Transactions of KSAE, Vol. 18, No. 4, pp.48-53 (2010)

Copyright Ⓒ 2010 KSAE
1225-6382/2010/106-06

<기술논문>

자동차 배출가스에 의한 도심 교차로의 대기오염 특징

이 승 복 · 배 귀 남*

한국과학기술연구원 지구환경센터

Characteristics of Air Pollution at a Junction Area Contaminated with Vehicle Emissions

Seung-Bok Lee • Gwi-Nam Bae*

Global Environment Center, Korea Institute of Science and Technology, 39-1 Hawolgok-dong, Seongbuk-gu, Seoul 136-791, Korea

(Received 29 June 2009 / Accepted 12 December 2009)

Abstract : Roadside measurement of ultrafine particles, black carbon, and NO_x was carried out to investigate air pollution at a junction area contaminated with vehicle emissions in Seoul from March 19 to 23, 2007. Diurnal variation of ultrafine particles, black carbon, and NO_x concentrations at a roadside showed minimum at around 2-4 a.m. and two peak modes during the morning and evening rush hours. Since these pollutants might be mainly emitted from vehicles, the roadside was highly contaminated with vehicles.

Key words : Ultrafine particle(초미세입자), Size distribution(입경분포), Junction(교차로), NO_x(질소산화물), Black carbon(검댕), Diurnal variation(일변화)

1. 서 론

서울과 같은 대도시 지역에서 대기오염, 특히 미세먼지의 주요 배출원은 자동차로 알려져 있다. 미국을 비롯하여 유럽 등 선진국에서도 자동차 배출 오염물질의 허용 기준을 점차 강화하고 있으며, 우리나라 자동차 업계도 신속하게 이에 대응하기 위하여 노력하고 있다.

최근 경유 자동차에서 배출되는 디젤 초미세입자에 대한 규제 방안이 유럽을 중심으로 활발하게 논의된 후 Euro 5에 반영되어 2011년경 초미세입자의 수 농도 규제가 시작될 전망이다.[1] 이러한 국제적인 규제 동향에도 불구하고 서울 대기 중 10 μm 이하인 미세먼지의 질량농도(PM_{10})에 대한 자동차의 기여도가 절반 수준에도 미치지 못한다는 국내 연구결과가 사회적 이슈로 부각되었다.[2] 그러므로 일반 주거지역의 대기 미세먼지에 영향을 미치는 자동차 배출 미세입자에 대한 체계적인 연구가 필요하다.

이러한 대기질 영향뿐만 아니라 현대인이 일상생활에서 쉽게 노출되는 자동차 배출가스의 인체 위해성에 대한 관심도 필요하다. 미국 로스앤젤레스는 자동차에서 배출되는 오염물질로부터 학생들을 보호하기 위하여 고속도로에서 500 ft(약 168 m) 이내에는 새로운 학교를 설립하지 못하게 제한하는 규정을 2004년부터 시행하고 있다.[3] 국내에서도 자동차 배출가스에 의한 도로변의 대기오염 특성에 대한 연구들이 수행되어 왔으나, 대부분 기체상 물질의 농도와 입자의 질량농도에 국한되었다.[4-7] 최근 본 연구팀에서는 서울 서대문구 신촌동 연세대 정문 앞 성산로 도로변에서 SMPS(Scanning Mobility Particle Sizer)와 Aethalometer로 20~600 nm 범위인

*Corresponding author, E-mail: gnbae@kist.re.kr

입자의 수 농도와 검댕 농도를 각각 실시간으로 측정하여 자동차의 통행량, 기상 요인 등에 따라 달라지는 대기오염 특징을 밝혀냈다.[8,9)]

