

## METREX 확산실험 자료를 이용한 INPUFF모델의 평가

### Evaluation of INPUFF Model Using METREX Tracer Diffusion Experiment Data

이 종 범\* · 송 은 영 · 황 윤 성  
강원대학교 자연과학대학 환경과학과  
(2002년 1월 24일 접수, 2002년 9월 23일 채택)

Chong Bum Lee\*, Eun Young Song and Yun Sung Hwang  
*Department of Environmental Science, Kangwon National University, Chunchon 200-701, Korea*  
(Received 24 January 2002, accepted 23 September 2002)

#### Abstract

The Metropolitan Tracer Experiment (METREX) was performed over the Washington, D.C. area using two inert, non-deposition perfluorocarbon gases for over 1 year period (November 1983 ~ December 1984). Two perfluorocarbon gas tracers (PDCH, PMCH) were released simultaneously at intervals of every 36 hours for 6 hours, regardless of the meteorological conditions in metropolitan area. Samples were collected continuously for 8 hours at a central downtown and two adjacent suburban locations. Monthly air samples were collected at 93 sites across the whole region (at urban, suburban, and rural locations).

The purpose of this study is to simulate INPUFF and ISCST model using METREX data, and to compare calculated and observed concentrations. In the case of INPUFF simulation, two meteorological input data were used. One is result data from wind field model which was calculated by diagnostic wind model (DWM), the other is meteorological data observed at single station. Here, three kinds of model calculation were performed during April and July, 1984; they include (1) INPUFF model using DWM data (2) INPUFF model using single meteorological data (3) ISCST model.

The monthly average concentration data were used for statistic analysis and to draw their horizontal distribution patterns. Eight-hour-averaged concentration was used to describe movement of puff during the episode period. The results showed that the concentrations calculated by puff model (INPUFF) were better than plume model (ISCST). In the case of puff model (INPUFF), a model run using wind field data produced better results than that derived by single meteorological data.

**Key words** : puff model, tracer experiment, diffusion model

#### 1. 서 론

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

최근 쓰레기 처리에 있어서 소각처리의 비중이

높아지면서 소각장 건설이 활발하지만, 소각장 건설은 다이옥신과 같은 유해물질 배출이라는 새로운 환경문제를 야기한다. 또한, 대표적인 대규모 점오염원인 화력발전소도 대기질 악화를 우려하는 주민들의 반대로 입지를 선정하는데 어려움을 겪고 있다. 그러므로 실제 소각장이나 발전소 건설에 따른 대기질 악화 정도를 정확히 예측할 필요성이 있다. 이와 같은 목적에 적합한 대기오염확산모델을 선택하고 개선해 나가야 한다.

대기오염 예측을 위하여 사용되고 있는 확산모델 중 Gaussian 확산모델은 계산 과정이 비교적 간단하고 입력자료의 수집이 용이하므로 널리 사용되고 있으나, 여러 가지 제한점으로 인하여 모델의 계산 결과는 실제와 크게 다를 가능성이 있다. 확산모델 중 Gaussian plume 모델은 배출량과 기상조건이 시간에 따라 변화하지 않는 정상상태(steady state)를 가정하는 모델인 반면, Gaussian puff 모델은 시간에 따른 풍향, 풍속의 지역차이를 고려할 수 있으며 시간에 따른 퍼프의 배출량 변화도 고려할 수 있으므로 비정상 상태에서에서도 적용할 수 있는 유용한 모델이다.

최근 들어 인체에 무해하고 대기 중에서 화학반응을 일으키지 않는 추적기체를 이용한 확산실험을 통해 기존의 대기오염 확산모델 등에 대한 평가 및 개선이 많이 이루어지고 있으며, 특정 지형을 대상으로 한 확산실험도 종종 이루어지고 있다(이종범 등, 1989, 1996, 2001).

대부분의 추적자 확산실험들은 여러 가지 제한점으로 인해 실험기간이 비교적 짧았으나 METREX (Metropolitan Tracer Experiment; Roland R. Draxler, 1985)는 NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration)에서 실시한 확산실험으로써 Washington D.C.를 중심으로 1년여 동안 장기간 수행하였다. 이 확산실험은 다양한 기상조건을 포함하고 있으므로 모델을 평가하기 위해서는 매우 유용한 자료로 생각된다.

본 연구에서는 METREX 자료를 이용하여 Gaussian puff식을 사용하는 INPUFF (INtegrated PUFF version 2.5)모델과 Gaussian plume 모델로서 미국 EPA에서 추천하고 있는 여러 모델 중 자주 사용되는 ISC (Industrial Source Complex model version 3.0) 모델을 평가하고 점오염원에 의한 주변 대기오염농

도 산출을 목적으로 하는 경우 퍼프모델의 유용함을 보이고자 한다. INPUFF모델은 이종범 등(1996)이 단기간동안 기상조건이나 배출량의 시간변화가 큰 비정상상태에서 유용성을 보인 바 있으며, 본 실험에서는 더욱 장기간의 자료로 평가하고자 한다.

## 2. 방 법

### 2.1 METREX 확산실험 개요

확산실험은 미국 Washington D.C. 지역에서 1983년 말 경부터 1984년 말까지 1년여 동안에 걸쳐 실시되었으며, 추적자로는 perfluorocarbon gas인 PMCH (perfluoro-methyl-cyclohexane)와 PDCH (perfluoro-dimethyl-cyclohexane)를 사용하였다. Tracer gas는 서로 다른 2지점에서 2종의 tracer gas를 36시간마다 6시간동안 동시에 방출(방출시작시각은 10:00 또는 22:00 EST)하였다. 실험기간 동안에 3지역에서 8시간 간격으로 1년간 지속적으로 시료를 채취하였으며, 도심 및 교외 전역에 분포되어 있는 93개 지점에서는 14개월 동안 한달 간격으로 연속적으로 시료를 채취하여 월평균 농도를 산출하였다. 그림 1은 추적자 기체 방출지점(1601, 1602, 1603)과 8시간 간격으로 1년간 공기시료를 포집한 지점(1701, 1702, 1703)을 나타낸 것이다. PDCH는 지점 1603에서 방출하였으며, PMCH는 1983년 11월부터 1984년 5월까지의 지점 1602에서, 1984년 6월 이후에는 지점 1601에서 방출하였다. 본 확산실험 기간중의 기상자료는 5개의 기상탑을 설치하여 두 층에서의 기상요소를 측정된 자료와 2개 공항에서 측정된 기상자료, 9개소의 기상 관측소 자료가 있다. 이 중에서 5개의 기상탑에서 측정된 기상자료 중 2개소의 자료는 결측치가 많고 신뢰성이 결여되어 있으므로 본 연구에서는 사용하지 않았다. 그림 2는 두 공항(◆)의 위치와 9개 기상관측소(▲) 그리고 3개의 기상탑(▼) 위치를 나타낸 것이다. 이들 자료는 미국 해양 대기청(NOAA)의 Web site에서 download 하였다.

표 1은 확산실험에 사용된 3가지 추적자 기체(PMCP, PMCH, PDCH)의 특성을 나타낸 것이다. 배경 농도는 PDCH가 PMCH에 비하여 높았으므로, 방출율은 PDCH는 300 g/h로 하고, PMCH는 100 g/h

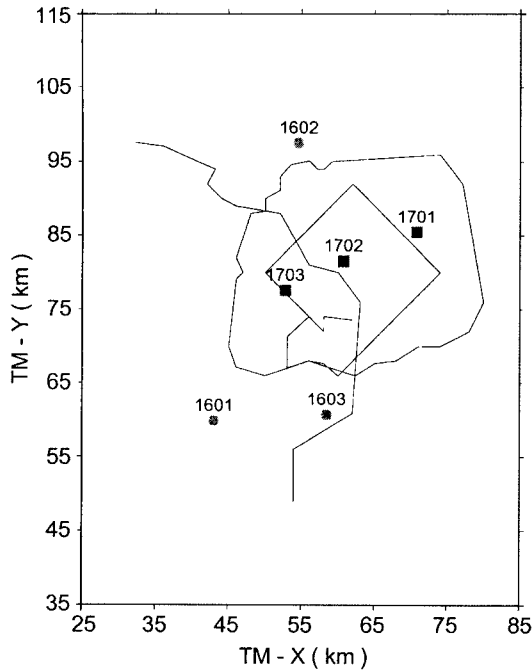


Fig. 1. Location of tracer release sites (●), sampling sites (■).

