Atmosphere. Korean Meteorological Society Vol. 27, No. 1 (2017) pp. 29-40 https://doi.org/10.14191/Atmos.2017.27.1.029 pISSN 1598-3560 eISSN 2288-3266

연구논문 (Article)

# 2015년 봄철에 선박으로 관측한 서해상 이차에어로졸 성분의 농도 및 오염 특성

고희정<sup>1)</sup>·강창희<sup>2)</sup>·차주완<sup>1)\*</sup>·류상범<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>국립기상과학원 환경기상연구과, <sup>2)</sup>제주대학교 화학·코스메틱스학과

(접수일: 2016년 10월 25일, 수정일: 2017년 1월 6일, 게재확정일: 2017년 1월 26일)

## Concentration and Pollution Characteristics of Secondary Aerosol Components Over the Yellow Sea by Ship-Borne Observation in Spring, 2015

Hee-Jung Ko<sup>1</sup>, Chang-Hee Kang<sup>2</sup>, Joo Wan Cha<sup>1)\*</sup>, and Sang-Boom Ryoo<sup>1</sup>

<sup>1)</sup>Environmental Meteorology Research Division, National Institute of Meteorological Sciences, Jeju, Korea <sup>2)</sup>Department of Chemistry and Cosmetics, Jeju National University, Jeju, Korea

(Manuscript received 25 October 2016; revised 6 January 2017; accepted 26 January 2017)

Abstract The PM<sub>10</sub> and PM<sub>2.5</sub> particles over the Yellow Sea of Korea were collected by shipborne observation during two cruises in spring, 2015. Their water-soluble ionic components such as NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, Ca<sup>2+</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, Cl<sup>-</sup>, F<sup>-</sup>, CH<sub>3</sub>COO<sup>-</sup>, HCOO<sup>-</sup>, and CH<sub>3</sub>SO<sub>3</sub><sup>-</sup> were analyzed, in order to examine the pollution characteristics of the secondary aerosol components. The comparative study of particle size distribution has resulted that  $NH_4^+$ , nss-SQ<sup>2-</sup>, nss-Mg<sup>2+</sup>, nss-K<sup>+</sup>, HCOO<sup>-</sup>, and CH<sub>3</sub>SO<sub>3</sub><sup>-</sup> species mostly existed in fine particle mode. Meanwhile, nss-F<sup>-</sup> and sea-salt species were distributed in both fine and coarse particle mode,  $NO_{3}^{-}$ , nss-Ca<sup>2+</sup>, CH<sub>3</sub>COO<sup>-</sup> species were rich in coarse particle mode. The concentrations of secondary pollutants (nss-SO<sub>4</sub><sup>-</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>) increased in fine particles, and those of natural components (nss- $Ca^{2+}$ , Sea-salt) increased in coarse particles.  $NH_4^+$  exists as the form of  $(NH_4)_2SO_4$  and  $NH_4NO_3$ , and mostly as (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> in fine particles. NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub> has lower content compared to (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, and it mostly existed in fine particles at Yellow Sea I and in coarse particles at Yellow Sea II. The concentration ratios of NO<sub>3</sub><sup>-</sup>/nss-SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> for Yellow Sea I and Yellow Sea II were 0.52 and 0.16 in coarse particles, and they were 0.64 and 0.38 in fine particles, respectively, showing that the stationary source emissions were more important than mobile source emissions in Yellow Sea II (except Passage II-4).

**Key words:** The Yellow Sea, passage, coarse and fine, chemical composition,  $(NH_4)_2SO_4$  and  $NH_4NO_3$ ,  $NO_3^-/nss-SO_4^{2-}$ 

## 1. 서 론

동아시아 지역은 급속한 산업화와 인구 증가로 대기 에어로졸 농도가 크게 증가하는 추세이며, 빈번한 황 사발생 역시 대기절에 영향을 미치고 있다(Lee et al., 2006). 동아시아 지역에서 발생된 각종 대기 오염물질 은 장거리 수송을 통해 북반구 대기 환경에 영향을 미 치고 있다(Ramanathan and Feng, 2009). 동아시아 지 역 대기 에어로졸의 특성을 규명하기 위한 국제공동 연구로 2001년 봄철에 'ACE (Aerosol Characterization Experiment)-Asia' 집중관측이 수행되었고(Huebert et al., 2003), 국내에서도 황사를 비롯해서 각종 오염물 질에 대한 연구에 많은 노력을 기울이고 있다(Lee and

<sup>\*</sup>Corresponding Author: Joo Wan Cha, Environmental Meteorology Research Division, National Institute of Meteorological Science 33 Seohobuk-ro, Seogwipo-si, Jeju 63568, Korea. Phone: +82-64-780-6563, Fax: +82-64-738-6512 E-mail: jwcha@korea.kr

Kim, 2004; Han et al., 2006; Noh et al., 2007). 특히 최근에 빈번히 발생하고 있는 고농도 미세먼지는 대 부분 중국에서 발생하여 한반도로 수송되고 있기 때 문에, 에어로졸의 특성과 그 영향을 규명하기 위한 연 구의 필요성이 한층 높아지고 있다(Park et al., 2012).

서해는 중국의 산업화에 의한 오염물질 배출 영향 을 직접적으로 받고 있는 지역이다. 중국 동부 산업지 대에서 배출되는 막대한 오염물질은 대부분 편서풍 풍 하측에 위치한 서해를 거쳐서 한반도, 일본, 그리고 태 평양으로 확산된다. 따라서 서해는 중국에서 이동하는 대기 오염물질의 장거리 수송 영향을 직접적으로 모 니터링할 수 있는 가장 가까운 위치에 있다(Lee et al., 2001). 또한 서해는 기류의 흐름에 따라 중국에서 발 생한 대기 오염물질과 한반도에서 배출되는 오염물질 이 공존하기 때문에 대륙성 에어로졸이 해양 경계층 대기질에 미치는 영향을 관측하는데도 아주 적합한 지 리적 조건을 갖추고 있다(Park et al., 2016).

대기 에어로졸의 조성은 오염물질 배출량과 화학반 응, 지형적 조건, 기상조건 등 다양한 인자와 관련되 어 있다(Park et al., 2014). 특히 대기 에어로졸의 대 표적 이차 오염물질인 황산염, 질산염 등은 이러한 인 자에 따라 다양한 농도변화를 보인다. 이 중 NO<sub>3</sub> 성 분은 일반적으로 국지적 오염원에 의해 영향을 많이 받고, 겨울에 증가하는 경향을 보인다(Won et al., 2010; Park et al., 2013). 반면에 SO<sub>4</sub><sup>-</sup> 성분은 주로 광역 오 염원의 영향으로 장거리 수송 중에 SO<sub>2</sub>의 대기 변환 과정을 통해 생성되며, 여름에 발생하는 대기 에어로 졸에서 고농도 현상의 원인 물질로 잘 알려져 있다 (Won et al., 2010; Yu et al., 2015). Sun et al. (2014) 의 연구에 의하면 중국 베이징에서 2013년 1월에 관 측된 심각한 연무오염 역시 주로 이들 이차 오염물질 들에 기인하고 있는 것으로 나타나고 있다.

본 연구에서는 선박을 이용하여 서해상에서 항로별 로 PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub> 에어로졸을 채취하여 주요 수용성 이 온성분을 분석하였다. 그리고 그 결과로부터 서해상 대기 에어로졸의 화학조성을 조사하고, 선박 항로에 따라 조대입자와 미세입자 이차에어로졸 조성을 비교 함으로써 해양 경계층 에어로졸의 오염특성을 파악하 고자 하였다.

