

미세먼지(PM₁₀)와 초미세먼지(PM_{2.1})의 농도와 폐포 침착율 조사

김성천[†]

군산대학교 환경공학과

Investigation of the Concentration of PM_{2.1} & PM₁₀ and Alveolar Deposition Ratio

Seong Cheon Kim[†]

Department of Environmental Engineering, Kunsan National University

ABSTRACT

Objectives: In this study, a nine-stage cascade impactor was used to collect dust, and the concentration of PM_{2.1} & PM₁₀ and alveolar deposition ratio were investigated.

Methods: This study was conducted at Kunsan National University from May to June 2016. A nine-stage Cascade Impactor was used to analyze the concentrations of fine and ultrafine dust and to estimate the alveolar deposition rate by particle size of atmospheric dust particles. The pore size of each stage of the collector used in this study gradually increased from F to 0, with the F-stage as the last stage.

Results: The mass fraction of PM showed a bimodal distribution divided into PM_{2.1} & PM₁₀ based on 2.1-3.1 μm. The average mass fraction of particulate matter in the range of 2.1-3.1 μm was 44%, and the area occupied by PM_{2.1} was similar. Therefore, the Gunsan area is considered to be a region where there are similar effects from anthropogenic and natural sources.

Conclusion: Dust collecting efficiency increased with the stage of collecting fine dust, and the efficiency of collection was very low at the stage of collecting ultra-fine dust. The seasonal overall efficiency of the Cascade Impactor was 44% in spring and 37.4% in summer, and the average overall efficiency was 40.7%. The alveolar deposition rate of PM_{2.1}/PM₁₀ during the sampling period was estimated to be about 75% deposited in the alveoli.

Keywords: PM_{2.1} & PM₁₀, cascade impactor, efficiency of collection, alveolar deposition rate

I. 서 론

미세먼지는 7개 주요 대기오염물질 중의 하나로 지난 삼십 년 동안 물리, 화학적 특성에 관해 여러 연구가 진행되고 있다. 미세먼지가 인체 및 동식물에 미치는 영향에 대한 여러 연구를 통해 10 μm 이하의 입자인 미세먼지(PM₁₀)과 2.5 μm 이하의 초미세먼지(PM_{2.5})가 인체에 더 유해한 영향을 미치고 있

음이 밝혀졌다.^{1,2)}

먼지는 일반적으로 2가지로 구분한다. 즉, 부유하고 있는 입경이 10 μm 보다 큰 거대입자와 입경이 10 μm 보다 작은 미세입자로 구분하고, 인체에 유입되는 먼지를 0~100 μm인 먼지를 흡입성먼지(IPM; Inhalable particulate mass), 폐기도 및 폐기관지에 침착되었을 때 독성을 나타내는 입자상물질로 50%가 침착되는 평균입자의 크기가 10 μm인 흉곽성먼

[†]Corresponding author: Department of Environmental Engineering, Kunsan National University, 558 Daehak-ro, Kunsan, Korea, Tel: +82-63-469-1875, Fax: +82-63-469-4964, E-mail: ksc@kunsan.ac.kr
Received: 09, March, 2019 Revised: 29, March, 2019 Accepted: 11, April, 2019

지(TPM; Thoracic particulate mass), 폐포에 침착될 때 독성을 나타내는 크기로서 평균입자의 크기는 4 µm인 먼지를 호흡성먼지(RPM; Respirable particulate mass)라고 한다. 보통 먼지의 크기는 0.001~500 µm 정도이며, 보통 먼지 직경이 10 µm 이하일 경우를 PM₁₀이라 하고, 2.5 µm 이하인 먼지를 PM_{2.5}라고 한다. PM₁₀과 PM_{2.5}에 대한 연구는 최근 들어 매우 활발한 상태이다.³⁾

