



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

2007年 8月
博士學位論文

輕油 粒子狀物質 濾過裝置의
排氣低減性能에 關한 研究

朝鮮大學校 大學院

環境生命工學科

朴 鏞 熙

輕油 粒子狀物質 濾過裝置의
排氣低減性能에 關한 研究

A Study on Performance Evaluation of Emission
Reduction in a Diesel Particulate Filter

2007年 8月 24日

朝鮮大學校 大學院

環境生命工學科

朴 鏞 熙

輕油 粒子狀物質 濾過裝置의
排氣低減性能에 關한 研究

指導教授 申 大 允

이 論文을 博士學位 申請論文으로 提出함

2007年 4月 日

朝鮮大學校 大學院

環境生命工學科

朴 鏞 熙

朴鏞熙의 博士學位論文을 認准함

委員長	仁荷大學校	教授	嚴	明	道	印
委 長	全南大學校	教授	徐	聖	奎	印
委 長	朝鮮大學校	教授	李	仁	化	印
委 長	朝鮮大學校	教授	田	榮	男	印
委 長	朝鮮大學校	教授	申	大	允	印

2007年 6月 25日

朝鮮大學校 大學院

목 차

List of Tables	VIII
List of Figures	IX
Abstract	XII
제1장 서론	1
제1절 연구 배경	1
제2절 자동차배기가스 관리 동향	2
제3절 연구 목적	4
제2장 이론적 고찰	5
제1절 경유 입자상물질 여과장치의 연구 동향	5
제2절 경유 입자상물질	8
1. 정의	8
2. 경유 입자상물질의 구성	8
3. 경유 입자상물질 여과장치	10
4. 경유 여과장치	17
제3절 매연정화장치의 종류	26
1. 디젤산화촉매(DOC)	26
2. 경유촉매 입자상물질 여과장치(CDPF)	35
3. CRT필터	43
4. 연료첨가제방식 매연정화장치	52
5. 전기히터방식 매연정화장치	55
제3장 실험장치 및 방법	59
제1절 배기정화장치	59
1. PDPF의 원리	59
2. PDPF의 종류	60

3. 배기정화장치의 구성	62
제2절 실험엔진 및 장치	67
1. 실험엔진	67
2. 실험장치	67
제3절 실험방법	71
1. 배기가스 정화시험	71
2. 내구시험	74
3. 재생 평형온도시험	74
4. 저온 검댕포집시험	75
5. ETC모드에 의한 배기가스 정화시험	75
6. 매연시험(Lug-Down 3모드)	76
7. 실차시험	76
제4장 결과 및 고찰	79
제1절 배기가스 정화성능	79
1. 기본 성능 시험	79
2. 제거율 시험	81
3. 입자상물질의 포집율의 세부산출 근거	83
제2절 내구시험	84
1. 내구시험 결과 분석	84
2. 장치의 내구성	86
제3절 재생 평형온도시험	87
1. 재생 평형온도시험	87
2. NO ₂ 에 의한 매연 재생가능온도	88
3. 재생가능온도(LOT)	90
제4절 저온 검댕포집시험	91
제5절 ETC모드에 의한 배기가스 제거율	95
1. ETC모드	95

2. 배기가스 제거율	98
제6절 매연측정실험	99
제7절 실차시험에 따른 제거율시험 결과분석	101
1. 주행패턴에 따른 온도분포	101
2. 배출가스 제거율	103
3. 실차시험의 배기온도, 배압 및 주행속도	104
4. PDPF장착이 엔진의 성능에 미치는 영향	106
제5장 결 론	107
1. 배기가스 정화시험	107
2. 특성시험	107
3. 실차시험	108
참 고 문 헌	110

List of Tables

Table 2-1. Commercial monolith materials	18
Table 2-2. Comparison of cordierite and SiC materials	19
Table 2-3. Physical properties of cordierite diesel filter materials ..	21
Table 2-4. Diesel filter sizes(Corning, EX-80/100/17)	22
Table 2-5. Typical CDPF sizing ranges in heavy-duty engines	36
Table 2-6. Balance temperature comparison	46
Table 2-7. PM reduction efficiency in CRT filter(CAT 3126 engine)	50
Table 2-8. Emission performance on a DDC 6V92TA diesel engine, federal HD urban bus cycle, 0.08% sulfur #2 fuel	57
Table 2-9. Trap system performance-fuel penalty	58
Table 3-1. Specification of PDPF	63
Table 3-2. Specification of sintered metal layer filter	64
Table 3-3. Specification of front-coated substrate	64
Table 3-4. Specification of test engine	67
Table 3-5. Specification of test device	68
Table 3-6. Schedule of ND-13 mode	71
Table 3-7. Engine speed A, B, C In full load	73
Table 3-8. Schedule of Seoul-10 mode	74
Table 4-1. Power of test engine	79
Table 4-2. Emission reduction rates of PDPF	81
Table 4-3. Reduction results of emissions by driving time	85
Table 4-4. Pmax and SFC results by with or w/o PDPF	85
Table 4-5. Emission results by using muffler and PDPF	97
Table 4-6. Reduction rates results of ETC mode	98
Table 4-7. Engine speed and torque of lug-down 3 mode	99
Table 4-8. Smoke reduction rates in lug-down 3 mode(Paper type)	100
Table 4-9. Smoke reduction rates in lug-down 3 mode(Light extinction)	100
Table 4-10. Emission results of PDPF installed in vehicle	103

List of Figures

Fig. 1-1. Emission regulations for diesel vehicle	3
Fig. 2-1. DPF technology	6
Fig. 2-2. Classifications of regeneration methods	7
Fig. 2-3. Schematic of diesel particulates	9
Fig. 2-4. Composition of diesel particulate matter	10
Fig. 2-5. Schematic of particulate filter with thermal regeneration	11
Fig. 2-6. Wall-flow and flow-through substrates: flow pattern	12
Fig. 2-7. Diesel soot oxidation	13
Fig. 2-8. Particulate filter operation modes	14
Fig. 2-9. DPF operation with periodic stochastic regenerations	15
Fig. 2-10. DECSE 5-mode balance point test-example run data	16
Fig. 2-11. Gas flow in a monolith filter	17
Fig. 2-12. Cell geometry	18
Fig. 2-13. Cordierite wall flow monolith	20
Fig. 2-14. SiC filter material: flectron microscope photograph of channel surface	23
Fig. 2-15. SiC Wall-flow monolith made of cemented sections	24
Fig. 2-16. Pressure drop pattern during loading cycle	25
Fig. 2-17. Functional diagram of catalyst	30
Fig. 2-18. Catalyzed diesel particulate filter	36
Fig. 2-19. Conversion of DPM in Pt-based CDPF at different fuel sulfur levels	39
Fig. 2-20. Conversion of gases in Pt-based CDPF	40
Fig. 2-21. Oxidation of PM by oxygen and nitrogen dioxide	44
Fig. 2-22. Configurations of catalytic filters	45
Fig. 2-23. Comparison of regeneration rates in various C-filter configurations	47

Fig. 2-24. CRT balance temperature as a function of fuel sulfur level	48
Fig. 2-25. CRT effect on diesel bus NO _x emissions(1998 DDC series 50 engine)	49
Fig. 2-26. Exhaust back-pressure with CRT trap	51
Fig. 2-27. Prototype of light-duty CRT system	52
Fig. 2-28. System schematic	56
Fig. 2-29. Backpressure distribution on trap equipped buses	58
Fig. 3-1. Fundamentals of partial DPF	59
Fig. 3-2. Construction of partial DPF	60
Fig. 3-3. Metal partial through filter	61
Fig. 3-4. Half plugging filter	61
Fig. 3-5. Metal foam filter	62
Fig. 3-6. Pore size selection	65
Fig. 3-7. Filter density selection	65
Fig. 3-8. PM reduction effect on exhaust temperature and catalyst type	66
Fig. 3-9. View of test engine	69
Fig. 3-10. Exhaust gas analyzer	69
Fig. 3-11. View of PM dilution and sampling system	69
Fig. 3-12. Partial particulate filter	69
Fig. 3-13. Installed PDPF	69
Fig. 3-14. Schematic diagram for exhaust emission test system	70
Fig. 3-15. Driving condition of ND-13 mode	72
Fig. 3-16. Calculation methods of engine speed A, B, C	73
Fig. 3-17. Schedule of ETC mode	75
Fig. 3-18. View of test vehicle	76
Fig. 3-19. View of PDPF	76
Fig. 3-20. Real road schedule of vehicle test	77
Fig. 4-1. NO _x /Soot-ratio of different Diesel-applications	80
Fig. 4-2. Emission results of PDPF	82

Fig. 4-3. Emission reduction rates of PDPF	82
Fig. 4-4. PM reduction rate on PDPF length	83
Fig. 4-5. Speed and torque of test engine in Seoul 10 mode	84
Fig. 4-6. Temperature and pressure of pre PDPF in Seoul 10 mode	84
Fig. 4-7. Back pressure variation by endurance test	86
Fig. 4-8. Speed and torque in BPT test	87
Fig. 4-9. Back pressure with temperature of pre PDPF	88
Fig. 4-10. Relationship of NO ₂ and regeneration temperature	89
Fig. 4-11. Regeneration possibility temperature of SOF	90
Fig. 4-12. Speed and Torque in soot loading test	91
Fig. 4-13. Temperature of pre and after PDPF	92
Fig. 4-14. Back pressure of pre PDPF	92
Fig. 4-15. Smoke results of after PDPF	93
Fig. 4-16. Smoke reduction rates	93
Fig. 4-17. PM results of after PDPF	94
Fig. 4-18. PM reduction rates	94
Fig. 4-19. Engine speed in ETC mode	95
Fig. 4-20. Torque in ETC mode	96
Fig. 4-21. Exhaust flow of partial flow system	96
Fig. 4-22. European transient cycle	97
Fig. 4-23. Modal results of ETC mode	98
Fig. 4-24. Log-down 3 mode map	101
Fig. 4-25. Distribution of exhaust gas temperature by vehicle speed	102
Fig. 4-26. Emission reduction rates of PDPF installed in vehicle	104
Fig. 4-27. Distributions of exhaust temperature upper 250℃	104
Fig. 4-28. Distributions of exhaust temperature upper 300℃	105
Fig. 4-29. Pre PDPF pressure	105
Fig. 4-30. Maximum and average speed with mileage	106
Fig. 4-31. Performance comparison of with or w/o PDPF	106

ABSTRACT

A Study on Performance Evaluation of Emission Reduction in a Diesel Particulate Filter

Park Yong-hee

Advised : Prof. Shin Dae-yewn Ph.D.

Department of Environmental Bioengineering

Graduate School of Chosun University

As the motor vehicle emission regulation becomes stricter due to the accelerated global warming and air pollution all over the world, diesel engine which has high efficiency and low CO₂ emission is being reevaluated as the solution. But diesel engine has disadvantage in high toxic emissions such as Particulate Matter(PM) and NO_x which are very difficult to reduce simultaneously. Although diesel emission control technology such as precise injection timing control, a common-rail high pressure fuel system and an alternative fuel has been improved, the diesel engine is still difficult to meet the future regulation which is stricter than EURO 5. Since it is quite difficult to meet post-EURO 5 regulation with pre-processing technology such as improvement of engine performances, aftertreatment technology such as Diesel Particulate Filter(DPF) or Selective Catalyst Reduction(SCR) should be developed to reduce PM and NO_x. Although the strict management of newly manufactured motor vehicles is important, the management of in-use diesel vehicles, especially in metropolitan region where a large number of motor vehicles are running, is another important factor for controlling air pollution.

Trying to reduce the emissions of PM, Korean Ministry of Environment(MOE) has implemented the retrofit program which has installed the Diesel Oxidation Catalyst(DOC) and DPF in light-duty and heavy-duty diesel vehicles, respectively.

When DPF for heavy duty vehicles is applied to medium and light duty vehicles such as county buses, the regeneration efficiency and the performance and fuel consumption efficiency of motor vehicles are getting down.

So in order to reduce the emissions from medium duty truck which is difficult to apply DPF, the Partial Diesel Particulate Filter(PDPF) which has better motor vehicle performances and fuel consumption efficiency than DPF by reducing the resistance of exhaust flow and the load to engine or motor vehicle instead of lowering PM filtering efficiency by 50~60% with opening PDPF passage, was developed and the performance evaluation was also carried out.

PDPF uses the corrugated layer blades which have three dimensional geometry and captures particulate matter by making some part of exhaust gas pass through porous fleece layer.

For the evaluation for PDPF, reduction efficiency test, durability test, property test and smoke test(Lug down 3 mode) were executed. PDPF reduced 56.3% of PM, 98.3% of CO, 93.6% of HC and 4.3% of NOx in ND-13 emission mode test. PDPF slightly affected maximum engine power and fuel consumption efficiency, but did not exceed the standard value of 5%. In property test before and after DPF set up, the difference of emission reduction efficiencies and the variation of temperature and pressure in up-and-down streams of PDPF is negligible. With these property test results, the performance of durability could be confirmed. In the Lug Down 3 mode test under the condition of 100, 90, 80% of engine rated speed using engine dynamometer, PDPF has shown smoke reduction of 50.4% in smokemeter and 54.4%

in opacimeter, which confirms over 50% reduction efficiency in both smoke measurement methods.

Because PDPF has higher durability and safe performance than DPF for heavy duty trucks of which main driving cycles are low speed and high load, PDPF technology could be available to the medium and heavy duty vehicles that DPF could not be applied to.

제1장 서론

제1절 연구 배경

수도권의 대기오염도는 뉴욕, 런던, 파리, 동경 등 선진국의 주요도시에 비해 이산화질소(NO_2)와 미세먼지(PM10) 등이 1.8~3.5배나 높은 수준이며, 또한 수도권 지역의 오존주의보 발령횟수와 NO_2 및 PM10의 환경기준 초과율이 비수도권에 비하여 매우 높은 수준이다.

대기오염으로 인하여 건강이 나빠지고, 서울시에서는 미세먼지에 의한 조기 사망자수를 연간 9천명 이상으로 추정하고 있다. 미국 환경보호청(EPA)에서는 미세먼지와 오존농도가 증가할 경우 뇌졸중 사망자수가 각각 1.5%와 2.9% 증가하고, 대기오염으로 인한 사망자수가 교통사고 사망자 수의 3배정도라고 발표한 바 있다.

수도권의 자동차 등록대수는 1980년 27만대에서 2007년에는 743만대로 27배 증가하고, 차령 10년 이상 노후차량이 1994년 3만5천대에서 2007년에는 41만대로 급격히 증가하여 대기오염을 가중시키고 있다.^{1,2)}

환경부는 수도권의 대기질을 개선하기 위하여 “수도권 대기환경 개선에 관한 특별법”을 제정·공포(2003.12)한 이래 동법에 의해 2005년 1월부터 수도권에서 운행 중인 경유자동차를 대상으로 정밀검사를 실시하여 불합격 차량에 대해서 특별대책의 일환으로 경유매연여과장치(DPF : diesel particulate filter) 또는 산화촉매장치(DOC : diesel oxidation catalyst)의 부착, LPG 저공해자동차로 개조, 조기폐차 중에서 한 가지 방법을 선택하도록 조치하고 있다.

특별대책의 골자는 경유차 배기가스 저감방안으로서 무저공해자동차 보급과 운행경유차의 배기가스 감축이다. 환경부는 이와 같은 특별대책을 촉진시키기 위하여 기술개발 및 제품국산화를 목표로 2004년에 Eco-STAR Project에 무저공해자동차사업단을 발족하여 2011년까지 4단계 기술개발계획을 수립하였으며, 현재 2단계 사업을 추진하고 있다.

이와 같이 미국, 일본, 독일 등 몇몇 선진국이 독점하고 있는 첨단기술을 조속히 개발하여 국산화하기 위해서는 우선 선진국들의 기술을 면밀하게 조사 분석하고 장·단기 국내외 저공해자동차 보급정책을 파악하여야 한다.

제2절 자동차배기가스 관리 동향

세계적으로 자동차 배출기준 강화되는 추세이기 때문에 우리나라도 2002년 7월부터는 EURO3 수준으로 배출기준을 강화하고, 특히 경유차 수요가 급증함에 따라 경유차 배출가스의 PM과 NOx에 대한 규제를 강화하였다.

Fig. 1-1에 경유자동차 배출기준을 선진국과 비교하여 나타내었다.

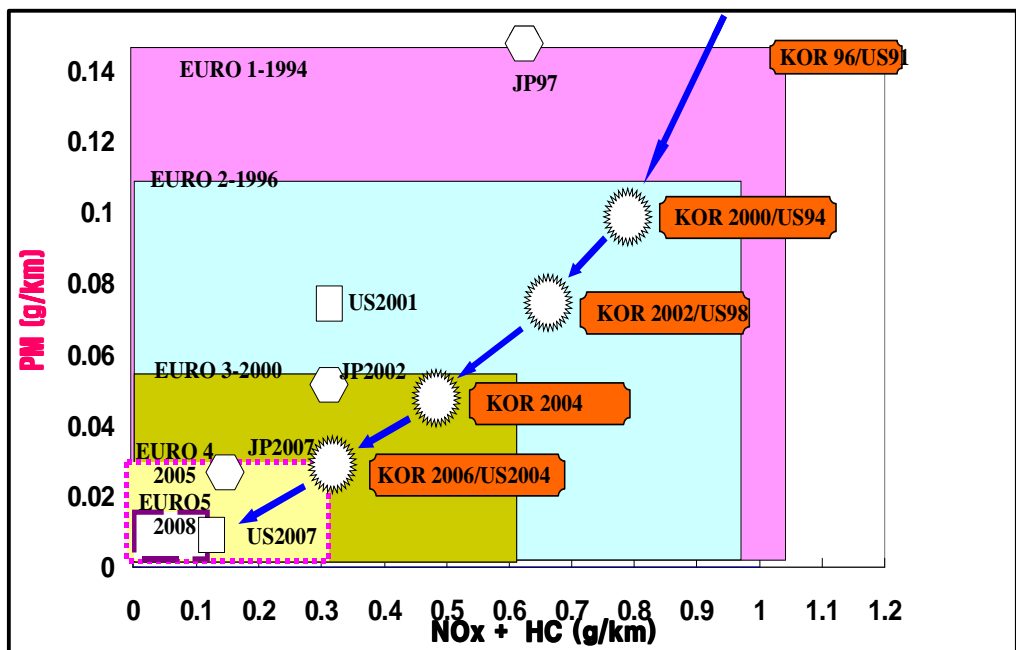


Fig. 1-1. Emission regulations for diesel vehicle.

최근에는 경유차의 EURO4 배출규제를 충족시키기 위해서 커먼레일(Common-rail)방식의 분사시스템을 도입하고 있다. 이 방식은 분사계통이 고압-전자화 되었기 때문에 정밀제어기술과 고압환경의 재료내구성이 요구된다.

커먼레일 시스템은 아직 일부 차종이 EURO4 배출규제에 미달되지만, 후처리 시스템을 조합할 경우 가능할 것으로 기대하고 있다. 장차 EURO4 이후의 배출기준을 충족시키기 위해서는 엔진개량 등 전처리 기술만으로는 미흡하므로, DPF(Diesel Particulate Filter)나 SCR(Selective Catalyst Reduction)과 같이 PM과 NOx 제거효율이 우수한 정화장치가 도입되어야 한다.

이와 같이 국제적으로 강화되는 배출기준에 대응하여 신규 제작차를 관리하는 것도 중요하지만, 대기오염이 심화된 대도시 대기질을 개선하기 위해서 대형경유차의 배출가스를 저감하는 것도 매우 중요하다.³⁾

최근 미국, 일본 및 유럽 국가들은 여러 가지 후처리 시스템을 도입하고 있다. 세계적으로 가장 배출가스 규제가 엄격한 미국 캘리포니아주 프로그램에서는 DPF시스템 장착을 의무화하였고, 2007년까지 앵겔하드와 J/M사로부터 차량 70만대에 후처리시스템을 장착하기로 합의하였다.

또한 일본, 홍콩, 중국 등 동남아 지역에서도 배출가스 규제가 강화됨에 따라 앵겔하드와 J/M사의 시스템을 도입하기 위하여 다양한 프로그램이 개발되고 있다. 지금까지 적용된 프로그램을 살펴보면 일본과 홍콩의 경우 엔진과 도로조건이 취약하여 이렇다할 성과가 없는 상황이다.

장차 앵겔하드 기술이 도입되면 수 년 내에 후처리 시스템 장착이 의무화 될 것으로 판단된다.

제3절 연구 목적

세계적으로 자동차 배출기준이 강화되고 있으며, 2000년대 이후 우리나라 배출기준도 선진국 수준으로 대폭 강화되었다. 국내 대도시 대기오염에 대한 자동차 배출가스의 기여율은 질소산화물 50%이상, 입자상물질 84%이상이기 때문에 교통체계를 개선하거나 자동차의 배출원단위를 낮추지 않고는 쾌적한 대기환경을 복원할 수 없다.

정부에서는 PM배출원단위가 높은 경유차의 배출량을 삭감하기 위해서 수도권에서 운행하는 소형경유차는 DOC(Diesel Oxidation Catalyst)를 부착하고, 대형경유차는 DPF를 의무적으로 부착하도록 규제하고 있다. 그러나 대형차에 적합한 DPF를 마을버스와 같은 할 경우 재생효율과 자동차 성능이 저하되고 연비도 나빠진다.

본 연구에서는 중형경유차에 적합한 매연정화장치를 개발함으로써 배출량을 삭감하기 위해, 연속재생방식 DPF를 개선하여 단면적의 일부를 개방시켜 PM제거율을 50~60% 수준으로 낮추는 대신, 배기가스 유동저항을 줄이고 엔진 및 차량부하를 낮춤으로써, DPF보다 차량성능 및 연비가 향상되는 부분유량정화장치(PDPF : partial diesel particulate filter)를 개발하여 그 성능을 평가하였다. 또한 시제품을 제작하고 실용화를 촉진하기 위하여 장치의 성능 및 내구성 등을 검증하였다.

제2장 이론적 고찰

제 1 절 경유 입자상물질 여과장치의 연구동향

후처리 기술은 크게 포집기술(Accumulation), 재생기술(Regeneration), 소재 기술(Materials), 제어기술(Control) 등 네 가지로 구분한다. 포집기술은 배기가스의 매연을 포집하고, 재생기술은 포집된 매연을 연속적 혹은 주기적으로 산화·연소시켜 필터의 배압을 줄임으로서 지속적으로 작동할 수 있게 하는 기술을 말한다. Fig. 2-1에 DPF시스템 개발에 필요한 기술들을 나타내었다.

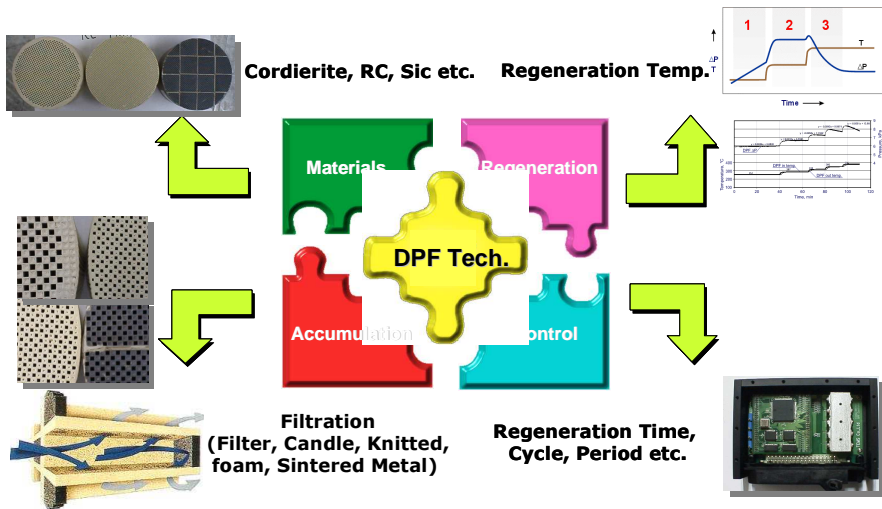


Fig. 2-1. DPF Technology.

소재기술은 후처리기술의 가장 중요한 요소이며, 여과소재는 고온에서 재생할 때 용해나 소결 등에 대한 내구성을 갖추어야 한다. 여과소재는 초기에 코닝(사)에서 독점적으로 생산하는 코디에라이트를 사용하였으나, Ividen(일본), NGK, NoTox, Heimbach 등의 업체들이 고온에서 내구력이 우수한 SiC필터를 개발함으로써 자연재생(Passive)방식에 강제재생(Active)방식을 접목시킨 시스템이 도입되었다.

마지막으로 제어기술은 강제재생 시스템에 적용되며, 재생 시기를 결정하는 기술이다. 필터의 내구성은 재생 시기의 적용방법에 따라 달라지므로 제어기술은 필터의 내구성을 향상시키는 기술이라고 할 수 있다.^{4,5,6)}

우리나라의 경우, 포집기술은 선진국기술에 의존하고 있으나, 재생기술은 선진적 수준에 접근하고 있다. 국산차는 외국차에 비해 엔진에서 배출되는 배기가스가 많고, 도로사정이 취약하기 때문에 강제재생시스템이 유리하다.

소재기술은 DPF시스템에 따라 SiC와 코디에라이트 중에서 선택하여 사용하며, 일반적으로 강제재생시스템에서는 SiC필터를 사용하고, 자연재생시스템에서는 코디에라이트를 사용한다.

강제재생시스템에서는 재생 시기를 임의로 조절할 수 있기 때문에 여과소재가 열충격보다는 국부 고온에 강하여야 하고, 고온에서 열전도도가 우수하여 온도구배를 균등화 할 수 있어야 한다.

자연재생시스템은 재생 시기를 정하기 어렵고 배기가스에 의해 매연을 재생해야 하기 때문에 여과소재는 열용량이 적고 열전도가 낮은 것이 좋는데, 경우에 따라 일시 연소재생(uncontrolled regeneration)이 발생할 수 있다.⁷⁾

재생기술은 시스템과 엔진조건에 적합한 재생 시기, 기간, 주기 등을 결정하는 기술이다. 재생방식은 자연재생방식과 강제재생방식으로 구분되는데 각각 장단점이 있다. 재생방식을 선정할 때에는 경과시간에 따른 매연 포집량과 재생용량 및 필터의 온도제어방식 등을 고려하여야 한다.

포집기술은 엔진에서 배출되는 매연이 대기 중에 방출되지 않도록 제어하는 방식이다. 다양한 기술이 개발되었지만, 필터방식이 가장 많이 사용되고 있다. 엔진에 적합한 필터를 선정하기 위해서는 필터의 배압이 엔진출력에 미치는 영향과,⁸⁾ 필터의 물리화학적 특성 등을 검토하여야 한다.

제어기술은 강제재생 방식이 주로 사용되는 데, 재생이 원활하게 이루어지도록 주위 환경을 조절하는 기술이다.⁹⁾

재생기술은 Fig. 2-2에 나타낸 바와 같이 배기온도를 매연이 자연산화할 수 있는 온도까지 상승시키는 자연재생방식과 산화제를 사용하여 재생온도를 낮추는 강제재생방식이 있다.

강제재생방식에 사용되는 열원은 전기히터, 경유버너, 마이크로파, 후분사 방

식이 있고, 자연재생 방식에는 연료첨가제, 촉매, 산화제(NO₂, 라디칼) 등이 사용된다. 엔진운전조건이나 도로사정이 원활한 곳에서는 어떤 방법을 선택하더라도 무방하지만, 최근에는 두 가지 시스템을 혼용하고 있다.^{10,11)}

Classification for Regeneration Methods

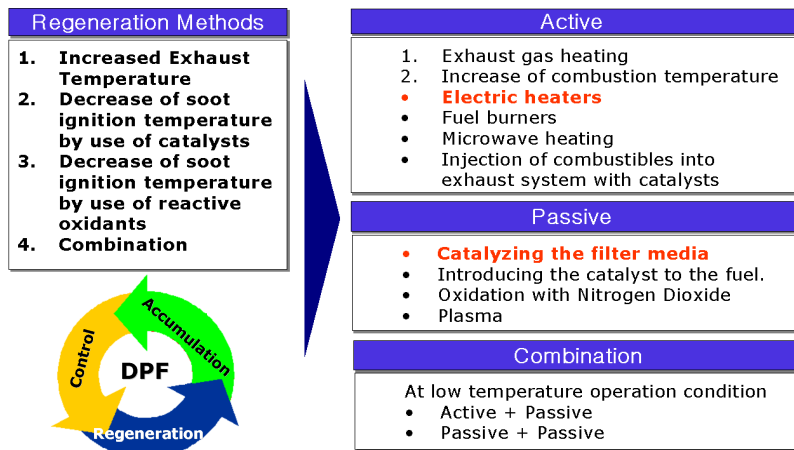


Fig. 2-2. Classifications of regeneration methods.

제 2 절 경유 입자상물질

1. 정의

경유 입자상물질(DPM : diesel particulate matters)은 경유엔진에서 배출되는 배기가스 중에 들어 있는 물질이다. 아직까지 경유 입자상물질의 형성과정, 물리적 화학적 특징 및 인체에 미치는 영향 등이 명확히 밝혀지지 않고 있다.

PM은 경유엔진에서 배출되는 가장 중요한 유해배기가스로 규정되었으며, 전 세계적으로 배출저감에 관심을 모으고 있다.¹²⁾ PM은 탄소를 중심으로 구성된 물질로서 타 화합물과 물리화학적으로 결합하여 복잡한 구조를 형성한다.

결합구조는 크게 핵(nuclei) 모드와 결합 모드로 구분되는데(Fig. 2-3), 핵 모드는 주로 연소 후 연소실에서 탄소알갱이에 의해 생성되며 입자크기는 0.007~0.04 μm 으로 매우 미세하다. 연소 후 배기가스의 온도가 낮아지면 수분이나 황성분이 첨가되는 수도 있다. 결합 모드의 입자는 핵 모드에서의 입자들이 서로 결합하여 생성된 것으로 주로 배기라인이나 DPF내에서 성장하며, 입자크기는 0.04~1 μm 이다.¹³⁾

2. 경유 입자상물질의 구성

경유차 배기가스의 PM성분은 Fig. 2-4에 나타낸 바와 같이 SOL 54%, SOF 37%, SO₄ 14%정도의 비율이라고 보고되었으며,¹⁴⁾ DPM은 물리화학적 분석에 따라 Solid fraction(SOL)-탄소, Soluble organic fraction(SOF)-엔진오일, 연료 및 Sulfate particulates(SO₄)-황산, 물, 엔진오일로 구분된다.

엔진 연소실에서 배출된 PM은 초기에는 탄소입자로만 구성되지만, 배기과정에서 액상 미연탄화수소 및 황산화물 등과 결합하여 덩어리 형태가 된다. 생성과정의 주위온도 및 산소존재여부에 따라 성상이 결정된다. SOL의 또 다른 형태는 엔진오일, 연료 및 각종 첨가제에 기인한 것으로 이 또한 PM을 형성하는 핵으로 작용한다.¹⁵⁾

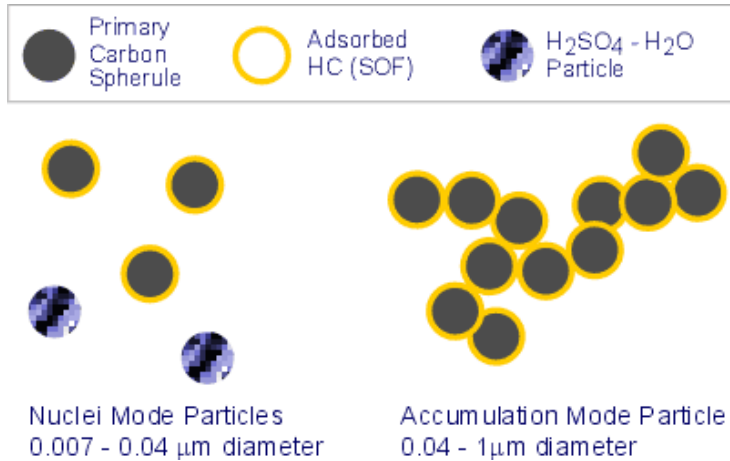


Fig. 2-3. Schematic of diesel particulates.

황산염은 연료나 엔진오일 중에 포함된 황이 산화되어 생성되는 데 이산화황이 95%이상을 차지한다. 배기가스 중에 산소가 충분하면 쉽게 산화되어 삼산화황이 되고, 다시 수분과 결합되어 황산이 되며, 촉매로 사용된 금속성분 등과 결합하여 황산염이 된다.

황산염은 PM물질의 주요 구성 성분이며 DPF적용의 장애물질로서 DPM이라고 한다.¹⁶⁾ DPM의 생성량은 엔진기술, 엔진운전조건 및 시험조건에 따라 달라진다.

