

소형 경유 운행차의 매연여과장치 재생용 촉매연소기 개발에 관한 연구

김 홍 석^{*1)} · 최 현 하¹⁾ · 조 규 백¹⁾ · 정 용 일¹⁾ · 조 성 호²⁾ · 박 종 수²⁾

한국기계연구원 친환경엔진연구팀¹⁾ · 한국에너지기술연구원 수소시스템연구센터²⁾

Development of a Catalytic Combustor for DPF Regeneration of In-use Light Duty Diesel Vehicles

Hongsuk Kim^{*1)} · Hyunha Choi¹⁾ · Gyubaek Cho¹⁾ · Youngil Jeong¹⁾ · Sung-ho Cho²⁾ · Jong-soo Park²⁾

¹⁾Engine R&D Team, Korea Institute of Machinery & Materials, 171 Jang-dong, Yuseong-gu, Daejeon 305-343, Korea

²⁾Hydrogen System Research Center, Korea Institute of Energy Research, 71-2 Jang-dong, Yuseong-gu, Daejeon 306-110, Korea

(Received 14 May 2008 / Accepted 20 May 2008)

Abstract : In-use light duty diesel vehicles are considered as one of major sources of particulate emissions in many cities, and the start of the retrofit program for the light duty diesel vehicles is expected in near future in Korea. One of the problems of the retrofit of the light duty diesel vehicles is that the exhaust gas temperature is too low to apply passive regeneration DPF systems. This study introduces a catalytic combustor as a new active DPF regeneration technology. This study shows the principle and characteristics of DPF regeneration by the catalytic combustor and suggests it's proper control method for better regeneration.

Key words : Catalytic combustor(촉매연소기), DPF(Diesel Particulate Filter, 매연여과장치), Active regeneration(강제재생), In-use vehicle(운행자동차)

Nomenclature

P : pressure, mbar
T : temperature, °C

Subscripts

uDPF : upstream of Diesel Particulate Filter
dDPF : downstream of Diesel Particulate Filter
uDOC : upstream of Diesel Oxidation Catalyst
dDOC : downstream of Diesel Oxidation Catalyst

1. 서론

국내에서는 2005년부터 수도권대기질개선에 관한 특별법의 일환으로 경유 운행차 매연여과장치 보급사업이 대대적으로 전개되고 있다. 현재까지는 배출가스온도가 높아 자연재생방식의 매연여과장치를 적용할 수 있는 버스나 중대형 트럭등에 매연여과장치 보급사업이 진행되었으나 최근에는 차량대수가 많아 대도시 대기 오염에 큰 비중을 차지하는 소형 경유 차량에 대한 매연여과장치 보급사업이 거론되고 있는 실정이다.

소형 운행 경유차는 배출가스온도가 매우 낮아 자연재생방식의 매연여과장치 적용이 불가능하다. 현재 제작사에서 시판하는 DPF(Diesel Particulate Filter)가 장착된 소형 경유자동차의 경우 커

*Corresponding author, E-mail: hongsuk@kimm.re.kr

먼레일을 이용한 연료후분사방식으로 DPF 재생이 가능하지만^{1,2)} 운행차의 경우에는 별도의 강제 또는 복합재생방식의 매연여과장치 적용이 필요하다.

강제 또는 복합재생방식의 매연여과장치로는 일진전기에서 개발한 전기히터와 촉매를 함께 사용하는 대형차량용 복합재생방식 DPF³⁾가 대표적이다. 이 시스템은 투입되는 전기에너지의 밀도를 높이기 위해 분할된 전기히터를 사용한다는 것이 특징이다. 이 외에도 플라즈마 착화식 경유 버너⁴⁾를 이용하는 매연여과장치, 산화촉매 전단에 연료를 분사하고 산화촉매에서 발생하는 산화열을 이용하여 DPF를 재생하는 장치⁵⁾ 및 마이크로웨이브^{6,7)}를 사용하는 매연여과장치 등 많은 기술들이 개발 중이다.

