〈논 문〉 SAE NO. 97370126

점화에너지 특성이 예혼합기의 착화와 연소에 미치는 영향(2)

Effect of Ignition-Energy Characteristics on the Ignition and the Combustion of a Premixed Gas(2)

이 중 순*, 강 병 무**, 김 현 수***, 정 성 식****, 하 종 률****
J. S. Lee, B. M. Kang, H. S. Kim, S. S. Chung, J. Y. Ha

ABSTRACT

For the improvement of ignitability we need ignition energy and its discharge characteristics which are suitable for a part distribution of the mixture density around the ignition spark plug and the flow characteristics of the mixture in the combustion. Especially, for the solving of the instability of initial ignition and lean ignitability limit in the case of lean-burn combustion, the more powerful ignition energy is required. The conclusions from the observation can be summarized as follows:

1) The ignitability limit for HIS expands wider and the combustion is more stable than for CDI.

2) The combustion duration and ignition timing depend upon the distribution of local mixture density in the vicinity of ignition spark plug.

주요기술용어 : Ignition Device(점화장치), Flammability Mixture Ratio(가연혼합비), Visualized Engine(가시화엔진), Constant Volume Combustion Chamber with Sub-chamber(부실식 정적연소기), Ignition Energy(점화에너지)

1. 서 론

종래의 후처리 방식만으로는 날로 엄격해지는 배출가스 규제를 극복하기가 어려워짐에 따라 엔진 본체에서 발생되는 가스를 근본적으로 저감시키기 위한 연구가 활발히 진행되고 있다. 특히, 유해 배기 가스 배출 저감과 연료 소비율의 개선을 동시에 만족시키기 위한 희박연소의 실현을 위해서는 희박한 예혼합기의 발화성 향상을 위한 점화조건 개선과 연소촉진을 위한 혼합기 유동조건의 개선이 요구된다.

연소실 내 유동과 점화에너지 및 연소특성과의 관계에 대한 연구로서 Kiyota 등[1]은 4밸브 단기통 가시화엔진을 사용하여 화염의 구조를 분석한 결과, 화염발달의 초기에는 큰 와류가 화염전파

*정회원, 동명전문대학 기계과
**동아대학교 대학원
***동의대학교 대학원
****정회원, 동아대학교 기계공학과

를 촉진시키는 반면, 후반에는 작은 스케일의 난류가 연소를 촉진시킨다고 밝히고 있다. Omori 등[2]은 단기통 가시화엔진에서 LDV를 이용한 연구에서 저속 영역과 부분 부하상태의 희박연소에는 텀블이 보다 연소개선에 효과적이라고 보고한 바 있고, Herweg 등[3]은 화염핵의 형상은 난류강도의 크기에 의하여 변화된다고 주장하고 있다. 또 점화에너지 개선을 통한 희박 공연비의 가연범위 확대를 꾀한 연구로서 화염핵 생성에 미치는 유동의 영향을 확인하기 위해 주류가 존재하지 않는 유동을 만들어 유도성분과 용량성분이 착화에 미치는 영향을 연구한 결과, 용량성 성분에 대해서 유도성 성분을 약간 부가하는 쪽이 유동장에서의 점화능력이 향상하며, 전 점화에너지 중에서 후속성분의 에너지 비율이 클수록 점화력이 향상됨을 보고하였다.[4),5)] 그러나, 점화에너지의 분포 및 구성에서 용량성 성분과 유도성 성분의 역할과 최적 점화 에너지 분포에 대한 의견의 일치 및 주어진 에너지 조건에서의 최적 혼합기 유동 조건은 제시되지 않고 있다. 따라서, 적절한 유동조건하에서도 확실한 점화를 이루기 위한 최적의 점화조건에 관한 정보가 필요하다.

본 연구에서는 전보(前報)[6]에 이어 2종의 점화장치를 사용하여 부실식 정적연소기와 가시화엔진에서의 방전 에너지 특성이 예혼합기의 착화와 연소에 미치는 영향을 밝혀 유동조건에 대한 연소특성과 가연혼합비 한계를 확대할 수 있는 점화 조건을 규명하는데 목적을 두고 있다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

2.1.1 점화장치의 구성

Fig.1(a), (b)은 본 연구에 사용된 2종의 점화장치 개략도를 나타낸 것이다. (a)는 축전기 방전식 점화장치(CDI)로서 점화 에너지의 크기 변화가 가능하며 방전기간이 200μs정도로 비교적 짧아 방전에너지 밀도가 큰 것이 특징이며, (b)는 점화 능력의 개선을 위하여 개발한 고주파 점화장치(HIS)로서 에너지 밀도는 적으나 점화

