

황해상 덕적도의 대기 에어로졸 특성

Aerosol Characteristics at Tokchok Island in the Yellow Sea

이승복 · 배귀남* · 김용표¹⁾ · 진현철 · 윤용석 · 문길주
한국과학기술연구원 지구환경연구센터, ¹⁾이화여자대학교 환경학과
(2001년 12월 17일 접수, 2002년 6월 24일 채택)

Seung-Bok Lee, Gwi-Nam Bae*, Yong Pyo Kim¹⁾,
Hyun-Chul Jin, Yong-Suk Yoon and Kil-Choo Moon
Global Environment Research Center, Korea Institute of Science and Technology, Seoul, Korea
¹⁾*Department of Environmental Science and Engineering, Ewha Womans University, Seoul, Korea*
(Received 17 December 2001; accepted 24 June 2002)

Abstract

Various air pollutants were measured at Tokchok Island in the Yellow Sea that is about 50 km distant from Incheon since April 1999. This study was undertaken to help understanding the level of air pollution and its distribution characteristics over the Yellow Sea. The geographical characteristics of the air pollution monitoring station and emission inventories of Tokchok Island are introduced. The mass concentrations and chemical compositions of TSP and PM_{2.5} measured until March 2000 are discussed in this paper. The overall average mass concentrations are about 37.2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ for TSP and 18.7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ for PM_{2.5}, respectively, which are similar to or a little lower than the values observed in other background sites at Kangwha and Taean. However, they are much lower than those observed at Qingdao in China.

The low mass concentration and major anthropogenic ion concentrations in aerosols collected at Tokchok Island show that local sources are not dominant at Tokchok Island. The estimated average fractions of anthropogenic non-sea-salt sulfate to the total sulfate concentration of TSP and PM_{2.5} are greater than 80% for both sizes. It hence suggests that the sulfate be mainly affected by anthropogenic sources. If we consider the average mass ratio of PM_{2.5} to TSP, the mass fractions of anthropogenic species to PM_{2.5}, and the molar ratio of nss SO₄²⁻ to total NO₃⁻, it may be possible to infer that a part of anthropogenic species measured at Tokchok Island be transported from China. The characteristics of neutralization of nss SO₄²⁻ and the particle size of major ions are also discussed.

Key words : aerosol, TSP, PM_{2.5}, Tokchok Island, Yellow Sea

1. 서 론

* Corresponding author
Tel : +82-(0)2-958-5676, E-mail : gnbae@kist.re.kr

황해는 중국대륙과 한반도에 의해 3면이 막혀 있는 바다로 인접 국가의 산업발전에 따라 다양한 경

로를 통해 오염되고 있다. 황해의 오염은 어획량 감소와 같은 자원고갈을 야기할 수 있으므로, 오염방지 대책을 수립하기 위해서 황해로 유입되는 경로에 따른 오염물질의 유입량을 파악할 필요가 있다. 오염물질이 해양으로 유입되는 경로 중에서 대기오염물질이 해양으로 침적(대기 수송)되는 것은 해안의 오염원 뿐만 아니라 원거리의 대형 오염원의 영향을 받을 수 있으며, 이러한 영향이 전 해상으로 파급될 수 있으므로 매우 중요하다(Schneider *et al.*, 2000; US EPA, 2000).

특히 중국의 인구 증가, 산업화, 문화 수준의 향상 등으로 인해 배출되는 막대한 양의 대기오염물질이 편서풍에 의해 우리 나라, 일본 그리고 태평양으로 장거리 이동하고 있으므로, 대기 수송에 의한 황해의 오염은 더 심각할 수 있다(Lee *et al.*, 2001). Duce *et al.* (1980)은 북태평양에 위치한 Marshall 제도의 Enewetak Atoll (Bokandretok Island)에서 에어로졸을 측정하여 중국으로부터 장거리 이동되어 온 것으로 추정되는 봄철 입자가 열대 북태평양에 침적되어 1000년 동안 약 0.3 mm의 두께를 형성할 것으로 예측함으로써 대기오염물질의 장거리 이동과 해양으로의 대기 수송의 중요성을 강조하였다. 홍기훈 등(1997)은 황해에서 대부분의 인위적인 중금속들은 대기 수송량이 하천 수송량보다 많고, 암모늄염 등은 대기 수송량이 하천 수송량보다 최대 10배 가량 많을 것으로 추정하였다. 따라서, 황해의 해양 환경을 보전하기 위한 대책을 마련하기 위해서는 대기 수송에 의한 황해의 오염현황을 정량화시킬 수 있는, 황해의 해양 대기에 관한 체계적이고 종합적인 연구가 필요하다.

현재 황해에 인접한 대기오염물질의 장기 측정소로는 환경부의 국가배경대기 측정망으로 운영되고 있는 강화군 석모리, 태안군 파도리, 복제주군 고산리 측정소가 있는데, 이곳에서는 현재 PM₁₀(공기역학적 입경이 10 μm 이하인 입자)이 측정되고 있다. 또한, 대기오염물질의 장거리 이동을 연구하기 위하여 문길주 등(1999)이 1996년부터 강화군 장화리, 태안군 파도리 및 복제주군 고산리에서 주로 PM_{2.5}(공기역학적 입경이 2.5 μm 이하인 입자)를 측정하고, 안산에 위치한 해양연구소에서는 주로 TSP(총부유입자, Total Suspended Particulate)에 해당하는

대기 에어로졸을 측정하여 왔다(양동범 등, 1998). 중국의 경우 산둥반도의 남쪽에 있는 청도시의 해안가에 위치한 도시 배경농도 측정소에서 입자상과 가스상 물질을 측정하고 있다(Lee *et al.*, 2001). 이처럼 고산을 제외한 기존 측정소들이 육지의 영향을 직접적으로 받을 수 있는 해안에 위치하고 있다. 또한, 고산 측정소의 경우 지리적으로 황해의 남동쪽 가장자리인 제주도에 위치하므로, 황해의 오염현황을 파악하기 위한 대표적인 측정소로는 한계가 있다. 따라서, 황해의 대기환경을 감시하기 위한 새로운 측정소가 필요하다.

황해의 대기환경을 종합적이고 체계적으로 조사하기 위해 한국과학기술연구원 지구환경연구센터를 중심으로 1998년 12월부터 황해종합조사사업의 일부로 “해양-대기 조사 연구”가 수행되고 있다(문길주 등, 2001; 배귀남 등, 1999). 이 연구에는 입자상 및 기체상 오염물질의 측정(나광삼 등, 1999; 이승복 등, 1999), 라이다를 이용한 에어로졸 수직분포의 측정 및 역계적 분석(윤순창 등, 1999), 건성 침적량의 추정(박문수 등, 1999), 자연적 황화합물(DMS)의 측정(김기현 등, 2000) 등이 포함되어 있다. 황해 전반의 대기오염현황을 파악하기 위하여 본 연구팀에서는 세 가지 연구방법을 사용하였다. 첫째, 황해의 대기환경을 대표할 수 있는 도서로 덕적도를 선정하여 대기오염 측정소를 구축한 후 대기오염물질을 측정하고 있다. 둘째, 직선항로로 황해를 가로지르며 항해하는 인천-청도(중국)간 정기여객선에서 년 2회 정도 대기오염물질을 측정하고 있다(김용표 등, 2000). 셋째, 황해 전역을 순회하며 조사하는 선박인 이어도호에서 1999년 8월 항해 중 대기오염물질을 측정하였다(김용표 등, 2000).

