

ORIGINAL ARTICLE

## 부산지역 미세먼지 농도 분포에 따른 기상요소 분석

김민경 · 정우식<sup>1)\*</sup> · 이화운<sup>2)</sup> · 도우곤 · 조정구 · 이귀옥<sup>3)</sup>

부산광역시 보건환경연구원, <sup>1)</sup>인제대학교 대기환경정보공학과/대기환경정보연구센터

<sup>2)</sup>부산대학교 대기환경학과, <sup>3)</sup>디엠제이시스템 대기환경연구소

### Analysis on Meteorological Factors related to the Distribution of PM<sub>10</sub> Concentration in Busan

Min-Kyoung Kim, Woo-Sik Jung<sup>1)\*</sup>, Hwa Woon Lee<sup>2)</sup>, Woo-Gon Do, Jung-Gu Cho, Kwi-Ok Lee<sup>3)</sup>

Busan Metropolitan City of Institute of Health and Environment, Busan 613-806, Korea

<sup>1)</sup>Department of Atmospheric Environment Information Engineering/Atmospheric Environment Information Research Center, Inje University, Gimhae 621-749, Korea

<sup>2)</sup>Department of Atmospheric Environmental Sciences, Pusan University, Busan 609-735, Korea

<sup>3)</sup>Atmospheric Environmental Research Center, DMJSYSTEM, Busan 609-735, Korea

#### Abstract

PM<sub>10</sub> concentration is related to the meteorological variables including to local and synoptic meteorology. In this study the PM<sub>10</sub> concentrations of Busan in 2007~2011 were analyzed and the days of yellow sand or rainfall which is more than 5 mm were excluded. The sections of PM<sub>10</sub> concentration were divided according to 10-quantiles, quartiles and 90-quantiles. The 90-quantiles of daily PM<sub>10</sub> concentration were selected as high concentration dates. In the high concentration dates the daily mean averaged cloudness, mean daily surface wind speed, daily mean surface pressure and PBL height were low and diurnal variation of surface pressure and daily maximum surface temperature were high. When the high PM<sub>10</sub> dates occurred, the west and south wind blew on the ground and the west wind blew strongly on the 850 hPa. So it seemed that long range transboundary air pollutants made effects on the high concentration dates. The cluster analysis using Hysplit model which is the backward trajectory was made on the high concentration dates. As a result, 3 clusters were extracted and on the short range transboundary cluster the daily mean relative humidity and cloudness were high and PBL height was low.

**Key words** : PM<sub>10</sub>, Meteorological variable, Backward trajectory

#### 1. 서론

대기 중 부유하고 있는 대기오염물질과 수분 등이 결합하여 에어로졸이 생성되며, 에어로졸 중 가벼운

것은 대기 중에 부유하고 무거운 것은 지면에 침적된다. 특히 에어로졸 중 10 μm이하인 것을 미세먼지 (PM<sub>10</sub>: Particulate Matter with aerodynamic Diameter ≤ 10μm)라고 하며, 미세먼지는 대기 중에서 산란되면

Received 6 May, 2013; Revised 21 May, 2013;

Accepted 24 May, 2013

\*Corresponding author : Woo-Sik Jung, Department of Atmospheric Environment Information Engineering, Inje University, Gimhae 621-749, Korea

Phone: +82-55-320-3932

E-mail: wsjung1@inje.ac.kr

© The Korean Environmental Sciences Society. All rights reserved.

© This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

서 시정을 감소시키기도 하고, 천식과 같은 호흡기계 질병을 악화시키고, 폐 기능의 저하를 초래한다. 또한 식물의 잎 표면에 침적되어 신진대사를 방해하며, 건축물에 퇴적되어 조각된 유적물이나 동상 등에 부식을 일으킨다(환경부, 2011). 미세먼지 농도가 증가하는 요인으로는 도시의 인구와 차량에 의한 대기오염물질 증가를 꼽을 수 있으며, 대기안정도가 높아짐에 따라 확산이 불리해져 미세먼지 농도가 증가할 수 있다. 또한 장거리 수송에 의해서 고농도의 대기오염물질이 이송되어 도시 내 미세먼지 농도가 증가할 수 있으며, 이는 황사와 같은 중국에서의 장거리 수송이 대표적이라 할 수 있다. 최근 우리나라 겨울철과 봄철에 발생하고 있는 비황사시의 고농도 미세먼지 경향 또한 장거리 수송과 대기확산 억제가 결합되어 발생하고 있는 실정이다(전병일, 2012).

우리나라에서 미세먼지는 PM<sub>10</sub> 항목으로 대기환경기준에 설정되어 관리되고 있다. 1993년 연평균 80  $\mu\text{m}^3/\text{m}^3$ , 일평균 150  $\mu\text{m}^3/\text{m}^3$ 으로 기준이 신설되었으며, 2001년 연평균 70  $\mu\text{m}^3/\text{m}^3$ , 일평균 150  $\mu\text{m}^3/\text{m}^3$ 으로, 2007년 연평균 50  $\mu\text{m}^3/\text{m}^3$ , 일평균 100  $\mu\text{m}^3/\text{m}^3$ 으로 강화되었다. 2011년 말 현재 전국에는 대기환경기준 달성 여부를 판정하고 지역 대기질 상태를 모니터링하기 위해 도시대기측정소 250개소가 운영 중에 있으며, 2011년 유효측정소수는 239개소로 파악되었다. 이 중 연평균 PM<sub>10</sub> 환경기준을 달성한 측정소 비율은 55.6%이며, 24시간 PM<sub>10</sub> 환경기준을 달성한 측정소 비율은 불과 1.7%에 지나지 않는 것으로 보고되었다(환경부, 2011).

미세먼지의 오염도는 크게 장거리 수송에 의한 외부유입, 내부 배출원에 의한 영향, 대기오염물질의 확산조건, 국지 및 종관적 기상조건, 지형 그리고 대기화학과정 등과 밀접하게 관련되어 있다(서울시정개발연구원, 2011; Chen 등, 2008). 특히 국지 및 종관적 기상조건에 따른 변화는 미세먼지 농도변화에 크게 영향을 미치므로 이와 연관된, 기상조건과 미세먼지 농도와의 관계를 살펴본 국내외 연구 사례를 다수 찾을 수 있다. 종관기상장에 따른 미세먼지 농도를 살펴본 연구(이 등, 2007; Lee 등, 2011)와 기상조건과 관련하여 미세먼지 농도를 분석한 연구(최 등, 2006; 김 등, 2007; 신 등, 2007; 전병일, 2012; Unal 등,

2011; Choi 등, 2007; Sfetsos와 Valchogiannis, 2010) 사례가 있으며, 미세먼지를 포함한 대기오염물질과 기상학적 관련성을 시도한 연구(Choi 등, 2006; 오와윤, 1996; 이와 박, 1997; 정 등, 1995; Jeong과 Park, 2013; Mamtimin and Meixner, 2011; Snyder와 Strawbridge, 2004)도 상당 부분 이루어졌다.

본 연구에서는 부산지역에서 나타나는 국지 및 종관적 기상요소들과 미세먼지 농도와의 관련성을 찾아 미세먼지 농도 발생의 특징을 살펴보고자 하였으며, 이를 통하여 미세먼지 농도 발생에 대한 이해를 높이고자 하였다.

