

연구논문

부산지역의 겨울철 황사 발생 특성

전 병 일

신라대학교 환경공학과

(2012년 5월 21일 접수, 2012년 8월 2일 승인)

Characteristics of wintertime Asian Dust occurrence at Busan

Byung-Il Jeon

Department of Environmental Engineering, Silla University, Busan 617-736, Korea

(Manuscript received 21 May 2012; accepted 2 August 2012)

Abstract

The purpose of this study was to analyze the characteristics of fine particles concentration and meteorological parameters, and long range transport of wintertime Asian dust at Busan. Also we studied occurrence frequency and tendency of wintertime Asian dust from 1961 to 2010 in Korea. Asian dust occurred most frequently in the spring, the next to winter in Korea. Wintertime Asian dust is steadily increasing recently. Asian dust in Busan was the most occurred in 2001 with 21 days, followed by 12 days in 2002, and 10 days in 2006. The annual mean frequency during the past 12 years(1999~2010) was 7.5 days, and it was two times more than that during the past 50 years(3.8 days). Wintertime Asian dust in Busan has occurred 6 episodes since 2008, and it all occurred in December except for 20 Feb. 2009. The highest concentration of wintertime Asian dust was recorded mostly at Hakjangdong and Jangrimdong which are industrial area. Maintenance time of Asian dust at Busan was from 1hr 30min to 9hr 20min, it was shorter than in the spring. It took from 10 to 15 hours move to Busan after Asian dust was first detected in Korea. Wintertime Asian dust originated from Gobi desert in Mongolia and inner Mongolia near China, except for 9 Dec. 2008 at Busan.

Keywords : Asian dust, fine particle, meteorological parameter, wintertime

1. 서론

최근 황사현상은 중국의 황토고원, 내몽골 고원, 훈산타크 사막에서의 기온 상승 및 강수량 감소 그리고 경작지개발과 과도한 토지이용에 의한 사막화와 산림감소 등의 영향으로 빈도와 강도가 증가하고 있다. 또한 황사가 중국 동부지역의 산업지대를 통과하면서 대기오염물질과 함께 우리나라와 일본으로 수송되어 인체 및 동·식물 그리고 경제에 심각한 영향을 미치고 있다. 특히 낮은 기온과 건조한 날씨로 면역력이 최저로 떨어진 겨울철에 중금속이 포함된 황사가 발생한다면 알레르기에 의한 각종 피부염을 유발될 수 있다(Monn *et al.*, 1997). 또한 겨울철의 안정한 대기에서 발생하는 연무와 황사 입자가 결합된다면 인체에 더욱 더 치명적인 영향을 미칠 수 있다. 대체로 황사는 발원지의 상황과 수송과정 그리고 침적조건으로 인해 봄철에 가장 높은 발생빈도를 나타내나(윤용환, 1990), 최근에는 1월을 포함한 겨울철에도 종종 황사가 발생하여 우리나라에 영향을 주기도 한다.

국립환경과학원(2010a)은 전국 71개 도시에서 측정된 2009년도 12월의 미세먼지(PM_{10}) 농도가 겨울 황사의 영향으로 큰 폭으로 증가하였고, 전국적으로 최근 5년 평균 대비 미세먼지 농도 수준은 월 평균치가 $5\mu g/m^3$ 정도 증가하였으며, 수도권 전 지역에서의 미세먼지 농도는 $9\mu g/m^3$ 정도의 큰 증가폭을 보였다고 하였다. 전영신 등(2000)은 겨울철에 관측된 황사에 대해 지상과 상층의 기압분포 특성, 이동경로, 대기 중의 부유분진의 농도, 에어로졸 수농도, 황사 후 내린 눈의 화학적 특성을 고찰한 바 있고, Chun *et al.*(2001)은 종관바람장과 후방궤적선을 이용하여 겨울철의 황사 이동속도를 분석한 결과 봄철에 비해 상대적으로 빠르다고 하였다. Kim and Park(2001)은 1999년 1월 25일~27일 사이에 우리나라에 영향을 준 겨울철 황사 발생 시 4곳에서 측정된 에어로졸 분석을 통해 황사의 물리적, 화학적 특성을 고찰한 바 있다. Liu *et al.*(2009)은 타이완의 겨울철 황사는 PM_{10} 농도의 24~30%인 $5\mu g/m^3$ 정도 기여를 하며, 황사가 심

할 때는 60~70% 정도 증가한다고 하였다. 부산지역에서 겨울철 황사에 대한 연구는 전병일 등(2002)이 1999년 1월 황사를 대상으로 종관기상학적 특성과 부유분진 분포에 대해 조사한 바 있으나, 장기간에 걸쳐 체계적으로 부산지역 겨울철 황사를 연구한 바는 없다.

따라서 본 연구에서는 부산지역에서 황사가 관측된 1961년부터 2010년까지 50년간 겨울철 황사발생의 빈도와 경향을 고찰하고, 2008년 이후 부산지역에서 발생한 여섯 사례의 겨울철 황사를 대상으로 미세먼지 농도 특성, 기상학적 특성, 이동경로 등을 구체적으로 고찰하였다.

