

연구논문

종관기상장에 따른 서울 지역 미세먼지 농도 변화

이정영* · 한진석* · 공부주** · 홍유덕* · 이종현*** · 정일록*

국립환경과학원 대기환경과*, 국립환경과학원 지구환경연구소**, 친환경상품진흥원***

(2007년 8월 27일 접수, 2007년 10월 4일 승인)

Variation of PM₁₀ Concentration in Seoul in Association with Synoptic Meteorological Conditions

Jung-Young Lee · Jin-Seok Han · Boo-Joo Kong* ·

You-Deog Hong · Jong-Hyun Lee** · Il-Rok Chung

Environmental Diagnostics Research Department, National Institute of Environmental Research*

Global Environment Research center, National Institute of Environmental Research**

Korea Eco-Products Institute***

(Manuscript received 27 August 2007; accepted 4 October 2007)

Abstract

To evaluate dominant synoptic classes which affect on PM₁₀ concentration in Seoul, 64 synoptic classes are classified from four seasons, 850hPa geopotential wind and lower level stability Index. In this study, we used air monitoring and meteorological data in Seoul for five years from 2001 to 2005.

The results indicate that the highest occurrence frequency of synoptic class is under a strong westerly geopotential wind and stable lower atmosphere in spring. The highest PM₁₀ concentration of synoptic class is associated with a weak geopotential wind speed and high lower level stability. In that class, not only PM₁₀ but SO₂, NO₂ and CO concentrations are also higher than other classes. The analysis of spacial distribution of PM₁₀ concentration in each class are indicate that the influence of synoptic class are similar in the Metropolitan area in Korea. But PM₁₀ concentration in some areas in Kyoung-Gi are more higher than in Seoul. The relationship between PM₁₀ concentration and Meteorological indicator (relative humidity, temperature, surface wind speed) under same synoptic class is more correlative in Winter than other season.

Key words : Synoptic Class, PM₁₀, 850hPa geopotential wind, Lower Level Stability Index

I. 서론

매일의 대기 오염도를 개선하기 위해서는 배출량 뿐 아니라 그 날의 종관기상장 및 기상인자들과 대기오염도와의 관계를 파악하는 것이 중요하다. 우리나라의 비황사시 미세먼지의 고농도 사례는 주로 정체성 고기압의 영향으로 국지수송 및 확산이 적은 종관기상조건과 연관되어 나타나며, 특정 종관상태가 한반도를 지배할 때 우리나라 대부분 지역에서 상대적으로 비슷한 농도 분포를 나타내는 경향이 있으므로(김철희 등(2004)), 비황사시 미세먼지 농도에 영향을 미치는 종관 상태를 분류할 필요성이 있다.

국외에서는 Sanchenz *et al.*(1990)이 지상과 500 hPa 고도의 기상 변수(지오폠펌셜 고도, 온도, 상대습도 등)를 이용하여 종관 군집을 분류하였고 각 군집에 따른 부유분진(TSP)의 농도분포를 통해 대기오염 포텐셜을 판단하였다. 국내에서는 박순웅·윤일희(1991)가 계절에 따라 850 hPa 지균풍의 풍향과 세기 및 운량 등을 고려하여 한반도의 국지기상 특성을 분석하였다. 김시완 등(1996)은 Sanchenz *et al.*(1990)의 방법을 이용하여 계절별로 분류한 종관기상장과 남한지역 4대 도시의 대기오염물질(SO₂, NO_x, CO, O₃) 농도와의 관계를 분석하였다. 또한 김철희 등(2005)은 850 hPa 지오폠펌셜 고도와 하층대기의 일평균 풍속 및 혼합고와 유사한 개념의 하층연직 대기안정도를 계산하여 종관기상 상태를 분류한 바 있다.

본 연구에서는 서울 지역에 대해서 2001 ~ 2005년 기간 중 황사일을 제외한 날들을 사계절과 850 hPa 지균풍의 방향과 세기, 그리고 하층대기 안정도에 따라 총 64개 종관기상장으로 분류하였다. 이후 각 종관기상장별 미세먼지(PM₁₀)의 농도를 계산하였으며, 계산된 미세먼지의 농도의 공간분포를 통해 미세먼지 고농도 가능성이 큰 종관기상조건을 제시하고자 했다. 또한 분류된 종관기상장 내에서의 미세먼지 농도와 기상요소 사이의 관계를 분석하였다.

II. 사용한 자료 및 연구 방법

본 연구에서 사용한 수도권 지역의 미세먼지(PM₁₀) 농도 자료는 2001 ~ 2005년 기간동안 환경부 및 지자체에서 관할하는 도시대기측정소의 매시간 측정 자료로, 미세먼지의 대기오염공정시험법인 베타선 흡수법에 따라 측정된 것이다. 이 외에 다른 오염물질(SO₂, NO₂, O₃, CO)의 농도 자료 역시 미세먼지 농도자료와의 비교를 위해 함께 이용하였으며, 연도별로 자료를 사용한 측정소의 수는 표 1과 같다. 종관기상장 구분에 필요한 850 hPa 지균풍의 방향과 세기 및 고층 기온 자료(850 hPa, 1000 hPa)는 오산 고층기상대에서 매일 00 UTC에 측정한 자료를 이용하였다. 또한, 동일 종관장 안에서 미세먼지 농도와 기상인자의 상관관계를 조사하기 위하여 서울의 정규기상관측소의 지상풍속 및 상대습도, 기온 등의 시간별 측정 자료를 사용하였다.

본 연구에서는 연구기간 동안의 서울 지역의 대기오염도 및 기상요소(상대습도, 기온, 시정, 이슬점온도) 자료를 일평균 값으로 계산한 뒤 64개 종관장으로 분류하였다. 이 때 종관기상장 구분에 앞서 각 자료에서 황사일의 측정값은 제외하였다. 본 연구에서 황사일은 기상청에서 황사로 발표한 날로, 하루 중 짧은 동안이라도 황사현상이 보고된 날은 모두 황사일로 분류하였다. 이후 계절에 따라 자료를 분류한 후, 850 hPa 지균풍의 풍향에 따라 북풍 계열(315° 이상 ~ 45° 미만), 동풍 계열(45° 이상 ~ 135° 미만), 남풍 계열(135° 이상 ~ 225° 미만), 서풍 계열(225° 이상 ~ 315° 미만)의 4개 경우로 구분하였고, 풍속은 850 hPa 종관 바람이 약한 날(5 m/s 미만)과 강한 날(5 m/s 이상)의 두 경우로 나누었다. 다음으로 그날의 하층대기 안정도를 구하기 위하여 매일 오산에서 관측되는 고층 기온자

표 1. 수도권 지역의 연도별 도시대기측정소수(단위 : 개소)

	2001년	2002년	2003년	2004년	2005년
서울	26	27	27	27	27
인천	10	10	11	11	11
경기	32	43	47	51	55

료를 이용하였다. 여기서 하층대기안정도(S)란 1000 hPa의 공기덩어리를 단열 과정을 통해 850 hPa까지 상승시켰을 때 변화된 온도(T₁)와 본래의 850 hPa 고도의 기온(T₂)과의 차이로, 다음과 같이 정의한다.

$$S = T_2 - T_1$$

이 값은 연직 환기 효과와 연관되는 인자로 일변화를 하는 혼합고 대신 하루를 하나의 인자로 표현할 수 있는 장점이 있다(변희룡 등, 1995). 즉 S 값이 클수록 하층대기가 안정함을, 작을수록 불안정함을 의미한다. 본 연구에서는 2001 ~ 2005년 평균값인 8을 기준으로 그보다 큰 경우와 작은 경우로 구분하였다.

