차량 주행 과정에서 타이어와 도로의 마찰에 의해서 발생하는 도로입자의 특성연구

이 석 환* · 김 홍 석 · 박 준 혁 · 우 세 종 · 곽 지 현

한국기계연구원 그린동력실

Properties of Roadway Particles from the Interaction between Tire and Road Pavement

Seokhwan Lee* · Hongseok Kim · Junhyuk Park · Sejong Woo · Jihyun Kwak

Engine R&D Team, KIMM, 171 Jang-dong, Yuseong-gu, Daejeon 305-338, Korea

(Received 15 July 2011 / Revised 15 March 2012 / Accepted 16 March 2012)

Abstract : A large fraction of urban PM₁₀ concentrations is due to non-exhaust traffic emissions including road dust, tire wear particles, and brake lining particles. Although potential health and environmental impacts associated with tire wear debris have been increased, few environmentally and biologically relevant studies of actual tire wear debris have been conducted. Tire wear particles (TWP) are released from the tire tread as a result of the interaction between the tire and the pavement. Roadway particles (RP), meanwhile, are particles on roads composed of a mixture of elements from tires, pavements, fuels, brakes, and environmental dust. The main objective of present study is to identify the contribution of tires to the generation of RP and to assess the potential environmental and health impacts of this contribution. First, a mobile measurement system was constructed and used to measure the roadway particles on asphalt road according to vehicle speed. The equipment of the mobile system provides PM₁₀ concentrations by Dusttrak DRX and number density & size distribution measurements of fine and ultra-fine particles by a fast mobility particle sizer (FMPS) and an aerosol particle sizer (APS). When traveling on an asphalt road at constant speed, there is a clear tendency for PM₁₀ concentration to increase slightly in accordance with an increase in the vehicle speed. It was also found that considerable brake wear particles and particles from tire/road interface were generated by rapid deceleration of the vehicle. The morphology and elements of the roadway particles were also analyzed using SEM-EDX technique.

Key words : Tire(타이어), PM₁₀ concentration(PM₁₀ 농도), TWP(타이어 마모 입자), RP(도로입자), SEM(주사전자현미경)

1. 서 론

전 세계적으로 환경규제가 강화되면서 자동차 운행 중에 발생하는 유해 배출가스와 미세먼지 그리고 타이어 마모에 의한 미세먼지에 대한 관심이 높아지고 있다. 차량이 많아지고 이동거리가 증가됨에 따라 타이어에서 발생하는 미세먼지에 의한 오

염은 커지고 있다. 또한 자동차 배출가스 중 이산화탄소는 지구 온난화의 주범으로 작용하므로 해외 및 국내에서도 자동차 연비 향상을 위하여 타이어 구름저항(Rolling resistance)에 대한 규제치를 설정하고 있다. 미세먼지의 효과적인 저감대책을 위해서는 부문별로 미세먼지 발생원을 규명하고 발생원별로 대기 중 PM₁₀ 오염도에 미치는 기여도를 산출하는 작업이 선행되어야 한다. 지금까지 난방, 차량

*Corresponding author, E-mail: shlee@kimm.re.kr

비산먼지, 차량 배기가스 등에 대한 저감대책은 다각적으로 마련되었으나 타이어 마모에 의한 미세먼지 저감대책은 잘 이루어지지 않았다. 하지만 자동차의 운행 중에 발생하는 타이어 마모입자는 대기 오염 및 인체건강에 영향을 미칠 수 있는 인자로 파악되고 있다.¹⁻³⁾ 최근 환경문제가 주요한 사회적 문제로 제기되면서 유럽에서는 TROWS(Tyre and Road Wear and Slip Assessment)등과 같은 EU project로 기업체 및 공공 연구소가 연구 컨소시엄을 이루어 3년씩 5차에 걸쳐 15년간의 장기 프로젝트를 추진하고 있으며 현재도 지속적으로 연구를 추진 중에 있다. 또한 국내 및 해외 타이어업체들을 중심으로 마모입자의 조사를 위한 Working Group를 구성하여 연구를 추진하고 있다.⁴⁾ 도로 주행 조건에서 타이어 미세먼지를 포집하는 경우 타이어 마모 입자 뿐만 아니라 도로먼지가 같이 포집되며 이를 구분하는 것이 어려우므로 타이어 마모입자만을 평가하기 위하여 도로 시뮬레이터(Road simulator)를 통해 타이어 마모입자 평가가 진행되었다.⁵⁻⁷⁾ 하지만 실험실에서는 실제 주행 조건에 비해 가혹한 환경에서 시험하게 되므로 발생된 마모입자가 크기가 증가되는 문제가 발생하며,^{1,8)} 미세입자의 성분차이로 인하여 환경 위해성 평가도 어렵기 때문에 실제 차량에 샘플링 장치를 장착하며 도로를 실제로 주행하면서 타이어 미세먼지를 측정하는 연구들도 수행되었다.⁹⁻¹²⁾ 또한 차량이 감속하는 경우 브레이크패드에서도 마찰에 의한 미세먼지가 많이 배출되므로 브레이크 마모입자의 발생 특성에 대한 연구도 함께 진행되었다.^{13,14)}

