

# 차대동력계를 이용한 대형 디젤 차량의 매연 배출 특성 연구

진광석 · 이충훈<sup>†\*</sup>

서울산업대학교 산업대학원 · \*서울산업대학교 자동차공학과

(2009. 1. 7. 접수 / 2009. 7. 1. 채택)

## A Study on the Characteristics of Smoke Emissions from Heavy Duty Diesel Vehicles Using a Chassis Dynamometer

Kwang-Suk Jin · Choong-Hoon Lee<sup>†\*</sup>

Graduate School of Industry, Seoul National University of Technology

\*Department of Automotive Engineering, Seoul National University of Technology

(Received January 7, 2009 / Accepted July 1, 2009)

**Abstract** : The characteristics of smoke emissions from diesel heavy duty vehicles which weigh over 5.5 tons was investigated by driving the vehicles with both the Lugdown 3 modes in the chassis dynamometer and free accelerating mode under no load. The vehicles include commercial vehicles such as bus, microbus, trucks and specialized vehicles, etc. The total numbers of the vehicles tested were 200. The light extinction method was used to measure the smoke emissions from the vehicles' tail pipe. The values of the smoke emissions in the free accelerating mode showed 0~20% band nearly independent of both the mileage and year of production of the tested vehicles, while those in the Lugdown 3 modes showed 0~99% of wide band. The correlation coefficients between the values of the smoke emissions with both the Lugdown 3 modes and the free acceleration mode were 0.12, 0.08, 0.12, respectively. The inspection with Lugdown 3 modes is better one than that with free acceleration from the point of exact inspection of the diesel vehicles' smoke emission.

**Key Words** : smoke, diesel engine, Lug-down 3 mode, free acceleration, light extinction method

### 1. 서론

대기 환경 개선 및 국민의 안전을 위해 현재 우리나라 디젤 차량에 대해 실시하고 있는 매연 배출 규제는 신규 차량이 출하된 후 대기환경 규제 지역<sup>1)</sup>으로 지정되어 있는 지역의 등록 차량 중 일정 기간<sup>2)</sup> 이내에 실시하는 정기 검사와 일정 기간이 지난 후 실시하는 정밀 검사가 있다. 정기 검사는 무부하 급가속 조건에서 여지 반사식에 의한 매연측정방법<sup>3)</sup>을 사용하며 정밀검사 시에는 Lugdown 3 modes<sup>4)</sup>의 부하(load) 운전 조건에서 광투과식 매연측정 방법<sup>5)</sup> 사용한다. 여지반사식 측정법은 측정자가 가속 페달을 밟는 패턴, 배기관 길이, 머플러 체적, 배출 가스 샘플링 타이밍에 따라 측정값이 다를 수 있을 뿐만 아니라 현재 대형 디젤 운행 차량의 대부분이 채용하고 있는 기계적인 가압방식

분사펌프의 경우 연료 전부하 분사량을 줄이는 조정만으로도 검사를 통과할 수 있다는 문제점이 있다. 반면에 Lugdown 3 mode에 의한 부하 검사 방식은 전술한 무부하 급가속 조건에 의한 여지 반사식 매연 검사 방법의 단점을 피할 수 있다. 부하 검사 방법에서 채택하고 있는 광투과식 측정법은 여지 반사식보다 정밀한 측정이 가능한 것으로 알려져 있다<sup>6)</sup>. 최근에는 수도권 및 대구 부산 등의 대도시에서 우선적으로 차대동력계를 도입하여 차량의 매연 검사를 부하 검사 방법으로 하고 있으며 이를 전국적으로 확대해 가는 추세이다.

디젤 차량의 매연 측정 방법과 관련된 선행 연구는 Cho<sup>7)</sup>가 여지반사식과 광투과식 매연 측정법의 비교 연구를 엔진 동력계를 사용하여 수행하였고, Kim과 Lee<sup>8)</sup>는 다수의 소형 디젤 차량에 대해 차대동력계 상에서는 Lugdown 3모드에 의한 광투과식 방법으로 매연을 측정하고 동일차량에 대해 무부하급가속 조건에서 여지 반사식으로 매연을 측정

<sup>†</sup> To whom correspondence should be addressed.  
chlee5@snut.ac.kr

함으로써 두 매연 측정법의 비교 연구를 수행한 바가 있다. Kim과 Park<sup>9)</sup>은 엔진 동력계 상에서 두 매연 측정기 간의 상관관계를 구하는 연구를 수행하였다.

한편, 5.5톤을 초과하는 대형 디젤 차량의 매연 검사는 주로 무부하 급가속 조건에서 이루어졌으나 최근에는 대형 차대동력계에 의한 Lugdown 3 modes 부하 검사 방법을 순차적으로 도입하고 있다. Kim과 Lee<sup>8)</sup>의 연구는 차량 중량 5.5톤 이하의 소형 디젤 차량을 대상으로 차대동력계를 사용하여 매연 특성을 연구하였으나 5.5톤 이상의 대형 디젤 차량의 매연 특성은 연구는 부족한 편이다. 이에 따라, 본 연구에서는 대형 디젤 차량에 대해 차대동력계 상에서 Lugdown 3 modes에 의한 매연 측정하였으며 아울러 무부하 급가속시의 매연 특성을 연구하였다. 매연 측정은 부하 및 무부하 조건 모두 광투과식을 사용하였다. 버스, 트럭, 특수차 등을 포함하는 총 200대 대형 디젤 차량의 매연을 측정하고 결과를 분석하였다.

