도심지 빌딩주위 자동차 오염물질 분산에 대한 수치해석

조 선 희*, 전 영 남
조선대학교 공과대학 환경공학부

1. 서 론

도심지는 인구밀도가 높고 운용면적이 좁은 관계로 고층건물이 밀집되어 있고 차량으로 인한 자동차 배출오염물질이 거리峽谷(street canyon)에 분산되게 된다. 이러한 문제는 빌딩의 실내환기시 빌딩내로 오염물질이 유입해 들어감으로써 또 다른 실내오염문제를 야기 시키게 된다.

대기오염 물질의 순환과정에서 분산과정을 정확히 이해하는 것은 주어진 배출규제 농도를 토대로 오염물의 분포상태를 정확히 예측하기위해 필요하다. 오염물질의 확산은 빌딩주변의 난류장에 의해 알수있는데, 최근 난류모델링의 진보는 수치해석적 기술과 computer power에 의해 난류장 주위의 고립된 건물에 대하여서는 거의 정확하게 해석할 수 있게 되었다.

본 연구에서는 빌딩주위의 난류분산을 해석하기위해 난류점성항을 미분방정식으로 풀지않고 직접 해석하는 소위 zero equation model인 단순난류모델(simple turbulence model)과 two equation model인 k-ε모델에 대하여 building block내에 자동차로 부터 배출되는 NO_x의 분산농도를 해석하는 것을 목적으로 하였다.

2. 수학적 모델 및 방법

수치해석은 검사체적에 기초한 유한 차분 방법을 사용하였으며 운동량 방정식에 대한 압력과 속도의 연계는 SIMPLEST 알고리즘을 사용하였다.

지배방정식

난류유동에 대한 유동장 및 농도장을 해석하기 위한 일반 종속변수에 대한 지배 방정식은 대류 및 확산 束(flux)의 tensor와 단위체적당 생성항의 합으로 아래와 같다.

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

단순난류모델

종속변수 x-, y-, z-방향의 속도 u, v, w와 NO_x의 농도 C 및 압력 P에 대한 지배미분방정식은 식(1)-식(3)과 같다.

- 연속방정식

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \tag{1}$$

- 운동방정식

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

- 화학종 보존방정식

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

유효에디확산계수 K_j 및 가스상 오염물의 확산계수 h_i의 영향을 위해 K_j와 h_i를 미분방정식에 의해 계산하지 않고 직접 해석하는 zero equation model을 사용하여 비등방성 단순난류모델을 적용하였다. x-, y-, z-방향의 유효에디확산계수 K_j는 식(4)와 같고 가스상오염물질의 확산계수 h_i는 식(5)과 같다.

$$K_1 = K_3 = 6.7 \text{ m}^2/\text{s},$$
$$K_2 = 2.6 \text{ m}^2/\text{s}, \text{ y}>100 \text{ m} \tag{4}$$
$$K_2 = 2.6 \left(\frac{y}{100}\right) \text{m}^2/\text{s}, \text{ y} < 100 \text{ m}$$

$$h_1 = h_3 = 6.7 \text{ m}^2/\text{s}, \; h_2 = 2.6 \text{ m}^2/\text{s} \tag{5}$$

k-ε 난류모델

본 연구에서는 two equation model중 k-ε 난류모델의 적용을 위해 지배미분방정식 식(1)-식(3)이 동일하게 적용된다. 식(2)에서 K_j 를 동점성계수 ν로 하

고 식(3)의 h_i를 전달계수 I 로 하여 시간평균(time average)을 취하면 다음 식(6)-(8)과 같다.

- 연속방정식

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \tag{6}$$

- 운동방정식

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho\nu\,(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}) - \rho\,\overline{u_i' u_j'}) + S \tag{7}$$

- 화학종보존방정식

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i C) = \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho\Gamma\,\frac{\partial C}{\partial x_i} - \rho\,\overline{u_i' C'}) + S \tag{8}$$

상기 식(7)의 Reynolds stress $-\overline{u_i' u_j'}$은 식(9)과 같고 식(8)의 turbulent scalar flux $-\overline{u_i' C'}$는 식(10)과 같다.

$$\text{Reynolds stress tensor} \quad -\overline{u_i' u_j'} = \nu_t\,(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}) \tag{9}$$

$$\text{Turbulent scalar flux} \quad -\overline{u_i' C'} = \Gamma_t\,\frac{\partial C}{\partial x_i} = \frac{\nu_t}{\sigma_c}\,\frac{\partial C}{\partial x_i} \tag{10}$$

식(7)과 식(8)에 각각 식(9)와 식(10)을 대입하여 식(11)과 식(12)와 같다.