본 연구팀은 덕적도에서 1999년 4월부터 대기 에어로졸(TSP, PM₁₀, PM_{2.5}, 입경분포)과 가스상 물질(SO₂, O₃, CO, VOCs)을 대상으로 상시 측정 및 집중 측정을 실시하고 있다. 이 논문에서는 먼저 덕적도 측정소의 지리적 특성 및 배출원 특성을 검토한 후, 1999년 4월부터 2000년 3월까지 측정된 TSP와 PM_{2.5}의 질량농도 및 화학적 조성 등의 특성을 분석하였다. 또한, 덕적도 측정소의 대기오염물질 농도 수준을 파악하기 위하여 측정결과를 황해에 인접한 강화 및 태안 측정소의 자료와 비교하였다.

2. 덕적도 측정소의 특성

2.1 지리적 특성

황해의 대기환경을 감시할 수 있는 측정소를 구축하기 위해 육지에서 충분히 떨어진 섬인 백령도, 외연도 및 덕적도를 답사한 후 적합한 측정소의 위치로 덕적도를 선정하였다. 백령도는 대도시 오염원(인천)으로부터 멀리 떨어져 있는 장점이 있지만, 교통이 불편하며 북한과의 접경지대이므로 인접 육지의 오염현황에 대한 정보가 없고, 측정위치를 선정하는데 제약이 있는 단점이 있다. 충남 대천 연안에 있는 작은 섬인 외연도는 교통과 숙박이 매우 불편하고, 섬의 동쪽과 서쪽에 야산이 있으므로 대기오염물질이 방해받지 않고 이동할 수 있는 적합한 측정위치를 선정하는 것이 어렵다.

이에 반해 측정소로 선정된 덕적도는 교통과 숙박이 편리하고, 측정장비도 비교적 쉽게 운송할 수 있다. 동쪽, 남쪽 및 북쪽으로 바다가 내려다 보이고, 서쪽으로 산 능선이 보이는 곳에 측정소가 위치하므로, 지리상으로 대기오염물질이 방해받지 않고 이동할 수 있다.

그림 1에서 보듯이 덕적도는 위도상으로 황해의

중간에 위치하고, 중국 산둥반도에서 동쪽으로 약 330km, 인천에서 서남서쪽으로 약 50km 거리에 있다. 대기오염 측정소는 덕적도의 해안에서 약 600m, 선착장에서 약 900m 떨어져 있으며, 해발 고도 약 160m인 산 정상에 한국통신(37° 13'N, 126° 9'E)에 위치하고 있다. 대기 에어로졸 측정장비는 1층 건물 옥상에 설치하였다. 약 3m 옆에 기상청의 자동기상관측장비가 설치되어 있으므로, 기상자료를 쉽게 얻을 수 있는 장점이 있다. 측정위치로부터 약 10m 떨어진 곳에 전화 중계탑이 있지만 측정결과에 큰 영향을 미치지 않을 것으로 생각된다.

2.2 배출원 특성

황해의 대기환경 현황을 파악하기 위해서는 인위적인 국소 오염원의 영향을 적게 받는 곳에 측정소가 위치하여야 하므로, 측정소 주변의 배출원 특성은 측정소 선정의 중요한 요소가 된다. 덕적도가 속해있는 옹진군, 환경부의 국가배경대기 측정망이 있는 강화군과 태안군에 대하여 정일래 등(1997)이 산출한 행정구역별 연간 대기오염물질의 배출량을 그림 2에 나타냈다. 행정구역내 배출량이 같아도 행정구역의 면적이 넓으면 배출원의 영향이 줄어들 수 있으므로 단위 면적당 배출량으로 환산하여 비

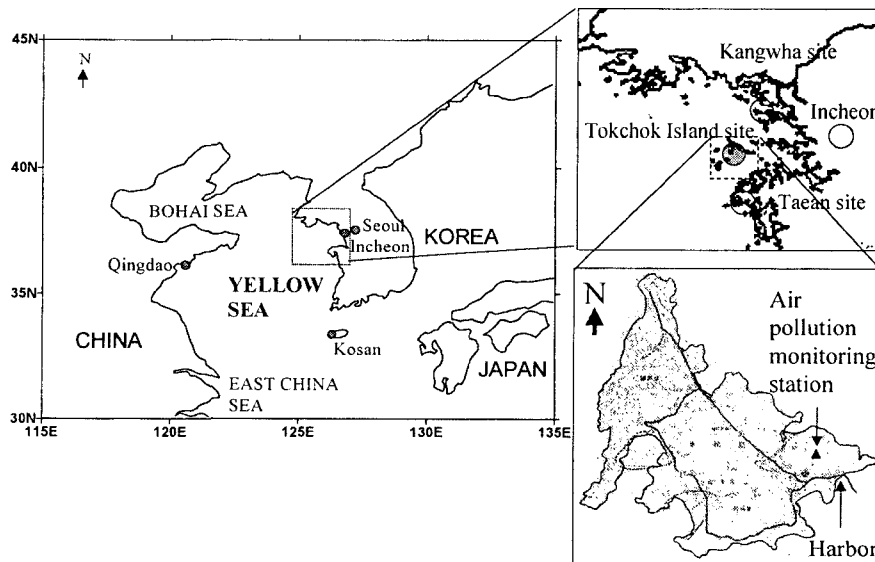


Fig. 1. Location of the air pollution monitoring station at Tokchok Island.

교하였으며, 1종에서 5종까지의 점오염원, 면오염원 및 이동오염원을 모두 포함하여 배출량을 산출하였다.

그림 2에서 보듯이 웅진군의 SO₂, NO₂ 및 CO 배출량은 각각 약 2톤/년·km²으로 강화군의 63%, 27%, 23%이고, 태안군의 51%, 64%, 52%이다. 웅진군의 TSP 배출량은 약 1톤/년·km²으로 강화군의 약 20%이고 태안군보다 약 1.9배 많다.

환경부의 국가배경대기 측정망이 위치한 제주도

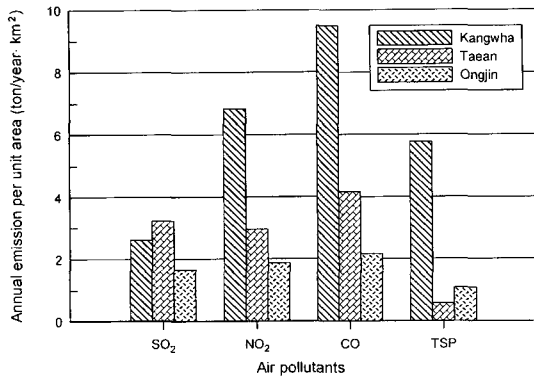


Fig. 2. Comparison of emissions of air pollutants per unit area with other regions including background monitoring sites.

와 비교하기 위해 환경부 자료(환경부, 1997)를 근거로 1995년 제주도의 단위 면적당 대기오염 부하량(SO₂, NO₂ 또는 NO_x, CO, TSP 배출량의 합)을 산출하면 20.3톤/년·km²이다. 웅진군의 부하량은 6.8톤/년·km²이므로, 제주도의 약 30%로 매우 적다.

