

메타놀의 희박연소를 위한 혼합기의 성층화와 연소특성에 관한 연구

(第 1 報 : IDI형 정적연소기에서의 혼합기 연소특성)

박 춘 근* · 윤 수 한**

A Study on the Combustion Characteristics and Stratification for Lean Burn of Methanol

(The Combustion Characteristics
in a IDI Type Constant Volume Combustion Chamber)

C. K. Park* · S. H. Yoon**

Key words : Constant volume combustion chamber with sub-chamber(부실식 정적연소기), Passagehole(연락공), Stratified mixture(성층혼합기), Lean inflammability limit(희박가연한계), Capacitor discharge ignition system(축전기방전식 점화장치), High frequency ignition system(고주파점화장치)

Abstract

In this paper, we find a method to improve ignitability using methanol which is prospective as an alternative fuel. The constant volume combustor is divided into main chamber and sub-chamber. These two chambers are linked by an adapter which is shaped like a cup. We also compare CDI to HIS that is revised in our laboratory for making a scrutiny into the effects of ignition characteristics. Besides, we analyze a flame propagation process in the main and sub-chamber through taking pictures 10,000 frames per second by high speed camera at the state being fabricated quartz glass aside main and sub-chamber.

1. 서 론

국내외적으로 연료절감과 유해가스 저감을 위

한 희박연소에 관한 연구는 70년대부터 시도되어 배기의 개선은 얻을 수 있었지만, 혼합기가 희박해질수록 화염전파 속도가 느리고, 연소 상태가 불안

* 동아대학교 기계공학과 교수 (원고접수일 : 97년 4월)
** 동명전문대학 기계과 교수

정하며 연소 최고압력이 떨어지는 등의 문제로 인하여 출력을 개선하지는 못하였다. 그러나 80년대에는 성층연소의 개념이 회박연소에 도입되어 여러가지 문제점들을 개선시키기 위한 연구가 활발하게 이루어지고 있으나 실제엔진에의 적용을 위해서는 아직 개선되어야 할 문제들이 많다. 이에 많은 연구자들은 회박 연소의 안정화, 회박 가연한계 확장 및 성능 개선을 위해 점화방법 개선, 점화시기, 연소실 형태, 혼합기의 생성 및 유동 형태, 화염의 전파과정, 연료의 분사 방법 및 층돌분류 생성, 벽면 열이용 방법, 적용연료 변화 및 첨가물 혼합 등을 연구 대상으로 하여 지속적으로 보고하고 있다.^{1,2)} 그 중에서도 부실식 성층급기 방식은 주실과 부실이 연락공으로 연결되어 있어 연락공에서 다소의 열손실이 있으나 연락공의 크기와 길이, 형상의 변화에 의해 열손실을 최소화 시킬 수 있다. 부실 내에 연료를 분사하면 주류는 주실로 분출되지만 부실의 크기가 상대적으로 매우 작기 때문에 착화가능한 혼합기를 이루고 여기에 점화시키면 안정된 화염이 형성되어 매우 빠른 속도로 주실에 유입되므로 주실이 회박 혼합기 상태라 하더라도 안정된 연소가 가능하게 된다. 이 때 연락공의 각도에 따라 혼합기의 유동이 달라지게 되어

연소시간에 영향을 미치게 된다. 따라서, 착화성이 크게 개선되며 유동에 의해 화염 전파속도가 빨라져 연소시간이 짧아지고 유해 배출물 저감 효과도 기대할 수 있게 된다. 따라서, 본 연구에서는 부실식 정적연소기에 대체연료인 메타놀을 고압으로 분사, 성층화하여 연소시킨 후 연소특성을 구명하고, 이를 통한 회박가연한계의 확대, 안정연소, 출력향상, 화염전파의 거동 예측 등을 위한 기초정보를 제공하는데 그 목적이 있다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

실험장치는 정적연소실, 점화장치, 공기공급장치, 연료공급장치, 정압연료분사장치, 각종 제어 및 계측장치로 구성되어 있고, Fig.1은 본 실험장치의 개략도를 나타낸다.

