

지하처분장내 고준위 방사성 폐기물 발열량에 따른 자연환기력 연구

노장훈^{1)*}, 최희주²⁾, 유영석¹⁾, 윤찬훈²⁾, 김진¹⁾

A Study on Natural Ventilation by the Caloric Values of HLW in the Deep Geological Repository

Jang-hoon Roh, Heui-joo Choi, Yeong-seok Yu, Chan-hoon Yoon, Jin Kim

Abstract In this study, the natural ventilation pressure resulting from the large altitude difference which is a characteristic of high radioactive waste repository and the caloric value of the heat emitted by wastes was calculated and based on the results, natural ventilation quantities were calculated. A high radioactive waste repository can be considered as being operated through closed cycle thermodynamic processes similar to those of thermal engines. The heat produced by the heating of high radioactive wastes in the underground repository is added to the surrounding air, and the air goes up through the upcast vertical shaft due to the added heat while working on its surroundings. Part of the heat added by the work done by the air can be temporarily changed into mechanical energy to promote the air flow. Therefore, if a sustained and powerful heat source exists in the repository, the heat source will naturally enable continued cyclic flows of air. Based on this assumption, the quantity of natural ventilation made during the disposal of high radioactive wastes in a deep geological layer was mathematically calculated and based on the results, natural ventilation pressure of 73~173Pa made by the stack effect was identified along with the resultant natural ventilation quantity of 92~143m³/s. The result of an analysis by CFD was 82~143m³/s which was very similar to the results obtained by the mathematical method.

Key words High radioactive waste repository, Natural ventilation pressure, Natural ventilation quantities, Stack effect, CFD, Deep geological layer

초 록 본 연구에서는 고준위 방사성 폐기물 처분장의 특징인 높은 고도 차이와 폐기물에서 발생하는 발열량에 따른 자연 환기력을 계산하고 이를 바탕으로 자연 환기량을 계산하였다. 고준위 방사성 폐기물 처분장은 열 엔진과 유사한 폐쇄 사이클의 열역학적인 과정을 따른다고 볼 수 있다. 지하처분장내 고준위 폐기물의 발열에 의한 열이 공기에 추가되고 이로 인해 공기가 upcast 수직갱을 통해 위로 올라가는 동안 팽창됨에 따라 주위에 일을 하고, 이때 한 일에 의해 첨가된 열의 일부는 임시로 기계적 에너지로 변함으로서 공기의 흐름을 촉진할 수 있다. 이는 처분장 내에서 지속적인 강력한 열원이 존재한다면 자연 지속적인 공기의 사이클적 흐름을 가능하게 할 것이다. 이를 바탕으로 고준위 방사성 폐기물의 심지층 처분시 발생하는 자연 환기량을 수학적 방법으로 계산한 결과 굴뚝효과에 의하여 폐기물 발열량에 따라 74~183Pa의 자연 환기력이 계산되고 이에 따른 자연 환기량은 92.5~147.7m³/s이 계산되었다. 또한 CFD의 자연환기량 해석결과는 82~143m³/s로서 수학적 방법과 비교하여 매우 비슷한 결과를 나타내었다.

핵심어 고준위 방사성 폐기물 처분장, 심지층 처분, 자연환기력, 자연환기량, 굴뚝 효과, CFD, 심지층 처분

¹⁾ 인하대학교 에너지 자원공학과

²⁾ 한국원자력연구원

* 교신저자 : iglord2@naver.com

접수일 : 2011년 11월 16일

심사 완료일 : 2011년 12월 1일

게재 확정일 : 2011년 12월 12일

1. 서 론

국내 원자력 발전소의 운전경력은 약 30년에 이르고 있으며, 국제 에너지 수급 동향 및 국가 에너지의 장기적인 수요상황을 고려하면 원자력 발전소는 더 큰 비중

을 가지고 운영될 것이다¹⁾. 원자력 발전의 가동 시 발생되는 방사성 폐기물은 일반적으로 발전소 내 저장조에 임시 저장으로 운영하고 있으며, 이러한 임시저장시설의 저장용량은 가까운 시일 내에 포화 상태에 이를 것으로 예상된다. 원자력 발전소의 가동 및 안정적인 전력공급을 위하여 환경 친화적인 방사성 폐기물의 처분장 개발이 중요해 지고 있으며, 이러한 목표를 달성하기 위하여 고준위 폐기물은 일반적으로 지하 수백 미터의 건전한 암반에 처분하는 것이 가장 안전한 방법으로 고려되고 있으며, 우리나라를 비롯한 세계 각국에서 이러한 심지층 처분시스템 개발 연구가 활발하게 진행되고 있다^{2,3)}.

