



## 저작자표시-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.
- 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#) 

工學碩士學位 請求論文

고준위 방사성 폐기물 처분장 설계를 위한 Diagonal 환기  
회로 내 공기량 분배에 관한 연구

A study on the Airflow Distribution in the Diagonal Ventilation  
Circuit for the Design of a High Level Radioactive Waste  
Repository



仁荷大學校 大學院

에너지資源工學科

黃寅弼

工學博士學位 請求論文

고준위 방사성 폐기물 처분장 설계를 위한 Diagonal 환기  
회로 내 공기량 분배에 관한 연구

A study on the Airflow Distribution in the Diagonal Ventilation  
Circuit for the Design of a High Level Radioactive Waste  
Repository



2012年 2月

指導教授 金 辰

이 論文을 碩士學位 論文으로 提出함

仁荷大學校 大學院

에너지資源工學科

黃 寅 弼

이 論文을 黃寅弼의 碩士學位論文으로 인정함



主審 \_\_\_\_\_

副審 \_\_\_\_\_

委員 \_\_\_\_\_

## 요 약 문

원자력 발전 시 발생하는 방사성 폐기물은 중·저준위 방사성 폐기물과 고준위 방사성 폐기물로 구분된다. 그 중에서 고준위 방사성 폐기물은 반감기가 최소 수 십년 이상으로 안정성을 갖기 위해선 그 이상의 시간이 소요된다. 따라서 고준위 방사성 폐기물을 처분하는 고준위 방사성 폐기물 처분장은 매우 장시간 유지·관리되어야 하며, 심지층 처분장의 경우에는 작업 환경 및 위생, 안전, 처분장 내 수분 제거와 같은 처분장의 환경을 위해 환기시스템에 대한 고려가 반드시 필요하다.

환기시스템을 설계할 때에는 일반적인 처분장 운영 상태를 고려함은 물론이고, 방사능 오염 공기나 화재에 의한 유독 가스등이 배출될 때의 비상사태를 고려해야 한다. 이러한 상황은 작업자나 처분장 안전성에 치명적일 수 있으므로 공기 유동 방향의 제어가 꼭 필요한 요소이다.

본 연구에서는 환기시스템에 적용할 공기 회로 중 공기량 조절과 공기 유동 방향의 제어에 이점을 가진 Diagonal 환기 회로에 대해서 연구하였다. Diagonal 환기 회로에 대해서는 공기조절기 조절에 따른 공기 흐름의 예측과 대략적인 공기량의 조절에 대한 연구가 이루어졌지만, 정확한 공기량 분배에 관한 연구가 수행되지 않아서 실제 설계에 적용시키기에는 부족하므로 이에 초점을 맞추어 연구를 진행하였다.

연구 결과, Diagonal 환기 회로에서도 Diagonal 갱도(Branch)로 유입시킬 공기량과 공기 유동 방향을 미리 정한다면 다른 직·병렬 회로와 마찬가지로 수식이나 프로그램에 의한 공기량을 산정할 수 있음을 알 수 있었다. 이를 적용하기 위해 앞으로 처분될 고준위 방사성 폐기물의 추정 데이터를 통해 Diagonal 환기 회로와 병렬식 환기 회로가 적용된 고준위 방사성 폐기물 처분장의 설계안을 마련하였다. 설계를 진행하면서 폐기물 거

치 갱도의 차이에 따른 비교뿐만 아니라, 처분장 내 안전성 확보를 위해 입기부와 배기부에 위치시켜야 할 부분들에 대한 개념을 확보할 수 있었다. 신선한 공기가 제일 처음으로 유입되는 입기부쪽에는 사람이 이동할 수 있는 수직갱 및 사람들이 활동할 수 있는 Uncontrolled area(비통제 구역)를 위치시키고, 폐기물 수직갱은 배기구에 가깝게 위치시켜서 혹시라도 폐기물을 거쳐 오염되었을 가능성이 있는 공기는 사람이 활동하는 공간의 반대쪽인 배기구쪽으로 바로 빠져나가게 하는 방안들이 그것이다.

이렇게 마련된 설계안 별 비교 및 예상 운영 결과를 얻기 위해서 환기 네트워킹 프로그램인 Ventsim 프로그램을 통해 환기 네트워크 시뮬레이션을 수행하였다. 그 결과 저항 증가가 큰 수치로 발생할 것으로 예상되었던 Diagonal 처분장은 병렬식 환기 회로가 적용된 처분장과 비교하였을 때, 선풍기 압력은 1570pa, 총 유량  $84\text{m}^3/\text{s}$ , 선풍기 효율 76.4%, 선풍기 소요 전력 181.2kW 및 연간 선풍기 운영 비용 178,710,838원으로 압력과 유량값에서 최대 8% 정도의 차이를 보였고, 운영 비용 측면에서는 1.5%의 차이를 보였다. 하지만, 유량이 약 10% 더 흐르는 상황에서 운영 비용이 1.5% 더 소요된다는 것은 시뮬레이션 전에 예측한 결과에 비해 매우 미비한 차이로 판단된다. 연간 선풍기 운영 비용은 선풍기 소요 전력에 따른 전력비로써 전력값과 소요환기량의 변화시 유동적인 변화가 가능하다. 시뮬레이션 결과를 종합한 결과, 처분장 내 안전성을 최대한 확보할 수 있는 Diagonal 환기 회로의 적용이 경제적인 측면에서도 타당성을 가지며, 향후 고준위 방사성 폐기물 처분장의 설계시 Diagonal 환기 회로의 적용 가능성을 보여준다고 사료된다.

## Abstract

It is considered that the control of airflow direction is an integral part of the radioactive waste disposal repository, because the repository must be persisted for a very long time, and can be a deathblow to workers or the surrounding environment in case of an emergency. Thus this study investigated the diagonal ventilation system that has the advantage of being able to control air contents and airflow direction. Although, there are some studies on the diagonal ventilation system in terms of the prediction of airflow direction and the control of approximate air contents depending on regulators, there is lacking in researches about the distribution of accurate air contents, thus the study did a research on the distribution of air contents.

The result of the study is as follows.

If air contents and airflow direction to bring into the diagonal branch in the diagonal ventilation system are established in advance, we can calculate the air contents by a numerical formula or a program like other series-parallel ventilation systems.

The study made a design of the high level radioactive waste repository with the diagonal and parallel ventilation system through data about high level radioactive wastes that will be stored, and then to secure safety, it found ideas about each part which has to be situated near the inflow-section and exhaust one.

Moreover, the study conducted a ventilation network simulation by using Ventsim program of the ventilation networking program through

the design. As a result, the difference between the diagonal repository whose resistance was predicted to increase greatly and another repository with parallel ventilation systems in terms of fan pressure, the total flow, and fan efficiency, electricity requirement, and operation cost is maximum 8 percent. Thus the application of the repository with the diagonal ventilation system is possible, and then the resistance increase in the repository system is insignificant.





# 목 차

요 약 문 .....	I
Abstract .....	III
List of Figure .....	VII
List of Table .....	VII
1. 서 론 .....	1
2. 문헌 연구 .....	4
2.1. 고준위 방사성 폐기물 처분장 .....	4
2.1.1 고준위 방사성 폐기물 .....	4
2.1.2 고준위 방사성 폐기물 처분장 .....	4
2.1.3 고준위 방사성 폐기물 처분장 환기시스템 .....	5
2.1.4 고준위 방사성 폐기물 환기 기준 .....	5
2.2. 지하 처분장 환기 이론 .....	7
2.2.1 터널의 압력손실 및 저항 .....	8
2.2.2 Hardy Cross Method .....	13
2.3. 환기회로 구성 모델 .....	16
2.4. Ventsim 컴퓨터 프로그램 .....	18
2.5. 지하 공간 환기 시스템 .....	19
2.6. Diagonal 환기 시스템 .....	21

<b>3. 연구 방법</b> .....	<b>25</b>
3.1. Diagonal 환기 회로 내 유량 조절 .....	25
3.2. Diagonal 환기 시스템 분석 .....	26
3.3. 고준위 방사성 폐기물 처분장 설계 .....	29
3.3.1 고준위 방사성 폐기물 처분장 모델 .....	29
3.3.2 고준위 방사성 폐기물 처분장 환기 시 고려 사항 .....	31
3.3.3 직·병렬 및 Diagonal 환기 회로를 적용시킨 처분장 설계안	32
<b>4. 연구 결과</b> .....	<b>35</b>
4.1. 고준위 방사성 폐기물 처분장 설계안 시뮬레이션 .....	35
4.1.1 Diagonal 환기 회로 적용 설계안 시뮬레이션 .....	36
4.1.2 병렬식 환기 회로 적용 설계안 시뮬레이션 결과 .....	38
4.1.3 설계안 비교 및 분석 .....	40
<b>5. 결 론</b> .....	<b>42</b>
<b>참고 문헌</b> .....	<b>44</b>

## List of Figure

Fig. 1. Resistance Curve & Fan Characteristic Curve .....	15
Fig. 2. Ventilation Circuits .....	16
Fig. 3 The Ventilation System and its Control .....	20
Fig. 4. The Simple Schematic of Diagonal System .....	24
Fig. 5. Diagonal 환기회로도 .....	26
Fig. 6. Diagonal식 환기회로 적용 처분장 설계안 .....	33
Fig. 7. 병렬식 환기회로 적용 처분장 설계안 .....	34
Fig. 8. Diagonal식 환기회로 적용 설계안 시뮬레이션 결과 .....	37
Fig. 9. 병렬식 환기회로 적용 처분장 설계안 시뮬레이션 결과 .....	39

## List of Table

Table 1. Proposed temperature criteria in Yucca Mountain Site .....	7
Table 2. Equivalent Length for Various Sources of Shock Loss .....	11
Table 3. Friction Factor .....	12
Table 4. Characteristic of Circuits .....	17
Table 5. Waste and Tunnel Information .....	29
Table 6. 500m Level Rooms Information .....	30
Table 7. Proposed ventilation airflow rate and velocity in Yucca Mountain .....	31
Table 8. Result of a Diagonal Ventilation Circuit Simulation .....	37
Table 9. Result of a Parallel Ventilation Circuit Simulation .....	38
Table 10. Comparisons between Diagonal and Parallel System .....	40

# 1. 서론

국내에서 생산되는 전력의 약 40%는 원자력 발전에 의해 공급되고 있으며, 국내 에너지 소비의 증가율을 고려하면 원자력 발전소는 더 큰 비중을 가지고 운영될 것으로 예상된다.<sup>[1]</sup> 또한 원자력 발전의 비중이 확대될수록 이에 따른 방사성 폐기물의 발생량이 증가하므로 원자력 발전을 안정적으로 운영할 수 있는 기술뿐만 아니라, 원자력 발전 후 발생하는 방사성 폐기물의 처분 시스템을 개발하는 연구도 활발히 진행되고 있다.

