

## 대관령과 영종도에서 측정한 에어러솔 크기분포 및 CCN 수농도에 관한 연구

김종환<sup>1)</sup> · 박민수<sup>1)</sup> · 심성보<sup>2)</sup> · 염성수<sup>1),\*</sup>

<sup>1)</sup>연세대학교 대기과학과

<sup>2)</sup>국립기상연구소

(접수: 2011년 11월 23일, 수정: 2012년 1월 9일, 게재확정일: 2012년 1월 25일)

### On the Contrast of Aerosol Size Distribution and Cloud Condensation Nuclei Concentrations between the East and the West of the Korean Peninsula

Jong Hwan Kim<sup>1)</sup>, Min-su Park<sup>1)</sup>, Sungbo Shim<sup>2)</sup>, and Seong Soo Yum<sup>1),\*</sup>

<sup>1)</sup>Dept. of Atmospheric Sciences, Yonsei University

<sup>2)</sup>National Institute of Meteorological Research

(Received: 23 November 2011, Revised: 9 January 2012, Accepted: 25 January 2012)

**Abstract** Aerosol number concentration ( $N_{CN}$ ), size distribution and cloud condensation nuclei (CCN) concentration ( $N_{CCN}$ ) were measured during 16-21 August 2008 at Daegwallyeong (DG) located in the eastern rural region of the Korean Peninsula. In the very next week (22-29 August 2008) the same aerosol properties were measured at Yeongjong Island (YJ) in the Yellow Sea.  $N_{CN}$  for all 3 size cuts (above 3, 6 and 10 nm) was significantly higher at DG than YJ, but  $N_{CCN}$  was significantly lower at the former and resulted in the  $N_{CCN}/N_{CN}$  ratio more than twice higher at YJ ( $0.94 \pm 0.09$  vs.  $0.35 \pm 0.15$  at 0.53% supersaturation). The geometric mean diameter at DG,  $53 \pm 15$  nm, was much smaller than that at YJ,  $91 \pm 6$  nm, due to the particle formation events that were likely to have occurred continuously at DG. For given mean diameter, aerosols were more likely to act as CCN at YG compared to those at DG.

**Keywords:** Aerosol concentration and size distribution, cloud condensation, nuclei concentration

## 1. 서 론

포화상태를 초과한 수증기는 습도가 수백 %에 달하지 않는 이상, 응결할 수 있는 표면을 찾아야만 잠열을 방출하며 액체로 전환될 수 있다. 대기 중에서는 에어러솔의 일부가 그런 표면을 제공하는데 이들을 구름응결핵 (Cloud condensation nuclei, CCN)이라 부른다 (Seinfeld and Pandis, 2006).

인간 활동의 증가로 인해 인위적 에어러솔 배출이 증가하면서 CCN 수농도가 증가하였고, 그 결과 구름

입자의 수농도가 이전보다 많아지면서 구름의 미세물리가 변화하여 구름의 복사적 성질이 변화하는 것을 기후변화에 끼치는 에어러솔 간접효과 (aerosol indirect effect)라고 한다. 에어러솔 간접효과는 수치모형으로 기후변화를 예측하는데 있어서 가장 큰 불확실성의 원인으로 지목되고 있다 (IPCC, 2007).

한 개의 CCN은 한 개의 구름입자를 생성할 수 있기 때문에 구름입자의 수농도 증가를 이해하기 위해서는 CCN과 에어러솔의 수농도에 관한 정보가 필요하다. 그러나 수농도의 대부분을 직경  $0.1 \mu\text{m}$  미만 에어러솔이 차지하는 반면, 것처럼 작은 에어러솔들은 질량농도에서 극히 일부만을 차지하기 때문에 (Seinfeld and Pandis, 2006)  $\text{PM}_{10}$  또는  $\text{PM}_{2.5}$ 와 같은 기존의 에어러솔 질량농도 측정으로는 에어러솔 간접효과를 이

\*Corresponding Author: Seong Soo Yum, Department of Atmospheric Sciences, Yonsei University, 134 Shinchon-dong, Seodaemun-gu, Seoul 120-749, Korea  
E-mail: ssyum@yonsei.ac.kr

해하는데 필요한 정보를 얻기가 어렵다. 에어러솔 수농도 크기분포를 측정하는 광학입자계수기 (Optical particle counter, OPC)의 경우, 수농도의 대부분을 차지하는 직경  $0.1 \mu\text{m}$  미만 에어러솔을 감지할 수 없기 때문에 역시 에어러솔 간접효과를 연구하는 목적에는 적합하지 않다. 에어러솔 간접효과 연구를 위해서는 응결입자계수기 (Condensation particle counter, CPC), 전기 이동도 차분 분석기 (Differential mobility analyzer, DMA), 이 둘을 결합한 SMPS (Scanning mobility particle sizer), CCN 계수기 (CCN counter, CCNC)와 같은 측정 도구를 사용한 별도의 연구가 필요하다.

에어러솔은 대기 중 체류하는 시간이 수 시간 또는 수 일 이상 지속되기 어렵고 (IPCC, 2007) 전 지구적으로 분포가 매우 불균등하기 때문에, 체류시간이 수 년 또는 수 세기에 달하는 온실가스보다 더 많은 지역별 측정자료가 요구된다.

소수의 연구 (김필수, 1986; 김필수 등, 1986, 1991)를 제외하면 한반도 대기 중 에어러솔의 수농도 및 크기분포에 관한 연구는 2000년대 이후부터 활발히 진행되었다. 배귀남 등 (2001)은, 국내 선행연구들이 사용한 전위계 (electrometer) 보다 감지 능력이 뛰어난 CPC를 사용하여 서울 에어러솔 수농도 크기분포를 측정하였다. 이들 연구의 경우 기후변화 보다는 대기질에 초점을 맞추어 연구를 진행하였다는 것이 특징이다.

기후변화를 염두에 둔 한반도 에어러솔 수농도 연구는, 2001년 외국 과학자들의 주도로 동아시아에서 진행된 두 차례의 국제공동관측, Transport and Chemical Evolution over the Pacific (TRACE-P)와 Asian Pacific Regional Aerosol Characterization Experiment (ACE-ASIA)를 계기로 활발해졌다 (Weber *et al.*, 2003; Buzorius *et al.*, 2004; McNaughton *et al.*, 2004; Massling *et al.*, 2007). 국내 연구자들도 ACE-ASIA 측정자료를 제공받으면서 기후변화 연구에 에어러솔 수농도 자료를 사용하기 시작하였고 (송근용·염성수, 2004; Kim *et al.*, 2005a, 2005b), 이후 SMPS와 CPC를 이용한 대기 에어러솔 수농도 연구가 활발해졌다 (Lee *et al.*, 2008; Park *et al.*, 2008; Kim *et al.*, 2009; Park *et al.*, 2009; 이현혜 등 2010; Song *et al.*, 2010; 김유미 등 2011).

