

대기확산모델을 사용한 공단주변지역의 대기오염물질농도 예측 및 평가 - ISCST3, FDM, AERMOD를 중심으로 -

이 화 운 · 원 경 미 · 배 성 정*
부산대학교 대기과학과 · 부산대학교 환경시스템학과
(1998년 12월 31일 접수)

The Prediction and Evaluation Air Pollutants Concentration around Industrial Complex by using Atmospheric Dispersion Models - Based on ISCST3, FDM, AERMOD -

Hwa-Woon Lee, Gyeong-Mee Won, and Sung-Jung Bae*
Dept. of Atmospheric Sciences, Pusan National University, Pusan, Korea
*Dept. of Environmental System, Pusan National University, Pusan, Korea
(Manuscript received 31 December, 1998)

We will calculate concentration of air pollutants using ISCST3, FDM and AERMOD of models recommended in U. S. EPA which are able to predict concentration of short term for point source, complex like industrial complex, power plant and burn-up institution.

Before executing model, as analyzing computational result of many cases according to selecting of input data, we will increasing predictable ability of model in limit range of model. Especially, we analyzed three cases - case of considering various emission rate according to time scale and not, case considering effect of atmospheric pollution materials removed by physical process.

In our study, after comparing and analyzing results of three model, we choose the atmospheric dispersion model reflected well the characteristic of the area. And we will investigate how large the complex pollutant sources such as industrial complex contribute to atmospheric environment and air quality of the surrounding the area as predicting and estimating chosen model.

Key words : atmospheric dispersion model, industrial complex, case study, various emission rate, physical process, air quality

1. 서 론

현재 대기오염 확산모델은 대상지역의 지형적 특성이나 오염물의 종류에 따라 수십 종이 개발되어 있으며, 국내에는 미국에서 개발된 UNAMAP(User's Network for Applied Modelling of Air Pollution)에 수록된 가우시안 모델들이 널리 사용되고 있다. 1983년 미국 Engineering Science사가 환경부 용역으로 국내 현대 엔지니어링과 효성 엔지니어링이 협력하여 수행한 한강유역 환경종합 계획에서 서울을 중심으로 한 수도권지역에 대하여 ISC, APRAC, IMPACT, VISIBILITY, RECEPTOR 모델 등을 이용하여 폭 넓은 대기오염연구를 수행한 바 있고, 1985년 환경청의 낙동강유역지방 환경보전종합계획사업에 현대 엔지니어링이 ISCLT 모델을 적용한 바 있다. 또한 김양균 등¹⁾은 서울지역을 대상으로 TCM, CDMQC, ISCLT (Industrial Source Complex Long Term) 모델을 사용하였

고, 김신도 등²⁾이 서울지역에 TCM, CDMQC, ISCLT 모델을 적용시켰으며, 정용과 장재연³⁾은 역시 서울지역에 Hanna - Gifford 모델과 AQDM(Air Quality Dispersion Model) 모델을 사용하였다. 또 나진균⁴⁾은 TCM을 근간으로 하여 복잡한 국내 지형조건에 맞게 SCM(Seoul Climatological Model)을 개발한 바 있고, 김영성과 손재익⁵⁾은 서울지역에 대해 ISCLT를 적용하고 정합도를 평가하였으며 최근에는 방종선⁶⁾이 TCM2, CDM2, ISCLT2 모델을 중심으로 부산 지역을 대상으로 하여 대기확산모델을 적용하였다. 특히 기존의 연구에서는 CDMQC, TCM 등의 대기오염모델이 지역 대기질 관리를 위한 연구에 많이 활용되었다.