원자력 발전시 발생하는 방사성 폐기물은 중-저준위 방사성 폐기물, 사용후핵연료, 재처리를 거친 후 발생하는 고준위 폐기물로 나뉘어진다.<sup>[2]</sup> 이러한 폐기물들은 종류에 상관없이 안전성이 보장되지 않으면 인명 피해와 재산 피해를 입힐 수 있을뿐만 아니라 장기간에 걸쳐 피해가 지속될 수 있다. 이로 인해 각 방사성 폐기물의 특성에 따라 저장용기에 압축을 시키거나 차폐효과 및 부패방지 특성을 갖는 처분용기에 담아 장기간 보관할 수 있는 준비를 한다.<sup>[2]</sup>

그 이후에 중-저준위 방사성 폐기물은 지하 굴착공간에 쌓아놓고, 고준위 방사성 폐기물의 경우에는 처분용기에 넣고 지하 처분장 터널에 처분한다. 이를 위해 고준위 방사성 폐기물의 경우에는 일반적으로 지하 수백 미터의 건전한 암반에 처분하는 것이 가장 안전한 방법으로 고려되고 있다.<sup>[3][4]</sup>

지하 방사성 폐기물 처분장 개발은 다섯 단계로 이루어지는데 첫째, 부지특성화 사업, 둘째, 처분장 건설, 셋째, 폐기물 처분장 운영, 넷째, 모니터링, 다섯째, 폐쇄 등이다. 환기설계는 처분장 건설단계에서 뿐만 아니라 폐기물 운영단계에서의 작업 환경 및 위생(호흡성 암반 분진, 디젤 흡, 폐기물 방열에 의한 고온의 환경, 사고시 발생 가능한 부유성 핵종분

진, 유해가스 등), 안전(화재 및 기타 사고 시 공기 조절), 그리고 향후 처분장의 쾌적한 환경(처분 용기를 부식시키고 방사성 핵종을 운반시킬 수 있는 물과 수분 제거)을 위해서 꼭 필요한 부분이다.<sup>[2]</sup>

지하 공간내 환기회로는 공기가 흐르는 갱도의 연결 형태에 따라 직렬, 병렬, Diagonal 시스템으로 구분할 수 있으며, 한 지하 공간내에서 세 종류의 환기시스템을 복합적으로 사용하는 것도 가능하다. 이 중 공기량과 공기 흐름을 원하는대로 바꿀 수 있는 Diagonal 시스템은 미국의 고준위 방사성 폐기물 처분장인 Yucca Mountain repository의 설계에 적용되었다. Diagonal 시스템은 직, 병렬 시스템에 비해 처분장 건설 시 폐기물의 효율적 저장이 가능하고 이동로가 위·아래로 나뉘어 구조적으로 유리한 이점을 가진다.<sup>[5]</sup> 또한, 모든 거치 갱도의 유입 공기량과 공기 유동 방향의 조절을 독립적으로 할 수 있으므로 처분이 완료되는데 까지 수 십년 이상의 시간이 소요되는 고준위 방사성 폐기물 처분장의 특성에 적합하며, 비상사태 발생 시 작업자의 안전성을 확보하는데 큰 역할을 할 수 있다.

Diagonal 시스템은 직렬, 병렬 시스템과는 달리 유량 조절을 원하는 Diagonal 갱도에 공기조절기를 설치하지 않는다. 이러한 특성으로 공기 유동 방향을 변화시킬 수 있다는 이점이 있지만, 유량 조절을 위한 공기 조절기가 직접 위치하지 않기 때문에 저항값의 변화에 따른 유량 값을 직접적으로 계산할 수가 없다. 즉각적으로 유량 조절을 할 수 없다는 것은 처분장 내에서 비상사태 발생할때에 순간적인 대처가 불가하다는 말과 같으므로 매우 치명적인 단점으로 작용한다.

이에 본 연구에서는 Atkinson Equation과 Hardy Cross Method에 근거하여 환기회로 시뮬레이션을 수행하는 Ventsim 프로그램을 통해 Diagonal 시스템을 적용 및 검토하였다. 끝으로 원자력 발전시 발생하는

폐기물 데이터(예측 데이터)를 이용하여 방사성 폐기물 처분장을 환기적 측면에서 설계하고, 각 설계안 별 환기 네트워크 시뮬레이션을 통한 비교 및 분석을 수행하여 고준위 방사성 폐기물 처분장 내 Diagonal 환기 회로 적용 타당성을 검토 한다.



## 2. 문헌 연구

### 2.1 고준위 방사성 폐기물 처분장

#### 2.1.1 고준위 방사성 폐기물

고준위 방사성 폐기물이란 높은 방사능을 가진 방사성 폐기물로서 사용 후 핵연료를 재처리했을 때의 폐 용액 또는 사용 후 핵연료 그 자체를 말한다. 고준위 폐기물은 장기간에 걸쳐서 방사능을 지니는 소위 장수명의 방사성 핵종을 많이 함유하고 있고, 이러한 핵종에서 나오는 붕괴열 때문에 특별한 관리가 요구되고 있다.<sup>[6]</sup>

고준위 방사성 폐기물이 지니는 장기적인 방사성독성(radiotoxicity)으로 인한 붕괴열의 방출은 심지층 처분장의 장기 안전성 확보에 매우 중요한 요소이다. 이러한 요소들과 심지층 처분 환경과의 장기적 양립성을 분석, 예측할 수 있는 정보의 한계가 심지층 처분장이 아직까지 상용화되지 못하고 있는 주요 원인중의 하나라고 할 수 있다. 원자력 선진국들에서는 이를 극복하기 위한 여러 형태의 연구개발 사업이 수십 년 전부터 진행되고 있다.<sup>[6]</sup>

#### 2.1.2 고준위 방사성 폐기물 처분장

장기적인 국가 전력개발 계획에 따르면 원자력 발전소의 수명기간동안 발생 될 사용 후 핵연료의 양은 총 36,000tHM으로 여기에는 경수로 발전소에서 발생하는 PWR(Pressurized Water Reactor) 사용 후 핵연료가 20,000ton이며 중수로 발전소에서 발생하는 CANDU(Canadian Deuterium Uranium) 사용 후 핵연료가 16,000ton이 될 것이다.<sup>[7]</sup>

이에 고준위 폐기물의 안전하고 영구적인 폐기물관리를 위해 심지층 처분, 심해저지층처분, 우주처분, 빙하처분 등 여러 가지 방법들에 대한

타당성 검토가 수행되었다. 이중 고준위폐기물에 함유되어 있는 방사성 핵종이 처분된 주변 환경으로 누출되지 않으며, 기술적으로 가능성이 높고 경제적인 것으로 판단된 처분 방법이 심지층 처분 방식이다. 또한 심지층 처분은 방사선과 열적 위해로부터 충분한 안전성을 확보할 수 있다.<sup>[8]</sup>

국내 고준위 방사성 폐기물 처분시설의 개념으로, 처분장이 위치하는 심도는 지하 약 500m 이상이며 처분터널간의 간격은 40m, 처분터널의 길이는 약 200m 정도이다. 이와 같이 방사성 폐기물 처분시설은 일반적으로 지하 500m~1000m의 심부 암반층에 건설된다.<sup>[9]</sup>

### 2.1.3 고준위 방사성 폐기물 처분장 환기시스템

고준위 방사성 폐기물 처분장의 운영은 처분 터널에 폐기물을 포함한 처분용기를 처분 후 완충제를 이용하여 충전하고 마지막에 폐쇄할 수 있는 구조적으로 안정되고 반복적인 형태가 갖추어져야 한다. 또한, 동굴처분의 기본원칙으로는 운영 및 비상 사고시, 폐쇄 후에 방사능 누출 및 피폭량을 설정된 허용치 이하를 유지하여야 한다는 방사능 방호원칙과 환경과 자원의 보호원칙을 고려해야 한다.<sup>[10]</sup> 이와 같은 원칙에 따라 처분장 내 오염물질을 허용치 이하로 유지시켜 내부 작업자들을 보호하고, 주변 환경에 미치는 영향을 최소화 할 수 있는 최적의 환기시스템이 필요하다.<sup>[8]</sup>

### 2.1.4 고준위 방사성 폐기물 환기 기준

고준위 폐기물은 폐기물의 진도 및 복사열에 의해 터널 내의 공기를 가열시키기 때문에 (완충재 사용 유무에 따라 100℃ 이하 ~150℃), 고준위 폐기물 처분장 시스템은 필요에 따라 처분 터널의 공기 냉각 조건을 요구 한다. 즉, 고준위 폐기물 처분장의 경우 온도의 제어가 매우 중요



한 설계 조건임을 알 수 있다.<sup>[2]</sup>

표 1<sup>[11]</sup>은 미국의 Yucca Mountain Site에서 사용되는 온도 기준을 보여 준다. 표 1에서 보여지는 온도는 처분장 내 어떠한 냉각 시스템 없이 순수한 환기량에 의한 온도 기준이다. 고준위 폐기물 처분장에서 발생하는 열량에 의하여 발생하는 자연 환기량이 온도 기준을 충족 하지 못한다면, 여러 가지 환기 시스템을 적용하여 온도 조건을 충족해야만 한다. 자연 환기량은 공기 온도에 의존하고, 이러한 공기의 온도는 처분장 내 폐기물의 거치 기간 및 여러 변수들에 지배된다. 이러한 이유로 온도에 따른 소요 환기량을 계산하기는 매우 어려운 문제이다. 그러므로 특정 처분장 내에 발생하는 열과 환기량에 따른 공기 온도 변화를 계산해서 특정 처분장 소요 공기량을 산출하고 조정할 필요가 있다.<sup>[2]</sup>

처분 터널을 위한 환기 요구량은 작업의 종류에 따라 변화된다. 처분 활동 이전인 건설기간까지는 환기를 통해서 건설 작업자에게 적절한 환경을 제공하기 위해서 신선한 공기를 공급하고 분진 농도 수준을 조절해야하며, 폐기물 처분 작업 동안에는 거치 갱도 내의 온도가 장비 운영에 적절한 범위 이내에 있도록 환기를 통해 유지되어야 한다. 그리고 처분공간에 완충재와 함께 폐기물을 처분한 후에는 환기를 통해서 일반적으로 발생하는 열의 약 70%를 제거해야 하며,<sup>[11]</sup> 처분 터널 내 예기치 않은 비상사태와 같은 상황에 대응하기 위해 공기량 및 공기 유동 방향의 제어가 필요하다.

**Table 1.** Proposed temperature criteria in Yucca Mountain Site<sup>[11]</sup>

Item	Temperature
Human access maximum temperature	48°C
Human full shift occupation (8 hours)	25°C
Instruments, monitoring equipment, and remote access equipment limit	50°C

## 2.2 지하 처분장 환기 이론

대규모, 대심도에서 건설되는 지하공간은 일반적으로 지하공간의 구축 및 유지, 환경제어, 운용 관리 면에서 고도의 기술들을 필요로 한다. 특히, 환경적인 측면에서 지하공간의 이용을 위해서는 지상공간처럼 쾌적하게 만드는 것이 필요하다. 이를 위해서는 오염된 가스 및 부유분진 등을 효과적으로 처리할 수 있는 최적 환기 시설의 설치가 필수적이다. 그러나 지하 공간에 경우 환기 구조는 매우 복잡한 네트워크를 형성하는 경우가 많고 이를 설계하고 분석하는 것은 그리 용이한 일은 아니다.

