

활성라디칼 유도분사를 이용한 정적연소기 및 엔진에서의 연소특성

Combustion Characteristics in a Constant Volume Chamber and an Engine Using Active Radicals Induced Injection



박 종 상 / Jongsang Park
동아대학교 대학원
Dong-a University



정 성 식 / Sungsik Chung
동아대학교 교수
Dong-a University



하 종 룰 / Jongyul Ha
동아대학교 교수
Dong-a University

머리말

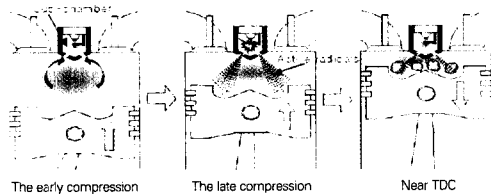
예혼합압축착화 엔진은 디젤엔진의 고효율 특성과 가솔린엔진의 저배기 특성을 동시에 실현시킬 수 있는 현실적인 잠재력을 가지고 오래 전부터 PREDIC, HCDC, HCCI, ATAC 등의 이름으로 활발한 연구가 수행되어 왔다.

그러나 상기의 엔진연소 기술들을 상용화하는데 있어 가장 큰 난점은 폭넓은 부하영역에서 사이클 안정성을 실현시킬 수 있는 확실한 자기착화원의 확보와 자기착화시기의 제어라고 할 수 있다. 이러한 관점에

서 활성라디칼 유도분사라는 새로운 개념의 연소방법을 도입하게 되었다.

이는 주연소실(이하 주실) 외에 별도의 부연소실(이하 부실)을 두어 부실에서의 점화에 의해 생성된 활성라디칼을 연락공을 통해 주실로 분출시켜 주실 내 예혼합기의 동시다점착화를 유발시키는 것이다. 즉 부실에서의 스파크 점화시기는 자기착화시기를 결정지을 것이며 활성라디칼은 자기착화원이 되는 것이다.

본 고에서는 정적연소기에서 전체연소실 체적의 1% 내·외인 다수의 연락공을 지닌 부실을 주실 상부에 설치하고 주·부실 내 혼합기의 당량비를 동일하게 유지한 후 일련의 기초실험을 행하였으며, 그 결과를 실엔진에 적용하여 가능성을 고찰하고자 하였다.



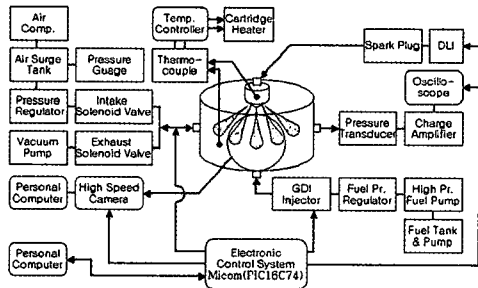
〈그림 1〉 활성라디칼 유도분사 엔진의 작동개념

정적연소기에서의 기초 연소특성

실험장치의 구성도를 〈그림 2〉에 나타내며 주실과 부실로 구분된 정적연소기 본체를 중심으로 연료공급장치, 흡·배기부, 가열장치, 점화장치, 전자제어장치,

연소압력 계측장치 및 가시화장치 등으로 구성된다.

정적연소기는 알루미늄합금(AL7074)으로 제작되었고 주실의 형상은 엔진의 연소실을 모방하여 원통형이다. 주실의 직경과 높이는 110×45mm이고 내부 용량은 487cc이며 측면에 가시창을 설치하였다.



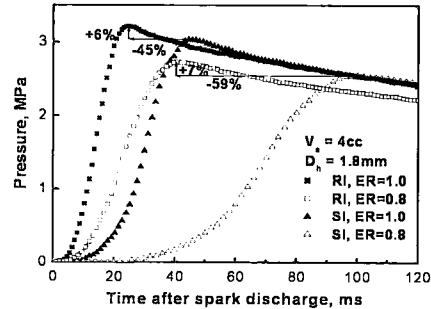
〈그림 2〉 실험장치의 구성도

실험에 사용된 연료는 n-헵탄(C₇H₁₆)이며, 주·부실의 초기압력(P_i) 및 분위기온도(T_i)는 각각 0.5MPa과 403K으로 고정하였다. 주실과 부실 내 혼합기의 당량비는 동일하며 이론혼합비 영역, 희박영역(ER=0.8) 및 희박가연한계로 나누어 실험을 수행하였다. 또한, 활성라디칼의 생성과 분출에 가장 큰 영향을 미칠 것이라고 예상되는 변수인 부실의 체적(V_s)을 2.2cc, 4cc 및 7cc로 변화시키고 연락공의 직경(D_h)을 1.0~2.4mm로 변화시키면서 그 최적치를 찾고자 하였으며 연락공의 개수는 12개로 고정하였다.

