

암반 열물성과 지하공간 환경분석 연구

이창우¹⁾

A study on the relationship between the thermal properties of rock and the environment in underground spaces

Changwoo Lee

ABSTRACT This fundamental study analyzes the relationship between rock thermal properties and psychrometric properties in underground space and has a ultimate goal to develop technologies for predicting major environmental variables. The study is divided into 2 subjects; (1) development of a basic model for predicting temperature and humidity, (2) analysis of the validity of the model through application to a local underground storage space for military supplies. The basic model is built for the network of tunnel-shaped underground spaces. The model takes into account rock thermal properties and changes in moisture content in the air due to condensation/evaporation on the rock surface. Using lumped-parameter analytical method, heat flux from or to the surrounding rock is calculated and then the psychrometric properties(air quantity, pressure, temperature, humidity) are estimated through network simulation. The model can be utilized regardless of the tunnel type. The study site is a local storage space built in rock, mainly granite gneiss and quartz-porphry. It is a U-shaped tunnel, 593.5 m long and 6×6.5 m wide. Relative humidity inside has to be strictly controlled under 55% to avoid erosion of a certain types of supplies stored in 6 chambers with the capacity of 300~1,000 ton. The thermal conductivity varies between 2.734 and 2.779 W/m°C and the thermal diffusivity is in the range of 1.119 and 1.152×10^{-6} m²/s; the specific heat between 910 and 920 J/kg°C. Relative errors of the predicted values of dry/wet temperature and relative humidity are 0.8~3.0%, 0~7.5% and 0~7.0%, respectively. Apparent errors associated with the rock surface temperature seems to be partly due to the intrinsic limitations in the infrared thermometer used in this study.

1. 서 론

최근 국내에서는 유류 및 가스 저장기지, 곡물 및 군수물자 저장 시설, 상업시설, 도시 복합 공간, 산업시설, 환경시설, 교통시설 등을 위한 지하공간 건설이 본격적으로 추진되고 있으며 특히 인프라 공간으로서 지하공간 건설이 적극적으로 계획되고 있다. 이는 국토의 효율적 개발, 환경 보존, 에너지 절약 등의 면에서 더욱 그 중요성이 인식되고 있다.

지하공간 건설에는 지반 조사 평가, 지하 공간 구축, 안정 유지, 환경 제어, 안전 대책 및 운용 관리 등 관련 기술이 핵심 요소 기술이며 이중 환경 제어 기술에 해당하는 지하환경(온도, 습도) 평가 기술은 특히 암반내에 건설되는 저장공간, 생활 공간, 교통 시설 공간 등의 개발에 필수적인 요소기술로 인식되고 있으나 국

내에서는 기술개발에 대한 인식이 극히 미약한 실정이었다.

암반내 지하공간 환경은 암반과 공간과의 열전달에 좌우되며 열전달은 암반의 열물성, 공간형태, 지하수 용출여부 등에 영향을 받을 뿐만 아니라 이들 변수량이 일정할 경우에도 건설 후 시간 경과에 따라 상당기간 동안 열전달율이 변하는 비정상 상태에 놓이게 되는 복잡함이 있다. 따라서 암반 열물성을 중심으로 한 환경 영향 평가는 국내 지하공간의 효율적인 개발을 위하여 반드시 수행되어야 할 과제이다.

본 연구는 지하공간 환경기술 개발의 기초 연구로서 가장 일반적인 지하공간의 형태인 터널형 공간에서의 온·습도 예측을 위한 기초 모델을 개발하여 이의 현장 적용성 분석을 목적으로 한다.

1) 정희원, 동아대학교 자원공학과 교수

2. 외국 기존 모델

터널형 지하공간 환경예측 모델로 가장 일반적으로 알려져 있는 Starfield(1966)의 모델은 남아프리카 공화국의 심부 금광산갱도 내에서의 온도 예측을 목적으로 작성되었으며 다음의 radial heat conduction의 Goch and Patterson(1940)해를 이용하여 온·습도 예측을 하고 있다.

$$\alpha \left(\delta \frac{\theta}{\delta y^2} + \frac{1}{\gamma} \frac{\gamma \theta}{\delta y} \right) = \frac{\delta \theta}{\alpha}$$

