Transactions of KSAE, Vol. 11, No. 4, pp.29-36 (2003)

Copyright © 2003 KSAE
1225-6382/2003/064-05

정적연소기에서의 메탄-공기 혼합기의 연소특성(2) : 비균질급기

최 승 환[1] · 전 충 환[*2] · 장 영 준[2]

부산대학교 기계공학과[1] · 부산대학교 기계공학부, 기계기술연구소[2]

Combustion Characteristics of Methane-Air Mixture in a Constant Volume Combustion Chamber(2) : Inhomogeneous Charge

Seunghwan Choi[1] · Chunghwan Jeon[*2] · Youngjune Chang[2]

[1]*Department of Mechanical Engineering, Pusan National University, Busan 609-735, Korea*
[2]*Department of Mechanical Engineering, RIMT, Pusan National University, Busan 609-735, Korea*

(Received 7 March 2003 / Accepted 3 May 2003)

Abstract : A cylindrical constant volume combustion chamber was used to investigate the flow characteristics at spark plug and the combustion characteristics of inhomogeneous charge methane-air mixture under several parameters. The flow characteristics such as mean velocity and turbulence intensity was analyzed by hot wire anemometer. Combustion pressure development measured by piezoelectric pressure transducer was used to investigate the effect of initial charge pressure, excess air ratio and ignition times on combustion pressure and combustion duration. Mean velocity and turbulence intensity had the maximum value at 200 or 300ms and then decreased to beneath 0.05m/s gradually at 3 seconds. Second mixture is accompanied by an increase in the combustion rate, and that the higher the mass which is added in the second stage injection, the faster the burn rate.

Key words : Constant-volume combustion chamber(정적연소기), Methane-air mixture(메탄-공기 예혼합기), Mass fraction burned(질량연소분율), Rate of pressure rise(압력상승률), Inhomogeneous charge(비균질급기)

1. 서 론

최근 에너지 고갈과 환경문제가 전세계적인 화두로 대두됨에 따라 희박 연소 및 저공해 대체연료의 개발에 관한 연구가 진행되고 있다. 특히 가솔린 연료보다 공해배출물이 적은 액화석유가스, 압축천연가스, 수소 등의 가스연료를 사용한 엔진에 대한 연구가 활발히 진행되고 있으며, 이러한 대체 연료 중 최근 압축천연가스가 각광을 받고 있으며 도심을 중심으로 천연가스 자동차가 운행되고 있다.[1,2]

천연가스는 옥탄가가 높아 열효율이 좋으며, 비메탄 유기가스(NMOG, non-methane organic gases)가 작고, C/H비가 낮아 CO_2를 포함한 배기배출물의 발생이 작다는 장점을 가지고 있으며, 이러한 이유로 천연가스 스파크 점화 엔진은 이미 상용화 단계에 있다.[3]

또한 최근의 연구동향은 지구 온난화 요인의 하나인 CO_2를 저감할 수 있는 핵심 요소인 엔진의 효율을 향상시킬 수 있는 희박연소 스파크 점화에 초점을 맞추고 있다. 많은 연구들로부터 연소실로의 혼합기 유입과 분사의 최적화에 의해 스파크 플러그 근방에서 혼합기가 성층화됨을 알 수 있었으며, 이러한 성층화는 희박 한계를 확장시키고 연료 효율을 향상시키는데 효과적인 방법이다. 하지만 희

*To whom correspondence should be addressed.
chjeon@pusan.ac.kr

박연소시 착화성의 악화, 열효율 및 연소속도의 저하, 연소상태의 불안정 등과 같은 문제점이 발생되며, 특히 저부하 운전시 HC의 배출량이 많으며, 이는 동일 운전 조건에서 가솔린 기관의 10배에 달한다.[4)]

성층급기와 관련된 연구로 Shiga 등[3)]은 급속압축장치(RCM, rapid compression machine)에서 균질혼합기와 분사위치에 따른 3가지 형태의 성층혼합기에 대해 실험을 수행하여 연소특성과 배기배출물 특성을 조사하였다. Furuno 등[5)]은 가스 유동과 난류가 없는 정적연소기에서 비누거품법을 이용하여, 점화 위치 근방에 상대적으로 농후한 혼합기를 형성하는 국소 성층급기에 대한 연구를 수행하였다. Lee 등[6)]은 정적연소기에서 유동특성을 가미하여 난류특성을 파악하고, 화염속도, 화염면적 및 화염형상을 조사하여, 화염전파에 미치는 난류의 영향에 대해 연구하였으며, Hong과 Kim[7)]은 정적연소기에서 혼합기의 성층화 및 유동을 이용하여 연소실내의 혼합기 유동, 연료분사 방향 및 점화위치가 연소특성에 미치는 영향에 대해 조사하였다.

