

혼합기의 유동과 점화특성이 기관성능에 미치는 영향

Effects of Mixture Flow and Ignition Characteristics on the Engine Performance

이 중 순*, 김 진 영**, 정 성 식***, 하 중 름***, 배 충 식****
J. S. Lee, J. Y. Kim, S. S. Chung, J. Y. Ha, C. S. Bae

ABSTRACT

Lean burn combustion is an important concept for improving the fuel consumption and exhaust emissions. However, the lean burning is associated with increased cycle-to-cycle combustion variations due to the ignition instabilities and reduced flame propagation rates. Engine stability under lean mixture conditions could be improved by increasing flame speed through enhanced flow characteristics and by securing ignitability with improvement of ignition systems.

The effects of flow motion and ignition characteristics on the combustion performances were investigated in a 4-valve SI engine. Flow motions of tumble -swirl were varied with a swirl control valve attached at the inlet ports, while ignition energy and its distribution were controlled in a high-frequency ignition system by changing spark duration and spark frequency. The improvement of lean burn performance by the optimum flow motion and ignition characteristics is discussed.

주요기술용어 : Lean Flammability Limit(희박가연한계), Lean Burn(희박연소), Cyclic Variation(사이클 변동), Swirl Control Valve(스윙조절밸브), High Frequency Ignition System(고주파점화장치), Universal Exhaust Gas Oxygen Sensor(광역산소센서)

1. 서 론

내연기관에 있어서 실린더 내 유동장의 구조는 연료소비율, 배기가스의 조성 등은 물론, 기관의 성능에 영향을 미치는 중요한 인자이다.¹⁾ 따라서, 주어진 운전조건 내에서 기관 성능을 향상시키기

* 정회원, 동명대학 기계과
** 정회원, 동아대학교 대학원 기계공학과
*** 정회원, 동아대학교 기계공학과
**** 정회원, 한국과학기술원 기계공학과

위해서는 기관 내로 유입된 혼합기의 유동이 연료 액적의 증발을 통한 미립화 촉진 및 연료-공기 혼합기의 공간적 균일화에 기여할 수 있어야 하며, 적정 난류강도의 제어를 통하여 연소시간을 단축하는 것이 바람직하다.

연소실 내부 유동은 기관의 출력과 배기가스의 조성에 직접적인 영향을 미치기 때문에 흡기포트 및 흡기밸브의 최적 설계를 통하여 적절한 유동특성을 갖도록 하는 것이 필요하다. 즉, 기관의 흡기계 형상을 변화시켜 스윙(swirl)이나 텀블(tumble) 또는 경사텀블(inclined tumble) 등과 같은 유동을 생성시켜 실린더 내의 유동장을 강화함으로써 난류의 강도를 증진할 필요가 있다. 최근, 연비의 상승과 유해 배기가스 저감을 동시에 실현하기 위한 회박연소와 관련된 연구가 많은 연구자들에 의하여 활발히 진행되고 있지만, 회박연소 방식은 연소속도의 저하와 초기착화의 불안정성 등으로 인하여 사이클 변동을 수반하는 등의 많은 문제점들이 있다.

회박공연비로 인한 연소속도의 저하는 적정 난류강도를 갖는 유동을 발생시킴으로써 해결될 수 있는데, C. Arcoumanis 등²⁾은 혼합기 유동속도 및 점화전극 근처에서의 난류강도가 클수록 연소기간의 단축과 사이클 변동이 감소됨을 밝힌 바 있다.

한편, 상대적으로 과잉의 공기를 공급하는 회박연소의 경우 초기착화의 불안정성과 회박가연한계도 문제가 되는데, 이를 극복하기 위해서는 큰 점화에너지를 가진 점화장치가 요구된다.

Warner 등³⁾은 회박혼합기의 착화성 향상을 목표로 다회수 방전 점화시스템을 이용하여 실험한 결과, 이론공연비 영역의 혼합기에 비하여 회박혼합기의 조건에서 보다 많은 에너지가 필요함을 밝힌 바 있고, Richard 등⁴⁾은 유도성 성분을 길게 하여 점화에너지를 증가시킨 결과 회박연소 한계의 확장은 물론 사이클 변동이 적은 것으로 보고한 바 있다. 또한, 이 등⁵⁾은 점화능력 개선을 위하여 개발한 고주파점화장치를 사용하여 실험한 결과, 점화지속시간이 길어짐에 따라 일정범위 내에서 회박가연한계가 증가되는 반면, 난류강도가 증가하면 회박가연한계는 좁아짐을 밝힌 바 있다.

