

한국대기보전학회지

제 14 권 제 5 호

목 차

1998년

논문

- 오염물질 이동 추적을 위한 SF₆ 추적자 실험 분석과 모사 연구
..... 김영성 · 조성호 · 경남호 · 오현선 · 문길주 ... (397)
- 복잡한 지형의 임해지역에서 대기 분산계수의 평가 박옥현 · 천성남 ... (411)
- 부산의 지형적 특성을 고려한 O₃의 건성 침적속도 시뮬레이션 원경미 · 이화운 ... (421)
- 입자상 물질의 습성 침적에 관한 수치 모의 김유근 · 이화운 · 홍정혜 ... (433)
- 酸化觸媒에 의한 大型디젤엔진의 排出가스 淨化特性 - 실차실험을 중심으로 - 조강래 · 김희강 ... (443)
- 촉매담지 세라믹 필터를 이용한 황산화물과 질소산화물의 제거에 관한 연구
..... 홍민선 · 이동섭 · 오필경 · 이재춘 ... (455)
- 초음파 풍속온도계를 이용한 SO₂ 건성침착속도의 계절변화 특징 ... 이종범 · 박세영 · 김용국 · 조창래 ... (465)
- 이온성분의 환경거동과 기상인자와의 관계: 제주지역을 중심으로 한 유·무기성 이온성분의
대기-해양지화학 김기현 · 이강웅 ... (479)
- 산성강하물의 침착량과 동태 해명에 관한 연구 - 춘천 지역 안개의 화학 조성 (1996~1997)
..... 김만구 · 임양석 · 박기준 · 황 훈 ... (491)

기술자료

- LAEEM에 의한 전국 매립가스 발생량 추정에 대한 연구 장영기 · 서정배 ... (499)

단 보

- 대기중 휘발성 유기화합물의 채취 및 분석 방법 비교
..... 나광삼 · 김용표 · 문길주 · 백성욱 · 황승만 · 김성렬 · K. Fung · 이강봉 · 박현미 ... (507)
- 공기 중 포름알데히드 측정을 위한 크로모트로핀산법과 DNPH/HPLC방법의 비교 · 평가
..... 황윤정 · 박상곤 · 백성욱 ... (519)

학회소식

- 학회소식 (525)

Journal of Korea Air Pollution Research Association

Vol. 14, No. 5

CONTENTS

1998

Original Paper

- Analysis and Simulation of SF₆ Tracer Experiments for Tracking
the Pollutant Transport Young-Sung Kim, Sung-Ho Cho, Nam-Ho Kyong
Hyun-Sun Oh and Kil-Choo Moon ... (397)
- Estimation of Atmospheric Dispersion Coefficients in A Coastal Area with Complex
Topography Ok-Hyun Park and Sung-Nam Chun ... (411)
- A Simulation of the O₃ Dry Deposition Velocity Considering Topographical
Characteristics in Pusan Gyeong-Mee Won and Hwa-Woon Lee ... (421)
- The Numerical Simulation on the Wet Deposition of Particles
..... Yoo-Keun Kim, Hwa-Woon Lee and Jung-Hye Hong ... (433)
- Characteristics of Exhaust Emission Reduction of Heavy Duty Diesel Engine by
Oxidation Catalyst - Engine Bench Test - Kang-Rae Cho and Hui-Kang Kim ... (443)
- A Study on the Removal of SO_x and NO_x Using Catalytic Ceramic Filters
..... Min-Sun Hong, Dong-Sub Lee, Pill-Kyung Oh and Jae-Chun Lee ... (455)
- Seasonal Variations of SO₂ Dry Deposition Velocity Obtained by Sonic Anemometer-
Thermometer Chong-Bum Lee, Se-Young Park
Yong-Goog Kim and Chang-Rae Cho ... (465)
- The Behavior of Particulate-Bound Ionic Components and Their Relationships with
Meteorological Parameters: Air-Sea Geochemistry of Inorganic and Organic Ions in
Cheju Island Ki-Hyun Kim and Gang-Woong Lee ... (479)
- A Study on the Behavior and Deposition of Acid Precipitation - Chemical Composition
of Fog Water at Chunchon (1996~1997)
..... Man-Goo Kim, Yang-Suck Lim, Ki-Jun Park and Hoon Hwang ... (491)

Note

- A Study on the Estimation of Landfill Gas Emission by LAEEM in KOREA
..... Young-Kee Jang and Jung-Bae Seo ... (499)

Review Paper

- Comparison of Sampling and Analysis Methods for Volatile Organic Compounds
in Ambient Air Kwang-Sam Na, Yong-Pyo Kim, Kil-Choo Moon
Sung-Ok Baek, Seung-Man Hwang, Sung-Ryul Kim, Kochy Fung
Kang-Bong Lee and Hyun-Mee Park ... (507)
- Comparison of Chromotropic Acid Method and DNPH-HPLC Method for the
Measurement of Formaldehyde in the Air
..... Yoon-Jung Hwang, Sang-Gon Park and Sung-Ok Baek ... (519)

News

- News (525)

오염물질 이동 추적을 위한 SF₆ 추적자 실험 분석과 모사 연구

Analysis and Simulation of SF₆ Tracer Experiments for Tracking the Pollutant Transport

김영성 · 조성호¹⁾ · 경남호²⁾ · 오현선 · 문길주
한국과학기술연구원 지구환경연구센터
¹⁾한국에너지기술연구소 에너지환경연구부
²⁾한국에너지기술연구소 건물에너지연구부
(1998년 1월 14일 접수, 1998년 10월 20일 채택)

Young-Sung Kim, Sung-Ho Cho¹⁾, Nam-Ho Kyong²⁾
Hyun-Sun Oh and Kil-Choo Moon

Global Environmental Research Center, Korea Institute of Science and Technology
¹⁾ *Energy and Environment Research Department, Korea Institute of Energy Research*
²⁾ *Building Energy Research Department, Korea Institute of Energy Research*

(Received 14 January 1998; accepted 20 October 1998)

Abstract

Tracer experiments were performed 4 times in December 1992 on the relatively flat terrain and nearby building area adjacent to the Taedok Science Town in Korea. Each experiment was continued for relatively short period of 1 or 2 hours with intermittent release of SF₆ up to 2.07 g/s at 10 m height. Movement of tracer plume was tracked by a continuous tracer analyzer installed on an air monitoring van. Simulation with INPUFF was carried out to analyze and predict experiments. Measured profiles of tracer plume were narrow and sharp while predicted profiles by INPUFF were broad and slowly varied. Tracer plumes were detected at a short distance of 0.5 to 2.2 km mainly due to intermittent release and high value of lower detectable limit. Various experimental conditions were tested by INPUFF simulation in order to find desirable conditions. Higher wind speed and less variable wind direction could yield longer distance of plume tracking only when the lower detectable limit was sufficiently low. Distance of plume tracking was long and did not much depend on the lower detectable limit in stable atmospheric conditions.

Key words : SF₆ tracer experiment, INPUFF modeling, plume tracking, detectable limit, meteorological conditions

1. 서 론

추적자 실험은 대기 중에 식별이 가능한 물질을

배출한 후 이 물질의 궤적을 추적함으로써 대기 중 오염물질의 이동과 확산을 조사하는 실험이다. 추적자로는 통상 생태학적으로 안전하고 반응성이 없으며 미량측정이 가능한 물질을 사용하나 보다 정확한 오염물질의 이동과 확산을 조사하기 위하여 SO₂

의 ^{35}S 와 같은 동위원소를 이용하기도 한다(Hidy, 1984). 추적자의 종류는 오염물질의 이동을 눈으로 확인할 수 있는 색깔을 띤 입자부터, 10^{-6} 까지 측정이 가능하여 오염물질의 장거리 이동 추적에 사용될 수 있는 과불화탄소(perfluorocarbon)에 이르기까지 다양하다(Tombach, 1987). SF_6 는 대기 중 농도가 0.5 ppt이고 ECD (electron capture detector)로써 ppt 단위까지 분석이 가능하여 단거리 혹은 중거리 실험에 적합한 물질이다.

