



시정을 이용하여 추정한 1982~2014년 서울과 춘천의 PM_{2.5} 농도 변화 추이

Using Visibility to Estimate PM_{2.5} Concentration Trends in Seoul and Chuncheon from 1982 to 2014

이 용 희 · 광 경 환^{1)*}

강원대학교 환경학과, ¹⁾강원대학교 환경융합학부

(2017년 12월 11일 접수, 2017년 12월 21일 수정, 2017년 12월 22일 채택)

Yong-Hee Lee and Kyung-Hwan Kwak^{1)*}

Department of Environmental Science, Kangwon National University

¹⁾*School of Natural Resources and Environmental Science, Kangwon National University*

(Received 11 December 2017, revised 21 December 2017, accepted 22 December 2017)

Abstract

Long-term trend analysis on air pollutant concentrations is very important to diagnose the present status and plan for the future. In this study, the long-term trends of PM_{2.5} concentrations were estimated based on the relationship between the visibility and PM_{2.5} concentration regarding the effects of relative humidity in Seoul and Chuncheon. The relationships between the visibility and PM_{2.5} concentration were derived from the measurement data in 2015 and 2016. Then, the annual trends of PM_{2.5} concentration from 1982 to 2014 were estimated and compared to those of PM₁₀ concentration available in Seoul and Chuncheon. During the estimation process, four ranges of relative humidity were considered such as less than 30%, 31~50%, 51~70%, and 71~90%. In Seoul and Chuncheon, the visibility and PM_{2.5} concentration generally have the inverse relationship while the visibility decreases as the relative humidity increases. The estimated PM_{2.5} concentrations similarly showed the decreasing tendencies from 2006 to 2012 in Seoul and Chuncheon. However, the estimated PM_{2.5} concentrations showed the increasing tendency before 2005 in Chuncheon in contrast to the decreasing tendency in Seoul. This implies that the long-term trends of PM_{2.5} concentration in different cities in South Korea reflect the local influencing factors. For example, 'Special Act on the Improvement of Atmospheric Environment in the Seoul Metropolitan Area' can affect the different long-term trends in Seoul and Chuncheon. The estimated PM_{2.5} concentrations were validated with the measured ones in Seoul and Chuncheon. While the general tendencies were well matched between the estimated and measured concentrations, the PM_{2.5} concentration trends in 1990s and their monthly variations are needed to be improved quantitatively using more reference data for longer years.

Key words : PM_{2.5}, Visibility, Long-term trend, Seoul, Chuncheon

*Corresponding author.

Tel : +82-(0)33-250-8575, E-mail : khkwak@kangwon.ac.kr

1. 서 론

대기 중의 공기역학적 지름이 2.5 μm 이하인 초미세 먼지(PM_{2.5})는 인위적으로 배출되는 오염원 주변 지역에서 뿐만 아니라 2차적인 생성에 의해 광역적으로 인체 건강상 위해를 끼치고 동식물에게도 해를 입힌다. PM_{2.5}가 2차적인 반응에 의해 생성되는 과정에서 대기 중에 체류하는 시간이 길기 때문에 상대적으로 광역 오염의 성격을 지녀 넓은 지역에 영향을 미친다(Kim, 2006). PM_{2.5}의 입자 크기가 매우 작기 때문에 폐포 모세혈관으로 유입되어 간, 골수, 심장 등으로 전달되어 질병을 일으키는 것으로 알려져 있다(Kang *et al.*, 2006).

우리나라에서는 비교적 최근 2015년부터 대기환경 기준물질에 PM_{2.5}를 포함시켜 연간 평균치와 24시간 평균치를 관리하고 있다. 그러나 최근 들어 PM_{2.5} 농도를 관리하기 시작한 까닭에 아직 장기적인 변화 추이를 알 수 있는 신뢰성 있는 자료를 확보하기는 어렵다. 그마저도 PM_{2.5} 농도를 측정하는 지점은 수도권 등 대도시에 집중되어 있어 지방 도시의 경우 PM_{2.5} 농도 측정의 공간 해상도가 상당히 낮다.

대기오염의 전통적인 지표 중 하나인 시정은 대기 혼탁의 정도를 표시하는 척도로 PM_{2.5} 농도와 밀접한 관계를 갖는 것으로 알려져 있다. PM_{2.5}는 원소 탄소, 유기 탄소, 황산염, 질산염 등으로 이루어져 있는데 이러한 입자상 화학 성분물질에 의한 빛의 흡수와 산란으로 인해 시정이 악화된다(Choi *et al.*, 2015). PM_{2.5}의 성분 중 NO₃⁻, SO₄²⁻, NH₄⁺ 모두 상관계수 0.6 이상으로 시정 악화에 기여하며, 황산염과 질산염 성분 입자의 광학적 특성에 의해 빛의 소멸계수가 크게 증가하는 것으로 확인되었다(Park *et al.*, 2015; Chen *et al.*, 2014). 또한 가시광선의 파장과 유사한 0.1 μm부터 2.0 μm까지 크기의 작은 입자는 큰 입자에 비해 산란에 의한 시정 장애를 효과적으로 일으키는 것으로 확인되었다(Lee, 2007). 이와 같이 도출된 대기 중 입자의 광학두께와 시정과의 관계식은 원격 관측 분야에서 널리 활용되고 있다(Lee *et al.*, 2013).

