

# GDI 엔진에서의 연소 제어기술

김 형 만 교수 · 인제대학교 기계자동차공학부

배 명 환 교수 · 경상대학교 수송기계공학부

## 1. 서론

직접분사 엔진은 층상급기 초회박 연소에 의한 디젤엔진의 저연비 특성과 균일 혼합에 의한 포트분사 가솔린엔진의 고출력 특성을 실현시킬 잠재력을 갖고 있다. 이제까지 넓은 부하영역에 걸쳐서 초회박 연소를 실현시키

기 위해 직접분사 엔진에 대한 연구가 광범위하게 진행되어 왔다 [1-4].

GDI(Gasoline Direct Injection) 엔진은 <그림 1>에서 나타낸 바와 같이, 엔진의 부하에 따라 두 종류의 연소방식을 채택하였다. 부분부하 조건에서는 디젤엔진과 같이 점화 직전의

압축행정 말기에 연료가 분사되어 스파크 플러그 주위에 과농 혼합기를 형성하고 점화되어 연소가 진행된다. 고부하 조건에서는 포트분사 가솔린엔진과 같이 흡기행정 중에 연료가 분사되고 실린더로 유입되는 공기와 혼합되어 균일한 혼합기를 형성하여 화염이 전파된다. 이때, 엔진 부

**Partial Load**

- a. Compression stroke Injection
- b. Stratified air/ fuel mixture
- c. Ultra-lean combustion

Low fuel consumption comparable to that of a diesel engine



**High Load**

- a. Intake stroke Injection
- b. Homogenous mixture
- c. Stoichiometric combustion

More power than a conventional gasoline engine



<그림 1> GDI 엔진에서의 연소방식 [5]

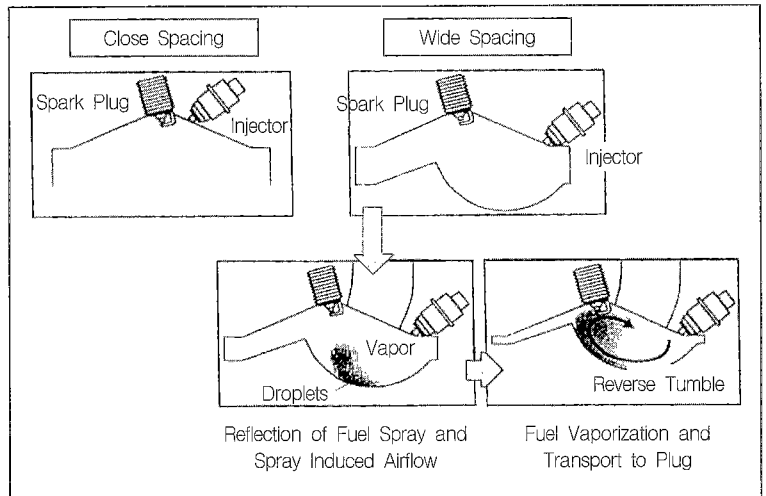
하의 정도에 따라 연소방식을 원활하게 전환할 수 있는 제어기술이 필요하다.

또한, 가솔린의 직접분사로 인해 낮아진 점화성은 GDI 엔진에서 해결해야 할 중요한 부분이다. 디젤엔진에서는 필요한 고온 조건에 도달하면 연료 액적은 확산되면서 연소된다. 그에 비해, 가솔린엔진에서는 연료가 기화되어서 적절한 혼합비로 공기와 혼합되어 있어야 한다. 즉, 적절한 혼합비를 가진 혼합기가 스파크 플러그의 전극 사이의 제한된 공간에 유입되어서 정확한 시간에 점화되어야 한다. 따라서, GDI 엔진에서 혼합기의 공간·시간적 상태가 높은 정밀도로 제어되어야 한다.

