

부실을 가진 정적연소기에서 부실형상의 최적화 연구

An Study on the Optimization of Sub-chamber Geometry in CVC with Sub-chamber

박종상*, 강병무*, 엄정국***, 하종률***, 정성식***

Jong-sang Park, Byung-mu Kang, Jung-kuk Yeum, Jong-yul Ha, Sung-sik Chung

Abstract

An experimental study was carried out to obtain the fundamental data about the effects of radical ignition on premixture combustion. A CVC(constant volume combustor) divided into the sub-chamber and the main chamber was used. Numerous narrow passage holes are arranged between the main chamber and the sub-chamber. The products including radicals generated by spark ignition in the sub-chamber derives the simultaneous multi-point ignition in the main chamber. We have examined the effects of the sub-chamber volume, the diameter and number of passage holes, and the equivalence ratio(ϕ) on the combustion characteristics by means of burning pressure measurement and flame visualization. In a CVC, the overall burning time including the ignition delay became very short and the maximum burning pressure was slightly increased by the radical ignition(RI) method in comparison with those by the conventional spark ignition(SI) method. Combustible lean limit by RI method is extended by $\phi=0.25$ compared with that by SI method. Also, In cases of changing the number and the diameter for the fixed total cross section of the passage holes, combustion period increased significantly at a sub-chamber with a single hole, but those of the other conditions had almost a similar tendency in the sub-chamber with 4 or more holes, regardless of equivalence ratio. Therefore, it was proved that a critical cross section exists with the number of passage holes.

주요기술용어 (Key Words) : Radicals induced injection, Sub-chamber, Passage hole, CVC (Constant volume combustor)

1. 서론

예혼합기의 희박연소는 배기의 청정화와 열효율 향상 측면에서 매우 현실적인 기술로 인정받고 있지만 이와 동시에 실화, 느린 연소속도, 미연탄

화수소 배출량의 증가 등의 단점들도 가지고 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해 본 연구에서는 주실 상부에 별도로 부실을 설치하여 주실 내 희박혼합기의 연소개선을 꾀하려고 하는 이른바 라디칼 유도분사 기술을 개발하고자 한다.

주실 상부의 부실에서 생성된 연소물질을 주실 예혼합기에 분출하여 급격연소를 실현하는 기술이다.^(1,2) 동일당량비의 혼합기가 주실 및 부실

* 동아대학교 기계공학과 대학원

*** 동아대학교 기계산업시스템공학부

(sub-chamber)에 공급된 후 부실에서 스파크에 의해 생성된 연소생성물들을 연락공(passage holes)을 통해 주실로 분사한다. 즉, 부실에서의 점화에 의하여 다수의 연락공을 통해 주실로 분출된 고온의 연소물질은 활성물질인 각종 라디칼을 다량 포함하고 에너지 밀도가 높아 예혼합기의 점화성을 증대시킬 뿐 아니라 분출가스에 의한 주실 내 유동을 유발하여 초기화염면을 확장시켜 희박예혼합기의 급속연소를 가능케 할 것으로 생각된다.

본 연구에서는 라디칼 유도분사식(radicals induced injection) 연소기술의 실연진 적용에 앞서 정적연소기를 이용하여 엔진구동에 필요한 기초데이터를 확보하기 위하여 실험을 실시하였다. 부실의 체적, 연락공의 직경 및 개수, 혼합기의 당량비 등을 변화시키면서 주실 내 연소압력 특성 및 화염을 고찰함으로써 부실의 기하학적 형상을 최적화하기 위한 자료로 활용하고자 한다.

2. 실험장치 및 실험방법

2.1 정적연소기

Fig. 1은 본 실험에 사용된 정적연소기 및 이를 포함한 실험장치 구성도이다. 정적연소기는 알루미늄합금(AL7075)으로 제작되었고, 주실의 형상은 엔진의 연소실을 모방한 원통형으로서 110×48.5mm의 직경과 높이를 가지며 그 상부에 부실이 장착된다. 또한 부실로부터의 연소분출물과 주실에서 연소화염의 가시화를 위하여 주실의 양측면에 석영창을 설치하였다.

혼합기의 가열을 위해 주실과 부실 외벽에 각각 2.8kW, 1.2kW 용량의 카트리지 히터를 삽입하였으며 설정온도의 제어를 위해 K-타입 열전대를 주·부실에 각각 삽입하였다. 또한 연소실 내에 정확한 당량비의 예혼합기 형성은 수증기 제거 필터와 서지탱크 및 압력 레귤레이터를 거친 압축공기와 주실 하부에 장착된 GDI 엔진용 고압 인젝터에 의한다.

