

The Feasibility of Natural Ventilation in Radioactive Waste Repository Using Rock Cavern Disposal Method

동굴처분 방식을 사용하는 방사성 폐기물 처분장의 자연 환기 타당성 평가

Jin Kim and Sang Ki Kwon*

Inha University, 253 Yonghyun-Dong, Nam-Ku, Incheon

*Korea Atomic Energy Research Institute, 150 Duckjin-dong, Yuseong-gu, Daejeon

jinkim@inha.ac.kr

김 진, 권 상기*

인하대학교, 인천시 남구 용현동 253번지

*한국원자력연구소, 대전시 유성구 덕진동 150번지

(Received May 17, 2005 / Approved August 19, 2005)

Abstract

Natural ventilation in radioactive waste repositories is considered to be less efficient than mechanically forced ventilation for the repository working environment and hygiene & safety of the public at large, for example, controlling the exposure of airborne radioactive particulate matter. It is, however, considered to play an important role and may be fairly efficient for maintaining environmental conditions of the repository over the duration of its lifetime, for example, moisture content and radon (Rn) gas elimination in repository. This paper describes the feasibility of using natural ventilation which can be generated in the repository itself, depending on the conditions of the natural environment during the periods of repository construction and operation.

Evidences from natural cave analogues, actual measurements of natural ventilation pressures in mountain traffic tunnels with vertical shafts, and calculations of airflow rates with given natural ventilation pressures indicate possible benefits from passive ventilation for the prospective Korean radioactive waste repository. Natural ventilation may provide engineers with a cost-efficient method for heat and moisture transfer, and radon (Rn) gas elimination in a radioactive waste repository. The overall thermal performance of the repository may be improved. The dry-out period may be extended, and the seepage flux likely would be decreased.

Key words : radioactive waste repository, natural ventilation, rock cavern disposal method, thermodynamic method

요 약

자연환기는 처분장의 작업 환경 및 위생, 부유 방사성 핵종의 노출 등과 같은 안전문제에 있어 자연환기 자체만으로는 기계적 강제 환기에 비해서 덜 효과적이지만 처분장 내의 수분제거, 작업 환경 조성과 관련하여 라돈 (Rn) 가스의 희석과 같은 향후 처분장의 장기적 환경을 위해서는 중요한 역할을 할 수 있고, 환풍기와 같은 환기 설비를 이용해야하는 기계환기에 비해 경제적으로 매우 효과적일 수 있다. 본 논문에서는 지하 처분장의 건설 및 운영 기간동안 자연환경 조건에 따라 처분장에 스스로 생기는 자연 환기의 타당성에 대하여 기술하였다.

자연 동굴을 통한 자연환기 유사에 의해 밝혀진 증거들과, 수직갱을 갖는 산악 도로터널에서의 자연 환기 측정, 그리고 주어진 자연환기 압력에 의한 공기 발생량 계산 등 을 통해서 자연 환기는 한국형 지하 방사성 폐기물 처분장에 잠재적으로 매우 유익함을 알 수 있다. 효과적으로 유도된 자연 환기는 방사성 폐기물 처분장 내에 발생하는 열과 습도, 그리고 라돈 가스를 제어하기에 경제적으로 좋은 방법이 될 수 있다. 자연환기를 통해 처분장의 전반적 열적 특성은 개선될 수 있고, 수분으로 포화된 공기는 효과적으로 건조되고 그 건조상태 유지 기간은 확장 될 수 있을 것이다.

중심단어: 방사성폐기물처분장, 자연환기, 동굴처분방식, 열역학적 방법

I. 서 론

지층이 가진 구조적, 화학적, 열적, 수리적 안정성 때문에 방사성 폐기물은 지층에 처분하는 것이 장기적 안정성 측면에서 유리할 수 있다. 지층 처분장이 효과적으로 운영되기 위해서는 폐기물로부터 발생하는 열과 처분용기를 부식, 퇴화시키고 방사성 핵종을 운반시킬 수 있는 처분장 주변 유체의 이동을 차단, 제어하고 처분장 내로 유입된 물과 수분을 안전하게 제거할 수 있어야 한다. 이를 위해 적절한 환기시스템이 처분장 건설 및 운영을 위한 개념 선정 단계에서부터 고려되어야한다 [McPherson, 1993; Hartman 등, 1982; 김 진 등, 2005]. 또한, 지하 처분장 개발 기간 중 환기를 절대적으로 필요로 하는 처분장의 건설 및 운영 그리고 운영 실태 확인 기간은 일반적으로 장기간에 걸쳐 이루어지고 있으므로 (국가에 따라 다소 차이가 있지만 미국 Yucca Mountain 고준위 처분장의 경우는 약 100년을 산정하고 있음) 에너지와 비용 소모가 많은 기계적 환기뿐만 아니라, 처분장 지형, 처분장 형태, 처분장 근처 지역의 기후에 따라 처분장에 스스로 생기는 자연 환기의 가능성과 자연 환

기력의 크기를 산출해 보는 것은 지층 처분장의 최적 환기시스템 설계를 위한 중요한 부분이 될 수 있다.

