

논문

2014년과 2020년 대전지역 대기 중 미세먼지 화학조성 변화에 따른 가시거리 악화 특성 비교

Comparison of Visibility Impairment Due to the Change in PM_{2.5} Chemical Compositions in Daejeon between 2014 and 2020

문정호^{1),3)}, Jayant Nirmalkar¹⁾, 황태경²⁾, 김대곤²⁾, 양재환³⁾, 정진상^{1),*}

¹⁾한국표준과학연구원 가스분석표준그룹, ²⁾국립환경과학원 대기환경연구과,

³⁾충남대학교 환경공학과

Jung Ho Moon^{1),3)}, Jayant Nirmalkar¹⁾, Tae Kyung Hwang²⁾, Dae Gon Kim²⁾,
Jae Hwan Yang³⁾, Jinsang Jung^{1),*}

¹⁾Gas Metrology Group, Korea Research Institute of Standards and Science (KRISS),
Daejeon, Republic of Korea

²⁾Climate&Air Quality Research Division, National Institute of Environmental Research (NIER), Incheon, Republic of Korea

³⁾Department of Environmental Engineering, Chungnam National University, Daejeon, Republic of Korea

접수일 2022년 8월 13일
수정일 2022년 9월 26일
채택일 2022년 10월 4일

Received 13 August 2022
Revised 26 September 2022
Accepted 4 October 2022

*Corresponding author

Tel : +82-(0)42-868-5934

E-mail : jsjung@kriiss.re.kr

Abstract The visibility impairment caused by air pollutants and aerosol water is a major environmental problem in our society. This research investigates the impacts of chemical composition of PM_{2.5} and aerosol water on visibility impairment in Daejeon, Korea between 2014 and 2020. Light scattering and absorption coefficients were measured by a nephelometer and an aethalometer, respectively whereas light extinction coefficient was calculated from PM_{2.5} chemical composition and relative humidity (RH) using the IMPROVE algorithm. Good agreement of light extinction coefficients was observed between measured and calculated ones with a slope of 0.99 and R² of 0.95. Decreases in annual average concentrations of (NH₄)₂SO₄, organic mass (OM), elemental carbon (EC), and sea-salt (SS) were observed in 2020 comparing to those in 2014 whereas NH₄NO₃ was increased. During the period of poor visibility (Worst 20%), light extinction coefficient decreased 16.9% in 2020 compared to that in 2014, resulted in 23.2% increase in visibility. The contribution to the total light extinction coefficient decreased from 34.4% (2014) to 22.6% (2020) for (NH₄)₂SO₄ and from 18.0% (2014) to 10.8% (2020) for OM whereas increased from 36.8% (2014) to 59.9% (2020) for NH₄NO₃. During the Worst 20% visibility period, the contribution of aerosol water to the total light extinction coefficient increased from 48.4% in 2014 to 53.5% in 2020, indicating that aerosol water is important contributor to visibility impairment. This research indicates that reducing NH₄NO₃ was a significant factor in the deterioration of visibility.

Key words: Visibility, Light extinction coefficient, PM_{2.5} chemical compositions, Relative humidity

1. 서 론

입자상 대기오염 물질인 미세먼지는 인간의 건강을 악화시키고, 빛을 산란 및 흡수하여 가시거리를 감소시킨다(Jung and Kang, 2021). 여기서 가시거리(시정)란 하늘을 배경으로 어두운 물체를 식별할 수 있는 최

대 거리로 정의된다(Tao *et al.*, 2008; So *et al.*, 2007). 공기 중의 미세먼지 농도와 상대습도가 높으면 빛의 산란 및 흡수량이 많아져 가시거리가 줄어들게 된다. 이를 가시거리 악화(시정 악화)라고 정의한다(Pui *et al.*, 2014; Park *et al.*, 2003). 가시거리 악화는 도시 지역의 미세먼지 농도 증가의 가시적 지표이다(Watson,

2002). 도심지역 가시거리 감소와 미세먼지 농도 사이의 상관관계가 여러 선행 연구에서 보고되었고, 질산염과 황산염과 같은 이온 성분과 유기입자는 빛 산란을 통해, 원소탄소(EC)는 빛 흡수를 통해 가시거리를 악화시킨다(Tao *et al.*, 2009; So *et al.*, 2007).

2007년 봄철 중국 광저우에서 미세먼지에 의한 가시거리 악화 기여도는 황산염이 40%로 가장 높았고, 유기입자(22%), 원소탄소(22%), 질산염(16%) 순으로 나타났다(Tao *et al.*, 2009). 1999년부터 2000년까지 대만 가오슝에서 미세먼지에 의한 가시거리 악화 기여도는 황산염(29%), 질산염(28%), 유기탄소(22%) 순으로 나타났다(Yuan *et al.*, 2006). 2016년 겨울 중국 북경에서는 상대습도(RH)가 80% 이상일 때, PM_{2.5} 질량 농도가 증가함에 따라 가시거리가 급속히 악화되는 것으로 나타났다(Shen *et al.*, 2021). 2006년 여름철 중국 광저우에서는 총 빛 소멸계수에서 수분에 의한 영향이 평균 34.2%로 산출되었다(Jung *et al.*, 2009).

2012년부터 2013년까지 중국 북경에서 겨울철 PM_{2.5} 질량 중 황산암모늄 ((NH₄)₂SO₄), 질산암모늄 (NH₄NO₃), 유기입자(OM), 원소탄소(EC) 및 토양 성분(Fine Soil)이 각각 21±5%, 20±5%, 36±7%, 5±2% 그리고 7±4%를 차지하는 것으로 나타났다(Quan *et al.*, 2014). 2017년에서 2019년까지 중국 북경에서 PM_{2.5}에 대한 질산암모늄의 기여율은 PM_{2.5} 농도가 35 µg/m³ 이하일 때 13.0%였지만, PM_{2.5} 농도가 115 µg/m³~150 µg/m³으로 높아질 때 39.6%로 급격히 증가하였다. 하지만 동일 기간 유기입자(33.1% → 16.5%), 황산암모늄(17.0% → 15.0%), 원소탄소(5.4% → 3.7%) 기여율은 감소한 것으로 나타났다(Hu *et al.*, 2021).

2011년부터 2020년까지 중국 칭다오의 연평균 PM_{2.5} 농도는 2015년에 51 µg/m³에서 2020년에 32 µg/m³으로 감소하였다(Liu *et al.*, 2022). PM_{2.5} 화학성분 중 SO₄²⁻의 연평균 농도는 2011년과 2012년 대비 2019년에 23.5 µg/m³에서 6.7 µg/m³으로 크게 감소하였지만, NO₃⁻는 3.5 µg/m³에서 10.0 µg/m³으로 크게 증가한 것으로 나타났다. 이 결과 NO₃⁻/SO₄²⁻ 질량비

가 0.14에서 1.5로 크게 증가하였다(Liu *et al.*, 2022).

1980년부터 2008년까지 중국 북경, 천진 등 대도시 지역의 경우 지속적으로 가시거리가 감소하였다(Zhao *et al.*, 2011). 중국의 582개 지역에서 1980년에서 2005년까지 대부분 가시거리가 감소하였지만, 2005년에서 2017년 사이에는 가시거리가 유사한 수준으로 유지되거나 일부 증가하였다(Zhang *et al.*, 2020). 이러한 경향은 계절에 상관없이 동일하게 나타났고, 겨울철에 가시거리가 가장 낮고, 여름에 가장 높은 계절적 특성을 나타냈다.

한반도는 중국으로부터 장거리 이동된 오염물질의 영향을 많이 받는다(Jung *et al.*, 2019, 2018). 한반도에 유입된 장거리 이동 오염물질의 배출원 지역 특성에 따라 미세먼지의 광학 및 흡습성이 유사하거나 상이한 특성이 나타내었다(Jung *et al.*, 2015). 최근 중국에서는 대기오염물질 배출량이 급격하게 줄어 도심지역의 미세먼지 농도가 감소하였고, 미세먼지 화학조성별 기여율도 변하고 있다(Liu *et al.*, 2022). 이로 인해 중국 도심지역 가시거리도 점차 개선되고 있다(Zhang *et al.*, 2020). 그렇기 때문에 중국에서 오염물질 배출량의 장기 변화로 인한 한반도 지역의 가시거리 변화 특성을 분석할 필요가 있다.

대전지역에서 PM_{2.5}의 화학적 특성에 관한 다양한 연구가 수행되었지만, 가시거리와 화학조성 및 광학 특성의 관계에 대한 정보는 부족하다(Jung and Kang, 2021). 본 연구에서는 미세먼지가 가시거리 악화에 미치는 영향을 정확히 규명하기 위해 화학조성별 농도와 광학 특성에 따른 가시거리 변화를 분석하였다. 2014년과 2020년에 중부권대기환경연구소에서 측정된 미세먼지 물리 및 화학 특성 측정자료를 심층 분석하여, 미세먼지 화학조성 변화 및 가시거리 장기 변화 특성을 규명하였다.

