

1990年代를 위한 디젤機關의 排氣物制御

Diesel Emission Control for the 1990 S

鄭 仁 碩*
In - Seuck Jeung

1. 序 論

最近 國內에서도 政府 各機關 및 自動車生產業體에 있어서 디젤機關의 排氣物 억제에 대한 技術的 檢討가 자주 있었고, 많은 關係者들이 관심을 가지고 디젤機關의 排氣物規則에 주목하고 있는 實情이다. 이에 본 解説에서는 美國 SAE의 Automotive Engineering, 第 96 卷第 9 號(1988 年 9 月號)에 게재된 美國에 있어서의 1990 年代 디젤機關의 排氣物制御에 관한 추세 혹은 동향, 전망을 學會會員께 널리 전과하여 次後 國內에서의 디젤機關 排氣物制御의 參考資料로 活用하거나 또는 美國에 대한 輸出戰略의 일면이 될 수 있기를 바라 그 전문을 번역하여 게재코자 한다.

2. 本 文

1990 年대의 디젤기관에 엄격한 배기규제에 대처하기 위해서는 EPA 와 정유회사, 트럭제작자, 엔진과 부품생산자, 최종사용자들간의 공동노력이 필요하다. '60 년대에는 13 가지 형태의 가스배기사이클(gaseous emissions cycle)이 개발되었고, 매연기준이 확립되었다. '70 년대에는 이것이 계속 발달되어 순간배기

사이클(transient emissions cycle)이 선보였고, 실용적인 수명계수(life factors)들이 확립되었다. '80 년대에는 선택적이고 강제적인 검사(SEA)와 매연미립자기준(particulate standards)들이 정해졌다. 결국 오늘날의 엔진들은 제품의 가치가 향상되었으며 또한 연료효율과 신뢰도가 높아졌다.

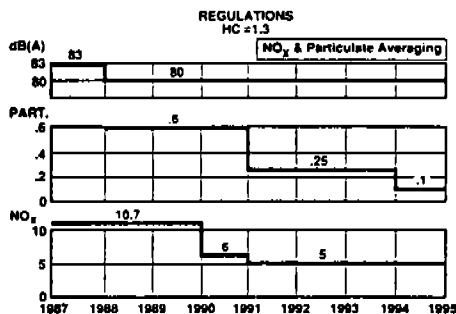


Fig. 1 Future EPA regulations

Fig. 1 은 EPA의 현재와 미래 배기규제치를 보여준다. 이런 규제에 맞게 하기 위해서는 개발목표들을 규제치보다 낮게 잡아야 한다. 엔진은 생산과 공정의 가변성과 사용기간중의 엔진 성능저하를 고려하여 기준보다 낮은 배기값을 가지도록 설계·개발되어야 한다. 필요 margin을 결정하기 위해서는 다음 항목들을 고려해야 한다.

* 正會員, 서울大學校 航空工學科 副教授

- 선택적인 필수검사(SEA: Selective Enforcement Auditing)의 사항
- 배기성능 저하
- 엔진간 가변성(engine-to-engine variability)
- 통관율(pass rate)(SEA에서 시험되어지는 엔진수를 최소화하기 위해)
- 안심도(confident factor)

이러한 목표들은 비용절감 프로그램과 규격에 맞는 엔진생산에 도움을 준다. 기술된 엔진처럼 한쪽 배기가스의 감소는 다른쪽 배기가스의 증가를 초래한다. 디젤기관의 경우는 NOx와 배기매연미립자(particulates) 사이의 관계에서 이러한 시소(seesaw) 현상을 볼 수 있다. 미래의 규제에 대처하기 위해서는 배기물 저감대책을 포함한 성능, 연료소모, 내구성 등을 저하시키지 않는 범위내에서 새로운 기술이 필요하다.

'90년대의 배기가스 대책방안은 엔진기술, 연료와 윤활유의 질, 사후제거(aftertreatment)에 초점을 맞추어야 한다.