원통형 정적연소실은 알루미늄 2024합금을 이용하여 제작하였고, Fig.2와 같이 직경 70mm, 폭 50mm의 주실과 직경 30mm, 폭 50mm의 부실 및 주·부실을 연결하는 어댑터로 구성되어 있다. 어댑터는 컵(cup)형상의 부실(7.8cc) 및 연락공으로

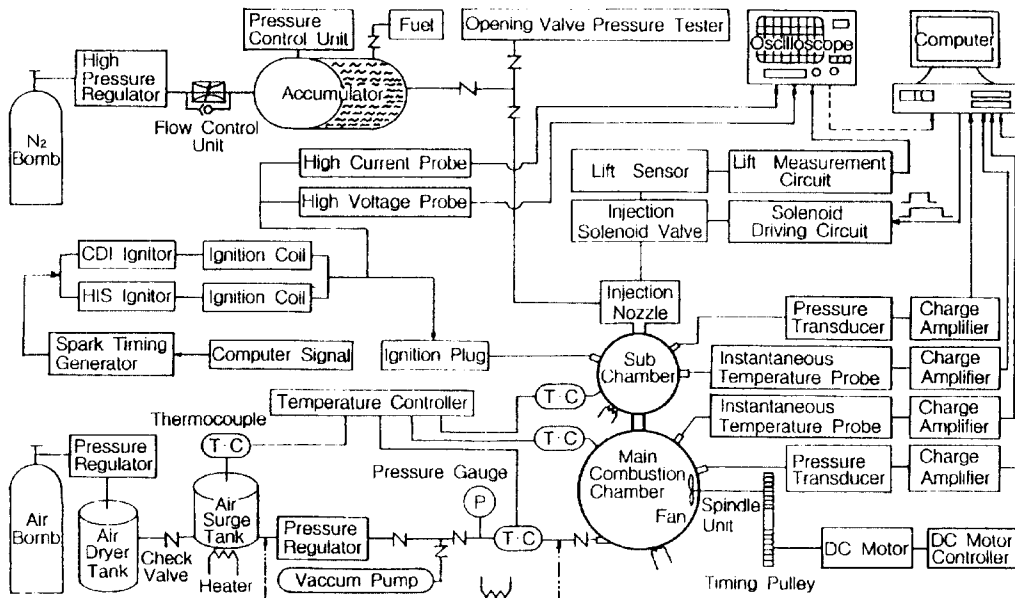
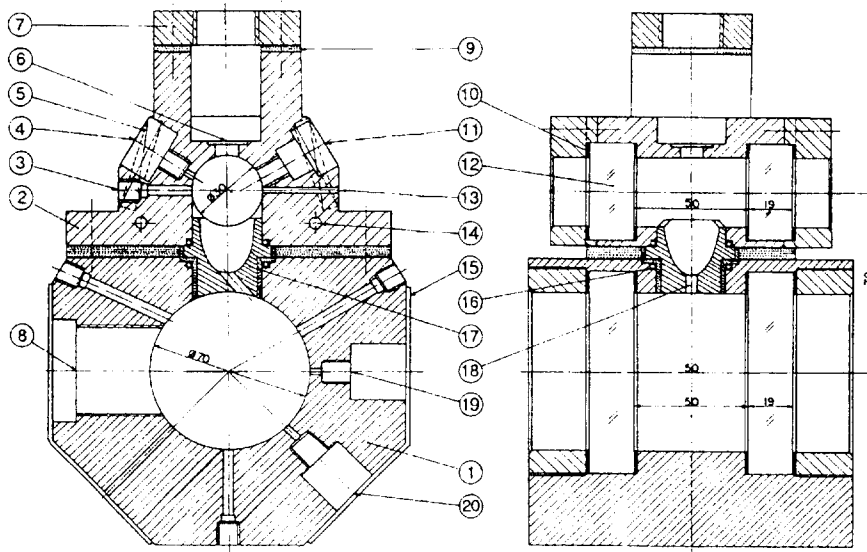


Fig. 1 Overall schematic diagram of experimental apparatus



- | | | |
|---------------------------------|-------------------------|---------------------|
| 1. Main combustion chamber | 2. Sub chamber | 3. Thermocouple |
| 4, 19. Pressure transducer | 5. Ag cell heater | 6. Injection nozzle |
| 7. Nozzle body attsch plate | 8. Turbulence generator | 9. Bakelite |
| 10. Gasket | 11. Ignition plug | 12. Quartz glass |
| 13. Instantaneous temp. probe | 14. Ceramic heater | 15. Plate heater |
| 16. O - ring | 17. Chamber adapter | 18. Passagehole |
| 20. Inlet/Outlet of air and gas | | |

Fig. 2 Schematic diagram of combustion chamber

이루어져 있다.

연락공의 크기는 松井³⁾, 中園 등⁴⁾, 金 등⁵⁾의 연구와 실제엔진에서의 크기를 고려하여 직경 5.5mm, 길이 10mm로 설계하였다. Table 1은 실험에 사용된 4종(A형 : 30° 단공, B형 : 40° 단공, C형 : 30° 2공, D형 : 40° 2공)의 어댑터 및 연락공의 형상과

치수를 나타낸 것이다.