2. 연구 방법

2014년과 2020년 대전지역 가시거리 악화 특성을

구명하기 위해 미세먼지 화학조성과 IMPROVE 알고리즘을 이용한 빛 소멸계수 및 가시거리 산출방법에 대한 검증은 수행하였다. 먼저 미세먼지 화학조성과 IMPROVE 알고리즘을 이용해 계산된 빛 소멸계수의 검증은 수행하였다. Nephelometer와 Aethalometer를 이용해 각각 빛 산란계수와 흡수계수를 측정하고, 이로부터 빛 소멸계수를 계산하였다. 광학적으로 측정된 빛 소멸계수와 화학조성으로부터 계산된 빛 소멸계수를 비교하여 IMPROVE 알고리즘을 이용한 빛 소멸계수 산정식을 검증하였다. 다음으로 IMPROVE 알고리즘과 가시거리 산정식을 이용해 계산된 가시거리의 검증은 수행하였다. 이를 위해 인근의 기상청 관측소에서 시정계를 이용해 측정된 가시거리 값을 활용하였다. 2020년 1월에서 3월까지 계산된 가시거리와 측정된 가시거리의 비교를 통해 IMPROVE 알고리즘과 가시거리 산정식을 검증하였다.

미세먼지 화학조성 및 광학 특성은 대전광역시 중구에 위치한 중부권대기환경연구소에서 측정되었다. 중부권대기환경연구소 건물의 4층 실험실 내부에 미세먼지 화학조성 및 광학 특성을 측정하기 위한 장비가 설치되어 있다. 측정장비별로 독립적인 시료 흡입관을 사용하여 옥상으로부터 시료를 흡입한 후 화학조성 및 광학 특성의 실시간 측정이 이루어졌다. 가시거리는 중부권대기환경연구소에서 북서쪽으로 약 6.7 km 떨어진 대전광역시 유성구에 위치한 대전지방기상청에서 시정계를 이용해 측정되었다. 기상청 시정계를 이용해 측정된 1시간 간격의 가시거리는 기상청 기상자료개방포털 (<https://data.kma.go.kr>)에서 다운로드 받아 분석에 사용하였다. 본 연구에서는 비가 온 시간의 가시거리 측정값은 제외하였다.

2.1 광학 특성 측정 방법

Aethalometer (AE33, Magee Scientific, USA)를 이용해 7개 파장(370, 470, 520, 590, 660, 880, 950 nm)에서 빛 흡수계수(b_{abs})를 측정하였다. 대기로부터 분당 5 L로 흡입된 시료는 PM_{2.5} 사이클론(SCC1.829, BGI, USA)을 통과하며 PM_{2.5}만 분리되었다. PM_{2.5}를

유리섬유 필터 위에 포집 후 필터에 빛을 투과하여 투과된 빛이 감쇄하는 양으로부터 빛 흡수계수와 블랙본(BC)의 농도를 측정하였다(Magee Scientific, 2021). 필터에 포집된 에어로졸 입자의 loading에 대한 측정오차를 보정하기 위해서 AE33 모델은 고유량과 저유량으로 필터에 에어로졸을 동시 포집하여 loading factor를 산출해 보정하였다. 또한, 필터 내 다중 산란에 의한 오차 보정을 위해 PTFE/PET로 코팅된 유리섬유 필터(M8060, Magee Scientific, USA)의 다중 산란계수인 1.39를 적용하였다(Magee Scientific, 2021). 빛 흡수계수에서 BC 농도를 산출할 때 사용된 파장별 질량 흡수 단면적은 18.47 m²/g (370 nm), 14.54 m²/g (470 nm), 13.14 m²/g (520 nm), 11.58 m²/g (590 nm), 10.35 m²/g (660 nm), 7.77 m²/g (880 nm), 7.19 m²/g (950 nm)이다. 독일 Leipzig에서 유럽의 측정망에서 사용 중인 23개의 AE33 aethalometer에 대한 비교 평가 연구에 따르면, 880 nm에서 먼지가 제거된 상태에서 노이즈 신호는 평균 0.031 µg/m³으로 산출되었다(Cuesta-Mosquera *et al.*, 2021). 또한, soot과 nigrosin을 임의로 발생시켜 23개의 AE33 aethalometer를 동시에 측정했을 때, 기준 aethalometer와 비교해서 평균 1% 이내에 일치하는 것으로 나타났다(Cuesta-Mosquera *et al.*, 2021). Aethalometer의 분석불확도는 제조사로부터 5% 이내로 보고되었다(Hansen, 2005).

Nephelometer (Model 3563, TSI, USA)를 이용해 3개 파장(450 nm, 550 nm, 700 nm)에서 에어로졸에 의한 빛 산란계수(b_{scat})를 측정하였다. 제로 교정은 에어로졸이 제거된 가스를 주입해 이루어지고, 스팬 교정은 순수한 이산화탄소를 주입해 수행되었다. Nephelometer를 이용한 빛 산란계수 측정의 불확도는 5분 간격에서 2% 이내이고, 검출한계는 6 Mm⁻¹ (450 nm), 3 Mm⁻¹ (550 nm) 그리고 3 Mm⁻¹ (700 nm)로 보고되었다(Jung *et al.*, 2017).

2.2 화학 특성 측정 방법

베타선흡수법 측정기(BAM 1020, Met One, USA)를 이용해 1시간 간격으로 PM₁₀과 PM_{2.5} 농도를 측정

하였다. 대기 중 시료는 분당 16.7 L로 PM₁₀ 임팩터와 PM_{2.5} 싸이클론(VSCC, BGI, USA)을 통해 흡입된 후 롤 필터에 포집되었다. 대기 시료 포집 전후의 베타산 카운트의 차이로부터 질량 농도를 산출하였다.

PM_{2.5} 수용성 이온성분은 이온크로마토그래피 기반 이온성분연속측정기(URG-9000D, URG, USA)를 이용해 1시간 간격으로 측정되었다. PM_{2.5} 싸이클론(URG-2000-30ED, URG, USA)을 통해 분당 3 L로 흡입된 시료는 parallel plate membrane diffusion denuder를 통과하며 가스상 무기성분이 제거된 후 액화포집 장치를 이용해 입자상 이온 성분이 포집되었다. 이온 크로마토그래피법을 이용해 액화 포집된 시료 중 양이온(Na⁺, NH₄⁺, K⁺, Ca²⁺, Mg²⁺)과 음이온(Cl⁻, NO₃⁻, SO₄²⁻) 성분이 각각 분석되었다.

PM_{2.5} 유기탄소(OC)와 원소탄소(EC) 농도는 열광학적탄소분석기(4F-semi continuous field analyzer, Sunset Laboratory, USA)로 준실시간으로 측정되었다. 대기 중 시료는 PM_{2.5} 싸이클론(SCC 2.354, BGI, USA)을 통해 분당 8 L로 흡입된 후 parallel carbon denuder를 통과하며 가스상 유기성분이 제거된 후 필터에 포집되었다. 40분 포집 후 20분 동안 분석이 수행되었고, 분석 시 온도 조건은 NIOSH (National Institute for Occupational Safety and Health) 프로토콜을 따랐다. 탄화된 유기탄소는 레이저 투과도법을

이용해 보상하였다. 유기탄소와 원소탄소의 검출한계는 0.5 µg C/m³으로 보고되었고, 검출한계는 5%로 보고되었다(Polidori *et al.*, 2006).

2.3 분석 방법

빛 소멸계수(b_{ext})는 빛 산란계수(b_{scat})와 빛 흡수계수(b_{abs})의 합으로 구성된다. 도심지역에서 PM_{2.5}에 의한 가시거리 악화 영향을 평가하기 위해 PM_{2.5}를 6개의 화학물질로 분류하였다(Malm and Hand, 2007). 6개 화학물질은 황산암모늄((NH₄)₂SO₄), 질산암모늄(NH₄NO₃), 유기입자(OM), 원소탄소(EC), 해염(SS), 토양입자(FS)이고, 표 1에 요약하여 나타내었다. 황산암모늄은 완전히 중화된 상태라는 가정하에 황산염 농도로부터 계산하였고, 질산암모늄은 질산염 농도로부터 계산하였다. 유기입자 질량 농도의 경우 유기탄소 질량 농도에 개수 1.7을 곱하여 산출하였다(Malm and Hand, 2007). 서울특별시 은평구에 위치한 수도권대기환경연구소에서 AMS(aerosol mass spectrometry)를 이용해 측정된 2018년 평균 OM/OC 비가 약 1.95로 보고되었다(Song *et al.*, 2021). 중부권대기환경연구소의 경우 도심 중심가 대로변에 위치하고 있기 때문에 1차 배출 특성을 반영하여 서울시 평균값보다 작은 1.7을 사용하였다. 해염입자 질량 농도의 경우 염화이온 농도에 해수 중 질량 비인 1.8을 곱하

Table 1. IMPROVE's calculation formula to be used for analysis (DeBell *et al.*, 2006).

