

산악 계곡지형에서의 오염확산에 관한 연구(II) : 수치해석

심우섭[†], 김석철^{*}, 유성연^{**}

국방과학연구소, ^{*}볼트환경기술, ^{**}충남대학교 기계설계공학과

A Study on the Pollutant Dispersion over a Mountain Valley Region (II) : Numerical Simulation

Woo-Sup Shim[†], Seogcheol Kim^{*}, Seong-Yeon Yoo^{**}

Agency for Defense Development, Daejeon 305-600, Korea

^{*}BOOLT Simulation Technology, Seoul 137-844, Korea

^{**}Department of Mechanical Design Engineering, Chungnam National University, Daejeon 305-764, Korea

(Received August 5, 2005; revision received September 23, 2005)

ABSTRACT: Passive gas dispersions over a 1/1000 scale terrain model at Eiffel type wind tunnel were reproduced by numerical simulation. Large eddy simulation was used to treat the sub-grid scale turbulences. The terrain features were represented by millions of point forces densely distributed over the solid surface using the virtual boundary method. The model simulations agreed very well with the experiments in a consistent fashion for all wind directions. The measured profiles of the wind speeds as well as the tracer gas concentrations were nicely simulated by the CFD model at most locations scattered over the model terrain. With scale factor adjusted and the thermal stratification effects incorporated, the CFD model was expected to provide reliable information on pollutant dispersions over the real complex terrains.

Key words: Pollutant dispersion(오염확산), Large eddy simulation(LES), Virtual boundary method(가상경계기법), Passive gas dispersion(피동적 가스확산), Complex terrain (복잡지형)

기 호 설 명

Cs : Smagorinsky 일반상수

D_F : 유동장 변형텐서, $\frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)$

R : Pearson 상관계수

T : 모델과 실험의 온도비교 위치

W : 모델과 실험의 풍속비교 위치

그 리 스 문 자

ν_T : 난류에디 동점성계수

Δ : 평균 모델격자 크기, $\sqrt{\Delta_x \Delta_y \Delta_z}$

Δx : x 좌표 모델격자 크기

Δy : y 좌표 모델격자 크기

Δz : z 좌표 모델격자 크기

[†] Corresponding author

Tel.: +82-42-821-4398; fax: +82-42-821-2391

E-mail address: woosup@add.re.kr

1. 서 론

계곡과 능선으로 고도변화가 심한 산악지형이

나 복잡한 형태의 인공구조물이 위치한 도시지역에서 대기오염확산은 매우 복잡한 양상을 지닌다. 복잡한 지형 혹은 구조물로 인한 기류변화는 가변적이어서 오염입자의 궤적을 넓은 범위에서 제대로 추적하는 것은 매우 어렵다. 국내는 산악지형이 절대적으로 많고 인구가 도시지역에 집중되어 있어 오염물질의 이류확산(advection and diffusion)을 계산하기 위한 대기확산모델의 주요 대상 영역은 복잡지형이다. 이러한 조건 하에서 평탄한 지형에서 상대적으로 단순한 특성의 기류 및 확산현상을 대상으로 개발된 단순모델(예, Gaussian 연기모델⁽¹⁾ 등)은 신뢰성이 크게 떨어진다. 단순모델은 오염확산에 영향을 주는 기류조건, 곧 평균 유속 및 난류의 공간분포를 유형화된 조건에 대해서 단순한 형태로 대수적으로 모델로 모형화한다. 그 결과 신속한 계산이 가능하다는 장점이 있지만, 지형조건이 복잡해질 경우 모델가정과 실제현상 간에 차이가 커져 모델 정확도가 현저히 떨어지는 문제점이 있다.

CFD 모델은 산악이나 도시 등의 복잡지형에서 확산양상을 정확하게 예측하기 위한 도구로 주목받고 있다. CFD 모델은 다양한 조건에 대해서 일반적으로 성립하는 근본적인 현상모델에 근거하여 구성된다. 유체에 대한 운동방정식, 유동장내 오염물질의 거동을 지배하는 물질전달방정식, 난류모델 등에 대한 수치해석적 이론이 CFD 모델의 토대이다. 따라서 지형조건이 복잡한 경우에도 CFD 모델은 여전히 적용 가능하다.

오염확산 연구에서 CFD 모델을 적용한 사례는 꾸준히 증가하고 있다.⁽²⁻³⁾ Pullen et al.⁽⁴⁾은 미국 Chicago와 Washington DC의 도시화된 지역을 대상으로 해당지역 내 개별건물을 상세히 고려하여 유동장 및 오염확산 해석을 수행한 바 있다. 그러나 계산부하 및 모델 정확도와 관련하여 최적 공간해상도 설정과 비유선형 고체경계면에 대한 적절한 난류모델 선택 등은 여전히 해결해야 할 문제이고, 특별히 광역 확산현상에 대한 CFD 모델의 예측 정확도에 대해서는 보다 충분한 검증이 필요하다.

본 연구에서는 CFD 모델에 의한 수치해석적 방법으로 산악지형에 대한 오염확산을 해석하였다. 해석결과를 풍동실험에서 얻어진 결과⁽⁵⁾와 비교 분석함으로써 CFD 모델의 적용성(예측 정확도)을 평가하고자 하였다. 균등 직교좌표계에 대한

유한차분법을 적용하였으며, 난류해석기법은 LES (Large Eddy Simulation)를 사용하였다. 지형의 영향은 가상경계기법(Virtual Boundary Method)을 사용하여 고려하였다.

2. 수치해석

2.1 해석지형과 지배방정식

해석지형은 풍동실험과 동일하게 실제 산악지형을 1/1000로 축소하여 적용하였다. Fig. 1에 나타낸 바와 같이, 해석지형은 북서에서 남동방향으로 입구가 넓은 계곡이 형성된 산악지형으로, 국내에서 흔히 관찰할 수 있는 형상이다. Fig. 1의 해석지형은 북서풍인 경우이며, 풍동확산 실험시 배출원과 농도 혹은 온도 계측위치를 표시하였다.

