

연무 종류별 강수 발생시간 관측 특성 및 에어로졸-강수 연관성 분석

은승희¹⁾ · 장문정¹⁾ · 박성민¹⁾ · 김병곤^{1)*} · 박진수²⁾ · 김정수²⁾ · 박일수³⁾

¹⁾강릉원주대학교 대기환경과학과, ²⁾국립환경과학원 기후대기연구부,

³⁾한국외국어대학교 한·중남미 녹색융합센터

(접수일: 2018년 3월 17일, 수정일: 2018년 5월 14일, 게재확정일: 2018년 5월 31일)

Observed Characteristics of Precipitation Timing during the Severe Hazes: Implication to Aerosol-Precipitation Interactions

Seung-Hee Eun¹⁾, Wenting Zhang¹⁾, Sung-Min Park¹⁾, Byung-Gon Kim^{1)*},
Jin-Soo Park²⁾, Jeong-Soo Kim²⁾, and Il-Soo Park³⁾

¹⁾Department of Atmospheric Environmental Sciences, Gangneung-Wonju National University, Gangneung, Korea

²⁾Climate and Air Quality Research Department, National Institute of Environmental Research, Incheon, Korea

³⁾Korea-Latin America Green Convergence Center, Hankook University of Foreign Studies, Yongin, Korea

(Manuscript received 17 March 2018, revised 14 May 2018, accepted 31 May 2018)

Abstract Characteristics of precipitation response to enhanced aerosols have been investigated during the severe haze events observed in Korea for 2011 to 2016. All 6-years haze events are classified into long-range transported haze (LH: 31%), urban haze (UH: 28%), and yellow sand (YS: 18%) in order. Long-range transported one is mainly discussed in this study. Interestingly, both LH (68%) and YS (87%) appear to be more frequently accompanied with precipitation than UH (48%). We also found out the different timing of precipitation for LH and YS, respectively. The variations of precipitation frequency for the LH event tend to coincide with aerosol variations specifically in terms of temporal covariation, which is in contrast with YS. Increased aerosol loadings following precipitation for the YS event seems to be primarily controlled by large scale synoptic forcing. Meanwhile, aerosols for the LH event may be closely associated with precipitation longevity through changes in cloud microphysics such that enhanced aerosols can increase smaller cloud droplets and further extend light precipitation at weaker rate. Notably, precipitation persisted longer than operational weather forecast not considering detailed aerosol-cloud interactions, but the timescale was limited within a day. This result demonstrates active interactions between aerosols and meteorology such as probable modifications of cloud microphysics and precipitation, synoptic-induced dust transport, and precipitation-scavenging in Korea. Understanding of aerosol potential effect on precipitation will contribute to improving the performance of numerical weather model especially in terms of precipitation timing and location.

Key words: Haze, aerosol, precipitation, interactions, timing

*Corresponding Author: Byung-Gon Kim, Department of Atmospheric Environmental Sciences, Gangneung-Wonju National University, 7 Jukheongil, Gangneung, Gangwon 25457, Korea.
Phone: +82-33-640-2326, Fax: +82-33-640-2320
E-mail: bgk@gwnu.ac.kr

1. 서 론

한반도는 최근 다양한 대기오염을 동반한 연무로 뒤덮이는 사례가 자주 발생하고 있다. 연무의 주요 구성 성분인 에어로졸은 황사나 해염과 같이 자연적으로 발생하거나 인간 활동에 의해 직·간접적으로 생성될 수 있다. 기상학적으로 에어로졸에 의한 시정장애 현상을 연무(haze)라고 일컫는 데, 높은 상대습도(relative humidity; RH)에서 응결된 미세한 물방울에 의한 안개(fog)나 박무(mist)와 달리 상대습도가 낮은 상태(RH < 75%)에서 미세한 입자들에 의해 발생한다(KMS and KMA, 2015). 미세입자 증가를 동반하는 연무는 건강에 악영향을 미치고 시정장애 등의 중요한 사회적인 문제를 일으키고 있다(Lee et al., 2017).

한편 한반도에서 대기오염농도는 지속적으로 감소하고 있음에도 불구하고(Kim, 2017), 국민들의 체감 오염도는 전혀 개선되지 않고 있는 데, 이는 국민들의 건강에 대한 관심 증가와 연무가 동반하는 시정장애 현상을 일반인들이 쉽게 체감할 수 있기 때문이다. 시정장애를 유발하는 미세한 크기의 에어로졸은 대기오염 가스성분이 미세입자로의 이차적인 변환을 거쳐 생성되는 데, 이들은 직접적으로 태양 복사의 전달에 영향을 미칠 뿐만 아니라 구름방울의 응결핵 혹은 빙정핵으로 작용함으로써 구름의 생성과 발달, 나아가 강수에도 영향을 미치고 있다(Kim and Kwon, 2006; Tao et al., 2012).

선행 연구결과들에 의하면 중국의 풍하측에 위치한 한반도는 중국으로부터 유입되는 장거리이동 오염물질의 영향을 받고 있으며(Kim et al., 2001; Kim and Park, 2001; Lee et al., 2013; Oh et al., 2015), 심각한 연무가 발생할 경우 구름 및 강수의 변화 가능성까지 제시되고 있다(Eun et al., 2016). 일례로 2013년 1월 중국 베이징에서 PM_{2.5}와 PM₁₀ 질량농도가 높게 관측된 이후 1~2일 이후 백령도와 서울에서도 고농도가 시간차를 보이면서 관측된 바 있다(Uno et al., 2014; Eun et al., 2016). 중국으로부터 장거리이동으로 증가된 에어로졸 개수농도는 구름방울 크기는 감소시키면서 개수농도를 증가시켜 구름방울의 충돌병합 효율을 감소시키는 데, 결국은 강수를 지체하거나 억제하는 경향이 있다(Albrecht, 1989; Khain et al., 2008; Eun et al., 2016). 강수 효율의 감소는 잠재적 대류에너지가 강할 경우, 구름 방울들이 빙결고도 위까지 연직 상승하게 되고 빙결과정에서 추가적인 잠열이 방출되면서 구름의 연직발달과 강수 강도를 증가시킬 수도 있다(Bell et al., 2008; Rosenfeld et al., 2008). Van den Heever et al. (2011)에 의하면 에어로졸이 강수에 미치는 영향은 유형의 종류에 따라 결정된다고 강조한 바 있다. 결국 고농도 에어로졸을 포함한 연무가

구름 시스템과 함께 한반도로 이동할 경우 에어로졸에 의한 구름 및 강수의 변화가 발생할 가능성이 있다.