일반적인 환기 네트워크 분석은 지하 공간에서의 소요 환기량을 선정한 후, 설계상의 통풍로 단면적, 길이, 표면 거칠기 등 관련되어지는 인자들을 고려하여 적절한 용량의 선풍기를 선정함으로써 완성되어진다. 이 과정에서 터널의 저항과 선풍기의 특성 곡선을 이용한 수치적인 해석으로 문제에 접근하여 해결하게 된다.

## 2.2.1 터널의 압력손실 및 저항

### ① 마찰손실(Friction Loss)

마찰손실이란, 관이나 유체 자체의 내적 마찰 또는 관의 벽의 저항 또는 끌림에 기인하는 흐름에서 발생하는 정적 압력의 손실이다. 환기로의 마찰손실은 유체 흐름의 속도, airway의 내적 표면의 특징과 면적에 관련하여 발생한다. 터널 등을 구성하는 환기시스템에서 공기의 흐름은 거의 정상 난류로 간주되어지며, 원형 풍관에서 마찰손실을 계산하기 위한 유체역학 식은 Darcy-Weisbach 방정식으로 표현되어 진다.

$$h = \frac{4fLv^2}{2gD} \quad (1)$$

h : pressure loss (m)

L : length (m)

D : diameter (m)

v : fluid mean velocity (m/s)

f : friction coefficient (dimensionless)

g : acceleration due to gravity ( $m/s^2$ )

이것은 길이 단위 이므로 압력 단위로 바꾸면,

$$P_f = h\rho g \quad (2)$$

$$P_f = \frac{2f\rho Lv^2}{D} \quad (N/m^2 = Pa) \quad (3)$$

으로 표현되어진다. (3)식은 파이프를 사용한 경우에 해당되는 식으로, 터널과 같이 단면이 불규칙한 경우를 표현하기 위해서는 D를 면적과 주변의 길이로 나타내어야 한다. 따라서, (4)식을 (3)식에 대입하면 (5)식과 같이 표현된다.

$$D = \frac{4A}{p} \quad (4)$$

(5)

A : area ( $m^2$ )

p : perimeter (m)

v : velocity ( $m/s^2$ )

(5)식에서 v를 Q(air flow)와 A에 대해 표현하면 다음과 같다.

$$P_f = f \frac{\rho L p Q^3}{A^3}$$

(6)

난류상태에서의 Atkinson 법칙은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$P = RQ^2 \quad (7)$$

P : pressure loss (Pa)

R : airway resistance ( $Ns^2/m^8$ )

Q : volume flow ( $m^3/s$ )

(7)식을 R에 대해서 정리하고 (6)식을 대입하면,

$$R = \frac{f\rho Lp}{A^3} \quad (8)$$

와 같이 유도되고, (8)식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$R = \frac{KLp}{A^3} \quad (9)$$

K : friction factor ( $kg/m^3$ )

이때 저항 R은 환기로의 단면적, 길이, 주변장, 그리고 표면의 거칠기와 관계가 있다.<sup>[12]</sup>

## ② 충격손실(Shock Loss)

충격손실은 관의 면적이나 공기 흐름의 방향이 바뀔 때 따라 발생되며 장애물 등에 의한 단면적이 줄어드는 효과에 의하여도 발생한다. 일반적으로 복잡한 네트워크를 가지는 지하공간의 환기 설계에서 많이 사용되고 있으며 충격손실 측정방법은 단면적 변화가 없는 직선 통풍로에 충격 손실이 가해지는 만큼의 증가한 길이

(Equivalent Length)를 더해줌으로써 표현하게 된다. 그 식은 다음과 같다.<sup>[13]</sup>

$$R = \frac{Kp(L+L_e)}{A^3} \quad (10)$$

$L_e$  = Equivalent Length (m)<sup>[14]</sup>

이 결과를 통하여, 통풍로의 압력손실과 저항은 실측을 통해 결정된 각 인자들의 조합으로 계산 가능하다

표 1과 2에서는 처분장의 저항산정을 위해 적용된 등가길이와 마찰계수값을 나타내고 있다. 등가길이의 경우 직각으로 꺾어지는 통풍로와 통풍로 내에 차량이 이동하는 경우에 비교적 값이 크며, 이러한 경우 통풍로의 저항 및 압력손실이 증가하게 된다.<sup>[15]</sup>

**Table 2.** Equivalent Length for Various Sources of Shock Loss<sup>[12]</sup>

Source	(m)	Source	(m)
Bend, acute, round	1	Contraction, gradual	1
Bend, acute, sharp	45	Contraction, abrupt	3
Bend, right, round	1	Expansion, gradual	1
Bend, right, sharp	20	Expansion, abrupt	6
Bend, obtuse, round	1	Splitting, straight branch	10
Bend, obtuse, sharp	5	Splitting, deflected branch(90°)	60
Doorway	20	Junction, straight branch	20
Overcast	20	Junction, deflected branch(90°)	10
Inlet	6	Mine car or skip (20% of airway area)	30
Discharge	20	Mine car or skip (40% of airway area)	150

**Table 3.** Friction Factor<sup>[12]</sup>

Tunnel Situation	Friction factor, K ( $kg/m^3$ )
<b>Steel arched airways</b>	
Smooth concrete all round	0.004
Bricked between arches all round	0.006
Concrete slabs or timber lagging between flanges all round	0.0075
Slabs or timber lagging between flanges to spring	0.009
Lagged behind arches	0.012
Arches poorly aligned, rough conditions	0.016
<b>Shafts</b>	
Smooth lined, unobstructed	0.003
Brick lined, unobstructed	0.004
Concrete lined, rope guides, pipe fittings	0.0065
Brick lined, rope guides, pipe fittings	0.0075
Unlined, well trimmed surface	0.01
Unlined, major irregularities removed	0.012
Unlined, mesh bolted	0.014
Tubbing lined, no fitting	0.007–0.014
Brick lined, two side buntons	0.018
Two side buntons, each with a tie girder	0.022

## 2.2.2 Hardy Cross Method

환기 네트워크에서의 작동점(Operating Point)은 Atkinson 방정식으로 표현되는 터널의 저항곡선과 선풍기의 특성 곡선으로서 교차점으로 결정되게 된다(그림 1). 그러나 다수의 메쉬(Mesh)를 가지는 환기 네트워크의 경우 이를 직접적으로 알아낼 수 없기 때문에 연속적인 계산에 의해서 오차를 줄여 나가는 "Iteration Method"가 적용되게 되는데 이를 "Hardy Cross Method"라 한다.

Hardy Cross Method는 다음과 같이 두 가지 사실에 기초한다.

1. 전체의 시스템에서 한 점의 관내 흐름의 나가고 들어오는 양은 일정하다.
2. 전체의 시스템에 들어오는 양은 하나의 값을 가지며, 그 값은 방향에 상관없이 동일하다.

그림 1.과 같이 P, Q 값을 통하여 통풍로의 저항곡선이 만들어지게 되며, 선풍기 특성곡선과 만나는 지점인 작동점을 Hardy Cross Method를 이용하여 찾아낸 후처분장 환기에 적절한 선풍기를 선정하게 된다.<sup>[16]</sup> 터널 곡선과 선풍기 특성 곡선이 만나는 작동점(Operating point)을 이용하여 식(11)이 성립한다.

$$\begin{aligned} P &= P_t = P_f \\ Q &= Q_t = Q_f \end{aligned} \quad (11)$$

만약 시스템을 통과하는 공기량을  $Q_a$ 라 하면,

$$P_f = f_2(Q_a) \text{ for Tunnel curve}$$



$$P_f = f_2(Q_a) \quad \text{for Fan characteristic curve} \quad (12)$$

가 된다. 이 때,

$$\Delta P = P_f - P_t \quad (13)$$

만약  $\Delta P > 0$  이라면  $Q_a$ 는  $Q$  보다  $\Delta Q_a$ 만큼 큰 값으로 표현될 것이고,

$\Delta P < 0$  이라면  $Q_a$ 는  $\Delta Q_a$ 만큼 작은  $Q$  값으로 표현될 것이다.

한편,  $\Delta P = 0$  라면  $Q_a = 0$  이므로,

$$P_t = P Q^2 = P_f \quad (14)$$

$$Q = Q_a + \Delta Q_a \quad (15)$$

$$\begin{aligned} P_f = P_t &= R(Q_a + \Delta Q_a)^2 \\ &= RQ^2 + 2RQ_a\Delta Q_a + R\Delta Q_a^2 \end{aligned} \quad (16)$$

그런데,  $\Delta Q_a$ 가 매우 작은 값이라면,  $\Delta Q_a^2$  은 무시할 수 있으므로

$$P_t = RQ_a^2 + 2RQ_a\Delta Q_a = P_f \quad (17)$$

$$Q_a = -\frac{(\sum RQ_a|Q_a| - P_f)}{\sum 2R|Q_a|} \quad (18)$$

$$\therefore \Delta Q_a = -\frac{\sum RQ_a|Q_a|}{\sum 2R|Q_a|} \quad (19)$$

여기서  $\Delta Q_a$ 는 Q 값에 대한 임의로 정의된  $Q_a$  값의 오차값으로  $\Delta Q_a$  값을 최소화 시키면서 공기량 Q 값을 결정한다.

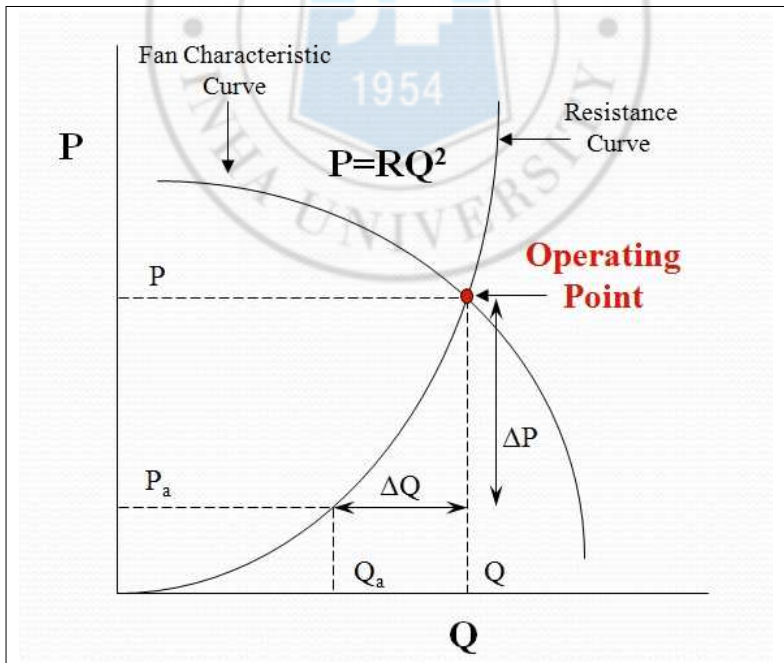


Fig. 1. Resistance Curve & Fan Characteristic Curve

## 2.3 환기회로 구성모델

지하공간 내에 적절한 공기분배를 위해서는 환기회로를 구성하여야 하는데 이는 지하공간의 터널 배치에 따라 직렬회로와 병렬회로가 조합된 형식으로 나타나게 된다(그림 2). 회로의 지형적 구조와 관련되어 통풍로 내 기류의 방향이 바뀌거나 나누어지는 지점에서 절점(node)들을 형성하고, 각 절점들을 연결한 branch마다 각각의 압력, 저항, 공기량이 형성된다. 결국, 지하공간 내 모든 회로의 공기량 분배는 직렬, 병렬, 혹은 그 조합으로 연결된 각 branch의 저항에 따라 달라진다. 각 branch의 배치에 따라 발생하는 등가 길이를 포함한 저항값은 식(10)에 의해 계산되어지고, 계산된 branch 저항값의 총 합으로 전체 지하공간의 시스템 저항이 결정된다.