그러나, 유동과 점화에너지가 혼합기의 연소특성 및 기관 성능에 미치는 영향을 명확히 밝힌다는 것은 쉽지 않다.

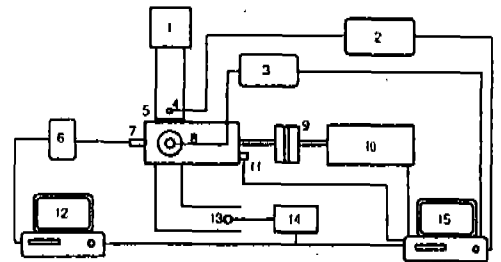
본 연구에서는 유동과 점화에너지의 상관관계 해석을 위하여 스윙조절밸브를 설치한 단기통기관과 점화에너지의 크기와 분포특성의 변화가 가능한 고주파점화장치⁵⁾를 사용하여 유동특성과 방전기간, 방전주파수 등의 변수가 기관 성능 및 연소에 미치는 영향을 실험적으로 규명하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

Fig.1은 실험장치의 개략도를 나타낸 것이다. 연소를 위한 실험장치는 배기량 2.0 l인 DOHC 4기통 기관의 1번 실린더만을 사용할 수 있도록 개조한 단기통기관과 기관의 초기 구동을 위한 직류전동기(132D-15kW)부분, 엔진과 전동기사이의 동력단속 및 일정 회전수 제어를 위한 전자클러치 및 제동부, 기관 주변장치들을 제어하는 제어부 및 연소해석장치 등으로 구성되어 있다. 본 실험에 사용된 기관의 주요 제원은 Table 1과 같다.

또한, 연료의 기화를 돕기 위해 연소실과 흡기매니폴드에 히터를 설치하고, 공급공기는 180 l 용량의 공기 예열탱크를 사용하여 333K으로 예열한 후 공급하였으며, 크랭크축의 위치를 검출, 제어하기 위하여 엔코더를 설치하여 TDC 신호와 Crank



- | | | |
|-------------------|----------------------------|----------------------|
| 1. Air surge tank | 2. Fuel system | 3. Ignition system |
| 4. Injector | 5. Swirl control valve | 6. A/D converter |
| 7. Pressure trans | 8. Ignition plug | 9. Electronic clutch |
| 10. DC motor | 11. TDC/CA sensor | 12. Analysis system |
| 13. UEGO sensor | 14. UEGO sensor controller | 13. Control system |

Fig.1 Schematic diagram of experimental apparatus

Table 1 Specifications of test engine

Item	Specification
Type of engine	4-valve Single-cylinder SI engine (DOHC)
Type of combustion chamber	Pent roof
Intake valve Open Close	10 deg. BTDC 55 deg. ABDC
Exhaust valve Open Close	55 deg. BBDC 10 deg. ATDC
Stroke volume(cc)	499.5
Bore×Stroke(mm)	86.0 × 86.0
Compression ratio	9.2 : 1

angle 신호의 기준 신호로 사용하였다. 한편, 공연비 계측을 위하여 광역산소센서(UEGO Sensor, NGK Spark Plug Co.)를 배기다기관에 설치하여 배기가스 중의 공기-연료 혼합비를 구하였다.

또한, 스윙조절밸브는 흡기매니폴드와 기관의 측면 블록 사이에 장착하여 적정 유동을 발생시켜 화염전파속도의 증가를 피하였다.

2.2 실험방법

기관의 흡기계 형상을 변화시켜 스윙(swirl)이나 텀블(tumble) 또는 경사텀블(inclined tumble) 등과 같은 유동을 생성시켜 실린더 내의 유동장 강화를 피할 필요가 있다. 이를 위하여 다양한 형태의 스윙 조절 밸브를 제작한 후 정상유동 실험

을 통하여 스윙비 및 텀블비를 측정한 후, 이를 실험 조건으로 채택하였다. 또, 유입각도 20°를 가진흡기포트 형상 변경용 카세트를 제작하여 기관에 부착하였다.

Table 2는 스윙 조절 밸브의 형상에 따른 스윙비와 텀블비를, Fig.2는 실험에 사용된 스윙 조절 밸브의 대표적인 형상을 각각 나타낸다.

