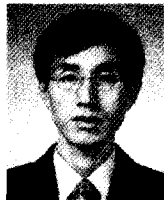


# 3. 기술동향

## (1) 기술동향

### 박용디젤기관의 질소산화물 저감기술 NOx Reduction Technologies on Marine Diesel Engines



박 권 하  
K-H Park

• 한국해양대학교 기계·정보공학부

#### 1. 서 론

디젤기관은 연료의 경제성 및 내구성, 신뢰성이 우수하며 탄화수소와 일산화탄소 및 이산화탄소의 배출면에서 유리하고 고출력을 낼 수 있는 장점을 갖고 있기 때문에 진동소음과 제조비용의 단점에도 불구하고 사용이 계속 증가하고 있다. 그러나, 확산화염을 동반하는 디젤기관에서는 매연미립자와 질소산화물의 배출을 피할 수 없으며 특히 박용기관에서 다량 배출되는 질소산화물에 대한 대책이 절실히 요구되고 있다. 국제해사기구(IMO)에서는 2000. 1. 1부터 박용기관의 NOx배출규제를 시작하였으며 5년을 주기로 강화될 것으로 예상된다. 이러한 규제의 강화와 환경 친화적인 기술개발에 대한 사회적 요구에 의하여 질소산화물 저감을 위한 많은 기술들이 개발되고 있다. 이 기술들은 크게 2분야로 구분되는데 연소실내의 기술과 배기후처리 기술이다. 박용에 적용되는 연소실내의 기술은 분사시기지연, 분사압력의 고압화, 흡입공기냉각, 흡입공기유동최적화, 흡배기시기의 조절 등을 들 수 있으며, 후처리기술은 오로지

SCR만이 사용되고 있다. 하지만 이러한 기술들은 현재의 규제에는 적절히 사용될 수 있지만 앞으로 계속 강화되는 규제를 만족하기 위해서는 추가적인 기술개발이 요구된다. 연소실내의 미래기술로는 분사특성을 자유로이 제어할 수 있는 common rail 고압분사 전자제어시스템, 물분사/물에멀전기술, clean EGR기술, 예혼합 압축착화기술 등이 개발되고 있으며 후처리기술로는 lean NOx촉매, 흡장형NOx촉매 및 plasma기술 등이 개발 중에 있다. 이들 기술은 미래에 강화되는 배기규제 만족을 위하여 단독으로 혹은 복합적으로 적용될 것으로 예상된다.

본 고에서는 디젤기관에서의 질소산화물 배출기구와 환경에 미치는 영향을 살펴보고 박용, 차량용, 산업용을 목적으로 개발된, 또는 개발중에 있는 각종 저감기술들을 정리하고 육상용의 배출규제에 대한 대책기술과 비교하면서 박용기관의 배출규제를 예상하고 그때의 대책기술들에 대하여 논하고자 한다.

## 2. 질소산화물의 생성과 영향

### 2.1 질소산화물의 생성

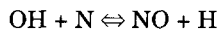
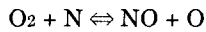
질소산화물은 일산화질소(NO)와 이산화질소(NO<sub>2</sub>)를 포함하며 디젤 배기에서 NO<sub>x</sub>의 농도는 50-1000ppm 이고 70-90%정도가 NO로 구성되어 있다. 그 물리적 성질은 Table 1과 같다.

**Table 1 Physical properties of NO and NO<sub>2</sub>**

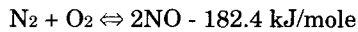
Name	Nitric oxide	Nitrogen dioxide
Formula	NO	NO <sub>2</sub>
Formula weight	30.01	46.01
Appearance	Colorless gas	Red-brown gas
Density	1.0367 (rel. to air)	-
Melting point	-161℃	-9.3℃
Boiling point	-151℃	21.3℃

주배출물인 NO의 생성기구는 3가지로 구분되는데, 대기중의 질소가 산화되어 발생하는 Thermal NO와 연료에 포함되어있는 질소성분이 산화되어 발생하는 Fuel NO 그리고 아직 논란의 여지가 있는 과농한 영역에서 발생하는 Prompt NO로 구분된다.

디젤기관에서는 대부분이 Thermal NO에 기인하며 그 생성기구는 확장 Zeldovich mechanism라 불리는 다음 식들에 의하여 발생하는 것으로 받아들여지고 있다.



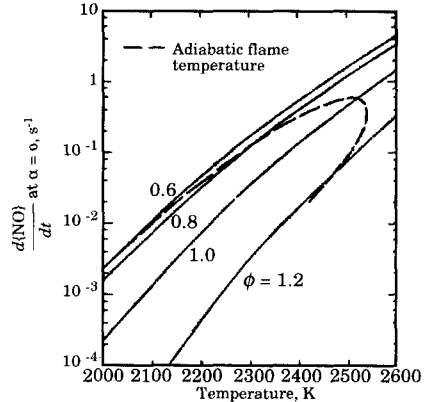
종합적으로 질소가 산화되어 NO가 발생하는 반응식은 다음과 같다.



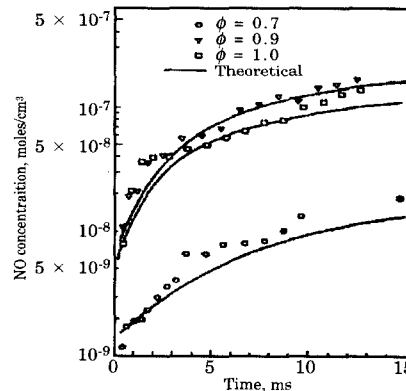
이는 흡열반응으로 고온 고압의 분위기에서 발생하며 온도가 낮아지면 환원되는 반대방향의 반응이 일어나지만 일반적으로 연소실내에서 발생하는 NO는 급속히 얼어붙어 배출된다.

NO의 생성에 미치는 물리적 영향을 보면 온도와 당량비 및 반응시간으로 구분된다. 온도와 당량비의 영향은 Fig. 1에서 보여주는 것처럼 온도가 높을수록 당량비가 낮을수록 즉 산소가 많을수록

NO의 발생율이 높지만 당량비에 따른 연소실 온도가 점선과 같이 변하기 때문에 연소실의 단열화염의 경우에는 이론 당량비에서 가장 높은 발생율을 나타내며 희박하거나 농후한 혼합기에서는 급격히 발생율이 낮아짐을 보여준다. 또한 Fig. 2에서 보여주는 것처럼 고온체류시간이 NO생성에 중요한 역할을 한다.

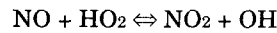


**Fig. 1 NO formation rate as a function of temperature for different equivalence ratio**

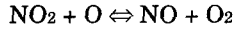


**Fig. 2 NO concentrations behind flame in high-pressure cylindrical bomb**

NO<sub>2</sub>의 발생은 주로 화염영역에서 생성된 NO가 아래의 반응으로 급속하게 NO<sub>2</sub>로 변환하여 생성된다.



이렇게 생성된 NO<sub>2</sub>는 차가운 유체에 급속하게 혼합되지 않으면 아래의 반응에 의해 다시 NO로 변환된다.



따라서 연소실내에 차가운 영역이 많이 존재하게 되는 운전조건, 즉 아이들링 상태나 저부하 운전상태에서  $\text{NO}_2/\text{NO}$  비율이 높다.

디젤엔진 연소는 가솔린엔진 연소와 달리 연료가 연소행정 직전에 연소실내에 분사되어 공급됨으로서 공기와 연료가 충분하게 혼합되기 전에 연소가 시작되며 따라서 공연비 분포가 불균일(heterogeneous)하고 연소과정이 매우 복잡하다.

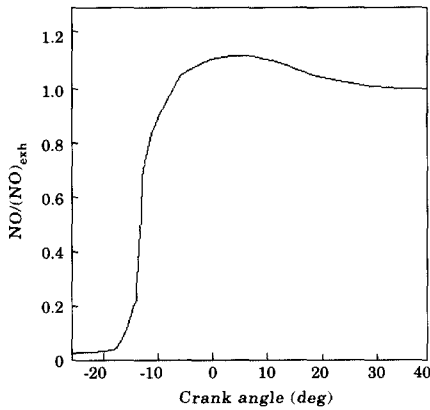


Fig. 3 Ratio of cylinder average NO concentration at given crank angle to exhaust NO concentration

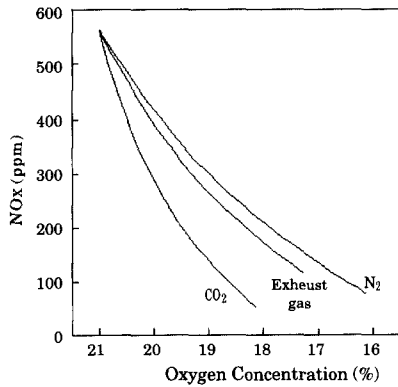


Fig. 4 Effect of reduction in oxygen concentration by different diluents

점화 지연 기간 직후의 예연소에서는 이론공연비 농도의 혼합기가 동시에 연소되면서 높은 열발생율을 나타내며, 주연소기간 동안에는 분사된 연료가 공기와 혼합되면서 농후한 혼합기, 희박한 혼

합기, 공기, 기연소 가스가 서로 혼합되어 복잡한 연소가 진행되는 난류확산화염을 형성하는데, 연소 시작후 20° CA에서 NO 발생이 대부분 완료된다(Fig. 3). Fig. 4에서 보여주는 것처럼 배기가스나 이산화탄소 혹은 질소를 혼합하여 산소농도를 저감하는 경우  $\text{NO}_x$  발생을 크게 억제하는 것을 알 수 있다.

### 2.2 질소산화물의 영향

발생원별 질소산화물의 배출량을 보면 수송분야에서 50%이상을 차지하며 산업, 발전의 순으로 나타나고 있으며 유럽과 미국의 경우도 이와 유사하다(Fig. 5, 6, 7). 수송분야에서 발생하는 질소산화물의 양을 분석하면 약 50%는 디젤기관으로부터 배출되는 것으로 나타나고 있다(Table 2, 3).

질소산화물이 미치는 영향은 대기환경과 인체에 미치는 영향으로 구분되는데 대기환경에 미치는 영향을 살펴보면 광학스모그와 산성비에 영향을 준다는 것을 알 수 있다.

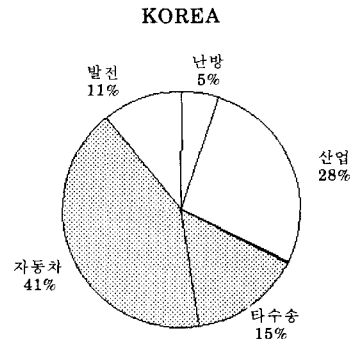


Fig. 5 Korea NOx emission inventory

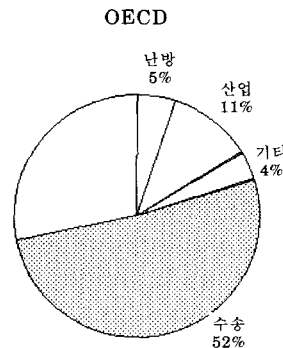


Fig. 6 OECD NOx emission inventory

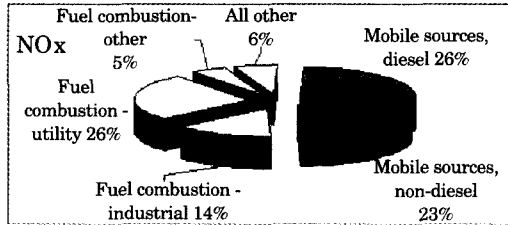


Fig. 7 U.S. NOx emission inventory(1997)

Table 2 1997 U.S. Nitrogen Oxides Emission Inventory (thousand short tons per year)

Category	NOx Emission	% of total	% of mobile
Total, all sources	23,582	100	-
Total, mobile sources <sup>a</sup>	11,595	49	100
· gas <sup>b</sup>	5,313	22.5	45.8
· diesel <sup>b</sup>	4,919	20.9	42.4
· railroad <sup>c</sup>	949	4.0	8.2
· marine vessels	235	1.0	2.0
On-road vehicles	7,035	30	61
· gas	5,102	21.6	44.0
· diesel	1,932	8.2	16.7
Non-road vehicles	4,560	19	39
· gas <sup>b</sup>	211	0.9	1.8
· diesel <sup>b</sup>	2,987	12.7	25.8

a-also includes aircraft  
 b-excluding marine vessels, railroad, and aircraft  
 c-all fuels  
 d-also includes marine vessels, railroad, and aircraft

Table 3 1997 UK NOx and PM10 Emission Inventory

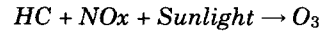
Category	NOx		PM10	
	kton/yr	%	kton/yr	%
Total <sup>a</sup>	1835	100	184	100
Road Transport	883	48	43*	23
· gasoline	485	26	10	5
· diesel	398	22	33	18
Non-road <sup>b</sup>	74	4	2	1

a-all anthropogenic sources  
 b-excluding marine vessels, railroad, aircraft and military  
 \* -includes tire and brake wear  
 Note: NOx reported as NO2

■ 광학스모그

스모그는 세계의 대부분 도시를 괴롭히는 대기오염물질들의 혼합성분으로 이루어지는데, 주

요성분으로는 질소산화물, 황산화물, 일산화탄소와 미세분진이다. 스모그의 척도가 되는 지상의 오존현상은 2차 대기오염으로 광학스모그에 의하여 발생하며 기침, 호흡장애 등 호흡기질환의 원인이 되는 회갈색 안개로서 햇볕과 질소산화물, 탄화수소의 복합적인 반응으로 발생한다.



대기중의 질소산화물의 광화학반응은 Fig. 8과 같이 도식적으로 나타낼 수 있다.

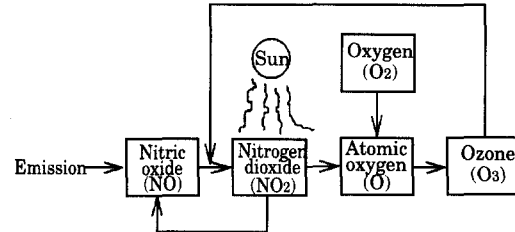


Fig. 8 Schematic of Ozone generation

■ 산성비

산성비의 원인은 산성가스인 NOx, SO2 등이 물에 녹아 생성되며 비나 눈, 안개 혹은 이슬 등과 함께 지상에 내리게 되는데, 호수 등을 산성화시킨다든지 숲을 죽인다든지 건축물을 부식시킨다든지 하는 중요한 문제들을 일으킨다.

■ 인체에 영향

NO는 눈, 코, 목구멍, 어지러움, 무의식증을 발생시킬 수 있으며 미국의 OSHA에 의하면 사람의 노출한계를 25ppm에서 8시간으로 규정하고 있다.

NO2는 매우 유독가스로서 100ppm에서 매우 위험하며 200ppm이 되면 사망하게된다. 증상은 기침, 입의 거품, 가슴통증, 폐수종, 눈 등에 영향이 있으며, 가벼운 통증과 함께 시작된 폐렴은 수일후 폐수종과 함께 사망의 원인이 된다. 그 노출한계는 Table 4와 같이 규정하고 있다.

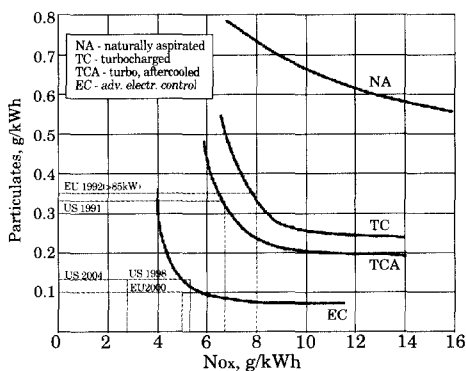
3. 디젤기관의 질소산화물 저감기술

디젤기관은 연료를 연소실에 분사하고 분사된 연료가 연소실내에서 미립화되면서 주위 공기와

**Table 4 Nitrogen Dioxide Exposure Limits**

Authority	Limit	Value
<b>Occupational Safe &amp; Health Limits</b>		
U.S. OSHA	PEL, ceiling value	5 ppm
ACGIH	Threshold Limits Value(TLV), 8 hrs avg	3ppm
ACGIH	Short Term Exposure Limits(STEL), 15 min avg	5ppm
<b>Ambient Air Quality Limits</b>		
U.S. EPA (NAAQS)	annual average	0.052ppm
Environment Canada	annual average (max. acceptable)	0.050ppm
Environment Canada	24 hours average (max. acceptable)	0.110ppm
Environment Canada	1 hours average (max. acceptable)	0.210ppm

혼합되고 연소조건이 형성되면 이론공연비 부근의 연료들이 확산 연소되는 과정을 통하여 연소된다. 따라서 연소가 진행되는 이론공연비 영역은 단열화염조건의 높은 온도에 도달하게 되고 NO<sub>x</sub>의 생성이 많아지게 된다. 이러한 근본적인 디젤연소 특성 때문에 많은 연구에도 불구하고 디젤기관에서의 NO<sub>x</sub> 저감대책은 명쾌한 해답을 얻기 어려우며, NO<sub>x</sub> 저감을 위하여 도입되는 많은 기술들은 NO<sub>x</sub>을 저감하는 대가로 연료소모율과 매연미립자의 증가를 가져온다. Fig. 9은 여러 가지 기술을 적용한 엔진에 대하여 NO<sub>x</sub>와 PM의 상관관계를 보여주고 있다. 자연급기방식에서 터보급, 급기냉각 그리고 엔진전자제어의 기술이 적용되면서 배기가스의 저감을 실현하고 있지만 여전히 질소



**Fig. 9 NO<sub>x</sub> - PM Trade-Off**

산화물과 매연미립자의 상관관계는 극명하게 나타나고 있다.

