

Emission Control Technologies

金萬永, 선임연구원乙, 崔圭勳, 수석연구원, 디젤엔진시험팀, 譯
W. Addy Majewski, PhD, President of Ecopoint Inc., <http://www.dieselnet.com/tg.html>, 著

Abstract

이 논문은 현재 디젤엔진에서 사용할 수 있는 배기저감 기술에 대한 일반적인 분류에 대한 논의를 하고자 한다. NO_x와 PM은 일반적으로 디젤엔진 배기가스 중에서 가장 문제가 되고 있는 것이기 때문에, NO_x와 PM의 제어에 사용되는 기술에 대한 간략한 정리를 하였다. 이와 관련된 보다 자세한 내용들은 본 시리즈의 뒷 부분에 있는 논문들을 참고하기 바란다.

1. Classification of Methods

디젤엔진에서 배기저감에 사용되는 기술은 크게 다음의 세그룹으로 분류할 수 있다. 즉, (1) 엔진변경(engine modification), (2) 연료와 첨가제 기술(diesel fuel and additives technology), 그리고 (3) 배기 후 처리장치(exhaust gas aftertreatment)가 그것이다. 이러한 각각의 항목은 아래의 Table 1에 나와 있는 것처럼 보다 자세한 세부항목으로 나뉘어 진다. 이 중의 일부는 현재 엔진에 채용되고 있지만, 이 중의 일부는 향후 배기규제 대응을 위하여 현재 개발이 진행중이다.

Table 1 Diesel Emission Control Options

Engine Design and Modifications	Electronic Engine Control
	Fuel Injection System Modifications
	Exhaust Gas Recirculation
	Combustion Air Intake Improvements
	Combustion Chamber Modifications
	Water Addition
	In-Cylinder Coatings
Fuel, Oil, and Additive Technologies	Fuel and Lube Oil
	Alternative Diesel Fuels
	Fuel Additives
Exhaust Gas Aftertreatment	Diesel Oxidation Catalyst
	Lean NO _x Catalyst *

	SCR Catalyst Systems ^(S)
	Diesel Particulate Traps
	Chemical and Physicochemical Treatment ^(S)
	Plasma Exhaust Treatment *
* under development, not commercially available ^(S) commercially available only for stationary engines	

1970년대 이후 디젤엔진의 공해물질 제어에 대한 눈부신 발전이 이루어져 왔다. PM, NO_x와 HC의 배출은 그 당시의 10% 정도로 감소되었다. 이러한 발전의 대부분은 배출가스 저감에 초점을 맞춘 엔진설계(engine design) 기술의 발달에 의한 것이다. 즉, 공기 유동 및 공기/연료 혼합의 최적화를 위한 연소실 형상의 개선, 연료 분사압의 증대와 연료의 미립화 및 혼합의 최적화를 위한 진보된 분사기의 설계 등을 통하여 배출가스 제어기술의 진보가 이루어졌다. 이와 함께 터보차저 인터쿨러의 장착은 보다 높은 출력과 NO_x의 저감을 가능하게 하였다. 한편, 최근 디젤엔진에 도입되고 있는 전자제어 시스템으로 인하여 보다 향상된 배출물 제어기술이 가능하게 되었다. 하지만, 공해물질의 배출저감을 위한 많은 엔진기술은 일반적으로 NO_x-PM의 상반관계(trade-off) 특성을 보인다. 즉, NO_x의 저감을 위한 기술은 PM의 증가를 가져오고, 이와 반대로 PM의 저감을 위한 기술은 NO_x의 증가를 초래한다. 이러한 상반관계의 좋은 예로 지연분사법(retarded injection timing)을 들 수 있는데, 이 방법은 NO_x를 저감시키는 데는 매우 효과적이지만 PM 배출의 증가를 초래한다. 이러한 상반관계로 인하여, 엔진설계의 개선만으로 NO_x와 PM을 동시에 저감시키는 것은 매우 어려운 일이다. 한편, 엔진설계의 개선에 의한 배출물의 제어는 연료소비율의 증가와 출력의 저하를 일으키기도 한다.

디젤연료와 윤활유 역시 디젤의 공해물질 배출에 영향을 미치는 것으로 알려져 있다. 따라서 연료기술(fuel technology)의 개선에 의한 배출물의 제어도 중요한 부분이다. 최근 추진되고 있는 연료중 유황성분의 저감 노력은 이산화황(sulfur dioxide, SO₂)의 배출저감 뿐만 아니라 후처리장치 기술을 사용할 수 있는 범위를 넓혀주기 때문에 전세계적인 관심이 집중되고 있다. 배출물의 저감에 기여할 수 있는 또다른 연료기술에는 세탄가의 증대(higher cetane number)와 방향족 성분의 저감(lower aromatic content)이 있다. 이와 함께, 최근 배출물 제어를 위한 연료첨가제(fuel additive)의 사용이 제안되어 시험되고 있는데, 이중 일부는 주목할 만한 성과를 올리고 있다.

