

지하공간 환경예측 시뮬레이션 개발 연구-핵 폐기물 저장공간 중심으로

이 창 우¹⁾

A study on simulation modeling of the underground space environment- focused
on storage space for radioactive wastes

Changwoo Lee

ABSTRACT In underground spaces including nuclear waste repository, prediction of air quantity, temperature/humidity and pollutant concentration is utmost important for space construction and management during the normal state as well as for determining the measures in emergency cases such as underground fires. This study aims at developing a model for underground space environment which has capabilities to take into account the effects of autocompression for the natural ventilation head calculation, to find the optimal location and size of fans and regulators, to predict the temperature and humidity by calculating the convective heat transfer coefficient and the sensible and latent heat transfer rates, and to estimate the pollutant levels throughout the network. The temperature/humidity prediction model was applied to a military storage underground space and the relative differences of dry and wet temperatures were 1.5 ~ 2.9% and 0.6 ~ 6.1%, respectively. The convection-based pollutant transport model was applied to two different vehicle tunnels. Coefficients of turbulent diffusion due to the atmospheric turbulence were found to be 9.78 and 17.35m²/s, but measurements of smoke and CO concentrations in a tunnel with high traffic density and under operation of ventilation equipment showed relative differences of 5.88 and 6.62% compared with estimates from the convection-based model. These findings indicate convection is the governing mechanism for pollutant diffusion in most of the tunnel-type spaces.

Key words : simulation modeling, underground storage space, radioactive waste, natural ventilation, temperature

초 록 핵폐기물 저장공간과 같이 대규모 터널형 지하공간내에서의 환기량, 온/습도, 오염물질 농도 예측은 공간건설 및 운영을 위하여서 뿐만 아니라 화재등과 같은 비상시의 대처방안 강구를 위하여 반드시 필요하다. 본 연구에서는 압축성 가정하에서 autocompression의 영향을 고려한 자연환기압 계산, fan 및 regulator의 최적 위치 및 용량 결정, 암반 열물성 및 암반 표면으로부터의 증발, 응축에 의한 수분함유량 변화를 고려한 온/습도 계산, 이류확산에 기초한 오염물질 농도 분포 계산 기능을 갖춘 네트워크형 지하공간 환경예측 모델을 개발하였다. 온/습도 예측 모델을 군수물자 지하 저장공간에 적용한 결과 실측값과 상대오차는 건구온도 1.5 ~ 2.9%, 습구온도 0.6 ~ 6.1%로 나타났다. 도로터널 2개소를 대상으로한 실험결과 외부 입기만에 의한 확산계수는 9.78과 17.35m²/s로 큰 편이었으나 차량 운행과 환기설비의 작동시에는 이류확산만을 고려한 경우 CO 및 매연 농도의 상대오차가 5.88과 6.62%로 비교적 작게 나타났다. 이는 대부분의 터널형 지하공간에서의 농도 분포는 이류확산만에 의하여 추정이 가능함을 의미한다.

핵심어 : 시뮬레이션 모델링, 지하저장공간, 핵폐기물, 자연환기, 온도

1. 서 론

현재 국내에서는 중저준위 방사성 폐기물의 경우 200리터 드럼기준 약 50,000드럼, 고준위 방사성 폐기물의 경우는 약 3,000톤 정도가 임시 저장되어 있으며 2006년까지 가압 중수로형 원자로 5기, 가압수로형 원자로 18기 등 총 23기의 원자력 발전소가 건설 또는 운영될 예정에 있

어 방사성 폐기물의 처분 공간 건설이 시급한 실정이다. 국내에서 고려하고 있는 핵폐기물 처분 방식은 KBS-3 시스템으로 암반 심부에 건설한 터널형 저장공간에 처분 용기(canister)를 매립, 밀봉하는 방식이다(장근무 등,

1) 정회원, 동아대학교 자원공학과 교수
원고 접수일 : 1999년 9월 15일
원고 심사 완료일 : 1999년 11월 10일

1997). 시스템의 공간 구성은 운반 및 환기용 수갱, 운반 터널, 처분 터널로 되어 있으며 공간내에서의 환기는 (1) 방사선으로부터의 작업원 방호 및 작업환경 유지, (2) 방사선 핵종의 외부 유출억제, (3) 비상시 대처 등을 목적으로 한다. 첫 번째 목적은 내부압력을 외부 기압보다 낮게 유지함으로써 가능하며, 두 번째 환기 목적을 위하여서는 터널내 온/습도의 예측이 필수적이다(Pusch and Svemar, 1993). 반면, 세 번째의 경우에는 화재로 인한 화재연의 확산 예측이 필요하다. 본 연구에서는 정상적 상황의 환기를 목적으로 터널내 환기속도, 압력, 온/습도 및 오염물질 확산 예측 기능을 가진 시뮬레이션 모델의 개발을 목적으로 한다.

