

충남 대기환경 영향요인에 관한 연구 - 천안, 당진, 서산 등을 중심으로

황규원¹, 김진영², 권영주^{1*}

¹한국해양과학기술원 해양법·정책연구소, ²충남연구원 사회통합연구소

A Study on the Factors Affecting the Air Environment in Chungnam Province - Focusing on Cheonan, Dangjin, and Seosan

Kyu-Won Hwang¹, Jinyoung Kim², Young-Ju Kwon^{1*}

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

²Dept. of Social Integration Research, ChungNam Institute

요약 최근 대기환경에 대한 국민의 관심이 증대하고 있으며, 미세먼지 등으로 인하여 국민 건강이 위협 받고 있다. 또한 정부는 대기오염물질에 대한 모니터링을 확대하고, 환경기준을 강화하는 등 대기질 개선을 위한 노력을 지속하고 있다. 한반도 지역에 따라 대기질이 상이하기 때문에 원인 파악과 영향요인 탐색이 필요한 실정이다. 본 연구에서는 충남 권에 위치한 도시의 대기환경과 지역적 차이를 탐색하였다. 연구방법으로 충남 3개 도시의 대기질 현황을 확인하고, 기온, 풍속, 강수, 계절 등의 기상조건과 SO₂, NO₂, CO, PM₁₀, PM_{2.5}, O₃ 등의 대기오염물질과 입자상 물질에 포함된 Pb, Cd, Cr, Cu, Ni, As, Mn, Fe, Al, Ca, Mg 등의 중금속 성분을 대상으로 회귀분석을 수행하였다. 분석결과 PM₁₀ 농도의 경우, 천안은 Mn(0.4884), 당진은 CO(0.3329), 서산은 Mg(0.5691) 농도에 의한 기여도가 높았다. PM_{2.5}의 경우, 천안 NO₂(0.4759), 당진 CO(0.4128), 서산 NO₂(0.3715)에 의한 영향이 크게 나타났다. 종합하면 대기질 측면에서 충남 지역별 영향요인이 상이하고, 기여도에 분명한 차이가 존재하므로 이를 고려한 정부의 지역별 대기질 관리가 요구된다고 판단된다.

Abstract Recently, the public's interest in the air environment has increased, and public health is threatened by fine particulate matter. Furthermore, the government continues efforts to improve air quality by expanding the monitoring of air pollutants and reinforcing environmental standards. Since air quality differs depending on the region in the Korean Peninsula, it is currently necessary to identify the cause and search for influencing factors. In this study, the atmospheric environment and regional differences in cities located in the Chungnam Province were observed. As a research method, regression analysis was performed for weather conditions, such as temperature, wind speed, precipitation, and season and targeted at air pollutants, such as SO₂, NO₂, CO, O₃, PM₁₀, and PM_{2.5}, as well as heavy metals contained in particulate matter, such as Pb, Cd, Cr, Cu, Ni, As, Mn, Fe, Al, Ca, and Mg. In the case of PM₁₀, the concentrations of Mn(0.4884) in Cheonan, CO(0.3329) in Dangjin, and Mg(0.5691) in Seosan were highest. In the case of PM_{2.5}, Cheonan NO₂(0.4759), Dangjin CO(0.4128), and Seosan NO₂(0.3715) were significantly affected. In summary, the influencing factors vary according to the region in Chungnam province in terms of air quality, and there is a difference in the degree of contribution. Therefore, it is considered that the Korean government's management of air quality is required for each region.

Keywords : Chungnam, Air Pollutants, Secondary Pollutants, Correlation Analysis, Regression Analysis

본 논문은 2021년 한국해양과학기술원의 "해양공간 통합관리 연구(PE99943)" 사업의 지원을 받아 수행되었음.

*Corresponding Author : Young-Ju Kwon(KIOST)

email: yjkwon@kiost.ac.kr

Received February 22, 2021

Revised April 13, 2021

Accepted May 7, 2021

Published May 31, 2021

1. 서론

국내 대기오염도는 지역 간 차이가 존재하며, 원인과 영향은 지리적 위치와 주변 오염원에 의해 결정된다. 환경부를 비롯한 정부와 지방자치단체는 대기오염물질 저감을 위한 사업을 추진하고 있으며, 관련 법·제도를 강화하고 있는 추세이다. 특히 입자상 물질의 증감속 농도를 실시간으로 측정 및 공개함으로써 대기오염물질 모니터링을 확대하고 있다[1].

미세먼지 등을 비롯한 대기오염물질은 환경적 피해와 더불어 경제적 피해를 야기하고, 국민 건강을 위협하고 있다. 특히 경제적인 측면에서 보면, 대기오염물질로 인하여 2060년 한국의 국내총생산은 농산물 생산 저하로 0.6%, 의료비로 0.5%, 노동 생산성 악화로 0.6%가 각각 감소될 것으로 전망된다[2]. 인체 영향 측면에서는 박종길 외[3] 연구에서 나타난 바와 같이 대기오염물질이 호흡기 관계 질환과 심혈관계 질환을 유발한다. 또한 막대한 사회적 비용이 소요되고 있으며, 국민의 생산 활동에도 부정적인 영향을 미치고 있는 실정이다[4]. 충남 지역은 「사업장 대기오염물질 총량관리지역」으로 지정되어 2020년 4월부터 사업장의 질소산화물(NOx), 황산화물(SOx), 총먼지(TSP) 등의 배출허용량을 할당 및 준수하도록 관리하고 있다[5]. 또한 충남은 「대기환경개선 5개년 종합계획」을 수립하여, 대기오염물질 저감 및 관리를 추진하고 있다[6].

본 연구의 목적은 충남권 내 위치한 도시의 대기질 특성을 파악하고, 영향요인을 탐색하여 지역 간 영향요인 차이와 기여도를 평가하는 것이다. 특히 연구 대상지역은 위치적으로 바다와 근접한 지역과 내륙 주거지역으로 구분되며, 도시 성격 상 대규모 오염시설이 근접한 지역과 비점오염원 지역으로 구분될 수 있어, 상호 간 비교가 가능하다. 이를 위해 본 연구에서는 연구 대상지역의 대기오염물질 측정소 실시간 데이터와 지자체에서 수행하고 있는 입자상 물질에 포함된 증감속 성분 농도를 분석하고, 동일시간대의 풍속, 풍향, 강수량 등 기상조건을 활용하고자 한다. 또한 선행연구에서 수행한 통계적 분석 방법을 탐색하고, 충남권 내 지역 간 대기오염 기여도 차이를 분석함으로써 향후 지역 대기질관리 정책 추진에 유용한 정보를 제공하고자 한다.

2. 이론적 배경과 선행연구

2.1 이론적 배경

본 연구에서 대기질 기여도를 평가하기 위해 몇 가지 이론과 가정을 설정하였다. 대기오염물질은 1차 생성물질과 2차 생성물질로 구분하였다. 1차 생성물질은 NO₂, SO₂, CO 등이 있으며, 2차 생성물질은 PM₁₀, PM_{2.5}, O₃ 등으로 알려져 있다[7]. 다만 2차 생성물질인 PM₁₀의 경우, 1차 발생물질이 포함되지만, 본 연구에서는 2차 생성물질로 정의하였다.

1차 오염물질 중 NO₂, SO₂ 등의 전구물질은 대기중 광화학 반응과 산화·환원 반응에 의해 2차 생성물질인 PM₁₀, PM_{2.5} 등의 입자상 오염물질로 발달된다[8,9]. 또한 NO₂의 경우, 광화학 반응을 통해 O₃가 생성된다. 입자상물질 중 증감속 성분은 자연적 발생원과 인위적 발생원으로 구분할 수 있다.

