

지하 작업장내 3차원 기류거동 예측기술 연구

김복윤¹⁾ · 한공창¹⁾

Research on 3 Dimensional Air Flow Simulation in Underground Workings

KIM Bok-youn, HAN kong-chang

ABSTRACT According to the wide application of diesel equipments in tunneling faces, the air contamination by various toxic gases and carcinogenic diesel particulate matter becomes a serious problem these days. For taking a scientific measures to solve the problem, the way to simulate 3 dimensional flow movement of the working sites is required. In this paper, the newly developed simulation program(3D-FLOW) and the results of a simulation on a model tunneling workings using diesel equipments are introduced. In case of typical model of tunneling face, the gas concentration of human height is about one third of roof concentration and right side half of the tunnel shows better environment than left half. NO_x concentration of workings can be estimated about 0.45ppm which is much lower than permissible level(5 ppm).

1. 서 론

갱도나 터널공사 작업 막장은 대체로 지하 심부에 위치하거나, 주요 통기회로에서 격리되어 있으며, 발파 및 경석 처리 작업 등으로 각종 유해가스 및 분진 발생이 많은 곳이다. 특히 최근에는 작업의 대형화 추세에 따라 대형 디젤 장비들이 사용되고 있어 각종 유해가스 및 발암성으로 알려진 디젤입자상물질 등으로 오염되고 있다. 이러한 오염 물질을 효과적으로 회석 배제시켜 작업원들이 쾌적한 환경에서 일할 수 있게 하기 위해서는 공간내의 기류의 이동 상황을 정확히 예측하는 일이 매우 중요하다.

본 연구에서는 수치유체역학(Computerized Fluid Dynamics)을 이용한 Simulation 프로그램인 3D-FLOW의 개발과 실제 작업장 모델에 대한 해석을 통하여 작업장내 기류 거동의 경향성을 밝혀냄으로써 작업장 설계 및 안전 대책에 기본 자료를 제공 하고자 하였다.

2. 막장기류의 특성

막장에서 불어넣기식 국부통기를 할 때 공기의 거동을 非壓縮性 유체의 噴流(Jet flow)로써 취급하기로 한다. 분류는 크게 자연분류와 제한분류로 나누어질 수 있는데 굴진막장과 같이 분류 주변에 분류의 진행을 저해하는 벽면이나 반대방향의 기류가 있는 경우임으로 제한분류라 할 수 있다. 그러나 실제 굴진 작업장에서는 풍관 출구와 측벽 사이의 기류는 벽면분류와 유사한 경향을 나타내게 된다. 막장면에 가까운 분류는 충돌분류라고 하는 기류로서 급격히 그 모양이 흐트러지면서 방향이 완전히 변하여 막장 벽면을 따라 흐르게 된다. 이와 같이 돌아 나오는 기류는 막장면을 향한 기류의 아래쪽으로 통과 면적을 넓히면서 풍관 하부로 흐르게 된다. 따라서, 풍관에서 토출되는 기류의 하부 영역에는 되돌아 나오는 기류의 영향을 받는 역분류가 된다.

위에서 언급한 바와 같이 막장 부근에서는 壁面噴流, 衝突噴流, 逆噴流 등의 복합적인 氣流場이 된다. 이와 같은 기류를 수치해석으로 재현하기 위해서는 단독氣流과 벽면부근의 기류를 함께 고려할 수 있는 모델과

1) 정회원, 한국자원연구소 자원개발연구부

알고리즘이 필요하다.

3. 수치해석 기법

3.1 지배방정식

막장 공간은 거의 모든 영역에서 난류가 일어나기 때문에 數値解析을 하기 위해서는 Navier-Stokes 방정식과 함께 난류 모델을 이용할 필요가 있다. 난류 모델은 현재까지 많은 모델이 제안되어 있다.²⁾ 현재 비교적 많이 사용되어 좋은 성과를 보고있는 2방정식 모델은 유속의 散亂 성분에 기인하는 레이놀즈 응력을 2개의 변동 특성량에 대하여 미분 방정식을 풀어 구하는 것으로 Launder와 Spalding 에 의해 제안된 것이다. 산란 에너지 k와 그 산란율 ε을 이용하여 레이놀즈 응력을 평가하는 소위 k-ε 모델이 가장 많이 이용되고 있다. 본 연구에서도 k-ε 모델을 이용하였다.

기초 식은 연속식, 시간평균 Navier-Stokes 방정식, k-ε 수송 방정식 등이다. 연속 식은(1)식, 운동 및 에너지 식은 (2)식으로 표시된다.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} (\partial u) = 0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial (\rho \phi)}{\partial t} + \text{div}(\partial u \phi) = \text{div}(\Gamma \text{grad } \phi) + S \tag{2}$$

단, ρ: 밀도(kg/m³)

t: 시간(s)

Table 1. Γ, S for φ

φ	Γ	S
u	u ₁ + u _t	$-\frac{\partial P}{\partial x}$
v	u ₁ + u _t	$-\frac{\partial P}{\partial y}$
ω	u ₁ + u _t	$-\frac{\partial P}{\partial z}$
κ	$u_1 + \frac{u_t}{\sigma_k}$	GK - ρε
ε	$u_1 + \frac{u_t}{\sigma_\epsilon}$	$C_1 G_k \frac{\epsilon}{K} - C_2 \rho \frac{\epsilon}{K}$

- u: x축 방향의 속도(m/s)
- v: y축 방향의 속도(m/s)
- ω: z축 방향의 속도(m/s)
- u₁: 분자점성계수(P.s.S)
- u_t: 와점성계수(Pa.S)
- P: 압력(Pa)
- κ: 난류 에너지(m²/s²)
- ε: 에너지 산란율(m²/s³)
- GK: 산란계수(Pa/s)

u : 속도벡터(m/s)

φ에 대한 Γ와 S는 표1과 같다.

