

2011~2013년 한반도에서 관측된 다양한 연무의 분류 및 광학특성

이규민¹⁾ · 은승희¹⁾ · 김병곤^{1)*} · 장문정¹⁾ · 박진수²⁾ · 안준영²⁾ · 정경원³⁾ · 박일수³⁾

¹⁾강릉원주대학교 대기환경과학과, ²⁾국립환경과학원 기후대기연구부,

³⁾한국외국어대학교 한·중남미 녹색융합센터

(접수일: 2017년 4월 10일, 수정일: 2017년 5월 21일, 게재확정일: 2017년 6월 9일)

Classification of Various Severe Hazes and Its Optical Properties in Korea for 2011~2013

Kyu-Min Lee¹⁾, Seung-Hee Eun¹⁾, Byung-Gon Kim^{1)*}, Wenting Zhang¹⁾,
Jin-Soo Park²⁾, Jun-Young Ahn²⁾, Kyung-Won Chung³⁾, 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 10 April 2017; revised 21 May 2017; accepted 9 June 2017)

Abstract Korea has recently suffered from severe hazes, largely being long-range transported from China but frequently mixed with domestic pollution. It is important to identify the origin of the frequently-occurring hazes, which is however hard to clearly determine in a quantitative term. In this regard, we suggest a possible classification procedure of various hazes into long-range transported haze (LH), Yellow Sand (YS), and urban haze (UH), based on mass loading of fine particles, time lag of PM mass concentrations between two sites aligned with dominant wind direction, backward trajectory of air mass, and the mass ratio of PM_{2.5} to PM₁₀. The analysis sites are Seoul (SL) and Baengnyeongdo (BN), which are distant about 200 km from each other in the west to east direction. Aerosol concentrations at BN are overall lower than those of SL, indicative of BN being a background site for SL. We found distinct time lag of PM_{2.5} and PM₁₀ concentrations between BN and SL in case of both LH and YS, but the intensity of YS being stronger than LH. Time scale (e-folding time scale) of LH appears to be longer and more variable than YS, which implies that LH covers much larger spatial scale. In addition, we found linear and significant correlations between τ_a obtained from sunphotometer and τ_{cal} calculated from surface aerosol scattering coefficient for LH episodes, relative to few correlation between those for YS, which might be associated with transported height of YS being much higher than LH. Therefore surface PM concentrations for the YS period are thought to be not representative for vertical integrated amount of aerosol loadings, probably by virtue of decoupled structure of aerosol vertical distribution. Improvement of various hazes classification based on the current result would provide the public as well as researchers with more accurate information of LH, UH, and YS, in terms of temporal scale, size, vertical distribution of aerosols, etc.

Key words: Haze, aerosol, PM_{2.5}, PM₁₀, scale

*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. 서론

동북아시아 지역은 다량의 에어로졸이 배출되는 핫스팟(hot spot)으로서 최근 빈번히 발생하는 에어로졸로 인한 시정장애, 건강피해, 지역적인 기후변화, 더 나아가 전지구적 기후변화에 영향을 주는 것으로 알려져 있다(IPCC, 2014). 이 중 에어로졸에 의한 시정장애 현상을 연무(haze)라고 일컫는데, 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). 최근 중국의 급속한 산업화와 경제 발전으로 유발된 극심한 연무현상은 건강에 악영향을 미치고 중요한 사회적인 문제로 거론되고 있다(He et al., 2002; Tie et al., 2009; Liu et al., 2013; Huang et al., 2014; Ji et al., 2014; Quan et al., 2014; Zhang et al., 2014; Yang et al., 2015).

중국의 풍하측에 위치하는 한반도는 최근 연무 발생일수가 꾸준히 증가하고 있고(Shi et al., 2016), Eun et al. (2016)의 연구결과에 의하며 중국으로부터 유입되는 장거리이동 연무에 의한 구름 및 강수변화 가능성까지 제시되고 있다. 한반도에서 관측된 연무는 2차 오염물질인 암모늄, 질산염, 황산염이 6배이상 증가하고(Kang et al., 2004) 미세입자의 수밀도가 증가하는 특징을 보인다(Chun et al., 2003). Song et al. (2015)은 정체성 연무와 장거리 수송 연무 사례들의 에어로졸 광학두께와 옹스트롬 지수 확인을 통해 서울의 정체성 연무는 미세입자가 더욱 우세하고 장거리 이동 연무는 광학두께가 크게 나타나는 결과를 보여주었다.

우리나라는 장거리 이동되는 에어로졸뿐만 아니라 국내에서 배출되는 에어로졸의 영향을 함께 받고 있으나, 오로지 지상에서 관측한 질량농도만을 이용한 모니터링 때문에 국내 오염원과 외부에서 유입된 오염원에 대한 구분과 이해가 어렵다. 이를 해결하기 위하여 역궤적 분석을 통해 에어로졸 발원지를 분류하거나(Park et al., 2004; Kim et al., 2007; Hyeon et al., 2014), 궤적 분석과 함께 위성자료를 활용한 장거리 이동 연무의 수송패턴에 대한 연구들도 다수 진행되었다(Lee et al., 2006; Noh et al., 2009; Jung et al., 2010; Shi et al., 2016). 또한 Jo and Kim (2010)은 연무의 발생지를 구분하기 위하여 연무와 연관된 다양한 종관규모 기상변수 특성을 이용한 연무 발생지 구분법을 제시하였다. 하지만 발생 근원지에 대한 다양한 분석이 증가추세에 있지만 일반적으로 연무현상이 복합적인 요인으로 일어나기 때문에 연무발생기원을 파악하는데 어려움을 겪고 있는 실정이다. 특히 연무 이동과정이나 물리적인 특성(크기나 정량적인 농도 등)을 고려한 연무의 기원에 따른 분류에 관한 연구는

여전히 미흡하다.

