

한반도 도서 지역 대기질 영향요인에 관한 연구 -울릉도, 제주도, 백령도 등을 중심으로

황규원¹, 김동연², 진세준¹, 김임현^{3*}

¹한국해양과학기술원 해양정책연구소, ²한국화학연구원 환경자원연구센터, ³대구대학교 회계학과

A Study on the Factors Influencing Air Pollutions in the Islands of Korean Peninsula: Focusing on the Case of Ulleung, Jeju, and Baengnyong Island

Kyu-Won Hwang¹, Dong-Yeon Kim², Se-Jun Jin¹, Im-Hyeon Kim^{3*}

¹Ocean Policy Institute, Korea Institute of Ocean Science and Technology(KIOST), Busan, 49111, Korea

²Center for Environment & Sustainable Resources, Korea Research Institute of Chemical Technology(KRICT), Daejeon, 34114, Korea

³Department. of Accounting, Daegu University, Daegu, 38453, Korea

요약 최근 미세먼지, O₃ 등의 대기오염물질에 대한 국민 관심이 증대되고, 대기질 개선을 위한 정부의 노력이 지속되고 있다. 특히 대기오염물질로 인한 경제적 피해와 국민 건강 위협이 증대되고 있는 실정이다. 본 연구는 국가배경농도 측정 지점이 위치한 울릉도, 제주도, 백령도 3개의 도서 지역을 대상으로 청정 지역의 대기오염도와 기상조건을 분석하여, 각 지역의 2차 대기오염물질 기여도를 평가하고 지역 간 차이를 비교하였다. SO₂, NO₂, CO, O₃, PM₁₀, PM_{2.5} 등 대기오염물질의 1시간 평균농도와 동일 시간대 풍속, 강수량, 일조시간 등의 기상조건을 활용하였다. 연구방법은 지역별 대기오염물질과 기상조건 간의 상관관계를 분석하고, SO₂, NO₂, CO 등 1차 생성물질을 독립변수로, PM₁₀, PM_{2.5}, O₃ 등 1차 생성물질이 포함된 2차 생성물질을 종속변수로 설정하였다. 국내외 선행연구 분석을 통해 대기질 영향요인을 탐색하고, 도서 지역의 기상조건을 통제하여 회귀분석을 수행함으로써 지역별 특성을 파악하였다. 종합하면 도서 지역의 대기질 측면에서 지역별 주요 영향요인과 기여도가 상이하여 오염발생 원인과 영향에 대한 지속적인 모니터링이 필요하다.

Abstract Recently, public interest in air pollutants has increased, and the Korean government and local governments have attempted to improve air quality. This study examined the secondary air pollutant contribution in Ulleung Island, Jeju Island, and Baengnyeong Island and compared the differences between them by analyzing the air pollution level and weather conditions in these regions. The weather conditions of the island regions, such as wind speed, precipitation, and sunshine duration, and the average concentration of air pollutants, such as SO₂, NO₂, CO, O₃, PM₁₀, PM_{2.5}, were examined. The correlation coefficient between air quality factors of each island region and weather conditions was calculated. Regression analysis was conducted by setting primary air pollutants, SO₂, NO₂, and CO as independent variables, and secondary air pollutants, O₃, PM₁₀, and PM_{2.5} as dependent variables to identify the regional contribution and impact. Therefore, the government and local governments should establish air quality management for each island region.

Keywords : Island, Air Pollutants, Influencing Factors, Correlation Analysis, Regression Analysis

본 논문은 2020년 한국해양과학기술원의 “해양공간 통합관리 연구(PE99843)” 사업 지원을 받아 수행되었음.

*Corresponding Author : Im-Hyeon Kim(Daegu University)

email: hsbkih@daegu.ac.kr

Received August 25, 2020

Revised October 12, 2020

Accepted November 6, 2020

Published November 30, 2020

1. 서론

최근 환경부는 대기질 개선을 위해 2020년부터 도서 지역에서 운영되는 발전시설(1.5MW 이상)을 대기오염 관리시설로 새롭게 추가하는 등 기존 육상 지역 관리범위를 도서 지역까지 확대하고 있다[1]. 또한 중앙정부와 지방자치단체는 도서 지역 발전시설 미세먼지 자발적 감축계획을 수립하여, 중앙부처, 지방자치단체, 전력공급기업 등 협력을 확대하고 친환경 연료로 대체를 추진하고 있다[2,3]. 특히 대기질 관리 측면에서 국가배경농도 측정소가 위치한 울릉도, 제주도, 백령도 등 도서 지역에 대한 환경적 탐색이 필요하다.

한국을 비롯한 중국, 일본 등 동북아 지역의 SO₂, NO₂, PM₁₀, PM_{2.5} 등의 대기오염물질 농도는 감소 추세이다[4]. 다만 한국의 경우, 편서풍 영향으로 PM_{2.5} 농도의 51% 정도가 중국을 비롯한 국외 발생원에서 기인했다. 한반도 대기질 연구와 비슷한 관점에서 대만의 상황을 고려한 Kuo 외[5]에 따르면, 중국과 근접한 대만도 중국 지역의 대기오염물질 영향을 받고 있는 것으로 나타났다. 한편 Nguyen 외[6]에 의하면 중국 내륙, 한반도 내륙, 일본 화산활동 등에 의해 발생된 수운이 장거리 이동하여 제주 지역에 영향을 미치는 것을 확인하였다. 일본의 경우에도, Watanabe 외[7]은 한반도 기인 대기오염물질의 장거리 이동에 따른 영향을 확인하였고, Sakata 외[8]은 일본 연안에서 중국 북부지역 영향을 규명하였다. 즉 동아시아 한반도의 대기질은 국내 오염원과 해외 기원의 오염원 영향을 받고 있는 실정이다.

정부는 이러한 미세먼지, O₃ 등의 2차 오염물질 생성 원인과 영향을 규명하기 위해 수년간 대기오염물질 분석 및 모니터링을 지속적으로 실시하고 있다[9-11].

OECD[12]에 의하면 한국은 대기오염물질로 인해 사회적 건강비용이 2015년 기준 600억 달러에서 2060년 최대 29,000억 달러 규모로 증가되어 국가 경제에 막대한 영향을 미칠 것으로 전망된다. 또한 대기환경 중 PM₁₀, PM_{2.5}, O₃ 등에 의해 심혈관계 질환, 호흡기관계 질환 등이 증가되고 있다[13-16]. 장기간 O₃와 PM_{2.5}에 장기간 노출될 경우, 알츠하이머 등과 같은 퇴행성 뇌질환 위험이 증가한다고 알려져 있다[17].

본 연구의 목적은 대기오염물질로 인해 국가 경제와 국민 건강이 위협 받고 있는 실정에서, 한반도 주변 도서 지역의 대기질 영향요인을 탐색하고, 지역별 대기오염물질 생성의 기여도를 평가하는 데 있다. 연구 대상은 국가배경농도측정소가 운영 중인 울릉도, 제주도, 백령도 등

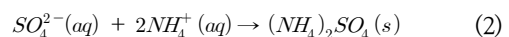
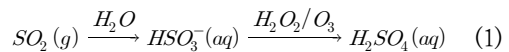
이며, 지리적으로 동해권, 남해권, 서해권 등에 위치하고 있다.

