

직접분사식 가솔린엔진의 혼합기 형성 기술의 최신동향

New Technology of the Mixture Formation for the Spark Ignited Direct Injection Gasoline Engine

이 창 희 / Chang-Hee Lee
한양대학교 대학원
Hanyang University



이 기 형 / Ki-Hyung Lee
한양대학교 교수
Hanyang University



머리말

현재 전 세계적으로 ULEV(Ultra Low Emission Vehicle)와 CAFE(Corporate Average Fuel Economy) 등과 같은 갈수록 강화되고 있는 배기 규제에 대응하기 위하여 자동차 산업체는 연료 경제성이 뛰어나고 오염 물질의 배출이 적은 차량에 대한 요구가 증대되고 있다. 가솔린엔진의 배기 저감 기술은 삼원 촉매와 공연비 제어의 개선에 의하여 대폭 향상되었다. 미연 탄화수소(UHC)의 경우 ULEV 규제를 만족하는 엔진은 규제 전 수준에 비하여 1/100 이하 수준까지 저감을 실현한 상태이며, 난기 후의 배기는 거의 EZEV(Equivalent Zero Emission Vehicle = ULEV의 1/10수준)에 까지 도달하였다고 발표되고 있다. 한편 지구 온난화의 주범인 CO₂ 저감 기술로서는 가솔린엔진의 연료 소비를 줄이기 위한 기술 즉, 펌프 손실의 저감과 연소 효율의 향상 및 기계 손실의 저

감 등이 있으나, 연료 소비율을 대폭적으로 저감시킬 수 있는 차세대 가솔린엔진 연소기술로서 직접 분사식 희박 연소 엔진 개발에 심혈을 기울이고 있는 추세이다.

이와 같이 연료를 연소실내에 직접 분사하는 직분식 가솔린엔진은 초 희박 연소를 가능하게 함으로써 펌프 손실과 냉각 손실 저감을 통해 엔진의 초저연비를 실현할 수 있을 뿐만 아니라 엔진 내에 분사된 연료의 증발시 야기되는 분위기 온도의 냉각 효과는 고압축비와 고출력을 가능하게 한다. 또한 연료의 미립화 기술에 의한 균일 혼합기 분포 기술은 미연 탄화수소의 저감을 초래하여 유해 배기가스의 감소를 얻을 수 있다.

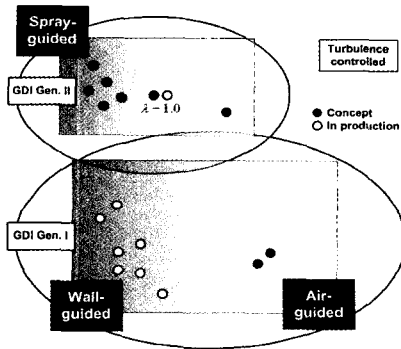
직접분사식 가솔린엔진 기술

직접 분사식 가솔린엔진의 역사는 오래되었지만 배출가스 규제를 만족하고 양산에 성공한 곳은 일본이

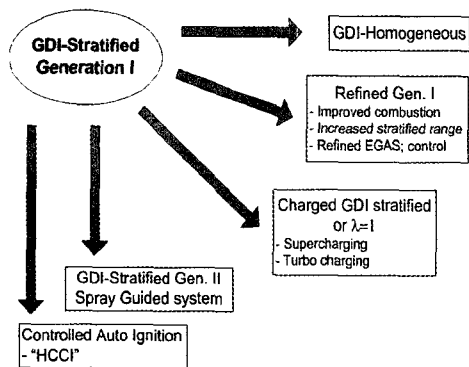
최초이다. 1996년 이후, 일본의 세 자동차 회사가 신 연소 개념의 SIDI(Spark Ignited Firect Injection)를 일본 내에서 판매함과 동시에 유럽시장에도 1997년부터 도입하기 시작하여 유럽 각 회사에 큰 영향을 미쳤다. 유럽의 각 회사에서도 필사적인 개발 노력으로 2000년에는 VW(Volks Wagen)과 Renault가 직접 분사식 가솔린엔진의 시판을 시작하였다. 저 유황 가솔린의 공급 기반이 충분하지 않고 배기 규제의 엄격함 때문에 보급은 확대되지 못하고 있는 상태이다. 현재 실용화 되고 있는 것은 <그림 1>과 <그림 2>에서 나타낸 바와 같이 대부분이 Wall Guide 개념의 엔진이

고, 양산에 대한 의지는 높지만 연비 향상이 10% 전후여서 충분한 효과를 얻지는 못하고 있는 실정이다. 현재는 제 2세대로서 더욱 높은 연비 성능을 가지는 Spray Guide 개념이 실용화를 목표로 개발이 활발히 진행되고 있다.

