

겨울의 미세먼지, 여름의 오존 고농도 개선 위해 계절별 VOC 배출원 분석 통해 관리 방향 설정

서울의 초미세먼지·오존 문제 개선하려면 휘발성유기화합물 배출관리도 중요해

초미세먼지가 서울시 대기오염의 주요 문제로 떠오르면서, 서울의 대기오염물질 관리는 미세먼지 직접 배출원과 질소산화물(NO_x) 배출원에 집중됐다. 그 결과, 서울의 초미세먼지 농도가 개선되는 성과는 있었지만, 런던, 도쿄, 뉴욕 등 해외 대도시와 비교하면 여전히 추가적인 노력이 필요한 상황이다.

최근 국내외 연구에서는 겨울철 동북아 도시지역 초미세먼지의 추가적인 개선을 위해서 그동안 관리가 미흡했던 휘발성유기화합물(VOC) 배출관리가 필요함을 강조하고 있다. 겨울철 VOC는 대기의 산화력에 영향을 미쳐 질산염 등 2차 미세먼지 생성을 강화하기도 하고, 2차 생성 유기물질(Secondary Organic Aerosol: SOA)의 전구물질로 작용해 초미세먼지 농도 증가에 기여한다. 여름철에는 VOC와 NO_x가 광화학 반응해 생성되는 오존이 문제가 된다. 오존은 초미세먼지, 이산화질소 등 다른 기준성 대기오염물질과 달리 서울을 포함한 국내에서 증가 경향을 보여 초미세먼지와 함께 주요 관리 대상이다. VOC 배출관리가 서울의 오존 농도 개선을 위해 필요하다는 의견은 꾸준히 제기돼 왔다.

겨울 미세먼지, 여름 오존 개선 위해 관측자료 기반 계절별 VOC 배출원 파악해야

VOC는 단일성분이 아니고 상온, 상압에서 기체 상태로 존재하는 유기성 물질을 총칭하므로 그 성분과 배출원이 다양하다. 일부 VOC 성분 및 배출원은 온도에 영향을 받아 계절별 배출 수준이 다를 수 있다. 겨울의 미세먼지, 여름의 오존 개선을 목표로 한다면 계절별 주요 VOC 배출원 파악이 우선돼야 한다.

대기오염물질의 배출원은 주로 국가의 대기정책지원시스템(CAPSS)에서 제공하는 공

식 배출량 자료를 이용해 파악된다. 배출원별 배출량은 각 배출원의 활동도 자료와 배출계수로 산정된다. 배출량 산정 결과의 불확도가 상대적으로 높은 대기오염물질 중 하나가 VOC이다. VOC는 특정 배출구가 없이 배출되는 비산배출 특성이 강하고, 소규모 배출원도 많아 누락 배출원의 존재 가능성이 큰 것이 불확도를 높이는 원인 중 하나다. 이처럼 불확도가 큰 것으로 알려진 배출량 자료(CAPSS)로만 VOC 배출원을 파악해 관리하는 방식의 한계를 고려하면, 관측자료 기반의 배출원 추정방식도 활용할 필요가 있다.

