한국대기환경학회지 제 23 권 제 4 호
J. KOSAE Vol. 23, No. 4 (2007) pp. 405~419
Journal of Korean Society for Atmospheric Environment

추적자 확산 실험에 의한 서울 도심 확산 현상 연구
- 추적기체의 확산특징과 CALPUFF 모델에 의한 모사

Tracer Experiment for the Investigation of Urban Scale Dispersion of Air Pollutants
- Simulation by CALPUFF Dispersion Model and Diffusion Feature of Tracer Gases

이종범* · 김재철 · 이강웅[1] · 노철언[2] · 김혜경[2]
강원대학교 환경과학과,
[1]한국외국어대학교 환경학과, [2]인하대학교 화학과

(2007년 1월 26일 접수, 2007년 6월 21일 채택)

Chong Bum Lee*, Jea Chul Kim, Gangwoong Lee[1],
Chul-Un Ro[2] and HyeKyeong Kim[2]
Kangwon National University, Department of Environmental Science
[1]*Hankuk University of Foreign Studies Department of Environmental Science*
[2]*Inha University, Department of Chemistry*

(Received 26 January 2007, accepted 21 June 2007)

Abstract

A series of tracer experiments for the evaluation of atmospheric dispersion was performed over the urban area of Seoul using two inert, non-deposition perfluorocarbon (PMCH and m-PDCH) gases during three years campaign on 2002, 2003 and 2005. 30 sampling sites for collecting these tracers were located along two arcs of 2.5 and 5 kilometers downwind from the release point. About ten measurements which each lasted for 2 hours or 4 hours were made over the two consecutive days during each campaign.

CALPUFF and MM5 meteorological model were applied to evaluate the urban dispersion in detail. Size of Modeling domain was 27 km × 23 km and the fine nest in the modeling domain had a grid size of 0.5 km. The results showed that CALPUFF dispersion model had a tendency to estimate tracer concentrations about 2~5 times less than those of ambient samples under many conditions. These consistent inaccuracy in urban dispersion was attributed to inherent inaccuracy and lack of details in terrain data at urban area.

Key words : Tracer experiment, CALPUFF, Diffusion model

1. 서 론

*Corresponding author.
Tel : +82-(0)33-250-8571, E-mail : cbl@kangwon.ac.kr

대기확산 모델의 정확도는 모델 자체의 계산과정,

기상조건, 배출량 자료의 3가지 요인에 의해 좌우된다. 일반적으로 대기확산모델에 의하여 산출된 농도를 대기 중에서 실측한 농도와 비교하여 모델을 평가하는 경우에는 오차의 주원인이 모델 자체의 계산과정인지, 기상자료의 부정확성 때문인지, 배출량 자료의 부정확성 때문인지의 파악이 곤란하며, 따라서 개선방안을 마련하기도 모호한 경우가 많다.

추적자 확산실험은 정확하고 상세하게 기상을 측정하고 추적자 기체를 미리 계획된 대로 배출함으로써 이와 같은 불확실성을 제거하고 확산 모델 자체의 정확도를 평가하기에 적절하며 또한, 대기 중에서 대기오염물질의 확산 거동을 정량적으로 파악하는데 적합하다. 확산실험은 특정 지역의 대기 중에 방출하는 오염물질의 궤적을 추적함으로써 대기오염물질의 이동 및 확산을 조사하는 실험으로서 확산모델 실행결과를 여러 시료 채취지점에서의 농도 측정 자료와 비교하여 확산모델의 계산과정을 평가할 수 있으며, 특정 조건하에서의 확산모델의 적용가능성도 평가할 수 있다. 최근 대기확산 모델을 적용하여 확산실험의 결과와 모델결과를 비교 · 평가함으로써 대기오염 확산모델에 대한 평가 및 개선에 관한 연구가 활발히 진행되고 있으며, 우리나라에서는 국지규모의 확산실험을 실시하여 확산모델의 모사능력을 평가한 연구(이종범 등, 1996; 이종범과 강인구, 1989)가 있다. 또한 대기오염물질의 장거리 수송현상을 규명하기 위한 목적으로 서해상의 덕적도에서 추적자기체를 방출하고 강화도에서 태안반도에 이르는 서해안지역에서 공기 시료를 포집하는 중규모 실험을 실시한 바 있다(이종범 등, 2001).

본 연구는 2002년부터 2004년까지 3년간 실행한 '대기오염물질 장거리이동 이해를 위한 추적자확산실험'의 결과를 사용하였다(이종범 등, 2004). 추적자 기체의 농도와 기상자료는 주 · 야간 도시열섬효과 등의 도시기후가 나타나는 서울의 대기오염물질 이동 특성을 파악하는데 이용되었다. 또 Gaussian 확산모델 중 미국 EPA에서 비정상 상태와 대기오염물질의 장거리 이동현상에 권장하는 모델인 CALPUFF 모델을 사용하여 도심의 건물 밀집지역에서 확산현상을 파악하고 모델의 모사 능력을 평가하였다. 또한 CALPUFF의 기상 입력 자료로서 MM5 (The Fifth-Generation NCAR-Penn State Mesoscale Model)의 과정 중 TERRAIN의 토지이용도와 지형을 고해상도로 변경하고, NESTDOWN과정의 연직구조를 보다 세분화함으로써 확산모델이 도시효과를 고려하는지의 여부에 따라 확산이 어떻게 이루어지는가를 알아보고자 하였다.

2. 연구 방법

2.1 추적자 확산실험 개요

추적자 확산 실험의 개요와 시료채취장소 등은 표 1에 요약하였고, 추적자 방출율은 표 2와 같다.

측정농도의 수평분포를 파악하기 위한 공기시료채취시간은 짧을수록 시간변화에 따른 농도 분포를 이해하기 좋지만 이 경우 추적기체 농도를 분석해야

Table. 1. Summary of tracer experiments during 3 campaign periods.

Year	2002	2003	2004
Period	April 20 & May 25~26	May 16~18	April 2~4
Release site	Yongdu-dong	Anam-dong	Anam-dong
No. of sampling site	2.5 km arc-15 site 5 km arc-15 site	2.5 km arc-15 site 5 km arc-15 site	2.5 km arc-30 site
Average sampling time	3 hrs	3 hrs	4 hrs

Table 2. Tracer release rates in experiment periods.

	2002			2003			2004
	April 20 15:02~17:28	May 25 15:00~20:00	May 26 15:08~17:59	May 16 16:30~21:00	May 17 14:31~20:31	May 18 14:30~16:35	April 2 15:46~April 4 06:17
PMCH	1.92 g/hr	2.99 g/hr	3.14 g/hr	16.8 g/hr	29.8 g/hr	40.0 g/hr	74.4 g/hr
m-PDCH	2.20 g/hr	3.42 g/hr	3.59 g/hr	16.8 g/hr	41.9 g/hr	40.0 g/hr	74.4 g/hr

할 공기시료의 수가 너무 과다하게 되는 점과 낮 시간 동안 풍향의 변화가 크지 않았으며, 또한 주간과 야간의 평균적인 확산 특징을 비교하는 목적 등을 고려하려 시료 채취시간을 각각 3시간(2002년, 2003년 실험)과 4시간(2004년 실험)으로 설정하였다.

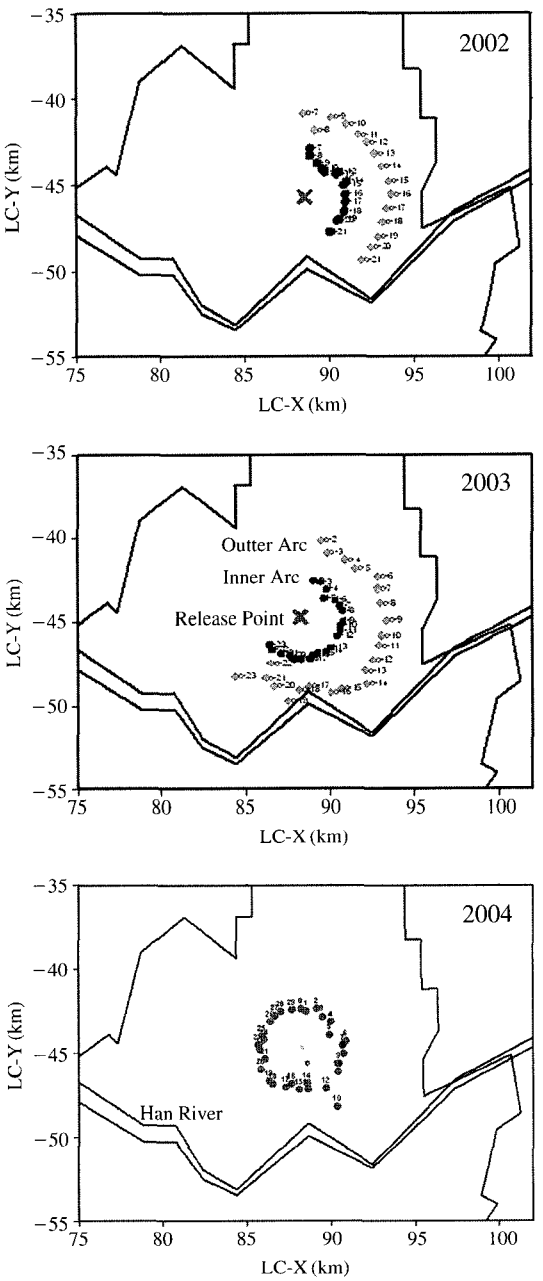

Fig. 1. Release site and sampling sites for the tracer experiments.