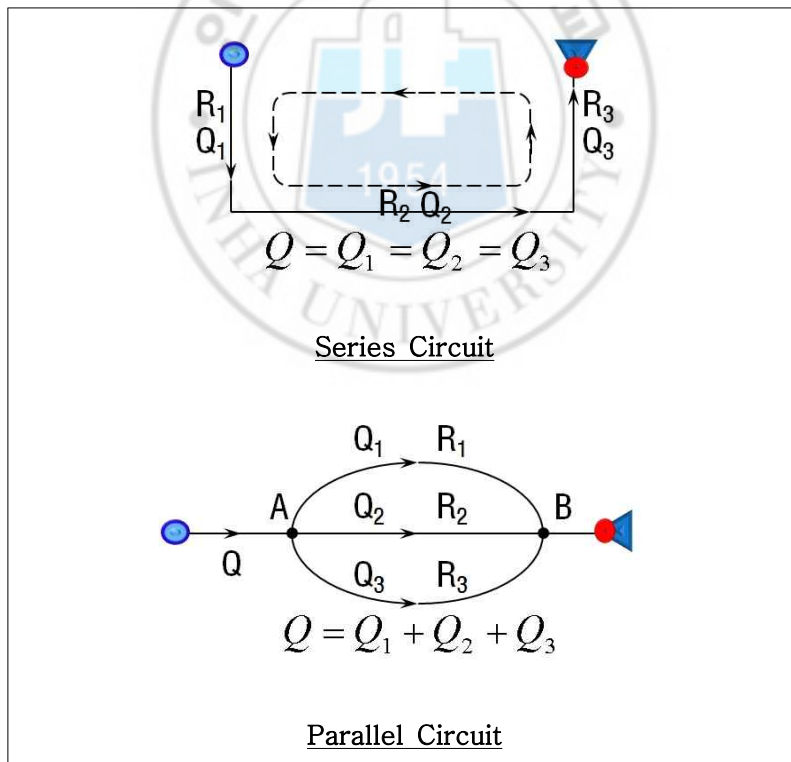


Fig. 2. Ventilation Circuits

표 4의 식에 의해서 직렬과 병렬이 조합된 전체 회로에서 직렬회로보다 병렬 회로의 구성이 많아지는 경우 전체 저항은 감소하게 되며, 지하공간 내 공기분배는 좀 더 수월하게 이루어진다. 이와 반대로 직렬회로의 구성이 많은 경우는 전체 시스템 저항이 증가하여 공기분배에 어려움이 발생 할 수 있다. 이와 같은 결과는 지하공간 내 주 선풍기의 배치에도 큰 영향을 미치며, 선풍기를 직렬로 연결하게 되면 공기량의 변화는 없으나 선풍기의 압력을 증가시킬 수 있고 병렬로 연결하는 경우 압력의 증대 효과는 볼 수 없으나 공기량을 증가시킬 수 있게 된다.

**Table 4.** Characteristic of Circuits<sup>[5][17]</sup>

직렬연결	병렬연결
$R_{eq} = R_1 + R_2 + R_3$	$R_{eq} = \left( \frac{1}{\frac{1}{\sqrt{R_1}} + \frac{1}{\sqrt{R_2}} + \frac{1}{\sqrt{R_3}}} \right)^2$

## 2.4 Ventsim 컴퓨터 프로그램

Ventsim은 환기 네트워크 컴퓨터 프로그램으로, 유카산 처분장 환기 네트워크 시뮬레이션에도 사용된 VnetPC 프로그램과 동일한 메커니즘을 갖는다. Ventsim 프로그램을 통해 지하 환기시스템 디자인을 수행하면, 기하학적인 환기 네트워크에서 통풍로의 저항, 면적, 선풍기의 위치와 특성곡선 등을 이용하여 다음과 같은 결과를 얻을 수 있다.

- \* 각 통풍로에서 공기의 흐름
- \* 각 통풍로의 저항
- \* 통풍로의 배치에 따른 압력 변화 값
- \* 각 통풍로의 환기 비용
- \* 선풍기의 적절한 위치
- \* 공기조절기(regulator)와 보조 팬의 필요 여부와 위치

Ventsim 프로그램은 유체가 비압축성 기체라는 가정 하에 Kirchoff's Law를 기초하여 발전되었으며 Hardy Cross의 반복적 기술의 가속적 형태를 사용한다. 지하공간 형상, 터널의 크기, 길이, 벽면의 형상에 따른 마찰계수 등을 입력하면 선풍기 작동지점, 공기 유동량, 마찰에 의한 압력 감소 등의 데이터를 계산하여 종합적인 환기 네트워크를 가능하게 한다.

## 2.5 지하 공간 환기 시스템

그림 3은 지하 공간에서의 일반적인 환기 시스템을 개략적으로 나타내고 있다. 지하 공간에서의 입기 수직갱(downcast shaft)을 통해서 유입된 신선한 공기는 입기 통풍로(intake airway)를 통해서 작업장(working area)이나 다수의 오염물질이 발생하는 공간으로 유입되며, 배기 통풍로(return airway)를 지나 배기 수직갱(upcast shaft)을 통해 외부로 배출된다.

지하 공간 내에서는 먼지와 독성가스, 가연성 가스 등의 오염물질이 발생하기 때문에 환기 시스템을 통해 지하 공간 내 작업자들의 안전을 위해 정해진 오염물의 허용치를 모든 구간 내에서 넘지 않도록 해야 한다.

지하공간 내 환기 시스템을 구축하기 위해서는 일반적으로 지상에 위치한 주 선풍기(main fans)를 통해서 지하공간으로 공기를 공급하며, 지하 공간에서 손실되는 공기압력을 보충하기 위해 보조 선풍기(booster fan)를 통풍로(Branch)에 설치할 수도 있다. 그림 3에서 주 선풍기는 upcast 상부에 위치하고, 외부로 공기를 배출시키기 위해 배기선풍기(exhaust fans)를 사용한다. 하지만 경우에 따라 주 선풍기가 입기 수직갱에 설치되기도 하는데 이 때는 외부의 공기를 지하공간으로 유입시키기 위해 송기 선풍기(blow fans)를 사용한다.

지하 공간이 굴착되면서 효율적인 공기 분배를 위해 분벽(stopping), 공기문(door), 공기조절기(regulator) 등의 구조물이 설치된다. 분벽은 통풍로에 영구적이거나 임시적으로 설치되어 공기의 흐름 방향을 제어하며, 공기문과 공기조절기는 통풍로(Branch)에서 공기량을 제어하는 역할을 한다.

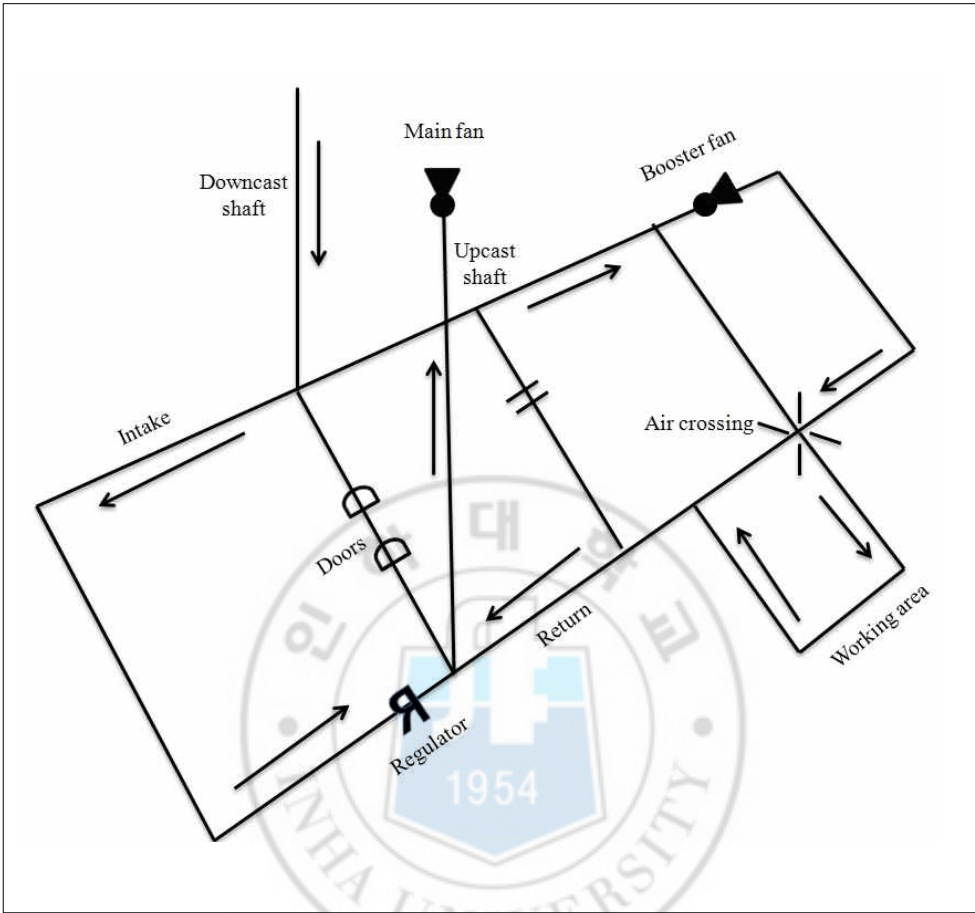


Fig. 3. The ventilation system and its control

## 2.6 Diagonal 환기 시스템

Diagonal 시스템의 기본적인 형태는 그림 4와 같다. Diagonal 공기 회로의 공기 흐름을 2번 교차점부터 3번 교차점이라고 가정하면, Mesh I 과 Mesh II 에서의 압력강하는 Kirchhoff's second law에 의거하여 다음과 같이 나타난다.

$$\text{Mesh I} : R_b Q_b^2 + R_c Q_c^2 - R_a Q_a^2 = 0 \quad (20)$$

$$\text{Mesh II} : R_b' Q_b'^2 + R_a' Q_a'^2 - R_c Q_c^2 = 0 \quad (21)$$

$R_a, R_a'$  : a, a' branch에서의 저항값 [ $N \cdot S^2/m^8$ ]

$R_b, R_b'$  : b, b' branch에서의 저항값 [ $N \cdot S^2/m^8$ ]

$R_c$  : c branch에서의 저항값 [ $N \cdot S^2/m^8$ ]

이 때  $Q_c = 0$  이라고 하면, 식(20)과 식(21)은 다음과 같이 표현된다.

$$R_b Q_b^2 = R_a Q_a^2 \quad (22)$$

$$R_b' Q_b'^2 = R_a' Q_a'^2 \quad (23)$$



또한, Kirchhoff's first law에 의하여 3번 교차점과 2번 교차점에서의 유량의 합은 식(24)과 식(25)로 나타내어진다.

$$\text{at 3 } Q_a - Q_{a'} + Q_c = 0 \rightarrow Q_a = Q_{a'} \quad (24)$$

$$\text{at 2 } Q_b - Q_c + Q_{b'} = 0 \rightarrow Q_b = Q_{b'} \quad (25)$$

얻어진 식 (24)과 식(24)을 Atkinson 식( $P=RQ^2$ )에 대입하면,

$$R_b Q_b^2 = R_a Q_a^2 \quad (26)$$

$$R_{b'} Q_{b'}^2 = R_{a'} Q_{a'}^2 \quad (27)$$

가 된다.