배기가스 후처리장치에 대한 기술은 연료소비율을 유지하면서 NO_x와 PM 제어의 상반관계를 약화시킬 수 있다. 예를 들어, PM 배출을 제어하기 위한 후처리장치를 사용한다면 엔진설계자들은 NO_x의 저감에 초점을 맞추어 엔진설계를 할 수 있는 신축성을 발휘할 수 있고, 이와 반대로 NO_x 후처리장치를 사용한다면 PM의 제어에 관점을 두고서 엔진설계를 할 수 있다. 유럽의 승용차, 미국의 일부 고속트럭(highway truck), 그리고 배기규제의 대응을 위하여 후처리장치를 사용해야 하는 일부 정치엔진(stationary engine)의 경우 이미 후처리장치가 사용되고 있다. 한편, 배기규제가 점점 엄격해짐에 따라 후처리장치의 중요성이 점점 강조되고 있다. 디젤 후처리장치의 가장 대표적인 것으로 HC, CO, 그리고 PM 저감을 위하여 설계된 산화촉매(oxidation catalyst)를

들 수 있다. 또한, 현재 개발이 진행중이거나 혹은 일부 특정시장(niche market)에서 이미 사용되고 있는 많은 매연여과장치(diesel particulate trap, DPF)에 의한 대폭적인 PM의 저감이 가능하리라 예상되고 있다. 한편, NO_x 저감을 위하여 SCR(selective catalytic reduction with ammonia/urea) 촉매 시스템과 cyanuric acid 등을 사용한 화학 후처리장치(chemical aftertreatment) 등이 정치산업(stationary applications)에서 이미 사용되고 있다. 이와 함께, 희박(lean) NO_x 촉매와 같은 또다른 후처리장치들이 현재 개발중이다.

배출물이 적은 깨끗한 디젤엔진을 개발하기 위해서는 구조적 접근이 필요하다. 현실적으로, 특정엔진에 장착되기만 하면 한번에 모든 배출물을 효과적으로 제어할 수 있는 “plug-in” 장치는 존재하지 않는다. 효과적인 배출물 제어 전략이란 적절한 연료와 연료첨가제, 그리고 후처리장치를 사용하면서 엔진설계의 중요 기술을 적절히 조합하는 것이다. 아래의 예는 배출물 제어를 위한 구조적 접근의 필요성과 효과를 간략히 나타낸 것이다.

- 배기가스재순환(exhaust gas recirculation, EGR)은 NO_x 배출을 저감시키는 효과적인 방법이다. 하지만 EGR의 결과 PM 배출이 증가할 뿐만 아니라 재순환된 배기가스에 포함된 입자상물질로 인하여 엔진의 마모가 증가한다. 매연여과장치와 EGR을 함께 사용함으로써 이 두 문제를 동시에 해결할 수 있다.
- 디젤산화촉매(diesel oxidation catalyst)는 입자상물질의 탄화수소 부분(hydrocarbon portion, i.e. SOF)을 산화시킴으로서 PM을 저감할 수 있지만 고체탄소 부분(carbonaceous fraction)을 제거하는 데에는 비효율적이다. 따라서 촉매의 전체적인 효율을 높이기 위해서, SOF 배출은 증가될지라도 탄소부분은 적게 나오도록 엔진을 설계할 수도 있다.
- 바이오디젤(biodiesel)은 배출가스 저감 효과를 볼 수 있는 에너지원이다. 그러나 바이오디젤은 현재 디젤엔진에 주로 사용되고 있는 여러가지 재질(alloys, elastomers)과 양립될 수 없다. 따라서 바이오디젤 연료만을 사용하는 엔진의 경우 재료의 선정에 대한 특별한 고려가 필요하다.

2. NO_x Control Technologies

2.1 Charge Air Cooling

엔진의 크기(배기량)와 무게를 증가시키지 않고 출력의 증가를 얻을 수 있는 엔진 설계의 일반적인 방법은 흡입공기를 압축시키는 것이다(charge air compression). 압축공기를 엔진에 공급한다는 것은, 엔진의 연소실로 흡입되는 공기의 질량을 증가시켜 보다 많은 연료가 사용될 수 있도록 하며 결국 출력의 증가를 이룰 수 있다. 하지만, 공기의 압축으로 인하여 흡입공기의 온도가 상승하게 되고 이에 따라 NO_x의 생성이 증가하게 된다. 또한 엔진부하와 온도의 상승으로 인하여 엔진내구성의 문제가 야기된다.

흡입공기를 압축시키는 방법에는 여러가지가 있으나 디젤엔진에서 주로 사용되는 방법은

과급(turbocharging) 방식이다. 흡입공기의 압축으로 인한 온도의 증가는 NO_x 의 배출을 증가시키는데, 흡입공기를 압축 후 냉각시킴으로서 이를 최소화시킬 수 있다. 흡입공기의 냉각(charge air cooling)은 연소에 이용될 수 있는 공기의 양을 증가시킬 뿐만 아니라 고온의 연소온도에 연관된 엔진내구성의 문제를 줄일 수 있다. 한편, 흡입공기의 냉각으로 인한 공기 온도의 감소는 PM 배출의 증가를 일으킬 수 있지만, 만일 연소온도의 감소 정도가 충분히 작기만 하면, PM의 배출은 이의 영향을 받지 않거나, 연소에 이용할 수 있는 산소의 증가에 의해 오히려 감소하기도 한다.

