



논문

입자소산효율 분석을 통한 부산과 울산의 미세먼지 특성 변화 연구

A Study on the Characteristic Variations of Fine Particle in Busan and Ulsan through Particle Extinction Efficiency Analysis

주소희, Dekhoda Naghmeh, 노영민^{1),*}

부경대학교 지구환경시스템과학부 환경공학전공

¹⁾부경대학교 환경공학과

접수일 2021년 1월 7일
수정일 2021년 1월 22일
채택일 2021년 1월 23일

Received 7 January 2021
Revised 22 January 2021
Accepted 23 January 2021

*Corresponding author
Tel : +82-(0)51-629-6526
E-mail : nym@pknu.ac.kr

Sohee Joo, Dekhoda Naghmeh, Youngmin Noh^{1),*}

Division of Earth Environmental System Science, Pukyong National University,
Busan, Republic of Korea

¹⁾Department of Environmental Engineering, Pukyong National University,
Busan, Republic of Korea

Abstract In this study, the extinction efficiency, one of the fine particle optical characteristics was calculated using the PM_{2.5} mass concentrations and the visibility data measured in Busan and Ulsan city during the period 2015~2019. We identified higher seasonal extinction efficiency in summer and autumn compared to spring and winter due to variations in relative humidity, particle characteristics, and wind direction. In addition, the annual extinction efficiency rate with the values of 0.72 and 0.87 (m²/g)/year in Busan and Ulsan, respectively, indicated an increasing trend in both regions from 2015 to 2019. However, no considerable trend was observed in relative humidity during the study period. We conclude that the annually increasing trend might be associated with the particle characteristics, such as an increase in the number of particles per unit mass due to the smaller particle size compared to the past, or an increase in the particles with the light scattering characteristics. Considering the wind direction, the extinction efficiency was also high when the eastward wind was dominant compared to other winds. Despite the reduction in PM_{2.5} mass concentration, citizens can not feel this effect, since they perceive the PM_{2.5} mass concentration reduction by an increase in visibility. Our study suggests that it can be more effective to implement the pollution reduction policies based on the particle characteristics such as particle size, particle components, and the source of particle origination, not only the fine particle weight.

Key words: Busan, Ulsan, Extinction efficiency, PM_{2.5}, Visibility

1. 서론

2013년 세계보건기구(WHO)가 미세먼지를 1군 발암물질로 지정한 후 전 세계적으로 미세먼지에 대한 관심이 높아졌다. 실제로 많은 연구에서 미세먼지가 호흡기 및 심장 질환과 관련이 있음을 보고하였다(Xing *et al.*, 2016; Polichetti *et al.*, 2009; Laden *et al.*, 2006; Dockery and Pope, 1994). 미세먼지는 사람의 건강뿐만 아니라 시정, 대기질 그리고 기후변화와 밀

접한 관련이 있어 환경문제에 있어서도 중요한 관심사다(Cao *et al.*, 2012; Wang *et al.*, 2006). 한국의 경우, 2013년 정부가 미세먼지를 대기환경기준물질로 지정하고 이에 대한 예보제를 실시할 것을 발표하면서 미세먼지에 대한 관심이 급격히 높아졌다. 특히, 전문가가 아닌 일반 시민들의 미세먼지에 대한 관심도는 크게 증가하였다. 2012년에 비해 2013년 미세먼지 관련 언론 보도 건수는 4.5배로 증가하였으며(Kim *et al.*, 2015), ‘미세먼지’라는 용어를 포함한 미디어 기사가

2012년 이후 10.5배 급증하였다(Lee and Bae, 2020). 또한 2018년에 실시된 한 통계청 조사결과 39,000명 중 82.5%가 ‘미세먼지 문제에 대해 불안하다고 답하여 환경문제 중 미세먼지에 대한 시민들의 불안감이 큰 것을 확인할 수 있었다(KOSTAT, 2018a).

이에 따라 한국 정부는 미세먼지 감축을 위해 노후 경유차 감축 및 사업장 배출허용기준 강화와 같은 다양한 정책을 실시하였다. 이러한 정부의 노력에 의해 전국 PM_{10} 은 2001년부터 2017년까지 꾸준히 감소하고 있으며, 서울의 $PM_{2.5}$ 의 경우에도 2003년부터 2017년까지 감소하고 있다(Yeo and Kim, 2019). 하지만, 일부 지역에서는 미세먼지에 대한 관심도가 높아진 2013년 이후에도 그 감소 추이가 뚜렷하지 않았다(Yeo and Kim, 2019). 따라서, 몇몇 연구에서는 지역별 미세먼지 연구 필요성을 강조하였다(Yeo and Kim, 2019; Han *et al.*, 2008).

시정은 대기 중 물체를 인식할 수 있는 최대 거리를 말한다. 일반 시민들이 미세먼지를 실제로 체감하는 방법은 대기가 흐린지 또는 맑은지를 느끼는 것으로 시정은 시민들이 대기오염 정도를 파악할 때 쉽게 이용되는 지표 중 하나다. 시정은 빛의 소산과 관련이 있으며 대기 중 가스와 입자에 의해 빛이 소산될 경우 시정은 악화된다(Koschmieder, 1924). 하지만, 가스보다 입자가 빛의 소산에 더 큰 영향을 주며 큰 입자보다 작은 입자에 의해 더 큰 영향을 받는다(Baik *et al.*, 1994; Kim, 1988; Sloane and Wolff, 1985). 또한, 모든 조건이 동일할 경우 미세먼지 농도가 높아지면 시정은 악화되고 농도가 낮으면 시정은 좋아진다. 또한 시정은 일반 시민들이 미세먼지에 대하여 직접적으로 체감할 수 있는 지표이다. 미세먼지 농도가 개선되었다는 것을 시정 개선으로 시민들이 체감할 수 있는 것이다. 이와 같은 시정의 특성을 이용하여 본 연구에서는 2015년부터 2019년까지 시정과 미세먼지 농도 변화를 분석하여 부산과 울산지역 미세먼지 소산 특성의 장기적인 변동 추세를 연구하였다.

