

산악 계곡지형에서의 오염확산에 관한 연구(I) : 풍동실험

유 성 연[†], 심 우 섭^{*}, 김 석 철^{**}

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

A Study on the Pollutant Dispersion over a Mountain Valley Region (I) : Wind Tunnel Experiments

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

Department of Mechanical Design Engineering, Chungnam National University, Daejeon 305-764, Korea

^{*}Agency for Defense Development, Daejeon 305-600, Korea

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

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

ABSTRACT: Heat and SF₆ gas dispersions over a complex terrain were investigated using wind tunnel. The wind speed, temperature and concentration profiles were measured for the 1/1000 scale complicated terrain model in an Eiffel type boundary layer wind tunnel with test section of 2.5 m in height and 4.5 m in width. The scale model was mounted on the top of a plate which can rotate with respect to the approaching wind. Dispersion processes from a continuous emission source driven by various wind direction were investigated, including plume climbing over the steep up-slope of the mountain and down-spreading toward the lower level of the valley. Extensive dispersion experiment data (wind speeds and concentration profiles) were provided for verification and validation of dispersion models. Under the identical flow and emission conditions, the independently measured profiles of the temperature and SF₆ concentration showed an excellent agreement which ensured the credibility of the results.

Key words: Heat dispersion(열확산), Gas dispersion(가스확산), Concentration profile(농도분포), Boundary layer wind tunnel(경계층 풍동), Complex terrain(복잡지형)

기 호 설 명

C_m : Gaussian 연직 최고 농도
 G : Gaussian 함수 회귀곡선
 I : 무차원 온도/농도 연직적분 [mm]
 R : Pearson 상관계수
 S : SF₆ 가스농도 계측위치
 T : 온도 계측위치

W : 연기확산폭 [mm]
 z_d : Gaussian 연기중심 고도[mm]

그리스 문자

σ : Gaussian 연기확산 폭 [mm]
 $\theta(z)$: 무차원 온도/농도 연직 회귀함수

1. 서 론

대기확산모델의 거동을 평가함에 있어서 복잡한 지형조건은 엄격한 기준이 된다. 복잡지형, 곧

[†] Corresponding author

Tel.: +82-42-821-6646; fax: +82-42-821-8894

E-mail address: syyooh@cnu.ac.kr

산악과 계곡 등과 같이 고도변화가 심한 지형에서 지면에 인접하여 대기 중으로 방출된 오염가스의 이동궤적은 평탄지형에 비해 훨씬 복잡하고 불규칙하다. 급격한 지형변화로 인해 기류가 복잡한 양상을 지니기 때문이다. 평탄지형에서 적정수준의 정확도를 보이던 대기확산모델이 복잡지형에서 큰 모델링 오차를 나타내는 경우가 많다. 이는 복잡한 지형에서 나타나는 확산과정이 모델에서 제대로 고려되지 못했기 때문이다. 국토면적의 70%가 산악으로 이루어진 국내에서 모델링 조건으로 평탄한 지형이 고려되는 경우는 많지 않다. 국내 적용을 목적으로 하는 오염가스 대기 확산모델은 반드시 복잡한 지형을 대상으로 그 정확성이 검증되어야 한다.

모델검증에는 실제현상과 모델결과를 바로 비교하는 직접적인 방법이 있다. 산악지형에서 SF₆와 같은 추적자 물질을 대기 중으로 방출하여 관찰된 실제 확산 양상에 대해서 모델을 비교 검증하는 것이다. 잘 수행된 야외확산실험은 모델평가에 있어 종합적으로 매우 유용한 기준을 제공하지만, 요소별 모델검증에 요구되는 세밀한 자료를 제공하지 못하는 약점이 있다. 야외확산실험에서 추적자 농도와 함께 관측되는 기상자료는 지상관측점(AWS) 자료와 고도별 연직 관측자료로 구성된다. 이 중 연직 관측자료는 확산실험 현장에서 수 내지 수십 km 떨어진 지점에서 관측된 자료(정기 관측자료)로 대체되거나 종종 생략되기도 한다. 어떤 경우이든 야외실험에 있어서 확산에 중요한 영향을 미치는 기상조건은 실험영역 내 몇 개 지점에 국한되는 것으로, 실험영역 전체에 대한 자세하고 세밀한 기상정보는 아니다. 넓은 지역을 대상으로 한 야외확산실험에서 고해상도 기상정보를 측정하는 것은 현실적으로 불가능하다. 따라서 야외확산실험에서 기상정보는 상당한 불확실성을 포함한다. 특별히, 기류변화가 큰 복잡지형에 대해 확산실험을 수행할 경우, 실험조건에서 기류정보의 불확실성은 더욱 증가한다. 야외 확산실험에서 소수지점에서 관측된 자료를 토대로 실험에 적용된 기상조건을 정확히 분별하는 데는 한계가 있다. 실제로는 판이하게 다른 기상조건 하에서 야외확산실험이 수행되었음에도 불구하고 지상관측점 자료에 의해서는 유사한 기상조건 하에서 수행된 것으로 오판될 수가 있다. 그 반대의 경우도 발생할 수 있다.

기상조건에 포함된 이러한 불확실성은 모델시스템 개발을 목적으로 야외확산 실험결과를 사용하고자 할 때 큰 약점이 된다.

