

황사의 물리·화학적 특성

배귀남 | 한국과학기술연구원 대기자원연구센터
책임연구원
E-mail : gnbae@kist.re.kr

1. 머리말

황사는 아시아 대륙의 중심부에 위치한 건조지대와 황토지대의 작은 모래나 황토가 공중에 부유하거나 상층 바람을 타고 멀리 수송되어 다시 지면 가까이 낙하하는 현상을 말한다. 이러한 황사 현상은 봄철에 매우 빈번하게 발생하는데, 그 중 일부만 우리나라를 통과하여 이동하고 있다. 표 1은 1991년부터 2003년까지 우리나라 주요 도시에서 관측된 황사의 발생 현황을 정리하여 나타낸 것이다. 중국의 급속한 사막화로 1998년 이후부터 황사의 발생이 증가하는 추세이며, 특히 2002년에는 극심한 황사로 초등학교가 휴교되는 사태가 발생하고, 230편의 항공기가 결항되는 피해가 발생하였으나, 2003년에는 황사 발원지에서 강수, 강설이 많아 황사가 적게 발생하였다.

국내에서는 1980년대 초부터 기상청, 국립환경연구원을 중심으로 황사에 대한 연구가 수행되기 시작하였는데, 최근 황사가 사회적 이슈로 등장함에

따라 황사 현상의 규명, 황사 예보, 건강 영향, 황사의 산업적 피해 등 다양한 주제에 대하여 많은 연구가 수행되고 있다. 표 2는 1990년부터 2000년 사이 기상청의 황사 연구결과를 정리하여 나타낸 것이다. 이와 함께 황사에 대응할 수 있는 공기청정기도 개발되고 있다. 정부에서도 단기적으로는 황사 발생 전후에 정부 차원의 체계적 대응을 통해 피해를 최소화하면서 중장기적으로는 2002년부터 중국의 생태복원사업 지원 등 국제협력사업을 통해 근원적인 저감 대책을 마련하고 있다. 표 3은 정부의 부처별 황사 피해 최소화 대책을 정리하여 나타낸 것이다.

황사의 발생, 이동, 침적 등의 현상을 이해하고 인체의 건강, 산업 및 자연에 미치는 영향을 규명하는데, 황사의 물리·화학적 특성이 매우 중요한 역할을 한다. 황사는 매우 드물게 발생하므로 황사의 물리·화학적 특성이 잘 알려져 있지 않다. 본 고에서는 국내의 학술지 등에 발표된 황사 자료를 근거로 황사의 물리·화학적 특성에 대하여 알아보았다.

표 1. 최근 우리나라의 황사 발생 현황(1991~2003년)

구 분	서울	강릉	대전	대구	전주	광주	부산
'91	횟수	3(11)	2(4)	2(7)	2(5)	2(6)	2(5)
	기간	5.1-5.2 5.8-5.12 11.30-12.3	5.8-5.9 5.11-5.12	5.1 5.8-5.13	5.1 5.9-5.12	5.1 5.9-5.12	5.1 5.9-5.13
'92	횟수	3(8)	1(3)	1(2)	1(1)	1(4)	0
	기간	4.12 4.19-20 4.22-4.26	4.23-4.25	4.24-4.25	4.24	4.22-4.25	4.22-4.25 4.29

