

도로상의 배출가스 측정에 의한 배출계수 및 연료소비효율 산출 연구

이태우^{*1)} · 이범호²⁾ · 조승환²⁾ · 박준홍¹⁾ · 엄명도¹⁾ · 김종춘¹⁾ · 이대엽²⁾

국립환경과학원 교통환경연구소¹⁾ · 인하대학교 기계공학부²⁾

On-Road Testing and Calculation of Emission Factor and Fuel Economy

Taewoo Lee^{*1)} · Beomho Lee²⁾ · Seunghwan Cho²⁾ · Junhong Park¹⁾ · Myoungdo Eom¹⁾ ·
Jongchoon Kim¹⁾ · Daeyup Lee²⁾

¹⁾National Institute of Environmental Research, Gyeongseo-dong, Seo-gu, Incheon 404-708, Korea

²⁾Department of Mechanical Engineering, Inha University, Incheon 402-751, Korea

(Received 1 October 2008 / Accepted 2 January 2009)

Abstract : An objective of this study is to suggest a procedure to evaluate vehicle emissions regardless of the driving pattern. Field experiments using portable emission measurement system were conducted under the real world driving cycle. Standardized average for NOx, CO₂ emission and fuel consumption rates were calculated while the vehicle specific power distribution within each vehicle speed bin was taken into consideration. Composite emission factor and fuel economy, which were obtained based on the standardized average results and traffic statistics, showed good similarity to those acquired through the conventional chassis dynamometer tests qualitatively as well as quantitatively. Considering that a conventional method obviously has a limitation to reflect various characteristics of the real world, the new approach suggested in this study can be used as an alternative procedure to collect more specific data to establish the mobile emission factors.

Key words : Portable emission measurement system(PEMS)(이동식 배출가스 측정장비), Emission rate(배출율), Composite emission factor(복합 배출계수), Vehicle speed(차속), Vehicle acceleration(차량 가속도), Vehicle specific Power(VSP)(차량 비출력)

1. 서론

정확한 이동오염원 배출량 산정은 국가의 대기질 관리정책 수립에 필수적인 요소이다. 이동오염원의 대기 오염물질 기여도 및 그의 시간적, 공간적인 변화를 정확하게 파악하기 위해서는 실제 도로상에서의 이동오염원별 오염물질 배출특성에 대한 파악이 반드시 필요하다.

이와 같은 필요에 의해 최근 이동식 배출가스 측정장비의 활용이 증가하고, 전통적인 실험실 배출

가스 측정의 대안으로 널리 고려되고 있다. 차대동력계 실험과 도로상에서의 배출가스 측정 실험은 각각의 장단점이 있다. 차대동력계 실험은 규정된 실험조건 및 차속 프로파일에 의한 실험으로서, 배출가스 인증실험 등 표준화된 비교에 적합한 반면 도로상에서 차량이 겪게되는 여러 가지 실제 교통 상황을 반영할 수 없다는 단점이 있다. 실제 도로상의 배출가스 측정 실험은 여러 가지 다양한 교통 상황을 반영한 배출가스 측정결과를 얻을 수 있는 장점이 있는 반면, 측정 결과가 포함하고 있는 그 다양성 때문에 표준화된 비교가 어렵다는 단점이 있다.

*Corresponding author, E-mail: taewoolee@me.go.kr

이와 같은 배경 하에 본 연구에서는 이동식 배출 가스 측정장비로 측정한 실제 도로상에서의 배출 가스 측정 결과를 표준화함으로써 단위 주행거리 당 배출을인 복합 배출계수를 도출하고자 하였다. 이를 위해 먼저 차량비출력 구간별 가중 비율을 반영한 표준 평균 배출을 및 연료소비율을 차속 구간별로 산출하여 도로 주행 결과를 표준화하였고, 대표적인 표준 도로 주행의 차속 구간별 가중 비율을 이용하여 복합 배출계수 및 연료소비효율을 산출하여 그 결과를 표준 배출가스 모드를 이용한 실험실 실험 결과와 비교하여 타당성을 확인하였다.

2. 실험내용 및 방법

2.1 실험의 구성

본 실험은 실제 도로상의 배출가스 실험 및 차대 동력계를 이용한 CVS-75 모드 배출가스 실험으로 구분된다.

2.2 실험차량

실험차량은 소형 경유 승합차 3대로서, V1, V2, V3로 구분하였다. 주요 제원은 다음 Table 1과 같다.

2.3 차대동력계 배출가스 실험

차대동력계 배출가스 실험은 실험차량이 차대동력계 상에서 실험 모드를 주행할 때 발생하는 배출 가스를 희석용 공기와 희석한 후 정용량 시료 채취 장치(CVS : Constant Volume Sampler)를 이용하여 채취하여 배출가스 분석기로 분석하였다. 실험 모드는 CVS-75 모드를 사용하였다. CVS-75 모드는 미국을 중심으로 널리 사용 중인 미국의 FTP-75 모드를 근간으로 하는 모드로서, 우리나라에서는 2008년 이전 연식의 경유 소형 승합 차량의 배출가스 인 증실험에 사용되었던 실험모드이다. 실험용 연료는 시중에서 판매되는 저황경유를 사용하였다.

2.4 실제 도로상의 배출가스 실험

2.4.1 일반 사항

도로 주행 실험은 인천광역시 내에서 수행되었다. 주행 코스는 도로 기울기의 영향을 무시할 수 있도록 평탄한 지역으로 선정하였으며, 선정된 지역

Table 1 Main specification of the test vehicles

| Vehicle | V1 | V2 | V3 | |
|-----------------------------------|------------------------|---------------------|---------------------|-------|
| Vehicle type | Van | Van | Van | |
| Model year | 2000 | 1996 | 1999 | |
| GVW (kg) | 2,715 | 3,360 | 3,360 | |
| Transmission | 4AT | 4AT | 4AT | |
| Mileage (km) | 66,627 | 186,996 | 111,130 | |
| Engine type | DI diesel | DI diesel | DI diesel | |
| Displacement (cc) | 2,607 | 2,874 | 2,874 | |
| Intake air | Naturally aspirated | Naturally aspirated | Naturally aspirated | |
| Max output (kW/rpm) | 62.5 / 4,000 | 69.9 / 4,000 | 69.9 / 4,000 | |
| Max torque (Nm/rpm) | 166.6 / 2,200 | 192.1 / 2,400 | 192.1 / 2,400 | |
| CVS-75 Mode emission test results | CO (g/km) | 0.026 | 0.031 | 0.032 |
| | THC (g/km) | 0.002 | 0.024 | 0.020 |
| | NOx (g/km) | 0.578 | 0.829 | 0.927 |
| | PM (g/km) | 0.086 | 0.085 | 0.078 |
| | CO ₂ (g/km) | 197.1 | 252.4 | 253.1 |
| | FE (km/L) | 13.6 | 10.6 | 10.6 |

