

환경 및 응용기상 분과 / 환경 및 응용기상 1-1

한반도 미래 기후변화 시나리오에 따른 광 흡수 및 광 산란 에어로졸의 복사 강제력 변화

조혜은¹, 김민중²

¹명지대학교 환경에너지공학과

²명지대학교 환경시스템공학과

에어로졸은 태양 복사와 지구 복사를 산란 또는 흡수하여 복사 에너지 수지를 직접적으로 변화시킨다. 이전 연구는 2003에서 2018년 사이 전 지구 복사 강제력의 증가를 보고하며, 주요 원인으로 온실가스 농도 증가와 산란성 에어로졸 농도 감소를 제시하였다. 흡수성 에어로졸인 블랙카본(BC)은 태양복사를 흡수해 대기를 가열하며, 추정치 기준 CO₂ 다음으로 강한 기후 강제력을 갖는다. 본 연구에서는 최신의 NDC 감축 시나리오에 따른 한반도 미래 기후 및 대기질 정책 시나리오 하에서 광 산란 및 광 흡수 에어로졸의 종별 복사강제력 변화를 산출하고, 그에 따른 기후-대기질 영향을 통합적으로 평가하였다. 전 지구 기후 모델과 지역 규모 대기화학 모형을 활용해 2020년부터 2050년까지 정책별 배출 시나리오에 따른 에어로졸 농도를 모의하였다. 이후 후처리 도구 FlexAOD로 AOD, SSA 등 에어로졸 광학 특성을 산출하고, RRTMG 복사 전달 모델로 종별 및 총 복사 강제력을 계산하였다. 모든 시나리오에서 2050년으로 갈수록 에어로졸 농도는 감소했으며, 특히 산란성 무기 에어로졸 농도 감소가 두드러졌다. 그 결과 산란성 에어로졸로 인한 대기 냉각이 약화되어 총 복사 강제력은 온난화 방향으로 증가하였다. 저배출이며 탄소중립 시나리오에서 에어로졸 농도의 감소 폭이 가장 컸고, 이에 따라 복사 강제력의 증가도 타 시나리오 대비 가장 컸다. BC의 복사 강제력 변화는 산란성 에어로졸 감소로 인한 총 복사 강제력 증가폭을 약 40-60% 상쇄하여 대기의 복사 효과를 조절하는 것으로 나타났다. 따라서 대기질 개선으로 산란성 에어로졸 농도가 줄어드는 만큼, 같은 기간 CO₂ 등 장수명 온실가스와 BC 등 흡수성 에어로졸을 동시 감축해야 총 복사 강제력 증가를 억제할 수 있다.

Keywords: 기후변화 시나리오, 복사강제력, 대기질, 광 산란 에어로졸, 광 흡수 에어로졸

※ 이 연구는 환경부의 재원으로 국립환경과학원의 지원을 받아 수행하였습니다. (NIER-2025-04-02-033).

환경 및 응용기상 분과 / 환경 및 응용기상 1-2

겨울철 한반도 유사 종관장에서 나타난 PM_{2.5} 농도 변동성에 관한 연구

채다운¹, 이순환^{2,3}, 권민지¹

¹부산대학교 지구과학과

²부산대학교 지구과학교육과

³부산대학교 환경연구원

초미세먼지(PM_{2.5}) 농도는 배출 저감 정책, 종관 규모의 기상, 물리·화학적 과정 등 다양한 요인에 의해 조절된다. 특히 종관 기상은 배출량 저감 효과에 영향을 줄 뿐만 아니라, 오염물질 축적, 지역 수송, 그리고 2차 에어로졸 형성과 같은 과정을 통해 단기적인 미세먼지 고농도 발생에 결정적인 역할을 한다. 따라서 종관 기상과 초미세먼지 (PM_{2.5}) 사이의 관계를 규명하는 것은 중요하다. 본 연구에서는 유사한 종관 기상 패턴에서 초미세먼지(PM_{2.5}) 저농도 및 고농도 사례의 발생 메커니즘을 분석하기 위해, 군집분석을 활용하여 겨울철 한반도의 주요 종관 패턴을 분류하였다. 그중 발생 빈도가 가장 높고 기압 경도가 동서 방향으로 나타난 군집을 대상으로 대기질 수치 모의를 수행하였다. 분석 결과, 기압 경도가 동서로 나타나는 종관 패턴에서 서울 지역의 초미세먼지(PM_{2.5}) 농도 차이를 유발하는 원인은 한반도 서해상에 위치한 작은 규모의 저기압임을 확인하였다. 이 저기압은 동서 방향의 기압 경도를 약화시켰으며, 그 결과 한반도 내 북서풍이 약해져 초미세먼지가 축적될 수 있는 환경이 조성되었고, 이는 서울 지역의 초미세먼지(PM_{2.5}) 고농도를 유발하였다.