Component	Specification		Mass calculation
(NH ₄) ₂ SO ₄	Ammonium sulfate	1.375 [SO ₄ ²⁻]	Small mode, [(NH ₄) ₂ SO ₄] _s = [(NH ₄) ₂ SO ₄] _{total} - [(NH ₄) ₂ SO ₄] _L Large mode, [(NH ₄) ₂ SO ₄] _L = [(NH ₄) ₂ SO ₄] _{total} ² / (20 µg m ⁻³)
NH ₄ NO ₃	Ammonium nitrate	1.29 [NO ₃ ⁻]	Small mode, [NH ₄ NO ₃] _s = [NH ₄ NO ₃] _{total} - [NH ₄ NO ₃] _L Large mode, [NH ₄ NO ₃] _L = [NH ₄ NO ₃] _{total} ² / (20 µg m ⁻³)
OM	Organic aerosol	1.7 [OC]	Small mode, [OM] _s = [OM] _{total} - [OM] _L Large mode, [OM] _L = ([OM] _{total}) ² / (20 µg m ⁻³)
SS	Sea salt	1.8 [Cl ⁻]	
EC	Elemental carbon	[EC]	
PM _{2.5} _others	Fine soil + unknowns	[PM _{2.5}] - [(NH ₄) ₂ SO ₄] + [NH ₄ NO ₃] + [OM] + [EC]	
CM	Coarse mode aerosol	[PM ₁₀] - [PM _{2.5}]	

여 산출하였다. 토양입자와 정량되지 않은 성분을 $PM_{2.5_others}$ 로 정의하여, $PM_{2.5}$ 전체 농도에서 나머지 5개 화학물질(황산암모늄, 질산암모늄, 유기입자, 원소탄소, 해염)의 합이 차이로 농도를 계산하였다. 조대입자는 PM_{10} 과 $PM_{2.5}$ 질량 농도의 차이로부터 계산하였다.

Hand and Malm (2006)이 수행한 선행 연구에서 대기 중 $PM_{2.5}$ 농도가 낮은 기간에는 중심 입경의 크기가 $0.2 \mu m$ 에 픽(표준편차는 2.2)을 가지는 입경별 질량 농도 분포가 관측되었고, $PM_{2.5}$ 농도가 높은 기간에는 $0.5 \mu m$ 에 픽(표준편차는 1.2)을 가지는 입경별 질량 농도 분포가 관측되었다. IMPROVE 알고리즘에서는 단일 화학물질의 질량 농도가 $20 \mu g/m^3$ 이 넘어가면 $0.5 \mu m$ 에 픽을 가지는 단일 질량 농도 분포를 가진다는 가정하에 아래 식과 같이 화학물질별로 small mode과 large mode로 구분하여 질량 농도를 나타내었다. 여기서 단일 화학물질 농도가 $20 \mu g/m^3$ 이 넘으면 모두 large mode로 가정하였다. 황산암모늄뿐만 아니라 질산암모늄과 유기입자도 동일하게 small 및 large mode로 분리하여 나타내었다.

$$[Large (NH_4)_2SO_4] = [Total (NH_4)_2SO_4]^2 / 20 \quad (1)$$

$$[Small (NH_4)_2SO_4] = [Total (NH_4)_2SO_4] - [Large (NH_4)_2SO_4] \quad (2)$$

IMPROVE 알고리즘에서 제시한 식 (3)을 이용해 $PM_{2.5}$ 화학조성별 농도와 상대습도를 이용해 빛 소멸계수 (b_{ext})를 계산하였다. 식 (3)에 나타난 질량 농도 앞에 개수는 단위 질량당 빛 산란 및 흡수효율을 나타낸다. Small mode에 비해 large mode의 중심 입경이 크기 때문에 상대적으로 큰 질량흡수효율이 적용되었다.

$$\begin{aligned} b_{ext} \approx & 2.2 \times f_s(RH) \times [Small (NH_4)_2SO_4] \\ & + 4.8 \times f_L(RH) \times [Large (NH_4)_2SO_4] \\ & + 2.4 \times f_s(RH) \times [Small NH_4NO_3] \\ & + 5.1 \times f_L(RH) \times [Large NH_4NO_3] \\ & + 2.8 \times [Small OM] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & + 6.1 \times f_L(RH) \times [Large OM] \\ & + 10 \times [Elemental Carbon] \\ & + 1 \times [PM_{2.5_others}] \\ & + 1.7 \times f_{SS}(RH) \times [Sea Salt] \\ & + 0.6 \times [Coarse Mass] + Rayleigh scattering \\ & + 0.33 \times [NO_2] \end{aligned} \quad (3)$$

여기서, $f(RH)$ 는 수용성 성분별 상대습도 증가에 따른 빛 산란계수 증가 비를 나타낸다. 상대습도가 높아지면 흡습성 입자는 수분을 흡수하여 입경이 커지고, 이로 인해 빛 산란효율이 증가한다. 건조상태에서 입자의 산란계수 (b_{scat} (dry))와 특정 상대습도 조건에서 산란계수 (b_{scat} (RH))로부터 $f(RH)$ ($= b_{scat}(RH) / b_{scat}(dry)$)가 계산된다. 비 흡습성 입자는 모든 상대습도 조건에서 $f(RH)$ 가 1을 나타내고, 흡습성 입자는 상대습도가 증가하면 1보다 큰 값을 가진다. 화학물질별 상대습도에 따른 $f(RH)$ 값은 Pitchford *et al.* (2007)이 제시한 값을 사용하였다. IMPROVE 알고리즘을 이용해 화학물질 농도별 총 빛 소멸계수 (b_{ext})를 계산하고, 아래 식 (4)를 이용해 가시거리를 계산하였다.

$$Visual\ range = -\ln(0.05) / b_{ext} = 3 / b_{ext} \quad (4)$$

여기서, 배경색 대비 물체를 구분할 수 있는 대비 임계값 (contrast threshold)는 세계기상기구에서 제시한 0.05를 사용하였다 (WMO, 2018). Koschmieder가 제안한 대비 임계값인 0.02를 활용해 가시거리를 계산할 수도 있지만, 기상청 시정계에서 측정된 가시거리와의 비교 평가를 위해 본 연구에서는 0.05를 사용하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 가시거리 산정식 검증

미세먼지 화학조성별 농도와 IMPROVE 알고리즘을 이용해 빛 소멸계수를 산출하는 방법론을 검증하기 위해, 2020년의 겨울철(1월, 2월, 12월) Nephelometer와 Aethalometer를 이용해 측정된 빛 소멸계수 ($b_{ext_measured}$)와 IMPROVE 알고리즘과 미세먼

지 화학조성별 농도로부터 계산된 빛 소멸계수 (b_{ext} (dry)_calculated)의 산포도를 그림 1에 비교하여 나타내었다. Nephelometer에 도입된 시료는 Diffusion dryer를 이용해 일부 제습이 이루어지지만, 완벽하게 제습이 되지 않았기 때문에 측정된 빛 산란계수는 건조상태라고 보기 힘들다. 중부권대기환경연구소의 실험실은 계절에 상관없이 온도가 일정하게 유지되고 있다. 여름철은 실내온도가 외부보다 낮기 때문에 흡입된 시료의 상대습도가 높아지고, 겨울철은 실내온도가 외부보다 높기 때문에 흡입된 시료의 상대습도가

낮아지게 된다. 또한, 대기 중 상대습도는 겨울철이 다른 계절에 비해 상대적으로 가장 낮고, diffusion dryer를 통해 일부 제습이 이루어지기 때문에 흡입된 시료의 상대습도는 30% 내외의 건조상태로 유지된다.

본 연구에서는 IMPROVE 알고리즘을 이용해 계산된 빛 소멸계수를 정확히 평가하기 위해 상대습도의 영향이 가장 적은 겨울철(1월, 2월, 12월)에 측정된 값을 선정하였다. Nephelometer와 Aethalometer를 이용해 겨울철에 측정된 값은 상대습도의 영향을 거의 받지 않았다는 가정하에, IMPROVE 알고리즘에 상대습도에 의한 영향을 제외하고 빛 소멸계수를 계산하였다. 그림 1에 보이는 바와 같이 IMPROVE 알고리즘을 이용해 계산된 빛 소멸계수는 광학적인 방법으로 측정된 빛 소멸계수와 기울기가 1.0, R^2 이 0.95로 나타났다. 이로부터 IMPROVE 알고리즘은 실제 빛 소멸계수를 잘 모사하는 것으로 나타났다.