Table 2 Main road test results

| Vehicle | V1 | V2 | V3 | |
|----------------------|--------|---------|----------|---------|
| Distance (km) | 34.7 | 40.6 | 20.8 | |
| Time (sec) | 7,071 | 5,810 | 3,971 | |
| Average speed (km/h) | 17.7 | 25.2 | 18.8 | |
| NOx | (g) | 24.6 | 30.9 | 24.7 |
| | (mg/s) | 3.5 | 5.3 | 6.2 |
| | (g/km) | 0.708 | 0.760 | 1.190 |
| CO ₂ | (g) | 9,171.9 | 10,328.9 | 6,921.8 |
| | (g/s) | 1.3 | 1.8 | 1.7 |
| | (g/km) | 264.2 | 254.2 | 333.4 |
| Fuel | (g) | 2,904.0 | 3,271.3 | 2,192.0 |
| | (g/s) | 0.4 | 0.6 | 0.6 |
| | (g/km) | 83.6 | 80.5 | 105.6 |
| | (km/L) | 9.9 | 10.3 | 7.9 |

내에서 교통 상황에 따라 임의로 주행하였다. 차량에는 운전자 포함 2인이 탑승하였으며, 이동식 배출 가스 측정장비를 탑재하였다. 실험은 실험 차량을 충분히 예열한 후, 역시 충분히 예열된 이동식 배출

가스 측정장비를 표준가스를 이용하여 교정한 후 실시하였다. 실험용 연료는 차대동력계 실험시와 같은 시중 저황경유를 사용하였다. Table 2에 실제 도로 주행 배출가스 실험의 주요 결과를 표시하였다.

2.4.2 이동식 배출가스 측정장비

본 연구에서 사용한 이동식 배출가스 측정장비 (Portable Emission Measurement System, PEMS)는 미국 Clean Air Technologies사의 OEM 2100 시스템이다.¹⁾ 본 장비는 차량 배기관에 시료 채취관을 삽입하여 배출가스를 채취한 후 탄화수소(THC), 일산화탄소(CO) 및 이산화탄소(CO₂)는 비분산적외선 방식, 질소산화물(NO_x)은 전기화학센서, 그리고 입자상물질(PM)은 광 산란 방식을 이용하여 그 농도를 측정한다. 농도 측정결과를 질량 측정결과로 환산하기 위해 필요한 배출가스 부피 유량은 센서를 이용한 측정 또는 차량 전자제어장치와의 통신을 통해 얻어진 엔진 변수들을 연료 조성 등의 변수들과 함께 계산하여 얻게 된다. 단위 시간당 배출가스 배출량, 즉 g/s 단위의 배출율은 농도 측정 결과와 배출가스 유량 계산 결과를 기초로 얻어진다. 연료 소비량은 주행 정보 및 이산화탄소 배출 농도에 기초하여 질량 수지에 기초한 방법으로 계산되며,²⁾ 모든 측정결과는 매 초당 1회씩 측정되어 저장된다.

본 시스템은 휘발유 사용 차량에 대해 좋은 성능이 입증되어³⁾ 여러 연구에 사용되었으며,^{4,5)} 경유 사용 차량에 대해서도 사용이 확대되고 있다.⁶⁻⁸⁾ 다만 일산화탄소 및 탄화수소 측정에 대한 제약이 지적된 바 있으며,⁸⁾ 광 산란 방식을 이용한 입자상물질의 측정에 대해서는 추가적인 검증 연구가 필요한 것으로 보고된 바 있어,⁹⁾ 본 연구에서는 질소산화물과 이산화탄소 배출율 및 연료 소비율만을 측정하였다. Table 3에 본 연구에서 사용한 표준 배출가스 측정장비와 이동식 배출가스 측정장비의 주요 사양을 비교하였다.

3. 실험결과 및 검토

3.1 주행 특징별 배출율

실제 도로 주행 배출가스 실험을 통해 얻어진 질소산화물과 이산화탄소의 단위 주행거리당 배출량 및 연료 소비량 결과를 CVS-75 모드 결과와 비교해

Table 3 Description of measurement capabilities of lab analyzer and PEMS

| Item | Lab analyzer | PEMS |
|-----------------|-----------------------|----------------------|
| NO _x | CLD | Electrochemical cell |
| CO ₂ | NDIR | NDIR |
| Fuel | Calculated | Calculated |
| Flow | Critical flow venturi | Calculated |
| Sample | Diluted exhaust gas | Raw exhausted gas |

보면 질소산화물의 경우에는 정성적으로 유사한 경향을 보이고 있으나, 이산화탄소 및 연료의 경우에는 그렇지 않음을 알 수 있다. 이와 같은 차이가 발생하는 원인은 실제 도로 주행시 각 차량의 주행거리, 평균 차속 등의 주행 조건이 모두 다르기 때문이다. 이처럼 도로상에서 실험 차량을 임의로 주행했을 때의 측정결과를 서로 비교하기 위해서는 배출가스에 지배적인 영향을 미치는 변수를 이용한 표준화 방법을 수립하여 전체 주행 결과에 대해 적용할 필요가 있다.

차량의 배출가스 및 연비에 미치는 변수는 여러 가지가 있으며, 특히 가속, 감속 등 주행 특징의 변화가 배출가스에 미치는 영향은 널리 연구되어 왔다.¹⁰⁻¹⁵⁾ 본 연구에서는 먼저 본 주행 실험의 주행 구분(Modal Definition)별 점유율 및 특징을 검토하기 위해 Table 4의 주행 구분¹⁵⁾에 의해 차량 주행을 가속 주행, 정속 주행, 감속 주행, 공회전 등 4가지로 구분하였다. 이 주행 구분은 정속 주행을 차속에 따라 세부적으로 구분하지 않고 있기 때문에, 사실상 가장 중요한 구분 기준은 가속도라고 할 수 있다.

Fig. 1과 Table 5에 각 실험 차량의 주행 구분별 점유 비율을 CVS-75 모드와 비교하여 나타내었다. 실험차량 1과 3이 다소 유사한 주행 구분 분포를 보이고 있고, 실험차량 2는 공회전 영역이 다른 실험차량에 비해 다소 적은 것을 알 수 있다.

