



논문

## 북한 시정의 시공간적 특성

# Temporal and Spatial Characteristics of Visibility in North Korea

여민주, 서지훈<sup>1)</sup>, 김용표<sup>2),\*</sup>

이화여자대학교 환경공학과, <sup>1)</sup>한국과학기술연구원 환경복지연구센터,

<sup>2)</sup>이화여자대학교 화학신소재공학과

Min Ju Yeo, Jihoon Seo<sup>1)</sup>, Yong Pyo Kim<sup>2),\*</sup>

Department of Environmental Science and Engineering, Ewha Womans University,  
 Seoul, Republic of Korea

<sup>1)</sup>Center for Environment, Health and Welfare Research, Korea Institute of Science and Technology,  
 Seoul, Republic of Korea

<sup>2)</sup>Department of Chemical Engineering & Materials Science, Ewha Womans University,  
 Seoul, Republic of Korea

접수일 2019년 8월 29일  
 수정일 2019년 10월 9일  
 채택일 2019년 10월 29일

Received 29 August 2019  
 Revised 9 October 2019  
 Accepted 29 October 2019

\*Corresponding author  
 Tel : +82-(0)2-3277-2832  
 E-mail : yong@ewha.ac.kr

**Abstract** Temporal and spatial trends of the visibility in North Korea (NK) were studied to further understand the air quality in NK. The data from 27 observation stations in NK sent through the Global Telecommunication Service (GTS) of the World Meteorological Organization (WMO) were used. These stations are classified into five groups based on the visibility characteristics. Other parameters such as relative humidity, wind speed, temperature, and the annual average PM<sub>2.5</sub> concentration were also used to characterize the visibility data. Generally, the visibility of NK has increased over the last 40 years. The visibility of NK was low in summer and morning and high in winter and afternoon, respectively. It is mainly due to weather conditions, visibility tends to be low in conditions with high relative humidity and low wind speed. However, it is difficult to explain the reasons why the visibility in summer afternoon was higher than winter afternoon. There were regional differences. For example, Pyongyang group only showed decreasing trend and Chagang group showed very low visibility. Differences in the weather conditions, air pollution level, and other factors such as change of observation method might give effects on the regional difference. And further study directions are suggested shortly.

**Key words:** Long-term trend, PM<sub>2.5</sub> concentration, Regional characteristic, Weather conditions

### 1. 서론

최근 국내에서 북한 대기질에 대한 관심과 연구 (Kim and Kim, 2019; Yeo and Kim, 2019b; Bae *et al.*, 2018; Yeo and Kim, 2018; Kim *et al.*, 2014; Kim *et al.*, 2013)가 증가하고 있다. 남북환경협력을 준비하는 목적도 있지만, 최근 우리나라에서 미세먼지 문제에 대한 관심이 높아지는 가운데 북한에서 배출된 대기오염물질이 우리나라 대기질에 영향을 줄 수 있다는 점이 북한 대기질에 대한 관심을 높이는 것으로 판단된다.

이전에는 북한 자료의 제한으로 인해 북한 외부에서 간접적으로 북한 대기질을 추정하는 연구가 주로 진행되었으며, 최근에는 위성과 수치모형을 이용한 대기질 자료가 생성되고 있어 북한 대기질에 대한 이해가 높아지고 있다 (Yeo and Kim, 2019b). 하지만 북한 현지에서 직접 측정된 대기질 자료가 없다는 점은 여전히 북한 대기질 연구의 한계로 작용하고 있다.

이러한 한계를 극복하기 위해 본 연구에서는 북한이 세계기상기구 (World Meteorological Organization, WMO)의 기상통신망 (Global Telecommunication Service, GTS)을 통해 제공한 총 27개 북한 현지 관측지

점의 기상관측자료 (KMA, 2019b) 중 시정과 상대습도, 풍속, 기온 등의 기상변수를 함께 분석하여 북한 대기질에 대한 이해를 높이고자 하였다.

시정은 수평 방향의 대기 혼탁 정도를 가시거리로 표현한 것으로, 일반인들이 대기오염을 체감하는 지표의 하나이며, 대기질을 반영하는 대리지표로 간주할 수 있다. 우리나라에서는 1990년대와 2000년대 초반에 우리나라 시정의 시·공간적인 분포와 특성, 시정 장애 현상과 원인을 파악하는 연구가 많이 수행되었으며 (Ghim *et al.*, 2005; Baik *et al.*, 1996; Lee *et al.*, 1995; Park *et al.*, 1994), 최근에는 시정과 미세먼지의 상관성을 이용해 미세먼지 농도의 장기 추이를 추정하려는 연구가 수행되었다 (Lee and Kwak, 2018).

시정은 기본적으로 대기 중 기체와 입자에 의해 영향을 받지만, 입자의 생성 및 성장과 물리·화학적 특성, 대기 중 적체 또는 확산을 유발하는 다양한 기상

조건의 영향을 함께 받는다. 따라서 각각 다른 지역의 시정 추이와 특성을 다양한 기상변수와 함께 분석하여 파악하는 것은 북한의 대기오염물질 시·공간적인 분포 이해에 중요하다.

본 연구에서는 북한의 (1) 시정 추이와 공간적 특성, (2) 상대습도, 풍속, 기온의 일변화 및 연변화와 공간적 특성, (3) 시정과 상대습도, 풍속, 기온, 연평균 PM<sub>2.5</sub> 농도와의 상관관계를 파악해 보았다.

## 2. 연구자료와 방법

### 2.1 자료

본 연구에서 사용한 북한의 시정 자료는 우리나라 기상청에서 제공하는 것 (KMA, 2019b)으로 북한이 세계기상기구의 기상통신망을 통해 보낸 27개 관측

**Table 1.** List of stations in North Korea (KMA, 2019b) and allocated group in this study.

Station	Group	Latitude	Longitude	Height above sea level (m)		
003	Hamgyong-bukto	Senbong	Clean area	42.32	130.40	3
005	Yanggang-do	Samjiyon	Clean area	41.82	128.32	1386
008	Hamgyong-bukto	Chongjin	Industrial area	41.78	129.82	43
014	Chagang-do	Chunggang	Chagang area	41.78	126.88	332
016	Yanggang-do	Hyesan	Clean area	41.40	128.17	714
020	Chagang-do	Kanggye	Chagang area	40.97	126.60	306
022	Yanggang-do	Pungsan	Clean area	40.82	128.15	1206
025	Hamgyong-bukto	Kimchaek	Industrial area	40.67	129.20	23
028	P'yongan-bukto	Supung	Industrial area	40.45	124.93	83
031	Hamgyong-namdo	Changjin	Clean area	40.37	127.25	1081
035	P'yongan-bukto	Sinuiju	Industrial area	40.10	124.38	7
037	P'yongan-bukto	Kusong	Industrial area	39.98	125.25	99
039	Chagang-do	Huichon	Chagang area	40.17	126.25	155
041	Hamgyong-namdo	Hamheung	Industrial area	39.93	127.55	38
046	Hamgyong-namdo	Sinpo	Clean area	40.03	128.18	19
050	P'yongan-namdo	Anju	Others	39.62	125.65	27
052	P'yongan-namdo	Yangdok	Clean area	39.17	126.83	279
055	Kangwon-do	Wonsan	Industrial area	39.18	127.43	36
058	P'yongan-namdo	Pyongyang	Pyongyang area	39.03	125.78	38
060	P'yongan-namdo	Nampo	Pyongyang area	38.72	125.37	47
061	Kangwon-do	Changjon	Clean area	38.73	128.18	35
065	Hwanghae-bukto	Sariwon	Pyongyang area	38.52	125.77	52
067	Hwanghae-bukto	Singye	Pyongyang area	38.50	126.53	100
068	Hwanghae-namdo	Ryongyon	Pyongyang area	38.20	124.88	5
069	Hwanghae-namdo	Haeju	Others	38.03	125.70	81
070	Hwanghae-bukto	Kaesong	Others	37.97	126.57	70
075	Kangwon-do	Pyongyang	Others	38.40	127.30	371

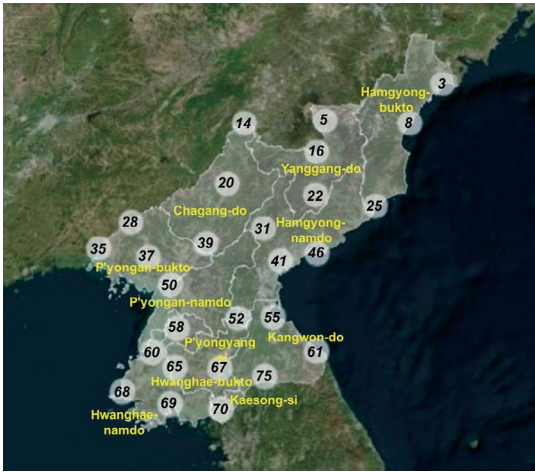


Fig. 1. Location of stations based on Latitude and Longitude in North Korea.