## 2. 재료 및 방법

부산지역의 미세먼지 농도는 2012년 말 기준으로 19개 대기오염측정소에서 모니터링 되고 있다(Fig. 1). 본 연구에서는 부산광역시 보건환경연구원에서 제공하고 있는 2007년~2011년까지 5년간의 시간별 PM<sub>10</sub> 농도 자료를 사용하였는데, 2012년 말 기준으로 운영되고 있는 19개 측정소 중 2011년~2012년에 신설된 대신동측정소와 수정동측정소는 분석에서 제외하고 총 17개 측정소의 자료를 사용하였다. 또한 5년간의 대상일 중 황사 발생일과 일 누적강수량 5.0 mm 이상 발생일은 분석에서 제외하였다. 황사 발생일은 장거리 수송과 고농도 미세먼지 특징이 뚜렷하게 나타나는 특이 기상일로 고농도 미세먼지 발생과 관련된 일반적 기상상황에서의 분석을 위해 황사 발생일은 본 연구에서 제외하였다. 또한 강우 발생일에는 대기오염물질의 세정작용(Wash out)이 우세하여 초기 강우 이후에는 대기 중 미세먼지 농도가 현저히 낮게 나타나게 된다. 따라서 본 연구에서는 초기강우량을 5.0 mm로 설정하였으며, 일 누적강우량이 초기강우량인 5.0 mm 이상으로 발생한 날은 대상일에서 제외시켰다. 초기강우와 후속강우에 대한 이온성분특성을 살펴본 선행 연구에 따르면 5 mm 이상의 강우량에서 이온성분이 급격한 감소를 보이는 것으로 나타났으며(최 등, 1998), 강우로 인해 발생하는 비점오염 저감시설인 비점오염원저감시설 설치기준(「수질 및 수생태계 보전에 관한 법률」)에서도 최소 초기강우량을 5 mm로 규정하고 있어 초기강우량을 5 mm로 보는 것

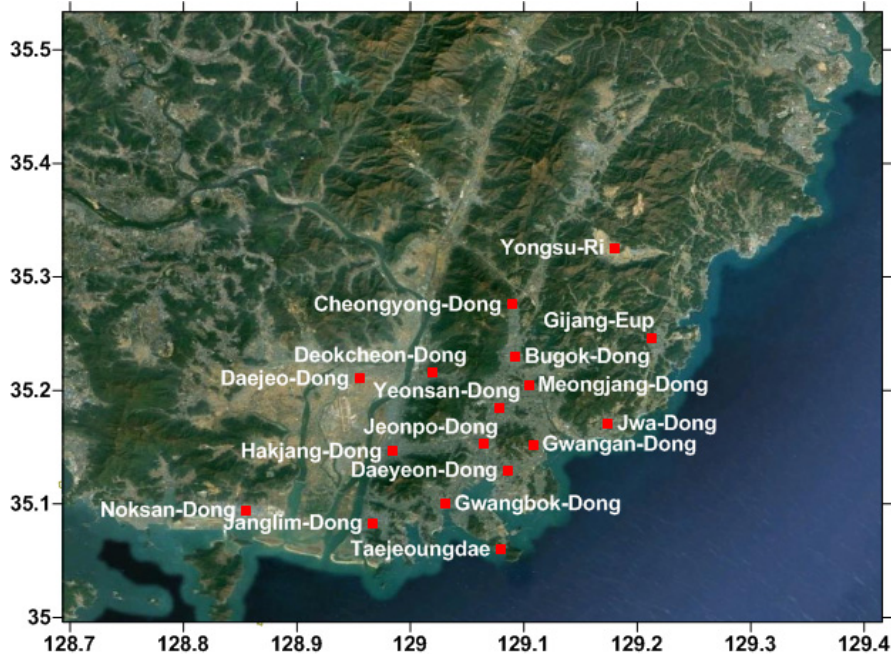


Fig. 1. Map showing the location of air quality monitoring sites in Busan.

이 적절하다고 판단된다. 즉, 일 누적강수량 5 mm 이상 발생한 날은 강우로 인한 세정작용으로 대기 중 미세먼지가 충분히 제거되었다고 판단되어 미세먼지 발생과 관련한 일반적인 기상요소 분석에서 제외하였다.

분석에 사용된 기상요소는 일평균운량, 일최고기온, 일평균풍속, 일평균 상대습도, 일평균현지기압, 일기압변화량, 풍향, 풍속, 현천(현재 날씨), 대기경계층 고도, 850 hPa 등압면의 풍향, 풍속이다. 이 중에서 대기경계층 고도와 850 hPa면 풍향 및 풍속은 NCEP/NCAR (National Center for Environmental Prediction/National Center for Atmospheric Research) 재분석 자료를 이용하였으며, 그 외 기상자료는 기상청 제공 AWS(Automatic Weather Station) 관측 자료를 이용하였다. 종관기상의 영향을 살펴보기 위하여 850 hPa 등압면에서의 풍향, 풍속을 사용하였는데, 이것은 장거리 오염물질과 같은 지역 규모 대기 오염물질의 이동을 다룰 경우 하층 제트와 연관된 850 hPa 혹은 700 hPa 등압면이 중요한 것으로 알려져 있기 때문이다 (김 등, 2007).

또한 PM<sub>10</sub> 농도 구간에 따라 기상요소의 특징적 차이가 나타나는 지를 살펴보기 위하여 T-검정과 분산 분석을 SPSS 12.0K를 이용하여 실시하였다. 저농도와 고농도의 PM<sub>10</sub> 발생일에 있어 기상요소의 차이가 나타나는지를 살펴보기 위하여 T-검정을 실시하였다. 본 연구에서 설정한 ‘저농도 발생일’은 2007년~2011년까지 황사발생일과 강수일(일 누적강수량이 5 mm 이상)을 제외한 부산지역 17개 측정소 시간별 PM<sub>10</sub> 농도 자료를 일평균한 PM<sub>10</sub> 농도에 대한 10% 분위수 이하의 PM<sub>10</sub> 농도가 나타난 날이며, ‘고농도 발생일’은 일평균한 PM<sub>10</sub> 농도에 대한 90% 분위수 이상의 PM<sub>10</sub> 농도가 나타난 날로 설정하였다. 본 연구에서 사용된 통계분석 중 T-검정이란 두 모집단의 평균의 차이 유무를 판단하는 통계적 검정 방법으로 “두 모집단의 평균 간의 차이는 없다”라는 귀무가설과 “두 모집단의 평균 간에 차이가 있다”라는 대립 가설 중에 하나를 선택하는 통계적 검정 방법이다(원과 정; 2005). 또한 PM<sub>10</sub> 농도 구간에 따라 기상요소의 차이가 발생하는 지를 살펴보기 위하여 분산분석을 실시하였으며, PM<sub>10</sub> 농도 구간은 일평균한 PM<sub>10</sub> 농도(황사발생

일과 일 누적강수량 5 mm 이상 발생일 제외)에 대한 25% 분위수 이하, 25~50% 분위수, 50~75% 분위수, 75% 분위수 이상 농도 발생일로 나누었다. 분산분석 (Analysis of Variance: ANOVA)은 k개의 표본들이 같은 분포를 갖는가를 검정하는 것으로 독립변수를 몇 개의 수준 또는 범주로 나누고 각 수준에 따라 나누어진 집단 간의 평균차를 검정하는 것이다. 즉, 독립변수의 수준에 따라 나누어진 각 집단의 평균 간의 차이가 통계적으로 유의한 지를 검정하는 것으로(원과 정; 2005), 모든 통계의 유의수준은 5%로 설정하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1. 부산지역 PM<sub>10</sub> 농도 경향

Fig. 2는 2007년에서 2011년까지 황사와 강수일(일 누적강수량이 5 mm 이상)을 제외한 부산지역 17개 대기오염측정소의 PM<sub>10</sub>의 연평균, 월평균, 시간평균 농도 변화를 박스플롯으로 나타낸 그림이다. 그림에서 나타낸 점은 각각 5%와 95% 수준을 나타낸 것

이며 박스는 각각 25%와 75%를, 그리고 박스 안의 실선은 중앙값, 점선은 평균을 나타낸 것이다. 그림을 보면, 2007년부터 2011년까지 PM<sub>10</sub> 농도는 점차적으로 감소하는 경향을 나타내고 있다. 2007년에는 54.5  $\mu\text{m}^3/\text{m}^3$ , 2008년 50.3  $\mu\text{m}^3/\text{m}^3$ , 2009년 49.1  $\mu\text{m}^3/\text{m}^3$ , 2010년 48.5  $\mu\text{m}^3/\text{m}^3$ , 그리고 2011년에는 43.2  $\mu\text{m}^3/\text{m}^3$ 으로 꾸준히 감소하는 추이를 보이고 있다. 계절별로는 봄철, 특히 5월이, 높은 농도를 나타내었으며 9월에 가장 낮은 농도를 나타내었다. 시간대별로는 오전 9시부터 오후 1시까지 다소 높은 농도를 나타내었는데, 특히 오전 10시~11시경에 최대 농도값을 보였다. 이것은 출근 시간대의 갑작스런 교통량 증가에 따른 배출량 증가가 원인인 것으로 볼 수 있다. 오후 시간대로 가면서 농도가 서서히 낮아지는 것을 볼 수 있는데 이것은, 대기혼합고의 증가에 따른 단위체적당 농도가 감소하기 때문으로 분석할 수 있으며 선행 연구와 일치하는 결과이다(김 등, 2007).

