

ISCLT3를 이용한 수도권 도시간 대기오염물질 유출입량 추정

Estimation of Fluxes of Air Pollutants in Seoul Conurbation Using ISCLT3

홍민선* · 김순태 · 김영제 · 양소희 · 이동섭¹⁾ · 장영기²⁾
아주대학교 환경도시공학부, ¹⁾경운대학교 환경공학과, ²⁾수원대학교 환경공학과
(2000년 8월 22일 접수, 2001년 1월 27일 채택)

Min-Sun Hong*, Soon-Tae Kim, Young-Jae Kim, So-Hee Yang,
Dong-Sub Lee¹⁾ and Young-Kee Jang²⁾
Division of Environmental & Urban System Engineering, Ajou University
¹⁾Dept. of Environmental Engineering, Kyungwoon University
²⁾Dept. of Environmental Engineering, Suwon University
(Received 22 August 2000; accepted 27 January 2001)

Abstract

ISCLT3 model was applied in Seoul metropolitan area to investigate the source-receptor relationships among 17 cities in the Kyonggi Province. For the purpose of the model simulation, emission rates of NO₂, SO_x, and PM₁₀ were prepared for grid scale with 1 × 1 km, and receptors were located on every 2 × 2 km grid. Meteorological data for the last 10 years ('88 ~ '97) were used as input data.

According to our study, NO₂ concentration of the cities ranged from 10 to 45 ppb with the highest value appearing from Puchon city. The concentrations of SO_x and PM₁₀ concentrations fell in the range of 5 ~ 20 ppb and 20 ~ 70 μg/m³, respectively. It was also found out that air quality in one city can be affected greatly by the air pollutants originating from other cities.

Key words : ISCLT3, SO₂, NO₂, PM₁₀, Source-receptor relationship

1. 서 론

최근 들어 생활수준의 향상과 함께 대기오염에 대한 관심이 고조되고 있는 가운데 서울을 중심으로 한 수도권 지역은, 도시화로 인한 인구집중 및 교통량 증가로 다량의 대기오염물질이 배출되면서

대기질 악화가 심화되고 있다. 이렇게 악화된 대기질을 개선하기 위한 노력의 일환으로 대기질 실천계획 수립이 의무화되는 대기환경규제지역 지정제도가 대기환경보전법 개정시(1995년) 신설되었으며 1997년 7월 서울시, 인천시와 경기도 15개시가 수도권 대기환경규제지역으로 지정, 고시되었다. 대기환경규제 지역으로 지정된 시·도의 경우 시·도지사가 주체가 되어 향후 실천계획 수립 및 세부 지침 등을 지정 후 2년 안에 마련하여야 하는데, 대기

* Corresponding author
Tel : +82-(0)31-219-2404, E-mail : msh@madang.ajou.ac.kr

오염의 특성상 여러 지방자치단체가 밀집되어 있는 수도권 지역의 효과적인 대기질 개선을 위해서는, 지역특성에 맞는 배출원 조사와 함께 현실적인 대기오염 관리방안이 검토되어야 하며, 각 지방자치단체간의 협조체제가 필수적인 것으로 이해된다.

ISC (Industrial Source Complex) 모델은 U.S. EPA의 규제모델 (regulatory model)로써 오염원으로부터 배출되는 오염물질을 모사하여 오염원 주변지역에 대한 영향을 예측하기 위한 모델로서, 주로 비반응성 물질의 모사에 이용되고 있다. 최초의 ISC 모델은 1970년대부터 개발되기 시작하여 그 동안 여러 번 수정을 거쳐 1992년에 ISC2 모델의 개정이 완료되었으며, 1995년부터 ISC3 모델이 이용되기 시작되었다. 개정된 ISC3의 경우 면오염원에 대한 모사가 가능해졌다. ISC 모델은 크게 ISCLT (ISC Long-Term)와 ISCST (ISC Short-Term) 모델로 구분되는데, ISCLT의 경우 대형 화력발전소나 소각장 건설, 주거지역 및 공업단지 조성 등 새로운 오염원 증가에 따른 영향을 예측하는데 이용될 수 있으며, 에너지 대체, 규제 및 증설에 따른 대기오염물질의 배출증감 등 에너지원과 배출변화에 따른 주변환경의 변화 등 장기적인 대기질 영향을 예측할 수 있다. ISCST 모델은 수 시간~수 일의 단기간 중 기상변화 등에 따른 대기질 예측에 이용되고, 인체 유해 및 대기오염물질 배출사고 등에 의한 단시간내의 대기질 변화도 모사할 수 있다 (U.S. EPA, 1995b). 국내의 경우 ISC 모델을 이용한 대기오염도 연구가 수 차례 수행되었는데, 김영성과 손재익 (1992)은 ISCLT 모사를 통해 서울지역에서의 SO₂ 오염도를 조사하였고, 정상진과 신영철 (1998)은 ISC를 이용하여 수원지역 SO₂ 농도에 관한 연구를 수행하였다. 오현선 등 (1997)은 ISC 모델을 복잡지형에 적용하고 다른 모델을 이용한 결과와 비교하였으며, 구윤서 등 (1999)은 지역분할방법에 의한 ISCST3 모델을 이용하여 수도권에서의 SO₂ 농도를 예측하였다.

본 연구에서는 장기모델인 ISCLT3를 이용하여 서울시와 인천시, 그리고 경기도의 대기환경규제지역인 고양시, 의정부시, 남양주시, 하남시, 부천시, 시흥시, 광명시, 안양시, 과천시, 의왕시, 성남시, 안산시, 군포시, 수원시, 구리시 등 주요 15개 시를 대상으로 산출된 배출량과 '88~'97년까지 10년간의 기상자

료를 이용하여 도시간 이동되는 대기오염물질의 농도를 모사하고 그 영향을 평가하고자 하였다.