지점의 지상관측자료이다. 해당 지상관측자료는 시정과 함께 기온, 12시간 누적 강수량, 풍향, 풍속, 해면기압, 상대습도, 전운량 등의 변수를 포함하고 있으며, 요소별로 차이가 있지만 1973년부터 3시간 단위로 제공된다.

이들 기상변수 중 시정은 1974년부터 1980년까지는 13개 관측지점에서, 1981년부터는 모든 관측지점에서 측정되었으며, 본 연구에서는 북한 시정의 공간적 특성 파악을 위해 전체 27개 관측지점에서의 자료가 제공되는 1981년부터 2018년까지의 자료를 활용하였다. 본 연구에서 사용한 북한의 기상관측 지점(KMA, 2019b)은 표 1 및 그림 1과 같다.

그림 1에서 확인할 수 있듯이 북한의 27개 관측지점은 북한 전역에 고루 분포되어 있다. 함경남·북도, 자강도, 양강도, 평안북도, 황해북도(개성 포함), 강원도에 각각 3개 지점이 있고, 평안남도(평양 포함)에 4개, 황해남도에 2개 지점이 있다. 지점별 일련번호와 위치에 대한 정보는 표 1에 정리하였다.

본 연구에서 시정과 비교를 위해 사용한 북한  $PM_{2.5}$  농도는 Yeo and Kim (2019b)과 동일하게 OECD (2018)에서 제공하는 것으로 세계질병부담(Global Burden of Disease, GBD) 2017 프로젝트(IHME, 2018)

에서 추정(Shaddick *et al.*, 2018)한 결과이다.

## 2.2 방법

본 연구에서는 선행 연구의 방법(Ghim *et al.*, 2005)에 따라 강수일의 시정을 분석대상에서 제외하였다. 강수는 현상 자체로 심각한 시정 장애를 일으킬 뿐만 아니라, 강수에 수반되는 높은 상대습도가 안개를 발생시키는 등 대기오염 현상이 아닌 대기 물현상으로 인한 시정 저하를 유발할 수 있다. 강수량이 매우 적다 할지라도 상대습도, 풍속 등 강수 전·후의 기상변화가 시정에 미치는 영향은 적지 않으므로(Ghim *et al.*, 2005), 본 연구에서는 하루 중 어느 시간이라도 강수량이 0 mm 이상인 날은 모두 강수일로 보고 분석에서 제외하였다.

북한 시정의 현황과 추이를 이해하고, 이에 기상요소가 미치는 영향을 파악하기 위하여 상대습도, 풍속, 기온 등 기상변수의 추이와 각 기상변수와 시정의 상관성을 함께 살펴보았다. 시정과 기상변수의 상관성을 논의한 이유는 각 기상변수가 대기 중 입자의 크기분포, 화학성분, 수분함량 등의 물리·화학적 특성에 영향을 주고(Seinfeld and Pandis, 2016) 결과적으로 시정에 영향을 미칠 수 있기 때문이다. 연구에서 사용한 북한의 상대습도, 풍속, 기온은 시정과 동일한 관측지점 및 기간의 자료를 사용하였으며, 시정과 마찬가지로 강수일의 자료는 분석에서 제외하였다.

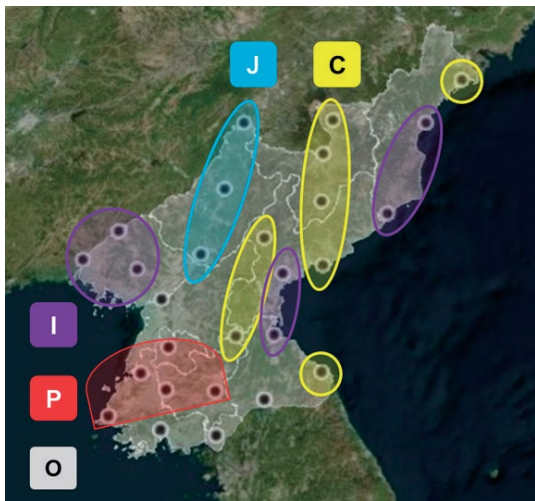
본 연구에서는 북한 시정의 시간적 특성을 파악하기 위하여 연도별, 월별(또는 계절별), 시간별 평균 시정과 시정 구간별 빈도분율을 살펴보았다. 시정의 구간별 빈도분율은 구간을 설정하여 해당 구간마다 그 값 이상인 경우의 빈도수를 계산하고, 전체 유효 자료수에 대한 구간별 해당 빈도수로 각각 계산하였다. 시정 15 km까지는 3 km 구간마다 구간 값 이상인 경우의 빈도수를 계산하였고, 15 km를 초과하는 구간으로는 20, 25, 30, 40 km를 설정하여 각각의 값 이상인 경우의 빈도수를 계산하였다.

또한 북한의 시정 추이에 대한 기상요인의 영향을 살펴보기 위해 여름(6, 7, 8월)과 겨울(12, 1, 2월), 아

침(6시와 9시)과 오후(15시와 18시)와 같이 네 종류의 시간대로 나누어 살펴보았다. 우리나라 시정 변화에 대해서는 우리나라 일부 지역의 시정을 겨울 아침 시정과 여름 오후 시정, 평균으로 구분하여 살펴본 사례(Ghim *et al.*, 2005)가 있다. Ghim *et al.* (2005)에서는 겨울 아침 시정을 1차오염, 여름 오후 시정을 2차오염과 밀접한 것으로 판단하였다.

북한 시정의 공간적인 특성을 파악하기 위하여 북한의 27개 관측지점을 지점의 위치와 지역적인 특성, 지점별 시정(그림 S1) 특성에 따라 청정지역, 평양지역, 공업지역, 자강도, 기타의 5개 그룹으로 나누어 결과를 살펴보았다(그림 2). 자강도는 산간지역이므로 청정지역으로 고려할 수 있지만, 그림 S1에서 볼 수 있듯이 해당 지점에서 독특한 시정 특성이 나타나 별도의 그룹으로 구성하였다.

청정지역 그룹에는 동해안의 해안가 지역 중 공업지역에 해당하지 않는 3) 선봉, 46) 신포, 61) 장전과 산간지역인 5) 삼지연, 16) 해산, 22) 풍산, 31) 장진, 52) 양덕을, 평양지역 그룹에는 58) 평양, 60) 남포, 65) 사리원, 67) 신계, 68) 용연을, 공업지역 그룹에는 8) 청진, 25) 김책, 28) 수풍, 35) 신의주, 37) 구성, 41) 함흥,



**Fig. 2.** Grouping the stations in North Korea. C) Clean area in yellow, P) Pyongyang area in red, I) Industrial area in purple, J) Chagang area in blue, and O) Others.

55) 원산을, 자강도 그룹에는 14) 중강, 20) 강계, 39) 희천을, 기타 그룹으로는 50) 안주, 69) 해주, 70) 개성, 75) 평강을 선정하였다.

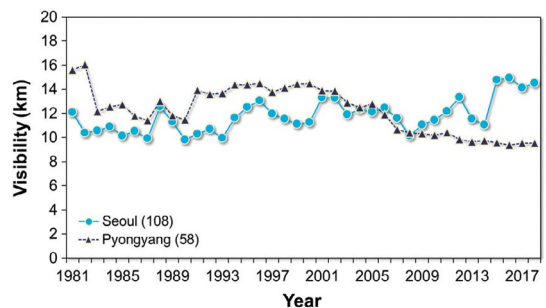
### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 북한 시정 추이

북한 시정 수준을 파악하기 위하여 서울과 평양의 시정을 그림 3과 같이 비교하였다. 지난 40여 년간 서울과 평양 시정은 두 도시 모두 10 km에서 15 km 사이로 비슷하였다. 하지만 서울은 1980년대 초반부터 시정이 전반적으로 증가하는 추이를 나타낸 반면, 평양은 1980년대 초반 시정이 급감하였다가 1980년대 후반 증가하고, 2000년부터 점차 감소하는 추이를 나타내어 상반되는 경향을 나타내었다.