본 연구에서는 도로 주행 조건에서 도로먼지 및 타이어 마모입자를 측정하기 위하여 이동형 측정장치를 구성하였으며 차량 운행 조건에 따라서 도로입자를 우선 측정하였다. 아스팔트 재질로 건설된 고속주회로에서 정속 조건 및 급가속, 급감속 조건에서 발생하는 입자들의 특성을 파악하였으며 입자들을 필터에 포집한 후 SEM-EDX법을 이용하여 입자들의 형상 및 성분 분석을 수행하였다. 이를 통하여 향후 도로입자에 포함되어 있는 타이어 마모입자의 환경적인 영향을 파악할 예정이다.

2. 실험 방법

차량 주행 과정에서 발생하는 타이어 마모입자를 실시간으로 측정하기 위하여 미니밴을 베이스로 하는 이동형 측정 차량을 구축하여 실험을 수행하였다. 우리나라에서는 정이 박힌 Studded 타이어를 사용하지 않기 때문에 모든 실험은 일반타이어(Summer tire)를 사용하여 진행되었다. 이동형 측정 차량에는 입자의 중량농도(PM mass), 수농도 (Particle number), 입경별 개수분포 및 중량분포 (Particle number & mass size distribution)를 측정할 수 있는 장비들이 장착되어 있다. 차량 내부에 장착된 두개의 펌프를 이용하여 대기 중에 존재하는 입자(Background)와 타이어 50 mm 후단에서 샘플링 되는 먼지를 동시에 측정하여 그 차이 값을 비산먼지(Road dust) 및 타이어마모(Tire wear particle)에 의하여 발생하는 도로입자(Roadway particle)라고 판단한다. 도로입자의 중량농도는 중량 농도 측정기(DustTrak DRX; TSI)를 이용하여 측정하였으며 개수분포 및 수농도는 FMPS (Fast mobility particle sizer, 3091; TSI), 중량분포는 APS (Aerosol Particle Sizer, 3321; TSI)를 사용하여 측정하였다. APS의 경우 0.5~20 μm 범위의 미세입자 입경을 1초에 한 번씩 스캐닝 할 수 있으며 이를 토대로 입자의 중량분포 그래프를 그릴 수 있다. 또한, FMPS의 경우 6~523 nm 범위의 크기를 가지는 미세입자 입경을 1초에 한 번씩 스캐닝 할 수 있다.

Fig. 1은 실제 이동형 측정 차량에 탑재된 측정 장

Fig. 1 Mobile measurement system of road dust and tire wear particles

비 및 샘플링 포트의 위치를 나타내고 있다. 차량 전면에 샘플링 포트를 설치하여 대기 중의 미세먼지를 측정하였고 차량의 앞바퀴에서 50 mm 후단 지점에 도로입자 측정을 위한 샘플링 포트를 설치하였다. 샘플링 포트는 차량 내에 설치된 샘플링 플레넘에 연결되어 있으며 샘플링 플레넘에 연결된 펌프에 의하여 먼지들이 흡입된다. 각 샘플링 플레넘에 포집된 먼지는 여러 측정 장비들로 연결되는데 특히 작은 입자들의 손실을 방지하기 위하여 APS와 FMPS로 연결할 때는 8 mm의 지름을 가지는 전도튜브(Conductive tube)를 사용하여 2 m의 길이로 연결하였다.