## 2. 실험 장치 및 방법

### 2.1. 실험 장치

본 연구에 사용되는 장비는 현재 운행차 배출가스 정밀검사에 사용하고 있는 장비로 자동차의 도

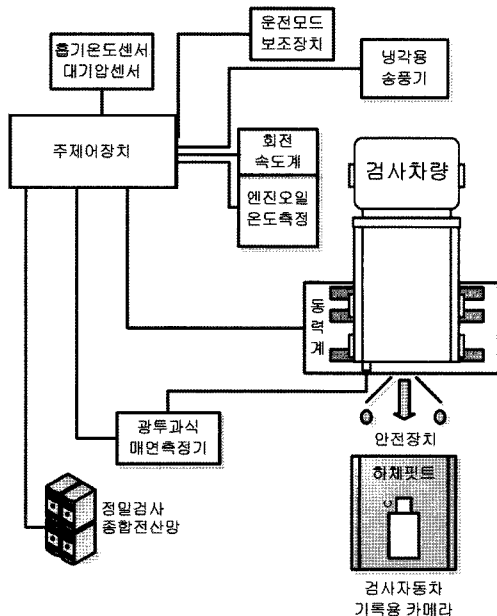


Fig. 1. Schematic diagram of smoke measurement with Lugdown 3 mode.

로 주행상태를 재현하여 이 때 배출되는 매연값을 측정하기 위하여 구성된 시스템으로 Fig. 1에 나타난 것과 같이 차대동력계, 매연측정장비, 회전속도계 및 기타 주변장치로 구성되어 있으며 주제가 장치에 의해 운영된다. 검사장비시스템 중에서 자동차의 주행 상태를 재현하는 장비는 차대동력계로서 자동차가 도로 주행시 부여되는 자동차 부하량 제어에 소요되는 용량에 따라 소형과 대형으로 구분된다. 본 연구에서는 차량 총중량 5.5톤 초과 대형 디젤 자동차에 외부 부하를 가하기 위해 자스텍사의 차대동력계(CCD HD 4000 K 모델)를 사용하였으며 차량이 실제 도로상을 주행할 때의 주행 저항과 관성 등을 모의하여, 실제 도로가 아닌 한정된 공간인 검사장에서 차대동력계의 물리위에서 시험 차량이 도로상을 실제 주행할 때와 비슷한 조건으로 운전되도록 재현할 수 있다.

매연 측정 장치는 Fig. 2의 개략도에 나타난 것과 같이 자스텍사의 CSM-2500 광투과식 매연 측정기를 사용하였다. 매연 측정기의 광투과도(oparcity) 측정 범위는 0~99%이다. CSM-2500은 직접적 또는 간접적으로 매연 측정을 할 수 있는 부분 연속 측정 기술을 사용하고 있다. 발광부(Transmitter)에서 나온 광원은 매연 입자를 통과하면서 일부가 흡수 또는 산란되며 입자를 통과하고 남은 광원의 세기를 반대편에 장착된 수광부(Receiver)에서 측정한다. 이 때 수광부에서 측정한 빛의 강도와 기준광의 강도를 비교하여 매연 농도를 계산한다. 광원으로는 550~570 nm 파장의 연초록 광선을 사용하며 수광 소자는 포토다이오드이다.

### 2.2. 자동차 매연 검사

본 연구를 위해 2007년 7월부터 2008년 7월까지 중량 5.5톤을 초과하는 대형 디젤 차량 총 200대의 Lugdown 3 modes에 의한 부하 운전 조건에서 매연

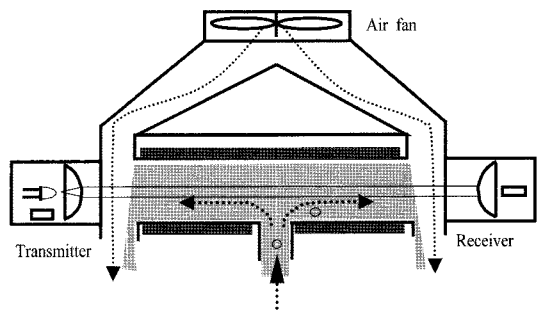


Fig. 2. Schematics of light extinction smoke meter<sup>10)</sup>

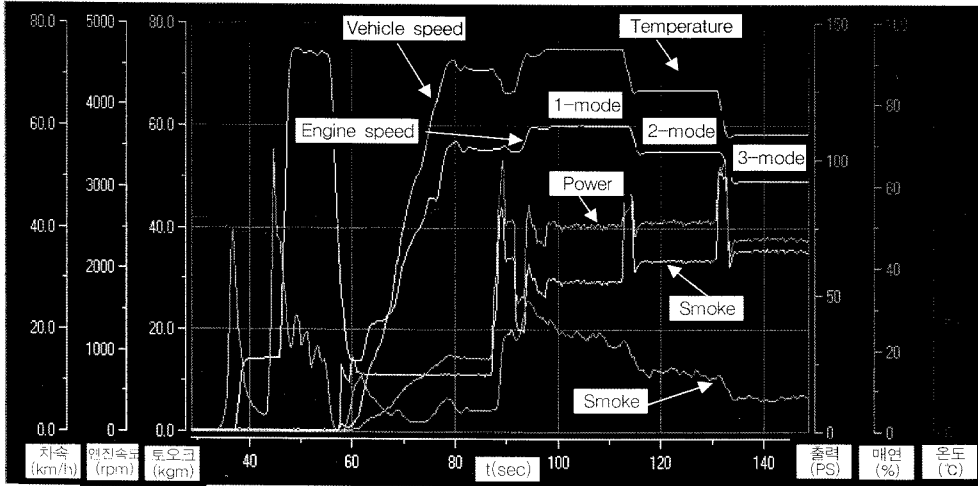


Fig. 3. A captured window of Lugdown 3 modes test result of a diesel vehicle.

을 측정하였고 동일차량에 대해 2006년도에 무부하 급가속 조건에서 측정한 결과와 비교하였다. 200대 차량 중 화물차는 154대이고 버스 등 승합차량은 54대이다. 제작 연식은 1998년부터 2004년까지 분포하고 있으며 엔진 배기량은 3.3L부터 14.6L까지 분포하고 있다.

