

광투과식 매연 측정법을 이용한 소형 디젤 차량의 무부하 급가속 조건에서의 매연 배출 특성

강일호 · 이충훈^{*†}

서울과학기술대학교 산업대학원 · *서울과학기술대학교 기계·자동차공학과
(2011. 10. 28. 접수 / 2012. 4. 24. 채택)

Characteristics of Smoke Emissions from Light Duty Diesel Vehicles Using Light Extinction Smoke Measurement Method under free Acceleration Test Mode

Il-Ho, Kang · Choong-Hoon Lee^{*†}

Graduate School of Industry, Seoul National University of Science and Technology

^{*}Department of Mechanical & Automotive Engineering, Seoul National University of Science and Technology
(Received October 28, 2011 / Accepted April 24, 2012)

Abstract : Characteristics of smoke emission in light duty diesel vehicles was investigated according to the year of production, engine displacement volume, and mileage. The smoke emission was measured using light extinction smoke measurement method under free acceleration test mode. Total number of the tested vehicles was 180. The year of production of the tested vehicles distributed from 2002 to 2007. The displacement volumes of the tested vehicles were categorized as 2-liter, 2.5-liter, 2.7-liter, and 3-liter. The mileage of the tested vehicles distributed from 20,000 km to 400,000 km. The more recent in the year of production of the tested vehicles did not show clearly lower in smoke emissions. Smoke emission showed different values according to driver's pedal pushing pattern. Also, smoke emission peak for each free acceleration test initially increased and reach a maximum of the peak values. Afterwards, the smoke peak gradually decreased as number of test increased. A new guide line was proposed to determine the smoke value from the light duty diesel vehicles based on smoke emission peak patterns which were obtained with several repeated free acceleration tests.

Key Words : smoke emission, free acceleration, light extinction, diesel vehicles, displacement volume, mileage

1. 서론

지구 온난화와 각종 기상 이변에 대한 피해 증가로 인해 날로 환경 안전에 대한 관심이 증대되고 있다. 특히, 자동차에 의한 환경오염 문제는 심각한 문제로 속히 해결해야 할 주된 과제로 대두되고 있다. 이에 따라 휘발유 및 경유 차량의 제작기준과 검사 기준은 날로 강화 되어가고 있다. 우리나라는 정기검사 또는 도로에서 수시로 배출 가스와 매연을 검사하는 제도를 실시하고 있다.¹⁻³⁾ 디젤 차량의 매연 검사는 정기 검사와 정밀 검사로 나누어 실시하는데 일단 정기 검사 방법으로 매연을 측정하여 통과하지 못

한 경우 정밀 검사를 하게 된다.

2010년까지의 정기 검사는 여지 반사식을 이용하여 매연을 측정하였다.⁴⁾ 여지 반사식은 매연 채취시 330 ± 15 cc 배출가스를 1.4 ± 0.2 초 내에 흡입하여 여과지를 통과시킨 후 여과지에 빛을 조사하여 반사된 광량을 광전소자로 측정하여 매연 농도를 측정한다. 매연 검사 방법은 가속 페달에 발을 올려놓고 엔진의 무부하 최고 회전 속도에 도달할 때까지 급속히 밟으면서 동시에 시료 채취 펌프를 작동시킨다. 이때 가속 페달을 밟을 때부터 놓을 때까지의 소요 시간은 4초 이내로 하고 이 시간 내에 시료를 채취하여야 한다. 이와 같은 방법으로 3회 연속 측정할 때 연 농도를 산술평균하고 최대치와 최소치의 차가 5%를 초과하는 때에는 2회를 다시 측정하여 총 5회 중 최대치와 최소치를 제외한 나머지 3회의 측정치

[†] To whom correspondence should be addressed.
chlee5@seoultech.ac.kr

를 산술평균한다. 한편 2011년부터는 정기 검사의 무부하 급가속 검사 방법을 변경하여 실시하고 있다.²⁾ 차량을 정차 상태에서 가속 페달을 급속히 밟아 테일 파이프로부터 배출되는 매연을 측정하여 평가하는 방식은 정기 검사의 무부하 검사 방법과 유사하다. 그러나, 매연 측정 장비에 차이가 있다. 즉, 기존의 정기 검사의 검사법에서는 여지 반사식으로 매연을 측정하는 반면에 2011년부터는 광투과식 방법⁶⁾에 의한 실시간 측정을 한다. 이와 같이 실시간 측정 방식으로 변경함으로써 기존 여지 반사식 장비를 사용한 무부하 검사 방법의 문제로 제기되었던 측정자의 샘플링 타이밍에 따른 오차와 가속 회전수 차이에 의한 오차 그리고 가속 구간에 따른 측정 오차를 줄일 수 있어 보다 더 정확하게 매연을 측정할 수 있게 되었다. 매연 검사는 가속 페달을 엔진의 무부하 최고 회전 속도에 도달할 때까지 급속히 밟으면서 매연을 측정한다. 이때 가속 페달을 밟을 때부터 놓을 때까지 소요 시간은 4초 이내로 한다. 3회 연속 측정된 매연농도를 산술 평균한 값을 측정치로 하고 3회 측정된 매연 농도의 최대치와 최소치의 차가 5%를 초과하거나 최종측정치가 배출허용기준에 부적합한 경우에는 순차적으로 1회씩 더 측정하여 10회까지 측정한다.