본 연구에서는 발생기원에 따라 중국으로부터 유입되는 장거리 이동 연무(long-range transported haze; LH) 및 국내 오염원에 의한 도시연무(urban haze; UH)와 장거리 이동되는 황사(yellow sand; YS)도 함께 고려한 분류 및 구분법을 제시한 후, 3가지 분류에 대한 광학특성을 분석하였다. 엄밀한 의미에서 황사는 연무와는 구분되지만 자연적인 요인으로 발생하여 장거리 이동되는 에어로졸의 한 종류라는 측면에서 분석에 포함하였다.

2. 연구방법

Eun et al. (2013)은 2011년 1년간 백령도 배경농도 측정소(Baengnyeongdo; BN)와 서울 도시집중 측정소(Seoul; SL)에서 네펠로미터(nephelometer) 관측자료를 활용하여 에어로졸의 광학특성을 분석한 바 있다. 본 연구에서는 자료기간을 확장(2011~2013년)하고 PM2.5와 PM10 질량농도, 에어로졸 광학두께(aerosol optical depth; τ_a) 등을 함께 분석하여 연무 구분방법과 연무의 광학적 특성을 이해하고자 하였다.

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. 또한 두 측정소는 장기간 연속 관측을 통해 이온, 중금속, 탄소, 에어로졸 질량농도 등 다양한 항목들을 모니터링하고 있어 자료의 신뢰성이 높은 장점이 있다.

연무구분방법은 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 역궤적 분석(backward trajectory analysis)을 통해 장거리이동 연무, 황사, 도시연무를 구분하였다. PM10과 PM2.5 농도는 서울과 백령도 측정소에서 2011년부터 2013년간 β -ray 흡수법과 TEOM(Tapered Element Oscillating Microbalance)으로 측정된 에어로졸 질량농도를 이용하였다. 더불어 사례 분류를 위한 기류의 방향을 확인하기 위하여 NOAA에서 제공하는 HYSPLIT (Hybrid Single Particle Lagrangian Integrated Trajectory) 모델 기반 역궤적 분석(backward trajectory analysis)을 수행하였다. 분류된 장거리이동 연무, 황사, 도시 연무의 에어로졸 시간규모를 살펴보기 위하여 Anderson et al. (2003)에서 활용한 식 (1)의 자기상관(autocorrelation; r)분석을 수행하였다.

$$r(k) = \frac{\sum_i^k [(x_i - m_1)(x_{i+k} - m_2)]}{s_1 s_2} \quad (1)$$

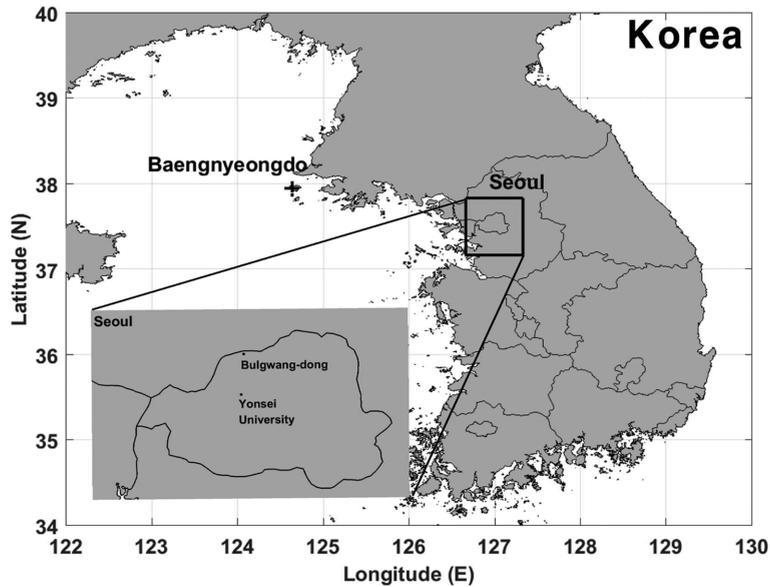


Fig. 1. The analysis of domain and air quality monitoring stations of Baengnyeongdo (BN) and Seoul (SL).

여기서 x 는 분석에 사용하는 변수, m_1 과 m_2 그리고 s_1 과 s_2 는 각각 i 와 $i+k$ 시간의 x 평균과 표준편차이다. 본 연구에서 자기상관은 시간자료와 같이 연속된 관측자료를 활용하여 상관성이 지수함수적으로 감소하는 구간을 찾아 관측자료의 본래 특성이 급격히 감소하는 구간(e-folding time)을 추론하는 중요한 함수이다.

