

논문

사각 건물 주위의 오염물 확산에 대한 수치해석적 연구

홍보영^{*1}, 박찬국^{*2}

Simulations of Pollutant Dispersion over Rectangular Building

B. Y. Hong and C. G. Park

Wind flow perturbations, recirculations and turbulence generated by buildings often dominate air pollutant distributions around buildings. This paper describes dispersion of contaminants in the vicinity of a building by solving the concentration equation based on previously simulated wind flow field. Turbulence closure is achieved by using the standard $k-\epsilon$ two-equation model. The paper shows application of the CIP method for solving a species concentration equation of contaminant gas around a rectangular building for two different sources under conditions of neutral atmospheric stratification. Results have been compared to the experimental data and the previous numerical results by hybrid scheme. The computational results of concentration profiles by the CIP method agree well with experimental data.

Key Words : 오염물 확산(Pollutant Dispersion), CIP 방법(Cubic Interpolated Propagation method), 구배 확산 이론(Gradient Diffusion Theory), $k-\epsilon$ 난류 모델($k-\epsilon$ turbulent model)

기호설명 (Nomenclature)		U, V, W	x, y, z 각 방향의 속도성분
C	농도	U_∞	자유유동속도
$C_{\epsilon 1}, C_{\epsilon 2}, C_\mu$	난류모델상수	α	power-law 속도지수
H	기준길이	δ	경계층 두께
k	난류에너지	ϵ	난류에너지 소산율
M	평균분자량	μ	점성계수
p	압력	μ_t	난류점성계수
R	기체상수	μ_{eff}	유효점성계수
R_0	일반기체상수	ρ	밀도
S	소스항	σ_c	난류슈미트수
U, V, W	x, y, z 각 방향의 속도성분	$\sigma_\epsilon, \sigma_k$	난류모델상수
		ν	점도
		χ	무차원 농도

* 2001년 8월 16일 접수

*1 학생회원, 전남대학교 대학원 기계공학과

*2 정회원, 전남대학교 자동차공학과

1. 서론

건물 근처에 위치하는 오염원으로부터 배출되는 오염물질이 건물과의 상호작용 때문에 건물 내부나 주위에 발생할 수 있는 환경적인 효과를 예측하는 것은 중요하다. 실제로 고층빌딩 주위 건물의 옥상 냉각탑에서 배출되는 물방울들이 고층빌딩의 환기구에 축적되어 발생하는 곰팡이로 인해 많은 수의 사람들이 집단적으로 질병에 시달리는 경우도 있고, 소각장의 배치문제로 정부와 주위 지역 주민들 사이에 심한 마찰을 빚기도 했다. 복지적 차원에서 오염은 최소화되어야 하며 오염원은 주위 주거지역에 대한 오염을 최소화시킬 수 있는 최적의 위치에 놓여져야 할 필요성이 있다.

과거에는 대기 오염물 확산예측을 위해 모형을 이용한 풍동실험이 주를 이루어 왔다. 그러나 최근에는 고성능 컴퓨터의 개발과 여러 가지 수치해석 방법의 발전에 힘입어 수치해석 방법을 많이 이용하고 있다. Gong[1, 2]은 중립대기 상태에 놓인 2차원 및 3차원의 완만한 경사의 언덕을 대상으로 유동특성과 확산현상을 풍동해석으로 연구하였으며, Arya 등[3]은 2차원 러시아형 언덕(Russian Hill) 주위의 유동 및 점오염원으로부터의 확산 특성을 실험 연구하였다. 최근에는 수치해석 방법을 많이 이용하게 되었는데, Castro 등[4]은 러시아형 언덕(Russian Hill) 주위의 유동과 오염물 확산에 대하여 자신들이 개발한 수정된 저 레이놀즈 수 난류모형을 이용한 수치해석을 하였다. Dawson 등[5]은 건물 옥상에서 배출되는 오염물의 확산을 계산하였고, 300m 원뿔형의 언덕에서 플룸(plume)의 이동과 확산에 대하여 수치해석을 행하였고, 지면근처에서 측정한 실험값과 비교한 결과 거짓확산(false dispersion)의 영향이 크다는 것을 보여 주었다. Zhang 등[6]은 입방형 건물주위의 오염물 확산과 유동장에 대하여 난류, 대기 안정도의 영향을 조사하였다. 지붕에서의 오염물배출에 대하여 농도장을 계산하였고, 계산된 농도장이 지면과 건물의 후류(wake)내에서는 잘 맞지만 횡방향 확산은 과소평가의 결과가 나오고 후류(wake)내에서의 수직 확산은 과대평가의 결과가 나옴을 제시했다. Selvam과

