

디젤 엔진의 연구동향 (Part I)

Research Trends of Future Diesel Engine

- In Terms of In-cylinder Emissions Control -



윤 한 호 / 델파이 중앙 연구소
Hanho Yun / Delphi Research Labs.

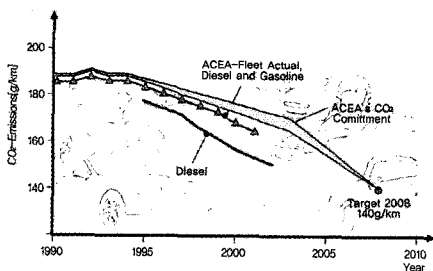
직접 분사식 디젤 엔진이 도입된 이래 디젤 엔진은 세계 시장에서 커다란 성공을 거두고 있다. 이미 유럽의 몇몇 국가에서는 디젤 엔진을 장착한 차량이 50%의 시장 점유율을 차지하고 있다. 특히 고급 차량의 경우는 그 수치가 70% 육박하기도 한다. 따라서 최근에는 미국 자동차 메이커들도 이 디젤 엔진 개발에 엄청난 자금을 투자하고 있다.

디젤 엔진의 큰 장점 중의 하나는 뛰어난 연비를 바탕으로 전 세계 CO₂ 가스 저감에 큰 기여를 한다는 것이다. 유럽 자동차 연합(ACEA, European Automotive Manufactures Association)은 자체

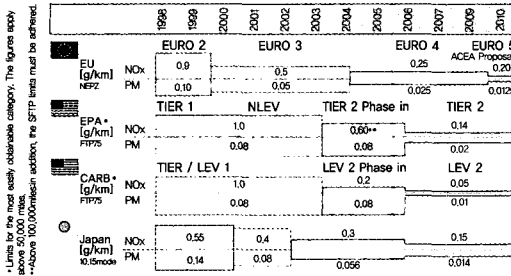
적으로 한 해 전체 신차의 평균 CO₂ 가스의 배출을 1995년 CO₂=186g/km에서 2008년 CO₂=140g/km로 25%를 줄이겠다고 발표하였다(그림 1).

그러나 유럽에서는 총 등록 차량 대수는 증가했음에도 불구하고 전체 차량 중 디젤 엔진이 차지하는 비중이 높아짐에 따라 차량으로부터 배출되는 CO₂ 가스가 피크를 지나 전환점에 와 있는 실정이다. 이처럼 직접 분사식 디젤 엔진은 CO₂ 가스 저감에 중요한 역할을 하고 있다. 가솔린 차량에 비하여 증가된 차량 무게에도 불구하고 이미 약 14% 정도의 CO₂ 저감은 가능하리라는 전망이 나오고 있다. 향후에도 디젤 엔진이 계속 경쟁력을 갖기 위해서는 점점 복잡해져가는 후처리 장치나 여러가지 신 기술의 도입시 현재의 장점을 최대한 보전한 상태에서 이루어져야만 한다.

그러나, 날로 엄격해져가는 환경 문제로 인하여 디젤 엔진의 배기 가스 저감이 해결해야 할 큰 숙제로 남아 있다. <그림 2>에 나타난 세계 각국의 디젤 승용차의 배기 가스 규제 현황을 보면, 1990년 이래로 HC와 NO_x 에미션은 95%가 감소하였고, Particulate는



(그림 1) 유럽 승용차 CO₂ 가스의 동향



(그림 2) 세계 각국의 배기가스 규제 현황

91%가 감소하였다는 것을 알 수 있다.

이러한 엄격한 배기 가스 규제에 대응하기 위하여 이미 유럽에서는 수 많은 연구가 진행중이다. 그 중에서도 2010년 이후의 디젤 엔진을 개발하기 위하여 여러 회사와 연구소가 공동으로 진행하는 세계의 큰 프로젝트가 주목을 받고 있다. 그 첫번째로는 HYPSPACE라고 이름 붙여진 Heavy Duty 디젤 엔진을 개발하는 프로젝트가 있고, 두번째로는 NICE라고 해서 승용 디젤 엔진을 개발하는 프로젝트이다. 마지막으로는 SPACE LIGHT라는 Light Duty 디젤 엔진을 개발하는 프로젝트가 있다.

이 세 프로젝트의 공통점은 배기 가스를 줄이기 위해 실린더 내 연소 최적화를 통한 Raw Emission 저감과 후 처리 장치를 이용한 Tail-pipe Emission 저감에 초점을 맞추고 있다. 이번 기고에는 Raw Emission 저감을 위해 이루어지고 있는 연구들에 대해 알아보려 한다. 후처리 장치를 통한 배기 가스 저감에 대해서는 다음 호에서 다루기로 하겠다.

