

대기 부유분진의 입경별 특성에 관한 연구

김성천 · 강달선 · 차영희
군산대학교 토목환경공학부

Study on Characteristics by Aerodynamic Diameter of Airborne Suspended Particulate Matters

Seong Cheon Kim, Dal Sun Kang and Young Hee Cha
School of Civil and Environmental Engineering, Kunsan National University

ABSTRACT

The mass fraction of PM_{10} had a bimodal distribution in the middle of between $2.1 \mu m$ through $3.1 \mu m$, and the average mass fraction of particles less than $2.1 \sim 3.1 \mu m$ was 54.1%. The concentrations were $59.9 \mu g/m^3$ for PM_{10} , $143.4 ng/m^3$ for Zn, $1.52 ng/m^3$ for Cd, $30.5 ng/m^3$ for Cr, $71.3 ng/m^3$ for Pb and $890.8 ng/m^3$ for Fe, respectively. For the concentration of PM_{10} and metallic elements by seasonal variations, PM_{10} showed bimodal distribution, while metallic elements showed different distributions by their sources. The ratios of fine particles to total mass were 0.45 for PM_{10} , 0.41 for Cr, and 0.20 for Fe, 0.57 for Zn, 0.68 for Cd and 0.63 for Pb, respectively. That facts indicated that PM_{10} , Zn, Cd, Cr and Pb were from anthropogenic sources, and Fe was from natural source. The geometric means and geometric standard deviations by seasonal variations were $3.6 \mu m$, $2.31 \mu m$ in winter, $3.0 \mu m$, $2.49 \mu m$ in spring, $2.7 \mu m$, $2.03 \mu m$ in summer respectively. And, total efficiency of cascade impactor by seasonal variations were 49.6 % in winter, 45.9% in spring and 44.5% in summer.

Keywords : Bimodal distribution, Mass fraction, Anthropogenic source, Natural source, Geometric mean

I. 서 론

분진은 주요 대기오염물질 중의 하나로 지난 십수년 동안 물리적, 화학적 특성에 관한 많은 연구가 이루어져 왔다. 특히 분진은 보통 공기역학적 직경 $2.5 \mu m$ 를 기준으로 미세입자와 조대입자로 나누어지는 쌍극분포의 형태를 나타내며,¹⁾ 분진이 인체에 미치는 영향에 관한 많은 연구를 통해 $10 \mu m$ 이하의 입자가 호흡성 분진으로 인체에 더 유해한 영향을 미치고 있음이 밝혀졌다.²⁾

분진은 크게 2가지로 구분할 수 있다. 즉, 공기 중에 부유하고 입경이 작은 부유분진과 입경이 크고 자연상태로 지상에 낙하하는 강하분진이 있다. 보통 분진의 크기는 $0.001 \sim 500 \mu m$ 정도이며, 보통 $100 \mu m$ 미만의 경우 TSP라 하며, $10 \mu m$ 이하일 경우를 PM_{10} 이라 한다. 그리고 $2.5 \sim 10 \mu m$ 범위인 입자를 $PM_{2.5-10}$ 으로 표기한다. 또한, 강하분진은 부유분진이 모두 포함되지만 일반적으로 $100 \mu m$ 이상을 의미한다. 그러나 PM_{10} 과 강하분진에 대한 연구는 매우 미미한 상태이다.³⁾

현재 우리나라의 분진에 대한 대기환경기준은 TSP의

경우 연평균 $150 \mu g/m^3$ 및 일평균 $300 \mu g/m^3$ 이다. 또한 1995년 신설된 공기역학적 직경 $10 \mu m$ 이하인 PM_{10} 기준은 연평균 $80 \mu g/m^3$ 및 일평균 $150 \mu g/m^3$ 이다. 미국에서는 1996년에 입자상 물질의 대기질 기준으로 공기역학적 직경이 $2.5 \mu m$ 이하인 $PM_{2.5}$ 의 기준을 신설하여 24시간 평균 $65 \mu g/m^3$, 연평균 $15 \mu g/m^3$ 이하로 규정하고 있다. 영국의 PM_{10} 기준은 24시간 평균 $50 \mu g/m^3$ 으로 강화하여 분진에 의한 건강상 피해를 규제하고 있으며, 특히 미세입자에 대한 효율적인 제어가 어려운 실정이다. 입자의 크기를 고려하지 않은 TSP 기준은 분진의 총 질량만을 저감시키는 기준치로서 건강 및 복지 등을 고려해 볼 때 PM_{10} 및 $PM_{2.5}$ 의 기준이 의미가 있다. 하지만 체감오염과 관련이 깊은 강하분진의 기준은 인체에 미치는 영향이 적다는 이유로 최근까지 설정된 바가 없다. 대기오염물질 중 분진은 대기오염에 큰 영향을 주는 인자이며, 분진 자체뿐만 아니라 유해물질과 결합되어 악영향을 끼친다. 특히 $0.1 \sim 1.0 \mu m$ 범위의 미세분진은 화석연료의 연소와 교통, 시설 등에 의한 인위적 배출과 응축과정을 거쳐서 가스상에서 입자상으로 변환된 2차 입자상 오염물질로서

입자의 표면적이 넓어져 유해한 무기물, 유기물을 흡착시켜 폐 깊숙이 흡입될 때 인체 및 동물에 심각한 피해를 주고, 장거리 이동시 청정한 지역까지 피해를 줄 수 있으며, 또한 가시광선을 산란시켜 시정장애를 유발할 수 있다.

