

## 서울대공원 코끼리 열차 특성에 따른 탑승자의 초극미세입자 (Ultrafine Particles) 노출

주송이 · 황지희 · 함승헌\* · 이기영†

서울대학교 보건대학원 환경보건학과, \*서울대학교 보건환경연구소

### Exposures of Ultrafine Particles for Passengers of Elephant Vehicle in the Seoul Grand Park

Songyi Joo, Jihee Hwang, Seunghon Ham\*, and Kiyoung Lee†

*Dept. of Environmental Health, Graduate School of Public Health, Seoul National University*

*\*Dept. of Environmental Health, Institute of Health and Environment, Seoul National University*

#### ABSTRACT

**Objectives:** The objectives of this study were to measure passengers' exposure to ultrafine particles (UFP) and to determine effects of fuel, operating condition and position of seat.

**Method:** UFP exposures in front and back seats of the Elephant vehicle in Seoul Grand Park were simultaneously measured by a condensation particle counter (P-Trak model 8525, TSI). The measurements were conducted 7 times with diesel-powered vehicle and 3 times with electricity vehicle in one day. The vehicle stopped at 3 locations along with 2.2 km of driving route.

**Results:** UFP concentration in diesel-powered vehicle was significantly higher than electricity vehicle. At front seat of diesel-powered vehicle, average UFP exposure during stopping was significantly higher than during moving. When diesel-powered vehicle moved, UFP exposure in back seat was significantly higher than in front seat.

**Conclusions:** Passengers in the diesel-powered Elephant vehicle could be exposed to high level of UFP. The UFP exposure was associated with operation condition and position of seat.

**Keywords:** ultrafine particles, elephant vehicle, diesel-powered vehicle

#### I. 서 론

코끼리 열차는 1984년 등장 이후 서울대공원내의 대표적 이동수단으로 연간 500만명(2008년 기준)이 이용하고 있다. 총 길이 23 m, 운전자가 있는 견인차를 포함하여 총 4칸으로 이루어져 있다. 디젤을 연료로 하는 열차 7대가 운행되고 있었으나, 디젤차량 운행시 불완전연소로 인해 배출되는 매연이 주변 사

람들로 하여금 시각적·후각적 불쾌감을 느끼게 하고 건강상 영향이 있음에 문제제기 된 바 있다. 이로 인해 서울대공원에서는 2011년 7월 19일 전기를 동력으로 하는 코끼리 열차를 3대 도입하였다. 그러나 온도 변화에 민감하고, 수용할 수 있는 인원이 적은 문제로 인해 아직까지 코끼리 열차 운행에 있어 디젤차량 의존도가 절대적으로 높은 편이다.

디젤을 연료로 사용하는 차량에서 불완전 연소로

†Corresponding author: Department of Environmental Health, Graduate School of Public Health, Seoul National University, Tel: +82-2-880-2735, Fax: +82-2-745-9104, E-mail: cleanair@snu.ac.kr

Received: 9 August 2012, Revised: 17 September 2012, Accepted: 24 October 2012

인해 배출되는 배기가스의 주성분은 일산화탄소(CO), 질소산화물(NO<sub>x</sub>), 탄화수소(HC), 아황산가스(SO<sub>2</sub>)와 같은 가스상 물질과 입자상 물질이다.<sup>1,2)</sup> 입자상 물질 중 ultrafine particles (UFP)은 공기역학적 직경이 100 nm 보다 작은 미세입자로서 디젤을 연료로 사용하는 차량에서 불완전 연소로 인해 주로 배출되는 오염물질로 알려져 있으며, 호흡 시 사람의 폐포까지 깊숙이 침투해 폐질환, 천식 등 호흡기 질환 및 심혈관 질환 등의 문제를 일으킨다.<sup>3,4)</sup> 농도가 증가 할 경우 이들 질환에 의한 발병률 및 사망률 증가를 초래하게 되며 입자가 작을수록 통계적으로 유의하게 증가 한다. 미세 디젤분진은 다환 방향족 탄화수소, 헤테로 고리 화합물, 페놀류등의 돌연변이 물질, 발암물질 및 기타 독성물질을 함유하고 있으며 국제 암 연구소 (IARC)의 Group 1A 발암성 물질로서, 특히, 폐암을 일으킬 수 있다고 알려져 있다.<sup>5,6)</sup> 아직까지 디젤차량에서 발생하는 UFP의 수 농도에 대한 기준이 정해지지 않았고, 몇몇 역학조사를 통하여 UFP의 만성적 노출이 심혈관계 질환과 관련된 사망률과 통계적으로 유의한 수준의 상관성이 있음이 밝혀진 바 있다.<sup>7)</sup>

