

천안시 대기 입자 중 수용성 이온성분의 계절적 특성 및 요인분석을 통한 오염기여도 평가

오세원*

¹상명대학교 환경공학과

Characterization and source apportionment by factor analysis of water soluble ions in atmospheric particles in Cheonan, Korea

Sewon Oh^{1*}

¹Department of Environmental Engineering, Sangmyung University

요약 천안시 대기 입자 중 수용성 이온성분의 특성을 분석한 결과, 양이온은 Na^+ 과 NH_4^+ 이, 음이온은 NO_3^- 와 SO_4^{2-} 이 조대입자와 미세입자에서 모두 주요한 이온성분으로 조사되었다. 분석된 수용성 이온성분의 농도는 미세입자가 조대입자보다 높은 농도로 나타났으며, 겨울과 봄철에 높은 농도를, 여름철에 가장 낮은 농도를 나타냈다. 총 수용성 이온 성분은 전체 입자의 질량 중 조대입자에서는 계절별로 봄 24.4%, 여름 33.2%, 가을 40.7%, 겨울 39.6%를, 미세입자에서는 각각 43.0%, 59.7%, 55.4%, 53.2%를 차지하는 것으로 분석되어, 조대입자 보다는 미세입자에서 차지하는 비율이 컸으며, 다른 계절보다는 봄철에 낮은 비율을 나타냈다. 이들 수용성 이온성분의 요인분석을 수행한 결과 조대입자는 2개의 요인이, 미세입자는 4개의 요인이 추출되었다. 이로부터 조대입자의 경우 자연적 배출원으로 부터의 기여가 70.03%로, 미세입자의 경우 인위적 배출원으로 부터의 기여가 66.01%로 추정되었다.

Abstract Seasonal characteristics of water soluble ions in atmospheric particles in Cheonan were studied between 2008 and 2009. Na^+ , NH_4^+ and NO_3^- , SO_4^{2-} were the principle cations and anions in both coarse and fine particles. Water soluble ions occupied 24.4%(spring), 33.2%(summer), 40.7%(fall), and 39.6%(winter) of the total mass of coarse particles. In fine particles, 43.0%(spring), 59.7%(summer), 55.4%(fall), and 53.2%(winter) of mass were occupied by water soluble ions. From the factor analysis, 2 and 4 factors were extracted for water soluble ions in coarse and fine particles, respectively. 70.33% of water ions in the coarse particles were estimated from the natural source, but 66.01% in the fine particles were from the anthropogenic source.

Key Words : Coarse particles, Fine particles, Water soluble ions, Factor analysis

1. 서론

대기 중 입자상 물질은 배출원의 다양성 및 배출 후 대기 중에서의 물리, 화학적 반응에 의해 구성 성분이 다양하고, 크기도 수십 nm에서 수십 μm 까지의 넓은 직경 범위에 걸쳐 분포한다. 이들 대기 입자들은 그 크기에 따라 침강, 산란, 충돌 특성과 같은 여러 물리적 성질이 달라지며, 이에 따라 인체 및 환경에 미치는 영향은 입자의 크기에 크게 좌우된다. 이와 같이 넓은 크기 범위에 분포

하는 대기 입자는, 그 발생방법에 따라 기계적 과정에 의해 생성되는 직경 $2.5\mu\text{m}$ 이상의 조대입자(Coarse Particle)와 화학적 과정에 의해 생성되는 직경 $2.5\mu\text{m}$ 이하의 미세입자(Fine Particle)로 구분된다. 이들을 구성하는 주요 성분은 황산염, 질산염, 암모니움과 같은 이온성 성분, 유기 및 원소 상태의 탄소를 포함하는 탄소 성분, 금속류를 포함하는 지각 성분, 해염과 수분을 포함하며, 지역의 특성에 따라 구성 성분이 차이를 나타낸다[1-3]. 따라서 대기 중 입자의 크기 분포 및 성분의 정확한 이해는, 그 지

본 논문은 상명대학교 2009년 교내 연구비 지원에 의해 수행되었음.

*교신저자 : 오세원(sewonoh@smu.ac.kr)

접수일 11년 01월 07일

수정일 (1차 11년 01월 24일, 2차 11년 02월 07일)

게재확정일 11년 02월 10일

역 대기 중 입자상 오염물질의 주요 배출원 및 그 영향을 예측하고, 제어 전략을 수립하는 과정에서 가장 필수적인 요소가 된다.