Keywords: 종관 기상 패턴, 군집분석, 대기질 수치 모의

※ 이 연구는 2020년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No. RS-2020-NR049592). 또한 이 연구는 2022년 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. RS-2022-NR070051).

한강 도심수계의 탄소 배출 특성과 CO₂ 동역학 조절요인 규명

최근재, 정수종

서울대학교 환경대학원

내륙 수계는 주요 탄소 배출원으로 주목받고 있으나, 도시화된 하천에서 CO₂ 동역학을 결정하는 다차원적 메커니즘은 아직 충분히 해명되지 않았다. 본 연구는 서울 한강을 대상으로 4년간 고해상도 에디 공분산 관측과 종합적인 환경 모니터링을 통해 도시 하천의 CO₂ 배출을 유발하는 다중 규모의 동인을 정량적으로 분석하였다. 한강은 평균적으로 1.38 gC m⁻² day⁻¹의 CO₂를 지속적으로 방출하는 순배출원으로 나타났으며, CO₂ 플럭스는 낮에는 약한 흡수(-0.25 μmol m⁻² s⁻¹), 밤에는 강한 방출(3.25 μmol m⁻² s⁻¹)을 보이는 뚜렷한 일변화 비대칭성을 보였다. 계절적으로는 생물학적 활성이 높은 여름철에 배출량이 최대에 달하였다. 통계모형(LME, SEM) 기반 분석 결과, CO₂ 배출은 물리적, 열역학적, 생물학적 요인 간의 상호작용에 의해 결정되며, 이들 요소는 상충적인 영향을 미치는 것으로 나타났다. 물리적으로는 표면 난류가 용존 CO₂의 환기를 촉진한 반면, 유량 증가는 수계 내 CO₂ 부하를 증가시켜 배출을 강화하였다. 열역학적으로는 높은 수온이 미생물 대사에 의한 CO₂ 생성을 증가시키는 한편, 수온과 기온 간의 열적 불균형은 기체 교환을 촉진하여 대기-수계 간 CO₂ 구배를 감소시켰다. 생물학적으로는 Chlorophyll-a가 일변화 규모에서는 광합성을 통해 CO₂를 흡수했지만, 장기적으로는 조류 유기물의 호흡이 CO₂ 농도 구배를 증가시켜 배출을 유도하였다. 또한, 수질 오염은 CO₂ 배출을 증폭시키는 주요 인자로 작용했으며, 수온과 CO₂ 농도 구배 간의 높은 상관성(R²= 0.87)은 향후 기후 변화에 따라 도시 하천이 더욱 강력한 탄소 배출원이 될 가능성을 시사한다. 본 연구는 도시 수계의 탄소 동역학이 지역적 차원을 넘어 전 지구적 기후 변화에 영향을 줄 수 있음을 강조하며, 도시 수자원 관리가 기후 변화 완화 전략의 핵심 요소임을 시사한다.

