

대류경계층에서 난류흐름에 관한 수치해석적 연구

박종혁* · 이우범** · 이정전***

*전남대학교 환경연구소

**여수대학교 환경공학과

***전남대학교 환경공학과

A Numerical Study on Turbulent Flows in CBL

Jong-Hyuk Park*, Woo-Bum Lee**, Jung-Jun Lee***

**Environmental Research center, Chonnam National University*

***Dept. of Environmental Engineering, Yosu National University*

****Dept. of Environmental Engineering, Chonnam National University*

ABSTRACT

As turbulent flows include a complex physical process in the convective boundary layer(CBL), it is difficult to explain the physical phenomena exactly. Therefore, it is possible to explain the model in a simple and limited way. For the explanation of the CBL turbulence, enormous amounts of data are required concerning in CBL turbulence. A method to study the structure and characteristics of CBL is numerical simulation of important parts of the flow field i.e. through large eddy simulation(LES).

In this study, turbulence in the CBL uniformly heated from below and topped by a layer of uniformly stratified fluid is investigated for flows by numerical simulation(LES). LES uses a finite-difference method to integrate the three-dimensional grid-volume-averaged Navier-Stokes equation for a Boussinesq fluid. In LES, the contribution of the large-carrying structures to momentum, heat and energy transfers are computed exactly, and only the effect of the smallest scales of turbulence is modeled. The purpose of this study is to analyze the velocity and temperature distributions in CBL turbulence in order to study the dispersion of atmospheric pollutant by LES.

Key Words : Turbulence, Convective Boundary Layer, Numerical Simulation, Model

1. 서 론

대기는 지구주위를 둘러싸고 있는 각종 기체들이 차지하고 있는 공간을 나타내고 있으며 그 두께는 지표로부터 약 600~1,000km에 이르는 것으로 추정되고 있다. 이러한 대기중에서 인간이 생활하고 있는 대기경계층은 지상 수십~수백미터까지의 공간으로 이곳에서는 지표면의 영향으로 난류와 대류작용에 의한 공기의 운동이 활발하여 인간생활에 중요한 영향을 준다. 최근 산업발달, 인구의 증가 및 교통량의 증가 등으로 대기오염에 의한 피해가 점차 심각한 사회문제화 되고 있다. 특히 대도시지역, 공단주변 및 고속도로 주변의 수목 중에서는 이상낙엽 현상과 고사현상이 나타나며 자동차의 증가로 광화학 Smog에 의한 피해가 전세계적으로 나타나고 있다. 이와 같이 대기오염물질의 확산에 따른 인간의 피해를 줄이기 위한 문제해결 방안으로 오염물질의 발생억제에 대한 연구는 물론이고 대류경계층에 있어서 대기의 흐름에 대한 연구가 요구되고 있다.

일반적으로 대류경계층에 있어서 대기의 흐름은 난류에 의하여 이루어지고 이러한 난류를 해석하는데 있어서는 난류모형과 수치해석의 기법이 난류유동특성의 정확성에 가장 큰 영향을 주고 있다. 1960년대부터 시작된 난류에 대한 해석방법으로는 원관 유동이나 단순채널의 유동과 같이 단순한 난류해석을 위한 1차방정식모델에서부터 최근에는 레이놀즈응력이나 난류의 스칼라유속에 대한 미분방정식을 직접 풀어서 값을 구하거나, 그 식들을 간략화된 대수식으로 만들어 풀거나, 난류유동속의 큰 와류(eddy)의 3차원 비정상흐름을 직접 시뮬레이션하여 값을 구하는 방법 등이 소개되고 있다. 이들 방법중에서 대기의 난류 흐름에 대한 해석법으로 난류속의 와류들 중에서 대규모와류와 소규모와류를 분리하여 직접계산법과 모형법을 혼합한 대형와류 모사법(Large Eddy Simulation

:LES)이 연구되고 있다.