구 분	서울	강릉	대전	대구	전주	광주	부산	
'93	횟수	5(14)	4(10)	5(16)	5(13)	5(14)	5(14)	5(10)
	기간	4.1-4.4 4.7-4.8 4.22-4.24 4.27 5.8-5.11	4.1-4.3 4.7-4.8 4.23-4.24	4.1-4.4 4.7-4.8 4.22-4.24 4.27-4.28 5.8-5.12	4.1-4.3 4.7-4.8 4.23-4.24 4.27-4.28 5.8-5.11	4.1-4.4 4.7-4.8 4.23-4.24 4.27-4.28 5.8-5.11	4.1-4.4 4.7-4.8 4.23-4.24 4.27-4.28 5.8-5.11	4.1-4.3 4.7-4.8 4.22-4.24 4.27-4.28 5.11-5.12
'94	횟수	0	0	1(2)	1(1)	1(2)	1(1)	1(1)
	기간	-	-	4.13-4.14	4.13	4.13-4.14	4.13	4.13
'95	횟수	4(13)	2(4)	3(7)	4(8)	3(5)	4(7)	4(5)
	기간	4.7-4.9 4.18 4.23-4.26 4.28-5.2	4.8-4.9 4.29-4.30	4.7-4.9 4.23-4.25 5.3	3.12 3.20 4.7-4.9 4.23-4.25	3.12 4.7-4.9 4.23	3.12 4.7-4.8 4.18 4.23-4.25	3.12 3.20 4.7-4.8 4.24
'96	횟수	1(1)	0	1(1)	3(5)	3(4)	4(5)	1(2)
	기간	5.8	-	5.8	4.17-4.18 5.2 5.8-5.9	3.8 5.2 5.8-5.9	3.8 4.17 5.2 5.8-5.9	5.8-5.9
'97	횟수	1(1)	1(1)	1(1)	1(1)	1(1)	1(1)	1(1)
	기간	3.30	3.30	3.30	3.30	3.30	3.30	3.30
'98	횟수	3(13)	2(10)	3(14)	2(10)	2(11)	2(10)	2(7)
	기간	3.28-3.30 4.14-4.22 4.28	3.28-3.30 4.16-4.22	3.28-3.30 4.14-4.22 4.27-4.28	3.28-3.30 4.15-4.21	3.28-3.29 4.14-4.22	3.28-3.29 4.14-4.21	3.28-3.30 4.18-4.21
'99	횟수	3(6)	1(3)	2(5)	2(5)	1(4)	2(5)	1(4)
	기간	1.25-1.28 2.27 4.5	1.25-1.27	1.25-1.28 2.27	1.25-1.28 2.27	1.25-1.28	1.25-1.28 2.27	1.25-1.28
'00	횟수	6(10)	3(6)	4(9)	5(8)	6(12)	6(11)	5(8)
	기간	3.7 3.23-3.24 3.27-3.28 4.7-4.8 4.23 4.26-4.27	3.23-3.24 3.28-3.29 4.7-4.8	3.23-3.24 3.27-3.29 4.7-4.8 4.26-4.27	3.19 3.23-3.24 3.27 4.7-4.8 4.26-4.27	3.23-3.24 3.26-3.29 4.7-4.8 4.12 4.23 4.26-4.27	3.23-3.24 3.26-3.29 4.7-4.8 4.10 4.12 4.26	3.19 3.23-3.24 3.27 3.29 4.7-4.8 4.12
'01	횟수	7(27)	7(24)	7(24)	8(22)	9(23)	7(21)	8(21)
	기간	1.2 3.3-7 3.20-25 4.7-4.12 4.24-26 5.16-19 12.13-14	1.2-1.3 3.3-7 3.20-23 4.9-12 4.24-26 5.16-19 12.13-14	1.2 3.3-7 3.20-25 4.10-12 4.24-26 5.16-19 12.13-14	1.2 3.3-4 3.6-7 3.20-24 4.10-12 4.24-26 5.16-19 12.13-14	1.2-1.3 3.3-4 3.6-7 3.20-25 4.10-12 4.24-25 5.3, 5.16-18 12.13	1.2 3.3-7 3.20-24 4.10-14 4.24-25 5.16-19 12.13	1.2-1.3 3.3 3.6-7 3.20-23 4.10-14 4.24-25 5.16-19 12.13
'02	횟수	7(16)	6(14)	6(15)	5(12)	6(13)	6(14)	5(12)
	기간	1.12-1.13 3.17-3.19 3.21-3.23 4.8-4.10 4.12 4.16-4.17 11.11-12	1.12 3.16-3.19 3.21-3.23 4.8-4.10 - 4.17 11.11-11.12	1.12 3.17-3.23 4.8-4.10 4.12 4.17 11.11-11.12	- 3.17-3.18 3.21-3.23 4.8-4.11 - 4.17 11.11-11.12	1.12 3.17-3.19 3.21-3.23 4.8-4.10 - 4.17 11.11-11.12	1.12-1.13 3.17-3.19 3.21-3.23 4.8-4.10 - 4.17 11.11-11.12	- 3.17-3.18 3.21-3.23 4.8-4.11 - 4.17 11.11-11.12
'03	횟수	2(3)	2(3)	2(2)	2(2)	1(1)	1(1)	
	기간	3.27 4.12-13	3.27 4.12-13	3.27 4.12	3.27 4.12	3.27	3.27	

* ()는 발생일수

표 2. 기상청의 황사 연구결과(1990~2000년)

년 도	저 자	학술지/보고서	제 목	내 용
1990	윤용황	한국 기상학회지	· 한반도에 수송되는 황사의 특징에 관한 연구	· 황사 발원지 및 발생 원인 · 일기도 분석을 통한 이동 경로 분석 · 대기의 혼탁도 증가 및 태양 에너지 감소
1993	이재규 김영화 김정선	기상연구 논문집	· 1993년 4월 1~3일에 관측된 황사 현상의 사례 연구	· 대기의 혼탁도 증가 및 시정 감소 · 중금속 및 공해물질 유입 가능성 제시 · 등압면상에서의 2차원 유적선 분석
1994	오성남 등	환경처 보고서	· 황사 및 장거리 이동되는 오염물질이 우리나라 에 미치는 영향 연구	· 황사의 이동 경로 및 상태 조사 · 황사의 발원지 원인 조사 · 황사발생시 총량 산정 및 화학적 특성 조사
"	김우규 전영신 이원환 김현미	한국 대기보전 학회지	· 서울 부유분진 농도와 황사 특성에 관한 사례 연구	· 황사시 서울의 총부유분진 농도가 평상시 에 비해 10배 이상 증가함
1995	정관영 박순용	한국 기상학회지	· 한반도에 황사 출현시의 중관 기상 특징	· 한반도에 황사 출현 2~3일 전에 황사 발원지에서는 한랭한 고기압이 발달함 · 황사의 이동경로는 2일 전 고비사막, 하루 전에 황토고원을 통과함 · 타클라마칸 사막의 영향은 적음
1996	조하만 등	기상연구소 기본과제	· 도시 대기중 에어로솔의 광화학적 특성 연구	· 황사시 대기의 혼탁 정도가 심함 · 황사시 장거리 수송되는 토양 입자의 평가
1998	정관영 박순용	한국 대기보전 학회지	· 황사의 크기 및 침착량에 대한 수치 모의	· 황사 수치 모의로 황사의 정량적 예측 시도 · 한반도를 통과하는 황사의 양은 2.65~8.91 메카톤(건성침착량: 2.1~490킬로톤, 습성: 1.5~56킬로톤)
"	조하만 등	기상연구소 기본과제	· 한반도에서 봄철 에어로솔 집중관측 및 분석	· 봄철 에어로솔의 물리, 화학적 특성 파악 · 황사시의 에어로솔 크기분포는 주로 2.23~6.06 μm 임
1999	최재천 조하만 김지영 김 산 박기준	한국 기상학회지	· 1998년 봄철 서울지역 에어로솔 중 TSP와 PM ₁₀ 의 화학적 특성 비교	· 황사시 PM ₁₀ 은 약 45% 증가, TSP는 약 50% 증가 · 황사시 황산염과 질산염도 증가함