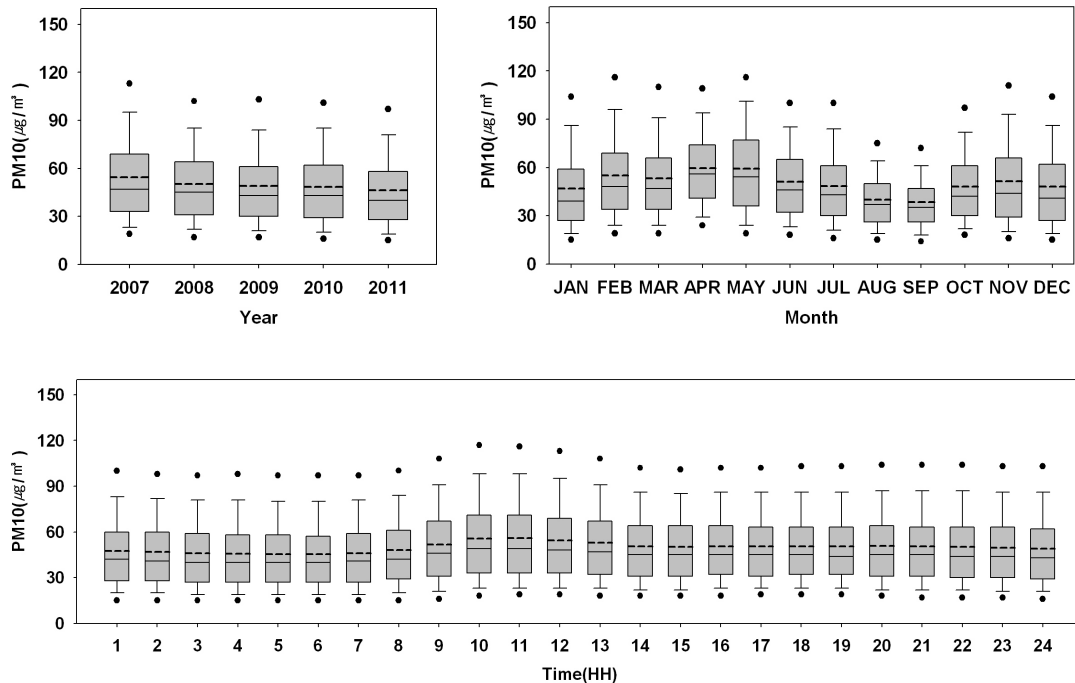


Fig. 2. The variation of PM<sub>10</sub> concentration at Busan in 2007~2011(except for rainy-day and yellowsand-day).

3.2. 미세먼지 농도 분포별 기상요인 비교 분석

Table 1은 2007년~2011년까지 황사일과 강우발생 일(일 누적강수량이 5 mm 이상)을 제외한 부산지역 PM<sub>10</sub> 농도의 구간별 분포와 관련된 정보를 나타낸 표이다. 총 대상일에 대한 PM<sub>10</sub> 일평균 분위수를 분석한 결과, 0~25% 분위수 구간은 PM<sub>10</sub> 13.8~35.0  $\mu\text{m}^3/\text{m}^3$ , 25~50% 분위수 구간은 PM<sub>10</sub> 35.0~44.7, 50~75% 분위수 구간은 PM<sub>10</sub> 44.8~60.8  $\mu\text{m}^3/\text{m}^3$ , 75~100% 분위수 구간은 PM<sub>10</sub> 60.9~147.7로 나타났다. 미세먼지 저농도 구간에 해당하는 10% 분위수 이하 구간은 PM<sub>10</sub> 28.4  $\mu\text{m}^3/\text{m}^3$  이하로, 고농도 구간에 해당하는 90% 분위수 이상 구간은 PM<sub>10</sub> 77.9  $\mu\text{m}^3/\text{m}^3$  이상으로 분석되었다.

각 구간에 대한 기상요소들에 대하여 일원배치 분

산분석(ANOVA)를 실시하였으며, 그 결과는 Table 2에 나타내었다. 결과를 살펴보면, 일평균운량, 일최고기온, 일평균풍속, 일평균 상대습도, 일평균현지기압, 일기압변화량, 대기경계층 고도에서 신뢰수준 95%에서 유의확률이 유의수준 0.005보다 작게 나타나서, 통계적으로, PM<sub>10</sub> 농도 구간별로 유의한 차이가 있는 것으로 분석되었다.

다음으로 PM<sub>10</sub> 저농도 발생일과 고농도 발생일의 기상요소별 차이를 살펴보기 위하여 독립표본 T-검정을 실시하였으며, 그 결과를 Table 3에 나타내었다. PM<sub>10</sub> 저농도 발생일은 일평균 기준으로 10% 분위수에 해당하는 28.4  $\mu\text{m}^3/\text{m}^3$  이하로 발생한 날로 정의하였으며, 고농도 발생일은 일평균 90% 분위수에 해당하

Table 1. The PM<sub>10</sub> concentration related to the PM<sub>10</sub> concentration section at Busan in 2007~2011

Cluster	Days	Average ( $\mu\text{m}^3/\text{m}^3$ )	Standard deviation ( $\mu\text{m}^3/\text{m}^3$ )	Minimum ( $\mu\text{m}^3/\text{m}^3$ )	Maximum ( $\mu\text{m}^3/\text{m}^3$ )
<10%	156	25.0	3.16	13.8	<b>28.4</b>
0~25%	392	29.1	4.12	13.8	35.0
25~50%	390	39.8	2.81	35.0	44.7
50~75%	391	52.4	4.58	44.8	60.8
75~100%	392	78.9	16.06	60.9	147.7
> 90%	156	94.6	14.22	<b>77.9</b>	147.7

Table 2. ANOVA result of the meteorological factors related to the PM<sub>10</sub> concentration section at Busan in 2007~2011

	sum of squares	degree of freedom	mean square	F	p-value
PM <sub>10</sub>	541314.169	3	180438.056	2372.893	0.000
Daily mean averaged cloudness	366.886	3	122.295	12.708	0.000
Daily maximum surface temperature	857.021	3	285.674	4.616	0.003
Daily mean surface relative humidity	3596.056	3	1198.685	4.082	0.007
Daily mean surface wind speed	61.343	3	20.448	16.221	0.000
Daily mean surface pressure	781.086	3	260.362	4.906	0.002
Diurnal variation of surface pressure	33.452	3	11.151	4.260	0.005
PBL height	13891054.65	3	4630351.549	18.237	0.000

Table 3. T-test result of the meteorological factors related to the PM<sub>10</sub> concentration section at Busan in 2007~2011

	t	degree of freedom	p-value
PM <sub>10</sub>	-59.622	310	0.000
Daily mean averaged cloudness	5.605	310	0.000
Daily maximum surface temperature	-2.572	310	0.011
Daily mean surface humidity	1.714	310	0.088
Daily mean surface wind speed	5.585	310	0.000
Daily mean surface pressure	2.418	310	0.016
Diurnal variation of surface pressure	-1.227	310	0.221
PBL height	8.655	310	0.000

는  $77.9 \mu\text{m}^3$  이상으로 발생한 날로 설정하였다. 독립 표본 T-검정 결과, 일평균 운량, 일최고기온, 일평균풍속, 일평균 현지기압, PBL 고도는 통계적으로 유의한 차이를 나타내었으나, 일평균 상대습도, 일기압변화량은 유의한 차이가 나타나지 않았다.

