

ORIGINAL ARTICLE

## 한후기 계곡지형 내 도시 시정악화 발생일의 기상 및 대기오염 특성 분석

강재은 · 송상근<sup>1)</sup> · 김유근\*

부산대학교 지구환경시스템학부, <sup>1)</sup>제주대학교 해양과학대학 지구해양학과

## Characteristics of Meteorological Conditions and Air Pollution in a Valley City on Bad Visibility Days of the Cold Half Year

Jae-Eun Kang, Sang-Keun Song<sup>1)</sup>, Yoo-Keun Kim\*

Division of Earth Environmental System, Pusan National University, Busan 609-735, Korea

<sup>1)</sup>Department of Earth and Marine Sciences, Jeju National University, Jeju 690-756, Korea

### Abstract

The characteristics of meteorological conditions and air pollution were investigated in a valley city (Yongsan) on bad visibility days (from 05:00 to 09:00 LST) of the cold half year (November 2008 to April 2009). This analysis was performed using the hourly observed data of meteorological variables (temperature, wind speed and direction, relative humidity, and 2 m and 10 m temperature) and air pollutants (NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, PM<sub>10</sub>, and O<sub>3</sub>). In addition, visibility data based on visual measurements and a visibility meter were used. The bad visibility days were classified into four types: fog, mist, haze, and the mixture (mist+haze). The results showed that the bad visibility days of the four types in the valley city were observed to be more frequently (about 50% of the total study period (99 days except for missing data)) than (27%) those near coastal metropolitan city (Busan). The misty days (39%) in the valley city were the most dominant followed by the hazy (37%), mixture (14%), and foggy days (10%). The visibility degradation on the misty days in Yongsan was closely related to the combined effect of high-level relative humidity due to the accumulation of water vapor from various sources (e.g. river, stream, and vegetation) and strong inversion due to the development of surface radiative cooling within the valley. On the hazy days, the visibility was mainly reduced by the increase in air pollutant (except for O<sub>3</sub>) concentrations from the dense emission sources under local conditions of weaker winds from the day before and stronger inversion than the misty days. The concentrations of NO<sub>2</sub>, PM<sub>10</sub>, and SO<sub>2</sub> (up to +36 ppb, +25 μg/m<sup>3</sup>, and +7 ppb) on the hazy days were a factor of 1.4-2.3 higher than those (+25 ppb, +14 μg/m<sup>3</sup>, and +3 ppb) on the misty days.

**Key words** : Valley city, Visibility, Haze, Mist, Local meteorology

### 1. 서론

시정(visibility)은 대기의 혼탁도를 나타내는 가시거리로, 대기 중 수증기 입자의 증가로 인한 안개, 박

무, 하층운 등과 오염물질 증가로 인한 황사, 연무, 스모그 등에 의해 감소되며, 두 개 이상의 현상이 혼합되어 감소되기도 한다(Chun 등, 2003; Chung, 1997; Jhun 등, 1998; Oh와 Yoon, 1996). 이러한 시정 감소

Received 16 January, 2013; Revised 24 January, 2013;

Accepted 12 March, 2013

\*Corresponding author : Yoo-Keun Kim, Division of Earth Environmental System, Pusan National University, Busan 609-735, Korea  
Phone: +82-(0)51-510-2282  
E-mail: kimyk@pusan.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.

현상들은 가시거리 감소에 따른 직접적 피해 이외에도 태양복사 차단에 의한 지면부근 일사량 감소, 대기 오염물질과의 혼합에 의한 건강 피해, 그리고 심리적인 불안들을 야기한다(Lee 등, 2010; Seo 등, 2001).

공항 및 대도시가 다수 위치하고 있는 우리나라 연안지역은 시정악화에 의한 피해 저감을 위하여 일찍부터 발생현황과 발생시 기상 및 대기오염에 관한 연구가 활발히 진행되어왔다(Choi 등, 1998; Heo와 Ha, 2004; Jo와 Kim, 2011; Leem 등, 2005; Lim 등, 2004; Seo 등, 2001). 연안지역에서의 시정악화는 여름철 안개 발생에 의한 현상이 빈번하며, 차가운 해수면 위의 온난 이류로 인한 이류안개와 전선 상에서 차가운 지표층 위로 약한 강수나 이슬비가 증발하여 발생하는 전선안개의 빈도가 높다(Heo와 Ha, 2004; Leem 등, 2005; Seo 등, 2002). 우리나라 서해 연안의 시정악화 현상은 중국대륙으로부터 대기오염물질의 장거리 수송에 의한 황사(Asian dust)와 연무(haze)로 인해 발생 빈도가 높으며, 이와 관련하여 많은 연구가 다각도로 수행되었다(Chun 등, 2003; Goo 등, 2008; Jo와 Kim, 2010, 2011; Lim 등, 2004). 반면, 남해 연안에서는 복잡한 해안선으로 인해 다른 연안과 비교시 해륙풍이 보다 발달되고, 해륙풍은 남해 연안도시 내 대기오염물질의 국지적 축적을 약화시켜 대기오염물질과의 혼합에 의한 시정악화 영향은 보다 감소하게 된다(Oh와 Kim, 2002).

연안지역과 달리 내륙지역에서의 시정악화는 한후기(cold half year) 동안 야간 복사냉각에 의해 발생하는 복사무에 의한 현상이 빈번하다. 특히 내륙 계곡지형에서는 야간 복사냉각이 보다 발달하며(Min, 1971; Yoon과 Chung, 1995), 이는 시정악화 현상을 보다 유발하게 된다. 야간에 지표 복사냉각된 찬 기류는 산사면을 따라 계곡의 지표부근으로 흘러 축적되어 다른 지역에 비해 강한 지표안정층이 형성되고, 이는 일출 이후에도 금방 소멸되지 않고 일정시간 지속된다(Bader과 McKee, 1992). 또한 산지지형은 발달된 종관 계절풍의 유입을 차단시키는 역할을 하여 계곡지형 내에는 상대적으로 약한 풍속조건을 가지게 된다(Barr과 Orgill, 1989; Whiteman, 2000).

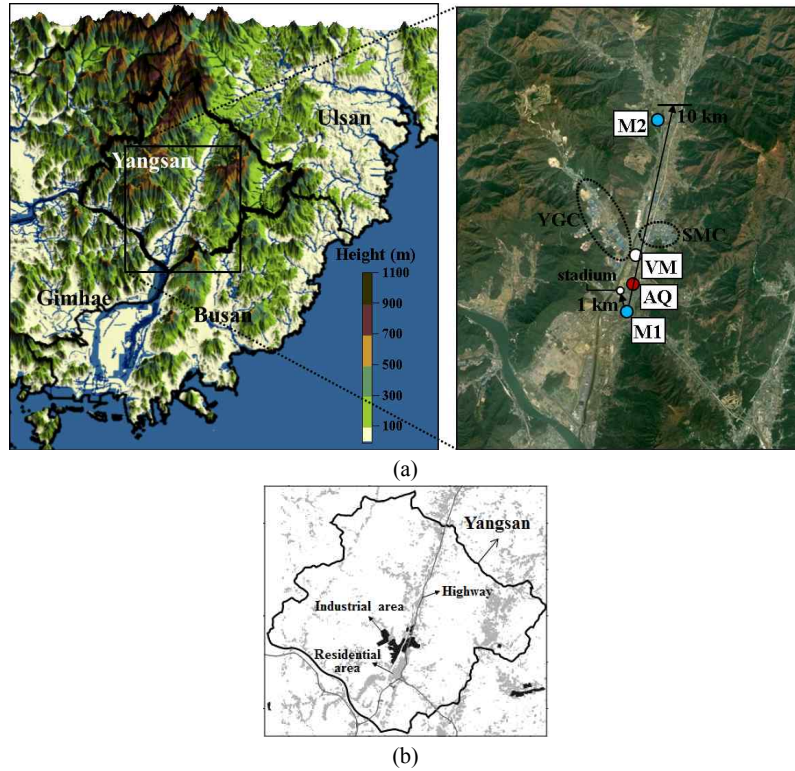
계곡지형 내 도시가 발달된 경우, 산지지형으로 둘러싸인 제한된 영역 내에 다수의 오염물질이 밀집되