Fig. 2에 주행 구분에 따른 질소산화물과 이산화

Table 4 Definitions of driving modes

| Modal name | Definition (V=vel., a=acc.) |
|--------------|---|
| Idle | $V \leq 3\text{km/h}$ and $ a \leq 0.1\text{ m/s}^2$ |
| Acceleration | $a > 0.1\text{ m/s}^2$ |
| Deceleration | $a < -0.1\text{ m/s}^2$ |
| Cruise | $V > 3\text{km/h}$ and $ a \leq 0.1\text{ m/s}^2$ |

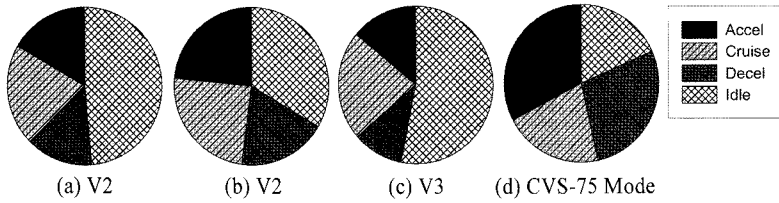


Fig. 1 Modal fraction of each vehicle's road test result and CVS-75 mode

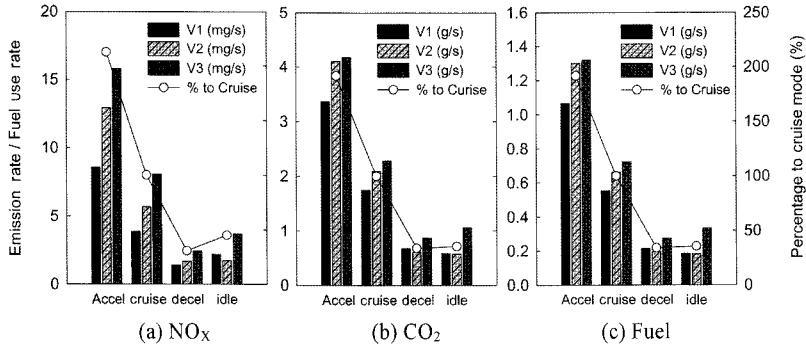


Fig. 2 Emission rate and fuel consumption rate for each modal fraction

Table 5 Modal fraction of test vehicles and CVS-75 mode

| Vehicle/Mode | | V1 | V2 | V3 | CVS-75 |
|----------------|--------|-------|-------|-------|--------|
| Time (sec) | Accel | 1,172 | 1,363 | 551 | 448 |
| | Cruise | 1,478 | 1,421 | 892 | 285 |
| | Decel | 982 | 1,079 | 417 | 386 |
| | idle | 3,437 | 1,947 | 2,111 | 253 |
| | Total | 7,069 | 5,810 | 3,971 | 1,376 |
| Percentage (%) | Accel | 0.166 | 0.235 | 0.139 | 0.327 |
| | Cruise | 0.209 | 0.245 | 0.225 | 0.208 |
| | Decel | 0.139 | 0.186 | 0.105 | 0.281 |
| | idle | 0.486 | 0.335 | 0.532 | 0.184 |

탄소의 배출율과 연료의 소비율을 비교하였다. 가속 주행시에 단위시간당 가장 많은 양의 질소산화물 및 이산화탄소를 배출하였으며, 정속 주행시에 그 다음으로 많은 양을 배출하였다. 감속 주행시와 공회전시에는 정속 주행시보다 적은 양을 배출하였다. 이와 같은 경향은 연료 소비율에 대해서도 동일하게 나타났다.

각 주행 구분별로 측정된 실험차량 3대의 배출율 및 소비율 평균값을 정속 주행시 결과의 비율로 나타내 보면, 가속 주행시의 배출율은 정속 주행시의 2배 수준이었으며, 감속 주행시 및 공회전시의 배출율은 각각 정속 주행시의 절반 이하의 수준이었다.

이와 같은 특성을 염두에 두고 Fig. 1의 각 실험차량별 주행 구분 분포를 CVS-75 모드 결과와 비교해 보면 공회전+감속 구간 비율과 가속, 정속 구분 비율이 CVS-75 모드와 가장 유사한 실험차량 2의 배출율이 CVS-75 모드 결과와 가장 유사하다는 흥미로운 결과를 관찰할 수 있다. 유사한 결과를 연료 소비율에 대해서도 확인할 수 있다.

위 결과를 통해 주행 구분에 따라 질소산화물, 이산화탄소 배출율 및 연료 소비율이 크게 달라지는 것을 알 수 있다. 전술한 바와 같이 주행 구분의 가장 중요한 기준은 가속도로서, 위의 결과는 차량의 가속도가 배출가스 배출율 및 연료 소비율에 미치는 영향이라고도 말할 수 있다. 이와 같은 연구결과는 정용량 시료 채취 장치와 샘플링 백을 이용하는 전통적인 배출가스 실험을 통해서서는 얻어내기 어려운 결과로서, 이동식 배출가스 측정장비를 이용하여 얻어 낼 수 있는 유용한 결과라고 할 수 있다.

3.2 표준 평균 배출율

앞에서 살펴본 것처럼 차량의 가속도는 도로상에서의 질소산화물, 이산화탄소 배출율 및 연료 소비율에 큰 영향을 미치기 때문에, 실제 도로 주행의 표준화 변수로서 매우 유용하다. 이와 같은 배경 하에

서 차량의 가속도를 차량 실험 결과 해석에 반영하고자 하는 여러 시도가 계속되고 있으며,^{4,14,15)} 그 중 Frey⁴⁾는 도로상에서 측정된 차량 배출가스 및 연료량 측정결과와 일관된 표준화를 위해 차량비출력 (Vehicle Specific Power, VSP)을 기반으로 한 표준 평균(Standardized Average) 방법을 제안하였다. 차량비출력은 차량의 속도 및 가속도를 포함하는 변수이며, 동시에 차량 중량에 대한 비출력이라는 점에서 차량 실험 결과 분석에 활용도가 높은 변수라 할 수 있다.

Frey는 다양한 주행 상황에서 측정된 배출을 결과의 표준화된 비교를 위해 차량비출력을 14개의 구간으로 구획하여 각 차량비출력 구간에서의 시간 점유율을 가중치로 한 표준 평균 배출율을 사용하였다. 이와 같은 접근방법은 차량이 경험하는 여러 주행 상황을 한꺼번에 반영할 수 있다는 측면에서 무척 바람직한 반면, 차속 변화에 따른 영향이 별다른 고려 없이 표준 평균 배출율에 포함되어 버린다는 측면에서는 다소 개선의 여지가 있다고 하겠다.

차속은 도로상의 측정이 용이한 변수로서, 실험 차량을 통한 측정 또는 고정식 장비를 이용한 도로 상황 관찰을 통해서도 얻어낼 수 있다. 또한 활용도도 매우 높는데, 우리나라 대기오염물질 배출량 산정의 근간이 되는 배출계수, 활동도 등의 주요 변수로 사용되고 있으며, 여러 교통 관련 통계 또한 차속을 근간으로 하여 구성되어 있다.