위에서 얻어진 식(26)를 식(27)로 나누어주면,

$$\frac{R_b}{R_{b'}} = \frac{R_a}{R_{a'}} \quad (28)$$

식(28)과 같은 각 브랜치의 저항 비로 표현 되는 식이 완성된다.

공기는 저항이 작은 쪽으로 흐르게 되므로 식(28)의 크기 차이 발생할 때에 Diagonal 브랜치의 공기의 흐름은 예측될 수 있다.

$$\frac{R_b}{R_{b'}} > \frac{R_a}{R_{a'}} \quad (\text{from 3 to 2}) \quad (29)$$

$$\frac{R_b}{R_{b'}} < \frac{R_a}{R_{a'}} \quad (\text{from 2 to 3}) \quad (30)$$

식(29)는 지점 3에서 지점 2로 공기가 흐를 때 저항 비 차이를 나타내고 식(30)은 지점 2에서 지점 3으로 공기가 흐를 때의 저항 비 차이를 나타낸다.

또한, Diagonal 시스템에서 전체 저항은 다음과 같은 식에 의해서 계산되어진다.

$$X = \sqrt{\frac{R_c}{R_a} + \frac{R_b}{R_a}(1+Y)^2}$$

$$Y = \sqrt{\frac{R_c}{R_{b'}} + \frac{R_{a'}}{R_{b'}}(X+1)^2}$$

$$R = \frac{R_a X^2 + R_{a'}(X+1)^2}{(X+Y+1)^2} \quad (31)$$

X, Y : 상수

R : Diagonal 환기회로의 총 저항값 [N · S<sup>2</sup>/m<sup>8</sup>]

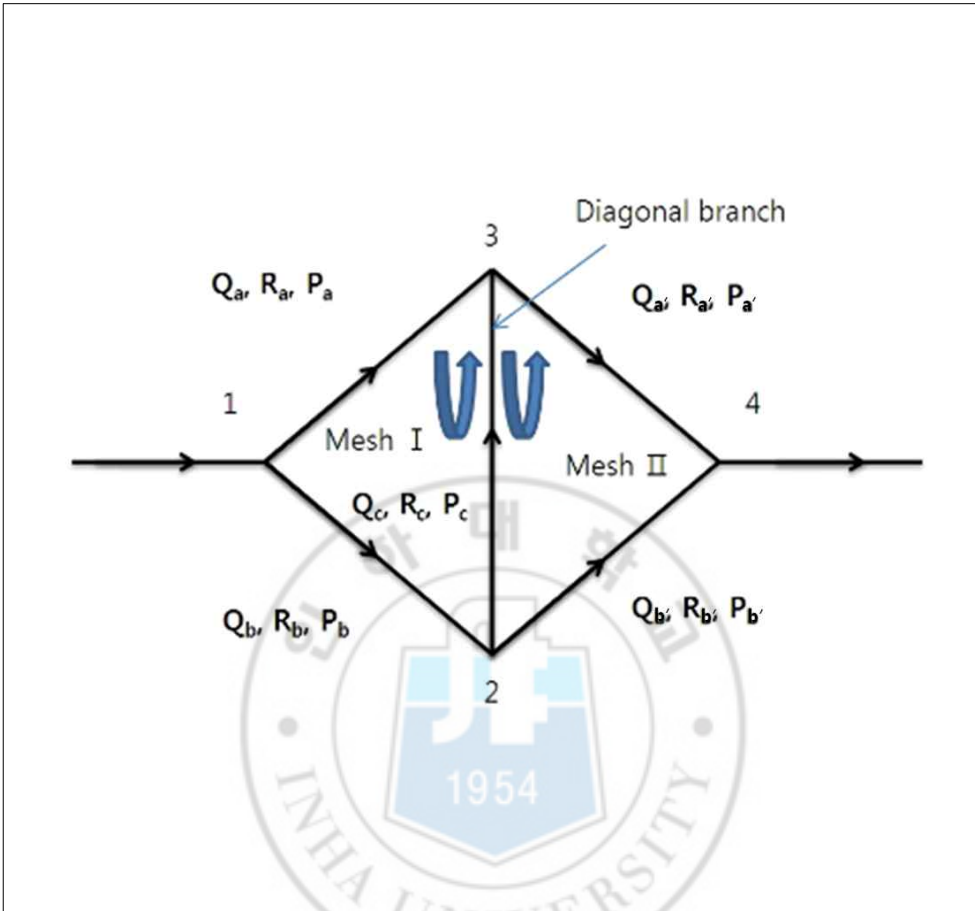


Fig. 4. The simple schematic of diagonal system

### 3. 연구 방법

#### 3.1 Diagonal 환기 회로내 유량 조절

그림 5는 Diagonal 브랜치가 5개인 환기 회로의 모습이다. 공기조절기의 조절이 없을 경우에는 좌측에서 유입된 공기는 위·아래 통로를 통해 우측으로 빠져나가며, 위쪽에 위치한  $R_{u1} \sim R_{u6}$ 와 아래쪽의  $R_{d1} \sim R_{d6}$  공기조절기의 조절에 따라 공기흐름의 방향뿐만 아니라 Diagonal 브랜치에 유입되는 공기량을 조절할 수 있다. 또한 공기의 상·하 유동 방향을 변화시킬 수 있는 공기 회로는 Diagonal 환기 회로가 유일하다.

이러한 특성은 지하 공간내에 유독 가스가 발생하거나 화재가 발생했을 때 작업자를 보호할 수 있다는 측면에서 매우 큰 장점이라 할 수 있다. 하지만 Diagonal 환기회로내에 위치한 모든 브랜치에 원하는 공기량을 제공하기 위한 연구는 아직 미흡하여 이에 따른 연구를 진행하였다.

Diagonal 환기 회로내 공기유동은 문헌 연구에서 보여진 Kirchhoff's Law에 의해 판단되지만, 이에 의거하여 공기량을 조절하기 위해선 여러 곳에 위치한 공기조절기의 저항을 하나씩 바꾸어주며 시뮬레이션을 통해 변화하는 공기량을 지속적으로 관찰해야한다. 한 개의 공기조절기 저항 변화는 그 외 모든 공기 조절기에 영향을 미치는 상호 작용을 하므로 Diagonal 브랜치가 3개 이상 존재한다면 각 브랜치에 원하는 유량을 공급하기 위해선 많은 시간이 소요된다. 이는 비상 사태가 발생한 고준위 방사성 폐기물 처분장등에 적용하기에는 치명적인 단점이 될 수 있으며 실제 지하 공간의 설계에 적용하기 위해서는 즉각적인 계산 방법이 필요하다.

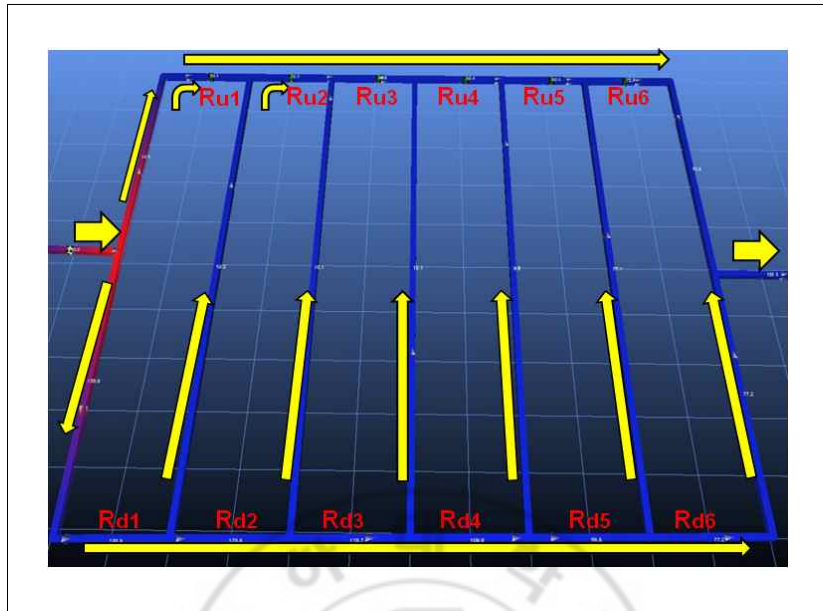


Figure 5. Diagonal 환기회로도

### 3.2 Diagonal 환기 시스템 분석

일반적인 환기 회로에서 공기조절기의 저항값 계산은 Atkinson Equation을 바탕으로 수행되며, 특정 브랜치에 일정 유량을 공급할 것을 가정하고 그 값에 따른 공기조절기의 저항이 계산되는 방식으로 이루어진다. 하지만 이는 유량이 공급될 브랜치와 공기조절기의 위치가 다른 Diagonal 환기 회로에 적용할 수 없으므로 다른 방식이 필요하다.

그림 5에서  $R_{u1}$ 과  $R_{d1}$ 은 좌측에서 유입된 공기가 위·아래 어느쪽으로 흘러갈지 결정짓게 할 수 있는 중요한 역할을 한다. 그림 5와 같이  $R_{u1}$ 의 저항을 크게 키우고  $R_{d1}$ 의 저항을 0으로 설정하면 대부분의 공기량은 저항이 큰 위쪽을 피해 아래쪽으로 집중되게 된다. 그 후에  $R_{d2} \sim R_{d6}$ 의 저항을 조절하면 각 Diagonal 브랜치에 유입되는 공기량을 조절할 수 있게 된다.