Fig. 3은 Lugdown 3 모드에 의한 차량 매연 측정 결과의 예를 보여주고 있다. 우선 엔진이 무부하 상태에서 급가속을 하여 엔진 최대회전수까지 상승 시켜 예열 운전을 한다 (0~60초 구간). 다음 단계로 가속 페달을 밟아 차속을 서서히 상승시키면서 일정시간 차속을 유지 시킨다(60~100초 구간). 다음 단계는 3 mode 측정 단계로 차대동력계에서 주행하는 상태에서 측정 대상자동차의 엔진 정격회전수에서 1모드(엔진회전수 3750rpm, 차속 75km/h), 엔진정격회전수의 90%에서 2모드(엔진회전수 3430rpm, 차속 67km/h) 엔진 정격 회전수의

80%에서 3모드(엔진회전수 3060rpm, 차속 58km/h)로 구성하며 이 때 엔진의 부하는 가속 페달을 완전히 밟은 전부하(full load) 조건이며, 각각의 모드에서의 엔진의 목표 회전수가  $\pm 5\%$  이내로 안정되고 나서 5초 후부터 검사 모드가 시작되어 10초 동안의 광투과식 방식에 의한 매연 농도를 반복 측정하여 산술 평균값을 기록한다. 동시에 엔진최대출력, 엔진회전수, 자동차주행속도, 엔진구동토크 등도 함께 기록한다(100~150초 구간).

무부하 급가속 측정 방법은 원래 차대동력계상에서 부하검사방법에 의하여 매연 측정이 불가능한 대형 디젤 차량에 적용하는 매연 측정 방법이다. 본 연구에서는 무부하정지기동(아이들링) 상태에서 엔진을 급가속 하여 배출되는 매연의 농도를 부분유량채취 방식에 의한 광투과식을 사용하여 측정하였다. 측정은 Fig. 4에 나타난 것과 같이 예비 무부하급가속과정에서 검출된 엔진의 무부하 최대

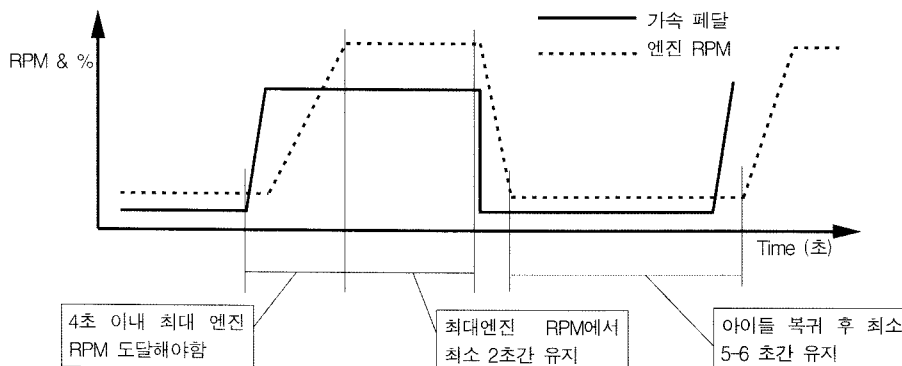


Fig. 4. Smoke measurement using reflection photo method with free acceleration mode<sup>10)</sup>.

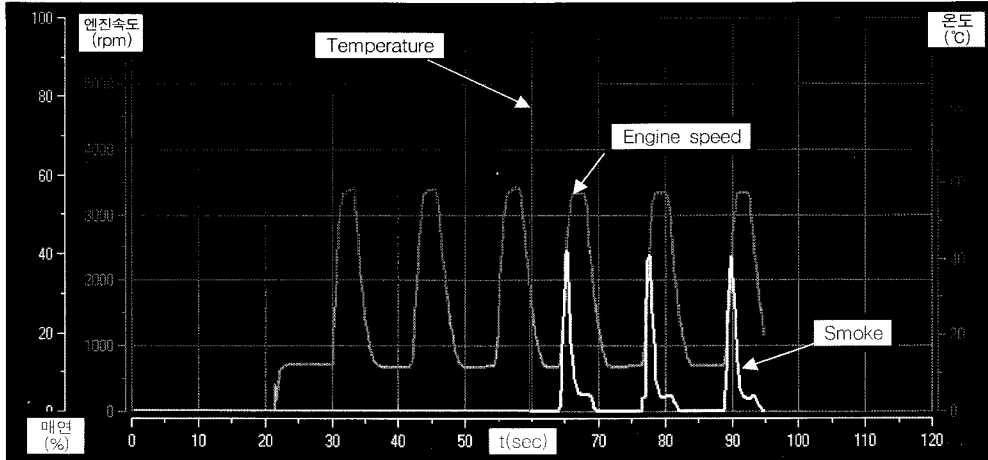


Fig. 5. A Captured window of smoke measurement result using reflection photo meter<sup>8)</sup>.

엔진회전수를 도달하도록 가속 페달을 밟았다가 놓을 때까지의 소요시간은 4초 이내로 하고 이 시간 내에 매연 농도를 0.5초 간격으로 측정하여 이중 최대값을 매연 측정값으로 한다. Fig. 5 측정환예를 보여주고 있다.

### 3. 결과 및 검토

Lugdown 모드 1, 모드 2, 모드 3에서의 전체 차량 매연 측정 결과를 통계 데이터를 살펴보면 Lugdown 모드 1에서의 매연 측정평균값은 19.1% 표준편차는 17.2% 최대값은 99% 최소값은 1%로 나타났다. 모드 2에서는 평균은 17.1% 표준편차 16.2% 최대 84% 최소 1%로 나타났으며 모드 3에서는 평균은 13.5% 표준편차 13.8% 최대 86% 최소 1%로 나타났다. 표준 편차가 평균값과 유사한 수준으로 크게 나타났다.