본 연구에서는 자동차에서 배출되는 입자에 의한 대기오염 특징을 파악하고자 서울시 동대문구 청량리 교차로 도로변에서 입자상 및 기체상 대기오염물질을 측정하였다. 측정한 각 대기오염물질의 주간변화, 일변화 및 오염물질간의 상관관계를 분석하였다. 측정자료 중에서 자동차 배출 초미세입자를 0.1초 이내에 신속하게 측정할 수 있는 TR-DMPS(Transient Differential Mobility Particle Spectrometer, Grimm)로 측정한 20~570 nm범위인 입자의 수 농도 및 입경분포는 약 5분마다 측정한 SMPS의 결과와 잘 일치한다는 것을 이미 발표한 바 있다.[10)] 본 연구를 통해 확보한 도심 교차로의 초미세입자 농도 자료는 향후 자동차 인접 생활환경에서 초미세입자에 의한 인체 노출 수준을 평가하는데 활용될 수 있다.

2. 측 정

본 연구에서는 서울시 동대문구 청량리동에 위치한 청량리 교차로의 도로변에서 2007년 3월 19일(월) 16:30부터 23일(금) 15:05까지 5일 동안 대기오염물질을 측정하였다. Fig. 1에 나타낸 것과 같이 측정위치는 청량리 교차로에서 동대문 방향 편도 3차선 도로의 우측 도로변에서 약 1 m 떨어진 곳인데, 이 지점은 환경부에서 운영하는 청량리 도로변대기측정소로부터 약 50 m 떨어진 곳이다. 측정지점 주위의 상세한 지도와 실제 사진은 이미 발표한 논문에 기술되어 있다.[10)]

청량리는 경기도 동북부 지역과 서울을 연결하는 대표적인 서울의 부심으로 2005년부터 버스 환승센터가 운영되어 Fig. 1의 승강장 1, 2, 3, 5에서는 총 42개 노선의 외곽방향(망우리, 장위동) 버스들이 정차하고, 승강장 4에서는 13개 노선의 시내방향(동대문, 종로) 버스들이 정차한다.

본 연구에 사용한 측정장비는 기존 연세대 정문 앞 성산로 도로변 측정의 장비와 동일하며 아래에 간략히 요약하였다.[8,9)] 매 5분마다 14~681 nm 범위인 입자의 크기분포를 측정하는데 이용한 SMPS

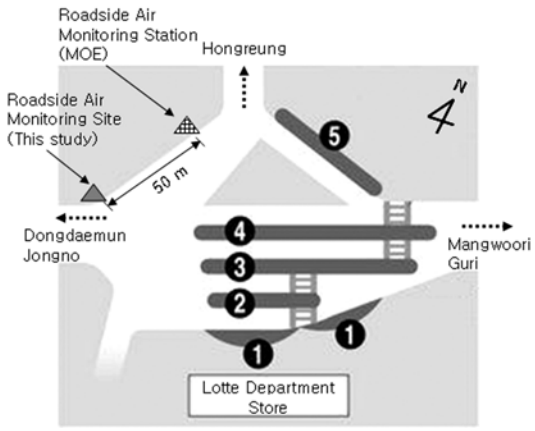

Fig. 1 Location of the air monitoring site at Cheongnyangni junction area (▲)

(TSI model 3936)는 DMA(Differential Mobility Analyzer, TSI model 3081)와 UCPC(Ultrafine Condensation Particle Counter, TSI model 3025A)로 구성하여 이동식 캐비닛 내부에 설치하였으며, 지면으로부터 약 2 m 높이에 흡입관을 설치하여 진공펌프로 도로변 대기를 등속 흡입하였다. 매 10초마다 NO-NO_2-NO_x 농도를 측정한 연속가스분석기(TEI model 42)와 매 5분마다 PM_1에 포함된 검댕(black carbon, BC) 농도를 측정한 Aethalometer(Magee Scientific model AE-42-7-ER-MC)는 별도의 이동식 캐비닛 내부에 함께 설치하였고, 각 흡입구의 높이는 SMPS의 흡입구 높이와 일치시켰다.

