

SMOKE 모델의 입력 모듈 변경에 따른 영향 분석

Assessment of Changed Input Modules with SMOKE Model

김지영* · 김정수¹⁾ · 홍지형 · 정동일 · 반수진¹⁾ · 이용미

국립환경과학원 환경총량관리연구부 대기총량과,

¹⁾국립환경과학원 지구환경연구소

(2007년 7월 16일 접수, 2008년 4월 3일 채택)

Jiyoung Kim*, Jeongsoo Kim¹⁾, Jihyung Hong, Dongil Jung,
Soojin Ban¹⁾ and Yongmi Lee

*Environmental Cap System Research Department, National Institute of
Environmental Research*

¹⁾*Global Environment Research Center, National Institute of Environmental Research*

(Received 16 July 2007, accepted 3 April 2008)

Abstract

Emission input modules was developed to produce emission input data and change some profiles for Sparse Matrix Operator Kernel Emissions (SMOKE) using Clean Air Policy Support System (CAPSS)'s activities and previous studies. Specially, this study was focused to improve chemical speciation and temporal allocation profiles of SMOKE. At first, SCC cord mapping was done. 579 SCC cords of CAPSS were matched with EPA's one. Temporal allocation profiles were changed using CAPSS monthly activities. And Chemical speciation profiles were substituted using Kang *et al.* (2000) and Lee *et al.* (2005) studies and Kim *et al.* (2005) study. Simulation in Seoul Metropolitan Area (Seoul, Incheon, Gyeonggi) using MM5, SMOKE and CMAQ modeling system was done for effect analysis of changed input modules of SMOKE. Emission model results adjusted with new input modules were slightly changed as compared to using EPA's default modules. SMOKE outputs shows that aldehyde emissions were decreased 4.78% after changing chemical profiles, increased 0.85% after implementing new temporal profiles. Toluene emissions were decreased 18.56% by changing chemical speciation profiles, increased 0.67% by replacing temporal profiles as well. Simulated results of air quality were also slightly elevated by using new input modules. Continuous accumulation of domestic data and studies to develop input system for air quality modeling would produce more improved results of air quality prediction.

Key words : Air Quality Model, SMOKE, CMAQ, Chemical speciation profile, Temporal allocation profile

*Corresponding author.

Tel : +82-(0)32-560-7522, E-mail : jykim@me.go.kr

1. 서 론

대기질 관리정책의 수립이나 정책시행에 따른 환경영향평가 등을 위해서는 현재의 대기질 상태 평가 및 미래 대기질 예측을 위한 대기상태, 오염물질 배출, 오염물질 간 화학과정 등의 상호과정을 평가하는 대기질 모델링이 필수적이다. 이를 위해 모델링 분야의 연구가 활발히 진행되어 왔으며 최근에는 매우 정교한 예측모델이 실용화되고 있다. Jose *et al.* (2007)은 AQMS (Air Quality Modeling Systems: MM5-CMAQ)을 구축하여 발전소 산업시설에서의 배출량에 따른 영향을 실시간으로 예측·분석하였고, Hogrefe *et al.* (2006)은 향후 NAAQS (National Ambient Air Quality Standards) 달성을 위한 배출량 제어 전략 수립을 위해 다양한 대기질 모델들을 이용하여 예측능력을 분석하였다. 이러한 예측모델을 이용하여 물리·화학과정을 정확히 모사하기 위해서는 이들에 대한 충분한 이해가 요구되며, 모델링 결과의 신뢰도를 결정하는 입력 자료의 준비과정이 매우 중요하다. 미국에서는 Kim *et al.* (2003)과 Diaz *et al.* (2005) 등의 연구에서 실측 및 국가 배출량 자료를 이용한 정확한 대기질 모델의 예측능력을 분석하였고 국내에서도 모델링 입력 자료의 신뢰성을 높일 수 있는 VOCs 배출량 산정과 구성비에 관한 연구(김소영 등, 2001; 이종범 등, 1997) 등이 이루어졌다. 또한, 김정수(2002)에서는 시간에 따른 배출량 처리 프로그램을 개발하였고 김동영 등(2004)에서는 VOCs 화학종별 배출량을 산정하는 연구를 수행하였다. 그러나 보다 정확한 대기질 예측 및 평가를 위한 국내 연구는 아직 미흡한 실정으로 더 많은 연구를 통해 대기질 모델을 위한 입력 자료의 확보 및 국내 실정에 적합한 입력 시스템 개발이 필요할 것이다.

본 연구에서는 향후 활용빈도가 많을 것으로 예상되는 대기질 모델링을 통한 대기환경개선정책의 실효성 분석을 보다 효율적으로 수행할 수 있도록 CAPSS (Clean Air support System, 대기정책지원시스템) 배출량 자료를 이용하여 배출모델에 입력할 수 있는 변환 모듈을 작성하였으며, 국내 실정을 반영할 수 있는 모델 변수들을 변경하여 그 효과를 평가하였다.

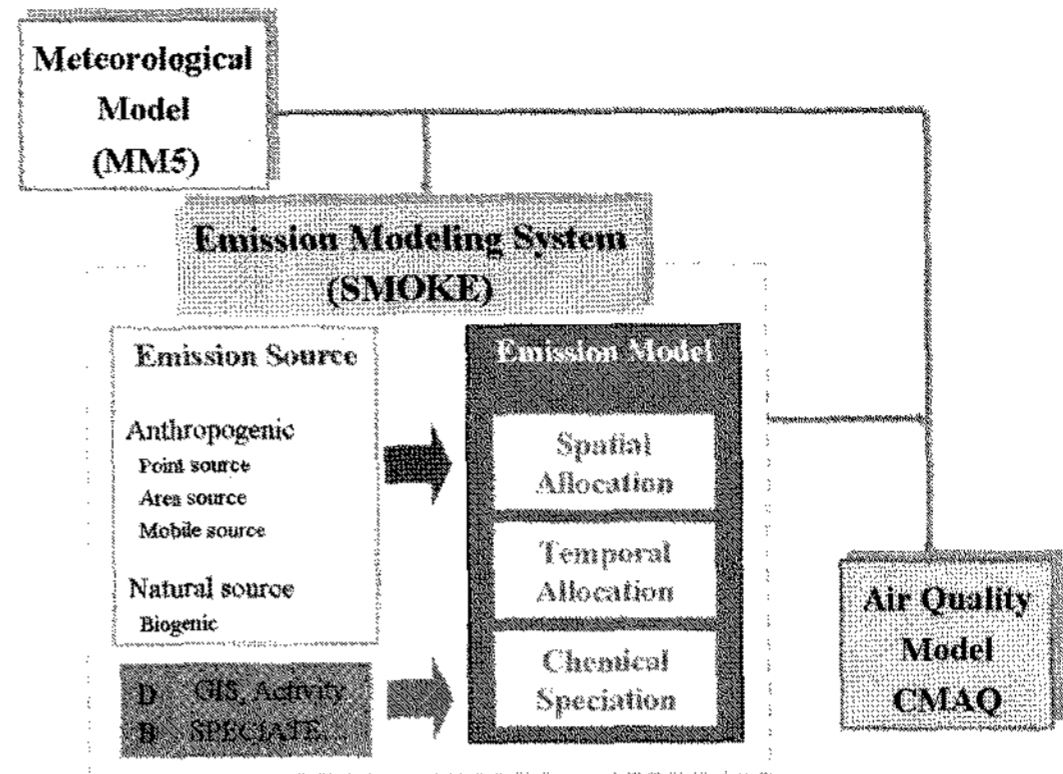


Fig. 1. Air quality modeling system.

2. 연구 및 방법

2.1 대기질 모델링 시스템 구축

국내에서 활용되고 있는 각 모델들을 바탕으로 현재 활용빈도가 높고 운영이 편리한 기상모델 (Mesoscale Meteorological Model: MM5), 배출모델 (Sparse Matrix Operator Kernel Emission: SMOKE), 대기질모델 (Comprehensive Multiscale Air Quality: CMAQ)을 바탕으로 대기질 모델링 시스템을 그림 1과 같이 구성하였다. 기상모델의 결과를 배출모델 및 대기질 모델에 이용하기 위한 인터페이스로는 MCIP (Meteorology-Chemistry Interface Processor)을 사용하였다.

2.1.1 기상모델

본 연구에서는 미국을 포함한 세계 각국에서 기상예보를 위해 사용하고 있는 MM5 (NCAR/Penn state Mesoscale Modeling 5th)를 사용하였다. MM5는 지금까지 사용되고 있는 기상모델 가운데 가장 발달된 것 중의 하나로 1970년 초에 펜실베니아 주립대학의 Anthes에 의해 개발된 중규모 모델로서 연구 목적으로 뿐만 아니라 기상예보를 위한 현업에서도 광범위하게 사용되고 있다.

2.1.2 배출모델

배출모델은 배출목록을 기본으로 대기질 모델에 알맞은 배출량 입력 자료를 생성하기 위한 도구로서 본 연구에서는 현재 가장 많이 사용되고 있는 Sparse Matrix Operator Kernel Emissions (SMOKE) 모델을