동북아시아 지역은 중국의 급속한 산업화와 경제발전으로 연무가 빈번히 발생하고 있지만 이로 인한 구름 및 강수 변화에 대한 연구는 여전히 미흡한 실정이다. Ding et al. (2013)은 심각한 대기오염에 의한 기상변화를 분석한 바 있으나 자체 발생한 에어로졸에 의한 구름 및 강수변화는 강수에 의한 세정효과로 원래 에어로졸의 강제력(forcing) 자체가 희석될 가능성이 있다. 이런 측면에서 Eun et al. (2016)는 한반도 중부지방에 외부(주로 중국)로부터 유입되는 에어로졸을 외부 강제력(external forcing)으로 가정하고 이에 의한 강수변화(response) 가능성을 분석한 바 있으나 단 하나의 장거리이동 연무사례 분석이었다. 본 연구에서는 이를 보완하기 위하여 Eun et al. (2016)에서 제시한 분석방법을 기반으로 지난 6년(2011~2016년) 동안 장거리이동 연무와 황사 사례들을 선별하여 이들의 강수와 연관성을 분석하였다.

구름 및 강수의 변화 가능성을 효과적으로 분석하기 위해서는 외부로부터 유입되는 에어로졸 강제력을 분석할 수 있는 적절한 선별방법이 필요하다. 기존 연구들에 의해 오염물질의 외부 유입에 대한 역궤적 분석이나 위성자료를 활용한 장거리 이동 연무의 수송 패턴 분석(Park et al., 2004; Kim et al., 2007; Hyeon et al., 2014), 그리고 연무와 연관된 다양한 중관 규모 기상변수 특성을 이용한 연무 발생지 구분법 등이 제시되었지만(Lee et al., 2006; Noh et al., 2009; Jung et al., 2010; Shi et al., 2016), 일반적으로 연무현상이 복합적인 요인으로 일어나기 때문에 연무발생기원을 파악하는 것은 어려운 실정이다. 특히 연무 이동과정이나 물리적인 특성(크기나 정량적인 농도 등)을 고려한 연무의 기원에 따른 분류 연구는 여전히 미흡하다. 최근 Lee et al. (2017)은 입자상 물질(Particle Matter: PM) 질량농도 수준, PM 질량 농도의 시간차, 역궤적 분석결과 그리고 PM_{2.5}/PM₁₀ 비 등을 고려하여 장거리 이동 연무(long-range transported haze; LH) 및 국내 오염원에 의한 도시연무(urban haze; UH) 그리고 황사(yellow sand; YS) 등의 구분 방법을 제시한 바 있다. 본 연구 목적을 달성하기 위해서 Lee et al. (2017)에서 개발된 방법을 기본적으로 적용하였다. 황사는 엄밀한 의미에서 연무와는 구분되지만 장거리 이동되는 에어로졸의 한 종류라는 측면에서 분석에 포함하였다.

2. 연구방법

Eun et al. (2016)은 2011~2013년 3년간 백령도 배경농도 측정소(Baengnyeongdo; BN)와 서울 도시집중

Table 1. Description of analysis variable, instrument, and its temporal resolution for this study along with station and period.

Variable	Instrument	Station	Period (year)	Temporal resolution
PM2.5 ($\mu\text{g m}^{-3}$) PM10 ($\mu\text{g m}^{-3}$)	TEOM	BN/SL	2011~2016	1 hr
σ_{sp} (Mm^{-1})	Nephelometer			
Precipitation (mm hr^{-1})	ASOS			1 hr
Cloud Amount	Eye-observed	SL		1 hr

BN and SL indicate Baengnyeongdo and Seoul, respectively.
TEOM: Tapered Element Oscillating Microbalance.
ASOS: Automatic Synoptic Observing Station.

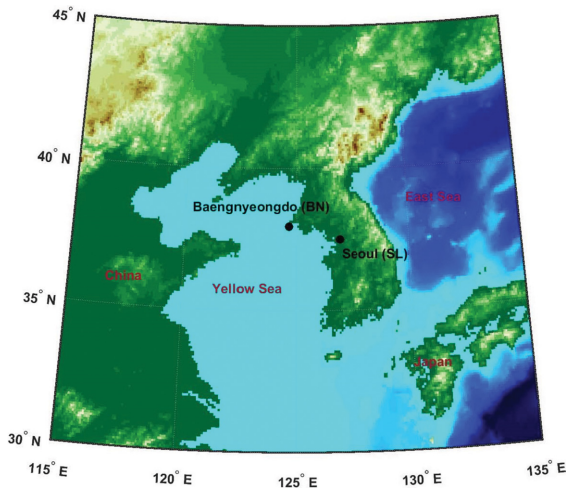


Fig. 1. Locations of Seoul (SL) and Baengnyeongdo (BN) stations mainly used for this study.

측정소(Seoul; SL) 관측자료를 활용하여 연무특성을 분석하였고, 2013년 1월 사례를 중심으로 장거리이동 연무시 의도하지 않은(inadvertent) 강수변화 가능성을 분석한 바 있다. Eun et al. (2016)에서 연무에 의한 강수변화 분석은 단일 사례에 국한되기 때문에 본 연구에서는 자료 기간을 6년(2011~2016년)으로 확장하고 PM2.5와 PM10 질량농도, 에어로졸 산란계수(aerosol scattering coefficient; σ_{sp}) 등을 활용하여 연무를 분류하고 해당 기간 동안 강수 변화를 분석하였다. 강수량은 백령도와 서울 기상관측소의 1시간 자료를 이용하였으며, 분석에 활용한 자료의 측정기기 및 간략한 설명을 Table 1에 제시하였다.

분석지점인 백령도와 서울 측정소는 동서 방향으로 약 200 km 가량 떨어져 있어(Fig. 1), 분석 영역이 편서풍 지대임을 고려할 때 백령도는 서울의 풍상측에 위치하고 있어 대기오염물질의 장거리 이동 여부를 분석하는데 용이하다. Lee et al. (2017)은 Jo and Kim

(2010)의 기상 관련 변수를 활용한 분석과는 달리 지상관측자료인 PM10, PM2.5 농도와 두 지점 PM 농도 최대치(peak)간의 시간차(time lag) 및 역계적 분석(backward trajectory analysis)을 통해 장거리이동 연무, 황사, 도시연무의 구분 방법을 제시하였다.