본 연구는 다음과 같이 이루어진다. 먼저 Section 2에서 분석 지점 및 분석 자료 등 본 연구에서 이루어

진 분석 방법에 대해 설명하였으며 Section 3에서는 분석된 자료를 바탕으로 부산과 울산의 미세먼지 농도 변화 특성에 대해 살펴보았다. 마지막으로 본 연구의 요약 및 결론을 Section 4에 나타냈다.

2. 방 법

2.1 분석 자료

본 연구에서 분석된 시정 자료는 기상청에서 관측한 지상기상관측자료를 이용하였다. 시정을 관측하는 방법은 숙련된 관측자가 지정된 대상 지점의 시야 확보 여부를 시정 거리를 측정하는 목측 방식과 시정계를 이용하여 관측하는 자동 측정 방식이 있다. 목측 방식을 통해 야간에 측정할 경우, 주간과 같은 밝기로 가정한 후 최대 거리를 측정한다. 2017년 이후로 22개 지점을 제외한 나머지 지점은 자동 측정 방식을 이용하고 있다.

시정은 입자의 특성 외에도 상대습도, 안개 및 강수와 같은 기상인자에 의해서도 영향을 받는다(Zhao *et al.*, 2011; Tang, 1996). 따라서, 본 연구에서는 지상기상관측자료에서 확인할 수 있는 상대습도, 풍향 그리고 현재 일기(현천)에 대한 정보도 이용하였다. 상대습도가 90% 이상인 경우, 강수와 안개가 발생했을 경우에 시정은 미세먼지 농도와 상관없이 악화된다(Malm and Day, 2001). 미세먼지 농도 외의 영향을 최소화하기 위하여 상대습도가 90%보다 높은 경우와 강수나 안개가 발생했을 경우의 시정 자료는 분석에서 제외하였다. 또한 시정을 목측 방식으로 관측했을 때 관측자가 최대 거리를 20 km로 측정했기 때문에 자동 측정 방식으로 시정 값이 20 km보다 크게 산정된 값은 20 km로 적용하여 분석하였다.

미세먼지 농도 자료는 한국환경공단에서 운영하는 사이트(airkorea.or.kr)에서 제공하는 최종확정자료를 확보하여 분석하였다. 미세먼지는 입자의 크기에 따라 PM_{10} 과 $PM_{2.5}$ 로 나눌 수 있다. PM_{10} 은 2000년 이전부터 전국적으로 관측망이 구축되어 관측을 수행하

고 있었으나, $PM_{2.5}$ 는 2015년부터 대기환경기준에 포함되어 전국 관측 데이터는 2015년부터 존재한다. 본 연구에서는 $PM_{2.5}$ 가 PM_{10} 보다 시정과의 상관관계가 높다는 선행 연구 결과(Yang *et al.*, 2007)를 바탕으로 $PM_{2.5}$ 의 질량 농도만을 분석에 적용하였다.

2.2 시정 관측 사이트

본 연구에서는 한국의 동남쪽에 위치한 부산과 울산을 연구 지역으로 하고 있다. 부산과 울산은 한국의 주요 항만 도시이다. 특히, 부산은 중국, 두바이, 싱가포르와 함께 ‘세계 10대 초미세먼지 오염항만’으로 선정되는 등 미세먼지에 의한 대기오염이 심각한 지역이다(Wan *et al.*, 2016). 이러한 항만도시는 선박 외에도 화물자동차 및 항만하역장비와 같은 다양한 미세먼지 배출원에 의해서도 영향을 받는다. 또한, 부산은 서울 다음으로 인구 밀도가 높은 지역이며 울산은 대규모 산업단지가 위치해 있어 인위적 오염물질이 발생할 확률이 높다(KOSTAT, 2018b).

본 연구는 시정 자료와 $PM_{2.5}$ 농도 자료를 이용하여 $PM_{2.5}$ 의 소산효율을 산출하였다. 하지만 기상청 지상기상관측소와 미세먼지 관측소가 동일 지점에 위치한 경우가 제한되어 본 연구에서는 기상청 지상기상관측소를 중심으로 가장 근접해 있는 미세먼지 관측소를 비교하였다. 먼저 부산의 시정 자료는 부산기상관측소(부산광역시 중구 북병산길 32번길 5-11)에서 측정된 자료이며 미세먼지 농도 자료는 광복동 주민센터옥상(부산광역시 중구 광복로 55번길 10)에서 확보한 자료이다. 울산의 시정자료와 미세먼지 자료는 각각 울산기상대(울산광역시 중구 달빛로 65-26)와 성남119안전센터옥상(울산광역시 중구 만남의 거리 14)에서 측정하였다. 기상시상관측소와 미세먼지 관측소 간의 직선 거리는 부산 약 0.58 km, 울산 약 3.46 km였다. 두 자료를 동시에 사용해야 하기 때문에 시정 자료와 미세먼지 농도 자료가 같은 날, 같은 시간에 하나의 자료라도 없으면 그 시간대의 소산효율은 산출하지 않았다.

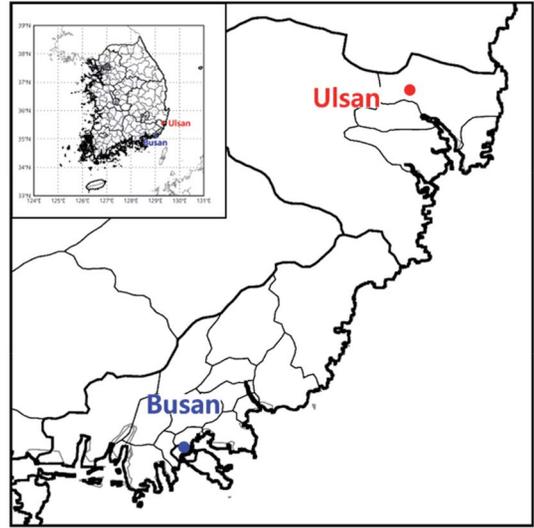


Fig. 1. Analysis point location (Busan and Ulsan).