본 연구에서는 스윙조절밸브를 부착하지 않은 경우를 고텀블형(High tumble형 ; 이하 HT로 표시함)으로 하고, 부착하는 스윙조절밸브의 형상에 따라 상대적으로 높은 텀블비와 스윙비를 갖는 스윙조절밸브를 부착한 경우를 고텀블 고스윙형(High tumble and high swirl형 ; 이하 HTHS로 표시함), 높은 텀블비와 낮은 스윙비를 갖는 경우를 고텀블 중스윙형(High tumble and medium swirl형 ; 이하 HTMS로 표시함), 텀블비와 스윙비가 모두 낮은 경우를 중텀블 중스윙형(Medium tumble and medium swirl형 ; 이하 MTMS로 표

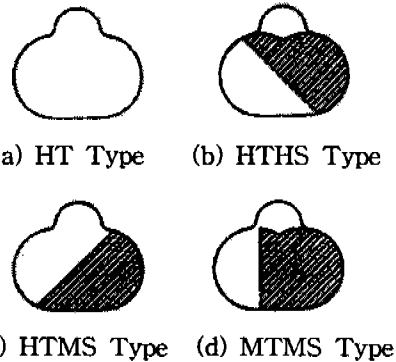


Fig.2 The shape of swirl control valves

Table 2 Swirl and tumble ratio of SCV's

Configuration	Tumble ratio	Swirl ratio	Open ratio	Tumble angle
HT (High tumble no swirl)	2.054	0.000	100%	90.0°
HTHS (High tumble high swirl)	2.138	1.182	55%	65.5°
HTMS (High tumble Medium swirl)	2.224	0.341	55%	75.9°
MTMS (Medium tumble medium swirl)	2.016	1.088	37%	61.5°

시험)으로 표시하였다.

점화시기, 연료분사시기, 압력채취시기는 캠각을 시간단위로 제어하며, 연료분사시간은 회전 각속도 변화에 따른 연료분사량의 불균일에 대응하기 위해 실시간 클럭(realtime clock : 122 μ s)으로 제어하였다. 제어용 컴퓨터에서 연속운전을 위한 사이클 횟수와 각 조건의 설정 값을 입력시킨 후 프로그램을 실행시키면 인터페이스를 통하여 출력된 신호가 전자클러치를 동작시켜 엔진을 구동시킨다. 이 때, 엔코더로부터 TDC와 CA 신호가 인터페이스를 통하여 제어용 컴퓨터로 입력되면 설정 회전에 도달할 때까지 10사이클 동안의 더미 사이클을 수행한 후, 11번째 사이클에 입력되는 TDC를 시작신호로 CA를 계수 하게 된다. 제어용 컴퓨터는 입력되는 매 CA(cam angle 1°)마다 프로그램 초기치 설정 값과 그 때의 크랭크 각도를 비교하여 해당시기에 동작 신호를 출력한다.

실험에 사용된 연료는 시약용 이소옥탄을 사용하였고, 시간경과에 따른 연소실 내의 연소압력은 압력 변환기와 증폭기를 사용하여 설정 사이클동안 계측한 후 분석하였다.

3. 결과 및 고찰

Fig.3은 PC를 이용하여 기관의 분사시기, 분사량, 점화시기 등을 제어하여 연속 운전을 행할 경우에 실험 영역 내에서의 운전 재현성과 신뢰성 확

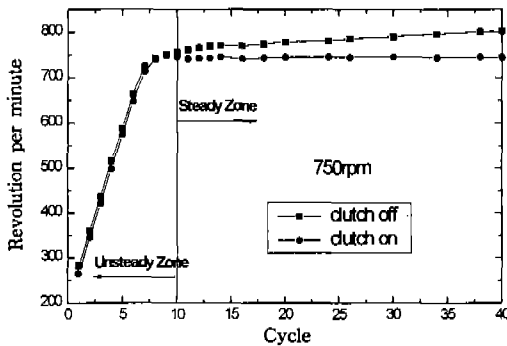


Fig.3 Relations between cycle numbers and rpm fluctuations with clutch on/off

인을 위하여 실험한 결과를 나타낸 것이다. 그림의 운전조건은 스로틀밸브 개도 50%, 기관 회전수 750rpm, 공기연료 혼합비 18.2 : 1인 경우로, 직류전동기를 구동시킨 후 설정 회전에 도달할 때까지는 약 10회의 사이클이 소요됨을 알 수 있고, 전자클러치를 동작시키지 않은 경우에 사이클의 증가와 함께 기관의 회전수는 점차적으로 증가하는 경향을 보이는 반면, 클러치 신호를 피드백받아 클러치의 단속을 행할 경우에는 사이클 증가와 무관하게 일정회전수를 유지함을 알 수 있다. 연소압력은 시간경과에 따라 회전수가 증가하는 초기구간을 제외한 영역의 값을 취하여 분석하였다.