흡입공기의 냉각방식에는 다음과 같은 두가지 방법이 있다. 즉, 수냉식(air-to-liquid)과 공냉식(air-to-air) 방식이다. 공냉식 시스템에서는 전통적으로 엔진냉각수를 사용해 왔다. 하지만 상대적으로 높은 냉각수 온도에 의하여 냉각의 정도에 제한을 받게 된다. 한편, 공냉식 인터쿨러(air-to-air aftercooler)는 흡입공기의 냉각을 위하여 외부에서 인터쿨러로 들어오는 공기를 이용한다. 외부의 공기를 이용하기 때문에 압축된 흡입공기를 외부온도의 근처까지 냉각시킬 수 있고, 따라서 압축된 흡입공기를 냉각시키는데 있어서 보다 효율적이다. 하지만 대기의 온도가 굉장히 낮은 곳에서는 과냉각(overcooling)이 일어날 수 있는데 이에 대한 적절한 제어가 이루어지지 않을 경우 매연과 PM의 문제를 일으킬 수 있다.

2.2 Exhaust Gas Recirculation

엔진에 흡입되는 공기의 일부를 불활성물질(inert material)로 대체하는 것도 NO_x 를 제어할 수 있는 또다른 방법이다. 불활성물질은 실린더 내의 공기/연료 혼합물을 희석시켜 탈 수 있는 공기의 양을 감소시킬 뿐만 아니라 불활성물질 자체가 연소열을 흡수함으로써 연소온도를 낮추는 역할을 한다. 흡입공기의 냉각에 관계없이 흡입공기의 희석(intake air dilution)은 결국 NO_x 의 배출을 줄이게 된다.

EGR은 연소혼합물을 희석시키기 위하여 배기가스의 일부를 이용한다. 재순환된 배기가스는 연료의 연소중 발생하는 에너지의 일부를 흡수하여 최고연소온도를 낮춰서 NO_x 의 생성을 억제시킬뿐만 아니라 엔진의 출력도 저하시킨다. 가솔린엔진에서 EGR은 무리없이 적용되고 있지만 디젤엔진의 경우 몇가지 제약을 받는다. 배기가스에 존재하는 PM에 의해 엔진과 과급기의 마모가 급격해진다. 또한, EGR이 인터쿨러의 전단에 도입된다면 EGR 가스 중의 PM은 엔진의 흡기 시스템에 부착되어 인터쿨러의 열전달을 감소시키고 과급기의 효율을 떨어뜨릴 수 있다. 이와 함께연소온도의 저하와 연소중 연료가 이용할 수 있는 공기량의 감소에 의하여 EGR은 불완전연소를 일으켜 HC, CO, 그리고 PM의 배출을 증가시킬 수 있다.

2.3 Water Addition

연소실내로 물을 첨가하는 것은 흡입공기 희석(intake air dilution)의 또다른 형태로 분류된다. 수분첨가(water addition) 방법은 EGR과 같은 작용을 한다. 즉, 연소실에 도입된 수분을 증발시키기 위하여 열을 흡수해서 최고연소온도의 저감을 가져와 NO_x 의 배출을 저감시킨다. 한편, 수분(water)은 액체의 형태로 도입되기 때문에 흡입공기의 매우 적은 부분만을 차지하게 되어 엔진출력에 미치는 영향은 크지 않다. 수분첨가는 NO_x 와 PM을 동시에 저감할 수 있는 몇 안되는 기

술중의 하나이다. 수분-연료 에멀전연료(water-fuel emulsion)를 사용한 경우 연료소비율의 급격한 악화없이, 혹은 전혀 악화없이 NO_x 와 PM을 약 40~50% 정도 저감할 수 있다. 한편 이러한 기술의 단점으로는 HC와 CO의 증가를 들 수 있는데, 하지만 HC와 CO는 디젤산화촉매(DOC, diesel oxidation catalyst)를 사용하여 쉽게 제어할 수 있는 물질이다.

수분사(water injection)의 방법에는 (1) 연료와 수분을 따로 분사하는 방법, 그리고 (2) 수분-연료 에멀전연료(water-fuel emulsion)화시켜 연료와 함께 분사하는 방법이 있다. 수분사는 다음과 같은 두가지 문제점을 안고 있다. 첫째, 수분사는 물탱크, 파이프 시스템, 펌프, 그리고 분사기 등 별도의 분사시스템을 필요로 한다. 이러한 시스템의 설계는 부식이라든가 혹은 불순물의 최적, 그리고 겨울철 결빙의 문제 등에 잘 대처할 수 있어야 한다. 둘째, 운전자는 주기적으로 물탱크를 채워주어야 한다. 엔진은 물이 없어도 운전될 수 있기 때문에 운전자에게 이러한 요구조건을 부여하는 것은 아무런 이득이 되지 않는다.