어떤 지하시설에서도 그 시설 내 공기 통로 (혹은 공기 회로)를 통한 압력손실을 극복할 수 있는 압력을 얻지 않는 한 그 공기 통로에서 공기흐름은 발생하지 않는다. 공기흐름은 압력차에 의해서 발생하고 이 압력차는 어떤 에너지원으로 부터만 얻어 진다. 압력차를 만들 수 있는 힘에는 두 가지가 있는데 하나는 기계적인 것이고 또 하나는 자연적인 것이다. 기계 환기는 에너지원으로 사용되는 환풍기에 의해서 만들어지는 압력에 의해서 발생하지만 자연 환기는 세 가지 메카니즘: 1) 지하시설 공기 통로 입구의 고도차, 2) 지하시설 내외부의 온도차, 그리고 3) 대기압의 변화 등 자연조건에 의해서 발생한다. 자연 환기에서는 이들 자연 조건의 차이가 크면 클수록 더 큰 자연 환기압이 생성되고 결과적으로 더 큰 공기흐름이 발생한다. 그리고 때때로 공기통로가 막힌 막다른 터널에서조차도 이 자연조건 변화에 의한 공기흐름은 크기 면에서는 작지만 발생할 수 있다 [Hartman 등, 1982].

더운 공기는 상승해서 위쪽의 차가운 공기를 대체

함으로 (굴뚝효과) 공기의 순환을 야기시킨다. 동굴 처분 방식을 사용하는 방사성 폐기물 처분장에서도 이와 유사한 현상이 발생할 수 있는데 이는 처분장내 공기통로 입구들의 고도차, 그리고 저장 지역에서 발생하는 열에 의한 내부와 외부의 온도차에 의한 것이다. 그러므로 지하 수백미터의 심부 암반에 위치하고 폐기물에서 발생하는 붕괴열과 지열에 의해 내부 온도가 높은 고준위 방사성 폐기물 처분장은 지리적 위치와는 상관없이 강한 자연 환기력을 가질 수 있다. 한편, 고준위 처분장과 비교할 때 처분장 깊이가 비교적 얇고 폐기물 붕괴열이 발생하지 않는 중저준위 방사성 폐기물 처분장의 경우라 할지라도 산중 혹은 작은 언덕지형에 터널 혹은 동굴을 건설한다면 공기통로 입구들의 고도차로 인해 상당한 자연 환기력을 확보할 수 있을 것이다.

이러한 자연환기력의 장단점을 고려하여 방사성 폐기물 처분장의 환기 설계에 자연환기력의 영향을 반영하는 것은 경제성, 안전성 측면에서 효율성이 높은 처분장을 건설, 운영하는데 도움이 될 수 있을 것이다.

II. 지하 처분장 자연 환기의 방향성

Figure 1 은 동굴식 지하처분장의 대표적인 두가지 형태를 보여주는데, 첫 번째 것은 저장시설이 두 개의 수직갱으로 연결된 경우를 나타내고 (a), 두 번째 것은 하나의 수평갱도와 수직갱으로 연결된 경우를 나타낸다. 지하 처분장의 수직갱, 저장시설, 수평갱도는 각각 연결되어 공기회로를 이루게 되는데, 이 공기회로에서 자연 환기력에 의한 공기흐름의 방향성을 예측하기 위해서는 먼저 각각의 기준면으로부

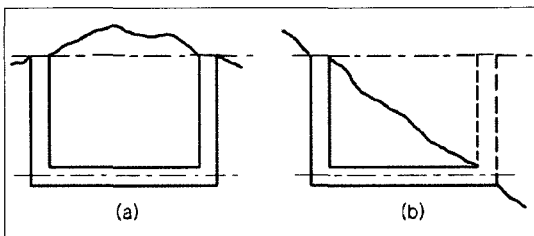


Figure 1. Direction of flow in basic natural ventilation of disposal repository

터 공기주 (air column) 높이에 의한 압력차를 비교해야 한다 ((a)에서의 공기주는 각 수직갱의 높이, (b)에서의 공기주는 수직갱의 높이와 보이지 않는 상상의 공기주 높이로 나타난다). 더 낮은 평균 온도를 갖는 공기주는 더 무거우므로 가라앉게 되고 더 따뜻하고 가벼운 공기주를 대치하게 된다. 처분장에서 자연 환기력에 의한 공기 방향은 무거운 공기주로부터 가벼운 공기주로 흐르게 된다.

지표면에 있는 공기통로 입구들 사이에 고도차가 크지 않다면, 지속적인 자연환기를 일으키기 위해서 환풍기와 같은 기계적 장치나 다른 수단에 의해서 공기를 먼저 인위적으로 흐르게 할 필요가 있을 수 있다. 그러나 일단 공기가 흐르기 시작하면 기계적 장치의 도움 없이도 그 흐름은 공기흐름에 도움을 주는 온도차가 존재하는 한 계속된다.

Figure 1의 system (a)의 경우, 겨울철에는 지하 처분장 내부의 공기 온도가 외부 온도보다 높으므로 굴뚝효과에 의해 공기흐름이 양쪽 어느 방향으로든 지 가능하게 되고, 여름철에는 처분장 내부의 공기 온도가 외부 온도보다 낮게 되므로 공기흐름은 발생되지 않는다. system (b)의 경우, 겨울철에는 역시 처분장 내부의 온도가 외부 온도 보다 높으므로 공기가 공기주의 무게가 더 무거운 오른쪽에서 왼쪽으로 흐르게 되고 여름철에는 반대로 왼쪽에서 오른쪽으로 흐르게 된다. 계절별로 온도가 변화함에 따른 공기흐름의 방향은 Table 1 과 같이 정리된다.

