

# 대형 디젤 엔진의 연료 소비율 및 유해 배출 가스 저감 기술

현 충 헌, 김 세 영, 최 규 훈 · 현대자동차(주) 선행연구소 디젤엔진개발실

## 1. 서 론

현재 전세계를 통해서 내연기관의 개발은 두 가지 중요한 변수에 영향을 받고 있다. 첫째는 지구 온난화 방지를 위한 CO<sub>2</sub> 배출 가스 감축 노력이며, 둘째는 PM(PARTICULATE MATTER : 입자상 물질) 및 NO<sub>x</sub>(질소 산화물)로 대별되는 EM(EMISSION : 유해 배기가스) 저감 노력이다. CO<sub>2</sub> 배출 가스 감축 노력은 전세계 산업화 과정에서 필연적으로 수반되는 CO<sub>2</sub> 배출 가스량 증가를 억제하기 위한 노력으로써, 선진국과 개도국 간의 큰 입장차이로 인해 많은 논란을 거듭하고 있는 사항이다. 특히 선진국에서는 지속적으로 CO<sub>2</sub> 배출량 감축을 위해 법제화를 시도하고 있으며, 지속적으로 국제회의 등을 통해 개도국에 압력을

행사하고 있다.

자동차에 있어서 CO<sub>2</sub> 저감 방안은 에너지 즉 연료 절약이 근본적인 방안이며 따라서 연료 경제성이 우수한 초 저연비 자동차 개발이 가장 핵심이 되는 기술 방향으로 제시되어 있다. 대부분의 자동차 제작사는 CO<sub>2</sub> 가 향후 자동차 기술 경쟁의 가장 중요한 요인으로 작용할 것으로 분석하고 있으며, 선진국 대부분의 자동차 제작사는 초 저연비 자동차 개발 사업을 몇 년 전부터 진행하고 있다.

1997년 교토 협약에 의해 가시화 된 CO<sub>2</sub> 감축 노력은 각 국가별로 큰 특색을 보이고 있다. 미국의 경우 PNGV PROJECT 를 정부 및 자동차 업체가 합의하여 80mpg(mile per gallon) 수준의 자동차 개발에 주력하고 있다. 또한 법규 차원에서는 자동차 제작

사의 평균 연비(연료 소비율)를 제한하는 CAFE 제도 등을 도입하고 있으며, 연료 과소비세(GAS GUZZLER TAX), FEEBATE(REBATE, FEE) 등의 제도를 도입하고 있다. 유럽의 경우 ACEA의 CO<sub>2</sub> 감축안을 보면, 2008년 신규 판매 승용차의 평균 CO<sub>2</sub> 배출량을 95년(186g/km) 보다 25% 감축된 140g/km의 목표치 달성해야 하며 또한 2000년 이후 유럽 내에 판매하는 차종 중 한가지 이상 모델이 120g/km을 만족할 것을 제안하고 있다. 이를 위해서는 소위 3 LITER CAR(3 liter / 100km = 78mpg) 개발이 현재 자동차 제작사의 가장 큰 이슈로 부각되고 있다. 기본적으로 CO<sub>2</sub> 배출가스에 대한 각국의 규제 혹은 제안은 주로 승용차 및 소형 화물차 위주로 진행되어 왔으나,

〈표 1〉 각국 유해 배출가스 규제 동향 (HEAVY-DUTY DIESEL ENGINE)

국가	규제연도	시험 MODE	단위	NO <sub>x</sub>	PM	CO	HC	SMOKE	비고
국내	1996	ECE-13	g/kWh	11.0	0.90	4.9	1.2	35%	
	1998			9.0	0.50	↑	↑	↑	
	2000			6.0	0.25 (0.10)	↑	↑	25%	( )는 시내버스
	2002			6.0	0.15 (0.10)	↑	↑	↑	( )는 시내버스
유럽	EURO-I 1993	ECE-13	g/kWh	8.0	0.36	4.5	1.1		
	EURO-II 1996			7.0	0.15	4.0	↑		
	EURO-3 2000	ESC-13 ELR		5.0	0.10	2.1	0.7	0.8m <sup>3</sup>	
	EURO-IV 2005	ETC		3.5	0.02	1.5	0.46	0.5m <sup>3</sup>	MODE 미확정
	EURO-V 2008	ETC		2.0	0.02	1.5	0.46	0.5m <sup>3</sup>	MODE 미확정
미국	1991	FTP-TRANSIENT CYCLE	g/bphh	5.0	0.25	15.5	1.3		
	1994			5.0	0.1 (0.05)	↑	↑	20/15 50%	( )는 시내버스
	1998			4.0	↑	↑	↑		
	2004			2.4/2.5	↑	↑	-		NO <sub>x</sub> +NMHC

주) ECE(ECONOMIC COMMISSION FOR EUROPE) 13 MODE :  
 GAS EMISSION 측정 CYCLE  
 ESC(EUROPEAN STEADY-STATE CYCLE) 13 MODE :  
 GAS EMISSION 측정 CYCLE  
 ELR(EUROPEAN LOAD RESPONSE) : SMOKE 측정 CYCLE  
 ETC(EUROPEAN TRANSIENT CYCLE) :  
 GAS EMISSION 측정 CYCLE (1800 SEC)  
 FTP(FEDERAL TRANSIENT PROCEDURE) :  
 GAS EMISSION 측정 CYCLE (1200 SEC)

향후 대형 상용차에까지 그 범위를 확대하려는 움직임도 있다. 이를 위해 전세계는 고효율 내연기관 개발을 위하여 노력하고 있는데 디젤 엔진, 연료전지, HYBRID 엔진 등이 주목받고 있다. 또한 차체 경량화 기술 개발 및 POWERTRAIN의 고효율화

등을 위한 노력도 함께 진행중이다.<sup>(1)</sup>

전술했듯이 자동차에 있어서 CO<sub>2</sub> 배출가스 저감은 엔진에서의 연비 저감과 그 의미가 일치된다.<sup>(2)</sup> 참고문헌 2 에서 보듯이 CO<sub>2</sub> 배출가스 저감과 연비 저감과는 1:1 대응관계가 있는 것을

잘 알 수 있다. 하지만 주지의 사실로써 디젤 엔진의 연소 개선에 의한 연비 저감은 주로 유해 배기가스 특히 NO<sub>x</sub>의 과다 발생을 수반한다. 대부분의 국가에서 지속적으로 유해 배기가스 총량을 규제하는 법규를 제정하고 있으므로 〈표-1〉, 디젤엔진에서 연비 및 유해 배기가스 저감은 동시에 진행되어야 한다.