본 연구에서 사용한 이동식 배출가스 측정장비는 주행 중 매 초당 순간 속도 및 가속도를 배출가스와 함께 측정하여 저장하기 때문에 이와 같이 차속을 기반으로 구축된 자료와 본질적으로 유사한 특징을 갖는다고 할 수 있다. 따라서 이동식 배출가스 측정장비를 이용한 실제 도로상의 측정결과로부터 차속 구간별로 각각의 표준 평균 배출율을 구하여 활용할 수 있는 방안을 구축하는 것은 국내 배출계수 및 배출량 산정에 매우 의미있는 새로운 시도가 될 것이라 할 수 있다.

이에 본 연구에서는 차량비출력 구간 및 차속 구간을 각각 정의하고 각 구간별로 표준 평균 배출율을 구함으로써 실제 도로 상의 임의의 주행 결과에 대한 표준화된 비교를 수행할 수 있도록 하였으며,

궁극적으로는 복합 배출계수를 구하여 활용할 수 있도록 하였다. 차속 구간은 우리나라 대기오염물질 배출량 계산 시스템인 대기정책지원시스템¹⁶⁾의 차속 구간 및 점유율을 고려하여 7개로 구획화하였으며, 차량비출력 구간은 Frey⁴⁾의 문헌을 준용하여 14개로 구획화하였다. Rykowski¹⁴⁾ 등은 주행 중인 차량의 연비 특성 파악을 위해 차속 구간 및 차량비출력 구간의 구간 넓이, 개수 등에 대한 여러 시도를 한 바 있는데, 본 연구의 구간은 그보다 세분화되어 있으므로 본 연구 목적을 달성하는 데 충분한 정도라고 판단된다.

엄밀히 말해 차량비출력은 차량마다 모두 다르지만, 중소형 차량에 대해서는 대표 변수를 이용한 다음 식 (1)을 적용할 수 있다고 알려져 있다.¹⁷⁾ 차량비출력의 변수중 하나인 도로 구배는 30~570m 정도의 단거리 구간 배출가스에는 큰 영향을 미치지, 장거리 구간에서의 배출가스에 미치는 영향은 미미한 것으로 보고되고 있으며,⁴⁾ 동시에 도로 주행 실험 구간이 비교적 평탄함을 감안하여 본 연구에서는 도로구배를 0으로 설정하였다.

$$VSP = 0.278v \times [0.305a + 9.81(\sin(a \tan(r/100))) + 0.132] + 0.0000065v^3 \quad (1)$$

- 여기서,
- v : 차속 (km/h)
- a : 차량 가속도 (km/h/s)
- r : 도로 구배 (%)
- VSP : 차량비출력 (kW/ton)

Table 6에는 차량비출력 구획의 정의와 함께 실험 차량 1의 질소산화물, 이산화탄소의 표준 평균 배출율 및 연료의 표준 평균 소비율을 예시하였다. 표준 평균 배출율은 차량비출력 구간을 기준으로 한 표준 배출율($E_{VB,j}$)과 차속 구간을 기준으로 한 표준 평균 배출율($E_{SB,i}$)의 두 가지를 정의하였다.

$$\bar{E}_{VB,j} = \sum_{i=1}^7 ER_{SB,i} \cdot f_{SB,i} \quad (2)$$

$$\bar{E}_{SB,i} = \sum_{j=1}^{14} ER_{VB,j} \cdot f_{VB,j} \quad (3)$$

Table 6 Definition of VSP bins and average emission and fuel consumption rate for test vehicle 1

| VSP bin | definition | NOx (mg/s) | CO ₂ (g/s) | Fuel (g/s) |
|---------|---------------|------------|-----------------------|------------|
| 1 | VSP < -2 | 1.447 | 0.678 | 0.215 |
| 2 | -2 ≤ VSP < 0 | 1.345 | 0.681 | 0.216 |
| 3 | 0 ≤ VSP < 1 | 2.342 | 0.664 | 0.210 |
| 4 | 1 ≤ VSP < 4 | 3.651 | 1.697 | 0.538 |
| 5 | 4 ≤ VSP < 7 | 7.440 | 3.058 | 0.970 |
| 6 | 7 ≤ VSP < 10 | 8.198 | 3.426 | 1.084 |
| 7 | 10 ≤ VSP < 13 | 10.400 | 4.528 | 1.432 |
| 8 | 13 ≤ VSP < 16 | 11.663 | 5.154 | 1.630 |
| 9 | 16 ≤ VSP < 19 | 13.451 | 5.971 | 1.889 |
| 10 | 19 ≤ VSP < 23 | 16.638 | 5.722 | 1.810 |
| 11 | 23 ≤ VSP < 28 | 19.922 | 6.441 | 2.038 |
| 12 | 28 ≤ VSP < 33 | 22.654 | 6.522 | 2.064 |
| 13 | 33 ≤ VSP < 39 | - | - | - |
| 14 | 39 ≤ VSP | - | - | - |

여기서,

$\bar{E}_{VB,j}$: j 번째 차량비출력 구간에서의 각 차속 구간별 배출율을 차속 구간별 시간 점유율에 대해 가중 평균한 표준 평균 배출율(연료에 대해서는 표준 평균 소비율)

$ER_{SB,i}$: i 번째 차속 구간에서의 평균 배출율(연료의 경우에는 소비율)

$f_{SB,i}$: i 번째 차속 구간의 시간 점유율

$\bar{E}_{SB,i}$: i 번째 차속 구간에서의 각 차량비출력 구간별 배출율을 차량비출력 구간별 시간 점유율에 대해 가중 평균한 표준 평균 배출율(연료에 대해서는 표준 평균 소비율)

$ER_{VB,j}$: j 번째 차량비출력 구간에서의 평균 배출율(연료의 경우에는 소비율)

$f_{VB,j}$: j 번째 차량비출력 구간의 시간 점유율

3.3 차속 및 차량비출력의 영향

Fig. 3의 위쪽 그림은 차속 구간별로 계산된 표준 평균 배출율 및 표준 평균 연료소비율을 나타낸 것이며, 아래쪽 그림은 차량비출력 구간별로 계산된 표준 평균 배출율 및 표준 평균 연료소비율을 나타낸 것이다. 차속 증가에 따라 배출율 및 연료소비율은 증가하고 있으며, 차량비출력에 대해서도 같은 경향을 보인다. 실험차량 및 측정항목 별로 다소 차이는 있으나, 이는 개별 차량의 특성에 기인한 것으로

