

## 지하공간의 환경 및 안전관리 요소

김복윤\*

### The Factors Governing Environment and Safety in Underground Spaces

Bok-Youn KIM

#### ABSTRACT

The environment of underground spaces might be considered in view of working environment during the construction and living environment after completion of the construction work. For controlling environment of underground space, an appropriate measures have to be taken on the governing factors such as air flow, dust, gases, heat, radiation, noise, illumination and water. The more critical matter, in underground environmental point of view, is underground disasters such as fire, gas explosion and water inrush.

This paper presents the general introduction of these factors mentioned above and some outcomes of research works as of now.

#### 1. 서론

지하공간의 환경은 지하공간을 구축하는 과정과 공간이 구축된 이후의 환경으로 구분할 수 있다. 구축하는 과정의 작업환경은 지하공간을 개발하는 과정에서의 근로자들의 건강보호와 작업능률 향상 재해예방을 목적으로 하고 있으며, 공간구축 이후의 환경은 공간내에서 인간이 생활하기에 적합한 조건을 마련해 주는 데 목적이 있는 것이다.

공간 굴착시 지하 작업장의 종합적인 환경은 주변암반의 물리적, 지역적 환경조건과, 작업의 종류에 의해 좌우된다. 일반적으로 환경은 지하굴착시의 단위작업 즉, 발파, 적재 운반 지보시공 등에 기인되며, 공간을 구축하려는 주변 암반의 지질학적, 수리학적, 지형적, 생태학적 현상과 관계가 있다.

---

\* 한국자원연구소 자원환경연구 그룹장

환경 요소별로그 원인, 가능한 제어방법, 제어 특성등의 일부를 표시하면 다음 표 1 과 같다.

표 1. 환경 요소별 원인 및 제어특성

요 소	원 인	제 어 방 법	제어 특성
가 스	자연 단위작업	통기 Scrruber	한계치, 농도 용출량
분 진	자연 단위 작업	통기, 살수 집진	농도 발생
방사선	자연	통기	농도, 방사량
열	자연 단위 작업	통기 냉각	Level, 온도 열유량
소 음	단위작업	조정, 격리 방음	Level
조 명	자연 단위작업	조명	Level 섭광
출 수	자연 단위작업	집수, 배수 지수, 동결 중화	유량
화 재	자연 단위작업	통기 내화재료	
폭 발	자연 단위작업	통기 내화재료	

## 2. 통기(=환기: Ventilation)

지하공간의 환경을 좌우하는 요소를 크게 나누어 보면 통기, 분진, 온도, 습도, 소음, 조명등 여러가지가 있으나 현실적으로 가장 심각하고 긴급을 요하는 것은 앞의 세가지 분야 즉, 통기, 분진, 온도 등이다. 그중에서도 역시 핵심기술은 통기이다. 그 이유는 통기가 개선되면 분진 및 온도는 어느정도까지는 저절로 해결될 수 있기 때문이다. 통기의 기본적인 목적은 다음과 같이 요약될 수 있다.

- 1) 지하공간 내에서 활동하는 사람에게 충분한 산소를 공급.
- 2) 폭발성 또는 유독성 가스, 연기, 분진 및 라돈가스 등을 허용농도 이하로 희석하여 지표로 배출.
- 3) 사람이 생활하고 작업하기에 쾌적한 온도, 습도 유지.

### 2-1. 통기 기술의 실제

지하공간에 적절한 공기를 공급하기 위해서는 지표로부터 지하공간에 이르는 통로 즉, 입기풍도와, 다 사용된 공기를 지표로 배출하기위한 배기풍도가 준비 되어야 한다. 보통 선풍기를 사용하지 않더라도 어느정도의 공기는 흐르지만 그 풍량이 불충분할뿐 아니라 계절에 따라 흐름의 방향이 변하고 풍량도 변하는등 필요로하는 곳에 필요한 공기량을 공급할 수 없기 때문에 일반적으로 선풍기를 사용하고 통기를 조절할 필요가 있는 것이다. 통기방법에 대한 일목요연한 분류는 어렵지만 대체로 표 2 와 같이 분류해 볼수 있다.

#### 2-1-1. 지하공간의 소요 통기량

지하공간의 소요 통기량은 다음과 같은 요소에의해 결정되는데, 세가지 요소에의한 산출치중 가장 많은량을 소요 통기량으로 한다.

- 1) 공간내의 최대 체류 인원수
- 2) 가연성, 유독, 유해가스의 발생량
- 3) 기온 및 습도

#### 2-1-2. 풍도설계

통기량이 결정되면 입배기 풍도의 단면이 결정되어야 하는데 이때는 제한풍속을 참고하여 단면을 설계하여야 한다. 가장 경제적인 설계를 하기 위해서는 전체 통기 Cost 가 최소가 되도록 하여야한다.

표 2. 통기 방법의 분류

분류 기준	분 류	내 용	장 단 점
○ 동 력	자연통기	지표와 지하의 공기 온도(밀도)차에 의한 통기압	○ 입기구와 배기구의 표고차가 클때는 동력 없이 어느 정도 통기가 가능하나, 지표의 온도변화나, 계절의 변화에 따라 기류의 방향이나 풍량이 변화하며 절대풍량의 임의 조정이 불가능함.
	강제통기	선풍기에 의한 인위적인 통기압	
○ 통기계통 (System) *입배기구 배치  * 통기압	中央식	입기풍도와 배기풍도를 통기계통의 중앙부에 인접하여 설치	○ 지표시설관리가 용이한이점은 있으나, 통기회로가 복잡해지고 누풍에 의한 손실이 불가피함.  ○ 회로가 단순해지고 누풍손실이 적지만 관리가 불편단부에 분리시켜 설치  ○ 천부이고 지표와의 관통구가 많을때에 적용하는 방법이다. 입구측에 Air Lock이 있어 인원이나 자재의 출입이 불편하며, 입기에 선풍기열이 가해진다.  ○ 입기에 열이 가해지지 않으며, Evase에 의해 동압을 정압으로 전환가능 ○ 오염된공기가 선풍기를 통과하여 선풍기수명이 단축됨.
	對隅식	입기풍도와 배기풍도를 통기계통의 양단부에 분리시켜 설치	
	壓入식	정압에 의한 통기 (불어넣기)	
	吸出식	부압에 의한 통기 (빨아내기)	
○ 통기분활방법	자연분활	풍도 저항에 따른 자연분활	○ 동력비가 최소임  ○ 필요한곳에 필요한 풍량을 배분할수있는반면 동력비가 증가함.
	인공분활	개소별 필요한 풍량을 확보하기 위하여 인공적인 저항을 추가 시키거나 Booster Fan 을 이용	

○ 풍도 개설을위한 자본비용 (I)

$$I = C_d \times A \times L$$

단,  $C_d$  : 굴착단가 (원/㎧<sup>3</sup>)  
 $A$  : 단면적 (㎧<sup>2</sup>)  
 $L$  : 풍도장 (m)

위의 자본비용을 연간 등가 비용으로 계산하면

$$I_a = I \times \left( \frac{i / 100}{1 - \left(1 + \frac{i}{100}\right)^{-n}} \right)$$

$$\text{소요통기압 (p)} = \frac{KLCQ^2w}{(1.2 A^3)} \text{ 임으로}$$

○ 통기 동력비 (Pc)

공기동력 (Pv) = p x Q (Watt) 에서

단, p : 소요 통기압 (Pa)  
 $Q$  : 풍량 (㎧<sup>3</sup>/S)

$$\text{공기동력 (Pv)} = \frac{KLCQ^3w}{(1.2 A^3)}$$

단,  $K$  : 풍도 마찰계수 (Ns<sup>2</sup>/㎧<sup>4</sup>)  
 $C$  : 풍도 주변장 (m)  
 $w$  : 공기 밀도 (kg/㎧<sup>3</sup>)

따라서, 선풍기, 전달장치 및 모터의 총효율을  $\eta$ , 동력 단가를  $C_p$  (원/Watt/년) 라 하면,

통기에 필요한 연간동력비(Pc)는 다음식으로 구할수 있다.

$$P_c = \frac{KLCQ3w}{(1.2 A^3)} \times \frac{100}{\eta} \times C_p \text{ (원)}$$

위와 같은 방법으로 비용을 산출한후 그림 1 의 개념에 의해 총 통기비용이 최소가 되는 풍도를 설계하여야 한다.