Fig. 3은  $\text{PM}_{10}$  농도 구간에 따른 기상요소를 박스 플롯으로 나타낸 그림이다. 일평균 운량을 먼저 살펴보면, 고농도 발생일의 평균 운량은 3.4로 저농도 발생일의 평균 운량 5.4에 비해 높게 나타났다. 일평균 분위수 구간별로는 25% 이하 구간이 4.9, 25~50% 구간이 4.6으로 다소 높게 나타났으며, 50~75%는 3.9, 75% 이상 구간에서는 3.8로 다소 낮게 나타나는 것을 알 수 있다. 다음으로 최고기온에 대하여 살펴본 결과, 고농도 발생일의 평균 최고기온은  $19.5^\circ\text{C}$ , 저농도 발생일은  $17.4^\circ\text{C}$ 로 나타났다. 구간별로는 25% 이하 구간이  $17.8^\circ\text{C}$ 로 가장 낮게 나타난 구간이었으며, 25~50% 구간이  $19.8^\circ\text{C}$ 로 가장 높게 나타났다. 일최고기온은 계절적인 변화, 하늘 상태, 바람, 경계층의 구조에 영향을 받게 되며, 공기가 건조할수록, 구름이 적을수록, 경계층이 낮게 형성되고 안정할수록 일최고기온이 높게 나타난다(이우진, 2011).  $\text{PM}_{10}$  저농도 구간에서 일최고기온이 낮게 나타나고 일평균 운량이 높게 나타난 것은 일 누적강수량 5 mm 이하의 강우의 효과인 것으로 판단되며,  $\text{PM}_{10}$  고농도 구간에서 일최고기온이 높게 나타나는 것은 강우 발생일이 적고 경계층 고도 및 일평균풍속 감소한 결과로 판단된다. 다음으로 일평균 상대습도를 분석한 결과, 25% 이하 구간에서는 59.3%, 25~50% 구간이 60.8%로 높게 나타났으며, 50~75% 구간이 56.9%, 75% 이상에서는 57.6%로 낮게 나타났다.  $\text{PM}_{10}$  고농도 발생일의 일평균 상대습도는 57.0%로  $\text{PM}_{10}$  저농도 발생일의 60.3% 대비 낮게 나타났으며, 이는 일 누적강수량 5 mm 이하 강수에 의한 영향으로 판단된다. 선행연구를 살펴보면, 강수 발생일을 포함한 연구사례에서 상대습도가 20% 미만일 때와 50~80% 수준일 때  $\text{PM}_{10}$  농도가 높은 수준을 나타내고 있었으며(신 등, 2007), 부산지역 겨울철 고농도 미세먼지와 울산지역 미세먼지 발생일에 대한 연구사례에서는 상대습도가 낮을 때 고농도 미세먼지 현상이 발생하는 것으로 나타났다(전병일, 2012; 최 등, 2006). 또한 부산지역에서 맑은날

을 대상으로  $\text{PM}_{10}$ 을 분석한 결과 상대습도와  $\text{PM}_{10}$  농도는 양의 상관관계를 나타내는 것으로 나타났다(김 등, 2007). 본 연구에서는  $\text{PM}_{10}$  50% 이하 발생일에서는 상대습도가 높게 나타나 이는 초기강수(5 mm 이하)의 영향으로 판단되며, 75% 이상에서의 상대습도가 57.6%로 50~75% 구간의 56.9% 대비 다소 높게 나타나 강우의 영향이 다소 배제된 상태에서는  $\text{PM}_{10}$  농도가 다소 높게 나타날 때 상대습도도 높게 나타나는 것으로 보여진다. 또한 이후에 분석하고자 하는 Fig. 5에서는 고농도  $\text{PM}_{10}$  농도 구간에서 박무 발생빈도가 높게 나타나고 있으며, 박무 발생이 상대습도 증가와 관련이 있는 것으로 판단된다.

다음으로 일평균풍속을 분석한 결과, 고농도 발생일의 평균 풍속은 3.0 m/s로 저농도 발생일의 평균 풍속 3.7 m/s 에 비해 약하게 나타났다. 구간별로는 25% 이하 구간이 3.5 m/s로 높게 나타났으며, 나머지 25% 이상에 해당하는 평균풍속은 구간별로 차이를 보이지 않는 것으로 나타났다. 즉, 일평균  $\text{PM}_{10}$  25% 이하 발생일의 평균풍속은 높게 나타났으며, 풍속이 높을수록 대기확산이 활발하여  $\text{PM}_{10}$  농도 저감에 기여하고 있는 것으로 판단된다. 이것은 저풍속에서 대기환기량이 감소하면서 미세먼지 농도가 증가함을 보인 선행 연구와 연관된 결과를 나타낸 것이다(신 등, 2007). 다음으로 일평균 현지기압 분석결과, 고농도 발생일의 평균 일평균 현지기압은 1015.3 hPa로 저농도 발생일의 1017.5 hPa 에 비해 낮게 나타났다. 구간별로는 일평균 25%이하 구간에서는 1017.6 hPa, 25~50% 1016.8 hPa, 50~75% 1016.1 hPa, 75%이상 1015.7 hPa로  $\text{PM}_{10}$  농도가 일평균 50% 이상 분위수를 나타낸 날에서 일평균 현지기압이 낮게 나타났다. 다음으로 일기압변화량을 분석한 결과, 고농도 발생일과 저농도 발생일의 평균 일기압변화량은 차이를 나타내지 않았으며, 분위수 구간별로는 75% 이상에서 1.328 hPa로 약간 높게 나타났다. 따라서  $\text{PM}_{10}$  고농도 발생일의 경우에는 일평균 현지기압이 낮고, 일기압변화량이 크게 나타나는 것으로 분석되었다. 기압은 기상을 결정하는 최소한의 요소로 대기조건들과 큰 상관관계를 가진다. 고기압이 되면 대기는 일반적으로 안정되고 건조하며 하늘은 맑고, 저기압일 때는 보통 대기가 불안정하고 구름이 많으며 습도가 높고 강수현