엔진에서 배출되는 PM, NO_x, HC는 1970년대 이후 연소실, 흡기계 및 분사계의 최적화 등 엔진기술이 발달됨에 따라 대폭 개선되었다. 특히 분사계의 전자화 및 고압화 도입으로 PM 및 NO_x가 획기적으로 감소되었다. NO_x와 PM은 상반 (trade-off)관계이기 때문에 동시에 두 가지 물질을 저감시키기는 매우 어렵다. 연료 중의 황을 조절하거나 연료의 세탄가를 높이는 방법이 시도되고 있으나 원천적으로 배기가스를 저감시키는 데는 한계가 있다.^{17,18)}

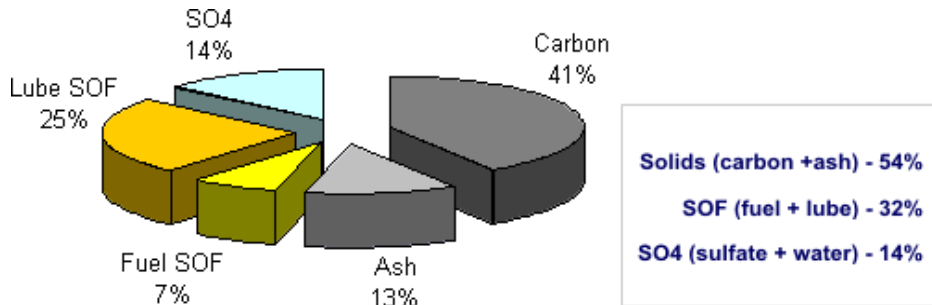


Fig. 2-4. Composition of diesel particulate matter.

3 경유 입자상물질 여과장치

가. 개요

경유 입자상물질 여과장치(Diesel Particulate Filter : DPF)는 대기 중에 방출되는 경유차의 입자상물질을 물리적으로 여과·포집하는 장치이다. 현재까지 개발된 DPF는 주로 세라믹으로 제작되었으며, 코디에라이트나 SiC필터가 주류를 이루고, 제거효율은 약 90%이고 열적 내구성이 매우 우수하다. DPF는 현재까지 알려진 배기가스 정화장치 중에서 PM을 가장 확실하게 제거할 수 있는 장치로 알려져 있다.¹⁹⁾

한편 제거효율이 100%가 되지 않는 이유는 SOL에 용융되어 있는 용해성유기물질(SOF : Soluble Organic Fraction)이 자연재생 필터에 의해 제거되지 않기 때문이다. 이를 동시에 제거하기 위해서는 산화촉매(SOF저감용)나 초저유황경유(Ultra Low Sulfur Diesel Fuel)를 사용하는 방법이다.²⁰⁾

필터를 사용하게 되면 PM의 비체적(0.056g/cm³)이 크기 때문에 비교적 짧은 시간에 많은 양의 PM이 필터에 포집되고 배압을 상승시켜 엔진의 출력이 저하된다. 따라서 필터에 포집된 매연을 연속적 혹은 주기적으로 제거해 주어야 하는 데 이를 필터재생이라고 한다. 재생방법은 매연을 열적으로 산화시켜 CO₂의 형태로 대기 중에 방출하는 방법이 사용된다.^{21,22)}

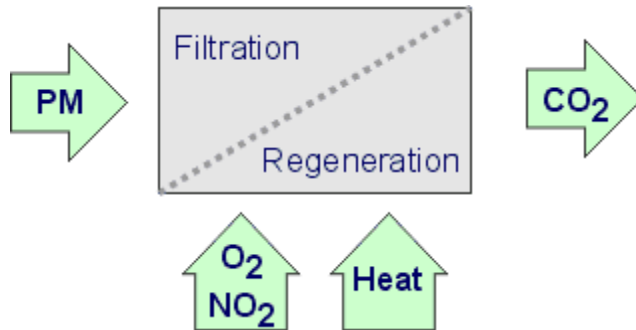


Fig. 2-5. Schematic of particulate filter with thermal regeneration.

Fig. 2-5에 재생장치의 구조를 나타내었다. 필터에 매연이 포집되면 적당한 시기에 산화제(O_2 나 NO_2)나 열을 가하여 매연을 산화시켜 CO_2 형태로 배출한다. 재생장치가 원활하게 유지되기 위해서는 엔진의 적절한 운전조건, 외부의 충분한 열 공급 및 적절한 산소농도가 확보되어야 한다.

나. 작동원리

경유엔진 후처리용으로 사용되는 필터는 대부분 축방향으로 세라믹을 압출하여 만든 벽면유량(wall-flow) 모노리스 형태이다. 일반적으로 가솔린용 유량흐름 형식의 담체와 유사하나 벽면유량 모노리스 방식은 세라믹 벽면에 포집되기 때문에 기공을 정밀하게 제거하여야 하며, 인접한 채널이 번갈아 가며 막히기 때문에 포집효율이 매우 우수하다. Fig.2-6에 경유엔진용 필터의 유로흐름(Flow-Through)을 나타내었다.²³⁾

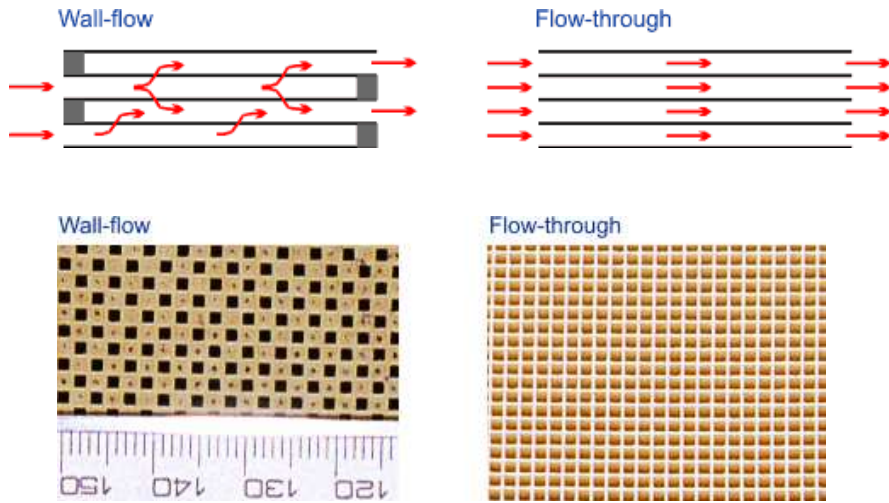


Fig. 2-6. Wall-flow and flow-through substrates: flow pattern.

다. 경유 필터 재생

(1) 산화율

필터에 포집된 검댕(PM중의 탄소성분)은 열적으로 산화될 때 온도, 가스, 잔존산소량 및 촉매의 영향을 받는다. 검댕은 반고체상태이기 때문에 CO와 같은 기체상 물질에 비해 산화속도가 매우 느리다. 또한 가솔린 담체에 사용되는 유량흐름은 체류시간이 짧기 때문에 검댕이 산화되기 어렵다.

Fig. 2-7에 경유필터에 포집된 검댕의 산화형태를 나타내었다.

실제 경유엔진에서 배출되는 검댕의 산화율은 온도와 체류시간의 영향이 크다.²⁴⁾

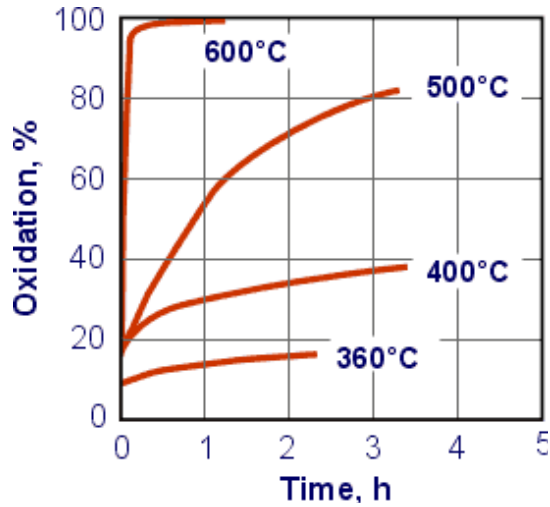


Fig. 2-7. Diesel soot oxidation.

필터에 포집된 검댕이 산화되는 온도를 산화온도(ignition temperature)라고 하며, 측정 장치와 엔진에 따라 다르다. 산화는 필터에 포집된 매연의 양이 어느 정도 이상일 때 진행되며, 산화반응속도는 아래식과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{dM}{dt} + M \cdot k(T) - e_F \cdot m = 0$$

여기서

M : 입자 포집용량, kg

τ : 반응시간, s

$k(T)$: 입자 산화반응 상수, 1/s

T : 반응온도, °C

e_F : 포집효율, 무차원

m : 입자 배출 질량유량, kg/s.

Fig. 2-8에 경유필터의 운전모드를 나타내었다. 경유필터의 운전모드는 필터의 검댕포집과 재생에 따라 포집모드, 평형 및 재생모드 등 세 가지 모드로 구분할 수 있다.

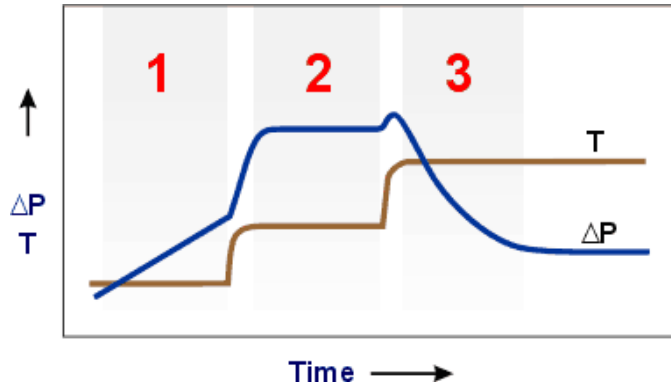


Fig. 2-8. Particulate filter operation modes.

그림의 (1)영역은 포집모드($dM/d\tau > 0$)를 나타낸 것으로 온도가 낮기 때문에 필터에 포집된 매연이 산화되지 않음으로써 배압이 상승한다. (2)영역은 동적 평형상태($dM/d\tau = 0$)로서 온도가 어느 정도 상승되어 엔진에서 배출되는 매연의 양과 산화되는 매연의 양이 같아지므로 배압의 변화는 거의 없다. (3)영역($dM/d\tau < 0$)은 재생모드로서 배기온도가 더욱 높아져서 배출되는 매연의 양보다 산화되는 매연의 양이 많아져서 배압이 낮아진다.

필터재생에는 온도와 필터에 포집되는 매연의 양이 매우 중요한 변수이다. 검댕의 산화율은 온도의 함수이지만 배기가스의 매연농도가 높으면 산화율이 급격히 저하한다. 따라서 평형점은 배기가스의 온도와 검댕의 양에 따라 달라진다. 배기온도가 낮아지면 필터에 포집되는 검댕의 양이 산화되는 양보다 많아지기 때문에 배압이 상승한다.

그러므로 연속 재생시스템에서는 최저온도를 제어하게 되는데, 그렇지 않은 경우에는 산화율이 급격히 저하하고 검댕이 축적되어 배압이 상승된다. 이러한 상태가 지속되면 필터의 막힘 현상과 혼잡(stochastic)재생 현상이 발생된다.

막힘 현상은 검댕이 필터에 과포집되어 필터의 기능이 상실된 상태를 말하고, 흡착재생현상은 과포집된 검댕이 일시에 급격히 연소되는 현상(burn-out) 을 말하며, 필터에 고온이 형성되므로 자연재생 방식에서는 매우 치명적인 결과가 초래될 수 있다. 반면에 흡착재생현상은 경우에 따라 배기온도가 매우 낮음에도 불구하고 자체적으로 유지될 수 있는 산화온도를 형성하는 긍정적 측면도 있다.²⁵⁾

Fig. 2-9에 인위적으로 필터에 검댕을 과포집하여 흡착재생할 때의 배압특성을 나타내었다. 연료첨가제를 사용하여 재생시켰으며, 연속재생하기 위하여 배기온도를 낮추고 주기적으로 검댕을 포집하였다. 흡착재생 현상이 주기적으로 발생되고 배압은 톱니 형태를 나타내었다.

경유필터 재생에는 배기온도와 포집되는 검댕의 양외에도 연료의 황함량, 배기가스 유량, 잔존산소량 등이 영향을 미친다.²⁶⁾ 예를 들면, 엔진의 배기가스 량이 많을 경우에는 단위시간당 산화되는 양이 많기 때문에 BPT가 상승하고, PM중의 SOF양이 많을 경우에는 BPT가 낮아진다. 특히 고온에서는 액상 SOF보다 기상 SOF의 양이 많기 때문에 실제로는 액상 SOF가 많은 저온에서 BPT의 변화가 생긴다.

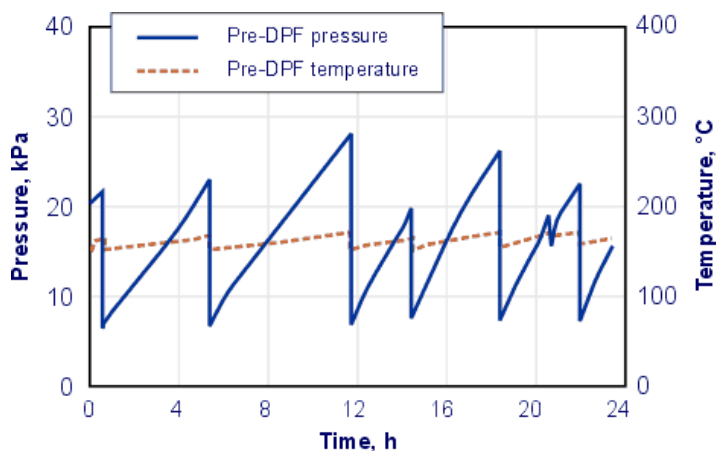


Fig. 2-9. DPF operation with periodic stochastic regenerations.

(2) 재생평형온도

재생평형온도(BPT : balance point temperature)는 필터에 포집되는 검댕의 양과 산화되는 검댕의 양이 동일하게 유지될 때의 온도를 말하며, 엔진조건이나 재생방법에 따라 달라진다.

재생평형온도는 엔진부하를 높이면 필터의 배압과 온도가 올라가는데 Ifxj에 검댕이 축적되지 않고 연속적으로 작동될 때 측정한다. Fig. 2-10에 DECSE(Diesel Emission Control-Sulfur Effects) 프로그램에서 사용하는 BPT측정방법을 나타내었다.

BPT는 온도 대 배압 그래프로부터 구하는데, 부하를 점차 증가시켜 배출되는 배기가스의 양과 온도를 조절한다. 배기온도가 증가할 때 배압이 상승하지 않는 상태를 BPT라 한다. 이 때 초기 매연포집용량을 일정하게 유지하여 측정하는 것이 중요하다. ²⁷⁾

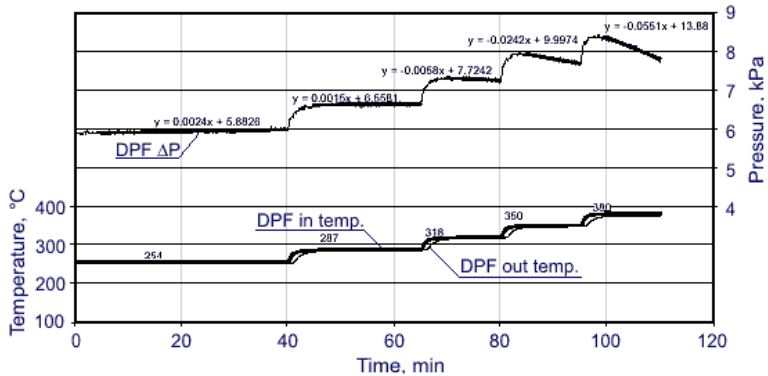


Fig. 2-10. DECSE 5-mode balance point test-example run data.

4. 경유여과장치

가. 벽면유량 모노리스의 구조

Fig. 2-11에 모노리스필터의 가스흐름형태를 나타내었다. 세라믹 벽면유량 모노리스(wall-flow monoliths)는 유량흐름(flow-through)형식으로 경유엔진 필터에 가장 많이 사용되고 있다. 모노리스 형식은 비표면적과 포집효율이 매우 우수하고 필터는 많은 수의 채널로 이루어졌고 각 채널은 사각모양이다. 벽을 통하여 검댕을 포집하기 용이하도록 인접채널이 교대로 막혀 있다.²⁸⁾

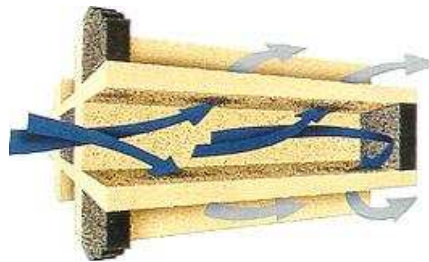


Fig. 2-11. Gas flow type in a monolith filter.

벽면유량 모노리스의 벽면은 포집효율을 높이기 위하여 미세기공(pore)을 발달시켰고, 필터의 기공율(porosity)은 45~50%, 기공의 크기는 10~15 μm 정도이다.

필터의 검댕포집 메커니즘은 Cake포집과 Depth 포집기구로 구분되며, Cake포집은 깨끗한 필터의 기공에 포집하고, Depth포집은 검댕이 포집된 표면에 검댕을 연속 포집하는 것을 말한다. 일반적인 필터의 검댕제거율은 70~95%이지만, 기상 및 액상 SOF의 포집효율은 검댕에 흡착된 것을 제외하고는 거의 없다.^{29,30)}

현재 상용화된 필터의 소재는 코디에라이트와 실리콘 카바이드(SiC)이며, 보통 코디에라이트는 가솔린용 담체로 사용하고, SiC는 반도체나 고온 산업용으로 사용한다. Table 2-1에 필터의 특성을 나타내었다.

Table 2-1. Commercial monolith materials

Material	Formula	Monolith Suppliers
Cordierite	$2\text{MgO}-2\text{Al}_2\text{O}_3-5\text{SiO}_2$	Corning, NGK
Silicon Carbide	SiC	Ibiden, NoTox*, NGK

Fig. 2-12에 필터에 사용되는 셀의 형상과 용어를 나타내었다.

필터의 구조는 셀에 의해 구분된다. 경유엔진용 필터로는 일반적으로 코디에라이트와 실리콘 카바이드(SiC)가 사용되는데, 코디에라이트는 1980년부터 소형 및 대형 경유엔진에 주로 사용되고 있다. SiC필터는 1990년도에 개발되었고, 2000년 푸조차량에 적용된 후 대부분 강제재생방식에 사용된다.

Table 2-2에 코디에라이트와 실리콘 카바이드(SiC)의 물리화학적 특성을 나타내었다. 코디에라이트는 TSP가 매우 높고 가격이 저렴하다는 장점이 있고, SiC필터는 충분한 용해온도를 지니고 있다는 장점이 있다. 코디에라이트는 TSP(Thermal Shock Parameter)가 높고 열전도도가 낮아서 재생온도를 유지하기 유리하기 때문에 자연재생 방식에 사용되고, SiC필터는 열 충격성이 적고 열전도도가 높기 때문에 강제재생방식에 사용된다.³¹⁾

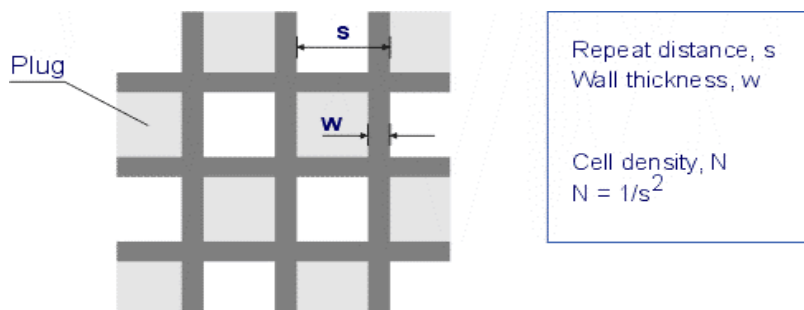


Fig. 2-12. Cell geometry.

Table 2-2. Comparison of Cordierite and SiC materials

Characteristics	Cordierite	SiC
Melting Point, °C	1450	2400a
Coefficient of Thermal Expansion, 10 ⁻⁷ /°C	7	45
Elastic modulus, axial E, GPa	4.7	33.3
Strength, axial MOR, MPa	2.6	18.6
Thermal shock parameter, TSP	790	124
Permeability, 10 ⁻¹² m ²	0.50	1.24
Thermal Capacity, kJ/m ³ K	500	950
Heat Conductivity, W/mK	<2	20
Relative cost	Low	High

나. 코디에라이트 모노리스

코디에라이트는 TSP가 높기 때문에 열적 내구성이 요구되는 경우 매연정화장치에 적합하며, 구성성분은 2MgO-2Al₂O₃-5SiO₂이다. 코디에라이트의 녹는점은 1450°C이며, 실제 배기가스중의 Ash와 반응하는 온도는 1,250°C정도이다. 이 온도에서는 코디에라이트 채널내의 미세한 기공에 포집된 Ash와 필터가 반응하므로 이를 방지하기 위해서 약 1,050°C이내로 제어된다.

배기온도가 제어되지 않으면 재생온도가 1,450°C이상 올라가는 경우도 있기 때문에 열적으로 우수한 필터의 개발이 요구되고 있다. 또 다른 결점으로는 기공구조가 균일하지 않고, 필터 제거효율에 부정적 영향을 미치는 폐쇄기공(closed pore)이 발생할 수 있으므로 제조 시 고려하여야 한다.³²⁾

필터 제조공정은 크게 두 가지로 구분되는데, 첫 번째 단계에서는 오븐에서 세라믹을 압출하여 형상을 만든 다음 각 채널에 마개를 하고, 두 번째 단계에서 다시 소결하여 제작한다. 필터의 직경이 큰 것은 300mm정도이고, 직경이 더 크면 몇 개의 필터를 조합하여 제작한다. Fig. 2-13의 확대된 필터의 그림에서 마개를 확인할 수 있다.³³⁾

필터는 코닝(사)가 처음으로 상업화하였는데, 초기제품은 EX-47, EX-54 및 EX-66이고, 셀 구조는 100/17으로 제작되었다. 내부적으로 기공크기가 다르기 때문에 제거율은 다소 다르다.

최근에 제작된 EX-80모델은 기존제품보다 열적 안정성이 높아서 현재 가장 많이 사용되고 있다. 한편 코디에라이트의 용해성을 개선하여 2000년 초에 셀 구조 (200/19)가 조금 상이한 내구트랩 RC(Robust Cordierite)가 개발되었다.



Fig. 2-13. Cordierite wall flow monolith.

이 구조는 채널의 두께를 늘림으로써 열용량을 향상시킨 것이다. 시험결과 열흡수량이 향상되어서 제어하지 않은 상태로 재생할 때 필터 최고온도가 다소 낮아진 것으로 확인되었다. Table 2-3에 코닝(사)에서 생산하는 코디에라이트 필터의 물성을 나타내고, Table 2-4에 EX-80 필터의 크기를 나타내었다.

Table 2-3. Physical properties of Cordierite diesel filter materials

	Composition					
	EX-47	EX-54	EX-66	EX-80		RC-200/19
Configuration	100/17					200/19
Porosity, %	50	50	50	48	49	45
Mean Pore Size, μm	13.4	24.4	34.1	13.4	13.0a	13.0a
Bulk Density, g/cm^3	0.39	0.45	0.54	0.42	0.46	0.70
Axial CTE(25~800 °C), 10 ⁻⁷ K ⁻¹	8.8	8.7	10.5	3.3	4.3	6.0
Axial MOR, MPa - psi	2.52 365	2.21 320	2.88 418	2.41 350	3.16 458	4.67 677
E-MOD, GPa - 106 psi	5.59 0.81	5.72 0.83	7.31 1.06	5.17 0.75	5.59 0.81	9.10 1.32
Initial Efficiency, %	84	70	55	87	-	-
Final Efficiency, %	90	90	90	91	-	-
Pressure drop @40 g soot, in. Hg	2.9	3.7	3.7	2.9	-	-
A-axis strength, MPa - psi	10.6 1539	9.3 1350	11.3 1642	9.9 1434	-	-
3D isostatic strength, psi	585	460	660	500	-	-
2D isostatic strength, psi	500	390	560	425	-	-
TSP	516	459	383	1414	1315	855
Total Raw Penetration, cm^3/g	0.418	0.421	0.410	0.35- 0.44	-	-
Bulk Volumetric Heat Capacity, $\text{kJ}/\text{m}^3\text{K}$	-	-	-	-	540	820
CTE - coefficient of thermal expansion MOR - modulus of rupture TSP = MOR/(CTE E-MOD) - thermal shock parameter Properties determined from 10.5" diameter 12" parts a - Median diameter b - intrinsic density of 코디에라이트 = 2.51 g/cm^3 c - intrinsic specific heat of 코디에라이트 @500 C = 1.11 kJ/kgK						

Table 2-4. Diesel filter sizes(Corning, EX-80/100/17)

Size, diameter length		Filter Volume	Filtration Surface Area	Max. Soot Load*
in	mm	dm ³	m ²	g
One-Piece Extrusions				
5.66×6	143.8 152.4	2.5	1.66	15
7.5×8	190.5 203.8	5.8	3.83	35
9.0×12	228.6 304.8	12.5	8.27	75
10.5×12	266.7 304.8	17.0	11.26	100
11.25×12	285.8 304.8	19.6	12.93	120
11.25×14	285.8 355.6	22.8	15.08	140
12×15	304.8 381.0	27.8	18.39	170
Assemblies				
15×15	381.0 381.0	43.4	28.73	250
20×15	508.0 381.0	77.2	51.08	460
* - approximately 6 g/liter				

다. 실리콘 카바이드 모노리스

SiC모노리스는 SiC파우더를 압출하여 제조한다. 기공구조는 압출할 때 형성되며, 기공 형상을 조절하기 위해 첨가제를 사용하기도 하나 낱알 모양으로 형성되며, 입자크기가 균일하기 때문에 폐쇄기공은 생성되지 않는다. 압출된 모노리스는 진공상태에서 약 2,500°C로 소결하여 제작한다. 또한 재료의 부식과 산화를 방지하기 위하여 약 1,000°C에서 50nm정도의 SiO₂피막을 입힌다. Fig. 2-14에 SiC필터의 소재를 나타내었다.

SiC필터는 표면이 부드러워서 촉매코팅이 어렵기 때문에서 촉매코팅 전에 와시코팅하고 촉매를 담지시키며, 필터제조 후 SiO₂로 미리 미세한 층을 만들어 둔다. NoTox는 지르코니아 알루미나를 코팅하고, Taoka는 SiC필터에 9-40 μ m 정도를 코팅한 후 귀금속을 25 g/dm³정도 담지시켰다.³⁴⁾

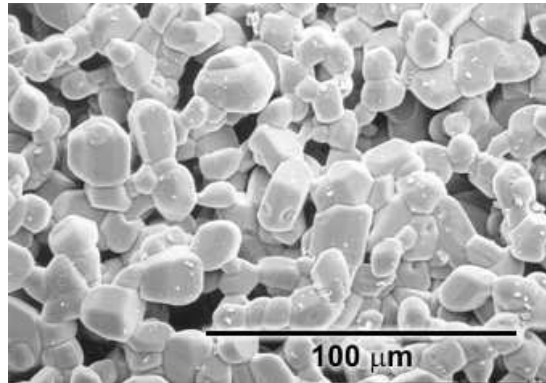


Fig. 2-14. SiC filter Material: electron microscope photograph of channel surface.

SiC필터는 고온에 매우 강하기 때문에 1,800~2,400℃에서 수행한 필터의 재생시험에서도 녹지 않았다. 코디에라이트는 필터가 녹기 전에 필터 중의 Ash성분이 필터와 반응하는 약점이 있는데, SiC필터의 Ash와 필터의 반응온도는 1,400℃이고, 약 1,300℃에서 결정이 형성된다. SiC는 열전도도와 열용량이 커서 국부적으로 고온이 형성되지 않기 때문에 재생 시 Ash와 필터는 반응하지 않는다.

SiC필터는 열팽창율이 높고 쉽게 부서지기 때문에 TSP값이 매우 작다는 단점이 있다. 따라서 SiC필터의 재생 시 열구배 특성이 매우 중요한 변수이다. 이러한 단점을 해결하기 위하여 Si-SiC필터가 연구되기도 하였다.

SiC필터의 낮은 TSP를 근본적으로 보완하기 위한 방안으로 필터의 분할이 도입되어 현재 사용되는 SiC필터는 대부분 분할 접합되어 있으며, 이 때 사용되는 접합제로는 탄성과 접착력이 우수한 실리카 알루미나 섬유, 실리카 졸, 카르복시 메틸셀룰로오스(carboxymethyl cellulose) 및 SiC분말 등이 사용된다. Fig. 2-15에 33×33mm의 크기로 분할 접합된 SiC필터를 나타내었다.³⁵⁾

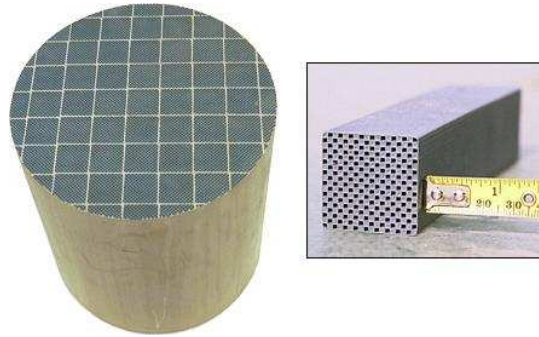


Fig. 2-15. SiC wall-flow monolith made of cemented sections.

SiC필터의 포집용량은 고온내구성이 강하기 때문에 많아지지 않고, 오히려 열구배(thermal gradient)의 취약성 때문에 최고포집용량은 코디에라이트필터보다 적다. 열구배에 의하여 100°C/cm 이상에서 필터가 파손되므로 포집용량을 7~10g/l로 제어하여야 한다.

Fig. 2-16에 엔진이 정상상태 있을 때의 배압변화를 나타내었다. 매연의 포집효율이 우수하면 매연이 포집됨에 따라 그 만큼 배압손실이 증가한다. 초기배압(ΔP_{clean})은 필터자체의 배압으로 인해 발생되고, 필터 기공의 매연포집(Depth Filtration)에 따라 배압증가는 비선형적으로 발생된다.

이와 같이 매연이 기공 내부에 포집되는 경우를 초기 매연 포집상태(Initial Loading Phase)라 하고, 포집되는 매연의 양이 늘어나면 채널에 포집되는데(Cake Filtration Phase) 이때 배압상승은 거의 선형적으로 증가한다. 이 때 매연포집효율은 포집층에 따라 달라진다.³⁶⁾

배압상승의 원인은 (1)채널입구의 수축(Contraction)과 채널출구에서의 팽창(Expansion), $\Delta P_{in/out}$, (2) 채널내의 벽면마찰, $\Delta P_{channel}$, (3) 채널벽의 기공율, ΔP_{wall} 과 같은 세 가지이며, 전체 배압은 (1)+(2)+(3)이다.

이때 (3)항이 배압상승의 지배적 요인으로 작용하며, 이 때 발생하는 배압은 Darcys의 법칙에 의해서 다음 식으로 나타낸다.

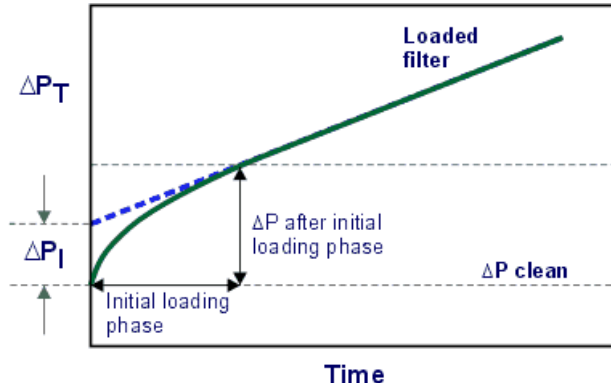


Fig. 2-16. Pressure drop pattern during loading cycle.

$$\Delta P_{wall} = (\mu / k_w) \cdot v_w \cdot w$$

여기서

μ : 배기가스의 동점성계수, Pa·s

k_w : 필터 재질의 투과율, m^2

v_w : 가스의 벽속도, m/s

w : 벽두께, m

투과율 k_w 는 필터 제조회사에서 제공하지만, Kozeny-Carman식으로부터 구할 수 있다.

$$k_w = (1/5.6) \varepsilon^{5.5} d_p^2$$

여기서

ε : 필터 벽면의 기공률

d_p : 기공 지름

$\Delta P_{channel}$ 과 $\Delta P_{in/out}$ 는 유로흐름에서 계산하는 방식으로 구할 수 있으며, 경유엔진용 필터에서는 ΔP_{wall} 의 기여율이 가장 높다. 또한 가솔린과 같은 유로흐름 형식에서는, $\Delta P_{channel}$ 에 의한 기여도가 가장 높다.

실제 상황에서 배압상승의 요인은 필터자체의 구조적 원인보다는 매연의 포집에 따른 배압이 지배적이다.³⁷⁾ 따라서 깨끗한 필터의 배압은 계산적으로 거의 실제 측정치와 유사하게 구할 수 있으나, 엔진이 운전에 따른 배압상승은 엔진 상태, 필터 상태 및 온도 등을 고려하여야 하므로 추정하기 어렵다. 특히 필터 내부에서 유동분포 및 부분포집 현상이 있을 경우에는 더욱 어렵다.

제 3 절 매연정화장치의 종류

1. 디젤산화촉매(DOC : Diesel Oxidation Catalyst)

DOC는 촉매, 담체, 지지체 및 이들을 둘러싸는 캐니스터(Canister)로 구성되며, 배기가스를 촉매가 담지된 셀 내부에 통과시켜 산화시키는 장치이다.³⁸⁾

가. 촉매(Catalyst)

일반적으로 촉매는 자신은 화학반응에 관여하지 않고 활성화 에너지를 낮추어 평형에 도달하는 속도를 증가시키는 물질을 말한다.