분진에 관한 초기 연구 단계에서는 총부유분진(Total suspended particulate matters; TSP)의 중량농도의 분포와 이화학적 특성에 중점을 두었으며, 대기오염 저감 정책 역시 TSP 중량 농도에 초점을 맞추었다. 그러나 TSP의 저감정책에서 성공을 거둔 선진국의 경우 새로운 어려움을 겪게 되었다. 즉, TSP의 농도가 감소하여도 대기의 질이 향상되거나 전진성의 피해가 감소되지는 않았다.⁴⁾ 이는 동일 질량의 분진을 가정할 때 입자의 직경이 작아질수록 저감효율이 떨어지며, 상대적으로 분진의 표면적이 커져 중금속이나 가스상 오염물질의 흡착이 용이해지기 때문이다.⁵⁾

또한, 이와 같은 유해성 분진은 호흡기를 통해 폐에 침착되어 폐암 등의 질병을 유발하기도 한다.^{6,7)} 미국의 경우 1987년 주요 대기오염물질의 기준으로 TSP 대신 공기역학적 직경 $10\mu\text{m}$ 이하인 PM_{10} 을 기준으로 채택하였고, 1996년에는 $\text{PM}_{2.5}$ 에 대한 기준을 공표하여 분진의 입경별 농도를 중요시하기 시작하여 인체에 대한 피해를 줄이는데 노력하고 있지만 이에 대한 연구는 미미한 실정이다. 이와 동시에 입경에 따른 분진의 화학성분에 관한 연구를 통해 분진 오염원의 합리적인 통제제를 하고 있다. 지난 몇 년 동안 분진에 대한 많은 연구와 역학적 연구에서 분진이 여러 기관지계의 병을 유발할 수 있음이 보고되었다. 오랫동안 폐렴으로 인한 사망률 증가, 호흡기계 환자들의 입원 증가, 그리고 호흡기계 병의 장기적인 증가에 따른 대기오염 기준도 달라졌다. 일반적으로 입자의 직경이 $0.01\sim 2.5\mu\text{m}$ 인 분진에 의해 20~60% 정도 호흡기계 질병을 유발할 수 있다고 알려져 있다.⁸⁾ 또한 PM_{10} , $\text{PM}_{2.5}$, $\text{PM}_{2.5-10}$ 을 이용해 질병율과 사망률을 나타내고 있으며, 그 예로 상대 위험도(RR; risk factor)를 이용하고 있다. 미국 6개 도시의 조사에 의하면, PM_{10} 이 $10\mu\text{g}/\text{m}^3$ 일 때 일별 사망률이 약 0.8% 증가했고, $\text{PM}_{2.5}$ 가 $10\mu\text{g}/\text{m}^3$ 일 때 1.5%, $25\mu\text{g}/\text{m}^3$ 일 때는 2~6%가 증가하였다는 보고가 있다.⁹⁾

이 논문에서는 분진의 입경별 농도 포집이 가능한 9단 Cascade Impactor(Andersen sampler: Model Mark II)와 PM_{10} Highi-vol air sampler(Sierra-Anderson/GMW, Model 321b)를 사용하여 분진의 입경별 농도 및 분진 중의 Zn, Cd, Cr, Fe, 그리고 Pb 등 중금속의 입경별 농도 분포와 계절별 분진 및 중금속의 농도 변화를 비교 검토하고 각 단별 총황효율을 산출함을 목

적으로 하였다.

II. 실험방법

1. 시료의 포집방법 및 위치

본 연구는 군산대학교 소룡캠퍼스에서 1999년 2월부터 8월까지 조사되었다. 분진과 금속원소의 농도분석을 위한 장비는 대기 부유분진의 입경별 포집을 위하여 9단 Cascade Impactor를 사용하고, 중금속의 농도는 AAS를 사용하였다. 포집장소는 전라북도 군산시 소룡동에 위치하고, 이 위치를 중심으로 북-북서 방향에 대단위 국가공단이 형성되어 있으며, 그 상당 쪽에 금강과 황해가 위치해 있다. 공기역학적 입경별로 분진을 포집할 수 있는 Cascade Impactor는 $28.3\text{ l}/\text{min}$ 의 유속으로 가동되며, 여지는 미량원소의 분석에 적합한 직경 81 mm , pore 크기 $0.45\mu\text{m}$ 의 유리섬유여지(glass fiber filter: 미국 Gelman Science사: Model 934-AH)를 사용했다. 여지는 시료 포집 전후 3일간 항온, 항습상태의 건조장치(dessicator; Shinai R-700C)에 보관하여 항량이 되게 하며 감도가 0.01 mg 인 전자저울(OHAUS Co.: Model AP250D-0)로 칭량하여 여과전후의 중량차로 분진의 농도를 산출한다.