전술한 바와 같이 측정 대상 차량 총 200대에 대하여 Lugdown 모드 1, 모드 2, 모드 3로 차량을 차대동력계에서 운전하면서 광투과식 매연 측정기를 사용하여 매연을 측정한 각각의 결과를 Fig. 6에 나타내었다. Fig. 6(a)~(c)는 매연 측정값을 주행거리(mileage) 변화에 따라 나타낸 것이다. Fig. 6(d)~(f)는 동일한 데이터를 차량 연식에 따른 매연 측정값으로 나타내었다. Fig. 6(d)~(f)에 나타난 실험 대상 차량의 연식 분포에서 알 수 있듯이 대체로 2002~2004년 식의 차량이 대중을 이루고 있고 그 중에서도 2004년 생산 차량이 가장 많은 수를 나타내고 있다. 차량의 주행 거리는 대체로 20만 킬로미터 이내인 차량이 가장 많이 분포하고 있음을

Fig. 6(a)~(c)로부터 알 수 있으며 그래프 내에 표시된 심볼의 수가 차량 대수를 의미하므로 검사 차량의 대부분은 주행 거리가 20만 킬로미터 이내이면서 매연 배출 값이 주로 30% 이내인 것으로 나타났다.

주행 거리에 따른 매연 배출 특성을 보면 Fig. 6(a)의 Lugdown 모드 1에서의 매연값이 Lugdown 모드 2(Fig. 6(b))와 Lugdown 모드 3(Fig. 6(c))에 비해 상대적으로 큰 값을 나타내고 있다. 이것은 일반적인 디젤 엔진의 토크 특성과 관련이 있다고 볼 수 있는데 즉, 전부하 조건에서 매연이 정격점(Lugdown 모드 1)에서 가장 많이 나오는 특징이다. 정격점에서 전부하 엔진 속도가 최대인 경우가 일반적이며 이에 따라 연료/공기 혼합이 이루어질 수 있는 시간이 부족하고 매연이 많이 나올 수밖에 없다. Lugdown 모드 2와 Lugdown 모드 3의 운전 조건도 역시 전부하이지만 상대적으로 엔진 스피드가 작기 때문에 연료/공기 혼합할 수 있는 시간이 상대적으로 길기 때문에 매연이 작게 나올 수밖에 없다. Fig. 6(d), (e), (f)에 나타난 차량 제작 연도에 따른 각 부하 운전 모드에서의 매연값도 Lugdown 모드 2, Lugdown 모드 3과 비교해서 Lugdown 모드 1에서 상대적으로 많은 매연을 배출하고 있음을 알 수 있다. 이러한 Lugdown 모드별 매연 배출 특성이 다르게 나타난 특성을 고려하여 Lugdown 모드별 가중치를 다르게 가져가는 것도 고려해볼 만하다. 예를 들면 시내버스의 경우 속도가 작은 모드 3에 가중치를 높일 필요가 있고, 고속버스의 경우 주로 모드1에 가중치를 높여 매연 배출값을 계산하는 것이다. 이와 같이 차량의 용도별 주행 특성