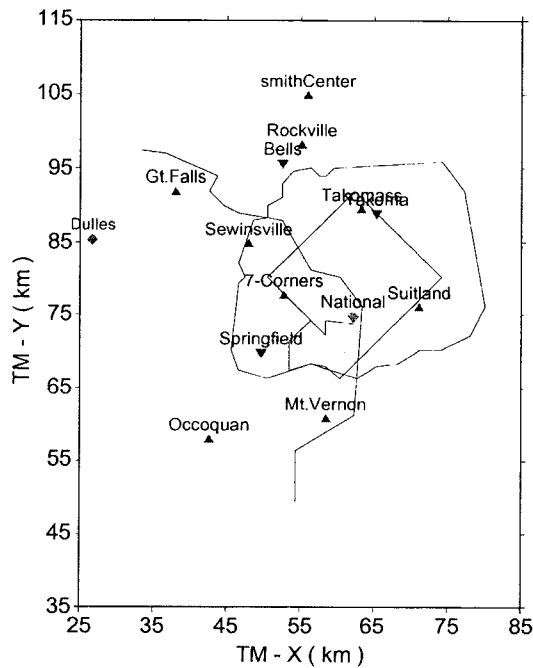


Fig. 2. Location of meteorological observation sites.

Table 1. Technical data of Perfluorocarbon tracers.

	Perfluoro		
	Methylcyclo-pentane	Methylcyclo-hexane	Dimethylcyclo-hexane
Abbreviation	PMCP	PMCH	PDCH
Boiling (°C)	48	76	102
Freezing (°C)	-45	-30	-70
Density (kg/l)	1.6	1.79	1.83
Vapor pressure (mb)	300	141	48
Heat of vaporization (KJ/kg)	85	85.9	82.9
Molecular weight (g/mole)	300	350	400
Purity (%)	90	97	97
Contamination (%)	0	0.03	0.15
Background (f/l <sup>+</sup> )	2.3	3.0	22

<sup>+</sup>f (Femto) = 10<sup>-15</sup>

로 계획하였다. 실제 방출율은 그림 3에 보인 바와 같이 시간에 따라서 변동하였으므로 모델 입력자료는 실제 방출율을 사용하였다.

## 2. 2 적용모델

### 2. 2. 1 INPUFF 모델

#### (1) 개요

퍼프모델은 굴뚝에서 연속적으로 배출되는 연기를 작게 잘라서 각각의 연기덩어리(puff)를 이동, 확산시켜서 농도를 계산한 후 모든 연기덩어리의 농도를 종합하여 대상지역의 농도분포와 시간변화를 계산하는 모델이다(이종범 등, 1996). INPUFF (Gaussian Integrated Puff Model) 모델은 비정상 상태와 바람분포가 균일하지 않은 상태에서 오염물질

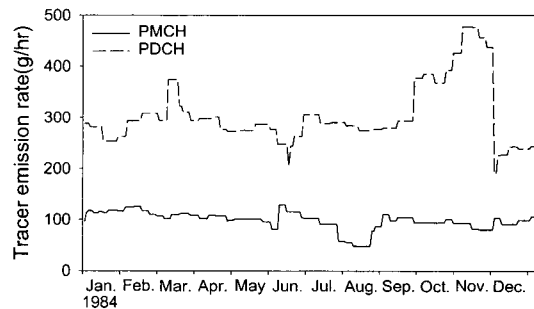


Fig. 3. Variation of PMCH and PDCH tracer release rates.

의 추정에 유용하다. 또한, 고정 배출원이나 선박과 같은 이동 배출원에 대한 계산이 가능하며 수평 및 연직확산폭의 산출은 프로그램 상에서 사용자가 선택하여 사용할 수 있도록 되어있다.

INPUFF에서는  $\sigma$ 를 계산하는데 3가지 방법을 이용하는데 단거리 확산일 경우 사용자는 Pasquill-Gifford scheme (Turner, 1964) 또는 On-site scheme (Irwin, 1983)을 선택할 수 있으며 거리가 멀어서 수송되는 시간이 긴 경우(Long travel time) 확산에 의한 퍼프의 성장은 시간의 자승근에 비례하도록 산출한다. 또한 부력에 의한 확산이나 전성침착, 침강을 고려하며 배출원은 단일 또는 다수의 점오염원에 대해 적용 가능하다. 또한, 수십 m에서 수십 km까지 계산이 가능하다.

INPUFF 모델은 다음과 같은 몇 가지 가정을 가지고 있다.

① 퍼프 내에서의 오염물질 확산은 정규분포(Gaussian distribution)를 이루고, 기상자료의 시간간격 내에서의 기상 조건은 균일하다고 가정한다. 이러한 가정은 특히, 장거리 이동시 농도를 추정하는데 중요한 오차의 원인이 될 수 있다.

② 대상오염 물질은 화학적으로 안정하다고 가정하며 화학 반응과 비선형 과정은 고려할 수 없다.

③ 대기안정도와 풍향은 고도에 따라 일정하다고 가정한다.

(2) 적용식

INPUFF 모델에서 적용되는 계산식은 식(1)과 같은 Gaussian puff equation을 기본식으로 한다.

$$C(x,y,z) = \frac{Q}{(2\pi)^{3/2} \sigma_x \sigma_y \sigma_z} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{x-ut}{\sigma_x}\right)^2\right] \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{y}{\sigma_y}\right)^2\right] \left\{ \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{z+h}{\sigma_z}\right)^2\right] \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{z-h}{\sigma_z}\right)^2\right] \right\} \quad (1)$$

여기서 각 퍼프는 풍속변화(u)에 따라 자유롭게 바뀌며 중심축(centerline)을 하나로 하지 않아도 될 뿐 아니라 확산 매개변수들은 풍하거리보다는 이동 시간(t)에 의존하며,  $\sigma_x$ 와  $\sigma_y$ 가 같다고 가정하여,  $(r=(x-ut)^2+y^2)$  식을 다시 쓰면 식(2)와 같다.

$$C(r,y,z) = \frac{Q}{(2\pi)^{3/2} \sigma_r^2 \sigma_z} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{r}{\sigma_r}\right)^2\right] \left\{ \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{z+h}{\sigma_z}\right)^2\right] \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{z-h}{\sigma_z}\right)^2\right] \right\} \quad (2)$$

여기서 C는 농도(mg/m<sup>3</sup>), x는 배출원으로부터 측정지점까지의 거리(m), y는 crosswind distance(m), z는 height above ground(m), H는 유효굴뚝 높이(m), Q는 배출량(g/sec), u는 풍속(m/sec),  $\sigma_x$ 는 풍하측 방향으로의 확산 매개변수(m),  $\sigma_y$ 는 lateral 확산 매개변수(m),  $\sigma_z$ 는 수직확산 매개변수(m),  $\sigma_r$ 은 수평 확산 매개변수(m)이다.

INPUFF 모델에서는 확산계수를 계산하는 방법으로서 On-site 측정치에 의한 방법과 Pasquill-Gifford scheme에 의한 방법이 있다.

On-site scheme을 이용하는 경우  $\sigma_y$  및  $\sigma_z$ 은 식(3)과 식(4)로부터 구할 수 있다.

$$\sigma_y = \sigma_v t F_y \quad (3)$$

$$\sigma_z = \sigma_w t F_z \quad (4)$$

여기에서,  $\sigma_v$ 는 주풍향에 직각방향인 바람의 표준편차(m/s)이며,  $\sigma_w$ 는 수직풍속의 표준편차(m/s)이다.  $F_y$  및  $F_z$ 는 이동시간의 무차원함수로, 대기가 불안정한 상태인 경우에는 다음의 식(5)와 식(6)을 이용하여 계산한다.

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

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

$\sigma_v$  및  $\sigma_w$ 는 식(7) 및 식(8)과 같이 수평 풍향변동의 표준편차( $\sigma_a$ ) 및 수직 풍향변동 표준편차( $\sigma_e$ )로부터 구할 수 있다.

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

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

한편, Pasquill-Gifford scheme에 의하여  $\sigma_y$ 와  $\sigma_z$ 를 구하기 위해서는 Pasquill 안정도가 필요하며 안정도 산출을 위하여서는 풍속과 운량, 운고 등의 자료가 필요하다.

본 연구에서는 Pasquill-Gifford scheme에 의하여  $\sigma_y$ 와  $\sigma_z$ 를 구하였다.

### (3) 입력 자료

INPUFF 모델 실행을 위해서는 크게 3가지, 기상 자료와 배출량 자료, 그리고 수용체 자료와 모델 계산에 필요한 각종 계수 등의 입력자료가 필요하다. 기상 자료로는 풍향, 풍속, 기온, 수평 풍향변동의 표준편차( $\sigma_a$ ), 수직 풍향변동의 표준편차( $\sigma_e$ ), 혼합층 고도 자료가 필요하며, 배출량 자료는 배출률, 배출 높이, 굴뚝온도, 굴뚝직경, 배출속도 등이 필요하다. 수용체 자료는 수용체좌표와 고도 자료가 필요하며, 모델의 입력자료 중 사용자가 선택적으로 고려할 수 있는 수평 및 연직 확산폭의 계산방법, 바람장(Wind Field), Stack Downwash, 부력에 의한 확산, Plume rise 등이 있다. 대기오염물질의 확산은 그 지역의 기상조건과 지형조건에 의존하므로 모델 예측의 정확도를 높이기 위해서는 이들 입력자료의 정확성이 요구된다.

### (4) 모델의 수정

INPUFF2.5 모델의 적용상 문제점과 프로그램의 잘못 등으로 본 연구에서 수정된 부분은 다음과 같다.