본 연구는 촉매연소기를 이용한 소형 운행 경유 차량용 강제재생방식 매연여과장치 개발에 관한 것으로써 본 연구의 촉매연소기는 가격적인 측면에서 전기히터나 플라즈마 방식에 비해 장점이 있다. 또한 일반 경유 버너방식에 비해 적은 양의 공기를 공급하여 연소할 수 있다는 것이 장점이다.

운행차는 제작자동차에 비해 매연여과장치의 상황을 모니터링 할 수 있는 센서의 개수가 절대적으로 부족하며, 시스템의 안정성 확보를 위해서 여러 종류의 센서를 부착할 경우 매연여과장치 가격 상승 요인이 된다. 이와 같은 문제점을 극복하기 위해서는 필수적인 센서만을 사용하여 촉매연소기의 착화 및 연소과정을 정확히 모니터링하고 제어해야 한다. 이에 따라 본 연구에서는 매연여과장치를 강제 재생하기 위한 촉매연소기의 효율적 운용 방법을 제시하고자 한다.

2. 촉매연소기 및 매연여과장치

2.1 촉매연소기의 구조 및 재생 원리

Fig. 1은 촉매연소기의 구조를 나타낸다. 촉매연소기는 1차 화염부와 2차 화염부로 구성된다. 1차 화염부에는 촉매가 장입되어 있으며, 촉매부를 가열하기 위한 전기히터가 설치되고, 이 곳에 소량의 1차 연료와 공기를 분사하여 촉매 연소 화염을 만든다. 1차 화염은 2차 화염을 만들기 위한 불씨에 해당

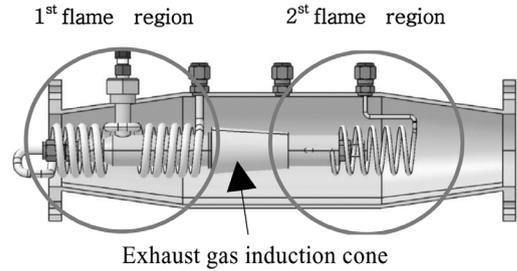


Fig. 1 The cross section view of catalytic combustor

한다. 촉매의 양, 전기히터의 용량, 공기 공급량등의 제한이 있어 1차 화염부의 촉매 연소만으로는 배출가스유량이 많은 조건에서 매연여과장치를 재생시키기 위한 충분한 열을 만들 수 없다. 따라서, 배출가스 유입콘(exhaust gas induction cone)에 의해서 배출가스가 유입되어 1차 화염과 혼합되는 부분에 다량의 2차 연료를 분사하여 연소시 발생하는 열 또는 기화된 2차 연료가 산화촉매에서 산화되면서 발생하는 열을 이용하여 배출가스유량이 많은 조건에서매연여과장치를 재생하는 원리를 갖는다.

2.2 산화촉매 및 매연여과장치

Table 1은 DPF 및 산화촉매의 제원을 나타낸다. 생산성 저하에 따른 비용증가 및 내구성 저하의 단점에도 불구하고, 차량 장착성을 위하여 단면이 형상이 oval 인 DPF 및 산화촉매를 사용하였다.

Table 1 Specifications of DPF and DOC(Diesel Oxidation catalyst)

DPF	
Materials	SiC
Cell density, N, cpsi	180
Filter length, mm	254
Filter Diameter, mm	124×158(Oval)
Volume, L	3.9
Pt coating amount, g/ft ³	30
DOC	
Materials	cordierite
Cell density, N, cpsi	400
Length, mm	125
Diameter, mm	124×158(Oval)
Pt coating amount, g/ft ³	70

2.3 시험 장치

본 연구에서 사용된 시험 장치는 Fig. 2와 같이 시험 엔진과 시험엔진의 배기관에 장착되는 촉매연소기, 산화촉매, DPF로 구성된다.

시험엔진으로는 국내 RV용 엔진을 사용하였다. Table 2는 시험엔진의 제원을 나타낸다. 과급기(turbo charger)와 EGR (Exhaust Gas Recirculation)장치가 장착되고, 로터리 타입의 연료펌프를 사용하여 연료를 공급하는 것이 특징이다.