Fig.4는 스웰 조절 밸브의 형상에 따른 최적점화시기(이하 MBT로 표시함)를 구하기 위하여 실험한 결과를 나타낸 것이다. 본 실험조건에서의 MBT는 이와 같이 연소최고압력(이하 Pmax로 표시함)과 도시평균유효압력(이하 IMEP로 표시함)의 최대값 및 Pmax의 발생시기를 고려하여 결정하였다. 공연비를 18.2 : 1로 하여 일정 초기 조건에서 연소를 행한 경우 스웰조절밸브에 따른 MBT는 각각 다른 값을 보이는 반면, 방전 주파수를 20kHz로 한 경우의 MBT가 15kHz인 경우에 비하여 모든 조건에서 동일하거나 최고 5° 정도까지 지각되는 경향을 보이는데, 이와 같은 결과는 점화회전의 증가가 점화지연기간을 단축시키는데 기인하는 현상인 것으로 판단된다. 또한, HT형인 경우는 점화주파수와 무관하게 가장

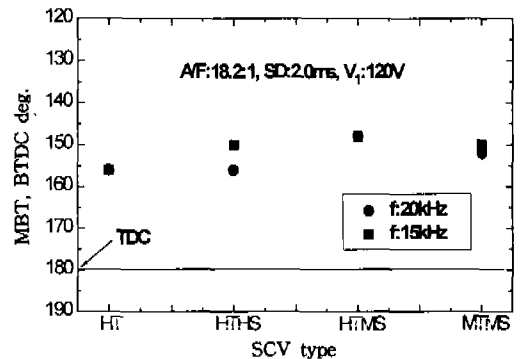


Fig.4 Relations between SCV type and MBT on the discharge frequency

지각된 MBT를 보이는 반면, HTHS형에서는 점화주파수 20kHz인 조건이 가장 지각된 MBT를 보인다. 실험을 통하여 각 당량비 조건은 물론 실린더 내의 혼합기 유동조건에 따른 각각의 MBT가 존재함을 확인하였다.

공연비 제어를 위하여 광역산소센서를 사용하였다. 공연비의 제측은 연소가스중의 산소 과부족 상태로부터 판정이 가능하며, 이론혼합비에 대한 실제 기연가스중의 산소량 과부족 상태를 0~5V의 전압 값으로 출력한다. 본 실험에 사용한 광역산소센서의 측정 가능 영역은 공연비로 9.1~24.2의 범위이다.

Fig.5는 일정 초기조건 of 희박영역에서 연소실험을 행하면서 동시에 제측한 광역산소센서의 출력을 나타낸 것이다. 본 그림은 광역산소센서의 응답 특성 확인을 위하여 공연비 18.2 : 1과 21.2 : 1인 조건에서 각각 50회의 연소를 행한 경우의 결과로, 회전수가 설정 회전수에 도달한 이후의 출력 특성은 매 사이클의 배기행정에서 정확한 공연비를 보이며, 운전 조건에 따라 매우 민감하게 반응함을 알 수 있다.

Fig.6은 750rpm에서 공연비 18.2 : 1인 다소 희박한 혼합기를 공급한 경우의 모터링 압력과 함께 동일 조건에서 점화시기 BTDC 30°로 하여 점화시킨 경우에 채취한 30회분의 연소압력을 중첩하여 나타낸 것이다. 모터링 압력은 제원상의 값을 충분히 만족시키며, 연소최고압력의 사이클 변동은 최고치 8% 정도, 연소최고압력 발생시기

사이클 변동은 최고치 2%이내의 값을 보이는 등 매우 안정된 연소현상을 보임을 알 수 있다.