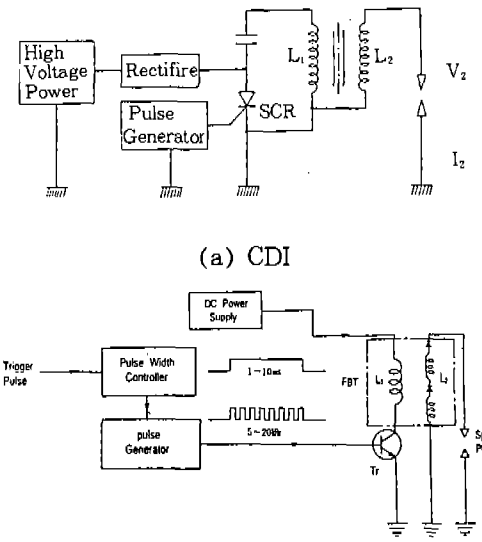


Fig.1 Schematic Diagram of Ignition Device

간격과 점화횟수를 변화시켜 점화에너지 방출특성과 점화지속기간을 자유롭게 변화시킬 수 있는 장치이다. 방전 주파수는 5kHz~20kHz까지 조절이 가능하며, 설정된 점화횟수가 고속용 점화코일의 1차코일에 인가되면 1차전류의 단속이 펄스 횟수만큼 이루어져 점화플러그에서 설정 횟수만큼 방전된다.

Table 1은 동일 방전분위기에서 계측한 점화장치에 따른 점화에너지의 크기를 나타낸 것이다. 점화는 컴퓨터로부터의 신호를 점화장치에 입력시켜 행하고, 이 때 점화핵 생성 및 유지 과정에서의 2차코일의 유기전압과 전류값의 시간경과를 고전압 프로브(HV-P30, Iwatsu Electric Co.)와 고전류 프로브(CP-502, Iwatsu Electric Co.)를 사용하여 2차 점화전압 파형과 1, 2차전류파형을 디지타이징 오실로스코프와 컴퓨터에 각각 입력시켜 계측 및 관찰하였고, 에너지 계산식[7]을 이용하여 방전에너지를 구하였다. CDI의 경우 약 200μs의 방전기간동안 큰 에너지를 방출하는데 비하여 HIS의 경우는 1.5ms 동안 30회의 절연파괴가 일어나는 경우이다. 전체 방전에너지는 HIS가 상대적으로 작은 값을 나타내지만 절연파괴 에너지는 최초의 1회분이 CDI의 절

연파괴 에너지와 비슷하고 그 후에 일어나는 절연파괴 에너지의 값을 고려하면 CDI보다 약 2배 정도 큰 값을 보인다.

Table 1 Comparison of Ignition Energy

Ignition Device	Breakdown Energy (mJ)	Arc-Glow Energy (mJ)	Total Energy (mJ)	Discharge Duration (ms)
CDI (Vi:340V)	2.35	12.66	15.01	0.2
HIS (1.5ms)	2.66	9.15	13.79	1.5
	1.66			

2.1.2 정압분사 부실식 정적연소기

Fig.2는 점화장치에 따른 초기화염의 착화과정을 밝히기 위해 사용된 정압분사 부실식 정적연소기를 나타낸 것이다. PC로 분사기간을 조절하여 연료분사량을 정밀히 제어할 수 있도록 개발된 정압연료 분사장치[8]를 사용하여 연소실 내에 설정 당량비로 연료를 고압분사시킨 후 화염의 초기 착화과정을 가시화하여 화염의 전파특성을 해석하였다. 본 연구에서는 부연소실에서의 착화과정만을 연구대상으로 하였다.

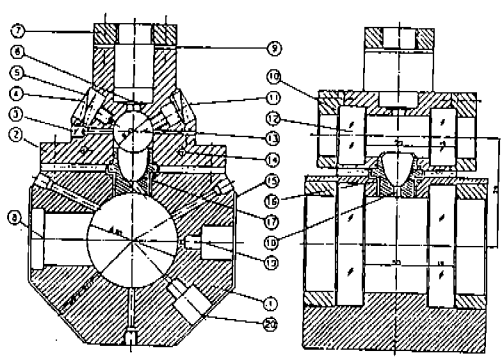


Fig.2 Constant Volume Combustion Chamber with Sub-Chamber

2.1.3 사용된 엔진

Fig.3은 점화 플러그 주변을 가시화할 수 있도록 개조된 가시화 엔진의 실린더를 나타낸 것이다. 개조된 가시화 엔진의 연소실 초기온도가 실제 엔진의 연소실 정상 작동 온도보다 낮기 때문에 공급되는 연료의 기화를 돕기 위하여 실린더 라이너의 상부와 흡기 다기관에 히터를 설치하여 예열하고 또, 180 ℓ 용량의 공기 예열탱크를 사용하여 공급 공기 온도를 333K으로 예열하였다. Table 2는 실험에 사용된 엔진의 제원을 나타낸 것이다.