Goch and Patterson는 암반 표면의 경계층의 단열 효과를 무시하여 무한대의 열전달계수와 무한대의 Biot 수를 가정하고 있으며 암반 표면 온도는 공기중 건구온도와 같다고 가정하고 있다. 그러나 이보다 먼저 1959년 Boldizar는 동일한 해를 이용하여 터널내 두 지점 사이의 습윤한 암반 표면으로부터의 증발 또는 응축에 의한 수분 함유량 변화를 사전에 예측 가능한 양으로 가정하므로써 온·습도 예측을 하고 있다. (1) 암반 표면의 일부 습윤 정도를 고려하여 공기중 수분 함유량 변화를 계산하며, (2) 경계층의 역할을 고려한 암반 표면 열전달 계수를 현실적으로 고려하며, (3) 시간 경과에 따른 암반 온도의 변화를 고려한 점에서 Starfield 모델이 Boldizar 모델과 현저히 다르다.

이후 발표된 모델들은 동일한 기본식에 기초하여 대부분 lumped parameter analysis 방법을 이용하여 무차원 변수로는 Fourier 수와 Biot 수를 이용하고 있다. 모델 사이의 가장 현저한 차이점은 (1) 암반 표면 온도 및 열전달계수의 결정 방법 (2) 습윤한 암반표면의 처리 방법을 들 수 있다. 최근 비교적 많은 현장 적용 사례가 발표된 McPherson(1986) 모델은 CLIMSIM이란 이름으로 알려져 있으며 비교적 복잡한 형태의 터널형 지하공간내 온·습도 예측을 주목적으로 하고 있다. 터널내 기계 설비 등과 같은 열원으로부터의 열전달도 동시에 고려하고 있다. 암반 표면 온도의 계산을 위하여 표면의 경계층 부근에서의 무차원 온도 구배 계수를 계산하는 Gibson의 알고리즘을 적용하고 있다.

3. 모델 개발

본 연구에서는 터널형 지하 공간의 형태에 관계없이 암반 및 공간내 기타 열원으로부터의 열전달을 고려한

온·습도 예측이 가능한 사용자 위주의 모델 개발을 목적으로 하였으며 환기량 예측 네트워크 분석 모델과 Starfield 모델을 기초로 하였다.

모델은 1-D 네트워크 형태의 지하공간을 터널의 물리적 특성(형태, 단면적, 지보 등), 암반 열물성, 환기관련 변수(환기 방식, 설비 등)가 다른 단위 터널구간(branch)으로 분할하여 (1) 전체 네트워크 내에서의 환기량 및 기압 분포를 시뮬레이션하고 (2) 입기점의 건·습구 온도 및 기압을 기준으로 steady-state에서의 각 branch의 열전달량을 계산하므로써 온·습도를 추정한다. 따라서 모델은 환기량 분포 시뮬레이션 모듈과 온·습도 시뮬레이션 모듈로 구분된다.

3.1 환기량 시뮬레이션 모델

본 모델은 비압축성, 정상류 흐름의 일차원적인 해석 모델로 환기량 및 기압 예측을 목적으로 한다. 네트워크로 해석한 지하 공간을 단위 branch로 세분화하여 mesh를 구성한 후 각 branch에서의 환기량 추정을 Hardy Cross 반복 수행 방법에 의하여 구하는 모델이다. 특히 지하공간의 특정 개소에서의 요구환기량이 사전 결정된 경우를 처리할 수 있는 fixed-quantity branch를 분석할 수 있는 기능을 갖추고 있으며 지하공간의 지속적인 개발에 따른 네트워크의 확장도 용이

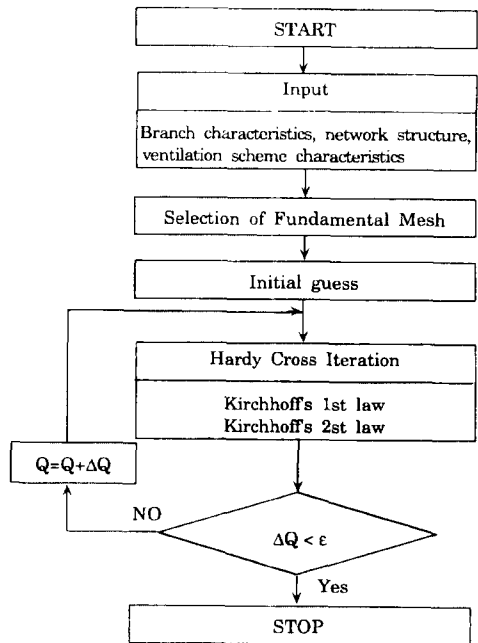


Fig. 1. Module for ventilation rate prediction.