측정지점에서 약 240 m 떨어진 청량리역 옥상(높이 35 m)에 설치된 기상청 무인자동기상관측장비(automatic weather station, AWS)의 관측자료에 의하면 3월 21일 14:30~20:30까지 약 1 mm의 약한 비가 내렸는데, 이 기간에는 측정을 중단하였다. 3월 19일부터 3월 20일 오전까지는 북동계열의 풍향이 지배적이었고, 그 이후에는 남서계열의 풍향이 지배적이었으며, 평균 풍속은 약 2.2 m/s이었다.

3. 결과 및 고찰

3.1 입자의 수 농도 특징

2007년 3월 19일(월)부터 23일(금)까지 총 5일간 측정한 도로변 에어로졸을 초미세입자(20~100 nm)와 미세입자(100~600 nm)로 구분하여 수 농도의 주

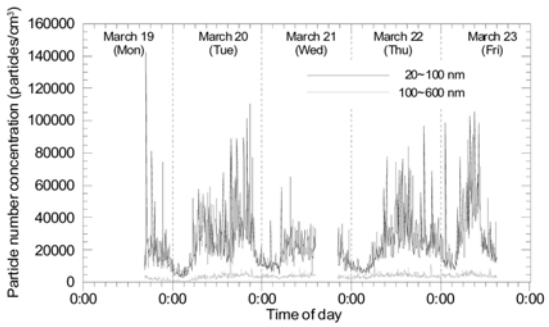

Fig. 2 Variation of particle number concentrations at a junction area in 2007

간변화를 Fig. 2에 나타내었다. 입자의 크기별 명칭이 통일되어 있지 않아서 본 연구에서는 다른 연구결과와 비교하기 위해 편의상 이와 같이 지칭한다.

Fig. 2에서 보듯이 초미세입자의 수 농도는 짧은 시간 동안 매우 큰 폭으로 변하였다. 교통량이 최소가 되는 새벽 2~4시에는 농도가 낮아지면서 변동폭도 감소하였다(Fig. 6 참조). 이러한 경향은 초미세입자의 수 농도뿐만 아니라 검댕 농도와 NO_x 농도에서도 관찰되었고(Fig. 4 참조), 2005년 3월에 6일 동안 연세대 정문 앞 성산로 도로변에서 측정한 초미세입자의 수 농도 변화도 비슷한 경향을 나타내었다.[8] 그러므로 이것이 도로변의 일반적인 농도 변화 특징이라고 판단된다. 이것으로부터 도로변이 대기에 의해 충분히 희석되지 않은 고농도의 자동차 배출가스의 영향을 직접적으로 받는 위치라는 것을 확인하였다. 100 nm보다 큰 미세입자의 수 농도는 상대적으로 변동폭이 작았는데, 이것은 자동차에서 배출되는 입자의 대부분은 100 nm 이하의 초미세입자라는 것을 의미하며, 성산로 측정결과뿐만 아니라 Kittelson 등이 Minnesota freeway에서 측정한 자동차 배출 입자의 입경분포에서도 이러한 특징이 관찰되었다.[8,11]

24시간 측정자료가 있는 3월 20일과 22일의 일평균 수 농도는 초미세입자의 경우 각각 26,087개/cm^3, 24,565개/cm^3이었고, 미세입자의 경우 각각 3,056개/cm^3, 3,966개/cm^3이었다. 이 값은 SMPS 측정기 내부에서 입자의 확산(diffusion)에 의해 손실되는 현상을 SMPS 소프트웨어(TSI Aerosol Instrument Manager version 8.0)로 보정한 결과인데, 기존 성산로 측정에서는 이러한 보정을 하지 않았기 때문에 직접 비교하기가 어렵다. 본 측정자료에 대해 확산손실을 보정하였을 때 초미세입자의 경우 약 1.7배, 미세입자의 경우 약 1.1배 증가하였다. 기존 측정결과와 비교하기 위해 본 연구의 측정값에 대해 확산손실을 보정하지 않으면 일평균 수 농도는 초미세입자의 경우 각각 14,646개/cm^3, 14,571개/cm^3이었고, 미세입자의 경우 각각 2,837개/cm^3, 3,686개/cm^3이었다. 이러한 농도 수준은 성산로에서 측정한 초미세입자의 일평균 농도인 12,926~16,903개/cm^3와 유사하고, 미세입자의 일평균 농도인 4,425~5,061개/cm^3의 약 70%이다.[8] 성산로에 비하여 청량리 교차로 도로의 차선 수는 적고, 교통량도 상대적으로 적을 것으로 추정되지만, 도로에서 더 가까운 위치이므로 두 측정위치에서 입자 농도의 수준이 유사하게 나타난 것으로 생각된다.