에멀전(emulsion) 연료는 엔진실린더로 수분을 도입하는 가장 효과적인 방법으로 인식되고 있다. 일부 회사들은 화학첨가제(chemical additive; surfactant), 고압, 또는 전기적 현상을 이용한 에멀전(emulsion) 기술에 대한 특허를 보유하고 있다. 에멀전(emulsion) 연료중 수분의 함량은 극히 소량에서부터 많게는 80%까지 포함하는 방법들이 제안되었다. 현재 개발되고 있는 기술들은 대부분 20~30%의 수분을 사용하고 있다. 에멀전(emulsion) 연료의 문제점은 연료의 윤희성과 부식 특성, 그리고 에멀전(emulsion) 연료의 성층화에 따른 안정성의 문제 등을 들 수 있다.

2.4 Fuel Delivery

배출가스 저감은 분사압(injection pressure), 분무형태(fuel spray pattern), 분사율(injection rate), 그리고 분사시기(timing) 등의 조절에 의해서도 개선될 수 있다. 위의 항목들을 개별적으로 수행하면 비용의 상승 혹은 효율의 저하와 같은 여러가지 손실이 있을 수 있지만, 이를 조합하여 각각의 효과를 최적화시키고 손실을 최소화할 수 있다. 전자제어(electronic control)는 위의 개별적인 개선안을 조합하여 실행시킬 수 있는 효율적인 장치이다. 특히 디젤트럭이나 승용차 엔진 등에 있어서 배기규제의 대응에 중요한 역할을 한다.

연료분사노즐과 연료계통에 적용되는 압력에 관한 설계는 연료의 분무형태를 결정하는 요소이다. 배기저감을 위하여 연소실의 형상, 그리고 스월(swirl)의 형태에 적합하도록 분무형태를 최적화시킬 필요가 있다. 최적화는 주로 (1) 연소실 바울(bowl)의 밖으로 빠져나가는 연료를 최소화시키고, (2) 연료분사후 분사기의 노즐에서 연료가 뚝뚝 현상(dribble)을 방지하기 위하여 분사기의 노즐 끝단의 "sac volume"을 최소화 시키고, 그리고 (3) 연료의 미립화(atomization) 및 연소실로 흡입된 공기와의 혼합(mixing)을 향상시키는 방향으로 이루어진다.

지연분사(retarded injection timing)는 연소압력과 온도를 낮춤으로서 NO_x 배출을 저감시킬 수 있는 고전적인 방법이다. 하지만 지연분사는 연료소비율의 증가와 PM과 매연(smoke)의 악화를 초래한다. 일부 적당한 운전조건에서는 엔진출력을 저하시킴으로서 지연분사에 의한 매연(smoke)의 배출을 줄일수 있기도 하다.

전체적인 연료분사율(overall injection rate)을 향상시키는 방법은 연료분사 기간(duration of

fuel injection)을 단축하는 데에 사용된다. 연료분사율을 향상시킴으로써 연료분사시기를 늦출 수 있으며 이는 결국 지연분사법(retarded injection timing)과 같이 최고연소온도를 낮춤으로써 NO_x 의 생성을 줄일 수 있다. 연료분사율을 향상시키는 방법을 사용하면, 지연분사법과는 달리 연료분사의 종료시기는 지연되지 않기 때문에, 지연분사법의 단점인 PM과 연료소비율의 악화를 어느 정도 줄일 수 있다.

분사율조절법(injection rate shaping)은 공해물질의 생성을 억제하기 위하여 전체 분사기간 동안 연료분사율을 의도적으로 변화시키는 방법이다. 이러한 방법의 좋은 예로 커먼레일(common-rail) 분사시스템에서의 파일럿분사(pilot injection)를 들 수 있다. 연료의 일부를 연소실에 일찍 분사시키고 대부분의 연료는 초기에 분사된 연료가 점화될 때까지 지연시켜 분사하는 방법이다. 대부분의 연료는 지연분사(delayed injection)되기 때문에, 대부분의 연료는 낮은 온도에서 연소되고, 이는 결국 NO_x 의 생성을 감소시킨다.

2.5 Electronic Control System

전자제어(electronic control)를 사용하면 설계자는 기계적 시스템을 사용할 때보다 훨씬 정확하게 연료분사를 제어할 수 있으며 또한 분사율조절(injection rate shaping)을 할 수 있다. 즉, 연료의 손실을 최소화하면서 배기가스의 제어 능력을 향상시킬 수 있다. 만일 전자제어를 활용할 수 없다면, 분사율조절(rate shaping)과 같은 진보된 개념의 기술을 사용하기가 힘들다.

