

ORIGINAL ARTICLE

## 제주지역 도로변 대기 중 에어로졸의 입경별 조성특성

허철구 · 김수미<sup>1)</sup> · 이기호\*

제주대학교 환경공학과, <sup>1)</sup>제주특별자치도 보건환경연구원 대기환경과

### Composition of Size-Segregated Atmospheric Aerosol Collected at an Urban Roadside Environment in Jeju Area

Chul-Goo Hu, Su-Mi Kim<sup>1)</sup>, Ki-Ho Lee\*

Department of Environmental Engineering, Jeju National University, Jeju 63243, Korea

<sup>1)</sup>Air Environmental Division, Jeju Special Self-Governing Province Research Institute of Health & Environment, Jeju 63142, Korea

#### Abstract

To determine the size distributions of water-soluble inorganic ionic species (WSIS) in roadside aerosols, sampling experiments were carried out in the urban roadside area of Jeju City on August 2018 and January 2019 by using the eight-stage cascade impactor sampler. The mass of roadside aerosols were partitioned at 57% in fine fraction, 36-37% in coarse fraction, and 6-7% in giant fraction, regardless of summer and winter. The mass concentrations of WSIS except for Na<sup>+</sup> and SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> in roadside aerosols were higher in winter than in summer. The size distributions of Na<sup>+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, Ca<sup>2+</sup> and Cl<sup>-</sup> were characterized by bimodal types with coarse particle mode peaking around 3.3-4.7 μm and 5.8-9.0 μm. The size distributions of NO<sub>3</sub><sup>-</sup> and K<sup>+</sup> shifted from a single fine mode peaking around 0.7-1.1 μm in winter to bimodal and/or trimodal types with peaks around coarse mode in summer. SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> and NH<sub>4</sub><sup>+</sup> showed a single fine mode peaking around 0.7-1.1 μm. The MMAD of roadside aerosols was lower than that of Na<sup>+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, Ca<sup>2+</sup> and Cl<sup>-</sup>. Based on the marine enrichment factors and the ratio values of WSIS and the corresponding value for sea water, the composition of roadside aerosols in Jeju City may be practically affected by terrestrial sources rather than marine source.

**Key words** : Roadside aerosol, Size distribution, Water-soluble ions, Enrichment factor

#### 1. 서론

전 지구적으로 보면, 대기 중 입자상물질의 농도에 대한 노출로 인해 연간 500,000명이 사망한다고 했다 (Bathmanabhan and Madanayak, 2010). 그리고 전 세계적으로 도시지역에 살고 있는 600 백만 명 이상의 사

람들이 교통으로 인해 유발되는 대기오염물질에 위험한 수준으로 노출되었다고 한다(Cacciola et al., 2002; Han and Naehner, 2006), 그런데 UN에 의하면 2018년에 전 세계 인구의 55%가 도시지역에 살고 있으며, 2050년에는 세계 인구의 68%까지 증가할 것으로 추정하고 있다 (UN, 2018).

Received 19 November, 2019; Revised 11 December, 2019;

Accepted 17 December, 2019

\*Corresponding author: Ki-Ho Lee, Department of Environmental Engineering, Jeju National University, Jeju 63243, Korea  
Phone: +82-64-754-3445  
E-mail : leekiho@jejunu.ac.kr

The Korean Environmental Sciences Society. All rights reserved.  
© This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

사회가 산업화되면서 도시화의 확대와 도로교통체계의 확대가 꾸준히 요구되어 왔다. 따라서 도시지역에서 도로변 에어로졸의 생성은 산업화의 결과라고 할 수 있다. 도시지역에 있어서 도로교통은 입자상물질의 직접 배출에 있어서 하나의 중요한 발생원으로 밝혀져 있다 (Pakkanen et al., 2001; Thorpe and Harrison, 2008; Pey et al., 2009; Hu et al., 2017). 도시 지역에서 배출되는 전체 입자상물질의 50% 이상이 교통에서 유발된다고 알려져 있으며(Wróbel et al., 2000), 지역에 배출된 전체 입자상물질에서 도로교통에 의한 배출이 차지하는 비중을 보면, 런던(영국)에서는 80% 이상이고, 아테네(그리스)에서는 66.5%였다고 한다(DoT, 2002; Economopoulou and Economopoulos, 2002). 또한 전 세계적으로 도시 대기 중  $PM_{2.5}$ 의 25%는 교통, 15%는 산업 활동, 20%는 가정 연료 연소, 22%는 인간에 기인한 불특정 배출원 그리고 18%는 자연적인 먼지와 염(salts)에 의한 것이라고 한다(Karagulian et al., 2015). 결국 도시의 대기 중 입자상물질에 대해서 교통요인이 중요한 인자라는 것이다. 그리고 교통수단의 영향이 직접적으로 나타나는 도로변 환경에서의 오염수준은 다른 도시 배경 지역에서 보다 더 심각하다고 알려져 있으며(Shields, et al., 2007; Zavala, et al., 2009), 농도 수준 뿐 아니라 입자의 화학적 조성, 입경분포 그리고 오염 특성의 시공간적 변동 등에 있어서도 차이가 발생한다고 알려져 있다(Zhang et al., 2008; Duan et al., 2009; Hu et al., 2017). 따라서 도시에서의 대기오염 그리고 그로 인해 초래되는 질병 부담을 저감하기 위해서는, 교통, 산업 활동, 그리고 생물 연소 등에서 실질적으로 입자상물질을 감소시키기 위한 방안을 조속히 찾아야 한다(Karagulian et al., 2015).

국내에서는 그동안 도로변과 주거지역 대기의 미세먼지 입경별 농도분포를 비교하거나(Cho et al., 2019), 도로중앙에서의 미세먼지가 도로변 대기에 미치는 영향을 평가하였으며(Ha, 2011), 또한 도로에서의 먼지 재비산 정도를 파악하고자 한 연구 등이 다수 진행된 바 있다(Yoo et al., 2009). 그렇지만 여태까지 제주시에서는 각종 발생원별 에어로졸의 배출특성에 관한 측정·조사가 전무한 형편이다. 제주시 도심지역의 대기 중 에어로졸에 대한 연구 성과가 최근에야 발표되기 시작했지만(Lee et al., 2017; Hu and Lee, 2018; Kim et al., 2018; Lee and Hu, 2018), 여전히 에어로졸의 발생에 큰 비중을 차

지하는 것으로 알려진 도로교통에 의해 발생하는 에어로졸의 특성에 관한 조사도 없는 실정이다. 이처럼 제주시에서는 에어로졸과 연관된 배출원과 그의 배출특성에 대한 실태가 제대로 파악되지 못하고 있다. 그로 인해 제주시에 대한 각종 에어로졸 발생원을 추정하고 그들의 기여도를 산정하기 위한 각종 수단들(수용모델 등)을 활용함에 있어서 상당한 제약이 따르고 있다.

최근 정부 발표에 따르면(MOLIT and LH, 2019), 제주도민 10명 중 9명이 제주도 전체 면적의 22.9%에 불과한 도시지역에 살고 있는 것으로 나타났다. 이처럼 도시지역에 거주하는 인구의 비율이 증가함에 따라서 에어로졸로 인한 도시 대기질 악화에 대한 관심이 증대하는 것은 당연한 결과일 것이다. 그러므로 제주시에서 각종 발생원들이 영향을 미치고 있는 곳을 중심으로 에어로졸의 농도와 조성특성을 파악하는 시도가 필요하다.

본 연구에서는 우선 최근 도시화가 더욱 심화되고 있는 제주시에서 교통량이 많은 도로변에서 에어로졸을 입경별로 포집하여 분석함으로써 도로변 에어로졸의 물리화학적 특징(먼지의 농도와 조성 그리고 입경분포 등)을 파악하고자 했다.

## 2. 연구 방법

### 2.1. 시료의 채취

본 연구를 수행하기 위해 선정한 도로변 지역은 제주시에서도 교통왕래가 많은 것으로 판단되는 제주특별자치도 청사 인근의 원형 로터리이며(Fig. 1), 가능한 차량의

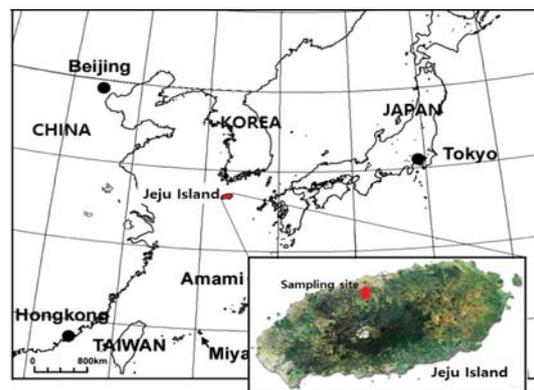


Fig. 1. The sampling site of roadside particulate matter in this study.

**Table 1.** Analytical conditions of ion chromatography used in this study

	Anion	Cation
Eluent	Dionex EGC III KOH Eluent Generator Cartridge	20mM Methanesulfonic Acid
Flow rate	1.0 mL/min	1.0 mL/min
Injection volume	300 $\mu$ L	100 $\mu$ L
Column	IonPac AS19 (4 $\times$ 250mm)	IonPac CS16 (5 $\times$ 250mm)
Suppressor	ASRS 300 4mm	CERS 500 4mm
Detector	Conductivity Detector	Conductivity Detector

왕래에 의한 영향만을 집중적으로 파악할 수 있도록 원형 로터리 안쪽에 시료채취장치를 설치했다.

이 측정지점은 제주시에서 대표적인 도심지역 중 한 곳이라고 할 수 있으며, 시료채취지점의 주변에는 제주 특별자치도 도청청사, 도의회, 교육청, 경찰청 등 각종 관공서, 각종 사무용 건물들, 그리고 소규모 공동주택 등이 산재하고 있다.

