

## CMB 수용모델을 이용한 PM<sub>2.5</sub>의 오염원 기여도 분석

구태완<sup>1\*†</sup> · 홍민선<sup>1</sup> · 문수호<sup>2</sup> · 김호정<sup>2</sup>

<sup>1</sup>아주대학교 환경안전공학과

<sup>2</sup>다산지역발전연구원

(2019년 8월 27일 접수: 2019년 9월 25일 수정: 2019년 9월 25일 채택)

### Pollutant Sources Contribution Analysis of PM<sub>2.5</sub> using The CMB Receptor Model

Tai-Wan Koo<sup>1\*†</sup> · Min-Sun Hong<sup>1</sup> · Su-Ho Moon<sup>2</sup> · Ho-Jung Kim<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Department of Environmental and Safety, Ajou University

<sup>2</sup>DASAN Region Development Institute

(Received August 27, 2019; Revised September 25, 2019; Accepted September 25, 2019)

**요약** : 본 연구에서는 CMB(Chemical Mass Balance) 모델을 이용하여 PM<sub>2.5</sub>에 대한 오염원 확인 및 오염원별 기여도를 분석하였다. A시의 배출원별 기여도 순위는 비산먼지(30.1%) > 생물성 연소(21.9%) > 2차 오염물질(21.1%) > 도로이동오염원(19.3%) > 면오염원(7.6%) 순이고, CMB 모델 기여도와 CAPSS(Clean Air Policy Support System) 배출자료 기여도 비교에서 증가한 배출원은 생물성 연소와 2차 오염물질이고, 감소한 배출원은 도로이동오염원, 비산먼지, 면오염원으로 분석되었다.

*주제어* : PM<sub>2.5</sub>, CMB 모델, 비산먼지, 생물성 연소, 2차 오염물질

**Abstract** : In this study, The Chemical Mass Balance (CMB) model was used to identify pollutant sources and their contributions to PM<sub>2.5</sub>. The contribution rankings by emission source in A city were ash dust (30.1%) > biomass burning (21.9%) > secondary pollutants (21.1%) > mobile source (19.3%) > area sources (7.6%), and The emission sources increased from the contribution of the CMB model and the Clean Air Policy Support System (CAPSS) emissions were biomass burning and secondary pollutants, and The emission sources reduced were mobile source, ash dust, and area sources.

*Keywords* : PM<sub>2.5</sub>, CMB model, Ash dust, Biomass burning, Secondary pollutants

---

<sup>†</sup>Corresponding author  
(E-mail: koo90@ajou.ac.kr)

## 1. 서론

대기 중 미세입자의 농도에 영향을 미치는 각종 발생원을 정성적으로 파악하고, 그 영향을 정량화하는 작업은 미세입자에 관련한 대기질 관리 측면에서 매우 중요하다. 이에 따른 대기오염물질의 오염원 규명 방법은 크게 오염원 중심모델과 착지점 중심모델로 구분되며, 그 중 오염원 중심모델로서 분산모델(Dispersion model)은 대기의 이류, 확산, 배출에 관한 변화의 효과를 모사화한 수학적 표현에 의하여 오염원의 영향을 예측하는데 적용되었다. 다만, 분산모델은 대상지역마다 다변화하는 기상조건 및 복잡한 지형조건을 고려할 수 없을 뿐만 아니라 미세입자로 기인하는 기여도를 포함시키지 않기 때문에 확산모델이 정확하다 하더라도 모델결과에 대한 신뢰도에 문제가 발생할 수 있다. 이러한 분산모델의 한계성 및 결점 때문에 환경기준 목표 달성을 위한 새로운 기술개발 차원에서 착지점 모델인 수용모델(Receptor model)의 도구가 개발되었다[1].

수용모델은 수용체(receptor)에서 오염원에 의하여 파급된 오염물질의 정도를 파악하여 그 영향을 주는 오염원을 정량적으로 파악하는 모델이다. 수용모델은 수십년 동안 전 세계적으로 검증되었고, 폭넓게 사용되고 있으며, PM<sub>10</sub> 및 PM<sub>2.5</sub>를 포함한 오염물질에 대한 저감대책을 수립함에 있어 중요한 역할을 하고 있다[2].

현재 국내에서는 PM<sub>2.5</sub>를 관리하기 위해 여러 정책들을 도입하고 있지만 효율적인 관리를 위해서는 수용모델을 통한 오염원의 규명과 오염원의 정량적인 기여도 평가가 선행될 필요가 있다[3]. 이를 위해 수용체에서 오염물질의 물리·화학적 특성을 분석한 후 오염원의 확인 및 오염원의 정량적 기여도를 평가하는 수용모델을 이용한 연구가 필요하며, 이러한 연구가 늘어나고 있는 추세이다[4].

