부산지역 겨울철 고농도 미세먼지 발생일의 기상학적 특성

전 병 일*

신라대학교 환경공학과

(2012년 4월 12일 접수; 2012년 5월 22일 수정; 2012년 7월 18일 채택)

Meteorological Characteristics of the Wintertime High PM₁₀ Concentration Episodes in Busan

Byung-Il Jeon*

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

(Manuscript received 12 April, 2012; revised 22 May, 2012; accepted 18 July, 2012)

Abstract

The purpose of this study was to analyze the meteorological characteristics of wintertime high PM₁₀ concentration episodes in Busan. PM₁₀ concentration has been reduced for the past four years and recorded near or exceeded 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (national standard of PM₁₀). High concentration episodes in Busan were 6 case, PM_{2.5}/PM₁₀ ratio was 0.36~0.39(mean 0.55). High PM₁₀ concentration occurred during higher air temperature, more solar radiation and sunshine, lower relative humidity, and smaller cloud amount. Synoptically, it also occurred when Busan was in the center or the edge of anticyclone and when sea breeze intruded. An analysis of upper air sounding showed that high PM₁₀ concentration occurred when surface inversion layer and upper subsidence inversion layer existed, and when boundary layer depth and vertical mixing coefficient were low. An analysis of backward trajectory of air mass showed that high PM₁₀ concentration was largely affected by long range transport considering that it occurs when air mass is intruded from China.

Key Words : Fine particle concentration, Anticyclone, Sea breeze, Inversion layer, Boundary layer, Backward trajectory

1. 서 론

미세먼지 오염도를 결정하는 요인은 크게 장거리 수송에 의한 외부유입, 내부 배출원에 의한 영향, 대기 오염물질의 확산조건, 국지 및 종관적 기상조건, 지형 그리고 대기화학과정 등을 들 수 있다(서울시정개발연구원, 2011; Chen 등, 2008). 특히 기상조건 중 풍향과 풍속은 오염물질의 확산에 중요한 인자이고 기온

과 습도는 대기오염물질의 화학반응에 영향을 미치며, 이런 기상상태는 효과적인 대기질 관리정책 수립이나 대기오염에 의한 피해를 저감시키는 데에 유용하게 사용된다. 미세먼지는 도시지역에서 시정장애를 유발하는 체감지표로 알려져 있으며, 천식과 같은 호흡기 질병, 폐기능 저하 등 인체에 위해성을 일으킨다(Dockery와 Pope, 1994). 대도시에서 겨울철의 고농도 오염은 일반적으로 거대 점오염원에서 배출되는 오염물질이나 자동차오염물질의 확산을 억제하는 안정한 대기에서 발생할 가능성이 높다(Lee와 Hills, 2003). 또한 겨울철은 복사냉각에 의한 접지역전층이 강하게 발생하기 쉽고 계절풍이 약하면 대기확산이 어려워 대기오염농도가 상승할 수 있다(吉門와 串畝,

*Corresponding author : Byung-Il Jeon, Department of Environmental Engineering, Silla University, Busan 617-736, Korea
Phone: +82-51-309-5056
E-mail: bijeon@silla.ac.kr

2000).

우리나라의 미세먼지 농도는 봄철에 빈번하게 출현하는 황사 시에 가장 높게 나타나는 것이 일반적이거나, 최근에는 중국으로부터 장거리 수송과 안정한 대기 상태에서 대기확산 억제로 인한 고농도 미세먼지 발생의 사례도 계절에 관계없이 자주 발생하고 있다 (Lee와 Hills, 2003). 특히 이러한 현상은 지역적으로 풍부한 오염물질과 장거리수송 그리고 대기상태가 결합되어 발생한다. 겨울철이나 봄철의 경우는 10월 중순부터 3월 후반까지 아시아 대륙에 우세한 영향을 미치는 대륙성 고기압과 관련이 높고 (Lee와 Hills, 2003), 겨울철의 고농도 미세먼지가 안정한 대기에서 박무와 같은 악시정과 함께 장기간 지속된다면 호흡기질환을 앓고 있는 환자들이나 노인성 환자에게는 치명적일 수 있다. 국내의 고농도 미세먼지에 대한 연구는 서울을 비롯한 대도시에서 행해졌고 (문 등, 2011; 정 등, 2007; 이 등, 2011; 서울시정개발연구원, 2011; Lee 등, 2011), 부산의 경우는 PM_{10} 과 $PM_{2.5}$ 의 시·공간적 특성과 미세먼지 고농도 사례 연구는 있으나 (전과 황, 2007; 전, 2010; 박 등, 2011), 겨울철만을 대상으로 고농도 미세먼지 사례를 기상학적으로 분석한 연구는 이루어진 사례가 없었다.