① INPUFF 모델에서는 바람장을 고려할 수 있는 옵션(LADT)이 있어서 사용자가 원한다면 기상자료와 바람장 자료를 같이 사용할 수 있도록 되어있다. 그러나 기존의 INPUFF2.5 프로그램은 퍼프 중심에서의 이동이 단일 기상자료를 사용하게 되어 있어서 사용자의 Wind Field 입력에 따른 바람의 U, V 성분을 이용하지 않고, 또 그 부분에 관한 처리가 누락되어 있었다. 따라서 퍼프가 위치한 그 때의 시간, 지점에 따른 풍향, 풍속자료를 이용하여 계산하도록 프로그램을 수정하였다.

② 바람장을 받아들이는 file도 기존의 U성분, V성분을 같이 입력해서 하나의 file로 받아들이도록 되어있는 부분을 바람의 U성분과 V성분을 각각 받아들일 수 있도록 추가하였다. 이 부분은 본 연구에서 적용코자 했던 DWM에서 생성된 바람의 U, V성분을 INPUFF 모델에서 그대로 사용하기 위하여 추가한 부분이다.

③ 원래의 입력자료에는 풍속계 고도를 고려하도록 되어있고, 사용자가 그때의 고도를 입력하도록 되어있다. 그러나 사용자가 바람장을 고려하려고 할 때, 바람장이 지상에서의 바람장이 아니라면 마땅히 바람장이 위치한 고도를 주어야 한다. 그렇지 않

면 모델내에서 풍속계 고도를 바람장의 고도로 인식하여 풍속에 따른 문제가 발생할 수도 있다. 따라서 이 부분을 수정함에 따라 입력자료에서 어느 높이에서의 바람장을 사용할 것인지를 사용자가 입력할 수 있도록 Wind Field Height(WFHGT) 입력부분을 추가하였다. WFHGT의 추가로 모델은 원하는 퍼프 중심의 위치를 파악하여 풍속의 지수법칙을 적용하여 풍속을 계산하게 된다.

④ 프로그램 중 Function UFACTR에서 굴뚝 고도(plume height)가 풍속계 고도(Anemometer Height)보다 낮을 때에는 풍속의 지수법칙을 고려하지 않도록 되어 있어서 이럴 경우에도 풍속의 지수법칙을 따르도록 수정하였다.

⑤ INPUFF 모델은 사용자 설명서에는 다중배출원을 고려할 수 있는 것처럼 기술되어 있으나 실제 계산 과정에는 단일 배출원의 경우에만 실행이 가능한 모델이다. 그러므로 다수의 배출원을 적용하기 위하여 배출원별로 전기간 실행을 반복하면서 각 수용체의 농도를 누적시키는 방법으로 다중배출원을 계산할 수 있도록 모델을 수정하였다.

### 2.2.2 ISC 모델의 개요

TSP, SO<sub>2</sub> 등의 비반응성 물질을 대상으로 하는 대기오염 확산모델은 사용 목적에 따라 여러 가지 종류가 있으나, 대기 중에서의 화학반응이 비교적 느려서 시간에 따른 농도변화가 크지 않은 물질 농도를 구하는 모델로서 가우시안 플룸모델이 일반적으로 널리 쓰이고 있다.

ISC3(Industrial Source Complex version 3)는 대상 지역의 고도가 구릉과 같이 굴곡을 이루는 경우에 사용할 수 있는 모델로써, 가우시안 플룸식을 사용하여 농도를 구하므로 기상 조건과 배출량의 시간 변화가 없다고 간주하는 정상상태모델이다.

ISC3는 비반응성 물질을 대상으로 장·단기농도를 산출하는 모델로써 구릉지역에서도 사용할 수 있으며, 입자의 중력침강과 건성침강도 고려할 수 있고 점오염원, 선오염원, 면오염원 뿐만 아니라 입체오염원과 노천광산과 같은 배출원도 취급할 수 있다.

본 모델은 적용기간에 따라 단기모델인 ISCST(Industrial Source Complex Short Term Model)와 장기모델인 ISCLT(Industrial Source Complex Long

Term Model)로 구성되어 있으며, 적용대상 지역에 따라 도시 및 시골지역에 적용할 수 있도록 풍속의 지수, 지면거칠기, 수직적인 온위기울기 등의 입력자료가 모델내에 구분되어 있으며, 확산계수 또한 대기안정도와 풍하거리의 함수로부터 구해지는 Pasquill-Gifford curves scheme (Turner, 1964)과 McElroy-Pooler (1968)에 의한 확산계수를 적용하도록 되어 있다. 또한 오염원에 근접된 건물에 의한 공기역학적 세류 영향을 고려할 수 있으며, 플룸의 상승고는 Briggs (1976, 1972)가 제시한 안정, 중립 그리고 불안정 등의 대기조건에 따라 플룸 상승고를 산정하는 Briggs의 플룸 상승식을 기본으로 하고 있다. 적용대상지역의 격자체계는 16 및 36방위의 극원점 좌표계 (Polar Grid System)와 직교좌표계 (Discrete Cartesian Grid System)로 구분하여 사용할 수 있다.

ISCST 모델은 매시간별 기상자료를 이용하여 1시간 및 24시간등의 오염물질 단기농도를 계산할 수 있으며 기상입력자료에 따라 월, 계절, 연평균 등의 오염물질 장기농도를 동시에 구할 수 있는 특성을 가지고 있다. 또한 모델실행시 대시간 동안의 각 수용체별 최고농도와 50개의 순위별 최고농도를 계산할 수 있는 장점을 가지고 있다. 또한 지형의 영향을 고려하기 위한 방법으로 연돌고보다 낮은 지형을 고려할 때는 단순지형방법을, 연돌고보다 높은 지형을 고려할 때에는 복잡지형 방법을 사용한다.

ISCST 모델에서 적용되는 계산식은 식 (9)를 기본으로 한다.

$$C = \frac{Q \cdot k \cdot V \cdot D}{2\pi \cdot U_s \cdot \sigma_y \cdot \sigma_z} \exp \left[ -0.5 \left( \frac{y}{\sigma_y} \right)^2 \right] \quad (9)$$

여기서, C는 오염물질 농도 ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ), y는 풍향직교 방향 거리 (m), Q는 오염물질 배출량 (g/sec), k는 단위환산계수,  $U_s$ 는 풍속 (m/sec),  $\sigma_y \cdot \sigma_z$ 는 수평·연직 확산계수, D는 오염물질의 반감기를 고려하는 항이며, V는 오염원의 높이나 수용체의 높이, 혼합고, 플룸의 상승, 입자의 중력침강 및 전성·습성침적의 영향을 고려하는 항이다.

한편, ISCLT는 계절 또는 년평균 등 장기간 평균 농도를 산출하기 위하여 기상결합빈도함수 (JFF: Joint Frequency Function)를 사용함으로써 ISCST의

계산과정을 단순화한 모델이다. 탁종석 (1996)에 의하면 장기간을 대상으로 ISCST와 ISCLT 두 모델의 농도계산결과를 비교해 본 결과 거의 유사한 결과를 얻었으며 또한 최근 PC의 계산속도가 빨라져서 ISCST로 장기간을 대상으로 계산하여도 계산시간은 크게 부담되지 않는다. 그러므로 본 연구에서는 ISCST모델을 사용하여 매 시간의 농도를 장기간 계산하여 장기평균농도를 구하였다.

### 2.2.3 DWM

DWM은 진단 모델 (diagnostic wind model)로 지상 및 상층에서 측정된 바람자료의 내삽 (interpolation) 과정을 거쳐 매 시간별로 3차원 격자내의 바람 (u,v,w)성분을 계산한다. DWM은 terrain-parallel 수직좌표계를 사용한다. 본 모델은 지상 기상자료를 처리하는 PRESFC와 상층 기상자료를 처리하는 PREUPR의 전처리 시스템과 이를 토대로 바람장을 추정하는 DWM으로 구성되어 있다. 전처리 시스템에서는 수평, 연직적인 바람 성분이 계산되고 DWM에서 이 자료를 이용하여 바람성분을 계산하게 된다.

DWM 계산은 2가지 과정을 거치게 되는데, 첫 번째 과정은 입력된 자료로부터 지형에 의한 효과와 경사면 효과, 장애물 등에 의한 효과를 계산하는 과정으로 지형이 험한 경우에 정확한 지형자료의 입력이 요구된다. 두 번째 과정은 실제 3차원 바람을 계산하는 과정으로, 입력된 바람자료의 내삽과정이 수행되며, 내삽된 인근 격자점 자료들과의 평활화과정이 수행된다. 이후에 연직바람속도 (w)를 계산하게 되고 질량보존의 법칙에 근거하여 3차원 방향에서의 바람의 발산을 최소화하는 계산이 수행된다.