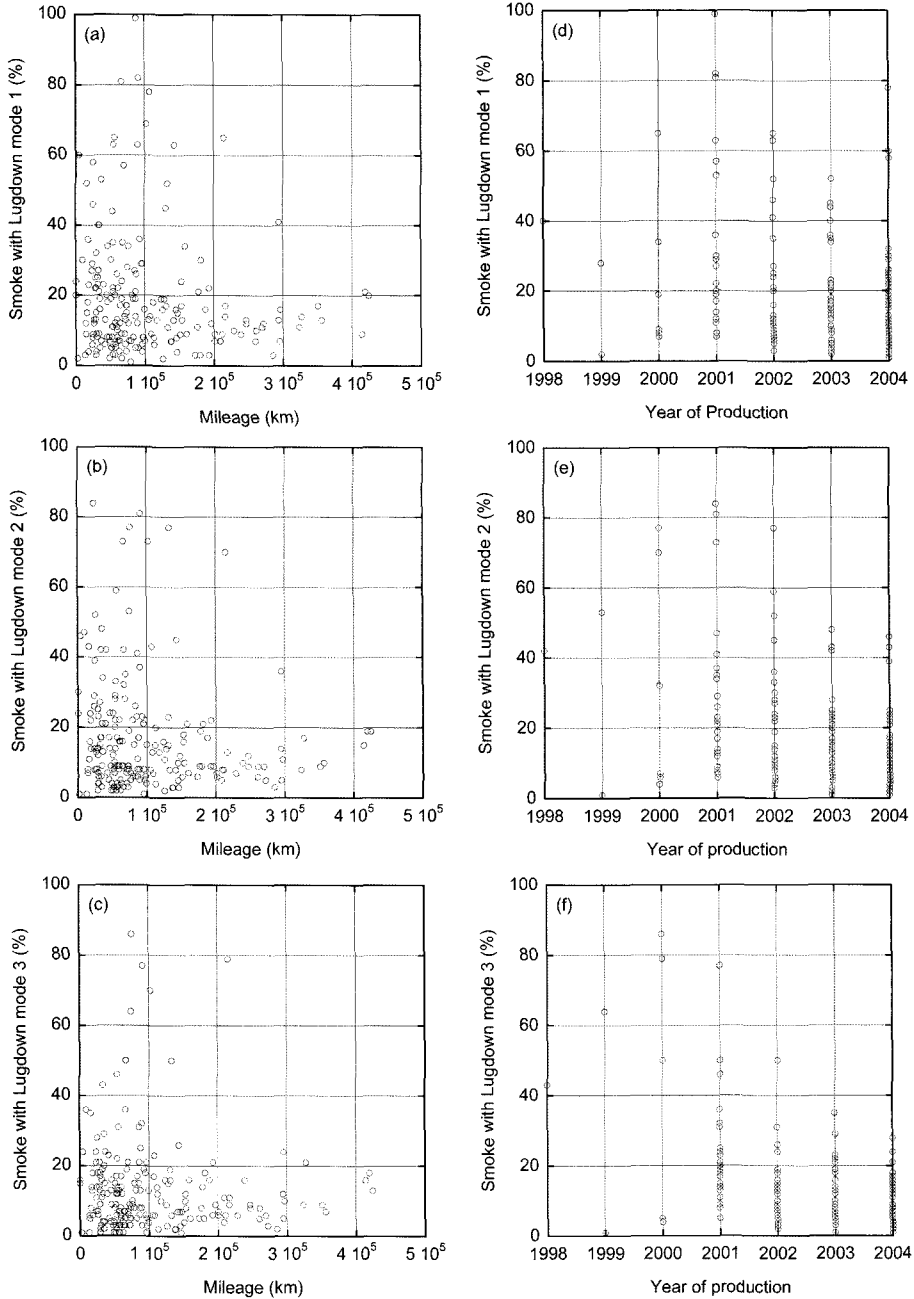


Fig. 6. Results of the smoke measurement for all tested vehicles with Lugdown 3 modes according to the mileage and year of production

을 반영하여 배출 규제를 하면 규제의 실효성을 높일 수 있다고 사료된다.

Fig. 6(a)~(c)를 보면 매연 측정값이 거의 0~99%에 걸쳐서 매우 폭넓게 분포하고 있는데 이는 차량을 검사하여 합격 불합격을 결정하는 관점에서 보

면 좋은 특성이라고 볼 수 있다. Lugdown 부하 모드에 의한 차대 동력계에서의 대형 디젤 차량 검사 방법이 바람직하다고 볼 수 있다. 또한 Fig. 6(a)~(c)에서 매연 배출값이 주행거리에 큰 영향을 받지 않고 오히려 Fig. 6(d)~(f)의 결과로부터 알 수 있듯

이 차량의 제작 연식에 더 큰 영향을 받고 있음을 알 수 있다. 즉, 연식이 최신인 경우(2004년) 매연 값이 작은 차량이 집중되어 있으며 제작연도가 오래된 차량일수록 매연을 많이 배출하는 차량의 대수가 증가하는 경향을 보이고 있다. 2001년, 2000년, 1999년과 같이 제작 연도가 오래된 차량일수

록 매연 배출 값이 넓은 밴드를 형성하고 있으며 최대 99%값까지도 측정된 경우도 있다. 이것은 다른 여러 요인을 고려해 볼 수 있지만 무엇보다도 최신 제작 차량에 신기술들이 많이 적용되어 매연이 적게 배출되었기 때문으로 사료된다.

Lugdown 모드1에서의 연식에 따른 매연 배출

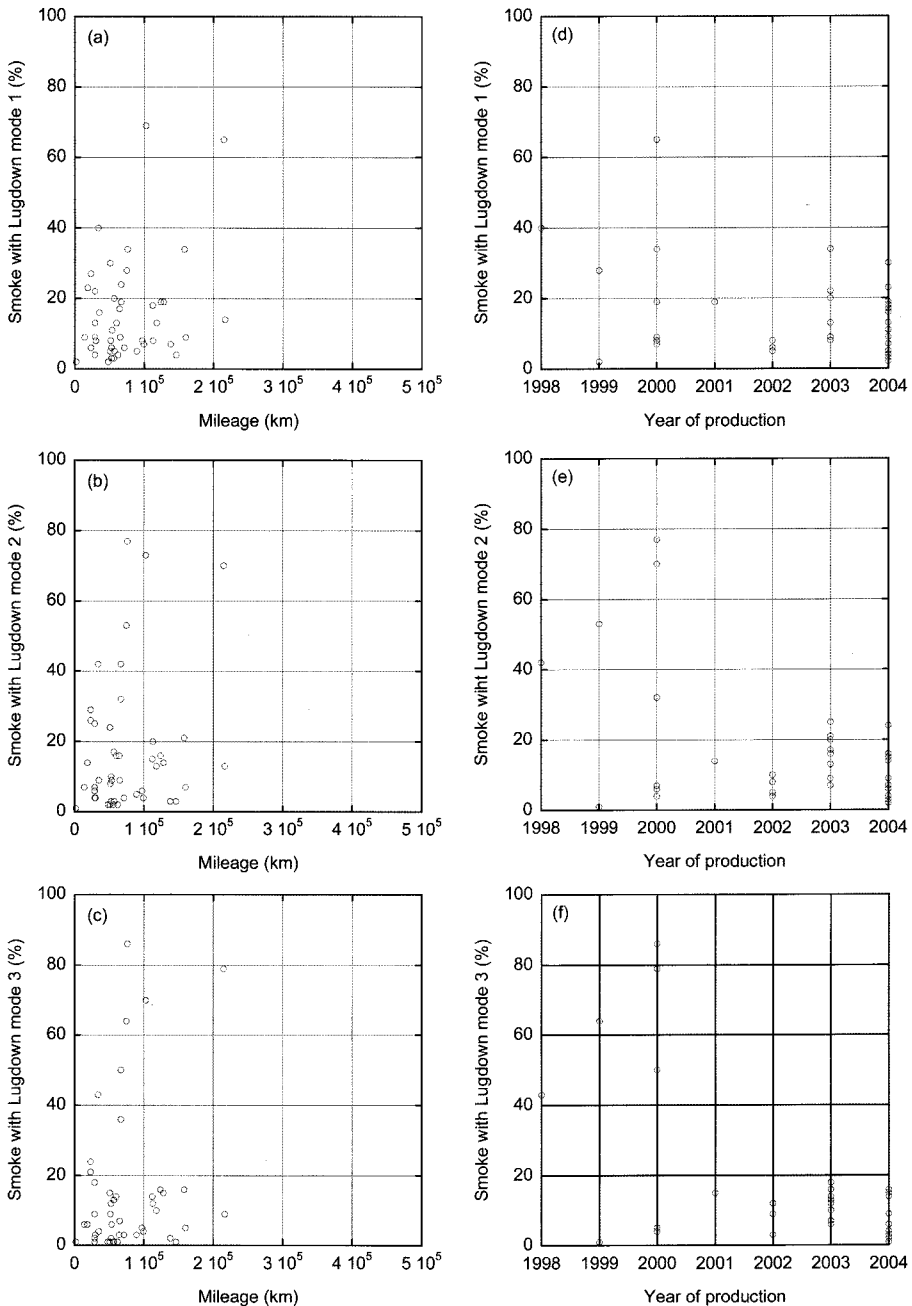


Fig. 7. Results of the smoke measurement for all buses with Lugdown 3 modes according to the mileage and year of production.

