

## 빌딩주변 자동차 배기가스중의 NO<sub>x</sub> 분산에 관한 수치해석

전 영 남 · 정 오 진 · 송 형 운  
조선대학교 공과대학 환경공학부  
(2004년 3월 16일 접수; 2004년 7월 2일 채택)

### Numerical Simulation on Dispersion of NO<sub>x</sub> in Vehicular Exhaust Gas around Buildings

Young Nam Chun, Oh Jin Jung and Hyoung Oon Song  
Dept. of Environmental Engineering, Chosun University, Gwangju 501-759, Korea  
(Manuscript received 16 March, 2004; accepted 2 July, 2004)

This paper demonstrates the numerical simulation of three dimensional flow pattern for vehicular exhaust dispersion in the street canyons. The wind flow around buildings in urban is computed by the SIMPLEST method. The convection-diffusion equation was used to compute the NO<sub>x</sub> concentration level near buildings. Details are given of important boundary conditions and turbulence quantities variations. The simple turbulence model was used for anisotropic viscous effect. A control-volume based finite-difference method with the upwind scheme is employed for discretization equation. The simple turbulence model applied in this study has been verified through comparison between predicted and measured data near buildings. By the predictive results, the updraft induced by the presence of high-rise buildings is important in the transport of street level pollutant out from the street canyons. Our suggestion for reducing ground level pollution is to have high-rise buildings constructed or to reduce the channelling effect of street canyons.

Key Words : Vehicular Exhaust, Dispersion, Turbulence Model, Unisotropic Viscous, NO<sub>x</sub>

#### 1. 서 론

인구의 도시집중과 산업 발전 등의 사회적 현상에 의하여 인간 활동의 범위가 확대되어 감에 따라 대기오염물질의 배출량도 증가하였으며, 대기질 관리 측면에서 그 배출형태와 대기분산 현상의 규명이 주요 관심 대상이 되어왔다. 도심지는 인구밀도가 높고 운용면적이 좁은 관계로 고층건물이 밀집되어 있고 차량으로 인한 자동차 배출오염물질이 거리 협곡에 분산되게 된다. 대부분의 이러한 문제는 빌딩의 실내 환기 시 빌딩내로 다시 오염물질이 유입해 들어감으로써 또 다른 실내오염문제를 야기시키게 된다. 자동차 배출오염 물질 중 NO<sub>x</sub>는 1차 오염물질로서도 중요하지만 광화학반응을 통하여 오

존 같은 2차 대기오염물질을 생성해 냄으로써 그 문제의 심각성이 대두되고 있는 실정이다.

대기오염물질의 분산과정을 정확히 이해하는 것은 주어진 배출규제 농도를 토대로 오염물의 분포 상태를 정확히 예측하기 위해 필요하다. 특정지역의 대기오염물질 분산을 예측하기 위해서는 일반적으로 가우시안 모델<sup>1)</sup>을 따른다. 그러나 가우시안 모델의 Pasquill-Gifford dispersion 상수는 평탄지 지표 부근 배출원에서만 타당성이 있으므로 고층빌딩이 밀집해 있는 도시에서는 사용이 불가능하다. 오염물질의 확산은 빌딩주변의 난류장에 의해 알 수 있는데 최근 난류모델링의 진보는 수치 해석적 기술과 컴퓨터 성능의 향상으로 난류장 주위의 고립된 건물에 대하여서 매우 정확히 해석할 수 있게 되었다.

본 연구에서는 빌딩주위의 오염물의 난류분산을 해석하기 위해 난류 점성항을 미분방정식으로 풀지 않고 직접 해석하는 단순난류모델(simple turbulence model)을 이용하여 측정 데이터와 비교함으로써 모델

Corresponding Author : Young Nam Chun, Dept. of Environmental Engineering, Chosun University, Gwangju 501-759, Korea  
Phone : +82-62-230-7156  
E-mail : yunchun@chosun.ac.kr

의 타당성을 검증하고, 광주광역시 금남로 주변 도심지내 유동특성과 자동차로부터 배출되는 NO<sub>x</sub>의 빌딩주위 분산특성을 파악하였다.