정밀 검사는 차량에 부하를 가하고 검사하는 방식으로 자동차 배출 가스 오염물을 질량 기준 평가하는 방식으로 전환하기 위하여 선진국에서 시행중인 강화된 운행차 배출가스 측정 방법을 도입한 것으로 수도권 대기 환경 규제 지역의 노후자동차를 대상으로 시행되고 있다. 부하 검사 방법에 따른 배출물 측정은 KD147모드에 의한 일산화탄소, 탄화수소, 질소산화물 등의 배출가스 측정과 Lug-down 3-mode 방식에 의한 매연 측정이 있다.³⁾ Lug-down 3-mode⁵⁾에 의한 매연 측정은 차대동력기에서 자동차 속도가 70 Km/h에서 100 Km/h를 사이에 있게 한 후 가속 페달을 최대 밟은 상태에서 최대 출력의 엔진 정격 회전수에서 1모드, 엔진 정격 회전수의 90%에서 2모드, 엔진 정격 회전수의 80%에서 3모드로 설정하며 각 모드에서 모드시작 5초 경과 이후 각 모드가 안정되면 엔진 회전수, 최대 출력 및 매연을 측정하기 시작하여 10초 동안 측정된 결과의 산술 평균한 값을 최종 측정치로 한다.

매연 측정 방법과 관련된 기존의 연구는 여지반사식과 광투과식 매연 측정법과 관련된 비교연구^{7,8)}와 Lug down 3-mode에 의한 대형 디젤 차량의 매연 배출 특성과 관련된 연구⁹⁾ 등이 이루어진 바가 있다.

광투과식 매연 측정기를 이용한 무부하 급가속 검사 측정 방법의 도입에도 불구하고 무부하 급가속 매연 측정 방식은 여전히 검사자의 페달을 밟는 패턴의 영향을 받는 것이 현실이다. 무부하급가속 검사 측정 방법에 있어 작업자에 의한 측정 에러를 줄이기 위해 여러 회에 걸친 무부하 급가속 조건에서의 광투과식에 의한 매연 측정 패턴을 분석하였고 이로부터 매연값을 결정하는 방안을 연구하였다. 이와 관련된 기존의 연구는 매우 부족하다. 총 180대의 소형 디젤 차량에 대해 무부하 급가속 검사 측정 방법으로 광투과식에 의한 매연 측정을 한 후 측정 결과를 분석하였다.

2. 실험 장치 및 방법

Fig. 1은 현재 운행차 배출가스 정밀검사에 사용되고 있는 매연 측정 시스템을 나타낸 것으로, 자동차의 주행 상태를 구현할 수 있는 차대동력계와 배출가스를 측정하는 장치, 각종 제어기, 송풍기, 대기압 및 온도 측정기, 기록용 카메라 등으로 구성되어 있다. 무부하 급가속 조건에서 차량이 정지한 상태에서 가속 페달을 급속히 밟았을 때 측정 대상 자동차의 테일 파이프로부터 배출되는 매연을 광투과식으로 측정하며 동시에 엔진 회전수, 흡입 공기 온도, 차속 등을 측정한다. 회전수 측정은 AVL사의 Dual 진동센서를 사용하였으며 진동센서는 마이크로폰과 가속도계를 사용하였다. 광투과식 매연측정 장치의 개략도는 Fig. 2에 나타내었으며 매연 측정기의 광투과도(opacity) 측정 범위는 0~100%이다. EpusT사의 OP-160¹⁰⁾ 장치를 사용하였고 부분 및 연속 측정이 가능하다. 발광부에는 연초록 LED (563 nm)를 사용하였고 수광부는 포토다이오드를 사용하고 있다. 채취된 배기가스는 측정실을 통과하는 동안 발광부로부터 측정실의 수평 방향으로 반대편의 위치한 수광부로 빛을 조사하는데, 이 때 매연량에 따른 빛의 감소량을 수광부의 렌즈를 통해 집광시켜 포토 다이오드에서 인지하여 매연 농도 값을 계산하게 된다.