배기 가스 저감을 위해서 통상적으로 이루어지고 있는 가장 우선 수단은 실린더내의 배기 가스 형성을 줄이는 것이다. 이를 위해서 다음과 같은 접근이 이루어지고 있다.

- Combustion Process
- Mixture Preparation [Port Design, Aimed Charge Motion, Injection Pressure, Swirl Ratio, Flexibility (multi-injection), Design of Injection Characteristic, Injection Nozzle Geometry]
- Control Concept [Exhaust Gas Recirculation, Boost Pressure, Engine Operating Temperature, Injection (cylinder Selective)]
- Fuel Quality [Sulfur Content, Cetane Number, Aromatic Content, Special Fuels]

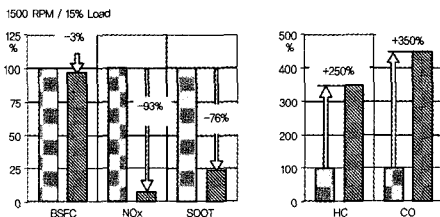
특히 연소 개발 측면에서는 HCCI 나 Premixed Low-temperature Combustion 같은 Homogeneous Combustion System의 확대 적용이 최우선 과제이다. 이에 대해서 좀 더 자세히 살펴보기로 하자.

1. Combustion Process

혼다 자동차의 PCCI Combustion, 도요타 자동차의 Smokeless Low Temperature Combustion 과 UNIBUS System, 닛산 자동차의 MK Combustion 그리고 프랑스 IFP 연구소의 NADI System 등이 현재 HSDI(High Speed Direct Injection) 엔진에서 주목을 받고 있는 새로운 디젤 연소 방법들이다. 이렇듯 최근 각광을 받고 있는 디젤 연소는 개선된 Air-fuel Mixing과 저온 연소로 특징 지워질 수 있다. 이를 위해서 다량의 EGR과 인젝션 타이밍의 최적화, 그리고 낮은 압축비가 엔진

에 적용되고 있다. 이렇게 실린더 내의 국부적인 고온 영역이나 Rich한 영역을 줄임으로써 NO_x나 Soot의 형성을 방지하는 것이 새로운 디젤 연소의 특징이다. <그림 3>에서 보듯이 이러한 새로운 디젤 연소는 배기 가스 저감에 커다란 역할을 한다는 것을 알 수 있다.

그러나, 그림에서도 알 수 있듯이 여전히 해결해야 할 문제가 남아있다. 그 첫번째로는 HC와 CO Emission의 저감이다. Early Injection으로 인한 실린더 Wall-wetting이 이 두 에미션의 증가에 가장 큰 원인으로 고려되고 있다. 따라서 실린더 Wall-wetting을 줄이기 위해 Narrow Cone Angle 을 가진 인젝터가 개발 연구중에 있다.



(그림 3) Emissions and Fuel Consumption with Alternative Combustion

두번째로 지적되고 있는 문제점은 적용 범위의 확대이다. 이러한 연소는 현재 Knocking이나 Misfire 문제로 인하여 Part Load Operation에서만 적용되고 있다. 따라서 Dual Mode 연소, 즉 저속 저로드 구간에서는 Homogeneous Premixed Combustion, 그리고 고속 고로드 구간에서는 Conventional Combustion이 현재 해결책으로 제시되어 진다. 가능한한 최대한의 적용을 위해서 현재에도 다방면으로 많은 연구가 행해지고 있다.

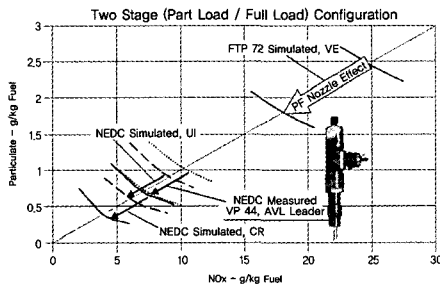
2. Fuel Injection System

디젤 엔진에 있어서 Fuel Injection System은 가장 중요한 요소 중의 하나이다. 특히 Common Rail System의 개발 이후 이러한 현상이 더욱 두드러지고 있다. 점점 커지고 있는 분사 압력, 다양하게 조절할 수 있는 분사 시기 및 수 등과 같이 현재 인젝션 시스템에 적용되고 있는 Flexibility로 인하여 새로운 디젤 연소 모델 개발에 박차를 가할 수 있게 되었다. 앞으로도 계속적인 인젝션 시스템의 개발이 디젤 엔진의 개발을 견인할 것이다.