SIDI는 혼합기 형성과 착화의 안전성, HC와 NOx의 배출 및 NOx 촉매 등과 같은 많은 개발과제를 안고 있지만, 차후의 연료 사정과 분무의 점화제어 및 NOx 촉매기술이 획기적으로 발전될 것이라고 기대되므로 빠른 시기에 실용화가 될 것으로 예상된다. 최근 유럽 각국이 저 유황 연료에 대한 인식이 고조되기 시작하는 것도 보급에 도움이 될 것이라고 생각된다.



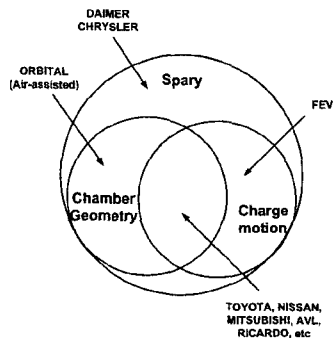
<그림 1> SIDI 엔진 연소 개념¹⁾



<그림 2> 장래의 SIDI 엔진 개발 추이³⁾

성층 혼합기 형성 기술

성층 혼합기 형성 특성을 파악하기 위한 가장 중요한 인자로서 분무 특성을 들 수 있다. 이러한 중요한 인자와 상호 연관이 있는 연소실 형상(피스톤, 실린더 헤드) 및 흡입 유동(Charge Motion)은 혼합기 형상을 이루는 중요한 요소이다. <그림 3>에서는 SIDI 엔진에 주로 적용되는 연소시스템을 나타내었다. 성층 혼합기를 이루기 위한 흡입 유동과 피스톤 형상 및 스윙 노즐로 구분하였다¹⁻³⁾.

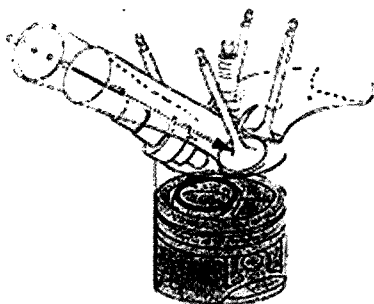


<그림 3> SIDI 엔진의 연소시스템의 분류²⁾

앞서 나타낸 바와 같은 <그림 1>과 <그림 2>에서 보면, 직분식 가솔린엔진내의 혼합기 성층화 형성 기술로는 Spray Guide 방향으로 개발이 진행되는 추세를 보이고 있다. 직분식 가솔린엔진의 구조적 특징은 희박연소를 위한 성층혼합기를 목적으로 하기 위하여 점화 플러그주위에 혼합기를 분포시킬 필요가 있는데, 성층 혼합기 분포를 형성하기 위한 구체적인 방법은 다음과 같다.

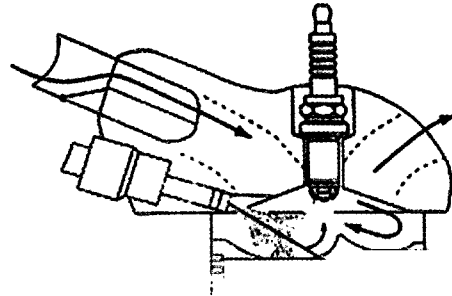
가장 일반적인 방식이 Wall Guide를 이용하는 기술로서, 피스톤 상면의 캐비티(Cavity)쪽을 향하여 연료를 분사한 후 이러한 피스톤 형상을 이용하여 성층 혼합기를 형성하는 방식이다. 현재 상품화된 기술은 적당한 분무 도달거리를 가지는 분무를 피스톤 상면의 캐비티에 분사하고, 실린더 내에 형성되는 스윙과 텀블유동을 이용하여 성층혼합기를 형성하고 있다.

Wall Guide방식을 실린더내 유동장에 따라 구분하면 다음과 같다. 먼저, 스윙을 이용한 대표적인 예를 <그림 4>에 나타내었다. 선회류에 의하여 피스톤 캐비티 내의 유동장 흐름을 점화플러그 방향으로 향하게 하여 연료 성층을 향상시키고 있다.

