

수도권지역에서 오염원별 대기오염농도 기여도 평가

Estimation of Source Contribution by Air Pollutant Type (Point, Area, Line) over Seoul Metropolitan Area

박일수* · 이석조 · 김종춘 · 김상균 · 이동원
유 철 · 이재범 · 송형도 · 이정영 · 김지현
국립환경과학원 지구환경연구소
(2005년 3월 28일 접수, 2005년 10월 6일 채택)

Il-Soo Park*, Suk-Jo Lee, Jong-Choon Kim, Sang-Kyun Kim, Dong-Won Lee,
Chul Yoo, Jae-Bum Lee, Hyung-Do Song, Jung-Young Lee and Ji-Hyun Kim
Global Environmental Research Center National Institute of Environmental Research

(Received 28 March 2005, accepted 6 October 2005)

Abstract

This study is to estimate source contribution by air pollutant types (point, area, line) over Seoul metropolitan area. The Air Pollution Model (TAPM) and the highly resolved anthropogenic and biogenic gridded emissions (1 km × 1 km) were applied to simulate SO₂, NO₂, O₃ and PM₁₀ concentrations by seasons and contribution was estimated by their source types (point, area, line). The results showed that the simulated concentrations of secondary pollutant agreed well with observed values with an index of agreement (IOA) over 0.4, whereas IOAs over 0.3 were observed for most primary pollutants.

The contributions of each source types by seasons were similar. The point source contribution was the highest for SO₂ at medium level ranged from 55.1% to 61.5%. But the contribution from area source during for the spring and summer increased as the concentration level increased. The line source contribution was the highest for NO₂ at all levels ranged from 68.3% to 93.1%. The results indicate that SO₂ emissions should be mainly controlled from point source, as well as area source at higher level concentration. Also, NO₂ and PM₁₀ from line source should be controlled.

Key words : Contribution rate, Air pollution sources, Seoul metropolitan, TAPM, Simulated concentration, Index of agreement

1. 서 론

우리나라는 경제발전과 더불어 서울을 포함한 대

도시를 중심으로 인구가 꾸준히 증가하여 총 인구의 약 45% 이상이 수도권에 집중되어 있으며, 자동차도 꾸준히 증가하여 6,878천대가 등록되어 있다. 1990년 초 환경부의 저유황 연료정책에 힘입어 SO₂의 농도는 급격히 감소하였으나, PM₁₀과 O₃ 농도는 인구 집중과 자동차 등록대수의 증가로 여전히 높은 수준

*Corresponding author.

Tel : +82-(0)2-846-2850, E-mail : nierpis@me.go.kr

에 있다.

서울을 포함한 수도권지역의 SO₂ 측정농도는 0.005~0.007 ppb, NO₂는 0.030~0.038 ppb, O₃는 0.014~0.019 ppb, PM₁₀은 61~69 µg/m³로 다른 대도시와 함께 높은 농도수준을 보이고 있으며, 그중 SO₂는 다른 오염물질과 비교하여 낮은 농도수준을 보이고 있다. 그러나 다른 오염물질을 보면 수도권지역 85개 측정소중에 O₃의 경우 1시간환경기준을 25개 측정소가 초과했으며, 8시간환경기준은 76개 측정소가 초과했다. 또한 PM₁₀은 71개 측정소가 24시간환경기준을 초과하여 초과율 83%를 보였다(국립환경연구원 2003a). 이와 같이 최근의 대기오염 현상은 대기 중 물리, 화학 과정 이외에도 국지적인 배출원과 장거리이동에 의한 영향도 매우 커지는 등 그 대상영역도 광역화되고 있어 훨씬 복잡하고 어려워지고 있다. 또한 서울을 포함한 수도권지역은 산악과 지면으로 구성되어 있어 이로 인하여 유발되는 국지기상현상도 다양화되고 있다. 이와 같이 복잡한 대기오염 형성과정과 다양한 국지기상현상 등의 특성을 지닌 수도권지역에서 대기질 개선을 위한 과학적 자료를 도출하기 위해서는 단순한 가우시안 모델보다는 3차원 수치모델이 권장된다(Park *et al.*, 2004). 근래에 서울을 포함한 수도권지역에서 3차원 수치모델을 이용하여 다양한 국지기상현상과 복잡한 대기오염현상들을 성공적으로 모사한 사례가 있으며, 이를 바탕으로 오염원과 대기오염물질 간의 상관관계도 연구된 바 있다(Park *et al.*, 2004; 국립환경연구원, 2004).

본 연구에서는 3차원 수치모델인 TAPM을 이용하여 수도권지역의 대기오염물질 배출원이 수도권지역의 대기오염에 미치는 영향을 파악하여 대기오염저감을 위하여 어떤 오염원에서 오염물질을 저감해야 하는지 그 기초 자료를 도출하고자 한다.

2. 연구 및 방법

2.1 계절별 대표성 있는 기상조건 도출

계절별로 대표적인 기상상태를 보인 연속된 5일의 모델링 수행날짜를 선정하기 위하여 기상청의 오산상층관측자료(기상청, 2001a)와 일기상통계자료집(기상청, 2001b)을 활용하였다.

2001년을 대상으로 매일 6시간 간격으로 관측한 오산의 850 hPa 지점의 풍향, 풍속자료를 이용하였으며, 일일 6시간 간격으로 강수가 있는 날과 없는 날로 분리하여 수도권에 위치한 42개 AWS자료를 활용하였다. 봄은 3월에서 5월, 여름은 6월에서 8월, 가을은 9월에서 11월, 겨울은 12월에서 2월로 정의하였으며, 풍향은 북풍은 315°~45°까지, 동풍은 45°~135°, 남풍은 135°~225°, 서풍은 225°~315°로 정의하였다. 그리고 풍속은 850 hPa 지점의 풍속이 5 m/s 이상과 이하로 나누어 조사하였으며, 강우는 강수량 0.1 mm를 기준으로 강수와 무강수로 구분하였다.

