

디젤 매연 필터에서 퇴적되는 입자상 물질의 퇴적량 예측

유 준* · 전 제 록 · 홍 현 준

현대 기아자동차 연구개발총괄본부 승용디젤엔진시험팀

Prediction of Particulate Matter Being Accumulated in a Diesel Particulate Filter

Jun Yu* · Jerok Chun · Hyunjun Hong

Passenger Car Diesel engine Test Team, Power Train R&D Center Hyundai Kia Motors,
772-1 Janduk-dong, Hwaseong-si, Gyeonggi 445-706, Korea
(Received 8 August 2008 / Accepted 12 January 2009)

Abstract : Diesel particulate filter (DPF) has been developed to optimize engine out emission, especially particulate matter (PM). One of the main important factors for developing the DPF is estimation of soot mass being accumulated inside the DPF. Evaluation of pressure drop over the DPF is a simple way to estimate the accumulated soot mass but its accuracy is known to be limited to certain vehicle operating conditions. The method to compensate drawback is adoption of integrating time history of the engine out PM and burning soot. Present study demonstrates current status of the soot estimation methods including the results from the engine test benches and vehicles.

Key words : Diesel particulate filter(DPF, 디젤 매연필터), Delta pressure model(차압모델), Simulation model(매연 적산법), Resiflow(유동저항), Particulate matter(PM, 매연)

Nomenclature

- P : pressure drop over the DPF
- L : length of DPF
- H : length of DPF cell

1. 서 론

질소 산화물(NOx)과 매연의 배출이 비교적 높은 편임에도 불구하고 디젤 엔진은 가솔린 엔진에 비하여 열효율이 상대적으로 높고 연비와 CO₂ 배출 특성이 우수하며 가속 성능이 탁월하다는 장점으로 인하여 유럽 시장에서 승용차용 엔진으로 널리 적용 되어 오고 있다. 디젤 엔진 탑재 차량은 점차로

강화되고 있는 질소 산화물(NOx)과 입자상 물질 (PM)에 대한 엄격한 배기 규제를 만족시키기 위하여, 압축비를 낮추고 EGR(Exhaust Gas Recirculation: EGR) 시스템 개선과 같은 방법을 통하여 질소 산화물 규제를 만족시키고 EGR 증대에 따라 상대적으로 증가되는 입자상 물질은 매연 여과 장치(Diesel Particulate Filter, DPF)를 이용하여 감소시키는 방안이 주류를 이루어 가고 있다. 승용 디젤 엔진 차량에 주로 장착되는 DPF는 배기 가스 중에 포함되어 있는 입자상 물질을 포집하고 포집된 매연은 고온의 배기가스를 DPF 내부로 유도하여 연소시켜(이후 재생이라 칭함) 필터 내부에 퇴적된 입자상 물질을 제거하는 기능을 한다. 차량이 실제 도로상에서 운행되는 동안 DPF 내부에서는 이러한 일련의 매연 포집과 재생의 과정이 반복되게 되는데, 재생의 것

*Corresponding author, E-mail: JunYu@hyundai-motor.com

점을 신뢰성 있게 결정하고 일정량 이상의 재생 효율이 차량 내구 수명 기간 동안 확보되도록 하는 것은 DPF의 신뢰성 있는 운전을 위해 개발되어야 할 중요한 기술이다. 본 논문에서는 DPF 개발의 중요한 기술 중 하나인 퇴적 매연량 예측 방법 및 특성을 소개하고 설명한다.

2. 실험 장치 및 방법

본 연구에서 사용한 엔진은 2.0L 커먼레일 장착 직접 분사식 디젤 엔진이고 매연 여과 장치는 디젤 산화 촉매(DOC)와 매연 필터가 일체로 구성되어 있는 시스템을 적용하였다. Fig. 1은 본 연구에서 사용한 실험 장치의 개략도이다. 엔진으로부터 배출되는 스모크와 배기가스는 스모크 메타(AVL 415S), 광투과식 매연측정기(AVL 439), 배기가스 분석기(호리바 MEXA 81200)에 의하여 계측하였다.