차량 주행 중에 발생하는 도로입자를 측정하기 위하여 이동형 측정 차량을 운행하면서 타이어에서 발생하는 도로입자 및 대기 중에 존재하는 미세먼지를 동시에 측정하였다. 일반 도로에서는 속도를 일정하게 유지하기 어려우며 주변 차량에서 배출되는 배출가스가 나노 사이즈의 미세먼지에 큰 영향을 미치므로 측정의 신뢰성을 높이기 위하여 시외에 위치한 고속주회로에서 실험을 수행하였다. 모든 실험은 화성시에 위치한 자동차성능연구소(Korea Automobile Testing & Research Institute)의 5.5 km 고속주회로를 이용하였는데 이 도로는 아스팔트 재질로 만들어진 도로이다.

“정속주행”, “급가속, 급감속 주행”의 두 가지 운전상황에 따라서 도로입자 측정 시험을 수행하였다. “정속주행” 조건에서는 차량의 핸들을 조작하지 않고 속도를 30, 50, 70, 90, 110 km/h로 변화시키면서 차량 속도에 따른 도로입자의 발생특성을 파악하였다. “급가속, 급감속 주행” 조건은 3.5 m/s²의 가속도로 0-140 km/h까지 급가속을 하였다가 -12.5 m/s²의 가속도로 완전히 정차할 때 까지 브레이크를 사용하여 감속을 하는 조건이다.

도로입자들의 형상 및 구성 성분을 파악하기 위하여 미세먼자 샘플링 장치를 이용하여 미세먼자를 포집한 뒤 SEM (Scanning Electron Microscopy) 이미지 측정을 하였다. 도로입자를 입경별로 포집하기 위하여 포어 사이즈가 8 µm (the first coarse fraction)와 0.4 µm (the second fine fraction)인 47 mm Nuclepore polycarbonate membrane 필터를 연속적으로 장

착하였다. 포집된 미세먼지는 SEM 촬영을 하였으며 성분 분석을 위하여 SEM-EDX 분석법도 수행하였다.

3. 실험 결과

3.1 차량 속도에 따른 도로입자의 PM₁₀ 농도 및 미세입자 수농도

Fig. 2에서는 아스팔트 도로로 이루어진 고속주회로를 주행하면서 차량의 속도에 따라서 측정된 도로입자의 PM₁₀ 중량농도 결과를 나타내고 있다. 이 값은 타이어 50mm 후단에서 샘플링 된 PM₁₀ 농도에서 대기에서 측정되는 PM₁₀ 농도를 빼준 값이다. 측정시간에 따른 PM₁₀ 농도를 살펴보면 도로에 비산되어 있는 먼지들의 농도 변화에 의해서 편차가 나타나지만 차량 속도의 증가에 따라서 PM₁₀ 농도도 증가하는 경향을 나타내고 있음을 알 수 있다. 고속주회로를 사용하여 차량의 속도를 일정하게 유지하였지만 도로에 존재하는 비산먼지의 농도가 구역별로 다르기 때문에 편차가 발생하는 것으로 판단된다. 각각의 속도에서 측정된 값을 평균하여 아래쪽 그림에 나타내었는데 속도가 30 km/h에서 110 km/h로 증가하면 PM₁₀ 농도는 2배 이상 증가하였다.

Fig. 3은 차량의 속도에 따라서 APS로 측정된 타이어에서 발생하는 도로입자의 입경별 중량분포를 나타낸 결과이다. 결과를 살펴보면 차량 속도의 증가에 따라서 각 입경별 중량 농도값이 증가하는 경향을 나타내고 있다. 대기 조건에서는 0.7 µm 부근에서 피크 값을 보이고 있는데 중량 값이 60 µg/m³으로 낮은 값을 보이고 있다. 차량 속도가 증가함에 따라서 2.5 µm 부근에서 중량 농도 값이 피크 값을 나타내고 있으며 차량 속도 110 km/h 조건에서는 농도 값이 270 µg/m³까지 증가하게 된다. 이는 차량 속도의 증가에 따라서 마모되는 타이어 입자가 증가하고 도로면에 존재하는 미세먼지가 더 많이 비산되면서 많은 양의 도로입자들이 샘플링 되기 때문이다. 현재 국내에서는 10 µm 이상의 먼지인 PM₁₀을 규제하고 있는데 실제로 차량 주행 중에 발생하는 미세먼지의 대부분은 2.5 µm 부근의 PM_{2.5}인 것으로 확인되었다. 향후 국내에서도 PM_{2.5}를 규제하고자 하는 움직임이 있는데 이를 적용하게 되면 타이어

Fig. 2 PM_{10} concentrations of roadway particles according to vehicle speed

Fig. 4 Particle number concentrations of roadway particles according to vehicle speed

Fig. 3 Averaged particle mass distribution of roadway particle according to vehicle speed

마모 입자 및 비산먼지가 대기오염의 주된 요인으로 작용할 것으로 판단된다.