이러한 배경에서 본 연구에서는 부산지역 최근 4년간 겨울철 일평균 $100 \mu g/m^3$ (PM_{10} 의 일평균 대기환경기준)에 근접하거나 초과하는 고농도 미세먼지를 나타낸 날을 추출하고 그 사례의 발생원인을 기상학적으로 분석하여, 향후 부산시의 미세먼지와 관련된 대기질 관리대책 수립에 기여하고자 한다.

2. 자료 및 방법

본 연구에 사용된 자료는 크게 미세먼지자료(PM_{10} , $PM_{2.5}$)와 기상자료로 나눌 수 있다. 미세먼지는 Fig. 1과 같이 부산광역시 보건환경연구원에서 측정하고 관리하는 시간별 PM_{10} 과 $PM_{2.5}$ 으로서 17개 자동측정망 (도로변 2개소 제외)에서 측정한 자료이다. 기상자료는 부산지방기상청의 일기상통계표, AWS(Automatic Weather Station) 관측자료, 지상일기도와 미국해양기상청(National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA)에서 제공하는 backward trajectory, 대기경계

층고도, 대기확산계수 그리고 미국 와이오밍대학교에서 제공하는 Skew T-Log P 단열선도를 이용하였다. 부산지역의 겨울철 고농도 미세먼지 발생 사례 선정은 겨울철인 1월, 2월, 12월을 대상으로 부산지역 17개 지점에서 일평균 PM_{10} 농도가 $100 \mu g/m^3$ 에 근접하거나 초과한 날로 하였다.

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

3. 결과 및 고찰

3.1. 고농도 미세먼지 사례 현황

Table 1은 최근 4년간 부산지역에서 겨울철(1월, 2월, 12월)에 일평균 PM_{10} 농도가 대기환경기준인 $100 \mu g/m^3$ 에 근접하거나 초과한 6개 사례에 대해서 1시간 및 24시간 평균 최고 농도가 나타났을 때의 시각과 장소 등을 나타낸 것이다. 1일 경우가 3개 사례(2010년 12월 1일, 2010년 12월 11일, 2010년 12월 23일), 2일 연속이 2개 사례(2009년 12월 11일~12일, 2012년 1월 9일~10일), 4일 연속이 1개 사례(2011년 2월 4일~7일)이었다. 대체로 최고농도를 나타낸 시각은 오전 7시부터 12시까지와 저녁 7시와 8시 사이에 발생하였고 공업지역인 장림동, 학장동, 녹산동에서 최고농도가 빈번하게 발생하였다. 1시간 평균 최고 농도는 녹산동에서 2009년 2월 12일 12시에 $302 \mu g/m^3$ 이었고, 24시간 평균 최고 농도 역시 녹산동에서 2010년 12월 1일에 $163 \mu g/m^3$ 이었다.