청량리 도로변에서 측정한 입자의 일평균 농도에 비하여 2001년 겨울철 서울에서 도로로부터 멀리 떨어진 위치에서 측정한 초미세입자의 수 농도는 상대적으로 매우 낮았고, 변화폭도 상대적으로 작았다.[12] 이것은 오염원으로부터 측정위치까지 이동하는 동안 확산과 희석이 충분히 이루어졌다는 것을 의미한다.

2007년 3월 20일(화)에 측정한 도로변 입자의 입경분포를 Fig. 3에 나타내었다. 초미세입자의 총 수 농도를 나타낸 Fig. 2와 마찬가지로 새벽시간대에는 고농도 피크가 관찰되지 않았으나, 새벽 5시경부터 30 nm 이하의 작은 입자들의 농도가 급격히 높아졌다. 그 이후 5분 간격으로 측정한 입자의 입경분포가 매우 심하게 변하였으나 대부분 60 nm 이하의 입자에서 고농도를 나타내었다. Kittelson 등이 실제 도로 주행 중에 측정한 자동차 배출 입자의 입경분포에서도 고농도 피크가 62 nm 이하에서 관찰되었다.[13] 또한, 디젤 승용차의 차대동력계 시험에서 82.9 nm 크기의 입자가 빈번하게 최고 농도를 나타내었다.[14] 따라서 디젤 자동차에서 배출되는 입자의 크기가 대부분 100 nm 이하이므로, 도로변에서도 작은 크기의 초미세입자가 주로 관측됨을 알 수 있었다.

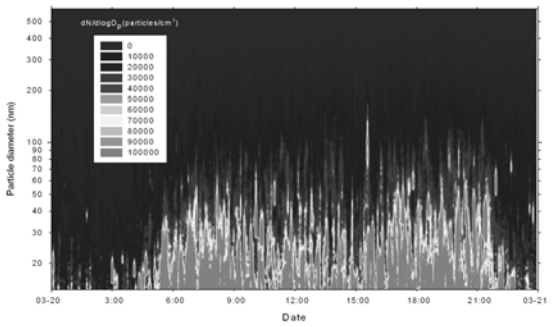

Fig. 3 Diurnal variation of particle size distribution at a junction area on March 20, 2007

3.2 검댕 및 NO_x 농도 특징

초미세입자의 수, 검댕 및 NO_x의 1시간 평균 농도를 Fig. 4에 함께 나타내었다. Fig. 4에서 볼 수 있듯이 검댕 농도와 NO_x 농도의 변화 경향이 초미세입자의 수 농도 변화와 잘 일치하였다. 이것은 초미세입자, 검댕 및 NO_x가 화석연료를 연소시키는 동일한 오염원에서 배출되었음을 암시한다. 본 측정위치의 특성상 이 오염원은 자동차 엔진 연소, 특히 경유 자동차의 엔진 연소인 것으로 추정된다.

Fig. 4를 살펴보면, 초미세입자의 수 농도가 20시부터 그 다음날 새벽 2~4시까지 감소하다가 4시 이후부터 뚜렷하게 증가하는 경향을 보였다. 이러한 일변화 경향을 관찰하기 위하여 1시간 평균값을 이용하여 각 시간대별 평균을 계산하여 Fig. 5에 나타내었다.