어 분포하게 된다. 일출 이후에도 지속되는 안정상태의 대기조건 하에서 도시 내 배출된 대기오염물질은 크게 확산 및 수송되지 못하고 정체하게 된다(Anquetin 등, 1999; Corsmeier 등, 2006; Savov 등, 2002). 즉, 한후기 계곡지형 내 도시는 역전층의 강한 대기안정 조건과 약한 풍속 하에서 빈번히 발생하는 복사무와 국지 배출 대기오염물질에 의한 시정 감소 현상인 연무 등의 다양한 시정악화 현상을 유발할 수 있는 요인을 복합적으로 갖추고 있게 된다. 1981~1991년 동안 계곡지형 내 도시인 대구지역의 시정 감소 발생(강수일 제외)이 인근 교외지역(예천)보다 4배정도 높았던 연구 결과가 이를 뒷받침한다(Lee와 Chung, 1994a). 그러나, 내륙지형 내 시정악화 현상에 대한 연구는 대체로 수도권을 중심으로 과거 발생현황 파악 및 종관규모를 대표하는 기상조건 분석, 다른 지역과의 비교연구에 국한되어 있어, 최근 시정악화 발생에 관한 국지적 기상조건 및 대기오염농도와의 관계 연구가 필요하다. 또한 도시발달에 따라 연안에서부터 내륙 계곡으로 확대되고 있는 도시의 대기환경 이해 및 개선을 위해 계절 및 지형조건에 따른 국지적 시정악화에 관한 연구가 요구된다. 따라서, 본 연구에서는 실제 한후기 동안 일출시간 이후에도 지속되는 빈번한 시정악화 현상으로 인해 행정기관에 많은 민원이 제기되어 관련 연구가 일부 수행된 바 있는 내륙 계곡지형 내 양산시를 대상으로 연구를 수행하였다(Yangsan city, 2009). 양산시 내 기상(목측 및 시정계를 통한 시정 관측자료 포함) 및 대기질 관측자료를 통해 지역 내 시정악화 발생현황을 살펴보고, 빈번히 나타나는 시정악화 현상에 대해 지표부근 기상 및 대기오염물질 농도의 국지적 변화 특성을 분석하였다.

## 2. 재료 및 방법

### 2.1. 대상지역과 관측자료 및 방법

본 연구 대상지역은 한반도 남동쪽 내륙에 위치한 양산시로, 도심지는 원편의 영축산(1,081 m)과 오른편의 천성산(922 m) 사이의 계곡지형 내에 위치하고 있으며, 계곡을 따라 인근 낙동강을 향해 흐르는 양산천이 존재한다(Fig. 1). 계곡 내에는 다수의 공업 및 산업단지가 산재되어 있고, 신도시 건설 등으로 주거지



**Fig. 1.** (a) Topographic map including locations of meteorological (including visual measurement of visibility, "M1") and air quality monitoring sites ("AQ") and (b) land-use categories (highway, industrial, and building areas) in a valley city (Yangsan) of Korea. "M2" and "VM" represent two sites equipped with 2 m and 10 m weather system and a visibility meter, respectively. The distance of 1 (northwest direction) and 10 km (northeast direction) from the M1 are critical values for the bad visibility in this study. (YGC: Yeogok industrial complex, SMC: Sanmak industrial complex)

역이 공업 및 산업단지 인근까지 위치하고 있다. 또한 계곡을 따라 인근 대도시(부산, 울산 등)를 연결하는 주요 고속도로(경부고속도로) 및 국도가 발달되어있어, 일 평균 5만대 이상의 교통량을 가진다(Korea Expressway Corporation, 2011). 대상지역은 인근 대도시에 비해 작은 규모의 도시로 전체 배출량은 상대적으로 낮으나 계곡 내 제한된 면적에 다수의 오염원이 밀집되어 있고, 수증기의 주요 공급원인 하천이 위치하고 있어, 대기오염물질 및 안개 발생으로 인한 시정악화 현상이 예상되는 곳이다.

본 연구에 이용된 관측자료는 기상청에서 제공한 대상지역 중앙동 지점의 시간별 기상요소(기온, 풍속, 풍향, 강수량)와 환경부에서 제공한 중앙동 인근 북부동 지점의 시간별 대기오염농도(이산화황(SO<sub>2</sub>), 이산

화질소(NO<sub>2</sub>), 미세먼지(PM<sub>10</sub>), 오존(O<sub>3</sub>)) 자료이다. 또한, 지역 내 부족한 기상관측지점을 보완하기 위해 직접 설치한 2층 AWS의 시간별 기상요소 관측값(2 m와 10 m에서의 기온, 상대습도)은 연직 기상조건 분석을 위해 이용하였다. 시정의 목적관측은 중앙동 기상관측지점과 동일장소(양산시청 옥상)에서 촬영한 대기상태 사진을 이용하였다. 사진은 양산시에서 직접 촬영하여 제공한 것으로, 시정 감소가 빈번히 나타나는 시간대(이후, 주요 발생시간대)인 05:00~09:00 LST에 포함되며 일출 이후 지속현상을 고려하기 위해 매일 09:00 LST에 촬영되었다(Yangsan city, 2009). 주거 및 산업단지가 밀집되어 있는 북서쪽을 중심으로 북쪽, 북서쪽, 서쪽, 남쪽, 북동쪽 방향을 향해 촬영되었으며 북서와 북동 방향 사진만 제시하였다. 시정

거리는 촬영된 사진 속의 지형지물을 기준으로 추정하였다(Fig. 1a 참고). 시정계 관측은 본 연구를 위해 부산대학교 대기오염기상연구실에서 직접 수행하였으며, 기존의 기상(및 대기질) 관측지점보다 지역 내 시정악화 현상이 뚜렷한 지역, 공단과 도심의 인접지역, 시정악화 현상 주변으로 고층 건물이 적어 장거리 시정확보가 가능한 지역, 기기관리가 용이한 곳(북정초등학교 옥상)에 설치되었다. 각 관측지점의 위치는 Fig. 1에 표시하였다. 시정계(Biral사에서 제조한 VPF-730 모델)는 Forward scatter meter 방식으로 시정을 측정하며, 10 m에서 75 km 거리까지 측정가능하고, 정확도는 2 km 미만의  $\pm 2\%$  이내로 비(0.015 mm/hr)와 눈(0.0015 mm/hr)에 대해 감지가능하다. 이 시정계 센서는 이동형 통합기상관측시스템으로 설치되어있어 시정과 함께 상대습도를 포함한 기상요소들이 2009년 3월 18일부터 4월 30일까지 10분 간격으로 동시 측정되었으며, 본 연구에서는 시간별 분석을 위해 매시 정각(매시 00분) 자료를 이용하였다. 따라서, 본 연구의 대상시간은 시정계 측정시간을 포함한 한후기(본 연구에서는 시정악화가 빈번한 시기인 11월-4월)로 정하였으며, 2008년 11월 1일부터 2009년 4월 30일까지이다.

자료가 장기간 축적된 목측(사진) 관측자료와 기상청 기상관측자료를 바탕으로 대상지역의 시정악화 발생현황을 파악하였다. 선행연구들에서 제시한 기준을 바탕으로 시정악화가 발생한 날을 현상별로 분류한 후, 높은 빈도를 가지며 발생조건이 다른 두 시정악화 현상에 대해 지표부근 기상조건 및 대기오염물질 농도 변화를 비교하였다. 종관기압계의 위치에 따라 시정악화 발생요인의 차이가 있으므로 해당기간의 기상청에서 제공한 지상일기도를 통해 고/저기압의 중심 위치 분포를 살펴보았다. 또한 지표부근 기상요소 및 대기오염물질 농도의 시간별 평균변화 및 발생빈도 분포를 통해, 대상지역 내 빈번히 발생하는 시정악화의 주요 국지적 발생원인을 추정하고 그 특성을 분석하였다. 이들 분석을 위한 시정악화시의 시간별 시정 변화 분석은 시정계 측정 자료를 이용하였다.

## 2.2. 시정악화 현상 분류 기준

본 연구의 대상지역에서 일출 이후 지속되는 시정

악화 발생현상을 파악하기 위해 09:00 LST의 목측 관측자료를 바탕으로, 시정악화일(bad visibility day)을 선정하고 현상별로 분류하였다(Fig. 2). 일반적으로 안개(fog)는 지표면 근처에서 수증기 공급 또는 지표면 냉각으로 인해 수증기가 수적으로 응결되어 나타나는 현상으로 수평시정이 1 km 미만인 경우를 뜻하며, 강수가 동반되기도 한다(Kim, 1992). 따라서, 강수일을 포함한 기준시간의 시정이 1 km 미만인 날을 안개 발생일로 하였다. 반면, 비강수일에 국지적으로 대기의 시정을 감소시키는 대표적 현상은 박무(mist)와 연무(haze)이다. 박무는 미세한 물방울이나 흡습성 입자상물질의 산란에 의해 시정이 감소되는 현상으로, 안개보다 습도가 낮고 연무보다 습도가 높으며, 회색을 띠게 된다. 박무는 시정이 1 km 이상인 경우, 시정이 1 km 미만인 안개와 차이를 가진다(Kim, 1992; Lee와 Chung, 1994a). 연무는 도시나 공업지대 등에서 인위적으로 배출되는 작고 건조한 입자상 물질이 대기 중에 부유된 현상으로 시정이 1 km 이상이며 습도가 비교적 낮다. 밝은 배경의 대기에서는 질산염 등의 오염물질에 의해 황갈색을 띠게 되어 회색을 띠는 박무와 구별될 수 있으나 우윳빛으로 뿌옇게 나타나기도 한다(Kim, 1992; Lee와 Chung, 1994a). 연무는 시정거리에 따라 강도가 분류되며 2 km 이하부터 10 km까지를 분류기준에 포함시키고 있다(KMA, 2002).