고준위 방사성 폐기물의 심지층 처분장은 지하 300~1000m 깊이에 처분장 터널과 처분공을 뚫고 처분용기와 함께 사용후핵연료를 처분한다. 처분장의 운영은 동굴을 건설하고 폐기물용기를 처분한 후 폐쇄할 수 있는 구조적으로 안정된 운영체계가 되어야 한다. 또한, 심지층 처분의 기본 원칙으로는 처분장 운영 및 비상시, 폐쇄 후에 방사능 누출 및 피폭량 또는 이에 대한 예측량의 발생확률을 고려하여 설정된 허용치 이하를 유지하여야 한다는 방사능 방호원칙과, 환경과 자원의 이용 및 보호에 영향을 미치지 않을 정도까지 안정성을 계속적으로 보장해야 한다는 환경과 자원의 보호원칙이 있다⁴⁾. 또한, 고준위 방사성 폐기물은 수 십년에 걸쳐 발열을 하게 되며, 이러한 발열은 처분장내의 대기 온도를 상승시키게 된다. 처분장내 대기 온도의 상승은 작업환경 및 폐기물의 안정성에 악영향을 미치게 되며 이러한 문제점을 해결하기 위한 방안으로 환기시스템을 적용하여 해결을 할 수 있다. 이러한 이유로 심지층 처분장의 환기 시스템은 처분장의 운영 시 중요하게 고려되어야 한다.

환기 시스템에는 크게 선풍기와 같은 기계적인 힘에 의한 환기시스템인 기계 환기와 자연적인 현상에만 의존하여 발생하는 자연 환기로 나눌 수 있다. 기계 환기는 안정적인 공기량의 공급 및 제어가 가능하다는 장점을 가지고 있지만 선풍기를 가동하는데 소요되는 운영비가 많이 소요되는 단점을 가지고 있다. 이에 반하여 자연환기는 자연 현상에 따라 환기가 발생하기 때문에 계획적인 유량의 공급에는 어려움이 따른다. 하지만 환기에 필요한 운영비가 소요되지 않기 때문에 경제적인 측면에서는 기계 환기보다 유리 할 수 있다. 고준위 방사성 폐기물 처분장의 경우 수십년동안 운영을 해야 하기 때문에 정확한 자연 환기량을 계산하여 적용한다면 효율적인 운영이 가능해 질 것으로 예상된다. 따라서 본 연구에서는 고준위 폐기물 처분장에 적용할 수 있는

자연 환기량 계산을 목적으로 연구를 진행하였다. 일반적으로 자연환기가 발생하기 위해서는 다음의 세 가지 조건이 충족되어야 한다.

- 1) 지하시설 공기 통로 입구의 고도차
- 2) 지하시설 내·외부의 온도차
- 3) 대기압의 변화

심지층 처분장의 경우 수백 미터 지하 심부에 건설에 되기 때문에, 고도차에 의한 높은 압력강하가 예상된다. 또한 고준위 방사성 폐기물의 발열에 의하여 처분장내의 온도가 상승함에 따라서 대기온도와의 차이가 발생한다. 이러한 증거를 바탕으로 고준위 방사성 폐기물 처분장은 Fig. 1에서 보는 것과 같이 간단하게 묘사할 수 있다. 공기가 downcast를 통해 유입이 되면 깊이가 깊어짐에 따라 압축되고 수직갱 아래에서 중력 에너지에 의해 가열되는데 이를 autocompression이라 한다. 그리고 지하처분장내 고준위 폐기물에 의한 열이 공기에 추가되고 이로 인해 공기가 upcast 수직갱을 통해 위로 올라가는 동안 팽창됨에 따라 주위에 에너지를 전달하게 된다. 이때 발생된 에너지에 의해 첨가된 열의 일부는 임시로 기계적 에너지로 변함으로서 공기의 흐름을 촉진할 수 있다. 이는 처분장 내에서 지속적인 열원이 존재한다면 자연 지속적인 공기의 주기적 흐름을 가능하게 할 것이다.⁵⁾ 또한 자연환기는 강제환기 만큼 효과적이지는 않지만 처분장내 열과 습기를 제거하기 위한 매우 효율적인 도구로 사용될 수 있고, 방사성 폐기물 처분장의 전반적인 열 특성을 개선시킬 수 있을 것이다.⁶⁾ 이에 따라서 고준위 방사성 폐기물에서 발생하는 열량을 바탕으로 야기되는 온도차 및 고도차에 의한 자연 환기량을 수학적 계산 및 CFD해석을 통하여 분석하는 것이 본 논문의 목적이다.