하게 처리할 수 있다.

모델의 flowchart 는 Fig. 1과 같으며 fundamental mesh 선택 방법으로는 minimum spanning tree 탐색방법을 적용하였으며, 최대 허용오차는 0.01 m³/s를 가정하였다. Quick Basic 언어로 작성된 모델은 54개의 module과 6개의 subroutine으로 구성되어 있다.

3.2 온 · 습도 예측 모델

본 연구에서 개발한 터널형 지하공간내 온 · 습도 예측 모델은 Starfield 모델을 기초로 하였으나 직선형 단일 터널 구간만을 대상으로 할 수 있는 한계성을 극복하기 위하여 네트워크형 터널을 분석 대상으로 하는 모델을 개발하게 되었다. 모델은 (1) 수직 갱도 내에서의 습공기 상태량 분석 모듈, (2) 합류점(junction)에서의 단열 합류(adiabatic mixing)에 의한 습공기 상태량 분석 모듈, (3) booster fan에 의한 습공기 상태량 분석 모듈, (4) 작업장면으로부터의 열전달 및 습공기 상태량 분석 모듈을 위한 모듈을 주요 구성 모듈로 하고 있다.

한편 Boldizar의 방법은 두 지점 사이에서의 공기 중 수분 함유량의 차이에 대한 사전 지식이 있을 경우 유용한 도구가 되며 또한 Starfield의 방법은 사용자가 터널 구간을 일정 길이로 구분하여 환기방향으로 점진적으로 습공기 상태량 변화를 분석해 볼 수 있는 1차적 분석 도구로서의 활용성이 있다. 따라서 본 모델에서는 이들 두 방법을 네트워크형 분석 방법과 같이 option으로 사용자가 선택하도록 제시하도록 하고 있다.

(1) 수직 갱도 내에서의 습공기 상태량 분석 모듈

수갱의 상단 및 하단에서의 온도, 압력, 고도, 환기량을 알 경우 2지점 사이에서의 열전달량을 계산하는 모듈로써 다음과 같은 운동에너지 항을 생략한 정상류 에너지식을 이용하고 있다.

$$q = M_a \{ (H_2 - H_1) + g \{ (1+r_2)Z_2 - (1+r_1)Z_1 \} \} a - M_w \{ H_1 + gZ_1 \} w_c$$

- | | |
|-----------------------------|------------------------|
| q: 열전달량 (kW) | M: 환기량 (kg/s) |
| a: 건조공기 | w _c : 증발수증기 |
| H: 엔탈피 (kJ/kg) | 1,2: 두 지점표시 |
| g: 중력가속도(m/s ²) | Z: 고도 (m) |
| r: 수증기 함유량 (kg/kg) | |

(2) 단열 합류(adiabatic mixing)점에서의 습공기 상태량 분석 모듈

2개 또는 3개의 터널의 합류에 의한 습공기 상태량

변화 분석은 응축, 증발 또는 살수와 같은 공기중 수증기 함유량 변화가 없는 경우나 또는 충분한 열교환이 이루어 질 수 없는 비교적 단시간에 이루어지는 합류의 경우를 분석할 수 있는 모듈로써 다음 식에 기초하고 있다.

$$M_{ac}(r_c + r_{wc}) = \sum (M_{ai}(r_i + r_{wi}))$$

$$M_{ac}H_c = \sum (M_{ai}H_i)$$

i: 합류되는 터널

e: 합류된 터널

(3) Booster fan에 의한 습공기 상태량 분석 모듈
지하공간 환기 설비중 가장 일반적인 설비인 booster fan은 모터의 용량에 따라 배출 공기의 습공기 상태량이 달라진다. 즉, 사용 전력은 모터의 가열과 기계적 일로 환원이 되므로 관련 기본식은 다음과 같다.