운행차 배출가스 검사방법²⁾에 명시되어 있는 방법으로 무부하 급가속 조건에서 매연을 측정하였다. 무부하 급가속 검사 모드는 예비 무부하 급가속과 매연 측정 무부하 급가속으로 구성된다. 예비 무부하 급가속은 엔진을 정상 작동 상태로 하고 배기관 내에 축적되어 있는 매연을 배출시키기 위하여 측정 대상 자동차의 엔진을 변속기가 중립인 상태에서 가

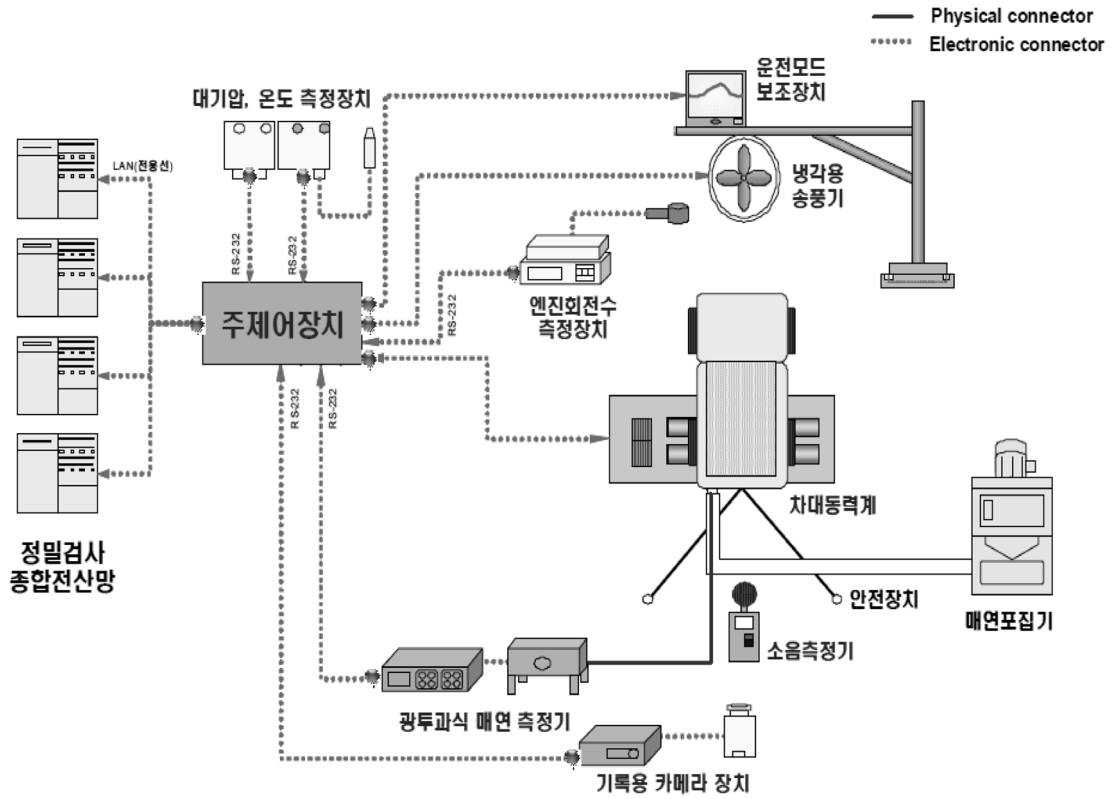


Fig. 1. Schematic diagram of measuring smoke emissions.

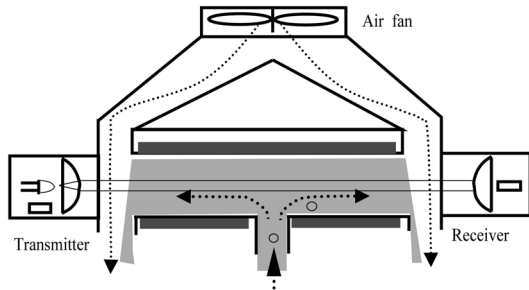


Fig. 2. Schematics of light extinction smoke meter.⁹⁾

속 페달을 최대로 밟은 상태로 급가속 하여 엔진 최고 회전수에 도달하게 한 후 2초간 유지시키고 정지 가동 상태로 복귀시킨 다음 5~6초간 둔다. 이와 같은 과정을 3회 이상 반복 실시한다. 이때 엔진 최고 회전수를 검출하여야 하며, 엔진 최고 회전수가 측정 대상 자동차의 엔진 정격 회전수 미만으로 검출되거나 가속 페달을 밟을 때부터 4초 이내에 엔진 최고 회전수에 도달하지 못하는 경우에는 부적합으로 판정하게 된다.

3. 결과 및 검토

무부하 급가속 조건에서 매연 배출을 검사한 차량은 전술한 바와 같이 동력계에서 도로 주행상태 조건으로 구동하기 불가능한 특수 구조 차량, 상시사륜, 상시 구동 제어 장치 장착 차량 등이며 2002년에서 2007년에 걸쳐 제작된 차량으로 배기량 범위는 2000 cc~3000 cc이다. 검사 대상 차량은 Table 1에 요약하여 나타내었다. 2002년 제작 차량은 주로 2.5리터급 이고 2004년과 2005년 제작 차량은 2리터급과 2.7리터급의 차량이 주를 이루고 있다. 배기량 2리터급

Table 1. Classification of tested vehicles according to the year of production and engine displacement volume