표 2. 계속

년 도	저 자	학술지/보고서	제 목	내 용
1999	오성남 등	기상연구소 기본과제	· 황사 현상과 관련된 에어로솔 특성 연구	· 황사의 과거 역사 자료 복원 · 황사 유적선 예상도 개발 · 황사눈, 황사비, 에어로솔 광학깊이 분석
"	전영신 김지영 최재천 신도식	한국 대기환경 학회지	· 황사시 서울과 안면도에서 관측된 에어로솔의 수 농도 특성	· 서울과 안면도의 황사 기간 중 에어로솔 수 농도의 차이 심함 · 황사 입자의 상호 관련성 분석
"	최재천 조하만 전영신 박기준	한국 기상학회지	· 1998년 봄철 서울에서 관측된 에어로솔의 금속성분에 관한 연구	· 황사시 알칼리 계통의 금속원소가 1.66~3.99 배 증가 · 황사시 토양의 기여율이 약 2배 이상 높음
"	최재천 조하만 박기준 김 산	한국 기상학회지	· 서울과 안면도에서 관측된 에어로솔의 화학적 특성 비교	· 황사시 안면도가 서울보다 토양의 기여율이 2배 정도 높게 나타남 · 토양기원인 Al과 Fe는 황사시 크게 증가
"	신도식 김 산 김정식 차주완	한국 대기환경 학회지	· 안면도에서 1998년 봄철에 관측된 황사의 광학적 특징	· 황사 입자에 의한 일사 감쇄 특성 조사 · 대기 혼탁도 분석
2000	전영신	한국 기상학회지	· 조선왕조실록에 나타난 황사 현상	· 조선왕조 500년 동안의 황사 관측 기록(57건)의 조사 및 분석
"	김지영 전영신 조하만 최재천 김 산	한국 기상학회지	· 도시지역과 농촌지역에 내린 강수의 중화 특성	· 황사가 강수에 미치는 중화 특성 분석
"	전영신 김지영 부경은	한국 대기환경 학회지	· 겨울철 황사 현상의 특징	· 전국적 규모로 나타난 1999년 1월 겨울철 황사 사례의 특징 분석
"	전영신 오성남 권원태	한국 제4기학회지	· 고려사에 나타난 황사와 황무	· 고려사에 나타난 황사(총 47건) 현상과 황무 자료 비교 분석

표 3. 정부의 부처별 황사 피해 최소화 대책(2003년)

부 처 명	주 요 업 무	2003년도 세부추진계획
환 경 부	<ul style="list-style-type: none"> ○ 황사 피해 종합대책 수립·추진 - 미세먼지, 중금속 등 측정 - 국제협력사업 추진 - 황사의 위해성 등 연구 	<ul style="list-style-type: none"> - 황사 종합대책 마련·시행 - 미세먼지 상시측정(174개소) 기상청 실시간 전송, 측정소 증설(6개소) - 황사중 중금속, 다이옥신 측정 - 국제협력 및 황사 위해성 연구 강화
교육인적 자 원 부	<ul style="list-style-type: none"> ○ 어린이 보호 대책 - 학교장 책임 하에 휴업·단축 수업 등 신속적 실시 - 야외학습 중지 등 지도활동 강화 	<ul style="list-style-type: none"> - 황사 비상대책반 운영 ·시·도교육청, 각급 학교와 비상연락망 구축, 신속한 상황전파 ·황사특보 발령단계별 대응 조치
외교통상부	<ul style="list-style-type: none"> ○ 황사 관련 국제협력사업 지원 	<ul style="list-style-type: none"> - 관계부처 국제협력사업 지원
행 정 자치부	<ul style="list-style-type: none"> ○ 대국민 홍보 및 재해대책 예산 지원 - 황사대비 행동요령에 대한 대국민 홍보 시행 - 황사대책 소요예산 지원(재해대책 예비비) 등 	<ul style="list-style-type: none"> - 대국민 홍보 실시 ·반상회보(3, 4월) 게재 ·대형 전광판 문자 표출(4, 5월) ·TV 방송 및 홍보 비디오 활용(3~5월) ·홍보전단지(5만부) 제작·배포 등 - 지자체 황사대책 지도·감독
농림부	<ul style="list-style-type: none"> ○ 농작물 및 가축 피해 대책 - 축사 세척, 소독 및 구제역 바이러스 정밀검사 실시 등 	<ul style="list-style-type: none"> - 농업인 대상 가축 및 시설작물 관리요령 집중 홍보 및 지도강화 - 농·축산물에 미치는 영향 조사·연구사업 (4건) 추진
산 업 자원부	<ul style="list-style-type: none"> ○ 산업보호 대책 - 조선·자동차 업종 등의 도장작업 조정 등 대응방안 강구 	<ul style="list-style-type: none"> - 업종별 산업피해 파악, 대응체제 구축 ·황사정보 적시 제공 ·야외 공정 작업일정 조정
보 건 복지부	<ul style="list-style-type: none"> ○ 황사 관련 보건의료 대책 - 황사로 인한 질병(안질환·호흡기·피부질환 등) 예방 강화 	<ul style="list-style-type: none"> - 병·의원을 통한 질병 감시체계 운영 - 질병예방 및 관리요령, 식품관리요령 홍보
건 설 교통부	<ul style="list-style-type: none"> ○ 항공기 결항 대비 대책 - 항공기 안전사고 예방, 결항시 대체 교통수단 확보대책 강구 	<ul style="list-style-type: none"> - 항공기 안전운항 확보 - 항공기 결항대비 대체 공항 및 교통수단 확보 - 항공 교통상황 신속 전파
국 정 홍보 처	<ul style="list-style-type: none"> ○ 황사 피해 예방·최소화를 위한 국민홍보 지원 	<ul style="list-style-type: none"> - 황사 피해 예방 홍보 ·KTV 등 국정홍보처 보유매체 활용 ·TV, 라디오 방송을 통한 홍보 - 재외 주재 홍보관 활용 황사정보 수집 관계부처 제공
기 상 청	<ul style="list-style-type: none"> ○ 황사 특보 발령 및 이동경로 파악 체계 구축 	<ul style="list-style-type: none"> - 황사 특보제 운영 - 황사 관측망 보강 ·미세먼지 측정소 확충(3개소→7개소) ·수직분포 관측소 확충(1개소→3개소) ·국의 관측소 설치(5개소) - 황사추적모델 개선 등 예보기능 강화