한편, 시스템 (a)에서와 같이 공기통로 입구들의 고도차가 존재하지 않더라도 자연 환기력은 발생할 수 있다. 예를 들면, 입구와 출구 사이에 고도차가 존재하지 않는 교통터널은 터널 내부에 지표면과 연결되는 수직갱이 존재하지 않더라도 때때로 큰 자연 환기력을 갖을 수 있다. 이것은 바람의 역할 때문이 아

Table 1. Air flow direction depending on seasons

	System (a)	System (b)
Need to induce (by fans)	Yes	No
Flow direction in winter	Either	Right to left
Flow direction in summer	None	Left to right

나라 입구와 출구 부분의 지형과 태양에 의한 온도차에 기인하는 것이다. 국내 산악지형에 위치한 교통터널에서도 입구와 출구 부분의 각기 다른 산악지형으로 말미암아 겨울철 맑은 날씨에는 입·출구의 일사 조건 즉, 직사광선을 받는 부분과 그늘 아래 있는 부분에 따라 온도차가 많이 일어날 수 있고 이는 강력한 자연환기의 동력원이 될 수 있다는 보고가 있다 [김민석, 2004].

Ⅲ. 자연 동굴을 통한 중저준위 동굴 처분장의 자연환기 유사

자연동굴에서의 자연환기 현상을 파악함으로써 처분장내에 열원이 거의 존재하지 않는 중저준위 방사성 폐기물 동굴 처분장의 자연환기 현상을 유사해 볼 수 있다. 대부분의 자연 동굴에서는 일반적으로 동굴의 내 외부 사이에서부터 오는 온도차에 의한 공기밀도 차가 공기 통로 입구의 고도차와 더불어 공기의 흐름을 유발시키지만 (굴뚝효과), 대기압의 변화에 의해서도 공기흐름이 발생할 수 있다.

Stickless 등 (2003)은 미국 내의 여러 자연 동굴에서 발생하는 자연환기를 위에서 설명한 세 가지 메카니즘, 즉 동굴 공기 통로와 입구의 고도차, 동굴 내부의 온도차, 그리고 대기압의 변화 등을 사용해서 설명하였다. 미국 South Dakota주에 위치하는 Wind Cave는 대기압에 의해서 통제되는 공기흐름을 대표적으로 보여 준다. 여기서 동굴은 크기가 매우 크고 오직 하나뿐인 입구를 가지고 있고 동굴을 대기 환경으로부터 고립시키는 단단한 지붕 암반을 가지고 있다. 대기중 고기압계의 움직임은 동굴을 공기로 충전케 되도록 "펌프질"하고 반대로 저기압계의 움직임은 저장된 공기가 배출되도록 한다. 이 대기압의 "펌프질"과 작은 크기의 입구가 합쳐져서 최대 순간 초속 30 m/sec의 공기속도를 유발시키기도 하지만, 일반적으로는 관광객의 출입을 위해 입구가 열린 상태에서 평균 0.8 m/sec의 공기량이 동굴 안으로 유입되거나 유출 된다 [Napstad, 1989]. Wind Cave의 경우처럼, 이렇게 입구가 하나뿐인 경우의 동굴에서는 대기압 변화에 의한 공기의 순환이 있다 하더라도 매

우 불규칙하기 때문에 예측하기가 힘들다.

공기 밀도 차에 의해서 자연 환기력을 갖는 동굴에는 두 가지 경우가 있다. 미국 New Mexico주 Carlsbad Caverns는 입구가 하나라는 점에서는 Wind Cave 경우와 비슷한 방식으로 대기압 변화가 일어나지만, 동굴의 모양은 Wind Cave와 다르게 완전히 수직으로 서있는 모양을 갖추었으므로 공기의 순환은 온도에 의해서 통제된다. 이 동굴에서의 계절별 공기흐름의 특성은 동굴 내 라돈 가스량에 의해서 잘 설명된다. 상대적으로 더운 여름보다 추운 겨울철에 동굴 내 라돈 가스량이 훨씬 적다고 보고 되고 있는데 [Wilkening, 1976], 이는 겨울에 바깥의 차가운 공기가 동굴내부의 따뜻하고 습도가 높은 공기를 대체하며 대류를 일으키기 때문으로 생각된다. 이런 형태의 동굴은 비록 입구는 하나 밖에 없지만 동굴 바닥부터 천정까지의 높이가 높으므로 공기의 대류를 유도하고 이는 보다 일정한 공기의 순환을 일으킬 수 있을 것이다.

공기 밀도 차에 의해서 자연 환기력을 갖는 시스템의 또 다른 예는 미국 Kentucky 주의 Mammoth Cave에 의해서 설명될 수 있다 (Figure 2). Mammoth Cave는 Figure 1의 시스템 (b)와 비슷한 경우로 동굴 입구와 다른 고도에 위치하는 자연 혹은 인공으로 만들어진 수많은 공기통로의 입구들이 있다. 이 공기통로 입구들로 인하여 계절에 따라 역방향 공기순환이 발생할 수 있다. 여름철에는 동굴내의 상대적으로 차가운 공기가 낮은 고도에 위치한 입구를 통해 나가고

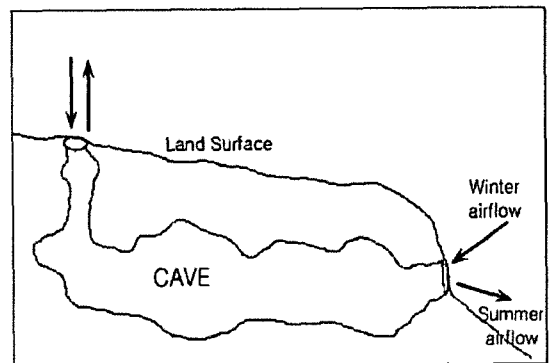


Figure 2. Configuration of Mammoth Cave in Kentucky US [Stickless 등, 2003]

