

# 가솔린 예혼합 압축착화 엔진 기술

## Technology of a Gasoline Homogeneous Charge Compression Ignition Engine

이 기 형 / 한양대학교 교수  
Kihyung Lee / HanYang University

이 창 식 / 한양대학교 교수  
Changsik Lee / HanYang University

류 재 덕 / 한양대학교 대학원  
Jeaduk Ryu / HanYang University

### 1. 서론

전 세계적으로 지구 온난화, 오존층 파괴, 산성비, 대기 오염, 소음 등의 환경 문제가 대두됨에 따라 배기가스 저감 및 연비 향상이 자동차 산업에 있어서 중요 연구 방향이 되고 있다. 미국에서는 ULEV 규제보다 한층 강화된 SULEV (Super Ultra Low Emission Vehicle) 및 ZEV (Zero Emission Vehicle) 등의 배출가스 규제가 제안되고 있다. 또한 유럽을 중심으로 디젤 엔진에 대하여도 엄격한 배기규제가 시행되고 있으며, 이러한 규제치를 만족시키기는 매우 어려운 상황이다. 따라서 강화된 배기규제를 만족시킬 수 있는 청정 연소의 저공해 엔진 기술 개발이 절실히 필요한 실정이며, 엔진의 배기가스 저감 기술은 해결해야 할 가장 중요한 과제로 부각되고 있다.

가솔린 엔진에 있어서는 점화 플러그에 의하여 공기 연료의 혼합기를 점화시키면 국부적인 고온이 생성되

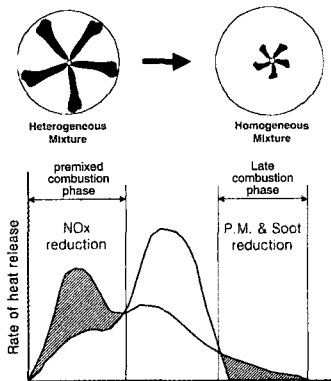
므로, 다량의 NO<sub>x</sub>를 발생시키는 결과를 초래하며, 디젤 엔진의 경우는 고온, 고압 상태의 연소실내로 연료가 분사되어 착화지연기간을 거친 후 연소가 시작하게 된다. 그러므로 예혼합 연소 구간에서 급격한 온도 상승에 따라 NO<sub>x</sub>가 생성되며, 확산 연소 구간에서는 불균일한 혼합기 분포에 기인하여 P. M. (Particulate Matter)을 배출하게 된다.<sup>(1)</sup>

최근 주목을 받고 있는 직접 분사식 가솔린 엔진(DISI)에서는 연료가 직접 실린더내로 분사되므로 점화 플러그 주위에서 성층화 되어 화염이 전파되는 특성을 가지고 있다. 이로 인하여 균일 혼합기 엔진에서와 마찬가지로 고온 화염 조건에서 NO<sub>x</sub>를 생성할 뿐만 아니라, 연료의 성층화를 이용하기 때문에 국부적으로 연료 농도가 높은 영역에서 P.M.을 생성시킬 수도 있다.<sup>(2)</sup> 따라서 현재 DISI 엔진의 한계인 NO<sub>x</sub> 및 P.M. 배출을 최소화할 수 있는 새로운 연소 기술인 가솔린 HCCI (Homogeneous Charge Compression

Ignition) 시스템에 대한 연구가 관심을 끌고 있다.<sup>(3)</sup> 그러나, HCCI 연소 모드를 사용하는 직접 분사식 가솔린엔진의 연구는 아직까지 미비한 상황이지만, 국내외의 여러 연구기관에서 기초연구와 실용화 실험이 활발하게 진행 중이다. 특히, Marriott 와 Reitz 의 연구에서는 2단 분사 가솔린 HCCI 연소를 사용하여 NOx 의 절감 효과가 있다는 결과를 보고하고 있다.<sup>(4)</sup> 이러한 가솔린 엔진의 HCCI 엔진의 경우 첫번째 분사(흡기행정)는 압축행정 동안 자착화가 이루어지지 않을 정도로 희박한 균일한 혼합기를 형성하며, 압축행정 동안 두번째 분사가 이루어지도록 하여 부분적으로 농후한 영역을 형성함으로써 자착화가 이루어지도록 하는 기술이다. 현재는 직접 분사식 가솔린 HCCI 엔진의 출력 및 배기성능을 향상시키기 위하여 분사방식과 흡기 온도 및 흡기압력과 같은 운전조건을 최적화 시키는 연구가 활발하게 수행되고 있다.