국내의 CMB 모델을 이용한 선행 연구는 CMB를 이용한 여수산단의 VOC의 기여도 추정 연구[5], 서울시 PM<sub>2.5</sub>의 오염원 기여도 추정 연구[6], 우리나라 주요도시(서울, 태안, 부산, 대구 등)에서의 TSP 오염원 기여도 추정 연구[7], 충주시 초미세먼지(PM<sub>2.5</sub>)의 배출원 기여도 추정에 관한 연구[8]가 진행된 바 있다.

특히, 다수의 수용모델 중 화학적 방법인 Chemical Mass Balance(CMB) 모델은 화학적 조성분석 결과에 대한 합은 각각의 모든 오염원

이 기여한 질량의 합과 같다는 가정에서 최소자승법 등의 방법을 이용하여 각 오염원의 기여도를 산출하는 방법이다[9]. 이러한 CMB 모델은 매우 폭넓은 지역에서 많은 연구자들에 의해 수행되었다[10].

따라서, 본 연구에서는 CMB 수용모델을 이용하여 PM<sub>2.5</sub>에 대한 오염원 확인 및 오염원별 기여도를 평가하고, 지역적 특성에 따른 PM<sub>2.5</sub> 농도 수준 분석을 통하여 효과적인 대응 및 관리 방안을 마련하고자 하였다. 이러한 연구 결과는 향후 국내의 PM<sub>2.5</sub>에 대한 배출원 관리정책을 수립하기 위한 유용한 기초자료로 활용하고자 한다.

## 2. 연구범위 및 분석방법

### 2.1. 대상지역 개요

본 연구에서는 PM<sub>2.5</sub>의 연평균 농도가 상대적으로 높은 A시 지역을 연구대상 지역으로 선정하였다.

대상지역은 전형적인 도농 복합도시로써 도심지역과 외곽지역의 오염물질 배출 특성이 상이하며, 도심지역에는 상업 및 서비스 시설이 밀집하여 오염물질 배출량이 상당히 많을 것으로 예측된다.

또한, 서쪽으로 석탄 화력발전소가 인접해 있어 해당 시설에서 배출되는 PM<sub>2.5</sub>의 외부 유입 영향을 받을 것으로 보인다.

대상지역은 특히, 분지지형 형태로써 외부에서 유입되는 오염물질의 확산이 원활하지 않는 지형적인 특징을 가지고 있다.

### 2.2. CMB 모델의 원리

CMB 모델에서 수용체에서의 총 오염물질은 오염원 구성 성분비와 오염원 기여도 곱의 합으로 표현된다[11].

이 모델의 기본적인 가정은 물질보전(mass conservation)이며, 만일 p개의 오염원이 존재하고, 오염원 배출원 간의 물질의 제거, 축소가 발생하는 상호반응이 없다면 그때 수용체에서 측정된 총 오염물질(M)은 모든 개개의 오염원의 기여도(S<sub>j</sub>)의 합으로써 식(1)과 같이 표현된다[1].

$$M = \sum_{j=1}^p S_j \quad (1)$$

마찬가지로 에어로졸 성분 i(물리화학적 특성)에 대한 농도 C<sub>i</sub>는 식(2)과 같이 표현된다.

$$C_i = \sum_{j=1}^p \alpha_{ij} f_{ij} S_{ij} \quad (2)$$

여기서 f<sub>ij</sub>는 오염원 배출원에서 i 성분을 갖는 j의 오염원 기여도의 질량분율이고, α<sub>ij</sub>는 오염원과 수용체 사이에서 i 성분분율이다.

실제로 같은 형태의 오염원에서 오염물질간의 구분은 불가능하다. 그래서 j는 통상 오염원의 어떤 부류로 본다. 성분분율(α<sub>ij</sub>)은 오염원 형태, 위치, 시간에 따라 다르며, 오염원과 수용체사이 대기 중에서 오염물질 성분의 손실 혹은 축소의 효과를 설명한다.

오염원 할당에서 식(2)를 활용하기 위한 대부분의 시도는 짧은 수송거리 즉, 도시대기 안에서 α<sub>ij</sub> = 1.0 이라고 가정한다. 결과적으로 수용체에서 i성분을 가진 j오염원 기여도의 질량분율을 알면 그때 모델식은 식(3)과 같이 표현된다.

$$C_i = \sum_{j=1}^p \alpha_{ij} S_{ij} \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (3)$$

식(2)와 (3)의 결과는 n에 대한 연립방정식이며, 식(3)에서 α<sub>ij</sub>는 α<sub>ij</sub>f<sub>ij</sub>이다.

만일 n ≥ p 일 때, 즉 미지수가 방정식의 수보다 적거나 같을 때 식(3)은 수용체에서 전체 오염물질에 대한 p 오염원 기여도로 풀 수 있다[12].