디젤엔진에 사용되는 DOC촉매의 가장 중요한 기능은 촉매표면에 산소분자를 화학흡착시킨 후 CO 및 HC 등과 결합하기 쉬운 산소원자 음이온상태로 만드는 것이다.

DOC촉매는 저온에서 산화성, 광범위 반응온도, 고농도 가스의 연소 및 산화성, 긴 촉매수명, 배기가스에 대한 낮은 피독작용 및 장기간 사용에 따른 강한

기계적, 열충격성 등이 요구된다.³⁹⁾

DOC촉매로는 귀금속과 금속원소가 사용되는데, 귀금속으로는 백금(Pt), 팔라듐(Pd), 로듐(Rh), 루테튬(Ru) 및 은(Ag), 금속으로는 니켈(Ni), 구리(Cu), 망간(Mn), 크롬(Cr), 철(Fe), 바나듐(V) 및 티탄(Ti) 등이 사용된다.

이 중에서도 Pt과 Pd이 특정 성분과 선택적으로 반응하고, 활성화 에너지가 낮으며, 쉽게 열화되지 않기 때문에 많이 사용된다. 특히 Pt은 촉매독에 강하고, Pd은 열적소결(Thermal sintering)에 강할 뿐만 아니라 이산화황 산화반응의 활성화에너지를 낮추는 장점이 있다.

나. 지지체(Substrate)

디젤엔진은 가솔린엔진보다 연소온도가 낮기 때문에 배기가스의 제거율을 제고하기 위해서는 촉매에 대한 CO, 용해성 유기물질, HC 및 매연 등의 충돌빈도를 크게 하여 촉매표면의 물리 흡착을 유도하여야 한다.

DOC지지체는 이러한 조건을 충족시키기 위해서 초기에는 굴곡(Tortuous flow path)형태로 만들었는데, 장기간 사용 시 PM포집용량이 증가함에 따라 배압이 상승되고 엔진의 성능이 저하되었다. 특히 자동차용 DOC지지체는 운전조건이 다양하기 때문에 비열과 열팽창계수가 낮고, 배기가스의 난류흐름에 대한 내마모성, 주행 중 진동에 의한 변동이 없어야 한다.

따라서 경유자동차에는 기계적 충격에 강하고 배압증가에 대응하기 쉬운 세라믹 하니컴형(Ceramic honeycomb type)이 많이 사용되었다. 세라믹모노리스의 성분은 코디에라이트(Cordierite : $2MgO \cdot 2Al_2O_3 \cdot 5SiO_2$)이며, 표면적이 넓고 열팽창계수가 낮으며 내마모성 및 열충격성이 우수하여 1,450℃이상 고온에서도 견딜 수 있는 장점이 있다.

초기에는 셀 밀도(Cell density)가 낮고 벽이 두꺼운 사각형 세라믹모노리스를 사용하였으나, 최근 세라믹 합성기술이 발달되어 셀 밀도가 높고 벽 두께가 얇은 사각형 세라믹모노리스가 사용되고 있다. 벽 두께가 얇아지면 표면적이 증가하고 셀 밀도가 증가하여 산화성이 개선되고, 배압이 감소하므로 장치 더욱 얇은 세

라믹 모노리스가 개발될 것으로 예상된다.

금속지지체는 세라믹 지지체보다 벽 두께가 얇아 배압이 낮고, 배기가스에 노출되는 셀 면적을 크게 할 수 있어 외벽의 캐닝(Canning)을 생략할 수 있다.⁴⁰⁾

지지체는 일반적으로 표면적이 넓고 촉매에 대한 접착력이 양호하며 배기가스 역압이 낮아야 하고, 고온에 대한 저항성 및 열 충격성이 우수하고 기계적 강도가 높고 충돌에 대한 저항성이 있으며 산화반응속도가 빨라야 한다.

다. 와시코트(Washcoat)

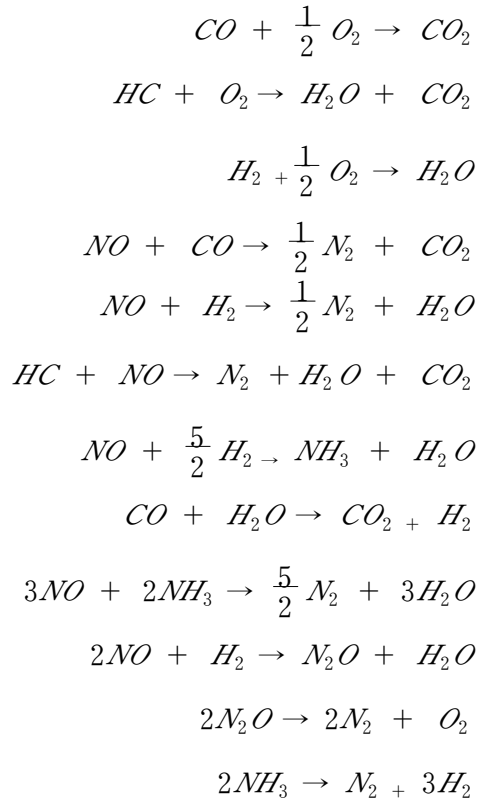
촉매장치의 담체는 귀금속을 지지체에 안정적으로 흡착시키기 위하여 세라믹 모노리스가 사용된다. 가솔린엔진에는 주로 알루미나(Al_2O_3)가 사용되지만, 디젤엔진에는 황산염의 생성과 HC의 흡착성을 고려하여 선정한다. 또한 모든 불균일계 촉매반응에서 촉매성분을 안정화시켜 표면적 증가 및 촉매성분의 확산이 증가하도록 고려하여야 한다.

세라믹모노리스의 비표면적은 $10 \text{ m}^2/\text{g}$ 이하로 매우 작아서 촉매를 담지하기 곤란하므로 담지하기 전에 점착력을 강화하는 담체를 먼저 담지시켜 두께 $10\sim 15 \mu\text{m}$ 의 박막을 형성시킨다. 담체로서는 산화규소(SiO_2), 알루미나(Al_2O_3) 및 이산화티탄(TiO_2) 등이 사용되며 혼합 사용되기도 한다.

위와 같이 제조한 세라믹모노리스의 비표면적은 $80\sim 120 \text{ m}^2/\text{g}$ 로서 대폭 증가되고 촉매 담지가 용이하며 안정제(Stabilizer)의 역할도 하게 된다.⁴¹⁾

라. DOC의 반응메커니즘

디젤엔진의 연소실에서 연료가 연소된 후 배기가스가 배출되는데, 이때 DOC촉매작용으로 오염물질이 생성된다. 반응식은 다음과 같다.



(1) 산화반응의 원리

Fig. 2-17에 DOC촉매작용으로 배기가스 중의 오염물질이 산화되는 반응개념을 나타내었다.

배기가스가 DOC촉매의 셀 속으로 들어가면 셀 표면에 코팅되어 있는 촉매에 의해 CO, HC 및 SOF가 쉽게 산화된다. 이 때 DOC촉매는 산소분자를 담체표면에 화학흡착시켜 CO 및 HC와 반응하기 쉬운 활성종을 만들어 반응속도를 증가시킨다.⁴²⁾

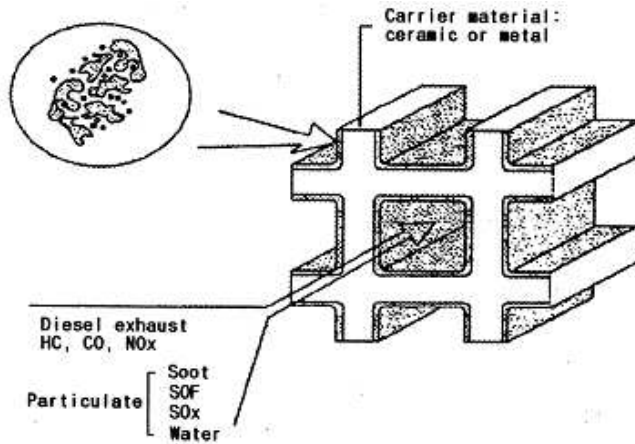
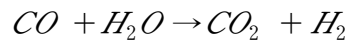
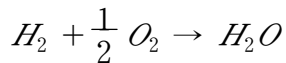
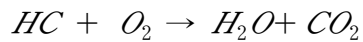
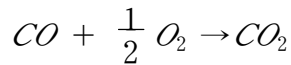


Fig. 2-17. Functional diagram of catalyst

(2) CO, HC의 산화반응

CO와 HC의 DOC촉매반응은 다음과 같다.



이 중 CO산화반응은 CO와 O₂의 DOC촉매 표면흡착, 반응 및 탈착 등의 단계로 진행되어 간단한 것처럼 보이지만 실제로는 그렇지 않다. 반응에는 CO분압 등 여러 요인이 작용한다. 예를 들면 CO와 O₂가 DOC촉매 표면에 흡착될 때 공간상 다른 자리를 차지할 수도 있다는 점이다.

Hoffmann⁴³⁾ 등은 Pd표면에 흡착된 CO의 적외선 분광스펙트럼으로부터 “linearly bonded CO” 와 “bridge bonded CO” 의 존재를 확인하였으며, bridge bonded CO는 표면에 σ -bonds 2개를 형성하여 강한 화학흡착 결합을 형성하고 Pd이 CO의 화학결합을 촉진한다고 주장하였다. 또 A. Clark⁴⁴⁾는 Pt촉매에 CO가 O₂와 흡착될 때 화학 결합체가 존재함을 밝혀내었다.

귀금속 촉매에서의 CO 산화반응은 촉매표면에 흡착된 O₂와 CO의 반응이다. Matsushima⁴⁵⁾에 의하면 Pt촉매표면에서 CO가 산화되어 CO₂를 형성하는 과정은 두 가지 모델이 있다. 즉, Eley-Rideal(물리흡착된 CO + 화학흡착된 O → CO₂)와 Langmuir-Hinshelwood(화학흡착된 CO + 화학흡착된 O → CO₂)메커니즘이다. Richard는 Pd에 대한 Eley-Rideal메커니즘을 제시하였다.

Eisches는 Pt과 Pd을 이용하여 CO를 200℃에서 산화시킬 때 속도지배단계는 O₂의 흡착단계이고, 반응차수는 온도에 의존한다고 밝혀 온도가 촉매반응에 영향을 미친다고 주장하였다. 이러한 현상은 온도가 증가함에 따라 O₂의 흡착량이 증가하는 점착성으로서 알 수 있다. 반응속도의 양상은 CO의 흡탈착성에 따라 다른 메커니즘으로 나타난다.

디젤엔진에서 배출되는 HC는 종류가 매우 다양하고 PM도 일종의 HC류이기 때문에 가능한 한 엔진의 연소실에서 산화를 시켜야 한다. 또한 HC는 주로 촉매표면에 흡착해서 결국 산소와 반응하여 H₂O + CO₂로 혹은 물과 결합하여 CO + CO₂ + H₂로 방출된다.

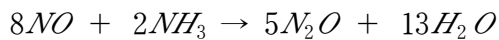
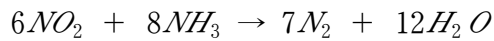
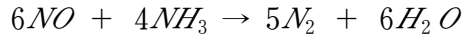
(3) NOx의 환원반응^{46,47)}

NO_x의 환원방법은 크게 선택적 촉매환원법(Selective catalytic reduction : SCR)⁴⁸⁾과 촉매분해법(Catalytic-decomposition)⁴⁹⁾으로 구분한다. SCR은 NH₃와 같은 환원제를 사용하여 NO를 N₂와 H₂O를 생성시켜 제거하는 방법으로 SO₂나 H₂O에 쉽게 피독되어 450℃ 이상에서는 촉매의 활성도가 급격히 저하된다.

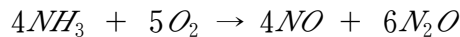
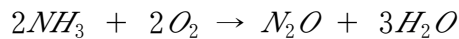
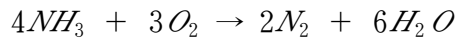
촉매분해법은 촉매를 사용하여 NO를 N₂와 O₂로 분해하는 방법이지만 NO 분해반응속도가 완만하기 때문에 반응속도를 증가시키는 촉매의 개발이 남은 과제이다.

① 촉매환원법에 의한 NO_x 환원반응

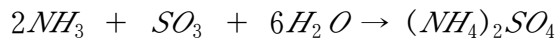
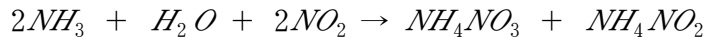
촉매표면에 배기가스와 NH₃를 동시에 통과시키면서 배기가스 중의 NO_x를 NH₃와 반응시켜 질소와 수증기로 환원하는 방법으로서, 반응식은 다음과 같다.



NH₃가 주위의 O₂와 반응하면 다음과 같은 물질이 생성될 수도 있다

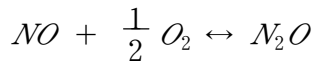
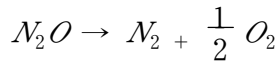
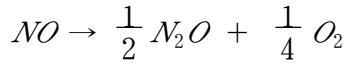
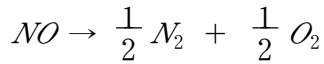


그 외의 반응식은 다음식과 같다.

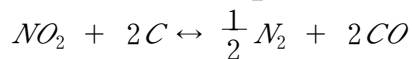
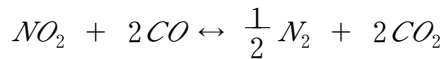
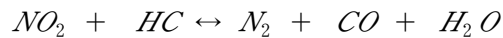


② 촉매분해법

촉매를 사용하여 NO를 N₂와 O₂로 분해시키는 가장 바람직한 방법이며, 다음과 같은 환원반응이 일어난다.



기타 NO₂는 다음과 같은 환원 반응이 일어난다.



(4) 입자상물질의 산화반응

디젤엔진에서 배출되는 PM은 탄소분자가 물과 결합되어 생성된 IOF, SOF, 황산(Sulfate) 등 세 가지 성분이며, 배기관의 배출상황에 따라 기체상태, 연무, 에어로졸 및 미연소 탄소입자(Carbon particulate)상태 등으로 존재한다.

디젤엔진의 배기가스 온도는 100~450℃로 낮기 때문에 DOC촉매반응에 의하여 배기가스가 전적으로 산화되기 어려우므로, 보통 SOF만을 선택적으로 산화시키는 방법이 사용된다.

이 중에서 미연소탄소의 SOF는 하나의 입자상태로 존재하며 DOC내에 들어가기 전에 기체상태인 SOF는 DOC에서의 촉매표면에 물리적으로 흡착된다. 일반적으로 기체상태의 물리적 흡착은 응축온도 부근의 촉매표면에서 진행된다.

Horiuchi 등⁵⁰⁾은 300℃까지는 배기가스온도가 상승함에 따라 SOF의 산화가 증가한다고 보고하였는데, 이것은 저온에서 SOF가 촉매표면에서 응축되거나 물리적

으로 흡착되어 산화되는 것을 의미한다. 그러나 300℃이상에서는 SOF가 응축온도 이상에서 물리적으로 흡착하거나 응축하는 양이 감소하므로 결국 SOF산화율이 감소한다.

Barris⁵¹⁾ 등은 탄소입자들의 물리적 활동성(Activity)은 DOC반응에서 비표면적이 크면 물리적으로 주위의 확산경계층으로부터 증기상의 HC를 흡수하고, 경계층에서 HC 분자들이 입자 쪽으로 접근하였다고 보고하였다.

HC는 연소실에 침투한 윤활유와 함께 불완전 산화되어 유기성 PM이 되어 담체 채널 벽의 입자(HC분자와 윤활유 방울)를 흡수한다. 또 반응성 입자가 없는 터널 표면 근처의 확산경계층은 또 다른 확산을 일으킨다.

배기가스 온도가 일정하고 검댕입자가 포집되어 산화될 수 있는 충분한 시간이 주어지면 입자포집단계는 검댕의 산화반응 속도와 평형에 도달하며 평형값은 촉매로 작용하는 담체벽상에 흡수된 입자가 산화됨에 따라 감소한다.

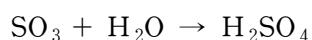
(5) SOx의 산화반응^{52,53)}

디젤엔진에서는 연료에 함유된 황이 연소 시 산화되어 SO₂를 발생하며 DOC를 통과하는 동안 SO₃로 산화한다. SO₃는 수증기에 흡수되어 황산mist를 형성하며 생성된 황산mist가 귀금속촉매를 피독시키고 PM도 증가시키므로 연료의 황함량을 최소화 하여야 한다. 또 SO₃가 500℃정도의 고온에서 수증기에 흡수되어 황산을 생성하고 PM을 증가시키기 때문에 고온에서 황산 생성을 억제하는 촉매를 사용하는 것이 바람직하다.

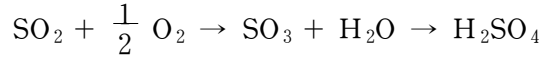
Chang⁵⁴⁾ 등은 촉매표면에서 황이 SO₃로 산화된 후 주위의 H₂O와 결합하여 H₂SO₄를 형성하는데 화학결합체가 SO₃으로부터 SO₄로 변한다고 주장하였다. 또한 DOC를 장착하지 않은 대형 디젤엔진에서 황산에 기인하는 PM이 엔진 설계 및 제조자들에게 중요한 관심의 대상이다.

황산mist는 다음과 같은 3가지 요인에 의해 생성된다.

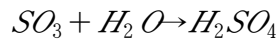
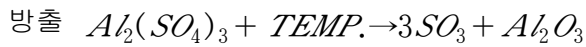
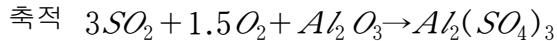
- ① 연소실에서 형성된 SO₃과 배기가스 중의 수분 결합



② 촉매에 의해 생성된 SO₃와 배기가스 중의 수분 결합



③ 고온에서 방출된 SO₃와 배기가스 중의 수분 결합



Douglas J. Ball⁵⁵⁾ 등은 알루미나 표면의 황산은 770℃에서 분해되는데, 적절한 촉매를 사용할 경우 770℃ 이하에서 황산PM의 방출이 가능하고, 연료의 황함량을 감소시킴으로써 황산PM이 감소되었다고 보고하였다.

2. 경유촉매 입자상물질여과장치(CDPF)

촉매를 사용하는 가장 중요한 목적은 배기온도와 유사한 300~400℃에서 재생할 수 있도록 매연의 산화온도를 낮추는데 있다. 촉매를 사용하지 않을 경우 배기가스 중의 PM은 약 500℃에서 재생할 수 있으나, 현실적으로 이 온도를 적용하기는 어렵다.

Fig. 2-18에 촉매필터의 개략도를 나타내었다. 지지체는 코디에라이트나 SiC 벽면유량 모노리스를 사용하고, 벽면은 활성촉매로 코팅하였으며, 배기가스 중의 PM은 촉매가 코팅된 벽면을 통과할 때 벽 내부의 기공이나 채널에 포집된 후, 배기가스 조건하에서 촉매에 의해 산화된다.⁵⁶⁾

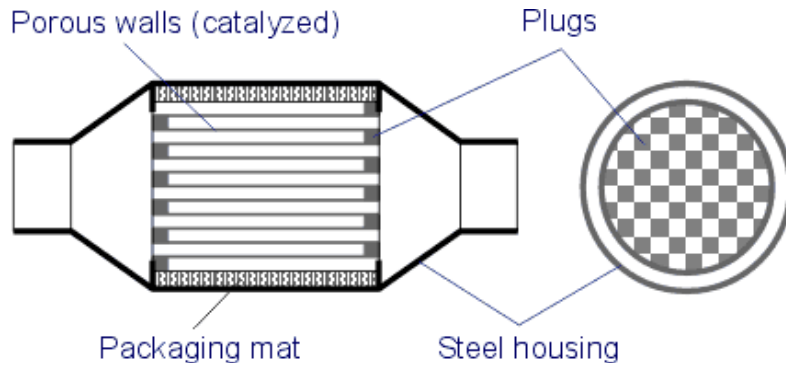


Fig. 2-18. Catalyzed diesel particulate filter.

촉매필터의 크기는 엔진기술, 용도, 연료량 등의 의해 따라 다르나, 가장 중요한 변수는 배기가스 중의 PM농도이므로, PM 포집용량과 엔진의 특성을 고려하여 선정한다.

Table 2-5에 100/17크기의 필터를 기준으로 엔진조건에 따른 필터체적을 나타내었다. 셀 밀도가 높을 경우에는 체적이 작은 필터를 사용하고, 사용자가 엔진의 상태와 연료/오일의 성분에 따라 그 비율을 달리할 수 있다. 보통 연료첨가제를 사용할 경우 필터체적/엔진배기량의 비율을 2정도 유지하고 있으나, 첨가제 함량과 촉매필터 사용에 따라 비율을 낮게 적용할 수 있다.

Table 2-5. Typical CDPF sizing ranges in heavy-duty engines

Parameter	Engine PM Emission	
	Low(≤ 0.05 g/bhp-hr)	High(≥ 0.30 g/bhp-hr)
Space velocity, 1/h	80,000	25,000
Filter volume/engine displacement ratio	1.5	4
Filter volume/engine rated power, cm ³ /hp	40	150

- Based on 100/17 wall-flow monolith geometry. Smaller filter sizes may be sufficient if monoliths of higher specific filtration surface area are used.

필터의 촉매코팅방법은 여러 가지가 있으나, 와시코팅에는 금속산화물과 주촉매로 귀금속이 사용된다. 백금은 저온에서 활성이 가장 우수하기 때문에 가장 많이 사용되고 있다.

최근 황에 의한 내 피독성을 높이기 위하여 엔진조건이나 배기가스 성분에 따라 Rh이나 Pd를 혼합하여 사용하며, 금속산화물로는 바나듐, 망간, 칼슘, 스트론튬, 바륨, 구리 등이 사용된다.

촉매코팅에 가장 많이 사용되는 방법은 세라믹 모노리스에 촉매전구물질을 수용액 상태로 혼합 함침하여(impregnation) 소결시키는 방법이다. 이 때 주촉매는 소결과정에서 형성된다. 전구물질을 수용액 상태로 사용하는 이유는 담체표면에 균일하게 코팅할 수 있기 때문이다. 또한 바나듐은 water slurry형태로서 함침하는 데, 필터 기공이 촉매에 의해 막히지 않도록 입도를 $10\mu\text{m}$ 이하로 조절하여야 한다.

Pt, Pd 등 귀금속은 세라믹 담체에 대한 친화력이 강하기 때문에 와시코팅 작업 없이 담지가 가능하다. 와시코팅에는 알루미늄, 실리카, 지르코니아 등이 사용되며 비표면적은 별로 중요하지 않다. 그 이유는 와시코팅을 할 경우 세라믹담체의 기공 크기가 줄어들어 엔진 배압을 상승시키고 와시코팅 자체의 내구성(담체와의 소결 및 배기가스와의 반응)이 문제가 되기 때문이다. 반대로 와시코팅을 하지 않으면 비표면적이 작아서 배기가스 정화효율이 낮다.

SiC필터를 사용할 경우 소재의 표면이 매우 부드럽기 때문에 표면에 알루미늄, 지르코니아, 알루미늄 등을 와시코팅하여 사용한다.

귀금속의 주촉매는 주로 Pt이 사용되는데, 로딩량은 주로 $35\sim 50\text{g}/\text{ft}^3$ 을 사용한다. 엔진의 상황과 운전조건에 따라 다소 차이는 있지만 재생용으로 주로 400°C 이상에 적합하다. 비교적 배기가스의 양이 적고 엔진조건이 양호하면 이보다 더 낮은 온도에서도 연속재생이 가능하다. 저온에서 사용할 경우 Pt로딩량은 $50\sim 75\text{g}/\text{ft}^3$ 이 적당하다.⁵⁷⁾

엥겔하드는 Pt $5\sim 150\text{g}/\text{ft}^3$ 에 Pt/Rh비율을 약 5:1정도로 사용하고 MgO를 $30\sim 1500\text{g}/\text{ft}^3$ 정도 사용하며, 촉매코팅은 수용액 상태에서 함침하고, 재생 온도는 $375\sim 400^\circ\text{C}$ 가 적당하다고 제안하였다. 여기서 Rh은 촉매사용에 따른 황산 생성을 억제하는 역할을 한다. Rh의 양이 지나치게 많으면 오히려 매연의 재생온도가 상

승한다.

황산염은 귀금속 촉매가 사용될 경우 연료 중의 황이 산화되어 생성되므로 Pt량을 적게 사용함으로써 황산염 생성을 조절할 수도 있다. 그러나 Rh를 첨가하여 황산염을 저감할 경우에는 산화 활성이 저하되므로 재생 시 불리하다.

촉매로서는 귀금속 이외에도 여러 가지 금속산화물이 사용된다. 특히 바나듐이 경유 필터의 코팅재로 가장 많이 사용된다. 미국 벤츠에서 처음으로 대구사에서 촉매코팅한 필터는 바나듐을 이용한 것이며, 이 때 재생온도는 약 380~400℃ 정도였다.

바나듐을 사용할 경우에는 재생 시 고온에서 바나듐이 휘발되고, 장기간 사용하면 지속적으로 효율이 저하된다. 이러한 단점 때문에 바나듐을 단독으로 사용하지 않고 은이나 구리와 복합하여 사용한다.

경유촉매필터를 사용할 경우에도 필터를 사용할 경우와 같이 모든 SOF를 포함한 입자상물질이 제거된다. 매연제거율은 포집된 매연의 양이 많아짐에 따라 증가하며, 매연이 기공에 포집된 경우에는 정화효율이 다소 낮아진다. 필터표면에 안정적으로 매연 층이 형성된 경우 매연제거율은 약 95~100%로서 매우 우수하다.

촉매필터 사용 시 입자상물질의 제거율은 황산염이나 SOF 등 비고체물질의 함량에 따라 달라진다. 이들 성분은 고온에서 기체상태를 유지하며 촉매필터에 걸러지지 않고 대기 중에 방출된다. 촉매필터는 이와 같이 기체상으로 방출되는 유해물질을 제거하는 역할을 수행한다. 한편, 고온에서는 배기가스 중의 SO₂는 촉매에 의해 SO₃로 쉽게 산화되어 황산염이 된다.

필터 내에서 SO₃이 형성되면, 배기가스 중의 수분에 흡수되어 황산염이 형성된다. 이러한 황산염의 생성으로 인해 오히려 전체 PM량이 증가한다. Pt은 촉매 중에서 이러한 황산염을 가장 많이 생성시키는 물질이다. 황산염은 비교적 고온인 350~450℃ 근처에서 생성되며, 촉매량이 많으면 저유황 경유를 사용하여 황산염 생성을 억제하여야 한다.

Fig. 2-19에 연료의 황함량에 따른 PM제거율을 세 가지 시험조건에 따라 나타내었다. 세 가지 조건 모두 배기온도가 상승함에 따라 PM이 증가하고, PM제거율은 연료의 황함량이 150ppm일 때 0%, 3ppm일 때 93~95%로서 황함량이 많으면 PM이 거의 제거되지 않았다. 또한 ESC 시험에서 연료의 황함량이 15ppm일 때 PM제거율

은 약 88%이었다. 실험은 필터에 의한 PM제거량과 촉매에 의한 황산염의 생성량이 같은 상태에서 진행되었다.

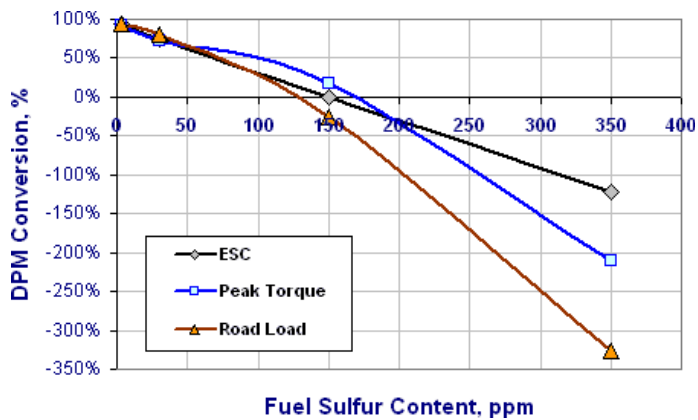


Fig. 2-19. Conversion of DPM in Pt-based CDPF at different fuel sulfur levels.

촉매필터를 사용할 경우 SOF(Soluble Organic Fraction)도 고온에서 필터에 포집되지 않고 산화된다. SOF제거율은 촉매 활성에 따라 다소 차이가 있으며, Pt 과 같은 고효율 촉매에는 거의 제거되지만 효율이 낮은 촉매를 사용할 경우에는 기체상으로 필터를 통과하여 제거율이 저하한다. 또한 촉매필터는 PM나노입자 생성을 유발시키는 고상의 입자수를 줄이는데 효과적이지만, 필터후단에 기체상의 물질이 응축되어 액상으로 존재하는 입자들을 처리하기는 어렵다.⁵⁸⁾

경유촉매필터는 PM뿐만 아니라 기체상 물질까지 제거할 수 있는데, 제거효율은 활성도에 따라 차이가 있으며 Pt을 코팅한 경우에는 HC, CO제거에 효과적이라고 알려져 있다.

CO제거율은 Pt이 주촉매로 사용된 경우 약 80~90%정도이고, Fig. 2-20에 나타난 ESC시험에서는 95%이었다. 일산화탄소는 재생과정에서도 발생할 수 있다. 매연이 포집되어 재생되는 경우 산소결핍 상태에서는 일산화탄소의 발생가능성이 매우 높다.

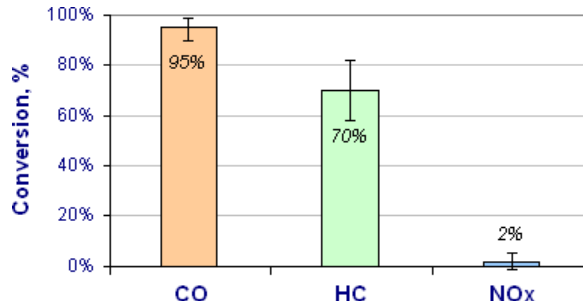


Fig. 2-20. Conversion of gases in Pt-based CDPF.

HC제거율은 Pt촉매를 사용할 경우 60~70%인데, 그 원인은 대부분의 SOF, 알데히드, PAH 등이 산화되었기 때문이다. 특히 알데히드는 HC보다 제거율이 우수한 것으로 알려져 있다. 또한 NOx제거율도 약 4%이었는데 이는 촉매 활성화에 기인한 대기보다는 필터에 의한 배압상승에 의하여 배기가스가 일부 재순환되었기 때문이라고 판단된다.

한편 촉매의 산화작용에 의해 배기가스 중의 NO가 인체에 유해한 NO₂로 전환되기도 하지만 이 경우 전체 NOx배출량은 변하지 않으며 오히려 일부 금속산화물 촉매의 활성이 저하된다. 실험에서 배기가스 중의 CO, HC 등은 연료의 황성분이 3~350ppm이내에서는 거의 제거효율이 변화가 없는 것으로 나타났다.

촉매필터의 재생은 배기온도에 따라 크게 좌우된다. 매연의 산화온도는 500~600°C이나 촉매필터를 사용할 경우에는 배기온도인 320~420°C에서 산화된다. 촉매에 의한 매연의 산화기구가 규명되지는 않았으나, Heterogeneous 촉매에서는 기체가 고체상 촉매표면에 접촉하면서 반응한다고 알려져 있다.

기체 분자보다 훨씬 무겁고 입경이 큰 입자가 촉매표면에 물리적으로 접촉하여 반응하는지는 의심할 여지가 있다. 게다가 매연입자는 촉매기공 내부에 포집되거나 필터 벽면에 포집되기 때문에 촉매와 접촉하기 어렵다.

지금까지 알려진 촉매에 의한 매연재생 메커니즘은 다음과 같다.

1) 산소에 의한 촉매산화 - 매연입자는 촉매표면에 흡착된 산소에 의하여 산화되며, 재생은 매연입자가 촉매표면에 얼마만큼 물리적으로 접촉하느냐에 따라

결정된다.

2) NO₂에 의한 산화 - 배기가스 중의 NO가 산화되어 생성된 NO₂는 산소보다 훨씬 저온에서 매연을 산화시킨다.

3) 산소에 의한 열적 산화 - 배기가스 중의 HC와 CO는 국부적으로 산화되면서 발열하는데 이 열에 의해 매연이 산화된다. 이 산화반응 온도가 500~600℃이므로 포집된 매연이 자연 산화된다.⁵⁹⁾

배기온도는 필터재생의 중요한 변수이며, 필터 온도가 높을수록 매연 산화율은 증가한다. 배기가스가 온도가 낮으면 포집되는 매연이 많아져서 배기가스의 유동저항이 증가하여 배압이 상승되고, 결국 필터를 막아버린다. 또 매연이 과다 포집되면 촉매내부에서 일시적으로 발화하여 과도한 필터 열구배에 의해 필터 지지체를 녹이거나 소결시키는 상태가 발생한다.

재생이 적절하게 유지되는 배기온도는 320~420℃ 범위이다. 이 온도는 필터 전단의 온도이며, 배기온도가 350℃ 이상인 시간이 전체 운전시간의 30% 이상 유지되는 것이 바람직하다.