복잡지형에 대한 오염가스의 확산예측 모델시스템은 기상정보를 생성하는 모델요소(기상모델)와 생성된 기상정보를 바탕으로 오염가스의 확산경로를 계산하는 모델요소(확산모델)로 구성된다. 기상모델은 기상관측자료, 곧 지상관측점(AWS)과 연직 기상조건을 사용하여 모델영역에 대한 3차원 고해상도 기상조건을 생성한다. 오염가스의 확산예측 모델시스템의 정확도는 두 가지 모델요소, 곧 기상모델과 확산모델의 조합에 의해 결정된다.⁽¹⁾ 최적인 시스템을 결정하기 위해서 각 모델요소의 정확도는 구분되어 평가되어야 한다. 야외확산실험과 비교하여 오염가스의 확산예측 모델시스템을 검증할 경우, 가스농도에 대한 모델 오차는 평가할 수 있으나 기상모델오차를 분석하는 것은 불가능하다. 즉, 오염가스 확산예측시스템의 종합적인 모델링 정확도는 평가할 수 있으나, 시스템 개선을 위해 조정해야 할 모델요소가 어떤 것인지 판단할 수가 없다. 따라서 모델시스템의 개발과 검증을 위해서는 복잡지형에 대한 농도분포와 상세한 기류정보가 동시에 필요하다.

확산현상에 대한 정교한 측정 혹은 확산모델의 개발이나 도시미기상 연구 등을 위해서 풍동실험을 수행한 연구사례는 많다.⁽²⁻³⁾ 그러나 실제지형의 복잡한 특징을 반영한 모형을 대상으로 풍동실험을 수행한 사례는 거의 없다. 야외확산실험과 비교하여 풍동은 잘 조절된 기상조건을 제공할 뿐 아니라 고해상도의 기류측정이 가능하다는 장점이 있다. 본 연구에서는 풍동을 이용하여 전형적인 산악지형을 대상으로 실제지형을 1/1000로 축소시킨 실험실 규모의 확산실험을 수행하였다. 풍동 내에서 열과 SF₆를 추적자로 사용하여 두 종류의 확산실험을 수행하였으며, 동일한 기상 및 배출조건에 대해서 독립적으로 반복 수행된 각 결과를 비교 분석함으로써 실험결과 신뢰도를 높이고자 하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 경계층 풍동 확산실험

열과 SF₆ 가스를 추적자로 사용한 확산실험을

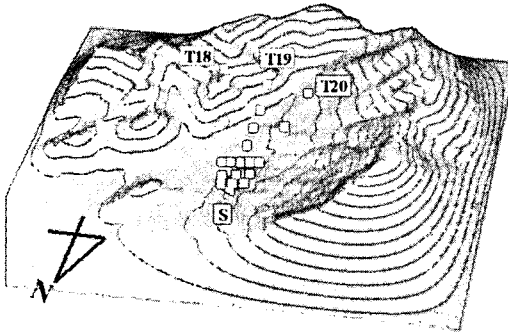


Fig. 1 Terrain model for wind direction of NW: S and T's denote the source and measurement points.

대형 경계층 풍동(Eiffel type)에서 수행하였다. 풍동의 전체 길이는 53m인데, 그중 측정부의 크기는 길이 25m, 높이 2.5m, 폭 4.5m이다. 지형 모형은 Fig. 1에 나타낸 바와 같이 실제 산악지형을 1/1000 크기로 축소하여 압축 스티로폼로 제작하였다. 실지형에 해당하는 모형의 원형부 지름은 3.0m(실지형 기준 3.0km)이고 측면부는 매끄럽게 곡면처리하였다. 모형은 풍동의 측정공간 내에 회전 가능한 원형 테이블 상단에 설치하였다. 원형 회전 테이블의 회전 각도를 조절하여 4가지 풍향조건(NW, NNW, N, NNE)에 대한 실험을

수행하였다.

풍속은 Fig. 2에 보인 바와 같이 일정 수평간격의 격자형상으로 배치된 20개 위치에서 연직방향으로 15개 고도(5, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100, 200, 300, 400, 500 mm)에서 다점풍속계(System 6242, model 1550, Kanomax, Japan)를 사용하여 측정하였다. 풍속의 측정위치는 모형에 고정시켰다. 그 결과, 풍향에 따라 모형이 회전되지만 모형 상에서 풍속측정위치는 일정하다. 접근류의 풍속은 풍동바닥으로부터 40 cm 높이에서 약 4m/s로 설정하였다. 모형 상부의 접근류의 풍속분포는 전원지역에 대한 전형적인 조건, 곧 노풍도(wind exposure) C일 때의 표준분포를 따르도록 조성하였다.⁽⁴⁾

동일한 기류조건을 대상으로 각각 열과 SF₆를 추적자로 하여 확산실험을 반복하여 수행하였다. 각 확산실험에서 열원(히터)과 SF₆ 배출원(가스방출구)의 위치는 동일하며, 배출원의 형태(원기둥) 또한 유사하게 제작함으로써 추적자의 종류를 제외한 나머지 확산조건이 유사하도록 실험조건을 설정하였다. 히터와 SF₆ 가스방출원의 형상은 직경 10 mm, 길이 100 mm인 원통형으로 제작하였다. 가스방출원의 경우 원통관에 미세한 구멍을 뚫어 내부의 SF₆ 가스를 유동장 내로 방출하였다. 원통관 배출원은 접근류의 유동에 직각방향으로 지면에 수평하게 설치하였다. 배출원의 높이는 지면에서 10 cm(실제지형 100 m)이다. 배출원에서 열과 SF₆ 가스는 일정 속도로 연속적으로 배출된다.

