

발간등록번호
11-1480523-005390-01

NIER-SP2023-281

지역별 PM_{1.0}, PM_{2.5} 상세분석 결과를 활용한 미세먼지
특성 및 생성원인 규명(II)

The Study of source and evolution characteristics of submicron aerosols
based on PM_{1.0} and PM_{2.5} analysis by NIER atmospheric research center

(주)미세먼지연구소
아주대학교 산학협력단
충남연구원

국립환경과학원

지역별 $PM_{1.0}$, $PM_{2.5}$ 상세분석 결과를 활용한 미세먼지
특성 및 생성원인 규명(II)

The Study of source and evolution characteristics of submicron aerosols
based on $PM_{1.0}$ and $PM_{2.5}$ analysis by NIER atmospheric research center

(주)미세먼지연구소
아주대학교 산학협력단
충남연구원

국립환경과학원

제 출 문

국립환경과학원장 귀하

본 보고서를 '지역별 PM_{1.0}, PM_{2.5} 상세분석 결과를 활용한 미세먼지 특성 및 생성원인 규명(II)' 용역 최종보고서로 제출합니다.

2024. 02. 13.

□ 연구기관명 : (주)미세먼지연구소
아주대학교 산학협력단
충남연구원

□ 연구책임자 : 김정호

□ 공동연구원 : 이재영, 김종범, 이상신, 윤종주, 김명복

□ 연구보조원 : 황혜민, 황규철, 조은숙, 이호준

□ 보조원 :

요 약 문

I. 연구개요

연구과제명	국문	지역별 PM _{1.0} , PM _{2.5} 상세분석 결과를 활용한 미세먼지 특성 및 생성원인 규명(II)		
	영문	The study of source and evolution characteristics of submicron aerosols based on PM _{1.0} and PM _{2.5} analysis by NIER atmospheric research center(II)		
연구기관 (주관)	(주)미세먼지연구소	연구책임자	소속	부설연구소
			성명	김 정 호
연구기관 (공동)	아주대학교 산학협력단	교 수	소속	환경안전공학과
			성명	이 재 영
연구기관 (공동)	충남연구원	책임연구원	소속	대기환경연구센터
			성명	김 중 범
연구기간	2023년 4월 18일 ~ 2024년 2월 13일 (100일)			
연구개발비	이억육천사백만원 (₩ 264,000,000)			
참여연구원수	총 15명	책임연구원 : 1명, 연구원이하 : 14명		

II. 연구목적 및 필요성

우리나라 권역별 대기환경연구소는 대기 중 입자 및 가스상 오염물질에 대한 물리·화학적 실시간 자료를 산출하고 있으며, 이를 활용하여 권역과 지역별 대기질 특성을 조사·분석하고 있다. 대기질 및 미세먼지에 대한 국민의 관심과 우려가 증가함에 따라 미세먼지의 상세구성성분, 대기질 특성 인자 등 측정분석 자료를 기반으로 과학적인 연구와 정책 활용도가 지속적으로 증가하고 있다. 대기질 분석의 고도화를 위해서는 준-실시간으로 관측되는 PM_{2.5} 및 그 화학적 성분의 특성 파악과 함께, 미세먼지 생성 영역인 PM_{1.0}의 물리·화학적 특성을 함께 비교 분석할 필요가 있다. 또한 고농도 미세먼지 사례의 원인파악을 위해 지리적·지상학적 조건과 PM_{1.0}과 PM_{2.5} 측정자료의 연계분석을 통한 미세먼지의 거동과 특성을 파악할 필요가 있다.

본 연구는 PM_{1.0}과 PM_{2.5}의 실시간 유·무기성분 자료의 과학적인 연관성 및 인과관계를 규명하여 입자의 생성 기원을 추정하고, 지역별 미세먼지 특성 규명을 통해 지역별로 특성화된 저감 대책을 수립하기 위한 과학적 근거자료를 제시하고자 한다.

III. 연구개발의 내용 및 범위

지역별 PM_{1.0}, PM_{2.5} 상세분석 결과를 활용한 미세먼지 특성 및 생성원인 규명(II)에 대한 내용과 범위는 다음의 각 항과 같다.