## 2. 연구내용 및 방법

### 2.1. 도심지형과 빌딩의 형태

본 연구는 Fig. 1(a)와 같이 광주광역시 금남로 분수대를 중심으로 빌딩이 밀집한 도심지역을 수치해석 영역으로 설정하였다. 폭, 길이, 높이는 각각 x, y, z 방향이며 그 크기는 400m, 500m, 100m이다. 계산격자는 x, y, z 방향으로 각각 38, 50, 10개이다.

Fig. 1(b)는 수치해석을 위한 3차원 공간을 평면도로 나타낸 것이다. A-A'단면은 대기질 자동측정망이 설치된 곳을 기준으로 풍하방향의 단면으로 제안된 모델을 실제 계산영역 내에서 모델을 검증하고 NO<sub>x</sub>의 분산특성을 파악하기 위한 단면이다. B-B'단면은 도심지내 오염물의 분산패턴을 규명하기 위해 금남로 중심인 분수대를 길이방향으로 관통하는 단면을 표시한 것이며, C-C'단면은 풍하방향 빌딩 후벽에 유동특성을 파악하기 위한 것이다.

### 2.2. 수학적 모델 및 방법

본 연구에서 빌딩 주위의 자동차로부터 배출되는 주요 대기오염물인 NO<sub>x</sub>의 분산에 대한 해석을 위해 코리올리의 힘(Coriolis's force)은 매우 적어 무시하고, 정상상태, 비압축성으로 하여 빌딩주위 대기를 3차원 난류유동으로 해석하였다. 일반적으로 난류 유체유동의 해석시 *k-ε* 모델을 주로 사용하지만 모델 특성상 난류 동점성계수의 계산시 등방성으로

계산되어지므로 비등방성 분산의 해석시에서는 유효 확산계수를 실험값으로 구하여 계산하는 단순모델이 타당하다<sup>2)</sup>. 이에 난류모델은 비등방성 유효계수(unisotropic effective coefficients)를 직접 사용한 단순난류모델을 적용하여 수치해석 하였다. 바람장(wind field)은 가스상 오염물의 분산에 관한 대류-확산(convection-diffusion) 방정식에 의해 결정된 후, 거리협곡(street canyon)내의 NO<sub>x</sub> 분산의 계산에 이용되었다. 자동차에서 배출된 NO<sub>x</sub>의 계산을 단순화하기 위하여 오존(O<sub>3</sub>)과의 반응에 의한 소실은 없다고 가정하였다.

#### 2.2.1. 단순난류모델

종속변수 x-, y-, z- 방향의 속도 u, v, w와 압력 P, NO<sub>x</sub>의 농도 C에 대한 지배방정식은 다음과 같다. 연속방정식(continuity equation)

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

운동량방정식(momentum equation)

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_i u_j) = -\frac{\partial P}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho K_j (\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i})) \quad (2)$$

화학종 보존방정식(species conservation equation)

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i C) = \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho h_i \frac{\partial C}{\partial x_i}) + S \quad (3)$$

여기서,  $\rho$ 는 밀도,  $u_i$ 는 평균 속도분포, S는 오염물의 생성항이며, 빌딩주위의 유체유동 및 오염물의 분산 예측을 위한 중요한 요소는 유효 에디확산

