

## 부산지역에서의 대기확산모델의 적용 및 평가

- TCM2, CDM2.0, ISCLT2 모델을 중심으로 -

방종선 · 김유근 · 이화운 · 전병일 · 문윤섭 · 홍정혜

부산대학교 대기과학과

(1996년 5월 15일 접수)

## The Application and Evaluation of Atmospheric Dispersion Models in Pusan Area

- Based on TCM2, CDM2.0, ISCLT2 -

Jong-Sun Bang, Yoo-Keun Kim, Hwa-Woon Lee, Byung-Il Jeon,  
Yun-Seob Moon and Jung-Hae Hong

*Dept. of Atmospheric Sciences, Pusan National University, Pusan, Korea*

*(Manuscript received 15 May 1996)*

For the efficient control of atmospheric quality, it is so important to predict the influence accurately of which the air pollutant emitted into the atmosphere. Atmospheric dispersion model enables to simulate and grasp the atmospheric condition occurred due to the emission of pollutants. The result of model is largely affected by the amount of emission, the characteristics of physical and chemical process, meteorological input data, and the receptor which the concentration is calculated.

The aim of this research, therefore, is to suggest more suitable model in Pusan area than other areas by performing TCM2, CDM2.0 and ISCLT2 models. As the basic work for executing the model, we computed the amount of emission of air pollutants in Pusan at 1992 and analyzed the occurrence frequency of atmospheric stability for recent decade(1985~1994). CDM2.0 showed the similar result relatively with observed value in the case of full year(1992), fall and winter, and ISCLT2 brought more suitable result in spring for Pusan area.

As the result of this research, in future, it is necessary for us to develop the numerical model considering the topographical characteristics, to select the proper observation site and to increase the observation site for Pusan.

**Key words** : atmospheric dispersion model, TCM2, CDM2.0, ISCLT2.

### 1. 서 론

대기질의 효과적인 관리를 위해서 대기 중에 방출되는 오염물질의 환경에 대한 영향을 정확히 예측하는 것은 매우 중요하다. 대기오염 예측 모델은 이러한 예측의 필요성을 해결하기 위한 방법으로서, 자연계에서 일어나는 현상을 간단한 수학적식으로 단순화하여 오염물의 방출에 의해 일어나는 환경 상태를 모사하고, 그 양태를 파악할 수 있게 한다. 모델에 의해 구해진 결과는 모델에 적용된 오염배출량, 오염물의 물리화학적 성질, 입력된 기상 자료의 특성, 오염물 배

출원의 주변 특성, 농도계산이 행해지는 착지점의 특성에 의해 크게 영향을 받는다.

그러므로 모델의 특성에 관한 검토와 입력자료 준비 및 적용에 대한 연구는 입력자료의 신뢰도를 높이고, 입력된 자료의 대기 오염 농도에 대한 올바른 반응을 위한 중요한 과정이다. 따라서 대기오염예측 모델을 대상지역에 적용할 경우에는 이에 대한 합당한 검토가 선행되어야 한다.

현재 우리 나라에서 널리 이용되고 있는 대기 오염 예측 모델은 주로 미국 NTIS(National

Technical Information Service)에서 보급하는 UNAMAP (User's Network for Applied Modeling of Air Pollution)에 수록된 모델들이며, 그 중에서도 장기모델로서는 CDM(Climatological Dispersion Model), TCM(Texas Climatological Model) 등이 많이 이용되고 있다(장영기와 송동웅, 1995).

대기 확산 모델에 대한 연구는 Pooler(1961)가 미국 테네시 주를 대상으로 월별 대기오염물 평균 농도를 구한 연구가 처음이다. 이후 Clarke(1964)는 여러 오염배출원으로부터 배출되는 오염물질의 농도를 계산할 수 있는 단기 모델을 개발하였다. 이후 Miller와 Holzworth(1967)는 상자 모델을 이용하여 도시 전체를 하나의 상자로 보고 도시의 평균농도를 구할 수 있는 경험식을 개발하였다. 또한 Martin과 Tikvart(1968)는 계절별 혹은 연간 농도를 예측할 수 있는 장기 모델을 개발하였고, 이것이 AQDM(Air Quality Display Model)으로 대중화되고, 이후 CDM(Busse and Zimmerman, 1973), CDM2.0(Irwin et al., 1985) 개발의 모체가 되었다. Texas 환경청에서는 CDM을 기초로 하여 단기 모델인 TEM(Texas Episodic Model)과 장기 모델인 TCM을 개발하였다. 또 장기모델로서 지형의 고저를 고려할 수 있는 ISCLT(Industrial Source Complex Long Term)도 AQDM과 CDM을 기초로 개발되었고, 현재 국내에서도 널리 사용되고 있다(김영성과 손재익, 1992).

Fisher와 Foster(1994)는 ISCST 모델과 EPA의 선택모델 2개를 적용하여 미국 Ohio주 Hamilton의 복잡한 지역을 대상으로 모델링을 수행하고 그 결과를 비교한 바 있고, 국내에서의 미국 EPA 확산모델을 이용하여 수행한 연구로는 김신도(1986) 등이 서울지역에 대해 TCM, CDMQC 그리고 ISCLT를 적용한 바 있다. 또한 한국토지개발공사(1989)에서는 단기개발에 따르는 대기환경의 영향을 평가하기 위한 목적으로 TCM을 서울지역에 적용한 바 있다. 최일경(1989)은 삼천포지역을 대상으로 지형을 고려할 수 있는 MPTER(Multiple Point Source Model with Terrain Adjustment)과 VALLEY 모델, 그리고 ISCST모델을 적용하면서 지형효과를 고찰하였고, 아울러 국내에서 미국 EPA 모델을 적용하고자 할 때에는 지형효과(여기서는 주로 지형 고저)에 대한 고려가 필요함을 나타내었다.

한편 나진균(1990)은 CDM2.0을 근간으로 하여 복잡한 국내 지형조건을 고려할 수 있는 SCM-3.2(Seoul Climatological Model-3.2)를 개발하였으며, 송동웅과 김원만(1991)은 울산지역을 대상으로 하여 CDM2.0과 TCM2에 대한 정합도 분석을 행한 바 있다. 그리고 한국동력자원연구소(1988, 1990)와 한국에너지기술연구소(1990, 1991, 1992)에서는 에너지소비에 따른 대기환경영향평가 기법을 개발하기 위하여 미국 EPA에서 권장하고 있는 대기확산 모델들을 소개하고, ISCLT를 이용하여 서울지역에 모델링을 수행하였다. 또한 김영성과 손재익(1992)은 서울지역에 대해 ISCLT모델을 적용하고, 정합도를 평가하였으며, 정진희(1993)는 서울지역에 대해 SBM(Seoul Box Model)과 PEM-2(Pollution Episodic Model)과 RAM-4(Real Time Air Quality Simulation Model)모델을 적용하여 정합도를 분석한 바 있다. 이 외에도 많은 연구가 여러 지역을 대상으로 행하여져 왔으나, 연안 대도시인 부산지역을 대상으로 모델을 수행한 연구는 한국과학기술원(1982)이 CDMQC를 이용하여 대기질 확산 현황을 파악한 것 외에는 거의 없다.

따라서 본 연구에서는 다소 복잡한 지형적 특징을 갖는 부산광역시를 대상으로 TCM2, CDM2.0 그리고 ISCLT2 모델을 이용하여 대기 확산 모델링을 실시하고, 그 결과를 부산지역에 설치된 대기오염 자동측정소 자료와 비교해 봄으로써 부산지역에 가장 적합한 모델이 무엇인가 하는 것을 고찰해 보려고 한다. 이 연구의 결과가 실제 부산지역을 대상으로 하는 대기환경영향평가와 대기질 조사에서 유용한 참고자료가 될 것으로 기대한다.