본 실험에서는 활성 라디칼 유도분사(Radicals Induced Ignition, 이하 RI) 기술의 보다 명확한 규명을 위하여 부실을 제거한 상태 즉, 주실만 존재하며 스파크플러그를 주실에 직접적으로 노출시킨 통상의 스파크점화방식의 경우(Conventional Spark Ignition, 이하 SI)에서의 실험을 병행하여 그 결과를 RI 방식의 경우와 비교하였다.

연소압력선도상의 시간이력을 파악하기 위하여 다음과 같이 정의하였다. 0ms 시점이 점화시기이며, 점화시기에서 압력상승 시작시점까지를 착화지연기간(τ_{10}), 연소최고압력의 10%까지 상승하는데 소요되는 시간을 초기연소기간(τ_{10}), 10%에서 90%까지 상승하는데

소요되는 시간을 주연소기간(τ_{90-10})으로 각각 정의하였다. 또한 연소최고압력(P_{max}) 발생시기를 연소종료시점으로 가정하였다.



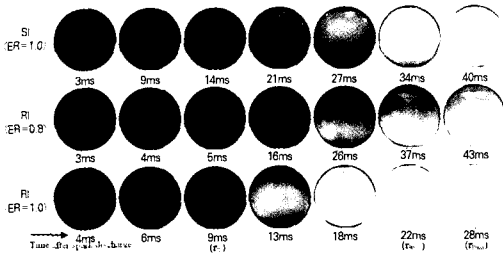
〈그림 3〉 RI 및 SI의 연소압력선도

〈그림 3〉은 RI 방식의 연소개선 효과를 설명하기 위해 초기조건 P_i=0.5MPa, T_i=403K에서 SI 방식과 RI 방식의 V_s=4cc, D_h=1.8mm인 경우 주실의 연소압력을 비교하여 나타낸 것이다.

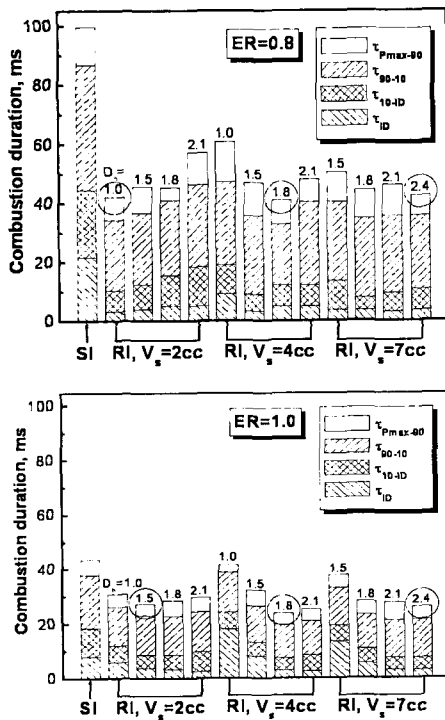
주·부실 혼합기의 당량비 ER=0.8, 1.0인 조건에서 SI 방식의 경우 점화지연기간 τ_{10} 가 각각 22ms, 10ms 정도인 반면, RI 방식의 경우는 각각 5ms, 3ms 정도이므로 RI 방식에서 최초의 점화위치가 부실 내부인 조건에도 불구하고 그 위치가 주실인 SI 방식보다 압력상승 시작을 유발하는 초기화염의 생성이 오히려 유리함을 뜻한다.

또한, P_{max} 발생시기를 보면 RI 방식의 전체연소기간(τ_{90-10})은 SI 방식에 비하여 ER=0.8과 1.0에서 각각 약 59%와 45% 만큼 크게 단축됨을 알 수 있으며, 연소기간의 단축에 의한 연소최고압력의 증가는 SI 방식 대비 6~7% 정도로서 큰 상승폭을 기대하기는 어려울 것으로 판단된다.