- 지역별(경기권, 수도권, 충청권) (초)미세먼지 특성분석
- 지역별 주요 오염물질의 변화 및 PM_{2.5}에 대한 특성 분석
- 입자생성기원추정을 위한 질량분석장비 정도관리
- 입자생성기원추정을 위한 질량분석장비 산출자료의 분석 방법론 개발
- 질량분석장비를 이용한 PM_{1.0} 집중관측 및 PM_{1.0}/PM_{2.5} 화학적 성분 상세분석
- PM_{1.0} 비교 검증을 위한 PM_{1.0} 농도 예측
- 산업단지 기상조건 변화에 따른 수직·수평 농도변화 특성분석

IV. 연구 결과

지역별 PM_{1.0} 및 PM_{2.5} 연계분석을 위하여 경기권대기환경연구소를 중심으로 PM_{1.0}과 PM_{2.5} 실시간 유·무기성분 자료의 과학적인 연관성 및 인과관계를 규명하기 위한 연구를 수행하였다. 이를 위하여 지역별(수도권, 경기권, 충청권)의 (초)미세먼지의 특성을 다각도로 분석하였으며, 안산 산업단지 주변의 기상특성에 따른 농도분포를 파악하고, PM_{1.0} 집중관측과 그 화학적 특성을 분석하는 향상된 대기질 분석을 통해 대기환경연구소의 미세먼지 연구 고도화를 도모하였다.

- 지(권)역별 배출원 및 배출량에 대하여 파악하였으며, 변경된 배출량 산정 (V6.0) 방법을 적용한 결과 가스상 오염물질은 큰 차이를 보이지 않지만, 입자상 오염물질은 큰 차이를 보였으며, 전국과 권역을 대상으로 지역별 배출특성을 검토한 결과 상이한 배출특성을 보임에도 불구하고 권역으로 묶여 동일한 개선정책이 추진되고 있어 향후 지역별 특성을 고려한 개선정책 수립과 추진이 필요한 것으로 파악된다. 지(권)역별 PM_{2.5} 상세분석은 CAPSS 기준 3개 연구소(수도권, 경기권, 충청권)가 위치한 지역의 대기오염물질 특성을 파악하였다. 주요 배출원과 오염물질을 선정하였고 측정소별 PM_{2.5}와 종합 분석 결과 일부 유사한 상관성을 보였지만 거시적인 배출특성보다는 국소적인 지역적 특징이 측정소 데이터에 더 큰 영향을 미치는 것으로 확인되었다.

