

“에어로졸의 역설: 청정 대기가 오히려 폭염을 부른다”

GIST, 에어로졸 저감이 폭염과 습도를 오히려 심화시키는 '기후 역설' 규명

- 환경에너지공학과 윤진호 교수가 이끈 국제 공동연구팀, 인구 고밀도 지역 분석 통해 온실가스와 에어로졸의 상반된 기후 효과 및 상대습도 상승 메커니즘 지표 냉각 증발량 감소 수증기 정체 밝혀
- ‘깨끗한 공기가 반드시 안전한 기후를 보장하지 않는다’는 역설적 사실 드러내... “기후대기 통합 고려한 정책 시급” 국제학술지 《Communications Earth & Environment》 게재



▲ (왼쪽부터) 환경·에너지공학과 윤진호 교수, 박진아 박사과정생

□ 기후변화로 인한 온도 상승뿐 아니라, 공기 중 미세입자(에어로졸)가 햇빛을 반사해 지표면을 냉각시키는 현상이 상대습도를 오히려 높일 수 있다는 연구 결과가 발표됐다. 연구팀은 이로 인해 사람이 겪는 열 스트레스가 더욱 심화될 수 있다고 경고했다.

○ 광주과학기술원(GIST, 총장 임기철)은 환경·에너지공학과 윤진호 교수 연구팀이 국내외 연구진과 함께, 에어로졸*에 의한 지표면 냉각 현상이 상대습도* 상승의 주요 원인임을 규명했다고 밝혔다.

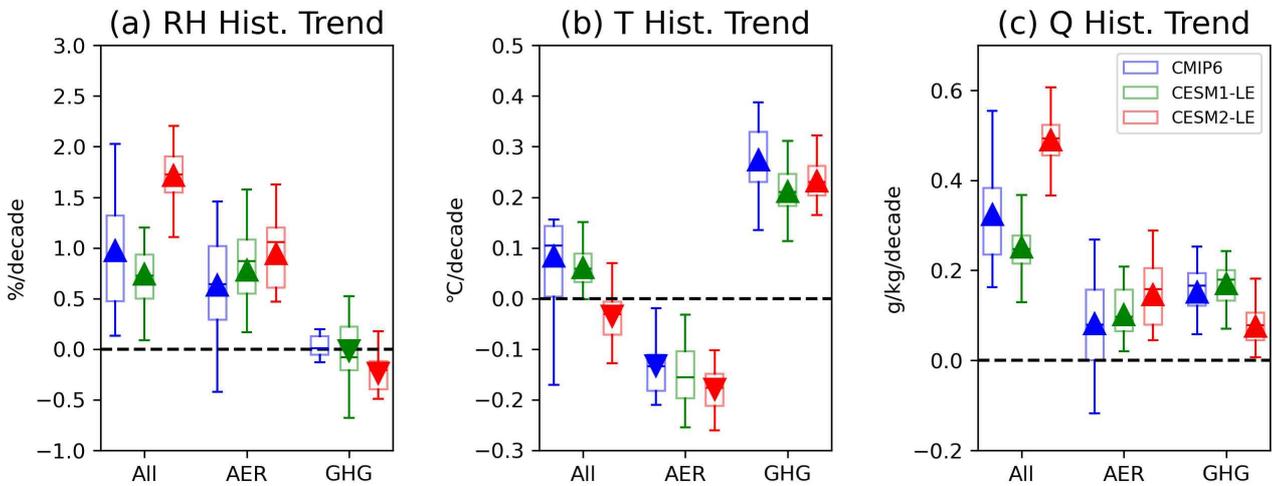
* 상대습도(Relative Humidity, RH): 공기 중에 포함된 수증기량(실제 수증기량)을 해당 온도에서 공기가 최대한으로 포함할 수 있는 수증기량(포화 수증기량)에 대한 백분율(%)로 나타낸 값이다. 절대 습도와는 다르게 수증기량이 같더라도 온도에 따라 습도가 다르게 나타나기 때문에 건조하고 습한 정도를 나타낼 때 사용된다.

* 에어로졸(aerosol): 대기 중에 부유하는 고체 또는 액체 상태의 미세한 입자를 의미하며, 자연적인 원인(화산 분출, 바람에 날리는 먼지, 해양의 소금 입자 등)과 인위적인 원인(화석연료 연소, 산업 활동, 차량 배출 등) 모두에서 발생할 수 있다. 이 입자들은 대기 중에서 햇빛을 반사하거나 흡수해 지표면의 온도를 변화시키고, 구름 생성에도 영향을 미쳐 기후 시스템에 복잡한 작용을 한다.