#### 2. 연구 방법

### 2.1 시료 채취

서해상 PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub> 시료는 국립기상과학원 기상1 호 선상에서 2015년 4월 24일부터 5월 5일에 걸쳐 채 취하였다. Sequential Air Sampler (APM Engineering, PMS-104, Korea)는 해면으로부터 약 6~6.5 m 이상의 높이인 선교(bridge) 뒤에 위치한 컨테이너 내부에 설

한국기상학회대기 제27권 1호 (2017)



**Fig. 1.** Ship track of GiSang 1 during April 2015 and May 2015 [(a) 24~29 April, and (b) 1~5 May].

치하였고, 테프론필터(Pall Co., Zefluor<sup>™</sup>, PTFE 47 µm, 2.0 µm, USA)를 사용하여 채취하였다. 샘플러의 공기 유속은 MFC가 부착된 자동 시스템을 사용하여 초기 부터 종료 시까지 지속적으로 16.7 L min<sup>-1</sup>을 유지하 였다. 채취된 시료는 현장에서 플라스틱 페트리디쉬 에 넣어 밀봉한 후, 실험실 데시케이터에서 건조(48~96 시간)하여 무게를 측정하였다. 무게를 측정한 시료는 다시 페트리디쉬에 밀봉하여 분석 전까지 -20°C 냉 동고에 보관하였다.

#### 2.2 시료 채취 항해 경로

2015년 4월 24일부터 5월 6일까지 13일간 선박(기 상 1호)의 항해 경로를 Fig. 1에 나타내었다. 선박의 서해상 운항경로는 크게 남해동 · 서부해상, 서해남 · 중부해상, 한중잠정조치수역 해상이다. 서해상 PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub> 시료는 4월 24일 부산항을 출발하여 거문도 근 처까지 이동과정에서 각각 1회씩 채취하였다. 25일에 는 거문도 해상에서 목포 내항, 26일에는 목포 내항 에서 서해 남부 한중잠정조치수역 경로를 따라 PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub> 각 1회씩 채취하였다. 27일에는 한중잠정조치수 역에서 서해(35-30°N, 122-15°E)를 따라 중간지점(37-00°N, 124-00°E)까지, 28일에는 태안 앞(37-20°N, 124-

Passage		Time		Area		No. of samples		Remark
		Start tine	End time	Longitude (N)	Latitude (E)	$PM_{10}$	PM <sub>2.5</sub>	Kennark
Yellow Sea I	I-1	2015-04-26 09:45	2015-04-26 20:25	$34.98 \rightarrow 35.00$	$125.65 \rightarrow 122.23$	1	1	
	I-2	2015-04-27 08:04	2015-04-27 17:21	$35.00 \rightarrow 36.89$	$122\text{-}07 \rightarrow 123.87$	1	1	
	I-3	2015-04-28 08:02	2015-04-28 14:22	$37.00 \rightarrow 37.48$	$124.00 \rightarrow 124.50$	1	1	Haze
	I-4	2015-04-29 08:02	2015-04-29 15:19	$37.32 \rightarrow 36.10$	$124.50 \rightarrow 125.96$	1	-	Fog, Rain, Mist
Yellow Sea II	II-1	2015-05-01 08:02	2015-05-01 18:16	$34.99 \rightarrow 34.99$	$125.48 \rightarrow 122.30$	1	1	Fog
	II-2	2015-05-02 08:02	2015-05-02 17:13	$34.99 \rightarrow 36.84$	$122.08 \rightarrow 123.82$	1	1	Fog, Mist
	II-3	2015-05-03 08:02	2015-05-03 14:24	$37.01 \rightarrow 37.35$	$124.00 \rightarrow 124.50$	1	1	Fog, Rain, Mist
	II-4	2015-05-04 08:02	2015-05-04 16:52	$37.32 \rightarrow 36.00$	$124.50 \rightarrow 126.99$	1	1	Asian Dust

Table 1. The detailed information of the four passages.



Fig. 2. Daily variation of meteorological parameters in GiSang 1 [PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>, PM<sub>10</sub> (β-ray), WD, WS, RH, WT].

30°E)으로 이동하였고, 2일간 PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub> 시료를 각 1 개회씩 채취하였다. 29일에는 안면도(36-40°N, 126-00°E) 에서 어청도 근처(36-00°N, 126-00°E)까지 이동 중에 PM<sub>10</sub> 시료 1개를 채취하였고, PM<sub>2.5</sub> 시료는 샘플러 오 작동으로 채취에 실패하였다. 5월 1~4일에는 4월 26~29 일과 동일한 항로를 반복하여 PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub> 시료를 각 1회/일로 4일간 채취하였고, 5월 1~3일에는 흐린 강우 날씨를 보였다. 이러한 선박 항로(Passage)를 4월 26~29 일의 1차 서해(Yellow Sea) I과 5월 1~4일의 2차 서해 II 항로로 구분하여 Table 1에 정리하였다. 그리고 각 세부 경로를 항로(Passage) I-1~I-4 및 항로(Passage) II-1~II-4로 세분하였고, 항로를 따라 채취한 시료의 총수 는 전체적으로 PM<sub>10</sub> 총 10개와 PM<sub>2.5</sub> 총 9개이다.

#### 2.3 수용성 이온성분 분석

PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub> 시료에 에탄올 소량을 넣어 침적 후 초 순수 14 mL를 가하여 초음파 세척기에서 30분, 진탕 기에서 1시간(200 rpm) 동안 수용성 성분들을 용출시 켰다. 용출액은 주사기 필터(Whatman, PVDF syringe filter, 0.45 μm, 13 mm)로 불용성 입자를 거른 후 여 액을 양이온 및 음이온 분석용 시료로 이용하였다. 양 이온(NH<sup>4</sup>, Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>)과 음이온 및 미량이 온(SO<sup>2-</sup>, NO<sup>3</sup>, CΓ, F<sup>-</sup>, HCOO<sup>-</sup>, CH<sub>3</sub>COO<sup>-</sup>, CH<sub>3</sub>SO<sup>3</sup>) 은 Metrohm Modula IC (Metrohm, model 818 IC pump/819 IC detector, Switzerland)를 사용하여 분석 하였다. IC의 분석조건은 Song et al. (2016)에서 기술 된 방법과 동일하며, 이때 수용성 이온성분 분석의 기 기검출한계(IDL)와 변동계수(CV)는 각각 0.29~7.48 μg L<sup>-1</sup>, 0.19~7.33%의 범위를 보였다.

### 3. 결과 및 고찰

**3.1 질량농도** 2차에 걸친 서해 Ⅰ과 Ⅱ의 각 경로별 PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub> 질

량농도와 동시에 기상 1호에서 β-ray 흡수법으로 실 시간 관측한 질량농도를 비교하였다(Fig. 2). 항로 I에 서 채취한 PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>와 β-ray PM<sub>10</sub>의 질량농도는 각 <sup>2</sup>  $45.0 \pm 14.9$  (n = 4), 37.1 ± 14.5 (n = 3), 38.0 ± 5.8 (n=4) μg m<sup>-3</sup>이었다. 반면에 항로 II에서 PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub> 과 β-ray PM<sub>10</sub>의 평균질량농도는 각각 32.1±20.6 (n= 4), 20.1 ± 11.9 (n = 4), 24.9 ± 26.0 (n = 4) μg m<sup>-3</sup>로 항 로 I이 항로 II보다 모든 시료에서 높은 농도를 보였 다. 서해상 시료채취 기간 중 PM10 질량농도와 기상 1호의 자동측정망으로 관측한 β-ray 흡수법 농도를 비 교해본 결과, 두 값 간의 상관계수(r)는 0.944로 좋은 상관성을 나타내었다. Zhang et al. (2015)에서 2012년 봄과 가을철에 발해만과 중국근해의 서해상 항로를 따라 측정한 TSP의 질량농도는 각각 100, 40.2 µg m<sup>-3</sup> 로 본 연구에서 채취한 PM10보다는 훨씬 더 높은 농 도를 보이고 있다. 또한 Lee et al. (2004)이 인천-청 도간 직선항로를 따라 1999년 6월~2001년 3월에 측 정한 PM<sub>10</sub> 질량농도는 15.6~113.4 μg m<sup>-3</sup>, 2002년 5 월 28~31일 측정한 인천-천진 항로상의 PM10 질량농 도는 38.0~169.7 μg m<sup>-3</sup>의 범위를 보여 인천-청도항로 보다는 인천-천진의 북쪽 항로에서 더 높은 경향을 나 타내고 있다. 본 연구에서는 대체적으로 이보다 낮은 농도를 보이는 것으로 조사되었고, 농도편차 역시 훨 씬 더 작은 결과를 보이고 있다.