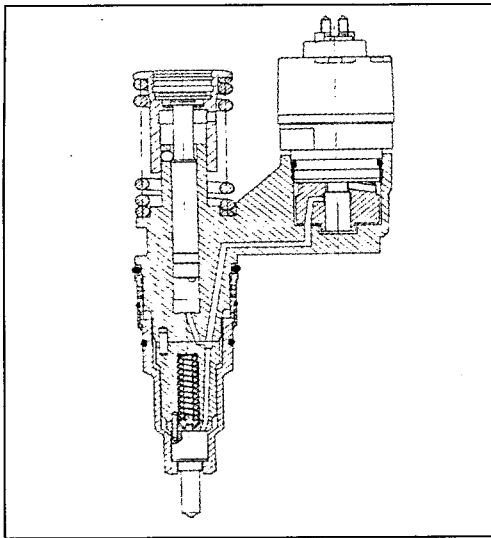
본 논문에서는 엔진 개체의 연비 특히 대형 디젤엔진에서의 연비 개선에 의한 CO<sub>2</sub> 배출 가스 저감과 이로 인해 발생하는 유해 배기가스 저감을 위한 국내의 기술 동향 및 당사의 엔진 개발 경험 등에 대해서 상세히 논하고자 한다.

## 2. 본 론

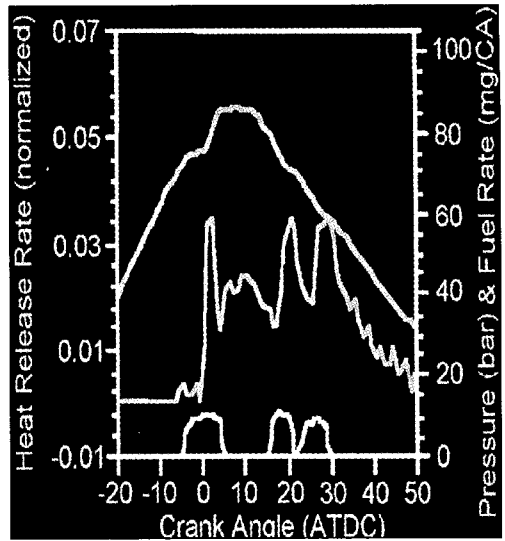
### 1) 국내외 저 연비, 저 유해 배출 가스 엔진기술 개발동향

일반적으로 디젤엔진에서 연비 저감과 유해 배출가스 정화는 서로 상반된 개념인 경우가 많다.

따라서 전세계 디젤 엔진 제작사는 이와 같은 상반된 개념을 극복할 수 있는 신기술 개발에 총력을 기울이고 있다. 현재 가시화되고 있는 두 가지 기술, 즉 엔진 연소 개선 기술 및 디젤 후 처리 기술에 중점을 두어 진행하도록 하겠다.



〈그림 1〉 EUI 단면도



〈그림 2〉 PILOT/MAIN/POST INJECTION

### ① 엔진 연소 개선

최근 10년 동안 디젤엔진은 놀라울 정도로 발전을 이루어 왔다. 이와 같은 발전은 디젤 엔진의 전자 제어화, 직접 분사화, 분사 연료의 초 고압화 및 분사 연료의 초 미립화, 디젤 엔진의 TCi화 (TURBOCHARGER INTER-COOLER : 과급화), 기타 연소 MATCHING 기술의 발전에 기인한다 하겠다. 향후 디젤엔진의 연비 개선 및 배기가스 저감을 위해서 적용될 수 있는 기술을 분사계, 흡기계, 연소 SYSTEM으로 나누어 설명할 수 있다.

분사계의 경우 현재까지의 일반적 추세가 지속 될 것으로 예상된다. 즉, 분사시기의 전자 제어화 및 분사 압력의 초 고압화를 위하여 COMMON RAIL SYSTEM 또는

EUI(ELECTRONIC UNIT INJECTOR), EUP(ELECTRONIC UNIT PUMP) SYSTEM의 채택 〈그림 1〉, 분사 연료의 초미립화를 위한 소분공경 다공 노즐의 사용, 분사율 제어를 위한 HEUI (HYDRAULIC ELECTRONIC UNIT INJECTOR) 사용 등이 주류를 이룰 것으로 파악된다.

특히 COMMON RAIL SYSTEM의 경우 PILOT / MAIN / POST INJECTION이 가능하며 〈그림 2〉, 또한 저속 영역에서 높은 분사압 유지 가능, NVH 측면의 우수성 등으로 인해 향후 가장 각광 받는 분사계로 평가 받고 있다.<sup>(3)</sup>

분사계의 초고압화는 기존 600-800 bar 수준의 분사압을

2000bar 이상으로 연료를 가압하여 분사하는 방법으로써 연료 분사 에너지의 증가에 의한 연비 개선은 매우 희망적인 수준이며, 더불어 매연 저감 또한 많은 부분 달성할 수 있다. 하지만 일반적으로 이로 인한 NOx 증가가 문제가 되는데, 이 NOx 저감을 위해 PILOT INJECTION 및 INJECTION RATE SHAPING 기술이 함께 적용되고 있다.<sup>(4)</sup>

흡기계의 경우 기존 NA (Naturally Aspiration : 자연 흡기) 방식에서 TCi 방식으로 변화되고 있다. TCi 방식을 채용하면 기존 NA 방식 대비 흡기 충전 효율 증가로 최대 출력 및 최대 토크의 큰 증가를 가져올 수 있고, 이로 인한 연비 개선의 효과도 얻을 수 있다. 즉 차량에서 최

대 여유 구동력이 증가함에 따라 엔진 연비가 유리한 영역에서 차량이 운전될 수 있도록 POWER-TRAIN 구성이 가능해져서 차량 주행 연비 개선이 가능해진다.

T/C의 경우, 향후 기존의 FIXED TYPE T/C 대신 VGT (VARIABLE GEOMETRY TURBOCHARGER) SYSTEM의 적용이 필수적일 것으로 인식되고 있다.<sup>[5]</sup> 저속 영역의 공기량 증대와 고속 영역의 과도한 과급 해소를 위해 사용하는 VGT SYSTEM은 전자 제어에 의한 전 엔진 운전 영역 공기량 제어가 가능해지므로, 엔진 개체의 최적 공기량 제어 및 차량 과도 상태에서의 최적 공기량 제어에 연비 개선에 큰 도움이 된다.