전국통계연감(한국도시행정연구원, 1997)과 웅진군의 통계연보(인천광역시 웅진군, 1998)의 자료를 정리하여 나타낸 표 1을 보면, 웅진군의 인구밀도는 약 82명/km²으로 강화군, 태안군 및 북제주군의 48~60%이고, 단위 면적당 자동차 등록대수는 강화군의 1/3, 태안군의 2/3 정도로 적고, 환경오염물질의 배출 시설수가 다른 지역에 비하여 적다. 덕적도 측정소에서 동남동 방향으로 약 1km 떨어진 곳에 소형 경유 화력 발전소가 있지만, 표 1에서 보듯이 다른 지역의 발전량에 비해 매우 적다. 덕적도가 포함되어 있는 덕적면은 웅진군에서 가장 인구밀도가 낮고, 웅진군 면적에 포함되지 않은 지리분포상의 바다 면적을 고려하면, 실제 덕적도의 단위 면적당 대기오염 부하량은 6.8톤/년·km²보다 훨씬 적을 것이다.

따라서, 덕적도가 황해에 인접한 강화군, 태안군 및 제주도에 비하여 국소 오염원에 의한 대기오염 물질 배출량이 적으므로, 덕적도 측정소는 기존 측정소들에 비하여 국소 오염원에 의한 영향을 더 적

Table 1. Comparison of environmental features with other regions including background monitoring sites.

Article	Region			
	Kangwha-gun (1995)	Taaan-gun (1995)	Bukcheju-gun (1995)	Ongjin-gun (1995) (Tokchok-myun, 1997)
Area [km ²]	410	503	721	164 (36)
Population density [persons/km ²]	172	144	137	82 (37)
Number of registrated motor vehicles per unit area [vehicles/km ²]	30.1	18.8	-	11.0 (5.6)
Gross power generation per unit area [MWh/km ²]	0	7.12	742.42	0.06 (-)
Waste burning per unit area [ton/day · km ²]	0.015	0.022	0.008	0.024 (-)
Fishing boats [G/ton]	-	-	5963	3296 (434)
Number of environmental pollution facility				
	class 1~3	0	2	0 (0)
class 4~5	32	80	51	3 (0)

Sources : Whole Country Yearbook (1997), Ongjin-gun Statistical Yearbook (1998).
 - : No data are given

게 받을 것으로 판단된다.

3. 측정 및 분석

황해 대기오염의 현황 및 특성을 파악하기 위하여 덕적도 측정소에서 1999년 4월 8일부터 2000년 3월 1일까지 대기오염물질을 측정하였다. 이 기간 동안 모두 4차례의 집중 측정(1999년 4월 8일부터 14일까지 7일간, 6월 12일부터 15일까지 4일간, 9월 8일부터 14일까지 7일간, 2000년 2월 24일부터 3월 1일까지 7일간)을 실시하였다. 이 논문에서는 측정 한 여러 항목 중에서 부유입자의 총량을 파악할 수 있는 TSP와 장거리 이동과 밀접한 관련이 있는 미세입자인 PM_{2.5}에 대하여 살펴보았다.

TSP와 PM_{2.5}를 측정하기 위하여 두 종류의 입자 채취장치를 사용하였다. 첫 번째 채취장치에서는 1단 테플론 필터팩(#0-47, Savillex), 임계 오리피스(SO-10, 16.7 L/min, BGI) 및 진공펌프로 TSP 채취장치를 구성하였고, 분리입경(cut size, aerodynamic diameter)이 2.5 µm인 싸이클론(2000-30EH, URG), 3단 테플론 필터팩(#6T-473, Savillex), 임계 오리피스(SO-10, 16.7 L/min, BGI) 및 진공펌프로 PM_{2.5} 채취장치를 구성하였다. 임계 오리피스를 통과하는 흡인유량이 설계유량(16.7 L/min)보다 약 10% 많고, 3단 필터팩이 연결된 PM_{2.5} 채취장치의 경우 진공펌프의 용량이 적어 오리피스의 임계유량을 흡인하지 못하는 문제점을 발견하여 1999년 9월 측정부터 유량 측정 부분을 개선한 두 번째 채취장치를 사용하였다. 즉, 임계 오리피스 대신에 플로우트 유량계를 사용하고, 차압계를 함께 부착하여 유량계 내부의 진공도를 보정하여 실제 유량을 산출하였다. 첫 번째 채취장치로 채취한 시료의 경우 실험실에서 동일한 채취장치를 구성하여 습식 가스미터로 유량을 교정하여 농도를 보정하였다. PM_{2.5} 시료의 흡인유량의 감소로 인한 분리입경의 증가는 20% 이내인 것으로 추정된다.

원칙적으로 오전 9시부터 다음날 오전 9시까지 24시간 동안 입자를 채취하였다. TSP와 PM_{2.5} 모두 입자 채취용 거름종이로 테플론 멤브레인 거름종이(Zefluor, pore size 2 µm, Gelman)를 사용하였고, 측정 전과 측정후 거름종이를 데시케이터에 24시간 이상

보관한 후 분해능이 1 µg인 전자저울(MT5, Mettler)로 무게를 측정하였다. 3단 필터팩에는 테플론 멤브레인 거름종이 후단에 질산 및 염산 등 휘발성이 있는 산성기체를 채취하기 위하여 나일론 멤브레인 거름종이(Nylasorb, pore size 1 µm, Gelman)를 삽입하고, 그 후단에 암모니아를 채취하기 위하여 1% citric acid 용액에 함침시킨 석영섬유 거름종이(QM-A, Whatman)를 삽입하였다. 3단 필터팩을 이용한 가스상 물질의 채취효율은 디누더보다 낮은 것으로 알려져 있고, 대기오염물질 사이의 산-염기 반응으로 인해 측정오차가 생길 수 있으므로, 이 논문에 제시된 휘발성이 있는 가스상 물질의 농도는 하한값으로 해석하여야 한다(Lee *et al.*, 2001).

입자상 물질과 가스상 물질의 음이온 성분(Cl⁻, NO₃⁻, SO₄²⁻)은 이온크로마토그래피(2000i/sp, Dionex)로 분석하였고, 암모늄(NH₄⁺)을 제외한 양이온 성분(Ca²⁺, Mg²⁺, K⁺, Na⁺)은 원자흡광광도계(ZR8200, Hitachi)로 분석하였다. 암모늄 이온은 인도페놀법으로 발색시킨 후 흡광광도계(Genesys2, Spectronic)로 분석하였다. 분석의 검출한계는 Cl⁻, NO₃⁻, SO₄²⁻의 경우 각각 0.01, 0.003, 0.003 µg/m³이며, Ca²⁺, Mg²⁺, K⁺, Na⁺, NH₄⁺의 경우 각각 0.006, 0.001, 0.003, 0.001, 0.003 µg/m³이다.

인천기상대의 황사 관측자료에 의하면, 1999년 1월에 나홀, 2월에 하루, 측정이 시작되기 전인 4월 5일에 마지막으로 황사가 관측되었고, 측정기간인 1999년 4월 8일부터 2000년 3월 1일까지 한차례도 황사가 관측되지 않았다.

4. 결과 및 검토

본 연구에서는 황해 대기 중 에어로졸의 특성을 파악하기 위하여 덕적도 측정소에서 1999년 4월부터 2000년 3월까지 집중 측정 및 상시 측정을 통해 얻은 TSP와 PM_{2.5}의 질량농도와 화학적 조성을 분석하였으며, 그 특성을 황해에 인접한 강화 및 태안 측정소의 자료와 비교하였다. 이때, 거름종이의 취급 또는 전처리 과정에서 오염이나 입자의 손실 등이 발생한 시료(TSP 4개, PM_{2.5} 3개)와 PM_{2.5}의 질량농도가 TSP의 질량농도보다 큰 시료(동일한 날의 TSP 1개, PM_{2.5} 1개)를 제외하였다. 이렇게 제외된

시료 수는 전체의 약 8%를 차지한다.