	2002	2004	2005	2006	2007	계
2리터급	16	29	20	1		66
2.5리터급	30	9	1	2	1	43
2.7리터급		34	18	3	1	56
3리터급	5	5	3	2		15
계	51	77	42	8	2	180

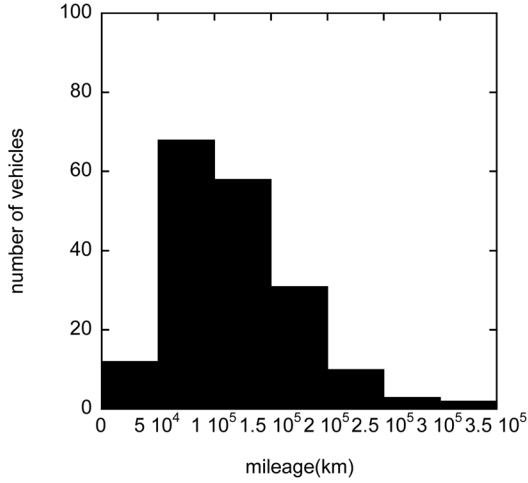


Fig. 3. Number of tested vehicles according to mileage range.

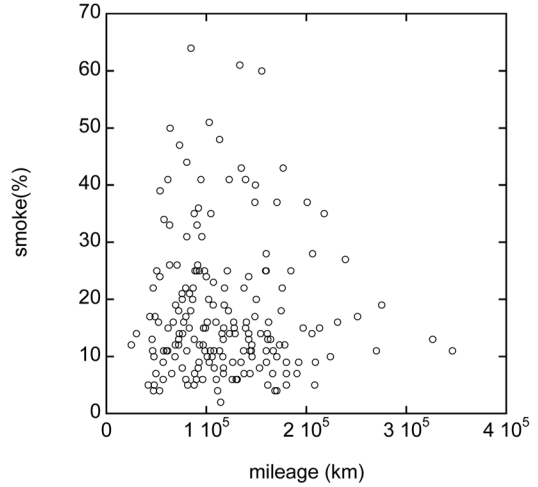


Fig. 5. Smoke distribution according to mileage.

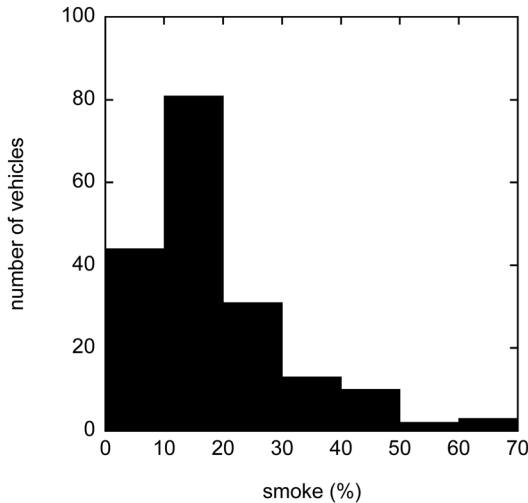


Fig. 4. Number of vehicles according to range of smoke emissions.

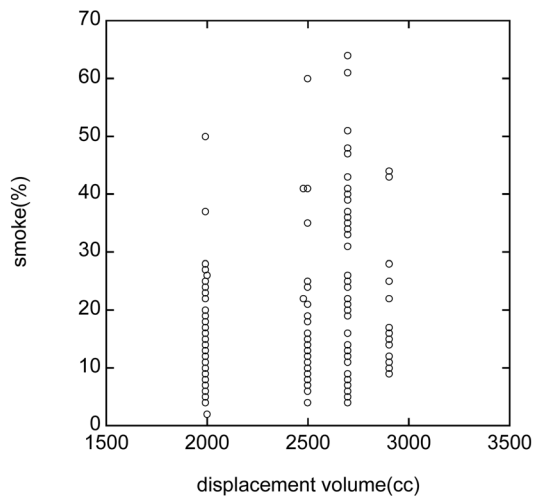


Fig. 6. Smoke distribution according to displacement volume.

차량이 가장 많았으며 2.5리터급과 2.7리터급이 그 뒤를 따랐다.

Fig. 3은 전체 검사 대상 차량의 주행거리 50000 km 범위 별로 분류하여 측정한 차량의 대수를 나타낸 것이다. 주행 거리 50000-100000 km 범위의 차량대수가 가장 많고 주행 거리가 길어질수록 차량 대수가 감소하는 분포를 보이고 있다. Fig. 4는 전체 검사 대상 차량의 매연 배출값 범위에 대응하는 차량 대수를 나타낸 것이다. 전체 검사 대상 차량의 대부분은 10~20% 범위의 매연 배출값을 보였으며 그 다음으로 0~10%, 20~30%, 30~40% 범위 등의 차례로 차량 대수가 감소하였다.