항로 I-1(항로 II-1)에서 PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>와 β-ray PM<sub>10</sub> 의 질량농도는 각각 35.6(17.1), 24.4(10.8), 30.7(12.6) μg m<sup>-3</sup>이었다. 그리고 항로 I-2(항로 II-2)에서는 이들 의 농도가 각각 49.1(22.3), 34.0(14.2), 42.2(13.2) µg m<sup>-3</sup>, 항로 I-3(항로 II-3)는 각각 64.1(22.0), 53.0(18.1), 43.1(10.1) μg m<sup>-3</sup>, 항로 I-4(항로 II-4)는 각각 31.0(67.8), -(37.5), 36.1(63.9) μg m<sup>-3</sup>로 조사되었다. 이 중 항로 I-3의 PM<sub>2.5</sub>/PM<sub>10</sub> 질량농도비는 0.83으로 타 항로의 PM2.5/PM10 농도비 0.55~0.82에 비해 비교적 높은 경 향을 보였고, 항로 I-3에서 대기 에어로졸이 미세입자 의 영향을 더 많이 받은 것으로 추정된다. 이러한 원 인은 이 시기에 채취한 PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>가 연무의 영향을 받았기 때문인 것으로 보이며, 기상 1호에서 목측으 로도 이러한 연무현상을 관측할 수 있었다. 이 시기 의 일기도는 Fig. 3a와 같이 한반도 북부지역에 고기 압이 위치하고, 중국 중부 동해안 지역에 저기압이 자 리잡아 북동풍이 형성되었으며, 이 바람의 영향으로 국내 서해안 지역 및 수도권 지역에서 발생한 오염물 질이 백령도 부근에서 관측하고 있던 기상 1호에 영 향을 준 것으로 보인다. 또한 항로 Ⅱ-4의 5월 4일에 PM<sub>10</sub>의 질량농도가 63.9 μg m<sup>-3</sup>로 높은 것은 5월 3일 에 내몽골 지역의 저기압 후면 및 고기압 전면에서 발원한 황사가 4일에 기상 1호로 영향을 준 것으로 보인다(Fig. 3b). 또 항로 II-1~II-3(5월1일~3일) 기간에

한국기상학회대기 제27권 1호 (2017)



**Fig. 3.** Weather chart (surface) in the (a) local emission observation case (09 KST, 28 April), (b) Asian dust observation case (12 KST, 04 May), and (c) low level aerosol mass concentration observation case (00 KST, 03 May).

는 Fig. 3c와 같이 서해상에 저기압이 지나면서 비와 안개가 발생하였고 상대습도도 85~92%로 높은 상태 를 나타내었다. 따라서 같은 항로임에도 불구하고 항 로 I-1~I-3에서 측정한 결과보다 더 낮은 질량농도를



**Fig. 4.** Concentrations and their ratios of water-soluble ionic species in coarse and fine particles over the Yellow Sea (Others: nss-F<sup>-</sup>, CH<sub>3</sub>COO<sup>-</sup>, CH<sub>3</sub>SO<sup>-</sup><sub>3</sub>).

나타내었다.

## 3.2 대기 에어로졸 화학 조성 3.2.1 이차에어로졸 성분 농도

서해상에서 관측한 에어로졸을 PM<sub>10-2.5</sub> 조대입자 (Coarse particle, 2.5 < D<sub>p</sub> < 10 μm)와 PM<sub>2.5</sub> 미세입자 (Fine particle, D<sub>p</sub> < 2.5 μm)로 구분하여 이온성분 농도 를 비교하였다. 이때 SO<sup>2+</sup>, F<sup>-</sup>, K<sup>+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, Ca<sup>2+</sup> 성분 들은 해상 에어로졸임을 감안하여 비해염(non-sea-salt) 농도로 환산하여 비교하였고(Sciare et al., 2005; Terzi et al., 2010; Cheung et al., 2011), 해염농도(Sea salt, µg m<sup>-3</sup>)는 Na<sup>+</sup>, Cl<sup>-</sup>, ss-SO<sup>2+</sup>, ss-Ca<sup>2+</sup>, ss-Mg<sup>2+</sup>, ss-K<sup>+</sup>, ss-F<sup>-</sup>의 합으로 나타내었다(Fig. 4). SO<sup>2+</sup> 에서 nss-SO<sup>2+</sup> 이 차지하는 비율은 조대입자의 경우 서해 I과 서해 II에서 각각 85.6, 66.0%, 미세입자의 경우 각각 98.2, 94.9%로 조대입자에서 해염 영향이 더 큰 영향을 미 치고 있다. 반면에 Ca<sup>2+</sup>에서 nss-Ca<sup>2+</sup>이 차지하는 비 율은 조대입자에서 서해 I과 서해 II가 각각 96.8, 90.6%, 미세입자에서 각각 82.5, 80.5%로 오히려 미 세입자 영역에서 해양의 기여도가 더 큰 것으로 조사 되었다. 이처럼 SO<sup>2</sup><sub>4</sub>과 Ca<sup>2+</sup> 모두 해양 기여도가 비교 적 낮은 것은 Lee et al. (2004)의 연구 결과와 같이 채취 위치가 해면으로부터 충분히 높았기 때문인 것 으로 추정된다.

주요 이차에어로졸 성분인 nss-SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, NO<sub>3</sub>, NH<sub>4</sub><sup>4</sup>의 입경별 농도 분포를 비교해 본 결과(Fig. 4), 조대입자 에서는 서해 I, II에서 각각 0.49~2.27, 0.07~0.70 µg m<sup>-3</sup>, 미세입자에서는 각각 1.61~8.86, 0.53~4.11 µg m<sup>-3</sup> 의 범위를 나타내었다. 또 토양의 지표성분인 nss-Ca<sup>2+</sup> 은 서해 I, II에서 조대입자가 각각 0.29, 0.25 µg m<sup>-3</sup>,

Coarse(PM10)/Fine(PM2.5), C/F Passage nss-Ca<sup>2+</sup> nss-SO<sub>4</sub><sup>2</sup>  $NO_3$  $NH_4^+$ I-1 0.1 1.7 0.0 2.0 I-2 0.0 0.5 0.0 2.7 I-3 0.0 0.8 0.2 2.2 I-4 II-1 0.4 5.0 0.4 1.9 II-2 0.0 0.0 1.8 2.9 II-3 0.0 0.2 0.8 2.2 II-4 0.0 0.1 0.0 2.4 a)Total East China Sea (02') 0.1 6.3 0.1 3.0 <sup>a)</sup>East China Sea & Pure (02') 0.1 4.7 0.1 0.3 <sup>a)</sup>East China Sea & Continentally affected (02') 0.1 6.7 0.1 3.5 <sup>b)</sup>Southern Taiwan & Inland and Breeze (06'-07') 0.8 0.8 0.5 1.2 <sup>b)</sup>Southern Taiwan & Offshore and Breeze (06'-07')  $1.0^{*}$ 0.6\* 0.7 0.4 <sup>b)</sup>Southern Taiwan & Monsoon and Inland (06'-07') 0.2 1.4 0.2 0.6 <sup>b)</sup>Southern Taiwan & Monsoon and Offshore (06'-07') 0.2\* 0.3\* 0.5 0.2 <sup>c)</sup>Incheon-Qingdao, Shipboard (99'-01') 0.2 0.3 0.9 1.0

**Table 2.** Coarse( $PM_{10}$ )/Fine( $PM_{2.5}$ ) concentration ratios of nss- $SO_4^{2-}$ ,  $NO_3^-$ ,  $NH_4^+$ , nss- $Ca^{2+}$  species over the Yellow Sea and other sites.