정적연소기에서의 혼합기형성과 점화 및 배기 등 일련의 실험과정은 12bit A/D와 8KB EEPROM이 내장된 마이컴(PIC16C74)에 의해 순차적으로 제어된다.

먼저, 진공상태로 된 주실 및 부실 내의 설정온도가 403K로 유지되면, 주실 하부에 장착된 인젝터는 설정당량비에 따라 연료를 5회로 나누어 분사한다. 그 직후 흡입용 솔레노이드밸브가 열리고 압력레귤레이터에 의해 설정된 압력의 건공기가 주실로 유입되면 이미 증발한 연료 증기와 공기는 10초간의 혼합시간을 거쳐 균질 혼합기를 생성함과 동시에 내부 유동이 정지된다. 이후 스파크플러그의 방전에 의해 부실의 혼합기는 점화되어 연소가 일어나고, 부실 내부의 급격한 압력상승과 함께 다량의 라디칼을 포함한 연소생성물들이 연락공을 통해 주실로 분출된다. 이때 점화신호와 동기화되어 연소압력이 계측된 후 배기밸브가 열리면 실험은 종료된다. 연소압력의 계측에는 압전식 압력변환기(Kistler Co. 6051B)와 증폭기(Kistler Co. 5011) 및 오실로스코프를 사용하였다.

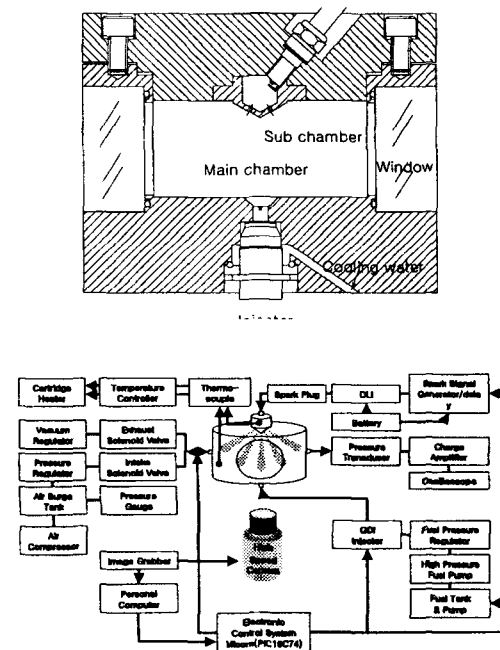


Fig. 1 Sectional view of the constant volume combustor and Schematic diagram of experimental apparatus

2.2 당량비의 설정

본 연구에서는 주실과 부실의 공기연료비를

정확하게 조절하기 위하여 상용 GDI 엔진의 연료분사 시스템을 적용하였다.

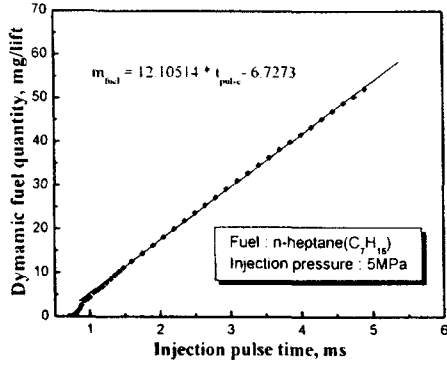


Fig. 2 Injection amount with pulse width of GDI injector

Fig. 2는 GDI 인젝터의 통전시간에 따른 노르말-헵탄의 1회 분사량을 나타낸 것이다. 계측의 정도를 높이기 위하여, 50회 분사하여 전자저울(AND, HM-200, min.=0.1mg)로 계측하고, 이를 5회 반복한 결과를 평균하여 나타내었다.

주실의 공기연료비는 주실 및 부실로 흡입되는 공기량을 압력조절기로부터 산출한 후, 주실 하부에 장착된 연료 인젝터의 분사량을 조절함으로써 결정된다.

주실과 부실에 흡입되는 공기량은 이상기체 방정식에서,

$$m_a = \frac{PV}{R_a T} \quad (1)$$

로 계산될 수 있으며, 초기압력은 $P_i=0.5\text{MPa}$, 주실과 부실의 체적은 각각 $V_m=487 \times 10^{-6}\text{m}^3$ 과 $V_s=4 \times 10^{-6}\text{m}^3$, 초기온도는 $T_i=403\text{K}$ 일 때, 공기의 기체상수는 $R_a=0.287(\text{J/g} \cdot \text{K})$ 라고 가정하면, (1)식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} m_a &= \frac{0.5\text{MPa} \times 491 \times 10^{-6}\text{m}^3}{0.287 \text{ J/g} \cdot \text{K} \times 403\text{K}} \\ &= \frac{0.5 \text{ N/m}^2 \times 10^6 \times 491 \times 10^{-6}\text{m}^3}{0.287 \text{ N} \cdot \text{m/K} \times 403\text{K}} \text{ g} \\ &\approx 2123\text{mg} \end{aligned} \quad (2)$$