VOC 배출원 분석의 90%, PMF 수용모델 이용...최근 개선된 방식 검토 필요해

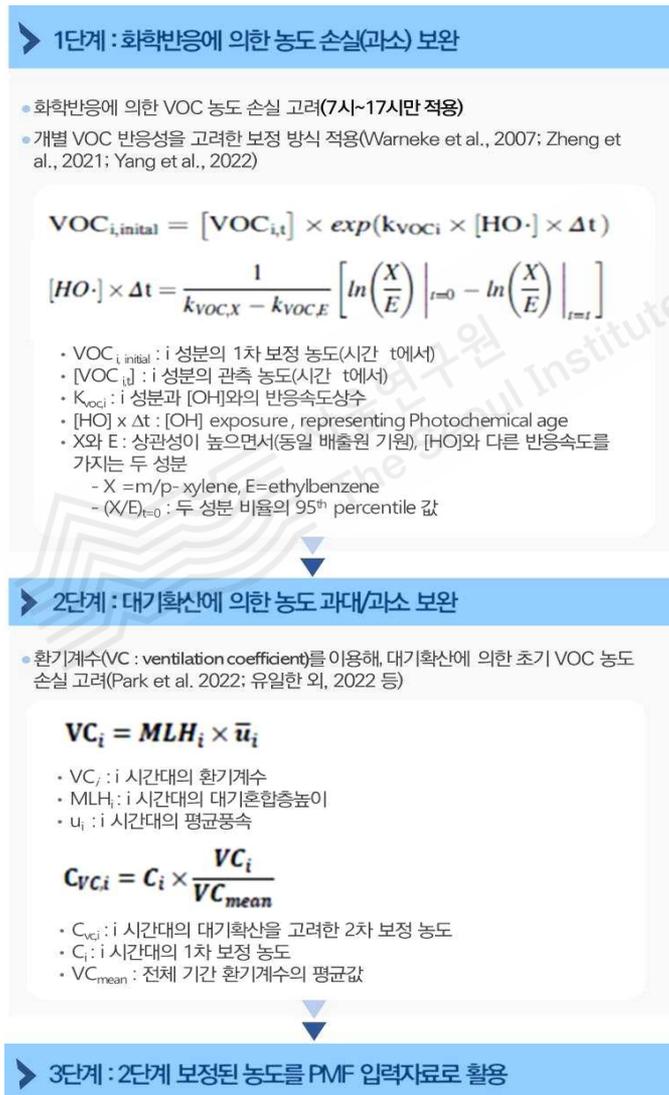
최근 VOC 배출원 정량분석 연구의 약 90%가 PMF 수용모델을 이용한 것으로 조사됐다. 수용모델의 대전제는 각 배출원의 화학적 지문(source profile)이 배출지점에서 수용지점으로 이동하면서 보전되는 것이다. 즉 배출원에서 성분 농도가 관측지점까지 이동 과정에서 어떤 변화(반응 및 확산에 의한 제거, 생성 등) 없이 유지됨을 의미한다. 하지만 일부 VOC 성분들은 반응성이 커서 배출원에서 관측지점까지 이동 과정에서 화학반응으로 손실될 가능성이 있고, 풍속, 혼합고 등 기상인자 변화에 따른 대기확산으로 오염물질이 농축되거나 희석되어 실제 배출원에서의 농도가 변화될 가능성도 있다. 즉 화학반응과 대기확산으로 배출원에서의 초기 농도가 변화될 가능성을 고려하지 않고 관측 농도로 얻어진 수용모델 결과는 배출원의 실제 영향을 과소 또는 과대평가할 가능성이 있다는 것이다.

최근 연구에서는 VOC 성분의 초기 농도(화학반응을 거치지 않은 농도)가 관측 농도보다 1~2.5배 높다는 결과나 초기 농도의 35% 정도가 광화학반응으로 손실된다는 결과 등이 보고되고 있다. 이러한 수용모델의 한계를 고려한 PMF 모델 절차를 개선한 사례들이 늘고 있어, 국내에서도 VOC 배출원 분석에 개선된 방식 적용을 검토할 필요가 있어 보인다.

이 연구는 화학반응·대기확산에 따른 VOC 초기 농도 고려한, 개선된 PMF 적용

대기확산과 화학반응으로 변화되기 이전의 초기 농도를 고려해 기존 PMF 수행 방식

을 보완하는 국내의 연구사례들을 분석했다. 화학반응에 의한 초기 VOC 농도 손실을 보정하는 방법으로는 개별 VOC 성분의 광화학반응 특성을 반영하는 방식을 선택했다. 대기확산을 고려하기 위해서는 풍속(u)과 대기혼합층높이(MLH)에 기반한 VC(환기계수)로 관측 농도를 보완하는 방식을 적용했다. 대기확산과 광화학반응에 의한 개별 VOC 성분의 농도 변화를 모두 반영해 관측 농도를 보정 후 PMF를 수행한 연구는 드물다. 이 연구는 개선된 PMF 수용모델을 국내 처음으로 적용한 사례로 [그림 1]은 PMF 수용모델 수행 절차를 보여준다.



[그림 1] 개선된 PMF 수행 절차(화학반응·대기확산 고려한 관측 농도 보정)