<sup>a</sup>Nakamura et al., 2005; <sup>b)</sup>Tsai et al., 2011; <sup>c)</sup>Lee et al., 2004; <sup>\*)</sup>Not-non-sea-salt but total ion.

미세입자가 각각 0.12, 0.10 μg m<sup>-3</sup>의 농도 범위를 보 였다. 이처럼 서해상 에어로졸은 미세입자에서는 nss-SO<sup>4-</sup>, NH<sup>+</sup> 성분이 높은 농도를 보이고, 조대입자에서 는 nss-Ca<sup>2+</sup> 성분이 상대적으로 높은 농도를 보였다. 또 NO<sup>3</sup> 성분은 서해 I에서는 조대입자에서 농도가 높 으나 서해 II에서는 미세입자에서 농도가 높아 항로 별로 서로 다른 특징을 나타내었다. 이러한 원인은 관 측기간 중에 연무, 황사가 발생하였고, 이러한 기상현 상이 이차에어로졸 성분에 영향을 미쳤기 때문으로 판단된다.

Zhang et al. (2015)의 연구에서 2012년 봄, 가을에 발해만과 중국근처 서해안 항로에서 채취한 TSP의 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>은 각각 2.09~17.6, 1.67~17.4, 0.66~ 5.90 μg m<sup>-3</sup>의 농도 범위를 나타내었다. 또 Ca<sup>2+</sup>은 0.22~2.78 μg m<sup>-3</sup>의 범위를 보인 것으로 나타나고 있 다. 또 인천-청도 항로의 PM<sub>10</sub>에서 nss-SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 11.5 μg m<sup>-3</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 5.7 μg m<sup>-3</sup>, NH<sub>4</sub><sup>+</sup> 3.93 μg m<sup>-3</sup>의 농도를 나 타내었다. PM<sub>2.5</sub>에서는 nss-SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 9.7 μg m<sup>-3</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 3.0 μg m<sup>-3</sup>, NH<sub>4</sub><sup>+</sup> 2.99 μg m<sup>-3</sup>이었고, nss-Ca<sup>2+</sup>은 PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>에서 각각 0.18, 0.09 μg m<sup>-3</sup>의 농도를 보이고 있 다. 반면에 인천-천진 항로에서는 PM2.5의 nss-SO4, NO<sub>3</sub>, NH<sub>4</sub>, nss-Ca<sup>2+</sup> 농도가 각각 14.3, 5.2, 5.06, 0.09 μg m<sup>-3</sup>로 나타났다(Lee et al., 2004). 이처럼 서해상 에서 관측한 본 연구의 nss-SO<sub>4</sub><sup>-</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, nss-Ca<sup>2+</sup> 이차 에어로졸 성분은 발해만 지역, 인천-청도, 인천-천진의 선행연구에 비해 더 낮은 농도를 보이는 것으로 조사

한국기상학회대기 제27권 1호 (2017)

되었다.

또한 에어로졸 성분의 입경별 농도분포를 확인하기 위하여 주요 이온성분의 조대입자/미세입자(C/F) 농도 비를 타 지역의 결과와 비교하였다(Table 2). 서해상 에서 측정한 에어로졸의 조대/미세입자 농도비는 NH4, nss-SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, NO<sub>3</sub> 등이 대체적으로 0.5보다 작은 값을 나타내어 주로 미세입자에 많이 분포하는 경향을 보 였다. 반면에 nss-Ca<sup>2+</sup> 성분은 모두 조대입자에 분포 하는 경향을 보였다. 성분별로는 nss-SO4-의 조대/미 세입자 농도비가 모든 항로에서 0.5보다 작은 값을 나 타내어 주로 미세입자에 분포하는 경향을 보였다. 반 면에 NO;은 대체적으로 조대입자와 미세입자에 고루 분포하지만 연무 시에는 조대입자에서 농도가 증가하 였고, nss-Ca<sup>2+</sup>은 모든 경우에 조대입자에서 높은 농 도를 나타내었다. 특히 NO5은 항로에 따라 입자분포 경향이 다르고, 항로 I-1, 항로 I-3, 항로 II-1에는 조대 입자에 대부분 많이 존재하나, 그 외의 항로에서는 미 세입자에 많이 분포하는 경향을 보인 것으로 조사되었 다. 중국 근해에서 관측한 타 연구에서는 nss-SO<sub>4</sub><sup>-</sup>, NH<sub>4</sub><sup>+</sup> 의 조대/미세입자 농도비가 타이완 남쪽 지역을 제외 한 다른 모든 지역의 미세입자에 더 많이 분포하는 경향을 보였다. 그러나 동중국지역은 조대입자에 많 이 분포하며, 타이완남쪽지역과 인천과 청도의 항로 는 조대와 미세입자에 골고루 분포하는 경향을 보였 다. 그리고 nss-Ca<sup>2+</sup>은 계절풍이 불었을 때 동중국과 타이완 남쪽지역에서 미세입자에 많이 분포하나 대부



**Fig. 5.** Composition ratio of water-soluble ionic species in coarse and fine particles over the Yellow Sea (Others: nss- $F^-$ , CH<sub>3</sub>COO<sub>5</sub>, HCOO<sup>-</sup>, CH<sub>3</sub>SO<sub>3</sub>).

분이 조대입자에 분포하는 경향을 보인 것으로 나타 나고 있다.

#### 3.2.2 에어로졸성분의 조성 및 특성

nss-SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, NO<sub>3</sub>, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>을 합친 이차에어로졸의 조성은 서해 I의 조대입자와 미세입자에서 각각 56.1, 81.0% 의 비율을 차지하였다. 또 서해 II의 조대입자와 미세 입자에서의 조성은 각각 36.3, 67.8%를 차지하여 이 들 이차에어로졸은 미세입자에서 더 높은 조성비를 나타내었다. 반면에 토양지표 성분(nss-Ca<sup>2+</sup>, nss-Mg<sup>2+</sup>) 은 서해 I의 조대입자와 미세입자에서 각각 8.5, 0.6%, 서해 II에서 각각 10.3, 4.5%를 나타내었다. 또 해염 성분(Na<sup>+</sup>, Cl<sup>-</sup> 등)은 서해 I에서 조대입자와 미세입자 에서 각각 26.8, 14.7%, 서해 II에서 각각 50.2, 22.9% 의 조성비를 보였다. 이처럼 서해상 에어로졸은 인위 적 기원의 이차오염물질들이 주로 미세입자에서 높은 조성을 보이고, 상대적으로 천연 성분들은 조대입자 에서 더 높은 조성을 보였다. 이차에어로졸 조성을 항 로별로 비교해 본 결과, 모든 항로에서 미세입자에서 더 높은 비율을 나타내었다(Fig. 5). 그러나 항로 I-3 에서 NO3은 조대입자와 미세입자에서 각각 45.9, 21.7% 로 조대입자에서 더 높은 조성비를 나타내었다. 반면 에 nss-SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>은 조대입자와 미세입자에서 각각 3.4, 40.0%로 미세입자에서 높은 조성비를 보여 다른 항 로들에 비해 두 성분의 분포가 크게 다른 특성을 나 타내었다. 이러한 이유는 항로 I-3 시에 연무가 발생

하였고, 이러한 기상현상이 서해상 에어로졸 조성에 영향을 미쳤기 때문으로 판단된다. nss-Ca<sup>2+</sup>과 nss-Mg<sup>2+</sup> 을 합한 조성비는 조대입자에서 0.4~16.8%, 미세입자 에서 0.1~4.8%의 범위를 보였고, 특히 항로 II-4에서 nss-Ca<sup>2+</sup> 조성비가 조대입자와 미세입자에서 각각 10.2, 2.5%로 두 입자에서 모두 크게 증가하였다. 이는 항 로 II-4의 5월 4일에 황사가 발생했기 때문이며, 황사 가 서해상 대기 에어로졸 조성에 직접적으로 영향을 미치고 있음을 의미한다. 또한 해염성분은 항로별로 서해상 에어로졸의 조대입자에서 6.3~82.2%, 미세입 자에서 1.2~51.5%의 조성비를 나타내었다. 이는 Cha et al. (2016)의 연구에서 기술한 바와 같이 항로 II-4 시에 다른 항로보다 풍속과 파고가 강해 이에 의한 영향으로 해염성분이 높은 농도를 나타낸 것으로 판 단된다. 이러한 결과들로 보아 서해상 에어로졸 성분 들은 대체적으로 도시지역과 유사하게 인위적 기원의 이차에어로졸 성분들은 미세입자에서 더 높고, 천연 성분들은 오히려 조대입자에서 더 높은 조성을 보이 고 있다. 그러나 연무 발생 시에는 조대입자에서 NO3 의 조성비가 증가하고, 황사 발생 시에는 조대입자와 미세입자에서 모두 nss-Ca<sup>2+</sup>의 조성비가 크게 증가하 는 특징을 보이고 있다.