Table 2 Specifications of Test Engine

Item	Specification
Type of engine	Single-cylinder, Air-cooled(DOHC)
Type of combustion chamber	Pent roof
Intake valve	
Open	10 deg. BTDC
Close	55 deg. ABDC
Exhaust valve	
Open	55 deg. BBDC
Close	10deg. ATDC
Stroke volume(cc)	499.5
Bore×Stroke(mm)	86.0×86.0
Compression ratio	9.2 : 1

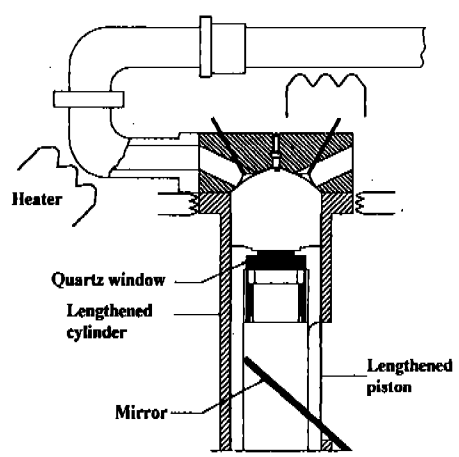


Fig.3 Schematic Diagram of Visualized Engine

2.1.4 제어 시스템 및 프로그램의 구성

실험장치는 배기량 2.0 ℓ 인 DOHC 4기통 기관의 1번 실린더만을 사용할 수 있도록 개조한 단기통기관과 기관의 초기 구동을 위한 직류전동기(132D-15kW)부분, 엔진과 전동기 사이의 동력단속 및 일정 회전수 제어를 위한 전자클러치 및 제동부, 기관 주변장치들을 제어하는 제어부 및 연소해석장치 등으로 구성되어 있다.

제어용 컴퓨터에서 프로그램을 실행시키면 인터페이스를 통하여 출력된 신호가 전자클러치를 동작시켜 엔진을 구동시키고, 이 때 엔코더로부터 TDC와 CA 신호가 인터페이스를 통하여 제어용 컴퓨터로 입력되어 기관의 회전수가 설정회전수에 도달할 때까지 공회전을 시킨 후, TDC를 시작신호로 CA(Cam Angle 1°)를 계수하게 된다. 제어용 컴퓨터는 입력되는 매 CA마다 프로그램 초기에 설정된 값과 그 때의 크랭크 각도를 비교하여 각 부분의 해당시기에 동작 신호를 출력한다. 단, 연료의 분사시기는 크랭크 각도 기준으로 제어되지만, 분사기간은 회전 각속도 변화에 따른 연료분사량의 불균일에 대응하기 위해 CA를 사용하지 않고 주파수가 일정한 Ext. Trigger(1kHz)를 사용하였다. 연소실 압력과 각 장치의 동기화를 위한 제어용 프로그램의 흐름도를 Fig.4에 나타낸다.

