

## 아파트 단지내의 열섬효과가 대기오염물질 확산에 미치는 영향 해석을 위한 열유동장 수치모의

장은숙  
동해대학교 환경공학과  
(2005년 6월 9일 접수; 2005년 6월 28일 채택)

### A Numerical Simulation of Heat Flow Field for Heat Island Effect Analysis to Air Pollutants Dispersion in Apartment Complex

Eun-Suk Jang

Department of Environmental Engineering, Donghae University, Donghae 240-150, Korea  
(Manuscript received 9 June, 2005; accepted 28 June, 2005)

Enormous apartment complexes in urban areas, temporary inversion state and heat island effect occur due to the strong sunshine and weak wind speeds which hinders the dispersion of air pollutants that are emitted from neighboring areas of apartment complexes. In this study, analysis were conducted by using the Fluent code based on the CFD(Computation Fluid Dynamics), including building layout, material, building height from the ground surface, the heat, analysis of flow field in the apartment complex. It was estimated that the temporal radiation inversion phenomenon during the daytime, which was caused by the weak wind speed and higher temperatures in the upper level, contributed to the stagnation of the air pollutants in the lower layer of the apartment complex.

Key Words : CFD(Computation Fluid Dynamics), Apartment complex, Heat island effect, Air pollutant

#### 1. 서론

1980년 이후 자동차 보급의 증가와 산업의 고도화에 따른 공업단지의 조성 및 도시화 현상의 심화로 국내의 대기오염은 급격히 증가하였다. 그 후, 정부의 청정연료와 저황유 공급의 확대, 저공해 자동차 보급 등 각종 대기오염 저감정책에 힘입어 아황산 가스와 먼지 등, 개도국형 대기오염상태는 개선되는 것처럼 보이나, 자동차의 증가로 인한 이산화질소 및 오존의 오염도는 비슷하거나 완만하게 증가하고 있어 대기오염의 형태가 선진국형으로 전환되고있는 추세에 있으며 대도시 지역의 오존주의보 발령횟수, 공단지역에 인접하여 살고 있는 주민들의 진정 사례횟수 등이 증가하고 있어 국민의 체감오염도는 점차 악화되고 있는 실정이다. 그러나 평

상시 이러한 대기오염에 대하여 우리가 얼마나 노출되어 있는지에 대한 실질적인 자료는 많이 부족하다.

그 동안 정부와 민간이 대단위 택지 개발사업을 추진하면서 그 지역의 기후조건 및 자연환경 등을 충분히 고려하지 못하고 획일적이고 평면적인 단지를 조성함으로써 대도시 지역에서 하절기에 발생하는 열섬효과는 대기오염물질의 확산을 저해하는 요인이 되고 있다<sup>1)</sup>.

그리고 대기오염물질의 순환과정에서 분산과정을 정확히 이해하는 것은 주어진 배출규제 농도를 토대로 오염물의 분포상태를 정확히 예측하기 위해 필요하다<sup>2,3)</sup>. 또한 대단위 아파트 단지 조성시에 도로와 아파트 대형건물의 배치 등 기류이동을 고려하지 않고 건설하므로 주위의 오염물질이 풍향 및 풍속에 따라 단지 내에 정체하여 건물의 실내로 들어가 또 다른 실내오염을 야기시키게 된다<sup>4)</sup>.

따라서 본 연구에서는 도로에 인접한 아파트 단지내의 열섬효과가 대기오염물질 확산에 미치는 영향을 해석하기 위하여, 아파트의 지면으로부터 수직

Corresponding Author : Eun-Suk Jang, Department of Environmental Engineering, Donghae University, Donghae 240-150, Korea  
Phone: +82-33-520-9296  
E-mail: esjang@donghae.ac.kr

높이(상층, 중층, 하층)의 대표지점에서 기온을 관측하고, 건축 구조물의 배열형태 혹은 구조물의 재질, 층수(지표면으로부터의 높이) 및 그 날의 기상조건을 고려한 아파트 단지내의 열, 유동장의 수치모의 결과와 비교를 통하여 아파트 단지내의 열환경의 분포를 해석하였다.