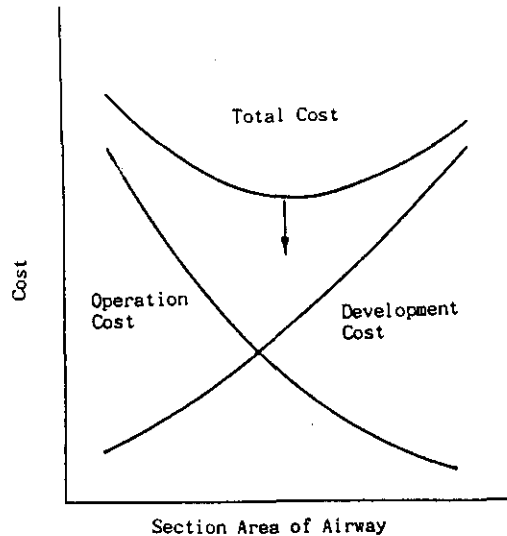


Fig. 1. Relation between Airway Size and Operation Cost

### 2-1-3. 통기망 해석

지하공간은 통기라는 측면에서 볼때는 공기가 흐르는 공간의 집합체라 할수있다. 공기가 흐르는 공간으로는 풍도, 굴착작업장, 각종 생활공간, 풍관, 누풍통로 등이 있으며 이를 전체적으로 풍도라 부른다. 이러한 풍도들이 서로 유기적으로 연결되어 있는데 이것을 통기망이라 한다.

선풍기를 사용하지 않아도 공기의 밀도차 (자연통기압)에 의해 어느정도 공기가 흐르지만 선풍기를 사용하면 더 많은 공기를 필요한 만큼 흐르게 할수있다. 통기망 해석은 통기망내의 풍도를 흐르는 풍량을 계산하여 필요한 개소에 필요한만큼의 신선한 공기를 공급하고 유해 가스나 호흡성 분진등을 희석 시키거나 배제하기 위해서 필요한 것이다.

이와같이 지하공간의 작업환경 개선에 필수적인 통기기술은 유체역학적인 이론을 바탕으로한 정확하고 신속한 계산이 뒷바침 되지 않으면 안된다. 그 이유는 통

기에 영향을 주는 각종 요소 즉, 풍도의 구조, 단면적, 연장등이 수시로 변하고 지표의 공기 온도도 계절이나 주야로 수시로 변하기 때문이다. 따라서, 어느 시점에서의 통기 상황을 정확히 파악하고 예측하여 미래의 계획을 세우고 필요한 대책을 마련하기 위해서는 신속한 통기망 해석기술이 필요하다.

통기계통은 크게 분류하면 앞에 말한 풍도, 선풍기 그리고 각종 조절장치등으로 구성되어 있다. 이와같은 요소들로 구성된 통기계통은 광산의 경우는 그 특성상 매우 빈번하게 변화될수밖에 없다. 따라서, 통기계통의 해석도 기동성 있게 뒤따라야 할 필요가 있다.

그리고 종래의 통기의 개념으로는 통기망 해석이란 다만 풍량을 대상으로 하였으나, 현재는 통기의 역할이 갱내의 고온환경 이나 화재시의 대책등 광범위해 지고 있다. 따라서, 화재시의 통기계통의 변화를 신속히 계산하고 안전한 대피통로를 검색하기 위해서는 화재시의 해석이 필요하며 더 나아가서 온도 습도등의 환경 해석도 필요하게 되었다.

이와같은 필요에 대응하기위해서 이미 오래전부터 복잡한 통기망을 신속히 해석할 수 있는 기법이 개발되어왔다. 지금까지는 kirchhoff의 전류와 전압법칙에 기초한 Hardy-Cross iteration technique (반복계산법)이 많이 사용되고있으며 일반적으로 Mesh 해석법으로 불려지고있다. 그러나 이 방법은 mesh 를 선정하기가 매우 힘들고 번거로우며, mesh선정 자체를 컴퓨터로 할수도 있으나 프로그램이 방대해질 것이다. 그리고 통기의 밀도차에 의해서 생기는 자연 통기압을 고려할때도 각 회로마다 일일이 자연통기압을 계산해야만한다.

따라서 통기계통이 매우 복잡할뿐 아니라 산재되어 있는 작업장이 수시로 변동되는 상황의 통기망의 신속한 해석을 위한 좀더 편리하고 이해하기 쉬운 Software의 개발이 필요한 것이다. 이와같은 상황을 고려하여 여러가지 요소들을 쉽게 감안할 수 있으면서도 사용이 편리한 절점식 해석 프로그램을 개발하게 되었다.

### 1) 이론적 배경

節点法 (Node Potential Method)은 갱내 임의점의 압력을 미지수로하여 구하는 방법이다. 갱도의 임의의 두점 사이에 성립되는 베루누이의 원리에 기초를 두고 있다.

$$P_1 - P_2 + d_{12}(Z_1 - Z_2) = r_{12} Q_{12} Q_{12} \text{ -----(1)}$$

단, P : 압력 (kg/m<sup>2</sup>)

d : 공기의 비중량 (kgw/m<sup>3</sup>)

Z : 높이 (m)  
 r : 통기저항 (weisbach)  
 Q : 통기량 (m<sup>3</sup>/sec)

(1)식에서 편의상,  $r_{12} Q_{12} = K_{12}$ . 로하고 1 점에서 2 점으로 흐르는 풍량  $Q_{12}$  에 대하여 정리하면 (2)식이된다.

$$Q_{12} = \frac{P_1 - P_2 + d_{12}(Z_1 - Z_2)}{K_{12}} \text{-----}(2)$$

경도가 서로 만나는 어떤 교점 즉, 절점 X 에 유입되는 풍량 Q 는 (3) 식과 같이 표시될 수 있다.

$$\sum_{i=1}^n \frac{P_i - P_x + d_{ix} (Z_i - Z_x)}{K_{ix}} = 0 \text{-----}(3)$$

따라서, 절점 X 의 압력은 다음의 (4) (5) (6) 식 등에 의해 계산될 수 있다.

$$P_x' = P_x + \frac{SW_x}{\sum \frac{1}{K_{ix}}} \text{-----}(4)$$

단,  $P_x'$  : 새로운 압력  
 $P_x$  : 전회 계산된 압력

$$SW_x = \sum_{i=1}^n \frac{P_i - P_x + d_{ix}(Z_i - Z_x)}{K_{ix}} \text{-----}(5)$$

$$K_{ix} = \sqrt{\{ P_i - P_x + d_{ix}(Z_i - Z_x) \} r_{ix}} \text{-----}(6)$$

(6)식의  $K_{ix}$  는 (5)식 의 분모가 풍량을 포함치 않도록 하기위한 것이다.  
 절점에 선풍기, 정류풍도 또는 누풍에 의한 풍량등을 고려할 필요가 있을때는  $SW_x$  를 다음 (7)식 과같이 하여 사용한다.

$$SW_x = \sum_{i=1}^n \frac{P_i - P_x + d_{ix}(Z_i - Z_x)}{K_{ix}} + W_{fx} + W_{cx} + W_{lx} \text{-----}(7)$$

단,  $W_{fx}$  : 선풍기에 의해 유입되는 통기의 중량 (kg/sec)  
 $W_{cx}$  : 정류풍도 " " "  
 $W_{lx}$  : 누풍 " " "

이와같이 절점 X 의 압력은 인접점의 압력, 고도차, 통기의 비중량 및 선풍기, 정



류풍도 또는 누풍등에의해 X 점에유입되는 풍량으로부터 구해질 수 있는 것이다.

## 2) 프로그램 개발

금번 개발된 프로그램 <TONGKIGESAN> 은 절점의 압력을 축차계산하는 방법으로 전체 절점의 압력을 위의 식에 의해 계산하여 보정해 나아간다. 여기서 이것을 계산의 한 cycle 이라 부르며, 이 보정값을 압력 보정치라 한다. 계산의 순서는 다음과 같다.

- 1) 전체 절점의 압력 초기치를 준다
- 2) 선풍기의 풍량 및 압력의 초기치를 준다.
- 3) 압력 보정을 시행한다. 여기서 절점의 한개 보정치가 구해지면 즉시 다음 보정 계산이 시행되며 이때 부터는 새로 보정된 압력이 사용된다.
- 4) 선풍기의 풍량을 보정 한다.
- 5) 수속 여부를 판정한다.
- 6) 수속조건을 만족시키지 못할 경우는 2) 항으로 되돌아간다.
- 7) 구해진 압력에의해 풍량을 계산한다.