외부의 따뜻한 공기는 높은 고도에 위치한 입구를 통해서 동굴 내부로 들어오게 된다. 반대로 겨울철에는 동굴내부의 상대적으로 따뜻하고 습도가 높은 공기가 높은 고도에 위치한 입구를 통해서 나가고 외부의 차가운 공기는 낮은 고도의 입구를 통해서 끌려 들어온다. Mammoth Cave에 대한 연구는 공기속도는 동굴 내부와 외부 공기 온도차에 비례한다는 것과 입구 문의 제거 혹은 입구의 크기는 자연환기의 크기를 결정짓는데 중요한 요소임을 보고 하였다 [Olson, 1996].

Figure 2에서 보는 것처럼 동굴 내에 외부와 연결된 공기통로가 있다면 이는 마치 도로터널에서 환기구로 사용하는 수직갱과 같이 굴뚝 역할을 하여 공기 순환은 더욱 강력하게 일어날 것이고, 또한 수직 공기통로의 길이가 길면 길수록 굴뚝효과는 상승할 것이다. 그러므로 환기적 측면에서 보면 수직 환기구가 존재하는 Mammoth Cave 형태의 동굴이 중·저준위 처분장을 위해서 가장 적절한 모델이 될 것이다. 하지만 만약 어떤 지역에서 지표면 공기 온도의 계절별 범위가 자연 환기력에 의해서 순환되는 처분장의 지층 평균 온도를 넘는다면 언제나 공기흐름의 역류 현상이 발생할 수 있다. 이런 이유 때문에 동굴 방식 처분장이 기계적 강제 환기장치 없이 자연 환기력에 의해 순수하게 환기되는 방식은 권장되지 않으며 기계적 환기 장치를 기본으로 하고 자연환기력의 영향을 고려한다면 효율성 높은 환기 시스템을 구축할 수 있을 것으로 사료된다.

IV. 고준위 처분장에서의 공기의 열역학적 과정과 폐쇄 사이클

지하 고준위 방사성 폐기물 처분장은 중·저준위 처분장과는 달리 처분장에 거치된 고준위폐기물에서 발생하는 붕괴열과 심도에 따라 증가되는 지열의 영향을 고려해야 한다. 국내 고준위폐기물 처분 연구에서 고려하고 있는 대상은 PWR 과 CANDU 사용후핵연료로서 이들이 발생하는 열은 사용후핵연료의 연소도와 냉각기간에 따라 달라진다. 연소도가 45,000 MWd/MtU 인 PWR 사용후핵연료의 경우 시간에 따

른 붕괴열은 다음 식으로 계산된다 [Choi et al., 1997].

$$P(t) = 14548.7t^{-0.76204} \quad (W/Ton) \quad t \geq 30 \text{years} \dots\dots(1)$$

그리고 지열의 경우 100 m 심도 증가에 따라 3℃ 정도의 온도 상승을 가지는 것이 일반적이다. 따라서 고준위 처분장의 경우 지하 깊은 곳에 열원 (폐기물 암반)을 그리고 높은 곳에 열 흡수 (자연 암반 표면) 장치를 갖는 일종의 열사이폰 (thermosiphon)이라 할 수 있다. 결과적으로 양의 부력 압 차이 (positive buoyance pressure difference)가 공기순환 회로 내에 발생 될 수 있다. 고준위 처분장 시스템은 Figure 3에서 보는 것과 같은 열 엔진과 유사한 폐쇄 싸이클의 열역학적 과정을 따른다고 볼 수 있다. 공기가 시스템으로 일단 들어오면 깊이가 깊어짐에 따라 압축되고 수직갱 아래에서 중력 에너지에 의해 가열되는데 이를 autocompression 이라 한다. 그리고 더 많은 열이 폐기물, 지층, 기계류 등으로부터 공기에 추가되고 이로 인해 공기가 배기 수직갱을 통해 위로 올라가는 동안 팽창됨에 따라 주위에 일을 하고, 이때 한 일에 의해 첨가된 열의 일부는 임시로 기계적 에너지로 변해서 공기의 흐름을 촉진할 수 있다. 이는 처분장 내에서 지속적이고 강력한

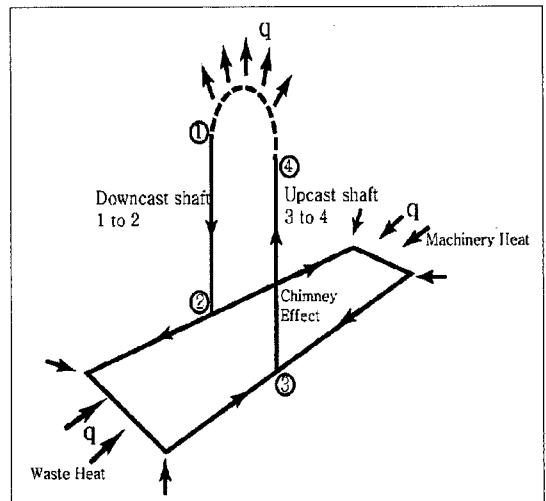


Figure 3. Schematic diagram of underground repository system with heat source [McPherson, 1993]

열원이 존재한다면 자연 지속적인 공기의 사이클적 흐름을 가능하게 할 것이라는 자연 유사적 증거가 된다.