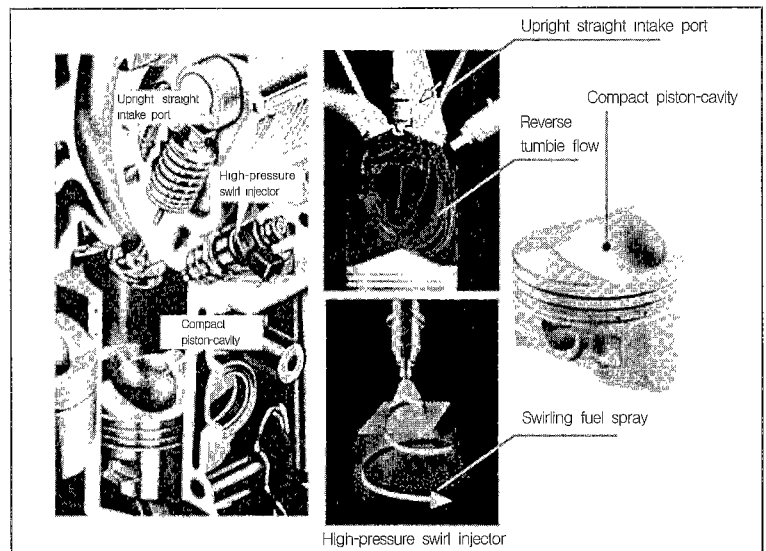
본고에서는 GDI 엔진에서 채택하고 있는 연소 제어기술에 대해 논하고자 한다.

## 2. 부분부하 조건에서의 연소 제어기술

정상 주행시의 부분부하 조건에서는 위에서 언급한 바와 같이, 과농 증상 혼합기가 스파크 플러그 주위에 존재해야만 점화되어 안정된 연소를 실현할 수 있다. GDI 엔진에서는 <그림 2>에 나타난 바와 같이, 기존의 엔진에 비해 연료 분사를 스파크 플러그로부터 멀리 떨어진 곳에서 수행하여 증발 가스연료와 공기의 적절한 혼합을 할 수 있는 공간을 만들어주는 '광폭 배치(wide spacing)'라는 새로운



<그림 2> '광폭 배치 (wide spacing)'의 개념도 [1]

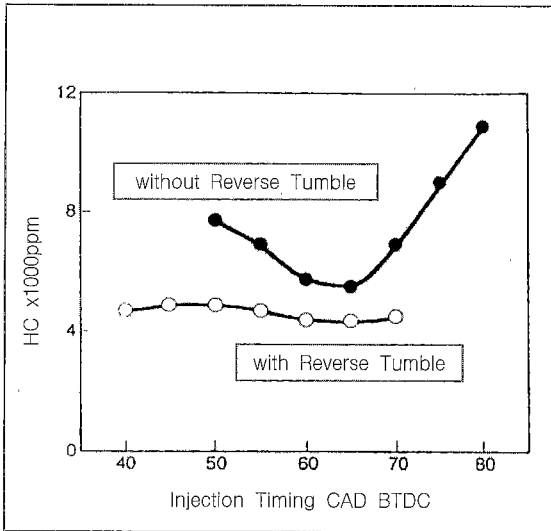


<그림 3> 혼합기 형성 및 실린더 내부유동 [5]

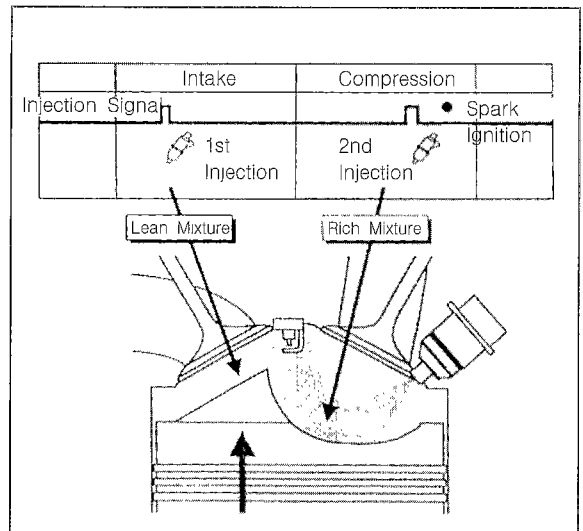
개념을 도입하였다.

스파크 플러그로 연료-공기 혼합기를 보내기 위해서 <그림 3>에 나타난 세가지 신기술을 이용하였다. 직립 흡기관(upright straight intake port) 내에서의 공기 유동은 수직으로 실린더

에 유입되어 피스톤 크라운에 부딪혀 텀블(tumble) 유동으로 바뀐다. 피스톤 크라운의 공동(cavity)의 형상은 분사된 연료가 스파크 플러그를 향하도록 설계되었다. 스월 분사기(swirl injector)는 공기유동에서 잘 미



〈그림 4〉 탄화수소 배출에 미치는 텀블 유동의 영향 [1]



〈그림 5〉 2단계 혼합의 과정 [1]

립화 되도록 연료 분무를 만들어 낸다. 전체적으로 실린더 내부유동, 연료분무 및 피스톤의 상승 운동이 잘 조화되어야 한다.