시정은 PM_{2.5} 이외에도 기온, 상대습도, 풍속, 강수량, 일조시간, 일사량 등의 기상요소에 직접적으로 영향을 받는다. 여러 기상요소 중 상대습도에 가장 큰 영향을 받으며 특히 상대습도 30~70% 구간에서 그 상관성이

뚜렷하다(Chen *et al.*, 2014). Oh and Yoon (1996)은 시정악화 현상의 일차적 원인은 대기 중에 존재하는 오염물질의 증가이지만, 대기 중에 배출된 오염물질이 시정을 악화시키는 과정에서 상대습도가 중요한 역할을 한다는 결론을 도출하였다. 대기 중의 수분은 응결핵의 성장을 도와주므로 상대습도가 높을수록 입자에 의한 빛의 산란이 더욱 잘 일어나기 때문이다. 반대의 예로, PM_{2.5} 농도가 증가하는 경우에도 상대습도가 감소하면서 시정이 개선되기도 한다(Choi *et al.*, 2015).

대기 중의 PM_{2.5} 농도가 과거부터 현재까지 어떻게 변화해왔는지를 정확히 파악하는 것은 현황을 파악하고 향후 대책을 논의하는 데 매우 중요하다. 이를 위해서는 장기간의 PM_{2.5} 농도 측정 자료가 필수적이거나 우리나라에서 체계적으로 PM_{2.5} 농도를 관리한 역사가 길지 않아 신빙성 있는 자료를 얻기 어렵다. PM₁₀ 농도는 1995년부터 측정이 이루어져 왔으나 PM₁₀과 PM_{2.5}의 변동은 상당부분 다른 배출원 및 생성과정과 소멸 과정을 겪기 때문에 공간적으로나 시간적으로 변동 차이가 크다(Lim *et al.*, 2015). 한편, PM_{2.5} 농도와 밀접한 상관관계를 갖는 시정의 관측은 기상관측소의 숙련된 전문가에 의한 목적과 광학적 시정 관측을 병행하여 오래전부터 시행되고 있으므로 장기간 변동을 파악하는 자료로 활용할 수 있다(Ghim *et al.*, 2002; Lee *et al.*, 1996; Park *et al.*, 1994). 따라서 장기간 시정 관측 자료로부터 PM_{2.5} 농도를 추정함으로써 PM_{2.5}의 장기간 변화 추이를 살펴볼 수 있을 것이다.

본 연구에서는 2015~2016년 서울과 춘천의 PM_{2.5} 농도와 시정의 상관관계를 도출하고, 이를 1982~2014년에 관측된 시정에 대입하여 장기간 PM_{2.5} 농도의 변화 추이를 추정하였다. 추정한 PM_{2.5} 농도의 장기 변화를 검증하기 위해 국내 학술자료에 보고된 과거 PM_{2.5} 농도와 비교한 후, 32년에 걸친 장기적인 서울과 춘천의 PM_{2.5} 농도 경향을 분석하였다.

2. 방 법

2.1 대상 지역

대상 지역은 대한민국 제 1의 도시인 서울과 연중 안개 발생일수가 많은 강원도 춘천이다. 선정된 두 도시는 사전 조사에서 대한민국 여러 도시 중 PM_{2.5} 농도

와 시정과의 상관성이 컸던 지역이다(Lee *et al.*, 2017). 서울은 대한민국의 수도이며 인구 약 990만 명의 대도시로 한강이 도시 중심부를 동서방향으로 관통하며 흐르고 서쪽 방향을 제외하고는 크고 작은 산들이 시 경계를 둘러싸고 있다. 춘천은 강원도 도청 소재지이며 인구 약 28만 명의 중소도시로 도시 주위에 의암호, 소양호 등 넓은 면적의 인공호수가 있으며 역시 크고 작은 산들이 시 경계를 둘러싸고 있다. 두 도시 모두 분지 지형에 위치하고 있어 대기 중 오염물질 확산에 불리한 조건을 갖고 있으며 큰 강과 인공호수로부터 수분의 공급이 원활한 특징이 있다.

2.2 자료의 수집과 처리

상대습도의 영향을 고려한 시정과 $PM_{2.5}$ 농도와와의 상관성을 분석하기 위해 서울과 춘천의 기상청 종관기상관측소 자료와 환경부 도시대기측정소(서울 중구, 춘천 중앙로) 자료를 이용하였다. 시정과 상대습도 등 기상 자료는 1982년 5월 1일부터 2016년 12월 31일까지 34년 8개월간 자료를 이용하였다. $PM_{2.5}$ 농도 자료는 2015년 1월 1일부터 2016년 12월 31일까지 2년간 자료를 이용하였으며, 비교를 위해 서울의 1995년 이후와 춘천의 2000년 이후의 기상청 PM_{10} 농도 자료를 환경부 대기연보의 PM_{10} 농도 자료와 함께 이용하였다. 2001년 6월 13일까지는 시정을 3시간 간격으로 관측하였으므로 연중 낮 시간에 해당하는 9시, 12시, 15시에 대해 분석을 수행하였다. 그 중 9시 시정 자료는 전반적으로 상대습도가 높고 안개의 영향을 많이 받아 결과에서 제외하였다. 분석 대상 기간 및 시간의 자료 중에서 시정과 $PM_{2.5}$ 농도 중 하나라도 결측된 자료와 시정이 정량적인 수치가 아닌 '20 이상'으로 기록된 자료는 분석에서 제외하였다. 강수 영향으로 시정과 $PM_{2.5}$ 농도의 상관관계가 뚜렷하지 않는 것으로 알려진 상대습도가 91% 이상인 자료 또한 제외하였다(Lee *et al.*, 2012).