2.3 소산효율(Extinction efficiency, Q_e) 산출

소산효율(Extinction efficiency, Q_e)은 단위 질량당 입자가 대기 중의 빛을 얼마나 소산하는지를 나타내는 값으로 대기 중 미세먼지가 같은 질량 농도를 가지더라도 입자의 특성이나 상대습도에 따라 빛의 소산 정도는 달라진다. Kim and Kim (2003)은 PM_{10} 보다 $PM_{2.5}$ 의 Q_e 값이 약 3배 높게 측정되며 시정 장애의 주요 원인이 $PM_{2.5}$ 에 의한 것이라고 발표하였으며, Qu *et al.* (2015)는 빛의 소산이 입자의 성분에 의해서 달라진다고 보고하였다. 또한, Han *et al.* (1996)은 상대습도가 60% 이하, 80% 이상일 때의 각각의 산란효율($PM_{2.5}$ 에 대한 입자산란계수) 값이 $1.03 \text{ m}^2/\text{g}$, $1.97 \text{ m}^2/\text{g}$ 로 상대습도가 높아짐에 따라 Q_e 가 증가한다고 발표하였다. 다시 말해, 입자의 크기나 성분과 같은 입자의 특성과 상대습도에 따라 단위 질량당 빛이 소산되는 정도인 Q_e 값이 달라지게 된다. Q_e 를 산출하기 위해서는 소산계수(Extinction coefficient, σ_{ext})를 먼저 산출해야 한다. σ_{ext} 란, 매개체에 의해 빛이 소멸되는 정도를 나타내는 것으로 이는 Koschmeider 식에 시정 자료를 대입하여 산출할 수 있으며 식은 다음과 같다(Koschmeider, 1924).

$$\sigma_{ext}(m^{-1}) = -\frac{\ln \varepsilon}{VIS(m)} \quad (1)$$

식 (1)에서 VIS는 시정, ε 는 대조한계를 나타낸다. 대조한계(Brightness contrast threshold)의 값은 WHO는 0.02, ICAO (International Civil Aviation Organization)은 0.05로 각 기관마다 추천하는 값이 다르다 (Xian *et al.*, 2018). 본 연구에서는 서울과 같은 대도시나 산업 지역의 시정 관련 연구에서 많이 사용되는 0.02를 대조한계 값으로 적용하여 소산계수를 계산하였다.

$$\sigma_{ext}(m^{-1}) = \frac{3.912}{VIS(m)} \quad (2)$$

대조한계를 0.02로 적용한 식 (2)를 이용하여 시정 자료로부터 σ_{ext} 를 산출한 뒤 이를 PM_{2.5} 질량 농도로 나누어 주면 최종적으로 단위 질량당 σ_{ext} 를 나타내는 Q_e를 구할 수 있다. Q_e를 구하는 식은 다음과 같이 나타낸다.

$$Q_e(m^2/g) = \frac{\sigma_{ext}(m^{-1})}{PM(g/m^3)} \quad (3)$$

여기서, PM은 미세먼지 질량 농도를 나타내며 본 연

구에서는 PM_{2.5} 질량 농도를 적용하였다. 이와 같은 방식으로 산출된 Q_e을 연도별, 월별, 그리고 계절별로 추세를 비교하였다.

3. 연구내용

3.1 시정 및 질량농도 추세

본 연구는 Q_e 산출에 앞서 Q_e 계산에 이용된 시정과 PM_{2.5} 농도 자료의 2015년~2019년 추세에 대해 살펴 보았다. 그림 2는 2015년 1월부터 2019년 12월까지의 월평균 시정과 PM_{2.5} 질량농도와 단순 선형 회귀 분석을 통한 증감 추세를 보여준다. 시정과 PM_{2.5} 모두 월별 등락은 있으나 전체적으로 부산과 울산 두 지역 모두에서 시정은 각각 0.00032와 0.00018 km/month로 개선되고, PM_{2.5}는 각각 -0.0054와 -0.0055 (μg/m³)/month로 농도가 감소되는 추세를 보였다.

PM_{2.5} 농도는 부산과 울산 모두 봄(3월, 4월, 5월)과 겨울(1월, 2월, 12월)에 높은 경향을 보였으며 여름(6월, 7월, 8월)과 가을(9월, 10월, 11월)에 낮은 농도를

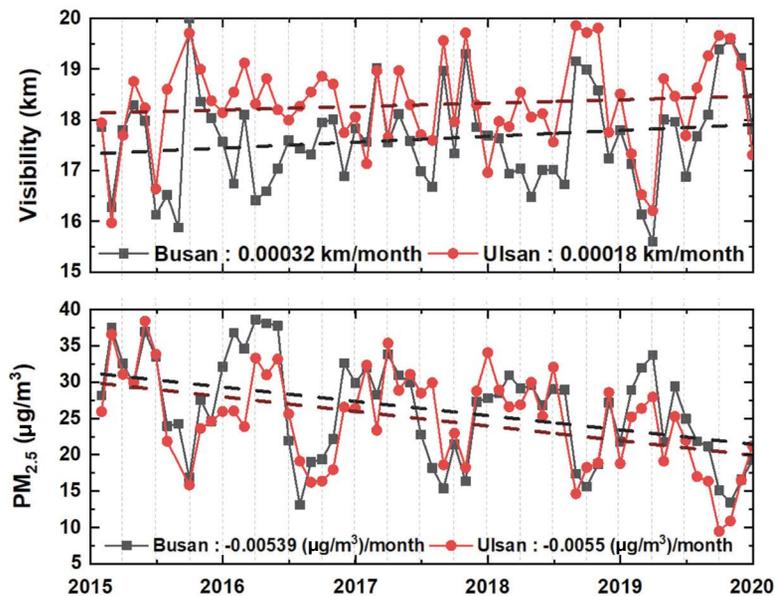


Fig. 2. PM_{2.5} concentration and visibility trend in Busan and Ulsan from 2015 to 2019 (Excluding data from Ulsan for August 2015 and July 2018).

보였다. 이는 Han *et al.* (2008)과 Lee and Hieu (2011)의 울산지역, Jeon (2010)의 부산지역 미세먼지 농도 연구와 유사한 결과이다. Jeon (2010)은 이러한 계절적 차이가 겨울철 공업지역의 난방을 위한 연료 사용 증가와 여름철에 비해 겨울철 대기혼합층 고도가 낮아졌기 때문으로 판단된다고 보고하였다. 시정 자료에서는 2016년을 제외하고 봄, 겨울보다 여름, 가을의 시정이 좋은 것을 볼 수 있다. 이러한 시정의 계절 간 차이는 존재했지만, 2015년부터 2019년까지 전체적인 시정 개선 정도는 미약하게 나타났다. 이에 본 연구는 시정과 직접적으로 관련이 있는 단위질량당 입자의 Q_e 을 산출하고자 하였다.