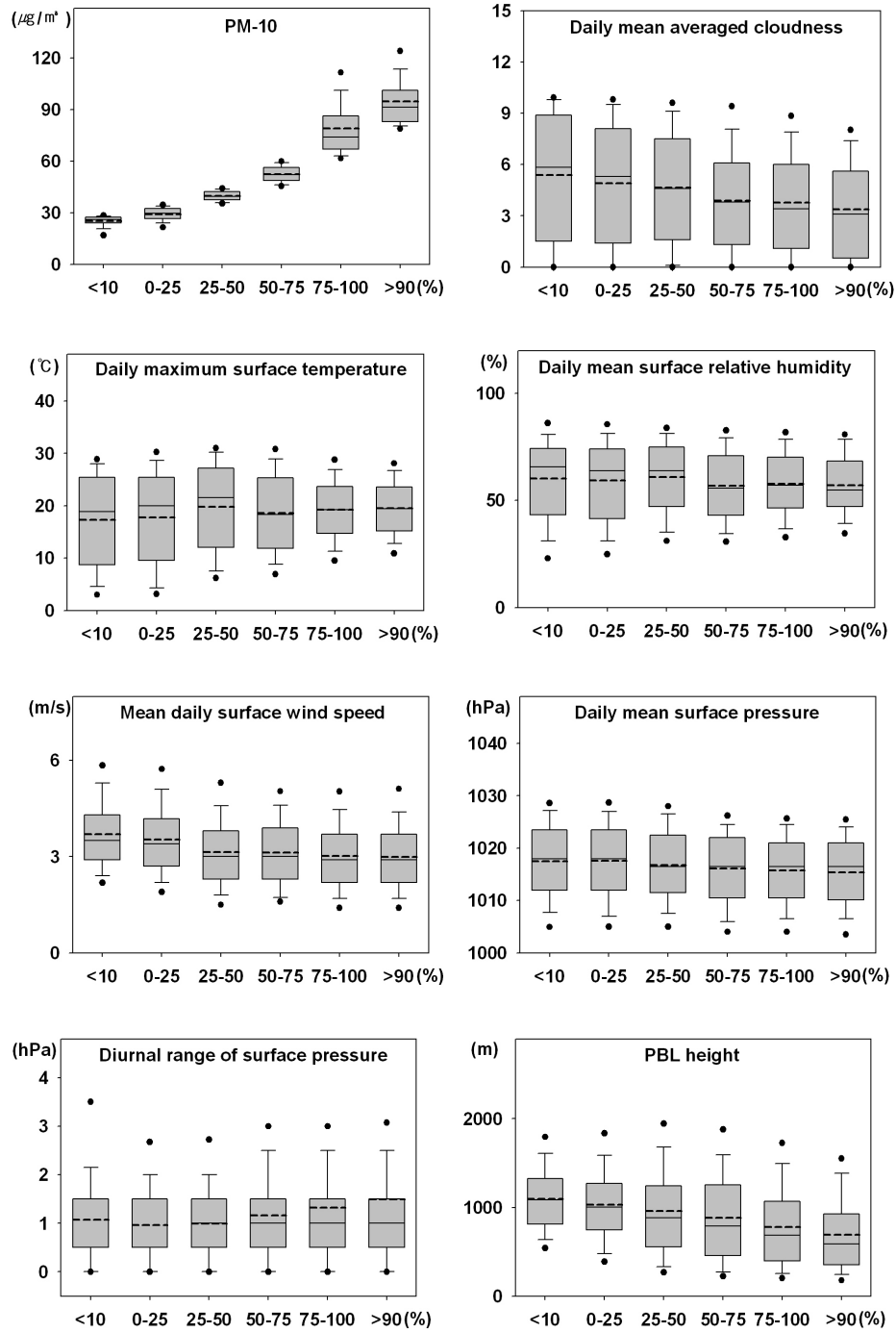


Fig. 3. The distribution of the Meteorological factors related to the PM<sub>10</sub> concentration section at Busan in 2007~2011.

상이 나타난다(윤일희, 2011). 일기압변화량은 기압계의 발달과 쇠약을 예측하는데 사용되며, 기층의 온도변화, 고기압, 저기압, 불연속면 등의 통과, 대기의 조석 진동 등 여러 가지 원인에 의해 기압이 변화하게 된다. PM<sub>10</sub> 농도는 장거리 수송과 관련이 깊으므로 기압변화의 경향과 기압변화량을 뜻하는 기압경향(pressure tendency)의 파악이 중요하다고 할 수 있다. 따라서, 본 연구에서 고려한 일평균 현지기압과 일기압변화량만을 가지고 기압과 PM<sub>10</sub> 농도와의 관련성을 파악하는 것은 다소 무리가 있는 것으로 판단되며, 향후, 기압배치를 나타내는 일기도와 기압 관련 기상항목의 추가적인 분석이 필요할 것으로 사료된다. 다음으로 대기경계층 고도를 분석한 결과, 고농도 발생일의 평균 대기경계층 고도는 692.9 m로 저농도 발생일의 1094.3 m에 비해 낮게 나타났다. 구간별로는 일평균 25%이하 구간에서는 1032.6 m, 25~50% 960.6 m, 50~75% 882.6 m, 75%이상 에서는 778.9 m로 PM<sub>10</sub> 농도가 높을수록 대기경계층 고도가 낮은 것으로 나타났다. 대기경계층 고도는 하층대기안정도와 관련된 항목으로 대기안정도가 높아질수록 미세먼지 농도가 증가한다는 선행연구결과의 밀접한 연관이 있는 것으로 볼 수 있다(이 등, 2007).

Fig. 3은 PM<sub>10</sub> 농도 구간별 바람장미를 나타낸 그림이다. 먼저 저농도 발생일과 고농도 발생일을 살펴

보면 저농도 발생일은 북~북동계열이 주풍향으로 나타났다으며, 850 hPa 등압면에서는 북서~북동계열로 나타났다. 고농도 발생일은 서~남풍계열이 주풍향으로 나타났으며, 850 hPa 등압면에서는 서~북서계열이 나타났다. PM<sub>10</sub> 농도 구간별 풍향을 살펴보면, 일평균 PM<sub>10</sub> 25% 분위수 이하에서는 10% 분위수 이하 발생일과 큰 차이를 나타내지 않았으며, 지면에서는 북동계열이 주풍향으로 나타났고 850 hPa 등압면에서는 서~동풍으로 비교적 다양한 방향의 풍계가 나타났다. 일평균 PM<sub>10</sub> 25~50% 분위수 구간에서는, 지면에서는 북동북 방향이 주풍향으로 나타났지만 남동계열을 제외한 풍향이 비교적 다양하게 나타나는 것을 알 수 있었으며, 850 hPa 등압면에서는 남~서~북 계열의 풍향이 나타났다. 50~75% 분위수 구간에서는, 지면에서는 남동계열의 풍향을 제외한 다양한 풍향에서, 특히, 서풍계열의 풍계가 높은 발생빈도를 보였고, 850 hPa 등압면에서는 서풍 및 북서계열이 우세한 것으로 나타났다. 즉, PM<sub>10</sub> 일평균 농도가 50% 분위수 이하 구간에서는 북동북 계열이 우세하였으며, PM<sub>10</sub> 일평균 농도가 50% 분위수 이상 구간에서는 남풍 내지는 서풍이 우세하였으며, 850 hPa 등압면에서는 서풍계열이 뚜렷하게 우세한 것으로 나타났다. 따라서 PM<sub>10</sub> 농도가 높을 때에는 서풍계열의 종관장이 우세한 것으로 나타나 서쪽에서 장거리 수송된 PM<sub>10</sub>이 영향을

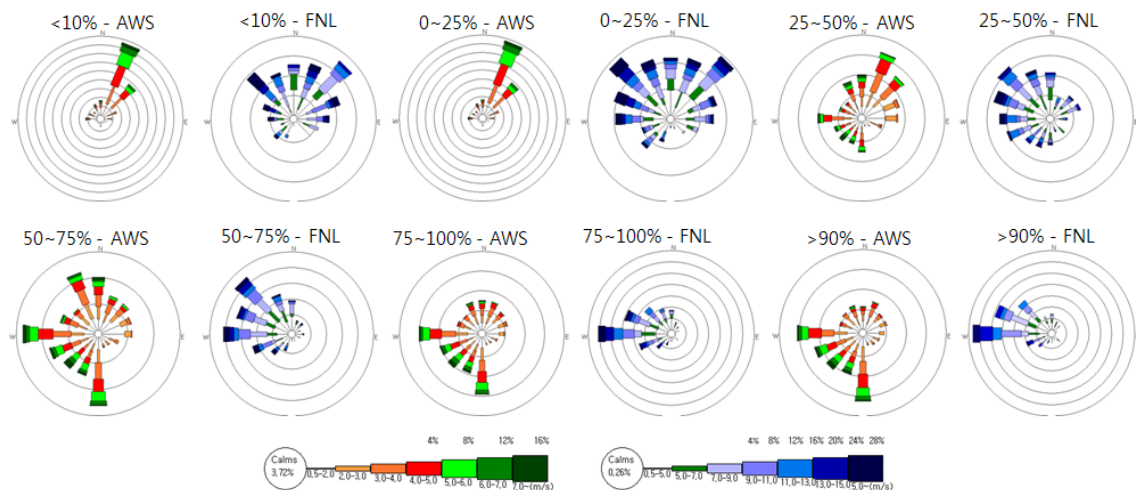


Fig. 4. Wind rose related to the PM<sub>10</sub> concentration section at Busan in 2007~2011.



미친 것으로 사료된다. 또한, 이러한 고농도 PM<sub>10</sub> 발생시 지면에서 서풍 내지 남풍의 경향이 나타난 결과는 인천, 경기 지역을 대상으로 분석한 선행연구(신 등, 2007)의 결과와도 일치하는 것으로 나타났다.