Fig. 5는 전체 검사대상 차량의 주행거리(mileage)에 따른 매연 측정값 분포를 나타낸 것이다. 측정된 매연값 분포는 주행 거리 증가에 따른 뚜렷한 상관관계를 뚜렷이 나타나지 않았다. 이는 차량의 매연 배출 특성이 주행 거리의 영향을 거의 받지 않음을 의미 한다.

Fig. 6은 전체 검사 대상 차량의 배기량별로 매연 측정 결과를 나타낸 것으로 Table 1에 요약한 바와 같이 2.0, 2.5, 2.7, 3.0 리터의 배기량을 갖는 차량의 매연 측정 분포를 나타낸 것이다. 각 배기량 별로 측정한 매연값은 0~65%까지 넓게 분포하고 있어 배기량이 매연값 분포 특성에 미치는 영향은 크지 않으나 다만 배기량 2.7리터 엔진을 장

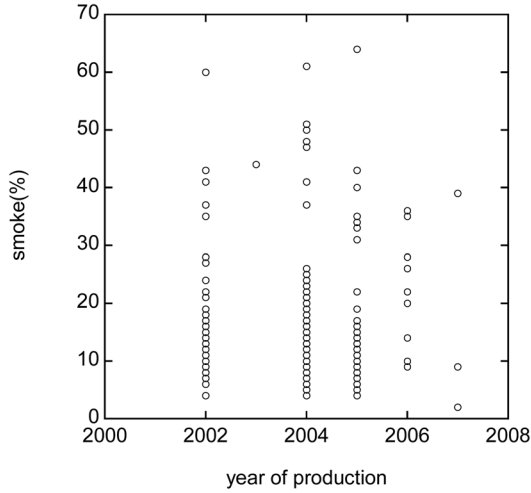


Fig. 7. Smoke distribution according to year of vehicle production.

차한 차량의 매연 분포가 상대적으로 약간 많은 매연을 배출하는 경향을 보이고 있다. Fig. 7은 검사 대상 차량의 연식 별 매연 분포를 나타낸 것으로 Fig. 6의 결과와 유사하게 매연 측정값이 0~65까지 넓게 분포하고 있으며 차량 연식이 매연값 분포에 미치는 영향은 미미하다고 볼 수 있다.

무부하급가속 조건에서의 매연 측정은 가속 페달을 밟아서 4초안에 엔진의 무부하 최고 회전수에 도달하여야만 측정이 유효하게 된다. 즉, 무부하급가속시 최고 엔진 회전수 도달 시간이 4초를 초과하는 경우 측정이 유효하지 않다고 본다. 차량의 무부하 급가속 운전을 10회 반복하여 측정한 매연값과 엔진 회전수를 기록하였으며 Fig. 8 (a)와 8 (b)에 각각 나타내었다. 매연 배출이 가장 많은 차량을 선택하여 실시하였으며 2005년식 2.7 리터급의 엔진을 장착한 차량이다. 무부하 급가속시 도달한 엔진 최고 회전수는 3900rpm으로 매회 반복하여 측정한 매연값의 변동은 크지 않음을 알 수 있다. 반면에 매연값은 측정회수가 증가함에 따라 점차 감소하는 경향을 나타내었다. 첫 번째 측정에서의 매연값은 10회째 측정 매연값의 1.5배 정도 높았다. 이는 측정 횟수가 증가하면서 변화된 엔진의 냉각수 온도 상승, 흡기 공기의 가열, 연료 가열 등의 요인에 의해 매연값이 감소한 것으로 사료된다. Fig. 9는 Fig. 8의 그래프에서 0초~50초 구간을 확대해 나타낸 것이다. 여기서 첫 번째와 세 번째 측정 결과를 보면 가속 구간의 엔진 최고 회전속 도까지 도달하는데 걸린 가속 시간이 4초로 측정되었고, 두 번째 측정에는 3초로

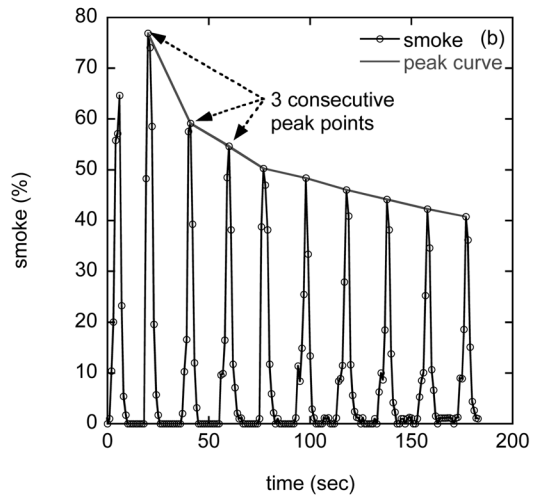
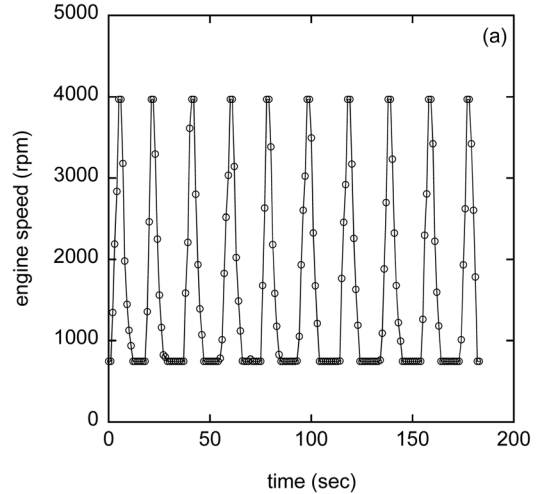


Fig. 8. (a) Smoke emissions and (b) engine speed according to elapsed time after starting free acceleration (2.7L Engine).

