

차대 동력계에서의 디젤 차량의 매연 측정을 위한 여지 반사식 및 광투과식 측정법의 비교 연구

김주철* · 이충훈†

*서울산업대학교 산업대학원 · 서울산업대학교 자동차공학과
(2007. 7. 12. 접수 / 2007. 11. 15. 채택)

A Comparative Study on the Measurement of Smoke from Diesel Vehicle on Chassis-dynamometer using Reflection Photo and Light Extinction Method

Ju-Chul Kim* · Choong-Hoon Lee†

*Graduate School of Industry, Seoul National University of Technology
Department of Automotive Engineering, Seoul National University of Technology
(Received July 12, 2007 / Accepted November 15, 2007)

Abstract : Diesel car's smoke measurement equipment and method were investigated based on the exhaust gas regulations. Reflection photo method and light extinction method for measuring smoke were compared under conditions of both no load mode and Lug-down 3 mode. Free acceleration mode at no load condition was used for regular inspection of diesel car, and Lug-down 3 mode was used for fine inspection of the diesel car. A correlation between no load mode and Lug-down 3 mode was investigated in this research. The smoke measured with reflection photo method was 1.5~2 times higher than that of light extinction method. The correlation coefficient between reflection photo method and light extinction method for measuring smoke was 0.83, which shows comparatively high correlation between the two methods for measuring smoke in diesel engines.

Key Words : smoke, diesel engine, Lug-down 3 mode, light extinction method, reflection photo method

1. 서 론

매연, 질소 산화물 등 유해 가스를 과다하게 배출하고 진동 및 소음으로 인해 승차감이 좋지 않음에도 불구하고 디젤 엔진은 연비가 뛰어나기 때문에 최근 유가의 급격한 상승과 국제적인 CO₂ 배출 규제와 맞물려 미래의 자동차 동력원으로 다시 주목 받고 있다. 기존의 전통적인 기계식 분사 방식 디젤 엔진이 가지고 있던 매연, 소음, 진동 등의 문제는 전자 제어로 정밀하게 제어되는 커먼 레일 분사 시스템, 1100 bar 내외에 이르는 초고압 분사 그리고 디젤 매연 후처리 장치(DPF) 및 NO_x 촉매 변환 장치를 장착함으로써 극복되고 있다^{1,4)}.

디젤 자동차로부터 배출되는 유해 가스는 대도시 시민의 건강 및 안전에 악영향을 끼친다. 이러한 유

해 배출 가스는 CO, HC, NO_x, 매연⁵⁾ 등이며 이 중에 운행 중인 차량에 대한 배출 가스 검사는 매연에 한정하여 이루어지고 있다. 디젤 자동차 매연 검사 방법에는 정기 검사를 시행하는 여지반사식 측정법⁶⁾과 정밀 검사를 시행하는 광투과식 측정법⁷⁾이 있다. 여지반사식 측정법은 측정자가 가속 페달을 밟는 패턴, 배기관 길이, 엔진의 특성, 배출 가스 샘플링 속도에 따라 측정값이 다를 수 있다. 여지반사식 검사 방법을 사용하는 경우 분사 펌프의 연료 전부하 분사량을 줄이는 조정만으로도 검사를 통과할 수 있는 문제점이 있다.

여지반사식은 디젤 차량 배기관으로부터 일정체적의 배출 가스를 여지에 통과시킨 후 여지를 수거하여 빛을 쪼여 여지에서 반사되는 빛의 강도를 측정하는 방식이다. 매연을 통과시키지 않은 여지에 빛을 쪼이면 0% BSU(bosch smoke unit) 이고 완전 흑색은 100% BSU로 측정된다. 광투과식 측정법은

* To whom correspondence should be addressed.
chlee5@snut.ac.kr

발광부에서 빛(적외선)을 주사하면 배출 가스 성분 입자상 물질에 의해 일부 빛이 산란되고 산란되지 않은 빛은 통과하여 수광부에서 그 강도를 측정함으로써 매연의 농도를 계산할 수 있다. 광투과식 측정법은 미세 먼지, 백연(white), 흑연(black smoke), 청연(blue smoke) 등을 모두 측정할 수 있으며 여지반사식보다 정밀한 측정이 가능하다⁸⁾. 따라서, 최근에는 여지반사식보다 정밀한 검사 방법인 광투과식 측정 장비를 도입하여 수도권 및 대구 부산에서 검사를 일부 시행하고 있는 추세이다.