3.2 差分방정식(Discretization Equation)

연속식 이외의 지배방정식에 주어진 境界條件을 기초로한 수치해석을 하기 위해 control volume 법을 사용하여 차분방정식을 도출한다. 그림 1에서 보는 바와 같이 계산 格子点 P와 그 주위의 격자점에 대해 지배방정식을 적분하여 다음과 같은 방정식(3)을 얻을 수 있다.

$$a_p \phi_p = a_E \phi_E + a_W \phi_W + a_N \phi_N + a_S \phi_S + a_T \phi_T + a_B \phi_B + b \tag{3}$$

위에서 a_p a_E a_W ---- a_B는 각 격자점의 차분계수로 예를 들면 격자점 E에서는 다음(4)식과 같이 표시될 수 있다.

$$a_E = D_e A(|Pe|) + [-F_e, 0] \tag{4}$$

위에서 D_e는 계산 격자점 P와 그 우측의 격자점 E의 2개의 control volume의 界面에서의 확산계수 Γ_e에 의한 물리량 φ의 확산량이고, F_e는 그 계면에서의 유체의 유입량이다. Pe는 대류와 확산의 비(F_e/D_e)이다.

함수 A(|P|)는 격자점간의 대류와 확산의 균형을 나타내는 것이다.

(5)식은 계산 격자점 P의 차분계수 a_p이며, 식중의 비정상項 a_p⁰는 (6)식으로 표시된다. 여기서 ρ_p⁰는 계산 격자점 P의 차분계수 a_p이며, 식중의 非正常項 a_p⁰는 (6)식으로 표시된다. 여기서 ρ_p⁰는 계산 격자점 P에서의 1 step 전의 밀도, Δt는 1 step의 시간간격, S_p는 負의 생성 항이다. 또한 正의 생성 항을 S_e라고 한다면 (5)식의 계수 b는 (7) 식으로 표시된다.

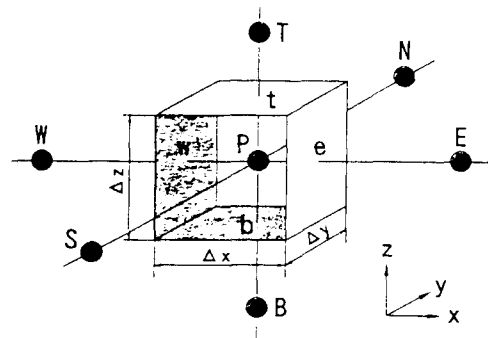


Fig. 1. Three dimensional control volume for CFD.

$$a_p = a_E + a_W + a_N + a_S + a_T + a_B + a_p^0 - S_p \Delta x \Delta y \Delta z \quad (5)$$

$$a_p^0 = \frac{\rho_p^0 \Delta x \Delta y \Delta z}{\Delta t} \quad (6)$$

$$b = S_c \Delta x \Delta y \Delta z + a_p \phi_p \quad (7)$$

3.3 경계조건

본 계산법에서는 벽면이 원활하다고 가정하여 벽면간의 거리의 대수함수로 하여 경계 층의 영향을 고려하였다. 벽면으로부터 1칸째 격자점의 亂流, 層流의 판정에는 다음 식(8)에 표시되어 있는 국부 레이놀즈수(Re_1)를 사용하고 있다. 이 값이 117이하일 때는 層流域으로 보지 않는다.

$$Re_1 = \frac{|u_p| y_p}{\nu} \quad (8)$$

단 u_p ; 벽면으로부터 1칸째 격자점에서의 벽면에 평행한 속도(m/s)

y_p ; 벽면으로부터 1칸째 격자점과 그 벽면의 간격(m)

ν ; 動粘性계수(m^2/s)

분류의 토출구에서의 난류 에너지 k 와 그 산란율 ϵ 값은 토출구 기류에서 k 생성 및 산란에 관하여 방향성이 같다고 가정하여 각각 (9) 식 및 (10) 식과 같이 정하였다.

$$k_{in} = 0.005 u_{in}^2 \quad (9)$$

$$\epsilon_{in} = \frac{C_D \times k_{in}^{3/2}}{0.03 R} \quad (10)$$

단, u_{in} ; 토출구에서의 분출 속도(m/s)

C_D ; 0.09

R ; 토출구의 반경(m)

3.4 차분 방정식의 해법

수치해석에 이용된 차분 방정식은 Patanker와 Spalding 이 放物形 방정식으로 표시되는 기류에 적용한 SIMPLER(Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equations Revised)법 알고리즘을 3차원 직교 좌표에 확장시킨 것이다. 기초 식을 離散化 함으로써 얻은 代數방정식은 반복계산법의 하나인 SOR(Successive Over-Relaxation Method)법에 의해 계산하였다. 특히 N.S. 방정식을 풀 경우 (5)식중의 주성분을 차분계수값(예: x 방향의 N.S. 방정식에서 a_x 와

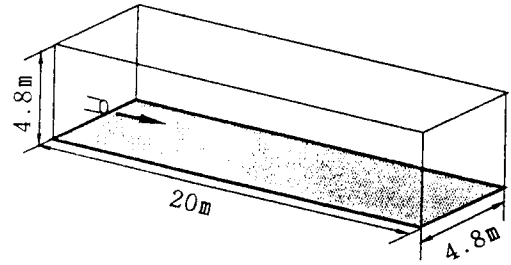


Fig. 2. Calculation model of Wall Jet.