디젤 배기 제어 기술은 이러한 상관관계를 어떻게 하면 효과적으로 대처할 수 있는가에 관심이 집중되고 있으며, 크게 구분하면 엔진설계 및 개선, 디젤유와 첨가제기술 그리고 배기후처리 기술로 나눌 수 있다. 이를 기술별로 살펴보면 다음과 같이 정리된다.

**3.1 엔진설계기술**

설계 기술로는 엔진전자제어, 분사시스템개선, 배기재순환, 급기개선, 연소실개선, 물혼합과 실린더코팅 기술 등을 대표적으로 들 수 있는데, 엔진을 설계할 때는 배기특성의 향상뿐만 아니고 엔진의 효율, 마력, 내구성, 진동특성, 제조비용을 총괄적으로 고려하여야 한다. 이러한 종합적인 개념에서 엔진이 설계되는데, Fig. 10은 Toyota의 1KZ-TE엔진의 설계개념을 보여준다. Nissan의 저온예혼합화 연소방식의 설계인 배기가스저감을 위한 조금더 구체적인 개념으로 Fig. 11에 보여준다.

**엔진전자제어**

디젤기관의 엔진전자제어장치는 1980년대 후반부터 차량용으로 급격하게 개발되고 있으며, 현재는 산업용 및 박용기관으로 빠르게 전파되고 있다. 전자제어는 엔진시동, 부하조절, 배기 조절과 같은 디젤기관의 전통적인 제어문제를 동시에 해결할 수 있는 강력한 도구로 등장하고 있으며, 배기 제어 시스템, 연료공급시스템과 흡배기 시스템을 광범위하게 제어함으로써 많은 배기 배출물을 획기적으로 저감할 수 있게 되었다. 이러한 목적을 위해서는 연료, 공기 및 EGR(가능하다면)의 양을 요구되는 온도와 압력상태에서 시간당 적절히 제어하여야 하며, 엔진을 사용하면서 나타나는 마모 및 고장 등에 의한 배기 배출량 증가에 대한 문제를 해결하여야 한다. 전자제어장치는 엔진속도, 급기압력, 온도 등의 물리적신호를 받아드려 제어장치에 전달하는 센서류와 이러한 신호를 받아드려 엔진상태를 판단하고 신호를 내보내는 ECU(electronic control unit) 그리고 이 신호를 받아 물리적 작동을 수행하는 작동장치(actuator)로 구성된다(Fig. 12).

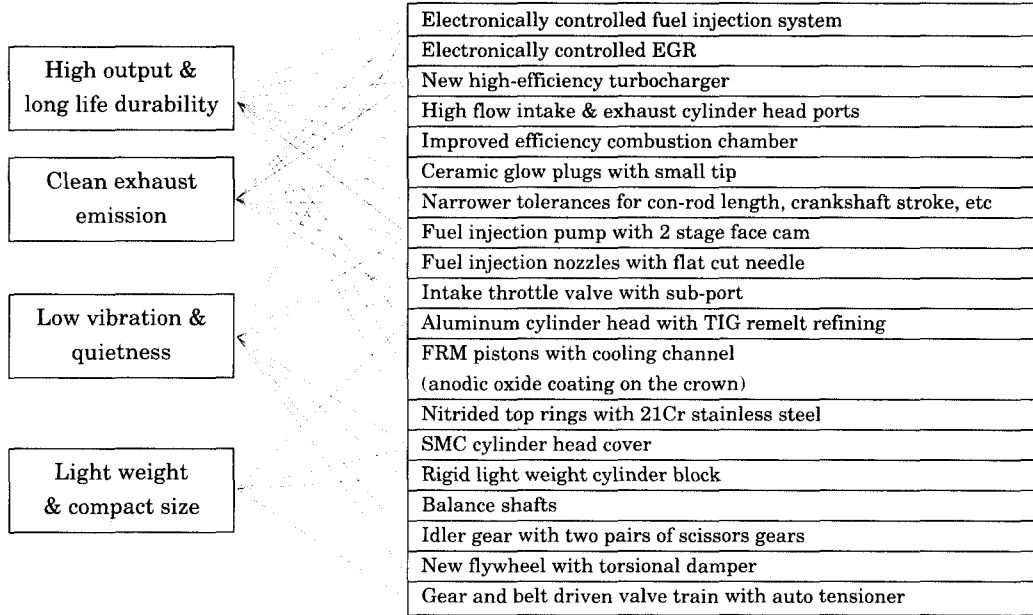


Fig. 10 Engine design concept of Toyota 1KZ-TE 3L Diesel engine

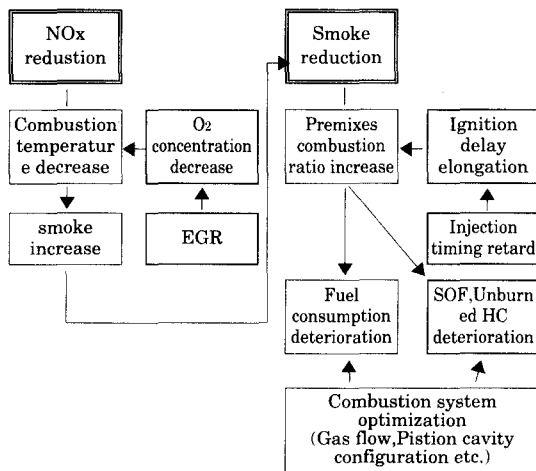


Fig. 11 Engine design concept of Nissan MK engine

연료량은 시동, 엔진속도, 부하의 조건에 따라 조속기에서 조절되는데, 속도 변환 조속기(variable speed governor)와 최저-최고 속도 조속기(minimum-maximum speed governor)의 2가지 시스템이 있다. Variable speed governor에서는 부하가 적용된 후에 엔진속도를 할당하는 형식으로 부하변동이 매우 심한 트랙터, 포크레인 혹은

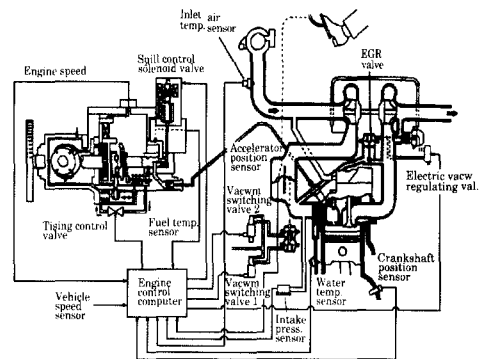


Fig. 12 Engine control system of Toyota 1KZ-TE 3L Diesel engine

엔진속도의 변화가 작은 경우에 적합하다. Min-max governor는 저속, 고속에서의 엔진손상을 방지하기 위하여 자동 조절되며 throttle 위치에 의하여 연료를 공급한다. 연료의 공급량의 조절은 ECU에 미리 저장된 3차원 fuel-map에 의하여 결정된 후에 유량 한계 연료 공급을 등 다른 엔진조건들과 비교되고 이 중에서 최저의 연료 유량값을 선택하여 연료 공급 시스템에 신호를 보낸다.

분사시기는 연소와 배기에 가장 중요한 요소가

되고 있으며 엔진성능의 최대 요소인 연료소모율, 배기 배출량과 연소실 최대압력 등은 연료분사시기에 매우 민감한 함수이다. 기계적인 분사시스템에서는 분사시기조절이 매우 제한되고 캠형상에 의하여 분사시기, 분사율이 결정되며 분사압력과 기간도 결정된다. 반대로 전자제어시스템에서는 엔진부하, 속도와 주위조건에 의하여 분사시기를 결정하며 배기 배출량을 최소화할 수 있게된다.

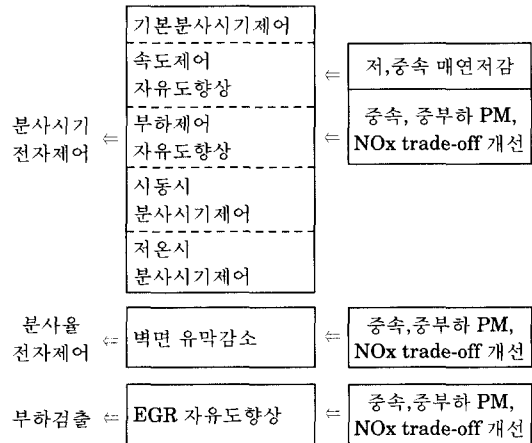
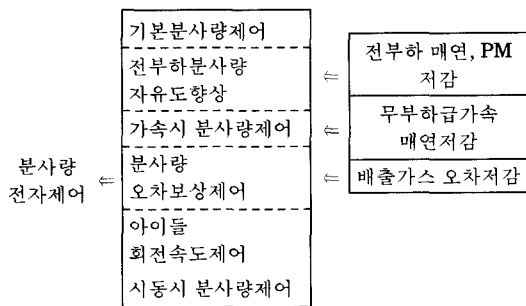
과급압력의 전자조절은 wastegate turbocharger 나 variable geometry turbocharger를 사용하는 과급기의 급기압력을 과급기의 성능과 배기특성을 고려하여 ECU 신호로서 조절함으로써 최적의 상태를 유지할 수 있도록 한다.

EGR율의 전자제어는 다른 성능을 유지하면서 NOx를 저감하기 위하여 재순환량을 자동 조절하지만 흡배기사이의 압력차이가 크지 않기 때문에 재순환 가스량을 측정하는 데에 어려움이 있다.

Serial Data Links는 전자제어항목이 점차 증가함에 따라 이를 종합적으로 통제할 필요성을 갖게 되었으며 1980년대 중반부터 개발이 진행되었다. 유럽에서는 Bosch에서 CAN(Control Area Network) standard를, 미국에서는 SAE standard를 개발하였다.

On-Board Diagnostics는 배기 제어 성능을 검출하며 배기 배출물 결함을 발견하는 시스템으로 이들 결함을 운전자에게 알리게 된다. 주요 검출신호는 배기 후처리 장치성능, 엔진실화, 연료공급시스템, EGR시스템, 에어컨시스템, 증발 연료 배기, 이차 공기시스템 등이 있다.

이상을 종합하면 다음표와 같다.



연료분사시스템

디젤기관의 분사시스템은 캠구동에 의한 시스템과 압축용기에 고압연료를 저장하는 시스템으로 구분이 되는데 Fig. 13와 같이 분류되며, 분사시스템기술은 분사시기지연, 분사압력의 증가, 분사기의 개조 그리고 고압분사 전자제어로 나눌 수 있다.

분사시기: 디젤기관에서 연소시기는 NOx 제어의 가장 근본적인 요소이다. 분사시기를 앞당기면 예혼합연소를 활성화하고 연소온도와 압력을 높이며 연소효율을 향상시키는 반면 질소산화물의 증가를 가져온다. 반면 지연시키면 질소산화물 배출의 저감(-30%일때)을 가져오지만 연료소모율(+13.4%), HC, PM(+15%), smoke를 증가시키게 된다(Fig. 14).

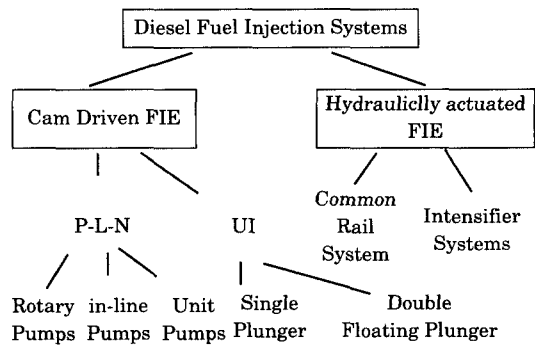


Fig. 13 Fuel injection system - overview

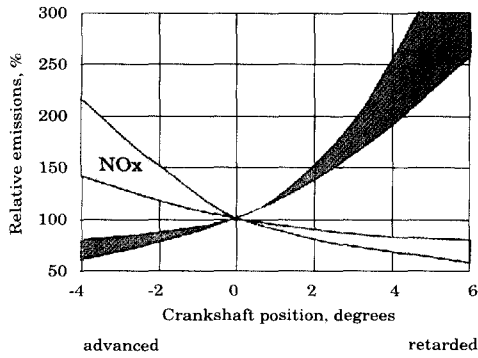


Fig. 14 Effect of Ignition Timing on Emissions from IDI Engines

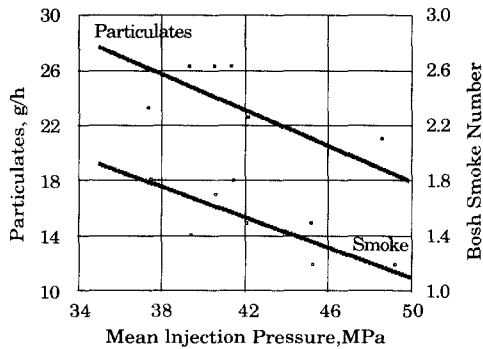


Fig. 15 Impact of Injection Pressure on Particulates and Smoke

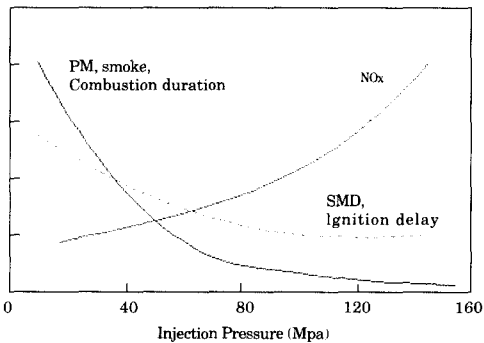


Fig. 16 Effects of injection pressure variation

분사압력: 새로운 분사시스템은 점점 고압화 되고 있는데, 이는 연료미립화의 향상과 연료관통 거리를 길게하여 공기를 충분히 이용할 수 있도록 하기 위함으로 연료소모율의 저감과 스모크특성을 개선하는 효과를 가져온다(Fig. 15).

하지만 Fig. 16과 같이 일반적으로 분사지연기

간의 단축에도 불구하고 질소산화물의 증가를 가져온다.

분사 압력 증가가 분무 및 연소에 미치는 영향을 상세하게 살펴보면, 액적의 평균직경은 분사압력이 60MPa까지 증가할 때 급격하게 작아지는데 그 이상의 압력증가에서는 큰변화가 없는 것을 알 수 있다(Fig. 17). 물론 분사시스템의 특성에 따라 그 값은 변화가 있을 것이지만 일반적으로 어떤 압력 이상에서는 미립화의 효과가 둔감하게 된다는 것을 말한다. Fig. 18에서 보여 주는 것처럼 연료소모율 역시 분사압력의 증가와 함께 저감됨을 알 수 있다. 80MPa 근처에서는 서로 큰 차이가 없지만 100MPa이 되면서 크게 향상됨을 보여준다. 고압 분사는 분무에 큰 동력학적 에너지를 공급하게 되고 이는 연소실내에서의 연료혼합을 활성화하며 결과적으로 연소효율을 향상하는 역할을 한다.

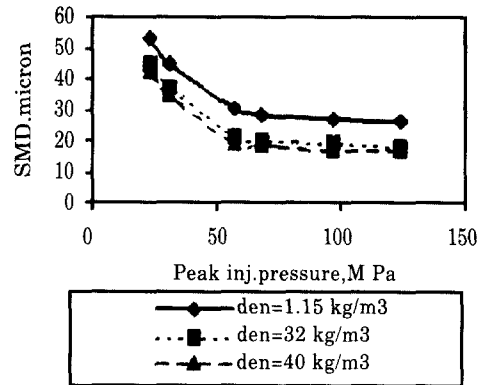


Fig. 17 SMD for pressure

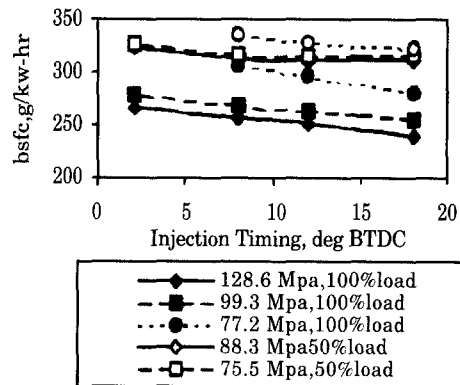


Fig. 18 Fuel consumption for pressure



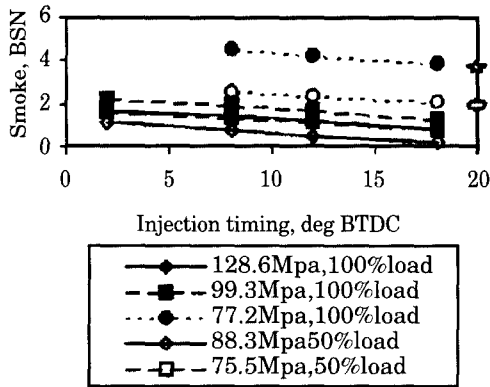


Fig. 19 Smoke for pressure

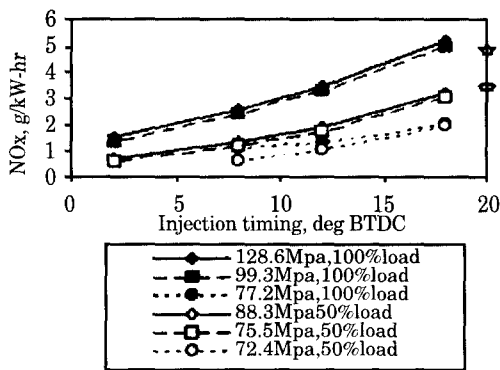


Fig. 20 NOx for pressure

고압분사의 가장 주요한 역할은 스모크 저감임을 알 수 있는데, Fig. 19은 Bosch 스모크 레벨을 보여준다. 보통 분사시스템과 비교하여 128MPa 분사압력에서는 68%의 스모크 저감을 나타낸다. 하지만 88MPa일 때 가장 낮은 수치를 보이면서 그 이상에 대하여는 유사함을 알 수 있다. 반대로 질소산화물의 배출은 분사압력의 증가와 함께 늘어남을 보여준다.(Fig. 20).