2. 기존 모델의 문제점

지금까지 터널형 지하공간 환기, 특히 광산통기를 목적으로 하여 개발 이용되고 있는 지하공간내 환기속도, 온/습도 및 압력예측을 위한 시뮬레이션 모델들은 대부분 네트워크 형태로 공간을 해석하여 압력 평형식에 따라 네트워크의 안정화를 통한 분석을 하고 있다. 그러나 이들 모델들을 KBS-3 시스템의 환경 예측 모델로 적용할 경우 다음과 같은 문제가 예상된다.

- KBS-3 시스템의 저장공간 심도가 약 500m정도이내에 따른 autocompression 효과를 고려하고 있지 않다.
- 비주기적인 자연환기력의 변화는 공간내의 압력균형에 상당한 영향을 미치게 되나 이에 대한 고려가 없거나 사용자가 상수로 입력하게 되어 있다.
- 압력 및 환기량 조절을 위하여 fan 및 regulator의 설치 필수적이나 fan과 regulator의 위치 및 최적용량의 결정 기능이 없다. 이와 같은 기능은 공간내 화재, 폭발 등과 같은 비상시에 신속한 대처방안 강구를 위하여 필수적인 사항이다.

기존의 오염물질 확산 모델에서 고려하고 있는 오염원의 형태는 고정점 오염원이거나 선형 오염원이다. 그러나 KBS-3 시스템과 같은 폐기물 처분 공간내에서의 오염원은 처분터널의 처분용기이거나 이동하는 운반장비로부터 확산되는 방사성 물질 또는 차량 배기물질이므로 확산 분석을 위하여 고정점 오염원뿐만 아니라 이동 오염원에 의한 확산 분석이 가능하여야 한다. 또한 공간을 일차원으로 해석하여 정상류 유동 이류확산만에 의한 확산모델을 적용하여 난류확산항을 무시하고 있으므로 이에 대한 검토를 위하여 난류확산 계수 분석이 필요하다.

3. 환기속도 및 압력 예측모델

기존의 국내의 모델들은 대부분 네트워크 해석법을 적용하고 있으며 Newton-Raphson법, Hardy-Cross법, linear theory법 등이 해석 기법으로 적용되었으며 second-order approximation법의 적용 가능성도 검토된 바 있다 (Kim, 1990). 본 모델은 환기속도 및 압력분포 계산 기능 뿐만 아니라 자연환기압 계산, 조절분류, fan이나 regulator의 위치 및 용량 결정 기능을 가짐으로써 정상시의 환기 뿐만아니라 비상시의 환기에 더욱 효율적으로 이용될 수 있도록 설계하였다.

3.1 자연환기압 계산

대부분의 기존 환기시뮬레이션 모델의 경우 5%의 계산 오차를 고려하여 고도차로 인한 자연환기압은 고려대상에서 제외하고 있다. 그러나 폐기물 저장공간내에서의 압력 균형의 유지는 방사성 핵종의 유출을 막기 위하여 반드시 필요하므로 운반 및 환기수갱 개방시에 작용하는 자연환기압의 분석이 요구된다.

입기 수갱에서의 p-판계식을 이용한 자연환기압(H_n)은 다음식에 의하여 결정된다.

$$H_n = -\int v dp = -\int \frac{dp}{\rho} \tag{1}$$

KBS-3 시스템은 처분용기가 저장되는 터널구간과 운반 터널의 구배가 극히 작으므로 자연환기압은 수갱내의 공기밀도 차이만에 의하여 결정되므로 윗식을 입배기 수갱에 적용하여 정리한 다음식을 이용하여 계산할 수 있다. 한편 자연환기압은 환기량의 크기에 관계없이 모든 구간에 일정하게 작용하게 된다

$$H_n = P_1 \left[\left(\frac{T_2}{T_1} \right)^{L/R\Delta t_d} - \left(\frac{T_3}{T_4} \right)^{L/R\Delta t_u} \right] \tag{2}$$

- P_1 : 입기 수갱 시작점에서의 압력
- T_1 : 입기 수갱 시작점에서의 온도
- T_2 : 입기 수갱 끝점에서의 온도
- T_3 : 배기 수갱 시작점에서의 온도
- T_4 : 배기 수갱 끝점에서의 온도
- L : 수갱 길이
- Δt_d : 입기 수갱 온도변화
- Δt_u : 배기 수갱 온도변화
- R : 기체상수