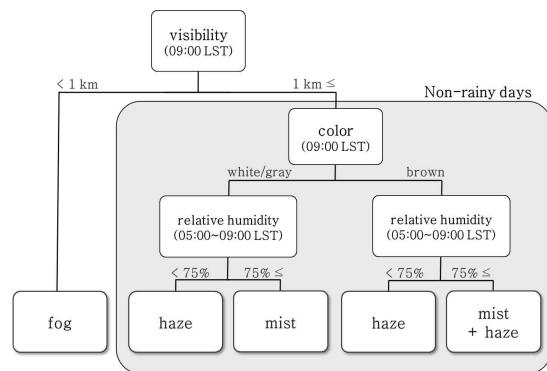


Fig. 2. The classification criteria of bad visibility days.

상기에서 정의한 바를 바탕으로 목측 관측된 시정이 10 km 미만인 날을 시정악화일로 선정하고(Fig. 1a

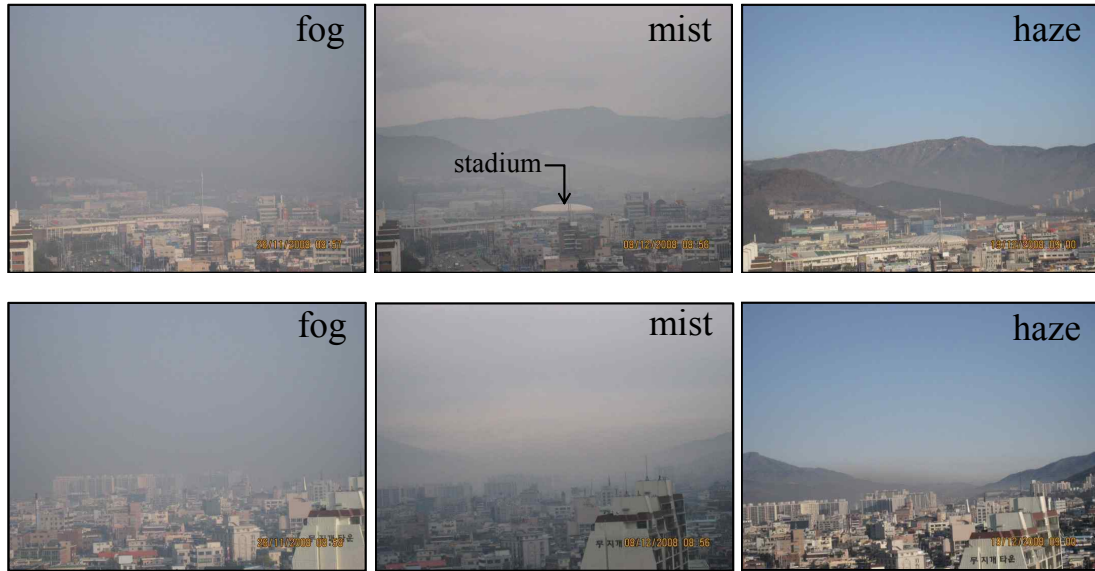


Fig. 3. The pictures showing representative days for fog (26 November, 2008), mist (8 December 2008), and haze (19 December 2008) phenomena in Yangsan (upper panel: northwest direction, bottom panel: northeast direction).

참고), 시정악화일 중 1 km 미만의 시정을 가지는 안개 발생일을 제외하고, 비강수일에 시정이 1 km 이상 일 때를 박무(misty day) 또는 연무 발생일(hazy day)로 하여, 사진을 통해 나타난 시정 감소 유발색과 시정 감소 발생 전부터의 상대습도(05:00~09:00 LST 평균) 차이에 따라 이들 발생일을 세부 분류하였다 (Chung, 1997; Jo와 Kim, 2010, 2011; Lim 등, 2004). 즉, 시정 감소 유발색이 흰색 또는 회색인 경우 상대습도가 75% 미만이면 연무 발생일, 75% 이상이면 박무 발생일로 분류하였다. 시정 감소 유발색이 황갈색인 경우 동일시간의 상대습도가 75% 미만이면 연무 발생일, 75% 이상이면 박무와 연무가 혼합 발생된 날(이하, 혼합일, mixture day)로 분류하였다. 분류된 안개, 박무, 그리고 연무에 대한 각 대표 발생일의 사진을 Fig. 3에 나타내었다.

시간별 시정 변화 분석시, 시간별 시정계 측정자료를 이용하여 시정악화일을 추가 선정하였다. 이는 시정계 측정기간 동안 다수의 목측 결측일로 인해 목측 관측에 의해 분류된 박무 및 연무 발생일 빈도가 적어, 시간별 시정 변화 분석결과의 신뢰도를 높이고자 한 것이다. 주요 발생시간대(05:00~09:00 LST)에 10 km 미만(1 km 이상)의 시정이 관측된 날을 추가 시정악

화일로 보고, 평균 상대습도가 75% 이상인 날을 추가 박무 발생일로 75% 이하인 날을 추가 연무 발생일로 하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1. 시정악화 발생현황

양산과 인근 연안에 위치한 대도시인 부산에서의 시정악화 발생현황은 Table 1과 같다. 연구대상기간(181일) 동안 양산의 총 자료획득일수는 99일이며(결측 82일), 그 중 시정악화일이 절반인 49일을 차지하였다. 양산의 시정악화일은 박무와 연무가 각각 39%(19일)와 37%(18일)이며, 혼합일 또한 14%(7일)를 차지하고, 안개는 전체 시정악화일 중 10%(5일)이었다. 즉, 대상지역 내 대기오염물질에 의한 시정악화일(연무 발생일, 혼합일)은 전체 시정악화일의 51%를 차지하였다.

양산과 동일한 날(총 99일)에 대해 부산지방기상청 날씨현황자료(일별 안개, 박무, 연무 등의 발생여부를 관측하여 기재한 자료)를 이용하여 부산의 시정악화 발생현황을 비교하였다. 부산의 시정악화일은 양산보다 낮은 27일이며(전체의 1/3~1/4), 이 중 양산과 동일

**Table 1.** Occurrence frequency of the foggy, misty, and hazy days in Yangsan and Busan from 1 November 2008 to 30 April 2009

[A] Yangsan					
Total <sup>a</sup>	Clear day	Bad visibility day			
		49 (49.5%)			
99	50 (50.5%)	Fog	Mist	Haze	Mixture <sup>b</sup>
		5 (10.2%)	19 (38.8%)	18 (36.7%)	7 (14.3%)
[B] Busan <sup>c</sup>					
Total <sup>a</sup>	Clear day	Bad visibility day			
		27 (27.3%) <sup>d</sup> / 19 (19.2%)			
99	72 (72.7%)	Fog	Mist	Haze	Mixture <sup>b</sup>
		1 (3.7%)	2 (7.4%)	11 (40.7%)	5 (18.5%)

<sup>a</sup> "Total" represents the number of days except for missing data during the study period in Yangsan

<sup>b</sup> "Mixture" represents a combination of mist and haze days (mist + haze)

<sup>c</sup> The days in Busan were classified using the weather phenomenon data at Busan weather station

<sup>d</sup> including rainy days on the mist, haze, and mixture days

한 기준을 적용하여 강수일의 박무 및 연무 발생일을 제외하면 19일이었다(전체의 1/5). 비강수일에 대해 부산은 연무가 가장 많이 발생하였으며(11일, 41%), 그 다음이 혼합일(5일, 19%)이고, 박무는 양산에 비해 특히 낮은 빈도(2일, 7%)를 보였다. 부산에서 나타나는 시정 감소 현상이 주로 연무에 의한 것임은 이전(2000~2007년) 자료를 통해서도 밝혀진 바 있다(Jo와 Kim, 2010). 즉, 연안도시인 부산 역시 건조한 대기상태에서 오염물질 증가로 인한 시정악화 발생이 빈번하나 양산이 보다 높은 빈도를 가지며, 내륙 계곡지형에 위치한 양산시는 인근 연안 대도시보다 여러 시정악화 현상이 보다 빈번히 발생됨을 확인할 수 있다.

