

## 1B2) 풍동실험과 CFD 모델을 이용한 복잡지형의 가스확산 연구 Wind Tunnel Experiments and CFD Simulation of Gas Dispersion over Complex Terrain

김석철 · 김윤석<sup>1)</sup> · 박명규<sup>2)</sup> · 심우섭<sup>2)</sup>

볼트환경기술, <sup>1)</sup>(주)티이솔루션, <sup>2)</sup>국방과학연구소

### 1. 서 론

풍동과 CFD모형을 이용하여 표고차가 큰 실제지형을 1/1000로 축소시킨 실험실 규모의 확산실험을 수행했다. 야외확산실험과 비교하여 풍동은 조절 가능한 기상조건을 제공할 뿐 아니라 고해상도의 기류 측정이 가능하다. 본 연구에서는 각각 4가지 풍향에 대해서 20개 위치에서 연직방향으로 15개 고도의 풍속을 측정했다(풍속측정 지점수=1200=4×20×15). 신뢰도 높은 실험결과를 얻기 위해서 각각 열과 SF<sub>6</sub>를 추적자로 사용하여 확산실험을 반복 수행하여 비교 분석하였다. 아울러 최신 이론에 근거한 CFD 모형을 구성하여 풍동실험을 해석했다. 풍동실험에 대해 검증된 CFD 모델은 유용한 도구이다. CFD 모델을 사용해서, 풍동의 축소된 규모가 아닌 실제규모의 가스확산에 나타날 수 있는 현상변화를 추정할 수 있을 뿐 아니라 풍동실험이 불가능한 조건, 곧 불안정/강안정 대기조건 하의 확산현상도 유추할 수 있다.

### 2. 풍동실험 및 CFD 해석방법

열과 SF<sub>6</sub> 가스를 추적자로 사용한 확산실험은 (주)현대건설기술연구소의 대형 경계층 풍동(Eiffel type)에서 수행하였다. 풍동 전장은 53m이며, 측정공간은 25m(길이) 2.5m(높이) 4.5m(폭)이다. 지형모형(재질: 압축스티로폼)은 실제 산악지형을 1/1000크기로 축소하여 제작하였다. 실지형에 해당하는 모형의 원형부 지름은 3.0m(실지형기준 3.0km)이고 측면부는 매끄럽게 곡면 처리하였다. 그림 1(a)은 풍동 내에 설치된 지형모형 사진이다. 모형은 풍동 측정공간 내에 회전 가능한 원형테이블 상단에 설치되기 때문에 회전 각도를 조절함으로써 다양한 풍향조건(NW, NNW, N, NNE)에 대한 실험이 가능하다.

풍속은 일정 수평간격의 격자형상으로 배치된 20군데에서 연직방향으로 15개고도(5, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100, 200, 300, 400, 500 m)에서 다점풍속계(System6242-model1550, Kanomax, Japan)를 사용하여 측정했다. 접근류의 풍속은 풍동바닥으로부터 40cm높이(실지형기준 400m)에서 약 4m/sec로 설정했다. 동일한 기류조건을 대상으로 각각 열과 SF<sub>6</sub>를 추적자로 하여 확산실험을 반복하여 수행했다. 각 확산실험에서 열원(히터)과 SF<sub>6</sub> 배출원(가스방출구)의 위치는 동일하며, 배출원의 형태(원기둥) 또한 유사하게 제작함으로써 추적자의 종류를 제외한 나머지 확산조건이 유사하도록 실험조건을 설정하였다. 배출원의 높이는 지면에서 10cm(실지형 100m)이다. 배출원에서 열과 SF<sub>6</sub> 가스는 일정한 속도로 연속적으로 배출된다. 각 측정지점에서는 온도와 SF<sub>6</sub> 농도의 시간평균을 구했다. 본 연구에서와 같이 배출 및 기류조건이 동일하고 온도변화가 높지 않은 경우, 열확산과 SF<sub>6</sub> 확산은 이론적으로 동일한 패턴을 따른다. 열/SF<sub>6</sub>확산실험에서 온도/SF<sub>6</sub> 농도를 측정할 곳은 배출원에서 풍하방향으로 부채꼴 형상으로 배치된 20/11개 지점으로, 각 지점에서 연직방향으로 15/5고도에서 온도/SF<sub>6</sub> 농도를 동시에 측정했다. 온도는 열전대로 순간변동을 계측하여 시간평균하였고, SF<sub>6</sub>농도는 이동식 가스포집기를 사용하여 각 측정위치에서 60초 동안 포집하여 실험실에서 질량분석기로 분석했다. 그림 1(b)는 풍속과 온도(SF<sub>6</sub>농도)의 측정위치를 지형등고선 상에 표시한 것이다.