Fig. 4에서는 차량의 속도에 따라서 측정된 타이어에서 발생하는 도로입자의 수농도 결과를 나타내

고 있다. 위쪽 그림에서는 측정시간에 따른 입자의 수농도를 측정한 결과를 나타내고 있는데 차량 속도의 증가에 따라서 입자의 수농도도 증가하는 경향을 나타내고 있다. 동일한 속도의 경우에도 편차를 나타내고 있으며 속도가 증가하는 경우 수농도가 갑자기 증가하였다. 이는 차량의 급가속을 위하여 엔진에서 타이어로 더 큰 힘을 전달하는 경우 순간적으로 타이어나 아스팔트의 마찰력이 증가하여 타이어나 마모가 심해지고 이로 인하여 타이어나 마모입자가 많이 발생하는 것으로 판단된다. 각각의 속도에서 측정한 값을 평균하여 아래쪽 그림에 나타내었는데 속도가 30 km/h에서 110 km/h로 증가하면 타이어나에서 발생하는 도로입자의 수가 $1,500\text{개}/\text{cm}^3$ 정도 증가하게 된다. 대기 중에 존재하고 있는 입자의 수농도는 $8500\text{개}/\text{cm}^3$ 으로 측정되었는데 차량 주행 시 타이어나에서는 마모 및 비산먼지에 의하여 입자가 생성되므로 대기 상에 존재하는 입자의 수농도보다 크다.

Fig. 5 Averaged particle size distribution of roadway particle according to vehicle speed

Fig. 5에서는 차량의 속도에 따라서 FMPS로 측정 한 타이어에서 발생하는 도로입자의 입경분포를 나타내고 있다. 결과를 살펴보면 속도의 증가에 따라서 각 입경별 존재하는 입자의 수도 약간 증가하는 경향을 나타내고 있다. 특히 80 nm에서 미세입자의 수농도는 피크값을 나타내고 있다. 극미세입자(nano-particle)로 분류되는 50 nm 이하의 미세입자들도 대기 조건에 비해서 차량 속도의 증가에 따라서 존재하였지만 농도가 높지 않았다. 속도의 증가에 따라서 도로입자의 수농도 값이 약간 증가하는 것은 차량 속도의 증가에 따라서 도로면에 존재하는 미세먼지들이 더 많이 비산되기 때문이다.

3.2 차량이 급가속, 급감속 하는 경우 발생하는 도로입자 특성

Fig. 6에서는 아스팔트로 이루어진 고속주회로에서 차량을 3.5 m/s^2 의 가속도로 0-140 km/h로 급가속하였다가 브레이킹을 하여 -12.5 m/s^2 의 가속도로 정지 상태까지 급감속하는 경우 브레이크 마모입자 및 타이어와 도로의 마찰에 의해서 발생하는 도로입자의 PM_{10} 농도를 측정한 결과를 나타내고 있다. 급가속보다 급감속하는 경우 타이어와 도로의 마찰에 의해서 많은 양의 미세먼지들이 발생하고 있는 것을 알 수 있다. 차량이 정속으로 주행하는 경우에는 PM_{10} 의 농도가 $230 \mu\text{g/m}^3$ 이하로 측정이 되었는데 140 km/h의 속도에서 급감속을 하는 경우 도로입자의 PM_{10} 농도가 최대 $4,000 \mu\text{g/m}^3$ 이상으로 상당

Fig. 6 PM_{10} concentration of roadway particles on vehicle acceleration and deceleration

Fig. 7 Particle number of roadway particles on vehicle acceleration and deceleration

히 높게 측정되었다.