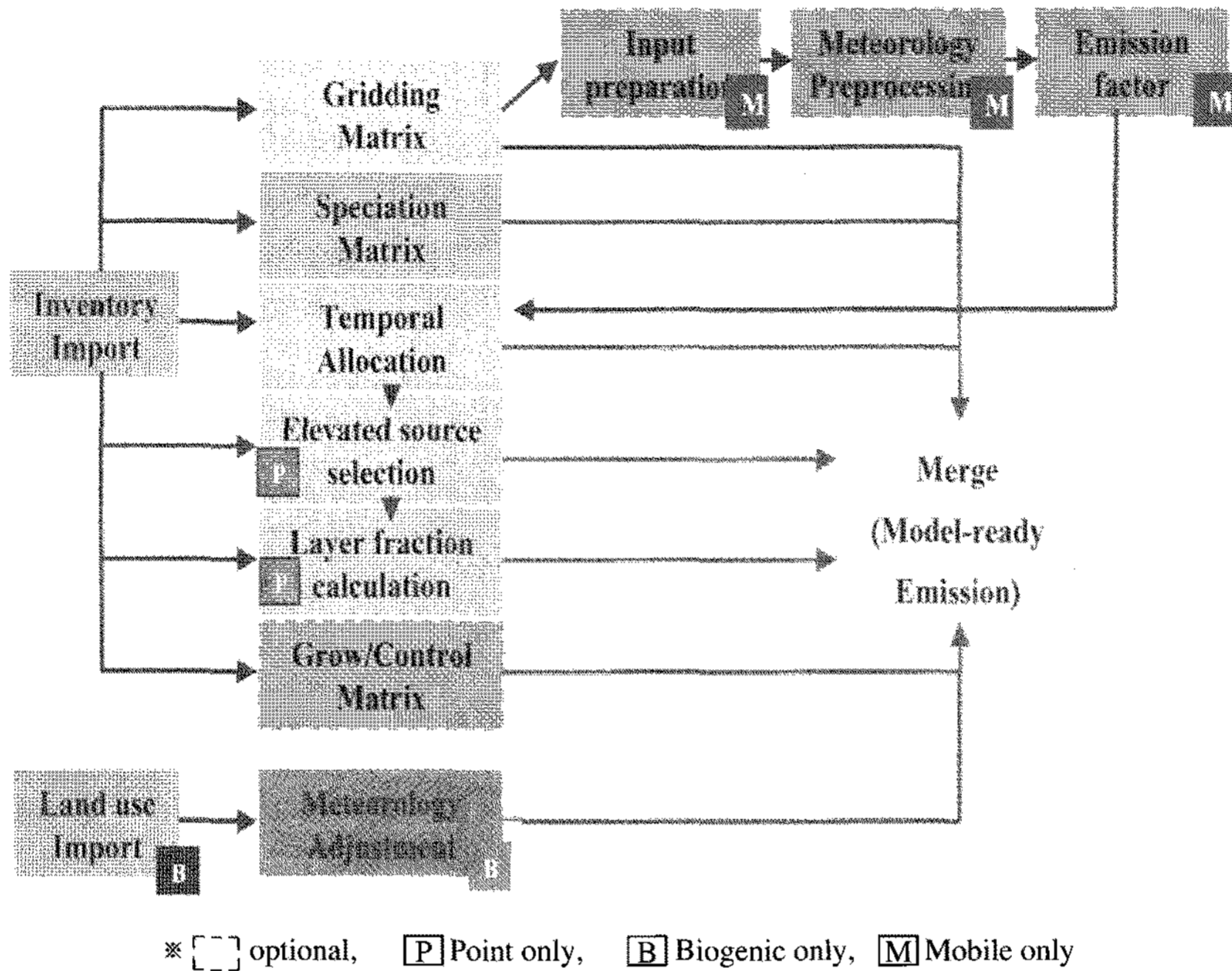


Fig. 2. SMOKE model system flow chart.

사용하였다. SMOKE(김동영 등, 2004)는 각 배출량 소스별(점, 선, 면)로 제공되는 연간 배출량 인벤토리(가능한 곳은 일평균 배출량)를 이용하여 시간별·종별·공간별 분배를 해서 대기질 모델에서 필요로 하는 해상도의 배출량 자료를 만들어주는 배출 프로그램으로, CO, NO_x, VOC, NH₃, SO₂ 등과 같은 가스상 물질 및 PM_{2.5}, PM₁₀과 같은 입자상 물질을 모두 처리할 수 있으며, 수은, 카드뮴, 벤젠, 포름알데히드와 같은 독성물질 또한 처리 가능하다.

SMOKE 배출 모델의 대략적인 구성요소를 그림 2에 나타내었다. 모델에서 사용되는 인벤토리 자료, 종분화·시간분배·공간분배를 위한 프로파일(profile)과 레퍼런스(reference) 파일 및 기타 모델 운영에 필요한 모델 격자정보, 기상자료 등을 준비하여 다음의 처리 과정을 거치게 되면 대기질 모델의 입력을 위한 모델준비 파일이 생성된다.

2.1.3 대기질 모델

EPA에서는 기존의 대기오염 모델의 단점을 보완하여 최근에 3세대 모델이라고 할 수 있는 Model-3/Community Multiscale Air Quality (CMAQ)을 개발하

였다. CMAQ은 1998년 6월에 1차 공식 버전이 발표되었으며 현재도 활발하게 개선되고 있는 모델이다. 이 모델은 주모델을 실행하기 위한 전처리 모델과 주모델인 화학수송 모델(CMAQ Chemical Transport Model: CCTM)으로 구성되어 있다. 본 연구에서는 CMAQ version 4.4를 사용하였다.

2.2 모델입력자료 준비 및 평가 지표

2.2.1 모델 입력자료 준비

위에서 구성한 모델링 시스템 중 특히 배출모델은 외국(미국)의 배출 인벤토리를 기반으로 구축된 모델이기 때문에 국내 배출량 인벤토리 자료인 국립환경과학원의 CAPSS 자료를 사용하기 위해서는 모델에서 요구하는 형태로의 변환이 필요하다. 본 연구에서 사용하는 SMOKE 배출모델에서 점 오염원 인벤토리에 대해 표 1과 같은 정해진 형태의 자료 입력이 요구된다. 이러한 인벤토리 이외에도 모델에서 요구하는 입력 자료는 다양하다. 또한 배출모델에서의 시간분류 및 화학종분류를 위한 자료들 역시 외국의 배출원 분류 체계에 따른 자료이기 때문에 국

Table 1. Inventory file for point source-IDA format type.

Position	Name	Description
1~2	STID	State code (required)
3~5	CYID	County code (required)
6~20	PLANTID	Plant Identification Code (required)
21~35	POINTID	Point Identification Code (recommended)
36~47	STACKID	Stack Identification Code (recommended)
48~53	ORISID	DOE Plant ID
54~59	BLRID	Boiler Identification Code (recommended)
60~61	SEGMENT	DOE ID (recommended)
62~101	PLANT	Plant Name (recommended)
102~111	SCC	SCC (required)
120~123	STKHGT	Stack height (ft) (required)
124~129	STKDIAM	Stack diameter (ft) (required)
130~133	STKTEMP	Gas exit temperature (°F) (required)
134~143	STKFLOW	Gas flow rate (optional)
144~152	STKVEL	Gas exit velocity (ft/s) (required)
227~230	SIC	Standard Industrial Classification (SIC) Code (required)
231~239	LATC	Latitude (degrees) (required)
240~248	LONC	Longitude (degrees) (required)
250~262	ANN1	pol1 yearly emission (short tons/yr) (required)
263~275	AVD1	pol1 average-day emission (short tons/average day)
276~282	CE1	pol1 Control Efficiency
283~285	RE1	pol1 Rule Efficiency
302~314	ANN2	pol2 yearly emission (short tons/yr) (required)

(Repeat for therest of n pollutants)

내 실정과는 다소 상이한 부분이 있다. 그러나 현재 국내에서는 이러한 부분에 대한 직접적인 조사나 분석이 미흡하기 때문에 외국의 자료를 기본값으로 사용하고 있다.

따라서 본 연구에서는 국내화된 모델 운영 특히, 배출모델에서 요구하는 입력형태로의 변환을 위해 모델 입력시스템을 변경하였으며, 배출량의 시간 및 화학종 분류 등의 입력 자료에 국내 실정을 반영하기 위해 국내의 관련 연구들을 조사하여 모델 입력 자료를 작성하였다.

또한 연구결과를 수도권 지역을 대상으로 한 대기질 모델링을 통해 국내 자료를 반영한 배출량 및 대기질 예측 결과의 차이를 분석하고자 하였다. 즉, 배출모델에서 기존에 사용하고 있는 외국 자료 기반의 예측 결과와 변경된 입력자료를 통한 모델링 결과치를 비교하였다.

2.2.2 결과 분석을 위한 통계 지표

본 연구에서는 수도권 지역의 20개 지점에서 통계적 지표를 사용하여 대기질 예측값의 정량적인 평가

Table 2. Formula for statistical analysis.

Index	Numerical formula
Mean Observation (M_o)	$M_o = \frac{1}{IJ} \sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^I O_j^i$
Mean Prediction (M_p)	$M_p = \frac{1}{IJ} \sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^I P_j^i$
Bias Error (B)	$B = \frac{1}{IJ} \sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^I (P_j^i - O_j^i)$
Gross Error (G)	$G = \frac{1}{IJ} \sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^I P_j^i - O_j^i $
Root Mean Square Error (RMSE)	$RMSE = \left[\frac{1}{IJ} \sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^I (P_j^i - O_j^i)^2 \right]^{1/2}$
Index of Agreement (IOA)	$IOA = 1 - \left[\frac{IJ * PMSE^2}{\sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^I P_j^i - M_o + O_j^i - M_o } \right]$

where, O_j^i : Observation at station i, time j,
 P_j^i : Model prediction station i, time j

를 수행하였고 이때 사용된 여러 가지 통계 지표는 표 2에 제시하였다. 분석에 사용된 지수 CORR의 계

Table 3. Fuel code allocation for CAPSS.

Fuel code	Fuel	New code	Fuel code	Fuel	New code
10101	Anthracite Coal for private heating	01	20306	B-C Oil (0.3%)	23
10102	Anthracite Coal except private heating	02	20307	LSWR	24
10201	Bituminous Coal	03	20400	Diesel	25
20100	B-A Oil	04	20401	Diesel (1.0%)	26
20101	B-A Oil (2.0%)	05	20402	Diesel (0.4%)	27
20102	B-A Oil (1.6%)	06	20403	Diesel (0.2%)	28
20103	B-A Oil (1.0%)	07	20404	Diesel (0.1%)	29
20104	B-A Oil (0.5%)	08	20405	Diesel (0.05%)	30
20105	B-A Oil (0.3%)	09	20500	Kerosene	31
20199	Not classified B-A Oil	10	20502	Kerosene for Boiler	32
20200	B-B Oil	11	20503	Indoor kerosene	33
20201	B-B Oil (3.0%)	12	20604	Unleaded Gasoline	34
20202	B-B Oil (1.6%)	13	20605	Regular Unleaded Gasoline	35
20203	B-B Oil (1.0%)	14	20606	Premium Unleaded Gasoline	36
20204	B-B Oil (0.5%)	15	20700	Aviation	37
20205	B-B Oil (0.3%)	16	40100	LPG	38
20299	Not-classified B-B Oil	17	40101	Propane	39
20301	B-C Oil (4.0%)	18	40102	Butane	40
20302	B-C Oil (2.5%)	19	40201	LNG	41
20303	B-C Oil (1.6%)	20	41300	CNG	42
20304	B-C Oil (1.0%)	21	99999	the others	43
20305	B-C Oil (0.5%)	22			

Table 4. CAPSS SCC (Source Classification Code) allocated new fuel code.

