

디젤 극미세 입자의 인체 영향

Health Effect of Diesel Exhausted Nano-particles



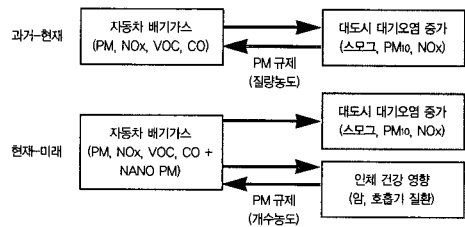
신 동 천 / 연세대학교
Dong Chun Shin / Yonsei University

머리말

최근 자동차에서 배출되는 입자상 물질(PM, Particulate Matter)에는 수많은 발암물질이 흡착되어 있고, 특히, 나노미터(10억분의 1미터) 수준의 극미세 입자(Nano Particles)가 배출되는 것으로 알려짐에 따라 자동차 배출물질에 대한 인식이 달라지고 있다. 지금까지는 자동차에서 배출되는 배기 가스(탄화수소류, 질소산화물, 일산화탄소 등)가 도시 대기의 주요 오염물질로 간주되고, 이들 중심의 규제·관리가 시행되어 왔으나, 최근 자동차에서 배출되는 극미세 입자로 인한 인체 유해 영향 연구가 진행되면서 자동차 배출물 중 극미세 입자를 규제하려는 활동이 유럽, 일본 등지에서 활발하게 진행되고 있다.

과거 자동차 배출물질은 대기오염에만 초점이 맞추어졌으며, PM의 경우 질량농도로 규제를 해온 실정이다. 그러나 앞으로는 오염물질에 극미세 입자를 포함하여야 할 것이며, 극미세 입자의 특성을 감안하여 질량농도와 동시에 개수농도를 평가하여 이로

인한 암이나 호흡기 등의 인체 영향을 정확하게 인지할 필요가 있다(그림 1).



〈그림 1〉 자동차 배출물질에 대한 인식 변화

특히 자동차에서 배출되는 극미세 입자는 대기 중으로 확산, 이동하여 물리화학적 반응을 통해 대기 환경에 영향을 미치고, 대기 중 체류하는 극미세 입자는 인체의 호흡기를 통해 폐로 침투하여 유해 영향을 유발할 수 있다. 그러므로 자동차에서 배출되는 극미세 입자를 효과적으로 규제하고 관리하기 위해서는 극미세 입자의 측정 및 환경거동 특성을 규명하고, 이러한 기초 연구를 바탕으로 대기오염의 기여도 평가, 인체 위해성 평가 및 제어 기술 개발에

대한 연구가 필요한 시점이다.

이에 본 원고에서는 자동차에서 배출되는 극미세 입자에 대한 일반적 특성 및 인체 유해 영향에 대한 내용을 살펴보고자 한다.

자동차 극미세 입자의 물리화학적 성질

자동차에서 배출되는 입자는 엔진의 부하에 따라 입자 크기 분포와 농도가 달라지지만, 대부분의 경우 평균 입경이 0.05~0.1 μm (μm : 백만분의 1m)이고, 1 μm 이하인 미세 입자가 개수농도로 90% 이상, 질량농도로 70% 이상 배출되는 것으로 알려져 있다. 지금까지는 주로 질량농도를 측정하여 규제하고 있으나, 유럽을 중심으로 인체의 위해성 측면에서 중요한 개수농도를 측정하여 규제하려고 준비 중인 것으로 알려져 있다.

주행 또는 정지한 자동차의 배기관에서 배출되는 배기가스는 상대적으로 낮은 온도의 대기와 만나면서 많은 극미세 입자가 새롭게 생성되는 것으로 알려져 있다. 또한, 매우 고농도로 배출된 극미세 입자들이 서로 충돌하면서 응집 현상이 일어나 크기 분포가 시간에 따라 변화한다. 이렇게 변형되면서 입자들은 지속적으로 확산, 이동, 물리적 및 화학적 반응 등을 경험하게 된다. 이때 배기가스 자체의 특성 뿐만 아니라 희석가스로 작용하는 주위 대기질의 특성에 따라 변화 경로가 달라질 수 있으며, 이를 정확히 파악하지 않고는 극미세 입자로 인한 대기 영향과 그에 따른 인체 위해성을 정확하게 파악할 수 없다는 제한점이 있다.