Cascade Impactor는 low-volume air sampler(LVAS)로서 유속은 $28.3\text{ l}/\text{min}$ 으로 고정되었으며 통과된 공기량은 매일 유속변화를 측정하여 군산대학교 대기오염연구실에서 개발한 프로그램을 통해 산출되고 있다. 여지의 교체는 7일에서 30일 간격으로 대기오염 부하량에 의해 $25\text{ l}/\text{min}$ 이하로 유속이 떨어질 때 교체하였다. 본 연구에 사용한 포집기 각 단의 기공(pore) 크기는 F단부터 0단까지 점진적으로 커져 F단은 마지막 단으로 backup 필터에는 공기역학적 직경이 $0.43\mu\text{m}$ 보다 작은 입자가 포집되며, 7단은 $0.43\sim 0.65\mu\text{m}$, 6단은 $0.65\sim 1.1\mu\text{m}$, 5단은 $1.1\sim 2.1\mu\text{m}$, 4단은 $2.1\sim 3.3\mu\text{m}$, 3단은 $3.3\sim 4.7\mu\text{m}$, 2단은 $4.7\sim 5.8\mu\text{m}$, 1단은 $5.8\sim 9.0\mu\text{m}$, 0단은 $9.0\sim 10.0\mu\text{m}$ 인 입자가 포집된다. Cascade impactor에 사용된 여지는 LVAS에 사용되는 유리섬유여지로 미량원소의 분석에 적절한 직경 81 mm , pore 크기 $0.45\mu\text{m}$ 이다.

군산시는 면적이 376.35 km^2 로 주변에 위치한 국가공단과 향후 새만금 개발사업으로 인한 대기오염 문제가 점차 심화될 것으로 예상되며, 중국에서 유입되는 분진 및 중금속은 여러 인자에 의해 그 피해 정도가 다르게 나타날 것으로 예상되는 지역이다(Fig. 1). 본 연구에서 분석한 금속원소의 수는 5개이며, AAS로는 standard burner를 사용하여 Zn, Cd, Cr, Fe, Pb 등 특징적인 5

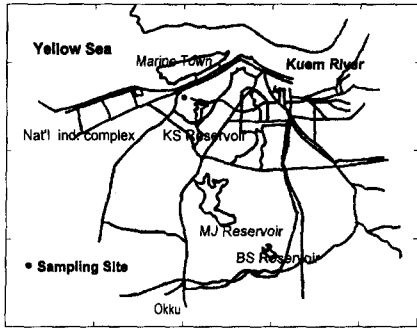


Fig. 1. Map of sampling site in Kunsan.

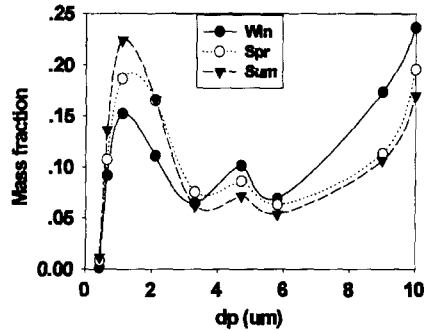


Fig. 2. The mass fraction by aerodynamic diameter in PM₁₀.

개 원소 분석을 목표로 한다.

III. 결과 및 고찰

1. 대기 중 부유분진 및 중금속의 계절에 따른 입경별 농도 분포

입경별 분진 포집기인 cascade impactor를 이용하여

포집한 7개 set의 분진 농도는 Table 1에 나타내었다. 7개월간 포집한 분진의 각 단별 평균 농도는 7개 set의 가중 평균치이다. PM₁₀의 분율을 보면, 3계절 모두 2.1 ~ 3.1 μm(4단)를 기준으로 미세입자와 조대입자로 나뉘어지는 쌍극분포(bimodal distribution)를 보였으며(Fig. 2), 이는 대기 부유분진의 공기역학적 직경이 약 2.5 μm를 중심으로 미세입자와 거대입자로 나뉘어지는