추적자 실험은 주어진 대기조건에서 특정 오염물질의 움직임을 정확히 파악할 수 있다는 점 때문에 수학적 모델링, 풍동실험과 함께 기존 및 신설 오염원의 대기환경 영향 분석과, 오염물질 이동과 확산의 매체로서의 대기 유동특성 조사에 이용될 수 있다. 기존 오염원의 대기환경 영향분석은 유사한 오염원의 영향이 중첩되었을 때 특히 유용하며, 특정 오염원에서 추적자를 배출하고 이의 농도를 측정함으로써 대상 오염원의 영향을 구별하여 낼 수 있기 때문이다. 아직 건설되지 않은 오염원의 경우는 설계치를 기준으로 기구(balloon)를 이용하여 일정 높이에서 추적자를 배출하고 이의 농도를 측정함으로써 대기환경 영향을 예측할 수 있다.

해안에서 배출된 오염물질이 밤에 안정된 육풍을 따라 바다에서 훈증(fumigation)된 후 다시 낮에 해풍을 따라 육지로 돌아오는 현상을 SF_6 로써 조사한 예나(McRae *et al.*, 1981), 미국 오대호 주변에서 기류가 호숫가를 따라 나선형으로 휘감으며 이동하는 모습을 관찰한 예(Barnett, 1991), 대도시 빌딩군 속에서 SF_6 와 과불화탄소를 배출하며 지표와 고공에서의 대기확산 특성을 조사한 예(Baxter, 1991), 3가지의 과불화탄소를 각기 다른 위치에서 배출하며 협곡 내 대기의 움직임을 조사한 예(Allwine, 1992) 등은 추적자 실험의 광범위한 유용성을 보여주는 사례들이다.

산성물질 강하현상을 연구하고자 애팔래치아 산맥 서쪽 오하이오 주에서 배출된 오염물질이 산맥을 넘어 북동부 인구 밀집지역에 미치는 영향을 조사하였던 CAPTEX(Ferber *et al.*, 1986)나, 오대호 서쪽부터 북동부 해안까지 광대한 지역을 대상으로 하였던 MATEX(Hidy *et al.*, 1985) 등은 추적자 실험 자체가 목적이었던 현장조사들이다. 캘리포니아 지

역의 오존 오염을 조사하기 위하여 캘리포니아 중부 산와킨(San Joaquin) 계곡에서 행하여졌던 실험(Blumenthal *et al.*, 1985)과 로스앤젤레스 북쪽 산타 바바라 해안을 중심으로 시행되었던 SCCAMP 1985(Strimaitis *et al.*, 1991)들은 대규모 현장조사의 일환으로 추적자 실험이 이용된 경우들이다. 이들 추적자 실험에서는 대상영역이 수백 km에 달함에 따라 산와킨 계곡에서 SF_6 를 이용하였을 뿐 모두 과불화탄소를 추적자로 사용하였다.

국내에서는 주로 단기확산 모델의 예측도를 시험하기 위하여 추적자 실험을 실시하였으며, 수 km 이내의 근거리 실험인 까닭에 SF_6 를 추적자로 사용하였다. 이종범과 강인구(1989)가 단기확산 모델인 CRSTER의 확산 예측을 평가하기 위하여 추적자 실험을 시도한 이래, 역시 이종범 등(1996)이 추적자 실험을 이용하여 동일한 장소에서 야간 강안정층 조건에서의 INPUFF 모델의 적용 가능성을 조사하였다. 홍민선 등(1996)은 복잡 지형에서의 오일리안 격자 모델과 INPUFF 등 단기 모델의 이용 가능성을 점검하기 위하여 경기도 산본 지역에서 SF_6 추적자 실험을 시도하였다.

본 논문에서는 1992년 12월 대덕연구단지 남동쪽 둔산 지역에서 실시되었던 SF_6 추적자 실험(김영성 등, 1992) 결과를 INPUFF (Gaussian Integrated PUFF; Petersen and Lavdas, 1986) 계산 결과와 비교함으로써, 실제 대기 중에서의 오염물질 농도 분포 특성을 살펴보고, 모델을 이용한 현장 실험 결과의 재현 가능성을 점검하고자 하였다. 시료 채취와 분석은 한국에너지기술연구소의 대기오염 측정차와 차에 탑재된 SF_6 연속측정기를 이용하였으며, 배출지점을 고정시킨 채 풍향을 따라 측정차가 이동하며 추적자의 농도를 분석하였다. 실험 당시 대상 지역의 지형이 대부분 평탄하였던 까닭에 주로 가우시안 형태의 농도 분포를 기대할 수 있었으며, 풍향, 풍속과 함께 가능한 범위 내에서 주변 건물의 영향에 따른 농도 분포와 측정 거리의 변화를 조사하였다. 현장 실험에서 충분치 못하였던 부분은 INPUFF 모사 실험을 통하여 확인하였는데, SF_6 추적자 실험에 중요한 인자들과, 실험 목적과 조건에 따라 적합한 기상 조건을 제시하고자 하였다.

2. 실험방법

2.1 대상지역

측량차 운영을 위하여 우선 그림 1과 같이 대상 지역의 도로망을 조사하였다. 실험 당시 둔산 지역은 신시가지 조성을 위한 정지(整地) 작업이 마무리된 상태에서 우측에 A로 표시된 구역에 10층 이상 고층 아파트가 건설되었을 뿐 대부분이 평탄하였다. 새롭게 만들어진 대부분의 도로는 바둑판 모양으로 연결되어 있었으며 많은 부분이 포장되었으나 사용되지는 않고 있었다. 임시도로가 세로로 지나간 넓은 구역이 제3정부종합청사 구역으로 이 구역 내에서 실험 당일의 풍향에 따라 SF₆ 배출장소를 선택하였다. 가능한 한 북풍조건에서 실험을 실시하여 추적자가 평탄한 지역에서 이동 및 확산되도록 하였다. 정부종합청사 예정지의 북쪽에는 또 다른 강이 흐르고 강 건너편이 '93 EXPO 개최지로 상당한 지역이 역시 평탄하였기 때문에 주변의 지형지물에 의한 배출원의 영향은 무시할 만 하였다.

2.2 추적자 배출과 기상측정

4m 길이의 1½" 탄소강관 위에 3m 길이의 1" 탄소강관 2개를 연결하여 10m 높이의 강관 탑을 만들었다. 강관 탑 끝에 길이 65cm인 받침대를 수평으로 고정시키고 양쪽에 진양상사의 모델명 WM-



Fig. 1. Road map of the Tunsan area. "A" indicates the area where apartment buildings of more than 10 floors are located.

IV A WS와 WD인 풍속기와 풍향기를 설치하였으며, SF₆는 받침대 중앙 강관 탑 끝에서 내경 10mm PVC 튜브를 통하여 배출하였다. SF₆의 배출은 적절

Table 1. Pasquill-Gifford stability categories by a solar radiation and delta-T method (USEPA, 1993).

	Wind Speed (u) ^d , m/s				
	u < 2.0	2.0 ≤ u < 3.0	3.0 ≤ u < 5.0	3.0 ≤ u < 5.0	u ≥ 6.0
DAY^a					
Incoming Solar Radiation (SR), W/m ²					
SR > 700	A	A	B	C	C
700 ≥ SR > 350	A	B	B	C	D
350 ≥ SR > 50	B	C	C	D	D
50 ≥ SR	D	D	D	D	D
NIGHT^b					
Temperature Lapse ^c (ΔT/Δz), °C/m					
ΔT/Δz < -0.01	D	D	D	D	D
-0.01 ≤ ΔT/Δz < 0.01	E	E	D	D	D
0.01 ≤ ΔT/Δz	F	F	E	D	D

^a Day begins at the start of the first full block hour after the calculated time of sunrise.

^b Night begins at the start of the last full block hour before the calculated time of sunset.

^c Average temperature lapse between 2 and 10 meters above the ground.

^d Average wind speed at 10 meters above the ground.

한 시간간격으로 유량계로 조절하였으며 배출량은 SF₆를 포함한 가스통의 실험 전후의 무게 차이로부터 산출하였다. 10 m 높이에서의 풍향과 풍속은 실험시간 동안 전압신호를 기록한 후 digitizer로 읽어 계산하였다. 상층의 기상은 측정하지 않았으며 측정 당시의 대기안정도는 radiometer를 이용하여 측정된 일사량과 10 m 풍속자료로부터 표 1에 의하여 결정하였다.