Table 1. Maximum pollutant concentrations for winter episode days at Busan

Date	Maximum PM ₁₀ concentration($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	
	1h	24h
11-12 Feb 2009	302 (12th, 1200, Noksandong)	151 (12th, Noksandong)
1 Dec 2010	267 (1100, Noksandong)	163 (Noksandong)
11 Dec 2010	251 (0700, Jangrimdong, Hwakjangdong)	124 (Hwakjangdong)
23 Dec 2010	227 (1900, Hwakjangdong)	142 (Hwakjangdong)
4-7 Feb 2011	258 (4th, 2000, Cheongyongdong)	154 (4th, Cheongyongdong)
9-10 Jan 2012	208 (10th, 1100, Jangrimdong)	154 (10th, Jangrimdong)

Table 2는 고농도 미세먼지 사례 시 $\text{PM}_{2.5}/\text{PM}_{10}$ 비를 나타낸 것이다. $\text{PM}_{2.5}/\text{PM}_{10}$ 비는 PM_{10} 중 포함된 $\text{PM}_{2.5}$ 의 기여율을 알아본다는 의미에서 매우 가치가 있으며, $\text{PM}_{2.5}/\text{PM}_{10}$ 비가 크다면 교통과 산업시설 등에서 기인된 2차 생성 먼지의 비중이 클 수 있음을 의미한다. 부산지역에서 PM_{10} 과 $\text{PM}_{2.5}$ 를 동시에 측정하는 곳은 장림동, 연산동, 기장읍, 좌동, 태종대로, 연산동의 자료는 자료의 신뢰성 때문에 제외하였다. 고농도 미세먼지 사례 시 $\text{PM}_{2.5}/\text{PM}_{10}$ 비는 0.36~0.69의 분포로 평균 0.55이었으며, 지역별로는 0.48~0.62이었고, 해안지역인 태종대가 가장 높았으며 주거지역인 기장읍이 가장 낮았다. 고농도 미세먼지 사례별로 편차가 큰 것을 알았으며 지역별로는 큰 편차가 없었다. 2010년 12월 11일은 부산지역에 중국으로부터 수송된 약한 황사에 의해 영향을 받아 $\text{PM}_{2.5}/\text{PM}_{10}$ 비가 비교적 작았다. 그러나 전(2010)에 의하면 부산지역의 동계 평균 $\text{PM}_{2.5}/\text{PM}_{10}$ 비는 장림동이 0.64, 기장읍과 좌동이 0.55인데 비해, 본 연구에서 미세먼지 고농도 발생일의 경우 장림동이 0.57, 기장읍이 0.48, 좌동이 0.52로 비교적 낮은 값을 나타내 평상시보다 2.5 μm 미만의 초미세먼지의 양이 작았다는 것을 알 수 있다. 그

리고 비교적 해안지역인 태종대에서 고농도 미세먼지가 발생할 때 $\text{PM}_{2.5}$ 이하의 초미세먼지 농도가 높다는 것은 향후 연구 해볼 가치가 있다고 판단된다.

Fig. 2는 PM_{10} 과 $\text{PM}_{2.5}$ 가 동시에 측정된 지역의 자료를 사용하여 부산지역 고농도 미세먼지 사례에 대한 일변화를 나타낸 것이다. 2009년 2월 11일~12일의 경우는 기장읍과 좌동의 자료로서 일변화를 본 것으로, 11일 20시에 183 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 최대농도이었고 오전보다는 오후에 고농도를 나타내었으며, 12일은 자동차의 rush-hour와 관련된 오전 9~11시경과 오후 6~8시경에 두 번의 피크를 보이는 전형적인 미세먼지 농도 일변화를 나타내었다. 2010년 12월 1일의 경우는 장림동, 기장읍, 좌동, 태종대를 자료를 이용한 것으로서, PM_{10} 과 $\text{PM}_{2.5}$ 모두 부산지역의 전형적인 일변화 유형을 나타내고 있다. 2010년 12월 11일의 경우는 오전 7시에 PM_{10} 농도가 225.3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 최대농도를 나타내었다. 그 후 농도가 급격히 하강하였으며, $\text{PM}_{2.5}$ 는 PM_{10} 과는 달리 높은 농도를 나타내지 않아 $\text{PM}_{2.5}/\text{PM}_{10}$ 비가 0.36으로 매우 낮은 값을 나타내었다. 앞서서도 언급하였듯이 12월 9일 고비사막과 내몽골에서 발생한 황사가 북서풍을 타고 이동하면서 10일

Table 2. $\text{PM}_{2.5}/\text{PM}_{10}$ ratio for winter episode days at Jangrimdong, Gijangup, Joadong, Taejongdae