SCC	Level 1	Level 2	Level 3	Fuel	CAPSS SCC
01010100	Combustion in energy production	Institutional power plant	1,2,3 class (Boiler)	Anthracite Coal for private heating	0101010002
				Bituminous Coal	0101010003
				B-C Oil (4.0%)	0101010018
				B-C Oil (2.5%)	0101010019
				B-C Oil (0.5%)	0101010022
				B-C Oil (0.3%)	0101010023
				Diesel (1.0%)	0101010026
				Diesel (0.1%)	0101010029
				Kerosene for Boiler	0101010032
				LNG	0101010041
01010400			Gas turbine	Diesel (0.1%)	0101040029
				Kerosene for Boiler	0101040032
...

산식은 다음과 같다.

$$CORR(R) = \frac{N \left(\sum_{i=1}^N O_i P_i \right) - \left(\sum_{i=1}^N O_i \right) \left(\sum_{i=1}^N P_i \right)}{\sqrt{\left[N \left(\sum_{i=1}^N O_i^2 \right) - \left(\sum_{i=1}^N O_i \right)^2 \right] \left[N \left(\sum_{i=1}^N P_i^2 \right) - \left(\sum_{i=1}^N P_i \right)^2 \right]}}$$

3. 연구 결과

3.1 배출모델 변경

국내 자료인 CAPSS 배출량을 이용하여 SMOKE 배출모델을 구동하기 위해서는 미국의 배출원 분류 코드(SCC)와 CAPSS의 배출원 분류코드를 일치하

Table 5. Matching between U.S. EPA SCC and CAPSS SCC.

SCC	Level 1	Level 2	Level 3	Fuel	CAPSS SCC	U. S. EPA SCC
01010100	Combustion in energy production	Institutional power plant	1,2,3 class (Boiler)	Anthracite Coal except private heating	0101010002	10100101
				Bituminous Coal	0101010003	10100202
				B-C Oil (4.0%)	0101010018	10100401
				B-C Oil (2.5%)	0101010019	10100401
				B-C Oil (0.5%)	0101010022	10100401
				B-C Oil (0.3%)	0101010023	10100401
				Diesel (1.0%)	0101010026	20100101
				Diesel (0.1%)	0101010029	20100101
				Kerosene for Boiler	0101010032	20100901
				LNG	0101010041	10100601
01010400			Gas turbine	Diesel (0.1%)	0101040029	20100101
				Kerosene for Boiler	0101040032	20100901
				LNG	0101040041	20100201
01010500			Combustion engine	B-C Oil (0.5%)	0101050022	20200501
...

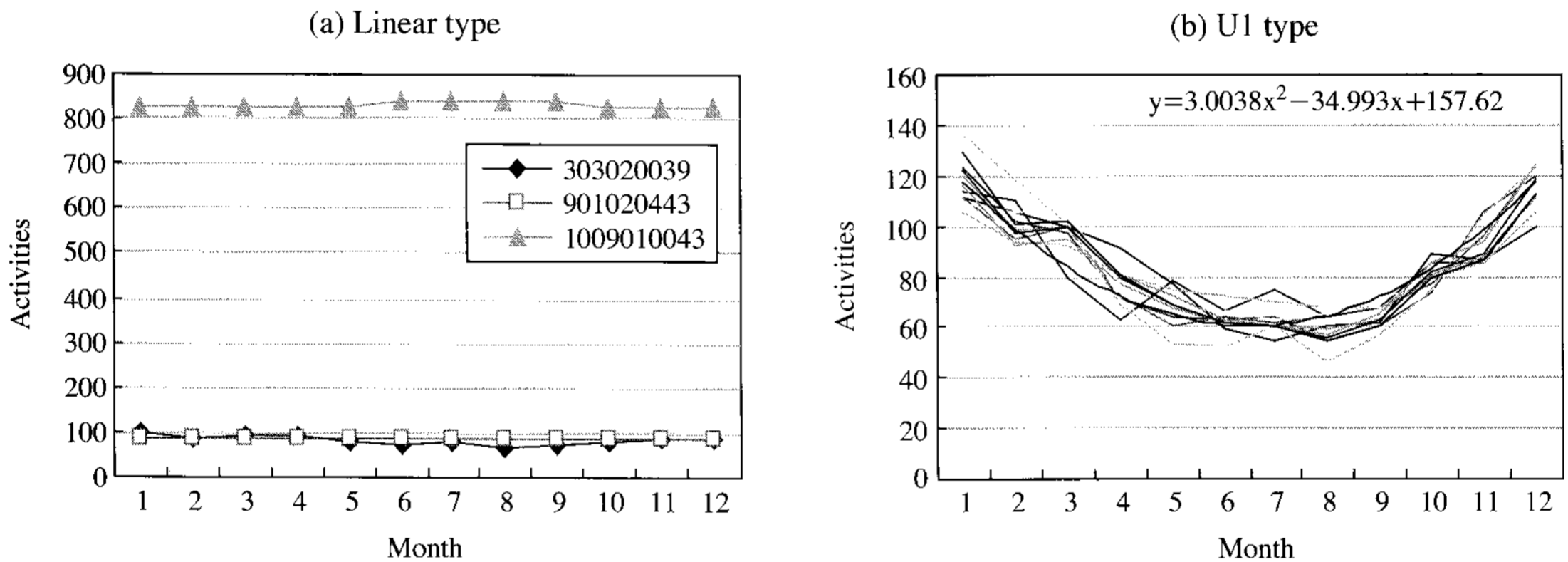


Fig. 3. Representative monthly profile for linear type (a) and U1 type (b) using CAPSS.

는 과정이 필요하다. 이 과정을 위해 표 3~4와 같이 8자리로 부여되어 있는 CAPSS의 SCC 코드에 연료 코드를 2자리수로 입력하여 총 10자리의 SCC 코드로 정의하여 사용하였다.

이렇게 새롭게 정의한 CAPSS의 배출원 분류코드와 미국의 배출원 분류코드를 비교하여 서로 일치하는 작업을 수행하였다(표 5).

배출모델의 시간할당 및 화학종분류에 필요한 자료들은 국내 자료 및 연구 자료들을 바탕으로 국내 오염원에 적합한 시간분류 및 화학종분류 할당 자료를 생성하였다.

3.1.1 시간분배 프로파일 변경

시간에 따른 프로파일을 계산하기 위해서는 사업장별, 오염원별의 특징을 나타낼 수 있는 활동도 계산이 필요하나 SCC별 활동도 자료 획득의 어려움으로 오염원별 배출량을 이용하여 사업장 및 오염원별 활동도를 대신하였다.

우선, 우리나라 배출원 분류 특성에 맞는 미국의 SCC별 시간분류 프로파일을 비교·분석하여 상관성을 살펴보았으며 이때 유사한 활동도를 보이는 579개의 코드는 개별 매칭을 통해 프로파일을 부여하였다. 표 5와 같이 개별 매칭을 한 후 활동도의 변

Table 6. Same as Table 4, except for line type code.

CAPSS SCC	Level 1	Level 2	Monthly		Weekly	Diurnal
			Old	New		
0902040043	Waste disposal	Incineration	456	262	7	26
1009020143	Natural source	Animal	1500	262	7	26
1102010143	Agriculture	Night-soil	1500	262	7	26
...

Table 7. Same as Table 4, except for U type code.

Type	CAPSS SCC	Level 1	Level 2	Monthly		Weekly	Diurnal
				Old	New		
Type I	0102010018	Combustion in energy production	District heating	262	9001	7	24
	0201010015	Non industrial combustion	Commercial/ Institutional	262	9001	7	24
	0201010023			262	9001	7	24
	0201030039			262	9001	8	26
...
Type II	0102010021	Combustion in energy industry	District heating	262	9002	7	24
	0102010023			262	9002	7	24
	0201010018	Non industrial combustion	Commercial/ Institutional	262	9002	7	24
	0201010021			262	9002	7	24
...
Type III	0301010008	Combustion in manufacturing industry	Combustion facilities	262	9003	7	24
	0302110029		Industrial processes	302	9003	7	24
	0303020041		The others	262	9003	8	26
	0303030041			262	9003	8	26
...

화가 유사한 프로파일의 경우 미국의 월별 프로파일을 적용하였다.

이 외 프로파일의 추가 및 수정이 필요한 항목의 경우 아래와 같은 방법을 통해 프로파일을 변경하였다. CAPSS 자료 중 다음 그림 3(a)와 같이 월별 활동도 변화가 거의 없는 상태의 일자형 배출원의 경우 3개의 대표 프로파일을 적용하였다. 월별 활동도의 변화가 없는 일자형 프로파일의 경우 승용차, 승합차, 버스 등의 이동오염원의 61개의 부문, 선박, 항공, 농기계 등의 비도로이동오염원의 11개 부문 및 생산 공정 일부와 분뇨 관리 등의 농업 및 자연 오염원 부문 등 22개의 부문에 대하여 대표 프로파일을 적용하였다. 표 6은 일자형 프로파일로 변경하는

일부의 예를 나타낸 것이다.

겨울철인 1, 12월에는 최대, 여름인 7, 8월에 최소 배출비율을 나타내고 있는 U자형 추이의 경우 총 3가지 분포 특성에 따라 나누어 대표 코드를 선정하였다. U자형 타입의 일부 배출원 분류코드를 표 7에 나타냈다. 각 타입을 대표하는 월별 프로파일의 예는 그림 3(b) 및 4(a, b)와 같다. 첫 번째 U자형 프로파일은 주거시설 및 농축산업 등의 비산업연소, 기타제조업 및 암모니아 소비에 의한 생산공정, 일부 도로 이동오염원 부문 등 36개의 코드를 대표하는 프로파일을 작성하였다. 또한 두 번째 U자형 프로파일은 그림 4(a)와 같은 추이로 역시 평균값의 추세선을 이용하여 새로운 월별 프로파일을 생성하여 사용하였