## 2. 대상모델의 개요 및 입력자료

### 2.1 대상 모델 및 연구 방법

적용한 대상 모델은 대기질 예측부분에서 가장 많이 이용되는 TCM2, CDM2.0과 1992년에 공급되고 지형의 고저에 대한 고려가 가능하며 여러 가지 선택사양이 많은 ISCLT2를 선정하였다. 이 모델들은 모두 장기적인 오염 농도 값을 예측하는 장기모델들로 TCM2 모델을 제외하고는 미국 EPA 권장모델(Guideline model)들이다. 이러한 Gaussian 대기확산 모델들은 오염물질의 배출량과 오염원 주위의 기상현상에

따라 그 농도 분포를 결정한다.

따라서 보다 정확한 부산지역에서의 확산모델링을 수행하기 위한 기초작업으로 부산광역시내에 존재하는 점, 선, 면 오염원에 대한 대기오염물질 배출량을 산정(1992년 대상)하고, 부산지역의 최근 10년간(1985~1994)의 기상자료를 분석하여 Pasquill-Turner 방법으로 대기안정도의 발생빈도를 결정하였다. 대기혼합고 자료는 부산지역과 다소 유사한 지형적 조건을 갖고, 상층관측의 자료를 이용할 수 있는 포항의 관측자료(1991)를 이용해 산정하였으며, 1991년과 1992년의 기상조건(기상청, 1991, 1992)을 서로 비교하여 안정도별, 계절별 혼합고를 분석하여 이들 모델에 이용하였다.

모델 입력자료 분석후 TCM2, CDM2.0 그리고 ISCLT2 모델을 부산지역에 적용하여 최소자승법 및 상관관계수 분석을 통해 실측치와 비교·분석함으로써 각 모델의 예측력을 조사하고 부산지역에 보다 적합한 모델을 제안하고자 하였다.

## 2.2 대상 모델의 개요

### 2.2.1 TCM2

TCM은 1975년에 Texas Air Control Board에서 개발되어 1980년에 수정된 모델로 Briggs의 연기 상승식, Pasquill-Gifford의 확산계수식, 오염물의 반감식과 Gaussian 확산식에 근거를 두고 있으며, 지상에서의 장기농도를 예측하도록 고안되었다(Texas Air Control Board, 1980). 또 TCM2는 새로운 오염원에 대한 영향평가, 연료대체계획, 측정망 설계, 그리고 대기오염 규제기술 평가 등의 목적으로 이용되고 있는 모델이다.

이 모델은 국내에서도 환경영향평가, 대기질예측을 위해서 주로 이용되는 모델(장영기와 송동웅, 1995)로 지형의 고저를 고려하지 못하는 단점을 보완하기 위해 여러 연구자들이 각 지역의 특성에 맞게 수정보완하여 왔다. 즉 나진균(1990)은 서울지역에 적합한 SCM을 개발하였고, 장영기와 조경두(1993)는 이 모델의 계산과정에 오류가 있음을 지적한 바 있다.

Gaussian 장기확산식에 근거를 둔 TCM2에서, k번째 풍향 sector에서 임의의 착지점에서의 평균지상농도  $C_p(\mu\text{g}/\text{m}^3)$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$C_p(k, \rho) = \frac{Q}{(2\pi)^{3/2} \rho} \left[ \frac{\psi(k, m)}{U^*(H, m) \sigma_z(m)} \exp\left(-\frac{H^2}{-2\sigma_z(m)^2}\right) \right] \quad (1)$$

여기서,  $Q$ 는 오염물질 배출량(g/sec),  $\rho$ 는 굴뚝에서 착지점까지의 거리(m),  $\psi(k, m)$ 는 기상 결합빈도 함수,  $k$ 는 풍향 sector,  $m$ 는 대기안정도,  $U^*(H, m)$ 는 안정도가  $m$ 일 때 굴뚝 높이  $H$ 에서의 가중평균풍속(m/sec),  $\sigma_z(m)$ 는 연직확산계수(m) 그리고  $H$ 는 유효굴뚝높이(m)이다.

TCM2의 입력자료는 기상 결합빈도 함수, 오염물질 배출량, 그리고 기온 등으로 다른 모델에 비하여 비교적 간단하고, 농도값의 출력 형태를 TM 좌표로 나타내므로 오염물질의 공간적인 농도분포 파악이 용이하다는 장점이 있다. 하지만 이 모델은 미국 Texas의 대평원 지역을 대상으로 개발되었기 때문에 지형의 고저에 대한 고려가 불가능하고, 착지점에서 관측치와의 직접적인 비교가 어렵다는 단점을 갖고 있다. 그리고 이 모델은 과거 컴퓨터 사정이 좋지 못했던 시기에 개발되어, 계산되는 속도를 줄이기 위해 연산 알고리즘을 축약해서 사용하는 등 현재시점에는 그 사용이 부적합하여 UNAMAP-5까지는 권장 모델로 취급되었지만, 그 후 UNAMAP-6에서는 제외된 모델이다. 이러한 단점에도 불구하고 이 모델은 입력자료의 간단성, 계산의 신속성 등으로 국내에서 많이 이용되고 있는 대기확산 모델 중의 하나이다.

### 2.2.2 CDM2.0

CDM은 1973년 Busse와 Zimmerman에 의해 개발되었고, 1985년 Irwin 등이 이 모델에 여러 특징들을 추가하고 보완하여 CDM2.0 모델을 개발하였다. CDM2.0은 CDM에 비해 stack-tip downwash 효과와 gradual plume rise를 고려할 수 있고, 풍향영역을 16방위 뿐 아니라 36방위까지 고려할 수 있게 되어 있다. 또, 7개의 확산 parameter의 결정 scheme이 추가되었고, buoyancy-induced 확산항을 고려할 수 있도록 보완되었다(U. S. EPA, 1987).

Gaussian 장기확산식을 이용하는 이 모델에서는 면 오염원에 대한 농도 계산과 점 오염원에 의한 농도 계산이 달리 고려되고 있다면 오염원에 대한 평균농도  $C_A$ 는

$$C_A = \frac{N}{2\pi} \int_0^\infty \left( \sum_{k=1}^N q_k(\rho) \right)$$

$$\sum_{l=1}^6 \sum_{m=1}^6 \psi(k,l,m) S(\rho,z;U_l,P_m) d\rho \quad (2)$$

로 표시되며, 여기서  $N$ 는 풍향 sector의 수,  $k$ 는 풍향 sector,  $q_k(\rho)$ 는  $k$  방향에 대한 배출량(g/sec),  $\rho$ 는 오염원과 착지점 사이의 거리(m),  $l$ 는 풍속 등급을 나타내는 index,  $m$ 는 안정도 등급을 나타내는 index,  $\psi(k,l,m)$ 는 기상 결합빈도 함수,  $z$ 는 착지점 고도(m),  $U_l$ 는 대표 풍속 (m/sec),  $P_m$ 는 안정도 범위이다.

그리고  $n$ 개의 점 오염원에 의한 평균농도  $C_p$ 는

$$C_p = \frac{N}{2\pi} \sum_{n=1}^n \sum_{l=1}^6 \sum_{m=1}^6 \frac{[\psi(k_n,l,m) G_n S(ho_n,z;U_l,P_m)]}{\rho_n} \quad (3)$$

으로 표현된다.

여기서,  $k_n$ 는  $n$ 번째 점 오염원의 풍향 sector,  $G_n$ 는  $n$ 번째 점 오염원의 방출율(g/sec),  $\rho_n$ 는  $n$ 번째 오염원으로부터 착지점까지의 거리(m)이며, 확산 함수  $S(\rho,z;U_l,P_m)$

$$S(\rho,z;U_l,P_m) = \frac{2}{(2\pi)^{1/2} U_l \sigma_z} \left\{ \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left[ \frac{(z-H)}{\sigma_z} \right]^2 \right\} + \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left[ \frac{(z+H)}{\sigma_z} \right]^2 \right\} \right\} \exp \left[ \frac{-0.6929}{U_l T_{v2}} \right] \quad (4)$$

으로 표현된다.