## 2. 관측자료

본 연구에서는 대전광역시의 주거지역에 있는 D 아파트 단지를 실험 대상지역으로 선정하여 전산유체역학(Computational Fluid Dynamics; CFD)에 기초한 열·유체 유동 컴퓨터 프로그램을 이용, 아파트 단지의 수평·수직단면에서의 풍속분포 및 온도 분포를 계산하기 위하여, 여름철 아파트 단지내에서 부는 바람의 주풍향과 풍속, 각 아파트 동의 크기, 동과 동사이의 간격, 주변 도로까지를 포함하는 전체영역을 계산범위로 채택하였다. 실험 대상 아파트 단지의 규모 및 배치를 나타낸 평면도는 Fig. 1과 같다. 또한 여름철 아파트단지내의 열환경 및 풍환경의 특성을 파악하기 위하여 전형적인 여름날씨를 보인 8월 16일, 아파트 단지내의 기류의 유입구 및 아파트의 수직높이를 하층(6m), 중간층(22m), 최상층(38m)으로 나누고 Data Logger(HOBO:H08-006-04)를 이용, 각 지점에서 아파트 벽면 온도 및 외기 온도를 측정하였다. 또한 수치계산의 초기자료로 사용하기 위하여 도로, 바닥 및 건물 벽의 온도를 측정하였다.

## 3. 수치계산

### 3.1. 일반지배방정식

기본적인 물리법칙을 연속체로 가정한 유체에 적용할 경우 유체의 유동은 속도, 압력, 밀도, 점도와 온도의 시간적·공간적 좌표에 의하여 미분의 형태로 나타낼 수 있다. 보존법칙을 수학적으로 표현한 것으로 물질의 질량은 생성되거나 소멸함이 없이 보

존된다는 질량보존의 법칙과 시스템의 운동량의 시간 변화율은 유체에 가해지는 힘의 합과 같다고 하는 운동량보존의 법칙 그리고 한 시스템이 한 사이클을 수행하는 동안 주위로부터 가해진 열은 시스템이 주위에 대하여 한 일에 비례한다고 하는 에너지보존법칙 등을 열거할 수 있다<sup>4)</sup>. 이러한 기본방정식을 유체에 적용할 경우 대상유체는 연속체로 가정하여 유체의 유동은 변수인 속도, 압력, 밀도, 온도와 이들의 시간적·공간적 미분형태로 표현할 수 있다. 3차원 x-y-z 좌표계에서 유해물질의 확산에 관한 기체의 운동을 기술하기 위해서는 운동방정식을 정상상태, 비압축성, 뉴우톤 유체로 가정한다. 본문에서 수치해석에 사용한 일반 지배방정식<sup>5,6)</sup>은 다음과 같다.

질량보존 방정식(연속방정식)은

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = S_m$$

$S_m$  : 상변화에 의한 추가된 질량

운동량보존 방정식은

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) \\ = \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \rho g + F_i \end{aligned}$$

$P$  : static pressure,  $F_i$  : external body force,  $\tau_{ij}$  : viscous stress tensor

에너지보존 방정식은

$$h = \sum_i m_i h_i, \quad h_i = \int_{T_{ref}}^T C_{p,i} dT$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho h) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j h) = \\ \frac{\partial}{\partial x_i} \left( k \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) - \frac{\partial}{\partial x_j} \sum_j h_j + \frac{\partial p}{\partial t} \\ + u_i \frac{\partial p}{\partial x_i} + \tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + S_h \end{aligned}$$

$J_j$ : flux of species  $j$ ,

$k$ : mixture thermal conductivity

$C_p$ : specific heat at constant pressure

$S_h$ : source term(chemical reaction, radiation, heat exchange)

또한 유체지배방정식인 Naviers-Stokes 방정식<sup>7)</sup>

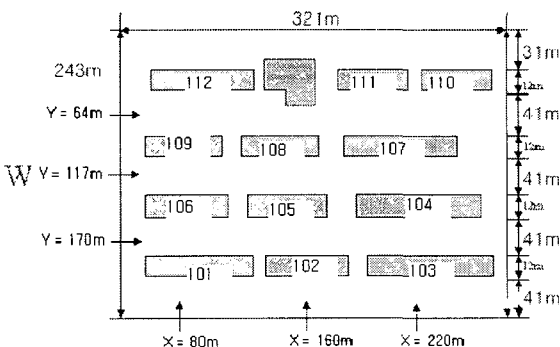


Fig. 1. Ground plan figure of apartment complex.