Fig. 5는 일평균 PM<sub>10</sub> 농도구간별 날씨 상황을 나타낸 그림이다. 본 연구에서는 일 누적강수량 5 mm 이하 발생일은 분석 대상으로 포함하였으므로 Fig. 5에서 나타난 강수는 5 mm 이하의 강수량을 나타낸 강수일을 의미한다. 일평균 PM<sub>10</sub> 25% 분위수 이하에 해당하는 분석 대상일 중에서 강수일은 이 구간에 해당하는 총 392일 중 109일이었으며, 25~50% 분위수 구간에서의 강수일은 총 392일 중 99일, 50~75% 분위수 구간에서는 총 391일 중 72일, 75% 이상 분위수 구간에서는 총 392일 중 54일이 일 누적강수량 5 mm 이하 발생일인 것으로 나타났다. 즉, 5 mm 이하의 적은 강수에서도 세정작용으로 인한 PM<sub>10</sub> 저감효과가 어느 정도 있는 것으로 나타났으며, PM<sub>10</sub> 75% 분위수 이상 구간에서도 일 누적 강수량 5 mm 이하 발생일이 54일(13.8%)로 나타나, 일 누적 강수량 5 mm 정도의 강우가 발생하였다고 하여 반드시 PM<sub>10</sub> 농도가 낮아지는 것은 아니라고 할 수 있다. 다음으로 박무일을 대

상으로 분석을 수행하였는데, 일평균 PM<sub>10</sub> 25% 분위수 이하에서 박무가 발생한 날은 총 392일 중 41일, 25~50% 구간에서는 392일 중 77일, 50~75% 구간에서는 391일 중 102일, 75% 이상 구간에서는 392일 중 175일이 박무가 나타난 것으로 조사되었다. 특히, 90% 분위수 이상의 구간에 해당하는 총 156일 중에서 79일이 박무가 발생한 날(50.6%)로 나타나서, 고농도 PM<sub>10</sub> 발생일에는 박무 발생이 PM<sub>10</sub>의 고농도와 깊은 관련이 있는 것으로 나타났다. 이러한 결과는, 박무가 옅은 안개를 뜻하는데, 대기 중 부유하는 미세한 물방울이 대기오염물질을 흡수 흡착하면서 PM<sub>10</sub> 농도가 높아진 것으로 판단할 수 있다.

다음으로 연무 발생일을 살펴보면, 일평균 PM<sub>10</sub> 25% 분위수 이하에서 연무가 발생한 날은 총 392일 중 1일, 25~50% 구간에서는 392일 중 11일, 50~75% 구간에서는 391일 중 40일, 75% 이상 구간에서는 392일 중 158일이 연무가 나타난 것으로 조사되었다. 특히 90% 분위수 이상에서는 구간 대상일 총 156일 중에서 87일, 즉 55.8%의 높은 비율로 연무현상이 나타나 고농도 PM<sub>10</sub> 발생일에는 박무와 마찬가지로 연무현상이 깊은 관련이 있는 것으로 나타났지만, 연무의



Fig. 5. The distribution of weather conditions related to the PM<sub>10</sub> concentration section at Busan in 2007~2011.

경우, 50% 분위수 이하에서는 연무발생이 총 782일 중 12일(1.5%) 나타나서 일평균  $PM_{10}$  50% 분위수 이하에서는  $PM_{10}$  농도와 연무발생이 거의 연관이 없는 것으로 나타났다.

### 3.3. 고농도 미세먼지 발생일 군집분석

본 연구에서는, 앞서 정의한 바와 같이,  $PM_{10}$  일평균 90% 분위수 이상의 농도를 나타낸 발생일을 고농도  $PM_{10}$  발생일로 정의하였으며, 이에 해당하는 사례일은 총 156일이었다. 여기서는 이들 고농도 발생일의 종관규모 기류 패턴을 파악하기 위하여 역궤적 분석을 수행한 결과를 나타내었다. 역궤적 분석을 위해 미국의 NOAA/ARL에서 제공하는 HYSPLIT-4(Hybrid Single Particle Lagrangian Integrated Trajectory) 모델을 이용하였으며, 역궤적 분석에 사용된 기상 자료는 미국의 NCEP/NCAR(National Center for Environmental Prediction/National Center for Atmospheric Research)의 GDAS(Global Data Assimilation System)를 사용하였다. GDAS는 수평해상도  $1.0^\circ$ 과 매 3시간의 해상도를 가지고 있으며, GDAS 자료를 사용한 HYSPLIT-4 모델을 이용하여 72시간 동안의 공기 이동경로를 분석하였다. 1차 대상일에 대한 역궤적 분석 결과를 이용하여 HYSPLIT-4 모델에서 제공하는 군집 분석을 실시하였으며 그 결과 3개의 특성을 가진 군집으로 기류를 분류할 수 있었다. 그 결과는 Fig. 6에 나타내었다. 군집 1과 3는 중국 북부지역에서 발원하여 북서풍 계열의 바람을 타고 한반도로 유입되는 사례이며, 그 중 군집 3은 먼 거리에서 유입되고 있는 사례이다. 군집 2는 중국 화중 지역에서 서해안 상공을 거쳐 한반도로 유입된 사례이다. 정체성 종관 기상 상태와 관련된 군집은 나타나지 않은 것으로 보아, 고농도  $PM_{10}$  발생일의 대부분은 장거리 이동과 연관이 큰 것으로 판단된다.

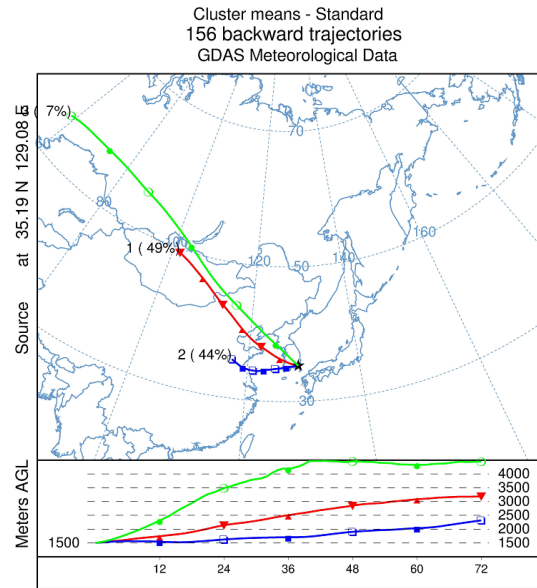


Fig. 6. Cluster analysis results of backward trajectory model about  $PM_{10}$  high concentration at Busan in 2007~2011.

Table 4는 각 군집별  $PM_{10}$  농도를 나타낸 것이다. 군집 1에 해당하는 사례일은 전체 대상일 156일 중에서 76일, 군집 2는 69일, 군집 3은 11일로 나타났다. 각 군집별로 기상요소들의 차이가 나타나는지를 살펴보기 위하여 일원배치 분산분석(ANOVA)을 실시하였으며, 그 결과를 Table 5에 나타내었다. 결과를 살펴보면, 일평균운량, 일최고기온, 일평균 상대습도, 대기 경계층 고도가 신뢰수준 95%에서 유의확률이 유의수준 0.05보다 작아 군집별로 유의한 차이가 있는 것으로 나타났다. 반면 일평균  $PM_{10}$  농도, 일평균풍속, 일평균 현지기압, 일기압변화량은 신뢰수준 95%에서 유의확률이 유의수준 0.05보다 크게 나타나, 통계적으로, 군집별로 유의한 차이가 없는 것으로 나타났다.

Table 4. The  $PM_{10}$  concentration related to the cluster from backward trajectory model at Busan in 2007~2011

Cluster	Days	Average ( $\mu m^3/m^3$ )	Standard deviation ( $\mu m^3/m^3$ )	Maximum ( $\mu m^3/m^3$ )	Minimum ( $\mu m^3/m^3$ )
cluster I	76	97.0	13.55	78.1	132.1
cluster II	69	92.0	13.35	77.9	147.7
cluster III	11	93.8	21.41	77.9	144.2

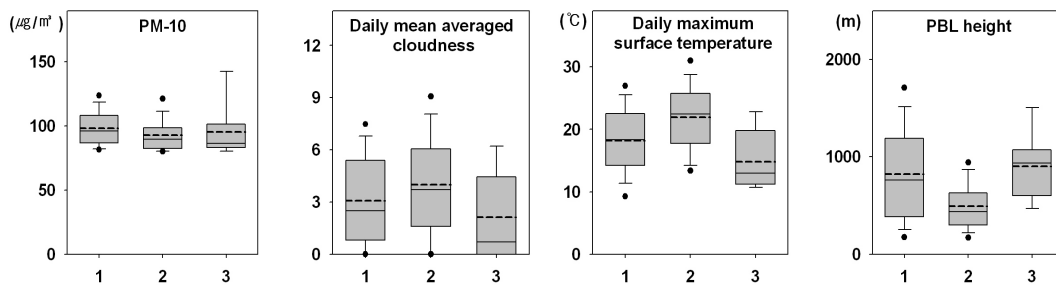
**Table 5.** ANOVA result of the meteorological factors related to the cluster of hysplit at Busan in 2007~2011

	sum of squares	degree of freedom	mean square	F	p-value
PM <sub>10</sub>	898.980	2	449.490	2.258	0.108
Daily mean averaged cloudness	60.630	2	30.315	4.097	0.018
Daily maximum surface temperature	703.913	2	351.956	13.970	0.000
Daily mean surface wind speed	1.455	2	0.728	0.617	0.541
Daily mean surface humidity	5560.891	2	2780.445	16.859	0.000
Daily mean surface pressure	449.871	2	224.935	3.169	0.045
Diurnal variation of surface pressure	5.900	2	2.950	0.183	0.833
PBL height	5030779.0	2	2515389.0	15.572	0.000