2.1.1 실험장소 및 일시

본 연구의 추적자 실험은 2002년의 경우 서울시 동대문구 용두동을 중심으로 2003년부터 2004년까지는 성북구 안암동에 위치한 고려대학교 이과대학을 중심으로 2.5 km와 5 km 내의 원호 상에서 실시하였다. 시료채취지점을 center로부터 2.5~5.0 km ARC를 설정해 준 이유는 대도시 환경인 도시협곡(urban canyon)효과와 불규칙한 확산현상을 파악하기 위해 설정하였다. 그림 1은 2002년부터 2004년까지의 추적자 기체 확산 실험의 대상지역을 나타낸 것이다. X로 표시한 지점은 추적자 기체 방출지점을 나타내며, 추적자 기체의 채취 지점은 내부(●)와, 외부(◆)로 나타내었다. 2003년의 경우 기상상태에 따라 실험 초기에는 북풍이 우세하여 지점 9부터 23까지 내·외부에 위치하도록 하였으나 갑작스러운 바람의 변화로 두 번째 날부터는 추적자 기체 배출지점의 동쪽에 즉, 지점 2부터 16까지 배치하였다.

2.1.2 추적자 기체의 방출

확산실험의 추적자 물질로 많이 사용되는 화합물로는 SF_6와 PFCs (perfluorocarbons)가 있다. 또, PFCs는 여러 종류가 있으며 주로 사용되는 것은 perfluorinated cyclic hydrocarbon류인 PMCH, PDCH, PDCB (perfluoro cyclobutane), PMCP (perfluoromethyl cyclopentane) 등이다.

본 연구에서는 극미량의 공기 중 농도를 분석할 수 있기 때문에 취급이 용이한 PMCH와 PDCH를 추적자 기체로 사용하였으며, 이들 기체는 모두 무색, 무반응성, 무부식성이라는 공통적인 특징을 가지고 있다.

PMCH의 분자량은 350 g/mol으로서 공기에 비해 매우 무거운 기체이며 상온에서는 액체 상태로 존재한다. 이와 같이 상온에서 액체 상태이며 분자량이 무거운 화합물을 기화하여 대기와 완전히 혼합하여 puff의 형태로 방출하기 위해서는 특수한 방출 시스템을 필요로 한다. PMCH의 경우 고온(200°C)에서도 매우 안정하기 때문에 본 실험에서는 고온 방출 시스템을 제작하여 사용하였다(이종범 등, 2004).

2.1.3 추적자 기체의 채취 및 분석

추적자 기체의 채취는 일정유량의 공기를 흡착튜

브에 통과시켜 선택적으로 추적자를 포집하는 방법을 사용하였다. PFCs를 채취하는 경우 흡착제로써 Carboxen-569를 사용하였는데, 이는 흡착능이 매우 우수할 뿐만 아니라 대기 중 수분의 영향을 적게 받아서 전자포획검출기(ECD)를 이용한 분석에서 매우 유용하다. 시료 채취를 위한 sampler는 직접 제작하여 사용하였다(이종범 등, 2004).

추적자 기체로 사용된 PMCH 및 PDCH의 농도 분석을 위하여 PFC의 분리가 가능하고 fluorocarbon류에 대한 감도가 큰 GC/ECD (gas chromatography/electron capture detector)를 사용하였다. 추적자 기체의 정량분석과 분석 시스템의 분석능과 재현성 등을 평가하기 위해서 기체상태의 표준물질이 필요하였다. 1 ppm, 10 ppb, 100 ppt 농도의 PMCH 표준 기체를 표준기체의 제조 장비와 기술을 보유하고 있는 한국표준과학연구원의 물질량 표준부에서 제작하였다. 추적자를 채취한 흡착제에는 추적자로 사용된 PFCs 외에도 ECD에 감도가 큰 산소나 fluorocarbon류 등도 흡착되어 있어 PFCs를 GC/ECD로 정량분석하기 전에 PFCs 만을 재포집하는 과정을 행함으로써 PFCs의 정량분석이 용이하도록 하였다. PFCs 분석 시스템 및 정량분석에 대한 사항은 이종범 등(2004)과 Kim *et al.* (2002)에 상세히 기술되어 있다.

2.1.4 기상측정

추적자 확산실험기간 동안에 지상기상을 측정하기 위하여 추적자기체 방출지점에 기상탑을 설치하여 풍향, 풍속, 기온, 일사량을 측정하였다. 또한 Pilot balloon을 이용하여 상층의 풍향, 풍속을 관측하여 추적자 기체의 확산 방향을 파악하였다.

2.2 모델의 적용

모델의 실행과정은 기상장의 생성을 위해 MM5를 실행시키고 그 결과와 기상측정자료를 이용하여 CALMET을 실행시킨 후 이를 이용하여 CALPUFF를 실행시켰다. 그림 2는 CALPUFF 모델 실행 과정을 나타낸 것이다.

2.2.1 적용모델

확산 모델이 농도를 계산할 때, 기상모델에서 계산되는 자료 중 바람장은 대기오염 물질의 이류 및 확산을 결정하여 농도에 직접적인 영향을 미치기 때문에 중요하다. 본 연구에서는 기상 입력자료를 산출하기 위하여 최근 미국을 포함한 세계 각 국에서 기상예보를 위해 사용하고 있는 MM5 (Mesoscale Meteorological Model version 5) 3-7 version 모델을 사용하였다. CALPUFF 모델은 퍼프모델(Puff model)로 굴뚝에서 연속적으로 배출되는 연기가 잘게 나누어진 각각의 연기덩어리(puff)로 배출된다고 가정하고, 이 배출된 퍼프가 공간적 해상도를 갖는 바람장을 따라서 이동 및 확산이 될 때 퍼프가 미치는 영향을 종합하여 농도를 계산하는 모델이다.

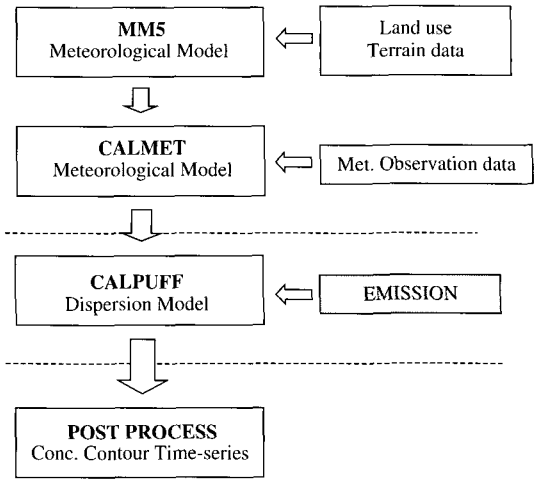

Fig. 2. Processing steps of CALPUFF modeling system.

CALPUFF 모델링 시스템은 CALMET, CALPUFF, CALPOST와 기상과 지형의 전처리 프로그램으로 구성되어 있다.

CALMET의 가장 중요한 기능은 3차원 격자 모델링 영역을 사용하여 매 시간별 바람과 기온자료를 사용하는 기상모델로 MM5의 결과를 사용할 수 있다는 것이다. 이로써, Gaussian 확산모델의 가장 큰 비중을 가지는 기상부분에 대한 정확도를 향상 시킬 수 있다. 또한, 자료 동화가 가능하기 때문에 상층기상자료, 지상기상자료, 강수자료, 지형자료, 토지이용도 등을 이용하여 바람장을 산출한다.