Date	Station	Jangrimdong	Gijangup	Joadong	Taejongdae	Mean
11-12 Feb 2009		-	0.52	0.57	-	0.55
1 Dec 2010		0.60	0.52	0.53	0.62	0.57
11 Dec 2010		0.43	0.28	0.28	0.43	0.36
23 Dec 2010		0.51	0.46	0.44	0.56	0.49
4-7 Feb 2011		0.68	0.63	0.66	0.75	0.68
9-10 Jan 2012		0.69	-	0.64	0.74	0.69
Mean		0.58	0.48	0.52	0.62	0.55

오후부터 서해 5도를 시작으로 11일 수도권, 강원, 중부내륙, 남부지방 등 전국 대부분의 지방에 영향을 미쳤고 12월 10일 오후 백령도에서 황사가 관측되었으며, 11일 10시경 부산, 울산 등 남부지방을 끝으로 황사의 영향에서 벗어났다. 2010년 12월 23일의 경우는 12월 11일과는 반대로 오후 7시경에 최고농도를 나타내었으며 PM_{10} 과 $PM_{2.5}$ 가 거의 비슷한 일변화를 나타내었다. 2011년 2월 4일~7일의 경우는 연속 4일간 고농도를 나타낸 사례로서 2월 4일은 정오경에 비교적 높은 농도를 나타내었고, 둘째 날인 2월 5일은 비

교적 낮은 농도로 13시경에 $60 \mu g/m^3$ 이하의 저농도를 나타내었고 셋째날인 2월 6일은 오후부터 급격히 농도가 증가해서 2월 7일 새벽 3시에 PM_{10} 이 $155.5 \mu g/m^3$ 의 고농도를 나타내었고 그 후에 급격히 농도가 하강하였다. 마지막으로 2012년 1월 9일~10일의 경우는 첫째 날인 1월 9일 오후부터 급격히 농도가 계속 증가하여 다음날 정오까지 고농도 미세먼지를 유지하였다. 일변화 경향을 따르지 않는 갑작스런 농도 증가는 장거리수송에 의한 급격한 외부유입이나 내부배출원에 의한 영향 그리고 대기확산이나 수렴에 의한 기

Fig. 2. Diurnal variation of PM_{10} and $PM_{2.5}$ concentration on winter episodes at Busan.

상학적 요인으로 볼 수 있다(Lee와 Hills, 2003; Ji 등, 2012).

3.2. 기상요소와 관계

3.2.1. 지상기상요소

Table 3은 부산지방기상청에서 측정한 일기상통계표(부산지방기상청, 2012)를 이용하여 고농도 미세먼지 사례 시의 기상상태를 나타낸 것이다. 부산지방의 지난 30년간(한국기후표, 1981-2010) 겨울철의 평균 최고기온은 9.4 °C, 상대습도는 50.0%, 운량은 3.4/10, 일조시간은 6.5시간, 일사량은 2.9 MJ/m²이었다. 부산지역 겨울철 고농도 미세먼지 발생 사례 시의 최고기온, 일사량, 일조시간은 각각 13.5 °C, 9.7 MJ/m², 7.6시간으로 평년치에 비해 4.1 °C, 6.8 MJ/m², 1시간 높거나 많았다. 그러나 상대습도와 운량은 42.1%와 1.4/10로 각각 7.9%, 2.0/10 낮았다. 시정은 평년치의 값이 없어 비교할 수는 없었으나 고농도 미세먼지 사례 시 시정이 평균 6.5 km로 매우 낮은 값을 나타내어, 연무나 박무현상으로 시정이 악화되었다는 것을 알 수 있다(Ji 등, 2012). 따라서 겨울철 부산지역의 고농도 미세먼지는 상대적으로 높은 기온, 일사량, 일조시간 그리고 낮은 상대습도와 운량일 때 발생하였다. 대부분 고농도 미세먼지가 주간에 발생한 것을 고려한다면 고농도 미세먼지 발생 시의 평균풍속 4.0 m/s는 30년간 부산지역 겨울철 평균 풍속이 3.7 m/s에 비해 약한 바람이라고 볼었다고 할 수 있다.