예를 들어, 각 Diagonal 브랜치에 20씩의 유량을 보내기로 가정하고  $R_{u1}$ 과  $R_{d1}$ 의 조절을 통해 공기 유동 방향을 아래쪽으로 100만큼 설정하였다면,  $R_{u1}$ 이 위치한 브랜치에는 공기량 0이 흐르고  $R_{d1}$ 이 위치한 브랜치에는 공기량 100이 흐르게 된다. 그 후에 첫 번째 Diagonal 브랜치로 20의 공기량이 빠져나가야 하므로  $R_{d2}$ 가 위치한 브랜치에는 80의 공기량이 흐르게 된다. 또한 위쪽  $R_{u2}$ 가 위치한 브랜치에서는  $R_{d1}$ 의 공기량 0과 Diagonal 브랜치를 통해 20의 공기가 합해지므로 20의 공기량이 흐르게 된다. 이와 같은 현상을 간단한 식으로 표현하면 다음과 같다.

각 Diagonal 브랜치에 20의 공기가 공급되어야 하며,

$$Q_{u1} = 0$$

$$Q_{d1} = 100$$

의 공기량으로 아래쪽에 공기를 유입시키는 상황을 가정하였 때,

$$Q_{d2} = Q_{d1}(100) - Q_{diagonal1}(20) = 80 \quad (32)$$

$$Q_{u2} = Q_{u1}(0) + Q_{diagonal1}(20) = 20 \quad (33)$$

아래쪽에 유입된 100의 공기량은 Diagonal 1 브랜치로 20만큼의 유량을 유입시키기 위해 Diagonal 1번 브랜치의 오른쪽 아래에 위치한  $d_2$  브랜치로 80의 유량을 보내야한다. 같은 방식으로 진행하면,

$$Q_{d3} = Q_{d2}(80) - Q_{diagonal2}(20) = 60 \quad (34)$$

$$Q_{u3} = Q_{u2}(20) + Q_{diagonal2}(20) = 40 \quad (35)$$

⋮

$$Q_{d6} = Q_{d5}(20) - Q_{diagonal5}(20) = 0 \quad (36)$$

$$Q_{u6} = Q_{u5}(80) + Q_{diagonal5}(20) = 100 \quad (37)$$

위 식과 같이 Diagonal 공기 회로내 모든 브랜치에 흐르는 공기량을 파악할 수 있다.

각 브랜치에 공급될 유량과 방향을 설정한다면 위의 과정을 통해 공기조절기가 위치한 브랜치에 공급될 유량을 계산할 수 있다. 또한 Atkinson Equation을 이용하여 계산한다면, 예측된 유량을 통해 각 공기조절기의 저항값을 계산할 수 있으므로 Diagonal 브랜치에 원하는 유량을 공급하는 것이 가능해진다.

이와 같은 내용은 Vnet-PC와 Ventsim과 같은 환기 네트워킹 프로그램을 통해 입증할 수 있었다.

또한, 프로그램을 통해 계산할 때에는 환기 시스템 전체의 공기량을 한번에 계산하여 즉각적인 계산이 가능하므로, 방사성 폐기물 처분장 설계 시 Diagonal 환기 시스템을 적용하여도 비상사태 시 즉각적인 공기 흐름의 조절 및 공기량의 조절이 가능하리라 판단된다.

결과적으로 고준위 방사성 폐기물 처분장의 설계에 Diagonal 환기 회로의 적용이 가능하리라 판단되어, 원자력 발전 시 발생하는 폐기물의 예측정보를 통해 처분장 거치 갱도의 구조가 병렬일 경우의 설계안과 Diagonal 회로일 때로 나누어 비교 분석을 수행하였다.

### 3.3 고준위 방사성 폐기물 처분장 설계

본 연구에서는 각기 다른 환기 회로의 적용과 그 차이점을 비교, 분석하기 위해 방사성 폐기물 처분장의 설계안을 제시하였다. 기본적으로 등가길이와 작업자의 동선 등을 우선적으로 고려하여 거치 갱도의 병렬식 설계안과 거치 갱도의 Diagonal식 설계안을 마련하였다.

#### 3.3.1 고준위 방사성 폐기물 처분장 모델

고준위 방사성 폐기물 처분장을 설계할때에 사용된 방사성 폐기물 데이터는 표5와 같다. 폐기물 저장 구간 중 가장 중점적으로 환기해야 할 부분은 표5의 폐기물C와 폐기물D가 저장되는 갱도로, 이는 고발열의 폐기물이기 때문에 열을 제대로 배출하지 못 할 경우 큰 온도 상승으로 인한 처분장 안정성 및 안전성에 악영향을 끼칠 것으로 예상된다.

Table 5. Waste and Tunnel Information

20,000tHM	폐기물-A	폐기물-B	폐기물-C	폐기물-D
Depth	200m level	500m level	200m level	200m level
Heat(kW/tunnel)	×	38	5,174	6,523
Number of Tunnels	2	16	2	1
Ventilation Needs	×	△	○	○
Area,WXH(m)	5.3×5.0	4.0×4.1	7.0×6.0	7.0×6.0
Tunnel Length(m)	200	220	130	130
Heating period	×	100년 이상	40년	40년
Shaft	4개(직경 5~6m) : Air intake, Return, 사람통로, 폐기물통로			



지하 500m 공간에 위치하게 되는 Uncontrolled area는 작업자들이 머물며 사용하는 공간이고, Controlled area는 방사성 관리 구역으로 방사성 물질의 농도가 최대허용치를 초과할 수 있지만, 사람들이 출입할 가능성이 있는 공간이다. 따라서 작업자의 안전을 위해서 신선한 공기가 가장 먼저 유입시켜야 하고, 이를 위해 입기부에 위치하도록 하였다. 비통제 구역과 통제 구역의 총 면적은 6500m<sup>2</sup>으로 터널의 폭을 6m로 계산하면 각각 약700m, 350m가량의 터널이 필요하다고 계산되어, 입기부의 저항을 줄이기 위해 터널을 병렬식으로 배치시켰다.

**Table 6.** 500m Level Rooms Information

	Controlled Areas	Uncontrolled Areas
Capacity	20명	80명
Area	2200m <sup>2</sup>	4300m <sup>2</sup>
Technical Rooms	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Power supply center</li> <li>• Telecommunication center</li> <li>• Sprinkler centre</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Power supply center</li> <li>• Telecommunication center</li> <li>• Sprinkler centre</li> </ul>
Auxiliary Rooms	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Rescue chamber (social rooms)</li> <li>• Parking hall</li> <li>• Vehicle washing and refuelling</li> <li>• Fuel cistern space</li> <li>• Sedimentation pools</li> <li>• Pumping station</li> <li>• Operation and decommissioning waste halls</li> <li>• Connecting tunnel</li> <li>• Ventilation tunnel</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Rescue chamber (social rooms)</li> <li>• Parking hall</li> <li>• Repair shop</li> <li>• Vehicle washing and refuelling</li> <li>• Fuel cistern space</li> <li>• Rescue station</li> <li>• Sedimentation pools</li> <li>• Pumping station</li> <li>• Connecting tunnel</li> </ul>

설계안에 따른 환기 네트워킹 시뮬레이션 시 고준위 방사성 폐기물의 방열량에 따른 소요환기량이 정해지지 않았기 때문에 처분장 내 소요환기량은 유카산 처분장의 환기량 데이터(표7.)를 사용하였다.

**Table 7.** Proposed ventilation airflow rate and velocity in Yucca Mountain<sup>[2]</sup>

	Airflow rate/ Velocity		Air Velocity
Exhaust shaft	800~850 m <sup>3</sup> /s	Minimum	1 m/s
Emplacement drift (70% heat removal)	15 m <sup>3</sup> /s per each	Haulage mains and ramps	6 m/s
Emplacement drift (Blasting cooling)	47 m <sup>3</sup> /s per each	Exhaust main	8 m/s
Intake and exhaust shafts	20 m/s	Intake and exhaust shaft accesses	8 m/s

### 3.3.2 고준위 방사성 폐기물 처분장 환기 시 고려 사항

기본적으로 지상에 배기선풍기를 설치하여 환기를 수행한다. 이는 처분장 내에 음압을 유지시켜 선풍기 작동이 멈추어도 처분장 내의 유독성 가스 등이 외부로 배출되는 것을 줄여준다. 그 외에는 안전성 확보를 위해 두 가지를 고려하였다.

첫 째, 비통제 구역과 통제 구역은 사람이 이동 혹은 상주하는 공간으로 이 공간들의 환기를 최우선으로 한다. 사람이 거주하는 공간을 환기한 공기가 폐기물 저장 터널의 환기에 사용되는 것은 문제될 바가 아니나, 폐기물 저장 터널의 환기에 사용된 공기가 비통제 구역과 통제 구역의 환기에 쓰이는 것은 절대 금지한다.

둘 째, 근무자의 쾌적하고 안전한 작업 환경을 위해 폐기물이 이동하는 통로와 사람이 이동하는 통로를 완전히 분리한다. 첫 번째 경우와 마찬가지로 폐기물 저장 터널의 환기에 사용된 공기가 사람이 활동하는 지역의 환기에 쓰이는 것을 절대 금지한다.

### 3.4 직,병렬 및 Diagonal 환기 회로를 적용시킨 처분장 설계안

#### 3.4.1. Diagonal 환기 회로를 적용시킨 처분장 설계안

고준위 방사성 폐기물 처분장을 설계할때에 최소한으로 필요한 수직갱의 개수는 4개로, 사람과 폐기물을 이동시킬 수직갱 각 한 개씩과 공기가 입·배기될 수 있는 수직갱 각 한 개씩으로 구성된다. 이러한 수직갱들의 배치는 작업자의 동선과 공기의 흐름 방향에 맞추어 이루어져야 하며, 이때 고려해야할 가장 중요한 요소는 작업자의 안전이다. 따라서 처분장내 구조물 중 작업자들이 상주하고 이동할 수 있는 공간에는 신선한 공기를 유입시키는 것이 최우선적으로 수행되어야 한다. 본 설계안은 방사성 폐기물 처분 터널이 Diagonal 환기 회로로 구성이 되어있기 때문에, 처분 터널에 비상 사태가 발생한다면 작업자가 위치한 곳으로 공기가 흐르지 않게 하거나 오염된 공기가 유입되지 못하게 공기 흐름의 방향을 바꿀 수 있다. 예를 들어 처분 터널 아래쪽에서 화재 등이 발생했을 때 작업자가 그보다 위쪽에 있다면, 위에서 아래쪽으로 공기가 흐르도록 공기 조절기를 조절하여 작업자를 보호할 수가 있다.

병렬식 배치로 비통제구역과 통제구역을 수직갱 아래쪽에 위치시켜 먼저 환기시킨 후, 그 공기를 지하 500m의 환기에 다시 사용하는 시스템을 마련하였다. 통제구역은 방사성물질의 농도가 허용치를 넘을 가능성이 있으므로 풍문 등의 설치를 통한 공기 유·출입의 조절이 꼭 필요하다. 또한 환기수직갱은 중심부에서 필요한 곳에 유량을 공급하므로 상황에 따른 소요환기량 변경 시 이에 알맞은 대응이 가능할 것이라고 판단된다. 폐기물 이동 수직갱은 입·배기구의 중간 부근에 위치시켜 폐기물 처분 터널에 공기를 공급할 수 있도록하고, 처분 터널까지의 거리를 최대한 줄일 수 있도록 하였다. 고준위 방사성 폐기물 처분장의 경우에는 처분이 완료된 후에도 오랜 기간 운영될 수 있으므로, 폐기물 이동 수직갱을 그 후에 완전한 제 2의 환기 수직갱으로 활용할 수도 있을 것이라 생각된다.