- 지(권)역별로 측정된 PM_{2.5} 농도 분석 결과 입경분포는 충청권에서 가장 큰 편차를 보였고, 입자 크기는 충청권 > 경기권 > 수도권으로 커지는 것으로 확인되었으며, 지역적 배출특성의 차이로 판단된다. 기상 조건은 북풍에서 서풍으로 변화하면서 풍속이 증가하였고, 저농도의 경우 풍속이 증가할수록 농도를 감소시키는 반면, 고농도에서는 풍속의 증가가 농도를 가중하는 것으로 확인되었다. 2021년 기준 고농도와 저농도 사례를 각각 3개씩 추출하여 역계적 분석을 통한 영향 분석을 수행하였고, 그 결과 한반도 전역에 걸쳐 계절 및 지역적 특성을 반영하고 있지만, 해당 기간 국외 영향 또한 크게 작용하고 있는 것을 확인할 수 있었다. 대형 배출원이 밀집한 충청권의 경우, 충남 내 위치하는 PM_{2.5} 성분측정망을 기반으로 지역 내 화학성분 조성을 분석한 결과 모든 관측지점에서 OC (유기탄소)가 가장 높은 수준으로, 유기탄소 및 그 생성과 발생원에 대한 관리가 필요한 것으로 나타났다.
- PM_{2.5} 질량농도는 화학성분과 기상인자에 기반한 PM_{2.5} 예측 모델을 통해 전국적으로 NH₄⁺의 중요도가 가장 높아 PM_{2.5} 저감을 위해서는 NH₃ 관리의 필요성이 제시되었고, 이와 함께 수도권과 경기권 대기환경연구소는 NO₃⁻의 중요도가 높은 특징을 보였다. 1차 오염물질 및 불완전 연소 기원의 CO 농도와 PM_{2.5}의 농도에 뚜렷한 상관성 (feature, SHAP value)은 없었고, 상대습도와는 음의 상관성을 나타내, PM_{2.5}는 1차 기원보다 2차 기원의 영향과 상대습도 변화 (강우 포함)에 따른 계절적 요인의 영향을 받는 것으로 파악된다. 모든 계절에서 공통적으로 경기 남부 및 충남 북부에서 PM_{2.5} 농도의 우심지역 (hotspot, 핫스팟)이 나타났다. 대기환경연구소에서 관측된 PM_{1.0} 농도 기반으로 예측한 전국적인 PM_{1.0} 검증 결과, 모든 지역이 PM_{1.0}과 다른 입력 변수 사이에서 동질적인 유의한 관계가 나타났다. 이를 바탕으로 PM_{1.0} 농도분포에서 나타난 주요 핫스팟 지역은 서울 및 안산 지역으로, 두 지역은 모두 교통량이 많은 지역이며, 특히 안산의 경우, 4개 산업단지 배후 및 연안 도시 특성으로 PM 배출과 생성이 활발한 것으로 판단된다.
- PM_{1.0}은 PM_{2.5}와 연계 분석을 위해 그 화학적 조성의 변화 특성을 파악하는 것이 중요하다. HR-ToF-AMS를 이용한 PM_{1.0} 고도 분석을 위하여 질량분석장비의 정도관리 절차 및 체계를 수립하였다. 신뢰성 있는 자료를 제시토록 표준운영절차에 기반하여 집중관측을 수행하여, 자료의 처리 및 PMF 분석을 위한 유기성분의 분류작업 (HOA, COA, SVOOA, LVOOA 등)을 실시하였다. 전체 기간 2021년~2023년 사이 총 20회의 집중관측 자료 (약 500일)를 확보하였으며, 최종 HR 분석을 통한 CDCE 적용 값을 자료로 확정하였다. 해당 자료는 matrices로 구축하였으며, PM_{1.0} 생성원인 연구에 중요한 과학적 자료로 활용될 수 있다.
- 경기권대기환경연구소에서 집중관측한 HR-ToF-AMS의 PM_{1.0}의 화학적 특성을 정리하

면 다음과 같다. 고농도와 저농도 구간의 특징이 서로 다르며, 대기질이 깨끗할수록 그 화학적 구성은 유기 성분비가 크며, 대기질이 나쁠수록 질산염의 비가 큰 폭으로 증가하였으며, 농도 수준을 구간별로 분류하여 상대습도와 비교한 결과 $PM_{1.0}$ 농도는 유기성분 및 질산염과 유의한 관계에 있는 것으로 파악된다.

