

연구노트

최근 5년간 부산지역의 미세먼지(PM₁₀)농도 특성에 관한 연구

전병일* · 황용식**

신라대학교 환경공학과*, 인제대학교 산업의학연구소 및 부산백병원 산업의학교실**
(2007년 9월 30일 접수, 2007년 11월 30일 승인)

Study on Characteristics of fine Particle (PM₁₀) Concentration in Busan for Five Years

Byung-Il Jeon* · Yong-Sik Hwang**

Department of Environmental Engineering, Silla University, Busan 617-736, Korea*
Institute of Industrial Medicine, Department of Occupational and Environmental Medicine, Busan Paik Hospital,
Inje University, Busan 633-165, Korea**

(Manuscript received 30 September 2007; accepted 30 November 2007)

Abstract

The general characteristics of fine particle and meteorological analysis of high PM₁₀ concentration day which was over 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ in busan were investigated for period of 2002 to 2006. Annual mean concentration including Asian dust day was 68.7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ in 2002, 54.6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ in 2003, 60.4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ in 2004, 58.3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ in 2005 and 58.8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ in 2006, respectively. Seasonal mean concentration was 73.4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ in Springtime, 56.8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ in Summertime, 55.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ in Wintertime and 54.4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ in Falltime, respectively. Mean concentration for land use was 69.2 37.0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ in industrial area, 64.2 35.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ in rural area, 62.6 34.4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ in commercial area and 55.3 33.8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ in residential area, respectively. Frequency of synoptic pattern for high PM₁₀ concentration day was 18 days(16.7%) in I type, 27 days(25.0%) in II type, 10 days(9.3%) in III type, 5 days(4.6%) in IV type, 13 days(12.0%) in V type and 29 days (26.9%) in VI type, respectively. Frequency of long range transport sector for high PM₁₀ concentration day was 9 days(8.3%) in I type, 64 days(59.5%) in II type, 34 days(31.5%) in III type, 1 days in IV type, 0 days, respectively.

Key words : fine particle, Asian dust, synoptic pattern, long range transport

I. 서론

1차 오염물질은 정부와 지방자치단체의 지속적이고 체계적인 노력으로 매년 감소하는 추세이며, 장·단기 대기환경기준을 초과하는 횟수가 점점 줄어들고 있다(국립환경연구원, 2004). 그러나 입경이 $10\mu\text{m}$ 이하인 미세먼지의 농도는 2000년 이후 오히려 매년 증가하는 경향을 보이고 있으며, 장기기준 뿐만 아니라 단기기준을 초과하는 사례도 점차 증가하고 있다(국립환경연구원, 2005). 특히 최근 들어 각종 산업시설과 자동차의 급격한 증가 그리고 생활수준의 향상으로 인하여 미세먼지 농도는 증가하고 있는 실정이다.

일반적으로 대기 중의 입자상 물질은 $2.5\mu\text{m}$ 보다 큰 입자를 조대입자, $2.5\mu\text{m}$ 보다 작은 입자를 미세입자로 분류하며, 조대입자는 주로 기계적인 마모 과정이나 자연적인 풍화현상 등에 의해 발생되며, 미세입자는 인위적인 연소과정에서 직접 배출되거나 배출된 후 대기 중에서 응집 및 응축 그리고 가스로부터의 고체로의 전환 등에 의해 생성되는 2차 입자로 나눌 수 있다. 특히 해안지역에서는 해양입자로부터의 생성되는 2차입자의 양도 무시하지 못할 수준이다(김경연, 2005). $10\mu\text{m}$ 보다 큰 입자는 코나 입으로 통과할 때, 호흡기를 통과할 때 점막에 의해 대부분 제거되지만, $10\mu\text{m}$ 보다 작은 입자는 입이나 코를 통해서 호흡기관으로 이동하여 폐에 침적되어 폐에 심각한 영향을 준다(이혜문 등, 1996). 이러한 이유로 환경부에서는 2001년 1월부터 TSP 측정기를 PM_{10} 측정기로 전부 교체하여 미세먼지관리체제로 전환하였고, 동년 미세먼지(PM_{10})의 대기환경기준(연간평균치 $70\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이하, 24시간평균치 $150\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이하)를 추가로 설정하였다(환경부, 2006), 또한 환경부는 2007년 1월 1일부터 미세먼지 대기환경기준을 연간기준치 $50\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이하, 24시간평균치 $100\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이하로 더욱 강화하였다.

따라서 본 연구에서는 부산지역의 최근 5년간(2002~2006) 시간별 미세먼지 농도자료를 이용하여 부산지역 미세먼지의 일반적 특성과 고농도 미세먼지발생 특성을 고찰하여 부산지역 미세먼지 관리를 수립하는데 기초자료로 활용하고자 한다.