Keywords: Urban River Carbon Emissions, Eddy Covariance Flux Measurement, Thermal-CO₂ Gradient Interaction, Climate-Carbon Feedback

※ 본 결과물은 환경부의 재원으로 한국환경산업기술원의 관측기반 온실가스 공간정보지도 구축 기술개발사업의 지원을 받아 연구되었습니다 (RS-2023-00232066)

Unequal Future Air Quality Benefits depending on the degree of Global Warming and Emission Changes over East Asia

Yeri Kim, Young-Hee Ryu

Department of Atmospheric Sciences, Yonsei University

Changes in climate and anthropogenic emissions play critical roles in future air quality, with significant implications for public health. In this study, air quality changes under SSP2-4.5, SSP5-8.5, and net-zero emission policies are projected for the year 2050 using the Weather Research and Forecasting model coupled with Chemistry. In the context of national commitments, many Asian countries have announced their emission reduction targets. However, we found that the benefits of air quality improvements depend on both the degree of global warming and the extent of emission changes. Importantly, these benefits are distributed unequally across East Asia. For the case of $PM_{2.5}$ (particulate matter with an aerodynamic diameter less than $2.5 \mu m$), the benefits are more evident in upwind regions such as the North China Plain in China, while downwind regions, including South Korea and Japan, experience weaker benefits, which might be due to transboundary transport. For O_3 (ozone), the benefits vary depending on O_3 - NO_x -VOC sensitivity, with reductions in NO_x leading to lower O_3 in NO_x -sensitive regimes but potentially higher O_3 in NO_x -saturated regimes. This study highlights the importance of accounting for unequal regional benefits in designing effective emission reduction policies.

Keywords: future air quality, unequal benefits, transboundary transport, O_3 - NO_x -VOC chemistry, East Asia

환경 및 응용기상 분과 / 환경 및 응용기상 1-5

기후변동성이 북태평양 항공기 운항에 미치는 영향: 비행시간 및 청천난류 회피 비용 분석

김준희, 김정훈

서울대학교 지구환경과학부

순항 중인 항공기는 상층 대기 상태, 특히 제트기류의 위치와 강도에 직접적인 영향을 받는다. 비행경로는 효율성을 확보하기 위해 순풍을 최대화하면서도, 깊은 대류, 난류와 같은 다양한 위험 기상인 지역을 회피하도록 계획된다. 그러나 이러한 일상적 경로 최적화에 더불어, 보다 긴 시간규모에서 나타나는 기후변동성이 항공 운항에 체계적인 영향을 미칠 수 있다. 엘니뇨나 북대서양진동과 같은 대규모 기후변동성은 제트기류의 위치와 강도를 변화시켜 수십 분 규모의 비행시간 차이를 유발하는 것으로 분석되었으며, 계절 단위의 높은 예측성 덕분에 중장기적 운항 전략 수립에 실질적인 정보를 제공할 수 있다. 그러나 기존 논의는 북대서양 지역에 집중되어 있으며 북태평양에 대한 연구는 부족하다. 또한, 제트기류와 청천난류의 높은 연관성 때문에 기후변동성의 위상에 따라 난류 발생의 공간 분포가 변화하여 난류 지역 우회에 따른 추가 비행시간이 달라질 수 있으나, 이에 대한 정량적 분석은 아직 이루어지지 않았다. 본 연구에서는 장기 재분석 자료(1979-2022)를 바탕으로 매일의 최적 경로와 청천난류 회피 경로를 계산하여, 북태평양(도쿄-LA, 인천-시애틀) 항로에서의 비행시간 및 청천난류 조우 특성을 분석하였다. 그 결과, 북태평양 횡단 비행시간의 뚜렷한 장기추세는 나타나지 않았으나, 기후변동성과 강한 계절적 연관성을 보였다. 특히 PNA는 도쿄-LA 항로의 겨울철 월평균 왕복 비행시간 분산의 60%를 설명하며, 위상에 따라 52 ± 9 분(일별 153 ± 7 분)의 차이를 유발하였다. 반면, 북대서양 선행연구와 달리 북태평양에서 청천난류 통과 및 회피 시간은 기후변동성과 유의미한 상관성이 보이지 않았다. 이는 청천난류의 높은 간헐성과 넓은 북태평양 지역의 높은 항행 자유도 때문으로 생각되며, 해당 지역에서의 청천난류와의 기후변동성의 연관성은 추가 분석이 필요함을 시사한다.

Keywords: 기후변동성, 제트기류, 청천난류, 비행경로

※ 이 연구는 기상청 「차세대 항공교통 지원 항공기상 기술개발(NARAE-Weather)」(RS-2022-KM220310)의 지원과 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원(RS-2025-24683550)으로 수행되었습니다.