수치해석모델을 구성하는 지배방정식은 다음과 같다.

$$\nabla \cdot \vec{V} = 0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + \vec{V} \cdot \nabla \vec{V} = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \nu \nabla^2 \vec{V} \tag{2}$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \vec{V} \cdot \nabla C = S_c + \lambda \nabla^2 C \tag{3}$$

식(1)과 식(2)는 비압축성 운동방정식(Navier-Stokes 방정식)으로, $\vec{V} [= (u, v, w)]$ 는 속도벡터이며, ρ 와 ν 는 각각 공기의 밀도와 동점성계수이다. 식(3)은 기류에 의해 수동적으로 이류확산되

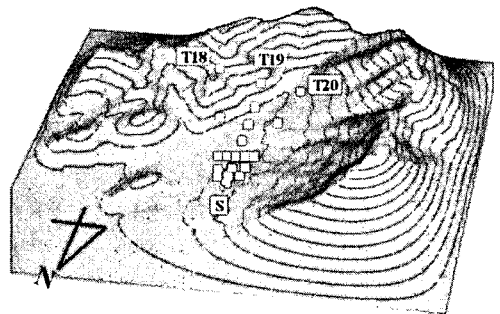


Fig. 1 Terrain model for wind direction of NW: S and T's denote the source and measurement points.

는 물질전달방정식으로, C 는 오염물질의 농도이며, S_c 는 오염물질의 생성항이고, λ 는 물질확산계수이다.

CFD 모델링을 위한 수치모델방정식은 유한차분법을 적용하여 공간에 대해서는 2차 정확도의 차분오차를 지니도록 구성하였고, 시간에 대해서는 3차 정확도의 Runge-Kutta 기법을 적용하였다.

2.2 가상경계기법과 LES

지형조건을 고려하기 위해서 VBM을 적용하였다. VBM은 FDM 고정격자를 사용하여 유동경계면이 변화하는 문제를 해석하기 위해 고안된 것으로, 최초로 제안한 Peskin⁽⁶⁾은 심장 내 혈류를 모델링하는데 VBM을 적용하였다. Peskin 이후 유사하지만 각기 다른 특징을 지닌 VBM이 다양하게 시도되었다.⁽⁷⁾ 본 연구에 적용한 것은 Peskin의 방식을 목적에 맞도록 수정한 것으로,⁽⁸⁾ 다양한 형상에 대해 적용할 수 있고 CFL(Courant-Friedrichs-Levy) 조건이 만족되면 수치 안정도가 보장된다.⁽⁹⁾

VBM에서는 고체경계면 등과 같은 유동장 내부의 물체를 델타함수의 합의 집합으로 간주하여 유동장 내부의 필요 위치에서 델타함수 힘을 직접 제어하므로, 고체경계면의 공간적 이동과 생성과 소멸 등의 시간적 변동도 용이하게 표현할 수 있다. 유동장 내 일정위치에서 규칙 혹은 불규칙적으로 명멸하는 힘은 난류유동을 생성한다. 힘의 크기와 지속주기 공간분포 등을 조절함으로써 원하는 형태의 난류유동을 생성할 수 있다. 본 연구에서는 델타함수형태의 forcing 함수를 모델링 대상 공간 내 임의의 지점 및 임의의 순간에 부여할 수 있도록 했는데, 이러한 VBM forcing 함수의 기능을 활용하여 적절한 난류조건을 생성하였다.

격자크기 이하의 난류성분을 모델링하기 위해서 LES(Large Eddy Simulation) 모델을 적용하였다. 본 연구에 적용한 LES는 Smagorinsky가 제안한 것으로,⁽¹⁰⁾ Navier-Stokes 방정식의 동점성계수가 다음의 난류에디(turbulent eddy) 동점성계수(ν_T)로 대체된다.

$$\nu_T = (Cs\Delta)^2 \sqrt{2D_F \cdot D_F - \frac{2}{3}(\nabla \cdot \vec{v})^2}^{2/3} \quad (4)$$

식(4)에서 D_F 는 유동장 변형텐서(deformation

tensor)이며, Cs 는 Smagorinsky 일반상수이다. 다양한 경우에 대한 선행연구에서 Cs 의 적당한 값은 0.15~0.25 범위인 것으로 보고되었다.⁽¹¹⁻¹³⁾ 본 연구에서는 Cs 의 값으로 0.17를 적용하였다. 식(4)에서 $\Delta = (\Delta_x \Delta_y \Delta_z)^{1/3}$ 는 평균 격자크기이다. 여기서 $\Delta_x, \Delta_y, \Delta_z$ 는 각각 x, y, z 방향으로 격자간격이다. 본 연구에서는 균등한 격자간격을 사용했으므로 Δ 는 상수이다. 본 과업에 적용한 LES 모델은 Smagorinsky가 제안한 최초 모델로 가장 단순한 형태의 모델이다. 이외에도 다양한 형태의 LES 모델(dynamic LES model)이 제안된 바가 있으나⁽¹⁴⁻¹⁵⁾ 본 연구에 참조될 수 있는 기존 비교연구⁽¹⁶⁾를 분석하면 dynamic 모델의 우수성은 현저하지 않거나 미미한 것으로 판단된다. 따라서 본 연구에서는 dynamic 모델 대신 Smagorinsky의 LES 모델을 선택하였다.

난류모델로 많은 계산이 요구되는 LES를 사용한 것은 본 연구조건에 대해서 LES가 더 정확할 것으로 생각되기 때문이다. 뭉툭한 물체(blunt body) 주변의 유동장을 대상으로 여러 난류모델을 비교한 기존연구에 의하면,⁽¹⁷⁾ LES에 비해서 RANS(Reynolds Averaged Navier-Stokes) 모델 결과가 현저히 부정확한 것으로 확인된 바 있다. 이는 RANS 모델의 보정인자가 대부분 유선형 물체 주변에 대한 유동장에 맞추어졌기 때문일 것이다. 유동장해석에서 난류모델이 폭넓게 이용된 엔지니어링 유동의 경우 유선형 유동장 경계가 많기 때문에 RANS 모델의 이런 단점이 심각한 문제가 되지 못하였다. 그러나 본 연구에서와 같이 복잡지형에서 오염확산연구를 위한 유동장 해석은 기존 엔지니어링 유동에 대한 경우와는 많이 다르다. 표고차가 큰 산악지형은 유선형과 많은 차이가 있다.