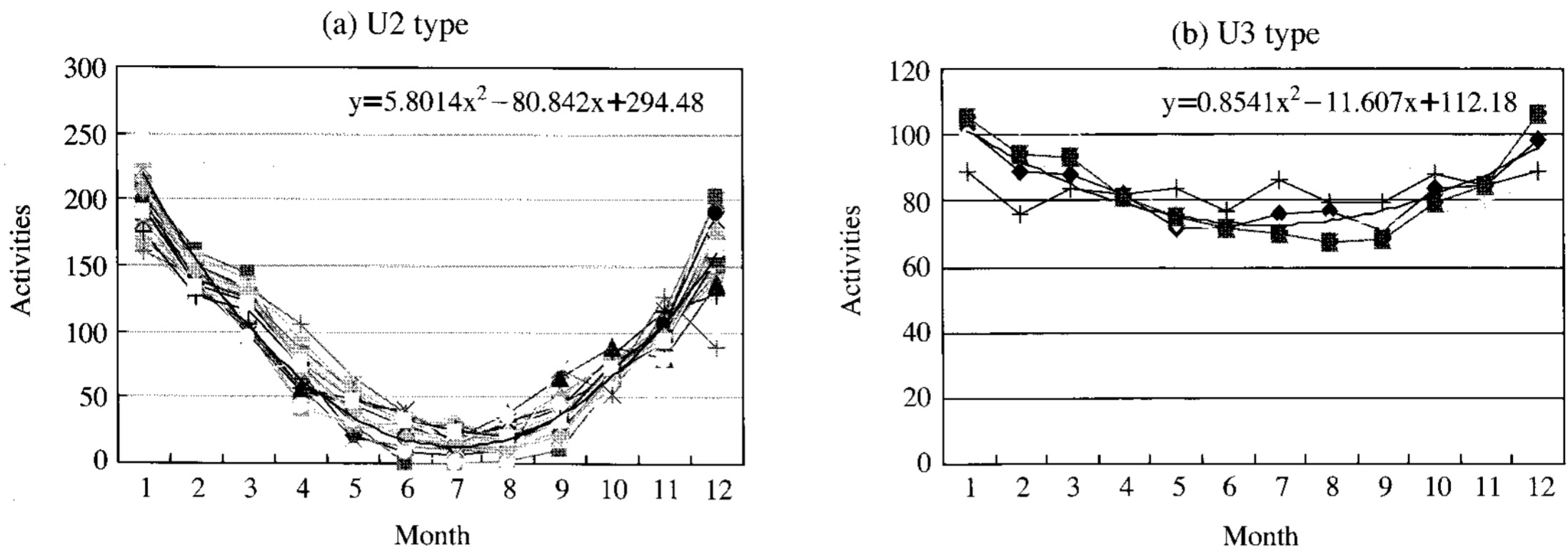


Fig. 4. Representative monthly profile for type U2 (a) and U3 (b) using CAPSS.

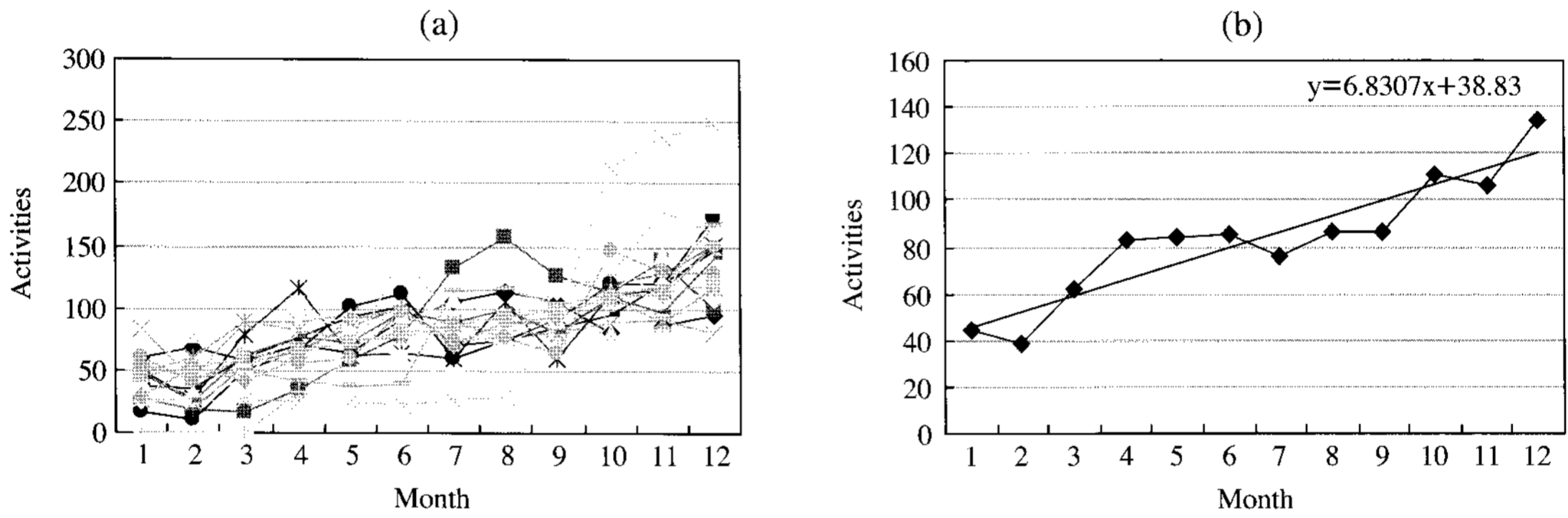


Fig. 5. Monthly profile (a) and representative profile (b) for growth type using CAPSS.

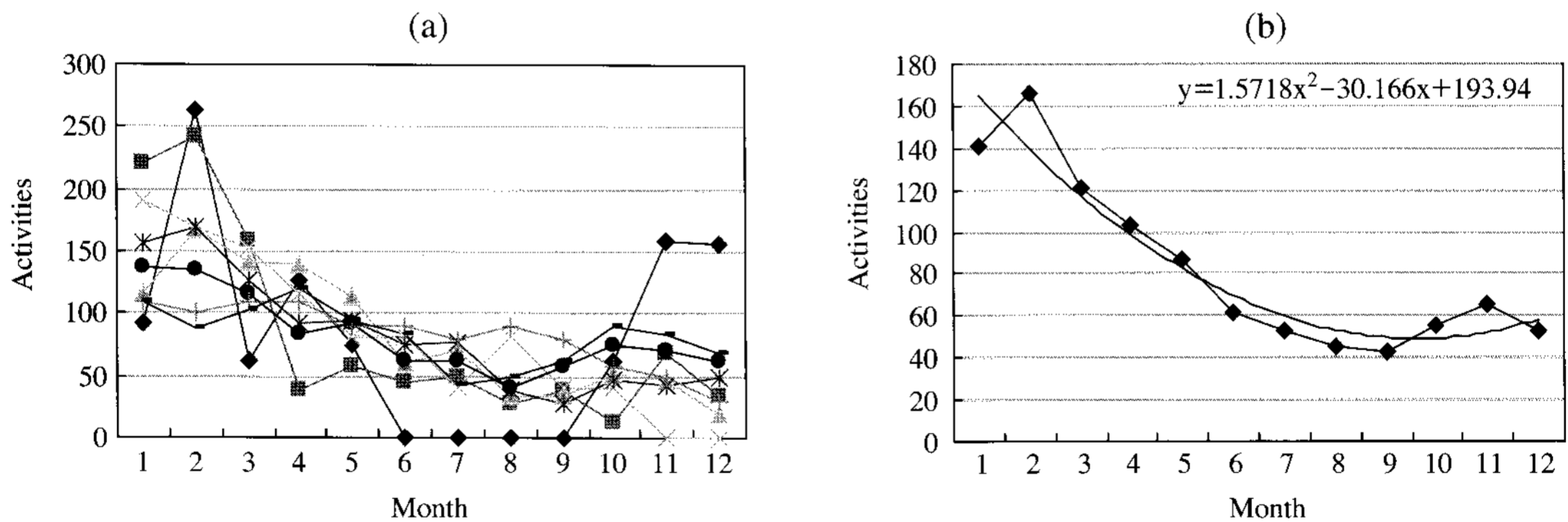


Fig. 6. Monthly profile (a) and representative profile (b) for reduction type using CAPSS.

다. 본 프로파일은 지역난방 등의 에너지산업 연소, 상업 및 공공시설과 주거용시설 등의 비산업 연소와 기타 제조업 및 승용차 부문 등의 64개의 코드를 대

표하는 프로파일로 작성되었다. 세 번째 U자형 프로파일의 경우, 그림 4(b)와 같이 최대월과 최소월의 큰 차이를 보이지 않는 완만한 곡선 분포를 보이고

Table 8. Same as Table 4, except for increase and decrease type.

CAPSS SCC	Level 1	Level 2	Monthly		Weekly	Diurnal
			Old	New		
0201050041	Non industrial combustion	Commercial/ Institutional	285	9000	7	24
0301010028	Combustion in manufacturing industry	Combustion facilities	137	9000	7	24
0301010041		Industrial processes	302	9000	7	24
0302020023		The others	312	9000	7	24
0303030022	Combustion in manufacturing industry	The others	262	9100	8	26
0303040007			262	9100	8	26
0303060008			262	9100	8	26
...

Table 9. Model-species for VOCs.

Pollutant	Species	Description
VOCs	ALD2	Acetaldehyde and higher aldehydes
	ETH	Ethene (CH ₂ =CH ₂)
	FORM	Formaldehyde (CH ₂ =O)
	ISOP	Isoprene (C ₅ H ₈)
	OLE	Olefinic carbon bond (C=C)
	PAR	Paraffin carbon bond (C-C)
	TOL	Toluene (C ₆ H ₄ -CH ₃)
	XYL	Xylene (C ₆ H ₅ -(CH ₃) ₂)
	NR	Non reaction

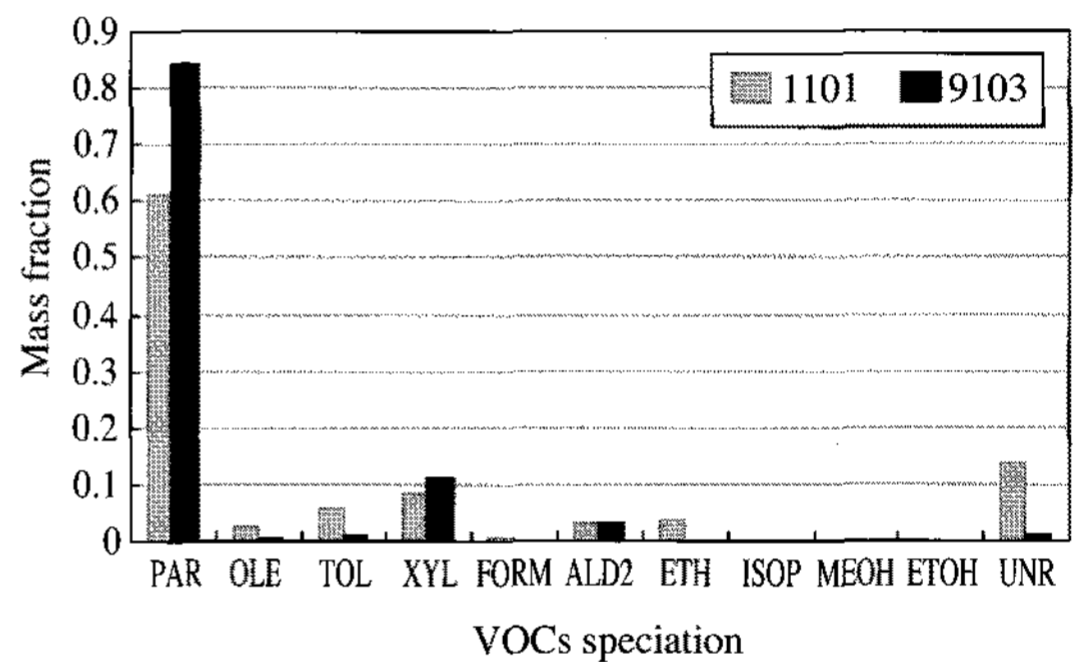
있다. 본 유형에서는 모두 제조업 연소에 해당하는 코드로서 연소시설, 공정로 및 기타 부문에 해당하는 31개 프로파일에 적용하였다.