전술했듯이 디젤엔진에서 연비 저감을 위한 기술의 대부분은 다량의 NOx 생성을 유발하며 이를 저감하기 위하여 EGR(EXHAUST GAS RECIRCULATION) SYSTEM을 사용한다.<sup>[6]</sup> 즉 EGR SYSTEM의 경우 배기가스를 흡기로 재순환시켜 최대 연소 온도 및 연소실내 산소 농도를 저하시켜 NOx의 생성을 저감시키는 방법이다. 하지만 디젤엔진에서 EGR SYSTEM 구성에 있어서 어려움이 있다. 즉 TCI 방식을 쓰는 디젤엔진의 경우 흡기관의 압력이 배기관의 압력 보다 높으므로 기존의 단순 배기-흡기 연결에

의한 EGR은 형성될 수 없다. 따라서 흡기관에 VENTURY 혹은 THROTTLE 밸브를 장착하거나 또는 배기관에 VGT를 써서 배압을 조정하는 방법으로 EGR SYSTEM을 형성하고 있으나 이 모든 것이 다 복잡한 LAYOUT을 필요로 하므로 그 적용에 어려움이 따른다. 또한 NOx 저감을 위하여 EGR를 적용하면 연비 악화 및 PM이 증가하는 경향이 있으므로 이의 해소를 위해 COOLED EGR 즉 EGR용 배출 가스 온도를 저감하여 재순환시키는 방법을 주로 쓴다. 하지만 이런 경우에도 입자상 물질을 원하는 수준까지 저하가 어려우므로 향후에는 PM 저감용 후처리 장치와 병행하여 EGR을 쓰는 경우가 보편적일 것으로 판단된다.

새로운 형태의 연소 시스템에 대한 연구도 활발히 진행되고 있다. 현재 승용 디젤 자동차에 적용중인 NISSAN MK SYSTEM의 예를 보면, SCV(SWIRL CONTROL VALVE)을 써서 강 SWIRL을 형성한 후 45% 이상의 EGR RATE을 적용하면서 분사시기를 ATDC 4°CA 이상 지각시키는 독특한 연소 시스템을 형성하고 있다. 이는 HEAVY EGR에 의해 악화되는 연소 효율을 강 SWIRL SYSTEM으로 보상하며 ATDC 이후 연료 분사

로 인해 확산 연소를 촉진시켜 연비의 악화를 막는다는 새로운 개념으로써 현재 소형 디젤엔진에서는 기 적용중이나, 중대형 디젤엔진에서는 적용 가능성에 대한 연구가 진행되고 있다.<sup>[7]</sup>

미래 기술로써 거론되는 HCC(HOMOGENEOUS CHARGED COMBUSTION) SYSTEM은 압축 초기에 연료를 분사하여 충분한 혼합기가 형성된 후 압축 과정 시 자연 발화를 일으키는 SYSTEM으로서 그 열효율이 뛰어난 장점이 있는 것으로 평가 받고 있으나, 연소(발화) 시기 제어 및 MISFIRE의 위험이 많은 것으로 알려져 있다.<sup>[8]</sup>

## ② 디젤 후처리 기술 (DIESEL AFTERTREATMENT TECHNOLOGY)<sup>[9]</sup>

현재까지 많은 NOx 저감 후처리 기술들이 개발되어 왔다. 하기 <표-2>에 연비 개선에 큰 걸림돌이 되는 NOx 저감용 후처리 장치들에 대한 개요를 정리하였다. LEAN NOx 촉매는 HC를 써서 NOx 성분을 환원시키는 역할을 수행한다. PASSIVE TYPE은 배기가스 중에 포함된 HC를 이용하여 NOx를 환원시키나, ACTIVE TYPE은 POST INJECTION 혹은 직접 배기관에 연료 분사를 통해 촉매 물질인 HC를 공급한다. 디젤엔진의 배

〈표-2〉 NOx 저감 후처리 기술

저감 기술	촉매 물질	최대 NOx 정화율
LEAN NOx ( PASSIVE TYPE )	HC	15%
LEAN NOx ( ACTIVE TYPE )	HC 공급 필요	30%
SCR ( Selective Catalytic Reduction )	UREA, AMMONIA	65%
NOx ABSORBER CATALYSTS	HC, CO, H2	54%
Plasma Tech.	- / Ammonia	10/ 50%

기 가스 중에 포함된 HC 량은 미소하므로 PASSIVE TYPE 촉매 정화율이 ACTIVE TYPE에 비해 열세를 보인다.

현재 정화율이 60% 이상인 실용 가능성이 있는 기술로써는 상기 표와 같이 SCR과 NOx ABSORBER CATALYSTS가 있다. 주로 대형 발전기 등에 이용되어온 SCR 기술은 촉매 물질로써 AMMONIA 혹은 UREA (요소)를 사용한다. UREA를 물에 용해 시켜 차량에 적용하였을 경우 NOx 정화율이 65%~75%에 달한다. 이 기술은 다른 후처리 장치의 가장 큰 장애로 여겨지는 연료 황성분 저감 필요성이 없는 큰 장점이 있어 다른 기술보다 그 실용화 가능성이 크다.

실제로 현재 유럽지역의 상용차 MAKER 들은 독일의 지멘스사와 합작하여 본 SCR 기술을 실차량에 적용하여 시험 중이며 가까운 장래에 실용화될 가능성이 크다는 보고가 있다. 하지만 본 SCR 기술은 두 가지의 선결 문제를 가지고 있는 것으로 알려져 있

다.

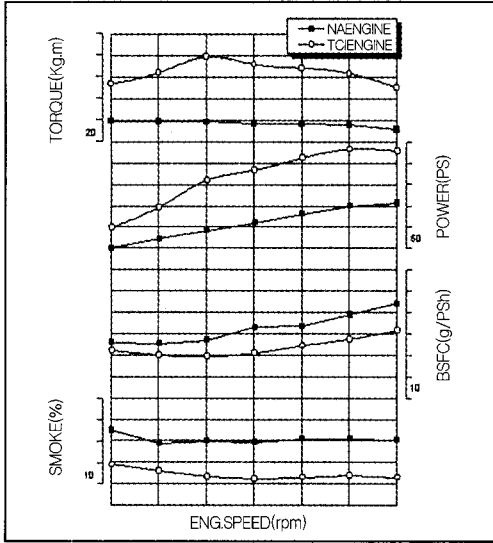
첫째는 AMMONIA SLIP 현상으로 촉매 물질의 양이 적정 수준을 초과할 경우 맹독성 AMMONIA 가스가 배기관에 발생하는 현상이며, 두 번째 문제는 차량 상태에서 UREA 수용액 (WATER + UREA)의 저장 문제로써 그 무게와 공간, UREA + WATER 의 REFILL 주기가 현재 양산 반영 수준이 안 되는 것으로 알려져 있다.