II. 자료 및 방법

본 연구에 사용된 자료는 크게 미세먼지 농도자료(PM_{10} , $PM_{2.5}$)와 기상자료로 나눌 수 있다. 겨울철 황사 발생 시 부산지역의 PM_{10} 과 $PM_{2.5}$ 는 Fig. 1과 같이 부산광역시 보건환경연구원에서 측정하고 관리하는 자료를 사용하였고, 겨울철 황사의 이동속도는 기상청 황사센터에서 관측하여 제공하는 PM_{10} 을 사용하였다. 또한 부산지역의 황사발생시각과 종료시각 그리고 각종 지상기상자료는 부산지방기상청의 일기상통계표(기상청, 2012)를 사용하였으며, 황사의 발생과 이동을 고찰하기 위해 지상일기도와 상층일기도 그리고 미국해양기상청(National

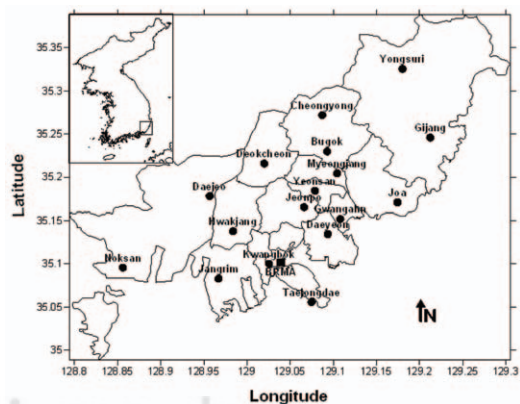


Fig. 1. Automatic air quality monitoring sites in Busan. BRMA is Busan Regional Meteorological Administration

Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA)에서 제공하는 backward trajectory를 이용하였다(Draxler and Rolph, 2012). 사례연구 대상일은 최근 3년간(2008~2010년) 부산지역에서 발생하였던 겨울철 황사를 선정하였으며, 2008년 12월 9일, 2009년 2월 20일, 2009년 12월 26일, 2009년 12월 30일, 2010년 12월 3일, 2010년 12월 11일로 모두 6개 사례이다.

III. 결과 및 고찰

1. 우리나라 황사의 계절적 특성

Fig. 2는 1961년부터 2010년까지 50년간 부산을 비롯한 전국의 주요 도시와 울릉도에서 발생한 황사의 계절별 발생비율을 나타낸 것이다. 대부분 봄철(3, 4, 5월)의 발생 비율이 가장 높았으며, 특히 울릉도가 86.3%로 가장 높았고 가장 남쪽에 위치한

제주도가 81.9%로 가장 낮았다. 두 번째로 발생비율이 높은 계절은 겨울철(1, 2, 12월)이었으며, 특히 서쪽에 위치한 광주가 12.6%로 가장 높았고 가장 동쪽에 위치한 울릉도가 9.9%로 가장 낮았으며, 본 연구지역인 부산도 11.6%로 비교적 높은 편이었다. 가을철(9, 10, 11월)은 3.0%(울릉도)~5.6%(제주)로 매우 낮았으며, 여름철(6, 7, 8월)은 발생하지 않았다. Kim *et al.*(2008)은 3월과 4월에 황사가 약 80%가 발생하고 겨울철에도 약 10~15%가 발생한다고 하였다. 따라서 겨울철의 황사발생빈도가 봄철 다음으로 높아 봄철만의 불청객이 아닌 겨울철에도 자주 발생한다는 것을 알 수 있다.

Table 1은 우리나라 주요도시와 울릉도에서 겨울철 황사발생일수를 10년 간격으로 살펴 본 것이다. 전체적으로 보면, 1960년대와 1970년대에 각각 20일과 28일이었고 1980년대는 2일로 발생빈도가 낮았으며, 1990년대와 2000년대에 각각 27일과 85일이었다. 특히 2000년대의 발생일이 전체의 52.5%로 겨울철 황사의 발생이 최근 급격히 증가하는 추세를 나타내었다. 2000년대를 지역적으로 보면, 서쪽인 광주와 서울이 각각 22일과 21일로 가장 많았고 우리나라의 가장 동쪽인 울릉도가 7일로 가장 작았으며, 부산은 제주와 같이 11일이었다. 지역적으로 볼 때, 광주가 37일로 가장 높았고 울릉도가 13일로 가장 낮았는데, 이는 광주가 황사발원지로부터 가장 가까운 서쪽에 위치하고 울릉도가 가장 먼 동쪽이기 때문으로 판단된다(Chun *et al.*, 2001).

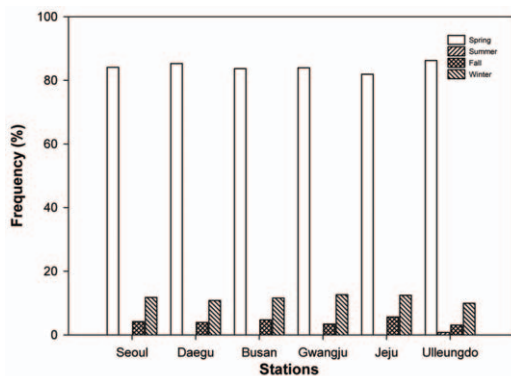


Fig. 2. Seasonal occurrence frequency of wintertime Asian dust at principal cities

Table 1. Decennial occurrence frequency of wintertime Asian dust at principal cities

Years	Seoul	Daegu	Busan	Gwangju	Jeju	Ulleungdo	Total
1961-1970	2	0	2	5	9	2	20
1971-1980	3	7	5	4	8	1	28
1981-1990	0	0	0	1	1	0	2
1991-2000	8	5	4	5	2	3	27
2001-2010	21	13	11	22	11	7	85
Total	34	25	22	37	31	13	162

2. 부산지역 겨울철 황사의 특성

1) 부산지역의 겨울철 황사의 일반적 특성

Fig. 3은 부산에서 1961년부터 2010년까지 50년간 황사의 발생빈도를 나타낸 것이다. 1961년에서 2010년까지 황사가 발생하지 않은 해는 1960년대에 8년, 1970년에 3년, 1980년대 4년, 1990년대에 1년, 2000년대에 1년이었으며, 최근 황사가 발생하지 않은 해가 감소하고 있다. 2001년에 황사발생일이 21일로 가장 많았고 2002년에 12일 그리고 2006년에 10일로 전체적으로 볼 때 매년 증가하는 추세를 나타내고 있다. 최근 부산에서 최근 12년간(1999~2010)의 연발생일은 7.5일로 50년(1961~2010) 평균의 3.8일보다 두 배가 높은 발생률을 보여 부산지역의 황사가 급격히 증가하고 있다는 것을 알 수 있다. 또한 50년(1961~2010)간 부산