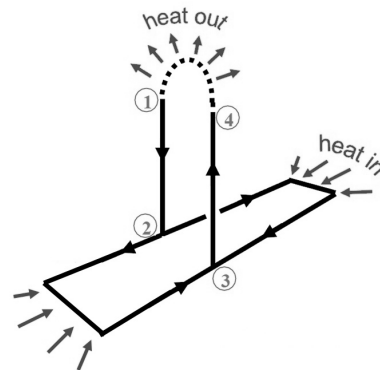


Fig. 1. Schematic diagram of underground repository system with heat source (McPherson, 1993)

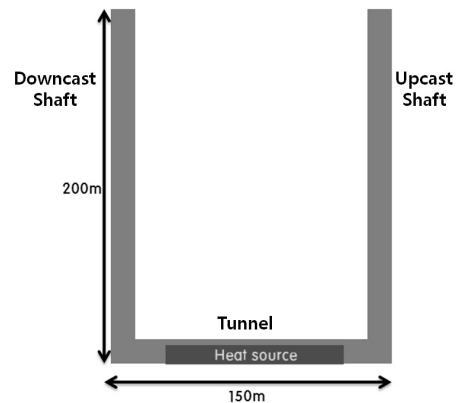
Table 1. Information of HLW repository

| 20,000ton | A-waste | B-waste | C-waste | D-waste |
|------------------------------|--|------------|------------|------------|
| Repository location | 200m level | 500m level | 200m level | 200m level |
| Quantity of heat (kW/tunnel) | × | 38 | 5,174 | 6,523 |
| Number of tunnel | 2 | 16 | 2 | 1 |
| Ventilation system | × | × | ○ | ○ |
| Tunnel Area W×H(m) | 5.3×5.0 | 4.0×4.1 | 7.0×6.0 | 7.0×6.0 |
| Tunnel length (m) | 200 | 220 | 130 | 130 |
| Period of heat(year) | × | 100 | 40 | 40 |
| Shaft | Four shaft(diameter 5~6m) : Air intake, Return, Human path, Waste path | | | |

2. 자연환기량 계산을 위한 방사성 폐기물 처분장의 모델

한국형 고준위 방사성 폐기물 처분장의 개념설계는 심부 200m와 500m로 나누어 설계가 진행 중이다. Table 1은 현재 고준위 방사성 폐기물 처분장의 심지층 연구에 관련하여 처분 예정인 폐기물의 정보들이다. 200m 심부에는 C-waste, D-waste 등 고발열 폐기물이 처분될 예정이며, 500m 심부에는 B-waste와 같은 저발열 폐기물이 처분된다. Table 4에서 보듯이 200m 처분장에 처분될 C-waste와 D-waste는 높은 발열량을 가진 폐기물로서 이에 따른 처분장내 높은 온도상승이 예상됨에 따라서 환기시스템이 필요한 처분장이다. 이에 따라 본 연구에서는 높은 온도 차이가 예상되어지는 200m 고발열 폐기물 처분장에 대한 자연 환기량 계산을 실시하였다. 연구에 사용될 심도 200m 처분장은 직경 6m의 수직갱과 폭 6m, 높이 6m의 처분장 터널을 가정하여 계산을 진행한다. 처분장의 처분장터널길이는 150m로 가정하였으며, 처분 터널 내 100m의 열원을 가정하였다 (Fig. 2). 100m의 열원을 가정한 이유는 Table 1에서 보는 바와 같이 200m 고발열 폐기물의 처분장터널의 길이가 130m인것을 감안하여 입구부와 출구부의 일정 간격을 제외하고 100m로 가정하였다. Fig. 2는 앞서 설명한 조건을 간단한 형상으로 만든 설계도안이다. 또한, 1000KW에서 4000KW까지 1000KW간격으로 4단계에 걸친 열원에 따라 환기량을 계산하였다.

또한, CFD의 연구에 있어서 필요한 압반의 열적 특성치는 한국원자력 연구원 내에 위치한 고준위 폐기물 처분 시스템의 다양한 현장 실증연구를 위해 건설어진 KURT(KAERI Underground Research Tunnel)의 실측데이터를 활용하였다. 이는 CFD의 해석시 압반의 상

**Fig. 2.** Design of Calculation for Natural Ventilation

세 물성치를 입력해야 하는데, 최대한 실제 현장과 흡사한 압반의 물성치를 입력하기 위하여 KURT에서 실측된 데이터를 직접 삽입하였다.

3. 자연환기량의 수학적 계산

3.1 굴뚝효과에 의한 자연환기력

수학적 계산을 통한 자연환기력의 계산은 고도 및 온도차이에 의한 영향을 바탕으로 계산하게 된다. 이러한 영향에 따라 공기의 밀도는 변하게 되고, 이러한 공기 밀도의 변화를 바탕으로 자연환기력(NVP)은 식 (1)과 같이 계산된다.

$$NVP = g\Delta h(\rho_{md} - \rho_{mu}) \quad (1)$$

이러한 원리를 바탕으로 수학적 계산 방법에는 현재까지 경험식을 포함하여 몇 가지의 식이 존재하며 일반

적으로 굴뚝효과에 의한 압력강하를 자연 환기력으로 계산하는 경우가 보편적으로 사용된다.