Fig. 7에서는 차량을 급가속, 급감속하는 경우 브레이크 마모입자 및 타이어와 도로의 마찰에 의해서 발생하는 입자들 중 560 nm 이하의 입경크기를 가지는 입자들의 수농도를 측정한 결과를 나타내고 있다. PM_{10} 농도와 마찬가지로 차량이 급감속하는 경우 많은 입자들이 샘플링 되어서 입자의 수농도 값이 매우 높은 것을 알 수 있다. 입자의 수농도값은 최대 $80,000 \text{ 개/cm}^3$ 이상이 샘플링 되었다. 차량을 급감속하는 경우 타이어와 도로의 마찰에 의하여 매우 많은 양의 입자들이 발생하는 것을 알 수 있다.

3.3 차량 주행 조건에서 발생하는 도로입자의 형상 및 성분 분석

실제로 차량 주행 조건에서 발생하는 도로입자들의 형상을 파악하기 위하여 미세입자 샘플링 장치를 이용하여 도로입자를 채취한 뒤 SEM (Scanning

Electron Microscopy) 이미지 측정을 하였다. 도로입자에 포함된 조세입자(Coarse particle) 및 미세입자(Fine particle)를 구분하여 포집하기 위하여 포어 사이즈가 8 μm (the first coarse fraction)와 0.4 μm (the second fine fraction)인 47 mm Nuclepore polycarbonate membrane 필터를 연속적으로 장착하였다. 포집된 미세먼지는 SEM 촬영을 하였으며 성분 분석을 위하여 SEM-EDX 분석법도 수행하였다.

Fig. 8과 Fig. 9는 포어 사이즈 8 μm , 0.4 μm 필터에

서 포집된 도로입자를 SEM을 이용하여 촬영한 이미지이다. Fig. 8의 경우 8 μm 이상의 크기를 가지는 입자들이 다량 존재하고 있으며 형상도 다양하였다. 필터에 포집된 미세입자들은 도로 비산먼지에 포함된 무기질, 타이어 마모입자, 차량 브레이크 마모입자, 차량에서 배출되는 배출가스 등 다양한 발생원에서 배출된 입자들이다. Fig. 9에서는 0.4 μm 이상의 크기를 가지는 입자들이 다량 관찰되었으며 형상도 매우 다양함을 확인하였다. 이 중에서도 정

Fig. 8 SEM photographs of roadway particles trapped with 8 μm pore size filter

Fig. 9 SEM photographs of roadway particles trapped with 0.4 μm pore size filter

Fig. 10 EDS spectra of roadway particles trapped with 8 μm pore size filter

육면체 형상을 하고 있는 입자들이 보이는데 이는 겨울철에 도로 결빙을 방지하기 위한 소금입자로 보인다. 50 nm 이하의 극미세입자 크기를 가지는 입자들이 다수 포함되어 있음을 알 수 있다. 미세입자들의 형상만으로 배출원을 구분할 수 없으므로 SEM-EDX 분석을 통하여 성분을 분석하였다.

Fig. 8과 Fig. 9에 나타나 있는 SEM 촬영 이미지들 중에서 각각 두 이미지를 선택하여 전체 영역을 SEM-EDX 분석하였다. Fig. 10에서는 8 μm 포어 사이즈를 가지는 필터에 포집된 도로입자들의 SEM-EDX 분석 결과 얻어진 스펙트럼을 나타내고 있는데 선택된 미세입자들을 구성하는 성분은 탄소 (C), 산소 (O), 나트륨 (Na), 마그네슘 (Mg), 알루미늄 (Al), 규소 (Si), 황 (S), 염소 (Cl), 칼륨 (K), 칼슘 (Ca), 철 (Fe)인 것으로 분석되었다. Fig. 11에서는 0.4 μm 포어 사이즈를 가지는 필터에 포집된 도로입자들의 EDX 스펙트럼을 나타내고 있는데 선택된 미세입자

Fig. 11 EDS spectra of roadway particles trapped with 8 μm pore size filter

들을 구성하는 성분의 대부분은 8 μm 필터에서 측정된 결과와 동일한 성분으로 분석되었다.