II. 자료 및 분석방법

본 연구에서 사용한 자료는 미세먼지 측정자료와 기상자료로 나눌 수 있다. 미세먼지 측정자료는 2002년 1월부터 2006년 12월까지 5년간이며, 부산 지역 19개 자동관측망 중 도로변측정소를 제외한 17개 지점에서 측정된 미세먼지(PM_{10}) 농도자료를 사용하였다. 유효측정자료의 선택은 일평균 자료의 경우 24시간 중에서 70%(18시간) 이상 측정된 자료를, 월평균 자료의 경우는 30일을 기준으로 관측치가 20 이상일 때를, 연평균 자료는 12개월 중 9개월 이상의 자료가 존재할 경우 유효한 자료라고 하였다(Lasen, 1973, 전병일, 1997). 부산지역의 대기오염측정소는 2006년 말 기준으로 공업지역은 3개 지점으로 장림동, 감전동 및 녹산동이고, 녹지지역은 2개 지점으로 동삼동과 대저동이며, 상업지역은 2개 지점으로 광복동과 전포동 그리고 주거지역은 10개 지점으로 덕천동, 연산동, 대연동, 재송동, 기장읍, 부곡동, 광안동, 복천동, 용수리 및 좌동이다. 기상자료는 미세먼지 측정자료와 같이 최근 5년간(2002~2006)이며, 고농도 미세먼지 발생일을 고찰하기 위해서 기상청에서 발행한 일기도를 이용하였다.

우리나라의 미세먼지농도는 중국과 몽골로부터 날아오는 황사에 의해 많은 영향을 받고 있다. 특히 봄철의 고농도 미세먼지는 대부분이 황사의 영향이라고 할 수 있을 정도이다(전병일, 2003). 그러나 본 연구와 같이 특정지역의 미세먼지에 대한 연구를 할 경우에는 황사의 영향이 있을 경우와 없을 경우를 분리해서 다룰 필요가 있다.

Table 1은 최근 5년간(2002년~2006년) 부산지역의 황사발생일을 조사하여 나타낸 것으로, 총 29일이

Table 1. Asian dust occurrence day in Busan for five years (2002~2006)

Year	Asian dust occurrence day	Total
2002	3.17~18, 3.21~23, 4.8~11, 4.17, 11.11~12	12
2003		-
2004	2.14, 3.11, 3.30~31, 4.23	5
2005	4.20, 11.17	2
2006	3.11~12, 3.14, 3.28, 4.8~9, 4.23~25, 5.1	10

발생하였다(기상청 황사정보센터). 2002년에 12일로 가장 높은 발생빈도를 보였으며, 2003년에는 이례적 현상이지만 우리나라에는 황사가 관측되지 않았고, 대부분의 황사는 3월과 4월에 집중되었다. 2002년은 11월에도 황사가 발생하여 봄철이 아닌 가을철에도 황사가 발생할 수 있다는 것을 보여주었다.

III. 미세먼지의 일반적 특성

1. 미세먼지의 연변화 특성

Table 2와 Table 3은 부산지역의 황사발생일을 포함하였을 경우와 황사발생일을 포함하지 않았을 경우의 PM₁₀ 농도의 연변화를 나타낸 것이다. 황사가 포함된 미세먼지 농도의 연변화(Table 2)을 보면, 2002년에 68.7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 2003년에 54.6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 2004년에 60.4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 2005년에 58.3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 2006년에 58.8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 를 나타내어 연간 국가대기환경기준인 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 를 초과하고 있다. 황사를 제외한 미세먼지농도를 보면(Table 3)을 보면 2002년에는 62.7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 를 나타내어 황사가 포함하였을 때

에 비해 6.0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 작았으며, 2003년은 황사가 발생하지 않은 해이기 때문에 동일하게 나타났고, 2004년은 59.6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 0.8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 정도, 2005년은 57.9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 0.4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 정도, 2006년은 55.1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 3.7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 작게 나타났다. 자연적으로 발생하는 황사는 인위적으로 저감할 수 없는 사항이므로 환경기준달성여부를 판단할 때 황사발생일을 제외하자는 의견도 제시되고 있는 실정이다. 따라서 부산지역은 황사를 제외하면 2006년 기준으로 55.1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 을 나타내었고, 특히 황사 비발생해인 2003년 54.6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 를 나타내어 연평균대기환경기준을 달성하기도 하였다. Table 2에서 가장 높은 미세먼지를 나타낸 지역으로는 2003년(최대농도: 장림동)을 제외하고 녹지지역으로 분류되어 있는 강서구의 대저동이 가장 높은 농도를 나타내었는데, 이는 대저동 인근에 김해평야가 있어 biomass burning에 의한 소각과 농작물 경작시 발생하는 자연적인 미세먼지에 의해 많은 영향을 받았을 것이라고 판단된다. 이에 대해서는 추후 소각 관련 오염물질의 농도를 측정하는 등 구체적인 연구가 필