3.2 소산효율(Q_e) 추세

그림 3은 2015년부터 2019년까지의 월별 Q_e 와 상대습도 값을 나타낸 그래프다. 상대습도와 Q_e 의 계절적 차이는 $PM_{2.5}$ 농도와 반대되는 경향을 보였다. 앞서 $PM_{2.5}$ 농도는 여름과 가을에 비해 봄과 겨울에 높은 경향을 보였지만 Q_e 은 이와 반대로 봄과 겨울에 비해 여름과 가을에 높은 값을 보였다. 이는 여름과 가을의 상대습도가 봄과 겨울에 비해 높은 값을 가지기 때문인 것으로 보인다. 상대습도 외에도 Q_e 에 영향을 주는 인자 중 하나는 입자의 크기이다. 여름과 봄의 입자 크

기를 비교해 봤을 때 봄의 입자크기가 여름에 비해 크고 여름에 작은 입자들이 더 많이 존재한다. 선행 연구에서는 $PM_{2.5}/PM_{10}$ 값이 봄보다 여름에 더 크다는 것을 확인할 수 있다(Lee and Hieu, 2011; Jeon, 2010). 이는 여름에 잦은 강수로 인해 큰 입자가 제거되기 쉽고, 봄은 중국이나 몽골 사막에서 불어오는 황사로 인해 큰 입자의 비율이 증가하기 때문이다. Han *et al.* (2008)은 울산지역에서 입자의 산란에 기여하는 황산염이 다른 계절에 비해 여름과 가을에 증가한다고 밝혔다. 이러한 여름과 가을철에 황산염의 증가는 바람의 방향과 관련이 있는 것으로 보인다. 그림 4와 그림 5는 각각 부산과 울산의 월별 풍향과 풍속을 보여준다. 겨울부터 봄까지는 북서풍이 주요한 반면 여름에 해당하는 6월부터 풍향이 바뀌어 동풍의 비율이 증가한다. 울산 관측 지점의 동쪽에 공업단지가 존재하고 부산 관측 지점의 북동쪽에는 항만이 위치하여 선박 및 화물차에서 발생하는 많은 양의 SO_2 가 발생했기 때문인 것으로 보인다. 이러한 상대습도의 변화, 입자의 특성과 같은 복합적인 이유로 인해 여름과 가을의 Q_e 이 봄과 겨울에 비해 높게 나타나는 것으로 보인다.

그림 6에서 보여지는 연도별 Q_e 변화를 보면 2015년부터 2019년까지 부산과 울산 모두 전체적인 Q_e 이 증가하는 경향인 것을 확인할 수 있다. 울산의 경우 2017년 Q_e 이 다시 감소했지만 2018년, 2019년 그 값이 다시 크게 증가한 것을 볼 수 있다. 이러한 경향은 연도별 Q_e 평균 그래프에서도 찾아볼 수 있다(그림 6). Q_e 의 연평균 값 또한 울산의 2017년을 제외하고 부산과 울산 모두 계속해서 Q_e 값이 증가하고 있다. 부산과 울산의 연평균 Q_e 의 증가 추세를 각각 0.72와 0.87 (m^2/g)/year이었다. 하지만 앞서 그림 3에서 확인되는 상대습도는 증가 경향은 찾아볼 수 없었다. 따라서 Q_e 의 연도별 증가 경향은 입자의 크기나 성분과의 변화와 관련된 것으로 보인다. 과거에 비해 입자크기가 작은 미세먼지가 많아져 단위질량당 입자 수농도가 증가했거나 빛의 산란 특성이 높은 입자의 생성이 과거에 비하여 최근으로 올수록 증가하고 있는 것으로 판단된다.

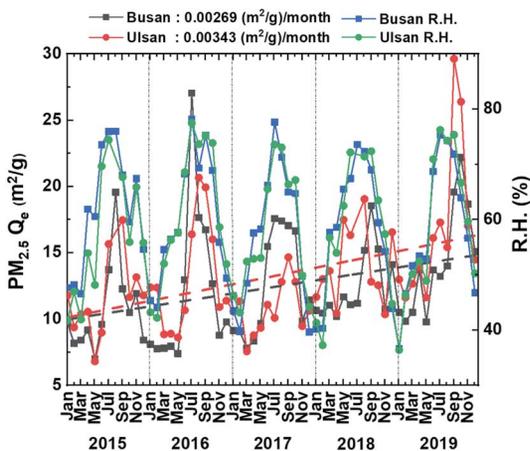


Fig. 3. Monthly variation of extinction efficiency (Q_e) and relative humidity from January 2015 to December 2019.