Huber 등[7, 8]은 건물 주위의 오염물질 확산에 대하여 실험과 수치해석을 행하였다.

Stathopoulos 등[9]은 농도방정식의 대류항에 hybrid 기법을 이용하여 건물주위에서 바람에 의해서 유발되는 오염물질의 확산 현상을 연구하였다.

본 연구는 사각 건물 주위에서 바람에 의해서 유발되는 오염물질 확산을 예측하기 위하여 난류 모델에는 표준 $k-\epsilon$ 모델을 사용하고, 농도 방정식은 Yabe 등이 개발한 CIP(Cubic Interpolated Propagation)[10] 방법을 이용하여 수치해석을 행하고, 문헌에 발표된 결과와 비교함으로써 CIP 방법을 검증하고자 한다.

2. 본론

2.1 가정 및 지배방정식

본 연구에서 오염물질 확산을 수치해석 하기 위하여 다음의 가정을 하였다. 유체는 오염물과 공기 두 성분이 혼합되어 있는 것이며 그 혼합기체의 기체정수 R 은 일반기체상수 R_0 와 국소적인 평균분자량 M 으로 구한다($R = R_0/M$).

오염물질의 비중은 공기와 같다. 열적으로 성층화되지 않은 대기 경계층 내에서 퍼져나가는 오염물질은 유동과 상호작용을 일으키지 않는 스칼라양(passive scalar)이고 부양성이 없다.

작동유체를 이상기체로 해서 질량, 운동량, 난류에너지, 난류에너지 소산율, 농도의 보존방정식은 다음과 같다.

연속 방정식을 텐서(tensor)로 나타내면 다음과 같다.

$$\frac{\partial(\rho u_j)}{\partial x_j} = 0 \quad (1)$$

난류유동을 고려한 운동량 방정식은 다음과 같다.

$$\rho u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \rho \overline{u_i' u_j'} \right] \quad (2)$$

여기서, μ 는 점성계수이고, $-\rho \overline{u_i' u_j'}$ 는 레이놀즈 응력(Reynolds stress)으로 다음과 같다.

$$-\rho \overline{u_i' u_j'} = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} \quad (3)$$

여기서, μ_t 는 난류점성계수로서 층류점성계수와는 달리 물성치가 아니며 난류의 구조에 의존하는 양으로서 다음 식과 같이 모델링한다.

$$\mu_t = C_{\mu} \rho \frac{k^2}{\epsilon} \quad (4)$$

이 난류점성계수는 다음 두 개의 수송방정식으로 부터 구해진다.

난류에너지 방정식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j k - \frac{\mu_{eff}}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_j}) \\ = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \rho \epsilon \end{aligned} \quad (5)$$

여기서, $\mu_{eff} = \mu + \mu_t$ 이다.

난류에너지 소산을 방정식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j \epsilon - \frac{\mu_{eff}}{\sigma_\epsilon} \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j}) \\ = C_{\epsilon 1} \frac{\epsilon}{k} \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \\ - C_{\epsilon 2} \rho \frac{\epsilon^2}{k} \end{aligned} \quad (6)$$

식 (5)-(6)에서 사용한 난류 모델상수는 $\sigma_k = 1.0$, $\sigma_\epsilon = 1.20$, $C_{\epsilon 1} = 1.44$, $C_{\epsilon 2} = 1.92$ 이다.