본 연구를 수행한 천안시는 충남의 동북부에 위치한 인구 약 50만 규모의 도내 최대 도시로, 충남지역의 교통과 산업의 중심 역할을 수행하고 있는 지역이다. 천안시는 1990년대 이후 지속적인 산업체의 유입으로 전자, 반도체, 기계, 금속, 자동차관련 업체들을 중심으로 12개의 산업단지에서 약 400개의 산업체가 운영 중에 있으며[4], 이에 따라 대기 질 변화에 대한 우려가 있는 실정이다. 환경부에서 운영 중인 지역대기측정망의 측정 자료를 살펴보면, 천안시의 대기질 중 직경 10 μm 이하의 호흡성 먼지인 PM10 오염도는 서울을 포함하는 대도시의 오염도와 유사한 수준으로 나타나고 있다. 특히 최근 새로운 대기질 기준으로 검토되고 있는 직경 2.5 μm 이하의 미세먼지인 PM2.5 오염도는 현 미국 EPA 일평균 기준을 상회하는 측정일 수의 빈도가 높은 것으로 조사되고 있다[5,6]. 이상의 측정 결과는 미세입자인 PM2.5가 천안시 대기 질 개선을 위해 고려해야 할 주요한 오염물임을 시사한다. 이들 미세입자는 기체상 오염물의 응축을 포함하는 화학적 과정에 의해 생성되기 때문에, 황산염, 질산염, 암모니움과 같은 수용성 이온성분이 주요한 구성 성분이다. 따라서 본 연구는 천안시 대기 입자 중 수용성 이온성분의 상세 조사를 통해, 이들 성분의 배출원별 기여도를 추정하여, 중장기적인 대기질 제어전략의 기초 자료를 제공하고자 하였다.

2. 연구방법

천안시 대기 입자의 계절별 이온 성분 특성을 조사하기 위해, 안서동에 위치한 상명대학교 본관 옥상에 5-Stage Cascade Impactor(Andersen, Model 235)를 장착한 High-volume Air Sampler(Andersen, GV2360-70)를 설치하여 대기 입자를 입경별로 유리섬유 여지에 포집하였다[7]. 시료의 채취는 24시간 연속적으로 수행하여 일평균 특성값을 도출하였으며, 계절별 특성을 조사하기 위해 2008년부터 2009년까지 3개월 단위로 봄은 3-5월까지, 여름은 6-8월까지, 가을은 9-11월까지, 겨울은 12월-2월까지로 계절을 구분하여, 총 36회 시료를 채취하였다. Cascade Impactor에서 100-7.2 μm , 3.0-7.2 μm , 1.5-3.0 μm , 0.95-1.5 μm , 0.49-0.95 μm , 0.01-0.49 μm 의 5구간 입경별로 섬유여과지에 채취된 대기입자는 먼저 여과지의 질량 측정(Satorius, Model CP225D)을 통해 입경별 입자의 질량농도 분석을 수행하였다. 이 후 입자가 채취된

여과지를 입경 3.0 μm 을 기준으로 조대입자와 미세입자로 구분하여 초순수에 담근 후, 초음파세척기(Hwashin, Power sonic 410)에서 1시간, 진탕기(Humancorp, SH-800S)에서 200 rpm으로 1시간동안 진탕하여 여과지에 채취된 입자의 수용성 이온성분을 추출하였다. 이온성분이 추출된 수용액은 이온크로마토그래피(Dionex, ICS-90)를 이용하여 양이온은 Na^+ , NH_4^+ , K^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} 을, 음이온은 Cl^- , NO_3^- , SO_4^{2-} 을 분석하였다. 분석용 컬럼으로는 양이온은 Ionpac CS12A를, 음이온은 Ionpac AS9-HC를 사용하였으며, 자세한 분석조건은 표 1에 기술하였다. 분석된 추출액중의 이온 농도를 통해 채취된 입자 중 미세입자와 조대입자별 각 이온성분의 질량 농도와 각 성분의 구성비(%)를 산출하였다.