마지막으로 월별 증가형과 감소형의 대표 프로파일의 활동도별 평균값의 추세를 사용하여 대표적 프로파일을 생성하였다. 증가형 프로파일은 그림 5와 같고 연소시설 및 공정로 등의 제조업 연소와 기타 유기용제사용 부문의 17개의 코드를 대표하는 프로파일이다. 감소형(그림 6) 프로파일은 민간발전의 에너지산업연소와 기타제조업연소 부문의 12개의 코드를 대표하는 프로파일이다.

3.1.2 화학종분류 프로파일 변경

SMOKE 배출모델에서 지원하는 CB-IV 메커니즘에서 VOCs는 표 9에 제시한 것과 같은 화학종으로 종분류 된다.

VOCs의 종분류 프로파일을 개선하기 위하여 이와 유사한 다음의 두가지 선행연구결과를 이용하였다. 본 연구에서는 '수용모델(CMB)을 이용한 VOCs



* 1101: before changed VOC profile, 9103: after changed VOC profile

Fig. 7. Example of comparison before and after VOC profile updated.

Table 10. Speciation VOC profile for gasoline vapor.

Gasoline vapor	Index	Mole fraction	Divisor	Mass fraction
	PAR	0.052146415	1	0.834342636
	OLE	0.000104778	1	0.003352911
	TOL	0.000088261	1	0.00988522
	XYL	0.00086505	1	0.110726385
	FORM	0	1	0
9103	ALD2	0.000926679	1	0.029653717
	ETH	0	1	0
	ISOP	0	1	0
	MEOH	0	1	0
	ETOH	0	1	0
	UNR	0.000752446	1	0.01203913
	Total	0.054883628		1

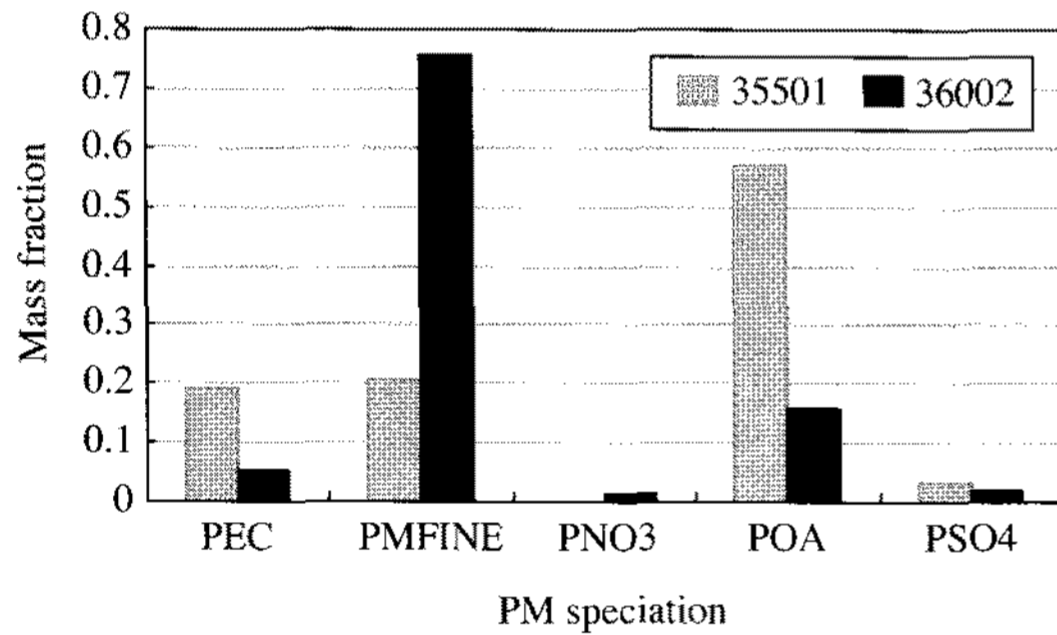
의 배출원별 기여율 추정'(김신도 등, 2005) 연구의 결과를 이용하여 VOCs 종분류 프로파일을 수정하였

다. 이 연구에서 도출된 연구결과의 한 예를 그림 7과 표 10에 제시하였다.

본 연구에서는 국내 실정에 맞는 프로파일을 작성하기 위해 국내 연구 자료를 참고하여 PM 화학종분류 프로파일을 변경하였다. 본 연구에 사용된 기존의 연구 자료들은 우선, 강병욱 등 (2000)의 '수용모델을 이용한 청주시 미세먼지 (PM_{2.5})의 기여도 추정'과 이학성 등 (2005)의 '수용모델을 이용한 서울지역 미세먼지 (PM_{2.5})에 영향을 미치는 배출원 특성에 관한 연구' 등에서 미세먼지 성분비 자료를 이용하였다. 다음으로는 김신도 등 (2005)의 연구 결과인 PM₁₀ 및 PM_{2.5}의 구성 성분의 비율을 활용하였다. 위 연구결과를 18개의 배출원에 대한 기여율표

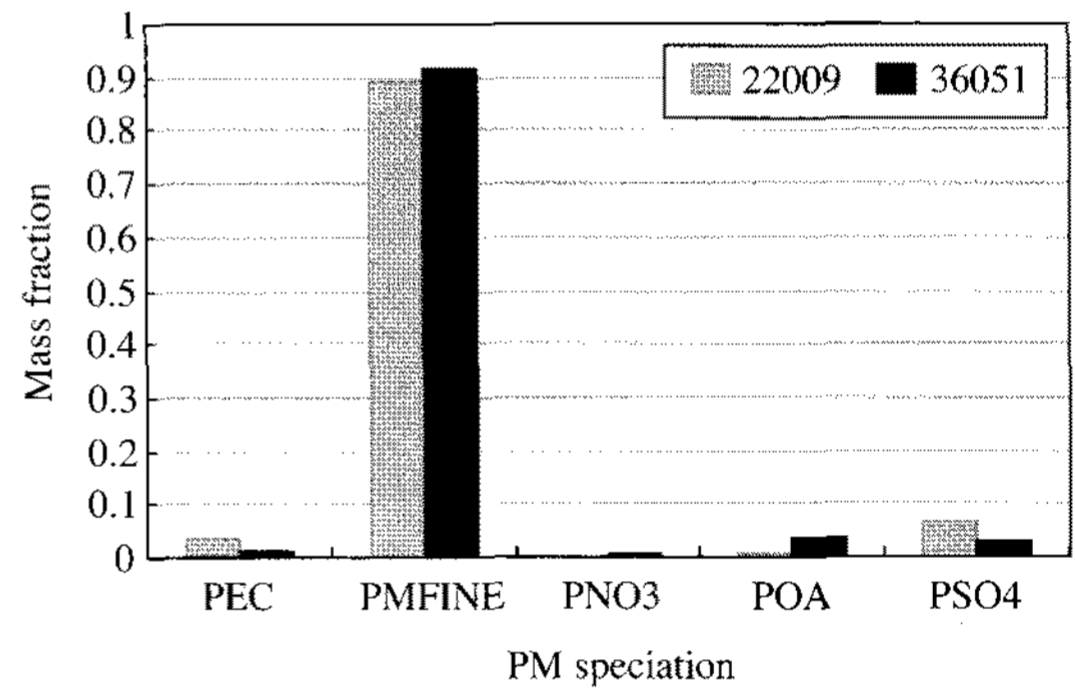
로 정리하였으며 각 연구에서 중첩되는 소각장, 디젤 자동차, 가솔린 자동차 등의 항목에 대해서는 차이가 있는 것에 대하여 판단기준을 따로 정하지 않고 이 자료들을 이용하여 두 가지 프로파일을 만들어 활용하였다. 본 분류는 강병욱 등 (2000) 및 이학성 등 (2005)의 연구를 통해 하나의 프로파일을 작성하였고 김신도 등 (2005)의 연구를 통해 다른 하나의 프로파일을 작성하였다.

PM 종분류 수정을 위한 기반 연구 결과에서 배출 프로파일이 조사된 배출원은 총 18가지이나 CAPSS에서 부여되지 않는 Soil, Marine, Biomass burning 등을 제외하고 CAPSS에서 부여된 항목의 프로파일



*35501: before changed PM profile, 36002: after changed PM profile

Fig. 8. Example of comparison before and after PM profile updated using Kang and Lee studies.



*22009: before changed PM profile, 36051: after changed PM profile

Fig. 9. Example of comparison before and after PM profile updated using NIER study.

Table 11. Speciation PM profile for gasoline mini-vehicle by Lee et al. study.

Gasoline mini-vehicle	Pollutant	Species	Split factor	Division	Mass fraction
36002	PM _{2.5}	PEC	0.053	1	0.053
		PMFINE	0.757	1	0.757
		PNO3	0.012	1	0.012
		POA	0.158	1	0.158
		PSO4	0.020	1	0.020

Table 12. Speciation PM profile for municipal incineration by NIER study.