윗식에서 보는 바와 같이 수갱내의 온도분포 계산이 자

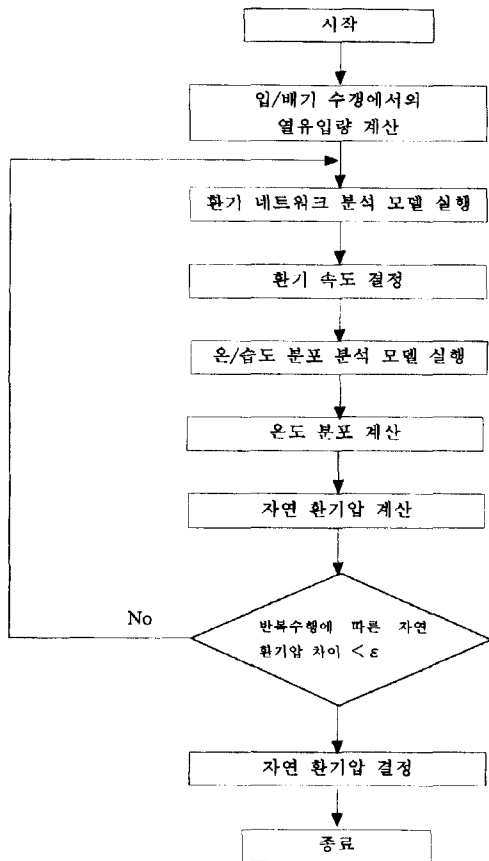


Fig. 1. Flowchart for calculation of the natural ventilation pressure

연환기압 계산에 선행되어야 하므로 수갱내에서의 열교 환과 autocompression의 영향을 고려한 수갱 상하부의 전구온도의 예측을 한 후 Fig. 1에서와 같은 단계를 거쳐 정상상태의 자연환기압의 수렴값을 구한다.

3.2 autocompression에 의한 온도상승

입기 수갱에서의 온도 및 엔트로피의 변화는 Fig. 2에서와 같이 1점에서 2점으로의 이동을 나타내며 빗금친 면적은 압반으로부터의 열전달(q_{12})과 공기 내부마찰열(F_{12})의 합을 의미한다. q_{12} 와 F_{12} 를 정리하면 다음과 같다.

$$F_{12} = \frac{U_1^2 - U_2^2}{2} + (Z_1 - Z_2)g - R(T_2 - T_1) \frac{\ln \frac{P_2}{P_1}}{\ln \frac{T_2}{T_1}} \quad (3)$$

$$q_{12} = H_2 - H_1 - \frac{U_1^2 - U_2^2}{2} - (Z_1 - Z_2)g \quad (4)$$

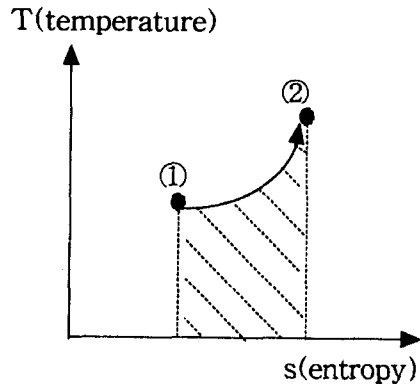


Fig. 2. T-s diagram in the intake shaft

- U_1 : 입기 수갱 시작점에서의 환기속도
- U_2 : 입기 수갱 끝점에서의 환기속도
- Z_1 : 입기 수갱 시작점 고도
- Z_2 : 입기 수갱 끝점 고도

KBS-3 시스템은 정상환기시 입기수갱 내부공기는 주변 압반과 평형상태에 놓여있고 수갱내벽이 완전 방수처리되므로 온도변화는 다음식으로 단순화할 수 있다.

$$T_2 - T_1 = \frac{(Z_1 - Z_2)}{C_p} g \quad (5)$$

C_p : 정압 비열

3.3 fan과 regulator 위치 및 용량 결정

일반적인 조절분류(controlled splitting) 기능을 가진 모델의 경우 사용자가 fan 및 regulator의 위치를 입력하여야 한다. 기존의 공간환기 분석에서와 같이 설비의 설치 위치가 제한된 경우에는 trial-and-error 방식으로 분석이 가능하나 공간건설 계획단계 또는 비상시와 같은 경우에는 최적 위치의 선택은 용이한 과제가 아니며 특히 비상시에는 신속한 결정을 필요로 한다. 본 모델에서는 설비 설치가능 구간을 대상으로 다음과 같은 선형계획법(L/P) 형태의 최적화식의 해를 구하여 fan과 regulator의 위치 및 용량을 결정한다.

$$\text{Min}Z = \sum_{j=1}^{N_b} Q_j H_j^F = \sum_{j=1}^{N_b} Q_j (H_j^L + H_j^R - H_j^N) \quad (6)$$

따라서

$$\sum_{j=1}^{N_b} b_{ij} (H_j^L + H_j^R - H_j^N - H_j^F) = 0, \quad i = 1, \dots, N_m \quad (7)$$

$$H_j^R \geq 0, H_j^L \geq 0, j=1, \dots, N_b$$

윗식은 총 N_m 개, 즉 mesh의 수에 해당하는 fan 및 regulator의 승압력이 계산되므로 설치 불가능한 구간의 경우 해당 mesh의 H_j^F 및 H_j^R 를 식에서 제외하여 처리할 수 있다.

$$-(\alpha_i Q_i^2 + \beta_i Q_i + \gamma_i) + \sum_{j=1}^{N_b} b_{ij} \left[R_j \sum_{k=1}^{N_m} b_{kj} Q_k \right] \left(\sum_{k=1}^{N_m} b_{kj} Q_k \right) - H_j^N = 0, i=N_q+1, \dots, N_q+N_f \quad (8)$$

- $\alpha_i, \beta_i, \gamma_i$: fan 특성곡선계수
- H_j^F : i 번째 구간 fan 승압
- H_j^R : i 번째 구간 regulator 승압
- H_j^L : i 번째 구간 압력손실
- H_j^N : i 번째 구간 자연환기압