이러한 대기오염 모델에 의해 예측된 결과는 모델에 적용된 오염물질의 배출량과 오염물질의 물리·화학적 성질, 입력된 기상자료의 특성, 배출원의 주변 특성, 농

도계산이 행해지는 착지점의 특성 등에 의해 크게 영향을 받는다. 따라서 모델의 특성에 관한 검토와 입력자료의 준비 및 지역 적용에 대한 연구는 입력자료의 신뢰도를 높일 뿐 아니라 모델의 예측력을 향상시킬 수 있을 것이므로 대기확산 모델을 대상지역에 적용할 경우에는 합당한 검토가 선행되어야 한다.

본 연구에서는 입력자료의 선정에 대한 여러 가지 사례별 연구를 통해 계산 결과가 얼마나 민감하게 반응하는가를 분석하여 모델이 갖는 한계범위 안에서 예측력을 높이고자 하였다. 이에 본 연구에서는 산업단지와 발전소, 소각시설과 같은 점오염원 및 복잡한 오염원에 대해 대기오염농도를 예측할 수 있는 대기확산모델인 ISCST3와 FDM, AERMOD 모델을 이용하여 입력변수에 대한 세 모델 결과를 비교 분석한 후, 가장 지역특성을 잘 반영할 수 있는 대기확산모델을 선정하여 주변 대기환경에 미치는 영향을 예측하고 평가하려고 한다. 이는 향후 적용지역에 대한 대기질 예측 및 대기질의 환경영향평가에도 활용할 수 있을 것이고, 앞으로의 총량규제에 대비하여 실용성 있는 대기환경 농도예측모델 개발에 기초자료를 제공할 수 있을 것이다.

2. 연구범위 및 분석방법

2.1. 대상모델의 개요

본 연구에서는 부산지역의 주요 배출원이 되고 있는 사상공단과 신평공단, 장림공단지역을 대상지역으로 선정하였는데 주변지역은 산악과 구릉지대로 이루어져 있어 산업단지에서 발생하는 오염물질에 의한 대기질 영향 예측시 지형의 영향을 크게 받게 된다. 따라서 미국 EPA에서 권장하고 있는 모델 중 지형을 고려하여 산업단지, 발전소, 소각시설과 같은 복합오염원과 점오염원에 대한 대기오염농도를 예측할 수 있는 대기확산모델인 ISCST3와 FDM, AERMOD 모델을 이용하였다.

2.1.1. ISCST3

ISCST3모델은 다양한 오염원과 지형의 영향 및 주변 지역의 건물에 의한 공기역학적인 영향 등을 고려할 수 있으며, 장·단기적인 농도 및 건·습성침적(dry·wet deposition)의 계산이 가능하다. 점, 선, 면, 부피, openpit 오염원의 입력범위에 제한이 없으며, 연기해석을 위해 Briggs의 연기 상승식 및 stack tip downwash식을 사용하였고 Huber와 Shulman의 building wake algorithm을 사용하여 stack tip downwash 현상과 주변의 건물에 의한 영향(building wake effects)을 고려할 수 있으며, 각각의 오염원이 대기질에 미치는 기여도를 분류할 수 있는 장점을 가지고 있다.

2.1.2. AERMOD

AMS/EPA Regulatory Model Improvement Committee (AERMIC)은 1995년 AERMOD를 발표하였는데, AERMIC의 목표는 ISC모델을 개선하여 AERMOD로 대체하는 것이다.

AERMOD모델은 runstream setup 파일과 기상자료

파일로 구성되어 있으며, AERMET 기상선행 프로그램에 의해 수행되는 기상자료 파일은 지표면 성분요소와 기상자료의 수직 profile을 포함하는 2개의 형태를 요구한다. 또한 지형의 영향을 고려하기 위하여 착지점 고도 계산이 가능한데, 이때 착지점의 고도와 함께 언덕(hill)의 높이를 입력해야 한다. 이 언덕높이의 값을 생성하기 위하여 AERMAP이라 불리는 지형 선행프로그램이 1995년에 개발되었다.