Municipal incineration	Pollutant	Species	Split factor	Division	Mass fraction
36051	PM _{2.5}	PEC	0.0146	1	0.0146
		PMFINE	0.9168	1	0.9168
		PNO3	0.0058	1	0.0058
		POA	0.036	1	0.036
		PSO4	0.0326	1	0.0326

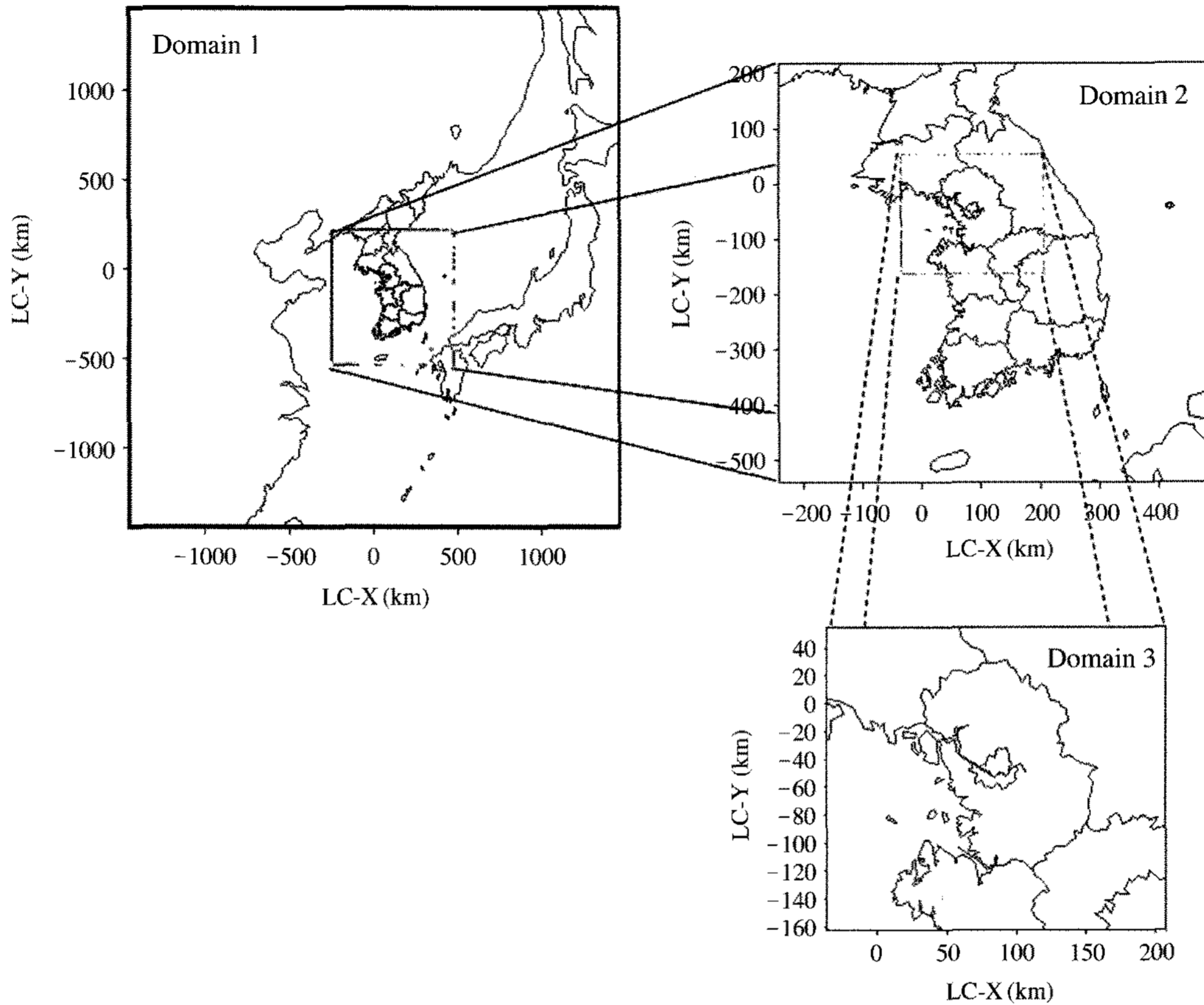


Fig. 10. MM5 domain.

만을 변환하였다.

우선, 강병욱 등(2000) 및 이학성 등(2005)에 의한 연구결과를 살펴보면, 본 연구결과를 이용하여 총 11 가지 프로파일을 추가하였다. 새로운 화학종분류 프로파일의 종분류 코드의 수정 전·후에 따른 예는 그림 8과 같고 이때, 변경된 프로파일은 표 11과 같다.

김신도 등(2005) 연구를 이용한 프로파일 변환 과정을 살펴보면, 연구결과를 토대로 프로파일을 정리한 결과 총 12개의 프로파일이 추가되었다. 새로운 화학종분류 프로파일의 종분류 코드의 수정 전·후의 예는 그림 9와 같고 이때, 변경된 프로파일은 표 12와 같다.

3.2 모델링 결과

국내 자료를 이용한 배출모델의 입력자료 변경에

의한 영향을 분석하기 위해서 수도권 지역에 대해 강수가 없고 NO₂와 PM₁₀의 농도가 평균농도를 나타내는 2003년 10월 5일 12UTC~10월 12일 12UTC를 우리나라의 가을철을 대표하는 사례일로 선정하여 모델링을 수행하였다. 본 연구에서는 Lambert conformal (LC) 격자 투영법을 이용하여 모델영역은 그림 10과 같이 동북아시아를 포함하도록 domain 1을 구성하고 2개의 동지격자를 구성하여 domain 3에 수도권을 포함하도록 하였다. 기상 모델의 입력 자료로는 기상청에서 제공하는 RDAPS (Regional Data Assimilation Prediction System) 자료를 초기 및 경계 기상자료로 사용하였으며, 인벤토리 자료는 동북아시아지역을 포함한 domain 1의 경우 ACE-Asia 연구과제에서 도출된 자료를 사용, domain 2, 3의 경우 CAPSS의 2003년 1 km×1 km 격자별 자료를 LC 좌표계로 변환하여 사용하였다.

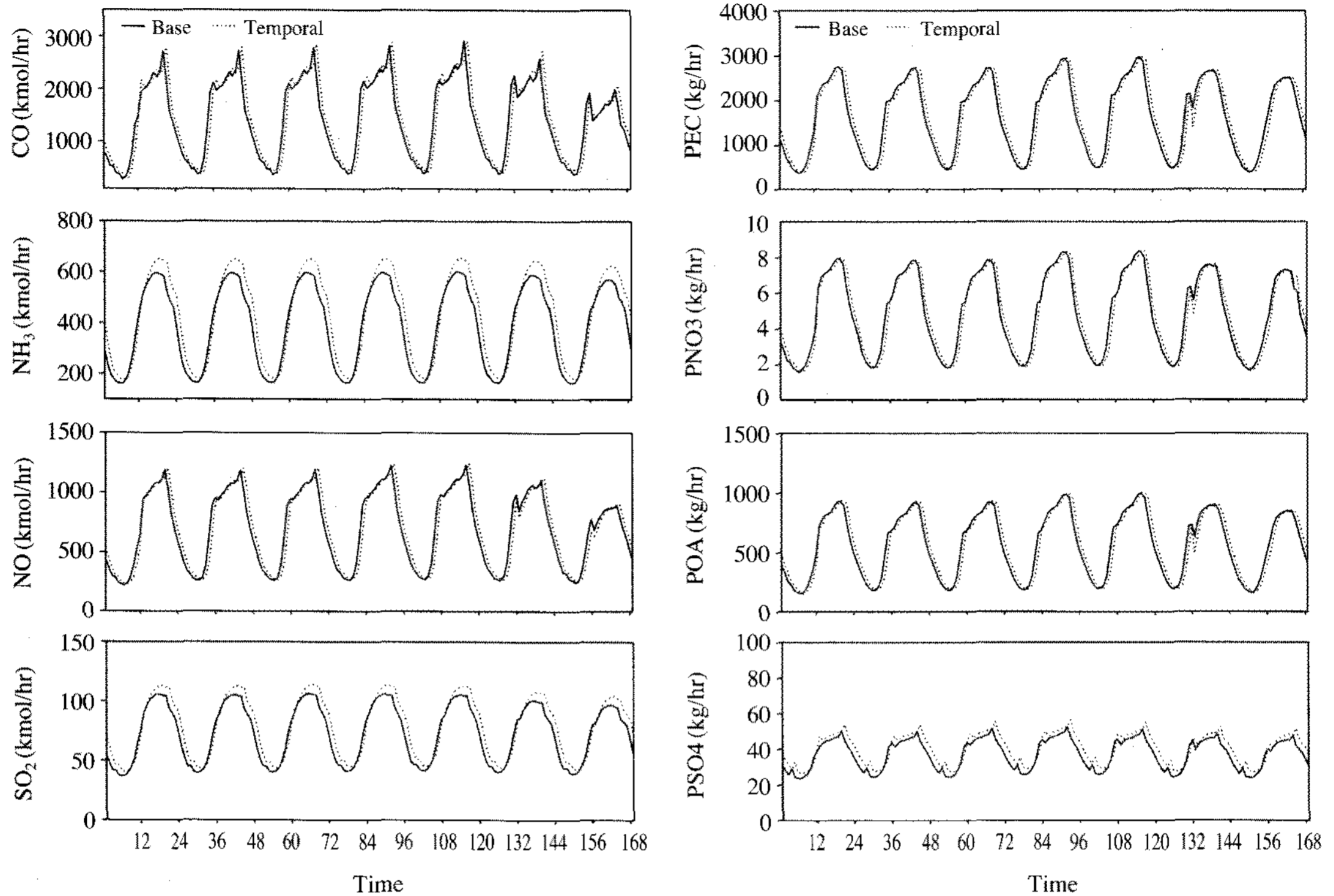


Fig. 11. Emission variation by before and after updated temporal profile.

3.2.1 배출 모델링 결과 분석

배출모델은 기상이나 대기질 모델의 결과 분석처럼 각 지점별, 종별 관측자료와 모델자료 간의 비교를 통한 분석이 불가능함에 따라 시나리오별 배출모델의 결과 분석을 위해 모델의 첫 번째 층에서 모델 전 영역에 대한 종별 배출총량을 분석하였다.

우선, 시간분류 변경에 의한 영향을 분석하기 위해 변경 전후의 결과를 이용하여 국내의 SCC별 월별 시간분류 프로파일을 반영한 결과 : 화학종별 배출량 변화율은 CO는 39.78 kmol/hr로 평균 2.80% 증가하였고, NH₃ (36.52 kmol/hr), NO (10.07 kmol/hr)와 SO₂ (5.77 kmol/hr)는 평균 9.42, 1.46% 및 7.87% 증가하였다. Sulfate는 0.04 kmol/hr로 평균 8.72%, 알데히드는 0.31 kmol/hr로 평균 0.82% 증가하였고 에탄올 (0.29 kmol/hr), 톨루엔 (0.44 kmol/hr) 및 자일렌 (0.71 kmol/hr)은 평균 0.46, 0.67% 및 3.04% 증가하여 시간분류 프로파일 변경을 통해 전반적인 배출량이 증가하는 것으로 분석되었다(그림 11).