CALPUFF는 이동 · 확산모델로 모델 소스로부터 방출된 물질의 puff를 이류 시키고 확산과 변형 기장을 통해 모사한다. CALPUFF는 CALMET에서 생성된 3차원 기상자료를 이용해 격자별 또는 원하는 지점의 농도를 예측할 수 있는 주프로그램이다(Earth Tech, Inc, 1999). CALPUFF에서 산출된 주요 output

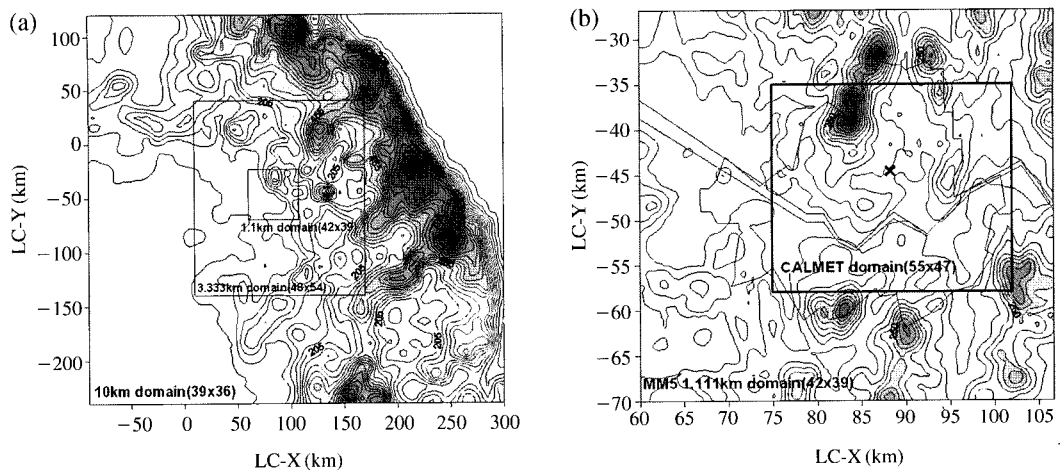

Fig. 3. MM5 nested domain (a) and CALMET (b) modeling domain.

Table 3. Modelling domain for MM5.

DOMAIN	Number of cross point		Grid size (km)	Origine L-C (km)		Number of vertical layer
	x	y		x	y	
DOMAIN 1	191	171	30 km	−2850	−2550	33
DOMAIN 2	24	21	10 km	−30	−150	35
DOMAIN 3	27	21	3.333 km	40	−80	35
DOMAIN 4	27	24	1.111 km	73.333	−60	35

Table 4. Modelling domain for CALMET and CALPUFF simulation.

MODEL	Number of grid cells		Grid size (km)	Origine L-C (km)		Number of vertical layer
	x	y		x	y	
CALMET CALPUFF	55	47	0.5 km	75	−58	12

은 선택된 수용체에서 계산된 시간별 농도 혹은 시간별 deposition flux를 포함한다. 그림 2는 CALPUFF 전체의 흐름을 나타내었다. 본 연구에서는 2006년 4월에 배포된 CALPUFF Version 6.0을 사용하여 모델링 하였다.

2.2.2 MM5 모델의 실행

MM5는 몇 개의 전처리, 메인 및 후처리 과정에 의해 계산된다. 기상자료는 지상에서 상층 50 hPa까지 33개의 연직층으로 구성되어 있으며, 수평격자 간격은 30 km이다. 이 자료는 둥지화 기법을 통해 10 km, 3.333 km, 1.111 km에 대해 모델링을 실행하여 1.111 km의 결과를 CALMET의 입력자료로 이용하였다. 1.111 km 격자영역의 연직층은 35층이며 최하층은 지표면에서 23.6 m까지이다. 본 연구의 MM5 모델링 대상지역은 그림 3-(a)와 같다. 또한, 각각의 수평격자 및 연직층 수는 표 3에 나타내었다.

현재 MM5 모델에서 사용하는 TERRAIN의 경우 USGS (United States Geological Survey)에 의해 과거의 자료를 바탕으로 작성되었기 때문에 실제의 지형과 토지이용도 현황을 제대로 고려하지 못하고 있다. 특히 지형이 복잡한 대상지역의 Height와 LANDUSE의 변화를 제대로 반영하지 못하여 많은 오차를 유발할 수 있다. 따라서 실측과의 오차를 최소화하기 위해 SRTM (The Shuttle Radar Topography Mission)의 3초 지형자료와 환경부의 토지이용도(중분류)를 이용하여 MM5의 실행 과정 중 TERRAIN에서 잘못됐거나 새로 생성된 지형과 시간이 지나며 새로 생성되거나 바뀐 토지이용도를 실제와 유사하게 변화하여 모델을 실행하였다.

2.2.3 CALPUFF 모델의 실행

CALMET의 domain은 그림 3-(b)와 같이 MM5에서 1.1 km에서 사용된 domain영역에 포함되며, 격자간격은 0.5 km로 하였다. 표 4에 CALMET에서 사용한 격자 및 간격을 나타내었으며, CALPUFF의

Table 5. Upper boundary height for vertical layers of the CALMET.

Layer	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Height (m)	20	40	80	160	300	600	1000	1500	2200	3000	4000	5200

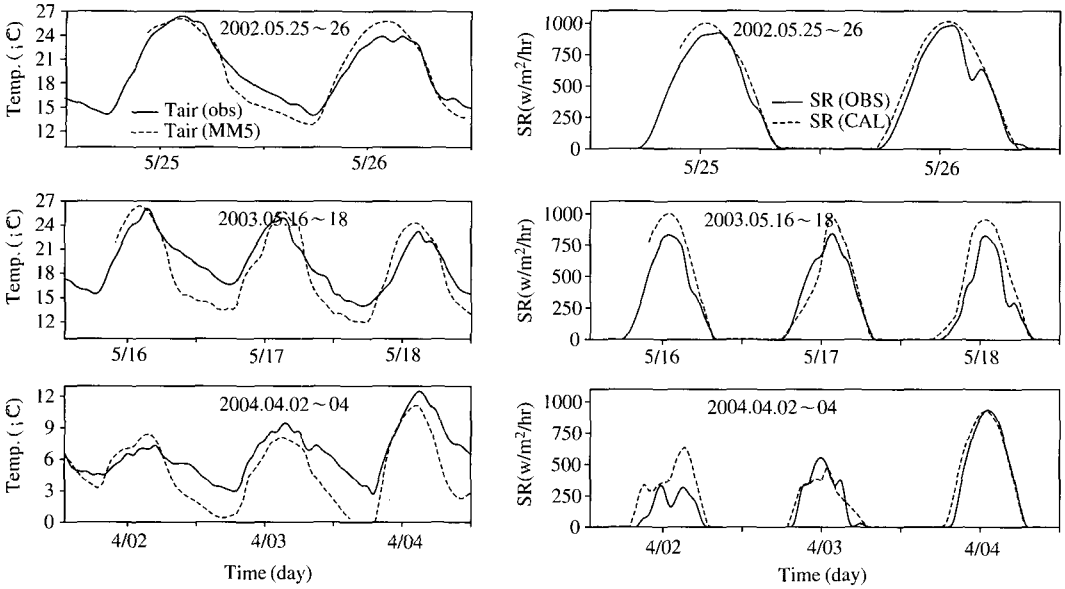

Fig. 4. Comparisons between meteorological variables observed at Seoul meteorological station and calculated by MM5 (left: temp. (°C), right: SR (w/m²/hr)).

domain 역시 CALMET과 동일하게 설정하였다. 수직 격자는 표 5와 같이 12 layer를 사용하였고 첫 번째 층은 지표에서 0 m에서부터 20 m로 하였으며 최고층은 5,200 m 높이까지를 정하였다.

본 연구에서는 기상장의 산출을 위해 MM5를 사용하였다. 그런데 CALMET의 입력자료로 사용하기 위해서는 MM5의 결과를 변환할 필요가 있다. 그 이유는 MM5의 수평격자체계는 Arakawa B grid를 사용하기 때문에 온도, 비습 등의 스칼라 변수는 cross point값에서 동서바람성분(U)과 남북바람성분(V)은 dot point에서 정의된다. 반면 CALMET은 각각의 격자셀의 중심에서 격자값이 정의 되는 non-staggered horizontal grid system을 사용하기 때문이다.

