

환기시스템이 적용된 고준위 방사성 폐기물 처분장 내 온도에 관한 CFD 연구

윤찬훈, 최종원, 권상기*, 김진*

한국원자력연구원, 대전시 유성구 대덕대로 989번길 111

*인하대학교, 인천 남구 용현동 253

chyoon@kaeri.re.kr

1. 서론

고준위 방사성 폐기물 처분장의 안정성을 확보하기 위해서는 깊은 심도로 인한 각종 열적 문제와 폐기물에서 발생하는 열에 의해 발생하는 처분장 암반의 온도상승 문제를 방지하는 것이 필수적이다. 그리고 사고로 인한 잠재적 부유성 방사성 물질, 방사성 붕괴로 발생하는 가스, 화학반응으로 발생하는 유독가스, 지하 화재시의 흠 등을 차단하고, 확산을 억제하면서 신선한 공기의 흐름을 유도할 수 있도록 설계되어야 한다. 특히, 고준위 방사성 폐기물 처분장의 경우 처분장 내부 열원으로 인해 공기의 부력효과가 나타나게 되고, 이는 곧 처분장 내부에 큰 자연환기압력을 형성시켜 방사성 부유 분진을 제어함에 어려움을 가져올 수 있다. 이러한 이유로 고준위 방사성 폐기물 처분장의 관리에 있어서 적절한 환기시스템의 적용은 반드시 필요한 과정이라고 볼 수 있다.^[1] 이에 본 연구에서는 한국원자력연구원 지하처분연구시설(KAERI Underground Research Tunnel, KURT) 내부 히터실험공간 대기 인자의 실측을 통해 결정된 열전달계수를 이용하여, 환기시스템이 적용된 고준위 방사성 폐기물 처분장 내 온도변화를 CFD(Computational Fluid Dynamics)를 이용하여 해석하였다.

2. 본론

2.1 처분시스템

본 연구의 처분시스템 암반은 KURT암반의 물성을 이용하였으며, 폐기물의 처분 형태는 수직처분방식을 선택하였다. 초기조건으로는 지표 온도 15°C, 저장심도 500m로 설정하였으며, 30°C/km의 지열구배를 감안하여 처분장 내부 암반과 대기의 온도를 30°C로 적용하였다. 또한 강제대류조건에서의 열전달계수는 7.46 W/m²·K를 사용하였으며,^[2] 처분터널의 입구는 콘크리트 방벽에 의해 폐쇄된 상황으로 가정하였다.

2.2 환기시스템

처분터널의 입구가 콘크리트 방벽으로 막혀있는 상황에서 강제대류조건을 만들기 위해 본 연구에서는 송·배기 환기시스템을 그림 1과 같이 적용하였다. 막장에서 5m 이격된 지점까지 직경 0.35m의 덕트를 삽입하여 신선한 공기를 냉도록 하였으며, 입구로부터 5m 지점까지 같은 직경의 배기 덕트를 설치하여 처분터널 내 공기를 배출시킬 수 있도록 하였다.

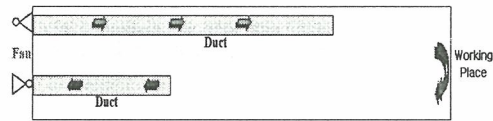


Fig. 1. Blowing & exhausting ventilation system.

2.3 사용후핵연료(PWR)의 열 방출량

수치해석에 사용한 PWR의 기준 열 방출량은 식(1)에 의해 결정하였다.^[3]

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

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

2.4 해석 형상

처분장 내 대기온도의 분석을 위해 사용된 해석코드는 PHOENICS (Parabolic Hyperbolic Or Elliptic Numerical Integration Code Series)로서 영국에서 개발된 상용 CFD 유체 유동 해석 프로그램이다. CFD 해석을 위해 수직처분시스템의 형상을 그림 2와 같이 너비 5m, 높이 6.15m의 처분터널 형상을 기본으로 하여 4방향(상, 하, 좌, 우)으로 10m 씩 확장하였다. 유입공기의 풍속은 0m/s ~ 2m/s, 온도는 20°C ~ 30°C 범위에서 변화시켜 처분터널의 대기 및 완충재의 온도를 분석하였다.

그리고 해석은 비정상상태(Unsteady)로 10년을 10 단계로 나누어 수행하였다.