2.3 추적자 농도측정

배출원에서 휴대용 무선 전화기(walkie-talkie)를 이용하여 측정차에 연락하면 풍향에 따라 측정차가 이동하며 추적자의 농도를 측정하였다. 많은 도로가 아직 사용되지 않기도 하였지만 차량 통행이 있는 도로에서도 가능한 한 측정차의 이동속도를 일정하게 유지하였으며, 측정차가 정차하거나 방향을 전환할 때에는 지도 위에 시간을 적어 추후 농도 기록지의 시간과 비교함으로써 추적자의 농도가 측정된 위치를 알 수 있도록 하였다. 공기는 측정차 위 4.1 m 높이의 가스 채취구에서 흡입하여 분석하였는데 채취된 공기가 분석될 때까지 관내 체류시간은 약 8초였다.

추적자인 SF₆의 농도는 미국 AeroVironment사의 모델명 CTA-1000 추적자 연속분석기로서 분석하였다. CTA-1000은 최소한 6 L/min의 공기를 받아들여 그 중 약 50 cc만을 분석에 사용함으로써 이동중에도 정확한 분석이 가능하도록 설계된 것이었다. 펌프에 의하여 흡입된 소량의 공기는 수소와 함께 molecular sieve 위 백금촉매 하에서 약 180°C로 연소된 후 국부가열식 투과 건조기(zone-heated permeation dryer)를 거쳐 ECD로 분석된다. 분석기의 신호는 주파수와 전압의 두 가지 형태가 가능한데 본 실험에서는 전압신호를 기록한 후 digitizer로 읽어 농도를 계산하였다. 그림 2는 측정차에 비치된 보정장치를 이용한 SF₆ 농도 보정 결과이다. CTA-1000 분석기의 SF₆ 보정 곡선은 분석기의 전압 설정 기준점에 따라 달라지는데, 분석기 사용 지침서의 보정 결과에는 분석하한(lower detectable limit)이 약 20 ppt로 나타나 있으나(Baxter and Pankratz, 1991), 그림 2의 보정 곡선의 분석하한은 200 ppt를 넘어 10배 이상 높다.

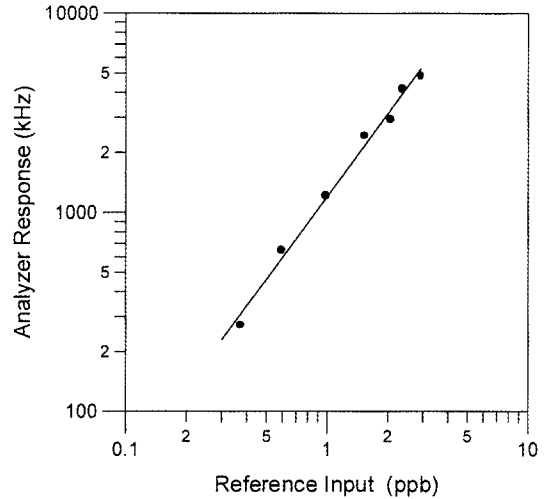


Fig. 2. Calibration of SF₆ continuous analyzer for the present experiment.

2.4 실험조건

표 2는 1992년 12월 1일, 3일, 9일, 21일의 실험일정과 실험시간 동안의 기상조건이다. 실험시간은 12월 3일의 2시간을 제외하고는 모두 1시간 이내의 단시간 실험이었다. 실험일로는 대체로 풍향이 일정하고 풍속이 높은 날을 선택하고자 하였는데, 실험기간 동안 평균 풍향은 북, 북북서 내지 북서로 큰 변화가 없었으나 평균 풍속은 1.5 m/s 이하로 낮았다. 표 2의 결과만을 본다면 풍속에 관한 한 실험일이 잘못 선정된 것으로 판단할 수도 있으나, 1990년까지 30년간의 기후표를 보면 대전측후소 12월의 평균 풍속이 1.3 m/s에 불과하고 0.3 m/s 미만 정체 비율도 평균 31.7%에 달하여(기상청, 1991) 표 2의 평균 풍속은 오히려 대상 지역의 특성으로 해석되었다. 풍속이 낮음에 따라 12월 오후의 일사조건에서 대기안정도는 모두 B등급이었다. SF₆ 농도 측정시간은 대체로 분석기에 SF₆가 감지되기 약간 전부터 SF₆ 배출이 끝난 시간까지를 말하는데, 모든 실험자료에는 농도측정 시작시간을 0으로 하여 이후의 시간경과를 분으로 표시하였다.

2.5 INPUFF 모델링

플룸 모델과 달리 퍼프 모델은 오염물질 이동 중의 기상 변화를 고려할 수 있으나 기본적으로 플룸

Table 2. Experiment and meteorological conditions.

Date and SF ₆ measuring interval	SF ₆ release interval	SF ₆ release rate (g/s)	Average wind direction	Average wind speed (m/s)	Temperature (°C)	Solar radiation (W/m ²)	Atmospheric stability
Dec. 1 15:23 ~ 16:16	15:08 ~ 15:13	0.345	nnw	1.18	10.0	212	B
	15:19 ~ 15:31	0.345	nnw	1.49	10.1	180	B
	15:52 ~ 16:15	0.069	nnw	0.98	10.4	98	B
Dec. 3 14:24 ~ 16:35	14:20 ~ 14:50	0.258	nnw	0.86	5.8	281	B
	14:52 ~ 15:22	0.517	n	0.70	6.4	216	B
	15:31 ~ 16:01	1.033	nnw	0.67	6.8	136	B
	16:05 ~ 16:30	2.067	nw	0.37	6.7	77	B
Dec. 9 13:44 ~ 14:42	13:19 ~ 13:37	0.090	n	0.20	6.7	101	B
	13:37 ~ 14:15	0.180	nnw	0.071	6.9	80	B
	14:15 ~ 14:40	0.360	w	0.006	7.1	61	B
Dec. 21 14:37 ~ 15:01	14:20 ~ 14:57	1.019	nw	1.39	5.7	96	B

모델과 동일한 확산계수를 이용하는 까닭에 연속적인 기상 변화를 그대로 수용할 수는 없다. 이에 따라 보통의 퍼프 모델은 기상 변화를 3~10분 이하로 과도하게 세분하지 않을 것을 권장하고 있다 (Petersen and Lavdas, 1986). 본 논문에서는 수 초 간격으로 측정된 기상자료를 20분 단위로 평균하여 입력자료로 사용하였다. 배출 시간은 연속 배출이 아닐 경우 기상 평균 시간을 정수로 나눈 값을 지정토록 되어 있는데, 본 논문에서는 표 2의 배출 시간 및 배출과 배출 사이의 간격, 계산의 경제성들을 감안하여 5분 단위로 배출량을 평균하였다. 시료 채취 시간 역시 기상 평균 시간을 정수로 나눈 값을 지정토록 되어 있는데, 이상적으로는 매우 세분화하여 차량 이동을 따라가도록 할 수도 있으나 기상자료를 20분씩 평균하여 사용하는 상황에서 이와 같은 세분화는 큰 의미가 없다고 판단되어 기상 평균 시간과 동일한 간격으로 20분을 지정하였다. 시료 채취 시간과 기상 평균 시간을 일치시킴에 따라 차량의 위치 역시 20분 간격으로 이동시켜가며 차량 위치에서 농도를 계산하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 실험결과 분석

그림 3은 12월 1일 대상 지역인 둔산지역의 지도 위에 측정차가 이동하며 측정된 SF₆ 농도를 나타낸 것이다. 우측의 점선구역은 그림 1에서 고층 아파트

가 위치하였던 구역들이다. 측정차의 이동경로를 셋으로 나누어 표시하였는데, 출발점과 좌측점을 두차례 왕복하였던 첫째 경로에서는 배출원의 SF₆ 배출량이 0.345 g/s 이었고 배출원과 측정차의 거리는 약 700~800 m 이었다. 배출량을 1/5인 0.069 g/s로 줄이는 동안 측정차를 보다 배출원에 가까운 북쪽으로 이동한 후 셋째 경로에서 추적자 농도를 측정하였다. 추적자의 농도는 기준점이 배출원을 향하도록 표시하였다. 구역 내에서 도로를 따라 직선으로 이동할 때 측정차의 이동속도는 일정하다고 가정하여 위치별 농도를 계산하였다. 풍향과 풍속, 거리에 따라 추적자의 농도분포가 다르기는 하나 대체로 정규분포에 근접한 형태를 취하고 있음을 볼 수 있다.