### 2.3. CMB 모델의 가정

CMB 모델을 수행하는데 있어서 다음과 같은 몇가지 사항, 즉, ① 기여하는 오염원형태(source types)를 확인, ② 화학종(chemical species) 또는 계산에서 포함된 다른 성분의 선택, ③ 각 오염원 형태에 포함된 화학성분분율의 예측, ④ 배출 오염물질농도와 오염원 구성성분비에서 불확실성의 예측, ⑤ 화학질량수지식의 해석방법 등이 요구된다[13].

이와 같은 단계를 거쳐 CMB 모델이 수행되는

데 다음과 같은 가정 하에 이루어진다. (1) 오염물질 배출기간과 오염물질 시료채취기간에 관계 없이 오염원 배출물질의 구성비는 일정하다. (2) 화학종간에 서로 상호반응은 없다. (3) 수용체에 기여하는 모든 잠재적인 오염원은 확인되고, 배출 물질들은 알려져 있어야 한다. (4) 오염원의 수 혹은 오염원 카테고리에는 화학종의 수보다 작거나 같다. (5) 오염원 프로파일은 서로 선형 독립적이다. (6) 측정치 불확실성은 무작위하고, 서로 상관관계가 없으며, 정규분포를 갖는다.

이러한 가정들을 적용하는데 있어서 오염원과 수용체에서 측정되는 입자상 물질과 가스상 물질에 많이 의존한다. 이 여섯 가지의 가정들은 상당히 제한적이며, 실제 상황에 전체적으로 맞지 않을 수도 있다. 다행히도 CMB 모델은 이들 편차는 오염원 기여도 추정치에 나타난 불확실성을 가중시킴에도 불구하고 이들 가정으로부터 발생 가능한 편차를 포용할 수 있다[14, 15].

### 2.3. 샘플링 및 실험방법

CMB 모델을 통한 오염원 기여도 산출을 위해서 사용된 PM<sub>2.5</sub> 구성성분 데이터 샘플은 A시를 대표할 수 있는 2개 지점에서 측정을 하여 분석된 샘플과 A시 보건환경연구원에서 측정 분석한 샘플을 사용하였다. PM<sub>2.5</sub> 측정분석 시기는 계절적 특성을 고려하여 고농도 미세먼지 발생이 빈번한 가을(11월)~겨울(1월)을 선정하여 실시하였다.

PM<sub>2.5</sub>의 화학적 성분 분석은 Thermal Optical Reflectance(TOR) 방법을 이용하여 유기탄소(OC : Organic Carbon)와 원소탄소(EC : Elemental Carbon)의 탄소성분을 분석하였고, Ion Chromatograph를 이용해서 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, Cl<sup>-</sup>, Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, Ca<sup>2+</sup> 등의 이온성 물질을 분석하였다.

또한, 중금속을 포함하는 미량원소(Mg, Al, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, As, Sr, Mo, Cd, Sn, Ba, Pb, Ca, P, S 등)는 ICP-MS 분석 기기를 통하여 분석하였다.

Table 1. Sampling period in site

Season	Site #1	Site #2
Fall	2016. 10. 31 ~ 2016. 11. 04	2016. 11. 08 ~ 2016. 11. 09
Winter	2017. 01. 17 ~ 2017. 01. 19	2017. 01. 20 ~ 2017. 01. 22

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1. PM<sub>2.5</sub> 중량 농도

Table 2와 Fig. 1은 측정기간 동안 측정지점에 대한 분석항목의 평균(Mean), 최소값(Min), 최대값(Max), 표준편차(SD)을 나타내었다. PM<sub>2.5</sub>의 농도가 가장 높은 날은 겨울철로 134.6  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (YW-2)로 나타났고, PM<sub>2.5</sub> 농도가 가장 낮은 날은 가을철로 42.6  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (YF-2)로 분석되었다. 기존 도시대기 측정값과 비교해 보면 상대적으로 측정기간 동안 측정된 값이 다소 높은 수준인 것으로 나타났다. 겨울철의 경우에는 대기환경 기준을 상회하는 높은 농도 특성을 보이고 있다.

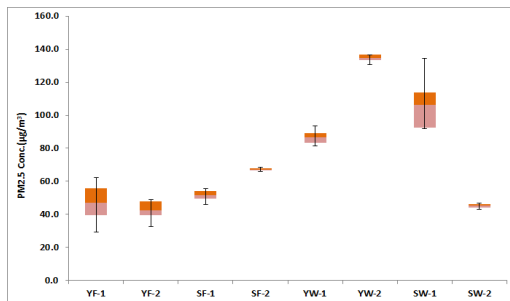


Fig. 1. PM<sub>2.5</sub> weight concentration variation in sample site.