Table 1. The concentration of particulate matters and metallic elements bystages

Stage	F	7	6	5	4	3	2	1	0	Fine	Coarse	Total	F/T	
Size(μm)	<0.43	0.43-0.65	0.65-1.1	1.1-2.1	2.1-3.3	3.3-4.7	4.7-5.8	5.8-9.0	9.0-10	<2.1	≥2.1			
PM ₁₀ (μg/m ³)	Win	0.09	5.86	9.73	7.08	4.10	6.47	4.41	11.10	15.10	22.76	41.17	63.93	0.35
	Spr	0.59	7.53	13.10	11.61	5.28	6.03	4.41	7.94	13.71	32.83	37.38	70.20	0.47
	Sum	0.53	6.22	10.24	7.58	2.80	3.27	2.45	4.86	7.76	24.57	21.13	45.69	0.53
	Avg	0.40	6.53	11.02	8.76	4.06	5.25	3.75	7.96	12.09	26.72	33.23	59.94	0.45
Zn (ng/m ³)	Win	7.50	10.13	19.77	16.28	13.33	7.16	7.11	10.81	18.47	53.67	56.88	110.55	0.49
	Spr	0.03	25.45	32.73	45.46	25.79	32.83	9.87	8.40	12.21	103.68	89.11	192.78	0.53
	Sum	8.75	11.65	46.10	22.13	8.92	14.12	3.16	3.71	8.30	88.64	39.21	127.85	0.65
	Avg	5.43	15.74	32.87	27.96	16.01	18.04	6.71	7.64	12.99	82.00	61.40	143.39	0.57
Cd (ng/m ³)	Win	0.00	0.13	0.35	0.39	0.17	0.13	0.04	0.09	0.00	0.87	0.44	1.31	0.67
	Spr	0.09	0.23	0.35	0.51	0.23	0.13	0.09	0.04	0.04	1.18	0.54	1.72	0.68
	Sum	0.16	0.32	0.19	0.38	0.16	0.12	0.09	0.08	0.03	0.89	0.47	1.36	0.61
	Avg	0.08	0.23	0.30	0.43	0.19	0.13	0.07	0.07	0.02	1.03	0.48	1.52	0.68
Cr (ng/m ³)	Win	0.04	7.52	4.55	4.24	5.38	4.41	3.19	2.66	8.13	16.34	23.77	40.12	0.41
	Spr	0.50	2.99	2.71	1.90	0.93	1.23	0.67	5.50	4.74	8.10	13.07	21.17	0.41
	Sum	3.75	1.28	2.44	6.06	1.06	3.19	3.71	6.03	2.61	13.53	16.60	30.13	0.42
	Avg	1.43	3.93	3.23	4.06	2.46	2.94	2.52	4.73	5.16	12.66	17.82	30.47	0.41
Pb (ng/m ³)	Win	0.00	7.87	14.42	18.79	9.18	6.56	3.93	5.68	5.68	41.08	31.03	72.11	0.56
	Spr	1.31	11.09	20.13	26.99	12.11	6.86	3.94	2.77	3.65	59.52	29.32	88.85	0.67
	Sum	1.45	6.68	9.56	17.08	6.51	4.91	2.46	1.60	2.62	34.78	17.43	55.20	0.68
	Avg	0.92	8.45	14.70	20.96	9.27	6.11	3.44	3.35	3.98	45.13	26.15	71.28	0.63
Fe (ng/m ³)	Win	19.23	25.13	64.24	65.60	111.22	187.66	133.95	229.66	31.07	174.20	693.56	867.75	0.20
	Spr	13.66	37.54	36.66	71.38	100.36	144.64	114.64	189.88	311.79	159.24	861.30	1020.5	0.16
	Sum	30.68	47.99	40.33	72.71	94.60	91.51	102.33	95.51	208.45	192.05	455.74	784.44	0.24
	Avg	21.19	36.89	47.08	69.90	102.06	141.27	116.97	171.68	183.77	175.05	715.75	890.81	0.20

쌍극분포를 보인다는 연구 결과와 일치하고 있다.¹⁾ 또한, 2.1~3.1 μm범위 이하인 분진의 평균 질량 분율은 51.4%로 미세입자가 차지하는 부분이 거대입자가 차지하는 부분과 유사하게 나타나 군산지역은 인위적인 오염원과 자연적인 오염원의 영향이 비슷하게 존재하는 지역이라고 사료된다.

2. 대기 중 부유분진 및 중금속의 입경별 계절 농도

Table 1을 보면, 계절별 PM₁₀의 농도는 평균 59.9 μg/m³였으며, 계절별로 보면 봄철이 70.7 μg/m³, 겨울철이 63.9 μg/m³, 그리고 여름철이 45.7 μg/m³로 봄철의 농도가 가장 높았다. 이는 우리나라의 연간 기준인 80 μg/m³에는 미치지 못하였고, 미국의 환경기준인 50 μg/m³에는 여름철을 제외하고는 초과하였다. 그리고 금속원소 중 인체의 면역력과 염색체의 변화, 그리고 종양의 성장을 억제하는 Zn은 봄철 192.8 ng/m³, 여름

철 127.9 ng/m³, 겨울철 110.6 ng/m³로 평균 143.4 ng/m³을 나타내 봄철의 농도가 겨울철에 비해 1.74배 높았고, 돌연변이원성과 임파구의 염색체의 변화를 초래하는 Cd은 봄철 1.72 ng/m³, 여름철 1.36 ng/m³, 겨울철 1.31 ng/m³로 평균 1.52 ng/m³을 나타내 봄철의 농도가 겨울철에 비해 1.31배 높았고, 형태학적 변이와 돌연변이원성 및 혈소판의 응집을 나타내는 Cr은 겨울철 40.1 ng/m³, 여름철 30.1 ng/m³, 봄철 21.2 ng/m³로 평균 30.5 ng/m³을 나타내 겨울철의 농도가 봄철에 비해 1.89배 높았고, 조혈기능 장애, 염색체 분체의 변화를 초래하는 Pb은 봄철 88.9 ng/m³, 겨울철 72.1 ng/m³, 여름철 55.2 ng/m³로 평균 71.3 ng/m³을 나타내 봄철의 농도가 여름철에 비해 1.61배 높았다. 그리고 태아세포의 형태학적 돌연변이를 유발하는 Fe은 봄철 1020.5 ng/m³, 겨울철 867.8 ng/m³, 여름철 784.4 ng/m³로 평균 890.8 ng/m³을 나타내 봄철의 농도가 여름철에