정적연소기를 이용한 다양한 실험에 대해서 조사한 결과 성층혼합기에 대한 연구는 거의 진행이 되고 있지 않음을 알 수 있었다. 따라서 본 연구에서는 연료를 2단계로 충진하는 방법으로 성층급기를 구현하고자, 연소특성의 관찰이 가능한 정적연소기를 제작하였다. 또한 열선유속계를 이용하여, 스파크 플러그 간극에서의 유동특성을 파악하여 점화시기를 결정하였다. 또한 3가지 형태의 성층혼합기 패턴에 따른 연소특성을 조사하였으며, 이들 중 농후분사라고 명명되는 조건에 대해, 전체 공기과잉율 ($\lambda_{overall}$ = 1.1, 1.4) 및 연소실 최종압력($P_{overall}$ = 0.3MPa)이 일정한 조건에서 1차 충진혼합기의 공연비와 압력의 변화와 같은 초기 충진조건에 따른 연소특성에 대한 연구를 수행하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 정적연소기 및 주변장치

Fig. 1은 본 연구에 사용된 정적연소기의 개략도이다. 연소실 형상은 배기량 2.4L의 승용차용 가솔린 기관의 압축상사점 부근을 모사하여 직경 86mm, 폭 25mm(체적 145cc)로 하였으며, 이는 대상 엔진의 BTDC 38° 에 해당한다.

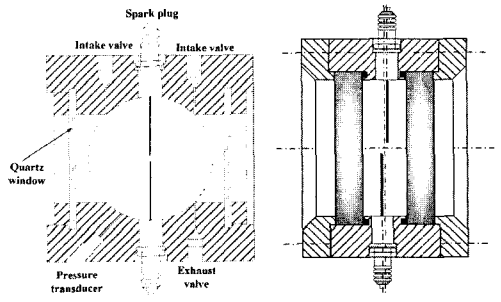


Fig. 1 Schematic diagram of CVCC

연소실 내부를 관찰하기 위해 연소실 양쪽에 두께 20mm의 FS창(fused silica window)을 각각 설치하였다. 충진혼합기 공급을 위한 흡입포트는 연소실 벽면에 접선방향으로 설치하였으며, 반대편 벽면에 분사용 흡입포트를 설치하였다. 또한 직경 1mm의 피아노 선을 이용하여 개조한 점화플러그 한 쌍을 연소실 상하 벽면에서부터 대향형으로 설치하여 연소실의 중심에서 점화하였으며, 이때 두 전극의 간극은 2mm로 고정하였다. 이 경우 2mm의 간극과 5m/s 이내의 평균유속에서의 점화에너지는 수 mJ에 불과하므로[8,9)] 본 연구에서는 점화에너지에 대한 영향은 고려하지 않았다. 연소실의 압력측정을 위해 압전형 압력변환기(Kistler 6160B)를 이용하였으며, 한번의 연소 이벤트가 종료된 후 연소가스는 진공펌프를 통해 배출된다.

Fig. 2는 실험장치의 구성도이다. 연료와 공기를 충진용 혼합탱크(A) 및 분사용 혼합탱크(B) 내에 충진하여 서로 다른 공연비를 갖는 균질혼합기를 만

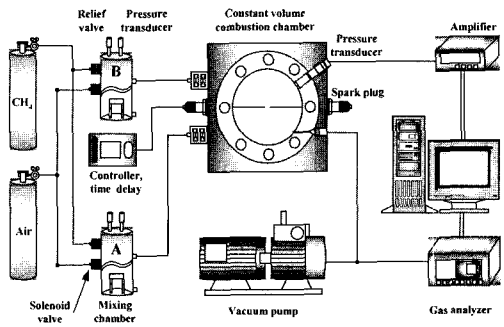


Fig. 2 Schematic diagram of experimental setup

들었다. 이때 공기과잉율은 충진되는 연료와 공기의 분압비에 의해 결정되며, 메탄과 공기의 분압은 1kPa 해상도의 다이어프램식 압력게이지를 사용하여 제어하였다.

유동특성 해석을 위해 정온도형 열선유속계(CCA : constant temperature hot wire anemometer, IFA-300)를 이용하였으며, 마이크로 마노미터와 TSI model 1125 교정기를 이용하여 3차의 다항식으로 근사하였으며, 이때의 표준편차는 0.45이다. 속도 데이터는 각 조건에 대해 100회씩 앙상블 평균을 취하여 구하였다.