$$q + w = M_a(H_2 - H_1)$$

$$q + w: \text{사용 전력량 (kW)}$$

(4) 작업장 면에서의 습공기 상태량 분석 모듈

굴착 작업이 진행되는 작업장 부근 암반 또는 기계 설비로부터의 열전달을 고려한 배기 터널에서의 습공기 상태량 변화 예측은 작업장에서의 소요 환기량을 계산하기 위한 필수 과제이다. 본 모듈에서는 작업장 부근의 입기 및 배기 중의 기압, 환기량, 건 · 습구 온도 차에 의한 관련 열전달량을 추정하여 추후 진행될 굴착 개소에서의 소요 환기량을 구하기 위한 자료의 제공을 목적으로 하며 관련식은 다음과 같다.

$$q = M_{a2}H_2 - M_{a1}H_1$$

q: 열 유입량

1,2: 작업장 면으로서 입기 및 배기점

(5) Boldizar 방법에 의한 습공기 상태량 분석 모듈
앞서 언급한 바와 같이 암반 표면 온도와 건구 온도가 같다는 가정과 습윤한 터널일 경우 단위 길이당 증발에 의한 공기중 수분 함유량 증가율이 일정하다고 가정한다. 모듈의 flow는 Fig. 2와 같다.

(6) Starfield 방법에 의한 습공기 상태량 분석 모듈

Starfield 방법은 암반 표면 온도를 유효공기 온도 및 표면 열전달계수를 기초로 하여 계산한 열전달량을 기준으로 하여 추정하며 암반의 습윤 정도를 명시하여 수

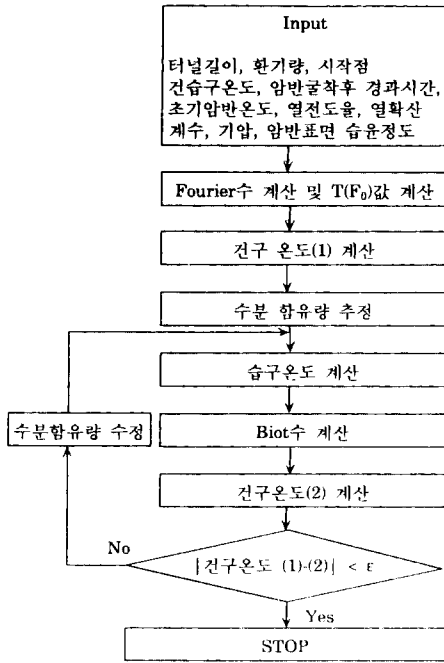


Fig. 2. Boldizar's module for temperature/humidity prediction.

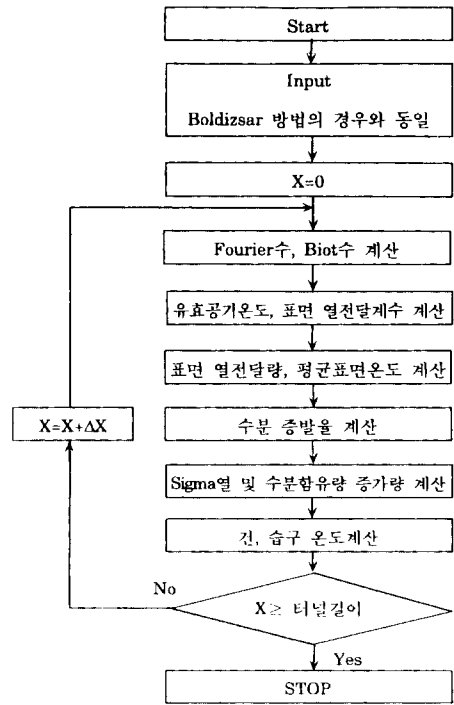


Fig. 3. Starfield's module for temperature/humidity prediction.

분 증발율을 계산한다는 점에서 Boldizar 방법과 크게 구분이 된다. 본 모듈의 flow는 Fig. 3과 같다.