난류확산이 분자확산효과보다 훨씬 우세하다는 가정 하에 식(3)에서 물질확산계수(λ)는 난류 물질확산계수(λ_T)로 대체하였다. 난류 물질확산계수(λ_T)와 난류확산계수(ν_T) 비는 일정한 것으로 간주하였다.

$$\lambda_T = \frac{\nu_T}{S_c}, \quad S_c = 0.7 \quad (5)$$

2.3 계산조건

풍동실험과 근사한 조건에 대해서 계산을 수행

하였다. 풍동실험과 동일하게 4가지 풍향조건(NW, NNW, N, NNE)에 대해서 각각 모델링을 하였다. 모델좌표, 곧 CFD 해석방정식의 좌표는 풍동덕트에 상대적으로 고정시켰다. 모델좌표에서 y 축은 풍동덕트와 같고 접근류는 $+y$ 에서 $-y$ 를 향한다. 따라서 입구경계는 항상 $+y$ 위치로 고정된다. z 축은 수직방향이며, x 축은 접근류에 수직인 횡방향이다. 계산에서도 실험과 마찬가지로 풍향에 따라 바닥지형이 모델좌표계 상에서 회전한다.

풍동실험과 직접 비교하기 위해서, 풍동실험에서 풍속과 SF₆ 가스농도, 그리고 온도를 측정할 위치에서 각각 평균 풍속과 평균 농도를 계산하였다. Fig.2는 풍속계산 수평위치를 나타낸 것이다. 풍속의 측정위치는 실험과 마찬가지로 지형에 고정된다. 풍향에 따라 지형모형이 회전하므로 계산좌표계 상에서 풍속측정위치도 풍향조건에 따라 회전한다. Fig.3은 농도계산 수평위치이다. 풍동실험에서 온도/농도 측정위치는 풍향에 따라 설정하였으므로, 계산에서 농도계산위치는 모델좌표계에 고정된다. 비교의 편의를 위해서 풍속 및 농도 수평계산위치는 풍동실험과 동일한 부호(W1~W20; T1~T20)로 표기하였다. Fig.4는 각 풍향조건에 대해서 풍속과 농도의 비교위치를 표시한 것이다.

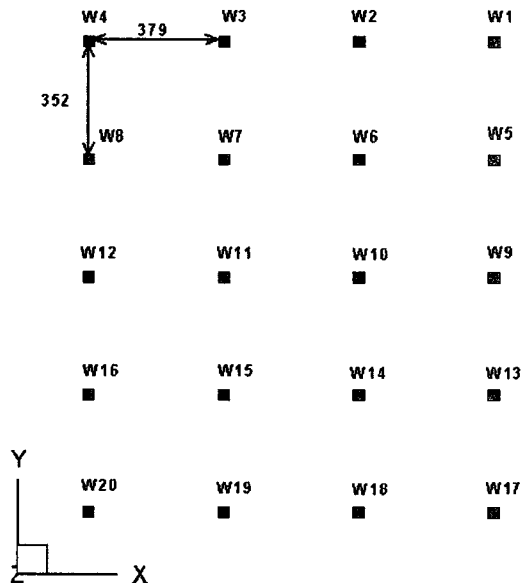


Fig. 2 Horizontal locations for the wind speed evaluations in the CFD coordinate.

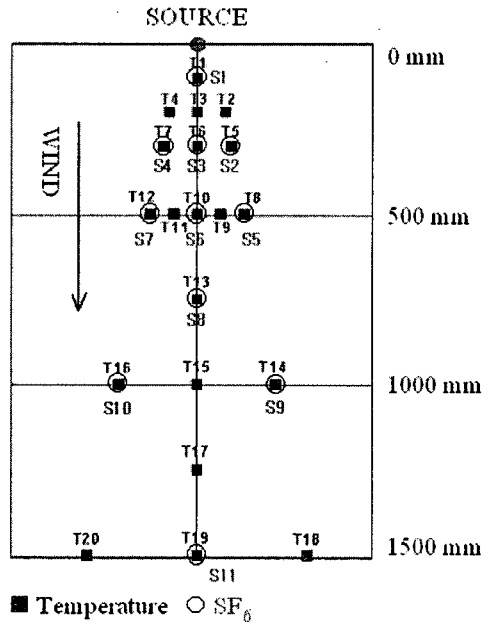


Fig. 3 Horizontal locations for the concentration which lie in the same points with the temperature/SF₆ measurements in the wind tunnel experiment.

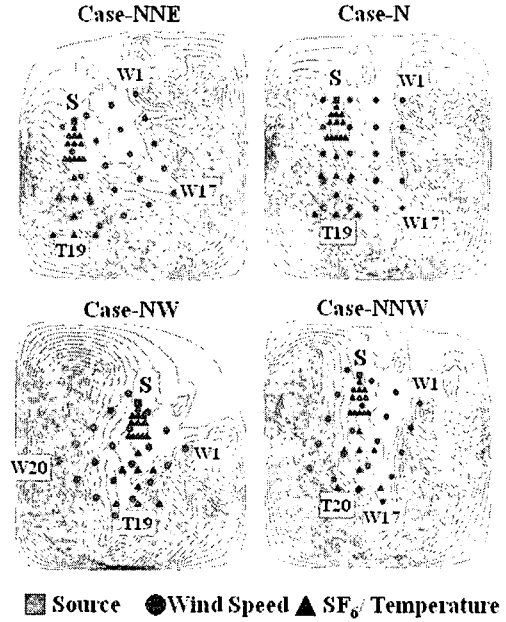


Fig. 4 Horizontal points of the concentration and wind speeds for wind direction of NNE, N, NW and NNW.

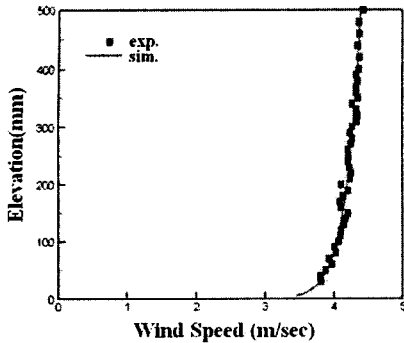


Fig. 5 The average profile of the inlet wind speed.

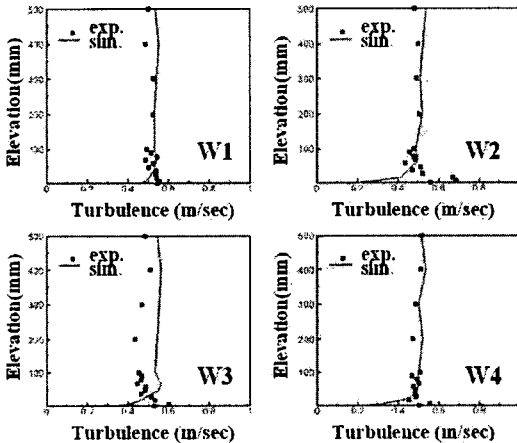


Fig. 6 The vertical profile of the wind turbulences at the first row of the wind measurement points (W1~W4).