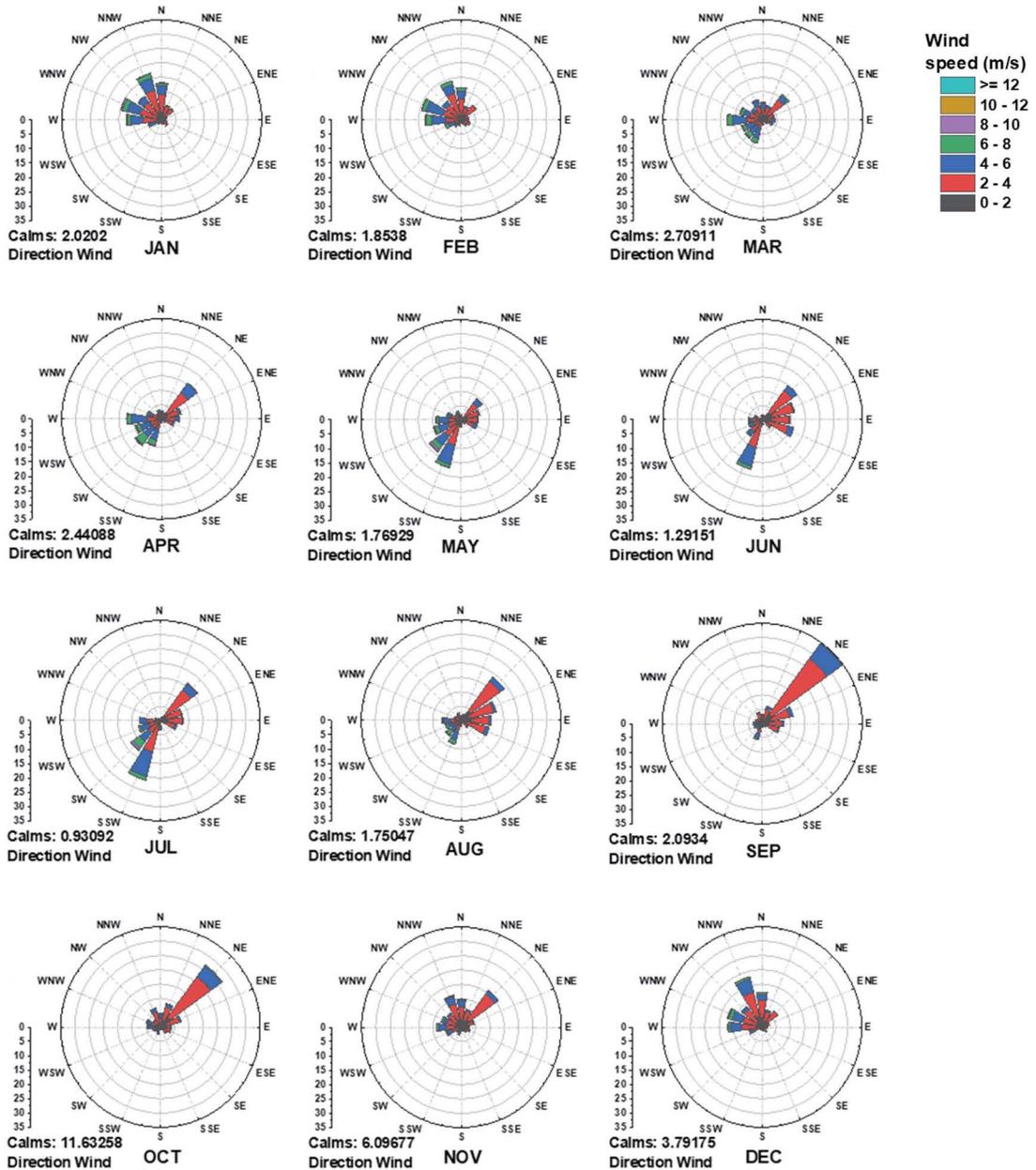


Fig. 4. Monthly wind speed and direction in Busan.

본 연구에서는 계절에 따라 연도별 Q_e 값의 변화를 살펴보았다(그림 7). 계절별로는 여름과 가을의 Q_e 이 봄과 겨울보다 높았다. 계절별 증감 추세도 부산의 여름을 제외하고 부산, 울산의 모든 계절에서 연도별 Q_e

이 증가하고 있는 것을 확인할 수 있었다. 단순선형회귀 분석을 통해 나타난 Q_e 기울기를 봤을 때 다른 계절과 달리 부산의 여름 기울기는 $-0.89 (m^2/g)/year$ 로 감소하고 있었지만 이를 제외한 다른 계절의 Q_e 기울