또한 CALMET의 자료동화를 위해 1시간 간격의 지상기상자료와 6시간 간격의 상층기상 자료가 이용되었다. 지상기상자료는 서울기상대와 대상지역전역에 분포되어 있는 30개의 AWS (Automatic Weather Station)지점이 사용되었다. 강수자료는 서울 기상대의 자료를 사용하였고, 상층 기상 자료는 오산(site number: 122)자료를 사용하였다. 우리나라에서 측정되는 상층 자료는 여러 곳이 있지만 본 연구에서 사용하는 모델영역에서 가장 가까운 측정 지점이 오산이기 때문에 오산 자료를 사용하였고, 좌표는 LC-X는 88.354 km, LC-Y는 −101.361 km이다.

지형의 경우 SRTM에서 작성한 Eurasia 3초 해상도의 DEM (Digital Elevation Map) 자료 중 한반도 부분만을 이용하여 500 m 격자의 지형자료를 작성하였고, 토지이용도의 경우 MM5에서 사용한 자료를 CALMET에 맞게 입력하였다. 예를 들어 MM5의 urban은 CALMET에서는 LANDUSE Type 10인 Urban or Built-up Land로 사용하였고, MM5의 water의 경우 CALMET에서는 LANDUSE Type 55인 Large Water Body로 수정하여 모델을 실행하였다(김재철, 2006).

CALPUFF의 경우 크게 네 부분으로 나눌 수 있는데, 시간별 기상자료, 배출량자료, 오존자료 그리고

CALPUFF control file이다. 기상자료는 CALMET의 결과를 사용하였고, 배출량 자료는 추적자 기체를 사용하였다. 오존 자료는 서울 27개 대기오염자동측정망 자료를 평균하여 사용하였다. 그리고 CALPUFF control file은 각 파라미터를 확산실험 당시의 상황에 맞게 적용하여 사용하였다.

3. 결과 및 토의

3.1 기상특징

실제 기상은 대기오염 물질의 이류 및 확산을 결정하는 중요한 요소이다. 대상지역인 서울은 도시열섬 등의 기상현상이 자주 일어나는 대표적인 도시환경을 나타내고 있다(박민호, 2001). 그림 4와 그림 5는 확산실험기간 동안의 실제 서울 기상대에서 측정된 기상요소들의 시계열을 1.1 km domain의 서울 기상대 위치에 해당하는 MM5모델 grid 결과와 비교하여 나타내었다.

2002년 5월 25일의 경우 14시의 기온이 26.3°C로 가장 높았고, 모델 역시 유사한 결과를 보인다. 풍속의 경우 평균 3 m/s의 서풍이 주로 불었다. 2002년 5월 26일의 경우 평균 기온이 18.6°C이었고, 일최고 기온이 실제 기온보다 모델결과가 약 2°C 높게 계산되었다.

2003년 5월 16일의 경우 16~18시의 기온은 평균 22.7°C, 최대 25.6°C이었고 풍향은 평균 281.25°로 서풍계열의 바람이 불었다. 평균 풍속은 2.75 m/s였으며, 최대 4.3 m/s로 17시에 최대 풍속이 나타났고 모델결과 역시 유사한 결과를 보이고 있다. 5월 17일 14~22시의 경우 기온은 평균 21.6°C, 최대 24.9°C를 나타냈다. 풍향은 평균 267.2°로 16일보다 남향으로 치우친 바람이 불었고 풍속은 평균 3.7 m/s, 최대 5.2 m/s로 16일보다 강하게 불었다. 최대 풍속이 나타난 시각은 17시였다. 5월 18일 14시~20시의 경우 기온은 평균 21.7°C, 최대 23.2°C를 나타냈다. 풍향의 경우 273.75°로 서풍이 불었으며 풍속은 평균 3.1 m/s, 최대 3.4 m/s로 17시에 최대 풍속이 나타났다.

2004년의 경우 대체로 날씨가 흐렸으며 낮 평균 기온이 10°C 이하로 낮았다. 4일이 되며 날씨는 점차 맑아졌고 낮 평균 기온이 10.8°C로 높아졌다. 특히 흐린 날 야간 기온의 경우 실제 측정값을 모델이 제대로 모사하지 못하고 있다. 풍속의 경우 평균 3.2 m/s의 바람이 불었고, 최대 6.6 m/s의 강한 바람이 불

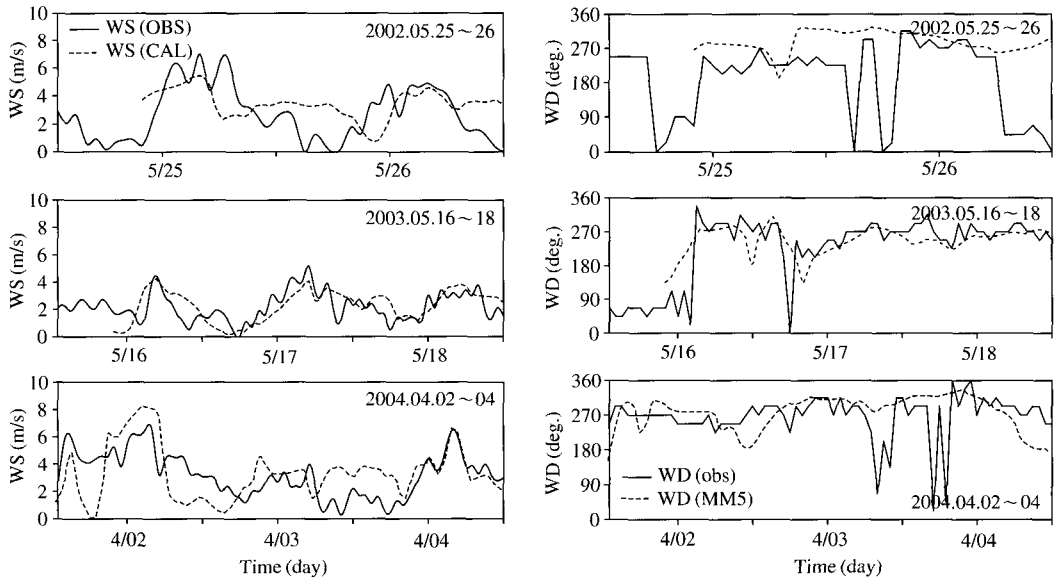

Fig. 5. Comparisons between meteorological variables observed at Seoul meteorological station and calculated by MM5 (left: WS (m/s), right: WD (deg.)).

었다. 모델결과는 대상기간동안 흐린 날씨와 불안정한 대기상태를 모델이 과소평가하고 있다.

3.2 측정농도와 모델결과 비교

분석 대상기간은 실험 자료를 각각 시료채취 간격인 3시간 단위와 4시간 단위로 평균하여 표 6과 같이 8개의 평균화기간으로 정리하였다. 단, PMCH는 2002년과 2003년의 3개 평균한 기간의 자료이다. 모델결과 역시 시료채취간격과 동일한 평균값을 사용하여 비교하였다.

Table 6. Case of episode in study period.

