

## 미세먼지(PM2.5) 성분 조사

- 환경에의 영향 및 인체 위해성이 상대적으로 큰 미세먼지의 구성성분 조사 필요
- 미세먼지 저감대책 마련을 위해 발생원 추적 및 위해도 평가 위해 기초조사 필요

### 1. 조사개요

- 조사기간 : 2016. 1. ~ 2016. 12. (3일간격 1회(24시간 시료채취))
- 조사항목
  - 중량농도
  - 이온성분 :  $Cl^-$ ,  $NO_3^-$ ,  $SO_4^{2-}$ ,  $Na^+$ ,  $NH_4^+$ ,  $K^+$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $Ca^{2+}$
  - 탄소성분 : OC, EC
  - 금속성분 : Al, As, Be, Ca, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Li, Mg, Mn, Mo, Ni, Pb, Sb, Se, Si, Sr, Ti, Tl, V, Zn

#### ○ 조사지점

지점	측정소	용도지역	구, 군	위 치
S1	광복동	상 업	중구	광복동 주민자치센터
S2	기장읍	주 거	기장군	기장초등학교
S3	연산동	주 거	연제구	연제초등학교
S4	학장동	공 업	사상구	학장초등학교

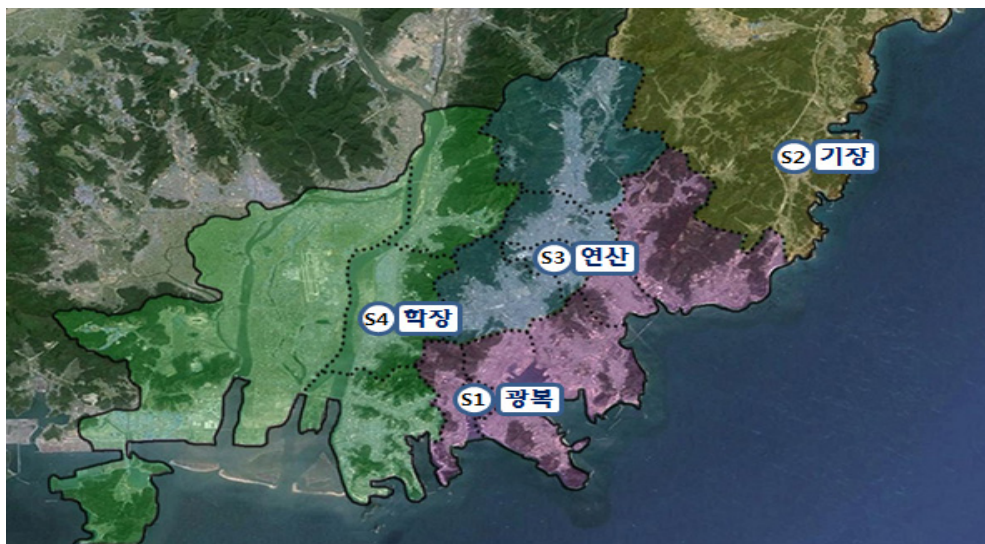


그림 1. 시료채취지점

## 2. 조사방법

- 시료채취 : 로우볼륨 에어샘플러법 (Low volume air sampler)
- 중량농도 : 중량농도법 (정밀저울)
- 이온성분 : 이온크로마토그래피법 (IC)
- 탄소성분 : 불꽃이온화검출법 (탄소분석기)
- 금속성분 : 유도결합플라즈마 원자발광분광법 (ICP-OES)