2.1.3. FDM

FDM모델은 fugitive dust의 오염원으로부터 농도와 침적의 영향을 계산하도록 고안된 대기확산모델이다. Gaussian Plume의 식을 기초로 하여, 개선된 gradient-transfer deposition algorithm을 통합시켰으며, 침적을 계산하기 위하여 일련의 입자크기 등급을 할당하도록 되어있다.

FDM은 1시간, 3시간, 8시간, 24시간 평균의 단기예측과 장기예측이 평탄 또는 복합지형에서 도시 또는 농촌지역에 대해 가능하고, 배출원과 착지점의 계산에 있어서는 최대 121개의 배출원과 1200개의 착지점의 수에 제한이 되어 있는 단점이 있다.

2.2. 계산영역 및 기간

부산지역 중 대기오염물질의 주요 배출원인 사상, 신평, 장림공단을 포함한 주변지역을 모델링계산 영역으로 설정하여 각 모델의 일정크기의 격자좌표에 적용할 수 있도록 1km크기의 수평격자로 나누어 10×23(TM좌표로 195 ~ 205km, 남북 171 ~ 194km영역)개 격자로 세분화하였으며 농도분포의 특성을 알아보기 위하여 1km×1km 격자 간격으로 착지점을 배치하였다.

대상물질로는 공단지역에서 오염도가 높은 물질인 SO₂와 TSP를 선정하여 고농도가 발생했던 1995년 12월 2일부터 3일까지 단기 예측하여 공단지역 및 인근지역에 미치는 영향을 파악하였다. 또한 모델의 정확도 분석시 요구되는 관측자료는 환경부 산하 대기질 자동측정망 중 덕천동, 광복동, 감전동, 신평동지점의 SO₂, TSP의 농도를 이용하였다.

2.3. 입력자료의 구성

2.3.1. 배출량자료

배출량은 SO₂와 TSP에 대해 1km×1km 격자 간격으로 산정하였다. 면오염원에 의한 오염물 배출량을 산정하기 위하여 이용한 자료^{7,8)}는 부산광역시에서 연간 가정난방용으로 사용하는 총 연료사용량, 각 구별 주택유형별 분포 현황, 각 주택유형별 연료 사용비 그리고 각 동별 인구 및 세대분포 등이다. 선오염원은 부산광역시의 차종별 차량 등록대수현황, 차종별 일일 평균 주행거리, 부산광역시 도로길이 추정자료를 이용하여 산정하였다. 점오염원자료는 환경부 산하 낙동강 환경관리청의 대기배출업소의 자료⁹⁾를 각각 이용하여 배출량을 산정하였다. 산정방법과 결과는 이화운 등¹⁰⁾의 연구에 수록되어 있다.

2.3.2. 기상자료

수평기상자료는 부산대학교 대기환경연구실에서 모델링영역내에 위치하고 있는 신평 2동 동사무소 옥상에 설치한 자동관측장비(AWS)의 관측자료를 이용하였다. 관측자료는 통신회선을 통하여 자동으로 수신하도록 시스템을 구축하였다. 관측항목은 1시간 간격의 풍향, 풍속, 기온으로 이러한 관측은 대상지역의 보다 정밀한 국지기상을 파악하는데 유용하게 사용된다.

대기혼합고를 산정하기 위해 필요한 연직기상자료는 본 모델링영역에 포함되어 있는 부산의 감천지역에서 1996년 2월 3일부터 4일까지 실시한 동계관측으로부터 자료를 생성, 이용하였는데 사용한 에어존대는 미국 Atmospheric Instrument Research Co. 의 ADAS-3B이며, 개인용 컴퓨터에 연결하여 자료를 처리하였다. 관측요소는 고도별 기압, 기온, 상대습도이다. 대기혼합고의 산정방법은 이화운 등¹⁰⁾의 연구에 수록되어 있다. 모델링기간의 국지적인 기상특성은 남서풍계열이 우세하고, 평균풍속이 4.8m/s, 평균기온이 -0.4°C이었으며, 평균 혼합고는 407m이었다.