3.2.2. 종관상태와 해풍유입

Fig. 3은 부산지역 겨울철 고농도 미세먼지가 발생

했을 때의 지상일기도를 나타낸 것으로 고농도 유형과 관련하여 매우 의미 있는 정보를 제공해 줄 수 있다. Fig. 3(a)는 2009년 2월 11일 09시의 지상일기도로 부산지방은 발해만과 동지나해에 중심을 둔 이동성고기압의 가장자리에 위치하여 구름이 없고 일사량이 많은 날씨로서 주간에 남서풍계열의 해풍의 유입이 있었다. Fig. 3(b)는 2010년 12월 1일 09시의 일기도로 부산지방은 동서로 걸친 이동성고기압의 중심에 위치하여 주간에 남서풍계열의 해풍이, 야간에는 북서풍계열의 약한 육풍이 나타났다. Fig. 3(c)는 2010년 12월 11일 09시의 일기도로 발해만 서쪽의 화중지방에 중심을 둔 고기압의 가장자리에 위치하여 북서풍계열의 바람이 지속적으로 유입되었고 특히 새벽과 오전에 5 m/s 이상의 강한 북서풍이 나타났다. Fig. 3(d)는 2010년 12월 23일 09시 일기도로 몽골지방에 1053 hPa의 중심을 둔 강한 고기압의 영향으로 부산지방은 북서계열의 건조한 바람이 약하게 지속적으로 불었고 구름은 없었으며 일사량이 많았다. Fig. 3(e)는 2011년 2월 4일의 09시 일기도로 부산지방은 남해상에 1023 hPa 약한 이동성고기압의 영향을 받고 있어 매우 맑은 날씨를 나타내었으며, 대륙으로 약화된 고기압이 우리나라로 천천히 이동해 옴에 따라 4일간 고농도 미세먼지가 지속되었다. Fig. 3(f)는 2012년 1월 10일 09시의 지상일기도로 몽골남부와 북부지방에 위치한 1058 hPa의 고기압의 영향으로 부산지방은 북서계열의 바람이 지속적으로 유입되었으며, 구름이 적고 맑은 날씨를 나타내었다.

Table 3. Meteorological data for winter episode days at Busan

Date	At hour max PM ₁₀		Max. air temper. (°C)	Mean RH(%)	Cloud amount (1/10)	Sunshine (h)	Solar radiation (MJ/m ²)	Visibility at max PM ₁₀ (km)
	WD	WS(m/s)						
11-12 Feb 2009	SSW	2.9	15.1	52.6	2.5	6.0	12.93	5
1 Dec 2010	SSW	2.3	19.3	55.9	0	8.9	10.59	7
11 Dec 2010	W	6.6	13.9	31.8	1.9	6.3	8.22	8
23 Dec 2010	N	2.8	12.4	31.9	0	7.8	8.68	7
4-7 Feb 2011	WSW	5.6	12.5	40.5	2.5	8.2	12.83	6
9-10 Jan 2012	N	3.7	7.9	39.7	1.5	8.5	9.7	6
Mean		4.0	13.5	42.1	1.4	7.6	9.7	6.5

Fig. 3. Surface weather charts on winter episode days at Busan. (a) Feb. 11, 2009, (b) Dec. 1, 2010, (c) Dec. 11, 2010, (d) Dec. 23, 2010, (e) Feb. 4, 2011, (f) Jan. 10, 2012.

Fig. 4는 고농도 미세먼지가 발생한 2009년 2월 11일~12일과 2010년 12월 1일의 기상요소의 일변화(풍향, 풍속, 기온, 기압, 상대습도)를 부산지방기상청의 AWS자료를 이용하여 나타낸 것이다. 일반적으로

해풍이 발생할 때는 기압경도가 완만해서 대기가 안정하고 역전층고도가 낮으며 대기의 확산능력은 작아진다. Table 3에서 보는 바와 같이 해풍이 발생한 날에 높은 기온과 습도, 강한 일사, 작은 풍속이 있었다.