지구대기에 대한 연구는 1963년 Smagorinsky에 의해 시작되었는데 Deardorff¹⁾에 의해 지구규모의 모델에 대한 경계조건을 얻기 위해 대기경계층을 적용하게 되었다. 대류경계층(convective boundary layer : CBL)이론에 기초한 오염물질의 이송과 확산연구에서 Haren and Nieuwstadt²⁾는 대류와 부력에 의한 plume의 활동을 나누어 발표하였으며 Henn and Skyes³⁾는 대류경계층에서 plume 확산을 대형와류모사법(large eddy simulation, LES)을 이용하였는데 안정층으로 덮여진 자유대기로 오염물질이 이동할 수 있다는 가정하에서 연구하였다.

본 연구는 매립지등 가스발생지역에서 오염물질의 확산에 대한 기초연구로서 대류경계층의 난류흐름과 온도분포를 대형와류모사법(Large Eddy Simulation)에 의하여 연구하였다.

2. 지배방정식

LES에 의한 난류를 표현하는 방법은 먼저 난류내에 다양한 크기를 갖는 와류들 사이에서 대형크기의 와류와 소형크기의 와류를 분리하는 여과(filtering) 작업이 필요하게 된다. 다시 말하면 난류에서 격자크기(grid scale, GS)의 와류와 격자보다 작은 크기(subgrid scale, SGS)의 와류로 분리한다. 여과 작업 후 분리된 와류중에서 격자크기의 와류는 격자점에서 직접 계산되나 격자보다 작은 와류는 직접계산되기 어려움으로 난류 모델링에 의해 계산된다. 위와 같이 대형크기의 와류와 소형크기의 와류를 분리하는 여과방정식은 다음과 같이 표현된다⁴⁾.

$$\overline{f}(x) = \int G(x-x')f(x')dx' \quad (1)$$

여기서, $\overline{f}$ 는 격자크기의 와류에 의한 값들이고

$G(x-x')$ 는 여과함수(filter function)이다. 지금까지 알려진 여과함수⁵⁾ 중 본 연구에서는 비교적 적용이 쉬운 tophat filter를 사용하였는데 tophat filter는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\overline{u_i}(\vec{x}, t) = \frac{1}{\Delta x_1 \Delta x_2 \Delta x_3} \int_{x_1 - \frac{\Delta x_1}{2}}^{x_1 + \frac{\Delta x_1}{2}} \int_{x_2 - \frac{\Delta x_2}{2}}^{x_2 + \frac{\Delta x_2}{2}} \int_{x_3 - \frac{\Delta x_3}{2}}^{x_3 + \frac{\Delta x_3}{2}} u_i(\vec{x}', t) d\vec{x}' \quad (2)$$

위와 같은 여과작업과 격자에서 직접 계산될 수 없는 소규모 격자크기(SGS)의 와류들이 갖는 변수들에 대한 모델링(modeling)을 기초방정식들에 적용하여 정리하면 다음과 같은 지배방정식들을 얻을 수 있다.

· 연속방정식

$$\frac{\partial \overline{u}}{\partial x} + \frac{\partial \overline{v}}{\partial y} + \frac{\partial \overline{w}}{\partial z} = 0 \quad (3)$$

· 운동방정식

$$\frac{\partial \overline{u_i}}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial x_j} (\overline{u_i u_j}) - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial \overline{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(K_m \left(\frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j} + \frac{\partial \overline{u_j}}{\partial x_i} \right) \right) + \frac{g}{\theta_0} \overline{\theta \delta_{i3}} \quad (4)$$

· 온도방정식

$$\frac{\partial \overline{\theta}}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial x_i} (\overline{u_i \theta}) + \frac{\partial}{\partial x_i} \left(K_h \frac{\partial \overline{\theta}}{\partial x_i} \right) \quad (5)$$