2. 황사의 물리적 특성

황사 입자는 태양 복사를 산란 또는 흡수하여 시정을 감소시킨다. 일반적으로 대기중 입자의 농도가 낮으면 시정거리가 멀고, 반대로 입자의 농도가 높으면 시정거리가 짧아진다. 그림 1은 정용승 등이 2000년 3월 23일과 24일 충북 청원에서 관측된 시정과 TSP(Total Suspended Particulates), PM₁₀ 농도의 관계를 나타낸 것인데, 예상대로 시정과 입자 농도는 반비례 관계임을 알 수 있다.

황사의 발원지, 이동경로 등에 따라 지역별로 받는 황사의 영향이 달라진다. 즉, 각 지역에 황사가 도달하는 시각, 머무르는 시간, 입자 농도 등이 다르다. 그리하여 2002년 4월부터 황사에 대한 예보 및 경보제 운영 기관이 기상청으로 일원화되어 기상청에서는 황사 강도를 3단계로 구분하여 예보하

고 있다. 즉, 황사로 인해 1시간 평균 미세먼지 농도가 200~300 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 정도가 될 때 약한 황사, 300~500 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 정도가 될 때 보통 황사, 500 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이상일 때 강한 황사로 예보하게 된다. 이때 1,000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이상인 경우 매우 강한 황사로 예보할 수 있다. 이와 함께 3단계의 황사특보를 발표하고 있다. 즉, 황사로 인해 1시간 평균 미세먼지 농도 300 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이상이 2시간 이상 지속될 것으로 예상될 때 황사정보, 500 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이상이 2시간 이상 지속될 것으로 예상될 때 황사주의보, 1,000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이상이 2시간 이상 지속될 것으로 예상될 때 황사경보를 발표한다.

그림 2는 2004년 2월 25일 서울에서 발생된 황사 입자를 3대의 입자 측정기(Aerodynamic Particle Sizer, Optical Particle Counters)로 측정된 0.5 μm 이상인 입자의 수 농도의 일변화를 나타낸 것이