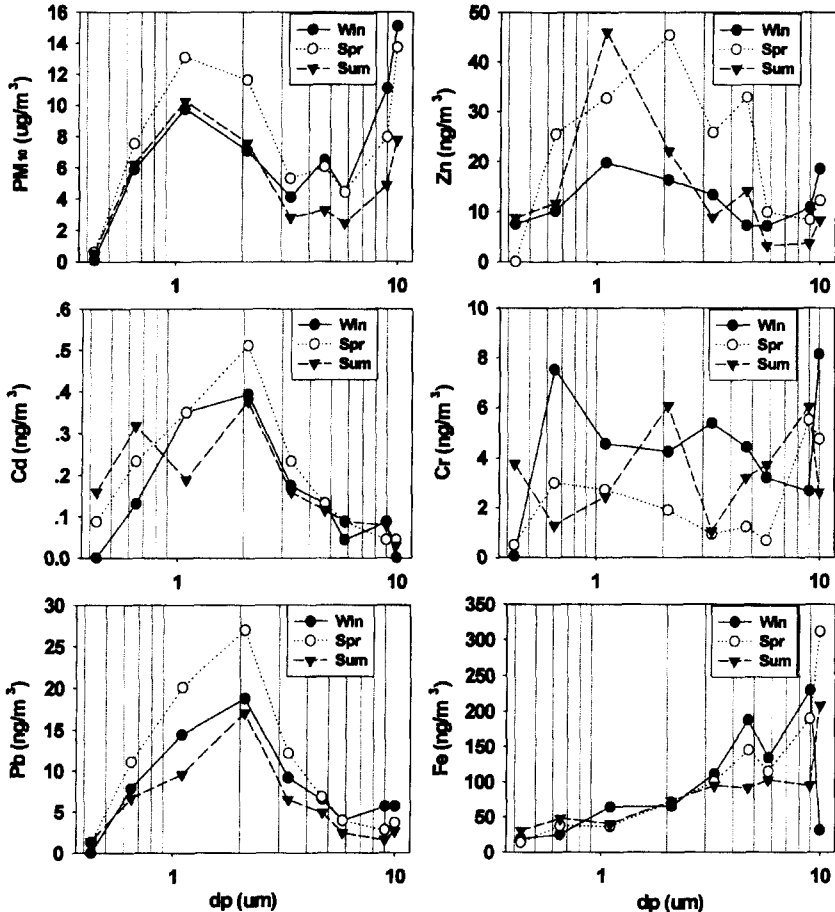


Fig. 3. The concentrations of PM₁₀ and metallic elements by seasons.

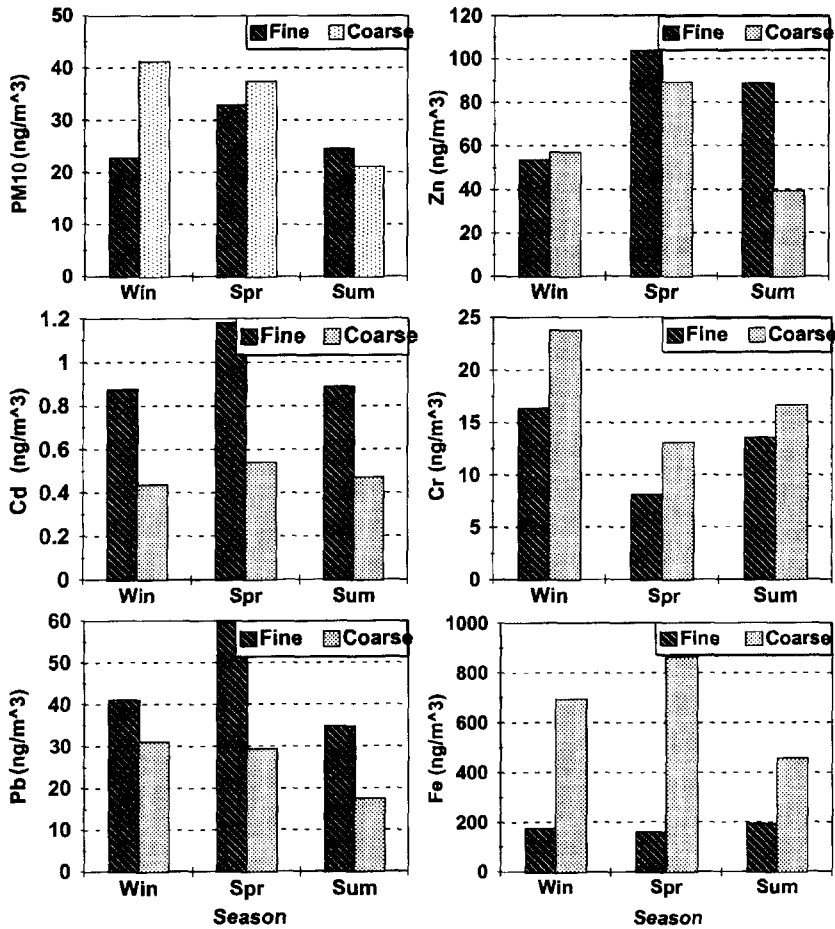


Fig. 4. The distributions of PM₁₀ and metallic elements of fine and coarse area by seasons.

비해 1.3배 높게 검출되었다. 금속원소들의 계절별 농도는 Zn, Cd, Pb이 봄철이 가장 높게 나타났다. 그리고 계절별로 분진 및 금속원소들의 입경별 농도를 보면, PM₁₀의 경우는 확실한 이산형 분포를 보이는 반면 금속원소들은 오염원에 의한 분포를 하고 있다. 즉 Zn, Cd, Cr 그리고 Pb은 미세영역에 치우쳐 있어 인위적 기원에 의한 물질로 알 수 있었으며, 자연적 기원에 의한 물질인 Fe은 조대입자 영역에 치우쳐 있었다.