국내의 선행연구 분석을 통해 연구 대상 지역의 대기질 분석 결과와 영향요인 탐색결과를 고려하여, 도서 지역의 특성을 파악하고, 대기질 영향요인을 도출하였다. 특히 도서 지역의 기상조건을 고려하여 1차 대기오염물질과 2차 생성오염물질에 대한 통계적 분석을 수행하였다. 이를 통해 대기환경 빅데이터를 활용한 지역별 대기질 기여도를 비교분석하여 대기환경 특성을 파악하였다.

2. 이론적 배경 및 선행연구

2.1 기여도 평가를 위한 대기 생성반응 이론

1차 생성물질인 SO₂는 물질 자체가 환경에 영향을 미치고, PM_{2.5} 등 2차 오염물질의 전구물질로 작용한다. NO₂도 2차 오염물질의 전구물질로 PM_{2.5}, O₃ 등 생성에 기여한다. CO는 주로 탄소성분이 불안전연소 시 발생하며, 대표적인 1차 오염물질로 비교적 대기체류 시간이 짧아 오염원의 유무를 확인할 수 있는 지표이다. 2차 생성물질인 PM₁₀의 경우, Colbeck[18]에 의하면 일반적으로 대기 중에 1차 배출되거나 2차 생성반응에 의해 발생되고, PM_{2.5}의 경우, 2차 생성반응에 의해 주로 생성된다. 특히 Kouimtzi and Samara[19]에 의하면 SO₂, NO_x 등의 가스상 물질의 광화학 반응과 H₂O와의 응축 반응을 통해 PM_{2.5} 이하의 초미세먼지로 발달된다. SO₂에 의한 미세먼지 생성 반응으로 Seinfeld and Pandis[20], Agranovski[21]에 따르면 SO₂는 Eq. (1)과 같이 H₂O와 반응하여 HSO₃⁻로 형태로 존재하며, 다시 H₂O₂, O₃과 반응하여 H₂SO₄로 산화된다. 또한 NH₄⁺ 이온과 반응하여 Eq. (2)와 같이 (NH₄)₂SO₄로 침착되어 미세먼지로 발달된다.



NO₂에 의한 미세먼지 생성 반응으로 Seinfeld and Pandis[20], Tomasi[22]에 따르면 대기환경의 NO₂는 광화학 반응으로 생성된 하이드록시라디칼(·OH)과 반응하여 Eq. (3)과 같이 HNO₃으로 전환되고 Eq. (4)와 같이 대기 중의 NH₃와 반응하여 NH₄NO₃로 생성되어 미세입자 형태로 존재한다.





O₃ 생성 반응으로 Seinfeld and Pandis[20], Hecklen[23], Finlayson-Pitts and Pitts Jr[24] 등에 의하면, NO₂는 Eq. (5)와 같이 태양광에너지(hν) 중 파장(λ)이 420nm 이하의 영역에서 광분해 반응을 통해 NO₂에서 NO으로 분해된다. Eq. (6)과 같이 생성된 NO는 광화학 반응에 의해 O₃로 생성된다. 다만 본 연구에서는 가역반응을 유사정류근사법에 적용하여 NO₂ 농도와 비례관계로 정의하였다.



2.2 연구 대상지역 실측정 및 통계분석 선행연구

본 연구와 관련된 선행연구는 방법론 측면에서 크게 대기오염물질을 실측정하여 분석한 연구와 통계적 접근을 통한 대기질 평가에 관한 연구로 구분이 가능하다. 또한 지리적 위치 측면에서 울릉, 제주, 백령 등을 포함한 한반도 지역과 편서풍 지대에서 수행한 국내의 연구가 있다.

제주 지역의 대기오염물질 농도를 실측정한 연구로 이종훈 외[25], 홍상범 외[26], 이기호·허철구[27], 이순봉 외[28] 등은 입자상 물질의 질량농도와 이온성분을 분석하였다. 또한 홍민선 외[29], 김정환 외[30] 등은 입자상 물질의 이온 성분을 주풍의 방향을 고려하여 영향요인을 추정하였다. 서해 도서 지역 중 오세호 외[31], 최진수 외[32] 등은 백령도를 대상으로 입자상 물질에 포함된 성분을 분석하여 인위적 오염을 확인하였으며, 공부주 외[33], 김정호 외[34] 등은 수도권 지역 입자상 물질 중 이온성분을 비교하여 대기질 특성을 파악하였다. 다만 실측정 분석을 수행한 선행연구는 연구목적에 따른 명확한 측정과 분석이 가능하지만, 사례일을 중심으로 수행되어 장기간의 연속적 영향을 종합하기 어려운 한계가 존재한다.

다음은 통계적 분석을 수행한 선행연구로 입자상 물질과 기상조건을 고려한 상관관계 분석, 가스상 물질과 입자상 물질 간의 회귀분석 등이 주를 이룬다. PM₁₀, PM_{2.5} 등의 입자상 물질과 기상조건을 중심으로 유재연 외[35], 충남연구원[36], 박순애·신현재[37], 박연희 외[38] 등은 상관관계 분석을 수행하였다.

회귀분석을 수행한 선행연구로 종속변수를 O₃, NO₂, 입자상 물질 등으로, 독립변수는 1차 오염물질, 도시특성, 기상조건 등으로 주로 설정하였다. 일례로 산업연구

원[39]와 이찬주·홍민선[40]은 입자상 물질을 종속변수로, 가스상 물질을 독립변수로 설정하였다.

한반도 주변 편서풍 지대의 대기오염 통계분석을 수행한 선행연구로 Li 외[41]은 우한 지역, Xie 외[42]는 31개 지방자치단체를 대상으로 대기오염물질 간 상관관계 분석을 수행하였으며, Wang 외[43]은 기상조건과 입자상 물질 간의 회귀분석을 통해 주요 영향요인을 분석했다. 대만에서 Tsai[44]는 대기오염물질 간, Yu and Chang[45]은 기상조건 간의 상관관계 분석을 수행하였고, Kuo 외[5]은 입자상 물질, 가스상 물질, 기상조건 등의 회귀분석을 수행하였다.

본 연구에서 앞서 언급한 국내외 선행연구에서 수행한 상관관계와 회귀분석 방법을 검토하여 대기질 영향요인을 1차 및 2차 대기오염물질과 기상조건으로 설정하였다. 특히 선행연구의 추측분석 방법에서 추가로 일사시간, 강수량, 적설량, 대기정체 등의 현상을 지시자 변수로 설정하여 외부 영향요인을 통제하여 분석하였다.

3. 연구방법

3.1 대기오염물질 및 기상조건 데이터

연구 대상지역은 국가배경농도측정망이 위치한 울릉, 제주, 백령 등이며, 이들 지역은 환경부에서 국가적인 배경농도를 파악하고, 국내외 오염물질 유입 유출 등을 파악하기 위해 운영 중이다. 이들 지역의 경우, 발전시설 등과 같이 대규모 1차 오염원이 거의 없는 지역으로 대기질 분석 측면에서 발생원이 아닌 영향권으로 판단할 수 있다[38,46].

기상조건은 기상청 측정 데이터를 활용하였으며, 연구 대상 지역에 위치한 국가기후데이터센터 종관기상관측(ASOS)의 일사시간, 강수량, 적설량, 풍속 등의 1시간 평균 데이터를 이용하였다. 강수량은 0.1mm 단위로 측정되고 있으며, 0.1mm 미만인 경우 0.0으로 기록되어 0.0 측정치도 값으로 인정하여 처리하였다[47]. 기상조건 측정 지점을 살펴보면, 백령도는 37.9740°E, 124.7124°N, 울릉도는 37.4813°E, 130.8986°N, 제주도는 33.2938°E, 126.1628°N 등에 위치하고 있다. 또한 측정 위치가 지표면과 근접하여 국지적인 한계가 존재하지만, 측정 지점의 일반적인 기상상태로 가정하였다.