다음으로 화학종분류에 따른 변경의 영향을 살펴보면, 우선 VOC 화학종분류를 김신도 등(2005)의 연구결과를 활용하여 수정한 결과 모델링 기간 중 배출량 변화는 알데히드가 10.299 kmol/hr로 평균 27.59% 증가하였고, 에탄올(22.16 kmol/hr)과 포름알데히드(5.57 kmol/hr)는 평균 34.85% 및 39.92% 감소하였으며 올레핀은 4.42 kmol/hr로 평균 9.15%, 파라핀은 120.57 kmol/hr로 평균 10.80% 증가하였다. 또한 톨루엔은 37.40 kmol/hr로 평균 56.82% 감소하였고 자일렌은 9.22 kmol/hr로 평균 39.394% 증가하는 등의 VOC 종분류 변경에 따른 배출량 변화가 나타났다(그림 12).

다음으로 PM 종분류에 의한 변경에 의한 영향을 살펴보면, 강병욱 등(2000) 및 이학성 등(2005)의 연구 및 김신도 등(2005)의 연구 등 국내 연구결과를 반영한 PM 종분류 결과는 그림 13과 같다. 우선, 강병욱 등(2000) 및 이학성 등(2005)의 연구결과에 따른 PM 종분류 변경에 의한 영향을 분석해본 결과,

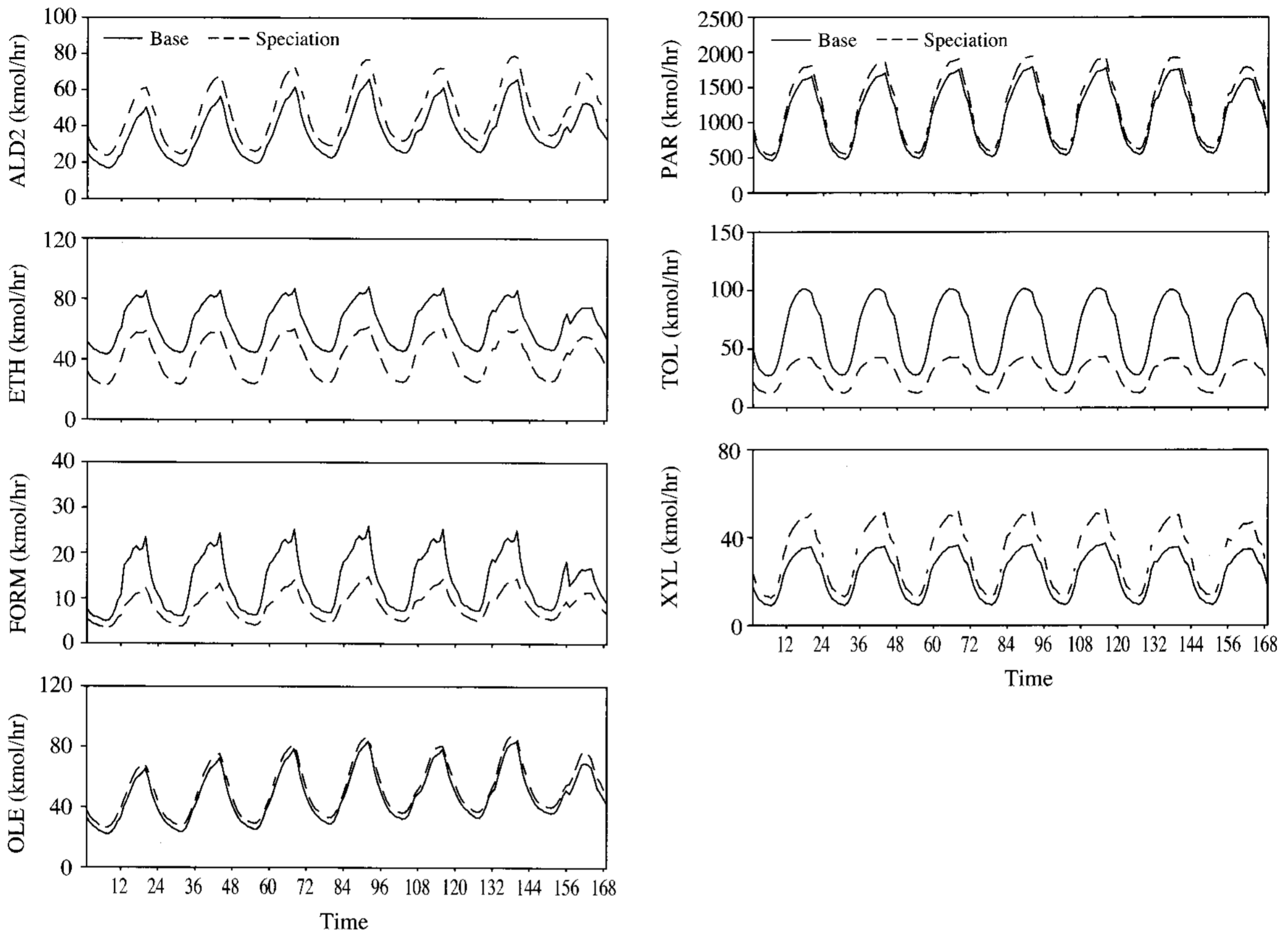


Fig. 12. Emission variation by before and after updated VOC profile.

모델링 기간 중 EC는 781.88 kg/hr로 평균 48.21%, NO₃⁻는 1.204 kg/hr로 평균 24.82% 감소하였고 OA (934.37 kg/hr)와 SO₄²⁻(1062.72 kg/hr)는 평균 166.07, 2000% 이상의 배출량의 증가가 있는 등 배출량 변화가 분석되었다.

또한, 김신도 등(2005)의 연구결과에 따른 PM 중 분류 변경에 의한 영향을 분석해본 결과, 모델링 기간 중 EC (Elemental Carbon)는 887.92 kg/hr로 평균 54.74% 감소하였고 NO₃⁻는 633.09 kg/hr로 평균 만 %가 넘는 배출량 변화가 있었다. 또한 OA (Organic Carbon)는 1685.45 kg/hr로 평균 300% 정도의 배출량이 증가한 반면 SO₄²⁻는 5.99 kg/hr로 평균 16.16%의 배출량 감소가 있는 등 배출량 변화가 크게 나타났다.

3.2.2 대기질 모델링 결과

각 수정 부분에 따른 모델링 적용에 앞서 기존 프

로파일을 이용한 모델링 결과와 관측값 간의 시계열 농도를 비교한 결과, 모델값이 관측값에 비해 절대적인 농도에서는 비교적 과소평가됨을 알 수 있었으나 일변화 경향은 유사하게 예측하고 있는 것으로 나타났다. 분석 기간 동안 NO₂의 평균 예측 농도값은 31.4 ppb이고 관측값은 40.7 ppb로 모델값이 관측값보다 평균 9.3 ppb 낮게 나타났으며 PM₁₀의 경우, 분석 기간 동안 평균 예측 농도값은 43.3 μg/m³이고 관측값은 71.5 μg/m³로 모델값이 관측값보다 낮은 농도값을 보이고 있었다.

다음으로 수정 항목별 모델링 결과 값을 살펴보면, 국내 자료 및 연구결과를 이용하여 VOCs 및 PM 화학종분류별 프로파일을 수정하여 대기질 모델링에 적용한 결과는 표 13~14와 같다. 이 때 PM 중분류에 대해서는 강병욱 등(2000) 및 이학성 등(2005)의 연구결과를 사용하여 모델에 적용하였다.

NO₂에 대한 관측값과 모델값의 통계지수를 분석

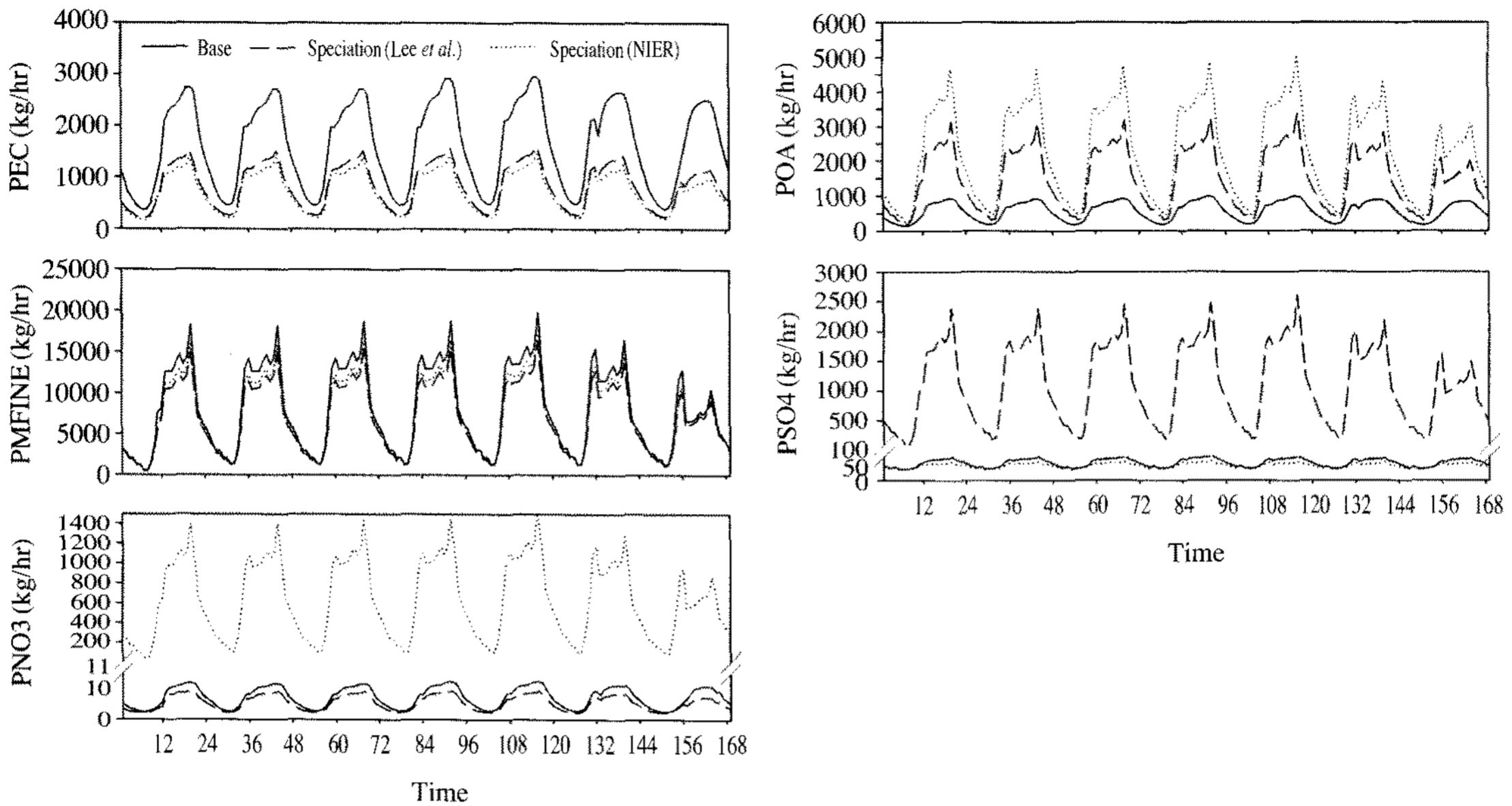


Fig. 13. Emission variation by before and after updated PM profile.