그림 4는 시간에 따른 배출원에서의 풍향 풍속 측정결과와 측정차에서의 농도측정 결과, 그리고 INPUFF 모델에 의한 계산결과를 자기 나타낸 것이다. 앞에서도 언급하였지만 그림 4에서 시간 0은 측정이 시작된 시간을 지칭한다. 실험시간 동안 풍향은 북북서로 거의 일정하며 풍속도 대개 1~2 m/s 이나 실험 후반에 1 m/s 이하로 떨어지고 있다. 측정차가 계속 이동하고 있으므로 농도 측정결과는 배출원으로부터의 거리 위에 1 km : 2 ppb의 비율로 표시하였다. 배출원의 방향은 측정차에서 바라본 배출원의 방향으로, 원칙적으로 이 방향이 풍향과 일치할 때 측정차는 확산의 중심축에 위치하게 되어 추적자의 농도가 가장 높아질 수 있다.

시간축에 표시된 S11, S12, S13은 각기 SF₆ 배출

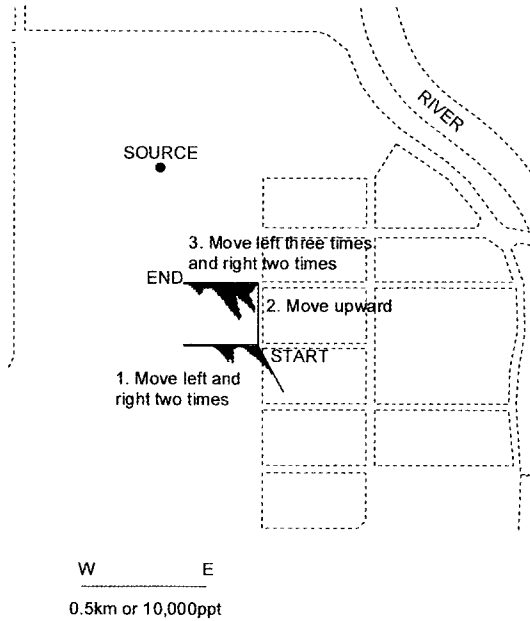


Fig. 3. Profiles of SF₆ plume by a continuous analyzer on the monitoring van on December 1, 1992. The plume is drawn on the map along the path of the van by directing the base to the source. Release rate was 0.345 g/s when the van moved along Path 1, and 0.069 g/s when the van moved along Path 3.

구간을, R11, R12, R13은 INPUFF 모델링을 위한 기상변수의 평균화 구간을 의미한다. 기상변수 평균화 시간과 시료 채취 시간을 일치시킴에 따라 R11부터 R13까지 20분 간격으로, 계산에 의한 농도 곡선이 경계 부분에서 조금씩 단절되는 현상을 보이고 있다. 농도 정점의 위치는 측정치와 계산치가 대체로 비슷하나 정점의 높이는 계산치가 훨씬 낮다. R11 구간에서는 측정치의 분포가 좁고 날카로운 반면 계산치는 분포가 넓은 뿐 아니라 정점과 정점이 이어지는 모습도 나타나고 있다. 이같은 차이는 모델 계산에서는 확산의 영향이 크고 평균 기상을 이용하고 있어 시간적으로나 공간적으로나 농도 변화가 급격하지 않은데 비하여, 실제 측정에서는 확산보다 바람의 순간 변화에 의한 이동이 두드러져 중심부의 농도는 높으나 이에서 벗어날 경우 농도가 빠르게 감소하기 때문에 해석된다. 측정차와 배출원의 방향이 풍향과 일치하지 않아 추적자가 검출

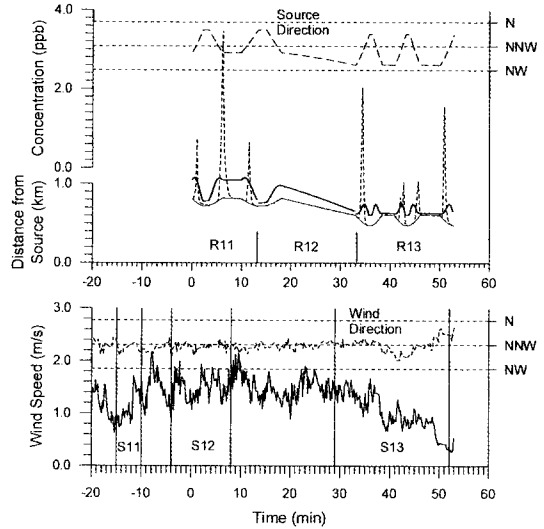


Fig. 4. SF₆ concentration measured at the monitoring van along paths shown in Fig. 3 and wind speed and direction measured at 10-m height at the source location on December 1, 1992. In the upper figure, SF₆ concentration is plotted on the curve representing the distance between van and source. Dotted line represents measured concentration, and bold line represents simulated concentration with INPUFF. Source direction refers to the direction of source from the monitoring van. Release rates were 0.345 g/s at intervals of S11 and S12 and 0.069 g/s at interval of S13. R11, R12 and R13 indicate the averaging interval of meteorological variables.

되지 않았던 R12 구간에서 계산 결과가 농도 변화를 보이는 것도 동일한 이유로 설명할 수 있다.

그림 5는 실험 이틀째인 12월 3일의 풍향, 풍속과 SF₆ 농도 측정 및 계산 결과이다. 실험 초기 북서풍으로 일정하던 풍향이 남풍을 넘나드는 S21 후 반까지는 풍속이 1~2.5 m/s로 비교적 높았으나, 이후 점차 서풍으로 변하며 풍속이 떨어지고 있다. SF₆는 S21부터 S24까지 20여분씩 4차례에 걸쳐 배출하였으며, 0.258 g/s부터 2.067 g/s까지 배출이 재개될 때마다 2배씩 배출량을 증가시켰다. 이틀째의 실험에서 가장 특징적인 현상은 실험 중반 추적자 농도가 측정 상한인 10 ppb를 넘은 점이다. 높은 배출량과 미풍 조건에서 바람의 영향이 감소하면서 상대적으로 확산 효과가 커짐에 따라 나타난 현상

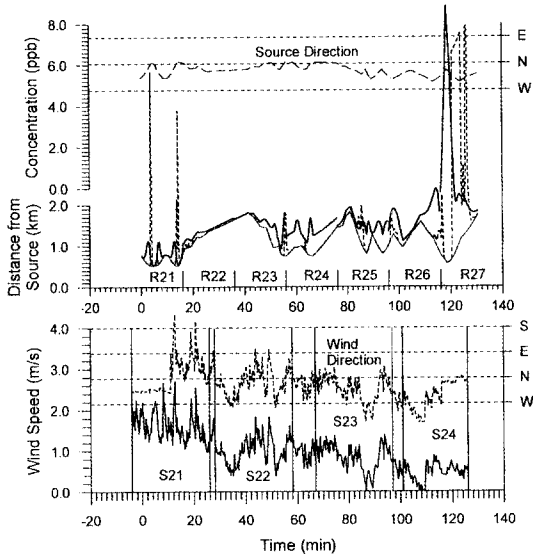


Fig. 5. SF₆ concentration measured at the monitoring van and wind speed and direction measured at 10-m height at the source location on December 3, 1992. Lines have the same interpretation as those in Fig. 4. Release rates were 0.258, 0.517, 1.033, and 2.067 g/s at intervals of S21 to the S24, respectively. R21 to R27 indicate the averaging interval of meteorological variables.