본 연구에서는 도로변 에어로졸을 입경별로 포집하기 위해서 8단 입경분리장치 (8-stage cascade impactor, Series 20-800, Anderson)를 사용하였으며, 포집기간 동안의 평균 공기유량은 공기역학적 입경범위를 유지하기 위해서 MFC (Digital Mass Flow Controllers, CMQ-V, Azbil Co., Japan)를 설치하여 28.3 L/min로 유지되게 하였다. 그리고 강우, 바람 및 주변 환경으로부터의 직접적인 영향을 배제하기 위하여 알루미늄 재질로 제작된 shelter내에 cascade impactor를 고정시켰다.

시료의 채취는 2018년 8월과 2019년 1월에 실시하였으며, 시료채취장치 2대를 동시에 가동하면서 에어로졸 시료를 채취하였다. 시료채취 시 공기흡입은 중단없이 3일(72시간) 동안 이루어졌으며, 72시간 후 여지를 교환하였다. 이러한 시료채취과정을 여름철에 세 번, 겨울철에는 두 번을 실시하였다. 본 조사에서 사용한 입경분리 장치의 제1단에서는 9  $\mu$ m 이상의 입자가 포집되며, 이어지는 순서대로 5.8~9.0  $\mu$ m, 4.7~5.8  $\mu$ m, 3.3~4.7  $\mu$ m, 2.1~3.3  $\mu$ m, 1.1~2.1  $\mu$ m, 0.7~1.1  $\mu$ m, 0.4~0.7  $\mu$ m 입자가 포집된다. 그리고 마지막의 backup 필터에는 0.4  $\mu$ m 이하의 입자들이 포집된다. 그리고 시료 채취 시 각 분리단에서 입자가 튕겨지는 현상을 최소화하기 위해 각 충돌판에는 여지(직경 80 mm, pore size 0.43  $\mu$ m, PTFE, Adventec)를 사용하였다. 본 조사에서는 마지막 단 (backup)에서도 동일한 여지를 사용하였다.

본 연구에서 사용한 cascade impactor의 각 분리단의 유효 전단 입경(Effective Cut-off Diameter, ECD)으로 인해 미세입자와 조대입자의 경계를 2.5  $\mu$ m 대신 2.1  $\mu$ m로, 조대입자의 상한 경계를 10  $\mu$ m 대신에 9.0  $\mu$ m로 하였다. 따라서 미세입자는 PM<sub>2.1</sub>, 조대입자는 PM<sub>2.1-9</sub>를 의미한다. 그리고 impactor의 각 분리단에 포집된 에어로졸을 모두 합한 전체 에어로졸을 PM<sub>T</sub>라고 표현했다.

## 2.2. 시료의 분석

항온항습(상대습도 35%, 온도 21.5 $^{\circ}$ C) 상태에서 3일간 보관하여 항량한 후 감도가 0.01 mg인 전자저울 (Mettler Toledo, XS205)로 무게를 측정하였다. 시료가 포집된 여지들은 포집 전후의 무게 차이를 이용하여 포집면적의 질량으로 하였다.

무게 측정이 끝난 여지는 화학적 분석을 위한 전처리기가 이루어지기 전까지 petri dish에 넣어 파라필름으로 밀봉한 후 -20 $^{\circ}$ C로 냉동 보관하였다. 입자가 포집된 여지는 전처리하기 전에 시료 성분의 손실이 없도록 주의하면서 세라믹 가위로써 2등분으로 자른 후 한쪽 부분을 추출용기에 넣고 20 mL의 초순수를 가하여 60분간 초음파 추출을 하였다. 이 추출용액을 syringe filter (PVDF, 0.45  $\mu$ m)로 여과한 후 ion chromatography (ICS-3000, Dionex)를 이용하여 Na<sup>+</sup>, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, K<sup>+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, Ca<sup>2+</sup>, Cl<sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 성분을 분석하였으며, 사용된 분석기기의 분석조건은 Table 1과 같다.

## 3. 결과 및 고찰

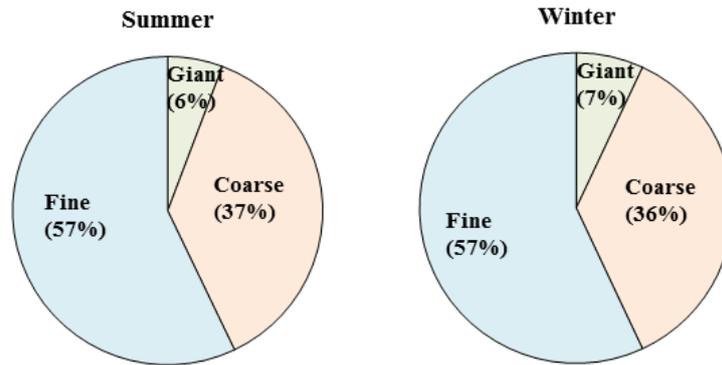
### 3.1. 도로변 에어로졸의 질량농도

Table 2에는 여름철과 겨울철에 측정된 도로변 에어로졸의 질량농도와 질량농도의 비를 입자크기별로 나타

**Table 2.** Mass concentration and the ratio of a given size fraction in roadside aerosol at Jeju City

Item		Summer	Winter
Mass ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	$\text{PM}_T^*$	29.3 $\pm$ 5.9	28.9 $\pm$ 3.7
	$\text{PM}_9$	27.6 $\pm$ 5.6	26.9 $\pm$ 3.1
	$\text{PM}_{2.1-9}$	10.9 $\pm$ 4.1	10.4 $\pm$ 3.5
	$\text{PM}_{2.1}$	16.7 $\pm$ 3.7	16.5 $\pm$ 1.1
	$\text{PM}_{1.1}$	11.5 $\pm$ 3.2	12.2 $\pm$ 1.6
Ratio (-)	$\text{PM}_9/\text{PM}_T$	0.94	0.93
	$\text{PM}_{2.1-9}/\text{PM}_T$	0.37	0.36
	$\text{PM}_{2.1}/\text{PM}_T$	0.57	0.57
	$\text{PM}_{1.1}/\text{PM}_T$	0.39	0.42
	$\text{PM}_{2.1}/\text{PM}_9$	0.61	0.61
	$\text{PM}_{1.1}/\text{PM}_9$	0.42	0.45

\*:  $\text{PM}_T$  : Total roadside aerosol (the sum of all stages)

**Fig. 2.** Mass percentage of roadside aerosol in the three size fraction in Jeju City.

났다. 여름철과 겨울철을 나누어 보면,  $\text{PM}_T$ 의 평균 질량 농도는 각각 29.3 $\pm$ 5.9, 28.9 $\pm$ 3.8  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었고,  $\text{PM}_9$ 는 각각 27.6 $\pm$ 5.6, 26.9 $\pm$ 3.0  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ,  $\text{PM}_{2.1}$ 은 각각 16.7 $\pm$ 3.7, 16.5 $\pm$ 1.1  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ,  $\text{PM}_{1.1}$ 은 각각 11.5 $\pm$ 3.3, 12.2 $\pm$ 1.6  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 나타났다. 두 계절을 비교하면 입자크기별 농도 수준은 아주 비슷한 수준임을 알 수 있다. 또한 입자크기별 농도비를 보면 여름철과 겨울철의  $\text{PM}_9/\text{PM}_T$ 는 각각 0.94, 0.93이고,  $\text{PM}_{2.1-9}/\text{PM}_T$ 는 각각 0.37, 0.36이었으며  $\text{PM}_{2.1}/\text{PM}_T$ 도 각각 0.57로 동일한 수준이었다. 그리고  $\text{PM}_{2.1}/\text{PM}_9$  비는 여름철과 겨울철에 각각 0.61로 동일한 수준이었으며,  $\text{PM}_{1.1}/\text{PM}_9$ 는 각각 0.42, 0.45로 비슷한 수준을 나타냈다. 따라서 제주도 도심지역의 도로변 에어로졸에 있어서 입자크기별 농도 비는 두 계절(여

름철과 겨울철)에서 상당히 비슷한 수준을 나타냈다. 도로변 에어로졸을 미세입자영역(2.1  $\mu\text{m}$  이하의 입자), 조대입자영역(2.1-9.0  $\mu\text{m}$  범위의 입자) 그리고 거대입자영역(9.0  $\mu\text{m}$  이상의 입자)으로 구분하여 여름철과 겨울철의 농도비율을 비교해 보면(Fig. 2), 제주도 도심지역 도로변 에어로졸에는 미세입자 57%, 조대입자 36~37%, 그리고 거대입자 6~7%로 여름철과 겨울철에 상관없이 거의 비슷한 수준으로 포함되어 있음을 알 수 있다.

### 3.2. 질량농도의 입경분포 특성

Fig. 3은 여름철과 겨울철에 측정된 도로변 에어로졸 질량농도의 입경분포를 나타낸 것이다. 여기서는 각 분리단(stage)에 대해서 총 에어로졸( $\text{PM}_T$ )의 농도에 대한

주어진 입경범위에서의 농도비율( $\Delta C/C$ )로써 나타냈는데, 이렇게 표현하면 각 입경에 대해서 다른 입경에 대한 상대적인 질량을 직접적으로 판단하고 관찰하기 용이하다. Fig. 3에서 여름철과 겨울철에 아주 유사한 분포특성을 보임을 알 수 있는데, 미세입자 영역에서는 0.7~1.1  $\mu\text{m}$  범위의 입경에서 그리고 조대입자 영역에서는 5.8~9.0  $\mu\text{m}$  범위의 입경에서 높은 극값(peak)을 지나는 이산형 분포(bimodal distribution)를 나타냈다. 다만 겨울철에는 3.3~4.7  $\mu\text{m}$  범위에서 다소 높은 농도비가 나타나기도 했다. 제주시 도심지역에서 채취된 도로변 에어로졸의 입경분포는 주요 극값이 여름철과 겨울철에 각각 총질량의 39%, 43% 정도를 차지하는  $\text{PM}_{1.1}$ 에서 나타나고, 총질량의 17% 정도를 차지하는 5.8  $\mu\text{m}$  이상의 조대

입자 영역에서 작은 극값을 나타냄을 알 수 있다. 이처럼 submicron size range에서 높은 분포(40~80%)가 나타나는 결과가 이전 연구에서도 보고된 바 있다(Espinosa et al., 2001; Samara and Voutsas, 2005). 이러한 분포결과에 대해서는 앞으로 보다 많은 관측 자료를 확보하여 보다 분명히 밝혀야 할 것이다.