식 (1)에서 첨자 md와 mu는 각각 downcast와 upcast의 공기밀도의 평균값을 의미하며, 이러한 공기밀도의 차이에 의하여 발생하는 자연 환기력의 식을 온도항으로 변환하여 주면 식 (2)와 같은 굴뚝효과에 의한 자연 환기력의 계산식(Rees, 1950)이 만들어 진다.⁷⁾

$$H = \left(\frac{T_u - T_d}{T} \right) \rho g \Delta h \quad (2)$$

여기서 H 는 굴뚝효과에 의한 자연환기력이고, T_u 는 upcast에서의 온도, T_d 는 downcast에서의 온도를 의미한다. T 는 평균온도를 의미하며, $(T_u + T_d)/2$ 로 계산할 수 있다. ρ 는 표준공기밀도, Δh 는 깊이를 말한다.

3.2 Atkinson's Equation에 의한 유량계산

굴뚝효과에 의한 자연환기력을 바탕으로 발생하는 자연환기량을 계산하기 위하여 Atkinson Equation을 적용하였다. 관이나 유체 자체의 내적 마찰 또는 관의 벽의 저항에 기인하는 흐름에서 발생하는 정적 압력의 손실을 포함한 환기시스템에서 공기의 흐름은 거의 정상 난류로 간주되어진다. 통풍로에서의 마찰손실을 계산하기 위한 유체역학 식은 Darcy-Weisbach방정식으로 표현되어 지며, 이 방정식으로부터 환기시스템에서 가장 보편적으로 사용되는 Atkinson Equation이 만들어 진다.⁷⁾

$$Q = \sqrt{\frac{HA^3}{KP(L+L_e)}} \quad (3)$$

여기서 K 는 마찰계수(kg/m^3), A 는 통풍로의 단면적(m^2), P 는 통풍로의 둘레(m^2), Q 는 공기량을 의미하여(m^3/s), L 은 갱도의 총 연장선(m)을 의미한다. L_e 통풍로에 가해지는 충격손실의 양을 등가길이(Equivalent-Length)로 표현 한 것을 의미하며, 본 연구에서는 Hartman에 의하여 계산된 등가길이표를 참고하여 계산을 진행하였다. 또한 마찰상수(Friction factor) K 를 결정하기 위하여 KURT 실측 데이터인 거칠기(roughness)를 변환하였다. 일반적으로 Roughness는 Von Kármán가 제안한 e/d ratio에 의하여 K factor로 변환이 가능하며(Fig. 3), 다음 식으로 표현이 된다.⁵⁾

$$f = \frac{K}{0.6} = \frac{1}{4[2\log_{10}(d/e) + 1.14]^2} \quad (4)$$

여기서 d 는 직경(m), e 는 거칠기(m)를 의미한다. 이 식에 의하여 K factor로 변환 결과 KURT의 실측 roughness

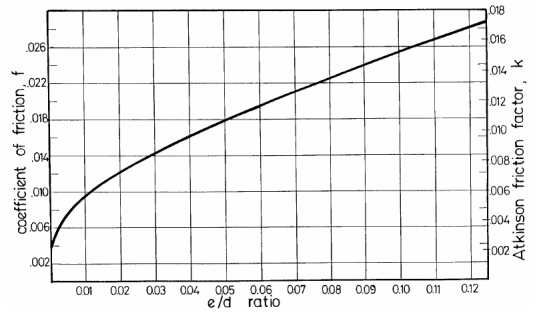


Fig. 3. The coefficient of friction varies with height of roughness divided the hydraulic mean diameter, e/d

0.775m는 $0.0176kg/m^3$ 으로 계산되었다.

3.3 Iteration Method에 의한 자연환기량 계산

본 연구에서는 자연 환기력의 예측을 통하여 발생하는 고준위 방사성 폐기물 처분장의 자연 환기량을 계산하기 위하여 Iteration Method를 적용하였다. 현재까지 알려진 자연 환기량의 계산은 현장실측을 바탕으로 계산되어 지지만, 본 연구에서는 현장의 실측 없이 자연 환기량을 예측해야 하기 때문에 초기 유량을 가정한 Iteration Method를 적용하여 계산을 진행하였다. 앞서 언급한 굴뚝효과에 의한 자연 환기력과 유량계산에 사용되는 Atkinson's Equation을 사용하여 Fig 5의 순서도에 적용하였다. 굴뚝효과에 의한 식에 적용하기 위하여 유량을 가정하고 공기의 정압비열 $1005J/kg \text{ } ^\circ C$ 을 활용하여 열량에 따른 온도 차이를 계산하였다. 이때 계산된 자연 환기력을 Atkinson's Equation에 적용하여 자연 환기량을 계산하였다. 만약 계산된 유량이 초기에 가정하였던 유량과 일치한다면 최종 자연환기량으로 결정하고, 일치하지 않는다면 초기 가정유량과 평균하여 다시 가정유량으로 입력하여 최종유량과 일치할 때까지 반복하여 계산한다. 이렇게 반복하여 최종 자연환기량을 계산하기 때문에 본 연구에서는 이러한 방법을 Iteration Method라고 명하였다. 오차 반복법에 의한 방법이기 때문에 초기유량을 임의로 설정하여도 최종적으로 수렴되는 값은 항상 일치하는 결과를 나타낸다.