2.2 실험방법

점화위치에서의 유동특성을 파악하기 위해 스파크 플러그 간극에 열선유속계 프로브를 위치시킨 후, 먼저 최종압력의 50%에 해당하는 초기 충진 혼합기를 공급한 후, 유동이 준정적(quiescent)상태가 되는 10초 후 나머지 압력의 혼합기로 연소실을 충진하였으며, 이때 최종압력은 0.3MPa로 고정하였다.

또한 연소실험의 과정은 다음과 같이 진행하였다. 한번의 연소가 종료된 후 진공펌프를 이용하여 연소실내의 잔류 배기가스를 배출한다. 실험을 재개할 온도가 되면, 진공펌프를 이용하여 연소실을 진공 상태로 한 후 충진용 혼합탱크와 연결되어 있는 솔레노이드 밸브에 전압을 인가하여 설정된 압력으로 충진한다. 충진용 혼합기의 분사 종료 후 10초가 경과된 후 분사용 혼합기가 연소실 내로 충진된다. 점화시기에 따라 연소가 진행되고, 연소가 종료되면 진공펌프와 직경 2mm의 배기포트를 통해 배기가스가 배출되게 된다.

먼저 농후분사(RI, rich injection), 균질분사(HI, homogeneous injection), 희박분사(LI, lean injection)로 명명되는 성층혼합기 패턴에 대한 실험을 수행하였다. 농후분사는 최종압력의 50%에 해당하는 압력의 공기로 연소실을 충진하고, 유동특성이 거의 소멸되는, 10초 후에 농후한 혼합기(λ_{inj} = 0.497)를 분사하는 경우이며, 균질분사는 초기 충진혼합기와 분사혼합기의 공기과잉율이 동일한(λ_{ini} = λ_{inj} = 1.1) 경우이며, 희박분사는 농후분사와 반대의 경우(λ_{ini} = 0.497, λ_{inj} = ∞)이다. 이때 전체 공기과잉율은 1.1이며, 최종압력은 0.3MPa, 점화시기는 300, 500, 1000ms로 하였다. 성층혼합기 패턴에 따른 실험조건은 Table 1과 같다.

또한 초기 충진압력의 변화에 따른 영향을 조사하기 위해 농후분사 조건에 대해 초기 충진압력을 최종압력의 25%(0.075MPa), 50%(0.15MPa), 75%(0.225Mpa)로, 초기 충진혼합기의 공기과잉율(λ_{ini})을 2.0, 3.0, 5.0, ∞의 조건으로 하여 실험을 수행하였다. 이때 전체 공기과잉율은 1.1, 1.4이며, 연소실 최종 충진압력은 0.3MPa, 점화시기는 300, 500, 1000 ms로 하였으며, 초기 충진압력의 변화에 따른 실험조건은 Table 2와 같다.

Table 1 Excess air ratio of inhomogeneous mixtures

Pattern	HI	RI	LI
λ_{ini}	1.1	∞	0.497
λ_{inj}	1.1	0.497	∞
$P_{ini} = P_{inj} = 0.15MPa$ (50%), $\lambda_{overall} = 1.1$, $\tau_{ig} = 300, 500, 1000ms$			

Table 2 Excess air ratio of inhomogeneous mixtures for rich injection

P_{ini} (MPa)	λ_{ini}	$\lambda_{overall} = 1.1$ λ_{inj}	$\lambda_{overall} = 1.4$ λ_{inj}
0.075 (25%)	2	0.950	1.269
	3	0.896	1.179
	5	0.855	1.114
	∞	0.799	1.024
0.150 (50%)	2	0.739	1.066
	3	0.642	0.888
	5	0.578	0.778
	∞	0.497	0.647
0.225 (75%)	2	0.423	0.706
	3	0.320	0.486
	5	0.261	0.378
	∞	0.196	0.271
RI condition $P_{overall} = 0.3MPa$, $\tau_{ig} = 300, 500, 1000ms$			