Case	Period	Case	Period
A	2002.5.25 15:00~18:00	E	2004.4.02 16:00~20:00
B	2002.5.25 18:00~21:00	F	2004.4.03 08:00~12:00
C	2002.5.26 15:00~18:00	G	2004.4.03 12:00~16:00
D	2003.5.18 18:00~21:00	H	2004.4.03 16:00~20:00

3.2.1 배경농도

실제 포집된 추적자 기체(PMCH, PDCH)와 CALPUFF의 농도를 비교하기 위하여 단위환산과 배경농도를 설정하였다. 농도단위의 경우 fL/L의 크기로 일치 시켰고, 배경농도의 경우 모델결과를 참고하여 추적자 plume이 통과하지 않았다고 생각되는 지점들의 농도를 평균하여 평균값을 시간대 별로 구한 후 전체 기간으로 평균하여 배경농도를 구하였다. 배경

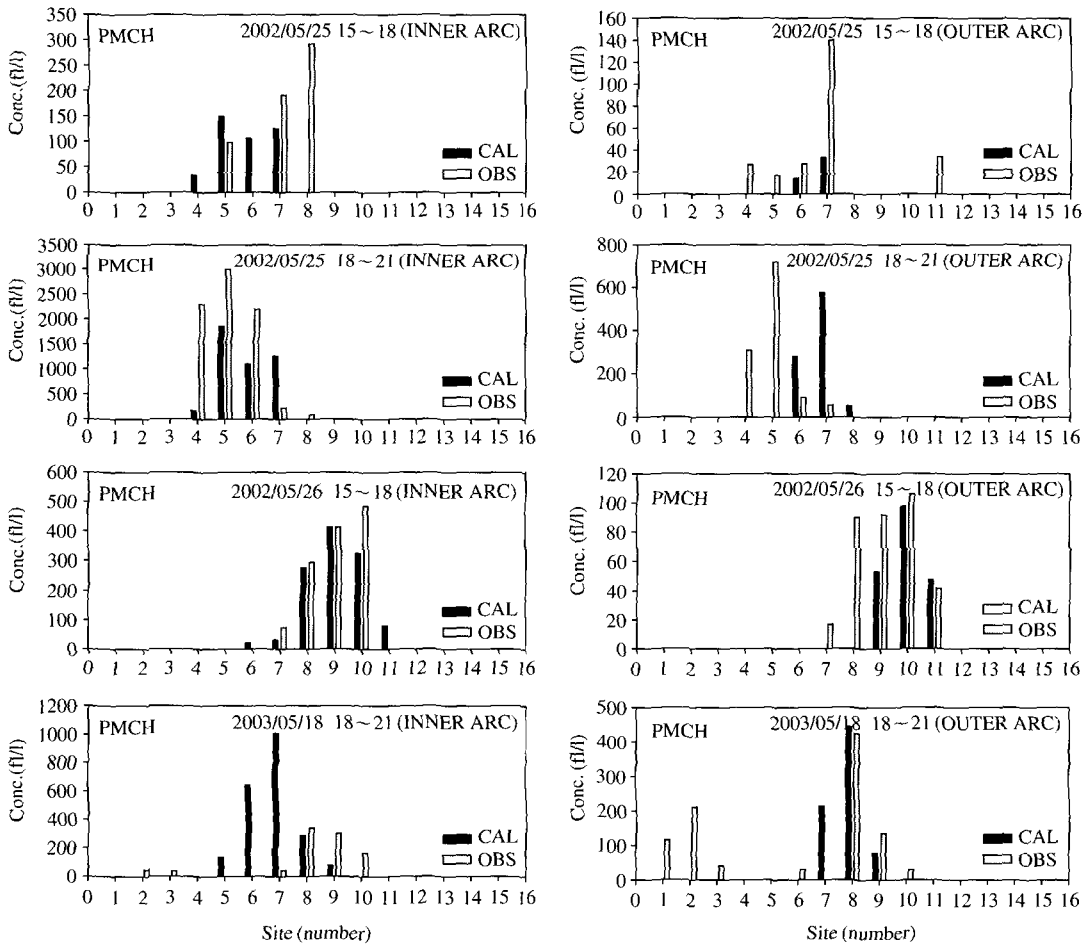

Fig. 6. Comparison between measured and calculated PMCH concentrations in 2002 and 2003.

농도는 PMCH가 8.7 fL/L이고, PDCH는 6.3 fL/L이었다. 따라서 실측치에서 배경농도 값을 뺀 나머지를 방출된 추적기체의 실제 농도(fL/L)로 간주 하였다. 단, plume과 무관한 지역에 배경농도 이상 남아 있는 작은 값들은 무시하여 0으로 하였다.

3.2.2 시료 채취지점에서의 측정값과 CALPUFF 모델 농도 비교

CALPUFF는 미리 지정된 격자점에서의 농도 뿐 아니라 임의의 좌표 지점에서의 농도도 계산해 준다. 이를 이용하여 30개의 추적자 기체의 채취 지점에서의 농도를 계산하여 그래프로 나타내었다. 그림 6부터 그림 8은 각 지점에서 채취된 추적자 기체의 농도와 CALPUFF 모델 결과를 배경농도를 뺀 후 비교한 것이다. 그림 6은 A부터 D case의 각각 지점에서 채취된 PMCH와 모델결과를 나타낸 것이다. 여기서 내부원호(INNER ARC)와 외부원호(OUTER ARC)를 나누어서 비교하였다. PMCH의 경우 C case에서 실측과 모델 결과가 가장 유사한 것을 볼 수 있다. D case의 경우 실제 결과 보다 약 20° 정도 남동쪽으로 농도 분포가 기운 모습을 볼 수 있고, 확산되면서 외부 원호상의 1, 2, 3번 Site에 나타난 실측농도를 모델은 계산하지 못하고 있다.

그림 7은 PMCH와 동일한 조건에서 m-PDCH의

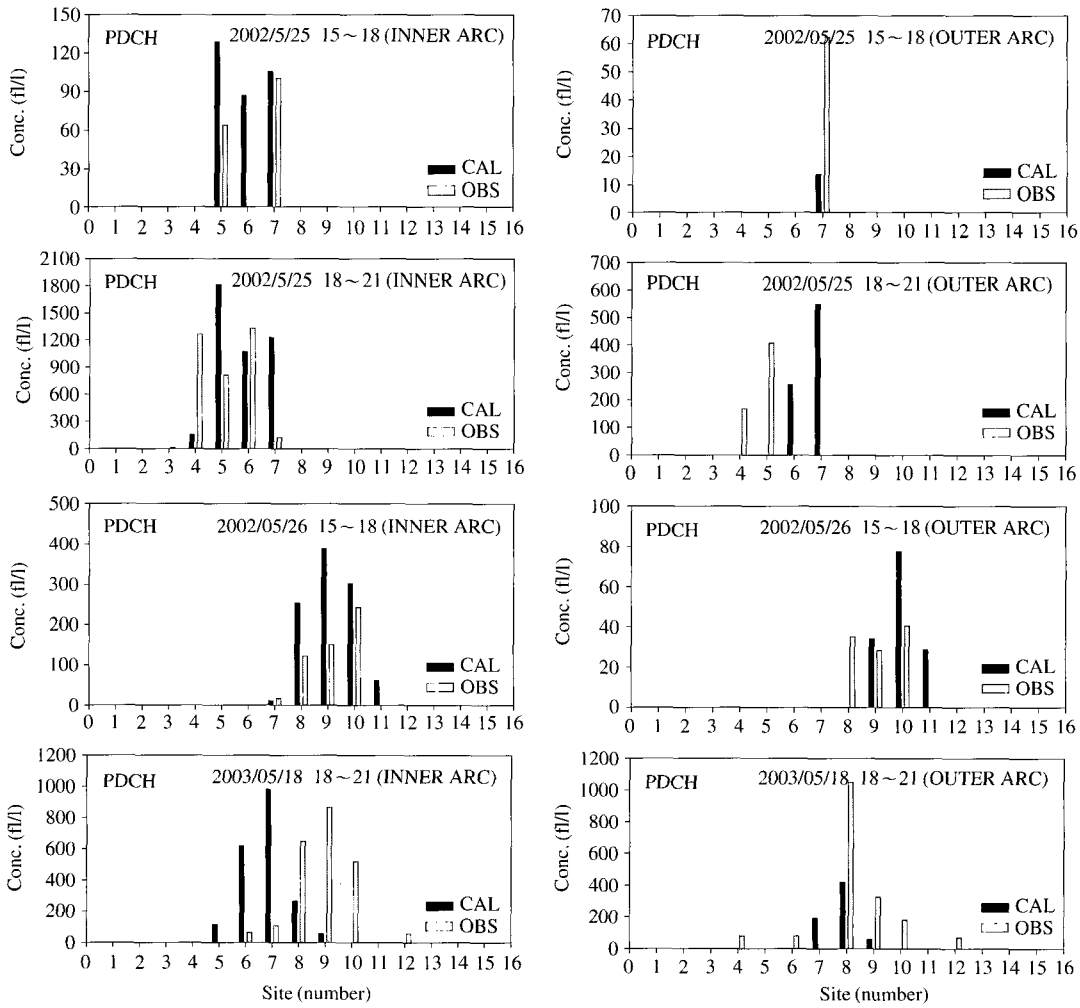

Fig. 7. Same as Fig. 6, but for PDCH.