2.3 시정과 $PM_{2.5}$ 농도 관계식

과거 시정 자료로부터 $PM_{2.5}$ 농도를 추정하기 위한 관계식은 서울과 춘천의 2015~2016년 2년간 자료를 사용하여 구하였다. 이 관계식에 상대습도의 영향을 반영하기 위해 상대습도 네 구간(30% 이하, 31~50%, 51~70%, 71~90%)의 시정- $PM_{2.5}$ 농도 관계식을 각각

얻었다. 상대습도의 구간은 Chen *et al.* (2014)에서 적용한 세 구간(30% 이하, 31~70%, 71% 이상)을 바탕으로 상대습도 90% 이상인 조건에서는 미세먼지와 시정 간 상관성이 낮아진다는 Lee *et al.* (2012)의 결과를 참고하여 선정하였다. 서울과 춘천의 각 시간별, 상대습도별 시정- $PM_{2.5}$ 농도 관계식에 1982년부터 2014년까지 시정 자료를 적용함으로써 서울과 춘천의 12시와 15시 상대습도 구간별 $PM_{2.5}$ 농도를 추정하였다. 관계식을 구하는 과정에서 제외된 시정 '20 이상' 자료와 상대습도 91% 이상의 자료에서 발생하는 오차는 해당 조건의 2015~2016년 평균 농도 편차를 앞서 추정된 $PM_{2.5}$ 농도에 더해주는 방법으로 보정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 장기간 PM_{10} 농도와 시정의 변화 추이

장기간 $PM_{2.5}$ 농도의 변화 추이를 추정하기에 앞서 활용 가능한 PM_{10} 농도의 장기 변화 추이를 살펴보았다(그림 1). 연평균 PM_{10} 농도는 서울에서 1995년 78 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 2002년 76 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 높았다가 해가 지날수록 감소하는 경향을 보인다. 특히 2005년 이후 연평균 PM_{10} 농도가 크게 감소하는 경향을 보이는데 이는 정부에서 2005년부터 시행한 수도권 대기 환경 개선에 관한 특별법에 의한 대기질 개선 효과로 판단된다(Lim *et al.*, 2015). 춘천의 연평균 PM_{10} 농도는 2001년 82 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 가장 높았으며 연도별 변동을 켜다가 2003년 이후 농도가 서서히 감소하는 경향을 보였다. 그러나 그 감소 폭은 서울에 비해 작았으며 이는 수도권 대기 환경 개선에 관한 특별법의 효과가 일부 춘천의 PM_{10} 농도 감소에도 영향을 주었으나 수도권에 비해 그 효과가 제한적인 것으로 판단된다.

그림 2는 장기간 $PM_{2.5}$ 농도의 변화 추이를 추정하기 위해 사용된 서울과 춘천의 1982년부터 2014년까지 연평균 시정의 변화 추이를 보여준다. 서울의 시정은 1980년대와 1990년대에 지속적으로 개선되다가 2002년을 기점으로 다시 악화되는 경향성을 보인다. 반면 춘천의 시정은 1980년대와 1990년대에 지속적으로 악화되다가 2000년대 이후 비슷한 수준을 유지하고 있다. 앞서 언급한 서울과 춘천의 PM_{10} 농도의 장기 변화 추이가 비슷하게 감소하는 경향성을 보이는 것과

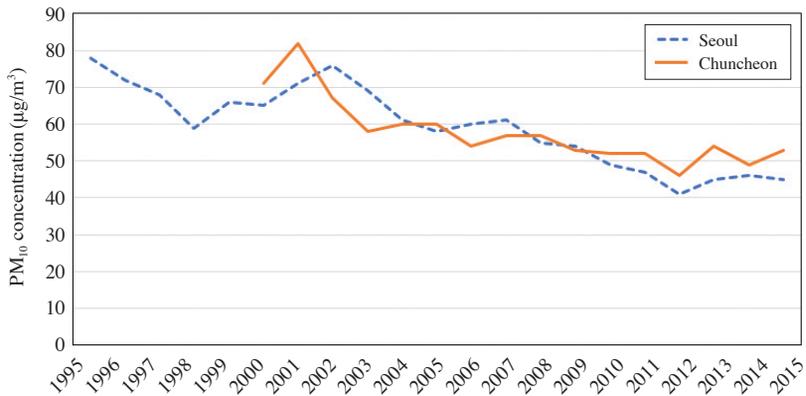


Fig. 1. Annual PM₁₀ concentration trends in Seoul and Chuncheon from 1995 to 2015.

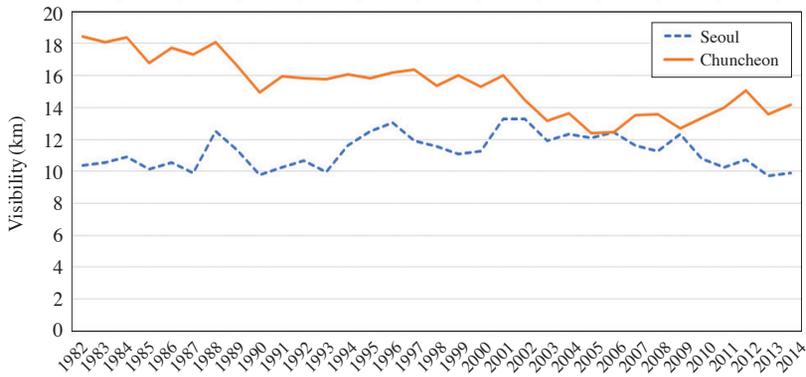


Fig. 2. Annual visibility trends in Seoul and Chuncheon from 1982 to 2014.