현재 우리나라의 먼지에 대한 대기환경기준은 1993년 신설된 공기역학적 직경 10 µm 이하인 PM₁₀ 기준은 연평균 50 µg/m³ 및 일평균 100 µg/m³이며, 미국에서 1996년에 신설된 초미세먼지의 대기질 기준으로 공기역학적 직경이 2.5 µm 이하인 PM_{2.5}의 기준을 신설하였으며, 우리나라는 2011년에 PM_{2.5}의 기준을 만들었고, 일평균 35 µg/m³, 년 평균 15 µg/m³ 이하로 규정하고 있다. 영국의 PM₁₀ 기준은 24시간 평균 50 µg/m³으로 강화하여 분진에 의한 건강상 피해를 규제하고 있으나, 각국이 미세먼지에 대한 효율적인 제어가 어려운 실정이다. 입자의 크기를 고려하지 않은 총부유먼지(TSP) 기준은 먼지의 총 질량만을 저감시키는 기준치로서 2001년에 폐지되었고, 인간의 건강 및 복지 등의 관점에서 볼 때, PM₁₀ 및 PM_{2.5}의 기준이 의미가 있다. 대기오염물질 중 미세먼지 및 초미세먼지는 대기오염에 큰 영향을 주는 인자이며, 먼지 자체뿐만 아니라 안개나 유해물질과 결합되어 악영향을 끼친다. 특히 0.1~1.0 µm 범위의 극초미세먼지와 2.5 µm 이하의 초미세먼지는 화석연료의 연소와 차량의 배출가스, 석탄화력발전소 등에 의한 인위적 오염원에서의 배출과 가스상에서 입자상으로 변환(gas to particle conversion)하여 응축된 2차 입자상 오염물질로서 초미세먼지로 변환되어 입자 표면적의 증가로 그 표면에 유해한 무기물, 유기물을 흡착시켜 폐 깊숙이 흡입될 때 인간 및 동물에 많은 피해를 주고, 국경을 넘어선 장거리 이동으로 오염이 안된 지역까지 피해를 줄 있으며, 또한 가시광선을 산란 및 흡수시켜 시정장해를 유발 할 수 있다.

먼지에 관한 초기 연구 단계에서는 총부유먼지(Total suspended particulates; TSP)의 중량농도 분포와 이화학적 특성에 중점을 두었으며, 먼지 저감 정책 역시 TSP중량 농도에 초점을 맞추어 시행되었다. 그러나 TSP의 저감정책이 성공을 거둔 선진국

의 경우 새로운 의견이 생기게 되었다. 즉, TSP의 농도가 감소하여도 대기질이 향상되거나 건강상의 피해가 감소되지는 않았다.⁴⁾ 이는 질량이 동일한 먼지를 비교할 때, 입경이 작아질수록 저감효율은 낮아지며, 상대적으로 먼지의 표면적이 커져 중금속이나 가스상 오염물질의 흡착이 용이해지기 때문이다.⁵⁾

또한, 이와 같은 유해물질이 포함된 초미세먼지는 호흡시 폐에 침착되면 폐질환 등의 질병을 유발하기도 한다.^{6,7)} 미국은 1987년에 대기오염물질 기준으로 TSP 대신 공기역학적 직경 10 µm 이하인 PM₁₀을 기준으로 채택했고, 1996년에는 PM_{2.5}에 대한 기준을 공표하여 먼지의 입경별 농도를 중요시하기 시작하여 인체에 대한 피해를 줄이는데 노력하고 있지만 이에 대한 연구는 진행 중 이다. 이와 동시에 입경에 따른 먼지의 화학성분에 관한 연구를 통해 먼지 오염원의 합리적인 통제를 하고 있다. 지난 몇 년 동안 먼지에 대한 많은 연구와 역학적 연구를 통해서 먼지가 기관지계 병들을 유발할 수 있음이 보고되었다. 오랫동안 폐렴으로 인한 사망률 증가, 호흡기계 환자들의 증가, 그리고 호흡기계 병의 장기적인 증가에 따른 대기오염 기준도 달라졌다. 한편, 입자의 직경이 0.01~2.5 µm인 초미세먼지에 의해 20~60% 정도 호흡기계 질병을 유발 한다.⁸⁾ 또한 PM₁₀, PM_{2.5}, PM_{2.5-10}을 이용해 질병율과 사망률을 나타내고 있으며, 그 예로 상대 위험도(RF; risk factor)를 이용하고 있다. 미국의 6개 도시의 조사결과를 보면, PM₁₀이 10 µg/m³일 때 일별 사망률이 약 0.8% 증가했고, PM_{2.5}가 10 µg/m³일 때 1.5%, 25 µg/m³일 때는 2~6%가 증가했다는 보고도 있다.⁹⁾

이 논문에서는 입경별 먼지 농도를 조사하기 위해 9단 Cascade Impactor (andersen sampler: Model Mark II)를 사용하여 먼지의 입경별 농도 분포와 계절별 미세먼지, 초미세먼지 농도 변화를 비교 검토하고 각 단별 총괄효율을 산출 하였다.

폐포의 침착율의 경우 입자의 흡입성은 입자의 화학적 조성 및 호흡기 내의 침착 부위에 따라 다르다. 따라서 에어로졸의 위험성을 적절히 평가하기 위해서는 입자가 어느 곳에 어떻게 침착하는지에 대한 사항은 매우 중요하다. 폐포부가 아닌 기도 표면에서의 입자 침착은 이 부위의 점막에서의 섬모운동으로 대략 수 시간 만에 호흡기계 밖으로 제거된다. 그러나 폐포부에 침착한 불용성 입자의 제거는 매우

느리고 수개월 이상이나 걸린다. 한편 수용성 입자는 폐포막을 빠져나가 혈액 증으로 용해되어 들어간다. 그러나 규산 같은 섬유질 입자는 일반적인 입자의 제거기능을 파손시키거나 섬유증의 원인이 되기도 한다. 또한, 이렇게 폐포부까지 도달한 호흡성먼지는 그 안에 Pb, Cd, Cr, Ni, As 등의 중금속 및 유기화합물들과 같은 각종 유해물질을 포함하고 있으며, 인체 암 등 수많은 질병의 원인이 되므로 보건학적 관점에서 볼 때 매우 중요하다.