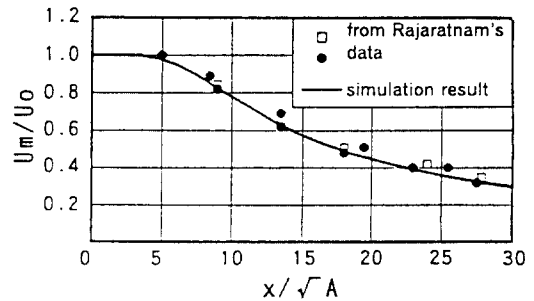


Fig. 3. Distribution of Maximum Velocity of Wall Jet.

a_w)이 최신 값이 얻어지도록 보완하여 고속계산이 되도록 하였다.

또한 각좌표의 운동 방정식에서는 난류 에너지 등을 계산하는 통상의 격자점에 대하여 1/2 메쉬 어긋나게 설정하는 staggered mesh를 사용하여 계산 과정에서 波狀速度場과 함께 波狀壓力場의 발생을 막고 있다.

이 계산에서는 각 방정식에 대한 離散化방정식 (3)식의 각 격자점 차를 계산하여 전 격자점에 대하여 (11)식을 만족시키도록 하여 수속됨을 판단한다.

$$\frac{|\sum a_{nb} \phi_{nb} + b - a_p \phi_p|}{|a_p \phi_p|} < 10^{-2} \quad (11)$$

단, a_{nb} 와 ϕ_{nb} 는 계산 격자점에 인접한 격자점의 차분계수 및 그 점의 물리량 값이다.

3.5 계산의 정확도 검정

정확도를 조사하기 위하여 Rajaratnam등에 의해 보고된바 있는 벽면 원형분류의 실험 결과와 본 연구에서 사용한 계산 값을 비교해 보았다. 계산 조건은 그림 2에 표시 된바와 같이 폭 4.8 m, 길이 20 m의 평판 상에 중앙선상 끝에 0.4 m의 풍관을 설치하여 10 m/s의

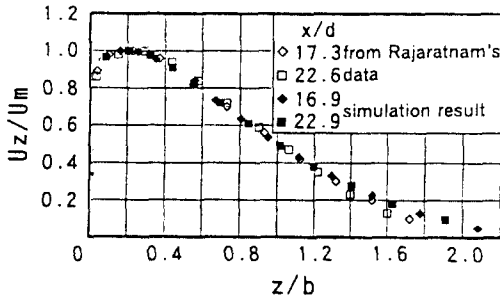


Fig. 4. Distribution of horizontal velocity on vertical plane in fully developed flow region.

공기를 토출시켰다. z방향에는 4.8 m의 공간을 두고 풍관이 설치된 쪽의 면의 경계 조건을 free end(自由端)으로하고, 기타 면은 벽면으로 하였다.

그림 3은 噴流 축상의 최대속도의 감쇄를 나타내는 것으로 종축은 풍관으로부터 거리 x만큼 떨어진 단면의 최대 속도 U_m 을 噴流의 토출 속도 U_0 로 나누어 준 무차원 속도, 횡축은 풍관 토출구로부터의 거리 x를 풍관의 단면적 A의 평방 근으로 나누어준 무차원 거리이다. 이 그림에서와 같이 실험치와 비교하면 계산치가 조금 작지만 거의 일치함을 알 수 있다.

그림 4는 풍관에 접해있는 벽면에 수직방향 속도 분포를 표시한 것이다. 종축은 분류 축을 지나는 풍관으로부터 x만큼 떨어진 단면에서의 속도 U_z 를 그 단면에서의 최대속도 U_m 으로 나누어준 무차원 속도를 표시한 것이고, 횡축은 벽면으로부터의 거리 x를 속도가 $U_m/2$ 가 되는 점의 벽면으로부터의 거리 b로 나누어준 값이다. 이러한 표시방법을 사용한 이유는 무차원으로 함으로써 발달영역의 모든 벽면 분류를 동일한 곡선 상에 나타낼수 있기 때문이다. 이 그림에서 z/b가 1.2 이상인 영역에서 계산치가 약간 크게 나타나고 있으나 벽면 부근에서는 거의 일치하여 난류 경계 층을 적용한 본 계산법은 실용상 충분한 정확도를 갖는 것으로 판단된다.

4. 실제 응용

4.1 계산 모델

3D-FLOW를 실제 응용하기 위하여 하나의 모델에 대한 해석을 실시하였다. 국내에서 디젤장비를 사용하는 일반적인 막장을 모델로 하였다. 그림 5와 같이 단면 6 m×5 m, 연장 20 m인 폐쇄막장에 디젤장비가 가

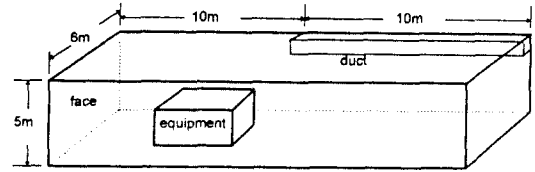


Fig. 5. Calculation model of heading.