[표 1] 이온크로마토그래피 분석 조건

항목	음이온	양이온
용리액	9mM Na_2CO_3	20mM Methanesulfonic Acid
분석용컬럼	Ionpac AG9-HC(4*50)/ Ionpac AS9-HC(4*250)	Ionpac CG12A(4*50)/ Ionpac CS12A(4*250)
유량	1 ml/min	
검출방식	전기전도도	
시료주입량	25 μL	

이렇게 측정된 대기 입자의 이온 성분별 농도 자료를 토대로, 이들 성분의 주요 오염원을 추정하고자 요인분석(Factor Analysis)을 수행하였다. 요인분석은 복잡한 다차원의 측정 변수들을 물리적으로 해석 가능한 저차원의 요인수로 변환하는 다변량통계분석법 중의 하나로, 대기 분야에서는 측정된 오염물의 복잡한 화학 성분 특성을 기초로 하여, 오염원을 확인하고 그 기여도를 평가하는 수용모델에 응용되어 사용되고 있다[8,9]. 요인분석법은 도출된 요인에 대한 타당성을 검증하기가 어렵다는 단점이 있으나, 한정된 자료를 기초로 오염원을 추정할 수 있는 장점을 가지고 있다. 본 연구에서는 대기 입자 중 수용성 이온성분 측정 자료를 기반으로 요인 분석을 수행하여, 입자 전체의 오염원 추정에 한계를 가지고 있으나, 수용성 이온성분이 미세입자의 주요 구성 성분임을 고려 할 때, 이들의 오염원 추정은 향후 대기질 제어 전략 수립에 필요한 기초자료 활용될 수 있다. 본 연구에서는 SPSS 10 통계 프로그램을 이용하여 요인분석을 수행하였다[10].

3. 결과 및 고찰

3.1 계절별 입자상 물질의 크기별 이온 농도

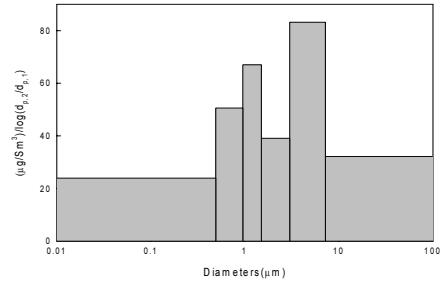
입자상 물질의 크기를 Cascade Impactor의 절단입경 3.0 μm 를 기준으로 조대입자와 미세입자로 구분하여 측정된 총 질량농도를 표 2에 나타냈다. 이와 함께 측정된 입경별 농도를 국내 대기환경기준과 미국 EPA 기준과 비교하기 위해 PM10과 PM2.5 농도값도 같이 기술하였다. 표 2의 PM10 농도는 Cascade Impactor의 4구간 (3.0-7.2 μm , 1.5-3.0 μm , 0.95-1.5 μm , 0.49-0.95 μm , 0.01-0.49 μm)의 농도를 더하고 여기에 100-7.2 μm 구간의 농도 중 구간에서 입자의 농도가 균일하다는 가정하에 7.2-10 μm 까지만의 농도를 더하여 산출하였으며, PM2.5는 0.01-0.49 μm 와 0.95-1.5 μm 구간의 전체농도와 1.5-3.0 μm 구간 농도 중 1.5-2.5 μm 구간의 농도만을 더하여 산출하였다. 표 2에 제시한 바와 같이, 측정된 전체 자료의 평균치는 조대입자가 51.13 \pm 35.51 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (95% 신뢰구간), 미세입자가 53.79 \pm 11.12 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 봄철을 제외하고는 미세입자가 조대입자 농도보다 상대적으로 높았으며, 조대입자와 미세입자 모두 계절별 농도는 봄, 겨울, 가을, 여름의 순으로 측정되었다.

[표 2] 계절에 따른 천안시 대기 입자의 입경별 농도

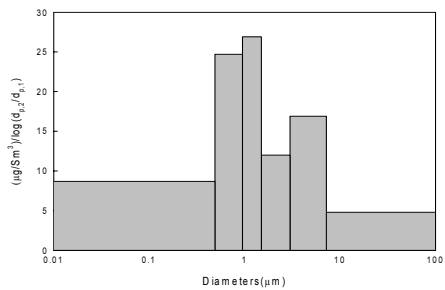
		$(\mu\text{g}/\text{m}^3)$				
		봄	여름	가을	겨울	전체
조대입자	평균	72.64	15.49	23.80	31.90	51.13
	최대	666.81	24.35	30.37	49.80	666.81
	최소	9.43	5.25	15.80	15.00	5.25
미세입자	평균	68.08	27.70	35.73	43.40	53.79
	최대	183.26	44.74	44.12	77.40	183.26
	최소	29.53	11.41	16.44	23.86	11.41
PM10	평균	112.34	37.85	52.62	64.66	85.75
	최대	534.40	60.37	64.97	98.98	534.40
	최소	39.62	15.44	29.73	36.19	15.44
PM2.5	평균	76.23	29.80	39.53	47.58	59.91
	최대	233.33	48.22	49.72	82.33	233.33
	최소	33.39	12.45	19.04	25.44	12.45