본 연구에서는 디젤 자동차의 대표적인 매연 측정법인 여지반사식과 광투과식 측정 장비를 각각 사용하여 동일 차량에 대해 매연 측정을 하였다. 여지반사식 매연 측정법은 차량을 무부하 조건에서 운전자가 급가속하는 조건에서 매연을 측정하며 광투과식 방법은 차량을 새시디어나모 미터에 거치한 조건에서 부하 검사(Lug-down 3모드)⁹⁾로 운전하면서 매연을 측정하였다. 동일 차량에 대해 전술한 여지반사식과 광투과식 측정 방법으로 매연을 비교 측정함으로써 상호 측정법의 상관관계를 연구하였으며 이와 관련된 기존의 연구로 조¹⁰⁾가 엔진 동력계에서 두 가지 측정법의 비교 연구를 진행하였다. 정부에서는 매연 검사의 정확성을 향상시키기 위해서 디젤 자동차 매연 검사를 Lug-down 3모드로 전환하려는 계획을 가지고 있다. Lug-down 3모드에 의한 매연 검사법을 전면적으로 실시하기에 앞서 단계적으로 그 적용을 확대할 계획이다. 당분간은 무부하 급가속에 의한 매연 측정법과 Lug-down 3에 의한 측정법을 병행하여 사용할 것으로 예상된다. 이에 따라 전술한 두 가지 매연 측정법에 의한 데이터의 상호 비교를 위해 상관관계를 파악하는 것은 중요하다. 그러나 현재 실제 차량 검사시 사용되고 있는 차대 동력계에서 직접 두 가지 매연 측정법을 비교하는 연구는 이루어지지 않았으며 이에 대한 연구가 필요하다. 또한, 차량의 연식, 주행거리 등에 따른 매연 배출 특성을 전술한 두 가지 매연 측정법으로 측정하여 비교하였다.

2. 매연 생성 메카니즘

디젤 기관을 겨울의 추운 날씨에서 시동하거나 장시간 저부하로 운전하는 경우 냉각수 온도가 높지 않음으로 인해 불완전 연소가 증가하여 자극적인 냄새를 동반한 백연과 청연을 배출한다. 백연은

생성된 가스 중의 수분과 탄화수소(THC) 성분이 냉각에 의해서 응축한 1.0 μm 이상의 입자로 되어 있고 청연은 기관이 워밍업에 따라서 입경이 작아져서 0.4 μm 이하의 입자로 구성되고 있다. 백연과 청연의 성분의 큰 차이는 없다.

매연 배출량이 많은 디젤 차량의 주행 조건은 차량의 발진, 정지 및 출발이 잦은 상태, 오르막 주행, 시동 후 급속 발진 등이다. 차량의 액셀 페달을 밟아 엔진 부하가 커짐에 따라 매연 입자의 배출량은 증가한다.

매연 입자는 대부분 탄소로 이루어져 있으며, 압력이 높을수록 분자체의 중합이 용이하므로 매연은 많이 형성된다. CO₂, H₂O, H₂, N₂ 및 불활성 기체를 연료에 첨가하면 이들 기체의 열 용량 효과에 의하여 매연의 생성은 억제된다. 그러나 철가루, 망간 및 할로겐족(특히 브롬)을 첨가하면 OH 등 라디칼의 재결합 반응을 유도하여 매연의 산화 반응을 억제하므로 매연의 생성을 증가시킨다.

확산화염의 경우 연료의 열분해는 연료의 구조에 따라 상이하고, 열 분해된 생성물 중 아세틸렌과 같은 생성물이 매연 형성에 영향을 주므로, 확산 화염의 산화에 연료의 구조가 영향을 미친다. 즉, 확산 화염에서는, 메탄, 프로판, 부탄 등의 알칸족 탄화수소보다 알켄족 탄화수소(에틸렌, 프로필렌, 옥텐), 알킨족(아세틸렌등), 방향족(톨루엔, 부틸벤젠)으로 가까이 갈수록 매연을 많이 발생 시킨다. 그러나 예혼합 화염의 경우, 탄화수소계 연료의 열분해 시에 생성된 아세틸렌이 함께 존재하는 산화제에 의하여 고온 화염면 전에서 산화가 많이 이루어지므로, 매연은 고온 화염면 이후에서 주로 형성된다. 따라서 예혼합 화염에서 연료의 구조는 매연 형성에 영향이 적다. 예혼합 화염의 경우 화염의 온도가 높으면, 화염 전에 형성된 매연 전조물의 산화가 촉진되므로, 매연 형성이 낮고, 비 예혼합화염의 경우 화염 온도가 높으면 열분해가 촉진되므로 매연의 형성이 높다.