IMPROVE 알고리즘으로부터 계산된 빛 소멸계수를 이용해 가시거리 산정식으로부터 계산된 가시거리를 검증하기 위해 2020년의 1월 초~3월 말 사이 기상청에서 시정계를 이용해 측정된 가시거리와 계산된 가시거리를 그림 2와 3에 비교하여 나타내었다. 그림 2에 보이는 바와 같이 IMPROVE 알고리즘과 가시거리 산정식을 이용해 계산된 가시거리가 기상청 시정계를 이용해 측정된 가시거리와 상당히 유사한 시계열 경향을 나타내었다. 특히 가시거리가 40 km 이하

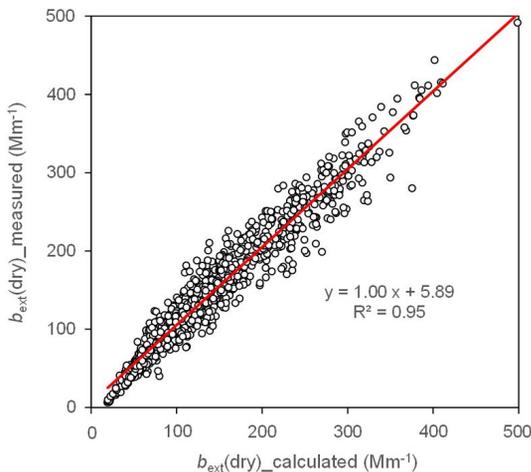


Fig. 1. Scatter plot of measured b_{ext} versus calculated b_{ext} by the IMPROVE Algorithm.

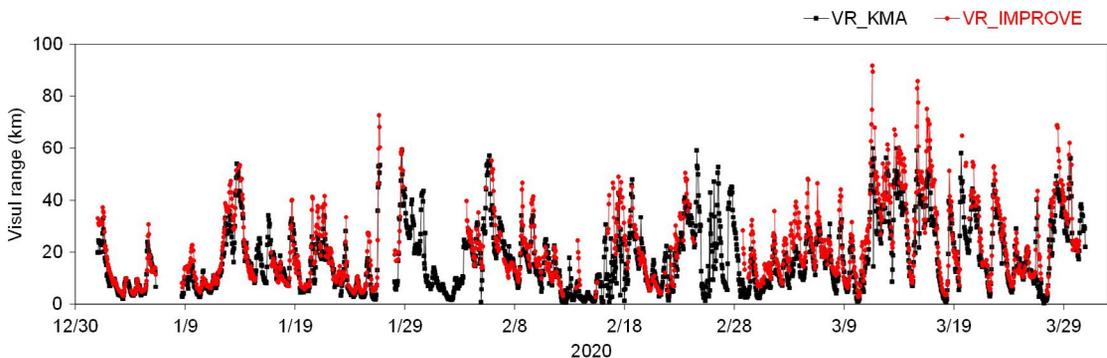


Fig. 2. Temporal variations of visual range in Daejeon measured by KMA and calculated by IMPROVE algorithm during January~March 2020.

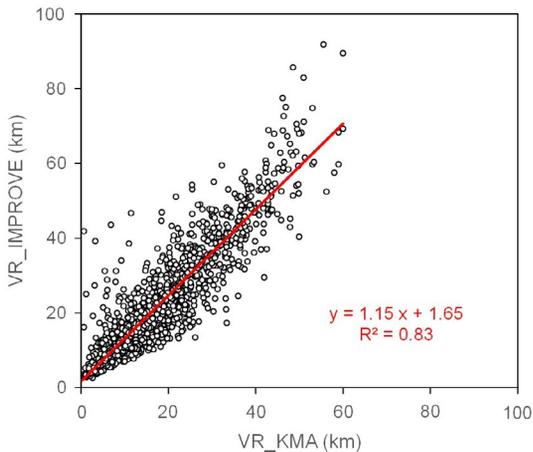


Fig. 3. Scatter plot of visual range measured by KMA versus calculated by IMPROVE during January~March 2020.

일 때 두 가지거리가 매우 유사한 값을 나타내는 것을 확인할 수 있다.

2020년 1월 초에서 3월 말까지 대전에서 기상청 시정계를 이용해 측정된 가지거리와 IMPROVE 알고리즘과 가지거리 산정식을 이용하여 계산된 가지거리의 산포도를 그림 3에 나타내었다. 계산된 가지거리가 기상청 시정계로부터 측정된 가지거리에 비해 상대적으로 크게 산출되었지만, R^2 이 0.83으로 상관관계는 매우 우수한 것으로 나타났다.

3.2 최근 사례(2020년)와 과거 사례(2014년)를 비교 분석

미세먼지 화학조성별 가지거리 악화 영향을 평가하기 위해 2014년과 2020년 계절별 화학조성 농도와 산란계수를 표 2에 나타내었다. $PM_{2.5}$ 질량 농도와 빛 소멸계수에 각 화학물질별 기여도를 그림 4에 나타내었다. 2014년 화학물질별 연평균 농도는 유기입자 ($10.27 \pm 6.20 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 29.9%), 황산암모늄 ($6.09 \pm 5.48 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 17.7%), 질산암모늄 ($5.16 \pm 5.68 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 15.0%), 원소탄소 ($1.69 \pm 1.08 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 4.9%), 해염 ($0.71 \pm 0.89 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 2.1%) 순으로 나타났고, 2020년의 경우 질산암모늄 ($7.43 \pm 8.43 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 30.7%), 유기입자 ($6.16 \pm 3.49 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 25.5%), 황산암모늄 ($5.25 \pm 3.38 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 21.7%),

원소탄소 ($0.99 \pm 0.58 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 4.1%), 해염 ($0.54 \pm 0.64 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 2.2%) 순으로 나타났다. 2014년에는 유기입자의 농도가 가장 높았지만, 2020년에는 질산암모늄의 농도가 가장 높게 나타났다. 황산암모늄과 유기입자의 연평균 농도는 2014년에 비해 2020년에 각각 13.8%, 40.1% 감소하였다. 특히 황산암모늄의 경우 겨울과 봄철에 상대적으로 많이 감소한 것으로 나타났다. 유기입자의 경우 전 계절에 걸쳐 고르게 감소한 것으로 나타났다. 반면, 질산암모늄의 연평균 농도는 2014년에 비해 2020년에 44.1% 증가하였다. 특히 겨울철에 농도가 크게 증가한 것으로 나타났다.

연평균 상대습도는 2014년과 2020년이 각각 $72.3 \pm 19.9\%$, $70.8 \pm 20.8\%$ 로 큰 차이를 보이지 않았고, 계절별 평균값도 유사하게 나타났다. 주요 화학물질별 빛 산란계수 및 빛 흡수계수는 2014년에 황산암모늄 ($63.9 \pm 83.4 \text{ Mm}^{-1}$, 31.1%), 질산암모늄 ($58.9 \pm 84.7 \text{ Mm}^{-1}$, 28.7%), 유기입자 ($50.4 \pm 40.7 \text{ Mm}^{-1}$, 24.6%), 원소탄소 ($16.9 \pm 10.8 \text{ Mm}^{-1}$, 8.2%), 해염 ($4.6 \pm 6.7 \text{ Mm}^{-1}$, 2.2%) 순으로 나타났다. 2020년의 경우 질산암모늄 ($78.6 \pm 122.4 \text{ Mm}^{-1}$, 46.4%), 황산암모늄 ($48.7 \pm 50.0 \text{ Mm}^{-1}$, 28.7%), 유기입자 ($25.5 \pm 18.9 \text{ Mm}^{-1}$, 15.0%), 원소탄소 ($9.9 \pm 5.8 \text{ Mm}^{-1}$, 5.8%), 해염 ($3.1 \pm 4.0 \text{ Mm}^{-1}$, 1.8%) 순으로 나타났다. 황산암모늄과 질산암모늄의 경우 상대습도가 증가하면 흡습성장으로 입경이 증가하여 산란효율이 증가한다. 반면, IMPROVE 빛 소멸계수 산정식에서는 유기입자를 비흡습성 입자로 가정하기 때문에 상대습도가 증가하여도 산란효율은 증가하지 않는다. 이 때문에 흡습성을 가지는 황산암모늄과 질산암모늄이 유기입자에 비해 산란계수가 상대적으로 크게 증가한 것을 확인할 수 있다.