4.1 TSP 및 PM_{2.5}의 질량농도 특성

TSP 질량농도의 연간 변화 특성을 살펴보기 위하여 1999년 4월 8일부터 2000년 3월 1일까지 덕적도에서 얻은 49개 시료의 일평균 TSP 농도를 그림 3에 나타냈다. 덕적도의 일평균 TSP 농도는 대부분 (80% 이상) 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이하이고, 연평균 TSP 농도는 37.2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 표준편차는 21.8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이다. 이 연구와 측정방법, 측정시기 및 시료수가 달라서 직접적으로 비교하기는 어렵지만, 덕적도의 TSP 농도 수준을 파악하기 위하여 황해 연안에 위치한 환경부의 국가배경대기 측정망인 강화군 석모리와 태안군 파도리에서 측정된 TSP 농도를 그림 3에 함께 나타냈다. 강화의 경우 1997년 9월부터 1998년 2월까지 얻은 127개 시료의 측정결과이고, 태안의 경우 1997년 10월부터 1998년 9월까지 얻은 309개 시료의 측정결과이다.

강화의 일평균 TSP 농도는 대부분 75 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이하이고, 연평균 TSP 농도는 56.3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 표준편차는 23.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로, 덕적도에 비해 연평균 TSP 농도가 약 19 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 높으나 일평균 농도의 편차는 비슷하다. 이것은 강화가 덕적도에 비해 주변 토양이나 대도시(인천 또는 서울)의 영향을 더 많이 받기 때문

인 것으로 생각된다(Lee *et al.*, 2001). 태안의 일평균 TSP 농도는 대부분 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이하이고, 연평균 TSP 농도는 67.3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 표준편차는 43.0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로, 덕적도에 비해 연평균 TSP 농도가 약 30 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 높고 일평균 농도의 편차는 2배 가량 크다. 태안의 TSP 농도는 태안 화력발전소, 보령 화력발전소 등과 같은 인위적인 오염원의 영향을 많이 받았거나 측정소의 지리적인 특성상 해염 및 토양의 영향을 많이 받은 것으로 생각된다(이종훈 등, 1997). TSP 질량농도의 비교로부터 덕적도는 강화나 태안의 측정소에 비해 주변 국소 오염원이나 대도시의 영향을 더 적게 받는다는 것을 알 수 있다. 따라서, 황해의 TSP 농도를 감시하기 위한 측정소로 덕적도가 강화나 태안에 비해 더 적합한 것으로 생각된다.

PM_{2.5} 질량농도의 연간 변화 특성을 살펴보기 위하여 TSP와 같은 기간 동안 덕적도에서 얻은 50개 시료의 일평균 PM_{2.5} 농도를 그림 4에 나타냈다. 덕적도의 일평균 PM_{2.5} 농도는 대부분 25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이하이고, 연평균 PM_{2.5} 농도는 18.7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 표준편차는 10.1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이다. 이 연구와 측정방법은 같아도 측정시기가 달라서 직접적으로 비교하기는 어렵지만, 덕적도의 PM_{2.5} 농도 수준을 파악하기 위하여 강화, 태안 및 서울에서 측정된 PM_{2.5} 농도를 그림 4에 함께 나타냈다(나광삼, 2001; 문길주 등, 1999). 강화의

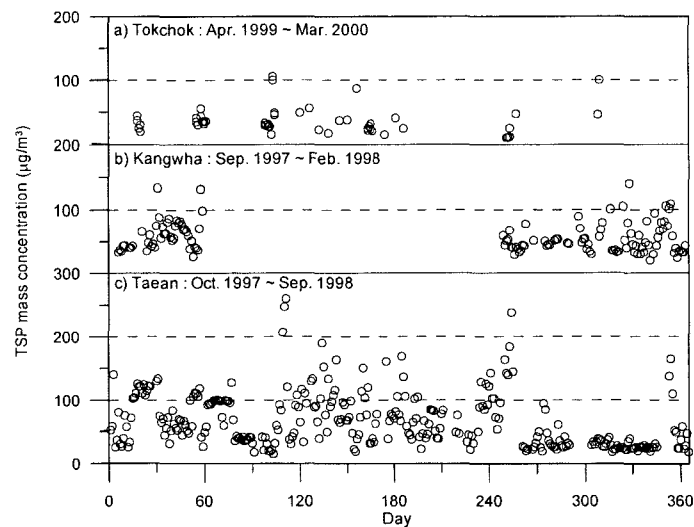


Fig. 3. Annual variation of the daily mass concentrations of TSP measured at a) Tokchok Island, b) Kangwha, and c) Taeon.

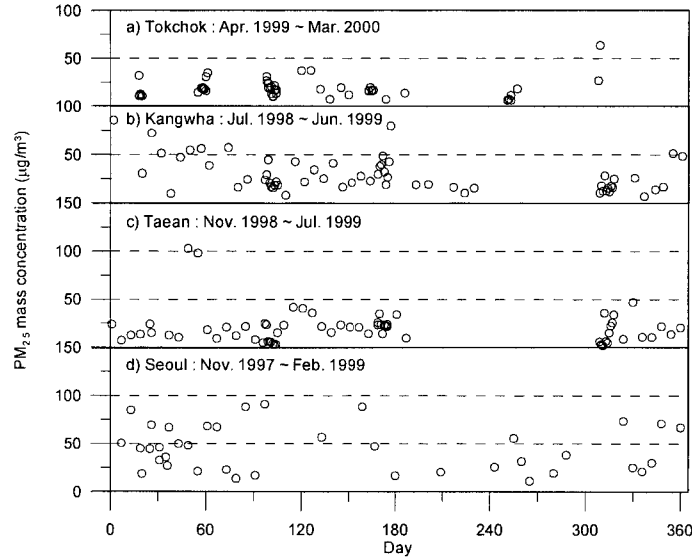


Fig. 4. Annual variation of the daily mass concentrations of PM_{2.5} measured at a) Tokchok Island, b) Kangwha, c) Taeon, and d) Seoul.

경우 1998년 7월부터 1999년 6월까지 얻은 61개 시료의 측정결과이고, 태안의 경우 1998년 11월부터 1999년 7월까지의 시료 중에서 1,000 µg/m³ 이상으로 고농도를 나타내는 황사기간의 2일을 제외한 64개 시료의 측정결과이며, 서울의 경우 1997년 11월부터 1999년 2월까지 얻은 38개 시료의 측정결과이다.

강화의 일평균 PM_{2.5} 농도는 대부분 40 µg/m³ 이하이고, 연평균 농도는 29.3 µg/m³, 표준편차는 17.7 µg/m³으로 덕적도에 비하여 연평균 PM_{2.5} 농도가 약 11 µg/m³ 높고, 일평균의 표준편차는 1.8배 가량 크다. 태안의 일평균 PM_{2.5} 농도는 대부분 25 µg/m³ 이하이고, 연평균 농도는 20.6 µg/m³으로 덕적도보다 10% 가량 높으며 연간 변화량은 덕적도와 비슷하다. 도심지역의 특성을 나타내는 서울의 일평균 PM_{2.5} 농도는 대부분 70 µg/m³ 이하이고, 연평균 농도는 45.0 µg/m³, 표준편차는 23.8 µg/m³으로 덕적도에 비하여 모두 2.4배 가량 크다(나광삼, 2001).