온도 및 SF₆ 가스농도는 Fig. 3에 제시한 형태의 계측위치에서 시간 평균을 구하였다. 온도/농도 측정위치는 배출원을 중심으로 풍하방향으로 부채꼴 형상으로 배치하였다. 부채꼴의 중심선은 항상 접근류의 풍하방향을 향하도록 배치하여, 실험조건인 풍향이 바뀔 경우에도 항상 추적자의 확산 양상을 포착할 수 있도록 하였다. 각 측정 지점에서는 온도와 SF₆ 농도의 시간 평균을 구하였다. 온도는 20개 위치에서(T1~T20) 연직방향으로 15개 고도에서 측정하였으며, SF₆ 농도는 11개 위치에서(S1~S11) 연직방향으로 5개 고도에서 측정하였다. Fig. 3에서 사각기호는 온도측정위치이며, 원형기호는 SF₆ 농도측정위치이다. 결과의 비교를 위해서, SF₆ 농도측정위치는 온도 측정위치와 동일하게 설정하였다(Fig. 3: S1=T1,

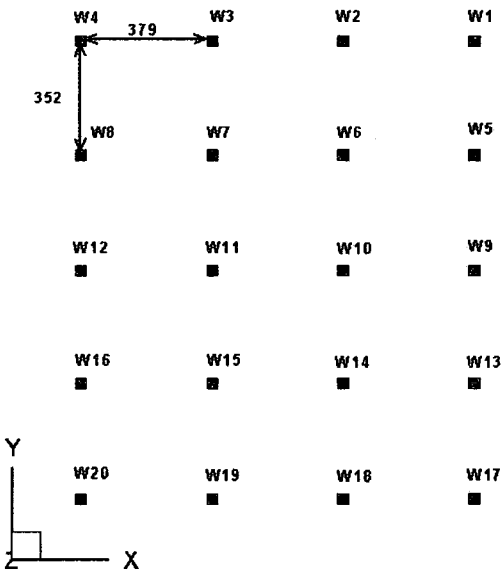


Fig. 2 Wind speed measurement layout.

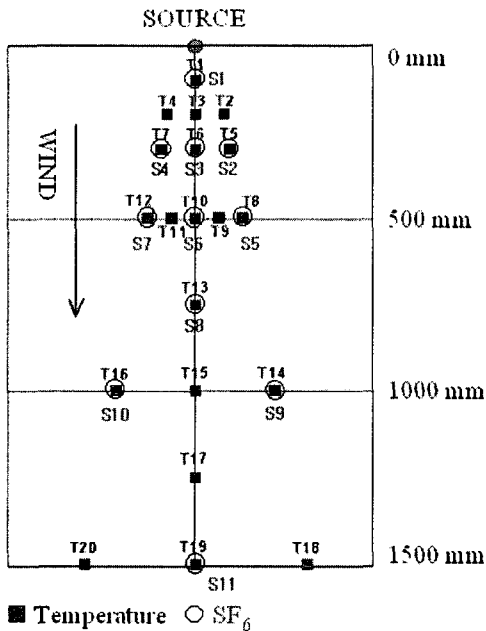


Fig. 3 Temperature and SF₆ measurement layout.

S2=T5, S3=T6, S4=T7, S5=T8, S6=T10, S7=T12, S8=T13, S9=T14, S10=T16, S11=T19). 본 연구에서와 같이 배출 및 기류조건이 동일하고, 분자확산에 비해 난류혼합이 우세하며, 열확산공간에서 온도편차가 크지 않은 경우, 열확산과 SF₆ 확산은 이론적으로 거의 동일한 패턴을 따른다.

온도는 열전대를 이용하여 측정하였고, SF₆ 농도는 이동식 가스포집기를 사용하여 각 측정위치에서 60초 동안 포집하여 질량분석기로 분석하였다. Fig. 4는 각 풍향조건에 대해서 풍속과 온도(SF₆ 농도)의 수평측정위치를 지형 등고선 상에 표시한 것이다. 원형 기호는 풍속측정위치를 나타낸다. 각 위치에서 연직방향으로 20개 고도에서 풍속을 측정하였다. 삼각기호는 온도(농도)측정위치이다. 각 위치에서 연직방향으로 15개 고도 혹은 5개 고도에서 각각 온도와 농도를 측정하였다. 사각기호는 배출원의 중심위치로 지형모형에 고정하였다. 풍속측정위치는 지형모형에 대해서 상대적으로 일정한 반면, 온도/농도측정위치는 접근류의 풍향에 대해서 상대적으로 일정하다. 접근류의 이동방향을 따라 온도/농도측정 중심선의 고도변화를 보면 풍향조건에 따라 다양하게 변한다.

2.2 실험결과 처리방법

열과 SF₆ 가스를 사용한 추적자 실험결과를 비교하기 위해서 측정된 온도와 농도는 각각의 관측 최대치(T1 혹은 S1 측정위치에서 최대값)를 사용해서 무차원화하였다. 즉, 원시 측정자료에서 온도와 농도를 관측 최대치로 나눈 값을 각각 무차원 온도와 농도로 정의하였다. 이렇게 정의된 무차원 관측치는 본 실험조건 하에서 거의 동일한 분포를 지니게 된다. 열 혹은 가스의 이류확산과정이 유동에 영향을 주지 않은 경우 동일한 유동조건 및 배출조건 하에서 온도와 농도분포는 배출량(배출열량 혹은 배출가스량)에 선형적으로 비례하고, 입지의 두 지점에서 온도 혹은 농도의 비는 일정하기 때문이다.