아파트 단지내의 열섬효과가 대기오염물질 확산에 미치는 영향 해석을 위한 열유동장 수치모의

의  $x, y, z$  방향의 속도성분  $u, v, w$ 의 임의 종속변수  $\phi$ 로 나타낼 때에 임의의 순간변수  $\phi$ 는 시간에 대한 평균값  $\overline{\phi}$ 와 난류 변동값  $\phi'$ 의 합으로 표시할 수 있다.

$$\phi = \overline{\phi} + \phi'$$

따라서 다음과 같은 식이 유도된다.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\overline{\rho \phi}) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\overline{\rho u_i u_j}) = \frac{\partial \overline{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial \overline{\tau_{ij}}}{\partial x_j} - \frac{\partial}{\partial x}(\overline{\rho u_i \phi'}) + \overline{\rho g} + \overline{F_i}$$

### 3.2. 수치해석 방법

본 연구에서 사용한 수치해석 방법은 대단위 아파트 단지를 검사체적으로 여름철 아파트 단지내에서의 풍속분포 및 온도분포를 전산유체역학에 기초한 컴퓨터 프로그램인 FLUENT code를 사용하여 계산하였다.

유동의 난류모델은 일반적인  $k-\epsilon$ 모델을 사용하였고 격자점 사이의 임의의 함수값 보정은 Power-law scheme을 이용하였으며, 운동방정식에서 나타나는 압력과 속도의 연계문제는 SIMPLEC(Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equation Consistent) 알고리즘을 사용하였다.

#### 3.2.1. 초기조건

Fig. 1에서 D아파트 단지는 남향으로, 전체 12개

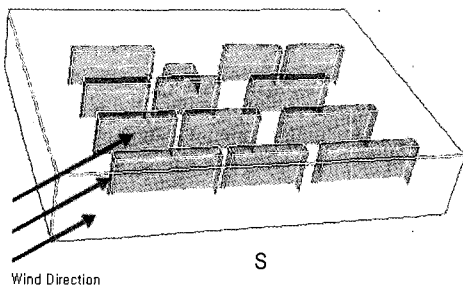


Fig. 2. Main wind direction of observation day in apartment complex.

Table 1. Input datas for CFD simulation

Wind speed	Wind direction	Temperature
2.1 m/s	WSW	atmospheric temperature 306.5K wall temperature 316K

동으로 구성되어져 있고 4면이 6차선 및 2차선의 도로로 둘러싸여져 있다. 실험대상 아파트는 대전광역시 둔산지역에 위치하고 있으며, 기류의 유입구인 풍상측의 초기 풍향, 풍속자료는 그 지역의 주풍향을 사용하였다. 여름철 주풍향은 서남서풍으로 최근의 30년치 통계분석에 의하면 주로 서풍계열이 지배적이었다. 모델의 초기 입력조건으로 풍속은 아파트 단지 내에서 관측을 실시한 날(8월 16일)의 평균 풍속과 Fig. 2에서와 같이 정남향으로 배치되어 있는 아파트단지를 향하여 불어 들어오는 주풍향(WSW 풍), 관측된 아파트 벽면의 온도 및 단지내의 대기온도를 Table 1과 같이 입력하여 계산을 실행하였다.