경계조건으로 입구에서는 풍동실험과 동일한 풍속조건을 적용하였다(평균 풍속 Fig. 5, 난류강도 Fig. 6). 측면과 상부 면에서는 미끄러짐 속도조건 (slip velocity condition : 경계면 격자점에서 경계면에 평행한 속도성분은 가장 근접한 내부 격자점에서의 속도성분과 동일하게 설정)을 부여하였다. 출구에서는 개방경계조건을 적용하였다. 곧 압력은 대기압으로 일정하고 출구방향으로 속도 변화율이 없는 Neumann 조건을 적용하였다. 농도모델링을 위한 방출조건으로는 가스가 100 mm × 20 mm × 20 mm 크기의 육면체의 6개면에서 낮은 속도(0.6 m/s)로 방출되도록 설정하였다. 가스를 방출하는 육면체의 중심은 풍동실험에서 히터의 중심과 동일한 곳에 오도록 하였다. 모델영역

은 직육면체 내부공간으로 3,300 mm × 4,400 mm × 1,000 mm (x -방향, y -방향, z -방향)이며, 모델 격자수는 660,000개 (= 100 × 132 × 50)이다. 따라서 모델링 공간해상도는 수평방향(x , y 방향)으로 약 33 mm이며, 수직방향(z 방향)으로 20 mm이다.

3. 수치해석 결과 및 고찰

3.1 풍 속

풍향조건 N에 대해서 CFD 모델에 의해 계산된 평균 풍속의 연직분포를 Fig. 7에 제시하였다. Fig. 7에서 실선은 해석결과이며, 사각기호는 풍동실험자료이다. 입구에 인접한 지점으로부터 먼 지점에 이르기까지 전산해석과 실험이 전반적으로 잘 일치하는 양상을 보인다. 해석과 실험은 입구에서 먼 곳에서 오히려 더 잘 일치하는데, 이는 전산해석과 실험의 입구경계조건의 차이가 입구에 가까울수록 더 큰 영향을 미치기 때문인 것으로 추측된다. 해석과 실험 간의 차이는 지면에 인접한 층, 곧 풍속이 낮은 지역에서 가장 크며, 경계층의 두께나 풍속의 수직분포양상은 잘 일치한다. W20 위치에서 경계층 상부의 풍속 overshoot, W17 위치에서 경계층 내에서 전반적으로 완만한 기울기를 유지하는 풍속분포, W9 위치에서 지표층 상단에서 급격하게 변화하는 풍속기울기 등이 해석과 실험에서 유사하게 관찰된다.

나머지 풍향(NNE, NNW, NW)에 대해서도 실험풍속과 해석결과는 전반적으로 잘 일치한다. Fig. 8은 W10 지점에서 풍향별로 평균 풍속분포를 표시한 것으로 모든 풍향에 대해서 해석결과는 실험과 유사하다. Fig. 9는 모든 풍향의 풍속에 대해 해석결과와 풍동 실험자료의 산포도이다. 해석과 실험은 높은 상관관계를 보인다(상관계수 $R = 0.88$, 자료개수 = 1,200개). 낮은 풍속(약 3.5 m/s 이하)에 대해서 해석결과가 실험보다 낮다. 즉, 지표면에 인접한 곳에서 풍동실험에 비해서 해석결과의 풍속이 낮다. 해석의 경우 고도가 낮아져 지면에 인접한 위치에서 풍속이 0으로 확실히 근접하는 반면, 실험에서는 이러한 경향이 상대적으로 두드러지지 않는다. 높은 풍속영역, 곧 지표면에 일정거리 이상으로 이격된 위치에서는 이러한 불일치가 현저히 줄어들어 해석과 실험이 훨씬 잘 일치한다.