2.6 Combustion Chamber

공해물질의 제어에 관점을 둔 연소실의 형상과 노즐의 위치 등에 대한 설계에 의하여 공기유동의 최적화, 그리고 분사된 연료의 거동을 최적화 시킴으로써 NO_x 와 PM의 배출을 감소시킬 수 있다. 하지만 특히 대형엔진의 경우, 구조적인 관점에서의 내구성 및 배출물제어에 관한 내구성 등이 연소실의 설계에 중요한 영향을 미친다.

배출물의 제어에 영향을 미치는 또다른 엔진의 설계인자에는 압축비(compression ratio)가 있다. 일반적으로, 압축비를 낮추면 NO_x 의 저감 및 연비의 개선을 이룰 수 있지만, PM의 악화를 초래한다. 따라서, 저압축비(low compression ratio) 엔진은 냉시동(cold starting) 시에 문제를 일으킬 수 있다. 하지만 저압축비는 엔진의 각 구성요소에 가해지는 하중을 낮춤으로써 결과적으로 엔진의 내구성을 향상시킬 수도 있다.

2.7 Lean NO_x Catalyst

특히 NO_x 를 줄이기 위한 촉매를 개발하기 위한 전세계적인 연구들이 진행중에 있다. 개발되고 있는 장치들은 NO_x 분해촉매(decomposition catalyst)와 NO_x 저감촉매(reduction catalyst)로 분류할 수 있는데, 이 중에서 NO_x 저감촉매가 기술적으로 좀 더 가치가 있어 보인다. NO_x 저감촉매는 촉매변환기(catalytic converter) 내의 저감제(reductant) 혹은 환원제(reducing agent)라고 불리는 성분의 농도를 적절히 유지해야 할 것을 요구한다. 디젤 NO_x 저감촉매(diesel NO_x reduction catalyst)의 목적은 디젤엔진의 특성인 희박배기가스(oxygen-rich exhaust gas) 상황에서

NO_x의 배출을 저감하는 것으로서, 이러한 형태의 촉매를 lean NO_x 촉매라고 부른다.

배기가스 중의 HC는 가장 효율적이면서도 편리한 환원제이지만, 현실적으로 디젤엔진의 배기가스에는 고효율의 NO_x 변환이 가능한 만큼의 충분한 양의 HC가 존재하지 않는다. 따라서, lean NO_x 촉매를 사용하기 위해서는 배기 시스템에 HC 혹은 디젤연료를 추가로 분사할 수 있는 보조장치가 필요하다. 하지만 촉매활성도(catalyst activity)와 내구성(durability)의 문제로 인하여 아직까지 디젤자동차에서의 검증은 이루어지지 않고 있다. 한편, lean NO_x 촉매의 NO_x 저감 능력은, 비록 HC가 충분한 상황에서도, ECE+EUDC 테스트 사이클에서 아직까지 20%를 넘지 못하고 있다.

아직 개발의 초기단계이기는 하지만, 촉매의 담층(washcoat)에 NO_x 포집(trapping) 재료를 사용하여 NO_x를 저감시키는 새로운 NO_x 저감촉매 기술이 개발되고 있다. 이 trap은 희박영역에서 NO_x를 포집하였다가 농후영역에서 배출(release)하여 재생(regeneration)시키는 것으로서, 재생을 위한 농후한 혼합기가 짧은 시간 동안만 유지되어야 한다(short duration spikes of rich air-to-fuel mixture). 이러한 농후혼합기는 common-rail 분사시스템에서 실현될 수 있는 후분사(post-injection of fuel)를 통하여 조성될 수 있다. NO_x 트랩의 또다른 문제는 황성분에 피독될 수 있다는 것이다. 이와 같은 문제들이 해결될 수 있다면 NO_x 트랩은 ECE+EUDC 엔진 테스트 사이클에서 50% 이상의 NO_x를 저감시킬 수 있는 유망한 기술로 평가되고 있다.

2.8 Selective Catalytic Reduction (SCR)

한편, HC 대신에, 암모니아(ammonia)나 우레아(urea)와 같은 함질소물질(nitrogen containing compound)이 NO_x 저감촉매의 환원제(reductant)로 사용될 수 있다. 이와 같은 형태의 디젤 NO_x 저감촉매는 오랫동안 정지엔진(stationary engine)에 사용되어 왔는데, 이를 SCR 촉매(SCR catalyst)라고 한다.

정지디젤엔진에 사용되고 있는 SCR 촉매시스템은 대부분 암모니아(ammonia) 또는 우레아(urea)를 환원제(reducing agent)로 사용하고 있다. 이 두 화합물은 산업체 응용분야에서 효율적으로 사용하고 있는데, 정상상태 운전(steady-state operation)에서 NO_x의 변환효율이 매우 높은 것으로 알려져 있다. (Held, 1990) 이 촉매를 사용하기 위해서는 환원제를 적절히 분사하기 위한 정확한 암모니아(혹은 우레아) 제어 시스템이 필요하다. 너무 많은 양의 암모니아를 분사하면 ammonia slip이라고 하는 암모니아 배출 문제가 발생한다. 한편, 이러한 SCR 기술을 자동차 분야에 실용화하지 못하는 데에는 몇가지 이유가 존재하는데, 무엇보다 자동차에서 종종 경험하는 비정상상태 조건(transient condition)에서 환원제의 분사제어가 어렵다는 것이다. 이외의 문제로서는 배기가스의 넓은 범위의 온도변화, 환원제의 저장 및 공급장치와 장치규모 측면의 어려움, 환원제의 독성(toxicity) 문제, 그리고 시스템의 복잡성 등이 있다.