Lee et al. (2017)에서 제시된 연무 4가지 구분 방법을 간단히 정리하면 다음과 같다. 1) 2011~2016년도 평균 PM 농도의 $+1\sigma$ (표준편차) 이상인 기간을 선별한다. 본 연구에서는 서울지점의 경우 PM2.5와 PM10 농도가 각각 $48.3 \mu\text{g m}^{-3}$, $82.6 \mu\text{g m}^{-3}$ 와 백령도의 경우 PM2.5와 PM10 농도가 각각 $42.8 \mu\text{g m}^{-3}$, $63.0 \mu\text{g m}^{-3}$ 이상인 조건에 해당한다. 2) 백령도와 서울의 PM 농도 증가 패턴에 시간차(time lag)가 존재하는지 여부를 확인하였다. 본 연구에서는 백령도에서 서울 방향으로 이동하는 장거리이동 사례에 초점을 맞추었다. 3) 두 번째 단계에서 지연시간이 확인된 경우, 역계적 분석 결과를 토대로 공기덩이가 중국으로부터 유입되었는지를 확인하였다. 4) 연무는 미세입자가 지배적이고, 황사경우에는 조대입자가 대부분임을 고려하여 PM2.5/PM10의 비율이 0.7 이상인 경우를 연무로 분류하고, 0.3 이하의 값을 가지는 경우를 황사로 분류한다. 본 연구에서 경험적으로 정한 PM2.5/PM10 비 0.7과 0.3은 임의로 정해진 값으로써 >0.7 과 <0.3 은 미세입자가 전체 입자 중에서 70% 이상을 차지하는 경우, 30% 이하를 차지하는 경우(즉, 조대입자가 70% 이상)를 각각 의미한다. 한반도에서 관측되는 연무나 황사 사례가 순수하게 단일 사례로 관측되기 보다는 여러 발생원의 에어로졸이 혼합되어 나타나기 때문에 PM2.5/PM10 비를 정량화하기 어려운 측면이 있다. 이 밖의 상세한 연무분류법은 Lee et al. (2017)에 명시되어있다.

연무를 분류한 후에는 연무(황사)가 강수 진행 및 유지 시간과 어떻게 연관되어 있는지 이해하고자 하였다. 연무나 황사 발생시에 기간 중·전·후를 구분하여 강수 동반 여부를 파악하고, 각 연무(황사)별로 강수 지속 시간대가 연무(황사) 기간 중인지, 이전 혹은

이후 시간대인지를 분류하였다. 강수 시간대 구분 분석에서는 Lee et al. (2017)에서 제시한 방법을 이용하여 연무와 황사사례를 선별하고 선정된 사례 내에서 PM2.5 또는 PM10 최대치를 중심으로 24시간을 연무(황사)사례 기간으로 정의하였다. 또한 연무(황사) 사례 구간의 이전 24시간을 PRE, 24시간 이후를 POST로 정의하였다. Lee et al. (2017) 분석 결과에 의하면 대다수의 장거리이동 연무와 황사의 시간 규모가 24시간 이내로 나타난 바 있다. 마지막으로 에어로졸과 강수 연관성을 확인하기 위하여 연무발생시에 기상청 일기예보 통보문을 검토하여 강수 예보 정확도를 검토하였다. 현재 날씨 예보를 위해 운영중인 수치모델의 경우 에어로졸-구름-강수 상호작용을 상세하게 고려하지 않고 있기 때문에 장거리이동 연무나 황사와 같은 고농도의 에어로졸이 구름 시스템과 함께 유입될 경우 강수 예보 정확도를 감소시킬 수 있다. 본 연구에서는 에어로졸-강수 연관성 이해를 위해서 실제 일기예보 모델의 강수 예측 정확도를 시간 규모에서 비교·분석하였다.

3. 연구결과

3.1 연무(황사)시 강수 동반여부

먼저 장거리이동 연무(LH), 도시연무(UH), 황사(YS), 그리고 혼합 연무(MH)가 127개 전체 사례 중 차지하는 비율을 나타낸 원형(pie) 그래프를 Fig. 2에 제시하였다. 총 연무 중에서 LH는 40 (31%), MH는 35 (28%), UH는 29 (23%), 그리고 YS는 23 (18%) 사례를 차지하는 것으로 나타났다. 이와 더불어 대기 중에 에어로졸 농도가 높을 때 강수와의 연관성을 확인하기 위하여 2011~2016년 동안 연무 관측시의 강수 동반 여부를 조사하였다. 6년간 127개 연무(황사, 혼합형 연무 포함) 사례가 관측되었고, 이 중에서 PM 농도가 최대치인 시점을 중심으로 24시간과 전·후 포함하여 3일 이내 기간에서 강수를 동반한 사례는 75

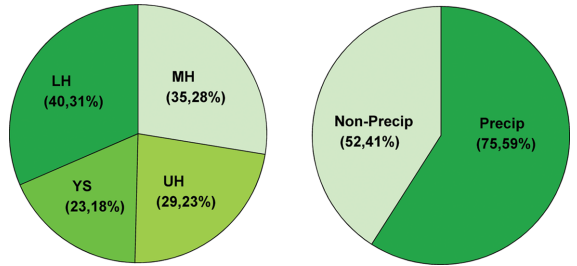


Fig. 2. (Left) Frequency distribution of long-range transported haze (LH), yellow sand (YS), urban haze (UH), and mixed haze (MH), and (Right) precipitation frequency in association with hazes and YS for 2011 to 2016. Numbers in the parenthesis indicates frequency number and percentage (%), respectively.

사례(59%)로 나타났다(Fig. 2). 흥미롭게도 고농도 에어로졸이 관측될 때 3일 이내 시간 규모에서 대략 60% 정도 강수를 동반하는 것을 알 수 있었다.

Figure 3은 선정된 고농도 연무 및 황사 사례 기간 중과 전·후 시간대의 강수 동반 여부를 나타낸 것이다. LH의 경우 총 40개 사례 중에서 27개(68%), YS는 총 23개 중에서 20개(87%), 그리고 UH는 총 29개 중에서 14개(48%) 사례가 강수를 동반하는 것으로 나타났다. 대부분의 황사사례는 강수와 동반하여 유입되었는데 주로 강수를 동반한 한랭전선이 한반도를 통과하면서 후면에서 강한 풍속과 함께 발생하는 경향이 있어 강수 이후 고농도 PM10이 관측되는 것을 자주 확인할 수 있었다. 더불어 장거리이동 연무 사례에서도 68%가 강수를 함께 동반하는 결과가 나온 것은 흥미롭다.

3.2 강수 시간 분포 특성

연무나 황사 사례에서 강수가 관측될 경우, 에어로졸 농도 변동에 따른 강수 발생 시간대를 살펴보기

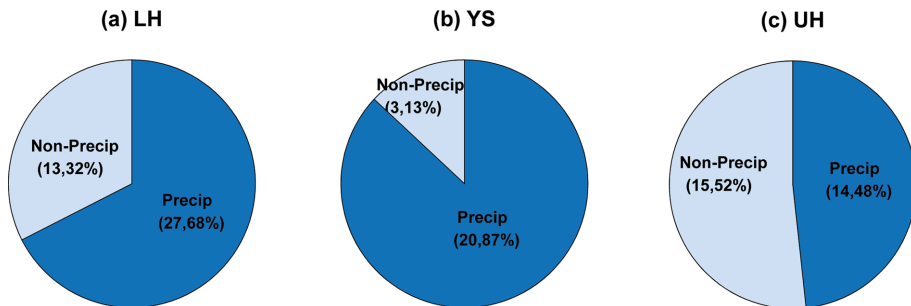


Fig. 3. Precipitation frequency for LH, YS, and UH for 2011 to 2016 at Seoul. Numbers in the parenthesis indicates frequency number and percentage (%), respectively.