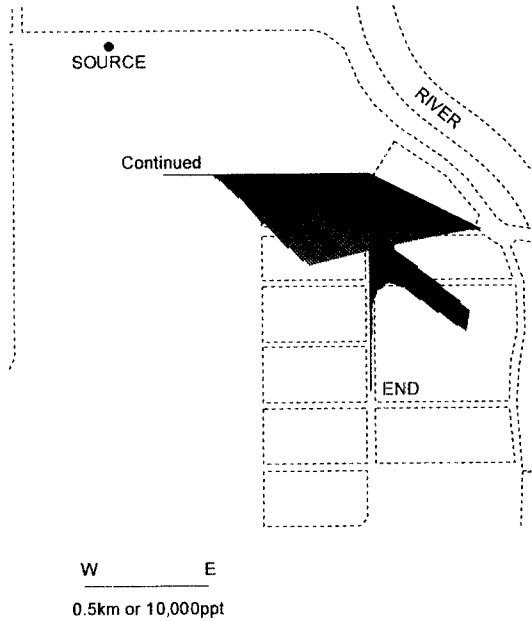


Fig. 6. Profiles of SF₆ plume from 118 to 130 min after starting concentration measurement on December 3, 1992. SF₆ release rate was 2.067 g/s at interval of S24 from 101 min, but it was 1.033 g/s at interval of S23 from 67 min to 97 min as shown in Fig. 5.

으로 이해되는데, 계산 결과에서도 고농도가 나타나고 있으나 평균 풍향과 풍속을 이용한 까닭에 고농도 부분의 시간과 크기가 정확히 일치하지는 않는다.

그림 6은 실측에서 추적자 농도가 상승하기 시작하는 118분 이후의 농도 변화를 측정차의 이동과 함께 지도 위에 표시한 것이다. 배출원으로부터 약 500 m 지점부터 측정차가 동쪽으로 이동하는 동안 추적자의 농도가 계속 높으며, 측정차가 남쪽으로 방향을 바꾸어 배출원으로부터 1 km 이상 고층 아파트 구내를 이동하는 동안에도 다시 한번 농도가 상승하고 있다. 그림 7은 그림 6의 농도 상승 원인을 알아보기 위하여 INPUFF로써 S23과 S24의 배출을 분리시킨 가운데 측정차의 이동에 따른 농도 변화를 조사한 것이다. 앞서도 몇차례 지적한 바와 같이 INPUFF 계산의 한계 때문에 측정치와 계산치를 정확히 비교하기는 쉽지 않다. 그러나 118분

이후 계산치의 농도 상승을 보면, 측정차가 서쪽에서 동쪽으로 움직이던 앞쪽의 농도 상승이 S24 배출 때문이라면 고층 아파트 구내에서의 농도 상승은 측정차의 이동이 추적자의 이동보다 빨라, S23 기간에 배출된 추적자가 측정되었을 가능성이 크다. 풍속이 1 m/s 이하로 매우 낮아 이동보다 확산의 영향이 중요한 상황에서 앞의 고층 아파트로 대기의 흐름이 저지됨에 따라 고농도 부분이 넓게 퍼지게 되고, 고층 아파트 구내에서도 추적자의 이동 시간이 짧지 않았음에도 고층 건물 사이 바람장의 변화로 추적자 농도가 높게 상승한 것으로 추정된다.

그림 8은 실험 사흘째인 12월 9일의 풍향, 풍속과 SF₆ 농도 측정 및 계산 결과이다. 먼저 풍향과 풍속을 살펴보면 초반 북풍, 북북동, 북북서풍에서 후반에는 서풍으로 변하고 있는데 무엇보다 풍속이 0.5 m/s를 훨씬 밑돌고 있으며 마지막에는 거의 무풍에 이르고 있다. 주로 배출원과 거리가 가까울 때

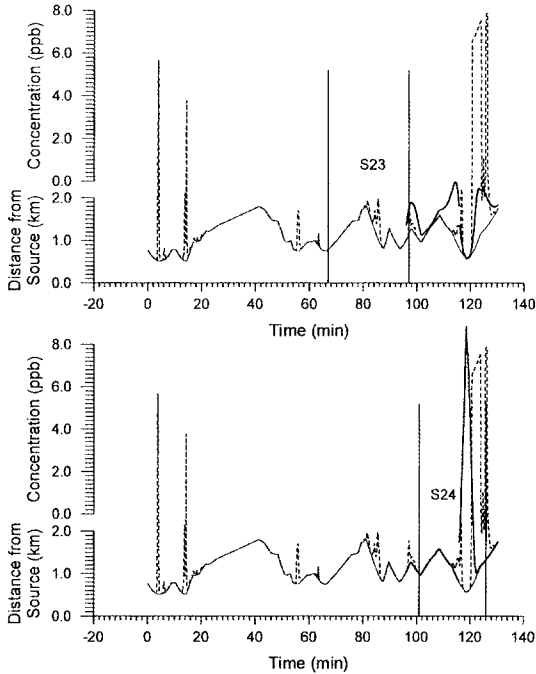


Fig. 7. SF₆ concentrations measured at the monitoring van and simulated with INPUFF. Solid line in the upper figure was obtained by assuming SF₆ release only for the period of S23 in Fig. 5, and solid line in the lower figure was obtained by assuming SF₆ release only for the period of S24.

순간 풍속에 의하여 간헐적으로 농도가 측정되고 있으나, 평균 풍속을 이용하는 모델링 결과에서는 농도가 거의 나타나지 않고 있다. 측정 전반에 비하여 후반에 비교적 농도가 높은 것은 앞의 배출이 측정된 때문으로 추정되나 계산 결과에는 농도가 나타나지 않아 확인할 수 없다.

그림 9는 12월 21일 마지막 날의 추적자 실험 결과이다. 이날의 풍향은 북서풍을 중심으로 초반 북북서에서 후반 서북서로 변하고 있으며 풍속은 측정 시작 전에는 평균 1.0 m/s에 못 미쳤으나 측정이 시작된 후에는 1~2 m/s를 넘어서는 경우도 많았다. 이날 역시 측정 후반에 추적자 농도가 분석기의 보정 한도인 10 ppb를 넘었는데, 당시 높은 풍속의 풍향이 배출원의 방향과 일치하였기 때문에 해석된다. INPUFF 모델링 결과에서도 같은 시기에 농도가

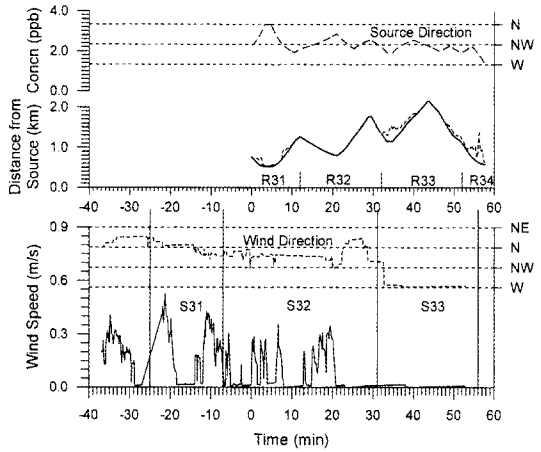


Fig. 8. SF₆ concentration measured at the monitoring van and wind speed and direction measured at 10 m height at the source location on December 9, 1992. Lines have the same interpretation as those in Fig. 4. Release rates were 0.090, 0.180, and 0.360 g/s at intervals of S31 to S33, respectively. R31 to R34 indicate the averaging interval of meteorological variables.

상승하고 있으나 역시 정점의 높이는 훨씬 낮다. 반면 초반에는 풍향 및 풍속의 변화 폭이 큰 까닭에 측정치와 계산치의 비교가 그리 만족스럽지 못하다.

3.2 검토

SF₆를 이용한 추적자 실험이라면 짧아도 수 km, 길게는 10여 km의 오염물질 추적을 기대하는 것이 보통이다. 그러나 본 실험에서는 가장 거리가 먼 경우가 2 km를 조금 넘는 정도였고 대부분의 실험이 1.5 km 이내에서 이루어졌다. 우선적으로 추적자 분석이 잘못된 경우를 생각할 수 있으나 INPUFF 모델링 결과도 유사함을 감안하면 여러 실험 조건이 수 km 이상 오염물질 추적에 불리한 형태로 조합되었을 가능성이 크다. 가장 중요한 원인의 하나로 분석기의 분석 하한을 생각할 수 있다. 통상 ppt 수준의 분석이 가능하고 본 연구에서 사용한 분석기의 지침서에서도 20 ppt 정도의 분석하한을 제시한데 비하여 그림 2의 분석하한 200 ppt는 너무 높다. 분석하한의 자리수가 하나 혹은 둘이 낮아진다면 측

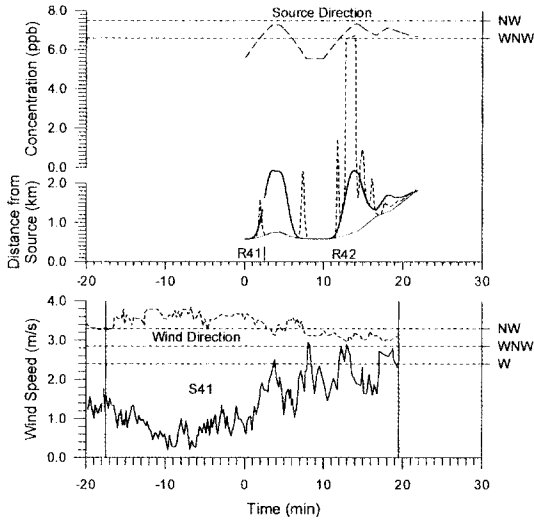


Fig. 9. SF₆ concentration measured at the monitoring van and wind speed and direction measured at 10 m height at the source location on December 21, 1992. Lines have the same interpretation as those in Fig. 4. Emission rate was 1.019 g/s at interval of S41. R41 and R42 indicate the averaging interval of meteorological variables.