SCR 촉매의 NO_x 저감 효율은 90% 이상으로 알려져 있다. SCR 촉매가 비록 많은 문제점을 갖고 있다고 하지만, 이와 같은 고효율 때문에 SCR 촉매시스템을 자동차에 실용화하기 위한 연구가 한창 진행중이다.

2.9 Chemical Treatment

NO_x 저감을 위하여 cyanuric acid를 사용한 화학 후처리장치(chemical aftertreatment)에 대한 연구가 진행되고 있다. 배기가스가 cyanuric acid 펠릿(pellet)을 지나가면, 펠릿은 cyanuric acid 가스(HCNO)를 방출하는데, 이 cyanuric acid는 NO_x 와 반응하여 N_2 , CO_2 , 그리고 H_2O 를 내놓는다. 미국의 캘리포니아에서는 이 기술을 정치엔진, 즉, 상대적으로 출력의 변화가 급격하지 않고 주로 정상상태로 운전(steady-state operation)되는 대형디젤엔진에 있어서의 “best available technology” 이라고 인정하였다.

3. Particulate Matter Control Technologies

3.1 Combustion Chamber

흡입공기 혹은 연소실의 형상에 의한 난류, 그리고 이 두가지 효과의 조합(i.e. inducing swirl)에 의한 연소실내의 난류(turbulence)의 보강을 통하여 연소실내의 공기와 연료의 혼합을 증대 시킴으로서 디젤엔진의 PM의 배출을 줄일 수 있다. 전통적으로, 트럭엔진에서는 흡입공기 통로의 변경(routing) 또는 연소실 형상의 변경에 의해 스윙(swirl)을 도입하고 있다. 하지만, 트럭 제조업자들 사이에서는 “리엔트런트(reentrant)” 피스톤 형상의 사용이 점점 증가하고 있는데, 리엔트런트(reentrant) 피스톤은 연소실로 흡입된 공기가 압축되고 조절된 스윙(controlled swirl)을 제공할 수 있도록 바울(bowl)의 형상을 변경한 것이다. 리엔트런트(reentrant) 연소실은 압축행정 말기에 강한 스윙(vortices of swirling air eddies)를 발생시켜 연료/공기의 혼합을 촉진시키며, 팽창행정까지 높은 스윙을 유지하여 추가로 바울(bowl) 내에 난류를 생성시킴으로서 확산연소를 도와준다. 이와 같이 리엔트런트(reentrant) 연소실은 연료/공기 혼합의 향상과 급속한 연소로서 보다 완전연소를 얻음으로써 HC와 PM의 저감에 뛰어난 효과를 가져온다. 하지만 고압연료 분사시스템이 채용됨으로서 과도한 스윙은, 특히 저부하 운전조건에서 연료의 완전한 침투를 방해함으로써 불완전 연소, 연료 효율의 저하에 따른 HC, CO, 그리고 PM의 증가를 초래하기도 한다. 따라서, 스윙의 정도는 엔진 설계의 다른 변수들, 즉, 연료분사압, 압축비, 그리고 피스톤 바울(bowl)의 형상 등을 고려하여 설계되어야 한다.

연소실 형상의 설계는 PM의 배출을 저감할 수 있도록 좀 더 최적화될 수 있다. 트럭엔진에서 피스톤의 상부 대비 제일 윗 피스톤 링의 위치(location of the top piston ring)에 대한 많은 연구가 이루어지고 있다. 피스톤 링의 위치는 피스톤과 피스톤 링 어셈블리의 내구성 유지 및 구조적 결함없이 “crevice volume”을 최소화하여 HC와 PM의 배출을 줄이기 위한 설계변경이 이루어지고 있다. 한편, 피스톤 링의 위치변경은 링의 과열(overheating)을 방지할 수 있도록 냉각시스템의 변경을 요구한다.

3.2 Fuel Injection System

연소압을 증가시킴으로서 연료의 미립화(atomization)와 공기/연료의 혼합(mixing) 특성을

개선할 수 있다. 액적(droplet) 크기의 감소, 그리고 혼합의 증대는 연료/공기 혼합물의 완전연소를 얻을 수 있도록 하며 결과적으로 PM의 생성을 줄일 수 있다. 고압 분사시스템의 단점은, 연료분사 시스템의 및 엔진의 다른 부속품의 강성을 증가시켜야 한다는 것이다.