2. 모사방법

2.1 입력자료

ISCLT3를 이용한 모사시 필요한 입력자료는 배출량, 기상, 그리고 지형자료이다. ISCLT3의 경우 기본적으로 평탄지형을 가정하므로 많은 경우 지형자료가 생략되나, 본 연구에서는 점, 면오염원의 지표 높이를 고려해 주기 위해 지형자료를 이용하였다. 입력된 지형자료는 국립지리원에서 발행되는 5만 분의 1 지도를 이용하여 TM좌표 1×1 km 격자별로 평균 고도값을 구하였다. 그림 1은 서울시와 인천시를 포함한 경기도의 격자별 고도값을 나타낸 것이다. 경기도의 전반적인 지리적 특징을 보면 서쪽은 바다와 접해 지표 고도값이 낮은 반면, 동쪽은 강원도와 인접한 산악지형으로서 높은 고도값을 가진다. 입력된 지형값들은 각 격자의 평균 지형값을 이용한 것으로 실제 지형값과는 다소 차이가 있을 수 있다. 기상자료의 경우 풍향, 풍속, 기온, 혼합고 등이 요구되며, 본 연구에서는 '88~'97년까지 10년간 자료를 분석하여 이용하였다. 이는 시간에 따른 변화가 심한 기상 특성을 장기간에 걸쳐 분석하고 모사자료로 이용함으로써 도시간의 이동되는 대기오염물질의 일반적인 경향을 파악하는데 도움이 될

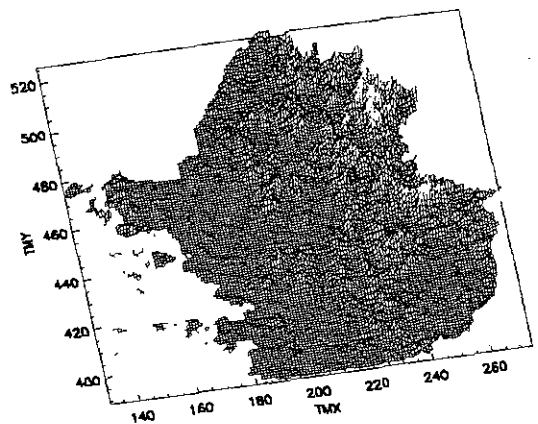


Fig. 1. Gridded-surface contour of Kyonggi Province including Seoul and Incheon.

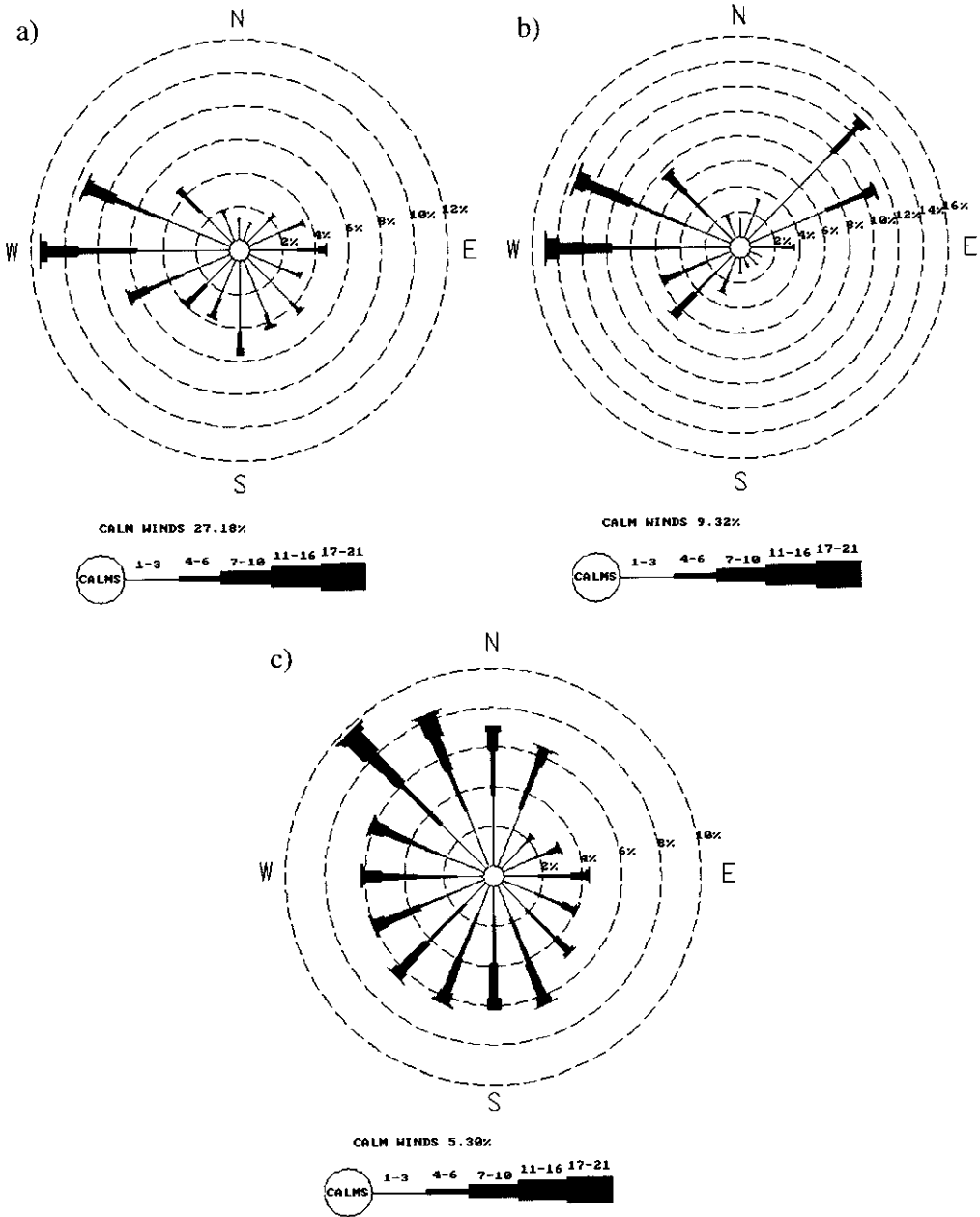


Fig. 2. Wind roses in a) Suwon, b) Seoul, and c) Incheon during the simulation period from 1988 to 1997.