매연 입자의 생성과 소멸은 크게 매연 전입자의 생성, 입자생성, 표면 성장 및 입자 합체, 입자의 산화등 네 단계로 나뉘어진다. 매연전 입자인 다중고리방향족 탄화수소(Polycyclic Aromatic Hydrocarbon, PAH)의 생성에는 화학 반응율이 중요한 역할을 한다. 연료로부터 생성된 아세틸렌과 고리 구조의 생성이 입자의 생성과 성장에 관건이 된다. 비예혼합 화염이나 예화염 화염이나 생성된 매연의 화학적 성질은 유사하고, PAH 성장, 매연 형성 및 성장 등은

연료에 따라 변하지 않으므로 초기 링 구조의 형성이 매연 생성에 큰 영향을 미친다.

입자 생성단계에서 화학적 방법과 결합에 의하여 성장한 매연입자가 약 3000~10000원자 질량단위(atomic mass unit)까지 성장하여 연료, 여러 화학종과 만나서 표면이 성장하고 합체가 일어나는 단계가 세 번째 단계이다. 확산화염에서의 매연 생성은 입자와 기체의 충돌에 의하여 일어난다¹¹⁾. H 원자, 비닐 라디칼, 아세틸렌 등이 매연 입자 생성에 많은 영향을 미친다. 매연 형성에 활성화 에너지가 크기 때문에 1400~1600K에서 매연 입자가 형성되기 시작한다. 아세틸렌 끼리 결합해서 PAH를 형성하거나, 생성된 매연입자에 흡착되므로 아세틸렌은 매연 성장에 중대한 역할을 한다. 형성된 매연 입자가 유선을 따라 이동하면서 복사 열손실 등으로 인하여 온도가 1300K로 낮아지면 매연의 산화가 정지된다. 매연의 산화는 주로 OH, O₂에 의하여 이루어지고, O, H₂O, CO₂도 관여한다. OH가 O₂에 비하여 매연 산화에 효과적이다¹²⁻¹⁵⁾.

전술한 바와 같이 매연생성이 주로 1400~1600 K에서 이루어지기 때문에 디젤엔진 연소실 내의 연소 온도를 낮추어 매연 생성을 억제 하려는 시도가 최근 많이 연구 되고 있다. 연소 온도를 낮게 제어 하면 매연 생성이 억제될 뿐만 아니라 NO_x도 줄이는 효과도 있다. 즉, 매연과 NO_x를 동시에 저감할 수 있는 방법이기도 하다.

3. 실험 장치 및 방법

3.1. 매연 측정 장치

본 연구에서 사용한 매연 측정법은 여지반사식과 광투과식이다. 여지반사식은 매연 채취시 330 ± 15cc의 배출 가스를 1.4 ± 0.2초 내에 흡입하여 여과지를 통과시킨 후 여과지에 빛을 조사하여 반사된 광량을 광전소자에서 받아 값으로 출력시킨다. 이때 완전 반사인 경우(매연이 없는 경우)는 0%의 값을 나타내고 완전 흡수(흑색)는 100값을 나타낸다. Fig. 1에 나타낸 것과 같이 여지반사식 측정 장비는 채취부, 포토 센서, 여과지 등으로 구성되어있다.

광투과식은 자동차 배기 파이프를 통해 대기 방출되는 배출 가스에 특정 파장의 가시광선을 조사하면 배출 가스에 포함된 매연 입자에 의해 조사된 빛은 산란과 흡광으로 투과되는 빛의 양이 줄어들게 되고 조사된 광의 일부가 광수신부에 있는 광

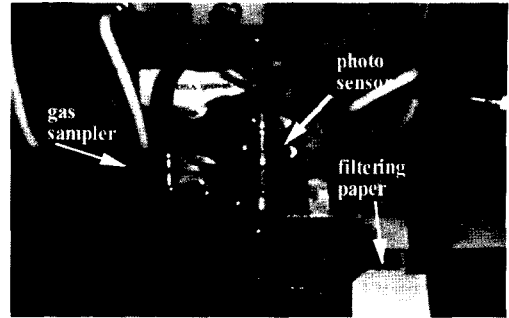


Fig. 1. Photograph of reflection photo-meter.