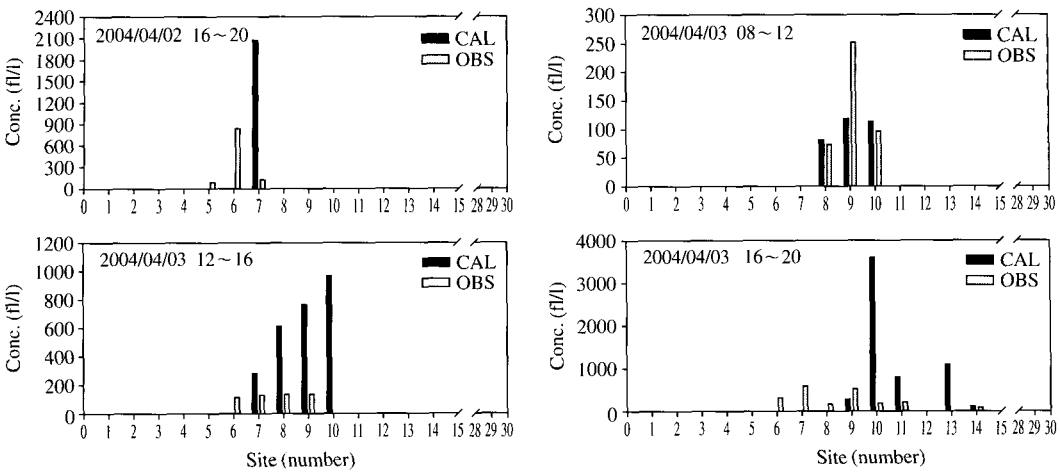

Fig. 8. Same as Fig. 6, but for PDCH in April 2004.

농도를 비교한 것이다. PMCH의 단위는 fL/L이고, PDCH는 mt, mc, pt, pc 등 4가지 기하이성질체가 섞여 있기 때문에 그 중 가장 많은 양이 포함되어 있는 mtPDCH의 농도를 분석하였다. 그러나 농도 계산에 필요한 mtPDCH만의 표준기체 제작이 불가능하여 mtPDCH의 농도는 chromatogram에서 얻은 mtPDCH의 peak area를 총유량으로 나눈 값으로 사용하였다. PDCH와 PMCH는 혼합하여 방출하였으므로 PDCH와 PMCH의 농도 Peak가 나타나는 위치는 동일하여야 한다. 그림 6의 PMCH와 그림 7의 PDCH 농도 분포는 대체로 유사하지만 D case에서는 외부 원호 1, 2, 3 site에서 뚜렷한 차이가 있으며 모델 결과도 이 site의 농도가 0이므로 실험 과정 중에 이지점 공기 시료가 PDCH에 오염된 것으로 추정된다. 그림 8은 2004년의 경우(E~H case)로서 기체 방출 지점으로부터 2.5 km 원호상에서의 m-PDCH 농도에 대하여 실제 측정값과 모델결과를 비교하였다. 실제 측정값과 모델결과는 고농도가 나타난 site에서 대체로 유사하였지만 농도는 큰 차이를 보이고 있다.

3. 3 수평농도 분포

CALMET에 의해 모사된 바람장과 CALPUFF에 의해 모사된 모델농도 결과를 수평분포를 통하여 그림 9부터 그림 12까지 나타내었다. CALMET에 의하여 모사된 바람장은 실험기간 동안 주로 서풍 계열이었다.

그림 9의 경우 각각 실제 peak가 나타난 7번과 5번 Site방향으로 puff가 지나가는 것을 볼 수 있다. 그림 10의 경우 2002년 5월 26일의 오후(C case)의 PDCH의 농도를 나타낸 것인데 동쪽 Site에서 peak가 나타난 실제 농도를 puff의 모양도 모사하고 있다. 2003년 5월 18일의 경우 해풍의 영향을 받아서 PDCH의 농도가 동쪽에 나타나고 있다. 그림 11과 그림 12는 2004년의 PDCH의 농도를 4시간씩 평균한 결과를 나타내었다. 그림 12의 경우 낮은 풍속과 큰 풍향 변동에 의하여 계산농도는 비교적 넓게 분포되었다. 여기서 확산 등의 모델 결과를 비교할 때 해당 지역의 일반적인 경향을 보기위한 평균화 시간은 적절하지만, 본 연구의 경우 도시지형의 다양성과 대상영역의 수평규모가 수 km이므로 보다 국지적인 확산현상을 모사하기 위해서는 기상자료의 시간간격이 1시간 보다 짧은 간격의 자료를 이용한 모델링이 요구 된다.

3. 4 CALPUFF 모델의 평가

대기질 모델 결과를 평가하는 가장 좋은 통계적 분석 방법은 "무엇이다" 라고 정의 할 수 없으며 (Chang and Hanna, 2004), 경우에 따라 여러 가지 통계적 방법이 모델을 평가하기 위하여 사용된다(Yu Song *et al.*, 2006). 본 연구에서는 표 7에 제시한 6가지 통계 방법을 사용하여 모델을 평가하였다.

통계 결과에서 r값의 경우 1.0에 가까울수록 모델

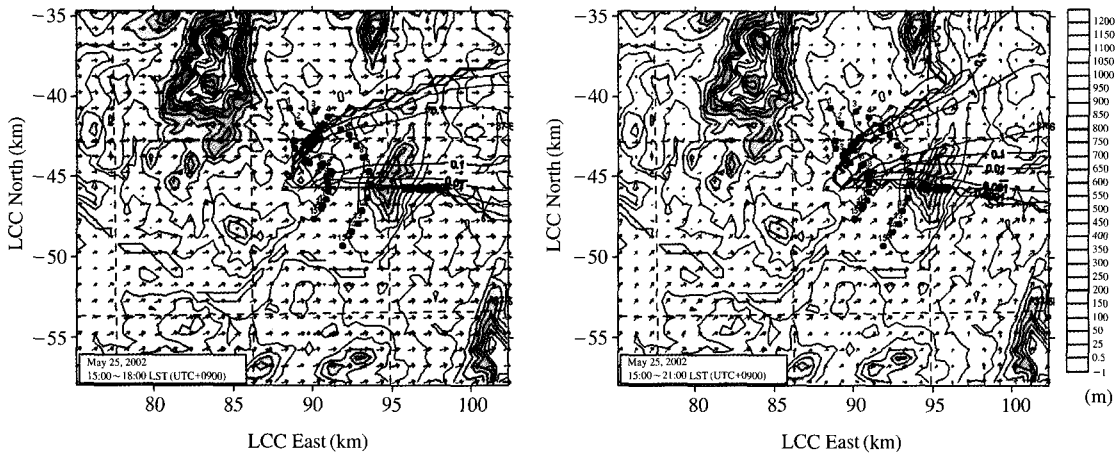

Fig. 9. Horizontal distributions of PDCH concentration (fL/L) calculated by CALPUFF on period 15～18 LST (left) and 18～21 LST (right) May 25, 2002. Arrows represent wind field calculated by CALMET.

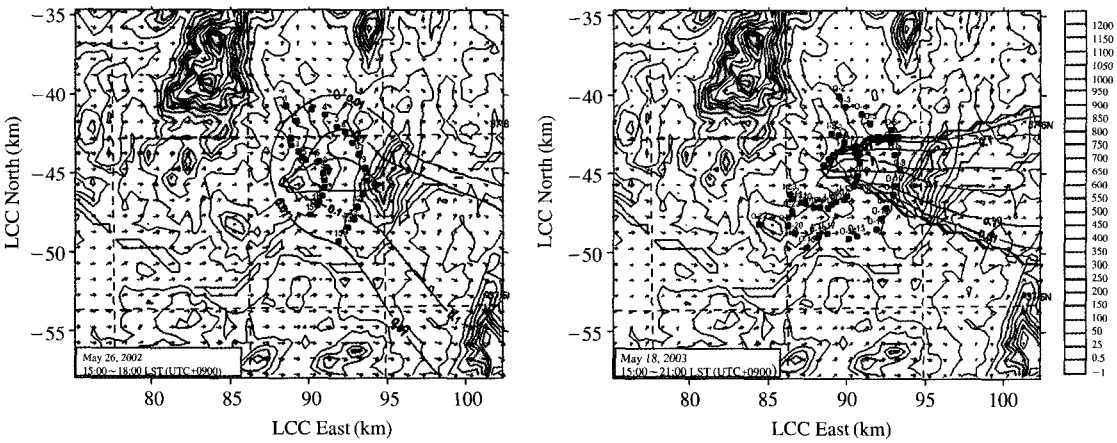

Fig. 10. Same as Fig. 9 but for the period 18～21 LST May 25, 2002 (left) and the period 18～21 LST May 18, 2003 (right).