CCN 측정 장비는 국내 도입이 늦었기 때문에 외국 연구진의 장비에 의존하거나 (Yum *et al.*, 2005; Yum *et al.*, 2007) CCN 자료 없이 에어러솔 간접효과에 관한 연구가 이루어지기도 하였다 (송근용·염성수, 2004; Yum and Cha 2010; 김유준 등, 2011). 이후 장비가 국내에 도입되면서 자체적으로 CCN 측정자료가 생산됐으며 (심정보 등, 2008; 김우재, 2011; Kim *et al.*, 2011), 장비 자체를 독자기술로 개발하려는 시도도 진행되고 있다 (Park *et al.*, 2011).

본 연구는, 대관령과 영종도에서 직경 3 nm 이상

에어러솔 총 수농도 및 크기분포, CCN 수농도와 산란계수를 측정된 결과를 비교 분석한다. 대관령과 영종도는 거의 동일한 위도 상에 위치하고 있고 수평적으로 약 190 km 밖에 떨어져있지 않지만 각각 한반도 동쪽과 서쪽, 내륙과 섬이라는 조건이 다르다. 에어러솔과 구름응결핵이 한반도와 주변 지역의 다양한 조건에서 어떻게 분포하고 있는지에 관한 기초자료를 제공하고자 하는 것이 본 연구의 목적이다.

이미 심정보 등 (2008)이 같은 지역들에서 측정된 산란계수 분석결과를 제시한 바 있으므로 본 연구에서는 에어러솔 총 수농도와 CCN 분석에 초점을 맞추었다.

## 2. 연구방법

### 2.1. 측정장비

본 연구에서는 에어러솔 수농도 (Condensation nuclei number concentration,  $N_{CN}$ ) 측정을 위하여 미국 TSI사에서 제작한 CPC들을 사용하였다. CPC 3025는 직경 3 nm 이상, CPC3781은 6 nm 이상, CPC 3010은 10 nm 이상 에어러솔의 수농도를 1분마다 측정한다. TSI SMPS(model 3936L10)를 사용하여 직경 10~400 nm 범위 에어러솔의 크기분포를 102개의 로그 등간격 크기구간으로 나누어 3분마다 측정하였고, TSI 네펠로미터 (model 3563)을 이용하여 1분마다 파랑색 (450 nm), 녹색 (550 nm), 적색 (700 nm) 3개의 파장에서 산란계수를 측정하였다. 미국 Droplet Measurement Technologies (DMT)사의 CCN counter (CCNC)는 1초 간격으로 특정 과포화도에서 CCN 수농도를 측정할 수 있다. 본 연구에서는 10분 또는 5분마다 과포화도를 5 단계 (0.21%, 0.37%, 0.53%, 0.69%, 0.85%)로 변화시켜서 30분마다 CCN 분광 (spectrum)을 얻었다.

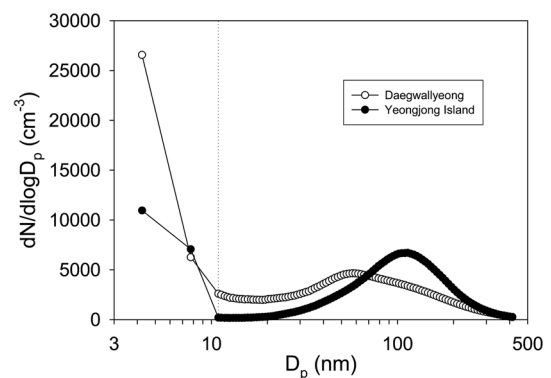


Fig. 1. Extended aerosol size distribution produced by combining the data from the SMPS and the three CPCs of different size cuts.

본격적인 측정에 앞서 장비들을 검정하였다. 총 4대의 TSI CPC (CPC3010, CPC3025, CPC3781, SMPS용 CPC3010)에 대해 3단계의 검정을 수행하였다. 먼저 무 에어러솔 필터 (zero filter)를 연결하였을 때 1분 동안 10개 이하의 입자를 감지하는 것을 확인함으로써 장비 내부 누출 (leak)이 없다는 것을 확인하였다. 다음으로 거품유량계를 사용하여 각 CPC 표본구의 흡입 유량이 설정값의 5% 이내의 오차를 갖도록 보정하였으며, CPC3025는 총 흡입유량뿐만 아니라 에어러솔 유량 (aerosol flow, 실제 측정이 이뤄지는 유량)과 덮개유량 (sheath flow, 레이저까지 표본을 운반하는 유량)까지 개별적으로 보정하였다. 끝으로 측정단계에 부합하는 수농도의 대소관계가 나타나는지 여부를 확인하였다. 즉, CPC3010과 SMPS용 CPC3010은 둘 다 10 nm 이상 에어러솔을 측정하므로 값들이 일치해야 하고, 이들보다 더 작은 6 nm까지 감지할 수 있는 CPC3781은 그보다 큰 값을 가져야 하고, 가장 작은 3 nm까지 감지할 수 있는 CPC3025이 최대 값을 가져야 한다. 본 연구에서 사용한 CPC3010과 SMPS용 CPC3010은 매우 높은 선형상관계수 값 ( $r^2 > 0.99$ )를 보였고 8% 이내의 오차를 보였으며 나머지 CPC들과의 대소관계를 항상 만족시켰다.

CCNC는 3단계 검정을 거쳤다. 먼저 측정을 앞두고 제작사에서 장비 내부의 실시간 유량 측정 센서를 보정하였다. 다음으로 장비 내부 누출이 없는지 확인하기 위해 펌프로 장비 내부 공기를 빨아낸 후 진공이 안정적으로 유지되는지와 무 에어러솔 필터를 연결하였을 때 수농도가 0으로 떨어지는지를 확인하였다. 끝으로 연세대학교 실험실에서 단분산 염화나트륨 에어러솔을 순차적으로 크기를 바꿔가며 발생시켜서 구름 활성화가 일어나는 직경을 측정하는 방법으로 장비 내부 과포화도를 보정하였고, 이 과정에서 Rose *et al.* (2008)이 analytical approximation 1 (AA1)이라 명명한 Köhler 모델을 사용하였다. AA1 모델은, 구름응결핵의 흡습성이 수용액의 농도와 무관하다는 가정을 바탕으로 별도의 수치해석 없이 손으로 임계과포화도를 계산할 수 있다는 장점이 있다.

종종 생략되는 이 과포화도 보정은 필수적이다. 장비가 납품될 때 제공되는 과포화도 값이 해발 1600 m에 위치하여 대기압이 840 mb 밖에 되지 않는 DMT 본사에서 검정한 것이기 때문이다. 장비 내부 과포화

도 값이 기압에 따라 바뀌기 때문에 별도의 보정 없이 해수면 근처에서 사용할 경우 실제보다 과포화도를 0.09%만큼 과소 판정하게 되는데 (Rose *et al.*, 2008), 상대오차로 환산하면 11~43%에 이른다.