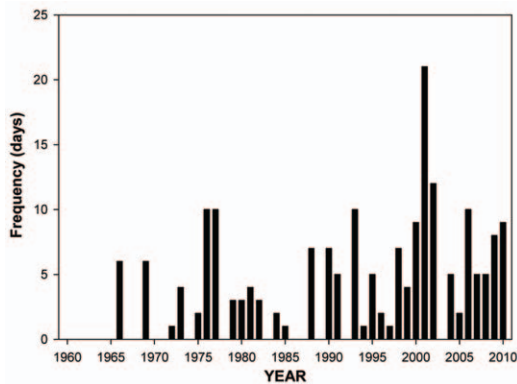


Fig. 3. Yearly frequency of Asian dust observed at Busan during 1961-2010

의 연평균 황사발생일수 3.8일은 광주(5.9일/년), 서울(5.8일/년), 제주(5.0일/년), 대구(4.6일/년)에 비해 낮고 울릉도(2.6일/년)에 비해서 높게 나타났다.

Table 2는 1999년부터 2010년까지 12년간 부산에서 발생한 황사의 월별 분포를 나타낸 것이다. 표에는 없지만 6월부터 9월까지 부산은 황사가 전혀 발생하지 않았으며, 3월이 33일(37%)로 가장 높았으며, 두 번째로 4월이 27일(30%), 5월이 9일(10%)로 그 다음이었고, 봄철(3월, 4월, 5월)의 발생일이 69일로 전체의 77%를 차지하였다. 본 연구의 초점인 겨울철의 발생일수는 1월이 6일, 2월이 2일, 12월이 7일로 총 15일이었으며, 전체의 16.6%를 차지하여 50년간(1961~2010) 평균인 11.6%에 비해 높아 최근 겨울철 황사의 발생이 증가하고 있다.

2) 부산지역 겨울철 황사의 농도 특성

Table 3은 최근 3년간(2008~2010년) 부산에서 발생한 여섯 사례의 겨울철 황사에 대한 부산지역의 최대농도와 발생지역, 발생시간, 고농도($PM_{10} > 120 \mu g/m^3$) 지속시간과 $PM_{2.5}/PM_{10}$ 비, 강수 유무, 우리나라 최초 황사발생지역에서 부산까지 도달하는데 걸린 시간 등을 나타낸 것이다. 부산지역의 최대농도는 2009년 2월 20일의 황사 시 $374 \mu g/m^3$ (학장동)이었으며, 최소농도는 2009년 12월 30일 황사 시 $256 \mu g/m^3$ (학장동)으로, 겨울철 황사 시 최대농도는 공업지역인 주로 학장동과 장림동에서 나타났다. 부산지방기상청의 일기상통계표를 이용하여 부산지역에 영향을 미친 황사의 지속시간은

Table 2. Number of Asian dust days at Busan for 12 years(1999~2010)

Year Month	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	Total
1	4	.	2	.	.	.	.	.	.	.	.	.	6
2	.	.	.	.	.	1	.	.	.	.	1	.	2
3	.	5	7	5	.	3	.	4	1	2	2	4	33
4	.	4	7	5	.	1	1	5	2	.	1	1	27
5	.	.	4	.	.	.	.	1	2	2	.	.	9
10	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	1	.	1
11	.	.	.	2	.	.	1	.	.	.	.	2	5
12	.	.	1	.	.	.	.	.	.	1	3	2	7
Total	4	9	21	12	0	5	2	10	5	5	8	9	90

Table 3. Statistical summary of wintertime Asian dust at Busan

Date	Factor	Max. hourly concentration ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Occurrence time at Busan	$\text{PM}_{10}>120 \mu\text{g}/\text{m}^3$		Precipitation	Taked time onset of Asian dust to primary peak(hrs)
				Duration	$\text{PM}_{2.5}/\text{PM}_{10}$		
2008.12.9		305 (Hwakjangdong)	13:07~18:49 (5hr 42m)	25hrs	0.34	×	12(31km/hr)
2009.2.20		374 (Daejeodong)	14:20~23:40 (9hr 20m)	14hrs	0.21	○	13(41km/hr)
2009.12.26		377 (Jeonpodong)	22:30~07:50 (9hr 20m)	12hrs	0.24	×	11(49km/hr)
2009.12.30		256 (Hwakjangdong)	12:15~13:45 (1hr 30m)	5hrs	0.31	×	15(36km/hr)
2010.12.3		364 (Hwakjangdong)	05:40~10:10 (4hr 30m)	5hrs	0.25	○	11(49km/hr)
2010.12.11		251 (Hwakjangdong)	03:40~10:25 (6hr 45m)	7hrs	0.33	×	10(54km/hr)

2009년 2월 20일과 12월 26일의 황사 시 9시간 20분으로 가장 길었으며, 2009년 12월 30일 황사 시 1시간 30분으로 가장 짧았다. 그리고 고농도 미세먼지라고 일컫는 시간당 $120 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 를 초과하는 시간은 2008년 12월 9일 황사 시 25시간으로 가장 길었으며, 2009년 12월 30일과 2010년 12월 3일 황사 시 5시간으로 가장 짧았다. 부산지역의 겨울철 황사 시 $\text{PM}_{2.5}/\text{PM}_{10}$ 비는 0.21~0.34로 나타났으며, 이는 부산지역의 겨울철 평균 $\text{PM}_{2.5}/\text{PM}_{10}$ 비인 0.60인데 비해 매우 낮아 황사 시 미세먼지 PM_{10} 중의 초미세먼지인 $\text{PM}_{2.5}$ 의 비중이 매우 낮은 것으로 나타났으며, $\text{PM}_{2.5}/\text{PM}_{10}$ 의 비율은 인체에 유해한 입경 $2.5\mu\text{m}$ 이하의 미세먼지 기여율을 알 수 있다(전병일, 2010; 전병일, 2012).