## 3. 조사결과

- 연평균 조사결과
  - '16년 4개 지점의 PM2.5 중량농도는 평균 21.9  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 학장지점에서 25.1  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 최대, 기장지점에서 18.8  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 최소로 나타났음.
  - PM2.5 구성성분별 평균농도(구성비)는 이온성분 11.95  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (53.1%), 탄소성분 4.81  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (23.2%), 금속성분 0.98  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (4.9%), 기타 4.22  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (19.4%)을 차지하였음. 구성성분별 농도는 이온성분, 탄소성분, 금속성분 모두 학장지점에서 최대, 기장지점에서 최소로 나타났음.
  - 이온성분 평균농도( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )는  $\text{SO}_4^{2-}$ (5.57) >  $\text{NO}_3^-$ (2.93) >  $\text{NH}_4^+$ (2.28) >  $\text{Na}^+$ (0.59) >  $\text{K}^+$ (0.23) >  $\text{Cl}^-$ (0.21) >  $\text{Ca}^{2+}$ (0.15) >  $\text{Mg}^{2+}$ (0.05)로 나타났으며,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_x$ ,  $\text{NH}_3$  등 가스상물질이 대기 중 화학반응에 의해 입자로 전환된  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{NO}_3^-$  가 초미세먼지를 구성.
  - 탄소성분 평균농도( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )는 OC(3.64) > EC(1.15)로 유기탄소(OC)가 원소탄소(EC) 대비 3배정도 높게 나타났음.
  - 금속성분 평균농도( $\text{ng}/\text{m}^3$ )는 Fe(289.8) > Si(191.5) > Ca(162.5) > Zn(92.9) > Al(69.9) > Mg(60.7) > Mn(28.4) > Cu(22.9) > Pb(17.2) 순이었으며, 토양기원의 Fe, Si이 상대적으로 높은 값을 나타내었고, Pb은 대기환경기준(500  $\text{ng}/\text{m}^3$ )의 3.4%수준이었음. PM2.5 중 미량 금속성분의 함유 비율(%)은 PM10 중 미량금속('16년 대기 중금속측정망 자료) 함유 비율(%) 보다 높게 나타나 PM2.5의 중금속 유해성이 더 높음을 알 수 있음. (표2)

표 1. '16년 PM2.5 성분조사 결과

[단위 : 중량, 이온, 탄소( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )]

지점	중량 PM2.5	이온성분									탄소성분		
		$\text{Cl}^-$	$\text{NO}_3^-$	$\text{SO}_4^{2-}$	$\text{NH}_4^+$	$\text{Na}^+$	$\text{K}^+$	$\text{Ca}^{2+}$	$\text{Mg}^{2+}$	계	OC	EC	계
평균	21.9	0.21	2.93	5.57	2.28	0.59	0.23	0.15	0.05	11.95	3.64	1.15	4.79
광복	23.0	0.15	3.31	5.73	2.48	0.49	0.22	0.14	0.05	12.56	3.90	1.28	5.18
기장	18.8	0.11	2.15	5.32	2.09	0.67	0.25	0.14	0.04	10.56	3.11	0.89	4.00
연산	20.6	0.13	2.92	5.38	2.21	0.62	0.22	0.13	0.05	11.65	3.26	1.12	4.38
학장	25.1	0.43	3.32	5.85	2.35	0.59	0.24	0.17	0.08	13.03	4.31	1.30	4.61

[단위 : 금속(ng/m<sup>3</sup>, 기타(μg/m<sup>3</sup>)]

지점	금속성분																					기타 성분		
	Al	As	Be	Ca	Cd	Co	Cr	Cu	Fe	Li	Mg	Mn	Mo	Ni	Pb	Sb	Se	Si	Sr	Ti	V		Zn	계
평균	69.9	5.0	0.0	162.5	0.8	0.2	9.9	22.9	288.8	0.3	60.7	28.4	0.8	8.3	17.1	5.3	4.9	191.5	1.0	9.8	1.7	6.0	92.9	422
광복	69.8	5.0	0.0	209.6	0.6	0.2	4.1	7.4	176.9	0.4	58.0	17.7	0.4	10.2	14.1	3.4	7.3	210.7	0.9	15.8	1.7	9.3	68.1	891.4
기장	55.1	5.9	0.0	164.4	1.0	0.1	5.7	10.7	126.7	0.1	60.3	11.3	0.3	3.4	16.7	5.4	5.2	154.2	1.0	7.9	1.5	4.5	41.8	670.3
연산	63.9	4.2	0.0	137.5	0.6	0.2	4.9	9.1	166.8	0.3	50.0	15.0	0.4	5.0	13.7	8.1	4.8	141.4	1.3	6.9	2.1	4.8	56.5	697.4
학장	90.1	4.9	0.0	141.9	0.8	0.5	24.4	63.3	675.5	0.4	74.7	68.2	1.9	14.7	24.3	4.1	2.5	259.6	0.8	8.8	1.5	5.3	201.6	1670.0