## 4. 결과 및 토의

### 4.1. 아파트의 높이에 따른 온도 분포

Fig. 3은 아파트 단지내의 대표지점인 104동, 105

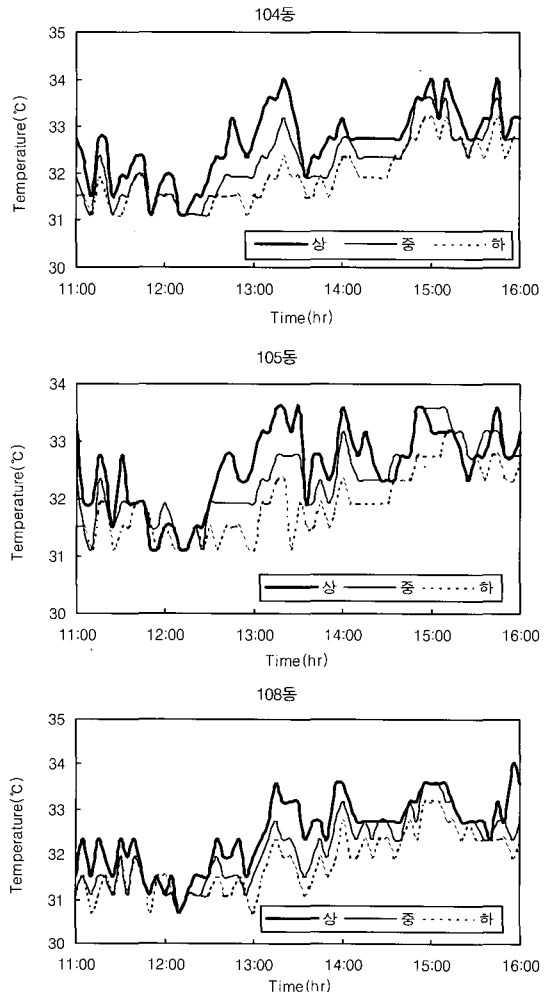


Fig. 3. Daily variation of atmospheric temperature in apartment complex.

동, 108동에서 8월 16일 하루동안 지상으로부터 아파트 높이(상층, 중층, 하층)에 따른 대기온도를 측정된 결과이다. 아파트 최상층에 위치하고 있는 옥상까지의 높이는 41m이고, 각각 지상으로부터 6m(하층), 22m(중층), 38m(상층)에서의 하루 중 아파트 내의 대기온도 분포를 나타내고 있다. 오전 11시에서 12시 사이에는 측정을 실시한 3동 모두 하층과 중간층에서는 거의 온도 차이를 보이지 않거나 거의 동일한 온도 분포를 보이고 있으며, 상층과도 약 0.5℃ 미만의 차이를 보이고 있다. 그러나 정오가 넘어서면서 태양고도가 높아져 일사량이 많아지고 콘크리트로 되어있는 아파트 구조물의 벽면 및 최상층의 옥상으로부터 발생하는 복사열의 증가로 인하여 하층과 상층의 온도차는 약 1℃이상으로 증가하였고 최대 2℃정도까지의 차이를 보였으며, 한낮에 전체적으로 하층에서 상층으로 갈수록 높은 기온 분포를 하고 있음을 알 수 있다. 이는 대류권내에서 온도는 높이에 따라 감소하며, 일출전의 지표층에서 형성되었던 복사역전은 일출 후 기온이 상승하여 일몰 전까지 불안정층을 형성하는 것이 보통이지만, 구름이 없고 일사량이 많으며, 바람이 약한 여름철 낮 동안 대단위 아파트 단지내의 아스팔트 및 콘크리트 구조물로부터 방출되어지는 복사에너지에 의하여 태양의 고도에 따라 음지와 양지를 반복하고 주변의 식물에 의한 기온 하강효과의 영향을 받는 하층부분보다 태양에 노출되어진 상층부분의 대기온도가 훨씬 높음을 알 수 있다. 또한 오전에는 하층과 중층의 기온이 거의 동일하고, 오후에는 중층과 상층의 기온이 거의 같은 값을 보이고 있음을 볼 때, 오전에는 기온이 낮은 혼합층의 영역이 중층까지 달하고 있고, 오후에는 한낮에 한층 더 높아진 하층의 기온영역보다 위쪽에 해당하는 중, 상층 부분에서 중, 상층의 풍속차이에 의하여 생성되는 역학적인 난류에 의한 대기의 혼합이 발생되어질 것으로 판단 되어진다. 따라서 아파트 주변에 위치하고 있는 도로로부터 배출되어지는 대기오염물질들에 의한 노출정도는 출근 교통량이 많은 오전에 저층 부분에서 클 것으로 예상된다. 관측치와 비교하기 위하여 CFD 프로그램의 변수 수정을 통하여 계산되어진 아파트 단지의 동과 동 사이, 4곳의 연직 단면의 온도장을 Fig. 4에 나타내었다.