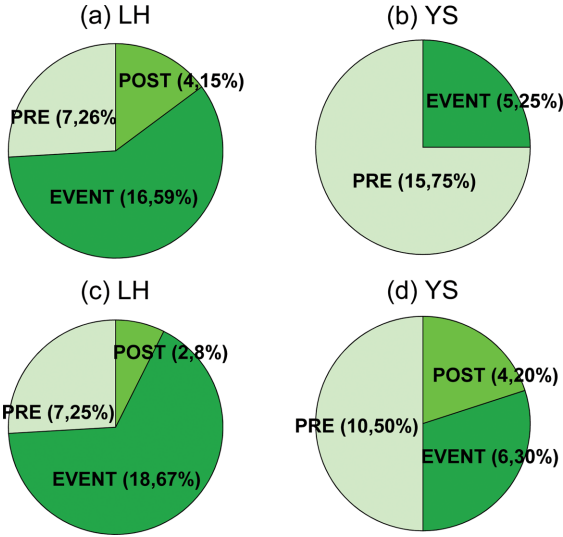


Fig. 4. Frequency distribution of precipitation timing in accordance with precipitation amount (upper) and precipitation time (bottom) for the period (PRE, EVENT and POST) of LH and YS. Numbers in the parenthesis indicates frequency number and percentage (%), respectively.

위하여 PM2.5 또는 PM10 최대값인 시점을 중심으로 24시간을 연무(황사)기간 중(EVENT)으로 정의하였고, 연무(황사) 기간 이전 24시간을 PRE 기간으로, 연무(황사) 이후 24시간을 POST 기간으로 각각 정의하였다. 이상의 조건을 기준으로 LH, YS 사례별 강수 시간대가 위치하는 시간 구간의 빈도분포를 강수량과 강수시간 기준으로 각각 나누어 Fig. 4와 같이 원형(Pie) 그래프로 제시하였다. 다만 본 연구에서는 도시 연무는 시간 규모가 대체로 1일 이상으로 상대적으로 길고 외부로부터 유입되는 강제력에 초점을 맞추기 위해서 LH와 YS만을 분석하였다. 만약 강수량 기준으로 분류할 때 연무 전부터 연무기간 중까지 강수가 계속 이어지게 된다면 두 구간 중 강수량이 가장 많은 구간으로 분류하였다. 마찬가지로 강수시간을 기준으로 분류할 때는 연무 전부터 연무기간 중까지 강수가 유지된다면 두 구간 중 강수 기간이 긴 구간으로 구분하여 나타냈다. 만약 연무 전(PRE)과 연무기간(EVENT)이 강수량(강수시간)이 동일하다면 강수기간(강수량)이 긴(큰) 쪽으로 분류하였다.

먼저 LH 사례의 경우, EVENT 기간(에어로졸 농도가 높은 기간)중 강수가 관측되는 빈도가 강수량을 고려하는 조건에서 59%, 강수시간을 고려하는 조건에서는 67%로 나타나 주로 EVENT 기간과 강수기간이 겹쳐지는 경향을 잘 보여주고 있다. 반면 YS 사례는 강수량과 강수기간으로 분류한 경우 YS 이전 시간

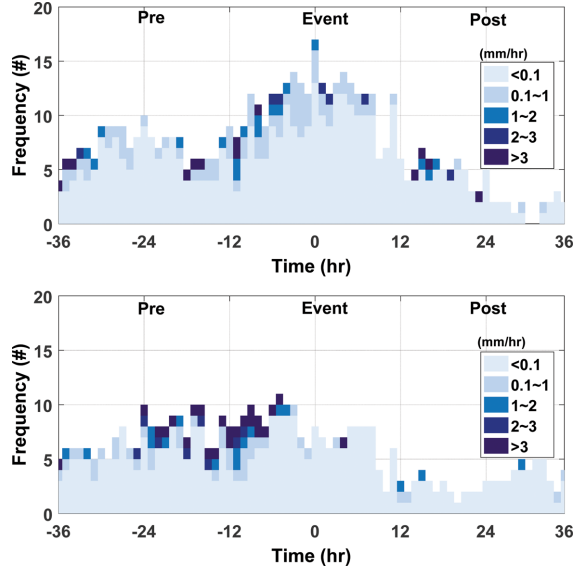


Fig. 5. Three-day variations of precipitation frequency along with precipitation intensity against aerosol variations for LH and YS.

(PRE)대에 강수 발생빈도가 각각 75%, 50%로 가장 높게 나타나, 황사 발생 전 강수가 선행하는 경향이 있음을 의미한다. 종관적 측면에서 볼 때 한랭전선 후면을 따라 이동해오는 황사의 특성상 강수대와 겹치거나 강수 이후 황사면지가 이동하는 특성을 보여준다. 그리고 LH 사례는 전체 27회 중에 겨울철에 15회, YS 사례는 전체 20회 중에 봄철이 13회로 대부분을 차지하고 있기 때문에 현재 연무와 황사 기간 중의 강수 시간 분석결과(Fig. 4)는 LH는 겨울철을, YS 사례는 봄철을 대변하는 결과라고 할 수 있다.

좀 더 구체적으로 각 사례 시간대별로 강수강도가 어떤 변화를 보이는지를 살펴보기 위하여 Fig. 5에 사례 기간 시간대별 강수강도 빈도 분포를 제시하였다. LH는 Fig. 4에서도 알 수 있듯이 연무 이전(PRE)이나 이후(POST)에 비해 연무가 진행중인 기간(EVENT)에 약한 강도의 강수가 지속되는 빈도가 높은 것을 알 수 있었는데, 특히 0.1 mm hr⁻¹ 이하의 아주 약한(trace-level) 강수가 대부분을 차지하고 있었다. 연무기간 중에 강수가 있을 때는 강수 입자에 의한 에어로졸의 세정(scavenging) 효과로 에어로졸 농도가 예측되지만 강수가 지속됨에도 불구하고 에어로졸 농도가 높은 상태를 유지하는 것은 주목할 만하다. 이는 고농도 에어로졸에 의해 구름방울크기 감소와 개수농도 증가로 강수효율 감소가 일어나고 이로 인해 강수강도가 약화되면서 강수시간이 길어지는 경향과 관련 있을 것으로 추정된다. 물론 Fig. 5에서 제시된

Table 2. Category of assessment between forecast and observational precipitation, specifically in terms of timing. Brackets indicate percentage during LH at Seoul.