## 3) 프로그램의 장점

본 프로그램은 AT 급이상의 Personal Computer 만 있으면 현장 기술자라도 쉽게 사용할수 있으며, 통기에 필요한 다양한 Parameter 들을 다룰 수 있고, 갱내통기에 관한 어떤 경우의 Simulation 도 가능하여 지하공간의 설계, 선풍기 선택, 통기송의 위치선정, 조절문의 설계문제등 지하공간내 통기에 관한 모든 사항에 활용될 수 있다.

특히 지하공간내 화재시 통기상황 변화의 Simulation 이 가능하여 임의의 위치에서 화재가 발생할 경우 화염의 이동상황을 시간별로 예측할 수 있으며, 그때 각 작업장의 인원이 안전하게 대피할 수 있는 통로를 검색하여 나타내줄 수도 있어 화재로인한 대형사고를 예방할수 있다. 그리고 입력자료나 해석결과등이 모니터 화면상의 통기망도 위에 나타나기 때문에 입력이나 해석결과 의 이해가 매우 용이하다. 본 프로그램은 국내 유일의 최신 Software 로 지하공간내 작업환경 또는 생활환경 개선 및 재해예방에 획기적인 공헌을 할것으로 확신한다.

## 4) 현장활용 사례

이 프로그램의 실용성을 확인하기 위하여 국내 탄광중 심도가 깊고 온도도 매우 높은 강원탄광 통기망을 해석하고 그 결과에 의해 개선안을 마련하여 실제로 실행한 결과 Simulation 결과와 같이 나타 남으로써, 통기망의 해석과 Simulation 이



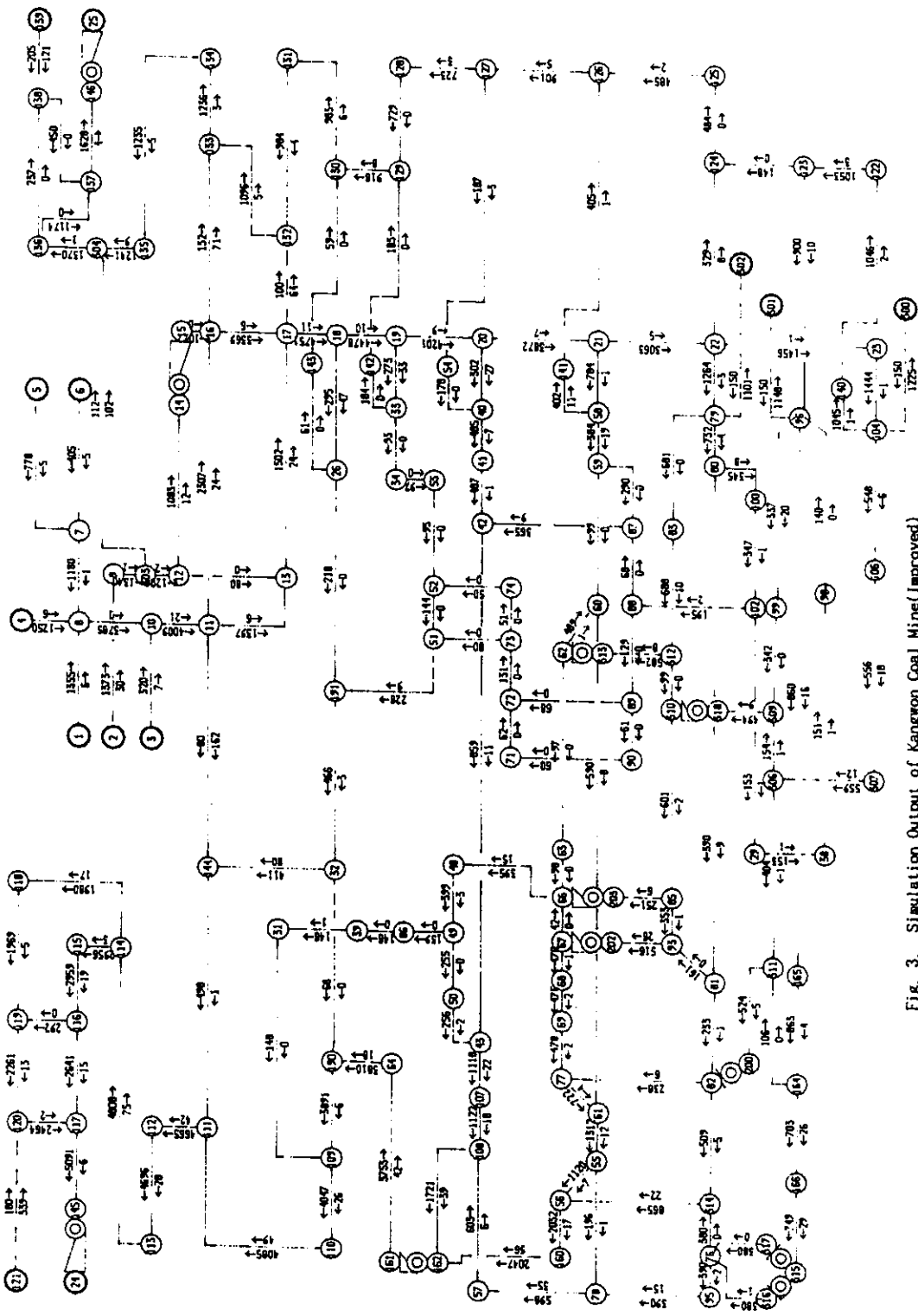


Fig. 3. Simulation Output of Kangwon Coal Mine(Improved)

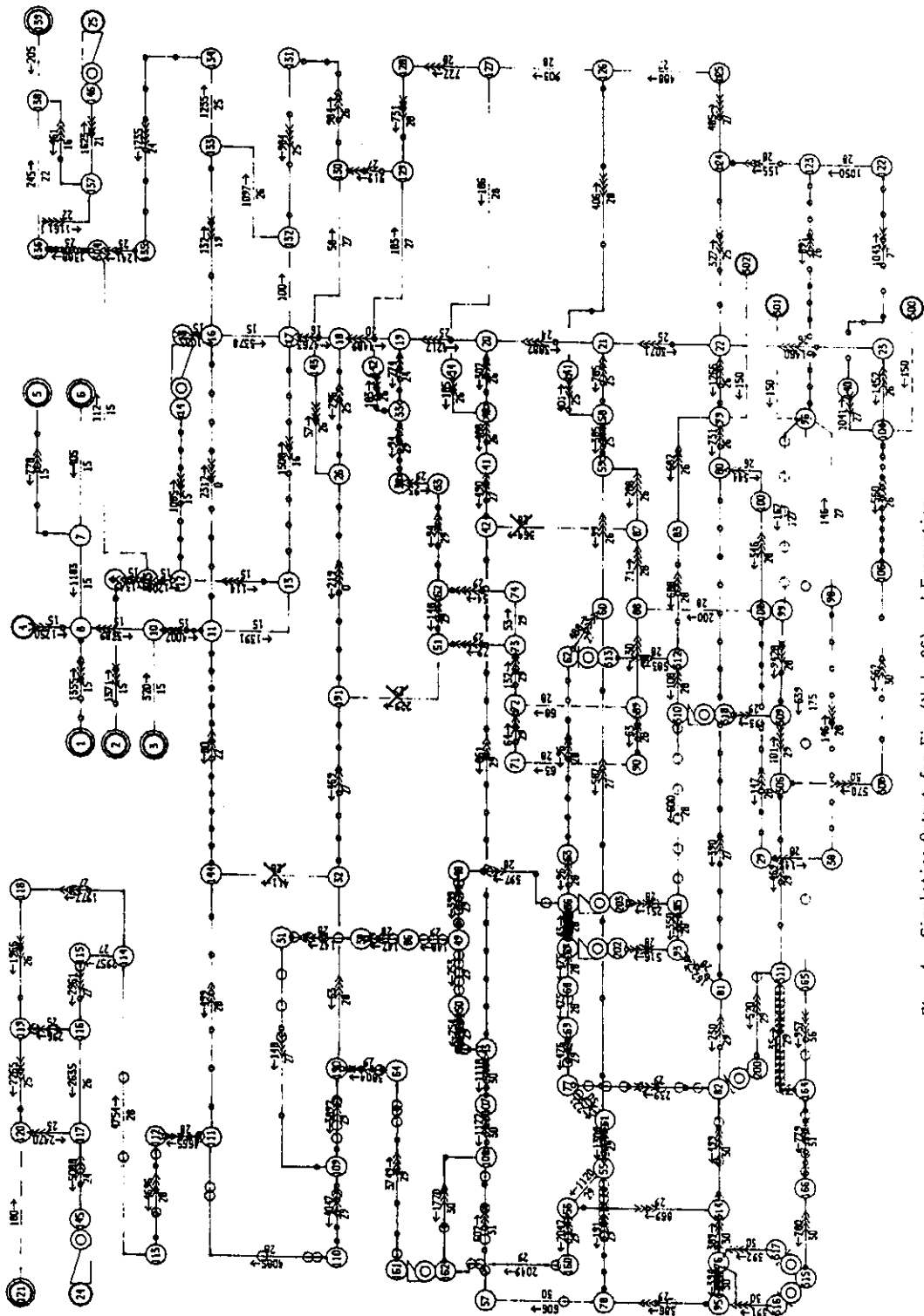


Fig. 4. Simulation Output for Fire(Node 96) and Evacuation

성공적임이 확인되었다.