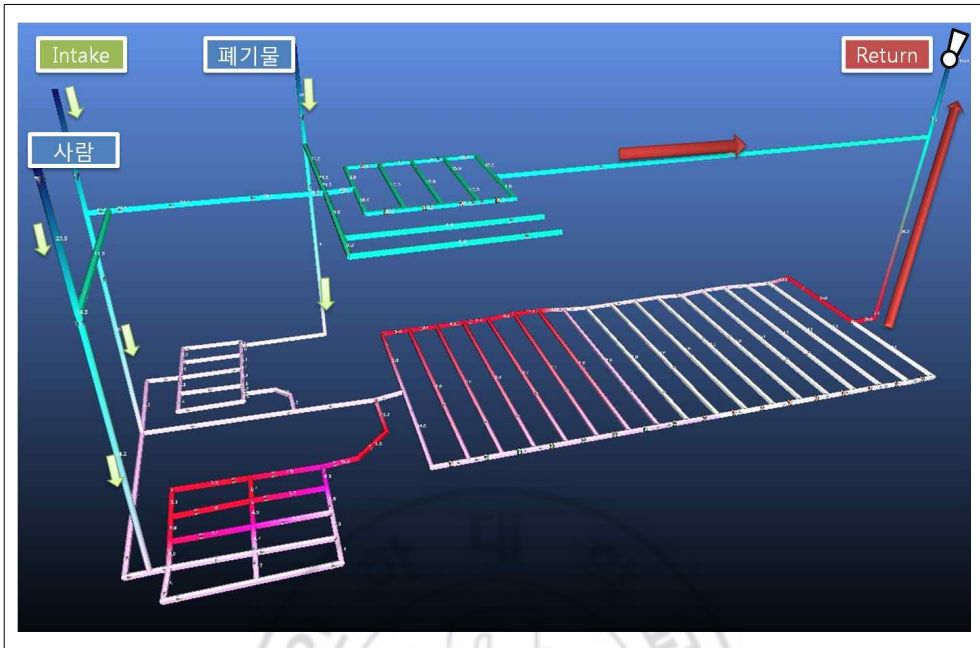


Fig. 6. Diagonal식 환기회로 적용 처분장 설계안

### 3.4.2. 직,병렬식 환기 회로를 적용시킨 처분장 설계안

병렬식 환기 회로를 적용시킨 설계안도 Diagonal 환기 회로를 적용시킨 설계안과 처분 터널의 형상을 제외하고는 같은 형태를 가진다. 마찬가지로 최소한으로 필요한 수직갱의 개수는 4개로, 사람과 폐기물을 이동시킬 수직갱 각 한 개씩과 공기가 입·배기될 수 있는 수직갱 각 한 개씩으로 구성된다. 이러한 수직갱들의 배치는 방사성 폐기물 처분 터널이 위치한 곳의 앞쪽까지만 영향을 미치므로 같은 형태를 유지하여 직접적인 비교를 할 수 있다.

병렬식 터널의 배치는 연결된 브랜치의 수가 증가할수록 저항이 감소한다는 특성을 가지고 있다. 이로 인해 전체적인 처분장의 저항이 감소할 것이라 예상된다. 또한 지하 500m 처분 터널의 형상이 Diagonal식 환기 회로를 적용한 설계안에 비해 지하 200m 공간의 길이를 짧게 만들 수 있는 장점이 있다. 이 또한 처분장내 전체적인 저항 감소에 영향을 주어 선풍기 운영 등에 유리한 점으로 작용할 것이다.

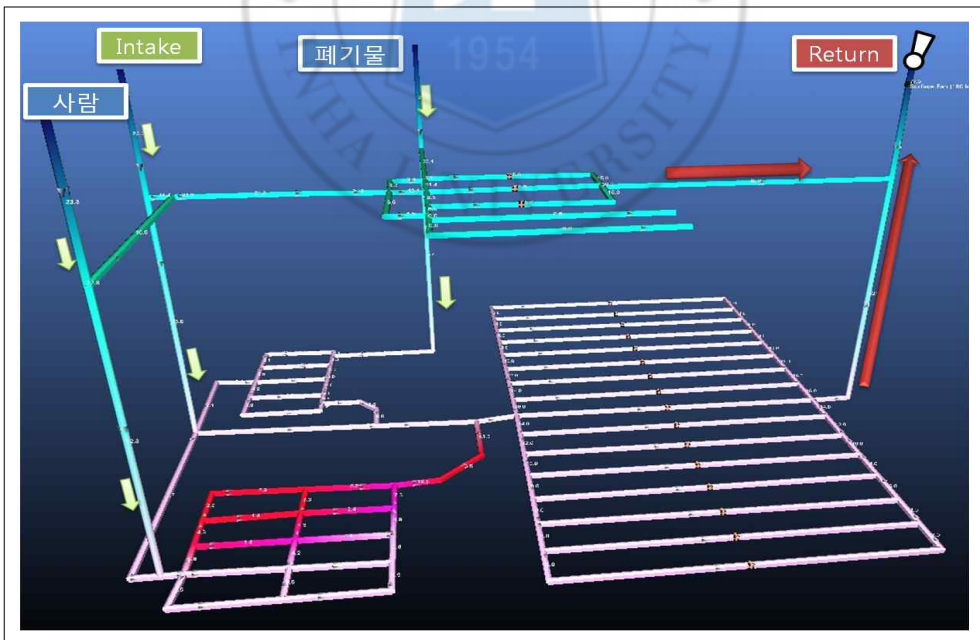


Fig. 7. 병렬식 환기회로 적용 처분장 설계안

## 4. 연구 결과

### 4.1 고준위 방사성 폐기물 처분장 설계안 시뮬레이션

Ventsim 환기 네트워킹 프로그램을 통하여 처분장 설계안의 시뮬레이션을 수행하였다. 이를 통해 Diagonal 환기 회로 내에서 유량을 결정하는 방법이 유효하다는 것을 검증할 수 있었고, 처분장의 일부분으로 설계하여 시뮬레이션 했을 경우에도 원하는 유량을 정확히 제공할 수 있었다.

두 처분장 설계안의 시뮬레이션은 같은 선풍기를 사용하여 수행되었고, 그 결과로 선풍기 압력, 각 브랜치에 흐르는 유량과 총 유량, 처분장 구조에 따른 선풍기 효율, 선풍기 운영에 필요한 전력과 그에 따른 운영 비용을 얻을 수 있었다.



#### 4.1.1 Diagonal식 환기 회로 적용 설계안 시뮬레이션

Diagonal 환기 회로를 적용한 고준위 방사성 폐기물 처분장의 시뮬레이션은 각 브랜치에 원하는 유량을 유입시킴으로써 원활하게 진행되었다. 시뮬레이션 결과 중 처분장 내 유입되는 공기량은 공기가 이동하는 통로가 추가로 존재하는 Diagonal 환기 회로의 특성상 처분장 소요환기량  $77\text{m}^3/\text{s}$ 보다 약 10% 증가한  $84\text{m}^3/\text{s}$ 로 나타났다.

외부 공기는 처분장 내 환기를 위해 사용하는 환기 수직갱을 통해서 총 유입 공기량  $84\text{m}^3/\text{s}$ 의 약 55% 정도가 유입되고 있었으며, 폐기물이나 사람이 이동하는 수직갱을 통해 유입되는 공기의 양도 45% 정도로 소요환기량을 공급하는데 절반정도의 비중을 차지함을 알 수 있었다. 이는 한 개의 수직갱으로 많은 양의 공기가 유입되는 것은 압력 강하의 원인이 되므로 나누어 입기되는 것으로 파악된다. 따라서, 폐기물 이동 수직갱이 추후에 폐기물 처분이 완료된 후 제 2의 환기 수직갱으로 활용된다면 공기 유입시 발생하는 압력 강하를 더욱 낮출 수 있을 것으로 판단된다.

지하 500m 심도에 위치한 비통제 구역과 통제 구역은 입기부 바로 아래에 위치하여 신선한 공기가 가장 먼저 유입되고 있다. 또한 이곳을 거친 공기는 같은 심도의 폐기물 처분 터널의 환기에 사용되면서 필요 이상의 공기는 유입되지 않고 있다.

시뮬레이션 결과로 나타난 연간 운영비용은 폐기물이 전부 처분되었을 때의 소요환기량을 기준으로 계산된 것으로, 처분 초기나 처분이 완료되지 않은 시점의 처분량을 대상으로 소요환기량을 선정하고 시뮬레이션한다면 연간 운영비용은 처분량의 정도에 따라 비례적인 차이가 있을 것이다.



Table 8. Result of a Diagonal Ventilation Circuit Simulation

Fan pressure	1570 Pa
Quantity	84 m <sup>3</sup> /s
Fan efficiency	76.4%
Fan power	181.2 kW
Annual fan operating cost	KRW 178,710,838

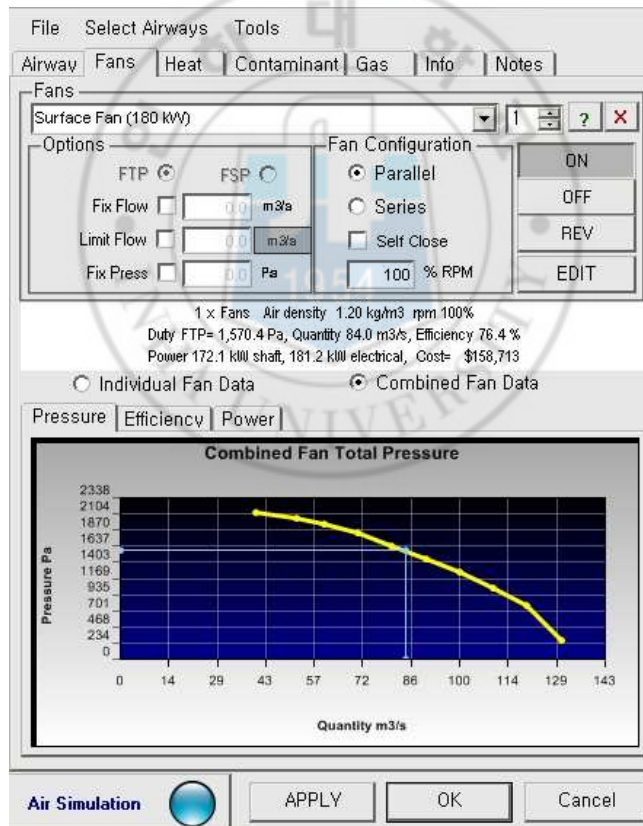


Fig. 8. Diagonal식 환기회로 적용 설계안 시뮬레이션 결과



#### 4.1.2 병렬식 환기 회로 적용 설계안 시뮬레이션

시뮬레이션 결과 중 처분장 내 유입되는 공기량은 처분장 소요환기량인  $77\text{m}^3/\text{s}$ 와 99% 이상 일치하여 최적의 결과를 얻을 수 있었다.

