

추적자 확산실험에 의한 야간 강안정층 하에서의 가우시안 퍼프모델의 평가

Evaluation of Gaussian Puff Model with Tracer Experiment under Nighttime Strong Stable Conditions

이종범 · 김 산¹⁾ · 김용국 · 조창래 · 유승도²⁾

강원대학교 환경학과

¹⁾기상청 기상연구소

²⁾국립환경연구원

(1996년 5월 16일 접수, 1996년 11월 25일 채택)

Chong Bum Lee, San Kim¹⁾, Young Goog Kim, Chang Rae Cho, Seung Do Yu²⁾

Department of Environmental Science, Kangwon National University

¹⁾*Meteorological Research Institute, KMA*

²⁾*National Institute of Environmental Research*

(Received 16 May 1996; accepted 25 November 1996)

Abstract

Dispersion experiment using SF₆ tracer was performed in the flat field of Chunchon Basin during four nights from August 29 to September 2, 1991. The purpose of this study is to analyze the horizontal distribution of tracer concentration under the strong stable conditions and to evaluate the results calculated by INPUFF model.

In case of high wind speed, plume spread of SF₆ concentration appeared in narrow area of the downwind and the standard deviation of the horizontal wind angle (σ_w) was small. However, the SF₆ was spread widely in cases of low wind speed because of the large σ_w . The result of the INPUFF model was similar to the observed distribution of the SF₆ concentration. It is proved that the Gaussian puff model is useful when wind direction varies significantly.

Key words : Puff model, tracer experiment, diffusion model

1. 서 론

최근 들어 인체에 무해하고 대기 중에서 화학반응을 일으키지 않는 추적기체를 이용한 확산실험을 통해 기존의 대기오염 확산모델들에 대한 평가 및 개선이 많이 이루어지고 있으며, 특정 지형을 대상으로 한 확산실험도 종종 이루어지고 있다. 대기오염 예측을 위하여 사용되

고 있는 확산모델중 가우시안 확산모델은 계산 과정이 비교적 간단하고 입력자료의 수집이 용이하므로 널리 사용되고 있으나, 여러 가지 오차에 의하여 모델의 계산 결과는 실제와 크게 다를 가능성이 있다.

특히, 입력자료중 기상자료의 부정확성으로 인한 오차가 크게 발생할 수 있으며, 오차의 주요인은 대기안정도, 또는 대기안정도와 풍하거리의 함수로부터 구해지는 연기의 수평확산폭(σ_y)과 수직확산폭(σ_z)이다. 가우시

안 확산모델에서는 일반적으로 σ_z 및 σ_y 를 대기안정도와 풍하거리로부터 Pasquill-Gifford scheme (Turner, 1964)에 의하여 계산하는 것이 대부분이나 Pasquill 안정도계급의 경우 산출방법이 용이한 반면 실제 대기안정도와 큰 차이를 나타내는 경우가 많다(이종범과 김용국, 1990).

한편, 야간에는 주간에 비하여 풍속이 약하고 지표면 부근에 접지 역전층이 발달하여 대기가 안정하므로 대기 오염 물질의 수평 및 연직확산이 억제되어 고농도의 대기오염 현상이 일어날 가능성이 높다. 일반적으로 연기의 확산폭은 대기가 안정할 수록 좁아지는 것으로 계산되고 있으나 야간 안정층 하에서는 풍향의 변동이 크게 나타남으로 대기오염 농도는 폭넓게 분포한다(Brusasca *et al.*, 1992; Lee *et al.*, 1991). 야간 강안정층에서의 대기경계층의 구조와 확산현상 파악을 위하여 최근까지도 많은 연구가 활발히 진행되고 있으나 아직 명확하게 밝혀지지 못한 부분이 많아서 확산모델의 예측 결과에 오차가 크게 나타날 수 있으므로 이러한 오차를 줄이기 위한 연구도 진행되고 있다(Tangirala *et al.*, 1992; Vever *et al.*, 1992).

확산모델에 필요한 정확한 입력자료를 얻기 위하여서는 확산실험을 실시하여야 한다. 확산실험에서는 미리 정해진 배출량을 정확히 방출하고, 자세한 기상관측을 실시하여 이들 자료를 확산모델의 입력자료로 한다. 또한 확산모델을 실행하고, 그 결과를 다수의 시료채취 지점에서의 가스농도 측정자료와 비교함으로써 확산모델의 계산과정을 평가할 수 있으며, 특정 조건에서의 확산모델의 적용가능성 등도 평가할 수 있다.

본 연구에서는 춘천시 근교의 평탄한 농경지를 대상으로 야간에 SF₆ (sulfur hexafluoride) 가스를 이용한 확산실험을 실시하여 INPUFF 모델을 평가하였다. 이를 위하여 기상조건에 따른 SF₆ 농도의 수평분포 결과를 해석하고 가우시안 퍼프식을 사용하는 INPUFF 모델(Perersen and Lavdas, 1986)을 적용하여 계산농도와 실측농도를 비교하고 평가하였다. INPUFF 모델은 기상조건이나 배출량의 시간변화가 큰 비정상상태에도 적용이 가능하므로 본 연구에서 대상으로 하는 야간 강안정상태의 농도계산에 적절한 모델이다.

2. 연구방법

2.1 확산실험

2.1.1 장소 및 일시

국지확산모델의 평가 및 개선을 위하여 수행되고 있는

확산실험의 수평적인 대상영역은 연구목적에 따라 다양하지만 대체로 수백 m~수십 km까지를 대상으로 하고 있다(Brusasca *et al.*, 1992; Moore *et al.*, 1988). 본 연구의 대상 지역은 우리나라 중부지방에 위치한 춘천시 근교로서 소양호와 춘천호, 의암호가 있으며, 반경 약 6 km 거리에 해발 500 m 내외의 산이 둘러 쌓여있는 분지의 중앙부에 해당한다(그림 1). 확산실험은 그림 2에 보인 바와 같이 춘천시 근교의 해발 약 100 m의 평탄한 농경지에서 반경 500 m 이내를 대상으로 1991년 8월 29일부터 9월 2일까지 야간에 실시하였다.

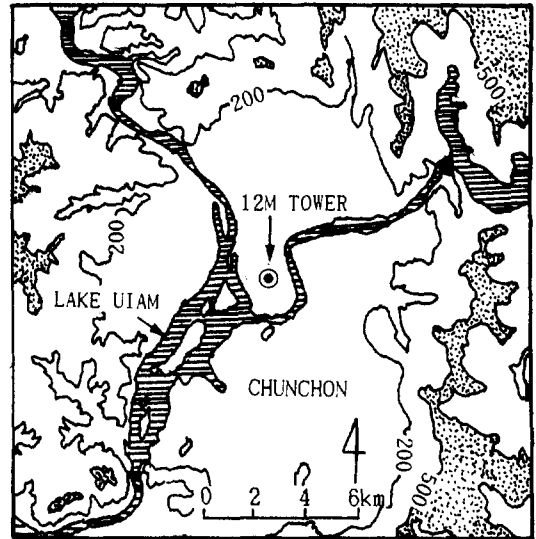


Fig. 1. Map of the dispersion experiment site and surroundings of Chuncheon basin.

