

복잡한 지형내 오염물질의 대기확산 풍동실험 II. 산지지형 실험의 Gaussian 모델링

Wind Tunnel Experiments for Studying Atmospheric Dispersion in the Complex Terrain II. Gaussian Modeling of Experiments in a Mountainous Area

김 영 성¹⁾ · 경 남 호

한국에너지기술연구소, 305-343 대전 대덕연구단지 사서함 5호

¹⁾한국과학기술연구원, 130-650 서울 청량 사서함 131호

(1994년 11월 30일 접수, 1995년 3월 25일 채택)

Young-Sung Ghim¹⁾, Nam-Ho Kyong

Korea Institute of Energy Research, P.O. Box 5 Taedok Science Town, Taejon 305-343

¹⁾*Korea Institute of Science and Technology, P.O. Box 131 Cheongryang, Seoul 130-650*

Abstract

Predictability of a Gaussian model, ISCST2 was assessed by scaling up wind tunnel experiments with a 1/3,000 terrain model to the real scale. Concentration profiles obtained from the flat-terrain experiment in the neutral condition were estimated to be in agreement with the calculated ones from ISCST2 in the stability class A, but the difference between the two was still large. Concentration profiles from the mountainous-terrain experiments were better fitted to the calculated ones primarily because in the experiment, concentration behind the source was raised due to the effect of a hill in the upstream side. Model prediction was improved with including the downwash effect of buildings and the hill, but overall concentration profiles were not much different from a typical Gaussian profile. While concentration profiles in the experiments were changed with local flows by varying the wind direction and the topography, those from the Gaussian modeling were not freely changed together with these variations.

1. 서 론

현장실험과 달리 풍동을 이용한 대기확산 실험은 풍향과 풍속의 조절이 용이하고 확산조건이 균일하며 상세한 측정이 가능하다. 그럼에도 실제 대기 속에서 구체적 모형을 이용하여 실험한다는 점에서 풍동실험은 수학적 모델링보다 훨씬 현실적이다. 풍동실험의 중요한 목적의 하나는 현장실험에 앞서 현장의 대기확산 특성을 이해하기 위함이다. 현장에 대한 이해가 깊을수록 현장실험은

노력의 낭비없이 단기간에도 충실할 수 있다. 최근 수학적 모델과 전산기법의 발달로 수학적 모델링으로도 현장의 대기확산을 상당 부분 예측할 수 있으나 지형이 복잡하거나 풍향과 풍속의 변화가 심한 경우에는 아직 어려움이 많다.

풍동실험은 수학적 모델의 개발과 평가에도 매우 유용하다. 현장에서 원하는 확산조건을 기다리는 것도 쉽지 않을 뿐 아니라 많은 비용과 노력을 투입하더라도 풍동실험에 상응하는 정확하고 상세한 측정치를 얻는 것은 어렵다. 반면 풍동내 균일한 확산조건에서 얻은 상세한 측정

치들은 그 모습이 수학적 모델결과와 매우 근사하여 곧바로 비교분석이 가능하다.

본 논문에서는 복잡 지형 확산에 대한 Gaussian 모델의 예측 능력을 알아보기 위하여 앞서 발표된 산지 지형에서의 대기 확산 실험결과(경남호 등, 1992)를 Gaussian 모델인 ISCST2의 계산치와 비교하였다. ISC의 확산계수들이 실제 지형에서의 Pasquill-Gifford 계수나 McElroy-Pooler 계수를 이용한 것들이기 때문에(USEPA, 1992) 먼저 축소 지형에 대한 풍동실험 결과를 실제 규모까지 확대시킨 후 ISCST2를 적용하였다.

2. 풍동실험

풍동실험의 방법과 결과는 앞서의 논문에 상세히 수록하였다(경남호 등, 1992). 따라서 본 논문에서 필요한 내용과 추가된 부분만을 기술하면 다음과 같다.

2.1 실험방법

본 연구에 사용된 풍동은 흡입형으로 수축면적비는 3:1, 시험부의 크기는 1.2m×1.2m, 길이는 6.0m이었다. 산지 지형 모형은 직경 800mm의 원반 위에 실제

지형을 1/3,000로 축소하여 제작하였으며 풍향은 원반을 회전시킴으로써 조절하였다. 수직방향의 온도변화를 통한 대기 성층화는 시도되지 않았고 따라서 모든 실험은 중립조건에서 실시되었다.

시험가스로는 분자량이 공기와 비슷한 CO를 사용하였다. 시험가스 배출조건은 표 1과 같다. 경계층의 높이는 230mm, 경계층 위 균일유동장의 풍속은 7.2m/s이었으며 지수식에 맞추어 본 결과 지수값이 대략 6으로 표면의 거칠기가 아주 작았다. 표 1의 굴뚝높이 20mm에서의 평균풍속은 약 4.63m/s이었는데 시험가스 배출 속도 보다 높아 굴뚝 끝에서 downwash가 일어나는 조건이었다.