특성을 Fig. 6(d)에 나타내었는데 매연의 배출값이 폭넓게 분포하고 있어서 차량 검사시 합격 및 불합격 판단을 하는데 도움을 줄 수 있다. 모드 2에서의 매연 배출 특성(Fig. 6(e))도 모드 1과 유사한 특성을 보이고 있다. 모드 3(Fig. 6(f))의 매연 배출 특성은 모드 1, 모드 2 배출 특성과는 다르게 매연

배출값 밴드폭이 상대적으로 좁게 분포함을 알 수 있다.

Fig. 7은 전체 실험 차량 중 버스차량만의 매연 배출 특성을 따로 나타낸 것이다. 매연 검사를 한 버스의 대수는 46대이다. 이들의 Lugdown 3 모드에서의 매연 배출 평균값은 모드 1, 모드 2, 모드 3

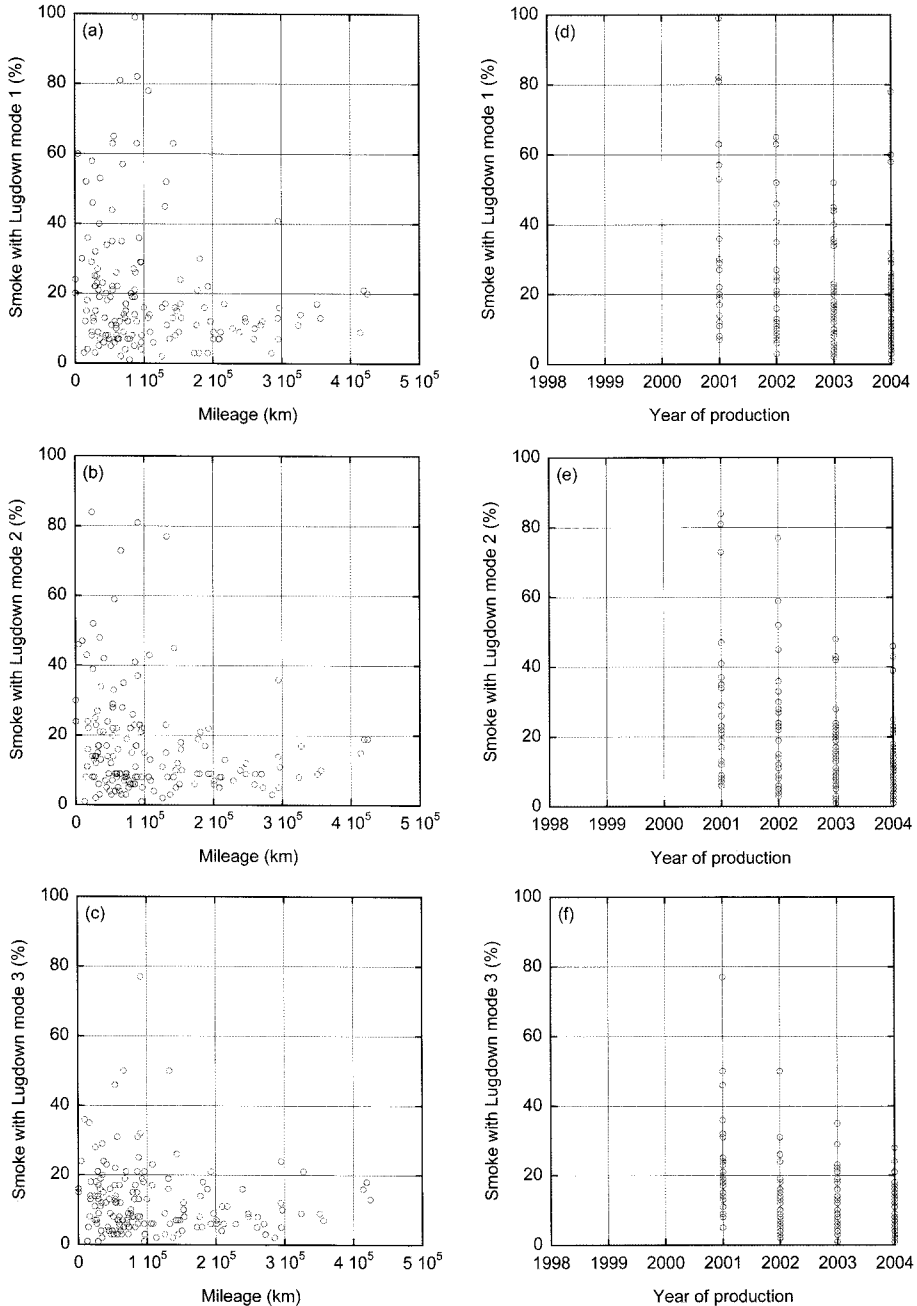


Fig. 8. Results of the smoke measurement for all trucks with Lugdown 3 modes according to the mileage and year of production.