CFD 모델은 공간에 대해서는 2차 정확도, 시간에 대해서는 3차 정확도의 FDM차분방정식으로부터 구성했다. 수평방향 모델격자의 크기는 균등하게 약 3cm(실지형기준30m)이고 연직방향 모델격자의 크기는 균등하게 2cm(실지형기준 20m)이다. 격자크기 이하 난류현상에 대해서는 LES 모델을 사용했다(Smagorinsky, 1963; Murakami, 1993). 모델링 영역 내에 고체 면에서 점착조건은 VBM 기법을 적용하

여 만족시켰다(Peskin, 1977, Lee 2003). CFD 모델에서 지형모형 풍상측 유속분포가 풍동의 접근류와 유사한 난류특성을 지니도록, 유동장 입구에 접한 일정 공간에 시간 및 공간에 대해 무작위로 명멸하는 forcing 함수를 분포시켰다. 비압축성 Navier-Stokes 방정식과 물질이동방정식을 토대로 기류와 SF<sub>6</sub> 가스/온도 확산과정을 해석했다.

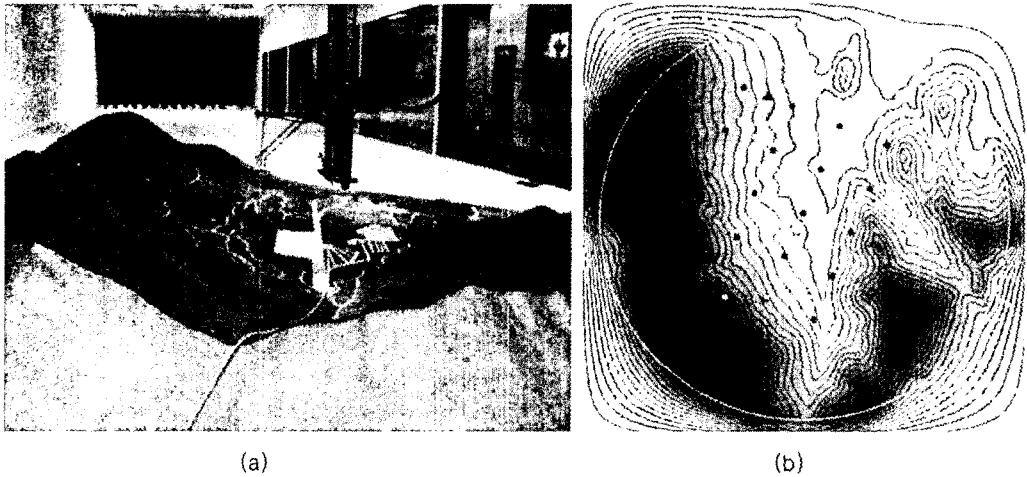


Fig. 1. (a) Wind Tunnel Experiment, (b) Winds(blue circle) and Temperature/SF<sub>6</sub> Gas Concentration(yellow box) Measurement and Heat/SF<sub>6</sub> Source(red triangle) Locations.