#### 3.2. PM<sub>2.5</sub> 화학조성 특성

PM<sub>2.5</sub>의 상세한 화학조성 분석은 PM<sub>2.5</sub>의 구성

성분을 파악하여 오염물질의 종류와 배출원을 해석하는데 매우 유용한 자료이며, 상세한 화학분석 연구는 시료채취 장비를 갖추고, 측정 능력이 겸비된 시스템만이 수행할 수 있기에 매우 많은 비용과 시간이 요구되는 작업이다. 가을과 겨울 2차례에 걸쳐 총 8일간 진행된 측정기간 동안 PM<sub>2.5</sub> 평균 농도는 가을의 경우 52.1  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 나타났으며, 겨울의 경우 93.2  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 나타났다. 측정기간 동안 PM<sub>2.5</sub>의 일별 농도 변화는 계절 및 측정지점별 특성보다는 연무나 박무에 의해 고농도가 발생한 날이 PM<sub>2.5</sub> 농도 변화에 크게 영향을 미치는 것으로 분석되었다.

Table 3은 PM<sub>2.5</sub> 샘플별 주요 화학조성 농도를 나타낸다. 황산이온의 경우 다양한 황산염, 특히 황산암모늄(Ammonium Sulfate)과 같은 황산염 입자로 존재하며, 측정 시 황산 음이온으로 측정하여 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>로 환산한 값이며, 석유계열의 연료와 석탄연소에서 발생하는 SO<sub>2</sub>와 황산을 사용하는 산업공정 및 해양에서 황화물이 산화되어 존재하는 것으로 나타났다. 또한, 질산이온은 자동차 운행을 비롯한 고온연소가 진행되는 배출원에서 발생한 질소산화물로부터 생성되며, 황산이온 보다 다소 높은 농도로 분석되었다. 암모늄은 황산염이나 질산염을 이루는 양이온 물질로서 생물성 연소 시 발생되거나 질소 원자를 함유한 물질들의 순환과 관련이 깊으나 대기에서의 반응성, 역할 등에 관련한 자료가 많지 않다. 그러나 암모늄 성분은 황산이온, 질산이온과 1차적으로 결합하는 성분으로 이들의 당량비를 이용하여 입자의

Table 2. PM<sub>2.5</sub> concentration of sample site

Site	PM <sub>2.5</sub> concentration in this study				Reference data
	Mean	Min	Max	SD	
YF-1	47.1	29.4	62.4	16.6	11.5
YF-2	42.6	32.5	49.0	8.9	22.0
SF-1	51.4	46.1	55.5	4.8	40.0
SF-2	67.1	65.8	68.4	1.8	41.3
YW-1	86.6	81.6	93.3	6.1	44.8
YW-2	134.6	130.6	136.6	3.4	72.3
SW-1	106.4	91.9	134.4	24.3	113.9
SW-2	45.2	43.1	46.8	1.9	51.9

(Note)

○YF : site #1 Fall, YW : site #1 Winter, SF : site #2 Fall, SW : site #2 Winter

○Reference data : Urban air quality measurement site

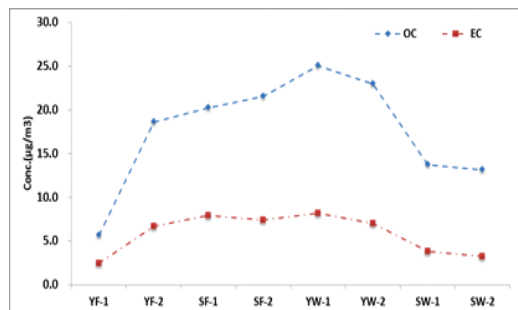
Table 3. The concentration of chemical composition in PM<sub>2.5</sub>

Compositi on	Site							
	YF-1	YF-2	SF-1	SF-2	YW-1	YW-2	SW-1	SW-2
PM <sub>2.5</sub>	47.1	42.6	51.4	67.1	86.6	134.6	106.4	45.2
OC	5.6	18.6	20.2	21.6	25.0	23.0	13.7	13.1
EC	2.4	6.7	7.9	7.4	8.2	7.0	3.8	3.2
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	3.6	4.3	5.6	6.6	8.3	8.5	3.0	2.6
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	7.5	8.8	9.9	10.7	8.3	7.9	4.3	4.6
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	5.6	6.8	8.4	10.0	8.3	8.3	3.4	3.6
Cl <sup>-</sup>	5.9	7.5	9.9	11.7	9.6	8.1	4.2	3.7
OC/EC	2.3	2.8	2.6	2.9	3.1	3.3	3.6	4.1

(unit :  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )

생성, 배출원을 추적하기도 한다[16].

유기탄소(OC)의 경우 다양한 분자의 형태를 갖고 있으며, 그 물리적 특성들이 서로 달라 일괄적인 특성을 기대하기가 어려워 종합적으로 OC로 나타내는 화학물질이다. 측정기간 중 OC 농도는 가장 낮은 농도인  $5.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$  부터 최고 높은 농도인  $25.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$  에 달하였으며, 전체 평균  $17.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$  으로 나타났다.

Fig. 2. OC and EC concentration in PM<sub>2.5</sub>.

