

황사현상에 의한 대기오염물질의 농도분포 특성에 관한 연구

이용기 · 김종찬 · 최승석 · 임흥빈 · 최양희 · 이수문*

경기도보건환경연구원*

A Study on the Concentration Distribution Characteristics of Air Pollutants by Yellow Sand Phenomenon

Yong-Ki Lee, Jong-Chan Kim, Seung-Seok Choi, Heung-Bin Im, Yang-Hee Choi,
Hyung-Ryul Ryu, Mi-Jung Kim, Hee-Cheon Moon, Jong-Bo Kim and Soo-Moon Lee*

*Kyonggido Institute of Health & Environment**

Abstract

This study was conducted to evaluate the concentration distribution characteristics of air pollutants by the yellow sand from China. The concentrations and chemical properties of FPM contained in the yellow sand were compared with those of air pollutants when having no yellow sand in order to estimate the variation characteristics and the originated source of air pollutants moved by yellow sand.

The concentrations of PM-2.5 and PM-10 contained in the yellow sand showed an increase of 2.3 to 2.7 times than usual, and the concentrations of NO₂ and SO₂ in the gaseous pollutants showed an increase of about 1.6 times by yellow sand, and thus the air contamination was much influenced by yellow sand phenomenon.

The concentrations of inorganic elements contained in FPM from the yellow sand showed a higher concentration variation in the order of Al>Mg>Zn>Pb than usual.

The concentration coefficient of air aerosol during the yellow sand period showed that Na, K, Ca, Mg and Fe were originated from natural source, and Pb, Cr, Cd, Cu and Zn were originated from artificial source for inorganic elements. The correlation analysis between FPM and inorganic elements showed in the descending order of Al>K>Pb>Mg, and thus the deposited amount of Pb was influenced by that of yellow sand. The average concentrations of PM-10 measured during the yellow sand period exceeded the Korea Air Environmental Standard and showed a excess rate of 3.4 times in the maximum, but the average concentrations of PM-2.5 showed within the United States Air Environmental Standard

Key word : Yellow Sand, Air Pollutants, PM-2.5, PM-10, inorganic elements

I. 서 론

대기중 부유분진의 발생원은 자연적 발생원과 인위적 발생원으로 나눌 수 있다. 자연적으로 발생하는 분진은 토양기원입자, 해염입자, 화산분출활동 등에 의해 대기로 방출된 입자 등이 주종을 이룬다. 특히 바람에 의해 토양에서 배출된 입자의 양이 자연발생 분진량의 대부분을 차지하고 있으며 이양은 인위적 발생량 보다 많다¹⁾.

주로 3, 4, 5월에 걸쳐 발생하는 황사현상은 대표적인 자연발생 분진이며 우리나라에서 관측되는 대기오염물질의 장거리이동현상을 대표한다. 중국과 몽고의 사막지대(타클라마칸, 몽고고원, 만주)등과 황하중류의 황토지대에 저기압이 통과할 때 다량의 누런 먼지가 강한 바람이나 난류를 타고 상승했다가 공중에 부유하거나 지면에 하강하면서 생기는 시정장애 현상인 황사는 발원지로부터 약 5.5km의 고도에서 강한 편서풍을 타고 3~5일만에 우리나라에 영향을 미치며 구성성분은 발원지에 따라 다르나 사막지대에서 발원한 황사는 규소(석영)이 주성분이고 황토지대는 장석이 주성분이며 알루미늄, 철, 칼슘 등의 성분이 많이 포함되어 있다.

발원지에 강수량이 적고 풍속이 강한 기상조건에서 발생되며 강한 편서풍기류가 통과하는 3~5월에 우리나라에 영향을 미치며 햇빛을 가려 태양복사의 산란과 흡수를 증대시키고 하늘을 황갈색으로 변화시킬 뿐만 아니라, 맑고 깨끗한 날의 경우 사람이 관측할 수 있는 시야는 10km를 넘으나, 황사가 심한 시기에는 시정거리가 2km 미만이 된다.