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho\nu_{eff}\,(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i})) \tag{11}$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i C) = \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho\,\frac{\nu_{eff}}{\sigma_c}\,\frac{\partial C}{\partial x_i}) + S \tag{12}$$

여기서 ν_{eff} 는 유효점성계수로서 층류동점성계수 ν와 난류동점성계수 ν_t의 합으로 식(13)과 같다.

$$\nu_{eff} = \nu + \nu_t \tag{13}$$

본 연구에서는 계내에 시간당 차량수(*automobile flow rate*)는 1,000 car h^{-1}로 하고, NO_x *emission factor*는 Duprey[7]에 의해 제안되어진 2.3956×10^{-3} g car^{-1} m^{-1}로 하며 차도(*middle roaa*)의 폭과 단위높이를 각각 42m와 1m로 하였으며 생성항 S는 15.83 kg $m^{-3}s^{-1}$이 된다. NO_x의 지면으로 흡수는 5%로 하였고, 초기 오염물의 농도는 계 모든 영역에서 0으로 하였다. 벽근처의 유체흐름 영역의 유동해석을 위해 wall function을 사용하였다.

3. 결과

그림 1은 수치해석을 실시한 빌딩의 도식도로서 오염물질이 발생되는 42m의 차도를 중심으로 양쪽에 인도가 각각 4m씩 위치하고 있으며, 이 도로 좌측에는 10m의 podium위에 90m 높이의 tower가 있고 우측으로는 30m 높이의 restaurant가 위치하며, 바람은 좌측에서 우측(z-축 방향)으로 불고 있다. 그림 2는 수치해석을 위한 3차원 공간을 평면도로 나타낸 것으로 x-축은 폭(130m), y-축은 높이(150m), z-축은 길이(210m)이며, 수치해석시 단위격자는 10x10x10(m)이다. 바람은 지면의 마찰저항에 의해 지면으로 부터의 높이가 0m, 30m, 90m 일 때 각각 0m/s, 3.4m/s, 4.5m/s이고 100m이상일 때는 지면의 영향을 받지 않는 potential flow로 10m/s의 속도로 유입된다. 그림3은 지면의 속도벡터 및 NOx의 농도분포를 나타낸 것이다. 속도분포를 보면 외부로 부터 계좌측면으로 유입되는 바람은 podium에 의해 저항을 받아 속도가 감소되어진 상태에서 tower양측의 podium 상부를 통해 거리**峽谷**(street canyon)으로 유입되지만 맞은편 restaurant에 의해 **反流**(counter flow)가 형성되어 다시 tower후단을 향해 podium쪽으로 흐른다. 거리협곡내의 차도에서는 오염물이 일정량 지속적으로 발생되어 거리협곡 양측면에서 tower후단부로 모이게 되므로 NO_x의 농도가 podium중심 후단부의 농도가 가장 큰 것을 알 수 있다. 그림4는 수직방향으로 30m(restaurant상단)높이에서 수평단면의 속도벡터 및 농도를 나타낸 것이고 그림5은 k-ε모델을 사용한 결과이다. 그림에서 알 수 있듯이 속도크기의 차이는 있지만 두 경우 모두 30m높이 에서는 tower주위로 부터 거리협곡으로 유입되는 흐름이 restaurant의 상단을 통해 하류로 이동하므로 반류현상이 약화되지만 tower후단부로 유동이 모아져 상류로 흐르는 wake영역이 존재하며 k-ε 모델의 경우가 다소 작은 wake영역을 형성하며 흐른다. NO_x의 농도의 경우 속도장에서 예측할 수 있듯이 비등방성이 적용된 단순모델의 경우가 x-방향과 z-방향으로 넓게 분포되어 있는 것을 알 수 있다. 그림6은 수직방향으로 90m 높이에서 수평단면의 속도벡터 및 농도를 나타낸 것이다. 90m 높이에서는 거리협곡에 대한 반류현상은 없고 tower후류쪽의 속도벡터가 주위 흐름보다 다소 작은 것을 보이며 restaurant후류도 **空洞**(cavity)현상이 없이 자유흐름(free stream)과 거의 같다. NO_x의 농도는 tower후류쪽에서 주위보다 다소 큰 값을 가지고 풍하방향으로 분산되는데 이는 지표면의 오염물이 tower후단부를 타고 올라와 풍하방향의 흐름과 만나 후류로 이동하기 때문이다.

4. 결론

Tower block주위의 오염물의 분산을 규명하고자 비등방성의 단순모델과 k-ε모델 대한 수치해석을 수행하였다. 해석결과 바람부는 방향에 대해 tower block 후단면을 타고 지면으로 부터 수직방향으로 wake효과가 발생하여 거리협곡에서의 NO_x가 이 수직기류를 타고 풍하방향으로 분산되었다. 따라서 지면의 오염물 분산을 위해서는 거리협곡에 대한 편류효과를 감소시키는 것이 중요하며 이를 위해서는 podium의 높이를 가능한 낮게하던가 설치하지 말고 wake효과를 발생시킬 수 있게 건물의 높이를 높게하는 것이 유리하다. 본 연구와 같이 tower block주위의 오염물 분산의 수치해석적 연구는 비등방성으로 인해 유효점성계수의 적당한 실험값을 적용된 단순모델이 k-ε모델보다 잘 적용될 수 있다.