강원탄광의 기존 통기망 해석결과는 그림 2, 개선을 위한 Simulation 결과는 그림 3, 과 같다. Simulation 결과에 따라 실제로 시행한결과는 예측대로 확인되었다. 그리고, 임의 개소에서 화재가 발생했을 경우의 화염 이동경로및 대피로 검색의 예로 절점 96 에서 600°C 의 화원이 발생되었을 때의 화염 이동경로(0 표시)와 안전 대피로(>>> 표시)를 Simulation 한 결과를 보면 그림 4 와 같다.

이와같이, 본 프로그램은 현장 기술자라도 쉽게 사용할수 있으며, 통기에 필요한 다양한 Parameter 들을 다룰 수 있고, 갱내통기에 관한한 어떤 경우의 Simulation 도 가능하여 광산은 물론 각종 지하공간의 설계, 선풍기 선택, 통기승의 위치선정, 조절문의 설계문제등 통기에 관한 모든일 에 활용될수 있다.

특히 화재시 통기상황 변화의 Simulation 이 가능하여 화염의 이동 경로 및 안전 대피로 검색이 가능하여 화재로 인한 대형사고를 예방할 수 있다.

### 3. 분진(Dust)

#### 3-1. 분진의 정의

분진(Dust)이란 고형물질로 부터 분리된 물리적 화학적 성질이 원래의 물질과 동일한 미세한 입자를 말한다. 분진 입자의 크기는 마이크로미터( $\mu\text{m} = 1/1,000 \text{ mm} = 1/10^6 \text{ m}$ ) 로 표시하며, 일반적으로 부유분진(Airborn Dust)은 0.001 - 1,000  $\mu\text{m}$  의 입자를 말한다. 40  $\mu\text{m}$  이상의 입자는 눈에 보이며 7  $\mu\text{m}$  이상의 입자는 사람에게 그렇게 해로운 대상이 아니다.

지금까지의 연구결과에 의하면 부유분진중 0.5 - 7  $\mu\text{m}$  범위의 분진이 가장 쉽게 사람의 폐포에까지 도달하고 침착되어 진폐증을 일으키는 것으로 밝혀졌으며 이러한 분진을 호흡성분진(Respirable Dust)이라고하고 7  $\mu\text{m}$  이상의 분진까지 합한 분진을 총분진(Total Dust)이라고 하여 구별한다.

공기중의 부유분진은 다음과 같은 세가지 면에서 인간생활에 지장을 준다.

- 눈, 코, 목구멍 등에 분진이 들어가 활동에 불편을 주며 시야를 불량하게 하고 사용하는 각종 장비들을 오염시켜 고장의 원인이 된다.
- 석탄분진등 일부 분진은 한정된 조건에서 폭발을 일으키기도 한다.

- 가장 심각한 것은 분진환경에 장시간 노출될때 분진이 폐포에 침착하여 진폐증(Pneumoconiosis)이라는 질병을 일으킨다는 것이다.

몇가지 분진의 입도범위의 한예를 보면 그림 5 와 같다.

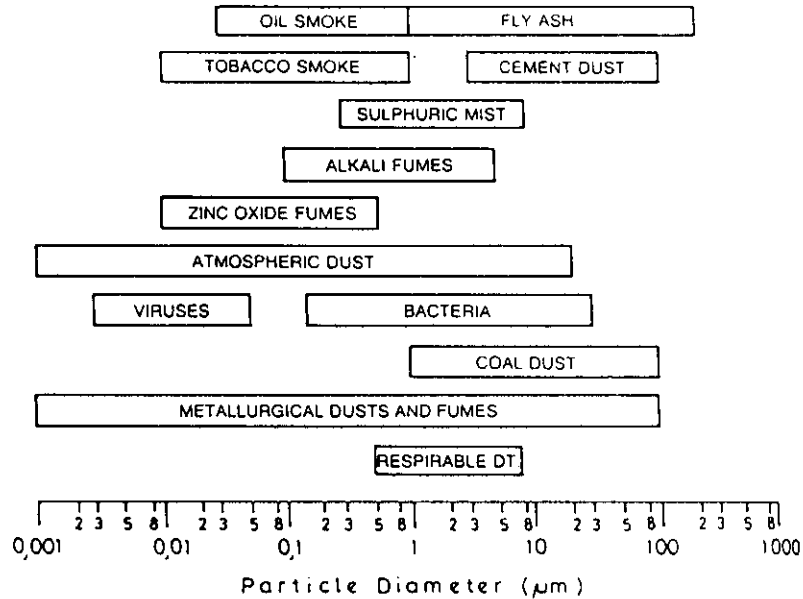


Fig. 5. Range of Dust Particles

### 3-2. 분진의 위해도 및 허용농도

인체에 해를 끼치는 정도는 분진의 (1) 성분, (2) 입도, 및 (3) 농도에 의해 달라진다. 일반적으로 인체 조직내에서 용해되지 않거나 용해가 어려운 분진을 다량 흡입할때 진폐의 원인이 된다. 특히 광물질 분진일때는 분진입자중 유리규산분의 함유율이 높을수록 진폐의 위험이 크다. 입도는 호흡성분진 (0.5 - 7 μm) 중에서도 1-2 μm 의 입자가 가장 위험하다.

각국의 지하갱도 작업장의 환경관리를 위한 법적 분진 허용농도를 표 3 과 같다.

Table 3. Tolerable level of dust Concentration in Mine

	Sampling System	Tolerable Level (mg/m <sup>2</sup> )
U. S. A.	Gravimetric System (50% recovery in 3.5 μm)	2 mg/m <sup>3</sup> < 5% free silica 10/ % of free silica > 5% free silica
Great Britain	Gravimetric System (50% recovery in 5.0 μm)	3 mg/m <sup>3</sup> in blind raise 8 mg/m <sup>3</sup> in coal face, roadway, transfer point of conveyor.
Japan	Gravimetric System ( < 7.5 μm)	1 mg/m <sup>3</sup> of respirable dust } < 10% of 4 mg/m <sup>3</sup> of total dust } free silica
Russia	Gravimetric System (Total dust)	> 10 % of free silica Respirable dust : 2.9/(0.22 x silica % + 1) Total dust : 12/(0.23 x silica % + 1) > 70 % of free silica : 1 mg/m <sup>3</sup> 10% - 70% : 2 mg/m <sup>3</sup> < 10% : 4 mg/m <sup>3</sup> 0 % : 10 mg/m <sup>3</sup>
Belgium, Netheland	Gravimetric System (Total dust)	0% - 10% of ash : 50 - 110 mg/m <sup>3</sup> 10% - 20% : 37 - 88 mg/m <sup>3</sup> 20% - 40% : 24 - 55 mg/m <sup>3</sup> 40% - 60% : 17 - 37 mg/m <sup>3</sup> 60% - 80% : 13 - 28 mg/m <sup>3</sup> 80% -100% : 10 - 22 mg/m <sup>3</sup>
Korea	Gravimetric System	< 2 mg/m <sup>3</sup> When >30 % of Free Silica < 5 mg/m <sup>3</sup> When <30 % of Free Silica

### 3-3. 분진환경의 평가

분진 농도는 단위 공기 체적당 분진의 중량으로 표시하는 질량농도(mg/m<sup>3</sup>)와 분진입자수로 표시하는 개수농도(Particles/cm<sup>3</sup>) 등 두가지 방법이 있으나 진폐이환이 분진의 질량과 비례관계가 있으므로 질량농도가 많이 사용되고 있다. 질량농도 측정장치들은 호흡성 분진만을 선택적으로 측정하도록 되어있으며 채취된 분진의 질량을 평량하는 절대농도 측정기와 광간섭의 원리를 이용하여 광학적 물리량으로 측정하는 상대농도 측정기가 많이 쓰이고 있다.