자연적인 토양발생원으로서의 황사는 그 입경분포가 주로 10 μ m이상의 조대입자군에 속하지만 대기 에어로졸의 중요한 성분인 미세입자(PM-2.5:dp \leq 2.5 μ m로서 이하 fine particulate matters(FPM)로 칭함)도 다량 포함하고 있어 이에 대한 관리규제와 기초연구의 필요성이 대두되고 있다²⁾. PM-2.5는 호흡성분진으로 호흡량의 절반이상이 폐포에 도달하여 기관지염, 천식, 안질 등의 질환을 일으킬 수 있으며 표면적이 넓어 많은 양의 중금속이나 다이옥신 심지어 핵물질 등을 포함하여 인체

건강에 치명적인 위해를 주는 오염물질이다. 또한 농작물, 활엽수의 기공을 막아 식물의 광합성작용의 저해를 할 뿐만이 아니라, 빨래나 음식물 등에 침강, 부착되어 일상생활을 불편하게 하며 정밀산업과 반도체에도 많은 영향을 끼치고 있다.

최근 중국의 공업발전에 따른 황해연안의 개발과 에너지 수요의 증가에 의하여 많은 대기오염물질이 황사먼지에 함유되어 우리나라에 영향을 미치고 있는 이 시점에서 황사에 포함되어 있는 PM-2.5에 대한 기초연구는 매우 중요한 것으로 생각된다.

본 연구는 오염원이 없는 비교적 청정한 지역에서 황사에 포함되어있는 PM-2.5의 농도와 화학물성을 황사가 없는 평상시와 비교하여 황사로 인한 대기오염물질의 변동특성을 조사하고 황사현상에 의해 이동되는 오염물질의 발생기원을 추정하여 향후 장거리 이동대기오염물질의 대책을 수립하는데 필요한 기초연구자료를 제공하고자 하는데 그 의의가 있다.

II. 재료 및 방법

1. 조사지역 현황

본 연구의 조사지역으로 선정된 경기도 안산시 대부도는 경기도의 서해안지역으로 면적 1000km², 인구 6000명 정도의 작은 마을로 과거에는 섬이었으나 95년 시화방조제의 완공으로 현재는 내륙과 연결되어 있다. 시료채취지점은 주변의 장애물 또는 물리적 환경의 영향을 최소화할 수 있는 대부분 출장소 옥상으로 고정오염원이나 이동오염원이 비교적 적으며 중국으로부터 발원하여 국내에 영향을 미치는 황사의 영향을 연구하는데 적절한 지역이라고 판단된다. 조사기간은 우리나라에 황사가 가장 자주 출현하는 기간으로 2001년 3월14일부터 4월15일까지 약1개월간 24시간 연속 측정하였다. 측정기간동안의 기상상태는 연구원이 소유하고 있는 이동측정차량의 기상장비로 측정하였으며 평균 기온은 10 $^{\circ}$ C, 평균상대습도 65.3%, 풍속 2.3m/s, 주풍향은 서남서향의 서풍계열이었다.

2. 시료채취 및 연구방법

SO₂등 일반대기오염물질은 연구원이 보유하고 있는 대기오염이동측정차량을 이용 측정하였고 미세 입자는 PM-2.5 Auto sampler(Tecora, Model, Sky Post PM)를 이용 16.7 l/min의 유속으로 시료를 채취하였으며 실험에 사용된 여지는 pore size 2μm, 직경 47mm의 teflon filter(TEF-DISC)를 사용하였다. 이 여지는 낮은 바탕농도를 가지고 있어 XRF, INAA, ICP, IC, AAS등의 방법으로 분석하기에 알맞은 여지로 알려져 있다.³⁾ 여지는 시료 채취전후로 항온, 항습 상태의 chamber에서 항량을 시킨 후 0.01 mg의 감도를 가진 전자저울을 이용 무게를 달아 칭량 전후의 무게차로 PM-2.5의 농도를 구하였다. 여지 위에 채취된 무기원소분석을 위한 전처리기는 Microwave 추출장치(Questron, Model Q-15 Micro Prep)을 이용한 질산 전처리 법을 수행하였다. 전처리가 끝난 시료는 ICP-OES(Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectrometer, PERKIN ELMER, Model OPTIMA 3000)을 사용하여 Pb, Cr, Cd, Cu, Zn, Mn, Fe, Al, Ca, Mg, Na, K등 12개 무기원소성분을 분석하였다.