북한 전역의 전반적인 시정 추이를 파악하기 위하여 전체 관측지점에 대해 평균한 시간대별 연평균 시정을 그림 4(a)에 나타내었다. 그림 4(a)에서 북한의 시간대별 연평균 시정은 1982~1983년 사이의 급감 및 2007~2008년 사이의 급증 구간을 제외한다면, 2000년대 초중반 감소 추이를 보이긴 했으나 전반적으로 증가하여 왔음을 알 수 있다.

1983년과 2008년의 불연속적인 연평균 시정 추이는 모든 시간대에서 동일하게 발생하였는데, 1983년에는 북한 전역에서, 2008년에는 북한 일부 지역에서 시정을 측정하는 방법에 변화가 있었기 때문에 추



**Fig. 3.** Annual trends of visibility in Seoul and Pyongyang between 1981 and 2018 (raw data: KMA, 2019a, b).

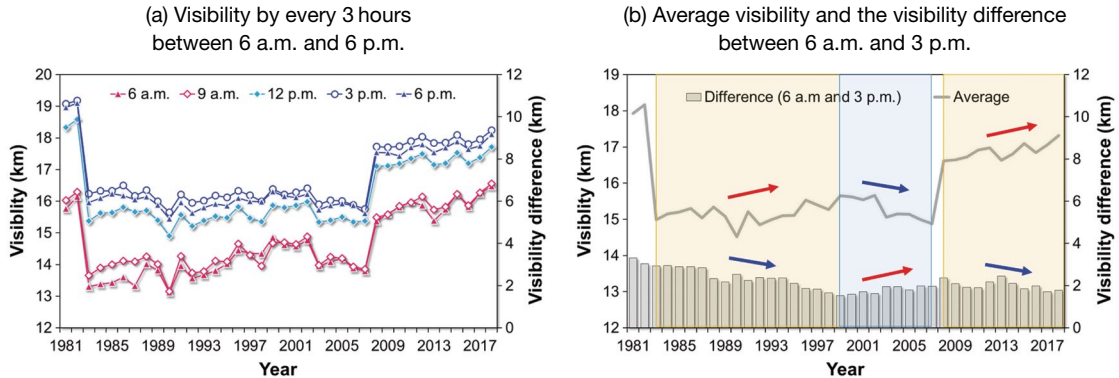


Fig. 4. Annual trends of the visibility by every 3 hours between 6 a.m. and 6 p.m. and the visibility difference between 6 a.m. and 3 p.m. in North Korea between 1981 and 2018 (raw data: KMA, 2019b).

측된다. 왜냐하면 그림 3을 보면 평양의 경우 2008년 급증 구간이 나타나지 않았고, 그림 5에서도 평양지역과 공업지역 그룹에서 2008년 급증 구간이 나타나지 않았기 때문이다. 또한, 우리나라 서울, 울산, 전주 추이(Yeo and Kim, 2019a)를 살펴보았을 때도 1983년과 2008년에 급변 구간이 나타나지 않았기 때문이다.

각 시간대별 시정은 오후 3시에 가장 높았고, 1997년부터 1999년까지는 오전 9시, 그 외의 기간에는 오전 6시에 가장 낮았다. 그림에는 나타나지 않았지만, 사람들이 주로 활동하는 시간대가 아닌 새벽 12시와 밤 9시의 시정은 시간대별 평균에 가까웠다.

그림 4(b)에서는 시정이 급감 및 급증한 1982~1983년, 2007~2008년을 제외한 기간 동안 연평균 시정과 시정이 가장 낮은 오전 6시와 높은 오후 3시의 시정 차이를 함께 살펴보았다. 시정이 증가한 1983~1999년, 2008~2018년, 시정이 감소한 1999~2007년 연평균 시정과 오전 6시와 오후 3시의 시정 차이를 선형회귀식으로 나타내면, 기울기가 시정은 각각 20.2, 51.8, -120.1 m/year이었고, 두 시간대의 시정 차이는 각각 -84.6, -40.6, 67.4 m/year로 연평균 시정이 증가하는 기간에는 감소하였고, 연간 평균 시정이 감소하는 기간에는 증가했다.

오전 6시와 오후 3시의 연평균 시정 차이는 1980년대 초반 약 3 km에서 1990년대 중반 이후 2 km 이하로 감소하였고, 2000년 이후 증감을 반복하여 2018년

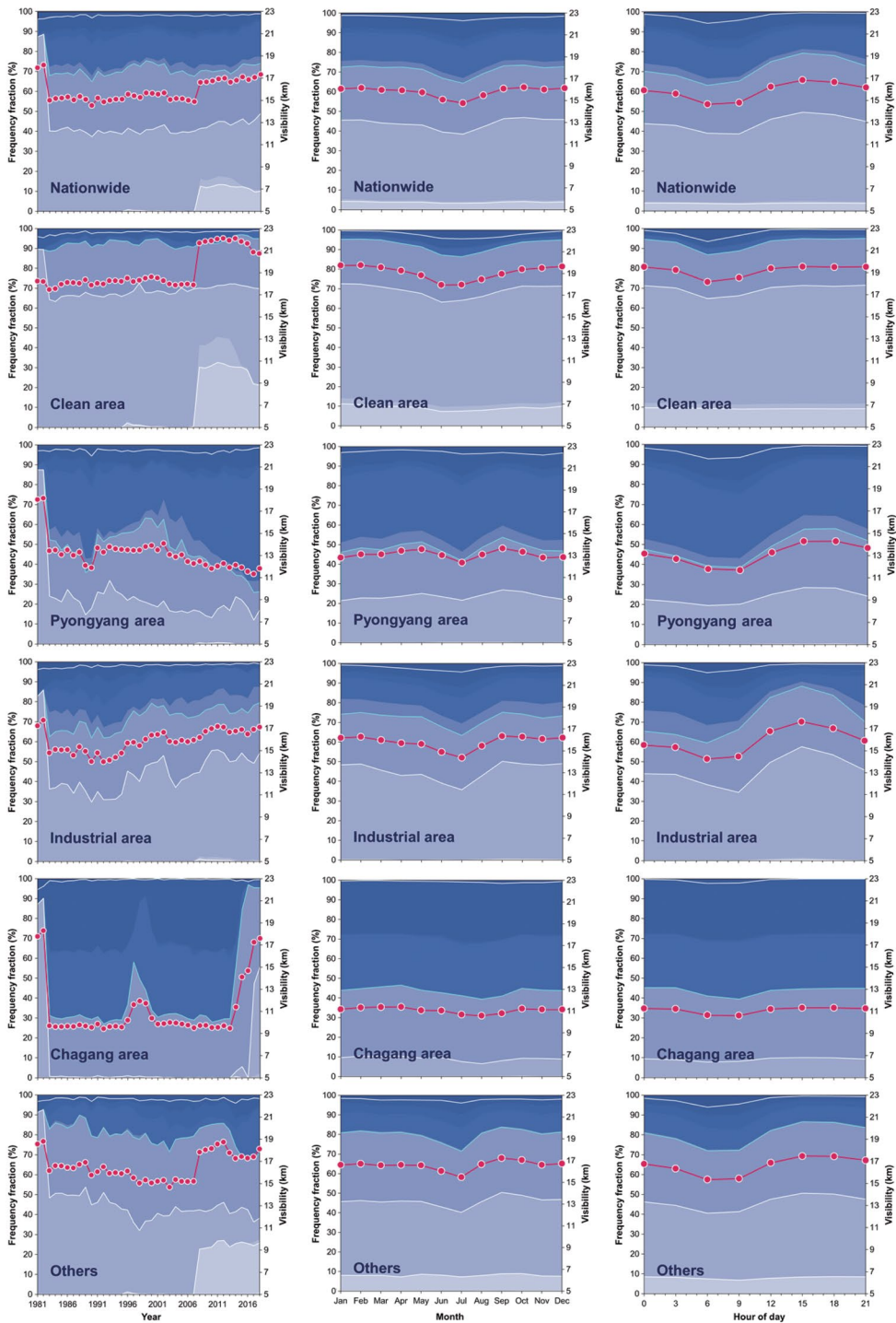
에는 약 1.8 km였다. 이는 시정의 증가 추세에서는 오후에 비해 오전 시정의 개선이, 시정의 감소 추세에서는 오후에 비해 오전 시정의 악화가 더 빠르게 이루어진 결과이다.

오전 6시의 시정은 안개 또는 대기오염물질의 1차 배출의 영향을 받을 가능성이 큰 반면, 오후 3시의 시정은 광화학반응에 의해 2차생성된 대기오염물질의 영향을 받을 가능성이 크다는 점에서 오전 시정의 개선과 악화가 오후에 비해 빠르게 이루어진 것은 북한의 시정이 기상조건과 대기오염물질의 직접배출에 더 크게 영향을 받는다는 것을 의미한다.