고준위 지층 처분장으로 건설 중인 미국 Nevada 주에 위치한 Yucca Mountain 처분장은 자연환기의 가능한 효과를 보고했다 [Anon., 2001]. 보고서에 의하면 자연 환기력에 의해 발생된 공기량은 실제 용출량이 수리해석 모델링을 통해 계산된 지하수의 지층을 통한 용출량보다 10배가 된다고 가정했을 때라도 10,000년 동안 처분장 내의 상대습도를 40% 이하로 유지시킬 수 있다고 보고하고 있다. 현재 공사가 완료된 Exploratory Studies Facility (ESF)를 차단시키지 않는다면 자연 환기력에 의한 공기 속도는 0.5 m/sec 정도가 될 것이고, 이는 45 liter/m of tunnel/year 정도 되는 수분을 제거할 수 있을 것으로 추정된다.

V. 자연 환기력 계산

자연환기를 발생시키는 자연환기 압력차는 정수압적 방법 (hydrostatic method)으로 계산되어 지고 이는 공기주 (air column)의 높이에 대한 밀도 차를 계산함으로써 그 크기를 알 수 있다. 즉, 자연환기 압력 (NVP: Natural Ventilating Pressure)은 공기 밀도 함수를 고도로 적분한 면적이 되며 다음과 같이 표현된다.

$$NVP = g \times \int \rho [T(Z)] dZ \dots\dots\dots(2)$$

여기서 공기밀도 (ρ)는 온도 (T)의 함수고 온도는 다시 고도 (Z)의 함수가 된다.

지하 방사성 폐기물 처분장 자연 환기의 보다 정확한 계산을 위해 자연환기 압력은 열역학적 방법 (thermodynamic method)으로도 계산되어 질 수 있다. 자연적으로 환기되는 지하 처분장을 위한 열역학 P-V (압력-부피) 선도는 입기 수직갱 (1-2), 저장지역 (2-3), 그리고 배기 수직갱 (3-4)를 위해 Figure 4에서 보이는 것처럼 간략히 설명될 수 있다.

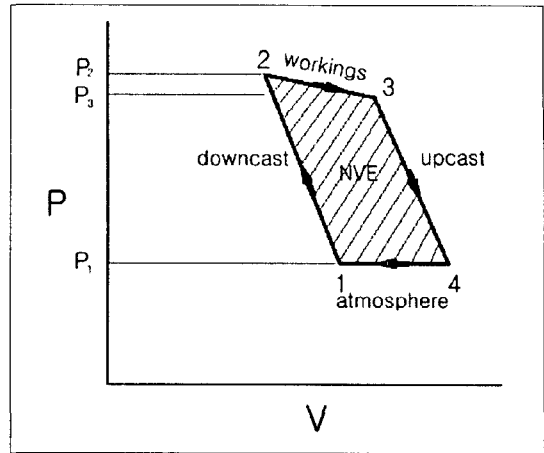


Figure 4. P-V diagram for a naturally ventilated underground repository ($NVE = \int VdP = \sum F$)

각각의 $\int VdP$ 항은 P-V 선도상의 좌측 면적으로 표시된다. 완전한 사이클을 위한 순환 적분 $\oint VdP$ 은 P-V 선도 상에서 1-2-3-4로 표시되는 닫혀진 면적이 된다. Figure 4는 그 닫혀진 면적이 “음”임을 보여주며 이것은 순수한 공기흐름 일 (net flow work)이 공기에 의해서 행해진 것임을 알 수 있다. 이것이 공기의 흐름을 발생시키고 유지시키는 기계적 에너지 (자연환기 에너지: Natural Ventilating Energy)가 된다. 또한 P-V 선도는 이 NVE 면적이 크게 두 가지 요소에 의존함을 보여 준다; 첫째, 지하처분장에서 지점 2-3 사이의 단위 부피를 확장시킬 수 있는 열의 추가 범위; 둘째, 수직갱 1-2와 3-4 각각의 깊이에 의해서 야기되는 압력차. 즉, 추가되는 열과 처분장의 깊이가 커질수록 NVE도 점점 커지게 된다.

자연환기 압력 (에너지)을 산출하기 위해서, 만약 지하의 환경이 폴리트로픽 법칙 (polytropic law)을 따른다고 가정하면, 전체 지하 공기통로에 걸쳐 발생하는 마찰을 극복하기 위해 행해진 일의 양은 다음과 같은 방정식에 의해서 계산된다.

점 i 는 위치 2, 3, 그리고 4를, u 는 공기속도, Z 는 수직갱 깊이, T 는 절대온도, P 는 공기압력을 나타내고, 결과로 나오는 힘 (일)의 합은 NVE를 나타낸다. 그리

$$F_{i-1} = \frac{u_{i-1}^2 - u_i^2}{2} + (Z_{i-1} - Z_i) \rho - R(T_i - T_{i-1}) \frac{\ln(\frac{P_i}{P_{i-1}})}{\ln(\frac{T_i}{T_{i-1}})} \dots(3)$$

고 자연환기 압력 (NVP)은 다음과 같이 계산된다.

$$NVP = NVE \times \rho \quad \dots\dots\dots(4)$$

미국 New Mexico 주에 위치하고, 군사방위와 관련된 초 우라늄 방사성 폐기물 (중·저준위)의 안전한 처분을 위해 지하 깊은 지층 (약 -650 m) 속에 건설된 Waste Isolation Pilot Plant (WIPP)에서는 대기압, 공기 온도 및 속도 측량을 한 다음 자연 환기 압력을 열역학적 방법으로 계산하였는데, 그 크기는 일반 모드일때 36 ~ 433 N/m², 필트 모드일때 95 ~ 365 N/m² 정도 되는 것으로 보고하고 있다 [Brunner 등, 1989].