표 2는 분류된 종관기상장의 조건으로 봄철의 경우를 나타낸다. 여기서 각 경우를 나타내는 세 숫자는 분류 구분의 편의상 첫째 숫자는 풍향 구분으로

1 ~ 4가 각각 북, 동, 남, 서 방향을 나타내고, 두 번째 숫자는 종관 풍속 구분으로 1은 5 m/s 미만을, 2는 5 m/s 이상을 나타낸다. 세 번째 숫자는 하층대기안정도 값(S)으로 1은 안정도가 8미만을, 2는 안정도가 8이상을 나타낸다. 같은 방법으로 봄철 뿐 아니라 다른 계절에 대해서도 종관기상장을 구분하여 총 64가지 군으로 분류하였다.

III. 연구결과

1. 서울의 미세먼지 농도 현황

서울의 미세먼지 농도는 1995년 측정을 시작한 후로 조금씩 감소하다가 1999년을 기점으로 다시 증가하였고, 2002년 이후로 미미하게 감소하는 추세이다. 이는 봄철마다 우리나라의 대기질에 영향을 미치는 황사 사례를 제외한 연평균 농도에서 좀더 분명히 나타나며, 서울 지역의 미세먼지 농도는 2004년 이후로 그 농도가 조금씩 개선되고 있다(표 3).

표 4는 황사일을 제외한 2001 ~ 2005년 기간에 대해서 서울 지역 미세먼지 일평균 농도의 범위를 연도별로 나타낸 것이다. 일평균 농도가 50 µg/m³ 이하인 저농도 일수는 매년 조금씩 증가하는 추세이고 100 µg/m³ 이상인 고농도 일수는 2003년 이후 다소 감소하다 2004년과 2005년이 거의 비슷한 수준이다. 따라서 서울 지역 미세먼지 오염도는 매년 조금씩 개선되고 있으며 이는 고농도 일의 감소뿐 아니라 저농도 일이 증가에도 큰 영향을 받고 있음을 알 수 있다.

표 5는 본 연구에서 매일의 미세먼지 농도에 영향을 미친다고 가정한 종관기상 조건에 따른 자료의 빈도를 제시한 것이다. 계절별 자료의 빈도는 사

표 2. 봄철에 대한 16개 종관기상장의 분류 조건

계절	850 hPa 풍향	850 hPa 풍속(WS)	하층안정도(S)	분 류
봄	N (315° ~ 45°)	ws < 5 m/s	S < 8	1-1-1
			S ≥ 8	1-1-2
		ws ≥ 5 m/s	S < 8	1-2-1
			S ≥ 8	1-2-2
	E (45° ~ 135°)	ws < 5 m/s	S < 8	2-1-1
			S ≥ 8	2-1-2
		ws ≥ 5 m/s	S < 8	2-2-1
			S ≥ 8	2-2-2
	S (135° ~ 225°)	ws < 5 m/s	S < 8	3-1-1
			S ≥ 8	3-1-2
		ws ≥ 5 m/s	S < 8	3-2-1
			S ≥ 8	3-2-2
W (225° ~ 315°)	ws < 5 m/s	S < 8	4-1-1	
		S ≥ 8	4-1-2	
	ws ≥ 5 m/s	S < 8	4-2-1	
		S ≥ 8	4-2-2	

표 3. 황사를 포함 했을 때와 제외했을 때의 미세먼지 연평균 농도(단위 : µg/m³)

년/도시	2001년		2002년		2003년		2004년		2005년	
	연평균	비황사 연평균*	연평균	비황사 연평균	연평균	비황사 연평균	연평균	비황사 연평균	연평균	비황사 연평균
서울	71	66	76	65	69	69	61	59	58	56
인천	52	48	57	52	61	60	62	61	61	60

* 비황사 연평균 : 황사일의 자료를 제외하고 계산한 연평균

표 4. 2001 ~ 2005년 기간 서울 지역 도시 일평균 농도의 분포(단위 : 일수)

도시 및 연도	농도 분류	0~50 μg/m ³	51~70 μg/m ³	71~100 μg/m ³	101~120 μg/m ³	121~150 μg/m ³	151 μg/m ³ 이상	유효일*
서울	2001년	119 (35%)	110 (33%)	66 (20%)	18 (5%)	14 (4%)	9 (3%)	336
	2002년	124 (36%)	93 (27%)	90 (26%)	20 (6%)	16 (5%)	5 (1%)	348
	2003년	130 (36%)	84 (23%)	92 (25%)	20 (6%)	21 (6%)	15 (4%)	362
	2004년	170 (47%)	75 (21%)	86 (24%)	17 (5%)	8 (2%)	4 (1%)	360
	2005년	179 (51%)	84 (24%)	62 (18%)	16 (5%)	12 (3%)	0 (0%)	353

* 유효일은 연도별로 계산된 도시일평균의 개수

* () 안의 값은 각 농도 분류별 일수의 유효일에 대한 비율

표 5. 종관기상 조건에 따른 자료의 빈도

구 분	계 절				850 hPa 풍 향				850 hPa 풍 속		하층대기 안정도	
	봄	여름	가을	겨울	북	동	남	서	5 m/s 미만	5 m/s 이상	8 미만	8 이상
빈도 (일)	405	458	450	443	427	196	252	881	426	1330	926	830
전체에 대한 비율 (%)	23.1	26.1	25.6	25.2	24.3	11.2	14.3	50.1	24.3	75.7	52.7	47.3
총 일수	1756 (100.0 %)				1756 (100.0 %)				1756 (100.0 %)		1756 (100.0 %)	

계절이 거의 유사한 편으로 봄철 자료의 빈도가 비교적 낮은 이유는 황사일을 제외하는 과정에서 상대적으로 봄철 자료가 많이 제외된 까닭으로 보인다. 850 hPa의 풍향을 고려하였을 때 우리나라는 서풍의 영향을 가장 많이 받았으며(전체 자료의