미래 디젤 엔진용 인젝션 시스템의 하나로서 고려되고 있는 것중에서 가장 주목받고 있는 것으로는 Variable Nozzle Orifice(VNO) System과 Piezo-injector가 있다. 첫번째, Piezo-type Injector의 장점은 기존의 Solenoid-type Injector에 비하여 2배에서 3배정도 빠르게 노즐 Needle의 열고 닫음을 조절할 수 있다는 것이다. 따라서 매우 정확한 연료량의 제어가 가능하다. 또한 2,000bar 정도까지의 매우 높은 분사 압력 조건에서도 훌륭한 Multiple Injection 성능을 보여줄 수 있다. 따라서 아주 작은 양의 분사도 매우 정확히 제어할 수 있게 되었다. 이러한 장점들로 인하여 10% 정도의 성능 향상과 20에서 30% 정도의 배기 가스 저감이 가능하다는 것이 결과로 보고되고 있다. 마지막으로 이 시스템은 연료 소비율을 향상시키는데 도움을 주며 Fuel Cooler와 Fuel Return 시스템을 제거할 수 있게 됨으로서 Low Cost 인젝션 시스템의 구축도 가능하게 한다. 유럽의 몇몇 양산중인 엔진에는 이미 1세대 Piezo-type 인젝터가 장착되고 있다.

두번째로는 Two Stage Variable Nozzle Orifice System이 있다. 이른바 Part Load / Full Load 노

즐이라고 불리는데, <그림 4>에 여러가지 인젝션 시스템과 결합하여 얻은 실험 결과를 나타내었다. 초기 배기 가스 결과에 관계 없이 Variable Orifice Nozzle 인젝터의 사용으로 인하여 비슷한 양의 NOx 와 Soot를 줄일 수 있다는 것을 알 수 있다. 이는 Dual Mode Combustion System과 결합하여 현재 많은 연구가 이루어지고 있는 상태이다.



<그림 4> Variable Orifice Nozzle 인젝터의 NOx/Particulate에 대한 영향

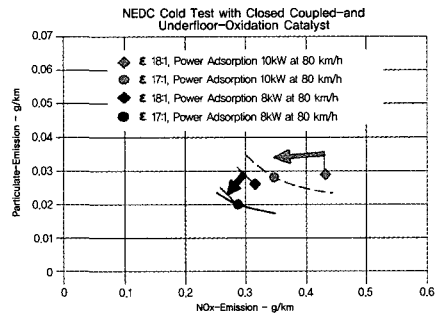
이처럼 Fuel Injection System은 엔진 성능과 배기 가스 형성에 직접적으로 관련이 있다. 그러므로 지속적인 새로운 Fuel Injection System의 개발이 미래 디젤 엔진 개발을 위해서는 필수적인 선택이다.

3. Geometric Compression Ratio

현재 양산되고 있는 대부분의 디젤 엔진의 압축비는 18~20이다. 그러나, 현재 미래 디젤 엔진을 위해 연구중인 엔진의 압축비는 14~16이다. 낮은 압축비의 디젤 엔진이 추세로 여겨지고 있는 실정이다.

이렇듯 압축비 저감을 통하여 얻을 수 있는 효과로는 최대 실린더 압력이 줄어들므로써 더 큰 Power Density를 얻을 수 있을 뿐만 아니라 연소

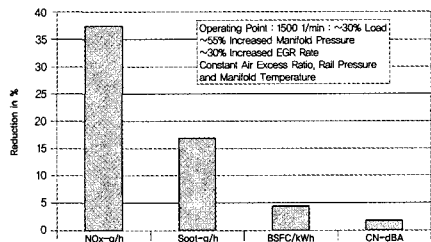
온도의 저감을 통하여 NOx나 Soot 에미션을 줄이는 데도 커다란 역할을 한다. <그림 5>에 NEDC 테스트 사이클에서 압축비 저감(18:1 → 17:1)이 에미션에 미치는 영향에 대해서 나타내었다. 평균적으로 압축비 저감을 통하여 약 15% 정도의 NOx와 Soot 에미션의 저감이 이루어짐을 알 수 있다.



<그림 5> 압축비 저감을 통한 NOx/Soot 에미션의 저감

4. Turbocharging

<그림 6>에 1,500rpm, 30% 로드 조건에서 흡입 공기의 압력이 에미션, 연료 소비 및 연소 노이즈에 미치는 영향에 대해서 나타내었다.