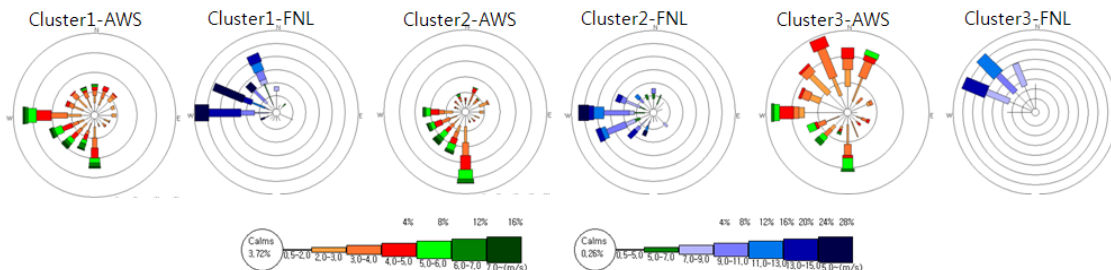
Fig. 7은 군집별 기상요소를 박스플롯으로 나타낸 그림이다. 일평균 운량을 살펴보면, 군집 3이 2.0로 가장 낮게 나타났으며, 군집 2가 4.0으로 가장 높게 나타났다. 일최고기온은 군집 3이 14.8℃로 가장 낮게 나타났으며, 군집 1이 18.2℃, 군집 2가 21.7℃로 이동거리가 멀수록 최고기온이 낮은 것으로 분석되었다. 일평균 상대습도는, 군집 2에서 63.6%로 가장 높게 나타났으며, 군집 1은 52.2%, 군집 3은 47.1%로 나타나서, 이동거리가 가까울수록 일평균 상대습도가 높게

나타나는 결과를 보였다. 대기경계층 고도는 군집2에서 493.3 m로 가장 낮게 나타났으며, 군집 1은 838.5 m, 군집 3은 939.79 m로 나타나 이동거리가 가장 짧았던 군집 2에서 대기경계층 고도가 가장 낮은 것으로 나타났다. 그러나 군집들 간의 PM<sub>10</sub> 농도차는 통계적으로 유의하지 않은 것으로 나타났다.

Fig. 8은 군집별 바람장미를 나타낸 그림이다. 이동거리가 가장 먼 군집 3을 살펴보면, 지면에서는 북서북과 서풍 방향이 주풍향으로 나타났으며, 850 hPa 등압면에서는 북서계열이 뚜렷하게 나타났다. 다음으로



**Fig. 7.** The distribution of the Meteorological factors related to the cluster of hysplit at Busan in 2007~2011.



**Fig. 8.** The distribution of weather conditions related to the cluster of hysplit at Busan in 2007~2011.

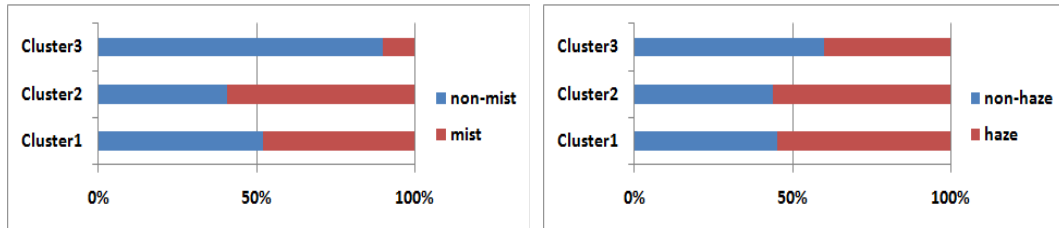


Fig. 9. The distribution of weather conditions related to the cluster of hysplit at Busan in 2007~2011.

군집 1을 살펴보면 지면과 850 hPa 등압면 모두 서풍 계열이 주풍향으로 나타났다. 이동거리가 가장 짧은 군집 2는 지면에서 남풍이 주풍으로 나타났으며, 820 hPa 등압면에서는 서풍계열이 주풍향인 것으로 나타났다. 즉, 이동거리가 가장 긴 군집 3은 북풍과 서풍 계열이 지면에서 우세하였고 유입방향은 군집 3과 유사하나 이동거리가 군집 3에 비해 짧은 군집 1은 서풍 계열이 지면에서 우세하였으며, 이동거리가 가장 짧은 군집 2는 남풍계열이 우세한 것으로 나타났다. 850 hPa 등압면에서는 Fig. 6의 hysplit 결과와 비슷한 형태로 나타났으며, 군집 3과 1은 북서계열이 우세하였고, 이동거리가 가장 짧았던 군집 2는 서풍계열이 우세한 것으로 나타났다.

Fig. 9는 군집별 날씨 상황을 나타낸 그림이다. 이동거리가 가장 먼 군집 3은 총 10일 중 1일이 박무 발생일이었고, 군집 1은 총 71일 중 34일, 이동거리가 가장 짧은 군집 2는 총 64일 중 38일에서 박무가 발생한 것으로 나타났다. 연무 발생일을 분석한 결과, 이동거리가 가장 먼 군집 3은 총 10일 중 4일(40%)에서 연무가 발생하였으며, 군집 1은 총 71일 중 39일(55%), 이동거리가 가장 짧은 군집 2는 총 64일 중 36일(61%)에서 연무가 발생한 것으로 나타났다. 따라서 이동거리가 가장 짧은 군집 2에서 박무와 연무 발생이 가장 빈번한 것으로 나타났다.

#### 4. 결론

부산지역에서 기상요소들과 미세먼지 농도와의 관련성을 분석하기 위하여 2007년부터 2011년까지 총 5년간의 시간별 PM<sub>10</sub> 농도, 일평균 운량, 일최고기온, 일평균풍속, 일평균 상대습도, 일평균 현지기압, 일기압변화량, 지면에서의 풍향, 풍속, 날씨, 대기경계층

고도, 850 hPa 등압면에서의 풍향, 풍속을 사용하여 분석을 수행하였다. 이를 위해, PM<sub>10</sub> 농도 구간별 기상요소의 차이가 나타나는 지를 살펴보기 위하여 T-검정과 분산분석을 실시하였으며, PM<sub>10</sub> 일평균 농도 분위수로 구간을 설정하였다. 본 연구에서 저농도 PM<sub>10</sub> 발생일은 2007년~2011년까지 황사발생일과 강수일(일 누적강수량이 5 mm 이상)을 제외한 부산지역 17개 측정소 시간별 PM<sub>10</sub> 농도 자료를 일평균한 PM<sub>10</sub> 농도에 대한 10% 분위수 이하의 PM<sub>10</sub> 농도가 나타난 날이며, 고농도 PM<sub>10</sub> 발생일은 일평균한 PM<sub>10</sub> 농도에 대한 90% 분위수 이상의 PM<sub>10</sub> 농도가 나타난 날로 설정하였다. 또한 구간별 분석을 위한 PM<sub>10</sub> 농도 구간은 0~25%, 25~50%, 50~75%, 75~100% 분위수로 선정하였다. 이러한 조건에 대한 분석 결과는 아래와 같다.