50.1%), 다음으로 북풍(24.3%), 남풍(14.3%), 동풍(11.2%)의 순서로 영향을 받았다. 850 hPa의 풍속에 따라서는 5 m/s 이상으로 강한 풍속을 나타내는 경우가 전체의 75.7%로 5 m/s 이하의 약한 풍속을 나타내는 경우보다 약 3배 정도로 빈도가 높았

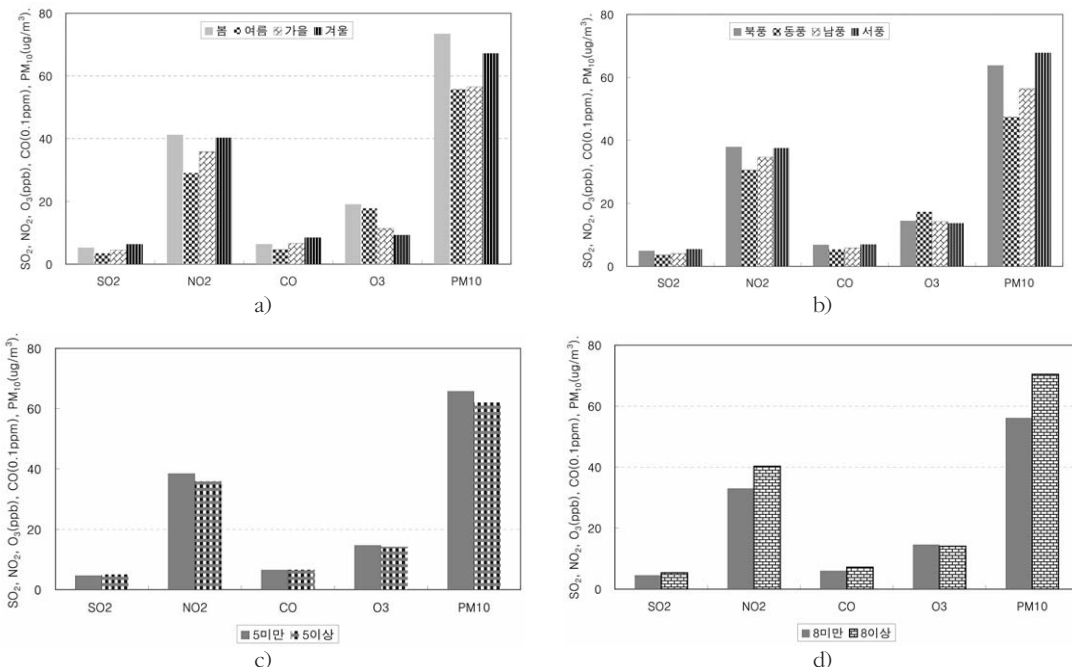


그림 1. 종관기상조건(a) 계절, b) 850 hPa 풍향, c) 850 hPa 풍속, d) 하층대기안정도에 따른 대기오염도(서울지역)

다. 하층 대기안정도에 따라 분류했을 때는 8 미만으로 불안정한 경우(52.8%)가 8 이상으로 안정한 경우(47.2%)보다 그 빈도가 조금 많았으나 큰 차이는 없었다.

그림 1은 표 5에 제시한 종관기상 조건에 따른 대기오염도를 나타낸 것이다. 계절별로는 NO₂와 PM₁₀이 봄에 가장 농도가 높았고 겨울, 가을, 여름 순서로 농도가 높았다. 850 hPa 풍향별로는 PM₁₀, SO₂, CO 항목은 서풍, NO₂는 북풍, O₃은 동풍의 영향 하에서 오염도가 높게 나타났다. 850 hPa 풍속에 따른 대기오염도는 5 m/s 미만인 경우의 농도가 그 이상인 경우보다 비교적 높았으나 큰 차이는 없었다. 하층 대기 안정도에 따른 대기오염도는 PM₁₀과 NO₂의 경우에 상당한 차이를 보였으며 하층 대기안정도가 8 이상으로 높은 경우가 그렇지 않은 경우보다 PM₁₀은 14 μg/m³, NO₂는 13 ppb 이상 농도가 높았다. 이는 PM₁₀과 NO₂의 경우 대기가 안정하여 정체하는 경우 고농도 현상이 발생할 확률이 다른 오염물질보다도 더 높음을 시사한다.

2. 종관기상장별 빈도 및 미세먼지 농도 특성

표 6은 2001 ~ 2005년 기간 서울 지역을 대상으로 종관기상장 구별법에 따라 분류한 64개 군에서의 대기오염도를 나타낸 것이다. 분류된 종관기상장별 빈도를 살펴보았을 때, 우리나라는 계절에 관계없이 상층(850 hPa) 서풍과 북풍의 영향을 많이 받았으며, 특히 겨울철에 상층 풍향별 빈도의 차이가 커졌고 여름철에 그러한 차이가 상당히 줄어들었다. 계절별로 주로 영향을 미치는 종관기상장으로는 봄철에는 서풍이면서 상층 바람이 세고 하층 대기 안정도가 8 이상인 종관기상장(4-2-2 군)이 100일로 봄철 전체의 24.7 %를 차지했으며, 여름철을 비롯한 가을과 겨울철에는 서풍이면서 상층 바람이 세고 하층대기 안정도가 8 미만인 종관기상장(4-2-1 군)이 각 88일(여름철 전체의 19.2 %), 103일(가을철 전체의 22.9 %), 149일(겨울철 전체의 33.6 %)로 나타났다. 이러한 계절별 대표 종관기상장의 미세먼지 농도는 봄철이 80.9 μg/m³로 가장 높았으며, 다음으로 겨울철 68.0 μg/m³, 가을철