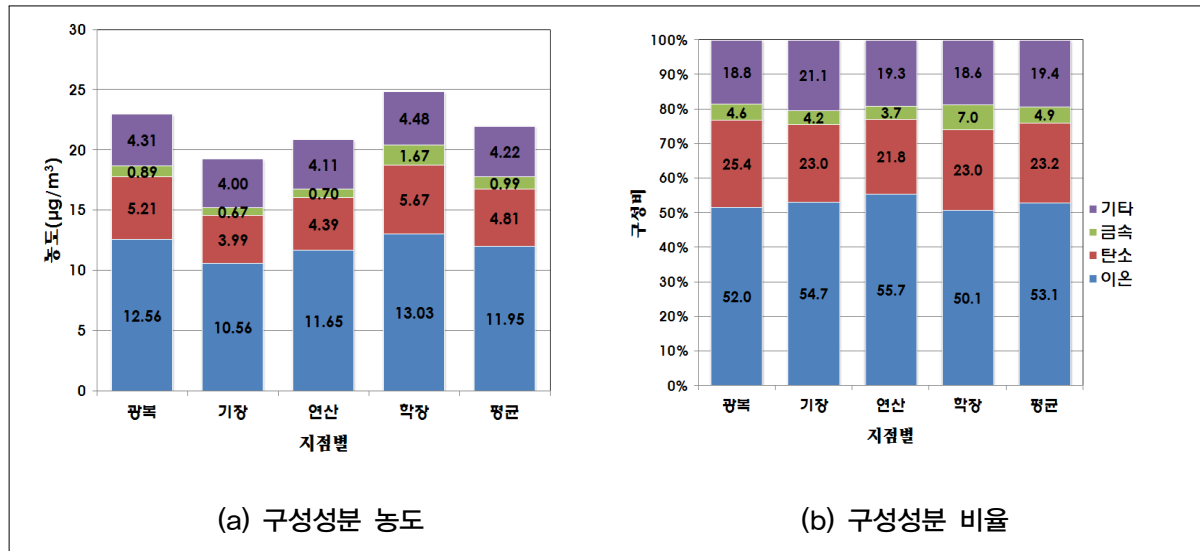


그림 2. 2016년도 미세먼지(PM2.5) 구성성분 농도(a) 및 비율(b)

표 2. PM2.5와 PM10 중 미량금속 함유비율

(단위 : %)

	Pb	Cr	Cu	Mn	Ni	As
PM2.5	0.08	0.05	0.10	0.13	0.04	0.02
PM10	0.04	0.01	0.04	0.08	0.01	0.01

○ 월별 PM2.5 구성성분 농도 추이

- PM2.5 중량농도(25 μg/m<sup>3</sup>초과)는 광복지점 3월(28.6) > 12월(27.2) > 1월(26.0) > 11월(25.9), 기장지점 1월(25.0), 연산지점 3월(27.1) > 11월(25.3), 학장지점 1월(33.1) > 11월(31.6) > 3월(31.2) > 2월(29.1) > 12월(28.6) > 5월(26.7)으로 1월과 3월중 높은 농도로 나타났으며, 겨울과 봄철 발생하는 고농도 미세먼지 영향 때문으로 추정됨.
- 이온성분 또한 PM2.5 중량농도와 유사하게 4개 지점 모두 1월과 3월에 더 높은 농도로 나타나 이온성분은 PM2.5 농도와 밀접한 관계임을 알 수 있음.
- 탄소성분은 지점에 따른 월별 최고 농도의 차이가 있었으며, 각 지점별 높은 농도를 나

타내는 달은 광복 및 연산지점 11월 12월, 기장지점 4월, 7월, 학장지점 1월, 11월, 12월로 기장지점을 제외하면 겨울철 높은 농도로 나타났음.

- 금속성분 또한 지점에 따라 월별 최고 농도의 차이가 났으며, 각 지점별 최고 농도는 광복 7월, 기장 4월, 연산 2월, 학장 12월이었음. 특히 광복지점은 7월에 PM2.5 농도가 가장 낮는데 비해 금속성분이 높게 나타났는데 향후 지속적인 조사가 요구됨.