3. 실험결과 및 고찰

3.1 유동특성해석

유동실험은 정적연소실 내의 압력을 모니터링 하면서 실험을 수행함으로써 신뢰성을 높였으며, 혼

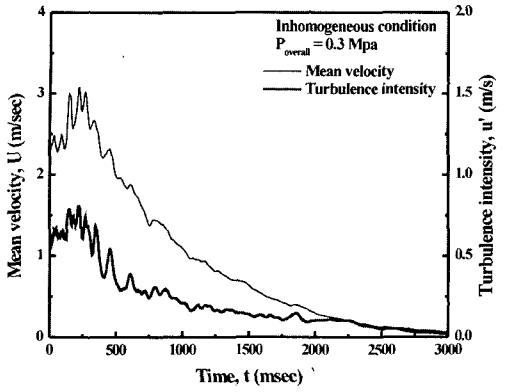


Fig. 3 Flow characteristics at spark plug

합기 최종압력은 0.3MPa이 되도록 하였다. Fig. 3은 스파크 플러그 간극에서의 평균속도와 난류강도의 결과이다. 두 경우 모두 속도가 일정한 값까지 증가한 후 점점 감소하여 3000ms 이후부터는 평균속도와 난류강도는 거의 존재하지 않음을 예측할 수 있다. 평균속도와 난류강도의 최대값이 나타나는 시점은 분사 종료 후 200~300ms 근방이며, 3000ms에서의 평균속도와 난류강도는 0.05m/s 이하의 값으로 감소됨을 알 수 있었다. 이러한 유동 결과로부터 점화시기는 유동의 대소에 따라 대표값으로 300, 500, 1000ms로 선정하였다.

3.2 성층급기 패턴에 따른 연소특성

성층혼합기 패턴에 따른 연소특성을 조사하기 위해 균질분사(HI), 농후분사(RI), 희박분사(LI)에 대해 실험을 수행하였으며, 성층급기 패턴에 대한 개략도는 Fig. 4와 같다. 초기 충진압력은 최종압력(0.3MPa)의 50%이며, 공기과잉율 1.1, 점화시기 300, 500, 1000ms에 대해 실험을 수행하였다.

Fig. 5는 점화시기 300ms에 대한 균질, 농후, 희박분사에 대한 연소압력과 질량연소분율, 압력상승율

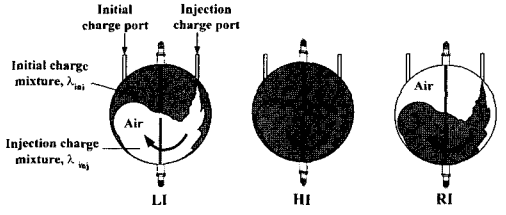
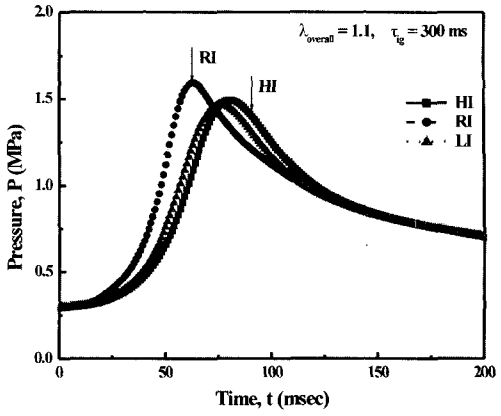
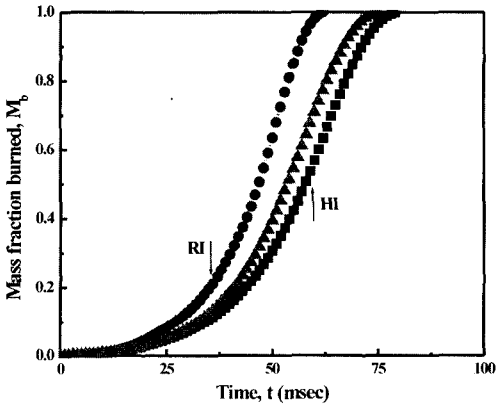


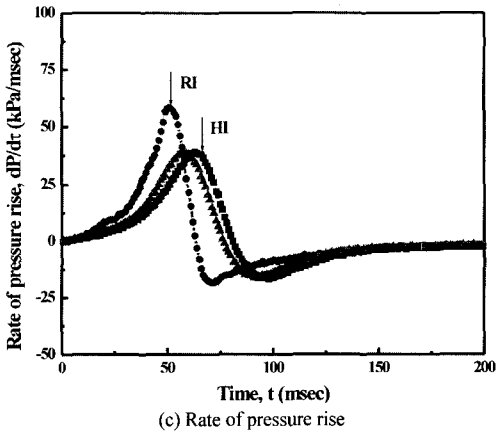
Fig. 4 Schematic diagram of stratified charge