LEAN BURN GASOLINE 엔진에서 출발한 NOx ABSORBER CATALYSTS 기술은 A/F LEAN 상황에서 발생하는 NOx를 촉매 담체에 포집하였다가 A/F RICH 조건에서 저장된 NOx를 환원시키는 방법이다. 이 기술은 현재 LEAN BURN 혹은 GDI(GASOLINE DIRECT INJECTION) 엔진에서 가장 많이 쓰이는 촉매 기술 중에 하나이다. 디젤엔진에서는 가솔린 엔진과는 달리 촉매 재생을 위한 A/F RICH 조건 형성이 매우 어려운 실정이다. 디젤엔진

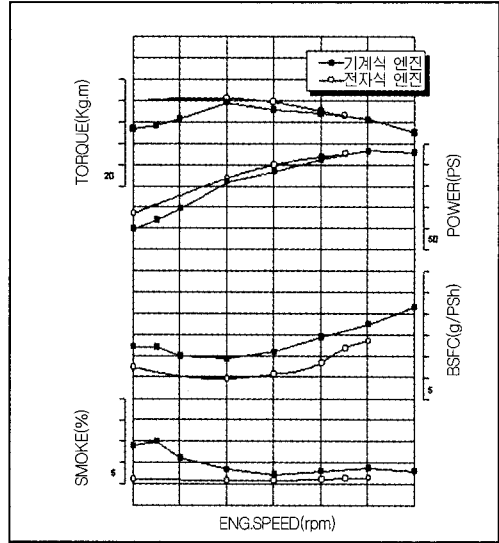
에서 A/F RICH 조건을 형성하게 되면 연비 및 매연, 입자상 물질이 악화되는 경향이 있다.

본 NOx ABSORBER CATALYSTS 기술의 적용에 가장 큰 걸림돌은 무엇보다도 SULFATE 형성이라 하겠다. 연료중의 황 성분이 산화 작용으로 인해 SULFATE가 형성되는 문제는 기술적으로 연료의 황 함유량 저감만이 유일한 대책이 되나, 이는 막대한 정유 시설의 재투자를 필요로 하므로 쉽게 해결될 가능성은 없는 것으로 판단된다. 문헌상 약 20ppm 이하의 황 함유량 유지가 필요하다고 하나 현재 EURO III의 황 함유량 규제가 50ppm인 것을 감안하면 본 기술의 단시일 내 적용은 용이하지 않을 것으로 판단된다.

근래 10여년 동안 연소 개선을 통한 입자상 물질의 저감 기술은 눈부신 발전을 이룩해 왔다. 특히 분사계의 고압화에 의한 입자상 물질의 저감은 놀라울 정도이다. 하지만 향후에는 그 입자상 물질의 총량뿐만 아니라 그 입자의 수 (2.5 $\mu$ m size PM 또는 NANO-SIZE PM)에 많은 관심이 집중되고 있으며, 최근의 연구 보고서에 의하면 인체에 직접적 영향을 미치는 입자상 물질은 바로 이런 NANO-SIZE PM 이라는 보고가 있다. 현재 사용중인 분사압 고압화에 의한 입자상 물질 저감



〈그림 3〉 NA-TCi 엔진 전부하 성능 비교



〈그림 4〉 기계식-전자식 엔진 전부하 성능 비교

기술은 바로 이런 NANO-SIZE PM 저감에는 큰 효과가 없는 것으로 인식되고 있으므로, 많은 엔진 제작사들이 DPF(Diesel Particulate Filter) 적용에 큰 관심을 보이고 있다. DPF는 엔진 전 운전 영역에서 PM 저감에 큰 효과가 있다. 현재 DPF 적용의 가장 큰 걸림들은 PM 포집이 아니라 필터에 포집된 PM을 어떻게 제거하느냐 하는 필터 재생(REGENERATION) 기술의 문제라 하겠다. 많은 후처리 장치 개발 업체들이 이 재생 기술 개발에 중점을 두고 있는 것으로 알려져 있다. 영국의 JOHNSON MATTHEY사에서 양산 중인 CRT(CONTINUOUS REGENERATING TRAP) 방법은 DPF 촉매 상류에 다른 제2

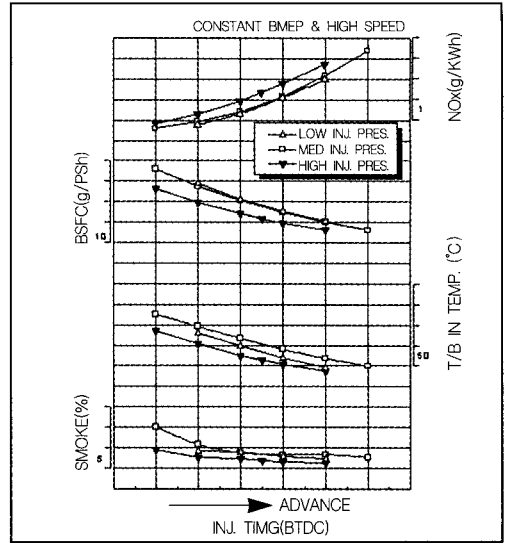
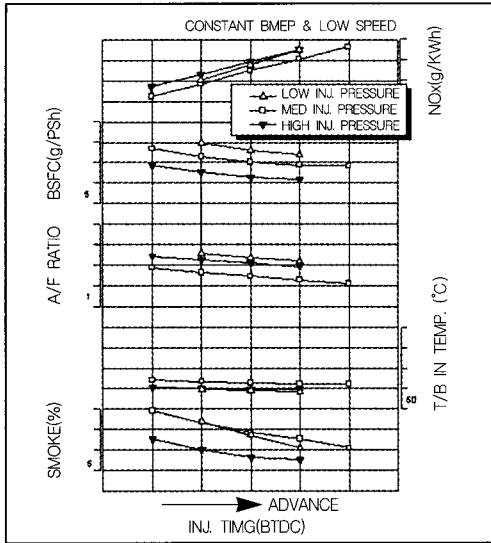
의 촉매를 써서 매연 재생 온도를 낮추는 장치로써 현재 가장 많이 사용되는 방법이다.

## 2) 당사 저연비 대형 디젤 엔진 개발

당사에서는 과거 10년 동안 저연비 고효율 CLEAN 디젤 엔진 개발을 위해 노력해 왔다. 과거에는 기존 엔진의 미소 개선 방향으로 엔진 개발을 수행해 왔으나, 최근 점점 강화되는 유해 배기가스 규제 및 저연비 차량/엔진에 대한 국내의 요구에 부응하기 위하여 당사 자체 신엔진을 개발하는 방향으로 그 어려움을 극복하고 한다. 이와 같은 신엔진 개발 CONCEPT 및 당사의 개발 경험 등을 본 지면을 통해 기술하려 한다.

## ① TCi 엔진 적용

기존 NA 엔진을 TCi화 했을 때 흡입 공기량 증가에 의해 얻을 수 있는 최대 토크 및 출력 향상, 연비 저감, 매연 저감에 관한 결과를 그림 3에 나타내었다. 본 그림에서 보듯이 최대 약 40% 이상의 토크 및 출력 증대를 얻을 수 있었으며, 연비 또한 5% 이상 개선되었다. 본 결과는 동일한 배출 가스 규제를 만족하는 범위 내에서 각각 최적의 연소계를 구성하였을 경우의 엔진 성능/EM 결과이다. NA 엔진의 경우는 저속 영역 SMOKE의 개선을 위해 NOZZLE 분공경을 축소하여 고압 분사를 추구 하였으나, TCi 엔진의 경우 많은 가용 공기가 흡입되므로 해서 상대적으로 작은 양의 SMOKE 제어 보다는 연비 및



〈그림 5〉 분사압에 따른 성능 / EM 변화

최대 출력 향상에 초점을 두어 NA 엔진 대비 큰 분공경의 NOZZLE를 적용하였다. 두 엔진의 기본 HARDWARE 및 내구력이 동일하므로 설계 허용 최대 연소압은 같다.