정거리 몇 배 정도는 쉽게 증가할 수 있다.

두 번째 원인으로서는 실험 기간 동안의 기상 조건을 생각할 수 있다. 앞에서 언급한 바와 같이 본 연구에서는 대체로 풍향이 일정하고 풍속이 높은 날 실험을 실시하고자 하였는데, 결과적으로 풍속이 낮았던 것을 포함하여 과연 어떠한 기상 조건이 추적자 실험에 유리한 기상 조건인가를 검토할 필요가 있다.

세 번째로는 수분간 단속적으로 추적자를 배출하며 단시간 측정하였던 실험 계획이 원인일 수 있다. 이는 적은 실험으로써 많은 정보를 얻고자 짧은 시간에 다양한 조건의 실험을 시도하였기 때문인데, 결국 플룸이 아닌 퍼프를 실험한 형태가 되어 확산이 진행됨에 따라 중심부의 농도가 낮아지더라도 추가 배출에 의한 오염물질의 공급이 없어 전체적으로 저농도 조건의 실험을 감행한 결과를 빚게 되었다. 첫 번째, 두 번째 원인에 비하여 마지막 세 번째 원인은 개선이 비교적 용이하다는 점에서, 또한 전체적으로 저농도로 실험이 진행되어 앞의 두 원

인이 중요하게 되었을 수 있다는 점에서 마지막 원인은 다른 어느 원인보다 중요할 수 있다.

4. 모사실험

4.1 모사실험 방법

수시간 동안 연속 배출 결과를 예측하고, 10~20 km 거리의 오염물질 이동 추적에 유리한 실험 조건을 조사하며, 분석기 측정 하한의 영향을 정량적으로 알아보기 위하여 INPUFF 모사 실험을 실시하였다. 모사 실험에 이용한 배출 조건과 기상 조건은 각각 표 3 및 그림 10과 같다. 전반적으로 SF₆의 배출량이 작았다고 판단되어 실험 이틀째 기장 많았던 2 g/s로 고정하였고, 여타 조건은 상온의 100% 가스 배출을 가정하는 등 실제 실험과 동일하였다. 기상 조건은 추적자 실험이 실시되었던 4일간의 기상을 실험결과 확인과 분석을 위한 INPUFF 모델링에서와 같이 20분 단위로 평균하여, 연속성을 지니도록 12월 3일, 9일, 21일, 1일을 연결하여 총 6시간을 구성하였다. 이에 따라 풍속 변화는 0.01~2.0 m/s, 평균 풍속 0.9 m/s, 풍향은 북서풍을 중심으로

Table 3. SF₆ release conditions for INPUFF simulation.

Release rate	2 g/s
Exit velocity	4 m/s
Release height	10 m
Stack diameter	0.01 m

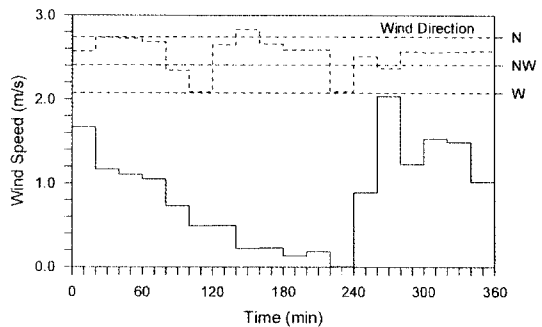


Fig. 10. Changes of wind speed and direction in INPUFF simulation of tracer experiment. They were taken from experiments on December 3, 9, 21, and 1, consecutively, and averaged at 20 min intervals.

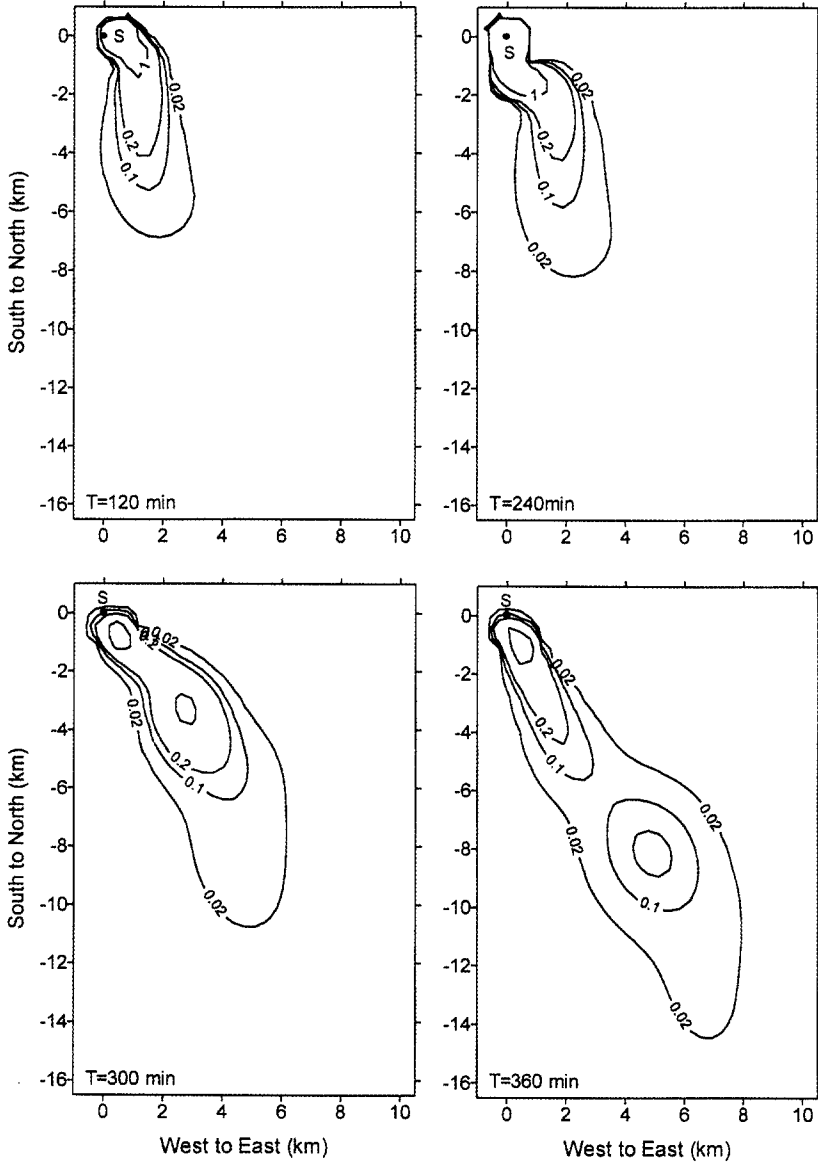


Fig. 11. Movement of SF₆ plume simulated by INPUFF with release conditions of Table 3 and meteorological conditions of Fig. 10. Concentration is expressed in ppb and averaged for 20 min till the time shown at the left lower corner.

북풍부터 서풍까지 변화하였다. 기온은 표 2에 나타난 것과 같이 5.7~10.4°C, 대기 안정도는 B 등급, 혼합고는 5,000m로 충분히 크게 하여 영향을 배제하였다. SF₆는 6시간 연속 배출을 가정하였고, 농도는 그림 10에서와 같이 20분 단위로 평균하였다.