입자분포는 미세입자 영역의 0.49-1.5 μm 와 조대입자 영역의 3.0-7.0 μm 에서 피크 농도를 보이는 도심지역의 이산형 분포를 나타냈으며, 봄을 제외한 나머지 계절에서는 0.49-1.5 μm 에서 최고의 농도를, 봄철의 경우 3.0-7.0 μm 에서 가장 높은 농도를 나타내고 있다. 각 계절별 입

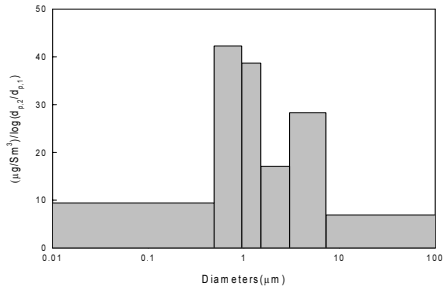
자분포도를 그림 1에 도시하였다.



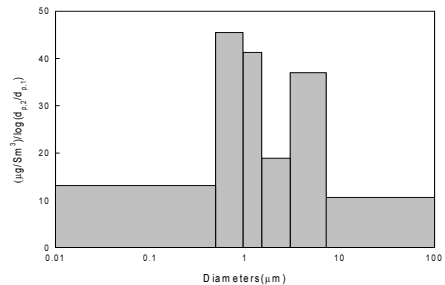
(a) 봄



(b) 여름



(c) 가을



(d) 겨울

[그림 1] 각 계절별 천안시 대기입자분포도

이와 같이 계절별로 봄철이 다른 계절에 비해 다른 특성을 보이는 이유는 토양입자로 구성된 조대입자가 대부

분을 구성하고 있는 황사현상이 봄철에 집중되고 있기 때문에 사료된다. 이와 함께 측정된 PM10과 PM2.5의 농도는 각각 평균 85.75±28.06 µg/m³, 59.91±13.33 µg/m³으로 나타났으며, 봄철 PM10과 PM2.5는 각각 112.34, 76.23 µg/m³으로 가장 높은 농도를 보였다. 여름철은 PM10과 PM2.5 각각 37.85, 29.80 µg/m³으로 가장 낮은 농도를 나타냈는데, 이는 우리나라의 여름철 집중 호우성 기후의 영향으로 추측된다. 국내 PM10 일평균기준치가 100 µg/m³임을 고려할 때, 측정기간 중 여름, 가을, 겨울은 기준치를 초과하는 측정일이 관측되지 않았으나 봄에는 기준치의 초과일이 관측되었다. 반면 PM2.5의 경우, 현 미국 EPA 일평균 기준치는 35µg/m³으로, 여름철을 제외하고는 모두 기준치를 상회하는 것으로 측정되어 미세입자인 PM2.5의 관리의 중요성을 보여주고 있다. 특히 향후 국내 PM2.5 기준 도입 시, 이에 대한 대책수립 및 기준치 설정에 주의를 필요함을 시사하고 있다. PM10에 대한 PM2.5의 비율이 각 봄, 여름, 가을, 겨울철에 각각 0.68, 0.79, 0.75, 0.74로 나타나 여름철에 가장 높은 0.79의 비율을 미루어 볼 때, 특히 여름철에는 집중 호우성 기후로 인해 조대입자의 형성 및 비산이 억제되는 것으로 추측된다.

이상의 입경별 질량농도 분석이 완료된 입자를 조대입자와 미세입자로 구분하여 수용성 이온 성분을 계절별로 분석한 결과를 표 3에 기술하였다.