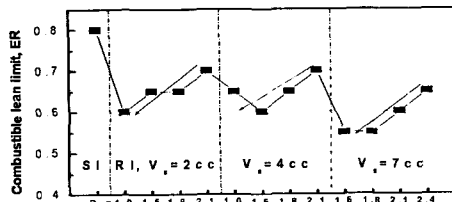
〈그림 4〉는 SI 방식과 RI 방식의 V_s=4cc, D_h=1.5mm인 조건에서 자발광을 가시화한 것이다. SI 방식의 경우 전 영역에서 구면상의 매끈한 화염면을 갖는 전형적인 층류화염전파를 하고 있는 반면, RI 방식의 경우 부실로부터 각종 연소생성물이 연락공을 벗어나 주실 내로 분출되면서 초기연소기간 전·후까지 강한 난류를 형성한다. 이와 동시에 다량의 활성화학종



(그림 4) SI 방식 및 RI 방식의 자발광 사진



(그림 5) 부실의 체적 및 연락공 직경 변화에 따른 연소압력의 시간이력



(그림 6) 희박가연한계의 변화

을 포함한 연소가스가 주실 전역에 걸쳐 분산되어 폭발적으로 반응하는 초분산반응대(Well-Dispersed Burning Zone)가 청염과 함께 관찰되고, 이후 벌크연소의 형상을 띠는 다점착화현상이 관찰된다. 또한 이후의 주 연소방향은 SI 방식과는 달리 부실에서의 연소가스 분출방향과 역으로 주실에서의 난류에 편승하여 연락공 쪽으로 향하는 것을 볼 수 있다.

(그림 5)는 V_s 및 D_h 변화에 따른 주실에서의 연소압력을 시간이력으로 구분하고 이를 적산하여 나타낸 것이다.

RI 방식의 경우 거의 모든 조건에서 SI 방식에 비하여 τ_{10} 를 포함한 τ_{10} 이 매우 단축되며 전체연소기간의 단축에 지배적인 영향을 미친다. 그러나 이혼합비 영역에서 $V_s=4cc$, $D_h=1.0mm$ 및 $V_s=7cc$, $D_h=1.5mm$ 의 경우에는 τ_{10} 가 SI 방식보다 오히려 연장되는 경향을 보이기도 한다. 한편, 연소기간을 단축시키는데 적합한 각 부실체적에 대한 연락공의 직경은 당량비에 따라서도 다소 이동하지만, 본 실험조건 내에서는 $V_s=4cc$, $D_h=1.8mm$ 인 경우가 가장 최적치로 판단된다. 이와 더불어 부실체적의 감소 측면에서, $V_s=2.2cc$ 는 전체 연소실체적의 약 0.45% 정도임에도 불구하고 RI 방식의 연소기술을 실현하는데 있어 큰 무리가 없음을 보여준다.

(그림 6)은 RI 방식이 희박가연한계의 확장에 미치는 영향을 나타낸 것이다. 희박가연한계는 RI 방식의 경우가 약 당량비 0.1~0.25 만큼 확장되는데, 이는 작은 체적의 부실에서 1차적으로 점화가 됨으로써 상대적으로 화염전파거리가 긴 SI 방식에 비해 부실 내에서 화염핵의 냉각에 의한 실패 가능성이 줄어들고, 부실에서 생성된 연소에너지가 주실 내 희박혼합기의 특정공간에 집중적으로 공급되어 초기화염의 발달을 촉진하기 때문으로 생각된다. 이와 더불어 동일 부실체적에서 D_h/V_s 가 작을수록 희박가연한계가 확장되는 경향을 보이는데, 이는 동일 부실체적에서 생성된 같은 양의 착화원이라고 할지라도 주실의 희박혼합기에 공급될 때, 연락공의 직경 축소에 의한 유속의 감소와 이로 인한 공급시간의 연장이 희박가연한계의 확장에는 오히려 유리하게 작용하기 때문으로 생각된다.