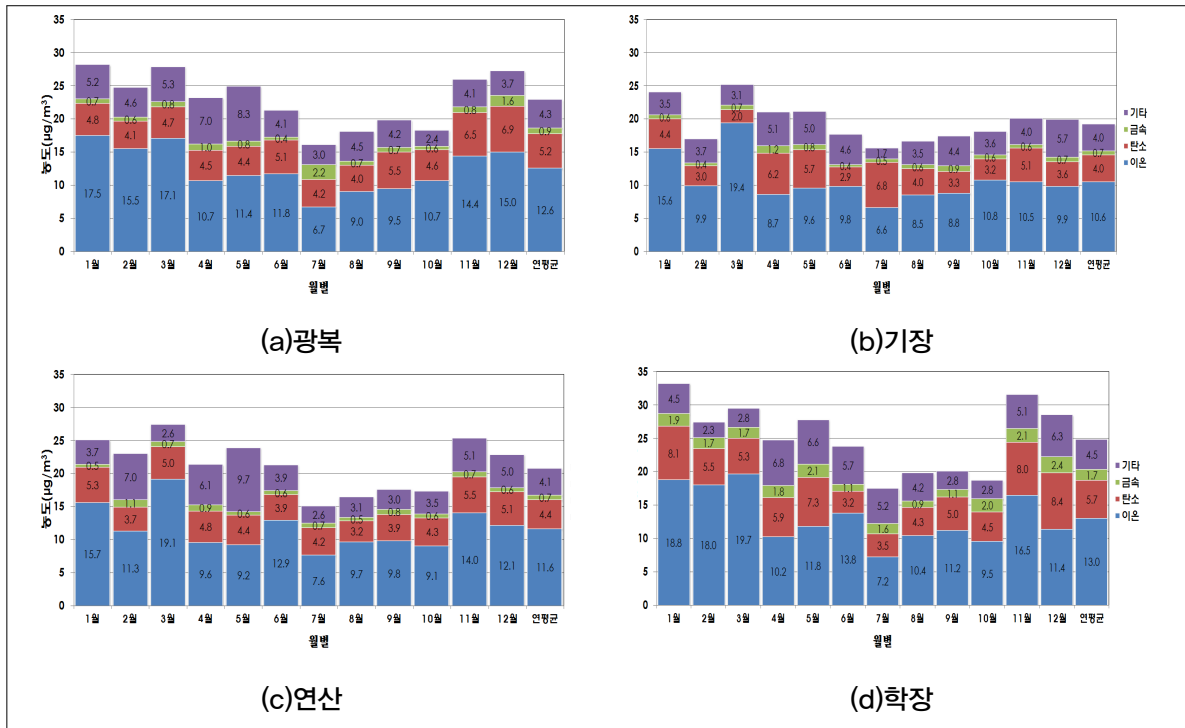


그림 3. 2016년 월별 PM2.5 구성성분 농도 추이

○ PM2.5 구성성분별 농도 현황

- 이온성분은 4개지점 모두  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{NH}_4^+$ 가 주요물질이었음. 특히,  $\text{SO}_4^{2-}$ 는 4개지점 모두 하절기에 고농도로 나타났는데, 이는 하절기 고온 및 대기중 활발한 광화학반응으로 인해 기체상  $\text{SO}_2$ 가 입자상인 황산염( $\text{SO}_4^{2-}$ )로의 전환 증가에 의한 것으로 판단됨.  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{NH}_4^+$ 는 4개지점 모두 동절기에 고농도로 나타났는데, 동절기 질소산화물 배출 증가 및 저온으로 인한 입자상 질산암모늄( $\text{NH}_4\text{NO}_3$ ) 증가에 의한 것으로 판단됨(표 3, 그림 4).
- 탄소성분은 4개지점 모두 유기탄소(OC)가 주요물질이었음. 유기탄소(OC)는 광복, 연산, 학장지점 등 3개 지점에서 동절기(12월)에 고농도였고 기장지점은 하절기(7월)에 고농도로 나타났음. 광복, 연산, 학장지점 등 동절기 고농도 원인은 난방 등 석유계 연료사용량 증가로 추정되며, 기장지점의 하절기 고농도 원인은 인위적 배출원 뿐만아니라 산림 등 자연에서 배출된 유기물질이 활발한 광화학반응에 의해 2차 생성된 것으로 사료됨. 원소탄소(EC)는 지점별 다소 다른 농도특성으로 나타났으나, 보다 정확한 원인분석을 위해서는 지속적인 조사가 필요한 것으로 판단됨(표 3, 그림 5).