현재까지 디젤엔진을 사용하고 있는 코끼리 열차에서 배출물질의 노출에 대한 연구는 없었으며, 불쾌감과 같은 주관적인 자료에 의한 결과 보다는 측정치 등을 이용한 객관적인 자료에 의하여 현재 상황을 파악하는 것이 매우 필요한 시점이다. 최근 전기를 동력을 하는 차량으로 일부 교체하였으나 시범 운행 단계이며, 대부분 디젤차량이 사용되고 있는 실정이다. 따라서 본 연구의 목적은 코끼리 열차의 연료형태, 탑승위치, 운행상태에 따른 탑승객의 UFP의 노출 수준을 파악하고자 한다.

## II. 재료 및 방법

본 연구는 2011년 10월 19일 하루에 걸쳐 열차 이용에 따른 UFP의 노출수준을 측정하기 위해 서울대공원 내 코끼리열차 운행경로에 따라 차량에 탑승을 하여 진행하였다. 측정 당일의 평균 온도는 12.4 °C, 상대습도 44% 였다. 서울대공원 내의 코끼리 열차의 운행경로의 총 거리는 2.2 km이고 한 바퀴를 도는데 약 8분이 소요되며, 평균 16.9 km/h의 속도로 움직인다. 출발지인 종합안내소를 시작으로 대공원

과 서울랜드에서 정차를 하여 다시 종합안내소로 돌아온다. 디젤을 연료로 하는 코끼리 열차와 전기를 이용하는 코끼리 열차 이용에 따른 UFP 노출수준의 변화를 보기 위해 디젤을 연료로 하는 코끼리 열차는 7회, 전기를 이용하는 코끼리 열차는 3회를 탑승하여 총 10회 측정을 하였고, 측정위치는 열차의 앞뒤 농도비교를 위해 앞좌석과 뒷좌석에서 동시에 이루어졌다. 총 4칸의 차량 중 첫 번째 차량 가장 뒤쪽에 디젤 배기구가 있었고, 여기서 앞좌석은 두 번째 차량의 맨 앞이자 디젤배기구 바로 뒤를 의미하며, 뒷좌석은 네 번째 차량의 맨 뒷칸을 의미한다.

측정기기는 P-Trak Ultrafine Particle Counter (Model 8525, TSI, USA)를 이용하였고, 이는 입자의 수를 측정하는 기기로 UFP 수 농도 (pt/cc)를 실시간으로 측정한다. P-Trak 내부의 펌프에 의해 기기로 들어온 입자들은 포화기 관를 통과하며, 이곳에서 기체상태의 이소프로필 알코올과 섞이게 되며, 생성된 입자/알코올 혼합물은 응축기 관를 통과하며, 알코올이 입자에 응축된다. 응축된 입자들은 고정되어있는 레이저 빔을 통과하면서 광선을 방출하고 이것을 광검출기가 감지하여 입자의 수 농도를 결정한다. 측정 전, zero filter로 보정하였다. 기기의 측정 간격은 1초로 설정하여 측정을 하였다.

통계분석은 SAS 9.3 (SAS Inc., Cary, NC, USA)를 이용하여 측정된 자료를 분석하였다. 기술통계를 사용하여 농도를 표현하였고, 산술평균과 표준편차를 구하였다. 데이터 분석 시, 주행과 정차에 의한 농도 변화 비교를 위해 코끼리열차 운행시 열차의 시작점인 종합안내소에서 열차 탑승 후 열차 출발 시까지와 제1정류장인 대공원역과 제2정류장인 서울랜드에서 승객들의 승, 하차가 이루어지는 구간을 정차로 보았고 각 지점간의 열차운행을 주행으로 보았다. 자료는 샘플 수가 적어 비모수 통계를 사용하였고, 연료형태, 운행상태, 탑승위치에 따른 차이는 Wilcoxon rank-sum test를 이용하였다.