1990년대 상용차의 경우 배기온도가 380~420℃ 범위가 25% 정도인 운전조건이 비도로 차량에 적용된 바 있다. 엔진의 배기가스 제어가 발달되어 저유황 경유차는 이 보다 더 낮은 온도도 적용되었다. 앵겔하드에서는(모델 DPX, 1994년 미국 캘리포니아) 황함량이 15ppm인 경유를 사용하여 평균배기온도를 225℃로 적용한 바 있다.⁶⁰⁾

Pt로딩량이 높은 DPX필터는 경유-전기 복합엔진에 적용하기 위해 개발되었으며, 배기온도는 거의 300℃를 초과하였다.

촉매필터의 BPT를 결정하는 변수는 다음과 같다.

1) PM배출량 - 촉매필터의 BPT는 엔진의 PM배출량이 적을 때 낮아진다.

2) 연료의 황함량 - 촉매필터의 BPT는 연료의 황함량이 3~30ppm일 때 30℃ 정도 낮아지며, 황함량이 더 높아지더라도 비슷하다.

3) 배기가스 공간속도 - 촉매필터의 BPT는 엔진회전수가 증가함에 따라 높아진다. 또 촉매필터의 체적이 커지면 BPT가 낮아지는데, 반대로 필터의 체적이 너무 크면 열용량이 증가하기 때문에 오히려 BPT가 높아진다.

주기적으로 재생하는 경우 순간적으로 매연이 과다 포집되어 제어불능상태가

되는 위험이 초래된다. 만일 매연이 발화된 직후 엔진이 아이들링상태가 되면 배기가스가 열을 방출할 수 없는 경우가 발생할 수 있다. 결과적으로 필터내부의 온도구배가 매우 커져서 코디에라이트는 용해되고 SiC필터는 균열(crack)이 발생한다.

촉매필터를 포함한 모든 필터에서 배압은 상존하며, 일반적으로 고온에서는 5kPa이상이고 저온에서는 20kPa정도이다. 배압은 연료를 2~4% 소모하고, 실제 DECSE프로그램에서는 필터나 엔진에 따라 다르지만 연비를 약 2% 감소시킨다.

필터의 내구성은 자연재생방식의 경우 매우 중요한 변수이다. 실질적으로 필터 재생을 모든 엔진 운전조건에서 fail없이 유지하는 것은 매우 어렵고 불가능하다. 예를 들면 엔진이 고온 운전되는 경우 아이들이 잠시 노출되면 매연이 과다 포집되기 쉽다.

필터의 내구성은 엔진상태를 적절하게 유지함으로써 향상될 수도 있다. 특히 촉매필터는 엔진오일 중의 황이나 첨가제에 의해 피독되기 쉬우므로 오일이 배기가스 라인에 유입되지 않도록 방지하여야 한다.

촉매필터를 제작차에 적용하는 경우에는 필터에 매연이 과다 포집되어 배압이 상승하지 않도록 강제재생방식을 채택하는 것이 좋다. 이 경우 배기온도를 높이기 위하여 분사장치를 부착하게 된다. 또 운행차의 필터 내구성을 개선하기 위해서는 배기온도, 오일소모량, 배압 등을 측정하여 검토하여야 한다.

촉매필터 시스템에서는 필터배압을 주로 운전대 앞에서 모니터링 한다. 필터배압의 급격한 상승은 매연의 과다 포집을 의미하므로 제어불능상태의 재생이나 막힘이 발생하지 않도록 주의하여야 한다. 배압이 급격히 상승하면 빨리 필터를 청소하거나 재생하여야 한다.

한편 너무 낮은 배압은 필터의 파손을 의미하므로 빨리 교환하여야 한다. 광산용 촉매필터의 경우 엔진운전 시간이 5,000~10,000시간까지는 안정적으로 작동된다. 촉매필터를 처음 인증 받아 실차에 적용한 미국의 MY2001 Navistar 530 School 버스는 185,000마일의 내구를 통과하였다.

촉매필터의 인증절차는 먼저 엔진벤치에서 약 1,000시간 정도 Aging한 후 시험한다. 촉매필터를 운행차 프로그램에 적용한 곳은 2000년 미국의 캘리포니아 주이고, 150,000마일의 내구를 통과하였으며, 시스템회사에서 100,000마일의 내구를 보장하였다.

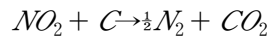
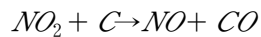
촉매필터의 내구를 악화시키는 또 다른 요인은 촉매에 의한 Ash 배출이다. Ash는 엔진오일 및 각종 첨가제에 기인한 것으로, 필터에서 산화되지 않기 때문에 점진적으로 필터의 배압을 상승시킨다. 이와 같은 영구적 필터 파손을 방지하기 위해서는 시스템 제작회사에서 명시한 세척주기를 준수하여 주기적으로 공기나 물로 세척하여야 한다.

영국의 운행차 프로그램에서는 Ash를 주기적으로 제거하기 위해서 주행거리 30,000km마다 1회씩 세척하고, 엔진오일 소모량에 따라 세척주기가 단축되어야 한다고 보고하였다.

3. CRT필터

CRT필터는 PM이 NO₂공존 시 재생온도가 낮아지는 점을 착안하여 1990년 J/M사에서 제품화하였다. PM중의 탄소는 배기온도 550℃이상에서 재생되나 배기가스에 NO₂가 포함된 경우에는 Fig. 2-21과 같이 250℃이하에서도 반응률이 높아 재생이 가능하다.

CRT필터는 전단의 산화촉매와 후단의 필터로 구성되어 있다. 산화촉매는 배기가스 중의 NO를 산화시켜 NO₂로 전환하고, 필터는 포집되는 매연을 다음 반응식에 따라 연속적으로 재생시킨다.



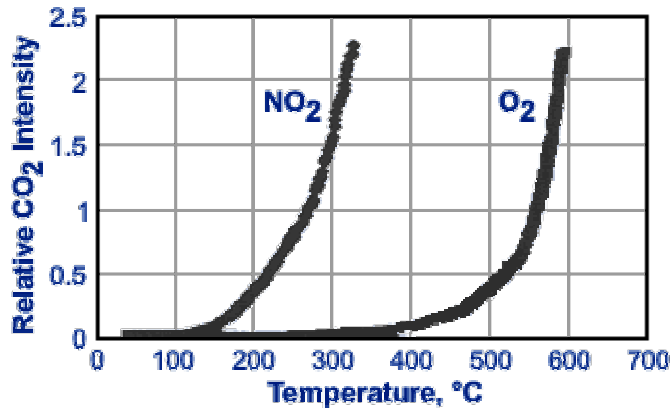


Fig. 2-21. Oxidation of PM by oxygen and nitrogen dioxide.

여기서 C는 PM중의 매연을 의미한다. 이론적으로 PM중의 탄소는 NO₂에 의해 산화되며, NO₂는 환원되어 NO나 N₂상태로 배출된다. 또한 매연은 NO₂가 배기가스 중의 수분과 반응하여 생성한 질산mist와도 반응한다.⁶¹⁾

엔진 배기가스에 함유된 NO_x의 조성은 NO 95%, NO₂ 5%이다. CRT필터는 온도에 따라 다르지만 NO의 절반정도를 NO₂로 산화한다. NO의 산화율은 저온에서는 온도가 상승함에 따라 증가하나, 고온에서는 온도가 상승함에 따라 NO₂가 NO로 환원되므로 저하된다.

그림에서 평형상수를 나타내는 파라미터는 각각 배기가스 중의 NO₂와 O₂농도에 따라 나타낸 것이다. 즉 비교적 저온에서 배기가스 온도나 촉매활성도가 증가할수록 전환율이 증가하며, 고온에서 NO/NO₂의 비율은 열역학적 상수에 의해 좌우되며, 배기온도가 증가함에 따라 전환율이 감소한다. 배기가스 온도가 250~350°C일 때 전환율이 약 70~80%로서 가장 양호하다.

NO₂는 필터에 포집된 매연과 반응하는데, 반응율은 온도와 NO₂농도가 높아짐에 따라 증가한다. 따라서 재생이 연속적으로 유지되기 위해서는 NO₂농도가 일정하게 유지되는 것이 바람직하다. 일반적으로 CRT필터를 통과한 NO_x중의 NO₂점유율은약 20%이다. 실제로는 산화촉매에서 배출된 NO₂가 CRT필터에서 매연과 반응하여 NO로 전환되는 양이 N₂로 전환되는 양보다 많기 때문에 NO_x배출량은 줄어들지 않는다.

CRT필터가 정상 작동하기 위해서는 촉매 활성도나 크기보다는 엔진 운전조건을 고려하여야 한다. 귀금속이 담지된 촉매필터에서 일부 재생이 일어나며, 이로 인해 재생에 유리하게 작용한다.

CRT필터는 NO₂에 의하여 재생되도록 설계되었으며, NO₂가 필터 전단에서 생성되도록 함으로서 매연 산화율을 높이고 있다. 촉매필터에서는 NO₂가 모노리스 벽 근처에서 생성되기 때문에 필터 입구에 포집되는 매연을 산화시키기 어렵다. 따라서 CRT의 재생효율이 촉매필터보다 높다.

자연재생방식은 CRT, 촉매필터(CDPF) 및 두 가지 복합시스템으로 구분된다. Fig. 2-22에 세 가지 자연재생방식시스템을 나타내었다. CRT필터는 산화촉매와 필터로 구성되고, 촉매필터는 필터표면을 촉매로 코팅한 것이며, 복합시스템은 산화촉매와 촉매필터로 구성되어 있다.

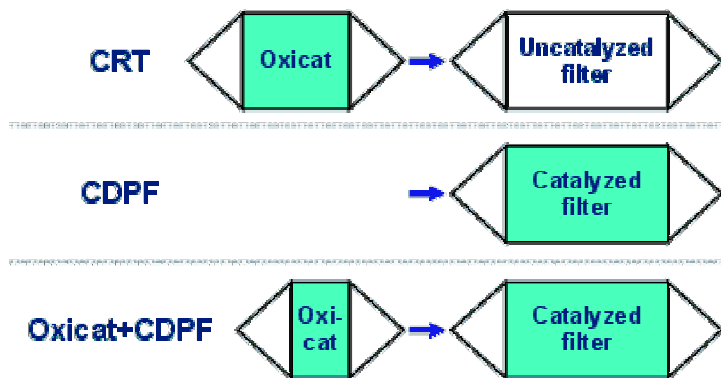


Fig. 2-22. Configurations of catalytic filters.

CRT는 NO₂의 양에 따라 재생되고, 촉매필터는 재생 메커니즘이 복잡하나 산소와 NO₂와 같은 산화제에 의해 재생된다. CRT필터에서 NO₂는 산화촉매에 의해 생성되고, 매연산화에 소모된다. 촉매필터에서 NO₂는 모노리스 벽면 근처에서 생성되며 매연산화에는 사용되지 않고 채널 내에 포집되기만 한다.

CRT필터의 경우 엔진 배기가스의 NOx농도가 높으면 촉매필터보다 더 낮은 온도에서 재생된다. 반면 NO₂는 CRT필터에서 단 한번만 사용되고 탄소입자와 반응하여 NO를 NO₂로 전환할 수 없다. 이러한 CRT필터의 단점때문에 촉매필터와 복합적으로 사용된다. 복합시스템에서는 재생 후 발생하는 NO가 촉매필터에서 NO₂로 전환되므로 매연산화온도를 보다 낮출 수 있다.

Table 2-6에 황함량이 3ppm인 연료를 사용하여 측정한 BPT를 나타내었다. CRT필터의 BPT는 촉매필터보다 15℃ 낮고, 복합시스템의 BPT는 CRT필터보다 15℃ 낮게 나타났다.

Table 2-6. Balance temperature comparison

Configuration	Balance Temperature
CRT(oxicat + uncatalyzed DPF)	265 °C
CDPF	280 °C
Oxicat + CDPF	250 °C

Fig. 2-23에 CRT, CDPF 및 Oxicat + CDPF시스템의 재생속도를 나타내었다. 복합시스템은 CRT나 촉매필터보다 반응속도가 훨씬 빨라서 배압이 낮게 형성되는 것을 알 수 있다.

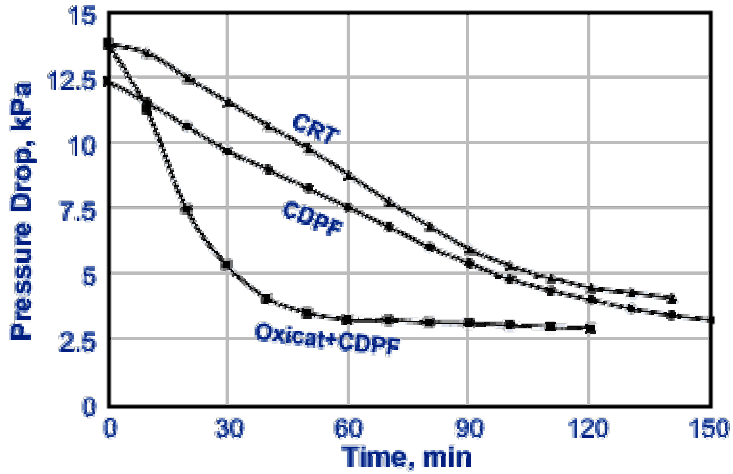


Fig. 2-23. Comparison of regeneration rates in various C-filter configurations.

CRT필터는 촉매필터보다 유리한 점이 있지만 배기온도는 275℃이하, NOx/PM 비는 8:1 ~ 25:1(by weight), 연료의 황함량은 50ppm미만으로 적용하여야 하는 제한조건이 있다.

이러한 조건은 J/M사에서 제시한 사항이며, 엔진에서 배출되는 PM의 양이나 과도운전(Transient) 상태에 대한 언급은 포함되어 있지 않다. 실제 엔진에서는 여러 가지의 상반 관계가 성립한다. 예를 들어 엔진의 배기온도가 낮으면 황함량이 낮고 NO/PM비가 높아야 하므로 엔진의 PM배출량이 적을 때 유리하다.

CRT필터를 자연재생방식으로 원활하게 작동하기 위해서는 배기온도가 최저온도 이상 유지되어야 한다. 실제 캘리포니아 운행차 프로그램의 인증과정에서는 1994년 이전형식의 고속버스에 대해서는 배기온도가 270℃이상이 전체 운전범위의 40%이상이고 연료의 황함량이 15ppm이하이어야 한다고 규정되었다.⁶²⁾

Fig. 2-24에 CRT필터 BPT의 연료의 황함량에 따른 변화를 나타내었다(CAT 3126엔진, DECSE시험모드). 초저유황 경유를 사용한 경우에는 필터온도 300℃이하에서도 매연이 산화되는 것을 볼 수 있다. 황함량이 3~30ppm인 경유를 사용한 경우에는 BPT가 약 60℃ 저하되었다.

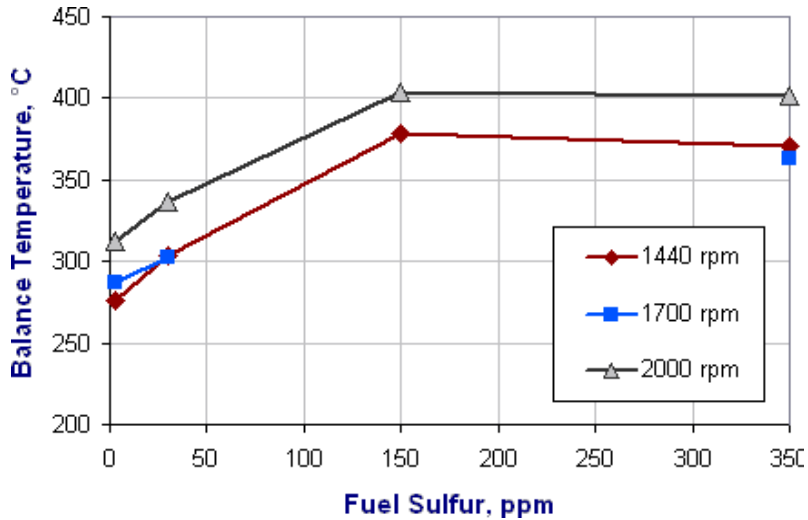


Fig. 2-24. CRT balance temperature as a function of fuel sulfur level.

황함량이 많은 경우에는 배기가스 중의 SO_2 가 NO를 활성화시키는 영역에서 피독되어 NO_2 전환율이 낮아지므로 많은 양의 매연을 재생시키기 위해서는 BPT가 상승한다. CRT필터에 저유황경유를 사용하는 또 다른 이유는 SO_2 의 산화 때문이다. NO/ NO_2 의 전환율을 제고하기 위하여 활성이 우수한 촉매를 사용하고 있는데, 이 촉매에 의해 SO_2 도 SO_3 로 산화되고 황산염이 만들어지며, 황산염 입자(Sulfate Particulate)가 필터에 걸려져 PM제거율이 감소된다.⁶³⁾

CRT필터에만 적용되는 또 다른 중요한 변수는 엔진 배기가스의 NO_x/PM 이다. CRT필터는 촉매처리가 되어있지 않고 오로지 배기가스 중의 NO만을 활용하기 때문이다. 즉 많은 양의 NO가 배출되면 NO_2 배출량이 증가하여, 재생에도 유리하게 작용된다. 배기가스 중의 NO가 100% NO_2 로 전환되고 전환된 NO_2 가 모두 재생에 사용된다고 가정하면, 이론적으로 NO_x/PM 의 비율은 3.38:1이다. 이상적인 20:1 ~ 25:1이라고 하지만 실제로는 배기가스 중의 NO가 전량 NO_2 로 전환되지 않으므로 최소 8:1의 비율이 유지되도록 운전하고 있다.

CRT필터는 촉매와 필터를 조합한 것이기 때문에 배기가스 중의 기체 및 고체 물질처리가 가능하다. ECE R49와 ESC시험에서 PM제거율은 85~90%이고, FTP75모드 시험에서는 온도가 다소 낮기 때문에 CO와 HC제거율은 70~90%이고 포름알데히드

및 아세트알데히드를 포함한 알데히드류 제거율은 50~90%이었다.

1999년 DDC 50엔진 시험에서 CO 및 HC제거율은 90%이상이고, 특히 알데히드, 케톤 등은 99%, PAH는 80%이었다. 또 NO_x는 대부분 재생반응에 관여하였으나, NO_x의 제거율에는 큰 변화가 없었고, NO₂생성량이 기존의 엔진에 비해 많은 것이 관측되었다. NO₂는 인체에 유해하기 때문에 고정용으로 설치할 경우에는 유의하여야 한다.⁴⁾ NO₂배출량은 20~60%로서 기존차량 5%보다 매우 많았다.

Fig. 2-25는 운행 중인 시내버스에 CRT필터를 장착하여 NO/NO₂배출량을 측정한 값이다.

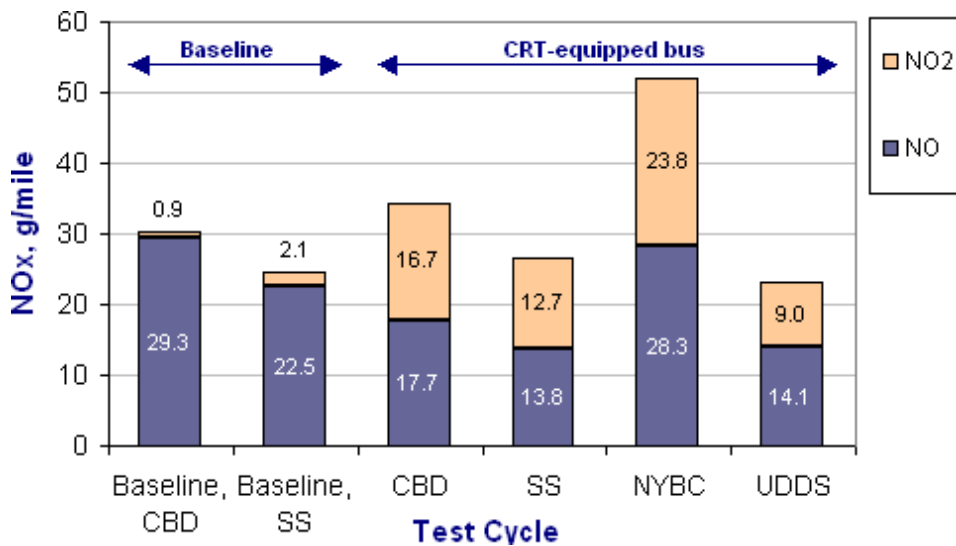


Fig. 2-25. CRT effect on diesel bus NO_x emissions(1998 DDC Series 50 engine).

매연제거율은 PM(SOL, SOF, SO₄)의 종류에 따라 차이가 있다. 필터를 사용하는 후처리 시스템에서 SOL제거율은 약 95%이고, CRT필터와 같이 산화촉매를 사용할 경우에는 SOF까지 거의 제거되었지만, PM제거율은 황산염(Sulfate)에서 차이가 난다. 황산염 제거율은 배기온도가 증가하고, 연료의 황함량이 높아질수록 저하된다.

Table 2-7에 ESC시험과 최고 출력점에서 연료의 황성분에 따른 PM변화를 나타내었다. ESC시험에서는 고온영역이 많아서 CRT필터를 적용하기에 불리한 점이 있다.⁶⁴⁾

CRT필터의 PM제거효율은 연료의 황함량이 10~30ppm일 때 약 90%이다. 이 값은 EURO 4/5를 만족시키고 있으며, EUR02의 운행차와 1994년식 엔진이 2007년까지 가능하게 되었다. CRT필터를 소형차에 적용하였을 때 PM배출량은 0.2g/mile에서 0.02g/mile으로 저하되어 EUR04와 US Tier 2규제를 충족시켰다.

Table 2-7. PM Reduction efficiency in CRT filter(CAT 3126 engine)

Fuel Sulfur Level, ppm	PM Reduction, %	
	ESC test	Peak Torque
3	95	91
30	72	73
150	-3	19
350	-155	-139

J/M사에서는 CRT필터를 저유황경유가 보급된 지역의 운행차 버스에 적용할 수 있다고 보고하였으며, 현재 스웨덴, 영국, 독일 및 유럽 등에서 적용하고 있다. 스웨덴에서는 황함량이 10 ppm이하인 1등급 연료 혹은 50ppm인 연료를 사용하는 모든 차종에 사용하고 있다. 또 연료의 황함량이 15ppm이하로 규제되는 미국 캘리포니아에서 2000년에 상용화되었고, 1994년부터 2001년까지 유럽 18,000대, 미국 1,000대 등 19,000대의 차량에 장착하여 사용된 바 있다.⁶⁵⁾

CRT필터는 자연재생 시스템이기 때문에 엔진의 운전조건에 매우 민감하게 작동한다. 따라서 내구를 충분히 확보하기 위하여 엔진에 적용하기 전에 엔진의 운전조건, 온도, NOx/PM비 등을 측정한다. 유럽에서는 터보엔진에 1985년 형식 이후의 차량에 장착하고 있다. 내구성 시험이 현재도 진행되고 있으며, 버스, 트럭, 기차 등에 적용하여 총 누적거리는 106,000~600,000km이 데. PM제거율은 80~95%이었다.

Fig. 2-26에 나타난 실제 시험에서는 필터에 엔진에서 배출되는 Ash 등이 축적되어 배압이 점차 상승하였다. 이러한 근거로 CRT필터를 사용할 경우 1년에 한번 이상 필터를 세척하도록 권장하고 있으며, 실제 엔진에서 배출되는 Ash의 양은 엔진오일의 약 1.8%이다.⁶⁶⁾

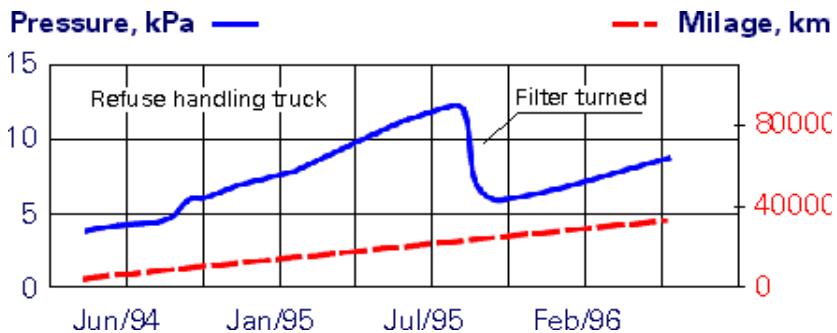


Fig. 2-26. Exhaust back-pressure with CRT trap.

CRT필터의 실차시험은 뉴욕에서 버스 50대(1999 DDC Series 50 4행정엔진 25대, 1993 6V92 DDEC 2행정엔진 25대)에 장착시켜 황함량이 30ppm인 연료를 사용하며 약 8개월 동안 수행하였다.

시리즈 50엔진에서는 재생이 원활하게 이루어졌으나, 6V92엔진에서는 필터 막힘 현상이 발생하였다. 또 시리즈 50엔진에서는 배기온도 275℃이상 운전시간이 전체의 60%이었다. 엔진배압도 안정적으로 유지되었으며, 최고배압은 14kPa이었으며, 연비는 배압이 증가함에 따라 1~3% 악화되었다.

CRT필터는 소형승용자동차에 적용되었는데, 배기온도가 낮기 때문에 별도의 보조열원장치가 필요하였다. Fig. 2-27에 소형차량에 처음 적용된 폭스바겐 D1 V10 5.01 엔진(10기통 TDI엔진 230 kW/4000rpm)을 나타내었다.

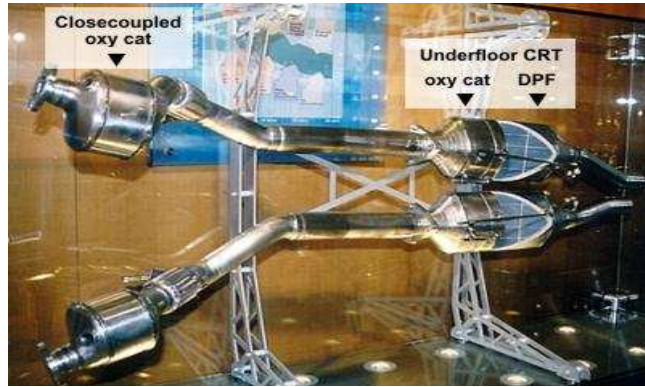


Fig. 2-27. Prototype of light-duty CRT system.

4. 연료첨가제방식 매연정화장치

연료첨가제는 매연 저감과 세탄가 제고를 목적으로 연구되었다. 연료첨가제로 사용된 금속은 Ba, Ca, Fe, Mn 등이며, 매연저감 효과가 높다고 보고되었다.

매연저감은 (1) 알칼리 이온과 알킨기의 매연 전구물질 저감, (2) 매연 전구물질의 응집 방해 및 (3) 발생한 매연의 산화 등 세 가지 메커니즘으로 설명되고 있다.

금속소재의 연료첨가제는 DPF장치에서 주로 매연저감 목적으로 사용되고, 자연재생방식에서 정화장치의 재생역할을 하는 산화촉매로서 연구되고 있다. 연료첨가제는 엔진 실린더에서 연소되어 금속산화물이나 황산염 형태로 배출되고 필터에 포집된 후 매연을 산화시킨다.

매연재생방식은 촉매방식보다 매연과 접촉하는 비율이 높고, 재생평형온도는 낮다. 재생평형온도가 낮음에도 불구하고, 소형경유 자동차의 매연 문제가 완벽하게 해결되지 않았기 때문에 자연재생-강제재생 시스템이 도입되었다. 이는 엔진의 분사장치를 활용하는 방식으로 실린더에 연료를 분사시켜 주기적으로 배기온도를 상승시키는 방식이다.

연료첨가제 방식에 대한 연구가 많이 보고되었으나, 연료첨가제와 매연입자의 상호관계나, 촉매반응기구, 첨가제 입자크기 등에 관한 세부적인 연구결과는 미흡하다.⁶⁷⁾

그 밖에 알킨기와 Li, Ca, Ba, Mn, Fe, Ni, Ce, Cu, Pb, Ag, V, Pt 등 전이 금속과 귀금속이 매연재생 첨가제로서 연구되었으며, 경유차 매연재생에는 약 100ppm 농도로 사용되었다. 첨가제의 선정에는 첨가제 농도, 배기가스의 온도, 발생하는 매연의 양과 조성 등이 고려되어야 한다. 일반적으로 첨가제의 양이 많을수록 재생온도는 낮아지나, 첨가제의 양이 너무 많으면 Ash포집량이 많아져서 오히려 배압이 상승된다.

실제로는 첨가제를 100ppm 이상 사용하고 있으나, 첨가제 농도가 높으면 Ash에 의하여 배압이 상승하므로 부적합하다. 연료첨가제에 의한 재생시험은 성공적으로 이루어졌으나 아직 상용화되지 않았으며, 실차평가시험이 진행되고 있다.

연료첨가제를 필터에 포집된 매연재생 목적으로 사용할 경우 발생하는 문제점은 다음과 같다.

1) 연료첨가제 분사장치(dosing system) 도입

대부분 정유회사가 연료첨가제를 생산하지 않기 때문에 시스템에서 자동적으로 연료에 첨가하는 장치가 필요하다. 이 경우 장치가 복잡해지고, 자연재생 시스템에 부분적으로 강제재생 시스템이 도입되기 때문에 단가가 상승한다.

2) 필터의 Ash 포집

연료첨가제가 매연재생에 사용된 이후에는 무기산화물 형태로 필터에 잔존하게 된다. 이 Ash는 필터에서 재생되지 않고 퇴적되어 필터의 배압을 상승시킨다.

3) Ash 배출

필터제거효율 한계이상이거나 필터파손 시 연료첨가제에 기인하여 배출되는 Ash가 대기 중에 방출될 경우 인체에 유해한 영향을 끼치므로, 첨가제는 환경부의 인증 후 사용하도록 규제하고 있다.

4) 엔진배기가스의 영향

연료첨가제는 엔진에서 배출되는 가스나 매연의 제거율을 향상시키거나 오히려 악화시킨다. 또 매연의 입자크기를 변화시키고, 2차 오염물질을 배출한다.

5) 엔진 혹은 엔진 부품의 영향

일부 연료첨가제는 연료분사장치에 매우 유해한 영향을 미친다. 따라서 연료첨가제를 사용하기 전에 엔진자체의 내마모 시험을 실시하고 제작회사에서 추천하는 사용량을 준수하여야 한다.

6) 연료안정성

연료첨가제가 연료와 혼합될 때 연료분사계통에 침전물이 잔류되어 치명적으로 파손될 수 있다.

푸조회사는 2000년 연료첨가제를 바탕으로 경유차 매연여과장치를 상용화하였다. 상용화된 모델은 자체 생산차량인 DW12 TED4, 2.2리터 98kW급 커먼레일 승용경유차이다. 소형경유자동차용 매연정화장치는 2005년 EURO기준에 만족하는 수치인 0.025g/km수준까지 저감시켰다.

푸조시스템은 재생평균온도를 낮추기 위하여 연료첨가제를 사용하고, 엔진 연료분사장치의 후분사를 통한 배기온도를 상승시키는 강제재생방식도 도입하였다. 이 때 엔진제어를 통한 후분사 기술이 도입되고, 또 다른 형태의 강제재생방식이 소개되었으며, 자연재생과 강제재생의 혼합방식이 도입되었다.

푸조시스템은 SiC필터와 전단의 산화촉매로 구성되었으며, 재생온도를 올리기 위해 Ce계통 연료첨가제를 사용하였다. 실제시험에서 자연재생은 배기가스 온도가 약 450℃이하일 때 이루어졌는데, 이 온도는 실제 운전에서 거의 발생빈도가 적기 때문에 엔진 후분사와 같은 강제재생방식이 도입되어 배기가스 온도를 높이게 되었다.

재생은 배기온도를 상승시키는 연료 분사장치에 의해 제어된다. 재생을 돕기 위한 연료분사방식은 후분사(Post injection)와 후연소(Post combustion)로 구분되는데, 후분사방식에서는 배기온도가 200~250℃까지 상승되고, 후연소방식에서는

배기가스 중의 미연탄화수소가 발생되고 산화촉매에 의해 배기온도는 100℃정도 상승된다.

위의 두 가지 효과에 의해 배기온도는 450℃이상 높아지는데, 이러한 재생은 실제 엔진 운전조건이나 매연배출량에 따라 다르지만 약 400~500km정도에 한 번씩 재생하게 된다. 연료첨가제는 자동적으로 연료탱크에 공급되며, 일단 새로운 연료가 탱크에 주입되면, 연료첨가제는 계산된 양만큼 연료탱크에 분사된다. 실제로는 연료 60ℓ 당 첨가제 37.5mℓ(Ce : 1.9g, 25ppm)가 분사된다.

이와 같은 비율로 분사하면 첨가제 5ℓ로서 약 80,000km를 주행할 수 있다. 80,000km 주행 후에는 첨가제를 보충하여야 하며, 필터의 Ash를 제거하기 위하여 물로 세척하여야 한다. 이 시스템은 엔진의 운전조건이나 재생주기에 따라 다소 다르지만 후분사할 경우 연비가 약 5% 상승한다.

5. 전기히터방식 매연정화장치

전기히터방식 매연정화장치는 전력원에 따라 on-board와 off-board 재생방식으로 구분된다. On-board 재생방식은 전력 공급이 가능한 고속버스 및 트럭에 사용되는데, 배기온도를 1℃ 높이는데 소모되는 엔진의 동력이 약 1hp로서 에너지 소비가 많은 편이다

즉 이론상으로 전기에너지를 이용하여 배기온도를 상승시키는 경우, 100hp의 엔진으로 100℃ 높이는데 소요되는 에너지는 $100 \times 100 \times 1.43 = 14.3\text{kW}$ 이다. 엔진의 회전수가 낮으면 에너지 소모가 더 적지만, 실제 엔진(100hp, 75kW)으로 이와 같은 에너지를 단시간에 생성하는 것은 불가능하다.