\* 원소탄소 주요 발생원 : 화석연료, 생체소각 등 불완전 연소

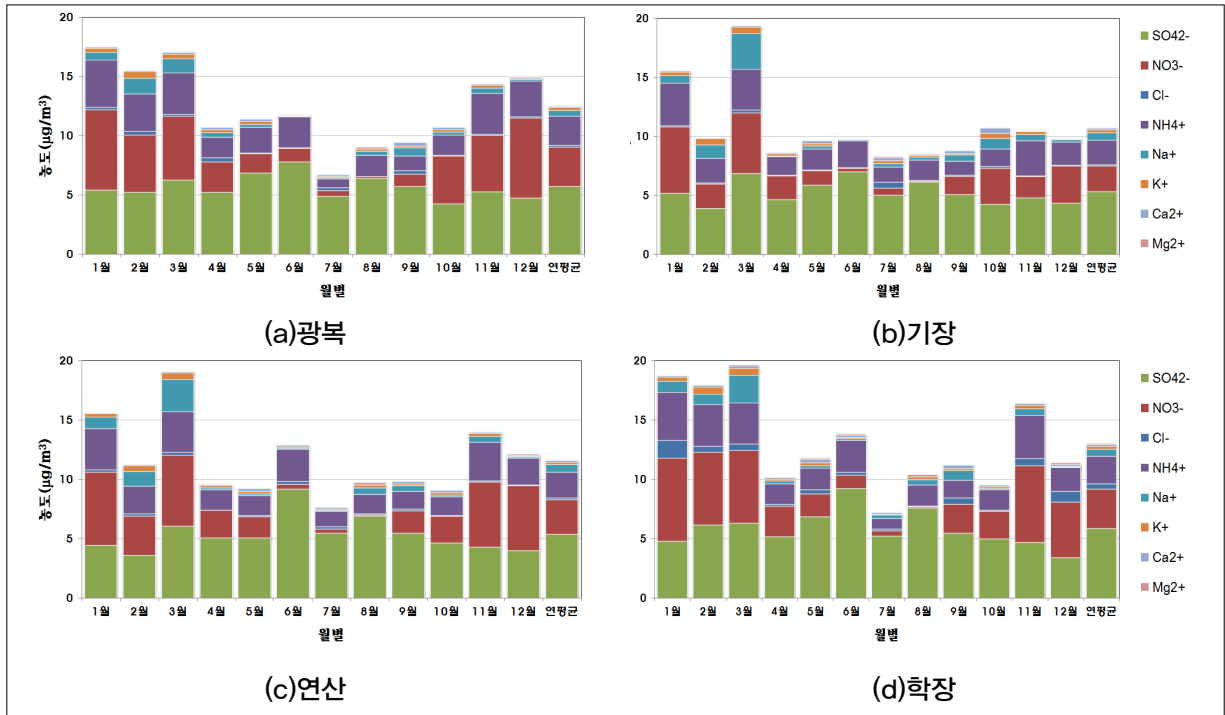


그림 4. 월별 이온성분 농도 추이.