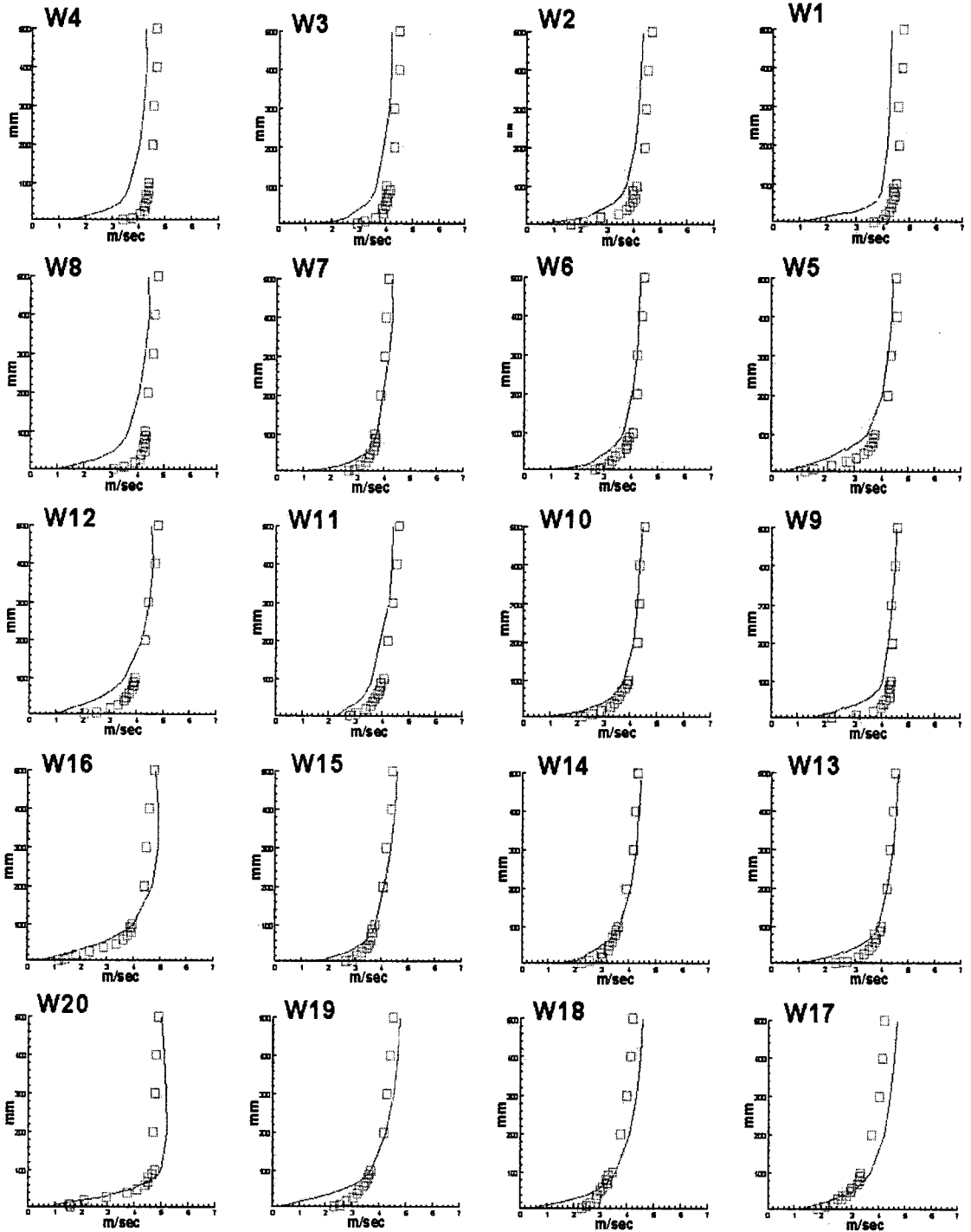


Fig. 7 The vertical profile of the average wind speeds for wind direction of N: solid lines and rectangular captions denote the simulation results and corresponding wind tunnel measurements, respectively.

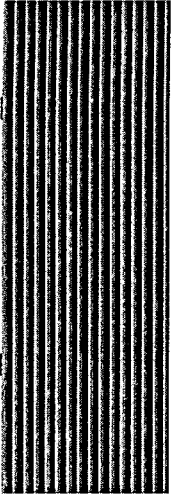


Fig. 8 The wind speed profiles for various wind directions at W10 point.

3.2 추적자 농도

풍향조건 N과 NW에 대해서 CFD 해석에 의해 계산된 평균 농도의 연직분포를 Fig. 10과 Fig. 11에 제시하였다. 각 그림에서 실선은 CFD 해석 결과이며, 사각기호는 풍동실험 온도측정자료이다. 해석과 실험이 전반적으로 잘 일치하는 경향을 보인다. 높은 농도를 보이는 배출원에 인접한 지점에서는 해석과 실험은 거의 정확하게 일치한다. 반면, 농도가 낮은 먼 위치에서는 특별히 풍향 N의 경우 해석과 실험 간에 차이가 커진다. 나머지 풍향(NNE, NNW)에 대해서도 실험과 해석의 비교결과는 유사한 경향을 보였다.

풍향이 N인 경우에는 방출된 추적자가 가파른 경사면을 따라 이동하는 지형조건인데, NW의 경우에는 계곡을 향하여 내려가는 지형이다(Fig. 4 참조). 이러한 지형조건 차이로 인해 추적자의 확산양상이 달라진다. Fig. 10과 Fig. 11에는 지형조건이 상이함으로 인해 나타나는 풍향별 농도분포의 차이가 모델과 실험에서 유사하게 나타난다. 풍향이 N인 경우 배출원에서 방출된 가스 운의 중심이 풍하방향으로 이동하면서 왼쪽으로 휘다. 이러한 경향은 Fig. 10에서 T2, T3, T4(혹은 T5, T6, T7)의 연직농도분포를 비교하여 확인할 수 있다. 그러나 풍향이 NW인 경우에는 추적자가 기류를 따라 풍하방향으로 이동하면서 그 질량중심이 오른쪽으로 편향된다.

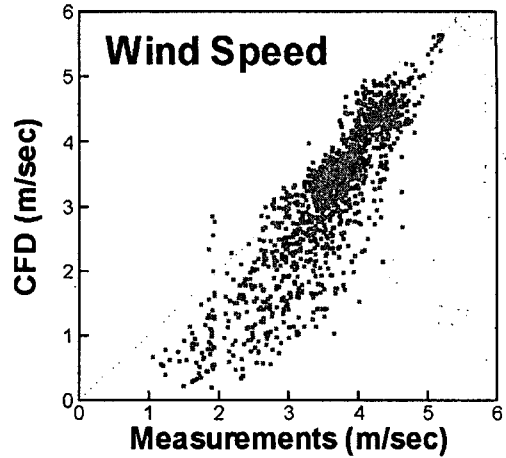


Fig. 9 Scatter plot of computed average wind speeds versus wind tunnel measurements.

방출된 추적자의 질량중심의 고도가 풍하거리에 따라 달라지는 형태도 두 풍향에서 판이하다. 풍향 N인 경우, 산경사면을 따라 풍하방향으로 추적자가 상승 이동하지만 지면에서 질량중심까지의 고도는 별로 변하지 않는다. 그러나 계곡을 향해 사면을 따라 내려가는 지형조건인 풍향 NW의 경우, 추적자가 거의 수평을 유지하며 이동함으로써 지면에서 질량중심까지의 고도는 지형고도가 낮은 지역일수록 높다. Fig. 11에서 T2, T3, T4의 연직분포나 T5, T6, T7의 연직분포 혹은 T8, T9, T10, T11, T12의 연직분포로부터 최고 농도 고도를 비교하여 이를 확인할 수 있다.

Fig. 12는 해석농도와 풍동실험의 SF₆ 농도를 산포도로 표시한 것이다. Fig. 13은 해석과 온도 측정결과를 산포도로 표시한 것이다. 두 경우 모두 모델과 실험 간에 상관관계가 높은데, 비교자료수가 더 많은 해석과 온도 간의 상관성이 더 높다(전산해석과 SF₆ 농도 간의 상관관계수 R=0.82, 비교자료수=155개 : 해석과 측정온도 간의 상관관계수 R=0.92, 비교자료수=773개). Fig. 14는 풍동실험에서 SF₆ 농도와 온도의 산포도이다. 이 경우, 두 측정항목 간의 상관관계수(R)는 0.80이다(비교자료수=73개). 두 측정항목, SF₆ 농도와 온도 간의 상관관계수보다 해석과 각 실험항목 간의 상관관계수가 오히려 더 높다.