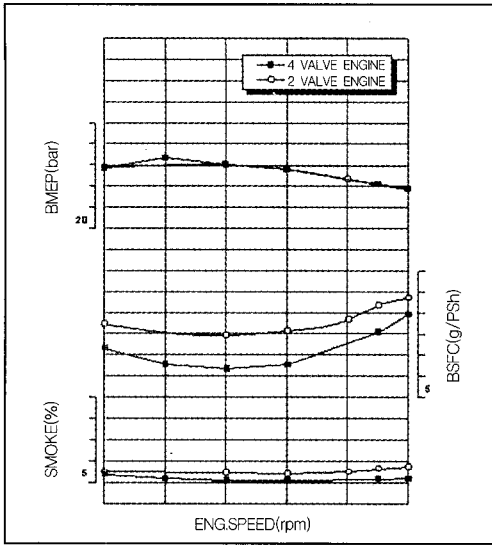
기본적으로 NA 엔진의 경우 그 특성상 출력이 잦은 도심 지역 운행 버스에 많이 사용되며, TCi 엔진의 경우 TURBO LAG 측면의 불리로 출력이 상대적으로 적은 고속도로 운행을 주 목적으로 하는 고속버스 혹은 CARGO 형 트럭에 주로 장착되어 왔다. 하지만 최근에는 이런 구분이 불필요할 정도로 과급 엔진의 출발성은 상당한 수준으로 개선되었다.

## ② 연료 분사계 고압화 및 전자 제어화

기존 기계식 연료 분사계 엔진에서 전자식 분사계 엔진으로 전환함으로써 얻을 수 있는 연비 개선량을 그림 4에 도시하였다. 전자식 분사계 엔진의 경우 최적화된 연소 시스템을 도입함으로써 연비의 추가 저감이 가능하였으며 또한 SPEED / LOAD에 따른 최적 분사시기 제어도 가능하였다. 따라서 기존 기계식 엔진으로는 만족하기 어려웠던 국내 2000년 배기가스 규제(EURO II)를 만족하였고, 통상적인 배기 규제 강화에 따른 연비 희생 없이 오히려 기계식 엔진 대비 약 5% 이상의 연비 개선 결과를 얻을 수 있었다. 기존 기계식 분사계에서의 분사압은 약 800bar 내외이었으나, 전자식 분사계 엔진은 1000bar 이상의 분사압 형성이

가능하였고, 이에 따라 연소계 재 MATCHING이 필요하였다.

즉, 연소실 형상 및 분사 노즐의 변경, T/C의 재튜닝을 수행하였다. 연소계 MATCHING의 대강을 살펴보면, 연소실 형상의 경우 1000bar 이상의 고압 연료 분사에 의한 OPEN BOWL 형상에서 TURBULENT STEPPED BOWL 형상으로의 변경이 필요하였고, NOZZLE 분공경 축소에 의한 추가적인 NOZZLE SIDE의 분사압 증가를 도모하였다. 또한 T/C의 TURBINE AREA 축소로 저속에서의 TORQUE 증대 및 SMOKE 억제를 동시에 수행할 수 있었다. 하지만 TURBINE AREA 축소에 의한 고속 영역에서의 과대 BOOSTING으로 인하여 T/C 내구력 향상 및 연비 개



〈그림 6〉 2 VALVE / 4 VALVE 엔진 성능 비교

선을 위한 WASTE GATE TYPE T/C 도입이 필요하였다.

다른 전자식 분사계 엔진에서 수행한 연료 분사압 변화에 따른 연비 개선 경향을 그림 5에 도시

과정에서는 최적의 분사계 선정을 위하여 많은 양의 NOZZLE 및 연소실 형상 변경 시험을 수행하여 임의의 분사계에 제일 적합한 연소실, 노즐, HEAD 흡기 포

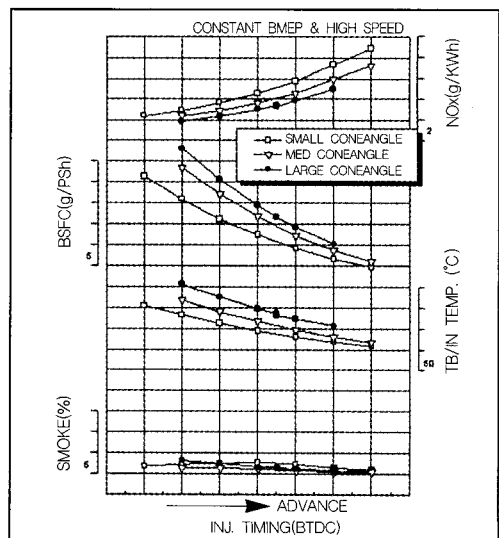
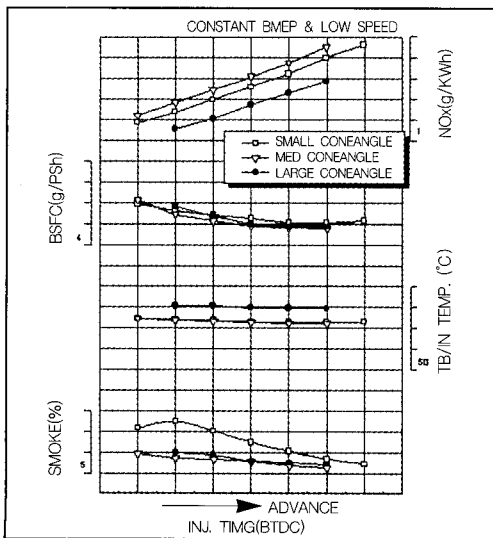
하였다. 본 그림에서 보듯이 연료 분사압이 상승함에 따라 연비 및 매연이 많은 수준 개선 가능하다, NOx EM의 악화가 동시에 수반된다. 즉, 고압화에 따른 성능 EM에 이익 및 손해가 분명하므로 분사계 선정에 주의할 필요가 있다. 본 엔진의 개발

트 등을 선정하였다.