덕적도에서 관측된 PM_{2.5}의 질량농도는 미국 남부 캘리포니아 해안에서 약 130 km 떨어진 북태평양의 청정지역인 San Nicolas Island (9.7 µg/m³)와 북대서양 서부에 위치한 청정지역인 영국의 Bermuda

(9.4 µg/m³)에 비하여 높으며(최민규 등, 2000), 일본의 산악지역인 Nagano의 TSP 농도(8.04 µg/m³)보다 훨씬 높고(Lee *et al.*, 2001), 미국 도시인 시카고의 PM_{2.5} 농도(18 µg/m³)와 비슷하다(Sweet and Gatz, 1998).

덕적도의 PM_{2.5} 질량농도는 국소 오염원의 영향을 심하게 받는 서울보다 상당히 낮고, 수도권의 배경농도 지역으로 평가되는 강화 측정소에 비해 국소 오염원이나 가까운 대도시의 영향을 더 적게 받는다는 것을 알 수 있다. 따라서, 황해의 PM_{2.5} 농도를 감시하기 위한 측정소로 덕적도가 강화보다 더 적합한 것으로 판단된다.

덕적도에서 측정된 에어로졸의 입경 특성을 살펴보기 위하여 이온 분석용 시료 32개에 대하여 동일 측정일의 TSP 농도에 대한 PM_{2.5} 농도의 비(PM_{2.5}/TSP)를 구하면, 총 평균은 0.59이고 표준편차는 0.19이다. 덕적도의 농도비는 환경부의 1999년 PM₁₀ 관측자료를 이용하여 계산한 강화와 태안에서의 PM₁₀ 농도에 대한 PM_{2.5} 농도의 비(PM_{2.5}/PM₁₀)인 0.42 ± 0.13 (25개 시료), 0.29 ± 0.19 (31개 시료)보다 크다(문길주 등, 1999). 기상 등과 같은 조건이 세 지역에서 유사하다고 가정하면, 덕적도는 PM_{2.5}/TSP

비를 감소시키는 측정소 주변의 국소 오염원의 영향보다는 이 비를 증가시키는 에어로졸의 외부 유입에 의한 영향을 다른 두 지역보다 더 많이 받는다고 추정된다.

4.2 TSP 및 PM_{2.5}의 화학적 조성

덕적도에서 채취한 에어로졸 시료로부터 질량농도를 구한 후 에어로졸 중의 수용성 이온성분 또는 금속성분의 농도를 분석하였으며, 이 논문에서는 수용성 이온성분의 화학적 조성을 살펴보았다.

덕적도에서 채취한 TSP와 PM_{2.5}에 포함된 주요 수용성 이온성분의 전체 평균 농도 및 표준편차를 표 2에 제시하였다. 검출한계 이하인 시료(TSP 중에서 Cl⁻는 12개, PM_{2.5} 중에서 Cl⁻는 13개, NO₃⁻는 5개, Ca²⁺는 2개)는 통계값을 계산할 때 제외하였다. 휘발성이 있는 산성(Cl⁻, NO₃⁻) 및 염기성(NH₄⁺) 염들의 가스상 물질인 HCl, HNO₃ 및 NH₃를 분석한 결과도 표 2에 함께 나타내었다.

해안이나 도서에서 채취한 입자에는 해염 입자가 많이 포함되어 있다. Na⁺을 모두 해염 기원이라고 가정하고 Horne (1969)의 해수 조성비를 참조하여 해염 입자 농도를 계산한 후 이를 제외한 비해염(non-sea-salt; nss) 입자의 농도를 추산하여 표 2에 나타내었다. 예를 들면, 황산염의 경우 식(1)과 같이 해수 조성비를 이용하여 비해염 황산염의 농도를 구하였다. 이때, [SO₄²⁻]_{sample}는 시료의 황산염 농도, $\left[\frac{SO_4^{2-}}{Na^+}\right]_{sea}$ 는 해수에서 황산염과 나트륨 이온의 조성비, [Na⁺]_{sample}는 시료의 나트륨 이온 농도이다.

$$nss\ SO_4^{2-} = [SO_4^{2-}]_{sample} - \left[\frac{SO_4^{2-}}{Na^+}\right]_{sea} \times [Na^+]_{sample} \tag{1}$$

표 2에서 nss Cl⁻는 거의 모든 시료에서 음수로 계산되었는데, 이는 염소의 휘발에 의한 측정오차 때문으로 추정된다 (Bae *et al.*, 2001; Zhuang *et al.*, 1999; Kim *et al.*, 1998; Mukai *et al.*, 1990). 또한, nss Mg²⁺도 상당수의 시료에서 음수로 계산되었는데, 이것은 제주도 고산에서의 측정결과와 유사하며 (Kim *et al.*, 1998), Mg²⁺이 미량성분이기 때문에 발생한 측정오차로 생각된다.

표 2에서 보듯이 전체 SO₄²⁻에서 nss SO₄²⁻가 차지하는 비율은 TSP와 PM_{2.5}에서 모두 97% 이상이다. 이것은 덕적도 측정소가 해발 고도 약 160m의 높은 곳에 위치하므로, 주로 조대입자로 존재하는 해염 입자의 영향을 덜 받기 때문인 것으로 생각된다. Gao *et al.* (1996)은 중국해의 대기 에어로졸을 측정하여 인위적인 오염원에 의한 nss SO₄²⁻가 전체 nss SO₄²⁻의 81~97%를 차지할 것으로 추정하였다. 그러므로, 덕적도에서 채취된 전체 SO₄²⁻의 80% 이상이 인위적인 오염원에 기인된 것으로 추정된다. 이것은 덕적도에서 채취된 황산염은 인위적인 오염원의 영향을 심하게 받았다는 것을 의미한다.

주요 성분들의 TSP 및 PM_{2.5}의 질량농도에 대한 구성비를 나타낸 그림 5에서 보듯이 TSP와 PM_{2.5} 모두 수용성 이온성분들 중에서 nss SO₄²⁻가 가장 높다. 그 다음이 TSP에서는 NO₃⁻이고, PM_{2.5}에서는 NH₄⁺이다. 여기에서 잔류물질(residue)에는 유기탄소, 원소탄소, 토양원소 등이 포함된다. PM_{2.5}에 포함

Table 2. Mass and ion concentrations in TSP and PM_{2.5}, and concentrations of the gaseous species measured at Tokchok Island from April 1999 to March 2000. (unit: µg/m³)

Particle size	Mass	Ions											Gaseous species					
		Anion						Cation					HCl	HNO ₃	NH ₃			
		Cl ⁻	nss Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	nss SO ₄ ²⁻	Ca ²⁺	nss Ca ²⁺	Mg ²⁺	nss Mg ²⁺	K ⁺	nss K ⁺				Na ⁺	NH ₄ ⁺	
TSP	No.	49	26	26	36	36	36	36	36	36	36	36	36	36	36	-	-	-
	avg	37.2	0.80	-0.44	2.53	6.42	6.27	0.446	0.423	0.127	0.056	0.316	0.295	0.589	1.857	-	-	-
	std	21.8	1.10	0.52	2.82	3.10	3.11	0.335	0.324	0.118	0.090	0.218	0.212	0.433	1.385	-	-	-
PM _{2.5}	No.	50	24	24	32	37	36	35	34	37	36	37	36	36	37	35	35	35
	avg	18.7	0.39	-0.27	0.99	5.42	5.36	0.090	0.079	0.031	-0.006	0.262	0.253	0.312	1.688	0.35	1.34	0.642
	std	10.1	0.51	0.52	1.28	3.05	3.08	0.056	0.054	0.021	0.032	0.222	0.223	0.265	1.011	0.20	1.12	0.540

avg: average, std: standard deviation.

