

“초미세먼지, 농도만으로는 부족하다”

GIST, 초미세먼지 성분 정보까지 분석해 건강 유해성 정밀 예측하는 AI 모델 개발

- 환경·에너지공학과 박기홍 교수팀 한국과 중국의 도심농촌에서 초미세먼지 성분독성 데이터 수집해 초미세먼지의 유해성과 원인 진단·예측하는 모델 개발... 실측 독성 데이터 없어도 활용 가능
- '설명 가능한 AI' 기술로 망간·납·구리 등 주요 산화 독성 성분 밝혀내고 성분 간 상호작용까지 규명... 건강 위험성 정밀 예측 가능해 국민 건강 위험 예방과 정책 수립에 기여 기대
- 국제학술지 《Journal of Hazardous Materials》 게재



▲ (왼쪽부터) GIST 환경·에너지공학과 박기홍 교수, 이승혜 박사과정 학생

국내에서는 초미세먼지의 위험성을 주로 농도* 기준으로 판단하고 있다. 그러나 실제 건강에 미치는 영향은 농도뿐 아니라, 초미세먼지를 구성하는 유해 물질의 종류와 양에 따라 크게 달라진다.

따라서 건강에 미치는 영향을 보다 정확히 파악하기 위해서는 초미세먼지에 함유된 유해 성분과 독성 정보를 함께 살펴보는 것이 매우 중요하다.

* 농도(concentration): 공기 중 특정 물질이 일정 부피 안에 얼마나 포함되어 있는지를 나타내는 수치로, 단위는 보통 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (마이크로그램/세제곱미터)로 표시된다. 초미세먼지의 농도가 높을수록 호흡기 및 심혈관계 질환 발생 위험이 증가하는 등 건강에 미치는 영향이 커지므로, 농도는 국민 건강을 평가하고 관리하는 중요한 지표로 활용된다.

광주과학기술원(GIST, 총장 임기철)은 환경·에너지공학과 박기홍 교수 연구팀이 중국과 한국에서 수집한 초미세먼지(PM2.5)의 화학 성분과 산화잠재력(oxidative potential, OP)*을 분석하고, 이를 기반으로 한 인공지능(AI) 예측 모델을 개발하는 데 성공했다고 밝혔다.

연구팀은 초미세먼지의 농도만으로는 인체 건강에 미치는 영향을 충분히 설명할 수 없다는 점에 주목해, **미세먼지가 체내에서 유발하는 산화스트레스 능력(산화잠재력)을 새로운 건강위험 지표로 활용했다.**

* **산화잠재력(oxidative potential, OP):** 미세먼지가 체내에서 산화스트레스를 유발할 수 있는 능력을 나타내는 지표. OP가 높을수록 인체 내 활성산소를 생성할 가능성이 커져 호흡기 및 심혈관계 등 건강에 미치는 영향이 증가할 수 있다.

초미세먼지*의 유해 성분과 독성을 직접 측정하는 데는 많은 시간과 비용이 필요하다.

이에 연구팀은 수년간 **한국과 중국 등 국내외 도심과 농촌 지역에서 ▲농도 ▲화학적 성분 ▲산화 독성(OP)* 데이터를 동시에 수집해 AI 모델에 학습시켰다.** 그 결과, 농도와 화학적 성분만으로 산화 독성을 가장 정확하게 예측할 수 있는 최적 모델을 선별했다.

* **초미세먼지(fine particles or PM2.5):** 지름이 2.5마이크로미터(μm) 이하인 미세먼지로, 사람 머리 카락 지름의 약 1/30 수준에 불과하다. 폐 깊숙이 침투할 수 있어 호흡기 질환, 심혈관계 질환 등 건강에 직접적인 영향을 미칠 수 있다.

* **산화 독성(oxidative potential):** 미세먼지가 체내에서 산화스트레스를 유발할 수 있는 능력을 나타내는 지표로, OP가 높을수록 활성산소를 생성해 호흡기와 심혈관계 건강에 미치는 영향이 커질 수 있다.

특히 연구팀은 **'설명 가능한 인공지능(Explainable AI, XAI)*'을 적용해 초미세먼지의 산화 독성에 가장 큰 영향을 주는 화학 성분을 규명했다.**

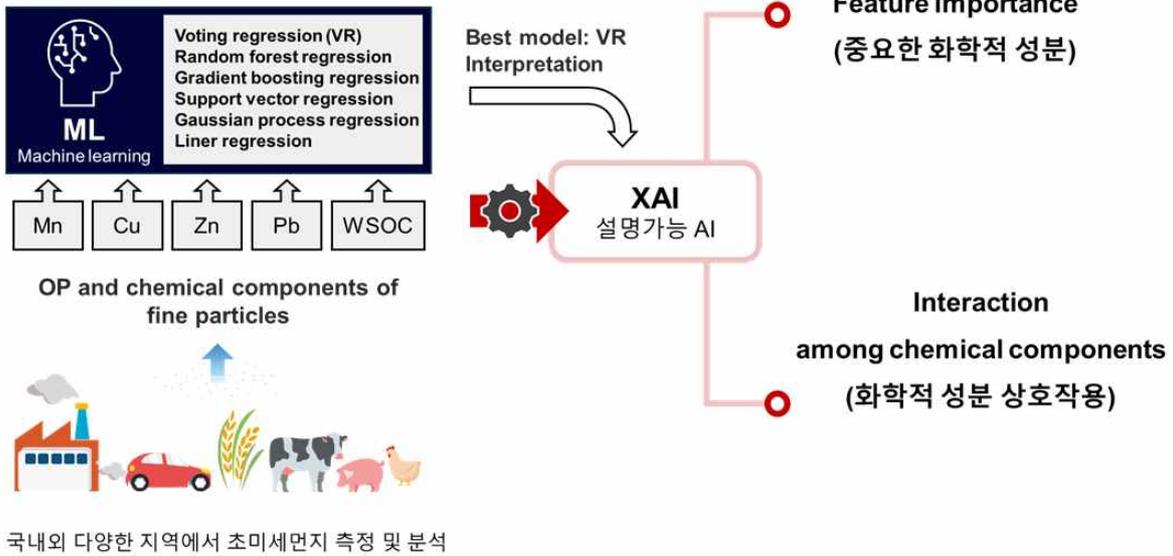
그 결과 미세먼지를 구성하는 성분 중 **▲망간(Mn) ▲납(Pb) ▲구리(Cu) ▲아연(Zn) ▲수용성 유기탄소(WSOC)가 중요한 요인임을 밝혀냈으며,** 이 중 산화 독성에 가장 큰 영향을 주는 성분은 망간(Mn)이었으며, 그 뒤로 납(Pb), 수용성 유기탄소(WSOC), 구리(Cu), 아연(Zn) 순으로 나타났다.