Table 2. Annual mean PM₁₀ concentration ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) in Busan between 2002 and 2006

Site	Annual mean concentration ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)					Mean	S.D
	2002	2003	2004	2005	2006		
장림동	77.0	66.3	72.8	74.9	72.2	72.7	38.0
감전동	74.4	60.7	72.2	72.5	72.0	70.3	37.8
녹산동			58.9	56.6	69.0	61.6	32.8
동삼동	60.1	52.6	56.8	47.6	45.2	52.4	27.7
대저동	77.2	63.9	78.6	82.9	74.8	75.5	38.3
광복동	70.6	56.6	61.6	64.9	69.1	64.4	30.7
전포동	76.6	54.8	59.9	56.4	57.3	60.7	37.7
덕천동	67.2	49.8	46.7	50.8	61.5	56.7	35.2
연산동	67.8	51.3	55.0	44.1	52.4	54.0	31.6
대연동	77.2	54.5	55.8	53.8	55.3	59.4	37.2
재송동	74.0	51.8	67.0	64.7	61.4	63.6	29.5
기장읍	51.0	41.6	53.3	49.8	43.2	47.7	35.9
부곡동	63.3	50.5	54.9	53.4	57.3	55.9	36.0
광안동	51.7	51.3	52.7	49.0	50.4	51.0	31.6
복천동		55.7	64.5	58.3	59.2	59.8	29.8
용수리			38.0	51.4	55.8	52.0	31.9
좌 동				40.9	43.8	43.5	32.6
평 균	68.7	54.6	60.4	58.3	58.8	59.9	35.1

Table 3. Annual mean PM₁₀ concentration ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) in Busan between 2002 and 2006 except Asian dust day

Site	Annual mean concentration ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)					Mean	S.D
	2002	2003	2004	2005	2006		
장림동	70.8	66.3	72.0	74.7	68.6	70.5	30.6
감전동	68.0	60.7	71.5	72.0	68.3	68.0	29.6
녹산동			58.0	56.1	65.0	59.7	26.9
동삼동	54.1	52.6	56.2	47.3	42.5	50.5	19.5
대저동	71.4	63.9	78.0	82.5	71.1	73.4	30.8
광복동	67.7	56.6	60.8	64.9	65.8	63.0	26.3
전포동	69.5	54.8	59.0	55.9	53.6	58.3	28.9
덕천동	60.7	49.8	46.3	50.2	59.4	54.2	24.0
연산동	61.2	51.3	54.2	43.8	50.1	52.0	22.8
대연동	70.3	54.5	55.0	53.2	51.4	56.9	27.2
재송동	68.7	51.8	66.4	64.4	57.9	61.7	21.7
기장읍	44.7	41.6	52.3	49.4	39.1	45.5	25.5
부곡동	57.0	50.5	54.0	53.1	53.2	53.5	25.6
광안동	46.6	51.3	51.8	48.6	46.3	49.1	23.9
복천동		55.7	63.6	57.9	55.0	58.3	24.8
용수리			38.0	51.1	51.1	49.7	23.0
좌 동				40.9	40.2	40.3	21.2
평 균	62.7	54.6	59.6	57.9	55.1	57.8	27.2

요할 것으로 보인다.

2. 미세먼지의 월변화 특성

Table 4는 부산지역의 측정소별 PM₁₀ 월변화를

Table 4. Monthly mean PM₁₀ concentration ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) in Busan between 2002 and 2006.

Site	Monthly mean concentration ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
장림동	74.3	74.6	88.0	82.4	64.6	67.2	51.8	53.4	59.3	81.6	84.6	81.9
감전동	68.8	73.5	90.0	89.4	71.4	72.2	59.1	45.6	50.8	70.9	76.4	72.1
녹산동	45.9	48.9	75.2	86.6	65.3	68.4	59.9	53.9	44.4	60.6	67.8	55.9
동삼동	54.5	53.5	68.3	69.7	48.5	50.9	43.5	38.6	40.2	49.4	58.1	53.0
대저동	62.3	72.9	87.5	95.4	83.9	94.3	74.9	64.4	65.0	75.4	69.1	60.5
광복동	59.2	64.8	71.9	76.5	69.9	70.0	65.9	59.3	52.7	63.4	64.0	57.4
전포동	52.1	56.4	74.4	81.9	64.4	68.6	64.9	48.9	47.1	58.7	60.3	51.1
덕천동	55.6	66.5	103.6	93.5	60.2	58.6	47.1	40.9	39.2	51.7	56.4	53.2
연산동	48.9	53.6	67.8	77.9	63.0	59.1	47.6	42.0	42.8	48.4	51.2	47.6
대연동	56.1	56.9	76.6	85.8	65.6	68.3	55.2	44.2	42.6	55.1	57.6	49.0
재송동	59.8	64.8	76.5	84.2	65.6	68.0	58.9	54.0	49.9	58.8	67.6	58.6
기장읍	40.5	48.0	64.9	70.9	51.4	57.5	47.1	38.0	31.8	41.7	43.6	37.3
부곡동	47.4	53.7	75.7	77.0	58.5	66.1	59.3	46.6	42.4	51.1	51.6	42.7
광안동	37.1	45.6	59.5	75.5	56.9	65.1	52.8	46.3	41.1	45.0	45.2	38.4
복천동	51.7	57.2	75.1	83.9	66.2	72.6	58.2	50.6	45.1	51.8	57.3	53.4
용수리	39.3	41.5	69.2	84.2	53.2	60.5	48.7	49.1	34.2	49.5	51.3	45.5
좌 동	41.4	42.5	72.6	76.4	42.8	44.0	23.1	33.1	24.3	50.5	39.0	39.2
평 균	54.4	59.1	76.1	81.6	63.2	66.9	55.7	48.0	45.7	57.0	59.7	53.5