2.4. 모델의 실행

본 대상지역의 지형을 고려하기 위하여 각 격자별 해발고도를 산출하여 모델의 지형자료를 만들었다. 모델의 실행은 McElroy - Pooler확산계수를 사용하는 도시 모델의 조건에서 대기확산모델의 선택조항 대부분을 사용하여 예측하였다. 그러나 대기확산모델은 동일조건-풍속, 혼합고, 배출특성 등 - 에 대한 수많은 반복결과와 평균농도를 나타낸 것으로, 현재의 기술력으로 밝혀지지 않거나 정량화되지 않은 현상 즉, 난류속도 등에 따라 모델링 결과의 재현성이 감소되어 측정치와 예측치의 편차가 발생하게 된다. 이에 모델링 결과에 크게 영향을 미치는 요소 중의 하나인 입력자료를 사례별로 변화시켜 계산한 결과가 얼마나 민감하게 반응하는가를 분석함으로써 모델이 갖는 한계범위 안에서 오차를 최소화하여 모델의 예측력을 높이고자 하였다.

본 연구에서는 대기확산모델의 입력자료 중 가장 중요한 요소 중의 하나인 배출량자료와 물리적 변환에 의한 제거기작에 중점을 두어 3가지 사례연구를 하였다. 사례 1은 기존의 연구에서처럼 시간에 따라 변화하는 배출율의 영향을 고려하지 않은 경우이며, 사례 2는 시간에 따라 변화하는 배출율의 영향을 고려한 경우, 사례 3은 시간에 따라 변화하는 배출율의 영향과 물리적 과정에 의해 제거되는 오염물질의 영향을 모두 고려한 경우이다. 사례 2와 사례 3의 경우 시간에 따라 변화하는 배출율의 계산이 가능한 모델은 ISC3모델과 AERMOD모델이며, 오염물질이 확산되는 시간을 8시간, 24시간 구분하여 SO₂와 TSP의 농도를 각각 계산하였다.

3. 사례 연구

3.1. 시간에 따른 배출율의 영향을 고려하지 않은 경우(사례 1)

배출율을 24시간 동일시하여 단기 예측한 결과 8시간

간격으로 확산이 이루어졌을 때의 최고농도는 실제 측정 결과보다 높은 값을 보였는데, 이는 실제 측정결과가 확산이 충분히 이루어진 상태에서 측정된 평균적인 농도이기 때문으로 24시간 확산이 이루어진 평균농도가 실제 측정값과 비슷한 농도분포를 보였다. 이때 상관도 분석 결과 SO₂의 경우(Fig. 1) ISCST3, AERMOD, FDM모델에 대해 각각 0.853, 0.671, 0.798의 상관성을 나타내고 있으며 TSP의 경우(Fig. 2)에는 0.792, 0.814, 0.892의 상관성을 나타내었다. TSP의 경우 FDM모델이 양호한 상관성을 보이고 있는데 이는 미세먼지의 영향을 고려하는 모델의 특성의 결과라고 보여진다. 그리고 모델 예측치는 실제 관측치에 비해 과대평가하는 경향을 나타내었다.

3.2. 시간에 따른 배출율의 영향을 고려한 경우(사례 2)

시간에 따라 변화하는 배출율의 영향을 고려할 수 있는 ISCST3와 AERMOD모델의 경우 실제 부산지역의 12월 SO₂, TSP농도의 일변화에 근거를 두어 1시간 간격으로 배출율을 변화시켜 모델링하였다. 그 결과 확산간격을 24시간으로 두었을 때 ISCST3와 AERMOD모델에 대한 상관도는 SO₂의 경우(Fig. 1) 0.887, 0.865, TSP의 경우(Fig. 2) 0.885, 0.852로 배출율을 동일시하여 계산한 사례 1보다 향상된 결과를 나타내었다.