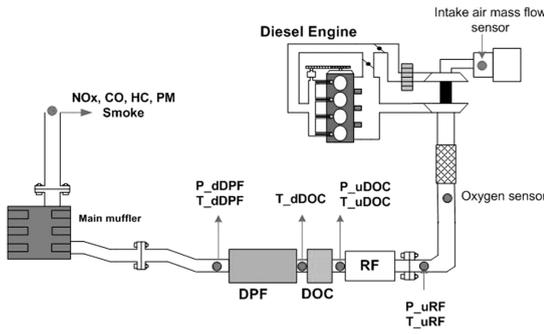


Fig. 2 Schematic of the experimental setup

Table 2 Specifications of test engine

Name	J3
Number of cylinder	4
Bore×Stroke (mm)	97.1×98.0
Displacement vol. (L)	2.9
Max. torque(kgf-m)	35@1700 rpm
Max. power (ps)	110@3700rpm
Mode year	1998
Turbo charger and intercooler equipped mechanical fuel injection	

3. 자연재생 전략

자연재생능력이 증대될수록 강제재생 기술의 여러 취약점들을 보완할 수 있기 때문에 현재 시판 중인 매연여과장치의 경우 고성능의 산화촉매를 사용하고, 매연여과필터에도 귀금속을 코팅하여 매연여과장치의 자연재생능력을 최대한 확보하고 있다.

Fig. 3은 시험 차량의 차속별 배출가스 온도분포를 나타낸다. 시험대상 차량은 차속 120km/h이하 고속도로 운행조건에서도 배출가스온도가 250°C이상은 약 7%에 불과하며, 현재까지 우리나라에

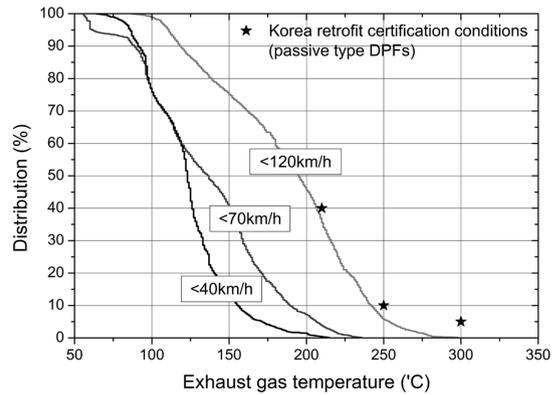
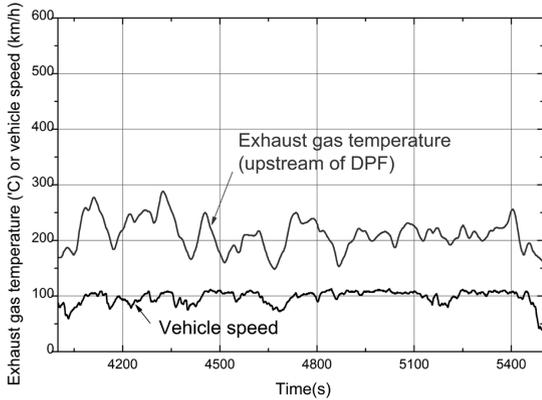


Fig. 3 Distribution of exhaust gas temperature with respect to vehicle speeds

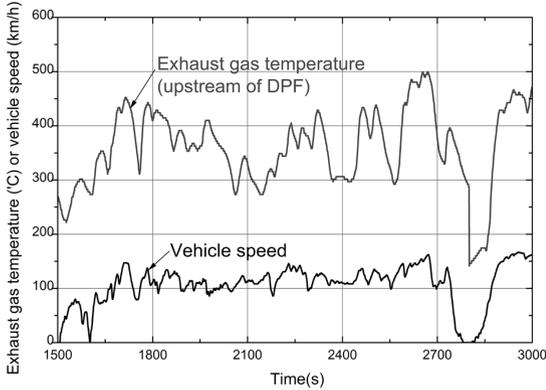
retrofit 시장에 적용된 자연재생방식 매연여과장치의 적용 온도조건보다 열악한 상태임을 알 수 있다. 즉, 시험 차량의 retrofit으로 단순한 자연재생방식의 매연여과장치 적용은 불가능하다는 것을 의미한다.