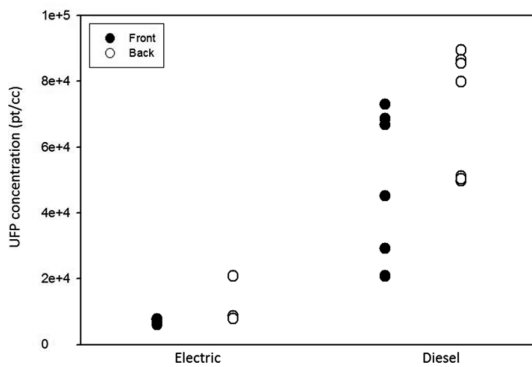
## III. 결 과

### 1. 연료형태에 따른 농도

전기차와 디젤차의 앞뒷좌석에서 UFP 노출 수준을 평가한 결과는 Table 1과 Fig. 1에 나타내었다. 전기차 앞좌석의 UFP 농도는 각각 6,065 pt/cc, 7,452 pt/cc,

**Table 1.** UFP concentrations (pt/cc) in vehicles by fuel type and seat position

Fuel Type	Seat Position	
	Front	Back
Electric	7,654±6,387	20,718±36,155
	7,452±4,455	8,660±2,311
	6,189±836	7,827±1,173
Diesel	68,578±96,265	89,389±54,246
	66,738±93,818	86,480±65,364
	NA	85,408±61,924
	72,994±98,061	79,800±60,335
	45,158±107,462	49,685±39,956
	20,768±34,206	51,034±38,753
	29,135±69,178	50,344±42,140

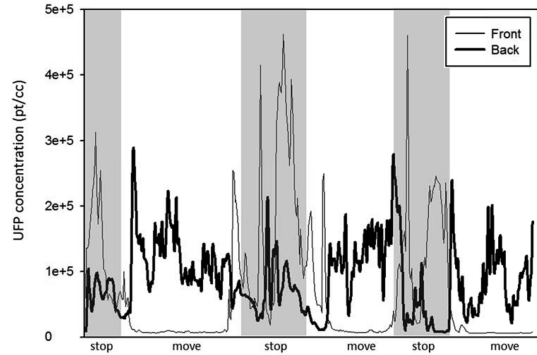


**Fig. 1.** Comparison on UFP concentrations by fuel type.

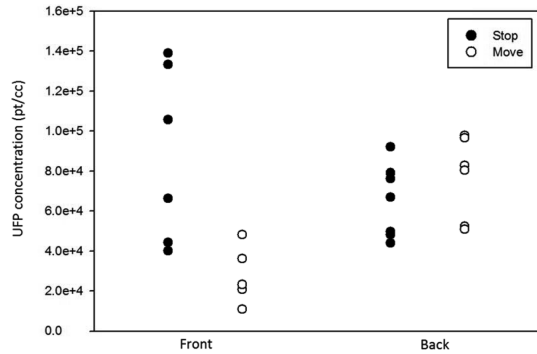
7,654 pt/cc 였으며, 동시에 측정된 전기차 뒷좌석에서의 UFP 농도는 각각 7,826 pt/cc, 8,659 pt/cc, 20,717 pt/cc 이었다. 디젤차의 앞좌석의 UFP 평균농도는 50,562±22,206 pt/cc (n=6)이고, 범위는 20,767 pt/cc~72,933 pt/cc 였다. 뒷좌석의 UFP 평균농도는 70,306±18,882 pt/cc (n=7)이고, 범위는 49,685~89,388 pt/cc 였다. 디젤차의 앞뒷좌석에서 UFP 농도는 전기차보다 모두 통계적으로 유의하게 높았다 ( $p=0.03$ ). 디젤차의 앞좌석 농도는 뒷좌석보다 약간 낮았지만 통계적으로 유의한 차이가 없었다 ( $p=0.10$ ).