것으로 사료된다. ISCLT3 모델 특성상 모사영역 내에서는 단일한 기상장이 가정되나, 본 연구와 같이 넓은 모사영역에서는 실제적으로 많은 차이가 있다. 이러한 제한점을 줄이고자 총 17개 시 중 서울

시와 인천시, 경기도 북부의 고양시와 의정부시를 제외한 경기도 13개 시의 경우 수원 기상대의 자료를 이용하였으며, 서울시와 인천시의 경우 각각 서울과 인천 기상대의 자료를 이용하였고 고양시와

의정부시의 경우 인접한 서울 기상대의 자료를 이용하여 오염원에 인접한 지역에서의 모델결과 유효치를 높이고자 하였다. 안정도 계급은 Pasquill-Gifford 안정도 등급(U.S. EPA, 1995a)에 따라 분석한 후 풍향, 풍속과 함께 STAR (STability ARray)로 정리하였다. 그림 2는 '88~'97년까지 10년간 수원, 서울, 그리고 인천 기상대의 자료를 토대로 작성한 바람장미도를 보인 것으로 수원과 서울의 경우 서풍이 강한 비슷한 양상을 보이는 반면, 인천의 경우는 내륙을 제외한 모든 방향에서 고루 바람이 불어 올음을 볼 수 있다.

대기혼합고는 대기안정도와 모델모사시 주요한 입력자료로서, 하루중에도 시간에 따른 변동성을 보인다(Wark *et al.*, 1998). 현재 혼합고 산정은 Holzworth 방법(1972)이 많이 쓰이고 있고 ISC와 같은 U.S. EPA의 모델 모사시 이 방법을 추천하고 있으나, 본 연구에서는 D'Abreton *et al.* (1998)의 방법으로 최대 혼합고를 계산하였으며, 최소 혼합고의 산출은 Benkley and Schulman(1979)이 제안한 방법을 이용하였다. 그림 3은 모사기간 중 최소, 최대 혼합고의 월별 변화를 나타내는데 최소혼합고의 경우 100 m 내외로 월 변화가 거의 없으나, 최대혼합고의 경우에는 월별로 1,000 m에서 1,600 m까지 변화를 있음을 알 수 있다. 일 최대 혼합고의 경우 4월~6월에 월 평균 1,600 m로 가장 높았으며 12월에 950 m로 가장 낮은 값을 보였다. 본 연구는 산업체, 발전소, 도로, 난방 등에서 배출되는 대기오염물질의 도시간 영향을 파악하기 위한 것으로, 모사영역은 경기도

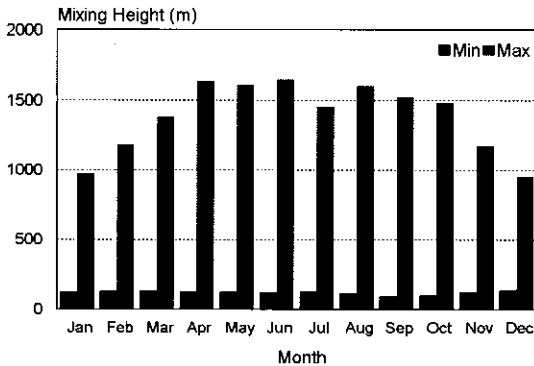


Fig. 3. Monthly variation of mixing heights in Suwon from 1988 to 1997.

주요 15개시와 서울시, 인천시를 대상으로 하였으며, 대상 오염물질은 SOx, NO₂, PM₁₀ 세 가지로 정하였다. 도시별 배출량 자료는 경기개발연구원(2000)과 장영기(1999)에 의해 산출된 자료를 이용하였다. 모사시에는 점오염원의 경우 1~3종만을 고려하였고 선오염원의 경우 면오염원에 포함시켰으며, 면오염원의 격자 크기는 1×1km로 정하였다. Receptor는 도시별로 2×2 km 간격으로 위치시켰으며, 서울과 인천 등과 같이 넓은 면적을 차지하는 도시들에 대해서는 3×3 km마다 위치시켰다. 그림 4는 모사시 입력된 도시별 대기오염 물질 배출량을 비교하기 위해 나타낸 것으로 서울시와 인천시의 NOx와 PM₁₀ 배출량이 타 도시에 비해 월등히 많은 것을 볼 수 있다. SOx 배출량도 서울시와 인천시가

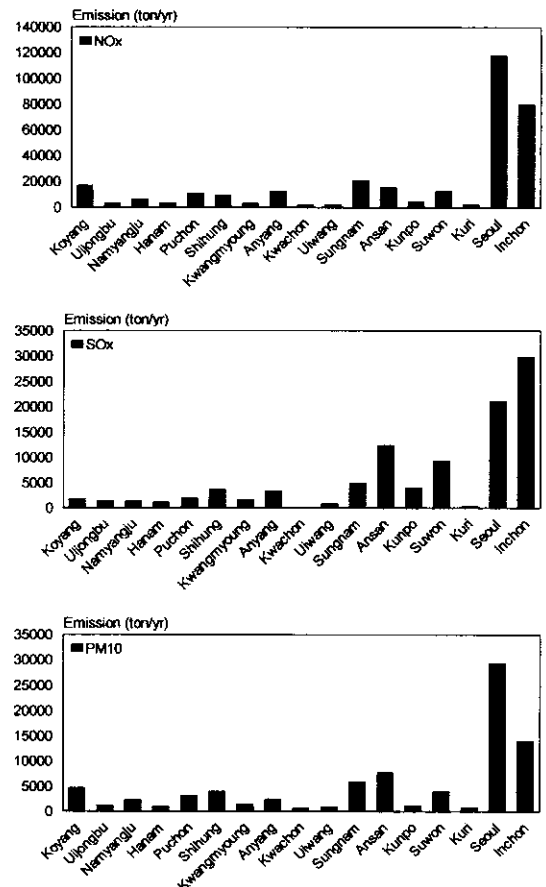


Fig. 4. Comparison of emission rates of air pollutants in 17 cities (top: NO₂, Middle: SOx, bottom: PM₁₀).