Fig. 4는 연구대상 차량의 배출가스온도가 자연재생에 적합하지 판단하기 위해 매연여과장치를 부착하고 출시되는 제작자동차의 배출가스온도와 비교하였다. 자연재생이 활발한 고속도로 운전 조건에서 비교하였으며, 이 때 본 연구대상 차량의 배출가스 온도는 약 180~280°C임에 반해 매연여과장치 부착 제작자동차의 배출가스온도는 약 300~450°C로 약 100°C이상 높음을 알 수 있다.

이상에서 알아본 바와 같이 본 연구 대상 차량은 고속 운전 시에도 배출가스온도가 매우 낮기 때문에 제작자동차에서 사용하는 유사한 양의 귀금속을 산화촉매와 매연여과장치에 코팅하더라도 필요 수준의 자연재생 성능 확보가 곤란할 것으로 예상된다. 따라서 본 연구대상 차량의 retrofit 시에는 어느 정도 양의 촉매를 코팅하여 어느 정도의 자연재생능력을 확보할 것인지 기준 재설정이 필요하다. 즉, 제작자동차에서 사용하는 유사한 양의 귀금속을 산화촉매와 매연여과장치에 코팅한 후 최소한 고속도로 운전 중에는 자연재생이 가능하도록 촉매 연소기를 가동하여 배출가스온도를 평균 350°C로 유지시키는 방안 또는, 최근 귀금속 가격의 상승 측면과 자연재생 기여 수준을 고려하여 매연여과필터에는 촉매 코팅을 생략하는 방안등을 고려해야 한다.



(a) In-use light duty vehicle of this research



(b) Reference vehicle (EURO-5, DPF equipped)

Fig. 4 The exhaust gas temperatures of the vehicles during highway driving

4. 강제재생전략

4.1 1차 화염의 안정화 방안

축매연소기에서는 소량의 1차 연료와 공기를 이용하여 1차 화염을 축매연소 방식으로 생성시킨다. 전술한 바와 같이 1차 화염은 2차 화염을 만들기 위한 불씨에 해당한다.

배출가스 유량이 적은 조건에서는 1차 화염이 2차 연료가 분사되는 부근까지 도달하여 분사된 2차 연료가 직접 연소될 수 있는 분위기를 만들고, 이 때 발생하는 열로 DPF를 재생시킨다. 배출가스유량이 많은 조건에서는 1차 화염에서 발생한 열 또는 배출가스 열로 2차 연료를 무화하고, 무화된 연료가 산화축매에서 산화되면서 발생하는 열로 DPF를 재생한다. Table 3은 재생시 축매 연소기의 작동 순서이

Table 3 Operating procedure of catalytic combustor during DPF regeneration

Step No.	Name of step	Status			Remark
		Glow plug	Air pump	Fuel pump	
1	Preheating	ON	ON	ON	Preheating temp should be checked by a sensor.
2	1 st flame initialization	ON	ON	ON	Steadily increase of 1 st fuel/air amount
3	1 st flame stabilization	OFF	ON	ON	Constant (1 st fuel/air)
4	DPF regeneration by 2 nd flame	OFF	ON	ON	
5	Purge	OFF	ON	OFF	

다. 재생이 필요한 순간이 되면 glow plug와 공기펌프, 연료펌프를 동시에 작동시키고, 1차 화염이 안정되면 축매부를 가열하는 glow plug는 끄게 된다.