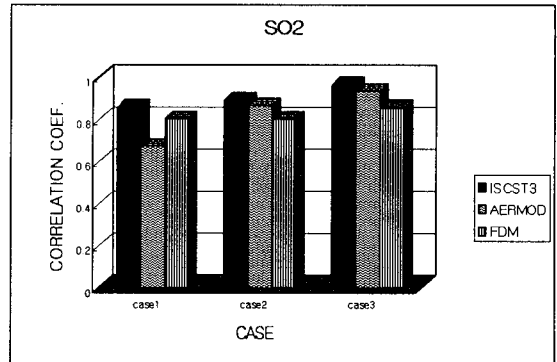


Fig. 1. Correlation coefficients between observed values and predicted values of SO₂ by ISCST3, AERMOD and FDM models according to each case study.

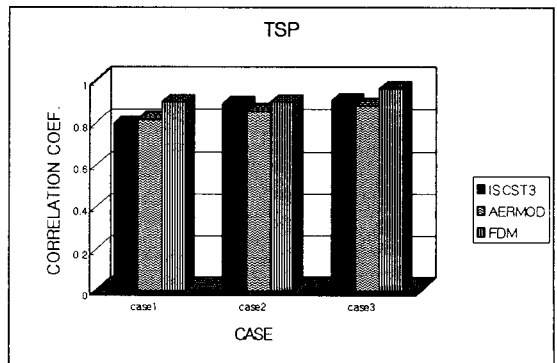


Fig. 2. Same as Fig. 1 but for TSP.

각 모델별로 보면 SO₂의 경우 ISCST3가 가장 높은 상관도를 나타내었고, TSP의 경우 미세먼지의 영향을 고려한 FDM모델이 가장 높은 상관성을 보였다. 또한 모델 예측치는 여전히 실제 관측치에 비해 과대평가하는 경향을 나타내었다.

3.3. 시간에 따른 배출율과 물리적 변환에 의해 제거되는 오염물질의 영향을 모두 고려한 경우(사례 3)

대기오염물질은 건조상태에서의 건조침적과 강우에 의한 습성침적, 그리고 물리적 변환에 제거되어진다. 사례 1과 2에서 모델 결과치가 실제 관측치에 비해 다소 과대평가하는 경향을 보이고 있는데 이는 물리적 과정에 의해 제거되는 오염물질의 영향이 고려되지 않았기 때문일 것이다. FDM모델의 경우 오염물질의 농도계산에 침적의 영향을 고려하였고 ISCST3, AERMOD모델의 경우 오염물질의 반감되는 시간과 관련된 감쇄항을 고려하여 농도를 계산하였다.

ISCST3와 FDM모델에 있어서 감쇄항(D)은 $\psi > 0$ 인 경우에는 $\exp(-\psi \frac{x}{u})$ 이고, $\psi = 0$ 인 경우에는 -1이다. 여기서 ψ 는 감쇄계수(decay coefficient(1/sec)), x 는 풍하 거리(m), $\psi = \frac{0.693}{T_{1/2}}$ 이다. FDM모델의 침적항(D)은 $U_d X_{z=0}$ 이다. 여기서 D는 침적율(deposition rate), U_d 는 침적속도(deposition velocity), X는 농도이다.

시간에 따른 배출율과 물리적 변환에 의해 제거되는 오염물질의 영향을 모두 고려하여 계산한 결과 ISCST3, AERMOD, FDM모델에 대한 각각의 상관도는 SO₂의 경우(Fig. 1) 0.962, 0.930, 0.853, TSP의 경우(Fig. 2) 0.893, 0.876, 0.956로 나타났다. 또한 실제 관측값에 근접하는 결과를 보이는데 모델별로 상관도를 분석해 보면 SO₂의 경우에는 ISCST3와 AERMOD모델이 높은 상관도를 나타내었으며, TSP의 경우에는 FDM과 ISCST3모델이 높은 상관도를 나타냈다.

