

혼합기의 유동 및 점화조건에 따른 초기화염의 전파특성

The influence of Mixture Flow and the Ignition Conditions on the Initial Flame Propagation Characteristics

김진영*, 이종순**, 하종률***
Jinyoung Kim, Joongsoun Lee, Jongyul Ha

ABSTRACT

Initial flame development and propagation were visualized under the new ignition system developed to estimate the effects of ignition characteristics on the engine performance in a port injection SI engine. Effects of intake air flow characteristics were also investigated by three different kinds of the swirl control valve.

Experiments were performed in an optical single cylinder engine modified from a commercial engine. Flame images were captured through the quartz window mounted in the piston by the high speed video camera and analyzed to compare initial flame development.

Results show that IMEP tends to rise slightly as the ignition duration gets longer. The direction of flame propagation is decisively governed by the in-cylinder flow motion. Every flame grows toward the exhaust valve forming a kind of turbulent flame. Initial flame propagation characteristics are very similar to ones analyzed from pressure data.

주요기술용어 : Swirl control valve : SCV(스윙조절밸브), Ignition Characteristics(점화특성)
High speed video camera(고속비디오 카메라), Visualization(가시화)
Initial flame(초기화염)

1. 서론

포트 분사식 가솔린엔진에서 흡입유동은 엔진의 형상 변화에 의하여 비정상 난류유동으로 이

루어지고 있다. 이러한 실린더 내 가스유동은 흡입행정 에 이어 압축과정시 난류를 생성 또는 유지하여 화염전파속도를 증가시키는 등 연소과정에 영향을 미치는 인자이기 때문에 실린더 내의 유동에 대한 연구가 활발하게 진행되어 왔다.^{1,2)}

최근에서는 유해배기가스 저감과 연료경제성을 만족시키기 위하여 부분적인 희박연소 방식의

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

채택으로 인한 연소기간이 길어지는 문제를 난류 강도를 높여 화염전파속도를 증가시킴으로써 연소기간을 단축시키는 방법을 사용하고 있다.^{3),4)}

실린더 내 유동장의 강화는 연료의 혼합 측면 뿐만 아니라 압축행정 말기, 점화 후의 난류강도 증가가 희박연소시 화염전파속도를 증가시키는 역할을 하므로, 희박연소 가솔린기관의 개발에 있어서는 실린더 내의 적절한 유동장의 제어와 그 평가기술이 매우 중요한 문제로 부각되고 있다. 이를 위하여 흡기관의 구조변경, 흡기포트의 설치각도에 따른 영향, SCV의 설치 등 연소실 내의 혼합기에 적절한 유동을 가해주기 위한 연구가 국내외에서 많이 수행되고 있다. 그러나 압축행정 말기에는 복잡한 난류유동과 화염의 상호작용이 개입하므로 희박혼합기 조건에서의 사이클 변동이 생기며 이를 최소화하기 위한 연구도 필요하다.

따라서, 본 연구에서는 혼합기의 유동과 점화 에너지 방전조건이 희박혼합기 착화에 미치는 영향을 밝히기 위하여 실기관에서의 연소특성을 변화없이 재현하도록 가시화엔진을 설계·제작하였다. 또한 점화에너지의 크기와 분포특성의 변화가 가능한 고주파점화장치⁵⁾와 유동특성의 변화를 위한 3종의 스윙조질밸브(swirl control valve

: SCV)를 사용하였다. SCV를 흡기포트에 장착하여 텀블 및 경사유동장을 형성시킨 후 연소를 행하면서 연소압력측정 및 고속비디오 카메라로 화염의 착화 및 초기화염을 촬영하였다. 이로부터 점화 및 혼합기의 유동 조건에 따른 혼합기의 연소해석과 초기화염의 전파특성을 밝혔다.

2. 실험장치

1) 가시화 엔진

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

본 연구에서는 연료의 기화를 돕기 위해 연소실과 흡기매니폴드 둘레에 히터를 설치하고, 공급공기는 180 l 용량의 공기 예열탱크를 사용하여 333K으로 예열한 후 공급하였으며, 크랭크축의 위치를 검출, 제어하기 위하여 엔코더를 설치