(7) 시뮬레이션에 의한 습공기 상태량 분석 모듈

지하공간의 형태에 관계 없이 네트워크화한 터널형 지하공간 내 각 점에서의 환기량, 기압, 온·습도 예측 모델의 개발을 위하여 (1) 네트워크 이론을 적용한 환기량 및 기압 예측을 목적으로하는 환기 시스템 시뮬레이션 모듈을 개발하고, (2) 환기 시스템 모델의 출력에 기초하여 습공기 상태량을 예측하는 모듈을 개발하였다. 환기 시스템 시뮬레이션 모델은 앞에서 거론하였으며 다음은 모델의 습공기 상태량 예측 모듈을 단계별로 정리하였다.

STEP 1

네트워크를 단위 길이로 구분하여 각 터널 구간에서의 환기량 및 기압을 환기 시스템 시뮬레이션 모델로부터 구한다.

STEP 2

터널 내벽의 건조 부분과 습윤한 부분을 구분하여 건조한 표면으로부터는 sensible heat 유입량을, 습윤한 표면으로부터는 sensible heat와 latent heat 유입량을 계산하여 터널 내벽 습윤도에 따른 가중 평균값을 구하여 총 유입량을 계산한다. 암반이 아닌 열원인 기계 설

비 등으로부터의 열유입량도 동시에 고려하고 있다.

$$Q = q_{\text{sensible, dry}} \times A_d + q_{\text{sensible, wet}} \times A_w + q_{\text{latent, wet}} \times A_w + R$$

Q: 총 열유입량(W) q: 열유입율(W/m²)

A_d: 건조한 암반 표면적(m²) A_w: 습윤한 암반 표면적(m²)

R: 기타 열원으로부터의 열유입량(W)

STEP 3

환기량 및 증발 잠열에 기초하여 각 구간에서의 수분 함유량 증가량을 계산한다.

$$\Delta r = \frac{\Sigma q_{\text{latent}}}{L \cdot M}$$

Δr: 수분함유량 증가량 (kg/kg건조공기)

L: 증발잠열 (J/kg)

M: 환기량 (kg건조공기/s)

STEP 4

건구온도 계산을 위한 단계로 sensible heat 의 증가는 건구온도의 상승, 속도 및 위치 에너지 변화에 이용되므로 다음식에 기초하여 계산한다.

$$C_{pa}(td_2 - td_1) - q_{sensible} = \frac{1}{2}(u_1^2 - u_2^2) + (Z_1 - Z_2)g$$

C_{pa} : 건조공기 비열 (J/kg°C) td : 건구온도 (°C)

1,2: 터널 구간의 시작 및 끝점 표시

u : 환기속도 (m/s)

Z : 고도 (m) g : 중력가속도 (m/s²)

STEP 5

습구온도를 계산하기 위하여 이미 알고 있는 건구온도, 기압, 수분함유량 등의 독립적인 변수값을 이용하여 반복 수행 방법을 계산한다.

터널 단위 구간 중 지표면과 접속된 node에서 이미 알고 있는 습공기 상태량을 시작으로 하여 환기 방향과 같은 방향으로 변화되는 습공기 상태량을 추정하여 가는 방식을 따르며 순차적인 터널 구간의 선택 방법의 pseudo program은 다음과 같다.

```

Assign .FALSE. to all iA(i) for i=1,2,...NBR
; iA(i)=ith branch의 attribute
DO *** i=NBR, 1,-1 ;NBR=총 branch수
IF(no branch attached at the ending node)
THEN
iA(i) = .TRUE.
ELSE
CALL SUB1
ENDIF
*** CONTINUE
### jN = INDEX2-1
IF(jN=0) RETURN
INDEX2 = 1
DO *** j = 1,jN
j1 = ISRT2(j)
CALL SUB1
*** CONTINUE
GO TO ###
SUBROUTINE SUB1
IF(.NOT. iA(any subsequent branch of i)) THEN
ISRT2(INDEX2)=i and increment INDEX2 by 1
ENDIF
IF(iA(i)) ISRT1(INDEX1) = i and increment
INDEX1 by 1
RETURN
    
```

iA(i)는 i번째 터널구간이 표면과 연결되었거나 선택이 된 상태이면 "true"가 된다. 전체 네트워크에서의 branch별 습공기 상태량 계산 순서가 ISTR()에 역순으로 정리되어진다.