분사율제어: 분사압력이 높아짐에 따라 분사 시작부터 연소가 시작되는 점화지연기간동안의 연료분사량이 증가하여 급속 연소 기간에 폭발연소가 발생하여 연소압력이 높아지며 연소온도도 증가하여 NOx와 소음이 증가한다. 이를 막기 위하여 분사시기를 지연시키면 연비 악화와 PM 증가가 동반되기 때문에 한계가 있다. 이를 방지하기 위한 대책으로 분사율 형상을 바꿈으로서 분사율

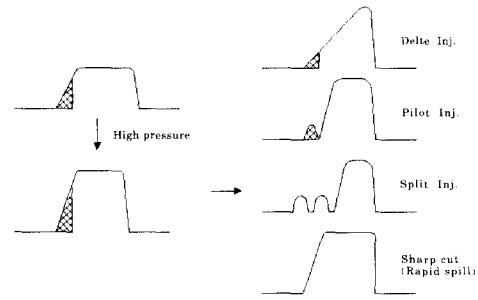


Fig. 21 Injection rate control patterns

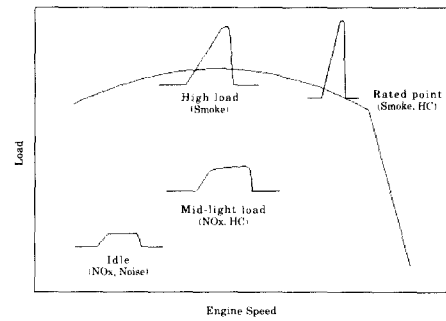


Fig. 22 Injection rate control with engine condition

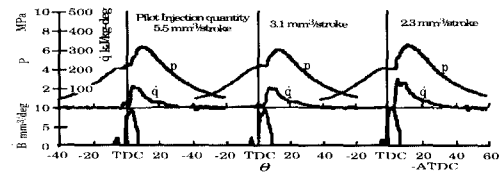
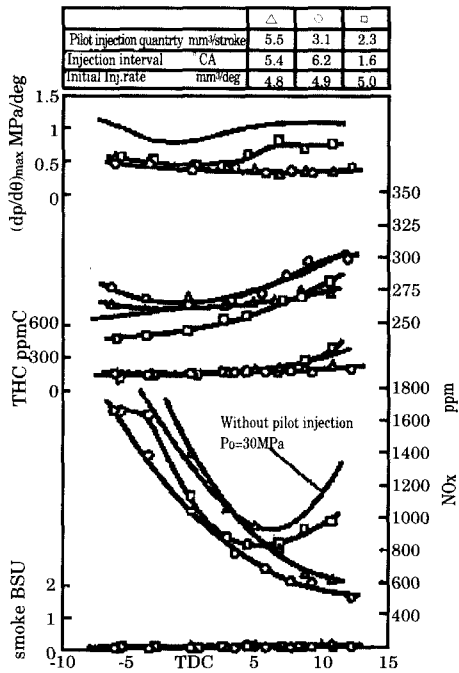


Fig. 23 Cylinder pressure for different pilot injection rate

을 제어한다. 초기 분사율 증가를 완화하여 점진적으로 증가시키는 델타형 분사율 형상, 착화 전에 미소한 연료를 우선 분사하는 파일롯분사 등이 사용된다. 또한 분사종료에 필요한 고압연료를 분사한 후 급속하게 종료하는 급속종료(sharp cut, rapid spill)를 구현하여 HC, 스모그, 연비의 개선을 도모하고 있다.

파일롯 분사를 이용하면 연소실내의 예혼합연소를 조절함으로써 PM의 증가를 가져오지 않으면서 NOx 저감을 가져올 수 있게된다. Fig. 23는 파일롯 분사량을 변화시킬때의 분사율 형태와 연소실 압력 변화를 보여준다.

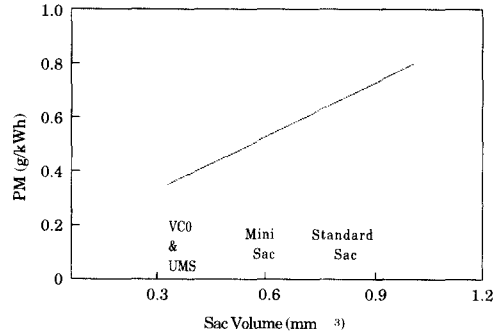
파일롯 분사량이 너무 작거나 많은 경우에 연



**Fig. 24 Engine performances for different pilot injection rate and timing**

소실 압력의 급격한 증가를 보여주는데, 이는 배기 가스와 연비에 영향을 미치며 Fig. 24에서 보여주는 것처럼 파일롯 분사량이 3.1mm<sup>3</sup>/stroke인 경우가 다른 배기 특성을 적절히 유지하면서 NOx를 저감할 수 있는 것으로 보여진다. 파일롯 분사와 함께 분사시기를 지연하면 PM, HC 등의 큰 증가 없이 NOx의 저감을 극대화할 수 있음을 알 수 있는데, 연비의 증가는 어쩔 수 없는 것으로 보여진다.

**Nozzle 형상:** 노즐의 분사구멍을 작게 하고 개수를 증가시킴으로서 분사압력의 고압화와 함께 분무의 미립화를 촉진시켜 연료공기의 혼합이 향상되며 매연과 PM을 저감시킨다. 동시에 분무입자의 관통거리가 짧아 연소실 벽면에 부착되는 연료 유막 형성이 적어 HC가 감소된다. 분사구멍 직경은 0.15-0.18mm가 사용되며 가공기술 등을 감안할 때 향후 0.1mm 수준까지 가능할 것으로 전망된다. 섹체적(sac volume)을 가능한 줄여서 분사말기의 후적연료의 미연소를 줄이고 있다. 섹체



**Fig. 25 Effect of Sac Volume on PM**



**Fig. 26 Sac volume reduction methods**

적을 줄이기 위해 원추형의 섹(UMS; Ultra Mini Sac)과 니들 끝단이 분사구멍을 막는 VCO(Valve Covers Orifice) 타입 등이 시험되고 있으며, 종래 타입에 비해 절반 이상으로 섹체적을 줄일 수 있는 것으로 검토되고 있다. VCO는 섹체적이 가장 적으나 분사공 사이의 분무 관통도에 편차가 발생할 수 있으며, UMS는 분무형성을 희생하지 않으면서 섹체적을 최소화 할 수 있는 여유가 크나 가공이 어려워 생산성에 불리하다. 단공의 경우에는 Flat cut에 의하여 섹체적을 없게하는 형태도 있다.

**고압연료분사시스템:** 1990년대 초반에 차세대 연료 분사 시스템 개발을 위한 많은 사업들이 진행되었는데 크게 전자 제어 분배 펌프(electronically controlled distributor pump), 전자 제어 독립식 분사기(electronically controlled unit injector) 그리고, Common rail injection system으로 그룹 지어진다.

(1) EUI

최근의 고압 연료 분사 장치의 개발 동향을 살펴보면, 미국을 중심으로 전자제어식 유니트 인젝터(EUI; electronic unit injector)가 발전하고 있으며, 초창기의 기계식 유니트 인젝터를 탈피하여 솔레노이드를 사용하여 분사량을 조절하는 전자 계

어식 유닛 인젝터가 사용되고 있다. 엔진 연소실에 각각의 인젝터를 설치하며 인젝터에 부착되어 있는 캠을 엔진이 직접 구동하여 플런저를 작동시킴으로서 고압을 발생시킨다. UI는 탱크용으로 상당히 오래 전부터 개발되어 왔으며 자동차에도 이미 상용화되어 사용되고 있다. 그러나 엔진 설계시 EUI가 일체로 설계되기 때문에 타 엔진과의 호환성이 어려워 EUI를 적용하기 위해서는 새로운 엔진을 설계하여야 하는 부담이 있으며, 저속시 충분한 분사압력을 얻기가 용이하지 않으며, 엔진 기통간의 불균일 작동, 펌프구동에 비교적 많은 동력이 소요되는 등의 문제점이 있다. EUI는 현재 미국에서 많이 사용되는 추세이며 대형(heavy-duty) 엔진에 주로 사용될 수 있을 것으로 예상되고 있다.

(2) Commonrail

차세대 연료분사시스템으로 개발된 시스템 중 분사형상을 자유로이 변경할 수 있는 Common rail 시스템이 엔진소음과 NOx 저감측면에서 가장 유리한 시스템으로 받아들여지고 있다. 고압 펌프에서 발생된 고압연료를 저장용기 즉 레일에 저장시켜 전자밸브로서 분사를 제어한다. 콤포레일에 연료가 저장되어 공급되므로 분사기간 동안 엔진 회전속도에 관계없이 적은 압력변동과 최적압력 제어가 가능하며, 분사율, 분사량, 분사시기 등의 전자제어 구현이 가능하다. 3방향밸브(three-way valve)를 이용하여 콤포레일의 압력을 분사 종료 시에 역으로 작동시켜 노즐의 니들을 막아줌으로써 분사급속종료(sharp cut)가 가능하며, 이에 따라 분사말기에 낮은 분사압력에 의한 후적이거나 2차 분사를 막을 수 있어 연소불량을 개선할 수 있다. 또한 고속 3방향밸브를 사용하여 과일릿터 분사도 제어가 가능하다. Common rail system은 유럽을 중심으로 연구가 활발하며 특히 독일의 보쉬사가 가장 앞서 있으며 일본 니폰덴소(Nippondenso)사의 ECD-U2 시스템도 우수한 결과를 보이고 있다. 이 시스템의 장점을 정리하면,

- 엔진속도나 부하에 관계없이 일정한 압력을 유지하며 분사율과 분사시기를 쉽게 제어할 수 있다(Fig. 28).
- 저속, 저부하에서도 높은 압력을 유지함으로써

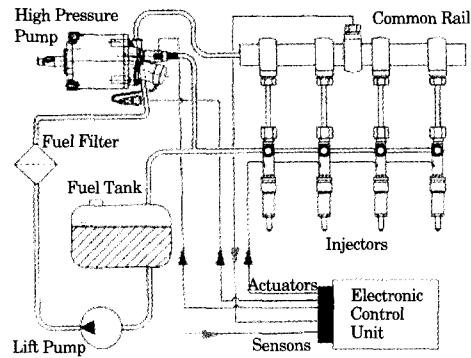


Fig.27 Schematic of the common rail injection system

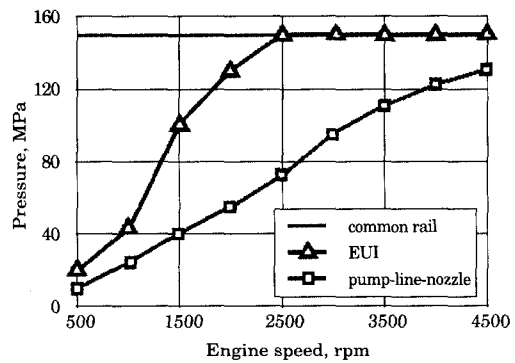


Fig. 28 Pressure Capabilities of Different Fueling Systems

서 분무특성을 좋게 유지할 수 있다.

- NOx와 소음저감을 위하여 pilot 분사를 수행할 수 있다.
- DPF(diesel particulate filter), lean NOx 촉매, NOx 트랩의 사용을 위하여 후분사(post injection)를 수행할 수 있다.
- 연료분사펌프를 회전시키는 구동축의 토크변동과 최대토크가 작다.

Toyota, Daimler-Benz, Fiat, Lucas 그리고 Bosch에서 다양한 시스템이 개발되고 있는데, pilot, pre, main, post, delayed의 5단계 분사제어가 가능하며, 소음이 30-40% 감소하고, 성능도 6-7% 향상되는 것으로 발표하고 있다(Fig. 27).

(3) TICS

한편 일본 제셀(Zexel)사에서 TICS(timing

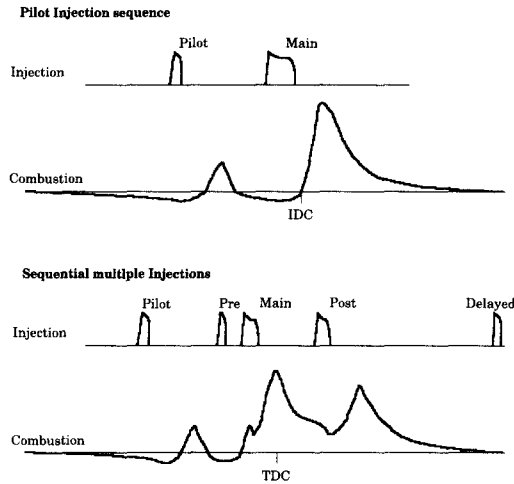


Fig. 29 Next generation common rail injection

Table 5 Comparison of injection systems

		종래형	Commonrail	EUI	TICS
압력범위					
분사율조절	Spill rate	×	◎	△	△
	Pilot	×	○	×	×
	Split	×	○	△	×
	Governing	△	◎	○	△
전자제어	Timing	△	◎	○	△
	FCCB				
	기통제어	×	○	○	×
	Random fire	×	○	○	×

◎ 아주우수, ○ 우수, △ 보통, × 불가

injection control system)를 개발하여 발표하였다. 이 시스템은 전자식 액추에이터를 이용하여 플런저바렐(plunger barrel)을 상하 이동시킴으로써 연료의 분사량과 분사시기를 부하와 회전수에 맞춰 임의로 조절 가능하게 하였으며, 최근에 와서는 플런저의 하단 모양을 개조하여 파일롯분사(pilot injection)를 피하고 있다. 종래의 시스템에서 pre-stroke 위치를 조정할 수 있도록 하여 정적 분사시기를 제어하는 시스템으로 이미 실용화 단계에 있으며 고압화보다는 분사시기와 분사율 제어가 이루어진 시스템이다.

이상에서 새로운 분사시스템을 살펴보았다. 그

장단점을 비교하여보면, Table 5과 같이 Commonrail system이 모든 면에서 월등함을 알 수 있으며 따라서 차세대 분사시스템으로 널리 사용될 것으로 전망된다.

**Multi-injection:** Common rail 분사시스템의 등장과 함께 분사시기와 분사형태를 자유로이 제어할 수 있게 됨에 따라 분사를 한번만 수행하지 않고 연소특성을 최대한 개선하기 위하여 수차례 분사하는 multi-injection 시스템이 개발되고 있다. Fig. 30은 Raitz에 의하여 실험된 여러 가지 경우의 분사형태를 보여주고 있다. 그들의 실험에 의하면 Case D5의 경우는 75% 부하에서 NOx의 증가없이 PM을 저감하였으며, 작은 pilot 분사후 주 분사를 행한 D1의 경우에는 75%부하에서 최대압력의 저감과 함께 질소산화물의 저감을 가져왔다. S2와 같은 형태에서는 PM의 증가를, T2에서는 NOx의 증가 없이 PM의 감소를, T1의 경우에는 25%부하에서 PM 40%와 NOx 16%의 저감을 가져왔다. 그러나 대부분의 경우에 연료소모율이 약간 증가되는 경향을 보이고 있다. 종합적으로 볼 때 NOx 저감을 위해서는 분사시기와 초기 분사량과 분사율이 중요한 역할을 한다. 분사지연과 함께 2-3번의 분사를 시행하면 PM의 증가 없이 NOx를 저감할 수 있음을 발표하고 있다. 그들에 의하면 최적의 분사형태는 초기분사에서 낮은 분사율 증가과 소량의 pilot분사(NOx저감)를 마지막 분사에서 급격한 분사율 증가(PM저감)를 갖을 수 있도록 하는 것이다. 이상에서와 같이 commonrail 분사 시스템에서 분사형태를 적절히 조절하면 NOx와 PM을 동시에 저감할 수 있을 것으로 생각된다.