본 연구에서는 자연적 발생원과 더불어 특정 지역에서 생성되는 증감속 성분을 고려하여 지역 대기질 기여도를 비교분석하였다[7]. 풍속의 경우, 대기 정체와 연관되어 풍속이 낮으면, 대기 정체로 인해 대기오염물질이 확산되지 못하고, 국지적 오염 영향으로 인한 대기오염도가 악화될 수 있다. 연구 대상지역의 대기오염도와 기상조건 데이터를 활용하여 상관관계와 다중 회귀분석을 수행하였다. 상관관계는 설정된 변수가 증가하거나 감소할 때 다른 변수의 변화 정도와 방향을 추정하는 통계적 분석 방법이다. 다중 회귀분석은 독립변수에 대한 종속변수 간 관계를 수학적 모형으로 추정하는 것으로, 독립변수의 농도가 종속변수의 농도 변화 정도를 예측하는 분석방법이다.

2.2 선행연구

본 연구와 관련된 선행연구는 크게 충남권 대기질 측정 연구와 통계적 접근을 통한 영향분석 연구로 구분할 수 있다. 본 연구 대상지역인 충남권 내 대기질 관련 연구로 SO₂, NO₂, CO, O₃, PM₁₀, PM_{2.5} 등의 대기오염물질과 더불어 입자상 오염물질에 포함된 증감속 성분농도를 분석한 연구가 있다. 충남 지역을 대상으로 대규모 오염물질 발생원의 영향에 관한 연구로 김순태 외[10], 손세창 외[11], 김종범 외[12], 주서령 외[13] 등이 PM_{2.5}를 중심으로 영향을 분석하였다. 또한 김중수 외[14], 국립환경과학원[15], 양윤철 외[16], 강병욱 외[17] 등은 입자상 물질에 포함된 증감속 성분을 대상으로 통계적 분석을 수행하여, 유의미한 증감속 경향을 탐색하였다.

상관관계 및 회귀분석 등 통계적 접근을 통한 대기오염물질 영향(기여도)을 평가한 연구로는 입자상물질의 이온 성분과 상관관계 분석(홍상범 외[18]) 연구가 있으며, 서울 지역을 대상으로 입경별 입자상 물질의 증감속

성분을 분석하였다[19]. 또한 기상조건과 대기오염물질 간 회귀분석을 수행하였다[20,21]. 해외에서 국내 연구와 유사하게 대기오염 통계분석을 수행한 Munir 외[22]는 영국에서 O₃에 대한 회귀분석을 수행하였으며, Eeftens 외[23]은 유럽 전역 20개 지역의 입자상 물질의 상관관계를 탐색했다. Akyüz and Çabuk[24]는 터키, Pires 외[25]는 포르투갈에서 입자상 물질과 기상조건을 고려한 통계적 분석을 수행했다. 미국 및 남미 지역으로 Parkhurst 외[26], Rizzo 외[27]은 미국에서, Koutrakis 외[28]은 칠레에서 가스상 물질과 입자상 물질 간의 상관관계 및 회귀분석을 분석하였다. 독일에서 Dieter Gladtke 외[29]는 산업시설별 PM₁₀ 농도에 대한 영향요인 회귀분석을 수행했다. 중국에서 Wei Dong[30]은 PM_{2.5}과 PM₁₀에 포함된 중금속 성분을 분석하여 도시 간 차이를 확인하였다.

3. 연구방법

3.1 대기오염물질 농도 및 기상조건

국내 충청남도에 위치한 천안, 서산, 당진을 대상으로 분석하였다. 대상 지역의 특징으로 천안은 내륙에 위치한 주거지역으로 선정하였으며, 서산은 연안 지역에 위치하고 있으며, 주변에 화학공장이 위치하고 있다. 또한 당진의 경우, 연안 지역에 위치하고 있으며, 인근 지역에 제철소가 운영중이다(Table 1).

기상조건은 기상청 측정 데이터를 활용하였으며, 연구대상 지역에 위치한 기상청 방재기상관측(AWS, Automatic Weather Station)의 평균기온, 강수량, 풍속 등의 일평균 데이터를 분석하였다. 기상조건 관측소 위치는 천안 지역은 위도 36.87817°E, 경도 127.1561°N, 서산 지역은 위도 37.01061°E, 경도 126.38808°N, 당진 지역은 위도 36.88936°E, 경도 126.61739°N에 위치하고 있다.

대기오염물질 농도는 환경부 도시대기측정항목인 SO₂, CO, O₃, NO₂, PM₁₀, PM_{2.5} 등과 중금속 측정항목을 분석하였다. 인위적인 오염원을 Pb, Cd, Cr, Cu, Ni, As 등으로 구분하고, 자연적인 오염원(토양성분)을 Mn, Fe, Al, Ca, Mg 등으로 구분하여 분석하였다[15,16,17]. 다만 대기오염물질별 배출원 추정치 Wei Dong 외[30]과 같이 상이한 경우가 존재한다.

대기오염물질 측정소는 천안의 경우, 위도 36.8143°E, 127.1521°N, 서산의 경우, 위도 36.9917°E, 경도 126.3683°N, 당진의 경우, 위도 36.9765°E, 경도 126.7164°N에 위치하고 있다.

Table 1. Measurement target area locations and surrounding environment

Area	Land Use	Distance to Coast	Environment
Cheonan	Residential	26 km	Apartment
Dangjin	Industrial	5 km	OO Steel
Seosan	Industrial	2 km	OO Chem Ltd

연구기간은 2014년 1월 1일부터 2019년 12월 31일 까지 최근 5년간 중금속 성분 측정일의 1일 평균 측정값을 대상으로 분석하였다. 대기오염물질 농도를 1일 평균 농도와 동일 시간대의 평균 풍속, 강수량, 계절 등을 대기질 영향요인으로 설정하였다. 다만 대기오염물질 측정소와 기상 관측소 간의 거리는 지리적으로 가장 근접한 지점을 선정하였으며, 대기중 공기괴를 동일한 영향권으로, 동일 지점의 측정값으로 가정하였다. 또한 데이터 신뢰도 확보를 위해 PM₁₀ 농도와 PM_{2.5} 농도 차이가 음수의 경우, 일부 요인 측정값이 누락된 경우는 분석대상에서 제외하였다.

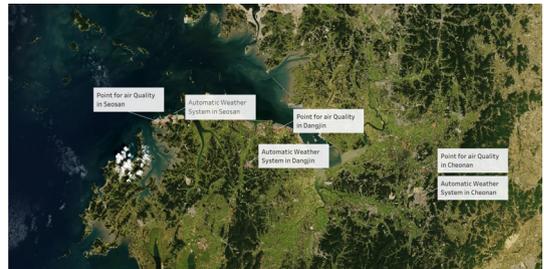


Fig. 1. Air pollutants measurement and meteorological observation locations

3.2 상관관계 및 다중 회귀분석

본 연구는 Stata 통계 소프트웨어 패키지(Stata Corp LLC, 2018, SE/14)를 활용하여 통계적 분석을 수행했으며, 대기질 영향요인별 상관관계를 분석하였다. 또한 1차 오염물질을 독립변수로 2차 생성물질을 종속변수로 설정하여 다중회귀분석을 수행하였다. 이를 통해 각 지역별 영향요인에 의한 2차 오염물질 기여도를 평가하였다.

