

# 디젤 극미세 입자의 대기환경 영향 연구

## Studies on Diesel Nanoparticles in Ambient Air



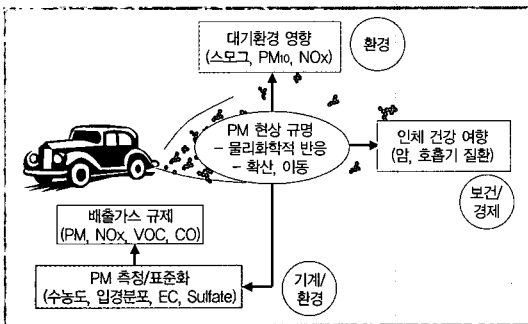
배귀남 / 한국과학기술연구원  
Gwi-Nam Bae / Korea Institute of Science and Technology

### 머리말

자동차에서 배출되는 입자상 물질(PM)은 대기 중으로 확산, 이동하여 물리화학적 반응을 통해 대기 환경에 영향을 미치고, 대기 중 체류하는 극미세 입자는 인체의 호흡기를 통해 폐로 침투하여 질병을 유발할 수 있다. 그러므로 자동차에서 배출되는 PM을 효과적으로 규제하고 관리하기 위해서는 PM 현상을 정확히 규명하고, 이러한 기초 연구를 바탕으로 대기오염의 기여도 평가, 인체 위해성 평가, PM 측정방법의 표준화 기술 등을 개발할 필요가 있다. 즉, <그림 1>에 나타난 바와 같이 자동차 배출 PM

연구는 크게 3가지(PM 측정/표준화, PM 대기환경 영향 규명, PM 인체 위해성 평가)로 구분될 수 있으며, 기계, 화공, 환경, 보건, 예방의학 전공의 연구자들의 참여에 의한 학제적 연구를 통해 결실을 맺을 수 있는 분야이다.

이러한 자동차 PM에 대한 연구는 환경부 TRM (Technical Road Map)에서 맑고 안전한 공기 프로그램의 3개 중점영역 중 미세먼지 오염개선과 오존 및 스모그 오염 개선의 2개 중점영역에 포함되어 있다. 미세먼지 오염개선에는 자동차 미세먼지 저감기술 개발로 포함되어 있으며, 이동오염원의 미세먼지 배출 저감 및 저공해 자동차 상용화를 목표로, ① 자동차 후처리 장치 상용화 및 복합 후처리 기술개발, ② 청정연료 기술 및 자동차 연료 적합성 평가 프로그램 개발, ③ 천연가스 차량 핵심 부품 및 경제적인 천연가스 차량 사용화, ④ 자동차의 연소 외 미세먼지 배출실태 조사 및 환경친화적 차량 대체 부품 개발 등의 연구가 계획되어 있다. 오존 및 스모그 오염 개선에서는 NOx 배출 저감에 초점이 맞추어져 ① De-NOx용 촉매기술 및 대형차량용 탈질기술 개발, ② 운행차, 제작차용 복합 후처리 장치 개발(PM,

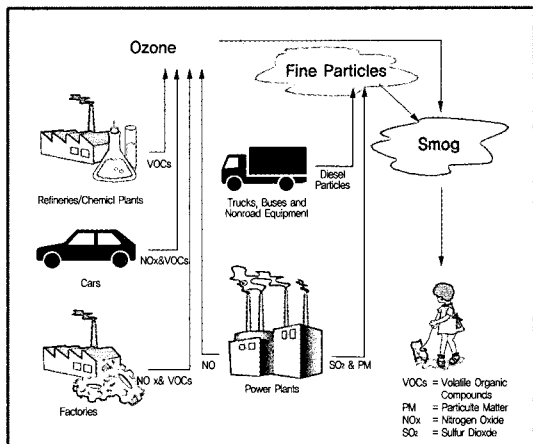


<그림 1> 자동차 PM/극미세 입자의 3대 핵심 연구 분야

SOx, NOx) 등의 연구가 계획되어 있다.