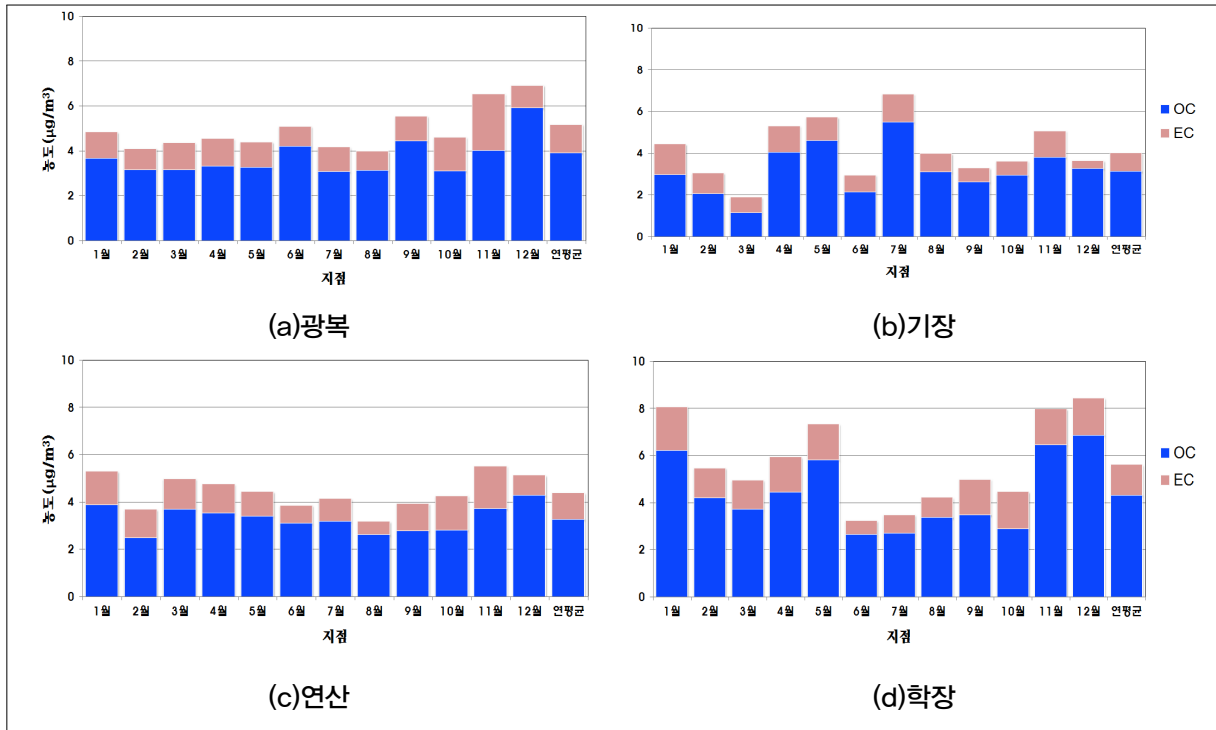


그림 5. 월별 탄소성분 농도 추이

표 3. 월별 PM2.5 구성성분 농도(이온성분, 탄소성분)

(단위 : µg/m³)