Fig. 4는 부산지역 겨울철 여섯 사례의 황사에 대해 PM_{10} 과 $\text{PM}_{2.5}$ 농도의 일변화를 나타낸 것이다. 그림에 사용한 PM_{10} 과 $\text{PM}_{2.5}$ 자료는 부산지역에서 두 농도를 동시에 측정하는 장림동, 연산동, 기장읍, 좌동, 태종대(2010년 이후) 자료를 사용하였으며, 유효한 자료로 인정된 경우에 한하여 이용하였다.

2008년 12월 9일 황사의 경우, 04시에 PM_{10} 이 $120 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 를 초과하면서 고농도 미세먼지가 나타나기 시작하였고 16시에 $184 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 최고농도를 나타내었으며, 12월 10일 05시에 $132 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 를 마

지막으로 농도가 감소하기 시작하였다. 일기상통계 표상의 황사지속시간은 5시간 42분이나 $120 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 를 초과하는 고농도는 25시간(12월 9일 04시~12월 10일 05시)으로 매우 길었다. 황사의 영향이 지속되었던 13시와 14시에 장림동의 관측자료가 결측되어 그림에는 표시하지 못하였다. 2009년 2월 20일 황사의 경우, 두 번의 peak가 나타났는데 첫 번째 peak는 15시에 PM_{10} 이 $206 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었으며, 두 번째 peak는 8시간 후인 23시에 $309 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 두 번째 peak가 $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 높은 농도를 보였으며, $\text{PM}_{2.5}/\text{PM}_{10}$ 비는 0.21로 가장 낮았다. 그러나 황사기간 중 백령도와 서울 불광동 그리고 덕적도의 $\text{PM}_{2.5}/\text{PM}_{10}$ 비는 각각 0.06, 0.13, 0.12로 매우 낮았다(기상청, 2009). 2009년 12월 26일 황사의 경우, PM_{10} 이 02시에서 05시까지 $300 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 를 초과하는 고농도를 나타내었으며, $\text{PM}_{2.5}$ 가 $60 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 내외의 높은 농도를 나타내었고 $\text{PM}_{2.5}/\text{PM}_{10}$ 비는 0.24이었다. 고농도 미세먼지가 저녁 늦게부터 새벽까지 영향을 미쳐 실제 실생활에는 민감하게 영향을 주지 않았다고 할 수 있다.

2009년 12월 30일 황사의 경우, 여섯 사례 중 미세먼지 농도가 가장 낮은 황사로서 12시에 PM_{10} 이 $178 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었고 일기상통계표에 의하면 황사발생시간은 12시 15분부터 13시 45분까지 1시간 30분간으로 겨울철 황사 중 가장 짧은 황사이었다.

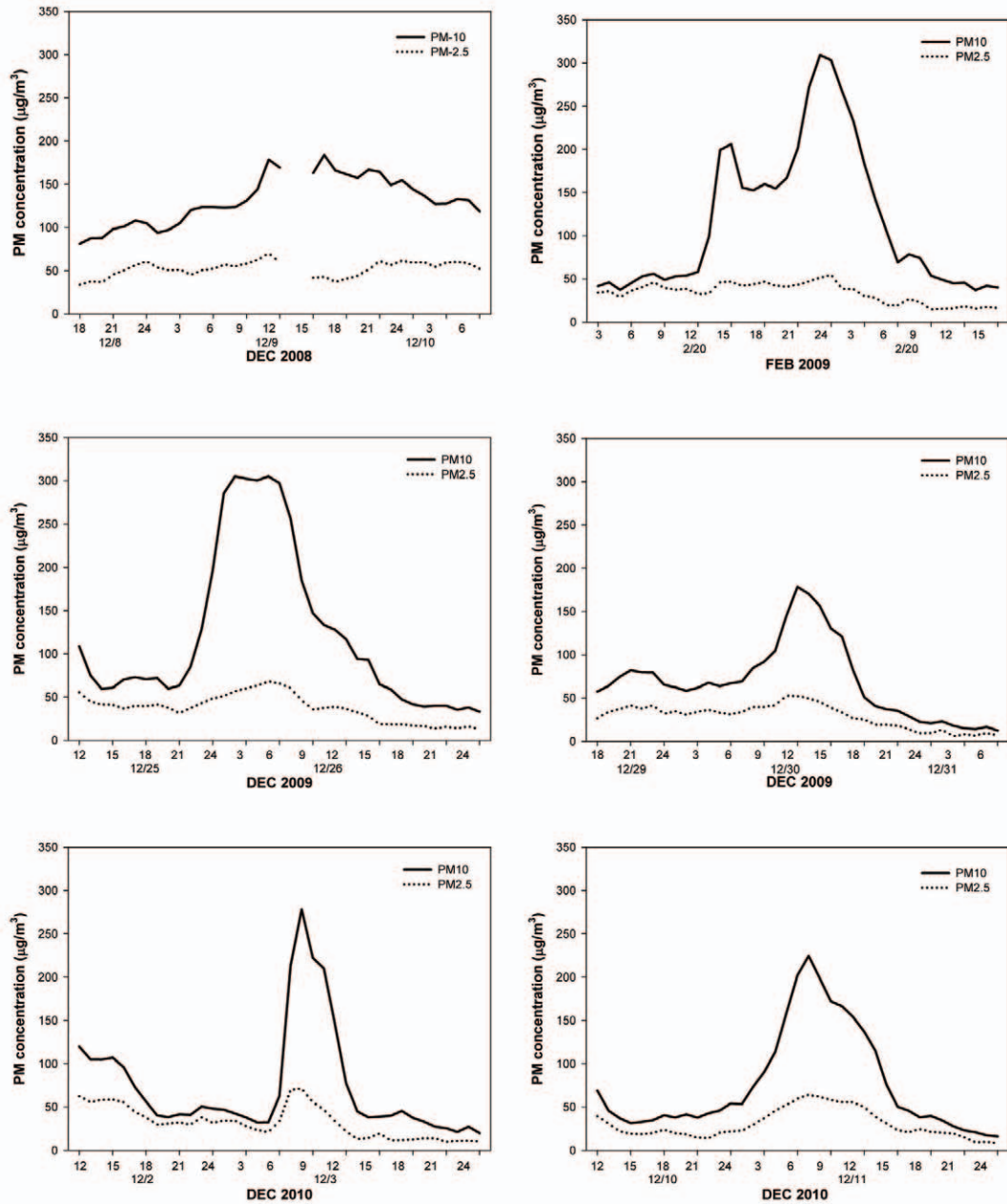


Fig. 4. Diurnal variation of PM₁₀ and PM_{2.5} concentration on wintertime Asian dust at Busan