4. 온/습도 예측 모델

KBS-3 시스템의 처분터널 하부에 밀봉되는 처분용기 케니스터는 밀봉 후 상당기간동안 발열을 하게된다. 또한 터널내부로의 열유입은 이외에 암반을 통한 열전달, 암반 표면으로부터의 대류, 지하수 유입에 의한 열전달 등이 있다. 저장공간의 정상적인 운영기간이 20년을 훨씬 상회하므로 저장공간내의 환경은 이들 변수에 상당한 영향을 받게됨을 알 수 있다. McPherson의 CLIMSIM(1997)로 대표되는 기존의 온/습도 예측 모델의 경우 각 분석대상 터널구간 입기점에서의 건습구 온도의 입력이 요구되므로 네트워크 형태의 공간을 대상으로 하는 분석이 어렵다 (McPherson, 1986). 따라서 수갱, 운반터널, 처분터널 등이 네트워크 형태로 구성된 시스템 공간내에서의 환경 분석은 모델에 대한 전문가적인 지식이 없는 경우, 분석이 불가능하다. 이에 반하여 본 모델은 Fig. 4에서와 같이 네트워크로 해석된 터널의 주요 node에서의 건/습구 온도 및 기압의 입력을 통하여 공기흐름방향으로 온/습도의 순차적 예측이 가능하도록 작성되어 네트워크형 터널 전구간 분석이 가능하다.

4.1 암반표면으로 부터의 열 유입량 계산

비교적 규모가 큰 네트워크형 지하공간 전체를 대상으로 수치해석을 이용한 열전달 분석은 상당히 어려운 과제

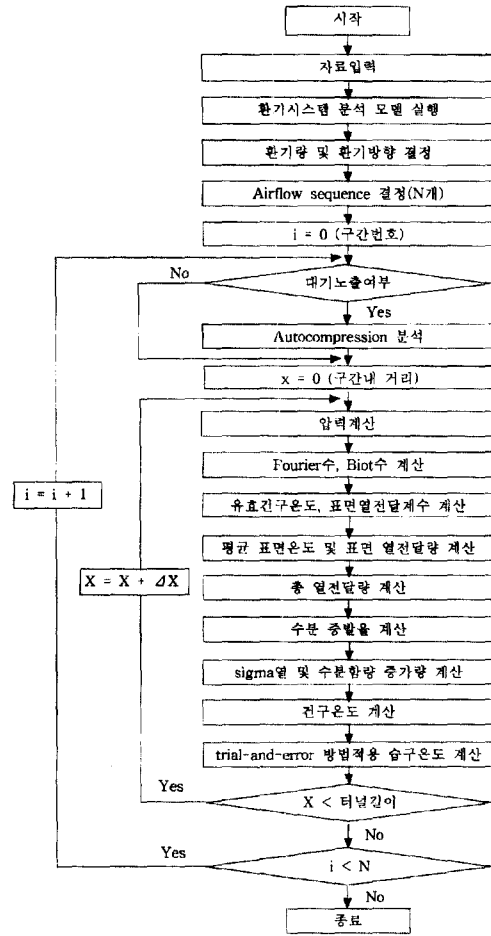


Fig. 4. Flowchart of the temperature and humidity prediction

이다. 따라서 본 연구에서는 단면이 비교적 일정한 터널 형태의 지하공간을 대상으로 해석적(analytical) 방법을 적용하여 모델링하였다.

Fourier의 열전달식에 의한 열전달량 및 암반표면의 경계층을 통한 열유입량(q) 계산식은 각각 다음과 같다.

$$q = k \left[\frac{\partial \theta}{\partial y} \right]_s \quad (9)$$

$$q = h(\theta_s - \theta_d) \quad (10)$$

$$\theta_s = \frac{G}{B}(VRT - \theta_d) + \theta_d \quad (11)$$

- k : 열전도계수
- θ_s : 암반표면 온도
- θ_d : 공간내 건구온도

- h : 표면 열전달계수
- VRT : 초기 암반 온도
- G : Gibson의 무차원 온도구배 변수
- B : 무차원 열전달 계수인 Biot 수 ($= h \cdot \gamma / k$)
- γ : 터널 반경

상기식에서 보는 바와같이 직접 측정이 어려운 암반 표면 온도가 중요 변수중 하나임을 알 수 있다. 본 모델에서는 Gibson(1977)이 제안한 알고리즘에 따라 암반 표면 온도구배를 나타내는 무차원 변수(G)를 Fourier수 및 Biot수의 함수로 계산하였으며 열유입량 (q_d)을 다음과 같이 구하였다.

$$q_d = h \frac{G}{B} (VRT - \theta_d) \tag{12}$$

$$G = f(\alpha/r_2^2, hr_g/k) \tag{13}$$

한편 암반 표면이 습윤한 경우에는 습윤한 표면을 통한 열유입량 (q_{ws})은 다음과 같이 구한다.

$$q_{ws} = h \frac{G}{B} (VRT - \theta_{eq}) \tag{14}$$

θ_{eq} : 유효건구온도

유효 건구온도는 암반표면이 건조한 경우의 열유입량과 실제 습윤한 표면으로부터의 유입량이 같아지는 건구온도를 의미한다. 따라서 습윤한 암반표면 온도, (θ_{ws})를 적용한 열유입량 식은 다음과 같다.

$$q_{ws} = h \frac{G}{B-G} (VRT - \theta_{ws}) \tag{15}$$

터널구간의 습윤도(터널표면중 습윤한 표면의 비율)를 고려하여 열유입량은 건조한 표면 및 습윤한 표면으로부터의 열유입량의 합으로 계산한다.

