

SM1

시화지구 주거지역에서 측정된 PM_{2.5} 입자의 오염원 특성 Source Characterization Study of PM_{2.5} Particles Measured in a Residential Area of Sihwa

박승식·배민석·김영준
광주과학기술원 환경공학과

1. 서론

시화지역은 크게 공단지역과 주거지역으로 구분되어 있으며 공단지역에서 발생하는 대기오염물질이 대기확산을 통해 주거지역으로 이동하면서 주거지역에 살고있는 주민들에게 많은 악영향을 미치는 것으로 알려져 있다. 현재 공업단지내에서는 폐유, 폐 합성수지, 폐 합성고무, PCB 폐기물등을 소각하는 폐기물 소각업체, 일반화학업종 및 염색등의 산업이 관심의 대상이 되고 있으며 분진, 황산화물, 질소산화물외에 염화수소, 납, 구리등의 유해물질등이 배출되는 것으로 알려져 있다. 특히 이중에서 폐기물 소각업체에서 배출하는 대기오염물질에 의해 주거지역에 많은 문제를 야기시키고 있다. 시화지역의 지역적인 특성상 공단지역에서 주거지역으로 대기오염물질의 유입이 상당히 발생할 것으로 예상되지만, 실제로 어떤종류의 대기오염물질이 주거지역으로 유입되고 있는지 조사할 필요가 있으며, 주거지역의 대기오염물질 저감방안을 효과적으로 수립하기 위해서는 대기중 오염물질을 측정하여 그 오염물질을 구성하고 있는 오염원들의 규명과 각 오염원에 대한 기여도를 정량적으로 이해할 필요가 있다. 따라서, 본 연구에서는 주거지역에서 PM_{2.5} 입자를 측정하여 미세입자의 화학적 조성자료, 바람장 벡터해석 및 화학적 질량수지(CMB) 수용모델을 활용하여 주거지역에 존재하는 오염원을 규명하고 공단지역에 존재하는 폐기물 소각 및 다른 오염원에 의해 발생된 오염물질이 주거지역에 어느 정도 영향을 미치는지 규명하였다.

2. 연구 방법

2.1 분진측정 및 분석

대기중 PM_{2.5} 입자의 측정은 시흥시 시화지구내 주거지역에 위치한 서해초등학교 6층 옥상에서 수행하였다. PM_{2.5} 분진샘플을 채취하기 위해 Dichotomous 샘플러(ASI/GMW사 모델 240)와 2개의 싸이클론(URG-2000-30EH) 샘플러가 사용되었다. Dichotomous 샘플러에서 측정된 샘플들은 유도결합 플라즈마 분광분석기(ICP/AES: Shimadzu ICPS-III), 유도결합 플라즈마 질량분석기(ICP/MS; VG PQIII STE), 및 원자흡수분광분석기(AAS: Unicam989)에 의해 22종의 원소성분(Na, Mg, Al, P, S, K, Ca, Sc, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Ni, Cu, Zn, Ga, As, Se, Cd, Ba, Pb)을 분석하는데 사용되었으며, 분석은 기초과학지원연구원(대전분소)에서 수행하였다. 두 싸이클론 샘플러에서 측정된 샘플들은 8종의 이온성분(Cl⁻, NO₃⁻, SO₄²⁻, NH₄⁺, Na⁺, K⁺, Mg²⁺, 및 Ca²⁺)과 탄소성분을 분석하는데 사용되었다. 이온성분은 광주과학기술원에 보유하고 있는 IC(Dionex사)에 의해 분석하였고 탄소성분(유기 및 원소탄소)의 분석은 열산화방안법(TMO, Thermal, Manganese Oxidation)에 의해 미국 AtmAA사에서 수행하였다. PM_{2.5}분진의 측정은 세 번의 집중측정기간(1998년 2월 16일-2월 25일, 6월 8일-6월 18일, 및 8월 23일-9월 2일)을 통해 이루어졌으며, 24시간 기준으로 분진을 채취하였다. 그리고 분진측정기간중 시화공단내 노동복지회관 15m 높이의 옥상에서 자동기상측정장비에 의해 풍향, 풍속, 및 습도등의 기상자료를 1시간 평균으로 관측하였다(조승현, 1998). 기상자료는 분진의 측정시간과 일치하도록 24시간 평균자료를 계산하여 사용하였고, 바람장 벡터해석을 통해 바람방향에 따라 오염물질의 거동변화가 주거지역에 어떻게 영향을 미치는지 조사하였다.