## 2. 가솔린 HCCI 엔진의 기본 개념

전술한 바와 같이 자동차용 엔진의 배기가스 문제를 해결하기 위하여 연료와 공기가 충분히 혼합할 수 있도록 예혼합 연료 분사 시스템을 이용하여 흡입행정 및 압축행정 초기에 연료를 분사함으로써 연소실내에



〈그림 1〉 HCCI 연소의 기본 개념

형성된 희박 균일 예혼합기를 동시에 착화시키는 연소 방식인 예혼합 압축착화 (Homogeneous Charge Compression Ignition) 가 주목을 받고 있다. 〈그림 1〉에 HCCI 연소의 기본적인 개념을 도시하였다.

HCCI 연소는 내연기관의 대체 연소 개념으로서 압축행정 초기에 연료를 분사시키면 가솔린 엔진에서와 같이 연료는 공기와 균일하게 예혼합되어 상사점에 도달한 후, 디젤 엔진과 같이 자착화에 의하여 연소가 시작되는 원리이다. 이와같이 가솔린과 디젤 엔진은 점화시기 및 분사시기에 의하여 연소가 시작되지만, HCCI 연소의 시작시점은 직접 제어하는 방법이 없으므로 연료 특성, 흡기온도, 공연비, 분사방식, 엔진 회전수, 흡기 및 배기압력 등 엔진 변수들이 엔진연소를 제어하게 된다. 또한 연료 분무형상, EGR, 밸브 타이밍, 스윙비, 과급, 압축비, 연소실 형상 등 엔진 성능 변수에 의해서도 영향을 받는다.

이러한 HCCI 연소를 실현시키기 위하여는 적절한 균일 혼합기가 필요하게 된다. 연료의 자착화 특성이 HCCI 연소를 제어하는 지배적인 변수이므로, 연료의 기화 온도도 균일 혼합기 형성에 중요한 역할을 한다. 따라서, HCCI 연구자들은 Iso-Octane, Ethanol<sup>(5,9)</sup>, Natural Gas<sup>(6,6,7,10)</sup>, Hydrogen<sup>(11)</sup>, Gasoline<sup>(2,7,12-16)</sup>, Dieselfuel<sup>(2,6,13,17)</sup>, N-Heptane<sup>(6,9,17)</sup>, Methanol<sup>(9)</sup>, Propane<sup>(18)</sup> 등 여러가지 연료를 사용하여 HCCI 연구를 수행하였다. 이와 같은 연구들은 수소와 에탄올 등과 같이 휘발성 높은 연료가 공기와의 혼합이 쉽게 이루어지므로 균일 혼합기 형성에 유리하다는 사실을 보여주고 있다. Christensen et al.<sup>(5,6)</sup> 등은 압축비 11, 흡기온도 90℃ 이하의 엔진 조건에서 가솔린, 디젤, iso-octane 및 n-heptane 연료를 비교하였는데, 디젤 연료는 미립화 및 기화 특성이 나쁘므로 연소가 악화 된다고 결론을 내렸다.

연소실 온도의 특성 또한 혼합기 형성에 중요한 영향을 미치므로, HCCI 연소를 제어하는 주 변수 중의

하나로서 흡입 공기 온도를 들 수 있다. 흡입 공기 온도는 주로 전기 히터 장치를 이용하여 조절할 수 있으나,<sup>(2,5,7,13,14)</sup> 실제 엔진에서는 열교환기에 의하여 배기 열을 이용하여 흡기온도를 제어하는 방법을 적용하고 있다. 이러한 연구들로부터 흡기 온도 상승은 연소 시작시기를 앞당기는 반면 체적효율에는 악 영향을 미치게 된다는 사실을 알 수 있다.

압축비가 착화시기에 미치는 영향에 관하여도 많은 연구가 수행되었다.<sup>(6,8,11)</sup> Christensen et al<sup>(6)</sup> 등은 흡기 포트 분사방식을 사용하여 일정 공연비 조건에서 압축비를 10:1 에서 28:1까지 변화를 시켰다. 이 연구 결과, 가솔린 연료의 경우는 흡기온도 상승 없이 만족스러운 운전조건을 유지하기 위하여는 22.5:1 의 압축비가 요구된다는 사실을 밝혔으며, 압축비가 상승함에 따라 스모크는 감소하였고, NOx 배출량도 감소된다고 결론을 내렸다.

또 다른 연소를 제어하는 방법은 가변 배기 밸브 타이밍을 사용하는 것이다. Law et al<sup>(12)</sup> 등은 내부 EGR율을 36% ~ 59% 적용하기 위하여 Active Valve Train (AVT) 시스템을 사용하여 자착화 연소 현상을 제어하였다. 이 연구에서는 1.8L인 4기통 가솔린 엔진을 압축비 10.5:1 인 단기통 엔진으로 개조하여 사용하였다. 공연비 변화나 흡기온도 변화 없이 내부 EGR를 사용하여 열발생 곡선이 상사점 부근으로 이동하는 것을 보여 주었다.