4.2 온도 계산

Starfield(1967), Starfield and Dickson (1967)의 유한 암반표면 열전달계수 가정에 기초한 본 모델은 구간별 열유입량 계산모델 실행 후 구간내 단위 세그먼트 끝점에서의 건·습구 온도는 Fig. 5와 같이 계산하며 환기 경로를 따라 순차적으로 이동하여 모든 구간을 대상으로 온/습도를 예측하게 된다. 잠열 발생량(q_{latent})는 다음과 같이 공기 수증기압(e), 습윤암반표면의 포화 수증기압(e_{ws}), 대기압(P), 습구온도에서의 증발 잠열(L_{ws})로 계산된다.

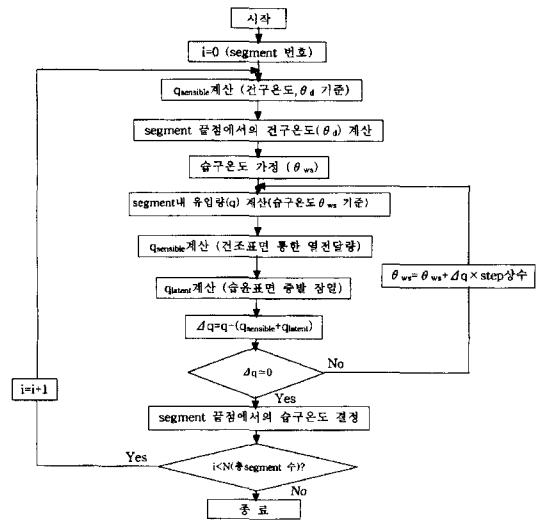


Fig. 5. Flowchart of the temperature prediction model

$$q_{latent} = 0.0007h_c L_{ws} (e_{ws} - e) / P \tag{16}$$

4.3 현장 적용

본 모델을 Fig. 6과 같은 형태의 총 길이 593.5m의 군수물자 저장공간에 적용하였다. 7개의 저장공간의 용량은 300 ~ 1000ton이며 터널 크기는 적하장의 일부 확대구간을 제외하고는 폭 6m, 높이 6.5m이다. 저장공간내의 상대습도를 55%이하로 유지하는 것이 절대적으로 요구되므

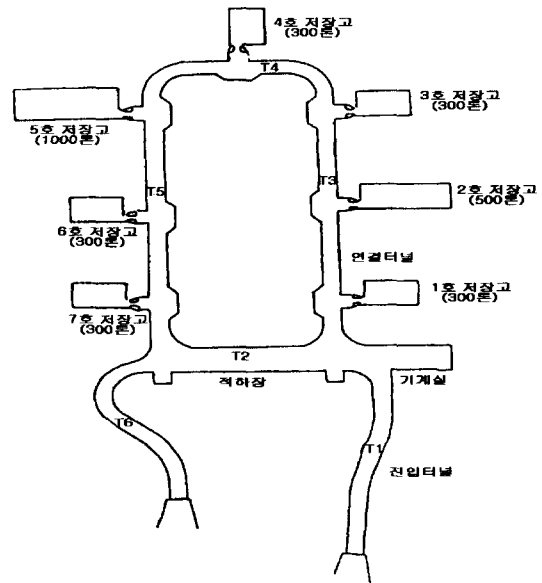


Fig. 6. Study site at military underground storage space

Table 1. Simulation results of temperature and humidity

Measuring Location	Measured data				Estimated data			Relative error(%)	
	t (dry) (°C)	t (wet) (°C)	humidity (%)	wetfraction (%)	t (dry) (°C)	t (wet) (°C)	humidity (%)	t (dry) (°C)	t (wet) (°C)
outside	28.0	24.8	77.4						
T1	17.5	16.8	93.4	20	17.2	16.9	97.1	1.7	-0.6
T2	17.3	16.5	92.5	25~30	17.0	16.1	94.2	1.7	2.4
T3	16.8	16.0	92.4	30	16.7	15.5	88.6	1.5	3.1
T4	16.8	16.1	93.3	80	16.4	15.1	87.6	2.4	6.1
T5	17.0	16.3	93.3	35	17.5	16.9	94.4	2.9	-3.7
T6	22.5	21.0	87.8	40	23.1	22.0	91.1	2.7	-4.8

로 터널구간에서의 공기 상태량 측정이 중요한 변수이다. 대상공간의 특성, 암반 열물성, 암반 표면 온도의 측정방법 및 측정 결과 등은 이창우(1996)에 자세히 발표되었다. 1998년 7월 12일 측정 결과와 모델의 적용결과를 Table 1에 정리하였다. 측정 당시의 터널외부 기압은 98.95KPa, 내부 기압은 98.96 ~ 98.98KPa이었으며 내부 풍속은 0.02 ~ 0.9m/s사이 범위를 나타냈다. 온/습도 추정치는 암반의 초기온도에 영향을 받으므로 기압 및 건/습구 온도를 반복 측정하여 역해석하므로써 초기암반 온도를 추정한 후 적용하였다.