**2. 디젤차의 탑승위치와 운행상태에 따른 농도**

Fig. 2는 디젤차량 탑승 시 앞뒷좌석에서 동시에 측정한 UFP 농도의 시간에 따른 변화의 한 예이다. 디젤차의 탑승위치에 따른 농도차이를 살펴보면, 뒷



**Fig. 2.** Temporal profile of UFP concentrations in operation route by seat position.



**Fig. 3.** UFP concentrations by seat position and movement status.

좌석의 UFP 평균농도가 앞좌석에 비해 약간 높았으나 통계적으로 유의한 차이가 없었다. 하지만 운행 상태에 따라서는 서로 다른 양상을 보이고 있다. 앞좌석의 농도는 정차 시에 뒷좌석보다 상대적으로 높았으나 주행 시는 낮은 농도로 유지되고 있다. 주행 시에는 뒷좌석의 농도가 앞좌석보다 상대적으로 높았다.

Fig. 3은 디젤차량의 탑승 위치와 운행상태에 따른 농도의 차이를 나타낸 결과이다. 탑승위치에 의한 주행과 정지에 따른 농도의 차이는 앞좌석과 뒷좌석에서 다르게 나타났다. 앞좌석에서 정차하는 동안 UFP의 평균농도는 88,025±43,905 pt/cc 이고, 노출 범위는 40,007 pt/cc~138,915 pt/cc였다. 앞좌석에서 주행하는 동안 UFP의 평균농도는 27,019±13,113pt/cc 이고, 노출 범위는 10,823 pt/cc~48,165 pt/cc였다. 앞좌석에서 정차 시 UFP 노출수준은 주행 시 농도보

다 통계적으로 유의하게 높았다( $p=0.03$ ). 뒷좌석에서 정차 시 UPF 노출 수준은 주행 시가 약간 높았으나 통계적으로 유의한 차이가 없었다( $p=0.202$ ).

탑승위치에 따른 결과를 살펴보면, 주행하는 동안 앞좌석의 UFP 평균농도는  $27,019 \pm 13,113$  pt/cc였으며, 범위는  $10,823$  pt/cc~ $48,165$  pt/cc였다. 뒷좌석의 UFP 평균농도는  $73,230 \pm 21,149$  pt/cc였으며, 범위는  $50,729$  pt/cc~ $97,868$  pt/cc였다. 주행하는 동안 앞좌석의 UFP 농도는 뒷좌석보다 통계적으로 유의하게 낮았다( $p=0.005$ ). 정차하는 동안 UFP 농도는 앞좌석의 농도가 뒷좌석보다 약간 낮았으나 통계적으로 유의한 차이가 없었다( $p=0.62$ ).

#### IV. 고 찰

본 연구의 결과를 통하여 디젤차의 승객이 노출되는 UFP의 농도가 전기차에 비해 현저하게 높음을 확인하였다. 본 연구에서 측정된 코끼리 열차 탑승객의 노출 수준은 디젤을 연료로 하는 스쿨버스내의 노출 수준인  $7,300$  pt/cc~ $34,000$  pt/cc의 범위의 농도 보다 상당히 높은 것으로 나타났다.<sup>8)</sup> 전기차의 농도는 낮았으나 3회 측정 중 마지막으로 측정된 뒷좌석에서의 농도가 비교적 높은 것은, 측정 시 근처에 봉고차의 운행이 있었기 때문이었다. 전기자동차는 디젤, 가솔린 등 화석연료를 사용하는 연료 자동차를 대체하기 위하여 개발되고 있다. 일부 완성차 업체에서는 판매를 시작하였지만 전기를 충전하는 시간이나 장소의 제한점 때문에 활성화되고 있지는 않다. 그러나 골프장, 공원관리용으로는 화석연료를 대체하여 사용하고 있는 실정이다. 그러나 일반 도로에서, 빠른 속도로 운행할 경우 잦은 충전을 해야 하는 제한점 때문에 아직까지 실용화되지 못하고 있다<sup>9)</sup>. 그러나 본 연구를 진행하였던 서울대공원에서는 무선충전 방식으로 주행 중에 도로에 매설된 급전선로에서 비 접촉 무선충전방식으로 전기를 공급받아 충전하는 급전선로를 총 2.2 km 중 372.5 m에 만들어 주행 시 수시로 바닥에서 전기를 제공받는다. 이러한 충전 시스템은 한 가지 경로로 운행하는 코끼리 열차에는 적합하다고 할 수 있다.