질량중위입경(Mass Median Aerodynamic Diameter, MMAD)은 넓은 입경범위를 지나는 대기 중 에어로졸 입자의 대표입경을 표현하는 방법의 하나인데, 본 연구에서는 MMAD를 추정함에 있어서는 각 분리단별 유효전단직경(Effective Cut-off Diameter, ECD)에 대수를 취해 x축으로 하고 각 분리단별로 포집된 에어로졸의 질량을 y축에 누적확률로 하는 대수확률그래프를 이용하였다(Table 3). 제주시 도심지역 도로변 에어로졸에 대한 MMAD는 여름철과 겨울철에 각각  $1.81 \pm 0.42 \mu\text{m}$ ,  $1.89 \pm 0.29 \mu\text{m}$ 로 비슷한 수준임을 알 수 있다. 제주시 함덕 해안에서 측정된 에어로졸에서는 1.8  $\mu\text{m}$  그리고 제주도 서쪽 해안(고산, 국가배경농도측정소)에서 봄철에 측정된 에어로졸에서는 2.0  $\mu\text{m}$ 으로 발표된 바 있다(Kim et al., 1999; Lee et al., 2003).

3.3. 이온 균형

에어로졸에 함유된 수용성 이온성분에 대한 이온균형(ion balance)을 비교함으로써 간접적으로 분석 신뢰도를 평가하고 정도관리에 이용할 수 있는데, 양이온과 음이온에 대한 당량농도의 합 사이의 상관계수가 1에

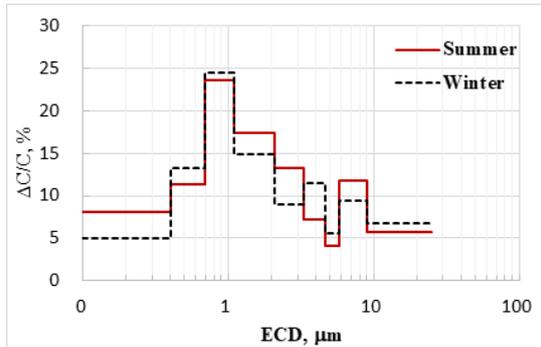


Fig. 3. The size distribution of roadside aerosol, plotted as fractional concentrations ( $\Delta C/C$ ) versus the Effective Cutoff Diameter (ECD) in this study.

Table 3. Concentration of water-soluble ion and its Mass Median Aerodynamic Diameter (MMAD)

	Concentration, $\mu\text{g}/\text{m}^3$		MMAD, $\mu\text{m}$	
	Summer	Winter	Summer	Winter
$\text{PM}_{\text{T}}$	$29.3 \pm 5.87$	$28.9 \pm 13.35$	$1.81 \pm 0.42$	$1.89 \pm 0.29$
$\text{Na}^+$	$1.11 \pm 0.45$	$1.05 \pm 0.42$	$2.93 \pm 1.18$	$3.95 \pm 0.28$
$\text{NH}_4^+$	$2.03 \pm 1.32$	$2.65 \pm 0.86$	$1.06 \pm 0.22$	$1.21 \pm 0.30$
$\text{K}^+$	$0.16 \pm 0.06$	$0.18 \pm 0.02$	$2.59 \pm 0.60$	$1.79 \pm 0.29$
$\text{Mg}^{2+}$	$0.13 \pm 0.06$	$0.15 \pm 0.06$	$2.80 \pm 1.15$	$4.03 \pm 0.10$
$\text{Ca}^{2+}$	$0.43 \pm 0.10$	$0.54 \pm 0.11$	$3.58 \pm 0.31$	$4.33 \pm 0.13$
$\text{Cl}^-$	$0.75 \pm 0.56$	$1.33 \pm 0.64$	$3.46 \pm 0.67$	$3.88 \pm 0.58$
$\text{NO}_3^-$	$1.79 \pm 0.99$	$5.25 \pm 0.82$	$3.70 \pm 0.75$	$1.76 \pm 0.21$
$\text{SO}_4^{2-}$	$7.22 \pm 3.99$	$4.88 \pm 0.81$	$1.00 \pm 0.61$	$1.37 \pm 0.23$

$\text{PM}_{\text{T}}$  : Total roadside aerosol (the sum of all stage)

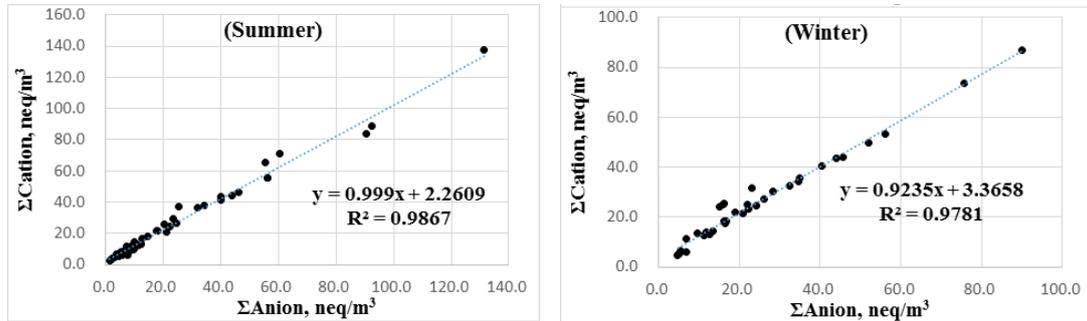


Fig. 4. Ionic balance between total anions and total cations of roadside aerosol in Jeju City.

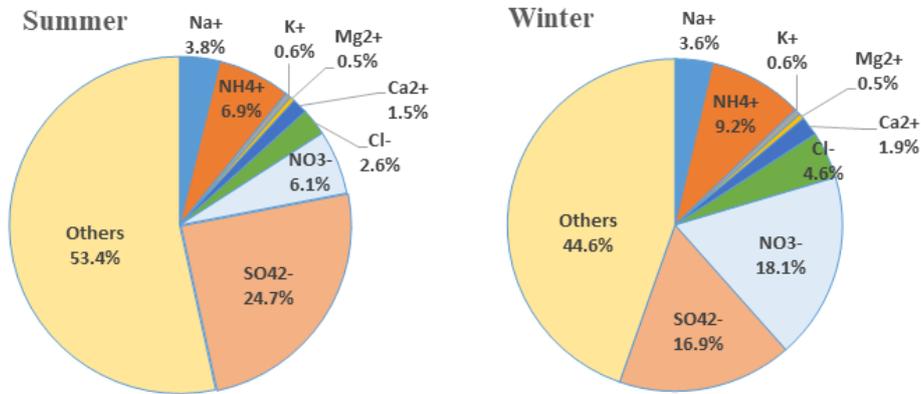


Fig. 5. Chemical composition of roadside aerosol in Jeju City.

가까울수록 측정된 값들은 일관성이 있고 신뢰도가 높다고 판단할 수 있다(Lee et al., 2011; Custódio et al., 2016). 양이온과 음이온 당량농도의 합에 대한 상관관계를 Fig. 4에 나타냈다. Fig. 4에서는 각 분리단에서 얻어진 수용성 이온 자료를 통합하여 나타냈는데, 그림에서 보듯이 양이온과 음이온 사이에서 결정계수( $R^2$ )가 여름철 0.9867, 겨울철 0.9781로 높게 나타났다. 여기서는 각 분리단별로 양이온과 음이온의 상관성에 대한  $R^2$ 을 산출해 보면, backup stage ( $R^2=0.7$ )를 제외하고 나머지 모든 분리단에서의  $R^2$ 은 0.9 이상으로 아주 높게 나타났다. 따라서 이 분석결과는 충분히 신뢰할 수 있는 것으로 판단하였다(Lee et al., 2011). 또한 음이온의 합( $\Sigma A$ )에 대한 양이온의 합( $\Sigma C$ )의 비( $\Sigma C/\Sigma A$ )가 1보다 클 경우 mineral dust 입자가 에어로졸의 산성도를 완충시키는 것으로 이해할 수 있는데, 제주도 도심지역에서 채취된 대부분의 도로변 에어로졸에서는  $\Sigma C/\Sigma A$ 가 1보다 큰

것으로 나타났다.

#### 3.4. 도로변 에어로졸에서의 이온농도

Table 3에는 도로변 에어로졸에 함유된 각 수용성 이온성분들의 평균농도를 나타냈다. 표에서 보면, 8가지 수용성이온성분들 중에서  $Na^+$ 와  $SO_4^{2-}$ 를 제외한 나머지 모든 이온성분들은 여름철에 비해 겨울철에 높은 농도를 나타냈다. 그리고 도로변 에어로졸의 총 질량농도에 대한 각 이온성분의 기여도를 보면(Fig. 5), 제주도 도심지역 도로변 에어로졸의  $PM_{10}$ 에 대한 수용성 이온성분의 기여도는 여름철(46.6%)에 비해 겨울철(55.4%)에 높게 나타났다. 이온성분별로 보면,  $NO_3^-$  기여도는 여름철에 비해 겨울철에 크게 증가하는 반면  $SO_4^{2-}$  기여도는 크게 낮아졌다. 그리고  $NH_4^+$ 와  $Cl^-$  기여도도 역시 여름철에 비해 겨울철에 약간 증가하였다. 그렇지만  $Na^+$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $Ca^{2+}$ ,  $K^+$  기여도는 두 계절에서 거의 변화가 없었다.