5. 오염물질 유동 분석 모델

핵폐기물 저장공간내에서의 오염물질은 폐기물로부터 유출되는 방사성 핵종과 폐기물 및 작업원 운반차량으로 부터 배출되는 배기물질 등이 있다. 우라늄 238은 유해한 알파, 베타, 감마 입자를 방출하며 자연붕괴가 지속된다. 이와같은 미세입자들은 흡입되더라도 다시 배출되나 부유분진 등에 흡착되는 경우 호흡기내에 잔류할 확률이 높아 지므로 방사성 핵종에 따른 위해도는 증가한다.

디젤 운반차량으로부터 배출되는 매연입자는 fume이나 soot로 구성되며 일부 국가에서는 부유분진과 분리하여 샘플링하도록하고 있을 정도로 관심대상이 되고 있는 유해입자이다. 방사성 핵종의 입도는 0.01 μ m정도에서 mode를 보이며 디젤 매연 입자의 경우 입도가 0.8 μ m이하가 일반적이다.

5.1 이류확산 모델

터널내에서 발생하는 오염물질의 확산은 다음식과 같이 풍속에 의한 이류확산과 난류확산의 합으로 구성된다.

$$\frac{\partial c}{\partial t} = -u \frac{\partial c}{\partial x} + E_x \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} \quad (17)$$

터널내의 난류확산은 외부로부터 유입되는 입기, 환기설비 가동 및 차량의 이동 등과 같은 3가지의 요인에 의하여 결정된다. 이들 요인중 정량화가 어려운 외부 입기에 의한 난류확산은 대기의 안정성과 외부 풍속 및 터널내부 풍속의 영향을 받으며 크기는 0.05 ~ 5.0m²/s 정도로 알려져 있다 (Schlang and Carlin, 1979). 그러나 선형 오염원을 가정할 수 있을 정도로 차량의 통행이 빈번한 도로터널의 경우, 난류확산 계수는 0.2 ~ 1.0m²/s의 범위를 보인다. 이와같이 3가지 요인이 모두 중합된 경우 난류확산계수가 현저히 작아지는 것에 비추어 외부 입기의 영향이 비교적 큰 터널의 경우에도 실제로 환기설비의 가동이나 차량의 운행시 외부입기에 의한 난류확산성(turbulent diffusivity)이 대폭 감소함을 알 수 있다. 국내 석탄광산 대형 운반갱도 부근에서의 디젤장비의 이동이 빈번한 경우, 환기속도가 0.3 ~ 0.5m/s일때의 난류확산계수가 0.10 ~ 0.48m²/s로 아주 낮게 나타났다 (이창우, 양원철, 1994).

따라서 광산 갱도 또는 터널형 지하공간내에서의 오염물질 확산의 경우 이류확산에 비하여 현저히 작은 난류확산을 무시한 이류확산만을 고려하는 경우가 일반적이다(이창우, 1993). 본 모델에서는 오염물질의 고정점 확산과 이동 오염원으로 부터의 확산을 이류확산식에 의하여 추정할 수 있도록 Fig. 7과 같은 단계를 거친다. 환기속도에 따라 확산범위가 결정되는 이류확산 모델에서의 오염물질 확산은 이동 오염원과 환기속도의 상대속도에 따라 결정된다. 이류확산식의 유한차분법에 의한 해석과 i 번째 구간을 통과하는 오염원에 의하여 중합된 농도는 다음식에 의하여 계산하였다(Lee et al., 1996, Wan et al., 1997).

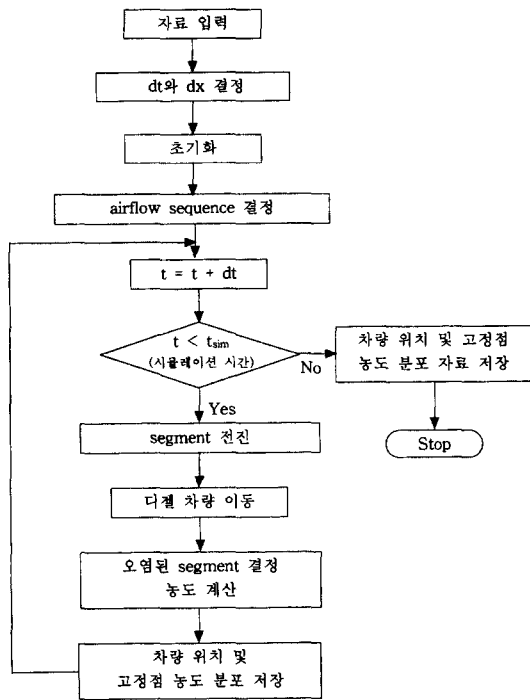


Fig. 7. Flowchart for the pollutant transport

$$C_{i+1} = \frac{C_i(U_i + U_{i+1} - q_i \cdot \Delta x_i) + 2\Delta x_i \cdot \text{Emission}(i, j, k)}{U_i + U_{i+1} + q_i \Delta x_i} \quad (18)$$

$$C_i = C_i + \frac{\text{Emission}(i, j, k)}{\Delta x_i \cdot |U_i - V_{veh}|} \quad (19)$$