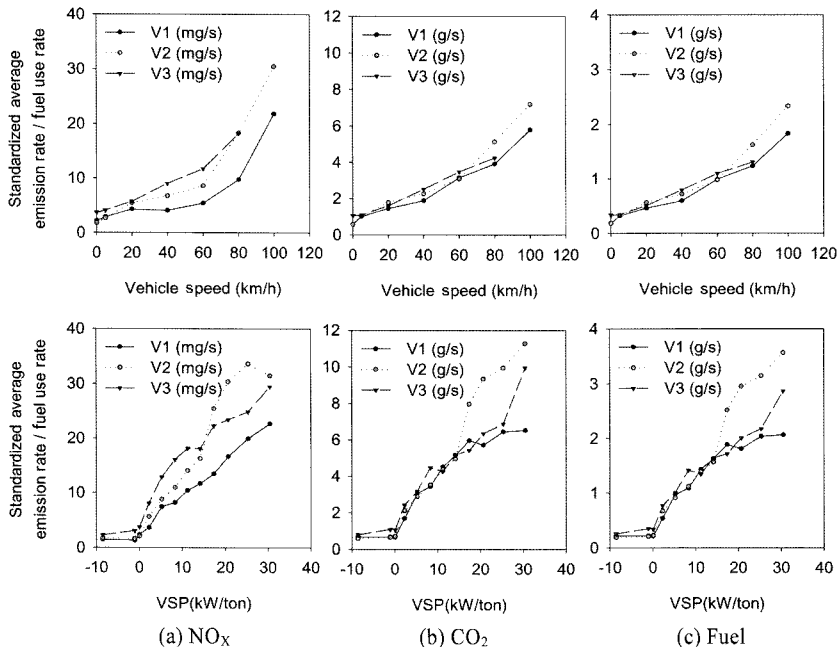


Fig. 3 Standardized average emission rate and fuel consumption rate based on vehicle speed bin(upper) and VSP bin (lower)

로 판단된다.

이와 같은 결과는 직관적으로 상당 부분 예측 가능한 결과라 할 수 있다. 특히, 위쪽 그림의 각 점에는 차량비출력의 영향이 포함되어 있으며, 아래쪽 그림의 각 점에는 차속의 영향이 포함되어 있음을 상기한다면 이 결과가 차량의 차속과 차량비출력이 배출가스 배출율과 연료 소비율에 미치는 영향을 나타냄과 함께 본 연구에서 사용한 표준 평균 방법이 공학적으로 타당한 결과를 도출함을 확인시켜주는 결과임을 알 수 있다.

Fig. 3에서 실험차량 2의 질소산화물 배출율이 차량비출력 30 kW/ton 부근에서 감소하는 경향을 보이고 있다. 이는 해당 차량비출력 구간에서의 측정 결과 중 배출율이 비교적 낮은 중저속 영역의 측정 결과는 많은 반면, 배출율이 높은 고속 영역의 측정 결과는 적기 때문에 차속 구간별 시간점유율에 대해 가중 평균하는 과정을 거치면서 고속 영역의 효과가 해당 차량비출력 구간에 충분히 반영되지 못하였기 때문에 생긴 결과이다. 이는 실험차량의 운전 영역이 특정 영역으로 편중되어 있거나, 반대로 특정 영역을 포함하지 못하는 경우에 생길 수 있는 문제에 대해 시사하는 결과로서, 이동식 배출가스 측정장비를 이용한 도로상의 실험을 계획할 때 참고해야 할 것으로 사료된다. 또한, 연구목적을 달성할 수 있는 한도 내에서 가급적 넓은 차속 구간 및 차량비출력 구간을 설정함으로써 이와 같은 문제 발생을 미연에 방지하는 것도 참고할 만한 내용으로 사료된다.

위와 같은 실험결과를 통해 차속 및 차량비출력이 소형 경유 승합차량의 질소산화물, 이산화탄소 배출을 및 연료소비율에 중요한 영향을 미치고 있음을 확인하였다. 이후에는 이 변수들을 이용하여 임의의 주행결과를 표준화함으로써 최종적으로 복합 배출계수를 산출하는 과정에 대해 논하도록 하겠다.

4. 복합 배출계수 산출

본 연구에서 최종적으로 산출하려고 하는 복합 배출계수(Composite Emission Rate)는 g/km 단위로 표시되는 단위 주행거리 당 배출량을 말한다. 주로

차종별, 연료별로 구분하여 산출되는 복합 배출계수는 배출량 산정의 기본 정보로서, 연평균 주행거리, 차량 등록대수 등, 차량의 활동도 자료와 함께 해당 차종의 연간 배출량이 어느 정도인지를 파악할 수 있도록 해 준다. 앞 장까지의 서술은 대부분 g/s 단위를 갖는 단위시간당 배출량, 즉 배출율(연료의 경우는 소비율)을 위주로 전개되었으나, 본 장 이후에는 두 개념을 모두 사용하도록 하겠다. 명확한 구분을 위해 g/s 단위를 갖는 경우를 배출율(소비율)이라고 칭하겠고, g/km 단위를 갖는 경우를 배출계수라고 칭하도록 하겠다. 통상적으로 km/L 단위로 표시되는 연비의 경우는 연료소비효율이라고 칭하도록 하겠다.

4.1 차속 구간별 가중 비율

차속 구간 별로 정리된 표준 평균 배출율 결과를 하나로 통합하여 복합 배출계수를 얻기 위해서는 기준으로 삼을 수 있는, 즉, 실제 도로 주행을 대표할 수 있다고 볼 수 있는 표준적이고 대표적인 주행 결과로부터 얻어진 각 차속 구간별 가중 비율이 필요하게 된다. 본 연구에서는 복합 배출계수를 얻기 위한 차속 구간별 가중 비율로서 다음과 같은 두 가지 자료를 이용하였다. 먼저, 2005년도에 우리나라 전역에서 측정된 경유 소형 승합차량의 차속 구간별 가중 비율인 VKT(Vehicle Kilometer Travel) 자료를 이용하였다. 이는 우리나라의 대기오염물질 배출량을 산정하는 대기정책지원시스템에서 사용 중인 자료이므로, 복합 배출계수를 얻기 위한 연구목적 달성에 매우 효과적인 것으로 판단된다. 두 번째로는 CVS-75 모드의 차속 구간별 비율을 이용하였다. 본 실험차량 3대는 모두 차대동력계 상에서 CVS-75 모드에 의한 배출가스 실험을 실시하였기 때문에, 이 결과와 본 연구를 통해 얻어진 복합 배출계수를 비교함으로써 산출 방법의 정량적, 정성적 타당성을 검증할 수 있다는 측면에서 매우 효과적인 것으로 판단된다.