[표 3] 계절에 따른 천안시 대기 입자 중 수용성 이온성분 농도

	(µg/m ³)							
	봄		여름		가을		겨울	
	조대입자	미세입자	조대입자	미세입자	조대입자	미세입자	조대입자	미세입자
Na ⁺	4.50 (6.20)	5.58 (7.68)	1.05 (6.75)	3.30 (11.92)	1.66 (6.98)	2.74 (7.67)	2.45 (7.69)	3.95 (9.10)
NH ₄ ⁺	0.60 (0.83)	2.92 (4.02)	0.15 (0.96)	0.82 (2.95)	0.76 (3.19)	2.64 (7.39)	0.68 (2.12)	2.74 (6.32)
K ⁺	0.43 (0.59)	1.12 (1.54)	0.12 (0.77)	0.66 (2.38)	0.25 (1.06)	0.83 (2.32)	0.35 (1.10)	1.30 (3.00)
Mg ²⁺	0.21 (0.29)	0.15 (0.20)	0.05 (0.33)	0.02 (0.09)	0.04 (0.18)	0.04 (0.10)	0.09 (0.29)	0.05 (0.11)
Ca ²⁺	1.32 (1.82)	1.02 (1.41)	0.35 (2.25)	0.31 (1.12)	0.77 (3.24)	0.50 (1.39)	0.99 (3.10)	0.79 (1.81)
Cl ⁻	2.53 (3.48)	1.83 (2.52)	0.51 (3.30)	0.83 (3.01)	0.83 (3.47)	0.63 (1.75)	2.25 (7.06)	2.10 (4.83)
NO ₃ ⁻	5.05 (6.95)	8.32 (11.46)	1.48 (9.58)	4.35 (15.69)	2.52 (10.58)	3.35 (9.37)	3.32 (10.40)	5.44 (12.53)
SO ₄ ²⁻	3.07 (4.22)	10.32 (14.21)	1.43 (9.25)	6.23 (22.49)	2.86 (12.02)	9.08 (25.42)	2.50 (7.85)	6.71 (15.45)
총이온	17.71 (24.38)	31.26 (43.04)	5.14 (33.19)	16.52 (59.65)	9.69 (40.72)	19.80 (55.41)	12.64 (39.61)	23.07 (53.15)

()의 값은 입자 중 각 이온이 차지하는 구성비(%)임.

표 3에 나타난바와 같이 양이온은 Na⁺과 NH₄⁺이, 음이온은 NO₃⁻와 SO₄²⁻이 계절적인 차이는 있으나 조대입자와 미세입자에서 주요한 이온성분으로 분석되었다. 분석된 총 수용성 이온성분의 농도는 조대입자의 경우 봄, 여름, 가을, 겨울에 17.71, 5.14, 9.69, 12.64 µg/m³이고, 미세입자는 31.26, 16.52, 19.80, 23.07 µg/m³로, 조대입자와 미세입자 모두 겨울과 봄철에 가장 높은 농도를, 여름철에 가장 낮은 농도를 보였다. 전체적으로 미세입자의 이온농도가 조대입자의 이온농도보다 높게 나타났으며, 여름철의 경우 미세입자의 이온농도가 조대입자의 3.21배에 해당하였다. 이는 여름철 집중 강우가, 기체상 오염물질의 전환에 의한 수용성 이온을 포함하는 미세입자의 생성보다는 조대입자의 생성을 더 억제하기 때문으로 사료된다. 이들 이온성분의 농도는 각 입자의 총 질량농도에 크게 영향을 받기 때문에, 절대 농도 보다는 상대적 비율을 분석하여 수용성 이온성분이 전체 입자 중 어느 정도를 구성하는지를 나타내는 구성비(%)를 통해 분석하였다. 이를 위해 표 3에 각 이온별로 전체 질량 중 각 이온이 차지하는 구성비를 산출하여 기술하였다. 조대입자의 경우 전체 질량 중 이온성분이 봄 24.4%, 여름 33.2%, 가을 40.7%, 겨울 39.6%를, 미세입자에서는 각 계절별로 43.0%, 59.7%, 55.4%, 53.2%를 차지하는 것으로 분석되었다. 이온성분이 차지하는 비율이 타 계절에 비해 봄철이 상대적으로 낮은 원인은 황사로 인해 대기 입자에 비수용성 금속성분이 다량 함유된 토양성분이 유입되어 수용성 이온성분의 비율이 상대적으로 감소하기 때문으로 사료된다[7]. 또한 미세입자에서 이온성분의 기여율이 조대입자에 비해 크게 나타나는데, 이는 NH₄⁺, NO₃⁻, SO₄²⁻와 같은 주요 이온성분들의 생성이 기체상 물질로부터 대기 중 전환에 의한 미세영역 크기에서 진행되기 때문이다[11]. 표 3에 제시한 바와 같이, 이들 세 이온은 천안시 미세입자 중 계절에 따라 29.7 ~ 42.2%를 구성하고 있으며, 평균 36.9%를 차지하고 있다. NH₄⁺, NO₃⁻, SO₄²⁻ 이온별 평균 구성비는 각각 5.2%, 12.3%, 19.4%으로 분석되었다. 이들 이온의 구성비는 직접적인 오염원으로부터의 영향이 미미하여, 국가배경농도 측정소가 운영 중인 한라산 고산(9%, 5%, 29%)과 황해상 덕적도(9%, 4%, 30%)와 다른 특성을 나타낸다[12,13]. 천안 미세입자에서 이들 이온이 차지하는 총 구성비(36.9%)는 청정지역(43%)에 비해 낮았으나, NO₃⁻의 구성비는 오히려 크게 나타났다. 이는 천안시 대기입자의 주요한 특성을 나타내는 지표로, 앞서 입자분포도가 전형적인 도심지역의 특성을 나타낸 결과에서도 유추할 수 있듯이, 천안시 미세입자에는 도심지역의 주요 오염원인 이동오염원으로부터 발생된 탄소성분 등이 상대적으로 높은 비율로 포함되어