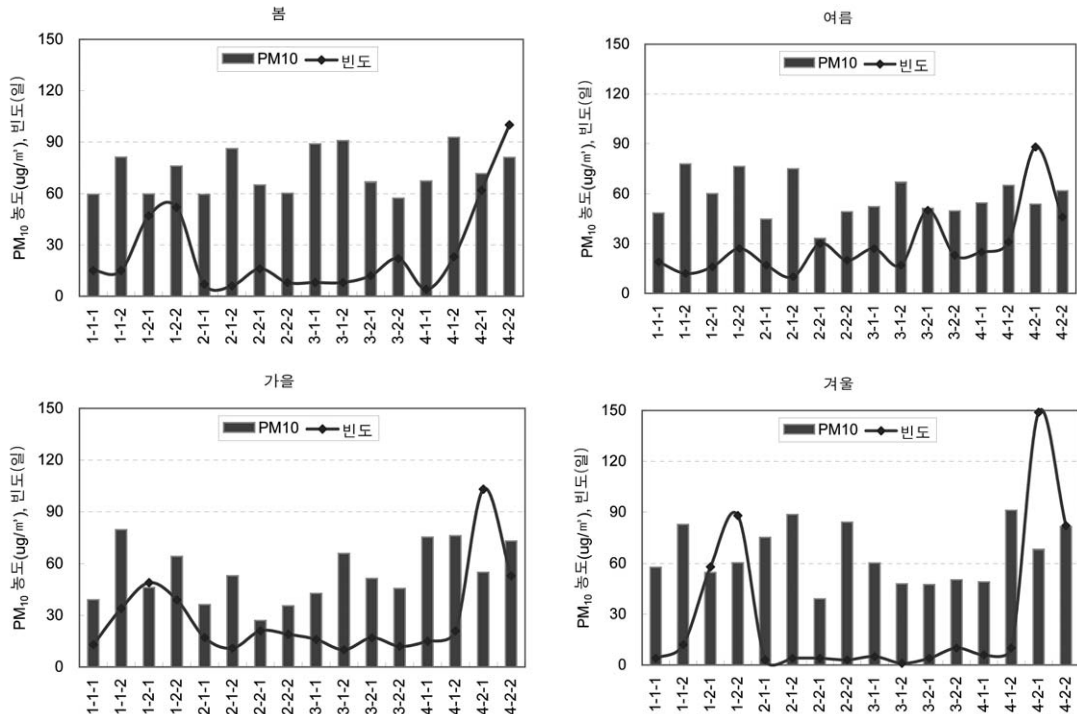


그림 2. 64개 종관장별 미세먼지 농도와 빈도(서울 지역)

표 6. 분류된 종관기상장에서 대기오염도 및 기상요소의 평균값(서울 지역)

분류	항목	빈도 (일)	PM ₁₀ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	SO ₂ (ppb)	NO ₂ (ppb)	CO (0.1ppm)	O ₃ (ppb)	상대습도 (%)	기온 ($^{\circ}\text{C}$)	지상풍속 (m/s)	시정 (Km)	이슬점온도 ($^{\circ}\text{C}$)
봄	1-1-1	15	59.7	4.4	41.2	6.5	15.0	54.5	8.9	2.1	11.0	1.2
	1-1-2	15	81.1	5.4	45.6	7.1	19.4	51.9	14.7	2.0	6.9	4.8
	1-2-1	47	59.8	4.4	34.5	5.9	20.4	49.6	7.3	2.8	10.5	-1.3
	1-2-2	52	75.9	5.3	42.9	6.5	18.9	50.8	14.9	2.2	8.7	7.1
	2-1-1	7	59.6	4.5	39.1	6.1	19.4	52.5	12.9	2.1	8.5	8.2
	2-1-2	6	86.1	5.1	51.5	7.3	19.2	55.8	17.3	1.6	9.3	6.6
	2-2-1	16	65.1	3.7	34.1	5.4	24.3	61.4	16.6	2.3	9.5	9.7
	2-2-2	8	60.2	4.2	38.0	5.8	24.2	46.3	20.4	1.9	11.0	11.6
	3-1-1	8	88.9	5.2	44.7	6.0	15.8	57.6	11.3	2.2	6.7	4.7
	3-1-2	8	90.7	5.6	54.8	8.5	14.1	55.4	16.1	1.8	7.2	8.9
	3-2-1	12	66.6	4.6	41.2	5.4	17.1	63.8	16.8	2.2	8.9	9.3
	3-2-2	22	57.3	4.2	39.4	5.7	15.8	66.1	15.5	2.4	7.1	9.6
	4-1-1	4	67.2	4.8	44.0	6.1	13.9	56.8	9.0	2.0	10.8	1.2
	4-1-2	23	92.7	6.4	51.4	7.5	17.7	53.3	15.2	2.0	6.7	5.6
	4-2-1	62	71.4	5.3	37.3	6.0	19.7	60.4	10.0	2.8	7.2	4.0
	4-2-2	100	80.9	6.2	42.6	6.8	19.9	58.0	13.2	2.5	7.4	4.7
여름	1-1-1	19	48.5	3.6	31.3	4.7	17.6	67.8	23.8	1.6	10.0	16.8
	1-1-2	12	77.8	4.9	40.4	5.7	23.0	59.2	25.4	1.7	8.5	16.0
	1-2-1	16	60.2	3.8	31.9	5.6	21.5	69.1	24.3	1.7	7.2	18.2
	1-2-2	27	76.2	4.7	36.5	5.4	23.7	62.7	24.1	1.9	6.9	15.6
	2-1-1	17	44.8	3.1	27.6	4.8	16.9	69.0	24.5	1.5	8.8	18.4
	2-1-2	10	74.8	4.1	36.8	5.9	21.5	65.8	25.7	1.5	9.1	18.2
	2-2-1	30	33.2	2.9	23.9	4.3	18.4	67.5	23.9	1.8	10.6	18.1
	2-2-2	20	49.2	3.3	26.3	4.6	18.5	67.3	24.2	2.3	9.2	16.6
	3-1-1	27	52.3	3.4	29.1	4.7	19.3	71.8	25.0	1.9	7.7	17.6
	3-1-2	17	66.8	4.3	35.0	5.8	18.0	72.2	25.1	1.7	5.6	17.8
	3-2-1	50	51.3	3.4	28.0	5.1	17.4	76.8	24.7	1.8	6.1	18.7
	3-2-2	23	49.7	3.5	30.2	5.0	15.6	76.0	22.3	2.1	6.9	16.2
	4-1-1	25	54.5	3.6	29.4	4.8	16.6	73.8	24.5	1.8	5.2	17.0
	4-1-2	31	65.2	3.9	32.3	5.1	19.1	70.2	24.6	1.6	6.6	16.7
	4-2-1	88	53.8	3.4	25.1	4.5	16.1	79.6	24.1	2.4	5.6	18.4
	4-2-2	46	61.9	4.0	29.1	4.8	16.2	74.9	23.8	2.1	5.7	16.8
가을	1-1-1	13	39.0	3.7	30.7	5.0	13.6	59.1	18.3	1.4	10.8	10.7
	1-1-2	34	79.5	5.0	42.4	8.4	10.6	61.2	15.9	1.2	8.0	7.9
	1-2-1	49	46.1	4.2	30.8	5.8	12.8	54.7	11.2	2.1	10.0	7.2
	1-2-2	39	64.2	4.9	40.1	7.6	10.3	56.2	12.1	1.6	9.0	5.7
	2-1-1	17	36.2	3.6	30.8	5.5	12.8	62.1	19.2	1.3	9.0	12.3
	2-1-2	11	53.0	4.1	35.4	6.2	12.9	61.7	21.2	1.4	7.9	15.0
	2-2-1	21	27.0	3.1	25.1	4.5	16.0	63.5	19.4	1.9	10.2	14.9
	2-2-2	19	35.5	3.5	26.3	4.6	15.7	61.0	19.8	2.3	10.9	11.4
	3-1-1	16	42.7	3.7	31.8	5.2	12.6	67.3	19.0	1.7	9.2	13.0
	3-1-2	10	66.0	5.1	43.7	7.9	10.0	57.9	16.6	1.5	11.7	7.1
	3-2-1	17	51.4	4.1	34.9	6.5	8.4	73.6	15.3	1.8	8.4	9.7
	3-2-2	12	45.6	4.4	37.3	6.3	8.9	68.3	17.0	2.1	10.4	11.8
	4-1-1	15	75.2	5.1	41.3	7.1	12.6	68.5	17.5	1.7	6.7	9.9
	4-1-2	21	76.0	5.5	43.8	7.9	9.8	64.9	16.5	1.5	8.1	9.4
	4-2-1	103	55.0	4.9	35.1	6.7	11.1	63.6	11.1	2.3	8.7	6.8
	4-2-2	53	72.9	4.9	40.3	7.7	9.3	69.9	14.9	1.6	8.0	9.4
겨울	1-1-1	4	57.7	5.9	37.6	9.6	7.7	63.7	5.4	1.8	6.1	10.0
	1-1-2	12	82.7	6.7	46.3	9.6	6.3	54.4	2.2	1.7	10.1	-5.2
	1-2-1	58	54.6	5.0	31.3	6.3	13.3	50.9	-1.8	2.6	10.2	-4.0
	1-2-2	88	60.4	6.0	40.0	8.3	8.6	51.3	-2.1	2.0	9.0	-6.1