본 연구의 목적은 군산지역에서 미세먼지인 PM₁₀과 초미세먼지인 PM_{2.5}의 농도와 폐포침착율을 추정하는데 있다.

II. 실험방법

1. 시료의 포집방법 및 위치

본 연구는 군산대학교에서 2016년 5월부터 6월까지 조사되었다. 미세먼지와 초미세먼지의 농도분석과 폐포 침착율을 추정을 위한 장비는 대기 부유분진의 입경별 포집을 위하여 9단 Cascade Impactor를 사용하였다. 포집장소는 군산대학교 해양과학대학 옥상에 위치하고, 이 위치를 중심으로 북-북서 방향에 대단위 국가공단이 형성되어 있으며, 그 상단쪽에 금강과 황해가 위치해 있다(Fig. 1). 공기역학적 입경별로 먼지를 포집할 수 있는 Cascade Impactor는 유속 28.3 L/min 가동되며, 여지는 미량원소의 분석에 적합한 직경 80 mm, pore size인 0.45 μm의 유리섬유여지(glass fiber filter: 미국 Gelman Science 사: Model 934-AH)를 사용했다. 여지는 시료 포집 전후 3일간 항온, 항습상태의 건조장치(dessicator; Shinai R-700C)에 보관하여 항량이 되게 하며 감도 0.01 mg인 전자저울(OHAUS Co.: Model AP250D-0)로 칭량하여 여과전후인 중량차로 먼지의 농도를 산출했다.

Cascade Impactor의 유속은 28.3 L/min으로 고정되었으며, 통과된 공기량은 매일 유속변화를 측정하여 대기오염연구실에서 개발한 프로그램을 통해 보정하였다. 여지의 교체는 15일 간격으로 대기오염 부하량으로 인해 25 L/min 이하로 유속이 떨어질 때 교체하였다. 본 연구에 사용한 포집기 각 단(stage)의



Fig. 1. Sampling site in Gunsan.

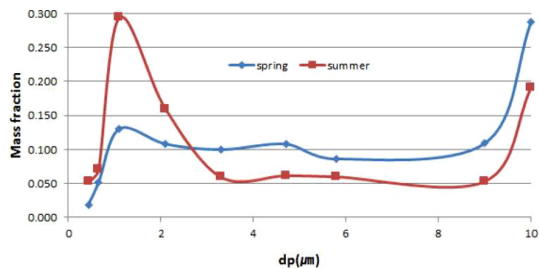


Fig. 2. Mass fraction of PM by aerodynamic diameter in spring and summer.

기공 크기는 F단부터 0단까지 점진적으로 커져 F단에는 backup 필터가 있고, 공기역학적직경이 0.43 μm보다 작은 입자가 포집되며, 7단은 0.43~0.65 μm, 6단은 0.65~1.1 μm, 5단은 1.1~2.1 μm, 4단은 2.1~3.3 μm, 3단은 3.3~4.7 μm, 2단은 4.7~5.8 μm, 1단은 5.8~9.0 μm, 0단은 9.0~10.0 μm인 입자가 포집된다. Cascade Impactor에 사용된 여지는 LVAS에 사용되는 유리섬유여지로 미량원소의 분석에 적절한 직경 81 mm, pore 크기 0.45 μm이다.

군산시는 면적이 376.35 km²로 측정 점에서 약 4 km 떨어진 공단과 향후 새만금개발 사업으로 인한 비산먼지 문제가 점차 심화될 것으로 예상되며, 중국에서 유입되는 미세먼지, 초미세먼지에 의해 그 피해 정도가 변화있게 나타날 것으로 예상되는 지역이다.