· 난류에너지방정식

$$\begin{aligned} \frac{\partial \overline{e}}{\partial t} = & -\frac{\partial}{\partial x_i} (\overline{u_i e}) + K_m \left(\frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j} + \frac{\partial \overline{u_j}}{\partial x_i} \right) \\ & \frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j} - \frac{g}{\theta_0} K_h \frac{\partial \overline{\theta}}{\partial x_3} + \frac{\partial}{\partial x_i} \\ & \left(2K_m \left(\frac{\partial \overline{e}}{\partial x_i} \right) \right) - C_k \frac{\overline{e}^{-3/2}}{l} \end{aligned} \quad (6)$$

여기서, K_m 과 K_h 는 각각 운동량과 열에 의한 확산계수를 나타내며 C_k 는 Deardorff⁶⁾에 의해 제안된 표면층의 영향을 고려한 상수이다.

3. 수치해석 방법

본 연구에서는 유한차분법(Finite Difference Method: FDM)에 의하여 수치해석 하였으며 해의 전개방법으로는 시간항에 대해서는 전진차분(forward difference), 이류항에 대해서는 풍상차분(upwind difference), 확산항에 대해서는 중앙차분(central difference)법을 선택하였다. 수치해석법의 알고리즘으로는 Patankar, S. V.에 의하여 소개된 SIMPLER(Semi-Implicit Method for Pressure Linked Revised)에 의하여 수행하였다.

격자는 균일격자(uniform grid : $\Delta x = \Delta y = 200$ 200m, $\Delta z = 60$ m)를 이용하였고 해석영역이 x, y 방향(수평방향)으로 8,000m, z방향(연직방향)으로는 2,400m가 되도록 격자수를 $41 \times 41 \times 41$ 으로 선택하였다.

상부의 경계조건으로 수평방향의 속도성분과 모든 scalar량의 시간에 따른 변화, 측면의 경계조건으로 유입측 수평속도성분 및 각 scalar량의 수평방향 변화율은 0으로 가정하였다. 또한 유입측의 수평속도성분 및 각 scalar량의 경계값은

$$\phi_{bound}^m = 2\phi^{m-1} - \phi^{m-2} \quad (7)$$

에 의하여 결정하였으며 지표면의 경계조건으로는 Monin Obukhov의 상사 법칙에 의한 Businger법을 적용하였다.

초기조건으로 $d\overline{\theta}/dz > 0$ 인 안정된 층에 의해 덮여진 혼합층의 온도는 일정하다고 가정하였으며, 이는 모든 결과를 무차원 대류크기의 항으로 표현한 것이다. 그러나 혼합층의 높이(z_{io})는 시간에

따라 변화되어 표준화하기 부적절함으로 초기조건에서의 혼합층 높이는 대략적인 경계층 높이인 $z_{i0}=1600\text{m}$ 로 정하고 표준화에 이 높이를 사용하였다. 대류조건에서 표면층의 온도 flux $Q_s(=\overline{w'\theta_0})$ 는 0.06ms^{-1} , 표준화된 대류 속도 w_{*0} 는 $w_{*0}=[(g/T_0)Q_s z_{i0}]^{1/3}$, 온도와 시간은 각각 $T_{*0}=Q_s/w_{*0}$, $t_{*}=tz_{i0}/w_{*0}^{(7,8)}$ 이다.

표면의 거치름도(z_0)는 우리들에게 잘 알려진 다른 두 높이의 풍속으로부터 계산될 수 있는 다음과 같은 로그속도법칙(logarithmic velocity profile law)에 의해 구해진다.

$$u/u_f=(1/\kappa)\log(z/z_0) \quad (8)$$

여기서 u : wind velocity at given height

u_f : friction velocity

z : height

또한 무차원 연직방향 대류속도, 온도, 시간크기는 다음 식으로부터 구해진다.

$$w_{*}=\left(\frac{g}{T_0}Q_s z_i\right)^{1/3} \quad (9)$$

$$T_{*}=\frac{Q_s}{w_{*}} \quad (10)$$

$$t_{*}=\frac{z_i}{w_{*}} \quad (11)$$

본 연구에서 사용된 x , y , z 방향의 초기속도 및 온도는 다음과 같다⁸⁾.