나타낸 것이다. 황사발생일이 포함된 Table 4를 보면, 4월이 81.6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 가장 높았고, 다음으로 3월이 76.1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었으며, 8월이 48.0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 9월이 45.7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 가장 낮은 농도를 나타내었다. 3월과 4월은 앞에서 서술한바와 같이 황사에 의한 영향과 기상학적인 원인에 의해 높은 농도를 나타내었다. 8월과 9월은 강수에 의한 세정작용과 대기 불안정으로 먼지가 많이 확산되기 때문이라고 생각된다. 황사를 제외한 경우를 보면(표로는 나타내지 않았음), 3월과 4월이 68 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 과 69 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 황사를 포함했을 때보다 8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 과 12 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 정도 작게 나타났다.

3. 미세먼지의 계절별 특성

Table 5는 부산지역의 측정소별 미세먼지(PM₁₀)의 계절변화(봄 3~5월; 여름 6~8월; 가을 9~11월; 겨울 12~2월)를 나타낸 것이다. 봄철이 73.4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 가장 높았고, 다음이 여름(56.8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), 겨울(55.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)이었고, 가을이 가장 낮은 54.4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었다. 봄철은 빈번히 발생하는 황사의 영향으로 높은 농도를 나타내었고, 여름, 가을, 겨울은 54~56 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 비슷한 농도분포를 나타내었다. 봄철은 대저동>감전동>덕천동 순이었으며, 여름철은 대저동>광복동>녹산동, 가을철은 장림동>대저동>감전동 그리고 겨울철은 장림동>감전동>대저동 순이었다. 겨울철에 공업지역인 장림동과 감전동이 높은 농도를 보였고, 여름철에 비교적 해안에 접한 광복동과 녹산동이 높은 농도를 나타내었다. 또한 녹지지역으로 분류된 대저동이 봄철과 여름철에 타 지점에 비해 월등히 높은 농도를 보였던 것이 특이한 현상이다.

Table 5. Seasonal mean PM₁₀ concentration ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) in Busan between 2002 and 2006

Site	Seasonal mean concentration ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)			
	Spring	Summer	Fall	Winter
장림동	78.5	57.9	76.8	77.0
감전동	83.6	59.0	67.0	71.4
녹산동	75.7	60.8	57.6	50.8
동삼동	61.9	44.3	49.5	53.6
대저동	88.8	77.9	69.9	65.0
광복동	72.6	65.0	60.1	60.3
전포동	73.5	60.8	55.4	53.1
덕천동	82.9	47.4	49.9	57.0
연산동	69.4	49.4	47.5	49.9
대연동	75.7	55.9	51.9	53.8
재송동	74.9	60.1	58.9	61.0
기장읍	62.3	47.5	39.4	41.7
부곡동	70.3	57.3	48.4	47.8
광안동	64.2	54.6	43.8	40.0
복천동	74.3	60.6	51.3	54.0
용수리	68.6	52.9	46.6	42.6
좌 동	63.7	33.3	38.2	40.5
Mean	73.4	56.8	54.4	55.5

여름에는 혼합도가 높아 대기의 확산능력이 강할 뿐만 아니라, 강우량과 강우빈도가 늦여름에 집중됨으로서 오염된 공기를 세정시키는 효과가 있기 때문에 여름의 미세먼지농도는 낮아지는 경향이 있다. 겨울철에는 표면의 냉각효과로 인해 대기가 정체하는 빈도가 높고, 여름과 가을철에 비해 혼합도가 낮기 때문에 오염물질의 확산이 어려워 상대적으로 미세먼지의 농도가 높아진다.

4. 미세먼지의 용도지역별 특성

Table 6은 부산지역의 용도지역별로 PM₁₀농도를 연별로 나타낸 것이다. 용도지역별로 보면, 공업

Table 6. Annual mean PM₁₀ concentration ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) for land use in Basan between 2002 and 2006.