일반적으로 대기 중의 황사화물과 질소산화물은 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, HNO<sub>3</sub>으로 산화과정을 거쳐 대기 입자상 물 질에 유입된다고 보고되고 있다. 그리고 암모니아나 토양의 염기성 물질[CaCO<sub>3</sub>, CaO, MgCO<sub>3</sub>, Mg(OH)<sub>2</sub>

**Table 3.** Neutralization factors by  $NH_3$  and  $nss-Ca^{2+}$  in Coarse and Fine particles over the Yellow Sea.

Passage	Coarse	(PM <sub>10</sub> )	Fine (PM <sub>2.5</sub> )		
(Site & Meteorology)	$NF_{\rm NH4^+}$	$NF_{Ca2^+}$	$\mathrm{NF}_{\mathrm{NH4^+}}$	$NF_{Ca2^{+}}$	
I-1	0.94	0.08	1.06	0.03	
I-2	0.88	0.07	0.95	0.02	
I-3	0.85	0.06	0.94	0.02	
I-4	-	-	-	-	
II-1	1.03	0.01	1.05	0.00	
II-2	0.94	0.13	0.34	0.03	
II-3	1.01	0.02	0.60	0.00	
II-4	0.53	0.60	0.61	0.16	

등 과 반응하여 입자상 황산염 또는 질산염으로 전환 된다. 따라서 SO4-와 NO3의 농도를 측정하면 대략적 으로 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, HNO<sub>3</sub>에 의한 산성화 기여도를 평가할 수 있다. 또한 NH4, nss-Ca2+ 등과 같은 성분의 농도 를 측정하면 산성물질의 중화정도를 어느 정도 유추 할 수 있다(Kang et al., 2009; Kim et al., 2014; Akpoa et al., 2015). Table 3의 결과와 같이 항로 I-1~ 항로 II-4별로 암모니아와 탄산칼슘에 의한 중화율을 확인해 본 결과, 항로 I-1~항로 I-3에서 암모니아에 의 한 중화율은 PM10과 PM2.5에서 각각 0.85~0.94, 0.94~ 1.06의 범위를 보였고, 탄산칼슘에 의한 중화율은 각 각 0.06~0.08, 0.02~0.03으로 나타났다. 항로 II-1~항로 II-4에서 암모니아에 의한 중화율은 PM10과 PM25에서 각각 0.53~1.03, 0.34~1.05의 범위를 보였고, 탄산칼슘 에 의한 중화율은 각각 0.02~0.60, 0.00~0.16로 나타 났다. 또한 항로 II-4(황사)를 제외한 나머지 항로는 PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub> 모두 탄산칼슘보다 암모니아에 의한 중 화율이 큰 것으로 확인되었으나, 항로 II-4는 PM<sub>10</sub>에 서 탄산칼슘에 의한 중화율이, PM<sub>2.5</sub>에서는 암모니아 에 의한 중화율이 큰 특징을 나타내었다.

Ko et al. (2016)과 Lee et al. (2013)이 제주도 고산 지역에서 기상현상에 따라 암모니아와 탄산칼슘의 중 화율을 측정한 결과를 보면 연무시에 암모니아에 의 한 중화율이 PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>에서 각각 0.85, 0.89, 탄산칼 슘에 의한 중화율이 각각 0.13, 0.01로 나타나고 있다. 그러나 연무시에는 PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub> 모두 탄산칼슘보다 암 모니아에 의한 중화율이 큰 것으로 나타나고 있다. 그 리고 고농도 황사시와 일반 황사시 PM<sub>10</sub>에서 탄산칼 슘에 의한 중화율이 높고, PM<sub>2.5</sub>에서는 암모니아에 의 한 중화율이 큰 것으로 조사되었다. 또한 비현상일에 는 PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub> 모두에서 암모니아에 의한 중화율이 큰 것으로 조사되었다. 반면에 네팔지역의 경우 탄산 칼슘의 중화율이 1.04, 암모니아에 의한 중화율이 0.06 으로 본 연구는 물론 일반적인 경향과는 다른 특징을 보이는 것으로 보고되고 있다(Tripathee et al., 2016).

## 3.3 에어로졸 오염 특성 3.3.1 암모늄염 농도

일반적으로 PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub> 에어로졸에서 NH<sup>+</sup><sub>4</sub>은 미세 입자에서 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 외에도 HNO<sub>3</sub>, HCl 같은 산성 물질 과 NH<sub>3</sub>의 반응으로 생성되며, NH<sub>4</sub>HSO<sub>4</sub>, (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub>, NH<sub>4</sub>Cl 등으로 존재한다. 그리고 응고나 배 기와 같은 물리적 과정을 통해서 부분적으로 조대입 자로 이동된다(Yeatman et al., 2001).

Rogula-Kozłowska et al. (2014)은 이들 성분들이 주 로 (NH4)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>와 NH4NO<sub>3</sub> 염으로 존재한다는 가정 하



Fig. 6. Estimated concentrations of (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> and NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub> in coarse and fine particles.

한국기상학회대기 제27권 1호 (2017)

Site	$NO_{3}^{-}/nss-SO_{4}^{2-}(SO_{4}^{2-})$		Site	$NO_3^-/nss-SO_4^{2-}(SO_4^{2-})$		
(Period)	Coarse (TSP or PM <sub>10</sub> )	Fine (PM <sub>2</sub> s)	(Period)	Coarse (TSP or PM <sub>10</sub> )	Fine (PM <sub>2</sub> s)	
		(1112.3)			(1112.3)	
Yellow Sea I (This study)	0.52	0.64	<sup>w</sup> Shanghai, China (13')	-	1.05	
Yellow Sea II (This study)	0.16	0.38	<sup>b)</sup> Total East China Sea (02')	1.6	0.03	
I-1 (This study)	1.28	0.04	<sup>b)</sup> East China Sea & Pure Marine	1.9	0.04	
			(02')			
I-2 (This study)	7.30	0.18	<sup>b)</sup> East China Sea & Continentally	1.7	0.03	
			affected (02')			
I-3 (This study)	13.72	0.54	<sup>c)</sup> Northern South China Sea &	0.55~0.58	0.46~0.50	
			Cruise I · II (03')			
II-1 (This study)	0.02	0.00	d Southern Taiwan & Inland and	0.52~0.61	0.46~0.60	
			Breeze (06'~07')			
II-2 (This study)	0.01	0.01	d)Southern Taiwan & Inland and	0.60~0.81	0.11~0.31	
•			Offshore Monsoon (06'~07')			
II-3 (This study)	0.18	0.02	<sup>e)</sup> Bohai Sea and Yellow Sea &	0.99~1.05	-	
•			Spring · Autumn (12')			
II-4 (This study)	-	0.92	<sup>f)</sup> Incheon-Qingdao, Shipboard	0.50	0.31	
• • •			(99'~01')			
<sup>a)</sup> Beijing, China (09')	-	0.60	<sup>f)</sup> Incheon-Tianjin, Shipboard (02')	-	0.36	

Table 4. NO<sub>3</sub>/SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> concentration ratios in Coarse and Fine particles at GiSang 1 and other sites.