Fig. 5는 엔진 공회전 조건에서 착화시 축매연소기 내부 온도의 변화 및 배터리 전압의 변화를 나타낸다. 그림 중의 T_inRF1~T_inRF3은 연소기 내부 중심선에 순차적으로 위치한 열전대의 온도이다. Glow plug를 이용하여 축매 층의 온도(T_inRF1)를 약 400°C까지 상승시킨 후 1차 연료를 분사하면 이후 축매연소기 내 화염이 발달하고, 2차 화염부의 온도를 의미하는 T_inRF3가 약 800°C에 도달하여 안정화된다. 배터리의 전압은 정상조건인 약 14V에서 glow plug와 공기펌프, 연료펌프, 인젝터가 작동됨에 따라 최저11.5V까지 저하되지만 glow plug가 꺼지는 시점에서 12V 수준을 회복한다.

Fig. 6은 엔진회전수 1200RPM 조건에서 착화시 축매연소기 내부 온도 및 배터리 전압의 변화를 나타낸다. 참고로 1200RPM-220Nm 은 전부하조건에 근접하는 조건이며, 이 조건에서는 배출가스 열에 의해 축매연소기가 가열되므로 Fig. 5의 엔진공회전 조건에 비해 glow plug에 의한 preheating이 필요 없음을 알 수 있다. 또한 배터리의 전압은 glow plug와 공기펌프, 연료펌프, 인젝터가 작동됨에 따라 최저 13V 수준까지 저하된다. 이는 Fig. 5의 엔진공회전 조건에 비해 양호한 것으로 엔진공회전시에는 alternator에서 충분한 전류를 생산하지 못하기 때문

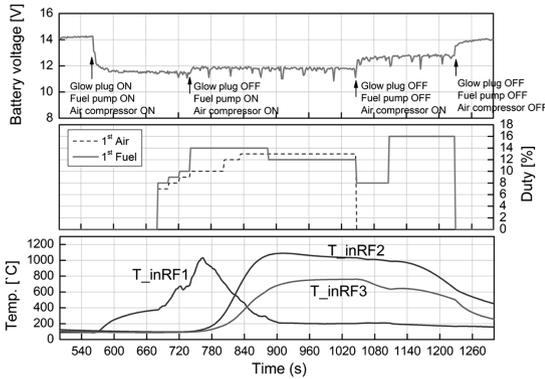


Fig. 5 The inner temperatures of catalytic combustor and battery voltage during DPF regeneration at the idle condition

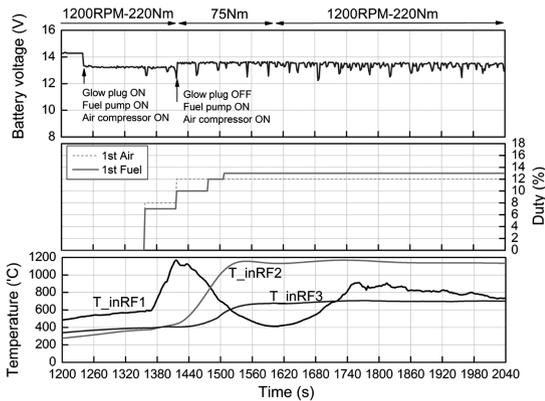


Fig. 6 The inner temperatures of catalytic combustor and battery voltage during DPF regeneration at 1200RPM condition

이다. 그리고, 1200RPM에서 부하를 220 Nm에서 75 Nm로 변동하면 촉매연소기 내부의 T_{inRF1} 의 온도는 영향을 받으나 T_{inRF2} 나 T_{inRF3} 는 영향을 받지 않는다.

촉매연소기에서 착화가 가장 어려운 조건은 엔진 공회전조건이다. 공회전조건에서 착화시에는 glow plug를 이용하여 촉매연소 반응에 필요한 온도까지 충분히 촉매부를 예열시키는 것이 중요하며, 일단 촉매연소가 시작되면 공기와 연료의 양을 단계적으로 증가시켜야 착화 실패 현상이 발생하지 않는다. 또한 공회전조건에서 착화시에는 배터리 전압을 모니터링하여야 하며, 일정수준 이하로 저하 되지 않도록 하여야 한다. 본 연구에서는 이와 같은 결과를