### 3.2. 시정악화일의 기상 및 대기오염 특성 분석

양산시 내 시정악화 현상의 주요 발생시간대를 대상으로 유효자료가 축적되기 시작한 2006년부터 2008년까지 3년간 한후기(11~4월)의 기온, 풍속, 상대습도 평균을 부산시와 비교한 결과, 양산은 부산에 비해 낮은 기온과 약한 풍속, 그리고 높은 상대습도를 가졌다(양산과 부산, 기온: 4.7±5.0 °C, 6.5±5.1 °C, 풍속: 1.8±1.5 m/s, 3.1±1.9 m/s, 상대습도: 65.07±19.0%, 56.0±18.3%). 양산지역은 야간에 인근 산으로부터의 냉기류 유입으로 발달되는 지표 복사냉각이 상대적으로 저온과 관련되며, 지표 저온은 대기를 보다 안정화시

켜 약한 풍속조건을 갖게 되고, 계곡을 따라 낙동강으로 유입되는 양산천이 지역 내 상대적으로 높은 습도와 관련된 것으로 보인다. 이에 양산시 내 빈번하게 발생하는 시정악화 현상인 박무와 연무 발생일에 대해 종관 및 국지 기상조건과 대기오염물질 농도의 변화 차이를 분석하여(Figs. 4~7), 한후기 계절 내 지형조건에 따른 빈번한 시정악화의 발생원인들을 살펴보고자 하였다.

#### 3.2.1. 박무 발생일

박무 발생시 한반도 상공의 종관기상조건과 관련된 인근 고·저기압 중심 위치분포와 대표사례일의 일기도(2008년 12월 8일 00:00 UTC)를 분석하였다(Fig. 4). 대체로 한반도로부터 남동쪽(또는 북쪽)에 중심을 둔 고기압의 영향으로 남서(또는 북동)기류에 의한 온난습윤(또는 한랭습윤) 공기의 한반도 내 유입이 예상된다. 한반도 남서해상으로부터의 습윤공기 유입조건을 박무 대표사례일의 일기도에서 볼 수 있다. 한반도 남서 해상에 이동성 고기압이 위치하여 습윤한 서풍기류가 유입되는 조건 역시 찾아볼 수 있었으며, 이는 중부지역의 안개 및 박무 발생시 주요 종관기상조건으로 제시된 바 있다(Yoon과 Chung, 1995). 즉, 대상지역에서 발생된 박무는 상대적으로 습윤한 종관기상조건하에서 빈번히 발생되었음을 확인할 수 있다.



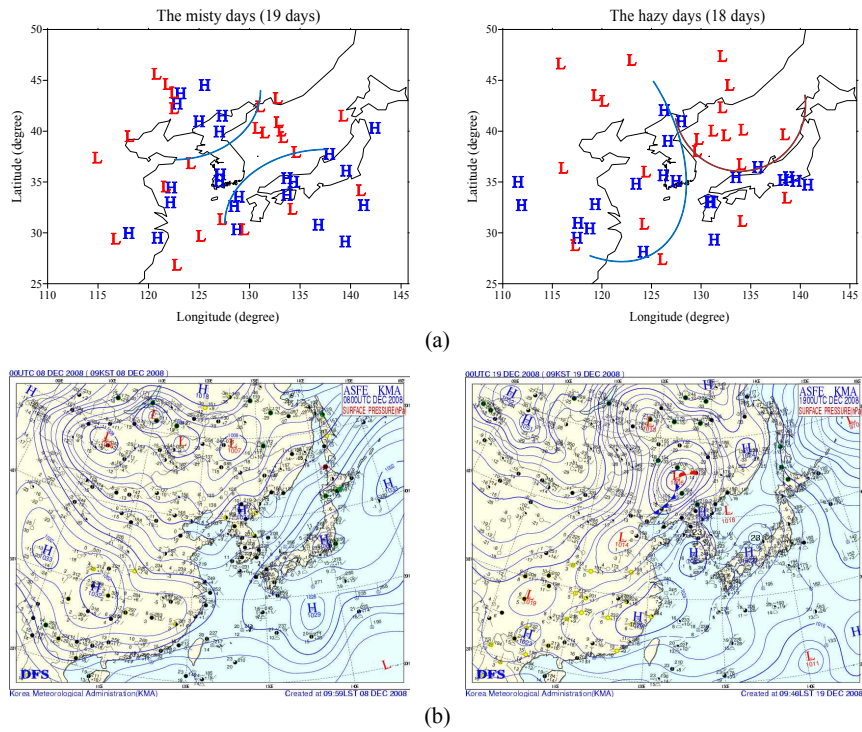


Fig. 4. (a) Central locations of high- ("H") and low-pressure ("L") systems on the misty (19 days) and hazy days (18 days) during the study period (1 November 2008 to 30 April 2009) and (b) surface weather maps (00:00 UTC) on representative days for mist (8 December 2008) and haze (19 December 2008) phenomena in Yangsan.

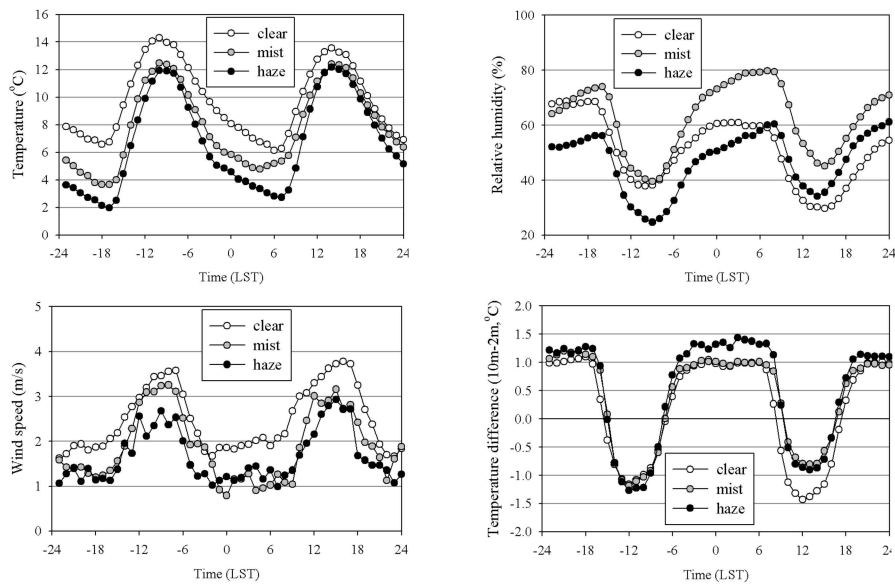


Fig. 5. Hourly variations of temperature, relative humidity, wind speed, and difference between 10 m and 2 m temperature (10 m - 2 m) on the clear, misty, and hazy days, including the day before (-24:00 to 00:00 LST), in Yangsan.