원소탄소(EC)는 자동차 연소 과정을 비롯한 모든 연료의 불완전 연소에 의하여 생성되기 때문에 도심지역에서는 특히 자동차에 의한 배출원의 지표물질로 간주된다. 측정기간 중 EC의 최고 농도는 YW-1 측정 일에 박무에 의한 고농도가 발생한 날  $8.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$  로 관측되었으며, 측정기간 중 EC 평균농도는  $5.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$  로 분석되었다.

OC/EC의 질량 비율은 SW-2에서 4.1%로 가장 높게 나타났으며, SW-1(3.6%) > YW-2(3.3%) > YW-1(3.1%) > SF-2(2.9%) >

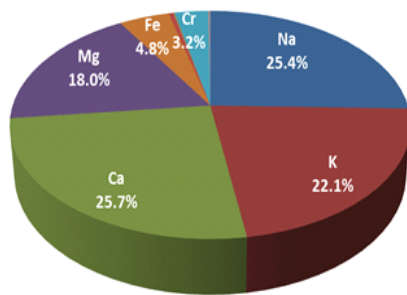
YF-2(2.8%) > SF-1(2.6%) > YF-1(2.3%) 순으로 나타났다. OC/EC 비율이 2를 초과할 경우 대기 중의 광화학반응에 의해 생성되는 2차 미세먼지 생성 확률이 높다는 것을 나타낸다(Fig. 2).

중금속 농도분포는 측정 지점별, 날짜별, 고농도 발생유무에 따라 조금씩 차이가 있으나 측정 지점별 평균 농도로 환산해 보면 PM<sub>2.5</sub>에서는 Na > Ca > K > Mg > Fe > Cr > Cu > Pb > Ni > Al > Zn > Cd > As > Hg 순으로 분석되었다(Fig. 3, Table 4).

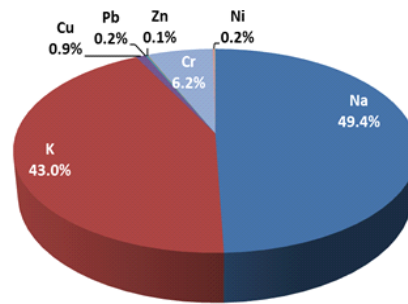
Ca, Al, Fe, K, Na, Mg, Zn, Ti는 주로 토양에서 기인하며, 겨울철 눈으로 인한 제설제 염화칼슘과 소금의 사용여부 및 정도에 따라 농도 변화가 다르게 나타났다. 측정기간 중 Ca와 Na 원소의 평균 농도는 각각  $1,651.0 \text{ ng}/\text{m}^3$ ,  $1,633.7 \text{ ng}/\text{m}^3$ 으로 분석되었고, 토양 기원 원소는 측정기간 중 평균농도로 비교하였을 때 Ca( $1,651.0 \text{ ng}/\text{m}^3$ ) > Na( $1,633.7 \text{ ng}/\text{m}^3$ ) > K( $1,421.0 \text{ ng}/\text{m}^3$ ) > Mg( $1,160.2 \text{ ng}/\text{m}^3$ ) > Fe( $307.7 \text{ ng}/\text{m}^3$ ) > Al( $3.4 \text{ ng}/\text{m}^3$ ) > Zn( $2.0 \text{ ng}/\text{m}^3$ ) 순으로 나타났다(Fig. 3).

### 3.3. CMB 모델에 의한 기여도 산출

CMB 모델을 사용하여 각 지점별 일별 배출원 기여도를 산출하였으며, CMB 모델에 의한 배출원 기여도 산출 방법은 CMB Model 8.2 User guidebook을 참조하였다. 측정 결과에서 절대농도로 측정된 성분 중 탄소성물질(OC, EC), 황산이온, 질산이온, 암모늄이온, 염소이온과 중금속(Na, Ca, K, Mg, Fe, Cr, Cu, Pb, Ni, Al, Zn, Cd, As, Hg 등) 21개 항목을 주 fitting 원소로



(a) Total heavy metals mean concentration



(b) Heavy metals mean concentration without soil origin

Fig. 3. The heavy metals concentration in PM<sub>2.5</sub>.