상관관계분석은 2개 상호관계로 1개 변수가 증가 또는 감소 시 다른 변수의 변화량과 관계방향을 추정하는 통계적 분석 방법이다. 대기오염물질 농도, 평균 기온, 강수량, 풍속 등의 요인이 정량적 증가 또는 감소가 동일하면 상관관계가 양수값이며, 반대 경우는 음수값을 갖고, 산출식은 아래와 같다[31].

$$\rho_{x,y} = \text{corr}(X, Y) = \frac{\text{cov}(X, Y)}{\sigma_x \sigma_y} = \frac{E[(X - \mu_x)(Y - \mu_y)]}{\sigma_x \sigma_y} \quad (1)$$

이 산출식에서 μ_x 는 모집단 X의 평균값을 뜻하며, μ_y 는 모집단 Y의 평균값, σ_x , σ_y 는 각각 모집단 X, Y의 표준편차를 의미한다. 모집단은 충남 지역별 SO₂, NO₂, CO, O₃, PM₁₀, PM_{2.5} 등 대기오염물질과 기온, 강수량, 풍속, 계절 등의 기상조건이다.

다중 회귀분석의 경우, SO₂, NO₂, CO 등 1차 생성물질과 입자상 물질에 포함된 중금속 성분(Pb, Cd, Cr, Cu, Ni, As, Mn, Fe, Al, Ca, Mg 등)을 독립변수로 설정하고, PM₁₀, PM_{2.5}, O₃ 등 2차 생성물질과 1차 발생물질이 포함된 2차 생성물질을 종속변수로 설정하였으며, 산출식은 아래와 같다[31].

$$Y_{Area} = \beta_0 + \beta_1(SO_{2, Area}) + \beta_2(NO_{2, Area}) + \beta_3(CO_{Area}) + \beta_4(Metals_{Area}) + B \cdot (Rain) \times \eta_i + \dots + \eta_4 + \epsilon_{Area} \quad (2)$$

위의 산출식에서 Y_{Area} 는 종속변수이며, PM₁₀, PM_{2.5}, O₃ 등 2차 생성물질의 농도를 의미하고, $Area$ 는 천안, 당진, 서산 지역을 뜻한다. PM₁₀, PM_{2.5} 등 입자상오염물질의 단위는 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이고, O₃의 단위는 ppm이다. $SO_{2, Area}$, $NO_{2, Area}$, CO_{Area} , $Metals_{Area}$ 등은 지역별 독립변수로 가스상 물질과 중금속 성분이며, 단위는 각각 ppm과 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이다. ϵ_{Area} 는 오차항, β 는 상수항과 독립변수의 회귀계수를 의미한다. η_i 는 가변수로 기상조건에서 강수량의 유무, 환경부의 대기정체 기준인 풍속이 2m/s 이하 여부 등으로 대기질 기여도에 영향요인을 통제하였다. 또한 고농도 영향을 통제하기 위해 PM₁₀ 고농도(24시간 환경기준 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)와 O₃ 고농도(8시간 환경기준 0.06 ppm)를 가변수로 추가하여 기여도를 분석하였다.

4. 분석 결과

4.1 측정자료의 통계분석결과

지역별로 천안은 타 지역과 비교하여 상대적으로 NO₂와 Cd 농도가 높았으며, 당진은 3개 지역 중 오염도가 높은 것으로 나타났다. 서산 지역은 O₃, Ni 등의 농도가 높고, PM_{2.5}의 농도 변화가 크게 나타났다(Table 2).

2차 생성물질의 경우, 당진 지역이 가장 높게 나타났으며, 물질별로 PM₁₀는 당진 > 천안 > 서산 순으로, PM_{2.5}는 당진 > 천안 >> 서산, O₃은 서산 > 당진 >> 천안

등으로 나타나 지역 간 차이가 존재한다. PM_{2.5}/PM₁₀ 비율의 경우, 천안 지역이 가장 높아 입경이 작은 입자상 물질 비율이 높았다[12].

입자상 물질 중 인위적 오염물질은 대부분 당진 지역이 상대적으로 높은 농도로 나타났으며, 물질별로 Pb, Cu, Cr은 당진 > 천안 > 서산, As은 당진 > 서산 > 천안, Cd은 천안 > 당진 > 서산, Ni은 서산 >> 천안, 당진 등의 오염도를 보였다. 자연적 발생 오염물질도 당진 지역이 높았으며, 특히 Fe과 Mn이 매우 높았으며, 물질별로 Mn, Fe, Al, Ca은 당진 >> 천안 > 서산 등의 순으로 나타났다.

종합하면, 1차 대기오염물질, 2차 생성물질, 중금속 성분 등이 양윤철 외[16], 강병욱 외[17]과 같이 지역별 차이가 존재한다. 당진 지역에서 손세창 외[11], 김종범 외[12]와 같이 높은 농도 수준의 오염도를 보였다. 다만 자연적 발생과 인위적 발생을 구분하기 위해 Kouimtzis and Samara[7]과 같이 물질별, 지역별 차이를 확인할 필요가 있다. 즉 지역별로 천안, 당진, 서산 간 전구물질의 차이가 존재하지만, 2차 생성물질 농도 차이가 크지 않아 2차 생성의 전구물질과 대기질 요인 간의 상관관계를 탐색하였다.

4.2 상관관계 분석결과

앞서 언급한 1차 오염물질, 인위적·자연적 기원 중금속 성분과 2차 생성물질 간 상관관계 분석을 수행하였다(Table 3). 물질별 분석결과 PM₁₀의 경우, 천안의 SO₂, 당진의 CO, 서산의 NO₂ 등과 높은 양의 관계를 나타내었다. 또한 Pb, Mn, Fe, Al, Ca 등의 중금속 성분과 PM_{2.5} 간의 유의미한 양의 관계를 보였다[14]. PM_{2.5}의 경우, PM₁₀과 유사하게 Pb, Mn, Fe, Al, Ca, Mg 등 중금속 성분이 조용성 외[19]와 같이 상대적으로 상관관계가 높게 나타났다. O₃의 경우, 입자상 오염물질보다 다소 낮은 상관관계를 보였으며, Ni, Fe, Al 등의 중금속 성분이 유의미한 양의 관계를 나타내었다. 계절 요인은 PM₁₀ 및 PM_{2.5} 간 모두 유의미한 상관관계를 보였다[12]. 천안에서 PM₁₀의 경우, PM_{2.5} 간에 Akyüz 외[24]와 같이 높은 상관관계를 보였으며, Pb, Mn, Fe, SO₂, NO₂ 등과 유의미한 양의 상관관계를 보였다. PM_{2.5}의 경우, CO, NO₂, Pb, Mn, SO₂ 등의 물질과 상대적으로 상관관계가 높았다. 당진 지역 PM₁₀의 경우, 양윤철 외[16]과 같이 인위적 오염물질인 PM_{2.5}, CO, Fe, Al, Mg, Mn, Ca 등과 유의미한 양의 상관관계를 보였다. PM_{2.5}의 경우도 PM₁₀과 유사하였으며, O₃의 경우 Fe, Al 농도