CDM2.0의 입력자료는 기상 결합빈도 함수, 오염물질 배출량, 기온, 그리고 대기혼합고 자료이다. 오염원에 대한 처리 능력은 점 오염원에 대해 200개, 면 오염원에 대해 2500개까지 한번에 모델링을 수행할 수 있고, 모델에서 고려할 수 있는 착지점의 개수는 제한이 없다. 모델의 수행을 위해서 입력되어야 하는 점 오염원의 굴뚝 높이, 굴뚝 직경, 배출가스의 온도 그리고 배출가스의 속도는 1992년의 오염원별 자료를 구할 수 없는 관계로 1, 2, 3 종의 대규모 업소들의 굴뚝은 보일러와 건물의 대폭적인 개조가 없는 한 일정할 것이라 가정하고, 환경부에서 실시한 배출업소 시설조사표(환경부, 1994)를 이용하였다. 그리고 2년 사이에 폐업을 한 업소들에 대해서는 전체 입력치의 평균치를 이용하였다. 면 오염원에 대해서는 지형의 고저에 대한 고려가 가

능하고 그 출력형태가 관측치와 모델치의 비교가 아주 쉽다는 장점에 비해, 한눈에 오염물질의 농도분포의 파악이 힘들고 오염물질의 제거과정이나 화학적 반응을 고려하지 못한다는 단점이 있다.

### 2.2.3 ISCLT2

ISC 모델은 도시지역에 존재하는 복합적인 오염원에 의한 오염물 농도의 예측을 위해 1979년 개발된 모델로써, 1987년에 보다 낮은 굴뚝에 대한 하향날림(downwash) 알고리즘의 개정 후에 많은 결함이 발생하였다. 그리고 ISC 모델에서 면 오염원에 대한 농도 계산식의 미분항에 오차가 존재하여 ISC2의 결과와 비교한 결과, 약 11.4%의 차를 나타내었다. 따라서 모델의 질과 사실성 그리고 모델의 유지를 위해 개선이 요구되어진 1992년 3월 미국 EPA에서 공급된 모델이다.

ISC2 모델은 ISC 모델에서 나타난 여러가지 오차를 줄이고 모델 수행 중 문제가 발생한 부분을 쉽게 찾아내는 등 입력자료에 의한 문제를 최소화한 모델이다. 모델을 크게 1개의 주 프로그램과 14개의 외부 프로그램으로 분리하고, 전체적으로 51개의 부프로그램을 이용하여 모델링을 수행하여, 모델의 세분화와 입력자료의 정착을 확인하는 과정을 거쳐 발생할 수 있는 오차를 최소화시켰고, 발생한 오차의 수정에도 아주 용이하게 할 수 있게 되어 있다. 그리고 ISC 모델의 입력자료를 그대로 ISC2 모델에 적용시킬 수 있어, 이용에 더욱 편리하게 만들어졌다(U. S. EPA, 1992(a), 1992(b), 1992(c)).

ISCLT2 모델 역시 Gaussian 장기확산식을 이용하며, 좌표 (x, y)에서의 오염물 농도  $C(x,y)$ 는

$$C(x,y) = \frac{QKVD}{2\pi u_s \sigma_y \sigma_z} \exp[-0.5 \left( \frac{y}{\sigma_y} \right)^2] \quad (5)$$

으로 표현된다.

여기서  $Q$ 는 오염물질의 방출율(g/sec),  $K$ 는 계산된 농도를 원하는 단위로 환산하기 위한 계수,  $V$ 는 연직향,  $D$ 는 감쇄항,  $u_s, \sigma_y$ 는 각각 측면, 연직방향의 농도 분포의 표준편차(m),  $u_s$ 는 굴뚝높이에서의 평균 풍속(m/s)이다.

ISCLT2 모델은 기존의 다른 대기 확산 모델에 비해 다소 광범위한 모델로, 모델 내에는 다양한 선택사항이 존재하여 모든 선택조건을 적

절히 잘 이용한다면 좋은 결과를 얻을 수 있는 모델이다. 그러나 실제적으로는 입력자료의 한계 때문에 모든 사양을 완전히 이용한다는 것은 불가능하며, 때문에 본 연구에서는 점 오염원 주위의 건물효과를 고려하지 못하였다. 반면 이 모델은 점, 면, 착지점 모두에 대해 지형의 고저에 대한 고려가 모두 가능하고, 그 출력 형태에 있어 오염원별 기여도 분석도 가능하며, UNIX 체제하에서 운영이 더욱 원활하다는 특징을 가지고 있다. 그러나 이 모델은 이러한 다양한 선택 사양과 지형고저에 대한 고려에도 불구하고 자동보정항이 없어서 모델치의 보정이 불가능한 관계로 실제 환경영향 평가 등에서 거의 이용되지 못하고 있는 실정이다.

따라서 본 연구에서는 일차적으로 ISCLT2 모델에 자동보정항을 첨가하여 모델을 최상의 수준으로 향상시킨 후, 보정된 모델로서 부산광역시에 대해 적용하여 결과를 분석하였다. 모델의 사양으로는 도시형으로 선택하여 SO<sub>2</sub>의 반감기를 4시간으로 두었고, 그 외의 다른 사양은 기본값(default)으로 지정하여 모델링을 수행하였다. 이 모델의 입력자료는 CDM2.0과 유사하게 배출량 자료, 기상 결합빈도 함수, 기온, 혼합고 자료 그리고 지형자료 등이 요구된다.

### 2.3 오염물질 배출량 산정자료

어떤 지역을 대상으로 대기확산 모델을 적용하여 오염물질의 공간적인 분포를 예측하고자 할 때에는 그 대상지역에 대한 대기오염물질 배출량 산정자료와 기상자료가 필수적으로 요구된다. 박순웅 등(1993)은 서울시와 그 인접지역에서의 대기오염 예측모델 개발을 목적으로 각 오염원별 오염물 배출량을 산정한 바 있고, 김동영(1992)은 서울지역을 대상으로 오염물 배출량 산정과 함께 각 오염원에 대한 기여도를 분석한 바 있다. 또한, 박준대(1990)는 서울시의 자료를 이용하여 면 오염원에 대한 배출량을 산정할 수 있는 방법을 개발하였다.

최근 외국의 경우에도 Alexopoulos 등(1993)이 그리스 아테네지역을 대상으로 차량 오염원에 의한 오염물 배출량 산정을 위한 모델을 개발하고, 그것을 이용하여 각 차량의 배출량 산정과 대기오염에 대한 기여도를 분석하였으며, Klimont 등(1994)은 유럽의 몇 개 국가에 대해서 1°×1° 격자로 거대규모의 오염물 배출량을

산정하는 등 보다 정확한 오염물질의 공간적인 분포의 예측을 위해 배출량 산정에 대한 연구를 확장하고 있다.

본 연구에서는 1992년도의 부산광역시 배출원별 자료를 이용하여 오염물질별 대기오염 농도에 대한 기여도를 파악하고 각 오염원별 배출량을 산정하였다.

배출량 산정영역은 128°45'54"E~129°18'13"E, 34°52'50"N~35°23'36"N의 부산광역시로 동서 47km, 남북 47km의 영역이다. 이 지역을 TM 좌표인 1km×1km의 격자계로 만들어 각 격자내에 존재하는 배출업소, 차량, 주택들을 대상으로 오염물 배출량을 산정하였다.

점 오염원은 배출업소 중 연간 고체연료로 환산한 연료 사용량이 100톤 이상인 1, 2, 3종의 업소만을 대상으로 하였고, 면 오염원은 배출업소와 가정난방으로 나누고 배출업소에 의한 오염물 배출량은 연간 고체연료 사용량이 100톤 이하인 4, 5종의 업소를 대상으로 산정하였으며, 가정난방에 의한 오염물 배출량은 부산광역시내 존재하는 주택을 일반주택, 아파트, 기타로 나누어 산정하였다. 그리고 선 오염원에 의한 배출량은 등록된 총 차량을 버스, 트럭, 승용차, 택시로 구분하여 미국 EPA 선 오염원에 대한 오염물질 배출계수를 이용해 산정하였으며(박순웅, 1993), 배출량 산정 대상 오염물질은 SO<sub>2</sub>, TSP, NO<sub>x</sub>, CO, HC이다.