**디젤 자동차 배출가스과 대도시 대기오염**

대기 중에는 크게 배출원으로부터 직접 배출되는 1차 오염물질(Primary Pollutants)과 이러한 오염물질이 대기에서 서로 반응하여 생긴 2차 오염물질(Secondary Pollutants)이 함께 존재한다. <그림 2>에 나타낸 바와 같이 대기오염물질의 주요 배출원으로는 정제공장, 화학공장, 자동차, 일반 공장, 발전소 등이 있다. 정제공장과 화학공장에서는 주로 휘발성 유기화합물(VOCs)이 배출되고, 휘발유 자동차와 일반 공장에서는 VOCs 뿐만 아니라 질소산화물(NOx)도 배출된다. 대기 중에서 NOx와 VOCs가 태양광을 받게 되면 광화학 반응을 일으켜 오존과 미세입자(Fine Particles)가 생성된다. 발전소에서 배출되는 질소산화물도 2차 오염물질 생성에 기여하게 된다. 대기 중에 존재하는 오존은 주로 이러한 광화학 반응에 의해 생성되며, 여름철 낮 오존 농도가 120ppb 이상으로 증가하면 오존 경보가 발령된다. 또한, 대기 중에 존재하는 미세입자는 발전소나



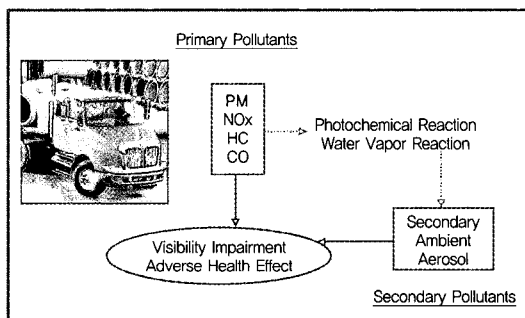
<그림 2> 주요 배출원과 대기오염 현상

경유 자동차에서 직접 배출되어 존재할 수도 있다.

배출원으로부터 직접 배출되거나 광화학 반응에 의해 2차적으로 생성되어 대기 중에 존재하는 미세입자는 빛을 산란시키거나 흡수하여 시정(Visibility)을 감소시키는 스모그 현상을 유발시킨다. 스모그 현상은 대표적인 대도시 대기오염 현상이며, 시정거리(Visual Range)는 일반인들이 대기오염 상태를 쉽게 느낄 수 있는 체감지표의 하나이다.

<그림 3>에 나타낸 바와 같이 디젤 자동차의 배기관으로부터 PM, NOx, HC, CO 등이 배출되는데, 이러한 오염물질은 1차적으로 시정을 저하시키거나 건강에 나쁜 영향을 미칠 수 있다. 또한, 광화학 반응이나 수분 흡수 등에 의해 생성된 오존이나 미세입자에 의해 다시 2차적으로 시정을 저하시키거나 건강에 나쁜 영향을 미칠 수 있다.

지금까지는 주로 기준 오염물질을 대상으로 차대동력계나 엔진 동력계를 이용하여 배출가스의 농도를 측정하여 1차 오염 측면에서 정부의 규제기준에 대응하고 있다. 그런데 정부에서 인체 위해성을 기반으로 환경 규제의 패러다임을 바꾸려고 하며, 일반인이 인터넷의 사용으로 상세하고 다양한 정보를 쉽게 접할 수 있게 됨에 따라 자동차업계에서도 배출가스 문제를 1차 오염뿐만 아니라 2차 오염 현상을 고려하여 대응할 필요가 있다.