타 도시에 비해 높은 배출량을 보였고, 그 외에 수원시, 안산시 등도 SOx 배출량이 많은 것으로 나타났다.

2.2 모델계산

전체 모사영역은 서울시와 인천시, 그리고 경기도 내 15개 시를 포함하는 면적으로 ISCLT3 이용시 권고되고 있는 50×50 km 보다 다소 넓으나, 수도권 내에서 이동되는 대기오염 물질의 도시간 상호 영향 파악을 도구로서 ISCLT3의 적용에 큰 제한점은 없을 것으로 사료된다. 모사시 도시간 영향을 파악하기 위하여 총 17개 시 중 1개 도시에만 배출원을 두어 나머지 도시들에 미치는 영향을 분석하고 그 다음 도시에 대해서도 똑같은 방법을 적용한 후, 그 결과를 종합하여 전체 17개 도시들에 대한 상호 영향을 파악하였다. SOx 모사시 소멸상수는 미리 지정된 값을 이용하였으며, PM₁₀의 경우는 시간에 따른 소멸상수를 고려하지 않았다. NOx의 경우 NO₂를 기준으로 배출량이 산정되었으며, NO로의 전환을 고려하기 위하여 모사대상 지역에서 측정된 NO/NO₂ 비율을 이용하여 모사결과를 보정해 주었다. 표 1은 1998년 일년 동안 대상도시에서 관측된 NO와 NO₂의 농도를 보인 것으로 NO₂/NOx 비가 0.4~0.6 정도에서 변화하는 것을 볼 수 있다. 여기

서 NOx는 NO와 NO₂를 합한 값을 나타내며, 이러한 측정자료를 이용할 수 없는 도시들의 경우 인접 도시의 값을 이용하였다. 고양시, 의정부시, 남양주시, 부천시, 하남시는 서울시, 성남시, 군포시는 안산시의 값을 각각 적용하였다.

3. 모사결과

3.1 오염물질 농도분포

그림 5는 모사영역에서 대상 오염물질의 농도분포를 보여주는 것으로 위로부터 NO₂, SOx, PM₁₀ 순이다. NO₂와 PM₁₀의 경우 서울 남부지역이 가장 높은 값을 보이는 유사한 농도 분포를 보였으며, SOx의 경우는 안산과 인천지역의 농도가 높게 나타나는 분포를 보였다. 그림 5에서 보면 NO₂의 경우 서울시와 부천시가 부분적으로 연간 기준치인 50 ppb를 초과하는 값을 보였으며, 도시 평균농도의 경우 10~50 ppb 사이에서 모사결과가 도출되었다. 서울 북부에 위치하는 고양시, 의정부시, 남양주시 등은 상대적으로 10 ppb 내외의 낮은 도시 평균농도를 보였는데, 이는 모사시 오염원들이 주로 서울 이남지역에 분포하였기 때문으로 사료된다. SOx의 경우 많은 배출량을 보이는 인천시, 안산시, 그리고 수원시 등에서 높은 농도를 보였다. 전반적인 모사결과 SOx의 연간 기준치인 0.03 ppm을 초과하는 도시는 없는 것으로 나타났다. PM₁₀의 경우도 서울 남부지역을 제외하고는 연간 기준치인 80 µg/m³을 초과하는 도시는 없는 것으로 모사되었으며 부천시, 안산시, 그리고 안양시 등에서도 높은 농도를 보이는 것으로 모사되었다.

그림 6은 서울시와 인천시, 경기도 내에 위치한 자동 측정망에서 관측된 농도와 본 모사결과에서의 농도를 비교한 것으로 자동측정망 자료의 경우 서울시의 광화문 등 20개 지점, 인천시의 세 개 지점, 안양시, 부천시, 성남시, 수원시, 안산시의 각 두 개 지점과 의정부시, 광명시, 의왕시, 시흥시, 과천시, 구리시의 각 한 개 지점에서 1997년에 측정된 연간 자료를 이용하였으며, 자동측정망이 두 개 이상인 경우 그 평균값을 이용하였다. 본 모사가 지난 10년간의 기상자료를 이용하여 1997년 연간 측정치와의 직접적인 비교는 어려우나, 그림 6에서 볼 수 있듯이 대부분 자동측정망의 농도값이 모사평균보다 낮

Table 1. The ratio of NO₂ and NOx in 17 cities. (Unit: ppb)

City	NO	NO ₂	NO ₂ /NOx Ratio	Remarks
Koyang	- ¹⁾	-	0.456	Seoul
Uijongbu	-	-	0.456	"
Namyangju	-	-	0.456	"
Hanam	-	-	0.547	Sungnam
Puchon	-	-	0.644	Seoul
Shihung	29.6±25.3	24.5±11.1	0.494	
Kwangmyoung	40.5±56.3	25.7±20.3	0.481	
Anyang	39.0±45.4	25.9±15.8	0.498	
Kwachon	23.9±27.0	21.8±12.4	0.535	
Uiwang	23.0±60.2	16.8± 7.8	0.596	
Sungnam	34.5±45.0	27.3±15.0	0.547	
Ansan	35.3±44.8	22.6±15.3	0.513	
Kunpo	-	-	0.513	Ansan
Suwon	27.8±40.4	30.9±17.0	0.653	
Kuri	57.0±52.6	39.0±18.3	0.491	
Seoul	52.5±59.0	30.5±19.6	0.456	
Inchon	29.5±44.7	29.3±17.9	0.644	