Table 1에서는 각각의 샘플에 대해서 SME-EDX 분석을 하여 얻어진 도로입자 성분들의 원자무게 (Atomic weight)를 Normalized 한 값을 나타내고 있다. 구성 성분 중 탄소와 산소 성분이 가장 높게 측정되었지만 이 성분은 별다른 의미가 없으므로 이를 제외한 성분들에 대한 Normalized 값이다. 8 μm 필터에서 포집된 도로입자의 경우 측정된 구성 성분 중 규소 성분의 원자무게 값이 가장 높았는데 이는 칼륨, 칼슘과 같이 도로 비산먼지 중 암석을 이루는 성분으로 판단된다. 나트륨, 염소 성분은 겨울철 도로의 결빙을 방지하기 위해 뿌린 소금 성분으로 보인다. 도로입자의 구성성분 중 함유량이 제법 높은 철, 마그네슘, 알루미늄과 같은 금속 성분들은 차량 배출가스, 타이어, 아스팔트, 차량의 브레이크 등 여러 가지 소스에서 발생할 가능성이 있다. 여러 가지 성

Table 1 The abundance of the major elements in the particles as atomic percentage (excluding oxygen and carbon)

Element	8 μm filter		0.4 μm filter	
	Sample 1	Sample 2	Sample 3	Sample 4
Na	8.36	8.07	1.79	55.20
Mg	3.60	3.38	1.94	0.40
Al	18.45	18.02	5.90	2.16
Si	38.77	40.18	30.79	3.75
S	1.93	1.91	9.12	0.40
Cl	10.07	9.63	17.71	36.91
K	4.51	4.21	0.82	0.11
Ca	8.36	8.58	29.22	0.74
Fe	5.93	6.03	2.62	0.34
Total	100	100	100	100

분 중 가장 주의 깊게 살펴볼 성분은 황 성분이다. 토양에는 황 성분이 포함되어 있지 않으므로 황 성분을 타이어 마모에서 기인된 성분이라 판단하였다. 황의 함유량이 높지는 않지만 대표적인 도로입자의 구성성분으로 함유되어 있다.

0.4 μm 필터에서 포집된 도로입자의 경우 첫 번째 스펙트럼에서는 측정된 구성 성분 중 칼슘, 규소 값이 매우높은 것으로 보아 도로 비산먼지 중 암석을 이루는 성분이 많이 포함되어 있는 것으로 판단된다. 타이어 마모에 의해서 발생한 성분으로 판단되는 황 성분의 경우 첫 번째 스펙트럼에서 함유량이 높은 편이다. 미세입자 영역에 속하는 입자들에 타이어 마모에 의해서 발생하는 입자들이 많이 포함되어 있는 것을 알 수 있다. 두 번째 스펙트럼의 경우에는 대부분의 구성성분이 나트륨, 염소이다. 이 스펙트럼의 대상이 된 SEM 이미지 영역에서는 대부분의 입자가 소금성분이라는 것을 알 수 있다. 겨울철 도로의 결빙을 방지하기 위하여 뿌린 소금들이 겨울철이 지나도 녹지 않고 미세입자 형태로 도로에 여전히 존재하고 있는 것이고 이것은 하나의 대기오염의 요인으로 작용할 가능성도 있다.

4. 결 론

- 1) 본 연구에서는 타이어와 도로의 마찰에 의해서 발생하는 미세먼지를 도로 주행 조건에서 실시간으로 계측하기 위하여 이동형 측정 시스템을 구축하였으며 실제 측정시스템을 사용하여 아

스팔트 도로 조건에서 차량의 속도에 따른 도로 입자의 특성을 살펴보았다. 본 연구를 통하여 다음의 결론들을 얻을 수 있었다.

- 2) 타이어 마모 미세먼지 측정용 이동형 측정시스템을 단독으로 구축하였다. 타이어에서 발생하는 도로입자를 실시간으로 계측하기 위하여 FMPS, APS, Dusttrak 등 다양한 장비들이 차량에 장착되었다.
- 3) 차량 속도의 증가에 따라서 측정되는 도로입자의 PM_{10} 농도, 입자의 수농도는 증가하는 경향을 가졌다.
- 4) 정속 주행 조건으로 아스팔트 도로를 주행하는 경우 극미세입자들은 낮게 검출되었으며 입자들의 중량분포에서 최대값은 2.5 μm 입경 부근에 위치하였다.
- 5) 차량이 급감속하는 경우 도로와의 마찰에 의해서 PM_{10} 농도 및 미세입자들의 수농도가 매우 높게 측정된다.
- 6) 도로입자들의 형상 및 구성 성분을 SEM-EDX 분석법을 통하여 측정한 결과 여러 형상을 가지는 입자들이 측정되었으며 구성 성분을 분석한 결과 도로입자들의 발생원은 도로 비산먼지, 브레이크 마모, 타이어 마모가 주원인으로 파악되었다.