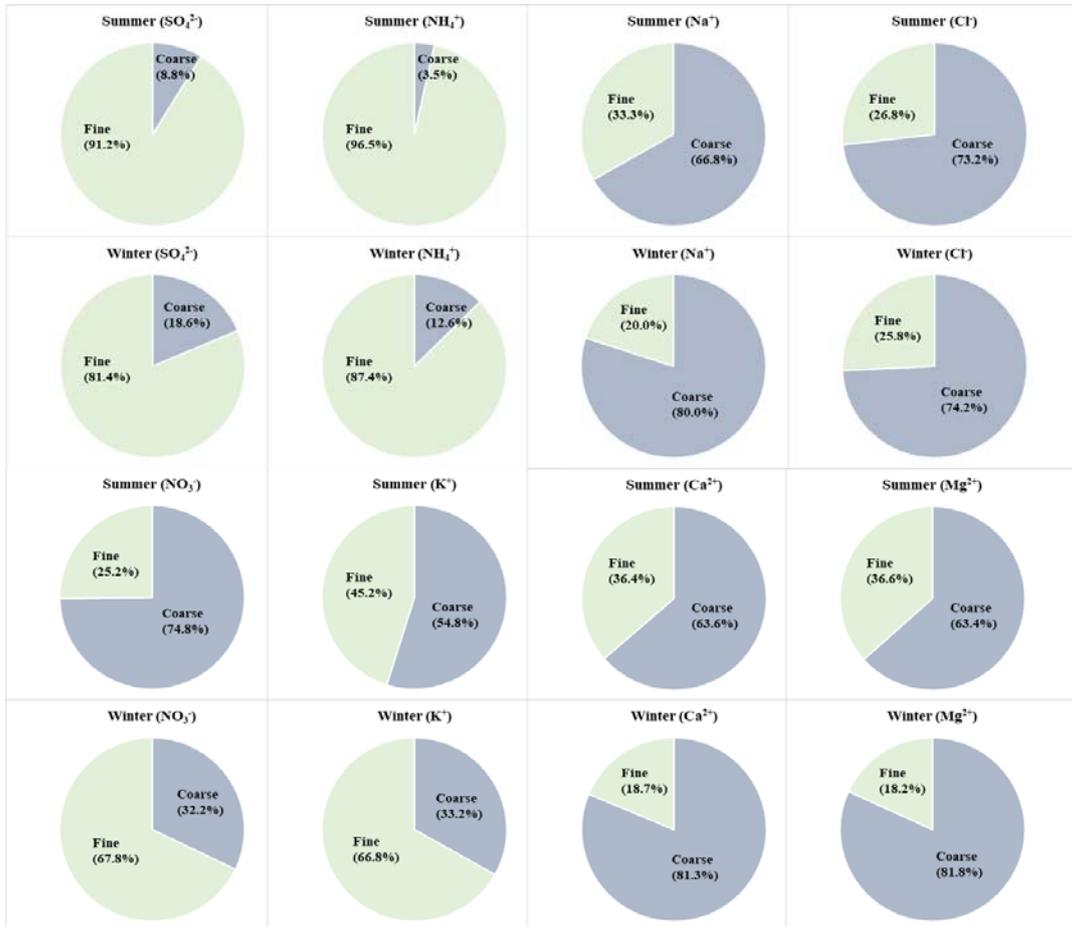


Fig. 6. Partitioning ratio of each ionic species between fine and coarse particle modes (Fine and Coarse in this figure means PM<sub>2.1</sub> and PM<sub>2.1-9</sub>, respectively)

Fig. 6은 직경 2.1  $\mu\text{m}$  이하의 미세입자(PM<sub>2.1</sub>)와 직경 2.1  $\mu\text{m}$  보다 큰 조대입자(PM<sub>2.1-9</sub>)에서의 각종 이온성분들의 기여도를 여름철과 겨울철로 구분하여 나타냈다. SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>와 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>는 미세입자에서의 기여도가 조대입자에 비해 훨씬 큰 것으로 나타났다. 그리고 조대입자에서의 기여도는 여름철에 비해 겨울철에 상당히 증가함을 볼 수 있다. Na<sup>+</sup>, Cl<sup>-</sup>, Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>은 미세입자에 비해 조대입자에서의 기여도가 크게 나타남을 볼 수 있다. 특히 조대입자에서의 기여도는 여름철에 비해 겨울철에 증가하는 것으로 나타났다. NO<sub>3</sub><sup>-</sup>와 K<sup>+</sup>는 미세입자와 조대입자에서의 기여도는 여름철과 겨울철에 서로 상반되게 나타남을 알 수 있다. 즉, 여름철에는 조대입자에서의 기여도

가 미세입자에서 보다 높았지만 겨울철에는 반대로 미세입자에서의 기여도가 크게 높아짐을 볼 수 있다.

Fig. 7에는 미세입자와 조대입자에 있어서 수용성 이온성분들의 평균 기여도를 여름철과 겨울철로 구분하여 나타냈다. 여름철에 미세입자에서는 수용성 이온성분의 기여도가 60.5%로 나타났으며, 이 중에서 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> (38.8%)와 NH<sub>4</sub><sup>+</sup> (11.2%)가 우세한 것으로 나타났다. 그렇지만 여름철에 조대입자에서는 수용성 이온성분들의 기여도가 31.6%로 크게 낮게 나타났다. 그리고 여름철에 이온성분별로는 조대입자에서의 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>와 NH<sub>4</sub><sup>+</sup> 기여도는 미세입자에 비해 크게 낮았고, Na<sup>+</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, Cl<sup>-</sup> 기여도는 우세한 것으로 나타났다. 겨울철을 보면,

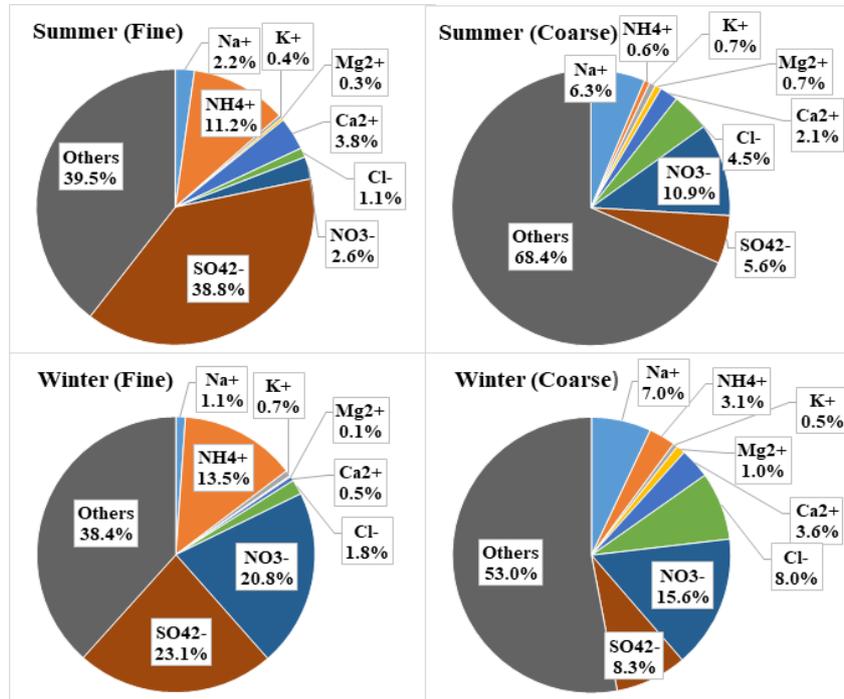


Fig. 7. Chemical compositions of fine and coarse modes of roadside aerosols in Jeju City.

미세입자에서는 수용성 이온성분의 기여도가 여름철과 비슷하게 61.6%를 나타냈으며,  $\text{SO}_4^{2-}$  (23.1%),  $\text{NO}_3^-$  (20.8%),  $\text{NH}_4^+$  (13.5%)가 우세하였다. 그렇지만 겨울철 조대입자에서는 수용성 이온성분들의 기여도가 47% 수준으로써 미세입자에 비해 크게 감소하는데,  $\text{SO}_4^{2-}$ 와  $\text{NH}_4^+$  기여도가 미세입자에 비해 크게 감소한 반면  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  기여도는 크게 높아짐을 볼 수 있다. 즉, 미세입자에서는  $\text{NO}_3^-$  기여도가 여름철(2.6%)에 비해 겨울철(20.8%)에 크게 높아지고 있지만 조대입자에서는 각 이온성분들의 기여도가 여름철과 겨울철에 큰 차이를 보이지는 않았다. 그러나  $\text{K}^+$ 를 제외한 모든 이온들의 기여도는 여름철에 비해 겨울철에 증가함을 볼 수 있다. 그리고 두 계절 모두에서  $\text{Na}^+$ 와  $\text{Cl}^-$ 의 기여도가 미세입자에 비해 조대입자에서 상당히 증가하였다.