열확산실험의 경우 실험이 진행되는 동안(약 2 시간) 외기온도, 곧 풍동 내로 유입되는 공기온도가 많게는 약 1℃ 정도까지 변화하였다. 온도측정에서 최대값과 최소값의 차이가 약 5℃이므로,

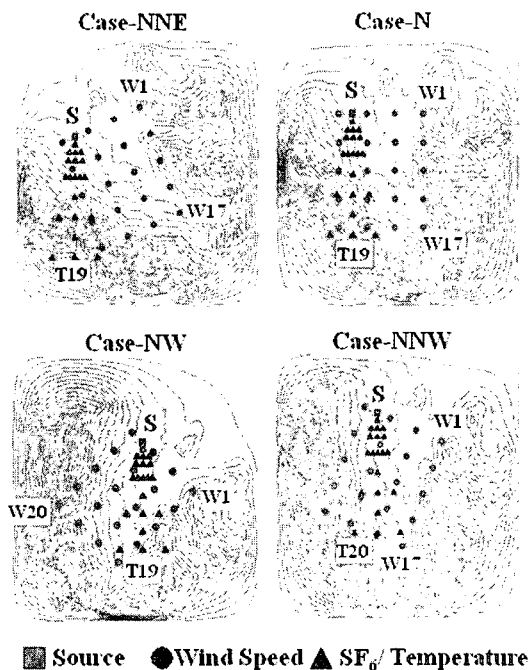


Fig. 4 Measurement locations of the SF₆, temp. and wind speed for wind direction of NNE, N, NW and NNW.

이러한 외기온도변화로 인한 영향을 무시할 수가 없다. 연직방향 온도분포(15개 고도)는 수 분 동안에 동시에 측정했으므로 동일한 수평위치에서 측정된 고도별 온도자료 간에는 외기온도변화로 인한 영향(곧 온도변화)이 거의 동일하게 미친다. 그러나 측정시각의 차이가 큰 다른 수평위치에서 측정된 자료에는 열확산에 따른 위치별 온도변화 외에도 외기온도변화에 따른 영향이 상대적으로 큰 차이를 보일 수 있다.

외기온도의 변화로 인한 각 측정지점의(예 : T1 지점) 온도변화는 다음과 같이 보정하였다. 수평위치 T1 지점에서 온도를 계측할 때의 외기온도와 기준 외기온도와의 차, 곧 외기온도 상승분(혹은 하강분)을 측정하였다. 이때 측정지점의 외기온도는 열확산에 의해서 영향을 받지 않는 것으로 판단되는 400 mm 고도의 온도로 설정하였다. 그 후, T1 지점에서 동시에 계측한 연직 온도자료(15개 고도)에서 외기온도 상승분(혹은 하강분)을 뺐다. 나머지 측정지점에 대해서도 동일한 방법으로 외기온도변화에 따른 효과를 보정하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 온도와 농도의 비교

모든 지점에 대해서 무차원 온도 및 SF₆ 무차원 농도를 Gaussian 함수에 적합하여 Fig. 5에 제시하였다. 그래프의 수평축은 무차원 온도(무차원 농도)이며, 그래프의 수직축은 고도(단위 : mm)를 나타낸다. 사각기호는 온도이고, 삼각기호는 SF₆ 농도이며, 또한 온도와 SF₆ 농도가 모두 측정된 지점만을 나타내었다. 북풍(N)에 대해서는 7개 지점에서 북북동풍(NNE)에 대해서는 1개 지점에서 비교 가능한 자료를 얻었다. 북북서(NNW)에 대해서는 11개 지점 모두에서 비교 가능한 자료를 얻었다.

Fig. 5에서 실선과 점선은 각각 온도와 SF₆ 농도에 대한 아래 식으로 정의한 Gaussian 함수 회귀곡선이다.

$$G(z) = \frac{C_m}{2} \left\{ \exp - \frac{1}{2} \left(\frac{z - z_d}{\sigma} \right)^2 + \exp - \frac{1}{2} \left(\frac{z + z_d}{\sigma} \right)^2 \right\} \quad (1)$$

여기서, C_m , z_d , σ 는 회귀계수로 Gaussian 확산 모델에서 각각 연직면에서의 최고농도, 연기고도(plume height), 연기확산폭(plume width)에 해당한다. 식(1)에서 오른쪽의 두번째 항은 지면에서 반사조건을 적용했을 때의 Gaussian 확산모델함수이다. Gaussian 함수로 사용하여 계측자료를 회귀곡선으로 표시한 것은 본 실험의 결과가(평탄한 지형에 대해서) 대표적으로 사용되어 온 확산 모델인 Gaussian 모델의 기본 가정에 얼마나 잘 부합되는지(혹은 상이한지) 살펴보기 위해서이다.

Fig. 5에서 SF₆ 농도와 온도에 나타나는 전반적인 확산양상(최고농도, 연직분포 등)은 매우 유사한 반면, 세부적인 특징(연기고도, 지표농도 등)에서 차이가 있다. SF₆ 농도와 온도 측정결과는 식(1)의 Gaussian 곡선에 의해서 비교적 잘 표현된다(R=0.96). 그러나 SF₆에 대한 Gaussian 곡선과 온도에 대한 Gaussian 곡선은 비교위치에 따라 일치 정도에 차이가 있다. 배출원에 가까울수록 SF₆ Gaussian 곡선과 온도 Gaussian 곡선의 차이가 큰 반면, 배출원에서 멀수록 두 Gaussian 곡선은 일치하는 경향을 보인다. 배출원에 인접한 위치에서 SF₆ Gaussian 곡선과 온도 Gaussian 곡선이 차이가 나는 것은 실제로 SF₆ 가스확산과 열확산 현상이 배출원에 가까운 곳에서 그 차이가 가장 크게 발생하였다기보다는 오히려 회귀곡선을 선택하는 과정에 포함되는 불확실성이 이 위치에서 가장 크기 때문인 것으로 보인다. 배출원에 인접한 측정위치, 예컨대 T1 혹은 S1 지점에서는 회귀계수(C_m , z_d , σ)를 조금만 바꾸어도 회귀곡선의 변화가 가장 크다.