따라서 대부분의 on-board재생 시스템에서는 배기가스의 일부를 바이패스시켜 재생하거나, hot air재생한다. 부분유량 시스템에서는 재생에 일부 배기가스만 사용되고 대부분 바이패스 하며, Hot air 시스템에서는 재생공기를 외부에서 공급한다.

Off-board시스템은 재생에 소요되는 히터의 전력을 외부에서 공급하며, 재생하는 동안 차량을 운행할 수 없으므로 주행거리가 짧은 차량에만 적용된다.

1993년 Donaldson사에서는 시내버스 경유필터에 최초로 전기히터 방식을 적용하여 DDC 6V92TA와 커민스 L10엔진에 대해서 EPA와 CARB 인증을 받았다. 당시 배출된 매연량은 0.018~0.041g/bhp·hr이었다. 이 매연정화장치는 33개 도시의 버스 2,000대에 적용되었는데, 뉴욕에서는 총 누적거리 20,000,000마일을 축적하였다. 그러나 1994년 EPA에서 배기가스를 0.5g/hp.h에서 0.7g/hp.h로 완화시킴으로써 Donaldson사는 내구성과 가격 등의 문제로 생산을 중단하였다.

Donaldson시스템은 Fig. 2-28과 같이 모노리스 필터와 재생을 담당하는 전기히터, 블로워(blower), 센서, 밸브 및 ECU로 구성되어 있다. 필터는 2개이며, 하나의 필터에 매연이 포집되어 전기히터에 의해 재생되는 동안 유로가 바뀌어 다른 깨끗한 필터에 매연이 포집되는데, 재생은 전자제어장치에 의해 전자동으로 이루어진다.⁶⁸⁾

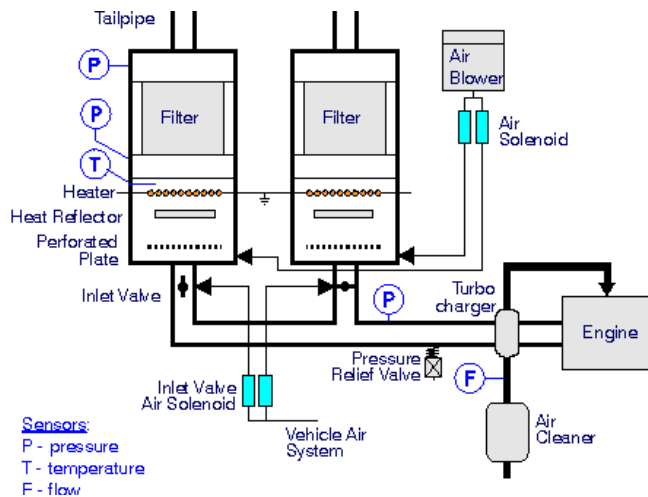


Fig. 2-28. System schematic.

재생하기에 적합한 양의 매연이 필터에 포집되면, 솔레노이드 밸브에 의해 유로가 바뀌고 블로워와 히터로부터 뜨거운 공기가 공급되어 재생된다. 매연의 포

집량은 흡기유량, 필터배압 및 필터입구 온도로부터 계산할 수 있다. 제어기는 재생시스템 및 센서 등을 모니터링하며, 한 쪽 밸브를 닫은 채 재생하기 시작한다. 장치가 정상적으로 작동되지 않으면 경고등이 점등된다.

Table 2-8에 나타낸 바와 같이 디트로이트 디젤엔진에서 측정된 PM제거율은 85%이었다. 이 때 NOx, HC농도는 증가하지 않았고, 재생 시 CO는 약간 증가하였다. 시험기간 동안 장치는 손상되지 않았고, 장치내구는 8년 290,000마일, 평균재생주기는 4.2시간이었고, 한 번 재생 시 히터 구동시간은 6.5분이었으며, 이 때 소모된 전기에너지는 24V, 150A이었다.

Table 2-8. Emission performance on a DDC 6V92TA diesel engine, federal HD urban bus cycle, 0.08% sulfur #2 fuel

	Engine Baseline g/bhp-hr	Trap g/bhp-hr	Efficiency %
NOx	5	4.3	14
HC	0.7	0.6	14
CO	2.5	3.0	-20
PM	0.35	0.053	85
SOF	-	-	63
non SOF	-	-	92

Fig. 2-29에 뉴욕 실차시험 시 측정된 배압분포를 나타내었는데, 평균배압은 4.1 kPa이었다.

전기히터방식에서 연료는 필터 배압상승과 전기에너지 사용에 의해 소모된다. Table 2-9에 엔진에서 배출되는 매연의 양을 기준으로 계산한 이론연료 소모량을 나타내었다.

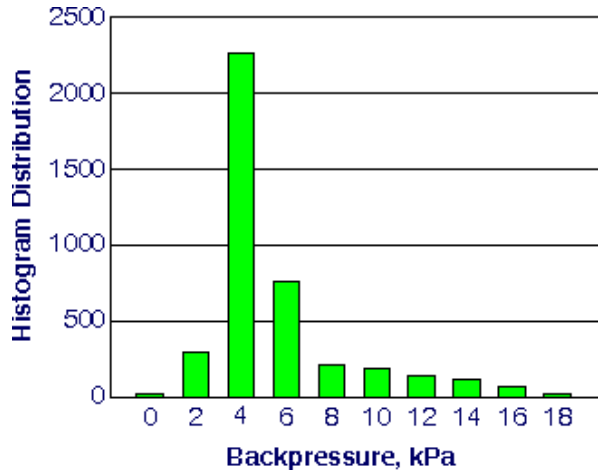


Fig. 2-29. Backpressure distribution on trap equipped buses.

Table 2-9. Trap system performance – fuel penalty

PM, Engine Baseline	Regeneration Frequency	PM, Trap	Fuel Penalty		
			Electric	Backpressure	Total
g/bhp·h	h	g/bhp·h	%	%	%
1.00	1.4	0.150	2.5	0.4	2.9
0.80	1.6	0.120	2.1	0.4	2.5
0.60	2.0	0.090	1.7	0.4	2.1
0.40	2.9	0.060	1.2	0.4	1.6
0.25	4.4	0.038	0.8	0.4	1.2
0.15	7.2	0.023	0.5	0.4	0.9

제3장 실험장치 및 방법

제1절 배기정화장치

1. PDPF의 원리

PDPF(partial diesel particulate filter)란 유량흐름(Flow Through) 유동의 DOC(diesel oxidation catalyst)와 벽면유량(Wall Flow) 유동의 DPF(diesel particulate filter)를 조합하여 PM제거율이 50%이상 되도록 만든 장치이다.

Fig. 3-1에 PDPF의 작동원리를 나타내었다. PDPF는 3차원 기하학적 구조를 가진 금속구조물(Corrugated Layer Blades)을 이용하여 전체 배기량의 일부를 다공성 금속섬유층(Porous Fleece Layer)에 통과시킴으로써 PM가 필터에 포집되도록 설계되었다.

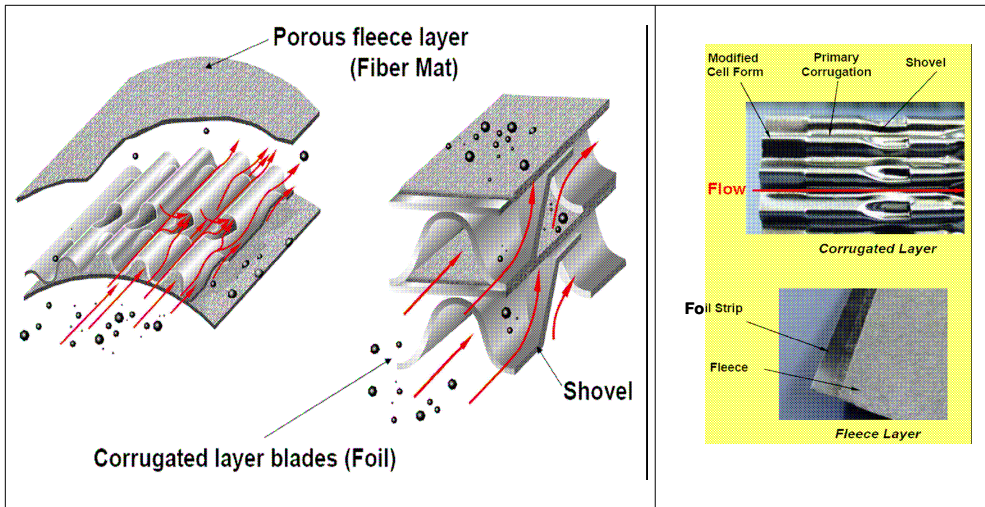


Fig. 3-1. Fundamentals of partial DPF.

PDPF방식은 연속재생방식 DPF와 유사하다. 즉, Fig. 3-2에 나타난 바와 같이 PDPF는 유입되는 PM의 일부를 필터에 포집하며, 배기가스 중의 NO가 DOC 및 PDPF에 코팅된 산화촉매에 의해 NO₂로 전환되면, NO₂를 이용하여 PDPF에 포집된 PM을 CO₂로 산화시킴으로써 PDPF가 연속 재생된다. DPF전단의 DOC는 산화촉매로서 NO가 NO₂로 전환되도록 반응을 보조하고, PM 구성성분인 SOF를 산화시킴으로써 PM제거율을 높이고, 배기온도를 상승시켜 PDPF의 PM산화반응을 촉진한다.

PDPF와 DPF의 차이점은 PDPF의 경우 단면적의 일부를 개방시켜 PM포집률을 50~60%로 낮추는 대신 배기가스의 유동저항을 줄임으로써 엔진이나 차량의 부하를 낮췄다는 점이다. 따라서 PDPF는 DPF보다 차량성능 및 연비가 우수하고, 배압이 과도하게 상승되지 않아 필터의 내구성이 우수하므로 엔진온도가 낮은 차량에 적합하다.

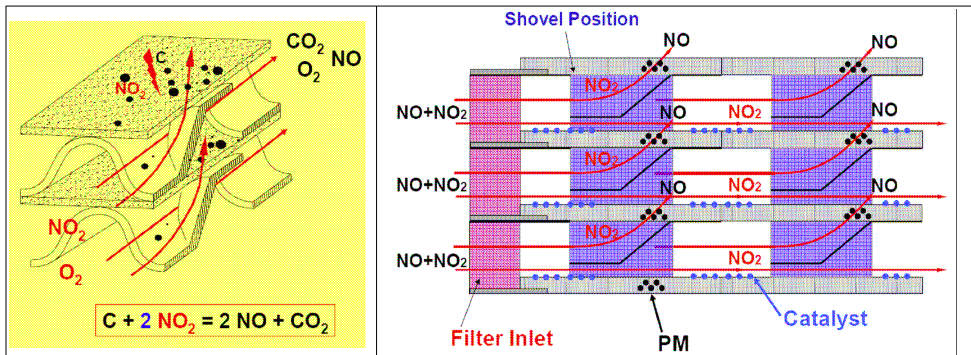


Fig. 3-2. Construction of partial DPF.

2. PDPF의 종류

PDPF는 금속부분통과필터(Metal partial through filter), 반 막음 필터(Half plugging filter), 금속 폼 필터(Metal foam filter) 등으로 구분되며, 그 외에 DOC와 연료첨가제를 조합하여 PM제거율을 50% 이상 향상시킨 장치도 개발되었다.

가. 금속부분통과필터

Fig. 3-3은 금속 DDC의 내부를 변형시킨 장치로서, 배기가스 중 일부는 기공층(Porous layer)을 통과하는 동안 포집되고 일부는 통과한다.

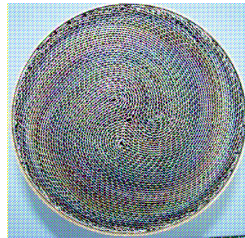


Fig. 3-3. Metal partial through filter.

나. 반 막음 필터

Fig. 3-4에 나타난 반 막음 필터는 필터마개에 구멍을 만들어 배기가스 중 일부만 포집하고, 배출함으로써 PM제거율을 50% 이상 유지하고, 배기온도가 낮더라도 필터가 파손되지 않는 장점이 있다.

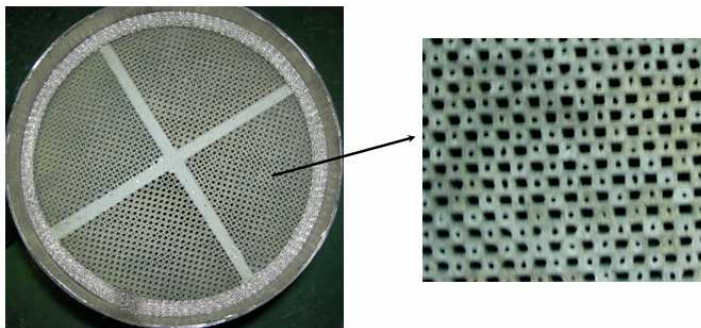


Fig. 3-4. Half plugging filter.

다. 금속 폼 필터

Fig. 3-5에 나타난 금속 폼 필터는 다양한 금속합금을 이용하여 다공성 담체로 제작한 것이다. 기공율을 조절하여 PM제거율을 조정하며, 방사형, 디스크형, 원통 실린더형 등 다양한 형태로 제작된다.



Fig. 3-5. Metal foam filter.

3. 배기정화장치의 구성

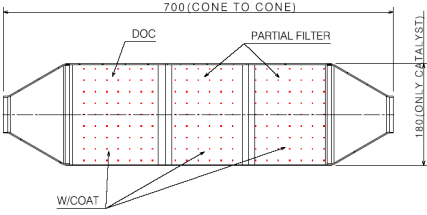

가. 장치의 제원

본 연구에 사용된 장치는 3~6ℓ 급 중형 경유차에 적용하는 PDPF배기정화장치이며, DOC와 DPF로 구성된다.

전단에 설치되는 DOC는 NO를 NO₂로 전환하고, 용해성 유기물(SOF)을 산화시킴으로써 PM제거율을 향상시킬 수 있고, 후단에 설치되는 DPF는 3차원의 기하학적 구조를 가지는 금속구조물(Corrugated Layer Blades)을 이용하여 배기 유량의 일부를 다공성 금속섬유층(Porous Fleece Layer)에 통과시켜 PM을 필터에 포집하고, 전단 촉매층을 통과하는 동안 변환된 NO₂를 이용하여 포집된 PM을 산화시킴으로써 매연 배출량을 저감하는 장치이다.

Table 3-10에 PDPF의 특징 및 제원을 나타내었다.

Table 3-1. Specification of PDPF

PDPF	Partial Diesel Particulate Filter	
Scheme		
Dimension and Weight	L : 700 mm, D : 200 mm, W : 25kg	
Attach type	Muffler substitute type	
Material	<ul style="list-style-type: none"> - DOC : Stainless Steel - PDPF : Stainless Steel / Sintered Metal Fiber 	
Housing	Stainless Steel, Round Type	
Filtering efficiency	> 50%	
Collection capacity	4.8 g/ℓ	

나. 필터와 담체의 제원

Table 3-2와 Table 3-3에 PDPF의 성능을 결정하는 필터와 담체의 공간속도, 셀 밀도 및 기공률 등 주요 제원을 나타내었다.

Table 3-2. Specification of sintered metal layer filter

Size/Volume	174.6mmD × 246 mmL / 5.9 ℓ
Space Velocity	~92,000Hr ⁻¹ (Maximum)
Cell Density	200 cpsi(Cell/in ²)
Foil / Fiber Mat	Stainless Steel / Sintered Metal Fiber
Fiber Diameter	22μm(Average)
Porosity	77%
Thickness : Foil / Fiber Mat	65μm / 300μm

Table 3-3. Specification of front-coated substrate

Size/Volume	174.6mmD × 150 mmL / 3.6 ℓ
Space Velocity	~151,000Hr ⁻¹ (Maximum)
Cell Density	300 cpsi
Foil	Stainless Steel
Foil Thickness	50μm

다. 필터와 담체의 선정

PDPF를 선정할 때 가장 중요한 요소는 매연포집에 따라 필터양단에 걸리는 배압을 최소화하면서 배기정화장치의 효율이 유지되도록 하는 것이다. Fig. 3-1과 3-2에 PDPF섬유질(Fleece Material)의 기공크기에 따른 정화효율을 나타내었다.

필터의 기공이 35μm일 경우 배압은 상대적으로 적으나 배기가스 입자크기에 비해 기공이 너무 크기 때문에 배기가스를 제거할 수 없으며(촉매코팅용 Cordierite는 20μm필터를 사용함), 기공이 12μm일 경우 포집되는 매연보다는 필터 양단에 걸리는 배압에 의해 by-pass되는 매연의 양이 더 많기 때문에 오히려 제거율이 저하된다. 따라서 본 연구에서는 기공의 크기가 22μm인 필터를 선정하였다.

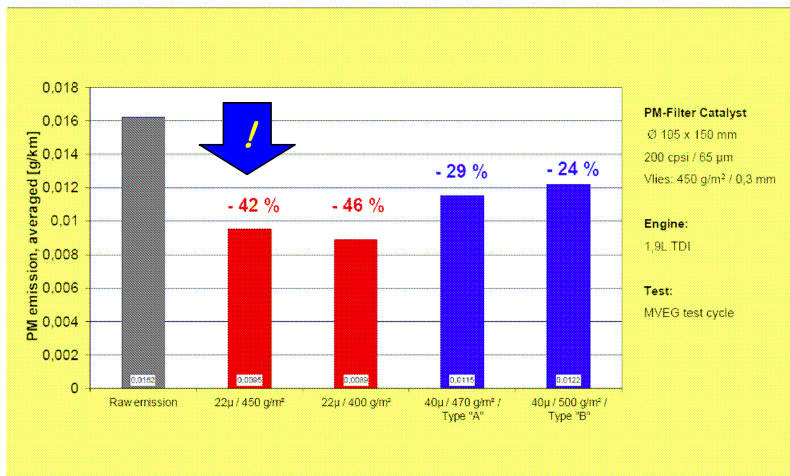
또한 필터두께를 450g/m²으로 선정하였는데, 그 이유는 400g/m²일 경우보다

제거율은 다소 낮지만 두터워짐으로써 열용량 및 기계적 강도가 확보되기 때문이다.



PM-Filtercatalyst efficiency
 Variation of fibre diameter

Fig. 3-6. Pore size selection.



PM Filtercatalyst
 Effect of Fibre diameter on filtration efficiency

Fig. 3-7. Filter density selection.

라. 부분유량정화장치의 촉매코팅

Fig. 3-8에 온도변화와 촉매의 구조에 따른 입자상물질의 제거율을 나타내었다. 전단의 담체 및 부분유량정화장치에 촉매를 코팅함으로써 제거율이 향상됨을 알 수 있다.

- CCRT = DOC + Coated Partial Filter
- CRT = DOC + Uncoated Partial Filter

따라서 부분유량정화장치에 Wash Coating을 적용한 CCRT가 전체 범위에서 성능이 가장 우수하여 부분유량정화장치에 촉매코팅을 도입하였다.

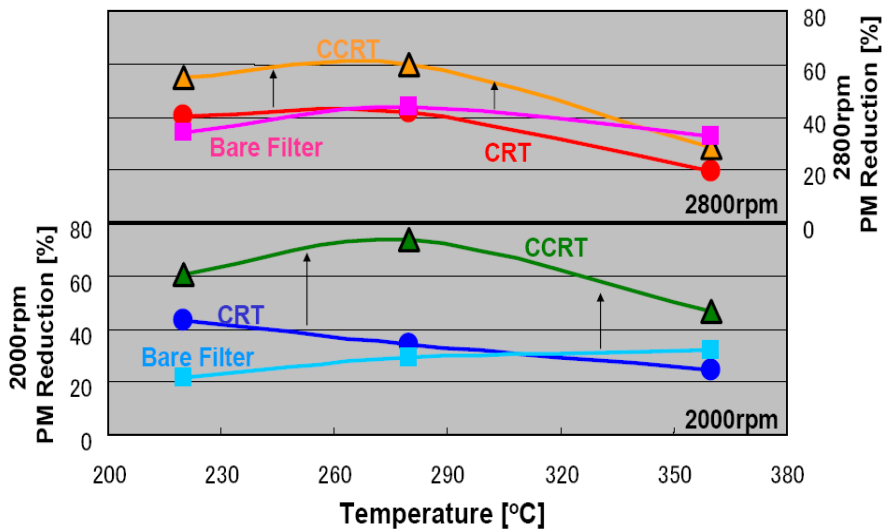


Fig. 3-8. PM reduction effect on exhaust temperature and catalyst type.

제2절 실험엔진 및 장치

1. 실험엔진

실험에 사용된 엔진은 최대출력 140ps, 배기량 3,907cc급이다. Table 3-4에 실험엔진의 제원을 나타내었다.

Table 3-4. Specification of test engine

Type of E/G	D4DA
Displacement(cc)	3,907
Max. output(ps/rpm)	140/3,200
Max. torque(kgf·m/rpm)	38/1,800
Air aspiration	TCi
Type of combustion	DI
Type of cycle / engine array	4Stroke, 4/In-Line
Bore(mm) × Stroke(mm)	104 × 145
Cylinder arrangement	1-3-4-2
Compression rate	17.8
Injection time	BTDC 7 ± 10°

2. 실험장치

엔진 동력계는 440Kw급을 사용하였으며, 동력계(Engine Dynamometer), 동력계 제어장치(Engine Controller), 연료 온도 조절장치, 냉각수 온도 조절장치, 윤활유 온도 조절장치, 흡입 공기유량계, 연료 유량계 및 연료 유량계 등으로 구성되어 있다.

배기가스는 CO, THC, NO_x 및 CO₂를 분석하였으며, CO 및 CO₂는 비분산적외선

분석법(NDIR, Non Dispersive Infrared Absorption), HC는 열불꽃이온화검출기법(FID, Flame Ionization Detector), NO_x는 화학발광법(CLD, Chemiluminescence Detector)을 사용하여 분석하였다.

Table 3-5 및 Fig. 3-9 ~ 3-13에 엔진동력계, 배기분석장치, 입자상물질 측정장치의 제원 및 외관을 나타내었다.

Table 3-5. Specification of test device

Test Device		Specification	Type Approval No.	Manufacture
E/G Dyn. and Test Equipment	E/G Dyno.	440kW	EAE-19	AVL (Austria)
	Fuel flow meter	0 ~ 150kg/h		
	Air flow meter	0 ~ 25,000 ℓ /min		
Emission Test Analyzer	HC Analyzer	FID, 0 ~ 1%	EAA-D21	Pierburg (Germany)
	NO _x Analyzer	CLD, 0 ~ 1%		
	CO Analyzer	NDIR, 0 ~ 3000ppm		
	CO ₂ Analyzer	NDIR, 0 ~ 16%		
	O ₂ Analyzer	NDIR, 0 ~ 25%		
PM Test Equipment	PM measurement system	MDT474	EAP-MD01	AVL (Austria)
	Weighing chamber	22 ± 0.3°C, 45 ± 0.3%		Heraeus
	Balance	0.001mg min.		



Fig. 3-9. View of test engine.



Fig. 3-10. Exhaust gas analyzer .



Fig. 3-11. PM dilution
and sampling system.



Fig. 3-12. Partial diesel particulate filter. Fig. 3-13. Installed PDPF.

엔진동력계를 이용한 배기가스 시험장치는 엔진동력계, 배기가스 분석기 및 입자상물질 측정장치 등으로 구성되어 있다.

배기가스 측정은 실제 차량의 주행패턴을 모사한 ND-13모드에 따라 엔진을 가동하면서 기체상물질은 모드별로 실측한 결과로부터 계산하고, 입자상물질은 부분유량 희석터널을 통하여 전 구간에서 시료를 채취하여 무게를 측정하였다. Fig. 3-14에 배기가스 측정시스템의 계통도를 나타내었다.

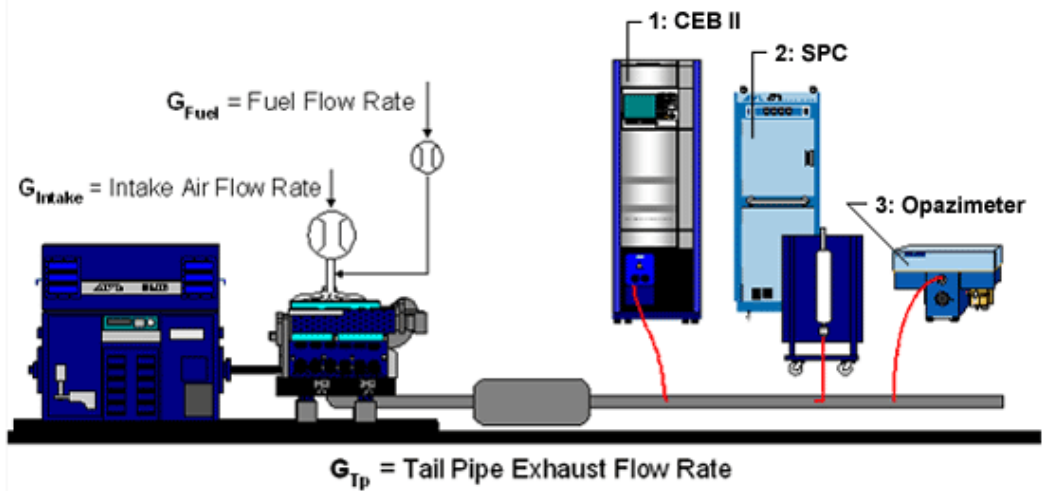


Fig. 3-14. Schematic diagram for exhaust emission test system.

제3절 실험방법

배기정화장치의 성능을 평가하기 위하여 정화시험, 특성시험 및 실차시험을 수행하였다.

1. 배기가스 정화시험

배기가스 정화시험에서는 ND-13 모드 장착 전·후의 제거율을 측정하였다. 입자상물질, CO, HC, NOx 및 유해독성물질은 첨가제를 사용하지 않고 촉매반응에서 유해물질이 생성되지 않았기 때문에 시험항목에서 제외시켰다.

Table 3-15에 ND-13모드의 운전조건을 나타내었다. Table 3-6에 나타낸 바와 같이 PM은 각 모드 당 가중계수 0.01당 6초를 적용하여 측정하였다.

Table 3-6. Schedule of ND-13 mode

Mode No.	Engine Speed (rpm)	Load Rate (%)	Weighting Factor	Mode Length (min)	PM Sampling Time(s)
1	idle	-	0.15	4	90
2	A	100	0.08	2	48
3	B	50	0.10	2	60
4	B	75	0.10	2	60
5	A	50	0.05	2	30
6	A	75	0.05	2	30
7	A	25	0.05	2	30
8	B	100	0.09	2	54
9	B	25	0.10	2	60
10	C	100	0.08	2	48
11	C	25	0.05	2	30
12	C	75	0.05	2	30
13	C	50	0.05	2	30

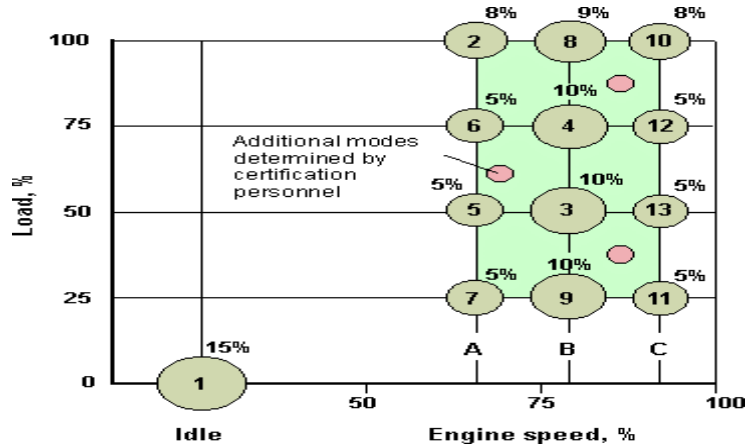


Fig. 3-15. Driving condition of ND-13 mode.

ND-13모드는 Fig. 3-15에 나타난 바와 같이 출력선도에서 최대출력이 50%엔진 속도(N_1)와 최대출력 이후 최대출력이 70%일 때의 엔진속도(N_h)구간을 정하고, 이 구간을 100%로 하여 N1측으로부터 25%를 A, 50%를 B, 75%를 C로 설정하였다. 측정은 엔진속도 A, B, C와 부하 1/4, 2/4, 3/4 및 4/4점에서 모드순서에 따라 실시하였다.

Fig. 3-16에 엔진속도 A, B, C에서의 배기가스 제거율을 나타내었다. 또 식 (1), (2) 및 (3)에 전부하시험 자료로부터 ND-13모드의 회전수 A, B, C를 구하는 과정을 나타내었다.

Table 3-7에 엔진속도 A, B, C에서의 전구간 배기가스 제거율을 나타내었다.

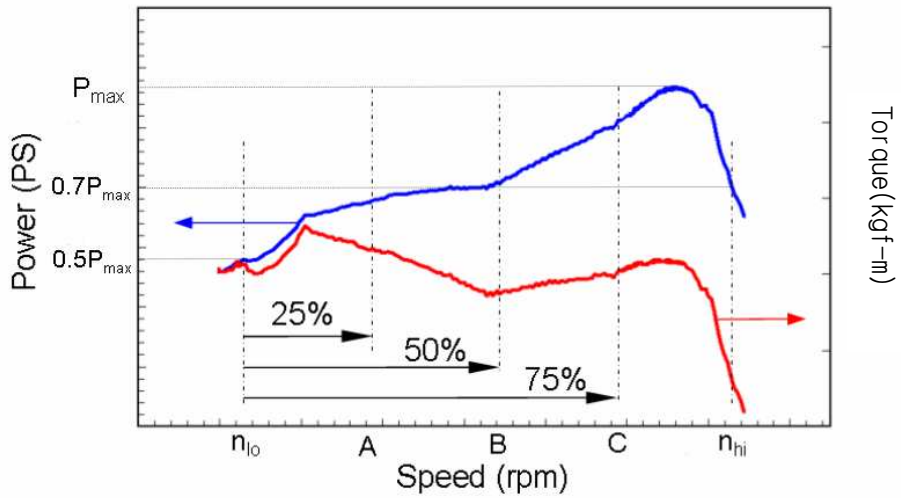


Fig. 3-16. Calculation methods of engine speed A, B, C.

$$\text{Speed A} = N_{low} + 0.25(N_{high} - N_{low}) \quad (1)$$

$$\text{Speed B} = N_{low} + 0.50(N_{high} - N_{low}) \quad (2)$$

$$\text{Speed C} = N_{low} + 0.75(N_{high} - N_{low}) \quad (3)$$

N_{low} 와 N_{high} 는 최대출력(P_{max}) 50%와 70%일 때의 엔진회전수를 의미한다.

Table 3-7. Engine speed A, B, C in full load

Speed A(rpm)	Speed B(rpm)	Speed C(rpm)
1970	2435	2900

2. 내구시험

내구시험에서는 0, 25 및 50시간의 배기가스, 출력 및 연비를 측정하였다. Table 3-8에 Seoul-10 모드의 50시간 내구시험에 따른 장치의 이상 유무 및 배기가스제거율을 나타내었다.

Table 3-8. Schedule of Seoul-10 mode

Mode No.	Engine Speed (%)	Load Rate (%)	Driving Time (min)
1	Idling	0	2
2	40	25	2
3	60	100	2
4	60	50	2
5	Idling	0	2
6	80	100	2
7	80	50	2
8	Idling	0	2
9	100	100	2
10	100	50	2

3. 재생평형온도(BPT) 시험

배기정화장치의 재생평형온도(BPT : Balance Point Temperature)는 엔진필터의 PM포집량과 재생량이 같을 때의 온도로서 나타내며, DPF의 재생성능을 의미한다. 배기온도를 일정하게 유지하면서 PM포집에 따른 배압의 변화를 측정하여 시간의 함수로 표시하고, 엔진의 회전수와 부하를 몇 단계로 변화시키면서 구한 배압 함수들로부터 BPT를 측정하였다.

4. 저온 검댕 포집시험

엔진배기온도가 낮은 영역에서 검댕포집 시 정화장치의 필터내 매연 퇴적에 의한 배기가스 정화시험 저하여부를 평가하기 위하여, 엔진 운전조건은 장치전단에서의 배기온도가 촉매활성화 온도보다 높고 재생평형온도(BPT)보다 낮은 210℃ 정도에서 운전하였으며, 엔진배기온도 운전조건에서 10시간 이상 운전하여 필터 내에서 매연이 재생되지 않고 퇴적되는 현상에 의한 장치특성을 분석하였다.

- 장치전단 배압 실시간 측정
- 10분 간격으로 매연측정
- 30분 간격으로 입자상물질측정

5. ETC 모드에 의한 배기가스 정화시험

도로 주행시 장치의 특성상 급가속 등에 의해 대기 중으로 매연이 배출되는지 여부를 측정하기 위하여 과도한 운전조건이 있는 Transient 모드인 ETC 시험방법으로 입자상물질의 제거율을 평가하였으며, 시험방법은 Fig. 3-17의 엔진회전속도와 부하를 갖는 ETC 모드로 배기가스의 정화효율을 측정하였다.