(a) Pressure



(b) Mass fraction burned



(c) Rate of pressure rise

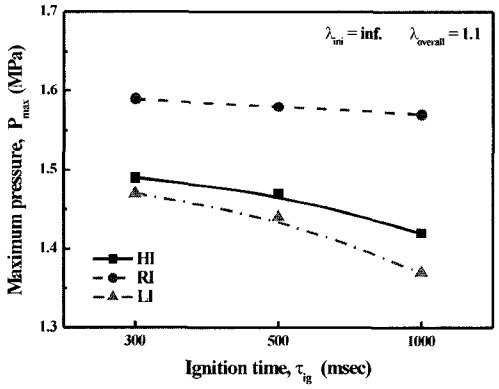
Fig. 5 Result of pressure analysis ($P_{overall}$ = 0.3MPa, $\lambda_{overall}$ = 1.1, τ_{ig} = 300ms)

의 결과를 나타낸 것이다. 최고 연소압력은 농후분사의 경우가 가장 높으며, 균질분사, 희박분사 순으로 나타났다. 균질분사는 희박분사보다 1.5~3.4%

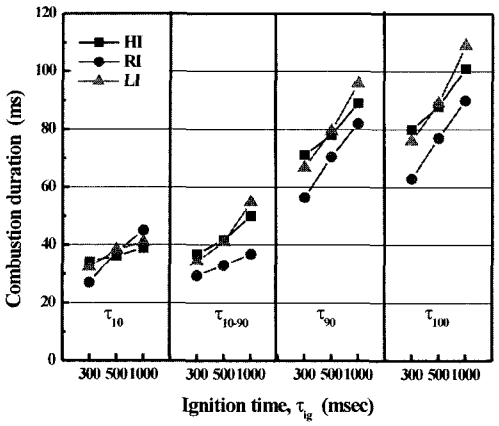
높은 결과를 나타내고 있으며, 농후분사 역시 희박분사에 비해 8.8~14.1% 높은 값을 나타낸다.

Fig. 6은 최고 연소압력과 연소기간에 대한 전체 결과를 도시한 것이다. 여기서 τ_{10}은 질량연소분율의 10%에 도달하는데 소요되는 시간으로 스파크 에너지 방출로부터의 기간을 의미하는 점화지연기간이며, $\tau_{10\text{-}90}$은 급속연소기간이며, τ_{90}은 혼합기의 대부분을 연소시키는데 요구되는 기간으로 화염발달기간이며, τ_{100}은 최고연소압력에 도달하는 시간으로 정적연소기에서는 총 연소기간으로 정의된다.

연소기간 역시 거의 모든 조건에서 농후분사의 경우가 가장 짧게 나타나며, 특히 $\tau_{10\text{-}90}$의 결과로부터 다른 성층혼합기 패턴에 비해 농후분사의 경우 급속연소가 이루어짐을 확인 할 수 있었다. 또한 모든 경우에 대해 300ms에서는 균질분사에 비해 희박분사의 경우 연소기간이 짧게 나타나지만, 1000ms에서는 더 길게 나타나는데, 이는 점화시기가 지연됨에 따라 성층혼합기의 농도분포, 즉 성층혼합기 패턴의 변화에 따른 결과로 사료되며, 이에 대한 정확한 분석은 NO_2 PLIF 등의 방법을 이용한 혼합기 농도분포 특성에 관한 연구를 통해 분석해야 할 것으로 판단된다.



(a) Maximum pressure



(b) Combustion duration

Fig. 6 Effects of stratified mixture pattern and ignition time on maximum pressure and combustion duration ($P_{overall}$ = 0.3MPa, $\lambda_{overall}$ = 1.1)

이상과 같이 성층혼합기 패턴에 따른 연소에서는 농후분사 패턴의 경우가 가장 좋은 연소 특성을 나타냄을 확인 할 수 있었으며, 농후분사 패턴에 대해 초기 충진압력과 공기과잉율과 같은 초기 충진조건의 변화가 연소특성에 미치는 영향을 조사하였다.

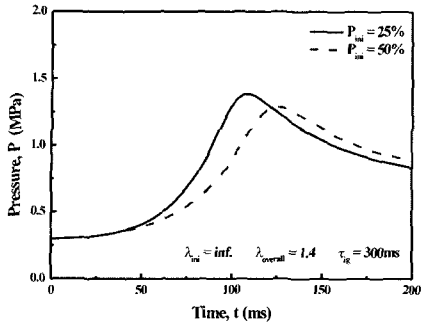
3.3 초기 충진조건에 따른 성층연소특성

초기 충진압력과 공기과잉율 조건이 성층 연소특성에 미치는 영향을 살펴보기 위해 농후분사 패턴에 대해 초기 충진압력을 최종압력의 25, 50, 75%와 초기 충진혼합기의 공기과잉율 2.0, 3.0, 5.0, ∞(inf.)에 대해, 전체 공기과잉율 1.1, 1.4, 점화시기 300, 500, 1000ms에 대해 실험을 수행하였다. 다른 조건과는 달리, 순수한 공기로 초기 충진압력의 75%를 공급한 경우, 불안정한 연소결과를 나타내어 본 논문에서는 제외하였다.