의 결과가 신뢰성이 있고, 표준화 평방근오차(RMSE)의 경우 직선회귀식에 의해 systematic과 unsystematic components로 나뉘며, 실측값의 기울기를 기준으로 실측과 예측 값의 산포도를 살펴보았다(Willmott, 1982). 편차(Bias)의 경우 관측과 측정 농도의 잔차를 정의 하는 오차평가 방법이며, 평균편차(MB)와 부분편차(FB)로 나눠 살펴보았다.

표 8은 각각의 시료채취시간과 동일한 모델 평균값을 이용하여 전체 실험 기간에서 농도가 검출되었거나 모델결과 농도가 0 이상으로 나타난 전 지점을 대상으로 하여 측정농도와 모델농도를 비교한 것이다.

r값의 경우 PMCH가 PDCH보다 높은 값을 보였으며, Bias에서 PMCH의 모델 결과가 실측에 비해 과소평가 되는 결과를 보여주고 있다. RMSE의 경우 systematic-RMSE와 unsystematic-RMSE를 비교했을 때 PMCH의 경우 직선회귀선상에 고루 퍼져 있는 분포를 보이고 있으며, PDCH의 경우 모델결과와 다소 큰 차이를 보이고 있다.

이상의 오차 평가결과를 보면 풍향 10°내지 20°

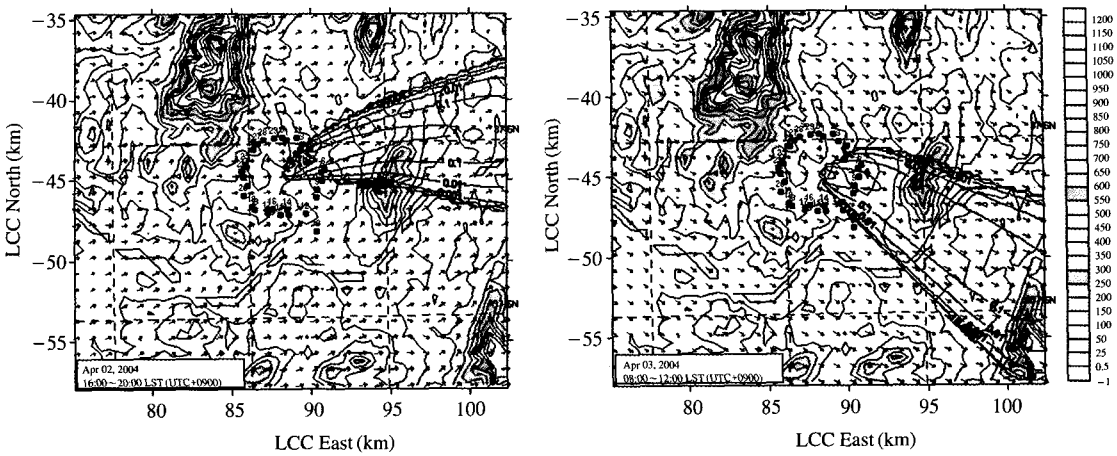

Fig. 11. Same as Fig. 9 but for the period 16～20 LST Apr, 02, 2004 (left) and the period 08～12 LST Apr, 03, 2004 (right).

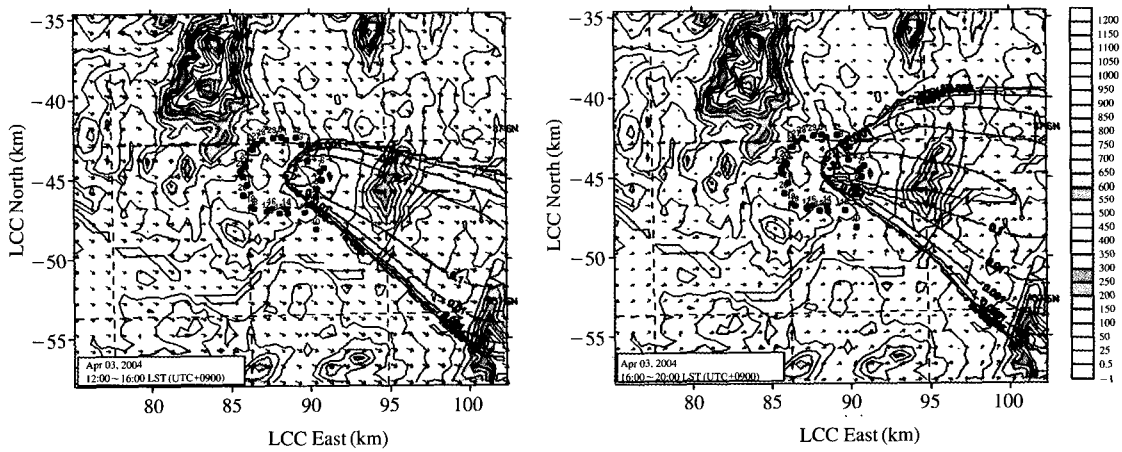

Fig. 12. Same as Fig. 9 but for the period 12～16 LST Apr, 03, 2004 (left) and the period 16～20 LST Apr, 03, 2004 (right).

정도의 크지 않은 오차에 의해서도 CALPUFF 모델의 오차는 매우 크게 평가 될 수 있다. 모델 오차의 주요인은 수평확산, 풍속, 연직확산의 3가지로 사료된다. 그러므로 풍향의 계산 오차에 의한 영향을 상쇄시키고 그 이외의 오차요인을 파악하기 위하여 측정결과와 모델결과에 대하여 매 평균화 기간 별로 내부원호와 외부원호(2004년의 자료는 내부원호임)의 농도 평균값을 구하여 비교한 결과는 그림 13과 같다.

원호상의 농도를 평균함으로서 수평확산의 오차는 상쇄되고 풍속 효과와 연직확산의 효과를 알 수 있다. 그림에서 1:1 직선상에 근접한 것은 매 평균화기간 별로 연직방향의 확산계수 σ_z가 실제 일어난 연직확산에 유사한 결과로 볼 수 있다. PMCH의 경우 대체로 유사하게 나타났으며, PDCH의 경우 모델농도가 현저히 높은 평균화기간이 2회 있었으며 이 경우 σ_z가 실제보다 작게 계산되었기 때문으로 사료된다.

3. 5 Case별 대표 방위

대표방위란 연기의 중심축(plume center)를 구하기 위한 것으로서 농도분포상의 최고농도 방향 또는 농

도가 검출된 여러 지점의 중간 방향이 아닌 농도 값을 가중 평균한 방향을 나타낸 것이다.

그림 14는 확산실험 기간 동안 실시한 Pibal 관측 자료의 대표 방위와 CALPUFF 모델 결과와 PDCH 실측값, MM5, CALMET에서 시간대별로 대표 방위를 나타낸 것이다. 여기서 고도에 따른 지상풍의 영향을 줄이기 위해 모델의 경우 각각 모델의 최하층(MM5: 11.8 m, CALMET, CALPUFF: 10 m)의 결과를 사용하였고, 시료채취 지점의 측정 높이는 건물옥상(10 m ~ 15 m) 높이에서 방위를 구하여 비교하였다. Pibal의 경우 고도에 따라 지속적으로 상승하므로 측정된 고도는 추적기체가 확산된 고도보다 높다. 하지만 확산실험 당시의 직접적인 풍향 · 풍속의 자료로서 제시하였다. 측정된 PDCH 농도와 모델에 의한 PDCH의 대표방위(representative direction: RDIR)는 다음 식(1)과 같이 Site의 농도에서 배경농도를 뺀 후 양의 농도 값만으로 구하였다(박상남, 2005).

$$RDIR = \frac{\sum_{i=1}^{n} Ci \times Di}{\sum_{i=1}^{n} Ci} \quad (1)$$

여기에서 Ci는 각 시료 채취 지점의 PDCH 농도이며, Di는 시료채취 지점의 방위각, n은 시료채취 지점 중 배경농도 보다 농도가 높은 지점 수이다. 또한 Pibal 관측 자료의 경우 시간대별로 측정한 풍향 자료를 산술평균한 후 바람의 방향에서 180을 뺌으로

Table 7. The statistical treatment methods for the comparison of data.