3. 대기 중 부유분진 및 중금속의 계절별 미세 / 거대입자 분포

대기 중 PM₁₀ 및 중금속의 농도 분포를 공기역학적 직경 2.1 μm 이하인 미세입자 영역과 2.1 μm 이상의 조대입자 영역으로 구분하고 계절별로 각각의 농도분포를 살펴본 결과(Fig. 4), PM₁₀, Cr, Fe의 거대입자 영역의 농도가 미세입자 영역의 농도 보다 높게 분포하

였고, Zn, Cd, Pb의 농도 분포는 미세입자 영역이 조대입자 영역에 비해 높은 농도 분포를 보였다.

또한 총량에 대한 미세입자 영역의 비율을 보면 (Table 1), PM₁₀, Cr, Fe의 비율은 각각 0.45, 0.41, 0.20으로 미세입자 영역이 차지하는 비율이 거대입자 영역에 비해 낮음을 알 수 있고, Zn, Cd, Pb의 비율은 0.57, 0.68, 0.63으로 미세입자 영역에 많은 양이 존재함을 알 수 있다. 이로 미루어 보아 인위적 기원에 의한 물질은 Zn, Cd, Pb임을 알 수 있고, PM₁₀, Cr은 중간영역에, 그리고 Fe은 조대입자 영역에 많이 존재한다고 사료된다.

4. 대기 중 부유분진 및 중금속의 입경분포 계절 농도 입경분포의 특성을 설명할 때 입경구분으로 나누어 각각의 구분에서 입자의 농도를 구하여 입경분포의 분포 현상을 쉽게 파악할 수 있다. 그러나 입경 구분의

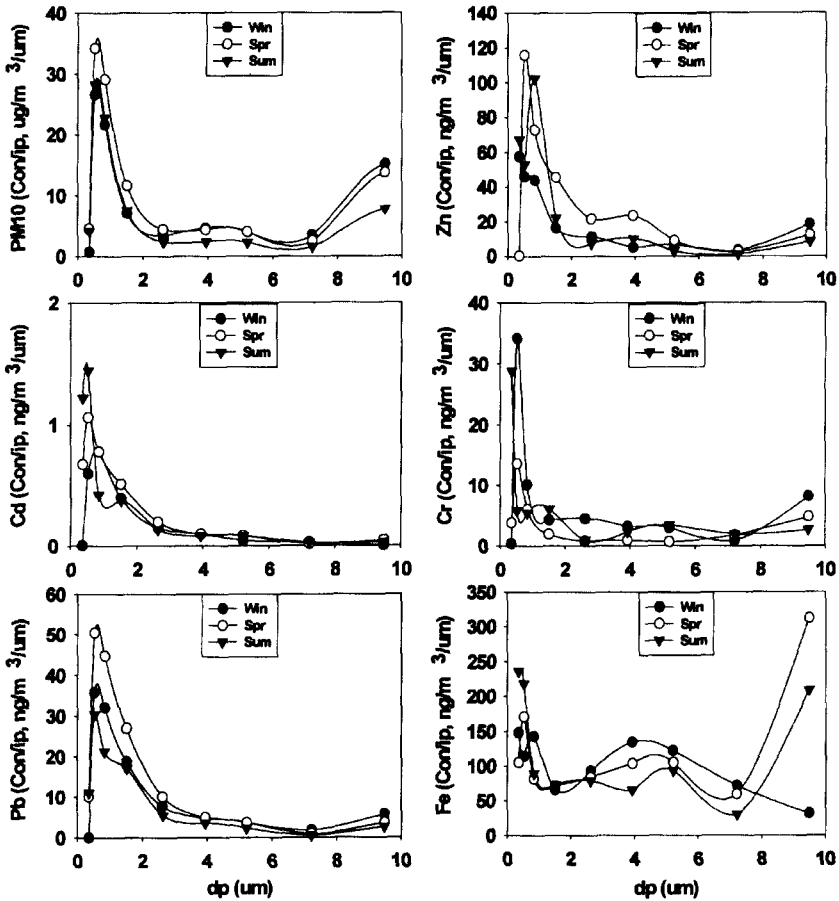


Fig. 5. The frequency distribution curves of PM₁₀ and metallic elements.

높이가 그 입경구분의 폭에 좌우되기 때문에 그다지 적당한 표현 방법이라 할 수 없다. 따라서 각 구분의 입자농도를 그 구분의 폭으로 나누어 일정 간격으로 규격화시킨 그래프로 나타내면 간격이 서로 다르더라도 서로 비교하기가 쉬운데 이를 빈도분포함수 또는 확률 밀도함수라고 한다.

Fig. 5를 보면, Fig. 3에서와는 달리 Fe을 제외한 PM₁₀과 Zn, Cd, Cr, Pb의 분포가 미세입자 영역에 치우친 비정규분포인 것을 알 수 있고, 이는 인위적인 기원 물질임을 나타내며, Fe은 거대입자 영역에 속하므로 자연적 오염원에서 배출된 것을 의미한다.