새로운 엔진기술은 진보된 연소체계(combustion system)와 흡기풍기계(air system), 연료장치(fuel system), 전자제어장치를 포함한다. 피스톤과 연소실설계의 개선은 흡기계를 향상시킬 수 있는 계기를 마련한다. 흡기계는 가변형상, 전자적으로 제어되는 부분들의 배치, 그리고 개선된 애프터쿨링시스템(aftercooling system)을 이용해 효율을 증가시킨 새로운 터보-차저(turbocharger) 디자인을 포함하고 있었다. 연료장치의 기술은 노즐의 sac volume (체크밸브(check valve)와 오리피스 사이의 연료통로)을 줄이는것, 분사, 최고압력을 증가시키는것, 전자제어를 통해 분사율을 맞추는것 등을 포함한다.

전자제어장치기술은 차량구동라인, diagnostics를 포함하는 주요계기들과, 같은 차량의 다른 부분 등에 직접적인 연관이 있다.

연료와 윤활기술은 매연미립자 배기물을 감소하기 위한 첫번째 조건으로 유헴성분을 제거해야 한다. 높은 세탄가(cetane)는 연소를

증진시키며, 냄새가 없을수록 매연미립자들을 더욱 감소시킨다. 사후제거방법으로서 매연미립자트랩(particulate trap)과 촉매전환장치(catalytic converter system)가 있다.

2.1 엔진기술 (Engine Technology)

EPA의 순간배기물 검사동안 수집되는 매연미립자들은 엔진내부의 여러가지 source로부터 생성된다. 매연미립자를 감소시키는 가장 효과적인 수단을 강구하기 위해 이러한 source들의 각각의 기여도를 정량적으로 알아야 한다. 화학분석에 의하면 매연미립자의 주요구성성분은 SOF (Soluble Organic Fraction), 검댕이(soot), 그리고 산화물(oxides)이다.

SOF는 기본적으로 매연미립자필터(particulate filter)에서 모여진 윤활유와 연료로부터 생성된 미연소탄화수소이다. 검댕이(soot)는 연료와 윤활유의 불완전 연소로부터 생기는 탄소 알갱이이다. 산화물(oxides)은 SO₂, H₂O, NO₂와 PO₄를 포함하며, 연료와 윤활유의 연소에 의해 생성된다. 산화물의 주요한 부분인 SO₄는 기본적으로 연료의 유헴성분에 의해 생성된다. 매연미립자배기물에서 SOF와 soot의 크기는 엔진의 디자인에 따라 상당한 차이가 난다. 덧붙여서 엔진기술의 다른 성능 향상은 주로 엔진디자인에 의존하며, 이것은 Soot와 SOF에 여러가지 영향을 미친다.

2.2 검댕이의 경감(Soot Reduction)

매연미립자에서 Soot가 차지하는 비율을 줄이기 위해서는 연료나 윤활유의 연소능력향상이 필요하다. 그런데 엔진이 소모한 윤활유는 전체연료소모량에 비해 미소한 양이므로 윤활유는 Soot형성에 거의 영향을 미치지 않는다고 가정할 수 있다.

1) 연소실 설계개선

연소실 디자인은 엔진의 신뢰성, 내구성, 가격 뿐만아니라 Soot형성에도 중요한 영향을 미친다. 공기/연료의 혼합과정과 연료의 연소가 일어나는 온도조건은 연소실내의 연소공기

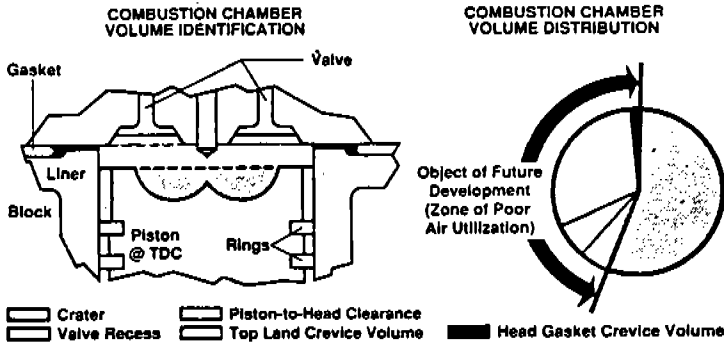


Fig. 2 Combustion chamber volumes

분포에 의해 영향을 받는다.

Fig. 2는 각각의 체적으로 표시된 연소실의 확대된 단면을 보여준다. 이 pie chart는 피스톤이 TDC에 도달했을때는(이 체적들의 상대적 크기가) 성립하지 않는다. 대부분의 공기/연료혼합이 일어나는 피스톤의 crater 체적은 total TDC 부피의 1/2 보다 약간 더 크다.