또한, 당량비의 정의 식에서,

$$\begin{aligned} \Phi &= \frac{\text{실제연공비}}{\text{이론연공비}} = \frac{(F/A)_{act}}{(F/A)_{stoich}} \\ &= \frac{(F/A)_{act}}{15.14^{-1}} = \frac{m_f/m_a}{6.605 \times 10^{-2}} \end{aligned} \quad (3)$$

따라서 주실에 공급될 연료량 m_f 는

$$m_f = \Phi \times 2123 \times 6.605 \times 10^{-2}\text{mg} \quad (4)$$

이다.

2.3 실험 조건

부실의 기하학적 적합성을 실험적으로 밝혀내기 위해 본 연구에서는 먼저 연락공의 개수 N_h 는 12개로 고정시킨 상태에서 부실의 체적 V_s 를 2.2, 4, 7cc로 변화시키고 연락공의 직경 D_h 을 각각 1.0, 1.5, 1.8, 2.1, 2.4mm로 변경시키면서 연소특성을 고찰하였다. 이를 Fig. 3에 나타낸다.

그 중에서 $V_s=4\text{cc}$, $D_h=1.8\text{mm}$ 인 조건이 주실 혼합기의 연소기간의 단축과 희박한계의 확장 면에서 전반적으로 가장 적절함을 알 수 있었다. 따라서 $V_s=4\text{cc}$, $N_h=12$, $D_h=1.8\text{mm}$ 인 경우(전체 연락공 단면적의 합, $A_h=30.5\text{mm}^2$)를 기준으로 연락공의 개수와 직경 및 전체단면적에 관한 추가실험을 행하였다. 연락공의 개수와 직경 및 전체단면적에 관한 실험은 Fig. 4(a)와 같이 연락공의 전체단면적 $A_h=30.5\text{mm}^2$ 로 고정한 상태에서 연락공의 개수 N_h 와 연락공의 직경 D_h 가 변화하는 경우와 Fig. 4(b)와 같이 $D_h=1.8\text{mm}$ 로 고정한 상태에서 N_h 와 A_h 가 변화하는 경우로 나누어 실험하였다.

이상의 실험조건을 종합하여 Table 1과 2에 나타낸다. 사용 연료는 n-헵탄(C_7H_{16})이며 주·부실의 당량비는 동일하다고 가정하였고 희박가연한계, 희박 영역, 이론혼합비 영역으로 나누어 실험을 수행하였다.

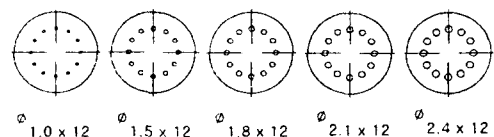


Fig. 3 Diameter change and arrangement of passage holes

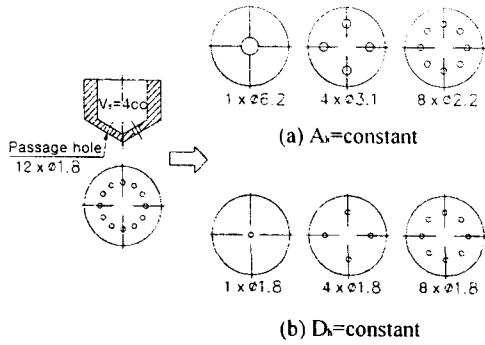


Fig. 4 Variation of N_h , D_h , and A_h for the sub-chamber of $V_h=4cc$, $N_h=12$ and $D_h=1.8mm$

Table 1 Parameters for the geometric shape of sub-chamber (V_s , and D_h)

Fuel	n-heptane	
Initial pressure(P_i)	0.5MPa	
Initial temperature(T_i)	403K	
Equivalence ratio(Φ)	Lean limit, 0.8, 1.0	
Volume of comb. chamber	Main(V_m)	487cc
	Sub(V_s)	2.2, 4, 7cc
Number of passage hole(N_h)	12(fixed)	
Diameter of passage hole(D_h)	1.0~2.4mm	

Table 2 Parameters for the geometric shape of sub-chamber (N_h , A_h , and D_h)

Volume of comb. chamber	Main(V_m)	487cc
	Sub(V_s)	4cc(fixed)
Number of passage hole(N_h)	1, 4, 8, 12	
Diameter of passage hole(D_h)	1.8~6.2mm	

3. 실험결과 및 고찰

3.1 부실의 체적(V_s) 및 직경(D_h)의 영향

본 실험에서는 활성 라디칼 유도분사(Radicals induced Ignition, 이하 RI) 기술의 보다 명확한 규명을 위하여 부실을 제거한 상태 즉, 주실만 존재하

며 스파크플러그를 주실에 직접적으로 노출시킨 통상의 스파크점화방식의 경우(conventional Spark Ignition, 이하 SI)에서 실험을 병행하여 그 결과를 RI 방식의 경우와 비교하였다.