그리고 대수정규분포를 입경분석에 적용하는 경우 대수확율지를 사용하여 누적빈도의 축을 확률축(중앙값 부근에서 백분율 눈금을 압축하여 양쪽 끝부분에서 확대한것)으로 변환해 대수정규분포의 누적분포를 plot하였을 때 Fig. 6처럼 직선으로 나타낼 수 있다. 이 그림

에서 직접 중앙경을 읽어낼 수 있고, 그 표준편차는 누적확률 84.1%에 대응하는 직경과 중앙경의 비로 나타내어진다. 여기서 계절별 분진의 입경별 백분율을 plot하면 직선이 형성되고 기하평균과 기하표준편차를 구한 결과, 겨울철에는 $d_g = 3.6 \mu\text{m}$, $\sigma_g = 2.31 \mu\text{m}$, 봄철에는 $d_g = 3.0 \mu\text{m}$, $\sigma_g = 2.49 \mu\text{m}$, 그리고 여름철에는 $d_g = 2.7 \mu\text{m}$, $\sigma_g = 2.03 \mu\text{m}$ 으로 나타나 여름철이 다른 계절에 비해 입경이 작은 입자들이 포집됨을 알 수 있다.

5. 각 단별 계절별 포집효율

100% 집진효율을 얻을 수 있는 최소 직경은 가스의 점도, 유입구의 폭과 비례관계에 있으며, 유효회전수, 유입가스의 속도, 입자와 가스와의 밀도 차와는 반비례 관계가 있다. 실제 집진효율은 이와 같은 변수들에 의존한다. 하지만, 각 단의 최소직경 보다 더 큰 입자는

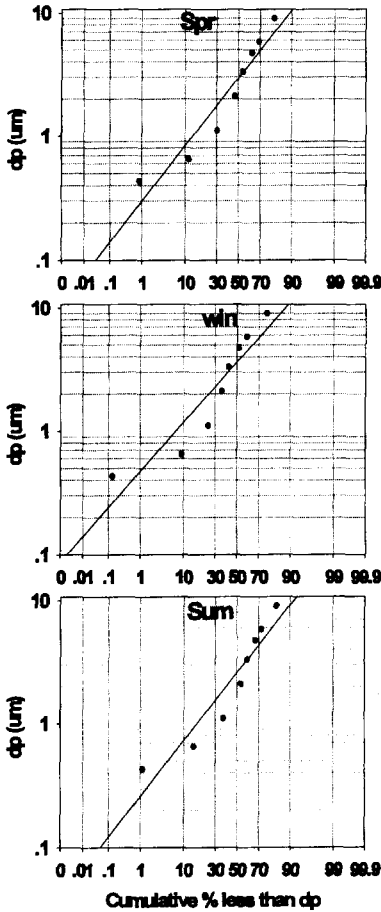


Fig. 6. The log probit distribution by seasons.

100% 효율로 집진될 것으로 예측되나 이는 사실과 다르다. 즉, 실제로 입경이 커도 통과하는 입자가 있고, 입경이 작아도 여지에 포집되는 입자가 존재한다. 따라서 Lapple¹¹에 의해 개발된 준 경험식은 50% 집진 효율을 갖는 입자의 직경, 즉 d_{pc} , 50% 절단직경(cut diameter)을 사용한다.

그 결과, 50% 절단입경은 겨울철이 3.6 μm , 봄철이 3.0 μm , 여름철이 2.7 μm 로 평균 3.1 μm 로 조사되었다.

Table 2. The efficiency of each stages by seasons

	Eff _T	d ₅₀	S-0	S-1	S-2	S-3	S-4	S-5	S-6	S-7	S-F
Win	49.63	3.60	87.41	80.11	67.48	54.48	34.84	15.13	5.23	2.11	0.99
Spr	45.93	3.00	90.91	85.29	75.18	63.28	43.50	20.43	7.36	3.01	1.41
Sum	44.50	2.70	92.51	87.75	78.90	68.03	48.73	24.06	8.93	3.69	1.74
Avg	46.69	3.10	90.28	84.38	73.95	61.93	42.36	19.87	7.17	2.94	1.38

Table 3. The total efficiency of cascade impactor by particle diameters

dp (um)	dj(um)	d ₅₀ /d _j	η_j	m _j %	η_j m _j %
0.43 <	0.365	8.493	0.014	0.713	0.010
0.43-0.65	0.540	5.741	0.029	11.162	0.328
0.65-1.1	0.875	3.543	0.072	18.765	1.346
1.1-2.1	1.600	1.938	0.198	14.732	2.927
2.1-3.3	2.700	1.148	0.424	6.695	2.835
3.3-4.7	4.000	0.775	0.619	8.616	5.336
4.7-5.8	5.250	0.590	0.740	6.177	4.568
5.8-9.0	7.400	0.419	0.844	13.095	11.050
9.0-10	7.500	0.326	0.903	20.045	18.095
Total					46.497

또한, 특정입경을 갖는 분진의 집진효율(η_j)¹¹은 $\eta_j = \frac{1}{1 + (d_{pc}/d_{pj})^2}$ 으로 계산되며,

여기서, η_j 는 j번째 입경범위의 집진효율, d_{pj} 는 j번째 입경범위의 직경이다.

Table 2에서 보면 미세입자를 포집하는 단으로 갈수록 집진효율이 낮아지는 것을 알 수 있고, 거대입자를 포집하는 단에서는 포집효율이 매우 높음을 알 수 있다.

그리고 Cascade Impactor의 총괄효율(η_0)은 여러 입경에 대한 각 집진효율의 가중 평균치이다.

$$\eta_0 = \sum \eta_j m_j$$

여기서, m_j = j번째 입경범위의 질량분율이다.