검출 센서에 의해 검출된다. 검출된 광투과 신호는 측정 데이터의 신뢰도를 높이는 여러 신호 처리 과정을 통하여 매연의 불투명도(매연농도)로 환산되어 매연 측정값이 구해진다. 광원으로는 550~570nm 파장의 연조록 광선을 사용하며 수광 소자는 포토다이오드를 사용한다.

Fig. 2는 본 연구에서 사용한 광투과식 매연 측정장치(EPlust사 제조)의 개략도를 나타내고 있다. 이 장비는 유럽 표준장비이고 북미 이외의 대부분 지역에서도 사용하고 있다. Fig. 2에 나타낸 바와 같이 자동차 배기관으로부터 일정 유량의 배출가스를 채취하여 측정부에서 발광체의 광원(Transmitter)을 샘플가스에 통과시키면 매연에 의해 일부 산란되고 산란되지 않은 광원이 광디텍터(Receiver)에 도달하여 그 강도를 평가하여 매연량을 계산하게 된다.

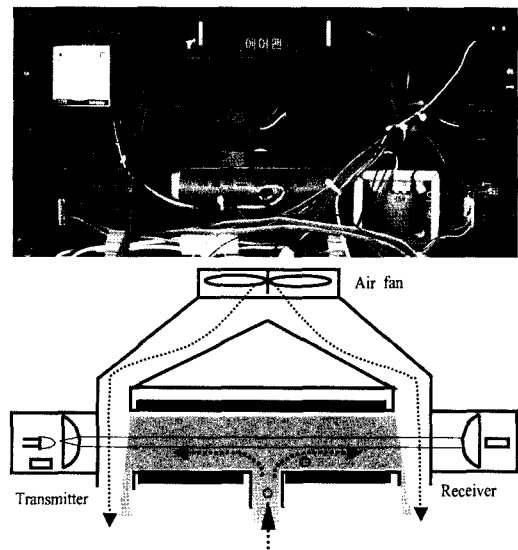


Fig. 2. Schematics of light extinction smoke meter¹⁶⁾.

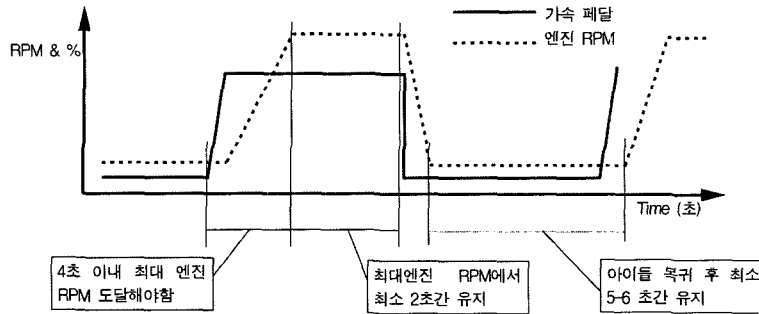


Fig. 3. Smoke measurement using reflection photo method with free acceleration mode¹⁶⁾.

3.2. 자동차 매연 검사

디젤 자동차 매연 검사는 여지반사식을 이용한 정기 검사 및 수시 점검과 Lug-down 3 모드에서 광투과식을 이용한 정밀 측정 방식 등 크게 두 가지 방식으로 대별할 수 있다.

여지반사식 측정 방법은 Fig. 3에 나타난 것과 같이 무부하 조건에서 가속 페달에 발을 올려놓고 엔진의 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. 이러한 방식은 운전자가 어떻게 가속 페달을 밟고 어떤 타이밍에 시료를 채취하는가에 따라 영향을 받을 수 있는 문제점이 있다.

Fig. 4에는 실제 디젤 차량을 무부하 급가속한 조건에서 여지반사식을 사용하여 매연을 측정하는 모습을 나타내었으며 Fig. 5는 측정 예를 나타낸 것이다. 같은 방법으로 3회 연속 측정한 매연 농도를 산술 평균하고 최대치와 최소치의 차가 5%를 초과하는 때에는 2회를 다시 측정하여 총 5회 중 최대치



Fig. 4. Photograph measuring smoke using reflection photo meter.