주실과 부실의 양측 면에는 화염전과과정을 가시화 할 수 있도록 두께 19mm의 석영유리를 설치하였고, 연소실내 압력이 10MPa까지 기밀이 유지됨을 확인하였다. 부실내의 혼합기에 점화시키기 위해 설치된 플러그는 위치 이동이 가능하도록 하

Table 1 Configuration and specification of the passagehole

Type	A	B	C	D
Configuration				

였으나 본 연구에서는 소형 상용플러그를 부실 벽면에 설치하였다. 주실과 부실에는 연료의 기화와 분위기 온도조절을 위해 히터를 설치하였다. 주실에는 100W용량의 판히터 2개를, 부실에는 주실과의 온도차이를 둘 수 있도록 130W용량의 세라믹 히터 2개와 40W용량의 Ag-Cell형 히터 4개를 부실의 내·외부에 심었다. 온도의 제어범위는 0~500℃이며 제어오차는 ±0.5℃이다. 점화장치는 축전기에 충전되는 충전전압을 변화시켜 점화에너지의 크기변화가 가능하도록 제작한 축전기 방전식 점화장치(이하 CDI로 표시함)와 점화에너지의 구성요소인 용량성 성분과 유도성 성분의 가변을 위하여 설정회수만큼의 다회수 점화가 가능하도록 제작한 고주파점화장치(이하 HIS로 표시함)를 각각 사용하였다. 고압용기에 충전된 공기는 감압시켜 탈습한 후 공기예열탱크에서 설정온도까지 가열시켜 연소실에 설정압력으로 주입되며, 연소 후 배기가스는 진공펌프에 의해 배출시킨다. 어큐물레이터에 장입된 연료는 고압질소가스에 의해 가압되어 분사노즐에 이르기까지 정압을 유지하며, 연료는 솔레노이드에 의해 설정된 연료공기 당량비(이하 당량비로 함)에 해당하는 연료량만큼 분사되며, 급속균일분사와 후적을 최소화하기 위해 분사노즐의 설정압력과 어큐물레이터 압력과의 차이를 10.78MPa로 하여 니들이 밸브시트를 밀착시킬 수 있도록 스프링 장력을 조절하였다. 또한, 분사시의 분사시점과 종점의 재현성을 파악할 수 있도록 니들리프트 센서를 솔레노이드 상단에 부착하여 오실로스코프에서 확인하였다. 분사노즐은 단공형 핀틀노즐을 사용하였고, 분공경은 1.0mm이다. 분사노즐 내부에 존재하는 연료의 온도 상승을 최소화하기 위해 노즐홀더 하부에 냉각수 순환장치를 설치하였다. 연료분사는 서로 폭이 다른 1차, 2차 펄스를 동시에 PC에서 μs 단위로 인가하여 조정한다. 이 때 1차펄스는 솔레노이드의 흡인 전류 상승을, 2차펄스는 유지전류를 제어하는 기간이 된다. 이에 따라, 분사노즐의 니들은 솔레노이드에 의해 상승되어 연료가 분사되고, 분사 종료시는 노즐 내의 스프링에 의해 니들은 복귀된다. 연소실 내의 압력변화는 주 부실의 측면의 압력변환기(PE200kW, Kyowa Co.)로 측정하며, 증

폭기를 거쳐 A/D변환기를 통해 PC에 입력된다. 점화시기는 PC에서 솔레노이드에 인가되는 펄스의 ON시점을 기준하여 리타더(retarder)로서 μs 단위로 지연시킨다.

2.2 실험방법

실험은 탈습된 공기를 373K로 가열하여 연소실에 0.5MPa로 주입시키며, 연소실의 벽면 온도 역시 373K로 유지시킨다. 연료분사압력은 10.78MPa로 설정하였으며 연료온도는 5~10℃를 유지하였다. 연락공의 각도(이하 PHA ; passagehole angle로 표시)는 주실로 유입되는 화염의 유동과 연소속도의 축진을 도모하기 위하여 수직축을 기준으로 30°, 40°로 변화시킨다. 연료는 시약용 니트 메타놀(순도 99.95%이상)을 사용하였다. 연료분사와 점화시기는 PC의 신호에 의해 조정하였다. 점화는 PC로부터의 신호가 점화신호 제어장치에 입력되면 실행됨으로 제어된 후, 점화장치에 공급되어 점화플러그에서 방전된다. 이 때, 당량비는 1.0에서 회박가연한계까지 조절한다. 가연한계는 20회 분사하여 주실에 실화가 전혀 없는 하한값을 취하였다.