는 달리 서울과 춘천의 시정 변화 추이가 서로 상반되게 나타나는 것으로 볼 때, 시정은 사전 연구에서 밝혀진 바와 같이 PM₁₀ 농도보다 PM_{2.5} 농도에 의해 크게 영향을 받을 수 있다는 점을 의미한다. 실제로 Shin (1996)은 대기 중 입자 크기가 작을수록 PM 농도와 시정과의 상관관계수가 높게 나타남을 밝힌 바 있으며, Yoon and Lee (1998)도 입경별 입자 수농도와 빛 산란계수의 상관관계수가 0.56~2.5 µm의 입자에서 가장 높았음을 확인한 바 있다. 이러한 결과는 PM_{2.5}가 PM₁₀보다 다 시정에 더 큰 영향을 미친다는 사실을 뒷받침한다.

3.2 시정과 PM_{2.5} 농도 간 상관성

상대습도에 따른 시정-PM_{2.5} 농도 관계식을 얻기 위해 먼저 12시와 15시의 시정과 PM_{2.5} 농도 간 산점도

를 그림 3에 나타내었다. 잘 알려진 바와 같이 PM_{2.5} 농도와 시정 간 반비례 관계를 확인하였으며, 12시와 15시 자료의 상관계수(R)는 각각 -0.37과 -0.46으로 12시에 비해 15시에 높은 상관성을 보임을 확인하였다. 시정은 12시보다 15시에 더 증가하는데 이는 상대적으로 12시에 비해 15시의 상대습도가 서울과 춘천에서 각각 5%와 10% 더 낮기 때문이며 따라서 12시보다 15시에 상대습도에 의한 영향을 덜 받는다고 해석할 수 있다. 전반적으로 시정과 PM_{2.5} 농도 간 서울과 춘천의 12시와 15시 상관성은 높게 나타나 이를 바탕으로 시정으로부터 PM_{2.5} 농도를 추정하기 위한 조건별 관계식을 도출하였다.

2015~2016년 일별 12시와 15시의 시정과 PM_{2.5} 농도를 상대습도 구간별로 나눈 후 각각 시정-PM_{2.5} 농도

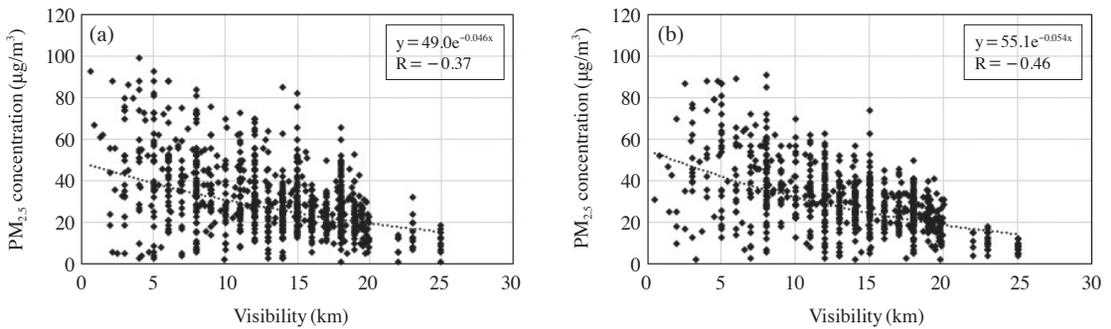


Fig. 3. Scatter plots between visibility and $PM_{2.5}$ concentration at (a) 12 LT and (b) 15 LT.

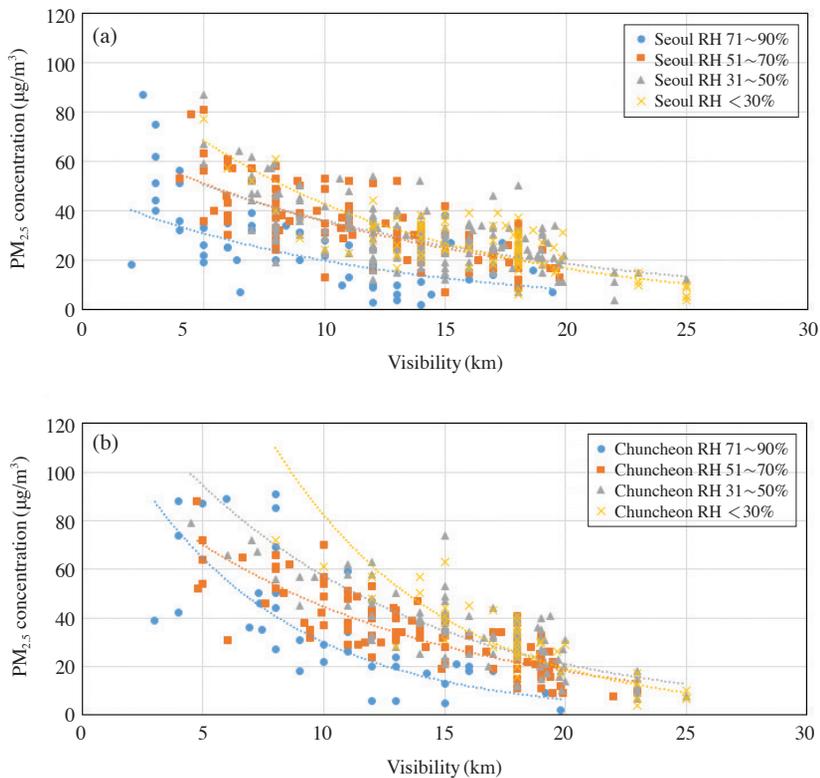


Fig. 4. Scatter plots between visibility and $PM_{2.5}$ concentration at 15 LT in (a) Seoul and (b) Chuncheon in terms of ranges of relative humidity.