헤드개스킷유격, top-land crevice와 valve recess volumes들과 같은 poor air utilization volume은 TDC 체적의 주요한 부분을 차지한다. Fig. 3과 같은 연소실 설계변화는 연소실 내의 공기분포를 개선시킬 수 있고 매연미립자 배기물을 감소시킬 수 있다. 기본압축비는 유지하면서 즉 poor air utilization regions을 줄이고 crater volume은 증가시킨 디자인 변화에서 시험이 수행되었다. 그 결과 매연미립자를 상당량 감소시키면서도 연비, power을, 최고토크조건(peak torque conditions)은 향상되었다.



Fig. 3 Piston

2) 연료분사특성의 개선

직접분사디젤엔진의 연료분사특성은 연소과정동안 Soot의 형성에 지대한 영향을 미친다.

연소의 확산연소비율 동안에 연소율에 큰 영향을 미치는 공기/연료 혼합비는 분사압력을 크게 함으로써 증가시킬 수 있다. 시험은 실험적인 연료시스템으로 작동되는 단기통엔진을 사용해 수행되었다. 이 시스템은 노즐 오리피스 단면적을 일정하게 하면서도 최고분사압력을 변화시킬 수 있고 NOx량을 '91년도 개발목표 근처에서 유지시키기 위해 분사시간을 변화시킬 수 있다. 시험결과로부터 분사압력을 22,000 psi 보다 크게 했을때, 이 엔진의 정상상태에서 매연미립자 배기물을 상당량 감소시킬 수 있었고, 공기/연료 혼합과정의 개선에 의한(매연미립자 배기물 감소) 능력향상을 얻을 수 있음을 알 수 있었다.

3) 다른 기술들

연소과정동안 Soot생성을 감소시키는 여러 가지 다른 기술들이 있다. 가변형상 터보차arger(variable geometry turbocharging), 굴곡 흡입체계(turned inlet system), 그리고 turbo compounding이 엔진의 순간응답특성을 향상시키는데 쓰여지고 그리고 좀 더 한정된 acceleration smoke control이 사용될 수 있다. 전자제어품들은 배기물기준은 만족하면서도 주행성과 연비향상을 할 수 있는 좀 더 유연하고 복잡한 제어대책을 제공할 수 있다.

2.3 SOF 경감(SOF Reduction)

앞에서 언급했듯이 '88년도 엔진에서 배출되는 매연미립자배기물중 SOF는 연료와 윤활유로부터 기인한다. 연료로부터 기인하는

SOF의 양과 윤활유로부터 기인되는 SOF의 양이 정량적으로 정확히 얼마인가를 알기는 힘들다. 그러나 가스크로마토 질량분광기(gas chromatograph mass spectroscopy(GCMS))는 매연미립자를 2염화메탄으로 추출함으로써 탄소수를 대략 알 수 있고 질량분포를 대충 밝힐 수 있다. 그러므로 연료와 윤활유의 GCMS 결과들을 비교함으로써 각각의 SOF 기인량을 대략 알 수 있다. 실험결과로부터 매연미립자중 SOF의 비율에서 약 70~90%가 윤활유로부터 기인됐음을 알게됐다. 그러므로 윤활유로부터 기인되는 SOF량을 감소시킴으로써, 엔진에서 낮은 매연미립자 배기물을 배출시킬 수 있는 능력을 향상시킬 수 있다.

윤활유로부터 기인되는 SOF를 줄이는 가능한 방법은 두가지가 있다. 하나는 순간 배기물 사이클동안 윤활유소비를 줄이는 것이고, 두번째는 사이클동안 엔진에 의하여 소모되는 윤활유 연소상태를 개선하는 것이다.

1) 윤활유 소모감소

현재처럼 과중한 부하가 걸리는 디젤엔진에서 윤활유 소비감소는 세심하게 고려하여 이루어져야만 한다. 만일 윤활유 소비가 무분별하게 많이 줄어든다면, Ring의 손상과 마찰이 오히려 역으로 영향을 미치게 된다. 보다 낮은 부하에서 작동할때는 피스톤링과 라이너의 윤활의 필요성은 줄어들 것이다. 그런데 연속적으로 반복되는 순간사이클에서 얻어지는 윤활유 소비량은 내구사이클(endurance cycle) 동안의 윤활유 소모량보다 3~4배 정도 많았다. 앞으로의 피스톤/링/라이너, 밸브 가이드, 터보차저 seal 등의 윤활기술은 고부하상태에서는 여전히 적절한 윤활유를 공급하면서도, 저부하나 아이들링 동안에는 윤활유를 적게 공급하는데 주력해야 할 것이다.