3. 실험결과 및 고찰

연락공의 각도에 따른 연소특성의 분석을 위해 연소압력 데이터에 의한 특성시간을 Fig.3과 같이 정의한다.

그림에서 A점은 점화시기, B점은 압력상승 시작시기, C점은 최고압력 도달시기로서 본 연구에

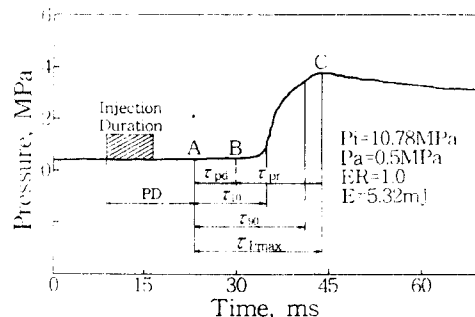


Fig. 3 Typical pressure signal and definition of symbol

서는 C점을 연소가 종료되는 시점으로 판단하였다. 연료분사 개시부터 점화시기까지의 기간은 예혼합기간으로서 PD(pre-mixed duration)로 정의한다. A점에서 B점까지의 기간은 압력발생지연시간 τ_{pd} , A점에서 C점까지를 연소시간 τ_{pmax} , B점에서 C점까지를 압력상승시간 τ_{pr} 로 각각 정의한다. 또, 초기압력에서 연소최고압력의 10%까지 상승하는데 소요되는 시간을 τ_{10} , 90%까지 상승하는데 소요되는 시간을 τ_{90} 으로 각각 정의하였다. 본 연구에서의 연료분사량은 솔레노이드에 의해 제어된다. 인가된 펄스에 의해 솔레노이드 구동장치가 작동되며, 이 때 유기되는 자속에 의해 솔레노이드의 아마추어는 당겨지고, 노즐의 니들이 상승되면서 연료는 분사된다.

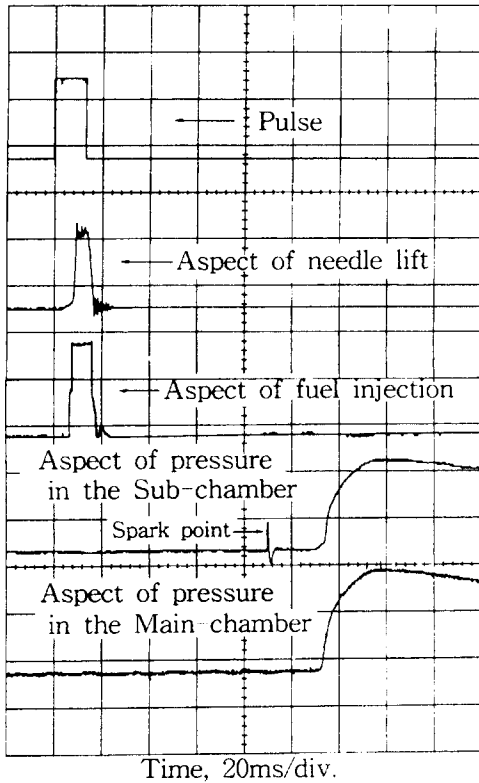


Fig. 4 Characteristics of needle lift, injection and pressure

Fig.4는 인가된 펄스에 따른 니들의 상승 과정 및 연료의 분사 시점과 종점을 리프트 센서와 포토

커플러를 이용하여 채취한 결과의 일례이다. 연료를 분사하기 위한 펄스가 인가된 후 일정기간을 리타더에 의해 지연시킨 다음, 펄스 폭 2ms의 점화신호를 인가한다. 이 때 CDI 점화장치에서 고전압이 형성되어 점화플러그에서 방전되어 부실의 혼합기에 점화된다. 부실에서 연소가 시작되면 화염은 연락공을 통해 주실로 분출되어 주실은 빠른 속도로 연소하게 된다. 동일한 조건에서 분사된 연료량의 재현성을 확인하기 위하여 초기압력(P_0) 0.5MPa, 초기온도(T_0) 373K의 상태에서 10.78MPa로 메타놀을 분사하여 예혼합기가 형성되도록 3분이 경과한 경우와 마이크로실린저(50mm³, 최소누극 0.5mm³)로 정밀계량한 연료를 공급하여 3분이 경과한 경우로 각각 10회의 연소를 행한 결과, 연소최고압력 평균값은 각 당량비에서 거의 동일하며 변동범위는 0.4~0.9%의 정도로 매우 적었다.⁶⁾