Table 7에 VKT 자료와 CVS-75 모드 자료의 차속 구간별 비율을 나타내었다. 두 자료의 출처가 다른 만큼 몇 가지의 차이점을 나타내고 있는데, 첫 번째로는 배출율 계산에 사용한 차속 구간이 서로 다르

Table 7 Comparison of weighting factors from two different information sources

| Speed bin (km/h) | VKT (%) | CVS-75 (%) |
|------------------|---------|------------|
| 0 | - | 19.0 |
| $0 < v \leq 10$ | - | 6.5 |
| $10 < v \leq 30$ | 42.3 | 17.3 |
| $30 < v \leq 50$ | 19.2 | 42.1 |
| $50 < v \leq 70$ | 18.7 | 7.4 |
| $70 < v \leq 90$ | 19.8 | 6.6 |
| $90 < v$ | - | 1.1 |
| total | 100 | 100 |

고, 다음으로는 차속 구간별로 적용한 가중 비율도 서로 다르다. 차속 구간의 차이에서 가장 눈에 띄는 것은 VKT 자료에 공회전 영역이 포함되어 있지 않다는 것이다. 이는 두 자료의 근본적인 차이점에 기인하는 것이다. 즉, VKT 자료는 우리나라의 평균적인 경유 소형 승합 차량이 일정한 거리를 주행할 때 각 차속 구간 내에서 주행한 주행거리의 비율을 나타낸 거리 기준의 자료인 반면, CVS-75 모드 자료는 해당 차량이 일정한 시간을 주행할 때 각 차속 구간에서 주행한 시간 비율을 나타내는 시간 기준의 자료이기 때문이다. 따라서 거리 기준의 VKT 자료는 주행거리가 없는 공회전 영역을 반영할 수 없고, 시간 기준의 CVS-75 모드 자료에서만 공회전 영역을 반영시킬 수 있게 되는 것이다. 두 번째 차이점인 가중 비율을 비교하고자 할 때에도 이런 근본적인 차이점을 고려하여 두 자료를 같은 기준으로 정리하여야 한다. Fig. 4에 두 가중 비율을 시간 기준으로 정리하여 나타내었다.

또 다른 중요한 고려 사항은 차속 구간을 기준으로 하여 얻어진 표준 평균 배출을 결과에 포함되어 있는 차량비출력의 영향에 대한 것이다. 본 경우처럼 차속 기준으로 정리된 결과에서는 차량 비출력의 빈도 분포가 중요한 의미를 갖게 된다. 차량비출력 분포가 서로 극단적으로 상이한 경우에는 표준 평균 배출을 비교가 어려워지는 경우도 생길 수 있기 때문이다. Fig. 5는 CVS-75 모드 및 실험차량 3대의 실험결과의 차량비출력 구간별 시간가중치를 비교한 것이다. 거리 중심 자료인 VKT 자료로부터는 가속도를 얻어낼 수 없기 때문에 차량비출력을 파악할 수 없다. 그러나 시간 중심 자료인 CVS-75 자

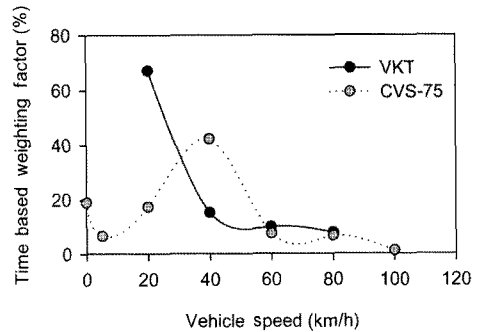


Fig. 4 Comparison of time based weighting factor

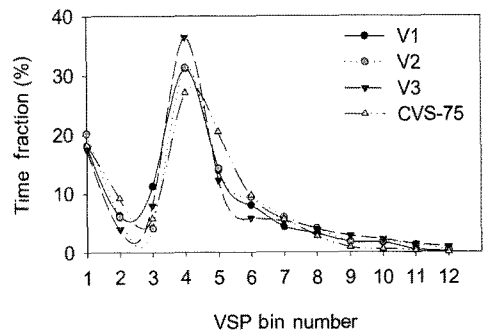


Fig. 5 Time fraction for each VSP bin

료로부터는 가속도를 얻어낼 수 있으므로 차속 구간별로 차량비출력 분포를 파악할 수 있다. 3회의 도로 실험 결과를 통해 얻은 차량비출력 빈도 분포는 CVS-75 모드의 차량비출력 빈도 분포와 매우 유사하다. 도로 실험시 CVS-75 모드의 운전영역을 염두에 두고 주행한 것이 아님을 고려한다면 이 결과는 실제 도로상에서 운전되는 중소형 차량의 평균적인 차량비출력 분포라고도 생각할 수 있는 바, 차량비출력의 시간 가중치를 반영한 표준 평균 배출율을 사용하는 것은 복합 배출계수 산출 과정에 평균적인 도로 주행 특성을 반영시키기 위한 유용한 접근방법 중 하나라고 할 수 있겠다.

4.2 차속별 배출특성 비교

복합 배출계수를 산출하기에 앞서, Fig. 6에 타 문헌에서 산출한 경유 소형 승합차량의 차속구간별 배출특성^{18,19)}을 본 실험결과와 비교하였다. 비교대상으로 선정된 질소산화물 배출특성은 1996년 연식부터 2005년 연식인 경유 승합차 25대를 차대동력

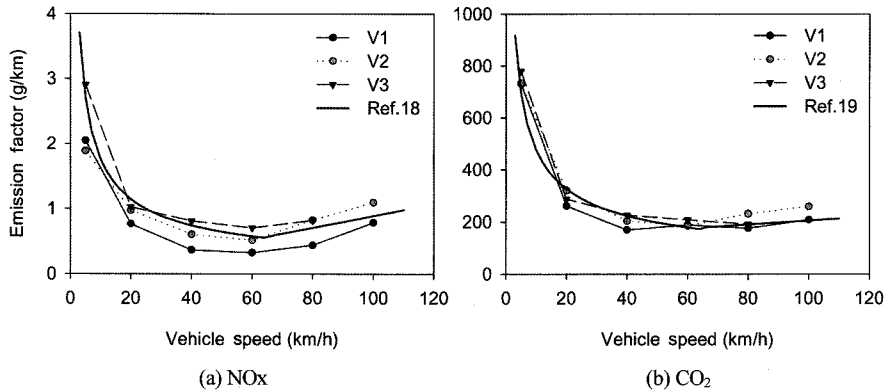


Fig. 6 Comparison of emission factor for NOx and CO₂

계상에서 6종의 차속 모드로 실험하여 얻어낸 결과이다. 이산화탄소의 차속별 배출특성 역시 같은 연구팀에 의해 유사한 방법으로 산출되었다. 이전 문헌에서 조사한 차속별 배출특성이 g/km 단위의 배출계수 형태로 조사되어 있어, 본 연구에서 구한 차속 구간별 배출율을 배출계수로 환산하여 비교하였다. 본 연구의 차속별 배출계수 결과는 이전 문헌의 결과와 정량적, 정성적으로 잘 일치하고 있다. 실험 차량 1 결과에서 보이는 정량적인 차이는 개별 차량의 배출가스 수준이 낮기 때문에 발생한 자연스러운 결과이다.