<sup>a)</sup>Wang et al., 2016; <sup>b)</sup>Nakamura et al., 2005; <sup>c)</sup>Zhang et al., 2007; <sup>d)</sup>Tsai et al., 2011; <sup>e)</sup>Zhang et al., 2015; <sup>f)</sup>Lee et al., 2004.

에 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, nss-SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 세 성분의 농도로 암모늄염 의 양을 환산하였다. 본 연구에서도 이러한 방법으로 이들 암모늄염 농도를 조사하였고, 그 결과를 Fig. 6 에 수록하였다. 항로별로 이온성분의 결합 형태를 확 인하여 (NH4),SO4 농도를 환산한 결과, 서해 I에서는 조대입자와 미세입자에서 각각 3.15, 10.69 μg m<sup>-3</sup>, 서 해 II에서는 각각 2.56, 3.36 µg m<sup>-3</sup> 농도를 나타내었 다. 세부 항로별로는 항로 I-1, 항로 I-2, 항로 I-3에서 (NH4),SO4은 대부분 미세입자에서 높은 농도를 나타 내어 주로 조대입자보다는 미세입자에 분포되는 경향 을 보였다. 반면에 항로 II-1, 항로 II-3의 경우, 미세 입자와 조대입자에서 비슷한 분포를 보이고 항로 II-2에서는 조대입자에서 다소 높은 농도를 보여 타 구 간과는 다른 특징을 나타내었다. 또 항로 II-4에서는 다른 항로들에 비해 전체적으로 낮은 농도를 나타내 었다. 이처럼 암모늄 농도가 조대입자에서 높은 것은 황사 에어로졸의 특징으로 산성인 암모늄이온과 토양 염기성 물질(CaCO3 등)의 중화반응으로 암모니아가 휘발되기 때문인 것으로 판단된다(Koutrakis et al., 1992; Robarge et al., 2002; Ko et al., 2016).

동일한 방법으로 환산한 NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub> 농도는 서해 I의 조대입자와 미세입자에서 각각 0.67, 2.28 μg m<sup>-3</sup>, 항 로 II에서는 각각 2.64, 0.27 μg m<sup>-3</sup>로 서해 I에서는 미세입자, 서해 II에서는 조대입자에 많이 분포되는 경향을 보였다. 특히 항로 II-2, 항로 II-3에서는 주로 조대입자, 나머지는 항로에서는 미세입자에서 높은 농 도를 나타내었다. 특히 항로 I-3에서는 NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub>이 미 세입자와 조대입자에 동시에 분포되는 특징을 보였고, 이러한 원인은 이 시기에 나타난 연무현상이 에어로 졸 조성에 영향을 미쳤기 때문인 것으로 추정된다.

이러한 결과를 종합해 보면, 서해상 에어로졸에서 암모늄은 대부분 (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 형태를 띠며, NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub>보 다 높은 농도로 미세입자에 존재한다. 하지만 항로 II-2에서는 (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>이 조대입자에 상대적으로 많이 분 포되는 특징을 보였다. 이러한 원인은 항로 II-2의 조 대입자에서 NH<sup>4</sup><sub>4</sub> 농도가 1.8배 더 높고, 동풍(90~100°) 으로 풍속도 높기 때문에 항로 II-1, 항로 II-3과는 다 른 결과를 나타낸 것으로 추정된다.

#### 3.3.2 이차에어로졸 조성 특성

NO<sub>3</sub>와 SO<sub>3</sub><sup>2</sup>의 전구물질인 SO<sub>2</sub>와 NO<sub>x</sub>은 서로 다른 배출원 특성을 나타내기 때문에 NO<sub>3</sub>/SO<sub>4</sub><sup>2</sup>의 비로 이 들의 상대적 기여도를 비교할 수 있다(Park and Lim, 2006). 일반적으로 황산화물은 주로 석탄에 의한 고정 오염원, 질소산화물은 자동차 등의 이동오염원의 발 생기원을 나타낸다(Yao et al., 2002; Shen et al., 2009). 따라서 NO<sub>3</sub>/SO<sub>4</sub><sup>2</sup> 비가 작을수록 고정오염원 영향이 큼 을 의미한다(Cao et al., 2009). NO<sub>3</sub>/nss-SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 농도비 는 서해 I의 경우 조대입자 0.52, 미세입자 0.64, 서해 II의 조대입자는 0.16, 미세입자에서 0.38의 범위를 나 타내었다(Table 4). 이는 Fig. 2의 그림에서 보듯이 항 로 I-1~항로 I-3에서는 주로 남동풍 및 동풍계열 풍향

에 기인하여 기류가 한반도에서 서해상으로 유입되었 고, 자동차 등의 이동오염원 영향이 크게 나타난 것 으로 보인다. 그러나 항로 II-3과 항로 II-4에서는 북 풍과 북서계열의 풍향으로 중국대륙에서 유입된 기류 에 의해 고정오염원의 영향을 더 많이 받은 것으로 추정된다. 이를 타 해안지역과 비교해 보면, 2003년 중국에서 수행한 결과에서 남서중국해안 항로의 NO<sub>1</sub>/ SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 평균농도비가 TSP에서 0.55~0.58, PM<sub>25</sub>에서 0.46~0.50의 범위를 보이고 있다(Zhang et al., 2007). 또 동중국해안 항로의 NO3/SO4- 평균농도비는 미세 입자에서 0.03~0.04, 조대입자에서 1.6~1.9의 범위를 나타내었다(Nakamura et al., 2005). 발해만과 서해상 항로의 NO<sub>3</sub>/SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 평균농도비는 봄과 가을철 TSP에 서 각각 0.99, 1.05이며(Zhang et al., 2015), 인천-청도 지역의 항로에서 PM10, PM25가 각각 0.50, 0.31, 인천-천진에서 PM2.5가 0.36으로 나타나고 있다(Lee et al., 2004). 이처럼 중국 베이징, 상하이 지역과 동중국해 안, 발해만과 중국 서해안지역에서 대기 에어로졸은 대부분이 조대입자에서 상대적으로 이동오염원의 영 향이 큰 경향을 보이고 있다. 반면에 이외의 항로에 서는 NO<sub>3</sub>/nss-SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 농도비가 0.5보다 낮아 이동오염 원보다는 고정오염원의 영향이 큰 것으로 나타나고 있다.

본 연구에서 항로별로 NO<sub>3</sub>/nss-SO<sub>4</sub><sup>-</sup> 농도비는 조대 입자의 경우 0.01~13.7, 미세입자는 0.00~0.92의 범위 를 나타내었다. 특히 항로 I-1~항로 I-3의 조대입자에 서는 이동오염원의 영향이 크고, 미세입자에서는 고 정오염원이 크게 영향을 미친 것으로 판단된다. 반면 에 서해 II에서는 항로 II-4를 제외하고는 모든 구간 에서 조대입자와 미세입자 모두 고정 오염원의 영향 을 많이 받은 것으로 추정된다. 하지만 항로 II-4 구 간에서는 미세입자의 NO<sub>3</sub>/nss-SO<sub>4</sub><sup>-</sup> 농도비가 0.92로 이동 오염원의 영향이 상대적으로 크게 영향을 미친 것으로 판단된다.

## 4. 결론 및 요약

기상청 기상 1호 선박을 이용하여 서해상에서 2차 에 걸쳐 PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub> 시료를 채취, 분석하였고, 이로 부터 이차에어로졸 성분의 농도와 오염특성을 조사한 결과를 요약하면 다음과 같다.