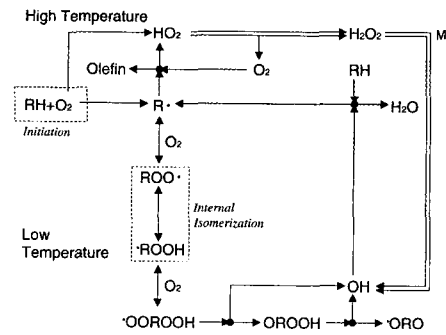
연료 분사 시기 또한 균일 혼합기 형성에 큰 영향을 미치므로 Gold et al<sup>(16)</sup>, Marriott<sup>(2)</sup> 등은 직접 분사식 가솔린 엔진을 사용하여 분사시기의 영향을 연구하였다. Gold 등은 1,500rpm, 공연비 22:1 운전조건에서 분사시기를 0 deg에서 90deg ATDC 까지 변화시키면서 실험을 수행하였다. 분사시기 및 착화시기의 차이가 증가됨에 따라 연소 안정성이 향상되는 경향을 나타내고 있다. Marriott<sup>(2,19)</sup>은 분사 시작 시기의 영향을 다양한 엔진 회전수와 공연비 조건에서 연구하여,

분사 시작 시기가 착화 시기 제어 및 비정상상태 운전 조건에 효과를 있음을 보여주고 있다. 이 연구에서 2 단 분사 및 다단 분사는 단일분사에 비하여 NOx가 80%정도 감소하는 결과를 보여주고 있다.

### 3. HCCI 엔진의 자착화 특성

HCCI 엔진의 자착화 특성은 일반 디젤 및 가솔린 엔진과 달리 저온 연소 및 고온 연소로 구분되는 2단 연소특성을 가진다. 2단 연소과정에서 가장 중요한 과정을 <그림 2>에 나타내었다.

초기 단계 점화는 저온 (T < 1000K)에서 파란 빛을 나타내는 연소 반응으로 냉염 연소이다. 저온 연소는 강한 발열 반응을 나타내는 R + O<sub>2</sub> = RO<sub>2</sub> 으로 시작하고 H<sub>2</sub>O와 Alkylperoxide인 O=ROOH 를 만들어낸다. 본 반응은 R + O<sub>2</sub> = Olefin + H<sub>2</sub>O 반응을 나타낼 정도로 온도가 상승할 때 까지 지속되며 이것으로 저온 연소과정은 끝나게 된다. 고온 연소과정은 온도의 급격한 상승이 약화되고, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> + M = OH + OH + M 반응으로 끝나게 되며, 폭발연소 (Brenched Thermal Explosion)를 동반하게 된다. 폭발연소단계에서는 O=ROOH 과 Olefin이 H<sub>2</sub>O 와 CO로 분해되는 과정이다. 최종적으로 CO + OH =



<그림 2> HCCI엔진의 고온 및 저온 연소반응

CO<sub>2</sub> + H 과정에서 CO<sub>2</sub>로 바뀌게 된다.

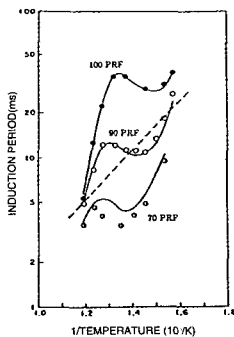
이와 같은 연소 반응은 연료 구조 및 온도에 따라서 제어가 되므로 HCCI 연소 과정은 연료 및 공기의 혼합정도 및 첨가제에 따라서 제어가 가능할 것으로 판단된다.

**4. 가솔린 HCCI 엔진의 연소제어 방법**

**4.1 착화시기 제어 방법**

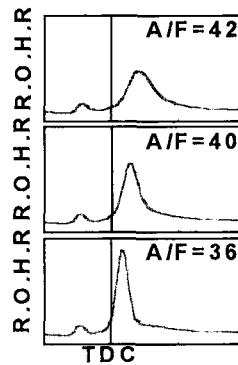
HCCI 연소에서 가장 중요한 부분이 착화시기를 제어하는 것이다. 일반 엔진과는 달리 HCCI 연소는 전술한 바와 같이 자착화 특성에 의하여 연소가 시작되므로, 착화시기 즉 냉염이 발생하는 시기를 제어하기 위해서는 초기 온도 및 연료 특성(옥탄가 및 첨가제)에 따른 영향을 평가하여야 한다.