있음을 시사한다. 이동오염원의 주요 배출물질이 탄소성분과 NOx임을 고려할 때, NOx의 대기 중 전환에 의해 NO₃⁻의 생성이 증가하여, 미세입자 중 구성비가 청정지역에 비해 높은 값을 나타내게 된 것으로 사료된다. 이는 이동오염원이 주요한 배출원인 서울에서 측정된 구성비(4.3%, 14.3%, 12.5%)[14]와 유사한 특성이며, 이를 통해 천안시 미세입자의 효과적인 관리를 위해서는 이동오염원에 대한 대책 수립이 필요함을 시사한다.

3.2 입경별 수용성 이온 성분의 요인분석을 통한 오염 기여도 평가

다양한 오염원에서 배출된 성분들은 화학적 결합 및 흡착에 의해 각 입자상 물질의 특성을 나타내게 되며, 이에 따라 배출오염원 특성에 따라 각 지역의 입자상 물질은 이를 구성하는 특정 성분비율이 존재하게 된다. 요인분석은 각 오염원의 특성을 나타내는 성분을 추출하여 공통성이 존재하는 요인으로 설명하는데, 본 연구에서는 각 이온성분의 농도를 변수로 사용하여, 이들의 요인을 추출하였다. 요인분석의 기본 모형은 식 1로 표시되는데,

$$X_i = A_{i1}F_1 + \dots + A_{ik}F_k + \dots + A_{im}F_m + U_i \quad (1)$$

여기서, X_i는 측정된 i번째 변수(각 이온별 농도)이며, A_{ik}는 i번째 변수와 k번째 공통요인에 대한 가중치로 요인적재치이고, F_k는 k번째 공통요인, U_i는 m개의 요인에 의해 설명되지 않는 i번째 변수의 특수요인이다[15]. 각 이온별 농도를 변수로 하여 조대입자와 미세입자로 구분하여 수행한 요인분석 결과를 표 4에 기술하였다. 표 4에서 요인적재치(Factor loading)는 각 변수와 요인간의 상관관계의 정도를 나타내는 값으로 통상 +0.30이상이면 고려할 만한 유의성을 갖고, +0.50이상일 경우 매우 의미 있는 것으로 해석한다. 또한 고유치(Eigenvalue)는 특정 요인에 적재된 모든 변수의 적재치를 제곱하여 합한 값으로, 특정 요인에 관련된 표준화된 분산을 가리키며, 분산(Variance)은 공통요인들에 의해 설명되어지는 변수의 분산비율이다. 적당한 요인수를 결정하기 위해서는 이들 고유치, 분산과 각 요인들의 누적분산 등을 고려하게 되는데, 일반적으로 고유치가 1.0 이상, 누적 분산이 80% 이상인 선에서 요인수를 결정한다[15].