$z < z_{i1}=0.844 z_{i0}$ 일 때

$$T=T_0+0.1\tau\left(1-\frac{z}{z_{i1}}\right)T_{*0} \quad (12)$$

$$w=0.1\tau\left(1-\frac{z}{z_{i1}}\right)w_{*0} \quad (13)$$

$$u=v=0 \quad (14)$$

이고, $z > z_{i1}$ 일 때

$$T=T_0+(z-z_{i1})\Gamma \quad (15)$$

$$u=v=w=0 \quad (16)$$

이다. 여기서, τ 은 -0.5와 0.5 사이의 random 수이다.

4. 결과 및 고찰

그림 1(a), (c), (e)는 높이(z)가 $0.1z_i$, $0.5z_i$, $1.1z_i$ 인 수평단면(x - y 평면)에서 수평속도성분(u , v 속도)의 합성속도벡터를 각각 나타내고 있으며, 그림 1(b), (d), (f)는 동일한 위치에서 연직방향 속도(w 속도)를 0.3%의 일정 간격으로 나타낸 등속도선이다. 여기서 점선으로 나타낸 밝은 부분은 연직하방향의 속도(w 속도가 음인 경우)를, 실선으로 나타낸 어두운 부분은 연직상방향의 속도(w 속도가 양인 경우)를 나타내고 있다. 즉, 본 연구의 수치해석 결과로부터 나온 w 속도의 최소값 -1.5%에서 최대값 3.5%까지의 속도분포를 명암의 정도에 따라 나타낸 것이다. 또한 그림 1(g)와 (h)는 $y=20\Delta y$ 위치(즉, 해석영역 y 축방향의 중심부분)에서 수직단면의 u - w 속도의 합성속도벡터와 v 속도의 등속도선을 나타내고 있다. 결과에 의하면 높이가 $z=0.1z_i$ 인 낮은 단면에서는 수평흐름방향의 집중된 현상들이 길고 좁은 영역으로 선명하게 나타나고 있으나 고도가 높아짐에 따라 수평흐름방향의 집중현상을 나타내고 있는 영역이 좁아지면서 일정영역에서는 강한 연직속도가 나타났다. 즉, 연직 높이가 $z=0.1z_i$ 일 때 최대 상승속도(w 속도)는 1.0%이나 연직 높이가 $z=0.5z_i$, $z=1.1z_i$ 로 높아짐에 따라 최대상승속도는 3.0%, 3.5%로 커지면서 영역들은 좁아지고 있음을 보여주고 있다. 이러한 형태의 흐름현상들은 Schmidt & Schumann⁷⁾을 비롯한 대류경계층에 대한 수치해석들의 결과⁹⁾뿐만 아니라 실험연구에서도 볼 수 있다.