Iteration Method에 의하여 자연 환기력을 계산하고, 열량에 따라 자연 환기량을 계산한 결과 열량의 증가에 따른 온도차이에 의하여 자연 환기량을 일정하게 증가하고 있음을 확인하였다. 1000kw일 경우 공기의 정압비열에 의한 온도 차이는 약 $9^\circ C$ 가 발생하고, 평균 공기 밀도는 $1.186kg/m^3$ 이 계산된다. 이에 따른 굴뚝효과에 의한 자연환기력은 $74Pa$ 이고, Atkinson's eq에 의한 최

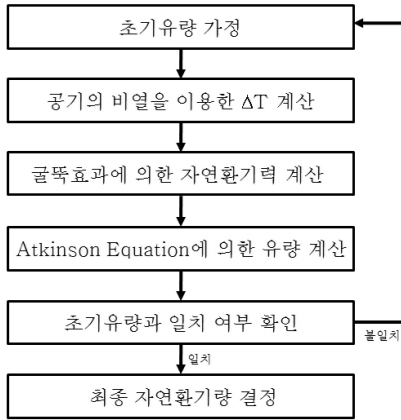


Fig. 4. Calculation of Natural Ventilation Quantity using Iteration Method

총 자연 환기량은 약 92.5m³/s가 계산되어 진다. 각 단계에 따른 계산 결과는 Fig. 5에 나타내었다.

4. 전산유체(PHOENICS 2010)를 활용한 자연환기량 계산

4.1 PHOENICS 2010

본 연구에서는 고준위 방사성 폐기물 처분장 내 온도 및 기류의 해석을 위해 PHOENICS 2010(Parabolic Hyperbolic Or Elliptic Numerical Integration Code Series)를 사용하였다. 유한 체적법(FVM, Finite Volume Method) 및 수렴성을 향상시킨 SIMPLEST 알고리즘 사용하고 있으며, 그 정확성은 이미 많은 연구에 적용되어 널리 검증되었다.^{8,9)} 본 프로그램에 적용한 난류모델은 PHOENICS에서 일반적으로 널리 사용되는 LVEL(Local Velocity Model)모델을 사용하였다. LVEL 모델은 특히 지하 공간 내 열전달 모델의 수치해석에 적합한 모델로서 Generalized Length-scale zero-equation model이며 레이놀즈수가 낮은 열전달 해석에 적합하다. 그리고 특히 유체 내부에 복잡한 형상의 고체들이 위치했을 경우 유용한 모델이며, 또한 유효점성을 가장 가까운 경계면으로부터의 거리, 유속, 층류 점성을 이용하여 계산하므로 시뮬레이션 시간을 줄일 수 있다. 게다가 복잡한 대 공간에서 기류의 열전달 영향을 조사할 때 필수적으로 고려되는 방법이다^{10,11)}. 본 연구는 실제 처분장과 흡사한 대 공간을 해석하고, 열전달을 고려하여야 하기 때문에 LVEL 모델을 사용하였다.