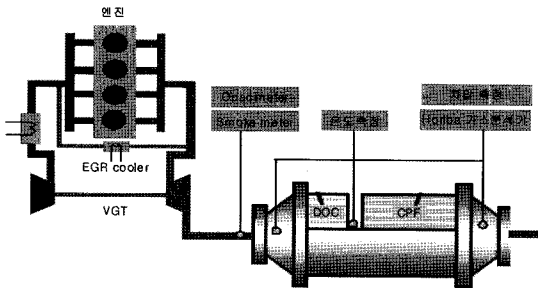


Fig. 1 Schematic diagram of experimental rig

본 연구에서는 엔진으로부터 배출되는 입자상 물질을 DPF로 직접 유입시켜 매연을 퇴적시켰고, 퇴적되는 과정 중에 NO₂에 의하여 매연이 산화되는 현상을 배제시키기 위하여 필터 전단온도를 200°C 이하로 유지시켰다. 매연 재생 속도(mol/s)는 DPF내에 퇴적된 매연이 탄소로 구성되었다는 가정 하에, 매연량(C, mol), DPF 전단 온도(T, K) 그리고 산소 농도(O₂, mol/mol)의 함수로 나타낼 수 있다.¹⁾

$$\text{매연재생 속도} = A \text{ EXP}(-E/RT) C^a O_2^b H_2O^c \quad (7)$$

여기서, A는 상수, E는 activation 에너지(J/mol), R은 기체상수(8.3145 J/(mol K))

하지만, 본 논문에서의 매연 재생 속도는 직접 무게 측정법으로부터 얻어진 재생된 매연 총량(g)

을 재생 기간(s)으로 나눈 값으로 정의하였고 재생 기간은 필터 내부에 퇴적된 매연이 재생되는 시점부터 재생을 종료시킨 시점까지로 정의했다. 재생이 되기 시작하는 시점은 매연 필터 전후단의 압력 차이가 낮아지기 시작하는 시점(혹은 매연 필터의 전단과 후단의 산소 농도 차이가 발생하는 시점)으로 하였고, 재생 종료는 매연 필터 후단(후단 10mm 지점)의 온도가 정점에 도달되는 시점(혹은 필터 전후단의 산소 농도가 동일해 지는 시점)으로 정의하였다.

3. 실험 결과

3.1 차압 모델

매연이 퇴적되지 않은 fresh DPF에 작용하는 차압은 식 (1)에서 나타낸 바와 같이 매연 필터 길이(L), 필터를 구성하고 있는 담체의 셀 크기(H), 그리고 배기가스가 필터를 통과하는 유속(u)의 함수로 나타낼 수 있다.²⁻⁴⁾

$$\Delta P = f(L, H, u^2) \quad (1)$$

매연이 필터 내부에서 퇴적되고 재생되는 과정을 반복하게 되면 매연 재생 잔유물인 ash 성분이 매연 필터 내부에 퇴적된다. 이러한 ash는 매연을 퇴적시킬 수 있는 필터 유효 길이(Le)와 유효 단면적을 축소시키게 되고 차압은 식 (2)와 같이 변경된다. 또한, Ash가 퇴적된 DPF는 재생 시 필터 내부 온도의 상승을 가속화시키는 원인이 되는 것으로 알려져 있다.⁵⁻⁷⁾

$$\Delta P = f(Le, He, u^2) \quad (2)$$

이러한 ash는 차압의 증대에 기여하게 되기 때문에 차압을 기준으로 매연량을 예측하는 경우, ash에 의하여 증가되는 차압은 매연량의 총량에서 제외시켜야 한다. 즉, DPF의 전단과 후단 압력 차이를 이용한 퇴적 매연량 예측 모델(차압 모델)은 식 (3)에서 보여지는 바와 같이 fresh DPF 전단과 후단의 압력 차이에서 ash 퇴적에 의한 차압 상승분이 제외된 값으로부터 유추될 수 있다.

$$\Delta P_{\text{매연량}} = P_{\text{차압}} - \Delta P_{\text{fresh}} - \Delta P_{\text{ash}} \quad (3)$$