Fig. 4. Variation of meteorological parameters on winter episode days at Busan.

2009년 2월 11일에 북서풍~서풍계열의 바람이 오후 2시부터 남서풍계열의 해풍으로 바뀌어 오후 6시까지 지속되었다. 2월 12일에도 새벽부터 오전 11시 40분경까지 북동풍계열의 육풍이 불었고, 그 이후 남풍계열의 해풍이 야간 늦게까지 지속적으로 유입되었다. 해풍이 유입될 때 일시적으로 기온의 하강, 습도의 증가가 있었고 해풍이 유입될 때부터 풍속이 지속적으로 증가하였다. 그리고 2010년 12월 1일의 경우, 오전 9시부터 북동풍계열의 육풍이 갑자기 남풍계열의 해풍으로 바뀌었고 육풍에서 해풍으로 바뀔 때 풍속이 일시적으로 약화되었고 해풍으로 바뀐 후 풍속이 강해졌다. 부산지역에서 해풍이 발생했을 때 TSP의 농도 증가율은 31.5%이었고 발생빈도도 고농도 계급으로 갈수록 증가하였다(전 등, 1994).

3.2.4. 대기상층분석

Fig. 5는 미국 와이오밍대학에서 제공하는 포항공항에서의 건구온도와 노점온도의 연직분포(SkewT-LogP 선도)를 나타낸 것이다(University of Wyoming, 2012). 대기경계층에 대한 관측자료가 없는 관계로 부산에서 북동쪽으로 60 km 떨어진 포항에서의 상층기

상자료를 활용하였으며, 대기가 안정한 상태에서 지표층이 아닌 1 km 정도의 대기경계층을 분석하는 데는 무리가 없다고 판단된다. 2009년 2월 11일의 경우는 1500 m에 상층역전이 존재하고, 2010년 12월 1일에는 지표에서 800 m까지 지표역전층이 발달되어 있으며, 2010년 12월 11일과 12월 23일에는 각각 1300 m 부근과 800 m 부근에 강한 상층역전층이 존재하고 있다. 2011년 2월 4일에는 지상에서 200 m까지 지표역전이 강하게 나타났고, 2012년 1월 10일에는 800 m 부근에 상층역전층이 나타내고 있다. 따라서 부산지역에 고농도 미세먼지 발생일은 지표역전층과 상층역전층이 존재하여 공기의 연직확산이 어려운 대기환경이었다고 할 수 있다. 특히 야간의 지구복사에 의한 지표역전과 단열압축에 의한 상층공기의 침강에 의한 침강역전이 동시에 발생하면 상층으로의 연직확산이 어려워 오염먼지의 축적을 일으켜 고농도 오염을 유발한다(Stull, 1991). 특히 침강에 의한 상층역전은 지붕과 같은 역할을 하기 때문에 고농도 오염을 장기간 지속적으로 발생시킬 수 있다. 또한 지상에서 기온과 이슬점차가 작을수록 연무나 박무현상이 발생할

Fig. 5. Sounding on winter episode days at Pohang airport site.

수 있는 기회를 제공하며 기체상 입자를 대기 중에 생성시킬 수 있다. 따라서 연무와 저시정 그리고 대기경계층고도가 낮을 때 고농도 미세먼지가 발생하기 매우 용이하다.

Fig. 6은 미국 해양기상청이 HYSPLIT(Hybrid Single Particle Lagrangian Integrated Trajectory) 수송확산모델의 계산식을 이용하여 계산한 부산지역의 대기경계층고도와 연직확산계수(Kz)를 계산하여 나타낸 것이다(NOAA, 2012). 부산지역에 고농도 미세먼지를 나타낸 모든 경우에 대기경계층고도가 오후 3시에 가장 높고 저녁에 낮아지는 전형적인 일변화 유형을 나타내고 있고 대기확산계수 또한 대기경계층고도와 비슷한 양상을 보이고 있다. 고농도 미세먼지가 발생하는 경우, 일중 경계층고도가 가장 높은 시간대임에도 불구하고 1000 m 이하를 나타내어 비교적 대기가 안정하였다는 것을 알 수 있다. 대기경계층고도가 낮을수록 대기확산이 어려워 미세먼지가 축적되어 고농도를

발생할 수 있는 최적의 조건이 된다(Liu와 Chan, 2002; Ji 등, 2012).