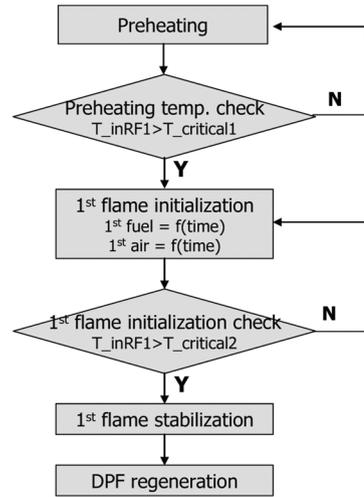


Fig. 7 Control logic of catalytic combustor during DPF regeneration

요약하여 착화실패 방지를 위한 촉매연소기 제어방안을 Fig. 7과 같이 도출하였다.

4.2 엔진운전영역별 강제 재생 특성

촉매연소기를 이용한 매연여과필터의 강제재생 성능확인을 목적으로 엔진공회전 조건을 포함한 총 9개의 운전조건에서 시험하였다. Fig. 8은 엔진 RPM-Torque 맵에 표시한 시험 조건이다.

Fig. 9는 여러 엔진운전조건에서의 촉매연소기 발열특성 실험결과를 나타낸다. Fig. 9(a)는 엔진 공회전 조건으로 산화촉매 전단의 온도가 약 600°C 이상 올라간다. 즉 배출가스 유량이 적기 때문에 2차 연료가 분사되는 부근까지 1차 화염이 도달하고, 분사된 2차 연료가 직접 연소되는 것을 의미한다. Fig. 9(b)는 “E” 조건으로서 배출가스의 온도는 약 200°C 임에 반해 산화촉매 전단온도는 약 350°C 까지 상승하고, 매연여과필터 전단의 온도는 600°C 이상 올라간다. 즉, 분사된 2차 연료의 일부분은 촉매연소기 내에서 연소되고, 일부분은 산화촉매에서 연소되는 것을 의미한다. Fig. 9(c)는 “F” 조건으로서 배출가스의 온도와 산화촉매 전단온도의 차이가 미비하며, 매연여과필터 전단의 온도는 600°C 이상 올라간다. 즉, 대부분 2차 연료가 산화촉매에서 산화되는 것을 의미한다.

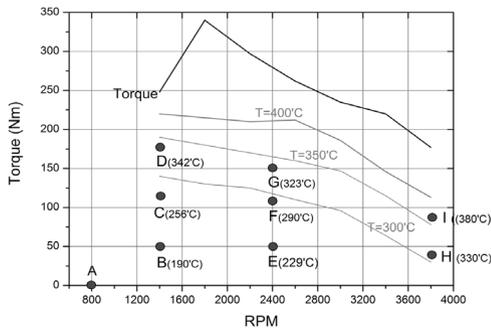


Fig. 8 Test conditions presented on the RPM-torque map

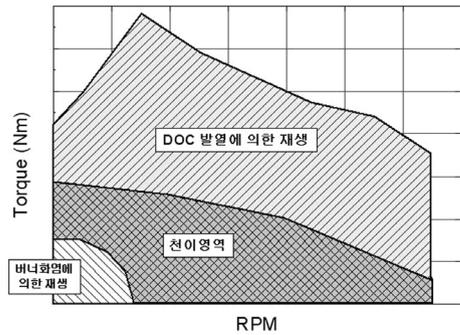
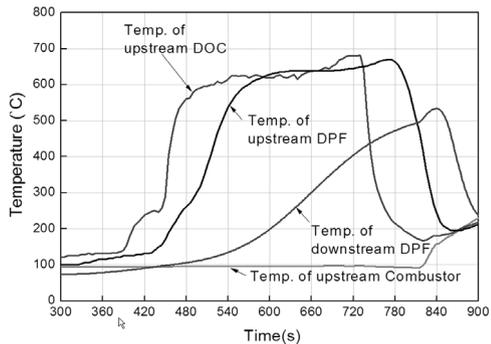
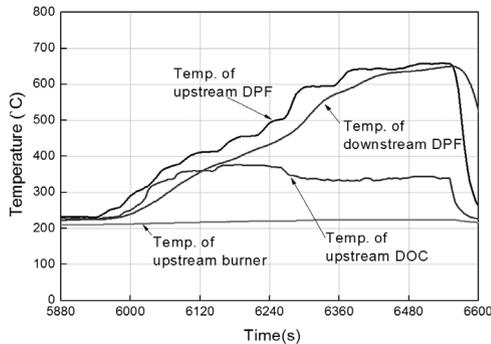