대기오염물질 농도는 환경부 국가배경농도 측정항목인 SO₂, CO, O₃, NO₂, PM₁₀, PM_{2.5} 등의 1시간 유효자료 처리비율 75% 이상 최종확정 자료를 활용하였다. 일

부 동일 시간대의 결측치가 있는 경우와 PM_{2.5} 농도가 PM₁₀ 농도보다 높은 경우에는 데이터 신뢰도를 위해 제외하였다[48]. 측정 지점은 백령도 37.9647°E, 124.6340°N, 울릉도 37.5223°E, 130.7967°N, 제주도 33.2925°E, 126.1622°N 등에 위치하고 있다. 다만 대기오염물질 측정 위치와 기상조건 측정 위치가 상이하지만, 같은 도서 지역 내에 위치하여 동일 지점의 측정값으로 가정하였다.

연구기간은 환경부의 초미세먼지 예보가 시작된 2015년 1월 1일부터 2018년 12월 31일까지 최근 4년간 1시간 평균 측정값을 대상으로 분석하였다.

3.2 상관관계 및 회귀분석 방법

울릉도, 제주도, 백령도 등의 도서 지역별 일사시간, 강수량, 적설량, 풍속 등의 기상조건을 요인으로 설정하였으며, 강수 현상으로 인한 대기세정 작용 영향을 사전에 방지하기 위해 강수량을 지시자 변수로 통제하였다. 상관관계와 회귀분석은 Stata 통계 패키지(StataCorp LLC, 2018, SE/14)를 활용하여 수행하였다.

상관관계 분석이론은 설정된 변수가 증가하거나 감소할 때 다른 변수의 변화 정도와 방향을 추정하는 통계적 분석법이다. 본 연구에서는 Nguyen 외[6], 홍상범 외[26], 공부주 외[33], 유재연 외[35], 충남연구원[36], Xie 외[42], Tsai[44], Yu and Chang[45] 등과 같이 1차 오염물질, 2차 오염물질, 기상조건 간의 상관관계를 분석하였다. 2개의 변수 간 증감이 일치하면 상관계수가 양의 값을 갖고, 변수 간 증감이 반대가 되면 음의 상관관계를 갖으며, 산출식은 아래와 같다.

$$\rho_{x,y} = \text{corr}(X, Y) = \frac{\text{cov}(X, Y)}{\sigma_x \sigma_y} = \frac{E[(X - \mu_x)(Y - \mu_y)]}{\sigma_x \sigma_y}$$

μ_x 는 모집단 X의 평균, μ_y 는 모집단 Y의 평균, σ_x 는 모집단 X의 표준편차, σ_y 는 모집단 Y의 표준편차이다. 모집단은 지역별 SO₂, NO₂, CO, O₃, PM₁₀, PM_{2.5} 등의 대기오염물질과 계절, 기온, 강수량, 풍속, 풍향, 일조시간 등의 기상조건으로 설정하였다. 특히 입자상 물질의 경우, 조대입자(PM₁₀-PM_{2.5})와 PM₁₀ 대비 PM_{2.5}의 농도 비율(PM_{2.5}/PM₁₀)을 2차 생성 입자상 물질 비율 요인으로 추가하였다[32].

회귀분석 이론이론은 앞서 언급한 Kuo 외[5], 박연희 외[38], 산업연구원[39], 이찬주·홍민선[40], Wang 외[43] 등의 선행연구와 같이 가설을 설정하였다. SO₂, NO₂, CO 등의 1차 대기오염물질을 독립변수로 설정하고, O₃, PM₁₀, PM_{2.5} 등은 2차 생성되거나 1차 발생원이

포함되어 종속변수로 설정하였으며, 산출식은 아래와 같다[39].

$$Y_{Area} = \beta_0 + \beta_1(SO_{2,Area}) + \beta_2(NO_{2,Area}) + \beta_3(CO_{Area}) + B \cdot (\text{Precipitation}) \times \eta_i + \dots + \eta_i + \epsilon_{Area}$$

산출식의 아래첨자 Area는 울릉, 제주, 백령 등의 지역을 의미하고, Y_i 는 설명변수의 영향 파악을 위한 종속변수를 의미하며, 2차 생성물질인 PM_{2.5}, PM₁₀, O₃ 등의 농도로 설정하고, 단위는 PM_{2.5}와 PM₁₀는 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, O₃은 ppm이다. $NO_{2,Area}$, $SO_{2,Area}$, CO_{Area} 는 독립변수로 NO₂, SO₂, CO 등이며, 단위는 ppm이고 η_i 는 지시자 변수로 강수량을 의미한다. ϵ_{Area} 는 오차항이며, β 는 상수항 및 NO₂, SO₂, CO 등 독립변수의 회귀계수이다.

본 연구에서는 기상조건 중 일조 유무, 강수 및 적설 현상, 풍속 2m/s 기준으로 대기 정체 현상 등을 지시자 변수로 통제하였다. 또한 자기상관 통제를 위해 PM₁₀-PM_{2.5}, PM_{2.5}/PM₁₀ 요인을 제외하여 회귀분석을 수행하였다.

4. 분석 결과

4.1 기술통계 분석결과

지역별 2015년부터 2018년까지 최근 4년간 대기오염물질 농도를 대상으로 기술통계를 수행하여, 오염물질별 수준과 변동을 분석하였다.

Table 1에서 보는 바와 같이 최근 4년간 평균 SO₂ 농도는 백령 지역이 가장 높은 0.0026 ppm이며, 다음 울릉 0.0019 ppm, 제주 0.0005 ppm 등의 순으로 지역 간 차이가 존재하였다. 반면 표준편차 대비 평균농도인 변동계수(Coefficient of Variation)는 제주 지역이 119.4%로 가장 높았고, 다음 울릉 63.3%, 백령 57.5% 순으로 분석되었다. NO₂의 평균농도는 울릉 0.0043 ppm, 백령 0.0039 ppm, 제주 0.0033 ppm 등의 순이며, 변동계수는 64.7%에서 76.1% 수준이다. CO 농도의 경우, 백령 0.3382 ppm, 울릉 0.2345 ppm, 제주 0.2329 ppm 등으로 백령의 CO 농도가 가장 높았으며, 변동계수는 울릉 지역이 63.4%로 가장 크고, 다음 백령 57.0%, 제주 42.5%로 차이가 존재한다.