2.1.2 SF₆ 가스의 방출과 채취

본 연구에서는 추적기체로서 SF₆ 가스를 이용하였다. SF₆ 가스는 비반응성 물질로 다루기 쉽고 분석이 용이할 뿐 아니라 저농도(ppb) 검출이 가능하므로 확산실험에 많이 사용되고 있다(Cagnetti *et al.*, 1988; Brown *et al.*, 1975).

가스를 방출시키기 위한 장치의 구조는 그림 3과 같다. 가스는 압력조절기, 열교환기 및 유량계를 거쳐 기상탑의 11 m 고도에서 방출되도록 하였으며, 가스 방출시 가스용기의 냉각을 방지하기 위하여 가열장치(heating pad)를 설치하였다. 가스의 방출율은 유량계를 이용하여 매 시간당 평균 400 g 또는 1,000 g이 유지되도록 하였으며, 실험시작 전과 실험이 끝난 후에 SF₆ 가

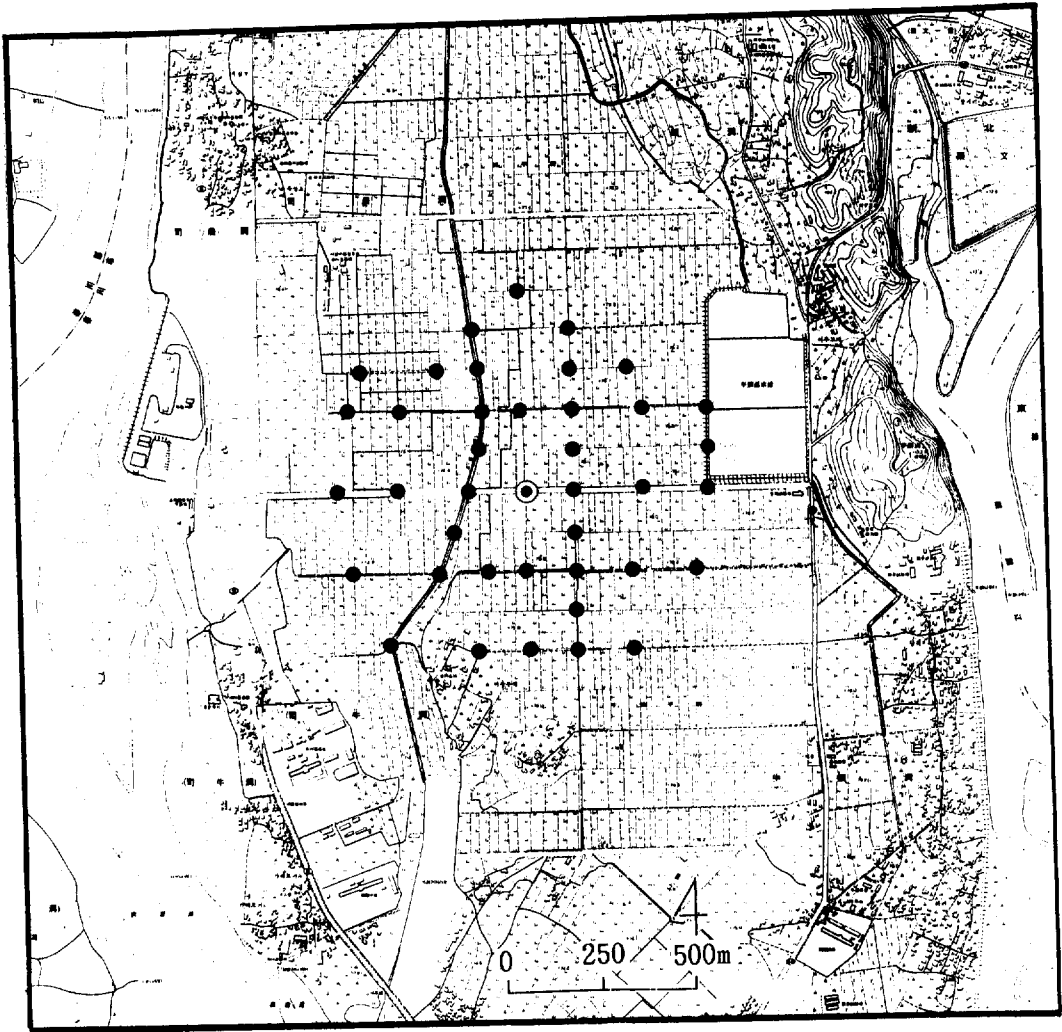


Fig. 2. Map of the sampling sites at Ududong, Chunchon.

⊙: SF₆ gas release and meteorological observation point ●: SF₆ gas sampling sites

스의 무게를 정량하여 정확한 방출율을 산출하였다. 공기시료 채취기 (air sampler)는 시료채취의 시작시간과 끝시간을 임의로 조절할 수 있고 견전지로 구동되도록 제작하였으며, 용량 50 ml인 1회용 주사기를 이용하여 시간당 40 ml씩 연속적으로 채취하였다. 표 1에 SF₆ 가스의 방출량, 방출시간 및 포집시간을 나타내었다. 공기시료는 방출개시 2시간 후부터 포집을 시작하여 1시간 단위로 총 21시간분을 채취하였으며, 매시간의 SF₆ 농도를 3시간 단위로 하여 총 7회의 시료채취 기간에 대한 지점별 평균농도를 산출하였다. 포집지점은 그림 3에 보인 바와 같이 SF₆ 가스 방출지점을 중심으로 한 반경

500 m 이내의 40개 지점이며, 채취기의 설치 높이는 지상 1.5 m로 하였다.

SF₆ 농도 분석은 ECD GC (electron capture detector gas chromatograph)를 사용하였으며, 분석 조건으로서 주입온도를 230°C, 컬럼온도를 200°C로 하고 길이 3 m, 내경 2.6 mm 인 충전컬럼을 사용하였으며, 시료운반 기체는 질소를 사용하여 유량을 40 ml/min으로 하고, 공기시료를 500 μl씩 주입하였다. 또한, SF₆ 가스의 농도는 0.5 ppb와 10.3 ppb 두 종류의 표준가스를 사용하여 보정하였다(이종범과 강인구, 1989).

Table 1. Tracer gas release rates from August 29 to September 2, 1991.

Release Date and Time	Sampling Date and Time	Release Rate (kg/hr)
29 Aug. 22:00 ~ 30 Aug. 03:00	30 Aug. 00:00 ~ 30 Aug. 03:00	0.4
30 Aug. 18:00 ~ 31 Aug. 02:00	30 Aug. 20:00 ~ 31 Aug. 02:00	1.0
31 Aug. 19:00 ~ 01 Sep. 03:00	31 Aug. 21:00 ~ 01 Sep. 03:00	1.0
01 Sep. 19:00 ~ 02 Sep. 03:00	01 Sep. 21:00 ~ 02 Sep. 03:00	1.0

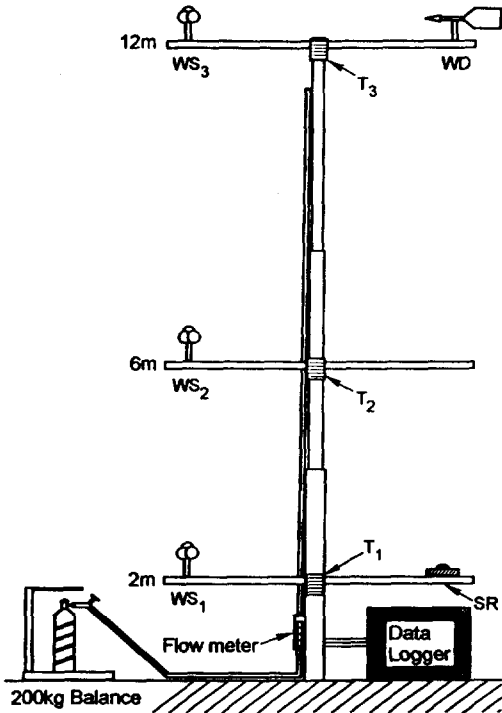


Fig. 3. Schematic diagram of meteorological observation system and SF₆ gas release system.