상대농도 측정기는 측정이 신속하고 편리하지만 질량농도로 환산하기위한 환산계수를 미리 구하여야한다.

분진의 위해성 정도의 평가를 위해서는 우선 분진의 입도분포와 분진의 유리규산분 분석이 이루어져야 한다.

### 3-4. 분진 제어방법

분진제어와 관련해서 다음과같은 4개 원칙이 있다.

- 1) 분진의 발생을 최소화하고 발생원의 분진이 공기중에 부유하는것을 방지
- 2) 통기에의해 가능한한 빠른시간 내에 회석 제거
- 3) 분진을 분리하여 제거(집진)
- 4) 분진 재비산 방지

분진발생의 억제방법으로는 물을 많이 사용하고 있다. 굴착전에 암반에 고압수를 주입하는 방법과, 절삭시 물을 분무하는 방법등이 일반적으로 많이 사용된다. 분진입자와 물방울의 크기는 분진 억제효율에 큰 영향을 주기 때문에 분진의 입도 분석 결과에 의해 분무장치가 설계되어야 한다. 일반적으로 분진 입자경에 비해 150 배 크기의 물방울일 때 분진 억제효율이 가장 높다. 분무방법에 따른 물방울 크기의 범위는 표 4 타 같다.

Table 4. Diameter range of Water drops

수적 발생 방법		수적경 범위 ( $\mu\text{m}$ )
주수 Showering	저압으로 굵은 물줄기를 뿌려줌	$\mu$
살수 Spray	작은 물방울을 뿌려줌	20 - 1,300 $\mu$
분무 Atomizing	안개를 분무함	0.1 - 200 $\mu$

분진개소에 통기량을 증가시켜 회석 제거하는 방법은 통기망 해석기법에의해 통기량을 증가 시키는 방법이다. 그러나 통기량의 증가에 따라 풍속이 증가하게되면 재비산 현상이 발생됨으로 풍속이 최대 4 m/sec 이하가 되도록 해야한다.

발생된 부유분진의 억제방법에는 집진 Mechanism 에 따라 표 5 와같이 분류될 수있다. 표에서 볼수 있는 바와 같이 집진 방식에 따라 집진 효율의 한계가 있으며 각각 장단점이 있다.



Table 5. Comparison of Dust Collecting Systems

집진기종류	장 점	단 점
중력식	압력손실작음, 설계 및 보수간단	설치면적이크고, 효율이낮음
원심력	설계, 보수용이. 설치면적이작고, 포집분진 의 연속배출가. 압력손실 낮음. 큰입경분진에적합 온도영향 적음.	작은입경분진에 효율낮음. 분진부하, 유량변동에민감.
세정	캐스흡수와 집진동시가능. 고온다습캐스의 냉각. 분진폭팔위험적음. 효율가변	부식및 마모발생. 배수처리및 재생원가증가
전기식	효율 99% 이상. 미립자집진가능. 습식, 건식가능. 압력손실, 소요마력낮음.	초기투자 큼. 분진부하, 캐스유동에민감. 경제성이낮음. 고전압 안전설비필요.
Bag Filter	건식집진가능. 소입경에적합. 효율이 높음.	여과속도의 영향이 큼. 습분의 영향을 받음.

따라서 집진기의 선택시는 먼저 배출 분진농도와 배출 기준농도에의해 목표로하는 집진율을 먼저 결정한다. 집진율이 결정 된후에는 다음과 같은 분진의 특성, 설비요소 및 경제성등을 면밀히 조사하여 집진기의 종류를 선택해야한다.

1) 분진의 특성

입도분포, 입자의 진비중, 진밀도, 형상, 부착성, 응집성, 흡습성 및 발화온도등.

2) 설비 요소

습식의경우 물 공급조건, 설치장소 조건, 집진물의 처리조건등.

3) 경제성

전력비, 폐기물처리, 인건비, 보수유지비, 용수 및 재료비 등.

일반적으로 집진대책을 위해 어떤 한가지 집진방법 만으로는 충분한 효과를 기대하기 어렵다. 분진의 성질, 발생상황, 설치조건 또는 경제성등에 따라 몇가지 방법을 병용하는것이 좋다.

#### 4. 방사선(Radiation)

지하공간내의 방사선은 주로 라돈(Radon)이나, 우라늄(Uranium)의 일종인 기체상 붕괴성원소의 자연붕괴에 의해 생긴다. 이러한 원소들은 정도의 차이는 있지만 모든 우라늄광산, 뉴화운드랜드의 형석광 스웨덴 및 영국의 철광등에서 나타나고 있다. 자연붕괴란 무거운 방사성원소의 원자가 붕괴하여 새로운 원소를 만들면서  $\alpha$ ,  $\beta$  입자 및  $\gamma$  선이라는 형태의 에너지를 방출하는 과정을 말한다.

##### 4-1. 방사선의 위험성

라돈은 무색, 무취, 무미의 불연성 가스이며 공기에 비하면 비중이 7,665 이다. 그외에 관계되는 기체로 토리움이 있으며 이 토리움(Thorium)은 제일먼저 붕괴되는 방사성 물질의 하나로 반감기가 52초밖에 되지않아 붕괴가 되기전에 이미 지하공간 내에 존재하는 경우가 많다. 아라스카나 캐나다의 우라늄광산은 이 토리움의 농도가 높아 위험성이 높다. 우라늄의 붕괴 계열은 그림 6 과 같으며, 우라늄 계열의 붕괴에 의한 생성물은 라듐을 제외하고는 모두 고체로 암반내에 잔류한다.

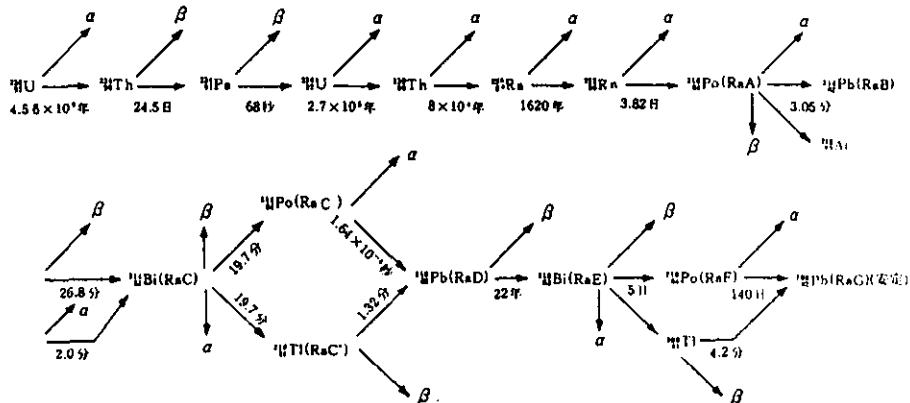


Fig. 6. Uranium Decay Series

라돈이 발생하면 암반내의 균열을 통해 또는 지하수와 함께 바로 지하공간내로 침출된 다음 계속해서 붕괴를 일으켜 공기중에 방사성 자원소(Daughter Products)를 발생시킨다. 자원소는 보통 正電氣를 띤 원자정도 크기의 입자인데 이와 같은 크기와 성질 때문에 붕괴된 라돈의 자원소는 공기중의 분진이나 그외 지하공간내 공기중의 자유표면에 쉽게 부착한다. 이런 공기를 흡입하면 라돈은 쉽게 폐로부터 혈액내에 확산되며, 분진의 일부는 폐나 기관에 축적된다. 여기에 부착된 분진중의 라돈은 계속 붕괴를 일으켜  $\alpha$  선을 방사하여 폐조직을 손상시키게 된다.

라돈은 대체로 호흡시 체외로 토출되나 대부분의 자원소는 배출되기 전에 체내에서 붕괴된다. 이와같이 라돈가스 보다는 라돈 자원소가 위험한 것이다. 라돈의 자원소는 라듐A(RaA), 라듐B(RaB), 라듐C(RaC) 및 라듐C'(RaC') 으로  $\alpha$ ,  $\beta$  입자 및  $\gamma$  선이며 이들의 흡입이 폐나 다른 기관의 암 발생 원인이 되는 것이다.

#### 4-2. 방사선의 제어

흡입된 라돈 자원소의 피폭선량(Emanation Rate)은 지하공간내 공기중의 분진, 공기의 순환 시간, 호흡의 속도, 기관지내 점막의 상태 등 여러가지 요인에 의해 달라진다. 피폭선량의 단위는 Working Level(WL) 이다.

