration	1000/steps

수치해석을 위해 수직 및 수평처분에 대한 형상을 그림 1과 2와 같이 너비 5m, 높이 6.15m의 처분터널 형상을 기본으로 하여 4방향(위, 아래, 좌, 우)으로 10m 씩 확장하여 형상을 만들었다. 그리고 터널의 입구는 콘크리트 방벽으로 막혀있는 상황으로 가정하였다.

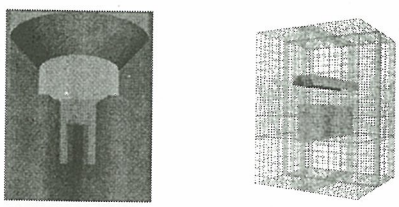

Fig. 1. Configuration of Simulation(Vertical disposal)

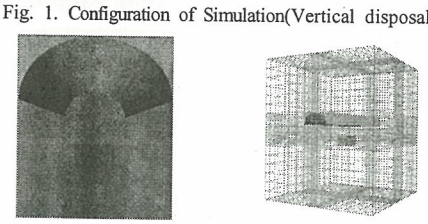

Fig. 2. Configuration of Simulation(Horizontal disposal)

2.5 해석결과

2.5.1 수직처분방식에서의 온도분포

그림 3은 열원을 중심으로 주변 암반으로 서서히 열이 전파된 모습을 보이며 PWR의 최고 온도가 처분 10년 후에 약 79.26℃까지 상승하였다.

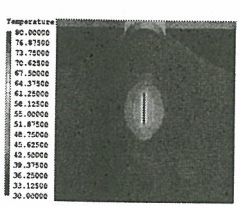

Fig. 3. After 10years(Temp)

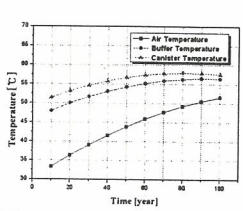

Fig. 4. Change of Temperature

그리고 수직처분 시 시간에 따른 처분터널의 대기, 완충재 및 캐니스터의 온도를 그림 4에 나타냈다. 10년이 지난 후 대기의 온도가 33.36℃, 100년 후 대기의 온도는 51.54℃ 까지 증가하였다.

2.5.2 처분기간에 따른 대기온도 변화

수평처분 시 PWR의 최고 온도가 처분 후 10년 후 84.35℃를 나타냈고, 수직처분에 비해 약 5.09℃ 높은 온도이다(그림 5). 그림 6 역시 수직처분과 마찬가지로 각 요소에 대한 온도변화를 나타내며, 10년 후 대기의 온도가 34.48℃를 나타냈고 처분 후 100년이 지난 시점에서는 52.63℃까지 증가하였다.

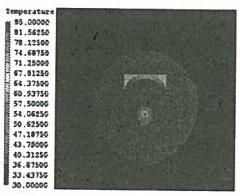

Fig. 5. After 10years(Temp)

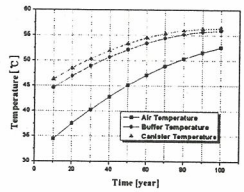

Fig. 6. Change of Temperature

3. 결론

시간에 따른 처분 방식별 수치해석 결과, 대기의 온도는 시간의 경과에 따라 약 2.1% ~ 3.3% 가량 수직처분 방식에 비해 높은 온도를 보였으나, 완충재 및 캐니스터의 경우는 오히려 0.5℃ ~ 3.36℃ 가량 낮은 온도를 형성하였다. 이는 폐기물의 저장위치에 따라 주된 매질(암반 & 공기)의 차이로 인한 결과로 판단된다. 본 연구 결과를 바탕으로 향후 폐기물의 발열량, 저장간격, 처분터널의 단면적 및 완충제 두께에 따른 대기온도 분포를 분석 할 예정이며, 추가적인 연구를 통해 처분장 내 최적 환기시스템 구축방안을 마련해 나갈 것이다.

4. 참고문헌

[1] 김진, 권상기, "한국형 방사성 폐기물 처분장을 위한 환기시스템 전략", Journal of the Korean Radioactive Waste Society, vol. 3(2), pp.135~148(2005).

[2] 권상기, 조원진. 2009, 지하처분연구시설 주변의 열, 수리, 역학적 초기조건, 공학적방벽 성능 현장 실증연구 과제 보고서, KAERI/TR-3796/2009.

[3] 윤찬훈, 권상기, 김진, "KURT 내 열전달계수 결정에 관한 실험적 연구", Journal of Korean Society for Rock Mechanics, Tunnel & Underground space, 19(6), pp.507~516(2009).