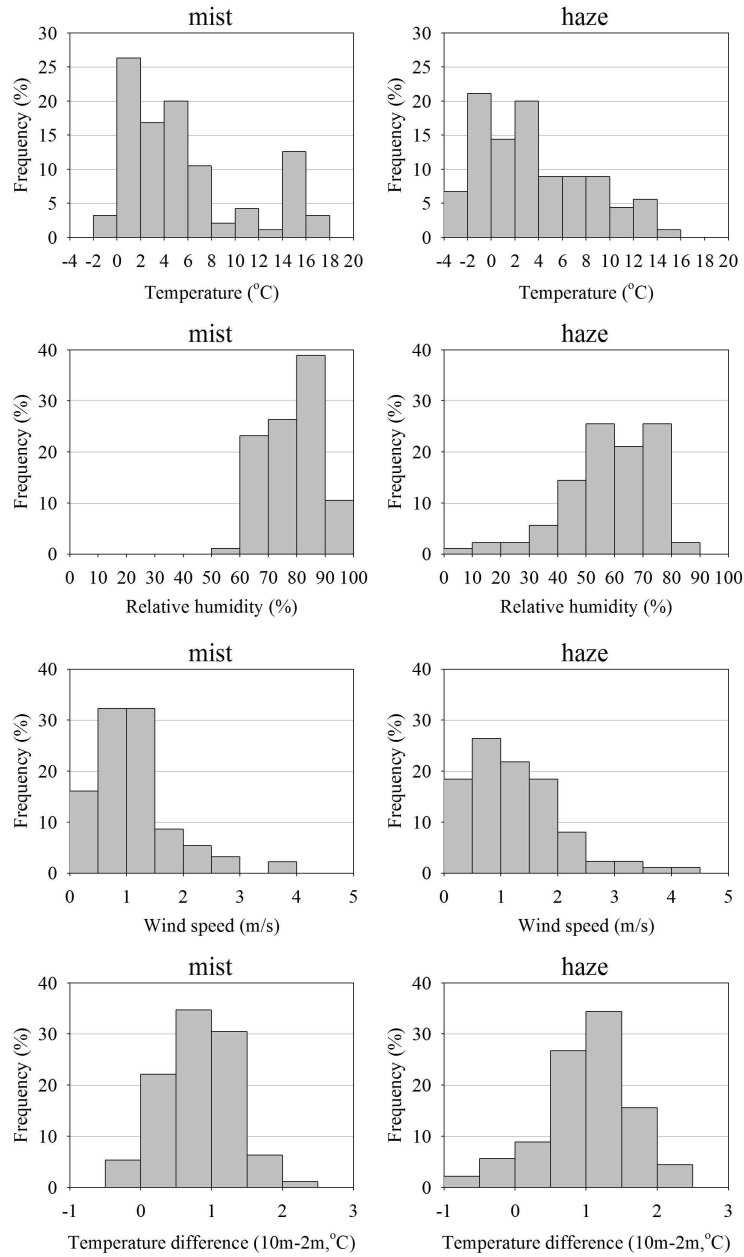


Fig. 6. Frequency distributions of temperature, relative humidity, wind speed, and difference between 10 m and 2 m temperature (10 m - 2 m) from 05:00 to 09:00 LST on the misty and hazy days in Yangsan.



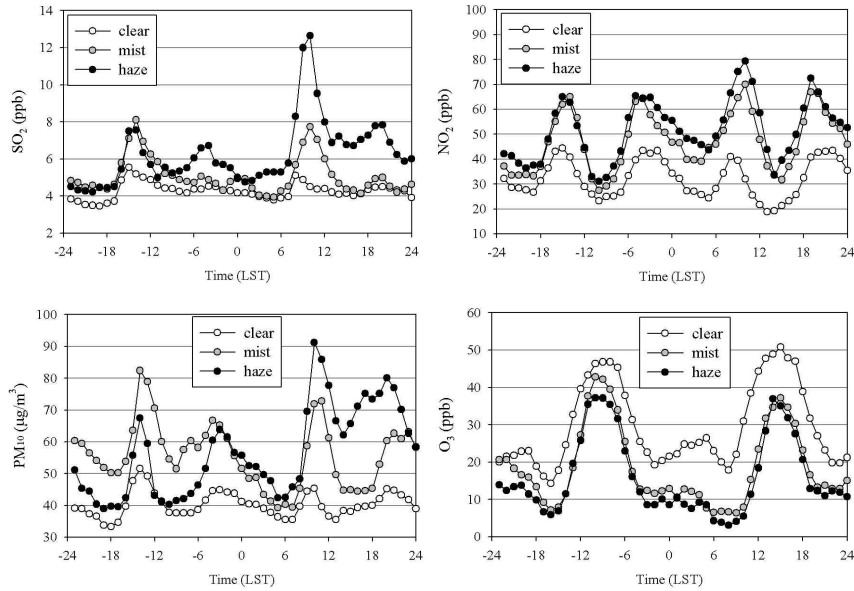


Fig. 7. Hourly variations of SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, PM<sub>10</sub> and O<sub>3</sub> concentrations on the clear, misty, and hazy days, including the day before (-24:00 to 00:00 LST), in Yangsan.

대상지역 내 박무 발생과 관련된 국지적 기상변화를 보기 위해, 박무 발생일과 발생 전일의 기온, 상대습도, 풍속, 기온차(10 m - 2 m)의 시간별 변화를 청정일(그리고 연무 발생일)과 비교하였다(Fig. 5). 박무는 청정일에 비해 발생 전날부터 주요 발생시간대(05:00~09:00 LST)까지 지속적으로 낮은 평균기온에서 발생되었다. 청정일과의 기온차는 전날 일몰시간 이후부터 점차 증가하며 주요 발생시간대 이전(04:00 LST)에 최고치(그리고, 가장 최저기온)를 보인 후 점차 감소하였다. 박무 발생일 상대습도의 경우 전날 오후에는 청정일과 큰 차이를 보이지 않으나, 일몰시간 이후에는 기온 감소와 함께 크게 증가하여 청정일보다 약 20% 높은 평균 80%의 상대습도를 보였다. 박무 발생 전날 오후의 평균 풍속 역시 청정일과 유사하며(평균 3 m/s 이상), 일몰 후부터 주요 발생시간대까지는 평균 풍속 1.5 m/s 이하의 매우 약한 풍속조건을 가졌다. 여기에 관련그림이 제시되지 않았으나 박무 발생과 관련한 풍향조건은 주야간의 풍향변화가 뚜렷한 국지풍 발달 분포를 보였으며, 주요 발생시간대 전후에는 약한 풍속이 지속됨에 따라 박무 발생과 관련된 풍향조건 영향은 적을 것으로 예상되었다. 야간시

간대에 10 m와 2 m에서의 기온차를 통한 대기안정도 조건을 보면, 박무 발생시 야간시간대의 대기안정도가 청정일과 유사하다. 다만, 안정한 대기상태(+값, 지표역전층)가 청정일(08:00 LST)에 비해 한 시간 늦은 주요 발생시간대까지 지속되었음을 알 수 있다(09:00 LST). 즉, 박무 발생 전날 오후의 기상요소(상대습도, 풍속) 변화가 비발생일과 유사하고, 일몰 후부터 주요 발생시간대까지 지속되는 약한 평균 풍속조건은 대상지역 내 높은 상대습도 조건에서 발생된 박무가 외부로부터의 직접적인 수증기 수송(유입)영향보다는 국지적 수증기 변화에 의한 발생이 빈번함을 설명한다. 일반적으로 대기 중 상대습도 증가는 기온 감소 및 수증기량의 증가에 의해 나타나는데(Lutgens과 Tarbuck, 2007), 박무 발생시 뚜렷이 나타난 기온 감소와 상대습도 증가 분포는 일몰 후 지표 복사냉각의 국지적 발달로 인한 기온 감소가 상대습도 증가와 밀접함을 설명한다. 그러나, 최저기온과 최고상대습도의 발생시간 차이는 양산천, 낙동강 및 인근 식물들로부터의 호흡작용 등에 의한 국지적 수증기량의 증가가 추가로 예상되는 부분이다.

주요 발생시간대의 기온, 풍속, 상대습도의 구간별

발생빈도를 분석한 결과(Fig. 6), 박무는 0~8 °C와 14~16 °C의 기온조건에서 각 구간별 5% 이상의 발생 빈도를 가지며, 온난대기보다 한랭대기에서 보다 빈번히 발생되었다. 박무 발생시 상대습도는 대개 60% 이상이며(총 발생빈도의 99%), 특히 80~90% 조건이 가장 빈번하다(38.9%). 또한 박무 발생시 3 m/s 이상의 풍속조건 빈도가 낮아 습윤공기의 외부수송 영향이 빈번하지 않으며(2.2%), 10 m 기온이 2 m 기온보다 큰 양(+)의 값을 가지는 안정한 대기상태(지표역전층)에서 주로 발생되었다(97%). 즉, 계곡지형 내 낮은 기온(0~8 °C)의 높은 상대습도(60% 이상), 그리고 약한 풍속(3 m/s 이하)의 매우 안정한 대기상태에서 박무가 빈번히 발생되었음을 확인할 수 있다.