이온성분의 기여도를 보면, 미세입자의 경우 산성이온인  $\text{SO}_4^{2-}$ 과  $\text{NO}_3^-$  그리고 이를 중화시키는  $\text{NH}_4^+$ 의 기여도가 높게 나타났고, 조대입자에서는  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ 의 기여도가 비교적 높게 나타났다. 이는 다음에 살펴볼 중화기여도에서의 결과와도 일치하는 것

으로 판단된다. 이차생성이온( $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{NH}_4^+$ )의 기여도는 여름철에 미세입자와 조대입자에서 각각 52.6%, 17.1% 그리고 겨울철에 각각 57.4%, 27.0%였다. 이러한 이차생성이온의 기여도는 수원(48.4%, 12.3%)과 대구(44.3%, 14.8%)와 같은 다른 지역에 비해 높은 수준을 나타냈다(Park and Lim, 2006; Oh et al., 2009). 이는 제주지역에서는  $\text{NH}_4^+$ 의 전구물질인  $\text{NH}_3$ 의 배출원이 상당히 널리 분포하고 있을 뿐 아니라  $\text{SO}_4^{2-}$ 과  $\text{NO}_3^-$ 의 전구물질인  $\text{SO}_x$ 와  $\text{NO}_x$ 의 배출 특성이 다른 지역과 큰 차이가 있기 때문으로 생각된다(Table 4). 이들 이온성분들의 상대적인 기여도를 고려하기 위해 미세입자와 조대입자의  $\text{SO}_4^{2-}/\text{NO}_3^-$  비를 살펴보면, 미세입자 영역에서  $\text{SO}_4^{2-}/\text{NO}_3^-$  비는 여름철과 겨울철에 각각 15.88, 1.11로 큰 차이를 보이지만 조대입자 영역에서는 각각 0.52, 0.54로 아주 비슷하게 나타났다. 제주시 도로변 에어로졸에서 미세입자 영역에서의  $\text{NO}_3^-$  평균농도는 겨울철( $3.43 \mu\text{g}/\text{m}^3$ )에 비해 여름철( $0.40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ )에 현저히 낮았고,  $\text{SO}_4^{2-}$  평균농도는 겨울철( $3.80 \mu\text{g}/\text{m}^3$ )에 비해 여름철( $6.35 \mu\text{g}/\text{m}^3$ )에 오히려 크게 증가하였다. 따라서 미세

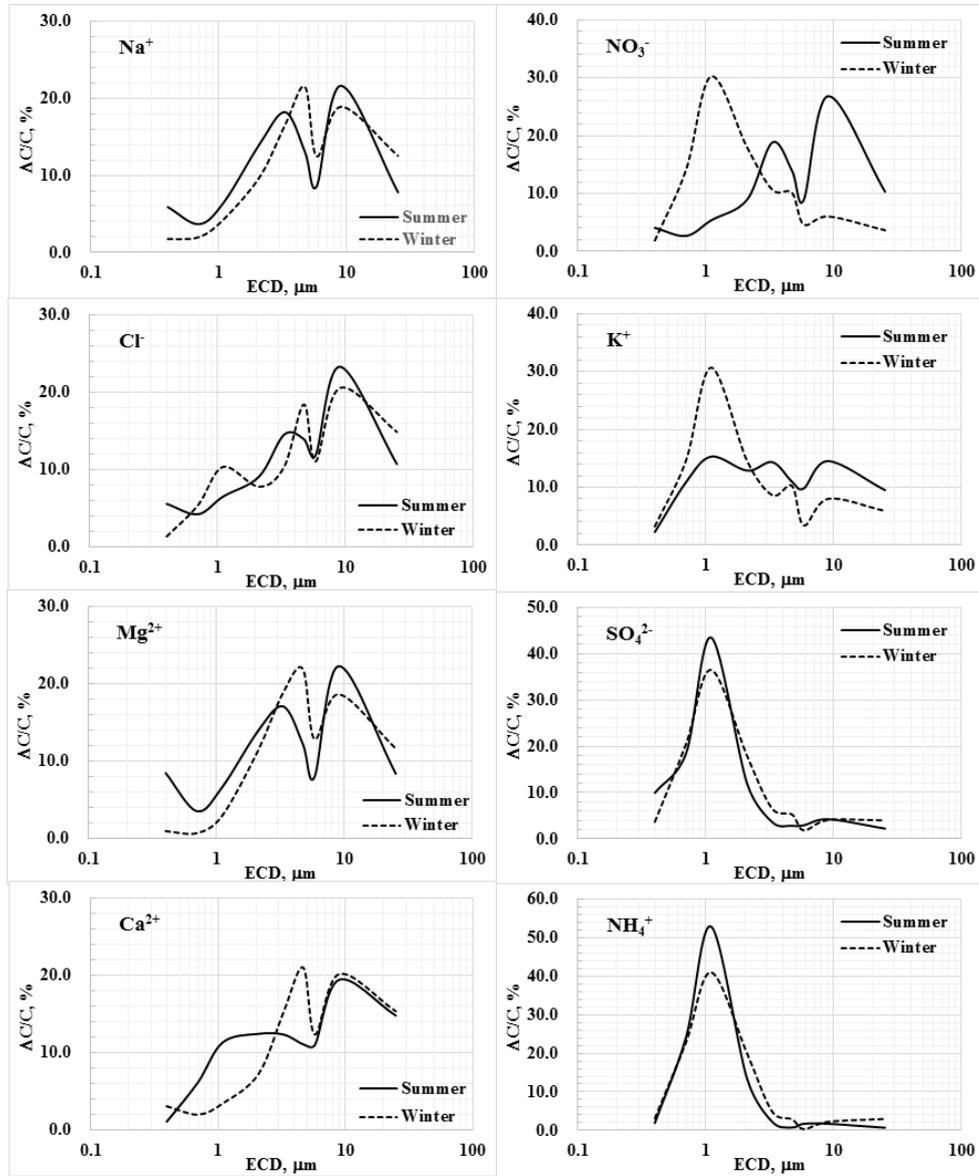


Fig. 8. Mass size distribution of water-soluble ions in roadside aerosol, plotted as fractional concentrations ( $\Delta C/C$ ) versus the Effective Cut-off Diameters (ECD).

입자 영역에서  $SO_4^{2-}/NO_3^-$  비가 여름철에 아주 크게 나타났다. 반면 조대입자 영역에서는  $SO_4^{2-}$ 와  $NO_3^-$  농도가 여름철( $0.61 \mu g/m^3$ 과  $1.18 \mu g/m^3$ )과 겨울철( $0.87 \mu g/m^3$ 과  $1.63 \mu g/m^3$ ) 사이에 큰 차이를 보이지 않으므로 인해  $SO_4^{2-}/NO_3^-$  비에 있어서도 큰 차이를 보이지 않았다고

생각된다. 우리나라의 배경지역인 제주도 고산에서의 대기 중  $PM_{2.5}$ 에 있어서  $SO_4^{2-}/NO_3^-$  비는 3.2~7.66 (월별로는 3.9~18.9) 수준인 것으로 나타났는데, 이는 배경지역에서는 자동차에 의한  $NO_x$ 의 배출량이 낮고 주로 자연적으로 배출되는 해양기원의  $SO_4^{2-}$  영향으로 인해 이

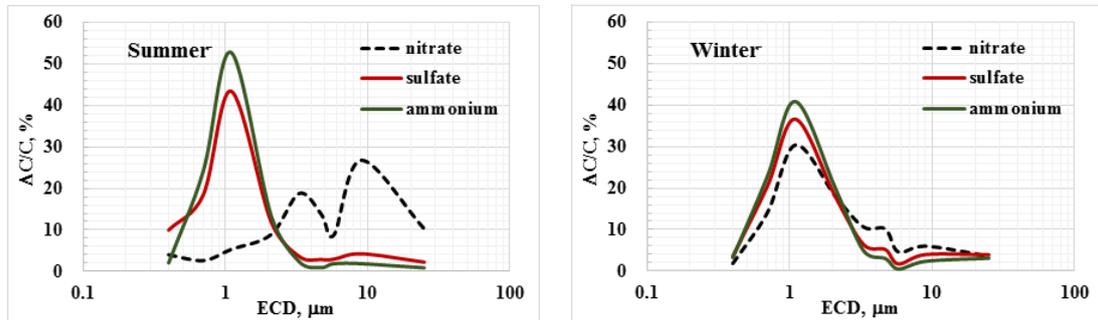


Fig. 9. Size distribution of sulfate, nitrate, and ammonium in roadside aerosol.

비가 큰 값을 보이는 것이라고 주장했다(Lee et al., 2001; Moon et al. 2005). 조대입자영역에서  $\text{SO}_4^{2-}/\text{NO}_3^-$  비가 낮은 것은  $\text{SO}_4^{2-}$  보다는  $\text{NO}_3^-$ 의 비중이 높아지기 때문으로 판단되는데, 이는 기체상의 질산이 조대입자의 알칼리 성분( $\text{Ca}^{2+}$  또는  $\text{Mg}^{2+}$ )들로 인해 먼저 중화되면서  $\text{NO}_3^-$ 가 생성되었기 때문에 결과적으로  $\text{SO}_4^{2-}/\text{NO}_3^-$  비가 감소한 것이라고 생각된다(Kerminen et al., 1997).