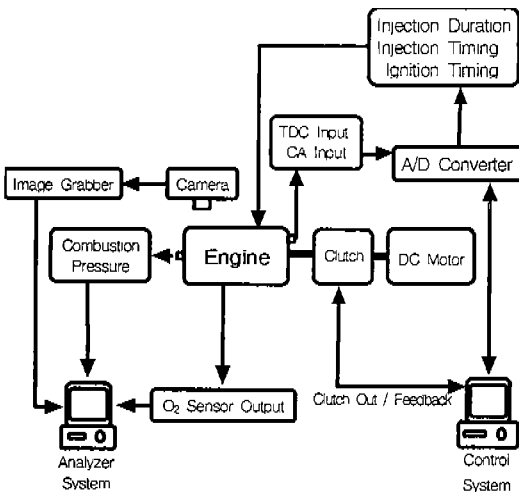


Fig.1 Schematic diagram of experimental apparatus

Table 1 Specifications of test engine

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

하여 기준신호로 사용하였다. 한편, 공연비 계측을 위하여 광역산소센서(UEGO Sensor, NGK Spark Plug Co.)를 배기다기관에 설치하여 배기 가스 중의 산소 농도에 따른 전압을 출력하여 공기-연료 혼합비를 구하였다. 그리고 연료는 단일 성분인 이소옥탄을 사용하였다.

2) 가시화 기법

연소실 내의 화염전파과정을 가시화 하기 위하여 피스톤의 헤드면에 설치한 두께 20mm의 계단형 석영 유리창을 설치하였다. 연소실 내의 가시화가 가능한 영역은 직경 34mm로 연소실 면적의 16%이다. 이는 커널 형성 및 초기화염전파과정을 가시화 하기 위한 것으로 연장 피스톤 하부에 45° 각도로 설치된 반사경을 통하여 화염을 촬영한다.⁶⁾

엔진내 화염전파과정은 칼라 디지털 저장방식을 채택한 고속비디오 카메라(MEMRECAMCi, Max. speed 2,000fps, NAC inc.)를 사용하여 동영상으로 촬영한다. 연속운전중 제어용 PC로부터 카메라 동기용 시그널이 출력되면 1,000fps의 속도로 10회 사이클분의 화염의 정보를 메모리에 저장한 후 비디오 테이프에 녹화한다. 영상 재생 과정에서 비디오 캡처보드를 사용하여 디지털 영상으로 컴퓨터에 기록하며, 이 영상들은 화염의 크기 및 거동을 분석하는데 사용된다.

3) 제 어

점화시기, 연료분사시기, 압력채취는 캠각의 신호를 시간기준으로 하여 수행하고, 연료분사시작신호는 캠각신호로, 분사량은 실시간 클럭(real time clock:122 μ s)으로 제어하였다. 제어용 컴퓨터에서 프로그램을 실행시키면 인터페이스를 통하여 출력된 신호가 전자클러치를 동작시켜 엔진을 구동시킨다. 이 때, 엔코더로부터 TDC와 CA 신호가 인터페이스를 통하여 제어용 컴퓨터로 입력되면 매 CA마다 프로그램 초기치 설정 값과 그 때의 크랭크 각도를 비교하여 각 제어내용의 해당시기에 동작 신호를 출력한다.

고주파 점화장치⁵⁾는 희박혼합기에 적합하도록 1회점화시 점화플러그의 틈새에 다수회의 불꽃방전을 형성하고, 이를 통한 충분한 양의 용량성에너지가 화염핵 생성 초기의 혼합기에 공급될 수 있도록 고주파수의 펄스를 연속적으로 스위칭 트랜지스터에 공급하는 개념을 채택하였다. 본 점화장치는 방전회수 및 방전기간의 제어가 가능하기 때문에 용량성 에너지 및 유도성 에너지의 크기 및 방전횟수를 변화시킬 수 있는 특징을 갖고 있다.

4) 유동특성의 변화

기관의 흡기계 형상을 변화시켜 스윙이나 텀블 또는 경사텀블 등과 같은 유동을 생성시켜 실린더 내의 유동장 강화를 꾀할 필요가 있다. 이를 위하여 두께 3mm인 3종류의 SCV를 제작한 후 정상유동 실험을 통하여 스윙비 및 텀블비를 측정하고 이결과를 실험의 변수로 채택하였고, 흡기포트와 기관의 측면 블록 사이에 장착하였다.

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

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



(A)HT Type (B)HTHS Type (C)HTMS Type (D)MTMS Type

Fig.2 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)	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°

3. 결과 및 고찰

Fig.3 은 흡기 포트각도 25°인 경우에서 점화 에너지의 영향을 고찰하기 위하여 점화에너지 변화에 따른 연소압력, 열발생률을 나타낸 것이다. BTDC 24°에서 점화시킨 경우의 10회의 연소압력을 앙상블 평균하여 나타낸 것이며, 그 평균값으로부터 열발생률을 산출하였다.