또한, 착화시기를 평가하기 위해서는 화학적인 지연기간 및 물리적인 지연기간으로 구분되는 착화지연기간을 정확하게 평가하여야 하므로 여러 연구자들에 의하여 이론 공연비 영역에서 자착화 시의 착화기간을 실험적이며 이론적인 연구가 주로 진행되고 있는 상황이다. 화학적인 지연은 주로 연료의 물성치(옥탄가 및 세탄가)에 따르는 영향이며, 물리적인 지연은 혼합기 분포와 온도 및 압력에 따른 현상이다. <그림 3>은 자착화시의 착화지연기간을 나타낸 결과이다.



<그림 3> 자착화 시의 착화지연 기간

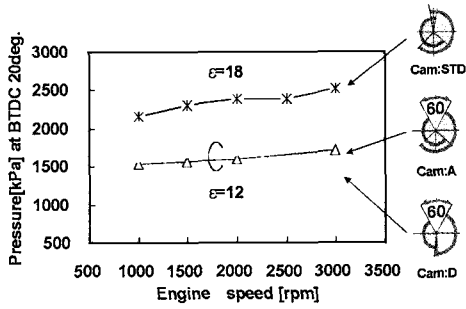
실제 엔진에서는 연소 초기의 온도 및 혼합기 분포를 제어하기 위하여 압축비와 흡기온도 및 잔류가스량을 제어함으로써 착화시기 및 열염 발생시기를 제어할 수 있다. 아래의 <그림 4>는 공연비 조건에 따른 열발생 특성을 비교한 결과이다.



<그림 4> 공연비 조건에 따른 HCCI 엔진의 열발생 특성 (연료 : 가솔린)

본 실험은 가솔린 GDI 인젝터를 사용하여 실험한 결과로서 공연비, 즉 혼합기 분포특성에 따라 냉염 발생시기 및 착화시기는 큰 변화가 없으나 열염 발생시기는 변화하는 경향을 보여주고 있다. 또한, 흡기온도가 상온이므로 공연비 조건이 36 - 42인 경우는 정상적인 연소가 이루어지는 반면, 공연비가 희박해지면 실화가 일어나며 농후한 영역에서는 노킹이 발생하는 것으로 보고 되고 있다. 이 결과로부터 직접 분사식인 경우는 연료 분사시기에 따라 즉 연료 및 공기의 분포 특성에 따라 열 발생을 최고값의 위치가 변경되므로 착화시기 및 연소제어가 가능해 진다는 사실을 알 수 있다.

<그림 5>는 밸브 개폐시기를 조절하여 유효 압축비를 변화시켰을 경우의 압축행정 말기의 연소실내의 압력을 나타낸 그림이다. 흡기밸브가 닫히는 시기를 빨리함으로써 유효 압축비가 2정도 증가되는 것을 보여주고 있으며, 2,000rpm 미만에서는 압력 상승율의



〈그림 5〉 실린더 연소가스의 압력

〈표 1〉 Valve Timing of Cams

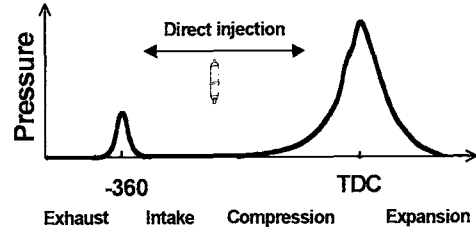
참여국	STD	A	B	C	D
EVO(° BBDC)	50	50	50	50	5
EVC(° ATDC)	10	-30	-45	-75	-30
IVO(° BTDC)	10	-30	-45	-75	-30
IVC(° ABDC)	46	50	50	50	5

결과는 미약하지만 밸브개폐시기 조절에 의하여 압축비를 변화시킬 수 있다는 사실을 알 수 있다. 〈표 1〉에는 〈그림 5〉의 결과에 사용된 캠의 밸브 타이밍을 표시하고 있다.

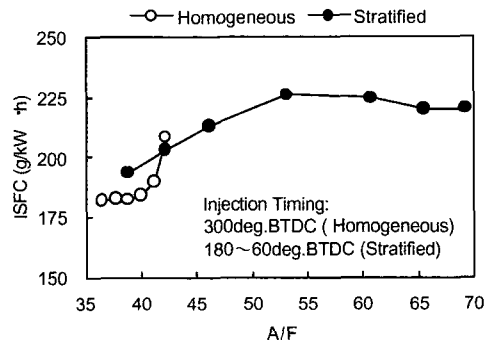
#### 4.2 분사시기 제어에 따른 HCCI 연소 특성

〈그림 6〉은 흡·배기 오버랩 구간을 조정하여 잔류가스의 양을 변화시키고 동시에 분사시기를 조정하여 착화시기에 미치는 영향을 연구한 개념도를 나타낸 그림이다.