각 위치에서 연직 최고 농도와 측정결과의 최고치 간에는 더욱 높은 상관관계를 보인다. 각

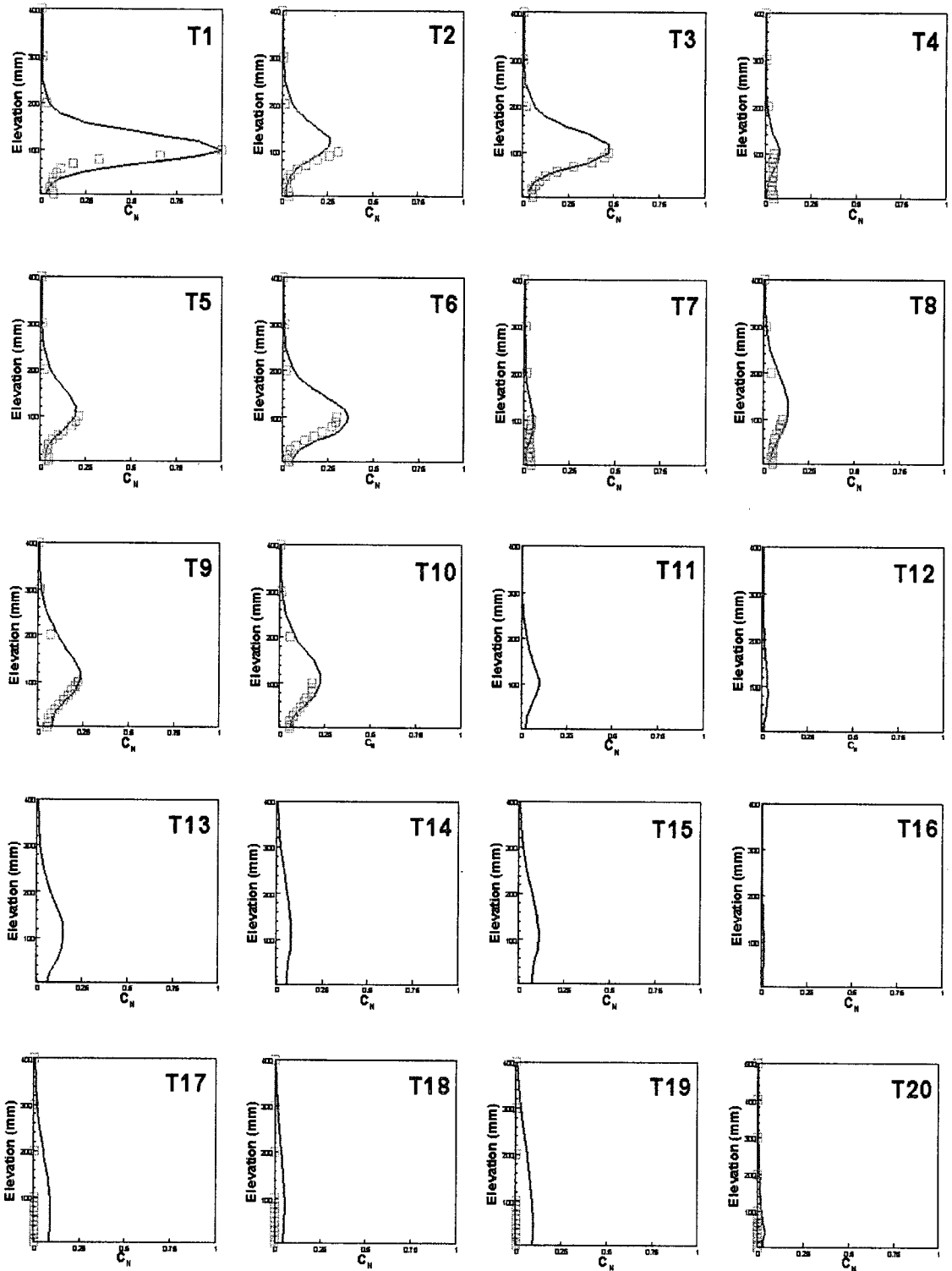


Fig. 10 The vertical profile of the normalized average concentrations for wind direction of N.