2.2. 측정 장소 및 기간

2007년 8월 16일부터 21일까지 현재 구름물리선도 센터 (장기호 등, 2007)가 위치한 구 대관령 기상대 (37.4°N, 128.5°E)에서 앞서서 설명한 장비들을 이용하여 관측을 수행하였다. 대관령 관측소는 해발 842 m에 위치하기 때문에 CCNC 보정을 수행한 실험실과 고도 차로 인해 CCNC의 과포화도가 약 0.04% 낮아질 듯 하다. 이를 다시 보정하면 구름응결핵 수농도 ( $N_{CCN}$ )가 약 8% 정도 늘어날 테지만 보정의 불확실성이 크기 때문에 본 연구에서는 대관령과 실험실 사이의 고도 차이를 보정하지는 않았다. 이 곳은 구 대관령 고속도로로부터 약 50 m 떨어진 곳에 위치하지만 차량 통행이 드물기 때문에 그로 인한 영향은 적다고 할 수 있으며 자료에서 간헐적으로 발견된 차량에 의한 고농도 자료는 분석에서 제외시켰다.

8월 22일부터 28일까지는 영종도 항공기상대 건물 (37.5°N, 126.4°E)에서 동일한 방법으로 측정자료를 생산하였다. 관측지점이 영종도의 서쪽 끝에 위치하여 인천국제공항의 주요 시설들로부터 수 km 떨어져 있었기 때문에 인위적인 배출원의 직접적인 영향에서 벗어나 있었다. 한편 해발 100 m가 안 되는 언덕에 위치하고 있으므로 기압 차에 의한 CCNC의 과포화도 오차는 무시할 수 있다.

3. 결과 및 분석

3.1. 에어러솔 수농도와 크기분포

대관령과 영종도에서 세 종류의 CPC들로 측정된 직경 3 nm, 6 nm, 10 nm 이상 에어러솔의 수농도 ( $N_{CN,3nm}$ ,  $N_{CN,6nm}$ ,  $N_{CN,10nm}$ ), 직경 3 nm 이상 6 nm 미만의 초미세 에어러솔의 수농도 비율 ( $N_{CN,3-6nm} / N_{CN,3nm}$ ) 및 SMPS로 측정된 직경 10 nm 이상 에어러솔의 기하평균직경 ( $D_g$ )을 Table 1에 나타내었다.

대관령의 평균  $D_g$ 값은  $53 \pm 15$  nm로서, 제주도 (Yum *et al.*, 2007), 백령도 (Kim *et al.*, 2011), 남해와 동중국해 (Kim *et al.*, 2009) 선행연구들의 값보다는 현저

Table 1. Average aerosol concentrations at different size cuts, ratio of ultrafine (3~6 nm) to total aerosol concentration and geometric mean diameter at Daegwallyeong and Yeongjong Island.

	$N_{CN,3nm}$ (cm <sup>-3</sup> )	$N_{CN,6nm}$ (cm <sup>-3</sup> )	$N_{CN,10nm}$ (cm <sup>-3</sup> )	$N_{CN,3-6nm}/N_{CN,3nm}$	$D_g$ (nm)
Daegwallyeong	11939 ± 4144	5536 ± 1592	5069 ± 2314	0.59 ± 0.02	53 ± 15
Yeongjong Island	7137 ± 1086	4664 ± 753	3011 ± 456	0.37 ± 0.07	91 ± 6

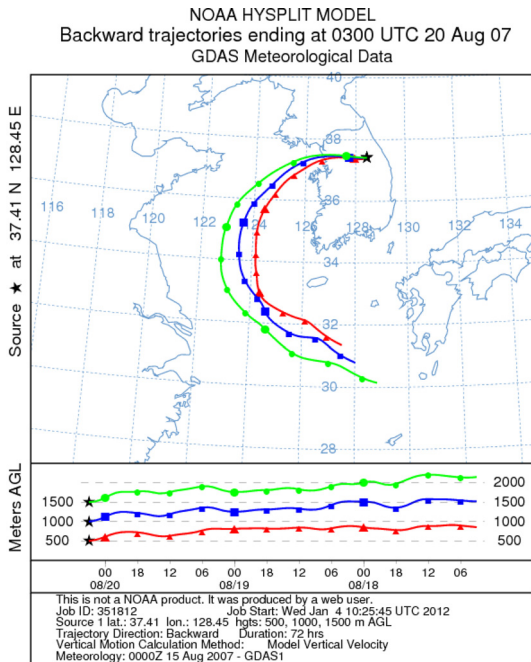


Fig. 2. Typical air mass back trajectories at Daegwallyeong site during the measurement period.

히 낮았고, 에어로솔 생성현상이 관측된 황해 (Kim *et al.*, 2009)와 비슷하였다.  $N_{CN,10nm}$  평균값 ( $5069 \pm 2314 \text{ cm}^{-3}$ ) 역시 황해와 비슷하였는데, 대관령에서 에어로솔 생성현상이 일어났을 가능성이 큰 것을 의미한다. SMPS로 측정된 직경 10 nm 이상 에어로솔의 크기분포를, 세 대의 CPC가 포괄하는 크기 영역의 차이를 이용하여 3 nm까지 확장한 것을 Fig. 1에 나타내었다. 초미세 에어로솔이 영종도보다 대관령에서 훨씬 더 많았다. 그러나 김유미 등 (2011)이 분석한 것처럼 최빈값 (mode) 직경이 수 시간 동안 지속적으로 성장하는 현상은 대관령에서 오직 한 차례만 관측되었고, 그 외 기간에도  $D_g$ 가 전반적으로 낮았다. 따라서 대관령에서는 초미세 에어로솔들이 특정 이벤트가 아니라 상시적으로 생성되었다고 볼 수 있다.

Yum *et al.* (2007)과 Kim *et al.* (2009)은 각각 제주도과 황해에서 관측한 생성현상을 분석하면서 기단이 몽골이나 러시아에서 올 때 생성현상이 발생하는 경향이 있다고 보고한 바 있다. 그러나 대관령 측정기간 동안의 역궤적을 HYSPLIT 모형 (Drexler *et al.*, 1998)으로 분석한 결과, 기단은 한반도 남쪽 바다로부터 시계방향으로 휘어지면서 한반도 내륙을 거쳐서 관측소에 도달하였다 (Fig. 2). 대부분의 경우 기단이 한반도 내륙을 12시간 이내로 빠르게 지나왔고, 역궤적 경로에 있는 서울 (김우재, 2011)과 광주 (Park *et*

*al.*, 2007)와 비교했을 때 대관령  $N_{CN}$ 이 각각 1/3과 1/2 이하로 낮았기 때문에 내륙 도시 오염물질의 영향은 작다고 판단하였다.