Table 1. Result of descriptive statistics in island region

Area	Variable	Mean	Std. Dev.	C.V.	Min	Max
Ulleung	SO ₂	0.0019	0.0012	63.3%	0.0000	0.0220
	NO ₂	0.0039	0.0026	67.4%	0.0000	0.0250
	CO	0.2345	0.1486	63.4%	0.0000	3.1000
	O ₃	0.0499	0.0154	30.9%	0.0050	0.1350
	PM ₁₀	40.5	27.6	68.2%	1.0	543.0
	PM _{2.5}	17.0	11.5	67.7%	0.0	84.0
Jeju	SO ₂	0.0005	0.0006	119.4%	0.0000	0.0090
	NO ₂	0.0033	0.0022	64.7%	0.0000	0.0220
	CO	0.2329	0.0991	42.5%	0.1000	1.0000
	O ₃	0.0443	0.0171	38.6%	0.0010	0.1210
	PM ₁₀	42.7	29.4	68.8%	1.0	429.0
	PM _{2.5}	20.1	14.5	72.2%	0.0	141.0
Baengnyeong	SO ₂	0.0026	0.0015	57.5%	0.0000	0.0290
	NO ₂	0.0043	0.0033	76.1%	0.0000	0.0460
	CO	0.3382	0.1927	57.0%	0.0000	2.5000
	O ₃	0.0443	0.0144	32.6%	0.0010	0.1320
	PM ₁₀	41.6	41.1	98.9%	1.0	1196.0
	PM _{2.5}	21.4	18.1	84.5%	0.0	240.0

2차 생성물질인 O₃의 경우, 0.0499 ppm으로 울릉 지역이 가장 높았고 제주와 백령은 0.0443 ppm 수준으로 지역 간 차이는 크지 않았으며, 변동계수도 제주 38.6%, 백령 32.6%, 울릉 30.9% 등으로 분석되었다. PM₁₀의 경우도 O₃와 유사하게 지역 간 농도차이가 크지 않지만, 변동계수는 백령 98.9%, 제주 68.8%, 울릉 68.2% 등으로 제주 지역의 변동이 매우 높았다. PM_{2.5}의 경우, 백령이 가장 높은 21.4 μg/m³이며, 다음 제주 20.1 μg/m³, 울릉 17.0 μg/m³수준이고, PM₁₀와 유사하게 백령 지역의 변동계수가 84.5%로 높았다. 또한 PM₁₀, PM_{2.5} 등의 농도가 최대치를 보인 경우는 대부분 황사 현상 영향 시간대에 발생하였고, 최저치의 경우에는 일부 강수 현상이 발생한 시간대에 발생하였다. 물질별로 SO₂의 경우, 지역 간 평균농도 차이가 크고, NO₂, O₃, PM₁₀, PM_{2.5} 등은 상대적으로 차이가 크지 않았다.

지역별로 울릉 지역의 경우, 도서 지역 중 O₃ 농도가 가장 높고, CO 농도 변화가 가장 컸으며, 제주 지역의 경우, PM_{2.5} 농도가 가장 높고, SO₂, O₃ 등의 농도 변화가 크다. 백령 지역의 경우, SO₂, NO₂, CO, PM_{2.5} 등이 3곳 중 가장 높고, NO₂, PM₁₀, PM_{2.5} 농도 변화가 상대적으로 큰 것으로 분석되었다.

대기오염물질별 농도 수준을 비교하면 SO₂, NO₂, CO의 경우, 백령 > 울릉 > 제주 순이며, O₃의 경우, 울릉

> 백령, 제주, PM₁₀의 경우, 제주 > 백령 > 울릉, PM_{2.5}의 경우, 백령 > 제주 > 울릉 등의 순이다. 또한 2차 생성물질은 지역 간 차이가 크지 않아 결정요인을 확인할 필요가 있다. 변동계수는 울릉에서 PM₁₀ > PM_{2.5} > NO₂ 등의 순으로 입자상 물질의 변동계수가 높았으며, 제주에서 SO₂ > PM_{2.5} > PM₁₀ > NO₂ 등의 순이고, 백령의 경우, PM₁₀ > PM_{2.5} > NO₂ 등으로 분석되었다. 모든 지역에서 O₃의 변동계수 38.6% 이하로 농도변화가 크지 않았다.

4.2 Pearson 상관관계 분석결과

기술분석 결과 3.1에서 언급한 바와 같이 지역별 대기 질이 상이하였으며, 이에 영향요인을 탐색하고자 대기오염물질과 기상조건 간의 상관관계 분석을 수행하여 변화 정도와 방향을 추정하였다. 모집단은 SO₂, NO₂, CO, O₃, PM₁₀, PM_{2.5}, PM_{2.5}/PM₁₀, PM₁₀-PM_{2.5} 등의 물질과 계절, 기온, 강수량, 풍속, 풍향 등의 기상조건으로 설정하였다.

기상조건과 대기오염물질 간의 상관관계는 김정환 외

Table 2. Result of each regional correlation coefficient

Factor		PCC	Ulleung	Jeju	Baengnyeong
SO ₂	O ₃	r	0.3178*	0.2085*	0.1037*
		p-value	0.0000	0.0000	0.0000
	PM ₁₀	r	0.3010*	0.2177*	0.3459*
		p-value	0.0000	0.0000	0.0000
	PM _{2.5}	r	0.4184*	0.2292*	0.4742*
		p-value	0.0000	0.0000	0.0000
PM _{2.5} /PM ₁₀	r	0.1126*	0.0533*	0.0423*	
	p-value	0.0000	0.0000	0.0000	
PM ₁₀ -PM _{2.5}	r	0.1649*	0.1456*	0.1808*	
	p-value	0.0000	0.0000	0.0000	
NO ₂	O ₃	r	0.1665*	0.1430*	0.0313*
		p-value	0.0000	0.0000	0.0000
	PM ₁₀	r	0.0657*	0.2781*	0.3200*
		p-value	0.0000	0.0000	0.0000
	PM _{2.5}	r	0.1009*	0.3284*	0.4923*
		p-value	0.0000	0.0000	0.0000
PM _{2.5} /PM ₁₀	r	-0.0791*	0.0592*	0.1363*	
	p-value	0.0000	0.0000	0.0000	
PM ₁₀ -PM _{2.5}	r	0.0309*	0.1615*	0.1363*	
	p-value	0.0000	0.0000	0.0000	
CO	O ₃	r	0.1335*	0.3639*	0.0526*
		p-value	0.0000	0.0000	0.0000
	PM ₁₀	r	0.1924*	0.5041*	0.3129*
		p-value	0.0000	0.0000	0.0000
	PM _{2.5}	r	0.3087*	0.6565*	0.5280*
		p-value	0.0000	0.0000	0.0000
PM _{2.5} /PM ₁₀	r	0.1021*	0.1540*	0.1586*	
	p-value	0.0000	0.0000	0.0000	
PM ₁₀ -PM _{2.5}	r	0.0833*	0.2509*	0.1063*	
	p-value	0.0000	0.0000	0.0000	

*는 0.05 수준에서 유의함을 의미함

[30], 유재연 외[35], 등과 유사하게 상관도가 높지 않았다. O₃의 경우, 백령과 울릉에서 기온 간에 각각 0.2335, 0.1946으로 양의 상관계수를 갖으며, 모든 지역에서 O₃와 계절 간에 음의 상관관계(-0.4476, -0.4302, -0.3754)를 보였다. PM₁₀의 경우, 제주와 울릉에서 PM₁₀와 풍향 간에 양의 상관관계(0.1330, 0.1119)를 보였고, 반대로 울릉에서 계절과 PM₁₀ 간 상관계수가 -0.1944로 음의 상관성을 보였다. PM_{2.5}의 경우, 울릉에서 풍향 간에 0.1181의 상관관계를 보였고, 제주에서 강수량 간 -0.1414, 울릉에서 계절 간 -0.1852로 음의 상관관계로 나타났다. PM₁₀-PM_{2.5}와 PM_{2.5}/PM₁₀의 경우, 통계적으로 유의미하지 않았다.