III. 결과 및 고찰

1. 대기 중 미세먼지의 계절에 따른 입경별 농도 분포

Table 1. Descriptive statistics of PM concentration in Kunsan

Stage	F	7	6	5	4	3	2	1	0	PM _{2.1}	PM _{2.1-10}	PM ₁₀	PM _{2.1} /PM ₁₀
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	-	-
2016 Spring Dust (μg/m ³)	0.687	1.849	4.679	3.877	3.583	3.877	3.092	3.910	10.306	11.091	24.768	35.859	31%
2016 Summer Dust (μg/m ³)	1.881	2.519	10.535	5.709	2.127	2.208	2.143	1.898	6.838	20.645	15.214	35.859	58%
2016 Avg (μg/m ³)	1.284	2.184	7.607	4.793	2.855	3.043	2.617	2.904	8.572	15.868	19.991	35.859	44%
2000 Spring Dust (μg/m ³)	0.59	7.530	13.100	11.610	5.280	6.030	4.410	7.940	13.710	32.830	37.380	70.200	0.470
2000 Summer Dust (μg/m ³)	0.530	6.220	10.240	7.580	2.800	3.270	2.450	4.860	7.760	24.570	21.130	45.690	0.530
2000 Avg (μg/m ³)	0.56	6.875	11.670	9.595	4.040	4.650	3.430	6.400	10.735	28.7	29.255	57.945	0.5

2. 대기 중 미세먼지(PM₁₀)와 초미세먼지(PM_{2.1})의 입경별 계절 농도

Table 1을 보면, 본 조사는 5월을 봄철로 하고, 6월을 여름철로 하여 조사하였다. 계절별 PM₁₀의 농도는 평균 35.9 μg/m³이었으며, 봄철이 35.86 μg/m³, 여름철이 35.86 μg/m³로 봄철과 여름철의 농도가 같았다. 그러나 저자가 2000년에 조사한 결과¹²⁾와는 낮은 결과를 보였다. 이번 조사 결과, 우리나라의 연

간 기준인 50 μg/m³에는 미치지 못하였고, 미국의 대기환경기준인 50 μg/m³에도 미치지 못하였다.

3. 대기 중 미세먼지와 초미세먼지의 계절별 비율 분포

대기 중 PM₁₀ 농도 분포를 공기역학적 직경 2.1 μm 이하인 초미세먼지와 2.1 μm 이상의 미세먼지 영역으로 구분하고 계절별로 각의 농도분포의 비율(PM_{2.1}/PM₁₀)을 살펴본 결과(Fig. 4), 2016년 봄철에 31%,

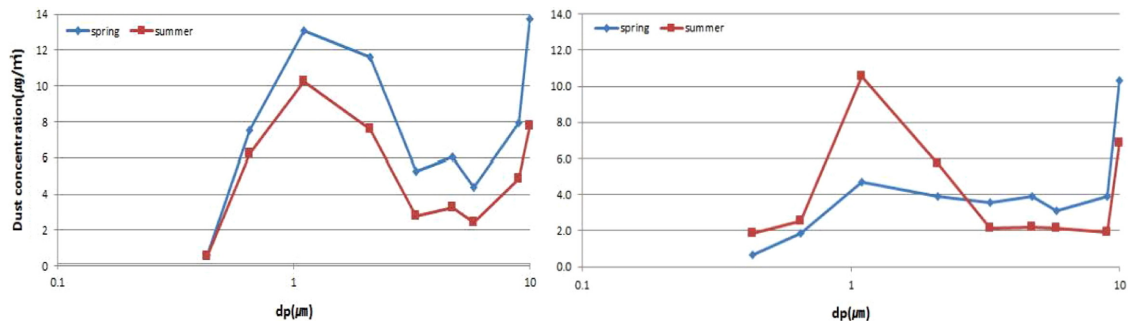


Fig. 3. Size distribution of PM mass concentration in 2000 and 2016 in Kunsan.

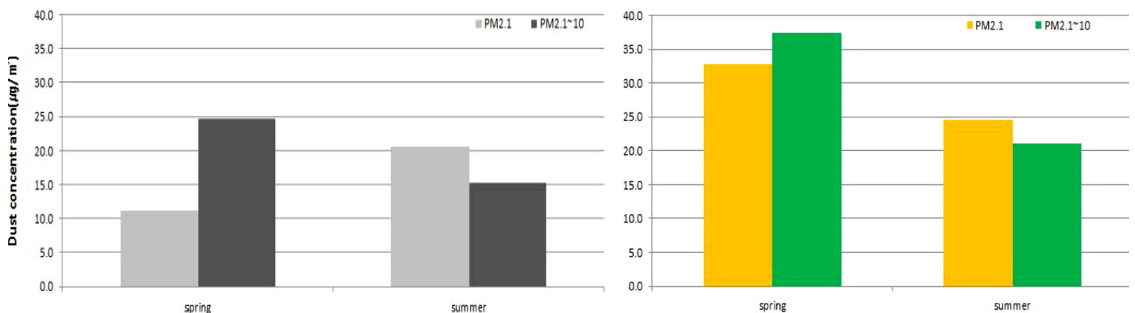


Fig. 4. Comparison of PM_{2.1} and PM_{2.1-10} area by season and year.