4.2 모사실험 결과

그림 11은 각각 추적자가 배출된 120분, 240분, 300분, 360분 후의 농도 분포이다. 기상 조건과 같이 20분 단위로 농도를 평균함에 따라 그림 11의 농도 분포는 실제로는 100~120분, 220~240분 등

표시된 시간까지 20분 동안의 평균 분포이다. 풍향에 따라 초기에 주로 남쪽으로 이동하던 플룸이 120분을 전후하여 남동내지 동쪽으로 잠시 방향을 바꾸었다가, 종반에는 북북서풍의 영향으로 남남동쪽으로 퍼져가고 있다. 120분부터 240분 사이에는 풍속이 낮아 플룸의 진행이 매우 느린데 비하여 300~360분 사이에는 풍속이 높아 플룸의 이동이 빠르다.

그림 12는 분석기의 분석 하한이 표 1과 같이 200 ppt 일 경우와 사용 지침서에 나타난 바와 같이 20 ppt 일 경우를 가상하여 최대 측정거리를 시간에 따라 조사한 것이다. 최대 측정거리는 시간이 지날수록 길어져 6시간 후에는 분석 하한이 200 ppt일 때에도 10 km에 이르며, 분석 하한이 20 ppt로 낮아지면 측정거리는 16 km까지 증가된다. 분석 하한에 따른 측정거리 변화는 결국 시간에 따른 해당 농도 곡선의 이동 모습이다. 그림 11에서 살펴본 바와 같이 풍속이 낮아지면 농도 곡선의 이동도 늦어져 시간에 따른 최대 거리의 증가가 둔화된다. 그러나 이와 같은 풍속의 영향은 고농도인 200 ppt에서 상대적으로 큰데 비하여, 20 ppt 곡선은 확산의 영향으로 풍속이 잦아드는 120~240분 구간에서도 최대 거리가 조금씩 증가하고 있다.

표 4는 표 3과 그림 10의 추적자 실험을 기본으

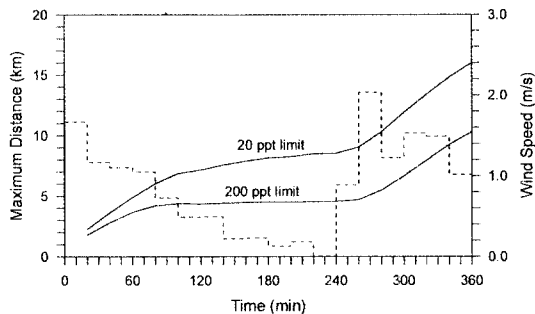


Fig. 12. Maximum distances of 200- and 20-ppt concentration fronts from the source with time together with wind speed variations. Concentration was averaged at the same interval as wind speed, so average at time t means average from t-20 to t.

로 배출 조건과 기상 조건을 변화시켰을 때 배출원으로부터 각 농도 곡선의 최대 이동 거리를 계산한 것이다. 먼저 기본 경우부터 살펴보면 20~200 ppt 까지는 그림 12에서 본 것과 같이 배출이 지속되는 동안 이동 거리가 계속 증가하여 모사 실험의 마지막인 6시간 후에 최대가 된다. 그러나 1,000 ppt 곡선은 1시간 전인 5시간째에 이동 거리가 최대가 되고 있는데, 그림 10, 11을 보면 240분까지는 풍속이

Table 4. Maximum distances of concentration contours from the source in various release and meteorological conditions.

Scenario		Maximum Distance (km)				
		(Time of Maximum Distance, min)				
		20 ppt	100 ppt	200 ppt	1,000 ppt	
Base Case ^a		16.0 (360)	11.6 (360)	10.3 (360)	4.8 (300)	
Short-term Release for 20 min. from t=0		11.1 (300)	5.3 (100)	3.7 (60)	1.6 (40)	
Wind Speed	2 W ₀	22.6 (360)	12.5 (320)	6.5 (280)	3.2 (260)	
	0.5 W ₀	9.5 (360)	8.1 (360)	7.0 (360)	5.5 (360)	
Wind Direction	Constant 180°	17.0 (360)	11.8 (360)	10.3 (360)	4.9 (300)	
	0.5 W ₀ rotation at every 20 min	0.5 W ₀	2.6 (360)	2.1 (360)	2.0 (360)	1.5 (360)
		W ₀	3.6 (360)	2.9 (360)	2.5 (360)	1.8 (300)
		2 W ₀	4.9 (360)	3.7 (320)	3.3 (280)	2.7 (260)
Stability	A (unstable)	13.2 (360)	5.1 (300)	2.6 (280)	1.7 (260)	
	D (neutral)	18.3 (360)	17.2 (360)	16.2 (360)	11.4 (360)	
	F (stable)	18.6 (360)	18.3 (360)	18.0 (360)	15.8 (360)	

^a Continuous release for 6 h, wind speed W₀, and wind direction shown in Figure 10, and B stability

점차 줄어 등농도 곡선이 일정한 형태를 유지하고 있으나 300분째에는 풍속이 빨라지며 1,000 ppt 곡선이 분열되면서 최대 이동거리로 기록된 것이다. 이후에는 빠른 풍속으로 앞쪽의 1,000 ppt 곡선은 급속히 확대되면서 사라지고 뒤쪽의 곡선만이 남게 되어 최대 이동 거리도 축소된다.

따라서 만일 분석 하한이 1,000 ppt인 분석기로 추적자의 이동을 추적하고 있었다면 5시간까지는 주로 앞으로 이동하며 추적자의 이동을 감지할 수 있으나 6시간째에는 풍속의 증가와 함께 앞쪽의 플룸이 사라지기 때문에 뒤로 이동하여야만 다시 플룸을 찾을 수 있다는 해석이 가능하다. 그러나 이와 같은 해석도 실제로는 플룸의 이동이 그림 11과 같은 일정한 형태의 등농도 곡선을 유지할 경우에만 의미가 있다. 측정차를 이용한 실험에서와 같이 농도의 실시간 측정에 의하여 추적자를 추적한다면, 풍속이 아주 낮을 때를 제외하고는 바람의 순간 변화에 의하여 등농도 곡선이 잘게 나누어지기 때문에 그림 11을 비롯한 본 논문의 모사 실험 결과는 평균적 의미의 참고 자료일 수밖에 없다.

연속 배출 대신 앞의 실험에서와 같이 SF₆를 20분간만 배출하면 최대 측정거리는 분석기의 분석하한이 높아짐에 따라 급속히 감소하여 분석하한이 1,000 ppt일 경우 연속배출의 1/3로 줄어든다. 분석하한이 20 ppt로 낮을 경우 이론적으로는 최대 측정거리가 11 km에 이르나 20분 배출에 최대 측정거리는 5시간 후이나 가능하므로 바람의 순간 변화가 중요한 실제 측정에서는 그만큼 어려움이 많아지게 된다. 즉, 추적자 실험에서는 특별한 이유가 없는 한 연속 배출이 오염물질 추적에 유리하다.

6시간 연속 배출과 그림 10의 기상 조건의 틀을 그대로 유지한 채 풍속만을 2배 증가시키면 표 4와 같이, 분석하한이 20 ppt 일 때는 최대 측정거리가 40% 이상 증가하나, 분석하한이 1,000 ppt 일 때는 67%로 감소한다. 분석하한이 높아질수록 측정거리가 최대가 되는 시간도 빨라지는데, 그림 10, 11에서 짐작할 수 있는 것과 같이 실험 후반 풍속의 증가와 함께 플룸 앞부분의 이동이 더욱 빨라지며 해석이 그만큼 촉진되기 때문이다. 반면 풍속이 1/2로 줄면 실험 후반 풍속 증가의 영향이 감소하여 분석하한에 관계없이 실험 마지막에 측정거리가 최대가 된다. 분석하한이 20 ppt 일 때는 풍속이 2배에서

1/2로 낮아짐에 따라 최대 측정거리가 감소하는 반면 분석하한이 1,000 ppt 일 때는 최대 측정거리가 오히려 증가하여, 1/2 풍속에서는 분석하한이 1,000 ppt에서 20 ppt로 낮아져도 최대 측정거리는 5.5 km에서 9.5 km로 73% 증가할 뿐이다.