4. 현장 적용성 검토

본 연구에서 개발된 모델을 적용할 대규모 네트워크 형태의 지하 공간은 국내에서는 계획 단계에 불과하여 본 연구에서는 중부 지방 산악 지형에 건설된 군수물자 저장공간을 적용 대상으로 하였다. 터널의 형태는 Fig. 4와 같으며 진입 터널 178 m, 연결 터널 335.5 m 등 총 터널 길이 593.5 m이며 7개의 300~1000 ton용량의 저장용 chamber가 설치되어져 있다. 터널의 단면적은 일부 적하장의 확대부를 제외하고는 폭 6 m, 높이 6.5 m이다. 저장 대상 군수물자의 부식 방지가 최대 관심 대상 변수이다. 이를 위하여 저장고 내부 상대습도가 항상

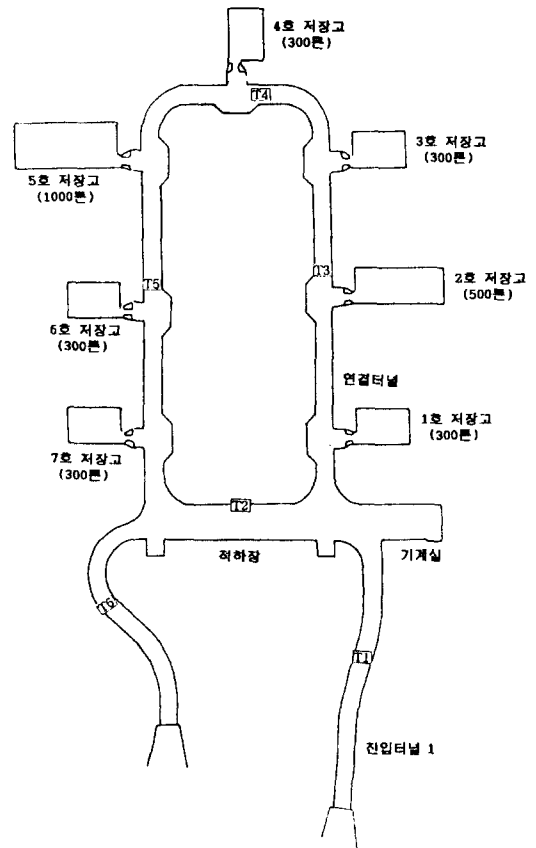


Fig. 4. Layout of the study site.

55% 이하로 유지되도록 제습하고 있으며 저장 chamber의 빈번한 개폐 시에도 습도 유지가 필요하므로 연결 터널 전체 구간에서의 공기 상태량 예측이 필수적인 과제가 되고 있다. chamber 내부는 이중 방수 천막을 시공하므로써 암반으로부터의 증발, 응축이 전혀 없다고 가정할 수 있다. 따라서 내부 공기 중의 수분 함유량을 전부 외부로부터의 입기 및 연결 터널내 습윤한 암반 표면으로부터의 유입된 량으로 추정 계산할 수 있다.

4.1 암반 열물성

입기 터널로 이용되는 진입 터널 1주위는 석영 반암이며, 진입 터널 2와 연결 터널은 화강 편마암이 주 암석이다. 본 연구에서 측정된 이들 암석의 열물성은 다음과 같으며, 두 암종 사이에 큰 차이를 보이지 않고 있다.

4.2 암반 표면온도

암반 표면온도는 모든 습공기 상태량 예측 모델에서 가정 또는 간접적인 방법(예: Gibson의 알고리즘)에 의하여 추정하고 있다. 암반 표면에 형성된 경계층내의 온도 측정은 어려운 과제이며 특히 암반 표면과 같이 요철이 있는 경우는 더욱 그러하다. 본 연구에서는 일본 San-ei사의 적외방사 온도계(Thermo tracer, model TH1101)를 이용하여 표면 온도를 측정하여 시뮬레이션 결과와의 비교를 목적으로 하였다. 온도계를 터널 바닥면 중간에 설치한 후 상부 천반부, 좌우 측벽 모두 3개소를 촬영하였다. 1996년 3월 8일 현장에서