간 관계식을 도출하였다(그림 4). 서울과 춘천에서 시정과 $PM_{2.5}$ 농도 간 상관계수는 각각 -0.57 에서 -0.75 까지의 범위와 -0.69 에서 -0.86 까지의 범위를 보여 서울보다 춘천에서 반비례성이 잘 나타나는 것을 알 수 있다. 상대습도 구간에 따른 관계식을 비교

한 결과, 서울과 춘천에서 모두 상대습도가 낮을수록 $PM_{2.5}$ 농도가 높게 추정되는 경향을 보였다. 이는 $PM_{2.5}$ 농도가 동일할 때 상대습도가 높을수록 시정이 감소한다는 이전 연구 결과와 일치한다. Cho *et al.* (2016)은 춘천의 $PM_{2.5}$ 농도와 $PM_{2.5}/PM_{10}$ 농도비 모두 상대습도

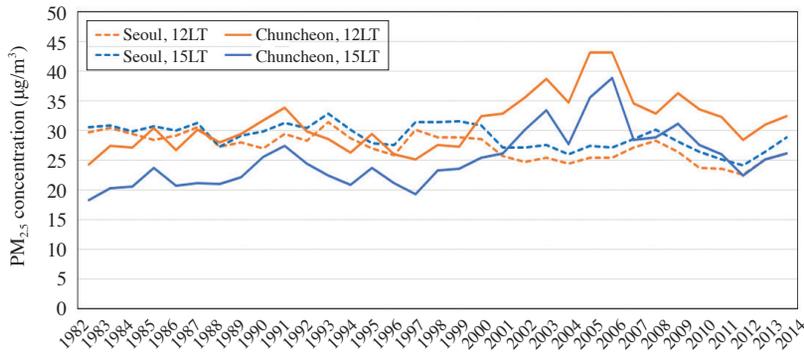


Fig. 5. Estimated trends of PM_{2.5} concentrations in Seoul and Chuncheon at 12 LT and 15 LT from 1982 to 2014.

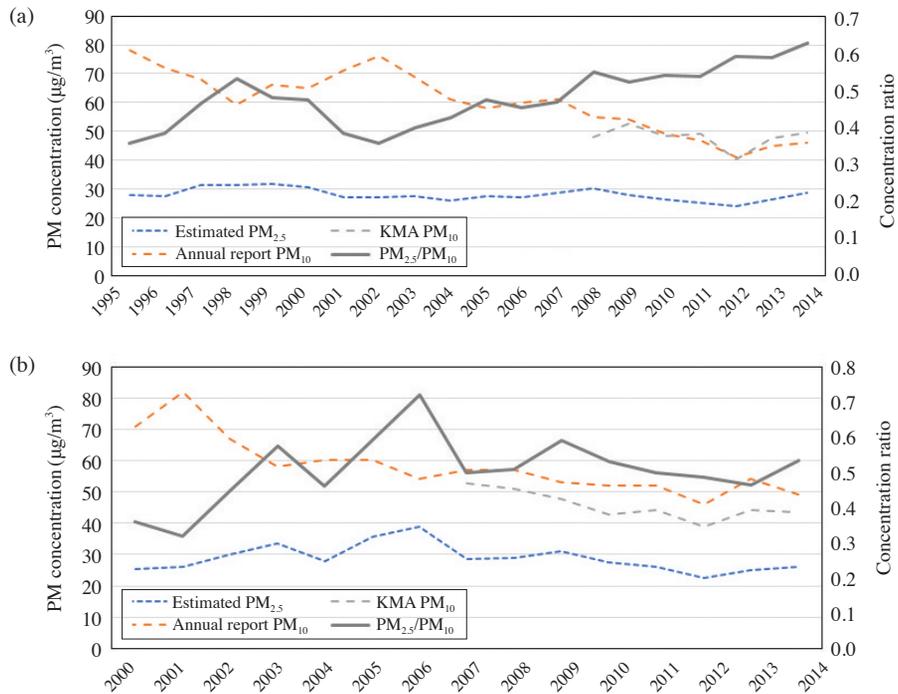


Fig. 6. Estimated trends of PM_{2.5}-to-PM₁₀ concentration ratios in (a) Seoul and (b) Chuncheon.

가 증가할수록 뚜렷하게 증가하는 것을 보였으며, 특히 안개 발생 시 유의하게 높은 PM_{2.5}의 농도 및 PM_{2.5}/PM₁₀을 확인하였다. 높은 상대습도는 이차 유기 및 무기 에어로졸의 형성에 좋은 조건을 제공하여 PM_{2.5} 농도를 증가시킨다. 이러한 상대습도에 따른 시정-PM_{2.5} 농도 관계식은 지역적인 특성에 따라 달라지므로 서울과 춘천에서 각각 구한 관계식을 해당 지역의 과거 시

정 관측 자료에 적용하였다.

3.3 장기간 PM_{2.5} 농도 변화 추이

앞서 도출한 상대습도 구간별 시정-PM_{2.5} 농도 관계식으로부터 1982년 5월 1일부터 2014년 12월 31일까지 32년 8개월간 일별 PM_{2.5} 농도를 추정하였다. 추정된 일별 PM_{2.5} 농도를 서울과 춘천 12시와 15시에 대

Table 1. Comparisons of estimated PM_{2.5} concentrations to reported ones in previous studies in Seoul.