Land use	Annual mean concentration ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)					Mean	S.D
	2002	2003	2004	2005	2006		
공업지역	75.7	63.4	68.0	68.0	71.0	69.2	37.0
녹지지역	68.9	58.4	67.9	65.7	60.3	64.2	35.5
상업지역	73.6	55.7	60.8	60.6	63.2	62.6	34.4
주거지역	65.2	50.7	55.8	52.7	53.9	55.3	33.8

지역이 $69.2 \pm 37.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 가장 높았고, 다음이 녹지지역이 $64.2 \pm 35.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 상업지역이 $62.6 \pm 34.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 주거지역이 $55.3 \pm 33.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 순으로 나타났다. 녹지지역이 상업지역보다 높은 것은 녹지지역인 대저동이 높은 농도를 보였기 때문이다.

5. 미세먼지의 일변화

Fig. 1은 부산지역의 17개 지점의 계절별 평균 미세먼지농도의 일변화를 나타낸 것이다. 일변화 경향은 계절별로 큰 차이를 보이지는 않는다. 봄철이 가장 높은 농도를 나타내고, 여름철은 새벽과 오전에 가을철과 겨울철에 비해 높은 농도를 나타내었고 한낮은 겨울철이 여름철과 가을철에 비해 높은 농도를 나타내었다. 봄철의 경우, 6시에 최소값을 나타내고, 점차 증가하여 10시에 최대값을 나타내었으며 이후 점차 감소하는 경향을 나타내었다. 여름철의 경우, 농도의 일변화가 타계절에 비해 작았으며, 10시에 최고농도를 나타내었다. 여름철에 일변화가 작은 이유는 잦은 강수와 지표가열에 의한 혼합층고도가 다른 계절에 비해 높아 상하혼합이 활발해지기 때문이다. 가을철과 겨울철의 경우, 6시에 최소농도, 10시에 최대농도를 보여 봄철과 매우 유사한 일변화를 경향을 나타내었다.

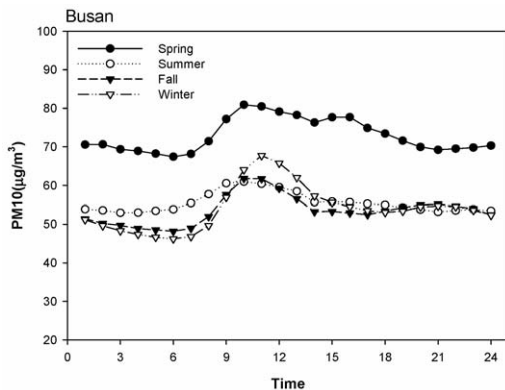


Fig. 1. Diurnal variation of seasonal PM_{10} concentration in Busan

IV. 고농도 미세먼지의 발생 특성

Table 7은 부산지역에서 최근 5년간(2002~2006) 황사발생일을 제외하고 24시간 국가대기환경기준(2007년 기준)인 $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 을 초과한 일수를 조사하여 나타낸 것이다. 본 연구에서는 국가대기환경기준인 24시간 $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 을 초과하는 날을 고농도 미세먼지 발생일로 규정하였다. 고농도 미세먼지 발생일수는 2002년(33일)>2005년(21일)>2004년(19일) 순으로 나타났으며, 총 103일의 고농도 미세먼지 발생일을 나타내었다. 월별분포를 보면, 4월에 20일로 전체의 19.4%를 차지하였고, 3월이 18일(17.5%)로, 3월과 4월이 전체의 36.9%를 차지하였으며 8월과 12월에 각각 1일로 가장 낮게 발생하였다. 특히, 봄철(3월, 4월, 5월)에 49일(47.6%)이 발생하여 가장 높았으며, 겨울철(12월, 1월, 2월)에 가장 낮은 빈도를 보였다.

따라서 부산지역의 고농도 미세먼지 발생은 황사를 제외하고도 봄철에 가장 높아, 이에 대한 관리방안이 강구되어야 할 것으로 생각된다. 봄철 고농도 미세먼지 발생일이 황사시작 전날과 종료 다음날의 경우가 상당수 있었는데, 이는 황사에 의한 잔류먼지가 남아 있는 경우라고 할 수 있다. 그리고 봄철의 경우는 이 동성고기압의 영향으로 안정된 기단이 많은데, 이에 의한 영향도 무시할 수 없는 요인이라고 할 수 있다.

1. 고농도 미세먼지 발생과 종관기압계

기상현상과 종관기상장과는 매우 밀접한 관계를 가지고 있다. 초기의 종관기압계분석은 주로 호우, 강설 그리고 안개 등과 같은 특이기상과 관련하여 분석이 되었으나, 최근에는 오존과 미세먼지와 같은 고농도 대기오염현상과 관련하여 발생학적 관점에서 연구되고 있다(김동정, 1988; 박일수 등, 1991; 전병일, 1997; 양진석, 2000; 허기영과 하경자, 2004). 고농도 미세먼지에 영향을 주는 종관기압계는 대부분 우리나라가 고기압의 영향을 받고 있는 경우가 대부분이기 때문에, 고기압의 이동방향과 위치에 따라 6개로 분류하였다.