DPF에 작용하는 차압은 배기가스 체적과 매연

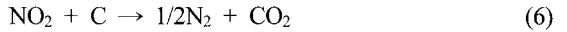
퇴적량 증가에 따라 증가하게 된다. 이와 같이 차압은 배기가스 체적과 매연 퇴적량의 함수로 정의될 수 있기 때문에 차압과 매연 퇴적량과의 관계 설정을 위하여 ‘유동 저항(resiflow)’ 개념을 도입했다(식 (4)).

$$\text{Resiflow} = \text{차압/배기가스체적}(\text{hPa}/\text{m}^3/\text{h}) \quad (4)$$

Fig. 2는 매연 퇴적량에 따른 배기가스 체적 별 유동 저항 변화이다. DPF에 퇴적된 매연량이 동일 할 때 유동 저항은 배기가스 체적 변화와는 무관한 일정한 값으로 유지되어 퇴적 매연량에 대한 유동 저항과의 관계 설정을 할 수 있지만, 배기가스 체적이 적은 영역에서는 유동 저항이 급격하게 변한다.

Fig. 3은 전술한 차압에 의한 퇴적 매연량 예측 모델(차압모델)의 결과인데, 그림에서 보는 바와 같이 DPF의 전단 온도가 낮게 형성되는 운전 영역에서는 차압 모델에 의하여 예측되는 퇴적 매연량은 실제 퇴적된 매연량과 유사한 값을 나타내고 있다. 하지만, DPF 전단 온도가 300~ 400°C로 상승되는 조건이 형성되면 차압에 의하여 예측된 매연량의 신뢰성은 크게 떨어지게 된다. 이러한 현상은 배기가스 중에 혼합되어 있는 NO₂ 가스가 매연을 산화시키는 현상이 발생되기 때문으로 알려져 있고, 식 (5), (6)에 나타난 NO₂와 입자상 물질의 주 성분인 탄소의

산화 반응은 250~400°C, NO_x/PM의 비율이 8~25 :1 범위에서 활성화되는 것으로 알려져 있다.⁷⁻⁹⁾



또한, 매연이 재생되는 조건에서는 차압 모델로 예측되는 매연 퇴적량의 신뢰도는 급격하게 저하되는 현상이 발생 한다(Fig. 4).

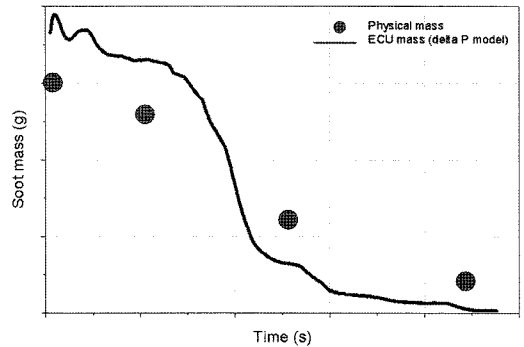


Fig. 4 Prediction of soot mass from delta pressure model during regeneration mode

3.2 Simulation 모델(매연량 적산법)

전술한 바와 같이 차압모델은 퇴적 매연량과 차압과의 관계를 특정한 온도 조건에서 설정한 것이기 때문에 모델 작성시에 설정된 조건을 벗어나면 차압에 의한 매연량 예측 신뢰도가 떨어지는 단점이 있다. 이러한 차압 모델의 단점은 시뮬레이션 모델(매연 적산법)의 적용을 통하여 보완할 수 있다. 즉 엔진으로부터 배출되는 매연 생성량과 재생되어 소모되는 매연량을 시간에 대하여 적산하면 잔류 매연량을 예측할 수 있게 된다. 이러한 적산을 위해서는 다양한 차량 조건 및 외부 환경 조건에 대하여 매연 발생량과 매연 산화량을 정량화해야 한다(Fig. 5). 즉, 정속 및 가속 운전 조건에서 엔진으로부터 배출되는 매연량은 스모크 메타(AVL 415S)와 광투과식 매연측정기로 측정하여 정량화 하고, 산소와 NO_x에 의하여 산화되는 매연량을 측정하여 매연필터 전단 온도, 산소량 배기가스체적의 함수로 변환시킨다. 이러한 엔진으로부터 매연 배출 및 재생 특성은 엔진 노후화에 따라 변화될 수 있지만 본 연구에서는 그 효과를 고려하지 않았다.