기상관측소에서 측정된 바람은 식 (10)과 같은 내삽과정을 거쳐 각 격자점에서의 바람자료로 계산된다.

$$(u,v) = \frac{\sum_k [r_k^{(-n)}(u_0, v_0)_k] + R_1^{(-n)}(u,v)_1}{\sum_k [r_k^{(-n)} + R_1^{(-n)}]} \quad (10)$$

여기에서  $(u_0, v_0)_k$ 는 k관측소에서 측정된 동서방향 ( $u_0$ ) 및 남북방향 ( $v_0$ )의 바람자료이며,  $r_k$ 는 관측소로부터의 거리를 말한다. 또,  $(u,v)_1$ 은 첫 번째 단계에서 계산된 바람 자료이며, R은 영향거리를 말한다.

다. 지수  $n$ 은 이 식에서 계산되는  $u$ 와  $v$ 를 INPUFF의 바람장 자료로 입력하였다.

DWM을 실행시키기 위한 기상 입력자료로는 지상관측소에서 측정된 매시간의 기온 및 풍향, 풍속과 상층기상관측소에서 1일 2회 또는 4회씩 측정된 고도별 기온, 풍향, 풍속자료 등이 사용된다. 이 외에도 수평격자내의 토지이용도와 고도 등 지형자료가 필요하다.

## 2.3 모델 실행

### 2.3.1 대상영역 및 기간

확산실험의 시료채취지점은 그림 1과 같이 미국 Washington D.C.를 중심으로 동서 60 km, 남북 80 km의 직사각형 영역내에 분포하고 있으나, 본 연구에서는 INPUFF 모델의 경우 계산 영역 밖으로 벗어나는 퍼프는 계산 대상에서 제외되므로 영역을 벗어났다가 되돌아오는 퍼프를 고려하기 위하여 모델 계산 영역을 4방위 각각 30km씩 넓게 설정하여 위도 36.167도, 경도 77.745도를 원점으로 하고 모델 계산영역을 120 km × 140 km로 하였다. 계산은 결측자료가 비교적 적은 1984년 4월과 7월을 대상으로 실행하였다. 대상 영역은 대체로 평탄한 지역이므로 지형의 고도는 모두 동일한 것으로 간주하였다.

### 2.3.2 입력 자료

INPUFF 모델에 필요한 입력자료는 기상자료, 배출량 자료, 수용체 자료, 그리고 모델 계산에 필요한 각종 계수로 나눌 수 있으며, 기상자료로는 풍향, 풍속, 기온, 혼합층고도, 대기안정도 등이 입력된다. INPUFF의 경우 DWM (Diagnostic Wind Model)과 같은 바람장 모델의 결과를 사용하거나 한 지점에서 측정된 기상자료(단일 기상자료)만을 사용할 수 있으며, ISCST의 경우에는 단일기상자료만을 사용한다. 이때, 단일기상자료는 Washington D.C 중심에 위치한 공항의 기상자료를 사용하였다. 기상자료는 DWM의 경우 지상기상자료는 기상관측소 9개소와 공항 기상관측소 2개소의 자료를 사용하였으며 상층기상자료는 5개의 기상탑에서 측정된 상층기상자료 중에서 결측이 많은 두 지점을 제외한 3지점의 자료를 DWM에 입력하였다. 혼합층고도는 확산실험 자료 중 일최고 혼합층고도만이 수록되어 있어

서 매시간의 혼합층고도는 각 시간별로 일정비율을 곱하여 산출했으며, Washington D.C.가 도시임을 고려하여 일최저 혼합층고도는 150 m 이상이 되도록 하였다. 대기안정도는 Washington D.C.의 National Airport에서 측정된 매시간별 자료 중에 Turner 안정도가 있으나 중립의 경우가 낮과 밤에 걸쳐서 그 빈도가 61.2%에 달해 자료의 신뢰성이 떨어지므로 그 공항에서의 풍속, 일사량, 운량, 운고 자료로 Pasquill 안정도 계급을 산출하여 ISCST 및 INPUFF 모델의 입력자료로 사용하였다.

배출량자료로는 배출 높이, 배출가스온도, 배출가스속도, 배출율 등이 이용된다. ISCST 모델의 경우에도 기상자료, 배출량 자료, 수용체 자료, 그리고 지형고도 자료 및 각종 계수 등이 입력된다.

### 2.3.3 모델 실행

본 연구에서는 INPUFF모델의 경우 DWM의 결과를 바람장 자료로 입력한 경우(INPUFF-DWM으로 표기)와 바람장 자료를 사용하지 않고 단일 기상자료만을 입력한 경우(INPUFF-single로 표기)로 나누어 실행을 하였으며, 또한 ISCST 모델을 실행하여 각각의 모델결과를 서로 비교하였다.

본 연구에서는 PDCH와 PMCH를 대상물질로 적용하였으며, 퍼프는 매 1분 간격으로 배출하였고 1984년 4월과 7월에 대하여 각각 1개월간 연속적으로 모델을 실행하였다.

## 2.4 결과 분석방법

월평균 농도자료의 경우에는 93개 지점에서 측정된 월 평균농도 측정자료와 대기확산 모델링 결과로부터 수평분포도를 작성하여 서로 비교하였다. 또한 측정자료와 모델 계산결과로 RMSE와 상관계수를 구하였다. 이때 93개 지점의 시료채취 시작일과 종료일이 정확히 매월의 첫째날과 끝날이 아닌 경우가 있었으며 5일 이상 차이가 나는 시료채취 지점의 농도 자료는 한 달간의 농도를 대표하기에는 적절치 않으므로 수평분포도 작성과 통계분석을 할 때는 제외하였다. 따라서 PDCH의 경우 4월달에 72개 지점, 7월달의 경우에는 64개 지점을 선정하였고, PMCH의 경우 4월에는 72개 지점, 7월에는 65개 지점만으로 서로 비교 평가하였다.

8시간 단기농도의 경우에는 단기 시료채취 지점인

3지점에서 모두 농도가 검출되었던 1984년 7월 중 4일간을 선정하여 DWM 결과를 이용하여 INPUFF를 실행하였다. 이때 수용체 격자는 2 km × 2 km로서 동서방향 31개 격자와 남북방향 41개 격자로 1271개 격자와 단기농도 측정지점 3지점을 합하여 총 1274개 수용체에서 PDCH의 매 8시간 평균농도를 산출하여 움직임을 비교하였다.

### 3. 결과 및 토의

#### 3.1 배경농도 산출

Draxler(1985)에 의하면 PMCH의 배경농도는 3f III ( $4.8 \times 10^{-11} \text{ g/m}^3$ 에 해당)이며, PDCH의 배경농도는 22f III ( $39.6 \times 10^{-11} \text{ g/m}^3$ 에 해당)라고 하였으며

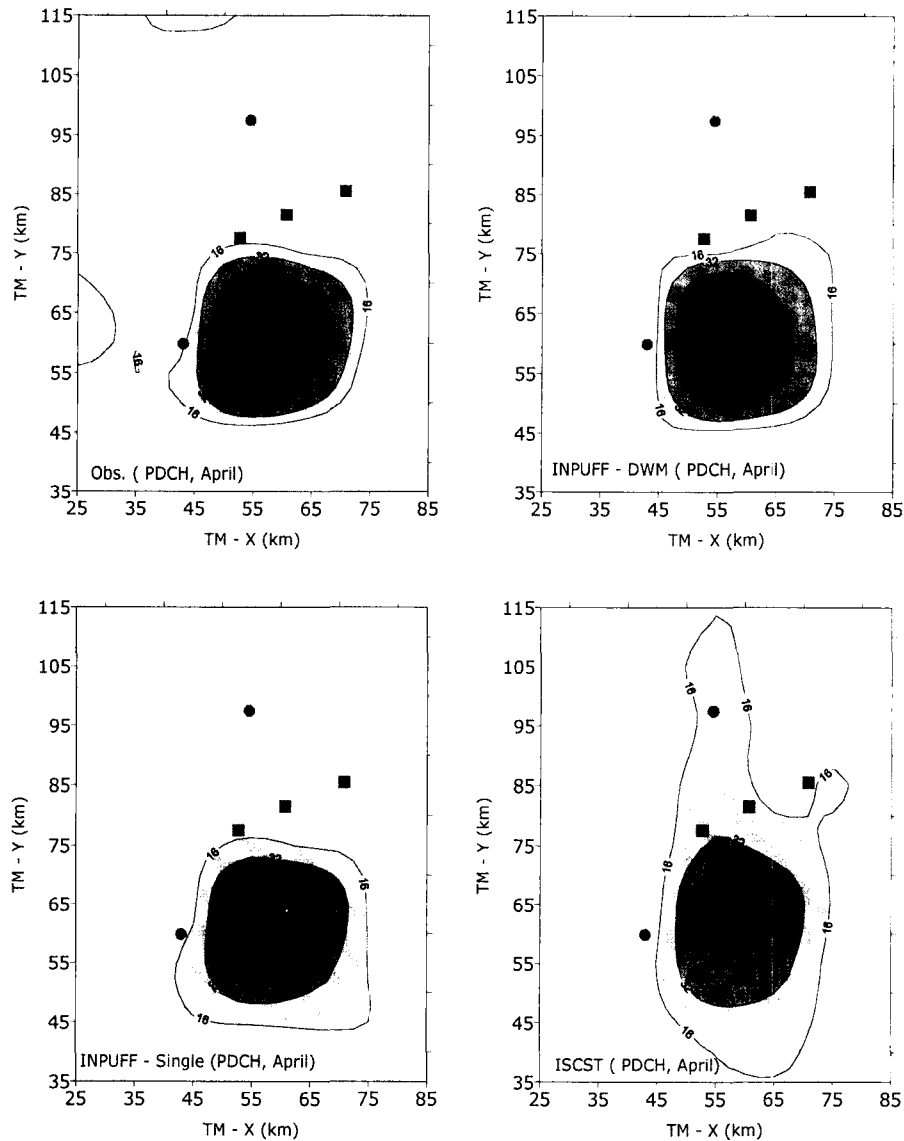


Fig. 4. Horizontal distributions of monthly average PDCH ( $10^{-11} \text{ g/m}^3$ ) in April, 1984 (a: Observed, b: INPUFF-DWM, c: INPUFF-single, d: ISCST)