박무 발생과 관련된 대기오염물질 농도변화를 보기 위해, 발생 전일부터 발생일까지의 시간별 SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub>, PM<sub>10</sub>의 농도변화를 청정일과 비교하였다(Fig. 7). 박무 발생일은 청정일에 비해 SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, 그리고 PM<sub>10</sub>의 농도가 전날 오후부터 지속적으로 높았다. 일반적으로 박무는 질산염 및 황산염과 같은 흡습성 오염물질들의 증가와 관련되는 것으로 알려져 있다(Chung 등, 1992; Lee와 Chung, 1994b). 본 연구 대상지역에서는 주요 발생시간대에 특히 NO<sub>2</sub>가 청정일에 비해 17~25 ppb (09:00 LST에 25 ppb) 증가된 농도를 가지며, PM<sub>10</sub>이 3~14 µg/m<sup>3</sup> (09:00 LST에 14 µg/m<sup>3</sup>), SO<sub>2</sub>는 상대적으로 작은 3 ppb 이내의 증가분포를 보였다. 이러한 상대적 농도 증가는 일별 국지적 배출량 변화가 청정일과 큰 차이가 없다고 가정시, 전날 일몰시간 이후부터 지속된 약한 풍속으로 대기오염물질이 크게 확산 및 수송되지 못하고 지역 내 정체되어 나타난 것으로 볼 수 있다. 즉, 09:00 LST에 가장 큰 농도 증가 차이를 보이는데, 이 시간은 청정일의 경우 불안정 대기상태로 오염물질의 정체성이 약화되거나 박무 발생일의 경우 안정 대기상태가 지속된 시간으로 오염물질의 정체성 차이로 인한 농도변화 차이를 확인할 수 있다. 또한 박무 발생일의 지속된 안정 대기상태는 청정일(08:00 LST)에 비해 늦어진 SO<sub>2</sub>와 NO<sub>2</sub>의 일최고농도 발생시간(10:00 LST)과 관련된 것으로 보인다. 즉 박무 발생시, 국지적으로 강화된 대기정체 상태에서 대기 중 증가된 수증기와 응결핵 역할을 하는 대기오염물질(특히, NO<sub>2</sub>와 PM<sub>10</sub> 관련 물질)이 시

정 감소에 일부 기여한 것으로 볼 수 있다. 반면, O<sub>3</sub>은 박무 발생일보다 청정일에 더 높은 평균 농도를 가짐에 따라, 박무 발생시 시정 감소 영향과의 관련이 낮은 오염물질이다.

박무 발생시 시간별 시정 변화와 대기오염물질(SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, PM<sub>10</sub>, O<sub>3</sub>) 농도와의 관계를 보기 위해, 주요 발생시간대의 시간별 시정값에 대한 각 오염물질별 농도의 분포를 나타내었다(Fig. 8). 박무 발생일은 두 변수 간의 상관관계를 나타내는 r의 값이 오염물질 모두에 대해 0.5 미만이며, 오염물질의 농도 증가에 따른 시정 감소의 분포 관계를 나타내는 음(-)의 상관역시 나타나지 않아(단, O<sub>3</sub> 제외), 박무 발생시 감소된 시정은 오염물질의 농도 증가와 직접적 관계를 가지지 않는 것으로 나타났다.

### 3.2.2. 연무 발생일

연무 발생일의 종관 기상조건을 살펴보면(Fig. 4), 연무는 시베리아 기단으로부터 발달되어 중국대륙 상공에 중심을 둔 한랭건조한 대륙성 고기압의 영향하에서 빈번히 발생하였다. 또는 한반도 남쪽 해상을 통과하는 이동성 고기압 조건에서 발생되었으며, 두 고기압 조건 모두 한반도로부터 동쪽에 중심을 둔 저기압의 발달로 한반도 상공에서 정체되는 경향을 가졌다. 연무 대표사례일의 일기도(2008년 12월 19일 00:00 UTC)에서 한반도 상공의 고기압은 시베리아 기단으로부터 발달되어 분리된 고기압으로, 대상지역은 발생 이전일부터 발생 이후까지 장시간 고기압 영향하에 있었다. 즉, 대상지역 내 연무는 정체성 고기압하의 건조하고 맑은 날씨와 약한 풍속의 종관기상조건에서 빈번히 발생됨을 알 수 있다. 서울을 포함한 대도시의 연무현상(1998~2002년) 역시 정체성 고기압 영향하에서 하층대기가 안정하고 지표 풍속이 약한 경우 발생됨을 밝힌 바 있다(Chun 등, 2003; Jo와 Kim, 2010, 2011; Lim 등, 2004).

국지 기상요소 변화를 보면(Fig. 5), 연무는 박무 발생시와 비교해 전날 최고평균기온은 유사하나 야간 및 주요 발생시간대의 기온 감소가 뚜렷하다(최고차: -2.7 °C, 청정일과 비교시에는 -4.0 °C). 즉, 연무는 평균적으로 전날 오후와의 큰 기온 일교차와 보다 한랭한 기온조건하에서 발생되었다. 일반적으로 맑은 날 야간의 기온 감소는 상대습도 증가를 동반함에 따라,

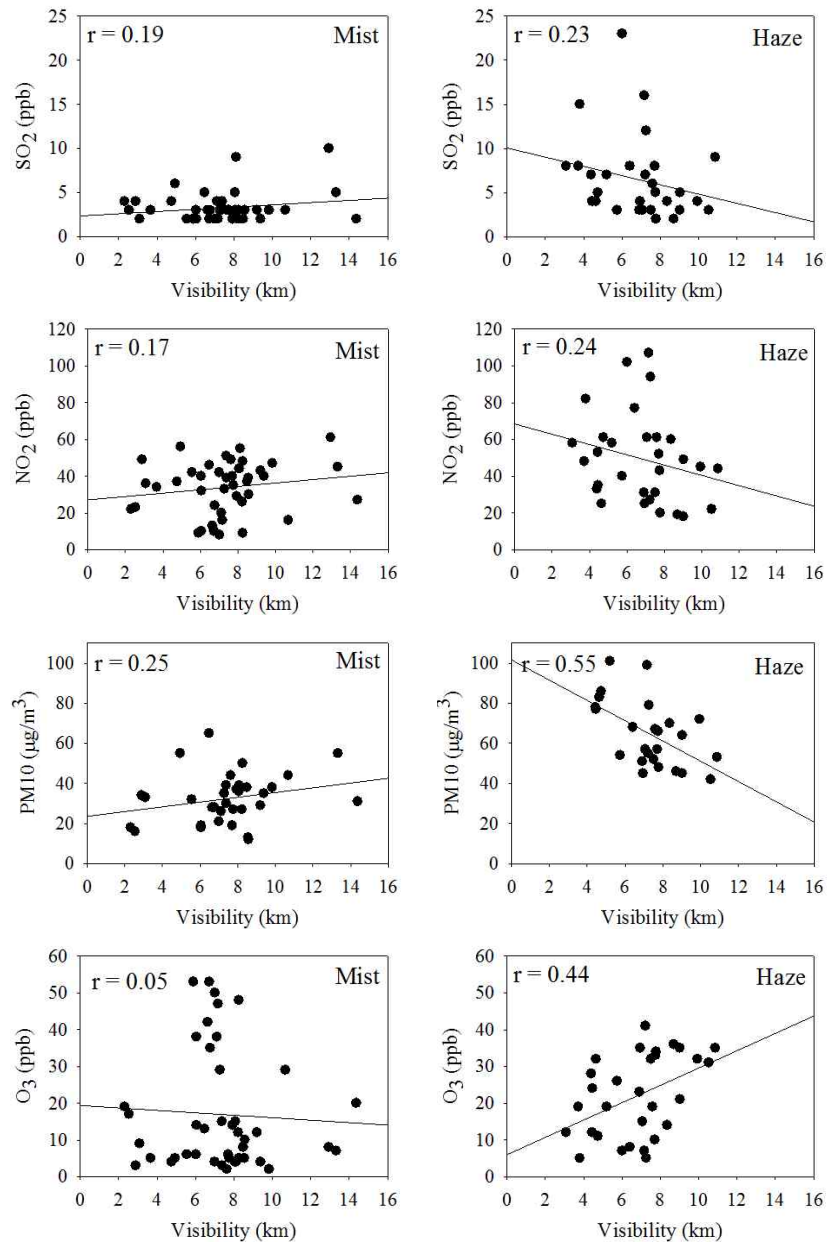
전날 일몰 이후부터 주요 발생시간대까지 점차 증가된 상대습도는 해당시간의 기온 감소와 관련된 것으로 볼 수 있다. 그러나, 연무 발생시 저온에서의 상대습도 평균은 60% 이하로 오히려 박무 발생일에 비해 건조상태임을 알 수 있으며, 박무 발생일에 비해 건조한 대기상태는 전날 오후부터 지속되었다(전일 최저 상대습도 24.7%). 한편, 연무 발생일의 주요 발생시간대에 증가된 상대습도, 즉 대기 중 증가된 수증기는 연무 발생시의 시정 감소와 관련될 수 있음을 보여준다. 연무는 또한 청정일 및 박무 발생일과 비교시 전날 오후부터 발생시까지 보다 약한 평균풍속에서 발생되었다. 연무 발생 전일의 오후 최대평균풍속은 3 m/s 이하(2.7 m/s, 박무 발생일 3.3 m/s, 청정일 3.6 m/s)이며, 야간 및 주요 발생시간대에는 평균 1.5 m/s 이하에서 풍속변화를 가진다. 약한 풍속조건하에서 연무는 박무 발생일보다 강한 역전층(지표역전층) 내에서 발생되었으며, 박무 발생시와 유사하게 청정일보다 지표역전층 소멸시간이 한 시간 가량 지체되었다. 풍향은 박무 발생일과 유사한 변화 경향을 가졌으며, 약한 풍속으로 인해 연무 발생과 관련된 풍향영향은 미비할 것으로 예상되었다(결과그림 미제시). 즉, 본 대상지역 내 발생된 연무는 청정일 및 박무 발생일과 비교시 한랭건조하고 약한 풍속조건이 전날부터 지속되었고, 지표복사를 흡수하여 온실효과를 가지는 대기 중 수증기량의 감소는 야간의 지표 복사냉각을 보다 발달 시킴에 따라, 강한 지표역전층 내의 상대적으로 건조하고 약한 풍속 조건하에서 연무가 발생되었다.