전반적으로 점화에너지의 변화는 연소특성에 그다지 큰 영향을 미치지 않는음을 알 수 있다. 다만 방전기간을 1.0ms에서 2.0ms로 증가시켰

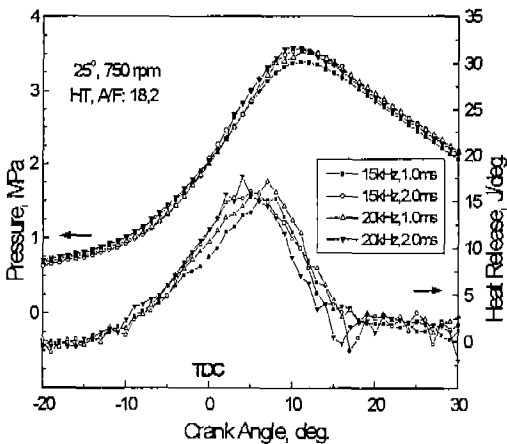


Fig.3 Effect of ignition energy on the Combustion pressure and Heat release rate

을 경우 연소최고압력이 약 6%정도 높아지며 열발생률 역시 20kHz, 2.0ms 조건에서 발생이 빠른 것을 알 수 있다. 이는 방전기간의 증가로 발화지연기간의 단축 및 강력한 초기화염의 발생으로 화염전파속도가 증가하는데 기인한다고 판단된다.

Fig.4는 공연비에 따른 연소최고압력과 IMEP의 변화를 확인하기 위하여 기관회전수 750rpm, 방전주파수 20kHz의 조건에서 공연비와 방전기간을 변화시킨 경우의 연소최고압력과 IMEP의 평균값을 나타낸 것이다. 각 조건에서의 점화시키는 공연비에 따라 각각의 MBT를 결정한 후 연소를 행하였다. 점화에너지의 방전기간이 증가함에 따라 1.0ms의 조건에 비해 연소최고압력과 IMEP는 증가하였고, 공연비가 증가할수록 증가폭은 커지는 것을 알 수 있다. 이 결과로부터 희박혼합기 조건에서는 보다 큰 점화에너지가 혼합기의 발화 및 화염의 전파특성에 도움이 됨을 알 수 있었다.

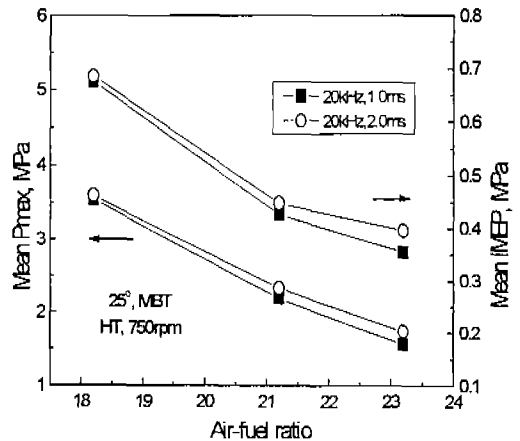


Fig.4 Relation between mean Pmax and mean IMEP on the A/F

Fig.5는 연소안정성을 확인하기 위하여 공연비와 점화에너지에 따른 연소최고압력과 IMEP의 사이클 변동량을 나타낸 것이다. 연소안정성을 나타내는 사이클 변동률은 공연비가 증가할수록

커지고 있다. 특히, 공연비 21 근처에서 COV_{IMEP} 의 값이 높아져 급격하게 연소의 안정성이 떨어지고 있음을 알 수 있다. 방전기간이 1.0ms에서 2.0ms로 증가함에 따라 COV_{Pmax} 의 값은 2%, COV_{IMEP} 의 값은 1.7%정도 감소하여 희박 공연비 조건에서도 상대적으로 연소의 안정성이 확보됨을 알 수 있다.

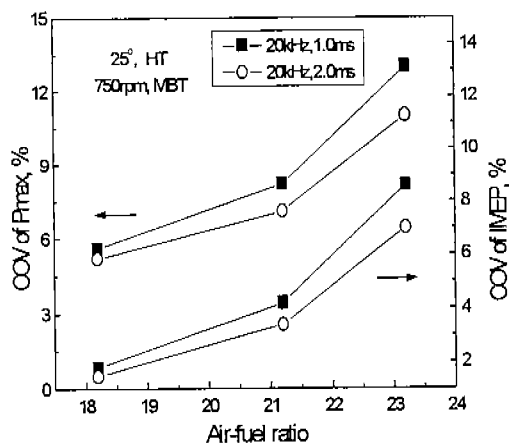


Fig.5 Relation between COV of Pmax and COV of IMEP on the A/F

스윙유동의 영향을 알아보기 위하여 스윙유동이 가미된 경사탐블 유동이 발생하도록 3종의 스윙조절밸브를 흡입포트에 장착하여 연소실험을 행하였다.