난류 유동장 내에서 오염물질의 이송 및 확산을 구배 확산 이론을 적용하여 모델링한 농도 방정식은 다음과 같다.

$$u_i \frac{\partial C}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\nu_t}{\sigma_c} \frac{\partial C}{\partial x_i} \right) + S \quad (7)$$

σ_c 는 난류슈미트수(turbulent Schmidt number)

로서 물리적으로는 난류 확산(turbulent diffusion)의 특성길이와 운동량이송의 특성길이 의 비를 나타내며, 대류 열전달에서의 난류 프란틀수(turbulent Prandtl number)와 동일한 의미를 지닌다. 본 연구에서는 이 값으로 0.7[11]을 이용하였다.

2.2 수치해석 방법

유동 계산 방법으로는 Gosman[12], Spalding [13]이 Tank and Tube 법을 일반 곡선 좌표 변환의 수법을 도입하여 일반화했던 GTT (Generalized Tank and Tube) 코드[14]를 사용하였다. GTT 코드는 우선 전 계산 영역을 임의 형상의 육면체 미소 체적 요소로 분할하고 이것을 일반 곡선 좌표변환을 통해서 입방체의 체적요소로 변환한다. 변환후의 체적요소의 중앙에 압력, 밀도, 난류에너지, 난류에너지 소산율, 농도를 배치하고, 속도는 체적요소의 각 꼭지점에 배치하는 엇갈림격자계(staggered grid)를 사용하여 수치해석을 행한다. GTT 코드에 대한 정확성의 검증은 기존의 연구 결과[14~16]에 나타나 있다.

난류모델에는 표준 k-ε 모델을 사용하고, 농도 방정식의 대류항 차분기법(scheme)은 CIP (Cubic Interpolated Particle)법[10]을 사용하였고, 농도 방정식을 제외한 방정식의 대류항 차분기법(scheme)은 Hybrid 법[17]을 사용하였다. 시간적 이산화는 완전음해법에 의해 행하였고, 압력보정에는 SIMPLEC 법을 이용하였다.

2.2.1 계산모델

건물모델과 계산모델은 Fig. 1 에서 보는 바와 같이 건물모델은 높이 H(=0.25 m), 폭 H, 길이 2H 인 사각형 모양이고, 건물은 길이 방향이 유동 방향에 수직으로 놓여 있다. 계산공간은 15H (유동방향), 10H(폭방향), 6H(높이방향) 이고, 66 x 56 x 51 의 격자점을 갖는다. 물성치가 크게 변하는 건물과 지표면 근방의 격자를 조밀하게 구성하였다. 벽면과 지표면으로부터 첫 번째 격자 간격(first grid spacing)의 최대값은 1/16 H 이다.

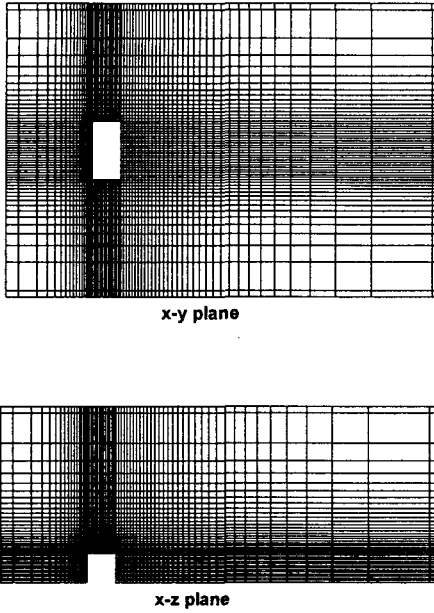


Fig. 1 Grid system

2.2.2 경계조건

상류유입 속도, 난류에너지와 난류에너지 소산율에 대한 경계조건은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} U(x, y, z) &= U_{\infty} \left(\frac{z}{\delta}\right)^{\alpha}, \quad V=0, \quad W=0 \\ k(x, y, z) &= k_0(z), \quad \varepsilon(x, y, z) = \varepsilon_0(z) \end{aligned} \quad (8)$$