서해상 에어로졸의 이온 성분은 nss-SO<sup>2-</sup>, NH<sup>4</sup>이 주로 미세입자에 분포하고, nss-Ca<sup>2+</sup>은 상대적으로 조 대입자에 더 많이 분포하는 경향을 보였다. NO<sub>3</sub>은 서 해 I에서는 대체적으로 조대입자에서 농도가 더 높으 나, 서해 II는 오히려 미세입자에서 농도가 높은 특징 을 보였다. 서해상 에어로졸의 nss-SO<sup>2-</sup>, NO<sup>3</sup>, nss-Ca<sup>2+</sup> 농도는 대체적으로 발해만, 인천-청도, 인천-천진 보다 더 낮은 경향을 보였다.

한국기상학회대기 제27권 1호 (2017)

서해상 에어로졸에서 이차에어로졸 성분의 농도는 대체적으로 미세입자에서 더 높고, 자연기원 성분들 은 조대입자에서 더 높은 경향을 보였다. 그러나 연 무 발생 시에는 조대입자에서 NO<sub>3</sub> 조성이 증가하고, 황사 시에는 조대입자와 미세입자에서 모두 nss-Ca<sup>2+</sup> 조성이 크게 증가하는 특징을 나타내었다. 또 조대입 자와 미세입자에서의 농도비를 비교한 결과, NH<sup>4</sup><sub>4</sub>, nss-SO<sup>2+</sup><sub>4</sub>, NO<sub>3</sub> 등은 주로 미세입자에 많이 분포하고, nss-Ca<sup>2+</sup>은 조대입자에 분포하는 경향을 보였다.

이차에어로졸 성분은 대체적으로 (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub> 형태를 띠며, 대부분 (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 형태로 미세입자에 많 이 분포하였다. NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub>은 (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>에 비해 낮은 함 량을 보이고, 서해 I 항로에서는 미세입자, 서해 II 항 로에서는 조대입자에 더 많이 분포되는 경향을 보였다. 서해상 에어로졸의 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>/nss-SO<sub>4</sub><sup>--</sup> 농도비는 중국의 주요 도시나 해안지역과 비슷한 수준을 나타내었고, 대체적으로 고정 오염원의 영향이 크지만 풍향이나 기상현상에 따라 조대입자와 미세입자에서 이동오염 원의 영향이 다르게 나타나는 특징을 보였다.

## 감사의 글

이 연구는 기상청 국립기상과학원 2017년 주요과제 인 '기상업무지원기술개발연구(NIMS-2016-3100)' 사 업에 의해 수행되었습니다. 그리고 선박관측을 위해 많은 노력을 해주신 국립기상과학원 지구환경시스템 연구과 기상 1호 기상관측선 직원 분들과 현장에 직 접 참여한 기상청 박진우연구원, 실험을 함께한 정지 영연구원께 진심으로 감사 드립니다.

## REFERENCES

- Akpoa, A. B., C. Galy-Lacaux, D. Laouali, C. Delon, C. Liousse, M. Adon, E. Gardrat, A. Mariscal, and C. Darakpa, 2015: Precipitation chemistry and wet deposition in a remote wet savanna site in West Africa: Djougou (Benin). *Atmos. Environ.*, **115**, 110-123, doi:10.1016/j.atmosenv.2015.04.064.
- Cao, J. J., Z. X. Shen, J. C. Chow, G. W. Qi, and J. G. Watson, 2009: Seasonal variations and sources of mass and chemical composition for PM<sub>10</sub> aerosol in Hangzhou, China. *Particuology*, 7, 161-168, doi:10.1016/ j.partic.2009.01.009.
- Cha, J. W., H.-J. Ko, B. Shin, H.-J. Lee, J. E. Kim, B. Ahn, and S.-B. Ryoo, 2016: Characteristics of aerosol mass concentration and chemical composition of the Yellow and South Sea around the Korean Peninsula using a Gisang 1 Research Vessel. *Atmosphere*, 26, 1-16, doi:10.14191/Atmos.2016.26.3.357 (in Korean

with English abstract).

- Cheung, K., N. Dahar, W. Kam, M. M. Shafer, Z. Ning, J. J. Schauer, and C. Sioutas, 2011: Spatial and temporal variation of chemical composition and mass closure of ambient coarse particle matter (PM<sub>10-2.5</sub>) in the Los Angeles area. *Atmos. Environ.*, **45**, 2651-2662, doi:10.1016/j.atmosenv.2011.02.066.
- Han, J. S., Y. M. Kim, J. Y. Ahn, B. J. Kong, J. S. Choi, S. U. Lee, and S. J. Lee, 2006: Spatial distribution and variation of long-range transboundary air pollutants flux during 1997~2004. *J. Korean Soc. Atmos. Environ.*, 22, 99-106 (in Korean with English abstract).
- Huebert, B. J., T. Bates, P. B. Russell, G. Shi, Y. J. Kim, K. Kawamura, G. Carmichael, and T. Nakajima, 2003: An overview of ACE-Asia: Strategies for quantifying the relationships between Asian aerosols and their climatic impacts. *J. Geophys. Res.*, **108**, 8633, doi:10.1029/2003JD003550.
- Kang, C. H., W. H. Kim, H. J. Ko, and S. B. Hong, 2009: Asian Dust effect on Total Suspended Particulate (TSP) compositions at Gosan in Jeju Island, Korea. *Atmos. Res.*, 94, 345-355, doi:10.1016/j.atmosres.2009.06.013.
- Kim, K.-J., S.-H. Lee, D.-R. Hyeon, H.-J. Ko, W.-H. Kim, and C.-H. Kang, 2014: Composition comparison of PM<sub>10</sub> and PM<sub>2.5</sub> fine particulate matter for Asian Dust and Haze events of 2010-2011 at Gosan site in Jeju Island. *Anal. Sci. Tech.*, **27**, 1-10, doi:10.5806/ AST.2014.27.1.1 (in Korean with English abstract).
- Ko, H.-J., J.-M. Song, J. W. Cha, J. Kim, S.-B. Ryoo, and C.-H. Kang, 2016: Chemical composition characteristics of atmospheric aerosols in relation to Haze, Asian Dust and mixed Haze-Asian Dust Episodes at Gosan Site in 2013. *J. Korean Soc. Atmos. Environ.*, **32**, 289-304, doi:10.5572/KOSAE.2016.32.3.289 (in Korean with English abstract).
- Koutrakis, P., K. M. Thompson, J. M. Wolfson, J. D. Spengler, G. J. Keeler, and J. L. Slater, 1992: Determination of aerosol strong acidity losses due to interactions of collected particles: Results from laboratory and field studies. *Atmos. Environ.*, 26, 987-995, doi:10.1016/ 0960-1686(92)90030-O.
- Lee, D. E., W. H. Kim, H. J. Ko, Y. S. Oh, and C. H. Kang, 2013: Chemical composition characteristics of sizefractionated particles during Heavy Asian Dust event in Spring, 2010. *J. Korean Soc. Atmos. Environ.*, 29, 325-337, doi:10.5572/KOSAE.2013.29.3.325 (in Korean with English abstract).
- Lee, D. H., K. H. Lee, J. E. Kim, and Y. J. Kim, 2006: Characteristics of atmospheric aerosol optical thick-

ness over the Northeast Asia using TERRA/MODIS data during the year 2000-2005. *Atmosphere*, **16**, 85-96 (in Korean with English abstract).