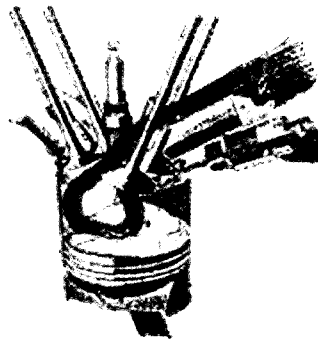


<그림 4> 스윙 이용 방식 (Nissan Neo-DI)

텀블을 이용한 대표적인 형태는 <그림 5>과 같은 예에서 볼 수 있다. 흡기 포트를 상하로 분할하고 성층 시에는 가변밸브의 상부 쪽 포트만을 흡기통로로 이용함으로써 연소실의 배기 쪽의 강한 텀블 유동을 생성



<그림 5> 텀블 이용 방식(VW RUPO FSD)



<그림 6> Air Guide 방식 (Audi A4 2.0)

하게 된다. 이와 같이 생성된 유동장을 이용하여 흡기 쪽 캐비티에 분사된 연료를 점화 플러그 쪽으로 유도하게 된다. 이러한 기술은 피스톤 상면의 형상을 이용한 유동장만으로 성층혼합기를 형성할 수 있기 때문에 Air Guide라고 한다(<그림 6>).

Wall Guide 개념의 또 다른 형태로서, 운전 영역의 차이와 사이클 간의 차이가 큰 실린더내 유동장에 의존하지 않는 방식도 등장했다. <그림 7>은 팬형 슬릿(Slit) 분사와 셸형(Shell) 피스톤 캐비티와의 연결을 통해 넓은 영역의 성층연소를 극대화한 경우를 나타내었다.

또한, 피스톤과 유동장의 효과가 상호관계가 없이 분사된 연료를 점화 플러그의 부근에 유도하여 연소시키는 방식인 Spray Guide를 <그림 8>에 나타내었다.

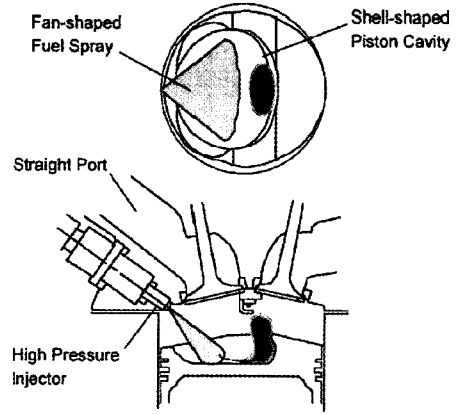
이 방식은 피스톤상면의 캐비티에 영향을 받지 않기 때문에 S/V비가 좋아질 뿐만 아니라 피스톤에의 연료 부착을 억제할 수 있다. 또한 Soot와 HC의 발생에 대해서 좋은 특징을 가지고 있지만 넓은 운전영역에서 혼합기를 형성하는 것은 어려우며 아직 상품화는 되지 않고 연구 중에 있다.

이미 1세대 SIDI 개념은 인젝터와 스파크 플러그 사이의 근접한 공간에서 Wall과 Air Guide에 대한 특성은 모두 보여주었다. 그러나 이러한 시스템은 여전히 불충분한 인젝터 기술에 대해 많은 제약을 받고 있다. 이와 같은 인젝터의 충분한 기술을 발전시키기 위해서는 현재 이러한 시스템들의 중요성을 재인식하여야 할 것이다. <그림 9>에서는 우수한 성층 특성을 보이는 결과를 보여주고 있다. 성층 특성과 혼합기 분포에 대하여 인젝터 자체적으로 조절이 가능해야 할 것이며, 인젝터와 점화 플러그 사이의 근접한 공간적 거리에 대하여는 혼합기 형성을 이루는 시간을 줄여야 한다. 따라서 인젝터에 대한 이러한 요구조건들은 Wall 또는 Air Guide 시스템보다 더욱 더 필요한 실정이다. 결과적으로, 1세대 시스템에서 널리 사용된 스웰 인젝터는 상용 점화 장치로 Spray Guide 시스템에 대하여 완벽한 해답을 주지 못하였다. 흡입 유동뿐만 아니라 연소실 형상은 1세대의 연소시스템보다는 고부하 요구조건과 피스톤 무게에 대하여 절충하여 설계하여야 할 것이다.