디젤차의 앞좌석에서의 UFP 노출 수준은 정차 시에 주행 시 보다 통계적으로 유의하게 높았다. 정차

시에는 엔진이 공회전하게 되는데, 앞좌석의 경우 엔진 배기구와 가까이 위치하고 있어서, 운전자와 탑승객은 디젤배출물질에 더 많이 노출될 위험이 있다.<sup>10)</sup> 디젤차량에서 배출되는 일산화탄소의 측정과 실험을 통하여 정차 시에는 차량이 이동할 때 생기는 바람에 의한 공기의 움직임이 생기지 않기 때문에 배출물질이 잘 퍼져나가지 못한다고 보고하고 있다.<sup>9)</sup> 일반적으로 자동차 정차와 주행의 시간비율을 보면 정차시간이 총 운행시간의 25%를 차지할 정도로 많은 비율을 차지하고 있다.<sup>11)</sup> 특히, 도로 옆에 정차하거나, 터미널 등에서 잠시 정차 할 때 시동을 끄지 않는 경우, 배출물질의 확산이 잘 되지 않기 때문에 운전자뿐 아니라 보행자에게도 영향을 미칠 수 있다. 이에 따라 홍콩에서는 주정차 시에 시동을 끄도록 하고 있다.<sup>9,10)</sup>

디젤차의 뒷좌석에서의 UFP 노출 수준은 주행 시에 뒷좌석에서 앞좌석보다 UFP 노출 수준이 통계적으로 유의하게 높았다. 이는 길이가 23 m인 코끼리 열차 특성에 의해, 정차 시 정체되어 있던 배기구 주변 공기의 흐름이 차량 속도로 인해 퍼지게 되어 앞 좌석의 농도가 낮아지고 차량 움직임으로 인해 배출물질이 뒷좌석에 영향을 미치게 된 것이라고 추정된다. Ning *et al*<sup>9)</sup>의 실험연구에 따르면, 코끼리 열차에서는 배출속도는 같았으나 차량이 주행시 속도를 가지기 때문에, 배출속도가 빨라진 것으로 생각해 볼 수 있다. 그러므로 배출구에서 거리가 먼 뒷좌석에서 주행 시 UFP 노출 수준에 더 많은 영향을 받았을 것이라 생각된다. 뒷자리가 배출구에서 멀리 있기 때문에 배출물질에 더 노출되지 않을 것이라는 예측에서 벗어나, 주행 시에는 앞좌석보다 뒷좌석에서 더 높은 농도를 나타냄을 본 연구를 통해 알 수 있었다.

본 연구는 두 가지 연료의 열차내의 UFP노출 수준을 하루에 반복 측정하였다. 이 방법은 온습도, 풍향 풍속 등 자연환경에 대한 영향을 고려하기 어려운 단점을 가지고 있으나 이들 인자들이 노출 수준에 미치는 영향은 미비할 것으로 사료된다. 본 연구처럼 하루에 반복측정을 진행하게 되면 자연환경 인자의 변이가 비교적 작기 때문에 측정 결과를 직접적으로 비교할 수 있는 장점이 있다. 전기차 내의 노출 수준은 비교적 안정적이고 낮기 때문에 디젤차의 측정보다 적은 횟수로 측정 하였다. 앞으로 환경

인자와 탑승객의 수 등에 대한 영향은 다양한 조건을 가지는 날에 반복측정 함으로써 추가 연구를 진행할 수 있을 것이다.