2.2 배출량 자료

수도권지역의 각 오염원별 대기오염기여도를 평가하기 위해서 수년간 국립환경연구원(2003b)에서 산업별, 시설별, 공정별, 연료별로 세분된 배출 계수를 이용하여 인위적 오염물질 배출량을 산정한 결과를 사용하였으며, VOC 배출량의 경우 자연 배출원까지 모두 고려한 배출량 자료를 모두 이용하였다. 모델영역에서 1 km × 1 km 격자간격으로 면오염원, 선오염원, 점오염원, 자연오염원으로 분류하였다. 4개 오염물질별(SO₂, NO_x, VOC, PM₁₀)로 수도권지역의 배출량(2001년)을 보면 SO₂는 연간 73,304톤이 배출되며 이중 점오염원이 42,447톤으로 가장 많은 배출량을 보였으며, NO_x는 연간 313,803톤이 배출되어 선오염원이 201,383톤으로 약 64%를 차지하였고, PM₁₀은 비산먼지를 포함하여 연간 97,194톤이 배출되는데 배출량의 거의 대부분인 약 97%가 선오염원에서 배출되는 것으로 조사되었다. VOC은 면오염원에서 연간 188,685톤이 배출되어 가장 많은 양을 배출하고 있다.

2.3 모델링

수도권지역의 오염원별 대기오염물질 기여도를 평가하기 위하여 선정된 모델은 The Air Pollution Model(TAPM ver. 3.0, Hurley *et al.*, 2002, 2001)로 기상과 대기오염확산 모델을 동시에 모의할 수 있는 on-line 모델이다. 특히 모델의 수행을 사용자가 편리하게 사용하도록 GUI(Graphic User Interface)로 구성되어 있다.

TAPM 기상모델의 초기 및 경계값은 기상청에서 생성되는 30 km 간격의 RDAPS(Regional Data

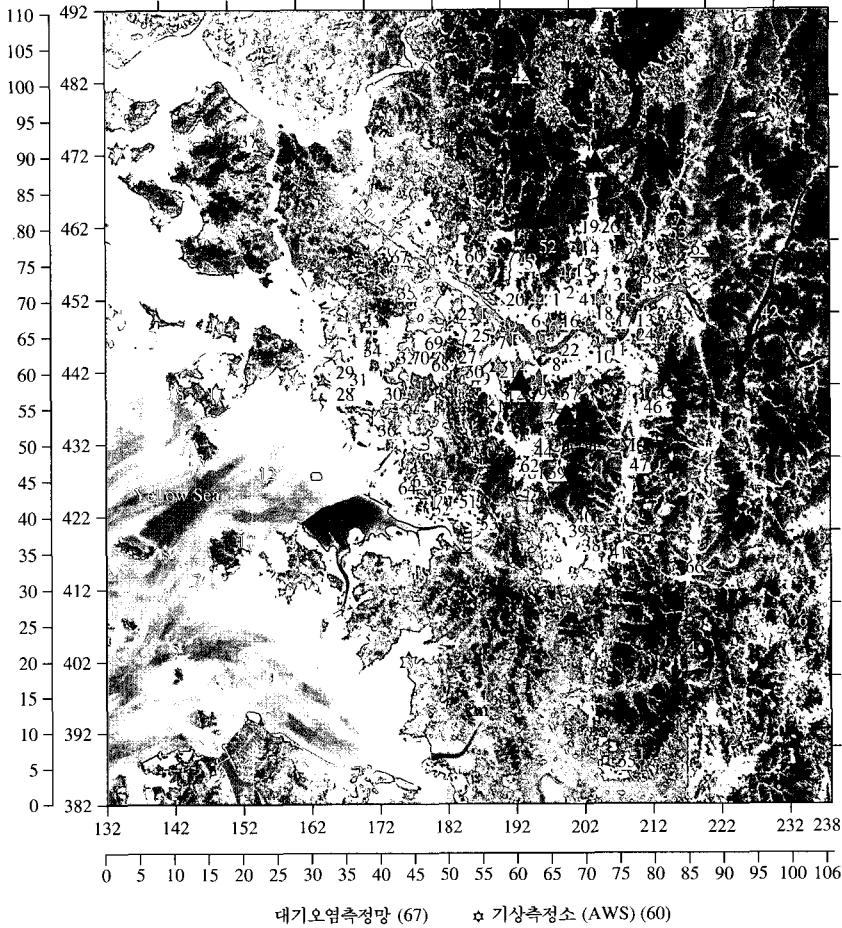


Fig. 1. Modelling domain and distribution of monitoring stations. The 60 stars denote automatic weather stations operated by Korea Meteorological Administration and the 67 triangles denote surface air quality stations operated by the Ministry of Environment. Seoul is indicated by the heavy blue line.

Analysis and Prediction System) 자료를 사용하였으며, 초기농도는 모델링 대상기간동안 수도권 대기오염자동측정망 자료로부터 시간평균농도를 구하여 사용하였으며, 모델링 영역은 그림 1과 같이 TMx 132~238, TMy 382~492이며, 검증용 위해 사용된 자동기상측정망은 60개, 대기오염자동측정소는 67개 자료를 사용하였다.

2.4 오염원별 대기오염농도 기여도 평가

계절별, 오염원별(점, 면, 선오염원), 오염물질별(SO₂, NO₂, O₃, PM₁₀)로 48사례에 대하여 모델링 한

결과를 이용하여 오염물질 농도가 medium, 90, 95, 99, 99.90% 수준에서 대기오염기여도(Noritaka Katatani *et al.*, 1994)를 아래와 같이 평가하였다.

$$\text{대기오염기여도}(\%) = \frac{\sum_{i=1}^3 S_i - \sum_{i=2}^3 S_i}{\sum_{i=1}^3 S_i} \times 100$$