[표 4] 천안시 대기 입자 중 수용성 이온성분의 요인분석 결과

	요인적재치							
	조대입자		미세입자					
	1	2	1	2	3	4		
Na ⁺	0.914	0.054	0.130	-0.016	0.163	0.945		
NH ₄ ⁺	-0.021	0.971	0.380	0.135	0.621	-0.599		
K ⁺	0.694	0.654	0.908	-0.115	0.097	0.168		
Mg ²⁺	0.962	0.063	-0.002	0.854	0.352	-0.196		
Ca ²⁺	0.926	0.226	0.808	0.446	-0.067	0.062		
Cl ⁻	0.820	0.111	0.010	0.875	0.002	0.074		
NO ₃ ⁻	0.767	0.409	0.103	0.196	0.918	0.215		
SO ₄ ²⁻	0.746	0.572	0.800	-0.134	0.374	-0.232		
고유치	5.602	1.251	2.896	1.750	1.394	0.991		
분산 %	70.026	15.636	36.201	21.880	17.421	12.384		
누적분산 %	70.026	85.662	36.201	58.081	75.502	87.887		

표4에서 볼 수 있듯이, 천안시 대기 입자의 수용성 이온성분은 조대입자에서는 2개의 요인으로 추출되었고, 이 2개의 요인이 전체 분산 중 85.7%를 차지하였다. 먼저 요인 1에서는 인위적 배출원인 연소과정에서 발생하는 K⁺와[16] NH₃으로부터 전환에 의한 NH₄⁺를 제외한 모든 양이온이 +0.50이상의 적재값을 가지고 있어, 이들 자연적 배출원으로 부터의 양이온이 Cl⁻, NO₃⁻, SO₄²⁻와 결합한 형태로, 주변의 산과 도로의 비산된 먼지로 인한 요인으로 추정된다. 요인 1은 전체 조대입자의 약 70.02%가 설명될 수 있는 주요 요인이었다. 반면 요인 2에서는 15.64%의 분산으로, 적재값이 +0.5이상인 NH₄⁺, K⁺, SO₄²⁻가 주성분으로, NO₃⁻ 성분이 유의한 성분으로 구성되어 있는 미량의 조대입자로 추정된다. 이들 주성분과 유의성분을 볼 때, 요인 2는 인위적 오염원으로부터 배출된 기체상 오염물질에 의해 생성된 미세입자가 조대입자와의 응집 등에 의해 형성된 것으로 추정된다.

반면, 미세입자는 총 4개의 요인이 추출되었으며, 이는 전체 분산 중 87.89%가 설명될 수 있었다. 이들 4개 요인은 각각 분산의 차이가 크지 않아, 미세입자는 여러 요인이 복합적으로 적용되었음을 알 수 있다. 먼저 36.2%가 설명되는 요인 1은 K⁺, Ca²⁺, SO₄²⁻이 주요 성분으로, NH₄⁺이 유의한 성분으로 나타나, 인위적 오염 성분이 주요 성분으로, 황산염의 형태로 이루어진 성분으로 추측된다. 또한 Ca²⁺성분의 적재치(0.808)가 큰 것으로 볼 때, 이 요인에는 인위적 배출원으로부터 생성된 입자에 토양성분이 흡착된 형태로 추측할 수 있다. 반면 요인 2

의 경우에는 Mg^{2+} 와 Cl^- 의 성분이 주요 성분이고 Ca^{2+} 의 성분이 유의하게 나타나 자연적 오염원에 의해 21.88%가 설명되는데, 이는 측정지점 주변의 비산먼지에 의한 영향으로 조대입자와의 경계 크기의 입자로 판단된다. 다음으로 요인 3의 경우에는 NH_4^+ 와 NO_3^- 의 성분이 주요 성분으로, Mg^{2+} , SO_4^{2-} 이 유의한 성분으로 전체의 17.42%를 차지하는 가장 큰 인위적 오염원의 영향 요인으로, 기체상 오염물인 NO_x 로 부터의 전환에 의해 형성되어 NH_4NO_3 의 형태로 존재하는 입자로 사료된다. 마지막으로 요인 4는 전체의 12.38%를 설명할 수 있고 Na^+ 가 가장 주요 성분으로 나타났으나, 다른 유의한 성분이 존재하지 않았으나 NO_3^- 의 성분이 가장 높은 유의수준을 나타내고 있어, 대기 중 NO_x 성분이 해염 성분인 $NaCl$ 과의 반응에 의해 $NaNO_3$ 로 생성된 입자로 판단된다. 이상의 요인 분석을 통해 미세입자는 요인 2를 제외한 3개의 요인이 인위적 배출원으로 부터 구성된 성분으로, 미세입자의 이온성분 중 66.01%를 차지하고 있는 것으로 추정된다.