이상의 사례별 연구에 의하면 SO₂의 경우 시간에 따라 변화하는 배출율을 고려하여 물리적 과정에 의해 제거되는 오염물질의 영향을 고려한 ISCST3모델이 예측력이 높았고, TSP의 경우에는 침적의 영향이 고려된 FDM모델이 예측력이 높았다. 따라서 SO₂의 경우에는 공단지역의 복잡한 점오염원의 농도예측이 용이하며 산악지형으로 둘러싸인 공단 인근지역의 영향을 잘 고려한 ISCST3모델이 본 연구 대상지역에 적합한 모델로 판단되며 TSP의 경우에는 미국 EPA에서 미세먼지의 농도에 측에 유용한 모델로 추천하고 있는 FDM모델이 ISCST3모델이 비해 양호한 상관도를 나타낸 본 대상지역에 적합한 모델로 판단된다.

4. 대상지역의 대기오염 농도 예측 및 평가

부산광역시 최대 대기오염 배출원인 사상, 신평, 장림공단지역과 인근에 위치해 있는 상업지역인 광복동과 주거녹지지역인 덕천동을 중심으로 본 연구에서 이 대상지역에 가장 적합한 모델로 분석된 ISCST3와 FDM을

이용하여 SO₂와 TSP 농도의 지역적 분포를 예측하고 평가하였다. Fig. 3은 모델링영역의 지역 분포 및 지형도를 나타낸다.

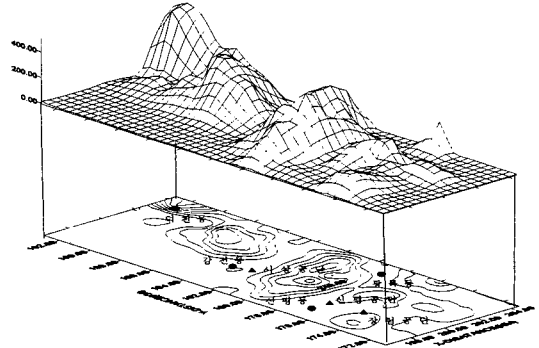


Fig. 3. Three-dimensional topography of industrial complex and its neighboring area. (● ; industrial complex, ▲ ; air quality monitoring site)

본 대상지역의 SO₂와 TSP의 배출량의 분포는 Figs. 4 ~ 5에서 보여주는데 점, 선, 면오염원을 모두 포함시킨 배출량이다. 사상 공단지역에서의 배출량이 가장 많은데, 4, 5종의 배출업소가 이 지역에 많이 위치하고 있으며, 1종의 대규모 배출업소도 포함되어 있다.

Figs. 6 ~ 7은 ISCST3와 FDM모델에 의해 예측된 SO₂와 TSP농도의 지역적 분포를 나타낸다. 두 오염물질에 대한 전체적인 분포형태는 크게 다르게 나타나지 않으며 공단지역인 사상과 신평 및 장림공단에서 최대농도를 보이고 있고, 상업지역으로 분류할 수 있는 광복동부근은 그 다음으로 농도가 높게 나타나고 있으며, 녹지지역인 덕천동 부근지역이 가장 농도가 낮게 예측되었다. SO₂의 경우 사상공단부근에서 농도의 최대치가 157ppb를 나타냈고 TSP의 경우 동일지역에서 최대농도치 350 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 을 나타냈다. 이 결과치는 SO₂와 TSP에 대한 24시간 환경기준치인 140ppb와 300 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 을 각각 초과하는 값들이다. 이는 사상공단지역의 자체 배출량도 많았지만 주풍이 남서풍계열이 우세한 점을 미루어 보아 모델링한 날의 신평, 장림공단에서 방출된 오염물질의 확산에 의한 영향도 크게 작용한 것으로 보인다.