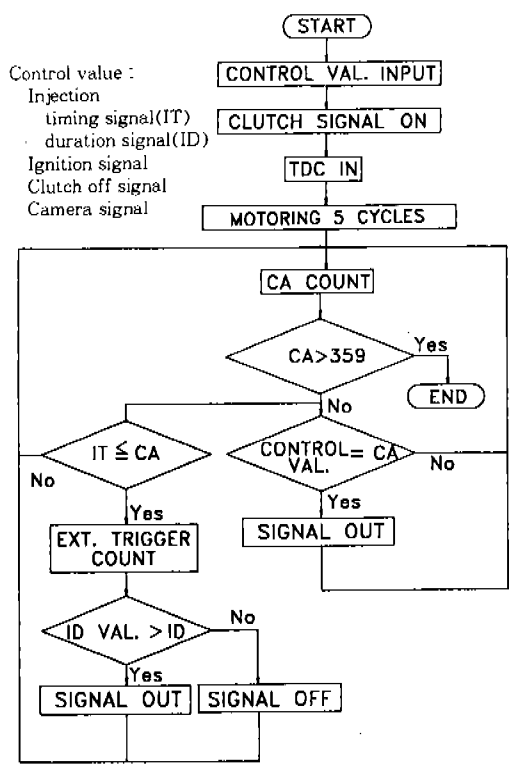


Fig.4 Flow Chart of Control Program

2.2 실험방법

방전특성에 따른 혼합기의 발화상태를 보다 정상적인 상태에서 확인하기 위하여 부실식 정적연소기에서 CDI, HIS 점화장치를 사용하여 착화초기의 연소현상을 가시화한 후, 해석하여 화염의 착화 초기과정에 미치는 방전특성의 영향을 고찰하였고, 이를 실제엔진에 적용하기 위해 가시화 엔진에서의 연소실험을 통해 착화초기의 연소특성을 밝힌다.

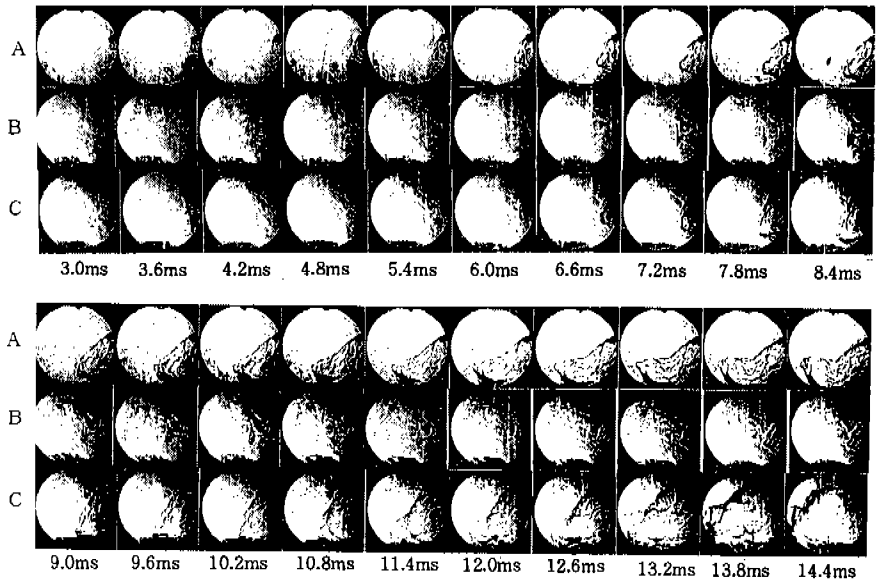
3. 결과 및 고찰

3.1 정압분사 부실식 정적연소기를 사용한 연구

Fig.5는 점화장치에 따른 초기화염의 착화 및 성장과정을 밝히기 위하여 정적연소기의 부실에서 화염의 성장과정을 다수회 촬영하고, 그 결과로부터 대표성있는 화염을 취하여 나타낸 것이다. 화염의 촬영은 회전드럼식 고속카메라(Cordin 350, V-Tek Co.)와 슐리렌 광학 시스템을 사용하여 10,000fps의 속도로 하였다. 본 조건에서의 점화플러그는 간극이 1mm이고 접지전극부에 V홈을 가진 형상을 사용하였다.

본 그림은 당량비 1.0인 조건에서 HIS와 CDI 점화장치를 각각 사용하여 점화한 결과로서 점화 후 3ms부터 600μs의 동일한 시간 간격으로 나타낸 것이다.

그림 A는 HIS 점화장치를 사용한 경우로서 점화 후 3.0ms 경과 이후에는 이미 착화가 이루어져 화염핵이 육안으로 구별할 수 있을 만큼 형성되어 있는 반면, CDI 점화장치를 사용한 B, C의 경우를 살펴 보면, 그림 B의 경우는 A에 비해 착화시기가 지연 되고 착화후 화염의 성장이 늦음을 알 수 있으나, 그림 C의 경우 화염핵의



A : HIS, B : CDI, C : CDI(ϕ=1.0, 10,000FPS)