Fig. 6은 동일 측정지점에서의 SF₆ 농도(수평축)와 온도(수직축)에 대한 산포도이다. 두 계측변수의 상관계수(R)는 0.80으로 비교적 높다. 동일한 측정지점에서 추적자 농도(여기서는 SF₆ 가스농도와 온도)를 비교하는 것은 통계적으로 편향된 분석결과를 산출하기가 쉽다.⁽⁵⁾ 이는 각 위치의 측정값이 인접한 측정지점의 결과와 완전히 독립적이지 않기 때문이다. 일례로 측정오차나 실험상의 불확실 요인으로 연기중심이 약간만 달라져도 확산형태가 사실상 거의 동일함에도 불구하고 개별위치에서 추적자 농도를 비교하면 매우 다른 것처럼 나타날 수도 있다. 이는 본 실험과 같이 배출원이 상대적으로 좁은 공간에 집중된 경우 단면방향으로 추적자의 농도분포가 위치에

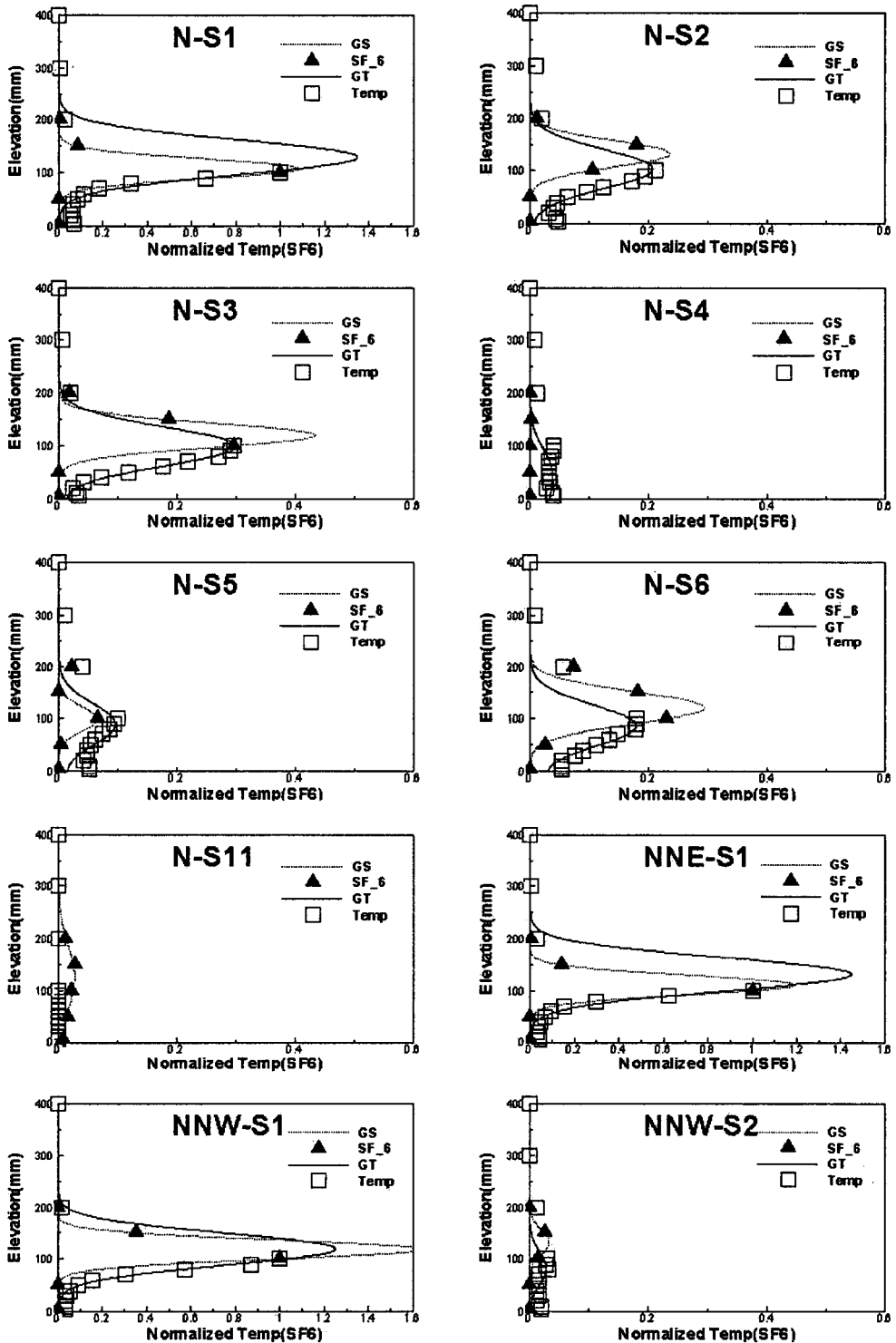


Fig. 5 Distribution of normalized SF₆ concentrations and temperatures compared with Gaussian curve.