Table 2. Result of descriptive statistics in region

Factor	Cheonan			Dangjin			Seosan		
	Mean	Std. Dev.	C.V.	Mean	Std. Dev.	C.V.	Mean	Std. Dev.	C.V.
SO ₂	0.0037	0.0015	39.9%	0.0087	0.0040	46.6%	0.0055	0.0025	46.4%
NO ₂	0.0232	0.0109	46.8%	0.0160	0.0071	44.5%	0.0178	0.0099	55.8%
CO	0.5188	0.2272	43.8%	0.6867	0.2462	35.9%	0.4896	0.1927	39.4%
PM ₁₀	44.52	20.71	46.5%	55.96	25.86	46.2%	40.45	20.74	51.3%
PM _{2.5}	25.41	12.84	50.5%	29.08	17.73	61.0%	18.87	12.82	67.9%
O ₃	0.0243	0.0134	55.2%	0.0322	0.0124	38.6%	0.0331	0.0118	35.5%
PM _{2.5} /PM ₁₀	0.5677	0.1282	22.6%	0.4960	0.1413	28.5%	0.4963	0.1419	28.6%
PM ₁₀ -PM _{2.5}	19.40	11.27	58.1%	26.88	12.71	47.3%	19.05	12.25	64.3%
Pb	0.0231	0.0187	81.3%	0.0466	0.0431	92.4%	0.0203	0.0157	77.4%
Cd	0.0009	0.0019	204.4%	0.0007	0.0010	140.2%	0.0005	0.0010	192.0%
Cr	0.0025	0.0031	124.5%	0.0043	0.0035	82.2%	0.0018	0.0022	120.4%
Cu	0.0158	0.0097	61.1%	0.0188	0.0157	83.5%	0.0100	0.0126	126.5%
Ni	0.0029	0.0023	79.2%	0.0029	0.0028	94.8%	0.0043	0.0034	78.1%
As	0.0027	0.0032	116.6%	0.0044	0.0075	169.8%	0.0033	0.0067	199.7%
Mn	0.0248	0.0138	55.7%	0.0921	0.0568	61.7%	0.0220	0.0155	70.8%
Fe	0.6428	0.4502	70.0%	3.4507	3.1789	92.1%	0.4586	0.3368	73.4%
Al	0.3167	0.4823	152.3%	0.8020	0.5926	73.9%	0.2619	0.3564	136.1%
Ca	0.4852	0.5456	112.5%	2.1195	1.6221	76.5%	0.3310	0.4182	126.3%
Mg	0.1438	0.1695	117.8%	0.3487	0.2358	67.6%	0.1382	0.1678	121.4%

간에 양의 관계를 보였다. 서산 지역 PM₁₀의 경우, 강병욱 외[17]과 같이 산업단지의 영향으로 PM_{2.5}, NO₂, Mn, Pb, Fe, SO₂ 등과 유의미한 양의 상관관계를 보였다. PM_{2.5}의 경우, Pb, Cd, NO₂, Mn, CO 등의 물질과 상대적으로 상관계수가 높으나, O₃의 경우, 통계적으로 유의미한 결과가 나타나지 않았다.

다만 일부 음의 상관관계를 보인 물질의 경우, 김순태 외[10]과 같이 오존 생성, PM_{2.5} 생성 과정에서 발생하는 소멸로 추정되지만, 측정 데이터의 한계가 존재한다.

4.3 다중 회귀분석 결과

회귀분석 결과는 Table 4.와 같으며, 지역별 PM₁₀, PM_{2.5}, O₃ 등의 회귀분석 결과 F-value는 8.44에서 24.61 수준이고, 그에 대한 p-value는 0.000이므로 유의수준 5%에서 통계적으로 유의한 것으로 나타났다. 따라서 종속변수와 독립변수가 통계적으로 유의하다는 것을 의미한다. 다만, 기상조건은 2차 생성물질에 유의미한 검정통계량을 보이지 않았다.

2차 생성물질에 영향요인과 기여도를 확인한 결과, Gladtkte 외[29], Wei Dong 외[30]과 같이 지역 간 차이가 존재한다. 또한 다중회귀분석 회귀모형의 적합도를 검토하기 위해 제시한 수정결정계수(Adjusted R²)는

PM₁₀과 PM_{2.5}의 경우 모든 지역에서 0.5168에서 0.8387로 높은 설명력을 갖았다. 다만 서산의 O₃ 수정결정계수 R²가 0.3261로 상대적으로 설명력이 낮아 측정되지 않은 물질과 기상조건에 의한 영향이 높은 것으로 판단된다. 천안의 회귀모형식은 아래와 같으며, PM₁₀ 농도와 PM_{2.5} 농도는 전구물질인 SO₂, NO₂ 농도와 Cd, Ni, As 등의 인위적 오염원에 영향을 크게 받았다.

O₃의 경우, SO₂, Ni, Cd 등에 의한 영향이 높았다. 회귀모형에서 변수의 스케일을 표준화함으로써 상대적 영향력을 비교하기 위해 표준화계수(β)를 분석하였다. PM₁₀의 경우, 자연적 발생원 Mn 농도와 NO₂, SO₂ 등에 영향을 받았다. PM_{2.5}의 경우, NO₂(β=0.4759), CO(β=0.3240), Mn(β=0.2130) 등의 회귀계수가 상대적으로 높았다.

$$PM_{10\ Cheonan} = 14.3 + 2403.0(SO_2) + 507.7(NO_2) + 7.7(CO) + 924.9(Cd) + 731.8(Mn) + 704.9(As) + \dots - 4.6(D_1) - 3.4(D_2) - 45.0(D_3) + 19.7(D_4) \quad (3)$$

$$PM_{2.5\ Cheonan} = 1.5 + 1085.4(SO_2) + 560.7(NO_2) + 18.0(CO) + 669.3(Cd) + 361.1(Ni) + 212.1(Mn) + \dots - 1.6(D_1) - 0.6(D_2) + 10.3(D_3) + 12.1(D_4) \quad (4)$$

$$O_3\ Cheonan = 0.0373 + 0.5930(SO_2) - 0.5575(NO_2) - 0.0087(CO) + 1.6810(Ni) + 0.2404(Cd) + 0.0127(Fe) + \dots - 0.0026(D_1) - 0.0012(D_2) - 0.0105(D_3) + 0.0302(D_4) \quad (5)$$

Table 3. Result of each regional correlation coefficient

Factor	PCC	PM ₁₀			PM _{2.5}			O ₃		
		Cheonan	Dangjin	Seosan	Cheonan	Dangjin	Seosan	Cheonan	Dangjin	Seosan
SO ₂	r	0.4795*	0.2832*	0.3211*	0.4417*	0.0909	0.1339	-0.0728	0.0419	-0.1017
	p-value	0.0000	0.0138	0.0000	0.0000	0.4381	0.0846	0.2135	0.7209	0.0630
NO ₂	r	0.4650*	0.4429*	0.4040*	0.6019*	0.4314*	0.4974*	-0.5079*	-0.5109*	-0.3942*
	p-value	0.0000	0.0001	0.0000	0.0000	0.0002	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
CO	r	0.4184*	0.6064*	0.2271*	0.5984*	0.4712*	0.3754*	-0.3604*	-0.007	-0.1606*
	p-value	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.9524	0.0032
PM ₁₀	r				0.8474*	0.8960*	0.8123*	0.0533	0.122	0.0729
	p-value				0.0000	0.0000	0.0000	0.3622	0.2973	0.1781
PM _{2.5}	r	0.8474*	0.8960*	0.8123*				-0.1404*	0.0767	0.0675
	p-value	0.0000	0.0000	0.0000				0.0345	0.5133	0.3857
O ₃	r	0.0533	0.122	0.0729	-0.1404*	0.0767	0.0675			
	p-value	0.3622	0.2973	0.1781	0.0345	0.5133	0.3857			
Pb	r	0.3979*	0.1892	0.3489*	0.4299*	0.3176*	0.5715*	-0.1172*	-0.2912*	-0.0923
	p-value	0.0000	0.1040	0.0000	0.0000	0.0055	0.0000	0.0447	0.0113	0.0879
Cd	r	0.0792	-0.011	0.1908*	0.0632	-0.044	0.5182*	0.0592	-0.1866	-0.0712
	p-value	0.1754	0.9255	0.0004	0.3431	0.7075	0.0000	0.3117	0.1089	0.1884
Cr	r	0.2108*	-0.0289	0.1276*	0.1849*	-0.0334	0.3053*	-0.0368	-0.2528*	-0.1278*
	p-value	0.0003	0.8057	0.0180	0.0052	0.7759	0.0001	0.5294	0.0287	0.0179
Cu	r	0.2709*	0.1028	0.1500*	0.2387*	0.0703	0.2559*	-0.3031*	-0.2275*	-0.1199*
	p-value	0.0000	0.3800	0.0054	0.0003	0.5491	0.0008	0.0000	0.0497	0.0264
Ni	r	0.2619*	-0.2186	0.2370*	0.1192	-0.1637	0.1989*	0.2645*	0.1706	0.1240*
	p-value	0.0000	0.0595	0.0000	0.0732	0.1604	0.0100	0.0000	0.1434	0.0216
As	r	0.2544*	-0.1711	0.0396	0.1635*	-0.1644	0.0531	-0.0861	-0.1867	-0.0526
	p-value	0.0000	0.1421	0.4651	0.0136	0.1588	0.4957	0.1407	0.1088	0.3312
Mn	r	0.6387*	0.4921*	0.3818*	0.4291*	0.2735*	0.3836*	-0.0186	-0.0278	0.0138
	p-value	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0176	0.0000	0.7508	0.8127	0.7989
Fe	r	0.5347*	0.5973*	0.3439*	0.3347*	0.3704*	0.2957*	0.0736	0.3011*	0.0494
	p-value	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0011	0.0001	0.2081	0.0087	0.3619
Al	r	0.2356*	0.5634*	0.1158*	0.2045*	0.2836*	0.0447	-0.0171	0.2435*	0.1233*
	p-value	0.0000	0.0000	0.0321	0.0020	0.0137	0.5664	0.7699	0.0352	0.0224
Ca	r	0.2016*	0.4893*	0.2181*	0.1513*	0.2375*	0.1825*	-0.1162*	0.1569	0.0659
	p-value	0.0005	0.0000	0.0000	0.0226	0.0402	0.0183	0.0466	0.1790	0.2237
Mg	r	0.2132*	0.5175*	0.2045*	0.1295	0.2565*	0.1065	-0.0702	0.1182	0.1275*
	p-value	0.0002	0.0000	0.0001	0.0514	0.0263	0.1708	0.2300	0.3125	0.0181