if 오염원 = 1

S₁: 점오염원

S₂: 면오염원

S₃: 선오염원

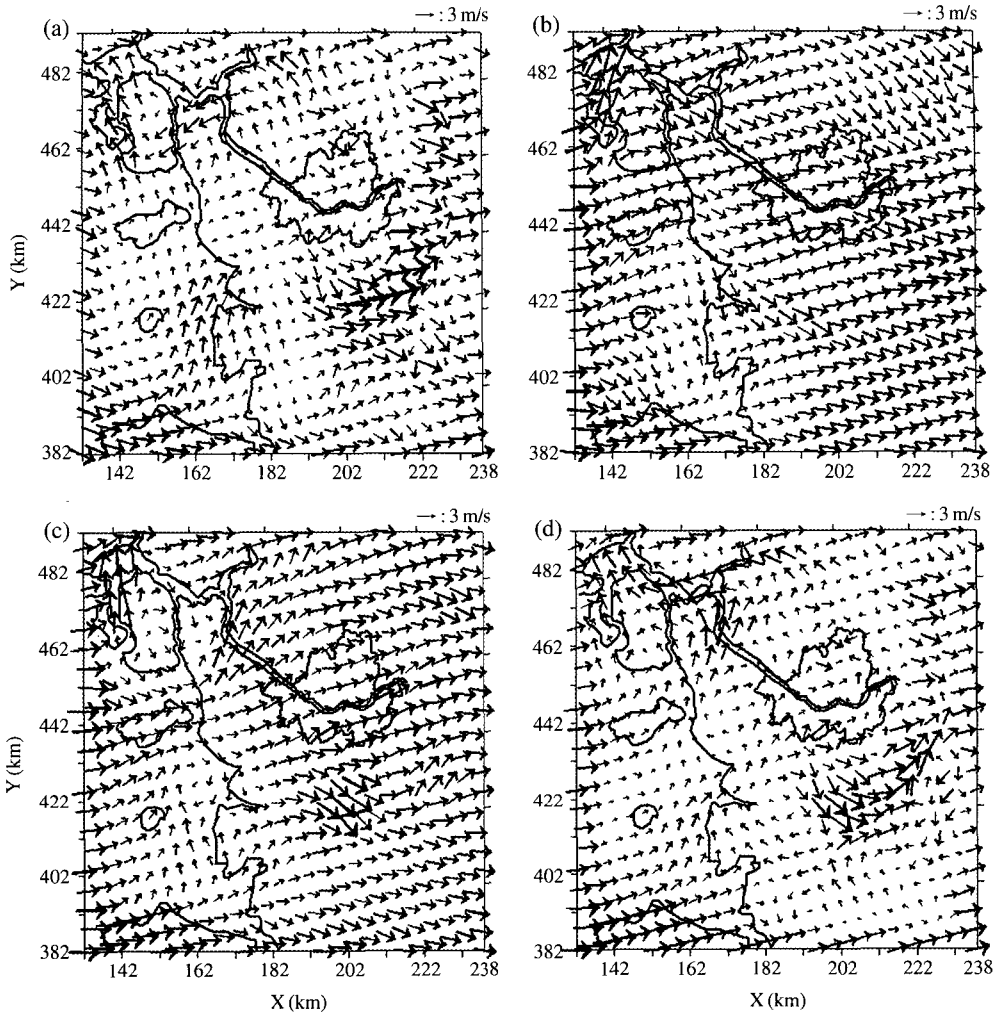


Fig. 2. Predicted wind fields at 10m above ground level on May 27, 2001, over the Seoul metropolitan area; (a) 6LST, (b) 12LST, (c) 18LST, (d) 24LST.

3. 결과 및 고찰

3.1 계절별 대표성 있는 기상조건 도출

수도권지역의 모델링을 위해서 무강수 사례 기간만을 적용하였으며, 풍향, 풍속별 사례 중 발생빈도가 높은 연속된 날을 모델링을 위한 기상사례로 선정하였다. 그 결과 각 계절별로 풍향, 풍속에 대하여 발생빈도는 봄철에는 총 266사례 중에 131사례가 서풍에 풍속 5 m/s 이상이 발생하여 49.2%의 발생빈도를 보였으며, 여름철에는 남풍에 5 m/s 이상이 21.1%

발생하였고, 가을철과 겨울철에는 서풍에 5 m/s 이상이 각각 25.7%, 58%가 발생함을 알 수 있었다. 각 계절별 대표적인 기상상태를 조건으로 2001년 계절별로 가장 적합한 연속된 5일을 선정한 결과 봄철은 5월 27~31일, 여름철은 7월 24~28일, 가을철은 10월 12~16일, 겨울철은 1월 12~16일로 결정하여 모델링을 수행하였다.

3.2 모델결과

3.2.1 기상장

계절별로 선정된 날짜에 대하여 바람 구조를 비교

분석하기 위하여 기상청에서 운영하는 60개 측정소 자동기상측정망 자료인 AWS (Automatic Weather System) 자료를 국지 기상모델에 동화(Four Dimensional Data Assimilation Technique; FDDA)하는 방법으로 TAPM 모델을 이용하여 3차원 바람구조를 생성하였다.

그림 2는 5월 27일 6, 12, 18, 24LST의 모사된 지상 10m 고도에서의 바람장을 나타낸다. 그림에 모사된 바와 같이 바람장은 국지적 특성을 잘 반영하고 있음을 알 수 있다. 야간에는 지형효과 및 안정한 대기조건에 의해 서울도심지역에 정체현상이 나타나

고, 이로 인하여 매우 약한 바람이 모사되었다. 또한 산풍이 우세하여 도봉산과 수락산 사이의 계곡을 따라 바람이 불어 내려오는(Channel)현상이 나타났다(그림 2a). 주간에는 지표면이 가열되어 정체 현상이 현저히 약화되어 서풍계열로 야간과 비교하여 강한 바람이 모사되었다(그림 2b). 북한산과 관악산 등의 정상을 향해 바람이 부는 계곡풍 현상이 나타났다. 또한 9시 이후부터는 육지와 바다간의 기온차가 증가함에 따라 서해안에서 서풍이 불기 시작하여(관련 그림은 제시되지 않았음) 점차 강화되어 12시에는 강한 해풍으로 전환되고 서해안에서 약 100km까지