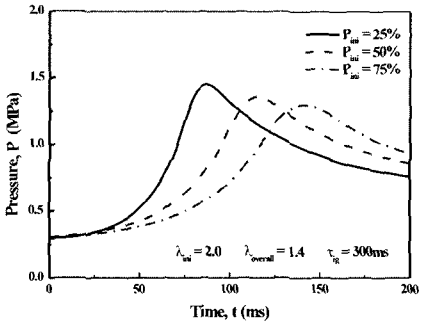
Fig. 7은 초기 충진혼합기의 공기과잉율을 일정하게 하였을 때, 초기 충진압력의 변화에 따른 압력선도를 전체 공기과잉율 1.4, 점화시기 300ms에 대해 나타낸 것이다. 모든 경우 초기 충진압력 25%의 경우가 최고 연소압력이 가장 높으며, 최고 연소압력 도달시간도 짧으며, 50%, 75%의 순서로 나타나고 있음을 알 수 있다. 이는 2차로 분사되는 분사압력이 증가할수록 유동특성의 영향이 증가되어, 연소특성이 향상되기 때문으로 사료된다.

Fig. 8은 초기 충진압력을 고정하였을 때, 초기 충진혼합기의 공기과잉율의 변화에 대한 압력 선도를 나타낸 것으로 Fig. 7을 재구성한 것이다. 전반적으로 초기 충진혼합기의 공기과잉율이 3.0인 경우 가장 좋은 연소특성을 보이며, 2.0, 5.0, ∞의 순서로 나타나고 있음을 관찰할 수 있다.

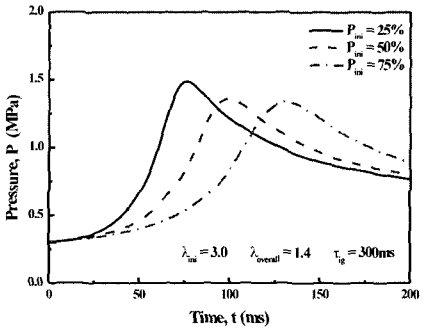
Fig. 9는 전체 조건에 대한 최고 연소압력을 나타



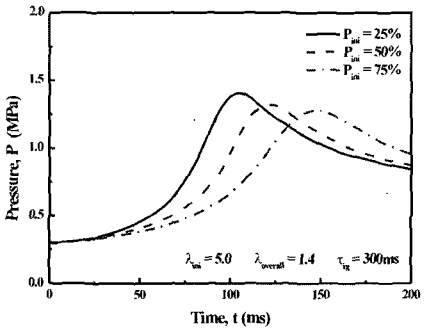
(a) λ_{ini} = inf.



(b) λ_{ini} = 2.0

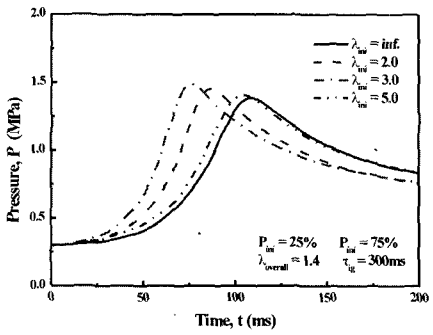


(c) λ_{ini} = 3.0

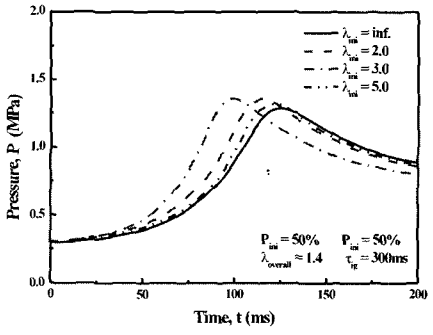


(d) λ_{ini} = 5.0

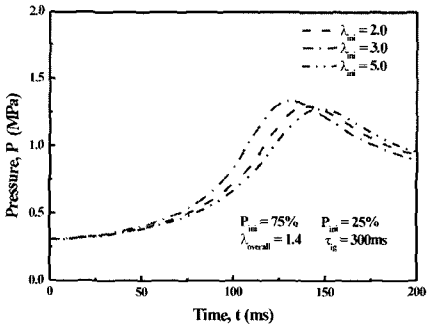
Fig. 7 Effect of pressure of initial charge mixture on combustion pressure