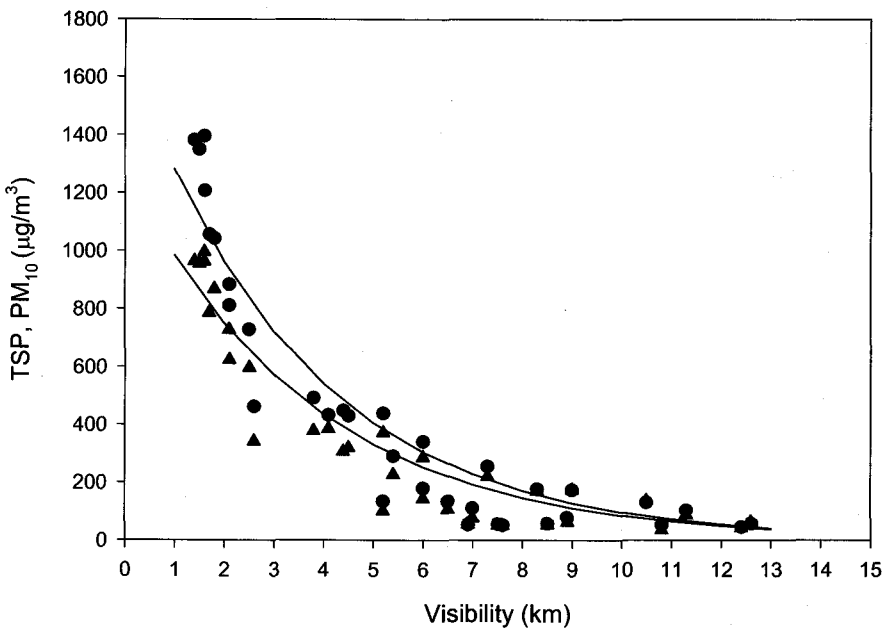


그림 1. 시정과 TSP, PM₁₀ 농도의 상관성

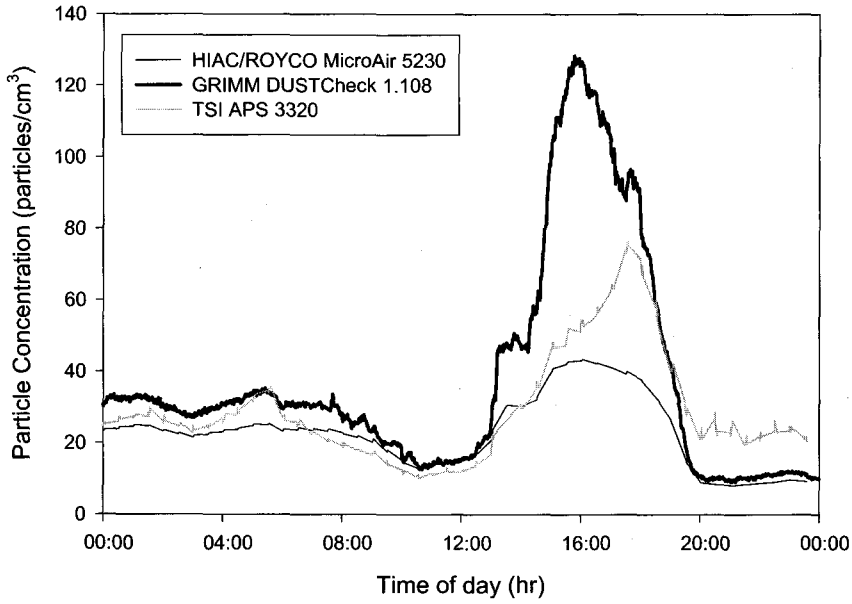


그림 2. 2004년 2월 25일 측정된 0.5 μ m 이상인 황사의 수 농도의 일변화

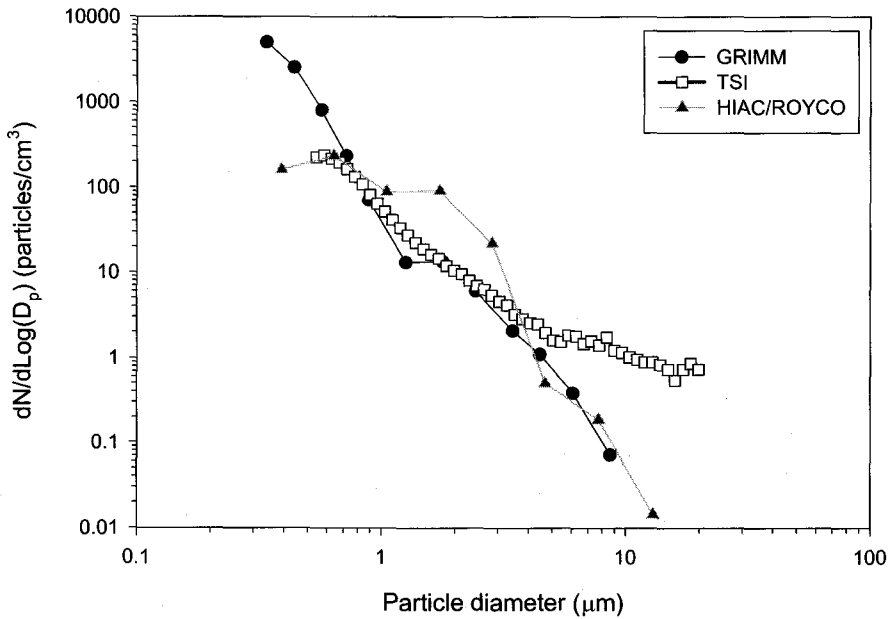


그림 3. 2004년 2월 25일 16시경 측정된 황사의 입경분포

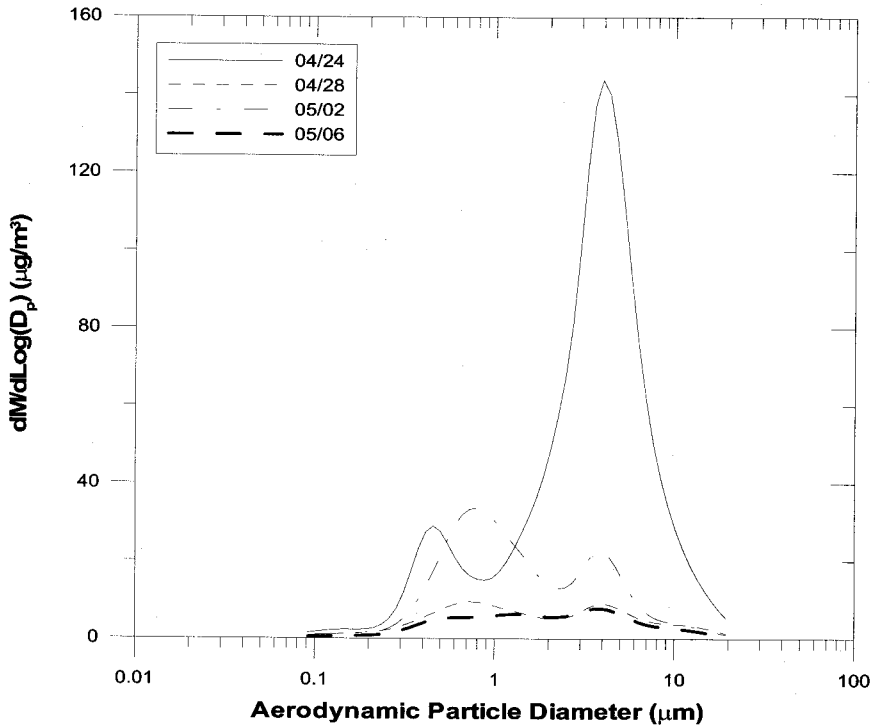


그림 4. 2001년 봄철 제주도 고산에서 측정된 대기 에어로졸의 입경분포

다. 낮 13시경부터 수 농도가 증가하기 시작하여 16시경 최대 수 농도를 나타낸 후 감소하여 저녁 20시경 평상시와 비슷한 농도가 되었다. 이러한 측정 자료는 서울에 도달한 황사의 규모, 미치는 영향을 평가하는데 기초 자료로 활용될 수 있다. 그림 3은 16시경 측정된 황사의 입경분포를 나타낸 것이다. 그림 2와 3을 보면, 측정기의 입자 측정원리, 특성 등의 차이로 인해 측정되는 입자의 농도와 입경분포가 다를 수 있다는 것을 알 수 있다.

그림 4는 2001년 봄철 제주도 고산에서 다단 입액터(Microorifice Uniform Deposit Impactor)를 사용하여 대기 에어로졸의 입경분포를 측정하여 나타낸 것이다. 기상청에서 4월 25일과 26일 황사가 발생하였다고 발표하였으며, 48시간 동안 입자를

채취하였으므로 4월 24일 시료에는 황사 입자가 포함되어 있다. 4월 24일의 입경분포를 보면, 다른 날에 비해 질량 농도가 매우 높는데 황사로 인해 주로 1 µm 이상인 조대입자의 농도가 크게 증가하였다.

3. 황사의 화학적 조성

황사의 발원지는 고비 사막, 타클라마칸 사막, 텐켈 사막 등 사막과 황하강 유역의 황토 지대로 알려져 있다. 표 4는 중국의 간숙성과 닝샤 지역에서 채취한 황토와 모래의 화학적 조성을 분석한 결과를 나타낸 것이다. 황토와 모래의 화학적 조성은 거의 비슷하며, 주로 Si, Al, Ca, Fe 등이 함유되어 있음을 알 수 있다.