Table 1. Emission of test gas.

Stack height, h_s	20mm
Stack diameter, d_s	1.6mm
Emission rate, Q	9.7×10^{-3} g/s
Gas exit velocity, v_s	4.14m/s
Gas exit temperature, T_s	room temperature

2.2 측정치의 무차원화

풍동실험 결과를 실제 규모까지 확대시킨 후 Gaus-

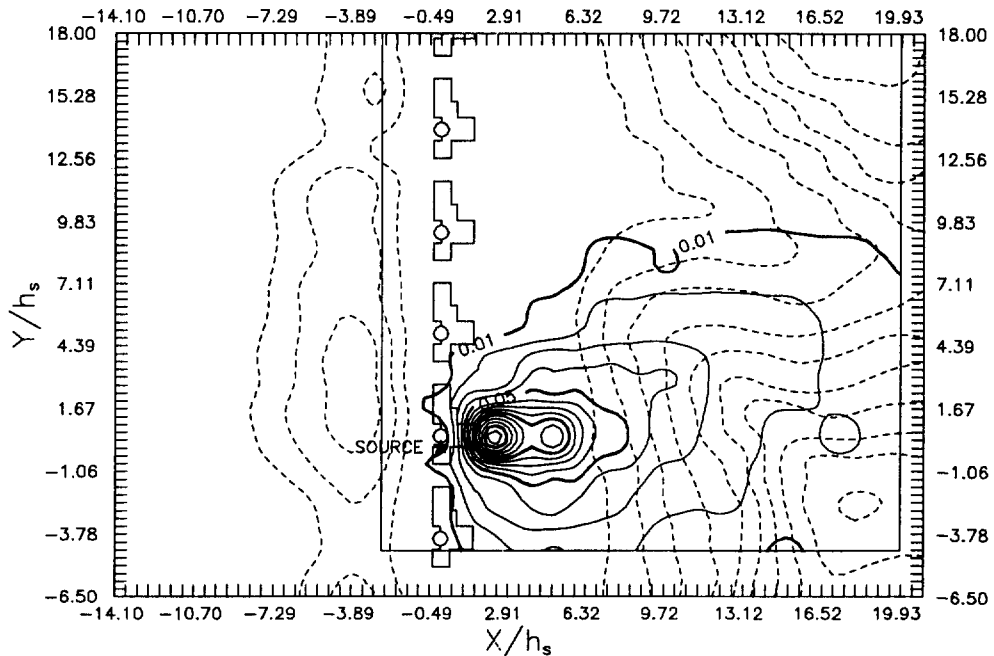


Fig. 1. Measurements of plume dispersion when the wind blows from the northwest. Source is located on the building #2.

sian 모델 결과와 비교하기 위하여 측정치를 무차원화하였다. 대기확산의 Gaussian 분포를 가정하면,

$$C = \frac{Q}{2\pi u_s \sigma_y \sigma_z} HV \quad (1)$$

이때 u_s 는 굴뚝 상단에서의 풍속을, σ_y , σ_z 는 수평, 수직 확산계수를, H와 V는 각각 Gaussian 분포의 수평과 수직항을 의미한다. 특성길이를 굴뚝높이 h_s 로 하여 (1)식을 정리하면,

$$Cu_s h_s^2 / Q = \frac{h_s^2}{2\pi \sigma_y \sigma_z} HV \quad (2)$$

(2)식의 좌우변은 무차원이 된다. 본 연구에서는 $Cu_s h_s^2 / Q$ 를 무차원 농도로 사용하였으며, 풍향거리는 X/h_s , 바람을 가로질러서는 Y/h_s 로 각기 무차원화 하였다(Snyder, 1979).

2.3 실험결과

그림 1, 2는 무차원화한 좌표계에 무차원 농도를 나타낸 것이다. 무차원 좌표계에서 오염원은(0, 0)점에 위치한다. 결과 자체는 앞서의 논문(경남호 등, 1992)과 동일하므로 특정적 내용만을 간략히 기술하면 다음과 같다.

북서쪽에서 불어 온 바람은 먼저 구릉을 만나 후면에 와류를 형성하고 구릉 후면에 위치한 건물들 역시 와류 영역 내에 포함된다. 따라서 건물에서 배출된 오염물질은 곧바로 지표면에 닿아 농도가 높아진다. 이후 오염물질은 동쪽과 남쪽의 높은 산을 피하여 남동쪽의 계곡으로 이동한다. 서풍조건에서는 초기에 풍향과 비스듬한 구릉의 영향으로 구릉을 따라 이동하던 오염물질이 후기에는 방향을 바꿔 계곡 쪽으로 이동하고 있다. 어느 경우나 최대점 부근의 등농도 곡선이 둘로 나뉘어진 것은 h_s 로 무차원과 하였을 때 2.5 간격으로 측정점을 배치하였기 때문이다.