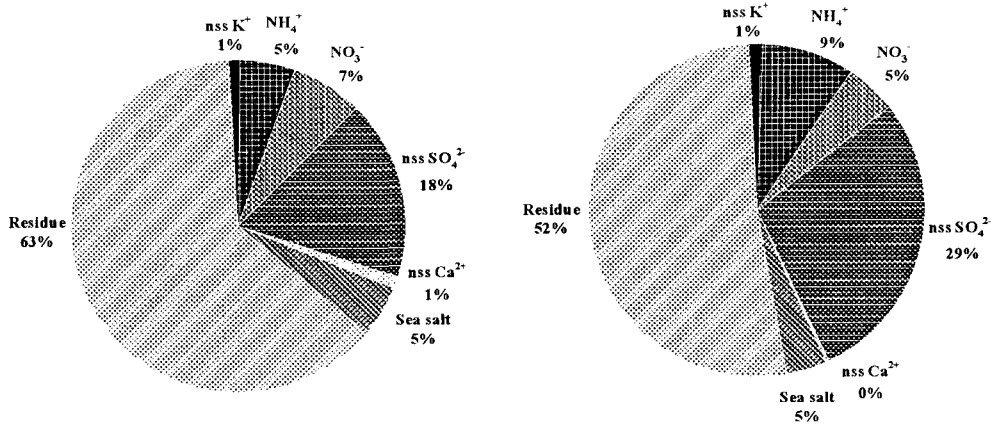


Fig. 5. Mass fractions of major components to TSP and PM_{2.5} measured at Tokchok Island.

된 주요 수용성 이온성분인 nss SO₄²⁻, NO₃⁻, NH₄⁺의 구성비가 덕적도의 경우 각각 29%, 5%, 9%로, 제주도 고산의 30%, 4%, 9%와 유사한 반면, 강화의 20%, 12%, 12%와는 다른 특성을 보인다(Lee et al., 2001). 이것은 덕적도가 강화와 지리적으로 가깝지만 강화의 미세입자 구성비에 많은 영향을 주는 오염원이 덕적도에 미치는 영향은 크지 않다는 것을 암시한다. 즉, 덕적도는 강화보다 수도권 지역의 대기오염 물질의 영향을 더 적게 받을 것으로 생각된다.

표 2에서 전체 평균을 비교해 보면, nss SO₄²⁻와 NH₄⁺의 PM_{2.5}/TSP 비는 모두 약 0.9로 nss SO₄²⁻와 NH₄⁺는 대부분 미세입자임을 알 수 있다. 반면, NO₃⁻의 PM_{2.5}/TSP 비는 0.3으로 NO₃⁻는 대부분 조대입자임을 알 수 있다. 조대입자로 존재하는 NO₃⁻는 해안이나 도에서 발견되며(Zhuang et al., 1999; Gao et al., 1996), 토양성분 입자에서도 관측된다(Galy-Lacaux et al., 2001). 이러한 인위적인 성분의 존재 형태 및 입경 특성을 파악하기 위하여 먼저 nss SO₄²⁻와 NH₄⁺의 상관성을 구해 보면, PM_{2.5}에 포함된 nss SO₄²⁻와 NH₄⁺의 상관계수(r=0.91)가 매우 높아 이 두 성분이 결합되어 있다고 추정된다. 각 시료에 포함된 nss SO₄²⁻에 대한 NH₄⁺의 당량비의 연평균은 0.87이므로(표 3 참조), NH₄⁺가 nss SO₄²⁻를 완전히 중화시키지 못하는 NH₄HSO₄와 (NH₄)₂H(SO₄)₂의 형태가 존재할 것으로 추정된다. 강화와 태안의 연평균 당량비는 각각 1.41, 1.25로 덕적도의 당량비와는 다르다. NH₃는 HNO₃와 반응

하면 미세입자인 NH₄NO₃를 생성시키지만(Hayami and Carmichael, 1998), 덕적도에서 채취된 PM_{2.5}의 시료에서는 nss SO₄²⁻를 완전히 중화시키지 못할 만큼 NH₄⁺의 농도가 낮았으므로, NH₃와 HNO₃의 반응은 매우 적었을 것으로 추정된다. 또한, 미세입자의 이온 밸런스를 만족시키기 위해 NO₃⁻가 휘발된 후 해염 입자와 반응하여 대부분 조대입자로 존재하게 되었을 가능성도 있다(Lee et al., 2001).

덕적도에서 채취한 에어로졸의 화학적 조성을 다른 연구결과와 비교하기 위해 황해에 인접한 한국 또는 중국 측정소의 결과와 일본의 배경농도 측정소의 결과를 표 3에 함께 나타냈다. 표 3에서 알 수 있듯이 TSP의 질량농도와 TSP에 포함된 주요 인위적 오염물질인 nss SO₄²⁻, NO₃⁻, NH₄⁺의 덕적도 농도는 중국 청도 농도의 30~40% 수준으로 낮으나 일본의 Nagano보다는 훨씬 높다. 덕적도의 PM_{2.5}에 포함된 주요 인위적 오염물질의 농도는 강화의 70~87%로 낮고, 태안보다 31~34% 높다. 앞에서 언급한 바와 같이 덕적도에서 채취한 에어로졸의 질량농도가 TSP의 경우 태안보다 약 30 μg/m³ 낮고 PM_{2.5}의 경우 태안보다 약 10% 낮음에도 불구하고, 덕적도의 PM_{2.5}에 포함된 인위적 오염물질의 농도가 태안보다 높다. 또한, 앞에서 언급한 바와 같이 용진군의 인위적인 배출량이 태안군보다 적다. 따라서, 덕적도가 태안에 비해 외부의 인위적인 오염원(수도권 또는 중국으로부터 오염물질의 장거리 이동)의 영향을 더 많이 받은 것으로 추정되므로, 향

Table 3. Average concentration of major species and equivalent and molar ratios in TSP and PM_{2.5}.

		Concentration ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)					Equivalent ratio	Molar ratio	
		Mass	nss SO_4^{2-}	NO_3^-	NH_4^+	Na^+	nss Ca^{2+}	$\frac{\text{NH}_4^+}{\text{nss SO}_4^{2-}}$	$\frac{\text{nss SO}_4^{2-}}{\text{T-NO}_3^-*}$
TSP	Tokchok Island ¹⁾ (n = 49 for mass, 36 for ions)	37.2 ± 21.8	6.27 ± 3.11	2.53 ± 2.82	1.857 ± 1.385	0.589 ± 0.433	0.423 ± 0.324	0.76 ± 0.33	1.40 ± 0.90
	Qingdao, China ²⁾ (n = 19)	115.6 ± 50.4	14.85 ± 9.44	8.16 ± 6.28	6.26 ± 4.39	3.29 ± 1.91	—	1.06 ± 0.34	—
	Nagano, Japan ³⁾	8.0	1.22	0.37	0.36	—	—	—	—
PM _{2.5}	Tokchok Island ¹⁾ (n = 50 for mass, 37 for ions)	18.7 ± 10.1	5.36 ± 3.08	0.99 ± 1.28	1.688 ± 1.011	0.312 ± 0.265	0.079 ± 0.054	0.87 ± 0.39	1.97 ± 1.25
	Kangwha ⁴⁾ (n = 61)	29.3 ± 17.7	6.15 ± 6.06	1.38 ± 1.85	2.401 ± 1.843	0.616 ± 0.482	0.548 ± 1.257	1.41 ± 1.18	0.83 ± 0.39
	Tae'an ⁵⁾ (n = 64)	20.6 ± 17.9	4.01 ± 3.44	0.74 ± 1.10	1.290 ± 1.412	0.563 ± 0.394	0.114 ± 0.098	1.25 ± 1.07	1.38 ± 0.96
	Qingdao, China ²⁾ (n = 19)	55.3 ± 32.4	12.26 ± 7.58	5.15 ± 4.28	5.64 ± 3.87	0.76 ± 0.42	—	1.14 ± 0.36	—