즉, 대관령은 안면도, 제주도, 황해에서 관측되는 것과는 다른 메커니즘으로 에어로솔이 생성되었을 가능성이 크다. 자료가 부족하기 때문에 생성의 구체적인 메커니즘 또는 조건을 규명하는 것은 불가능하다. 그러나 안면도, 제주도, 황해와 달리 대관령 관측소는 울창한 숲 속에 위치하고 있기 때문에, 북유럽의 경우처럼 삼림에서 배출되는 테르펜 (terpene) 등의 유기물질이 작용한 결과로 추측할 수 있다 (Tunved *et al.*, 2006). 그러나 대관령 일대 식생 정보가 없기 때문에 자세한 설명은 할 수 없다.

영종도는 2005년 제주도에서 해양성 기단만을 선별하여 평균한 선행연구 (Yum *et al.*, 2007)와  $D_g$  및  $N_{CN,10nm}$ 이 비슷하였다. 반면에 대륙성 기단 또는 기단을 구분하지 않은 제주도, 백령도, 남해, 동중국해의 선행연구들 (Kim *et al.*, 2009; Kim *et al.*, 2011) 보다는  $N_{CN,10nm}$ 가 현저히 낮았다. 따라서 본 연구의 측정 시기 동안 영종도는 대륙의 영향을 상대적으로 받은 해양성 기단에 속했다고 볼 수 있다. 측정 당시 영종도 대기의 역궤적을 분석한 결과, 전체 기간의 절반 정도를 해양성 기단이 차지하였다.

비록 영종도는 섬이지만, 해염입자의 영향은 무시할 수 있다고 본 연구에서는 가정하였다. 해염입자 수농도는  $10 \text{ ms}^{-1}$  이상의 강한 바람 하에서도  $50 \text{ cm}^{-3}$ 을 잘 넘지 않는데 본 연구에서 측정된 에어로솔 수농도가 그보다 훨씬 크기 때문이다 (Andrea and Rosenfeld, 2008). 제주도 (Lee *et al.*, 2007)와 백령도 (김상균 등, 2009)에서 에어로솔 화학성분을 측정된 선행연구들 역시, 대부분의 수농도가 집중되어 있는 직경 1 마이크로 미만의 크기영역에서는 해염입자가 무시해도 좋을 만큼 적다고 보고한 바 있다.

### 3.3. CCN 분광

대관령과 영종도에서 측정된 과포화도별  $N_{CCN}$ 과 CCN 비율( $N_{CCN}/N_{CN,10nm}$ )을 Table 2에 나타내었다. 또한 대관령과 영종도에서 측정된 CCN 평균 분광을, 2004년 안면도에서 Yum *et al.* (2005)이 측정된 CCN 분광과 2005년 제주 고산에서 Yum *et al.* (2007)이 0.6% 과포화도에서 측정된 CCN 수농도와 함께 Fig. 3에 나타내었다.

영종도, 안면도, 제주도와 비교하였을 때 대관령은 유일하게 산속에 위치하고 있는데 CCN 수농도가 모든 과포화도에서 가장 낮았다. 관측 기간이 여름이었기 때문에 대관령에 인적이 적었던 것과 상대적으로 다른 지역들보다 대도시로부터 더 멀리 떨어져 있기 때문인 듯 하다. 관측 당시 대관령에 자주 나타났던

**Table 2.** Average CCN concentration ( $N_{CCN}$ ) at various supersaturations, the ratio of  $N_{CCN}$  to  $N_{CCN_{10nm}}$ , the ratio of  $N_{CCN_{pred}}$  (predicted CCN concentration) to  $N_{CCN_{meas}}$  (measured CCN concentration), and the coefficient of determination ( $r^2$ ) for  $N_{CCN_{pred}}$  vs.  $N_{CCN_{meas}}$  linear regression at Daegwallyeong and Yeongjong Island.

	Daegwallyeong				Yeongjong Island			
	$N_{CCN}$ ( $cm^{-3}$ )	$N_{CCN}/N_{CCN_{10nm}}$	$N_{CCN_{pred}}/N_{CCN_{meas}}$	$r^2$	$N_{CCN}$ ( $cm^{-3}$ )	$N_{CCN}/N_{CCN_{10nm}}$	$N_{CCN_{pred}}/N_{CCN_{meas}}$	$r^2$
0.21%	633 ± 173	0.16 ± 0.08	2.25 ± 1.11	0.69	1414 ± 246	0.48 ± 0.07	1.32 ± 0.33	0.86
0.37%	1131 ± 292	0.28 ± 0.12	1.91 ± 0.47	0.78	2414 ± 481	0.81 ± 0.10	1.01 ± 0.19	0.87
0.53%	1401 ± 375	0.35 ± 0.15	1.74 ± 0.60	0.73	2791 ± 519	0.94 ± 0.09	0.97 ± 0.18	0.82
0.69%	1669 ± 464	0.43 ± 0.17	1.60 ± 0.41	0.83	2981 ± 567	1.01 ± 0.08	0.92 ± 0.14	0.88
0.85%	1850 ± 517	0.49 ± 0.18	1.63 ± 0.52	0.71	2992 ± 716	1.04 ± 0.07	0.90 ± 0.13	0.90

지형성 안개로 인한 세정효과 (scavenging effect) 때문에 CCN 수농도가 감소했을 수도 있다. 대관령이 영종도보다 고도가 더 높기 때문에 대관령에서 기압이 약 10% 정도 낮다는 점을 감안하더라도, CCN 수농도의 대소관계는 근본적으로 바뀌지 않았다.

대관령의 낮은  $N_{CCN}$ 이, 3.1절에서 언급한 에어러솔 생성 당시의 높은 에어러솔 수농도와 맞물리면서 CCN 비율 역시 여타의 지역보다 낮은 결과를 만들었다.

앞 절에서 영종도 에어러솔은 대륙의 영향을 덜 받은 해양성 기단과 유사하다고 제시한 바 있다. 그러나 영종도  $N_{CCN}$ 은 Yum *et al.* (2007)이 중국오염 기단으로 분류한 경우와 비슷한 수준으로 높았다.

이는 영종도에서 관측된 높은 이산화황 ( $SO_2$ ) 농도 때문인 듯 하다. 환경관리공단에 따르면, 영종도  $SO_2$ 의 농도 ( $7 \pm 3$  ppb)가 대관령 ( $2 \pm 0$  ppb)은 물론 서울 ( $4 \pm 0$  ppb)보다도 높았다. 관측장소로부터 남쪽으로 약 30 km 떨어진 곳에 위치한 영흥화력발전소와 신인천

복합발전소 때문인 듯 하다. 특히 영흥화력발전소는 석탄을 주원료로 사용하는데 이 과정에서 많은  $SO_2$ 가 배출된다. 전력 공급의 80 퍼센트 이상을 석탄 화력 발전소에 의존하고 있는 중국으로부터도 다량의 이산화황이 수송되었을 수 있다 (Lewis and Gallagher, 2011). 이산화황이 풍부한 조건에서는 광화학반응에 의해 황산 ( $H_2SO_4$ ) 또는 황산암모늄 ( $(NH_4)_2SO_4$ ) 등의 황산염이 생성되기 유리한데 이런 입자들은 같은 직경의 다른 입자들보다 CCN으로 더 쉽게 작용한다 (Seinfeld and Pandis, 2006).