표 6. 계속

분류	항목	빈도 (일)	PM ₁₀ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	SO ₂ (ppb)	NO ₂ (ppb)	CO (0.1ppm)	O ₃ (ppb)	상대습도 (%)	기온 ($^{\circ}\text{C}$)	지상풍속 (m/s)	시정 (Km)	이슬점온도 ($^{\circ}\text{C}$)
겨울	2-1-1	3	75.1	6.5	47.2	9.5	5.3	62.2	4.1	1.7	9.4	4.4
	2-1-2	4	88.6	8.5	48.9	11.0	4.1	58.1	3.8	1.8	6.0	0.6
	2-2-1	4	39.0	4.1	32.3	7.4	13.7	57.6	2.3	2.9	8.1	-5.2
	2-2-2	3	84.0	7.3	49.2	10.5	9.5	55.1	2.8	2.6	7.3	-6.4
	3-1-1	5	60.2	5.2	38.1	7.4	4.5	70.2	5.2	1.8	5.8	11.2
	3-1-2	1	47.9	6.6	43.7	14.9	7.6	57.8	0.3	1.8	6.1	-7.3
	3-2-1	4	47.5	4.6	41.4	7.5	5.1	67.4	4.8	2.0	8.2	4.6
	3-2-2	10	50.3	5.3	41.9	8.3	11.5	69.7	2.8	2.7	7.7	-3.0
	4-1-1	6	49.1	5.5	39.9	8.8	8.3	71.2	1.5	2.0	7.1	-1.6
	4-1-2	10	91.0	8.2	55.6	12.1	5.3	51.8	2.1	1.6	8.5	-7.9
	4-2-1	149	68.0	6.7	38.2	8.0	10.2	58.5	-1.1	2.6	8.6	-5.3
	4-2-2	82	81.5	7.2	47.3	10.2	7.0	60.7	0.9	2.1	7.9	-5.1

55.0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 여름철 53.8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 계산되었다.

분류된 종관기상장별 미세먼지 농도를 살펴보았을 때, 빈도가 극히 낮은 경우를 제외하고는 상층 풍향과 계절에 관계없이 상층 풍속이 약하고 하층 대기 안정도가 8 이상인 종관기상장(*-1-2 군)의 미세먼지 농도가 가장 높았다. *-1-2 군의 빈도는 가을철이 76일(가을철 전체의 16.9%)로 가장 높았으며 다음으로 여름철 70일(여름철 전체의 15.3%), 봄철 52일(봄철 전체의 12.8%), 겨울철 27일(6.1%)이었다. 그러나 계절별 *-1-2 군의 미세먼지 농도는 봄철이 88.3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 겨울철이 85.4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 가을철이 72.9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 여름철 69.1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 사계절 모두 2007년 개정된 연평균 미세먼지 환경기준인 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 을 초과하였다. 또한 *-1-2 군의 경우 미세먼지 뿐 아니라 2차 오염물질인 오존을 제외한 SO₂, NO₂, CO의 오염도도 상대적으로 다른 군에 비해 높게 나타나 종관기상 조건이 대기 오염도에 중요한 역할을 함을 확인할 수 있었다.

본 연구에서 종관 상태를 구분하기 위해 사용한 바람장은 850 hpa의 지균풍으로 전국을 대표할 수 있으나, 하층 대기 안정도 지표는 오산지역에서 측정된 고층 자료를 이용하여 계산하였으므로 전국을 대표하는 값이라 보기 어렵다. 따라서 하층 대기 안정도 지표가 대푯값으로 쓰일 수 있는 공간의 범위를 수도권에 한정하여 사 계절에 대한 미세먼지 농도의 공간분포를 살펴보았다. 그림 3은 사계절 중 미세먼지 농도가 가장 높았던 봄철에 대한 16개 종

관장별 미세먼지 농도의 공간분포이다.

그 결과 빈도수가 낮았던 겨울철 몇 개 종관장을 제외한 대부분의 경우 서울 지역에서 미세먼지 농도가 높았던 종관기상장에서 수도권의 미세먼지 농도가 전반적으로 높게 나타났다. 특히 경기도의 김포, 남양주, 화성 지역은 대체로 서울보다 미세먼지 농도가 상당히 높았으며 이들 지역을 중심으로 수도권 지역의 미세먼지 고농도대가 형성되었다. 또한 4가지 바람장 모두에서 하층 대기 안정도 값이 클수록 미세먼지의 농도가 높은 경향이 두드러졌으며, 지균풍속이 클 때보다는 작을 때의 미세먼지 농도가 높음을 확인할 수 있었다. 따라서 특정 종관기상장의 영향은 수도권 전체에 유사하게 작용하며, 미세먼지의 농도는 상층의 지균풍속이 약하고 하층 대기의 안정도가 높아서 대기가 안정한 종관장에서 그 오염도가 심해짐을 확인할 수 있었다.