III. 결과 및 고찰

1. 대기오염 물질의 오염특성 변화

조사지역은 비교적 청정한 지역으로 평상시의 대기오염도는 경기도의 배경농도로 사용할 수 있는 정도이다. 황사로 인한 대기오염물질의 변화는 Fig. 1과 같이 나타났다. PM-10은 평상시 60.57μg/m³이었으나 황사현상이 발생하면 166.12μg/m³으로 약2.7배 PM-2.5는 평상시 27.3μg/m³에서 황사 발생시 63.3μg/m³으로 약2.3배 증가하는 것으로 나타났다. 이것은 황사의 대부분이 흙먼지이기 때문에 흙먼지 속에 포함된 미세먼지의 영향이라 사료된다. 가스상 오염물질 중에는 NO₂와 SO₂가 평상시보다 약1.6배정도 증가하여 최근 중국의 산업화에 따른 화석연료의 증가에 의한 영향이라 생각할 수 있다. 실제로 중국에서 사용되는 화석연료의 대부분은 황성분이 다량 함유되어 있는 석탄류를 가장 많이 사용하고 있으며⁴⁾ 연료의 연소나 기

타 원인에 의해서 발생된 기체상의 SO₂가 한반도로 이동되는 양은 상당한 수준인 것으로 보고되고 있다.⁵⁾

Fig. 2는 조사기간 중 PM-2.5의 농도변화를 PM-10과 비교하였다. 그림에 나타난바와 같이 황사 현상이 발생하면 PM-10과 PM-2.5의 농도는 동시에 상승하는 경향을 나타내었다.

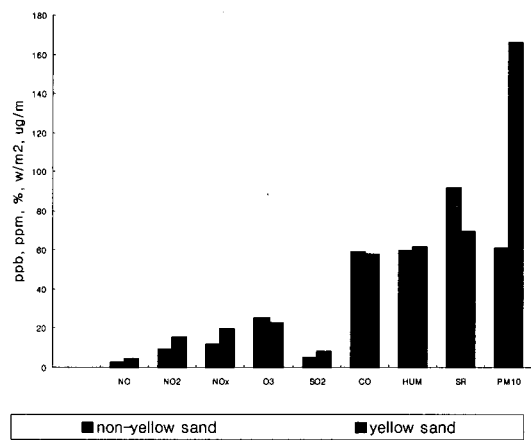


Fig. 1. Comparison of air pollution degree for yellow sand and non-yellow sand period.

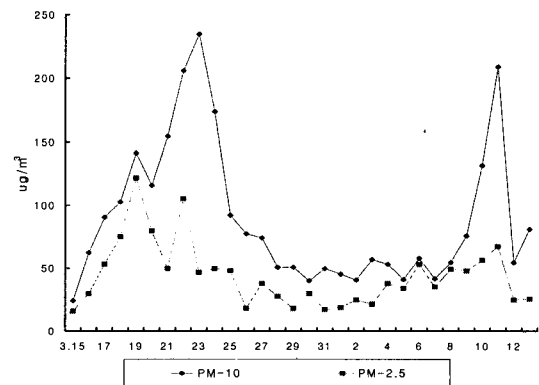


Fig. 2. Concentration variation of PM-10 & PM-2.5 in the yellow sand.

이것은 황사먼지의 주성분이 토사에 의한 것뿐만 아니라 중국의 산업시설에서 발생된 미세먼지가 황사와 함께 장거리 이동되어 우리나라까지 영향을 미치고 있음을 의미한다. 미세입자와 조대입자의 화학조성은 매우 다르며 조대입

자는 토양이 발생원 이지만 PM-2.5 이하의 미세입자는 발생원이 화석연료의 연소에 의한 것이기 때문이다.

2. 무기원소의 농도 분포 변화

황사 현상이 발생하였을 때 PM-2.5에 함유되어 있는 무기원소의 농도분포를 Fig. 3에 나타냈다. Al이 가장 높은 농도를 나타냈고 Ca, K, Mg 순으로 토양유래 금속성분이 높은 농도를 나타내어 황사의 주요 구성 성분이 토양입자임을 알 수 있었다. Fig. 4는 PM-2.5의 금속성분 농도분포를 황사가 없는 평상시와 황사현상 때를 비교하여 나타낸 것이다. 이 그림에서 Al과 Mg의 농도는 황사현상시 4~5배의 농도 변화가 있었으며 다음으로 Zn과 Pb 순으로 농도가 증가한 것으로 나타났다. 여기서 Al과 Mg 등은 토양유래 원소에 의한 농도 증가 현상으로 볼 수 있지만, Pb의 농도 증가 현상은 화석연료의 사용 등으로⁴⁾ 발생한 인위적 오염 금속원소가 황사를 타고 한반도에 영향을 주고 있는 것이 아닌가 생각되며 이에 대해 더 깊은 연구가 필요하다.