배기가스재순환(EGR)

**EGR의 효과:** 배기가스재순환은 엔진의 배기를 흡기계를 통하여 연소실로 흡입함으로써 연소실내에 불활성가스의 농도를 증가시켜 산소의 농도를 낮게함으로써 NOx의 저감을 가져오는 시스템이다(Fig. 31).

EGR에 의한 질소산화물 저감의 이유로는 다음의 두 가지 이론을 일반적으로 받아들이고 있다.

- 불활성가스에 의하여 흡입공기를 희석함으로써

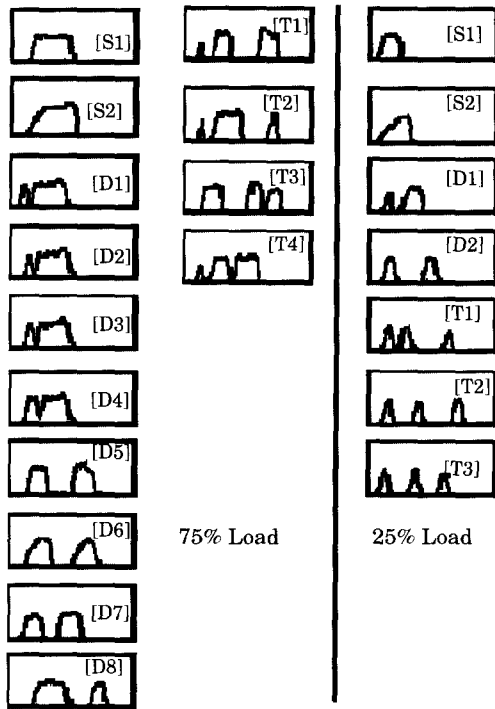


Fig. 30 Injection cases for study injection rate

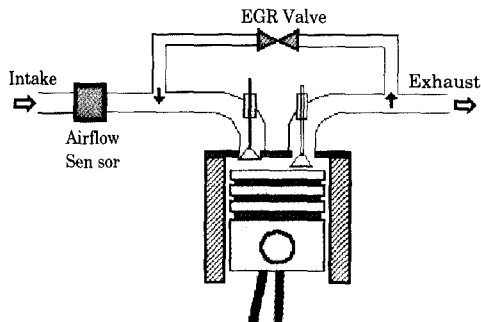


Fig. 31 Schematic Representation of an EGR System

서 연소과정에서 산소농도를 줄인다.

- EGR에 의한 열흡수의 영향, 즉 CO<sub>2</sub>의 물리적인 열흡수(열적효과)와 CO<sub>2</sub>의 해리현상(화학적효과)에 의한 열흡수에 의하여 연소압력과 온도를 감소시킨다.

즉, NO생성은 다음 식과 같이 질소와 산소의 농도 함수이며,

$$\frac{d[NO]}{dt} = k_1[N_2, O_2] - k_2[NO, NO_2]$$

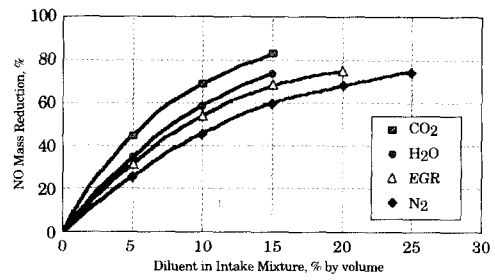


Fig. 32 Effect of Various Diluents on NO Reduction

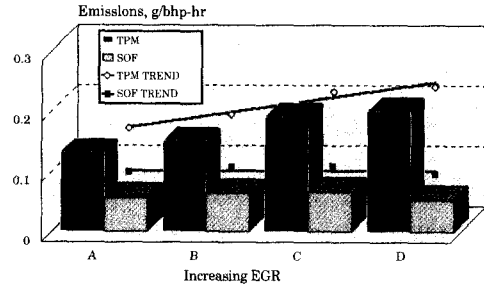


Fig. 33 Effect of EGR on PM Emission

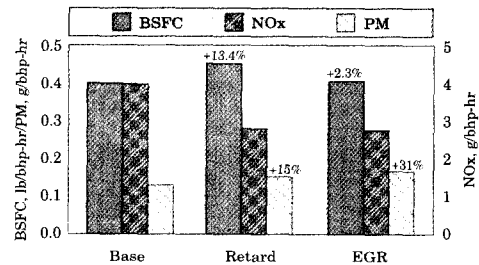


Fig. 34 Effect of EGR Versus Injection Timing Retard on BSFC

동시에 열흡수는 EGR의 양과 비열의 함수이다.

$$Q_{EGR} = \dot{m}_{EGR} \cdot c_p \cdot T$$

각종 EGR가스들에 의한 NOx 저감효과는 Fig. 32과 같다.

EGR을 적용함으로써 가장 문제가 되는 것은 역시 매연 미립자이다. Fig. 33는 11L turbocharged and intercooled Detroit Diesel 엔진에 적용한 경우의 PM과 SOF 증감량을 나타낸다.

NOx 저감을 위하여 사용되는 분사 지연에 의한 배기저감효과와 비교하면 Fig. 34와 같이 NOx 저감효과는 서로 유사하지만 PM의 증가량은 더 많고 연료소모율의 증가량은 더 적은 것을 알 수 있

다.

**EGR시스템:** EGR 시스템은 저압루프(Low Pressure Loop)와 고압루프(High Pressure Loop) 방식 또 이들을 혼합한 LPL/HPL 방식이 있으며 최근에는 전자밸브를 이용한 급속EGR이 연구되고 있다.

LPL(low pressure loop) EGR시스템의 이점은

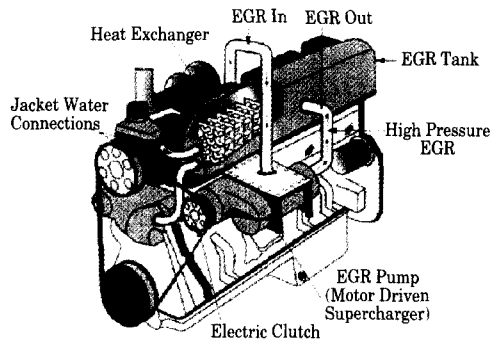
- HPL과 비교하여 터보과급성과 연료소모율 면에서 유리하다.
- 매연저감필터를 통과한 후의 배기가스를 재순환 시킬 수 있다.
- 터보차저 전에서 재순환하는 HPL과 비교할 때 보다 냉각된 가스를 공급할 수 있다.
- 또한 적은 용량의 cooler를 사용함으로써 냉각손실의 감소와 방열기의 용량을 줄일 수 있다.

또한 단점은 다음과 같이 정리된다.

- LPL시스템에서는 후처리필터를 통과한 후의 가스를 순환시킬 수 있지만 100%의 효율은 어렵기 때문에 매연미립자, 황산화물 및 질소산화물이 compressor를 부식, 마모시킨다.
- 지속적인 매연미립자의 퇴적 등으로 급기량이 줄어들게 되어 연소특성을 악화시킨다.

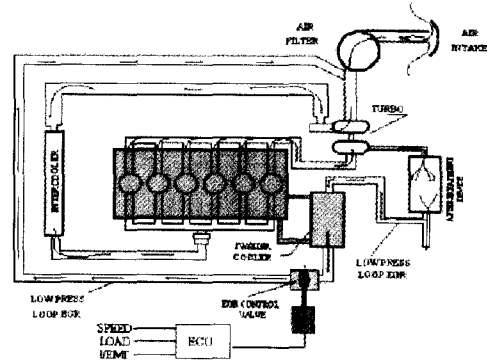
이러한 문제점 때문에 HPL을 주로 적용하고 있지만, 고부하 영역에서는 흡입측의 압력이 높아 EGR을 수행할 수 없게되기 때문에 EGR pump(Fig. 35)를 사용하게 된다.

다음 그림들(Fig. 36, 37, 38, 39)은 여러 가지 타입의 LPL과 HPL EGR 시스템을 보여 준다.

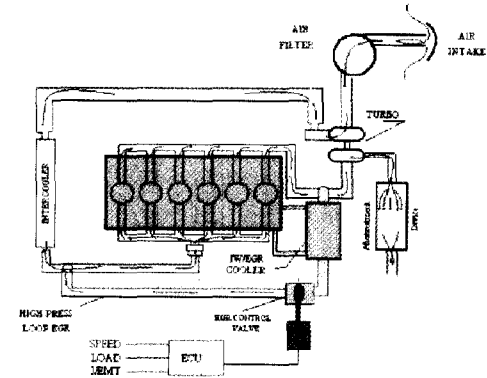


**Fig. 35 EGR Pump (HPL or LPL) to Overcome Intake Manifold Pressure**

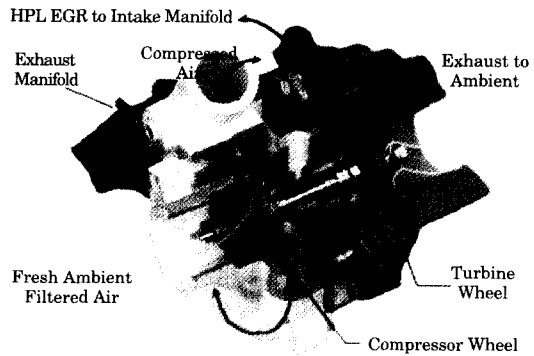
모든 EGR 시스템의 공통적인 결점은 EGR 밸브에서 연소실까지 채우고있는 재순환가스의 많은 양이다. 이는 급가속이 요구되는 경우에 연료공급이 증가하게되지만 EGR밸브에서 흡입구까지 존재하는 재순환가스는 농도의 변화없이 그대로



**Fig. 36 Low Pressure Loop EGR System for Heavy-Duty Diesel Engines**



**Fig. 37 HPL EGR Configuration Schematic**



**Fig. 38 HPL EGR Configuration with Venturi and Turbocharger Cutaway**

연소실에 들어 오게 된다. 따라서 연소가 악화되고 매연 미립자를 많이 배출하게 된다. 특히 이 문제는 turbo-lag현상, 즉 가속을 위한 분사량 증가와 과급기에서 공급되는 공기유입사이의 지연현상과 복합되어 필요한 신기의 양을 더욱 줄임으로서 연

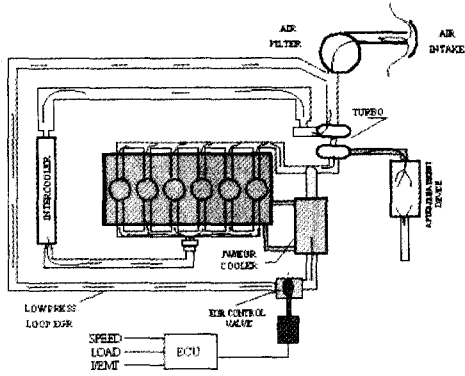


Fig. 39 Schematic of a Hybrid HPL/LPL EGR Configuration

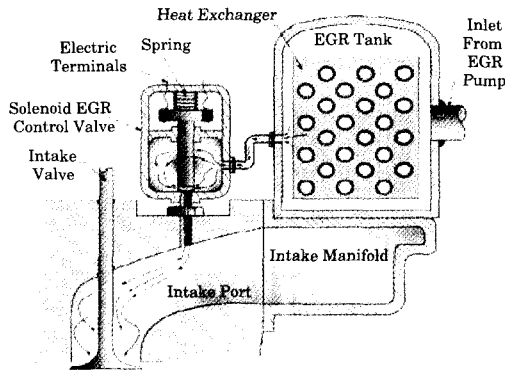


Fig. 40 Fast-Acting EGR System

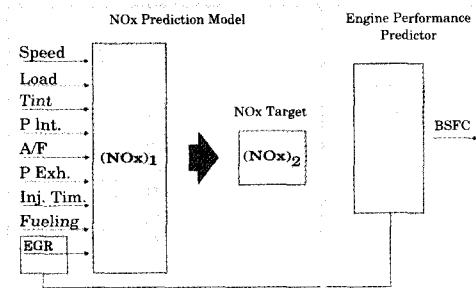


Fig. 41 Schematic Diagram for EGR, NOx, and BSFC Predictions

소특성을 매우 악화시키는 경향이 있다. 이러한 현상을 피하기 위하여 EGR 통로를 최소화하는 연구들이 진행되고 있는데, 대표적인 연구가 전자밸브를 이용한 fast-acting EGR 시스템이다. Fig. 40에 이 시스템을 보여 주고 있는데 EGR체적을 최소화할 수 있으며 EGR율을 자유로이 신속하게 조절할 수 있는 시스템이다.

EGR 제어시스템: 엔진의 속도 및 부하조건에 따라 EGR율은 적절히 조절되어야 한다. 이를 위하여 속도, 부하, 각종 온도, 압력, 분사시기, EGR

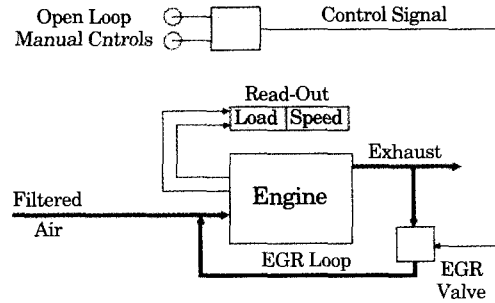


Fig. 42 EGR Open Loop Control Diagram

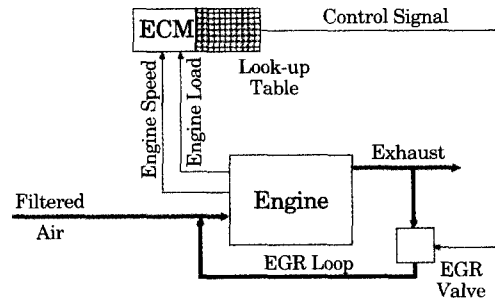


Fig. 43 Open Loop Control Scheme With Look-Up Table

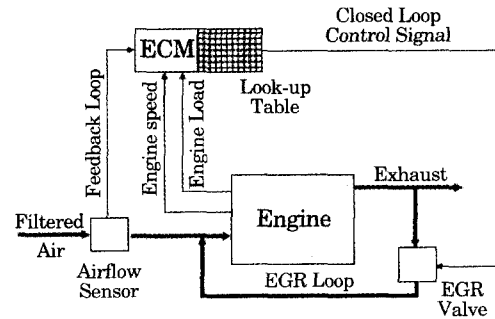


Fig. 44 EGR Closed Loop Control Diagram

을 등을 검출하여 NOx 저감의 목표와 다른 엔진 성능에 알맞도록 연속적으로 제어하게 된다(Fig. 41).

제어시스템의 형태는 Figs. 42, 43, 44와 같다.

EGR의 엔진마모 및 내구성: 엔진마모라하면 주로 엔진의 운동부에 초점을 맞추게 된다. 즉 피스톤, 피스톤링, 배어링, 축과 그것들의 인접부인 실린더나이너, 캠, 로커암과 밸브트레인을 들 수 있다. 이들에 영향을 주는 첫 번째 요인은 윤활유의 특성이다. 따라서 EGR이 윤활유에 어떠한 영향을 주는지 엔진조건에 따라 분석한 Perkins Engine Company의 결과를 살펴본다. Fig. 45과 46은 주기적으로 엔진오일을 교환하면서 실험한 것으로 오일에 함유된 철성분과 탄소성분을 분석한 결과이다. 50, 75, 100% 부하에서 EGR율이 28, 16, 5%인 경우이다. 초기에는 EGR을 행하지 않은 경우와 큰차이를 보이지 않고 있지만 1000시간이 넘으면서 철성분, 특히 soot의 함량이 급격하게 증가되는 것을 알 수 있다. 이는 마찰부의 마모가 진행되면서 윤활면사이로 많은 양의 iron과 soot이 침투되었음을 말해준다. 피스톤링과 라이너의 마모량은 역시 EGR율의 증가와 함께 증가되는데 10% 이상이 되면 급격하게 증가된다(Fig. 47, 48).

엔진마모와 내구성에 치명적인 인자로는 고유황함유연료의 사용, 윤활유의 장기사용, uncooled EGR, 높은 EGR율, 고속, 고부하, 높은 냉각수 온도를 들 수 있다. 이러한 측면에서 볼 때 EGR의 사용은 엔진의 조건, 연료의 조건 등에 의하여 적용의 한계하였음을 보여준다.

Fig. 49는 EGR과 트랩을 사용하여 배기저감을 실현한 예를 보여준다.

EGR의 여러 가지 문제점을 적절히 해결할 수 있는 방법으로 내부EGR, 즉 소기량을 줄임으로서 연소실내에 연소가스를 많이 남게하는 방식이다. 이를 위하여 흡배기 개폐시기를 적절히 조절하며 흡배기 압력을 적절히 조절하는 방법이 있다.