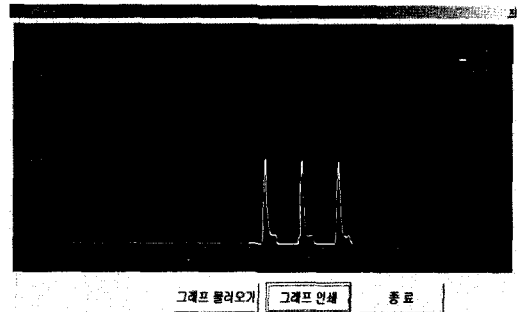


Fig. 5. A Captured window of smoke measurement result using reflection photo meter.

와 최소치를 제외한 나머지 3회의 측정치를 산술 평균하는 방식으로 매연 값을 계산한다⁶⁾.

Lug-down 3 모드에 의한 매연 측정은 자동차 배출 가스에 의한 대기 오염을 개선하기 위하여 도입된 검사 방법으로 수도권 대기 환경 규제 지역의 노후 자동차를 대상으로 정밀 검사를 할 때 사용하고 있다. 5.5톤 이하 차량은 Lug-down 3 모드에 의한 부하 검사를 적용하고, 5.5톤 이상 또는 상시 4륜 구동 자동차, 기타 특수구조 자동차는 등은 무부하 급가속에 의한 여지반사식 측정법을 적용하고 있다.

Fig. 6은 Lug-down 3 모드에 의한 측정 시스템을 나타낸 것이다. 측정 장비는 차대동력계, 배출가스 분석기, 광투과식 매연 측정기 및 그 부속 기기 등이 하나의 시스템으로 구성되어 있다. 배기관으로부터 배출되는 매연을 부분 유량 채취 방식으로 실시간으로 연속 채취하여 채취 가스에 광원을 투과하여 농도를 측정한다. 차대동력계는 동력흡수장치, 관성중량 부여장치, 구동장치, 톨러장치, 차량 속도 측정 장치, 엔진 회전 속도 측정 장치, 구동 출력 측정 장치, 운전 모드 보조 장치, 송풍장치, 안전장치 등으로 구성되어 있다. 측정 항목으로는 매연, 엔진 정격 회전수, 엔진 최대 출력 등을 기본으로 측정

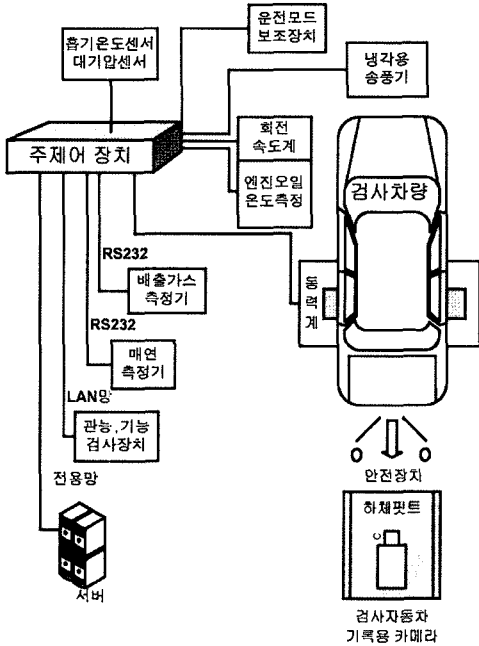


Fig. 6. Schematic diagram of smoke measurement of diesel engine on load condition using Lugdown 3 mode⁹⁾.



Fig. 7. Photograph of Lug-Down 3 mode test of a diesel vehicle on the chassis-dynamometer.