### 2.4 기상 자료

#### 2.4.1 대기 안정도

대기확산 모델에 대한 입력 자료의 또 다른 준비 단계로서 대기 안정도 발생빈도 분석이 요구된다. 일반적인 대기 안정도 판별법으로는 연직온도경도에 의한 안정도 분류 방법(Richard, 1979), 기계적 난류와 열적 대류의 비로서 대기의 안정도를 나타내는 Richardson 수에 의한 대기 안정도 분류법, 풍향의 표준편차를 이용한 Irwin의 방법(Irwin, 1980), Monin Obukhov Length (L)와 거칠기 길이 (Z<sub>0</sub>)를 이용하여 Pasquill Method를 수정한 안정도 판별법(김용국, 1992) 그리고 운량, 일사량, 풍향, 풍속의 자료로서 안정도를 판별하는 Pasquill-Turner 방법(Turner, 1964) 등이 있다.

본 연구에서는 대상 기간을 1985년~1994년의 최근 10년간으로 하였고, 대상 자료는 부산

**Table 1. Pasquill-Turner stability classification**

Wind Speed (m/s)	Day			Cloud Amount ( 8~9 )	Night	
	Insolation(cal/cm <sup>2</sup> -hr) > 50	49-25	< 24		Cloud Amount > 5	< 5
< 2	A	A-B	B	D	(G)	(G)
2 - 3	A-B	B	C	D	E	F
3 - 4	B	B-C	C	D	D	E
4 - 6	C	C-D	D	D	D	D
6 <	C	D	D	D	D	D

**Table 2. Mixing height for each atmospheric stability and season(unit:m)**

Stability	Input Form	Mixing Height				
		Spring	Summer	Fall	Winter	Annual
A	1.5 H <sub>p</sub>	2517	1821	2160	2034	2133
B	H <sub>p</sub>	1678	1214	1440	1356	1422
C	H <sub>p</sub>	1678	1214	1440	1356	1422
D	(H <sub>p</sub> + H <sub>a</sub> )/2	1077	933	975	988	993
E	H <sub>a</sub>	475	651	510	619	564
F	H <sub>a</sub>	475	651	510	619	564

지방 기상청의 풍향, 풍속, 운량 그리고 일사량의 매 3시간 관측 자료를 이용하였다. 분석 방법은 풍향, 풍속, 운량, 일사량 등 기존의 지상관측 자료로서 안정도를 판별하는 실용적이면서 일반적으로 많이 사용되는 Pasquill-Turner 방법을 이용하였다(Table 1 참조).

#### 2.4.2 대기 혼합고

CDM2.0 과 ISCLT2 모델에서는 기상자료로서 기상결합빈도 함수 이외에 대기혼합고 자료를 필요로 한다. 국내 대기혼합고를 지역별, 계절별로 분석한 연구(이단근, 1990)가 있으나 연구대상 기간이 다르고, 또 이 기간에 부산지역에 대해 상층관측이 수행된 자료가 없으므로, 본 연구에서는 포항의 상층관측자료를 이용해 대기 혼합고를 분석하였다.

안정도 등급별 혼합고는 오전과 오후의 대기

혼합고 관측치를 이용하여 Table 2(한국에너지기술연구소, 1992)와 같은 방법으로 추정하였으며, 계절별, 안정도 등급별 추정된 값을 이용하여 모델의 입력자료로 이용하였다. 여기서 H<sub>a</sub>와 H<sub>p</sub>는 각각 오전과 오후의 평균 혼합고를 나타낸다.

#### 2.5 실측 대기질 농도 자료

부산지역에는 전체 7개의 대기오염 자동 측정망이 주거지역으로 명륜동, 대연동, 덕천동, 공업지역으로 신평동, 감전동, 그리고 상업지역으로 범천동과 광복동에 설치되어 있다. 이들 측정망에서의 월별 SO<sub>2</sub> 농도분포(환경부, 1993)는 Table 3과 같다.

모델링 결과분석을 위하여 관측치의 단위를 ppm에서 µg/m<sup>3</sup>으로 환산하여 모델 결과값과 직접 비교하였으며, 관측치의 유효성을 유지하

기 위하여 각 계절별로 그리고 1년에 대해 70% 이상의 자료가 있는 경우에만 분석을 실시하였다. 연구기간 동안의 전년, 그리고 춘계와 동계를 대상으로 한 경우에는 대연동과 신평동을 제외시킨 5개지점의 관측치로서 모델치와 비교를 하였고, 하계의 경우는 2개 지점에 대해서만 관측치가 유효하여 분석에서 제외시켰다(전병일 등, 1994). 그리고 추계의 경우는 7개 지점의 자료가 모두 유효하여 전 측정망의 관측치 전체가 분석에 이용되었다.

그러나 현재 측정망의 위치적인 적정성 문제 그리고 부산광역시외의 크기에 비해 상대적으로 매우 적은 수의 측정망 자료 등이 모델링 결과에 대한 보다 광범위하고 정밀한 분석을 사실상 어렵게 만드는 요인들이었다. 따라서 향후 부산광역시의 효율적인 대기질 관리의 측면에서 부산지역에 대한 자동측정망의 증설과 함께 적절한 위치선정에 대한 고찰이 이루어져야 한다고 보여진다.

### 3. 모델링 결과 분석

#### 3.1 모델링 결과 분석

#### 3.1.1 ISCLT2 모델의 보정

ISCLT2 모델의 가장 큰 단점은 자동보정항이 없다는 것이다. 따라서 본 연구에서는 모델의 구성을 검토하고, 모델에 맞게 이 항을 첨가하여 모델링을 수행하였다. 즉, 1개의 주 프로그램(isclt2.f)과 14개의 외부 프로그램(inpsumlt.f, sositlt.f, ousetit.f, cosetit.f, resetit.f, mesetit.f, calc1lt.f, calc2lt.f, calc3lt.f, outputlt.f, metextlt.f, priselit.f, setuplt.f, sigmaslt.f)으로 구성된 ISCLT2 모델에서 농도 계산 부분인 calc1lt.f에 보정계수항을 직접 첨가하여 계산을 수행하였다. 보정항을 첨가하고 부산지역에 적용한 결과와 수정된 원모델상태로서 적용한 결과를 Fig. 1에 나타내었다.

Fig. 1(A)과 같이 연구기간인 1992년 전체에 대해서 모델링을 수행할 때, 보정항을 고려하지 않은 경우, 모든 관측지점에 대해서 관측치와 모델 결과치의 편차가 상당히 크게 나타나고 있다. 오염물 농도 분포는 연간 분석한 경우와 계절별로 분석한 경우 모두공단지역에서 최고치를 나타내고 있었으며, 특히 계절별로 분석하였을 때

Table 3. SO<sub>2</sub> concentration data at 7 air quality automatic observation sites in Pusan city(Kwang: Kwangbok, Myung: Myungryun, Dae: Daeyeon, Gam: Gamjeon, Duck: Duckcheon, Shin: Shinpyong and Bum: Bumcheon) (unit:µg/m<sup>3</sup>)

Sta. Mon.	Kwang	Myung	Dae	Gam	Duck	Shin	Bum
Jan.	139	144	-	157	81	-	-
Feb.	99	110	-	162	73	-	152
Mar.	94	105	-	141	76	-	-
Apr.	68	76	-	118	68	-	125
May	63	58	-	91	65	-	154
Jun.	47	42	-	91	65	-	-
Jul.	39	34	-	-	-	-	-
Aug.	52	47	-	-	-	-	-
Sep.	50	50	37	71	24	-	55
Oct.	81	71	76	128	37	81	105
Nov.	107	128	112	139	63	97	105
Dec.	110	128	120	183	63	105	97
Annual	78	84	86	128	63	94	112