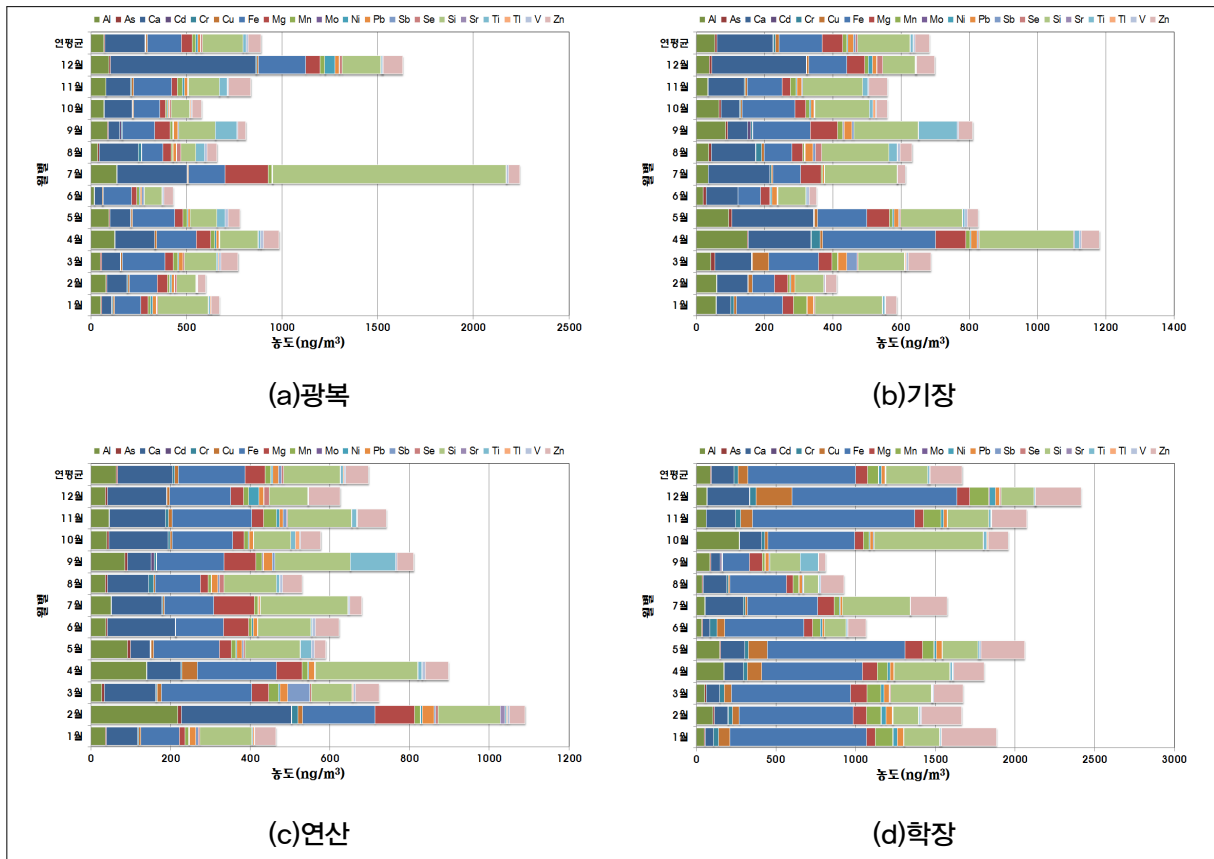


그림 6. 월별 금속성분 농도 추이

○ PMF를 이용한 미세먼지(PM2.5) 발생원 추정

- 미국 환경보호청에서 제공하는 수용모델(EPA PMF5.0)을 이용하여 각 조사지점별 PM2.5 농도에 영향을 미치는 발생원별 기여율을 표 5에 나타내었음.
  - ※ 추정 발생원은 관련 연구 문헌에 따라 다소 차이가 있으므로 일반적으로 통용되는 발생원을 적용하였음.
- 광복지점은 총 4개 발생원으로 추정되었으며, 추정 발생원별 기여율은 황산염계 2차입자 +중유연소(34.1%)가 가장 높고 다음으로 자동차 배출+도로먼지(31.0%) 이었음.
- 기장지점은 총 7개 발생원으로 추정되었으며, 추정 발생원별 기여율은 황산염계 2차입자 +중유연소(38.5%)가 가장 높고 다음으로 질산염계 2차입자(21.5%)이었음.
- 연산지점은 총 4개 발생원으로 추정되었으며, 추정 발생원별 기여율은 황산염계 2차입자 +중유연소+토양(지각)(42.2%)이 가장 높고 다음으로 질산염계 2차입자+자동차배출+도로먼지(32.0%)이었음.
- 학장지점은 총 4개 발생원으로 추정되었으며, 추정 발생원별 기여율은 황산염계 2차입자 +질산염계 2차입자(34.9%)가 가장 높고 다음으로 질산염계 2차입자+자동차배출+도로먼지(33.1%)이었음.

- 전 지점에서 공통적으로 황산염계 2차입자, 질산염계 2차입자 및 연료연소가 높은 기여율을 나타내어 SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, NH<sub>3</sub> 등 기체상 물질이 초미세입자로 전환된 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, NH<sub>4</sub><sup>+</sup> 등 2차입자와 석유계 연료의 연소로 생성된 탄소성분이 PM2.5의 주요물질로 판단됨.

표 5. 지점별 PM2.5 발생원 추정 및 기여율

지점	요인	추정 발생원	발생원 추적자 항목	농도(μg/m <sup>3</sup> )	기여율(%)
광복	1	황산염계 2차입자+중유연소	OC, EC, SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> , NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> , Ca <sup>2+</sup> , Fe, Mn, Ni, V	7.5	34.1
	2	자동차 배출+도로먼지	OC, EC, Al, Ca, Cd, Cr, Cu, Fe, Mg, Mn, Ni, Pb, Si, Ti, Zn	6.8	31.0
	3	해염입자	Cl <sup>-</sup> , Na <sup>+</sup> , K <sup>+</sup>	4.2	18.9
	4	질산염계 2차입자	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> , Mg <sup>2+</sup>	3.5	16.0
기장	1	황산염계 2차입자+중유연소	OC, EC, SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> , NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> , V	6.9	38.5
	2	질산염계 2차입자	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	3.8	21.5
	3	금속관련(1)	Ca, Cu, Fe, Mn, V, Zn	2.2	12.6
	4	해염입자	Na <sup>+</sup> , K <sup>+</sup>	1.8	10.2
	5	금속관련(2)	As, Cd, Cu, Pb	1.2	6.9
	6	토양(지각)	Al, Ca, Cr, Fe, Mg, Si, Ti	1.0	5.4
	7	염화물계	Cl <sup>-</sup>	0.9	4.9
연산	1	황산염계 2차입자+중유연소+토양(지각)	OC, EC, Cl <sup>-</sup> , SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> , NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> , Ca <sup>2+</sup> , Al, As, Ca, Fe, Mg, Mn, Ni, Se, Si, Ti, Zn, V	8.0	42.2
	2	질산염계 2차입자+자동차 배출+도로먼지	OC, EC, NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> , Ca <sup>2+</sup> , Mg <sup>2+</sup> , Si, Ti	6.1	32.0
	3	해염입자	Cl <sup>-</sup> , Na <sup>+</sup> , K <sup>+</sup>	3.5	18.4
	4	금속물질	Cd, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb, V, Zn	1.4	7.5
학장	1	황산염계 2차입자+질산염계 2차입자	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> , NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> , K <sup>+</sup>	8.3	34.9
	2	연료연소+자동차배출	OC, EC	7.8	33.1
	3	염화물+중금속 관련 배출+토양	Cl <sup>-</sup> , Cr, Cu, Fe, Mg, Mn, Ni, Pb, Si, Ti, Zn	5.1	21.4
	4	해염	Na <sup>+</sup>	2.5	10.6