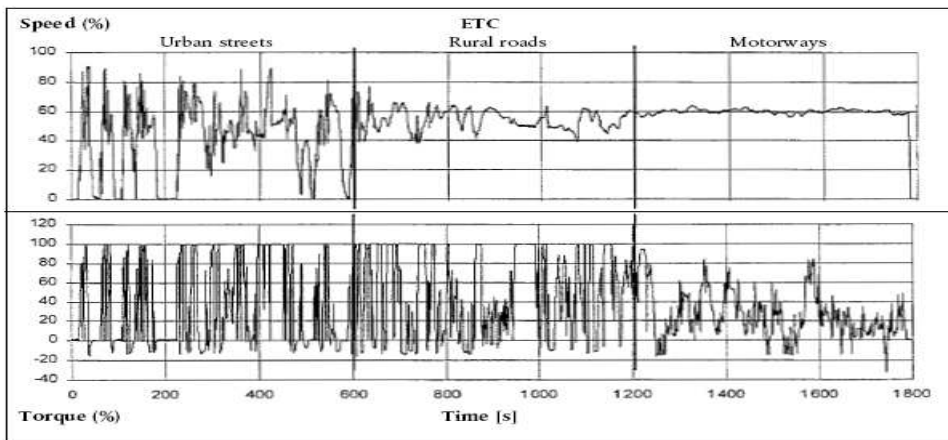


Fig. 3-17. Schedule of ETC mode.

6. 매연시험(Lug down-3 모드)

실차의 매연부하시험인 Lug-Down 3모드를 엔진동력계상에서 재현하여 매연제거율을 평가하였다.

매연은 광투과방식으로 측정하였다. 엔진 전부하상태에서 엔진회전수를 정격회전속도(Rated speed)의 100, 90 및 80%로 조절하며, 장치 장착 전·후의 매연 제거율을 측정하였다.

7. 실차시험

가. 실험차량

가속 조건에서 시험차량의 성능을 평가하기 위하여 매연이 과다 배출되고 주행거리가 30,000km 이상인 차량을 선정하였다. 30,000km 주행 후 일일평균 배기온도가 250℃ 이상이 10% 미만으로 15,000km 이상 주행시험을 추가로 실시하였다. 시험차량은 엔진출력이 크고, 과급기(Turbocharger)와 중간냉각기(Intercooler)가 장착된 TCI방식이어서 엔진형식 측면에서 배기량이 크고 배기온도가 낮다.

Fig. 3-18 및 3-19에 실차시험 차량과 차량에 장착한 부분유량정화장치의 모습을 나타내었다.



Fig. 3-18. View of test vehicle.



Fig. 3-19. View of PDPF.

나. 실험방법

실차주행의 주행속도분포(시간기준)는 30km/hr이하 30%, 30~60km/hr 30% 및 60km/hr이상 40%로 구성하였다.

Fig. 3-20에 실험차량의 주행노선을 나타내었다.

- ① 저속운전구간(30 km/hr 이하) 및 중속운전구간(30~60 km/hr)
부천-39번 국도-42번 국도-39번 국도-21번 국도-23번 국도-목포
1번국도-29번 국도-24번 국도-1084번 국도-3번 국도-2번 국도-부산
- ② 고속운전구간(60 km/hr 이상)
부산-경부고속도로-중부내륙 고속도로-영동 고속도로-부천



Fig. 3-20. Real road schedule of vehicle test.

장치의 정상작동 여부와 고장 및 파손 등을 확인하기 위하여 장치의 주요 부품을 2주 또는 운행거리 5,000km마다 점검하였다. 매연은 무부하 급가속 측정방법을 이용하여 3회 측정하고, 저장데이터와 자기진단장치를 점검하였다. 또 Lug-Down 3 모드를 이용하여 매연부하검사를 실시하였으며, 자동 기록된 실차의

장치 전단온도, 배압 등 시험자료 등을 분석하였다.

또한, 실차시험에 사용되었던 장치를 선정하여 제거율을 측정하였다. 시험은 ND-13모드로 실시되었고, 입자상물질, 일산화탄소, 탄화수소 및 질소산화물을 측정하였다.

제4장 결과 및 고찰

제1절 제거율시험 결과 분석

1. 기본성능시험

Table 4-1에 실험엔진의 기본성능 시험결과를 나타내었다.

엔진 제원에 표기된 출력은 140 PS이며 장치장착 전에 측정된 엔진출력은 134.9 PS으로 -3.6%의 차이를 보여 기준치인 $\pm 5\%$ 를 충족시켰다.

Table 4-1. Power of test engine

Item	Recommendation value	Test value	Difference	Standard
Max. power(PS)	140	134.9	-3.6%	$< \pm 5\%$

가. 적용차량의 연식제한 선정

적용차량은 1996년 이후의 연식을 선정하였다. 그 이유는 1996년 이전의 차량은 PM에 대한 규제가 없었고, 차량이 10년 이상으로 노후 되어 PM배출이 과다하여 폐차 유도가 타당하고, 과다 배출되는 PM을 처리하기 위해 2종장치를 부착할 경우 장치용적이 커서 비현실적이기 때문이다.

Fig. 4-1에 경유차에 적용하는 NOx/PM를 나타내었다. 1996년 규제에서는 NOx 11.0 g/kwh, PM 0.9 g/kwh으로써 NOx/PM비가 12이고, PM제거율 50%를 만족하는 PDPF를 적용할 수 있었으며, 이후 연식에서도 NOx/PM비가 18보다 크면 안정적으로 적용될 수 있었다.

PM촉매 코팅필터(Partial Filter) 길이와 NO₂/Soot Ratio에 따른 PM효율을 나타낸 그래프에서 검댕 1g당 NO₂ 배출량이 많은 대형차량이 PM 제거율이 좋으며, 필터의 길이가 길수록 PM제거율도 증가함을 볼 수 있다.

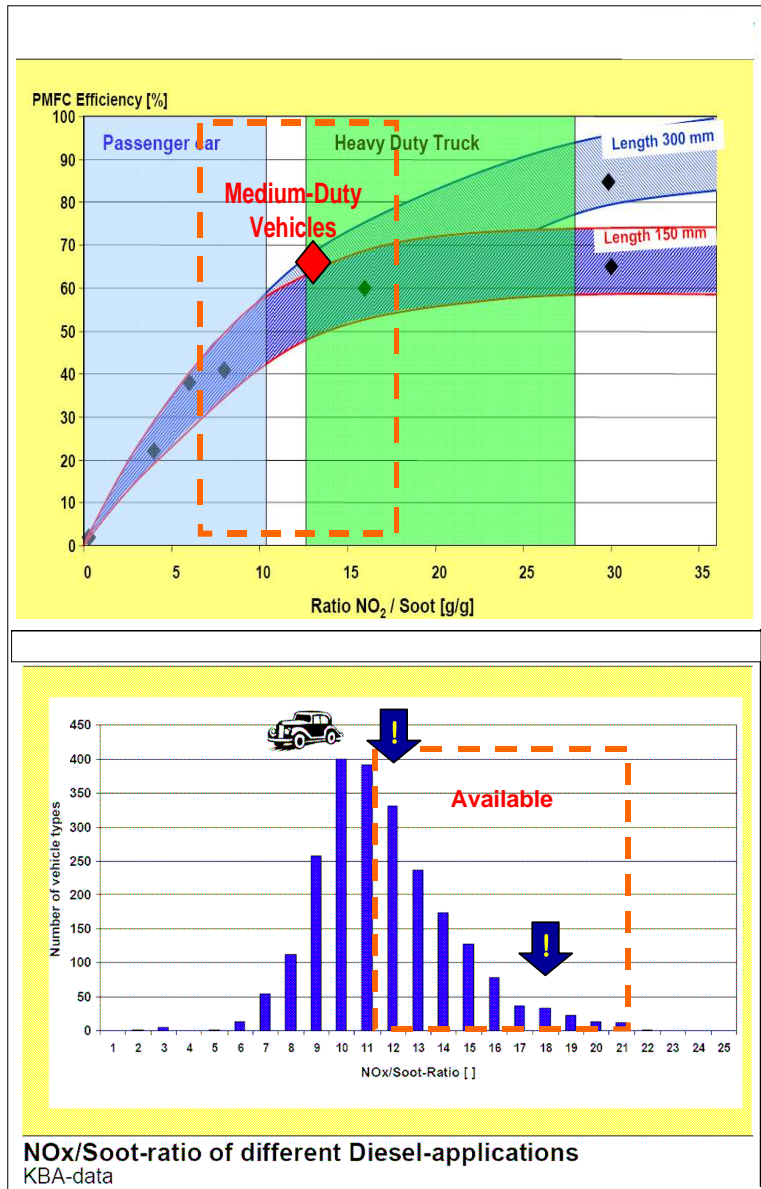


Fig. 4-1. NOx/Soot ratio of different Diesel applications.

2. 제거율시험

제거율시험은 ND-13모드로 수행하였으며, PM, CO, HC 및 NOx을 측정하였다. Table 4-2와 Fig. 4-2, Fig. 4-3은 제거율시험의 결과를 나타낸 것이다.

제거율은 PM 56.3%, CO 98.3% 및 HC 93.6%로 높게 나타났으나, NOx는 4.3% 정도 감소하는 경향을 보였다. 엔진출력과 연료소비율은 1%이하의 변화를 보였다.

Table 4-2. Emission reduction rates of PDPF

Items	Without PDPF	With PDPF	Reduction rate	Test Mode
PM(g/kWh)	0.112	0.049	56.3%	ND-13 Mode
CO(g/kWh)	0.82	0.014	98.3%	
HC(g/kWh)	0.217	0.014	93.6%	
NOx(g/kWh)	5.308	5.079	4.3%	
Engine power(PS)	134.9	134.5	0.3% ↓	FULL LOAD
Fuel consumption (g/kWh)	232.3	232.9	0.26% ↓	

PDPF는 유입된 PM의 일부를 필터에 포집하고, DOC 및 PDPF에 코팅된 산화촉매가 NO를 NO₂로 산화시키면, 생성된 NO₂를 이용하여 PDPF에 포집된 PM을 CO₂로 산화시킴으로써 PM을 연속적으로 재생시킨다.

PDPF 전단에 위치한 DOC는 산화촉매로서 NO가 NO₂로의 전환반응을 보조할 뿐 아니라 PM을 구성하는 SOF(Soluble Organic Fraction)를 산화시켜 PM을 일부 저감시키는 동시에 배기가스 온도를 상승시킴으로써 PDPF상에서의 PM 산화반응을 촉진시키는 작용을 수행한다.

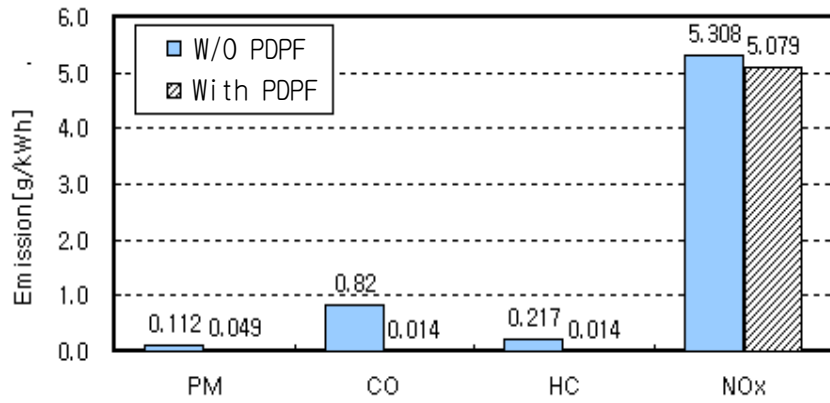


Fig. 4-2. Emission results of PDPF.

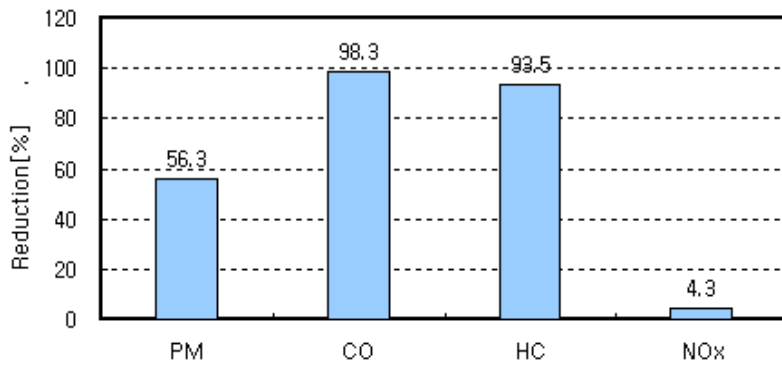


Fig. 4-3. Emission reduction of PDPF.

3. 입자상물질 포집율(50% 이상)의 세부산출 근거

Fig. 4-4은 에 PDPF 길이에 따른 PM제거율을 나타낸 것이다. 필터의 길이가 200mm이상일 경우 PM제거율은 50% 이상으로 나타나 본 장치에서는 충분한 정화능을 확보하기 위해 필터담체길이 246mm, 직경 174.6mm로 선정하였다. 필터부피가 대상엔진 배기량(4Liter급)의 1.5배로 부피비 1.5는 설계추천치인 1~1.5사이의 최대값으로 안정성이 최대로 확보되었다.

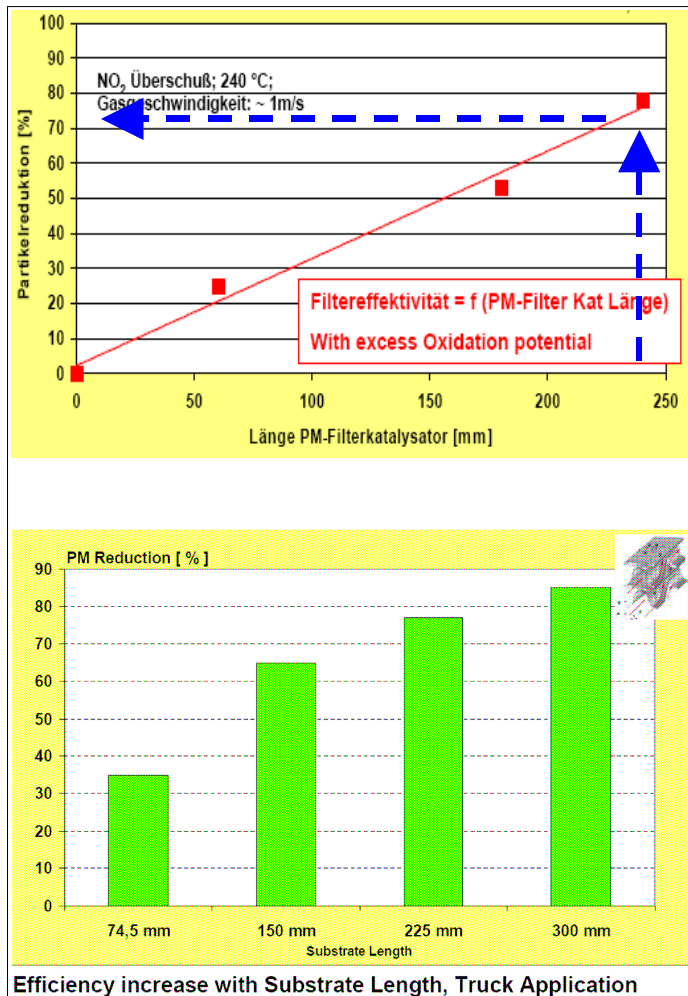


Fig. 4-4. PM reduction rate on PDPF length.

제2절 내구시험

1. 내구시험 결과분석

장치의 내구성을 알아보기 위하여 Seoul-10 모드로 50시간 이상 실시하였으며, Fig. 4-5와 Fig. 4-6에 장치 내구시험(Seoul-10 모드)에 따른 엔진 운전조건(회전속도, 토크)과 PDPF장치 전단에서의 배기온도 및 압력을 나타내었다. 그림에서 보면 내구성시험인 Seoul-10모드로 시험할 때 장치 전단의 온도는 최고 550℃정도이고 장치 전·후단에 걸리는 배압은 최고 240mbar로 측정되어 장치 성능저하에 미치는 영향은 없는 것으로 확인되었다.

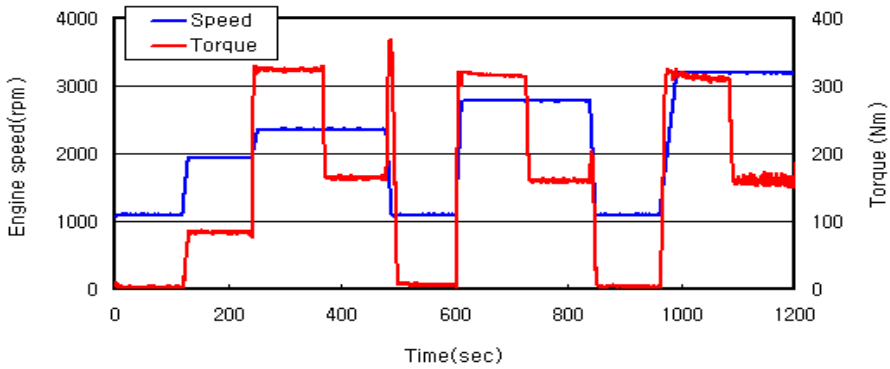


Fig. 4-5. Speed and torque of test engine in Seoul 10 mode.

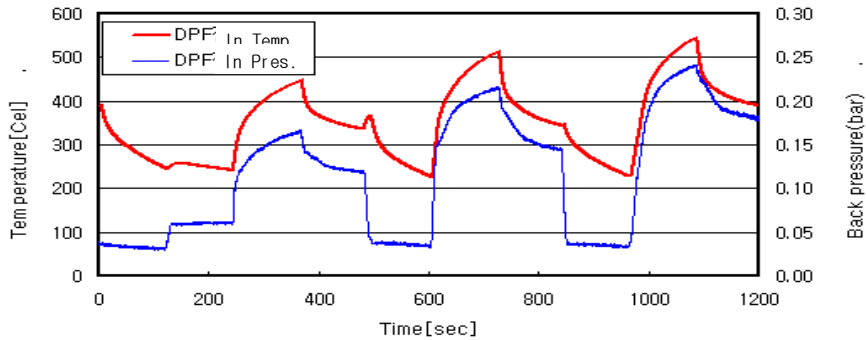


Fig. 4-6. Temperature and pressure of pre PDPF in Seoul 10 mode.

Table 4-3은 장치장착시간에 따른 배기가스 제거율이다. PM, CO 및 HC제거율은 50시간 특성시험 동안 큰 변화가 없었고, 50시간 이후에도 약 98%, 93%를 나타내어 장치의 재생성능의 변화는 없었다. 낮은 NOx저감 효율도 나타났으며 이는 NO₂가 배기가스 중의 일부 탄소와 결합하여 재생되었기 때문이다.

Table 4-3. Reduction results of emissions by driving time

Item		0 hr	25 hr	50 hr	Without PDPF
PM	Test value(g/kWh)	0.049	0.049	0.048	0.112
	Reduction Rate(%)	56.3	56.3	57.2	-
CO	Test value(g/kWh)	0.014	0.013	0.015	0.82
	Reduction Rate(%)	98.3	98.4	98.2	-
HC	Test value(g/kWh)	0.014	0.014	0.016	0.217
	Reduction Rate(%)	93.6	93.5	92.6	-
NOx	Test value(g/kWh)	5.079	5.201	5.12	5.308
	Reduction Rate(%)	4.3	2.0	3.5	-

Table 4-4는 PDPF 장착전과 장착후 0시간, 25시간, 50시간에 있어서 출력과 연료소비율의 변화를 나타낸 것이다. 또한 50시간 경과 후 PDPF를 탈착한 상태에서 출력과 연료소비율의 변화를 비교하였다. 비교결과 PDPF 장착 전·후 출력 및 연료소비율의 변화가 미미하게 변화가 있었으나 장치 사용상에는 전혀 지장이 없었으며, 또한 제 2종 배기가스 정화장치 성능 기준인 ±5% 이내로 기준치를 만족시킴을 알 수 있었다.

Table 4-4. Pmax and Fuel Consumption results by with or w/o PDPF

Item		Without PDPF	With PDPF at 0 hr	With PDPF at 25 hr	With PDPF at 50 hr	Without PDPF at 50 hr
Max. power (Pmax)	Measurement value(PS)	134.9	134.5	133.9	134.7	135.1
	Variation(%)	-	0.30	0.74	0.15	-0.15
F/C at Pmax	Measurement value(g/kWh)	232.3	232.9	233.1	234.1	232.1
	Variation(%)	-	-0.258	-0.344	-0.775	0.086

따라서, 단면적의 일부분이 Open 되어 있는 PDPF는 PM Filtering을 50~60% 수준으로 낮추는 대신 배기가스의 유동에 대한 저항을 낮춤으로써 엔진이나 차량에 작용하는 부하가 작고, DPF 대비 차량성능 및 연비측면에서 더 우수한 성능을 보이며, 과도한 배압상승이 발생되지 않아 필터의 내구측면에서도 우수하므로 상대적으로 운행온도조건이 낮은 차량에 적합한 매연정화장치임을 알 수 있다.

2. 장치의 내구성

Fig. 4-7은 엔진동력계상에서 부분유량정화장치에 대한 내구시험을 약 2900시간 동안 가동하며 열화에 의한 변화를 나타낸 것이다. 열화에 의한 제거율의 저하와 배압 상승율은 큰 변화 없이 내구성을 갖는 것으로 나타났다. 그러나 장치의 내구성은 연료의 황함량과 매연의 과다 배출 여부에 따른 영향을 받기 때문에 장치의 적용에 있어서 고려되어야 할 것으로 사료된다.

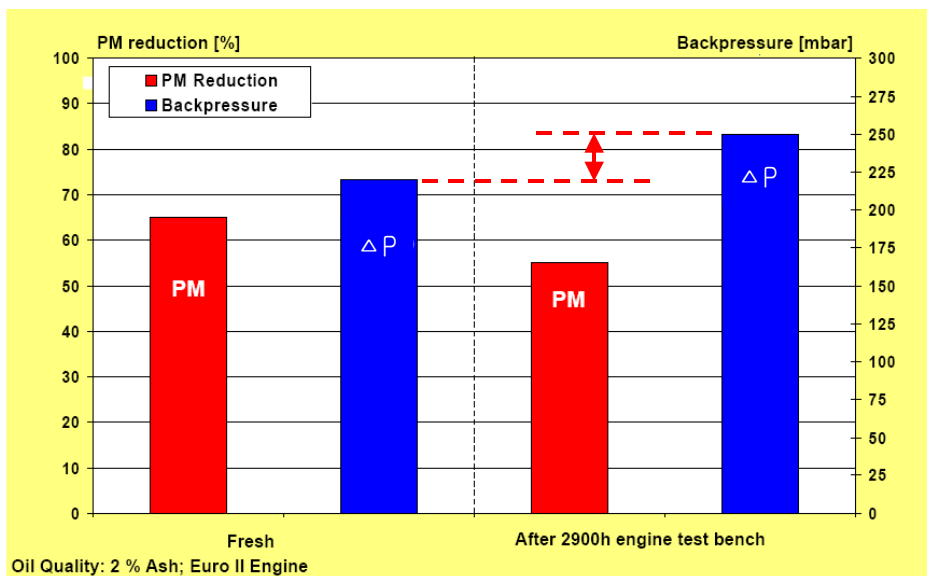


Fig. 4-7. Back pressure variation by endurance test.

제3절 재생평형온도 시험

1. 재생평형온도(Balance Point Temperature)시험

본 연구에서는 배기가스 온도를 일정하게 유지시켜가면서 PM 포집에 따른 배압의 변화를 측정하여 시간의 함수로 표시하였으며, 스모크가 농후한 영역인 엔진 회전수 1200rpm에서 BPT시험을 수행하였다.

Fig. 4-8에 엔진의 속도와 부하를 몇 단계로 변화시키면서 구한 배압 함수들로부터 BPT를 측정하여 나타내었다. Fig. 4-9는 배기온도 290℃ 부근에서 배압이 감소하는 경향을 나타내고 있다. 따라서 BPT는 약 270℃에서 290℃사이로 추정할 수 있으나, 시험 시 사용연료, 시험엔진의 종류 혹은 시험시의 매연농도와 질소산화물농도 등과 같은 시험조건에 따라 다르게 나타나는 것으로 사료된다.

재생평형온도는 재생이 이루어지는 필터에 포집되는 매연의 양과 산화되는 양이 일치하는 곳의 온도로 장치의 성능 발휘여부를 결정하는 요소로써 장치 적용을 위한 주행패턴 결정의 필요조건이다.

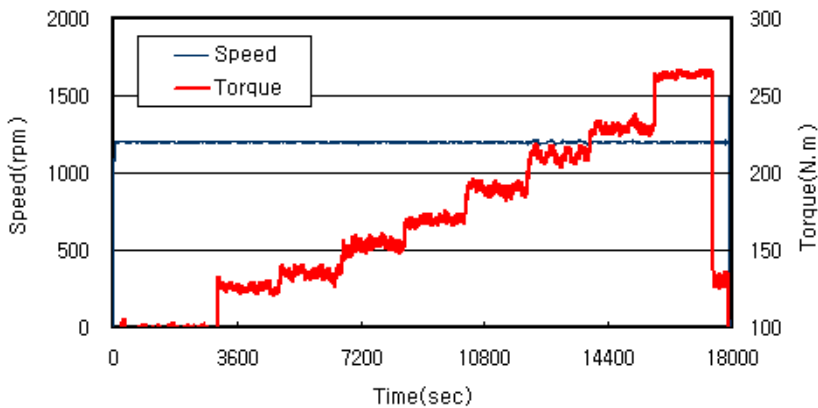


Fig. 4-8. Speed and torque in BPT test.

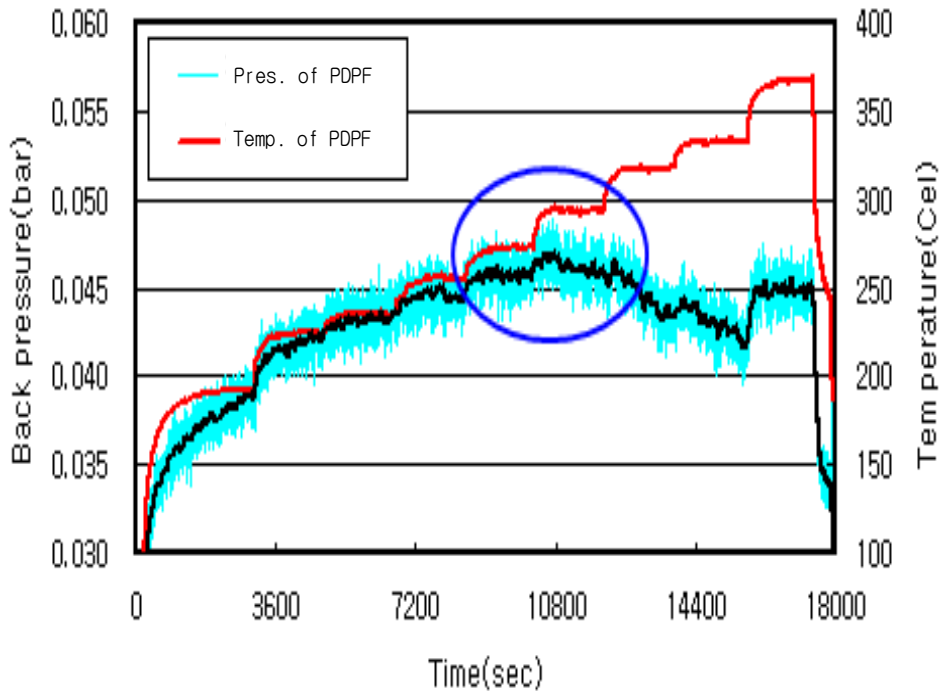
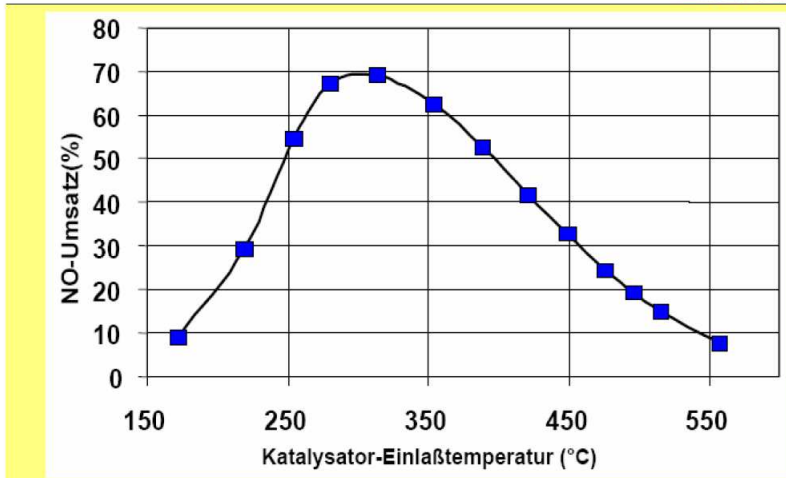


Fig. 4-9. Back pressure with temperature of pre PDPF.

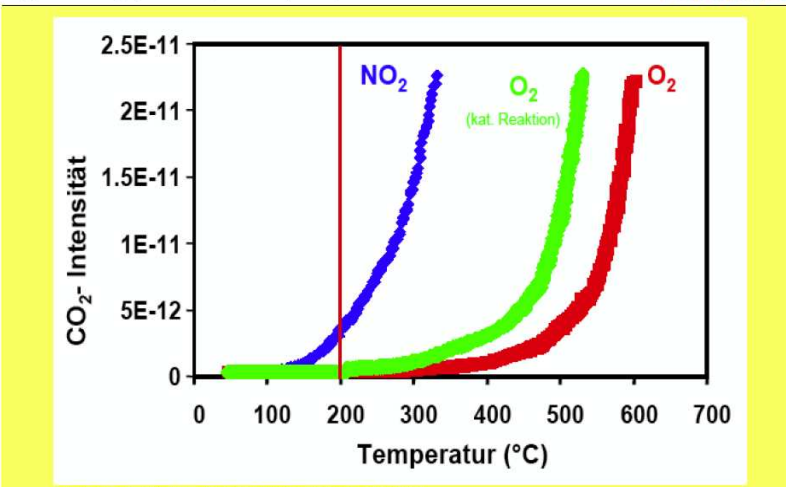
2. NO₂에 의한 매연 재생가능온도

NO₂에 의한 Carbon의 재생은 300°C부근에서 정점을 이루며 이보다 저온영역에서는 재생효율이 떨어지게 되는데, Fig. 4-10에서 보면 배기온도가 180°C이상의 온도 조건에서 Carbon 재생에 필요한 NO₂ 전환율이 나타나기 시작하는 것을 알 수 있으며, NO₂와 Carbon는 200°C 이상에서 반응하여 CO₂로 산화된다. 따라서 DOC활성과 NO₂에 의한 PM 재생을 고려할 때 PDPF시스템의 적용온도 조건은 210°C 이상이 25% 이상이면 가능할 것으로 판단된다. 이 조건은 동절기의 차량 온도분포도 만족하였다.



Quelle: Dr. C. Görsmann / Johnson Matthey / München Mai 2003

Influence of Temperature on Formation of NO to NO₂



Quelle: Dr. C. Görsmann / Johnson Matthey / München Mai 2003

Einfluß der Temperatur auf die Reaktionsgeschwindigkeit von NO₂ mit Russ

Fig. 4-10. Relationship of NO₂ and regeneration temperature.

3. 재생가능온도(Light-Off Temperature)

촉매의 산화력을 대변하는 CO의 Conversion LOT는 약 150℃로, 배기온도가 150℃이상일 때는 SOF에 대한 본격적인 산화가 이루어짐을 Fig. 4-11에서 나타내고 있다. LOT의 기준은 제거율 50%인 기준으로 정하였으며, 90%이상의 제거율 성능을 보이는 지점은 약 160℃를 나타내었다. 또한 장기 내구성능을 위해 추가로 30시간 2,000ppm의 황으로 급속 촉매 피독 시킨 후에도 LOT는 거의 변화가 없었으나, 최종 제거율만 90%에서 80%로 저하하였다. 그러나 실제 재생성능을 나타내는데는 LOT가 중요하므로 최종 내구성능 저하는 재생에 큰 영향을 미치지 않을 것으로 판단한다.

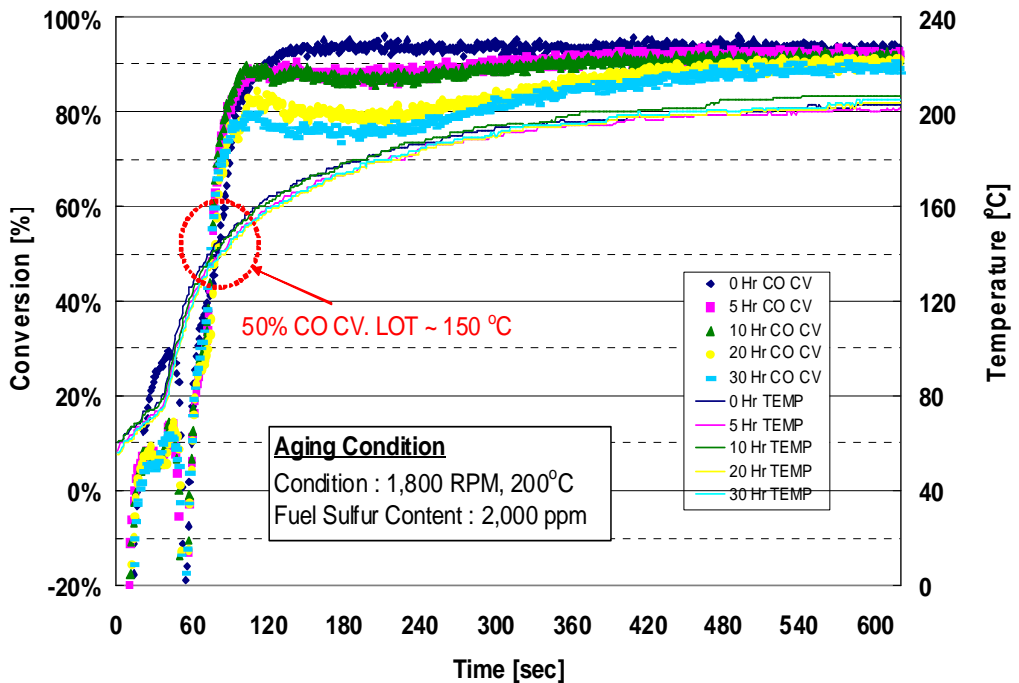


Fig. 4-11. Regeneration possibility temperature of SOF.