U_{∞} 는 자유유동속도 2.35 m/s, δ 는 경계층두께 1.8 m, α 는 power-law 속도 지수 1/6 이다. $k_0(z)$ 와 $\varepsilon_0(z)$ 는 $V=0$, $W=0$, $\partial/\partial x=0$, $\partial/\partial y=0$ 의 조건하에 난류에너지, 난류에너지 소산을 방정식으로부터 얻어진다[9].

지표면과 벽면 경계 조건으로는 점착조건(no-slip)을 이용하였고, 그 이외의 경계에서는 Neumann조건을 부가하였고, 벽면의 효과를 충분히 고려할 수 있는 벽법칙을 적용하였다.

오염물질의 소스는 Fig. 2 에서 보는 바와 같이 유동 하류 방향 건물 벽면 중앙의 지면과 지면으로부터 1.2H 인 곳에 점오염원이 존재한다.

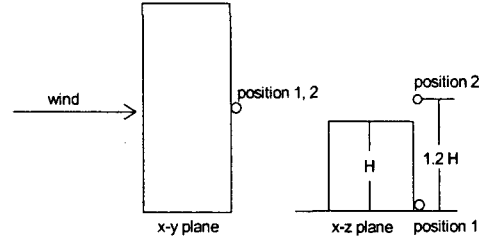


Fig. 2 Position of contaminant gas source

2.2.3 CIP 방법

농도 계산 방법은 특히 수치 확산이 적은 방법을 사용할 필요가 있다. 본 연구에서는 농도계산에 CIP(Cubic Interpolated Propagation)법을 사용하였다. 일정 대류속도로 수송된 변수에 대한 선형 수송방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial f}{\partial t} + C_x \frac{\partial f}{\partial x} = 0 \quad (9)$$

식 (9)의 일반해는 짧은 시간 스텝 사이에는 다음과 같이 근사할 수 있다.

$$f(x, t + \Delta t) \cong f(x - C_x \Delta t, t) \quad (10)$$

CIP 법에서는 각 격자점에 종속변수 f 와 그 기울기를 나타내는 변수 f' 를 배치하고 격자점간의 값을 다음 식에 나타난 3차 스프라인 함수에 의해 근사치를 구한다.

$$F_i(X) = a_i X^3 + b_i X^2 + f'_{i-1} X + f_{i-1} \quad (11)$$

여기서 $X = x - x_{i-1}$ 이고, f_{i-1} 와 f'_{i-1} 는 점 x_{i-1} 에서 함수 f 의 값과 일차 공간 도함수의 값이다. 계수 a_i 와 b_i 는 다음 두 식에 의해서 결정된다.

$$a_i = \frac{f_i + f_{i-1}}{\Delta x^2} - \frac{2(f_i - f_{i-1})}{\Delta x^3} \quad (12)$$

$$b_i = \frac{3(f_i - f_{i-1})}{\Delta x^2} - \frac{f_i + 2f_{i-1}}{\Delta x} \quad (13)$$

여기서, $\Delta x = x_i - x_{i-1}$ 이다.

식 (10)-(13)으로부터 시간스텝 $n+1$ ($t+\Delta t$) 에서 격자점 i 에서의 값은 다음 두 식에 의해서 계산된다.

$$f_i^{n+1} = a_i (\Delta x - C_x \Delta t)^3 + b_i (\Delta x - C_x \Delta t)^2 + f'_{i-1} (\Delta x - C_x \Delta t) + f''_{i-1} \quad (14)$$

$$f'_i^{n+1} = 3 a_i (\Delta x - C_x \Delta t)^2 + 2 b_i (\Delta x - C_x \Delta t) + f'_{i-1} \quad (15)$$

CIP 법은 대류항만을 풀 방법이기 때문에 본 연구와 같이 농도수송방정식에 확산항과 소스항이 있는 경우는 이것들의 경향을 완전음해법에 기초한 유한체적법으로 계산하고 얻은 평균값에 대해 CIP 법을 적용하여 농도방정식을 계산하였다.