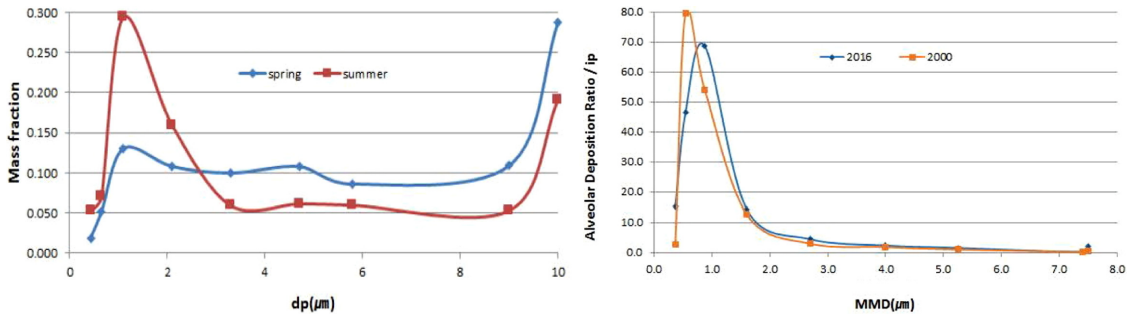


Fig. 5. Frequency distribution of PM size.

여름철엔 58%로 조사되었다. 이는 2000년 조사결과인 봄철 47%, 여름철 53%에 비해 그 비율의 차이가 나타났다. 이로 미루어 보아 여름철이 초미세먼지의 양이 더 많이 존재한다고 사료된다.

4. 대기 중 미세먼지와 초미세먼지의 입경보정 계절 농도

입경분포의 특성을 살펴볼 때, 입경간격으로 나누고, 각 구분에서 입자의 농도를 구하면 입경분포의 분포 현상을 바로 파악할 수 있다. 그러나 입경 구분의 높이가 그 입경 구분의 폭에 좌우되기 때문에 적당한 표현 방법이 아니다. 따라서 각 구분의 입자 농도를 그 간격의 폭으로 나누어 일정 간격으로 규격화시킨 그래프로 나타내며 간격이 서로 다르더라도 서로 비교하기가 쉽다. 이를 빈도분포함수 또는

확률밀도 함수라고 한다.

Fig. 5를 보면, Fig. 3에서와는 달리 PM₁₀의 분포가 초미세입자 영역에 치우친 비정규분포를 보이고 있으므로 인위적인 기원물질임을 나타낸다.

그리고 대수정규분포를 입경분석 시, 대수 확률지를 사용하여 누적빈도의 축을 확률축(중앙값 부근에서는 백분율 눈금을 압축하고, 양쪽 끝부분에서 확대한 것)으로 변환해 대수정규분포의 누적분포를 plot 하였을 때 Fig. 6처럼 직선으로 나타낼 수 있다. 이 그림에서 직접 중앙경을 읽고 기하평균을 구하고, 기하표준편차는 누적확률 84.1%에 대응하는 직경과 중앙경의 비로 나타낸다. 계절별 분진의 입경별 백분율을 plot하면 직선이 형성되고 기하평균과 기하표준편차를 구한 결과, 봄철에는 기하평균(d_g)=4.4 μm, 기하표준편차(σ_g)=2.2 μm, 그리고 여름철에는 기하

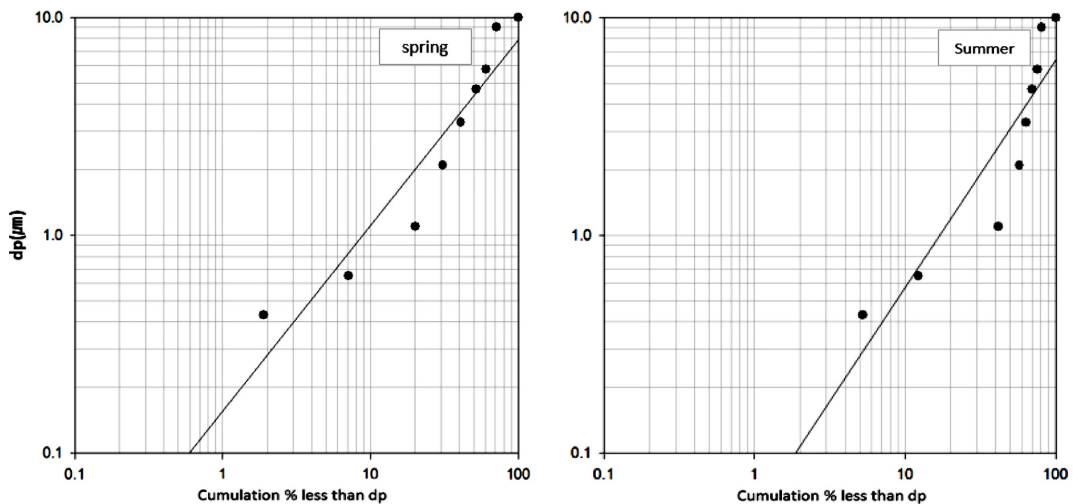


Fig. 6. The log probit distribution by seasons.

