

# HCCI 디젤연소의 연구개발 동향

## The Recent Trend of HCCI Combustion in DI Diesel Engine

김 장 현 / 현대자동차 선임연구원  
Jang Heon Kim / Hyundai Motor Company

윤 금 중 / 현대자동차 이사  
Kum Jung Yoon / Hyundai Motor Company

디젤엔진에서 NO<sub>x</sub>와 PM을 동시에 경이적으로 저감시킬 수 있는 신연소기술 개발에 다양한 시도가 선진 각 연구기관으로부터 수행되고 있다. 이러한 기술 중 HCCI(Homogeneous Charge Compression Ignition) Engine이 주목을 받고 있다. 이에 HCCI 엔진 연소기술의 개요 및 기술개발 동향에 대해 서술하고자 한다.

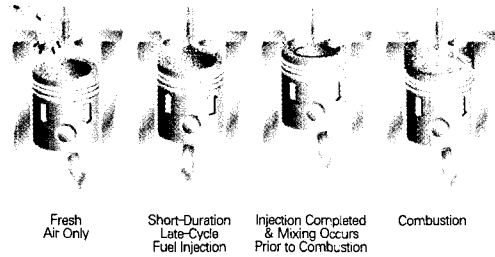
집중화를 통하여 실용화 개발 단계에 진입하리라 판단된다.

통상의 디젤 연소인 확산연소와는 달리, 연료와 공기를 균일하게 예혼합기화 한 후 연소를 수행시키는 예혼합 압축착화연소는 연소가스온도를 저하시킴으로써 NO<sub>x</sub> 를 수 Ppm, 매연을 거의 0 수준으로 동시에 저감시킬 수 있는 획기적인 연소 기술이다. 또한, 높

### 1. HCCI 연소기술 개요

예혼합 압축착화(HCCI)엔진은 21세기 내연기관의 최후 비장의 무기가 될 가능성이 높아짐에 따라, 연료 전지, 후처리 기술과 더불어 차기배기규제의 대안으로 인식되어, 선진 연구기관에서 기술개발에 대한 다양한 시도가 수행되고 있다.

예혼합연소기술은 지난 10여년 동안의 기초연구개발을 통하여 비약적인 발전을 하였으며, 향후 연구의



〈그림 1〉 HCCI 연소의 개념

은 열효율을 실현할 수 있으며, 연소소음이 낮은 점 등의 특징이 있어 많은 연구가 활발히 진행되고 있다.

예혼합기의 개념을 <그림 1>에 보인다.

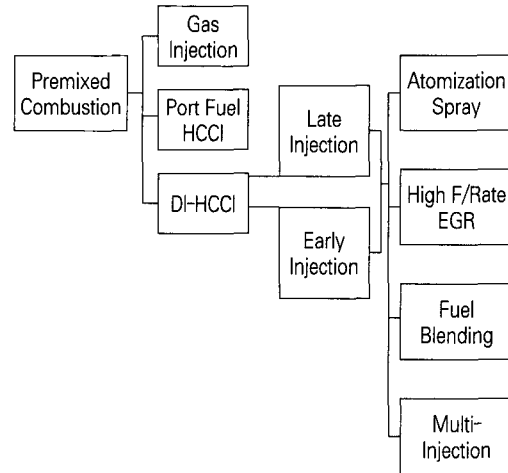
예혼합연소의 개념은 1) 연료 액적을 균일하게 분산시킨다는 개념으로부터, 2) 균일가스 예혼합기의 도입 개념까지 기술의 범위가 넓다.

예혼합연소기술은 서구에 비해, 특히 일본에서의 연구개발 착수가 빨라 약 10여년정도의 경험이 축적되어, 소규모이지만은 어느 정도의 개발 성과를 도출한 상태이다.

혼합기의 형성 및 연소제어에 따른 예혼합연소기술의 접근방법을 <그림 2>와 같이 정리하여 보았다.

예혼합연소기술은 혼합기의 형성 방법에 따라 Gas 분사, Port 분사, 직접분사식으로 대별 할 수 있다.