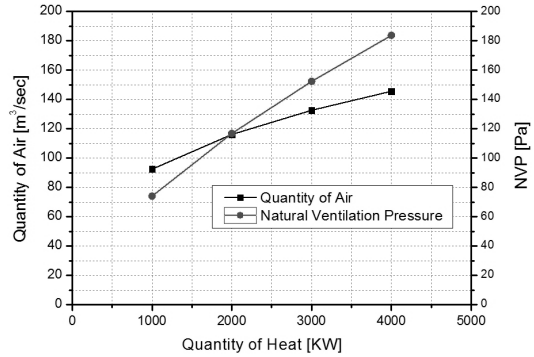


Fig. 5. Result of Iteration Method

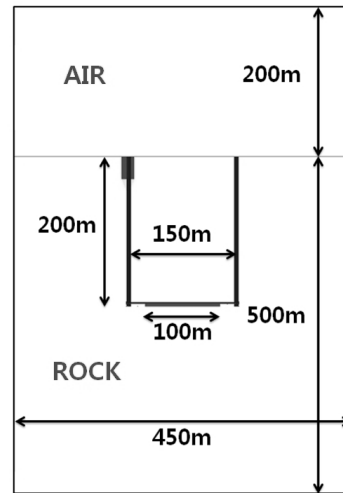


Fig. 6. Domain of Deep geological repository for PHOENICS Simulation

4.2 PHOENICS에 의한 자연환기량 계산

시뮬레이션을 위하여 처분장의 모델과 같은 도메인을 완성하고 지하 200m 처분장에 길이 100m의 열원을 삽입하여 이에 따른 자연환기량을 분석하였다(Fig. 6). 본 연구에서 사용된 도메인은 크기가 700×450×300(m)로서 상당히 넓은 영역을 해석해야 함으로 해석시간을 최대한 단축시키기 위하여 위에서 설명한바와 같이 LVEL 모델을 적용하여 해석하였다. 또한 암반의 열적 물성치는 Table 2와 같은 KURT의 실측데이터를 입력하여 설정하였다. 자연대류시 열전달 계수는 이전연구에서 계산된 여름철 열전달계수 4.54W/m²·K와 겨울철 열전달계수 4.93W/m²·K의 평균값인 4.73W/m²·K를 사용하였다.¹²⁾ 또한 전반적인 PHOENICS 2010의 해석 조건은 Table 3에 나타냈다. 격자 조건은 다양한 조건을 바

탕으로 해석한 결과 오차범위가 3%를 넘지 않는 최소한의 격자조건을 설정하였다. 격자가 더 조밀 할수록 계산의 결과는 정확해지겠지만 해석시간이 매우 증가함에 따라 오차범위를 넘지 않는 최소한의 격자를 설정하였다. Iteration의 경우 각 단계별로 2500번 내외에서

결과값이 수렴됨에 따라서 안정적인 수렴단계에 이르는 3000번으로 설정하였다.

Phoenics 해석시 유량을 확인하기 위하여 각 지점에

Table 2. Heat property of rock in KURT

| | |
|-------------------------------|-------------------------|
| Density | 2640kg/m ³ |
| Poisson ratio | 0.25 |
| Specific heat | 1000J/kg℃ |
| Thermal conductivity | 2.9W/m℃ |
| Thermal expansion coefficient | 8×10 ⁻⁶ /℃ |
| Roughness | 0.775m |
| Heat transfer coefficient | 4.73W/m ² ·℃ |

Table 3. Condition of CFD (Phoenics 2010)

| | |
|--------------------|--------------------------------|
| Simulation Program | Phoenics 2010 |
| Domain material | 20℃, 1atm air |
| Domain size | Rock 450×300×500(m) |
| | Air 450×300×200(m) |
| Grid | 108×79×42 |
| Tubulance Model | LVEL (Local Velocity Model) |
| Iteration | 3000/steps |
| Heat source | Steel at 27 deg C (C=1%) |