※ *표시는 p-value가 0.05 이하 수준에서 유의함을 뜻함

당진의 경우, PM₁₀ 농도와 PM_{2.5} 농도는 NO₂ 농도와 Cd, Cr, Mn 등의 오염원에 영향을 크게 받았다. O₃의 경우, SO₂, NO₂, Ni, Cd 등에 의한 영향이 높았으나, 가변수에 의한 영향이 적은 것으로 나타났다. 표준화계수를 비교하면 PM₁₀의 경우, 자연적 발생원 CO, Al, NO₂, Fe 등에 영향을 받았으며, 특히 Gladtkc 외[29]와 같이 Fe 농도에 의한 기여도가 높았다.

서산의 회귀모형식을 아래와 같으며, PM₁₀와 PM_{2.5}는 전구물질인 NO₂와 Ni, Cd, Pb 등의 인위적 오염원에 영향을 크게 받았다. 표준화 회귀계수를 비교하면, PM₁₀의 경우, 자연적 발생원 Mg와 NO₂ 등에 상대적으로 높은 영향도 보였다. PM_{2.5}의 경우, NO₂, Fe, Mg, Pb 등의 물질이 상대적으로 회귀계수가 높았다.

$$PM_{10\text{ Dangjin}} = 16.9 + 154.0(SO_2) + 1019.0(NO_2) + 36.1(CO) + 2168.3(Cd) + 803.6(Cr) + 72.4(Mn) + \dots - 9.5(D_1) - 9.3(D_2) - 29.2(D_3) + 9.4(D_4) \quad (6)$$

$$PM_{2.5\text{ Dangjin}} = 0.7 - 247.5(SO_2) + 721.3(NO_2) + 30.7(CO) + 906.7(Cd) + 576.6(Cr) + 22.5(Mn) + \dots + 0.6(D_1) + 0.4(D_2) + 18.2(D_3) - 1.5(D_4) \quad (7)$$

$$O_3\text{ Dangjin} = 0.0390 + 0.3612(SO_2) - 0.7253(NO_2) - 0.0006(CO) + 1.2272(Ni) + 0.0251(Mg) + 0.0009(Al) + \dots - 0.0013(D_1) - 0.0002(D_2) + 0.0054(D_3) + 0.0314(D_4) \quad (8)$$

$$PM_{10\text{ Seosan}} = 8.4 + 942.7(SO_2) + 517.9(NO_2) + 13.9(CO) + 522.5(Ni) + 295.0(Cd) + 152.5(Pb) + \dots - 4.5(D_1) + 1.8(D_2) + 69.8(D_3) + 19.0(D_4) \quad (9)$$

$$PM_{2.5\text{ Seosan}} = -0.2 - 932.3(SO_2) + 648.9(NO_2) + 14.1(CO) + 390.4(Ni) + 164.7(Pb) + 51.4(Mn) + \dots - 0.8(D_1) + 3.5(D_2) + 42.5(D_3) + 10.2(D_4) \quad (10)$$

$$O_3\text{ Seosan} = 0.0373 - 0.1334(SO_2) - 0.4064(NO_2) - 0.0016(CO) + 0.8497(Ni) + 0.0769(As) + 0.0745(Mn) + \dots - 0.0008(D_1) + 0.0012(D_2) + 0.0010(D_3) + 0.0288(D_4) \quad (11)$$

종합하면 천안에서 PM₁₀에 대해 Mn > SO₂ > NO₂, PM_{2.5}에 대해 NO₂ > CO > Mn, O₃에 대해 Fe > Ni 등의 순으로 기여도를 보였다. 당진 지역의 경우, PM₁₀에 대해 CO > Al > NO₂, PM_{2.5}에 대해 CO > NO₂ > Fe, O₃에 대해 Mg > Ni > SO₂ 등의 순으로 기여도를 보여 최봉욱 외[20], Pires 외[25]와 같이 NO₂가 공통적으로 입자상 물질에 기여하고 있다. 서산 지역의 경우, PM₁₀에 대해 Mg > NO₂ > CO, PM_{2.5}에 대해 NO₂ > Fe > Mg, O₃에 대해 Ni > Mn > Al 등의 순으로 기여도를 보

였다. 따라서 기여수준은 상이하지만 일반적으로 연소에 의해 발생하는 SO₂, NO₂, CO 등이 PM₁₀ 및 PM_{2.5} 생성 전구물질로 작용하고 있다고 추정된다[10,20]. 또한 Gladtko 외[29]와 같이 주변 지역에서 발생되거나 장거리 이동으로 유입된 중금속 성분이 지역 간 차이의 영향 요인으로 판단된다.