¹⁾ "-" represents "not observed"

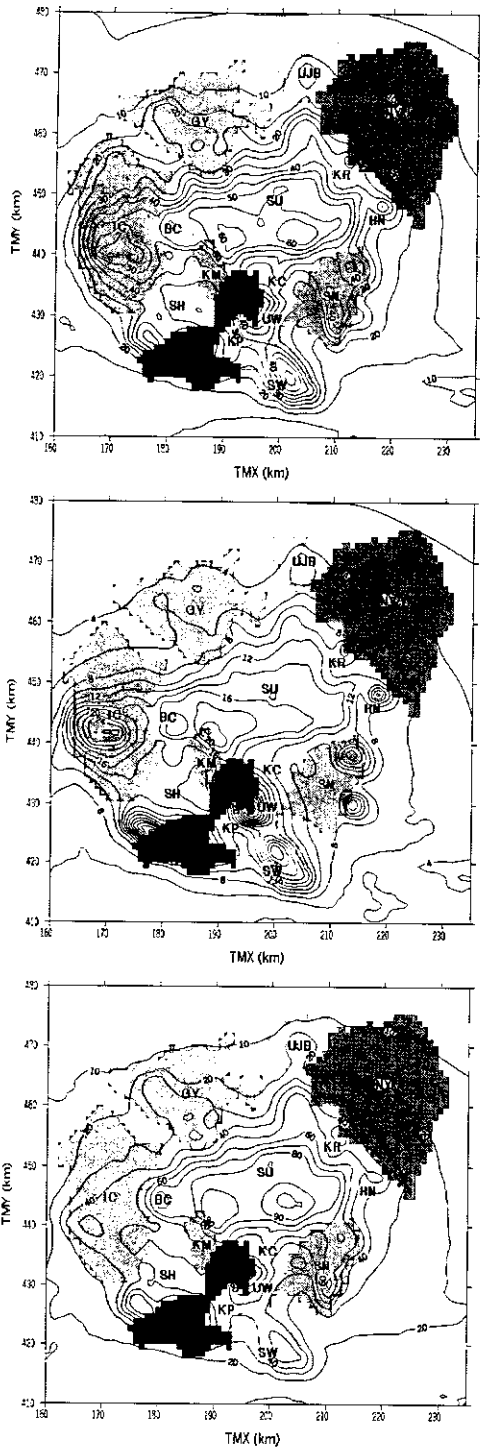


Fig. 5. Concentration distributions over the model domain (top: NO₂, Middle: SO_x, bottom: PM₁₀).

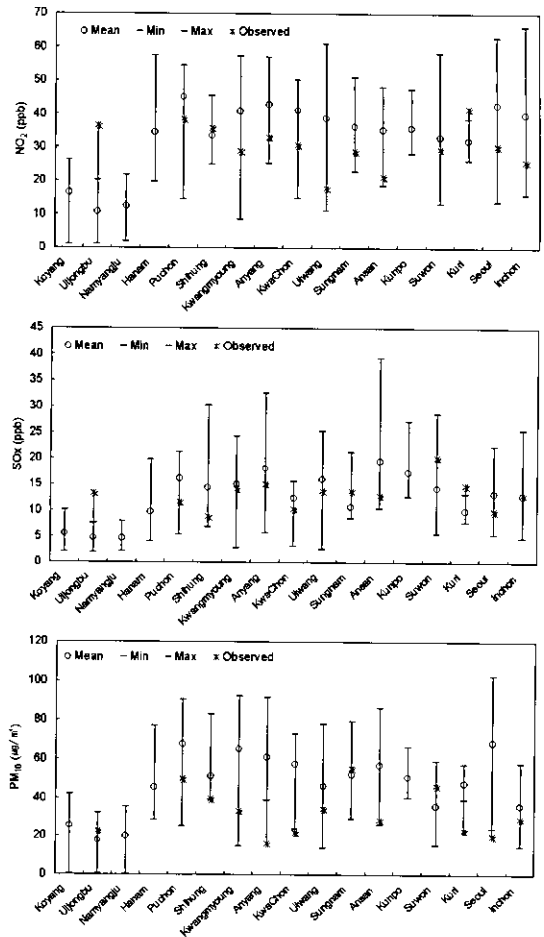


Fig. 6. Statistics for simulated results and comparison with the observed values (top: NO₂, Middle: SO_x, bottom: PM₁₀).

게 나타나는 경향을 보였는데, 이는 본 모사 특성상 모든 오염원의 정확한 배출 특성과 오염물질의 반응성 및 제거과정 등을 고려할 수 없는 제한점에서 기인한 것으로도 사료된다.

3. 2 도시간 영향추정

모사시 서울시와 인천시, 경기 15개시 등 총 17개시의 상호영향을 고려하였으며, 표 2~4는 각 도시별로 자체 오염원으로부터의 영향과 인접도시로부터 받는 영향을 쉽게 볼 수 있도록 나타낸 것이다. 예를 들어, 표 2에서 1997년 고양시의 NO₂ 모사결과는 도시 평균 16.5 ppb이고, 이 중 고양시 자체 오

염원에서는 6.4 ppb의 기여도를 보이며 나머지 10.1 ppb는 인접한 서울시, 인천시 등에서 각각 3.4 ppb, 2.5 ppb 정도 영향을 받았음을 나타낸다. 이러한 방법으로 도시 자체 오염원과 인접한 도시간에 상호 영향을 추정하였으며, 전반적으로 배출량이 많은 서울시와 인천시에 인접한 도시일수록 자체 오염원의 양보다 서울시, 인천시에 의한 오염물질 기여도가

큰 것을 볼 수 있다.