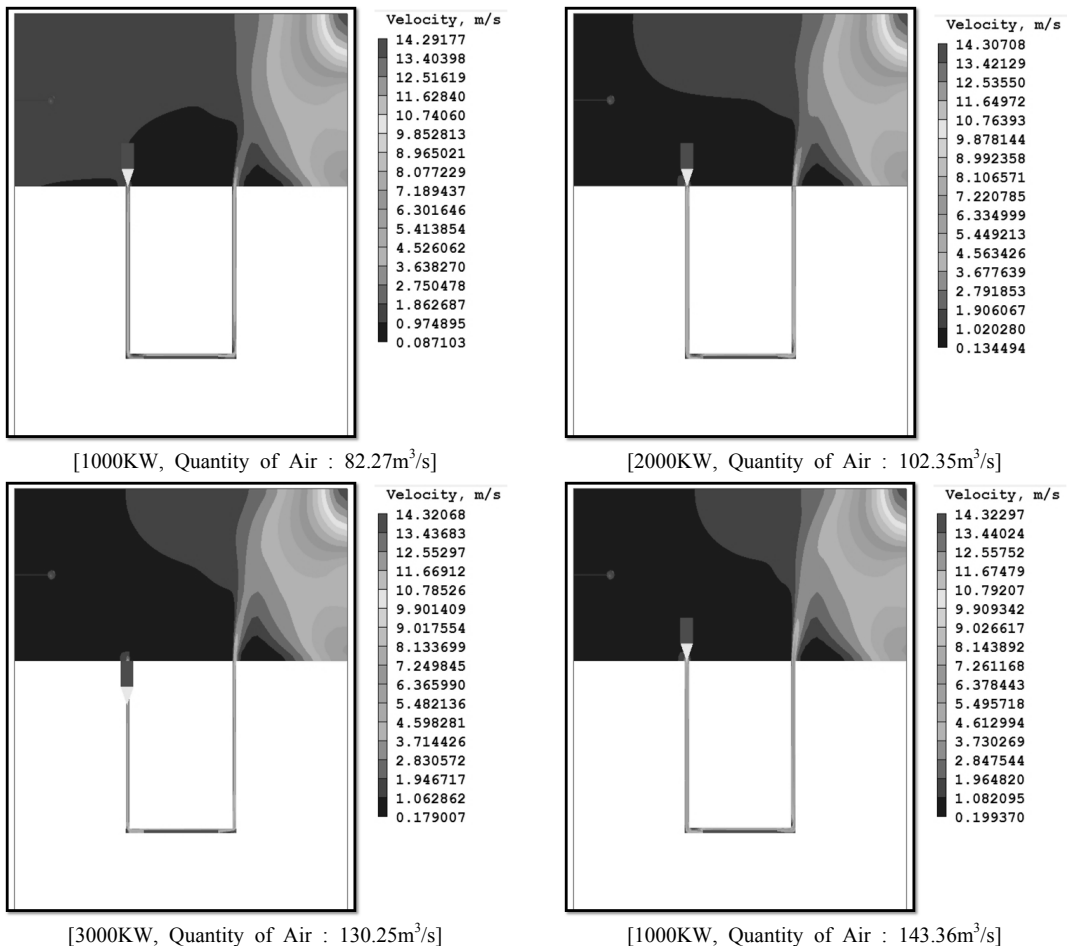


Fig. 7. Result of CFD(Phoenics 2010)

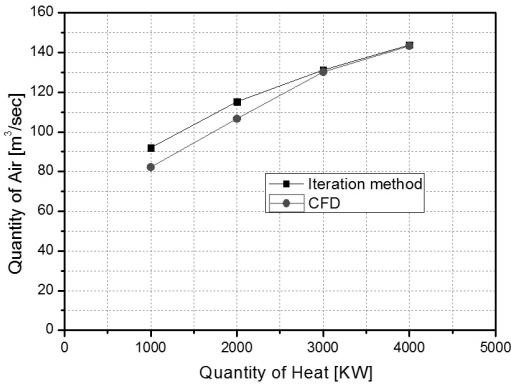


Fig. 8. Comparison between CFD and Iteration method

서의 유속으로 계산이 되어지는 해석 결과를 바탕으로 공기유입부에서 일정 간격으로 유속을 측정하여 평균 값에 단면적을 곱하여 유량을 산정하였다. 1000KW부터 4000KW까지 해석 결과 열량에 따라 발생하는 온도 차이가 증가함에 따라서 유입되는 자연 환기량은 Iteration Method와 마찬가지로 증가하고 있다. 각 단계별 해석 결과는 Fig. 7에 나타내었다.

5. 결과

본 연구에서는 고준위 방사성 폐기물의 심지층 처분 시 발생하는 자연환기량을 예측하기 위하여 모델을 단순화 시키고 Iteration Method를 적용하여 수학적 계산을 실시하였다. 또한 전산유체학(CFD)의 해석에 있어서 PHOENICS 2010을 활용하여 자연환기량을 해석하였으며, 두 결과를 비교하여 추후 건설 예정인 고준위 방사성 폐기물 처분장의 심지층 처분시 발생하는 자연 환기량을 예측하기 위한 사전 검토 자료로 활용가능 여부를 검토하였다. 고준위 방사성 폐기물의 심지층 처분장의 특징인 높은 고도 차이와 발열에 의한 온도 차이를 바탕으로 수학적 방법 및 CFD해석을 통하여 자연 환기량을 비교한 결과, 두 방법 모두 폐기물의 열량이 증가함에 따라 자연 환기량은 증가하였다. 두 방법의 오차 범위는 1000KW일 경우 11%정도로 다소 높지만, 열량이 증가함에 따라 오차범위는 1.6%까지 감소하는 것으로 나타났다(Fig. 8).

6. 고찰

1. 심도 200m 처분장의 자연 환기력을 Iteration Method로 계산 결과 처분장내 폐기물의 열량이 1000KW

에서 4000KW까지 증가함에 따라 발생하는 자연 환기력은 74.07~183.71Pa가 계산되었다. 계산식의 적용 시 온도 차이에 따라 발생하는 공기밀도의 차이에 따라서 자연 환기력이 결정됨을 확인하였다. 또한 추후 고도에 의한 공기밀도의 변화를 함께 적용할 수 있는 계산 방법의 보완이 필요하다.

2. 수학적 방법에서 계산된 자연 환기력에 따라 Atkinson's eq에 의한 심도 200m의 처분장으로 유입되는 자연 환기량은 92.49~145.65m³/s이며, CFD해석에 의한 자연 환기량은 82.27~143.36m³/s가 해석되었다. 두 방법 모두 폐기물의 발열량이 증가함에 따라 발생하는 자연 환기량은 증가하였고, 열량이 증가함에 따라 오차 범위는 1.6%까지 감소하는 것으로 나타났다. 자연 환기량의 예측에 있어서 수학적 방법에 의한 Iteration Method의 정확성이 검증됨에 따라서 추후 건설 예정인 고준위 방사성 폐기물 처분장의 자연 환기량 예측 시 사전 검토 자료로 활용되기에 충분한 방법임을 확인하였다.
3. 국외 중·저준위 방사성 폐기물 지하처분장인 미국의 WIPP와 스웨덴의 SFR의 경우 발열에 의한 온도 차이가 거의 없기 때문에 기계 환기를 통한 환기량이 각각 153m³/s, 145m³/s인 것과 비교해 보았을 때,¹³⁾ 고준위 방사성 폐기물의 온도차에 의한 자연 환기량이 상당히 큰 것으로 판단된다. 또한 실제 처분장의 경우 계산의 모델과 달리 복잡한 터널로 건설되는 것을 감안한다면 저항의 변화로 인하여 발생하는 자연 환기량은 크게 달라 질 것으로 예측되며, 이러한 복잡한 모델의 경우 자연 환기력을 계산할 수 있는 수학적 방법의 수정 및 보완이 필요하다.
4. 고준위 방사성 폐기물 처분장의 설계 시 온도의 제어가 매우 중요한 요소임을 감안한다면, 발생하는 자연 환기량에 의한 처분장내 대기온도 예측의 해석이 진행되어야 한다. 또한 자연 환기력의 계산 시 온도 차이에 따른 공기의 밀도가 큰 변수임을 감안한다면, 처분장터널과 외부 대기의 온도차이가 가장 크게 발생하는 겨울철에 자연 환기력이 가장 클 것으로 예측된다.