Forecast		Observation	
		Yes	No
Yes	Hit (15%)		
	Hit but extended (35%)	Miss (10%)	
	Hit but delayed (2.5%)		
No	False alarm (2.5%)	Correct negative (35%)	

바와 같이 아주 약한 강수강도이기 때문에 세정효과가 약했을 가능성도 배제할 수는 없다. 한편 YS의 경우는 PRE 기간부터 EVENT 전반부까지 다른 시간대에 비해 강수 빈도분포가 높게 나타났고, 강수강도 역시 시간당 2~3 mm까지 증가한 강한 강수 빈도가 LH 사례에 비해 크게 나타났다. 이는 앞 절에서도 언급한 바와 같이 종관장에서 비롯된 강수 이후 따라오는 황사 현상임을 뒷받침하는 결과로 생각된다.

이상의 관측적 해석을 기반으로 에어로졸과 강수의

연관성을 이해하기 위해서 장거리이동 연무 사례시 강수 예보 정확도를 분석하였다. 예보문과 관측된 강수를 비교하여 강수 예보가 관측된 강수와 일치한다면 Hit로 명시하였으며, 강수는 존재하지만 예보에 비해 강수 시간에 차이가 있다면 Extended(예보에 비해 연장), Delayed(예보에 비해 지체)로 정의하여 분류하였다. 강수예보는 존재하나 무강수였을 경우 False Alarm (FA), 예보가 없으나 강수가 관측되었을 경우 Miss, 무강수였다면 Correct Negative (CN)로 분류하여 판별하였다(Table 2 참조).

Table 2에서 제시된 분류에 근거하여 LH 사례들에 대한 평가결과를 Table 3에 제시하였다. 에어로졸 농도가 높은 장거리이동연무임에도 불구하고 예보를 통한 강수 여부의 정확도는 상당히 높은 편이지만 강수의 지속시간에 대한 예보는 정확도가 떨어짐을 확인할 수 있다. 연무기간 중 실제 강수시간이 강수 예보 시간보다 연장(Extended)되는 사례가 40개의 LH 사례 중 14개(35%)로 확인되었다. 에어로졸의 장거리이동 사례인 LH에서 1/3 이상의 사례들이 실제 관측된 강수시간이 예보시간보다 연장되어 나타나는 결과는 Eun et al. (2016)에서 장거리이동 연무 관측과 간단한 모의 결과에서도 제시된 바와 같이 증가된 에어로졸 농도에 의해 구름입자 크기와 개수변화에 따른 강수효율 감소로 인하여 강수강도가 약화되면서 강수시간이 연장되었을 것으로 생각된다. 물론 수치모델 자체가

Table 3. The differences of timing between observational precipitation and forecasting precipitation when the weather forecast failed to catch the precipitation during hazes at Seoul.

Episode	Period	Cloud top height (km)	Precip. forecast	Remarks
LH (20)	2011/01/09 ±2	0.59	Miss	-
	2012/01/09 ±2	0.98	Miss	-
	2012/01/21-22 ±2	3.96	Hit	Extended
	2012/01/27 ±2	4.20	Hit	Extended
	2012/04/10 ±2	1.16	Hit	Extended
	2012/05/25-26 ±2	2.68	FA	-
	2013/01/12-13 ±2	3.19	Hit	Extended
	2013/01/24 ±2	1.74	Hit	Extended
	2013/02/10 ±2	0.94	Hit	Extended
	2013/2/22 ±2	0.65	Hit	Extended
	2013/03/01 ±2	0.62	Miss	-
	2013/04/29 ±2	0.95	Hit	Extended
	2013/10/11 ±2	1.16	Miss	-
	2013/11/07 ±2	0.67	Hit	Extended
	2013/11/15 ±2	0.62	Hit	Extended
	2013/12/26 ±2	1.32	Hit	Delayed
	2014/11/1-2 ±2	0.72	Hit	Extended
	2015/01/15-16 ±2	1.59	Hit	Extended
	2015/01/18-19 ±2	2.07	Hit	Extended
	2015/02/17 ±2	1.89	Hit	Extended

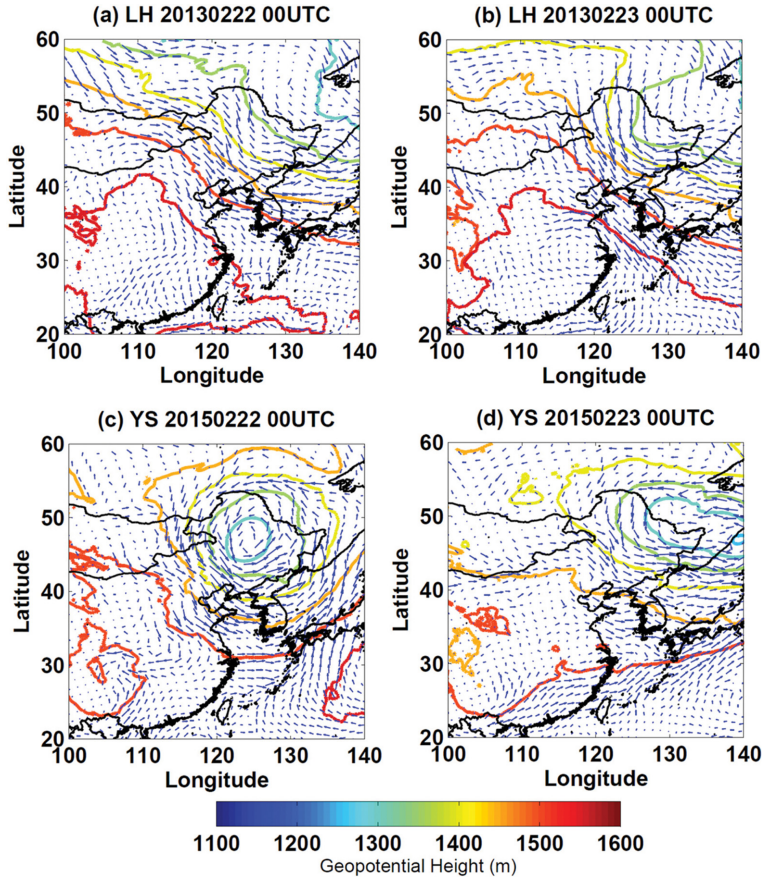


Fig. 6. Horizontal distributions of geopotential height and wind vector at 850 hPa pressure level. (a) 22 Feb and (b) 23 Feb 2013 for a LH event, and (c) 22 Feb and (d) 23 Feb 2015 for a YS event.

갖고 있는 약한 강수 모의 정확도의 한계와 종관시스템의 이동속도, 구름시스템의 복잡성 등의 에어로졸 효과 이외 다른 요인들로 인한 강수 예보 한계를 완전히 배제할 수는 없다. 이에 대한 향후 추가 분석이 필요할 것으로 생각된다.