에서 각각 15.8%, 17.1%, 15.7%로 표준편차는 14.6%, 19.1%, 21.4%로 매우 크게 나타났다. 대체로 3모드에 걸쳐서 비슷한 매연 배출값을 나타내었다. 한편 무부하급가속 조건에서 매연 배출 평균은 8.6%, 표준편차 4.8%로 Lugdown 3mode에 비해 작은 값과 작은 편차를 나타내었다. Fig. 6의 결과와 유사한

특성을 보이고 있다. Fig. 7(a)~(c)의 결과를 보면 주행거리가 10만km 이내의 차량이 주를 이루고 있는데 Fig. 7(d)~(f)의 연식별 매연 배출 특성 그래프에서 알 수 있는 바와 같이 차량의 연식이 주로 2003년, 2004년 분포하고 있어서 주행 거리가 짧을 수밖에 없다. Fig. 7(d)~(f)를 보면 2003년식, 2004

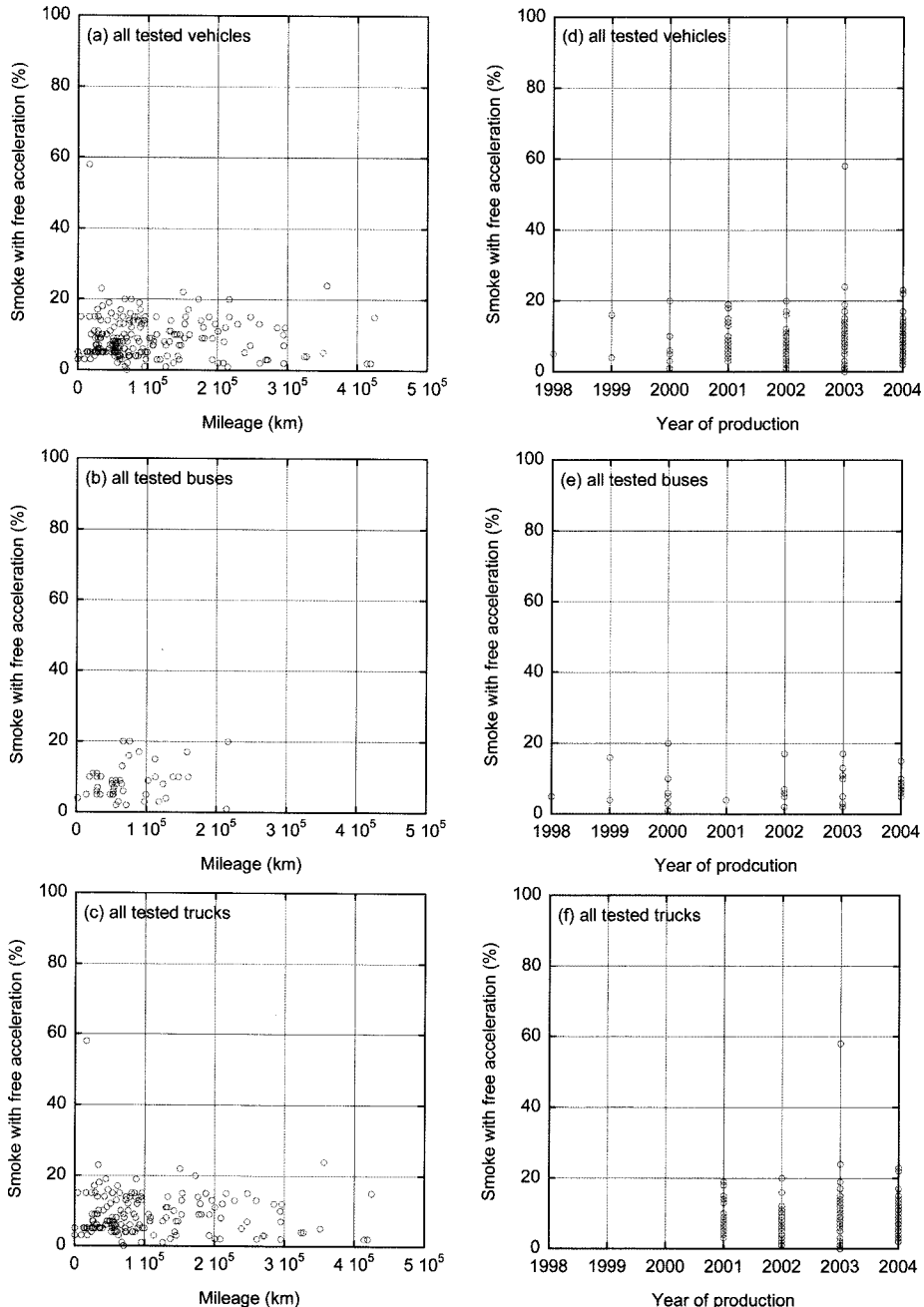


Fig. 9. Results of the smoke measurement with free acceleration mode according to the mileage and year of production.



년식의 차량은 매연 배출값이 20% 미만으로 매연 값이 작은 분포를 보이고 있다.

Fig. 8은 전체 실험 차량 중 트럭 154 대의 매연 배출 특성을 따로 나타낸 것이다. Lugdown 3모드에서 측정된 평균값은 모드1에서 20.1%, 모드 2에서 17.0%, 모드 3에서 12.8%이다. 표준 편차는 모드 1, 2, 3 각각 17.8%, 15.4%, 10.5%로 나타났다. 무부하급가속 조건에서의 평균 매연측정값은 9.0%이고 표준편차는 6.4%로 나타났다. 전체적으로 Lugdown 3모드에 의한 매연측정값이 높게 나타났고 무부하급가속에서는 매연 측정값을 작게 나타냈다. 트럭의 경우 생산 연식이 2001~2004년에 분포하고 있으며 2001년 이전에 생산된 것은 없음을 알 수 있다. 전체적인 매연 배출 특성은 Fig. 6 및 7의 결과와 유사한 특성을 보이고 있으나, 연식별 매연 배출값이 Fig. 7의 버스의 결과와 약간 다른 특성을 보이고 있다. 즉, 2003, 2004년 연식의 일부 차량에서는 매연 배출값이 최대 80%까지 높게 배출되는 차량이 있음을 알 수 있으며 이는 동일한 연식에서 버스의 최대 배출값이 거의 20%를 상회하지 않은 것과 대조적이다. 이러한 결과는 버스의 경우 일정한 주행 패턴과 부하 조건에서 운전을 하는 반면에 트럭류의 경우 차량의 사용 조건이 매우 다양한 것에 기인한다고 사료된다.