본 실험의 범위에서 착화율은 동일조건에서 일정횟수의 연소를 행한 후, 부실의 화염이 주실로 유입되어 주실 내의 혼합기가 완전연소되는 비율

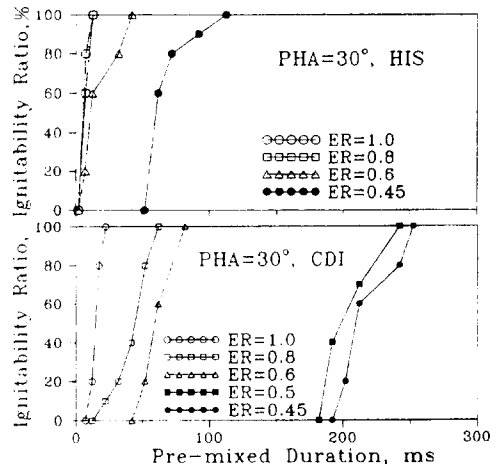


Fig. 5 Relations between ignitability ratio and pre-mixed duration

로 정의하였다. Fig.5는 PD에 따라 20회 실험하여 얻어진 착화율에 대한 예로서 PHA=30°인 조건에서 CDI 점화장치와 HIS 점화장치를 비교한 경우로, PD는 0~300ms로 한정하여 실험하였다. 당량비가 높을수록 동일 착화율에 대한 PD는 짧아

지는 경향이 있으나 CDI 점화장치에 비해 HIS 점화장치를 사용한 경우가 훨씬 짧게 나타남을 볼 수 있다. 착화율이 80%인 경우의 PD가 CDI 점화장치에서는 당량비 1.0~0.6의 영역에서 17~72ms, 당량비 0.45에서는 232ms를 보이는 반면, HIS 점화장치에서는 당량비 1.0~0.6의 영역에서 7~32ms이며 당량비 0.45에서는 72ms였다. 착화율이 100%인 PD가 CDI 점화장치에서는 당량비 1.0~0.6의 영역에서 22~82ms이며, 당량비 0.45에서는 242ms로 나타난 반면, HIS 점화장치에서는 당량비 1.0과 0.8의 조건에서는 12ms를, 당량비 0.6인 경우에는 32ms를, 0.45에서는 112ms를 각각 나타내었다. 이로 미루어 보면, HIS 점화장치에서는 CDI 점화장치에 비해 모든 당량비에서 착화에 필요한 PD가 짧아지며 그 현상은 당량비가 희박해 질수록 현저하게 나타남을 알 수 있다. 이는 HIS 점화장치에서 발생하는 다회수의 방전에 의해 생성되는 커널(kernel)이 점화플러그 주위의 혼합기와 쉽게 점화될 수 있는 상태로 될 때까지 지속되기 때문인 것으로 생각된다.

Fig.6은 당량비 변화에 따라 주실에 실화가 전혀 없는 안정 연소 PD를 연락공 각도 및 점화방법에 따라 나타낸 것이다. PD는 당량비가 1.0인 경우 CDI 점화장치는 12~22ms를 보인 반면, HIS 점화장치는 12ms를 보여 비교적 짧게 나타났으나 당량비가 적어질수록 증가하고 있다. CDI 점화장