Table 1. Thermal properties of rock at the study site

암석종류	열전도계수 (W/m°C)	비열 (J/kg°C)	열확산계수 (m ² /s)
화강편마암	2.779	910	1.152×10 ⁻⁶
석영반암	2.734	922	1.119×10 ⁻⁶

Table 2. Rock surface temperature

측정점	공기			암반 표면 온도(°C)		
	온도 (°C)	습도 (%)	기압 (KPa)	좌측 측벽	우측 측벽	천반부
T1	12.2	47.0	99.3	6.4	6.5	7.4
T2	13.5	58.0	99.3	7.7	7.6	7.6
T3	13.5	61.5	99.3	8.4	8.4	8.2
T4	13.6	70.3	99.3	8.2	8.2	8.8
T5	14.1	57.4	99.3	8.7	8.7	8.6
T6	13.9	66.0	99.3	6.3	8.3	8.5

(주) 측정 당시의 외부 온도 6.5°C, 습도 30%, 기압 99.4 KPa

Fig. 4에서와 같이 총 6개소에서 측정하였으며 측정 결과는 Table 2에 정리하였다. 가장 대표적인 암반 표면 주사 사진은 Fig. 5와 같다.

4.3 온도 및 습도

시뮬레이션 모델의 현장 적용 결과를 1996년 3월 8일 측정 자료와 비교한 결과를 Table 3에 정리하였다. 실측치중 상대 습도는 건·습구 온도 및 기압의 측정치에 기초하여 계산된 수치이다. 한편 상대오차는 실측치를 기준으로 계산하였다

4.4 결과 분석

분석 결과의 상대오차는 Table 3에서 보는데와 같이 건구온도의 경우 0.8~3.0%, 습구온도 0~7.5%, 상대습도 0~7.0%정도의 범위를 보이므로 비교적 작게 나타나고 있다. 그러나 추정치는 모델의 입력자료중 초기 암반 온도에 큰 영향을 받고 있으므로 본 연구에서는 초기 암반 온도 측정상의 문제로 현장 습공기상태량의 측정치와 시뮬레이션 결과치를 feedback을 통하여 초기 암반 온도를 역해석하는 과정을 거쳤다.

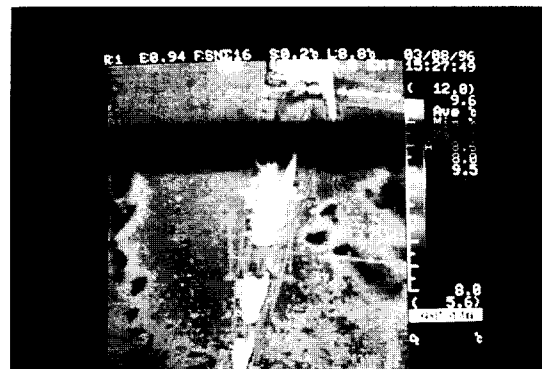


Fig. 5. A typical rock surface photo by Thermo tracer.

Table 3. Comparisons of temperature and humidity

측정점	실측치			추정치			상대오차(%)		
	건구 온도 (°C)	습구 온도 (°C)	상대 습도 (%)	건구 온도 (°C)	습구 온도 (°C)	상대 습도 (%)	건구 온도 (°C)	습구 온도 (°C)	상대 습도 (%)
외부	6.5	0.9	30.0	*	*	*	*	*	*
T1	12.2	7.0	47.0	12.3	7.0	47.0	0.82	0	0
T2	13.5	9.3	58.0	13.1	8.8	56.5	2.96	5.38	2.59
T3	13.5	9.7	61.5	13.7	9.9	63.1	1.48	2.06	2.60
T4	13.6	10.7	70.3	13.9	11.5	75.2	2.21	7.48	6.97
T5	14.1	10.6	66.0	13.7	10.0	62.8	2.84	5.66	4.85
T6	13.9	9.5	57.4	13.6	9.2	56.1	2.16	3.16	2.26