Table 2. The total efficiency of cascade impactor by particle diameters (spring, summer).

d_p (μm)	d_j (μm)	d_{50}/d_j	n_j	m_j (%)	$n_j * m_j$ (%)	d_p (μm)	d_j (μm)	d_{50}/d_j	n_j	m_j (%)	$n_j * m_j$ (%)
<0.43	0.365	12.055	0.007	0.916	0.013	<0.43	0.365	8.493	0.014	5.246	0.072
0.43~0.65	0.540	8.148	0.015	5.155	0.076	0.43~0.65	0.540	5.741	0.029	7.026	0.207
0.65~1.1	0.875	5.029	0.038	13.047	0.496	0.65~1.1	0.875	3.543	0.074	29.380	2.168
1.1~2.1	1.600	2.750	0.117	10.812	1.263	1.1~2.1	1.600	1.938	0.210	15.922	3.349
2.1~3.3	2.700	1.630	0.274	9.991	2.733	2.1~3.3	2.700	1.148	0.431	5.931	2.558
3.3~4.7	4.000	1.100	0.452	10.812	4.892	3.3~4.7	4.000	0.775	0.625	6.159	3.848
4.7~5.8	5.250	0.838	0.587	8.622	5.065	4.7~5.8	5.250	0.590	0.741	5.976	4.431
5.8~9.0	7.400	0.595	0.739	10.903	8.055	5.8~9.0	7.400	0.419	0.851	5.292	4.502
9.0~10	7.500	0.587	0.744	28.741	21.382	9.0~10	7.500	0.413	0.854	19.069	16.287
PM ₁₀		-			43.976	PM ₁₀		-			37.422

평균(d_g)=3.1 μm , 기하표준편차(σ_g)=2.6 μm 으로 나타나 여름철이 봄철에 비해 입경이 작은 입자들이 포집되었다.

5. 각 단별 계절별 포집효율

100% 집진효율을 얻는 최소 직경은 가스의 점도, 유입구의 폭과 비례하며, 유효회전수, 유입가스의 속도, 입자와 가스와의 밀도 차와는 반비례 한다. 실제 집진효율은 이와 같은 변수들에 의해 좌우된다. 하지만, 각 단의 최소직경 보다 더 큰 입자는 100% 효율로 집진될 것으로 예측되나 이는 사실과 다르다. 즉, 실제로 입경이 커도 통과하는 입자가 있고, 입경이 작아도 여지에 포집되는 입자가 존재한다. 따라서 Lapple¹¹⁾에 의해 개발된 준 경형식은 50% 집진효율을 갖는 입자의 직경(즉, d_{pc})인 50% 절단직경(cut diameter)을 사용한다.

그 결과, 50% 절단입경은 봄철이 4.4 μm , 여름철이 3.1 μm ,로 평균 3.8 μm ,로 조사되었다

또, 특정입경을 갖는 분지의 집진효율(n_j)¹¹⁾은

$$n_j = \frac{1}{1 + (d_{pc}/d_{pj})^2} \text{으로 계산되며,}$$

여기서, n_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(n_0)은 여러 입경에 대한 각 집진효율의 가중 평균치이다.

$$n_0 = \sum n_j m_j$$

여기서, m_j =j번째 입경범위의 질량분율이다.

본 조사에서 총괄효율의 결과를 Table 3에 나타내었다. 계절별 총괄효율은 봄철이 44%, 그리고 여름이 37.4%로 평균 총괄효율은 40.7%로 여름의 집진효율이 봄에 비하여 낮은 형태를 보인다.

6. PM₁₀ 및 PM₁₀중 화학종의 폐포 침착율

어떤 물질의 폐포부의 침착은 보통 기관을 통하여 폐포부에 최종적으로 침착한 흡입 입자의 비율로서 나타낸다. 기관·기관지부에서의 침착은 입경에 따라 다르고, 10 μm 이상의 입자는 보통 폐포부까지 도달하지 않으며, 2~10 μm 사이의 입자는 흡입시보다 어느 정도 감소하여 도달한다고 알려져 있다.