- C_i : i 번째 터널 구간 농도
- q_i : i 번째 터널 구간의 추가 입기량
- Emission(i, j, k) : k 번째 mode로 i 번째 터널 구간을 운행 중인 j 번째 이동 오염원의 배출량
- Δx_i : i 번째 터널 구간의 길이

Table 2. Results of diffusion experiments at Baekyang tunnel

	Case 1	Case 2
CO ² dispersion quantity(ppm · m)	13705.2	9881.2
Dispersion duration(sec)	90	90
Dispersion distance(m)	1000	1000
Max concentration(ppm)	62.4	35.8
Mean air velocity(m/s)	2.55	2.86
Peak arrival time(sec)	392.8	349.8
Diffusion coefficient (m ² /s)	9.78	17.35

5.2 난류확산계수 실험

본 연구에서는 차량운행이 없는 개통전 도로터널내에서의 확산실험을 통하여 난류확산계수의 크기를 추정하였다. 대상터널은 부산 백양터널로 길이 2340m, 내공단면적 53.315m²이며 반횡류식 환기방식을 채택하여 크라운부에 100m 간격으로 환기구가 설치되어 있다. 1998년 6월 3일 수행한 확산실험은 CO²가스를 터널단면상의 중앙에 설치한 노즐을 통하여 90초간 1.8 ~ 5.0kg정도를 확산한 후 1000m 후방에 설치한 CO²가스 모니터를 이용하여 농도를 측정하였다. 액화가스의 충분한 기화를 위하여 가스탱크에 부착한 레귤레이터 다음에 약 2m길이의 소구경 동파이프를 달팽이관 형태로 설치하였다. 확산실험동안 터널 중앙에서 환기속도를 열선식 풍속계를 이용하여 측정하였으나 평균속도와는 괴리 때문에 농도피크의 도달시간을 이용하여 계산한 평균 환기속도를 난류확산계수 계산에 이용하였다. 수회 반복한 실험중 비교적 뚜렷한 농도 피크가 찾아진 두 경우를 대상으로 Klebanov and Martynyuk(1974)의 그래프 방법을 이용하여 계산한 난류확산계수 계산 결과는 Table 2와 같다. 계산결과 외부 입기만에 의한 터널내 난류확산계수는 9.78 및 17.35m²/s로 예상값에 비하여 비교적 높게 나타났다. 그러나 확산계수는 앞에서 거론한 바와 같이 환기설비의 가동 또는 운반

Table 3. Diffusion of smoke and CO in a vehicle tunnel

	Case A			Case 2		
Air velocity in tunnel (m/s)	6.50			4.44		
Traffic rate (veh/h)	821			713		
Operation of jet fans (On/Off)	On			Off		
	measured	predicted	relative error (%)	measured	predicted	relativeerror (%)
smoke (m-1)	0.0017	0.0016	5.88	0.0018	0.0016	11.11
CO(ppm)	2.87	3.06	6.62	5.08	3.68	27.56

장비의 이동시 현저히 감소할 것으로 예상되며 특히 외국의 경우처럼 폐기물 저장공간의 운영과 건설이 동시에 진행되는 경우는 난류 확산성은 극히 작게 나타나게 되므로 이류만을 고려한 확산 모델의 적용에 문제가 예상되지 않을 것으로 추정된다.

이와같은 추정을 확인하기 위하여 1998년 6월 18일 구마고속도로상의 길이 1350m의 달성터널을 대상으로 현장 측정 실험을 수행하였다. 구배 +1.8%, 내공단면적 60m²의 중류식 달성 하행 1터널의 출구편 100m지점에서 매연 및 CO농도를 측정하여 이류확산에 의한 추정값과 비교하였다. Table 3에서 보는 바와같이 이류확산만을 고려한 경우 매연농도의 상대오차가 5.8%, 11.11%, CO농도의 경우 6.62%, 27.56%로 나타나 환기설비를 가동한 Case A가 오차가 작음을 알 수 있다. 이와같은 결과는 교통량이 많고 환기설비가 가동된 Case A 경우의 난류확산계수가 상대적으로 작아져서 이류확산에 의한 추정이 좀더 정확함을 의미하는 결과이다.

6. 결 론

본 연구에서는 터널형 지하공간 특히 국내 핵폐기물 저장방식으로 검토되고 있는 KBS-3시스템과 같은 공간내에서의 환경예측이 가능한 모델개발을 목적으로 하였다. 특히 네트워크 형태의 복잡 지하공간내에서의 온/습도, 압력 및 오염물질 확산농도를 예측할 수 있는 모델을 개발하였으며 주요 연구 결과를 정리하면 다음과 같다.