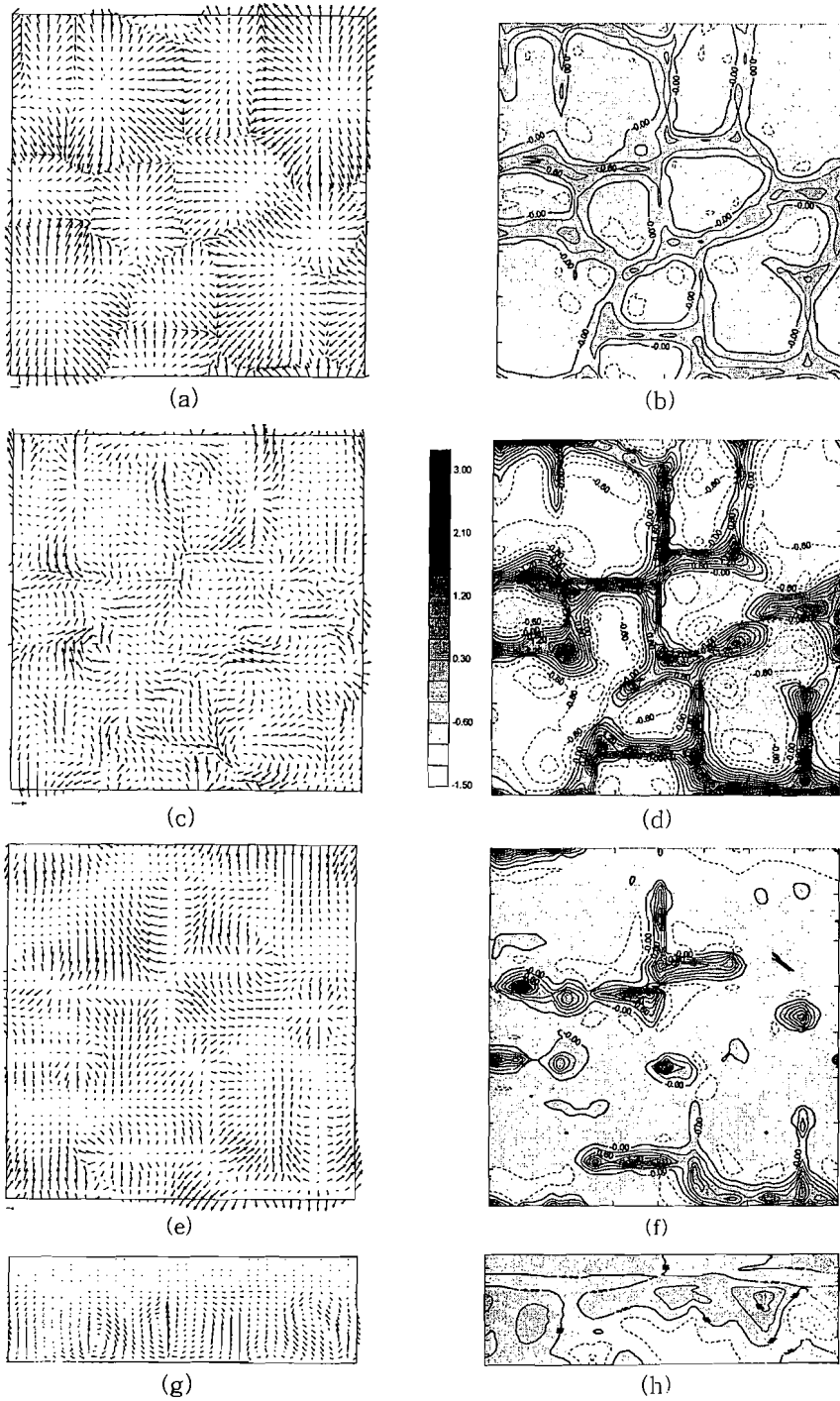


Fig. 1. Flow vectors(a,c,e) of u - v velocity and contour plots(b,d,f) of w velocity in horizontal cross sections at the normalized height $z = 0.1 z_i$, $0.5 z_i$ and $z = 1.1 z_i$ respectively, and vertical cross section(g,h) at $y = 20 \Delta y$ respectively.