2010년 12월 3일 황사의 경우, 08시에 PM₁₀이 278 µg/m³로 최대농도이었고 이후 몇 시간 만에 급격히 농도가 하강하여 황사의 영향에서 벗어났으며, 황사의 출현시각이 오전으로 인위적인 영향에 의해 미세먼지농도가 증가하는 시간대와 겹쳐 미세먼지 농도가 더 증가하였는데, 이는 PM_{2.5}가 08시

에 71.4 µg/m³까지 상승한 것을 보더라도 알 수 있다. 이날 전국 주요 도시들의 시간당 PM₁₀ 최고농도는 315~482 µg/m³ 수준이었으며, 전국 최고농도는 경남 경화동에서 나타나 주된 황사 풀림이 주로 남부지방에 영향을 준 것으로 판단된다.

2010년 12월 11일의 경우, 07시에 PM₁₀이 225 µg/m³

의 최대농도를 나타내었고 일기상통계표에 의하면 황사발생시간은 03시 40분부터 10시 25분까지 6시간 45분간이었다. 2010년 12월 3일 황사와 마찬가지로 황사의 영향이 03시 40분부터 10시 25분까지로 오전의 자동차에 의한 인위적인 오염물질과 겹쳐 고농도 미세먼지가 발생하였다. 또한 $PM_{2.5}$ 가 11일 05시부터 12시까지 7시간동안 $50 \mu g/m^3$ 이상의 고농도를 나타내었고 $PM_{2.5}/PM_{10}$ 비도 0.33로 비교적 높은 값을 나타내었다. 그리고 황사기간 중 백령도와 서울의 불광동의 $PM_{2.5}/PM_{10}$ 비가 각각 0.42와 0.33로 다소 높은 값을 나타내었다(국립환경과학원, 2010b).

따라서 황사의 발생시간이 인위적으로 발생된 미세먼지와 겹쳐 고농도를 나타낼 수 있어 황사에 의한 특보 발령 시 이를 감안 할 필요가 있다. 그리고 겨울철 황사의 지속시간은 빠른 기압계의 이동과 강한 풍속으로 인해 1시간 30분에서 9시간 20분으로 봄철 황사에 비해 비교적 짧은 시간동안 영향을 미쳤다.

3) 부산지역 겨울철 황사의 기상학적 특성

Fig. 5는 부산지역 겨울철 황사가 발생하였을 때의 지상일기도를 나타낸 것이다. 황사의 발생과 이

동 및 침적과정을 이해하기 위해서 지상일기도 외에도 상층일기도 및 유선도 등 다양한 보조선도를 활용하여야 하나, 본 연구에서는 부산지역의 황사를 이해할 수 있는 지상일기도만을 선택하여 고찰하였다.

Fig. 5(a)는 2009년 12월 8일 09시 지상일기도로서 몽골지역에 동서로 길게 세 개의 저기압이 위치하며 몽골에서 중국의 황토고원으로 기압골이 형성되어 있다. 이 기압골의 영향으로 황토고원의 먼지가 상승하였으며, 12월 9일 오전 서해안을 거쳐 우리나라에 영향을 주었고 부산에는 13시경부터 영향을 미쳤다. 부산은 12월 8일 09시부터 황사가 종료되는 12월 9일 19시까지 계속해서 서풍계열의 바람이 불었다. Fig. 5(b)는 2009년 2월 19일 00시의 지상일기도로서 고온 및 가뭄으로 메말라 있던 몽골고비사막과 중국의 내몽골에 저기압이 형성되었고 내몽골지역의 기온은 평년보다 $4\sim 6^\circ C$, 만주지역은 $2\sim 4^\circ C$ 높았다(기상청, 2009). 여기서 발원한 황사가 만주와 화북지방을 거쳐 20일 새벽 3시경에 백령도에 도달하였고, 오전에 서울을 비롯한 중부지방에 영향을 주었으며, 부산지역은 20일 14시 20분부터 황사가 나타났고 23시 40분까지 9시간 20분간 지속되었다. 부산지방은 황사가 도달하기 전

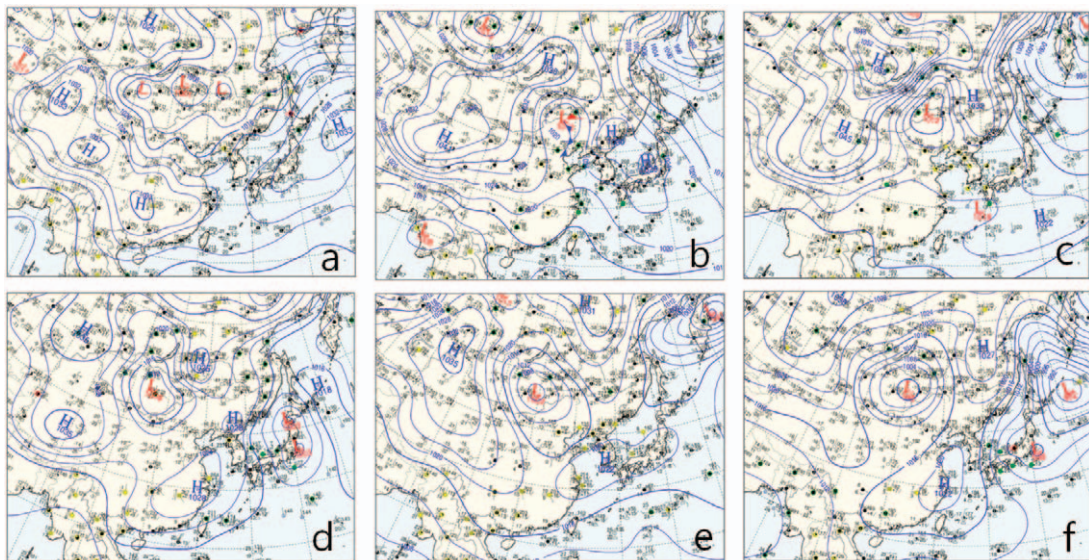


Fig. 5. Surface weather chart on wintertime Asian dust at Busan

(a) Dec. 8, 2008 (b) Feb. 19, 2009 (c) Dec. 24, 2009 (d) Dec. 28, 2009 (e) Dec. 1, 2010 (f) Dec. 9, 2010