$N_{CCN}$ 이 높았기 때문에 영종도는 본 연구의 대관령과 안면도·고산·백령도 선행연구들 보다 CCN 비율이 압도적으로 컸다. 특히 장비 내 커다란 온도 경도를 요구하는 0.85% 과포화도  $N_{CCN}$ 의 경우, 장비 과부하 때문에 고농도 사례일이 제외된 것임을 감안하면 실제 영종도의  $N_{CCN}$ 은 Table 2에 제시된 것보다 더 높을 개연성이 크고, 그 경우 CCN 비율은 더욱 높아진다.

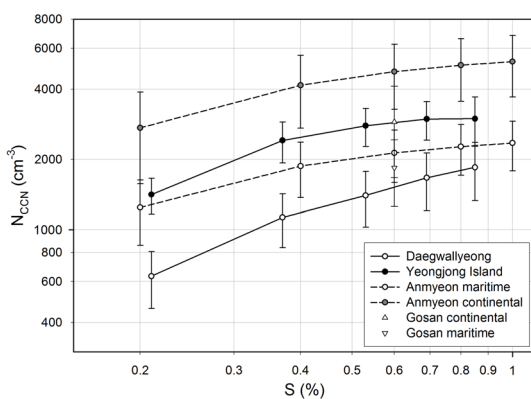
#### 4. 토의

##### 4.1. 에어러솔 구름활성화도의 입자 크기 및 화학성분 의존도

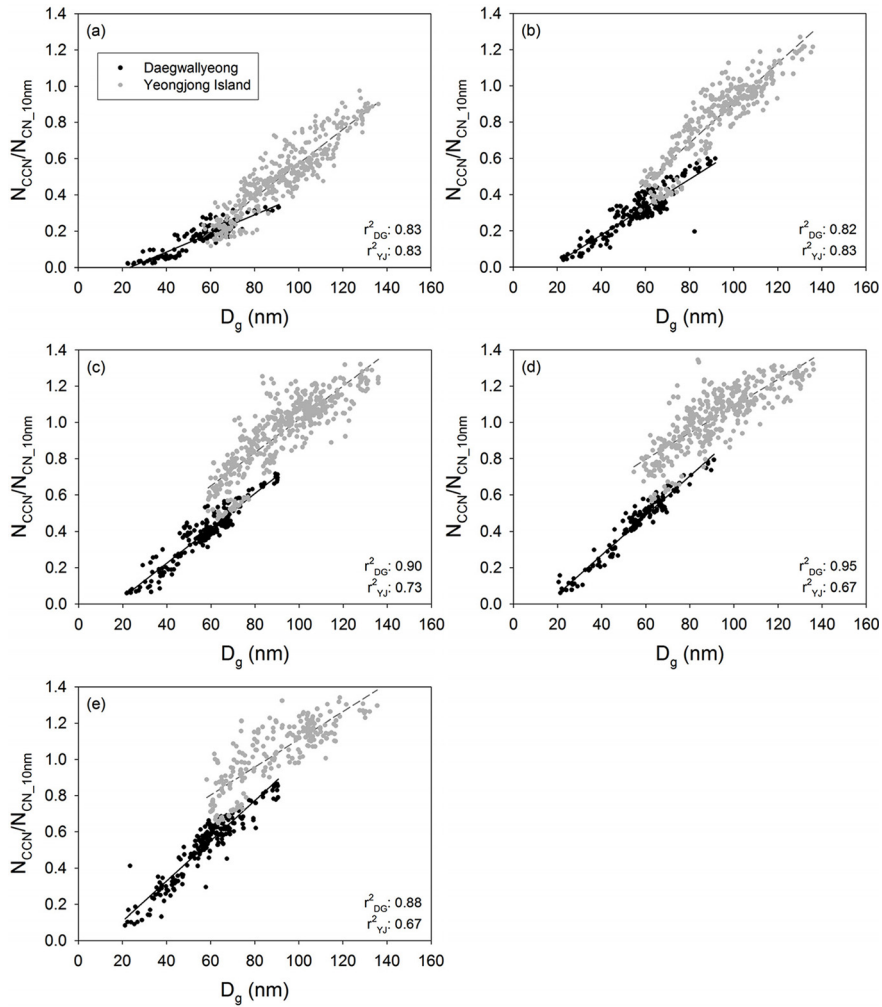
에어러솔은 CCN으로 작용하는데 있어서 1차적으로 크기에 의존하지만 화학성분 역시 변수로 작용한다는 사실은 여러 선행 연구에 의해 지적되어 왔다 (Dusek *et al.*, 2006; Hudson, 2007).

본 연구에서는 에어러솔이 CCN으로 작용하는데 있어서 크기와 화학성분에 얼마나 의존하는지 알아보기 위해 SMPS 측정 주기인 3분마다 평균한 각 과포화도에서의  $N_{CCN}/N_{CCN_{10nm}}$ 을 같은 시간대에 측정된  $D_g$ 와 비교하였다 (Fig. 4).

$D_g$ 는 대기 중에서 임의의 에어러솔 입자 하나를 선택하였을 때 그 입자의 평균 직경이라고 해석할 수 있다. 마찬가지로  $N_{CCN}/N_{CCN_{10nm}}$ 은 선택된 에어러솔이



**Fig. 3.** Average CCN spectra at Daegwallyeong and Yeongjong Island in comparison to those measured at Anmyeon in 2004 (Yum *et al.*, 2005) and at Gosan in 2005 (Yum *et al.*, 2007).



**Fig. 4.** CCN ratio ( $N_{CCN}/N_{CN\_10nm}$ ) at (a) 0.21%, (b) 0.37%, (c) 0.53%, (d) 0.69% and (e) 0.85% supersaturation versus geometric mean diameter ( $D_g$ ) for Daegwallyeong (DG) and Yeongjong Island (YJ). The linear regression line and the corresponding coefficient of determination for each site are also shown.

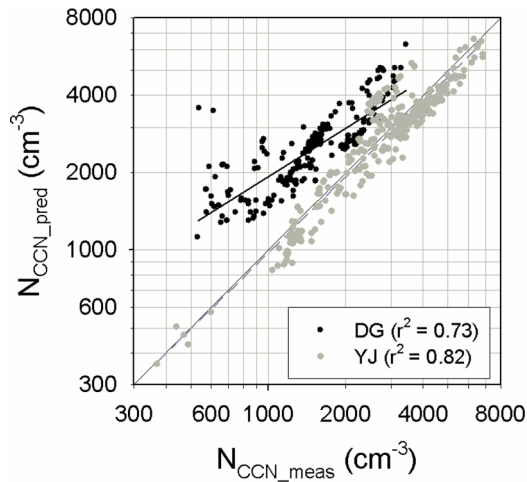
CCN으로 작용할 확률이라고 해석할 수 있다. 따라서 이 둘을 비교하면 대기 중에서 임의의 에어러솔 입자를 선택하였을 때 그 크기의 입자가 CCN으로 작용할 확률을 추정할 수 있을 것이라 가정하였다.