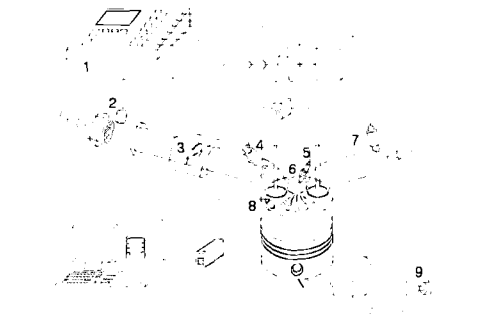
실엔진의 적용

〈그림 7〉은 본 엔진의 구동시스템을 나타낸다. 실험 엔진을 만들기 위한 베이스엔진은 부실의 설치를 용이하게 하기 위하여 배기량 623cc의 예연소실식 단기통 디젤엔진을 사용하였으며 압축비는 9.2로 대폭 줄였다. 점화장치는 CDI방식을 사용하고 상용엔진의 점화플러그를 사용하였다. 또한, 흡기관 내의 진공도에 따른 연료분사량의 차이를 무시할 수 있도록 분사압력이 5MPa의 GDI 인젝터를 사용하여 흡기관 내에 분사된다. 점화시기, 연료분사량, 연료분사시기 등의 제어를 위하여 별도 제작한 엔진전자제어장치를 이용하였다.

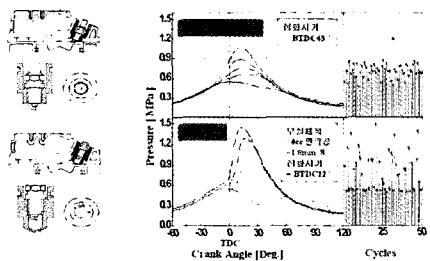
스파크플러그가 장착된 SI식 엔진과 RI식 엔진의 연소실 개략도와 P-θ 선도 및 빗형 선도(Comb Type Diagram)를 〈그림 8〉에 나타낸다. 스파크플러그는 예연소실을 제거한 부분에 이와 외형을 같게 한 어댑터를 제작하여 설치하였다. SI식 엔진을 RI 방식으로

개조하는 것은 연락공을 가진 부실 내에 스파크플러그를 설치하는 것에 불과하지만 부실의 체적, 연락공의 개수 및 크기 등은 라디칼엔진의 성능에 영향을 미치는 주요한 인자이다. 따라서 정적연소기의 결과를 바탕으로 부실의 체적, 연락공의 개수 및 직경을 $V_s=4cc$, $D_h=1.8 \times 8$ 로 고정하여 실험을 행하였다. 사용연료는 가솔린이며 냉각수의 온도는 80℃이고 무부하 조건이다.

SI 방식의 경우 빗형 선도에서 보듯이 최고압력의 변동폭이 적지 않고, 점화시기가 BTDC 52°로 통상의 가솔린엔진에 비하여 연소기간이 매우 연장됨을 알 수 있다. 한편, RI 방식의 P-θ선도 및 빗형 선도는 SI 방식에 비하여 일관성 있는 연소를 하는 것으로 보이지 않는다. 즉, P-θ선도에서 연소최고압력은 0.4~0.5MPa 정도 증가하는 모습을 보이기도 하지만 그 변동폭이 SI 방식에 비해 더욱 증가하는 경향을 보인다. 이는 부실 내 신기의 유입 및 잔류가스의 유출이 용이하지 않아 활성 라디칼 및 연소가스의 씨딩에서 부조가 일어나는 것으로 보인다. 즉, 잔류가스의 농도가 사이클마다 변하여 부실에서 주실로 분출되는 가스의 물리적 및 화학적인 요소를 변화시켜 엔진의 사이클 변동으로 이어진다고 생각한다. 이것으로 부실의 소기 문제는 본 연소기술의 실엔진 적용시 무엇보다 우선적으로 해결해야 하는 필수과제로 판단된다.



1.ECU 2.Air Flow Sensor 3.Throttle Body 4.Injector 5.Spark Plug
6.Sub-Chamber 7.A Sensor 8. Pressure Transducer 9.Encoder
〈그림 7〉 실험엔진 구성도



〈그림 8〉 엔진에서의 P-θ 선도 및 연소최고압력의 변동을 나타내는 빗형 선도

결 언

부실에서 생성된 활성라디칼을 주실의 혼합기에 유도분사하여 주실 내 예혼합기의 연소개선을 시도하였다. 기초연소특성을 고찰하기 위해 정적연소기를 이용하였고 그 결과를 바탕으로 실엔진을 구동하여 본 연소기술의 가능성 및 문제점 등을 살펴보았다.

정적연소기에서의 결과를 보면 RI 방식은 SI 방식에 비하여 연소기간의 단축, 희박가연한계의 확장 등에서 많은 개선을 보였다. 이에 반하여 초기 실엔진의 구동은 성공적이었지만 동시에 부실의 소기라는 과제도 지니고 있음을 확인하였다.

(하중률 교수 : hajy@donga.ac.kr)