Table 4. The concentration of heavy metals in PM<sub>2.5</sub>

Metal	(unit : ng/m <sup>3</sup> )							
	YF-1	YF-2	SF-1	SF-2	YW-1	YW-2	SW-1	SW-2
Na	1,555.6	1,593.8	1,402.8	2,156.3	2,274.3	2,090.3	1,086.8	909.7
K	1,218.8	1,361.1	1,270.8	1,822.9	2,152.8	1,861.1	888.9	791.7
Ca	1,170.1	1,604.2	1,378.5	2,159.7	2,520.8	2,225.7	1,260.4	888.9
Mg	1,118.1	1,204.9	1,170.1	1,555.6	1,510.4	1,347.2	722.2	652.8
Sr	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D
Fe	309.0	270.8	284.7	402.8	437.5	395.8	180.6	180.6
Mn	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Cu	31.3	20.8	31.3	41.7	41.7	38.2	17.4	17.4
Pb	6.3	5.3	7.7	8.2	6.7	6.5	4.2	3.8
Zn	1.8	1.9	2.8	2.5	2.9	2.4	0.8	0.8
Cr	236.1	177.1	170.1	298.6	270.8	253.5	118.1	114.6
Al	3.1	3.6	3.1	5.3	4.3	4.0	2.1	1.7
Li	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D
Sb	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D
Ti	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D
Ni	5.4	6.3	6.1	7.7	6.8	6.5	3.7	3.2
Cd	1.5	1.3	1.8	1.9	2.2	1.8	0.7	0.8
As	0.6	0.8	0.6	1.1	0.0	0.0	0.0	0.0
V	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D
Ba	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D
Hg	0.2	0.2	0.3	0.4	0.3	0.2	0.1	0.1
Sum	5,657.7	6,252.0	5,730.8	8,464.6	9,231.5	8,233.3	4,286.0	3,565.9

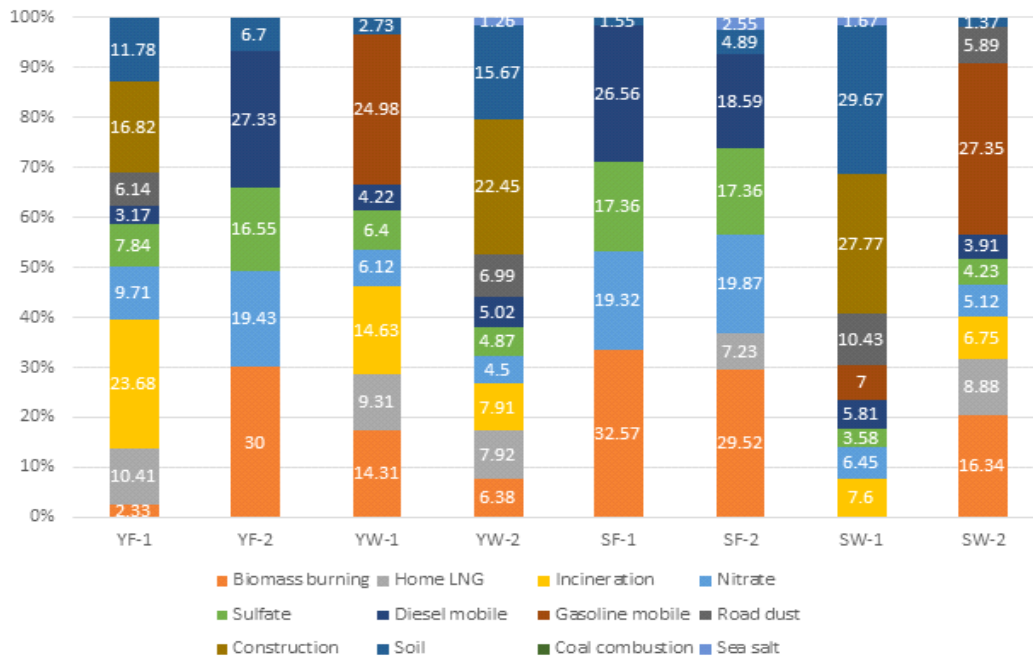


Fig. 4. Source contribution in PM<sub>2.5</sub> by CMB model.

입력하여 Source Profile 사이에서 Collinearity(유사성)가 일어나지 않는 4~8개의 배출원 조합으로 수개에서 수십여 개의 서로 다른 CMB 기여도 결과를 산출한 후, 각 배출원의 평균값을 산정하고, 모든 배출원의 합을 100%로 재환산(Normalization)하여 일별, 지점별 결과로 결정하였다.

측정기간별 PM<sub>2.5</sub> 배출원 기여율은 PM<sub>2.5</sub>를 구성하고 있는 각 물질의 분율을 CMB 모델에 입력하여 오염 배출원의 기여도를 산출하기 때문에 각 물질의 분율과 매우 상관관계가 높은 것으로 나타났다. Fig. 4는 CMB 모델에 대한 기여도 결과를 나타낸다.

가을의 경우 화석연료 연소에 대한 기여도를 살펴보면 석탄연소의 기여도는 산출되지 않았고, 생물성 연소에 의한 배출 기여도는 YF-1 지점에서 최소 2.3%를 제외하면, 나머지 시료에서 분석된 결과는 29.5~32.6%로 나타났으며, 뚜렷하게 생물성 연소에 의한 PM<sub>2.5</sub> 배출 기여율이 높은 것으로 분석되었다. 이러한 현상은 우리나라의 전형적인 농촌에서 가을 추수가 끝난 후 농업 잔재물을 소각하는 행태가 빈번히 발생하며, 그 외 목재난로나 아궁이 사용이 시작되는 시점이기 때

문으로 판단된다. 또한, 자동차 운행에 의한 기여도는 경유 차량의 배출 기여도가 높은 것으로 분석되었고, 비산먼지에 의한 배출 기여도는 나대지를 제외하고는 YF-1 지점에서 비산먼지의 배출 기여도가 나타났다.