차속별 배출특성을 조사하기 위한 위와 같은 실험방법은 현재 우리나라의 이동오염원 배출계수 산정을 위한 전통적인 실험방법이다. 따라서 Fig. 6에서 보인 두 결과의 유사성은 이동오염원 배출계수 및 배출량 산정 연구에 있어 이동식 배출가스 측정장비의 활용 가능성을 나타낸 것으로 볼 수 있다. 향후 이동식 배출가스 측정장비를 이용하여 보다 많은 대상에 대한 실험, 실제 교통 상황 반영, 관심있는 특정 도로나 특정 지역에서의 배출계수 확보 등, 전통적인 실험실 실험을 통해 파악하기 어려웠던 정보들도 조사 가능할 것으로 기대된다.

4.3 복합 배출계수 산출

차속 구간별 표준 평균 배출율과 차속 구간별 가중 비율을 이용하여 복합 배출계수를 산출하였다. 차속 구간별 가중 비율은 앞에서 서술한 두 가지 가중 비율을 이용하였다. Table 8에 각 실험 차량의

Table 8 Comparison of test results and composite emission factors

| Vehicle | | V1 | V2 | V3 |
|------------------------|-----------|-------|-------|-------|
| NOx (g/km) | CVS-75 | 0.578 | 0.829 | 0.927 |
| | Road test | 0.708 | 0.760 | 1.190 |
| | Method 1 | 0.541 | 0.787 | 0.882 |
| | Method 2 | 0.494 | 0.737 | 0.893 |
| CO ₂ (g/km) | CVS-75 | 197.1 | 252.4 | 253.1 |
| | Road test | 264.2 | 254.2 | 333.4 |
| | Method 1 | 213.1 | 255.3 | 241.7 |
| | Method 2 | 202.8 | 238.5 | 245.2 |
| Fuel (km/L) | CVS-75 | 13.6 | 10.6 | 10.6 |
| | Road test | 9.9 | 10.3 | 7.9 |
| | Method 1 | 12.3 | 10.3 | 10.9 |
| | Method 2 | 12.9 | 11.0 | 10.7 |

CVS-75 모드 결과, 도로 주행 결과 및 산출된 복합 배출계수 결과를 정리하였다. VKT 가중 비율을 이용한 방법을 Method 1이라고 칭하였고, CVS-75 모드 가중 비율을 이용한 방법을 Method 2라고 칭하였다. Fig. 7에는 이렇게 얻어진 질소산화물, 이산화탄소의 배출계수 및 연료 소비효율을 CVS-75 모드 결과와 각각 비교하였다. 상관성 검토를 위해 y축 절편을 0으로 하는 회귀 직선을 추가하였다.

산출된 복합 배출계수는 CVS-75 모드 실험결과와 완전히 일치하지는 않으나, 회귀 직선의 기울기가 0.9~1.0 수준으로서 정량적으로 높은 유사성을 나타내었다. 상관성 측면에서는 VKT 가중 비율을 이용한 이산화탄소 배출계수 및 연료 소비율 결과에서 0.48~0.58 수준의 R² 값을 보였으나, 그 외의 결

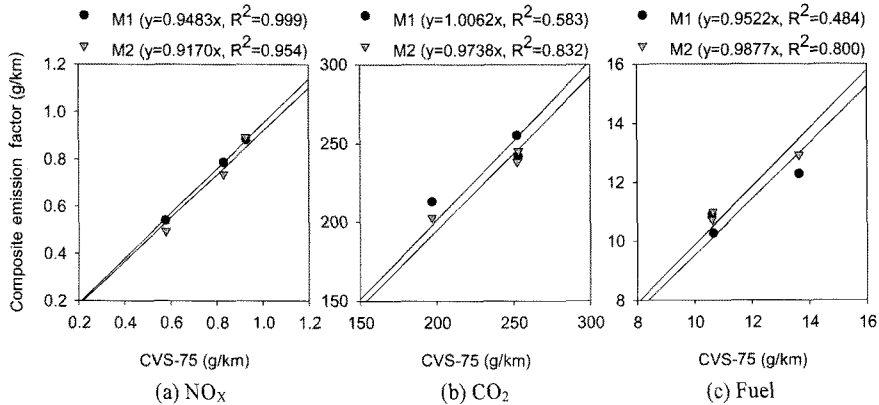


Fig. 7 Correlation between CVS-75 mode results and estimated composite emission factor and fuel economy

과에서는 0.8 이상의 R^2 값을 나타내었다.

이와 같은 결과는 본 연구에서 사용한 차속별 배출을 산정 방법 및 복합 배출계수 산정 방법에 대한 타당성을 입증함으로써, 이동식 배출가스 측정장비를 이용한 새로운 배출계수 산정 방법의 활용 방안을 제시한 것이라 할 수 있다. 특히, 현재 국내에서 사용 중인 배출계수와 동등한 형태의 자료를 산출함으로써, 기존 배출량 프로그램에 즉시 적용 가능토록 한 것도 시사하는 바가 크다고 할 수 있다.

또한, 차속 구간별로 차량비출력의 시간 점유율을 가중 비율로 이용하여 복합 배출계수를 도출하는 본 연구의 접근방법은 차량의 가속도를 도로 부하로 환산한 후 차대동력계에 부과함으로써 정속-정부하 상태에서 가속 주행 모사가 가능토록 하는 가속 모사 실험방법(Acceleration Simulation Mode, ASM)과 개념적으로 유사하다는 사실에 주목할 필요가 있다.²⁰⁾ 현재 가속 모사 실험방법은 우리나라의 휘발유 및 LPG 운행차 정밀검사 방법으로 사용 중이며, 이 때 실험 운전점은 차속 40km/h, 차량비출력 5.4 kW/ton의 정속-정부하 운전점이다. 따라서, 향후 ASM 운행차 검사 운전점을 실제 도로 주행을 통해 확보된 차속 구간과 차량비출력 구간에 따라 적절히 구체화하여 적용함으로써 많은 운행차 정밀검사 결과로부터 이동오염원 배출계수를 확보하는 방안에도 대해서도 검토가 필요하다고 할 수 있다.