제4절 저온 검댕 포집시험

엔진배기온도가 낮은 영역에서 필터의 검댕 제거율을 측정하기 위한 엔진 운전 온도는 장치전단의 배기온도가 촉매활성화 온도보다 높고 재생평형온도(BPT)보다 낮은 210℃를 선정하였다. 또한 210℃에서 10시간 이상 운전하여 필터에 검댕이 재생되지 않고 축적되는 현상을 분석하기 위하여 장치전단의 배압을 실시간 측정하고, 매연을 10분 간격으로 측정하였으며, 입자상물질을 30분 간격으로 측정하였다.

Fig. 4-12에 저온 검댕포집시험의 엔진 회전속도와 토크를 나타내었다. 엔진 회전속도 1,200rpm, 토크 130Nm를 유지하며 시험하였다.

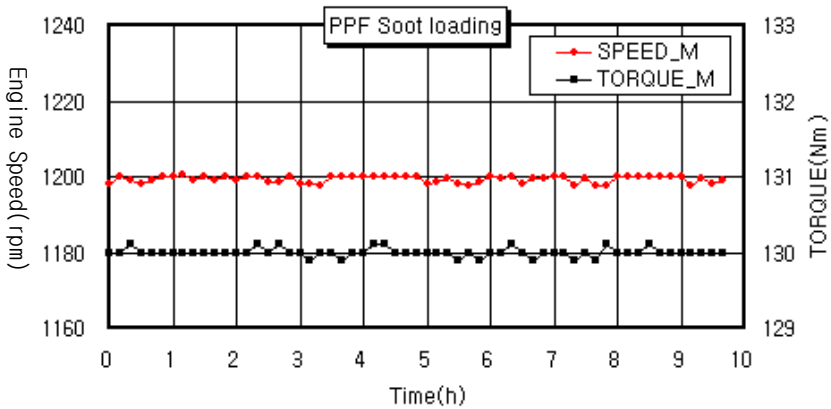


Fig. 4-12. Speed and torque in soot loading test.

Fig. 4-13에 저온 검댕포집시험 시 장치 전·후단의 엔진 배기온도를 나타내었다. 처음에는 220℃에서 출발하여 10시간 후에는 7℃정도 상승하여 227℃가 되었고, 전 시험기간 동안 엔진 배기온도는 220~230℃로 유지되었다.

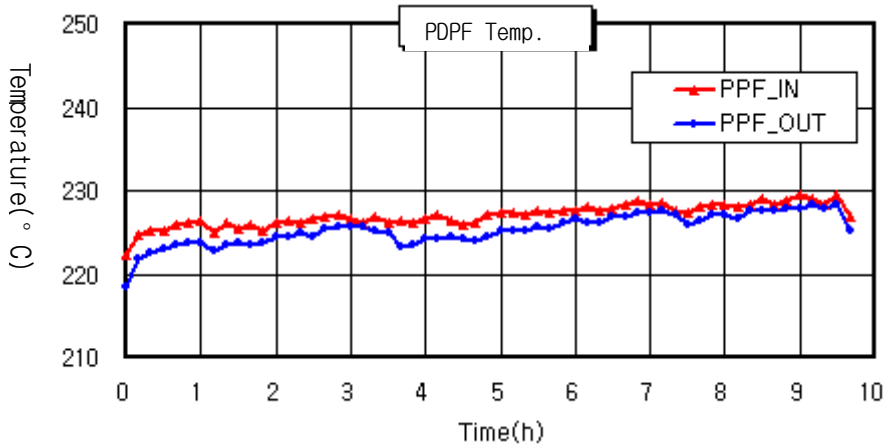


Fig. 4-13. Temperature of pre and after PDPF.

Fig. 4-14에 저온 검댕포집 시험 시 장치전단의 배압을 나타내었다. 10시간 동안의 운전하면서 장치후단에서 10분 간격으로 배압을 측정하였다. 필터에 검댕이 퇴적됨에 따라 배압이 약간씩 증가하여 초기배압 0.034bar에서 9시간 후 0.052bar로 증가하였다.

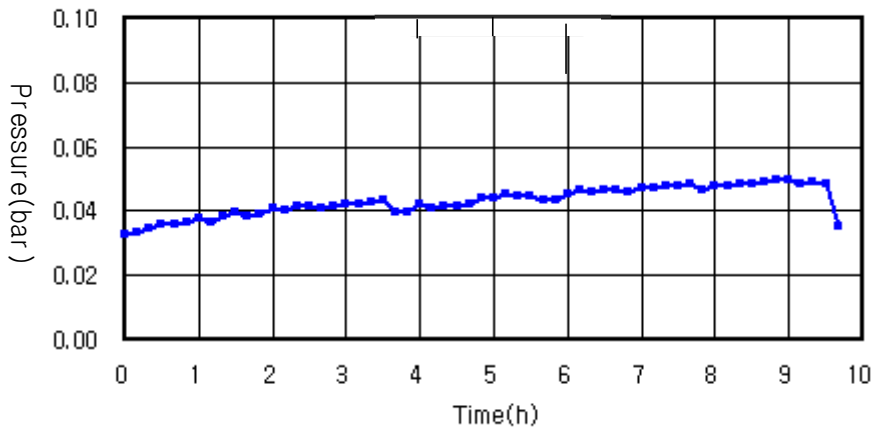


Fig. 4-14. Back pressure of pre PDPF.

Fig. 4-15에 저온 검댕포집시험의 경과시간에 따른 배출가스의 매연농도를 나타내었다. 10시간 동안 장치후단에서 30분 간격으로 매연농도를 측정한 결과,

매연은 0.8 ± 0.1 FSN(filter smoke number)수준에서 안정적으로 배출되었다.

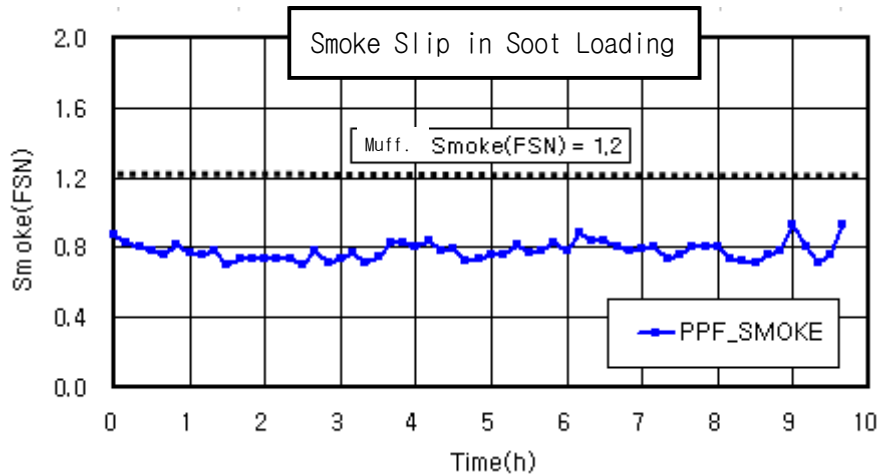


Fig. 4-15. Smoke results of after PDPF.

Fig. 4-16에 저온 매연저감시험의 경과시간에 따른 배출가스의 매연 저감율을 나타내었다. 10시간 동안 장치후단에서 매연농도는 증가하지 않았고 배출가스의 매연농도는 필터장착전보다 20~43%수준으로 저감되어 배출되었다.

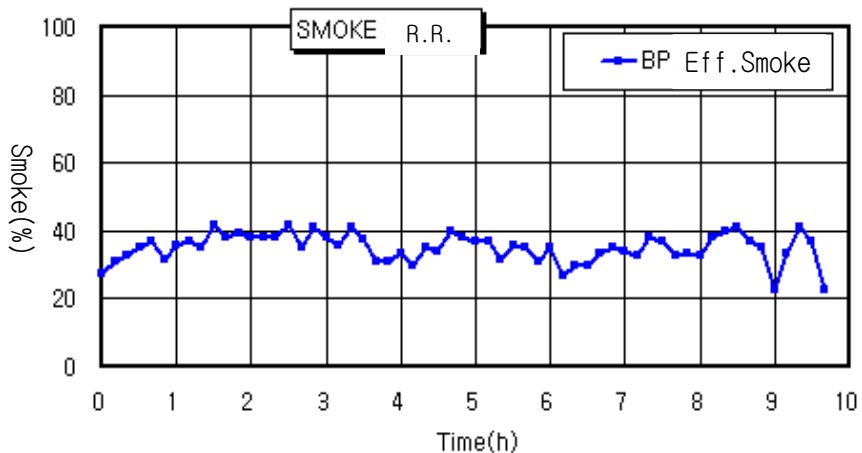


Fig. 4-16. Smoke reduction rates.

Fig. 4-17에 저온 매연저감시험의 경과시간에 따른 장치 후단에서의 PM배출량을 나타내었다. PM배출량은 필터장착 전에 3.18g/h이었으나, 장착 후 10시간 동안 1.5g/h수준을 유지하였다.

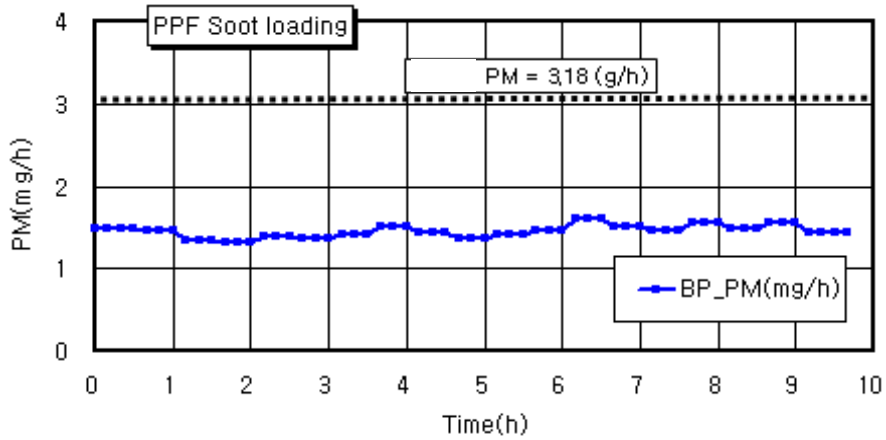


Fig. 4-17. PM results of after PDPF.

Fig. 4-18에 저온 매연저감시험의 경과시간에 따른 장치 후단에서의 PM제거율을 나타내었다. 10시간 운전하는 동안 PM제거율은 50~58%범위를 나타내었다.

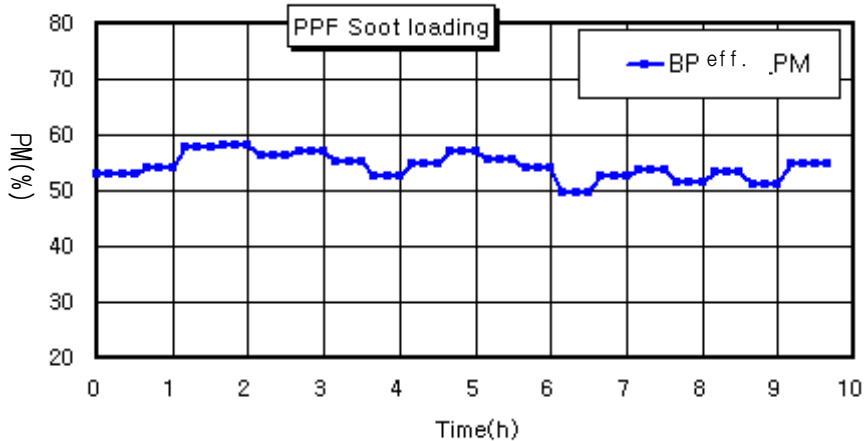


Fig. 4-18. PM reduction rates.

제5절 ETC 모드에 의한 배기가스 제거율

1. ETC 모드(European Transient Cycle)

도로주행 시 장치의 특성상 급가속 등에 의해 대기 중으로 매연이 배출되는지 여부를 측정하기 위하여, 과도한 운전조건이 있는 Transient 모드인 ETC 시험방법으로 입자상물질의 제거율을 평가하였다.

Fig. 4-19에 ETC 시험의 엔진회전수를 나타내었다. ETC 모드에서 엔진회전수는 600초까지는 1,000~3,000rpm으로 불안정하였으나, 600초 이후에는 $2,400 \pm 200$ 에서 $2,400 \pm 100$ rpm으로 근접하며 안정되었다.

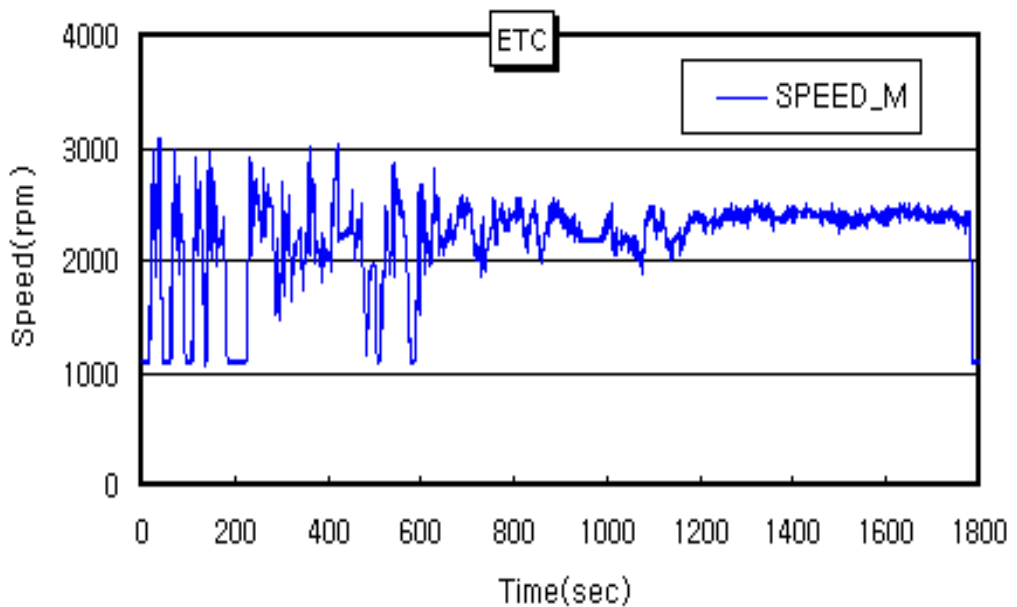


Fig. 4-19. Engine speed in ETC mode.

Fig. 4-20에 ETC 시험의 토크 변화를 나타내었다. ETC 모드에서 엔진 토크는 0~370N.m범위에서 안정성을 나타내었다.

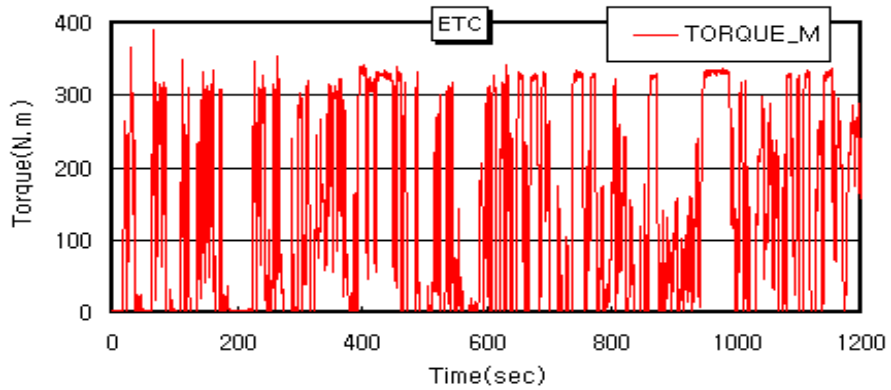


Fig. 4-20. Torque in ETC mode.

Fig. 4-21에 ETC 시험의 입자상물질 샘플링 유량을 나타내었다. 배출가스 중의 입자상물질 샘플링 유량은 초기 $0.2 \pm 0.1 \text{g/s}$ 에서 600초 경과 후 $0.2 \pm 0.05 \text{g/s}$ 로 안정되었다.

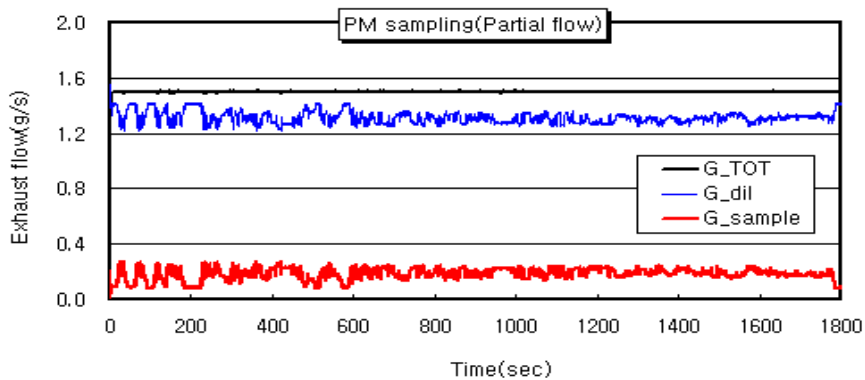


Fig. 4-21. Exhaust flow of partial flow system.

Fig. 4-22에 유럽 transient cycle을 나타내었다.

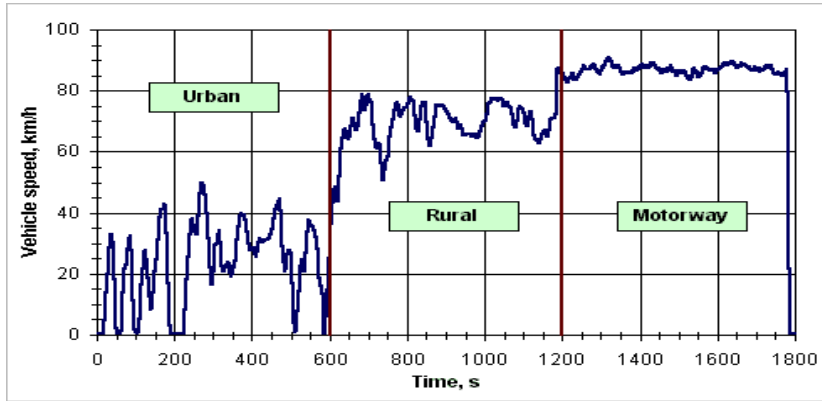


Fig. 4-22. European transient cycle.

2. 배기가스 제거율

Table 4-5와 Fig. 4-23에 ETC 시험의 배기가스 제거율시험 결과를 종합하여 나타내었다. PM제거율이 63.3%, CO는 91.0%, HC는 96.6%로 높게 나타났으나, NOx 제거율은 1.8% 감소하였는데, 이러한 결과는 ND-13모드와 유사하다.

PM 제거율이 ND-13모드보다 약 7% 상승한 것은 ETC모드의 특성이 Transient모드이므로 부하가 급격히 증가함에 따라 배압이 상승하고 이때 배기가스가 Open유로보다는 금속성유층을 통과하는 양이 증가되었기 때문이라고 사료된다.

Table 4-5. Emission results by using muffler and PDPF

Item	W/O PDPF	With PDPF	Reduction rate	Test mode
PM(g/kWh)	0.330	0.121	63.3%	ETC mode
HC(g/kWh)	0.464	0.044	91.0%	
CO(g/kWh)	1.428	0.049	96.6%	
NOx(g/kWh)	4.913	4.821	1.85%	

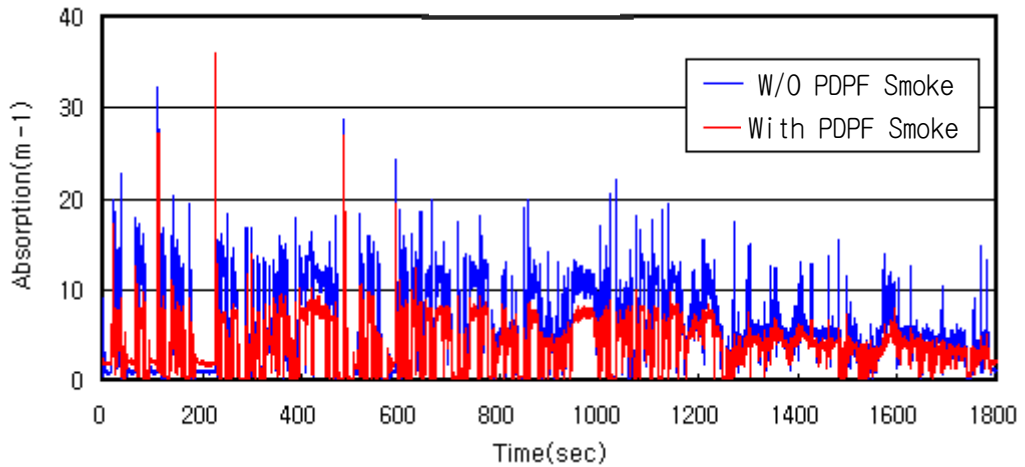


Fig. 4-23. Modal results of ETC.

Table 4-6에 ETC모드의 배기가스 제거율시험 결과를 나타내었다. 여기서 NOx배출량이 저감되지 않는 것은 산화촉매에 의해 배출되는 NO₂가 매연입자와 반응하여 N₂로 전환되지 않고 NO로 전환되었기 때문이다.

Table 4-6. Reduction rates results of ETC mode

Item		PM (g/kWh)	CO (g/kWh)	HC (g/kWh)	NOx (g/kWh)
Muffler	No.1	0.330	1.489	0.431	4.983
	No.2	0.326	1.394	0.470	4.900
	No.3	0.333	1.402	0.491	4.855
	Avg.	0.330	1.428	0.464	4.913
PDPF	No.1	0.118	0.058	0.046	4.846
	No.2	0.125	0.042	0.044	4.825
	No.3	0.120	0.048	0.042	4.791
	Avg.	0.121	0.049	0.044	4.821
Reduction rate(%)		63.3	96.6	91.0	1.8

제6절 매연측정실험

매연측정방식은 여지반사식과 광투과식으로 구분되는데 여지반사식은 자동차 배기가스 330 ± 15cc를 여지에 통과시키면서 배기가스 중의 검댕을 포집하고 빛을 투사하면서 반사량을 측정한다. 검댕 포집량에 따라 투사된 빛의 반사량이 달라지므로 매연농도(%)를 빛의 투과량에 대한 반사량의 비율로서 나타낼 수 있다.

광투과식은 측정셀에 자동차배기가스 일정량을 연속 통과시키면서 빛의 불투과율을 측정하여 매연농도(%)를 나타낸다. 여지반사식과 광투과식의 단위는 같지만 측정방식이 다르고, 여지반사식은 검댕(불연탄소)만 측정하는 반면, 광투과식은 검댕 외에도 백연, 청연 및 미세분진까지 포함하여 측정한다.

엔진 동력계상에서 배기가스 정밀검사 시 측정하는 매연부하시험과 유사한 방법으로 매연제거율을 평가하기 위하여 Fig. 4-24의 lug-down 3 mode를 이용하여 매연을 측정하였다. 시험방법은 엔진 전부하상태에서 장치장착 전·후의 엔진회전수와 엔진정격회전속도(Rated Speed)의 100, 90 및 80% 상태에서 장치장착 전·후의 매연제거율을 측정하였다. 매연은 여지반사식 및 광투과식으로 측정하였다. Table 4-7에 lug-down 3 mode의 엔진회전수와 토크를 나타내었다.

Table 4-7. Engine speed and torque of lug-down 3 mode

Item	Test mode condition		Test result	
	SPEED	TORQUE	SPEED (rpm)	TORQUE (Nm)
1mode	100%	WOT	3200	319
2mode	90%	WOT	2880	322
3mode	80%	WOT	2560	322

Table 4-8과 4-9에 lug-down 3 mode의 매연제거율을 나타내었다. 매연제거율은 여지반사식은 50.4%, 광투과식은 54.4%이었다.

Lug-down시험의 측정지점은 전부하(WOT : Wide-open Throttle)지점이기 때문

에 필터에 포집된 매연이 외부로 유출(blow-off)될 수 있다. 1회 시험에서는 매연 제거율이 다소 저하되었으나, 2회, 3회 시험에서는 매연제거율이 향상되었다. 배기유량이 최고인 WOT지역에서 광투과식으로 측정할 경우 초기에는 매연저감률이 저하되나, 2회 이후부터는 정상 복귀하므로 PDPF장치의 유출은 실차에서 문제되지 않을 것으로 판단한다.

Table 4-8. Smoke reduction rates in lug-down 3 mode(Paper type)

Item		Muffler				PDPF				R.R. (%)
		NO.1	NO.2	3회	평균	1회	2회	3회	평균	
Test 1	1mode	2.25	2.28	2.23	2.25	1.26	1.27	1.25	1.26	44.08
	2mode	1.84	1.91	1.99	1.91	1.05	1.06	1.1	1.07	44.08
	3mode	1.77	1.84	1.84	1.82	0.86	1	1.07	0.98	46.24
Test 2	1mode	2.16	2.14	2.26	2.19	1.15	1.11	1.11	1.12	48.63
	2mode	1.91	1.9	1.96	1.92	0.94	0.88	0.78	0.87	54.94
	3mode	1.93	1.93	1.82	1.89	0.86	0.83	0.83	0.84	55.63
Test 3	1mode	2.13	2.21	2.19	2.18	1.01	1.01	1.04	1.02	53.14
	2mode	1.86	1.9	1.97	1.91	0.91	0.9	0.83	0.88	53.93
	3mode	1.97	1.82	1.81	1.87	0.88	0.86	0.91	0.88	52.68
Total Average Reduction Rate										50.4%

Table 4-9. Smoke reduction rates in lug-down 3 mode(Light extinction)

분 류		Muffler (Absorption, m-1)	PDPF (Absorption, m-1)	R.R. (%)
Test 1	1mode	14.05	8.10	42.35
	2mode	11.44	5.89	48.54
	3mode	11.17	5.35	52.09
Test 2	1mode	13.92	6.26	55.05
	2mode	11.62	4.74	59.18
	3mode	11.40	4.85	57.47
Test 3	1mode	13.79	5.55	59.78
	2mode	11.24	4.74	57.83
	3mode	11.23	4.75	57.70
Total Average Reduction Rate				54.44

Fig. 4-24에 Log-Down 3모드 측정 시 엔진동력계상에서 이루어지는 엔진속도와 부하의 변화를 나타내었다.

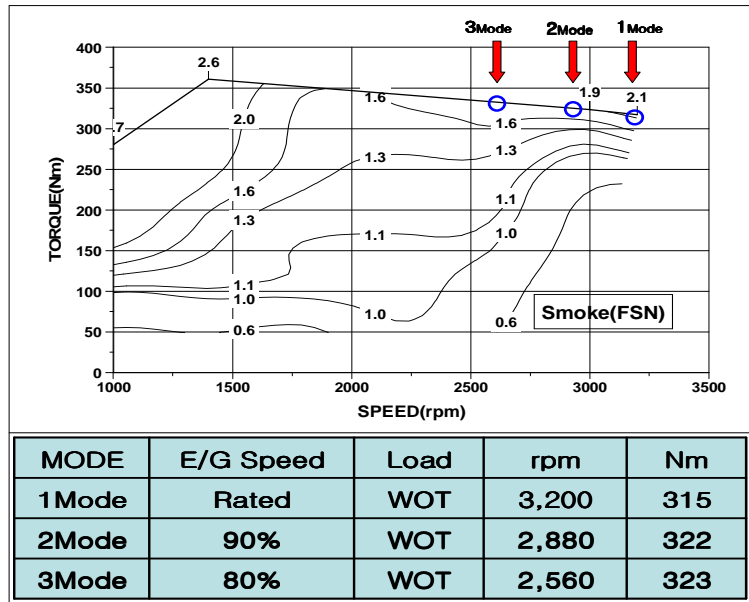


Fig. 4-24. Log-down 3 mode map.

제7절 실차시험에 따른 제거율시험 결과분석

1. 주행패턴에 따른 온도분포

Fig. 4-25에 실차시험의 주행패턴에 따른 배기온도분포를 나타내었다. 실차시험의 주행속도는 1~30, 30~60 및 60~90km/h에서 실시하였다. 1~30km/h에서는 최대 65%에서 최소 20%까지 주행하였으며, 1~30km/h에서의 평균주행온도는 120~170℃이었다. 30~60km/h주행에서 평균주행온도는 170~200℃이고 60~90km/h주행에서는 210~240℃이었다.

주행속도가 증가함에 따라 배기온도가 증가하는 경향을 나타내었다. 화살표로 표시한 1~30km/h구간과 60~90km/h구간에서 배기온도가 높게 나타났는데, 두 구간 모두 최고온도와 평균온도가 동시에 높아지지 않고, 주행속도와 배기온도간의 상관성이 낮음을 알 수 있다.

차량에 필터를 장착한 경우 배기온도는 순간 주행속도보다는 주행속도의 유지 시간에 더 민감하게 변하는 것을 알 수 있다. 차량선택 시 주행속도가 증가함에 따라 배기온도가 증가되는 점을 고려할 필요가 있다고 사료된다.

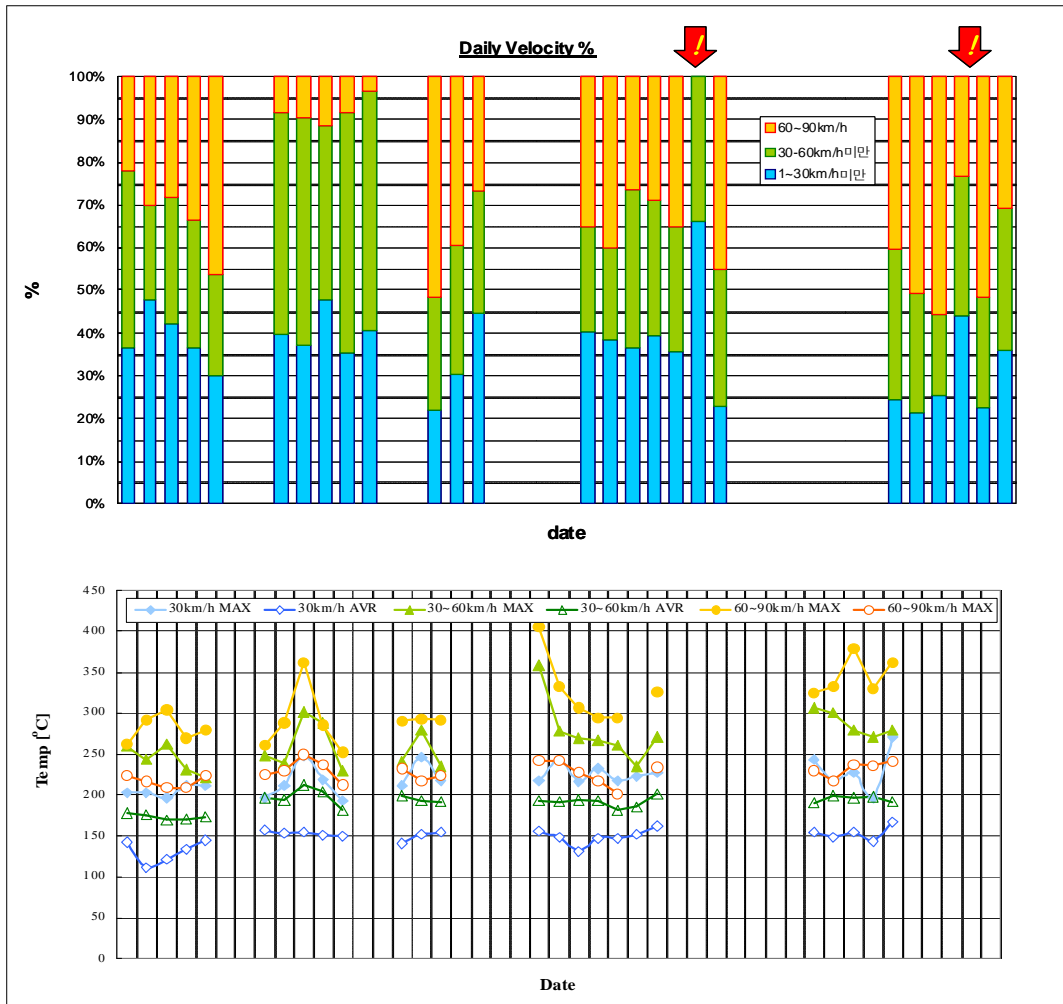


Fig. 4-25. Distribution of exhaust gas temperature by vehicle speed.

2. 배출가스 제거율

Fresh상태와 실차 내구시험 후 배출가스 제거율을 비교하기 위하여 실차시험을 실시하였으며, Table 4-10과 4-26에 실차시험의 배출가스 제거율을 나타내었다.