### ③ 엔진 흡·배기밸브의 4 VALVE 화

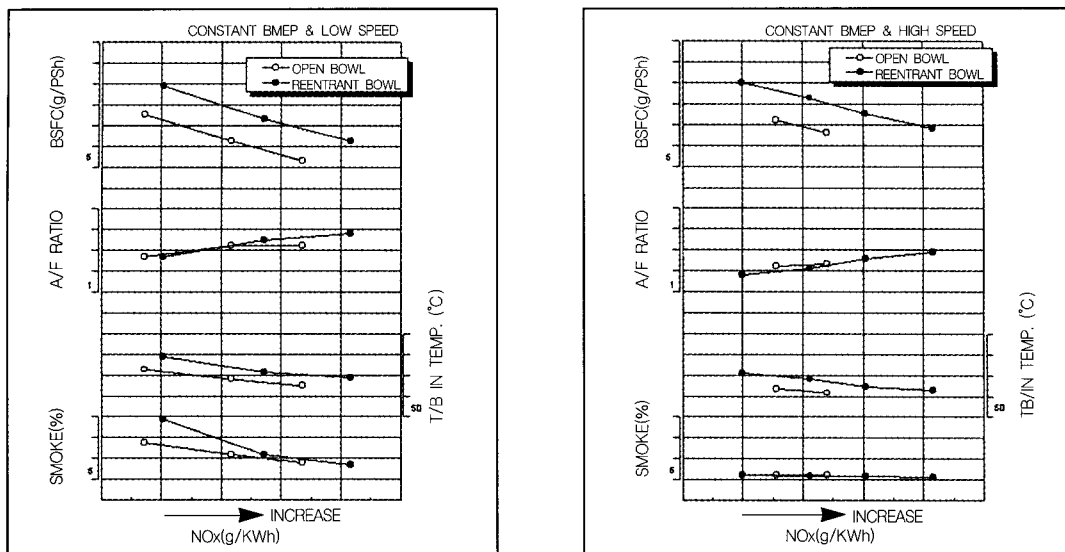
엔진 개발 과정에서 당면하는 가장 어려운 문제는 흡기 효율 증대를 위한 작업일 것이다. 본 고에서는 흡입 효율 개선을 위하여 수행하는 흡기 PORT의 Cf 값 개선 작업보다는 흡배기 밸브의 4 VALVE 화에 의한 성능/EM 변화에 대하여 논하고자 한다.

디젤 DI(DIRECT INJECTION) 엔진에서의 4 VALVE 화는 기존 가솔린 엔진 PORT INJECTION과는 그 의미가 많이 다르다. 즉, 기존 디젤 2 VALVE 엔진에서 구현할 수 없었던 분사 노즐의 직립화 및 연소 대칭을 이룰 수 있다는 점에서 연



〈그림 7〉 NOZZLE 분공각 변경 시험





(그림 8) 연소실 형상에 따른 변화 비교

소실내의 신기를 최고 효율로 이용할 수 있다는 장점을 내포하고 있다. 주지의 사실로써 디젤 TCi 엔진에서 Cf 값의 중요성이 기존 가솔린 혹은 디젤 NA 엔진 대비 크지는 않지만, 4 VALVE 화로 많은 양의 신기를 최소의 PUMPING LOSS 로 연소실 내로 흡입할 수 있는 장점도 있다.<sup>(10)</sup>

그림 6은 비슷한 배기량의 기준 2 VALVE 엔진과 4 VALVE 엔진으로 변경하였을 때의 연비 개선량을 도시한 것이다.

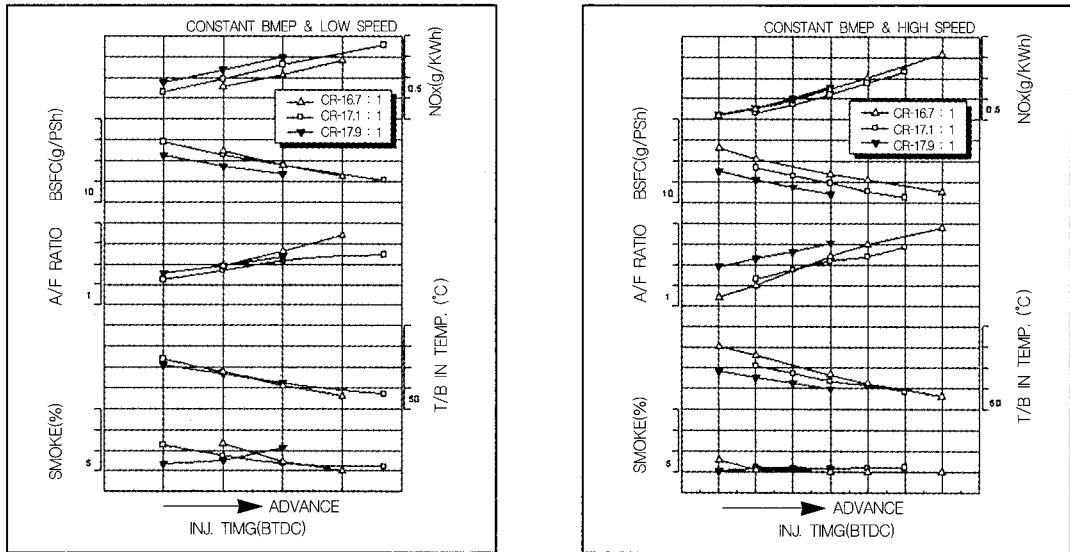
그림 6과 같이 동일 회전수 동일 BMEP 조건에서 연비를 비교하여 보면, 4 VALVE 엔진이 2 VALVE 엔진 대비 약 8% 이상의 연비 개선 효과를 보인다. 동일한 조건(동일 엔진 및 동일 사

양)에서 시험된 결과가 아니기 때문에 연비 개선량이 모두 4 VALVE 화에 의한 것은 아니지만, 개선량의 많은 부분이 4 VALVE 에 의한 것으로 판단할 수 있다.<sup>(10)</sup> 매연 등 유해 배기가스의 경우 두 엔진 모두 낮은 수준이므로 정확한 비교는 힘들으나, 4 VALVE 엔진의 경우가 좀 더 낮은 수준에서 형성 되는 것을 알 수 있다.

#### ④ 연소계 최적화

지금까지는 대형 디젤엔진에서 MAIN HARDWARE 변경에 의한 연비 개선에 관하여 논하였다. 본 장에서는 일반적으로 엔진 성능에 영향을 주는 연소계 인자들의 최적화 과정에 관해 논하고자 한다.

대형 디젤 엔진에서 연비 및 EM 에 영향을 주는 연소계 인자로는 연소실 직경, 깊이, 체적 등의 연소실 형상에 관한 것과 분사 압력, NOZZLE 분공경, 분공각, 노즐 홀 수 등의 분사계, T/C의 TURBINE AREA, COMPRESSOR A/R TRIM, WASTE GATE TYPE 등에 관한 TCi SYSTEM 등으로 나눌 수 있다. 본 고에서는 상기 인자들 중 몇 가지 사항에 대해서 논하고자 한다. 단, 본 인자들은 엔진의 기본 특성 및 작동 회전수, 작동 부하, 각 인자간의 상관 관계 등에 의해서 서로 다른 경향을 보일 수 있으므로 절대적 결과라 말할 수 없다. 일례로 NOZZLE 분공경의 경우 당사 엔진에서는 분공경이 커질수록 동일 NOx에



(그림 9) 압축비 변화 시험

서 연비 저감 효과를 보이지만, 다른 엔진에서는 정 반대 경향을 보이는 경우도 있다.