연무구분법을 활용하여 분류된 연무의 광학특성을 살펴보기 위하여 연세대학교 AERONET (Aerosol RObotic NETwork) 지점의 sunphotometer로 관측된 τ_a 와 불광동 대기오염 집중측정소의 σ_{sp} 와 σ_{ap} 자료를 이용하여 소산계수(extinction coefficient; σ_{ext})를 계산한 후 산출한 에어로졸 광학두께(τ_{cal})와 비교 분석하였는데, 여기서 σ_{ext} 는 입자상 물질의 산란과 흡수, 가스분자의 산란과 흡수의 합으로써 식(2)와 같이 표현할 수 있다(Eun et al., 2013).

$$\sigma_{ext} = \sigma_{sp} + \sigma_{ap} + \sigma_{sg} + \sigma_{ag} \quad (2)$$

여기서 σ_{sp} 와 σ_{ap} 는 입자에 의한 산란과 흡수를 의미하며, σ_{sg} 와 σ_{ag} 는 가스에 의한 산란과 흡수를 나타낸다. σ_{sp} 와 σ_{ap} 는 서울 은평구 불광동 측정소에서 네펠로미터로 관측된 550 nm의 산란계수와 아셀로미터로(aethalometer) 관측된 520 nm의 흡수계수 값이다. σ_{sg} 는 주로 대기 중 가스분자에 의한 빛의 산란을 의미하며 12.3 Mm^{-1} 값을 사용하였다. 대기 중 가스분자는 주로 태양빛을 산란시키지만 NO_2 농도에 의한 빛의 흡수는 $\sigma_{ag} [\text{km}^{-1}] = 0.33[\text{NO}_2]_{\text{ppm}}$ 을 이용하여 계산하였다(Hodkinson, 1966). 이렇게 계산된 σ_{ext} 는 식

(3)과 같이 경계층 고도까지 적분하여 τ_{cal} 을 산출하였다.

$$\tau_{cal} = \int_0^H \sigma_{ext} dz \quad (3)$$

여기서 H 는 경계층 고도 (Effective Height)를 의미하나 분석 사례 모두의 정확한 H 높이를 구하기 어렵기 때문에 1.5 km로 가정하였다. 하지만 향후 에어로졸 광학두께의 정확한 추정을 위해서는 H 에 대한 실제 관측값을 적용한 분석 연구가 필요할 것이다. 또한 지상자료를 이용하여 계산된 τ_{cal} 과 컬럼(column) 측정자료인 AERONET자료의 τ_a 에 e-folding scale을 고려하여 두 변수를 비교하였다. 연직 총 에어로졸 농도의 e-folding scale은 전체 고도의 63%까지를 의미한다. 본 연구에서는 AERONET 자료가 구름 및 강수가 존재할 시 자료의 이용이 불가능하기 때문에 추가 분석에서 제외하였다.

3. 연구결과

3.1 연무의 구분 방법

백령도와 서울의 전반적인 에어로졸 농도 수준을 확인하기 위하여 2011~2013년까지 네펠로미터를 이용하여 관측한 σ_{sp} 의 히스토그램을 Fig. 2에 제시하였다. 에어로졸 부하농도 분포를 고려하여 로그 스케일(log scale)로 표시한 결과 두 지점 모두 단일 봉우리형(uni-modal) 정규분포가 잘 나타나고 있다. 또한 서울이 백령도에 비해 우측으로 치우쳐 있는 형태가 잘

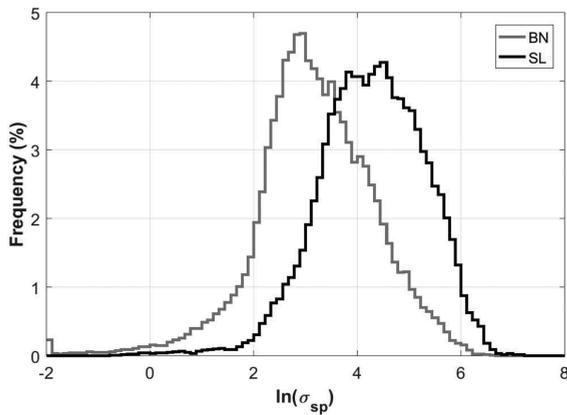


Fig. 2. Histograms of 5-minute average σ_{sp} at Baengnyeongdo (BN) and Seoul (SL) from 2011 to 2013. The sample numbers of BN and SL are 250165 and 223233, respectively.

나타나고 있어 평상시에는 백령도가 서울의 배경농도 역할을 하고 있다. 또한 백령도나 서울 두 지점 모두 σ_{sp} 의 고농도 현상이 빈번히 발생하고 있음을 알 수 있다. 두 지점에서 발생하는 다양한 연무현상을 발생 기원에 따라 4가지 구분 방법을 제시하고자 한다. 1) 2011~2013년도 평균 PM 농도의 $+1\sigma$ (표준편차) 이상인 기간을 선별한다. 본 연구에서는 서울지점의 경우 PM2.5와 PM10 농도가 각각 $54.3 \mu\text{g m}^{-3}$, $80.1 \mu\text{g m}^{-3}$ 와 백령도의 경우 PM2.5와 PM10 농도가 각각 $43 \mu\text{g m}^{-3}$, $74.1 \mu\text{g m}^{-3}$ 이상인 조건에 해당한다. 2) PM 농