- 2021-2023 집중관측 결과를 중심으로, $PM_{1.0}$ 과 $PM_{2.5}$ 연계분석을 수행하였고, 그 결과 $PM_{1.0}/PM_{2.5}$ 질량농도 비는 평균 $PM_{1.0}$ 이 약 70%를 차지하는 수준으로 파악되었으며, 질량을 구성하는 화학적 성분은 $PM_{1.0}$ 의 경우 유기성분, 질산염 순으로, $PM_{2.5}$ 의 경우에는 질산염과 유기물(OM) 순의 조성비를 보였다. 그 조성비는 입자의 크기 영역별로 다르지만, $PM_{1.0}$ 과 $PM_{2.5}$ 에서 가장 큰 구성비의 변화는 질산염으로, 대부분의 고농도 구간에서 질산염 증가는 $PM_{2.5}$ 의 농도 상승을 전인하는 축으로 작용함을 의미한다. HR-ORG에 대한 질량스펙트럼 자료는 PMF 분석을 통해 유기성분의 기원 분석에 이용하였다. ORG는 SOA, POA로 구분하였고, SOA는 LVOOA와 SVOOA로, POA는 HOA, COA 등으로 분류하였다. SOA (Secondary organic aerosol, 이차유기 에어로졸)는 LVOOA (Low volatility oxygenated OA) 28%, SVOOA1 (Semi-volatile oxygenated OA1) 22%, SVOOA2 12%의 구성을 나타냈고, POA (Primary OA)는 오염원에서 직접적으로 배출되는 OA로 HOA (Hydrocarbon-like OA) 16%, COA (Cooking-emitted OA) 18%를 차지하는 것으로 파악되었으며, 2차 유기 에어로졸을 구성하는 LVOOA 비중이 높은 것으로 확인되었다.
- 산업단지 기상조건변화에 따른 수직·수평농도변화 특성분석을 위해 고도별 수직분포 특성을 조사하기 위한 기반을 구축하였다. 드론을 이용한 고도별 관측 결과, 경기권 대기환경연구소의 여름철 $PM_{2.5}$ 와 기온은 고도가 증가함에 따라 값이 감소하는 경향이 있으나, O_3 는 고도가 증가함에 따라 농도가 증가하는 경향을 보였다. 겨울철에는 여름철보다 $PM_{2.5}$ 의 국지적 배출 증가 및 2차 생성으로 인해 60-120m 구간에서 고도 증가에 따른 농도 증가 경향이 나타났다. 겨울철 O_3 의 농도는 O_3 적정 효과에 의해 30-60m에서 고도 증가에 따른 농도 증가 경향이 나타났다. 계절과 무관하게, 온도는 고도가 증가함에 따라 감소한다. 여름철에는 고도 60m 이상부터 습도가 증가하며, 겨울철에는 모든 고도에 따라 습도가 증가하는 경향을 보인다. 또한, HYSPLIT에 의해 분류된 Cluster는 장거리를 이동하거나 바다를 거쳐온 기단일수록 $PM_{2.5}$ 의 농도는 낮으며, 육지를 거쳐 짧게 이동한 기단일수록 $PM_{2.5}$ 의 농도가 높게 나타났다.
- 미세먼지 생성 원인을 파악하기 위한 $PM_{1.0}$ 측정분석에 있어 고해상도 비행시간 질량분석기를 효과적으로 활용하기 위하여, 이에 대한 정도관리 기법을 수립하였으며, 질량분석 결과를 이용한 PMF 분석방법과 가이드라인을 제시하였다.

V. 연구결과 활용에 대한 건의

본 연구에서는 지역별 $PM_{2.5}$ 특성 분석, 산업단지 주변 오염물질의 공간분포 특성 조사 및 경기권대기환경연구소를 중심으로 $PM_{1.0}$ 과 $PM_{2.5}$ 의 화학적 성분 자료의 구축과 $PM_{1.0}$ 질량분석 정도관리 및 방법론 개발을 통해 분석기법의 고도화를 도모하였다.

지역별 $PM_{2.5}$ 특성을 다각으로 검토하였고, 그 결과를 바탕으로 지역 맞춤형 미세먼지 정책의 수립 및 개선방안을 제시할 수 있으며, 화학적성분 구축 자료 및 방법론을 바탕으로 입자 생성기원 추정을 위한 과학적 연구의 고도화를 도모할 수 있을 것이다.

미세먼지 특성 및 생성원인 규명에는 실시간 $PM_{2.5}$ 의 화학적 성분 자료와 함께 질량분석을 통한 $PM_{1.0}$ 성분 자료를 구축하는 작업과 연구가 중요하며, 이 과정에서 자료의 상호 비교와 확정 그리고 검증과 해석 방법에 대해 지속적으로 개선 및 보완할 필요가 있다.

주 의

1. 이 보고서는 국립환경과학원에서 시행한 연구용역과제 결과보고서입니다.
2. 이 보고서 내용을 발표할 때에는 반드시 국립환경과학원에서 시행한 연구용역과제의 연구결과임을 밝혀야 합니다.
3. 국가과학기술 기밀유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 아니 됩니다.
4. 이 보고서와 관련된 문의사항은 주관부서인 국립환경과학원 대기환경연구과 (전화 032-560-7274)로 하시면 됩니다.