③ 분사계

그림 7에 NOZZLE 분공각 변화에 따른 연비 및 NO<sub>x</sub>, SMOKE 변화량을 도시하였다. 본 엔진에서 NOZZLE 분공각이 넓어짐에 따라 저속에서 NO<sub>x</sub> 및 SMOKE 특성이 유리해지나, 고속 영역에서는 연비 악화를 초래한다. 특히 고속 영역에서 분사시기 지각에 따른 연비 악화가 크게 나타나는데 이는 분사말기에 많은 양의 연료가 CYLINDER LINER 부근에서 연소를 일으켜 급격한 열 효율 악화로 생기는 현상이라고 판단된다.

그 외에 분사계 변화는

NOZZLE FLOW RATE 변경, NOZZLE HOLE 수 변경 등이 있으나, 본 고에서는 논외로 하겠다.

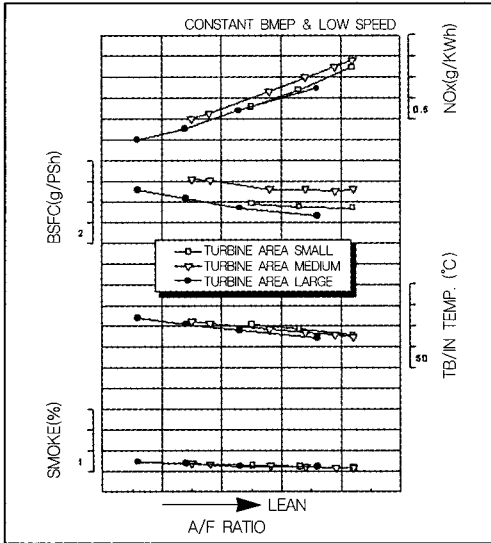
④ 연소실 형상

그림 8에 OPEN TYPE BOWL 및 REENTRANT TYPE BOWL에 대하여 비교 시험을 수행하였다. 본 엔진의 경우 다른 엔진 대비 상대적으로 LOW SWIRL 흡기 포트를 가지고 있고 또한 분사압이 1500bar 이상 초고압화 되어 있으므로 REENTRANT TYPE BOWL 보다는 OPEN TYPE 형태의 BOWL 형상이 유리한 것으로 보인다. 이는 REENTRANT TYPE BOWL의 경우 PISTON이 ATDC로 갈수록 REVERSE

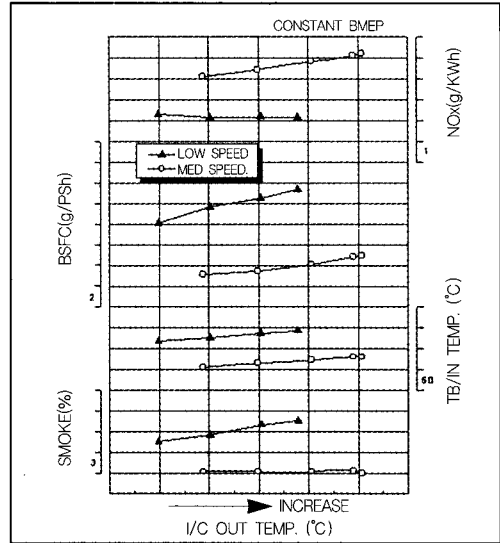
SQUISH의 강도가 강해짐에 따라 유동에 의한 열효율이 떨어져서 연비 악화를 초래하는 것으로 판단된다.

그림 9에 압축비 변화에 따른 연비/EM 변화를 도시하였다. 본 그림에서 보듯이 본 엔진의 경우에도 다른 엔진과 비슷하게 압축비 변화에 따른 일반적 경향을 보이고 있다. 즉, 압축비가 높아질수록 NO<sub>x</sub>의 증가가 뚜렷하지만 연비 및 SMOKE 측면에서의 개선 또한 뚜렷하다.

NO<sub>x</sub>의 경우 압축비 증가에 따라 IGNITION DELAY 감소에 의한 NO<sub>x</sub> 저감 효과와 최대 연소 온도 상승에 따른 NO<sub>x</sub> 상승 효과 중에 본 엔진에서는 후자가 우세하여 결과적으로 NO<sub>x</sub>가 증가한다고 말할 수 있다.



〈그림 10〉 T/B AREA 변화 시험



〈그림 11〉 I/C OUT 온도 변화 시험

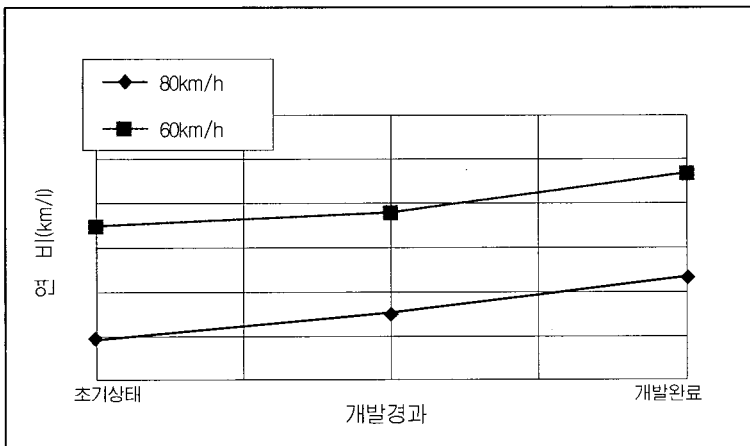
저속 영역의 경우 압축비 증가에 따른 NOx 증가가 연비 저감량 보다 많은 경향을 보이고, 고속의 경우 연비 저감량이 NOx 증가량 보다 더 우세한 경향을 보인다. 따라서 엔진 개발 시 동일한 NOx EM 하에서 최저의 연비

특성을 보이는 압축비를 선정하는 것이 중요하다. 또한 압축비 선정에서 반드시 고려되어야 할 사항은 압축비 상승에 따른 NOISE 증가 요인 및 연소 압력 증가에 따른 내구 성능 악화, 저온에서의 냉 시동성에 관한 것이

다.

◎ TCi SYSTEM 최적화

그림 10에 TURBINE AREA에 따른 성능 및 EM 변화를 도시하였다. 본 그림은 WASTE GATE TYPE T/C에서 A/F RATIO 변화에 따른 성능 / EM 비교 평가 시험을 수행한 결과로써, TURBINE AREA 확대에 따라 연비 및 NOx EM 저감이 이루어 짐을 알 수 있다. 단 본 그림의 예는 고속 영역에서의 결과로써 저속영역에서는 다른 경향을 보인다. 또한 TURBINE SIZE가 커짐에 따라 과도 상태에서의 TURBO LAG에 의한 응답 지연 현상이 심화되므로 TURBINE AREA 선택에 신중을 기할 필요가 있다. 결과적으로 TURBINE



〈그림 12〉 차량 연비 개선 과정

AREA 선택에는 T/C 내구력 측면, 차량에서의 운전성 및 동력 성능 측면, 엔진 단체에서의 연비 / EM 측면이 동시에 고려되어야 한다.