1) 지하심도가 500m이상의 경우에 자연환기압의 고려가 필요하며 입배기 수갱의 상하부 온도의 영향을 받는 자연 환기압 계산은 온도계산과 동시에 수행하여 정상상태의 수렴값을 구하는 모델로 개발하였다.

2) 심부화에 따라 압축성 유동을 고려할 경우 autocompression에 의한 온도 상승을 고려할 수 있는 기능을 갖추었다.

3) 정상환기시뿐만 아니라 비상시에 fan 및 regulator의 최적위치 및 용량의 결정은 중요한 과제이다. 본 모델에서는 설치 가능한 위치중 에너지 비용을 최소화할 수 있는 fan 및 regulator의 위치 및 용량을 결정할 수 있는 기능을 포함하였다.

4) 온/습도의 계산은 유한 암반표면 열전달계수를 가정하는 Starfield and Dickson(1967)의 모델에 기초하며 모델을 길이 593.5m의 군수물자 저장공간에 적용한 결과 실측값과 추정값 사이의 상대오차는 건구온도 1.5 ~ 2.9%,

습구온도 0.6 ~ 6.1%로 나타났다.

5) 터널형 공간에서의 난류확산은 이류확산에 비하여 상대적으로 작으므로 환경예측 모델에서는 일반적으로 생략되고 있다. 개통전의 도로터널을 대상으로 한 실험결과 외부 입기만에 의한 확산계수는 9.78과 17.35m²/s의 크기를 보였다. 그러나 실제 운행터널에서의 매연 및 CO농도 측정결과 차량 운행과 환기설비의 작동시에는 이류확산만을 고려한 경우 상대오차가 5.88과 6.62%로 비교적 낮게 나타났다. 이와 같은 결과는 터널형 지하공간에서의 확산은 이류확산만에 의하여 비교적 정확한 추정이 가능함을 알 수 있다.

사 사

본 연구는 1996년도 한국과학재단 핵심과제연구비(KOSEF 961-0407-023-2) 및 1998학년도 동아대학교 학술조성비(공모과제)의 지원으로 수행되었으며 지원에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. 장근무, 황용수, 김선훈, 1997, KBS-3 개념에 따른 포화된 암반내 사용후 핵연료 처분을 위한 열, 수리, 역학적 특성해석, 터널과 지하공간(한국암반공학회지), 7.1, 39-50.
2. Pusch, R., and Svermar, C., 1993, Influence of rock properties on selection of design for spent nuclear fuel repository, Tunneling and Underground Space Technology, 8.3, 345-356.
3. Kim, Jeongheum, 1990, An empirical study on mine ventilation network analysis methods, Ph.D. thesis, The Pennsylvania State University, US.
4. Mine Ventilation Services, 1997, CLISIM for windows Version 1.0: Users manual and general theory.
5. McPherson, M.J., 1986, The analysis and simulation of heat flow into underground airways, Int. J. Min. Geo. Eng., 4, 165-196.
6. Gibson, K.L., 1977, The computer simulation of climatic conditions in mines, proc. of the 15th APCOM symposium, Brisbane, 349-354.
7. 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.
8. 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.
9. 이창우, 1996, 암반 열물성과 지하공간환경 분석, 터널과 지하공간(한국암반공학회지), 6.1, 335-341.
10. Schlang, R.N. and Carlin, T.J., 1979, Aerodynamics and air quality management of highway tunnels,

- Federal Highway Association, US DOT, Science Applications Inc.
11. 이창우, 양원철, 1994, 추적가스를 이용한 석탄광산 갱내 디젤배기물질 확산계수 연구, 한국자원공학회지, 31.5, 483-490.
 12. 이창우, 1993, 갱내 디젤차량 배기물질 확산 모델링 방법간 비교연구, 한국자원공학회지, 30.3, 220-227.
 13. Lee, Changwoo, Mutmansky, J.M., and Ramani, R.V., 1996, A convection-based model of diesel particulate matter occurrence in mines, J. of Applied Occupational and Environmental Hygiene, 11.7, 881-888.
 14. Wan, W., Mutmansky, J.M., Ramani, R.V., and Lee, Changwoo, 1997, Modelling strategy simulating the transport of diesel particulate matter in multiple-diesel mine sections, J. of the Mine Ventilation Society of S. Africa, 50.4, 113-120.
 15. Klebanov, F.S. and Mertynyuk, G.K., 1974, A method for experimental determination of the coefficient of longitudinal turbulent diffusion in ventilating currents of mine workings, Soviet Mining Science, 9.4, 413-416.

이 창 우



1978년 서울대학교 공과대학, 공학사

1983년 미국 Pennsylvania State University, 자원시스템공학, 공학석사

1986년 미국 Pennsylvania State University, 자원시스템공학, 공학박사

Tel : 051-200-7769

E-mail : cwlee@seunghakdonga.ac.kr

현재 동아대학교, 지구환경공학부 교수