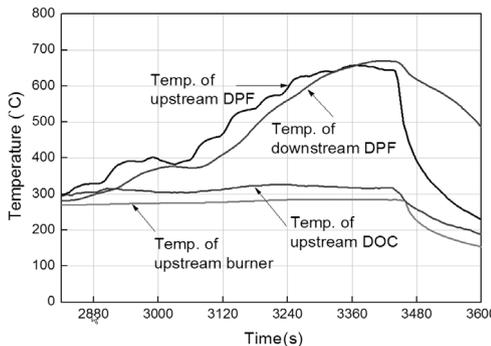
Fig. 10 Regeneration mode presented on the RPM-torque map



(a) Point "A"



(b) Point "E"



(c) Point "F"

Fig. 9 The performance of catalytic combustor

Table 4 Regeneration efficiency

Test conditions	Soot loading amount (g)	Regeneration effi.(%)
A (idle)	22.0	83.2
C (1400RPM-120Nm)	23.4	88.0

Fig. 10은 엔진맵상에서 촉매 연소기의 운전영역 별 재생모드를 표시하였다. 엔진회전수 및 토크가 낮은 영역은 촉매연소기의 자체 화염으로 연소되는 영역이고, 배출가스유량이 많은 고회전수 및 토크가 높은 영역은 DOC 발열에 의해 재생되는 영역이며, 그 사이는 천이 영역이 된다.

Table 4는 촉매연소기를 이용하여 15분동안 재생을 실시한 후 얻은 재생효율 결과이다. Idle과 1400rpm-120Nm 조건에서 80% 이상의 재생효율을 얻을 수 있음을 알 수 있다.

4.3 강제 재생 주기

Fig. 11은 실차량운전 중 매연포집량을 나타낸다. 산화촉매와 귀금속이 코팅된 매연여과필터를 사용했으며, 운전자 및 보조자 1인 또는 2인이 탑승하고 운전하였다. City 40km 모드와 city 70km 모드는 시내 도로에서 최고 속도를 40km 이하 또는 70km 이하로 제한하여 주행하였다. Highway 120km/h 모드는 고속도로를 최고속도 120km/h로 제한하여 운전한 모드이다. 또한, 300kg의 하중을 탑재하였을 때에는 city mode와 highway mode를 각 3회씩 주행하면서 매연포집량의 변화를 알아보았다. 고승도로 운전시보다 도심도로 운전시 매연포집량이 많았으

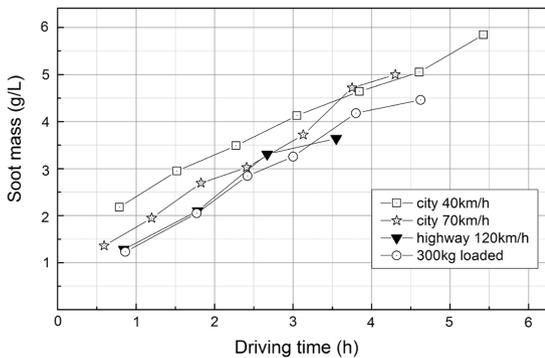


Fig. 11 PM loading mass with respect to driving time (DOC+CDPF system)

며, 300kg의 하중을 탑재하고 운전하는 경우가 매연 포집량이 가장 적다. 그 이유는 고속도로 운전과 300kg의 하중을 탑재시에는 배출가스온도가 높아 필터의 자연재생 특성이 양호해지기 때문인 것으로 판단된다. 이상의 결과로부터 재생시 필터내 온도 상승으로 인한 촉매열화를 방지하지 위해 한계매연 포집량을 6g/L⁶⁾으로 고려했을 때 강제재생 주기를 약 5시간으로 제어하는 것이 바람직하다.