Gas 분사의 경우는 혼합기의 도입 및 형성이 비교적 쉬우나 연소제어가 매우 어려운 단점이 있다. Port HCCI의 경우, 기화하기 어려운 경유의 흡기관 부착에 의해 혼합기 생성이 어렵고, 배기성능의 이점이 적다. 한편, 연소실내에 연료를 분사시키는 DI-HCCI의 경우, 조기분사, 지연분사, 이들 분사의 조합의 방법이 있으며, 양산개발 가능성 측면이 고려되어 가장 활발



<그림 2> 예혼합연소기술의 접근방법

하게 진행되고 있는 분야이다.

조기분사에서는 압축행정 초기에 연료를 분사하여 예혼합화하는데 필요한 시간을 얻는데 목적이 있으나, 조기분사에 따른 저압 분위기, Wall Wetting 등의 문제로 실용화에 많은 노력이 예상된다.

지연분사와 대량의 EGR의 조합에 의해 착화지연기

<표 1> New Combustion Technologies Trend

Approaches	Description	Inj. Timina	요소기술	문제점	연구기관 및 대상
Conventional Combustion	Common-Rail Direct Injection	Pilot+Main	예혼합+확산	높은 NOx / PM 연소압	-
HCCI	Homogeneous Charge Compression Ignition	120~60BTDC	Multi Inj.	착화 제어곤란, 운전영역	SwRI, AVL, DC/소형
MK	Modulated Kinetics	Late Injection	대량 EGR, High Swirl	운전영역 제한, 저균질도	Nissan / 소형, 양산 중
UNIBUS	UNiform BUIky Combustion System	40 BTDC	핀틀 노즐	운전영역 제한, 전부하성능	Toyota / 소형 / Multi
NADI	Narrow Angle Direct Injection	120 BTDC	Narrow Cone Angle	운전영역 제한, 전부하성능	IFP / Single Cylinder

간을 증대시켜 예혼합기를 얻는 방식은 혼합기의 균일도가 낮아 배기 저감 효과가 HCCI 연소기술 중 배기저감 효과가 가장 낮음에도 불구하고, 양산개발에 성공한 사례도 있다.

**2. 예혼합연소 주요 기술**

예혼합연소를 수행하기 위한 주요기술로는 혼합기의 형성을 위한 H/W 및 S/W 기술과 연소제어기술, EGR 기술 등을 들 수 있다.

**2.1 혼합기 형성기술(Mixture Preparation)**

예혼합연소에 요구되는 혼합기의 특성은 짧은 시간 내에 충분한 공간분포를 가질 수 있는 분무이어야 한다는 것이다. 방향으로는 연소실내의 직접분사로 분무의 형상을 추구하는 것도 한계가 있어, 단순히 희박하고 균일한 예혼합기에서는 Misfire에 이를 수도 있다.

연료와 공기의 예혼합기화에 필요한 기술로는 다음과 같은 사항이 거론될 수 있다.

- (1) 될 수 있는 한 짧은 시간(착화지연기간) 내에 연료의 분사를 종료할 것. 이에 반응성이 좋은 분사계, 예를 들어 초고압에 Piezo Injector 등이 요구될 수 있다.
- (2) 연소실 주위의 엔진냉각기술이 중요하게 된다. 예혼합기가 형성될 때까지 착화가 지연되어 이

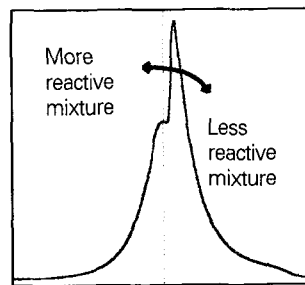


(Outward Opening Pintle Injector)  
 <그림 3> HCCI용 Spray Images

상적인 예혼합기 상태에서 연소가 개시될 수 있어야 한다.