4.4 분석결과 고찰

분석 결과 특정 지역의 대기오염도가 상대적으로 높았

Table 4. Regression of regional secondary air pollutants by region

Area	Variable	PM ₁₀				PM _{2.5}				O ₃			
		Coef.	Std.Err.	P> t	β	Coef.	Std.Err.	P> t	β	Coef.	Std.Err.	P> t	β
Cheonan	SO ₂	2403.0	718.2	0.001	0.1715	1085.4	632.2	0.087	0.1040	0.5930	0.4938	0.231	0.0655
	NO ₂	507.7	102.3	0.000	0.2661	560.7	83.7	0.000	0.4759	-0.5575	0.0703	0.000	-0.4526
	CO	7.7	4.7	0.101	0.0841	18.0	3.5	0.000	0.3240	-0.0087	0.0032	0.007	-0.1473
	Pb	-122.2	71.8	0.090	-0.1108	40.7	73.4	0.580	0.0391	-0.0896	0.0493	0.071	-0.1258
	Cd	924.9	435.9	0.035	0.0861	669.3	308.5	0.031	0.1114	0.2404	0.2997	0.423	0.0347
	Cr	-133.8	306.2	0.663	-0.0202	-239.7	473.5	0.613	-0.0303	-0.7825	0.2106	0.000	-0.1831
	Cu	-397.6	114.1	0.001	-0.1857	-259.2	86.2	0.003	-0.2034	-0.1987	0.0784	0.012	-0.1437
	Ni	-325.3	464.1	0.484	-0.0362	361.1	385.9	0.351	0.0536	1.6810	0.3191	0.000	0.2897
	As	704.9	302.4	0.020	0.1082	-256.3	256.3	0.318	-0.0564	0.0117	0.2079	0.955	0.0028
	Mn	731.8	158.3	0.000	0.4884	212.1	120.4	0.080	0.2130	-0.0370	0.1089	0.734	-0.0382
	Fe	-3.9	5.4	0.468	-0.0853	-4.0	4.6	0.387	-0.1382	0.0127	0.0037	0.001	0.4276
	Al	-2.1	4.4	0.628	-0.0498	-0.7	3.4	0.845	-0.0269	0.0022	0.0030	0.462	0.0805
	Ca	0.2	4.8	0.971	0.0046	-1.5	3.4	0.664	-0.0623	-0.0030	0.0033	0.365	-0.1214
	Mg	6.8	17.2	0.695	0.0554	1.1	11.9	0.926	0.0148	-0.0056	0.0118	0.639	-0.0707
cons	14.3	5.6	0.012	.	1.5	4.9	0.761	.	0.0373	0.0039	0.000	.	
Adj R ²		0.5826				0.5168				0.5268			
Dangjin	SO ₂	154.0	511.7	0.765	0.0229	-247.5	450.1	0.585	-0.0536	0.3612	0.3409	0.294	0.1149
	NO ₂	1019.0	259.7	0.000	0.2722	721.3	228.4	0.003	0.2807	-0.7253	0.1730	0.000	-0.4147
	CO	36.1	9.0	0.000	0.3329	30.7	7.9	0.000	0.4128	0.0006	0.0060	0.919	0.0122
	Pb	-63.5	45.1	0.166	-0.1063	-2.7	39.7	0.945	-0.0067	-0.0504	0.0301	0.100	-0.1806
	Cd	2168.3	2693.0	0.425	0.0773	906.7	2368.9	0.704	0.0471	-3.6546	1.7942	0.047	-0.2789
	Cr	803.6	768.1	0.300	0.1050	576.6	675.6	0.397	0.1097	-0.6767	0.5117	0.192	-0.1892
	Cu	-80.4	114.8	0.487	-0.0450	-109.1	101.0	0.285	-0.0890	-0.0508	0.0765	0.510	-0.0609
	Ni	-753.7	864.2	0.387	-0.0734	-868.6	760.2	0.259	-0.1232	1.2272	0.5758	0.038	0.2557
	As	-154.9	232.0	0.507	-0.0450	-130.1	204.1	0.527	-0.0550	-0.0285	0.1546	0.855	-0.0177
	Mn	72.4	78.1	0.358	0.1580	22.5	68.7	0.745	0.0715	-0.0518	0.0520	0.324	-0.2419
	Fe	2.3	1.5	0.134	0.2701	1.4	1.3	0.271	0.2527	-0.0010	0.0010	0.335	-0.2462
	Al	14.4	6.8	0.040	0.3316	-2.0	6.0	0.736	-0.0682	0.0009	0.0046	0.837	0.0464
	Ca	-10.0	3.5	0.007	-0.6095	-8.0	3.1	0.014	-0.7090	0.0006	0.0024	0.791	0.0822
	Mg	-10.2	31.3	0.747	-0.0930	14.6	27.5	0.598	0.1951	0.0251	0.0209	0.234	0.4922
cons	16.9	6.8	0.016	.	0.7	6.0	0.902	.	0.0390	0.0045	0.000	.	
Adj R ²		0.8387				0.735				0.6962			
Seosan	SO ₂	942.7	379.2	0.013	0.1175	-932.3	310.4	0.003	-0.1956	-0.1334	0.2656	0.616	-0.0296
	NO ₂	517.9	96.0	0.000	0.2473	648.9	120.8	0.000	0.3715	-0.4064	0.0672	0.000	-0.3450
	CO	13.9	4.6	0.003	0.1306	14.1	4.1	0.001	0.1816	-0.0016	0.0032	0.613	-0.0273
	Pb	152.5	79.1	0.055	0.1136	164.7	68.4	0.017	0.2035	-0.0278	0.0554	0.616	-0.0369
	Cd	295.0	911.9	0.747	0.0149	-45.7	1700.4	0.979	-0.0019	-0.4131	0.6386	0.518	-0.0370
	Cr	-426.0	388.8	0.274	-0.0461	-534.2	486.2	0.274	-0.0641	-0.7581	0.2723	0.006	-0.1458
	Cu	-138.7	70.1	0.049	-0.0844	-67.4	46.8	0.153	-0.0794	-0.0171	0.0491	0.727	-0.0185
	Ni	522.5	280.3	0.063	0.0865	390.4	217.7	0.075	0.0963	0.8497	0.1963	0.000	0.2502
	As	-226.5	153.1	0.140	-0.0609	-72.6	96.8	0.454	-0.0401	0.0769	0.1072	0.474	0.0368
	Mn	95.5	72.5	0.189	0.0723	51.4	43.3	0.237	0.0695	0.0745	0.0508	0.143	0.1003
	Fe	6.8	3.7	0.065	0.1122	10.8	4.4	0.015	0.2699	0.0008	0.0026	0.765	0.0226
	Al	-20.0	4.6	0.000	-0.3486	-11.2	3.2	0.001	-0.3197	0.0028	0.0032	0.387	0.0863
	Ca	-9.2	5.6	0.100	-0.1818	-5.5	3.6	0.130	-0.1619	-0.0034	0.0039	0.379	-0.1209
	Mg	71.7	15.7	0.000	0.5691	23.0	10.5	0.030	0.2627	0.0055	0.0110	0.618	0.0776
cons	8.4	2.9	0.004	.	-0.2	2.4182	0.938	.	0.0373	0.0020	0.000	.	
Adj R ²		0.5268				0.672				0.3261			

으며, 대기오염물질 농도 변동성이 지역과 물질에 따라 상이하였다. 특히 당진 지역의 경우, SO₂, CO 등 1차 오염물질이 높아 충남 지역 대상의 선행연구[10-13]과 유사하게 주변 오염원에 의한 영향을 받았다고 사료된다. 특히 Fe, Mn 농도는 타 지역에 비해 월등하게 높아, 손세창 외[11], Gladtko 외[29]와 같이 자연적으로 발생된 중금속 성분과 인위적 오염원에 기인하였다. 또한 지역 간 2차 생성물질 농도 수준 차이가 크지 않지만, 중금속 평균농도와 변동성이 상이하여 지역별 영향요인이 상이하다고 추정된다.

측정자료의 통계분석 결과를 토대로 대기오염물질과 기상조건 간 상관관계를 분석하여, 물질 간 관계를 판단하였다. 상관관계 분석 결과, 지역 모두 Pb, Mn, Fe, Al, Ca, Mg 등 중금속 성분과 PM₁₀과 양의 관계를 보여, 이들 성분이 2차로 생성된 입자상 오염물질에 영향을 미치는 것으로 나타났다. 이는 PM₁₀ 농도는 전구물질이 대기 환경에서 산화·환원 반응, 광화학 반응, 응축 반응 등을 통해 발달된 것으로 판단된다[7]. 또한 PM_{2.5}도 PM₁₀과 유사한 결과로 나타나, PM_{2.5}와 PM₁₀의 결정요인을 확인할 필요가 있다. 따라서 회귀분석을 통해 이들 입자상 물질 생성에 관여하는 요인과 정도를 파악하였다.