WL 은 1 리터의 공기중에 포함되어 있는 라돈 가스의 자원소 화합물로, 안정된 원소인 연(Pb)으로 붕괴하는 동안의 총 알파 에너지는  $1.3 \times 10^5$  MeV(Mega Electron Volt)이다. 1 WL 은  $100 \times 10^{-12}$  Ci/l ( 1 Ci 는 1초당  $3.7 \times 10^{10}$  의 붕괴임)의 라돈 밀도에 상당한다. 따라서 누계 폭로의 계산은 WL 에 전체 폭로시간을 곱하여 구한다.

미국의 경우는 월 170 시간 작업을 기준으로하여 전폭로 1 개월에 1 WL 의 피폭선량을 1 WLM(Working Level Month)라 하여 누계 폭로의 단위로 하고 있으며 4 WLM 를 최대 허용치로 하고있다.

라돈 자원소의 공기중 밀도는 적당한 필터를 사용하여 일정량의 공기를 채취한 후 필터상의  $\alpha$  선을 측정하여 구한다. 라돈가스의 제거는 주로 통기에의한 희석 제거 방법을 사용한다. 통기량을 증가시켜 희석시키고 공기의 지하공간내 체류시간을 짧게하여 붕괴가 진행되기 전에 배출시킨다.

#### 5. 소음(Noise)

##### 5-1. 소음의 척도

소음이라함은 인간이 듣기 싫어하는 음이라 할 수 있다. 음이란 공기등 탄성매체를 전파하는 음파(탄성파)에 의해 생기는 청각적 감각이라 할수있다. 공기중의 음파는 그림 7 과 같이 음의 진행방향으로 대기압에 비교할때 미소한 압력변화가 반복되는 종파에 의해 전해진다. 이 미소한 압력변화를 음압이라 하는데, 이 음압변화의 반복회수 즉, 1초간 사이클 수를을 주파수라하며 이것에 의해 음의 고저가 좌우된다.

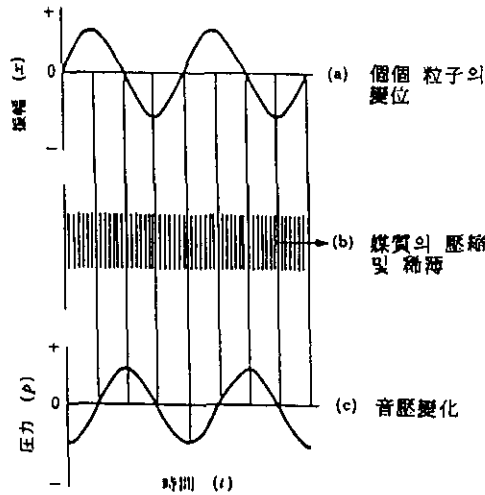


Fig. 7. Sound Transmission in Air

음의 강도( $I = \text{Intensity}$ )는 단위시간에 단위면적을 통과하는 음의 에너지량 ( $\text{W/m}^2$ )으로 표시되는데 음압과의 관계는 다음과 같다.

$$I = P^2 / (\rho C)$$

- 단,  $I$  : 음의 강도 ( $\text{W/m}^2$ )
- $P$  : 음압 (Pa)
- $\rho$  : 공기의 밀도 ( $1.2 \text{ kg/m}^3$ )
- $C$  : 공기중의 음속 ( $340 \text{ m/sec}$ )

건강한 정상인이 들을 수 있는 범위는 대략 다음과 같다.

- 주 파 수 : 20 - 20,000 Hz
- 음 압 :  $2 \times 10^{-5}$  - 20 Pa
- 음의 강도 :  $10^{-12}$  -  $10 \text{ W/m}^2$

그러나 일반적으로 음의 세기는 음압수준( $L_p$ )에 의해 표시하고 있으며 데시벨 (dB)이란 단위를 쓰고있다. 인간이 들을 수 있는 음압의 범위는 대략 0 - 130 dB 이다.

$$L_p = 10 \log_{10} (P/P_0)^2$$

$$= 10 \log_{10} (I/I_0) \text{ (dB)}$$

단,  $P_0$  와  $I_0$  는 기준량으로 인가이 들을수 있는  
최소치이다.

즉,  $P_0 : 2 \times 10^{-5} \text{ Pa}$

$I_0 : 10^{-12} \text{ W/m}^2$

같은 음압이라도 주파수에 따라 감도가 다르며 사람에게 같은 크기로 들리는 등  
감곡선을 보면 그림 8 과 같다.

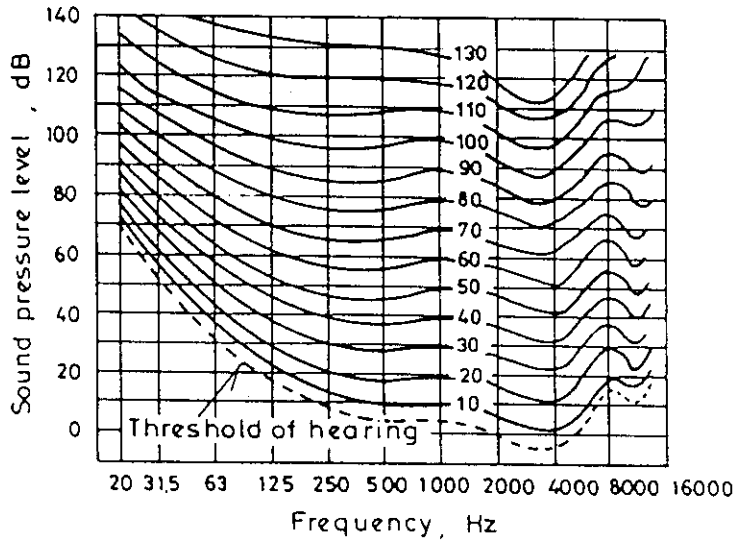


Fig. 8. Equal Loudness Contours

## 5-2. 소음의 영향

소음은 사람을 피로하게 하고, 작업능율을 저하시키며, 경고음등을 들을수 없게  
되어 재해의 원인도 된다. 그리고 장시간 접하면 소음성 난청을 일킨다. 높은 소  
음환경하에서 장시간 생활한 사람들의 청력 손실율의 일예를 보면 그림 9 와 같다.

그림에서 볼 수 있는바와 같이 4,000 Hz 부근에서 청력 손실이 가장 많음을 알  
수 있다.

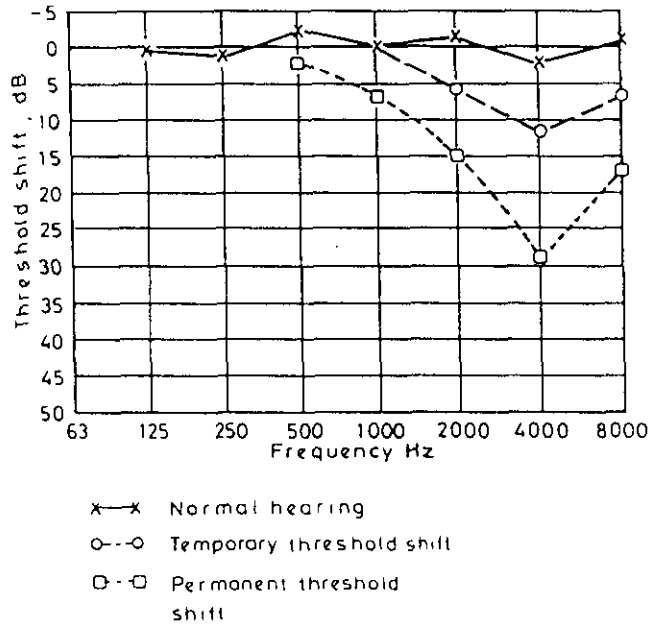


Fig. 9. Audiograms and Hearing Loss

### 5-3. 지하공간에서의 소음

지하공간에서의 소음은 반 자유공간을 전파하는 지표소음과 달라서 통로의 연장 방향으로 전파하며, 전파감쇄율은 지표에서 보다 매우 작게 나타난다. 통로의 단면적이 작을수록 더욱 그러하다. 실측치의 예를 보면 그림 10 과 같다.