Fig. 4를 보면, 대관령과 영종도 모두  $D_g$ 와  $N_{CCN}/N_{CN\_10nm}$  사이에 밀접한 상관관계가 있다.  $r^2$  역시 모든 과포화도에서 대관령과 영종도가 각각 0.82와 0.67 이상이었다. 또한, 같은  $D_g$ 에 대하여 대관령보다 영종도 에어러솔 입자가 CCN으로 작용할 가능성이 크다는 것도 보여준다. 영종도에서 매우 높았던  $SO_2$  때문에 에어러솔에 황산염 성분이 포함되었을 가능성이 크다는 추측을 뒷받침해준다. 따라서 CCN 수농도를

추정하기 위하여 크기 정보뿐만 아니라 관련 화학 정보도 필수적이다.

한편, 대관령과 영종도 둘 다 0.53% 미만의 과포화도에서는  $r^2$ 가 0.82~0.83으로 비슷한 값을 보였지만, 과포화도 0.53% 이상에서는 대관령의 상관관계가 ~0.9로 높아지는 반면에 영종도의 값은 ~0.7로 낮아졌다. 직경이 작은 에어러솔의 화학성분이 영종도보다 대관령에서 더 균질했다는 것인데, 대관령에서 진행 중인 에어러솔 생성현상으로 설명할 수 있다.

모든 입자들이 황산암모늄이라고 가정하고 CCN 수농도를 예측한 결과에서도 비슷한 사실을 확인할 수 있다 (Fig. 5). 높은  $SO_2$  때문에 에어러솔 중 황산염



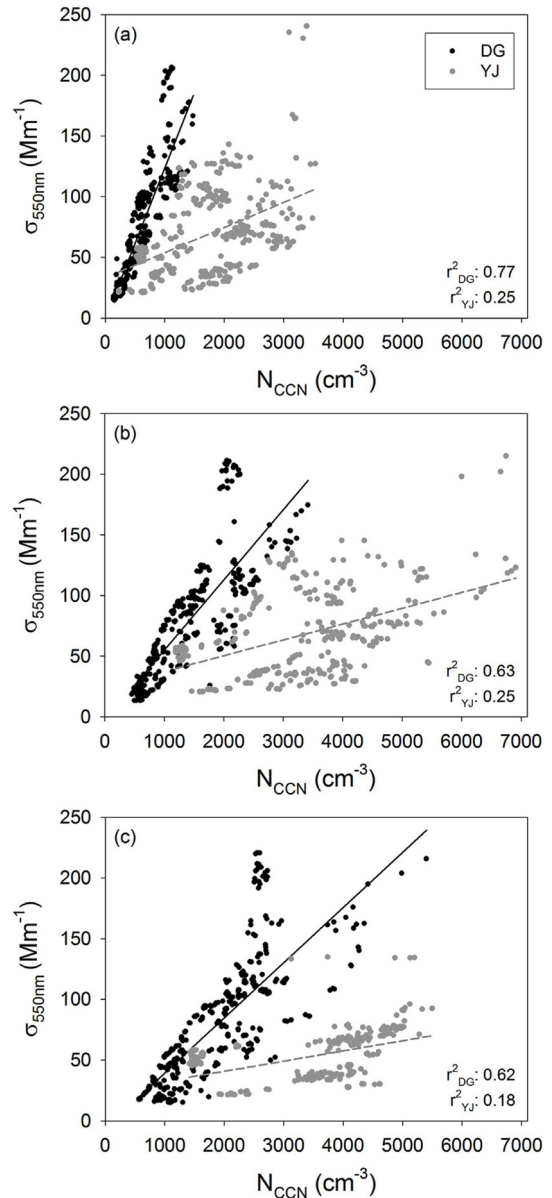
**Fig. 5.** CCN closure results at 0.53% S for Daegwallyeong (DG) and Yeongjong Island (YJ), where predicted CCN concentration ( $N_{CCN\_pred}$ ) was calculated with the assumption that all particles were composed of pure ammonium sulfate.

이 많을 것이라고 추측되는 영종도에서는 에어러솔 크기 정보로부터 예측한 0.53% 과포화도 하에서의 CCN 수농도 ( $N_{CCN\_pred}$ )가 실제 측정된 CCN 수농도 ( $N_{CCN\_meas}$  즉  $N_{CCN}$ )와 거의 일치했다. 황산암모늄과 같은 무기염은 입자 성분 중 소량만 있어도 전체 입자의 흡습성에 크게 영향을 끼치기 때문에 (Bilde and Svenningsson, 2004) 영종도 에어러솔들의 화학성분이 대관령보다 이질적이더라도 모두 소량의 황산암모늄을 포함하고 있으면 Fig. 5처럼 상관계수가 크게 나타날 수 있다.

산림에서 배출된 테르펜 등에 의한 유기성 물질이 에어러솔에 많이 포함되었거나, 영종도보다는 에어러솔에 황산염 성분이 적을 것으로 추정되는 대관령에서는 CCN 수농도 예측값이 측정값보다 50% 이상으로 큰 경우가 흔했다. 대기 중 에어러솔 성분들 중 황산염만큼 흡습성이 큰 물질이 드물다는 점과, 유기성 에어러솔은 같은 크기 황산염보다 CCN으로 작용하기 더 어렵다는 사실 (Petters and Kreidenweis, 2007)과 부합하는 결과이다. 모든 과포화도에서 예측값과 관측값 사이의  $r^2$ 도 영종도가 대관령보다 더 높았다 (Table 2).

**4.2. 에어러솔 산란계수와 CCN의 상관관계**

심성보 등 (2008)은 산란계수와  $N_{CCN}$ 의 변화 경향이 매우 유사하다는 점을 지적하면서 황산암모늄 에어러솔의 산란효율이 높고 흡습성이 크기 때문일 것



**Fig. 6.** Scatterplot of scattering coefficient versus  $N_{CCN}$  at (a) 0.21%, (b) 0.53% and (c) 0.85% supersaturation for Daegwallyeong (DG) and Yeongjong Island (YJ). The linear regression line and the corresponding coefficient of determination for each site are also shown.

으로 추정할 바 있다.

앞 절에서 대관령의 에어러솔은 테르펜 등으로부터 유래한 유기 (organic) 성분이 많고 영종도의 에어러솔은  $SO_2$ 로부터 유래한 황산염 성분이 많을 것으로

예상한 바 있다. 그러나 심정보 등 (2008)의 예상과는 달리, 영종도보다 대관령에서 산란계수와  $N_{CCN}$  사이에 더 높은 상관관계가 발견되었다 (Fig. 6).