연소압력선도상 시간이력을 파악하기 위하여 다음과 같이 정의하였다. 0ms 시점이 점화시점이며, 점화시점에서 압력상승 시작시점까지를 착화지연기간(τ_{ID}), 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.⁽³⁾

Fig. 5는 RI 방식의 연소개선 효과를 설명하기 위해 초기조건 $P_i=0.5MPa$, $T_i=403K$ 에서 SI 방식과 RI 방식의 $V_s=4cc$, $D_h=1.8mm$ 인 경우 주실의 연소압력을 비교하여 나타낸 것이다.

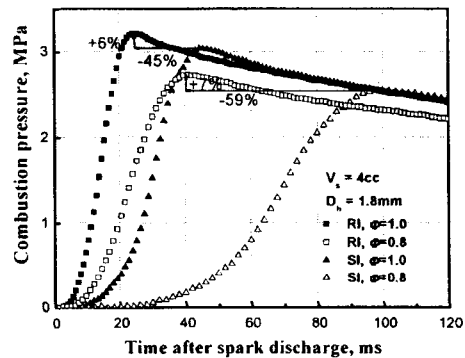


Fig. 5 Comparison of exemplary combustion characteristics of RI and SI method according to equivalence

주·부실 혼합기의 당량비 $\Phi=0.8, 1.0$ 인 조건에서 SI 방식의 경우 점화지연기간 τ_{ID} 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_{Pmax})은 SI 방식에 비하여 $\Phi=0.8$ 과 1.0에서 각각 약 59%와 45% 만큼 크게 단축됨을 알 수 있으며, 연소기간의 단축에 의한 연소최고압력의

증기는 SI 방식 대비 6~7배 정도로서 큰 상승폭을 기대하기는 어려울 것으로 판단된다.

하지만, 본 실험조건 하에서는 $V_s=4cc$, $D_h=1.5mm$ 인 경우가 가장 최적치로 판단된다. 이와 더불어

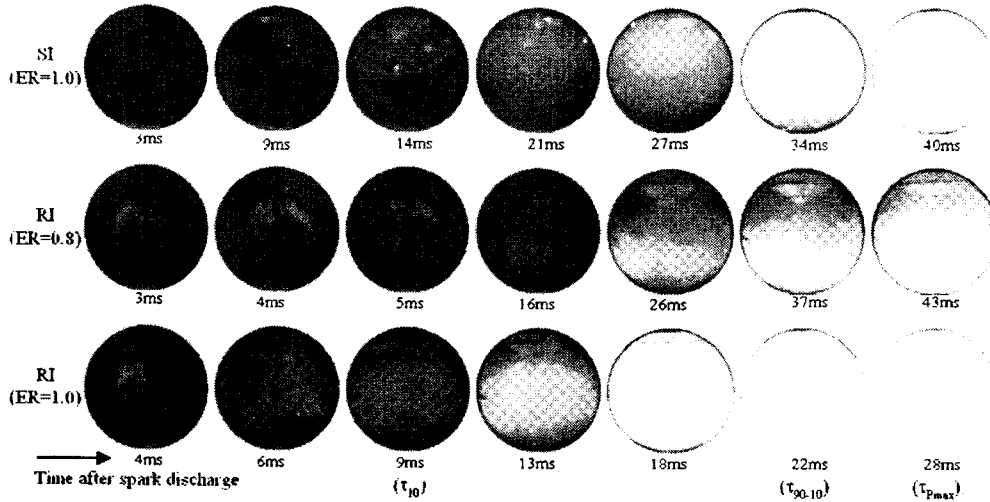


Fig. 6 Comparison of exemplary combustion characteristics of RI and SI method according to equivalence

Fig. 6은 SI 방식과 RI 방식의 $V_s=4cc$, $D_h=1.5mm$ 인 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 활성화화학종을 포함한 연소가스가 주실 전역에 걸쳐 분산되어 폭발적으로 반응하는 초분산반응대(well-dispersed burning zone)가 청염과 함께 관찰되고^[4], 이후 벌크 연소의 형상을 띠는 다점착화현상이 관찰된다. 또한 이후의 주 연소방향은 SI 방식과는 달리 부실에서의 연소가스 분출방향과 역으로 주실에서 난류에 편승하여 연락공 쪽으로 향하는 것을 볼 수 있다.