VI. 수직갱이 있는 산악 도로터널의 자연 환기력

동굴 처분 방식을 사용하는 중·저준위 방사성 폐기물 처분장의 자연 환기 가능성을 보다 실질적으로 유사하기 위해 산악 암반 중에 건설된 도로터널에서의 자연 환기력을 알아보았다. 국내의 산악 고속도로 터널 중 길이가 긴 장대 터널은 원활한 환기를 위해 터널 중간에 수직갱 (WIPP의 수직갱에 비해 깊이가 낮음; 200 m 이하)을 가지고 있는데, 이는 위에서 설명한 여러 동굴형태 중 가장 높은 환기 효율을 기대할 수 있는 Mammoth Cave 형태의 동굴과 유사하다. 산악 교통터널 중 국내에서 대표적인 수직갱 터널인 둔내 터널과 죽령 터널에서 여름철과 겨울철에 걸쳐 측량이 이루어졌다. 둔내 터널과 죽령 터널의 제원은 Table 2 와 같다.

Figure 5 는 수직갱을 가지고 있는 산악 장대터널의 기본 형상을 나타내고 있고, 둔내 터널과 죽령 터널에서 그림에서 나타난 것 처럼 4 곳의 측정지점에

Table 2. Configurations of Dun Nae and Jug Ryung Tunnels

	Length (m)	Grade (%)	Altitude (m)	Cross-sectional area (m ²)	Tunnel diameter (m)	Shaft height (m)
Dun Nae	3,300	±1.50	682	65.51	8.24	200
Jug Ryung	4,600	±0.54	400	64.10	8.81	142

서 여름철과 겨울철에 걸쳐 각각 대기압, 공기 온도 및 속도 측량을 실시한 다음 자연 환기 압력을 열역학적 방법으로 계산하였다. Figure 6과 Table 3은 각각 둔내 터널의 계산된 여름철 자연환기압 결과와 둔내, 죽령 터널의 계절 변화에 따른 자연환기압력 변화를 보여 준다.

자연환기력은 터널 내 외부의 온도차 및 고도차에 의해 크게 변화하는데, 양 터널 내 외부의 온도 차이를 비교하여 보았을 때 겨울철 보다 여름철에 온도 차이가 큰 것으로 나타났다. 예상대로 터널 내 외부의 온도차이가 큰 여름철의 자연환기력이 우세하였으며, 평균고도 및 수직갱의 높이가 더 높은 둔내터널의 자연환기력이 죽령터널에 비하여 더 큰 것으로 나타났다. 한편, 둔내터널의 하행선에는 수직갱이 설치되어 있지 않으므로 수직갱이 있는 터널과 없는 터널의 자연환기력을 자연스럽게 비교하여 볼 수 있었는데 수직갱이 없는 곳의 겨울철 자연환기력은 15.15 N/m²로 수직갱이 있는 것 보다 약 10배 가까이 적은 환기력을 나타내었다. 또한, 수직갱이 설치되어 있지 않은 국내 도심지 도로터널에서의 자연환기력은 일

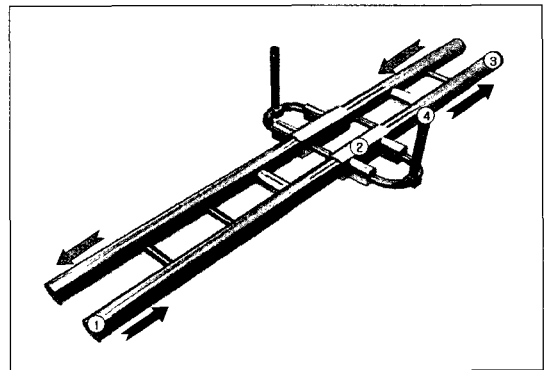


Figure 5. Measuring points in the tunnel

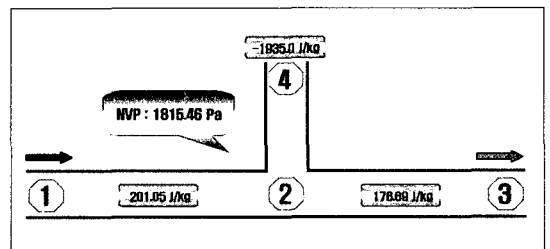


Figure 6. Natural ventilation pressures in Dun Nae tunnel at summer

반적으로 4.46 ~ 7.58 N/m² 정도였는데 [김효규, 1999], 이는 산악 터널 이면서 수직갱을 갖는 터널이 도심지 터널 이면서 수직갱을 갖지 않는 터널에 비해

Table 3. Natural ventilation pressures varying with season

Summer [N/ m ²]		Winter [N/ m ²]	
Dun Nae	1815.46	Dun Nae	142.92
Jug Ryung	1579.47	Jug Ryung	46.40

자연환기력이 크게 증가한다는 것을 보여준다.