**2.2 연소시기 제어(Combustion Phasing Control) 기술**

HCCI 엔진의 초기 컨셉 설계부터 착화지연의 메커니즘 이해, 그 활용의 방법이 많이 변화하고 있다. 착화지연을 형성하는 연료의 혼합지연(물리적 착화지연), 연료의 반응지연(화학적 지연)을 예혼합기화와 착화시기제어에 적극적으로 활용하는 것이 향후 기술의 핵심 일 것이다. <그림 4>에 연료 조성에 따른 연소 제어 특성을 보인다. 분사계, 흡배기계(고응답 과급, 고응답 EGR 등)의 엔진사이클만의 독립적인 제어도 고려해야 할 것이다. 연료와 공기와의 혼합촉진에 기여하는 연료측의 고려, 연료의 물리적 특성, 착화의 화학적인 지연에 착안한 신연료의 재검토도 필요하다. 또한 고전적인 과제였던 디젤노크, 가솔린 노크에 대한 이해도 HCCI의 연구에 의해서 더욱 발전될 것으로 생각된다. 궁극적으로는 두가지 엔진의 하이브리드적 개념으로 귀착될 것이며, 그때의 핵심기술은 연료 증발, 열역학적 평형에 관여하는 연료 성상에 따른 제어인자에 대한 고려가 연구의 한 축을 이룰 것으로 생각된다.



<그림 4> Combustion Phasing Control Through Fuel-Blending

### 3. 문제점 및 대응 전략

예혼합연소기술을 양산적용에 즈음하여, 선행되어야 할 문제점 및 대응 전략에 대하여 검토를 해보겠다. 예혼합연소의 당면 문제점으로는

(1) 착화시기제어가 곤란한 점, (2) 다량의 미연 HC가 배출됨, (3) 운전영역이 제한, (4) Cold EM., 운전성 악화 등이 문제점으로 거론되고 있다.

이의 해결을 위해서 분무의 균일 분산성, 연료특성(세탄가, 함 산소연료 등) 등에 대한 연구, 엔진제원(압축비 등), 흡기온도, EGR량 등에 의한 연소제어(Combustion Phasing Control)의 연구가 진행되어야 하겠으나, 연소현상이 복잡할 뿐 아니라 기존의 방법으로는 해명에 시간이 많이 걸리기 때문에 수치해석에 의한 연소해석도 병행하여 이루어지는 것이 바람직 하다고 판단된다.

### 4. 연구개발 사례

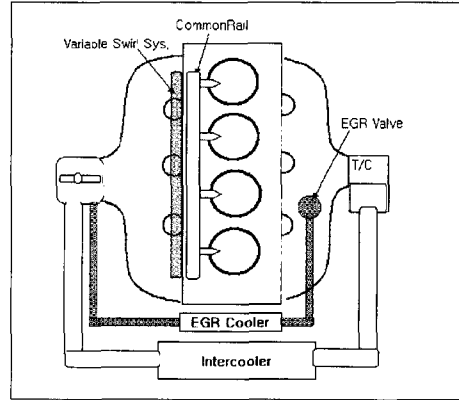
#### 4.1 현대자동차에서의 HCCI 연소연구

현대자동차에서는 지연분사 급속 연소기술을 통한 NOx, PM의 동시저감을 목표로 소형디젤엔진에 본 기술을 적용하였다.

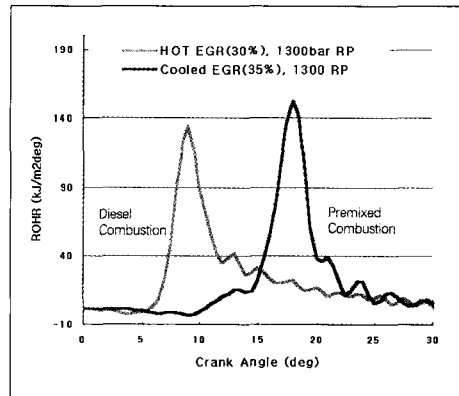
〈그림 5〉와 같이 소형 직접분사식 디젤엔진을 개량하여 예혼합연소 시스템을 구축하였다. 주요 요소기술로는 Heavy Cooled EGR, Common Rail 연료분사장치(최고분사압력 1,350 bar), Variable Geometry Turbocharger, Variable Swirl System, 예혼합연소실 등을 적용하였다.