3.3 장거리이동 사례 분석

에어로졸과 강수와의 상호작용을 시간별로 구체적으로 살펴보기 위하여 LH와 YS 대표 사례를 각각 선정하여 종관장 특징, 에어로졸 및 강수의 시간 변화 그리고 에어로졸과 구름의 수평적인 분포를 분석하였다. LH 사례로는 2013년 2월 22일, YS 사례로는 2015년 2월 22~23일을 각각 선정하였다. 우선 LH와 YS 사례의 종관장 특징을 Fig. 6에 제시하였다. LH 사례(2013년 2월 22일)의 경우, 기압골이 한반도에 접근하여 서서히 통과하는 과정에서 기압골 후면에서 뒤따라오는 기압능의 접근으로 기압골과 기압능 사이에서 기압경도력이 증가하면서 북서풍 계열의 풍속이 강화

되는 것을 알 수 있다. 강한 북서풍의 발달은 중국 북동쪽으로부터 한반도로의 활발한 에어로졸 수송을 가능하게 하였다. 이 때 선행하는 기압골의 영향으로 층운형 구름과 약한 강수가 발생하였고, 기압골을 뒤따르는 기압능과 이후 이동성 고기압의 영향으로 에어로졸(혹은 대기오염)이 축적되는 경향이 있었다. 이에 반해 YS(2015년 2월 22~23일) 사례는 한랭전선을 동반한 이동성 저기압이 동진하면서 중국 만주를 통과하는 과정에서 한반도 중부지방에 강수가 발생하였고 전선 후면에서 뒤따라오는 황사면지의 영향으로 PM10 농도가 900~1,200 $\mu\text{g m}^{-3}$ 까지 증가하였다(Fig. 7).

LH(2013년 2월 22일)와 YS(2015년 2월 22~23일)기간 중 백령도와 서울지역의 강수 지연 가능성을 보여주는 에어로졸 농도, 목측 운량과 강수 시간 변화를 Fig. 7에 제시하였다. LH 사례는 백령도(BN)의 PM2.5와 PM10 질량농도가 증가한 후 서울지역의 PM2.5와 PM10이 증가하는 시간차가 잘 나타났고, PM10의 대부분이 PM2.5로 나타나 에어로졸 크기가 2.5 μm 이

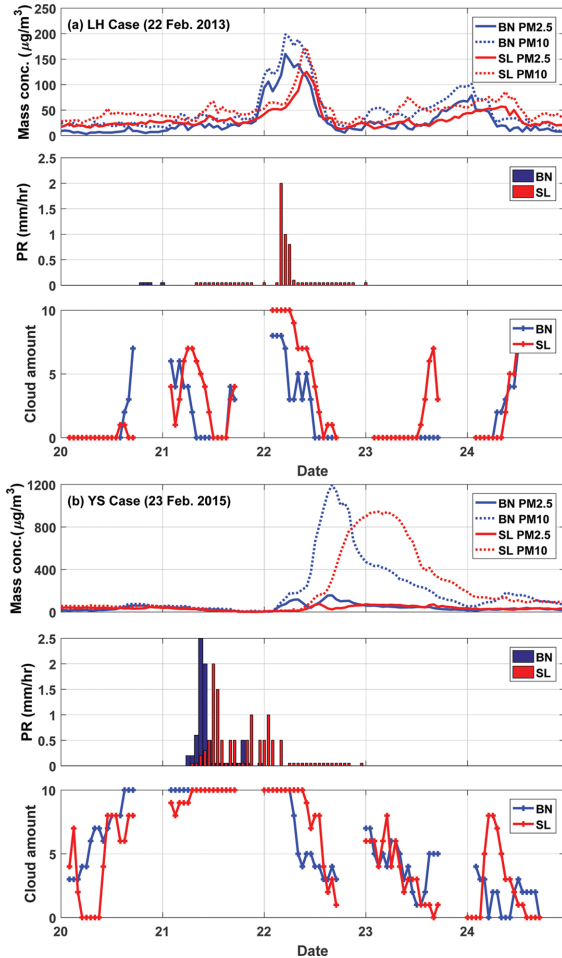


Fig. 7. Time series of PM_{2.5} and PM₁₀ mass concentrations, precipitation rate (PR), and cloud amount at Baengnyeongdo (BN) and Seoul (SL) about LH (upper) and YS (bottom) episodes.

하의 미세입자임을 알 수 있었다. PM_{2.5} 농도의 뚜렷한 시간차와 입자 크기 등을 고려할 때 본 사례는 외부로부터 미세한 입자 크기의 인위적인 에어로졸이 유입되었음을 알 수 있다. 반면 YS 사례의 경우 백령도 (BN)와 서울(SL)간의 PM_{2.5}와 PM₁₀ 농도의 시간차는 나타났지만, PM_{2.5} 농도는 거의 증가하지 않아 황사 먼지의 대부분이 조대입자가 차지하고 있음을 확인할 수 있다.

2013년 2월 22일 LH 사례는 3.2절에서 제시된 바와 같이 강수 예보시 강수 유무 예보는 정확했지만 강수예보시간보다 관측된 강수가 지연된 사례로써 실제 강수 종료시간이 예보시간보다 약 12시간 정도 늦어졌다. 2월 21일 23시 예보문에 의하면 2월 22일 낮

12시경에 강수종료를 예보하였지만 자정까지 강수가 지속되었다. 이상의 강수 지체현상은 Eun et al. (2016)에서도 유사하게 제시된 바 있다. 반면 2015년 2월 22~23일 YS 사례는 황사기간 이전 2월 21~22일 기간중에 강수가 관측되었고, 이후 강수는 점차 종료되면서 PM₁₀ 농도가 뚜렷하게 증가하였다.

LH와 YS 사례의 에어로졸과 구름의 수평분포를 살펴보기 위하여 Aqua 위성의 MODIS 자료를 이용하여 에어로졸 광학두께(AOD)와 운량을 Fig. 8에 제시하였다. 대체로 한반도 주변으로 구름이 넓게 분포하고 있고 운량에 의해 에어로졸 광학두께의 불연속성이 존재하지만 LH 사례의 경우 중국지역과 황해 및 동해상 지역이 주변지역에 비해 높은 AOD(약 1~2) 수준이 분포하였으며, YS 사례의 경우 높은 AOD 구역이 한반도 중북부로 유입되고 있다. 또한 MODIS 에어로졸과 구름의 수평적인 분포가 중첩된(overlapped) 것으로 나타나 증가된 에어로졸에 의해 구름 및 강수 변화 가능성을 분석할 수 있는 좋은 사례로 판단된다. 다만 본 사례는 MODIS의 시간적인 해상도가 지상관측에 비해 현저하게 낮고, 에어로졸과 구름의 연직 위치에 대한 관측정보가 부족하여 상세한 해석은 어려운 측면이 있다. 향후 이를 보완하기 위하여 CALIPSO나 CloudSat 등의 에어로졸과 구름의 시공간적인 고해상도 관측결과 활용이 필요하다.