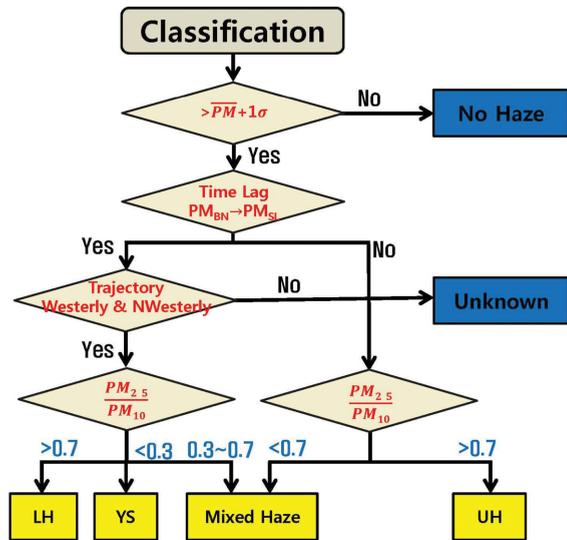


Fig. 3. The classification of long-range transported haze (LH), yellow sand (YS) and domestic urban haze (UH). Flow chart is classified to the various categories of heavy haze events by making use of aerosol optical depth, PM2.5 (or PM10), and time lag difference of PM2.5 (or PM10) increase time at both stations (BN, SL), backward trajectories, and the ratio of PM2.5 to PM10 specifically in the quantitative perspective.

도 증가가 백령도에서 먼저 시작되어 최댓값에 도달하고, 이후 서울에서 유사한 패턴의 농도 증가가 나

Table 1. Summary of PM10, PM2.5, σ_{sp} , AOD, time-lag, ratio of PM2.5 vs. PM10 for the selected long-range transported haze (LH), yellow sand (YS) and urban haze (UH) at Seoul.

Period	PM10 ($\mu\text{g m}^{-3}$)		PM2.5 ($\mu\text{g m}^{-3}$)		σ_{sp} (Mm^{-1})		AOD		Time-lag* (hr)	Ratio (PM2.5/PM10)	
	Ave.	Max	Ave.	Max	Ave.	Max	Ave.	Max			
LH	2012/01/11~15	50.7	139	35.1	98	164.7	612.8	0.32	1.49	6	0.78
	2012/01/25~29	46.6	108	30.0	78	139.3	444.4	0.24	0.82	7	0.81
	2012/03/04~08	37.7	171	32.3	132	92.0	493.4	NaN	NaN	2	0.97
	2012/05/02~06	44.1	184	25.7	101.8	92.9	466.1	0.32	0.76	7	0.70
	2013/01/10~14	104.0	211	83.4	164	342.3	779.8	1.21	2.14	11	0.81
YS	2011/04/30~05/04	154.2	450	48.3	103.7	91.9	256.7	0.79	1.60	12	0.29
	2011/05/10~14	63.1	508	20.3	112.8	35.6	105.8	0.41	0.88	4	0.26
	2012/03/24~26	40.6	138	18.5	37	66.5	164.9	0.28	1.03	2	0.17
	2012/03/30~04/03	63.1	170	24.5	58	94.4	312.3	0.49	0.75	5	0.20
	2012/11/26~30	52.1	318	24.0	88	87.9	423.3	0.34	0.92	4	0.25
UH	2011/06/01~05	61.4	122	45.1	82.2	304.5	672	0.72	1.84	-	0.76
	2012/04/21~25	39.2	130	31.21	113.3	156.3	665.2	0.98	1.75	-	0.93
	2012/05/11~15	44.4	86	41.8	77.5	238.4	614.2	1.05	2.42	-	> 1

*Time-lags of LH and UH are calculated using PM2.5, but for those of YS using PM10.

타나는 지연시간을 확인하였다. 3) 두 번째 단계에서 지연시간이 확인된 경우, NOAA에서 제공되는 HYSPLIT 모델 기반 역궤적 분석 결과를 토대로 장거리 이동 여부를 확인하고, 4) 연무는 미세입자가 지배적이고, 황사 경우에는 조대입자가 지배적인 점을 고려하여 PM2.5/PM10의 비율이 0.7 이상인 경우를 연무로 분류하고, 0.3 이하의 값을 가지는 경우를 황사로 분류한다. 한반도에서 관측되는 연무나 황사 사례가 순수하게 단일 사례로 관측되기 보다는 혼합되어 나타나 PM2.5/PM10 비를 정량화하기 어려운 측면이 있다. 본 연구에서 경험적으로 정한 PM2.5/PM10 비는 임의로 정해진 값이기 때문에 향후 다수의 사례 분석을 통해 검토가 필요하다. 이상에서 언급된 연무 사례 구분 절차를 간략화하여 Fig. 3에 제시하였으며 위의 방법을 토대로 장거리 이동 연무 5 사례, 황사 5 사례, 도시연무 3 사례를 분류하였다(Table 1).

3.2 연무의 시간변화

앞에서 연무의 구분절차에서 언급한 바와 같이 장거리이동 연무의 경우는 주로 중국으로부터 한반도로 유입되기 때문에 백령도와 서울에 에어로졸 농도 변화에 뚜렷한 시간차가 나타나는 경향이 있고, 연무는 미세입자 비율이, 황사는 조대입자 비율이 각각 높게 나타나는 경향이 있다. Figure 4는 위에서 제시된 사례구분 절차를 통해 확인된 장거리이동연무, 황사 그리고 도시연무를 대표하는 각 사례의 PM2.5와 PM10 농도의 시간변화를 나타낸 것이다.