〈그림 6〉, 〈그림 7〉에 예혼합연소 구현의 추이를 열 발생을, 배기가스 및 보인다.

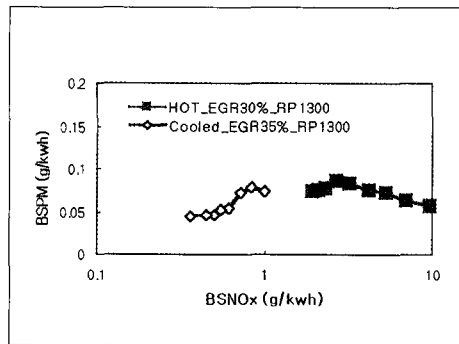
〈그림 8〉에는 Base엔진의 통상연소와 HCCI 연소를 통해 얻은 배기시험 결과를 보이는데, HCCI 연소



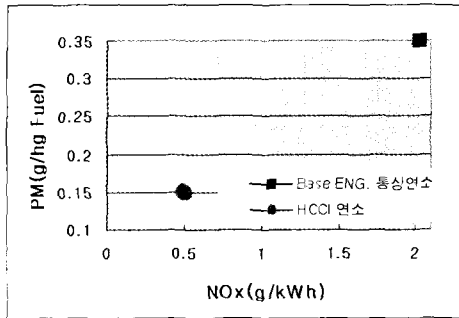
〈그림 5〉 디젤 예혼합압축착화 연소엔진



〈그림 6〉 HCCI와 통상디젤연소 비교



〈그림 7〉 예혼합연소 구현에 따른 배기가스의 변화추이

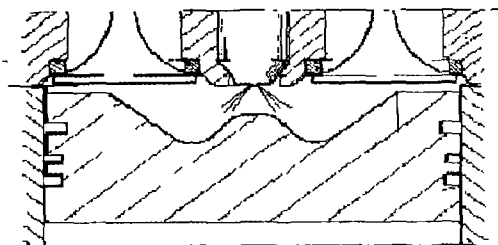


〈그림 8〉 HCCI연소와 통상연소의 배기비교

구현을 통하여, NOx는 75%, PM은 50%까지 저감시킬 수 있었다.

#### 4.2 IFP에서의 HCCI 연소 연구

프랑스의 국립 연구기관인 IFP(Institut Francais du Petrole)에서는 DI Diesel의 성능을 유지한 채 NOx와 PM을 거의 0 수준에 도달할 수 있는 신연소시스템을 개발하였다. 〈그림 9〉에 NADI HCCI 연소컨셉을 보인다. NADI(narrow Angle Direct Injection)라고 불리는 이 Dual Mode 엔진은 부분부하에서는 균일 예혼합 압축착화연소를 전부하에서는 통상연소로 전환되는 운전모드를 적용하도록 운전전환이 가능하다.

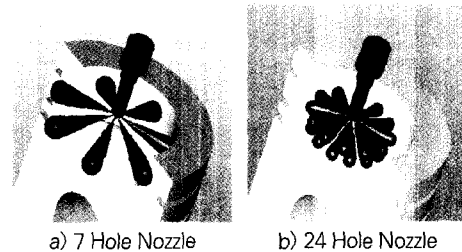


〈그림 9〉 NADI HCCI 연소 컨셉

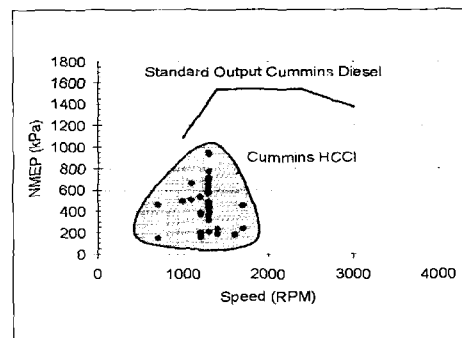
부분부하(FTP 사이클 포함)에서 HCCI 연소는 EURO III 수준의 연비와 0근처의 NOx와 PM를 도달하였고, 1,500, 2,000RPM에서 IMEP 6에서 9BAR 까지 운전이 가능하였다. 또한 전부하에서 동일 비출력인, @4000RPM에서 50/55kW/l에 도달하였다.