4. 토의 및 결론

한반도에 발생하는 다양한 연무를 발생 기원에 따라 구분하고 연무 종류에 따른 에어로졸-강수 연관성을 분석하였다. 전체 연무를 분류 구분한 결과 LH가 약 31%로 가장 빈도가 많았고, 그 다음이 도시연무(23%) 그리고 황사(18%) 순이었다. 특이한 점은 LH나 YS의 경우에는 에어로졸 농도가 높은 기간이나 이전 시간대에 주로 강수를 동반하는 경향이 있었고, YS는 강수가 에어로졸 증가를 선행하는 반면에 LH 사례는 에어로졸 증가와 강수가 상당수가 겹쳐져서 나타나는 경향이 있었다. 이는 YS 사례의 에어로졸 농도변화는 주로 종관장에 의해 지배받는 것을 보여주고, LH 사례의 경우에는 에어로졸 농도 증가가 강수에 영향을 주었을 가능성을 보여준다. LH 개별 에피소드에 대한 자세한 분석에서도 에어로졸 증가에 따른 약한 강수의 연장 및 지연 가능성을 잘 보여주고 있고, 강수 시간에 대한 일기예보보다 실제 강수는 오래 지속되는 경향이 있었다. 하지만 LH 시간 규모가 1일 이내로 짧기 때문에 에어로졸에 의한 강수의 변화 시간 규모 역시 1일 이내로 짧게 나타났다. 물론 현재 관측 결과만으로도 에어로졸 효과를 단정지을 수는 없지만 6년간의 연무 분석결과 에어로졸 농

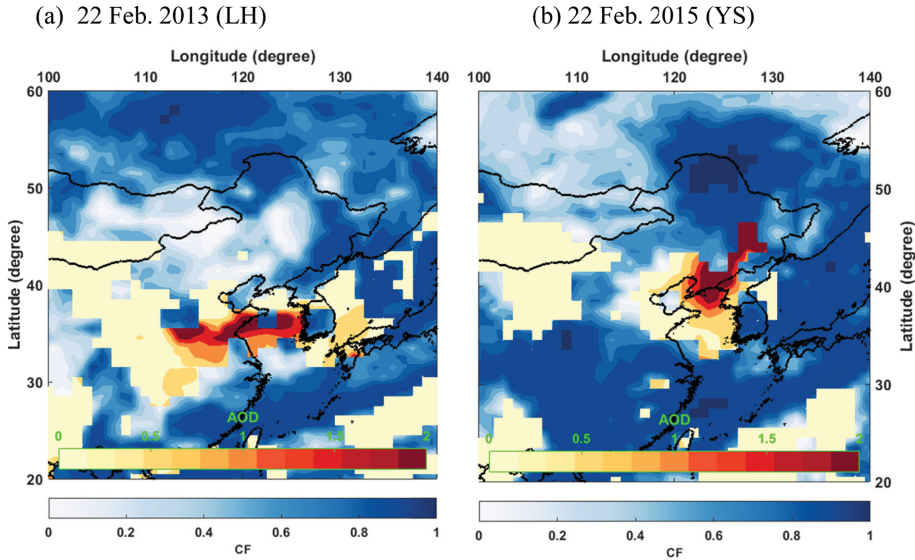


Fig. 8. Horizontal distributions of AOD (aerosol optical depth; yellow to red) and CF (cloud fraction; white to blue) derived from MODIS (aqua) for 22 Feb. 2013 (LH) and 22 Feb. 2015 (YS).

도가 높은 시간대에 약한 강수가 지속되는 빈도가 강수량 기준 59%, 강수시간 기준 67%로 나타났기 때문에 장거리이동 연무 사례에서 강수빈도가 높았음을 의미한다. 다년간의 관측결과에서 고농도 에어로졸이 관측되는 기간에 강수 동반 빈도가 높고, 강수 세정 효과로 인한 에어로졸 감소보다는 외부에서 강하게 유입되는 고농도 에어로졸과 강수의 시간대가 겹치는 경향을 보이는 점은 에어로졸-강수 상호작용을 암시하는 관측결과라고 생각된다. 외부로부터 청정한 상태의 수습배를 초과하는 에어로졸 강제력이 한반도 영역(반응 영역)으로 유입되기 때문에 강수에 의한 세정효과로 인한 에어로졸 감소를 최소화한 조건에서 구름과 강수에 미치는 에어로졸 효과가 나타났을 것으로 생각된다. 즉, 연무시의 증가된 에어로졸 수농도는 구름방울크기는 감소시키면서 개수농도 증가를 초래하여 약화된 강수가 오래 지속되었을 것으로 판단된다. 최근 심각한 중국 연무가 한반도로 이동해오면서 관측된 에어로졸-강수 관측결과와 모델 모의 연구(Eun et al., 2016)에서도 유사한 연구 결과가 제시된 바 있다. 향후 수치모의를 통한 정량적인 분석과 추가 관측결과를 확보하여 통계적 유의성 분석 등의 보완이 필요하다.

한편 최근 Jiang et al. (2017)도 에어로졸-구름-강수 상호작용을 고려하지 않은 National Centers for Environmental Prediction (NCEP) Global Forecast System (GFS) 모델의 강수 예보가 강수강도에 따라 과대 혹은 과소 모의하는 것을 제시한 바 있다. 이런

측면에서 볼 때 국내에서 사용되고 있는 수치예보 현업모델도 에어로졸-구름-강수 상호작용에 대하여 상세한 모수화가 이루어지지 않고 있기 때문에 본 연구 결과는 향후 에어로졸 효과를 고려한 강수예보의 시공간적인 정확도 향상에 기여할 수 있을 것으로 생각된다.

감사의 글

본 연구는 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구입니다(NRF-2012S1A5B8A03045253). 그리고 환경기술개발사업의 ‘동아시아지역 단기체류기후 변화 물질과 기후변화 상호 연관성 분석’ 사업과 국립기상과학원 응용기상연구과의 ‘인공증설 실험 수치모델링기술 개발연구’의 일부 지원으로 수행되었습니다.