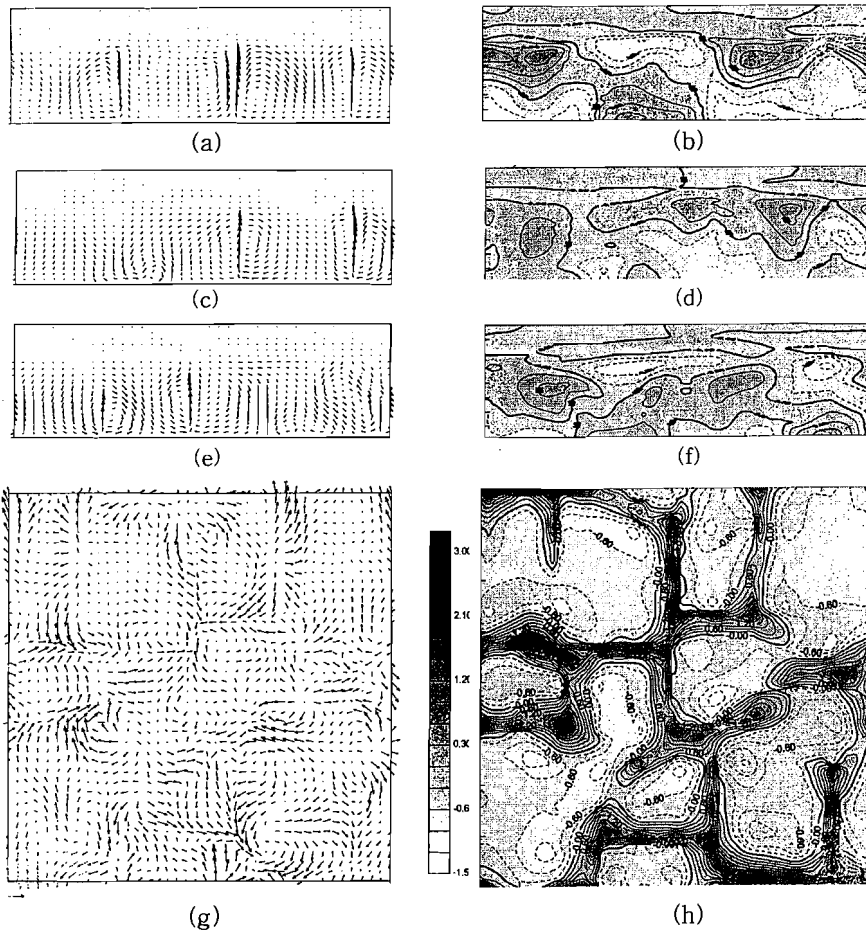


Fig. 2. Flow vectors(a,c,e) of $u-w$ velocity and contour plots(b,d,f) of v velocity in vertical cross sections at $y=4\Delta y$, $10\Delta y$ and $20\Delta y$ respectively, and horizontal cross section(g,h) at $z=0.5 z_i$ respectively.

그림 2(a)와 (b), (c), (d), (e), (f)는 대기흐름을 $y = 4\Delta y$, $10\Delta y$, $20\Delta y$ 인 수직단면($x-z$ 평면)에서 나타낸 것이다. 즉, 그림 2(a), (c), (e)는 각 수직단면에서 $u-w$ 속도의 합성속도벡터를 나타내고 있으며, 그림 2(b), (d), (f)는 v 속도의 등속도선들을 나타내고 있다. 결과에 의하면 혼합층내에서 v 속도분포는 단면의 위치에 관계없이 약 -1.0% ~ 1.1% 의 값으로 불규칙(random)하게 분포되어 있고 이는 지표면의 모든 부분에서 대류에 의한 영

향을 균등하게 받고 있음을 나타내고 있다. 또한 혼합층내에서 $u-w$ 합성속도 분포에 의하면 각 수직단면의 위치(y 축 방향)에 따라 발생된 위치(x 축 방향)는 각각 다르나 3~4개의 강한 상승기류가 잘 발달되어 있으며 그 영역들은 매우 좁게 나타나고 있다. 대기관측실험¹⁰⁾에서도 측정된바 있는 이와 같은 강한 상승기류는 혼합층에서 발달되어 일정한 온도상승으로 생긴 안정층을 통과하는 날카로운 연직상승의 형태로 나타난다. 반대로 하