1. 일평균 운량은 고농도 발생시 3.4, 저농도 발생일시 5.4로 고농도 PM<sub>10</sub> 발생시 운량이 더 높게 나타났다.
2. 일최고기온은 고농도 발생시 19.5°C, 저농도 발생시 17.4°C로 나타나 고농도 발생시 최고기온이 더 높게 나타났으며, 일평균풍속은 저농도 발생시 3.7 m/s, 고농도 발생시 3.0 m/s로 고농도 발생시 일평균 풍속이 더 낮게 나타나, 저풍속에서 대기환기량이 감소할수록 미세먼지 농도가 높게 나타났다.
3. 일평균 현지기압은 일평균한 PM<sub>10</sub> 농도에 대한 50%이상 분위수를 나타낸 날에서 일평균 현지기압이 낮게 나타났으며, 일기압 변화량은 75% 분위수 이상 구간에서 다소 높게 나타났다. 그리고 대기경계층 고도는 고농도 발생시 692.9 m, 저농도 1094.3 m로 고농도 발생시 PBL 고도가 낮게 나타나, 대기안정도가 높아질수록 미세먼지 농도가 증가하였다.
4. 저농도 구간에서는 지면에서 북풍 계열이 주풍

향으로, 850 hPa 등압면에서는 서~북~동풍 계열로 풍향이 비교적 다양하게 나타났으며 고농도 구간에서는 지면에서 서풍 또는 남풍계열이 주풍향으로 나타났으며, 850 hPa 등압면에서는 서풍계열이 뚜렷하게 우세한 것으로 나타나 PM<sub>10</sub> 농도가 높을 때에는 서쪽에서의 대기오염물질 장거리 수송이 명확한 것으로 나타났다.

이와 더불어, 고농도 PM<sub>10</sub> 발생일에 대하여 HYSPLIT-4 모델을 이용하여 군집분석을 수행한 결과, 중국 북부지역에서 발원한 기류(군집 1과 3)가 나타났으며, 중국 화중 지역에서 서해안 상공을 거쳐 한반도로 유입된 기류(군집 2)도 나타났다. 이 군집들간 PM<sub>10</sub> 농도 차이에 대한 유의성은 없었으며, 비교적 이동거리가 짧았던 군집 2에서 일평균 운량과 평균습도가 가장 높고, 그리고 대기경계층 고도가 가장 낮게 나타났다. 지면에서의 풍향은 남풍계열로 나타났으며, 850 hPa 등압면에서는 서풍 계열이 뚜렷하게 나타났다.

이와 더불어, 고농도 PM<sub>10</sub> 발생과 관련된 여러 원인들 중에서 장거리 수송도 매우 중요한 요소로 지적되고 있다. 따라서 여러 기상요소 중 기압 배치 및 기압강도가 PM<sub>10</sub> 발생과 어떠한 관계가 있는지 살펴보는 것 또한 중요하다고 판단된다.

따라서, 향후에는, 본 연구에서 수행된 일평균 현지 기압 및 일기압 변화량 등에 관한 기압관련 기상요소와 PM<sub>10</sub> 농도간의 관련성을 좀 더 심층적으로 정량 분석하기 위해 일기도와 기타 기압관련 기상요소에 대한 분석 등을 이용한 추가 연구가 필요하다고 판단된다. 더불어, 고농도 PM<sub>10</sub> 발생 원인 및 위해성 평가에 필요한, PM<sub>10</sub> 장거리 수송 유형 또는 고농도 PM<sub>10</sub> 발생 유형에 따른 PM<sub>10</sub> 성분 분석 또한 필요하다고 사료된다.

### 감사의 글

이 논문 또는 저서는 2009년 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구입니다.[NRF-2009-351-C00070]

### 참고 문헌

- Chen, Z. G., 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.
- Choi, B. W., Jung, J. H., Choi, W. J., Shon, B. H., Oh, K. J., 2006, Characteristics of the Distribution of High Ambient Air Pollutants with Sources and Weather Condition in Ulsan, *Kor. J. Env. Hlth.*, 32(4), 324-335.
- Choi, K. C., Kim, C. H., Cho, J. G., Park, J. H., Ionic Composition of Early and Succeeding Rainwater in Pusan Area, *Journal of Korea Air Pollution Research Association*, 14(4), 361-368.
- Choi, Y. S., Ho, C. H., Chen, D., Noh, Y. H., Song, C. K., 2008, Spectral analysis of weekly variation in PM<sub>10</sub> mass concentration and meteorological conditions over China, *Atmos. Environ.*, 42, 655-666.
- Hong, S. G., 2006. *Weather forecast and weather analysis*, Kyohakyungusa.
- Jeon, B. I., 2012, Meteorological Characteristics of the Wintertime High PM<sub>10</sub> Concentration Episodes in Busan, *Journal of the Environmental Sciences*, 21(7), 815-824.
- Jeong, J. I., Park, R. J., 2013, Effects of the meteorological variability on regional air quality in East Asia, *Atmos. Environ.*, 69, 46-55.
- Jo, H. Y., Kim, C. H., 2011, Characteristics of Air Quality over Korean Urban Area due to the Long-range Transport Haze Events, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 27(1), 73-86.
- Jung, Y. S., Park, S. U., Yoon, I. H., 1996, Characteristic Features of Local Air Quality Associated with Meteorological Conditions, *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences*, 32(2), 271-290.
- Kim, J. A., Jin, H. A., Kim, C. H., 2007, Characteristics of Time Variations of PM<sub>10</sub> Concentrations in Busan and Interpreting Its Generation Mechanism Using Meteorological Variables, *Journal of the Environmental Sciences*, 16(10), 1157-1167.
- Kim, C. H., Son, H. Y., Kim, J. A., Ahn, T. K., 2007,

- Classification of Synoptic Meteorological Patterns for the Environmental Assessment of Regional-scale Long Range Transboundary Air Pollutants, *Journal of Environmental Impact Assessment*, 16(1), 89-98.
- Lee, B. R., Park, S. U., 1997, Method for Forecasting Air Pollution Potential Using Synoptic Meteorological Conditions, *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences*, 33(4), 641-656.
- Lee, J. Y., Han, J. S., Kong, B. J., Hong, Y. D., Lee, J. H., Chung, I. R., 2007, Variation of PM<sub>10</sub> Concentration in Seoul in Association with Synoptic Meteorological Conditions, *Journal of Environmental Impact Assessment* 16(5), 351-361.
- Lee, S. M., Ho, C. H., Choi, Y. S., 2011, High-PM<sub>10</sub> concentration episodes in Seoul, Korea: Background sources and related meteorological conditions, *Atmos. Environ.*, 45, 7240-7247.
- Lee, W. J., 2011, *Weather Forecasting*(Korean edition), KwangGyo E-tax.
- Mamtimin, B., Meixner, F. X., 2011, Air pollution and meteorological processes in the growing dryland city of Urumqi (Xinjiang, China), *Atmos. Environ.*, 45, 1277-1290.
- Ministry of Environment, 2011, *Annual Report of Air Quality in Korea 2010*.
- Oh, H. S., Yoon, S. C., 1996, Characteristics of Air Pollutions and Meteorological Fields Affecting the Visibility Impairment in Seoul, *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences*, 32(1), 131-138.
- Seoul Development Institute, 2011, *A Study on Building customized Management Strategies Based on Local PM10 Emission Inventory in Seoul*, 30-47.
- Sfetsos, A., Vlachogiannis D., 2010, A new approach to discovering the causal relationship between meteorological patterns and PM<sub>10</sub> exceedances, *Atmos. Research*, 98, 500-511.
- Shin, M. K., Lee, C. D., Ha, H. S., Choe, C. S., Kim, Y. H., 2007, The Influence of Meteorological Factors on PM<sub>10</sub> Concentration in Incheon, *Journal of Koran Society for Atmospheric Environment*, 23(3), 322-331.
- Snyder, B. I., Strawbridge, K. B., 2004, Meteorological analysis of the Pacific 2001 air quality field study, *Atmos. Environ.*, 38, 5733-5743.
- Unal, Y. S., Toros H., Deniz, A., Incecik, S., 2011, Influence of meteorological factors and emission sources on spatial and temporal variations of PM10 concentrations in Istanbul metropolitan area, *Atmos. Environ.*, 45, 5504-5513.
- Won, T. Y., Jung, S. W., 2005, *Koran SPSS Statistics 12K*, SPSS Academy.
- Yoon, I. H., 2011, *Exercise manual and Study guide in Meteorology*, Kyungpook National University Archives.