장거리이동 연무를 대변하는 2012년 3월 4~8일 사례는 3월 6일 12시에 백령도에서 PM2.5 농도가 110 $\mu\text{g m}^{-3}$ 까지 도달한 이후 서울에서 130 $\mu\text{g m}^{-3}$ 까지 증가하였다. 다른 장거리이동연무 사례들도 백령도에서 PM 농도가 먼저 증가하여 최댓값에 도달하고 4~6시간 후 서울에서 유사한 형태로 PM 농도가 증가하는 경향이 뚜렷하게 나타났다. 또한 PM2.5 농도가 PM10 농도의 대부분을 차지하며, 조대입자 보다 미세입자의 변화에 민감하게 반응하는 산란계수도 PM2.5의 패턴과 유사한 경향이 나타났다.

황사는 장거리이동 연무 특징과 유사하게 백령도에서 에어로졸 농도가 증가하고 이후 서울로 유입되는 현상이 뚜렷하게 나타났지만, 전반적으로 장거리이동 연무보다 상당히 높은 농도(peak)가 유입되기 때문에 최고 농도 값이 장거리이동 연무에 비해 첨예한 봉우리 형태로 나타났다. 2012년 11월 26~30일 사례의 경우 백령도는 11월 28일 10시에 PM10 농도가 약 420 $\mu\text{g m}^{-3}$ 까지 증가하였고 서울은 4시간 후(28일 14시)에 최대 310 $\mu\text{g m}^{-3}$ 까지 증가하였다. 흥미로운 점은 PM2.5 농도는 PM10에 비해 변동폭이 적은 것을 알 수 있는데, 이는 황사가 대부분 조대입자(2.5 μm 이상)

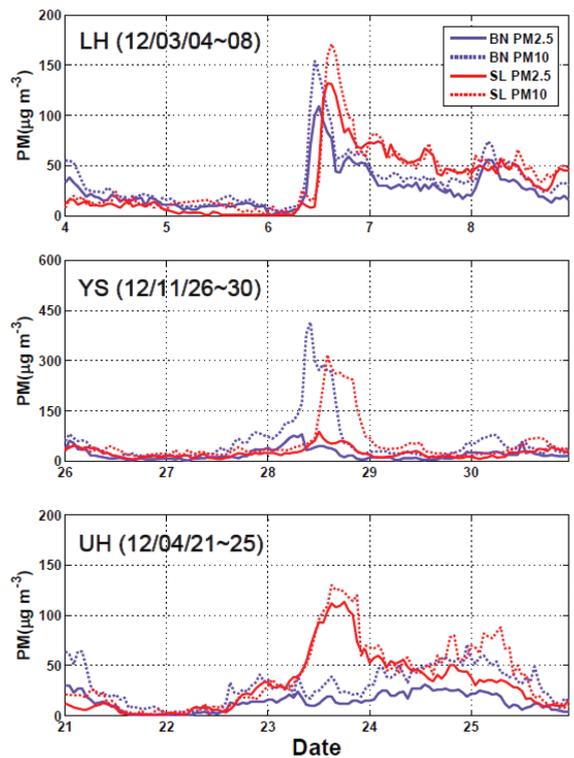


Fig. 4. Time series of PM2.5 and PM10 concentrations at BN and SL on Mar 4-8 for long-range transported haze (LH), on Nov 26-30 for yellow sand (YS), and on Apr 21-25 urban haze (UH) in 2012.

로 구성되어 PM2.5 농도 증가에 비해 PM10 농도 증가가 월등히 높기(PM2.5 농도의 약 4~5배) 때문으로 생각된다. 황사 사례들은 PM10에 비해 산란효율에 민감한 PM2.5 농도가 낮기 때문에 PM10 농도 증가에 비해 산란계수는 상대적으로 낮은 수준이었고, 조대입자(2.5 μm 이상)의 비중이 크기 때문에 PM 질량농도 증가가 뚜렷하게 나타났다.

도시연무 사례인 2012년 4월 21~25일에는 백령도에서 PM2.5 최대 농도가 20 $\mu\text{g m}^{-3}$ 으로 낮은 수준이지만, 서울은 4월 23일 8시부터 24일 오전까지 PM2.5 평균 농도의 +1 σ (54 $\mu\text{g m}^{-3}$) 이상 이었고 4월 23일 16~20시에 PM2.5 최댓값이 100 $\mu\text{g m}^{-3}$ 를 초과하였다. 그리고 장거리이동 연무와 마찬가지로 PM2.5 농도가 PM10 농도의 대부분을 차지하여 도시연무 역시 미세입자 비중이 큰 것을 잘 보여주고 있다.