디젤엔진에서 배출되는 물질의 제어에 있어서는 발생원을 제거하는 것이 최선의 방법이지만, 단기간에 모든 디젤차량을 전기차량으로 바꾸는 것이 현실적으로 어렵기 때문에 디젤엔진에서 연소 후에 배출되는 입자들을 걸러주는 디젤 매연 여과 장치(Diesel Particulate Filter) 또는 디젤 산화 촉매장치(Diesel Oxidation Catalyst: DOC)를 차량에 장착하는 방법과 배출구의 위치를 차량위로 높게 변경하는 방법을 도입하는 것을 제안한다. 미국의 경우, 어린이들의 건강을 보호하기 위해서 디젤을 연료를 하는 스쿨버스를 대상으로 DOC 를 장착하여 배기가스의 입자상 물질에 의한 건강상 영향을 줄이고자 하였으며, 장착 후 미세먼지의 경우 20-94% 줄어 드는 것으로 나타났다<sup>12)</sup>. 또한 정차 시에 시동이 꺼지고 출발 시에 시동이 켜져서 공회전이 이루어져 정차시 에 배출량을 줄이고 연비를 향상 시킬 수 있는 Idling Stop and Go system의 장착 역시 배출원을 제어 할 수 있는 방법으로 제안할 수 있다.

## V. 결 론

첫째, 연료에 따른 전기차와 디젤차의 UFP 농도는 디젤차량이 더 높았다. 따라서 전기차의 이용은 탑승객의 UFP노출을 현저하게 줄일 수 있다.

둘째, 디젤차량에 있어서 UFP 노출수준은 차량의 운행상태 및 좌석의 위치에 따라 차이가 있음을 알 수 있다. 정차 시는 배기구에서 가까운 앞좌석에서, 주행 시에는 배기구의 위치와 열차의 이동에 따른 영향으로 뒷좌석에서 높았다. 따라서, 디젤을 연료로 사용하는 차량의 배기구에서의 매연 저감장치 설치가 탑승객의 노출 저감을 위해 필요함을 보여준다.

## 감사의 글

이 논문은 2011년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구이며 (No. 2011-0016022), 서울대학교 보건대학원 노출평가개론의 과제로 진행된 연구이다.

## 참고문헌

1. Tong H., Hung W., Cheung C. On-road motor vehicle emissions and fuel consumption in urban driving conditions. *Journal of the Air & Waste Management Association*. 2000; 50(4), 543-554.
2. Maricq M. M., Chase R. E., Xu N., Laing P. M. The effects of the catalytic converter and fuel sulfur level on motor vehicle particulate matter emissions: Light duty diesel vehicles. *Environmental Science & Technology*. 2002; 36(2); 283-289.
3. Dominici F., Peng R. D., Bell M. L., Pham L., McDermott A., Zeger S. L., Samet J. M.: Fine particulate air pollution and hospital admission for cardiovascular and respiratory diseases. *JAMA: the journal of the American Medical Association*. 2006; 295(10); 1127-1134.
4. Puett R. C., Hart J. E., Yanosky J. D., Paciorek C., Schwartz J., Suh H., Speizer F. E., et al. Chronic fine and coarse particulate exposure, mortality, and coronary heart disease in the Nurses' Health Study. *Environmental health perspectives*. 2009; 117(11); 1702.
5. International Agency For Research on Cancer (IARC): IARC: Diesel Engine Exhaust Carcinogenic, 2012.
6. Kagawa J.: Health effects of diesel exhaust emissions-a mixture of air pollutants of worldwide concern. *Toxicology*. 2002; 181-182; 349-353.
7. Knibbs L. D., Cole-Hunter T., Morawska L.: A review of commuter exposure to ultrafine particles and its health effects. *Atmospheric Environment*, 2011; 45(16); 2611-2622.
8. Zhang Q., Zhu Y.: Measurements of ultrafine particles and other vehicular pollutants inside school buses in South Texas. *Atmospheric Environment*, 2010; 44(2); 253-261.
9. Ning Z., Cheung C., Lu Y., Liu M., Hung W.: Experimental and numerical study of the dispersion of motor vehicle pollutants under idle condition. *Atmospheric Environment*. 2005; 39(40); 7880-7893.
10. U.S.Environmental Protection Agency (USEPA): Truck Engine Idling, 2002.
11. Hong ST, Lee BH, Lee DY, Shim MK, Lim JM: An Analysis of Idling Stop Time Using Real On-road Driving Data. *Journal of Korean society of Transportation* 2010; 28(1); 25-38.
12. Zhang Q., Zhu Y.: Performance of School Bus Retrofit Systems: Ultrafine Particles and Other Vehicular Pollutants. *Environmental Science & Technology*, 2011; 45(15); 6475-6482.