### 3.5. 이온성분들의 입경분포

Fig. 8에는 각 이온성분들의 농도비( $\Delta C/C$ )를 입경별로 나타냈다. 그림에서 보면,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ 는 여름철과 겨울철에 관계없이 ECD 기준 5.8  $\mu\text{m}$ 를 중심으로 3.3~4.7  $\mu\text{m}$  범위와 5.8~9.0  $\mu\text{m}$  범위에서, 즉 조대입자 영역에서 극값을 지니는 이산형 분포를 나타냈다.  $\text{NO}_3^-$ 의 경우 겨울철에는 0.7~1.1  $\mu\text{m}$  범위의 입경에서 큰 극값을 나타냈지만 여름철에는 조대입자 영역인 2.1~3.3  $\mu\text{m}$ 와 5.8~9.0  $\mu\text{m}$ 에서 극값을 나타냈다. 미세입자 영역의  $\text{NO}_3^-$ 는  $\text{NH}_3$ 와 질산과의 반응으로 생성되는데 기온이 낮은 겨울철이 기체상에서 입자상으로 분배되기 좋은 조건이 된다. 반면 조대입자 영역의  $\text{NO}_3^-$ 는 주로 질산 혹은  $\text{NO}_2$ 와 해염, 토양입자들과 같은 큰 입자들과의 비균일 반응에 의해서 생성되는 것으로 알려져 있다(Calvo et al.,

2013; Jiang et al., 2019).  $\text{K}^+$ 는 겨울철에는  $\text{NO}_3^-$ 처럼 미세입자 영역에서 큰 극값을 보였고, 여름철에는 4.7~5.8  $\mu\text{m}$  입경범위를 중심으로 좌우 넓은 범위의 입경에서 비슷한 수준의 농도비를 나타냈다. 이러한 여름철  $\text{K}^+$ 의 입경분포를 제주도 함덕 해안가에서 관찰한 바 있다(Lee et al., 2003).  $\text{SO}_4^{2-}$ 와  $\text{NH}_4^+$ 는 0.7~1.1  $\mu\text{m}$  범위의 입경에서 극값을 지니는 단극 분포 형태를 나타내고 있다. 이와 같은 이온성분들의 입경분포 특징으로부터 제주도 도심지역의 도로변 에어로졸에 포함된 수용성 이온성분들은 다음과 같이 3가지로 분류할 수 있었다. 즉, 첫째 조대영역에서 이산형 분포를 보이는 성분들( $\text{Na}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Cl}^-$ ), 여름철과 겨울철에 따라 최고 극값의 위치가 미세영역과 조대영역으로 완전히 이동하는 성분들( $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{K}^+$ ), 그리고 계절에 관계없이 미세영역에서 극값을 지닌 일산형 분포를 보이는 성분들( $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NH}_4^+$ )로 구분할 수 있었다.

Fig. 9에는 이차생성이온들에 대한 입경분포를 별도로 나타냈다. 그림에서 보면  $\text{SO}_4^{2-}$ 는 0.9~1.1  $\mu\text{m}$ 에서 극값을 지니는 단극 분포를 보이면서 전형적인 droplet mode에 있음을 나타내고 있다.  $\text{SO}_4^{2-}$  입경분포에서 조대영역에 극값이 보이지 않는 것은 제주도 도심지역의 도로변 에어로졸 내  $\text{SO}_4^{2-}$ 의 생성에 있어서 해염이나

Table 4. Ratio of emission amount of air pollutants during 2015 in S. Korea

Area	$\text{NH}_3/\text{SO}_x$	$\text{NO}_x/\text{SO}_x$	$\text{NO}_x/\text{NH}_3$
Jeju	4.6	8.4	1.8
Suwon	2.0	24.4	12.4
Daegu	0.5	6.3	12.5
Nationwide (S. Korea)	0.8	3.3	3.9

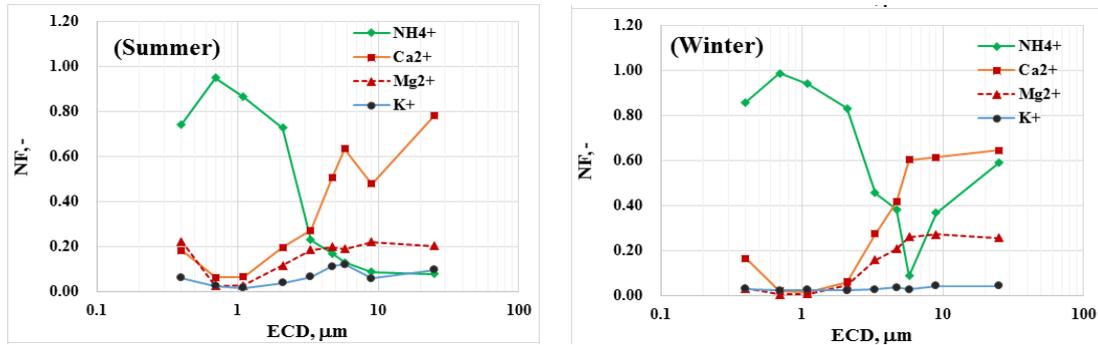


Fig. 10. Size distribution of Neutralization Factor (NF) in roadside aerosol.

토양입자의 영향이 아주 제한적이기 때문인 것으로 생각된다(Jiang et al., 2019).  $SO_4^{2-}$ 와 달리  $NO_3^-$ 의 분포는 두 계절에서 분명히 다르게 나타나는데, 겨울철에는 0.9~1.1  $\mu m$ 에서 극값을 지나는 단극분포를 보이지만 여름철에는 조대입자 영역에서만 두 개의 극값을 지나는 이산형 분포를 나타내고 있다. 이는 여름철에는 높은 기온으로 인해 입자인  $NH_4NO_3$ 의 해리가 일어나기 때문에 미세입자 영역에서 극값이 나타나지 않았다고 판단되며, 조대입자 영역의  $NO_3^-$ 는 주로 토양과 먼지와 관련이 있다고 생각된다(Jiang et al., 2019).

Table 3에는 수용성 이온성분들의 MMAD를 산출하여 나타냈다. Table 3에서  $NH_4^+$ 와  $SO_4^{2-}$ 의 MMAD를 보면 다른 수용성 이온들의 MMAD보다 아주 작을 뿐 아니라 겨울철에 비해 여름철에 더욱 작은 것으로 나타났다.  $Na^+$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $Ca^{2+}$ ,  $Cl^-$ 은 다른 수용성 이온들보다는 큰 MMAD를 보였으며, 여름철보다는 겨울철에 큰 것으로 나타났다. 그리고  $NO_3^-$ 와  $K^+$ 의 MMAD는 여름철이 겨울철보다 큰 것을 볼 수 있다. 그리고 제주도 도심지역 도로변 에어로졸( $PM_{10}$ )의 MMAD가  $Na^+$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $Ca^{2+}$ ,  $Cl^-$ 의 MMAD보다 작은 것으로 나타났는데, 이는 에어로졸에 포함된 다른 성분들(즉, 나머지 이온성분들, 원소 성분들, 유기성분들 등)이 이들 이온보다는 더 작은 입자에 축적되어 있을 것임을 시사하고 있다.

### 3.6. 중화기여도

$SO_4^{2-}$ 와  $NO_3^-$ 와 같은 산성이온을 중화시키기 위해서는  $NH_4^+$ ,  $Ca^{2+}$  등과 같은 알칼리성 이온들이 필요하다. 이들 알칼리성 이온들의 중화기여도(Neutralization

Factor, NF)를 다음과 같이 각 이온성분들의 당량농도로써 계산할 수 있다(Kulshrestha et al., 1995).

$$NF = \frac{[X^+]}{[SO_4^{2-}] + [NO_3^-]}$$

각 알칼리성 이온별로 계산한 NF를 입경별로 나타냈으며, 이를 여름철과 겨울철을 비교하여 제시했다(Fig. 10). 가장 대표적인 알칼리성 이온인  $NH_4^+$ 의 NF를 보면, 여름철에는 미세영역(2.1  $\mu m$  이하인 입경범위)에서 아주 우세하지만 조대영역(2.1  $\mu m$  보다 큰 입경범위)에서는 0.2 이하로 크게 미약해진다. 그런데 겨울철  $NH_4^+$ 의 NF를 보면, 미세영역에서는 여름철과 같이 여전히 우세하지만 조대영역, 특히 5.8  $\mu m$  보다 큰 범위의 입경에서는 NF도 우세해짐을 볼 수 있다.  $Ca^{2+}$ 의 NF는 여름철과 겨울철 모두 미세영역에서는 미약하지만 조대영역에서는 입경이 클수록 더욱 우세해짐을 볼 수 있다.  $Mg^{2+}$ 를 보면 여름철과 겨울철의 입경별 NF 수준과 분포형태는 서로 비슷하고 조대영역에서의 NF는  $Ca^{2+}$ 의 경우처럼 미세영역에 비해 우세함을 볼 수 있다.  $K^+$ 은 모든 입경에서 아주 미약한 수준임을 알 수 있다. 대구지역의 대기 중  $PM_{2.5}$ 에서는  $NH_4^+$ 의 NF가 0.99로 매우 우세하지만  $PM_{2.5-10}$ 에서는  $Ca^{2+}$ 와  $NH_4^+$ 의 NF가 각각 3.73과 0.89로 우세하고  $Mg^{2+}$ 와  $K^+$ 의 NF는  $NH_4^+$ 와  $Ca^{2+}$ 에 비해서 아주 미약하다고 발표한 바 있다(Park and Lim, 2006).

### 3.7. 해양의 영향

일반적으로 대기 중 에어로졸에 함유된 성분들은 지각

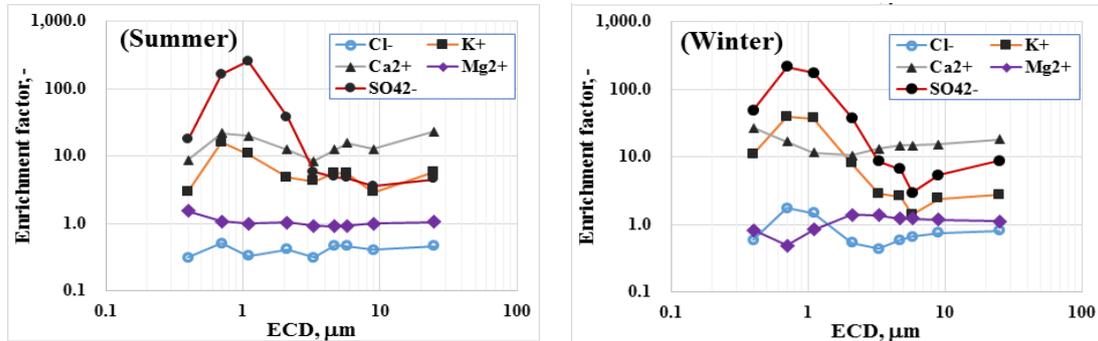


Fig. 11. Size distribution of enrichment factor in roadside aerosol.