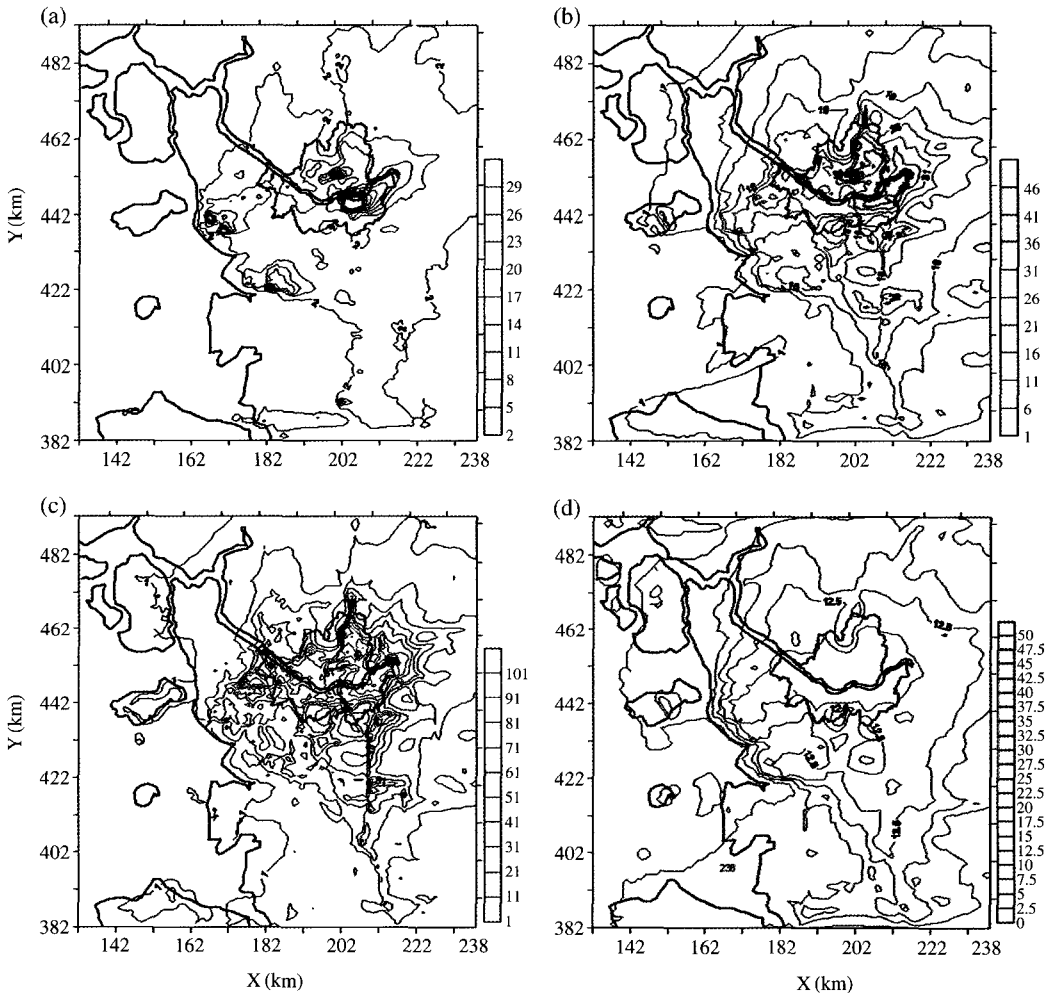


Fig. 3. Spatial distributions of predicted averaged concentrations during May 27~31, 2001, over Seoul metropolitan area : (a) SO₂ (ppb), (b) NO₂ (ppb), (c) PM₁₀ (µg/m³), (d) O₃ (ppb).

Table 1. Averaged statistics performances of predicted wind and temperature at 60 stations by seasons during 2001.

Season	Variable	AVG-MOD	STD-MOD	AVG-OBS	STD-OBS	CORR	RMSE	IOA	BIAS
Spring	U	1.74	1.39	1.21	1.49	0.66	1.38	0.76	0.6
	V	0.86	1.09	0.59	1.26	0.61	1.19	0.74	0.5
	T	18.48	2.75	20.21	3.88	0.76	3.07	0.77	1.82
Summer	U	0.4	0.85	0.27	0.94	0.53	0.9	0.7	0.24
	V	0.78	1.07	0.29	1.01	0.58	1.11	0.7	0.53
	T	26.46	1.87	27.51	2.45	0.69	2.25	0.74	1.26
Fall	U	0.21	1.11	-0.03	1.3	0.57	1.22	0.71	0.34
	V	-0.51	1.04	-0.3	0.92	0.53	0.94	0.69	0.27
	T	17.12	2.54	16.27	3.39	0.78	2.38	0.82	1.11
Winter	U	1.62	1.06	0.53	1.14	0.51	1.6	0.6	1.11
	V	-2.33	0.86	-0.85	1.03	0.42	1.84	0.5	1.48
	T	-9.73	1.59	-13.86	3.64	0.77	4.93	0.59	4.13

AVG: Arithmetic average, MOD: Model Predictions, STD: Standard Deviation, OBS: Observations, CORR: Pearson Correlation Coefficient (0 = no correlation, 1 = exact correlation), RMSE: Root Mean Square Error, IOA: Index of agreement (0 = no agreement, 1 = exact agreement)

의 내륙지역으로 침투됨을 알 수 있다(그림 2c). 18 시부터는 해풍이 약화되고 서울도심지역에 다시 정체현상이 나타났다(그림 2d). 모사된 바람장은 다른 연구결과(Park *et al.*, 2004)와 같이 국지풍 현상을 잘 표현하였다.

3.2.2 대기질

그림 3은 5월 27일부터 31일까지 5일동안 모사된 지표면 평균농도장을 나타낸다. SO₂ 농도는 비균질적인 공간분포를 보이며(그림 3a), 점오염원이 밀집된 서해안을 따라 높고, 서울 북동부 및 수도권 남부에서 낮게 나타났다. 서울 남동지역에 나타난 고농도는 열병합발전소가 위치한 지역적 영향으로 풀이된다. NO₂ 농도는 이동오염원이 밀집된 서울과 인천에서 높게 나타났다(그림 3b). PM₁₀ 농도도 NO₂ 농도와 유사한 공간분포를 보이나 특히 고속도로변에서 높게 나타났다(그림 3c). 그러나 O₃ 농도의 공간분포는 다른 대기오염물질과 달리 비교적 균질적이며, 높은 농도가 서해안, 서울 북동부 및 남부지역에서 나타났고, 서울도심에서는 낮은 농도가 나타났다(그림 3d). 이와 같은 원인은 광화학과 기상현상으로 풀이된다. 서울북동부에서 고농도는 해풍으로 이동되어 축적된 기상현상으로 해석되며(Kim and Ghim, 2002), 서해안 및 서울 남부지역에서 고농도는 밀집된 이동오염원과 일부 배경농도(서해안)의 영향에 의한 광화학현상으로 해석된다. 또한 서울도심에서는 O₃가 NO를 NO₂로 산화시키는데 많이 소비되어 광화학현상

에 의해 낮게 나타났다고 풀이된다(Park *et al.*, 2004).