본 조사에서 총괄효율의 결과를 Table 2와 Table 3에 나타내었다. 계절별 총괄효율은 겨울철이 49.6%, 봄철이 45.9%, 그리고 여름이 44.5%로 평균 총괄효율은 46.5%로 각 단별 총괄효율과 비슷하게 조사되었다.

V. 결 론

본 연구에서 9단 cascade impactor를 이용해 분진을

포집하고, 포집한 분진의 입경별 농도 및 분진 중의 Zn, Cd, Cr, Fe, 그리고 Pb 등 중금속의 입경별 농도 분포, 그리고 계절별 분진 및 중금속의 농도변화를 비교 검토하고 각 단별 총 포집효율을 산출한 결과는 다음과 같다.

1. PM₁₀의 질량 분율은 3계절 모두 2.1~3.1 μm를 기준으로 미세입자와 거대입자로 나뉘어지는 쌍극분포(bimodal distribution)를 보였으며, 2.1~3.1 μm 범위 이하인 입자상 물질의 평균 질량 분율은 51.4%로 미세입자가 차지하는 부분과 조대입자가 차지하는 부분이 유사하게 나타나 군산지역은 인위적인 오염원과 자연적인 오염원의 영향이 비슷하게 존재하는 지역이라고 사료된다.

2. PM₁₀의 평균 농도는 59.9 μg/m³였으며, Zn 143.4 ng/m³을 나타내었고, Cd 1.52 ng/m³, Cr 30.5 ng/m³, Pb 71.3 ng/m³, 그리고 Fe은 890.8 ng/m³을 나타내었으며, 금속원소들의 계절별 농도는 Zn, Cd, Pb이 봄철이 가장 높게 나타났다.

3. 계절별로 분진 및 금속원소들의 입경별 농도를 보면, PM₁₀의 경우는 확실한 이산형 분포를 보이는 반면 금속원소들은 오염원에 의한 분포를 하고 있다. 즉 Zn, Cd, Cr 그리고 Pb은 미세영역에 치우쳐 있어 인위적 기원에 의한 물질로 알 수 있었으며, 자연적 기원에 의한 물질인 Fe은 조대입자 영역에 치우쳐 있었다.

4. 총량에 대한 미세입자 영역의 비율은 PM₁₀, Cr, Fe의 비율은 각각 0.45, 0.41, 0.20으로 PM₁₀을 제외하고는 미세입자가 차지하는 비율이 거대입자에 비해 낮음을 알 수 있고, Zn, Cd, Pb의 비율은 0.57, 0.68, 0.63으로 미세입자 영역에 많은 양이 존재함을 알 수 있다.

5. 계절별로 분진의 기하평균과 기하표준편차는 겨울철 dg = 3.6 μm, σ_g = 2.31 μm, 봄철 dg = 3.0 μm, σ_g = 2.49 μm, 그리고 여름철 dg = 2.7 μm, σ_g = 2.03 μm으로 나타나 여름철이 입경이 작은 입자들이 포집됨을 알 수 있다.

6. 거대입자를 포집하는 단으로 갈수록 집진효율이 높

아졌고, 미세입자를 포집하는 단에서는 포집효율이 매우 낮았다. Cascade Impactor의 계절별 총괄효율은 겨울철이 49.6%, 봄철이 45.9%, 그리고 여름이 44.5%로 평균 총괄효율은 46.5%로 조사되었다.

사 사

이 논문은 1999년 군산대학교 수산과학연구소에서 일부 출연한 학술연구비에 의하여 연구되었습니다.

참고문헌

- Whitby, K. T., Husar, R. B. and Liu, B. Y. H.: The aerosol size distribution of L. A. smog, *J. Col. & Inter. Sci.*, **39**, 203, 1972.
- Emison, G. A.: Overview of PM₁₀ police and regulation, An APCA/EPA International Specialty Conference, 1988.
- Kenneth W, Warner C. F, Wayne T. D, Air pollution- its origin and control : 3rd ed., Addison Wesley, 24-26, 1998.
- Ferris, B. G.: Health effect of exposure to low levels of regulated air pollutants, A critical review, *JAPCA*, **28**, 482, 1978.
- Saffiotti, U.: Experimental studies of the conditions of exposure to carcinogens for lung cancer induction, *JAPCA.*, **15**, 23, 1965.
- Fennelly, P. F.: The origin and influence of airborne particulates, *American Scientist*, **64**, 46, 1976.
- Linton, R. W., Loh, A. and Natusch, D. F. S.: Surface predominance of trace element in airborne aerosol, *Nature*, **268**, 518, 1977.
- U.S. EPA: National Air Quality and Emissions Trends Report, EPA-454/R-97-013, Research Triangle Park, NC 27711, 1996b.
- Kenneth, W, Warner, C. F and Davis, W. T.: "Air pollution- Its origin and control", ed. Addison-Wesley Longman Inc., 24-25, 1998.
- Dzubay, T. G. and Stevens, R. K.: Ambient air analysis with dichotomous sampler and X-ray fluorescence spectrometer, *Env. Sci. Technol.*, **3**, 913, 1969.
- Lapple, C. E.: "Processes use many collector types," *Chemical Engineering*, **58**, 5, May, 1951.