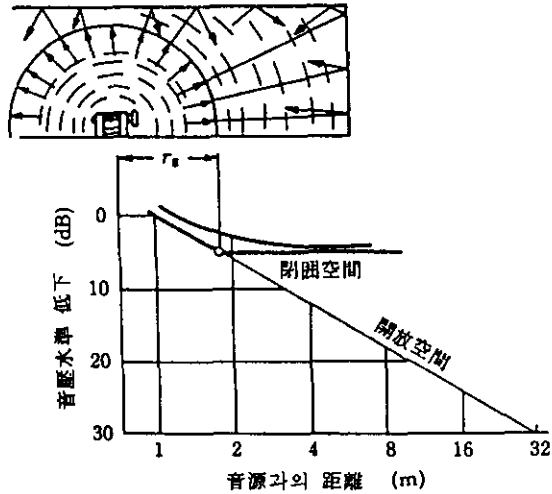


Fig. 10. Attenuation of Noise

#### 5-4. 소음대책

소음의 크기와 노출시간에 대한 허용범위는 표 6과 같으며 지하공간의 소음을 이러한 허용범위 이하로 유지하기 위해서 아래와같은 방법들이 있다.

Table 6. Noise Level Criteria

Maximum Daily Exposure Duration(Hours)	Sound Level (dB)	
	Walshy-Healy Criteria	U. S. Department of labour
8	90	85
6	92	
4	95	88
3	97	
2	100	91
1.5	102	
1	105	93
0.5	110	94
0.25	115	

- 1) 음원 대책 : 소음 발생을 위험수준 이하로 감소시킴(박킹, 소음기등)
- 2) 소음 전파방지 : 발생된 소음의 전파경로에서 위험수준 이하로 감소  
(차음벽 등)
- 3) 보호구 사용 : 귀마개 사용
- 4) 노출시간 규제 : 높은 소음하에서의 작업시간 규제

#### 6. 조명 (Illumination)

지하공간에서의 조명은 근로자의 안전, 생산성 및 근로의욕에 영향을 주는 요소 중의 하나이다. 지하굴착 작업중에는 여건상 고정 조명보다는 개인용 조명을 많이 사용한다. 그리고 암반 벽면의 반사율이 낮고 분진, 연기, 수증기등에 빛이 흡수 되기 때문에 지표조명보다 훨씬 불리한 조건이다. 문헌에 의하면 소련의 탄광에서는 채탄작업장에 형광등으로 고정조명을 한결과 생산성 3.5 % 향상되고 재해가 40 % 감소했다고 하며, 헝가리에서도 개인용 조명과 고정조명의 작업장에 대한 비교 결과 재해가 60 % 나 감소 했다고 한다.

### 6-1. 광의 특성 및 단위

빛의 측정 단위로는 광원(Source)의 밝기인 광도(Luminous Intensity), 광원으로부터 일정시간에 방사되는 에너지량인 광속(Luminous Flux), 광속이 표면에 도달했을 때의 표면의 조도(Illumination) 및 표면의 반사등에 의한 인간이 느끼는 밝기인 휘도(Surface Brightness)등이 있다. 이것을 알기쉽게 표시하면 그림 11 및 표 7 과 같다.

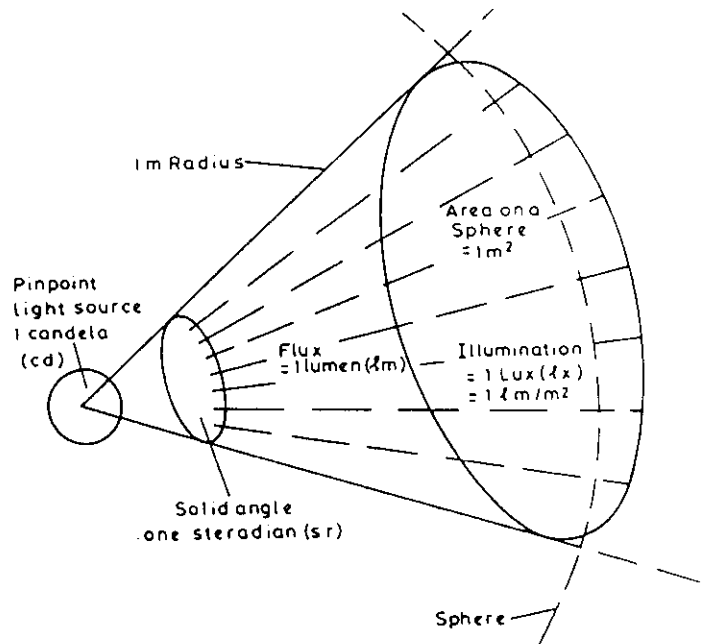


Fig. 11. Concept for Units of Light

Table 7. Unit and Definition of Light

물리량	기호	단위의 명칭	정의	단위의 약어
광도	I	Candela	기본적 국제단위	cd
입체각	$\Omega$	Steradian	수학적 정의	sr
광속	$\Phi$	Lumen	cd x sr	lm
조도	E	Lux	lm/m <sup>2</sup>	lx
휘도	L	Candela/m <sup>2</sup>	cd/m <sup>2</sup>	cd/m <sup>2</sup>
반사율	$\rho$		$\frac{L\pi}{E}$	



### 6-2. 지하공간의 광원

지하공간의 광원으로는 필라멘트 전구, 형광등, 수은등, 나트륨등, 등이 있으며 이들의 밝기 및 수명등을 비교하면 표 8 과 같다.

Table 8. Comparison of Light Sources

Light Source	Efficiency (lm/W)	Brightness (cd/m <sup>2</sup> )	Life Time (Hours)	Order of Cost (l:high)
Filament Lamps	10 - 15	10 <sup>5</sup> - 10 <sup>7</sup>	750 - 1,000	7
Halogen Lamps		2 x 10 <sup>7</sup>	- 2,000	4
Fluorescent Lamps	35 - 85	5x10 <sup>4</sup> - 2x10 <sup>5</sup>	- 30,000	3
Mercury Vapour Lamps	35 - 60	10 <sup>5</sup> - 10 <sup>6</sup>	16,000 - 24,000	6
High Pressure Sodium Lamps	110 -130	10 <sup>7</sup>	12,000 - 24,000	1
Low Pressure Sodium Lamps	150	10 <sup>5</sup>	10,000 - 18,000	5

### 6-3. 지하공간의 조명기준

International Commisson on Lighting(국제조명위원회)가 탄광의 조명기준을 제안한바가 있는데 기 기준은 다음과 같다. 각 국별 지하작업 공간의 조명기준을 보면 표 9 와 같다.

- 통행량이 적은 지하통로 ----- 0.05 cd/m<sup>2</sup>
- 기계화 작업장 ----- 0.2 cd/m<sup>2</sup>
- 일반 작업실 ----- 10 cd/m<sup>2</sup>
- 정밀 작업실 ----- 20 cd/m<sup>2</sup>

Table 9. Guide line of Illumination

(Unit : Lux)

Nations	Shaft bottom	Machine room	Roadway	Loading point	Office	Mainten- ance room	Working face
Australia	20	20		20	100		
Belgium	20	25	15	20	270	270	
Canada	50	50	20	20			
Czechoslovakia	15	20	5	20			5
Germany	30	40	15	40			
Hangary	60	20	2	40		20	10
Poland	50	50	2	15		50/100	2
United Kingdom	70	30		30	60	50/150	
United States							15

## 7. 열환경 (Thermal Environment)

지하 심부로 갈수록 다음과 같은 원인에 의해 온도가 상승하기 때문에 사람이 작업 하기에 적합한 온도를 유지할 필요가 있게된다.

- 지열(암반온도)
- 공기 압축열
- 전기, 기계류에 의한 열
- 석탄의 산화열(탄광)
- 고온 용수
- 갱목의 부식
- 발파
- 인체로부터의 발열

지하공간에서의 온도는 단순한 건구온도 보다는 사람이 느끼는 감각적인 온도가 중요하기 때문에 피부의 수분을 증발시키는 냉각능력을 포함한 온도를 사용한다. 이러한 온도로 유효온도(Effective Temperature) 와 Kata 도 가 있다. 이들은 온도, 습도, 및 풍속등 열환경 인자를 종합적으로 표시하는 단위이다.

그림 12 는 유효온도를 쉽게 구할수 있는 Nomogram 이다. 유효온도가 상승하게되면 작업능율은 저하하게 되는데 그 관계에 대한 연구 결과를 보면 그림 13 과 같다.