REFERENCES

Albrecht, B. A., 1989: Aerosols, cloud microphysics, and fractional cloudiness. *Science*, **245**, 1227-1230.
 Bell, T. L., D. Rosenfeld, K. M. Kim, J. M. Yoo, M. I. Lee, and M. Hahnenberger, 2008: Midweek increase in U.S. summer rain and storm heights suggests air pollution invigorates rainstorms. *J. Geophys. Res.*, **113**, D02209, doi:10.1029/2007JD008623.
 Ding, A. J., and Coauthors, 2013: Intense atmospheric pollution modifies weather: A case of mixed biomass

- burning with fossil fuel combustion pollution in eastern China. *Atmos. Chem. Phys.*, **13**, 10545-10554, doi:10.5194/acp-13-10545-2013.
- Eun, S.-H., B.-G. Kim, K.-M. Lee, and J.-S. Park, 2016: Characteristics of recent severe haze events in Korea and possible inadvertent weather modification. *Sci. Online Lett. Atmos.*, **12**, 32-36, doi:10.2151/sola.2016-007.
- Hyeon, D.-R., J.-M. Song, K.-J. Kim, W.-H. Kim, C.-H. Kang, and H.-J. Ko, 2014: Compositions of haze aerosol and their variation by inflow pathway of air mass at Gosan site in Jeju Island during 2012~2013. *Anal. Sci. Technol.*, **27**, 213-222 (in Korean with English abstract).
- Jiang, M., J. Feng, Z. Li, R. Sun, Y.-T. Hou, Y. Zhu, B. Wan, J. Guo, and M. Cribb, 2017: Potential influences of neglecting aerosol effects on the NCEP GFS precipitation forecast. *Atmos. Chem. Phys.*, **17**, 13967-13982, doi:10.5194/acp-17-13967-2017.
- Jo, H.-Y., and C.-H. Kim, 2010: Characteristics of East Asia synoptic meteorological conditions in association with haze phenomena. *Atmosphere*, **20**, 161-172 (in Korean with English abstract).
- Jung, J., Y. J. Kim, K. Y. Lee, M. G. Cayetano, T. Batmunkh, J.-H. Koo, and J. Kim, 2010: Spectral optical properties of long-range transport Asian dust and pollution aerosols over Northeast Asia in 2007 and 2008. *Atmos. Chem. Phys.*, **10**, 5391-5408, doi:10.5194/acp-10-5391-2010.
- Khain, A., N. Cohen, B. Lynn, and A. Pokrovsky, 2008: Possible aerosol effects on lightning activity and structure of hurricanes. *J. Atmos. Sci.*, **65**, 3652-3677.
- Kim, B.-G., and S.-U. Park, 2001: Transport and evolution of a winter-time Yellow Sand observed in Korea. *Atmos. Environ.*, **35**, 3191-3201.
- _____, and T.-Y. Kwon, 2006: Aerosol indirect studies derived from the ground-based remote sensings. *J. Korean Soc. Atmos. Environ.*, **22**, 235-247 (in Korean with English abstract).
- _____, J. S. Han, and S. U. Park, 2001: Transport of SO₂ and aerosol over the Yellow sea. *Atmos. Environ.*, **35**, 727-737.
- Kim, H.-S., J.-B. Huh, P. K. Hopke, T. M. Holsen, and S.-M. Yi, 2007: Characteristics of the major chemical constituents of PM_{2.5} and smog events in Seoul, Korea in 2003 and 2004. *Atmos. Environ.*, **41**, 6762-6770.
- Kim, Y. P., 2017: Research and Policy Directions against Ambient Fine Particles. *J. Korean Soc. Atmos. Environ.*, **33**, 191-204, doi:10.5572/KOSAE.2017.33.3.191.
- Korean Meteorological Society, and Korea Meteorological Administration, 2015: *Atmospheric Sciences Terminology*. Sigma Press, 1056 pp.
- Lee, K. H., Y. J. Kim, and M. J. Kim, 2006: Characteristics of aerosol observed during two severe haze events over Korea in June and October 2004. *Atmos. Environ.*, **40**, 5146-5155.
- Lee, K.-M., S.-H. Eun, B.-G. Kim, W. Zhang, J.-S. Park, J.-Y. Ahn, K.-W. Chung, and I.-S. Park, 2017: Classification of various severe hazes and its optical properties in Korea for 2011~2013. *Atmosphere*, **27**, 225-223, doi:10.14191/Atmos.2017.27.2.225 (in Korean with English abstract).
- Lee, S., C.-H. Ho, Y. G. Lee, H.-J. Choi, and C.-K. Song, 2013: Influence of transboundary air pollutants from China on the high-PM₁₀ episode in Seoul, Korea for the period October 16-20, 2008. *Atmos. Environ.*, **77**, 430-439, doi:10.1016/j.atmosenv.2013.05.006.
- Noh, Y. M., D. Muller, D. H. Shin, H. Lee, J. S. Jung, K. H. Lee, M. Cribb, Z. Li, and Y. J. Kim, 2009: Optical and microphysical properties of severe haze and smoke aerosol measured by integrated remote sensing techniques in Gwangju, Korea. *Atmos. Environ.*, **43**, 879-888, doi:10.1016/j.atmosenv.2008.10.058.
- Oh, H.-R., C.-H. Ho, J. Kim, D. Chen, S. Lee, Y.-S. Choi, L.-S. Chang, and C.-K. Song, 2015: Long-range transport of air pollutants originating in China: A possible major cause of multi-day high-PM₁₀ episodes during cold season in Seoul, Korea. *Atmos. Environ.*, **109**, 23-30, doi:10.1016/j.atmosenv.2015.03.005.
- Park, M. H., Y. P. Kim, C.-H. Kang, and S.-G. Shim, 2004: Aerosol composition change between 1992 and 2002 at Gosan, Korea. *J. Geophys. Res.*, **109**, D19S13, doi:10.1029/2003JD004110.
- Rosenfeld, D., U. Lohmann, G. B. Raga, C. D. O'Dowd, M. Kulmala, S. Fuzzi, A. Reissell, and M. O. Andreae, 2008: Flood or drought: how do aerosol affect precipitation? *Science*, **321**, 1309-1313.
- Shi, H., S.-S. Lee, H.-W. Chun, H.-J. Song, Y.-C. Noh, and B.-J. Sohn, 2016: Optical properties of aerosols related to haze events over Seoul inferred from skyradiometer and satellite-borne measurements. *Atmosphere*, **26**, 289-299, doi:10.14191/Atmos.2016.26.2.289. (in Korean with English abstract).
- Tao, W.-K., J.-P. Chen, Z. Li, C. Wang, and C. Zhang, 2012: Impact of aerosols on convective clouds and precipitation. *Rev. Geophys.*, **50**, RG2001, doi:10.1029/2011RG000369.

Uno, I., N. Sugimoto, A. Shimizu, K. Yumimoto, Y. Hara, and Z. Wang, 2014: Record heavy PM2.5 air pollution over China in January 2013: Vertical and horizontal dimensions. *Sci. Online Lett. Atmos.*, **10**, 136-140, doi:10.2151/sola.2014-028.

Van den Heever, S. C., G. L. Stephens, and N. B. Wood, 2011: Aerosol indirect effects on tropical convection characteristics under conditions of radiative-convective equilibrium. *J. Atmos. Sci.*, **68**, 699-718, doi: 10.1175/2010JAS3603.1.