표 4. 중국의 황토와 모래의 화학적 조성

(단위 : %)

구 분	Al	Ca	Mg	Na	Mn	K	Fe	Si
황토 표준 시료	6.01	5.83	1.57	1.33	0.063	1.94	2.94	27.7
모래 표준 시료	5.88	5.33	1.57	1.38	0.064	1.70	3.02	28.0

황사의 영향을 정량적으로 추정하기 위하여 강승우와 김동술은 SEM/EDX를 이용하여 개별 입자를 분석하여 표 5와 같이 황사 입자와 지역 토양에 대한 PM₁₀ 오염원 분류표를 작성하였다. 황사 시료 Y-1에는 14개, Y-2에는 15개 입자군이 창출되었으며, 각 입자군에 대한 질량분율이 제시되어 있다. 각 시료의 질량분율은 Y-1의 경우 Na-Si-Mg 입자군이 0.385, Na-Si-Al-Mg 입자군이 0.203, Na-Al-Si-Mg 입자군이 0.112로 높게 조사되었다. 또한, Y-2의 경우 Si-Al-Na-Mg 입자군이 0.283, Al-Si-Na-Mg 입자군이 0.269, Na-Si-Al-Mg 입자군이 0.152로 높게 조사되었다. 따라서 Na-Si-Al-Mg 입자군이 황사 오염원에서 공통적으로 높게 조사되어 대표적인 입자군이라고 볼 수 있다. 한편, 지역 토양의 경우 시료 S-1(수원)은 7개 입자군, 시료 S-2(속초)는 20개 입자군, 시료 S-3(제주)는 15개 입자군으로 분류되었다. S-1의 경우 Si 입자군이 0.515, Si-Mg 입자군이 0.231로 높았고, S-2의 경우 Na-Si-Mg 입자군이 0.205, Mg 입자군이 0.104, Na-Mg 입자군이 0.100으로 각각 조사되었으며, S-3의 경우 Na-Si-Mg 입자군이 0.204, Si-Na-Mg 입자군이 0.123, Na-Si 입자군이 0.120으로 높았다. 각 지역 토양 입자군에는 공통적으로 높게 조사된 입자군이 없었으므로, 지역마다 특징적인 입자군이 존재하였고, 황사와 해안지역 토양 입자군에서 Na-Si-Mg 입자군이 모두 높게 조사되었다.