그림 10에서 풍향 변화를 없애고 일정하게 하였을 때의 변화는 풍속을 높게 하였을 때와 비슷하나 기본 경우인 그림 10의 풍향 변화가 심하지 않아 효과는 크지 않다. 매 20분마다 풍향을 180° 바꾸면 측정거리가 최대가 되는 시간은 변하지 않으나 최대 측정거리는 특히 분석하한이 20 ppt로 낮을 때 현저하게 줄어든다. 이와 같이 풍향이 심하게 바뀌는 상태에서 풍속을 증가시키면 측정거리가 최대가 되는 시간은 기본 경우에서의 풍속 변화와 동일하나, 최대 측정거리는 분석하한이 1,000 ppt 일 때도 풍속에 따라 증가하여 기본 풍향 조건에서의 풍속 변화와 다르다.

그림 10의 풍향, 풍속을 그대로 두고 대기 안정도를 B 등급에서 A 혹은 D, F로 변화시키면 어느 경우나 안정도가 증가할수록 최대 측정거리가 멀어진다. F 등급에서는 분석하한이 1,000 ppt 일 때도 최대 측정거리가 16 km에 이르는 반면 확산이 활발한 A 등급에서는 분석하한이 1,000 ppt 일 때 최대 측정거리가 1.7 km에 불과하여 풍속을 2배 증가시켰을 때보다도 측정거리가 짧다. 대기가 중립이거나 안정할 때에는 확산이 억제된 상황에서 추적자가 이동함에 따라 분석하한에 관계없이 실험 마지막에 측정거리가 최대가 된다.

5. 결 론

측정차에 탑재된 연속분석기를 이용하여 추적자의 이동을 실시간 추적하였다. 대상 지역은 고층 아파트가 건설된 일부 지역을 제외하고는 평탄하였고 대부분의 도로는 바둑판 모양으로 연결되어 있을 뿐 아니라 차량 통행이 거의 없었다. 1992년 12월 4일간에 걸쳐 SF₆의 단속 배출에 의한 1~2시간 이내의 단기 실험을 행하였고 INPUFF 모델링 결과와 비교하였다. 실험에서 충분히 않았던 부분은 실험을 실시하였던 4일간의 기상과 연속 배출을 기본으로 INPUFF 모사실험을 실시함으로써 확인하였다.

① 실제 측정 농도는 바람의 순간 변화가 그대로

반영되고 좁고 날카로운 분포를 보인 반면 모델 계산 농도는 평균 기상의 사용과 확산의 영향으로 분포가 완만하였다. 그럼에도 건물의 영향이 심한 경우와 풍속이 특별히 약할 경우를 제외하고는 두 분포의 정점의 위치는 대체로 일치하였다.

② 현장 실험에서 추적자는 대부분 배출원으로부터 0.5~2.2 km 범위에서 측정되었고, 농도 정점은 주로 1.5 km 이내에서 관찰되었다. 그러나 이와 같은 측정거리는 오염물질 이동을 추적하고자 통상 고려하는 거티에 비하여 너무 가까웠으며, 실험이 근거리에 머문 이유는 추적자가 단속적으로 배출되었고 분석기의 분석하한이 200 ppt로 높았기 때문이다.

③ 연속배출을 시험한 모사실험에 의하면 분석하한이 20 ppt 정도로 충분히 낮을 때에는 풍속이 빠를수록 측정거리가 증가하였으나, 분석하한이 높을수록 풍속의 영향이 작았고 경우에 따라서는 풍속이 높아짐에 따라 측정거리가 감소하기도 하였다. 결과적으로 빠른 풍속, 일정한 풍향이 추적자 실험에 유리한 것은 분석하한이 충분히 낮을 때였다.

④ 현장실험은 B등급의 안정도에서 실시되었으나 대기가 안정할수록 측정거리가 증가하였고 특히 분석기의 분석하한이 높을 때 측정거리가 현저하게 증가하였다. 이에 따라 대기가 매우 안정한 F 등급에서는 분석하한에 따른 측정거리 변화가 크지 않았다.

감사의 글

본 연구의 실험은 한국에너지기술연구소의 통상 산업부 출연연구사업으로 수행되었으며, 분석과 모사 실험은 누출 확인을 위한 추적자 실험 가능성을 예상하여 과학기술부 국책 방재기술개발사업의 일환으로 수행되었습니다. 1992년 12월 추적자 실험은 본 논문의 저자들 외에도 한국에너지기술연구소 에너지환경부의 많은 분들이 참여하였기에 감사하였습니다. 도움을 주신 모든 분들께 감사드립니다.

참고 문헌

기상청 (1991) 한국기후표 제II권.
 김영성, 경남호, 선도원, 배달희, 조성호, 임정환 (1992) 에너지소비에 따른 대기환경영향 평가기법 개발

(III), KE-92058G, 한국에너지기술연구소.
 이종범, 강인구 (1989) 단일배출원 대기오염 단기모델에 관한 연구 (Tracer Gas에 의한 확산 실험), 한국 대기보전학회지, 5, 84-96.
 이종범, 김 산, 김용국, 조창래, 유승도 (1996) 추적자 확산 실험에 의한 야간 강안정층 하에서의 가우시안 퍼포모델의 평가, 한국대기보전학회지, 12, 529-540.
 홍민선, 이성철, 장영기 (1996) 추적자 실험을 통한 복잡지형 적용 가능 대기오염 모델 개발에 관한 연구, 특정연구 제1차 중간보고서, 한국과학재단.
 Allwine, K.J. (1992) *Atmospheric Dispersion in Mountain Valleys and Basins*, PNL-7922, Pacific Northwest Laboratory, Richland, Washington.
 Barnett, A.N. (1991) AeroVironment, Monrovia, CA, personal communication.
 Baxter, R.A. (1991) AeroVironment, Monrovia, CA, personal communication.
 Baxter, R.A. and D. Pankratz (1991) *Operator's Manual for Aero Vironment Inc. Continuous Tracer Analyzer Model CTA-1000*, AV-OM-91/6148, Aero Vironment, Monrovia, CA.
 Blumenthal, D.H., T.B. Smith, D.E. Lehrman, G.Z. Whitten, R.A. Rasmussen, and R.A. Baxter (1985) *Southern San Joaquin Valley Ozone Study-Data*, STI 94100-501-FR, Sonoma Technology, Santa Rosa, CA.
 Ferber, G.J., J.L. Heffter, R.R. Draxler, R.J. Lagomarsino, F. L. Thomas, R.N. Dietz, and C.M. Benkovitz (1986) *Cross-Appalachian Tracer Experiment (CAPTEX '83)*, Final Report, NOAA Technical Memorandum ERL ARL-142, Air Resources Laboratory, Silver Spring, MD.
 Hidy, G.M. (1984) Source-receptor relationships for acid deposition : pure and simple? A critical review, J. Air Pollution Control Assoc., 34, 518-531.
 Hidy, G.M., D.A. Hansen, and A. Bass (1985) *The Feasibility and Design of the Massive Aerometric Tracer Experiment (MATEX)*, Vol. 1. *Presentation of the MATEX Design Concept*, Draft, ERT Document No. P-B582-840, Environmental Research & Technology, Inc., Newbury Park, CA.
 McRae, G.J., F.H. Shair, and J.H. Seinfeld (1981) Convective downmixing of plumes in a coastal environment, J. Appl. Meteorol., 20, 1312-1324.
 Petersen, W.B. and L.G. Lavdas (1986) *INPUFF 2.0-A Multiple Source Gaussian Puff Dispersion Algorithm: User's Guide*, EPA-600/8-86-024, Environmental

Protection Agency, Research Triangle Park, N.C..
Strimaitis, D.G., G.E. Moore, and S.G. Douglas (1991)
Analysis of tracer data collected during the SCC-
CAMP (South-Central Coast Cooperative Aerome-
tric Monitoring Program) 1985 intensive measure-
ment periods, J. Appl. Meteorol., 30, 674-706.
Tombach, I. (1987) *Measurement and Strategies*, A Short

Course on Air Pollution, AeroVironment, Monro-
via, CA.

U. S. Environmental Protection Agency (1993) *An Evaluation
of a Solar Radiation/Delta-T Method for Estima-
ting Pasquill-Gifford (P-G) Stability Categories*,
EPA-454/R-93-055, Environmental Protection
Agency, Research Triangle Park, N.C.