급기개선: 실제적으로 대부분의 최근 디젤기관에서는 과급기를 사용하는데 배기가스의 운동 에너지를 이용하여 급기압력을 높이는 시스템이다. 터보과급기의 열역학적 매력은 버려지는 배기

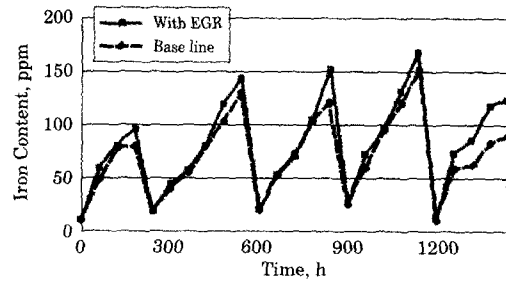


Fig. 45 Comparison of Iron Content in Lube Oil

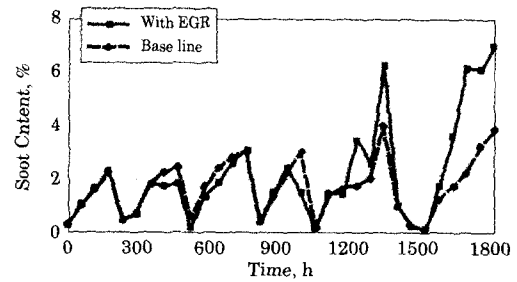


Fig. 46 Comparison of Soot Content in Lube Oil

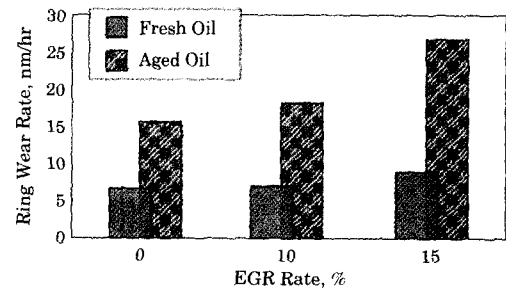


Fig. 47 Ring Wear Rate for Three EGR Levels and Two Lube Oil Conditions

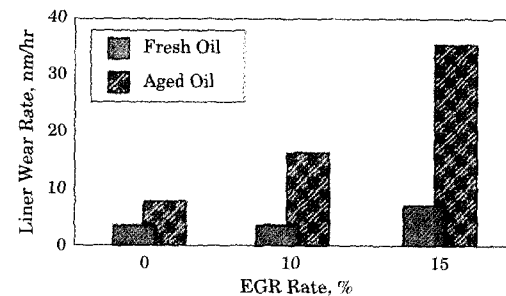


Fig. 48 Liner Wear Rate for Three EGR Levels and Two Lube Oil Conditions

가스의 에너지를 이용하는 것이다. 흡입공기를 압축함으로써 상승하는 온도를 내리기 위하여 냉각기를 사용하는데 aftercooler 혹은 intercooler라고



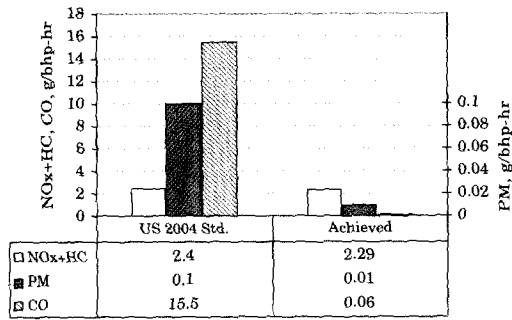


Fig. 49 Demonstration Results of Navistar Engine with EGR Technologies

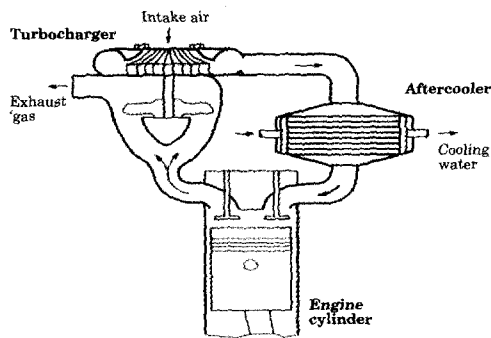


Fig. 50 Turbocharging and aftercooling

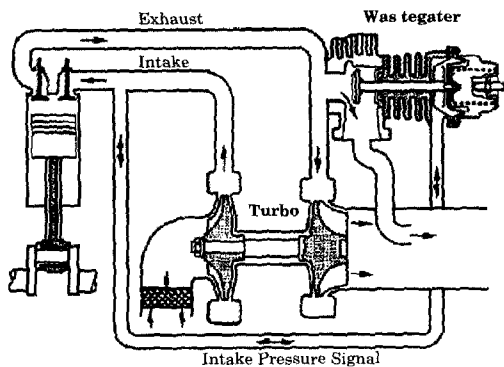


Fig. 51 Schematic Diagram of a Turbocharger Bypass (Waste-Gate)

불리하다(Fig. 50).

과급기의 방식을 보면 다음과 같이 구분된다.

• 터보과급기(Turbocharger; T/C): 터보과급기는 배기터빈(turbine)과 흡기압축기(compressor)로 구성되어 있으며 압축기의 특성이 T/C 성능에 가장 중요하다. 엔진과 T/C의 유량특성이 서로 다

르기 때문에 두 장치의 결합시 매칭이 매우 중요하다. 저부하 운전시는 배기가스 온도가 낮으며, 저속시는 배기유량이 적어 배기터빈이 흡기 압축기를 구동할 수 있는 충분한 구동력을 얻지 못하기 때문에 무과급 엔진 토크 특성을 갖는다. 반면 고속운전 영역에서는 과도한 과급압력과 배기터빈의 과회전에도 유의하여야 한다.

• 웨이스트 게이트 부착 과급기(Waste Gate Turbocharger; WGT): 엔진 고속운전 영역에서 배출가스를 바이패스 시켜 급기와 배기압력이 과대해지는 것을 방지하는 방식으로 중저속운전 영역에 성능개선을 도모한 장치이다(Fig. 51).

• 가변 용량 과급기(Variable Geometry Turbocharger; VGT): 엔진 저속회전 영역의 성능개선을 위하여 배기터빈 입구면적을 가변적으로 변화할 수 있는 방식이다. 엔진 저속시는 과급기를 작동시킬 수 있는 배기유량이 부족하기 때문에 노즐면적을 줄여 배출가스 속도를 증가시킴으로서 배기터빈 회수에너지를 크게 하여 급기압력을 높인다. VGT를 사용함으로써 저속 토크 성능을 향상시키며, 저속시 발생하는 매연 감소와 가속성능 향상을 얻는다(Fig. 52).

• 세라믹 과급기(Ceramic Turbocharger): 동일형상의 과급기라도 재질에 따라 중량 및 관성력을 줄일 수 있다. 이런 관점에서 특히 고온에서 작동하는 터빈의 재질을 일반적으로 사용되고 있는 강철(steel)에서 세라믹으로 변경함으로써 중량을 상당히 감소시킬 수 있어 반응성을 향상시킬 수 있다. 그러나 아직도 세라믹 기술이 완전하지 못하여 고온에 의한 터빈 날개(blade)의 파손이나 제조가

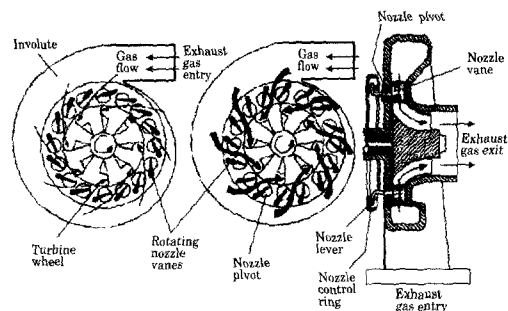


Fig. 52 Schematic Diagram of a Variable Geometry Turbocharger

격이 높은 문제점이 있다.

- 볼베어링 과급기(Ball Bearing Turbocharger): 일반적으로 T/C는 유체 원심력을 이용한 floating bearing을 사용하고 있으나 이는 로터의 회전속도 제동에 비례하여 마찰손실이 증가하고 엔진 윤활 계통의 고장시나 엔진 시동시에 오일 공급이 원활 하지 못하면 쉽게 마모되는 단점이 있다. 이런 문제점을 개선하기 위하여 볼베어링을 대체함으로써 마찰 손실을 감소시키고 내구성도 향상시킬 수 있으나 제조가격이 10%정도 높다.

- 트윈과급기(Twin Turbocharger): 트윈과급기는 동일한 크기의 T/C를 두 개 장착한 것으로 로터의 크기를 줄여 타임랙을 줄일 수 있으나 저속 토크는 향상시키지는 못한다. 4기통이나 6기통 엔진의 경우 2기통과 3기통으로 분배하여 장착한다.

- 시퀀셜과급기(Sequential Turbocharger): 트윈과급기와 달리 시퀀셜과급은 크기가 다른 두 개의 T/C를 사용하며 연결방식은 직렬방식과 병렬 방식이 있다. 병렬형의 경우는 각각의 T/C 담당 회전범위가 좋고 또한 최고 효율점 근처에서 튜닝하기 때문에 저, 중속 영역의 성능이 우수하다. 저속에서는 소형 T/C가 가동하며 중속에서는 두 개가 동시에 작동하고 고속으로 가면 대형 T/C만 작동하는 원리이다. 병렬형에서는 서로 다른 T/C의 작동 전환점에서 토크 굴곡이 발생하며 이를 제어 하는 것이 매우 어렵다. 직렬형은 서로 크기가 다른 T/C를 일직선으로 설치하여 저, 중속에서는 소형 T/C가 가동하며 중, 고속으로 가면 트윈밸브가 작동하여 소형 T/C 작동은 서서히 줄어들고 대형 T/C 작동이 활발하여지는 원리이다. 직렬형에서는 토크 굴곡이 발생하지 않으며, T/C 작동 전환 조절 장치인 트윈밸브의 제어가 비교적 용이하다. 또한 저속 토크 향상이 가능하고 고속영역에서의 배기손실을 최소화 할 수 있으며 터보랙을 크게 향상할 수 있는 장점이 있다. 그러나 엔진과 T/C 매칭이 어려우며 제조단가가 비싼 단점이 있다.

- 기계식 과급장치(Supercharger; S/C): 루트블로어(root blower)나 랜셀럼 등과 같은 용적형 압축기를 엔진이 직접 구동하는 방식으로 배기가스 에너지를 사용하지 않기 때문에 엔진 열효율을 약

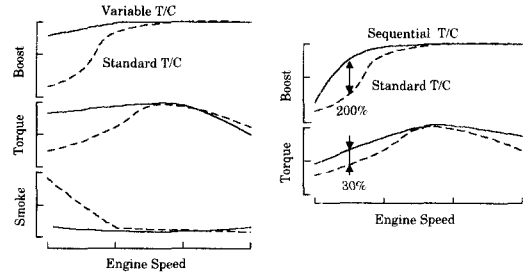


Fig. 53 Performances of Variable T/C and Sequential T/C

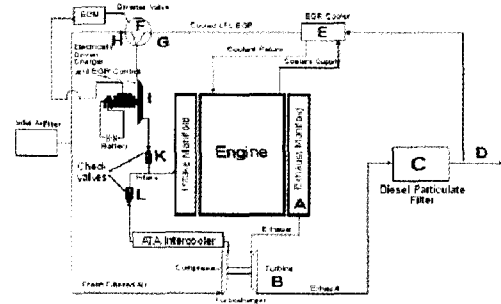


Fig. 54 Schematic of an Electrically - Driven Supercharger for A/F Ratio Control

화시키며 연료소비가 나빠지기 때문에 특히 연비를 중시하는 상용차에는 거의 사용되지 않는다. 그러나 수퍼차저는 엔진 저속시 기계적으로 구동하여 과급효율이 높기 때문에 T/C와 조합하여 사용하면 저속시는 S/C가 작동하여 토크 및 가속성을 향상시키고 중고속에서는 T/C가 작동하여 기존 터보과급기의 문제점을 개선할 수 있다. 이와 같이 T/C와 S/C를 복합한 하이브리드 과급시스템이 장래의 중요한 기술이 될 것으로 전망하고 있으며 많은 연구가 진행되고 있다.

- 인터 쿨러 부착 과급(Turbocharger/Intercooler; T/I): T/C에 의해 압축된 흡기는 100℃ 이상 온도가 상승하는 경우도 있어 이는 엔진 체적효율의 저감을 가져와 T/C 사용효과를 상쇄한다. 이를 보완하기 위하여 열교환기로서 흡기를 냉각시키는 방법이 사용되고 있다. 열교환 방식으로 엔진의 냉각수를 사용할 경우 구조가 콤팩트해지고 엔진 본체에 일체로 할 수 있는 등의 이점이 있으나 흡기 온도를 냉각수 온도 보다 낮출 수 없기 때문에 자동차에 사용하기는 어렵다. 현재는 열교환 매체로

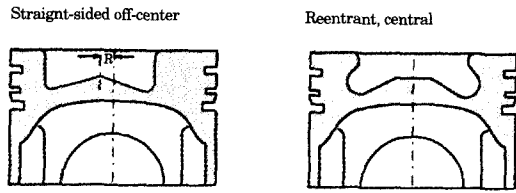


Fig. 55 Combustion Bowl Designs

자동차 주행시 발생하는 공기를 사용하여 흡기온도를 50℃ 정도 저하시키는 방식의 인터쿨러(I/C; intercooler)를 사용하고 있으나 열교환기 부피가 크며 탑재성과 배관 등에 어려움이 있다. I/C를 사용하여 급기온도를 낮추면 연소온도가 저하되어 NOx 발생이 저감된다. 또한 연소 및 배기온도가 낮아져 엔진의 열부하가 경감되며 급기 비중이 증가함에 따라 급기압력을 낮출 수 있어 T/C의 부하를 줄일 수 있다. 그러나 저부하 영역에서 과도하게 흡입공기를 냉각시키면 점화 지연 시간을 길게 하여 도리어 PM과 HC가 증가하기 때문에 저부하에서 냉각을 적절하게 제한할 수 있는 방식이 필요하다.

연소실형상개선

디젤기관의 특성상 분사된 연료가 연소실내에 널리 퍼지지 못하고 농후한영역과 희박한 영역으로 나뉘어 연소하게되는데(확산화염) 이는 이론공연비 근처에서 매우 높은 화염온도를 나타내고(NOx생성) 동시에 혼합되지 않은 농후한 영역에서는 산소부족에 의하여 연소가 어려워지는 문제를 일으킨다. 이러한 현상을 개선하기 위하여 분사된 연료를 가급적이면 넓게 분포할 수 있도록 연소실형상을 개선하는 연구들이 진행되고 있다.

• 유동활성화: 연소실유동을 활성화하기 위하여 흡입포트를 개선하여 스윙강도를 높이거나 피스톤보울의 형상을 개선(Fig. 55)하여 스쿼시 강도를 높이고 있다. 이렇게 유동을 활성화하면 착화 지연시간이 줄어들고 연소속도가 빨라지기 때문에 증가되는 NOx 저감을 위하여 분사시기를 충분히 지연할 수 있는 여지가 생긴다.

충돌분무연소실: 연소실내에 연료를 넓게 분포시키고자 하는 연구로서 분무충돌을 이용한 연소실이 있다. 분사된 연료액적들을 분사방향에 미

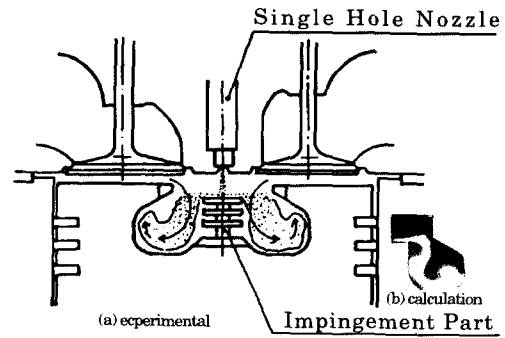


Fig. 56 Chamber and spray in OSKA-D engine



Fig. 57 Spray shape in NICS-MH system

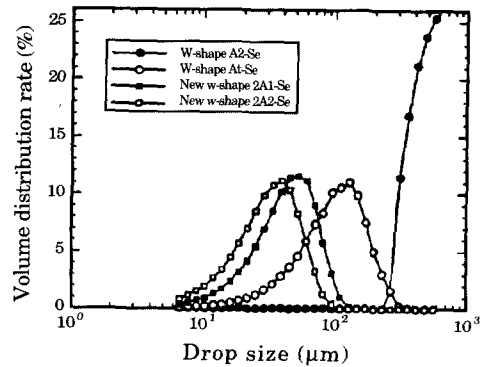


Fig. 58 Droplet size distributions

리 준비된 충돌면에 충돌시킴으로서 충돌된 액적들이 더욱 작은 액적들로 미립화되고 동시에 연소실내에 널리 분포하게된다. Fig. 56, 57은 이러한 대표적인 연소실을 보여 주는데 연료가 넓게 분산됨을 알 수 있다. 충돌액적의 미립화는 Fig. 58에 보여주는 것처럼 벽면 충돌되어 벽면에 퇴적되는 액적에 비하여 매우 작아지는 것을 알 수 있다. 이

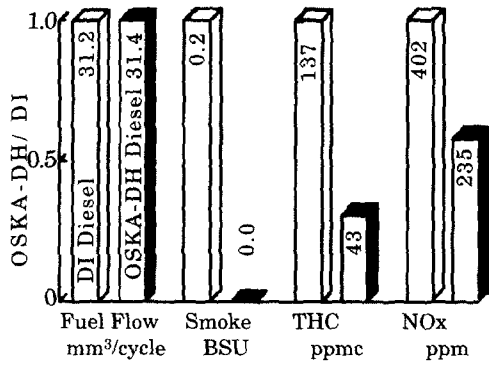


Fig. 59 Exhaust emission comparison in OSKA-DH

러한 연소는 더 이상 디젤고유의 확산연소라고 보기에 어려움이 있으며 어느 정도는 가솔린 기관과 같은 예혼합연소의 특성을 갖는다. 따라서 가솔린 예혼합연소에서와 같이 매우 낮은 매연미립자와 함께 NOx의 저감을 실현하고 있다(Fig. 59).