3.2.5. 역궤적 분석

Fig. 7은 부산지역 겨울철에 발생한 고농도 미세먼지 사례에 대한 공기를 추적하기 위해서 미국 해양기상청에 의해 개발된 HYSPLIT 모델을 사용하여 기류의 이동방향을 추적한 것이다(Draxler와 Rolph, 2012). 중국에서 발생한 대기오염물질의 경우 대략 4일 이내에 한반도에 도달하는 것으로 알려져 있으나, 본 연구에서는 부산지역에 영향을 미치는 공기괴의 궤적을 알아본다는 차원에서 역궤적의 모사시간을 72시간으로 하고 6시간 간격으로 하였다. 측정지점의 좌표는 부산지방기상청으로 위도 N35° 06′ 경도 E129° 02′ 지점을 설정하였다. 여섯 사례 모두 중국으로부터 공기괴의 유입이 있었고 대부분 72시간 공기괴의 이동이 매우 짧아 중국 내륙에서 정체된 상태로 머물렀던 공기괴가 우리나라로 유입된 것으로 보인다. 따라

Fig. 6. Boundary layer depth and vertical mixing coefficient on winter episode days at Busan.

서 고농도 미세먼지를 발생시킨 원인으로 중국의 북부지역과 중국 동부 공업지역으로부터 오염물질의 유입이 있었던 것으로 판단된다. 서풍계열이 우세한 경우에는 중국으로부터의 장거리수송과 서해상의 해염입자의 영향을 받을 수 있다. 그러나 1500 m의 공기괴는 이동거리가 다소 긴 경우도 있었다. 2010년 12월 1일과 2011년 2월 4일의 경우는 1000 m이하의 공기괴가 중국 동부지역에서 장기간 걸쳐 서서히 유입되었고 1500 m의 공기괴는 중국 북부지역으로 상대적으로 빠르게 유입되었다. 또한 2012년 1월 10일의 경우는 세 고도 모두 중국 북경과 만주 발해만을 거쳐 부산으로 유입되어 된 것으로 중국으로부터 우리나라로 수송된 월경성 오염물질일 수 있다(Lee 등, 2011). 그리고 2012년 1월 10일의 경우를 제외한 모든 사례의 공기괴는 우리나라로 이동하면서 연직방향으로 상승과 하강이 반복된 모습을 보여주었다. 그러나 부산의

고농도 미세먼지에 대한 중국의 정량적인 기여를 파악하기 위해서 해당지역의 농도나 수치 모델링을 통한 공간적인 해석이 요구된다.

4. 결 론

부산지역에서 최근 4년간 겨울철 일평균 PM_{10} 농도가 $100 \mu g/m^3$ 에 근접하거나 초과한 날을 선정하여 그 원인을 기상학적으로 고찰한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 부산지역 겨울철에 일평균 PM_{10} 농도가 대기환경기준인 $100 \mu g/m^3$ 에 근접하거나 초과한 사례는 6개 이었고, $PM_{2.5}/PM_{10}$ 비는 0.36~0.69(평균 0.55)이었다.
2. 고농도 미세먼지는 평상시 보다 높은 기온, 일사량, 일조시간 그리고 낮은 상대습도와 운량일 때 발생하였고, 종관적으로 부산지방이 고기압의 중심부나

Fig. 7. Backward trajectory arriving at Busan on winter episode days.

가장자리에 위치할 때와 남풍계열의 해풍이 유입하는 날에 발생하였다.

3. 대기상층을 분석한 결과, 고농도 미세먼지는 지표역전층과 상층역전층이 존재할 할 때 발생하였고 대기경계층고도와 대기확산계수가 작을 때 발생하였다.