겨울철의 경우도 화석연료 연소의 기여도는 가을과 마찬가지로 석탄연소에 대한 기여도는 산출되지 않았다. 생물성 연소에 의한 배출 기여도는 가을과 다르게 다소 낮은 비율로 나타났고, 토양에 의한 배출 기여도는 SW-2 지점에서 최소 1.4%로 나타났다.

또한, 자동차 운행에 의한 기여도는 휘발유 차량의 배출 기여도가 높은 것으로 분석되었고, 비산먼지에 의한 배출 기여도는 나대지, 도로재비산먼지, 건설현장 모두 배출 기여도가 골고루 나타났다. 해염에 의한 배출 기여도가 YW-2와 SW-1 지점에서 배출 기여도가 나타났는데 이는, 서해로부터 약 60km 떨어져 있어, 서해상에서 유입되는 미세먼지의 영향인 것으로 판단된다.

### 3.4. 배출원별 배출 기여도 비교

Table 5는 2013년 CAPSS(Clean Air Policy Support System) 배출량과 CMB 모델에 따른 기

여도를 비교 분석한 것이다. CMB 모델에 따른 기여도는 비산먼지(30.1%) > 생물성 연소(21.9%) > 2차 오염물질(21.1%) > 도로이동오염원(19.3%) > 면오염원(7.6%) 순으로, CMB 모델 기여도와 CAPSS 배출자료 기여도 비교에서 증가한 배출원은 생물성 연소와 2차 오염물질이고, 감소한 배출원은 도로이동오염원, 비산먼지, 면오염원이다. 생물성 연소의 경우, CMB 모델 기여도는 21.9%로 나타난 반면 CAPSS 배출자료 기여도는 17.2%로 CMB 모델 기여도가 4.7% 높은 것으로 나타났다. 2차 오염물질의 경우, CMB 모델 기여도는 21.1%로 나타난 반면 CAPSS 배출자료 기여도는 2차 오염물질이 고려되지 않았다.

도로이동오염원의 경우, CMB 모델 기여도는 19.3%로 나타난 반면 CAPSS 배출자료 기여도는 26.8%로 CMB 모델 기여도가 각각 7.5% 낮게 나타났고, 비산먼지의 경우, CMB 모델 기여도는 30.1%로 나타난 반면 CAPSS 배출자료 기여도는 43.5%로 CMB 모델 기여도가 13.4% 낮은 것으로 나타났다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 CMB 모델을 이용하여 PM<sub>2.5</sub>에

대한 오염원 확인 및 오염원별 기여도를 분석하였으며, 그 결과는 다음과 같이 요약할 수 있다.

A시의 배출원별 기여도 순위는 가을의 경우 화석연료 연소에 대한 기여도는 산출되지 않았고, 생물성 연소에 의한 배출 기여도는 YF-1 지점에서 최소 2.3%를 제외하면, 나머지 시료에서 분석된 결과는 29.5~32.6%로 나타났으며, 뚜렷하게 생물성 연소에 의한 PM<sub>2.5</sub> 배출 기여율이 높은 것으로 분석되었다. 또한, 자동차 운행에 의한 기여도는 경유 차량의 배출 기여도가 높은 것으로 분석되었고, 비산먼지에 의한 배출 기여도는 나대지를 제외하고는 YF-1 지점에서 비산먼지의 배출 기여도가 나타났다. 겨울철의 경우도 화석연료 연소에 대한 기여도는 가을과 마찬가지로 산출되지 않았다. 다만, 생물성 연소에 의한 배출 기여도는 가을과 다르게 다소 낮은 비율로 나타났고, 토양에 의한 배출 기여도는 SW-2 지점에서 최소 1.4%로 나타났다. 자동차 운행에 의한 기여도는 휘발유 차량의 배출 기여도가 높은 것으로 분석되었고, 비산먼지에 의한 배출 기여도는 나대지, 도로재비산 먼지, 건설현장 모두 배출 기여도가 골고루 나타났다. 해염에 의한 배출 기여도가 YW-2와 SW-1 지점에서 나타났는데 이는, 서해로부터 약 60km 떨어져 있어, 서해상에서 유입되는 미세먼지의 영향인 것으로 판단된다.