Fig. 7은 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 이혼혼합비 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 이동

부실체적 감소 측면에서 $V_s=2.2cc$ 는 전체 연소실체적의 약 0.45% 정도임에도 불구하고 RI 방식의 연소기술을 실현하는데 있어 큰 무리가 없음을 보여준다.

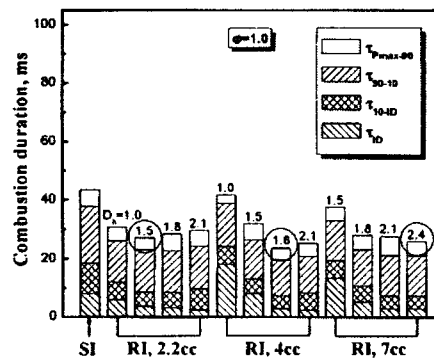
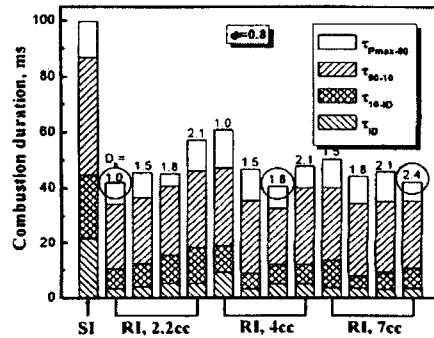


Fig. 7 Details of combustion duration with hole diameter in each volume of sub-chamber

Fig. 8은 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 화염전과거리가 긴 SI 방식에 비해 부실 내에서 화염핵 냉각에 의한 실화 가능성이 줄어들고, 부실에서 생성된 연소에너지를 주실 내 희박혼합기의 특정 공간에 집중적으로 공급되어 초기화염 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 유속감소와 이로 인한 공급시간 연장이 희박가연한계 확장에는 오히려 유리하게 작용하기 때문으로 생각된다.

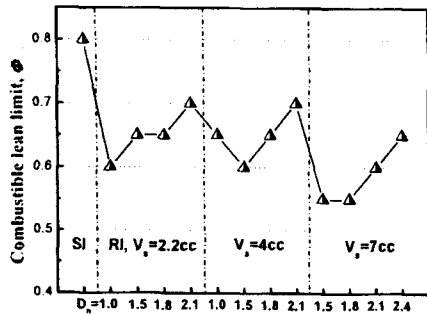
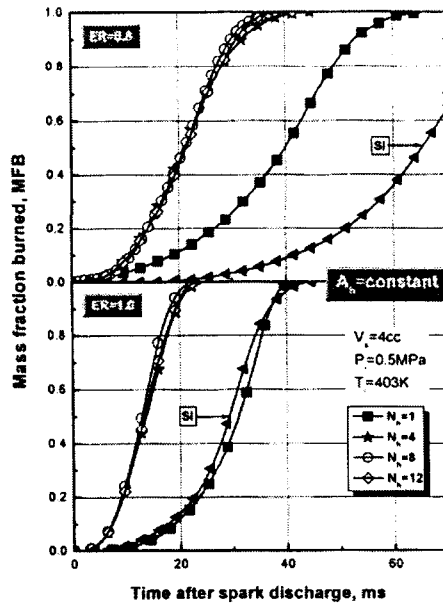


Fig. 8 Effects of hole diameter and sub-chamber volume on combustible lean limit

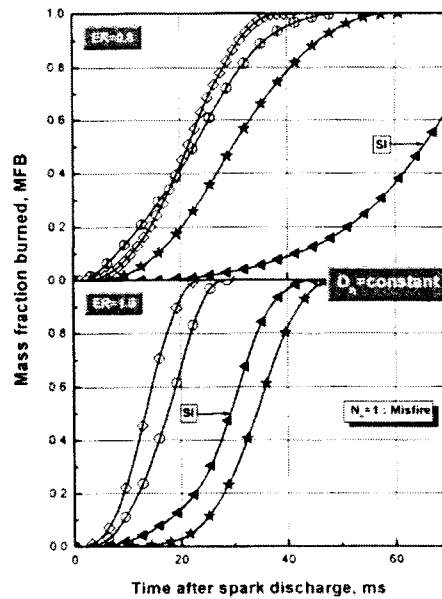
3.2 연락공의 개수(N_h), 전체단면적 (A_h) 및 직경(D_h)의 영향