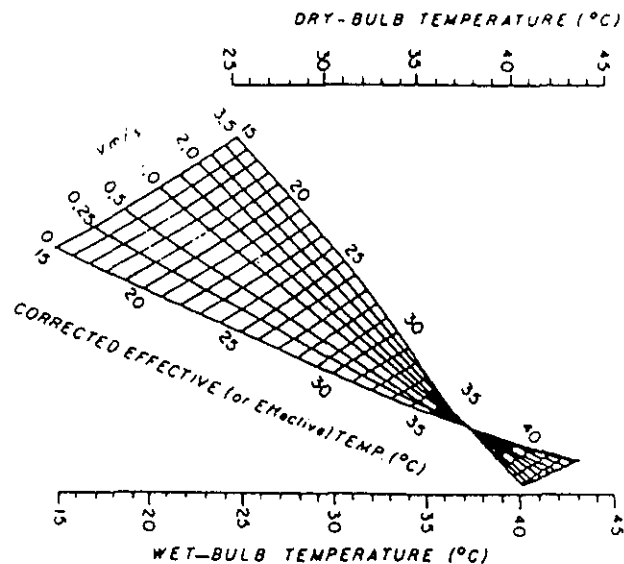


Fig. 12. Nomogram of Effective Temperature

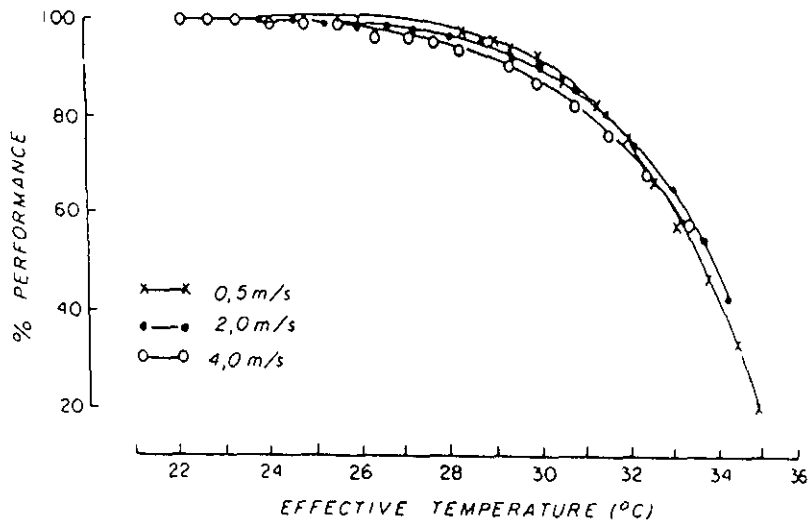


Fig. 13. Effect of high Temperature on Performance

따라서 지하공간의 온도가 적정수준 이하가 되도록 하기 위해서는 먼저 통기기술을 충분히 활용하여야 하며 그 이후 불가능할때는 냉방 기술에 의존해야 한다. 그러나 지하 500 m 이내일때는 일반적으로 통기에의해 해결이 가능하다.

## 8. 재해방지

지하공간의 이용에 있어서 가장 큰 문제점은 돌발적인 재해이다. 즉, 화재, 가스돌출, 출수등을 거론할수 있다. 지하공간의 특징은 폐쇄성에 있기 때문에 화재시 열이나 유해가스가 빠른 시간내에 집적되어 초기 진화나 대피가 어렵고, 출수시는 전량을 동력에의해 배수 해야한다.

### 8-1. 화재

화재의 영향은 열, 연기, 및 가스 등 세가지가 있다. 이들은 서로 복합적으로 작용하여 영향을 미치게 된다. 지하 화재시 그림 14 와 같이 여러가지 요소가 서로 복잡한 관계를 갖고 영향을 끼친다.

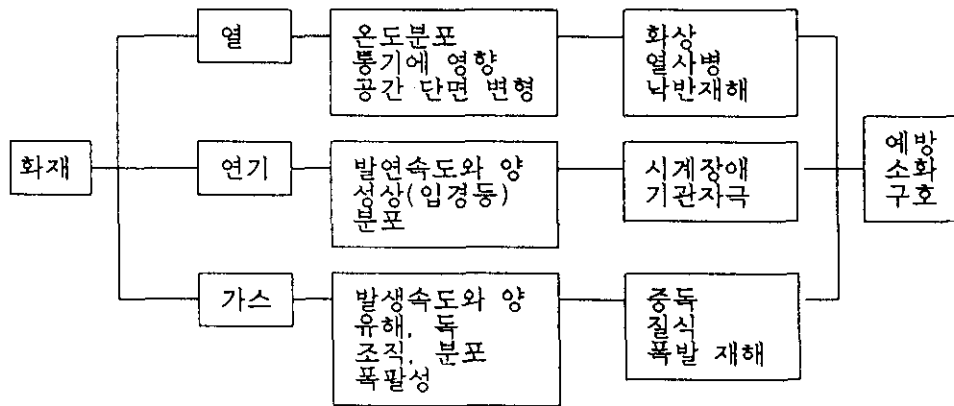


Fig. 14. Relation of Fire Elements

화재의 종류는 다음과 같이 4 가지로 분류한다.

- 분류 A : 종이, 목재, 직물, 플라스틱 등 의 연소에 의한 화재로 재를 남긴다.
- 분류 B : 유류, 페인트, 용제등 가연성 액체 및 기체의 연소에 의한 화재.
- 분류 C : 모터, 스위치, 전기기구 등 전기 설비에 의한 화재.
- 분류 D : 마그네시움, 티타니움, 알카리등 금속의 연소에 의한 화재.

화재를 일으키는 열원은 다음과같이 세가지로 분류 된다.

- 역학적 에너지의 변환 : 정지된 벨트와 회전하는 Pulley 의 마찰에 의한 열
- 전기적 에너지의 변환 : 단락 이나 과부하, 정전기의 방전등
- 화학적 반응 : 화약류, 알루미늄/마그네시움 합금의 반응(텔미트 반응)

지하공간의 화재에 있어 가장 중요한것은 예방과 조기 발견, 그리고 초기 진화 인데 예방에는 내화구조, 불연재 사용등의 방법이 있으며, 화재의 조기 발견을 위해서는 다음과 같은 검지방법들이 있다.

- 1) 온도 검지
- 2) 화염 검지
- 3) 화재 생성물 검지
  - . 가스 검지
  - . 연기 검지

조기 발견에 따른 초기 진화를 위해서는 여러가지 방법들이 있으며 이때 사용되는 소화제를 보면 다음과 같이 다섯 종류가 있다.

- 1) 약제
- 2) 물
- 3) Foam
- 4) 할로겐화 탄화수소
- 5) 이산화 탄소

소화활동시에는 화재가 크게 확대되지 않도록, 근로자들이 안전하게 대피할 수 있도록 통기 계통을 잘 조정하는 일이 매우 중요하다. 2장에서 언급한 통기 프로그램에 의한 Simulation의 활용으로 복잡한 통기망 내에서의 화재시 매연 진행경로 및 이에 따른 대피로 검색이 가능하다.

## 9. 물

지하공간에서의 물의 영향은 첫째로 굴착중의 배수로인한 원가 부담이며, 두번째는 다음과 같은 간접적인 영향이다.

- 1) 공간주벽암반의 강도를 약화시키고 지보재의 부식을 촉진.
- 2) 작업원의 옷을 적신다거나, 습도 증가로 인한 작업환경의 악화.
- 3) 폐석(또는 광석)을 적셔 조작을 어렵게 함.
- 4) 발파공의 침수로 작업곤란 및 위험성 증가.
- 5) 기계 장비류를 녹슬게함.

물을 제어하는 일반적 방법은 다음과 같다.

- 1) 지표수는 지하에 침투하지 못하도록 지표에서 배수.
- 2) 굴착전에 지표로부터 굴착된 시추공을 이용 배수.
- 3) 암반의 투수성을 감소시킴.(씨멘트, 모래, 점토등)
- 4) 출수 사고 방지를 위한 보안광주 설정, 선진천공 시행.

## 10. 결론

지하공간의 환경이라함은 공간을 굴착하는 과정의 작업환경과 구축이후의 생활 환경으로 구분할수 있으며, 앞에서 언급한 여러가지 영향 인자들이 복합적으로 작용하기 때문에 지하공간의 지리적위치, 심도, 지질학적 조건, 암반의 물리화학적 조건, 지하공간의 용도 등에 따라 적절한 환경조건을 유지하기위한 종합적인 대책을 마련하여야 한다.

지하공간 환경에서 가장 핵심은 역시 통기 기술이며 지하라는 특수 환경에서 인간의 심리적 불안을 해소 시키기 위한 분야(Human Factor)의 연구도 본격적으로 진행되어야 할것이다.