3.3 모델치와 측정치 비교검증

3.3.1 기상장

일반적으로 모델의 결과를 검증할 때 주로 사용하는 평균값과 표준편차를 포함하여 평균제곱근오차(Root Mean Square Error; RMSE), 일치도지수(Index of Agreement; IOA), 상관계수(Correlation coefficient; CORR) 등이 사용된다(Hurley, 2001; Karppinen *et al.*, 2000). 특히, 바람의 경우 방향성을 가진 벡터량이라는 점에서 바람의 동서성분(U-component)와 남북성분(V-component)으로 구분하여 분석하였으며, 스칼라량인 온도 역시 위의 분석방법을 적용하였다.

표 1과 같이 계절별 기상모델 예측값과 AWS 관측자료를 비교분석해 보면 U성분(동서방향)의 일치도지수(IOA)는 0.60~0.76이며, 봄철이 0.76으로 가장 높은 일치도를 보였으며, V성분(남북방향)의 일치도지수(IOA)는 0.50~0.74로 겨울철의 일치도가 0.5로 가장 낮았다. 또한 상관 계수를 보면 U성분(동서방향)은 0.51~0.66이며, 봄철이 0.66으로 가장 높았고, V성분(남북방향)은 0.42~0.61로 겨울철이 0.42로 가장 낮았다. 기온을 분석해 보면 일치도지수(IOA)는 0.59~0.82, 상관계수는 0.69~0.78로 바람 보다는 일치도가 높으며, 특히 가을철이 가장 높은 정확도를 보였다. 다른 연구결과(Hurley *et al.*, 2002)에서 보면 일치도지수(IOA)가 0.5 이상일 경우 “중

Table 2. Averaged statistics performances of predicted concentrations at 67 stations by seasons during 2001.

Season	Pollutant	AVG-MOD	STD-MOD	AVG-OBS	STD-OBS	CORR	RMSE	IOA	BIAS	RMSEs
Spring	SO ₂	6.96	3.07	6.39	2.84	-0.04	5.28	0.29	2.48	3.88
	NO ₂	34.73	18.09	28.2	10.56	-0.06	24.20	0.29	8.53	13.66
	O ₃	31.24	14.88	33.39	15.65	0.17	21.10	0.48	5.65	14.95
	PM ₁₀	67.08	44.88	80.16	38.32	-0.10	67.58	0.37	22.45	41.57
Summer	SO ₂	7.13	4.95	5.48	2.48	0.07	6.53	0.29	2.87	3.89
	NO ₂	33.86	13.59	25.9	10.57	0.01	19.28	0.34	7.96	13.13
	O ₃	10.09	6.25	13.58	12.69	-0.02	15.38	0.39	4.72	13.57
	PM ₁₀	56.47	57.91	48.71	24.28	0.05	61.70	0.35	9.70	23.65
Fall	SO ₂	7.77	6.20	5.62	2.23	0.06	7.57	0.29	2.98	3.80
	NO ₂	40.38	19.10	32.09	11.37	-0.08	26.32	0.29	10.15	15.39
	O ₃	29.42	14.05	11.61	11.50	0.06	25.62	0.41	17.81	21.25
	PM ₁₀	74.44	28.10	61.72	27.31	0.03	44.96	0.37	19.22	34.25
Winter	SO ₂	9.35	2.06	8.91	3.23	0.03	5.52	0.38	3.44	4.94
	NO ₂	33.80	9.19	30.43	12.74	0.23	18.20	0.50	9.28	15.52
	O ₃	30.64	7.89	15.21	8.02	0.32	18.46	0.48	15.44	16.82
	PM ₁₀	49.43	5.62	44.47	20.06	-0.01	26.27	0.41	13.26	25.26

AVG: Arithmetic average, MOD: Model Predictions, STD: Standard Deviation, OBS: Observations, CORR: Pearson Correlation Coefficient (0 = no correlation, 1 = exact correlation), RMSE: Root Mean Square Error, IOA: Index of agreement(0 = no agreement, 1 = exact agreement)

음”으로 간주한다.

계절별로는 겨울철의 모델 정확성이 낮은 것으로 판단되지만 절대적인 정확도를 보면 위에서 언급된 바와 같이 일치도지수가 0.5 이상으로 본 연구를 위하여 기상모델의 적용에는 문제가 없다고 판단된다. 또한 기상모델로 예측된 바람장을 모사한 결과는 다른 계절에 비하여 북풍 계열로 풍속이 강하여 지형 효과가 적게 나타났으며, 이는 다른 연구 결과(Park *et al.*, 2004; Almbauer *et al.*, 2000)에서 밝혀진 산악에서의 바람장 특성과 유사함을 확인하였다.

3. 3. 2 대기질

오염물질에 따른 계절별 모델 예측값과 측정소 측정값과의 통계분석은 위의 기상장 통계분석방법과 같으며, 분석결과는 표 2와 같이 SO₂의 경우 일치도가 0.29~0.38이며, 겨울철이 0.38로 가장 높은 일치도를 보였으며, 모델 예측농도 평균은 6.96~9.35 ppb이며, 측정농도 평균은 5.48~8.91 ppb로 비슷한 수준이었다. NO₂의 일치도는 0.29~0.50이며, 겨울철이 0.50으로 가장 높은 일치도를 보였고, 모델 예측농도 평균은 33.80~40.38 ppb이며, 측정농도 평균은 25.9~32.09 ppb 수준이었다. O₃의 경우 일치도가 0.39~0.48로 봄철과 겨울철이 0.48로 높은 일치도를 보였

다. 모델 예측농도 평균은 10.09~31.24 ppb이며, 측정농도 평균은 11.61~33.39 ppb로 비슷한 수준이었다. PM₁₀의 일치도는 0.35~0.41로 겨울철이 0.41로 가장 높은 일치도를 보였으며, 모델 예측농도 평균은 49.43~74.44 µg/m³이며, 측정농도 평균은 44.47~80.16 µg/m³이었다.

전반적인 특징을 보면 통계적으로 유의한 상관관계를 보였으며, 특히 겨울철에 일치도가 높았고, 오염물질별로 보면 오존의 일치도가 높은 것으로 분석되었다. 모든 계절에서 예측치와 측정치간의 통계분석 결과는 다른 연구(Park *et al.*, 2004; Hurley *et al.*, 2002)와 유사하였다.