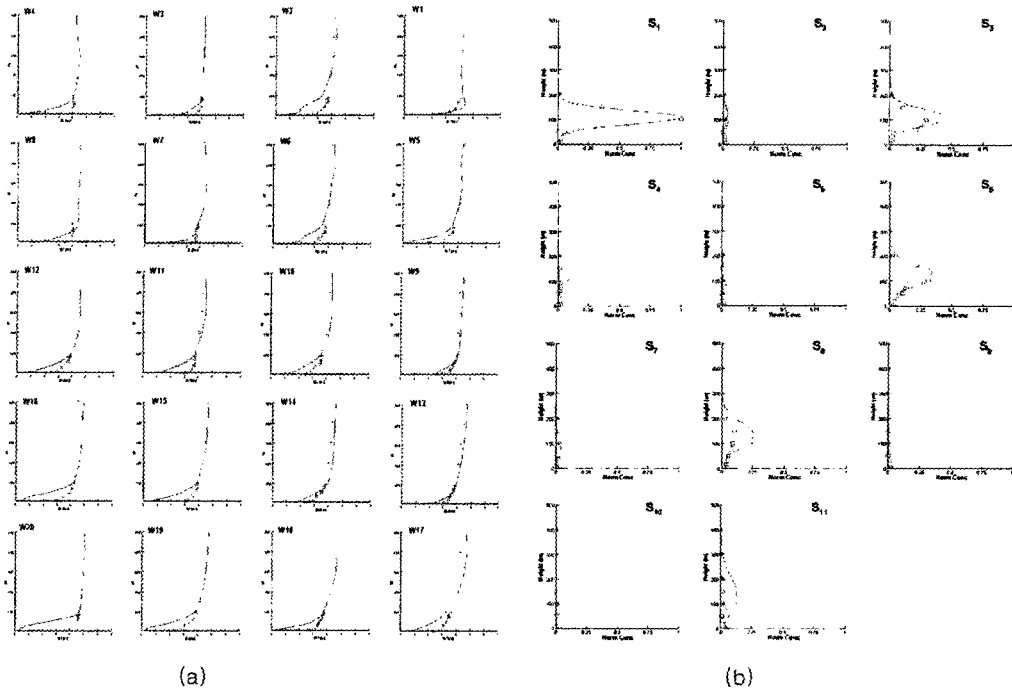


Fig. 2. (a) Average Wind Speeds from Wind Tunnel Experiments(green box) and CFD model(red solid line), (b) Comparison of the Normalized Temperatures(green box), SF<sub>6</sub> Gas Concentrations(blue circle), and CFD model(red solid line).

### 3. 결 과

그림 2(a)에 풍동실험과 CFD 모델의 평균풍속을 비교했다. 사각기호(녹색)는 풍동에서 다점풍속계로 측정된 풍속이며 실선(적색)은 CFD 모델결과이다. 그림 2(b)에 풍동의 열 및 SF<sub>6</sub>확산실험과 CFD 농도 모델링 결과를 비교했다. 결과를 요약하면 다음과 같다.

- △ LES 난류모델을 사용한 CFD모델에서 무작위로 명멸하는 forcing 함수를 상류에 배치하여 입구의 난류조건을 실험과 유사하게 설정했을 때, 복잡지형모형에 대한 풍동실험과 CFD 모델간에 전체적인 유동장 경향(지표층 높이, 후류발생 형상 등)이 잘 일치했다.
- △ 열 및 SF<sub>6</sub>확산 실험과 CFD 모델을 비교하면 오차가 최고농도의 30% 이내였다. 대부분의 지점에서 10% 이내로 CFD 모델과 풍동실험은 일치했다. 방출위치에 근접한 지점일수록 모델과 실험이 잘 일치하며, 유독가스의 중심농도 궤적은 전 영역에서 일치했다.
- △ 열을 추적자로 한 확산실험과 SF<sub>6</sub>를 사용한 실험결과는 모든 비교지점에서 서로 잘 일치했다. 열확산 실험보다 SF<sub>6</sub> 확산실험이 CFD 모델에 약간 더 가까웠다.

복잡지형모형에 대해서 종류가 다른 추적자를 사용한 확산실험과 CFD모델이 적절한 오차 범위 안에서 일치했다. 이러한 결과는 열과 SF<sub>6</sub>를 확산 추적자로 사용한 풍동실험과 CFD 모델에 대해 신뢰성을 높여준다. CFD모델과 열 혹은 SF<sub>6</sub> 가스를 추적자로 사용한 풍동실험은 조절 가능한 확산실험환경을 보장함으로써, 산악과 도심 등의 복잡지형에 대한 새로운 대기확산모델 개발에 유용한 검증수단이 된다. 취급이 위험하거나 분석이 까다로운 유해가스나 SF<sub>6</sub> 가스 대신 열을 추적자로 사용해도 적절한 조건하에서 실험이 수행될 경우 합리적인 결과를 얻을 수 있음을 확인했다. 아울러 본 연구를 통해 검증된 CFD 모델은 직접적인 풍동실험이 불가능한 조건에 대해서도 확대 적용될 수 있을 것으로 기대된다.

### 참 고 문 헌

- Smagorinsky, J(1963) General Circulation Experiments with the Primitive Equations. I. The Basic Experiment, Monthly Weather Review Vol. 91, 99.
- Murakami, S (1993) Comparison of various turbulence models applied to a bluff body, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics Vol. 35, 49.
- Peskin, C.S. (1977) Numerical analysis of blood flow in the heart, Journal of Computational Physics Vol. 25, 220.
- Lee, C. (2003) Stability characteristics of the virtual boundary method in three-dimensional applications, Journal of Computational Physics, Vol. 184, 559.