대표적인 도시별 모사결과를 보면, 안산시의 경우 NO₂ 모사농도는 35.2 ppb이었으며 자체 오염원에 의한 영향은 50% 정도인 것으로 나타났고, 서울시에서 20%, 인천시에서 10%, 시흥시에서 10% 정도 영향을 받는 것으로 나타났다. SO_x 모사 평균농도는 19.5 ppb로 자체오염원의 기여도는 60% 정도이

Table 2. Simulated NO₂ source-receptor relationship among 17 cities.

(Unit: ppb)

Cities ¹⁾	Source																	
	KY	UJB	NYJ	HN	PC	SH	KM	AY	KC	UW	SN	AS	KP	SW	KR	SU	IC	Total
KY	6.4	0.4	0.1	0.1	0.8	0.4	0.2	0.4	0.1	0.1	0.5	0.5	0.2	0.3	0.1	3.4	2.5	16.5
UJB	0.7	3.9	0.2	0.2	0.3	0.1	0.1	0.3	0.1	0.1	0.6	0.2	0.1	0.3	0.3	2.5	0.8	10.7
NYJ	0.6	0.4	2.0	0.5	0.3	0.2	0.1	0.2	0.0	0.0	0.7	0.2	0.1	0.2	0.5	5.6	0.6	12.4
HN	0.7	0.1	0.8	5.1	0.7	0.3	0.2	0.5	0.2	0.1	2.4	0.4	0.2	0.4	0.5	20.7	0.9	34.6
PC	0.5	0.2	0.3	0.1	15.7	1.5	0.6	0.7	0.1	0.1	0.5	1.1	0.3	0.5	0.0	15.4	7.3	45.0
SH	0.1	0.1	0.3	0.0	0.5	8.2	0.3	0.9	0.1	0.2	0.6	3.6	0.4	0.6	0.0	10.9	6.3	33.4
KM	0.2	0.1	0.4	0.1	2.6	2.6	5.9	2.5	0.2	0.3	0.8	1.6	0.7	0.8	0.0	18.3	3.6	40.8
AY	0.2	0.0	0.4	0.1	1.1	2.0	1.2	15.3	0.4	0.9	1.1	2.0	2.9	1.4	0.0	10.8	2.6	42.7
KC	0.5	0.1	0.5	0.2	1.3	1.0	1.1	5.3	5.8	1.1	2.3	1.1	0.8	1.5	0.1	16.7	1.9	41.0
UW	0.2	0.0	0.4	0.1	0.8	1.5	0.5	6.8	0.4	5.4	2.0	3.7	3.7	4.3	0.1	6.5	2.4	38.7
SN	0.5	0.0	0.3	0.2	0.8	0.8	0.4	2.5	0.7	0.7	15.9	1.1	0.8	1.3	0.1	9.2	1.3	36.3
AS	0.1	0.1	0.3	0.1	0.2	3.0	0.1	0.7	0.1	0.3	0.6	17.3	0.7	1.0	0.1	6.6	4.1	35.2
KP	0.2	0.1	0.3	0.1	0.6	2.1	0.3	2.5	0.2	1.0	1.1	6.0	10.6	2.0	0.1	6.1	2.9	35.7
SW	0.2	0.0	0.2	0.1	0.5	1.1	0.2	0.9	0.1	0.7	1.0	3.7	1.2	18.1	0.0	2.5	2.5	32.9
KR	1.0	0.1	1.8	0.7	0.5	0.2	0.1	0.3	0.1	0.1	1.4	0.3	0.1	0.4	6.0	17.7	0.9	32.0
SU	1.2	0.2	0.5	0.3	1.5	0.4	0.8	0.9	0.5	0.2	1.4	0.5	0.3	0.5	0.2	31.6	1.6	42.6
IC	1.9	0.2	0.3	0.1	1.6	1.4	0.3	0.5	0.1	0.1	0.5	1.2	0.3	0.5	0.1	7.8	23.1	39.7

¹⁾Cities: KY (Koyang), UJB (Uijongbu), NYJ (Namyangju), HN (Hanam), PC (Puchon), SH (Shihung), KM (Kwangmyoung), AY (Anyang), KC (Kwachon), UW (Uiwang), SN (Sungnam), AS (Ansan), KP (Kunpo), SW (Suwon), KR (Kuri), SU (Seoul), IC (Inchon)

Table 3. Simulated SO_x source-receptor relationship among 17 cities.

(Unit: ppb)

Cities	Source																	
	KY	UJB	NYJ	HN	PC	SH	KM	AY	KC	UW	SN	AS	KP	SW	KR	SU	IC	Total
KY	1.2	0.2	0.1	0.0	0.3	0.2	0.2	0.2	0.0	0.0	0.2	0.5	0.2	0.3	0.0	0.9	1.1	5.5
UJB	0.2	1.9	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.0	0.0	0.2	0.2	0.1	0.3	0.1	0.7	0.4	4.7
NYJ	0.1	0.3	0.7	0.3	0.1	0.1	0.1	0.1	0.0	0.0	0.3	0.2	0.1	0.2	0.2	1.6	0.3	4.6
HN	0.1	0.1	0.2	1.9	0.2	0.1	0.2	0.2	0.0	0.0	0.9	0.4	0.2	0.3	0.1	4.3	0.4	9.6
PC	0.1	0.1	0.1	0.0	4.9	0.6	0.5	0.4	0.0	0.1	0.2	1.1	0.3	0.5	0.0	3.9	3.2	16.1
SH	0.0	0.1	0.1	0.0	0.2	3.4	0.2	0.4	0.0	0.1	0.2	3.1	0.4	0.5	0.0	2.6	3.0	14.3
KM	0.0	0.1	0.1	0.0	1.0	0.7	2.7	1.1	0.0	0.1	0.2	1.3	0.8	0.7	0.0	4.3	1.7	15.0
AY	0.0	0.0	0.1	0.0	0.3	0.7	0.5	6.1	0.0	0.4	0.3	1.4	3.2	1.2	0.0	2.3	1.3	18.1
KC	0.1	0.0	0.1	0.1	0.4	0.4	0.6	2.1	0.5	0.3	0.6	0.8	1.0	1.2	0.0	3.3	0.8	12.3
UW	0.0	0.0	0.1	0.0	0.2	0.6	0.2	2.3	0.0	1.4	0.5	2.1	3.5	2.9	0.0	1.2	1.0	16.0
SN	0.1	0.0	0.1	0.1	0.2	0.3	0.3	0.9	0.1	0.2	3.6	0.8	0.9	1.0	0.0	1.8	0.6	10.7
AS	0.0	0.0	0.1	0.0	0.1	1.9	0.0	0.3	0.0	0.1	0.2	11.9	0.5	0.8	0.0	1.5	2.0	19.5
KP	0.0	0.0	0.1	0.0	0.2	0.9	0.1	1.2	0.0	0.4	0.3	3.3	6.4	1.8	0.0	1.3	1.4	17.4
SW	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.5	0.1	0.3	0.0	0.2	0.2	2.4	0.7	8.3	0.0	0.4	1.0	14.3
KR	0.2	0.1	0.6	0.4	0.1	0.1	0.1	0.2	0.0	0.0	0.5	0.3	0.2	0.3	1.8	4.6	0.4	9.8
SU	0.2	0.2	0.2	0.1	0.5	0.2	0.6	0.4	0.0	0.1	0.5	0.5	0.4	0.5	0.1	8.0	0.8	13.2
IC	0.2	0.1	0.1	0.0	0.3	0.6	0.1	0.2	0.0	0.0	0.1	0.9	0.2	0.3	0.0	1.4	8.1	12.8