Fig.7은 방전기간에 따른 IMEP의 변화를 확인하기 위하여 일정 초기조건에서 공연비와 스웰 조절밸브를 실험 조건으로 한 경우의 결과를 나타낸 것이다. 각 조건에서의 점화시기는 공연비와 유동에 따라 각각의 MBT를 결정된 후 연소를 행하였다. 방전기간이 증가함에 따라 전반적으로 IMEP는 약간 증가하는 경향을 보이고, 공연비 18.2 : 1인 조건에서는 HTHS의 경우가, 더욱 희박한 21.2인 조건에서는 HT의 경우가 각 조건에서 가장 높은 IMEP를 보인다.

Fig.8은 방전주파수에 따른 IMEP의 변화를 관찰하기 위해 일정 초기조건에서 실험을 행한 경우의 결과이다. 각 조건에서의 점화시기는 해당

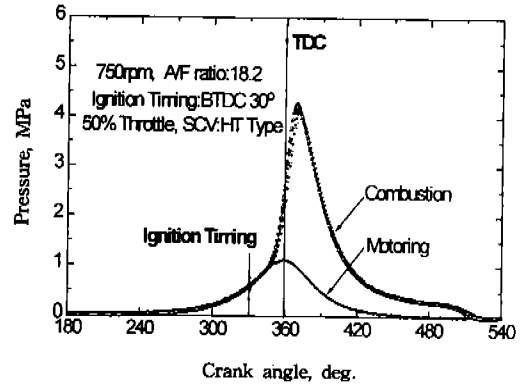


Fig.6 Cylinder pressure versus crank angle

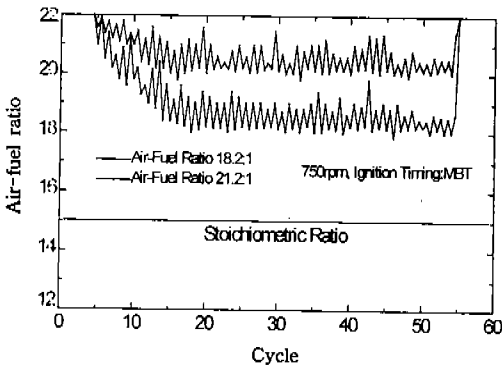


Fig.5 Typical waveform of the UEGO sensor output voltage

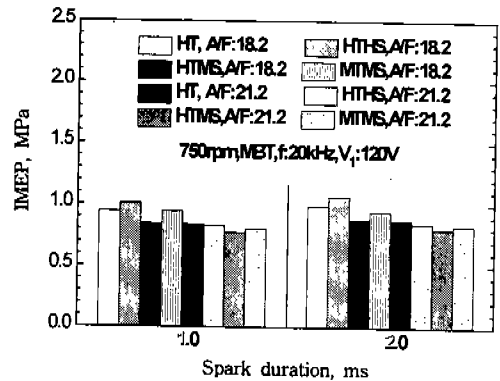


Fig.7 Relations between IMEP and SD

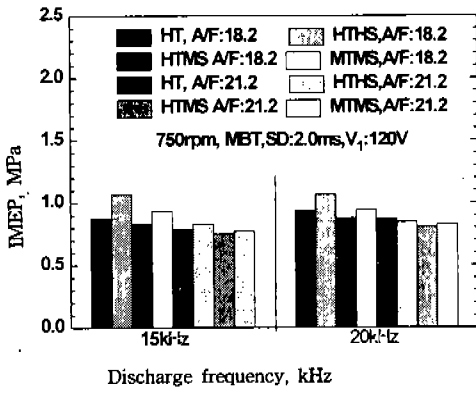


Fig.8 Relations between IMEP and frequency

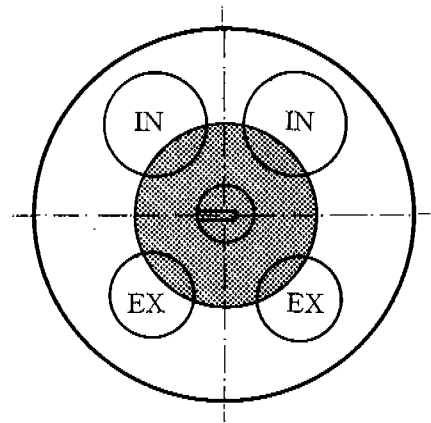


Fig.9 Schematic diagram of head and visible area

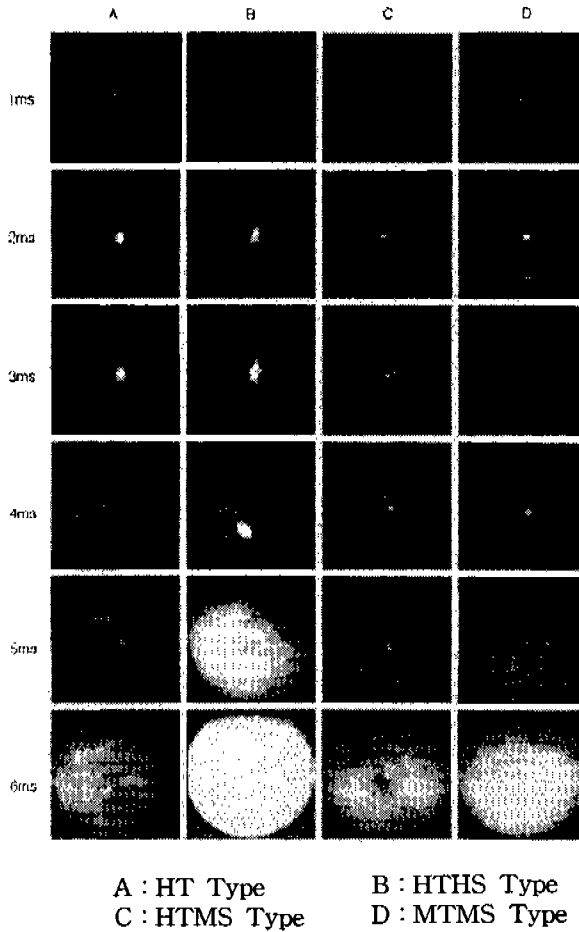


Fig.10 Images of the initial flame propagation process

조건에 최적인 점화시기를 취한 경우이며, 전반적으로 방전주파수의 변화는 IMEP에 그다지 큰 영향을 미치지 않는음을 알 수 있다.