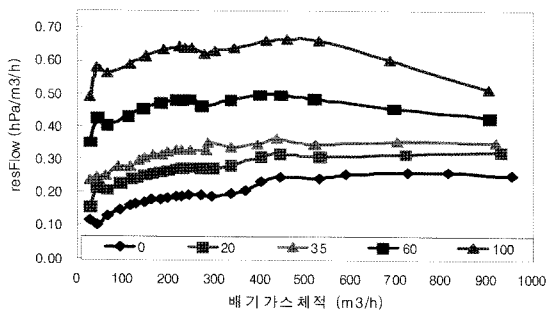


Fig. 2 Resiflow VS accumulated soot

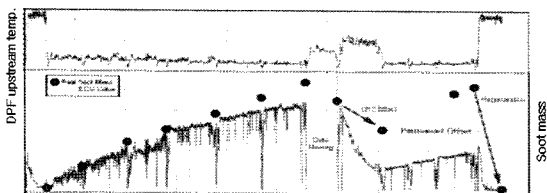


Fig. 3 Prediction of soot mass from delta pressure model

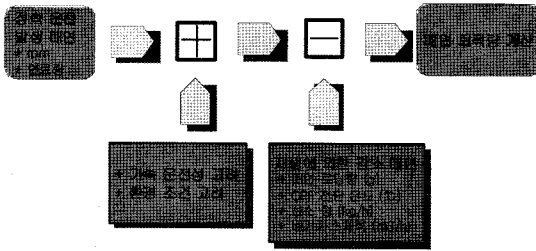


Fig. 5 Schematic of simulation model

3.2.1 매연 발생률과 재생 속도

Fig. 6은 차량 정속 조건에서 배출되는 스모크와 차량 가속시 추가적으로 발생하는 매연 배출량을 스모크 메타와 광투과식 매연측정기로 측정된 값과 매연 적산법으로부터 예측되는 값을 비교한 것인데, 그림에서 보여지는 바와 같이 같이 적산법에 의하여 예측되는 실제 배출량과 유사한 배출 경향을 나타내고 있다.

Fig. 7은 2000rpm, 20Nm 운전 조건에서 매연재생 속도를 매연 퇴적량의 함수로 나타낸 것이다. 그림에서 보여지는 바와 같이 재생 속도는 퇴적 매연량 증가에 따라 선형적으로 증가되고 이러한 특성은 엔진 운전 조건, 즉 DPF 전단온도와 산소 질량 유량에 따라 변화되게 된다. Fig. 8은 매연 퇴적량 15g, DPF 전단온도 600°C 조건에서 산소 질량 유량에 따른 매연 연소 속도를 나타낸 것인데, 그림에서 보여지는 바와 같이 산소량 증가에 따라 매연의 연소 속도는 증가된다.