극미세 입자의 독성 영향

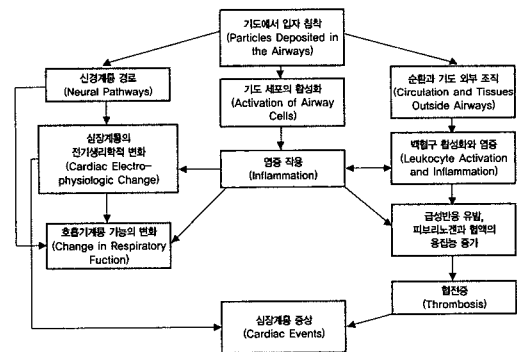
극미세 입자의 독성 영향에 있어 주요 역할을 담

당하는 것은 염증반응이며, 기도질환의 악화나 심혈관계의 영향이 중요하다. 그리고 산화성 스트레스는 세포 손상의 흔한 기전으로서 방사선이나 미생물의 증식, 허혈시 일어나는 세포 손상과 같은 결과를 야기할 수 있다.

극미세 입자는 호흡기계 자체 정화기전을 방해하고 좀 더 독성이 강한 물질을 제거하는 작용을 방해하거나 느리게 한다. 따라서 나노 크기의 입자일수록 인체 내 침투될 확률이 높을 뿐만 아니라 호흡기계 정화기전을 둔화시키고, 입자 내 독성물질이 흡착되어 있는 경우는 위해성이 증가될 수 있으며, 극미세 입자의 흡입에 따른 새로운 폐 질환의 유발 가능성과 더불어 미세입자의 흡입이 기존의 세균성 질환의 치료를 어렵게 하거나 만성화 시키는 등, 기존 질환을 더욱 악화시킬 수 있다는 사실이다.

극미세 입자는 또한 심혈관계에도 영향을 미칠 수 있다고 여겨지는데 자율신경계의 자극이나 혈전 등에 의한 심장의 직간접적인 손상으로 인해 심장리듬의 변화가 생긴다고 보고 있다.

〈그림 2〉는 극미세 입자가 호흡기계와 심혈관계에 영향을 미치는 과정을 도식하여 나타냈다.



〈그림 2〉 극미세 입자로 인한 호흡기계와 심혈관계통의 독성 영향

극미세 입자의 인체 위해성

최근 선진국을 중심으로 극미세 입자의 독성에 대한 연구결과가 발표되면서 그 위험의 심각성이 높아지고 있다. 물질이 나노미터 수준으로 작아지면 거시세계에서는 볼 수 없는 특이한 물리화학적 성질이 나타나게 된다. 극미세 입자는 물질 자체의 독성 영향도 존재하지만, 입자 크기가 작아질수록 그 표면적이 상대적으로 증가하기 때문에 유해 물질의 흡착율 및 생체조직에 대한 반응성이 증가되어 독성이 발생하는 것으로 추정하고 있다. <표 1>에 서로 다른 입경의 입자에 대해서 동일한 농도일 때, 개수 농도와 표면적의 차이를 나타내었다.