- 연구팀은 유럽중기예보센터가 제공하는 고해상도 대기 재분석 자료(ECMWF Reanalysis v5, ERA5)와 대규모 기후 모델 시뮬레이션*을 활용하여 약 60년간 (1961~2020)의 상대습도 변화와 그 원인을 정밀 분석했다.
 - 그 결과, 공장이나 차량 등에서 배출된 에어로졸 미립자가 햇빛을 산란시켜 지표면을 냉각시키는 동시에, 증발량 감소 → 수증기 정체 → 상대습도 상승으로 이어지는 ‘에어로졸-습도 메커니즘’을 밝혀냈다.
 - * 대규모 기후 모델 시뮬레이션: 전지구기후모델 다중앙상블 실험(Community Earth System Model Large Ensemble Project; CESM LENS) 및 다중 모형 비교 프로젝트(Coupled Model Intercomparison Project Phase 6; CMIP6)
- 이러한 메커니즘은 일정 수준의 에어로졸이 상대습도를 높이며 기온 상승을 억제하는 ‘완충 작용’을 한다는 점을 보여준다.
 - 그러나 에어로졸 배출을 급격히 줄일 경우, 이 냉각 효과가 사라지면서 기온이 빠르게 오르고, 습도와 결합된 열스트레스 지수(불쾌지수·위험지수 등)가 급격히 증가해 인체 건강과 사회 전반에 새로운 기후 리스크를 초래할 수 있다.
 - 이 같은 결과는 ‘깨끗한 공기가 반드시 안전한 기후를 보장하지 않는다’는 역설적인 사실을 드러낸다.
- 실제로 인도 북부, 방글라데시, 파키스탄 동부에 걸친 인도-갠지스 평원(Indo-Gangetic Plain, IGP) 지역에서는 최근 수십 년 동안 상대습도(Relative Humidity, RH)가 뚜렷하게 증가하고 있다.
 - 이 지역은 약 14억 명이 거주하는 세계에서 가장 인구 밀도가 높은 지역 중 하나로, 고온다습한 여름철에는 열 스트레스, 농업 생산성 저하, 전염병 확산 등의 위협이 매우 크다.
 - 특히 고온에 상대습도가 높게 유지되면 땀 증발을 막아 체온 조절을 어렵게 만들고, 노약자와 어린이 등 취약 계층의 건강에 직접적인 위협을 초래할 수 있다.
- 연구팀은 다중 위성·관측 데이터와 함께 CESM2-LE* 모델을 통해, 1961년부터 2020년까지 IGP 지역의 상대습도가 평균 약 10.3% 증가한 것을 확인했다.

* CESM2-LE(Community Earth System Model version 2 - Large Ensemble): 미국 국립대기연구소(NCAR)에서 개발한 지구 시스템 기후모델 CESM2(Community Earth System Model version 2)의 대규모 앙상블 시뮬레이션(Large Ensemble) 버전으로, 대기, 해양, 육지, 해빙 등

지구 기후 시스템의 주요 요소들을 통합적으로 모의한다. 동일한 외부 조건 아래 수십 회의 시뮬레이션을 반복 수행함으로써, 자연적인 내부 변동성과 인간 활동에 따른 외부 요인(예: 온실가스, 에어로졸)의 영향을 분리해 분석할 수 있으며, 특히 장기간의 기후 변화 추세와 그 원인을 정량적으로 규명하는 데 강점을 가진다.



▲ 온실가스와 에어로졸이 상대습도 (RH), 온도 (T), 특정습도 (Q)에 미치는 영향 비교.

60년 동안 상대습도, 온도, 특정습도의 변화 추세를 CMIP6, CESM1-LE, CESM2-LE 자료로 각각 분석한 결과를 나타낸다. 세 가지 강제시나리오 (전체 효과 포함, 에어로졸 효과만 포함, 온실가스 효과만 포함)별로 분류하였으며, 에어로졸은 지표를 냉각시키며 상대습도를 증가시키는 반면, 온실가스는 기온을 상승시키며 RH 변화가 거의 없거나 오히려 감소하도록 영향을 미치는 것을 보여준다.

□ 분석 결과, 상대습도 상승의 약 95%는 대기 중 수증기량의 증가 때문이며, 기온 감소 역시 상대습도 상승에 기여했으나(5%) 그 영향은 상대적으로 미미한 것으로 나타났다.

- 특히, 산란 효과가 큰 에어로졸(황산염, 유기탄소 등)이 지표를 냉각시킴으로써 대기를 안정화시키고 수증기 축적을 유도해 상대습도가 높아지는 일련의 과정을 주도한 것으로 확인됐다.

□ 또한 연구팀은 온실가스(GHGs)*와 에어로졸의 영향을 각각 분리하여 파악하기 위해 단일 인위 강제력(single forcing)* 실험도 수행했다.

- 그 결과, 온실가스는 지표면 온도를 상승시켜 상대습도를 낮추는 반면, 에어로졸은 지표면 온도를 낮추어 상대습도를 높이는 정반대의 효과를 보였다.