3. 확산계수의 결정

원칙적으로 중립조건에서 풍동실험이 실시되었으므로 Gaussian 모델에서도 중립조건 확산계수를 사용하여야 한다. 그러나 이는 축척의 변화가 없을 때의 이야기이다. 아무리 상사(similarity) 조건에 충실하게 대기 경계층을 만들어 실험을 하였어도 축소 영역에서의 대기 확산이 실제 규모에서의 확산과 동일할 수는 없으며 축척 비가 클수록 차이는 더욱 커진다(Snyder, 1981).

Snyder(1979)의 약 1/570 축소실험 결과를 보면 중

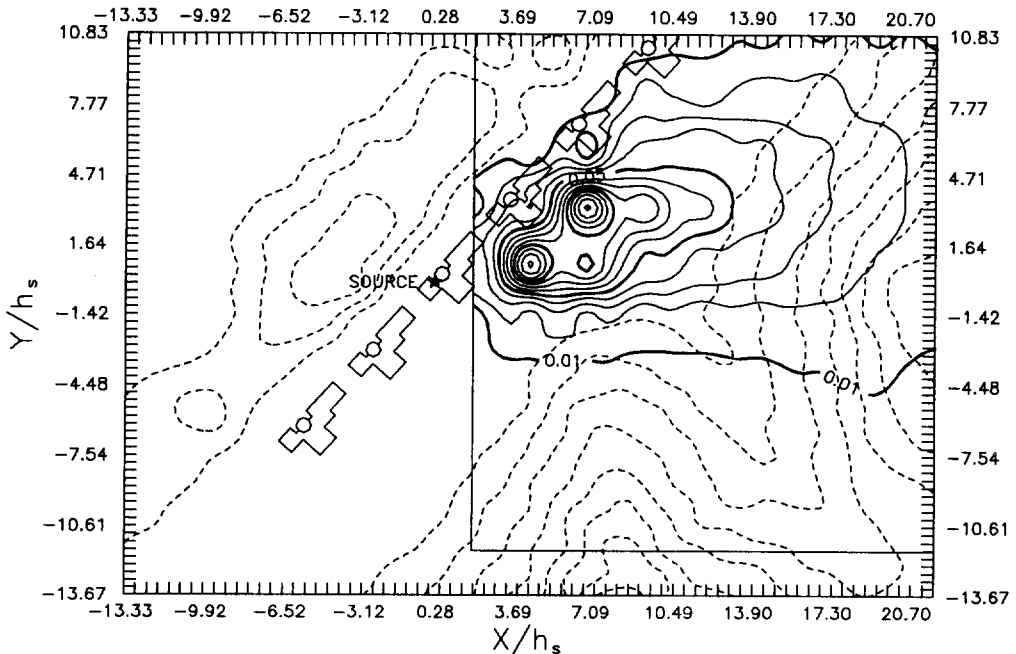


Fig. 2. Measurements of plume dispersion when the wind blows from the west. Source is located on the building #3.

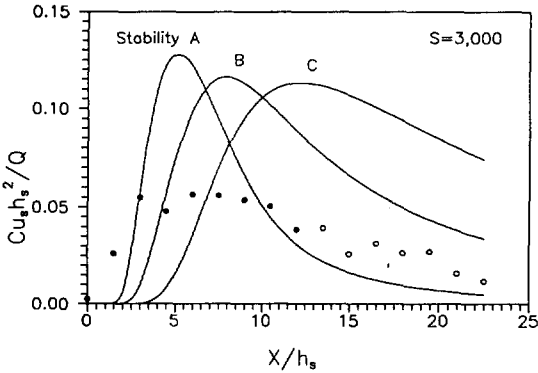


Fig. 3. Comparison of concentration profiles from the experiment and Gaussian modeling on the centerline in the flat terrain. Circle symbols represent experimental results, and solid lines represent calculated results with different atmospheric stabilities. Open circles indicate that the distortion of concentration field due to the blockage of a obstacle at the end of the downstream is suspected (Kyong et al., 1992).

림조건의 실험임에도 수직확산은 안정도 C의 Pasquill-Gifford 확산계수에, 수평확산은 안정도 D의 확산계수에 가까우며 거리에 따른 확산계수의 증가도 Pasquill-Gifford 보다 완만하다. Stein 등(1989)은 건물와류 효과를 조사하기 위하여 1/300의 축소실험을 행한 후 Gaussian 확산식 계산치와 비교하였는데 대부분의 실험이 안정도 B에서의 계산치와 유사하였다.