CIP 방법은 수치 불안정성과 수치 확산이 상대적으로 적기 때문에 계산에 정확성은 증가하지만 계산시간이 오래 걸리는 단점이 있다.

3. 결과 및 고찰

수치해석을 통하여 구해진 오염물질의 농도는 다음 식(16)과 같은 무차원화된 농도이다.

$$\chi = (C U_\infty H^2) / Q \quad (16)$$

Q 는 오염물질의 배출량이다.

Fig. 3 은 바람이 불어오는 방향 건물 반대쪽 중앙 지표면에 오염원이 위치하는 경우에 유동방향의 지표면에서의 오염가스의 농도분포를 보여주고 있다. $x/H=0$ 위치는 유동방향의 건물모서리가 된다. CIP 방법을 이용한 본 연구의 결과는 실험결과와 잘 일치하고 있다. 그러나 건물의 후류지역(wake zone) 근처에서는 실험값보다 비교적 낮은 값을 보여주고 있다. 이것은 수치 모사에 사용되어진 난류모델과 오염 물질 확산계수의 영향일 것으로 생각된다. hybrid 기법을 이용하여 계산한 Stathopoulos [8]의 결과는 건물에서 멀리 떨어진 곳에서는 실험결과와 비교적 잘 일치하지만 후류지역(wake zone)

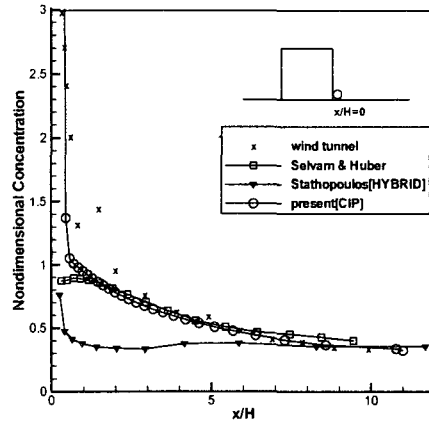


Fig. 3 Comparison of longitudinal ground level concentration along the centerline for source position 1

근처에서는 실험값보다 상당히 낮은 값을 보여주고 있다.

Fig. 4 는 유동 방향 건물의 반대쪽 벽으로부터 $3H$ 되는 위치에서 농도의 수치분포를 실험결과와 Stathopoulos 의 수치해석 결과와 본 연구의 결과를 비교한 것이다. 본 연구 결과는 실험값과 비교적 잘 일치한다. 그러나 실험값은 $0.7H$ 높이가 근처에서 최대농도가 존재하지만 본 연구의 경우는 지면에서 최대농도를 보이고 있다.

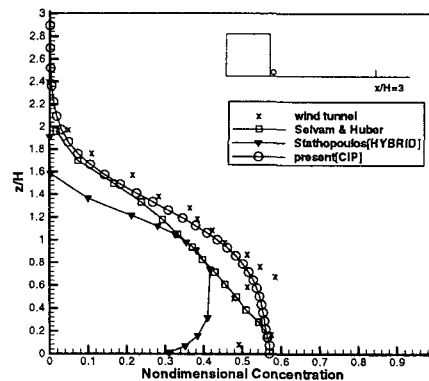


Fig. 4 Comparison of vertical profiles of concentration along the centerline at $x/H = 3$ for source position 1