5. 결 론

부산광역시의 최대 배출원인 신평과 장림 및 사상공단지역과 그 주변지역을 대기확산모델을 이용하여 단기간의 SO₂와 TSP농도를 예측하였다. 본 연구에서는 지역특성에 적합한 대기확산모델을 선정하는데 있어서 예측력을 향상시킬수 있도록 입력자료에 대한 사례연구를 수행하였다. 단기예측의 경우 모델치는 실제 관측치에 비해 과대평가하는 경향이 있는데 시간에 따라 변화하는 배출율과 물리적 변환에 의한 영향을 고려했을 때 계산 결과는 관측치와 잘 일치하였다. 특히 SO₂의 경우 공단

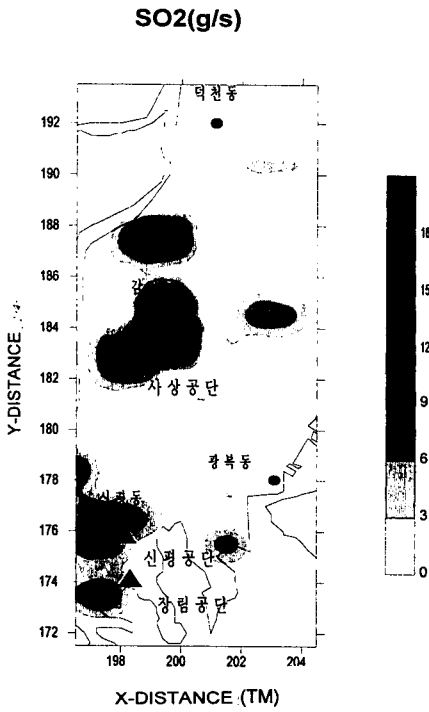


Fig. 4. The emission distribution of SO₂ emitted from modeling area.

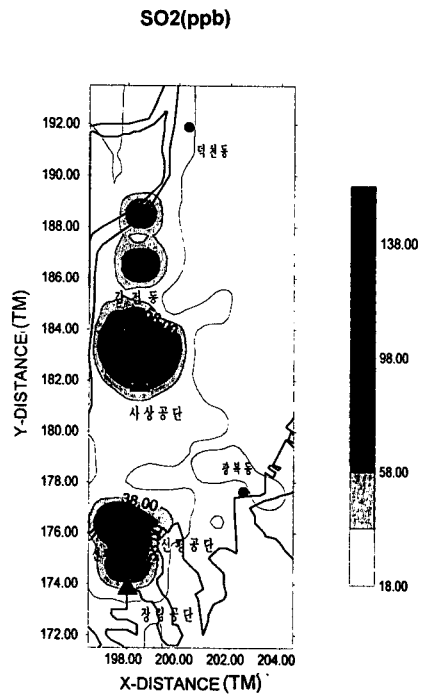


Fig. 6. Distribution of SO₂ concentration simulated by ISCST3 model.

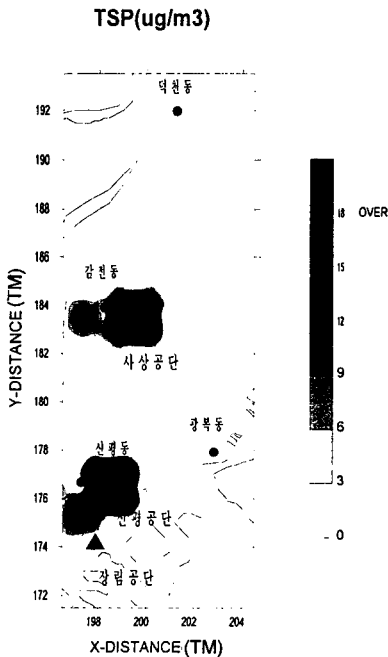


Fig. 5. Same as Fig. 4 but for TSP.