2. 1. 3 기상측정

실험기간 동안 접지층의 기상요소를 측정하기 위하여 실험장소의 중앙부에 그림 3과 같이 12 m 높이의 기상탑을 설치하였다. 온도센서 및 풍속계는 기상탑의 2 m, 6 m, 12 m 세 고도에 각각 설치하였으며, 12 m 고도에는 풍향계를, 2 m 고도에는 일사계를 설치하였다. 또한 thermistor 뿐만이 아니라 thermocouple을 동시에 설치하여 정확한 온도차를 측정하도록 하였다. 각 기상요소의 측정간격은 5초로 하였으며, 자료수룩장치에는 매 5분간의 평균값이 저장되도록 하였다. 한편, 상층기상을 측정하기 위하여 radiosonde를 이용하였으며, 매 시간 고도별 기압, 기온, 상대습도를 측정하였다.

2. 2 INPUFF 모델의 개요

INPUFF 모델은 비정상 상태하에서의 대기오염농도를 산정하는데 유용한 가우시안 퍼프모델로서, 단일 또는 다수의 점오염원에 대하여 수십 m에서 수십 km까지의 범위에 있는 최대 100개 지점에 대한 농도계산이 가능하다. 또한 선박과 같은 이동배출원에 대한 계산도 가능하다. 한편 이 모델은 화학반응과 복잡한 지형을 고려할 수 없으며, 대기안정도와 풍향은 고도에 따라 일정하다고 간주한다.

모델에서 각 퍼프는 풍속 및 풍향의 변화에 따라 자유롭게 이동되며, 퍼프의 확산은 대기안정도 및 이동시간 (t)에 의해 결정된다. 퍼프의 확산폭을 계산하기 위하여 단거리 확산일 경우 사용자는 P-G scheme 또는 On-site scheme (Irwin, 1983)을 선택할 수 있으며, 장거리 이동시에는 퍼프의 성장은 시간의 제곱근에 비례하는 것으로 계산한다. 식 (1)은 INPUFF 모델의 기본식을 나타낸 것으로, 이때 풍하측 방향으로의 확산폭 (σ_x) 과 수평확산폭 (σ_y)은 같다고 가정한다.

$$C(r, z, H) = \frac{Q}{(2\pi)^{3/2} \sigma_y^2 \sigma_z} \exp\left[-\frac{1}{2} \left(\frac{r}{\sigma_y}\right)^2\right] \times \left\{ \exp\left[-\frac{1}{2} \left(\frac{z+H}{\sigma_z}\right)^2\right] + \exp\left[-\frac{1}{2} \left(\frac{z-H}{\sigma_z}\right)^2\right] \right\} \tag{1}$$

$$r^2 = (x-ut)^2 + y^2 \tag{2}$$

여기에서, C는 농도(mg/m³), x는 배출원으로부터 측정지점까지의 거리(m), y는 x축에 직각 방향으로의 거리(m), z는 지면으로부터의 높이(m), H는 유효 굴뚝 높이(m), Q는 배출량(g/sec), u는 풍속(m/sec)이다. On-site scheme을 이용하는 경우 σ_y 및 σ_z은 다음의 식 (3) 및 식 (4)로부터 구할 수 있다.

$$\sigma_y = \sigma_{yt} F_y \tag{3}$$

$$\sigma_z = \sigma_{zt} F_z \tag{4}$$

여기에서, σ_v 는 주풍향에 직각방향인 바람의 표준편차 (m/sec)이며, σ_w 는 수직풍속의 표준편차 (m/sec)이다. F_y 및 F_z 는 이동시간의 무차원 함수로, 대기가 불안정한 상태인 경우 $F_z=1$ 이며, F_y 는 식 (5)와 같다. 또한 안정한 경우에는 다음의 식 (6)을 이용하여 계산한다.

$$F_y = \frac{1}{[1+0.9(t/1000)^{1/2}]} \quad (5)$$

$$F_z = \frac{1}{[1+0.9(t/50)^{1/2}]} \quad (6)$$

σ_v 및 σ_w 는 식 (7) 및 식 (8)과 같이 수평 풍향변동의 표준편차 (σ_n) 및 수직 풍향변동의 표준편차 (σ_e)로부터 구할 수 있다.

$$\sigma_v = \sigma_n u \quad (7)$$

$$\sigma_w = \sigma_e u \quad (8)$$

본 연구에서는 위와 같이 기상측정 자료로부터 σ_v 및 σ_w 를 계산하는 On-site scheme을 이용하였다.

2.3 INPUFF 모델의 실행

오염물질의 농도를 계산하기 위한 INPUFF 모델의 실행을 위해서는 기상자료, 배출량자료, 풍하측 대상지점 (receptor)의 위치 및 계산에 필요한 각종계수 등의 입력자료가 필요하다. 배출량자료로는 SF₆ 가스의 방출율을 0.11 g/sec (또는 0.278 g/sec), 방출고도 11 m, 방출가스 온도 300 K, 굴뚝내경은 0.1 m로 하였으며, 가스의 배출속도는 0.01 m/sec로 입력하였다. 기상자료로는 풍향, 풍속, 대기안정도, 야간경계층 고도, 수평 풍향변동의 표준편차, 수직풍향변동의 표준편차 및 기온 등을 입력하였다.

대기안정도는 두 고도의 기온 및 한 고도의 풍속만으로 Monin-Obukhov 길이 (L)를 추정하여 이로부터 Pasquill 안정도계급을 추정하는 방법 (이종범과 김용국, 1990)을 이용하여 산출하였다.

야간이 되면 지표부근에 접지역전층이 형성되어 강한 안정층이 나타남으로 대기 중으로 배출된 오염물질의 연직확산은 억제되지만 바람에 의한 역학적인 난류에 의하여 야간경계층 내에서도 혼합이 일어난다. 야간경계층의 높이 (h)는 Zilitinkevich (1972)가 제시한 식 (9)로부터 산출하였다.

$$h = [(3^{1/2}kRi_f)(u_*L/f)]^{1/2} \quad (9)$$

여기에서, k 는 von Karman 상수로서 0.4를 이용하였고, u_* (m/sec)는 마찰속도, f 는 Coriolis parameter로서 $f=2\Omega\sin(\phi)$ 이며, Ω 는 지구의 자전각속도, ϕ 는 위도, Ri_f 는 flux Richardson number, z 는 고도 (m)이다.