동중이고 우측벽 상단에는 0.36 m² 단면의 풍관이 막장으로부터 10 m지점까지 설치되어 매분 65 m³/min. 공기를 불어넣고 있는 작업장이다. 갱내 공기온도는 15°C, 막장면에서 갱도의 자유 단까지는 20 m인 경우 디젤장비에서 배출되는 NOx 농도분포 및 거동을 해석 하였다. 입력자료로는 공간의 치수와 경계조건을 비롯하여 공기 및 가스의 각종 물리적 parameter 등 여러 가지 상수들이 입력되었으며 계산 시간은 Pentium PC에서 약 50시간이 소요되었다.

4.2 계산 결과

다음의 그림들은 3차원 해석 결과를 3개의 축을 X(연장), Y(폭), Z(높이)라 할 때 3가지 단면에서 기류장 및 가스농도 분포를 보여주고 있는 것이다.

1) 그림 6은 막장 5 m 후방의 Y-Z 단면으로 막장과 장비의 중간 부분 횡단면이다.

- 기류의 벡터를 보면 하부에서 우측으로부터 좌측을 경유하여 천정쪽으로 올라가는 기류 장을 볼 수 있다.
- 가스농도는 천정의 중심과 우측벽 사이에서 가장 높게 나타나며 최대 농도는 배출 농도의 0.5%이다.
- 사람의 키 높이에서 보면 좌측 1/3 구간은 0.15% 이하, 우측 2/3 구간은 0.1%이하로 우측 부분이 더 좋은 환경임을 알 수 있다.
- 국내 장비들의 평균 NOx 배출 농도가 300 ppm 임을 감안하면, 좌측 1/3 구간은 0.45 ppm, 우측 2/3 구간은 0.3 ppm으로 예측되어 허용농도인 5 ppm보다는 훨씬 낮음을 알 수 있다.

2) 그림 7은 막장으로부터 7.25 m 후방의 Y-Z 단면으로, 디젤장비를 가로지르는 횡단면이다. 장비를 가운데 두고 좌측과 우측 공간의 상태를 비교할 수 있다.

- 장비와 우측벽 사이에서는 기류가 시계 방향으로 회전되고 있으며, 장비와 좌측벽 사이에서는 막장 쪽에서 바닥을 통해 나오던 기류가 좌측 벽을 경

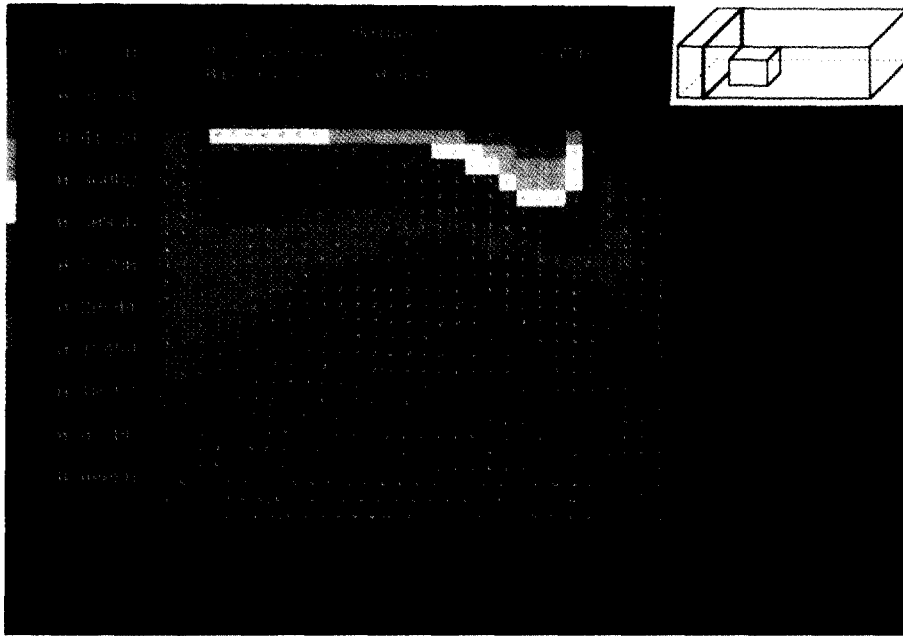


Fig. 6. Flow vector and NOx concentration of section Y-Z at 5 m from the face.