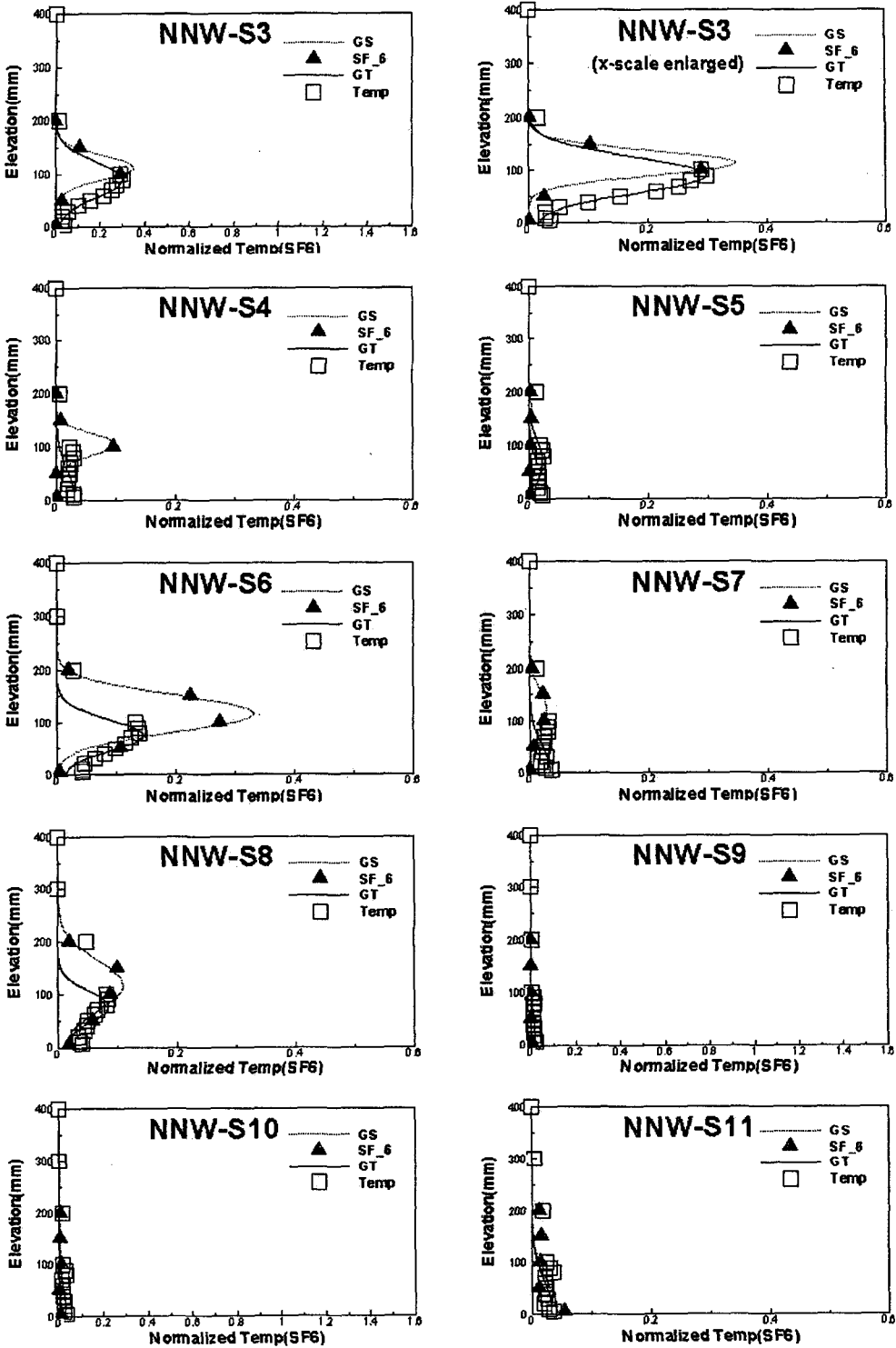


Fig. 5 Continued.

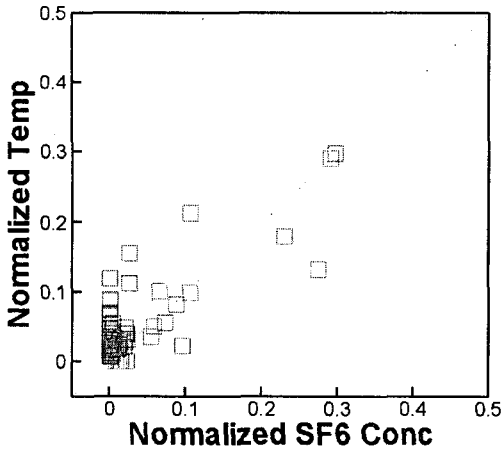


Fig. 6 Scatter plot of SF₆ concentrations versus temperatures at the same measurement locations.

따라 민감하게 달라질 경우에 흔히 나타날 수 있는 상황이다.

Fig. 7은 각 수평측정위치에서(T1~T20, S1~S11)에서 연직방향으로 SF₆ 농도와 온도의 최고치의 상관관계를 표시한 산포도이다. 동일 지점에서 농도와 온도 상관관계에 비해서(Fig. 6) 최고치 간의 상관관계는 현저히 높다. 최고치 간의 상관계수(R)는 0.91이다. 이러한 결과는 일정한 수평위치에서 추적자의 연직분포 최대치는 계측위치 등의 불확실성에 덜 민감하기 때문인 것으

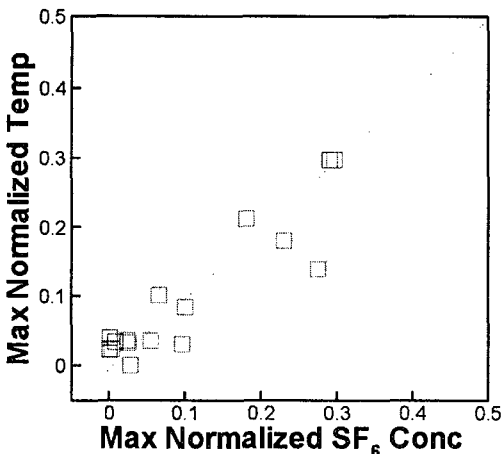


Fig. 7 Scatter plot of maximum SF₆ concentrations versus temp. at the same vertical measurement line.