σ_n 는 풍향계에서 측정된 값을 이용할 수 있으나, σ_e 는 측정된 자료가 없으므로 다음의 관계식을 이용하였다. 대기가 안정한 상태에서 σ_e 는 식 (10)과 같다.

$$\sigma_e = 1.4u_*(1-z/h)^{3/4}/u \quad (10)$$

한편, 본 연구기간과 같은 야간 강안정층 하에서는 풍향 및 풍속의 변동이 크게 나타나므로 보다 정확한 퍼프의 이동을 고려하여야 한다. 따라서 기상자료는 매 5분간의 평균값을 입력하였고, 모델의 계산간격도 5분으로 하였다. 또한 모델의 계산영역 밖으로 벗어나는 퍼프는 계산 대상에서 제외되므로 모델 계산영역을 충분히 ($40 km \times 40 km$) 넓게 설정하였으며, 모델에 의하여 계산된 농도의 착지지점은 공기시료 채취지점과 동일하게 $1 km \times 1 km$ 지역내의 40개 지점으로 하였다. 계산은 매일 배출 시작시간에 맞추어 시작하여 배출이 끝나는 시까지만 실행하였다.

2.4 모델평가

대기오염 확산모델의 계산결과를 평가하기 위한 오차 표현방법으로는 AAE (average absolute error), RMSE (root mean square error), NMSE (normalized mean square error), FB (fractional bias), COR (spatial correlation coefficient) 및 MRE (mean relative error) 등 여러 가지 (Harison et al., 1994; Hanna, 1988)가 있으나 본 연구에서는 식 (11)부터 식 (14)에 제시한 것과 같이 비교적 자주 사용되고 있는 AAE, RMSE, NMSE, FB 및 직선회귀식의 기울기 (a)와 절편 (b), 상관계수 (r) 등을 이용하여 모델을 평가하였다.

$$AAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |(C_p - C_0)_i| \quad (11)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (C_p - C_0)_i^2} \quad (12)$$

$$NMSE = \frac{(\overline{C_p - C_0})^2}{(\overline{C_p} \cdot \overline{C_0})} \quad (13)$$

$$FB = \frac{(\overline{C_p} - \overline{C_0})}{0.5(\overline{C_p} + \overline{C_0})} \quad (14)$$

여기에서, C_0 는 각 시료채취 지점의 측정농도(ppb), C_p 는 모델에 의한 계산농도, $\overline{C_0}$ 는 측정농도의 평균, $\overline{C_p}$ 는 계산농도의 평균이며 n 은 측정지점수에 해당하는 것으로 첫 번째 기간은 36개, 그 외의 기간은 37개이다.

3. 결과 및 고찰

3.1 기상조건

4일간에 걸친 야간 확산실험 기간동안 매일 20시부터 다음날 03시까지 매 5분 간격으로 지상 12 m 높이에서 측정된 풍속, 풍향 및 σ_z 의 변화를 그림 4에 나타내었으며, 7개 시료채취 기간에 대한 풍속, σ_z , z/L 및 야간 경계층 고도(h)의 평균값을 표 2에 제시하였다. 이때 L 은 이종범과 김용국(1990)의 방법으로 산출하였다.

시료채취 기간별 평균 풍속의 세기를 살펴보면 1번째

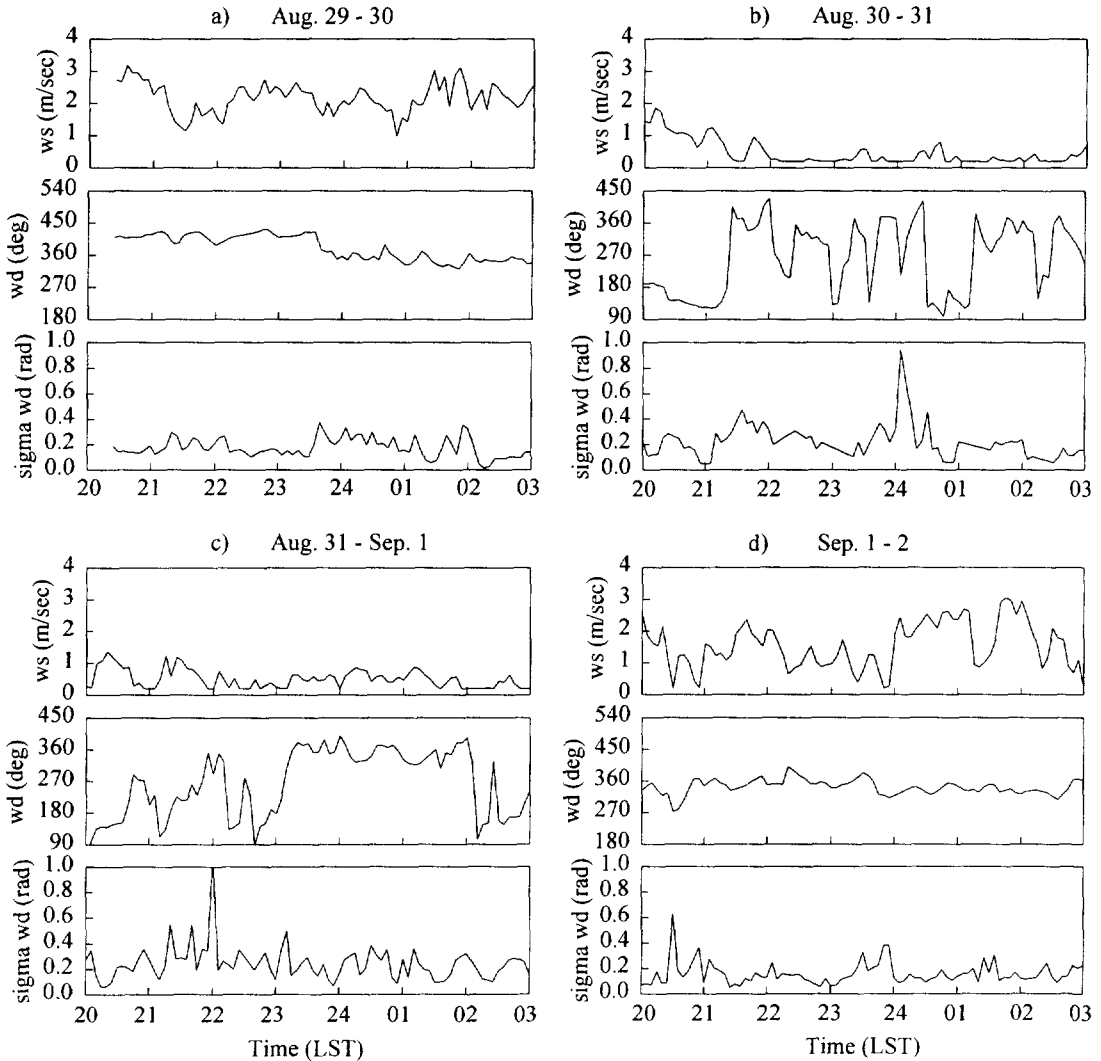


Fig. 4. Wind conditions during the dispersion experiment from Aug. 29 to Sep. 2, 1991.