그림 3은 1/3,000로 축소한 그림 1의 실험과 동일한 배출 조건의 평지 실험 결과를 3,000배로 확대한 후 중심선에서의 농도 분포를 자기 다른 대기 안정도에서의 Gaussian 모델 계산치와 비교한 것이다. 여기서 크기인자 S는

$$S = \frac{\text{dimension of calculated domain}}{\text{dimension of wind tunnel facility}} \quad (3)$$

로 정의된다. S가 3,000이므로 확산식의 계산에서 굴뚝 높이 h_s 는 60m, $X/h_s=25$ 는 풍하거리 1.5km에 해당된다. 산지 지형 실험에서는 무시될 수 있으나 $X/h_s=15$ 부근부터는 하류의 이송 장치 영향으로 유동이 방해될 수 있는 상태에서 측정된 농도이기 때문에(경남호 등, 1992) 참고로만 사용할 수 있도록 표식을 달리하였다.

실제 풍동실험이 중립조건인 안정도 D에서 행하여졌음에도 안정도 A일 때의 계산치가 그 중 근사하다. 실험치가 오염원 위치부터 바로 높아진 것은 아무래도 배출구 끝에서의 downwash가 계산치에서 고려한 것보다 컸던 때문으로 추정된다. 그럼에도 downwash 만으로 설명하기에는 초기 확산이 클 뿐 아니라 하류로 내려가면서도 농도 감소가 뚜렷하지 않아 Snyder(1979)에서와 같이 풍하거리에 따른 확산 증가가 크지 않다. 이같은 현상을 유동에 대한 무차원수인 Reynolds 수의 차이로부터 살펴보면 다음과 같다.

실제 지형에서 경계층 높이 δ 과 경계층 위 균일 유동장에서의 유속 \bar{U} 를 기준으로 한 Reynolds 수는

$$Re = \frac{\bar{U}\delta}{\nu} = \frac{10\text{m/s} \cdot 1000\text{m}}{10^{-5}\text{m}^2/\text{s}} = 10^9 \quad (4)$$

그러나 풍동에서는 δ 이 기껏해야 1,000mm order이므로 Reynolds 수는 10^6 정도가 되며 동일한 수준의 Reynolds 수를 유지하기 위하여서는 \bar{U} 가 10m/s가 되어야 하나 이는 현실적으로 불가능하다.

물론 Reynolds 수가 임계점인 $10^5 \sim 10^6$ 이상이면 유동의 난류특성이 더 이상 크게 변하지 않음은 잘 알려진 사실이다(Townsend, 1956; Cermak, 1971, 1976). 그러나 상사이론보다 낮은 풍동내의 유속은 오염물질의 이동보다 확산의 역할을 상대적으로 크게 하여, 사실은 중립조건에서의 실험임에도 이를 실제 규모로 확대할 경우 안정도 C, B, A의 불안정한 조건에서의 확산현상에 가까운 결과를 나타내는 것으로 해석된다. 또한 이같은 현상은 확산초기에 더욱 심하며, 바꾸어 말하면 풍동실험의 측정비율이 크면 클수록 두드러진다.

그림 4는 크기인자 S가 3,000일 때 안정도 A 조건에서 계산된 일정 풍하거리에서의 농도분포의 단면을 풍동 실험치와 비교한 것이다. $X/h_s=4.5$ 는 계산치의 농도가 최대가 되는 부근이며, $X/h_s=7.5$ 는 측정치의 농도가 최대로 나타난 곳이다. 중심선의 농도는 작으나 연기의 폭이 대체로 잘 일치하고 있다.

4. 산지 지형 실험의 Gaussian 모델링

4.1 ISCST2에 의한 Gaussian 모델링

ISCST2(Industrial Source Complex Short-Term 2)를 이용하여 그림 1, 2의 실험을 모사하였다. ISCST2에서는 건물 주위 와류 효과를 계산할 때 건물의 직접적 영향을 고려하기 위한 Schulman-Scire 계산법 뿐 아니라 간접 영향을 위한 Huber-Snyder 계

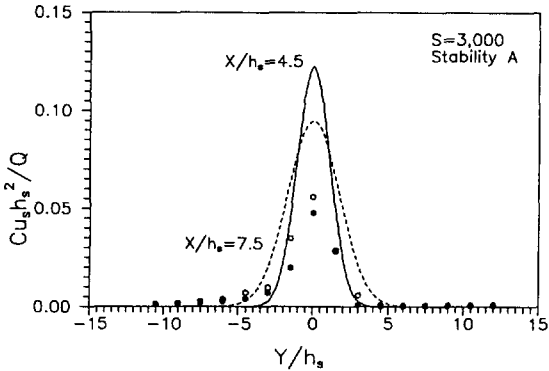


Fig. 4. Comparison of the crosswind concentration profiles from the experiment and Gaussian modeling in the flat terrain. Circle symbols represent experimental results, and lines represent calculated results. Solid circles and solid line are for $X/h_s=4.5$ near which the calculated results show the maximum, and open circles and dotted line are for $X/h_s=7.5$ at which the experimental results show the maximum, on the centerline.