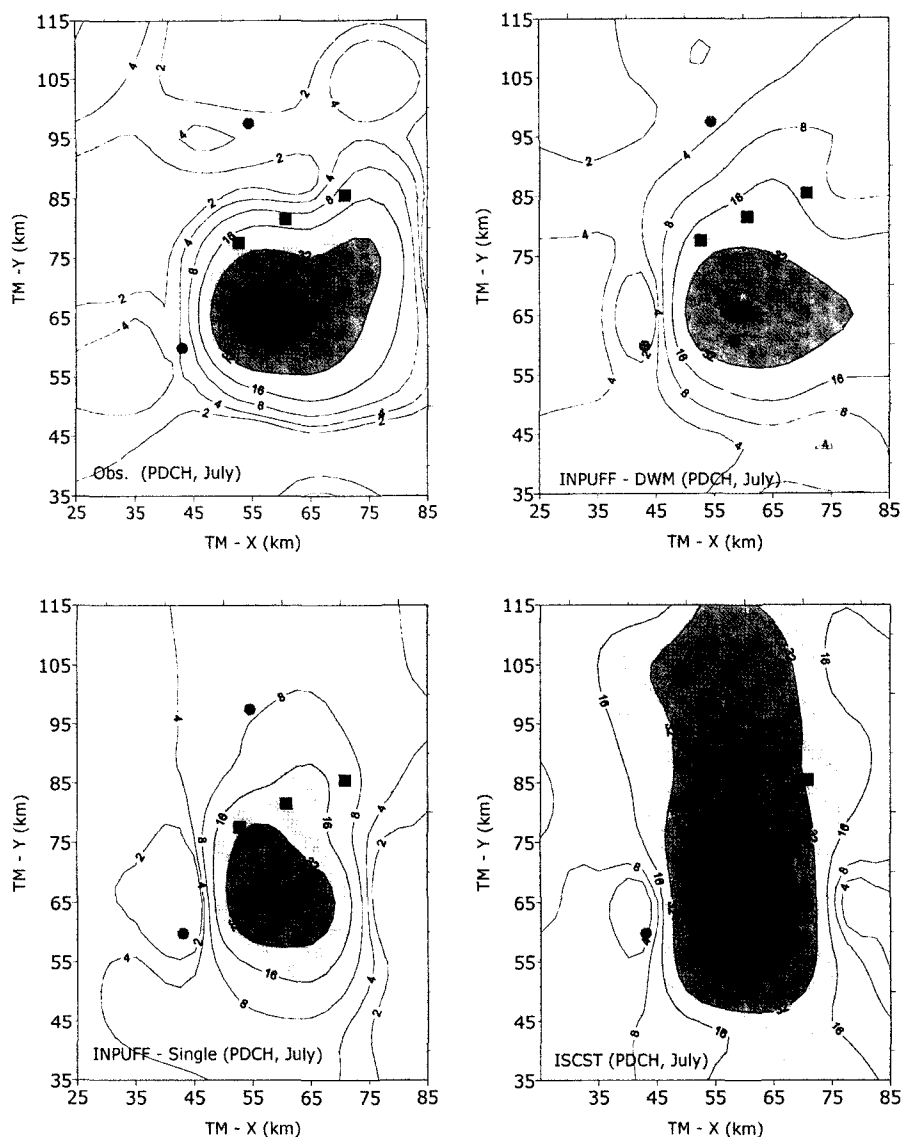


Fig. 5. Same as Fig. 4, but for July, 1984.

배경농도는 아마도 배경지역의 농도 중에서 높은 농도 상한 값을 취한 것으로 생각된다. 이러한 배경농도는 배출된 Tracer의 영향을 전혀 받지 않는 배경지역에서 측정된 농도의 평균값이어야 한다.

본 연구에서는 4월과 7월의 측정농도 중 DWM 결과를 이용한 INPUFF 모델결과를 참고로 하여 계산농도가 낮은 배경지역에서 측정된 농도를 배경농

도로 간주하고 이 값들의 평균을 취하여 배경농도로 하였다. 이렇게 결정된 배경농도는 물질과 계절에 따라 달라지며 PDCH는 4월의 경우  $8 \times 10^{-11} \text{ g/m}^3$ , 7월의 경우  $2 \times 10^{-11} \text{ g/m}^3$ , PMCH는 4월의 경우  $2 \times 10^{-11} \text{ g/m}^3$ , 7월의 경우  $1 \times 10^{-11} \text{ g/m}^3$ 이었다.

모델결과는 추적기체의 배출량만으로 농도를 계산한 것으로 측정결과와 비교하기 위하여서 모델

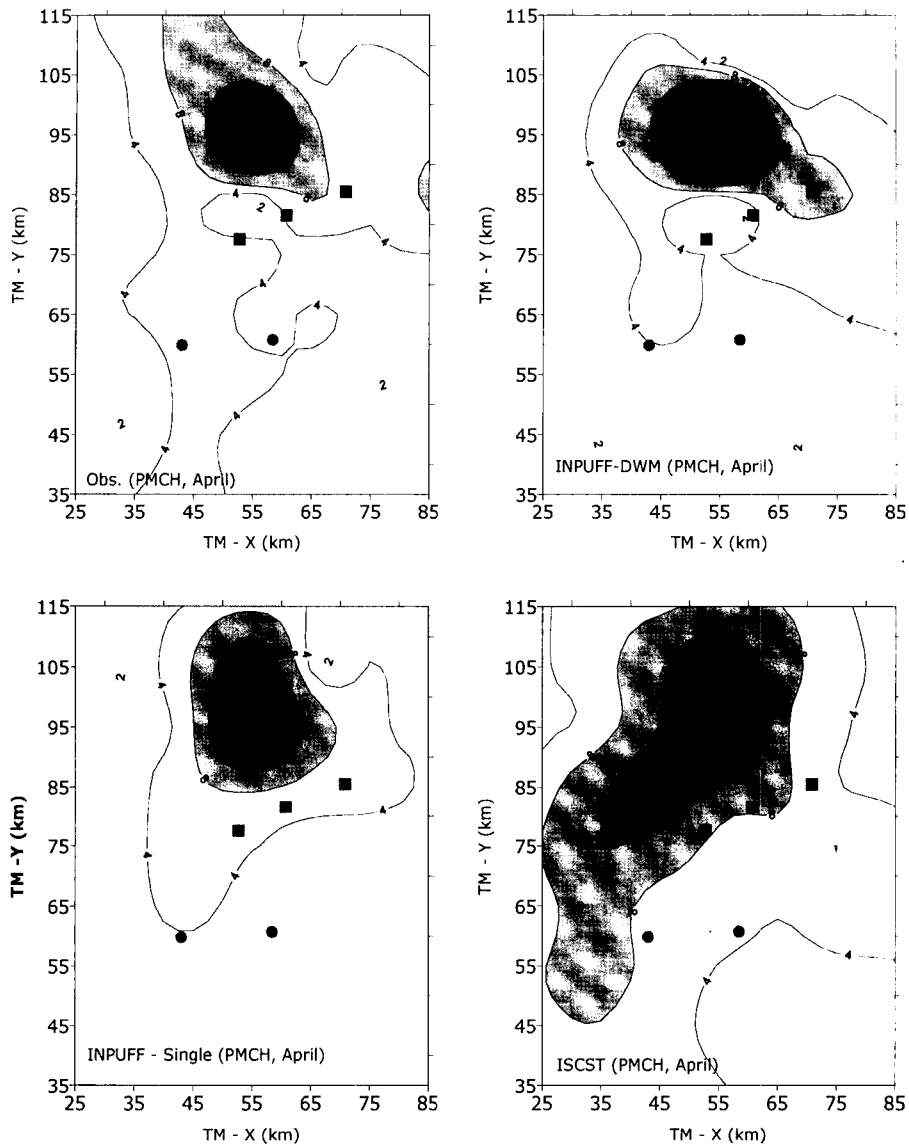


Fig. 6. Same as Fig. 4, but for PMCH in April, 1984.