분석결과 2차 오염물질 농도 결정에 통계적인 유의미한 결과를 확인하였다. 다만 O₃의 경우, 연구 대상 물질로는 설명력이 부족하여, 전구물질로 작용하는 요인을 추가하거나 요인통제가 필요하다. 천안의 경우, PM₁₀ 농도 결정요인으로 NO₂의 기여도가 높았으며, 중금속 성분은 Mn이 영향요인으로 작용하였다. 이는 Colbeck[8]과 같이 Mn 성분이 일반도로의 이동오염원에서 생성되어 발달된 것으로 사료된다. 당진 지역에서는 Fe의 기여도가 높아 Gladtko 외[29]와 같이 주변의 OO제철에서 발생한 물질이 2차 오염 생성에 주요한 원인으로 판단된다. 서산의 경우, 당진과 유사하게 Fe이 주요한 영향요인으로 나타났다으며, Mg도 높은 기여도를 보여, Wei Dong[30]과 같이 서산 측정소 주변에서 운영되고 있는 화학공장에서 발생된 Mg, Fe, Ni 등이 주요한 요인으로 작용한 것으로 판단된다.

5. 결론

본 연구는 충남 3개 지역의 대기오염물질 농도와 기상조건을 대상으로 통계적 분석을 수행하여, 지역별 2차 생성오염물질에 대한 기여도를 분석하였다. 가스상 물질, 입

자상 물질, 중금속 성분 농도를 대상으로 추론통계를 수행하였으며, 동일 시간대 기상조건을 통제하여 영향요인을 확인하였다. 연구 대상 지역은 충남권에 위치하고 있으며, 천안 지역은 주거 용도, 당진과 서산은 제철시설과 화학단지가 위치하고 있어, 지역적으로 오염원이 상이하다.

측정자료의 통계분석결과, 당진지역에서 자연적 발생 중금속 성분이 타 지역에 비해 매우 높아, 자연적 발생이 아닌 인위적 오염으로 판단된다. 이는 인접 지역의 특정 오염원(OO제철)에 의한 영향에 기인하였음을 의미한다.

상관관계 분석 결과, 천안 지역은 PM₁₀ 농도와 SO₂ 간에 높은 양의 관계를 보여, SO₂의 2차 생성반응이 주된 영향으로 판단된다. 반면 서산 지역의 PM₁₀과, NO₂ 간에 상관성이 높아 지역 차이를 확인하였다.

회귀분석 결과, 입자상 물질에 대한 설명력은 높았지만 O₃의 설명계수가 낮아 O₃ 농도는 본 연구의 요인과 다른 영향 요인이 존재함을 의미한다. 천안 지역에서 PM₁₀ 농도는 Mn, Mg, NO₂, 등에 영향을 받고 있으며, PM_{2.5} 농도는 NO₂, CO, Mn 등의 기여도가 높았다. 당진 지역의 경우, PM₁₀와 PM_{2.5} 농도는 Fe, Al, CO 등에 의한 영향을 크게 받았다. 서산 지역의 경우, PM₁₀에 대해 Mg, NO₂, Pb 등에 의한 영향력을 확인하였다. 따라서 충남권 내 3개 지역의 2차 생성물질 농도는 장거리 이동에 의한 오염물질 유입과 인접 지역 발생 오염원 영향을 받아 농도가 결정되고 있음을 추정할 수 있다.

연구한계로 대기오염물질 측정 지점과 기상조건 관측 지점 간 거리로 인한 한계가 존재한다. 또한 지역 오염원을 추적하여, 원인과 대책을 마련하는 대기질 관리가 필요하다라고 사료된다. 특히 서산의 OO시설, 당진의 OO시설 등은 지역 대기질에 영향도가 매우 크기 때문에 이에 대한 고려가 필요하다. 보다 정확한 평가를 위해서는 입경별로 중금속 농도가 상이할 수 있어, 입경별 농도에 대한 모니터링이 요구된다.

References

- [1] Ministry of Environment, Expansion of real-time disclosure items for ultra-fine dust metal components including manganese, etc., Korea, pp.1-2.
- [2] Lanzi, E., Dellink, R., & Chateau, J., "The sectoral and regional economic consequences of outdoor air pollution to 2060", *Energy Economics*, Vol.71, pp.89-113, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2018.01.014>
- [3] Jong-Kil Park, Yun-Jeong Choi, 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. DOI: <https://doi.org/10.5322/JESI.2015.24.7.961>
- [4] Min Ji-won, “Survey on public perception of fine dust”, *Korea Economic Review*, Vol.833, pp.1-16, 2019.
- [5] Korea Environment Corporation, Available From: <https://www.keco.or.kr> (accessed Jan. 2, 2021)
- [6] The Province of Chungcheongnam-do, Five-year comprehensive plan for air environment improvement in Chungcheongnam Province, 2018, Korea, pp.101-157.
- [7] 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>
- [8] Colbeck, I., Environmental Chemistry of Aerosols, p255, Blackwell Pub, 2008, pp.4-5. DOI: <http://dx.doi.org/10.1002/9781444305388>
- [9] Hwang, K. W., Lee, J. H., Jeong, D. Y., Lee, C. H., Bhatnagar, A., Park, J. M., Kim, S. H., “Observation of difference in the size distribution of carbon and major inorganic compounds of atmospheric aerosols after the long-range transport between the selected days of winter and summer”, *Atmospheric Environment*, Vol.42, No.5, pp.1057-1063, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2007.11.029>
- [10] Soontae Kim, Okgil Kim, Byeong-Uk Kim, Hyun Cheol Kim, “Impact of Emissions from Major Point Sources in Chungcheongnam-do on Surface Fine Particulate Matter Concentration in the Surrounding Area”, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, Vol.33, No.2, pp.159-173, 2017. DOI: <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2017.33.2.159>
- [11] Se-Chang Son, Seungshik Park, Minah Bae, Soontae Kim, “A Study on Characteristics of High PM_{2.5} Pollution Observed around Large-scale Stationary Sources in Chungcheongnam-do Province”, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, Vol.36, No.5, pp.669-687, 2020. DOI: <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2020.36.5.669>
- [12] Jong Bum Kim, Soo Hyang Yoon, Sang Sin Lee, Kyung Hwan Kim, Sujin Noh, Gwi-Nam Bae, “Spatial and Temporal Distributions of PM₁₀ and PM_{2.5} Concentrations in Chungcheongnam-do”, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, Vol. 36, No.4, pp.464-481, 2020. DOI: <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2020.36.4.464>
- [13] Seoryeong Ju, Geun-Hye Yu, Seungshik Park, JiYi Lee, Sangil Lee, Joonbum Jee, Kwangyul Lee, Mindo Lee, “Pollution Characteristics of PM_{2.5} Measured during Fall at a Seosan Site in Chungcheong Province”, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, Vol.36, No.3, pp.329-345, 2020. DOI: <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2020.36.3.329>
- [14] Jong Soo Kim, Soon Mo Hong, Myoung Sook Kim, Yo Yong Kim, Eun Sang Shin, “Distribution Characteristics of PM₁₀ and Heavy Metals in Ambient Air of Gyeonggi-do Area using Statistical Analysis”, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, Vol.30, No.3, pp.281-290, 2014. DOI: <http://dx.doi.org/10.5572/KOSAE.2014.30.3.281>
- [15] National Institute of Environmental Research, A Study on the physicochemical properties and effects of yellow dust in the atmosphere(I), 2010, Korea, pp.81-84.
- [16] Yoon-Cheol Yang, Se-Haeng Lee, Byoung-Hoon Park, Gwang-Un Jo, Sang-Hoon Yoon, Ji-Young Park, Dong Jang, Ji-hyo Chong, Seok-Jin Bae, Suk-Kyoung Jeong, “Estimation of Heavy Metal Contamination by PM₁₀ Inflow Pathways while Asian Dust in Gwangju”, *Journal of Environmental Science International*, Vo.29, No.1, pp.55-68, 2020. DOI: <https://doi.org/10.5322/JESI.2020.29.1.55>
- [17] Byung-Wook Kang, Min-Ji Kim, Kyung-Min Baek, Young-Kyo Seo, Hak Sung Lee, Jong-Ho Kim, Jin-Seok Han, Sung-Ok Baek, “A Study on the Concentration Distribution of Airborne Heavy Metals in Major Industrial Complexes in Korea”, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, Vol.34, No.2, pp.269-280, 2018. DOI: <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2018.34.2.269>
- [18] Sang-Bum Hong, Duk-Sang Jung, Soon-Bong Lee, Dong-Eun Lee, Seung-Hee Shin, Chang-Hee Kang, “Ionic composition comparison of atmospheric aerosols at coastal and mountainous sites of jeju island”, *Analytical Science & Technology*, Vol.24, No.1, pp.24-37, 2011.
- [19] Jo Yong Seong, Lee Hong Seog, Kim Yun Sin, Lee Jong Tae, Park Jin Su, “A Study on Chemical Composition of Fine Particles in the Sungdong Area”, Seoul, Korea”, *J. of the Environmental Sciences*, Vol.12, No.6, pp.665-676, 2003.
- [20] Jeonghwan Kim, Young Sung Ghim, Jin-Seok Han, Seung-Myung Park, Hye-Jung Shin, Sang-Bo, Lee, Jeongsoo Kim, 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. DOI: <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2018.34.1.001>
- [21] Bong-Wook Choi, Jong-Hyeon Jung, Won-Joon Choi, Byung-Hyun Shon, Kwang-Joong Oh, “Characteristics of the Distribution of High Ambient Air Pollutants with Sources and Weather Condition in Ulsan”, *Korean Journal of Environmental Health*, Vol.32, No.4, pp.324-335, 2006.
- [22] Munir, S., Chen, H., & Ropkins, K., “Characterising the temporal variations of ground-level ozone and its relationship with traffic-related air pollutants in the United Kingdom: A quantile regression approach”, *International Journal of Sustainable Development and Planning*, Vol.9, No.1, pp.29-41, 2014. DOI: <https://doi.org/10.2495/SDP-V9-N1-29-41>