한반도에 영향을 주는 고기압은 계절별로 크게

Table 7. Occurrence day of high fine particle day except Asian dust (2002~2006)

Year	Occurrence day of high fine particle day												Total
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
2002	3	5	10	5		3	1		1	5			33
2003	2	3	1	5	3	2			1				17
2004	1		5	4	3	1	1		1		2	1	19
2005			1	6	2	5	3	1		1	2		21
2006	1		1		3	1				7			13
합 계	7	8	18	20	11	12	5	1	3	13	4	1	103

시베리아고기압(겨울), 양쯔강고기압(봄, 가을), 오호츠크해고기압(초여름) 그리고 북태평양고기압(여름)이라 할 수 있으며, 부산의 고농도 미세먼지에 영향을 주는 고기압은 주로 이런 고기압으로부터 분리되어 이동성고기압이 형성되었을 경우라고 할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 이동성고기압의 중심위치가 어디에 있는가를 기준으로 하여 다음과 같이 크게 6개로 분류하였다(Fig. 2 참조). 고농도 미세먼지 발생일 중 6개의 중관기압계에 속하지 않는 경우를 기타로 분류하였다.

I형(북서쪽으로부터 접근) : 고기압중심이 화중 또는 화북지방에 중심을 두어 한반도에 영향을 주는 형태로 주로 겨울철 시베리아고기압이 약화된 상태에서 주로 나타난다.

II형(남서쪽으로부터 접근) : 고기압중심이 동중국해나 화남지방에 위치하며 남서쪽에서 북동쪽으로 고기압의 이동하는 형태이다.

III형(동서고압대) : 고기압중심이 한반도의 동쪽과 서쪽에 대상으로 위치하여 고기압이 서에서 동으로 이동하며 전형적인 맑은 날씨가 나타난다.

IV형(북동쪽으로부터 접근) : 차고 습한 성질인 오호츠크해고기압중심이 북동쪽에 위치하며 영동지방에 서늘한 초여름날씨를 나타낸다.

V형(동해안 고기압형) : 고기압중심이 동해안에 위치하며 서해나 화중지방에는 저기압이 위치하는 형태로 이동성고기압의 수명이 다하고 저기압의 영향을 받기전의 형태라고 할 수 있다. 다시 말하면, 고기압의 가장자리에 위치한 경우이다.

VI형(남해안 고기압형) : 고기압중심이 남해안에 위치하는 형태로 북태평양고기압이 분리된 경우도



Fig. 2. Classified synoptic pattern for examination of high fine particle occurrence day in Busan

있고, 대륙으로부터 이동하는 고기압의 위치가 남쪽으로 치우친 경우도 있다.

기타 : 위와 같은 고기압 분류에 속하지 않는 기압 형태

Table 8. Occurrence frequency of classified synoptic pattern and PM₁₀ concentration($\mu\text{g}/\text{m}^3$) for high fine particle occurrence day in Busan

Type	Frequency	PM ₁₀ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
I	18(16.7%)	118.3
II	27(25.0%)	123.2
III	10(9.3%)	126.0
IV	5(4.6%)	108.0
V	13(12.0%)	116.8
VI	29(26.9%)	118.8
기타	6(5.6%)	113.6

Table 8은 부산지역 고농도 미세먼지 발생일에 나타난 종관기압계를 조사하여 분류한 것이다. 고기압이 북서쪽과 남서쪽으로 부터 접근하는 I형과 II형이 각각 18일(16.7%)과 27일(25.0%)을 나타내었고, 동서고압대인 III형은 10일(9.3%)이었다. 그리고 오호츠크해고기압의 영향인 IV형이 가장 작은 5일(4.6%)이었으며, 동해안고기압형인 V형은 13일(12.0%)이었고 남해안에 고기압이 위치하는 VI형이 가장 많은 29일(26.9%)을 차지하였다. 그리고 위와 같은 분류에 속하지 않는 경우가 6일(5.6%)을 나타내었다. 각 종관형태별 PM₁₀농도는 공기덩어리가 가장 안정한 상태인 동서고압대인 III형이 126 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 가장 높은 농도를 나타내었고 한랭습윤한 공기덩어리로 부산을 비롯한 동해안에 여름철 저온 현상을 나타내는 IV형이 가장 낮은 108 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 을 나타내었다. 그리고 온난습윤하고 부산지역에 비교적 습기를 많이 가져다주는 형태인 VI형이 비교적 높은 발생빈도와 높은 먼지농도를 나타내었다. 이 기압형태에서는 해양으로부터의 영향이 기대되며, 따라서 2차 먼지의 생성이 용이한 기압형태로 판단되어 추후 연구가 필요하다고 생각된다.