Fig.5 Schlieren Phtgraphs of Flame Propagation

크기는 그림 A의 경우에 비해 다소 작은 반면 착화 시기는 거의 같고, 이 후의 화염 성장이 상대적으로 빠른 결과를 보인다. 이와 같이 동일한 초기조건에서 화염의 전파속도가 빠른 것은 점화시기에 점화 플러그 전극 근처를 통과하는 혼합기 덩어리의 국소 농도 당량비 등의 영향으로 판단되고, B 사진의 경우에는 C 사진의 조건에 비해 점화 플러그 전극부분을 통과하는 혼합기 덩어리가 상대적으로 희박하기 때문인 것으로 판단된다. 이와 같이 HIS 점화장치를 사용한 경우의 착화 및 초기화염 성장과정이 균일한 경우에 비하여 CDI 점화장치를 사용한 경우의 착화 및 초기화염 성장과정이 불균일한 경우는 연소기간이나 연소기간 변동계수값으로 확인할 수 있는데, 이와 같이 HIS 점화장치를 사용한 경우에 착화시기는 물론 연소기간의 변동이 적고 화염전파속도가 안정된 값을 보이는 것은 방전특성상 점화순간에 다수회의 불꽃 방전이 일어나기 때문에 1회의 불꽃 방전을 하는 CDI점화장치에 비하여 플러그 간극 부근에서의 유동 및 국소 당량비 변동 등의 현상에 상대적으로 영향을 적게 받기 때문에 연소속도가 안정된 현상을 보이는 것으로 판단하였다.

Fig.6은 점화장치의 방전특성이 초기 화염의 성장에 미치는 영향을 알아보기 위해 화염전파과정을 가시화한 결과 중에서 임의의 동일시기 현상을 나타낸 것이다. 첫번째의 HIS와 두번째의 CDI 점화장치에 의한 화염사진은 화염전파속도가 빠른 경우이고 중간의 CDI장치에 의한 결과는 화염전파속도가 느린 경우이다.

HIS 점화장치를 사용한 경우의 화염은 화염표면에 발생한 화염면의 주름중 단위 Wrinkle의 표면적이 작은 반면 개수가 가장 많음을 알 수 있고, CDI 점화장치를 사용한 경우에는 상대적으로 단위 Wrinkle의 표면적이 큰 대신 개수가 적음을 알 수 있다. 이러한 현상은 HIS 점화장치를 사용하여 방전회수를 증가시키면 화염핵 생성 및 성장속도를 증대시킬 수 있기 때문이다. 물론, 점화에너지를 짧은 기간에 다수회 집중적으로 방출하는 것이 어떠한 작용에 기인하여 안정된 화염핵 형성에 유리한지는 정확히 알 수 없지만, 본 연구의 영역에서는 방전기간동안 다수회의 방

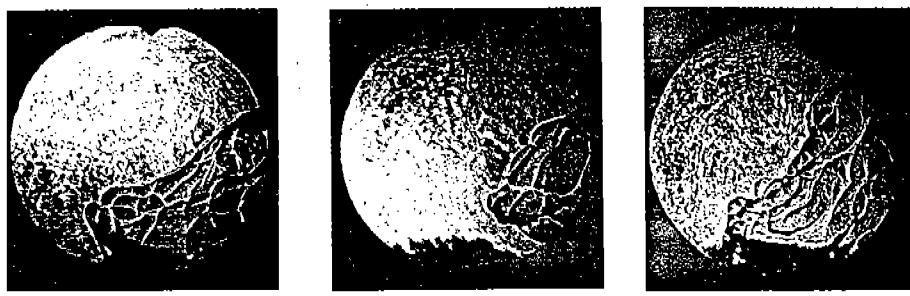


Fig.6 Results of Vortex Formation by Discharge Characteristics

전을 행할 경우 화염핵 내의 활성화 입자수가 증가하기 때문에 점화플러그 간극 부근을 통과하는 혼합기 덩어리의 국소당량비에 대한 영향을 적게 받을 것으로 추정한다. 또, 전술한 다수회 방전으로 인한 압력파에 의하여 아주 미세한 소용돌이가 생성되고, 이는 Wrinkle 표면적의 증가를 초래하여 화염전파속도가 증가하는 것으로 판단하였고, 특히 이러한 현상은 희박한 분위기에서 현저하다.

Fig.7은 점화장치의 방전특성과 혼합기의 유동 및 연료차이에 의한 혼합기의 착화성을 알아보기 위해 정적연소기 내에서 가연한계를 확인한 결과이다. HIS의 방전특성에 의해 전 난류강도 영역에서 HIS의 경우가 CDI 경우보다 가연한계가 확장되는 결과를 보이는데, 이는 위에서 밝힌 바와 같은 특성에 기인하여 안정된 화염의 성장을 나타내기 때문이다.