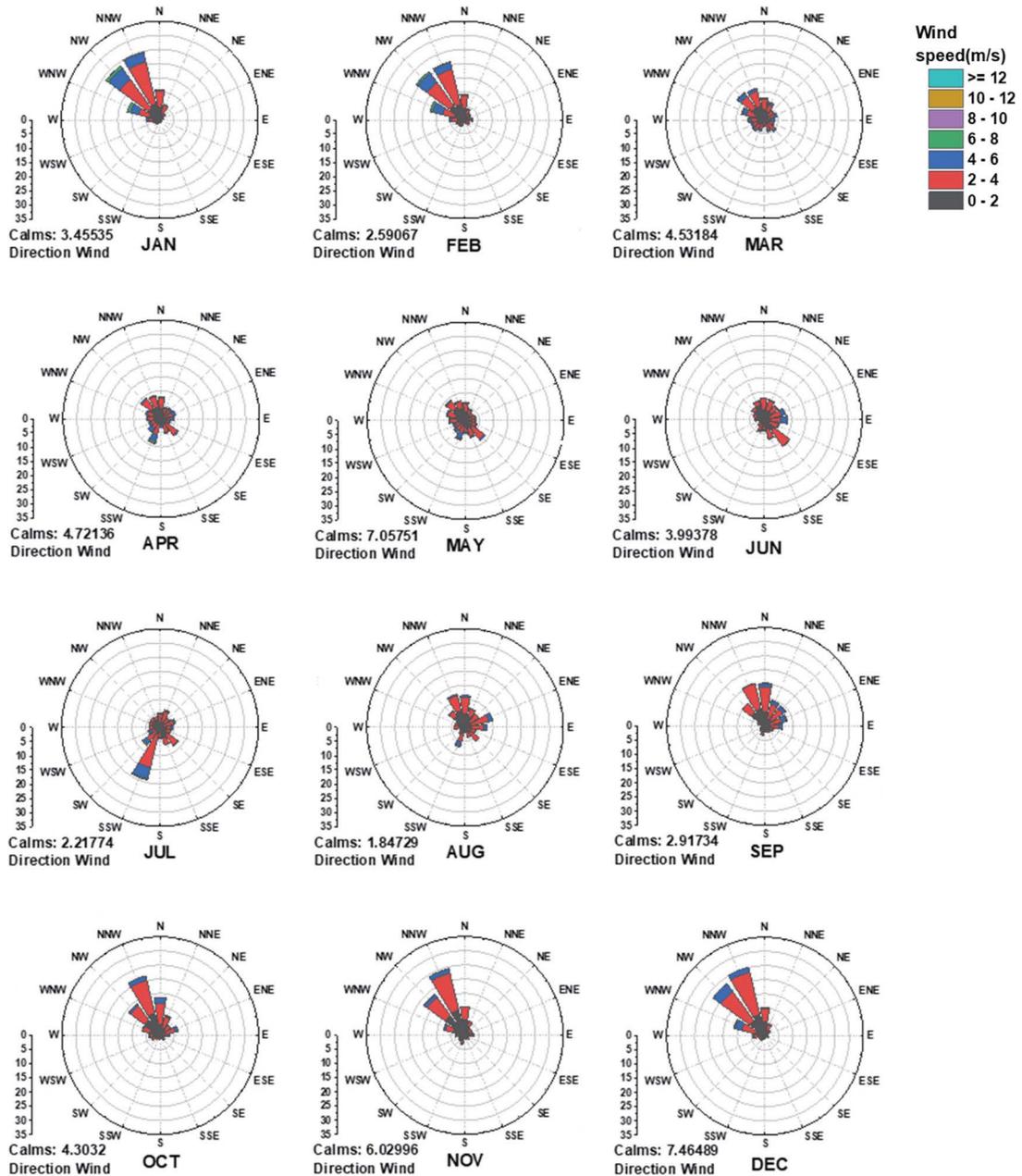


Fig. 5. Monthly wind speed and direction in Ulsan.

기는 증가했다. 또한 가을에 부산과 울산의 기온기각 각각 $1.99 \text{ (m}^2\text{/g)/year}$, $1.64 \text{ (m}^2\text{/g)/year}$ 으로 가장 가파르게 상승하고 있었으며 그 다음으로는 봄에 부산과 울산의 기온기각 각각 $0.95 \text{ (m}^2\text{/g)/year}$, $1.20 \text{ (m}^2\text{/g)/}$

year으로 상승하고 있는 것을 확인할 수 있었다. 부산과 울산의 Q_e 을 비교해 보면 봄에는 부산보다 울산, 가을과 겨울에는 울산보다 부산의 Q_e 증가 경향이 더 뚜렷하게 나타났다.

3.3 풍향에 따른 소산효율 (Q_e)

앞서 살펴본 Q_e 은 계절에 따라 차이를 보였다. 계절이 변화함에 따라 바람의 방향도 변화하게 되어 Q_e 에 영향을 미쳤다. 따라서 본 연구에서는 풍향에 따른 Q_e 값 차이에 대해 살펴보았다. 표 1은 각각 부산과 울산

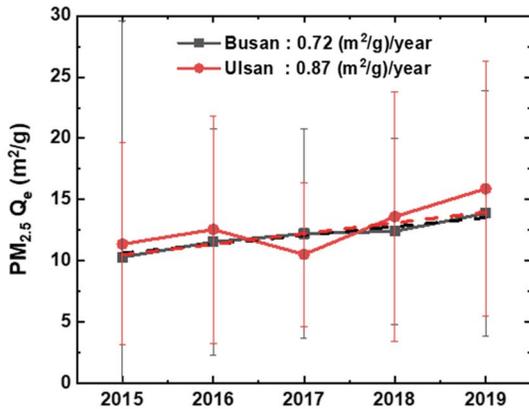


Fig. 6. Yearly variations of extinction efficiency (Q_e) from 2015 to 2019.

지역의 풍향에 따른 Q_e 값을 나타낸 것이다. 풍향을 나눌 때 16방위로 나눈 그림 4, 그림 5와 달리 표 1에서는 8방위로 나누어 Q_e 값을 살펴보았다. 풍향은 북(NNW, N), 북동(NNE, NE), 동(ENE, E), 남동(ESE, SE), 남(S, SSE), 남서(SW, SSW), 서(W, WSW), 북서(WNW, NW)로 나누었다. 부산의 경우 관측 지점의 북동쪽에 위치한 부산항의 영향을 받아 다른 방향에 비해 북동쪽의 Q_e 값이 높았으며 동쪽과 남동쪽의 Q_e 또한 다른 방향보다 높은 값을 보였다. 울산의 풍향에 따른 Q_e 값 변화 또한 부산과 비슷한 경향을 보였다. 울산의 관측 지점 동쪽 방향에 산업단지가 위치해 있는데 북서보다는 북동, 서보다는 동 그리고 남서보다는 남동의 Q_e 값이 더 높았다. 특히, 북동과 동의 Q_e 값이 다른 방향에 비해 높은 값을 보이는 것을 확인할 수 있었다. 또한 이러한 부산의 북동, 동, 남동의 Q_e 값과 울산의 동쪽 Q_e 값은 다른 바람 방향과 달리 여름이 시작되는 6월부터 급격히 증가하는 것을 볼 수 있다. 이는 6월을 기점으로 부산의 북동, 동, 남동 그리고

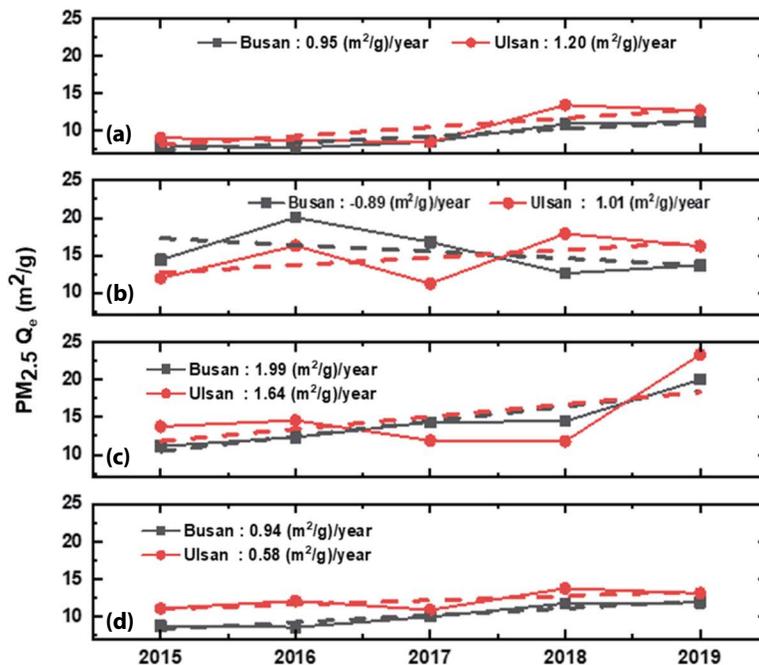


Fig. 7. Seasonal difference of yearly variations in extinction efficiency (Q_e) from 2015 to 2019. (a) Spring, (b) Summer, (c) Autumn, and (d) Winter.