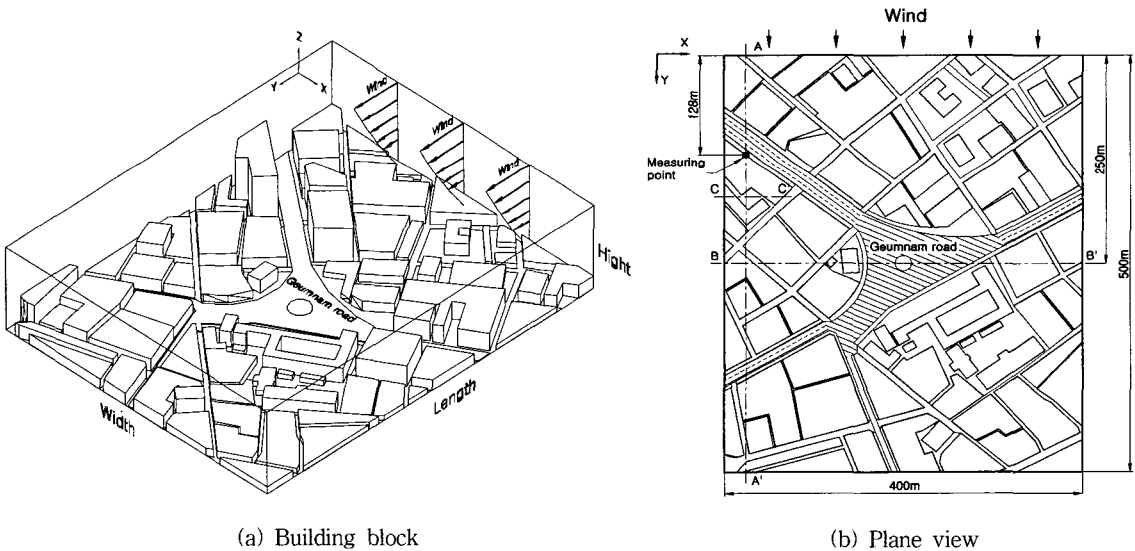


Fig. 1. Schematic of the buildings in an urban.

계수  $K_j$  및 가스상 오염물의 확산계수  $h_i$ 의 영향이다. 이를 위해 본 연구에서는  $K_j$ 와  $h_i$ 를 미분방정식에 의해 계산하지 않고, 직접 해석하는 비등방성 단순난류모델을 적용하였다. 비등방성계수는 Tropical Ocean Meteorology 연구소<sup>3)</sup>와 Monin & Obukhov<sup>4)</sup>에 의해 실험적으로 구한 값을 사용했는데  $x$ -,  $y$ -,  $z$ -방향의 유효 에디확산계수  $K_j$ 는 식(4)와 같고 가스상 오염물질의 확산계수  $h_i$ 는 식(5)와 같다.

$$\begin{aligned} K_1 &= K_2 = 6.7 \text{ m}^2/\text{s} \\ K_3 &= 2.6 \text{ m}^2/\text{s}, \quad z \geq 100 \text{ m} \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} K_3 &= 2.6 \left( \frac{z}{100} \right) \text{ m}^2/\text{s}, \quad z < 100 \text{ m} \\ h_1 &= h_2 = 6.7 \text{ m}^2/\text{s}, \quad h_3 = 2.6 \text{ m}^2/\text{s} \end{aligned} \quad (5)$$

### 2.2.2. 수치해석 방법

난류 유동에 대한 유동장 및 농도장을 해석하기 위한 일반 종속변수에 대한 지배 방정식은 대류 및 확산 속(flux)의 텐서(tensor)와 단위체적당 생성량의 합으로 식(6)과 같다.

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho V_i \phi) = \frac{\partial}{\partial x_i} [\rho \Gamma_\phi \frac{\partial \phi}{\partial x_i}] + S_\phi \quad (6)$$

일반적인 2차 편미분 지배방정식의 해를 얻기 위해서는 검사 체적에 기초한 유한차분방법(control volume based finite difference method)을 사용하였고, 대류항의 선형화를 위해 상류도식(upwind scheme)을 이용하여 차분 방정식(discretization equation)을 유도하였다. 각 검사체적에 대한 차분 방정식은 Line-by-line TDMA (TriDiagonal Matrix Algorithm)에 의해 해를 구하였으며, Navier-Stokes 운동방정식에서 나타나는 압력과 속도의 연계를 빠른 수렴을 위하여 SIMPLEST 알고리즘(Semi Implicit Method for Pressure-Linked Equations Shortened)을 사용하였다.