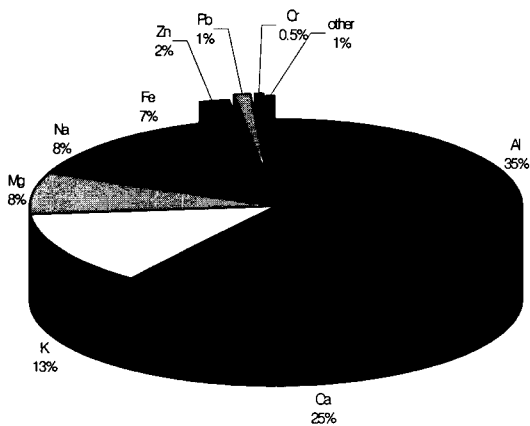


Fig. 3. Heavy metal distribution of PM-2.5 in the yellow sand.

3. 황사에 포함된 무기원소의 발생기원 분석

대기에어러졸의 원소조성을 이해하기 위한 방법

으로 농축계수를 이용하는 방법이 있다. 본 연구에서는 황사 기간 중 측정된 무기원소의 농도를 기준으로 각 원소의 지각농축계수를 계산하여 발생기원을 추정하고자 하였다. 기준물질은 Al로 하였고 농축계수를 구하는 방법은 Bowen이 제시한 다음 식을⁶⁾ 이용하여 구하였다.

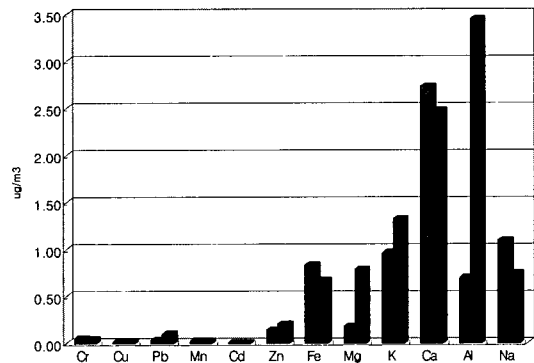


Fig. 4. Comparison of heavy metal conc. before and after the yellow sand.

$$Enrichment\ Factor(E.F.) = (X/Y)_{Aerosol} / (X/Y)_{Crust}$$

여기서 (X/Y)는 대기 부유먼지중 또는 토양중의 원소 X와 Al의 농도비를 나타낸다. Al은 토양입자 원소의 전형적인 원소⁹⁾이기 때문에 E.F. 값이 높을 수록 인위적 발생원 유래의 원소라고 할 수 있다.

본 연구에서 황사기간 중 측정된 무기원소 가운데 Fig. 5에 나타난 바와 같이 Na, K, Ca, Mg 및 Fe의 E.F. 값은 Al과 거의 비슷한 1에 가까운 값을 나타내 자연발생원 유래 원소임을 알 수 있고 Pb, Cr, Cd, Cu, Zn과 같은 원소는 높은 E.F. 값을 나타내 이러한 원소들은 인위적 오염원 유래원소임을 알 수 있었다. 이것은 이민희 등이⁷⁾ 서울지역을 대상으로 조사 보고한 자료와 유사하게 나타났다. 또한 황사현상시 인위적 오염 무기원소들이 포함되는가를 알아보기 위해 평상시와 황사기간의 E.F. 값을 비교해 보았다. 모든 원소들의 E.F. 값은 평상시보다 황사현상이 있을 때 낮게 나타나 황사에 의한 대기중 에어러졸 원소의 대부분은 자연발생적으로 생성되는 흙먼지에서 유래되고 있음을 증명하고 있다.