<표 1> 입자 입경에 따른 개수농도와 표면

입경(μm)	농도(μg/m ³)	개수농도(개/ml)	표면적(μm ² /ml)
2	10	1.2	24
0.02	10	2.4×10 ⁸	3,016

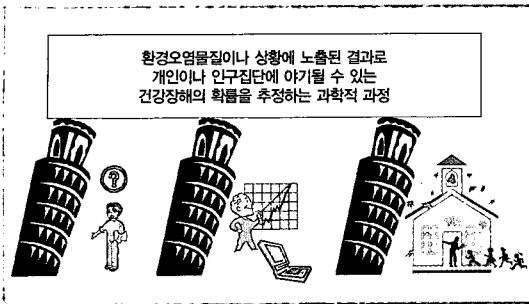
자동차는 매우 발암성이 높은 입자상 물질을 배출한다. 이들 입자에는 약 40개 이상의 발암물질이 포함되어 있다. 1998년에 미국 캘리포니아 대기자원국(California Air Resource Board, USA)에서 디젤 엔진 배출 입자는 혼합물질의 특성을 가지는 물질이라 특이할 만하다고 발표하였다. 또한, 미국 환경보호청의 경우도 자동차 배출 입자를 발암물질로 간주하고 있으며, 30개의 다른 역학적 연구를 검토한 결과에 의해 디젤 배출물질이 폐암 발생률을 증가시키는 것으로 입증되었음을 보고한 바 있다. 16개의 연구에서 폐암 위험성이 약 20~167%까지 증가되는 것으로 보고하고 있으며, 특히 디젤 배출물질의 발암성은 휘발유 자동차의 배출물질보다 2배 높은 것으로 조사되었다. 배출가스의 양을 고려하면 디젤 자동차의 발암위해는 24대의 휘발유 자동차 및 84

대의 CNG 자동차와 동일한 수준을 나타내는 것으로 보고하였다. 독일 정부 환경청도 디젤은 휘발유보다 약 80배 이상 높은 발암효과를 가진다고 보고하고 있다.

이와 같이 자동차에서 발생하는 다양한 발암물질과 극미세 입자와의 상호작용으로 인한 인체 위해 가능성은 매우 클 것으로 추정되고 있어, 선진국에서는 자동차의 극미세 입자로 인한 인체 위해성 평가 및 관리 기술 개발에 막대한 예산을 투입, 집중 연구하고 있는 추세이다. 저공해 또는 무공해 자동차 개발의 궁극적인 목표는 자동차 배출물질의 노출로 인한 인체 영향을 최소화하여 국민의 삶의 질을 높이고 건강한 삶을 유지하는데 있다. 대기오염을 저감시키는 자동차 개발의 효과를 측정하는 수단으로는 오염물질의 감축 정도도 중요한 지표가 되지만, 현실적으로 일반 국민에게 이해시킬 수 있는 지표가 필요하다. 즉, 대기오염 저감으로 인해 자동차 배출물질이나 극미세 입자로 인한 질병이나 사망이 얼마나 감소했는지, 그리고 이들 감소로 인해 화폐 가치로 환산했을 때, 얼마나 경제적인 이득이 있는지를 알려주면 매우 효과적인 지표로서 활용성이 높을 것이다.

이러한 지표가 위해도(Risk)이며, 이를 추정하는 과정이 위해성 평가 기술이다. 위해성 평가는 다양한 상황에서 환경오염물질의 노출로 인하여 나타날 수 있는 인체 악영향을 과학적으로 추정하는 과정이며, 이미 선진국에서는 이러한 기술을 통해 중요한 정책 결정을 실행하고 있다. 즉, 자동차 배출물질의 감축 목표를 설정하거나 새로운 기술 개발(예: 저공해 또는 무공해 자동차 도입)의 시행 효과를 측정하는데 이용하고 있다(그림 3).

따라서 효과적인 감축 수준 및 방법을 결정하는 정책 결정의 합리적인 지표로서 인체 위해도와 이를



〈그림 3〉 인체 위해성 평가의 정의

화폐가치로 평가하여 제시되는 경제적 지표의 활용성은 매우 높고, 이들 지표가 매우 과학적인 과정을 통해 계량화된 수치이므로 객관성을 확보할 수 있다. 또한, 다양한 이해 당사자의 의사소통의 지표로서 사회적 갈등 해소 방안으로도 필요하다.

유럽연합(EU)에서는 자동차 배출물질에 대한 인체 위해성을 평가한 후, 이들 결과를 바탕으로 인체 피해로 인한 사회적 손실 비용을 추산하고, 피해 비용을 줄이기 위해 배출물질의 감축 목표를 설정하는 등 정책 시행에 적극적으로 활용하고 있다. 또한, 국제적 협약에 따라 자동차 수출시 배출물질에 대한 위해성 평가 자료가 요구될 가능성이 높기 때문에 이에 대한 기술 개발이 필수적이다. 현재 우리나라의 경우 위해성 평가에 대한 보편적인 기술은 개발되어 있으나, 자동차와 관련하여 배출물질이나 미세입자 또는 극미세 입자에 대한 위해성 평가 기술이나 이들 평가에 필요한 근본적인 자료가 거의 없는 실정이다.