물질별로 Table 2와 같이 PM₁₀과 PM₁₀-PM_{2.5} 간 0.8858에서 0.9221이며, PM₁₀과 PM_{2.5} 간 상관계수는 0.6954에서 0.7366 등으로 전반적으로 높은 상관성을 보였다. 또한 Li 외[41]과 같이 PM_{2.5}와 SO₂, NO₂, CO 간의 높은 상관성을 보였고, SO₂, CO, NO₂ 등과 PM₁₀ 간의 양의 상관관계를 보였으며, NO₂와 CO 간 상관관계의 경우, Yu and Chang[45]와 유사하게 0.2400에서 0.3643으로 양의 관계를 확인하였다.

2차 생성물질과 전구물질 간의 상관관계 분석 결과, SO₂를 중심으로 O₃, PM_{2.5}/PM₁₀ 간에는 울릉 > 제주 > 백령, PM₁₀, PM_{2.5}, PM₁₀-PM_{2.5} 간에 백령 > 울릉 > 제주 등의 순으로 분석되었다. NO₂를 중심으로 O₃ 간에는 울릉 > 제주 > 백령 등의 순이며, Tsai[44]와 유사하게 PM₁₀, PM_{2.5}, PM_{2.5}/PM₁₀ 등 입자상 물질 간의 높은 상관관계를 보였으며, 백령 > 제주 > 울릉 등의 순이다. PM₁₀-PM_{2.5} 간에 제주 > 백령 > 울릉 등으로 분석되었다. CO를 중심으로 O₃ 간에는 제주 > 울릉 > 백령, PM₁₀, PM_{2.5}, PM₁₀-PM_{2.5} 간에 제주 > 백령 > 울릉, PM_{2.5}/PM₁₀ 간에 백령 > 제주 > 울릉 등의 순으로 분석되었다.

지역별 분석결과를 구분하면, 울릉 지역의 경우, SO₂ 농도가 상대적으로 2차 생성오염물질 간에 유의미한 양의 상관관계를 보였다. 제주 지역의 경우, CO 농도가 O₃, PM₁₀, PM_{2.5}, PM₁₀-PM_{2.5} 등의 2차 오염물질 간의 상관관계가 상대적으로 높아 CO 농도가 주요한 영향요인으로 작용했다. 백령의 경우는 SO₂와 NO₂ 농도와 PM₁₀, PM_{2.5} 농도 간 상관계수가 높게 나타났다.

4.3 회귀분석 결과

지역별 2차 생성 전구물질, 1차 오염물질과 2차 오염물질 간 기여도 평가를 위해 SO₂, NO₂, CO 등을 독립변

수로, O₃, PM₁₀, PM_{2.5} 등을 종속변수로 가정하였다. 다만 CO는 2차 생성반응의 전구물질은 아니지만 영향요인으로 가정하여 독립변수에 포함했다. 앞서 4.2 상관관계 분석결과, 기상조건이 복잡한 영향 요인으로 작용하여, 기상조건에 의한 영향을 통제하기 위해 Table 3과 같이 일조시간, 강수량, 적설량, 대기정체 등을 지시자 변수로 통제하였다[41,42].

지역별 회귀분석 결과, 울릉 지역의 경우, 모든 변수들이 유의미한 검정통계량(t)을 갖았다. SO₂가 상대적으로 O₃, PM₁₀, PM_{2.5} 등의 2차 오염물질에 높은 기여도($\beta = 0.2882, 0.2510, 0.3434$)를 보여 이찬주-홍민선[40]과 유사하였으며, 기상조건으로 강수 및 적설, 대기 정체 현상은 음의 영향력을 보였다. 제주 지역의 경우, NO₂에 의한 O₃, 일사시간에 의한 PM₁₀ 간에 유의미한 검정통계량을 보이지 않았으며, CO에 의한 O₃, PM₁₀, PM_{2.5} 농도의 증가에 기여도($\beta = 0.3411, 0.4468, 0.6067$)가 높았으며, 기상조건으로 강수, 적설, 대기 정체 현상이 약한 음의 영향력을 보였다. 다만 PM_{2.5}는 유재연 외[41]과 같이 대기 정체 현상에 미미한 양의 결정계수로 나타났다. 백령 지역의 경우, 대기 정체에 의한 O₃과 PM_{2.5}, 일사시간에 의한 PM_{2.5} 간에 유의미한 검정통계량을 보이지 않았으며, O₃ 회귀식의 결정계수(R²)는 낮은 설명력을 갖았다. SO₂, NO₂, CO 등이 PM₁₀, PM_{2.5} 간에 0.1665에서 0.3471 사이의 회귀계수로 나타나, 입자상 물질 농도에 일부 영향을 주고 있다.

2차 오염물질별로 비교한 결과, 울릉 지역의 경우, O₃ 농도는 SO₂ > NO₂ > CO 등의 순으로 영향을 받고 있으며, PM₁₀ 및 PM_{2.5} 농도는 SO₂ > CO > NO₂ 등의 순으로 결정되었다. 제주 지역의 경우, CO > SO₂ > NO₂ 등의 순으로 O₃, PM₁₀, PM_{2.5} 농도 결정에 기여하였다. 백령 지역의 경우, O₃ 농도는 SO₂에 영향을 주로 받았으며, PM₁₀ 농도는 SO₂ > CO > NO₂ 등의 순으로, PM_{2.5} 농도는 CO > NO₂ > SO₂ 등의 순으로 영향을 받았다.

4.4 분석 결과에 대한 고찰

기술통계에 대한 고찰로 첫째, 지역과 관계없이 황사와 강수 현상에 따른 PM₁₀, PM_{2.5} 등의 농도변화가 확인되어, 황사 현상으로 인한 고농도 미세먼지 유입과 강수 현상으로 인한 세정작용 영향이 원인으로 판단된다 [32,36-38]. 둘째, 도서 지역별로 오염원 영향 차이로 인한 대기오염물질 농도와 변동이 존재한다. 특히 백령 지역은 선행연구의 역귀적 분석결과와 유사하게 수도권 육상 오염물질과 중국 등 국외 오염원의 영향이 기인하였

다[31-34]. 셋째, 모든 지역에서 O₃을 제외한 2차 오염 물질의 농도 변화가 높게 나타나, 외부에서 발생된 대기 오염물질이 장거리 이동하여 2차 생성반응 및 유입에 의한 영향이 지배되었다고 추정된다[27,28,37,43].

상관관계 분석결과를 보면, 첫째, 물질별로 정도의 차이는 존재하지만 1차 오염물질과 2차 생성물질 간의 양의 상관관계를 보여, 국내의 선행연구와 유사하게 전구물질의 광화학 반응과 산화·환원 반응에 의한 생성으로 판단된다[18,19,44]. 둘째, 지역별로 대기오염물질 간의 상관관계의 차이가 나타났으며, 앞서 기술통계 결과와 유사하게 지리적 위치에 따른 주변 오염 발생원의 이동과 생성의 차이가 기인했다[33,37]. 셋째, 기상조건과 대기오염물질 간의 상관관계는 일부 지역에서 통계적인 유의미한 결과를 얻었지만, 전반적으로 뚜렷한 차이를 확인하지 못했다. 기상현상의 복잡한 작용과 국지적 기상조건의 한

계로 향후 고도별로 세분화된 분석이 필요한 것으로 사료된다.