<그림 3> 디젤 자동차 배출가스의 1차 및 2차 대기오염

### 자동차 배출 PM/극미세 입자 연구

자동차 배출가스 중 PM이 대기환경에 미치는 영향을 파악하기 위한 현장 측정 연구는 목적에 따라 크게 두 가지로 나뉜다. 즉, 실제 도로에서 주행하는 자동차에 의해 배출되는 PM의 배출계수를 정확하게 구하는 연구와 자동차에 의해 오염된 도로변의 대기질 상태를 파악하는 연구로 구분된다. 첫번째 목적을 달성하기 위해 4가지 방법이 사용되고 있다. ① 실험실 동력계 시험, ② On-road Method(Car-chasing : 실제 주행하는 자동차의 뒤를 따라가면서 측정), ③ 도로 터널 측정을 통해 단일 또는 다양한 종류의 자동차에서 배출되는 배출가스를 총체적으로 측정, ④ 도로변에서 측정한 결과를 이용하여 기상장을 고려한 수치모델을 적용. 두번째 목적으로 도로 주변에서 대기질을 측정하고 있는데, 도로로부터의 거리에 따른 입자의 변화 특성을 파악하기도 하고, 수용모델을 이용하여 디젤 자동차의 대기질 기여도 등을 추정하고 있다.

실험실에서 동력계 시험(Dynamometer Test)에 의한 배출가스 측정 연구들에 의하면 연료 조성, 엔진 상태, 엔진 회전수, 부하, 희석비, 희석가스의 온습도, 샘플링 위치 등에 따라 입자의 배출 특성이 달라진다. 국내에서도 이러한 특성을 규명하는 연구들이 진행되고 있다. 그런데 아직까지 이러한 인자에 따른 극미세 입자의 배출 메커니즘을 종합적으로 이해하지 못하고 있으며, 표준화될 수 있는 측정 조건 및 방법들을 규정하지 못하고 있는 실정이다. 따라서 실제 대기 중으로 배출되는 특성에 가장 근접한 측정 조건을 찾아 표준화 방법으로 제시할 필요가 있다.

실험실에서의 안정화된 희석/샘플링 조건이 실제 상황과 차이가 있으므로, 직접 주행하는 자동차의

뒤를 따라가면서 배출가스를 측정하는 연구도 시도되고 있다. 그러나 이러한 경우 배출계수를 정확히 측정할 수는 있지만, 대기오염에 미치는 영향을 파악하기에는 확산, 이동, 반응의 Time Scale이 매우 짧다. 또한, 태양광에 의해 빠르게 변화되는 성분의 특성이 왜곡될 수 있다. 도로 터널 측정의 경우 Time Scale이 상대적으로 길기 때문에 시간에 따른 변화 또는 터널 위치에 따른 입자의 특성 변화를 관찰할 수 있지만, 광화학 반응에 의한 이차 입자의 생성 등을 관찰할 수 없다. 또한, 하루 이상 오랜 시간 동안의 Aging Effect를 관찰하기가 어렵다.

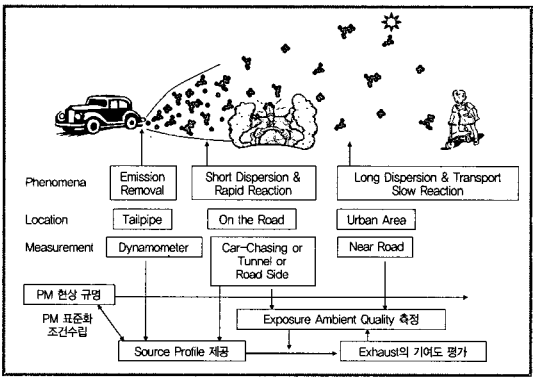
첫번째 목적으로 수행된 연구결과를 이용하여 자동차 배출가스가 대기오염에 미치는 영향을 파악하려면 대기확산 모델을 활용해야 한다. 두번째 목적으로 수행된 도로변의 대기질 측정결과를 이용하여 자동차의 대기질 기여도를 파악하기 위하여 통계적인 방법을 이용하는데, 수용 모델의 경우 자동차 배출가스의 배출원 특성(Source Profile)을 정확히 파악하여야 한다. 그런데 실제 상황에서 자동차 배출가스의 배출 특성에 불확실성이 많고 배출된 후에 많은 변화과정을 거치므로, 수용 모델 결과에 대한 불확실성이 커질 수 있다.