Fig. 9는 연락공의 개수와 직경 및 단면적 영향을 동시에 파악하기 위해 $V_s=4cc$, $N_h=12$, $D_h=1.8mm$ 인 조건을 기준으로 연락공 전체단면적의 합($A_h=30.5mm^2$)을 고정한 상태에서 연락공 개수를 변경한 경우(a)와 연락공 직경($D_h=1.8mm$)을 고정한 상태에서 개수를 변경한 경우(b)에 대해 실험한 결과를 질량연소율로 나타내었다. (a)의 단공의 경우 SI 방식보다는 연소기간이 짧으나 다른 조건에 비해서는 연소기간이 확연하게 길어지고 있는데 이는 연락공이 너무 커짐으

로 인해 부실로부터 분출물 유속이 느려져 주실 내 혼합기의 유동이 작아질 뿐 아니라 착화점이 한곳에만 집중되기 때문으로 보인다. 그러나 단공을 제외하고는 당량비에 상관없이 SI 방식에 비해 거의 일치되게 향상된 결과를 볼 수 있다.



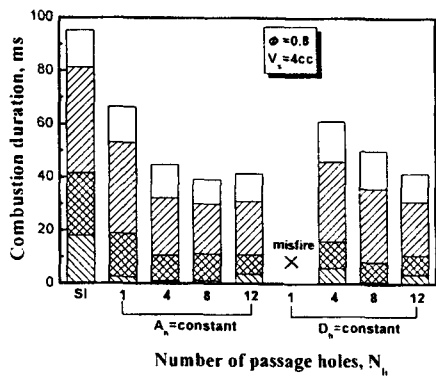
(a) $A_h=constant=30.54mm^2$



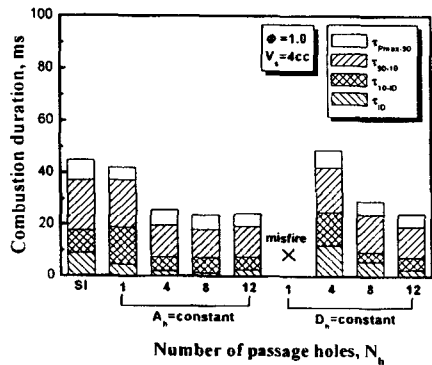
(b) $D_h=constant=1.8mm$

Fig. 9 Mass fraction burned with the number of passage holes in cases of $A_h=constant$ and $D_h=constant$

또한 연락공 개수와 단면적의 합은 동일한 상관성을 지님을 보여주는데 4개 이상의 다공일 경우 동일한 연락공 단면적은 비슷한 연소특성을 보임을 알 수 있다. 이러한 결과는 (b)에서도 알 수 있는데, 비록 4홀 이상 다공이지만 전체단면적 축소에 따라 연소기간은 증가한다. 이와 같이 연락공의 개수 N_h 가 일정 값 이상이 되면 적절한 임계단면적이 존재함을 파악할 수 있다.



(a) $\Phi=0.8$



(b) $\Phi=1.0$

Fig. 10 Effects of passage hole number and passage area on each combustion duration

Fig. 10은 Fig. 9의 시간특성을 보다 상세히 파악하기 위해 나타낸 것이다.

연락공의 직경을 고정시키고 개수를 변경한 경우를 보면 전체연소기간을 비롯한 거의 모든 연소 구간들은 연락공 개수 감소에 비례적으로 증가함을 보이는데 특히, 이론공연비에서 더욱 뚜렷한

정향을 보인다. 이와 같이 착화지연(D_h)을 비롯한 각 연소기간의 증가는 협소한 연락공으로 인해 발생하는 교축손실의 증가가 부실에서의 연소생성물 분출을 억제시키기 때문으로 생각된다. 이것은 결국 초기화염 생성에 필요한 착화에너지원의 감소를 초래하고 τ_{10} 의 연장과 더불어 τ_{Pmax} 의 연장으로 이어진다고 판단된다.

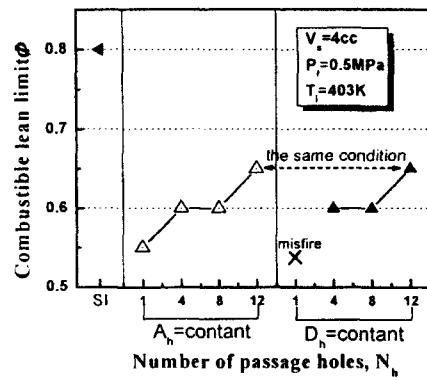


Fig. 11 Effects of passage hole number and passage area on lean combustible limit

Fig. 11은 연락공의 개수와 연락공 단면적 변화에 따른 희박가연한계를 나타낸 것이다. 연락공의 단면적 변화와 관계없이 연락공 개수가 줄어들수록 희박가연한계는 확장되는데, 이는 연락공 개수가 줄어들음으로 인해 불출물의 집중도가 좋아지고 혼합기의 유동이 적어 초기화염생성에는 유리하기 때문으로 보인다. 반면 부실로부터의 연소생성물에 의한 주실 내 유동과 초기 화염면적이 줄어들음으로 인해 이후의 주연소기간 및 전체연소기간은 오히려 길어지게 된다.