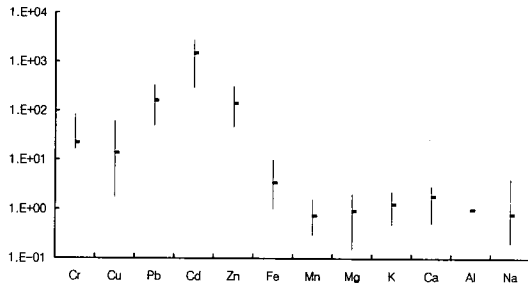


Fig. 5. Concentration coefficient of inorganic elements during the yellow sand period

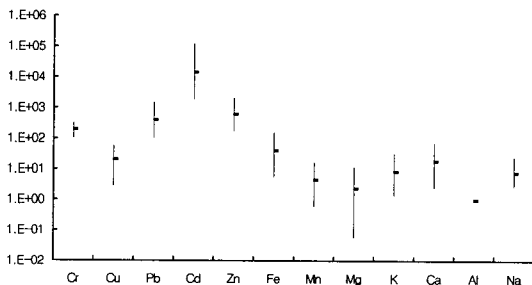


Fig. 6. Concentration coefficient of inorganic elements in PM-2.5 during the non-yellow sand period.

그러나 인위적발생원의 대표적인 원소인 Pb와 Cu의 E.F.값은 다른 원소에 비하여 Fig.5와 Fig. 6

의 변화가 현저한 차이를 확인하지 못하였다. 즉 황사기간도 평상시와 거의 같은 E.F 값을 나타냈다. 이것은 중국의 산업 활동으로 배출되는 분진에 함유된 무기원소들이 황사를 타고 한반도에 영향을 주고 있음을 간접적으로 나타내는 것이라 할 수 있다. 따라서 가스상 오염물질은 물론 중금속과 같은 무기원소들도 황사에 의해 장거리 이동되고 있음을 추정할 수 있었으며, 이에 대해 이동되는 경로와 이동량 등에 대한 심층적인 연구조사가 필요하다고 할 수 있다.

4. 황사에 의한 PM-2.5와 무기원소의 상관성 변화

황사기간과 평상시의 PM-2.5에 함유된 무기원소의 상관계수를 분석한 결과 Table 1 및 Table 2와 같았다. Table에 나타난바와 같이 황사기간 중 PM-2.5와 상관성이 가장 높은 원소는 Al로 0.89를 나타냈으며 다음이 K>Pb>Mg 순이었고 평상시의 PM-2.5와 상관계수가 가장 높은 원소는 Zn으로 0.76이며 Al>Cu>Cd 순으로 높게 나타났다. 황사현상이 발생된 기간 중에는 토양유래 원소들의 상관계수가 비교적 높게 나타났고, 황사가 없었던 평상시에는 대부분의 인위적 오염원소가 PM-2.5와 높은 상관성을 나타내어 황사가 토양의 비산에 의

Table 1. Correlation of PM-2.5 and inorganic elements PM-2.5 during the yellow sand period.

	PM2.5	Cr	Cu	Pb	Mn	Cd	Zn	Fe	Mg	K	Ca	Al	Na
PM2.5	1.00												
Cr	-0.05	1.00											
Cu	0.02	-0.09	1.00										
Pb	0.70	0.01	0.15	1.00									
Mn	0.28	-0.06	-0.04	0.00	1.00								
Cd	0.53	0.25	-0.02	0.45	-0.49	1.00							
Zn	0.18	0.34	0.25	0.38	0.60	-0.26	1.00						
Fe	0.11	0.18	-0.08	-0.16	0.92	-0.54	0.64	1.00					
Mg	0.55	-0.11	-0.26	0.25	0.12	0.33	0.02	0.16	1.00				
K	0.77	-0.16	0.44	0.75	0.29	0.24	0.39	0.03	0.13	1.00			
Ca	0.11	0.33	0.15	-0.15	0.60	-0.23	0.46	0.56	-0.34	0.24	1.00		
Al	0.89	0.09	0.42	0.42	0.19	0.53	-0.01	0.11	0.59	0.50	0.02	1.00	
Na	-0.35	0.77	-0.04	-0.04	-0.45	0.23	0.10	-0.27	-0.39	-0.26	0.06	-0.27	1.00

Table 2. Correlation of PM-2.5 and inorganic elements PM-2.5 during the non-yellow sand period.