### 2.2.3. 경계조건

본 연구에서 적용한 입구 경계조건의 주풍향과 풍속은 광주광역시 2002년 6월의 측정값을 기준으로 하였으며 각각, 북북동(NNE)과 1.67m/sec이다. 외부에서 계산영역 내로 유입되는 입구 유속분포(inlet wind velocity profile)는 식(7)과 같고, 출구압력은 작용하지 않는다.

$$v(z) = 2.6 \left( \frac{z}{10} \right)^{0.25} \text{ (m/s)} \quad (7)$$

바닥면과 빌딩표면은 no-slip 조건의 난류 벽함수

(turbulent wall function)을 사용하였다. 경계면 상부 및 양측은 자유흐름(free stream)의 parallel slip flow로 한다. 도로는 자동차로부터 NOx가 배출되는 선오염원(line source)으로 식(3)의 생성항에 해당되며, 다음 식(8)과 같다.

$$S(\text{g}/\text{m}^3 \cdot \text{s}) = \frac{\text{automobile flowrate}(\text{car}/\text{s}) \times \text{emission factor}(\text{g}/\text{car} \cdot \text{m})}{\text{width of roads}(\text{m}) \times \text{unit height of roads}(\text{m})} \quad (8)$$

시간당 차량수(automobile flowrate)는 측정값으로 1 car/s 이며, NOx 배출계수(emission factor)는 Duprey<sup>5)</sup>에 의해 제안되어진  $2.3956 \times 10^{-3} \text{ g}/\text{car} \cdot \text{m}$ 로 하였다. NOx의 지면으로 흡수율은 5%로 하였고, 총 오염물의 농도  $C_T$ 는 식(9)와 같다.

$$C_T = C + C_a \quad (9)$$

여기서,  $C$ 는 단순난류모델의 식(3)에 의해서 구해진 값이고  $C_a$ 는 주위 배경농도(background concentration)로  $0.02 \text{ mg}/\text{m}^3$ 이다.

## 3. 결과 및 고찰

도심지 도로의 자동차로부터 배출되는 오염물질인 NOx가 복잡한 빌딩주위로 분산을 규명하기 위해 식(4), (5)와 같이 비등방성 유효계수(unisotropic effective coefficient)를 이용한 단순 난류모델로 수치해석적 연구를 수행한 결과를 다음에 나타내었다.

### 3.1. 모델의 검증

Fig. 2는 본 연구에서 적용한 단순 난류모델의 실

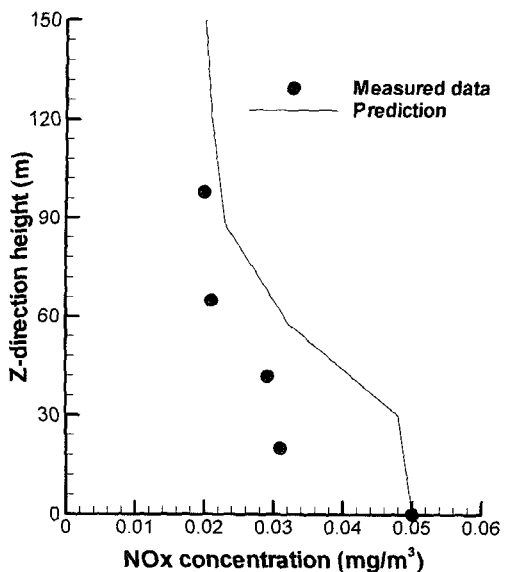


Fig. 2. Comparison between predicted and measured data near the building.

제 적용성을 검증하기 위하여 단순지형에서의 실제 측정값<sup>(6)</sup>과 비교하였다. 비등방성 유효확산계수를 적용한 단순난류모델의 경우 고도 30 m 이하에서는 NO<sub>x</sub> 농도가 다소 차이를 보이는데 이는 NO<sub>x</sub>의 농도감소가 기대되는 O<sub>3</sub>생성반응이 고려되지 않았기 때문이다. 하지만 고도 30m이상에는 대체적으로 유사한 농도 분포특성을 보이고 있다. 따라서 본 연구에서 적용한 단순 난류모델의 경우 광화학 모델의 추가가 필요하기는 하나 도심지 빌딩주변 자동차 오염물질의 분산해석에 큰 무리가 없을 것으로 판단된다.