### 도로변 PM/극미세 입자 측정

주행 또는 정지한 자동차의 배기관에서 배출되는 배출가스는 상대적으로 낮은 온도의 대기와 희석되면서 많은 극미세 입자가 새롭게 생성되는 것으로 알려져 있다. 또한, 매우 고농도로 배출된 극미세 입자들이 서로 충돌하면서 응집 현상이 일어나 입경분포가 시간에 따라 변형된다. 이렇게 변형되면서 입자들은 지속적으로 확산, 이동, 물리적 및 화학적 반응-동을 경험하게 된다. 이때 배출가스 자체의 특성

뿐만 아니라 희석가스로 작용하는 주위 대기질의 특성에 따라 변화 경로가 달라질 수 있다. 따라서 자동차 배기관에서의 정확한 PM/극미세 입자 측정만으로는 실제 대기환경에 미치는 영향과 그에 따른 인체 위해성을 정확하게 파악할 수 없다.

그러므로 자동차 배기관에서 배출된 입자들이 실제 대기환경에서 겪는 물리·화학적 변화 과정을 규명하여야 하며, 이를 위해 <그림 4>에 나타난 바와 같은 도로변 PM/극미세 입자의 측정이 필요하다. 도로변 PM/극미세 입자 측정결과를 통해 1차적으로 자동차 배출가스에 의한 도로변 대기질 상태를 파악할 수 있고, 보행자에게 노출되는 정도를 해석하는데 기초 자료로 이용될 수 있다. 또한, 도로 위, 도로변, 그리고 주위 대기에서의 입자 특성을 서로 비교하고, 배기관에서의 입자 특성을 함께 비교함으로써 자동차 배출가스가 실제 대기환경에서 경험하는 변환 과정을 규명하여 대기오염에 미치는 영향을 파악할 수 있다.



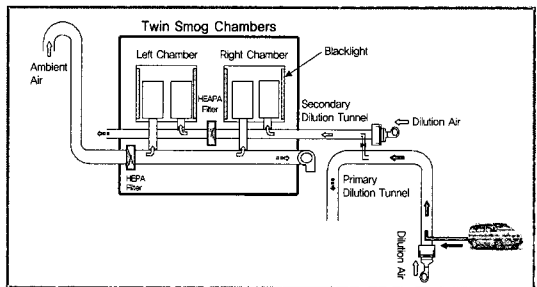
<그림 4> 도로변 PM/극미세 입자의 측정 개요

**챔버를 이용한 2차 오염 평가**

실제 도로에서 관찰된 특정 현상들을 설명하기 위해서는 적절한 가설을 세우고, 그것을 입증하기 위

한 챔버 실험이 병행되어야 현장 측정결과를 정확히 해석할 수 있다. 또한, 도로에서 자동차 배출가스가 도로변으로 이동하는데 수 십분 이내의 시간이 소요될 것으로 추정되는데, 이보다 상대적으로 긴 소요 시간이 필요한 물리·화학적 변화 과정은 도로변 측정을 통해서서는 관찰하기가 어렵다. 그런데 실내 스모그 챔버(Smog Chamber)를 사용하면, 이러한 변환 현상을 관찰할 수 있고, 그 메커니즘도 파악할 수 있을 것이다.

자동차 배출가스 중 PM의 총 질량농도를 저감시켰을 때 오히려 극미세 입자의 개수 농도가 훨씬 급증하였다고 알려지고, 미국에서 아황산가스(SO<sub>2</sub>)의 배출을 저감시켰을 때 오히려 질산염의 농도가 증가하였다고 알려진 것과 유사하게 1차 배출의 저감이 오히려 2차 오염을 심화시킬 수 있다. 따라서 배출가스 저감장치를 개발하여 배출가스 농도가 저감되고 조성이 달라질 경우 2차 오염에 대한 영향을 실내 챔버 실험을 통하여 확인할 필요가 있다. 즉, 2개의 쌍둥이 챔버에 똑같은 실제 대기를 주입한 후 하나의 챔버에는 배출가스 저감장치를 사용하지 않은 배출가스를 추가로 주입하고, 다른 챔버에는 배출가스 저감장치를 통과한 후의 배출가스를 추가로 주입하여 오존 및 극미세 입자의 생성량을 실험적으로 비교할 수 있다. <그림 5>는 자동차 배출가스 연구용 챔버 시스템의 예를 나타낸 것이다. 일본의 경우 체



<그림 5> 자동차 배출가스 연구용 챔버 시스템

적이 40~67m<sup>3</sup>인 테플론 챔버를 제작하여 자동차 배출가스의 확산 현상을 연구하고 있다.