주된 이유는 산란계수와  $N_{CCN}$ 이 직경 증가에 다르게 반응하기 때문이다. 산란계수는 직경이 커질수록 연속적으로 값이 증가하지만,  $N_{CCN}$ 은 임계직경 이상의 직경을 갖는 입자들의 총 수농도이므로 이들 입자들의 직경의 변화에 제한적으로만 영향을 받는다. 그런데 황산암모늄은 높은 흡습성 때문에 직경이 작더라도 CCN으로 작용할 수 있기 때문에 CCN 수농도가 높더라도 높은 산란계수를 보이지 않을 수도 있다. Fig. 6에서 CCN 수농도가 같을 때, 영종도 에어러솔의 산란계수가 대관령보다 대부분 작다는 사실도 이를 뒷받침한다. 한편 산란계수가 산란효율에는 선형적으로 비례하지만 직경에 대해서는 제곱에 비례하기 때문에 (Hoppel *et al.*, 1990) 황산암모늄의 높은 산란효율이 끼치는 영향력은 제한적이다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 대관령과 영종도에서 측정된 에어러솔 수농도 크기분포 및 구름응결핵 (Cloud condensation nuclei, CCN) 분광을 비교 분석하였는데, 같은 위도임에도 불구하고 한반도 동쪽과 서쪽에 위치한 두 지역은 매우 다른 결과를 보여주었다.

영종도는 한반도 주변에서 측정된 선행연구들의 결과와 비교하였을 때 전체 에어러솔 중 CCN 수농도의 비율이 매우 높았는데, 높은  $SO_2$  농도 때문인 듯하다. 반면에 한반도 동쪽에 속한 대관령은, 영종도 또는 서해안이나 서해 상에서 측정된 선행연구들의 결과와 비교하였을 때 CCN 수농도가 가장 낮은 편에 속하였다. 에어러솔 생성현상이 지속적으로 진행되었기 때문에 기하평균직경 ( $D_g$ )이 영종도나 한반도 주변 선행연구들 보다 낮았으며 이 때문에 CCN 비율 역시 가장 낮았다.

에어러솔의 직경과 해당 에어러솔이 CCN으로 작용할 확률 사이에는 강한 연관성이 있는 것으로 나타났다. 그러나 같은 직경일 경우 영종도 에어러솔이 대관령 에어러솔보다 더 효율적으로 CCN으로 작용했는데, 화학성분 차이 때문이다. 황산암모늄을 가정해서 CCN 수농도를 예측한 뒤 이를 실제 측정값과 비교한 결과에서 영종도가 더 높은 일치율을 보인 것과, 산란계수와 CCN 수농도 사이의 상관관계가 영종도보다 대관령에서 더 높았던 것 역시 같은 이유로 설명할 수 있다.

한반도 동쪽과 서쪽의 에어러솔 및 CCN 분포와 그것에 영향을 끼치는 대기 현상이 다르다는 본 연구의 결과는 단일 장소에서 측정된 결과로부터 한반도 전

역을 대표할 에어러솔 및 CCN 정보를 얻어내는 것이 어렵다는 사실을 보여준다. 따라서 향후 한반도 내 더 많은 지역에서 추가적인 관측 연구가 필요하다.

## 감사의 글

이 연구는 기상청 기후변화 감시·예측 및 국가정책지원 강화사업(RACS 2010- 5001)의 지원으로 수행되었습니다. 환경관리공단 측정자료는 전국 실시간 대기오염도 공개 홈페이지 (<http://www.airkorea.or.kr>)에서 내려 받아 사용하였습니다.

## 참고문헌

- 김우재, 2011: 2004년 6월~2010년 6월 동안 관측한 서울 에어로졸과 구름응결핵의 물리적 성질에 대한 연구. 연세대학교, 석사학위논문, 53pp.
- 김유미, 김상우, 윤순창, 장임석, 이석조, 이미혜, 김지형, 2011: 제주 고산에서 2009년 가을에 관측된 입자 생성 및 성장 현상의 특성. *대기*, **21**, 35-44.
- 김유준, 이진화, 김병근, 2011: 한반도 주변에서 MODIS와 NCEP/NCAR 재분석 자료를 이용한 에어로졸과 구름의 연관성 분석. *대기환경학회지*, **27**, 152-167.
- 김필수, 1988: 서울 대기 Aerosol의 물리적 특성: 가시광선의 산란. *한국대기보전학회지*, **4**, 28-37.
- 김필수, 김운장, 이양호, 조숙현, 안승태, 1986: 도시대기 Aerosol의 입자직경 0.01~1.0  $\mu\text{m}$  범위의 농도 변화 특성. *한국대기보전학회지*, **7**, 227-234.
- 김필수, 오미석, 김의훈, 1991: 서울 대기 에어러솔의 농도와 광소산에 관한 연구. *한국대기보전학회지*, **7**, 227-234.
- 배귀남, 김민철, 임득용, 문길주, 백남준, 2003: 2001년 겨울철 서울 대기 에어로졸의 입경별 수 농도 특성. *한국대기환경학회지*, **19**, 167-177.
- 송근용, 염성수, 2004: ACE-Asia 기간 중 해양성/대륙성 구름의 미세물리적 대조에 대한 연구. *한국기상학회지*, **40**, 177-189.
- 심정보, 윤영준, 염성수, 차주완, 김종환, 김준, 이방용, 2008: 네펠로미터로 관측한 서울의 에어러솔 산란계수 특성. *대기*, **18**, 459-474.
- 이현혜, 김진영, 이승복, 배귀남, 염성수, 2010: 서울지역 겨울철 대기 에어로졸의 수 농도 및 산란계수 분석. *Particle and Aerosol Research*, **6**, 91-103.
- 장기호, 오성남, 정기덕, 양하영, 이명주, 정진입, 조요한, 김효경, 박균명, 염성수, 차주완, 2007: 구름물리 관측시스템 및 산출물 검증. *대기*, **17**, 101-108.
- Bilde, M. and B. Svenningsson, 2004: CCN activation of slightly soluble organics: the importance of small amounts of inorganic salt and particle phase. *Tellus*,