이미 단순지형에서 적용성이 검증된 단순 난류모델을 복잡한 도심지에 적용하기 위해 Fig. 1에서 언급한 바와 같이 광주광역시 금남로 분수대를 중심으로 빌딩이 밀집한 도심지역을 수치해석 영역으로 설정하여 모델의 적용에 대한 타당성 검토와 NO<sub>x</sub>의 분산특성을 파악하였다.

Fig. 3은 도심지의 자동 측정망과 동일한 위치를 A-A' 단면으로 설정하여 측정점 고도 10 m와 동일한 위치에서 풍하방향으로 NO<sub>x</sub>의 농도를 나타낸 것이다. 측정점에서 측정값과 수치 해석값은 각각 0.0412mg/m<sup>3</sup>와 0.0415mg/m<sup>3</sup>로 매우 유사한 값을 보이고 있다. 따라서 본 연구에서 제안된 모델이 복잡한 지형에서 무리 없이 적용될 수 있다는 것을 알 수 있었다.

NO<sub>x</sub> 농도는 풍하방향으로 차도(Fig. 1의 해칭부분)가 있는 풍하길이 100m와 375m에서 큰 값을 보이는데, 이는 도로 양변에 고층건물로 거리 협곡(street canyon)이 형성된 상태에서 차도의 자동차로부터 NO<sub>x</sub>가 지속적으로 발생되기 때문이다. 특히, 차량 운행이 많은 풍하길이 100m에서 NO<sub>x</sub>가 0.068 mg/m<sup>3</sup>로 최대값을 보인다. NO<sub>x</sub>의 농도가 0인 값을 갖는 위치(136m~155m)는 고층건물을 관통하는 지점이다.

Fig. 4는 단면 A-A'에서 속도벡터, NO<sub>x</sub> 농도분포, 압력분포를 나타낸 것이다.

Fig. 4(a)의 속도벡터를 보면 고층빌딩 B2 후단부에서는 재순환영역(recirculation zone)이 존재하며, 고층빌딩 후단면(단면 C-C'참고)에 반류(counter flow)가 형성되며 웨이크 효과(wake effect)가 발생되어 풍하방향으로 흐른다. 웨이크 효과의 발생은 Fig. 4(c)의 압력분포에서 볼 수 있듯이 고층빌딩 후류 쪽에 대기압보다 낮은 부압이 형성되기 때문이다. Fig. 4(b)는 NO<sub>x</sub>의 농도분포를 나타낸 것으로 Fig. 3에서 언급되었듯이 차도가 있는 건물 B1과 B2사이, 건물 B3과 B4사이의 거리협곡 내에 NO<sub>x</sub> 농도가 큰 값을 가지는 것을 볼 수 있다.

이 영역의 경우 Fig. 4(a)에서 상세히 보기는 어

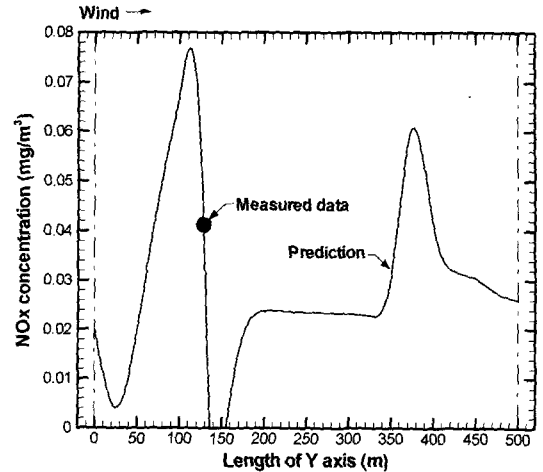


Fig. 3. NO<sub>x</sub> concentration profile at 10m height of section A-A'.