특이한 것은 수직갱이 있는 산악 도로터널에서의 자연환기력이 WIPP에서의 자연환기력 보다 수직갱의 높이가 낮은데도 (WIPP: -650 m) 불구하고 훨씬 더 큰 것으로 나타났다는 점이다. 이는 첫째, WIPP 이 Figure 1의 시스템 (a)에 가까운 형태인 반면, 수직갱 도로터널은 시스템 (b)에 가까운 형태를 가지고 있기 때문이고, 둘째, 각각 다른 지역의 기후 및 온도 차 때문인 것으로 생각된다. 이와같이 공기통로 입구의 고도차이는 내 외부의 온도차이와 더불어 자연환기력에 큰 영향을 주는 중요한 요소이므로 자연환기를 설계에 반영하는 경우 이의 영향을 고려하여야 할 것이다.

V. 자연 환기력에 의한 공기 발생량 산출

지하 처분장에서 자연 환기력에 의한 공기 발생량은 자연 환기 압력 (NVP)대 공기량 (Q) 그래프위에 NVP와 지하 처분장 공기통로 저항 (R) 특성곡선의 교차점 (작동점: working point)을 구하여 산출할 수 있다.

처분장 공기통로 저항 값은 터널의 길이 및 형상, 터널표면의 거칠기, 터널의 굽음, 터널들의 직렬 혹은 병렬연결, 필터 시스템 등에 의해서 결정되지만 기계적 강제 환기가 없는 상태에서 자연환기만 고려할 때 즉, 공기속도가 작을 때만을 고려한다면 터널 마찰과 충격에 의한 저항은 거의 무시할 수 있을 것이며 공기가 필터 시스템을 지나는 동안 발생하는 압력손실로부터 발생하는 필터 저항이 전체 저항 값을

거의 지배하게 된다. 일반적으로 필터에서 저항 값은 공기량 1 m³/s당 1000 N/m² 압력손실로 나타낼 수 있다. 그리고 공기통로 저항특성 곡선은 다음과 같이 Atkinson 방정식으로 표현된다.

$$\Delta P = R \Delta Q^2 \dots\dots\dots(5)$$

그러므로 2차 저항 특성 곡선이 Figure 7에 보이는 것과 같이 나타난다.

WIPP의 경우, 자연 환기압력에 의해서 공기 필터, 폐기물 저장 터널 등 전체 공기 회로 시스템의 저항을 극복하고 시스템에 흐르게 되는 공기량은 약 0.20 ~ 0.66 m³/sec 정도가 되는 것으로 예측 된다. 수직갱을 갖는 장대 도로터널의 경우, 겨울철 최대 약 1.35 m³/sec, 여름철 최소 약 0.22 m³/sec의 공기량이 발생할 것으로 예측 된다 (수직갱 끝에 같은 공기 필터를 사용한 다는 가정). 두 경우 모두 자연환기압력에 의해 발생하는 공기량은 계절별로 매우 큰 차이를 보이며 변동하는 것으로 보이지만 향후 처분장의 장기적 환경을 위해서는 적지 않은 공기량으로 평가 된다.

처분장내에 열원을 가지고 있지 않는 중·저준위 처분장의 경우는 상관없지만 처분장내에 열원을 가지고 있는 고준위 처분장의 경우는 자연 환기력에 의해 발생하는 공기량 산출이 더 복잡해진다. 즉, 본 논문에서는 논의 되지 않았지만 고준위 처분장에서의

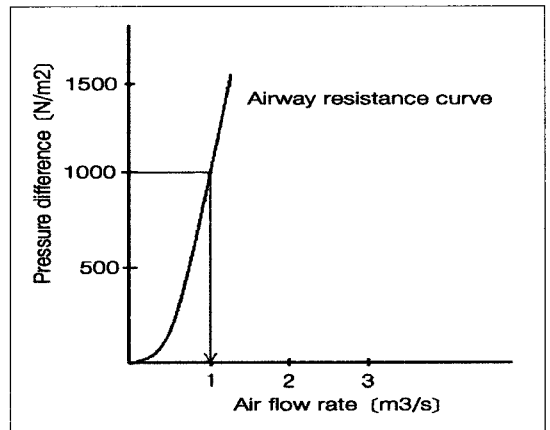


Figure 7. Performance characteristics of natural ventilation (Airway resistance curve described by $\Delta P=R \Delta Q^2$)

자연 환기 압력은 공기 온도에 의존하고 공기 온도는 다시 흐르는 공기량에 의해 지배되므로 처분장 내에 발생하는 열과 환기 공기량에 따른 공기 온도 변화를 계산해서 공기량을 산출해야 할 것이다.

VI. 결 론

자연환기는 처분장 내의 수분제거, 작업환경 조성과 관련하여 라돈(Rn) 가스의 희석과 같은 향후 처분장의 장기적 환경을 위해 중요한 역할을 할 수 있을뿐만 아니라 기계 환기 효율의 향상에도 도움이 될 수 있으므로 특정 지역에 설계된 지층 처분장에서 발생할 수 있는 자연환기의 가능성과 그 크기를 예측한다면 경제적이면서도 안전한 처분장 운영에 큰 도움이 될 것이다.

자연 동굴의 자연환기 유사로부터 동굴 방식 처분장을 자연환기를 고려해서 설계할 때 다음의 설계인자: 1) 동굴 입구의 위치, 크기, 2) 동굴의 형상(수평적 공간인지 혹은 수직적 공간인지), 3) 동굴 입구에 공기통로의 유무, 4) 동굴 내부와 외부의 기후 등이 고려되어야 한다. 일반적으로 동굴은 바닥부터 천장까지의 높이가 높아야 대류를 잘 일으킬 것이고, 또한 동굴 내에 수직 환기구가 있고 적절한 곳에 위치하며 가능한 한 높이가 높다면 굴뚝효과에 의해 자연환기를 극대화시킬 수 있을 것이다.