- [23] Eeftens, M., Tsai, M. Y., Ampe, C., Anwander, B., Beelen, R., Bellander, T., Hoek, G., "Spatial variation of PM_{2.5}, PM₁₀, PM_{2.5} absorbance and PM coarse concentrations between and within 20 European study areas and the relationship with NO₂-results of the ESCAPE project", *Atmospheric environment*, Vol.62, pp.303-317, 2012.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2012.08.038>
- [24] Akyüz, M., & Çabuk, H., "Meteorological variations of PM_{2.5}/PM₁₀ concentrations and particle-associated polycyclic aromatic hydrocarbons in the atmospheric environment of Zonguldak", *Turkeym Journal of hazardous materials*, Vol.170, No.1, pp.13-21, 2009.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.05.029>
- [25] Pires, J. C. M., Martins, F. G., Sousa, S. I. V., Ferraz, M. C. M. A., Pereira, M. C., "Prediction of the daily mean PM₁₀ concentrations using linear models", *American Journal of Environmental Sciences*, Vol.4, No.5, pp.445, 2008.
DOI: <https://doi.org/10.3844/ajessp.2008.445.453>
- [26] Parkhurst, W. J., Tanner, R. L., Weatherford, F. P., Valente, R. J., Meagher, J. F., "Historic PM_{2.5}/PM₁₀ concentrations in the southeastern United States-Potential implications of the revised particulate matter standard", *Journal of the Air & Waste Management Association*, Vol.49, No.9, pp.1060-1067, 1999.
DOI: <https://doi.org/10.1080/10473289.1999.10463894>
- [27] Rizzo, M., Scheff, P., Ramakrishnan, V., "Defining the photochemical contribution to particulate matter in urban areas using time-series analysis", *Journal of the Air & Waste Management Association*, Vol.52, No.5, pp.593-605, 2002.
DOI: <https://doi.org/10.1080/10473289.2002.10470808>
- [28] Koutrakis, P., Sax, S. N., Sarnat, J. A., Coull, B., Demokritou, P., Demokritou, P., Gramsch, E., "Analysis of PM₁₀, PM_{2.5}, and PM_{2.5-10} Concentrations in Santiago, Chile, from 1989 to 2001", *Journal of the Air & Waste Management Association*, Vol.55, No.3, pp.342-351, 2005.
DOI: <https://doi.org/10.1080/10473289.2005.10464627>
- [29] Gladtko, D., Volkhausen, W., Bach, B., "Estimating the contribution of industrial facilities to annual PM₁₀ concentrations at industrially influenced sites", *Atmospheric Environment*, Vol.43, No.30, pp.4655-4665, 2009.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2009.04.063>
- [30] Dong, W. "Characteristics and Source Analysis of PM₁₀ and PM_{2.5} in Shizuishan City, Ningxia Hui Autonomous Region", In E3S Web of Conferences. *EDP Sciences*, Vol.165, p.02007, 2020.
DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202016502007>
- [31] Kyu-Won Hwang, Dong-Yeon Kim, Se-Jun Jin, Im-Hyeon Kim, "A Study on the Factors Influencing Air Pollutions in the Islands of Korean Peninsula: Focusing on the Case of Ulleung, Jeju, and Baengnyong Island", *Korea Academy Industrial Cooperation Society*, Vol.21, No.11, pp.814-824, 2020.
DOI: <https://doi.org/10.5762/KAIS.2020.21.11.814>

황 규 원(Kyu-Won Hwang)

[정회원]



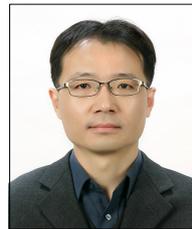
- 2004년 2월 : 연세대학교 환경공학부 (공학사)
- 2006년 8월 : 연세대학원 환경공학부 (공학석사)
- 2014년 1월 ~ 현재 : 한국해양과학기술원 연구원

<관심분야>

과학기술정책, 해양환경, 대기오염, 해양공간계획

김 진 영(Jinyoung Kim)

[정회원]



- 2002년 2월 : 성균관대학교 일반대학원 행정학과 (행정학석사)
- 2015년 2월 : 성균관대학교 국립관리대학원 행정학과 (행정학박사)
- 2015년 5월 ~ 2016년 7월 : 한국해양과학기술원 연수연구원
- 2016년 8월 ~ 현재 : 충남연구원 책임연구원

<관심분야>

거버넌스, 해양정책, 타당성 분석

권 영 주(Young-Ju Kwon)

[정회원]



- 2014년 2월 : 서울과학기술대학교 에너지환경대학원 에너지정책학과 (경제학석사)
- 2018년 8월 : 서울과학기술대학교 에너지환경대학원 에너지정책학과 (경제학박사)
- 2019년 6월 ~ 2020년 5월 : 한국해양과학기술원 연수연구원
- 2020년 6월 ~ 현재 : 한국해양과학기술원 전문연구원

<관심분야>

환경경제, 자원경제, 해양정책, 에너지정책