가지거리 악화에 직접적인 영향을 주는 빛 소멸계수의 경우 2014년에 황산암모늄이 31.1%로 기여도가 가장 높았으나, 2020년에는 28.7%로 소폭 하락하였다. 반면 질산암모늄의 기여도는 2014년 28.7%에서 2020년 46.4%로 크게 증가한 것을 확인할 수 있다. 이 결과로부터 2014년의 경우 가지거리를 개선하기 위해 황산암모늄의 농도를 줄이는 것이 가장 효과적인

Table 2. Summary of seasonal average of chemical and optical properties in Daejeon during 2014 and 2020.

Compound	Unit	2014					2020					
		Winter	Spring	Summer	Fall	Annual	Winter	Spring	Summer	Fall	Annual	
(NH ₄) ₂ SO ₄	μg m ⁻³	7.20 ± 6.05	6.39 ± 5.50	6.08 ± 5.72	4.84 ± 4.28	6.09 ± 5.48	5.32 ± 3.21	4.89 ± 2.75	5.79 ± 4.19	5.11 ± 3.44	5.25 ± 3.38	
NH ₄ NO ₃		7.87 ± 6.48	6.04 ± 5.87	2.96 ± 3.97	4.28 ± 5.08	5.16 ± 5.68	12.82 ± 8.98	6.36 ± 5.84	0.77 ± 1.24	8.29 ± 9.79	7.43 ± 8.43	
OM		14.71 ± 8.07	12.28 ± 4.46	6.96 ± 3.96	8.11 ± 3.66	10.27 ± 6.20	7.31 ± 3.72	5.92 ± 2.86	4.37 ± 2.74	6.73 ± 3.85	6.16 ± 3.49	
EC		2.24 ± 1.41	2.09 ± 0.90	1.10 ± 0.60	1.48 ± 0.83	1.69 ± 1.08	1.25 ± 0.70	0.90 ± 0.43	0.71 ± 0.30	1.02 ± 0.64	0.99 ± 0.58	
SS		1.51 ± 1.10	0.61 ± 0.53	0.19 ± 0.31	0.57 ± 0.75	0.71 ± 0.89	1.16 ± 0.69	0.27 ± 0.27	0.09 ± 0.12	0.51 ± 0.58	0.54 ± 0.64	
PM _{2.5} _others		13.51 ± 13.84	16.54 ± 9.66	10.40 ± 10.65	3.34 ± 3.70	10.49 ± 11.20	2.76 ± 3.43	4.74 ± 4.21	4.92 ± 4.87	2.74 ± 2.80	3.80 ± 4.04	
RH		%	67.8 ± 18.3	62.2 ± 22.1	82.2 ± 13.6	77.1 ± 18.4	72.3 ± 19.9	67.0 ± 18.5	59.5 ± 22.7	83.4 ± 14.6	73.2 ± 18.8	70.8 ± 20.8
<i>b</i> _{scat} -(NH ₄) ₂ SO ₄		Mm ⁻¹	65.4 ± 69.7	51.7 ± 65.7	73.0 ± 94.4	61.8 ± 92.7	63.9 ± 83.4	41.9 ± 38.5	36.5 ± 35.5	68.6 ± 63.7	55.7 ± 58.5	48.7 ± 50.0
<i>b</i> _{scat} -NH ₄ NO ₃			76.1 ± 80.4	57.2 ± 84.3	42.6 ± 77.8	61.1 ± 92.2	58.9 ± 84.7	136.2 ± 135.3	56.1 ± 83.0	9.0 ± 20.8	103.0 ± 162.3	78.6 ± 122.4
<i>b</i> _{scat} -OM			80.3 ± 54.5	61.7 ± 31.1	29.9 ± 23.9	35.8 ± 22.0	50.4 ± 40.7	31.6 ± 20.9	23.7 ± 15.1	16.6 ± 13.3	28.7 ± 21.7	25.5 ± 18.9
<i>b</i> _{scat} -EC	22.4 ± 14.1		20.9 ± 9.0	11.0 ± 6.0	14.8 ± 8.3	16.9 ± 10.8	12.5 ± 7.0	9.0 ± 4.3	7.1 ± 3.0	10.2 ± 6.4	9.9 ± 5.8	
<i>b</i> _{scat} -SS	8.8 ± 8.4		3.3 ± 4.2	1.6 ± 2.9	4.7 ± 7.3	4.6 ± 6.7	6.4 ± 4.8	1.3 ± 1.7	0.8 ± 1.2	3.4 ± 4.0	3.1 ± 4.0	
<i>b</i> _{scat} -PM _{2.5} _others	13.5 ± 13.8		16.5 ± 9.7	10.4 ± 10.7	3.3 ± 3.7	10.5 ± 11.2	2.8 ± 3.4	4.7 ± 4.2	4.9 ± 4.9	2.7 ± 2.8	3.8 ± 4.0	

것으로 나타났고, 2020년의 경우 질산암모늄의 농도를 줄이는 것이 가장 효과적인 것으로 나타났다.

2014년과 2020년 전체 기간 동안 대기환경 및 건조 상태에서 화학물질별 빛 산란계수 및 빛 흡수계수를 표 3에 나타내었다. 2014년과 2020년 유효 측정일 평균 상대습도는 각각 72.3 ± 11.4%와 70.8 ± 20.8%로 2020년에 상대습도가 소폭 감소한 것으로 나타났다. 황산암모늄, 질산암모늄, 그리고 해염의 경우 상대습도 증가에 따른 흡습성장에 의해 빛 산란계수가 크게 증가한 것을 확인할 수 있다. 각 화학물질별 상대습도 증가에 따른 산란계수 기여율(RH effect)을 아래와 같이 계산하였다.

$$RH_{effect,x_i}(\%) = \frac{(b_{scat,x_i}(RH) - b_{scat,x_i}(dry))}{b_{scat,x_i}(RH)} \times 100 \quad (5)$$

여기서, $b_{scat,x_i}(RH)$ 는 화학물질 x_i 가 특정 상대습도(RH) 조건에서 빛 산란계수를 나타내고, $b_{scat,x_i}(dry)$ 는 건조상태에서 빛 산란계수를 의미한다.

황산암모늄의 경우 상대습도 증가에 의한 흡습 성장을 통해 빛 산란계수가 2014년과 2020년에 평균 66.3%와 65.9% 증가한 것을 확인할 수 있다. 질산암모늄도 유사하게 2014년과 2020년에 각각 66.3%와 59.8% 증가한 것을 확인할 수 있다. 전체 빛 소멸계수 중 흡습성 입자에 포함된 수분에 의한 영향이 2014년에 평균 36.6%로 산출되었고, 2020년에 소폭 증가하여 42.5%로 산출되었다. 상대습도는 2014년에 비해 2020년에 소폭 감소하였지만, 흡습성 입자에 포함된 수분에 의한 기여도는 2020년에 증가한 것을 확인할 수 있다. 이러한 특징은 그림 4에 나타난 바와 같이 PM_{2.5}를 구성하는 화학물질 중 흡습성이 있는 화학물

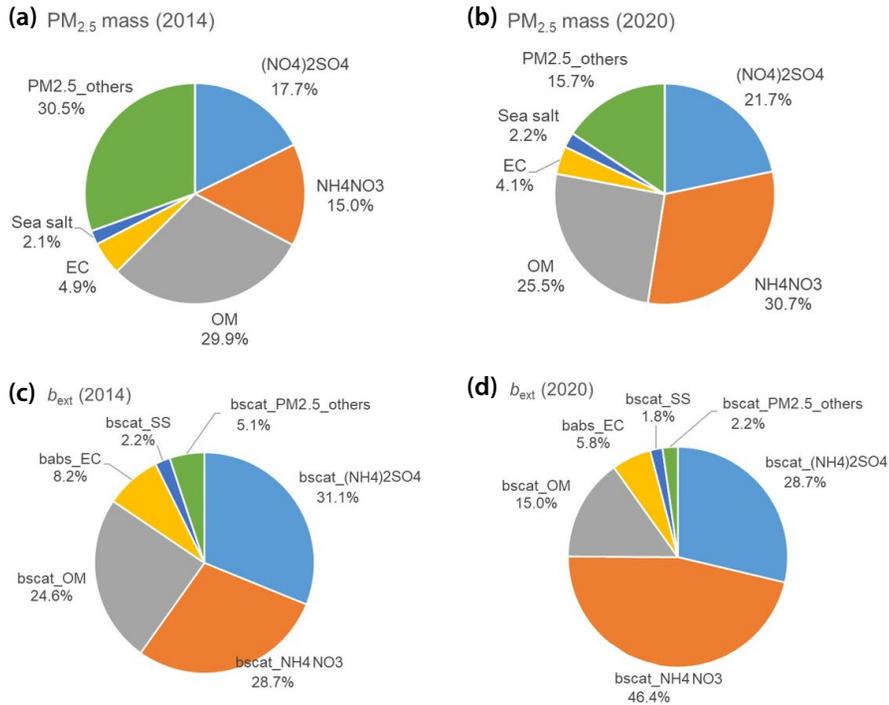


Fig. 4. PM_{2.5} mass budget in Daejeon during (a) 2014 and (b) 2020 and b_{ext} budget during (c) 2014, and (d) 2020. OM (organic mass), EC (elemental carbon), SS (sea salt).