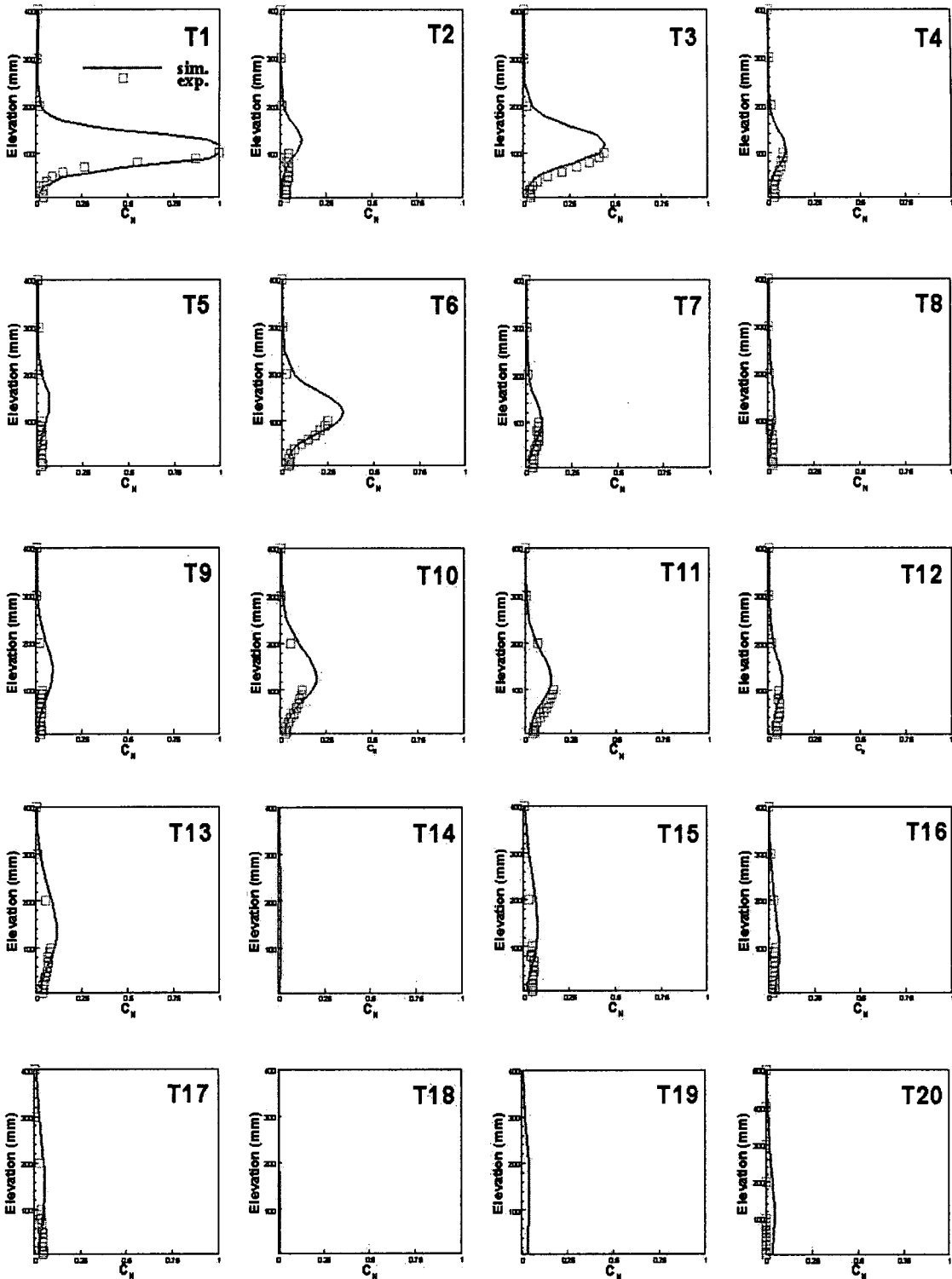


Fig. 11 The vertical profile of the normalized average concentrations for wind direction of NW.

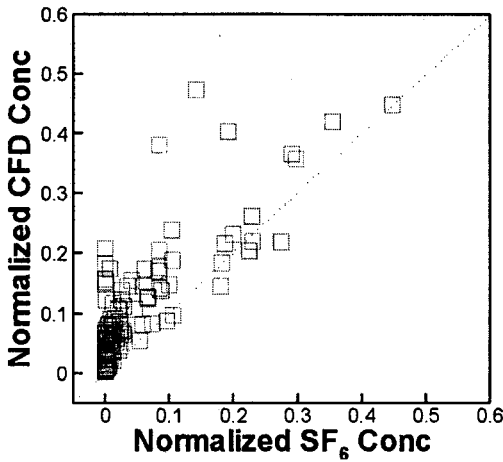


Fig. 12 Scatter plot of SF₆ concentration measurements versus computed concentrations.

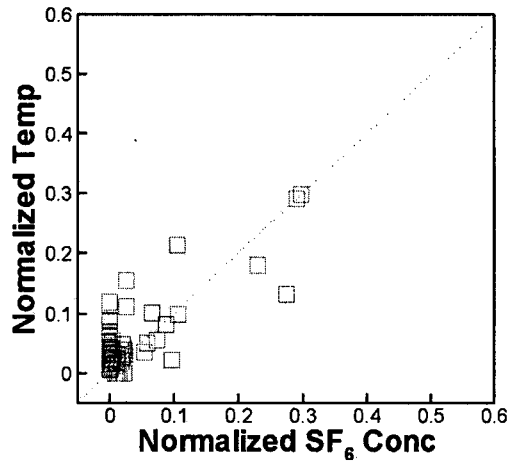


Fig. 14 Scatter plot of SF₆ concentrations versus temperatures in the wind tunnel experiment.

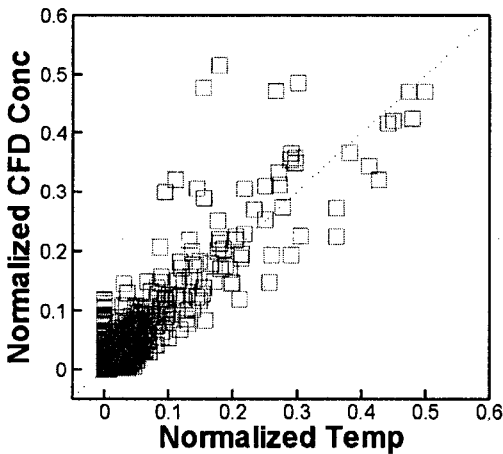


Fig. 13 Scatter plot of temperature measurements versus computed concentrations.

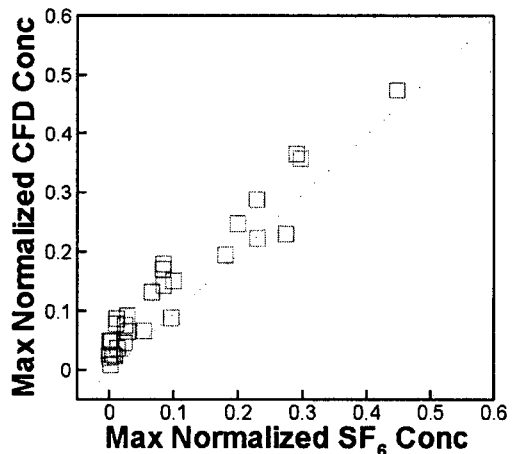


Fig. 15 Scatter plot of maximum SF₆ concentration measurements versus computed concentrations.

수평 비교위치에서 해석농도의 최고치와 실험의 SF₆ 농도 최고치에 대한 산포도를 Fig. 15에 나타냈다. 두 자료 간의 상관계수가 매우 높다(상관계수 R=0.96, 비교자료수=29개). Fig. 16은 해석농도의 최고치와 온도 최고치에 대한 산포도이다. 이 역시 상호 상관성이 매우 높다(상관계수 R=0.98, 비교자료수=53개). 참고로 실험결과의 최대치 간의 상관계수 R=0.91(비교자료수=16개)로 모델과 각 실험결과 간의 상관계수보다 오히려 낮다(Fig. 17).

이상의 결과로부터, LES VBM CFD 전산해석을 사용하여, 만족스러운 정확도로 복잡지형모형에 대한 풍동확산실험을 해석할 수 있음을 확인하였다. 풍동실험에 의해 검증된 CFD 해석은 유용한 도구가 된다. CFD 해석을 사용해서 풍동실험이 불가능한 조건, 곧 확산실험규모를 풍동크기에서 실제규모로 증가시켰을 때 유독가스확산에 미치는 효과를 추정할 수가 있다. 또한, 풍동실험이 어려운 조건, 곧 불안정/강안정 대기조건하의 확산현상도 계산할 수가 있기 때문이다.

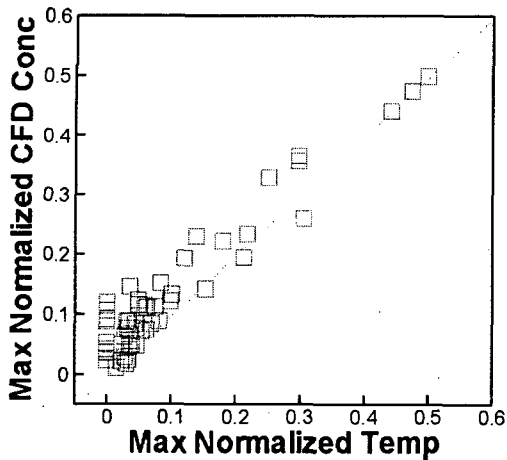


Fig. 16 Scatter plot of maximum temperature measurements versus computed concentrations.