그림 11에 전형적인 INTER-COOLER OUT 온도 변화에 따른 연비 및 EM 변화 시험 결과를 도시하였다.

INTERCOOLER OUT 온도는 차량 상태에서 차량의 속도 및 COMPRESSOR OUT 온도, 대기온 등에 큰 영향을 받으나 INTERCOOLER 자체 구조 및 재질 변경에 의한 방열 효율 증대 및 INTERCOOLER 방열 면적 증대, 차량 ENGINE ROOM 내 HOT AIR 유동 개선 등으로 충분한 온도 저감을 이룰 수 있다. 본 그림에서 INTERCOOLER OUT 온도 저감에 따라 연비 및 NOx, SMOKE 양이 큰 폭으로 감소하는 것을 알 수 있다. 저속 영역의 경우 INTERCOOLER OUT 온도가 10℃ 감소할 때 연비가 약 3% 정도 개선되며, 또한 SMOKE의 경우도 4% 이상 개선된다. NOx의 경우 흡입 공기 온도 감소에 의한 연소 온도 저감으로 NOx EM 저감이 가능한 요인과 흡기 공기 밀도 증가에 의한 흡기 공기량 증가와 이에 따른 총 배기 가스량 증가로 인한 NOx 증가 요인이 서로 상쇄되어 전체적으로 총량에서는 큰 변화가 없

는 것으로 판단된다.

중속 영역의 경우는 저속 영역과 다른 경향을 보인다. 흡기 온도 저감에 따른 SMOKE 및 연비 개선량 보다는 NOx 개선 폭이 더 크게 나타나는 것을 알 수 있다. 이는 상대적으로 저속 영역에 비해 중속 영역의 A/F RATIO가 LEAN 하므로 흡기 공기량 증가에 따른 연비 개선량이 크지 않은 것으로 판단된다. NOx의 경우를 보면, 저속 영역보다 중속 영역의 연소압 및 연소 온도가 높으므로 흡기 온도 저감에 의한 NOx 저감 효과가 중속 영역에서 좀 더 크게 나타난다고 판단된다.

### ⑤ 차량 연비 개선

그림 12에 동일 엔진의 연소 성능 개발 진행에 따른 차량 상태 정속 연비 개선량을 도시하였다. 본 그림은 초기 개발 엔진 상태에서 상기 ④항에 언급한 연소계 재 MATCHING으로 개선된 차량 연비 개선량으로써 약 9% 이상의 차량 상태 정속 연비 개선을 이룰 수 있었다. 만약 상기 ①~④ 까지 논의된 TCi 화, 전자 제어 분사계, 4 VALVE 화, 연소계 개선 등을 적용한다면, 기존 기계식 NA 엔진 대비 최종 사양의 엔진은 약 20~30 % 이상의 차량 연비 개선을 이룰 수 있을 것으로 예상된다.

### 3. 결론

교토 3차 협약에서부터 본격 대두된 전 세계 CO<sub>2</sub> 감축 노력은 자동차 제작사들로 하여금 기존과는 다른 방향으로의 엔진 개발을 촉진시키고 있다. 또한 각국의 강화되는 유해 배기 가스 규제 또한 엔진 개발에 많은 어려움으로 작용하고 있다. 이런 모든 규제 및 제약은 선진국의 눈에 보이지 않은 무역 장벽으로 작용하고 있으며, 이런 변화에 능동적으로 대처하지 못하는 자동차 제작사는 도태될 수밖에 없는 상황이 되어 가고 있다.

본 고에서는 대형 디젤엔진에서 현재 진행되고 있는 연비 개선 및 유해 배기 가스 저감을 위한 전세계 기술 개발 동향에 대하여 정리하였고, 현재까지 당사의 기술 개발 경향을 통하여 향후 디젤 엔진 개발 방향을 정립하고자 하였다. 기존 NA 방식의 엔진에서 TCi 방식을 채택하므로써 얻을 수 있는 연비 개선 및 SMOKE 저감, 전자 제어 및 초고압화 분사계 채택에 의한 연비 개선, 4 VALVE 엔진으로의 개량, 연소계 최적화 과정 등으로 얻을 수 있었던 연비 개선 등에 대해 실증적으로 논하였다. 향후 좀 더 개선된 형태의 연소계 및 현재 선진 엔진 제작사에서 연구중인 디젤 후처리 장치와 같은 신 기술을 당

사 엔진 개발에 적극적으로 적용하여 대내외 적으로 계속 강화되는 연비 개선 요구 및 배기 가스 규제에 능동적으로 대처 할 계획이다. 끝으로 본 논문이 향후 엔진 개발에 다소나마 도움이 될 수 있기를 바란다.

#### 참고문헌

1. Johans Bierbaumer, Rainer Cichocki, Walter Ospelt, "CO<sub>2</sub> Emission Reduction the Contribution of Modern HSDI Engine", KSME 15th Workshop.
2. Wojciech Gis, Piotr Bielaczyc, "Emission of CO<sub>2</sub> and Fuel Consumption for Automotive Vehicle", SAE 1999-01-1074.
3. S.P. Edwards, A.D. Pilley, S. Michon, G. Fournier, "The Optimization of Common Rail FIE Equipped Engines Through the Use of Statistical Experimental Design, Mathematical Modelling and Genetic Algorithms", SAE 970346.
4. H. Eriach, F. Chmela, W. Cartellieri, P. Herzog, "Pressure Modulated Injection and Items Effect on Combustion and Emissions of a HD Diesel Engine", SAE 952059.
5. Richard R. Lundstrom, Joseph M. Gall, "A Comparison of Transient Vehicle Performance Using a Fixed Geometry, Wastegated Turbocharger and a Variable Geometry Turbocharger", SAE 860104.
6. Henk J. Dekke, Wilco L. Sturm, "Simulation and Control of a HD Diesel Engine Equipped with New EGR Technology", SAE 960871.
7. "예혼합 연소개념을 도입한 최초의 엔진 : YD25DDTi 엔진의 MK 연소방식 조사", 현대자동차 선형연구소 내부 보고서.
8. R.H. Thring, "Homogeneous Charge Compression Ignition (HCCI) Engines", SAE 892068.
9. Hartrnut Luders, Peter Stommel, Sam Geckler, "Diesel Exhaust Treatment New Approached to Ultra Low Emission Diesel Vehicles", SAE 1999-01-0108.
10. Shin Endo, Y. Adachi, Y. Ihara, M. Terasawa, K. Suenaga, "Development of J-Series Engine and Adoption of Common-Rail Fuel Injection System", SAE 970818.