다만, HTHS의 경우는 공연비 18.2:1인 경우에 점화주파수와 무관하게 가장 높은 IMEP를 보이는 반면, 더욱 희박한 공연비인 21.2:1인 조건에서 점화주파수 15kHz인 경우에는 공연비 18.2:1에서의 타 조건보다 높거나 거의 동등한 정도의 값을 보이고 점화주파수 20kHz인 경우에도 다소 높은 값을 보인다. 이러한 결과로 미루어 볼 때, HTHS는 희박한 혼합비 영역에 효과가 있는 것으로 보인다. 또, HT의 경우는 점화주파수 20kHz 영역에 비하여 15kHz가 현저하게 낮은 IMEP를 나타내는 특징을 볼 수 있는데, 이러한 결과와 Fig. 7의 내용을 종합하여 보면 희박한 혼합비 영역에서는 각각의 유동특성에 따른 적정의 점화조건이 존재함을 알 수 있다.

Fig.9는 연소실 내의 화염전파과정을 가시화하기 위하여 피스톤의 헤드면에 설치한 두께 20mm의 계단형 석영 유리창을 통한 가시화 부분을 나타낸 것이다. 연소실 내의 가시화가 가능한 영역은 직경 34mm로 연소실 단면적의 16%이다. 이는 커널 형성 및 초기화염전파과정을 가시화하기 위한 것으로 연장피스톤 하부에 45° 각도로 설치된 반사경을 통하여 화염을 촬영한다.

Fig.10은 기관회전수 750rpm, 공연비 16.6:1인 조건에서 점화주파수 20kHz, 방전기간 2.0ms, 1차전압 120V를 점화조건으로 착화시킨 경우의 스윙조절밸브의 변화에 따른 화염의 초기착화 및 전파과정을 촬영한 영상이다. 연속운전중 제어용 PC로부터 설정 사이클, 설정 크랭크각도의 위치에서 카메라 동기용 시그널이 출력되면 1,000fps의 속도로 10회의 사이클동안 연속으로 동영상이 촬영된다. 화염의 촬영은 칼라 디지털 저장방식을 채택한 고속비디오 카메라(MEMRECAMci, Max. speed 2,000fps, NAC inc.)를 사용하였고, 영상은 400×282pixels로 저장된다. 본 사진의 경우는 점화신호와 동시에 카메라용 시그널을 출력한 경우로 1ms 간격(크랭크각 4.5°에 해당)으로 촬영한 화염중 비교를 위하여 초기의 6프레임만을 각각의 유동특성에 따라 나타낸 것이다.