Fig. 9는 산소에 의한 매연 재생속도에 미치는

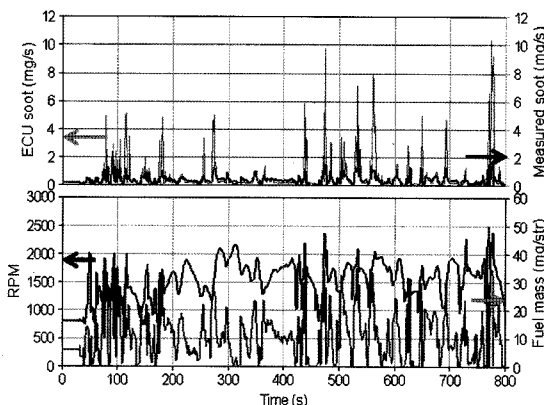


Fig. 6 Prediction of soot mass during vehicle dynamic modes

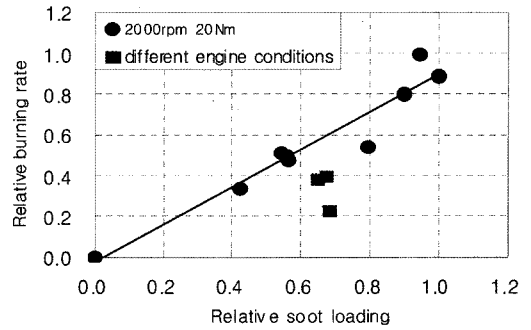


Fig. 7 Soot loading VS burning rate

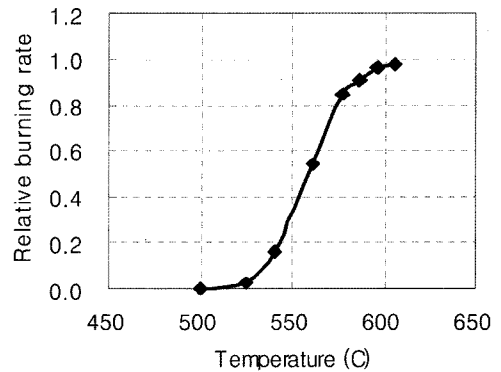


Fig. 8 Oxygen mass VS burning rate at the condition of a 600°C DPF upstream temp. and a 15g of soot mass

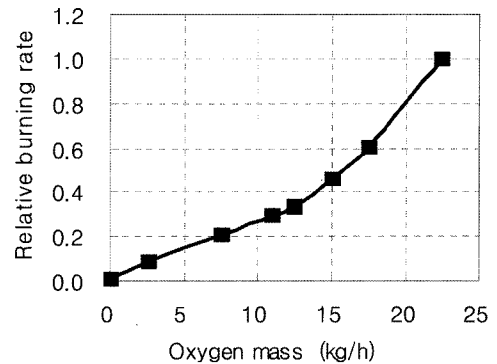


Fig. 9 Effect of DPF upstream temperature on O₂ burning rate at the condition of a 10kg/h oxygen mass flow rate and a 15g of soot mass

DPF 전단온도의 영향도를 나타내는 것인데, 산소에 의한 매연 재생은 약 500°C에서 시작되어 550~600°C에서 급격하게 일어나는 것을 알 수 있다. NO₂에 의한 매연 재생속도는 NO에서 NO₂로의 변환이 활발하게 일어나는 350~400°C 부근에서 최대

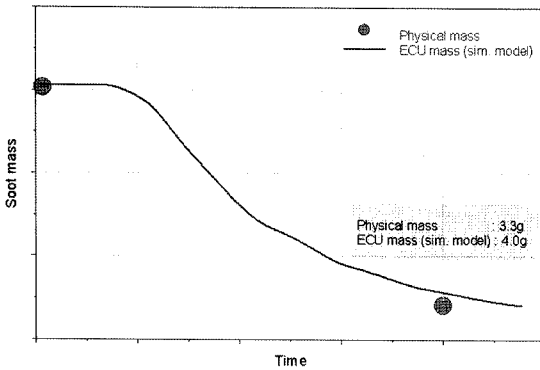


Fig. 10 Soot mass prediction of the simulation model during the regeneration mode

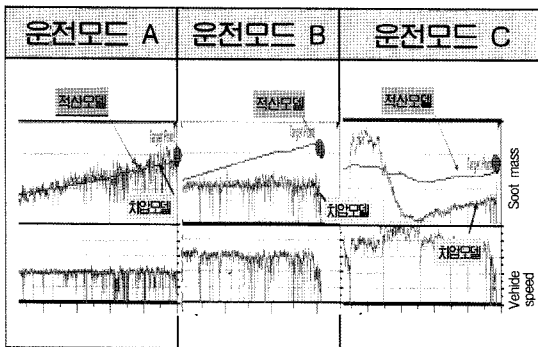


Fig. 11 Comparison of soot mass prediction from the delta pressure and soot simulation models

가 되는 것으로 알려져 있다.

Fig. 10은 재생 기간 동안 매연적산법에 의하여 예측되는 매연량을 나타낸 것으로 재생 기간 동안에 감소되는 매연량을 잘 예측하고 있다.