연료는 피스톤이 상승하는 압축행정중에 분사되므로, 연료분무와 피스톤은 서로를 향해 움직인다. 실린더 내부유동은 엔진속도에 비례하나 연료분무의 운동량은 무관하다. 만일 실린더 내부유동만이 연료분무를 확산시키고 움직인다면 층상 연소는 한정된 엔진속도 범위에서만 가능할 것이다. 그러나 엔진속도가 증가할수록 텀블 유동 및 피스톤의 운동에 의해 혼합이 촉진된다. 따라서, 광범위한 엔진속도에서 적정하게 분포된 농도를 가진 혼합기를 얻을 수 있게 된다.

미연 탄화수소의 배출에 미치는 텀블 유동 및 분사시기의 영향을 〈그림 4〉에 나타낸다. 텀블

유동이 없는 경우, 미연 탄화수소의 배출량이 증가하는 것은 화염이 도달하여도 연소가 일어나지 않는 과도하게 희박 혼합비 영역이 존재함을 의미한다.

### 3. 고부하 조건에서의 연소 제어기술

가속을 필요로 하는 고부하 조건에서 연료는 흡기행정 중에 일찍 분사되고, 연료 분무는 피스톤을 따라 내려가면서 기화되고 전체 공간으로 퍼져서 균일한 혼합기를 형성한다.

연소 특성은 기본적으로 MPI (Multipoint Port Injection) 엔진과 같으나, '급기 냉각(charge cooling)'을 통하여 출력 성능을 향상시켰다.

GDI 엔진의 작동에서는 연료분무가 실린더에 넓게 퍼져 기화

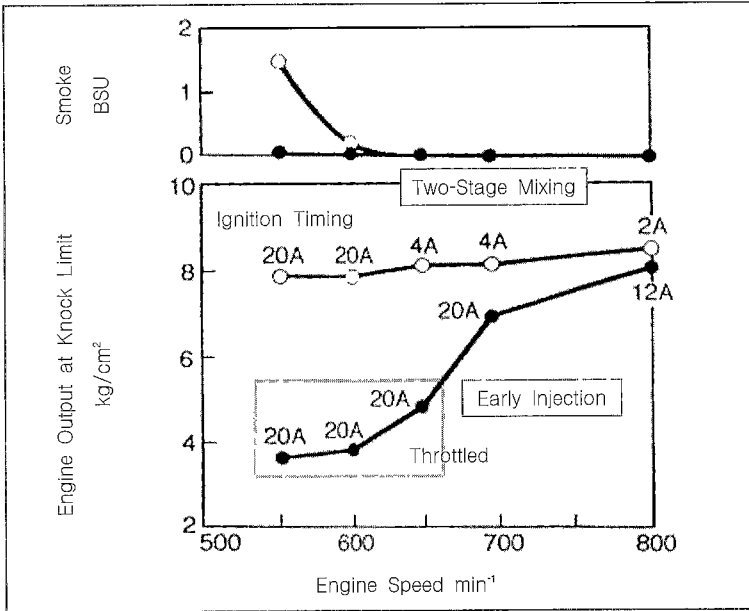
하면서 주위 공기로부터 증발잠열을 뺏으므로, 급기가 15K 정도 냉각되어 질량으로 약 5%가 증가한다.

압축행정 말기에 가스온도는 30K 정도 떨어져서 노킹이 억제된다. MPI 엔진에서는 노킹을 억제하기 위해 점화시기를 지연함으로써 출력을 저하시킨다.

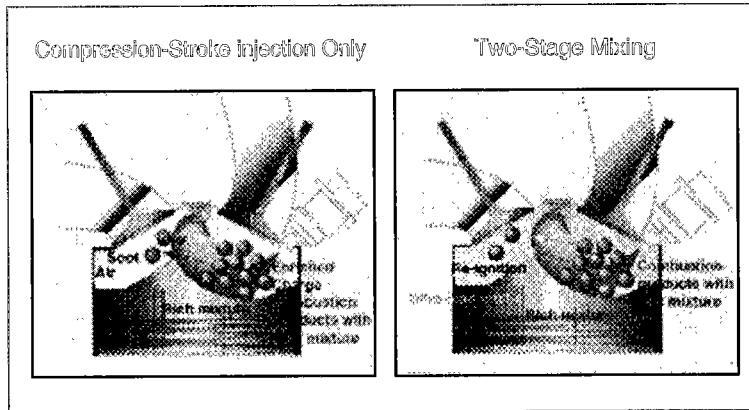
GDI 엔진은 가속시에 연소실벽이 정상상태 작동보다 더 냉각되어 점화시기를 앞당길 수 있다. 결과적으로, GDI 엔진은 MPI 엔진에 비해 충전효율의 증가와 점화시기의 촉진에 의해 출력이 10% 정도 증가한다.