- Lee, J. H., Y. P. Kim, K. C. Moon, H. K. Kim, and C. B. Lee, 2001: Fine particle measurements at two background site in Korea between 1996 and 1997. *Atmos. Environ.*, **35**, 635-643, doi:10.1016/S1352-2310(00)00378-2.
- Lee, K. H., and Y. J. Kim, 2004: Russian forest fire smoke aerosol monitoring using satellite and AERONET data. J. Korean Soc. Atmos. Environ., 20, 437-450 (in Korean with English abstract).
- Lee, S.-B., G.-N. Bea, H.-C. Jin, Y. S. Ghim, K.-C. Moon, and S. G. Shim, 2004: Shipboard measurements of air pollutants across the Yellow Sea. *J. Korean Soc. Atmos. Environ.*, **20**, 33-46 (in Korean with English abstract).
- Nakamura, T., K. Matsumoto, and M. Uematsu, 2005: Chemical characteristics of aerosols transported from Asia to the East China Sea: An evaluation of anthropogenic combined nitrogen deposition in autumn. *Atmos. Environ.*, **39**, 1749-1758, doi:10.1016/j.atmosenv. 2004.11.037.
- Noh, Y. M., Y. J. Kim, and D. Müller, 2007: Retrieval of aerosol microphysical parameter by inversion algorithm using multi-wavelength Raman lidar data. *J. Korean Soc. Atmos. Environ.*, 23, 97-109, doi:10.5572/KOSAE. 2007.23.1.097 (in Korean with English abstract).
- Park, G.-H., J. Kwak, J.-W. Jeong, and E.-C. Yoo, 2014: The research on the estimation of source apportionment of PM<sub>2.5</sub> in Busan. *Annu. Rep. Busan Metropol. city Inst. Health Environ.*, 24, 174-184 (in Korean with English abstract).
- Park, J.-Y., and H.-J. Lim, 2006: Characteristics of water soluble ions in fine particles during the winter and spring in Daegu. J. Korean Soc. Atmos. Environ., 22, 627-641 (in Korean with English abstract).
- Park, M., S. S. Yum, N. Kim, J. W. Cha, and S. B. Ryoo, 2016: Characteristics of aerosol and cloud condensation nuclei concentrations measured over the Yellow Sea on a meteorological research vessel, GISANG 1. *Atmosphere*, 26, 243-256, doi:10.14191/Atmos.2016. 26.2.243 (in Korean with English abstract).
- Park, S. S., S. A. Jung, B. J. Gong, S. Y. Cho, and S. J. Lee, 2013: Characteristics of PM<sub>2.5</sub> haze episodes revealed by highly time-resolved measurements at an air pollution monitoring Supersite in Korea. *Aerosol Air Qual. Res.*, **13**, 957-976, doi:10.4209/aaqr.2012. 07.0184.

- Park, S.-Y., Y.-J. Kim, and C.-H. Kim, 2012: Characteristics of long-range transport of air pollutants due to different transport patterns over Northeast Asia. J. Korean Soc. Atmos. Environ., 28, 142-158, doi:10.5572/ KOSAE.2012.28.2.142 (in Korean with English abstract).
- Ramanathan, V., and Y. Feng, 2009: Air pollution, greenhouse gases and climate change: Global and regional perspectives. *Atmos. Environ.*, 43, 37-50, doi:10.1016/ j.atmosenv.2008.09.063.
- Robarge, W. P., J. T. Walker, R. B. McCulloch, and G. Murray, 2002: Atmospheric concentrations of ammonia and ammonium at an agricultural site in the southeast United States. *Atmos. Environ.*, **36**, 1661-1674, doi:10.1016/S1352-2310(02)00171-1.
- Rogula-Kozłowska, W., K. Klejnowski, P. Rogula-Kopiec, L. Ośródka, E. Krajny, B. Błaszczak, and B. Mathews, 2014: Spatial and seasonal variability of the mass concentration and chemical composition of PM<sub>2.5</sub> in Poland. *Air Qual. Atmos. Health*, 7, 41-58, doi:10.1007/s11869-013-0222-y.
- Sciare, J., K. Oikonomou, H. Cachier, N. Mihalopoulos, M. O. Andreae, W. Maenhaut, and R. Sarda-Estève, 2005: Aerosol mass closure and reconstruction of the light scattering coefficient over the Eastern Mediterranean Sea during the MINOS campaign. *Atmos. Chem. Phys.*, **5**, 2253-2265, doi:10.5194/acp-5-2253-2005.
- Shen, Z., and Coauthors, 2009: Ionic composition of TSP and PM<sub>2.5</sub> during dust storms and air pollution episodes at Xi'an, China. *Atmos. Environ.*, **43**, 2911-2918, doi:10.1016/j.atmosenv.2009.03.005.
- Song, J.-M., J.-O. Bu, S.-H. Yang, J.-Y. Lee, W.-H. Kim, and C.-H. Kang, 2016: Influences of Asian Dust, Haze, and Mist events on chemical compositions of fine particulate matters at Gosan site, Jeju Island in 2014. *J. Korean Soc. Atmos. Environ.*, **32**, 67-81, doi:10.5572/KOSAE.2016.32.1.067 (in Korean with English abstract).
- Sun, Y. L., Q. Jiang, Z. F. Wang, P. Q. Fu, J. Li, T. Yang, and Y. Yin, 2014: Investigation of the sources and evolution processes of severe haze pollution in Beijing in January 2013. J. Geophys. Res., 119, 4380-4398, doi:10.1002/2014JD021641.
- Terzi, E., G. Argyropoulos, A. Bougatioti, N. Milhalopoulos, K. Nikolaou, and C. Samara, 2010: Chemical

composition and mass closure of ambient PM<sub>10</sub> at urban sites. *Atmos. Environ.*, **44**, 2231-2239, doi:10.1016/j.atmosenv.2010.02.019.

- Tripathee, L., S. Kang, D. Rupakheti, Q. Zhang, J. Huang, and M. Sillanpää, 2016: Water-soluble ionic composition of Aerosols at Urban Location in the Foothills of Himalaya. Pokhara Valley, Nepal. *Atmosphere*, 7, 102, doi:10.3390/atmos7080102.
- Tsai, H.-H., C.-S. Yuan, C.-H. Hung, and C. Lin, 2011: Physicochemical properties of PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>2.5-10</sub> at Inland and offshore sites over Southeastern Coastal Region of Taiwan Strait. *Aerosol Air Qual. Res.*, **11**, 664-678, doi:10.4209/aaqr.2010.12.0113.
- Wang, Z., and Coauthors, 2016: Analysis of chemical characteristics of PM<sub>2.5</sub> in Beijing over a 1-year period. *J. Atmos. Chem.*, **73**, 407-425, doi:10.1007/s10874-016-9334-8.
- Won, S. R., Y. J. Choi, A. R. Kim, S. H. Choi, and Y. S. Ghim, 2010: Ion concentrations of particulate matter in Yongin in spring and fall. *J. Korean Soc. Atmos. Environ.*, 26, 265-275, doi:10.5572/KOSAE.2010.26. 3.265 (in Korean with English abstract).
- Yao, X., C. K. Chan, M. Fang, S. Cadle, T. Chan, P. Mulawa, K. He, and B. Ye, 2002: The water-soluble ionic composition of PM<sub>2.5</sub> in Shanghai and Beijing, China. *Atmos. Environ.*, **36**, 4223-4234, doi:10.1016/S1352-2310(02)00342-4.
- Yeatman, S. G., L. J. Spokes, and T. D. Jickells, 2001: Comparisons of coarse-mode aerosol nitrate and ammonium at two polluted coastal sites. *Atmos. Environ.*, 35, 1321-1335, doi:10.1016/S1352-2310(00)00452-0.
- Yu, G.-H., S.-Y. Cho, M.-S. Bae, K.-H. Lee, and S.-S. Park, 2015: Investigation of PM<sub>2.5</sub> pollution episodes in Gwangju. *J. Korean Soc. Atmos. Environ.*, **31**, 269-286, doi:10.5572/KOSAE.2015.31.3.269 (in Korean with English abstract).
- Zhang, X., G. Zhuang, J. Guo, K. Yin, and P. Zhang, 2007: Characterization of aerosol over the Northern South China Sea during two cruises in 2003. *Atmos. Environ.*, 41, 7821-7836, doi:10.1016/j.atmosenv.2007.06.031.
- Zhang, Y., H. H. Zhang, G. P. Yang, and Q. L. Liu, 2015: Chemical characteristics and source analysis of aerosol composition over the Bohai Sea and the Yellow Sea in Spring and Autumn. J. Atmos. Sci., 72, 3563-3573, doi:10.1175/JAS-D-14-0372.1.

40

한국기상학회대기 제27권 1호 (2017)