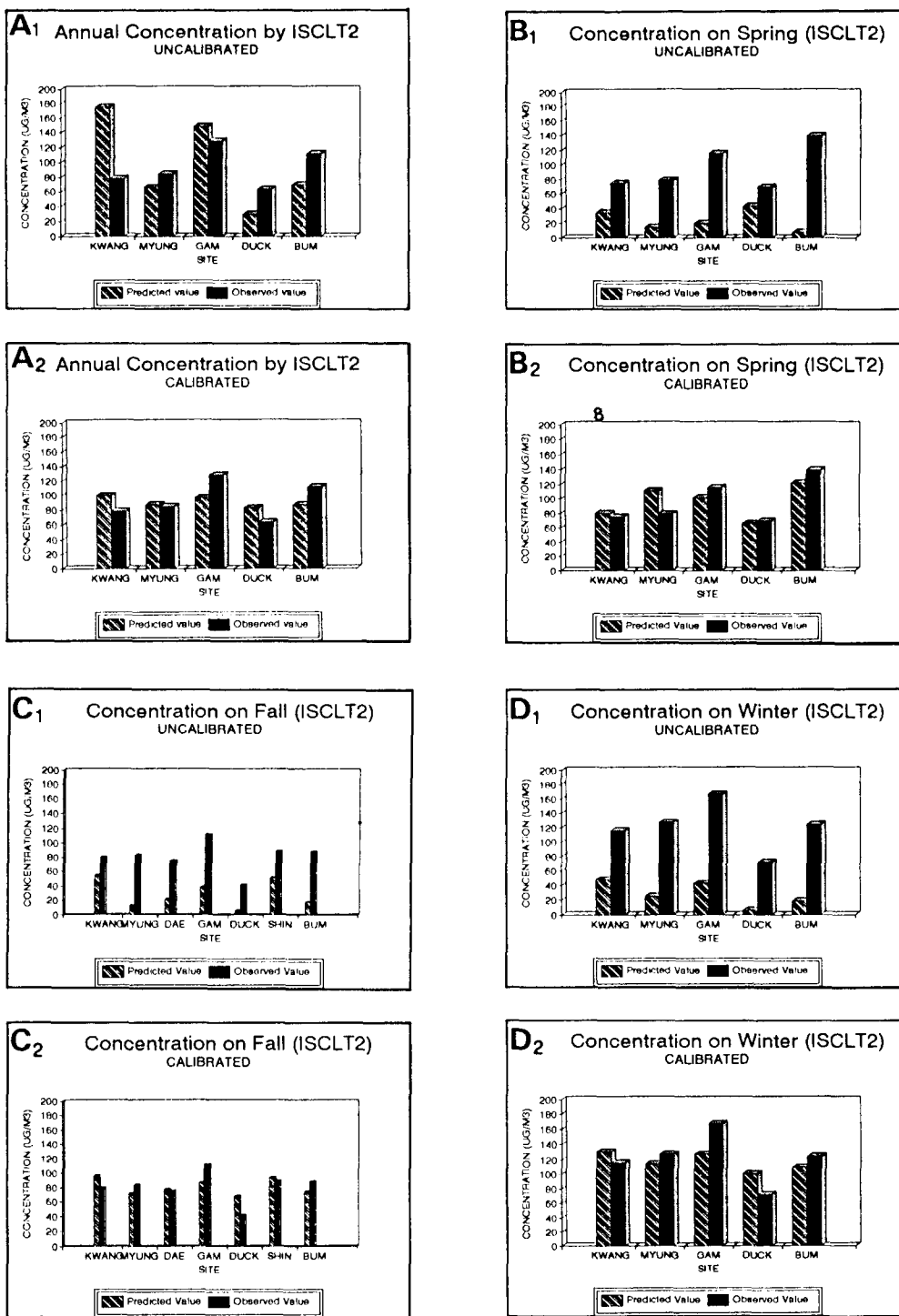


Fig. 1. Concentration of SO<sub>2</sub> for uncalibrated and calibrated ISCLT2 model in 1992.(A) Annual, (B) spring, (C) fall, (D) winter.



의 모델링 결과치는 오염물 농도를 크게 과소추정하고 있었다. 따라서 회귀 분석을 통하여 각 경우에 대한 보정계수를 찾고, 모델에 자동보정항을 첨가하여 모델링 하였을 때, 관측치와 모델치의 편차가 상당히 감소하였고 각 지점마다 그 변화경향은 뚜렷하지 않았지만 관측치에 매우 근사해지는 결과를 나타내었다.

따라서 부산 지역을 대상으로 ISCLT2 모델을 수행하고자 할 때에는 상기와 같은 보정방법으로 모델을 보정한 후 오염물 농도를 예측하는 것이 보다 타당하다고 사료된다.

### 3. 1. 2 대상모델을 이용한 결과 분석

부산광역시를 대상으로 TCM2, CDM2.0 그리

고 보정한 ISCLT2 모델을 중심으로 모델링을 수행한 결과는 Figs. 2~4와 같다. 이 그림들은 각 모델에 대해 연간 및 계절별로 모델링을 수행한 SO<sub>2</sub> 농도의 수평 분포를 나타내고 있다. 전체적으로 그 분포형태는 크게 다르지 않게 나타나고 있으나, 농도값에 있어서는 다소 차이가 나타나고 있다.

세 모델 모두에 대해서 그 결과적인 분포가공단지역인 사상과 장림에서 최대의 농도를 보이고 있고, 상업지역으로 분류할 수 있는 광복동, 범천동 등은 그 다음으로 높게 나타나고 있으며, 명륜동, 덕천동 등 주거 녹지지역인 동래지역은 오염물의 농도가 가장 낮게 예측되고 있다. 각 모델별로 그 결과를 살펴보면, TCM2의 경우 모