분사시스템 개선의 또다른 방향은 “sac volume”을 최소화시키는 것이다. “Sac volume”은 연료분사가 끝난 뒤에도 노즐의 끝단에 남아있는 연료의 작은 체적을 말한다. 여기에 남아 있는 연료는 분사종료 후에도 조금씩 흘러나오는데, 이는 특히 저부하일 경우 PM 배출의 증가를 초래한다. 고부하 운전일 경우, 폭발행정 동안에는 연소실내의 압력이 높기 때문에 연료가 노즐 내에 잡혀 있지만, 폭발행정 다음의 배기행정에서는 연소실내의 압력이 낮기 때문에 sac volume에 잡혀 있던 연료가 흘러나와 HC 성분으로 배출된다.

3.3 Diesel Oxidation Catalyst

PM의 대부분은 엔진의 가속시에 배출된다. “터보랙(turbo lag)”라고 알려진 가속효과는 특히 과급기(turbocharger) 장착 엔진의 경우 치명적이다. PM의 배출은 엔진가속시에 추가의 공기를 공급함으로써 어느 정도 줄일 수 있다.

PM 저감을 위한 전자제어 송풍 시스템(electrically driven blower kit)이 Turbodyne社에 의하여 “TurboPac”이라는 이름으로 시판되고 있다. (Page, 1996) “TurboPac” 슈퍼차저(supercharger)는 저부하 운전의 엔진 가속시에 추가의 공기를 공급한다. 따라서, 이 장치는 “터보랙(turbo lag)” 효과에 의한 PM의 배출과 가시적 매연(visible smoke)의 생성을 제어한다. 하지만 송풍시스템은 과도한 전류를 필요로 하기 때문에 자동차의 전기시스템의 부하를 증가시킨다. 이 장치를 실제차량에 탑재한 경우의 데이터는 별로 없는 실정이다.

3.4 Diesel Oxidation Catalyst

디젤엔진에서 배출되는 PM은 고체탄소입자(carbonaceous particle), 용해성유기물질(soluble organic fraction), 황산염(sulfate), 그리고 흡착된 수분성분(adsorbed water)으로 구성되어 있다. 산화촉매(oxidation catalyst)는 배기가스의 PM 성분중에서 SOF 성분은 저감시킬 수 있지만 고체탄소성분에는 영향을 미치지 않는다. 따라서 이 장치에 의한 PM의 저감에는 한계가 있는데, PM의 최고 저감효율은 SOF 성분의 양에 따라 달라지며, 일반적으로 20~30%로 알려져 있다. (Harayama, 1992) 한편, 배기가스중에 존재하는 SO₂ 성분에 의한 황산염의 생성을 억제하기 위한 촉매시스템의 설계와 저유황연료의 사용이 필수적이다.

3.5 Diesel Particulate Trap

디젤산화촉매(diesel trap)는 필터링된 입자상물질(filtered particulate)을 산화시킴으로써 엔진 배기가스 중의 PM을 저감한다. 현재 디젤엔진에 이용할 수 있는 필터는 세라믹 유동형 모노리스(ceramic wall-flow monolith) 필터와 실타입의 세라믹 섬유재질(yarn-like ceramic fiber material)이 여러 층으로 쌓인 구조로 되어 있는 필터튜브(filter tube) 등이 있다. 이러한 필터에는 작은 구멍들(pore, hole)이 존재하는데, 배기가스를 필터의 구멍으로 흘러보냄으로써 배기가스 중의 PM을 포집한다.

필터에 포집된 PM은 결국 제거되어야 한다. 이러한 제거 과정을 재생(regeneration)이라고 하는데, 일반적으로 두가지 재생방법이 연구되고 있다. “수동시스템(passive system)”으로 불리는 방법은 필터에 촉매물질을 사용하여 시스템의 정상작동 과정 동안 연속적 혹은 주기적인 방법으로 재생을 하는 시스템이다. 한편, 또다른 방법인 “능동시스템(active system)”은 전기히터(electric heater)나 연료버너(fuel burner)를 사용하여 전자제어 시스템의 신호를 받아 주기적으로 필터의 온도를 올림으로서 PM을 산화시켜 트랩을 재생시키는 기술이다.

디젤산화촉매는 PM의 저감에 매우 효과적인 장치이지만 다음과 같은 몇가지 단점을 가지고 있다. 즉, 엔진의 내구성의 문제, 배압의 증가에 따른 연료 경제성의 문제, 그리고 “능동시스템(active system)”의 경우 히터나 버너의 작동의 문제를 가지고 있다.

3.6 Diesel Fuel

디젤연료에 대한 현재의 연구들은 디젤연료의 물성치를 조절하거나 또는 디젤엔진의 새로운 대체연료의 개발 등에 초점이 맞춰져 있다. 디젤연료 조성의 변화에 따른 효과는 서로 연관되어 있는데, 예를 들어, 연료의 세탄가(cetane number)를 증가시키는 것은 일반적으로 방향족 성분(aromatic content)의 감소 및 휘발성(volatility)의 증가와 관련되어 있다. 따라서 몇가지 경우에 있어서 각각의 파라미터(parameter)의 변화에 따른 효과를 서로 구분하는 것은 매우 어려운 일이 될 수 있다.