폐포침착율 평가는 비교적 보수적이 모델인 ACGIH 모델을 이용하여 수행되어진다(Hindy, 1982). 국내의 경우는 김성천(2000), 이해문 등(1996)이 이 모델을 이용해 PM₁₀의 입경별 폐포침착율을 조사한 바 있으며 폐포침착율 산출은 다음과 같은 식을 이용하여 수행되었다.

$$RF_i = 10^{(0.325 - 0.185d_i)}$$

$$ADF_i = MF_i \cdot RF_i$$

여기서,

RF_i =입경영역 i의 호흡성 분율

d_i =입경영역 I의 평균 입경

MF_i =총분진 질량 중 입경영역 i의 질량분율

ADF_i =입경영역 i에서의 폐포 침착율

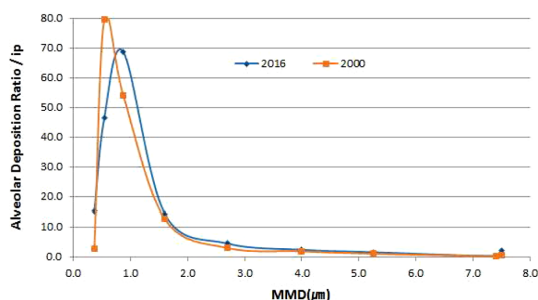
Table 3. Alveolar deposition of sizable particulate matters

Size range	Alveolar Deposition (%)	
	Dust	
year	2000	2016
<0.43	1.2	6.5
0.43~0.65	17.5	10.2
0.65~1.1	24.3	30.9
1.1~2.1	12.6	14.3
2.1~3.3	3.5	5.3
3.3~4.7	2.5	3.3
4.7~5.8	1.1	1.7
5.8~9.0	0.6	0.7
9.0~10	0.6	2.1
PM ₁₀	63.9	74.9
PM _{2.1}	55.6	61.9
PM _{2.1-10}	8.3	13.0

한편, 위의 식을 적용 시 미세먼지 영역의 입자에 대한 호흡성 분율은 1을 초과하게 된다. 즉, 실제의 총량을 초과하게 되는 경우가 발생하는데 이는 Cascade impactor 등을 사용한 시료 포집시 미세입자의 포집효율이 상대적으로 낮고, 인체의 유해도를 평가함에 있어서 이러한 보수적인 평가를 하여 인체를 보호한다는 취지 때문이기도 하다.

본 연구에서도 기존의 ACGIH모형을 이용하였으며, Table 1은 이를 이용한 시료 채취기간 중의 PM₁₀의 폐포침착율을 나타낸 것이다. 여기에서, PM₁₀은 전체의 약 75%가 폐포부에 침착되는 것으로 조사되었으며, 이는 이혜분 등(1996)의 수원지역 조사에서 2000년도 64% 1991년 71.6%에 비해 3.4~11% 높은 값이며 1992년 80.8%, 1993년 78.3%에 대비 약 3.3~5.8% 정도 낮은 값이다. 또한 PM₁₀쪽으로 갈수록 폐포 침착율이 급속히 낮아지는 경향이 발견되어졌다. 한편, 2.1 μm 미만의 입자를 미세입자로 가정할 경우 폐포에 침착하는 전체량 중 미세입자의 비율은 PM₁₀이 약 0.826이었으며 이는 미세입자 관리의 보건학적 중요성을 나타내는 것이다. 최대 입경별 폐포 침착율을 보면 초미세먼지의 경우 0.65~1.10 μm 범위에서 가장 높은 침착율을 보였다.

폐포 침착율의 경우 2000년도 Peak는 0.6 μm이며, 2016년도의 Peak는 봄에 0.70 μm, 여름에는 0.85 μm

**Fig. 7.** Alveolar deposition of PM size.

로 추정된다. 이 직경은 폐포 깊은 곳으로의 침착율이 제일 높은 직경이며, 2000년도에 비해 2016년도의 침착 직경이 더 크게 나타났다.

또한 Fig. 7은 간격이 서로 다르더라도 서로 비교하기가 쉽게 하기 위해 각 입경범위별 폐포 침착율을 그 범위의 폭으로 나누어 일정 간격으로 규격화한 그래프로 나타내었으며, 이 결과 본 연구에서는 약 0.54 μm(중앙경; MMD)의 입경에서 가장 높은 폐포 침착율을 보였다.

조사기간에 환경부 측정소의 미세먼지의 평균 농도가 봄철 39.4 μg/m³, 여름철 49.7 μg/m³으로, 군산대 측정소의 자료와 차이를 보이는 것은 측정위치가 다르기 때문에 농도의 오차가 발생 한 것이라 추정된다.

IV. 결 론

본 조사연구에서 9단 cascade impactor를 사용해서 먼지를 포집하고, 포집한 미세먼지와 초미세먼지의 입경별 농도 분포, 그리고 계절별 농도변화를 비교 검토하고 각 단별 총 포집효율을 산출한 결과는 다음과 같다.

1. PM₁₀의 질량 분율은 2계절 모두 2.1~3.1 μm를 기준으로 미세먼지와 초미세먼지로 나누어지는 쌍극 분포(bimodal distribution)를 보였으며, 2.1~3.1 μm 범위 이하인 먼지의 평균 질량 분율은 44%로 미세먼지가 차지하는 부분과 초미세먼지가 차지하는 부분이 비슷하게 나타나 군산지역은 인위적인 오염원과 자연적인 오염원의 영향이 비슷하게 존재하였다.