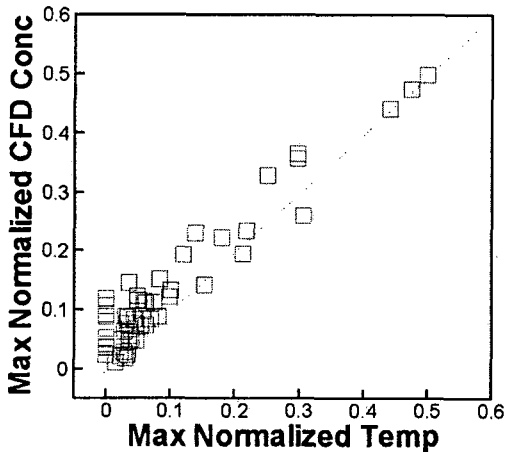


Fig. 17 Scatter plot of computed maximum SF₆ concentrations versus temperatures in wind tunnel experiment.

모델격자 해상도에 따른 경향을 보기 위하여 모델해상도를 2배로 증가시켰을 때(즉, 격자간격이 17 mm로 설정했을 때), 실험과 비교하여 모델 결과의 정확도는 대체로 비슷하거나 약간 향상되는 것으로 나타났다. 모델결과가 2차 정확도의 공간차분식에 해당하는 전형적인 격자해상도별 일치 경향은 관찰되지 않았다. 이는 차분방정식의 정확도 외에 물리적 모델로서 LES 모델의 타당성과 고체경계면을 표현하는 VBM의 적합도가 모두 격자해상도에 영향을 받기 때문인 것으로 해석된다.

4. 결 론

산악지형에서의 오염확산을 LES를 사용하여 수치해석하고 풍동실험결과와 비교하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 산악 지형모형 상에 일정하게 배치된 20개 위치에서 연직 평균 풍속을 비교한 결과, 모든 풍향 모든 위치에서 전산해석과 풍동실험은 전반적으로 잘 일치하였다. 낮은 풍속에 대해서는 해석결과가 실험보다 다소 낮은 경향을 보인 반면, 높은 풍속에서는 반대 경향을 보였다.

(2) 배출원을 기준으로 풍향방향으로 방사형으로 배치된 20개 위치에서 연직 평균 농도를 비교한 결과, 모든 풍향에 대해서 해석결과는 풍동실험과 잘 일치하였다. 배출원에서 가까울수록 더욱 정확하게 일치했고, 각 위치에서 연직 최고 농도는 매우 정확하게 일치했다.

(3) 전산해석과 각 실험결과(온도 및 SF₆ 농도) 간의 상관계수는 온도와 SF₆ 농도 실험결과 간의 상관계수보다 높았다.

(4) 전산해석은 풍향에 따라 확산중심이 상승 혹은 하강하는 복잡지형에서 나타나는 풍동실험의 확산양상을 적절히 묘사하였다.

참고문헌

1. US Environmental Protection Agency, 1995, User's Guide For Industrial Source Complex (ISC3) Dispersion Models, Research Triangle Park, NC, p. 390.
2. DeCroix, D. S., Smith, W. S., Streit, G. E. and Drown, M. J., 2000, Large-eddy and Gaussian simulations of downwind dispersion from large building HVAC exhaust, American Meteorological Society, pp. 53-58.
3. Vardoulakis, S., Fisher, B. E. A., Dericous, K. and Gonzalws-Flesch, N., 2003, Modelling air quality in street canyons: a review, Atmospheric Environment, Vol. 37, pp. 155-182.
4. Pullen, J., Boris, P., Young, T., Patnaik, G. and Iselin, J., 2005, A comparison of contaminant plume statistics from a Gaussian puff and urban CFD model for two large cities, Atmospheric Environment, Vol. 39, pp.

- 1049-1068.
5. Yoo, S. Y., Shim, W. S. and Kim, S., 2005, A study on the pollutant dispersion over a mountain valley region (I): Wind tunnel experiments, Vol. 17, No. 11, pp. 1050-1059.
 6. Peskin, C. S., 1977, Numerical analysis of blood flow in the heart, *Journal of Computational Physics*, Vol. 25, pp. 220-252.
 7. Goldstein, D., Hander, R. and Sirovich, L., 1993, Modeling a no-slip flow boundary with an external force field, *Journal of Computational Physics*, Vol. 105, pp. 354-372.
 8. Kim, S., 2003, Development of an efficient CFD algorithm using virtual boundary method for complicated flow geometries, *Journal of the Wind Engineering Institute of Korea*, Vol. 7, No. 1, pp. 67-72.
 9. Lee, C., 2003, Stability characteristics of the virtual boundary method in three-dimensional applications, *Journal of Computational Physics*, Vol. 184, pp. 559-591.
 10. Smagorinsky, J., 1963, General circulation experiments with the primitive equations, Part I: The basic experiment, *Monthly Weather Review*, Vol. 91, pp. 99-164.
 11. Deardorff, J. W., 1972, Numerical investigation of neutral and unstable planetary boundary layers, *Journal of Atmospheric Sciences*, 29.
 12. Masden, P. J., 1989, Large eddy simulation of the convective atmospheric boundary layer, *Journal of Atmospheric Sciences*, Vol. 46, pp. 1492-1516.
 13. Moin, P. and Kim, J., 1982, Numerical investigation of turbulent channel flow, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 18, pp. 341-377.
 14. Germano, M., Piomelli, U., Moin, P. and Cabot, W. H., 1991, A dynamic subgrid scale eddy viscosity model, *Physics of Fluids Vol. A3(7)*, pp. 1760-1765.
 15. Lilly, D. K., 1992, A proposed modification of the Germano subgrid-scale closure method, *Physics of Fluids Vol. A4(3)*, pp. 633-635.
 16. Murakami, S. and Mochida, 1999, Past, present and future of CWE: the view from 1999, *Proceedings of the tenth international conference on wind engineering*, Copenhagen, Denmark, pp. 91-104.
 17. Murakami, S., 1993, Comparison of various turbulence models applied to a bluff body, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 46, pp. 21-36.