산법에서도 방향에 따른 건물크기를 필요로 하는데, 본 연구에서는 Trinity Consultants(1991)의 BRZ-WAKE를 이용하여 입력자료를 작성하였다. 수용처의 모든 지형조건과 풍하거리에 따른 연기상승들을 고려하였으나, 실제 ISC의 계산에서는 굴뚝 높이보다 낮은 수용처의 지형만이 고려될 뿐 굴뚝 높이 이상의 수용처는 굴뚝 높이로 가정하고 있다(USEPA, 1992). 모델 계산은 풍동지형을 3,000배 확대한 원래의 지형조건에서 행하였으며 확산계수는 안정도 A에서의 Pasquill-Gifford 확산계수를 이용하였다.

4.2 북서풍 조건에서 건물 #2에서 배출된 오염물질의 확산

그림 5의 (a)는 그림 1에서 Y/h_s 가 0.5일 때 즉, 격자 형태의 측정점 중 농도가 가장 높아진 가로 선에서의 계산치를 측정치와 비교한 것이다. 그림의 아래 부분은 $Y/h_s=0.5$ 선상의 지형 변화이다. 굴뚝은 $X=0$ 에서 $Z=h_s$ 이므로 동근 건물보다 약간 높다. 점선은 건물의 존재를 무시하였을 때의 농도분포이다. 실선은 건물의 와류효과를 고려한 것인데 실제 배출물의 확산에 미치는 것은 건물의 동근 부분 뿐이었다.

*를 포함한 점선은 건물 앞의 구릉까지를 그림 1의 점선에서와 같이 3층 건물로 가상하여 건물 와류효과 계산에 포함시켰을 때의 계산치이다. 그림 1에서 앞 구릉의

동고선의 높이는 각기 $Z/h_s=0.4, 0.8, 1.2$ 등인데, 실제 배출물의 확산에 영향을 미치는 것은 $Z/h_s=0.8$ 이상이었다. 건물 와류효과를 포함시킬 경우 ISC는 건물의 높이와 너비 중 큰 쪽의 3배 거리 이하는 와류영역으로 보아 농도를 계산치 않으며 따라서 그림 5(a)의 실선과 *를 포함한 점선의 앞부분은 끊어져 있다.

실제 실험에서는 앞 구릉에 의한 와류의 영향으로 오염물질의 농도가 굴뚝 바로 뒤에서 급격히 높아지는 반면 ISC 계산에서는 오염원 앞의 복잡한 유동변화가 고려되

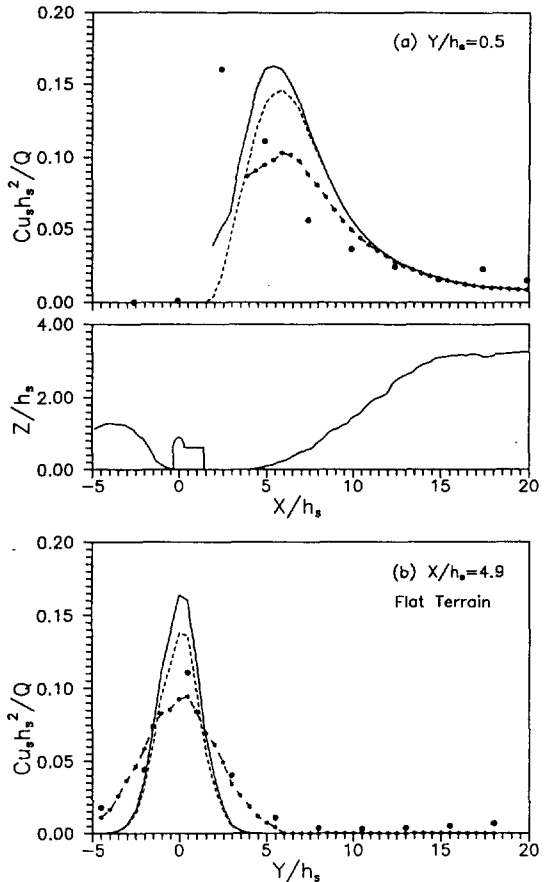


Fig. 5. Comparison of concentration profiles from the experiment and Gaussian modeling when the wind blows from the northwest. Solid circles represent experimental results, and lines represent calculated results. Dotted line indicates the results without downwash effects, solid line indicates those with building downwash, and dotted line with * indicates those with both building and the hill downwash.

지 못하여 최대점이 하류 쪽으로 한 걸음 물러나 있다. 건물의 와류효과를 고려할 경우 계산치는 점선에 비하여 실험치에 상응하는 수준까지 높아지나 최대점의 위치는 거의 변화가 없다. 앞의 구릉까지를 건물로 가정하여 와류효과를 계산하였을 때에도 최대점의 위치는 거의 동일하며 건물과 구릉을 무시하였던 점선보다 농도는 오히려 감소하였다.