Fig. 5에서 보듯이 초미세입자, 검댕 및 NO_x 농도 모두 새벽 2~4시경에 하루 중 최소 농도가 나타났고, 새벽 4시경부터 서서히 증가하여 아침 출근시간

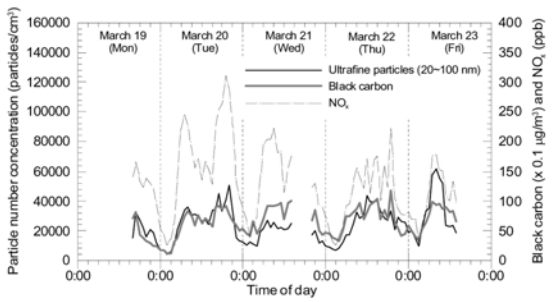

Fig. 4 Variation of 1-hr average concentrations of ultrafine particle number, black carbon, and NO_x at a junction area in 2007

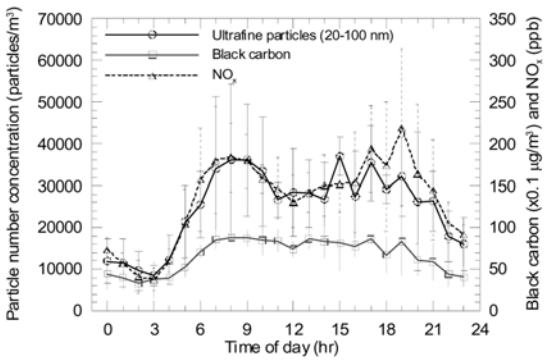

Fig. 5 Diurnal variation of 1-hr average concentrations of ultrafine particle number, black carbon, and NO_x at a junction area in 2007

대에 고농도 피크가 관찰되었다. 낮시간대에는 출근시간대의 농도에 비하여 약간 낮아졌다가 퇴근시간에 고농도 피크들이 관찰되다가 20시 이후부터 뚜렷이 감소하는 일변화 특징을 보였다. 낮시간대에 농도가 낮아지는 것은 혼합고의 증가로 인한 희석 때문인 것으로 생각된다.[15)]

Fig. 5에 나타낸 초미세입자의 수 농도와 NO_x 농도의 시간대별 평균 농도의 상관성을 살펴보면, 두 오염물질은 결정계수(r^2)가 0.87인 양호한 선형관계를 나타내었다.

Fig. 5의 시간대별 평균 농도를 이용하여 측정기간 중 평균 농도를 계산하면 초미세입자의 수 농도는 24,910개/cm^3, 검댕 농도는 6.6 μg/m^3, NO_x 농도는 133 ppb이다. 청량리 도로변의 검댕 평균 농도는 성산로 도로변에서 주중 평균 농도인 8.3 μg/m^3에 비하여 20% 정도 낮았다.[9)]

본 측정지점에서 약 50 m 떨어진 환경부 청량리 도로변 측정소의 PM_{10} 농도의 일평균은 45~115(평균 80) μg/m^3이었다. 환경부 도로변 측정소의 샘플링 입구는 지상에서 약 4 m 높이에 설치되어 있다. 검댕 농도와 PM_{10} 농도의 상관관계는 성산로 도로변 측정결과와 마찬가지로 24시간 자료를 이용하는 경우(결정계수 0.28)보다 교통량이 급격히 증가하는 새벽 0~5시 사이의 자료를 이용하는 경우(결정계수 0.65)가 더 양호하였다.