또, 혼합기의 초기온도, 초기압력, 점화에너지 등이 동일한 경우에 난류강도가 증가함에 따라 희박가연한계가 좁아지며, 이러한 현상은 연료의 조성이 바뀌어도 동일한 경향을 보인다.

Fig.8은 부실식 정적연소기에서 점화장치에 따른 연소기간과 그것의 변동률을 나타낸 것이다. 혼합기가 희박해질수록 연소기간이 길어지며 이러한 현상은 당량비 0.6에서 현저하게 나타난다. 당량비 1.0과 0.8의 경우, 점화장치가 연소기간에 미치는 영향은 적지만 당량비 0.6에서 HIS를 사용한 경우가 CDI를 사용한 경우보다 연소기간이 짧아지는 결과를 보이며 연소기간의 변동계수

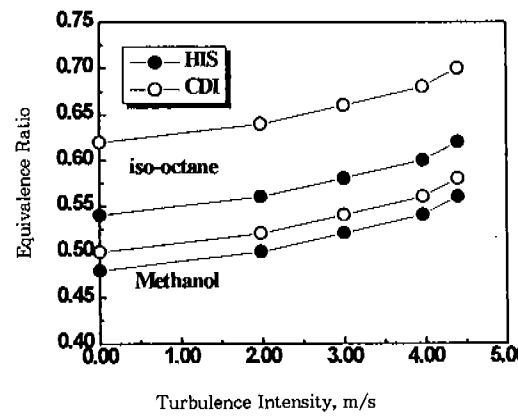


Fig.7 Lean Burn Limit for Turbulence Intensity and Ignition Devices

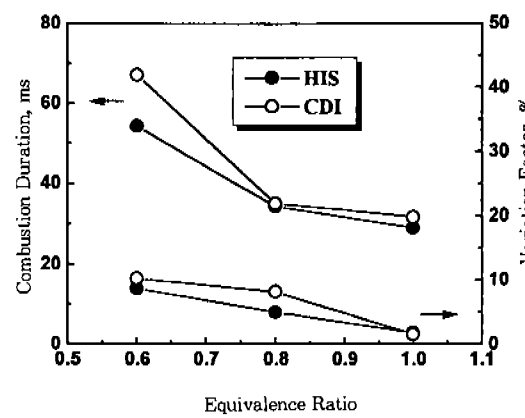


Fig.8 Combustion Duration for Ignition Device

값은 HIS를 사용한 경우에 희박영역에서 다소 낮음을 알 수 있다.

3.2 엔진을 사용한 연구

Fig.9는 각 조건에서의 최적점화시기(MBT)를 구한 결과의 한 예이다. 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 점화시기를 진각시킴에 따라 연소최고압력은 증가하지만, IMEP의 값은 최고값을 보인 후 하강하는 결과를 볼 수 있다. 본 실험조건에서 MBT는 이와 같이 IMEP의 극대값과 Pmax 발생위치를 고려하여 결정하였다. 연구를 통하여 흡기포트의 설치각도와 각 당량비조건 및 점화장치의 방전특성에 따른 각각의 MBT가 존재함을 확인하였다.

연료분사 시스템에서의 솔레노이드 구동시간에 따른 연료량과 기관회전수에 따른 흡입공기유량을 계측한 후 당량비를 계산하여 실험을 행한 결과, 이론혼합비 영역의 연소현상이 거의희박한 영역 정도의 연소현상을 보였다. 이와 같은 현상은 연소실 내의 혼합기 분무거동 등과 관련된 것으로 생각되지만, 본 실험의 영역에서는 정적연소기와의 비교를 위해 연소화염의 전파과정 및 연소압력 등과 같은 연소결과로부터 당량비를 구하고, 이를 상대 당량비로 표현한다.

초기조건을 동일하게 한 경우, 점화에너지의 방전 특성이 다른 2종류의 점화장치를 사용하여 연소 가능한 전 당량비 영역에서 연소실험을 행한 결과 얻어진 최고연소압력을 Fig.10에 나타낸다. 그림은 동일조건에서 각각 50회씩의 연소를 행한 후 앙상블 평균한 값으로 표시하였다. 본 연구를 통하여 얻은 결과를 종합하여 보면, 점화에너지는 적정혼합비 영역에서는 연소최고압력의 변화에 거의 영향을 주지 않지만, 희박한 영역에서는 HIS를 사용한 경우가 다소 증가하는 경향을 보인다. 또, HIS를 사용한 경우 연소최고압력의 사이클 변동은 최고 8% 정도, 연소최고압력 발생시기 사이클 변동은 최고 2% 이내의 값을 보이는 등 매우 안정된 연소현상을 보였다.