4. 공기괴의 역적재 분석 결과, 고농도 미세먼지는 중국내륙으로부터 공기괴가 유입될 때 발생하여 외부로부터의 장거리 수송에 의한 영향이 있는 것으로 나타났다.

5. 향후 부산지역의 고농도 미세먼지 발생에 기여하는 기상학적 요소를 정량적으로 평가하거나 미세먼지 농도에 미치는 국지적인 요인과 외부적인 요인을 체계적으로 분석하는 것이 요구된다.

참 고 문 헌

- 기상청, 2011, 한국기후표(1981-2010).
- 문광주, 반수진, 박지훈, 박승명, 박종성, 장성기, 김종춘, 2011, 서울지역 고농도 미세먼지 사례의 발생 경향 분석 및 미세먼지 성분특성에 관한 연구, 한국대기환경학회 2011년 추계학술대회 논문집, 104-104.
- 박기형, 도우곤, 유은철, 이병규, 2011, 2010년 부산지역 미세먼지(PM₁₀) 고농도 사례 분석, 한국대기환경학회 2011년 추계학술대회 논문집, 277-277.
- 부산지방기상청, 2012, 일기상통계표.
- 서울시정개발연구원, 2011, 서울시 고농도 미세먼지 오염 현상의 원인분석 및 지역별 맞춤형관리대책, 30-47.
- 이형민, 김정연, 김용표, 2011, 2005년 7월 서울시 미세먼지 고농도 현상에 대한 분석, 한국입자 에어로졸학회지, 7(2), 49-57.
- 전병일, 2010, 부산지역 PM₁₀과 PM_{2.5}농도의 시간 및 공간적 변화 특성, 한국환경과학회지, 19(8), 1013-1023.
- 전병일, 김유근, 이화운, 1994, 해풍이 부산지역의 대기 오염농도에 미치는 영향, 한국환경과학회지, 3(4), 357-365.
- 전병일, 황용식, 2007, 최근 5년간 부산지역의 미세먼지 (PM₁₀)농도 특성에 관한 연구, 환경영향평가, 16(6), 533-542.
- 정권, 이준복, 강미혜, 안미진, 김주형, 김민영, 2007, 서울지역 고농도미세먼지 발생원인, 한국대기환경학회 2007년 추계학술대회논문집, 524-525.
- 吉門 洋, 串魚崎耕, 2000, 濃尾平野の初冬季高濃度大気汚染 -気象学的構造における関東との差異-, 大気環境学会誌, 35(1), 63-75.
- Chen, Z. H., Cheng, S. Y., Li, J. B., Guo, X. R., Wang, W. H., Chen, D. S., 2008, Relationship between atmospheric pollution processes and synoptic pressure patterns in northern China, Atmos. Environ., 42, 6078-6087.
- Dockery, D. W., Pope, C. A., 1994, Acute respiratory effects of particulate air-pollution, Annual Review of Aerosol Science 29, 421e444.
- 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.
- Ji, D., Wang, Y., Wang, L., Chen, L., Hu, B., Tang, G., Xin, J., Song, T., Wen, T., Sun, Y., Pan, Y., Liu, Z., 2012, Analysis of heavy pollution episodes in selected cities of northern China, Atmos. Environ., 50, 338-348.
- Lee, S. M., Ho, C. H., Choi, Y. S., 2011, High-PM₁₀ concentration episodes in Seoul, Korea: Background sources and related meteorological conditions, Atmos. Environ., 45, 7240-7247.
- Lee, Y. C., Hills, P. R., 2003, Cool season pollution episodes in Hong Kong, 1996 - 2002, Atmos. Environ., 37, 2927 - 2939.
- Liu, H. P., Chan, C. L., 2002, Boundary layer dynamics associated with a severe air-pollution episode in Hong Kong, Atmos. Environ., 36(12), 2013 - 2025.
- NOAA, 2012, <http://ready.arl.noaa.gov/archives.php>
- Stull, R. B., 1991, An introduction to boundary layer meteorology, Kluwer Academic Publishers, 151-175.
- University of Wyoming, 2012, <http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>.