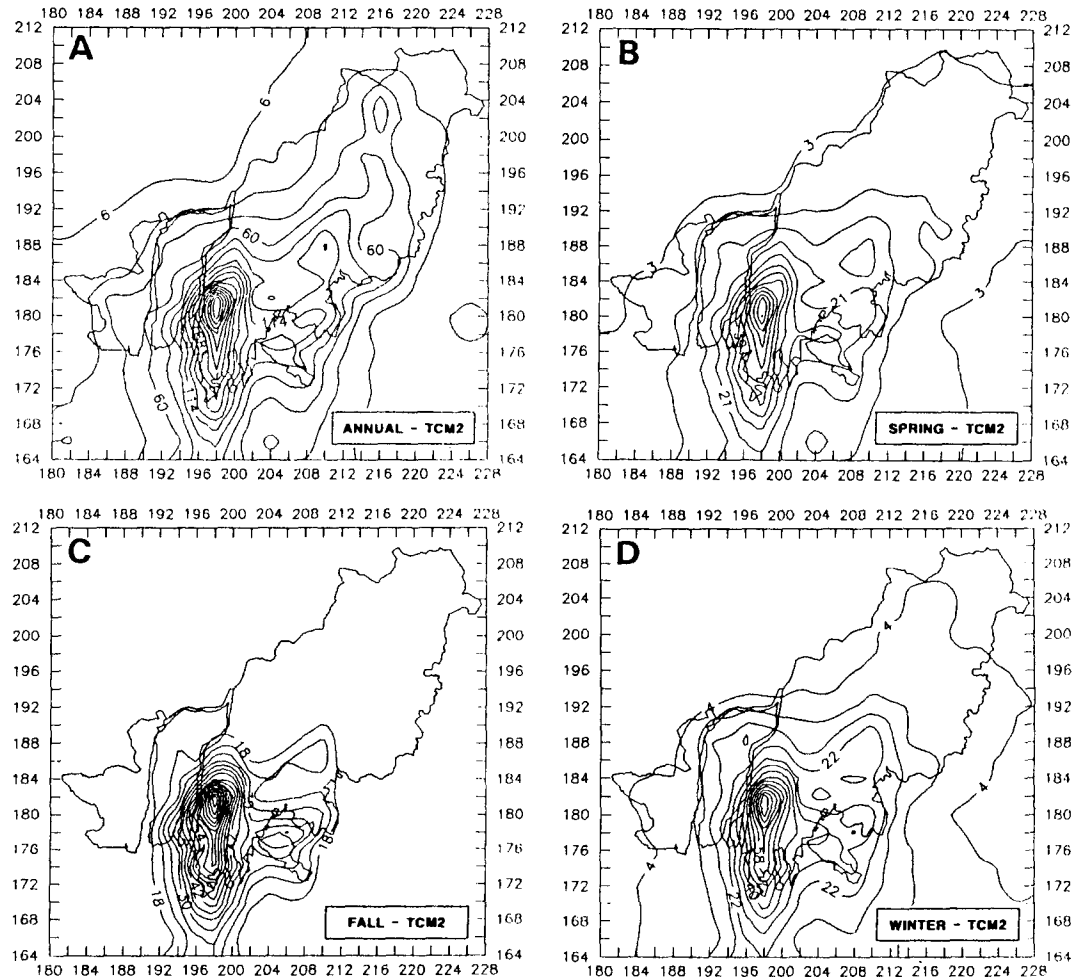


Fig.2. The distribution of SO<sub>2</sub> concentration( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) by TCM2 in 1992.(A) annual, (B)spring, (C) fall, (D) winter.

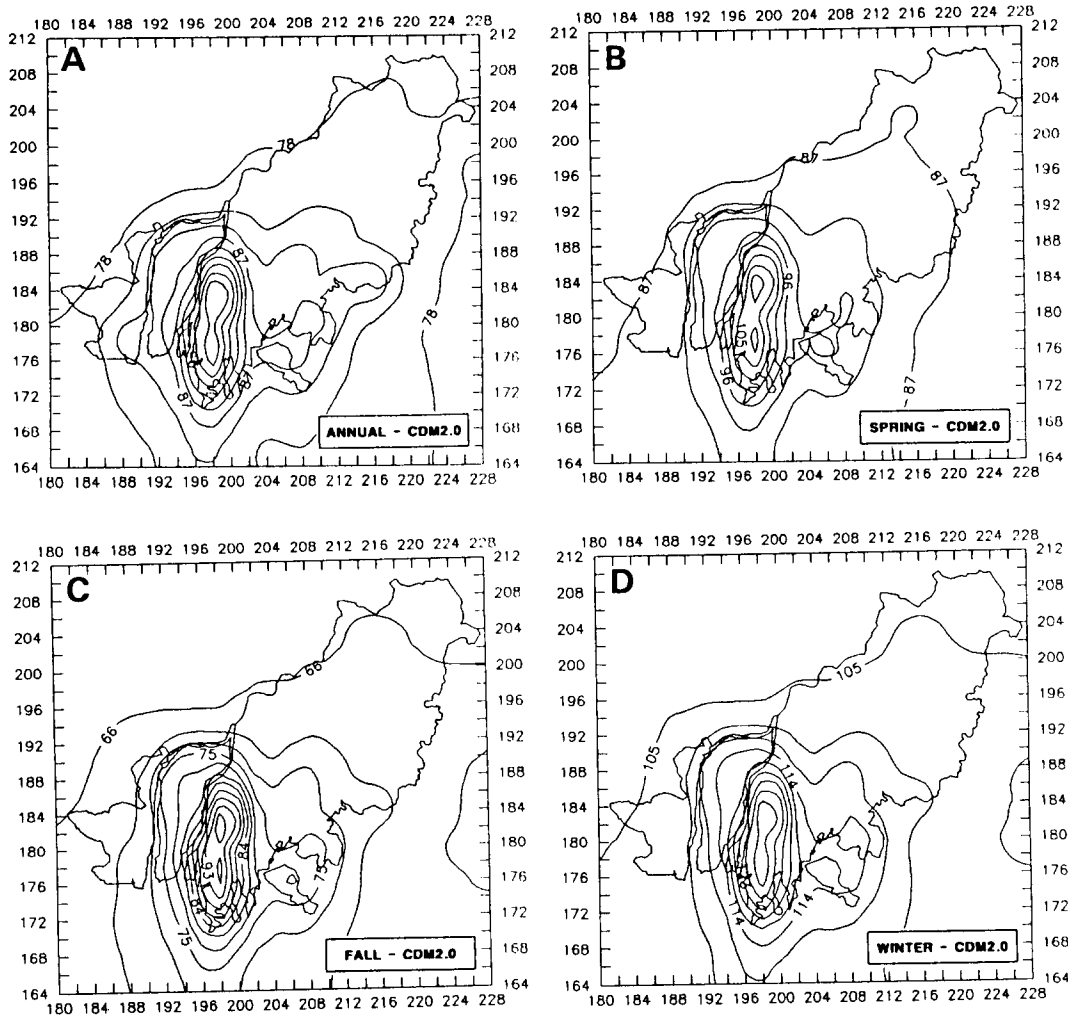


Fig. 3. The distribution of SO<sub>2</sub> concentration( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) by CDM2.0 in 1992. (A) Annual, (B) spring, (C) fall, (D) winter.

델 예측을 통한 농도의 최대치가  $400\mu\text{g}/\text{m}^3$ 을 나타내고 있으나, 이는 관측치보다 훨씬 높게 예측된 것이다. 그리고 CDM2.0과 ISCLT2 모델에 의한 최대 농도의 예측치는 관측치와 유사하게 나타나고 있으며, 두 모델의 오염물 농도 분포 패턴도 아주 유사하게 나타나고 있다.

모델별로 보정과정을 거쳐 관측치와 비교해서 살펴보았을 때, 연간에 대한 모델링에서는 CDM2.0이 비교적 관측치에 더 유사한 값을 나타내었고(Fig. 5(A)), 봄의 경우에는 ISCLT2 모델이 더 관측치에 가깝게 나타났다(Fig. 5(B)). 그리고 가을과 겨울에도 CDM2.0이 다른 모델보다 유효한 결과를 나타내고 있음을 알 수 있다

(Figs. 5(C), 6(D)). 결과적으로 CDM2.0 모델이 부산지역에 대해서는 보다 정합도가 높으리라는 예상을 할 수 있다.

### 3.2 부산지역에 대한 확산 모델의 적용 제안

앞 절에서는 모델별 모델링 결과에 대한 연간 및 계절별 농도 분포와 모델의 보정, 그리고 관측치와 모델치의 비교 등에 대해 살펴보았다. 본 절에서는 간단한 통계적인 방법을 이용하여 TCM2, CDM2.0 그리고 ISCLT2 모델 중에서 어떠한 모델이 부산지역에 가장 적합한 대기 확산 모형인지를 분석하고, 앞으로 부산지역을 대