Fig. 6을 통해 확인할 수 있듯이, 연무는 박무보다 저온에서의 발생빈도가 높고, 온난대기조건에서의 발생빈도가 낮다. 또한 박무보다 건조상태에서의 빈도가 높다(60% 미만 상대습도: 박무 1.1%, 연무 51.0%, 80~90% 상대습도: 박무 38.9%, 연무 2.2%). 연무는 3 m/s 이하의 풍속조건에서 다수 발생하였으며(95.3%), 10 m 기온이 2 m 기온보다 높은 역전층에서의 빈도가 지배적이고(92.2%), 1 °C 이상의 기온차를 가지는 강한 역전층 조건에서의 발생빈도가 박무(37.9%)에 비해 높다(56.6%). 즉, 연무는 박무 발생시보다 국지적으로 대기 중 수증기량은 적으나 보다 한랭하고 강한 역전층 내에서 빈번히 발생되었음을 확인할 수 있다.

연무 발생일의 대기 중 오염물질농도 변화를 보면,

박무 발생일과 유사하게 O<sub>3</sub>을 제외한 SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, 그리고 PM<sub>10</sub> 농도가 청정일에 비해 전날 오후부터 지속적으로 높으며, 특히 주요 발생시간대에 농도수준이 크게 증가하였다(Fig. 7). 그러나, 연무 발생일과 박무 발생일 비교시, 전날 오후의 SO<sub>2</sub>와 NO<sub>2</sub> 최고농도 수준은 큰 차이가 없으며, PM<sub>10</sub>은 오히려 연무 발생일에 더 낮은 최고농도를 가졌다. 즉, 전날 오후의 대기오염 농도 증가는 박무와 연무의 두 발생일 차이와 관련이 낮은 것으로 볼 수 있다. 그러나, 주요 발생시간대의 농도변화를 비교하면 연무 발생일은 청정일(그리고 박무 발생일)에 비해, NO<sub>2</sub> 농도는 19.4~35.6 ppb (-0.8~10.4 ppb), PM<sub>10</sub> 농도는 6.0~25.1 µg/m<sup>3</sup> (2.3~10.9 µg/m<sup>3</sup>), SO<sub>2</sub> 농도는 1.4~7.1 ppb (1.0~5.1 ppb) 증가되어, 세 오염물질 모두 연무 발생시 큰 폭의 농도 증가를 보였으며, 특히 NO<sub>2</sub>와 PM<sub>10</sub>의 농도 증가 폭이 SO<sub>2</sub>에 비해 크다. 이는 일반적으로 연무가 황산화물 및 질소산화물의 농도 증가와 관련된다는 선행 연구 결과와 다소 차이를 가지며(Kim, 1992), 인근 부산지역 연무 발생시 지역 내 일 최고 O<sub>3</sub> 농도가 함께 증가한다는 결과와도 차이를 가진다(Jo와 Kim, 2010, 2011). 즉 대상지역 연무는 강한 역전층 조건하에서 상대습도 증가보다 지역 내 다수의 차량이동 등에 의한 주요 배출오염물질들(NO<sub>2</sub>와 PM<sub>10</sub>)의 농도 증가에 의한 시정악화 영향이 크며, 청정일보다 낮은 평균 오존농도의 시간별 분포는 광화학 스모그에 의한 연무 현상과는 관련이 낮은 것으로 설명된다. 반면, 주요 발생시간대에 증가 경향을 나타낸 상대습도 분포는 대기 중 수분과 오염물질의 상호작용에 의한 시정 감소 영향 또한 생각해 볼 수 있게 한다.

연무 발생시 주요 발생시간대의 시간별 시정값에 대한 각 오염물질의 농도분포를 보면(Fig. 8), 박무 발생일과 다르게 O<sub>3</sub>을 제외한 SO<sub>2</sub>와 NO<sub>2</sub>, 그리고 PM<sub>10</sub>의 농도가 증가할수록 시정이 감소하는 음(-)의 상관분포를 가진다. 특히 PM<sub>10</sub>의 경우 r값이 0.5 이상으로 농도와 시정 간의 관계가 유의한 수준에 있는 것으로 확인되었다. 이와 함께, 연무 발생시 NO<sub>2</sub>와 PM<sub>10</sub>은 박무 발생시보다 높은 농도값이 빈번하였던 것으로 나타났다. 즉, 대상지역 내 연무 발생시 시정 감소는 O<sub>3</sub>을 제외한 세 오염물질의 농도 증가와 관련됨을 확인할 수 있으며, 특히 지역 내 PM<sub>10</sub> (그리고 NO<sub>2</sub>)의



**Fig. 8.** Scatter plots of hourly visibility and air pollutant (SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, PM<sub>10</sub>, and O<sub>3</sub>) concentrations from 05:00 to 09:00 LST on the selected misty (12 days) and hazy days (11 days) based on the observed data by the visibility meter during 18 March-30 April 2009, in Yangsan.

농도 증가가 시정 감소와 직접적으로 관련되어 있음을 보여준다.

#### 4. 결론

본 연구는 시정악화를 유발하는 기상 및 대기오염 배출조건을 복합적으로 가진 내륙 계곡분지에 위치한 도시에서의 시정악화 발생현황을 파악하고, 주요 시정악화 현상별 지표부근 기상요소 및 대기오염물질 농도의 변화차이 분석을 통해 국지적 시정악화의 발생원인을 살펴보고자 한 것이다. 이러한 분석은 한후기(11월-4월) 시정악화 현상이 일출 이전(05:00 LST)부터 일출 이후(09:00 LST)까지 지속적이며 빈번하게 나타나는 양산시를 대상으로 시정(목측 및 시정계 자료)을 포함한 기상 및 대기질 관측자료를 이용하여 수행되었다. 대상지역은 인근 연안에 위치한 대도시 부산에 비해 시정악화 발생빈도가 확연히 높았으며(총 자료획득일의 50% 발생), 양산 지역 내 시정악화일의 90%를 차지하는 박무(39%)와 연무 발생일(37%), 또는 혼합일(14%)이 보다 높은 빈도를 가짐에 따라, 국지적 기상 및 대기오염배출 조건이 이러한 차이를 유도한 것으로 볼 수 있다.

지역 내 박무는 대체로 한랭습윤한 중관기류 조건에서 야간 및 일출 후까지 지속된 지표역전층 내 높은 상대습도 조건에서 발생됨을 확인하였다. 즉, 야간의 계곡 내 지표복사냉각 강화가 지표역전층 지속과 관련되며, 양산천 및 낙동강, 그리고 주변 식생으로부터의 국지적 수증기 유입 증가와 약한 풍속으로 인한 지표역전층 내 수증기 정체는 국지적 박무 발생 증가의 요인으로 볼 수 있다. 또한 박무 발생시 주요 발생시간대의 NO<sub>2</sub> (최고 +25 ppb), PM<sub>10</sub> (최고 +14 μg/m<sup>3</sup>), 그리고 SO<sub>2</sub> (최고 +3 ppb)의 평균농도가 청정일에 비해 증가되었으나, 이들 오염물질의 농도 증가는 박무에 의한 국지적 시정 감소와 유의한 관계를 가지지 않은 것으로 나타났다.