3. 미세먼지 농도에 영향을 미치는 기상 요소

상층의 바람 뿐 아니라 지상 풍속과 상대습도와 같은 기상요소도 미세먼지 농도에 영향을 미친다고 알려져 있으나 실제로 이들 요소와 미세먼지 농도를 일대일로 대응시켜보면 그 상관도가 상당히 낮게 나타난다. 이는 우리가 그 영향을 알고자 하는 기상요소 외에 계절 등의 미세먼지 농도에 영향을 미치는 다른 요인들의 영향도 함께 받고 있기 때문이다. 따라서 본 연구에서는 미세먼지 농도에 미치는 특정 기상요소의 영향을 알아보기 위하여 앞서 분류된

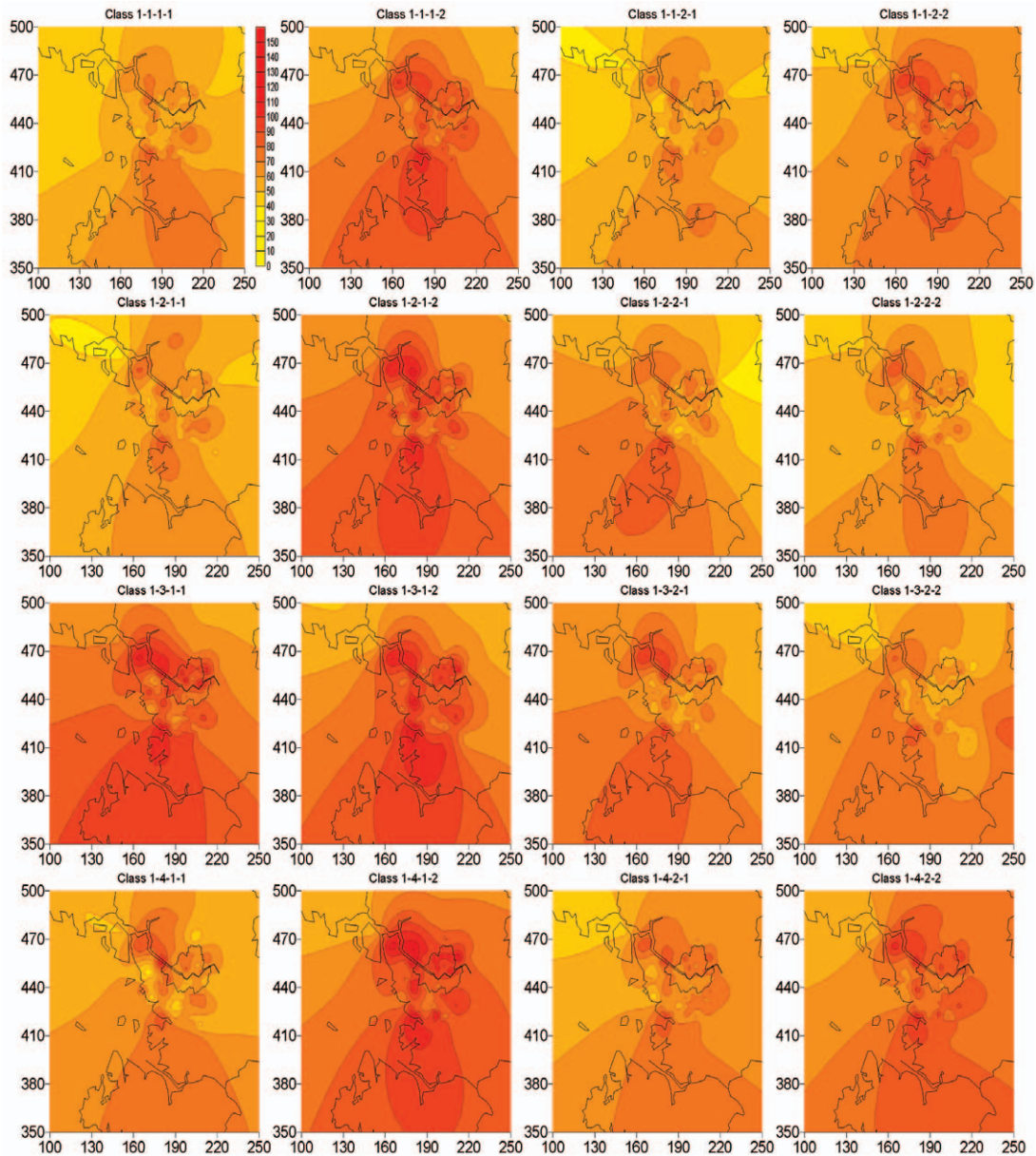


그림 3. 봄철에 대한 16개 종관기상장별 미세먼지 농도의 공간분포(수도권)

64개 종관기상장으로 다른 요인들의 영향을 완화한 후 같은 종관기상장 내에서의 미세먼지 농도와 기상 요소 사이의 상관관계를 조사하였다(표 7).

그 결과 동일 종관기상장으로 자료의 범위를 한정할 후에도 특정 기상요소와 미세먼지 농도 사이의 일정한 상관관계는 보이지 않았다. 그러나 다른 계절에 비하여 겨울철의 경우는 미세먼지 농도와

상대습도, 기온, 지상 풍속 사이에 비교적 강한 상관관계가 나타났다. 특히 북풍이고 상층 바람이 강하며 하층대기안정도가 높은 군(4-1-2-2)과 서풍이면서 상층 바람이 강하고 하층대기 안정도가 낮은 군(4-4-2-1)에서는 상대습도 및 기온과 상관계수가 0.5 이상의 비교적 강한 양의 상관관계를, 지상풍속과 -0.4 이하의 비교적 강한 음의 상관관계

표 7. 분류된 종관기상장별 미세먼지 농도와 기상인자 사이의 상관계수(서울 지역)