4. 오염원별 대기오염농도 기여도 평가

4.1 봄철

봄철의 각 오염원별 대기오염기여도는 표 3과 같이 SO₂의 경우 중간값(medium)에서는 점오염원이 56.3%로 가장 높은 기여도를 보였으며, 고농도사례(99.9%)로 갈수록 점오염원의 기여도는 감소(56.3% → 14.5%)하고 면오염원의 기여도는 증가(39.4% → 65.4%)하는 것을 알 수 있었다. 선오염원의 기여도

Table 3. Contribution rate of air pollution concentration by sources according to percentile during May 27~31, 2001.

unit: %

Percentile	SO ₂				NO ₂				PM ₁₀			
	All sources	Point source	Line source	Area source	All sources	Point source	Line source	Area source	All sources	Point source	Line source	Area source
Medium	(7.1)	56.3 (4.0)	8.5 (0.6)	39.4 (2.8)	(31.6)	21.8 (6.9)	64.9 (20.5)	13.6 (4.3)	(50.6)	2.2 (1.1)	94.1 (47.6)	2.6 (1.3)
90%	(9.9)	44.3 (4.4)	10.1 (1.0)	45.5 (4.5)	(51.6)	13.2 (6.8)	65.1 (33.6)	12.2 (6.3)	(77.3)	1.8 (1.4)	94.8 (73.3)	2.5 (1.9)
95%	(11.3)	39.8 (4.5)	9.7 (1.1)	49.6 (5.6)	(59.7)	11.4 (6.8)	62.6 (37.4)	12.5 (7.5)	(93.7)	1.6 (1.5)	95.3 (89.3)	2.5 (2.3)
99%	(17.5)	31.4 (5.5)	7.4 (1.3)	60.6 (10.6)	(72.4)	8.6 (6.2)	58.6 (42.4)	15.0 (10.8)	(121.7)	1.2 (1.4)	95.8 (116.6)	2.3 (2.8)
99.9%	(37.5)	14.5 (5.4)	3.8 (1.4)	65.4 (24.5)	(77.9)	8.0 (6.2)	54.7 (42.6)	15.8 (12.3)	(135.9)	1.0 (1.4)	95.0 (129.1)	2.2 (3.0)

*Predicted concentration in parentheses (ppb in SO₂, NO₂ and µg/m³ in PM₁₀)

Table 4. Contribution rate of air pollution concentration by sources according to percentile during July 24~28, 2001.

unit: %

Percentile	SO ₂				NO ₂				PM ₁₀			
	All sources	Point source	Line source	Area source	All sources	Point source	Line source	Area source	All sources	Point source	Line source	Area source
Medium	(7.8)	61.5 (4.8)	9.0 (0.7)	32.1 (2.5)	(35.1)	22.8 (8.0)	64.7 (22.7)	12.5 (4.4)	(57.9)	1.9 (1.1)	93.8 (54.3)	2.6 (1.5)
90%	(13.4)	55.9 (7.5)	7.5 (1.0)	38.8 (5.2)	(57.5)	18.4 (10.6)	58.1 (33.4)	11.8 (6.8)	(84.5)	1.9 (1.6)	93.1 (78.7)	2.6 (2.2)
95%	(15.8)	52.2 (8.2)	7.6 (1.2)	38.6 (6.1)	(65.4)	14.2 (9.3)	56.3 (36.8)	12.4 (8.1)	(100.6)	1.8 (1.8)	93.9 (94.5)	2.3 (2.3)
99%	(25.9)	52.5 (13.6)	4.3 (1.1)	38.3 (9.9)	(77.8)	9.8 (7.6)	56.7 (44.1)	14.1 (11.0)	(131.3)	1.3 (1.7)	94.9 (124.6)	2.3 (3.1)
99.9%	(58.3)	26.0 (15.1)	2.0 (1.2)	37.0 (21.6)	(86.1)	9.3 (8.0)	50.8 (43.7)	15.0 (12.9)	(149.9)	1.0 (1.5)	93.8 (140.6)	2.1 (3.2)

*Predicted concentration in parentheses (ppb in SO₂, NO₂ and µg/m³ in PM₁₀)

는 중간값 (medium)에서는 8.5%, 90%에서는 10.1%로 증가하였으나, 이 후로 감소하여 99.9%에서는 3.8%의 기여도를 보였다. NO₂에 대한 각 오염원별 대기오염기여도는 중간값 (medium)에서는 선오염원이 64.9%로 가장 높은 기여도를 보였으며, 고농도사례 (99.9%)로 갈수록 선오염원의 기여도는 다소 감소 (64.9% → 54.7%)하고, 면오염원의 기여도는 다소 증가 (13.6% → 15.8%)하는 것을 알 수 있었다. 점오염원의 기여도는 중간값 (medium)에서는 21.8%, 90%에서는 13.2%로 증가하였으나 이 후로 감소하

여 99.9%에서는 8.0%의 기여도를 보였다. PM₁₀에 대한 각 오염원별 대기오염기여도는 농도 수준에 따른 기여도의 변화가 거의 없이 선오염원의 기여도가 가장 높았다. 중간값 (medium)에서는 선오염원이 93.1%로 가장 높은 기여도를 보였으며, 고농도사례 (99.9%)로 갈수록 선오염원의 기여도는 계속 조금씩 증가 (93.1% → 95.0%)하고, 면오염원과 점오염원의 기여도는 다소 감소 (면오염원: 2.6% → 2.2%, 점오염원: 2.2% → 1.0%)하는 것을 알 수 있었다. 점오염원의 기여도는 중간값 (medium)에서는 2.2%, 90%

Table 5. Contribution rate of air pollution concentration by sources according to percentile during Oct. 12~16, 2001.
unit : %

Percentile	SO ₂				NO ₂				PM ₁₀			
	All sources	Point source	Line source	Area source	All sources	Point source	Line source	Area source	All sources	Point source	Line source	Area source
Medium	(7.8)	55.1 (4.3)	7.7 (0.6)	37.2 (2.9)	(42.0)	19.7 (8.3)	64.5 (27.1)	14.4 (6.1)	(72.0)	1.2 (0.9)	95.7 (68.9)	2.3 (1.7)
90%	(13.7)	48.2 (6.6)	8.0 (1.1)	40.1 (5.5)	(67.7)	13.1 (8.9)	62.8 (42.5)	12.9 (8.7)	(118.1)	1.0 (1.2)	96.4 (113.8)	2.3 (2.7)
95%	(17.5)	43.4 (7.6)	8.0 (1.4)	41.1 (7.2)	(79.8)	12.5 (10.0)	59.5 (47.5)	14.4 (11.5)	(142.0)	1.1 (1.6)	96.4 (136.9)	2.2 (3.1)
99%	(41.5)	53.6 (22.2)	5.1 (2.1)	44.5 (18.5)	(100.7)	11.1 (11.2)	56.1 (56.5)	16.5 (16.6)	(194.9)	1.0 (2.0)	95.6 (186.3)	1.7 (3.2)
99.9%	(106.5)	24.3 (25.8)	2.2 (2.3)	36.4 (38.8)	(120.3)	7.8 (9.4)	47.9 (57.6)	15.3 (18.4)	(241.7)	0.3 (0.7)	93.6 (226.2)	2.5 (6.0)

*Predicted concentration in parentheses (ppb in SO₂, NO₂ and µg/m³ in PM₁₀)

에서는 1.8%로 감소하였고, 99.9%에서는 1.0%의 기여도를 보였다.