이상과 같이 본 장에서 실험은 급속연소 즉 전체연소기간의 단축과 희박가연한계의 확장이 라는 측면에서 향상된 연소특성을 규명하는 방향으로 수행되어왔다. 그러나 한편으로 Fig. 9 (b)의 $N_h=1, D_h=1.8mm$ 경우와 같이 비록 단공이라 할지라도 주실에서 실화되는 현상이 관찰됨에 따라 그 원인을 실험적으로 고찰할 필요성이 있다고 판단된다. 여기에는 여러 가지 인자들이 작용하겠지만 부실의 체적과 내부형상이 동일한 경우 연락공의 직경(D_h)과 개수(N_h)에 의해 결정

되는 연락공 전채단면적(A_h), 연락공 길이(L_h) 및 연락공 배치 등이라고 추정된다.

먼저 Fig. 9(b)와 같은 초기조건과 $\phi=1.0$, $D_h=1.8\text{mm}$ 의 경우, N_h 를 2와 3으로 변경시켰을 때 실화가 발생하였다. 또한 L_h 를 기존의 2.5mm에서 2.0→1.5→1.0mm로 축소시켜보았지만 역시 실화가 발생하였다. 따라서 이 조건의 경우 연락공 개수는 최소한 4개 이상일 경우에만 정상적인 연소가 가능할 것으로 생각되고, 연락공 길이는 본 실험 범위 내에는 예상보다 큰 영향이 없는 것으로 생각된다.

마지막으로 연락공 개수를 단공($N_h=1$)으로 고정하고 연락공 직경(D_h)을 3.6부터 6.2mm까지 증가시키면서 실험을 수행하였다. 여기서 $D_h=3.6\text{mm}$ ($A_h=10.2\text{mm}^2$)는 Fig. 9(b)에서 정상적으로 착화된 $N_h=4$, $D_h=1.8\text{mm}$ 인 경우의 전채단면적($A_h=10.2\text{mm}^2$)을 기준으로 하였고, $D_h=6.2\text{mm}$ 는 Fig. 9(a)에서 정상적으로 연소된 $D_h=6.2\text{mm}$, $N_h=1$ 경우이다. 그 결과를 Fig. 12와 Fig. 13으로 나타낸다.

Fig 12는 $N_h=1$ 일 때 $D_h=5.0\text{mm}$ 의 경우 및 $D_h=5.4\text{mm}$ 의 경우 점화방전 이후 주실의 연소압력을 각 5회 채취하여 나타낸 것이다. 그림에서 볼 수 있듯이 $D_h=5.4\text{mm}$ 의 경우는 거의 편차가 없는 결과를 보이는 반면 $D_h=5.0\text{mm}$ 의 경우는 매우 불규칙적인 연소압력을 보인다. 이러한 현상은 $D_h=4.0$ 과 4.2인 경우에서도 비슷하게 나타났고 10번 중 2~3번 정도는 실화를 동반하였다. 이는 곧 단공에서 신뢰성 있는 착화가 가능한 연락공의 직경은 5.4mm 정도가 경계인 것을 의미한다.

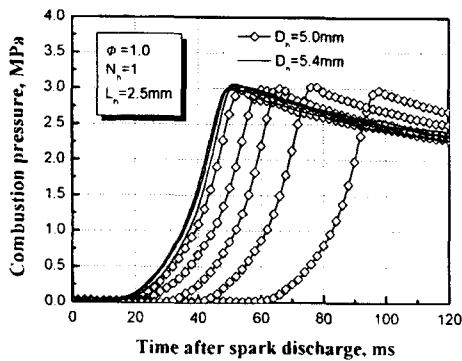


Fig. 12 P-t diagram for $D_h=5.0\text{mm}$ and $D_h=5.4\text{mm}$ in the case of $N_h=1$

Fig. 13은 단공의 연락공 직경을 3.6~6.2mm로 변화시키면서 취득한 주실의 연소압력을 평균치로 나타낸 것이다.