(crust), 해양(ocean) 그리고 각종 인위적인 과정에서 유래된다. 특히 제주시는 연안에 위치한 도시이므로 에어로졸에 대한 해양의 영향은 주요 고려사항이다. 따라서 본 조사에서는 도로변 에어로졸에 대한 해양의 기여도를 파악하고자 했다. 이를 위해서 널리 사용되는 해양농축계수를 산출하였다. 일반적으로 해양농축계수는 다음의 식으로 나타낼 수 있다.

$$EF_{marine}(-) = \frac{(X/Na^+)_{sample}}{(X/Na^+)_{seawater}}$$

여기서  $X_{sample}$ 은 시료 중 이온의 농도( $ng/m^3$ ),  $Na^+_{sample}$ 은 시료 중  $Na^+$  농도( $ng/m^3$ )를 말하며,  $X_{seawater}$ 는 해수 중 이온의 농도( $ng/m^3$ )를 의미하며,  $Na^+_{seawater}$ 은 해수 중  $Na^+$  농도( $ng/m^3$ )를 말한다. 본 연

구에서는 문헌에 제시된 해수의 조성을 활용하였다 (Parmar et al., 2001). Fig. 11에는 해양과 관련이 있는 이온들에 대해 계산한 해양농축계수를 입경별로 나타냈다. 그림에서 보면, Cl<sup>-</sup>은 대부분의 입경에서 1보다 작은 농축계수를 나타냈으며, Mg<sup>2+</sup>는 모든 입경에서 1에 가까운 수준을 나타냈다. 나머지 이온들(K<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>)은 모든 입경에서 1보다 큰 값을 나타냈는데, K<sup>+</sup>와 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>에서는 0.71 μm 그리고 1.1 μm에서 큰 EF를 나타내고 있으며, Ca<sup>2+</sup>의 EF는 비교적 큰 값이지만 입경별로는 비슷한 수준을 나타냈다. 이들 이온들의 입경별 EF를 보면 여름철과 겨울철 사이에서 차이가 거의 나타나지 않았다. 그리고 EF가 1에 가까울수록 해양기원으로, 1보다 클수록 육상기원으로 해석할 수 있다. 즉, EF가 클수록 에어로졸 내에 비해양 성분이 혼입되었다고 할 수 있다. 따라서 연안지역에 위치한 제주도 도심지역 도로변 에어로졸에 포함된 Cl<sup>-</sup>과 Mg<sup>2+</sup>은 해양에 기인하며, 나머지

Table 5. Ratios of water-soluble ions of roadside aerosol and the corresponding value for sea water

Season	Mode	Cl <sup>-</sup> /Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup> /Na <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup> /Na <sup>+</sup>	Mg <sup>2+</sup> /Na <sup>+</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> /Na <sup>+</sup>
Summer	PM <sub>T</sub>	0.67	0.15	0.38	0.12	6.33
	Fine	0.52	0.19	0.39	0.13	18.58
	Coarse	0.71	0.12	0.34	0.11	0.90
Winter	PM <sub>T</sub>	1.27	0.17	0.52	0.14	4.67
	Fine	1.59	0.62	0.47	0.13	20.93
	Coarse	1.14	0.08	0.51	0.15	1.20
Sea water*		1.8	0.036	0.038	0.120	0.251

PM<sub>T</sub> : Total roadside aerosol (that is, the sum of all stage)

Fine: PM<sub>2.1</sub>, Coarse: PM<sub>2.1-9</sub>

\*: Values taken from Parmar et al.(2001)

이온성분들은 육상기원의 영향이 더 크게 작용하는 것으로 보인다. 도로변 에어로졸의 조성에 대한 해양의 영향을 알아보기 위해서, Na는 전부 해양에서 기인한다고 가정하여 Na에 대한 주요 해수성분( $\text{Cl}^-$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ )들의 비를 계산하고 이를 해수에서의 비율과 비교하여 Table 5에 나타냈다. 표에서 보면,  $\text{K}^+/\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}/\text{Na}^+$ ,  $\text{SO}_4^{2-}/\text{Na}^+$ 의 비율은 해수에서의 비율보다는 더 큰 값을 나타내고 있으며,  $\text{Mg}^{2+}/\text{Na}^+$  비는 해수와 비슷한 값을 나타냈다. 그리고  $\text{Cl}^-/\text{Na}^+$  비율은 해수에서보다 낮게 나타났다. 에어로졸 내에서 해수의 주요 성분으로 알려진 이온성분이 해수에서의 비율보다 높은 값을 나타내는 것은 해염이 아닌 원인에서 유래된 성분(비해염 성분)이 혼입되었다는 것을 의미하며, 낮은  $\text{Cl}^-/\text{Na}^+$  비를 보이는 것은 해염의 분열 및 비해염 성분에 의한 변질에 의한 것으로 보인다(Parmar et al., 2001). 현재까지의 결과에 의하면, 제주시 도심지역 도로변 에어로졸에서는 해양의 영향이 일부 나타나고 있지만 육상기원 오염원의 영향이 보다 크게 나타나는 것으로 판단된다.

#### 4. 결론

제주시 도심지역의 도로변에서 에어로졸을 입경별로 측정하였다. 본 연구에서는 도로변 에어로졸 및 그에 함유된 수용성 이온성분들의 질량농도와 입경별 분포 특성을 여름철과 겨울철로 구분하여 비교하였다. 제주시 도심지역 도로변 에어로졸의 입경별 농도비율은 여름철과 겨울철에 상당히 비슷한 것으로 나타났다. 에어로졸의 입경범위별 분배비율은 미세입자 영역( $\text{PM}_{2.1}$ ) 57%, 조대입자 영역( $\text{PM}_{2.1-9}$ ) 36~37%, 그리고 거대입자 영역(입경  $9.0 \mu\text{m}$  이상) 6~7%로 여름철과 겨울철에 관계없이 거의 같은 수준을 나타냈다. 제주시 도로변 에어로졸은 여름철과 겨울철에는 대체적으로  $0.7\sim 1.1 \mu\text{m}$ 와  $5.8\sim 9.0 \mu\text{m}$  범위의 입경에서 극값을 갖는 이산형 분포를 나타냈다. 제주시 도로변 에어로졸의 MMAD는 여름철과 겨울철에 각각  $1.81 \mu\text{m}$ ,  $1.89 \mu\text{m}$ 로 비슷한 수준이었다.

도로변 에어로졸에 함유된 수용성 이온성분들에서  $\text{Na}^+$ 와  $\text{SO}_4^{2-}$ 를 제외한 나머지 6개 이온 성분들은 모두 여름철에 비해 겨울철에 높은 농도를 나타냈다. 도로변 에어로졸의 총 질량농도에 대한 수용성 이온성분들의 기여도를 보면, 여름철에 비해 겨울철에  $\text{NO}_3^-$  기여도는 크

게 증가하는 반면  $\text{SO}_4^{2-}$  기여도는 크게 낮아졌다. 그리고  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$  기여도는 두 계절에서 거의 변화가 없었다. 미세입자와 조대입자에 대한  $\text{SO}_4^{2-}$ 와  $\text{NH}_4^+$ 의 기여도는 여름철과 겨울철에 비슷하게 나타났으며, 미세입자에의 기여도가 조대입자에 비해 훨씬 크게 나타났다.  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  기여도는 미세입자에 비해 조대입자에서의 큰 것으로 나타났으며, 여름철에 비해 겨울철에 증가하였다.  $\text{NO}_3^-$ 와  $\text{K}^+$ 의 기여도에서는 여름철에는 조대입자에의 기여도가 미세입자에서보다 높고, 겨울철에는 그 반대로 나타났다.

제주시 도심지역의 도로변 에어로졸에 함유된 수용성 이온성분들은 3가지 입경분포 형태로 분류할 수 있다. 즉, 조대영역에서 이산형 분포를 보이는 성분들( $\text{Na}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Cl}^-$ ), 여름철과 겨울철에 따라 극값이 미세영역과 조대영역으로 이동하는 성분들( $\text{NO}_3^-$ 와  $\text{K}^+$ ), 그리고 계절에 관계없이 미세영역에 극값을 지닌 단극 이산형 분포를 보이는 성분들( $\text{SO}_4^{2-}$ 와  $\text{NH}_4^+$ )로 구분할 수 있었다. 그리고  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Cl}^-$ 의 MMAD는 다른 이온들에 비해 크고, 겨울철이 여름철보다 더 큰 반면  $\text{NO}_3^-$ 와  $\text{K}^+$ 에 대한 MMAD는 겨울철이 여름철보다 작았다. 그리고  $\text{NH}_4^+$ 와  $\text{SO}_4^{2-}$ 의 MMAD는 이온성분들 중에서 가장 작았다. 또한 각 수용성 이온성분들의 해양농축계수와 해수 조성비로 볼 때 제주시 도심지역 도로변 에어로졸에서는 해양의 영향이 일부 나타나지만 육상기원 오염원의 영향이 보다 큰 것으로 보인다.

#### 감사의 글

이 논문은 2019학년도 제주대학교 교원성과지원사업에 의하여 연구되었음.