하고 부하 검사 방법 1모드에서는 엔진 정격 출력이 엔진 정격 회전수의 $\pm 5.0\%$ 이내에서 엔진정격 최대 출력의 50% 이상이어야 한다. 차대동력계에서 자동차의 속도가 70Km/h에서 100Km/h를 사이에 있게 한 후 부하 검사 방법에 따라 가속페달을 최대한으로 밟은 상태에서 최대 출력을 나타내는 엔진 정격 회전수 조건에서 1모드, 엔진정격회전수의 90% 조건에서 2모드, 엔진 정격 회전수의 80% 조건에서 3모드가 된다. 각 모드에서 모드 시작 5초 경과 후 모드가 안정되면 엔진회전수, 출력, 매연 등을 측정하기 시작하여 10초 동안 측정된 결과의 산술 평

모드	엔진회전수 (rpm)	속도 (km/h)	속정비율 (PS)	수평비율 (PS)	대기압력 (kPa)	흡기온도 (°C)	흡습비율 (%)	매연농도 (%)
1 모드	3750	75	76	71	101.0	18.3	60	23
2 모드	3430	67	77	73	101.0	18.3	60	14
3 모드	3060	58	71	67	101.0	18.3	60	8

데이터 인쇄 그래프 불러오기 그래프 인쇄 종료

Fig. 8. A captured window of Lugdown 3 mode test result of a diesel vehicle.

균값을 최종 측정치로 하였다. Fig. 7은 검사대상 디젤 차량의 후륜을 차대 동력계에 고정하고 Lug-down 3 모드로 차량을 검사하는 모습을 나타낸 것이다. Fig. 8은 실제 측정된 예를 나타낸 것이다.

4. 결과 및 검토

전술한 무부하 급가속에 의한 여지 검사법과 Lug-down 3 모드에 의한 부하 검사 방식의 연관성을 얻기 위해 비교 실험 실시하였으며 아울러 제작 연식 및 주행 거리별 매연 배출 특성을 검토하였다. 무부하급가속 조건에서의 여지반사식 및 Lug Down 3 모드 조건에서의 광투과식 측정법으로 각각 측정된 매연 절대값은 광투과식 측정된 매연값이 높게 나타나며 이것은 전술한 바와 같이 측정 방식 차이에 기인한다.

무부하 급가속 방법 조건에서 여지반사식 매연 측정기와 부하검사(Lug Down 3모드)방법으로 광투과식 매연측정기를 동시에 사용하여 차량중량 3.5톤 이하 소형 중형 디젤 차량 112대를 검사하였다. 총 112대의 검사 대상 차량을 연식별 및 주행거리별로 각각 분류하여 Table 1, 2에 나타내었다. 여지반사식 매연 측정값은 3회 측정하여 평균값을 측정값으로 하였고 광투과식 매연측정값은 1모드 2모드 3모드 측정값의 평균을 측정값으로 하였다.

Table 1. Number of car investigated according to year of production

Production year	1992 ~ 1993	1994 ~ 1995	1996 ~ 1997	1998 ~ 1999	2000 ~ 2001	2002 ~ 2003	2004 ~ 2005	계
Vehicle weight ≤ 3.5ton	3	10	10	18	31	29	11	112

Table 2. Number of car investigated according to mileage of the car

mileage	~3	3~5	6~8	9~11	12~14	15~17	18~20	21~23	24~26	sum
Vehicle weight ≤ 3.5ton	5	18	19	22	14	12	10	5	7	112

112대 차량에 대해 2 가지 매연 측정법으로 측정 후, 각각의 측정법에 의한 매연값을 나타내는 차량 대수 분포를 Fig. 9에 나타내었다. 대체로 여지반사식은 대체로 매연값이 60%를 넘지 않았으며 25~30%의 매연값 분포를 나타내는 차량이 주류를 이루었고, 광투과식 방식으로 측정된 매연값은 주로 30~60%에 걸쳐서 가장 많은 차량대수가 분포하고 있으며 70% 이상의 매연값을 나타내는 차량대수 적지 않았다.

Fig. 10은 3.5톤 이하의 디젤 차량을 Table 1에 나타낸 것과 같은 제작 연식으로 구분하여 여지반사식과 광투과식 평균 매연값을 비교하여 나타낸 것이다. 전술한 바와 같이 대체적으로 광투과식으로 측정된 것이 여지반사식에 의한 평균 매연값의 약 1.5~2배 정도의 평균 매연값을 나타내고 있다.

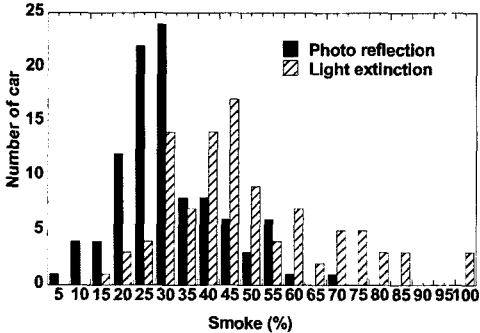


Fig. 9. Numbers of car vs smoke using reflection photo method and light extinction method.