Table 1. Monthly extinction efficiency value according to wind direction in Busan and Ulsan.(unit: m^2/g)

		Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
North	Busan	9.8	9.6	9.9	10.5	10.8	12.5	17.5	15.3	16.9	14.8	11.7	12.2
	Ulsan	12.1	12.1	11.7	12.1	13.1	17.2	19.3	19.8	21.2	17.6	12.0	13.9
Northeast	Busan	10.4	9.3	10.6	13.2	13.3	17.5	19.7	23.5	23.4	18.8	16.3	12.3
	Ulsan	12.3	10.4	12.6	13.7	15.4	17.1	19.9	18.4	22.1	17.1	15.5	13.9
East	Busan	9.2	8.1	8.5	10.0	9.3	14.6	19.1	16.5	15.2	13.5	11.0	11.3
	Ulsan	10.4	9.2	11.2	12.8	10.1	15.0	17.8	18.8	19.9	15.8	13.6	11.5
Southeast	Busan	10.6	7.9	8.2	9.6	8.0	12.8	14.4	12.8	12.5	10.9	10.0	11.5
	Ulsan	11.5	11.0	8.8	8.6	8.0	8.6	9.2	11.6	12.8	12.9	9.1	11.7
South	Busan	9.7	8.5	7.8	8.6	7.9	8.8	12.7	10.1	13.6	12.1	10.6	11.9
	Ulsan	10.0	9.0	8.8	8.3	8.0	8.6	11.7	12.5	11.8	12.2	8.5	8.1
Southwest	Busan	8.9	7.1	7.6	8.1	7.5	9.2	14.8	13.1	10.7	10.2	8.2	10.0
	Ulsan	9.3	9.5	9.1	9.0	10.9	8.4	15.0	15.2	10.6	13.3	10.1	12.4
West	Busan	8.6	8.4	8.6	9.2	8.9	10.9	16.0	15.4	11.8	12.7	10.2	10.5
	Ulsan	9.7	10.2	9.3	10.1	10.2	8.1	12.5	14.7	11.6	11.1	10.7	10.1
Northwest	Busan	9.8	10.0	10.4	10.0	10.2	11.1	15.8	17.8	14.3	14.7	11.8	12.5
	Ulsan	12.9	13.2	11.3	10.8	10.1	12.1	12.1	17.9	15.4	14.6	13.0	14.5

울산의 동풍의 바람 비율이 조금씩 증가하는 것과 관련된 것으로 보인다.

4. 결 론

본 연구에서는 부산과 울산의 미세먼지 특성 변화 연구의 필요성으로 시정 자료와 $PM_{2.5}$ 농도 자료를 이용하여 2015년부터 2019년까지 Q_e 변화 추세를 대해 살펴보았다. 먼저 Q_e 계산에 사용된 시정과 $PM_{2.5}$ 질량농도를 보면 $PM_{2.5}$ 는 지속적으로 감소하는 추세이나 시정은 미세먼지 감소 추세에 비하여 개선되는 정도가 미약함을 확인할 수 있었다. $PM_{2.5}$ 농도의 계절적 차이는 여름과 가을에 비해 봄과 겨울에 높은 경향을 보였다. 하지만 Q_e 는 질량농도와 달리 봄과 겨울에 비해 여름과 가을에 높은 값을 보였으며 이는 상대습도 및 입자의 크기나 성분과 같은 입자의 특성을 포함한 복합적인 이유에 의한 것으로 보인다. Q_e 의 연도별 추세를 보면 부산과 울산에서 각각 0.72와 0.87

(m^2/g)/year으로 증가하는 추세를 보였다. 계절별로 구분한 Q_e 의 추세도 부산의 여름을 제외한 모든 계절에서 증가하는 경향을 보였다. 상대습도에서 연도별 증가 추세가 확인되지 못한 것을 고려할 때, Q_e 의 증가는 과거에 비하여 근래로 올수록 부산과 울산에서 생성되는 미세먼지가 단위질량당 수농도가 더 증가한다고 판단할 수 있다. 이는 미세먼지일지라도 크기가 더 작거나 산란특성이 높은 입자의 생성이 증가하는 것으로 판단할 수 있다. 특히, 풍향에 따른 Q_e 값의 변화를 살펴보면, 부산은 북동, 울산은 북동, 동, 남동의 Q_e 값이 높았으며 이러한 Q_e 값의 증가는 여름이 시작되는 6월을 기점으로 급격히 높아졌다. 이는 부산은 관측 지점의 북동쪽에 위치하여 부산의 주요한 미세먼지 발생 지역인 부산항, 울산의 관측 지점의 동쪽에 위치한 산업단지에서 발생된 미세먼지의 Q_e 가 높은 값을 보이는 것을 확인시켜 준다. Q_e 의 값이 지속적으로 증가한다는 것은 각종 정책으로 미세먼지 발생량을 감소시키더라도 시민들이 체감하는 감소효과는 반감되고 있다는 것을 의미한다. 따라서, 미세먼지

저감의 체감 정도를 높이기 위해서는 단순 미세먼지의 무게 기준으로 저감정책을 마련하기보다는 발생 성분별 저감정책을 마련하는 것이 효과적일 수 있다. 향후에는 미세먼지의 소산효율의 변화에 영향을 주는 입자의 크기 및 성분 분석의 연도별 변화에 연구가 필요할 것으로 사료된다.

감사의 글

이 논문은 2020학년도 부경대학교 국립대학육성사업 지원비(PhiNX 보호학문 차세대육성)에 의하여 연구되었음.