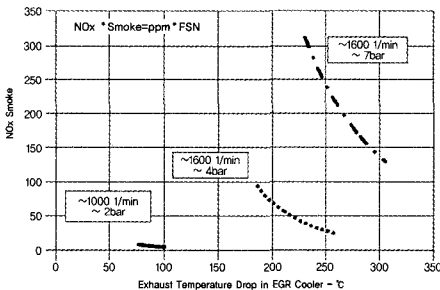


<그림 6> Part Load Turbocharging의 효과

흡입 매니폴드의 온도와 A/F Ratio는 고정한 채, 흡입 매니폴드의 압력을 55% 증가시키고 EGR 양을 30% 증가함으로써 NOx는 38% 줄일 수 있고, Soot는 17% 줄일 수 있다는 것을 발견했다. 따라서 Turbocharging 시스템은 엔진 성능 향상 뿐만 아니라 배기 가스 저감에도 효과가 있다는 사실을 알 수 있다.

5. Exhaust Gas Recirculation

EGR이 NOx Emission 저감에 커다란 역할을 한다는 것은 널리 알려져 있는 사실이다. 그러나 다량의 EGR을 이용할 경우에는 Smoke를 증가시키는 원인이 되기도 한다. 최근에는 이를 방지하기 위하여 EGR 온도에 대한 연구도 많이 이루어졌다. <그림 7>에 나타내었듯이, 특히 Higher Load(1,600 rpm, 7bar)에서 EGR Cooling을 통해서 NOx와 Smoke를 동시에 줄일 수 있다는 것을 알 수 있다.



<그림 7> NOx와 Smoke 에미션에 대한 EGR Cooling의 영향

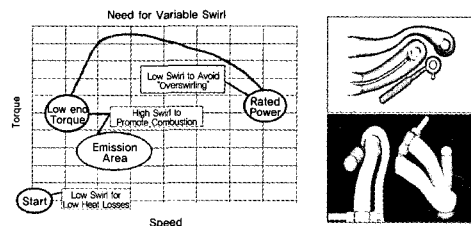
그러나 실질적으로 과도한 EGR 냉각은 아주 저로드 조건에서는(1,000rpm, 2bar) NOx와 Smoke

Emission의 저감에 특별한 영향이 없고 오히려 HC and CO Emission이 증가시키는 원인이 된다.

이러하듯 최근의 경향은 단순히 EGR을 이용하는 것이 아니라 엔진 운전 조건에 따른 정확한 콘트롤이 가미되고 있는 상황이다. 엔진 스피드와 로드 조건에 따라 Cooling의 정도와 By-pass의 유무를 결정하기 위하여 EGR Cooler By-pass 장치를 설치하기도 한다. 특히 냉시동 시나 엔진 Warm-up 구간에서는 반드시 By-pass 장치를 이용한다.

6. Variable Swirl

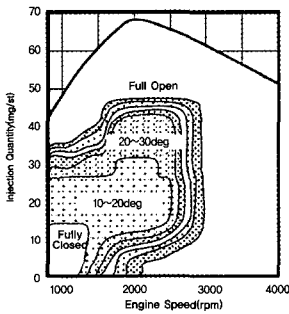
스월은 디젤 엔진에서 아주 중요한 콘트롤 변수 중의 하나이지만 최적의 스월 정도는 엔진 스피드와 로드 조건에 따라 변한다. 따라서 Variable Swirl을 이용하면 연소 최적화에 좀 더 자유도를 가질 수 있게 된다. 고정된 스월의 연소 시스템에서는 일반적으로 Part Load에서는 너무 낮은 스월로 인하여 Mixing에 손해를 보고, High Load에서는 너무 높은 Swirl로 인하여 적절한 Air Utilization에 방해받는다. 이러한 사실은 <그림 8>에서도 잘 나타나 있다. 이러한 단점을 극복하기 위하여 최근에 AVL은 "Split



<그림 8> HSDI 디젤엔진에서 Variable Swirl Split Port의 개념과 적용

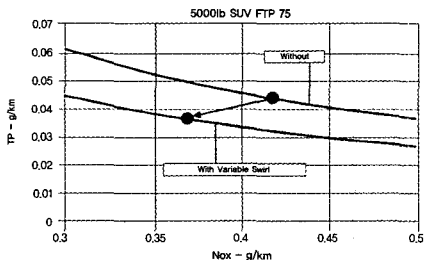
Port"를 새롭게 설계하였다 (<그림 8> 오른쪽 각각 도시한 2밸브와 4밸브용 참조). 이로 인하여 Volumetric Efficiency에 커다란 영향을 주지 않고도 원하는 Flexibility를 구현할 수 있게 되었다.