그림 5의 (b)는 X/h_s 가 4.9일 때 즉, 그림 1에서 두 번째로 농도가 최대가 되는 지점을 세로로 잘랐을 때의 농도분포를 계산치와 비교한 것이다. 그림 1에서도 볼 수 있는 것과 같이 $X/h_s=4.9$ 를 따라서는 지형의 높이가 거의 변하지 않는 평탄한 지형이다. 점선과 실선의 변화는 (a)의 경우와 유사하나, 앞의 구릉을 건물로 가정할 *를 포함한 점선은 비록 최대점은 낮지만 폭이 훨씬 넓어 실험치와 잘 일치하고 있다. 즉, 그림 1에서 확산 초기 세로 방향으로 넓은 분포는 앞의 구릉 때문이다.

반면, 뒷부분 높은 산의 영향은 크지 않은 것으로 판단된다. 그림 5(a)의 후반부는 세 곡선이 수렴하여 일치된 경향을 보이고 있는데 이때의 계산치는, 앞에서 언급한 바와 같이, 지형의 높이가 굴퓏의 높이 즉, $Z/h_s=1.0$ 이상일 때에는 지형의 높이를 굴퓏 높이로 가정한 결과이다. 만일 CTDMPPLUS(Perry, 1992; Paumier et al., 1992) 등의 모델을 사용한다면 지형의 높이 때문에 농도가 다소 높아질 수 있으나 높은 산이 최대점을 훨씬 지난 하류에 있고, 또 안정도 A 확산 계수를 이용한 까닭에 그 효과는 크지 않을 가능성이 높다.

4.3 서풍 조건에서 건물 #3에서 배출된 오염물질의 확산

그림 6의 (a)와 (b)는 그림 2에서 오염원에 가까운 최대점을 중심으로 각기 X, Y축을 따라 절단한 농도 분포를 계산치와 비교한 것이다. (b)의 지형 그림에 나타난 건물은 건물 #4이며, 북서풍의 경우와 달리 Y축을 따른 절단에서도 지형이 평탄치 않다. 건물과 앞 구릉의 영향이 그림 5와 유사하여 계산치의 경향도 비슷하다. 그러나 그림 5에 비하여 실험치의 최대점이 뒤에 위치하여 계산치와의 차이가 작는데, 풍향이 45도 변함에 따라 오염원과 앞 구릉의 거리가 $\sqrt{2}$ 배만큼 멀어져 구릉의 영향이 그만큼 줄었기 때문으로 해석된다.

그림 7은 그림 2에서 오염원으로부터 먼 최대점을 중심으로 $Y/h_s=3.3$ 선을 따라 절단한 농도 분포를 계산치와 비교한 것이다. $Y/h_s=3.3$ 은 중심선에서 수직 방향으로 굴퓏 높이의 3.3배만큼 떨어졌음을 의미한다. 실제 실험에서는 구릉의 영향으로 풍향이 바뀌어 중심선에

서 훨씬 벗어난 지점의 농도가 높아졌으나, 구릉의 영향을 고려한 계산치도 구릉을 따라 흐르는 유동에 의한 오염도 상승을 거의 재현하지 못하고 있다. 더군다나 $Y/h_s=3.3$ 선상에서는 하류에서 오염물질의 이동이 계속 쪽으로 방향을 전환함에 따라 뒷부분의 측정치가 중심선에 가까웠던 그림 6의 (a)보다 오히려 높으나 계산 결과는 반대이다.

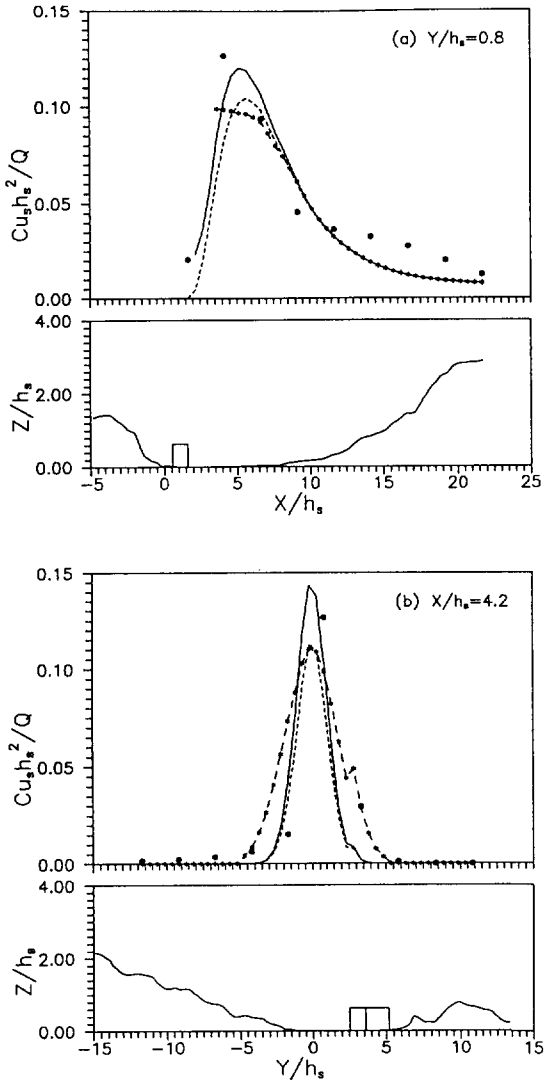


Fig. 6. Comparison of concentration profiles from the experiment and Gaussian modeling when the wind blows from the west. Symbols have the same interpretation as those in Fig. 5.