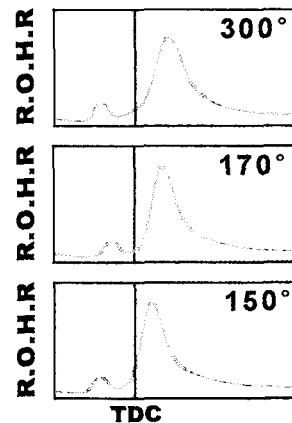
혼합기 분포에 따른 연료 소비율을 비교한 〈그림 7〉로부터 성층 혼합기 분포의 경우가 희박한 공연비 영역까지 예혼합 압축착화 영역을 확대시키는 것을 보여주고 있다. 그래프상의 데이터는 각 운전영역에서 최대 IMEP을 나타내는 분사시기를 사용한 결과이다. 〈그림 8〉은 분사시기에 따른 가솔린 HCCI 엔진의 열



〈그림 6〉 잔류가스에 따른 착화시기 특성



〈그림 7〉 혼합기 성층화에 따른 운전영역 (Engine speed : 1,000rpm, Cam : D, WOT Fuel : 50% iso-octane + 5% N-Heptane)



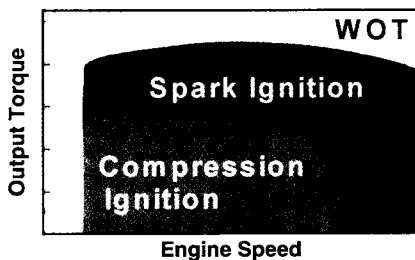
〈그림 8〉 분사시기에 따른 HCCI 엔진의 열발생 특성 (Engine spee : 1,000rpm, Cam : D, WOT, Fuel : 50% iso-Octane + 50% N-Heptane A/f : 42)

발생을 특성을 나타낸 그림이다. 균일 혼합기 상에서 공연비 42인 경우에 IMEP 값이 급격히 감소하면서 착화지연 시간이 증가되는 것을 보여주고 있으며, 분사시기가 지각됨에 따라 착화시기는 진각 되는 것을 보여주고 있다. 이러한 경향은 공연비나 밸브 타이밍에 무관하게 나타나고 있다.

따라서, 균일 혼합기를 사용하는 경우는 공연비가 45 이상으로 희박해지면 실화의 위험성이 높아지는 반면 혼합기가 성층화 되면 희박영역에서도 연소가 안정적인 것을 보여주고 있다.

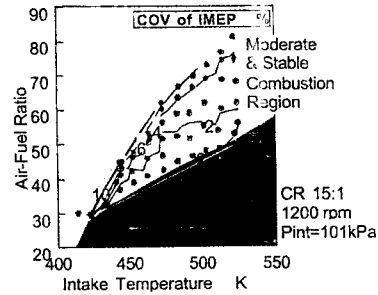
### 4.3 가솔린 HCCI 엔진의 운전영역 특성

〈그림 9〉는 가솔린 HCCI 엔진의 부하조건에 따른 운전방법을 도식적으로 표시한 것이다. 부하가 저부하이고 엔진 회전수가 낮은 경우는 균일 예혼합기를 압축착화 하는 방식을 사용하는 것이 유리하며, 고속 고부하의 운전영역에서는 S.I. 방식으로 변환하면 전 영역에서 운전이 가능한 HCCI 엔진의 연소모드가 가능하게 되는 시스템이다.



〈그림 9〉 HCCI 연소의 출력 특성

HCCI 연소는 앞 절에서 전술한 바와 같이 전 운전영역에서 적용하기에는 어려운 점이 있다. HCCI 엔진에서 착화 조건을 얻기 위해서는 공기 및 연료의 혼합기 조건에 따라 착화가 이루어질 수 있는 온도 및 압력 조건이 요구된다. 〈그림 10〉과 같이 HCCI 엔진의 운전영역은 매우 좁게 되는데 그 이유는 공연비



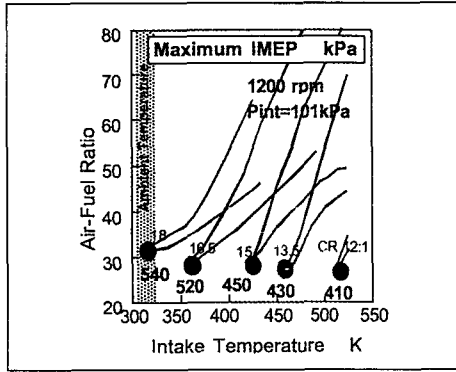
〈그림 10〉 HCCI 엔진 운전영역

가 희박하고 흡기온도가 낮은 경우는 실화의 위험이 증가하며, 공연비가 농후하고 흡기온도가 높은 경우는 노킹의 발생 빈도가 증가하기 때문이다.