저기압에 의해 19일 13시 01분부터 강수가 시작되어 20일 새벽 2시 42분까지 17.0 mm가 내렸으며, 20일 08시부터 바람이 북서풍으로 전환되면서 풍속이 강해졌다(Fig. 6 참조).

Fig. 5(c)는 2009년 12월 24일 09시 지상일기도로서 몽골의 고비사막, 중국 내몽골에서 발원한 황사가 북서풍을 타고 25일 11시경 백령도를 시작으로 우리나라 서해안에 나타났고 부산은 25일 22시 30분부터 26일 07시 50분까지 황사의 영향을 받았으며, 연부현상과 함께 발생하여 미세먼지농도를 더욱 가중시켰으며, 26일 03시와 06시의 시정이 8 km로 관측되었다. 또한 25일 09시부터 북동풍에서 서풍계열로 바뀐 후 황사가 종료될 때까지 6 m/s이상의 강한 바람이 지속적으로 불었다. Fig. 5(d)는 2009년 12월 28일 09시 일기도로서 몽골과 중국의 내몽골에서 발생한 황사가 저기압 후면을 지나가면서 그 일부가 지상으로 떨어져 12월 29일 21시에 백령도를 시작으로 30일 오후에 중부와 제주를 포함한 남부지역으로 확대되었고 부산지역

은 29일 12시 15분부터 13시 45분까지 비교적 짧은 시간동안 황사의 영향을 받았다. 부산지역의 바람은 북서풍이 29일 18시까지 나타났고, 그 이후부터 서풍계열의 바람이 계속해서 강하게 불었다. 서울은 12월 29일 저녁 늦게 약간의 비가 내렸고 북동풍에서 서풍으로 풍향이 급변하면서 풍속이 강화되었으나, 남부지방은 기압골의 영향은 없었다. 중부지방은 황사에 의한 먼지 농도가 높았지만 남부지방은 중부지방에 비해 약한 농도를 나타내었다. 2009년 12월에 우리나라에 황사가 자주 발생한 것은 상층공기의 흐름이 우리나라로 향하는 형태가 지속되었고, 11월 황사발원지의 강수량이 매우 적고 건조한 상태가 지속되었기 때문이었다(기상청, 2010).

Fig. 5(e)는 2010년 12월 1일 09시 일기도로서 고비사막과 내몽골에서 발생한 황사가 북서풍을 타고 이동하면서 2일 오후부터 서해 5도를 시작으로 수도권 등 전국 대부분의 지역에 영향을 미쳤다. 12월 2일 오후 백령도에 황사가 관측되었으며 3일 12시 울릉도를 끝으로 황사의 영향에서 벗어났고 부