구 분	빈도 (일)	PM ₁₀ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	상대 습도	기 온	지상 풍속	시 정	노점 온도	구 분	빈도 (일)	PM ₁₀ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	상대 습도	기 온	지상 풍속	시 정	노점 온도
1-1-1-1	15	60	-0.38	0.20	-0.07	-0.31	-0.33	2-1-1-1	19	49	0.52	-0.35	-0.01	-0.68	-0.02
1-1-1-2	15	81	0.05	-0.44	-0.45	-0.13	-0.20	2-1-1-2	12	78	-0.02	-0.24	-0.34	-0.66	-0.22
1-1-2-1	47	60	0.16	0.36	-0.20	-0.14	0.26	2-1-2-1	16	60	-0.09	-0.05	0.26	-0.63	-0.19
1-1-2-2	52	76	0.35	0.06	-0.24	-0.53	0.24	2-1-2-2	27	76	-0.02	-0.10	0.14	-0.39	-0.03
1-2-1-1	7	60	0.00	-0.72	-0.25	-0.40	-0.57	2-2-1-1	17	45	0.16	-0.17	-0.01	-0.47	-0.11
1-2-1-2	6	86	-0.41	0.05	-0.10	-0.43	-0.16	2-2-1-2	10	75	0.23	0.11	-0.21	-0.81	0.19
1-2-2-1	16	65	-0.26	0.26	-0.39	-0.53	-0.01	2-2-2-1	30	33	0.17	0.32	-0.33	-0.29	0.09
1-2-2-2	8	60	0.41	0.04	-0.32	-0.15	-0.37	2-2-2-2	20	49	0.08	-0.13	-0.62	-0.53	-0.01
1-3-1-1	8	89	-0.14	0.40	-0.36	0.10	0.56	2-3-1-1	27	52	0.16	-0.04	-0.34	-0.48	-0.04
1-3-1-2	8	91	-0.64	0.09	0.51	-0.61	0.03	2-3-1-2	17	67	-0.72	0.47	-0.08	-0.52	-0.01
1-3-2-1	12	67	-0.62	-0.23	0.29	0.36	-0.60	2-3-2-1	50	51	-0.42	0.01	-0.21	-0.38	-0.48
1-3-2-2	22	57	-0.44	0.32	-0.59	0.08	-0.13	2-3-2-2	23	50	-0.33	0.32	-0.21	-0.11	-0.21
1-4-1-1	4	67	-0.83	0.83	-0.34	-0.10	0.14	2-4-1-1	25	55	-0.18	0.13	0.15	-0.53	-0.16
1-4-1-2	23	93	-0.04	0.14	-0.50	-0.32	0.15	2-4-1-2	31	65	-0.28	0.02	0.00	-0.63	-0.22
1-4-2-1	62	71	-0.02	0.19	-0.42	-0.13	0.23	2-4-2-1	88	54	-0.19	-0.17	0.04	-0.39	-0.03
1-4-2-2	100	81	-0.09	-0.05	-0.14	-0.22	0.02	2-4-2-2	46	62	-0.23	-0.27	0.21	-0.31	-0.28
봄 전체	405	73	-0.06	0.13	-0.28	-0.28	0.10	여름 전체	458	56	-0.15	0.00	-0.09	-0.45	-0.15
3-1-1-1	13	39	0.13	-0.36	-0.04	-0.39	-0.25	4-1-1-1	4	58	-0.65	0.93	0.01	-0.56	0.30
3-1-1-2	34	80	0.35	0.07	-0.16	-0.45	0.01	4-1-1-2	12	83	0.51	-0.02	-0.10	-0.38	0.26
3-1-2-1	49	46	0.08	-0.09	-0.28	-0.37	-0.06	4-1-2-1	58	55	0.35	0.52	-0.27	-0.19	0.19
3-1-2-2	39	64	0.57	0.12	-0.42	-0.49	0.17	4-1-2-2	88	60	0.56	0.54	-0.52	-0.43	0.30
3-2-1-1	17	36	-0.46	-0.05	-0.47	-0.43	-0.31	4-2-1-1	3	75	-0.53	-0.43	-0.68	-0.86	-0.01
3-2-1-2	11	53	0.42	-0.66	-0.56	-0.80	-0.67	4-2-1-2	4	89	0.35	-0.45	-0.68	-0.65	-0.42
3-2-2-1	21	27	-0.12	0.38	-0.51	-0.49	0.06	4-2-2-1	4	39	0.13	-0.48	-0.91	0.18	-0.37
3-2-2-2	19	36	0.08	-0.48	-0.15	-0.02	-0.44	4-2-2-2	3	84	0.90	-0.04	-0.31	-0.49	0.75
3-3-1-1	16	43	0.01	0.05	-0.45	-0.16	-0.02	4-3-1-1	5	60	-0.74	0.17	-0.53	-0.09	-0.52
3-3-1-2	10	66	0.02	-0.47	0.00	-0.20	-0.34	4-3-1-2	1	48	-	-	-	-	-
3-3-2-1	17	51	-0.21	0.28	-0.41	-0.49	0.04	4-3-2-1	4	48	0.17	-0.12	-0.80	-0.01	-0.94
3-3-2-2	12	46	-0.65	-0.75	-0.48	0.10	-0.68	4-3-2-2	10	50	-0.83	0.51	-0.80	0.29	-0.72
3-4-1-1	15	75	0.03	-0.04	-0.45	-0.14	-0.38	4-4-1-1	6	49	-0.18	0.71	-0.97	0.01	-0.35
3-4-1-2	21	76	0.01	-0.26	-0.22	-0.37	-0.11	4-4-1-2	10	91	0.58	0.23	0.20	-0.44	0.75
3-4-2-1	103	55	0.12	-0.04	-0.28	-0.32	-0.17	4-4-2-1	149	68	0.50	0.52	-0.41	-0.35	0.24
3-4-2-2	53	73	0.07	-0.22	-0.19	-0.43	-0.30	4-4-2-2	82	82	0.31	0.40	-0.35	-0.41	0.41
가을 전체	450	57	0.14	-0.10	-0.31	-0.38	-0.17	겨울 전체	443	67	0.34	0.44	-0.38	-0.33	0.21

를 보였다. 이 두 군의 빈도가 겨울 전체의 53 %를 차지하는 것으로 볼 때 겨울철의 미세먼지 농도의 경우 상대습도와 기온이 높을수록, 지상풍속이 약할수록 높아짐을 알 수 있었다. 겨울철의 대기오염도와 기상요소 사이의 연관성은 임규호 등(1996)이 경기 일원의 대기오염 농도와 기상변수의 시계열을 분석한 결과 겨울철 대기오염도가 통계적인 측면에서 배출원의 변동이나 지형적인 원인보다 종관규모의 운동에 의해 결정된다고 앞서 밝힌바 있다.

64개 종관기상장 중 평균 미세먼지 농도가 $90 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이상이었던 봄철 남풍이면서 상층 바람이

약하며 하층대기안정도가 낮은 군(1-3-1-2)은 상대습도와 -0.64, 지상풍속과 0.51, 겨울철 서풍이면서 상층 바람이 약하고 하층대기 안정도가 높은 군(4-4-1-2)은 상대습도와 0.58, 노점온도와 0.75, 봄철 서풍이면서 상층 바람이 약하고 하층대기 안정도가 높은 군(1-4-1-2)은 지상풍속과 -0.50 의 비교적 높은 상관관계를 보였다. 고농도를 보인 종관기상장의 경우는 상대습도와 지상풍속 두 요소 모두와 경우에 따라 정관계 혹은 부정 관계를 보였으며 이는 상대습도의 경우 강수 유무에 의해, 지상풍속의 경우 장거리 이동의 영향에 따라 미세

먼지 농도에 미치는 영향이 반대로 작용하기 때문에 판단된다. 그러나 세 경우 모두 그 빈도가 낮기 때문에 신뢰성의 확보를 위해서는 더 많은 자료를 분석할 필요가 있다.