연무 발생은 대체로 정체성 고기압 영향하에 청정일 및 박무 발생일에 비해 한랭건조한 국지적 대기상태가 전날부터 지속되었다. 연무 발생일의 야간 지표복사냉각은 박무 발생일보다 강화되어 더 발달된 지표역전층을 가졌으나, 지표역전층 내 상대습도는 보

다 낮은 조건임을 확인하였다. 지표역전층 내 약한 풍속은 국지배출된 대기오염물질의 확산 및 수송을 약화시켜, 주요 발생시간대의 NO<sub>2</sub> (최고 +36 ppb), PM<sub>10</sub> (최고 +25 μg/m<sup>3</sup>), 그리고 SO<sub>2</sub> (최고 +7 ppb) 농도가 청정일에 비해 크게 증가하여 박무 발생일보다 1.4~2.3배 증가된 값을 가졌다. 이와 함께 연무 발생시에는 대기 중 오염물질(O<sub>3</sub> 제외) 농도가 증가할수록 시정이 감소되는 경향의 분포가 뚜렷하며, 특히, PM<sub>10</sub>의 농도 증가가 연무의 시정 감소와 유의한 관계를 가지는 것으로 나타났다. 즉, 연무 발생시 시정 감소는 지표역전층 내 수증기량 증가보다 계곡 내 밀집된 오염원으로부터 배출된 국지적 대기오염물질 농도 증가와 밀접함을 보였다. 한편, 광화학 스모그의 유발물질인 O<sub>3</sub>은 연무(및 박무) 발생일의 농도가 청정일에 비해 낮은 수준에 있어 대상지역의 국지적 시정 감소에 미치는 영향이 작은 것으로 보여진다. 이는 황산염 및 질산염에 의한 시정 감소 영향이 크다는 선행 연구결과 및 인근 대도시 부산의 연무 발생시 대기오염조건과 차이를 가지는 것으로 확인되었다. 또한 청정일에 비해 일출 후에도 지속된 박무와 연무 발생일의 지표역전층은 오염물질의 국지적 축적을 돕고, 확산 및 수송을 약화시키게 되어 주요 발생시간대 이후에 나타나는 오염물질들의 일최고농도 발생시간의 지연을 동반하였다.

결론적으로, 내륙 계곡 내 위치한 도시는 지형 특성에 따른 국지 기상 및 대기오염물질배출 조건이 지역 내 시정악화 현상(특히, 박무 및 연무)의 발생 빈도 및 특성과 밀접한 관계를 가지며, 시정악화시 발달된 지표역전층 등의 기상조건은 발생 이후의 대기오염물질 농도변화와도 유관함을 확인하였다. 그러나 시정악화의 보다 근원적 발생원인을 파악하기 위해서는 향후 대기 중 에어로솔의 물리·화학적 변화특성에 관한 상세연구가 병행되어야 할 것으로 사료된다.

#### 감사의 글

이 연구는 기상청 기상지진기술개발사업(CATER\_2012-6140)의 지원으로 수행되었습니다.

## 참고 문헌

- Anquetin, S., Guilbaud, C., Chollet, J. P., 1999, Thermal valley inversion impact on the dispersion of a passive pollutant in a complex mountainous area, *Atmos. Environ.*, 33, 3953-3959.
- Bader, D., McKee, T. B., 1992, Mesoscale boundary-layer evolution over complex terrain. part II: Factors controlling nocturnal boundary-layer structure, *Mon. Weather Rev.*, 120(5), 802-816.
- Barr, S., Orgill, M. M., 1989, Influence of external meteorology on nocturnal valley drainage winds, *J. Appl. Meteorol.*, 28(6), 497-517.
- Choi, H., Kim, J. W., Takahashi, S., 1998, Three-dimensional numerical prediction of fog formation over coastal complex terrain, *J. of Korean Meteor. Soc.*, 34(2), 319-335.
- Chun, Y., Lim, J. Y., Choi, B. C., 2003, The features of aerosol in Seoul by Asian dust and haze during springtime from 1998 to 2002, *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, 39(4), 459-474.
- Chung, Y. S., Kim, T. K., Chung, J. S., 1992, On relationship of low visibility to air pollution in cities, *J. Korean Soc. Atmos. Environ.*, 8(1), 1-6.
- Chung, Y. S., 1997, On the observations of visibility impairment in the Chongju-Chongwon area, *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, 33(4), 595-608.
- Corsmeier, U., Kossmann, M., Kalthoff, N., Sturman, A., 2006, Temporal evolution of winter smog within a nocturnal boundary layer at Christchurch, New Zealand, *Meteorol. Atmos. Phys.*, 91, 129-148.
- Goo, T. Y., Hong, G. M., Kim, S. B., Gong, J. U., Kim, M. S., 2008, A case study of aerosol features of Asian dust, fog, clear sky, and cloud at Anmyeon Island in April 2006, *Atmosphere*, 18(2), 97-109.
- Heo, K. Y., Ha, K. J., 2004, Classification of synoptic pattern associated with coastal fog around the Korean peninsula, *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, 40(5), 541-556.
- Jhun, J. G., Lee, E. J., Ryu, S. A., Yoo, S. H., 1998, Characteristics of regional fog occurrence and its relation to concentration of air pollutants in South Korea, *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, 34(3), 486-496.
- Jo, H. Y., Kim, C. H., 2010, Characteristics of East Asia synoptic meteorological conditions in association with haze phenomena, *Atmosphere*, 20(2), 161-172.
- Jo, H. Y., Kim, C. H., 2011, Characteristics of air quality over Korean urban area due to the long-range transport haze events, *J. Korean Soc. Atmos. Environ.*, 27(1), 73-86.
- Kim, G. S., 1992, *Encyclopedia of meteorology*, Hyangmunsa, 735pp.
- Korea Expressway Corporation, 2011, <http://www.ex.co.kr/portal/index.jsp>.
- Korea Meteorological Administration (KMA), 2002, *Training guide in surface weather observations*, KMA, 121-150pp.
- Lee, C., Chang, K. H., Cha, J. W., Jung, J. W., Jeong, J. Y., Yang, H. Y., Seo, S. K., Bae J. Y., Kang, S. Y., Choi, Y. J., Cho, H., Choi, C. Y., 2010, Estimation for the economic benefit of weather modification (Precipitation enhancement and fog dissipation), *Atmosphere*, 20(2), 187-194.
- Lee, Y. O., Chung, Y. S., 1994a, On the low visibility and air pollution observed in Taegu: I. Low visibility, *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, 30(1), 21-26.
- Lee, Y. O., Chung, Y. S., 1994b, On the low visibility and air pollution observed in Taegu: II. Air pollution, *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, 30(1), 27-34.
- Leem, H. H., Lee H. W., Lee S. H., 2005, The analysis of the characteristics of the fog generated at the Incheon Int'l airport, *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, 41(6), 1111-1123.
- Lim, J. Y., Chun, Y., Cho, K. M., Lee, S. S., Shin, H. J., 2004, The meteorological, physical, and chemical characteristics of aerosol during haze event in May 2003, *J. Korean Soc. Atmos. Environ.*, 20(5), 697-711.
- Lutgens, F. K., Tarbuck, E. J., 2007, *The atmosphere : an introduction to meteorology*, 10th ed. Pearson Prentice Hall, 520pp.
- Min, K. D., 1976, A study on the occurrences of fog along the Seoul-Busan express way, *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, 12(1), 14-24.
- Oh, H. S., Yoon, S. C., 1996, Characteristics of air pollutions and meteorological fields affecting the visibility impairment in Seoul, *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, 32(1), 131-138.
- Oh, I. B., Kim, Y. K., 2002, Surface ozone in the major cities of Korea : Trends, diurnal and seasonal variations, and horizontal distributions, *J. Korean*

- Soc. Atmos. Environ., 18(4), 253-264.
- Savov, P. B., Skakalova, T. S., Kolev, I. N., 2002, Lidar investigation of the temporal and spatial distribution of atmospheric aerosols in mountain valleys, *J. Appl. Meteorol.*, 41, 528-541.
- Seo, E. J., Lee, H. J., Seo, J. W., Nam, J. C., 2002, A survey on characteristics of fog at Yangyang international airport, *Atmosphere*, 12(1), 512-515.
- Seo, J. W., Nam, J. C., Kim, Y. C., 2001, Characteristics of fog events occurred in Yeongjongdo, *Atmosphere*, 11(1), 300-303.
- Whiteman, C. D., 2000, *Mountain Meteorology - Fundamentals and applications*, New York Oxford, Oxford University Press, 221-236pp.
- Yongsan city, 2009, A study on characteristics of air pollution and atmospheric environment improvement program in Yongsan, Yongsan, 363pp.
- Yoon, M. B., Chung, Y. S., 1995, Characteristics of fog and mist observed in the rural area of Chongju and Chongwon, *J. Korean Soc. Atmos. Environ.*, 12(1), 15-21.