부산지역에서의 대기확산모델의 적용 및 평가

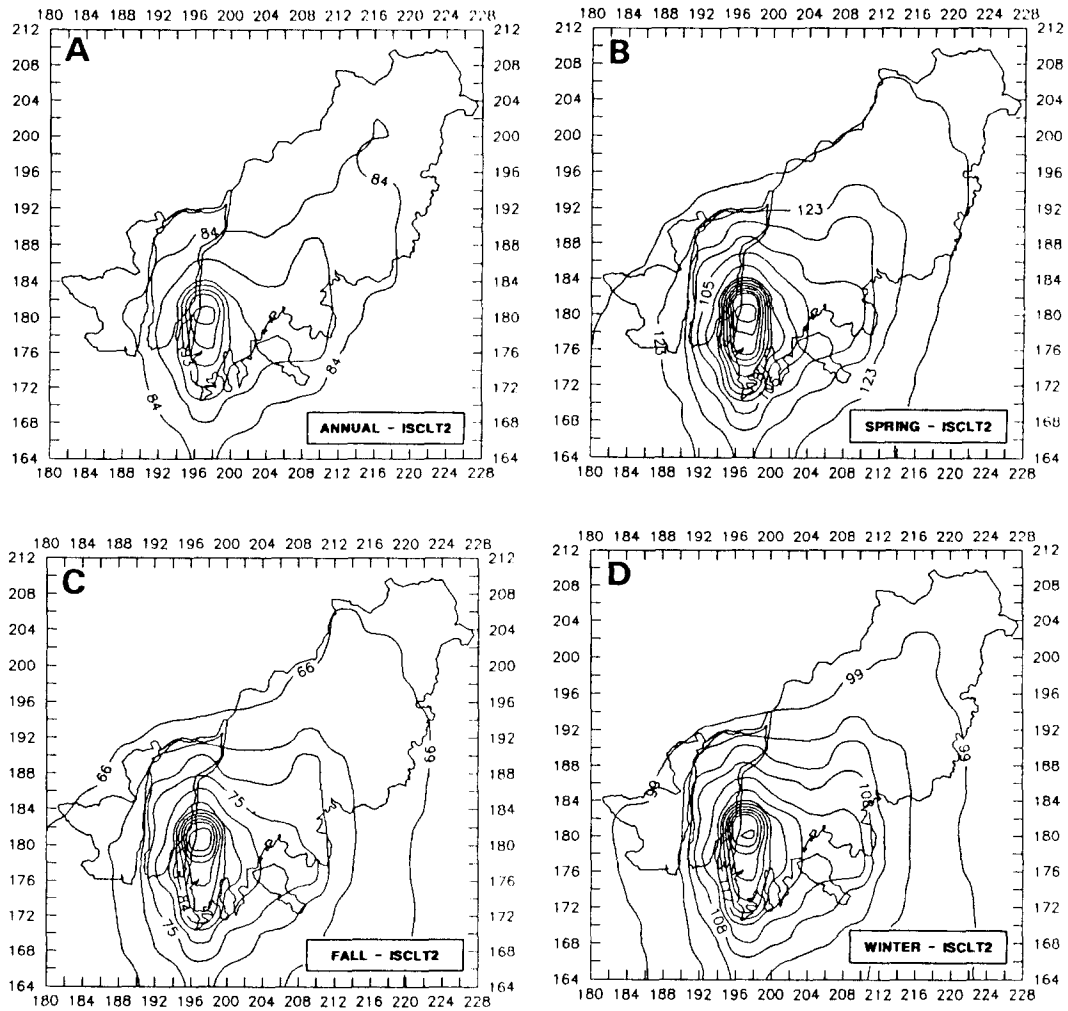


Fig. 4. The distribution of SO<sub>2</sub> concentration(μg/m<sup>3</sup>) by ISCLT2 in 1992. (A) Annual, (B) spring, (C) fall, (D) winter.

상으로 한 대기질 예측에서 이용할 수 있는 모델을 제안하였다.

본 연구에서는 주어진 모델 중 관측치를 가장 잘 설명할 수 있는 최적 모델을 결정하기 위하여 최소자승법을 이용하였다. 최소자승법은 모델 추정치와 실제 관측치의 차(잔차)의 제곱을 모두 합한 잔차자승합이 최소가 되는 모델을 관측치와 가장 유사한 모델로 판단하는 원리이다. 잔차자승합을 식으로 나타내면 다음과 같다.

$$d_j^2 = \sum_{i=1}^n (y_{ij} - x_i)^2, \quad j=1, \dots, k \quad (6)$$

여기서,  $k$ 는 모델의 개수,  $y_{ij}$ 는 모델  $j$ 에 의한 모델 추정치,  $x_i$ 는  $i$  지점에서의 실제 관측치이

다.

Table 4은 부산지역을 대상으로 수행한 모델링 결과에 대해 최소자승법을 통해 분석한 잔차자승합을 나타낸 것이다. 연간으로 분석할 때는 CDM2.0 모델이 다른 모델들보다 뚜렷이 우수함을 보이고 있으며 가을과 겨울의 경우에도 다른 모델들 보다 상당히 나은 결과를 나타내었다. 그러나 봄의 경우에는 ISCLT2 모델이 가장 적절한 결과를 나타내고 있었다. 이와 같은 결과를 토대로 연구기간 전체 및 계절별로 우세한 결과를 나타내었던 CDM2.0 과 ISCLT2, 이 두 모델에 대해서 상관관계를 분석하였다.

상관관계를 분석한 결과(Table 5), CDM2.0

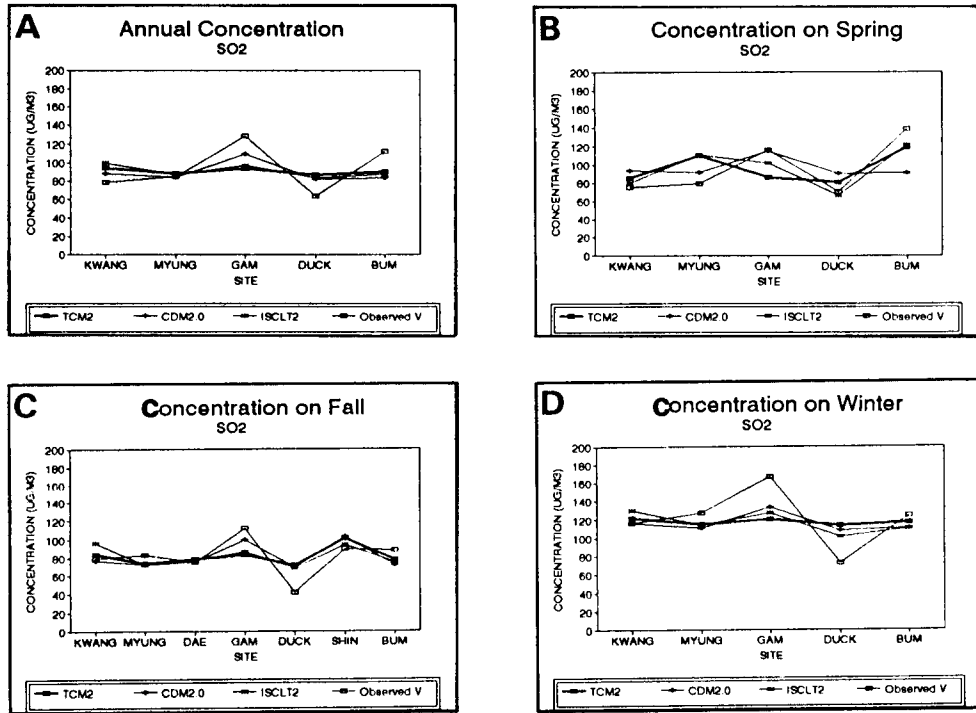


Fig. 5. Comparison with observed and predicted values in 1992. (A) Annual, (B) spring, (C) fall, (D) winter.

이 전년과 가을, 겨울의 경우에 상관계수가 각각 0.73, 0.66, 0.82로 관측치와 양호한 상관관계를 나타내고 있으며, 특히 한후기인 겨울의 경우에 이 모델이 매우 양호한 상관관계를 가지고 있었다. 그리고 봄의 경우에는 ISCLT2 모델이 0.76으로 CDM2.0 보다 훨씬 높은 매우 양호한 상관관계를 나타내고 있었다. 따라서 부산지역을 대상으로 대기질 예측을 함에 있어서 전반적으로는 CDM2.0 을 권장할 수 있으며, 봄의 경우에는 ISCLT2를 특히 권장할 수 있다. 물론 본 연구에서는 입력 자료의 한계상 ISCLT2 모델링 과정에서 모든 선택사항을 고려하지 못하였으나, 앞으로 입력자료의 충실한 준비와 함께 모델의 계속적인 개량이 수행된다면, ISCLT2 모델 역시 연간 및 계절적으로 부산지역에 대해 적용을 권장할 만 하다고 사료된다.