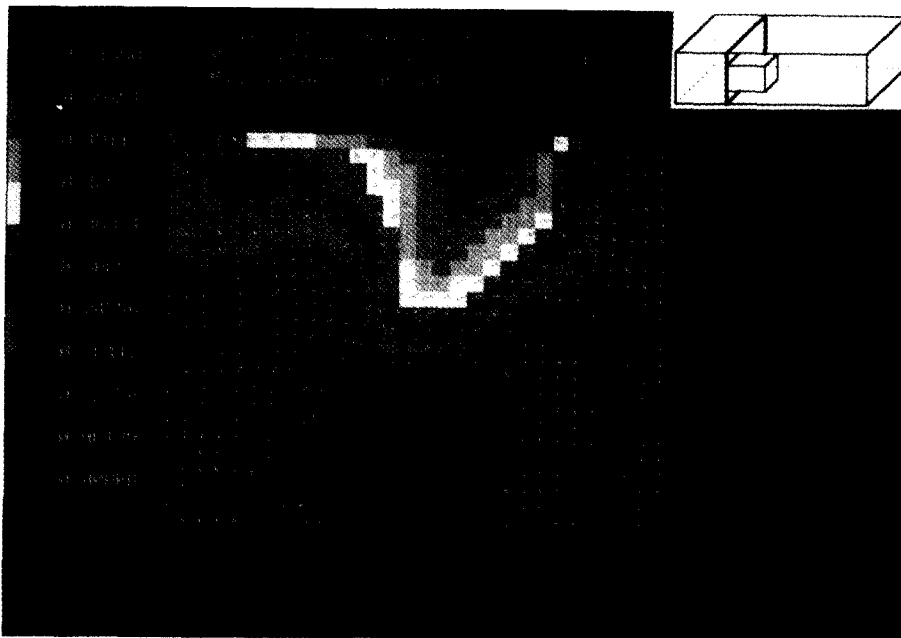


Fig. 7. Flow vectors and NOx concentration of Y-Z section at 7.25 m from the face.

- 유하여 상부로 올라 가면서 우측으로 흐르고 있다.
- 천정의 중심과 풍관사이에서 가장 높은 농도를 나타내고 있으며, 최대농도는 배출농도의 0.6% 정

- 도이다.
- 사람의 키 높에서 보면 전체적으로 0.12%(0.36 ppm) 이하, 좌측벽에 가까운 곳에서는 0.18%(0.

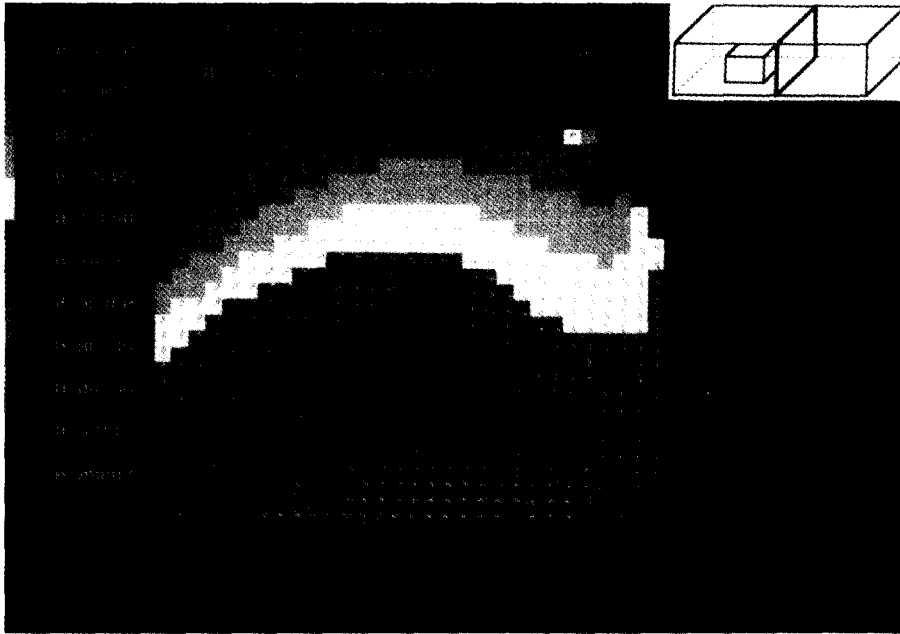


Fig. 8. Flow vectors and NOx concentration of Y-Z section at 12.25 m from face.

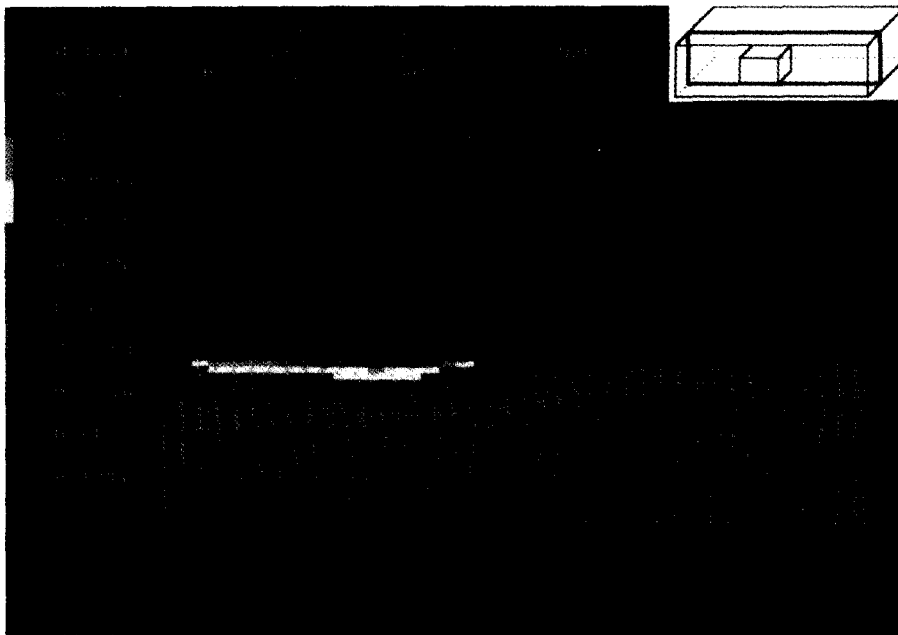


Fig. 9. Flow vectors and NOx concentration of X-Z section at 1.1 m from the left wall.

54 ppm)로 나타나고 있다.