일부 디젤연료 성분의 변화는 디젤의 배출물 저감에 기여할 수 있다. 연료중 유황성분의 감소는 SO₂의 감소 및 이에 따른 유황염 입자상물질(sulfate particulate)의 저감을 이룰 수 있다. 이에 따라 촉매 후처리장치의 성능과 내구성을 향상시킬 수 있다. 한편, 세탄가의 증가와 밀접하게 연관되어 있는 방향족성분(aromatic content)의 감소에 따라 PM과 NO_x 배출을 동시에 저감할 수 있으며 (McCarthy, 1992; Ullman, 1990), 디젤연료의 동점성(kinematic viscosity)의 증가에 의해 PM의 배출을 줄일 수 있다.

“바이오디젤(biodiesel)”이라고 알려져 있는 식물성 기름(vegetable oil)과 동물성 지방(animal fat)으로부터 추출된 기름은 그 자체로서 디젤연료로 사용되기도 하고 또는 디젤연료와의 혼합연료(blend)로 사용되기도 한다. “바이오디젤(biodiesel)”은 계속 사용이 가능한 연료(renewable fuel)의 잠재 에너지원으로서 미국과 유럽 등지에서 관심을 받고 있다. 산소 혹은 함산소 성분을 첨가한 “바이오디젤(biodiesel)” 혼합연료는 NO_x 배출을 증가시킬 수 있다는 위험을 갖고 있지만 PM을 저감시킬 수 있는 것으로 알려져 있다.

3.7 Lubricating Oil

한편, 윤활유의 조성이나 윤활유 소모량을 저감시킴으로서 PM의 배출을 저감시킬 수 있다. 정유업체에서는 트럭엔진의 PM 저감을 위한 윤활유의 개발 연구를 진행하고 있다. 윤활유 개선의 한가지 대안은, 윤활유에 일반적으로 사용되는 금속첨가제(metal additive)를 비금속(nonmetallic) 성분으로 대체하여 윤활유의 비가연성물질(noncombustible portion, ash)을 줄이는 것이다. 이러한 시도는 “인(phosphorus)”과 같은 촉매독성(catalyst poison)을 줄임으로서 후처리장치의 내구성을 증가시

킬 수 있다.

합성유(synthetic oil), 혹은 부분적인 합성유를 사용함으로써 PM의 생성을 저감시킬 수 있다. 일반적인 윤활유는 넓은 온도 범위에서 증발이 일어난다. 저온에서 증발되는 부분은 크랭크케이스(crankcase) 내에서 증발이 일어나 연소실로 확산되어 PM의 배출을 증가시킬 수 있다. 한편, 합성 윤활유는 좁은 영역의 고온에서만 확산이 일어나도록 제조될 수 있다. 이러한 합성 윤활유는 윤활유의 증발이 PM 배출에 미치는 영향을 감소시킬 수 있다.

3.8 In-Cylinder Coatings

엔진제조업체들에서는 연소실의 표면에 세라믹 재질을 사용하는 방법을 연구하고 있다. 이러한 코팅(coating)은 열적 장애물(thermal barrier)로 작용하는데, 아직까지 배출물의 저감에 미치는 정확한 메커니즘은 알려지지 않고 있다. 세라믹 Engelhard社는 PM의 저감과 연비의 개선을 위한 지르코니아계 코팅(ceramic zirconia based coating)을 시판하고 있다. (Voss, 1997) 이러한 코팅 시스템은 분사시기의 조정, 분사율의 변경 등과 같은 다른 방법과 같이 사용되어 NO_x 배출의 증가 및 연비의 악화없이 PM을 저감할 수 있다.

참 고 문 헌

1. Harayama, N., et al., 1992, "Effects of Sulfate Adsorption on Performance of Diesel Oxidation Catalysts," SAE 920852.
2. Held, W. et al., 1990, "Catalytic NO_x Reduction in Net Oxidizing Exhaust Gas," SAE 900496.
3. McCarthy, et al., 1992, "Diesel Fuel Property Effects on Exhaust Emissions from a Heavy Duty Diesel Engine that Meets 1994 Emission Requirements," SAE 922267.
4. Miyamoto, N., 1992, "Description of Diesel Emissions by Individual Fuel Properties," SAE 922221.
5. Page, D. L., 1996, "Optimization of the Air/Fuel Ratio for Improved Engine Performance and Reduced Emissions," SAE 961714.
6. Ullman, T. L., et al., 1990, "Effects of Fuel Aromatics, Cetane Number and Cetane Improver on Emissions from a 1991 Prototype Heavy-Duty Diesel Engine," SAE 902171.
7. Voss, K., et al., 1997, "Zirconia Based Ceramic, In-Cylinder Coatings and Aftertreatment Oxidation Catalysts for Reduction of Emissions from Heavy Duty Diesel Engines," SAE 970469.