아파트 단지내 온도의 연직분포는 풍상층에서는 별 뚜렷한 변화를 보이지 않고 있으나, 아파트 건물내의 풍하측에서 최하층과 상층의 온도가 약 1℃이상의 차이를 보이고 있음을 알 수 있다. 이는 관측에서 측정되어진 연직온도 분포와 거의 일치하고 있음을 알 수 있다.

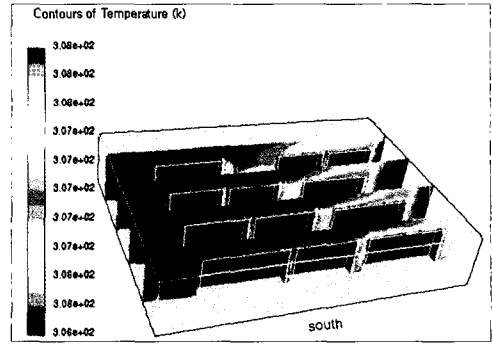


Fig. 4. Calculated temperature distribution of vertical section by CFD simulation in apartment complex.

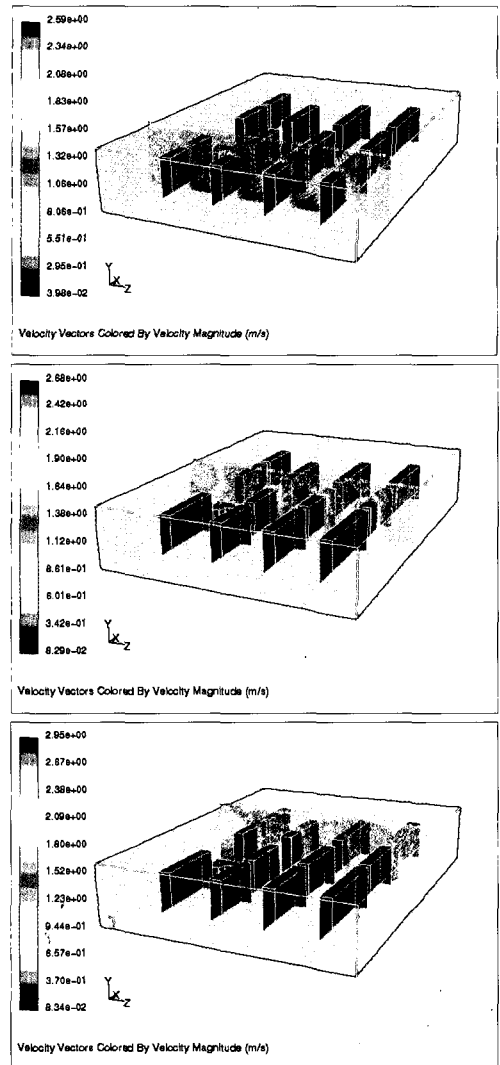


Fig. 5. Wind direction and wind speed of X-direction by CFD simulation in apartment complex(X= 80m, 160m, 220m).