정도로 나타났다. 매연값은 첫 번째, 두 번째, 세 번째 각각 60%, 80%, 60%이다. 엔진 최고 속도에 도달하는 데까지 걸린 가속 시간이 4초 정도인 경우 3초 정도인 경우(두 번째 가속)에 비교해 매연 증가가 상대적으로 작은 경향을 보이고 있다. 가속 시간이 3초인 경우에는 가속 페달을 상대적으로 빠르게 밟은 것으로 볼 수 있는데 이로 인해 매연 배출이 상대적으로 증가하였다고 볼 수도 있다. 이것은 가속 페달을 얼마나 빠르게 밟느냐에 따라서 매연 배출 특성이 영향을 받는다고 볼 수 있다.

현재의 정밀검사 대상 디젤 차량의 매연 측정은 측정 전에 3회 무부하 급가속을 하여 머플러에 잔류 매연을 배출한 후 이어서 무부하 급가속을 하여

엔진 최고 속도에 4초 이내에 도달하는 과정에서 측정된 3회 연속 매연 피크값의 평균을 차량의 매연값으로 정하는 방식을 취하고 있다. Fig. 8 (b)에 나타난 것과 같이 무부하 급가속 회수가 증가함에 따라 측정된 매연 피크값이 점점 감소하는 경향을 보이기 때문에 몇 번째 검사에서 측정된 매연을 측

Table 2. Averaged smoke value (%) according to starting point of summation for three consecutive measurement

No.	1	2	3	4	5	6	7	8
2.7 L	66	63.5	54.7	51.1	48.3	46.2	44.2	42.4
2.0 L	22.2	28.3	27.7	20.6	13.9	-	-	-

정의 대푯값으로 하느냐에 따라 매연값이 영향을 받는다. 이러한 측정 방식은 검사 대상 차량의 정확한 매연값을 측정하는데 문제가 될 수 있다. 이러한 문제를 제거하기 위해 각 회의 매연 피크값의 3회 연속된 값들의 평균을 취하여 어떤 단계에서의 매연값을 디젤 차량의 매연 측정 값으로 할 수 있는지를 검토하였다. Table 2에는 2.7 L엔진 장착 차량의 3회 연속 측정된 매연 피크값들의 평균을 나타낸 것이다. 3개 연속 매연 피크값 평균값은 회수가 증가함에 따라 감소하는 경향을 보이고 있다. 한편, 3개 매연 피크값 평균값을 대푯값으로 쓰는데 있어서 어느 시점으로부터 평균값을 취하느냐 하는 문제가 발생할 수 있는데, 이를 위해 Fig. 8 (b)에 나타난 것과 같이 피

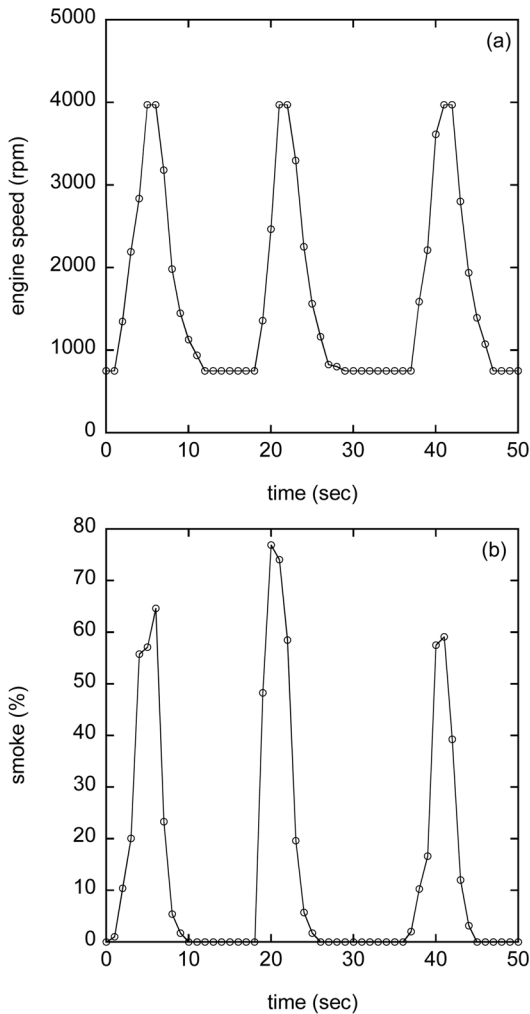


Fig. 9. Selected part of (a) smoke emissions and (b) engine speed according to elapsed time after starting free acceleration (2.7 L Engine).