Table 2에 정리된 적외방사 온도계의 측정치를 암반 표면에 형성된 경계층내부 온도라고 결론 내리기에 상당한 제약이 따른다. 특히 암반의 emissivity의 가치에 따라 측정치에 현저한 차이가 나며 습윤한 암반 표면인 경우에는 더욱 문제가 된다. Boldizar 모델에서는 건구온도와 같은 표면온도 즉 무한대의 표면 열전달 계수를 가정하나 측정치를 기준으로할 경우 4.8~7.6°C 정도의 비교적 큰 차이를 보인다. 본 모델에서는 암반 표면 온도는 암반으로부터의 열유입량이 latent heat 및 sensible heat의 유입량과 같아지는 온도로 정의하여 반복 수행을 통하여 계산하고 있다. 따라서 표면온도와 습구 온도의 차이가 그다지 크게 나타나지 않음을 알 수 있으나 측정치의 경우 1.4~3.2°C 정도의 차이를 보인다. 따라서 습공기 상태를 예측하기 위한 주요 변수인 암반 표면 온도에 대한 지속적인 연구가 필요하다고 사료된다.

5. 결 론

본 연구에서는 터널형 지하공간내 환경예측기술 개발을 위하여 지하공간 환경(온도 및 습도)예측 모델 개발과 이의 현장 적용성 검토를 목적으로 하였다. 유한 암반표면 열전달계수를 가정한 Starfield 방법을 기초로 하여 복잡 터널 네트워크형 지하공간을 대상으로 하여 개발한 온·습도 예측 시뮬레이션 모델은 환기량 및 기압 예측 모듈과 온·습도 예측 모듈로 구성되어 있다. 온·습도 예측과 아울러 수직갱도, 합류점, booster fan, 작업장면 부근에서의 습공기상태량 예측이 가능토록 하였다.

총 터널 길이 593.5 m의 순환형 군수물자 저장공간에 모델을 적용한 결과 건구온도, 습구온도, 상대습도의 추정치의 상대오차는 각각 0.8~3.0%, 0~7.5%, 0~7.0% 범위를 보였다. 그러나 암반 표면 온도의 경우 적외방사 온도계를 사용한 측정치와 비교적 큰 차이를 보였으나 이는 온도계 자체의 제약과 표면 경계층의 특성에 기인한다고 보인다.

지하공간의 환경예측 기술개발은 환경변수에 관한 측정 기술개발과 아울러 Chamber 형태의 지하공간을

대상으로한 미시적인 분석 모델의 개발이 필요하다. 또한 모델은 오염물질 확산 모듈(열확산 포함)을 포함하는 종합 환경변수 예측 모델로 개발될 수 있도록 지속적인 관심이 필요하다고 사료된다.

사 사

본 연구는 한국과학재단 핵심전문 연구비(951-0805-006-1)지원으로 수행 되었으며 지원에 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

1. Goch, D. C. and Patterson, H. S., 1940, "Heat flow into tunnels," J. Chem., Metall. Min. Soc. S. Afr. 41, 117-28.
2. Wiles, G. G., 1959, "Wet bulb temperature gradients in horizontal airways," J. S. Afr. Inst. Min. Metall., 59.
3. Starfield, A. M., 1966, "Tables for the flow of heat into rock tunnel with different surface heat transfer coefficients," J. S. Afr. Inst. Min. Metall., 66.
4. Starfield, A. M. and Dickson, A. J., 1967, "A study of heat and moisture pick-up in mine airways," J. S. Afr. Inst. Min. Metall., 68.
5. Hall, A. E., 1975, "Computer techniques for calculating temperature increase in stopes and mine airways," J. Mine Vent. Soc. S. Afr. 28, 55-9
6. Gibson, K. L., 1977, "The computer simulation of climatic conditions in mines," Proc. 15th AP-COM Symp., Brisbane, 349-54.
7. Hall, C. J., 1981, Mine ventilation engineering, SME of AIME, New York, USA.
8. Anon., 1982, Environmental Engineering in South African mines, The Mine Vent. Soc. of S. Afr.
9. McPherson, M. J., 1986, "The analysis and simulation of heat flow into underground airways," Int. J. Min. Geo. Eng., 4, 165-196.
10. Mine Ventilation Services, 1986, CLIMSIM 2.0, Climatic Simulation Program User's Manual, 2nd edn.
11. McPherson, M. J., 1993, Subsurface ventilation and environmental engineering, Chapman & Hall.