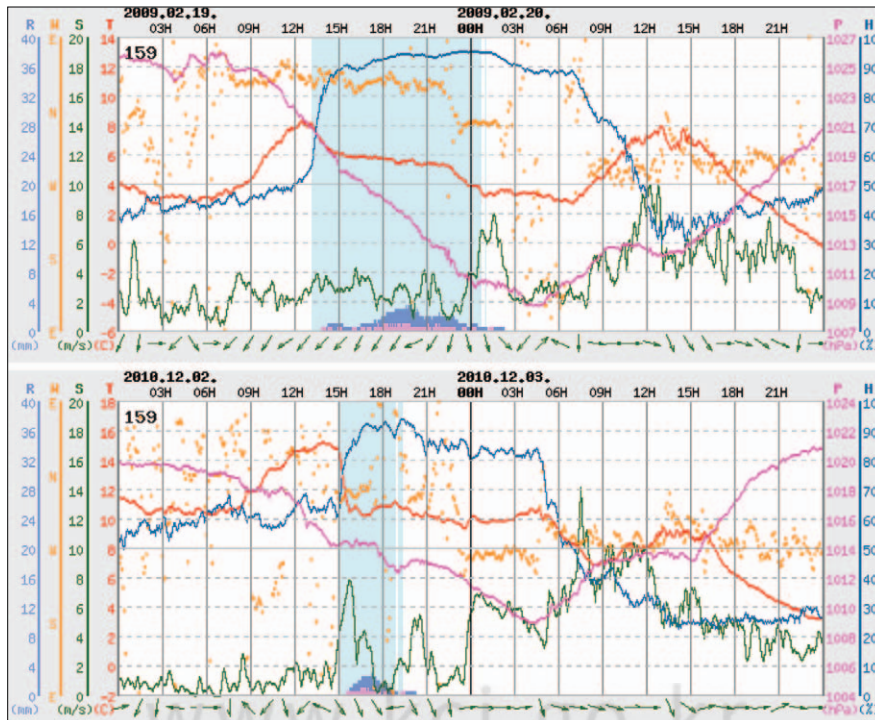


Fig. 6. Variation of meteorological parameters on wintertime Asian dust at Busan

산은 12월 3일 05시 40분부터 10시 10분까지 황사의 영향을 받았다. 부산지역은 저기압의 영향으로 12월 2일 14시 50분부터 19시 20분까지 6.0 mm의 강수가 있었다. 그리고 12월 3일 자정 경부터 풍향이 서풍으로 바뀌었고 풍속도 급격히 상승하였고 07시 23분에는 14 m/s의 돌풍이 관측되었으며, 황사가 끝나자마자 풍속은 약화되었다(Fig. 6 참조). Fig. 5(f)는 2010년 12월 9일 09시 일기도로서 고비사막과 내몽골에서 발생한 황사가 10일 오후부터 서해 5도를 시작으로 11일 수도권, 남부지방 전국 대부분의 지방에 영향을 미쳤으며, 부산은 11일 03시 40분부터 10시 25분까지 황사의 영향을 받았다. 부산지역은 10일 18시부터 서풍계열의 8 m/s 정도의 강한 바람이 11일 오전까지 지속되었다. 부산지방은 저기압 중심이 중부지방을 통과하면서 강우는 없었고 풍향의 급변도 없었다. 그러나 서울지역은 17시 무렵에 강수현상이 있었고 북동풍에서 남서풍으로 바뀌었고 한랭전선 통과 후 북서풍이 나타났으며, 황사는 10일 늦게 나타났고 자정에 최고농도

를 나타내었다.

4) 부산지역 겨울철 황사의 backward trajectory

Fig. 7은 부산에 발생한 겨울철 황사에 대한 공기를 추적하기 위해서 미국 해양기상청에 의해 개발된 HYSPLIT(Hybrid Single Particle Lagrangian Integrated Trajectory) 모형을 이용하여 기류의 이동방향을 추적한 것이다. 중국에서 발생한 대기오염물질의 경우 대략 4일 이내에 한반도에 도달하는 것으로 알려져 있으나(전병일과 황용식, 2007), 본 연구에서는 부산지역에 영향을 미치는 공기괴의 궤적을 알아본다는 차원과 겨울철 공기괴의 이동이 빠르다는 가정 하에 역궤적의 모사시간을 48시간으로 하고 6시간 간격으로 하였다. 측정지점의 좌표는 부산지방기상청으로 위도 $35^{\circ} 06' N$ 경도 $129^{\circ} 02' E$ 지점을 설정하였다.

여섯 차례의 겨울철 황사 중 2008년 12월 9일을 제외하고 모두 몽골의 고비사막과 중국의 내몽골에서 발원한 황사가 발해만(요동반도)을 거쳐 우리나라

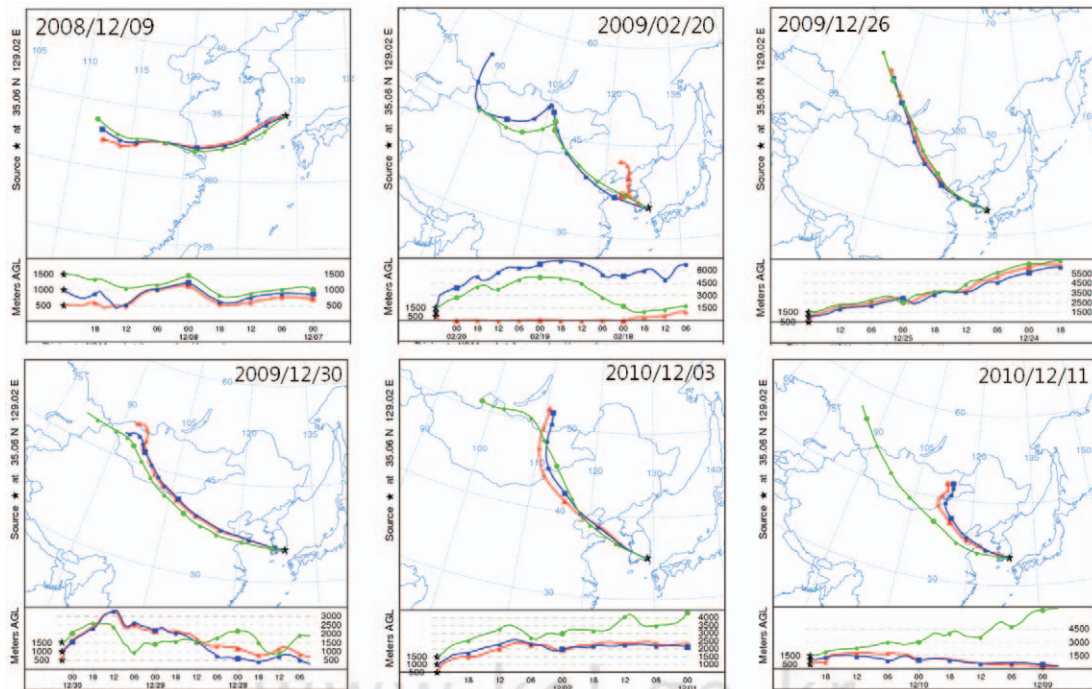


Fig. 7. Backward trajectory arriving at Busan on wintertime Asian dust

라로 이동한 것으로 나타났다. 2008년 12월 9일의 황사는 중국의 황토고원에서 발원하여 화남지방을 거쳐 서해안으로 진입한 후 우리나라에 영향을 준 것으로 매우 특이한 경우이었다. Table 3에서 보듯이 우리나라에 최초로 황사가 관측된 뒤 부산에 황사가 도달하는데 10시간~15시간이 걸렸으며, 이동 속도는 31 km/hr ~ 54 km/hr이었다. Kim and Park(2001)은 우리나라 동서로 걸친 4곳에서의 최대농도 발생시각을 이용하여 겨울철 황사의 이동속도가 70 km/hr라고 추정하였고, 일본에서는 에어로졸의 지상관측을 통해 60 km/hr 정도라고 하였다(西川, 1993). 겨울철 황사의 특징은 빠른 종관 흐름으로 인해 봄철 황사에 비해 황사농도가 낮고 지속시간이 짧지만(Kim and Park, 2001), 비교적 짧은 시간 내에 우리나라에 영향을 미칠 수 있기 때문에 이에 대한 예측이나 대비는 필요하다고 판단된다.