및 7번째 기간중에 2.2 및 2.0 m/sec 로 강하게 나타났으며, 2번째부터 5번째 시료채취 기간 중에는 0.3에서 0.7 m/sec 의 매우 약한 바람을 나타냈다. 또한 바람이 비교적 강했던 1번째, 6번째, 7번째 기간 중에는 대체로 북풍계열의 풍향을 일정하게 유지하였으나, 이외의 기간중에는 풍속이 작아 풍향의 변화가 크게 나타났다. σ_a 는 풍속의 증가에 따라 지수적으로 감소하게 되는데 (Hanna, 1983), 본 연구에서도 바람이 약할 수록 풍향의 변동이 커지는 특징을 나타냈다. 바람이 약한 강안정한 대기상태에서는 기압계에 의한 일반풍의 풍향변화보다는 주변의 지형이나 호수면 등의 영향을 받아 풍향이 변화되기 쉽다. 또한 내부중력파도 영향을 미치며, 이로 인해 약 5분~20분 정도의 주기를 가진 풍향의 meandering이 자주 발생하기 때문이다 (Etling, 1990).

그림 5는 실험기간 동안 측정된 온위의 수직분포를 나타낸 것이다. 8월 29일 22시부터 30일 2시까지 측정된 온위분포를 살펴보면 상층에서의 시간에 따른 온위변화는 작으나 약 70 m 이하의 하층에서는 시간에 따라 빠른 기온의 하강을 나타냈다. 다른 날의 경우에도 비슷한 변화를 나타냈으며, 모두 지표부근에 강한 접지역전층을 형성하는 특징을 나타냈다. 한편, 야간경계층의 고도는 이러한 온위의 수직분포로부터 구할 수도 있으나, 그 높이를 결정하기 어려울 뿐만 아니라 전체 기간에 대한 온위 측정자료가 필요하므로 본 연구에서는 식 (9)로부터 계산하여 모델에 입력하였다. 시료채취 기간별 평균 야간경계층 고도를 표 2에 함께 제시하였다. 이때 식 (9)로부터 계산되는 값이 작은 경우에는 모델에서 SF₆의 방출고도가 고려될 수 있도록 15 m로 제한하였다. 1번째,

Table 2. Mean wind conditions, z/L and NBL height (h) during 7 sampling periods.

Sampling Period (number)	Date and Time	WS (m/sec)	σ_a (radian)	z/L	h (m)
1	30 Aug. 00:00~30 Aug. 03:00	2.2	0.17	0.61	39
2	30 Aug. 20:00~30 Aug. 23:00	0.7	0.24	4.00	15
3	30 Aug. 23:00~31 Aug. 02:00	0.3	0.24	4.00	15
4	31 Aug. 21:00~31 Aug. 24:00	0.5	0.28	4.00	15
5	01 Sep. 00:00~01 Sep. 03:00	0.5	0.22	4.00	15
6	01 Sep. 21:00~01 Sep. 24:00	1.3	0.16	2.51	25
7	02 Sep. 00:00~02 Sep. 03:00	2.0	0.15	1.81	34

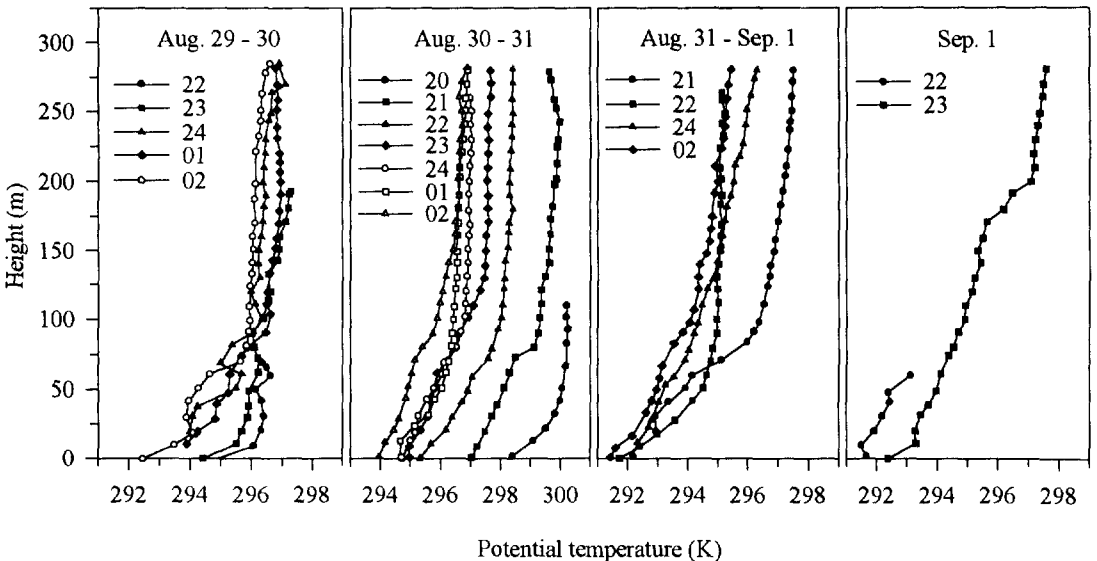


Fig. 5. Potential temperature profiles during the dispersion experiment (Aug. 29~Sep. 1, 1991). Numbers in each legend represent local standard time.

6번째 및 7번째 기간 중의 평균 야간경계층 고도는 각각 39 m, 25 m, 34 m로 계산되었으나, 그 이외의 기간 중에는 15 m 보다 낮게 계산되었다. 야간의 경계층고도를 결정짓는 주요 인자는 풍속의 크기로서, 본 연구에서도 바람이 강할 수록 경계층 고도는 높은 특징을 나타냈다.

또한 표 2에 제시한 z/L 은 대기안정도를 나타내는 parameter로서 양의 큰 값일 수록 강안정한 대기상태를 나타낸다. 이때 계산되는 값이 너무 클 경우 극단적인 강안정상태의 값을 나타내는 4로 제한하였다. 계산된 z/L 을 이용하여 Pasquill 안정도계급을 산출한 결과 실험기간 동안의 대기안정도는 모두 강안정한 상태를 나타내는 G계급으로 산출되었다. 특히 2번째부터 5번째까지의 시료채취 기간 중에는 바람이 매우 약하여 역학적 난류가 거의 존재하지 않을 뿐만 아니라 기온경도가 매우 컸으므로 극단적인 강안정상태를 나타낸 것으로 분석되었다.

3. 2 농도분포

그림 6은 7개 시료채취 기간중 비교적 풍속이 강했던 1번째와 6번째, 7번째 기간의 평균 농도분포를 나타낸 것으로서 a-1), b-1), c-1)은 측정농도의 분포이며, a-2), b-2), c-2)는 INPUFF 모델로 계산한 결과이다. 모든 결과는 SF₆를 방출한 지점을 중심으로 1 km × 1 km 지역을 대상으로 비교하였다.