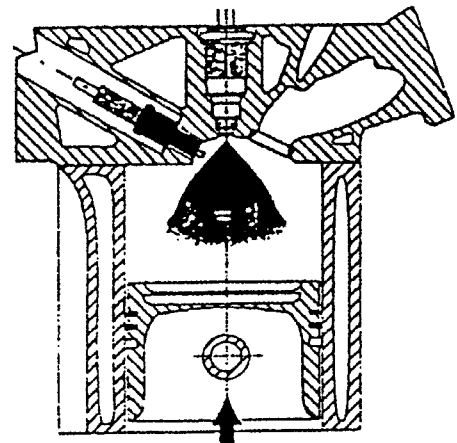
성층인자에 대한 혼합기 분포

성층혼합기 형성기술을 실현시키기 위한성층인자로서는 피스톤 형상과 분무 형상 및 분사압력을 들 수 있으며, 이러한 인자들에 따른 성층 혼합기의 영향을 파악하여야 한다.

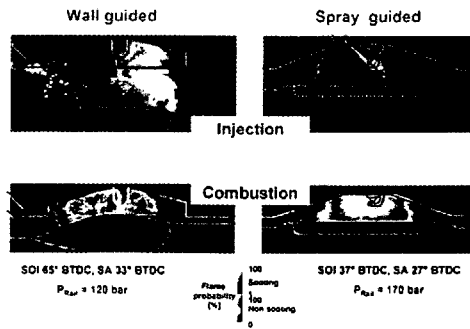
<그림 10>은 분무 패턴에 따른 혼합기 분포의 영향을 보이고 있는 결과이다. A type의 경우는 분무의 가



<그림 7> Swirl Guide 방식 (Toyota)

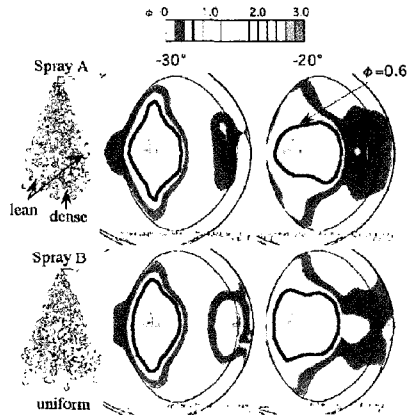


<그림 8> Spray Guide 방식 (Benz)

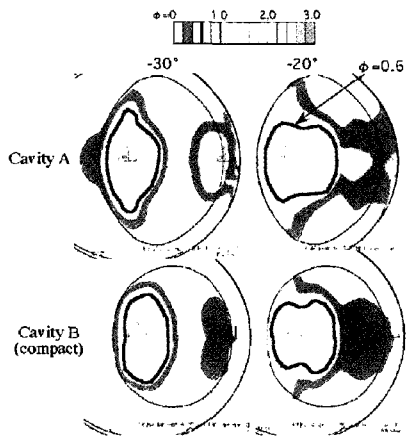


<그림 9> 1세대와 2세대 SIDI 시스템의 분무 및 연소 특성³⁾

장자리보다는 중심부가 연료 액적의 밀도가 높은 경우의 인젝터이며, B Type의 분무 패턴은 균일한 연료 밀도를 갖는 형태의 인젝터이다. 농도가 낮은 분무가 장자리의 혼합기를 갖는 A Type의 인젝터의 경우가 B Type보다 캐비티 가장자리에서 더 희박한 혼합기 영역($\phi < 0.6$)이 형성되며, 비교적 넓게 혼합기 분포를 형성하는 것을 알 수 있다.