3) 그림 8은 막장 후방 12.25 m 지점의 Y-Z 단면이다. 즉, 디젤장비 후방의 횡단면이다.

- 전체적으로 기류는 바닥 우측에서 좌측 벽을 경유하여 천정으로 상승하면서 우측으로 회전하는 기류 장을 보여준다.

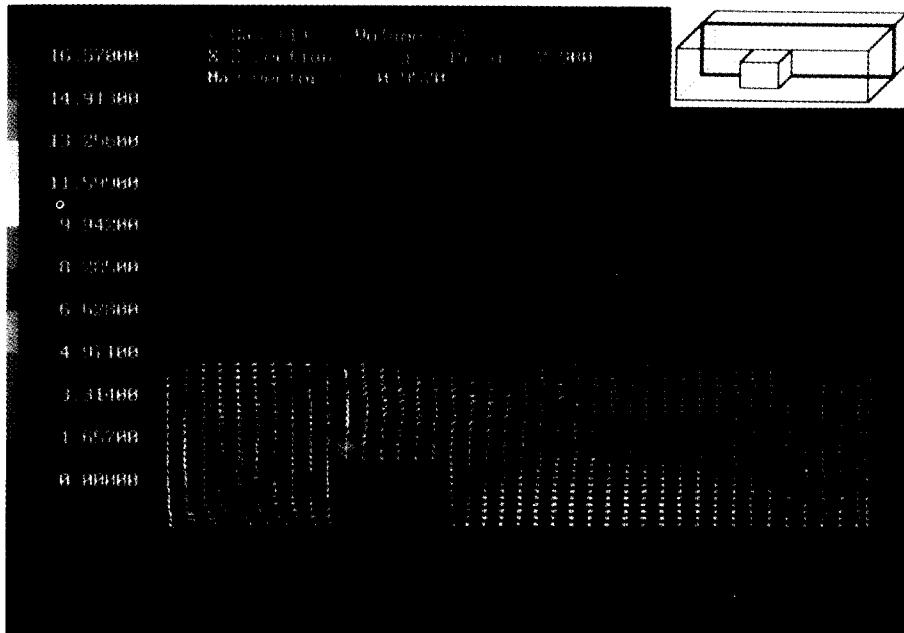


Fig. 10. Flow vectors and NOx concentration of X-Z section at 3.1 m from the left wall.

- 농도 분포는 천정부에서 0.2% 정도로 가장 높고 아래로 향하면서 점차 낮아지고 있으며, 대체적으로 층상으로 분포되고 있다.
 - 사람의 키 높에서 보면 전체적으로 0.1%(0.30 ppm) 이하이나 좌측 벽에 가까운 곳에서는 0.12%(0.36 ppm)로 약간 높게 나타나고 있다.
- 4) 그림 9는 좌측 벽에서 1.1 m 지점의 X-Z 단면으로 디젤장비와 좌측 벽 사이공간의 종단면이다.
- 그림에서 보는 바와 같이 풍관에서 나온 공기가 막장면에 부딪힌 다음 바닥으로 내려왔다가 상부로 떠오르면서 후방으로 배출되는 기류장을 나타내고 있다.
 - 가스농도는 막장면에서 10 m 이내의 천정부에서 0.3%로 가장 높게 나타나며 하부로 갈수록 점차 낮아지고 있다.
 - 사람의 키 높이에서 보면 막장 가까이에서 0.15% (0.45 ppm), 후방 10m까지는 0.13%(0.4 ppm), 그 후방은 0.1%(0.3 ppm)로 후방으로 갈수록 농도가 낮아지고 있다.
- 5) 그림 10은 갠도 중심의 X-Z 단면으로 디젤장비를 통과하는 종단면의 상황이다.
- 장비와 막장사이에서는 풍관에서 나온 기류가 벽면에 부딪힌 다음 바닥으로 내려와서 장비 쪽으로 흐르다가 다시 상부로 올라가고 있다. 즉, 시계 반대방향으로 유동하고 있음을 알 수 있다. 장비 후방에서도 같은 모양의 기류장을 보이고 있다.
 - 가스 농도는 장비의 배기관 출구에서는 매우 높으나 배기관에서 멀어질수록 빠른 속도로 희석됨을 알 수 있다.
 - 배기관 직 상부에서는 16%(48 ppm)까지 나타나지만 급격히 희석되어 사람 키 높이에서는 1.6% (4.8 ppm) 이하가 되며, 실제로 다른 화면에서 볼 수 있는 바와 같이 0.13%(0.4 ppm) 이하를 나타내고 있다.
- 6) 그림 11은 좌측 벽으로부터 5.1 m, 우측 벽으로부터 0.9 m 지점의 X-Z 단면이다. 즉, 디젤장비와 우측벽 사이공간의 종단면이다.
- 풍관 끝과 막장사이에서 와류가 생기면서 0.28%의 농도가 분포되고, 특히 풍관 끝부분에도 작은 와류가 형성되어 높은 농도를 나타내고 있음이 특기 할만하다.
 - 사람의 키높이에서는 0.09%(0.27 ppm) 이하로 종단면 중에서 가장 낮은 분포를 보이고 있음을 알 수 있다. 즉, 장비와 풍관이 설치된 우측벽사이