#### 4.3 SwRI HCCI 연소 연구

미국의 SwRI에서는 Port 분사 및 조기분사방식의 예혼합연소 연구를 수행하고 있으며, 연료조성에 따른 연소제어특성에도 많은 관심을 보이고 있다. 〈그림 10〉에 SwRI사의 HCCI 연소 연구용 노즐에 의한 분무분포의 개념을 보이며, 〈그림 11〉에는 Cummins엔진을 이용, 지금까지 구현된 HCCI운전 영역을 보인다.



〈그림 10〉 Swri사 HCCI 연구용 Nozzle



〈그림 11〉 SwRI사 HCCI 연소 구현 영역

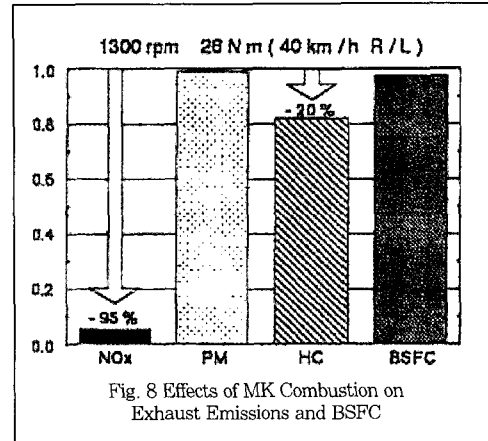
#### 4.4 NISSAN MK 연소 연구

NISSAN 자동차에서는 MK(Modulated Kinetics)라는 저온 예혼합연소기술을 개발하여, 2.2, 2.5리터 디젤엔진에 적용, 양산개발을 추진하여 대폭적인 NOx, PM 저감 효과를 보였다. 특히 커먼레일을 이용한 고압 지연분사를 통하여 신단기규제('2000규제)를 만족할 수 있었다. <그림 12>에는 MK 저온 예혼합연소에 의해 얻어진 배기가스저감효과를 보이고 있으며, <그림 13>에는 현재까지 개발된 예혼합연소 구현 영역을 보인다.

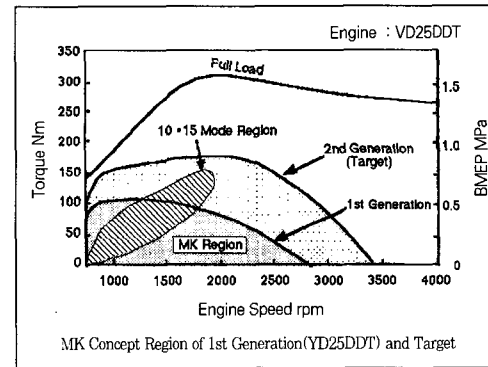
### 맺 음 말

디젤엔진에서 NOx, PM을 획기적으로 동시에 저감시킬 수 있는 신연소기술인 HCCI 연소기술의 개발동향 및 문제점에 대하여 서술 하였다.

HCCI 연소 기술 개발은 차기 배기규제 만족이라는 현실적인 목적 외에도 향후의 디젤연소를 선도할 수 있는 기술이라는 측면, 자동차 회사의 기술력 과시를 통한 회사홍보라는 측면 등에서 많은 중요성을 가지고 있다. 이에 현재까지 나타난 문제점을 극복, 양산성이 확보된 연소기술 개발 단계에 이를 수 있도록 많은 관심과 부단한 노력을 경주해야 할 것이다.



<그림 12> MK 연소 Simulation 결과



<그림 13> NISSAN MK 연소 구현영역

(김장현 연구원 : janheon@hanmail.net)