(a) 25%



(b) 50%

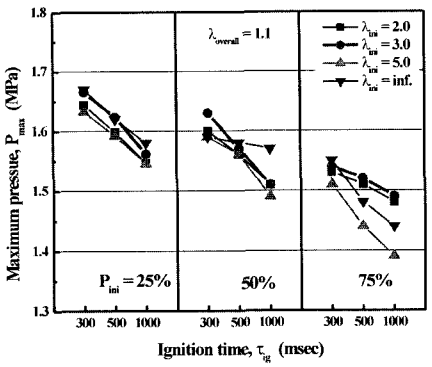


(c) 75%

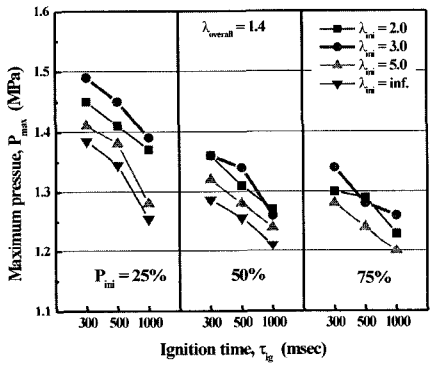
Fig. 8 Effect of excess air ratio of initial charge mixture on combustion pressure

낸 결과이다. 전체 공기과잉율 1.1의 조건에 대한 결과인 Fig. 9(a)에서 각 조건에 대해 λ_{ini} =3.0의 조건에서 대부분 높은 최고 연소압력을 나타내지만, 복잡한 양상을 보인다. 하지만 더 희박한 조건인 전체 공기과잉율 1.4의 경우(Fig. 9(b))에는 최고 연소압력이 초기 충진혼합기의 공기과잉율 3.0이 가장 높으며, 2.0, 5.0, ∞의 순서로 나타남을 관찰할 수 있다.

Fig. 10은 전체 조건에 대한 최고연소압력 도달기간을 나타낸 결과이다. 모든 경우 λ_{ini} =3.0의 경우

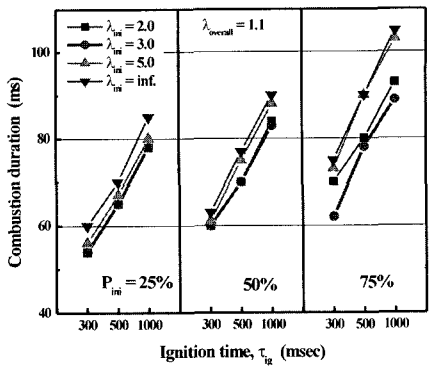


(a) $\lambda_{overall}$ = 1.1

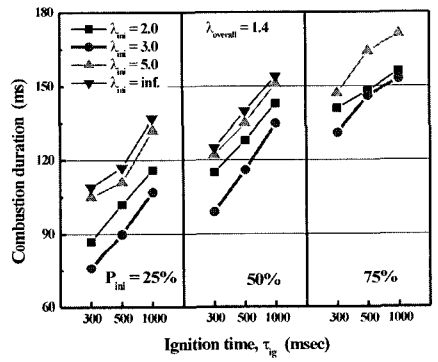


(b) $\lambda_{overall}$ = 1.4

Fig. 9 Effect of initial charge pressure and excess air ratio of initial charge mixture on maximum combustion pressure



(a) $\lambda_{overall}$ = 1.1



(b) $\lambda_{overall}$ = 1.4

Fig. 10 Effect of initial charge pressure and excess air ratio of initial charge mixture on combustion duration

최고 연소기간이 짧으며, 2.0, 5.0, ∞의 순서로 나타난다.

Fig. 7~10의 결과를 종합해보면, 동일한 초기 충진 공기과잉율 조건에서, 초기 충진혼합기의 압력비가 증가함에 따라, 즉, 농후해짐에 따라, 최고 연소압력이 감소되는데 이는 연소실 내에서의 혼합부족에 의한 결과로 사료된다. 일반적으로 연소 생성물은 산화에 의해 생성되는 높은 화학적 엔탈피를 갖게 된다. 그러나 연소기 내에서의 혼합의 결핍은 이를 방해하며, 농후한 중심 영역에서의 혼합기는 완전한 산화를 할 수 없게 되며, 이로 인해 낮은 최고 연소압력을 나타내게 되며, 이는 최고 연소압력 도달 기간에도 영향을 미치기 때문인 것으로 생각된다.