2.2 화학적 질량수지 수용모델

CMB 수용모델에 의한 오염원 선정은 오염발생지역(source)과 수용위치(receptor)에서 측정된 자료를 토대로 시작되며, 주어진 시간간격을 통해 수용위치에서 가능성 있는 오염원을 확인하고 그에 대한 오

염원 기여도를 정량화하기 위함이다(Watson et al., 1990). 화학적 질량수지 모델은 수용체에서 측정된 성분들의 화학적 조성을 오염원 조성분류표(source profile)와 오염원 기여율의 곱의 합으로서 표현되는 선형방정식 집합을 푸는 방법으로 식 (1)과 같이 표현된다.

$$C_i = \sum_{j=1}^p a_{ij}S_j \quad (i=1,2,\dots,m) \quad (1)$$

여기서, C_i 는 수용위치에서 측정된 화학종 i 의 농도($\mu\text{g}/\text{m}^3$), a_{ij} 는 오염원 j 로부터 배출되는 화학종 i 질량분율(mg/g), S_j 는 오염원 j 의 기여도($\mu\text{g}/\text{m}^3$), p 는 전체 오염원 수를 나타낸다. 시화지구 주거지역에서 측정된 $\text{PM}_{2.5}$ 분진의 오염원 선정을 위한 계산은 미국 환경청에서 개발한 CMB7 소프트웨어(Watson et al., 1990)를 사용하여 이루어졌으며, 계산결과를 모델 타당성 프로토콜(Watson et al., 1991)에 적용하였다. 모델수행결과는 R^2 , χ^2 및 계산된 질량농도 %을 포함한 여러 가지의 적합성을 판단하는 지표(fit indices)을 조사함으로써 평가된다.

3. 결과 및 고찰

표 1은 1998년 2월, 6월, 및 8월에 시화지역내 주거지역에 위치한 서해초등학교 옥상에서 측정된 $\text{PM}_{2.5}$ 분진의 화학종 농도자료를 나타낸 표로서 평균농도, 표준편차, 및 화학적 질량수지 모델계산에 사용된 화학성분(fitting species)을 포함하고 있다. CMB 계산의 타당성을 보장하기 위해 화학적 조성이 다른 동종의 오염원과 다른 종류의 오염원을 적절히 선택하여 사용함으로써 여러 종류의 민감도 시험(sensitivity test)을 수행하였다. 표 2은 시화지역에서 측정된 $\text{PM}_{2.5}$ 분진의 평균농도자료(표 1)를 토대로 일련의 CMB 계산의 민감도 시험결과를 나타낸다. 모든 계산은 오염원 종류와 오염원 조성분류표를 변화시키면서 수행되었다. 화학적 질량수지모델에 의한 모든 계산결과는 R^2 , χ^2 , 및 계산된 분진질량 %와 같은 여러 성능평가지표에 의해 결정되며, 그 결과를 표 2에 제시하였다. 표 2에 나타난 CMB 모델결과

Table 1. Average and standard deviation of $\text{PM}_{2.5}$ chemical concentrations. ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

Species	Unit	Average	Std. dev.	Fitting species
Mass	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	27.755	10.282	
Cl	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	0.940	0.787	*
NO_3	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	2.667	1.741	*
SO_4	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	3.942	2.015	*
NH_4	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	2.350	1.106	*
TC	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	8.003	3.904	*
OC	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	6.548	2.912	
EC	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	1.455	1.099	
Na	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	0.118	0.045	*
Mg	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	0.027	0.015	
Al	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	0.121	0.099	*
S	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	1.847	0.958	
K	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	0.277	0.163	*
Ca	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	0.132	0.077	*
Ti	ng/m^3	1.276	0.775	
V	ng/m^3	2.233	1.044	
Cr	ng/m^3	2.464	1.874	
Fe	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	0.165	0.085	*
Ni	ng/m^3	5.817	2.408	
Cu	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	0.061	0.038	
Zn	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	0.215	0.118	*
As	ng/m^3	7.548	6.244	
Cd	ng/m^3	3.382	2.283	
Pb	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	0.126	0.083	*