4.2 여름철

여름철의 각 오염원별 대기오염기여도는 표 4와 같이 SO₂의 경우 중간값 (medium)에서는 점오염원이 61.5%로 가장 높은 기여를 보였으며, 고농도사례 (99.9%)로 갈수록 점오염원의 기여도는 감소(61.5% → 26.0%)하고 면오염원의 기여도는 증가(32.1% → 37.0%)하는 것을 알 수 있었다. 선오염원의 기여도는 중간값 (medium)에서는 9.0%, 95%에서는 7.6%로 감소하였으나, 이 후로 증가하여 99.9%에서는 2.0%의 기여도를 보였다. NO₂에 대한 각 오염원별 대기오염기여도는 중간값 (medium)에서는 선오염원이 64.7%로 가장 높은 기여도를 보였으며, 고농도사례 (99.9%)로 갈수록 선오염원의 기여도는 다소 감소(64.7% → 50.8%)하고 면오염원의 기여도는 다소 증가(12.5% → 15.0%)하는 것을 알 수 있었다. 점오염원의 기여도는 중간값 (medium)에서는 22.8%, 90%에서는 18.4%로 감소하였고 이 후로 99.9%에서는 9.3%의 기여도를 보였다. PM₁₀에 대한 각 오염원별 대기오염기여도는 농도 수준에 따른 기여도의 변화가 거의 없이 선오염원의 기여도가 가장 높았다. 중간값 (medium)에서는 선오염원이 93.8%로 가장 높은 기여도를 보였다. 면오염원과 점오염원의 기여도는 감소(면오염원: 2.6% → 2.1%, 점오염원: 1.9%

→ 1.0%)하는 것을 알 수 있었다.

4.3 가을철

가을철의 각 오염원별 대기오염기여도는 표 5과 같이 SO₂의 경우 중간값 (medium)에서는 점오염원이 55.1%로 가장 높은 기여도를 보였으며, 99%의 농도사례 (기여도: 53.6%)를 제외하고는 고농도사례 (99.9%)로 갈수록 점오염원의 기여도는 감소(56.3% → 24.3%)하였다. 면오염원의 기여도는 99% 농도사례에서 44.5%로 가장 높은 대기오염기여도를 보였으며, 선오염원의 기여도는 중간값 (medium)에서는 7.7%, 90%에서는 8.0%로 증가하였으나 99% 농도사례부터 감소하여 99.9%에서는 2.2%의 기여도를 보였다. NO₂에 대한 각 오염원별 대기오염기여도는 중간값 (medium)에서는 선오염원이 64.5%로 가장 높은 기여도를 보였으며, 고농도사례 (99.9%)로 갈수록 선오염원의 기여도는 다소 감소(64.9% → 47.9%)하였고, 면오염원의 기여도는 SO₂와 마찬가지로 99% 농도사례에서 16.5%로 가장 높은 대기오염 기여도를 보였으며, 점오염원의 기여도는 중간값 (medium)에서는 19.7%, 90%에서는 13.1%로 감소하였고 이 후로 99.9%에서는 7.8%의 기여도를 보였다. PM₁₀에 대한 각 오염원별 대기오염기여도는 농도 수준에 따른 기여도의 변화가 거의 없이 선오염원의 기여도가 가장 높았다. 중간값 (medium)에서는 선오염원이 95.7%로 가장 높은 기여도를 보였으며,

Table 6. Contribution rate of air pollution concentration by sources according to percentile during Jan. 12~16, 2001.
unit: %

Percentile	SO ₂				NO ₂				PM ₁₀			
	All sources	Point source	Line source	Area source	All sources	Point source	Line source	Area source	All sources	Point source	Line source	Area source
Medium	(9.0)	55.6 (5.0)	10.0 (0.9)	33.3 (3.0)	(29.2)	21.9 (6.4)	61.3 (17.9)	14.0 (4.1)	(47.1)	3.2 (1.5)	91.3 (43.0)	3.2 (1.5)
90%	(10.0)	57.0 6.0	(5.7) (0.6)	38.0 (3.8)	(36.9)	20.6 (7.6)	47.2 (17.4)	14.4 (5.3)	(53.2)	2.8 (1.5)	80.6 (42.9)	3.2 (1.7)
95%	(10.5)	56.2 (5.9)	5.7 (0.6)	36.2 (3.8)	(38.5)	20.8 (8.0)	45.2 (17.4)	14.5 (5.6)	(54.2)	2.2 (1.2)	79.2 (42.9)	2.8 (1.5)
99%	(13.0)	57.7 (7.5)	4.1 (0.5)	30.8 (4.0)	(41.4)	19.6 (8.1)	42.0 (17.4)	13.3 (5.5)	(57.5)	2.3 (1.3)	74.4 (42.8)	2.6 (1.5)
99.9%	(19.7)	54.4 (10.7)	2.5 (0.5)	15.4 (3.0)	(47.1)	26.3 (12.4)	36.8 (17.3)	9.3 (4.4)	(62.7)	3.2 (2.0)	68.3 (42.8)	2.2 (1.4)

*Predicted concentration in parentheses (ppb in SO₂, NO₂ and µg/m³ in PM₁₀)

면오염원의 경우 2.3%, 점오염원의 경우는 1.2%의 기여도를 보였다. 또한 선오염원은 90%, 95% 농도 사례에서 96.4%의 가장 높은 기여도를 보였으며, 점오염원은 99.9%에서 가장 낮은 기여도(0.3%)를 나타냈고, 면오염원은 99%에서 가장 낮은 기여도(1.7%)를 나타냈다.