그림 5에서는 북한의 그룹별 평균 시정 추이를 연도별, 월별, 시간대별로 시정 구간별 빈도분율과 함께 나타내었다. 시정이 3, 20, 30 km 이상인 구간을 흰색, 15 km 이상인 구간을 연한 파란색 테두리로 선명하게 나타내었다. 그림 4에서 살펴본 것과 같이 북한의 전국평균 연도별 시정은 증가하는 추이를 나타내었고, 시간대별로는 오전 6시의 시정이 가장 낮았고, 오후 3시의 시정이 가장 높았다.

그룹별 추이에는 차이가 있었는데, 5개 그룹 가운데 청정지역 그룹의 평균 시정과 시정이 15 km 이상인 경우의 빈도분율이 90% 내외로 가장 높았다. 연도별 추이를 살펴보면, 평양지역 그룹이 기간 내 유일하게 지속적으로 감소 추이를 나타낸 것이 특징적이다.

본 연구 전체 대상 기간인 1981~2018년, 시정이 급



**Fig. 5.** Annual, monthly, hourly mean trends of visibility (bold line with circle markers in each figure) and frequency fraction by the visibility level (first, second, third, fourth bold lines for visibility:  $\geq 3$ ,  $\geq 15$ ,  $\geq 20$ , and  $\geq 30$  km) in North Korea between 1981 and 2018 (raw data: KMA, 2019b).

**Table 2.** Slopes of linear regression and total average of annual mean visibility by group and period in North Korea. Cases with the negative slopes are shaded (raw data: KMA, 2019b).

	Slopes (m/year)				Total average (km)			
	1981~2018	1983~2018	1983~2007	2008~2018	1981~2018	1983~2018	1983~2007	2008~2018
Nationwide	35.7	63.7	7.7	51.8	15.8	15.7	15.2	16.9
Clean area	116.9	128.3	12.1	-89.2	19.2	19.2	18.1	21.7
Pyongyang area	-83.7	-49.6	-4.9	-70.2	13.1	12.8	13.2	11.9
Industrial area	52.6	77.8	69.4	27.8	15.9	15.8	15.3	16.8
Chagang area	32.0	106.2	25.4	870.0	11.0	10.6	10.0	12.1
Others	21.8	46.4	-74.7	-67.4	16.6	16.4	15.8	17.9

감 및 급증한 1982~1983년, 2007~2008년을 고려하여 1983~2018년, 1983~2007년, 2008~2018년의 연평균 시정을 선형회귀식으로 나타내면, 동일한 지역 그룹이더라도 기간에 따라 기울기의 크기와 방향이 달라지는 것을 알 수 있다(표 2). 예를 들어, 청정지역 그룹은 2007년 이전까지와 전체 기간에는 기울기가 증가하여 시정이 증가하였지만, 2008년 이후에는 기울기가 감소하여 시정이 감소한 것을 알 수 있다.

그림 5와 표 2에서 평양의 시정은 기간과 상관없이 감소한 것을 알 수 있는데, 이는 평양을 비롯한 인근 지역의 시정을 악화시킬 수 있는 기상요인인 습도, 온도, 안개 발생빈도 등에 변화가 있었거나, 입자상 대기오염물질 농도가 증가하였기 때문으로 보인다. 평양지역 그룹은 북한에서 경제활동이 가장 활발한 지역이고, 석탄화력발전소 등 비교적 큰 규모의 대기오염물질 배출시설이 밀집해 있어 대기오염물질의 국지적인 배출이 북한 내 다른 지역에 비해 많을 뿐 아니라, 서해안에 가까워 중국 대기오염물질의 장거리 이동 영향도 상대적으로 크게 받았을 것으로 추정된다.

공업지역 그룹의 시정이 기간에 상관없이 지속적으로 증가하는 추이(그림 5, 표 2)를 나타내는 것도 특징적인데, 이 역시 기상학적 요인의 변화 또는 대기오염물질 농도 추이 변화에 의한 것으로 보인다. 대기오염물질 농도가 감소하였다면, 이는 북한에서 공업시설에서의 대기오염물질의 배출이 감소하였기 때문인 것으로 보이는데, 환경관리가 엄격해졌기 때문인 것은 아닐 것으로 보여 공업시설에서의 가동률 감소

가 원인으로 보인다.

평양지역 그룹은 시정이 15 km 미만인 경우의 빈도분율도 증가하였는데, 기타지역 그룹도 동일하였다(그림 5). 기타지역 그룹은 청정지역 그룹과 함께 2008년 시정이 30 km를 넘는 경우의 빈도분율이 급증하였는데, 이 때문에 두 그룹의 평균 시정도 그림 4에서 볼 수 있듯이 2008년 모든 시간대에서 급증하였다. 이는 앞에서 논의한 것처럼 북한 일부 지역에서 시정을 측정하는 방법에 변화가 있었기 때문으로 추정된다. 북한의 전국평균과 시정 구간별 빈도분율도 두 그룹의 영향을 받아 2008년 급증하였고, 시정이 30 km 이상인 경우의 빈도분율도 급증하였다. 그림 4에서 1983년 모든 시간대의 시정이 급감한 것을 볼 수 있었는데, 이 시기에는 5개 모든 그룹에서 시정이 30 km 이상인 경우의 빈도분율도 급감하였다.

이를 통해 북한의 지역 그룹별로 시정의 연평균 추이와 시정 구간별 빈도분율 추이에는 차이가 있다는 것을 알 수 있었다. 북한 시정 추이의 지역별 차이는 지역별 기상 영향 및 대기오염물질 농도의 차이가 주로 영향을 준 것으로 추정되며, 1983년 및 2008년에 발생한 시계열 불연속에서 볼 수 있듯이 시정 측정방법의 변화 등에 의한 요인도 영향을 주었을 것으로 추정된다.

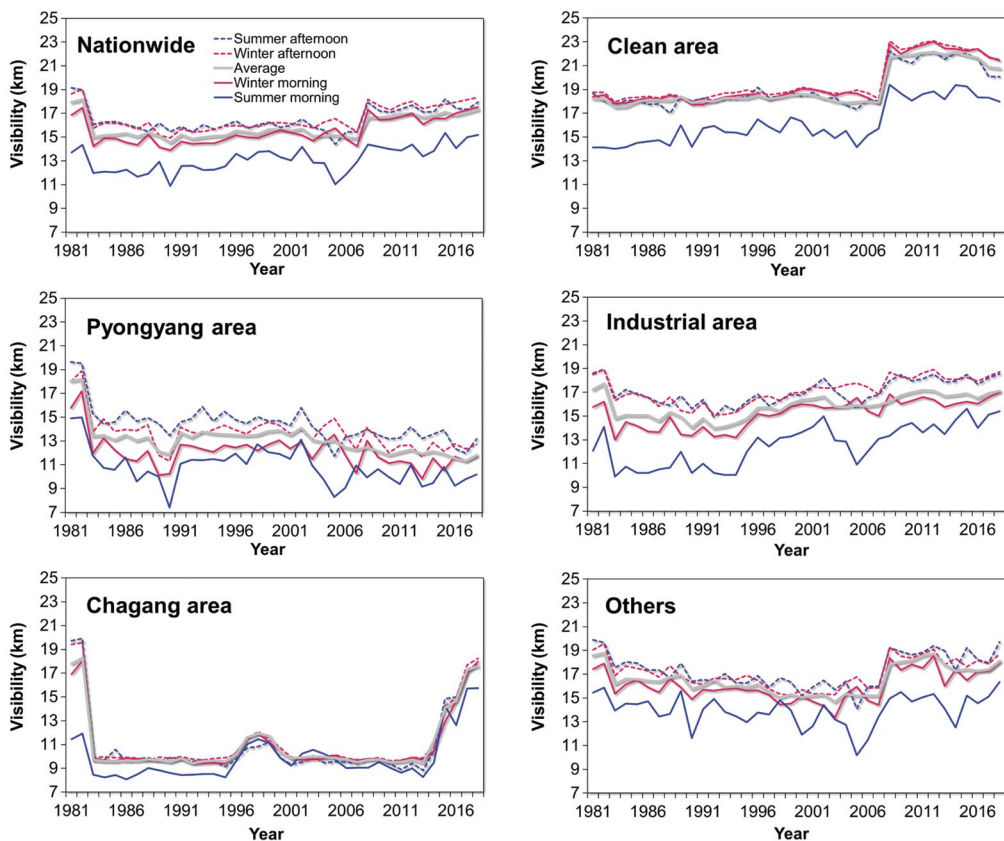
북한의 지역 그룹별 시정의 월별 추이를 살펴보면(그림 5), 일년 중 여름철인 6, 7월에 5개 모든 그룹에서 가장 낮은 값을 나타내었고, 대부분의 그룹에서 나머지 계절의 시정에는 큰 차이가 없었다. 하지만 평양의 경우 겨울철인 12월과 1월에도 시정이 낮은 경향