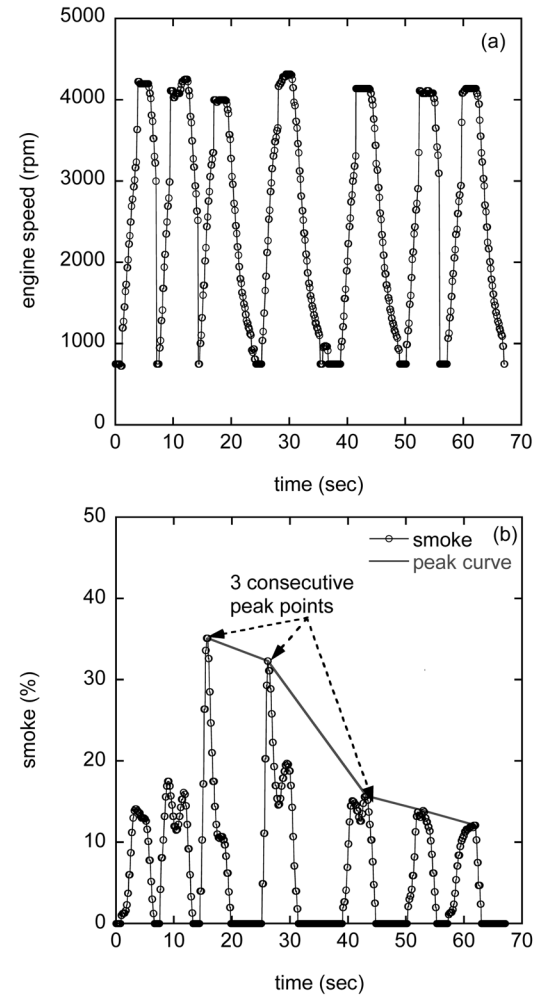


Fig. 10. (a) Smoke emissions and (b) engine speed according to elapsed time after starting free acceleration (2.0 L Engine).

크값의 최대값을 시발점으로 하여 3개 연속 매연 피크값의 평균값을 취하여 그 값을 검사 대상 차량의 매연 배출값으로 정하는 것이 대안 될 수 있다. 이러한 방식으로 계산한 Table 2의 2.7 L엔진 장착 차량 데이터 중 2번째 매연 값인 63.5가 대표값이다. 이와 같은 방식을 사용하면 언제 측정할 매연값을 대푯값으로 할 것인지에 대한 일관된 기준이 마련된다고 볼 수 있다.

Fig. 10은 상대적으로 매연이 적게 측정된 2리터급 배기량 차량의 매연측정 데이터 그래프를 나타내었다. 총7회 측정을 하였으며 엔진회전수는 평균적으로 4200 rpm정도로 측정되었다. 측정할 매연값은 초기에는 증가하는 경향을 보이다가 점차 감소하는 경

향을 볼 수 있었고 매연 값이 많이 측정된 구간은 적게 측정된 구간의 값보다 2배 이상으로 측정되었다. Fig. 11은 0-25초 구간을 확대하여 나타내었고 측정된 최고 회전수는 4000 rpm-4250 rpm이며 가속시간은 3초대로 동일하였다. 가속시 2초 경과 후 측정된 회전수를 보면 첫 번째와 두 번째 측정값은 2700 rpm으로 비슷하고 세 번째 측정값은 3050 rpm으로 나타났으며 측정된 엔진최고회전수는 첫 번째와 두 번째는 4200 rpm 세 번째는 4000 rpm으로 더 낮게 측정되었지만 매연 피크 값은 13%, 17%, 33%로 증가한 것으로 나타났다. Fig. 10의 결과를 보면 Fig. 8의 결과와 유사하게 무부하 급가속시 최고 엔진 회전수까지 도달하는 시간은 측정 요건을 만족하지만 그 도달 시간에 차이가 나면 즉, 페달을 밟는 속도가 다르면 이에 따라 매연 측정값이 차이가 날 수 있음을 알 수 있다.

Fig. 8의 2.7리터 엔진을 장착한 차량의 매연 측정 결과와 유사하게 2.0리터 엔진을 장착한 경우에도 초기 1, 2회 매연 피크값이 작게 나오다가 3번째 매연 피크값의 최대값에 도달하고 그 이후의 측정된 매연 피크값은 차차 감소하는 경향을 보이고 있다. 2.0리터 엔진을 장착한 차량의 매연값 대표치를 결정하는 방식도 전술한 방법과 유사하게 피크의 최대값(3번째 측정치)을 포함한 총3회의 매연 피크값의 평균을 매연값으로 정하는 방식으로 하는 것이 가능하다. 이와 같은 방식으로 결정된 2.0리터 장착 차량의 매연 대푯값은 27.7%이다.