2) 윤활유 연소의 개선

엔진에 의해 소모되는 윤활유의 연소상태는 매연미립자 배기물의 SOF량에 영향을 미치는 또 다른 요소이다. 엔진안의 윤활유의 소모는 윤활유 연소에 중요한 영향을 미친다.

터보차저 터빈 Seal이나 배기밸브가이드를 통해 증기상태로 엔진에 들어간 윤활유는 미연소 탄화수소로 남게되고, 대부분 SOF로 변환하게 된다. 터보차저 압축기 Seal(Turbocharger compressor seal)이나 흡입밸브 가이드나 피스톤링/라이너를 통해 연소실로 들어간 윤활유는 대부분 산화해 약간만이 SOF로 변환하게 된다. 오일의 근원에 관계없이 윤활유 연소를 증진시키는 중요한 사항은 Sealing 기술을 증진시키는데 있다.

3) 분사노즐 개선

오늘날 엔진에서 연료로부터 기인되는 SOF의 양은 전체 SOF 양의 10~30%를 차지한다. 매연미립자의 생성비율을 결정하는 주요한 인자는 노즐의 sac volume이다. 이곳의 연료는 각 cycle 동안 연소온도에 노출되어 있으므로 효율적으로 탈 수 있는 기회가 없이 기화된다. sac volume을 감소시키는 것은 매연미립자 배기물을 직접적으로 감소를 가져오게 되며 노즐 sac 만을 변형(modification)시키면 soot formation은 증가되지 않는다. 하지만 이것은 어떤 노즐형상에 대해서는 성취하기가 대단히 어렵다. 매연미립자 배기물에서 산화물의 비율 특히 SO₄의 비율은 엔진기술에 대해 영향을 거의 받지않고 일정하게 된다. 이러한 구성요소는 '91년과 '94년에는 매연미립자 배기물 허용치에 중요한 비율을 차지하게 되므로 그때의 허용치에 맞추기 위해선 연료의 질을 향상시켜야만 한다.

2. 4 연료의 질(Fuel Quality)

디젤연료의 유황성분은 엔진의 매연 미립자 배기물에 직접적인 영향을 미친다. 이러한 관계를 정의하기 위하여 Fig.4에서 보여지는 것처럼 디젤엔진의 세가지 종류를 대변할 수 있는 세개의 엔진이 실험되었다. 그리고 이 세개의 엔진은 표준 실험연료(standard test fuel)와 저유황성분연료(low-sulfur fuel)를 사용하여 배기물 cycle을 실험했다.

이 두가지 연료는 가스상태의 배기물을 비교하기 위해 사용되었다. 성능자료(perform-

ENGINE COMPARISON			
CONFIGURATION	ENGINE X	ENGINE Y	ENGINE Z
Ataac	Yes	Yes	Yes
HP	250	425	325
BMEP (psi)	120	180	195
Combustion System	Swirl	Quiescent	Quisscent
Number Valves	2	4	4
Peak Cyl Press	Low	Med	High
Electronic Control	No	Yes	Yes
Unit Injectors	No	No	Yes
PERFORMANCE, g/bhp-hr			
NO _x			
0.31% Sulfur	5.05	3.95	5.28
0.03% Sulfur	4.96	3.87	5.27
HC			
0.31% Sulfur	0.71	0.22	0.31
0.03% Sulfur	0.53	0.23	0.32
Particulates			
0.31% Sulfur	0.31	0.38	0.38
0.03% Sulfur	0.24	0.33	0.29
Particulate Reduction With Low Sulfur Fuel			
% Reduction	0.07	0.05	0.07
	22%	13%	19%

FUEL SPECIFICATIONS

	CURRENT	LOW SULFUR
Sulfur	0.31	0.03
Aromatics	31.0	31.0
90% Point	600	612
Cetane No.	48	51