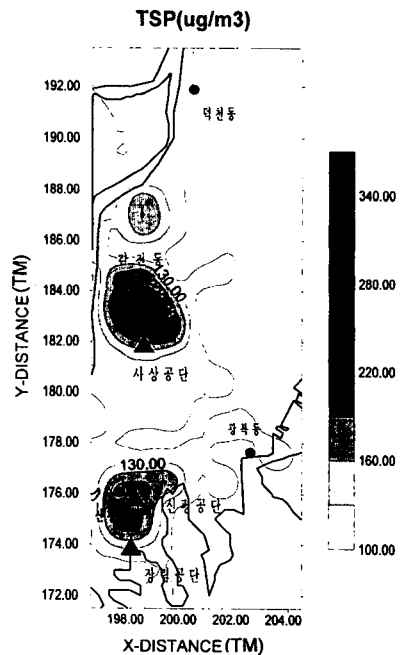


Fig. 7. Distribution of TSP concentration simulated by FDM model.

지역의 복잡하고 다수의 점오염원의 고려가 용이하고 주변 산악지형의 지형고려가 가능한 ISCST3모델이 가장 높은 예측력을 보였고, TSP의 경우에는 미국 EPA에서 미세먼지의 영향과 침적과정의 고려가 가능한 모델로써 추천하는 FDM모델이 가장 높은 예측력을 보였다. 따라서 SO₂의 경우는 ISCST3모델과 TSP의 경우에는 FDM 모델이 대상지역에 적합하다고 판단되었으며, 이를 이용하여 모델링한 결과는 SO₂의 경우 사상공단부근에서 최대농도치 157ppb를 나타냈고, TSP의 경우 동일지역에서 최대농도치 350 μg/m³을 나타냈다. 이 결과치는 SO₂와 TSP에 대한 24시간 환경기준치인 140ppb와 300 μg/m³을 각각 초과하는 값들로써 공단주변지역에 대한 엄격한 대기질 규제가 행해져야 할 것이다.

참 고 문 헌

- 1) 김양균, 최덕일, 이민희, 조강래, 나진균, 정장해, 1985, 대기오염확산모델 개발에 관한 연구, 한국대기보전학회지, 1(1), 53-70.
- 2) 김신도, 김희강, 김정욱, 1986, 서울특별시 대기오염 감축대책 연구, 서울특별시.
- 3) 정용, 장재연, 1986, 대기오염모델의 정합도에 관한 연구(서울특별시 대기오염추계에 있어 Hanna-Gifford Model과 AQDM의 적용에 대하여), 한국대기보전학회지, 2(1), 81-90.
- 4) 나진균, 1990, 복잡한 지형에서의 대기오염 확산모델에 관한 연구, 인하대 박사학위논문.
- 5) 김영성, 손재익, 1992, ISCLT에 의한 서울지역의 SO₂ 오염도 조사, 한국대기보전학회지, 9(2), 168-173.
- 6) 방종선, 1990, 부산지역에서의 대기확산 모델의 적용 및 평가 - TCM, CDM2.0, ISCLT2 모델을 중심으로 -, 부산대학교 대학원 석사학위논문, 82pp.
- 7) 부산광역시, 1996, 부산광역시 통계연보.
- 8) 동력자원부, 1996, 에너지 총조사 보고서.
- 9) 환경부, 1995, 점오염원 배출업소 시설조사표.
- 10) 이화운, 김유근, 원경미, 문운섭, 장난심, 정우식, 홍정혜, 1997, 부산 대기정책 수립을 위한 선박오염 실태조사 및 예측, 과제번호 : 96 - p - 01, 1-92.
- 11) 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 Country, Ohio, J. Air & Manage. Assoc., 44, 418-427.
- 12) U. S. Environmental Protection Agency, 1995, User's Guide for the fugitive dust model.
- 13) U. S. Environmental Protection Agency, 1995, User's Guide for the Industrial Source Complex (ISC3) dispersion models volume I.
- 14) U. S. Environmental Protection Agency, 1997, Revised draft User's guide for the AMS/EPA Regulatory model - AERMOD.