에 의한 계산 농도에 그 지역에 상존하는 배경농도 값을 더하여 수평분포도 및 오차분석 등 모델결과 분석을 행하였다.

### 3. 1. 1 수평분포도

그림 4와 그림 5는 월평균 농도측정 지점에서의 1984년 4월과 7월의 월평균 PDCH 농도를 나타낸 것이다. INPUFF-DWM과 INPUFF-single의 결과가

ISCST의 결과에 비하여 실측농도 분포와 유사성이 큰 것을 알 수 있다. 특히 ISCST 모델의 경우에는 플룸 모델이므로 농도분포가 넓게 퍼지는 것으로 나타나서 실측농도와는 큰 차이를 나타내었다. 그림 6과 그림 7은 1984년 4월과 7월의 월평균 PMCH 농도를 나타낸 것으로써, 실측치와 비교해볼 때 INPUFF-DWM, INPUFF-single, ISCST의 순으로

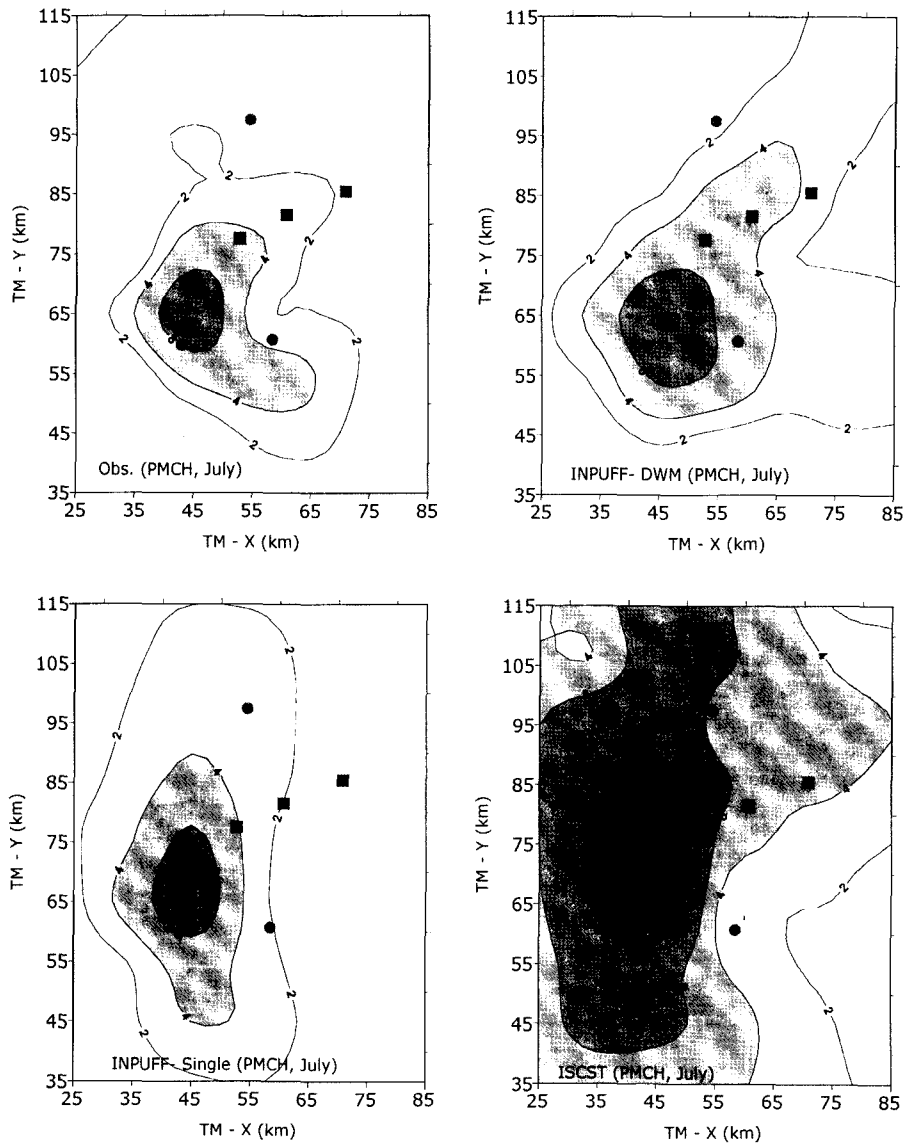


Fig. 7. Same as Fig. 4, but for PMCH in July, 1984.

실측치와 더 유사한 것을 알 수 있다.

### 3. 1. 2 오차분석

오차 분석을 위해서 총 93개 수용체 지점 중 결측과 시료채취 기간이 부적절한 경우를 제외하여 PDCH의 경우 4월은 72개 지점, 7월은 64개 지점, PMCH의 경우 4월은 72개 지점, 7월은 65개 지점에서의 값을 분석하였다. 그림 8은 PDCH와 PMCH

에 대해서 1984년 4월과 7월의 월평균 측정농도와 모델결과를 비교하여 나타내었으며 회귀분석한 결과는 표 2와 같으며 모델결과간의 상관계수를 그림 9에 비교하였다. 상관계수는 세 가지 모델결과 중 INPUFF-DWM이 가장 높았다. 표 3과 같이 모델결과를 실측농도와 비교하여 RMSE를 구한 결과는 PDCH의 경우 INPUFF-DWM이 다른 경우에 비해

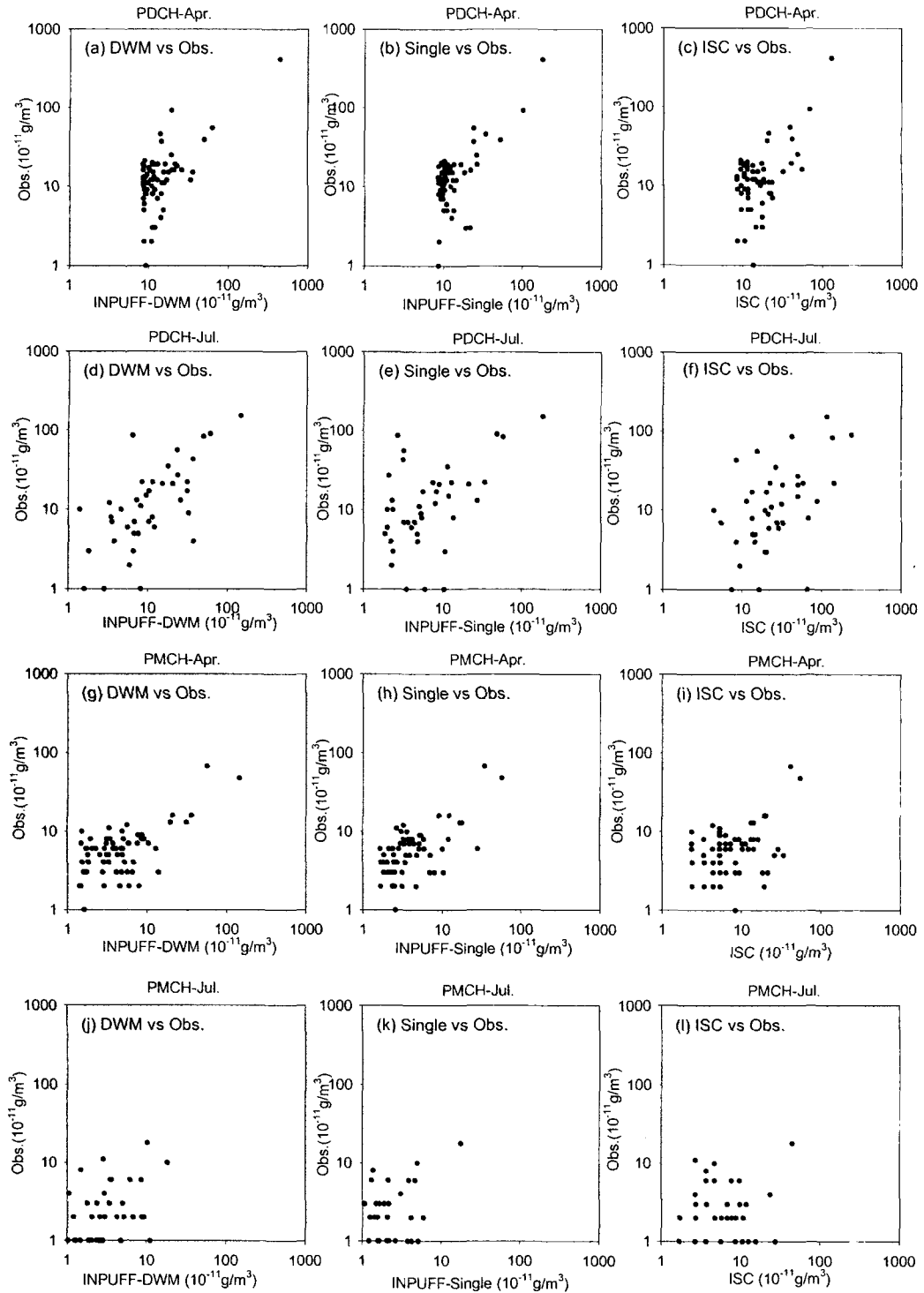


Fig. 8. Scatter plot of observed concentration vs. model calculation results for PDCH and PMCH.