* **설명 가능한 인공지능(Explainable AI, XAI):** 연구팀은 초미세먼지(PM2.5)의 화학적 성분과 농도를 활용해 산화 독성(oxidative potential, OP)을 예측하는 인공지능 모델을 개발했으며, 설명가능 AI 기술을 적용해 모델이 어떻게 산화 독성을 판단했는지 그 근거를 확인할 수 있다. 이를 통해 예측 결과의 신뢰성을 높이고, 건강 영향 평가 및 정책 수립에 보다 투명하게 활용할 수 있다.

또한 **XAI 분석을 통해 화학 성분 간 상호작용 효과도 규명했다.**

예를 들어, 구리(Cu) 농도가 $0.004\mu\text{g}/\text{m}^3$ (마이크로그램/세제곱미터) 이상일 경우 수용성 유기탄소(WSOC)와의 상호작용에서 강한 길항 효과(antagonistic effect, 두 물질이 서로의 영향을 약화시키는 현상)가 발생해, 산화잠재력(OP) 증가가 억제되는 현상이 관찰됐다. 이는 기존의 통계학적 분석만으로는 밝히기 어려운 **비선형적 상호작용(선형적인 비례 관계가 아닌, 복잡한 방식으로 나타나는 상호 영향)을 찾아낸 성과다.**

산화 독성 진단 및 예측 모델



▲ **설명가능 인공지능(explainable AI) 기반:** 연구팀은 초미세먼지(PM2.5)의 화학적 성분과 농도를 활용해 산화 독성(oxidative potential, OP)을 예측하는 인공지능 모델을 개발했으며, 설명가능 AI 기술을 적용해 모델이 어떻게 산화 독성을 판단했는지 그 근거를 확인할 수 있다. 이를 통해 예측 결과의 신뢰성을 높이고, 건강 영향 평가 및 정책 수립에 보다 투명하게 활용할 수 있다.

이번에 개발된 AI 모델은 **특정 국가나 지역에 국한되지 않고, 다양한 환경에서 초미세먼지의 건강 위험성을 정밀하게 진단하고 변화 추이를 예측할 수 있어,** 국민 건강 위험 예방과 정책 수립에 활용될 수 있다.

연구팀은 이 기술이 **향후 새로운 초미세먼지 건강지표 개발에도 크게 기여할 것으로 기대하며,** 실외뿐 아니라 실내에서 발생하는 미세먼지의 건강 영향에도 활용할 수 있을 것으로 보고 있다.

박기홍 교수는 “이번 연구는 미세먼지의 단순한 농도가 아니라 **화학적 특성과 구성 성분 간 상호작용까지 고려한 정밀한 건강위험 평가 방법을 제시했다는 점에서 의의가 크다**”며, “**설명 가능한 AI**” 기법을 통해 **대기오염 관리뿐 아니라 국가 정책 수립에도 과학적 근거를 제공할 수 있다**”고 말했다.

GIST 환경·에너지공학과 박기홍 교수가 지도하고 이승혜 박사과정생 등이 수행한 이번 연구는 과학기술정보통신부·한국연구재단 개인기초연구사업(중견연구) 등의 지원을 받았다.

연구 결과는 국제학술지《저널 오브 해저더스 머터리얼즈(Journal of Hazardous Materials)》에 2025년 9월 11일 온라인으로 게재됐다.

한편 GIST는 이번 연구 성과가 학술적 의의와 함께 산업적 응용 가능성까지 고려한 것으로, 기술이전 관련 협의는 기술사업화센터(hgmoon@gist.ac.kr) 를 통해 진행할 수 있다고 밝혔다.

논문의 주요 정보

1. 논문명, 저자정보

- 저널명 : Journal of Hazardous Materials (IF=11.3, 2024)
- 논문명 : Explainable AI for Predicting Oxidative Potential of Fine Particles and Key Chemical Drivers
- 저자 정보 : 이승혜(제1저자, GIST 환경·에너지공학과), 박민한(공저자, GIST 환경·에너지공학과), 이진규(공저자, GIST 환경·에너지공학과), 심연주(공저자, GIST 환경·에너지공학과), Galym Tokazhanov(공저자, GIST 환경·에너지공학과), 김준우(공저자, GIST 환경·에너지공학과), 박기홍(교신저자, GIST 환경·에너지공학과)