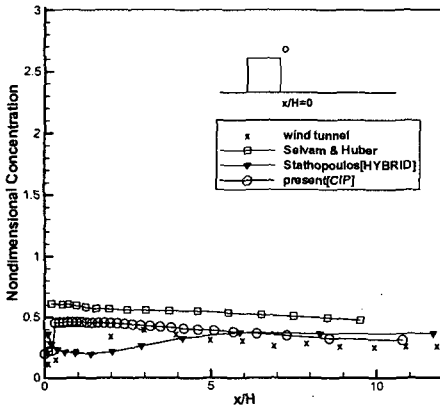


Fig. 5 Comparison of longitudinal ground level concentration profiles along the centerline for source position 2

Stathopoulos [8]의 수치해석 결과는 실험결과보다 작은 값을 예측하지만 실험결과와 비슷한 경향을 보여주고 있다.

Fig. 5는 오염원의 위치가 지면으로부터 $1.2H$ 에 존재하는 경우에 지면에서 유동 방향을 따르는 농도분포를 보여주고 있다. 본 연구에서 사용한 CIP 법이 기존의 수치해석 결과보다는 실험값과 잘 일치하는 것을 볼 수 있으며, 건물벽면 ($x/H=0$)에서부터 $x/H=3$ 인 곳

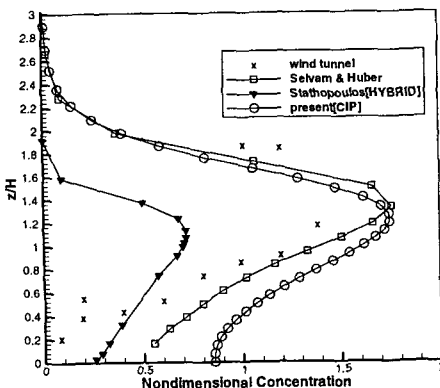


Fig. 6 Comparison of vertical profiles of concentration along the centerline at $x/H=3$ for source position 2

에서는 실험값보다 큰 값을 예측하고 있다.

Fig. 6은 오염원의 위치가 지면으로부터 $1.2H$ 에 위치하는 경우에 건물의 벽면으로부터 $3H$ 되는 곳에서 농도의 수직분포를 실험값과 기존의 수치해석과 본 연구의 결과를 비교한 것이다. 실험결과와는 잘 일치하지는 않지만 Selvam & Huber [6]의 수치해석 결과와는 비슷한 경향을 보이고 있다.

4. 결론

본 연구에서는 사각 건물 주위에서 배출되는 오염가스의 거동을 수치해석을 이용하여 모사하였다. 난류모델에는 표준 $k-\epsilon$ 모델, 농도 수송방정식의 대류항 차분기법은 CIP (Cubic Interpolated Propagation) 방법을 이용하여 수치해석을 행하였다. 오염가스가 유동 하류 쪽 건물 벽면 중앙 지면과 지면에서 $1.2H$ 떨어진 곳에 위치하는 점 오염원에서 배출되는 두 가지 경우에 대하여 계산을 하였다. 유동 하류 방향 건물 벽면에서부터 유동 방향을 따라서 지면에서 형성되는 농도의 분포와 유동하류 방향 건물 벽면으로부터 $3H$ 떨어진 곳에서 수직방향으로 형성되는 농도 분포를 기존의 실험과 수치해석 결과와 비교 분석하였다.

유동하류 쪽 건물벽면 중앙 지면에서 오염물질이 배출되어지는 경우는 Hybrid 기법을 이용한 기존의 수치해석 결과보다 CIP 법을 이용한 본 연구의 결과가 실험 결과와 잘 일치하는 것을 확인할 수 있었다. 유동하류 쪽 건물 벽면 중앙 지면에서 $1.2H$ 떨어진 곳에서 오염 물질이 배출되어지는 경우는 본 연구의 결과가 실험값보다 대체적으로 큰 값을 보여주고 있지만 기존의 다른 수치해석 결과보다는 더 잘 일치하는 경향을 보인다는 것을 알 수 있었다.

오염물질의 확산해석에 적절한 난류모델과 CIP 법을 적용하여 시뮬레이션 해석을 한다면 좋은 결과를 얻을 수 있을 것으로 기대된다.