후 기

본 연구는 환경부에서 지원되는 “친환경 자동차 개발사업”의 연구비로 수행되었으며, 이에 감사의 뜻을 표합니다.

References

- 1) M. Kreider, J. Panko, B. McAtee, L. Sweet and B. Finley, “Physical and Chemical Characterization of Tire-related Particles: Comparison of Particles Generated Using Different Methodologies,” Science of the Total Environment, Vol.408, pp.652-659, 2010.
- 2) M. Gustafsson, G. Blomqvist, A. Gudmundsson, A. Dahl, E. Swietlicki, M. Bohgard, J. Lindbom and A. Ljungman, “Properties and Toxicological Effects of Particles from the Interaction between Tyres, Road Pavement and Winter

- Traction Material,” Science of the Total Environment, Vol.393, pp.226-240, 2008.
- 3) T. Councell, K. Duckenfield, E. Landa and E. Callender, “Tire-wear Particles as a Source of Zinc to the Environment,” Environmental Science and Technology, Vol.38, pp.4206-4214, 2004.
- 4) ChemRisk Inc., Interim Report of Tire Wear Particle Research, 2008.
- 5) M. Gustafsson, G. Blomqvist, A. Gudmundsson, A. Dahl, P. Jonsson and E. Swietlicki, “Factors Influencing PM₁₀ Emissions from Road Pavement Wear,” Atmospheric Environment, Vol.43, pp.4699-4702, 2009.
- 6) A. Dahl, A. Gharibi, E. Swietlicki, A. Gudmundsson, M. Bohgard, A. Ljungman, G. Blomqvist and M. Gustafsson, “Traffic-generated Emissions of Ultrafine Particles from Pavement-tire Interface,” Atmospheric Environment, Vol.40, pp.1314-1323, 2006.
- 7) K. Kupiainen and H. Tervahattu, “Size and Composition of Airborne Particles from Pavement Wear, Tires, and Traction Sanding,” Environmental Science and Technology, Vol.39, pp.699-706, 2005.
- 8) M. Camatini, G. Crosta, T. Dolukhanyan, C. Sung, G. Giuliani, G. Corbetta, S. Cencetti and C. Regazzoni, “Microcharacterization and Identification of Tire Debris in Heterogeneous Laboratory and Environmental Specimens,” Materials Characterization, Vol.46, pp.271-283, 2001.
- 9) K. Kupiainen and L. Pirjola, “Vehicle Non-exhaust Emissions from the Tyre-road Interface - Effect of Stud Properties, Traction Sanding and Resuspension,” Atmospheric Environment, Vol.45, pp.4141-4146, 2011.
- 10) M. Mathissen, V. Scheer, R. Vogt and T. Benter, “Investigation on the Potential Generation of Ultrafine Particles from the Tire-road Interface,” Atmospheric Environment, Vol.45, pp.6172-6179, 2011.
- 11) L. Pirjola, K. Kupiainen, P. Perhoniemi, H. Tervahattu and H. Vesala, “Non-exhaust Emission Measurement System of the Mobile Laboratory SNIFFER,” Atmospheric Environment, Vol.43, pp.4703-4713, 2009.
- 12) T. Hussein, C. Johansson, H. Karlsson and H. Hansson, “Factors Affecting Non-tailpipe Aerosol Particle Emissions from Paved Roads: On-road Measurements in Stockholm, Sweden,” Atmospheric Environment, Vol.42, pp.688-702, 2008.
- 13) P. Sanders, N. Xu, T. Dalka and M. Maricq, “Airborne Brake Wear Debris: Size Distributions, Composition, and a Comparison of Dynamometer and Vehicle Test,” Environmental Science and Technology, Vol.37, pp.4060-4069, 2003.
- 14) B. Garg, S. Cadle, P. Mulawa and P. Groblicki, “Brake Wear Particulate Matter Emissions,” Environmental Science and Technology, Vol.34, pp.4463-4469, 2000.