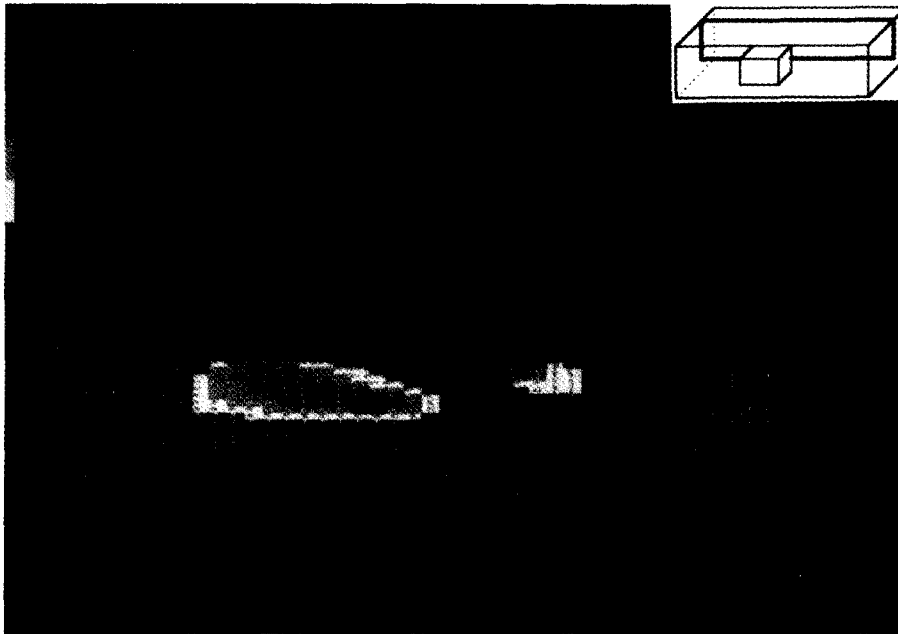


Fig. 11. Flow vectors and NOx concentration of X-Z section at 5.9 m from the left wall.

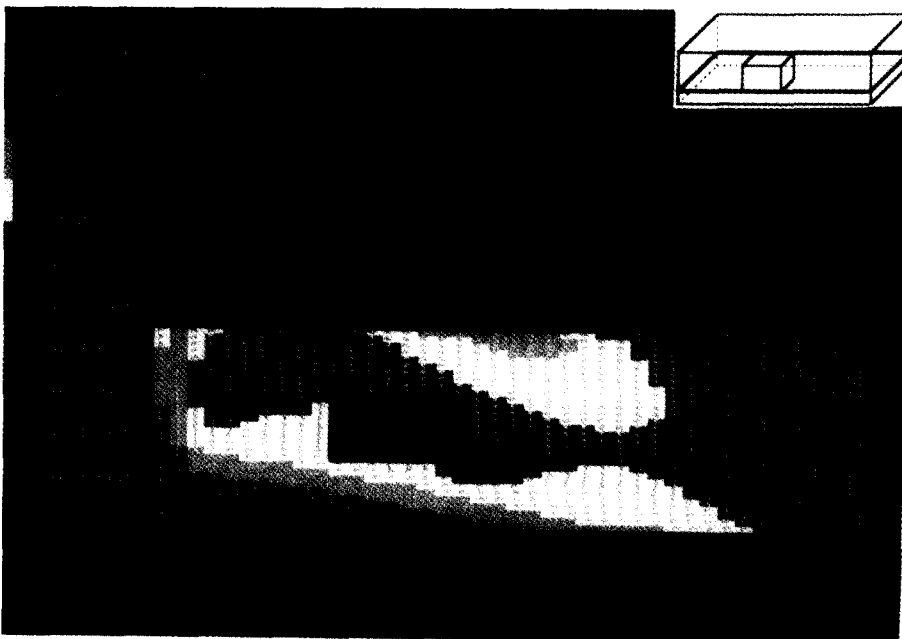


Fig. 12. Flow vectors and NOx concentration of X-Y section at 1.5 m from the bottom.

공간이 가장 좋은 환경임을 알 수 있다.

7) 그림 12는 바닥에서 1.5 m 높이의 X-Y 단면으로 사람 키 높이의 평단 면의 기류장 및 가스농도 분포 상

황이다.

- 막장에서부터 좌측 벽을 따라 장비와 좌측벽사이 공간에서 0.15%(0.45ppm)로 높은 농도를 보이고



Fig. 13. Flow vectors and NOx concentration of X-Z section at 2 m from the bottom.