의 최고의 적합성(best fit)은 해염입자, 포장된 도로먼지, 자동차 배출가스, 폐기물 소각연소, 2 차생성 황산 암모늄 및 질산암모늄등으로 평가되었다. 일반적으로 민감도 시험의 결과는 본 연구에서 실행된 CMB 계산이 만족할만한 결과를 보여주었다. 성능평가지표인 χ^2 , R^2 , 계산질량농도 %의 값은 0.25, 0.96 및 90%로 Pace와 Watson(1987)에 의해 규정된 목표범위를 만족시키는 것으로 나타났고, 계산과정에서 화학적 조성이 유사한 여러 종류의 오염원들은 존재하지 않았다.

Table 2. Sensitivity of PM_{2.5} particles source contribution estimates. (units : $\mu\text{g}/\text{m}^3$)

Profile ^a	Best fit	Trial1	Trial2	Trial3	Trial4
MARI00	0.38±0.15	0.31±0.15	0.32±0.15	0.38±0.15	0.38±0.15
PDUST1		1.93±0.93			
PDUST2	3.20±1.48				
PDUST3			2.37±1.11		
SDUST2				1.65±0.83	
SDUST3					1.68±0.84
AUTO3					
DIESL2					
PHDIES	11.05±5.57	11.01±5.58	10.72±5.59	11.40±5.57	11.35±5.57
INCIN1	1.76±0.69	1.84±0.69	1.84±0.69	1.85±0.69	1.86±0.69
AMSUL	5.13±2.40	5.14±2.40	5.14±2.40	5.12±2.40	5.12±2.40
AMNIT	3.46±2.13	3.46±2.13	3.46±2.13	3.46±2.13	3.46±2.17
R Square	0.96	0.95	0.96	0.94	0.94
Chi Square	0.25	0.32	0.27	0.37	0.37
% Mass	90.0	85.4	86.0	86.0	85.9
Profile ^a	Trial5	Trial6	Trial7	Trial8	Trial9
MARI00	0.38±0.15	0.37±0.15	0.36±0.15	0.36±0.15	0.36±0.15
PDUST2	3.67±1.45	3.93±1.44	2.17±1.89	2.32±1.91	3.28±1.49
DIESL4	9.10±4.46	9.16±4.46			
PHDIES			11.05±5.57	11.03±5.57	11.09±5.57
INCIN1	1.77±0.69	1.81±0.69	1.81±0.69	1.79±0.69	1.78±0.69
STEEL1			0.35±0.29	0.25±0.32	
FUOIL		0.11±0.12		0.32±0.50	0.51±0.44
AMSUL	5.49±2.39	5.49±2.39	5.13±2.40	5.13±2.40	5.13±2.40
AMNIT	3.50±2.13	3.50±2.13	3.46±2.13	3.46±2.13	3.46±2.13
R Square	0.96	0.94	0.96	0.97	0.96
Chi Square	0.26	0.40	0.24	0.21	0.27
% Mass	86.1	87.8	87.7	88.9	92.3
Uncert./	-	-	-	STEEL1	-
Simil. Cluster				FUOIL	

참 고 문 헌

- 조승현 (1998) 대기오염확산모델(ISCST3)을 이용한 시화 및 반월공단의 SO₂ 농도분포와 오염기여도에 관한 연구, 광주과학기술원 환경공학과 석사학위 논문
- Watson, J.G., N.F. Robinson, J.C. Chow, R.C. Henry, B.M. Kim, T.G. Pace, E.L. Meyer, and Q. Nguyen(1990) The USEPA/DRI chemical mass balance receptor model, CMB 7.0 Envir. Software 5, 38-49
- Watson, J.G., J.C. Chow, and T.G. Pace(1991) Chemical mass balance. *In Data Handling in Science and Technology*-Volume 7 : Receptor Modeling for Air Quality Management, Edited by P.K. Hopke, Elsevier Science Publishers, New York, NY, pp 83-116
- Pace, T.G. and J.G. Watson(1987) Protocol for applying and validating the CMB model, EPA 450/4-87-010, U.S. Environmental Protection Agency, Research Triangle Park, North Carolina