2. 고농도 미세먼지 발생일의 발원지 추적

고농도 미세먼지(PM₁₀)의 발원지를 추적하기 위하여 24시간 기준 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 을 초과하는 사례를 대상으로 역궤적 추적 분석(backward trajectory analysis)을 이용하였다. 대기오염물질의 장거리수송을 연구하기 위해서는 오염물질이 배출되고 수송되는 지역을 대상으로 오염물질의 이동경로를 파악

하는 것이 중요하다(신선아 등, 2006; 안준영, 2004; 국립환경연구원, 1999).

부산지역에서 발생한 고농도미세먼지에 대한 공기를 추적하기 위해서 미국의 해양기상청(NOAA)에 의해 개발된 HYSPLIT-4 모형을 사용하여 기류의 이동방향을 추적하였다. 중국에서 발생한 대기오염물질의 경우, 대략 4일 이내에 한반도에 도달하는 것으로 알려져 있으나, 본 연구에서는 부산지역에 영향을 미치는 공기괴의 궤적을 알아본다는 차원에서 역궤적의 모사시간을 48시간으로 하고 6시간 간격으로 하였다. 측정지점의 좌표는 부산지방 기상청으로 위도 N35° 41' 경도 E129° 55' 지점을 설정하였다. 장거리수송의 영향을 고찰하기 위해 동북아지역을 Fig. 3과 같이 5개 권역으로 구분하여 그 영향을 알아보았다(국립환경연구원, 1988). I 권역은 만주와 북한을 포함하는 권역이고, II권역은 북경을 중심으로 산둥반도와 발해만 연안지역이 포함되는 구역이다. III권역은 상해를 중심으로 중국 남부지방과 동지나해를 포함하는 권역이며, IV권역은 중국과 일본사이의 해양으로서 인위적인 배출원이 거의 없는 권역이며, V권역은 일본을 포함하는 태평양권역이다.

Table 9는 부산지역의 고농도 미세먼지 발생일에 역궤적 분석으로 장거리수송의 영향을 준 권역

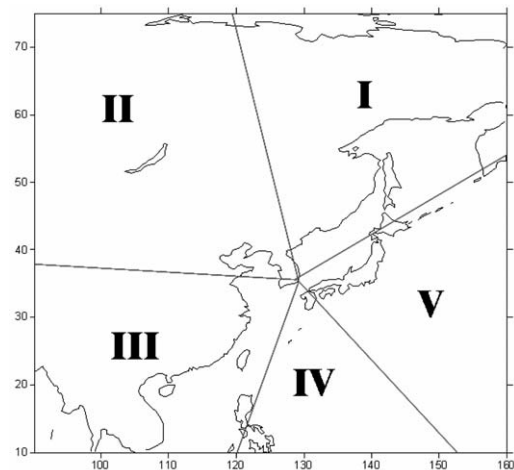


Fig. 3. Divided 5-sectors in Northeast Asia according to source distribution

Table 9. Occurrence frequency of divided sector and PM₁₀ concentration($\mu\text{g}/\text{m}^3$) for high fine particle occurrence day in Busan

Type	Frequency	PM ₁₀ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
I	9(8.3 %)	116.4
II	64(59.3 %)	119.4
III	34(31.5 %)	120.1
IV	1(0.9 %)	125.9
V	0(0 %)	-

의 빈도를 조사하여 나타낸 것이다. I권역은 전체 고농도 미세먼지발생일 108일중에 9일이 해당되어 8.3%로 나타났으며, II권역은 64일로 59.5%를 나타내어 가장 높은 발생빈도를 보였다. III권역은 34일로 31.5%, IV권역이 1일이 발생하였으며, V권역은 단 하루도 발생하지 않았다. 따라서 부산시 고농도 미세먼지는 II권역과 III권역에서 전체의 90.8%를 차지해 대부분을 중국 북부지방, 중부지방, 남부지방을 거쳐 오는 공기덩어리의 영향을 받는 것으로 나타났다. 또한 I권역에서 장거리 수송되었을 때, 부산시 미세먼지의 평균농도는 $116.4\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었으며, II권역일 경우에는 $119.4\mu\text{g}/\text{m}^3$, III권역일 경우에는 $120.1\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었다. 따라서 중국으로부터 유입되는 공기일 경우에 더 높은 농도를 보였다. IV권역의 경우에는 단 하루의 자료이기 때문에 유의한 자료로서 볼 수 없어 비교하기가 어려웠다.