서 RMSE가 대체로 더 낮은 것을 알 수 있다. PMCH의 경우는 INPUFF-Single이 실측결과와 유사한 평균을, RMSE 결과 또한 낮은 것을 볼 수 있

다. 표 3에는 전체지점의 평균농도도 비교하였는데, 역시 INPUFF-DWM이 가장 유사한 결과를 보였다. 한편 ISCST로 한달간 매시간의 농도를 계산하여 구한 월평균농도는 큰 오차를 나타내었다.

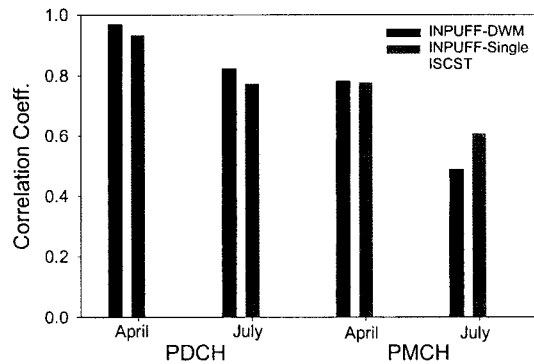


Fig. 9. Correlation coefficient of INPUFF-DWM, INPUFF-Single and ISCST results.

Table 2. Regression analysis results between observed concentration and three model results (INPUFF-DWM, INPUFF-single and ISCST).

		INPUFF- INPUFF- ISC			
		DWM	Single	ISC	
PDCH ( $10^{-11}$ g/m <sup>3</sup> )	April	Slope	0.932	1.972	2.370
		Intercept	1.034	-12.01	-23.07
		r	0.969	0.932	0.850
	July	Slope	1.042	0.840	0.387
		Intercept	-1.165	3.688	-0.807
		r	0.823	0.773	0.567
PMCH ( $10^{-11}$ g/m <sup>3</sup> )	April	Slope	0.409	0.884	0.684
		Intercept	3.193	1.003	-0.233
		r	0.782	0.777	0.669
	July	Slope	0.496	0.794	0.187
		Intercept	0.359	8.450	0.761
		r	0.488	0.607	0.420

3.2 단기간 시계열농도

그림 10은 1984년 7월 한달 동안 8시간 간격의 실측치를 시계열로 나타낸 것으로, 3개 지점 모두 농도가 검출된 기간을 episode 기간으로 설정하였다. 그 대상 기간은 7월 25일 0시부터 27일 24시까지 72시간이며 이 시간 동안의 Washington D.C. National Airport에서 측정된 풍향, 풍속은 그림 11과 같다.

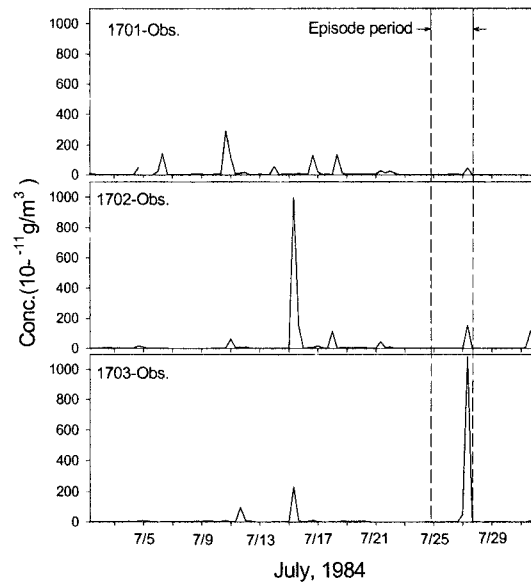


Fig. 10. An observed 8 hour mean PDCH concentration INPUFF-DWM for July 1984.

Table 3. Comparison between observed concentration and model results of INPUFF-DWM, INPUFF-Single and ISCST results. (Unit :  $10^{-11}$  g/m<sup>3</sup>)

Month	No. of receptors	obs. avg.	BC*	INPUFF-DWM		INPUFF-single		ISCST		
				avg.	RMSE	avg.	RMSE	avg.	RMSE	
PDCH	April	72	19.39	8.0	19.70	12.63	15.93	28.84	17.92	35.30
	July	64	13.83	2.0	14.39	15.03	12.07	17.31	37.78	40.11
PMCH	April	72	6.81	2.0	8.83	12.45	6.56	6.07	10.29	8.42
	July	65	2.08	1.0	3.47	3.41	2.51	2.54	7.05	8.04

BC\*: background concentration

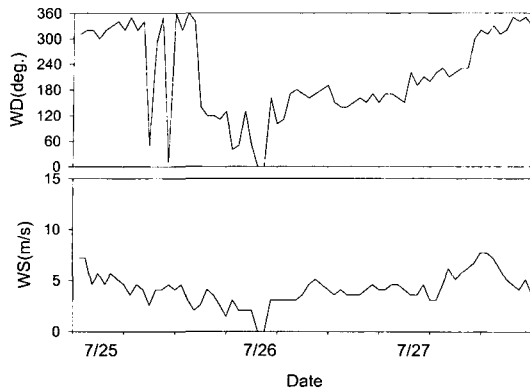


Fig. 11. Wind direction and wind speed during episode period (7. 25~7. 27, 1984).

그림 12는 그림 10에서 episode 기간만을 실측치와 INPUFF-DWM에 의한 PDCH 계산 농도를 시계열로 자세하게 나타낸 것이다. 보논바와 같이 3지점에서 실측치와 모델치의 농도검출 경향이 유사한 것을 알 수 있다. 다만 지점 1701에서는 모델에 의한 계산치가 한 기간(8시간) 지연된 것을 알 수 있다. 그림 13은 episode 기간동안에 INPUFF-DWM의 결과를 8시간 간격으로 평균하여 각 기간을 그림 12의 시계열과 비교하기 위해 퍼프의 움직임을 볼 수 있도록 등농도 그림으로 그린 것이다. period 1에서는 퍼프의 배출이 없다가 period 2에서 퍼프가 배출되면서 퍼프가 대부분 동쪽으로 흘러가고, 북서쪽으로도 조금 이동한 것을 알 수 있다. 따라서 수용체 지점에는 농도가 계산되지 않았다. period 3에서는 퍼프가 더 퍼지기 시작하면서 농도가 현저히 감소되는 것을 알 수 있으며, 수용체지점에는 영향을 주지 못한 것을 알 수 있다. period 4에서는 저농도의 퍼프가 더 퍼지게 되면서 지점 1703에 영향을 주어 약간의 농도검출이 있었으며, period 5에서의 퍼프는 북동쪽으로 점점 이동하는 것을 볼 수 있다. period 6에서는 30시간만에 새로운 퍼프가 배출되면서 지점 1703에 약간 영향을 주어 농도가 약  $20 \times 10^{-11} \text{ g/m}^3$ 정도가 계산되었다. period 7에서는 지점 1703에 직접적인 영향을 주어 약  $900 \times 10^{-11} \text{ g/m}^3$  정도의 고농도가 나타났으며, 지점 1702에서도 농도가 나타나는 것을 알 수 있다. 이때 지점 1701에서의 실측치는 약  $50 \times 10^{-11} \text{ g/m}^3$ 으로 나타났으나,

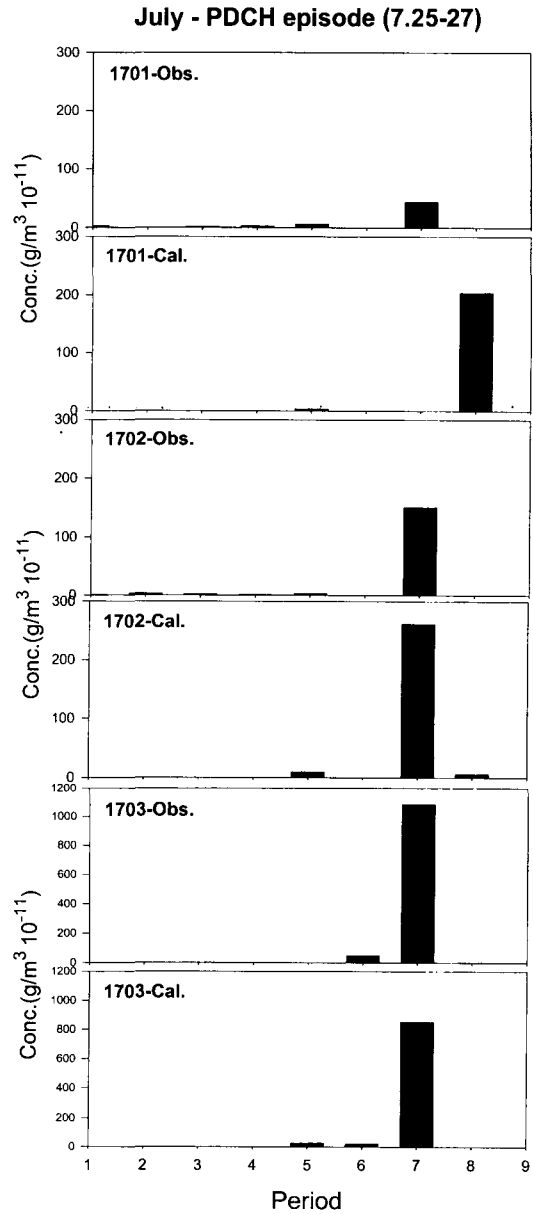


Fig. 12. Comparison of PDCH concentration and calculated PDCH concentration by INPUFF-DWM for episode period.