Table 13. Result of statistical analysis for NO₂.

	NO ₂ scenario				
	Default	Lee et al. (2005)	Nier	Temporal	Lee et al. (2005) +temporal
Mp	31.38	31.36	31.36	31.33	31.25
Mo	39.79	39.79	39.79	39.79	39.79
MBIAS	-8.41	-8.43	-8.43	-8.46	-8.54
RMSE	21.47	21.44	21.43	21.43	21.38
R	0.45	0.45	0.45	0.52	0.52
R ²	0.269	0.269	0.269	0.294	0.298
Gross error	17.62	17.61	17.60	17.60	17.55
IOA	0.56	0.56	0.59	0.59	0.59

Table 14. Result of statistical analysis for PM₁₀.

	PM ₁₀ scenario				
	Default	Lee et al. (2005)	Nier	Temporal	Lee et al. (2005) +temporal
Mp	44.21	45.69	46.09	48.17	49.67
Mo	68.82	68.82	68.82	68.82	68.82
MBIAS	-24.61	-23.13	-22.73	-20.65	-19.15
RMSE	47.74	47.61	47.96	51.26	51.64
R	0.12	0.12	0.12	0.20	0.21
R ²	0.070	0.071	0.072	0.098	0.099
Gross error	39.42	39.24	39.57	41.83	41.89
IOA	0.42	0.42	0.42	0.45	0.45

한 결과(표 14), 전반적으로 모델이 농도 값을 과소 평가하고 있는 것으로 나타났다. 이때, 상관성을 알아보기 위한 상관도지수 분석 결과, 수정 전의 경우 0.45로 나타났으며, 시간분류 프로파일을 수정한 경우는 상관도는 0.52로 약간의 상관도지수가 상승한 것으로 나타났다. 관측값과 모델값의 일치도 정도를 나타내는 IOA 지수는 1에 가까울수록 일치도가 높은 것으로 변경 전에는 0.56였으나, 시간분류 프로파일을 수정한 후에는 0.59로 이 지수 역시 약간 상승하는 것으로 분석되었다(표 14).

NO₂와 마찬가지로 PM₁₀에 대한 통계지수를 분석한 결과, 표 14와 같이 NO₂와 마찬가지로 전반적인 모델값이 과소평가되었다. 상관도지수는 시간분류 및 종분류 프로파일을 수정한 경우 0.12에서 0.21로 약간 상승하였으며 모델값과 관측값 차이를 나타내는 bias값 역시 프로파일을 수정한 경우가 수정 전보다 관측값과 모델값의 차이가 더 작은 것으로 나타났다. IOA 지수 역시 프로파일을 수정한 결과 약간 상승하는 것으로 나타났다. 그러나 PM₁₀의 경우, NO₂에 비해 시계열 분석 및 통계지수 분석에서 전반적으로

낮은 예측력을 보이는 것으로 나타났다.

이와 같이 현재 기본값으로 많이 사용되고 있는 외국 자료를 활용한 모델 결과는 국내 자료를 반영하여 모델링에 적용한 결과, 전반적으로 모델의 결과값의 예측력이 소폭 향상된 것으로 나타났다. 그러나 본 연구에서는 현재 수준에서 이용할 수 있는 자료들을 이용하여 시간분류 및 화학종분류를 일부 수정한 것으로 추후에는 보다 많은 자료와 관련 연구를 통해 지속적인 보완을 함으로써 모델의 예측력을 향상시킬 수 있을 것으로 사료된다.

4. 결 론

본 연구는 현재 대기질 개선을 위한 정책수립 및 평가, 환경영향평가 등에서 활발하게 이용되고 있는 대기질 모델링에 필요한 배출 모델 입력 시스템을 구축하고 이와 함께 CAPSS 배출량 자료 및 국내 연구를 통해 배출 모델의 입력 자료를 변경하여 그 영향을 평가하고자 하였다. 지금까지의 본 연구를 통해 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1. 대기질 모델링의 효율적인 활용을 위하여 대기정책지원시스템(CAPSS)의 국가배출량 자료를 이용하여 배출모델에 입력할 수 있는 변환 모듈을 생성하였으며, 배출모델의 시간 및 화학종별 분류 프로파일을 국내 실정에 맞도록 수정하였다. 시간분류 프로파일은 CAPSS의 월별 배출량 자료를 기반으로 한 활동도 자료를 이용하여 수정하였고 VOC 및 PM 화학종분류 프로파일은 국내 연구 자료들을 이용하여 국내 실정을 반영하도록 변경하였다.

2. 국내 연구 자료들을 이용한 입력자료를 배출 모델에 적용한 결과는 다음과 같다. 화학종별 배출량 변화를 통한 VOC 종분류 개선효과를 분석한 결과, 모델링 기간 중 ALD2는 1.76 kmol/hr로 평균 4.78% 감소, FORM는 3.36 kmol/hr로 평균 24.04% 감소, OLE는 4.82 kmol/hr로 평균 9.98% 감소, TOL은 12.22 kmol/hr로 평균 18.56% 감소 등의 VOC 종분류 프로파일 수정에 따른 배출량 변화가 나타났다. 또한 PM의 경우 김신도 등(2005)의 연구결과를 반영한 경우, 모델링 기간 중 PEC는 887.92 kg/hr로 평균 54.74% 감소, PNO₃는 633.09 kg/hr로 평균 만%가 넘는 배출량 변화가 있었으며, POA는 1685.45 kg/hr

로 평균 300% 정도의 배출량 증가, PSO₄는 5.99 kg/hr로 평균 16.16%의 배출량 감소가 있는 등 국내 자료를 반영한 경우 기존의 값과는 다른 배출량 변화가 나타났다. 시간분류 프로파일 수정에 대한 분석 결과 역시 모델링 기간 중 CO는 39.78 kmol/hr로 평균 2.80% 증가, NH₃는 36.52 kmol/hr로 평균 9.42% 증가 등 국내 자료를 반영한 시간분류 프로파일 수정을 통해 전반적인 배출량의 증가가 나타났다.

3. 배출모델의 입력자료 수정을 통해 생성한 배출 입력 자료를 대기질 모델링에 적용시켜 NO₂ 및 PM₁₀ 농도 예측에 적용한 결과, 국내 자료를 반영한 배출 입력 자료를 이용한 경우가 기존의 외국자료를 기본값으로 이용한 경우보다 농도값 예측에 있어 미미하게나마 향상된 결과가 나타나는 것을 알 수 있었다.

4. 본 연구에서는 현재 기본값으로 많이 사용되고 있는 외국 자료들을 국내에서 이용 가능한 자료들을 반영하여 모델링에 적용을 시도한 예로 그 결과가 뚜렷하게 향상된 결과를 가져오지 못하였다. 그러나 본 연구를 토대로 대기질 모델의 국내화를 위한 연구의 필요성을 알림과 동시에 앞으로 입력자료 개선에 필요한 많은 자료를 확보함과 동시에 지속적인 보완작업이 이루어져야 할 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

- 강병욱, 이학성, 김희강(2000) 수용모델을 이용한 청주시 미세먼지(PM_{2.5})의 기여도 추정, 한국대기환경학회지, 16(5), 477-485.
- 김동영, 최상민, 조규탁(2004) 대기질 모델링을 위한 배출모형의 개발, 한국대기환경학회 2004 춘계학술대회 논문집, 74-75.
- 김소영, 한진석, 김희강(2001) 휘발성 유기화학물의 주요배출원의 배출물질 구성비에 관한 연구-오존 생성전구 물질을 중심으로, 한국대기환경학회지, 17(3), 233-240.
- 김신도, 김영준, 조석연, 김종호, 김동술, 조용성(2005) 미세먼지 생성과정 규명과 저감대책 수립, 국립환경과학원, 274-290.
- 김정수(2002) 대기질 예측 모델링을 위한 대기오염물질 배출량의 시간변화 고려 기법, 서울시립대학교.
- 이종범, 김용국, 김태우, 방소영, 정유정(1997) 광화학 확산모델 적용을 위한 수도권지역의 대기오염물질 배출

- 량 산출, 한국대기보전학회지, 13(2), 123-135.
- 이학성, 강충민, 강병욱, 이상권 (2005) 수용모델을 이용한 서울지역 미세먼지($PM_{2.5}$)에 영향을 미치는 배출원 특성에 관한 연구, 한국대기환경학회지, 21(3), 329-341.
- Diaz, L.A., G.D. Reed, and J.S. Fu (2005) Source Apportionment of Diesel Particulate Matter in the Southeastern United States Using Models-3/CMAQ, 14th Annual International Emission inventory Conference.
- Hogrefe, C., P.S. Porter, E. Gego, A. Gilliland, R. Gilliam, J. Swall, J. Irwin, and S.T. Rao (2006) Temporal features in observed and simulated meteorology and air quality over the Eastern United States, Atmospheric Environment, 40(26), 5041-5055.
- Jose, R.S., J.L. Perez, and R.M. Gonzalez (2007) An operational real-time air quality modelling system for industrial plants, Environmental Modelling and Software, 22(3) 297-307.
- Kim, E., T.V. Larson, P.K. Hopke, C. Slaughter, L.E. Shepard, and C. Claiborn (2003) Source identification of $PM_{2.5}$ in an arid Northwest U.S. city by positive matrix factorization, Atmospheric Research, 66, 291-305.