### ○ 요약 및 결론

- '16년 4개 지점의 PM2.5 중량농도는 평균 21.9 μg/m<sup>3</sup>로 학장지점에서 최대(25.1 μg/m<sup>3</sup>), 기장지점에서 최소(18.8 μg/m<sup>3</sup>) 최소로 나타났음.
- PM2.5 구성성분별 평균농도(구성비)는 이온성분 11.95 μg/m<sup>3</sup>(53.1%), 탄소성분 4.81

$\mu\text{g}/\text{m}^3$ (23.2%), 금속성분  $0.98 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (4.9%), 기타  $4.22 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (19.4%)이었으며, 구성 성분별 농도는 이온, 탄소, 금속성분 모두 학장지점에서 최대, 기장지점에서 최소로 나타났다.

- 이온성분은 4개 지점 모두  $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_x$ ,  $\text{NH}_3$  등 가스상물질이 대기 중 화학반응에 의해 입자로 전환된  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{NO}_3^-$  가 높게 나타났다
- 탄소성분은 4개 지점 모두 OC가 EC 대비 3배 정도(지점별 2.9~3.5) 높은 농도로 나타났다. EC는 지점별 다른 농도 특성을 나타내어 원인분석을 위해서는 지속적인 조사 필요.
- 금속성분의  $\text{PM}_{2.5}$  중 중량농도는 낮으나 인체 위해성 측면에서 중요성을 지니며, 본 조사결과 주요 금속성분은 Fe, Si, Ca, Al 등 토양(암석)기원 물질이고, Pb은 대기환경기준의 3.4%(2.7~4.9) 수준으로 나타났다. 기타 미량금속성분(Cr, Cu, Mn, Ni 등)은 전반적으로 학장지점에서 높게 나타났다.
- 수용모델(EPA PMF5.0)을 이용한  $\text{PM}_{2.5}$  발생원 추정결과 전 지점에서 황산염계 2차입자, 질산염계 2차입자, 그리고 연료연소가 높은 기여율을 나타내었으며, 그 외 자동차 배출(광복, 연산, 학장), 해염(4개지점 모두), 도로먼지(광복, 연산), 중금속배출(학장) 등이 추정되었음.
  - ⇒  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{NH}_4^+$  등 2차입자와 탄소성분(OC, EC)이  $\text{PM}_{2.5}$ 의 주요물질로서  $\text{PM}_{2.5}$  저감을 위해서는 배출원으로부터의  $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_x$ ,  $\text{NH}_3$  등 가스상물질의 배출저감과 석유계연료의 사용감소 및 타에너지원로의 전환 필요
- 향후 수용모델(PMF) 적용뿐 아니라 대기질 진단평가시스템을 활용한 발생원별 기여도 파악 및 오염원 추정 필요

#### 4. 활용방안

- 미세먼지 발생원 추적 및 위해도 평가, 대시민 환경정보 제공, 초미세먼지 관리 대책 마련

#### 5. 기대효과

- 초미세먼지 구성성분 파악으로 발생원 추적 및 관리 대책 수립으로 대기질 개선
- 부산지역 초미세먼지 성분 자료 공개로 대시민 환경정보 보급 및 알권리 충족