Fig.11(a), (b)는 2종류의 점화장치를 사용하여 점화에너지를 변화시킨 경우 희박과 적정 혼합비 조건에서 크랭크 각도의 변화에 따른 연소압력과 압력상승률을 각각 나타낸 것이다. 연소압력의 결과를 살펴 보면 HIS를 사용한 경우에 당량비 1.0과 0.8의 조건 모두 CDI를 사용한 경우에 비하여 연소압력이 높고, 압력상승률의 결과에서도 볼 수 있는 바와 같이 압력발생 지연기간이 약간 짧은 반면, 압력 상승 구배는 다소 급격함을 알 수 있다. 이와 같이 연소기간의 단축과 함께 연소압력이 증가하는 현상은 HIS를 사용한 경우에 점화지연기간과 압력발생 지연기간이 단축됨에 따라 질량연소율이 증가하여 열손실이 감소하기 때문이며, 이로 인해 연소압력의 기울기가 다소 급격해진다.

Fig.12는 일정 초기조건에서 점화장치에 따른

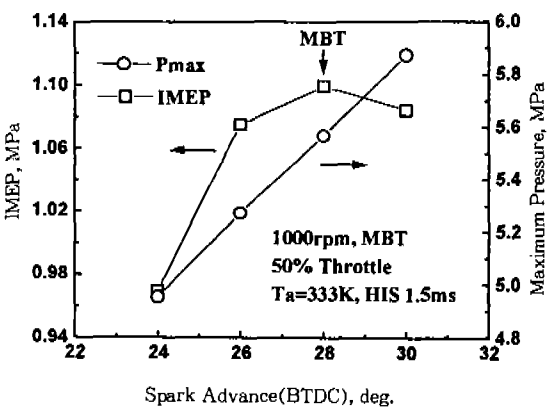


Fig.9 Definition of MBT

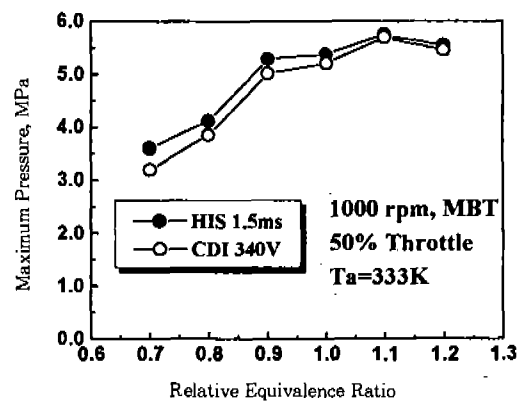
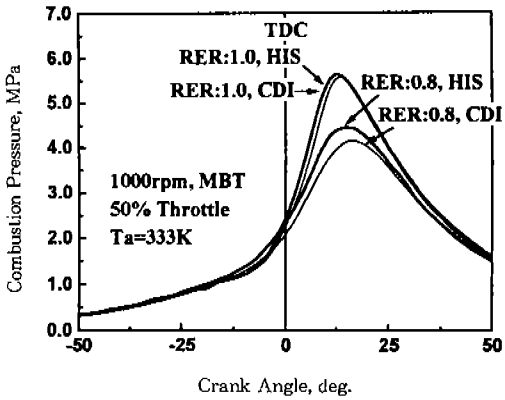
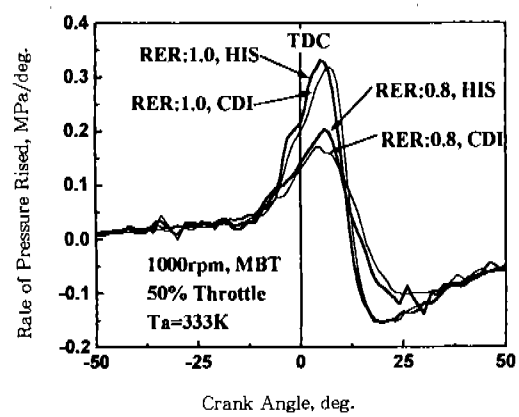