5. 결론

1) 가속, 감소 등 실 도로 주행 중의 주행 구분에 따라

질소산화물, 이산화탄소 배출율 및 연료 소비율이 크게 변하는 것을 확인하였다. 가속 주행시의 배출율(소비율)은 정속 주행시의 2배 수준이었으며, 감속 주행시 및 공회전시의 배출율(소비율)은 각각 정속 주행시의 절반 이하의 수준이었다.

- 2) 임의로 주행한 실제 도로 주행 결과의 표준화를 위해 차량의 가속도를 반영한 차량비출력을 사용하여 구간별 가중 비율을 반영한 표준 평균 배출량을 산출하였다. 이동식 배출가스 측정 결과의 표준화를 위한 이와 같은 접근방법은 실제 도로 주행시의 차량비출력 분포를 적절히 반영할 수 있으며, 전통적인 방법에 의해 얻어낸 차속별 배출계수 결과와 정성적·정량적으로 유사한 결과를 도출할 수 있는 유용한 방법임을 확인하였다.
- 3) 이동식 배출가스 측정 결과의 차속 구간별 표준 평균 배출량과 가중 비율을 이용하여 복합 배출계수를 산출하였다. 본 연구를 통해 얻어낸 복합 배출계수는 표준 배출가스 모드를 이용한 실험실 실험 결과와 높은 상관성을 보임을 확인하였다.
- 4) 이는 이동오염원 배출계수 산정을 위해 기존에 사용되었던 전통적인 실험실 방법과 함께 이동식 배출가스 측정장비를 이용한 새로운 방법의 활용 가능성을 제시한 것이라 할 수 있으며, 현재 국내의 배출계수와 동등한 형태의 자료를 산출하여 기존 배출량 프로그램에 즉시 적용 가능토록 한 것도 시사하는 바가 크다고 하겠다.

후 기

본 연구는 환경부의 “2005년 수도권 운행경유차 배출가스 저감사업 평가 및 사후관리 방안 마련” 사업 및 BK(Brain Korea) 21 Program사업의 지원으로 수행되었고, 이에 사의를 표합니다.

References

- 1) CATI, OEM-2100 Montana System Operational Manual Clean Air Technologies International, Inc., Buffalo, New York, 2003.
- 2) US Patent 6308130, Portable On-board Mass Emissions Measuring System, Issued on October 23, 2001.
- 3) US EPA, Environmental Technology Verification Report : Clean Air Technologies International, Inc. REMOTE On-Board Emissions Monitor, 2003.
- 4) H. C. Frey, K. Zhang and N. Roupail, “Fuel Use and Emissions Comparisons for Alternative Routes, Time of Day, Road Grade, and Vehicles Based on In-Use Measurements,” Environ. Sci. Technol. Vol.42, No.7, pp.2483-2489, 2008.
- 5) H.C. Frey, A. Unal, N. Roupail, J. Colyar, “On-road Measurement of Vehicle Tailpipe Emissions Using a Portable Instrument,” J. Air Waste Manage. Assoc. Vol.53, No.8, pp.992-1002, 2004.
- 6) W. Miller, T. Durbin, K. Johnson and D. Cocker, “Final Report - Evaluation of Portable Emissions Measurement Systems for Inventory Purposes and the Not-To-Exceed Heavy-Duty Diesel Engine Regulation,” California Air Resources Board Contract No. 03-345, 2006.
- 7) M. Vojtisek-Lom, D. Lambert and J. Wilson, “Real-world Emissions From 40 Heavy-Duty Diesel Trucks Recruited at Tulare, CA Rest Area,” SAE 2002-01-2901, 2002.
- 8) M. Vojtisek-Lom and J. Allsop, “Development Of Heavy-Duty Diesel Portable, On-Board Mass Exhaust Emissions Monitoring System With NOx, CO₂ and Qualitative PM Capabilities,” SAE 2001-01-3641, 2001.
- 9) H. Moosmuller, “Evaluation of Five Instruments for the Real-Time Measurement of Diesel Particulate Mass Emissions,” Proceedings of the 10th CRC On-road Vehicle Emissions Workshop, 2000.
- 10) M. Denis, P. Cicero-Ferndez and A. Winer, “Effects of In-use Driving Conditions and Vehicle/Engine Operating Parameters on Off-cycle Events: Comparison with Federal Test Procedure Conditions,” J. Air Waste Manage. Assoc. Vol.44, No.1, pp.31-38. 1994.
- 11) Y. Takada, N. Takad and N. Iida, “Transient NOx Characteristics of Freight Vehicles with EGR System in Real Traffic Conditions,” SAE 2005-01-1619, 2005.
- 12) I. Vlieger, D. Keukeleere and J. Kretzschmar, “Environmental Effects of Driving Behavior and Congestion Related to Passenger Cars,” Atmos. Environ, Vol.34, No.27, pp.4649-4655, 2000.
- 13) A. Saito, S. Ueki, Y. Nagatomi, N. Sawazu and Y. Takada, “Analysis of CO₂ Reduction Mechanism by Eco-Driving with Light Duty Diesel Freight Vehicle in Real Traffic Conditions,” SAE 2008-01-1304, 2008.
- 14) R. Rykowski, E. Nam and G. Hoffman, “On-road Testing and Characterization of Fuel Economy of Light-Duty Vehicles,” SAE 2005-01-0677, 2005.
- 15) Y. Gao and M. Checkel, “Experimental Measurement of On-Road CO₂ Emission and Fuel Consumption Functions,” SAE 2007-01-1610, 2007.
- 16) Korean National Institute of Environmental Research, CAPSS : Clean Air Policy Support System, 2005.
- 17) US EPA, Methodology for Developing Modal Emission Rates for EPA's Multi-scale Motor Vehicle & Equipment Emission System, EPA Report 420-R-02-027, 2002.
- 18) J. Ryu, Y. Lyu, C. Lim, S. Kim, J. Kim, S. Kwon, S. Jung and D. Kim, “A Study on the Calculation of Pollutant Emission Factors for Vehicle - Part3,” NIER Report 2005-32-777, Korean National Institute of Environmental

Research, 2005.

- 19) D. Lee, J. Ryu, Y. Lyu, D. Kim, J. Lee, J. Han and J. Kim, "A Study on the Characteristics of Green House Gas Emissions Exhausted from Vans," Proceedings of the 46th Meeting of KOSAE, 2008.
- 20) US EPA, Acceleration Simulation Mode Test Procedures, Emission Standards, Quality Control Requirements, and Equipment Specifications, EPA Report 420-B-04-011, 2004.