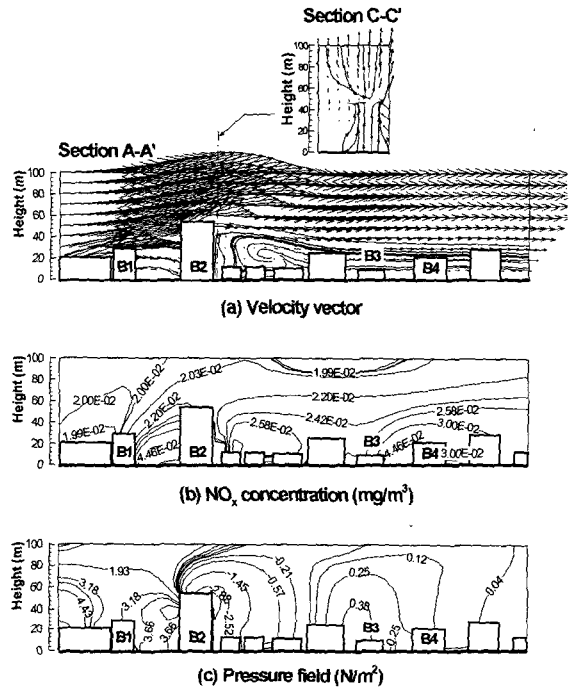


Fig. 4. Velocity vector, NO<sub>x</sub> concentration and pressure field at section A-A'.

렵지만 국부적으로 데드존(dead zone)이 형성되는 영역이라고 할 수 있다. 특히, 풍하방향 선단부 근처에 있는 건물 B1과 B2사이 협곡은 Fig. 4(c)의 압력 분포에서 볼 수 있듯이 압력이 높은 상태로 NO<sub>x</sub>가 정체되어 있다고 할 수 있다. 또한, 고층건물 후단부의 경우 재순환영역이 형성되어 NO<sub>x</sub> 농도가 큰 값을 갖지만 웨이크 효과로 인해 NO<sub>x</sub>가 고층건물 후벽기류를 타고 풍하방향으로 분산된다.

Fig. 5는 도심지내 오염물의 분산패턴을 규명하기 위해 금남로 중심인 분수대를 폭방향으로 관통하는 단면 B-B'에서의 속도벡터와 NOx 농도분포를 나타낸 것이다.

Fig. 5(a)에 속도벡터를 보면 도청 분수대 부근의 지면부근에서는 거리협곡을 따라 유동이 도청 분수대로 집중되지만, 일정 고도이상에서는 공기유동이 상류로 이동되고 있다. Fig. 5(b)는 NOx의 농도분포를 나타낸 것으로 유동이 집중되는 도청 분수대에서는 0.0941 mg/m<sup>3</sup>로 고농도를 보이지만, 고도가 높아질수록 바람에 의한 영향이 커져 NOx가 넓게 분산된다.

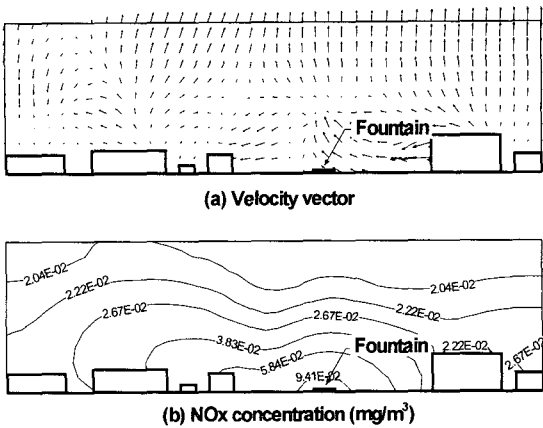


Fig. 5. Velocity vector and NOx concentration at section B-B'.

Fig. 6은 지면부근에서의 속도벡터와 NOx의 농도 분포를 나타낸 것이다.

Fig. 6(a)의 속도벡터를 보면 도심지로 유입되는 바람은 빌딩과 거리협곡으로 유입되는 흐름의 경우 채널링 효과(channelling effect)가 발생하여 유속이 빨라지며, 거리협곡을 통하여 저항이 적은 도청 분수대 부근으로 모여진 후 풍하방향 주도로로 빠져 나간다. NOx의 농도분포는 Fig. 6(b)에서 볼 수 있듯이 도로에서 발생한 NOx가 도청 분수대로 집중되어 NOx가 최대농도인 0.111mg/m<sup>3</sup>을 보인 후, 이류(advection)에 의해 풍하방향으로 일부 분산된다.