후기

본 연구는 2000년 BK21 지역대학육성사업단(수송 기계 분야) 지원으로 수행되었으며, 이에

관계자 여러분께 감사 드립니다.

참고문헌

- [1] Gong, W., Ibbetson, A., "A Wind Tunnel Study of Turbulent Flow over Model Hills", *Boundary-Layer Meteorology*, Vol.49(1989), pp. 113-148.
- [2] Gong, W., "A Wind Tunnel Study of Turbulent Dispersion over Two-and Three-Dimension Gentle Hills from Upwind Point Sources in Neutral Flow", *Boundary-Layer Meteorology*, Vol.54(1990), pp. 211-230.
- [3] Arya, S.P.S., Capuano, M.E., Fagen, L.C., "Some Fluid Modeling Studies of Flow and Dispersion over Two-Dimensional Low Hills", *Atmos. Env.*, Vol.21, No.4(1987), pp. 753-764.
- [4] Castor, I.P., Apsley, D.D., "Flow and Dispersion over Topography : A Comparison Between Numerical and Laboratory Data for Two-Dimensional Flows", *Atmos. Env.*, Vol.31, No.6(1997), pp. 839-850.
- [5] Dawson, P., Stock, D.E., Lamb, E., "The Numerical Simulation of Airflow and Dispersion in Three Dimensional Atmospheric Recirculation Zones", *J. Appl. Meteorol.* 30 (1991), pp. 1005-1024.
- [6] Zhang, Y.Q., Arya, S.P., Snyder, W.H., "A Comparison of Numerical and Physical Modeling of Stable Atmosphere", *Atmospheric Environment* Vol.30 (1996), pp. 1327-1345.
- [7] Selvam, R. P., Huber, A.H., "Computer modeling of pollutant dispersion around buildings: current status", *Proc. 9th Int. Conf. Wind Eng.*, New Delhi, India(1995), pp. 596-605.
- [8] Huber, A.H., Snuder, W.H., Lawson, R.E., "The Effects of a square building on short stack Effluents: a Wind-tunnel study", Report EPA-600/4-80-055, U.S. Environment Protection Agency, Research Triangle Park, NC(1980).
- [9] Li, Y., Stathopoulos, T., "Numerical Evaluation of Wind-induced Dispersion of Pollutants around a Building", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 67&68(1997), pp. 757-766.
- [10] Yabe, T., Ishikawa, T., Wang, P.Y., Aoki, T., Kadota, Y and Ikeda, F., *Comput. Phys.*, Vol. 66(1991), pp. 266-242.
- [11] Stull, R.B., "An Introduction to Boundary Layer Meteorology", Kluwer Academic Publishers(1994).
- [12] Gosman, A.D. et al., "Heat and Mass Transfer in recirculating Flow", Academic Press(1969), p. 103.
- [13] Spalding, D.B. and Pun, W.M., *Imperial College Mech. Eng. Dept. Report. HTS/76/2* (1976)
- [14] Wakisaka, T. et al., "Analysis of the Effects of In-Cylinder Flows During intake Stroke on the Flow Characteristics near Compression TDC in Four-Stroke Cycle Engine", *COMODIA90* (1990), pp. 487-493.
- [15] Yamaguchi, T., Wakisaka, T., "Computation of the Hollow-Cone Sprays from a High-pressure Swirl Injector for a Gasoline Direct-injection S.I. Engine", *SAE paper 962016* (1996).
- [16] Yamaguchi, T. et al, "Numerical Analysis of Stratified Mixture formulation in Direct-Injection Gasoline Engines", *Direkteinspritzung im Ottomotor*, Expert Verlag (1998), pp. 166-185.
- [17] Spalding, D.B., "A Novel Finite-difference Formulation for Differential Expressions Involving Both First and Second Derivatives", *Int. J. Numer. Methods Eng.* Vol.4 (1972), p. 551