아파트 단지내의 열섬효과가 대기오염물질 확산에 미치는 영향 해석을 위한 열유동장 수치모의

#### 4.2. X-축방향 수직단면의 풍향, 풍속의 분포

대기오염물질에 의한 피해 예상지역을 결정하는 것은 풍향이며, 오염물질의 농도를 좌우하는 것은 풍속과 난류이다. 도로에 인접한 아파트 단지 내에서 근접 도로의 다양한 교통수단으로부터 대기 중으로 배출된 대기오염물질들의 확산, 희석은 그때의 기상조건, 지형, 지물에 의하여 크게 좌우되기 때문에 그 상태를 정확하게 파악하기는 어렵다. Fig. 5는 아파트 단지의 x축 방향으로 수직단면의 풍향, 풍속의 분포를 나타내고 있다. 단면들은 앞 절, Fig. 1의 아파트단지 평면도에서 X-축 방향으로 각각 80m, 160m, 220m인 곳에서 수직으로 자른 단면에서의 유동장을 보여 주고 있다. 정남향으로 배치되어 있는 아파트단지를 향하여 불어 들어오는 서남서풍을 주 풍향으로 설정하였으므로 바람이 유입되는 풍상측에는 동과 동 사이에서 2.1m/s 정도의 풍속을 계속 유지하고 있었으며, 아파트 외곽의 왼쪽 측면도로변에서는 아파트 건물을 통과하면서 마찰에 의해 약해진 풍속이 약해지고 있음을 알 수 있다. 또한 풍하측에서는 앞절, Fig. 4에서 보여준 아파트 단지내의 온도장의 분포에서 알 수 있듯이 112동과 109동의 사이, 103동과 109동의 사이에 풍속이 현저히 저하되었음을 알 수 있다.

#### 4.3. Z축방향 수직단면의 풍향, 풍속의 분포

Fig. 6은 Z축방향, Fig. 1에서 보여진 바와 같이 Z=64m, 117m, 170m에서의 수직단면의 풍향, 풍속의 분포를 나타낸 것이다. 정남향의 아파트의 위치에서 볼 때 아파트의 북쪽면으로 갈수록, 아파트의 가운데로 갈수록 풍속은 약해지고 있음을 알 수 있다. 또한 풍하측으로 갈수록 아파트의 하층에서 상층으로 갈수록 풍속이 약해지고 있음을 알 수 있다. 이는 아파트 건축 구조물로 인한 유동의 방해와 콘크리트 및 아스팔트로 인한 태양복사에너지의 내부 열원에 의한 열확산의 속도가 저하되고 있음을 알 수 있다. 또한 이로 인한 기류의 정체를 유발하여 지면에 인접한 저층의 대기온도보다 고층의 기온이 상승하는 열섬효과가 나타나게 되며, 대기오염물질은 상층으로 확산되기보다는 저층부분에 장시간 체류하게 된다.

### 5. 결론

도로에 인접한 아파트 단지 내에서 건축 구조물의 배열형태 혹은 구조물의 재질, 층수(지표면으로부터의 높이) 및 그날의 기상조건에 따른 아파트 단지내의 열, 유동장을 분석하여 보았다. 대단위 아파트 단지는 콘크리트화된 건물에 의해 주간에는 많은 태양복사열을 흡수하여 높은 온도를 유지하게 되며