#### 4. 결 론

복잡한 빌딩 주변의 NOx의 분산을 파악하기 위해 단순 난류모델을 제안하고, 모델의 타당성을 입증하기 위해 실측치와 비교하여 복잡한 지형에서 사용 가능성을 검증하였다.

본 모델을 통해 수치해석한 결과 고층빌딩 후단면 상부에 압력이 -2.88 N/m<sup>2</sup>의 부압상태가 되어 웨이크 효과가 발생하여, NOx가 이 수직기류를 타고 풍하방향으로 분산된다. 차도에서 발생한 NOx는 거리협곡에 의해 도심지 중심인 도청 분수대로 모여 지면부근의 NOx가 최대 농도 0.111mg/m<sup>3</sup>을 보인다.

결과적으로 지면에 오염물을 저감시키기 위해서는 높은 빌딩들에 의해 기류의 상승을 향상시킴으로서 거리 협곡으로부터 오염물의 분산을 유도하는 것이 중요하지만, 유동이 국부적으로 특정위치에 모

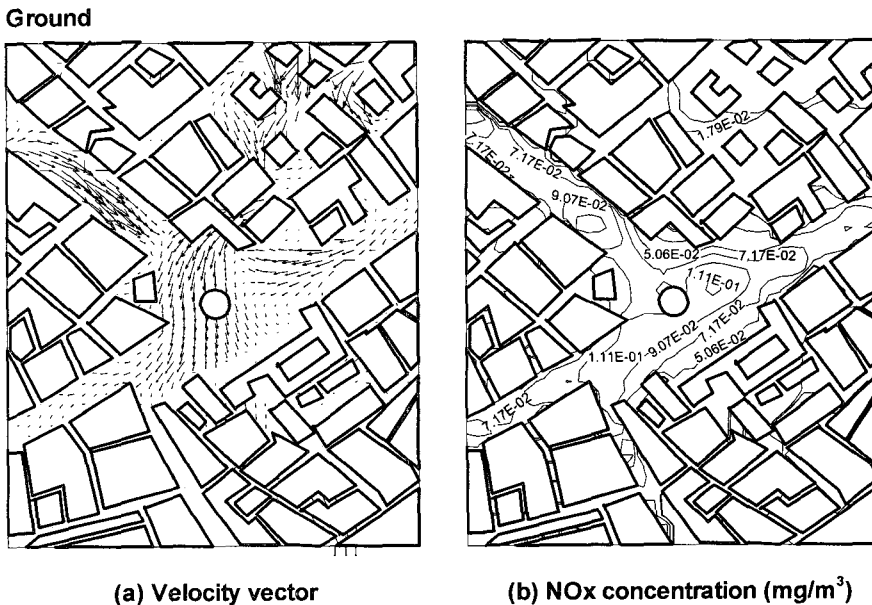


Fig. 6. Velocity vector and NOx concentration on the ground.

일 경우 이류에 의해 오염물이 누적될 수 있다.

### 참 고 문 헌

- 1) Kot, S. C., 1989, Numerical Modeling of Contaminant Dispersion around Buildings, Building and Environment, 24, 33-37.
- 2) Chun, Y. N, T. I. Ohm and S. H. Cho, 1997, Numerical Simulation of Vehicular Exhaust Dispersion around the Building Block, J. of KSEE, 19, 601-610.
- 3) Institute of Tropical Ocean Meteorology, 1986, The measurement of atmospheric diffusion parameters and analysis of diffusion characteristics of Shezhen special economic zone, Report of Institute of Tropical Ocean Meteorology, Guandong Province(in Chinese).
- 4) Monin, A. S. and A. M. Obukhov, 1954, Basic turbulent mixing laws in the atmospheric surface layer, Trudy Geofiz, Inst. An S.S.S.R., 24, 163-187.
- 5) Duprey, R. L., 1968, Compilation of air pollutant emission factors, PHS Publication 999-AP-42, Curham, NC, National Center for Air Pollution Control.
- 6) Qin, Y. and S. C. Kot, 1990, Validation of Computer Modelling of Vehicular Exhaust Dispersion Near a Tower Block, Building and Environment, 25, 125-131.