- 56B**, 128-134.
- Buzorius, G., C. S. McNaughton, A. D., Clarke, D. S. Covert, B. Blomquist, K. Nielsen, and F. J. Brechtel, 2004: Secondary aerosol formation in continental outflow conditions during ACE-Asia. *J. Geophys. Res.*, **109**, D24203, doi: 10.1029/2004JD004749.
- Draxler, R.R. and G.D. Hess, 1998: An overview of the HYSPLIT\_4 modeling system of trajectories, dispersion, and deposition. *Aust. Meteor. Mag.*, **47**, 295-308.
- Dusek, U., G. P. Frank, L. Hildebrandt, J. Curtius, J. Schneider, S. Walter, D. Chand, F. Drewnick, S. Hings, D. Jung, S. Borrmann, and M. O. Andreae, 2006: Size matters more than chemistry for cloud-nucleating ability of aerosol particles. *Science*, **312**, 1375-1378.
- Hoppel, W. A., J. W. Fitzgerald, G. M. Frick, R. E. Larson, and E. J. Mack, 1990: Aerosol size distributions and optical properties found in the marine boundary layer over the Atlantic Ocean. *J. Geophys. Res.*, **95(D4)**, 3659-3686.
- Hudson, J. G., 2007: Variability of the relationship between particle size and cloud-nucleating ability. *Geophys. Res. Lett.*, **34**, L08801, doi:10.1029/2006GL028850.
- IPCC, 2007: Climate Change 2007: The Scientific Basis. Cambridge Univ. Press, New York, 1056pp.
- Kim, S.-W., S.-C. Yoon, A. Jefferson, J. A. Ogren, E. G. Dutton, J.-G. Won, Y. S. Ghim, B.-I. Lee, and J.-S. Han, 2005a: Aerosol optical, chemical and physical properties at Gosan, Korea during Asian dust and pollution episodes in 2001. *Atmos. Env.*, **39**, 39-50.
- Kim, J., S.-C. Yoon, A. Jefferson, W. Zahorowski, and C.-H. Kang, 2005b: Air mass characterization and source region analysis for the Gosan super-site, Korea, during the ACE-Asia 2001 field campaign. *Atmos. Env.*, **39**, 6513-6523.
- Kim, J. H., S. S. Yum, Y.-G. Lee, and B.-C. Choi, 2009: Ship measurements of submicron aerosol size distributions over the Yellow Sea and the East China Sea. *Atmos. Res.*, **93**, 700-714.
- Kim, J. H., S. S. Yum, S. Shim, S.-C. Yoon, J. G. Hudson, J. Park, and S.-J. Lee, 2011: On aerosol hygroscopicity, cloud condensation nuclei (CCN) spectra and critical supersaturation measured at two remote islands of Korea between 2006 and 2009. *Atmos. Chem. Phys. Disc.*, **11**, 19683-19727.
- Lee, Y.-G., H.-W. Lee, M.-S. Kim, C. Y. Choi, J. Kim, 2008: Characteristics of particle formation events in the coastal region of Korea in 2005. *Atmos. Env.*, **42**, 3729-3739.
- Lewis, J. I. and K. S. Gallagher, 2011: Energy and environment in China: achievements and enduring challenges. Chapter 13 in Axelrod, R. S., S. D. Vandever, and D. L. Downie, eds, 2011. The Global Environment Institutions, Law, and Policy, CQ Press, Washington D.C., 321 pp.
- Massling, A., S. Leinert, A. Wiedensohler, and D. Covert, 2007: Hygroscopic growth of sub-micrometer and one-micrometer aerosol particles measured during ACE-Asia. *Atmos. Chem. Phys.*, **7**, 3249-3259.
- McNaughton, C.S., A. D. Clarke, S. G. Howell, K. G. Moore II, V. Brekhovskikh, R. J. Weber, D. A. Orsini, D. S. Covert, G. Buzorius, F. J. Brechtel, G. R. Carmichael, Y. Tang, F. L. Eisele, R. L. Mauldin, A. R. Bandy, D. C. Thornton, and B. Blomquist, 2004: Spatial distribution and size evolution of particles in Asian outflow: significance of primary and secondary aerosols during ACE-Asia and TRACE-P. *J. Geophys. Res.*, **109**, D19S06, doi:10.1029/2003JD003528.
- Park, K., J. Y. Park, J.-H. Kwak, G. N. Cho and J.-S. Kim, 2008: Seasonal and diurnal variations of ultrafine particle concentration in urban Gwangju, Korea: Observation of ultrafine particle events. *Atmos. Env.*, **42(4)**: 788-799.
- Park, K., J.-S. Kim, S. Park, 2009: Measurements of hygroscopicity and volatility of atmospheric ultrafine particles during ultrafine particle formation events at urban, industrial, and coastal sites. *Envir. Sci. Technol.*, **43(17)**, 6710-6716.
- Park, M., J. Oh, and K. Park, 2011: Development of a Cloud Condensation Nuclei (CCN) counter using a laser and CCD camera. *Front. Environ. Sci. Engin. China*, **5**, 313-319.
- Petters, M. D. and S. M. Kreidenweis, 2007: A single parameter representation of hygroscopic growth and cloud condensation nucleus activity. *Atmos. Chem. Phys.*, **7**, 1961-1971.
- Rose, D., S. S. Gunthe, E. Mikhailov, G. P. Frank, U. Dusek, M. O. Andreae, and U. Pöschl, 2008: Calibration and measurement uncertainties of a continuous-flow cloud condensation nuclei counter (DMT-CCNC): CCN activation of ammonium sulfate and sodium chloride aerosol particles in theory and experiment. *Atmos. Chem. Phys.*, **8**, 1153-1179.
- Seinfeld, J. H. and S. N. Pandis, 2006: *Atmospheric Chemistry and Physics: From Air Pollution to Climate Change*. Wiley, New Jersey, 1232pp.

- Song, M., M. Lee, J. H. Kim, S. S. Yum, G. Lee, and K.-R. Kim, 2010: New particle formation and growth in relation to vertical mixing and chemical species during ABC-EAREX2005. *Atmos. Res.*, **97**, 359-370.
- Tunved, P., H.-C. Hansson, V.-M. Kerminen, J. Ström, M. Dal Maso, H. Lihavainen, Y. Viisanen, P. P. Aalto, M. Komppula, M. Kulmala, 2006: High natural aerosol loading over boreal forests. *Science*, **312**, 261-263.
- Weber, R. J., S. Lee, G. Chen, B. Wang, V. Kapustin, K. Moore, A. D. Clarke, L. Mauldin, E. Kosciuch, C. Cantrell, F. Eisele, D. C. Thornton, A. R. Bandy, G. W. Sachse, and H. E. Fuelberg, 2003: New particle formation in anthropogenic plumes advecting from Asia observed during TRACE-P. *J. Geophys. Res.*, **108(D21)**, doi:10.1029/2002JD003112.
- Yum, S. S. and J.-W. Cha, 2010: Suppression of very low intensity precipitation in Korea. *Atmos. Res.*, **98**, 118-124.
- Yum, S. S., J. G. Hudson, K. Y. Song, and B.-C. Choi, 2005: Springtime cloud condensation nuclei concentrations on the west coast of Korea. *Geophys. Res. Lett.*, **32**, L09814, doi:10.1029/2005GL022641.
- Yum, S. S., G. Roberts, J. H. Kim, K. Song, and D. Kim, 2007: Submicron aerosol size distributions and cloud condensation nuclei concentrations measured at Gosan, Korea, during the Atmospheric Brown Clouds–East Asian Regional Experiment 2005. *J. Geophys. Res.*, **112**, D22S32, doi:10.1029/2006JD008212.