Table 5. The comparison of source contribution in PM<sub>2.5</sub>

(unit : %)

CMB Source	Source contribution(%)		Source	Source contribution	
	site #1	site #2		CMB	CAPSS
Biomass burning	13.28	19.61	Biomass burning	21.9	17.2
Home LNG	6.91	4.03			
Nitrate	9.93	12.69	Secondary pollutant	21.1	-
Sulfate	8.89	10.63			
Diesel mobile	10.10	13.72	Mobile source	19.3	26.8
Gasoline mobile	6.25	8.59			
Road dust	3.28	4.08	Ash dust	30.1	43.5
Construction	9.67	6.94			
Soil	9.22	9.37			
Sea salt	0.32	1.05			
Bare earth	10.61	5.70	Point source	7.6	12.5
Incineration	11.55	3.59			
Total	100.0	100.0	Total	100.0	100.0



2013년 CAPSS 배출량과 CMB 모델에 따른 기여도를 비교 분석결과, CMB 모델에 따른 기여도는 비산먼지(30.1%) > 생물성 연소(21.9%) > 2차 오염물질(21.1%) > 도로이동오염원(19.3%) > 면오염원(7.6%) 순으로, CMB 모델 기여도와 CAPSS 배출자료 기여도 비교에서 증가한 배출원은 생물성연소와 2차 오염물질이고, 감소한 배출원은 도로이동오염원, 비산먼지, 면오염원이다.

본 연구 결과는 향후 국내의 PM<sub>2.5</sub>에 대한 효과적인 대응 및 관리 방안 마련과 배출원 관리정책을 수립하기 위한 유용한 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

### References

1. G. D. Thurston, P. J. Lioy, "Receptor modeling and aerosol transport", *Atmospheric Environment*, Vol.21, pp. 687-698, (1987).
2. GIHE, "Annual Report of Air Quality in Gyeonggi-do 2016", *Gyeonggi-do Institute of Health & Environment*, (2017).
3. G. H. Park, W. G. Do, E. C. Yoo, "Reduction of air pollutants through facility improvement of bus platform and risk assessment", *The annual report of Busan metropolitan city institute of health & environment*, Vol.20, No.1 pp. 163-175, (2011).
4. S. H. Lee, K. S. Lee, S. H. Yoon, et al., "Characteristics of PM<sub>2.5</sub> in Gwangju Evaluated by Factor Analysis", *Journal of Environmental Science International*, Vol.28, No.4 pp. 413-422, (2019).
5. J. M. Jeon, D. Hur, D. S. Kim, "Development of source profiles and estimation of source contribution for VOCs by the chemical mass balance model in the Yeosu Petrochemical Industrial Complex", *J. Korea Soc. Atmos. Environ.*, Vol.21, No.1 pp. 83-96, (2005).
6. H. S. Lee, C. M. Kang, B. W. Kang, S. K. Lee, "A study on the PM<sub>2.5</sub> source characteristics affecting the Seoul area using a chemical mass balance receptor model", *J. Korea Soc. Atmos. Environ.*, Vol.21, No.3 pp. 329-341, (2005).
7. S. A. Shin, J. S. Han, S. D. Kim, "Source apportionment and the origin of Asian dust observed in Korea by receptor modeling(CMB)", *J. Korea Soc. Atmos. Environ.*, Vol.22, No.2 pp. 157-166, (2006).
8. B. W. Kang, H. S. Lee, "Source Apportionment of Fine Particulate Matter(PM<sub>2.5</sub>) in the Chungju City", *J. Korea Soc. Atmos. Environ.*, Vol.31, No.5 pp. 437-448, (2015).
9. J. G. Watson, N. F. Robinson, J. C. Chow, "Receptor model technical series, VolIII CMB7 User manual", *U.S. Environmental Protection Agency(EPA-450/4-90-004)*, (1984).
10. M. D. Cheng, P. K. Hopke, "Identification of markets for chemical mass balance receptor model", *Atmospheric Environment*, Vol.23, pp. 1373-1384, (1989).
11. S. K. Friedlander, "Chemical element balances and identification of air pollution sources", *Environ. Sci. Technol.*, Vol.7, pp. 234-240, (1973).
12. R. C. Henry, C. W. Lewis, P. K. Hopke, H. J. Williamson, "Review of receptor model fundamentals", *Atmospheric Environment*, Vol.18, pp. 1507-1515, (1984).
13. E. M. Fujita, J. G. Watson, J. C. Chow, N. F. Robinson, L. W. Richards, N. Kummar, "Northern front range air quality study", Vol.C, Final Report, (1998).
14. G. E. Gordon, "Critical review-receptor models", *Environ. Sci. Technol.*, Vol.22, pp. 1132-1142, (1988).
15. D. H. Lowenthal, J. C. Chow, G. R. Neuroth, et al., "The effects of collinearity on the ability to determine aerosol contributions from diesel and gasoline-powered vehicles using the chemical mass balance model", *Atmospheric Environment*, Vol.26A, No.13 pp. 2341-2351, (1992).

16. X. H. Song, N. M. Faber, P. K. Hopke, et al., "Source apportionment of gasoline and diesel by multivariate calibration based on single particle mass spectral data", *Analytica Chimica Acta*, Vol.446, pp. 327-341, (2001).