1번째와 6번째, 그리고 7번째 시료채취 기간 동안의 풍속은 확산실험 기간 중 비교적 강하게 나타났으며, 풍향 및 σ_y 의 변동이 작게 나타남에 따라 측정농도는 남쪽 하단에 위치한 지역을 중심으로 분포하고 있다. 특히, 바람이 가장 강했던 1번째 기간은 풍하측 한 방향에 좁게 분포하고 있다. 모델에 의하여 계산된 농도분포는 측정농도 분포와 유사한 농도분포를 보이고 있으며, 모델에서 계산된 최고농도의 착지지점 및 각 시료채취 지점별 농도값 역시 실제 측정된 최고농도 착지지점 및 각 시료채취 지점의 농도값과 유사하게 나타났다. 이는 다른 기간들에 비하여 풍속이 비교적 강하고 풍향 및 σ_y 의 변동이 작게 나타났기 때문으로 생각된다.

그림 7은 풍속이 약했던 2번째부터 5번째기간까지의 평균 농도분포를 나타낸 것으로 그림 6과 마찬가지로 측정농도 및 INPUFF 모델의 결과를 제시한 것이다. 2번째 시료채취 기간 동안의 평균풍속은 0.7 m/sec로 약하게 나타났으며, 풍향은 처음에 남풍계열을 나타냈으나 다시 남풍계열, 북풍계열로 바뀜에 따라 측정농도의 분포는 여러 지역에 나타났다. 모델에 의하여 계산된 농

도분포도 측정농도의 분포와 유사하게 여러 지역에 농도 분포를 보이고 있으나 모델에 의하여 계산된 SF₆ 가스 최고농도 착지지점은 다소 차이를 보이고 있다.

무풍에 가까운 풍속을 나타냈던 3번째 시료채취 기간 동안의 측정농도 역시 여러 지역에 걸쳐 넓게 분포하는 것으로 나타났다. 또한 모델에 의하여 계산된 농도분포는 측정농도 분포에 비하여 최고농도 착지지점 및 각 시료채취 지점별 농도값이 최고 4배 가까이 높게 나타나 다른 기간에 비해 비교적 큰 차이를 나타냈다. 이와 같이 풍하측 최고농도 착지지점이 다소 다르게 나타난 것은 대기가 강안정하고 풍속이 약한 경우, 한 지점에서 측정된 기상자료가 전체 대상지역을 충분히 대표하지 못했기 때문으로 생각된다. 또한 평균 0.7 m/sec의 약한 풍속과 함께 가장 큰 σ_y 를 나타냈던 4번째 시료채취 기간 동안의 측정농도 분포는 두 지역에 고농도를 보이고 있으며, 모델의 계산결과와는 가장 큰 차이를 나타냈다.

5번째 시료채취 기간 동안에는 σ_y 가 비교적 크게 나타났으나 풍향변화는 대체로 북풍 계열로 2, 3 및 4번째 기간에 비하여 작게 나타남에 따라 측정농도 분포는 남쪽 하단에서 고농도를 보였고, 북쪽 상단에서 저농도를 보였다. 모델에 의하여 계산된 농도분포는 측정농도 분포와 약간의 차이는 있으나 유사한 경향을 나타내었다.

3. 3 모델평가

각 시료채취 기간 동안의 확산모델 결과를 평가하기 위하여 기율기(a), 절편(b), 상관계수(r), AAE, RMSE, FB 및 NMSE를 구하여 표 3에 나타내었다.

표 3에 계산된 AAE 및 RMSE는 7기간 중 3시간 평균풍속이 비교적 1 m/sec 이상이고 풍향 및 σ_y 의 변동폭이 비교적 작은 1번째, 6번째 및 7번째 기간에 작게 나타났으며, 3시간 평균풍속이 1 m/sec 이하이고 풍향 및 σ_y 의 변동폭이 크게 나타난 2, 3, 4, 5번째 기간에 크게 나타났다. 실측농도와 모델계산농도의 상관성은 표 3에 나타난 바와 같이 4번째 기간을 제외하고는 비교적 상관성이 있는 것으로 나타났다. 그러나 식(12)와 같이 실측농도에 비하여 모델계산 결과의 과소 또는 과대평가 여부를 나타내는 FB는 풍속이 강하고 풍향 및 σ_y 의 변동폭이 작은 경우 과소평가하는 결과를 나타내었으며, 풍속이 약하고 풍향 및 σ_y 의 변동폭이 큰 경우 과대평가 하는 경향을 보였다. 실측치와 예측치 사이의 분산의 척도로 사용되는 NMSE는 풍속이 강하고 풍향 및 σ_y 의 변동폭이 작게 나타난 1번째 기간과 7번째 기간에 비교적 크게 나타났다. NMSE는 AAE, RMSE 및 FB와는 다르게 한 임의의 지점에서 실측농도와 예측