Correlation coefficient	$r=\frac{\overline{(c_o-\bar{c}_o)(c_p-\bar{c}_p)}}{\sigma_{c_o}\sigma_{c_p}}$
Root Mean Square Error (RMSE)	$RMSE=\sqrt{\frac{1}{N}\sum_{1}^{N}(C_P-C_O)^2}$
	$RMSEs=\sqrt{\frac{1}{N}\sum_{1}^{N}(C^*-C_O)^2}$
	$RMSEu=\sqrt{\frac{1}{N}\sum_{1}^{N}(C^*-C_p)^2}$ $C^*=a+bC_O$
Fractional Bias (FB)	$FB=\frac{\bar{C}_p-\bar{C}_o}{0.5(\bar{C}_p+\bar{C}_o)}$
Mean Bias (MB)	$MB=\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(C_p-C_o)$

C_p: predicted concentration, C_o: observed concentration

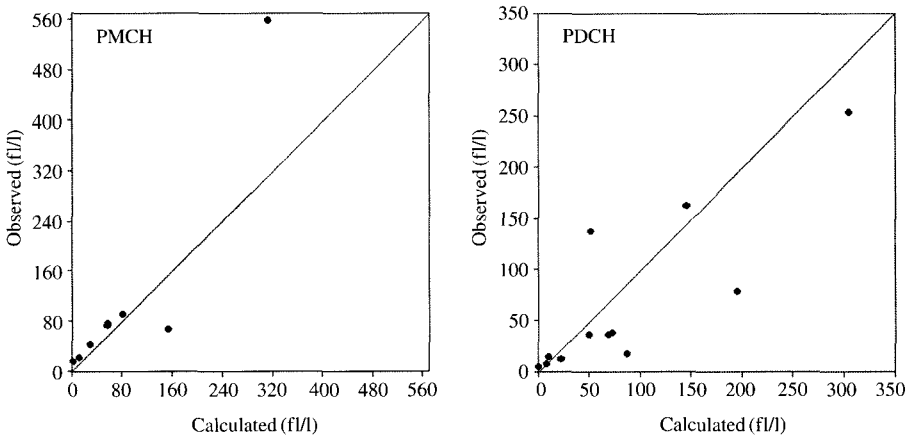

Fig. 13. Comparisons between averaged along arc. observed and calculated. *PMCH* (left) and *PDCH* (right).

Table 8. Statistical measures of model performance (PMCH).

CASE	No. of data	r	RMSE	RMSEs	RMSEu	FB	MB
PMCH	117	0.673	302.85	232.77	193.75	−0.287	−28.58
PDCH	237	0.310	336.20	83.39	325.70	0.405	28.68

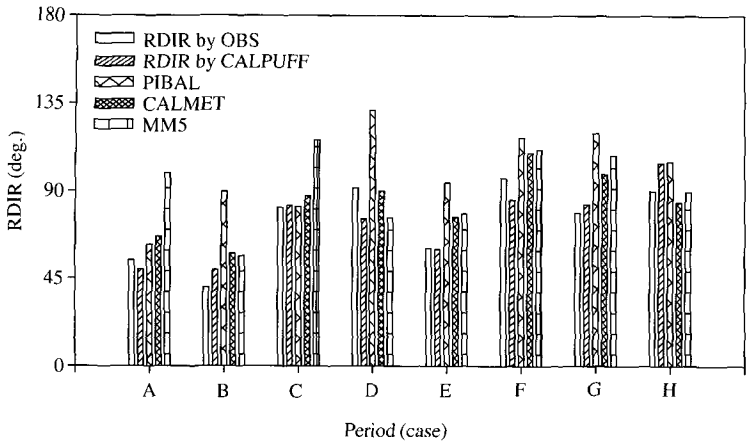

Fig. 14. Comparison of representative directions.

써 RDIR을 구하였으며, CALMET과 MM5의 경우 배출지점에서의 값을 읽어서 Pibal과 마찬가지로 180을 뺌으로써 RDIR을 구하였다.

Pibal 방위의 평균값은 100° 내외로 나타났으며, MM5의 풍향과 CALMET의 풍향을 비교했을 때 1시간별 AWS (Auto weather system)자료와 서울기상대의 풍향을 내삽해준 CALMET의 결과가 MM5의 결과 보다 실측값에 가깝게 나타났다. PDCH의 실측값과 모델값을 비교하면 각각 평균(74.3°)과 평균(73.8°)의 매우 유사한 결과를 나타내고 있다. C case에서 Pibal을 제외한 모든 대표방위가 일치하는 값을 나타내었고, 실험기간동안 북서서 방향의 대표방위가 주로 나타났다.

4. 결 론

본 연구의 추적자 확산실험 측정농도 분석결과, PMCH와 PDCH의 농도는 방출지점인 용두동과 고려대의 동쪽에서 각각 고농도가 나타났으며, 복잡한 도시와 도로망으로 이뤄진 도심에서의 fine-grid CALPUFF 모델결과가 확산 현상을 대체로 잘 모사했다. 하지만 경우에 있어서 모사결과와 동떨어진 농도분포를 보이는 경우가 있었다. 이는 불규칙한 건물 배치와 기상으로 인해 모델로서 한계가 있고, 이런 모사에는 개개 건물에 의한 바람장을 상세히 계산할 수 있는 모델을 적용할 필요가 있다고 사료된다.

또한 CALMET의 기상자료 내삽을 통하여 MM5 결과에서 오차가 생길 수 있었던 부분이 상층 및 지상기상자료 등이 포함되면서 모델의 모사능력 향상을 확인할 수 있었다. 풍향의 경우 서풍의 바람장을 잘 모사하여 추적자 실험이 이루어진 시간대에는 서풍계열의 바람이 주된 풍향으로 모사되었다.

RDIR의 경우 실제 PUFF 방향과 모델에서 계산된 주풍향이 유사한 값을 보이고 있으며, 이런 결과는 다소 복잡한 지형과 도시기후에서의 확산현상을 CALPUFF모델이 비교적 잘 모사하는 것을 확인하였다.

반면, 기상상태가 불안하고, 흐린 날의 기상모델 모사에는 한계가 있었고, 이런 날의 기상모사를 위한 physical parameter에 대한 연구가 필요하다.

이러한 연구결과는 확산모델을 도심지역에 적용할 때 확산 모델의 현장평가에 참고 될 수 있을 것이라 기대된다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구(0101037-1-2)지원으로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

김재철(2006) CALPUFF 모델을 이용한 동해시 지역의 산

악지형하에서 대규모 점 오염원에서 배출되는 NO_x의 확산현상 모사, 강원대학교 대학원 석사논문.

박민호(2001) LANDSAT TM 열적 외 데이터를 이용한 도시열섬현상에 관한 연구, 대한토목학회지, 21(6), 861-874.

박상남(2005) 도심지에서의 추적자 확산실험에 의한 CALPUFF 모델의 검증, 강원대학교 대학원 석사논문.

이종범, 강인구(1989) 단일배출원 대기오염 단기모델에 관한 연구, 한국대기보전학회지, 5(2), 84-96.

이종범, 김 산, 김용국, 조창래, 유승도(1996) 추적자 확산실험에 의한 야간 강안정층 하에서의 가우시안 퍼프모델의 평가, 한국대기보전학회지, 12(5), 529-540.

이종범, 이강웅, 노철언, 김혜경(2001)「대기오염물질 장거리 이동 이해를 위한 추적자 확산 실험」최종보고서, 국립환경연구원.

이종범, 이강웅, 노철언(2004)「추적자 확산실험에 의한 대기오염물질의 도시규모 확산 현상 연구」최종보고서, 한국과학재단.

Chang, J.C. and S.R. Hanna (2004) Air quality model performance evaluation, Meteorology and Atmospheric Physics, 87(1-3), 167-196.

Earth Tech, Inc (1999) CALMET model version 5.0 : A User's Guide for the CALMET, CALPUFF Dispersion Model.

Kim, H., S.K. Yea, C-U. Ro, C.B. Lee, M. Jang, G. Lee, E. Yoo, and J-S. Han (2002) Determination of atmospheric perflourocarbon background concentrations of fL/L range at the western coastal area of Korea, Bull. Korean Chem. Soc., 23, 301-309.

Song, Y., M. Zhang, and X. Cai (2006) PM10 modeling of Beijing in the winter, Atmospheric Environment, 40, 4126-4136.

Willmott, C. (1982) Some comments on the evaluation of model performance, Bulletin of the American Meteorological Society, 63, 1309-1313.