중·저준위 폐기물 처분장이 동굴 방식으로 만들어지는 경우 예상되는 자연환기량을 예측하기 위해 WIPP의 경우와 수직갱을 갖는 국내 산악 도로터널의 경우를 분석했다. 계산된 자연 환기량은 WIPP이 약 0.20 ~ 0.66 m³/sec정도가 되고, 공기 필터(공기량 1 m³/sec당 1000 N/m² 압력손실)를 수직갱에 포함하는 산악 도로터널 경우 계절에 따라 약 0.22 ~ 1.35 m³/sec정도의 자연환기에 의해 상당량의 공기흐름이 발생하는 것으로 예측 되었다.

둔내터널에서 상행선(수직갱 설치)과 하행선(수직갱 미설치)의 자연환기력을 비교하여 보면 수직갱이 있는 상행선이 수직갱이 없는 하행선 보다 자연환기력이 약 10배(겨울철 기준) 가까이 큰 것으로 나타났다. 또한, 수직갱이 설치되어 있지 않은 국내 도심

지(상대적으로 산악지역 보다 기온차가 심하지 않음) 도로터널에서의 자연환기력을 더불어 비교하여 볼 때, 산악 터널 이면서 수직갱을 갖는 터널이 도심지 터널 이면서 수직갱을 갖지 않는 터널에 비해 자연환기력이 크게 증가한다는 것을 보여준다.

동굴 방식의 중·저준위 처분장에서 자연환기압력에 의해 발생하는 공기량은 계절별로 매우 큰 차이를 보이며 변동할 것으로 예측된다. 하지만 이를 잘 분석하고 처분장의 형태를 자연환기를 고려하여 설계한다면 비록 자연환기량이 처분장 내의 작업 환경 및 위생, 부유 방사성 핵종의 노출 등과 같은 안전문제를 감당할 정도의 공기량은 되지 못하겠지만, 향후 처분장의 장기적 환경에는 큰 도움이 될 수 있는 공기량으로 평가 된다.

고준위 방사성 폐기물 처분장의 경우는 처분장에 열원을 가지고 있어 더욱 강력한 자연환기가 발생할 것이다. 이때 자연 환기 압력은 공기 온도에 의존하고 공기 온도는 다시 흐르는 공기량에 의해 지배되므로 열량 미분방정식을 사용하여 처분장 내의 시간에 따른 공기 온도 변화를 계산해서 공기량을 산출해야 한다. 미국 Yucca Mountain Project 의 경우에서 보듯이 고준위폐기물 처분장에서도 자연환기력에 의해 상당량의 수분이 효과적으로 제거될 것 수 있을 것이다.

향후 국내 중·저준위 처분장이 동굴 처분방식으로 선정되는 경우 그리고 고준위폐기물 처분장을 지하 심부 암반에 건설하는 경우, 환기량의 계산 및 적정 환기 시스템의 설계에 있어 계절에 따른 환기 시스템의 변화와 같은 자연환기력의 영향을 반영하는 것이 필요할 것이다.

참고문헌

1. 김 민석, 2004, "수직갱을 포함하는 장대터널에서의 자연환기력 평가" 인하대학교, 환경공학과, 석사학위 논문.
2. 김 진, 권 상기, 2005, "한국형 방사성 폐기물 처분장을 위한 환기시스템 전략" 한국방사성폐기물학회지, Vol.3(2), pp.135-148.

3. 김 효규, 1999, "국내 도르터널 내 자연환기력 분석 연구" 동아대학교, 자원공학과, 석사학위 논문.
4. Anon., 2001, "Yucca Mountain Science and Engineering Report," DOE/RW-0539, U.S. Department of Energy.
5. Brunner, D. J., Wallace, K. G., Deen, J. B., 1989, "The Effects of Natural Ventilation Pressure on the Underground Ventilation System at the Waste Isolation Pilot Plant," Proceedings of 5th US Mine Ventilation Symposium, p. 593.
6. Choi, J. W., Ko, W. I., Kim, S. G., et al., 1997, "Reference spent fuel and its characteristics for the concept development of a deep geological disposal system", KAERI/TR-914/97
7. Hartman, H. L., 1982, "Mine Ventilation and Air Conditioning," John Wiley & Sons, p. 239.
8. McPherson, M. J., 1993, "Subsurface Ventilation and Environmental Engineering", Chapman & Hall, p. 242.
9. Napstad, J. and Pizarowicz, J., 1989, "Wind Cave, South Dakota: Temperature and Humidity Variations," National Speleological Society Bulletin, 51, p. 125.
10. Olson, R., 1996, "This Old Cave-The Ecological Restoration of the Historic Entrance Ecotone of Mammoth Cave and Mitigation of Visitor Impact," Proc. 5th Annual Conference Mammoth Cave National Park, p. 87.
11. Stickless, J. S. and Toomy III, R. S., 2003, "Long-Term Passive Ventilation at Yucca Mountain," Radwaste Solutions, Sept-Oct. p. 31.
12. Wilkening, M. H. and Watkins, D. E., 1976, "Air Exchange and ^{222}Rn Concentration in the Calsbad Caverns," Health Physics, 31, p. 139.