3.3 연무 규모 및 광학특성

연무의 시·공간적인 규모를 추정하기 위하여 2장에서 제시한 식 (1)과 같이 장거리이동연무, 황사, 도

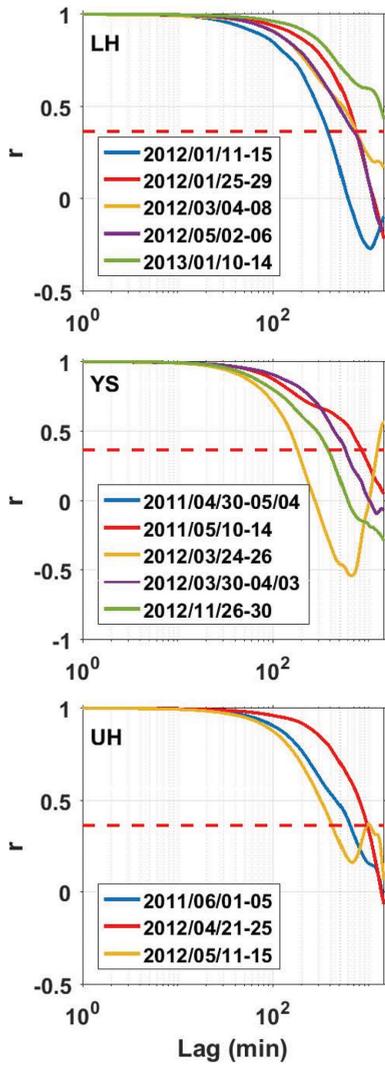


Fig. 5. Autocorrelation (r) of aerosol scattering coefficient (σ_{sp}) at Seoul (SL) site for long-range transported haze (LH), yellow sand (YS), and urban haze (UH). Dashed red line indicates e-fold time scale.

시연무 각 사례에 대한 5분 평균 에어로졸 산란계수 (σ_{sp})의 자기상관계수(r)를 구하고, 이를 Fig. 5에 제시하였다. 본 연구에서는 Anderson et al. (2003)이 정의한 바와 같이 σ_{sp} 의 e-folding 시간을 연무의 시간규모(τ)로 정의하였다. 전반적으로 장거리이동 연무는 7~24 시간 내외로 변동폭이 큰 반면에, 도시연무와 황사는 시간규모가 12시간 내로 뚜렷하게 작은 경향이 나타나 장거리이동 연무가 시·공간적으로 보다 큰 규모에서 한반도에 영향을 주는 것으로 생각된다. 일반적인 종관풍 속도(20 km h^{-1})를 고려하면 장거리이동 연

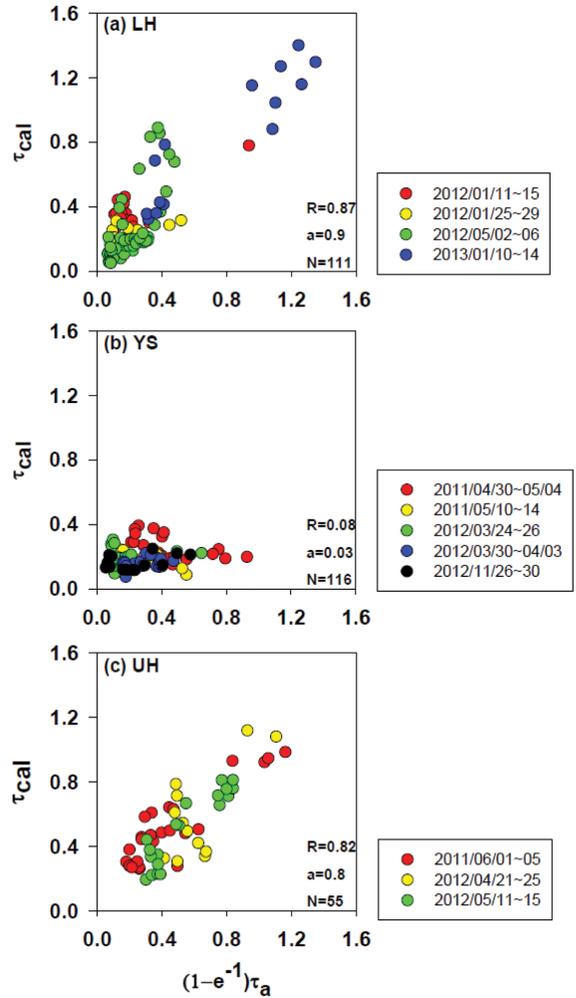


Fig. 6. Comparisons of τ_{cal} with $(1 - e^{-1})\tau_a$ for long-range transported haze (LH), yellow sand (YS), and urban haze (UH).

무의 공간적인 규모는 140~480 km, 황사와 도시연무는 240 km 이하의 수평규모를 갖는 것으로 나타났다. 이는 기존 연구(Sanchez-Lorenzo et al., 2012; Kim et al., 2009)에서도 언급되었던 바와 같이 대기현상의 meso-β 규모에 해당된다.

대기 중에 부유하는 미세한 입자인 에어로졸은 햇빛의 산란과 흡수에 영향을 주어 시정장애나 태양빛의 감쇄를 초래한다. 또한 에어로졸은 발생원에 따라 에어로졸의 화학적 성분과 크기 역시 다르기 때문에 연무의 발생 기원에 따라 에어로졸의 광학적 특성 역시 변화하게 된다. Figure 6은 식 (3)을 통해 AERONET의 sunphotometer로 관측한 에어로졸 광학두께와 지상자료를 활용하여 계산된 에어로졸 소산계수를 에어

로졸 유효고도를 고려하여 비교한 것이다. Eun et al. (2013)에서 제시된 방법과 같이 상대습도의 영향을 최소화하기 위하여 강수가 제외된 시간 관측값을 이용하여 분석하였다. 장거리이동 연무와 도시연무는 상관관계수가 각각 0.87, 0.82로 두 변수간의 상관성이 높지만 황사는 상대적으로 상관도가 낮았다. 이는 일부 황사의 경우 황사발원지에서 강한 상승류에 의해 상층으로 부유된 황사 먼지가 풍하층으로 이동하기 때문에 지상관측 σ_{ext} 와 연직으로 누적된(integrated) 에어로졸 광학두께 τ_a 의 상관성이 낮은 것으로 판단된다. 이런 측면에서 볼 때 황사시 지상관측자료를 이용하여 추정된 τ_{cal} 이 에어로졸 연직분포를 잘 구현하지 못하는 것으로 추정된다. 반면에 장거리이동 연무와 도시 연무 사례는 두 변수간의 기울기가 0.8~0.9로 나타나 지상에서 관측한 값이 연직 에어로졸 부하량을 충분히 대변한다고 할 수 있다.