4. 결론

정밀 무부하 급가속 측정법으로 소형 디젤 차량의 연식 및 배기량과 주행 거리에 따른 매연을 측정하여 결과를 분석하였으며, 여러 회 반복하여 측정할 매연값을 측정 대상 차량의 대푯값으로 결정하는 방법을 연구하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 소형 디젤 차량의 무부하 급가속 조건에서 광투과식 검사 방법으로 측정할 매연 배출값의 주행 거리, 연식, 엔진 배기량에 대한 상관 관계는 거의 나타나지 않았다.
- 2) 무부하 급가속 검사 방식으로 여러 회 반복 측정하였을 때 각 회의 매연 피크값은 점차 증가하는 경향을 보이다가 매연 피크값의 최대값에 도달한 후 점차 감소하는 경향을 보였다.
- 3) 무부하 급가속 검사 방식으로 측정할 소형 디젤 차량의 매연 배출 대푯값을 정하는데 있어서 매

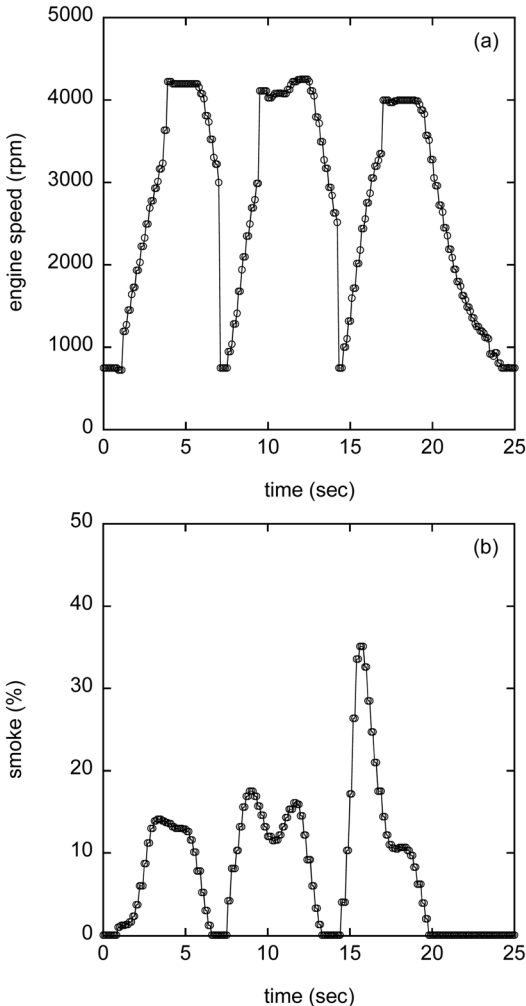


Fig. 11. Selected part of (a) smoke emissions and (b) engine speed according to elapsed time after starting free acceleration (2.0 L Engine).

회 반복 측정된 매연 피크값의 최대값 도달 후 3개 연속 피크값의 평균을 취하여 차량의 매연 배출값으로 정하는 방식을 제시하였다. 이와 같이 새로이 제시된 매연값 결정 방식은 기존의 매연값 결정 방식이 검사자가 임의의 판단에 따라 반복 무부하 급가속 후 엔진최고속도 4초 이내에 도달한 조건에서 3회 연속 매연 피크값의 평균값을 매연값을 정하는 방식의 모호성을 제거할 수 있는 기준을 제시하였다.

참고문헌

- 1) 대기환경보전법, 제63조 (운행차의 배출가스 정밀검사).
- 2) 대기환경보전법 시행규칙, [별표 22] 운행차정기검사의 방법 및 기준(제87조 제1항 관련).
- 3) 대기환경보전법 시행규칙, [별표 26] 운행차의 정밀검사 방법 · 기준 및 검사대상 항목(제97조 관련).
- 4) 여지반사식 측정법, 대기환경보전법 제92조 관련 [별표 26].
- 5) Lug down 3모드 측정법, 대기환경보전법 제4조 2항 관련 [별표 1].
- 6) 광투과식 측정법, 대기환경보전법 제92조 3,4,7항 관련 [별표 27의 3].
- 7) 김주철, 이충훈, “차대동력계에서의 디젤차량의 매연측정을 위한 여지반사식 및 광투과식 측정법의 비교 연구,” 한국안전학회지, 제22권, 제6호, pp. 13~19, 2007.
- 8) 김영주, 박경석, “여지반사식과 광투과식 매연 측정기의 매연도 상관 계수에 관한 연구,” 한국자동차공학회논문집, 제15권, 제5호, pp. 146~152, 2007.
- 9) 진광석, 이충훈, “차대동력계를 이용한 대형 디젤차량의 매연 배출 특성 연구,” 한국안전학회지, 제24권, 제4호, pp. 146~152, 2009.
- 10) Operating Manual AVL DiSpeed 490, AVL DITEST.