오염물질별 제거율은 PM이 fresh 상태에서 56%이었으나 내구시험 후 53.1%로 하고, CO제거율은 98%에서 82.3%로 16%저하하였으며, HC는 93.6%에서 90.8%로 2%저하하였다. 이 결과를 보면, 내구시험 전후 PM과 HC제거율은 큰 변화가 없고, CO 제거율의 차이가 큰 것을 알 수 있다.

CO제거율의 차이가 큰 것은 재생과정에서 C(검댕)이 NO₂와 반응하여 CO₂로 산화되는 데 내구시험에 사용된 필터는 포집된 매연의 양이 fresh한 필터보다 많기 때문에 산소가 결핍되어 CO₂로 산화되지 않고 CO가 생성되기 때문이다. 결과적으로 내구시험으로 인하여 촉매의 성능이 크게 저하되지 않는다고 판단된다.

Table 4-10. Emission results of PDPF installed in vehicle

Item	W/O PDPF	With PDPF	Reduction Rate	Test mode
PM(g/kWh)	0.112	0.053	53.1%	ND-13 mode
CO(g/kWh)	0.820	0.063	82.3%	
HC(g/kWh)	0.217	0.020	90.8%	
NOx(g/kWh)	5.308	5.276	0.6%	
Engine power(PS)	134.9	133.1	1.3%	FULL LOAD
Fuel consumption(g/kWh)	232.3	237.9	2.4%	

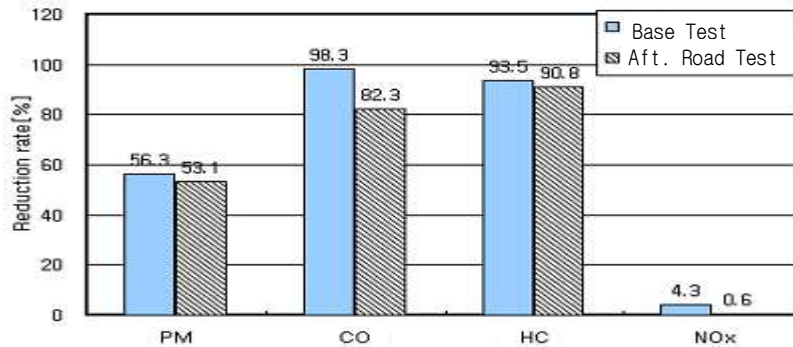


Fig. 4-26. Emission reduction rates of PDPF installed in vehicle.

3. 실차시험의 배기온도, 배압 및 주행속도

실차시험의 저온 재생시험에서 장치의 정상작동 여부를 파악하기 위해 배기온도를 측정하였으며, Fig. 4-27과 4-28에 엔진배기온도가 250℃ 및 300℃이상 분포되는 비율을 나타내었다.

시험시작 시 엔진배기온도 250℃이상 분포율은 20~60%(300℃이상의 온도분포 0~40%)이었으나, 저온 재생시험 이후에는 0~10%(300℃이상의 온도분포 1%이하)로 저하되었다.

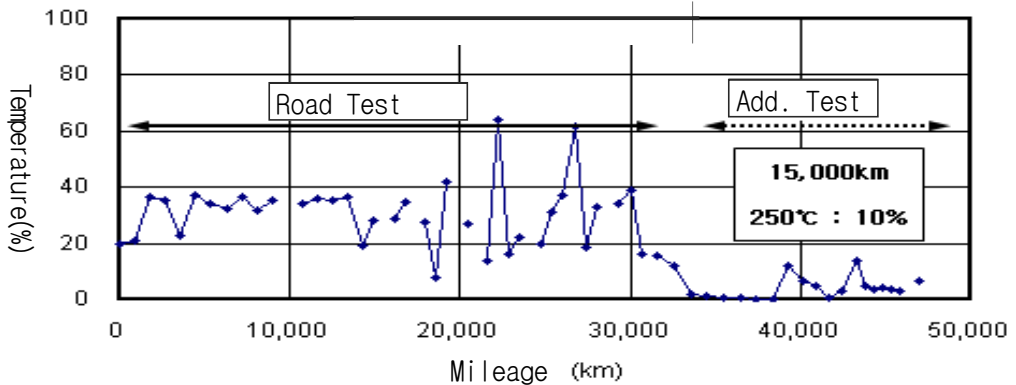


Fig. 4-27. Distributions of exhaust temperature upper 250℃.

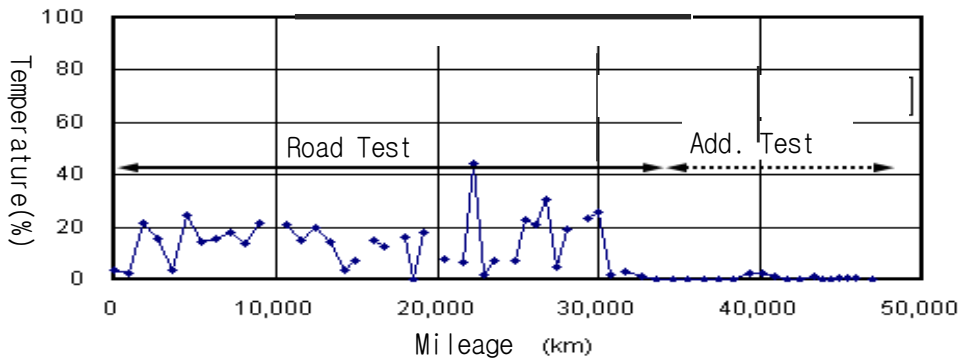


Fig. 4-28. Distributions of exhaust temperature upper 300℃

Fig. 4-29에 실차시험에서 45,000km 주행에 따른 DPF 전단의 압력변동을 나타내었다. 전 차량 시험 동안 DPF 전단의 압력은 크게 증가하지 않고 100mbar 정도로 유지되었으며, 전체 평균압력은 58mbar이었다. 특히 30,000km이하의 저속주행에서는 배압이 상승하지 않고(300℃ 1%이하) 안정적으로 작동되었다.

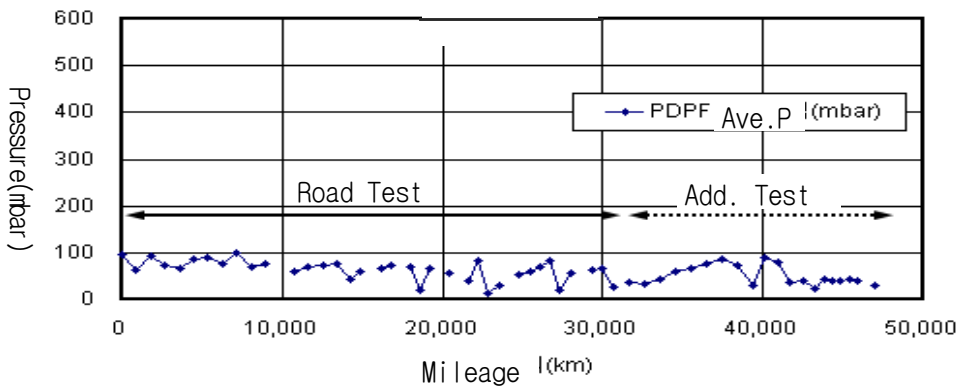


Fig. 4-29. Pre DPF pressure.

Fig. 4-30에 실차시험의 일일 최고속도와 평균속도를 나타내었다. 일일 최고속도는 120km/h, 평균속도는 58km/h이고, 추가시험의 최고속도는 100km/h, 평균속도는 50km/h이었다.

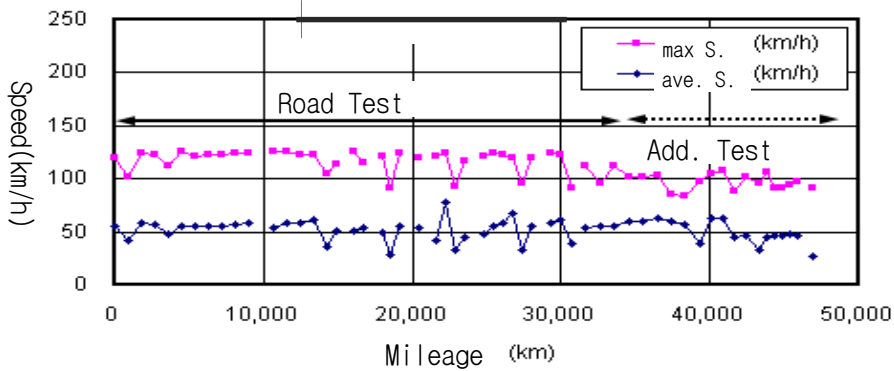


Fig. 4-30. Maximum and average speed with mileage.

4. PDPF장착이 엔진의 성능에 미치는 영향

Fig. 4-31에 실차 내구주행 후 PDPF장착에 따른 배압상승이 성능에 미치는 영향을 나타내었다.

실차 내구주행 후 PDPF장착에 따른 배압상승이 성능에 미치는 영향은 크지 않음을 알 수 있다. 이는 일부유량을 통과시킴으로써 과도한 배압 상승을 억제하기 때문이며 전부하시에도 배압 상승은 10%정도로써 DPF보다 배압상승율이 낮다. 따라서 PDPF의 경우 배압의 상승이 엔진의 성능 저하에 미치는 영향은 미미하다고 판단된다.

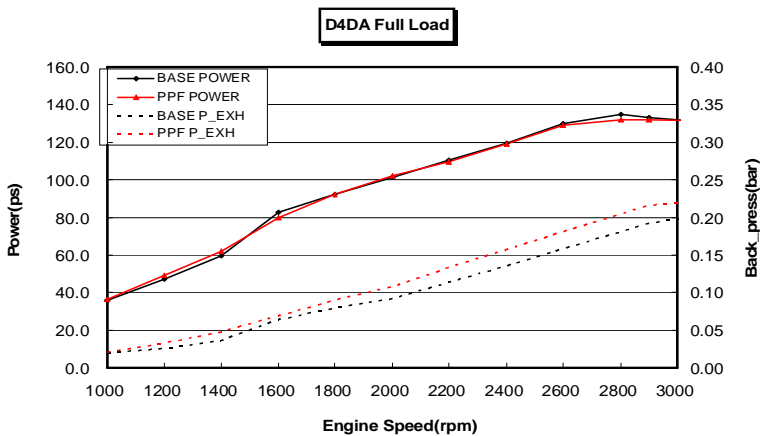


Fig. 4-31. Performance comparison of with or w/o PDPF.

제5장 결 론

본 연구에서는 지금까지 대형 경유차에 사용되어온 매연정화장치(DPF:diesel particulate filter)를 개선하여 단면의 일부를 개방시킴으로써 저감원리가 상이한 부분유량 배기정화장치(PDPF:partial diesel particulate filter)를 개발하였다. PDPF를 운행차량에 적용하기 위해 배기가스제거시험, 특성시험 및 실차시험을 실시하였으며, 중형트럭에 적용하여 차량의 성능 및 배기가스 저감효율을 조사하였다. 연구 결과 얻은 결론은 다음과 같다.

1. 배기가스 정화시험

직경 174.6mm, l 길이 246mm, 부피 약 6 l 인 부분유량 배기정화장치(PDPF)를 3~6 l 급 경유자동차에 적용하여 ND-13 모드로 측정된 배기가스 제거율은 PM 56.3%, CO 98.3%, HC 93.6% 및 NO_x 4.3%이었다.

PDPF 장착에 따른 엔진최대출력 및 연료소비율은 기본 성능대비 각각 -3.6% 및 0.26%로서 기준치인 $\pm 5\%$ 를 초과하지 않았다.

PDPF의 기능은 정상적으로 작동되었으며, 실차적용 실험에서도 차량의 성능이 저하되지 않았고, PM제거율이 50%이상 유지되었다.

2. 특성시험

가. PDPF를 장착한 엔진 내구시험을 Seoul-10모드로 50시간 수행한 결과 장치 배압은 최고 240mbar로서 차량의 성능에 영향을 미치지 않는 수준이고, 0, 25 및 50시간 후 배기가스 제거율은 거의 비슷하였으며, 재생에 영향을 미치는 HC제거율의 변화도 뚜렷이 나타나지 않았다.

이 결과는 장치의 보급사에서 시험한 2,900시간 후의 배기가스 제거율 및 배압의 시험결과와도 유사하다.

나. 필터의 재생평형온도(BPT)시험은 엔진회전수 1,200rpm, 배기온도 270~290℃에서 수행하였으며, 필터 전·후단에 걸리는 배압의 기울기가 음수로 바뀌었다.

이것은 PDPF시스템에 포집되는 매연의 양보다 촉매에 의해 재생되는 양이 많은 것을 의미한다. 이 온도 이상에서는 연속 재생이 가능하였다.

다. PDPF시스템의 장기간 저온(매연의 BPT온도보다 낮은 210℃)시험에서 필터에 매연을 과다 포집한 결과, 배압에 의한 엔진의 토크 및 회전수는 변하지 않고, 배압이 20mbar 증가하고, 배기온도가 7℃ 증가하였다.

필터의 매연 정화능은 30~40%이고, PM제거율은 50~60%로서 안정적으로 제거되고 필터 후단부로 유출(blow-off)되는 매연은 거의 없었다.

라. PDPF시스템의 ETC모드시험 결과 배기가스 제거율은 PM 63.3%, CO 91.0%, HC 96.6% 및 NOx 1.8%이었다. ETC시험에서도 HC 및 CO제거율은 90%이상으로서 엔진 내구시험에 사용한 필터의 재생효율은 크게 달라지지 않았고, 주행 중 필터 전후단의 매연 유출현상은 나타나지 않았다.

마. Lug Down 3모드 시험에서 매연제거율은 여지반사식 50.4%, 광투과식 54.4%이었다. Lug-down의 경우 전부하(WOT)에서 정격엔진회전수 100~80% 영역에서 배기온도가 높고 배기유량이 많았으며, 이 영역에서 PM제거율은 50%이상이고 장치는 정상 작동하였다.

3. 실차시험

가. 실차 배기정화 성능시험은 주행패턴 1~30km/h, 30~60km/h 및 60~90km/h로 수행하였으며 주행속도가 증가함에 따라 배기온도가 증가하였고, 최고온도와 최고평균온도가 동시에 형성되지 않았다. 엔진 배기가스 온도변화에는 순간 주행속도보다 주행속도의 유지시간이 더 큰 영향을 미쳤다.

나. 실차시험의 배기가스 제거율은 PM 53.1%, CO 82.3%, HC 90.8%로서, 내구 시험 전후 PM과 HC제거율은 큰 변화가 없고, CO제거율은 16% 저하하였다. CO제거율이 낮아진 것은 재생과정에서 C(검댕)이 NO₂와 반응하여 CO₂로 산화되는 데 내구 시험에 사용된 필터는 포집된 매연의 양이 fresh한 필터보다 많기 때문에 산소가 결핍되어 CO₂로 산화되지 않고 CO가 생성되기 때문이다.

다. 실차시험의 저온 재생시험에서 초기 배기온도 250℃ 이상 분포율은 20~60%이었으나, 저온 재생시험 이후에는 0~10%로 저하되었다.

45,000km주행시험 동안 DPF 전단 압력은 안정적으로 100mbar 이하로 유지되었으며, 평균압력은 58mbar이었다. 30,000km 주행 이후 저속 운행시험에서는 배압이 상승하지 않고, 장치가 안정적으로 작동하였다.

본 연구에서 개발한 PDPF시스템은 PM제거율을 80%에서 50~60%로 낮추는 대신 배기가스 유동저항을 줄이고 엔진의 배압성능을 낮춤으로써 기존의 DPF시스템보다 차량성능 및 연비측면에서 우수함을 알 수 있었다.

참 고 문 헌

- (1) 환경부, “수도권 대기질 개선 특별대책 및 특별법의 주요내용과 추진현황”, 2004.
- (2) 김호, "미세먼지와 건강", 서울대학교 보건대학원, 2004.
- (3) 환경부·국립환경과학원, "차기 제작자동차 배출허용기준 설정 및 인증제도 개선방안 연구", 2006.
- (4) 정용일, “경유자동차 매연여과장치 기술동향”, 자동차공학회지 제24권 제1호, 2002.
- (5) 정용일, "자동차와 환경", pp.16-23, 1998.
- (6) Allansson, R., Blakeman, P. G., Cooper, B. J., Hess, H., Silcock, P.J., Walker, A. P., 2002. "Optimizing the Low Temperature Performance and Regeneration Efficiency of the Continuously Regenerating Diesel Particulate Filter(CR-DPF) System", SAE 2002-01-0428.
- (7) Cooper, B. J., J. E. Thoss, 1989. "Role of NO in Diesel Particulate Emission Control", SAE 890404.
- (8) Kittelson, D.B., 1998a. "Engines and Nanoparticles: A Review", J. Aerosol Sci., 5/6(29), pg. 575-588.
- (9) Day, J. P., 1997a. "Substrate Effects on Light-Off - Part II: Cell Shape Contributions", SAE 971024.
- (10) Hawker, P., et al., 1997. "Experience with a New Particulate Trap Technology in Europe", SAE 970182.
- (11) Hiranuma, S., Y. Takeda, T. Kawatani, R. Doumeki, K. Nagasaki, T. Ikeda, 2003. "Development of DPF System for Commercial Vehicle-Basic Characteristic and Active Regenerating Performance", SAE 2003-01-3182.
- (12) Konstandopoulos, A. G., et al., 2000. "Fundamental Studies of

- Diesel Particulate Filters: Transient Loading, Regeneration, and Ageing", SAE 2000-01-1016.
- (13) Konstandopoulos, A. G., et al., 2001. "Spatial Non-Uniformities in Diesel Particulate Trap Regeneration", SAE 2001-01-0908.
- (14) Fukano, I., "A Diesel Oxidation Catalyst for Exhaust Emissions Reduction", SAE 932958, 1993.
- (15) R. J. Farrauto and Brent Wedding, "Poisoning by SO_x of some base metal oxide auto exhaust catalysts", J. of Catal., 33, 249, 1973.
- (16) Henk M. G., Williamson W. B., Silver R. G., "Diesel Catalysts for Low Particulate Emissions and Low Sulfate Emissions", SAE 920368, 1992.
- (17) Minoruri Arai, "Thermal Analysis for the Evaluation of SOF Oxidation Temperature by Diesel Catalyst", SAE 930134, 1993.
- (18) Heywood, J. Internal Combustion Engine Fundamentals, McGraw Hill, 1988.
- (19) Fred Brear, Sten C. G. Fredholm and E. Andersson, "The Role of the Through Flow Oxidation Catalyst in the Development of a Low Emissions Specification HD Diesel Engine", SAE 920367, 1992.
- (20) Robert J. Farrauto, Kenneth E. Voss and Ronald M. Heck, "A Base Metal Oxide Catalyst for Reduction of Diesel Particulates", SAE 932720, 1993.
- (21) K. F. Hausen, F. Bak, E. M. Anderson and H. Beider, "The Influence of an Oxidation Catalytic Converter on the Chemical and Biological Characteristics of Diesel Exhaust Emissions", SAE 940241, 1994.
- (22) Gregory M. Pataky, Kinby J. Baumgard, and Linda D. Gratz, "Effects of an Oxidation Catalytic Converter on Regulated and Unregulated Diesel Emissions", SAE 940243, 1994.
- (23) Yezerets, A., N.W. Currier, H. Eadler, A. Suresh, S.Popuri, 2002.

- "Quantitative Flow-Reactor Study of Diesel Soot Oxidation Process", SAE 2002-01-1684.
- (24) Michael G. Campbell and Edward P. Martin, "Substrate Selection for a Diesel Catalyst", SAE 950372, 1995.
- (25) P. D. Stroom, R. P. Merry and S. T. Gulati, "Systems Approach to Packaging Design for Automotive Catalytic Converters", SAE 900500, 1990.
- (26) 崔炳喆, "メタノール 豫混合氣の觸媒燃焼に 關する 研究 ", 北海導大學院, 1990.
- (27) Kathleen C. Taylor, "Automobile Catalytic Converters", Catalysis Science & Technology, Vol. 5, 119.
- (28) Merkel, G. A., Cutler, W. A., Warren, C. J., 2001. "Thermal Durability of Wall-Flow Ceramic Diesel Particulate Filters", SAE 2001-01-0190
- (29) Kojetin, P., et al., 1993. "Production Experience of a Ceramic Wall Flow Electric Regeneration Diesel Particulate Trap", SAE 930129.
- (30) Horiuchi, M., "Sulfur Storage and Discharge Behavior on Flow-Through Type Oxidation Catalysts", SAE 910605, 1991.
- (31) Cutler, W. A., Merkel, G. A., 2000. "A New High Temperature Ceramic Material for Diesel Particulate Filter Applications", SAE 2000-01-2844.
- (32) S. T. Gulati, B. J. Cooper, P. N. Hawker, et al, "Optimization of Substrate/Washcoat Interaction for Improved Catalyst Durability", SAE 910372, 1991.
- (33) S. T. Gulati, J. C. Summers, D. G. Linden and K. I. Mitchell, "Impact of Washcoat Formulation on Properties and Performance of Cordierite Ceramic Converter", SAE 912370, 1991.
- (34) Irwin M. Lachman, "Monolithic Catalyst Systems", Alumina Chemicals, 283, 1990.
- (35) D. Kattge, "Advanced Canning Systems for Ceramic Monoliths in

- Catalytic Converters", SAE 900500, 1990.
- (36) John S. Howitt, "Advances in automotive catalysts supports", Catalysis and Automotive Pollution Control, 301, 1987.
- (37) Masoudi, M., et al., 2001. "Validation of a Model and Development of a Simulator for Predicting the Pressure Drop of Diesel Particulate Filters", SAE 2001-01-0911.
- (38) Yoshitsugu Ogura, Kazuya Kibe, Satoshi Kaneko, "Development of Oxidation Catalyst for Diesel Engine", SAE 940240, 1994.
- (39) Suresh T. Gulati, "Design Considerations for Diesel Flow-Through Converter", SAE 920145, 1992.
- (40) S. T. Gulati, "Cell Design for Ceramic Monolith for Catalytic Converter Application", SAE 881685, 1988.
- (41) Ken Voss, Bulent Yavuz, Carol Hirt, and Robert Farrauto, "Performance Characteristics of a Novel Diesel Oxidation Catalyst", SAE940239, 1994.
- (42) Yung-Fang, Yu Yao, "The Oxidation of CO and CH over Metal Oxides", J. of Catal., 39, 104, 1975.
- (43) Hoffmann et al., "Kinetic Study and Modelling of Diesel Particulate Filter Regeneration", Chemical Engineering Science, Vol. 46, No. 4, pp. 1101 ~ 1113, 1991.
- (44) A. Clark, "The Chemisorptive bond basic concept," Academic press, pp25, 1974.
- (45) Tatsuo Matsushima, "J. Catal.", 64, 38, 1980.
- (46) W. Addy Majewski, Jeffrey L. Ambs and Kenneth Bickel, "Nitrogen Oxides Reactions in Diesel Oxidation Catalyst", SAE 950374, 1995.
- (47) S. Sumiya, J. Muramatsu, N. Matsumura, and K. Yoshida, "Catalytic Reduction of NOx and Diesel Exhaust", SAE 920853, 1992.
- (48) 이원석 외 8인, "선택적 환원촉매장치(SCR)에 의한 대형 경유엔진의 NOx 저감에 관한 연구", 한국자동차공학회 2006년 추계학술대회 논문집

Vol 1, 2006.

- (49) S. Sumiya, J. Muramatsu, N. Matsumura, and K. Yoshida, "Catalytic Reduction of NO_x and Diesel Exhaust", SAE 920853, 1992.
- (50) Horiuchi, M., "Sulfur Storage and Discharge Behavior on Flow-Through Type Oxidation Catalysts", SAE 910605, 1991.
- (51) Martiy A. Barris, "Development of Diesel Exhaust Catalytic Converter Mufflers", SAE 920369, 1992.
- (52) Hunter G, Scholl J, Hibbler F, Bagley S, Leddy D, Abata D, Johnson J. 1981a. "The Effects of Fuels on Oxidation Catalyst", SAE 811192 1981.
- (53) R. J. Farrauto and Brent Wedding, "Poisoning by SO_x of some base metal oxide auto exhaust catalysts", J. of Catal., 33, 249, 1973.
- (54) Chang, C. C., "J. Catal." p. 53, p. 374, 1978.
- (55) Douglas J. Ball and Robert G. Stack, "Catalyst Considerations for Diesel Converters", SAE 902110, 1990.
- (56) J. P. Day, "The Design of a New Ceramic Catalyst Support", SAE 902167, 1990.
- (57) J. R. Anderson and M. Boudart, "Catalysis", vol. 2, pp 250-252, 1981.
- (58) G. I. Golodets, "Heterogeneous catalytic reactions involving molecular oxygen.", Chap. 10, pp280, 1983.
- (59) S. Ozturk, D. L. McKinnon, J. L. Puliafito, "International Experience Using Diesel Catalytic Converters for Urban Bus", SAE 940238, 1994.
- (60) Kazuyuki Narusawa, Shigeo Hori, Tatsuji Sato, and Tsugio, "The Evaluation of Oxidation Catalysts for Diesel Trucks", SAE 950157, 1995.
- (61) Myers N., 1995. "Continuously Regenerating Trap(CRT) for Diesel Engines", SAE Catalysts, Emission Control and Catalytic Combustion

TOPTec, Costa Mesa, CA, October 1995.

- (62) 신동길, 정용일, “자연재생촉매방식 매연여과장치의 실차시험에 관한 연구”, 한국자동차공학회 2004년 춘계학술대회 논문집 Vol 1, 2004.
- (63) 조강래, “산화촉매에 의한 대형디젤기관의 배출가스 정화 특성”, 건국대학교 대학원, 박사학위 논문, 1997.
- (64) D. L. Mckinnon, S. Ozturk and C. Meneses, "Latin America's Experience with Diesel Catalytic Purifiers for Urban Buses", SAE 930132, 1993.
- (65) Mimour Arai, "SOF Reduction and Sulfate Formation Characteristics by Diesel Catalysts", SAE 910328, 1991
- (66) Engler B. H., Lox E. S., Ostgathe K., CarTillieri W. and Zelenka P., "Diesel Oxidation Catalysts with Low Sulfate Formation for HD Diesel Engine Application", SAE 910607, 1991.
- (67) Lemaire J., W. Mustel and P. Zelenka, 1994. "Fuel Additive Supported Particulate Trap Regeneration Possibilities by Engine Management System Measures", SAE 942069.
- (68) 함윤영 외 2인, “전기히터방식 매연여과장치의 PM 산화 특성에 관한 연구” 자동차공학회논문집 제14권 제1호, 2006.

ACRONYMS and ABBREVIATIONS

A/F	Air/Fuel
Al ₂ O ₃	Aluminum Oxide
Ba(NO ₃) ₂	Barium Nitrate
BaCO ₃	Barium Carbonate
bhp-hr	Brake Horsepower Hour
BPT	Balance Point Temperature
CIDI	Compression Ignition Direct Injection
CO	Carbon Monoxide
CO(NH ₂) ₂	Urea
CO ₂	Carbon Dioxide
CB-DPF	Catalyst-Based Diesel Particulate Filter
CRT	Continuously Regenerating Trap
CCRT	Catalyst Continuously Regenerating Trap
CTE	Coefficient of Thermal Expansion
Cu	Copper
Cu-ZSM-S	Copper Zeolite
DeNO _x	lean NO _x
DOC	Diesel Oxidation Catalyst
DPF	Diesel Particulate Filter
ETC	European Transient Cycle
F/C	Fuel Consumption
FSN	Filter Smoke Number
FBC	Fuel-Borne Catalyst
FTP	Federal Test Procedure
H ₂	Hydrogen
H ₂ O	Water

HC	Hydrocarbon
HDE	Heavy-Duty Engine
IOF	Insoluble Organic Fraction
LDV	light-duty Vehicle
LOT	Light-Off Temperature
MECA	Manufacturers of Emission Controls Association
MOR	Modulus of Rupture
mg	Milligram
mg/s	Milligram per Second
MVEG	Motor Vehicle Emission Group
N ₂	Nitrogen
NH ₃	Ammonia
nm	Nanometer
NO	Nitrogen Oxide
NO ₂	Nitrogen Dioxide
NO _x	Oxides of Nitrogen
O ₂	Oxygen
PAH	Polyaromatic Hydrocarbon
Pd	Palladium
PDPF	Partial Diesel Particulate Filter
PM	Particulate Matter
ppm	Parts Per Million
Pt	Platinum
Rh	Rhodium
RC	Robust Cordierite
S	Sulfur
SCR	Selective Catalytic Reduction
SI	Spark Ignition
SO ₂	Sulfur Dioxide

SO₃	Sulfur Trioxide
SOF	Soluble Organic Fraction
SUV	Sport-Utility Vehicle
SV	Space Velocity
TCi	Turbo Charger Intercooler
TSP	Thermal Shock Parameter
TWC	Three-Way Catalyst
V₂O₅/TiO₂	Vanadium Oxide/Titanium Oxide
WOT	Wide-open Throttle
°C	Degrees Celsius

감사의 글

항상 나에게 은혜와 풍성함으로 삶을 이끌어 주신 주님께 먼저 영광 돌리며, 이 작은 결실이 이루어질 수 있도록 지도와 격려를 다하여 주신 신대운 교수님께 깊은 감사를 드립니다. 아울러 본 논문을 세심하게 심사하여 주시고 충실한 내용이 될 수 있도록 자상하게 검토하여 주신 전영남, 이인화 교수님, 전남대학교 서성규 교수님, 교통환경연구소 엄명도 박사님께 진심으로 감사드립니다.

늦게나마 학문을 계속할 수 있도록 격려해주시고 안내하여 주신 이기철 원장님, 신창기 소장님께도 감사드립니다. 또한 본 논문이 나오기까지 많은 도움과 배려를 아끼지 않으신 김종춘 소장님, 강대준, 차준석 박사님 항상 옆에서 든든한 역할을 하며 논문이 만들어질 수 있도록 많은 도움을 준 권상일, 황진우, 박준홍, 임철수, 이종태, 강대일, 신창현 연구사 여러가지로 바쁜 가운데도 자료와 논문정리에 많은 협조를 하여준 전상우, 엄동섭, 김예은 연구원 그리고 시간을 나누어준 류정호 연구관, 한중수 연구사와 교통환경연구소 모든 가족들에게 감사드립니다.

이 논문을 준비하고 완성하기까지 많은 조언과 자료를 제공하여 주신 조강래, 황재원 박사님께 무한한 감사드리며, 실험에 참여해 주신 모든 분들과 이 논문의 심사에서 최종정리까지 몰심양면으로 도움 주신 문옥란 선생님께 특히 감사드립니다.

부족하지만 항상 따뜻한 미소로 맞아 주시는 장인, 장모님께도 고마움을 전하며, 지금 이 시간까지도 장성한 아들의 건강과 장래를 걱정하시는 아버님과 언제나 가족이라는 울타리 안에서 따뜻한 버팀목이 되어주시는 형님, 누나, 동생들과 이 기쁨을 나누고자 합니다.

끝으로 한결같은 마음으로 기도와 위로로 내게 힘이 되어온 나의 반쪽인 사랑하는 아내와 아름다운 세상의 일원이 되기위해 이 시간에도 열심히 노력하고 있는 사랑하는 나의 아이들 세진이, 재윤이와 이 작은 결실의 기쁨을 함께 나누고자 합니다.

2007년 7월 연구실에서

저작물 이용 허락서

학과	환경생명공학	학번	10341176	과정	박사
성명	한글: 박용희 한문: 朴 鏞 熙 영문: Park Yong-Hee				
주소	인천광역시 경서동 종합환경연구단지내 국립환경연구원				
연락처	E-mail : nierpark@me.go.kr				
논문제목	한글: 輕油 粒子狀物質 濾過裝置의 排氣低減性能에 關한 研究				
	영문: A Study on Performance Evaluation of Emission Reduction in a Diesel Particulate Filter				

본인이 저작한 위의 저작물에 대하여 다음과 같은 조건 아래 조선대학교가 저작물을 이용할 수 있도록 허락하고 동의합니다.

- 다 음 -

1. 저작물의 DB구축 및 인터넷을 포함한 정보통신망에의 공개를 위한 저작물의 복제, 기억장치에의 저장, 전송 등을 허락함.
2. 위의 목적을 위하여 필요한 범위 내에서의 편집과 형식상의 변경을 허락함. 다만, 저작물의 내용변경은 금지함.
3. 배포·전송된 저작물의 영리적 목적을 위한 복제, 저장, 전송 등은 금지함.
4. 저작물에 대한 이용기간은 5년으로 하고, 기간종료 3개월 이내에 별도의 의사 표시가 없을 경우에는 저작물의 이용기간을 계속 연장함.
5. 해당 저작물의 저작권을 타인에게 양도하거나 출판을 허락을 하였을 경우에는 1개월 이내에 대학에 이를 통보함.
6. 조선대학교는 저작물 이용의 허락 이후 해당 저작물로 인하여 발생하는 타인에 의한 권리 침해에 대하여 일체의 법적 책임을 지지 않음.
7. 소속 대학의 협정기관에 저작물의 제공 및 인터넷 등 정보통신망을 이용한 저작물의 전송·출력을 허락함.

동의여부 : 동의(o) 반대()

2007년 8월 일

저작자: 박 용 희 (인)

조선대학교 총장 귀하