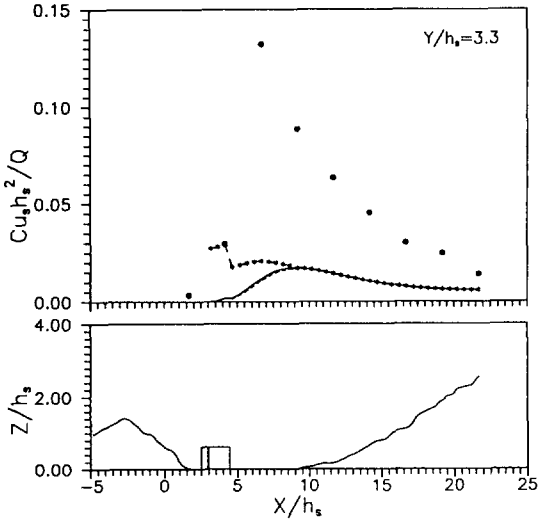


Fig. 7. Comparison of concentration profiles from the experiment and Gaussian modeling at $Y/h_s=3.3$, away from the centerline when the wind blows from the west. Symbols have the same interpretation as those in Fig. 5.

5. 결 토

관심 지역 내에서 지형조건에 의하여 풍향이 변할 때 Gaussian 모델의 농도 계산이 부정확함은 충분히 예상할 수 있는 결과이다. 그림 8은 Gaussian 모델링에 의하여 그림 2의 농도분포를 계산한 것이다. 건물의 와류 효과만을 고려한 (a)에서는 실질적으로 돔 형태의 건물만이 영향을 미침으로써 건물의 영향이 없을 때 Gaussian 분포와 크게 다르지 않다. 앞 구릉의 영향까지 포함한 (b)는 대체로 (a)보다 나아 보이나 위아래가 대칭인 Gaussian 분포의 틀을 벗어나지 못하고 있다. (b)의 그림에서 오염원 하류 상당부분의 농도가 낮게 나타난 것은 그림 5(a)와 함께 언급한 바와 같이 ISCST2가 와류 영역 내에서는 농도를 계산하지 않기 때문이다.

그럼에도 중심선 부근을 살펴본 그림 5, 6의 계산치와 측정치의 비교 결과는 평지 실험에 대한 그림 3, 4의 비교보다 오히려 나아 보인다. 지형 요소에 의한 유동이 지표 근처에서 지배적인 산지 지형 실험에 비하여 그림 3에서도 볼 수 있는 것과 같이 평지 실험의 유동은 균일하여야 하기에 까다로운 것이 사실이다. 그러나 그림 5, 6의 (a)의 최대점 위치들을 살펴보면 실험치가 X/h_s ,

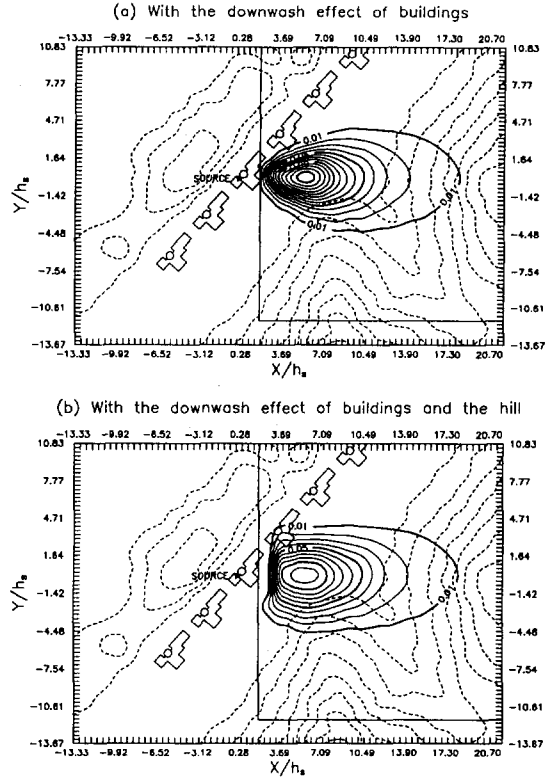


Fig. 8. Calculated concentration profiles by using ISCST2 when the wind blows from the west.