Table 4. Simulated PM₁₀ source-receptor relationship among 17 cities.

(Unit: ppb)

Cities	Source																	
	KY	UJB	NYJ	HN	PC	SH	KM	AY	KC	UW	SN	AS	KP	SW	KR	SU	IC	Total
KY	1.2	0.2	0.1	0.0	0.3	0.2	0.2	0.2	0.0	0.0	0.2	0.5	0.2	0.3	0.0	0.9	1.1	5.5
KY	11.1	0.6	0.3	0.1	1.2	0.7	0.4	0.5	0.2	0.2	0.8	1.1	0.2	0.5	0.1	4.8	2.5	25.4
UJB	1.1	7.1	0.3	0.3	0.4	0.3	0.2	0.3	0.1	0.1	1.0	0.5	0.1	0.5	0.4	4.0	0.7	17.5
NYJ	0.9	0.7	3.4	0.9	0.4	0.3	0.2	0.3	0.1	0.1	1.1	0.5	0.1	0.4	0.9	9.0	0.6	19.9
HN	0.9	0.1	1.1	5.9	0.8	0.6	0.4	0.6	0.3	0.2	3.5	0.8	0.2	0.6	0.8	28.1	0.7	45.6
PC	0.8	0.4	0.5	0.1	26.4	2.9	1.3	0.9	0.2	0.2	0.8	2.4	0.4	0.7	0.1	22.1	7.0	67.5
SH	0.2	0.2	0.5	0.1	0.8	15.6	0.7	1.1	0.2	0.3	0.9	7.0	0.5	0.9	0.1	16.4	5.8	51.2
KM	0.3	0.2	0.6	0.1	3.9	5.3	11.9	3.2	0.4	0.4	1.2	3.3	0.8	1.1	0.1	28.9	3.3	65.1
AY	0.3	0.1	0.6	0.1	1.6	4.2	2.4	19.9	0.7	1.4	1.7	3.8	3.4	1.9	0.1	16.4	2.3	60.9
KC	0.6	0.1	0.7	0.2	1.7	1.8	1.8	5.8	9.4	1.8	3.2	2.0	0.8	1.9	0.1	24.1	1.5	57.4
UW	0.3	0.0	0.5	0.1	0.9	2.4	0.8	7.2	0.5	7.2	2.4	5.8	3.4	4.7	0.1	8.2	1.7	46.2
SN	0.6	0.0	0.4	0.2	1.0	1.3	0.8	2.4	1.0	1.1	24.9	1.9	0.8	1.6	0.0	12.9	1.0	51.9
AS	0.1	0.1	0.4	0.1	0.3	5.5	0.2	0.8	0.1	0.3	0.9	32.4	0.8	1.3	0.1	9.8	3.5	56.7
KP	0.2	0.1	0.5	0.1	0.8	3.9	0.6	2.8	0.2	1.3	1.5	10.8	14.0	2.6	0.1	9.0	2.4	50.7
SW	0.2	0.0	0.3	0.1	0.5	1.6	0.3	0.8	0.1	0.7	1.1	5.5	1.0	19.7	0.0	2.8	1.6	36.2
KR	1.4	0.2	2.7	1.0	0.7	0.4	0.3	0.4	0.2	0.1	2.1	0.7	0.2	0.6	9.1	26.5	0.7	47.4
SU	1.8	0.4	0.9	0.4	2.2	0.9	1.7	1.0	0.7	0.3	2.4	1.2	0.3	0.8	0.4	51.5	1.5	68.5
IC	2.1	0.3	0.3	0.1	1.8	1.9	0.4	0.5	0.1	0.1	0.6	1.8	0.2	0.5	0.1	8.4	17.0	36.1

며, 서울시, 인천시, 시흥시에서 각각 10% 정도의 영향을 받는 것으로 나타났다. PM₁₀의 경우 모사된 도시 평균농도는 56.7 μg/m³로 55% 가량은 자체 오염원에 의한 것으로 나타났고, 나머지는 서울시에서 15%, 시흥시에서 10%, 인천시에서 6% 정도 영향을 받는 것으로 나타났다.