Fig. 4 Fuel-quality effects

ance data)에 나와 있는 것처럼 NO_x 배기물은 세 엔진에서 비슷했다. 고유황성분 (high sulfur) 과 저유황성분 (low-sulfur)의 두 연료에 대한 실험에서는 모든 엔진에서 4~5g의 NO_x 배기물이 나왔다. 각각의 경우에 탄화수소는 (hydrocarbon)는 1990년대의 기준인 1.3g/bhp.h 보다 매우 작았다. 모든 엔진에 대한 매연미립자 정도 (particulate level)를 측정했고, 저유황연료의 매연미립자 감소는 0.05~0.07g/bhp.h 정도이다. 이것은 13~22% 정도의 매연미립자 감소를 말한다. 0.3% 정도의 유황성분을 지닌 일반연료를 사용할때 보통엔진에서는 0.07g/bhp.h의 매연미립자가 만들어지는 것을 고려하면 (이 사실은 Fig. 5의 pie chart에서 알 수 있다) 전체 매연미립자 규제가 0.1g/bhp.h일때 fuel sulfur는 전체 매연미립자의 70%에 이른다. 그러므로 1994년의 매연규격에 따르기 위해서는 연료의 황성분은 0.05 정도까지 줄어들어야 한다.

2.5 후처리기술 (After Treatment)

후처리기술은 '90년대 디젤엔진 배기물 제어의 3번째 부분이다. 매연미립자 후처리에

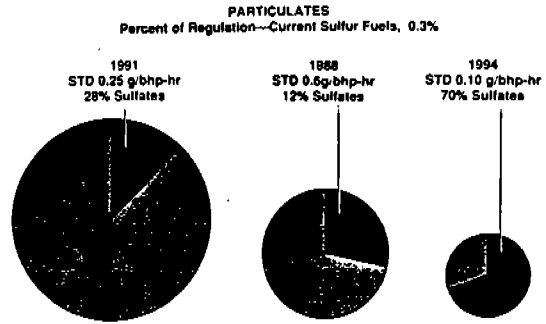


Fig. 5 Fuel-sulfur content

대한 예로서 널리 사용되는 것은 매연미립자 트랩 (particulate trap)과 산화촉매제를 관통하는 방법이 있다. Fig. 6의 매연미립자 트랩은 매연미립자중 검댕이 (soot) 부분을 걸러내는데 효과적인 필터매개체 (filter medium)을 사용하고 있다. 매연미립자 트랩은 또한 SOF를 줄일 수 있는 촉매로 사용되기도 한다. 한편 산화촉매변환기 (oxidation catalyst)를 통과시키는 방법은 매연미립자중 단지 SOF만을 줄이는데 효과적이다.

Ceramic wall flow trap system은 85% 정도의 Soot를 줄일 수 있는 능력이 있다. 황과 관련된 매연미립자들의 여러가지 수준들도 관측되었다. 그러나 SO₄ 배기물에 있어서는 단지 일시적인 감소가 예상된다. 왜냐하면 저장된 SO₄는 재생기간동안 배출될 수 있기 때문이다. 하지만 이러한 과정은 이번 실험에서는 수행되지 않았다. 매연미립자 배기물에서 상대적으로 SOF 비율이 큰 두번째 엔진에 대해 산화촉매변환기의 배기물 저감능력이 시험되었다. SOF는 촉매변환기에 의해 극적으로 감소된 반면 SO₄의 분율은 적어도 이 한정된 일련의 실험기간동안 증가되지 않았다. 촉매 온도와 촉매 formulations은 비록 저유황연료라고 해도 안정된 SO₄의 특성을 유지하는데 임계요소 (critical factor)를 가지고 있다. 이 두가지 기술이 어떻게 '94년 배기물규격을 만족시키기 위해 어떻게 기여해야 하는지를 알기위해 '91년도 배기물규격에 대한 엔진의 매연미립자 배기물의 구성에 대한 예측이 만들어졌다. 이 목표들을 달성하기 위한