회귀분석 결과에 대한 고찰로, 첫째, 울릉, 제주, 백령 등의 지역 주변에서 발생된 1차 오염물질의 유입 경로 차이로 주요 결정요인이 상이하하다[25,28]. 앞서 분석된 결과와 연계되어 지역별 1차 오염물질이 대기환경에서 이동하여 직접적인 영향을 주고 있음을 의미한다. 특히 백령의 경우, 박순애·신현재[37]과 같이 중국과 지리적으로 근접하고, 수도권 대기질 영향이 받았다고 판단된다. 둘째, 1차 오염원의 직접적인 유입과 더불어 전구물질의 장거리 이동 중 2차 생성조건 차이로 인해 대기질 기여도가 상이하하였다[27]. 이는 울릉 지역의 회귀분석 결과에서 2차 생성물질에 대한 SO₂의 회귀계수를 통해 확인할 수 있다[41,43,44,46]. 마지막으로, 강수, 기온, 풍향, 대기 정체 등 국지적 기상조건이 흥민선 외[31]과 같

Table 3. Regression of regional secondary air pollutants by region

Area	Variable	O ₃			PM ₁₀			PM _{2.5}		
		β	Std.Err.	P> t	β	Std.Err.	P> t	β	Std.Err.	P> t
Ulleung	SO ₂	0.2882	0.0800	0.0000	0.2510	146.8137	0.0000	0.3434	57.2181	0.0000
	NO ₂	0.1327	0.0361	0.0000	0.0227	66.3143	0.0000	0.0287	25.8448	0.0000
	CO	0.0238	0.0007	0.0000	0.1092	1.2202	0.0000	0.1977	0.4755	0.0000
	Dummy_Sunshine	0.0264	0.0002	0.0000	0.0365	0.3360	0.0000	0.0122	0.1309	0.0310
	Dummy_Precipitation	-0.0867	0.0003	0.0000	-0.1120	0.5234	0.0000	-0.0883	0.2040	0.0000
	Dummy_Snowfall	-0.1657	0.0003	0.0000	-0.0201	0.4910	0.0010	-0.0550	0.1914	0.0000
	Dummy_Stagnation	-0.0309	0.0002	0.0000	-0.0545	0.3802	0.0000	-0.0332	0.1482	0.0000
	cons.	.	0.0003	0.0000	.	0.4799	0.0000	.	0.1870	0.0000
	Adjusted R ²	0.1604			0.1179			0.2231		
Jeju	SO ₂	0.1440	0.1985	0.0000	0.1352	316.2753	0.0000	0.1325	135.9197	0.0000
	NO ₂	0.0023	0.0625	0.7750	0.0980	99.5742	0.0000	0.0875	42.7921	0.0000
	CO	0.3411	0.0014	0.0000	0.4468	2.1760	0.0000	0.6067	0.9351	0.0000
	Dummy_Sunshine	0.0438	0.0003	0.0000	0.0122	0.4040	0.0750	0.0013	0.1736	0.8250
	Dummy_Precipitation	-0.0687	0.0004	0.0000	-0.0589	0.6423	0.0000	-0.0222	0.2760	0.0000
	Dummy_Snowfall	-0.0801	0.0018	0.0000	-0.0281	2.8732	0.0000	-0.0255	1.2347	0.0000
	Dummy_Stagnation	-0.0387	0.0004	0.0000	-0.0056	0.6870	0.412	0.0351	0.2952	0.0000
	cons.	.	0.0004	0.0000	.	0.5944	0.0000	.	0.2555	0.0000
	Adjusted R ²	0.1724			0.2893			0.4605		
Baengnyeong	SO ₂	0.1082	0.0616	0.0000	0.2028	161.7966	0.0000	0.2239	59.3960	0.0000
	NO ₂	-0.0314	0.0277	0.0000	0.1665	72.6606	0.0000	0.2698	26.6739	0.0000
	CO	0.0283	0.0005	0.0000	0.1762	1.2223	0.0000	0.3471	0.4487	0.0000
	Dummy_Sunshine	0.0111	0.0002	0.0460	0.0104	0.4228	0.0420	-0.0060	0.1552	0.1640
	Dummy_Precipitation	-0.0735	0.0003	0.0000	-0.0548	0.7961	0.0000	-0.0437	0.2923	0.0000
	Dummy_Snowfall	-0.1638	0.0004	0.0000	-0.0722	1.0201	0.0000	-0.0978	0.3745	0.0000
	Dummy_Stagnation	-0.0019	0.0002	0.7290	-0.0244	0.5226	0.0000	0.0006	0.1918	0.8900
	cons.	.	0.0002	0.0000	.	0.5651	0.0000	.	0.2075	0.0000
	Adjusted R ²	0.0449			0.1883			0.4335		

이 기인하여 지역별 대기질에 영향을 미쳤다. 다만 통계적 분석 한계로 대기오염 요인을 명확하게 규명하기 위해 인위적 기원의 입자상 물질 이온성분과 연구 대상지역 주변 오염원에 대한 고려가 필요하다고 판단된다.

5. 결론

본 연구는 한반도 주변 울릉도, 제주도, 백령도 등의 도서 지역 대기오염도와 기상조건을 분석하여, 각 도서 지역 간 차이를 비교함으로써 2차 대기오염물질 기여도를 평가하는 연구이다. 연구 기간은 2015년부터 2018년까지 최근 4년간 1시간 평균 농도와 기상조건을 활용하여 상관관계와 회귀분석을 수행하였다. 또한 연구 대상지역은 간접 영향권으로 가정하였으며, 특히 2차 오염물질의 경우, 자체 발생이 아닌 외부 오염원 기인 농도로 가정하여 영향을 판단하였다.

- 기술통계 분석결과

울릉의 경우, 3개의 도서 지역 중 O₃ 농도가 가장 높고, CO 농도 변화가 가장 컸으며, 제주의 경우, PM_{2.5} 농도가 가장 높고, SO₂, O₃ 등의 농도 변화가 가장 크게 나타났다. 백령의 경우, SO₂, NO₂, CO, PM_{2.5} 등이 상대적으로 높았고, NO₂, PM₁₀, PM_{2.5} 농도 변화가 매우 큰 것으로 분석되었다. 1차 오염물질이 상대적으로 높은 백령에서 주변 육상오염원과 중국 등 국외 오염원의 영향이 추정된다.

- 상관관계 분석결과

지역별 차이가 존재하며, 기상조건과 대기오염물질 간의 상관관계 분석 결과, 전반적으로 통계적 유의미 결과를 확인하지 못했다. 울릉에서 SO₂ 농도 증가가 O₃, PM_{2.5}/PM₁₀ 농도에 영향을 주고 있으며, NO₂ 농도와 O₃ 간의 상관관계가 상대적으로 높아 전구물질의 영향이 크다. 제주의 경우, CO 농도가 O₃, PM₁₀, PM_{2.5}, PM₁₀-PM_{2.5} 등의 2차 오염물질 간의 상관관계가 상대적으로 높아 CO 농도가 주요한 영향요인으로 작용했다. 백령의 경우, SO₂와 NO₂ 농도와 PM₁₀, PM_{2.5} 농도 간 상관관계수가 높아 2차 생성에 의한 입자상 물질 증가로 판단된다.

- 회귀분석 결과

울릉의 경우, SO₂ 농도가 O₃, PM₁₀, PM_{2.5} 농도에 주

요한 결정요인으로 작용하고 있으며, 제주의 경우, CO 농도가 O₃, PM₁₀, PM_{2.5} 농도 결정에 기여하였다. 백령의 경우, SO₂ 농도 증가가 O₃, PM₁₀ 농도를 증가시키고 있으며, PM_{2.5} 농도는 CO 농도가 주요한 결정요인으로 분석되었다.