#### 4. 결 론

부산광역시를 대상으로 TCM2, CDM2.0 그리고 ISCLT2 모델을 이용하여 대기확산모델을 적용하고 평가하였다. 먼저 모델링을 수행하기 위한 기초작업으로서 부산광역시에 대한 배출량을 산정(1992년)하고, 최근 10년간 (1985~1994)에 대해 대기 안정도 발생빈도를 분석하였으며, 이 자료를 입력자료로 이용하여 부산지역을 대상으로 대기 오염물질 확산 모델링을 수행하였다. 그리고 마지막으로 최소자승법을 통해 세 모델 중 부산지역에 가장 적합한 모델을 제안하였다.

부산광역시를 대상으로 TCM2, CDM2.0 그리고 ISCLT2 모델을 적용한 결과,

- (1) CDM2.0이 연간 및 가을, 겨울에 있어 가장 양호한 결과를 나타내었고, 봄의 경우에는 보정된 ISCLT2가 부산지역에 보다 적합한 결과를 나타내었다.
- (2) 부산지역을 대상으로 ISCLT2 모델을 이용

Table 4. The summation of residuals analyzed by least square method

Season Model	Annual	Spring	Fall	Winter
TCM2	2539	2459	2160	4159
CDM2.0	1623	3220	1522	2856
ISCLT2	2470	1552	1990	3012

Table 5. Correlation coefficients for the results of CDM2.0 and ISCLT2

Season Model	Annual	Spring	Fall	Winter
CDM2.0	0.73	0.35	0.66	0.82
ISCLT2	0.37	0.76	0.52	0.69

하고자 할 때에는 보정항의 첨가와 함께 입력자료의 충실한 준비가 아울러 요구되어진다. 향후 부산광역시의 보다 효율적인 대기질 관리를 위해서는 선박 오염물 배출량 산정, 대기오염 관측망의 적절한 위치 재고찰, 그리고 그것의 절대적인 증설이 요구되어지며, 아울러 부산지역의 대기오염 현상을 잘 묘사할 수 있는 수치모델의 개발도 시급히 요구되어지는 부분으로 생각된다.

참 고 문 헌

기상청, 1991, 1992, 고층기상월보.  
 김동영, 1992, 서울시 대기오염도의 배출원별 기여도에 관한 연구, 서울대학교 환경대학원 석사학위논문, 68pp.  
 김신도, 김희강, 김정욱, 1986, 서울특별시 대기오염 감축대책 연구, 서울특별시.  
 김영성, 손재익, 1992, ISCLT에 의한 서울 지역의 SO<sub>2</sub> 오염도 조사, 한국대기보전학회지, 8(2), 128-137.  
 김용국, 1992, 대기안정도와 지형조건에 따른 풍향변동폭의 특성에 관한 연구, 강원대학교 대학원 석사학위 논문, 64pp.  
 나진균, 1990, 복잡한 지형에서의 대기오염 확산 모델에 관한 연구, 인하대학교 대학원 박사학위논문, 85pp.

박순웅, 전종갑, 윤순창, 1993, 장기 대기오염 농도예측을 위한 오염배출량 산정에 관한 연구, 한국환경과학연구협의회, 103pp.  
 박준대, 1990, 지역정보를 이용한 먼 오염원 배출량 산정방법의 개발에 관한 연구, 서울대학교 환경대학원 석사학위논문, 82pp.  
 송동웅, 김원만, 1991, 장기예측모델의 정합도 분석에 관한 연구, 한국대기보전학회지, 7(3), 150-155.  
 이만근, 1990, 국내 대기 혼합고의 지역별, 계절별 변화 추이에 관한 연구, 영남대학교 환경대학원 석사학위논문, 34pp.  
 장영기, 송동웅, 1995, 국내 대기오염모델링의 현황과 과제, 한국대기보전학회지, 11(1), 1-14.  
 장영기, 조경두, 1993, 도시형-TCM2개발에 관한 연구, 한국대기보전학회지, 9(2), 132 - 139.  
 전병일, 김유근, 이화운, 1994, 해풍이 부산지역의 대기오염농도에 미치는 영향, 한국환경과학회지, 3(4), 357-365.  
 정진희, 1993, 대기오염 단기예측모델의 정합도 분석에 관한 연구, 서울대학교 환경대학원 석사학위논문, 75pp.

- 최일경, 1989, 지형을 고려한 대기확산 모형의 정합도 분석에 관한 연구, 서울대학교 환경대학원 석사학위논문, 65pp.
- 한국과학기술원, 1982, 부산시 일원의 대기관리에 관한 연구, 112pp.
- 한국동력자원연구소, 1988, 확산 모델링의 최근동향과 한국형 모델개발 연구, 88pp.
- 한국동력자원연구소, 1990, 복잡한 지형내 오염물질의 대기확산모델 개발 연구, 63pp.
- 한국에너지기술연구소, 1990, 에너지소비에 따른 대기환경영향 평가기법 개발(I), 104pp.
- 한국에너지기술연구소, 1991, 에너지소비에 따른 대기환경영향 평가기법 개발(II), 105pp.
- 한국에너지기술연구소, 1992, 에너지소비에 따른 대기환경영향 평가기법 개발(III), 110pp.
- 한국토지개발공사, 1989, 단지개발에 따른 대기오염 확산 모델에 관한 연구, 222pp.
- 환경부, 1994, 점 오염원 배출업소 시설 조사표.
- 환경부, 1993, 환경연감.
- Alexopoulos, A., D. Assimacopoulos and E. Mitsoulis, 1993, Model for traffic emissions estimation, *Atmos. Env.*, 27B, 435-446.
- Busse, A. D. and J. R. Zimmerman, 1973, User's guide for Climatological Dispersion Model, U. S. EPA, 346pp.
- Clarke, J. F., 1964, A simple diffusion model for calculating point concentrations from multiple sources, *J. Air Poll. Control Assoc.*, 14, 347.
- Fisher, P. W., and J. A. Foster, 1994, Comparison of the ISCST model with two alternative U. S. EPA models in complex terrain in Hamilton County, Ohio, *J. Air & Manage. Assoc.*, 44, 418-427.
- Irwin, J. S., 1980, Estimation of Pasquill stability categories. U. S. EPA.
- Irwin, J. S., C. Thomas and J. Catalano, 1985, CDM2.0-Climatological Dispersion Model User's Guide(abridged), 49pp.
- Klimont, Z., M. Amann, J. Cofala, F. Gyarfas, G. Klaassen and W. Schopp, 1994, An emission inventory for the central European initiative 1988, *Atmos. Env.*, 28, 235-246.
- Martin, D. O. and J. A. Tikvart, 1968, A general atmospheric diffusion model for estimating the effects on air quality of one or more sources, *APCA paper* 68-148.
- Miller, M. E. and G. C. Holzworth, 1967, An atmospheric diffusion model for Metropolitan Areas, *J. Air pollution control Ass.*, 17(1), 46pp.
- Pooler, F., 1961, A prediction model of mean urban pollution for use with standard wind roses, *Int. J. Air Water Pollut.*, 4(3/4), p199.
- Richard A. D., 1979, Atmospheric Motion and Air Pollution, John Willy & Sons, Inc., 323pp.
- Texas Air Control Board, 1980, User's Guide to the Texas Climatological Model, Austin, 181pp.
- Turner, D. B., 1964, A diffusion stability model for an urban area. *J. Climate and Applied Meteorology*, 3, 83-91.
- U. S. EPA, 1987, Compilation of Air Pollutants Emission Factors, Vol. I : Stationary Point and Area Sources, AP-42, 4th Edition.
- U. S. EPA(a), 1992, User's Guide for the Industrial Source Complex(ISC2) dispersion models volume I, 175pp.
- U. S. EPA(b), 1992, User's Guide for the Industrial Source Complex(ISC2) dispersion models volume II, 54pp.
- U. S. EPA(c), 1992, User's Guide for the Industrial Source Complex(ISC2) dispersion models volume III, 50pp.