물분사기술

기관의 흡기계통이나 실린더 내로 직접 물을 분사하여 급기를 가습하면 연소 가스온도가 상당히 내려갈 수 있으며 이로 인하여 NOx의 생성이 억제될 수 있다. 그러나 물 분사를 하면 실린더내에서 수증기분압이 상승하고 황산의 노점이 높게 되고 실린더 라이너, 피스톤링구, 흡·배기밸브 등 연소실 주위 부품에 손상이 생긴다. 이는 물 분사의 가장 큰 단점으로 작용한다. Fig. 60은 독립식 물 분사방식으로서 독립된 물 분사밸브에 의해 물을 공급하는 방법이다. 이 방법은 피스톤의 압축행정 중에 직접 실린더내 물을 분사하여 증발에 의한 압축온도의 저하, 과포화 액적에 의한 화염의 냉각에 의해 NOx저감을 기대하는 것이다. 필렌드의 Wastila사가 독립식 물 분사밸브를 이용하여 실용화 단계에 있다고 보고되고 있다. 물 분사에 의한 부품의 손상과 같은 난점을 해결하는 것이 앞으로 과제로서 Fig. 61와 같이 특수하게 고안된 연료밸브로 연료분사중에 물을 층상으로 분사하는 기술이 이의 대안이 될 것으로 최근 일본의 Kawasaki사에서 디젤엔진의 NOx저감을 위해 동 기술의 개발이 진행되고 있으며 상당한 효과가 있어 급후대형 디젤엔진의 NOx저감에 주요대책이 될 것으로

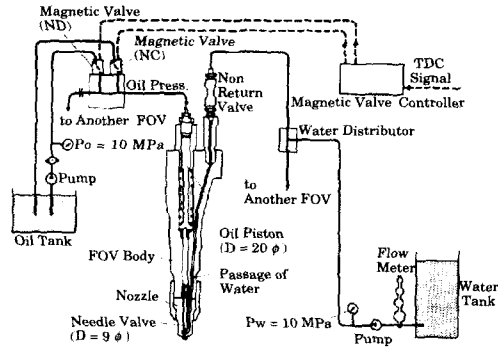


Fig. 60 Water injection system

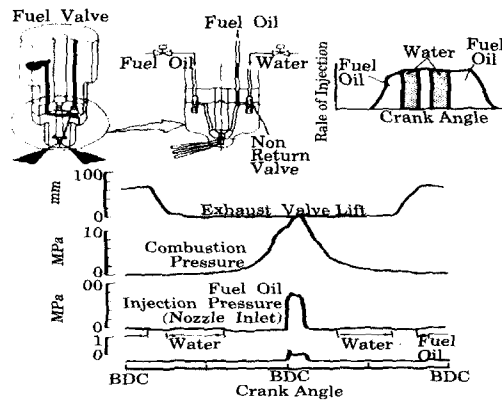


Fig. 61 Stratified Water injection system

판단된다.

물혼합 에멀전기술

물에멀전기술이 디젤연소에 미치는 영향을 요약하면

- 미세폭발(micro-explosion)에 의한 액적의 미립화와 연료 분산효과
- 물혼합량만큼 증가된 연료분사에 의한 분무진행거리 향상으로 주위공기이용도가 증가하는 효과
- 물의 온도흡수에 의하여 착화지연기간이 길어지는 현상
- 연소실내의 온도저감에 의한 열손실 감소효과
- 물증발가스에 의한 배기가스의 증가현상을 들 수 있는데, 이들 현상을 보면 열효율 측면에서는 미세폭발에 의한 연소성능향상에 의한 효율 증가 측면과 배기 손실 증가(배기 가스량 증가)

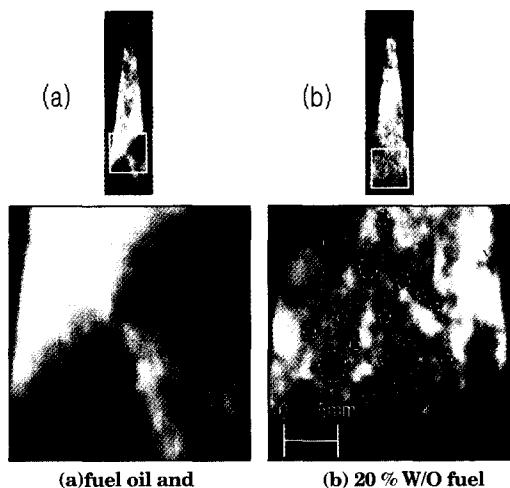


Fig. 62 Comparison of combustion flames

에 의한 효율감소의 측면이 상호 교환관계가 있으며 따라서 엔진의 조건 등에 따라 효율이 향상될 수도 있으며 감소될 수도 있다. 여러 가지 연구결과들도 이렇게 나타나고 있는데, 전반적으로 효율에는 큰 영향이 없다. 물 혼합 에멀전의 중요한 효과는 역시 연료의 미립화와 분포확대에 의한 매연 미립자의 저감과 물액적의 증발에 의한 온도저감, 특히 미세폭발과 함께 국부적인 온도상승을 억제하기 때문에 NOx배출을 크게 저감할 수 있는 동시저감효과라 할 수 있다. Fig. 62는 미세 폭발 현상에 의한 연소면의 확대와 연소온도의 저감을 보여준다. 배출가스에 대해서는 NOx가 물혼합을 1%당 1~2% 저감되며 smoke는 1~1.5% 저감되고 연료소모율은 거의 변화가 없다(Fig. 63, 64, 65).

물에멀전의 제조기술은 모터를 이용하여 기계적으로 물과 기름을 전단하여 혼합하는 타입(Fig. 66, 67)과 초음파를 이용하여 혼합하는 타입(Fig. 68) 그리고 연료흐름을 이용하여 자연적으로 혼합하는 타입으로 구분된다.

물에멀전기술의 많은 이점에도 불구하고 실용화되는 경우가 매우 적는데 그 이유는 물에 의한 분사계통 및 연소실에 미치는 문제와 물혼합량 만큼의 연료오일을 공급할 수 없는 것 그리고 신속하게 물혼합율을 제어할 수 없다는 것이다.

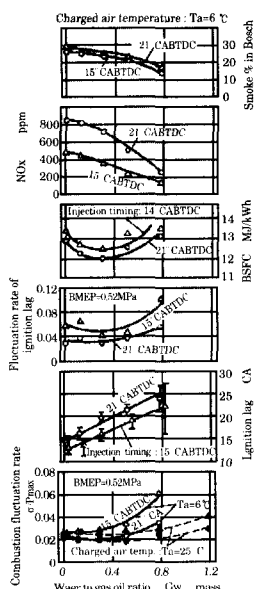


Fig. 63 Engine performance for water content ratio

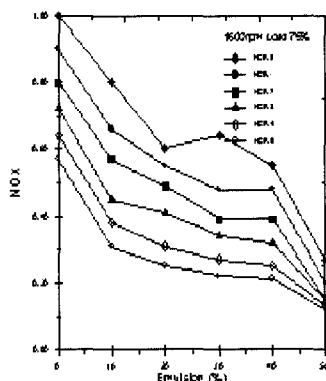


Fig. 64 NOx emissions

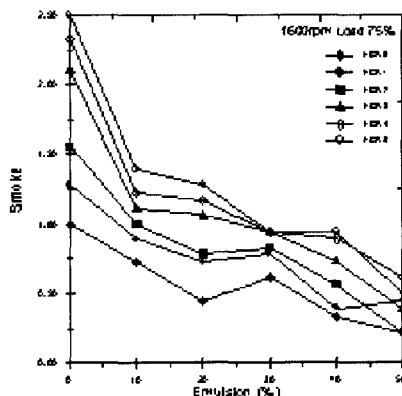


Fig. 65 Smoke emission

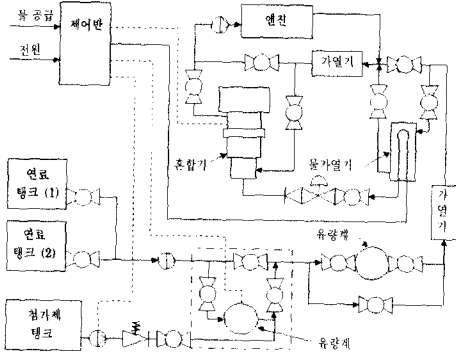


Fig. 66 Sekiguchi Mixing system

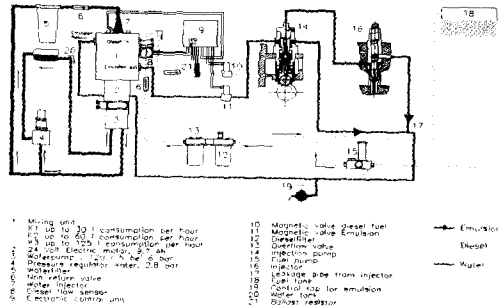


Fig. 67 HDC mixing system

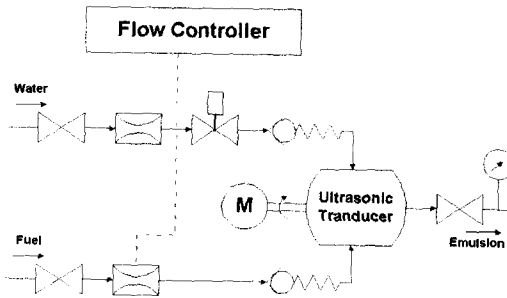


Fig. 68 Reson Homoniser

분사계통 및 연소실의 문제점 ;

■ 플런저와 바렐사이로 물이 접촉하는 경우에 펌핑성능의 악화와 마모율의 증가 : 해결책으로는 물액적의 크기를 플런저와 바렐사이 간극보다 작게(10 $\mu$ m 이하) 혼합하며 이들의 재결합을 방지(유화제첨가)함.

■ 분사펌프에서 분사기까지의 통로에서 물이 분리되면 부식 등의 문제 발생 : 역시 혼합의 정도를 계속 유지함이 요구됨.

■ 실린더내의 수증기분압 상승에 의하여 황산

의 노점이 높게 되고 실린더 라이너, 피스톤링구, 흡·배기밸브 등 연소실 주위 부품에 손상 : 엔진의 재질향상과 함께 물에열전의 미세폭발효과를 극대화하여 연소를 활성화함.

■ 모든 문제해결 : 물혼합의 위치를 분사밸브 직전으로 함.

물혼합을제어의 문제점 :

■ 기혼합된 물혼합연료가 분사펌프이전의 믹서부터 분사밸브까지 잔류하고 있기 때문에 엔진작동조건이 변경되어 물혼합이 없어야되는 경우(저부하에서)에도 잔존하는 혼합연료가 모두 공급될 때까지는 계속적으로 물이 혼합된 연료를 공급하게됨으로서 엔진의 작동이 악화됨 : 물혼합의 위치를 분사밸브 직전 혹은 분사 밸브내에서 직접 혼합하는 타입이 필요함.

연료오일공급량의 제한 :

■ 현재의 모든 기술로는 물이 공급되는 것만큼의 연료오일공급이 줄어 들게되며 이는 엔진의 최대출력을 그만큼 낮게하기 때문에 박용엔진 전문가들은 10%이상의 물혼합/분사 기술의 적용은 어렵다고 한다 : 물 추가량에 관계없이 연료 오일을 공급할 수 있는 장치의 개발이 요구됨.

상기에 열거된 많은 문제점들은 물혼합연료를 분사밸브직전에 공급하면서 물혼합과 관계없이 연료를 공급할 수 있는 장치가 개발(Fig. 69)된다면 해결이 가능하며 이러한 경우에 NOx 저감의 효과적인 대책이 될 것으로 생각된다.

액화CO<sub>2</sub>혼합연료 기술

NOx와 smoke를 동시에 저감할 수 있는 기술로서 액화CO<sub>2</sub>를 연료오일에 혼합하여 높은 압력으

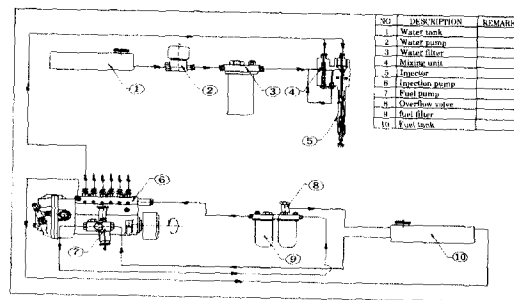
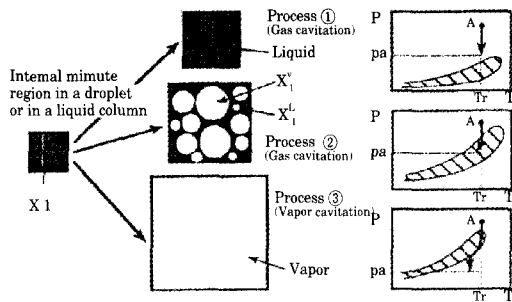
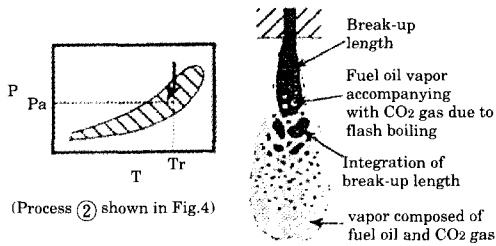


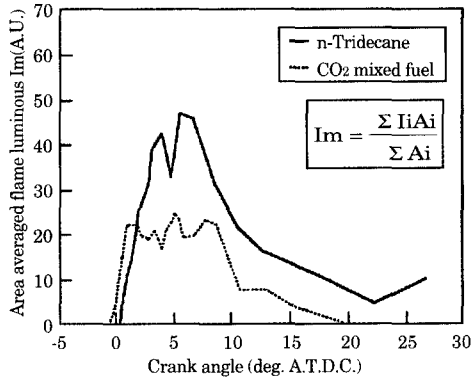
Fig. 69 Noble water mixing system



**Fig. 70** Illustration of phase changes accompanying rapid compression

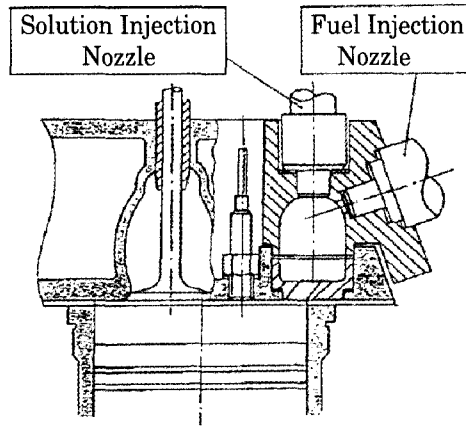


**Fig. 71** Promotion of atomization due to flash boiling



**Fig. 72** Temporal change in area averaged flame luminous intensity

로 분사하면 연소실내에서 압력이 낮아지면서 일어나는 CO<sub>2</sub>의 상변화현상(Fig. 70)을 이용하여 분사된 연료를 급속증발 현상(물혼합연료의 미세폭발과 유사한 효과)과 함께 연소실내에 넓게 분산시킴으로서 연소특성을 향상시키며(Fig. 71), 동시에 액체 CO<sub>2</sub>의 증발분포에 의한 EGR효과를 얻게된다(Fig. 72). 그들의 발표에 의하면 CO<sub>2</sub>의 분율 0.6에서 NO와 soot을 30% 동시에 저감할 수 있다.



**Fig. 73** Combustion chamber and nozzles for aqueous solution and fuel injection

급속용액분사기술

질소산화물과 스모크의 동시저감을 위한 기술로 급속용액(metal-salt solution)을 연소실에 직접분사하는 기술이 있다(Fig. 73). 실험결과를 보면 NO<sub>x</sub>와 smoke의 저감이 각각 60%, 50%로 물분사 기술보다 저감효과가 더 큰 것으로 나타났다.

3.2 후처리 기술

연소실에서 배출되는 유독가스를 처리하는 기술로서 디젤기관에 적용되는 기술은 디젤 산화 촉매, SCR, lean NO<sub>x</sub> 촉매, NO<sub>x</sub> 흡수촉매, Plasma 기술 등을 들 수 있다. 이들 기술은 디젤기관에 적용되기 위해서는 다음 사항을 만족해야하지만 아직 많은 개발이 요구된다.