최근 유럽에 출시된 혼다 어코드 2.2L 디젤 엔진도 스윙 콘트롤 밸브(SCV)를 이용하여 엔진 운전 조건에 따라 1.4~4.0 사이의 서로 다른 스윙 넘버를 사용하였다. <그림 9>에 스윙 콘트롤 밸브의 로드 맵을 나타내었다.



<그림 9> SCV의 콘트롤 맵

이러한 Variable Swirl System이 NO_x/Particulate Trade-off에 미치는 영향에 대해서 FTP 75 Test 사이클을 통해 얻은 결과를 <그림 10>에 나타내었다. Variable Swirl System은 에미션



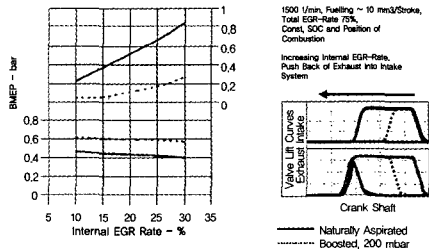
<그림 10> Variable Swirl 시스템의 이점

관련된 이점 이외에도 최대 파워의 증가, Improved Zero Boost, 저속 토크 향상, 향상된 냉 시동성의 결과를 얻을 수 있음을 알 수 있었다.

7. Variable Valve Actuation

이미 VVA의 여러 가지 이점들은 SI 엔진을 통해 잘 알려져 있고 받아들여지고 있다. 그러나 디젤 엔진에는 너무 작은 Valve-to-Piston 간극 문제로 인하여 아직까지는 광범위하게 적용되지 못하고 있는 실정이다.

최근에 낮은 압축비의 디젤 엔진에 대한 관심이 높아지면서 VVA에 대한 연구도 활발히 진행되어 이미 VVA에 대한 여러 가지 장점들(낮은 연료 소비와 에미션, 빠른 엔진과 후처리 장치의 Warm-up, 향상된 저속 토크, 빠른 천이 구간의 응답성)이 알려지기 시작하고 있다. <그림 11>에 밸브 타이밍의 조절을 이용하여 얻은 Internal EGR의 효과의 한 예를 나타내었다.



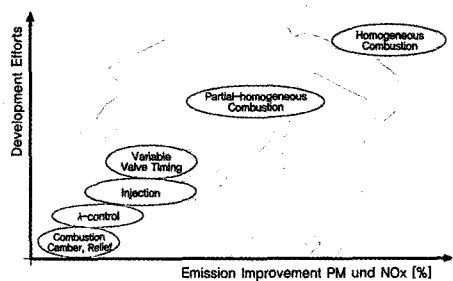
<그림 11> Soot 에미션과 BMEP에 대한 Internal EGR의 영향

Naturally Aspirated 엔진 조건에서는 Internal EGR의 증가가 Soot 에미션을 증가시키다는 것을

확연하게 볼 수 있지만 Turbocharged 엔진 조건에서는 그 영향이 상당히 미미함을 알 수 있다. 약 15%의 Internal EGR까지는 Soot Emission이 변하지 않고 순수하게 NO_x 에미션의 이득만을 얻을 수 있다는 것을 알 수 있다. 또한 외부 EGR 시스템과는 달리 Internal EGR은 응답성이 상당히 빠르기 때문에 Transient 구간에서의 배기 가스 조절에 상당한 이득이 예상되어 진다.

지금까지 미래의 에미션 규제에 대응하기 위해 고려되어지고 있는 실린더 내의 기술들에 대해서 알아 보았다. 그러나, 새로운 기술을 통하여 얻는 이득이 많으면 많을수록 그 기술을 적용하기 위한 투자와 노력이 많이 필요한 것이 사실이다<그림 12 참조>. 이러한 복잡성때문에 이전 보다 훨씬 더한 시간과

투자와 노력이 요구되어진다. 결론적으로 말하자면 신 기술 개발을 위한 끊임없는 노력과 투자가 필요한 시점이다.



(그림 12) 배기가스를 줄이기 위한 신기술의 적용과 투자 노력의 상관 관계

(윤한호 편집위원 : hanho.yun@delphi.com)

2005년 춘계학술대회 우수 포스터발표 논문상 수상자 안내

5월 3일부터 4일까지 KINTEX에서 개최된 우리학회 2005 춘계학술대회에서 아래의 두 편의 논문이 우수 포스터 발표상을 수상하였음을 알려드리며, 수상자분께는 축하드립니다.

- ▶ 자동차부품연구원 김현철 수석연구원 : 분절형 스틸 단조 피스톤을 장착한 디젤엔진의 배출가스 특성
- ▶ 한일일화 이현철 주임연구원 : 열응착 Boss 설계 개선

- 한국자동차공학회 사무국 -