수원시의 NO₂ 모사농도는 32.9 ppb로 자체오염원에 의한 영향은 55% 정도인 것으로 나타났으며, 안산시의 영향은 10% 정도, 서울시와 인천시의 영향은 각각 10% 미만인 것으로 모사되었다. SO_x의 경우 모사농도는 14.3 ppb로 자체오염원의 기여도는 60% 정도이며, 인접도시인 안산시에서 15% 가량 영향을 받는 것으로 나타났다. PM₁₀은 도시 평균농도가 36.2 μg/m³로 55% 가량이 자체오염원에 의한 것으로 나타났으며, 안산시에서 15% 내외의 영향을 받는 것으로 나타났다.

서울시의 경우 NO₂, SO_x, PM₁₀의 도시 평균농도는 42.6 ppb, 13.2 ppb, 68.5 μg/m³로 모사되었으며, 자체오염원에 의해 NO₂와 PM₁₀의 경우 75% 정도, SO_x의 경우 60% 가량 영향을 받는 것으로 모사되어, 모사 대상도시 중 자체오염원에 의한 기여도가 가장 높은 것으로 나타났다.

인천시의 경우 NO₂ 모사농도는 39.7 ppb로 자체오염원에 의해 60% 정도 영향을 받는 것으로 나타

났고, 서울시로부터도 20% 정도 영향을 받는 것으로 모사되었다. 인천시의 SO_x 농도는 12.8 ppb로 자체오염원 영향이 65% 정도, 서울시의 영향이 10% 정도 되는 것으로 나타났으며, PM₁₀의 경우는 36.1 μg/m³로 자체오염원으로부터 50%, 서울시로부터 25% 정도 영향을 받는 것으로 나타났다.

4. 결론 및 제언

본 연구는 모사치와 측정치와의 직접적인 비교하여 모델의 타당성 등을 검증하기 위한 것보다는 ISCLT3를 이용하여 수도권 상하도시간 대기질에 미치는 영향을 정량적으로 분석하기 위한 것이다. 이를 위해 도시별로 산출된 배출량 자료와 함께 1988년에서 1997년까지 10년간 기상자료를 정리하여 모사를 위한 입력자료로써 이용하였다. 모사시 NO₂, SO_x, 그리고 PM₁₀을 대상 오염물질로 선정하였으며 17개 도시 상호간 영향을 파악하기 위해 ISCLT3를 이용한 source-receptor 분석을 수행하였다.

모사된 오염물질의 도시별 평균농도를 살펴보면 NO₂의 경우 10~45 ppb 범위에서 모사되었고, 서울시와 인천시에 인접한 부천시 45 ppb로 가장 높은 농도를 보였다. SO_x의 경우 5~20 ppb 사이로 안

산시가 가장 높았고, PM₁₀ 농도는 20~70 µg/m³ 사이로 서울시가 가장 높은 농도를 보였다. 도시상호간 영향분석에서 대부분의 도시에서 자체오염원과 함께 인접한 도시의 영향이 확인되었으며, 특히 배출량이 많은 서울시와 인천시 등의 영향이 큰 것으로 조사되었는데, 인근도시에 대한 영향이 높은 경우 최고 ~50%까지 영향을 미치는 것으로 나타났다.

이로 미루어 볼 때 수도권내 도시 대기질 개선을 위해서는 자체 오염물질 저감노력과 함께 인근 도시의 영향을 고려해야 될 것으로 사료된다. 또한 수도권 지역의 대기질 개선을 위해서는 지방자치단체간의 상호협력을 바탕으로 한 개선노력이 병행되어야 할 것으로 사료된다.

향후 보다 정확한 영향분석을 위해서는 이에 부합되는 배출량 및 기상자료의 축적과 함께 대기오염물질의 반응성과 제거과정, 수도권내 지형특성을 고려할 수 있는 모듈개발이 요구될 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 경기도의 「경기 21세기 대기보전 실천 계획」에 의해 수행 되었습니다. 연구지원에 감사드립니다.

참 고 문 헌

경기개발연구원 (2000) 21C 경기 대기보전실천 계획, 경기도, 49-154.
 구윤서, 전경석, 최환영, 신봉섭, 신동윤, 이정주 (1999) 지역 분할방법에 의한 ISCST3모델로 수도권지역에

서 SO₂ 농도 예측 연구, 한국대기환경학회 1999 추계학술대회 논문집, 407-408.
 김영성, 손재익 (1992) ISCLT에 의한 서울지역의 SO₂ 오염도 조사, 한국대기보전학회지, 8 (2), 128-137.
 오현선, 김영성, 김진영, 문길주, 홍옥희 (1997) 보령화력 지역의 복잡지형이 대기확산 모델링에 미치는 영향 비교, 한국대기보전학회지, 13 (6), 427-437.
 장영기 (1999) 개인교신.
 정상진, 신영철 (1998) ISC모형을 이용한 수원지역 SO₂ 농도에 관한 연구, 대한환경공학회 '98 추계학술대회 논문초록집, 565-566.
 Benkley, C.W. and L.L. Schulman (1979) Estimating hourly mixing depth from historical meteorological depth, J. of Appl. Met., 8, 772-780.
 D'Abreton, P.C., M. Zunkel, and P.M. Gondwe (1998) Estimating mixing heights over southern Africa using surface-based measurements, South Africa J. of Science, 94, 375-380.
 Holzworth, G.C. (1972) *Mixing height, wind speed, and potential for urban air pollution through the contiguous United States*, Office of Air Quality planning and Standards Emissions, Monitoring, and Analysis Division, Research Triangle Park, NC.
 Wark, K., C.F. Warner, and W.T. Davis (1998) *Air pollution: Its origin and control*, 3rd, Addison Wesley Longman Publishing Company, Inc.
 U.S. Environmental Protection Agency (1995a) *PCRAMMET USER'S GUIDE*, Office of Air Quality planning and Standards Emissions, Monitoring, and Analysis Division, Research Triangle Park, NC.
 U.S. Environmental Protection Agency (1995b) *User's guide for the industrial source complex (ISC3) dispersion models*, Office of Air Quality planning and Standards Emissions, Monitoring, and Analysis Division, Research Triangle Park, NC.