이를 위해서는 자동차 배출물질 중 화학적 조성(유해 성분을 중심으로 한)에 대한 분석 기술 및 분석 결과, 그리고 배출물질의 돌연변이원성, 유전자 독성 및 발암성에 대한 독성 평가 기술 및 평가 결과가 인체 위해성 평가를 위해 필요한 기초적인 기술이고, 반드시 뒷받침되어야 할 자료이다. 따라서 이들

물질에 대한 독성 평가 기술 및 자료가 필요하며, 이러한 기술들을 통해 구체적으로 정량적 피해로 추정하는 인체 위해성 평가 기법 및 결과의 산출이 필요하다.

국내·외 현황

선진국에서는 대기오염과 사망률 및 유병율의 증가에 대한 연구를 꾸준히 지속하고 있다. 많은 연구에서 대기오염의 가장 중요한 오염원으로 자동차를 들고 있고, 특히 디젤 자동차에서 배출되는 입자상 물질에 대한 위해성의 많은 연구가 진행되었다. 환경오염물질 중의 극미세 입자에 관한 연구는 미국, 유럽의 선진국을 중심으로 입자 크기에 따른 독성 및 위해 영향에 대한 동물 실험 연구가 진행되고 있으며, 극미세 입자로 인한 호흡기계 및 심혈관계 질환에 대한 위해성 평가 연구가 활발히 진행되고 있다. 특히, 최근 극미세 입자에 대한 인체 위해성이 알려지면서, 미세입자에서 극미세 입자에 대한 연구로의 전환이 이루어지고 있는 시점이다. 미국 환경보호청에서는 Rochester 대학과 공동으로 PM Center를 설립하여 대기 중 극미세 입자로 인한 인체 독성 기전 및 유해 영향에 대한 연구를 수행하고 있다.

국내에서는 대기오염 중 미세입자로 인한 위해성 평가를 포함한 인체 영향 관련 연구는 일부 연구자에 의해 급성적인 영향을 중심으로 진행된 바 있지만, 만성적인 영향에 대한 연구는 아직도 매우 부족한 실정이다. 특히, 자동차 오염원에 의한 극미세 입자를 초점으로 연구된 바는 없다. 연세대학교에서 미세입자에 대한 위해성 평가를 실시한 경험이 있으나, 국내에서 생산 가능한 자료(농도나 노출 인구수 등)를 제외하고 대부분은 외국의 연구결과를 활용하

여 추정하였기 때문에 불확실성이 수반된다. 따라서 환경 중 극미세 입자의 독성이나 유해성에 대한 기반 연구는 매우 부족한 현실이며, 국내 고유의 자료들이 뒷받침되어야 이로 인한 인체 위해성 예측, 위험도 저감 또는 위해 관리를 위한 전략 등에 필요한 자료들을 생산해 낼 수 있을 것이다.

맺음말

앞서 기술하였듯이 현재 우리나라에는 화학물질에 대한 인체 위해성 평가 연구는 많이 알려진 반면, 극미세 입자에 대한 위해성 평가 연구는 미미한 실정이다. 최근 국제적인 연구를 통해 극미세 입자의 유해성이 밝혀지고 있는 이 시점에서 우리나라도 극

미세 입자로 인해 나타날 수 있는 인체 위해성에 대한 평가 및 그 연구가 절실히 필요하다. 이를 위해서는 정책적인 뒷받침과 함께 극미세 입자에 대한 공학적 연구 기반이 마련되어야 할 것이고, 이와 함께 보건학적인 위해성 평가 기술이 정립되어 향후 나타날 수 있는 극미세 입자로 인한 인체 영향을 최소화하는 연구에 집중되어야 할 것이다.

현대사회에서 자동차가 차지하는 비중은 평가할 수 없는 만큼 지대하며, 이로 인한 인체 위해성 역시 간과할 수 없을 것이다. 극미세 입자의 위해성을 적절히 평가하는 기술은 앞으로 인간이 좀 더 쾌적한 환경에서 생활하는데 필요한 기술적, 정책적 해결 방안을 마련하는데 핵심 기술이 될 것이다.

(신동천 교수 : dshin5@yonsei.ac.kr)