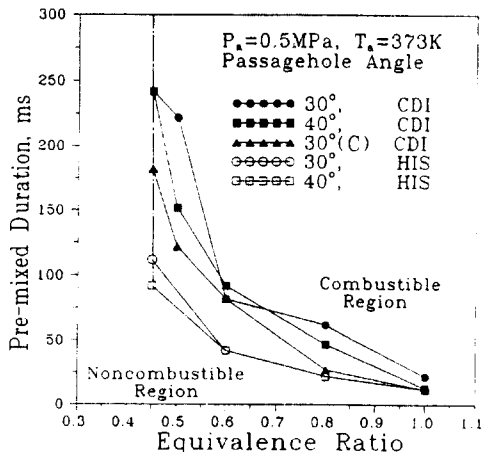


Fig. 6 Relations between 100% ignitable pre-mixed duration and equivalence ratio

치의 경우 가장 양호하게 나타난 $PHA=30^\circ$ (C형)에서 당량비가 적어질수록 지수 함수적으로 증가하는 반면, HIS 점화장치의 경우는 당량비 1.0~0.6까지는 거의 직선적으로 약간의 증가만을 보이고 있다. 당량비 0.45에서 PD는 $PHA=30^\circ$ (C형)에 CDI 점화장치를 사용한 경우에 비해 HIS 점화장치는 70~90ms 정도 짧은 것으로 나타났다. 이와 같은 현상은 점화시 점화플러그 주변의 혼합기 상태가 불안정하더라도 다회수 점화에 의해 기화를 촉진시키고 다수의 화염 핵을 형성시켜 강한 화염을 주실로 분출하기 때문으로 생각된다. 또한, HIS 점화장치는 당량비가 적을수록 CDI 점화장치에 비해 PD가 현저하게 짧음을 알 수 있다. PD=0~300ms 범위에서 희박가연한계는 모든 조건에서, PD의 차이는 있어도 당량비 0.45까지 가능하였으나 당량비 0.3~0.4에서 다소간의 실화가 발생하였다.

Fig.7은 PD가 비교적 긴 242ms에서 주실의 연소최고압력을 나타낸 것이다. 그림에서 당량비가 증가할수록 연소최고압력의 상승은 거의 직선적이다. HIS 점화장치의 경우가 CDI 점화장치에 비해 0.1~0.3MPa 정도 높게 나타난 것은 다수 발생하는 화염핵에 의해 부실 내 화염 성장이 빠르기 때문에 강한 화염이 주실로 분출되기 때문으로 생각된다.

Fig.8은 Fig.7과 동일한 조건에서의 압력상승 기

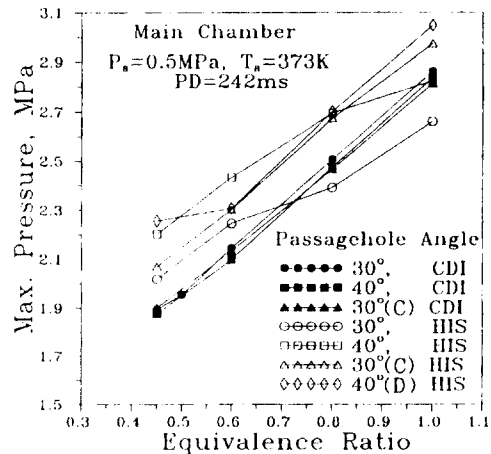


Fig. 7 Effects of equivalence ratio on maximum pressure

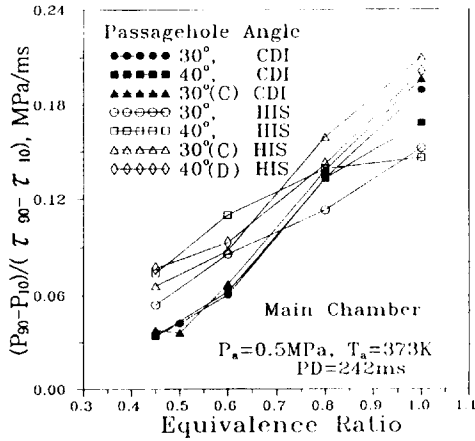


Fig. 8 Effects of equivalence ratio on pressure gradient

을 나타낸 것이다. 당량비가 증가할수록 압력의 기울기는 거의 직선을 유지하며 증가한다. 또, 점화장치를 HIS 점화장치로 사용하였을 경우가 거의 전 당량비에서 CDI 점화장치에 비해 높은 기울기를 나타내며, 특히 이러한 경향은 당량비 0.6 이하에서 현저하게 나타난다. 이러한 경향은 다회수 점화로 부실 내에서의 압력 상승이 급격하여 화염분출이 빨라지며, 주실 내에서의 난류가 커져 화염전파속도가 증가하기 때문으로 생각된다.

Fig.9는 당량비 1.0, PD=242ms인 조건에서 PHA 및 점화방식에 따른 주실의 연소기간 특성을

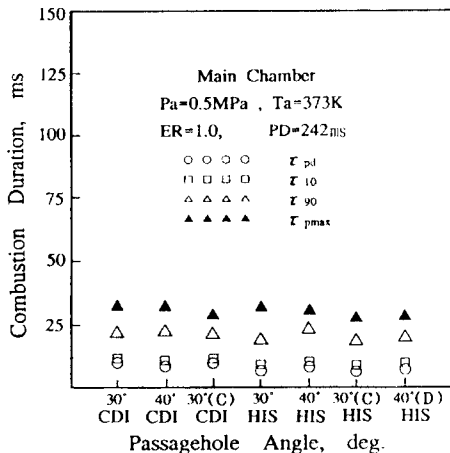


Fig. 9 Effects of passagehole and ignition method on combustion duration at ER=1.0