여름철 오존 고농도 시기, 광화학반응·대기확산에 따른 농도 보정 효과 가장 커

관측 농도를 그대로 사용한 기존 PMF 모델, 광화학반응과 대기확산을 고려해 보정 농도를 사용한 개선된 PMF 모델, 이 두 가지 모델의 분석 결과를 비교하면, 광화학반응과 대기확산에 의한 농도 보정 효과는 여름철에 가장 컸다. 미세먼지 고농도 시기의 TVOC(VOC 성분의 합) 농도는 보정 후에도 큰 차이를 보이지 않은 반면, 여름철 오존 고농도 시기에는 보정 농도가 관측 농도보다 약 33% 증가했다. 배출원별로는 반응성이 큰 성분으로 구성되고 온도와는 양의 상관성이 있어 여름철에 배출이 증가하는 Biogenic, 유기용제, 증발 관련 배출원의 농도가 증가 경향을 보였다. 특히 반응성이 큰 아이소프렌(isoprene)이 주요 구성성분인 Biogenic 배출원의 기여 농도와 비중이 여름철에 크게 상승했다. 따라서 여름철 VOC 배출원 분석에는 관측 농도를 보정해 입력자료로 사용하는 개선된 PMF 방식이 적용돼야 할 것으로 보인다. 다만, 관측 농도의 보정 과정에도 불확실성이 있다는 우려가 있어 개선된 PMF 분석 결과만을 단독으로 활용하기보다는 기존 PMF 결과와 함께 사용해 VOC 배출원별 기여도 결과를 범위로 제시하는 것이 적절할 것으로 판단된다.

겨울(미세먼지)·여름(오존) 따른 배출원 달라...계절별 배출원 관리 정책 추진해야

개선된 PMF 분석 결과뿐 아니라 기존 PMF 분석 결과도 계절별 VOC의 주요 배출원이 다르게 나타났다. 미세먼지 고농도 시기인 겨울에는 차량, 난방 관련 연료사용 배출원의 VOC 기여도가 70% 수준으로 높고, 유기용제와 가스 누출/증발 배출원이 나머지를 차지했다. 반면, 오존 고농도 시기인 여름철에는 연료사용 배출원이 33~43%, 유기용제, 가스 누출/증발, Biogenic 배출원이 나머지 VOC 배출 비중을 고루 나눠 갖는 것으로 분석됐다.

결과를 종합하면, 미세먼지 고농도 시기인 겨울철에는 주요 VOC 배출원이 차량, 난방 등 연료사용(기여도 70%)이므로 연료사용 관련 배출원 관리에 집중할 필요가 있다. 서울에서는 미세먼지 계절관리제의 주요 관리 배출원도 자동차와 난방시설이므로 이 시기에는 기존의 관리 대상에 집중한 정책 추진이 적절하다. 오존 고농도 시기인 여름철에는 연료사용 배출원뿐 아니라 유기용제, 가스 누출/증발, Biogenic 배출원이 고루 중요해 각 배출원에 대한 관련 정책과 수단 발굴이 필요하다. Biogenic은

자연 배출원으로 단기적인 배출관리는 어렵지만, 중장기적으로 서울시 수목 식재 계획에 아이소프렌(isoprene) 등 VOC 배출이 적은 수종 선정을 고려사항으로 포함할 필요가 있다.

[표 1] 계절별 VOC 배출원 기여도(기존 및 개선된 PMF 결과 종합)

구분	VOC 배출원별 기여도
미세먼지 고농도 시기 (12월~3월)	<ul style="list-style-type: none"> 유기용제(최대): 28~29% 연료사용(차량, 난방 등): 71~72%
오존 고농도 시기 (5월~9월)	<ul style="list-style-type: none"> 유기용제: 23~26% 연료사용(차량 등): 33~43% Biogenic: 3~18% 가스 누출/증발: 26~28%

향후 VOC 배출원 재분석, 오존·미세먼지 생성 잠재력 등 고려한 추가연구 필요해

이 연구는 2020~2021년 관측자료를 활용해 분석했다. 연구 대상 기간이 코로나 기간으로 실제 VOC 배출 상황이 반영되지 않았을 가능성이 있어 향후 코로나 상황이 종료된 기간을 대상으로 연구가 추진될 필요가 있다. 수용모델을 활용한 VOC 배출원 분석을 종로 측정지점만을 대상으로 진행한 한계도 있다. 서울 내 4개 측정지점에 대한 정성분석 결과, 겨울에는 측정지점별 VOC 특성에 차이가 작으나 여름철에는 차이가 클 것으로 나타나, 여름철에는 다른 측정지점에 대한 분석이 특히 필요하다. 겨울철 외부 영향이 증가할 가능성을 고려하면, 연구범위를 수도권으로 확대에 수도권 측정지점에 대한 분석도 추진해 함께 해석하는 것도 필요하다.

최근의 또 다른 연구 방향은 단순히 VOC 성분 농도와 배출원의 양적 기여도 외에 VOC 성분과 배출원의 오존 생성 잠재력과 미세먼지 2차 생성 잠재력을 고려한 분석으로 가고 있다. 향후에는 단순한 양적 농도 분석을 넘어 오존과 미세먼지 2차 생성에 대한 잠재력을 고려한 분석으로 연구가 발전되어, 미세먼지와 오존 관리 차원에서 더 효율적이고 효과적인 정책적 시사점을 제공할 수 있어야 한다.