결론적으로 울릉의 경우, SO₂, NO₂ 등 전구물질의 2차 생성반응에 의한 영향이 대기환경에 주된 기여요인이며, 제주의 경우 외부 유입에 기인한 2차 오염물질이 높은 기여도를 보이고, 백령의 경우, 외부 유입과 2차 생성반응에 의한 기여가 높게 평가되었다.

앞서 분석한 선행연구의 대기질 영향요인을 탐색하고, 본 연구에서 기상조건을 통제하여 2차 대기오염물질 기여도를 평가함으로써 도서 지역의 대기질 특성을 확인하였다. 다만 연구 한계로 측정 지점의 주변 환경과 위치에 따른 영향과 발생원으로부터 오염물질이 이동과정 중 발생하는 소멸과정을 고려하지 못했다. 또한 오염발생 추정 지역의 오염도를 반영하지 않고 기여도를 판단한 한계가 존재한다.

향후 고도별 풍속, 풍향 등 기상조건에 따른 오염영향도 추정 연구가 필요하고, 대기반응을 고려한 시차분석과 고농도, 황사, 대기정체 등의 사례를 고려한 기여도 분석을 수행할 예정이다.

References

- [1] Ministry of Environment, Public Announcement of Air Pollutant Emission Allowance Standard in 2020, Korea, pp.1-2.
- [2] Ministry of Environment, Local Governments, and Korean Electric Power Corporation Participated in Improving Air Quality of Island Regions, Korea, pp.1-4.
- [3] Korean Government, Comprehensive Plan of Fine Particle management(2020~2024), Korea, pp.1-4.
- [4] Ministry of Environment, Joint Research Report on Long-range Transboundary Pollutants, Korea, pp.1-4.
- [5] Kuo, C. Y., Chen, P. T., Lin, Y. C., Lin, C. Y., Chen, H. H., and Shih, J. F., "Factors affecting the concentrations of PM₁₀ in central Taiwan", *Chemosphere*, Vol.70, No.7, pp.1273-1279, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2007.07.058>
- [6] Nguyen, H. T., Kim, M. Y., and Kim, K. H., "The influence of long-range transport on atmospheric mercury on Jeju Island, Korea", *Science of the total environment*, Vol.408, No.6, pp.1295-1307, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2009.10.029>

- [7] Watanabe, K., Honoki, H., Iwai, A., Tomatsu, A., Noritake, K., Miyashita, N., and Aoki, K., "Chemical characteristics of fog water at Mt. Tateyama, near the coast of the Japan Sea in central Japan", *Water, Air, & Soil Pollution*, Vol.211, No.1-4, pp.379-393, 2010.
DOI: <https://doi.org/10.1007/s11270-009-0307-2>
- [8] Sakata, M., Ishikawa, T., and Mitsunobu, S., "Effectiveness of sulfur and boron isotopes in aerosols as tracers of emissions from coal burning in Asian continent", *Atmospheric environment*, Vol.67, pp.296-303, 2013.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2012.11.025>
- [9] National Institute of Environmental Research, Investigation and Countermeasure of Photochemical Air Pollution, Korea, pp.3-493.
- [10] National Institute of Environmental Research, A Study on Formation of PM_{2.5} in Urban Areas, Korea, South Korea, pp.1-172.
- [11] National Institute of Environmental Research, Investigation on Secondary Formation of Fine Particle in Urban Areas, Korea, pp.1-127.
- [12] Organisation for Economic Cooperation and Development(OECD), The Economic Consequences of Outdoor Air Pollution, p115, OECD, 2016, pp.90-91.
- [13] Hyunjoon Bae, "The Health Impacts and Benefits of Cardiovascular and Respiratory Hospitalization Attributed to PM_{2.5}", *Korea Review of Applied Economics*, Vol.18, No.3, pp.125-139, 2016.
- [14] Jong-Kil Park, Yun-Jeong Choi and Woo-Sik Jung, "An analysis on the distribution characteristics of PM₁₀ concentration and its relation to the death from Asthma in Seoul, Korea", *Journal of Environmental Science International*, Vol.24, No.7, pp.961-968, 2015.
- [15] Akbarzadeh, M. A., Khasheshi, I., Sharifi, A., Yousefi, N., Naderian, M., Namazi, M. H., and Nickdoost, N., "The association between exposure to air pollutants including PM₁₀, PM_{2.5}, ozone, carbon monoxide, sulfur dioxide, and nitrogen dioxide concentration and the relative risk of developing STEMI: A case-crossover design", *Environmental research*, Vol.161, pp.299-303, 2018.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envres.2017.11.020>
- [16] Young-hee Roh, "Pattern Analysis and Mapping of Urban Air Pollution Using Exposure Time Metric and Mortality Caused by Cardiovascular and Respiratory Illnesses", *Journal of Environmental Policy and Administration*, Vol.25, No.1, pp.21-48, 2017.
- [17] C. R. Jung, Lin, Y. T., and Hwang, B. F., "Ozone, particulate matter, and newly diagnosed Alzheimer's disease: a population-based cohort study in Taiwan", *Journal of Alzheimer's Disease*, Vol.44, No.2, pp.573-584, 2015.
- [18] Colbeck, I., *Environmental Chemistry of Aerosols*, p255, Blackwell Pub, 2008, pp.4-5.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1002/9781444305388>
- [19] Kouimtzi, T., and Samara, C., *Airborne particulate matter*, p339, Springer Berlin Heidelberg, 1995, pp.37-38.
DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-540-49145-3>
- [20] Seinfeld, J. H., and Pandis, S. N., *Atmospheric chemistry and physics from air pollution to climate change*, 2nd, p1120, John Wiley & Sons, 2006, pp.114-487.
- [21] Agranovski, I., *Aerosols: science and technology*, p463, John Wiley & Sons, 2010, pp.363-370.
DOI: <https://dx.doi.org/10.1002/9783527630134>
- [22] Tomasi, C., Fuzzi, S., and Kokhanovsky, A., *Atmospheric aerosols: Life cycles and effects on air quality and climate*, p680, John Wiley & Sons, 2017, pp.64-65.
DOI: <https://doi.org/10.1002/9783527336449>
- [23] Heicklen, J., *Atmospheric chemistry*, p406, Elsevier, 1976, pp.304-312.
DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-336740-2.X5001-X>
- [24] Finlayson-Pitts, B. J., and Pitts Jr, J. N., *Chemistry of the upper and lower atmosphere: theory, experiments, and applications*, p969, Elsevier, 1999, pp.96-97.
DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-257060-5.X5000-X>
- [25] Jong-Hoon Lee, Yong-Pyo Kim, Kil-Choo Moon, Hui-Kang Kim, Yong-Seung Chung and Chong-Bum Lee, "Characteristics of PM_{2.5} Particles Measured in the Background Sites of Korea", *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, Vol.13, No.6, pp.439-450, 1997.
- [26] Sang-Bum Hong, Duk-Sang Jung, Soon-Bong Lee, Dong-Eun Lee, Seung-Hee Shin, and Chang-Hee Kang, "Ionic composition comparison of atmospheric aerosols at coastal and mountainous sites of Jeju island", *The Korean Society of Analytical Sciences*, Vol.24, No.1, pp.24-37, 2011.
- [27] Ki-Ho Lee and Chul-Goo Hu, "A Study on Chemical Composition of Dustfall Sampled in Cheju Area: 2. Identification of Source", *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, Vol.15, No.2, pp.101-111, 1999.
- [28] Soon-Bong Lee, Chang-Hee Kang, Duk-Sang Jung, Hee-Jung Ko, Haeng-Bum Kim, Yong-Soo Oh and Hae-Lim Kang, "Composition and pollution characteristics of TSP, PM_{2.5} atmospheric aerosols at Gosan site, Jeju Island", *The Korean Society of Analytical Sciences*, Vol.23, No.4, pp.372-382, 2010.
- [29] Min-Sun Hong, Sang-Hun Lee, Dong-Sub Lee, Chang-Hui Kang and Kyoung-Yoon Park, "Analysis Study of Air Pollutants at Kosan, Cheju Island", *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, Vol.8, No.4, pp.257-261, 1992.
- [30] Jeonghwan Kim, Young Sung Ghim, Jin-Seok Han, Seung-Myung Park and Gangwoong Lee, "Long-term Trend Analysis of Korean Air Quality and Its Implication to Current Air Quality Policy on Ozone and PM₁₀", *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, Vol.34, No.1, pp.1-15, 2018.