- 기관의 수명과 같은 기간의 내구성(HD diesel: 8년 290,000miles)
- 열적 손상의 문제(크게 문제시되지 않음)
- 엔진오일과 첨가제에 의한 촉매내의 퇴적 손상(P, Zn, Ca, S)
- 연료에 함유된 황성분에 의한 촉매손상

Fig. 74는 촉매에 흡착된 P, S의 질량분율을 나타낸다.

디젤산화촉매

디젤산화촉매는 매연미립자(주로 SOF)와 CO, HC를 저감하기 위한 장치로 최대 12% 정도의

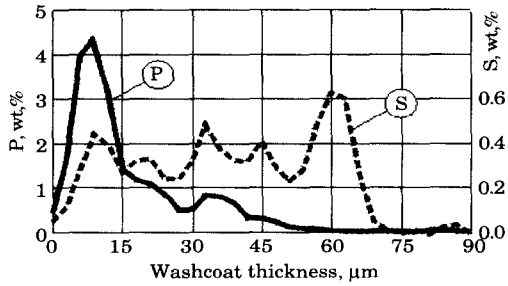


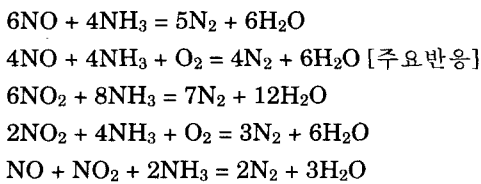
Fig. 74 P and S Distribution in the Washcoat of an Aged Diesel Catalyst

NOx 저감효과가 있다.

SCR(Selective Catalytic Reduction)

SCR기술은 NOx 저감을 위하여 암모니아나 요소를 사용하여 박용, 산업용으로 사용되고 있다. 촉매전의 배기가스중에 저감물질을 분사하여 작용하게되는데 백금, banadium oxide, zeolite 등 기본물질에 따라 작동온도범위(temperature window)가 달라지기 때문에 적용상태에 따라 적절한 선택이 요구된다. 경제적 문제에도 불구하고 아직까지는 미래 NOx 기준을 만족하기 위한 오로지 한가지의 촉매기술이다.

암모니아가 SCR에 사용되는 경우, 2가지 형태로 적용되는데 순수암모니아(pure anhydrous ammonia)와 물에 혼합된 암모니아(aqueous ammonia : NH<sub>3</sub>H<sub>2</sub>O)이다. 전자는 높은 증발 압력과 함께 매우 유독한 물질이며 후자는 물 73% 암모니아 27%로 상당히 안정하며 다루기 쉬운 물질로 디젤기관의 물질로 사용되기도 한다. 반응식은 다음과 같으며, NOx 전환율은 Fig. 75과 같다.



요소의 사용 ; 암모니아는 유독성물질로 다루는데 어려움이 있기 때문에 좀더 안전하고 다루기 쉬우며 부생산물이 무해하고 값이 저렴하며 암모니아로 쉽게 분해되는 물질이 요구되며 대표적으로 받아 드러지는 물질이 요소[CO(NH<sub>2</sub>)<sub>2</sub>]이다. 요소용액은 배기 가스 중에 분사되고 160℃ 이상에

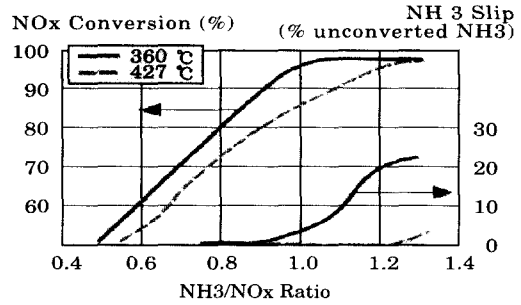


Fig. 75 NOx Conversion and Ammonia Slip for Different NH3/NOx Ratios

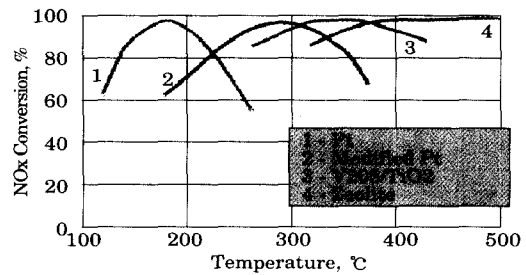
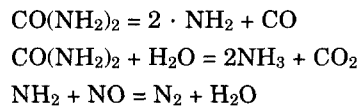


Fig. 76 Operating Temperature Windows for Different SCR Catalysts

서 다음과 같은 반응을 거쳐 분해되며 이후에 NOx를 환원하게된다.



따라서 1kg의 요소는 암모니아 0.566kg을 분사하는 것과 동등한 효과를 나타낸다.

촉매의 기본물질에 따른 촉매성능을 살펴보면 백금의 경우 175-250도, 바나듐의 경우 300-450도, 제올라이트의 경우 350-600도인 경우에 적합하다(Fig. 76).

SCR의 제조사별 종류는 Table 6에 그리고 시스템은 Fig. 77, 78에 보여준다.

잘 알려진 것처럼 SCR의 NOx 저감효과는 55%-90%이다. 하지만 암모니아와 질화암모늄입자의 배출이 가능하며 디젤산화촉매와 같이 사용된다면 황산염이나 N<sub>2</sub>O와 같은 이차 오염물질을 배출할 수 있다.

Lean NOx 촉매

NO분해촉매(NO decomposition catalysts)가



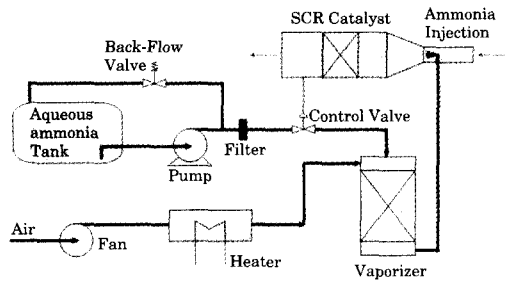


Fig. 77 Aqueous Ammonia Injection System

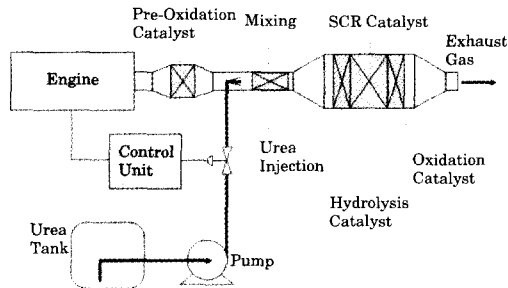


Fig. 78 Open Loop Urea SCR System for Mobile Diesel Engines

Table 6 Suppliers of Industrial SCR Catalysts

Supplier	Catalyst Type	Operating temperature,
Japan		
Babcock Hitachi	Base metal/metallic substrate	250-416
Hitachi Zosen	Base metal/ceramic monolith or wire mesh	330-421
Ishikawajima-Harima Heavy Industries	Base metal/ceramic monolith	204-400
Kawasaki Heavy Industries	Base metal/ceramic monolith	300-400
Mitsubishi Heavy Industries	Base metal/ceramic monolith	204-400
UBE	Base metal/ceramic monolith	250-400
U.S.		
W R Grace	Noble metal/metallic substrate	225-275
Engelhard	Base metal/ceramic monolith	302-400
Johnson Matthey	Base metal/metallic substrate	343-427
Norton	Zeolite	221-521
Germany		
BASF	V <sub>2</sub> O <sub>5</sub> -TiO <sub>2</sub> -WO <sub>3</sub> /Homogeneous monolith	-
Siemens	V <sub>2</sub> O <sub>5</sub> -TiO <sub>2</sub> -WO <sub>3</sub> /Homogeneous monolith	-
Steuler	Zeolite	300-521

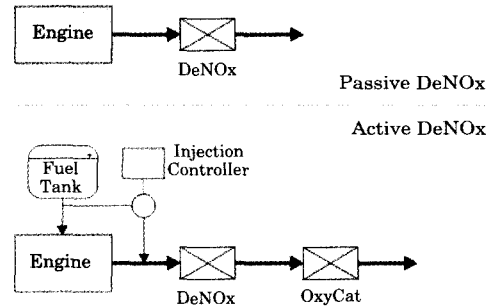


Fig. 79 DeNOx Catalyst Configurations

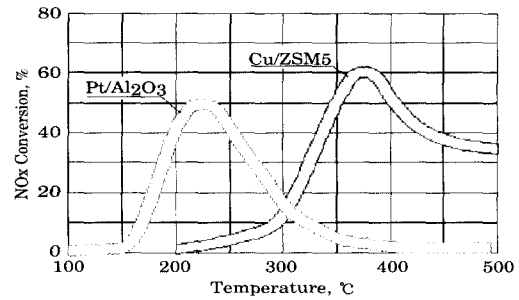
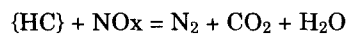


Fig. 80 Selective Catalytic Reduction of NOx by Hydrocarbons

Table 7 Lean NOx Catalyst Systems

Washcoat	Metal
Zeolite-based (mainly ZSM5)	Cu, Pt, Mn, Fe, Co, Ni, Zn, Ag, Ce, Ga
alumina-based	Pt, Pd, Rh, Ir, Ru, Pt-Rh, Pt-W, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Ag
Silica-alumina	Co, Cu
Titania, sulfated titania	
Zirconia, sulfated zirconia	

생산에 많은 결점을 가지고 있음이 밝혀지면서 여러 가지 선택식촉매가 개발되고 있는데, 탄화수소를 이용한 촉매를 “lean NOx 촉매(LNC)” 혹은 “deNOx촉매”라 한다. NO 환원반응은 다음과 같다.



촉매의 설치도는 Fig. 79과 같으며 시스템의 종류는 Table 7과 같고 촉매전환율은 Fig. 80과 같다.

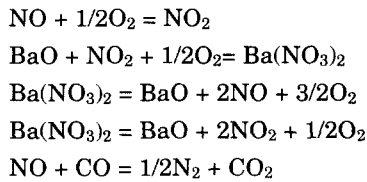
lean NOx 촉매는 최대효율이 60%정도로 높지만 작동온도범위(temperature window)가 매우

좁기 때문에 엔진작동의 전범위에 대하여는 10-20%정도에 불과하다. 만일 더 좋은 시스템의 개발이 없다고하면 황에 대해서도 어느 정도 내성이 있는 이 시스템이 작동온도범위 변화가 작은 박용이나 발전용 등으로 사용될 수 있을 것으로 예상된다.

**흡장형촉매**

흡장형촉매(NOx absorber/catalyst)는 NOx trap으로도 불리우는데, 디젤이나 직분식 가솔린 기관과 같이 희박연소, 즉 배기가스에 산소농도가 높은 경우 NOx를 촉매에 흡착하여 저장하게되고 엔진작동조건이 농후하게되어 혹은 연료를 배기계통에 분사하여 이른공연비에 이르면 삼원촉매의 원리에 의하여 NOx가 분리되면서 질소로 환원되는 시스템이다(Fig. 81).

흡착과 분리 그리고 환원반응은 화학적으로 다음과 같이 표현된다.



촉매시스템은 종래의 삼원촉매에 NOx 저장물질 추가하여 구성되는데, 사용되는 저장화합물의 종류는 다음과 같다.

■ Alkaline earths - barium (Ba), calcium (Ca), strontium (Sr), magnesium (Mg)

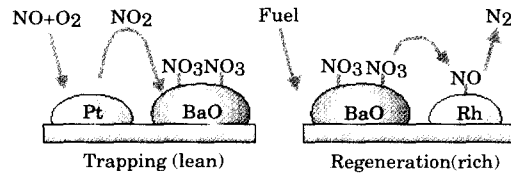
■ Alkali metals - potassium (K), sodium (Na), lithium (Li), cesium (Cs)

■ Rare earth metals - lanthanum (La), yttrium (Y)

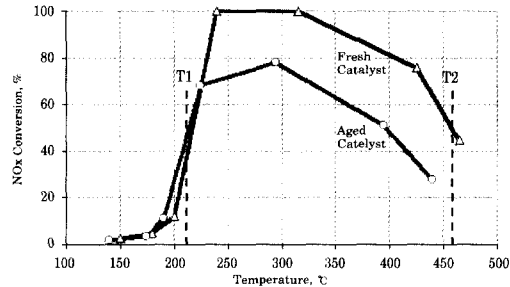
흡장 작동온도범위는 Fig. 82과 같다.

NOx adsorber/catalyst는 최대 80-90%의 전환율을 갖을 수 있지만 디젤기관적용에 매우 치명적인 문제가 있다. 황성분이 포함되면 전환효율이 급격히 저하되는데 600ppm 정도가 되면 거의 효과가 없어진다(Fig. 83). 따라서 Fig. 84와 같이 SOx를 먼저 제거하고 NOx촉매를 적용하는 시스템이 연구되고 있다.

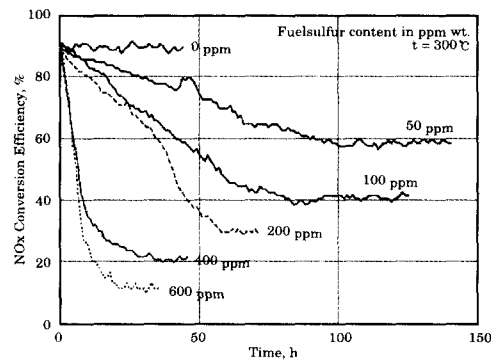
아직까지 실용화에 이르지 못하고 있으며 풀어



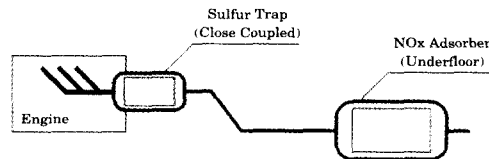
**Fig. 81 NOx Adsorption and Reduction Mechanism**



**Fig. 82 NOx Adsorber Temperature Window**



**Fig. 83 NOx Adsorber Efficiency at Different Fuel Sulfur Levels**



**Fig. 84 Sulfur Trap Configuration**

야할 문제는 다음과 같다.

- 촉매의 재생을 위하여 주기적으로 농후한 혼합기를 만들어 주어야함: 촉매전의 배기가스에 연료를 분사하거나 연소실내에서 후기분사를 함.
- 황성분의 제거를 위한 NOx/SOx 트랩기술의 개발이 요구됨.
- 연료분사 등에 의한 에너지효율 저감.

■ 2차 배기물질인  $H_2S$ ,  $N_2O$  같은 물질의 배출을 최소화해야함.

■ 촉매의 내구성이 요구됨.

Plasma 시스템 : Plasma는 전기적으로 중성과 같은 성질을 갖는 양성/음성의 가스로서, 자유전자, 라디칼, 원자, 분자로 구성되어 있다. Plasma는 thermal 혹은 hot 과 non-thermal 혹은 cold plasma로 구별되는데  $NO_x$  저감을 위해서는 주로 non-thermal plasma가 사용된다. Non-thermal plasma의 제조는 다음과 같은 방법이 있다.

- Corona Discharge (Fig. 85)
- Surface Plasma Discharges
- Dielectric Barrier Discharges
- Dielectric Packed Bed Reactor(Fig. 86)
- Electron Beam Reactor

$NO_x$  저감을 위하여 사용되는 non-thermal plasma는 lean  $NO_x$  촉매와 결합하여 Plasma-hydrocarbons- $NO_x$  시스템의 기술개발이 진행되고 있다. 이런 경우 넓은 작동온도 범위를 가질 수 있으며 효율도 현재에 비하여 60%정도 향상할 수 있다(Fig. 87)

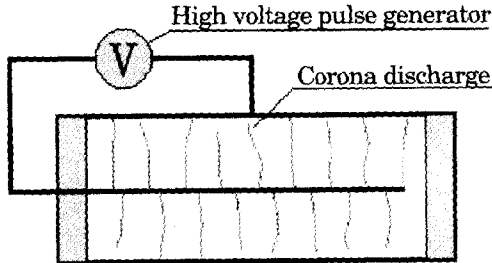


Fig. 85 Corona Discharge

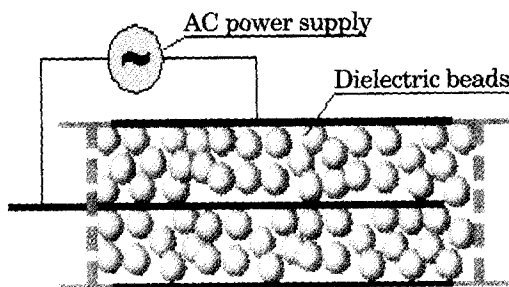


Fig. 86 Packed Bed Reactor

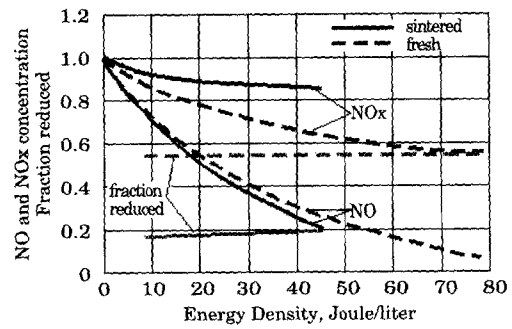


Fig. 87  $NO_x$  Performance of Fresh and Sintered Zeolite

#### 4. 디젤 $NO_x$ 저감 기술의 한계와 대책

박용 기관에서의 질소산화물 저감을 위한 현재 기술의 한계와 규제방향의 예측과 함께 미래의 더욱 강화될 규제에 대한 대안은 어떠한 것인지를 육상용 대형 디젤기관의 대책과 비교 검토함으로써 기술하고자 한다.