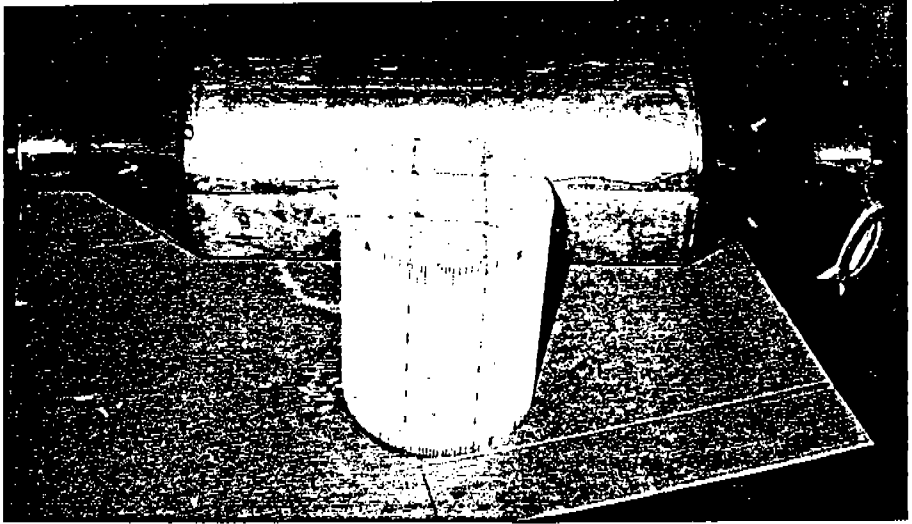


Fig. 6 Particulate trap

하나의 각본은 매연미립자중 Soot 부분의 80% 감소를 필요로 한다. 만약 연료/운환유연소상태에 있어 획기적인 개발이 이루어지지 않는한 '94년도 목표치에 대한 달성은 고성능의 트랩시스템(trapsystem)에 의해서만 가능하다. 디젤트럭엔진의 작동사이클은 초기에 재생을 시킬만큼 충분히 높은 배기온도를 만들지 않은채 오랜기간을 운행하기 때문에 매연미립자트랩에 의한 재생은 어렵게 된다. 보조히터가 이 문제를 극복하기 위하여 사용될 수 있다. 하지만 보조히터는 가격과 매연미립자트랩시스템의 복잡성만 가중시킨다. 순간적으로 엔진의 일반작동을 바꿀 수 있는 첨가제와 다양한 형태의 촉매체는 보조히터의 필요성을 줄일 수 있다. 하지만 이것이 엔진의 모든 작동조건에서 trap의 재생가능성을 설명하지는 않는다.

Trap 재료의 개선은 매연미립자 트랩시스템 개발에 큰 기여를 한다. 만일 실패없이 무제한적 재생을 할 수 있는 높은 효율의 trapping 매개체가 개발된다면 trap 시스템의 신뢰성과 가격문제를 줄일 수 있을 것이다.

2.6 가격해석 (value analysis)

가격해석은 저유황연료 개념과 매연미립자 트랩시스템을 비교하기 위해 사용된다. uni-form-series를 포함하는 교과서의 공식들은 가치를 나타내고 single payment는 구입시기

VALUE MODEL SUMMARY

	LOW SULFUR	PARTICULATE TRAP
Initial Truck Price	\$ 70,000.00	\$ 77,200.00
Fuel Consumption Engine	73,539.64	70,440.27
Oil Change	3,191.42	3,191.42
Oil Consumption	408.55	408.55
Early Hour Failure	168.79	168.79
Normal Reliability (During Warranty)	488.67	488.67
Normal Reliability (After Warranty)	4,609.24	4,609.24
Minor Overhaul	5,243.21	5,243.21
Major Overhaul	11,283.24	11,283.24
Trap		
Early Hour Failure	0.00	45.95
Normal Reliability (During Warranty)	0.00	130.31
Normal Reliability (After Warranty)	0.00	899.67
Major Overhaul		7,862.09
Resale Truck Value	11,912.66	13,137.96
Total	\$157,020.10	\$ 168,833.45

Fig. 7 Value model summary

에 맞게 원가를 계산할 공식을 나타낸다. Fig. 7의 가격모델 요약에서 저유황연료를 사용하는 트럭은 매연미립자 트랩을 사용한 트럭보다 11,813.34달러나 낮은 운행비용이 들게됨을 알 수 있다. 이것은 저유황연료를 사용하는 것이 처음 구입할때부터 소비자에게 유리함을 보여준다. 유황이 0.3%짜리 연료를 사용하게 되면 '94년도 표준기준치의 70%와 '94개발목표의 거의 90%에 이르게 될 수 있다. '94년도 배기물 규제기준을 맞추기 위해선 저유황연료가 요구되며 1990년대의 디젤배기물 제어의 중요한 요점이 된다.