4. 결론

천안시 대기 입자의 수용성 이온성분을 2008년부터 2009년 까지 분석한 결과, 양이온은 Na^+ 과 NH_4^+ 이, 음이온은 NO_3^- 와 SO_4^{2-} 이 조대입자와 미세입자에서 모두 주요한 이온성분으로 분석되었으며, 총 수용성 이온이 조대입자에서는 봄, 여름, 가을, 겨울에 각각 24.4%, 33.2%, 40.7%, 39.6%를, 미세입자에서는 각각 43.0%, 59.7%, 55.4%, 53.2%를 구성하였다. 이들 수용성 이온성분은 조대입자와 미세입자에서 각각 2개와 4개의 요인으로 추출되었으며, 미세입자의 경우 인위적 배출원에 의한 기여율이 66.01%로 추정되었다. 이상의 연구 결과를 통해, 천안시 대기 입자는 이동오염원의 영향이 크게 작용하는 도심지역의 특성을 나타내고 있음을 확인하였으며, 이에 따라 향후 천안시 대기 입자의 제어 전략 수립 시 이동오염원에 대한 고려가 매우 중요한 고려대상임을 제시할 수 있었다.

참고문헌

[1] Seinfeld, J. H., Pandis S. N., "Atmospheric chemistry and physics", John Wiley & Son: New York, 1997.
 [2] Finlayson-Pitts B. J., Pitts Jr. J. N., "Chemistry of the Upper and Lower Atmosphere", Academic Press,

2000.
 [3] Heintzenber J., "Fine particles in the global troposphere: a review", *Tellus*, 41B, pp. 149-160, 1989.
 [4] 한국산업단지공단, "2006년 국가 산업단지 산업동향", 2007.
 [5] 이현미, 오세원, "Dust Monitor를 이용한 천안시 대기 중 PM10, PM2.5 오염특성 조사", *한국대기환경학회지*, 제24권, 제3호, pp. 367-375, 2008.
 [6] 환경부, *환경백서* 2006, 2007.
 [7] 오세원, "2006-2008년 황사기간 중 천안시 대기입자의 특성 변화", *한국산학기술학회논문지*, 제10권, 제7호, pp. 1642-1647, 2009.
 [8] Henry C. A., "History and fundamentals of multivariate air quality receptor models", *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, 37, pp. 37-42, 1997.
 [9] 한진석, 김신도, "서울시 대기중 입자상 오염물질의 조성에 관한 연구", *한국대기보전학회지*, 제12권, 제4호, pp. 389-398, 1996.
 [10] 원태현, 정성원, "한글 SPSS10K 통계조사분석", SPSS 아카데미, 2003.
 [11] Whitby K. T., Sverdrup G. M., "California aerosols: Their physical and chemical characteristics", *Advances in Environmental Science and Technology*, 8, pp. 477-525, 1980
 [12] 이승복, 배귀남, 김용표, 진현철, 윤용석, 문길주, "황해상 탁적도의 대기 에어로졸 특성", *한국대기환경학회지*, 제 18권, 제4호, pp.305-316, 2002.
 [13] Lee J. H., Kim Y. P., Moon K. C., Kim H. K., Lee C. B., "Fine particle measurements at two background sites in Korea between 1996 and 1997", *Atmospheric Environment*, 35, pp. 1379-1390, 2001.
 [14] 조용성, 이홍석, 김윤신, 이종태, 박진수, "서울 성동구 지역 미세먼지의 화학적 조성에 관한 연구", *한국환경과학회지*, 제12권, 제6호, pp.665-676, 2003.
 [15] William R. D., Matthew G., "Multivariate Analysis", Wiley & Sons, 1984.
 [16] Wu Y., Fang G., Lee W., Lee J., Chang C., Lee C., "A review of atmospheric fine particulate matter and its associated trace metal pollutants in Asian countries during the period of 1995-2005", *Journal of Hazardous Materials*, 143, pp. 511-515, 2007.

오 세 원(Sewon Oh)

[정회원]



- 1990년 2월 : 서울대학교 공업화학과 (공학사)
- 1992년 2월 : 서울대학교 공업화학과 (공학석사)
- 2001년 5월 : University of Florida, 환경공학과 (공학박사)
- 2001년 9월 ~ 현재 : 상명대학교 환경공학과 교수

<관심분야>

대기오염제어, 대기오염물 분석