참 고 문 헌

Bowers, J. F., Bjorklund, J. R. and Cheung,C. S., *Industrial Source Complex Dispersion Model User's Guide,* Vols. I &II. U. S. EPA, Reseach Triangle, North Csarolina(1979).

KOT, S. C., *Numerical Modeling of Contaminant Dispersion Around Buildings*, Building and Environment, vol. 24. no.1 pp. 33-37(1989).

The measurement of atmospheric diffusion parmeters and analysis of diffusion characterics of Shenzhen special economic zone, Report of Institute of Tropical Ocean Meteorology, Guangdong Province (in Chinese) (1986).

Monin, A. S. and Obukhov, A. M., *Basic turbulent mixing laws in the atmospheric surface layer*, Trudy Geofiz, Inst. AN S.S.S.R.24, pp.163-187(1954)

Patanker, S. V., *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*, Hemishphere Publishing Corporation, New York(1980).

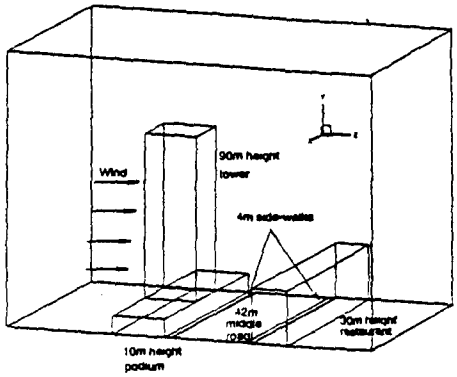

Fig.1. Schematic of tower block and restaurant

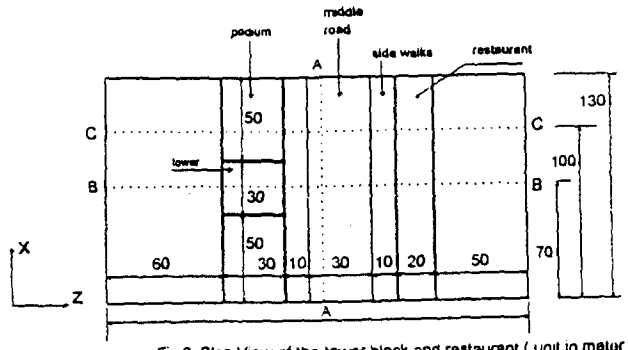

Fig.2. Plan View of the tower block and restaurant (unit in meter)

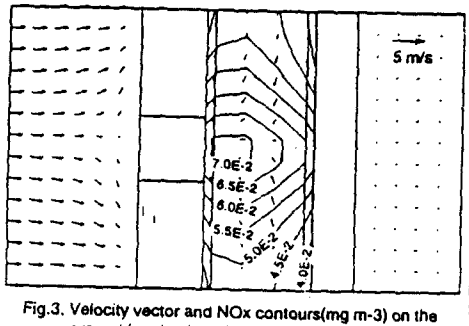

Fig.3. Velocity vector and NOx contours(mg m-3) on the ground for simple turbulence model

ground for simple turbulence model

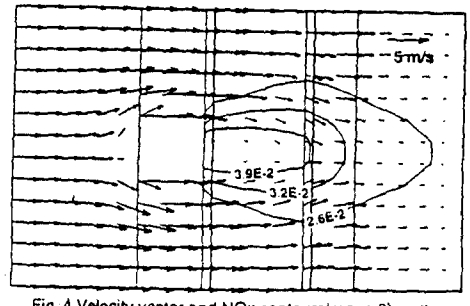

Fig. 4 Velocity vector and NOx contours(mg m-3) on the 30 m height for simple turbulence model

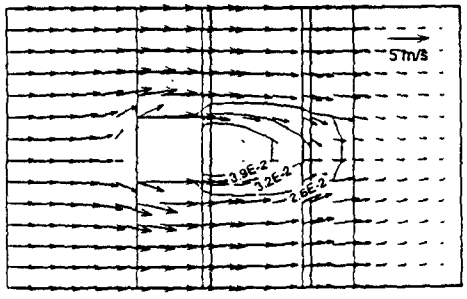

Fig.5. Velocity vector and NOx contours(mg m-3) on the 30 m height for k-epsilon model

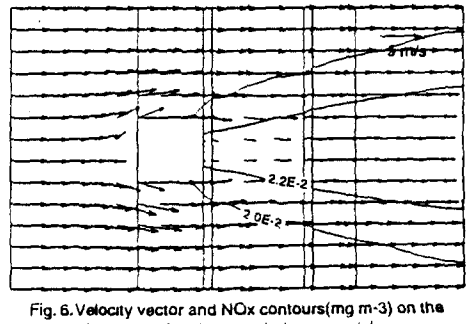

Fig. 6. Velocity vector and NOx contours(mg m-3) on the 90 m height for simple turbulence model