혼합기 공급에 있어서 '2단계 혼합(two-stage mixing)'이라는 연소 제어기술을 노킹의 억제를 위해 고안하였다.

〈그림 5〉에 나타낸 바와 같이, 약 1/4의 연료를 흡기행정 중에



〈그림 6〉 2단계 혼합에 의한 노킹의 억제와 엔진 출력의 증가 [1]



〈그림 7〉 2단계 혼합에 의한 매연 배출의 억제 [5]

분사하여 당량비 0.25정도의 초회박 혼합기를 생성한다. 나머지 연료는 부분부하 조건에서와 같이 압축행정 말기에 분사된다.

첫번째 분사에서 혼합기를 생성하여 압축행정을 거치나, 매우 희박하여 노킹을 일으키는 선행

반응의 진행이 늦다. 두번째 분사는 과농 혼합기를 연소 직전에 생성하여 선행반응이 진행할 시간이 없다.

따라서, 자발화에 의한 노킹이 억제된다. 노킹 억제에 의한 엔진 출력의 증가 효과를 〈그림 6〉

에 나타낸다.

2단계 혼합은 연소과정을 직접 제어하여 노킹을 억제시킴으로써, 혼합비를 자유롭게 변화시킬 수 있다는 이점이 있다.

더욱 중요한 것은, 과농 혼합기가 존재함에도 불구하고 매연 배출이 억제된다는 것이다.

GDI 엔진에서의 매연 배출의 억제 메커니즘을 〈그림 7〉에 나타낸다. 디젤엔진의 경우, 공기만이 존재하는 영역을 화염이 전파하여 냉각되면 매연이 그대로 배출된다. 이에 반해, GDI 엔진에서는 과농 영역에서 발생한 화염이 초회박 영역으로 전파하여 이 영역의 혼합기를 연소시킨다. 따라서, 과농 영역에서 생성된 매연은 초회박 영역에서 재연소되어 매연의 배출이 억제된다.

#### 4. 결론

GDI 엔진은 다음과 같은 연소 제어기술을 채택하여 혼합비를 자유롭게 변화시키고 안정된 연소를 달성하였다. 부분부하 조건에서는 텀블 유동을 이용하여 스파크 플러그 주위에서 혼합기 농도를 정밀하게 제어하여 연료소비율을 낮춤과 동시에 점화성을 향상시켰다. 고부하 조건에서는 연료의 직접분사에 의한 급기 냉각과 분사시기를 설정하는 2단계 혼합 기술을 이용하여 노킹을 억제함과 동시에 엔진 출력을 높였다.

가솔린 직접분사 엔진은 현존하는 가솔린엔진 및 디젤엔진의

기술을 약간 변형한 것이나, 연비 문제를 해결하는 획기적인 엔진 기술로서 앞으로도 많은 발전이 기대된다. 특히 지구온난화 가스인 CO<sub>2</sub> 배출 규제가 예상되므로, GDI 엔진을 비롯한 초저연비 자동차 엔진기술에 대한 많은 연구가 필요하다.

〈참고문헌〉

[1] H. Ando and K. Kuwahara, "Combustion Control for Mitsubishi GDI Engine", Proc.

of the 2nd Int. Workshop on Advanced Spray Combustion, 1998.

[2] T. Kume, et al., "Combustion Control Technologies for Direct Injection SI Engines", SAE paper 960600.

[3] Y. Iwamoto, et al., "Development of Gasoline Direct Injection Engine", SAE paper 970541.

[4] K. Kuwahara, et al., "Mixing

Control Strategy for Engine Performance Improvement in a Gasoline Direct Injection Engine", SAE paper 980158.

[5] Mitsubishi Motors Corporation, "Basic Technical Features of the GDI Engine", <http://web1.mitsubishi-motors.co.jp/GDI2000/p06.htm>.

〈김형만 교수: mechkhm@jnc.inje.ac.kr〉