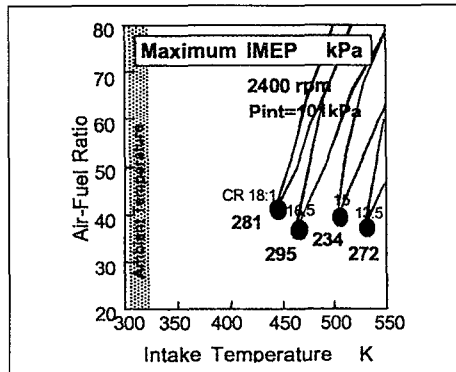
〈그림 10〉에 나타낸 바와 같이 흡기온도가 낮으면서 공연비가 농후할수록 출력이 증대되나, 운전영역이 감소하는 것을 알 수 있다. 이와 같이 좁은 운전영역을 극복하기 위하여 오버랩 타이밍을 변화시켜 내부 EGR을 증가시키는 방법, 혹은 압축비를 변화시켜 노킹을 방지함으로써 운전영역을 확대하는 연구 등이 진행 중에 있다. 〈그림 11〉과 〈그림 12〉는 1,200 rpm과 2,400 rpm에서 흡기온도 및 공연비 조건에 따라서 압축비를 변화시키면서 출력 특성을 도시 평균 유효 압력으로 표시한 결과이다. 압축비가 증가됨에 따라서 출력은 증가되는 경향을 보이고 있으나, 운전영역은 큰 차이를 나타내지는 않고 있다.

〈그림 11〉과 〈그림 12〉를 비교하면, 엔진 회전수가 증가됨에 따라서 착화 지연 시간이 점점 짧아져야 하므로 흡기 온도도 증가해지는 경향을 보이고 있다. 결과적으로 운전영역도 고온 쪽으로 이동하는 결과를 나타내며, 최대 도시 평균 유효 압력도 감소하는 경향을 보이고 있다.

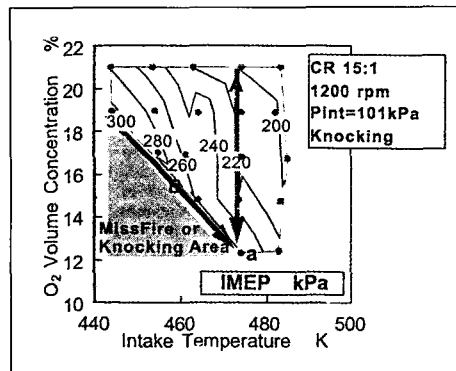
가솔린 HCCI 엔진에서 운전영역을 확대하고, 도시 평균 유효압력을 증대시키는 방법으로 압축비를 증가시키는 방법이 있다. 그러나, 노킹으로 인하여 한계가 있으므로, 흡입공기에 N<sub>2</sub>를 첨가하여 O<sub>2</sub> 농도를 변화



〈그림 11〉 HCCI 엔진의 흡기온도 및 압축비에 따른 운전 영역 비교 (1,200 rpm)



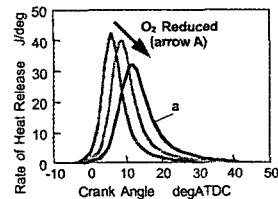
〈그림 12〉 HCCI 엔진의 흡기온도 및 압축비에 따른 운전 영역 비교 (2,400 rpm)



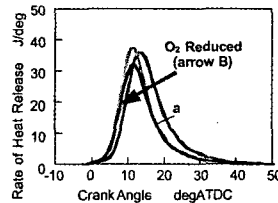
〈그림 13〉 HCCI 엔진에서의 O<sub>2</sub> 농도에 따른 출력 특성

시킴으로써 노크 발생을 억제하는 방법을 연구하고 있는데, 〈그림 13〉은 흡입공기의 O<sub>2</sub> 농도 변화에 따른 출력 특성을 나타낸 결과이다. 이 결과 그림에 나타낸 바와 같이 N<sub>2</sub> 농도가 증가함에 따라 O<sub>2</sub> 농도는 감소하므로 연소실내부의 비열비는 변화하지 않는 조건에서 흡기온도 및 O<sub>2</sub> 농도가 낮은 영역에서는 연소가 불안정함을 보이고 있는데, 이러한 현상은 O<sub>2</sub> 농도가 감소함에 따라 착화 지연 시간 및 연소 기간이 증가하여 나타나는 경향으로 판단된다.