성산로에서 초미세입자 수 농도의 평균 일변화의 경우 새벽 3~5시경에 하루 중 최소 농도가 나타났

고, 새벽 5시 이후에 농도가 증가하기 시작하였는데, 이러한 특징은 성산로의 교통량 특징과 잘 일치하였다.[8] 본 측정위치인 청량리 교차로 도로변의 경우 서울지방경찰청의 교통량 수집 지점이 없기 때문에 청량리 교차로와 주요 간선도로로 연결되는 동대문과 중랑교의 3월 19일 0시~3월 23일 9시 자료를 이용하여 교통량의 일변화를 분석하였다. 청량리의 주중 하루 양방향 교통량은 동대문의 6만대와 중랑교의 12만대 사이일 것으로 추정된다. 정확하게 비교하기 어렵지만, 성산로 도로변에서 초미세입자를 측정하였던 2005년 3월 측정기간 동안 성산로의 주중 하루 양방향 교통량인 10만대와 청량리의 교통량이 유사한 수준일 것으로 생각된다.[8] Fig. 6에 나타낸 것과 같이 동대문과 중랑교의 교통량이 다르지만 두 지점 모두 시내로 유입되는 교통량이 시외로 유출되는 교통량에 비해 1시간 정도 일찍 새벽 4~5시부터 증가하기 시작하였다. Fig. 5에서 보듯이 초미세입자의 수 농도, NO_x 및 검댕 농도도 새벽 4~5시부터 뚜렷이 증가하기 시작하였는데, 측정지점이 시내로 유입되는 도로의 우측 도로변이므로 유출 교통량보다 유입 교통량의 영향을 더 많이 받은 것으로 생각된다.

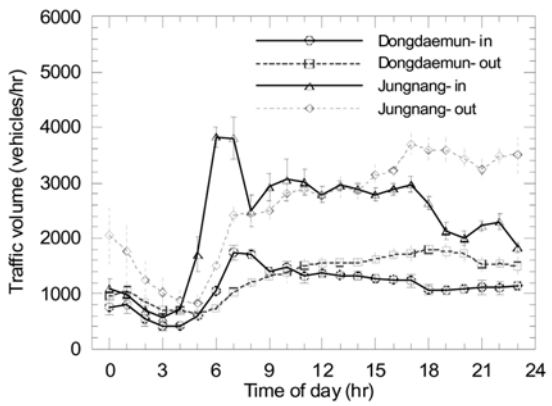

Fig. 6 Diurnal variation of traffic volume on the Dongdaemun and Jungnang Roads from Mach 19 to 23, 2007

4. 결 론

본 연구에서는 대도시 도로변에서 자동차에 의한 대기오염 특징을 파악하기 위하여 청량리 교차로 도로변에서 2007년 3월 중순에 5일 동안 입자의 수, 검댕, NO_x를 동시에 측정하였다. 이러한 관측자료를 기존 일반 대기 모니터링 결과 및 연세대 정문 앞 성산로 도로변 측정결과와 비교하여 다음과 같은 도로변 오염 특징을 알아냈다.

1) 일반 도시 대기 측정결과에 비하여 청량리 교차로 도로변에서 측정한 초미세입자의 수 농도는 상대적으로 고농도이면서 짧은 시간 동안 변동이 매우 컸다. 이러한 특징은 성산로 도로변 측정결과와 잘 일치하였다.
2) 교통량이 하루 중 최소를 나타내는 새벽 2~4시경에 초미세입자의 수 농도, 검댕 농도 및 NO_x 농도 역시 하루 중 최소 농도를 나타냈으며, 교통량이 증가하기 시작할 때 대기오염물질들의 농도도 증가하기 시작하였다.
3) 청량리 교차로 도로변의 초미세입자(20~100 nm) 및 미세입자(100~600 nm)의 일평균 수 농도는 SMPS 내부의 확산손실을 보정한 경우 각각 25,000개/cm^3와 3,500개/cm^3 수준이었다. 또한 확산손실을 보정하지 않은 경우 성산로 측정결과와 유사하므로 위 농도 수준이 도로변의 입자 오염 수준일 것으로 판단된다.
4) 도로변에서 측정한 초미세입자의 입경분포는 시간에 따른 변동이 심하였으며, 대부분 60 nm 이하에서 고농도를 나타냈다.
5) 도로변에서 측정한 초미세입자의 주간변화 및 평균 일변화 경향이 검댕 농도 및 NO_x 농도의 경향과 잘 일치하였다.

이상과 같은 특징으로부터 도로변은 충분히 희석되지 못한 고농도의 자동차 배출가스의 영향을 직접적으로 받고 있음을 알 수 있었고, 서울시 주요 도로변의 입자 오염은 도로에 따라 큰 차이가 없음을 알 수 있었다. 향후 이동 측정 차량을 이용하여 교통량이 적은 이면 도로변과 교통량이 많은 혼잡 도로변의 대기오염도 차이를 밝혀내는 연구를 수행할 예정이다.