Year	Measured PM _{2.5}	Estimated PM _{2.5} (12 LT)	Estimated PM _{2.5} (15 LT)	Difference (12 LT)	Difference (15 LT)
2003	38	25.5	27.6	12.5	10.4
2004	30	24.4	26.0	5.6	4.0
2005	29	25.5	27.5	3.5	1.5
2006	30	25.4	27.1	4.6	2.9
2007	30	27.1	28.6	2.9	1.4
2008	26	28.3	30.1	-2.3	-4.1
2009	26	26.5	28.1	-0.5	-2.1
2010	25	23.7	26.4	1.3	-1.4
2011	24	23.6	25.2	0.4	-1.2
2012	23	22.6	24.2	0.4	-1.2
2013	25	25.1	26.5	-0.1	-1.5

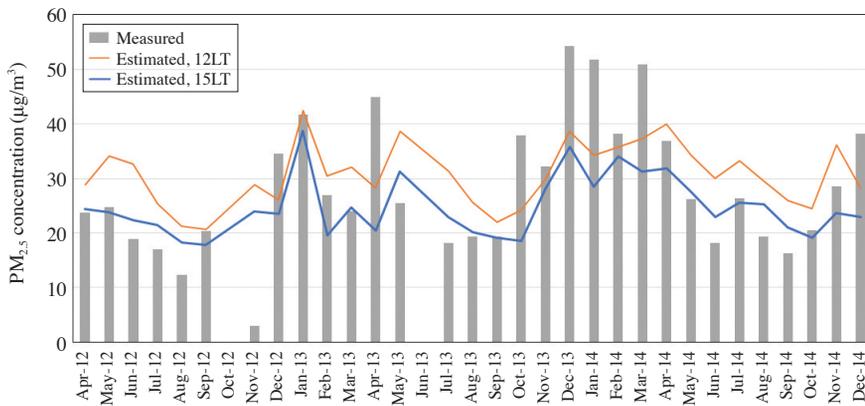


Fig. 7. Monthly variations of measured and estimated PM_{2.5} concentrations in Chuncheon.

해 각각 연도별 평균하여 장기간 농도 변화 추이를 살펴보았다(그림 5). 추정된 연평균 PM_{2.5} 농도는 서울에서 12시와 15시 모두 1993년에 각각 31.5 µg/m³와 32.8 µg/m³으로 최고치에 이르렀다가 이후 감소하여 2012년에 각각 22.6 µg/m³과 24.2 µg/m³으로 최저치를 보였다. 이는 앞서 그림 1에서 2012년 이후를 제외하고는 전반적으로 감소했던 장기간 PM₁₀ 농도 변화 추이와 상당히 비슷하다. 반면, 춘천에서는 12시와 15시 모두 1980년대와 1990년대 중반 이후 증가하는 경향을 보이다가 2005~2006년에 각각 43.2 µg/m³과 38.9 µg/m³으로 최고에 다다른 뒤 2012년까지 감소하는 경향을 보였다. 2006년 이후 2012년까지 감소하는 경향은 그림 1의 PM₁₀ 농도 변화 추이와 비슷하게 나타나지만 오히려 1980년대 이후 2005년 이전까지 증가하는 경향은 2000년 이후 PM₁₀ 농도 변화 추이에서 확인

할 수 없었던 부분이다. 12시와 15시의 PM_{2.5} 농도가 서울에 비해 춘천에서 더 큰 이유는 상대습도에 따른 PM_{2.5} 농도 차이가 원인으로 춘천에서 PM_{2.5} 농도는 상대적으로 서울에서보다 상대습도의 영향을 더 크게 받는 것으로 판단된다.

추정한 PM_{2.5} 농도와 기존 측정 자료인 PM₁₀ 농도로부터 서울과 춘천의 PM_{2.5}/PM₁₀ 농도비를 구하여 그림 6에 나타내었다. 이때, PM_{2.5} 농도는 15시 자료이며 PM₁₀은 일평균 자료이므로 상대적인 경향을 비교하는 것만 가능하다. 서울에서는 2002년 이후 PM₁₀ 농도는 지속적으로 감소하는 반면 PM_{2.5} 농도는 덜 감소하면서 PM_{2.5}/PM₁₀ 농도비가 꾸준히 증가하는 경향을 보인다. 이는 서울 지역의 대기 중 크기가 작은 입자의 비율이 높아지고 있음을 의미한다. 반면, 춘천에서는 2007년 이후 PM_{2.5} 농도와 PM₁₀ 농도가 비슷하게 감소

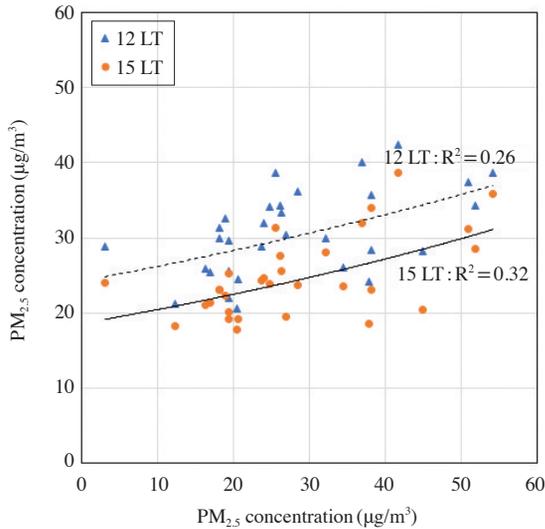


Fig. 8. Scatter plot between measured (x-axis) and estimated (y-axis) PM_{2.5} concentrations at 12 LT and 15 LT in Chuncheon.

하면서 PM_{2.5}/PM₁₀ 농도비는 큰 차이를 보이지 않는다. 위 결과를 통해 PM_{2.5}/PM₁₀ 농도비의 장기 변화 추이는 한반도 내에서도 지역적으로 다를 수 있음을 확인하였다.