〈그림 14〉는 〈그림 13〉의 흡기 온도 일정조건에서 O<sub>2</sub> 농도를 감소시키거나, 최저 흡기 온도조건에서의 O<sub>2</sub> 농도 변화를 나타낸 "A", "B"의 경향을 열발생 특성으로 도시한 것이다. 흡기온도가 일정한 상태에서 도시 평균 유효 압력은 증가하는 경향을 보이는데 이것은 착화시기가 지연되어 연소기간이 증가하는 경향을 보이므로 나타나는 현상이며, 최저 흡기 온도 조건에서는 O<sub>2</sub> 농도 감소가 착화지연기간을 증가시키지는 못하고 고온의 흡기 온도조건에서만 O<sub>2</sub> 농도가 착화시기에 영향을 미치는 것으로 판단된다.



(a) 동일흡기온도 조건



(b) 최저 흡기 온도 조건

〈그림 14〉 O<sub>2</sub> 농도 변화에 따른 열발생 특징

#### 4.4 가솔린 HCCI 엔진의 화염 가시화

가시화 단기통 엔진을 이용하여 가솔린 HCCI 엔진의 화염 가시화 실험을 수행하여 얻은 화염사진들을 비교하였다.

〈그림 15〉의 가장 위의 사진은 가솔린 엔진의 연소 현상을 나타낸 그림으로 난류 화염의 불규칙적인 모양의 화염면이 뚜렷이 나타나고 있다. 중간 사진은 HCCI 화염을 나타낸 것으로, 자착화 현상은 연소실 전체에 분포되어 있다. 연소실내에서 가장 온도가 높은 부분의 혼합기가 연소될 때, 팽창가스는 연소되지 않은 혼합기를 더욱 압축시키는 동시에 화염의 전파 없이 착화된다. 가장 아래의 사진은 성층 혼합기가 압축착화하는 경우를 나타낸 것이다. 성층 혼합기의 부분적인 혼합기 농도 증가는 비교적 높은 혼합기 온도

를 야기시키며, 이 부분에서 자착화가 일어난다. 이러한 자착화 영역은 혼합기 형성이 완전하지 않은 영역까지 점화시킨다. 농후한 영역에서는 밝은 화염이 나타나지만 매연은 발견되지 않았다.

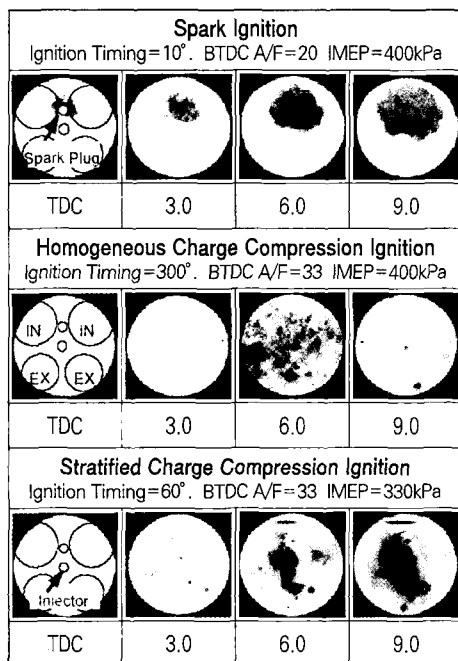
### 4. 결론

본 해설기사에서는 차세대 연소 시스템으로 현재 연구가 시작되고 있는 가솔린 HCCI 엔진의 연소 메커니즘 및 실제 엔진의 적용 예를 간략하게 소개하였다. 향후 강화되고 있는 환경 규제 및 지구온난화에 직접적으로 영향을 미치는 CO<sub>2</sub> 배출량을 감소시키기 위하여 전 세계 각국은 저연비, 저배기 엔진 연구에 많은 연구 개발이 진행되고 있는 단계이다. 그러므로, 국내에서도 배기규제 및 저연비를 실현하기 위한 방법으로 본 HCCI 연소 시스템이 큰 기여를 할 것으로 판단되므로, 아직까지 외국 선진 연구기관 및 기업과 큰 기술적 차이가 없는 HCCI 연소 연구에 많은 연구가 필요할 것으로 판단된다.

### 5. 향후 과제

향후 연구 과제로는 가솔린 HCCI 연소 제어에 가장 기본이 되는 연료의 자착화 특성 및 흡기온도, 압력, 연료 거동, 혼합기 조성 (EGR)이 자기착화에 미치는 영향을 분석함으로써 가솔린 HCCI 엔진의 연소 제어 기술을 확립하는 것이 시급한 문제이다. 또한, 연료 공급 시스템 변수인 분사시기, 다단분사 및 엔진 제어 변수인 EGR, 밸브 타이밍, 공연비 조건에 따른 가솔린 HCCI 운전영역 및 배기성능 특성의 연구가 진행되어야 할 것으로 판단된다.