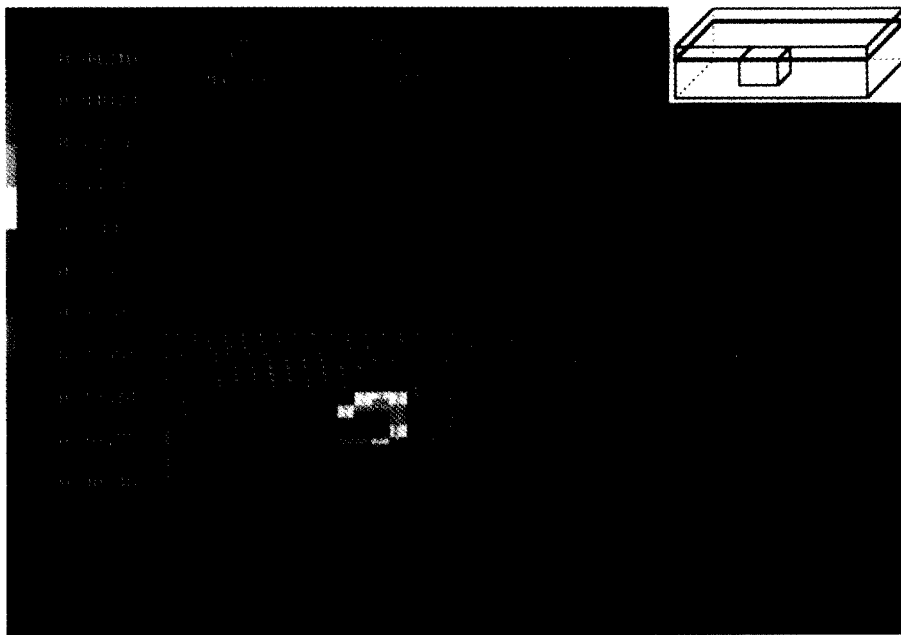


Fig. 14. Flow vectors and NOx concentration of X-Y section at 4 m from the bottom.

있다. 기류는 장비 앞쪽에서는 시계 반대방향으로 회전하는 기류장을 볼 수 있다. 막장과 장비 사이의 우측부분과 장비 후방이

0.09%(0.027ppm)로 가장 좋은 환경을 보이고 있다.

8) 그림 13은 바닥에서 2 m 높이의 X-Y단면이다.

1.5 m 높이의 단면과 유사하나 상부로 갈수록 환경이 더 나빠짐을 알 수 있다.

9) 그림 14는 바닥에서 4 m 높이의 X-Y 단면, 즉, 평 단면이다.

- 장비의 배기관 상부에서 0.9%로 높은 농도를 나타내지만 주변으로 확산되면서 0.2% 이하로 급격히 희석됨을 볼 수 있다.

5. 결 론

광산 갱내는 물론 날로 증가하는 각종 터널 굴진 작업장에는 각종 유해가스 및 분진이 발생하고 있으며 특히 최근에는 장비 대형화 추세에 따라 대형 디젤장비들이 투입되고 있어 통기에 의한 과학적인 환경제어의 중요성이 증대되고 있다. 복잡한 기류 장을 형성하는 갱내 작업장의 3차원 기류기동 해석 프로그램을 개발하고 대표적인 작업장 모델에 대한 해석을 실시한바 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 3D-FLOW의 개발로 각종 폐쇄 공간의 기류에 대한 3차원 거동해석이 가능하게 되어 작업장 설계 및 과학적 환경관리에 기여할 수 있게 되었다.

2) 대표적인 터널 작업장 모델에 대한 해석 결과는 다음과 같이 요약될 수 있다.

가. 장비에서 배출되는 가스는 배출되어 천정에 도달되기 전에 배출시 농도의 1% 이하로 급속히 희석된다.

나. 농도의 분포를 보면 천정부에서는 배기농도의 0.2-0.6%인데 비하여, 사람의 키 높이인 1.5 m 높이에서는 0.07-0.15% 로 천정농도에 비하여 1/3-1/4 수준이다.

다. 장비의 앞쪽 농도보다는 장비의 후방농도가 낮다.

라. 장비의 좌우와 앞쪽에서는 갱도중심선을 기준으로 좌측 농도보다는 풍관이 설치된 우측 절반부의 농도가 70% 수준으로 낮다.

마. 장비의 후방에서는 좌우의 농도가 전체적으로 같이 나타나고 있다.

3) 국내 디젤장비의 NOx 배출농도가 평균 약 300 ppm임을 감안하면 본 연구에서 다룬 모델일 경우 인체에 흡입되는 공기의 NOx 농도는 약 0.45 ppm임으로

허용농도인 5 ppm 보다는 훨씬 낮아 안전한 환경이 확보된다고 볼 수 있다.

감사의 말

Coding에 큰 역할을 해주신 규슈 교리쓰 대학교(九州共立大學校) 나까야마(中山伸介) 군과, 모형실험에 의한 성능검증을 도와 주신 규슈대학교(九州大學校) 이노우에(井上雅弘) 교수께 감사를 드린다.

References

1. Suhas V. Patankar, 1980, Numerical Heat Transfer and Fluid Flow, Hemisphere Publishing Corp.
2. Launder, 1974, Computing Method in Applied Mechanical Engineering, Vol. 3. p269
3. Hans M. Mathisen, 1994, Verification of Tool for Energy Calculation in Rock Caverns, Proceedings of Int. Symp. on Underground Openings for Public Use, Gjovic, Norway, p316
4. Even Thorbergesen, 1994, PC Program for Design of Public Halls in Rock Caverns Modeling and User Interface, Proceedings of Int. Symp. on Underground Openings for Public Use, Gjovic, Norway, p327
5. J.W. Oberholzer & C.F. Meyer, 1995, The Evaluation of Heading Ventilation Systems Through the Use of Computer Simulations, Proceedings of 7th US Mine Ventilation Symp.
6. D.J. Bruner, 1995, Example of the Application of Computational Fluid Dynamics Simulation to Mine and Tunnel Ventilation, Proceedings of 7th US Mine Ventilation Symp.
7. Sheila E.H. Shuttleworth, 1963, Int. J. Rock Mech. Mining Scien., Vol. 1, P79
8. N. Rajaratnam, 野村友正譯, 1981, 噴流 P290, 森北出版
9. 日本機械學會, 1989, 熱과 氣流의 컴퓨터 Analysis, 코로나社
10. 香月正司, 中山顯, 1991, 熱流動의 數值 시뮬레이션, 森北出版