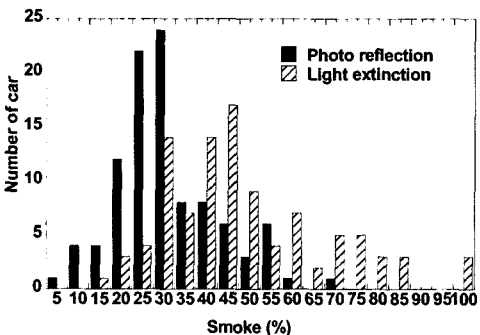


Fig. 10. Result of smoke measurement using both reflection photo method and light extinction method according to year of production.

Fig. 11은 Table 2에 요약한 바와 같이 주행 거리에 따른 여지반사식 및 광투과식 평균 매연 측정값을 나타낸 것이다. 주행거리가 20000 km 미만인 경우에는 광투과식으로 측정된 평균 매연값이 여지반사식으로 측정된 평균 매연값보다 오히려 작게 나타났다. 주행거리가 30000 km 이상인 경우에는 Fig. 10의 결과와 유사하게 대체로 광투과식에 의한 평균 매연값이 여지반사식에 의한 평균 매연값보다 대체로 크게 나타났다. 2만 km 이하 차량의 경우 광투과식에 의한 매연 측정값이 여지반사식보다 오히려 크게 나타났는데 이는 주행거리가 작은 차량의 경우 무부하 급가속시 매연이 많이 나오지 않아서 여지반사식 매연 측정값이 작게 나오기 때문이다. Fig. 12를 보면 매연이 작게 나오는 경우 두 매연 측정법에 의한 측정값의 차이가 크지 않음을 알 수 있다.

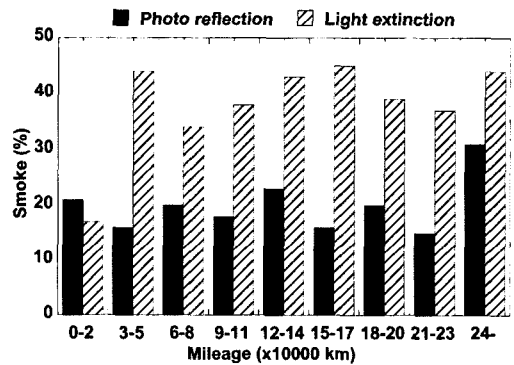


Fig. 11. Result of smoke measurement using both reflection photo method and light extinction method according to mileage.

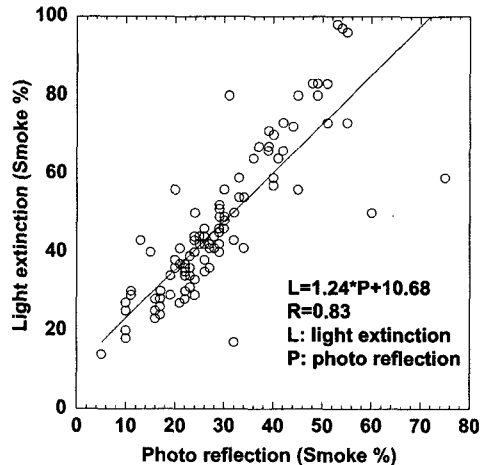


Fig. 12. Curve fitting result between reflection photo method and light extinction method from the experimental data.

Fig. 12는 전술한 3.5톤 이하 112대의 디젤 차량에 대해 두가지 방식으로 측정된 매연값 중 가로축에는 여지반사식으로 측정된 매연값을 나타내고 세로축에는 동일 차량에 대해 광투과식으로 측정된 매연값을 그래프에 나타낸 것이다. 여지반사식으로 측정된 매연값이 증가하면 광투과식으로 측정된 매연값도 선형적으로 증가하는 특성을 보여 주고 있다. 또한 여지반사식 매연 측정값(30~50%)이 크지 않을 때에는 두 매연 측정법 간의 상관관계가 높게 나타났으나 매연값(50%)이 증가하면 산포가 커지면서 두 측정법 간의 상관관계가 상대적으로 높지 않음을 알 수 있다. 두 가지 측정법에 의한 매연 측정 결과의 절대 값을 비교하는 것보다 이들의 상호 연관성을 파악하는 것이 더 중요하다. Fig. 12의 측정 데이터를 1차 선형회귀 관계는 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다. 이 때 상관계수는 0.83으로 계산되었고 두 가지 매연 측정법의 상관관계가 비교적 높게 나타났음을 알 수 있다.

$$L = 1.24 \times P + 10.68 \quad (1)$$

여기서, P는 여지반사식 매연 측정값(%)
L은 광투과식 매연 측정값(%).이다.