¹⁾ This study, ²⁾ November 1998 and April 1999 (Moon *et al.*, 1999), ³⁾ October 1991 (Lee *et al.*, 2001), ⁴⁾ July 12, 1998 ~ June 26, 1999,

⁵⁾ November 5, 1998 ~ July 6, 1999 (Moon *et al.*, 1999)

XX ± YY: average ± standard deviation, * T-NO₃⁻: total nitrate, sum of NO₃⁻ and HNO₃

후 기상자료 및 역궤적 분석자료를 이용하여 인위적 오염물질의 이동경로를 파악하여 이러한 원인을 정확하게 밝힐 필요가 있다.

주로 해양으로부터 생성되는 Na⁺의 경우 덕적도에서의 농도는 PM_{2.5}에서 약 0.3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 강화와 태안의 1/2 수준으로 낮다. 이것은 강화와 태안 측정소의 해발 고도가 덕적도에 비하여 상대적으로 낮고, 모두 해안선에서 150 m 이내에 위치하기 때문인 것으로 생각된다.

주로 토양으로부터 생성되는 nss Ca²⁺의 평균 농도가 덕적도의 경우 0.08 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 강화와 태안의 농도보다 낮다. 이것은 강화 측정소 주변에 농경지가 있고, 태안 측정소 앞쪽에 있는 해수욕장과 관련이 있는 것으로 생각된다.

Lee *et al.* (2001)이 에어로졸의 기원을 대략적으로 추정하기 위하여 사용한 지표인 nss SO₄²⁻/(NO₃⁻ + HNO₃)의 물비를 덕적도에서 채취된 PM_{2.5}에 대하여 계산하면 평균 1.97이다. 조대입자로 변환되었을 수 있는 NO₃⁻를 고려하기 위해 TSP에 포함된 nss SO₄²⁻와 NO₃⁻의 농도를 이용하여 이 비를 계산하면 1.40으로 줄어든다. 이 값은 한국의 전체 NO_x 배출량에 대한 SO₂ 배출량의 물비(SO₂/NO_x)인 0.5와 웅진군의 비인 0.63과는 크게 다른 반면, 중국

남부의 비인 2.34, 중국 북부의 비인 1.59와 유사하다(Lee *et al.*, 2001). 최근에 보고된 배출량 연구결과에 의하면, 중국의 경우 SO₂/NO_x는 1995년에 1.5 ~ 1.8이었고, 2030년에 이르면 0.8 ~ 1.5로 줄어들 것으로 예상되고, 한국의 경우 SO₂/NO_x는 1995년에 0.6이었고, 2030년에도 거의 변하지 않고 비슷할 것으로 추정된다(Klimont *et al.*, 2000; Streets *et al.*, 2000). SO₂와 NO_x의 산화반응 속도의 차이, 건성 침적 속도의 차이 등의 불확실성이 존재하지만, 덕적도에서 채취된 nss SO₄²⁻와 NO₃⁻는 수도권 뿐만 아니라 중국으로부터도 유입되었을 것으로 추정된다.

덕적도에서 측정된 에어로졸의 농도에 기여하는 요인으로는 덕적도내 국소 오염원에 의한 직접적인 영향, 한반도로부터 이동되거나 중국으로부터 장거리 이동되는 오염물질에 의한 영향 등이 있다. 앞에서 검토한 대기오염물질의 배출량 비교와 에어로졸 측정결과와의 비교를 통해 국소 오염원에 의한 영향 및 육지로부터의 직접적인 영향은 덕적도가 강화와 태안에 비해 적을 것으로 추정된다. 향후 주요 오염원 및 오염물질의 이동규모에 따른 오염원 기여도를 파악하기 위해 덕적도에서 측정된 가스상 물질의 농도 측정자료와 공기피의 역궤적 자료 등을 이용하여 종합적으로 분석할 예정이다.

5. 결 론

장기적인 황해상 대기오염물질의 농도 실측자료를 확보하여 황해 대기오염 현황을 파악하고, 황해로 침적되는 대기오염물질의 양을 추정하는데 기초 데이터로 활용하기 위해 황해상 도서인 덕적도에 새로운 측정소를 구축하였다. 덕적도는 접근하기 쉽고, 환경부의 국가배경대기 측정망 중에서 황해에 인접한 강화와 태안에 비하여 대기오염물질 배출량이 적다.

본 논문에서는 덕적도에서 1999년 4월부터 2000년 3월까지 측정된 TSP와 PM_{2.5}의 질량농도와 화학적 조성을 분석하였다. 덕적도 측정소의 TSP와 PM_{2.5}의 연평균 질량농도는 모두 강화보다 낮았고, 태안의 TSP 농도보다 낮았지만 PM_{2.5} 농도와 비슷하였다. 덕적도의 PM_{2.5}에 포함된 주요 인위적 오염성분의 농도는 강화의 농도보다 낮았고, 태안의 농도보다 약 30% 높았다. 그러므로, 황해 대기 에어로졸을 감시하기 위한 측정소로 덕적도가 강화에 비해 더 적합한 것으로 생각된다.

TSP와 PM_{2.5}에서 인위적인 오염원에 기원된 nss SO₄²⁻는 전체 SO₄²⁻의 80% 이상일 것으로 추정되는데, 이것은 인위적인 오염원의 영향을 심하게 받았음을 의미한다. 그런데, 덕적도의 PM_{2.5}에 포함된 인위적 오염성분(nss SO₄²⁻, NO₃⁻, NH₄⁺)의 구성비가 덕적도와 가까운 강화의 구성비와 다르고, 우리나라 청정지역인 제주도 고산의 구성비와 유사하며, 덕적도에서 관측된 에어로졸의 질량농도 비(PM_{2.5}/TSP)가 50% 이상이므로, 에어로졸의 일부가 멀리 중국으로부터 유입되었을 가능성이 높다고 추정된다. 또한, 전체 질산염에 대한 비해염 황산염의 몰비를 이용하여 덕적도 대기 에어로졸 중의 nss SO₄²⁻와 NO₃⁻의 기원을 대략적으로 살펴본 바에 의하면, 인위적 황산염과 질산염이 수도권 뿐만 아니라 중국으로부터도 유입되었을 것으로 추정된다. 반면, 덕적도 측정소는 강화와 태안의 측정소들에 비하여 토양기원인 성분과 해양기원인 성분의 영향을 더 적게 받는 것으로 나타났다.

덕적도에서 채취된 에어로졸 중 NH₄⁺는 nss SO₄²⁻와 결합하여 미세입자로 대부분 존재하지만, nss SO₄²⁻를 완전히 중화시키지 못한 결합상태가 존

재할 것으로 추정된다. 반면, NO₃⁻는 대부분 조대입자로 존재하였는데, 이것은 HNO₃와 NH₃ 사이의 반응은 미미하고, 미세입자의 이온 밸런스를 만족시키기 위해 NO₃⁻가 휘발하여 해염과 반응하였기 때문으로 생각된다.