2. 2000년도 미세먼지의 평균 농도는 57.9 μg/m³였으며, 2016년의 평균 농도는 35.9 μg/m³이었다.

3. 계절별로 먼지의 입경별 농도를 보면, 미세먼지

와 초미세먼지의 경우는 확실한 이산형 분포를 보였다.

4. 미세먼지에 대한 초미세먼지의 비율은 0.44으로, 미세먼지와 초미세먼지가 차지하는 비율이 거의 비슷하였다.

5. 계절별로 미세먼지의 기하평균과 기하표준편차는 봄철 $d_g=4.4 \mu\text{m}$, $\sigma_g=2.2 \mu\text{m}$, 그리고 여름철 $d_g=3.1 \mu\text{m}$, $\sigma_g=2.6 \mu\text{m}$ 으로 나타나 여름철이 작은 초미세먼지들이 포집됨을 알 수 있다.

6. 미세먼지를 포집하는 단으로 갈수록 집진효율이 높아졌고, 초미세입자를 포집하는 단에서는 포집효율이 매우 낮았다. Cascade Impactor의 계절별 총괄효율은 봄철이 44%, 그리고 여름철이 37.4%로 조사되었고, 평균 총괄효율은 40.7%로 조사되었다.

7. 시료 채취기간 중의 초미세먼지의 폐포 침착율은 약 75%가 폐포부에 침착되는 것으로 조사되었다. 한편 10 μm 쪽으로 갈수록 폐포 침착율이 현저히 낮아졌으며, 약 0.54 μm (중앙경; MMD)의 초미세먼지에서 가장 높은 폐포 침착율을 보였다.

References

- Whitby KT, Husar RB, Liu BYH. The aerosol size distribution of L. A. smog. *J. Col. & Inter. Scj.* 1972; 39: 203.
- Emison GA. Overview of PM₁₀ police and regulation. An APCA/EPA International Specialty Conference. 1988
- Kenneth W, Warner CF, Wayne TD. Air pollution-its origin and control: 3rd ed., Addison Wesley, 1988; 24-26.
- Ferris BG. Health effect of exposure to low levels of regulated air pollutants, A critical review. *JAPCA.* 1978; 28: 482.
- Saffiotti U. Experimental studies of the conditions of exposure to carcinogens for lung cancer induction. *JAPCA.* 1965; 15: 23.
- Fennelly PF. The origin and influence of airborne particulates. *American Scientist.* 1976; 64: 46.
- Linton RW, Loh A, Natusch DFS. Surface predominance of trace element in airborne aerosol. *Nature.* 1977; 268: 518.
- U.S, EPA: National Air Quality and Emission sTrends Report, EPA-454/R-97-013, Research Triangle Park, NC 27711, 1996b.
- Kenneth W, Warner CF, Davis WT. "Air pollution-Its origin and control", ed. Addison-Wesley Longman Inc., 1998; 24-25.
- Dzubay TG, Srevens RK. Ambient air analysis with dichotomous sampler and X-ray fluorescence spectrometer. *Env. Scj. Technol.* 1969; 3, 913.
- Lapple CE. "Processes use many collector types," *Chemical Engineering.* 1951: 58, 5, May
- Han Jae Ki. SPSSWIN 8.0. for statistical analysis. 1999
- Kim SC, Kang DS. A study on chracteristic by particulate size of atmospheric suspended particulates. *Journal of Environmental Health Sciences.* 2000a; 26(2): 108-115.
- Kim SC, Kang DS, Song JJ, Lim SH. A Study on concentration of PM₁₀ and characteristic of elements in Kunsan area. *Journal of Environmental Health Sciences.* 2000b; 26(4):
- Kim OS. Risk assessment of environmental chemicals, Shin Kwang Co., 1993
- Baik SO, Hwang SM. Evaluation of characteristics of airborne dust particles in Daegu area using regression analysis of principal components. *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment.* 1992; 8(3): 179-190.
- Yoo IS, Ryu YT, Lee JH, Kim YS. Risk assessment of human body due to volatile organic compounds and heavy metals in industrial complexes, Summit meeting summary in spring. *Korean Society of Environmental Engineers.* 1997; 257-259.
- Lee JH. The comparative risk assessment method of applied to air pollution. *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment.* (1992); 8(2): 100-1041.
- Lee HM, Kim DS, Lee JH. Long term average concentration of heavy metals in PM₁₀. *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment.* 1996; 12(5): 555-566.
- Korea Environmental Technology Development Institute. Research on regulation and management of harmful air pollutants. 1994.

<저자 정보>

김성천(교수)