참고문헌

1. 차정훈, 2011, 사용후핵연료 장기건식저장 시스템 열해석 방법론 개발, 경희대학교 박사학위논문, pp. 1-2
2. 최희주, 이종열, 조동경, 김성기, 김승수, 김건영, 정종태, 이민수, 최종원, 이재완, 전관식, 김풍오, 2008, 한국형 고준위폐기물 처분시스템. 선진핵주기 고준위폐기물 처분시스템 개발보고서, KAERI/TR-3563/2008.

3. 이종열, 김성기, 조동건, 최희주, 최종원, 2004, 지하처분장에서의 고준위폐기물 처분공정 개념, 한국정밀공학회 추계 학술대회 논문요약집, pp. 145-148.
4. International Atomic Energy Agency, Acceptance Criteria for Disposal of Radioactive Wastes in shallow Ground Rock Cavities, Safety Series No. 71, IAEA, Vienna 1985.
5. M. Mepherston, 1993, Subsurface Ventilation and Environmental Engineering, Chapman & Hall, pp. 42, 134-141.
6. 김진, 권상기, 고주석, 2005, 동굴처분 방식을 사용하는 방사성 폐기물 처분장의 자연 환기 타당성 평가, 한국방사성 폐기물학회지, Vol. 3(3), pp. 183-192.
7. H. L. Hartman, J. M Mutmanky and Y. J Wang, 1997, Mine Ventilation and Air Conditioning, Wiley Interscience, pp. 133-165.
8. CHAM, The PHOENICS Beginner's Guide, CHAM, UK, 1991.
9. CHAM, PHOENICS POLIS, <http://www.cham.co.uk>.
10. Agonafer D, Liao Gan-Li and Spalding B, (2000), "The LVEL turbulence model for conjugate heat transfer at low Reynolds numbers", Cham, London
11. 윤찬훈, 2011, 고준위 방사성 폐기물 처분장 내 온도예측을 위한 열 전달 계수 결정 현장실측과 수치해석에 관한 연구, 인하대학교 박사학위논문, pp. 29-30.
12. 윤찬훈, 권상기, 황인필, 김진, 2010, 강제대류시 계절에 따른 KURT내 열전달 계수 결정에 관한 연구, 한국방사성폐기물학회지, Vol. 8(3), pp. 189-199.
13. 김영민, 권오상, 윤찬훈, 권상기, 김진, 2007, 지하 동굴식 중-저준위 방사성 폐기물 처분장의 환기시스템 고찰, 한국방사성폐기물학회지, Vol. 5(1), pp. 65-78.

노 장 훈

2009년 인하대학교 환경공학과 공학사



Tel: 032-872-7551
E-mail: iglord2@naver.com
현재 인하대학교 에너지 자원공학과 석사과정

최 희 주

1983년 한양대학교 공학사
1985년 한국과학기술원 공학석사
1996년 한국과학기술원 공학박사



TEL: 042-868-2274
E-mail: hjchoi@kaeri.re.kr
현재 한국원자력연구원 방사성폐기물 처분연구부 처분시스템개발 과제책임자

유 영 석

2010년 인하대학교 환경공학과 공학사



Tel: 032-872-7551
E-mail: yeongseok.yu@gmail.com
현재 인하대학교 에너지 자원공학과 석사과정

윤 찬 훈

2002년 인하대학교 자원공학과 공학사
2004년 인하대학교 자원공학과 공학석사
2011년 인하대학교 환경공학과 공학박사



Tel: 032-872-7551
E-mail: yoon0940@hanmail.net
현재 한국원자력연구원 방사성폐기물 기술개발부 박사후 연구원

김 진

1987년 인하대학교 공학사
1990년 미국 University of Kentucky 공학석사
1995년 미국 University of Missouri-Rolla 공학박사



TEL: 032-860-7558
E-mail: jinkim@inha.ac.kr
현재 인하대학교 에너지자원공학과 교수