(이기형 편집이사 : hylee@hanyang.ac.kr)



〈그림 15〉 점화 형태에 따른 화염 발달과정 (엔진회전수 : 700rpm, 압축비 : 10, Cam : A, 연료 : n-heptane)



## 참고문헌

- 1) Kelly-Zion, P. L., and Dec. J., 2000, "A Computational Study of the Effects of Fuel-Type on Ignition Time in HCCI Engines", Proceedings of the 28th International Symposium on Combustion, Vol. 28, pp.1187-1194, Combustion Institute
- 2) Marriott, C. D., 2001, "An Experimental Investigation of Direct Injection for Homogeneous and Fuel-Stratified Charge Compression Ignited Combustion Timing Control", M. Sc. Thesis, University of Wisconsin, Madison, WI.
- 3) Kong, S-C., Marriott, C.D., Reitz, R. D., and Christensen, M., 2001, "Modeling and Experiments of HCCI Engine Combustion Using Detailed Chemical Kinetics with Multidimensional CFD", SAE Paper 2001-01-1026.
- 4) Marriott, C. D., and Reitz, R. D., 2002, "Experimental Investigation of Direct Injection-Gasoline for Premixed Compression Ignited Combustion Phasing Control", SAE Paper 2002-01-0418.
- 5) Christensen, M., Johansson, B., and Einewall P., 1997, "Homogeneous Charge Compression Ignition (HCCI) Using Isooctane, Ethanol, and Natural Gas-A Comparison with Spark Ignition Operation", SAE Paper 972874.
- 6) Christensen, M., Hultqvist, A., and Johansson, B., 1999, "Demonstrating the Multi Fuel Capability of a Homogeneous Charge Compression Ignition Engine with Variable Compression Ratio", SAE Paper 1999-01-3679.
- 7) Christensen, M., and Johansson, B., 1998, "Influence of Mixture Quality on Homogeneous Charge Compression Ignition", SAE Paper 982454.
- 8) Christensen, M., and Johansson, B., AmnJus, P., and Mauss, F., 1998, "Supercharged Homogeneous Charge Compression Ignition", SAE Paper 980787.
- 9) Richter, M., Franke, A., Alden, M., Hultqvist, A., and Johansson, B., 1999, "Optical Diagnostics Applied to a Naturally Aspirated Homogeneous Charge Compression Ignited Engine", SAE Paper 1999-01-3649.
- 10) Morimoto, S. S., Kawabata, Y., Sakurai, T., and Amano, T., 2001, "Operation Characteristics of a Natural Gas-Fired Homogeneous Charge Compression Ignition Engine (Performance Improvement Using EGR)", SAE Paper 2001-01-1034.
- 11) Goldsborough, S., and Van Blarigan, P., 1999 "A Numerical Study of a Free Piston IC Engine Operation on Homogeneous Charge Compression Ignition Combustion", SAE Paper 1999-01-0619.
- 12) Law, D., Kemp, D., Allen, J., Kirkpatrick, G., and Copland, T., 2000, "Controlled Combustion in an IC-Engine with a Fully Variable Valve Train", SAE Paper 2000-01-0251.
- 13) Thring, R. H., 1989, "Homogeneous -Charge-Compression- Ignition (HCCI) Engines", SAE Paper 892068.
- 14) Aoyama, T., Hattori, Y., and Mizuta, J., 1996, "An Experimental Study on Premixed-Charge Compression Ignition Gasoline Engine", SAE Paper 960081.
- 15) Oakley, A., Zhao, H., and Ladommatos, N., 2001, "Experimental Studies on Controlled Auto-ignition(CAI) Combustion of Gasoline in a 4-Stroke Engine", SAE Paper 2001-01-1030.
- 16) Gold, M., Stokes, J., Morgan, R., Heikel, M., De-Sercey, G., and Begg, S., 2001, "Air-Fuel Mixing in a Homogeneous Charge DI Gasoline Engine", SAE Paper 2001-01-0968.
- 17) Gray, A., and Ryan, T., 1997, "Homogeneous Charge Compression Ignition (HCCI) of Diesel Fuel", SAE Paper 971676.
- 18) Aceves, S. M., Flowers, D. L., Martinez-Frias, J., Smith, J. R., Dibble, R., Au, M., and Girard, J., 2001, "HCCI Combustion: Analysis and Experiments", SAE Paper 2001-01-2077.
- 19) Marriott, C. D., Kong, S-C., and Reitz, R. D., 2002, "Investigation of Hydrocarbon Emissions from Direct Injection-Gasoline Premixed Charge Compression Ignited Engine", SAE Paper 2002-01-0419.