실제 엔진 및 차량 운전 조건 아래에서는 매연 퇴적량, DPF 전단 온도, 산소 질량 유량 및 배기 가스 유량 등 DPF 내 퇴적되어 있는 매연의 재생 속도에 미치는 인자들이 혼합적으로 작용하게 되고 이러한 혼합 효과들은 특정 엔진 조건 혹은 차량 조건에서 Figs 6~9에서 보여준 매연 퇴적량과 매연 재생 속도 및 재생 속도들이 상호 작용하면서 퇴적과 재생 과정을 반복하게 되고, 운전시간에 따른 퇴적 및 재생된 매연량을 적산하여 DPF내에 잔유된 매연량을 정량적으로 결정되게 된다.

Fig. 11은 전 항에서 기술한 방법에 의하여 얻어진 차압 모델과 매연 적산 모델을 3가지 서로 다른 차량 운전 모드에 적용하여 차압 모델과 매연 적산

모델이 예측하는 매연량과 실제 퇴적된 매연량을 비교 한 것이다. 그림에서 보여지는 바와 같이 적산된 매연 퇴적량은 실제 퇴적된 매연량을 측정할 시점에서 유사하게 나오는 결과를 얻었고 조금 더 다양한 조건에서 추가적인 시험을 통하여 적산 모델에 대한 검증이 진행될 예정이다.

4. 결론

본 논문에서는 DPF개발의 중요한 기술 중 하나인 필터내부에 퇴적되는 매연 퇴적량의 예측 방법에 대한 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) DPF 담체의 차압 특성을 매연 퇴적량과 배기 가스 체적의 함수로 정량화하였다.
- 2) 차압 모델에 의한 퇴적 매연량은 NO₂에 의한 매연의 산화가 발생되지 않는 조건에서는 신뢰성 있게 예측되었다.
- 3) NO₂산화 반응 영역과 매연재생 영역으로 운전 조건이 전환되면, 차압 모델로 예측되는 매연 퇴적량의 오류는 크게 발생되었다.
- 4) 매연 발생량 및 매연 재생율(속도) 측정을 통하여 얻어진 시뮬레이션 모델(매연적산법)을 차량에서 검증한 결과, NO₂ 산화 반응 영역과 매연 필터 재생 기간 중 적산된 매연량은 실제 퇴적 매연량과 유사하게 나타났다.

References

- 1) A. Yezerets, N. W. Currier, H. Eadler, S. Popuri and A. Suresh, "Quantity Flow Reactor Study of Diesel Soot Oxidation Process," SAE 2002-01-1684, 2002.
- 2) K. Ohno, K. Shimato, N. Taoka, H. Santae, T. Ninmori, T. Komori and O. Salvat, "Characterization of SiC-DPF for Passenger Car," SAE 2000-01-0185, 2000.
- 3) G. Gaiser and P. Mucha, "Prediction of Pressure Drop in Diesel Particulate Filters Considering Ash Deposit and Partial Regeneration," SAE 2004-01-0158, 2004.
- 4) Y. J. Roh, J. W. Lee, H. J. Hong and K. J. Yoon, "Experimental Study on Ash Learning Strategy in Diesel Particulate Filter," Springer

- Conference Proceedings, Vol.I, KSAE, pp.263-268, 2008.
- 5) D. M. Young, D. L. Hickman, G. Bhatia and N. Gunasekaran, "Ash Storage Concept for Diesel Particulate Filters," SAE 2004-01-0948, 2004.
 - 6) R. J. Locker, N. Gunasekaran and C. Sawyer, "Diesel Particulate Filter Test Methods," SAE 2002-01-1009, 2002.
 - 7) Diesel Net, CRT Filter, Diesel Net 2002.
 - 8) J. Gieshoff, A. Schafer-Sindlinger, P. C. Spurr, J. A. A. van den Tillaart and G. Garr, "Improved SCR System for Heavy Duty Applications," SAE 2000-01-0189, 2000.
 - 9) Diesel Net, Diesel Filter Regeneration, Diesel Net 2005.