* 온실가스(Greenhouse Gases, GHGs): 대기 중에서 지구로 들어오는 태양복사 에너지는 통과시키면서, 지구에서 방출되는 적외선 복사를 흡수해 대기 중에 열을 가두는 기체들을 말한다. 주요 온실가스에는 이산화탄소(CO₂), 메탄(CH₄), 아산화질소(N₂O), 수증기(H₂O), 그리고 인공적으로 생성된 플루오르화가스 등이 포함되며, 이들은 지구 표면과 대기의 온도를 상승시키는 역할을 한다. 온실가스 농도의 증가는 지구 온난화와 기후변화의 주요 원인으로 꼽히고 있다.

* **단일 인위 강제력(single forcing)**: 여러 인위적 요인 중 하나만을 독립적으로 고려하여 해당 요인이 기후 시스템에 미치는 순수한 영향을 분석하는 개념이다. 이를 통해 온실가스, 에어로졸, 토지 이용 변화 등 다양한 인위적 원인이 기후에 끼치는 개별적 영향과 메커니즘을 명확히 이해할 수 있으며, 복잡한 기후 변화 원인을 분리해 평가하는 데 중요한 역할을 한다.

□ 예컨대, 온실가스만 변화시킨 경우 수증기는 증가했지만, 온도 상승으로 인해 상대습도는 오히려 감소하는 경향을 보였다.

◦ 반면, 에어로졸만 변화시킨 경우에는 지표면 온도가 떨어지면서 상대습도가 상승하는 결과가 나타났다.

□ 연구팀은 다양한 미래 기후 시나리오 분석을 통해, 향후 상대습도가 일정 시점 이후 정점에 도달한 뒤 하락세로 전환될 수 있다고 전망했다.

◦ 특히 고배출 시나리오(SSP3-7.0, SSP5-8.5)에서는 2040년 전후 ‘냉각 상실-급격 가열’ 전환점이 나타나 상대습도가 정점을 찍고 하락하면서 폭염 심화 가능성이 큰 것으로 나타났다.

◦ 반면, 저배출 시나리오(SSP1-2.6, SSP2-4.5)에서는 온난화 속도가 완만하고 에어로졸도 점진적으로 줄어들어, 상대습도가 비교적 안정적으로 유지되거나 소폭 증가하는 경향을 보였다.

◦ 이러한 상반된 결과는 향후 대기오염 저감 정책으로 에어로졸 농도가 줄어들 경우 예상치 못한 상대습도 감소와 기온 상승이 동시에 발생할 수 있음을 의미하며, 온실가스와 에어로졸의 복합적 영향을 함께 고려한 기후 정책 수립이 필요하다는 것을 시사한다.

□ 윤진호 교수는 “온실가스와 에어로졸이 서로 정반대 방향으로 기후에 영향을 미친다는 이중성을 간과하면, ‘깨끗한 공기’가 오히려 단기적인 폭염과 습도 위험을 키울 수 있다” 며, “IGP처럼 인구 밀도가 높은 고위험 지역에서는 온실가스 감축과 에어로졸 저감 정책을 어떻게 조화롭게 추진하느냐에 따라 인류가 마주하게 될 기후 위험의 양상이 크게 달라질 것” 이라고 말했다. 또한 “우리나라 역시 기후와 대기를 함께 고려하는 통합 전략의 수립과 실행이 시급하다” 고 강조했다.

◦ 이번 연구의 제1저자인 박진아 박사과정생은 “높은 습도는 땀 증발을 막아 체온 조절을 방해하고, 습구 온도 등 열 스트레스 지표를 폭발적으로 높인다” 면서 “이번 연구는 공기질 개선과 탄소중립 정책이 반드시 통합적 관점에서

수립돼야 한다는 점을 보여준다” 고 밝혔다.

- 이번 연구는 GIST 환경·에너지공학과 윤진호 교수와 박진아 박사과정생이 주도하고, KAIST 김형준 교수, 세종대학교 정지훈 교수, APEC기후센터(APEC Climate Center) 문수연 박사 등의 국내 연구진과 다수의 국외 연구자들이 참여한 공동연구로서, 한국연구재단 중견연구자지원사업 및 해외우수과학자유치사업, 기상청 기후변화 대응 연구과제의 지원을 받았다.
- 연구 결과는 《네이처(Nature)》 자매지로서 기상학 분야의 저명한 국제학술지인 《커뮤니케이션즈 어스 앤드 인바이런먼트(Communications Earth & Environment)》에 2025년 7월 8일 온라인으로 게재됐다. <끝>

논문의 주요 정보

1. 논문명, 저자정보

- 저널명 : Communications Earth & Environment (Impact Factor: 8.1)
기상학 분야 상위 10% 이내(6/110)의 저명한 국제학술지
- 논문명 : Aerosol-induced surface cooling elevates relative humidity on the Indo-Gangetic Plain
- 저자 정보 : Jina Park(제1저자, GIST 박사과정생), S. -Y. Simon Wang, Hyungjun Kim, Jee-Hoon Jeong, Nobuyuki Utsumi, Suyeon Moon, Jin-Ho Yoon (교신저자, GIST 교수)