향후 덕적도에서 관측되고 있는 에어로졸을 포함한 대기오염물질 측정자료가 충분히 축적되고 종합적인 해석이 이루어지면, 황해 대기오염 현황 및 변화 특성을 정확히 파악할 수 있을 것으로 기대되며, 이러한 측정자료는 우리 나라 배경농도를 파악하고 대기오염물질의 장거리 이동을 연구하는데 유용한 비교자료로도 활용될 수 있을 것이다.

감사의 글

이 연구는 과학기술부에서 지원하고 있는 황해종합조사사업의 세부과제인 “해양-대기 조사 연구(과제번호: 98-LO-01-01-A-03)”로 수행되었다. 덕적도 측정소 운영에 도움을 준 한국통신 관계자에게 감사를 드린다.

참 고 문 헌

- 김기현, 김지영, 송기범, 김나영, 이강웅, 배귀남 (2000) 한국 황해지역의 DMS 분포 특성에 대한 연구-덕적도를 중심으로, 한국지구과학회지, 21(1), 51-58.
- 김용표, 이승복, 나광삼, 진현철, 윤용석, 배귀남, 문길주 (2000) 선박을 이용한 1999년 황해에서의 휘발성유기화합물 측정 자료, 한국대기환경학회지, 16(5), 553-560.
- 나광삼 (2001) 개인교신.
- 나광삼, 배귀남, 김용표, 이승복, 진현철, 윤용석, 문길주, 이강웅, 박현미 (1999) 황해상 덕적도에서 방향족 탄화수소의 농도 측정, 한국대기환경학회 추계 학술대회 논문집, 323-324.
- 문길주 등 (1999) 동북아 대기오염 장거리 이동과 환경보전협력방안에 관한 조사(IV)-대기오염물질 장거리 이동현상과 감시망 운영, 국립환경연구원.
- 문길주 등 (2001) 해양-대기 조사 연구, 과학기술부.
- 박문수, 박상중, 박순웅 (1999) 황해상에서 SO₂의 건성침착량의 추정, 한국대기환경학회 추계 학술대회 논문집, 325-327.
- 배귀남, 김용표, 문길주 (1999) 황해의 대기환경 조사 연구,

- 한국대기환경학회 추계학술대회 논문집, 313-314.
- 양동범 등 (1998) 황해 해수순환과 물질플럭스 연구-황해의 물질균형 및 생지화학적 순환 연구, 과학기술부.
- 윤순창, 원재광, 김사영 (1999) 황해상 덕적도에서의 에어러솔 수직분포 및 특성연구, 한국대기환경학회 추계학술대회 논문집, 315-316.
- 이승복, 배귀남, 김용표, 진현철, 문길주 (1999) 덕적도에서의 O₃, SO₂ 측정: 1999년 4월~9월 결과, 한국대기환경학회 추계학술대회 논문집, 317-318.
- 이종훈, 김용표, 문길주, 김희강, 정용승, 이종범 (1997) 우리나라 청정지역에서 측정된 PM_{2.5} 입자의 특성, 한국대기보전학회지, 13(6), 439-450.
- 인천광역시 용진군 (1998) 제38회 통계연보.
- 정일래 등 (1997) 서해안권역내 발전소 입지예정지역 주변의 대기오염원 조사, 한국전력공사.
- 최민규, 여현구, 임종익, 조희강 (2000) 강화에서의 PM_{2.5} 특성, 한국대기환경학회지, 16(6), 573-583.
- 한국도시행정연구소 (1997) 전국통계연감.
- 홍기훈, 김석현, 정창수 (1997) 황해본역의 환경오염, 해양연구, 19(1), 55-62.
- 환경부 (1997) 환경백서, 46 pp.
- Bae, G.N., Y.P. Kim, S.B. Lee, and K.C. Moon (2001) Size distribution and composition of atmospheric aerosol measured at Tokchok Island in the Yellow Sea, Proceedings of the 12th World Clean Air & Environment Congress and Exhibition, Seoul, Korea, Vol. 1, 99 p. (paper no. K-0044).
- Duce, R.A., C.K. Unni, B.J. Ray, J.M. Prospero, and J.T. Merrill (1980) Long-range atmospheric transport of soil dust from Asia to the Tropical North Pacific: temporal variability, Science, 26, 1522-1524.
- Galy-Lacaux, C., G.R. Carmichael, C.H. Song, J.P. Lacaux, H. Al Ourabi, and A.I. Modi (2001) Heterogeneous processes involving nitrogenous compounds and Saharan dust inferred from measurements and model calculations, J. Geophys. Res., 106(D12), 12599-12578.
- Gao, Y., R. Arimoto, R.A. Duce, L.Q. Chen, M.Y. Zhou, and D.Y. Gu (1996) Atmospheric non-sea-salt sulfate, nitrate and methanesulfonate over the China Sea, J. Geophys. Res., 101(D7), 12601-12611.
- Horne, R.A. (1969) *Marine Chemistry*, Wiley Interscience, New York, U.S.A., 151 pp.
- Hayami, H. and G.R. Carmichael (1998) Factors influencing the seasonal variation in particulate nitrate at Cheju Island, South Korea, Atmos. Environ., 32(8), 1427-1434.
- Kim, Y.P., J.H. Lee, N.J. Baik, J.Y. Kim, S.-G. Shim, and C.-H. Kang (1998) Summertime characteristics of aerosol composition at Cheju Island, Korea, Atmos. Environ., 32(22), 3905-3915.
- Klimont, Z., J. Cofala, W. Schoepp, M. Amann, D.G. Streets, Y. Ichikawa, and S. Fujita (2000) Projections of SO₂, NO_x, NH₃ and VOC emissions in East Asia up to 2030, Acid Rain 2000 Meeting, Japan, S1-12.
- Lee, J.H., Y.P. Kim, K.C. Moon, H.K. Kim, and C.B. Lee (2001) Fine particle measurements at two background sites in Korea between 1996 and 1997, Atmos. Environ., 35, 635-643.
- Mukai, H., Y. Ambe, K. Shibata, T. Muku, K. Takeshita, T. Fukuma, J. Takahashi, and S. Mizota (1990) Long-term variation of chemical composition of atmospheric aerosol on the Oki Islands in the Sea of Japan, Atmos. Environ., 24A(6), 1379-1390.
- Schneider, B., D. Ceburnis, R. Marks, J. Munthe, G. Petersen, and M. Sofiev (2000) Atmospheric Pb and Cd input into the Baltic Sea: a new estimate based on measurements, Marine Chemistry, 71, 297-307.
- Streets, D.G. and S.T. Waldhoff (2000) Present and future emissions of air pollutants in China: SO₂, NO_x, and CO, Atmos. Environ., 34, 363-374.
- Sweet, C.W. and D.F. Gatz (1998) Short communication summary and analysis of available PM_{2.5} measurements in Illinois, Atmos. Environ., 32(6), 1129-1133.
- US EPA (2000) *Deposition of Air Pollutants to the Great Waters*, EPA-453/R-00-005.
- Zhuang, H., C.K. Chan, M. Fang, and A.S. Wexler (1999) Formation of nitrate and non-sea-salt sulfate on coarse particles, Atmos. Environ., 33, 4223-4233.