사진에서 볼 수 있는 바와 같이 각각의 화염은 유동조건에 따라 차이는 있지만, 초기부터 배기밸브쪽으로 치우치면서 발달해 가는 현상과 함께 경계면이 유동에 의하여 요철이 있는 난류화염의 형태를 보인다. 특히, 스윙 성분이 없는 HT의 경우에 초기에는 강력한 화염핵을 형성한 후 시간경과에 따라 화염의 전파속도는 느리게 발달하는 반면, HTHS 조건이 다른 조건에 비하여 상대적으로 빠른 화염전파속도를 보이고 있는데, 이는 모터링 운전시의 유동 측정 결과를 고려해 볼 때, 다른 조건에 비하여 스윙 각운동량이 크기 때문에 텀블 유동에 강한 와류를 생성시켜 압축과정 말기동안 점화플러그 전극 주변에 난류가 증진되기 때문이다. 또, 유동이 상대적으로 약한 MTMS의 경우도 화염의 성장 속도가 빠른 것을 볼 수 있었는데, 이러한 결과를 종합해 보면, 본 점화장치는 경사텀블 형태의 유동 특성에 적합한 것으로 보인다.

또, 동일 조건에서의 연소압력을 채취하여 분석한 결과도 유동특성에 따라 HTHS와 MTMS의 경우에 초기부터 열발생의 시기가 상대적으로 빠르고 질량연소율의 구배가 급격하게 나타남을 확인할 수 있었다.

4. 결 론

- 1) 당량비 조건은 물론 실린더 내의 혼합기 유동조건에 따른 각각의 MBT가 존재하며, 희박한 혼합비 영역에서는 각각의 유동특성에 따른 적정의 점화조건이 존재함을 알 수 있다.
- 2) IMEP는 방전기간이 증가함에 따라 전반적으로 다소 증가하는 경향을 보였고, 공연비 18.2:1인 조건에서는 고텀블 고스윙형의 경우가, 더욱 희박한 21.2인 조건에서는 고텀블 형의 경우가 각 조건에서 가장 높게 나타났다.
- 3) 연소화염은 유동조건에 따라 차이는 있지만, 초기부터 배기밸브쪽으로 치우치면서 발달해 가는 현상과 함께 경계면이 난류유동에 의하여 불규칙한 난류화염의 형태를 보인다. 또, HTHS 조건이 다른 조건에 비하여 상대적으로 빠른 화염전파속도를 보이는 것은 모터링

운전시의 유동 측정 결과를 고려해 볼 때, 다른 조건에 비하여 스윙 각운동량이 크기 때문에 텀블 유동에 강한 와류를 생성시켜 압축과정 말기동안 점화플러그 전극 주변에 난류가 증진되기 때문이다.

후 기

본 연구는 통상산업부와 과학기술처에서 시행한 G7 차세대자동차기술 공통기반과제중 흡기포트 및 연소실 설계기술 개발 사업의 기술개발 결과이며, 연구 수행과정에 있어 스윙조절밸브와 유동특성 데이터를 제공해 준 주관기관인 기계연구원 및 화염의 가시화 촬영에 협조해 준 KBAS 관계자에게 사의를 표한다.

참 고 문 헌

1. Marie Rönnbäck, Wang Xiao Le and Jan Roger Linna, "Study of Induction Tum- ble by Particle Tracking Velocimetry in a 4 Valve Engine", SAE Paper 912376, 1991.
2. C. Arcoumanis, C. S. Bae, "Visualization of Flow/Flame Interaction in a Constant Volume Combustion Chamber", SAE Paper 930868, 1993.
3. R. S. Warner, "Multiple Discharge-A More Effective Ignition, ASME Paper pp. 1~8, 1970.
4. Richard R. Burgett, Joseph M. Leptich and Karma V. W. Sangwan, "Measuring the Effect of Spark Plug and Ignition System Design on Performance", SAE Trans., pp. 48~66, 1972.
5. 이중순, 강병무, 윤수한, 하종률, "고주파점화장치를 사용한 착화성 향상에 관한 연구", 대한기계학회 논문집(B), 제20권 제1호, pp. 359~368, 1996.