전체 차량 200 대에 대한 무부하 급가속 조건에서의 매연 측정값은 평균이고 8.6% 표준편차 6.1%로 나타났다. 무부하 조건에서 측정하기 때문에 Lugdown 3모드에서의 매연 측정값보다 작게 나올 수밖에 없다. Fig. 9는 배연 배출 검사를 무부하 급가속 조건에서 매연 측정값을 전체 차량, 버스, 트럭에 대해 주행거리별 또는 제작 연식에 따라 나타낸 것으로 Lugdown 3 modes로 매연을 측정할 시점보다 1년 전에 동일한 차량에 대해서 광투과식으로 측정된 것이다. 매연 측정값이 전체적으로 거의 20% 이내 임을 알 수 있다. 매연 측정값 밴드가 0~20%로 매우 좁기 때문에 검사의 합격 불합격을 판정하는데 어려움이 있을 수 있다. 또한, 실제 차량의 운행이 엔진에 부하가 가해진 조건에서 이루어지기 때문에 무부하급가속 매연 검사 방법은 차량의 실제 매연 배출 특성을 반영하기 어렵고 단지, 매연 배출 검사의 편의성 및 신속성 검사 장비의 저렴함 등의 측면에서 장점이 있기 때문에 현재는 동력계상에서 검사 진행이 불가능한 구조의 자동차이거나 도로 주행 목적의 차량이 아닌 특수 차량들을 대상으로 실시되고 있다.

본 연구에서 얻어진 Lugdown 3 modes 매연 측정값과 광투과식 무부하급가속 매연 측정값이 1년의 시차를 가지고 있지만 상관계수가 1-모드에서 0.12, 2-모드에서 0.08, 3-모드에서 0.12 와 같이 상관계수가 매우 낮게 나타났다. 또한 총 200 대에 대한 차량 중 불합격률은 Lugdown 3모드로 하였을 때 40%, 무부하급가속 방법으로 하였을 때는 5%로 나타나 Lugdown 3모드에 의한 부하 측정 방식이 합격 불합격의 판정에 있어서 뛰어난 변별력을 가지는 것으로 나타났다.

따라서, 광투과식 매연 측정 장비를 사용한 무부하 급가속 매연 측정이 표준검사 방법으로 계속 사용되려면 측정시, 운전자의 가속페달을 누르는 속도 영향인자를 배제하고 재현성이 뛰어난 측정법이 개발되어야 할 것으로 사료된다. 즉, 인위적인 요소가 배제된 조건에서 무부하 급가속 매연 측정 실험 방법 및 측정 지그 등의 개발이 필요하다.

#### 4. 결론

광투과식 매연 측정 장치를 사용하여 중량 5.5 톤 이상의 대형 디젤 차량을 대상으로 차대동력계에서 Lugdown 3 modes의 부하 및 무부하 급가속 운전 조건에서의 매연 배출 특성을 비교 연구하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) Lugdown 모드 1, 모드 2, 모드 3에서 각각의 매연 측정평균값은 19.1%, 17.1%, 16.2%로 모드 1, 모드 2, 모드 3의 순서로 매연이 많이 배출되었다. 매연값 배출범위는 차량에 따라서 1~99%까지 매우 넓은 배출 범위를 나타내었다.
- 2) 대형 디젤차량 매연 검사 불합격률은 Lugdown 3모드로 하였을 때 40%, 무부하급가속 방법으로 하였을 때는 5%로 나타나 Lugdown 3모드에 의한 부하 측정 방식이 합격 불합격의 판정에 있어서 뛰어난 변별력을 가지는 것으로 나타났다.
- 3) 무부하 급가속 조건에서 8.6%였으며 Lugdown 3모드에서의 매연 측정값보다 작게 나왔다.
- 4) Lugdown 3 modes에 의한 부하 운전 조건에서 매연 배출값은 주행 거리에 의한 영향보다는 차량 제작 연식에 영향을 많이 받았으며 연식이 오래된 차량일수록 매연값 밴드 폭이 넓게 나타났다.
- 5) Lugdown 3 mode의 모드 1, 모드 2, 모드 3과 무부하 급가속에 의한 매연 측정값들 간의 각각의 상관계수는 0.12, 0.08, 0.12로 매우 낮게 나타났다.

### 참고문헌

- 1) 대기환경보존법 제633조, 운행차의 배출가스 정밀검사.
- 2) 대기환경보존법 시행규칙 제96조, 정밀검사대상 자동차 [별표25].
- 3) 여지반사식 측정법, 대기환경보전법 제92조관련 [별표26].
- 4) Lug down 3모드 측정법, 대기환경보전법 제4조2항관련 [별표1].
- 5) 광투과식 측정법, 대기환경보전법 제92조 3,4,7항 관련 [별표27의3].
- 6) B. L. Jones, D. J. Stollery, J. M. Clifton and T. F. Wylie, "In-Service Smoke and Particulate Measurements", SAE paper 970748, 1997.
- 7) 조배기, "디젤자동차 매연 측정 방법중 여지반사식과 광투과식의 비교에 관한 연구", 건국대학교 산업대학원 석사학위 논문, 1998.
- 8) 김주철, 이충훈, "차대 동력계에서의 디젤 차량의 매연 측정을 위한 여지반사식 및 광투과식 측정법 비교 연구," 한국안전학회지, 제22권, 제6호, pp. 13~19, 2007.
- 9) 김영주, 박경석, "여지반사식과 광투과식 매연 측정기의 매연도 상관계수에 관한 연구", 한국자동차공학회 논문집, 제15권, 제5호, pp. 146~152, 2007.
- 10) 광투과식 매연측정기 교육교재, (주) Eplust