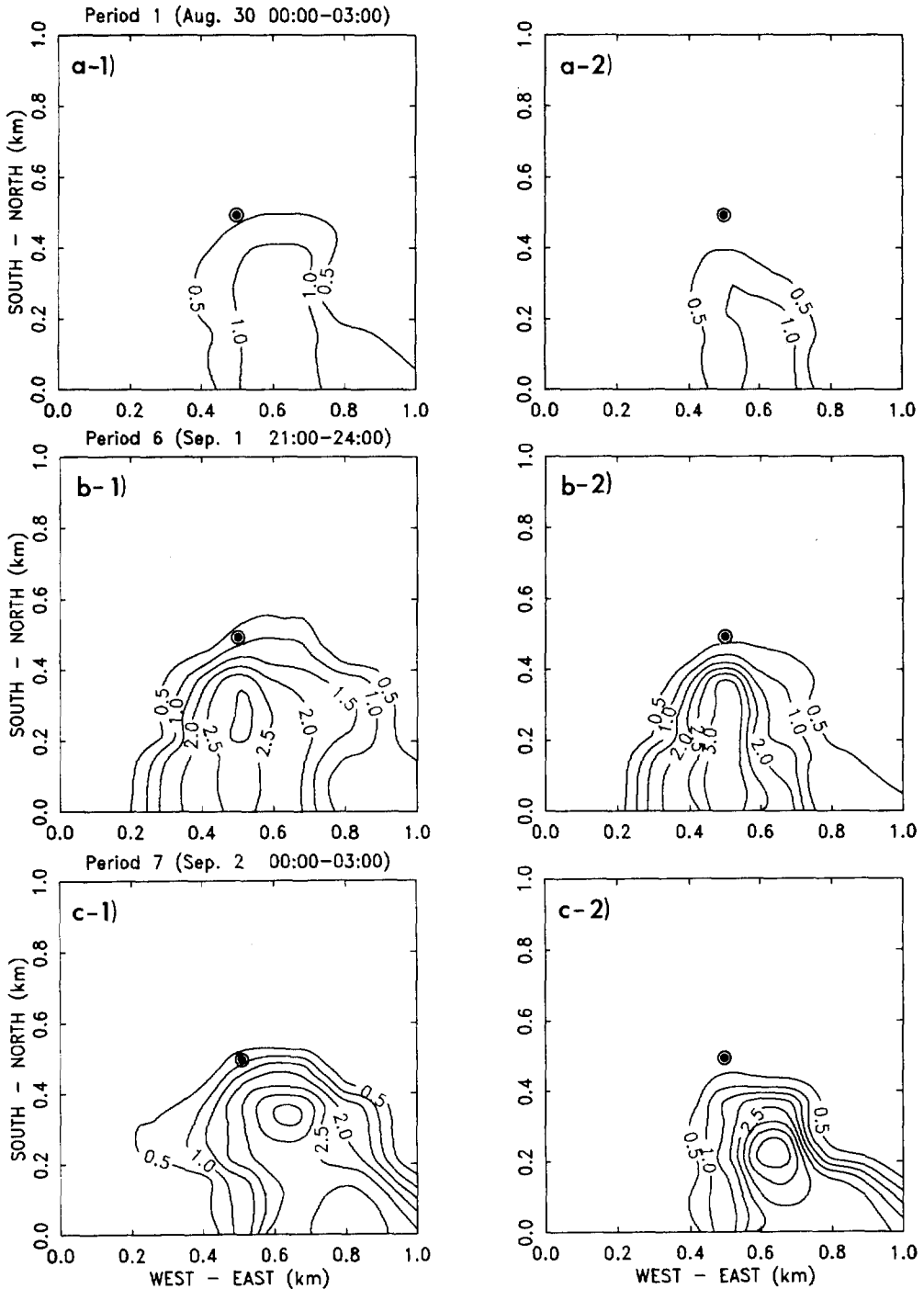


Fig. 6. Horizontal distributions of 3 hour mean SF₆ concentration (ppb) for moderate or strong wind periods.
 ●: SF₆ gas release and meteorological observation point
 a-1), b-1), c-1): Observed SF₆ concentration
 a-2), b-2), c-2): Calculated SF₆ concentration by INPUFF model

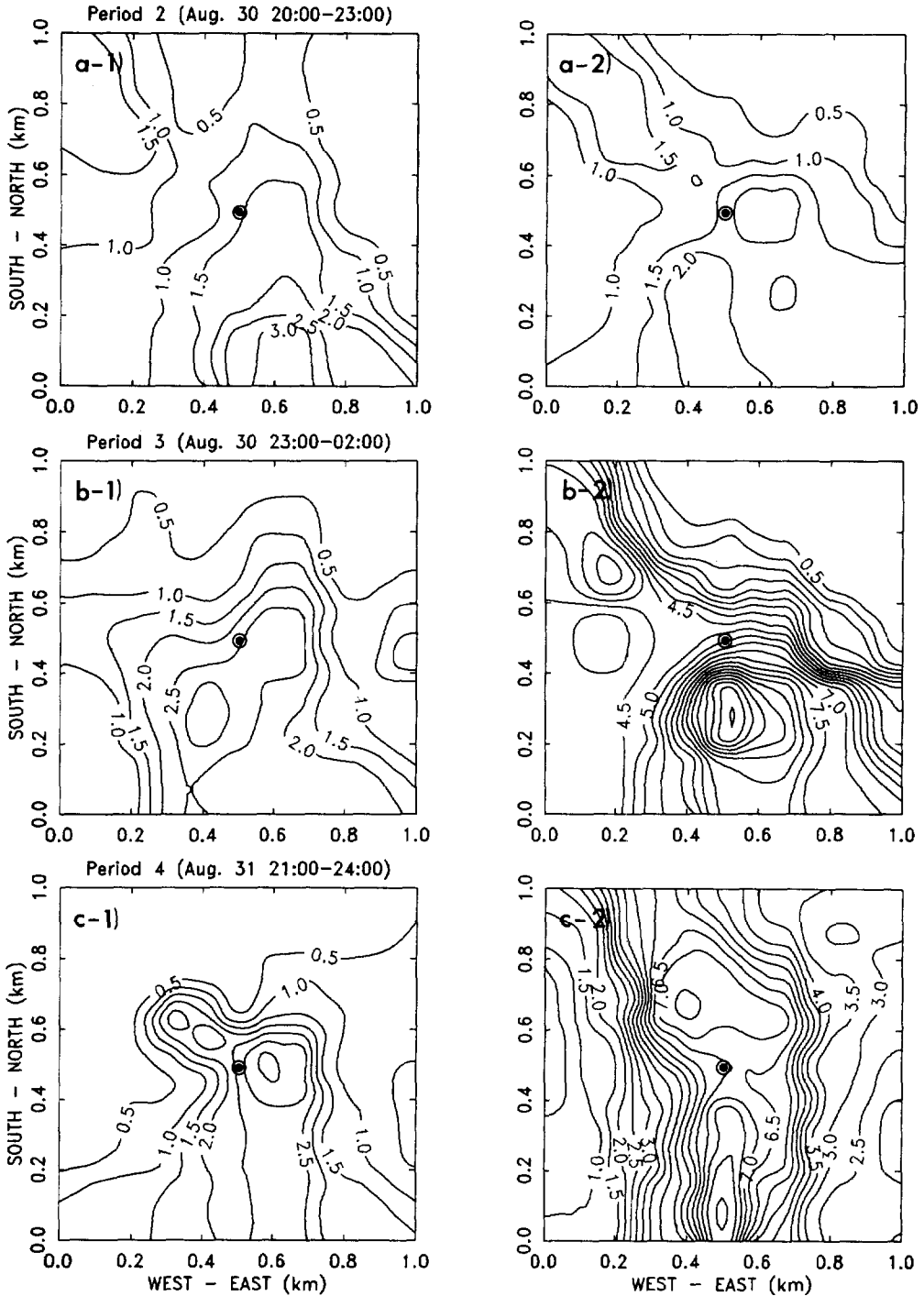


Fig. 7. Same as Fig. 6, except for weak wind periods.
 a-1), b-1), c-1), d-1): Observed SF₆ concentration
 a-2), b-2), c-2), d-2): Calculated SF₆ concentration by INPUFF model

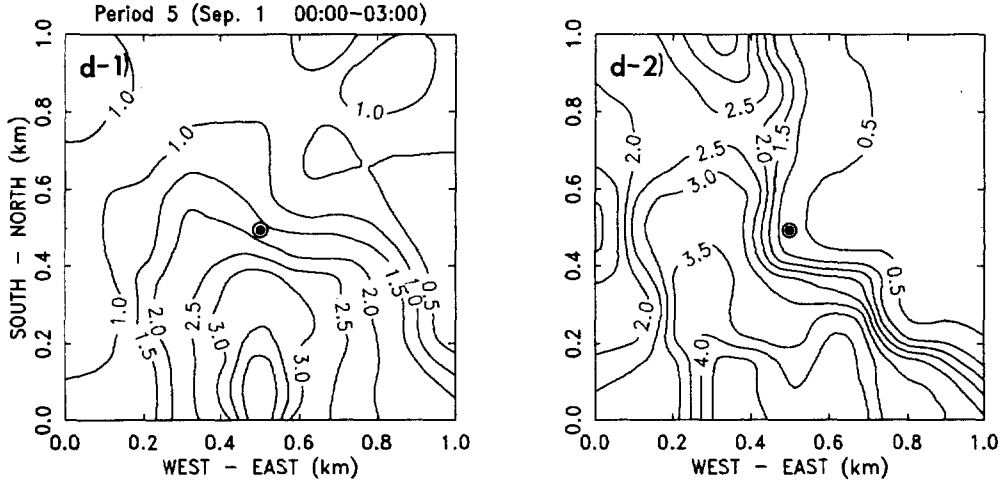


Fig. 7. Continued.