4. 토의 및 결론

본 연구에서는 2011년부터 2013년도까지 백령도와 서울의 대기오염 집중측정소에서 관측된 에어로졸 질량 농도(PM2.5, PM10), 에어로졸 광학특성자료 (aerosol scattering coefficient; σ_{sp} , aerosol absorption coefficient; σ_{ap})와 AERONET의 sunphotometer로 관측된 에어로졸 광학두께(τ_a)를 이용하여 연무 사례를 장거리이동 연무, 황사, 도시연무 3가지로 구분하는 방법을 제시하고 각 연무의 시간적인 변화 특성 및 광학적 특성을 분석하였다.

각 연무의 구분방법은 총 4단계로 구성되는데, 1) 2011년~2013년도 평균 PM 농도보다 표준편차($+1\sigma$) 이상인 사례들을 우선 연무로 구분한다. 2) PM 농도의 증가가 백령도에서 먼저 시작되어 최댓값에 도달하고, 이후 시간차를 가지면서 서울에서 유사한 패턴의 농도 증가가 나타나는지를 확인한다. 3) 세 번째 단계에서는 NOAA에서 제공되는 HYSPLIT 모델을 통해 역적 분석(back-trajectory analysis)을 실시하여 에어로졸이 서풍(혹은 북서풍)류의 바람을 타고 중국 동부지역을 거쳐 한반도로 유입되었는지 검토한다. 4) 마지막으로 대부분의 인위적인 연무는 미세입자로 구성되는 경향이 있는 반면에 황사는 조대입자의 비중이 증가하는 것으로 알려져 있다(Chun et al., 2001; Kim and Park, 2001). 따라서 PM2.5/PM10 비율을 계산하여 0.7 이상인 경우 연무로 분류하고, 0.3 이하의 값을 가지는 경우 황사로 분류하여 사례를 선별한다.

각 연무 사례의 특성을 살펴본 결과, 장거리이동 연무와 황사사례의 경우 백령도에서 PM 농도가 먼저 증가하여 최댓값에 도달하고 시간이 경과한 후 서울에서 유사한 형태로 PM 농도가 증가하는 경향이 뚜

렷하게 나타났다. 장거리이동 연무는 PM2.5 농도가 PM10 농도에 육박하는 수준까지 증가하지만 황사는 PM2.5에 비해 PM10 농도가 뚜렷하게 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 그러나 도시연무의 경우는 백령도에서 PM2.5 및 PM10 농도가 평년 수준을 보이는 반면에 서울에서는 현저하게 증가하는 것으로 나타났다. 연무의 시간규모를 분석한 결과 장거리 이동 연무는 7~24시간으로 변동폭이 컸지만 도시연무와 황사는 시간규모가 12시간 내로 작았다. 한편 PM 질량 농도는 조대 입자의 비중이 큰 황사가 가장 높게 나타나고 장거리이동 연무, 도시연무 순으로 나타났다. 또한 각 사례의 에어로졸 광학두께와 산란계수(σ_{ext})를 통해 광학특성 분석 결과, 장거리이동 연무와 도시연무는 $(1 - e^{-1})\tau_a$ 와 τ_{cal} 의 상관관계수가 각각 0.8~0.9로 상관성이 높게 나타났지만, 황사는 상관성이 낮게 나타났다. 이는 일부 황사의 경우 강한 상승류에 의해 상층으로 부유되어 경계층 위로 이동하기 때문에 지상 관측자료와의 연관성이 상대적으로 낮은 것으로 판단된다. 반면에 장거리이동 연무와 도시연무의 경우 지상에서 관측한 값이 연직 에어로졸 부하량을 충분히 대변한다고 볼 수 있다.

향후 다수의 오염사례를 확보하여 장거리이동 연무와 황사 구분시 제시된 PM2.5/PM10 비에 대한 분석이나 지상원격관측(예: 라이다 등)을 이용하여 에어로졸 광학두께 계산에 활용된 유효 높이(H)에 대한 분석이 요구된다. 또한 본 연구에서 연무사례시의 에어로졸 크기, 질량농도와 산란계수 등을 이용한 연무 구분방법이 제시되었지만 아직 선정사례의 개수가 적기 때문에 지속적으로 다양한 연무사례에 대해 제시된 구분방법의 적용을 통해 현재 연구결과의 신뢰성을 검토할 필요가 있다. 마지막으로 연무 구분방법에 에어로졸 조성이 추가로 고려된다면 연무 분류 정확도 향상에 기여할 것으로 생각된다.

감사의 글

본 연구는 한국연구재단(NRF-2015S1A5B8036201)의 지원과 환경기술개발사업의 ‘동아시아지역 단기체류기후 변화 물질과 기후변화 상호 연관성 분석’으로 수행되었습니다. 그리고 교신저자는 강릉원주대학교 장기해외과건연구, 제 1저자는 강릉원주대학교 전일제 대학원생 장학금을 지원받았습니다.