을 나타낸 것이 특징적이다. 표 2에서 볼 수 있듯이 전체 평균은 설정한 기간에 따라 달라지는데, 본 연구의 전체 대상 기간인 1981년부터 2018년까지의 전체 평균은 전국적으로는 약 16 km, 청정지역 그룹은 약 19 km, 평양지역 그룹은 약 13 km, 산업지역 평균은 약 16 km, 자강도 그룹은 약 11 km, 기타 그룹은 약 17 km로 청정지역 그룹이 가장 높았고, 자강도 그룹이 가장 낮았다. 서울은 여름철인 6, 7월에 시정이 주로 가장 낮지만, 황사 및 고농도 미세먼지 사례의 영향으로 봄철에도 시정 장애가 발생하여 3, 4월의 시정이 낮다(KMA, 2019a). 하지만 북한은 봄철에 특별히 시정이 저하되지 않았다.

시간별 추이를 살펴보면(그림 5), 평양지역과 자강도 그룹은 오전 9시, 청정지역, 산업지역, 기타지역 그

룹은 오전 6시에 가장 낮은 시정을 나타내었고, 평양지역 그룹과 공업지역 그룹, 기타 그룹은 오후 3시 또는 6시에 시정이 높아지는 경향을 나타내었다. 이 중 공업지역 그룹의 시간별 변화가 가장 크게 나타났다. 하지만 청정지역 그룹과 자강도 그룹은 아침에 시정이 낮아지는 것 외에 시간대별로 큰 차이가 없었다.

5개 지역 그룹 가운데 자강도 그룹은 시정이 3 km 이하인 빈도는 다른 지역에 비해 낮았지만, 평균 시정이 10 km 내외로 5개 지역별 그룹 가운데 가장 낮았고, 시정이 15 km 이상인 빈도도 50% 이하로 가장 낮아 전체적으로 가장 시정이 낮은 지역 그룹에 해당하였다(그림 5). 자강도 그룹에는 강계 공업지구가 있어 대기오염물질 배출시설이 밀집해 있을 것으로 보이지만 평양지역 및 공업지역 그룹과 비교하여도 시정이



**Fig. 6.** Annual mean trends of visibility on summer morning, summer afternoon, winter morning, winter afternoon, and total average by group in North Korea between 1981 and 2018 (raw data: KMA, 2019b).



매우 낮고, 월별, 시간별 변화가 거의 없어 자강도 그룹만의 특성이 있는 것으로 판단된다. 따라서 자강도 그룹은 저시정을 유발하는 기상요인이 다른 지역보다 큰 영향을 미쳤거나, 시정 자료 생산 과정에서 다른 지역과의 편차가 발생했을 것으로 추정된다. 2013년 이후 자강도 그룹의 시정은 2017년까지 거의 매년 급격히 증가하는 추이를 나타내어 시정에 영향을 주는 주요 요인에 큰 변화가 있었을 것으로 추정되지만, 주어진 자료만으로 자강도 그룹 시정 추이의 급증 원인을 파악하는 데에는 한계가 있다.

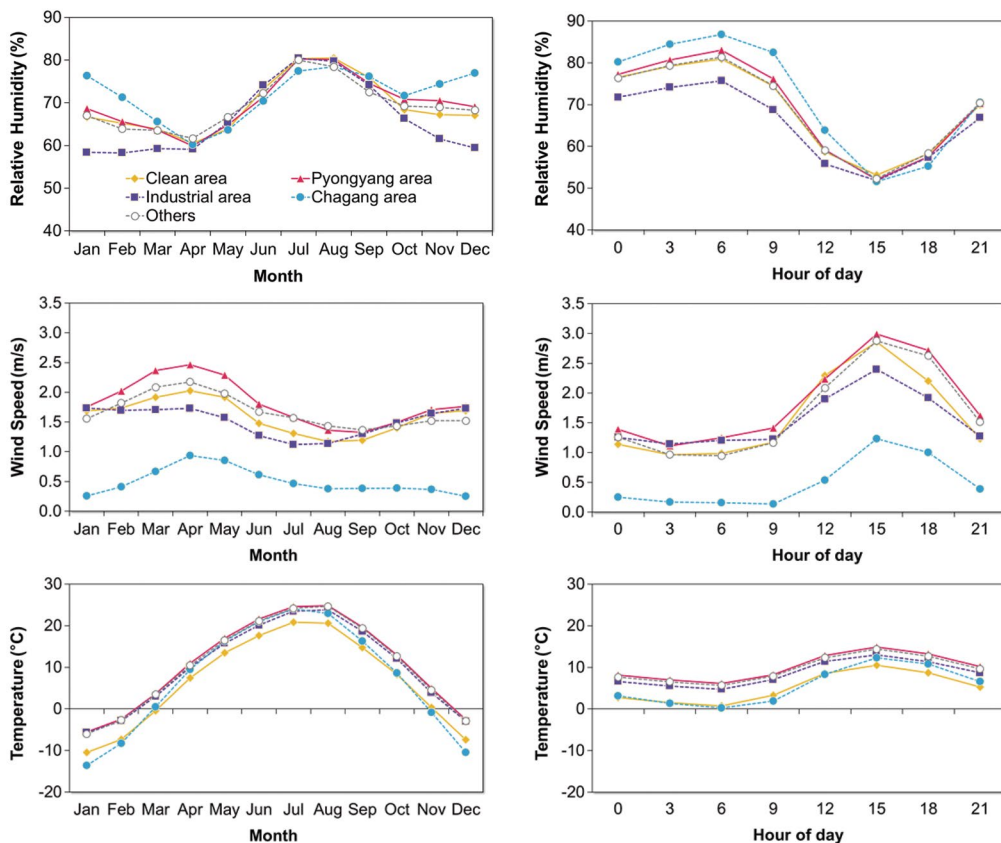
그림 6은 각 지역 그룹별로 여름과 겨울의 아침 및 오후 시정을 총 평균과 함께 비교한 것으로, 대부분의 그룹에서 아침보다 오후의 시정이 높았다. 청정지역과 자강도 그룹의 경우, 여름 오후와 겨울 오후, 겨울

오전 시정에 차이가 거의 없었다. 그러나 여름 아침 시정은 이 두 그룹을 포함한 모든 그룹에서 다른 시간대와 비교하여 유독 낮았으며, 자강도 그룹을 제외하면 여름 아침 시정이 평균 시정보다 5 km 이상 낮은 경우도 많았다.

평양지역 그룹은 다른 그룹들과는 달리 모든 계절별, 시간대별 시정에 차이가 있었다. 전반적으로 여름 오후의 시정이 가장 높았고, 그 다음으로 겨울 오후, 겨울 오전, 여름 오후 순으로 시정이 높았다.

### 3.2 북한 기상요소의 지역 그룹별 특성

북한의 5개 지역 그룹 모두에서 지난 40여 년간 계절별 상대습도는 여름에 높고 겨울에 낮았다. 하루 중에는 오전 6시에 80% 전후로 가장 높았고, 15시에



**Fig. 7.** Monthly and hourly trends of relative humidity, wind speed, and temperature in North Korea between 1981 and 2018 (raw data: KMA, 2019b).

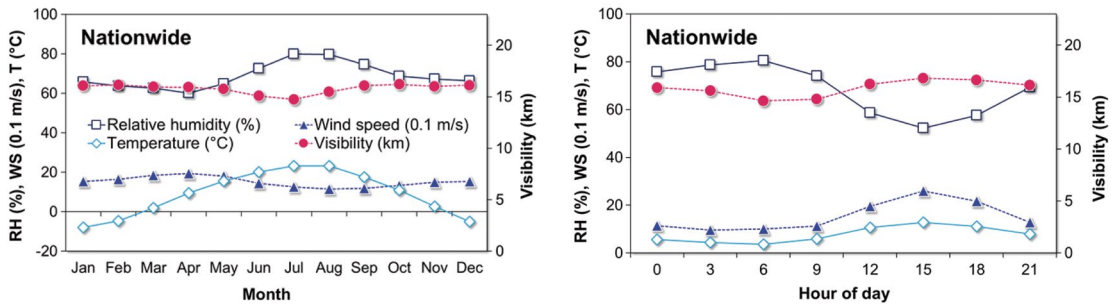


Fig. 8. Monthly and hourly mean trends of visibility, relative humidity, wind speed, and temperature in North Korea between 1981 and 2018 (raw data: KMA, 2019b).