나타낸다. PHA=30°(A형), 40°(B형)의 경우에는 점화장치의 종류에 관계없이 31~33ms를 보이고 있으나 주·부연락공이 있는 PHA=30°(C형), 40°(D형)의 경우는 점화장치와 관계없이 27~28ms를 나타내고 있다. 이는 부연락공에서 분출된 화염과 주연락공에서 분출된 화염이 연소실 중심 부근에서 새로운 난류를 형성하여 연소를 촉진하기 때문으로 판단된다. 점화후 주실의 압력 상승 시기는 CDI 점화장치의 경우 모든 PHA에서 8.5~10.0ms인 반면 HIS 점화장치에서는 6.0~7.5ms를 나타내어 전자에 비해 2.5ms 정도 짧다. 이는 HIS 점화장치의 경우 부실 내의 화염 성장이 빨라 주실로 강한 화염 분출이 되기 때문으로 생각된다.

Fig.10은 당량비 0.45, PD=242ms인 조건에서 PHA 및 점화방식에 따른 주실의 연소기간 특성을 나타낸다. 연소기간은 CDI 점화장치에 비해서 HIS 점화장치를 사용한 경우가 짧게 나타났다. CDI 점화장치에서는 PHA=30°(C형)가 가장 빠른 76.5ms를 보이고 HIS 점화장치에서는 PHA=40°(B형)가 가장 빠른 46.5ms를 나타내고 있다. HIS 점화장치에서 PHA=30°(A형), 40°(B형)에 비해 PHA=30°(C형), 40°(D형)의 연소기간이 길게 나타난 것은 상대적으로 압력상승 시기가 늦기 때문인데, 이는 단위시간당 방전에너지 밀도가 작은 상태이고 당량비가 낮으므로 상대적으로 열발

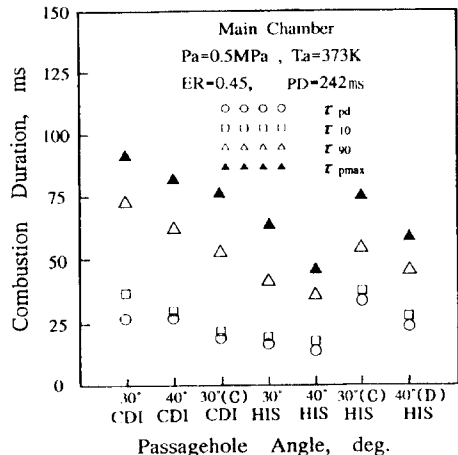


Fig.10 Effects of passagehole angle and ignition method on combustion duration at ER=0.45

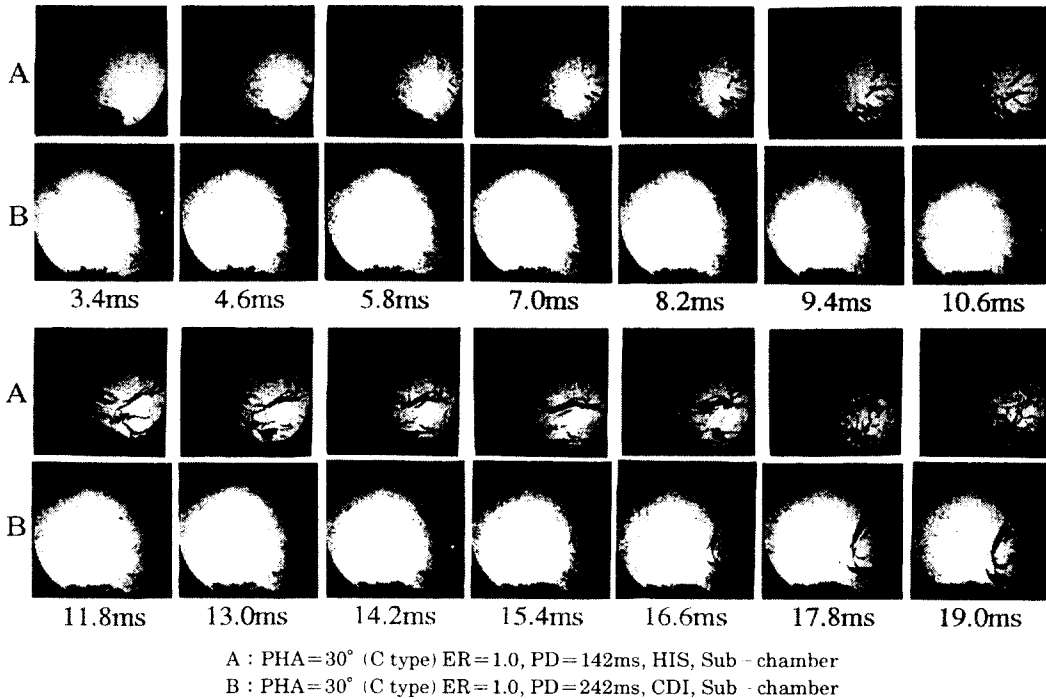


Fig. 11 Comparison of flame propagation at each ignition systems

생물이 적기 때문에 부연락공을 통과할 때의 교축 손실 및 화염 냉각이 큰 영향을 미치기 때문일 것으로 생각한다.