V. 결 론

부산지역의 최근 5년간(2002~2006) 시간별 미세먼지 농도자료를 이용하여 부산지역 미세먼지의 일반적 특성과 고농도 미세먼지발생 특성을 고찰하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

1. 황사가 포함된 미세먼지 농도의 연변화를 보면, 2002년에 $68.7\mu\text{g}/\text{m}^3$, 2003년에 $54.6\mu\text{g}/\text{m}^3$, 2004년에 $60.4\mu\text{g}/\text{m}^3$, 2005년에 $58.3\mu\text{g}/\text{m}^3$, 2006년에 $58.8\mu\text{g}/\text{m}^3$ 를 나타내어 연간 국가대기환경기준인 $50\mu\text{g}/\text{m}^3$ 를 초과하고 있다.

2. 계절별 농도는 봄철이 $73.4\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 가장 높았고, 다음이 여름($56.8\mu\text{g}/\text{m}^3$), 겨울($55.5\mu\text{g}/\text{m}^3$)

이었고, 가을이 가장 낮은 $54.4\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었다.

3. 지역용도별의 농도는 공업지역이 69.2 $37.0\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 가장 높았고, 다음이 녹지지역이 64.2 $35.5\mu\text{g}/\text{m}^3$, 상업지역이 62.6 $34.4\mu\text{g}/\text{m}^3$, 주거지역이 55.3 $33.8\mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 순으로 나타났다.

4. 고농도 미세먼지 발생시 종관기압계의 빈도는 서쪽과 남서쪽으로 부터 접근하는 I형과 II형이 각각 18일(16.7%)과 27일(25.0%)을 나타내었고, 동서고압대인 III형은 10일(9.3%)이었다. 그리고 오호츠크해고기압의 영향인 IV형이 가장 작은 5일(4.6%)이었으며, 동해안고기압형인 V형은 13일(12.0%)이었고 남해안에 고기압이 위치하는 VI형이 가장 많은 29일(26.9%)을 차지하였다. 그리고 위와 같은 분류에 속하지 않는 경우가 6일(5.6%)을 나타내었다.

5. 고농도 미세먼지 발생에 영향을 준 장거리수송의 권역 빈도를 보면, I권역이 전체 고농도 미세먼지발생일 108일중에 9일이 해당되어 8.3%로 나타났으며, II권역은 64일로 59.5%를 나타내어 가장 높은 발생빈도를 보였다. III권역은 34일로 31.5%, IV권역이 1일이 발생하였으며, V권역은 단 하루도 발생하지 않았다.

참고문헌

- 국립환경연구원, 1998, 장거리이동 대기오염물질의 공간분포 및 변화에 관한 연구(II), 국립환경연구원, 40-78.
- 국립환경연구원, 1999, 장거리이동 대기오염물질의 공간분포 및 변화에 관한 연구(III), 국립환경연구원, 62-101.
- 환경부, 2004-2005, 대도시 대기질 관리방안 조사 연구(광화학 대기오염 및 미세먼지의 생성 과정 규명과 저감대책 수립-미세먼지분야).
- 기상청, 황사정보센터(<http://www.kma.go.kr/dust/>)
- 김경연, 2005, 제주지역 대기 중 해양입자의 분포 특성, 제주대학교 대학원 석사논문, 62pp.
- 김동정, 1988, 가을철 한반도의 기압계 유형과 안개 발생에 관한 연구, 경북대학교 교육대학원

- 석사학위논문, 57pp.
- 박일수, 이덕길, 강인구, 1991, 서울지역 겨울철 SO₂농도를 지배하는 기상인자, 한국대기보전학회지, 7(2), 96-104.
- 신선아, 한진석, 김신도, 2006, 수용모델(CMB)을 이용한 한반도에서 관측된 황사의 발원지추정과 기여도에 대한 연구, 한국대기환경학회지, 22(2), 157-166.
- 안준영, 2004, 황해상에서 대기오염물질의 공간적 분포와 장거리이동, 건국대학교 대학원 박사학위논문, 173pp.
- 양진석, 2000, 한국의 추계한발의 중관기후학적 특성, 한국지역지리학회지, 6(2), 57-69.
- 이혜문, 김동술, 이진홍, 1996, PM₁₀ 내 중금속의 장기간 평균농도 및 위해도 평가, 한국대기보전학회지, 12(5), 555-566.
- 전병일, 1997, 부산연안역의 고농도 오존일의 예측 기법개발과 오존농도 수치모의, 부산대학교 대학원 박사학위논문, 119pp.
- 전병일, 2003, 부산지역 PM₁₀농도의 시간 및 공간적 변화 특성, 한국환경과학회지, 12(10), 1,033-1,041.
- 허기영, 하경자, 2004, 한반도 연안 안개의 발생과 연관된 중관 기압계 분류, 40(5), 한국기상학회지, 541-556.
- 환경부, 2006, 환경백서.
- Lasen, R. I., 1973, An air quality data analysis system for interrelating effects, standards, and needed source reduction, JAPCA, 23, 933pp.

최종원고채택 07. 12. 07