50% 전후로 가장 낮았다. 자강도 그룹을 제외한 북한의 풍속은 상대습도와 반대로 아침과 여름에 1.3 m/s 전후로 낮고, 오후와 겨울에 2 m/s 전후로 높았다. 북한 기온의 일변화는 아침에 낮고 오후에 높았지만, 월별로는 여름에 높고 겨울에 낮았다(그림 7).

그림 5에서 유일하게 시정 감소 추세가 나타난 평양지역 그룹의 상대습도는 다른 지역과 비교하여 큰 차이가 없었고, 풍속, 기온은 다른 지역과 비교하여 다소 높은 편이었지만 계절 변동 및 일 변동 특징에 있어 주목할만한 차이는 없었다. 공업지역 그룹은 상대습도와 풍속이 다른 지역에 비해 낮은 편이었다. 다른 지역에 비해 시정이 유독 낮게 나타났던 자강도 그룹은 다른 지역들에 비해 풍속이 유독 낮았고, 아침과 겨울철 상대습도는 높게 나타났다. 기온은 지역 그룹들 가운데 가장 낮은 편이었다.

3.3 북한 시정과 기상요인의 상관관계 및 고찰

일반적으로 시정은 빛소멸계수 ( $b_{ext}$ )의 반비례 함수로 표현된다. 빛소멸계수는 기체 및 입자의 산란계수와 흡수계수의 합이며, 기체보다는 주로 입자에 의해 증가하므로(Seinfeld and Pandis, 2016) 결과적으로 입자산란계수의 증가는 시정의 저하를 유발한다.

상대습도는 입자산란계수에 직접 영향을 주는 것은 아니지만 입자 중의 조해성분에 영향을 미쳐 시정 악화를 가속시키는 효과가 있다(Baik et al., 1996). 상대습도 증가에 따른 입자의 성장은 조대입자 영역이 아닌 미세입자 영역에서 나타나므로 입자 크기 또한

고려해야 할 요소이다. 하지만 일반적으로 상대습도가 증가하면 황산염, 질산염 등의 흡습성 에어로졸이 성장하여 입자 농도가 증가하는 경향이 있다(Jung et al., 2013).

풍속도 시정에 영향을 준다. 풍속의 증가는 입자상 대기오염물질의 확산을 유발하여 입자산란계수를 감소시킬 수 있으며(Baik et al., 1996), 따라서 풍속이 높아지면 시정도 높아질 것으로 예상할 수 있다. 한편 기온은 특히 일변화 관점에서 상대습도의 변화에 영향을 미칠 수 있는 주요 인자로, 주로 기온이 낮은 새벽에 높은 상대습도를 유발한다.

북한의 시정은 이런 기상요소와의 상관성을 잘 반영하는 것으로 판단된다. 그림 8에서는 북한의 전국적인 월별, 시간별 시정과 습도, 풍속, 기온을 나타내었다. 북한 시정은 여름과 아침에 낮고, 겨울과 오후에 높았는데(그림 5), 북한의 상대습도는 월간과 일간 변화 모두 북한 시정과 반대의 경향을 나타내어 여름과 아침에 높고, 겨울과 오후에 낮았다. 북한의 풍속은 일간과 월간 변화 모두 북한 시정과 동일한 경향을 나타내어 여름과 아침에 낮고, 겨울과 오후에 높았다. 북한의 기온은 일변화를 살펴보면 시정과 동일하게 아침에 낮고 오후에 높았지만, 월별로는 여름에 높고 겨울에 낮아 시정과 반대 경향을 나타내었다(그림 8).

그림 6을 보면, 북한의 모든 지역에서 여름 아침 시정이 겨울 아침과 오후 시정과 비교하여 유독 낮은 것을 알 수 있다. 이는 습도와 풍속에 의한 영향으로 보

이다. 습도가 높으면 흡습성 에어로졸 생성이 많아지고, 풍속이 낮으면 대기오염물질 확산이 용이하지 않아 입자생성에 유리해져서 입자가 증가하게 되고, 입자에 의한 산란과 흡수도 증가하여 시정이 낮아지는데, 일년 중 여름과 하루 중 아침 시간대에 습도가 높고 풍속이 낮기 때문이다.

북한 대부분의 지역 그룹에서 오후 시정은 아침에 비해 높았는데, 이는 낮은 상대습도와 높은 풍속, 높은 혼합고에 의한 영향인 것으로 보인다. 하지만 시정과 상대습도, 풍속의 상관성만을 고려하면 북한의 오후 시정은 상대습도가 더 낮은 겨울이 여름보다 높아야 하는데, 북한의 오후 시정은 여름과 겨울이 비슷한 수준을 나타내었다. 이는 계절에 따른 대기 중 입자상 물질의 2차 생성량 또는 물리화학적 특징이 다르기 때문일 것으로 생각된다.

광화학반응에 의한 입자상 물질 생성과 함께 시정이 저하된다면, 하루 중에는 기온이 높고 일사량이 많은 오후 3시경의 시정이 감소할 가능성이 크다(Park et al., 1994). 겨울에 난방 등으로 여름에 비해 입자를 생성하는 전구물질, 예를 들어, 황산화물, 질산화물 등의 배출이 많으면, 일사량이 많은 오후 시간대에 입자의 생성이 증가하여 시정이 감소하게 되므로 여름에 비해 낮아질 수 있을 것으로 추정된다.

입자의 2차 생성량뿐만 아니라 입자의 성분별 구성비에 따른 특성 또한 시정에 영향을 줄 수 있는데, 입자의 성분별로 질량당 빛산란계수와 가시광선에 대한 굴절지수가 다르고, 입자의 성분별 구성비에 따라 기체/입자 평형이 달라지기 때문이다.

그림 6에서 평양지역 그룹의 경우 다른 지역 그룹에 비해 여름과 겨울의 오후 시정의 차이가 컸고, 여름 오후 시정이 더 높았는데 이 경우 광화학반응에 의한 입자상 물질의 2차 생성에 의한 영향이 있는 것으로 보인다. 평양은 북한 내 다른 지역에 비해 겨울철 연료 사용이 원활할 것으로 생각되는 지역이므로, 겨울철 난방을 위한 에너지 소비와 그로 인한 대기오염물질 배출이 여름보다 많았을 것으로 예상된다. 하지만 난방에 의한 영향이 있다면 아침 시정도 겨울에

더 낮아야 할 것으로 예상되는데 그렇지 않기 때문에 주어진 자료만으로 북한 지역의 계절별, 시간대별 시정 차이의 원인을 파악하는 데는 한계가 있다.

### 3.4 북한 지역 그룹별 시정과 기상요인과의 상관관계 및 고찰

그림 9에 시정과 상대습도, 풍속, 기온 및  $PM_{2.5}$  농도와 상관도를 북한 지역 그룹별로 나타내었다. 본 연구에서는 북한의 시정 및 기상변수를 주로 1981년부터 2018년까지의 기간에 대해 사용하였다. 그러나 북한  $PM_{2.5}$  농도 자료(OECD, 2018)가 1998년부터 2015년까지 제시되었으므로, 그림 9는 모든 요소에 대해  $PM_{2.5}$  농도와 동일하게 1998년부터 2015년까지의 자료만을 사용하여 나타내었다.

시정과 다른 기상요소 및  $PM_{2.5}$  농도의 분포는 북한의 각 지역 그룹별로 차이를 나타내었다. 앞에서 논의하였듯이 시정은 습도와 반대 방향의 계절변화 및 일변화 변동성을 갖는데, 각 지역 그룹별 시정과 습도 역시 뚜렷한 반비례 관계를 보여주었다. 앞에서 언급하였듯이 풍속의 증가는 입자산란계수를 감소시킬 수 있으므로 시정과 풍속은 양의 상관관계가 기대된다. 그림 9에서 시정과 풍속은 전체적으로는 양의 상관관계를 나타내었지만, 자강도를 제외하면 약한 음의 상관관계를 나타내었다. 시정과 기온도 자강도를 제외하면 반비례 관계를 나타내었다.