이상의 결과로부터 직접분사식기관에 공기과잉율 3.0 근방의 초기 충진혼합기를 흡입행정에 공급하고, 농후한 분사혼합기를 압축행정에 분사하는 2단 분사 방식의 적용을 통해 최고 연소압력의 상승과 연소기간의 단축을 동시에 만족시킬 수 있을 것으로 생각되며, 특히 기체연료를 사용하는 희박연소 기관에서는 더 좋은 결과를 취할 수 있는 방법으로 생각되며 이에 대한 추가적인 연구가 요망된다.

4. 결 론

본 연구는 정적연소실에서 성층혼합기의 연소특성을 파악하기 위해 먼저 열선유속계를 이용하여 점화위치에서의 평균속도와 난류강도를 취득하였으며, 성층혼합기 패턴에 따른 연소특성을 조사하였다. 또한 성층혼합기 패턴의 결과로부터, 초기 충진혼합기의 공기과잉율과 초기 충진압력의 변화에 따른 연소 실험을 실시한 결과 다음과 같은 결론을

취득하였다.

1) 열선유속계를 이용한 유동특성 해석으로부터 평균속도와 난류강도는 약 200~300ms 근방에서 최대값을 형성한 후 점점 소멸되어 3000ms에서는 평균속도와 난류강도가 0.05m/s 이하의 값으로 감소되었다.

2) 성층혼합기의 패턴에 따른 연소특성 결과로부터 먼저 공기를 충진하고 농후한 혼합기를 분사하는 농후분사의 경우, 최고연소압력이 가장 높았으며 이때 희박분사에 비해 9.8~14.1% 높은 값을 나타내었으며, 최고 연소압력 도달시간도 가장 짧게 나타났다.

3) 농후분사 조건에서, 3가지 조건의 초기 충진압력에 대한 연소특성 결과로부터 초기 충진압력의 비율이 낮을수록 좋은 연소특성을 나타냄을 알 수 있었다.

4) 농후분사 조건에서, 4가지 초기 충진혼합기의 공기과잉율에 따른 연소특성 결과로부터 공기를 충진하는 일반적인 방법보다는 $\lambda_{ini} = 3.0$의 경우 연소에 좋은 영향을 미침을 알 수 있었다.

5) 기체연료를 사용하는 직접분사식 기관에 2단 분사 방식의 적용으로, 초기 충진혼합기의 공기과잉율 및 압력 제어를 통해 연소압력의 상승에 따른 출력 향상 효과를 기대할 수 있을 것이다.

후 기

본 연구는 청정생산기술사업의 지원에 의해 수행된 연구결과로, 관계 기관에 감사 드립니다.

References

1) T. Kato, K. Saeki, H. Nishide, T. Yamada, "Development of CNG Fueled Engine with Lean Burn for Small Size Commercial Van," JSAE Review, Vol.22, pp.365-368, 2001.
2) B. Ursu, G. C. Perry, "Natural Gas Powered Heavy Duty Truck Kemonstration," SAE 961669, 1996.
3) S. Shiga, S. Ozone, H. T. C. Machacon, T. Karasawa, H. Nakamura, T. Ueda, N. Jingu, Z. Huang, M. Tsue, M. Kono, "A Study of the Combustion and Emission Characteristics of Compressed-Natural-Gas Direct-Injection Stratified Combustion Using Rapid-Compression-Machine," Comb. and Flame, Vol.129, pp.1-10, 2002.
4) R. M. Frank, J. B. Heywood, "The Effect of Temperature on Hydrocarbon Injection Emissions from a Spark-Ignited Direct Piston Engine," SAE 910558, 1991.
5) S. Furuno, S. Iguchi, T. Inoue, "Lean Combustion Characteristics of Locally Stratified Charge Mixture : Basic Studies of In-vessel Combustion Ignited by Laser," JSAE Review, Vol.16, pp.357-361 , 1995.
6) S. J. Lee, J. T. Lee, S. Y. Lee, "A Study on the Influence of Turbulence Characteristics on Flame Propagation in Swirl Flow Field," KSME(B), Vol.20, No.10, pp.3282-3292, 1996.
7) M. S. Hong, K. S. Kim, "A Study on Direct Injection Stratified Charge Combustion with Spark Ignition in Constant Volume Bomb," Transactions of KSAE Vol.2, No.5, pp.30-40, 1994.
8) B. Lewis, G. von Elbe, Combustion, Flames and Explosions of Gases, pp.333-413, Academic Press Inc., 1987.
9) J. B. Heywood, Internal Combustion Engine Fundamentals, McGraw-Hill, pp.427-437, 1988.