- [31] Sea-Ho Oh, Taehyoung Lee, Taehyun Park, Joon-Young Ahn and Min-Suk Bae, "Spacial Distribution of PM_{1.0} Major Compounds from Long Range Transport at the Baegryungdo Super Site: Relationship between PSCF and Cluster Analysis", *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, Vol.33, No.4, pp.411-423, 2017.
- [32] Jin-Soo Choi, Jeong-Ho Kim, Tae-Hyoung Lee, Yong-Joo Choi and Ji-Hyung Hong, "A Study on Chemical Characteristics of Aerosol Composition at West Inflow Regions in the Korean Peninsula I. Characteristics of PM Concentration and Chemical Components", *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, Vol.32, No.5, pp.469-484, 2016.
- [33] Boo-Ju Kong, Sang-Kyun Kim, Jin-Soo Park, Sang-Duk Lee, Jong-Choon Kim, Jung-Soo Kim, Dong-Won Lee, Seok-Jo Lee and Eun-Sang Shin, "The Characteristics of particle composition at the Baengnyeong Island", *J. Korea Society of Environmental Administration*, Vol.16, No.2, pp.97-105, 2010.
- [34] Jeong-Ho Kim, Jin-Soo Park, Jin-Soo Choi, Jong-Seong Park and Shin-Do Kim, "A Study on the Characteristics of PM_{1.0} and source of organic components during summertime at Seoul and Baengnyeong Island", *Journal of the Korean Society of Urban Environment*, Vol.17, No.3, pp.213-230, 2017.
- [35] Jae-Youn Ryoo, Tae-Hyeok Kwon, In-Sook Kang, Kwang-Soo Lee and Taek-Soo Yoo, "A Study for Characteristics of Fine Particulate Matter and Atmospheric Stagnation Considering Elevation and Backward Trajectory", *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, Vol.35, No.6, pp.701-712, 2019.
- [36] Chungnam Research Institute, A Study on the Meteorological Characteristics of High Concentration Fine Particles, Korea, pp.3-37.
- [37] Soonae Park and Hyunjae Shin, "Analysis of the Factors Influencing PM_{2.5} in Korea : Focusing on Seasonal Factors", *Journal of Environmental Policy and Administration*, Vol.25, No.1, pp.227-248, 2017.
- [38] Yeon-Hee Park, Sang-Keun Song, Soo-Jeong Lee, Suk-Woo Kim and Seung-Bum Han, "An Analysis of Long-Term Variation of PM₁₀ Levels and Local Meteorology in Relation to Their Concentration Changes in Jeju", *Journal of Environmental Science International*, Vol.25, No.1, pp.107-125, 2016.
- [39] Korea Institute for Industrial Economics and Trade, Policy Implications and Regional Comparison on Fine Particles, Korea, pp.15-67.
- [40] Chan-Joo Lee and Min-Sun Hong, "Spatiotemporal Variations of Fine Particulates in and around the Korean Peninsula", *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, Vol.35, No.6, pp.675-682, 2019.
- [41] Li, L. N., Gong, X. P., Dai, L. C., and Zhan, X. H., The Regression Models of PM_{2.5} and Other Air pollutants in Wuhan, *Advanced Materials Research*, Vol.864, pp.1356-1359, 2014.
DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.864-867.1356>
- [42] Xie, Y., Zhao, B., Zhang, L., and Luo, R., "Spatiotemporal variations of PM_{2.5} and PM₁₀ concentrations between 31 Chinese cities and their relationships with SO₂, NO₂, CO and O₃", *Particuology*, Vol.20, pp.141-149, 2015.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.partic.2015.01.003>
- [43] Wang, P., Cao, J., Tie, X., Wang, G., Li, G., Hu, T., and Ding, W., "Impact of meteorological parameters and gaseous pollutants on PM_{2.5} and PM₁₀ mass concentrations during 2010 in Xi'an, China", *Aerosol Air Qual. Res.*, Vol.15, No.5, pp.1844-1854, 2015.
DOI: <https://doi.org/10.4209/aaqr.2015.05.0380>
- [44] Tsai, Y. I., "Atmospheric visibility trends in an urban area in Taiwan 1961-2003", *Atmospheric environment*, Vol.39, No.30, pp. 5555-5567, 2005.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2005.06.012>
- [45] Yu, T. Y., and Chang, I. C., "Spatiotemporal Features of Severe Air Pollution in Northern Taiwan", *Environmental Science and Pollution Research*, Vol.14, No.4, pp.268-275, 2006.
DOI: <https://doi.org/10.1065/espr2005.12.288>
- [46] Korea Meteorological Administration, Database <https://data.kma.go.kr>
- [47] Korea Meteorological Administration, Surface Weather Observation Guidance, Korea, pp.3-257.
- [48] Korea Environment Corporation, Air Korea Database <https://airkorea.or.kr>

황 규 원(Kyu-Won Hwang)

[정회원]



- 2004년 2월 : 연세대학교 환경공학부 (공학사)
- 2006년 8월 : 연세대학원 환경공학부 (공학석사)
- 2014년 1월 ~ 현재 : 한국해양과학기술원 연구원

<관심분야>

과학기술정책, 해양환경, 대기오염, 해양공간계획

김 동 연(Dong-Yeon Kim)

[정회원]



- 2006년 8월 : 연세대학교 환경공학부 (공학사)
- 2010년 9월 : 카이스트 건설 및 환경공학과 (공학석사)
- 2015년 2월 : 카이스트 건설 및 환경공학과 (공학박사)

<관심분야>

대기환경, 신재생에너지, 전기화학전환, 미세먼지

진 세 준(Se-Jun Jin)

[정회원]



- 2013년 2월 : 서울과학기술대학교 에너지환경대학원 에너지정책학과 (경제학석사)
- 2018년 8월 : 서울과학기술대학교 에너지환경대학원 에너지정책학과 (경제학박사)

- 2018년 9월 ~ 2020년 2월 : 한국해양과학기술원 연수연구원(선임급)
- 2020년 2월 ~ 현재 : 한국해양과학기술원 선임연구원

<관심분야>

과학기술정책, 환경경제, 자원경제, 산업경제

김 임 현(Im-Hyeon Kim)

[정회원]



- 2012년 8월 : 한양대학교 경영대학 회계학과 (경영학석사)
- 2019년 2월 : 한양대학교 경영대학 회계학과 (경영학박사)
- 2019년 3월 ~ 2020년 2월 : 대구대학교 회계학과 시간강사
- 2020년 3월 ~ 현재 : 대구대학교 회계학과 조교수

<관심분야>

대기오염, 기업명성, 세무조사, 조세회피, 재무보고 질