후 기

이 연구는 환경부 Eco-STAR project(무·저공해자동차사업단)의 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

References

1) S. Park and S. Kwon, “UN/ECE/GRPE and PMP Activity,” The 2nd Workshop on Vehicle-Related Nanoparticles and Environmental Health, Korea Institute of Science and Technology, pp.3-25, 2008.
2) Ministry of Environment, Korea, Elucidation Document to News, Available from http:\\www.me.go.kr/dev/board/download.jsp?id=notice_02&idx=149324&file=hae20060905.hwp, pp.1-3, 2006.
3) R. S. Green, S. Smorodinsky, J. J. Kim, R. McLaughlin and B. Ostro, “Proximity of California Public Schools to Busy Roads,” Environmental Health Perspectives, Vol.112, No.1, pp.61-66, 2004.
4) O.-Y. Kwon and Y. S. An, “Temporal and Spatial Distributions of PM_{10}, NO_x and O_3 around the Road,” J. KOSAE, Vol.22, No.4, pp.440-450, 2006.
5) M.-H. Kim, S.-G. Park and S.-O. Baek, “Characteristics of Atmospheric Concentrations of Volatile Organic Compounds at a Heavy-traffic Site in a Large Urban Aera,” J. KOSAE, Vol.18, No.2, pp.113-126, 2002.
6) S.-K. Park, S.-D. Kim and J.-H. Kim, “A Study of Concentration Prediction of Automobile Air Pollutant Near the Highway,” J. KOSAE, Vol.14, No.6, pp.607-620, 1998.
7) D. Shin, Y. Lim, S. Park and Y. Chung, “Assessment of Health Risk Posed by Organic Substances of Suspended Particulate Matters in a Heavy Traffic Area of Seoul,” J. KOSAE, Vol.12, No.5, pp.567-576, 1996.
8) G.-N. Bae, S. Huh, S.-B. Lee, M. An, D. Park and J. Hwang, “Ultrafine Particle Pollution Level at the Roadside of Seoul in Spring,” Particle and Aerosol Research, Vol.3, No.1, pp.29-40, 2007.
9) S.-B. Lee, G.-N. Bae, S.-M. Park and S.-G. Jung, “Black Carbon Pollution Level at a Roadside of Seoul in Spring,” J. KOSAE, Vol.23, No.4, pp.466-477, 2007.
10) D. Woo, S.-B. Lee, G.-N. Bae and T. Kim, “Comparison of Ultrafine Particles Monitored at a Roadside Using an SMPS and a TR-DMPS,” J. KOSAE, Vol.24, No.4, pp.404-414, 2008.
11) D. B. Kittelson, W. F. Watts and J. P. Johnson, “Nanoparticle Emissions on Minnesota Highways,” Atmospheric Environment, Vol.38, pp.9-19, 2004.
12) G.-N. Bae, M. C. Kim, D.-Y. Lim, K.-C. Moon and N. J. Baik, “Characteristics of Urban Aerosol Number Size Distribution in Seoul during the Winter Season of 2001,” J. KOSAE, Vol.19, No.2, pp.167-177, 2003.
13) D. B. Kittelson, W. F. Watts and J. P. Johnson, “On-road and Laboratory Evaluation of Combustion Aerosols- Part 1: Summary of Diesel Engine Results,” Journal of Aerosol Science, Vol.37, pp.913-930, 2006.
14) J. Lee, M. Jung, Y. Jeong and K. Cha, “Analysis of Diesel Nano-particle Characteristics for Different Vehicle Test Mode in Diesel Passenger Vehicle,” Transactions of KSAE, Vol.16, No.1, pp.114-120, 2008.
15) S. Ruellan and H. Cachier, “Characterisation of Fresh Particulate Vehicular Exhausts Near a Paris High Flow Road,” Atmospheric Environment, Vol.35, pp.453-468, 2001.