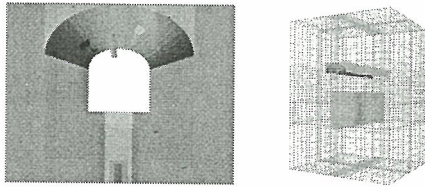


Fig. 2.Configuration of Simulation.

2.5 해석결과

그림 3은 풍속 0.5m/s, 온도 30℃일 때 처분터널 중앙부의 기류분포를 벡터 스케일로 나타낸 것으로서, 폐기물을 중심으로 기류분포가 양분되어 있는 형태를 보인다. 이와 같은 결과는 풍속과 온도에 상관없이 동일하게 나타났다.

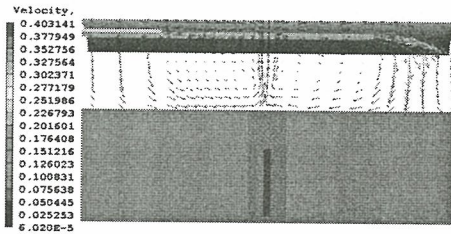


Fig. 3. Distribution of air flow.

2.5.1 유입공기의 풍속에 따른 온도변화

외기의 온도는 30℃로 고정시키고 풍속을 0m/s 부터 2m/s까지 증가시켜 해석한 결과를 그림 4에 나타냈다. 환기설비가 없는 경우, 10년 후 대기의 온도는 33.38℃, 완충재의 온도는 48.05℃로 나타났으며, 외기의 풍속이 증가되면서 대기온도는 약 7.22% ~ 8.27%, 완충재 온도는 4.14% ~ 4.58% 가량 감소하였다.

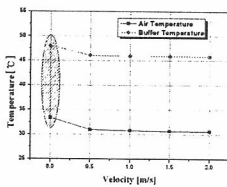


Fig. 4.Change of velocity.

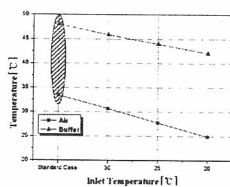


Fig. 5.Change of Temperature.

2.5.2 유입공기의 온도에 따른 온도변화

그림 5는 외기의 풍속을 1.5m/s로 고정시키고

온도를 30℃에서 20℃까지 낮추어 해석한 결과이다. 30℃의 외기 공급 시 10년 후 처분터널 대기는 환기설비가 없는 경우에 비해 약 3℃, 완충재는 약 2℃가량 감소하였다. 그리고 20℃ 공급 시 대기와 완충재의 온도가 각각 24.92℃, 42.09℃까지 하강하며 풍속에 따른 온도변화 결과에 비하여 비교적 큰 25.34%, 12.4%의 저감효과를 나타냈다.

3. 결론

고준위 방사성 폐기물에서 발생하는 열을 제어하고 처분터널의 적절한 대기환경을 조성하기 위해 환기시스템을 풍속과 온도의 측면으로 나누어 해석한 결과, 유입공기의 풍속이 증가함에 따라 처분터널의 대기온도는 약 7.22% ~ 8.27% 가량 감소하는 효과를 나타냈다. 그리고 유입공기의 온도 감소에 따른 대기온도의 저감효과는 약 8.03% ~ 25.34%로 나타났다. 즉, 처분터널의 대기온도를 낮추기 위해서는 유입공기의 풍속을 증가시키는 것 보다 온도를 낮추어 공급하는 것이 최대 20% 가량 우세한 효과를 보였다. 이와 같은 결과로 판단해 볼 때, 냉각시스템이 없는 환기시스템 일지라도 풍속을 조절함으로써 열 제어가 가능하다. 그러나 막대한 운용비용으로 인해 장기적 환기시스템의 유지가 어려운 경우 냉각시스템이 적용된 단기적 환기시스템의 운용이 고준위 폐기물 처분장에 가장 효과적일 것으로 판단된다.

4. 감사의 글

본 연구는 교육과학기술부의 원자력 연구개발 중장기 계획사업의 일환인 공학적 방벽 성능실증 기술개발 과제로 수행되었습니다.

5. 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] 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).
- [3] 최희주 외, (2008), “한국형 고준위 폐기물 처분시스템”, 선진핵주기 고준위폐기물 처분시스템 개발 기술보고서, KAERI/TR-3563/2008.