$PM_{2.5}$  농도가 높으면 입자에 의한 산란과 흡수가 증가할 것으로 예상되기 때문에, 일반적으로 시정과  $PM_{2.5}$  농도는 음의 상관관계를 가질 것으로 기대된다. 그림 9를 보면 시정과  $PM_{2.5}$  농도는 자강도를 제외하면 반비례 관계를 나타내었다.

그림 5에서 자강도 그룹은 다른 지역에 비해 시정이 유독 낮게 나타났고, 그림 7에서 기상요인으로 높은 습도와 낮은 풍속의 영향이 있는 것으로 추정할 수 있었다. 하지만 월별, 시간별 추이에 거의 변화가 없었고, 그림 S1에서 볼 수 있듯이 자강도 그룹에서 14) 중강과 29) 희천의 경우 평균 시정이 북한 내 다른 지역에 비해 크게 낮고, 저시정 빈도가 높았고, 2013년

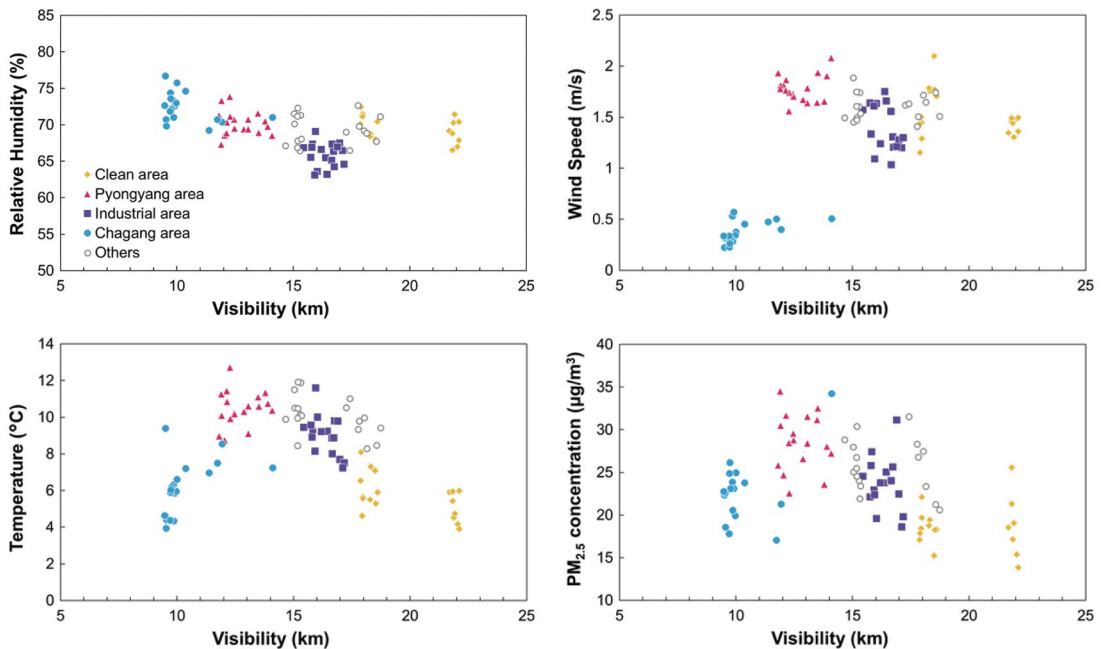


Fig. 9. Relationship between visibility and relative humidity, wind speed, and temperature, respectively, by group in North Korea between 1998 and 2015 (raw data: KMA, 2019b; OECD, 2018).

매우 가파르게 증가하여 높은 습도와 낮은 풍속의 영향만으로 설명하기 어려운 점이 있는 것으로 판단된다. 따라서 자강도 그룹의 시정 자료는 다른 그룹에 비해 불확도가 큰 것으로 보이며, 이는 자료 생산 과정에서 문제 또는 자강도 그룹만의 독특한 지형적, 지리적 특성에 기인한 것으로 추정된다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 북한 현지의 지상관측자료를 활용하여 북한 시정의 시·공간적인 특성을 파악하고, 이를 통해 북한 대기질에 대한 이해를 높이고자 하였다. 북한의 27개 관측지점을 청정지역, 평양지역, 공업지역, 자강도, 기타의 5개 그룹으로 구분하여 각 그룹별로 시정 및 상대습도, 풍속, 기온의 시·공간적 특성, 시정과 습도, 풍속, 기온, 연평균  $PM_{2.5}$  농도와와의 상관관계를 분석하였다.

1981년부터 2018년까지 북한의 전국 연평균 시정은 15~17 km 수준으로 주로 습도가 높고 풍속이 낮은 여름과 아침 시정이 낮았고, 겨울과 오후에 높았다. 북한의 연평균 시정은 불연속적으로 급감(1982~1983년) 및 급증(2007~2008년)한 기간도 있었지만 지난 40여 년간 대체로 증가하는 추이를 나타내었다. 공업지역 그룹의 시정도 증가하였는데, 공업시설에서의 운영률 감소가 원인으로 보인다.

하지만 평양의 시정은 지난 40여 년간 감소하였다. 평양지역 그룹의 기상 요인의 시간별, 계절별 변화는 다른 지역과 크게 다르지 않았으므로 대기 중 입자의 양과 특성 등의 차이에 영향을 받았을 것으로 보인다. 평양은 북한 내 다른 지역에 비해 대기오염물질의 국지적인 배출이 많고, 중국으로부터의 대기오염물질 장거리이동 영향도 상대적으로 크게 받아 입자상 대기오염물질 농도가 증가하였을 것으로 추정되지만, 주어진 자료만으로 정확한 이유를 파악하기에는 한계가 있다.

자강도 그룹은 다른 지역에 비해 유독 시정이 낮았는데 다른 지역들에 비해 유독 낮은 풍속, 아침과 겨울철의 높은 습도, 지역 그룹들 가운데 가장 낮은 기온의 영향이 있을 것으로 추정된다. 하지만 자강도 그룹에서 14) 중강과 29) 희천의 경우 이런 기상요인의 특징만으로 설명하기 어려운 점이 있어 자강도 그룹의 시정 자료는 생성 과정 등이 북한 내 다른 지역과 다르거나 다른 지역에 비해 불확도가 큰 것으로 추측된다.

본 연구에서는 북한 시정의 시·공간적 특성을 파악하고 시정과 기상요인의 상관관계를 살펴보았는데, 지상에서의 북한 내 관측자료를 활용하였다는 점에서 큰 의미가 있다. 기존 북한 대기환경 연구에서 북한 내 지상관측자료의 부재를 주요 한계점으로 논의하였기 때문이다.

본 연구는 세계기상기구의 자료에 대한 신뢰를 전제로 하여 진행하였지만, 이들 자료의 신뢰도 또는 불확도에 대한 평가가 없었다는 점에서 결과를 해석하는 데에 한계가 있었다. 향후 자료에 대한 신뢰도 또는 불확도를 평가하는 연구가 필요할 것으로 보인다. 또한 북한의 시정에 기상요인이 미친 영향을 통계적인 기법 등을 활용하여 분리하여 파악하고, 북한의 지형적인 특성 및 다른 사회·경제적인 지표 등을 함께 살펴본다면, 북한의 지역별 대기오염물질 농도 수준을 간접적으로 파악할 수 있을 것으로 기대된다.

## 감사의 글

이 논문은 2018년도 정부(미래창조과학부; 교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구입니다 (NRF-2017R1A2B4006760; NRF-2017R1A6A3A11029726).