표 5. 황사 입자와 지역 토양에 대한 PM₁₀ 질량분율

입자군	오염원				
	Y-1	Y-2	S-1	S-2	S-3
Al-Na-Si	0.012				
Al-Na-Si-Mg	0.017				
Al-Si			0.096		
Al-Si-Na-Mg		0.269			
Br-Mg				0.057	
Br-Na-Mg				0.045	
Br-Na-Si-Mg				0.026	
Br-Si-Na-Mg				0.014	
Mg			0.063	0.104	
Mg-Na				0.005	
Na				0.046	
Na-Al-Si-Mg	0.112	0.014			
Na-Br				0.063	
Na-Br-Mg				0.075	
Na-Br-Si-Mg				0.070	
Na-Mg				0.100	
Na-Mg-Br				0.038	
Na-Si	0.039			0.029	0.120
Na-Si-Al	0.013	0.003			
Na-Si-Al-Mg	0.203	0.152			
Na-Si-Br				0.010	
Na-Si-Br-Mg					0.090
Na-Si-Mg	0.385	0.033		0.205	0.204
Na-Si-Mg-Al		0.013			
Si			0.515		0.049
Si-Al			0.026		0.021
Si-Al-Mg		0.054			0.022
Si-Al-Mg-Na	0.008	0.014	0.032		
Si-Al-Na		0.021	0.037		
Si-Al-Na-Mg	0.047	0.283			0.030
Si-Br					0.020
Si-Br-Mg					0.024

Si-Br-Mg-Na				0.022	
Si-Br-Na-Mg					0.070
Si-Mg	0.020	0.018	0.231	0.015	0.084
Si-Mg-Na	0.015	0.009			0.040
Si-Na	0.047	0.006		0.008	0.072
Si-Na-Al-Mg	0.017	0.073			
Si-Na-Br-Mg					0.030
Si-Na-Mg	0.065	0.038		0.042	0.123
Si-Na-Mg-Br				0.024	
입자군의 수	14	15	7	20	15

제주도 고산은 한반도의 영향을 적게 받을 수 있으므로 우리나라 배경농도를 측정하는 곳으로 잘 알려져 있으며, 특히 중국으로부터 대기오염물질의 장거리 이동을 밝히는 연구를 수행하는데 많이 활용되고 있다. 박민하 등은 1993년부터 1996년 사이 제주도 고산에서 4월과 5월 사이에 측정된 금속 성분과 무기이온 성분의 농도 자료를 사용하여 황사

가 발생하였을 때와 발생하지 않았을 때 입자의 조성에 어떤 변화가 일어났는가를 통계적으로 검토하였다. 표 6과 7은 황사가 발생하였을 때와 발생하지 않았을 때 금속 성분과 무기이온 성분의 농도를 각각 비교하여 나타낸 것이다. 황사가 있을 때와 황사가 없을 때의 금속 성분 평균 농도의 비는 Fe, Al, Ca, Ti, Ni가 3 이상이고, 다른 원소들도 1보다 커 황사 현상으로 인해 농도가 증가한 것으로 확인되었다. 그러나 Cd만 예외적으로 1 정도이었다. 무기이온의 경우 암모늄염(NH₄⁺)을 제외하고 황사시 농도가 더 높았다. 인위적 성분으로 알려진 화학 성분 가운데 황사에 의해 유의할 정도로 증가한 성분은 납(Pb)과 질산염(NO₃⁻)이다. 질산염은 대기에서 토양 입자와 상관관계가 높은 것으로 알려져 있다. 이것은 토양의 염기성 성분과 기체상의 질산(HNO₃)이 상호 반응하기 때문이다.

표 6. 황사와 비황사시 금속 성분의 농도

(단위: ng/m³)

구 분		Fe	Al	Ca	Zn	Ti	Mn	Pb	V	Ni	Cu	Cd	Cr
황사 (9개 시료)	평 균	1640	1360	1550	79.1	50.7	36.7	45.5	6.28	25.1	11.2	1.56	4.02
	표 준 편 차	1220	1030	875	63.4	28.8	37.7	36.8	2.53	34.2	17.3	0.979	5.27
비황사 (135개 시료)	평 균	453	393	502	58.3	15.2	13.6	21.5	5.49	7.97	5.92	1.73	3.43
	표 준 편 차	472	466	471	72.5	13.5	13.5	21.6	4.03	12.5	8.84	1.40	4.32

표 7. 황사와 비황사시 무기이온 성분의 농도

(단위: µg/m³)

구 분		NH ₄ ⁺	Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	SO ₄ ²⁻	NO ₃ ⁻	Cl ⁻	nss SO ₄ ²⁻
황사 (9개 시료)	평 균	1.22	3.43	0.888	2.71	0.587	10.6	2.93	4.46	9.75
	표 준 편 차	1.10	2.48	0.542	1.95	0.322	5.98	1.53	4.91	6.13
비황사 (135개 시료)	평 균	1.53	1.45	0.365	0.626	0.266	8.27	1.50	1.41	7.90
	표 준 편 차	1.31	1.08	0.316	0.627	0.213	4.41	1.23	1.73	4.45

표 8. PM₁₀중 수용성 이온의 평균 농도 및 농도비

(단위: µg/m³)