IV. 결론

매일의 대기오염도는 비교적 일간 변동 폭이 작은 배출량보다는 기상요소를 포함한 종관기상장의 영향을 더 많이 받으며, 특정 종관 상태가 한반도를 지배할 때 우리나라 대부분 지역에서 비슷한 대기오염도를 나타내는 경향이 있으므로 종관기상상태를 분류하여 이에 따른 미세먼지 농도 변화를 분석할 필요가 있다.

본 연구에서는 서울 지역에 대해서 2001 ~ 2005년 기간 중 황사일을 제외한 날들을 사계절과 850 hPa 지균풍의 방향과 세기, 그리고 하층대기 안정도에 따라 총 64개 종관기상장으로 분류하였다.

그 결과 계절별 자료의 빈도는 사계절이 거의 유사하였으며 850 hPa의 풍향을 고려하였을 때 우리나라는 서풍의 영향을 가장 많이 받았고(전체 자료의 50.1%), 850 hPa의 풍속에 따라서는 5 m/s 이상으로 강한 풍속을 나타내는 경우가 전체의 75.7%로 빈도가 높았다. 하층대기안정도에 따라 분류했을 때는 8 미만으로 불안정한 경우(52.8%)가 8 이상으로 안정한 경우(47.2%)보다 그 빈도가 조금 많았으나 큰 차이는 없었다. 각 기준별 미세먼지 농도는 계절 구분에서는 봄철이, 850 hPa의 풍향 구분에서는 서풍의 경우, 850 hPa의 풍속에서는 5 m/s 이하 낮은 풍속에서, 하층대기안정도 분류에서는 8 이상으로 안정한 경우가 높게 나타났다.

계절별로 주로 영향을 미치는 종관기상장으로는 봄철에는 서풍이면서 상층 바람이 세고 하층대기 안정도가 8 이상인 종관기상장(4-2-2 군)이 100일로 봄철 전체의 24.7%를 차지했으며, 여름철을 비롯한 가을과 겨울철은 서풍이면서 상층 바람이 세고 하층대기 안정도가 8 미만인 종관기상장(4-2-1 군)이 각 88일(여름철 전체의 19.2%), 103일(가을

철 전체의 22.9%), 149일(겨울철 전체의 33.6%)로 나타났다.

분류된 종관기상장별 미세먼지 농도를 살펴보았을 때, 빈도가 극히 낮은 경우를 제외하고는 상층 풍향과 계절에 관계없이 상층 풍속이 약하고 하층대기 안정도가 8 이상인 종관기상장(*-1-2 군)의 미세먼지 농도가 가장 높았으며 이 군의 경우 미세먼지 뿐 아니라 SO₂, NO₂, CO의 오염도도 상대적으로 다른 군에 비해 높게 나타나 다른 종관기상 조건 중 850 hPa의 풍속과 하층대기안정도가 대기오염도에 미치는 영향이 큼을 확인할 수 있었다.

미세먼지 농도의 공간분포를 살펴보았을 때 특정 종관기상장의 영향은 수도권 전체에 유사하게 미쳤으며, 특히 경기도의 김포, 남양주, 화성 지역에서 미세먼지 고농도가 두드러졌으며 이들 지역을 중심으로 수도권의 미세먼지 고농도대가 형성되었다. 또한 미세먼지의 농도는 상층의 지균풍속이 약하고 하층대기의 안정도가 높아서 대기가 안정한 종관장에서 그 오염도가 심해짐을 공간적으로도 확인할 수 있었다.

미세먼지 농도와 기상요소 사이의 상관관계는 동일 종관기상장으로 자료의 범위를 한정된 후에도 특정 기상요소와 미세먼지 농도 사이의 일정한 상관관계는 보이지 않았다. 그러나 다른 계절에 비하여 겨울철의 경우는 미세먼지 농도와 상대습도 및 기온 사이에 비교적 강한 양의 상관관계가, 지상 풍속과 비교적 강한 음의 상관관계가 나타나서 상대습도와 기온이 높을수록, 지상풍속이 약할수록 미세먼지 농도가 높아짐을 알 수 있었다. 그러나 미세먼지 고농도가 나타난 종관기상장에서의 미세먼지 농도와 기상인자 사이의 상관관계는 자료의 빈도가 낮은 편으로 좀 더 많은 자료를 확보하여 분석할 필요가 있다고 판단된다.

참고문헌

국립환경과학원, 2007, 기상인자가 미세먼지 농도에 미치는 영향 연구.

- 김철희, 박일수, 이석조, 김정수, 홍유덕, 한진석, 진형아, 2005, 하층대기의 연직 안정도 지표를 이용한 차량 2부제의 수도권 대기오염도 저감효과 분석, 한국대기환경학회지, 21(2), 243-257.
- 변희룡, 이동규, 정삼연, 1995, 하층대기의 연직 안정도와 연관된 850 hPa 지오폠펜셜 고도장의 종관적 특성, 한국기상학회지, 31(3), 213-228.
- 김시완, 박순웅, 이보람, 1997, 종관기상장에 따른 SO₂, NO_x, CO, 그리고 O₃ 농도의 변화, 한국기상학회지, 33(2), 273-287.
- 박순웅, 윤일희, 1991, 한반도의 국지기상 특성, 한국대기과학회, 27(2), 87-118.
- 김철희, 박일수, 이석조, 김정수, 진형아, 2004, 지역대기측정망에 나타난 국내 대기오염도의 최근동향, 한국대기환경학회지, 20(2), 215-224
- 임규호, 김경아, 1996, 경기 지역 대기오염 농도의 시간 변동성과 관련된 종관 기상 상태의 전개, 한국기상학회지, 32(1), 153-167.
- 박일수, 이덕길, 강인구, 1991, 서울지역 겨울철 SO₂ 농도를 지배하는 기상인자, 한국대기보전학회지, 7, 96-104.
- 환경부, 2002, 대기환경연보.
- 환경부, 2003, 대기환경연보.
- 환경부, 2004, 대기환경연보.
- 환경부, 2005, 대기환경연보.
- Sanchen, M. L., D. Pasual, C. Ramos, and I. Perez, 1990, Forecasting particulate pollutant concentrations in a city from meteorological variables and regional weather patterns, *Atmos. Environment*, 6, 1509-1519.
- Davis, R. E. and D. A., Gay, 1993, A synoptic climatological analysis of air quality in Grand Canyon National Park, *Atmos. Environment*, 5, 713-727.