## References

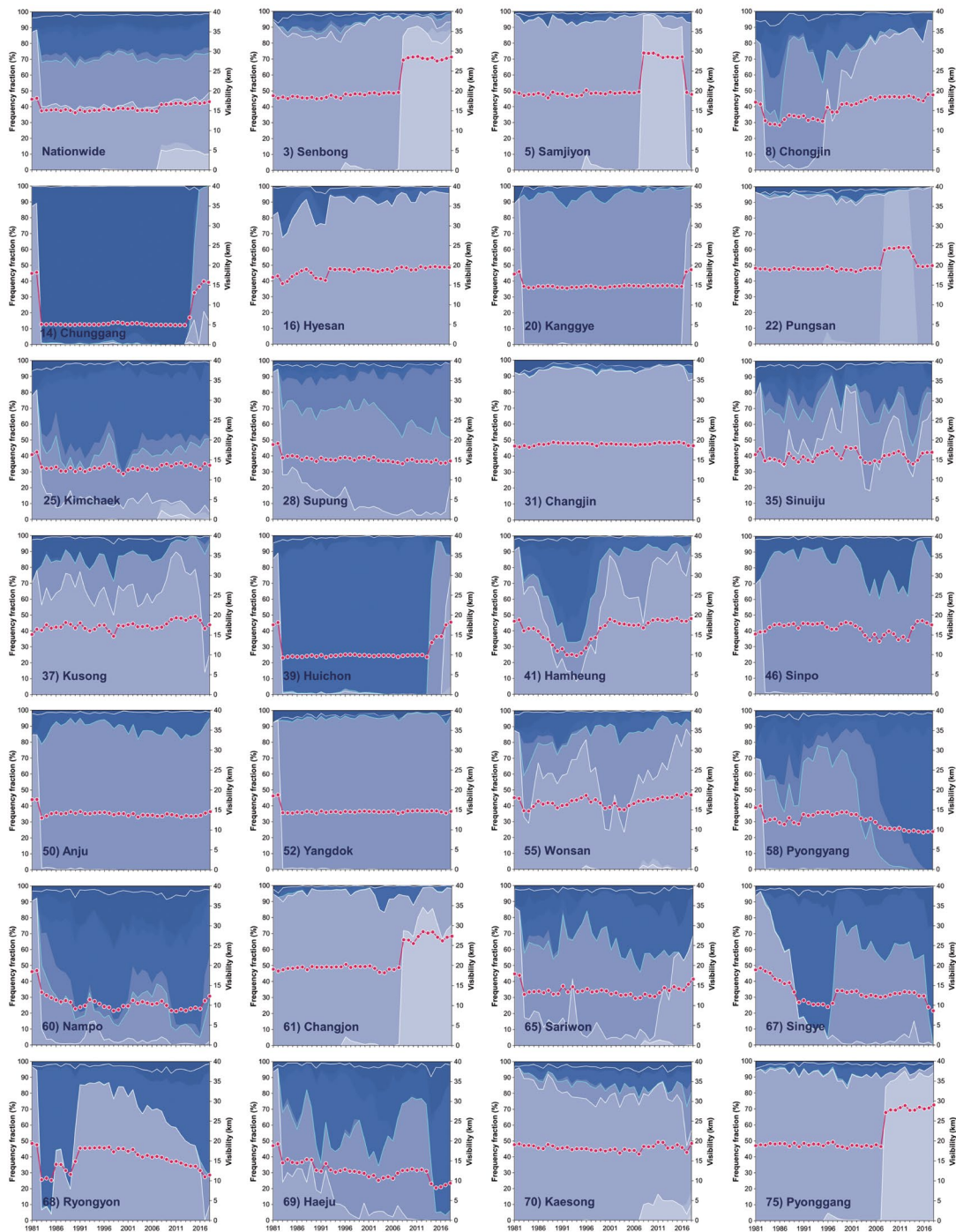
- Bae, M., Kim, H.C., Kim, B.-U., Kim, S. (2018) PM<sub>2.5</sub> simulations for the Seoul metropolitan area: (V) Estimation of North Korean emission contribution, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 34(2), 294-305, (in Korean with English abstract), <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2018.34.2.294>.
- Baik, N.J., Kim, Y.P., Moon, K.C. (1996) Visibility study in Seoul, 1993, *Atmospheric Environment*, 30(13), 2319-2328, [https://doi.org/10.1016/1352-2310\(95\)00443-2](https://doi.org/10.1016/1352-2310(95)00443-2).
- Ghim, Y.S., Moon, K.-C., Lee, S., Kim, Y.P. (2005) Visibility trends in Korea during the past two decades, *Journal of the Air & Waste Management Association*, 55(1), 73-82, <https://doi.org/10.1080/10473289.2005.10464599>.
- Institute for Health Metrics and Evaluation (IHME) (2018) Global Burden of Disease Study 2017 (GBD 2017) Data Resources. <http://ghdx.healthdata.org/gbd-2017>. Accessed November 11, 2018.
- Jung, C.H., Park, J.H., Kim, Y.P. (2013) Change of the size-resolved aerosol concentration due to relative humidity, *Particle and Aerosol Research*, 9(2), 69-78, (in Korean with English abstract), <https://doi.org/10.11629/jpaar.2013.9.2.069>.
- Kim, I.S., Lee, J.Y., Kim, Y.P. (2013) Impact of polycyclic aromatic hydrocarbon (PAH) emissions from North Korea to the air quality in the Seoul metropolitan area, South Korea, *Atmospheric Environment*, 70, 159-165, <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2012.12.040>.
- Kim, I.S., Kim, Y.P. (2019) Characteristics of energy usage and emissions air pollutants in North Korea, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 35(1), 125-137, (in Korean with English abstract), <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2019.35.1.125>.
- Kim, N.K., Kim, Y.P., Morino, Y., Kurokawa, J., Ohara, T. (2014) Verification of NO<sub>x</sub> emission inventory over North Korea, *Environmental Pollution*, 195, 236-244, <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2014.06.034>.
- Korea Meteorological Administration (KMA) (2019a) Weather observation. <https://data.kma.go.kr/data/grnd/selectAsosRltmList.do?pgmNo=36>. Accessed January, 24, 2019. (in Korean)
- Korea Meteorological Administration (KMA) (2019b) North Korea weather observation. <https://data.kma.go.kr/data/grnd/selectNkRltmList.do?pgmNo=58>. Accessed July, 24, 2019. (in Korean)
- Lee, J.H., Baik, N.-J., Kim, Y.P., Moon, K.-C. (1995) Visibility study in Seoul on Aug., 1993, *Journal of Korea Air Pollution Research Association*, 11(3), 291-298, (in Korean with English abstract)
- Lee, Y.H., Kwak, K.H. (2018) Using visibility to estimate PM<sub>2.5</sub> concentration trends in Seoul and Chuncheon from 1982 to 2014, *Journal of Korean Society for Atmospheric*

- Environment, 34(1), 156-165, (in Korean with English abstract), <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2018.34.1.156>.
- Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD) (2018) Exposure to PM<sub>2.5</sub> in countries and regions. <https://stats.oecd.org/index.aspx?queryid=72722>. Accessed November 09, 2018.
- Park, S.-O., Baik, N.-J., Kim, Y.P., Moon, K.-C., Ghim, Y.-S. (1994) The trend of visibility variation of Seoul during 1980-1993, *Journal of Korea Air Pollution Research Association*, 10(3), 203-208, (in Korean with English abstract)
- Seinfeld, J.H., Pandis, S.N. (2016) *Atmospheric chemistry and physics: From air pollution to climate change*, third edition, John Wiley & Sons Inc, Hoboken, New Jersey, USA.
- Shaddick, G., Thomas, M., Amini, H., Broday, D.M., Cohen, A., Frostad, J., Green, A., Gumy, S., Liu, Y., Martin, R.V., Prüss-Üstün, A., Simpson, D., van Donkelaar, A., Brauer, M. (2018) Data integration for the assessment of population exposure to ambient air pollution for global burden of disease assessment, *Environmental Science & Technology*, 52(16), 9069-9078, <https://doi.org/10.1021/acs.est.8b02864>.
- World Meteorological Organization (WMO) (2019) Country profile database, Democratic People's Republic of Korea, Regional Association II (Asia). <http://cpdb.wmo.int/democratic-people-s-republic-of-korea>. Accessed July, 24, 2019. (in Korean)
- Yeo, M.J., Kim, Y.P. (2018) Electricity supply trend and operating statuses of coal-fired power plants in North Korea using the facility-specific data produced by North Korea: characterization and recommendations, *Air Quality, Atmosphere & Health*, 11, 979-992, <https://doi.org/10.1007/s11869-018-0601-5>.
- Yeo, M.J., Kim, Y.P. (2019a) Trends of the PM<sub>10</sub> concentrations and High PM<sub>10</sub> concentration cases in Korea, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 35(2), 249-264. (in Korean with English abstract), <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2019.35.2.249>.
- Yeo, M.J., Kim, Y.P. (2019b) The state of the air quality and measures for improving it in North Korea, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 35(3), 318-335. (in Korean with English abstract), <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2019.35.3.318>.

### Authors Information

- 여민주 (이화여자대학교 환경공학과 연구교수)  
 서지훈 (한국과학기술연구원 환경복지연구센터 연구원)  
 김용표 (이화여자대학교 화학신소재공학과 교수)

## SUPPLEMENTARY MATERIALS



**Fig. S1.** Annual mean trends of visibility (bold line with circle markers in each figure) and frequency fraction by the visibility level (first, second, third, forth bold lines for visibility:  $\geq 3$ ,  $\geq 15$ ,  $\geq 20$ , and  $\geq 30$  km) in North Korea between 1981 and 2018 (raw data: KMA, 2019b).