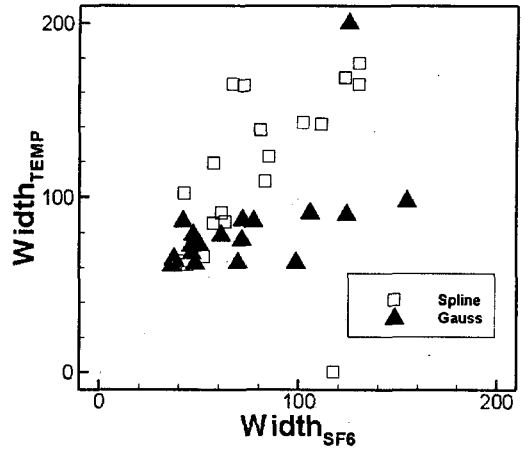


Fig. 8 Scatter plot of the plume widths (SF₆ versus temperature).

로 해석된다. 즉, 두 실험의 확산양상이 실제로 동일한 경우, 설사 연기고도의 측정에 큰 오차가 포함되는 경우에도 두 실험에 대한 최대치는 동일하다.

Fig. 8은 SF₆ 및 열확산 실험결과로부터 추정된 각 수평위치에서 연기확산폭이다. 여기서 연기확산폭(W)은 다음과 같다.

$$W = W_U + W_L \quad (2)$$

식(2)에서 W_U와 W_L은 각각 상, 하 연기반폭으로 다음과 같이 정의된다.

$$\int_{z_d}^{W_U} \theta(z) dz = 0.683 \int_{z_d}^{400\text{mm}} \theta(z) dz \quad (3)$$

$$\int_{W_L}^{z_d} \theta(z) dz = 0.683 \int_0^{z_d} \theta(z) dz \quad (4)$$

식(3)과 식(4)에서 $\theta(z)$ 는 SF₆ 무차원 농도 혹은 무차원 온도에 대한 회귀곡선식이다. 여기서는 Gaussian 회귀곡선과 spline 곡선식을 사용해서 식(3)~(4)로부터 연기확산폭을 계산하였다. Gaussian 회귀곡선의 경우 $W = \sigma$ 이다. Fig. 8에 나타난 SF₆ 농도와 온도분포로부터 계산된 각 수평위치에서의 연기확산폭(W)은 Fig. 6과 Fig. 7에 비해 상관도가 낮다(R=0.80 spline/R=0.57 Gaussian). 또한 회귀함수에 따라 확산폭의 크기가 달

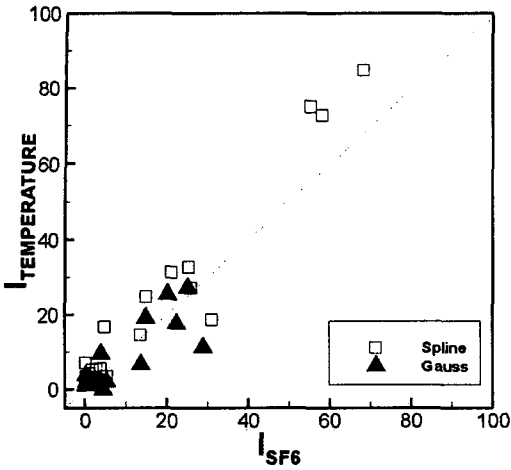


Fig. 9 Scatter plot of plume integrals from SF₆ concentrations and temperatures.

라진다. Gaussian 함수의 경우 배출원에서 가까운 곳에서는 온도확산폭이 크나 먼 곳에서 SF₆ 확산폭이 더 넓은 것으로 계산된 반면, spline 함수는 모든 지점에서 온도확산폭이 더 크게 나타났다.

마지막으로 확산양상을 나타내는 지표의 하나로써, 각 수평위치(T1~T20, S1~S11)에서 SF₆와 온도에 대한 회귀함수의 연직 적분값(I)을 비교하였다.

$$I = \int_0^{400\text{mm}} \theta(z) dz \quad (5)$$

식(5)에서 $\theta(z)$ 는 각 수평위치에서 SF₆ 무차원 농도 혹은 무차원 온도에 대한 회귀함수(Gaussian 함수 혹은 spline 함수)이다. Fig.9는 SF₆ 농도와 온도에 대한 적분값의 산포도이다. 두 양의 상관관계가 높고(R=0.85 spline/R=0.82 Gaussian), 회귀함수의 종류에 따라 그 상관관계 또한 크게 변하지 않는다.