필연적인 디젤기관의  $NO_x$  생성특성 : 디젤엔진 연소는 고압으로 분사된 연료가 연소실내의 주위공기와 혼합되면서 연소하는 난류 분무 확산 화염이다.

분사 노즐 근처에서는 아직 액체의 core(액주)가 존재하며 이는 분사압력과 비교하여 매우 낮은 압력과 높은 온도의 주위조건에 의하여 급속히 증발하면서 미립화되고 그 외곽으로 연소가 진행된다. 따라서 연소실 전체로는 매우 희박한 연소조건이지만 국부적으로는 매우 농후한 영역에서 시작하여 이론공연비 영역을 거쳐 매우 희박한 영역으로 구성된다. 연소는 주로 이론공연비 근처에서 진행되며 높은 화염온도를 나타낸다. 이는 연소실 평균온도와 비교하여 매우 높은 것을 알 수 있다(Fig. 88, 89). 이러한 현상은 디젤분무연소의 본질적인 특성으로 국부적인 고온의 영역을 피할 수 없으며 결국 많은 양의  $NO_x$ 의 생성을 피할 수 없게 된다.

$NO_x$  저감 기술정리 :  $NO_x$  저감기술은 크게 연소실내 기술과 후처리기술로 구분되며, 연소실내의 기술은 전 연소 영역의 온도 저감 기술(bulk treatment)과 분무확산에 의한 국부적인 온도저

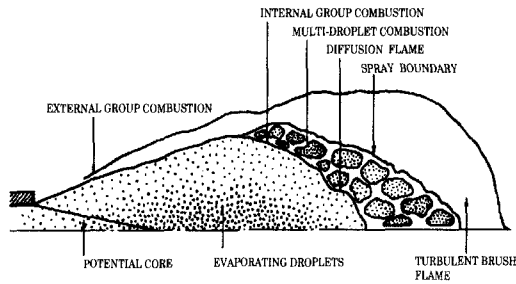


Fig. 88 Schematic of fuel spray group combustion

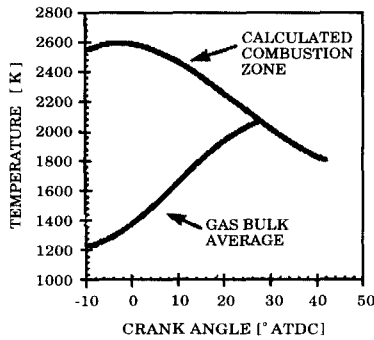


Fig. 89 Temperatures in cylinder of a diesel engine

감기술(local treatment)로 구분된다. Table 8은 앞장에서 설명한 기술들을 미국 육상용 대형디젤기관의 규제와 비교하면서 종합적으로 정리한 자료이다.

NOx규제와 적용기술 : 육상용 디젤기관의 규제와 비교하면서 박용기관의 규제를 예상하며 대응기술을 Table 9와 같이 요약한다.

NOx 규제 대응기술은 적용기술의 발달정도도 중요하지만 기관성과 제조비용, 수요자의 요구, 사회적 환경 등 종합적으로 고려하여 규제단계별로 적절하게 선정되어야만 한다. 특히 지구온난화가스인 CO<sub>2</sub>는 규제강화가 확실하기 때문에 상기의 모든 기술 중에서 연비향상과 동시에 질소 산화물을 저감할 수 있는 기술만이 최종적으로 받아들여질 것으로 예상된다. 이러한 기술의 첫 번째는 common rail 고압분사+injection rate shaping 기술로 생각되며 2009년경까지는 현재의 연소실기술을 정밀 적용함과 함께 후처리기술의 적용 없이 NOx 규제를 만족할 수 있을 것으로 사료된다. 그러나 이후의 더욱 강화되는 규제 만족을 위해서는

Table 9 Countermeasure for emission regulations

육상용디젤기관 (출력 250hp이상)		박용 디젤 기관 (예상) (속도 130rpm이하)		적용 기술
규제 년도	규제치	규제 년도	규제치	
1994년	5g/hph	2000년	17g/ kWh	.turbo-charger and intercooler .injection time retard .high injection pressure .combustion system optimization
1998년	4g/hph	2005년	14g/ kWh	.상기기술 + .common-rail & injection shaping
2004년	2g/hph	2010년	7g/ kWh	.상기기술의 fine tuning + .EGR(내구성, 연비, PM을 조심스럽게 검토필요) .Water emulsion(최고출 력저하문제해결의 경우)
최종 목표	1g/hph	최종 목표	4g/ kWh	.상기기술 + 후처리기술 .예혼합압축착화?

주) 규제치의 예상은 1994년 육상규제의 상태가 현재의 박용 규제 상태와 유사한 것으로 판단하여 이를 기준으로 규제단계별(박용의 경우 5년 단위로 규제 강화 예상)로 비례 산정하였다.

새로운 기술의 도입이 불가피하다. 즉 common rail 고압분사+injection rate shaping 기술+불혼합 예멀전 기술, 혹은 common rail 고압분사+injection rate shaping 기술+저비용 후 처리기술(SOx trap+lean NOx촉매, plasma)로서 만족할 수 있을 것으로 판단된다. HPL EGR기술 황성분 3%정도되는 박용 연료에 대해서는 상당히 부정적인 측면이 있으며 더구나 CO<sub>2</sub>규제를 고려할 때 적절한 대안이 될 수는 없다. 예혼합 압축 착화 기술은 박용기관의 대형 연소실에 희박정도가 균일한 예혼합가스를 공급하기에는 많은 어려움이 있기 때문에 적절하지 않을 것으로 판단된다.

5. 결 론

박용기관의 질소산화물 배출기구 및 저감대책을 살펴본 본 고의 내용을 간략히 요약하면서 보고서를 마감하고자 한다.

- 박용 디젤 기관의 계속성: 경제성 및 내구성,

**Table 8 NOx control technologies in heavy-duty diesel engines**

NOx 저감기술		작 용	NOx 저감율(%)	적용한계 (g/hph)	
In-cylinder treatment	B u l k control	분사지연	• 연소실온도 저감 • 연비, HC, PM악화	4%/ 1도지연	5
		급기냉각(intercooler)	• 연소실온도 저감 • 연비, HC, PM악화	0.6%/ 1도저감	5
		EGR	• 연소실온도저감 • 연비, HC, PM악화 • internal EGR 방법추가	2%/ 1%EGR	2
		물분사	• 연소실온도 저감 • 연비악화	1.0%/ 1%W	2
	L o c a l control	고압분사+분사율제어 (Injection rate shaping)pilot, split, multi	• 열발생율 시간분산 • 연료미립화, 분포확대 및 급속연소 • 최고연소실온도 저감 • PM저감	16%/ 동일연료소모율	2
		물에밀전	• 연료미립화, 분포확대 및 급속연소 • 국부적인 화염온도 저감 • PM저감	1.5%/ 1%W	2
		액체CO2에밀전	• 연료미립화, 분포확대 및 급속연소 • 국부적인 화염온도 저감 • PM저감	2%/ 1%CO2	2
		충돌분무	• 연료미립화, 분포확대 및 급속연소 • 국부적인 화염온도 저감 • PM저감	40%	2
	Comb. process change	디젤회박에혼합연소 (HCCI)	• 에 혼합압축 착화(Homogeneous charge compression ignition) • 연소영역확대 및 국부적온도 저감 • zero PM	98%	1
	After treatment	SCR	• 암모니아, 요소에 의한 환원반응	90%	1
Lean NOx		• 탄화수소에 의한 환원반응 • 황성분에 큰문제 없음	20%	-	
NOx adsorber		• 회박배기의 NO흡착-방출-환원반응 • 황성분포함시 사용불가	90%	1	
Plasma+Lean NOx		• 온도조절에 의한 효율향상	70%	1	

신뢰성이 우수하며 탄화수소와 일산화탄소 및 이산화탄소의 배출면에서 유리하고 고출력을 낼 수 있기 때문에 이를 대체할만한 기술이 현재까지는 없음.

■ NOx생성의 불가피성: 과급 고압축에 의한 고온연소분위기와 긴 연소기간을 갖는 박용 디젤 기관의 특성상 다량의 질소산화물 생성을 피할 수 없음.

■ 현재규제대응기술: 분사시기지연, 급기냉각, 소기조절, 급기 스윙 조절 등 현재기술의 정밀조절에 의하여 대응 가능할 것으로 판단됨.

■ 다음 단계 대응 기술(2005년부터 2009년까지

예상): (1)상기 기술의 fine tuning+common rail 고압분사+injection rate shaping 기술, (2)상기 기술의 fine tuning+물혼합에밀전+부분적용 HPL EGR기술로서 대응 가능할 것으로 판단됨.

■ 그 다음 단계 대응 기술(2010년부터 2015년까지 예상): (1)common rail 고압분사+injection rate shaping 기술+물혼합 에밀전 기술, (2)common rail 고압분사+injection rate shaping 기술+저비용 후 처리 기술(SOx trap+lean NOx촉매, plasma), (3)common rail 고압분사+injection rate shaping 기술+clean HPL EGR기술로서 만족할 수 있을 것으로 판단됨.

■ 이후 규제에 대한 기술은 반드시 CO<sub>2</sub>와 에너지 효율을 고려한 기술만이 적용될 것으로 생각되며 common rail 고압분사 전자제어기술, 충돌형 연소실 기술, 물에멀전 기술 등을 들 수 있다.

박용 기관에서의 NO<sub>x</sub> 저감대책은 가장 중요한 설계요소가 될 것이며 단계별로 적절한 기술의 예측과 개발만이 대응비용을 최소화할 수 있을 것이다.

REFERENCE

1. AEA, 1997. "National Atmospheric Emissions Inventory in the UK", Database maintained for the Department of the Environment by AEA Technology Environment, <http://www.aeat.co.uk/netcen/airqual/naei/>
2. ARB, 1998. "Proposed Identification of Diesel Exhaust as a Toxic Air Contaminant", Report by the Staff of the California Air Resources Board and the Office of Environmental Health Hazard Assessment, April 22
3. CSU, 1998. "Northern Front Range Air Quality Study", Report by Colorado State University, Denver, CO
4. EPA, 1998a. "National Air Pollutant Emission Trends Update, 1970-1997", U.S. Environmental Protection Agency, Office of Air Quality Planning and Standards, Report EPA-E-98-007, December
5. Walsh M.P., 1999. "Global Trends in Diesel Emissions Control - A 1999 Update", SAE 1999-01-0107
6. Degobert P., 1995. "Automobiles and Pollution", SAE / Editions Technip
7. Diederer H., et al., 1985. "Visibility reduction by air pollution in the Netherlands", *Atm. Environ.*, 19, pg. 377-383
8. EPA, 1999. "Air Quality Index Reporting", Final Rule, 64 FR 42530, August 4, 1999, [http://www.epa.gov/ttn/oarpg/t1/fr\\_notices/airqual.pdf](http://www.epa.gov/ttn/oarpg/t1/fr_notices/airqual.pdf)
9. Lenz H.P., Cozzarini C., 1999. "Emissions and Air Quality", Society of Automotive Engineers, Warrendale, PA
10. Sher E., 1998. "Environmental Aspects of Air Pollution", In: "Handbook of Air Pollution?", Editor: E. Sher, Academic Press, Boston, 1998, pg. 27-41
11. Walsh M.P., 1998. "Global Diesel Emission Trends", *Automotive Engineering*, June 1998, pg. 114-118
12. Hilborn J., Still M., 1990. "A State of the Environment Report: Canadian Perspectives on Air Pollution", SOE Report No. 90-1, Environment Canada, Ottawa, September
13. Holgate S.T. (Chairman), U.K. Department of Health, 1998. "Quantification of the Effects of Air Pollution on Health in the United Kingdom", The Stationery Office, London
14. Penney D.G., 1996. "Carbon Monoxide", CRC Press, Boca Raton, FL Peterson S., 1975. *J. Appl. Physiol.*, 39, pg. 633-638
15. Yoshida, T., Saiji, K. and Fujimura, T., 1995, "Development of a low exhaust emission high performance turbocharged diesel engine", *JSAE9439393*.
16. Beidl, C.V. and Gill, D.W., 1998, "The impact of emissions and fuel economy requirements on fuel injection system and noise of HD diesel engines", *SAE980176*.
17. Varde, K.S. and Watanabe, T., 2000, "Characteristics of high pressure spray and exhaust emissions in single cylinder DI diesel engine", Seoul 2000 FISITA World Automotive Congress, F2000H235
18. Chan, M., Das, S. and Reitz, R.D., 1997, "Modeling multiple injection and EGR effects on diesel engine emissions", *SAE972864*.
19. Montgomery, D.T. and Reitz, R.D., 1996, "Six-mode cycle evaluation of the effect of EGR and multiple injections on particulate and NO<sub>x</sub> emissions from a D.I. diesel engine", *SAE960316*.
20. Tow, T.C., Pierpont, D.A. and Reitz, R.D., 1994, "Reducing particulate and NO<sub>x</sub> emissions by using multiple injections in a heavy duty DI diesel engine", *SAE940897*.
21. Baert R.S.G., Beckman D.E., Veen A., 1999. "Efficient EGR Technology for Future HD Diesel

- Engine Emission Targets", SAE 1999-01-0837
22. Dennis A.J., Garner C.P., Taylor D.H.C., 1999. "The Effect of EGR on Diesel Engine Wear", SAE 1999-01-0839
  23. Haerter G., Rothuysen U., Schuerfeld A., 1993. " Brennersystem variabler Leistung zur Ansaugluftvorwaermung von Dieselmotoren", Pierburg
  24. Hawley, J.G., Brace C.J., Wallace F.J., 1998. "Combustion-Related Emissions in CI Engines", In: "Handbook of Air Pollution", Editor: E. Sher, Academic Press, Boston, 1998, pg. 280-357
  25. Hawley, J.G., et al., 1999. "Reduction of Steady State NOx Levels from an Automotive Diesel Engine Using Optimized VGT/EGR Schedules", SAE 1999-01-0835
  26. Khair M.K., 1997. "Technical and Synergistic Approaches Towards the 21st Century Diesel Engine", SAE 972687
  27. Kreso A.M., Johnson J.H., Gratz L.D., Bagley S.T., Leddy D.G., 1998b. "A Study of the Vapor- and Particle-Phase Sulfur Species in the Heavy-Duty Diesel Engine EGR Cooler", SAE 981423
  28. Mellow J.P., Mellor A.M., 1999. "NOx Emissions from Direct Injection Diesel Engines with Water/Steam Dilution", SAE 1999-01-0836
  29. Psaras D., Summers J.C., Das P.K., Ceynow K., Khair M.K., DiSilverio W.D., 1997. "Achieving the 2004 Heavy-Duty Diesel Emissions Using Electronic EGR and a Cerium Based Fuel Borne Catalyst", SAE 970189
  30. Reid R.C., Prausintz J.M., Poling B.E., 1987. "The Properties of Gases and Liquids", McGraw-Hill, New York, 4th ed.
  31. Arcoumanis, C., Nagwaney, A., Hentschel, W., Ropke, S., 1995. "Effect of EGR on Spray Development, Combustion and Emissions in a 1.9L Direct-Injection Diesel Engine", SAE 952356
  32. Challen B., Baranescu R., 1999. "Diesel Engine Reference Book", SAE, Warrendale, PA, 2nd ed.
  33. Dennis A.J., Garner C.P., Taylor D.H.C., 1999. "The Effect of EGR on Diesel Engine Wear", SAE 1999-01-0839
  34. Dodge L., 1998. "Modeling NOx Emissions in Diesel and Spark-Ignited Natural Gas and Gasoline Engines", SwRI Report, August 7, 1998
  35. Hawley, J.G., et al., 1999. "Reduction of Steady State NOx Levels from an Automotive Diesel Engine Using Optimized VGT/EGR Schedules", SAE 1999-01-0835
  36. Khair M.K., 1997. "Technical and Synergistic Approaches Towards the 21st Century Diesel Engine", SAE 972687
  37. Khair M.K., 1997a. "New Development in Trap Technology", The 6th Vice Presidents Symposium - Partnership for New Generation of Vehicles, Washington, DC, July
  38. Khair M.K., 1998. "Assessment of Turbopac as a Device for Controlling Diesel NOx and PM Emissions", SwRI Final Report prepared for Turbodyne Systems, Inc., October 1998
  39. Khair M.K., 1998a. "Turbocharging systems for internal combustion engines", US Patent #5,771,868 (Turbodyne), June 30
  40. Khair M.K., 1999. "Method and apparatus for exhaust gas recirculation control and power augmentation in an internal combustion engine", US Patent #5,927,075 (Turbodyne), July 27
  41. Lemaire J., Mustel W., Zelenka P., 1994. "Fuel Additive Supported Particulate Trap Regeneration Possibilities by Engine Management System Measures", SAE 942069