Fig.10 Maximum Combustion Pressure for Ignition Device



(a) Combustion Pressure



(b) Rate of Pressure Rised

Fig.11 Combustion Pressure and Rate of Pressure Rised for Ignition Device

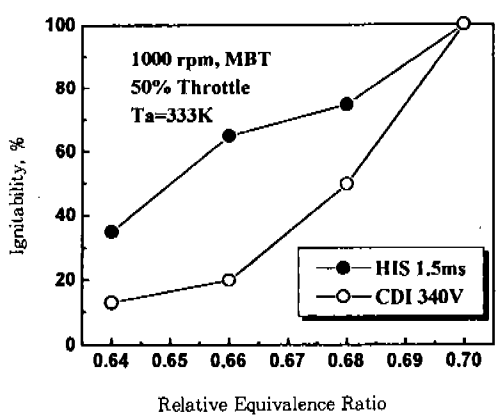


Fig.12 Ignitability for Ignition Device

희박가연한계를 확인하기 위하여 실험한 결과를 나타낸 것이다. 2종류의 점화장치 모두 상대당량비 0.7까지는 100% 착화되는 반면, 연소실내에 공급된 혼합기가 희박해질수록 HIS의 경우가 CDI에 비하여 착화률이 2배 정도 증가함을 알 수 있다. 이것은 희박영역에서는 단발 점화하는 CDI 점화장치에 비하여 HIS 점화장치의 경우가 방전기간동안 20kHz의 주파수로 연속적으로 방전하여 다회수의 착화를 시키는 결과에 기인한 것으로 판단된다.

4. 결 론

1) 혼합기의 초기온도, 초기압력, 점화에너지 등이 동일한 경우에 난류강도가 증가하면 희박가연한계는 좁아지는 현상을 보였다.
2) HIS를 사용하여 방전회수를 증가시킨 경우에 점화에너지의 구성 성분중 용량성 에너지가 증가하여 초기 화염핵의 생성이 확실하게 되며 이로 인해 혼합비가 희박한 영역에서의 가연한계가 확장되었다.
3) HIS를 사용한 경우에 착화시기는 물론 연소기간의 변동이 적고 화염전파속도가 안정된 값을 보이는데, 이는 방전특성상 점화순간에 다수회의 불꽃 방전이 일어나기 때문에 1회의 불꽃 방전을 하는 CDI점화장치에 비하여 플러그 간극 부근에서의 유동 및 국소 당량비 변동 등의 현상에 상대적으로 영향을 적게 받기 때문에 연소속도가 안정된 현상을 보이는 것으로 판단하였다.
4) 연소기간의 단축과 함께 연소압력이 증가하는 현상은 HIS를 사용한 경우에 점화지연기간과 압력발생 지연기간이 단축됨에 따라 질량연소율이 증가하여 열손실이 감소하기 때문이며, 이로 인해 연소압력의 기울기가 다소 급격해진다.

후 기

본 논문은 통산산업부에서 지원하는 G7 과제 중 흡기포트 및 연소실 설계 기술 개발 과제의

일환으로 수행하여 얻은 연구결과의 일부로서, 관계기관에 감사의 뜻을 표합니다.

참 고 문 헌

1. Y. Kiyota, K. Akishino, H. Ando, "Concept of Lean Combustion by Barrel Stratification", SAE Paper No.920678, 1992.
2. S. Omori, et al., "Effect of Intake Port Flow Pattern on the In-Cylinder Tumbling Air Flow in Multi-Valve SI Engines", SAE Paper No.910477, 1991.
3. Herweg, R. et al., "Flow Field Effects on Flame Kernel Formation in a Spark-Ignition Engine", SAE Paper No.881639, 1988.
4. 石井一洋 外 3名, "强流動場において可燃性混合氣の點火特性" 第9回內燃機關合同Symposium講演論文集, pp.15~20, 1991.
5. 桃瀨一成, 小松源一 外 3名, "Numerical Simulation on the Growth of Hot Gas Spots Produced by Composite Sparks", 日本機械學會 論文集(B編) Vol.59, No.557, pp.262~269, 1993.
6. 이중순, 이태원, 정성식, 하종률, "점화에너지 특성이 예혼합기의 착화와 연소에 미치는 영향", KSAE 논문집, Vol.4, No.1, No. 9637003, pp.28~35, 1996.
7. 이중순, "내연기관용 대체연료의 개발을 위한 메탄올의 연소특성에 관한 연구", 석사학위논문, 동아대학교, 부산, 1994.
8. 윤수한, 이중순, 김현지, 배종용, 하종률, "솔레노이드를 사용한 정압연료 분사장치의 제어에 관한 연구", KSAE 논문집, Vol.4, No.1, No.96370021, pp.229~237, 1996.