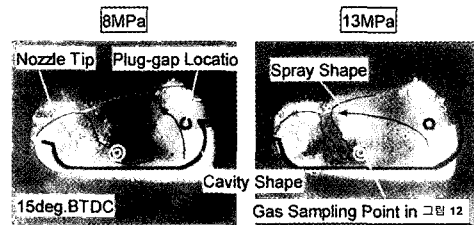
〈그림 10〉 분무 패턴에 따른 혼합기 분포의 영향⁴⁾



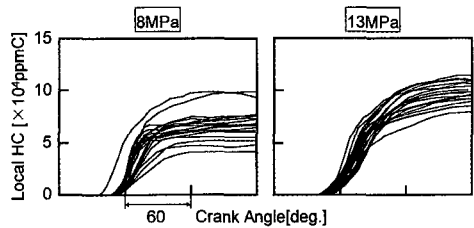
〈그림 11〉 피스톤 형상에 따른 혼합기 분포의 영향⁴⁾

〈그림 11〉은 피스톤 형상(Cavity)에 따른 연소실내 혼합기 분포의 영향을 보이고 있는 결과이다. 가장 체적(Edge Volume)이 감소된 Cavity B Type이 혼합기 분포가 균일하게 이루어지고 있으며, Cavity B의 전체 희박영역($\phi < 0.6$)은 Cavity A보다 매우 감소함을 명백하게 알 수 있다.

〈그림 12〉는 점화시기에 상응하는 BTDC 15°일 때 분사압력에 따른 혼합기 분포의 영향을 보인 결과이다. 13MPa로 분사할 경우는 Rolled-Back 혼합기로 흡입 방향으로 적당히 확산하는 반면에 8MPa로 분사할 경우는 흡입 방향으로 불균일한 확산을 이루며 Rolled-Back 혼합기로부터 분리되어 남아 있는 특징을 보이고 있다. 〈그림 12〉의 두 동심원으로 표시된 위치에서 표본가스를 얻은 위치에서의 연료 농도를 〈그림 13〉에 나타내었다. 8MPa로 분사할 경우, 분리되는 영역에서의 연료 혼합기 농도는 Rolled-Back 혼합기가 흡기 방향으로 도착한 후에 증가되지만, 곧 안정화를 이룬다. 반면, 13MPa로 분사할 경우는 점화



〈그림 12〉 분사압력에 따른 혼합기 분포의 영향⁵⁾



〈그림 13〉 피스톤 형상 중심에서의 연료 농도 분포⁵⁾

시기에 상응하는 시기 후에도 일정한 농도로 증가하는 경향을 보이고 있다. 즉 분무 도달거리가 증가하기 위한 고압 연료분사와 적합한 피스톤 형상 내에서의 혼합기 확산은 고부하 영역에서 성층 연소 효율을 높일 수 있는 효과적인 수단으로 생각된다.

맺음말

SIDI 엔진 시스템은 1세대 형태인 Wall 이나 Air

Guide 시스템에서 2세대 SIDI 엔진 시스템으로 진행되고 있는 과도기 시점에 있다고 할 수 있다. 혼합기 성층 특성을 위해서는 많은 연구가 진행되었지만 현재의 추세는 Spray Guide 시스템으로 연구가 진행되어가고 있다. 성층 혼합기를 이루기 위한 기술로서는 피스톤의 형상과 인젝터의 분무 특성 및 흡입 유동을 들 수 있으며, 이러한 성층 기술을 개발을 위한 요구조건 중에서 가장 중요한 것은 인젝터의 분무 특성이라고 할 수 있다.

(이기형 편집이사 : hylee@hanyang.ac.kr)

참고문헌

- 1) Makoto Koike, Akinori Saito, "Research and development of a new direct injection gasoline engine", SAE 2000-01-0530, 2000.
- 2) Mutsumi Kanda, Toyokazu Baika, Senji Kanto, Minoru Iwamuro "Application of a new combustion concept to direct injection gasoline engine", SAE 2001-01-531, 2001.
- 3) Ai Lettori. "The potential of next generation gasoline direct injection technology", ATA Vol. 56, n 1/2 Gennail/Febraioio 2003.
- 4) Tatsushi Nakashima, Masatoshi Basaki, Kimitaka Saito, Shigeo Furuno, "New concept of a direct injectio SI gasoline engine : a study of stratified charge combustion characteristics by radical luminescence measurement" JASE review, Vol 24, 2003, pp. 17-23.
- 5) Taketoshi Fujikawa, Yoshihiro Nomura, Yoshiaki Hattori, "Analysis of cycle-by-cycle variation in a direct-injection gasoline engine using laser-induced fluorescence technology", COMMODIA 2001, July, Nagoya.
- 6) K. Takeda, T. Sugimoto, T. Tsuchisa, M. Ogawa, S. Ueda, K. Yoneshie. "Slit nozzle injector for a new concept of direct injection SI gasoline engine", SAE 2000-01- 1902, 2000.