3.4 PM_{2.5} 농도 추정의 검증

추정한 PM_{2.5} 농도의 신뢰성을 확인하기 위하여 이전의 국내 연구에서 보고된 과거 서울과 춘천의 PM_{2.5} 농도 측정 자료에 대해 검증하였다. 먼저 서울의 12시와 15시의 시정과 상대습도로부터 추정된 PM_{2.5} 농도를 기존 측정 결과와 비교하여 표 1에 나타내었다. 검증에 사용한 측정 농도 자료는 연평균 PM_{2.5} 농도를 구할 수 있는 2003년 이후 기간에 한정되었다(Han and Kim, 2015; NIER, 2013). 기존 측정 농도를 본 연구의 추정 농도와 비교한 결과, PM_{2.5} 농도 차는 2003년 측정 자료에서 10 µg/m³ 이상 크게 나타난 반면, 2005년 이후 PM_{2.5} 농도 차는 5 µg/m³ 이하로 크지 않았다. 본 연구에서는 12시와 15시의 시정과 상대습도 자료만으로 PM_{2.5} 농도를 추정하였기 때문에 밤과 낮의 PM_{2.5} 농도 차가 큰 조건에서는 낮은 정확도를 보일 가능성이 있다. 표 1의 비교 결과는 12시와 15시의 시정과 상대습도 자료만으로도 연평균 PM_{2.5} 농도 변화 추이를 어느 정도 추정할 수 있음을 확인하였다. 다만, 2004년

이전의 큰 농도 차를 고려할 때 과거로 갈수록 PM_{2.5} 농도 추정 자료의 신뢰도가 낮을 수 있음을 감안해야 한다.

춘천은 장기간 연평균 PM_{2.5} 농도 측정 자료가 없어 대신 Park (2017)의 2012년 4월부터 2014년 12월까지 월별 PM_{2.5} 농도 자료를 이용하여 검증하였다(그림 7). 춘천 월평균 PM_{2.5} 농도는 대체적으로 10월에서 3월까지 높고 5월에서 7월까지 낮은 계절적 변화를 보인다. 12시와 15시의 추정 PM_{2.5} 농도는 이러한 계절적 변화를 잘 따르며, 연도별 계절적 변화의 차이도 유사하게 나타났다. 이를 좀 더 정량적으로 비교하기 위해 그림 8에 월별 측정 농도와 추정 농도 간 산점도를 나타내었다. 전반적으로 측정 농도의 변화 양상을 추정 농도가 잘 따르며 12시(R²=0.26)에 비해 15시(R²=0.32)의 농도 추정 결과가 더 좋았지만, 12시와 15시 모두 농도 변화폭은 측정 농도의 변화폭에 비해 작았다. 특히 2012년 10월에 이례적으로 낮은 농도가 산점도의 기울기에 큰 영향을 주어 1:1 선에서 상당히 벗어났다. 위의 검증 결과를 종합해볼 때, 춘천 PM_{2.5} 농도의 계절적 변화는 잘 추정되었으나, 그 변화폭은 실제 측정 농도에 비해 작음을 확인하였다.

4. 결론 및 한계점

본 연구에서는 시정과 PM_{2.5} 농도 관계식으로부터 과거 장기간 PM_{2.5} 농도 변화 추이를 추정하고 분석하였다. 2015~2016년 서울과 춘천의 시정, 상대습도, PM_{2.5} 농도 자료를 이용하여 관계식을 도출하였고, 이를 해당 지역의 1982년부터 2014년까지의 연평균 PM_{2.5} 농도를 구하는 데 적용하였다. 이때, 상대습도의 영향을 반영하기 위해 상대습도를 네 구간으로 나누어 각 구간별 관계식을 적용하였다. 이후 연평균 PM₁₀ 농도를 함께 비교하고 서울과 춘천에서 측정된 PM_{2.5} 농도에 대해 검증하였다. 그 결과 연평균 PM_{2.5} 농도는 서울에서 대체로 감소하는 경향을 보인 반면, 춘천에서는 2005~2006년까지 서서히 증가하다가 이후 감소하는 경향을 보였다. 측정값에 대해 검증한 결과, 2005년 이후 PM_{2.5} 추정 농도는 측정된 연평균 농도 변화와 잘 일치하였으며, 월별 변화 양상도 잘 따랐다. 다만, 2003년 이전 추정 농도의 신뢰도와 월별 정량적인 분

석은 좀 더 확인이 필요한 것으로 판단된다. 서울과 춘천에서 2005년 이후 미세먼지 농도가 감소한 주요 요인으로 수도권 대기환경개선에 관한 특별법 시행을 들 수 있다. PM_{2.5}에 의한 대기질 악화는 수도권에 국한되지 않고 풍하측 지역인 춘천에 영향을 미치는 등 광역적인 특성을 보인다. 본 연구에서 추정된 PM_{2.5} 농도 변화 추이로 볼 때, 이러한 대기환경개선정책을 수도권 외곽 지역까지 확대하여 적용하는 것이 필요하다. 시정을 이용하여 PM_{2.5} 농도를 추정하는 방법은 향후 일변화와 계절적 변화를 분석하는 데도 활용할 수 있으며, 시정과 PM_{2.5} 농도 간 상관성이 높은 다른 도시에도 적용할 수 있을 것이다.