References

- Baik, N.J., Kim, T.O., Kim, Y.P., Moon, K.C. (1994) Cause and Verification of Visibility Impairment Phenomenon: Related to Seoul Area Visibility Study, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 10(1), 1-23, (in Korean with English abstract).
- Cao, J.J., Wang, Q.Y., Chow, J.C., Watson, J.G., Tie, X.X., Shen, Z.X., Wang, P., An, Z.S. (2012). Impacts of aerosol compositions on visibility impairment in Xi'an, China, *Atmospheric Environment*, 59, 559-566. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2012.05.036>
- Dockery, D.W., Pope, C.A. (1994) Acute respiratory effects of particulate air pollution, *Annual Review of Public Health*, 15(1), 107-132.
- Han, J.S., Kim, B.G., Kim, S.D. (1996) Chemical composition of fine aerosol associated with visibility degradation in Seoul metropolitan area in 1994, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 12, 377-387, (In Korean with English abstract).
- Han, Y.J., Kim, T.S., Kim, H. (2008) Ionic constituents and source analysis of PM_{2.5} in three Korean cities, *Atmospheric Environment*, 42(19), 4735-4746. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2008.01.047>
- Jeon, B.I. (2010) Characteristics of Spacio-Temporal Variation for PM₁₀ and PM_{2.5} Concentration in Busan, *Journal of Environmental Science International*, 19(8), 1013-1023, (In Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5322/JES.2010.19.8.1013>
- Kim, K.W., Kim, Y.J. (2003) Opto-Chemical Characteristics of Visibility Impairment Using Semi-Continuous Aerosol Monitoring in an Urban Area during Summertime, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 19(6), 647-661, (in Korean with English abstract).
- Kim, P.S. (1988). Physical characteristics of atmospheric aerosols in Seoul: Scattering of visible light, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 4(2), 28-37.
- Kim, Y.W., Lee, H.S., Jang, Y.J., Lee, H.J. (2015) How does media construct particulate matter risks?: A news frame and source analysis on particulate matter risks, *Korean Journal of Journalism & Communication Studies*, 59(2), 121-154.
- Korea, Statistics (2018a) Social Survey results report.
- Korea, Statistics (2018b) Population and housing census report.
- Koschmieder, H. (1924) Theorie der horizontalen Sichtweite. *Beitrage zur Physik der freien Atmosphere*, 33-53.
- Laden, F., Schwartz, J., Speizer, F.E., Dockery, D.W. (2006) Reduction in fine particulate air pollution and mortality: extended follow-up of the Harvard Six Cities study, *American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine*, 173(6), 667-672. <https://doi.org/10.1164/rccm.200503-443OC>
- Lee, B.K., Hieu, N.T. (2011) Seasonal variation and sources of heavy metals in atmospheric aerosols in a residential area of Ulsan, Korea, *Aerosol and Air Quality Research*, 11(6), 679-688. <https://doi.org/10.4209/aaq.2010.10.0089>
- Lee, K.H., Bae, M.S. (2020) Discrepancy between scientific measurement and public anxiety about particulate matter concentrations, *Science of The Total Environment*, 760, 143980, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143980>
- Malm, W.C., Day, D.E. (2001) Estimates of aerosol species scattering characteristics as a function of relative humidity, *Atmospheric Environment*, 35(16), 2845-2860. [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(01\)00077-2](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(01)00077-2)
- Polichetti, G., Cocco, S., Spinali, A., Trimarco, V., Nunziata, A. (2009) Effects of particulate matter (PM₁₀, PM_{2.5} and PM₁) on the cardiovascular system, *Toxicology*, 261(1-2), 1-8. <https://doi.org/10.1016/j.tox.2009.04.035>
- Qu, W.J., Wang, J., Zhang, X.Y., Wang, D., Sheng, L.F. (2015) Influence of relative humidity on aerosol composition: Impacts on light extinction and visibility impairment at two sites in coastal area of China, *Atmospheric Research*, 153, 500-511. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2014.10.009>
- Sloane, C.S., Wolff, G.T. (1985) Prediction of ambient light scattering using a physical model responsive to relative

- humidity: Validation with measurements from Detroit, *Atmospheric Environment* (1967), 19(4), 669-680. [https://doi.org/10.1016/0004-6981\(85\)90046-0](https://doi.org/10.1016/0004-6981(85)90046-0)
- Tang, I.N. (1996) Chemical and size effects of hygroscopic aerosols on light scattering coefficients, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 101(D14), 19245-19250. <https://doi.org/10.1029/96JD03003>
- Wan, Z., Zhu, M., Chen, S., Sperling, D. (2016) Pollution: Three steps to a green shipping industry, *Nature*, 530(7590), 275-277. <https://doi.org/10.1038/530275a>
- Wang, J.L., Zhang, Y.H., Shao, M., Liu, X.L., Zeng, L.M., Cheng, C.L., Xu, X.F. (2006) Quantitative relationship between visibility and mass concentration of PM_{2.5} in Beijing, *Journal of Environmental Sciences*, 18(3), 475-481. <https://doi.org/10.2495/AIR06059>
- Xian, J., Han, Y., Huang, S., Sun, D., Zheng, J., Han, F., Zhou, A., Yang, S., Xu, W., Song, Q., Wei, L., Qingzhi Tan, Q., Li, X. (2018) Novel Lidar algorithm for horizontal visibility measurement and sea fog monitoring, *Optics Express*, 26(26), 34853-34863. <https://doi.org/10.1364/OE.26.034853>
- Xing, Y.F., Xu, Y.H., Shi, M.H., Lian, Y.X. (2016) The impact of PM_{2.5} on the human respiratory system, *Journal of Thoracic Disease*, 8(1), E69. <https://doi.org/10.3978/j.issn.2072-1439.2016.01.19>
- Yang, L.X., Wang, D.C., Cheng, S.H., Wang, Z., Zhou, Y., Zhou, X.H., Wang, W.X. (2007) Influence of meteorological conditions and particulate matter on visual range impairment in Jinan, China, *Science of the Total Environment*, 383(1-3), 164-173. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2007.04.042>
- Yeo, M.J., Kim, Y.P. (2019) Trends of the PM₁₀ concentrations and high PM₁₀ 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>
- Zhao, P., Zhang, X., Xu, X., Zhao, X. (2011) Long-term visibility trends and characteristics in the region of Beijing, Tianjin, and Hebei, China, *Atmospheric Research*, 101(3), 711-718. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2011.04.019>

Authors Information

- 주소희 (부경대학교 지구환경시스템과학부 환경공학전공 석사과정)
- Dehkhoda Naghmeh (부경대학교 지구환경시스템과학부 환경공학전공 박사과정)
- 노영민 (부경대학교 환경공학과 조교수)