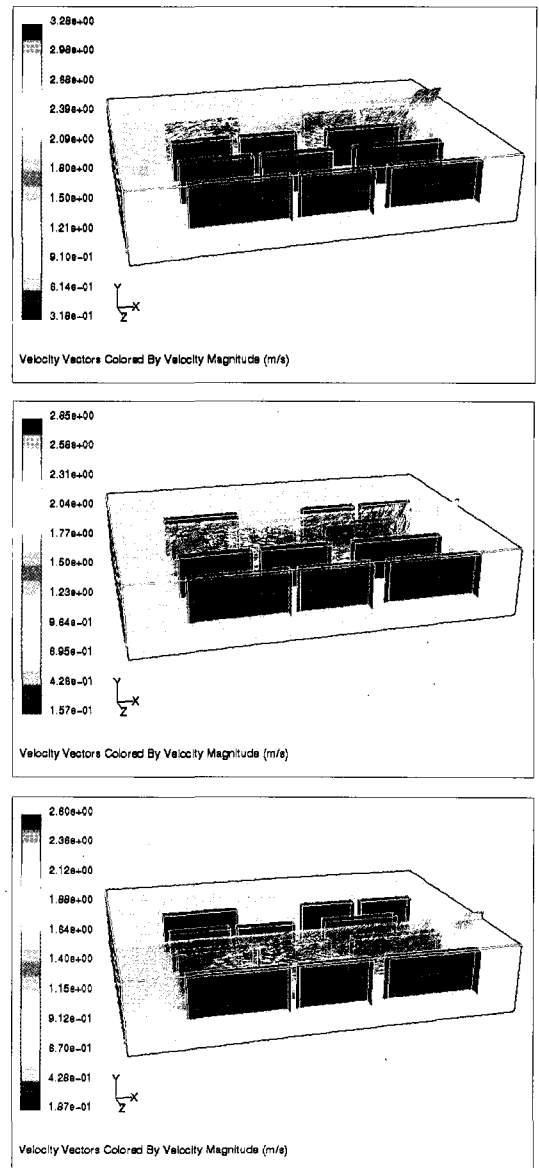


Fig. 6. Wind direction and wind speed of Z-direction by CFD simulation in apartment complex(Z=64m, 117m, 170m).

로 기류의 정체를 유발하고, 지면에 인접한 저층의 대기온도보다 고층의 기온이 상승하게 되는 역전현상을 일으키게 된다. 바람이 약하고 상층으로 갈수록 온도가 높아지는 여름철 한낮에 발생하는 이러한 도시내의 아파트 단지에서 발생하는 일시적인 한낮의 복사역전현상은 아파트의 저층부분에 오염물질을 정체시키는 역할을 한다. 또한 아파트 건축 구조물로 인한 유동의 방해와 콘크리트 및 아스팔트로 인한 태양복사에너지의 내부열원에 의한 열확산

의 속도가 저하되고 있음을 알 수 있었다. 이로 인한 기류의 정체를 유발하여 지면에 인접한 저층의 대기온도보다 고층의 기온이 상승하는 열섬효과가 나타나게 되며, 대기오염물질은 상층으로 확산되기보다는 저층부분에 장시간 체류하게 된다.

고층화 추세로 가고 있는 요즘 동과 동 사이의 공간 확보 및 적절한 식생의 조절을 통하여 대기오염물질의 활발한 확산을 인위적으로 유도하고, 저층부분에 아파트 주변의 도로로부터 배출된 대기오염물질이 한낮에 장시간 동안 정체하는 일이 없도록 하여 도로변에 인접한 아파트 주민들의 고농도의 대기오염물질에로의 노출로 인한 피해를 최소화하여야 할 것이다.

또한 본 연구는 향후 대단위 아파트 및 산업단지 조성시에 주위의 자연여건과 풍환경 등의 특성을 고려하여 보다 쾌적한 도시건설을 위한 기초자료로 적용될 수 있을 것이다.

#### 감사의 글

이 논문은 정부의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구임(R04-2003-000-10192).

#### 참고 문헌

1) 변용섭, 1999, 아파트 단지 대기오염물질 확산 규

명을 위한 열, 유체 유동해석, 한밭대학교 대학원 석사학위논문, 7-25.

- 2) 전영남, 엄태인, 조선희, 1997, 빌딩주위의 자동차 배기가스의 분산에 대한 수치해석, 대한환경공학회지, 19(5), 601-610.
- 3) Bowers, J. F., J. R. Bjorklund and C. S. cheung, 1979, Industrial Source Complex Dispersion Model User's Guide, I&II, U.S. EPA, Research Triangle, North Carolina.
- 4) 장은숙, 2004, 전산유체역학을 이용한 대기오염물질의 확산 경로 분석, 동해대학교 논문집, 3, 364pp.
- 5) Henkes, R. A. and W. M. Benchmak, 1992, Computation and Experiment for Turbulent Natural Convection in a Square Cavity, Joint Workshop of Eurotherm & Ercoftac, Delft, The Netherlands, Mar, 25-27.
- 6) Kjaldman, L., 1992, Numerical flow simulation of dust deflagrations, Power Technology, 71, 163-169.
- 7) Patankar, S. V., 1980, Numerical Heat Transfer and Fluid Flow, Hemishpere Publishing Corporation, New York.