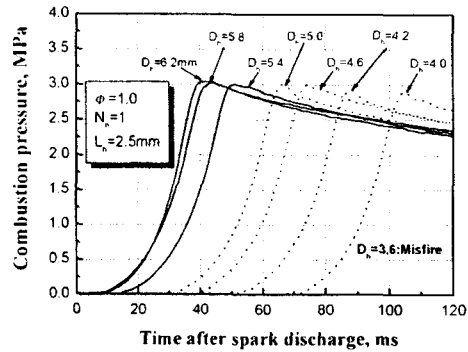


Fig. 13 P-t diagram with D_h in the case of $N_h=1$

$D_h=5.0\text{mm}$ 이하는 Fig. 12에서 설명한 바와 같이 이상불 평균이 불가능하므로 최고압력발생 시기, $\tau_{P_{max}}$ 의 평균값에 근사한 데이터를 나타내었다. $D_h=3.6$ 인 경우는 실화되었고, 그 나머지는 D_h 증가에 따라 $\tau_{P_{max}}$ 는 감소하고 P_{max} 는 증가하는 경향을 보이다가 $D_h=5.8$ 이상에서는 큰 변화가 없다는 것을 볼 수 있다. 또한 주연소기간의 기울기 즉, 압력상승률(dP/dt)은 큰 차이점이 없다는 것을 볼 수 있는데, 이는 $\tau_{P_{max}}$ 의 증감에는 착화지연시간, τ_{ID} 의 영향이 지배적임을 말해준다. 이상과 같이 단공의 경우에는 다공의 경우와 비교하여 실화의 우려 및 τ_{ID} 의 연장으로 인한 긴 연소기간을 지니고 있어 대부분 SI 방식보다 불리한 방법임을 확인할 수 있었다.

4. 결 론

희박혼합기의 급격연소 및 희박가연한계 확장과 같은 연소개선을 위해 부실에서 생성된 라디칼을 포함한 연소생성물을 주실의 예혼합기에 분사하는 라디칼 유도분사 기술을 시도하였다. 정적연소기를 이용하여 부실 및 연락공 형상 최적화에 필요한 기초 실험을 수행하였으며 다음을 그 주요결과이다.

- 1) 라디칼 유도분사 방식은 주실 및 부실 내 예혼합기의 당량비 0.8, 부실체적 4cc, 연락공직

경 1.8mm에서 SI 방식에 비하여 전체연소기간을 최대 59% 정도 단축시키며, 이론당량비에서는 최대 45% 정도 단축시킨다. 한편 연소최고압력은 당량비에 따라 6~7% 증가한다.

2) 주실에서의 가시화 사진에 의하면, SI 방식은 전 영역에서 통상적인 매끈한 구면의 화염전파를 보이는데 반하여, RI 방식은 초기연소기간 전·후 주실전역에서 난류화염면과 폭발적인 반응대를 형성한다.

3) 착화지연기간을 포함한 초기연소기간 감소가 전체연소기간의 감소에 지배적인 영향을 미친다.

4) RI 방식에 의한 희박가연한계는 당량비 0.25 정도 확장된다.

5) 연락공의 전체단면적(A_h)을 고정하고 연락공의 개수와 직경을 변경시킨 결과 단공인 경우에 연소기간이 확연하게 길어지는 반면 $N_h=4$ 홀 이상인 경우 당량비에 상관없이 거의 일치된 연소압력특성을 나타내어 적절한 임계단면적이 존재함을 확인하였다.

6) 연락공의 개별적인 직경(D_h)을 고정하고 연락공의 개수 및 전체단면적을 변경시킨 결과 각각의 연소기간은 전체단면적에 반비례한다.

7) 희박가연한계에 미치는 연락공 개수의 영향은 연소속도와는 반대로 개수가 적을수록 유리하게 작용하여 트레이드오프 관계를 보인다.

후 기

본 연구는 에너지관리공단의 에너지기술 학술진흥사업에 의해 수행되었으며, 관계자 여러분께 감사드립니다.

참 고 문 헌

- 1) T. Ma, H. Zhao, J. Li, N. Ladommatos, "Experimental Investigation of Controlled Auto-Ignition Combustion in a 4-Stroke Multi-Cylinder Gasoline Engine and Drive Cycle Simulations," IFP International Congress/Rueil-Malmaison, 2001.
- 2) P. Higelin, C. Robinet, C. Mounaim-Rouselle, O. Pajot, B. Moreau, "A New Combustion Concept for Internal Combustion Engines," Proceedings of the 15th Internal Combustion Engine Symposium (International) /Seoul, 9935761, 1999.
- 3) J. S. Park, H. S. Choi, M. J. Lee, T. W. Lee, J. Y. Ha, S. S. Chung, "A Fundamental Study to Improve the Ignitability of Lean Mixture by Radical Induced Injection in a Constant Volume Chamber," FISITA/Helsinki, 2002.
- 4) J. B. Heywood, Internal Combustion Engine Fundamentals, pp.376-390, McGraw-Hill, New York, 1988.