Table 3. Summary of light scattering and absorption coefficients by each chemical compounds under ambient and dry conditions during the entire periods in 2014 and 2020.

Parameter	2014			2020		
	Ambient condition	Dry condition	RH effect	Ambient condition	Dry condition	RH effect
	Mm ⁻¹	Mm ⁻¹	%	Mm ⁻¹	Mm ⁻¹	%
$b_{scat_}(NH_4)_2SO_4$	63.9 ± 83.4	21.5 ± 25.8	66.3	48.7 ± 50.0	16.6 ± 13.7	65.9
$b_{scat_}NH_4NO_3$	58.9 ± 84.7	19.9 ± 27.6	66.3	78.6 ± 122.4	31.6 ± 43.2	59.8
$b_{scat_}OM$	50.4 ± 40.7	50.4 ± 40.7		25.5 ± 18.9	25.5 ± 18.9	
$b_{abs_}EC$	16.9 ± 10.8	16.9 ± 10.8		9.9 ± 5.8	9.9 ± 5.8	
$b_{scat_}SS$	4.6 ± 6.7	1.2 ± 1.5	73.6	3.1 ± 4.0	0.9 ± 1.1	70.4
$b_{scat_}PM_{2.5_}others$	10.5 ± 11.2	10.5 ± 11.2		3.8 ± 4.0	3.8 ± 4.0	
b_{ext}	231.3 ± 196.8	146.5 ± 100.9	36.6	191.2 ± 169.1	110.0 ± 72.0	42.5
Visibility (km)	22.5 ± 16.7			26.8 ± 19.1		
RH (%)	72.3 ± 11.4			70.8 ± 20.8		

질 (황산암모늄, 질산암모늄, 해염)의 총 기여도가 2014년에 34.8%에서 2020년에 54.6%로 크게 증가한 것으로부터 설명될 수 있다.

가시거리 하위 20% 기간 동안 PM_{2.5} 질량 중 화학 물질별 평균 농도와 기여도를 표 4와 그림 5에 나타내었다. 가시거리 하위 20% 기간 동안 PM_{2.5}의 농도는

2014년 ($64.2 \pm 29.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$)에 비해 2020년 ($44.0 \pm 14.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$)에 대폭 감소하였다. 질산염을 제외하고 모든 주요 화학물질의 농도가 2014년에 비해 2020년에 감소한 것으로 나타났다. 국내 $\text{PM}_{2.5}$ 농도 감소는 중국 내륙의 급격한 농도 감소한 유사한 경향을 나타내었다(Liu *et al.*, 2022).

가시거리 하위 20% 기간 동안 $\text{PM}_{2.5}$ 질량 중 화학물질별 기여도를 살펴보면 $\text{PM}_{2.5_others}$ 를 제외하고, 2014년에 유기입자(26.2%), 질산암모늄(20.7%), 황산암모늄(20.3%), 원소탄소(4.4%) 순으로 나타났다. 2020년에는 질산암모늄(42.5%)의 기여도가 크게 증가하였고, 유기입자(22.6%), 황산암모늄(18.0%), 원소탄소(3.7%) 순으로 나타났다. 1년 평균과 가시거리 하위 20% 기간을 비교하면, 2014년에는 가시거리 하위 20% 기간 동안에 $\text{PM}_{2.5}$ 질량 중 유기입자의 기여

도가 29.9%에서 26.2%로 소폭 감소하였고, 황산암모늄과 질산암모늄은 각각 17.7%에서 20.3%로, 15.0%에서 20.7%로 기여도가 증가한 것을 확인할 수 있다. 2020년에도 유기입자와 황산암모늄의 기여도가 각각 25.5%에서 22.6%로, 21.7%에서 18.0%로 감소하였다. 반면, 질산암모늄의 기여도는 20.7%에서 42.5%로 대폭 증가한 것을 확인할 수 있다.

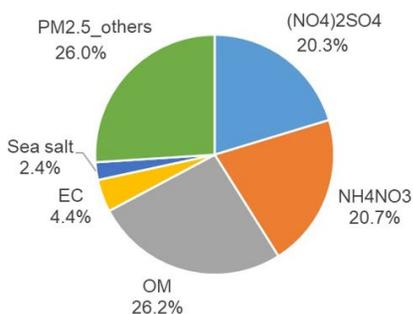
가시거리가 악화된 기간 동안 주요 화학물질 및 상대습도에 의한 빛 소멸계수 기여도를 파악하기 위해 2014년과 2020년 각각 가시거리 하위 20% 기간 동안 평균을 표 5에 요약하여 나타내었다. 가시거리 하위 20% 시기 상대습도는 2014년과 2020년에 각각 $83.0 \pm 14.5\%$, $80.7 \pm 14.6\%$ 로 2020년에 상대습도가 다소 낮았다. 대기환경 조건에서 화학물질별 빛 소멸계수 기여도를 그림 6에 나타내었다. 가시거리 하위 20% 시기에 평균 가시거리는 2014년과 2020년에 각각 $6.0 \pm 1.7 \text{ km}$, $7.4 \pm 2.3 \text{ km}$ 로 2020년에 가시거리가 개선된 것을 확인할 수 있다. 가시거리 하위 20% 시기에 2014년 대비 2020년에 가시거리가 개선된 원인은 표 4에 나타낸 바와 같이 2014년 대비 2020년에 $\text{PM}_{2.5}$ 농도가 크게 감소한 것으로 설명된다. 동일한 시기 대기환경 조건에서 평균 빛 소멸계수는 2014년과 2020년에 각각 $551.0 \pm 204.7 \text{ Mm}^{-1}$, $458.0 \pm 198.5 \text{ Mm}^{-1}$ 로 산출되었다.

2014년에는 가시거리가 악화된 시기에 질산암모늄

Table 4. Average mass concentrations of $\text{PM}_{2.5}$ chemical compounds during the worst 20% visibility period in 2014 and 2020.

Compound	Unit	2014	2020
$\text{PM}_{2.5}$		64.2 ± 29.0	44.0 ± 14.5
$(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$		13.0 ± 6.8	8.0 ± 3.4
NH_4NO_3		13.2 ± 6.3	18.9 ± 10.2
OM	$\mu\text{g m}^{-3}$	16.7 ± 7.5	10.1 ± 3.6
EC		2.8 ± 1.3	1.6 ± 0.7
SS		1.5 ± 1.2	1.1 ± 0.8
$\text{PM}_{2.5_others}$		16.6 ± 16.2	4.7 ± 4.8

(a) $\text{PM}_{2.5}$ mass (2014)



(b) $\text{PM}_{2.5}$ mass (2020)

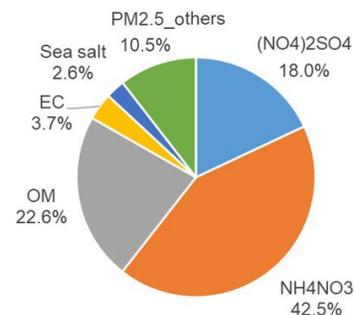
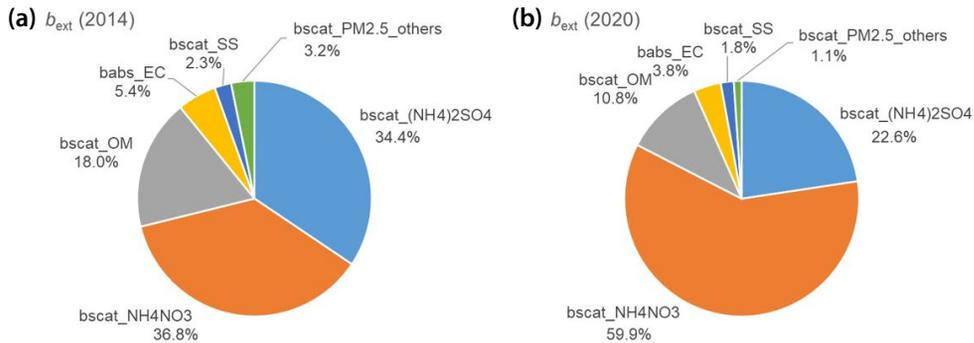


Fig. 5. $\text{PM}_{2.5}$ mass budget during the worst 20% visibility periods in (a) 2014 and (b) 2020.