환경 및 응용기상 분과 / 환경 및 응용기상 1-6

항공기와 위성 자료를 활용한 서태평양 상공 난류 특성 분석: 대류 주변 3차원 구조 및 지속 시간 패턴

백성호, 김정훈

서울대학교 지구환경과학부

본 연구에서는 2019년부터 2024년까지 서태평양 상공에서 상업용 항공기 관측 기상자료(Aircraft Meteorological Data Relay; 이하 AMDAR)의 난류 소산율(Eddy Dissipation Rate; 이하 EDR) 자료를 활용하여, 대류 지역 주변 난류의 3차원 분포와 항공기가 경험하는 난류의 지속 시간 특성을 분석하였다. 본 연구에서는 고도 30,000ft 이상에서 EDR 값이 $0.1\text{m}^{1/3}\text{s}^{-1}$ 이상인 관측 자료를 사용하였다.

첫째로, 천리안 2호 위성에 탑재된 Advanced Meteorological Imager(AMI)의 적외 채널($10.35\ \mu\text{m}$)의 밝기온도를 이용하여 깊은 대류 영역(Deep Convective Area; DCA)를 식별 하였다. 식별된 대류 코어의 상단을 기준으로 난류 사례들의 3차원 공간 분포를 분석한 결과, 난류의 발생 빈도는 대류 코어 중심에 수평적, 연직적으로 가까울수록 높게 나타났다. 구체적으로, 수평적으로는 100km 이내, 연직적으로는 상부 3km 및 하부 4km 범위에서 높은 집중도를 보였다. 수평 분포상으로는 대류 코어의 북서쪽에서 더 많은 난류가 분포하였다. 또한, 저위도 지역에서는 깊은 대류운의 강한 발달로 인해 상대적으로 코어 하부에서 난류가 빈번하게 발생하는 특징을 보였다.

둘째로, 10분 단위로 수집된 AMDAR 자료를 개별 비행경로로 재구성하는 작업을 선행하였다. 이후 각 비행경로 내에서 연속적으로 보고된 난류를 하나의 연속적인 사건을 하나의 '난류 이벤트'로 정의하고, 난류 지속 시간 분석을 수행하였다. 이렇게 정의된 난류 이벤트는 DCA와의 수평 거리를 기준으로 대류에 의한 난류(Convective Induced Turbulence; CIT) 이벤트와 non-CIT 이벤트로 구분하였다. 또한, 5분 이상 지속되는 난류를 'long-lasting', 그보다 짧은 경우를 'short-lasting'으로 정의하여 분석 결과, long-lasting CIT 이벤트는 주로 북서 태평양 지역에 분포하는 반면, short-lasting CIT는 저위도 지역에 집중되는 지리적 특성을 보였다. 한편 non-CIT의 경우, 여러 난류 지수가 난류 강도뿐만 아니라 지속 시간과도 유의미한 상관관계를 보였다. 나아가 long-lasting 난류 이벤트에 대해 왜도, 첨도, 푸리에 변환을 이용하여 난류의 패턴 분석을 수행하였다. 분석 결과, 왜도와 첨도 값은 중위도보다 저위도에서, 그리고 non-CIT보다 CIT 이벤트에서 유의미하게 큰 값을 보였다. 이는 특히 저위도 지역에서 long-lasting CIT 이벤트가 다른 이벤트에 비해 갑작스럽고 강한 난류를 경험할 확률이 높다는 것을 시사하며, CIT가 일시적이고 간헐적으로 발생한다는 기존 선행연구들의 결과에도 부합한다. 궁극적으로 본 연구에서 분석한 서태평양 상공의 CIT와 non-CIT 특성은 동아시아와 북미를 잇는 항공로의 안전한 운항에 중요한 정보로 활용될 것으로 기대된다.

Keywords: 대류에 의한 난류, 난류 강도, AMDAR, 천리안 2호

※ 이 연구는 기상청 「차세대 항공교통 지원 항공기상 기술개발(NARAE-Weather)」 (RS-2022-KM220310)의 지원으로 수행되었습니다.