4.4 겨울철

겨울철의 각 오염원별 대기오염기여도는 표 6과 같이 SO₂의 경우 중간값(medium)에서는 점오염원이 55.6%로 가장 높은 기여도를 보였으며, 99.9% 농도사례도 54.4%로 기여도의 차이가 거의 없었으며, 다만 99% 농도사례에서 가장 높은 57.7%로 가장 높은 기여도를 보였다. 면오염원의 기여도는 90% 농도사례에서 38.0%로 가장 높은 기여도를 보였으나 99.9% 농도사례에서 급격히 감소하여 15.4%의 기여도를 보였다. 선오염원의 경우는 중간값(medium)에서 10%의 기여도를 보였으나 꾸준히 감소하여 99.9% 농도사례에서는 2.5%로 약 20% 기여도가 감소하였다. NO₂에 대한 각 오염원별 대기오염기여도는 중간값(medium)에서는 선오염원이 61.3%로 가장 높은 기여도를 보였으며, 고농도사례(99.9%)로 갈수록 선오염원의 기여도는 다소 감소(61.3%→36.8%)하고 면오염원의 기여도는 다소 증가하다 99% 농도 사례부터 감소하여 99.9% 농도사례에서는 9.3%를 기여하는 것으로 예측되었다. 점오염원의

기여도는 중간값(medium)에서는 21.9%, 90%에서는 20.6%로 감소하였고, 99.9% 농도 사례에서는 26.3% 증가하는 것으로 분석되었다. PM₁₀에 대한 각 오염원별 대기오염기여도는 다른 계절과 다르게 농도수준에 따라 선오염원의 기여도가 큰 차이를 보였다. 중간값(medium)에서는 91.3%의 기여도를 보였으나 점차 감소하여 99.9%에서는 가장 낮은 68.3%의 기여도를 보였고, 점오염원의 영향이 중간값(medium)과 99.9% 농도사례에서 3.2%의 기여도를 나타내는 것으로 예측되었다. 면오염원은 중간값(medium)에서 3.2%의 기여도를 보였고 점차 감소하여 99.9%에서는 2.2%의 기여도를 보였다.

5. 결 론

수도권지역에서 오염원별 대기오염기여도를 평가하기 위하여 사용된 TAPM모델은 지형특성을 고려한 국지기상현상과 배출량특성을 고려하여 통계적으로 유의한 대기질을 잘 모사하였다.

수도권지역에서 오염원별 대기오염기여도를 평가한 결과는 계절별로 유사한 결과를 보였으며, SO₂는 중간농도 수준에서는 점오염원이 55.1~61.5%로 가장 큰 기여도를 보였으나, 고농도 수준으로 갈수록 점오염원의 기여도가 감소하고 면오염원의 기여도가 봄, 여름철에 증가하는 것을 알 수 있었다. 또한 NO₂

는 농도 수준과 관계없이 선오염원의 기여도가 36.8~65.1%로 가장 기여도가 높았고, PM₁₀은 선오염원이 68.3~93.1%으로 가장 높은 기여도를 보였다. 이 결과를 보면 대기오염도를 개선하기 위해서는 SO₂의 경우 점오염원을 주로 관리해야 되지만 고농도 수준에서는 면오염원의 영향도 무시할 수 없음을 알 수 있었으며, NO₂과 PM₁₀은 선오염원을 주로 관리되어야 한다는 것을 알 수 있었다.

또한 결과를 살펴보면 모든 오염원을 고려하여 모델링한 결과의 최고농도수준(99.9%)값이 각각의 오염원으로부터 측정된 최고농도들의 합보다 높게 나타남을 알 수 있는데 이것은 배출량과 최고농도는 비선형적으로 작용하기 때문으로 풀이된다. 따라서 최고농도를 대상으로 배출량을 저감하기 위해서는 개별 오염원 보다는 모든 오염원을 고려하여 최고농도를 추정하고 이를 근거로 대책을 수립해야 한다.

본 연구를 바탕으로 서울을 포함한 수도권 지역에서 주요지역간 상호 대기오염기여도를 평가하여 대기오염저감을 위한 과학적인 기초 자료를 도출할 예정이다.

참 고 문 헌

국립환경연구원 (2003a) 대기환경연보(2003)
 국립환경연구원 (2003b) 대기보전 정책 수립 지원 시스템 구축
 국립환경연구원 (2004) 수도권지역에서 주요 지역간 대기오염물질 배출원·피해지 연구(1)
 기상청 (2001a) 기상청 기상자료 제공
 기상청 (2001b) 일기상통계자료집

Almbauer, R.A., D. Oettl, M. Bacher, and P.J. Sturm (2000) Simulation of the air quality during a field study for the city of Graz. *Atmospheric Environment* 34, 4581-4594
 Hurley P.J. (2001) The Air Pollution Model (TAPM) Version 2. Part 1: Technical Description, CAR Technical Paper N. 25. 25, 49pp
 Hurley P.J., W. Physick, and A. Luhar (2002) The Air Pollution Model (TAPM) Version 2. Part 2: Summary of some verification studies, Draft CAR Technical paper.
 Karppinen, A., J. Kukkonen, t. Elolähde, M. Konttinen, and T. Koskentalo (2000) A modelling system for prediction urban air pollution : comparison of model predictions with the data of an urban measurement network in Helsinki. *Atmospheric Environment* 34, 3735-3743
 Kim, J.Y. and Y.S. Ghim (2002) Effects of the Density of Meteorological Observations on the Diagnostic Wind Fields and the Performance of Photochemical Modeling in the Greater Seoul Area; *Atmos. Environ.* 36, 201-212
 Noritaka Katatani, N. Murao, S. Okamoto, and K. Kobayashi (1994) Estimation of region-by-region source contribution ratio to the acid deposition in Japan using model calculations. *Proceedings of the 7th IUPPA Regional Conference on Air Pollution and Waste Issues, November 2-4, 1994, Taipei, Vol. II.*, 307-315
 Park, I.-S., S.-J. Lee, C.-H. Kim, C. Yoo, and Y.-H. Lee (2004) Simulation Urban-Scale Air Pollutants and Their Prediction Capabilities over the Seoul Metropolitan Area, *Journal of Air & Waste Management Association*, 54(6), 695-710