Fig.11은 HIS 점화장치와 CDI 점화장치를 사용한 경우에 동일 조건에서의 초기화염 성장과정을 비교 분석하기 위하여 부실의 화염을 나타낸 것이다. 실험 조건은 당량비 1.0, 연소실 내 초기압력 0.5MPa, 초기온도 373K, PHA=30°(C형)인 경우로 촬영속도는 10,000 fps이며, PD를 달리한 것은 방전에너지의 특성이 다르기 때문이다. 그림에서 A의 경우는 HIS 점화장치를 사용한 경우로 첫 번째 화염부터 화염이 성장되어가는데에 비하여 B의 경우는 8.2ms 영역에서 최초로 화염핵이 나타남을 볼 수 있고, 이후 시간의 경과에 따라 동일시간대에서 초기 화염의 크기가 많은 차이를 보인다. 특히, 화염의 성장과정에서 보는 바와 같이 CDI 점화장치를 사용한 경우에 비하여 화염의 표면에 많은 량의 볼텍스가 형성되어 주름진 형태와 같은 화염의 형상을 볼 수 있는데, 이러한 현상은 점화

플러그 주변의 혼합기에 연속적으로 방전이 일어나에 따른 착화현상에 의하여 생기는 현상으로 판단하였다. 이러한 각종의 현상들에 기인하여 HIS 점화장치를 사용한 경우의 화염전파속도가 훨씬 촉진됨을 알 수 있다.

4. 결 론

IDI형 부실식 정적연소기와 방전특성이 상이한 점화장치를 사용하여 메타놀을 고압으로 분사, 성층화시켜 연소시킨 결과 얻은 결론은 다음과 같다.

- 1) 당량비가 높을수록 동일 착화율에 대한 PD는 짧아지는 경향이 있으나 CDI 점화장치에 비해 HIS 점화장치를 사용한 경우가 훨씬 짧게 나타남을 볼 수 있다.
- 2) 당량비가 증가할수록 연소최고압력의 상승은 거의 직선적으로 증가함을 확인하였다.
- 3) 주연락공만 있는 경우에 비하여 주·부연락

공이 있는 경우는 점화장치에 무관하게 짧은 연소기간을 나타내는데, 이는 부연락공에서 분출된 화염과 주연락공에서 분출된 화염이 연소실 중심 부근에서 새로운 난류를 형성하여 연소를 촉진하기 때문으로 판단된다.

- 4) HIS 점화장치를 사용한 경우의 화염전파속도가 훨씬 촉진됨을 알 수 있다.

후 기

이 논문은 1996년도 동아대학교 교내 학술연구비(일반과제)에 의하여 수행하여 얻은 결과이다.

참고문헌

- 1) 石井光教 外 4人, “天然ガス自動車の排氣特性に関する研究”, JSAE 論文集, Vol.25, No.4, 9439140,

1994.

- 2) 片岡克己 外 4人, “急速壓縮燃燒装置を用いた天然ガスエンジンの燃燒特性に関する基礎的研究”, 内燃機關, シンポジウム, 9537484, 1995.
- 3) 松井幸雄, “副室式ディーゼル機關の連絡孔面積可變化に関する理論的考察”, JSAE 論文集, Vol.23, No.2, 1992.
- 4) 中園徹, 夏目祥宏, “副室式ガス機關の副室諸元の影響”, JSME論文集, 58卷553號, No.92 - 0202, pp.2931~2936, 1992.
- 5) 김봉석, 권철홍, 류정인, “부실식 정적 연소실내 연소특성에 관한 연구(Ⅱ) - 임계 연락공의 형상 변화에 따른 연소촉진효과 -”, KSME 논문집, 제17권, 제10호, pp.2611~2623, 1993.
- 6) 윤수한, 이중순, 김현지, 배종용, 하종률, “솔레노이드를 사용한 정압연료분사장치의 제어에 관한 연구”, KSAE 논문집, Vol.4, No.1, No.96370021, pp.229~237, 1996.