5. 결 론

디젤 차량에 대해 무부하 급가속 조건에서 여지 반사식으로 매연을 측정하고 동일 차량을 차대동력 계에 설치하고 Lug-down 3 모드로 부하를 조절하면서 광투과식을 매연을 측정하였다. 이러한 비교 측정을 총 112대 디젤 차량에 대해 실시하였으며 측정 데이터를 바탕으로 두 가지 매연 측정법의 상관 관계를 연구하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 여지반사식 매연 측정값(30~50%)이 크지 않을 때에는 두 매연 측정법 간의 상관관계가 높게 나타났으나 매연값(50%)이 증가하면 산포가 커지면서 두 측정법 간의 상관관계가 상대적으로 떨어졌다. 두 매연 측정법은 선형 회귀 관계식으로 나타낼 수 있었으며 상관 계수는 0.83이었다.
- 2) 제작 연식 및 주행 거리에 따른 평균 매연 측정 결과 광투과식 평균 매연 측정값이 여지반사식에 비해 1.5~2배 정도 높게 나타났다.

참고문헌

1) J. Schommers, F. Duvinage, M. Stotz, A. Peters,

S. Ellwanger, K. Koyanagi and H. Gildein, "Potential of Common Rail Injection System for Passenger Car DI Diesel Engines", SAE Paper 2000-01-0944, 2000.

2) W. Boehner and K. Hummel, "Common Rail Injection System for Commercial Diesel Vehicles", SAE Paper 970345, 1997.

3) U. Flaig, W. Polach and G. Ziegler, "Common Rail System(CR-System) for PassengerCar DI Diesel Engines; Experiences with Applications for Series Production Projects", SAE Paper 1999-01-019, 1999.

4) W. S. Mathews, T. Fang, R. E. Coverdill, C. F. Lee and R. A. White, "Soot Diagnostics Using Laser Induced Incandescence within an Optically Accessible HSDI Diesel Engine", SAE Paper 2004-01-1412, 2004.

5) J. B. Heywood, Internal combustion engine fundamentals, McGraw Hill, pp. 498~667, 1988.

6) 여지반사식 측정법, 대기환경보전법 제92조관련 [별표26].

7) 광투과식 측정법, 대기환경보전법 제92조 3,4,7항관련[별표27의3].

8) B. L. Jones, D. J. Stollery, J. M. Clifton and T. F. Wylie, "In-Service Smoke and Particulate Measurements", SAE Paper 970748, 1997.

9) Lug down 3모드 측정법, 대기환경보전법 제4조2항관련 [별표1].

10) 조배기, "디젤자동차 매연 측정 방법중 여지반사식과 광투과식의 비교에 관한 연구", 건국대학교 산업대학원 석사학위 논문, 1998.

11) I. Glassman, "Soot Formation in Combustion Processes", International 22nd Symposium on Combustion, The Combustion Institute, Pittsburg, PA, pp. 295, 1988.

12) R. Puri, R. J. Santoro and K. C. Smyth, "The Oxidation of Soot and Carbon-Monoxide in Hydrocarbon Diffusion Flames", Combustion and Flame, Vol. 97, pp. 125~144, 1994.

13) A. Coppalle and D. Joyeux, "Temperature and Soot Volume Fraction in Turbulent-Diffusion Flames - Measurements of Mean and Fluctuating Values", Combustion and Flame, Vol. 96, pp. 275~285, 1994.

14) B.S. Haynes and Wagner, H. G., "Soot Formation", Progress in Energy and Combustion Science, Vol. 7, pp. 229, 1981.

15) 김중현, 이근오, 이창언, "이중 확산 연소장에서 의 오염물질 배출 특성", 산업안전학회지, Vol. 17, No. 3, pp. 43~49, 2002.

16) 광투과식 매연측정기 교육교재, (주) Eplust.