모델에서 계산된 결과는 농도가 0이었으며, 8시간 늦은 period 8에서 퍼프가 북동쪽으로 이동하면서 지점 1701에 영향을 주어 약  $200 \times 10^{-11} \text{ g/m}^3$  정도의 농도가 계산되었다. 이는 모델에 입력된 풍속이

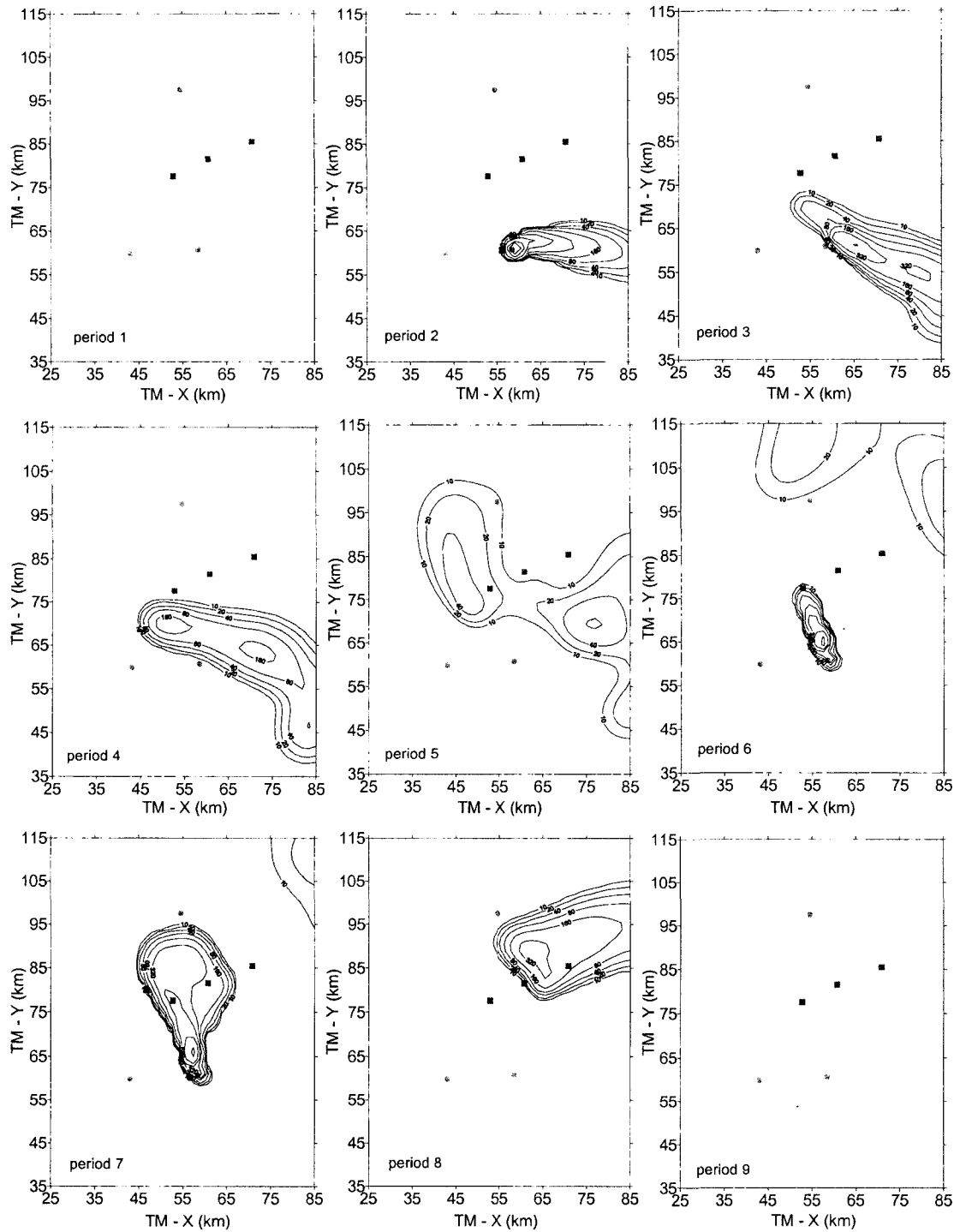


Fig. 13. Horizontal distributions of 8 hour mean PDCH concentration ( $10^{-11}$  g/m<sup>3</sup>) calculated by INPUFF-DWM for episode period.

실제 풍속보다 더 작게 입력되어 한 period 정도 지연된 것이라고 생각된다. 마지막 period 9에서는 퍼프가 모두 사라지면서 모든 지점에서 농도는 0이 되었다.

#### 4. 결 론

장기간에 걸쳐서 실시한 추적자 확산실험자료를 이용하여 퍼프모델인 INPUFF 모델과 플룸모델인 ISCST 모델을 평가한 결과 농도분포의 형태, RMSE, 농도의 절대값 등에서 INPUFF 모델이 훨씬 우수한 결과를 나타내었다. 또한, INPUFF 모델의 기상입력 자료로서 단일지점의 바람자료보다 바람장모델인 DWM으로 생성한 바람장자료를 이용하는 것이 모델 결과를 현저히 개선시킨다는 것을 확인하였다.

ISC 모델의 경우 일반적으로 농도분포가 넓은 범위에 퍼져서 나타나며 이러한 특징은 기상자료 입력 간격에 해당하는 평균화 시간인 1시간 동안에 배출원에서 배출된 플룸이 모델대상 영역 끝까지 퍼져 나가는 것으로 계산되기 때문이며 이러한 현상은 대상영역이 넓을수록 문제가 될 수 있다. 대상영역이 수 km 정도로 좁은 경우에는 기상자료의 시간간격보다 플룸 도달 시간이 짧으므로 이러한 효과는 감소될 수 있다. 그러므로 기상변화 특히 풍향 풍속 변화가 큰 지역과 수십 km 이상되는 넓은 지역을 대상으로 하는 경우 ISC 모델과 같은 가우시안 플룸 모델은 큰 오차를 유발하게 된다. 우리나라의 경우 해안선이 복잡하고 산악 및 구릉 지대가 많은 등 지형이 복잡하므로 풍계도 매우 복잡하다. 그러므로 대기확산을 계산하는 경우 오차를 감소시키기 위하여서는 PUFF 모델을 사용할 필요가 있다.

#### 참 고 문 헌

- 송은영 (1999) 미국 Washington, D.C.의 장기간 추적자 확산실험 자료를 이용한 INPUFF와 ISC모델의 평가, 62, 강원대학교 이학석사학위 논문.
- 이종범, 강인구 (1989) 단일배출원 대기오염 단기모델에 관한 연구(Tracer Gas에 의한 확산 실험), 한국 대기보전학회지, 5(2), 84-96.
- 이종범, 김 산, 김용국, 조창래, 유승도 (1996) 추적자 확산 실험에 의한 야간 강안정층하에서의 가우시안 퍼프모델의 평가, 한국대기보전학회지, 12(5), 529-540.
- 이종범, 이강웅, 노철언, 김혜경 (2001) 대기오염물질 장거리 이동 이해를 위한 추적자 확산 실험, 국립환경연구원, 231.
- 탁종석 (1996) ISC3 모델에 의한 수도권지역의 동계 SO<sub>2</sub> 농도 산출, 52, 강원대학교 이학석사학위논문.
- Briggs, G.A. (1972) Discussion on chimney plumes in neutral and stable surroundings, Atmospheric Environment, 6, 507-510.
- Briggs, G.A. (1975) Plume rise predictions. Lectures of air pollution and environmental impact analyses, American Meteorological Society, Boston, Ma, 59-111.
- Draxler, R.R (1985) Metropolitan Tracer Experiment (METREX). NOAA Technical Memorandum ERL ARL-140.
- Irwin, J.S. (1983) Estimating plume dispersion: A comparison of several sigma schemes, J. Climate Applied Meteorology, 22, 92-114.
- Turner, D.B. (1964) A diffusion stability model for an urban area, J. Climate and Applied Meteorology, 3, 2079-2084.
- U.S. EPA (1986) INPUFF (INtegrated PUFF) Model: A Multiple Source Gaussian puff Dispersion Algorithm User's Guide.
- U.S. EPA (1995) User's guide for the Industrial Source Complex model Vol. II.