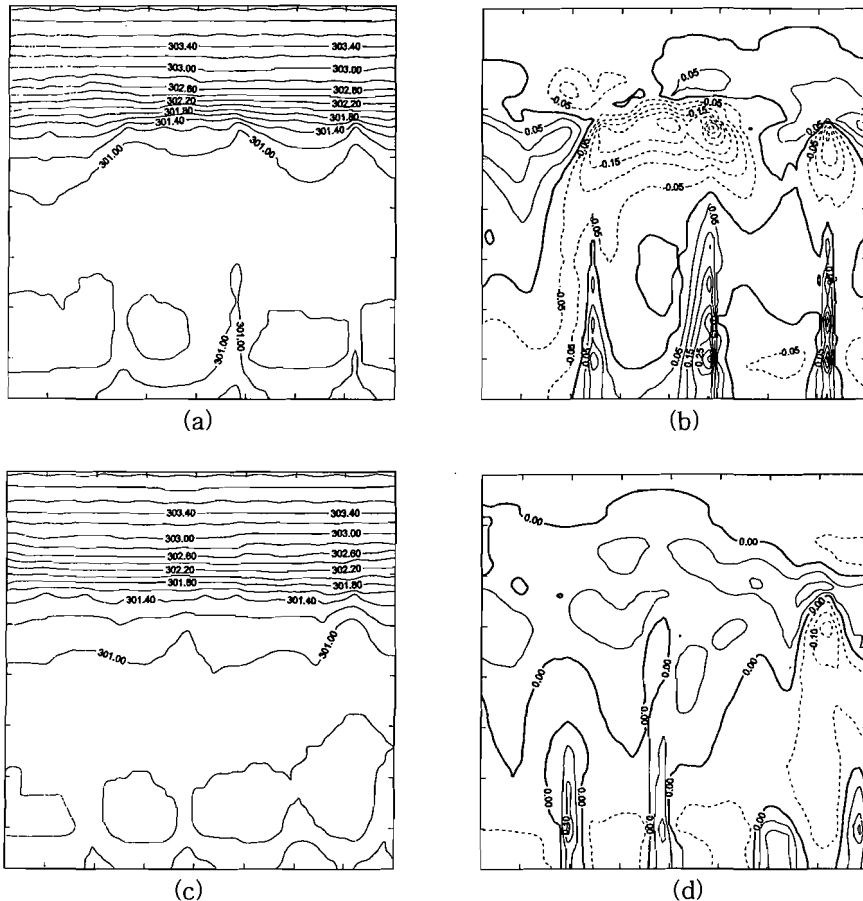


Fig. 3. Contour plots of temperature(a, c) and temperature fluctuation(b, d) in horizontal cross sections at $y=4\Delta y$ and $20\Delta y$.

강기류는 매우 넓은 영역에 분포되나 그 크기는 매우 적게 나타나고 있다.

그림 3(a)와 3(c)는 각 y 축($y=4\Delta y, 20\Delta y$)에 따른 수직단면($x-z$ 평면)에서의 절대온도를 0.2° 간격으로 나타낸 등온선이고, 그림 3(b)와 3(d)는 평균온도에 대한 변동성분을 0.05° 간격으로 나타낸 결과이다. 그림 3(a)와 3(c)에 의하면 지표면에서 열적으로 유도된 와류는 혼합층에서 잘 혼합되어 등온선에도 영향을 주고 있다. 안정층에서의 와류는 대부분 내부 중력파에 의한 영향만을 받으나⁹⁾ 연직방향의 강한 속도성분을 갖는 상승기류

에 의하여 안정층의 등온선에 영향을 주는 부분도 발생하였다. 이와 같은 결과는 그림 1의 w 등속도 선들에 대한 분석의 결과와 잘 일치하고 있다. 그림 3(b)와 3(d)에 나타난 결과에 의하면 평균온도에 대한 변동성분은 지표면에 가까운 영역에서 크게 나타났으나, 안정층 영역에서는 거의 0에 가깝게 나타났다. 이것은 지표면에 가까울수록 대류에 의한 대기의 운동이 활발하여 수직단면의 온도 분포에 영향을 주어 변동이 심하나, 대류의 영향을 거의 받지 않는 안정층 부근에서는 온도의 변동이 거의 나타나지 않기 때문이다.