자동차 배출가스 중 PM이 대기환경에 미치는 영향을 파악하기 위한 기존 챔버 연구는 대부분 광화학 스모그와 기후변화로 요약될 수 있다. 광화학 스모그는, ① 오존 생성과 이와 관련한 NO<sub>y</sub> 화학 반응, ② 이차 에어로졸 생성이다. 기후변화는, ① Cloud Condensation Nuclei로의 기여와, ② 태양 에너지 흡수에 따른 온실 효과에 대한 기여이다.

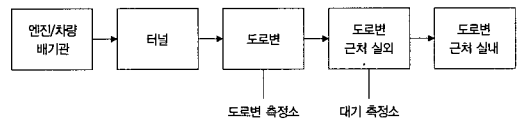
자동차 배출가스 자체가 저감되는 방안이라고 하여도 배출가스 성분의 변화에 의해 위에서 언급한 광화학 스모그와 기후변화 등에 더 많은 영향을 미칠 수 있으므로 신중하게 검토되어야 한다. 그런데 이러한 영향은 Time Scale이 길어야 현상이 뚜렷하게 관찰될 수 있기 때문에 앞에서 언급한 동력계 시험나 도로변 측정으로는 규명하기가 어렵다.

### 맺음말

환경부에서는 지금까지 배출원 관점에서 오염물질을 규제하여 왔으나, 최근 오염물질의 수용체(인간) 관점에서 대기오염물질을 규제하고 관리하는 방향으로 전환하려고 한다. 지금까지는 자동차 배출가스가 대기오염과 인체의 건강에 영향을 미칠 수 있다는 다소 막연한 전제에서 배출가스를 규제하였으나, 앞으로는 인체의 건강에 영향을 미치는 오염물질이 무엇이고, 이들의 배출원으로 어떤 것들이 있

으며, 각 배출원이 인체의 건강에 미치는 기여도에 따라 배출원의 규제 수준이 결정되는 방향으로 전환하려고 한다. 단순히 자동차 배기관에서 측정되는 배출가스에 대한 정보만으로 대기오염이나 인체의 건강에 미치는 영향을 충분히 설명할 수 없다는 것은 자명하다. 즉, 자동차 배출가스와 대기오염 또는 인체의 건강 사이의 관계를 파악할 수 있는 추가적인 정보가 필요하다.

현재 환경부의 Eco-STAR Project 사업의 하나인 무·저공해자동차사업단에서는 극미세 입자 평가관리 기반구축 과제를 수행하고 있다. 이 과제에서는 자동차 배출 PM/극미세 입자가 대기환경에 미치는 영향을 규명하기 위하여 <그림 6>에 나타난 바와 같이 극미세 입자의 오염도 수준을 5단계(엔진/차량 배기관, 터널, 도로변, 도로변 근처 실외, 도로변 근처 실내)로 구분하여 각 단계별 오염 특성을 규명하는 연구를 수행하고 있다. 특히, 오염물질로 극미세 입자의 입경별 수농도 분포뿐만 아니라 원소탄소(EC), 다환방향족탄화수소(PAHs) 등을 고려하고 있다. 이러한 측정자료들은 대기질 영향의 규명뿐만 아니라 극미세 입자의 규제 기준 설정, 독성 평가 및 인체 위해성 평가 등에도 활용될 것이다.



<그림 6> 디젤 극미세 입자의 5단계 오염도 수준

(배귀남 편집위원 : gnbae@kist.re.kr)