Table 3. Evaluation of the model results for each sampling period.

Sampling Period	n	\bar{C}_p	\bar{C}_0	a	b	r	AAE (ppb)	RMSE (ppb)	FB	NMSE
1	36	0.165	0.262	0.68	-0.03	0.76	0.121	0.288	-0.450	1.910
2	37	1.169	1.070	0.61	0.51	0.67	0.504	0.638	0.089	0.326
3	37	3.853	1.327	2.25	0.86	0.66	2.808	3.742	0.975	2.739
4	37	4.458	1.147	0.95	3.37	0.47	3.326	3.931	1.181	3.022
5	37	2.076	1.460	0.94	0.71	0.66	1.043	1.290	0.349	0.549
6	37	0.494	0.644	1.05	-0.36	0.90	0.242	0.436	-0.264	0.598
7	37	0.519	0.658	0.78	0.01	0.67	0.363	0.855	-0.236	2.142

농도 사이에 큰 차이를 보이면 NMSE는 크게 나타나기 때문이다.

야간 강안정층 상태에서 풍향의 변화가 큰 경우 대기 오염 물질의 확산은 매우 불규칙하게 나타나며, 이것을 확산모델로 모사 하기에는 어려움이 많다. 본 연구결과 INPUFF 모델은 이러한 복잡한 확산 조건에서도 비교적 만족스러운 결과를 얻을 수 있는 모델로 평가되었다. 한편 김 산(1992)은 가우시안 플룸모델인 TUPOS (Turbulence Profile Sigmas) 모델을 적용하여 본 연구의 확산실험 자료와 비교한 결과 야간 강안정층 하에서 가우시안 플룸모델의 사용은 부적합함을 밝혔다.

4. 결 론

4일간의 야간 확산실험 동안 지표부근의 대기는 모두 강한 안정상태를 나타냈으며, 평균 풍속은 0.3~2.2

m/sec 정도로 나타났다. 풍속이 1 m/sec 이하로 약한 경우 풍향변화는 크게 나타났으나, 그 이상으로 강한 경우에는 작은 변화를 나타냈다. 풍속이 강하고 σ_g 가 작았던 경우 SF₆ 가스는 풍하측의 한 방향으로 분포하였으며 농도는 낮게 측정되었다. 반면, 풍속이 약하고 풍향 변화가 커서 σ_g 가 컸던 경우 SF₆ 가스는 풍하측에 넓게 분포하거나 여러 지역으로 분리되어 나타났으며, 여러 지점에서 고농도를 나타냈다. 기상탑에서 측정된 기상자료 및 SF₆ 방출자료를 입력자료로 하여 총 7회의 INPUFF 모델을 실행한 결과 대기가 정상상태를 유지하지 않는 야간 강안정층 하에서도 퍼프모델은 SF₆의 농도를 비교적 잘 모사하는 것으로 평가되었다. 한편, 풍속이 약하여 풍향변화가 특히 컸던 경우 INPUFF 모델의 계산결과는 실측농도와 다소 차이를 나타냈으며, 이는 한 지점에서 측정된 기상자료가 전체 모델링 영역을 대표하지 못했기 때문으로 판단된다. 이를 위해서는 모

델링영역 내의 상세한 바람장을 고려할 수 있는 방법이 연구되어야 할 것으로 사료된다.

감 사

야간중에 확산실험을 실시하기 위하여 많은 인력과 노력이 필요하였다. 확산실험에는 강원대학교의 환경학과 대학원생과 학부생 다수가 참여하였으며 노고에 감사한다. 특히 대학원생인 김정식, 김래우, 탁종석과 강원도 보건환경연구원의 홍낙기 연구사의 도움이 컸으며, 감사의 뜻을 표한다.

참 고 문 헌

- 김 산(1992) 확산실험에 의한 야간 강안정층 하에서의 확산모델 평가, 강원대학교 이학석사학위논문, 58pp.
- 이종범, 강인구(1989) 단일배출원 대기오염 단기모델에 관한 연구, 한국대기보전학회지, 5(2), 84-96.
- 이종범, 김용국(1990) Pasquill 안정도계급의 평가와 안정도 parameter 추정방법의 개발, 한국대기보전학회지, 6(2), 168-175.
- Brown, R.M., R.N. Dietz, and E.A. Cote(1975) The use of sulfur hexafluoride in atmospheric transport and diffusion studies, J. of Geophysical Research, 80, 3393-3398.
- Brusasca, G., G. Tinarelli, and D. Anfossi(1992) Particle model simulation of diffusion in low wind speed stable conditions, Atmospheric Environment, 26A, 707-723.
- Cagnetti, P., F. Desiato, P. Gaglione, and A. Pellegrini(1988) An atmospheric diffusion study on a local scale at a coastal site, Atmospheric Environment, 22, 1051-1059.
- Etling, D.(1990) On plume meandering under stable stratification, Atmospheric Environment, 24A, 1979-1985.
- Hanna, S.R.(1983) Lateral turbulence intensity and plume meandering during stable conditions, J. Climate and Applied Meteorology, 22, 1424-1431.
- Hanna, S.R.(1988) An quality model evaluation and uncertainty, JAPCA, 38, 406-412.
- Harison, R.M., Z. Zlatev, and C.J. Ottley(1994) A comparison of the predictions of an eulerian atmospheric transport-chemistry model with experimental measurements over the North Sea, Atmospheric Environment, 28, 497-516.
- Irwin, J.S.(1983) Estimating plume dispersion: A comparison of several sigma schemes, J. Climate Applied Meteorology, 22, 92-114.
- Lee, C.B., Y.G. Kim, and T. Hanafusa(1991) Relationships between atmospheric stability parameters and fluctuation of wind direction, Proceedings of the 2nd IUPPA Regional Conference on Air Pollution, Seoul, Korea, Vol. 2, 319-327.
- Moore, G.E., L.B. Milich, and M.K. Liu(1988) Plume behaviors observed using lidar and SF₆ tracer at a flat and hill site, Atmospheric Environment, 22, 1673-1688.
- Petersen, W.B. and L.G. Lavdas(1986) *INPUFF: A Multiple Source Gaussian Puff Dispersion Algorithm, User's guide*, U.S. EPA, Research Triangle Park, N.C., 105pp.
- Tangirala, R.S., K.S. Rao, and R.P. Hosker(1992) A puff model simulation of tracer concentrations in the nocturnal drainage flow in a deep valley, Atmospheric Environment, 26A, 299-309.
- Turner, D.B.(1964) A diffusion stability model for an urban area, J. Climate and Applied Meteorology, 3, 2079-2084.
- Turner, D.B., T. Chico, and J. Catalano(1986) *TUPOS: A Multiple Source Gaussian Dispersion Algorithm Using on-site Turbulence Data*, U.S. EPA, Research Triangle Park, N.C., 93pp.
- Verver, G.H.L. and F.A.A.M. De Leeuw(1992) An operational puff model, Atmospheric Environment, 26A, 3179-3193.
- Zilitinkevich, S.S.(1972) On the determination of the height of the Ekman boundary layer, Boundary-Layer Meteorology, 3, 141-145.