IV. 결론

부산지역에서 황사가 관측된 1961년부터 2010년까지 50년간 겨울철 황사발생의 빈도, 경향을 고찰하고, 2008년 이후 부산지역에서 발생한 여섯 사례의 겨울철 황사를 대상으로 황사 시의 미세먼지 농도 특성, 기상학적 특성, 이동경로를 고찰한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 우리나라 황사의 봄철 발생 빈도는 81.9%(제주)~86.3%(울릉도)로 가장 높았고 겨울철이 9.9%(울릉도)~12.6(광주)로 두 번째로 높았으며, 2000년대(2001~2010)의 겨울철 황사 발생일이 전체의 52.5%로 최근으로 올수록 급격히 증가하는 추세를 나타내었다.

2. 부산지역의 황사발생일은 2001년에 21일로 가장 많았고, 2002년에 12일 그리고 2006년에 10일이었으며, 최근 12년간(1999~2010)의 연발생일이 7.5일로 50년(1961~2010) 평균의 3.8일보다 두 배가 높았다. 또한 부산지역의 봄철 발생일이 전체의 77%인 69일이었고 겨울철의 발생일수는 총 15일로 전체의 16.6%를 차지하여 50년간(1961~2010)

평균인 11.6%에 비해 높았다.

3. 부산지역에 2008년 이후 겨울철 황사는 여섯 차례 발생하였으며, 2009년 2월 20일을 제외하고 모두 12월에 발생하였다. 겨울철 황사 시 최고 농도는 공업지역인 확장동과 장림동에서 주로 나타났으며, 황사발생지속시간은 짧게는 1시간 30분에서 길게는 9시간 20분으로 봄철에 비해서는 짧았다. 또한 황사 발생 시 고농도(시간당 $PM_{10} > 120 \mu g/m^3$)는 황사발생전후에도 나타났으며, $PM_{2.5}/PM_{10}$ 비는 0.21~0.33으로 나타났다. 그리고 황사발생 전에 강수가 있었던 경우는 2008년 12월 9일과 2010년 12월 3일이었고, 우리나라에서 처음으로 황사가 관측된 후 부산까지 이동하는데 걸린 시간은 10~15시간 정도이었다.

4. 부산지역 여섯 차례의 겨울철 황사 중 2008년 12월 9일을 제외하고 모두 몽골의 고비사막과 중국의 내몽골에서 발원한 황사가 발해만(요동반도)을 거쳐 우리나라로 이동한 것으로 나타났으며, 저기압에서 상승기류의 영향으로 부상하여 비교적 빠른 상승기류를 타고 우리나라에 영향을 주었다.

5. 향후 황사발원지의 지상상태가 건조하고 기류의 이동 조건이 부합되면 겨울철 황사 발생이 증가할 가능성이 높으며 대기가 안정한 상태에서 겨울철 연무현상과 결합된다면 미세먼지농도가 상승하고 인체에 유해한 영향을 미칠 수 있어 체계적인 모니터링 및 예측 시스템 그리고 그에 따른 대응 및 관리 대책이 요구된다.

참고문헌

- 국립환경과학원, 2010a, 보도자료(2010. 3. 18).
 국립환경과학원, 2010b, 황사발생 특성 분석 결과 (2010. 12. 10~11).
 기상청, 2009, 기상청보도자료(2009. 2. 20).
 기상청, 2010, 기상청 보도자료(2010. 12. 14).
 기상청, 2012, 일기상통계표.
 윤용황, 1990, 한반도에 수송되는 황사의 특징에 관한 연구, 한국기상학회지, 26(2), 111~120.

- 전병일, 2010, 부산지역 PM₁₀과 PM_{2.5}농도의 시간 및 공간적 변화 특성, 한국환경과학회지, 19(8), 1013-1023.
- 전병일, 2012, 부산지역 겨울철 고농도 미세먼지 발생일의 기상학적 특성, 한국환경과학회지, 21(7), 815-824.
- 전병일, 박재림, 박종길, 2002, 1999년 1월의 황사 발생시 부산지역의 부유분진 특성, 한국환경과학회지, 11(10), 1081-1087.
- 전병일, 황용식, 2007, 최근 5년간 부산지역의 미세먼지(PM₁₀)농도 특성에 관한 연구, 환경영향평가, 16(6), 533-542.
- 전영신, 김지영, 부경은, 김남옥, 2000, 겨울철 황사 현상의 특징, 한국대기환경학회지, 16(5), 487-497.
- Chun, Y., Boo, K. O., Kim, J., Park, S. U., Lee, M., 2001, Synopsis, transport, and physical characteristics of Asian dust in Korea, Jour. of Geophy., Res., 106, 18,461-18,469.
- Draxler, R. R., Rolph, G. D., 2012, HYSPLIT (Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory) Model access via NOAA ARL READY Website (<http://ready.arl.noaa.gov/HYSPLIT.php>). NOAA Air Resources Laboratory, Silver Spring, MD.
- Kim, B. G., and Park, S. U., 2001, Transport and evolution of a winter-time Yellow sand observed in Korea, Atmos. Environ., 35, 3191-3201.
- Kim, S. W., Yoon, S. C., Kim, J., 2008, Columnar Asian dust particle properties observed by sun/sky radiometers from 2000 to 2006 in Korea, Atmos. Environ., 42, 492-504.
- Liu, T. H., Tsai, F., Hsu, S. C., Hsu, C. W., Shiu, C. J., Chen, W. N., Tu, J. Y., 2009, Southeastward transport of Asian dust: Source, transport and its contributions to Taiwan, Atmos. Environ., 43, 458-467.
- Monn, C., Carabias, V., Junker, M., Waeber, R., Karrer, M., Wanner, H. U., 1997, Small-scale spatial variability of particulate matter ($10\mu\text{m}$(PM₁₀) and nitrogen dioxide, Atmos. Environ., 31(15), 2243-2247.
- 西川雅高, 1993, 黄砂エアロゾルのふるまいについて, 環境化学, 3(4), 673-682.

최종원고채택 12. 08. 08