본 연구에서는 실제 측정 자료가 없는 1980~1990년대 서울과 춘천의 PM_{2.5} 농도를 추정했다는 점에서 그 의의가 있다. 그러나 연구 방법과 자료 활용의 측면에서 몇몇 한계점이 있었다. 첫 번째로 주간에 비해 야간의 시정과 PM_{2.5} 농도의 상관성을 확인하기 어려워 주간의 자료만 사용한 한계가 있다. 두 번째로 계절별 대기 중 입자의 광학적 및 화학적 특성이 다름에도 불구하고 2015~2016년 2년간의 자료를 구분 없이 사용한 한계가 있다. 마지막으로 2015~2016년 대기 중 입자의 광학적, 화학적 특성이 과거 32년과 동일하다고 가정한 한계도 존재한다. 이러한 한계를 보완하기 위해서 지점별, 시간별, 월별, 상대습도별 각각의 시정-PM_{2.5} 농도 관계식을 각각 도출하는 것이 필요하며 PM_{2.5} 농도가 아닌 각 화학 성분별 농도에 대한 관계식을 각각 도출하는 것이 필요하다. 추후 2015년 이후 몇 년간의 PM_{2.5} 농도 자료가 충분히 축적됨에 따라 언급한 한계점들이 해결될 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

본 논문의 개선을 위해 좋은 의견을 제시해 주신 두분의 심사위원께 감사를 드립니다. 본 연구는 행정안전부 극한 재난대응 기반기술개발사업의 연구비 지원(2017-MOIS31-001)에 의해 수행되었습니다.

References

Chen, J., Qiu, S., Shang, J., Wilfrid, O.M.F., Liu, X., Tian, H.,

Boman, J. (2014) Impact of relative humidity and water soluble constituents of PM_{2.5} on visibility impairment in Beijing, China, *Aerosol and Air Quality Research*, 14, 260-268.

Cho, S.-H., Kim, P.-R., Han, Y.-J., Kim, H.-W., Yi, S.-M. (2016) Characteristics of ionic and carbonaceous compounds in PM_{2.5} and high concentration events in Chuncheon, Korea, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 32(4), 435-447. (in Korean with English abstract)

Choi, J.S., Oh, J., Kim, H.-J., Ahn, J.-Y., Lee, S.-D., Lee, Y., Jeon, H., Hong, Y.-D., Park, J.-S. (2015) The study of the characteristics of PM_{2.5} and visibility at west inflow regions of in the Korea peninsula, *Journal of the Korean Society of Urban Environment*, 15(3), 273-281. (in Korean with English abstract)

Ghim, Y.S., Lee, S.H., Kim, J.Y., Moon, K.-C., Kim, Y.P. (2002) Visibility variations in Korea in the 1980s and 1990s, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 18(6), 503-514. (in Korean with English abstract)

Han, S.H., Kim, Y.P. (2015) Long-term trends of the concentrations of mass and chemical composition in PM_{2.5} over Seoul, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 31(2), 143-156. (in Korean with English abstract)

Kang, C.-M., Park, S.K., Sunwoo, Y., Kang, B.-W., Lee, H.S. (2006) Respiratory health effects of fine particles (PM_{2.5}) in Seoul, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 22(5), 554-563. (in Korean with English abstract)

Kim, Y.P. (2006) Air pollution in Seoul caused by aerosols, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 22(5), 535-553. (in Korean with English abstract)

Lee, C.B., Kim, Y.G., Baek, B.H. (1996) Long-term trends of visibility in Seoul and Chuncheon, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 12(4), 473-478. (in Korean with English abstract)

Lee, C.H. (2007) Visibility impairment phenomena due to air pollution factors in Seoul. M.S. dissertation of the University of Seoul, 40pp. (in Korea with English abstract)

Lee, H.-J., Lee, E.-H., Lee, S.-S., Kim S. (2012) Study of methodology for estimating PM₁₀ concentration of Asian dust using visibility data, *Atmosphere*, 22(1), 13-28. (in Korean with English abstract)

Lee, K.-H., Kim, K.-W., Kim, G., Jung, K., Lee, S.-H. (2013)

- Visibility estimated from the multi-wavelength sunphotometer during the winter 2011 intensive observation period at Seoul, Korea, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 29(5), 682-691. (in Korean with English abstract)
- Lee, Y.-H., Hahm, J.-H., Park, K.-C., Jeong, H.-Y., Kim, A.-Y., Kwak, K.-H. (2017) A study on the correlation between visibility distance and atmospheric PM_{2.5} concentration, *Proceedings of Asia Aerosol Conference 2017*, 2-6 July 2017, Jeju, Republic of Korea.
- Lim, H., Lee, T.-J., Kim, D.-S. (2015) PM₁₀ and PM_{2.5} characterization based on mass concentration long-term (1989~2012) database in Yongin-Suwon area, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 31(3), 209-222. (in Korean with English abstract)
- National Institute of Environmental Research (NIER) (2013) *Annual Report of Ambient Air Quality in Korea*, 2012.
- 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. (in Korean with English abstract)
- Park, J.M. (2017) *Fine particulate organic carbon in Chuncheon, Korea: Concentrations and source identification*, M.S. dissertation of Kangwon National University, 71pp. (in Korean with English abstract)
- Park, J.-S., Park, S.-M., Song, I.-H., Shin, H.-J., Hong, Y.-D. (2015) Characteristics of visibility impairment by semi-continuous optical and chemical property monitoring of aerosols in Seoul, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 31(4), 319-329. (in Korean with English abstract)
- 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 Korean Society for Atmospheric Environment*, 10(3), 203-208. (in Korean with English abstract)
- Shin, Y.J. (1996) *A Study on the atmospheric characteristics and visibility of smog phenomena in Seoul area*, M.S. dissertation of Konkuk University, 68pp. (in Korean with English abstract)
- Yoon, S.-C., Lee, G.-W. (1998) On the origin of visibility degradation in Seoul, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 14(3), 229-235. (in Korean with English abstract)