분 류	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	NH ₄ ⁺	Na ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺
비황사	8.04	7.28	4.50	0.77	0.36	0.08	0.68
황사	13.14	12.76	5.51	0.88	0.56	0.13	1.32
강한 황사	8.16	11.16	3.87	1.29	0.63	0.33	4.66
황사/비황사	1.63	1.75	1.22	0.15	1.54	1.54	1.93
강한 황사/비황사	1.02	1.53	0.86	1.68	1.72	3.95	6.85
강한 황사/황사	0.62	0.87	0.70	1.46	1.12	2.57	3.55

표 9. PM₁₀에 대한 수용성 이온의 질량분율

(단위 : %)

분 류	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	NH ₄ ⁺	Na ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺
비황사	13.83	12.52	7.74	1.32	0.63	0.14	1.17
황사	16.92	16.44	7.09	1.13	0.72	0.17	1.69
강한 황사	4.75	6.50	2.26	0.75	0.36	0.19	2.72

표 10. PM₁₀중 금속 성분의 평균 농도 및 농도비

(단위 : Na-Fe µg/m³, Mn-Pb ng/m³)

분 류	Na	Mg	Al	Ca	Fe	Mn	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	Cd	Pb
비황사	0.50	0.33	1.81	1.18	1.20	36.4	11.85	0.99	6.36	38.3	191.1	2.10	58.7
황 사	0.63	0.71	2.44	1.91	2.06	66.4	10.39	1.70	12.08	53.4	241.6	3.70	109.5
강한황사	1.59	3.07	10.47	6.89	6.42	152.0	9.58	2.32	7.34	30.2	95.8	1.24	76.0
황사/비황사	1.26	2.16	1.35	1.62	1.72	1.83	0.88	1.71	1.90	1.39	1.26	1.77	1.86
강한 황사/비황사	3.16	9.29	5.79	5.85	5.36	4.18	0.81	2.33	1.15	0.79	0.50	0.59	1.29
강한 황사/황사	2.50	4.30	4.29	3.61	3.12	2.29	0.92	1.36	0.61	0.56	0.40	0.34	0.69

Choi 등은 1998년 봄철 서울에서 PM₁₀을 측정하여 수용성 이온 성분과 금속 성분을 분석하여 비황

사, 황사 및 강한 황사로 구분하여 농도를 비교하였다. 표 8을 보면, 보통 황사시 NO₃⁻, SO₄²⁻, NH₄⁺의

농도가 높았고, 반면에 강한 황사시 Na^+ , K^+ , Mg^+ , Ca^+ 의 농도가 높았다. 비황사시에 비해 강한 황사시 Ca^+ 와 Mg^+ 의 농도가 크게 증가하였으므로, Ca^+ 가 황사 발생과 강도를 나타내는 좋은 지표가 될 수 있다. 표 9를 보면, PM_{10} 의 주된 성분은 NO_3^- , SO_4^{2-} , NH_4^+ 이고, 보통 황사시 이들 성분이 40% 정도를 차지한다. 반면에 강한 황사시 이들 수용성 이온 성분의 질량분율이 18%로 감소하였는데, 이것은 비황사시 37%의 절반 정도이다.

4. 맺음말

황사는 높은 농도의 입자가 일시적으로 이동하여 인체의 건강, 산업 등에 영향을 미치는 자연 현상이다. 그런데 황사의 발원지인 중국에서 황사가 발생하여 바람을 타고 우리나라에 도달하는데 시간이 걸리므로, 황사의 규모, 이동 경로 등을 정확히 예측할 수 있으면 미리 대비하여 피해를 줄일 수 있다. 또한, 황사의 물리·화학적 특성을 정확히 알고 있으면 황사의 영향을 객관적으로 평가하여 황사 문제에 현명하게 대처할 수 있다. 그러나 우리나라에서 황사는 간헐적으로 발생되므로 황사의 특성에 대한 자료가 많지 않으며, 지금까지는 주로 거시적 관점에서 황사를 다루었는데 앞으로는 미시적 관점을 포함하여 황사의 참 모습을 과학적으로 밝혀내는 연구들이 많이 수행되길 기대해 본다.

- 참고문헌 -

1. 강승우, 김동술 (2000) 황사의 오염원분류표 개발을 위한 개별입자분석, 한국대기환경학회지, 16(6), 565-572.
2. 박민하, 김용표, 강창희 (2001) 황사/비황사의 입자 조성 변화: 1993~1996년 봄철 고산 측정자료, 한국대기환경학회지, 17(6), 487-492.
3. 배귀남, 이승복, 문길주, 최병철, 최재천, 박기준, 안정언 (2004) APS와 OPC를 이용한 대기 에어로졸 입경분포 측정결과와의 비교, 한국대기환경학회 춘계학술대회, 발표 예정.
4. 심상규 등 (2003) 황사 발생 및 수송 과정에 관한 연구, 한국과학기술연구원 보고서.
5. 정용승, 김학성, 박기현, 전종갑, 첸수젠 (2000) 1997~2000년에 관측된 황사의 농도와 부하량 및 시정: 위성과 기상 분석, 한국기상학회지, 36(5), 583-600.
6. Choi, J.C., Lee, M., Chun, Y., Kim, J., and Oh, S. (2001) Chemical composition and source signature of spring aerosol in Seoul, Korea, J. of Geophysical Research, 106(D16), 18,067-18,074.
7. Nishikawa, M., Hao, Q., and Morita, M. (2000) Preparation of evaluation of certified reference materials for Asian mineral dust, Global Environ. Res., 1, 103-113.