$=2.4, 4.2$ 인데 비하여 계산치는 모두 5 부근으로 비슷하다. 이같은 사실은 농도에 있어서도 크게 다르지 않다. 평지 실험 결과보다 산지 실험 결과가 계산치와 잘 일치하는 것도 앞 구릉 와류의 영향으로 실험치의 농도가 계산치에 근접하게 높아졌기 때문이다.

6. 결 론

산지 지형에 대한 1/3,000 축소 모형에서 얻은 풍동 실험 결과를 실제 규모로 확대시킨 후 ISCST2 계산결과와 비교하였다. ISCST2 모델링은 앞 구릉과 건물의 와류효과들을 적절히 고려할 경우 어느 정도 향상된 결과를 얻을 수 있었으나 최대 농도 추정을 위주로 한 1차 (screening) 분석 목적 이상의 사용은 곤란하였다.

- 1) 중립조건의 평지 실험치를 확대시킨 결과는 안정도 A의 Gaussian 모델 계산치에 가장 가까웠으나 중심선 부근의 농도 분포는 차이가 컸다. Reynolds 수 상사를 토대로 볼 때 풍동내 대기확산은 확대된

실제 지형에서의 대기확산에 비하여 이동속도가 낮아 확산의 효과가 커졌고 따라서 안정도가 불안정한 쪽으로 이동한 것으로 해석되었다.

- 2) 산지 지형 실험과 모델 계산치는 평지의 경우보다 오히려 잘 일치하였는데 주로 실험에서 오염원 앞 구릉의 영향으로 하류 초기 오염물질의 농도가 높아진 때문이었다. 건물의 와류효과나 앞 구릉의 와류효과까지를 포함시켰을 경우 모델 예측이 다소 나아지기는 하였으나 Gaussian 분포의 큰 틀이 바뀔 정도는 아니었다.
- 3) 지형적 영향으로 오염물질의 이동이 중간에 방향을 바꾸는 서풍조건에서 관심영역이 풍향의 중심선을 벗어날 경우 계산치는 실험치와 큰 차이를 보였다. 실험에서는 풍향 및 주변 지형의 변화에 따라 유동이 바뀌어 농도 분포가 변하였으나 모델 계산에서는 이같은 변화가 수용되지 못하여 농도 분포가 대체로 일정하였다.

감 사

본 연구는 청정 에너지정책 수립을 위한 상공자원부 출연연구사업의 일환으로 진행되었습니다. 연구비를 지원하여 주신 관계자 여러분께 감사드립니다.

참 고 문 헌

경남호, 김영성, 손재익(1992) 복잡한 지형내 오염물질의 대기확산 풍동실험. I. 산지에서의 확산, 한국대기보전학회지, 8, 169-178.

Cermak, J. E. (1971) Laboratory simulation of the atmospheric boundary layer, AIAA J., 9, 1749-1754.

Cermak, J. E. (1976) Aerodynamics of buildings, Annual Review of Fluid Mech., 8, 75-106.

Paumier, J. O., Perry, S. G. and Burns, D. J. (1992) CTDMPPLUS: A dispersion model for sources near complex topography. Part II: Performance characteristics, J. Applied

Meteorol., 31, 646-660.

Perry, S. G. (1992) CTDMPPLUS: A dispersion model for sources near complex topography. Part I: Technical formulations, J. Applied Meteorol., 31, 633-645.

Snyder, W. H. (1979) The EPA Meteorological Wind Tunnel: Its Design, Construction, and Operating Characteristics, EPA-600/4-79-051, Environmental Protection Agency, Research Triangle Park, N. C.

Snyder, W. H. (1981) Guideline for Fluid Modeling of Atmospheric Diffusion, EPA-600/8-81-009, Environmental Protection Agency, Research Triangle Park, N. C.

Stein, W., White, B. R., Kavanagh, J., Brucker, D., Castro, E., Bagheri, N., and Stratardakis, C. J. (1989) Wind-Tunnel Study of Atmospheric Dispersion of Exhausts from the NDERF Building Stack, Report UCRL-21199; Wind-Tunnel Study of Atmospheric Dispersion of Exhausts from the Stack of Building 222, Report UCRL-21200, Lawrence Livermore National Laboratory, Livermore, CA.

Townsend, A. A. (1956) The Structure of Turbulent Shear Flow, Cambridge University, Cambridge, U.K., 315 pp.

Trinity Consultants, Inc. (1991) User's Manual for Breeze Wake: A Breeze Air Product Version 2.1, Dallas, Texas.

U. S. Environmental Protection Agency (1992) User's Guide for the Industrial Source Complex (ISC2) Dispersion Models: Volume I-User Instructions; Volume II-Description of Model Algorithms; Volume III-Guide to Programmers, EPA-450/4-92-008a, b, c, Environmental Protection Agency, Research Triangle Park, N. C.