3.2 경사면 조건에 따른 확산형태

풍향에 따라 본 실험조건에서 추적자의 확산경로는 매우 다른 조건을 지닌다. Fig.4에서 풍향조건이 NNE와 N일 경우에는 가파른 경사면을 따라 상승하는 반면, 풍향조건이 NW일 경우에는

계곡을 향하여 완만한 경사면을 따라 하강한다. 특히 풍향이 NNE의 경우 배출원에서 접근류의 풍향을 따라 연결한 관측점의 중심선은 매우 가파른 기울기를 지닌다. 이 경우, 배출원과 중심선이 통과하는 최고 지점인 능선과의 고도차는 약 360 mm인데 수평거리는 1200 mm로, 평균 기울기가 30%에 해당하는 급경사이다. NW일 경우에는 관측 중심선이 계곡과 평행하게 배치되어 거의 수평에 가까운 완만한 상승 형상이다. 이러한 풍향별 지형차이는 확산형태에 영향을 미치는 것으로 나타났다.

Fig.5에서 배출원으로부터 풍하방향을 따라 이격거리가 300 mm로 동일한 세 지점(S2, S3, S4)에서의 농도 및 온도의 연직분포를 풍향이 N인 경우(N-S2, N-S3, N-S4)와 NNW인 경우(NNW-S2, NNW-S3, NNW-S4)에 대해서 비교해 보자. 추적자 확산중심선의 편향 정도가 지형조건에 따라 다르다. 풍향이 N인 경우 S2의 연직 최고 농도(혹은 온도)가 S4에 비해서 현저히 높다. 즉 추적자의 확산 중심선이 풍하방향을 따라 좌측으로 기울어져 있다. 풍향이 NNW인 경우에는 이러한 좌편향 경향이 나타나지 않는다. 오히려 SF₆ 농도의 경우 S2에 비해서 S4의 최고 농도가 높아서 추적자의 확산 중심선이 풍하방향을 따라 우측으로 편향되는 특성을 나타낸다.

추적자의 확산 중심선이 풍향에 따라 지형의 영향으로 좌우로 휘는 정도가 심하게 나타나는 데 반해서, 추적자의 확산 중심선의 고도, 곧 지면에서 최고 농도 혹은 온도지점까지 연직거리는 풍향에 따라 크게 변하지 않았다(Fig.5 참조). 특히 본 실험조건에서는 추적자의 확산 중심선이 가파른 경사면을 따라 상승하는 경우에도 확산 중심선의 고도가 지면에 가까워지거나 지면에 충돌하는 현상은 전혀 나타나지 않았다. 오히려 확산 중심선은 풍하방향을 따라 거의 일정한 고도를 유지하였다. 그러나 경사면을 따라 하강하는 경우는 확산 중심선의 고도가 풍하방향으로 점점 더 증가하는 것으로 나타났다. 특히(풍향 NNE일 경우) 산 능선을 넘어선 후 급격하게 지형고도가 감소하는 영역에서는 유동박리가 발생하여 추적자의 확산 중심선의 고도는 지면으로부터 급격히 유리되어 상승하였다.

이러한 경향은 대기안정도와 밀접한 상관이 있다. 본 연구에서 풍동실험은 중립안정도 대기조건

이므로, 이러한 현상은 실제 대기에서는 바람이 강하게 불거나 날씨가 흐려서 태양광으로 인한 지면복사가 크지 않은 경우에 해당한다.

4. 결 론

대형 경계층 풍동에서 실제 지형을 1/1000 규모로 축소한 산악모형을 대상으로 열 및 SF₆ 확산실험을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 열을 추적자로 한 확산실험과 SF₆를 사용한 실험결과는 모든 풍향에 대해서 모든 비교지점에서 비교적 잘 일치하였다. 동일한 위치에서 연직 최고 온도와 최고 농도는 가장 높은 일치도를 보였으며, SF₆ 가스확산폭과 열확산폭 간의 일치도는 상대적으로 가장 낮았다.

(2) SF₆ 농도와 온도의 연직분포는 지면에서 반사조건을 만족하는 Gaussian 함수에 의해 잘 표현되었다(R=0.96). 그러나 추적자의 확산 중심선이 지형조건에 따라 복잡하게 편향되고, 확산 중심선의 고도가 지면 기울기에 따라 차이를 보여 평탄지역에 대해 적용되어 온 Gaussian 모델과는 판이한 양상을 보였다.

(3) 서로 다른 추적자를 사용하여 각기 독립적으로 반복한 확산실험이 일정 오차범위 안에서 서로 일치하였다. 이러한 결과는 열과 SF₆를 확산 추적자로 사용한 풍동실험에 대해 적절한 신뢰성을 보장해 준다.

(4) SF₆ 가스확산실험은 적절히 설정된 조건 하에서 열확산실험으로 대체할 수 있다. SF₆ 가스

확산실험에 비해서 히터와 열전대를 이용한 열확산실험은 수행이 용이할 뿐 아니라 더 정교한 실험이 가능하다. 아울러 응답특성이 우수한 열전대를 사용할 경우 SF₆ 가스를 이용한 확산실험에서는 측정할 수 없는 시간별 변동량 또한 계측할 수 있다.

참고문헌

1. Kim, S., 2001, Physics of Chemical Warfare Agents Dispersion and Prediction Models, 2001 CWA Defence Workshop, Korea Military Academy.
2. Bentham, T. and Britter, R. E., 2003, Spatially averaged flow velocity within obstacle arrays, Atmospheric Environment, Vol. 37, pp. 2037-2043.
3. Raupach, M. R. and Legg, B. J., 1983, Turbulent dispersion from an elevated line source: measurements of wind-concentration moments and budgets, Journal of Fluid Mechanics, Vol. 136, pp. 111-137.
4. Architectural Institute of Korea, 2002, Design of Wind Loads By Korea Government Standards of Year 2002.
5. ASTM D6589_00, 2000, Standard Guide for Statistical Evaluation of Atmospheric Dispersion Model Performance.