Table 5. Summary of light scattering and absorption coefficients by each chemical compounds under ambient and dry conditions during the worst 20% visibility period in 2014 and 2020.

Parameter	2014			2020		
	Ambient condition	Dry condition	RH effect	Ambient condition	Dry condition	RH effect
	Mm ⁻¹	Mm ⁻¹	%	Mm ⁻¹	Mm ⁻¹	%
$b_{scat_}(NH_4)_2SO_4$	178.3 ± 117.8	53.3 ± 36.5	70.1	98.3 ± 68.5	27.6 ± 16.0	71.9
$b_{scat_}NH_4NO_3$	190.5 ± 103.8	58.3 ± 36.2	69.4	260.3 ± 168.6	91.8 ± 55.7	64.7
$b_{scat_}OM$	93.1 ± 51.7	93.1 ± 51.7		47.0 ± 22.7	47.0 ± 22.7	
$b_{abs_}EC$	27.9 ± 13.4	27.9 ± 13.4		16.3 ± 6.6	16.3 ± 6.6	
$b_{scat_}SS$	11.9 ± 10.3	2.6 ± 2.1	78.3	7.8 ± 5.4	2.0 ± 1.4	74.9
$b_{scat_}PM_{2.5_}others$	16.6 ± 16.1	16.6 ± 16.1		4.7 ± 4.8	4.7 ± 4.8	
b_{ext}	551.0 ± 204.7	284.5 ± 121.2	48.4	458.0 ± 198.5	213.0 ± 81.0	53.5
Visibility (km)	6.0 ± 1.7			7.4 ± 2.3		
RH (%)	83.0 ± 14.5			80.7 ± 14.6		

**Fig. 6.** b_{ext} budget in Daejeon during the worst 20% visibility periods during (a) 2014 and (b) 2020.

의 기여도가 36.8% ($190.5 \pm 103.8 \text{ Mm}^{-1}$)로 가장 높았고, 황산암모늄 34.4% ($178.3 \pm 117.8 \text{ Mm}^{-1}$), 유기입자 18.0% ($93.1 \pm 51.7 \text{ Mm}^{-1}$), 원소탄소 2.3% ($11.9 \pm 10.3 \text{ Mm}^{-1}$) 순으로 나타났다. 2020년 가시거리가 악화된 시기에 질산암모늄의 기여도는 59.9% ($260.3 \pm 168.6 \text{ Mm}^{-1}$)로 가장 높았고, 2014년과 비교해 비율이 대폭 증가하였다. 다음으로 황산암모늄 22.6% ($98.3 \pm 68.5 \text{ Mm}^{-1}$), 유기입자 10.8% ($47.0 \pm 22.7 \text{ Mm}^{-1}$), 원소탄소 3.8% ($16.3 \pm 6.6 \text{ Mm}^{-1}$) 순으로 나타났다. 질산암모늄을 제외한 다른 화학물질은 2014년 대비 2020년에 빛 산란계수의 크기가 모두 감소하였다. 하지만 질산암

모늄의 경우 빛 산란계수 크기뿐만 아니라 기여도도 크게 증가하였다.

가시거리가 하위 20% 시기에 빛 소멸계수 중 흡수성 입자에 포함된 수분에 의한 영향이 전체 기간에 비교해 소폭 증가한 것을 확인할 수 있다. 전체 빛 소멸계수에 수분에 의한 영향은 2014년과 2020년에 각각 평균 36.6%와 42.5%였지만, 가시거리 하위 20% 기간에 각각 48.4%와 53.5%로 수분에 의한 영향이 크게 증가한 것을 확인할 수 있다. 예를 들어, 황산암모늄의 경우 2014년과 2020년에 각각 평균 66.3%와 65.9%였지만, 가시거리 하위 20% 시기에 각각 70.1%와 71.9%

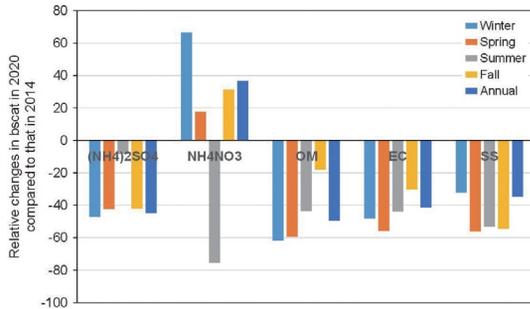


Fig. 7. Relative changes in light scattering and absorption coefficients of each chemical compounds in Daejeon during the worst 20% period in 2020 compared to those in 2014.

로 증가하였다. 이 결과로부터 동일한 시기의 경우 가시거리가 악화될 때 빛 소멸계수 중 수분에 의한 영향이 증가하였고, 과거(2014년)에 비해 최근(2020년)에 수분에 의한 영향이 증가한 것을 확인할 수 있다.

가시거리 하위 20%인 시기 2014년 대비 2020년 화학물질별 빛 산란계수 및 빛 흡수계수의 상대적 변화량을 그림 7에 나타냈다. 전체 빛 소멸계수는 2014년 대비 2020년에 16.9% 감소하였고, 이로 인해 평균 가시거리는 23.2% 증가하였다. 질산암모늄에 의한 빛 산란계수를 제외하고 모든 화학물질에서 빛 산란 및 흡수계수가 감소하였다. 질산암모늄에 의한 빛 산란계수는 연평균 36.6% 증가하였고, 여름을 제외하고 모든 계절 특히 겨울철에 산란계수의 증가비가 크게 나타났다. 2020년 여름철에 질산암모늄에 의한 빛 산란계수가 2014년 대비 크게 감소한 원인을 살펴보면, 2020년 여름철에는 질산염의 농도가 지속적으로 낮게 유지되었지만, 2014년 여름철에는 중국으로부터 장거리 이동된 오염물질과 시베리아 산불에서 배출된 오염물질의 한반도 유입에 영향을 받아 질산암모늄의 농도가 상대적으로 높게 유지되었다(Jung *et al.*, 2016). 황산암모늄에 의한 빛 산란계수는 여름철을 제외하고 다른 계절에 모두 크게 감소하였고, 연평균 44.9% 감소하였다. 유기입자는 가을철에 소폭, 다른 계절은 크게 감소하여 연평균 49.5% 감소하였다. 원소탄소에 의한 빛 흡수계수는 모든 계절에 크게 감소하여 연평균 41.4% 감소하였다.

4. 결 론

본 연구에서는 중부권 대기환경연구소에서 2014년과 2020년에 측정된 미세먼지 물리 화학 특성 데이터를 활용해 화학조성에 따른 가시거리 악화 원인 및 장기 변화 경향을 살펴보았다. 미세먼지 화학조성별 농도를 활용한 IMPROVE 빛 소멸계수 산정식은 실제 광학적으로 측정된 빛 소멸계수를 잘 모사하는 것으로 나타났다. 가시거리 하위 20% 기간 동안 2014년 대비 2020년에 빛 소멸계수가 16.9% 감소하였고, 이로 인해 가시거리가 23.2% 증가하였다. 전체 빛 소멸계수 중 질산암모늄의 기여도는 2014년 대비 2020년에 증가하였지만, 다른 화학물질에 의한 기여도는 크게 감소하였다. 이 결과로부터 대전지역에서는 가시거리 악화 문제를 해결하기 위해서는 질산암모늄의 농도를 줄이는 것이 가장 효과적임을 유추할 수 있다. 대기 중 질산암모늄의 농도를 줄이기 위해 전구 가스상 물질인 질소산화물(NO, NO₂)과 암모니아의 배출량을 줄일 필요가 있다. 전체 빛 소멸계수에서 수분에 의한 영향은 2014년과 2020년에 각각 평균 36.6%와 42.5%였지만, 가시거리 하위 20% 기간에는 각각 48.4%와 53.5%로 수분에 의한 영향이 크게 증가한 것을 확인할 수 있다. 이 결과로부터 동일한 시기의 경우 가시거리가 악화될 때 빛 소멸계수 중 수분에 의한 영향이 증가하였고, 과거(2014년)에 비해 최근(2020년)에 수분에 의한 영향이 증가한 것을 확인할 수 있다. 총 빛 소멸계수에서 수분에 의한 영향이 증가한 원인은 PM_{2.5}를 구성하는 화학물질 중 흡습성이 있는 화학물질(황산암모늄, 질산암모늄, 해염)의 총 질량 농도 기여도가 2014년(34.8%) 대비 2020년(54.6%)에 크게 증가한 것으로부터 설명될 수 있다.