V. 결 론

본 연구는 매립지등 가스발생지역에서 오염물질의 확산에 대한 기초연구로서 대류경계층의 난류 흐름과 온도분포를 대형와류모사법(Large Eddy Simulation)에 의하여 연구하였다.

결과에 의하면 높이가 낮은 단면에서는 수평흐름방향의 집중된 현상들이 길고 좁은 영역으로 선명하게 나타나고 있으나, 고도가 높아짐에 따라 수평흐름방향의 집중현상을 나타내고 있는 영역이 좁아지면서 일정영역에서는 강한 연직속도가 나타났다. 이러한 형태의 흐름현상들은 기존의 대류경계층에 대한 수치해석들의 결과 뿐만아니라 실측에 의한 실험연구의 결과와 거의 일치하고 있다. 지표면에서 열적으로 유도된 와류는 혼합층에서 잘 혼합되어 등온선에도 영향을 주고 있다. 또한 안정층에서의 와류는 대부분 내부 중력파에 의한 영향만을 받으나 연직방향의 강한 속도성분을 갖는 상승기류에 의하여 안정층의 등온선에 영향을 주는 부분도 발생하였다. 위와 같이 본 수치해석에 의한 대류경계층의 대기흐름과 온도분포에 대한 본 연구의 결과는 기존의 연구결과 및 실제현상과 잘 일치하였다. 위와 같은 결과에 의하여 오염물질의 확산에 대한 연구방법으로 대형와류모사법(Large Eddy Simulation)에 의한 수치해석법을 신뢰할 수 있게 되었다.

참 고 문 헌

1. Deardorff, J.W., "Three-dimensional numerical study of the height and mean structure of a heated planetary boundary layer", Boundary-Layer Meteorology, Vol. 7, 81~106(1974).
2. Haren, L., Van., and Nieuwstadt, F.T.M., "The behavior of passive and buoyant plumes in a convective boundary layer, as simulated with a large-eddy model", J. of Applied Meteorology, Vol. 28, 818~832(1989).
3. Henn, D.S., and Sykes, R.I., "Large-eddy simulation of dispersion in the convective boundary layer," Atmospheric Environment, Vol. 26A, No. 17, 3145~3159(1992).
4. Leonard, A., "energy cascade in large-eddy simulations of turbulent fluid flows", Advanced in Geophysics, Vol. 18A, 237~248 (1974).
5. Piomelli, U., and Chasnov, J.R., Large-eddy simulation : theory and application, turbulence and transition modeling Ch.7, Edited by M. Hallback et al., Kluwer Academic Publishers(1996).
6. Deardorff, J.W., "Stratocumulus-capped mixed layers derived from a three-dimensional model", Boundary-Layer Meteorology, Vol. 18, 495~527(1980).
7. Schmidt, H., and Schumann, U., "Coherent structure of the convective boundary layer derived from large-eddy simulations", J. Fluid Mech., Vol. 200, 511~562(1989).
8. Nieuwstadt, F.T.M. et al., "Large-eddy simulation of the convective boundary layer: A comparison of four computer codes", Proc. 8th Symp., Turbulence Shear Flows 1-4-1, 343~367(1991).
9. Moeng, C.H., "A large eddy simulation for the study of planetary layer turbulence", J. of the Atmospheric Science, Vol. 41 No.13, 2052~2062(1984).
10. Lenschow, D.H., Wyngaard, J.C., and Pennel, W.T., "Mean-field and second-moment budgets in a baroclinic, convective boundary layer", J. Atmos. Sci., Vol. 37, 1313~1326(1980).