REFERENCES

Anderson, T. L., and R. J. Charlson, D. M. Winker, J. A. Ogren, and K. Holmén, 2003: Mesoscale Variations of Tropospheric Aerosols. *J. Atmos. Sci.*, **60**, 119-136.

- Chun, Y., K.-O. Boo, J. Kim, S.-U. Park, and M. Lee, 2001: Synopsis, transport, and physical characteristics of Asian dust in Korea. *J. Geophys. Res.*, **106**, 18461-18469.
- _____, J.-Y. Lim, and B.-C. Choi, 2003: The features of aerosol in Seoul by Asian dust and haze during springtime from 1998 to 2002. *J. Korean Meteorol. Soc.*, **39**, 459-474 (in Korean with English abstract).
- Eun, S.-H., H.-G. Nam, B.-G. Kim, J.-S. Park, J.-Y. Ahn, and S.-J. Lee, 2013: An analysis of the characteristics of aerosol light scattering coefficients at Seoul and Baengnyeongdo. *J. Korean Soc. Atmos. Environ.*, **29**, 264-274, doi:10.5572/KOSAE.2013.29.3.264 (in Korean with English abstract).
- _____, 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.
- He, K., H. Huo, and Q. Zhang, 2002: Urban air pollution in China: Current status, characteristics, and progress. *Annu. Rev. Energ. Env.*, **27**, 397-431.
- Huang, R. J., and Coauthors, 2014: High secondary aerosol contribution to particulate pollution during haze events in China. *Nature*, **514**, 218-222, doi:10.1038/nature13774.
- 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. Tech.*, **27**, 213-222, doi:10.5806/AST.2014.27.4.213.
- Hodkinson, R. J., 1966: Calculations of color and visibility in urban atmospheres polluted by gaseous NO₂. *Air Wat. Pollut.*, **10**, 137-144.
- IPCC, 2014: *Climate Change 2014: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Stocker, T. F. et al. Eds., Cambridge University Press, 1535 pp, doi:10.1017/CBO9781107415324.
- Ji, D., and Coauthors, 2014: The heaviest particulate air-pollution episodes occurred in northern China in January, 2013: Insights gained from observation. *Atmos. Environ.*, **92**, 546-556, doi:10.1016/j.atmosenv.2014.04.048.
- 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 1997 and 2008. *Atmos. Chem. Phys.*, **10**, 5391-5408, doi:10.5194/acp-10-5391-2010.
- Kang, C.-M., H. S. Lee, B.-W. Kang, S.-K. Lee, and Y. Sunwoo, 2004: Chemical characteristics of acidic gas pollutions and PM_{2.5} species during hazy episode in Seoul, South Korea. *Atmos. Environ.*, **38**, 4749-4760, doi:10.1016/j.atmosenv.2004.05.007.
- 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.
- _____, M.-H. Choi, and C.-H. Ho, 2009: Weekly periodicities of meteorological variables and their possible association with aerosols in Korea. *Atmos. Environ.*, **43**, 6058-6065, doi:10.1016/j.atmosenv.2009.08.023.
- 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.
- Korean Meteorological Society, and Korea Meteorological Administration, 2015: *Atmospheric sciences Terminology*. Sigmappress, 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.
- Liu, X. G., and Coauthors, 2013: Formation and evolution mechanism of regional haze: A case study in the megacity Beijing, China. *Atmos. Chem. Phys.*, **13**, 4501-4514, doi:10.5194/acp-13-4501-2013.
- Noh, Y. M., D. Müller, 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.
- 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.
- Quan, J., X. Tie, Q. Zhang, Q. Liu, X. Li, Y. Gao, and D. Zhao, 2014: Characteristics of heavy aerosol pollution during the 2012-2013 winter in Beijing, China. *Atmos. Environ.*, **88**, 83-89, doi:10.1016/j.atmosenv.2014.01.058.

- Sanchez-Lorenzo, A., P. Laux, H.-J. Hendricks Franssen, J. Calbó, S. Vogl, A. K. Georgoulias, and J. Quaas, 2012: Assessing large-scale weekly cycles in meteorological variables: A review. *Atmos. Chem. Phys.*, **12**, 5755-5771, doi:10.5194/acp-12-5755-2012.
- 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).
- Song, S., J. E. Kim, E. Lim, J.-W. Cha, and J. Kim, 2015: Physical, chemical, and optical properties of an Asian dust and haze episodes observed at Seoul in 2010. *J. Korean Soc. Atmos. Environ.*, **31**, 131-142, doi:10.5572/KOSAE.2015.31.2.131 (in Korean with English abstract).
- Tie, X., D. Wu, and G. Brasseur, 2009: Lung cancer mortality and exposure to atmospheric aerosol particles in Guangzhou, China. *Atmos. Environ.*, **43**, 2375-2377.
- Yang, Y., X. Liu, Y. Qu, J. Wang, J. An, Y. Zhang, and F. Zhang, 2015: Formation mechanism of continuous extreme haze episodes in the megacity Beijing, China, in January 2013. *Atmos. Res.*, **155**, 192-203, doi:10.1016/j.atmosres.2014.11.023.
- Zhang, R. H., Q. Li, and R. Zhang, 2014: Meteorological conditions for the persistent severe fog and haze event over eastern China in January 2013. *Sci. China Earth Sci.*, **57**, 26-35, doi:10.1007/s11430-013-4774-3.