Diagonal 환기 회로를 사용한 처분장 설계안과 마찬가지로, 외부 공기는 처분장 내 환기를 위해 사용하는 환기 수직갱을 통해서 총 유입 공기량  $77.1\text{m}^3/\text{s}$ 의 약 55% 정도가 유입되고 있었으며, 폐기물이나 사람이 이동하는 수직갱을 통해 유입되는 공기의 양도 45% 정도로 소요환기량을 공급하는데 절반정도의 비중을 차지함을 확인할 수 있었다. 이는 두 설계안의 수직갱 데이터가 동일하기 때문에 같은 결과를 나타낸 것으로 파악된다.

Table 9. Result of a Parallel Ventilation Circuit Simulation

Fan pressure	1703 Pa
Quantity	$77 \text{ m}^3/\text{s}$
Fan efficiency	77.1%
Fan power	178.5 kW
Annual fan operating cost	KRW 176,052,352

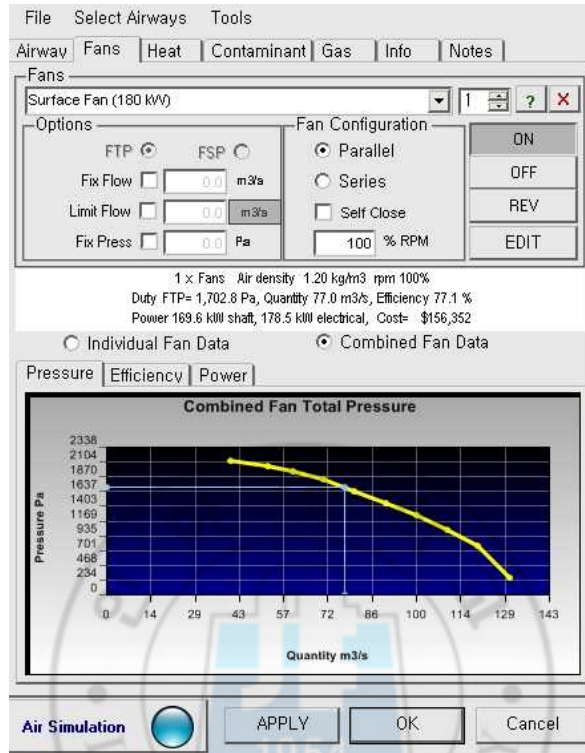


Fig. 9. 병렬식 환기회로 적용 처분장 설계안 시뮬레이션 결과

### 4.1.3 설계안 비교 및 분석

병렬식 환기 회로를 적용한 설계안과 비교한 Diagonal 환기 회로의 결과 데이터 차이는 표.10과 같다.

Table 10. Comparisons between Diagonal and Parallel System

Fan pressure	7.8% 증가
Quantity	8.3% 증가
Fan efficiency	1% 감소
Fan power	1.5% 증가
Annual fan operating cost	1.5% 증가

브랜치가 많아질수록 저항이 감소하는 병렬 환기 회로와 달리 Diagonal 환기 회로는 16개의 처분 터널이 연결됨에 따라 처분장 내의 저항이 증가하게 된다. 저항의 증가는 곧 선풍기 압력강하의 원인이 되므로 본 결과와 같이 선풍기의 압력 강하가 증가한 것으로 판단된다.

Diagonal 환기 회로를 적용하는 과정에서 공기가 빠져나갈 수 있는 갭도의 굴착이 필요하고, 이 구간으로 흐르는 공기량을 추가하였기 때문에 두 설계안에서 흐르는 환기량은 실질적으로 5% 내외의 차이를 갖고 있다고 보여 진다. 즉, 결과 데이터 중 총 유량 차이로 나타난 8.3%는 줄일 수 있는 값이며, 순수하게 Diagonal식 환기 회로와 병렬식 환기 회로의 구조적 차이에 의해 발생한 총 유량과 선풍기 압력의 차이는 7.8%보다 작은 3~5% 정도로 예상된다.

한편, 선풍기 소요 전력과 운영 비용의 경우, 시뮬레이션 이 전에 예측한 바와는 달리 1.5%의 작은 차이를 보였다. 이는 Diagonal 환기 회로의 구조에 의한 저항 증가가 매우 작다는 것을 의미하며, 처분장 내에 같은 유량이 흐르는 것을 가정한다면 그 차이는 더욱 줄어들어 1 % 내에

이를 것으로 예상된다.

이로서 처분장 내 안전성을 최대한 확보할 수 있는 Diagonal 환기 회로의 적용이 경제적인 측면에서도 타당성을 가지며, 향후 고준위 방사성 폐기물 처분장의 설계 시 Diagonal 환기 회로의 적용 가능성을 보여준다고 사료된다.



## 5. 결 론

본 연구에서는 Diagonal 환기 회로 내에서 원하는 공기량을 분배시키는 방법을 제안하였다. 또한 이를 토대로 Diagonal 환기 회로가 적용된 고준위 방사성 폐기물 처분장의 설계와 환기 네트워크 시뮬레이션을 수행하였고, 같은 조건에서 병렬식 회로를 적용한 설계안 또한 시뮬레이션하여 비교 및 분석 하였다. 또한, 위 과정들을 통하여 Diagonal 환기 회로 내에서 공기량 분배가 원활히 이루어지는 것을 확인하였다.

1. 유량이 설정되는 브랜치에 공기조절기가 설치되어 유량에 따른 공기조절기의 저항이 바로 계산되는 직·병렬 회로와는 달리 Diagonal 공기 회로의 경우, 공기 흐름 방향을 미리 설정하고 Diagonal 브랜치에 유입시킬 공기량을 정해놓는다면 공기 분배를 예측하고 이에 따른 위,아래쪽에 위치한 공기조절기의 저항을 계산할 수 있다.

2. 향후 건설 될 방사성 폐기물 처분장에서 공기 흐름 방향에 따라 입기구쪽에는 작업자가 이동하거나 상주할 수 있는 공간들이 위치해야하고, 위험을 입을 수 있는 폐기물 이동 수직갱, 폐기물 거치 갱도 등은 Return 수직갱 쪽에 가깝게 위치시켜야 한다. 또한 폐기물 이동 수직갱은 폐기물 거치 갱도 바로 앞쪽에 위치시킴으로써 거치 갱도에 공기량을 공급하는데 도움을 줄 수 있도록 하는 것이 유리하다.

3. Diagonal 환기 회로를 적용시킨 고준위 방사성 폐기물 처분장의 경우에는 거치 갱도가 40m 간격으로 16개가 평행하게 위치하여 입기에서 배기에 이르는 전반적인 갱도 길이가 증가하였다. 이로 인해 구조적인 이유뿐만 아니라 길이의 증가에 의해서도 병렬식 환기 회로를 사용했을 때보다 저항이 증가하는 경향을 보였다.

4. 주어진 폐기물 발생 예측 데이터로 설계안을 시뮬레이션 한 결과, Diagonal 과 병렬식 환기 회로를 적용시킨 설계안 둘 다 지표 선풍기 하나로 원활히 시뮬레이션 되었다. 이로 인한 운영 비용은 약 177,000,000 원으로 계산되었으나, 전력비의 설정과 소요환기량의 변화가 있을 시 많은 차이가 있을 수 있다.

5. 두 설계안간에 회로 특성에 따른 환기량의 차이가 있었음에도 불구하고 선풍기 압력, 총 유량, 선풍기 효율, 선풍기 소요 전력 및 선풍기 운영 비용의 모든 면에서 최대 8% 정도의 차이를 보이는 것으로 나타났다. 이는 저항을 매우 증가 시킬 것으로 예측되었던 Diagonal 환기 회로가 사실은 저항 증가에 큰 영향을 미치지 않는다는 것으로 판단된다.



## 참고 문헌

1. 차정훈, 2011, 사용후핵연료 장기건식저장 시스템 열해석 방법론 개발,  
경희대학교 박사학위논문, pp.1-2
2. 김진, 권상기, 2005, 한국형 방사성 폐기물 처분장을 위한 환기시스템 전략,  
한국방사성폐기물학회지, Vol.3(2). pp.135-148.
3. 최희주, 이종열, 조동경, 김성기, 김승수, 김건영, 정종태, 이민수, 최종원, 이재  
완,  
전관식, 김풍오, 2008, 한국형 고준위폐기물 처분시스템, 선진핵주기 고준위  
폐기물 처분시스템 개발보고서,KAERI/TR-3563.
4. 이종열, 김성기, 조동건, 최희주, 최종원, 2004, 지하처분장에서의 고준위폐기  
물  
처분공정 개념, 한국정밀공학회 추계학술대회 논문요약집, pp.145-148.
5. 양준승, 2008, 고준위 방사성 폐기물 처분장의 diagonal 환기시스템에 관한  
연구, 인하대학교 석사학위논문, pp.1-2.
6. 최종원, 권상기, 강철형, 2000, 세계 주요국의 고준위 폐기물 처분개념과 현황,

- 한국암반공학회, 제 11권 1호, pp.1-16.
7. 최종원, 강철형, 권상기, 최영성, “고준위폐기물 심지층 처분시스템 예비개념 선정을 위한 기술성 평가”, KAERI/TR-1361/99.
8. 윤찬훈, 2011, 고준위 방사성 폐기물 처분장 내 온도예측을 위한 열전달계수 결정 현장실측과 수치해석에 관한연구, 인하대학교 박사학위논문, pp.10-11.
9. 권상기, 장근무, 김철형, 1999, 심지층 고준위 방사성 폐기물 처분장의 개념설계를 위한 구조적 안정성 해석, 터널과 지하공간, Vol.9, pp.102-113
10. International Atomic Energy Agency, Acceptance Criteria for Disposal of Radioactive Wastes in Shallow Ground and Rock Cavities, Safety Series No.71, IAEA, Vienna 1985
11. Office of Civilian Radioactive Waste Management (OCRWM), “Yucca Mountain Project; Yucca Mountain Science and Engineering Report”, DOE, USA(2002).
12. McPherson, M., J., 1993, Subsurface Ventilation and Environmental



Engineering, Chapman & Hall, pp.134-141.

13. 오병화, 임한욱, 2006, 굴착중인 장대터널내 최적의 환기시스템에 대한 연구, 대한화약발파공학회, 24(2), pp.9-22.
14. Prosser B. S. & Stinnette J. D., Paredes J., 2002, Ventilation optimization at the La Camorra mine, Proceedings of the North American/Ninth US Mine Ventilation Symposium, Kingston, pp.57-63.
15. McPherson, M. J., 1987, The Resistance to Airflow of Mine Shaft
16. Aynsley Richard M., 1997, A Resistance Approach to Analysis of Natural Ventilation Airflow Networks, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 67&68, pp.711-719.
17. Hartman, H.L., Mutmansky J.M., and Y.J Wang, 1997, Mine Ventilation and Air Conditioning, Wiley Interscience, pp.133-165.