	PM2.5	Cr	Cu	Pb	Mn	Cd	Zn	Fe	Mg	K	Ca	Al	Na
PM2.5	1.00												
Cr	-0.57	1.00											
Cu	0.63	-0.18	1.00										
Pb	0.36	-0.11	0.73	1.00									
Mn	0.00	0.40	0.40	0.27	1.00								
Cd	0.36	-0.11	0.23	0.21	-0.24	1.00							
Zn	0.76	-0.13	0.72	0.48	0.20	0.32	1.00						
Fe	-0.45	0.65	0.03	-0.04	0.57	-0.42	0.00	1.00					
Mg	-0.29	0.65	-0.02	-0.01	0.73	-0.21	0.00	0.61	1.00				
K	0.09	0.03	-0.07	-0.01	0.33	0.24	-0.10	0.14	0.33	1.00			
Ca	-0.23	0.27	-0.03	-0.19	0.56	-0.30	-0.05	0.66	0.65	0.56	1.00		
Al	0.71	-0.28	0.75	0.60	0.09	0.35	0.80	-0.16	-0.22	-0.19	-0.29	1.00	
Na	-0.39	0.69	-0.27	-0.24	0.62	-0.33	-0.20	0.62	0.67	0.43	0.53	-0.45	1.00

한 것임을 추정할 수 있었다. 그러나 인위적오염 원소인 Pb는 정상시보다 황사기간 중에 높은 상관성을 나타내 황사에 의해 Pb가 장거리 이동되고 있는지에 대한 연구는 계속되어야 할 것이다. Pb는 연료의 옥탄가를 높이기 위해 첨가제로 많이 사용되며 자동차연료의 연소로 인한 알킬납이 대기 중 존재하는 납 오염도의 80~90%를 차지한다. 또 납 광석의 채련이나 철 생산, 구리채련, 석유연소 등의 산업활동에서도 배출되지만 자동차에서 배출되는 물질로 인한 오염은 대체적으로 도시지역에 국한되고 채련소와 같은 산업 배출원에 의한 오염은 멀리까지 영향을 미치기도 한다.⁸⁾ 본 연구에서 황사기간 중 Pb의 상관성이 높게 나타난 것은 중국의 산업활동으로 발생한 오염물질이 한반도에 영향을 미치고 있다는 것을 간접적으로 나타내고 있음을 의미한다.

5. 대기환경기준과의 비교

우리나라에서는 PM-10에 대해서 2001년1월부터 연간기준치 $70\mu\text{g}/\text{m}^3$, 24시간 기준치 $150\mu\text{g}/\text{m}^3$ 을 행정목표치로 설정하고 규제하고 있다. 반면 미국에서는 PM-10에 대해서 연평균 $50\mu\text{g}/\text{m}^3$, 일평균 $150\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 규제하고 있으며 97년 9월부터 PM-2.5에 대해서도 연평균 $15\mu\text{g}/\text{m}^3$ 일평균 $65\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 규제하고 있다.

본 연구기간동안 관찰된 PM-10의 농도는 황사가 발생한기간에는 평균 $166.1\mu\text{g}/\text{m}^3$ 를 나타내 환경기준을 초과하였으며 최고 $506.5\mu\text{g}/\text{m}^3$ 에서 최저 $41.9\mu\text{g}/\text{m}^3$ 까지 비교적 높은 변화폭을 나타냈다. 한편 FPM은 우리나라 기준치가 없으므로 미국의 기준치를 비교하였으나 황사기간 동안의 평균농도는 기준 이내로 나타났다. 다만 최고농도를 기준으로 상위 3회에 걸쳐 일평균 기준을 초과한 것으로 나타났으며, 황사가 없었던 정상시에는 PM-10, PM-2.5 모두 환경기준 이내로 좋은 대조를 보였다.

Table 3. Comparison of Korea Air Environmental Standard for PM-10 & PM-2.5

	PM-10($\mu\text{g}/\text{m}^3$)		PM-2.5($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	
	yellow sand	non-yellow sand	yellow sand	non-yellow sand
STD	150	150	65*	65*
AVE	166.1	60.6	63.3	27.3
SD	134.7	31.1	24.6	9.9
MAX	506.5	143.1	79.6	53.1
MIN	41.9	24.1	35.9	16.1