#### REFERENCES

- Bathmanabhan, S., Madanayak, S. N. S., 2010, Analysis and interpretation of particulate matter- $\text{PM}_{10}$ ,  $\text{PM}_{2.5}$  and  $\text{PM}_1$  emissions from the heterogeneous traffic near an urban roadway, Atmospheric Pollution Research, 1, 184-194.
- Cacciola, R. R., Sarva, M., Polosa, R., 2002, Adverse respiratory effects and allergic susceptibility in relation to particulate air pollution: flirting with disaster, Allergy, 57, 281-286.

- Calvo, A. I., Alves, C., Castro, A., Pont, V., Vicente, A. M., Fraile, R., 2013, Research on aerosol sources and chemical composition: Past, current and emerging issues, *Atmospheric Research*, 120-121, 1-28.
- Cho, B. Y., Shin, S. H., Jung, C. S., Ju, M. H., Yoon, M. H., Ahn, J. E., Bae, G. S., 2019, Characteristics of particle size distribution at the roadside of Daegu. *J. Korean Society for Atmospheric Environment*, 35, 16-26.
- Custódio, D., Cerqueira, M., Alves, C., Nunes, T., Pio, C., Esteves, V., Frosini, D., Lucarelli, F., Querol, X., 2016, A One-year record of carbonaceous components and major ions in aerosols from an urban kerbside location in Oporto, Portugal, *Science of the Total Environment*, 562, 822-833.
- DoT (Department of Transport) (UK), 2002, Sources of Particulate Matter in Urban Areas: TRAMAQ Project UG 250.
- Duan, J., Li, X., Tan, J., Chai, F., 2009, Size distribution and source apportionment of atmospheric particle number concentration in winter in Beijing, *Research of Environmental Sciences*, 22, 1134-1140.
- Economopoulou, A. A., Economopoulos, A. P., 2002, Air pollution in Athens Basin and health risk assessment, *Environmental Monitoring and Assessment*, 80, 277-299.
- Espinosa, A. J. F., Ternero Rodríguez, M., Barragán de la Rosa, F. J., Jiménez Sánchez, J. C., 2001, Size distribution of metals in urban aerosols in Seville (Spain), *Atmospheric Environment*, 35, 2595-2601.
- Ha, H. J., 2011, Comparative evaluation of the air quality at the center lane and roadside in the exclusive median bus lane, Ph. D. Dissertation, University of Seoul, Seoul.
- Han, X., Naeher, L. P., 2006, A Review of traffic-related air pollution exposure assessment studies in the developing world, *Environmental International*, 32, 106-120.
- Hu, C. G., Lee, K. H., 2018, Chemical composition of fine particulate matter in the downtown Area of Jeju City, *J. of Environmental Science International*, 27, 597-610.
- Hu, H., Lia, T., Chen, X., 2017, The concentration distribution of exposures to particulate air pollution on different road sections, *Transportation Research Procedia*, 25, 3343-3353.
- Jiang, F., Liu, F., Lin, Q., Fu, Y., Yang, Y., Peng, L., Lian, X., Zhang, G., Bi, X., Wang, X., Sheng, G., 2019, Characteristics and formation mechanisms of sulfate and nitrate in size-segregated atmospheric particles from urban Guangzhou, China, *Aerosol and Air Quality Research*, 19, 1284-1293.
- Karagulian, F., Belis, C. A., Dora, C. F. C., Prüss-Ustün, A. M., Bonjour, S., Adair-Rohani, H., Amann, M., 2015, Contributions to cities' ambient particulate matter (PM): A systematic review of local source contributions at global level, *Atmospheric Environment*, 120, 475-483.
- Kerminen, V. M., Pakkanen, T. A., Hillamo, R. E., 1997, Interactions between inorganic trace gases and super-micrometer particles at a coastal site, *Atmospheric Environment*, 31, 2753-2765.
- Kim, S. M., Kim, K. S., Hyun, S. S., Kim, J. H., Kim, M. C., Kim, B. J., Lee, K. H., 2018, Chemical composition and source apportionment of PM<sub>2.5</sub> in Jeju City in 2017, *J. of the Korean Society for Environmental Analysis*, 21, 61-70.
- Kim, Y. P., Bae, G. N., Ji, J. H., Jin, H. C., Moon, K. C., 1999, Aerosol size distribution and composition at Kosan, Cheju Island: Measurements in April 1998. *J. Korean Society for Atmospheric Environment*, 15, 677-685.
- Kulshrestha, U. C., Sarkar, A. K., Srivastava, S. S., Parashar, D. C., 1995, Wet-only and bulk deposition studies at New Delhi(India), *Water, Air and Soil Pollution*, 85, 2137-2142.
- Lee, D. E., Kim, W. H., Jo, E. K., Han, J. H., Kang, C. H., Kim, K. H., 2011, Acidification and neutralization characteristics of atmospheric fine particles at Gosan Site of Jeju Island in 2008, *J. Korean Society for Atmospheric Environment*, 27, 603-613.
- Lee, J. H., Kim, Y. P., Moon, K. C., Kim, H. K., Lee, C. B., 2001, Fine particle measurements at two background sites in Korea between 1996 and 1997, *Atmospheric Environment*, 35, 635-643.
- Lee, K. H., Yang, H. J., Hu, C. G., 2003, Size distribution of ambient aerosol measured at a coastal site in Jeju Island, *J. of the Environmental Sciences*, 12, 1043-1054.
- Lee, K. H., Hu, C. G., 2018, Elemental composition and source identification of PM<sub>2.5</sub> in Jeju City, *J. of*

- Environmental Science International, 27, 543-554.
- Lee, K. H., Kim, S. M., Hu, C. G., 2017, Ionic compositions of fine particulate matter during summer and winter in the downtown area of Jeju City in Jeju Island, *J. of Environmental Science International*, 26, 591-600.
- MOLIT (Ministry of Land, Instructure and Transport) and LH, 2019, 2018 Statistics of urban planning; <http://upis.go.kr/upispweb/statsmgmt/viewListdown.do>.
- Moon, K. J., Han, J. S., Kong, B. J., Lee, M. D., Jung, I. R., 2005, Characteristics of chemical species in gaseous and aerosol phase measured at Gosan, Korea During ABC- EAREX2005, *J. Korean Society for Atmospheric Environment*, 21, 675-687.
- Oh, M. S., Lee, T. J., Kim, D. S., 2009, Characteristics of ionic components in size-resolved particulate matters in Suwon area, *J. Korean Society for Atmospheric Environment*, 25, 46-56.
- Pakkanen, T. A., Loukkola, K., Korhonen, C. H., Aurela, M., Mäkelä, T., Hillamo, R. E., Maenhaut, W., 2001, Sources and chemical composition of atmospheric fine and coarse particles in the Helsinki area. *Atmospheric Environment*, 35, 5381-5391.
- Park, J. Y., Lim, H. J., 2006, Characteristics of water soluble ions in fine particles during the winter and spring in Daegu, *J. Korean Society for Atmospheric Environment*, 22, 627-641.
- Parmar, R. S., Satsangi, G. S., Kumari, M., Lakhani, A., Srivastava, S. S., Prakash, S., 2001, Study of size distribution of atmospheric aerosol at Agra. *Atmospheric Environment*, 35, 693-702.
- Pey, J., Querol, X., Alastuey, A., Rodríguez, S., Putaud, J. P., Van Dingenen, R., 2009, Source apportionment of urban fine and ultra-fine particle number concentration in a Western Mediterranean city, *Atmospheric Environment*, 43, 4407-4415.
- Samara, C., Voutsas, D., 2005, Size distribution of airborne particulate matter and associated heavy metals in the roadside environment, *Chemosphere*, 59, 1197-1206.
- Shields, L. G., Suess, D. T., Prather, K. A., 2007, Determination of single particle mass spectral signatures from heavy-duty diesel vehicle emissions for PM<sub>2.5</sub> source apportionment. *Atmospheric Environment*, 41, 3841-3852.
- Thorpe, A., Harrison, R. M., 2008, Sources and properties of non-exhaust particulate matter from road traffic a review. *Science of the Total Environment*, 400, 270-282.
- UN, 2018, World urbanization prospects; <https://esa.un.org/unpd/wup/Download/>.
- Wróbel, A., Rokita, E., Maenhaut, W., 2000, Transport of traffic-related aerosols in urban areas. *The Science of the Total Environment*, 257, 199-211.
- Yoo, E. C., Dou, W. G., Cho, J. G., 2009, Study for the control of re-suspended dust from paved road, *The Annual Report of Busan Metropolitan City Institute of Health & Environment*, 19, 177-186.
- Zavala, M., Herndon, S. C., Wood, E. C., Onasch, T. B., Knighton, W. B., Marr, L. C., Kolb, C. E., Molina, L. T., 2009, Evaluation of mobile emissions contributions to Mexico City's emissions inventory using on-road and cross-road emission measurements and ambient data. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 9, 6305-6317.
- Zhang, K., Chai, F., Zhang, X., Duan, N., Ma, X., 2008, Mass Concentration Characters of PM<sub>2.5</sub> in Autumn in Jiaying, *Research of Environmental Sciences*, 3, 1-6.

- 
- Professor. Chul-Goo Hu  
Department of Environmental Engineering, Jeju National University  
[huchulgo@jejunu.ac.kr](mailto:huchulgo@jejunu.ac.kr)
  - Researcher. Su-Mi Kim  
Air Environmental Division, Jeju Special Self-Governing Province Research Institute of Health&Environment  
[droopy78@korea.kr](mailto:droopy78@korea.kr)
  - Professor. Ki-Ho Lee  
Department of Environmental Engineering, Jeju National University  
[leekih@jejunu.ac.kr](mailto:leekih@jejunu.ac.kr)