5. 결론

본 연구는 촉매연소기를 이용한 소형 운행 경유 차량 강제재생방식 매연여과장치 개발에 관한 것으로서 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 본 연구 대상 차량은 고속 운전시에도 배출가스 온도가 낮기 때문에 제작자동차에서 사용하는 유사한 양의 귀금속을 산화촉매와 매연여과필터에 코팅하더라도 필요 수준의 자연재생 성능 확보가 곤란하다. 최소한 고속도로 운전 중에는 자연재생이 가능하도록 촉매 연소기를 가동하여 배출가스온도를 높이는 방안 또는, 귀금속 가격 측면을 고려하여 매연여과필터에는 촉매 코팅을 생략하고 강제재생을 강화하는 방안등을 고려해야 한다.
- 2) 촉매연소기를 이용하여 전 엔진 운전영역에서 DPF 재생가능 온도인 650°C까지 승온이 가능하였다.
- 3) 본 연구로부터 개발된 시스템은 엔진회전수 및 토크가 낮은 영역은 촉매연소기에서 생성되는

자체 연소열을 이용하여 재생하고, 고회전수 및 토크가 높은 영역은 촉매연소기의 화염이 충분히 발달하지 못하므로 산화촉매 발열에 의해 재생하며, 이 두 영역 사이의 천이 영역이 존재한다.

- 4) 재생시 여러 원인에 의해서 연소기내의 조건이 촉매 연소 조건을 벗어나 착화가 실패되는 경우를 방지하기 위해 촉매내부 온도 및 배터리 전압 모니터링이 필요하다.
- 5) 본 연구에 사용된 차량의 경우 재생시 필터내 온도 상승으로 인한 촉매열화 방지를 위해 한계매연포집량을 6g/L으로 고려했을 때 강제재생 주기를 약 5시간으로 제어하는 것이 바람직하다.

후 기

본 연구는 환경부 Eco-STAR Project 사업의 무.저공해자동차사업단 지원하에 수행되었으며 이에 감사드립니다.

References

- 1) J. W. Kang, M. Y. Kim and G. J. Youn, "A Study on the Combustion Optimization of a Common Rail Direct Injection Diesel Engine for Regeneration of the Diesel Particulate Filter," Transactions of KSAE, Vol.13, No.4, pp.167-173, 2005.
- 2) C. Kim and C. Baek, "A Study on the Characteristics of DPF Regeneration Process of Peugeot 406 Vehicle Engine," Transactions of KSAE, Vol.12, No.6, pp.96-102, 2004.
- 3) H. Kim, Y. Jeong, J. Hwang and S. Han, "Performance of an Electrical Heated CDPF System for a Midium Duty Diesel Engine," Fall Conference Proceedings, Vol.I, KSAE, pp.247-251, 2005.
- 4) Y. Jeong and H. Kim, "Trend of Diesel Particulate Filter Technology," Auto Journal, Vol. 29, No.1, pp.55-61, 2008.
- 5) L. Chiew, P. Kroner and M. Ranalli, "Diesel Vaporizer: An Innovative Technology for Reducing Complexity and Costs Associated with DPF Regeneration," SAE 2005-01-0671, 2005.

- 6) M. Gautam, S. Popuri, B. Rankin and M. Seehra, "Development of A Microwave Assisted Regeneration System for A Ceramic Diesel Particulate System," SAE 1999-01-3565, 1999.
- 7) Z. Ning and Y. He, "Experimental Study on Microwave Regeneration Characteristics of Diesel Particulate After-Treatment Systems," SAE 1999-01-1470, 1999.
- 8) J. Lee, C. Kwon, S. Kim and G. Yeo, "Control of Diesel Catalyzed Particulate Filter system 1(The CPF System Influence Assessment According to a Regeneration Condition)," SAE 2005-01-0661, 2005.