* U.S.A air environmental standard

IV. 결 론

매년 발생하고 있는 황사는 중국에서 배출하는 유해대기오염물질을 흡착하여 대기 기류에 의해 장거리 이동되는 대기오염물질로 우리나라에 큰 영향을 주고 있다. 본 연구는 황사에 포함되어있는 PM-2.5의 농도와 화학물성을 황사가 없는 평상시와 비교하여 황사로 인한 대기오염물질의 변동특성을 조사하고 황사현상에 의해 이동되는 오염물질의 발생기원을 추정하여 향후 장거리 이동대기오염물질의 대책을 수립하는데 필요한 기초연구를 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

황사현상으로 인해 PM-2.5 및 PM-10은 평상시보다 각각 2.3~2.7배 증가하였으며 가스상 오염물질 중 NO₂와 SO₂가 평상시보다 약 1.6배 증가하여 황사가 대기오염에 미치는 영향은 매우 큰 것으로 나타났다.

황사가 발생하였을 때 포집한 PM-2.5으로부터 무기원소를 조사한 결과 평상시와 비교해서 농도변화가 심한 원소는 Al>Mg>Zn>Pb 순으로 황사가 금속 무기원소를 장거리 이동시키고 있음을 나타냈다.

황사기간 중 대기에어러졸의 농축계수를 구해본 결과 황사에 포함된 무기원소 중 Na, K, Ca, Mg, Fe는 자연발생 유래원소임을, Pb, Cr, Cd, Cu, Zn은 인위적오염유래 원소임을 알 수 있었다.

황사에 함유된 PM-2.5와 무기원소의 상관분석을 시행한 결과 Al>K>Pb>Mg 순으로 상관성이 높게 나타나 황사의 침착량에 따라 인위적 오염 중금속원소인 Pb의 침착량이 영향을 받는 것으로 나타났다.

황사기간 중 측정된 PM-10의 평균농도는 대기환경기준을 초과하였으며 최고 3.4배의 높은 초과율을 나타낸 반면 PM-2.5는 미국기준치 수준이었다.

황사는 중국의 사막지대나 황토고원에서 발생되어 제트기류를 타고 한반도에 영향을 주는 장거리 이동대기오염물질의 하나이다. 더욱이 최근 중국의 산업화로 발생하는 여러 가지 유해 대기오염물질들이 황사에 함유되어 한반도에 영향을 주고있는 문제는 더욱 심각해지고 있다. 따라서 황사가 함유하고 있는 대기오염물질들의 이동경로와 이동량 등을 보다 면밀히 산정해 볼 필요가 있을 것이다. 그래야 국가간의 환경문제를 해결하는데 적절한 대안을 제시할 수 있으며 국내 대기오염물질의 제어에도 도움이 될 것이라 사료된다. 본 연구를 기초로 해서 다음 년도에는 입도별 유해금속원소의 농도 및 황사 침착량 등 보다 발전된 연구를 계속하고자 한다.

참 고 문 헌

1. Jousaume, S., *Three dimensional simulations of the atmospheric cycle of desert dust particles using a general circulation model*, *J. Gophys*, 95(D2) pp1909~1941. 1990.
2. 김병화, 김동술, 수원지역 대기중 PM_{2.5}와 PM₁₀의 환경거동에 관한 연구, *한국대기환경학회지*, 16(2), pp89~101. 2000.
3. Chow, J. C. *Measurement methods to determine compliance with ambient air quality standards for suspended particles*, *J. Air & Waste Manage. Assoc.*, 45, pp320~382. 1995.
4. Wu Xuefang., *China national Atmospheric Environmental Planning Toward the 21st Century*, 국립환경연구원 2000년 환경의날 기념 국제세미나, pp31~48. 2000.
5. 이상인, 조석연, 심상규, *STEM II를 이용한 한국과 중국동부지역의 대기오염물질 이동/확산/침착 모사에 관한 연구II* 한중간 SO₂와 sulfate의 이동에 관하여, *한국대기환경학회지*, 11(5), pp163~170. 1995.
6. Bowen, H. J. M. *Trace Elements in Biochemistry*, *Academic Press, New York*, pp39~42. 1966.
7. 이민희, 한의정, 신찬기, 한진석, 김상균, 황사현

- 상시 대기 에어러졸 중 무기물질의 동태, 한국대
기환경학회지, 9(3), pp230~235. 1993.
8. 정용, 신동천, 대기오염물질의 위해성 평가 및
관리기술, pp178~186, 환경부. 1997.
9. 오종민, 배재근, 토양오염학, pp178-180, 신광
문화사. 1997.