감사의 글

이 연구는 한국표준과학연구원 기초연구지원사업 “미세먼지 국가 측정체계 신뢰성 기반구축(Grant No.

22011085)의 연구비 지원을 받아 수행되었습니다.

References

- Cuesta-Mosquera, A., Močnik, G., Drinovec, L., Müller, T., Pfeifer, S., Minguillón, M.C., Briel, B., Buckley, P., Dudoitis, V., Fernández-García, J., Fernández-Amado, M., Ferreira De Brito, J., Riffault, V., Flentje, H., Heffernan, E., Kalivitis, N., Kalogridis, A.-C., Keernik, H., Marmureanu, L., Luoma, K., Marinoni, A., Pikridas, M., Schauer, G., Serfozo, N., Servomaa, H., Titos, G., Yus-Díez, J., Zioła, N., Wiedensohler, A. (2021) Intercomparison and characterization of 23 Aethalometers under laboratory and ambient air conditions: procedures and unit-to-unit variabilities, *Atmospheric Measurement Technique*, 14, 3195-3216.
- DeBell, L.J., Gebhart, K.A., Hand, J.L., Malm, W.C., Pitchford, M.L., Schichtel, B.A., White, W.H. (2006) Spatial and seasonal patterns and temporal variability of haze and its constituents in the United States: Report IV. CIRA, Cooperative Institute for Research in the Atmosphere, Colorado State University.
- Hand, J.L., Malm, W.C. (2006) Review of the IMPROVE equation for Estimating ambient light extinction coefficients. report, 146 pp., CIRA, Colorado State University., Fort Collins. (Available at http://vista.cira.colostate.edu/improve/Publications/GrayLit/016_IMPROVEeq_Review/IMPROVEeqReview.htm).
- Hansen, A. (2005) The Aethalometer manual, Magee Scientific, Berkeley, California, USA.
- Hu, S., Zhao, G., Tan, T., Li, C., Zong, T., Xu, N., Zhu, W., Hu, M. (2021) Current challenges of improving visibility due to increasing nitrate fraction in PM_{2.5} during the haze days in Beijing, China, *Environmental Pollution*, 290, 118032.
- Jung, J., Lee, H., Kim, Y.J., Liu, X., Zhang, Y., Gu, J., Fan, S. (2009) Aerosol chemistry and the effect of aerosol water content on visibility impairment and radiative forcing in Guangzhou during the 2006 Pearl River Delta campaign, *Journal of Environmental Management*, 90(11), 3231-3244.
- Jung, J., Lee, K.Y., Cayetano, M.G., Batmunkh, T., Kim, Y.J. (2015) Optical and hygroscopic properties of long-range transported haze plumes observed at Deokjeok Island off the west coast of the Korean Peninsula under the Asian continental outflows, *Journal of Geophysical Research*, 120, 8861-8877. <https://doi.org/10.1002/2015JD023154>
- Jung, J., Lyu, Y., Lee, M., Hwang, T. (2016) Impact of Siberian forest fires on the atmosphere over the Korean Peninsula during summer 2014, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 16, 6757-6770.
- Jung, J., Yu, J., Lyu, Y., Lee, M., Hwang, T., Lee, S. (2017) Ground-based characterization of aerosol spectral optical properties of haze and Asian dust episodes under Asian continental outflow during winter 2014, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 17, 5297-5309.
- Jung, J., Lee, D., Jeong, H., Lee, S., Oh, S. (2018) Chemical characterization of the long-range transport of firework/firecracker emissions over the Korean Peninsula: A novel indicator of Asian continental outflows, *Atmospheric Environment*, 178, 223-230.
- Jung, J., Ghim, Y.S., Lyu, Y.S., Lim, Y.J., Park, J., Sung, M.Y. (2019) Quantification of regional contributions to fine particles at downwind areas under Asian continental outflows during winter 2014, *Atmospheric Environment*, 210, 231-240.
- Jung, J.S., Kang, J.H. (2021) Postharvest Burning of Crop Residues in Home Stoves in a Rural Site of Daejeon, Korea: Its Impact to Atmospheric Carbonaceous Aerosol, *Atmosphere*, 12(2), 257.
- Liu, B., Wang, Y., Meng, H., Dai, Q., Diao, L., Wu, J., Shi, L., Wang, J., Zhang, Y., Feng, Y. (2022) Dramatic changes in atmospheric pollution source contributions for a coastal megacity in North China from 2011 to 2020, *Atmospheric Chemistry and Physics Discussions*, 22, 8597-8615.
- Magee Scientific (2021) Aethalometer Model AE33 User Manual, version 1.60. Aerosol d.o.o., Ljubljana, Slovenia.
- Malm, W.C., Hand, J.L. (2007) An examination of the physical and optical properties of aerosols collected in the IMPROVE program, *Atmospheric Environment*, 41, 3407-3427. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2006.12.012>
- Park, R.J., Jacob, D.J., Chin, M., Martin, R.V. (2003) Sources of carbonaceous aerosols over the United States and implications for natural visibility, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 108(D12), 4355.
- Pitchford, M., Malm, W., Schichtel, B., Kumar, N., Lowenthal, D., Hand, J. (2007) Revised algorithm for estimating light extinction from IMPROVE particle speciation data, *Journal of the Air and Waste Management Association*, 57, 1326-1336.
- Polidori, A., Turpin, B., Lim, H., Cabada, J., Subramanian, R., Pandis, S., Robinson, A. (2006) Local and Regional Secondary Organic Aerosol: Insights from a Year of Semi-

- Continuous Carbon Measurements at Pittsburgh, *Aerosol Science and Technology*, 40, 861-872.
- Pui, D.Y., Chen, S.C., Zuo, Z. (2014) PM_{2.5} in China: Measurements, sources, visibility and health effects, and mitigation, *Particuology*, 13, 1-26.
- Quan, J., Tie, X., Zhang, Q., Liu, Q., Li, X., Gao, Y., Zhao, D. (2014) Characteristics of heavy aerosol pollution during the 2012-2013 winter in Beijing, China, *Atmospheric Environment*, 88, 83-89.
- Shen, X., Sun, J., Zhang, X., Wang, H., Zhou, C., Zhang, Y., Zhang, S. (2021) A novel method of retrieving low visibility during heavily polluted episodes in the North China plain, *Atmospheric Environment: X*, 9, 100101.
- So, K.L., Guo, H., Li, Y.S. (2007) Long-term variation of PM_{2.5} levels and composition at rural, urban, and roadside sites in Hong Kong: Increasing impact of regional air pollution, *Atmospheric Environment*, 41(40), 9427-9434.
- Song, I.H., Park, J.S., Park, S.M., Kim, D.G., Kim, Y.W., Shin, H.J. (2021) Seasonal characteristics of PM₁ in Seoul, Korea, measured using HR-ToF-Aerosol Mass Spectrometer in 2018, *Atmospheric Environment*, 266, 118717.
- Tao, J., Ho, K.F., Chen, L., Zhu, L., Han, J., Xu, Z. (2009) Effect of chemical composition of PM_{2.5} on visibility in Guangzhou, China, 2007 spring, *Particuology*, 7(1), 68-75.
- Watson, J.G. (2002) Visibility: Science and regulation, *Journal of the Air & Waste Management Association*, 52, 628-713.
- WMO (2018) Guide to instruments and methods of observation (WMO-No. 8), World Meteorological Organization (WMO), Volume I, Chapter 9.
- Yuan, C.S., Lee, C.G., Liu, S.H., Chang, J.C., Yuan, C., Yang, H.Y. (2006) Correlation of atmospheric visibility with chemical composition of Kaohsiung aerosols, *Atmospheric Research*, 82(3-4), 663-679.
- Zhang, Y., Gao, L., Cao, L., Yan, Z., Wu, Y. (2020) Decreasing atmospheric visibility associated with weakening winds from 1980 to 2017 over China, *Atmospheric Environment*, 224, 117314.
- 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.

Authors Information

문정호 (충남대학교 환경공학과 대학원생)
(mjh940419@kriss.re.kr)

Jayant Nirmalkar (한국표준과학연구원 가스분석표준그룹 박사후연구원) (j_nirmalkar@yahoo.com)

황태경 (국립환경과학원 대기환경연구과 전문연구원)
(ecotk25@korea.kr)

김대곤 (국립환경과학원 대기환경연구과 과장)
(nierkdg@korea.kr)

양재환 (충남대학교 환경공학과 교수) (yjh98@cnu.ac.kr)

정진상 (한국표준과학연구원 가스분석표준그룹 책임연구원)
(jsjung@kriss.re.kr)