Fig.6은 경사탐블유동의 영향을 고찰하기 위하여 스윙조절밸브로써 혼합기의 실린더 내 유동을 변화시켜 크랭크 각도별 연소압력과 열발생률을 나타낸 것이다. HT에 비해 스윙유동이 가미된 경우가 다소 연소압력은 낮다. 이는 스윙유동이 발생하도록 개구율을 줄임으로써 흡입공기량의 저하를 초래한 결과로 보인다. 전술의 점화에너지 방전기간을 변화시킨 경우에 비하여 실린더 내에서 혼합기 유동을 변화시킨 경우에는 초기 연소압력의 증가 속도가 크게 변화하고 있음을

알 수 있다. 특히, HTHS인 경우 초기 압력상승이 빠르고, 이로써 급격연소가 일어남을 그림에서 알 수 있다. 또한 HTHS와 MTMS의 경우가 HT에 비교하여 연소의 진행이 다소 빠르거나 대등함을 열발생률로부터 알 수 있다.

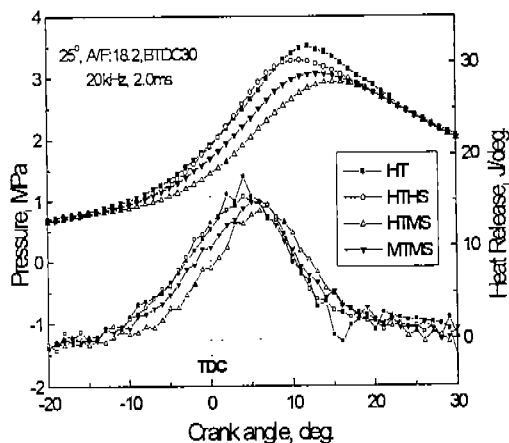


Fig.6 Combustion pressure and Heat release rate for SCV

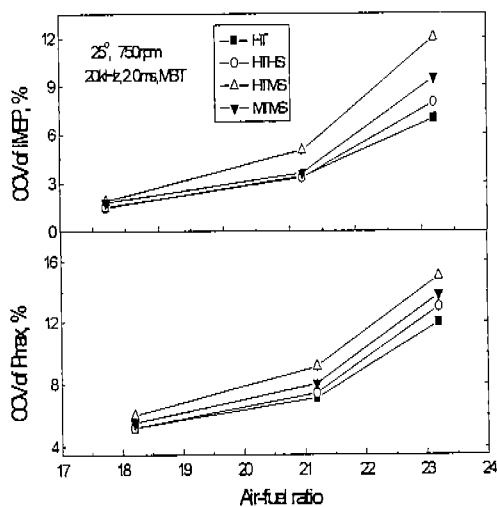


Fig.7 Relation between COV of Pmax and COV of IMEP on the A/F

Fig.7은 스웰조절밸브 장착시 연소안정성을 확인하기 위하여 공연비와 스웰조절밸브에 따른 연소최고압력과 IMEP의 사이클 변동량을 나타낸 것이다. 일정초기조건에서 실험을 행한 결과 HTHS, MTMS인 조건이 HT조건과 비슷한 값을 보이나 HTMS는 다소 변동률이 증가함을 알 수 있다. 특히 A/F 21이상으로 희박혼합기 조건이 될수록 경사턱플의 모든 조건에서의 COV_{IMEP} 값이 급격하게 높아짐을 알 수 있다. 이는 혼합비가 희박가연한계에 근접하고, 스웰유동 발생을 위해 개구율을 줄임으로써 연소압력이 낮고 또, 잔류가스의 증가로 사이클 변동이 크게 나타나는 것으로 판단된다.

Fig.8은 4종류의 스웰조절밸브를 장착하여 생성되는 경사턱플 유동장에서 나타난 화염면적을 크랭크 각도별로 나타낸 것이다. 일정초기조건에서 점화시기가 BTDC30°인 경우로 자발광의 화염을 가시화 한 것이다. 이 결과 순수턱플의 경우 점화플러그에 화염핵이 존재하는 시점까지는 매우 큰 화염면적을 보이나 이후 주변혼합기로 화염전파가 이루어지면 자발광의 광도가 줄었다가 다시 증가하는 경향을 보인다. 반면 경사턱플의 경우에는 초기부터 화염의 면적이 계속적으로 성장하는 것을 볼 수 있다.

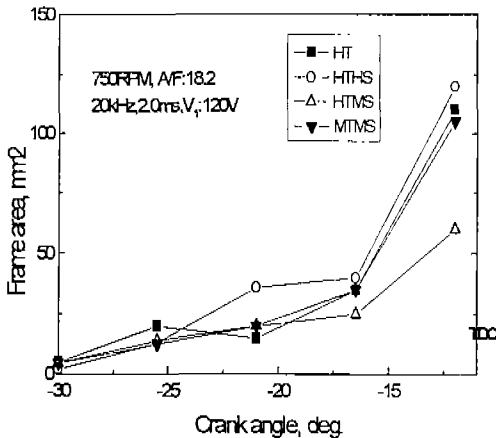


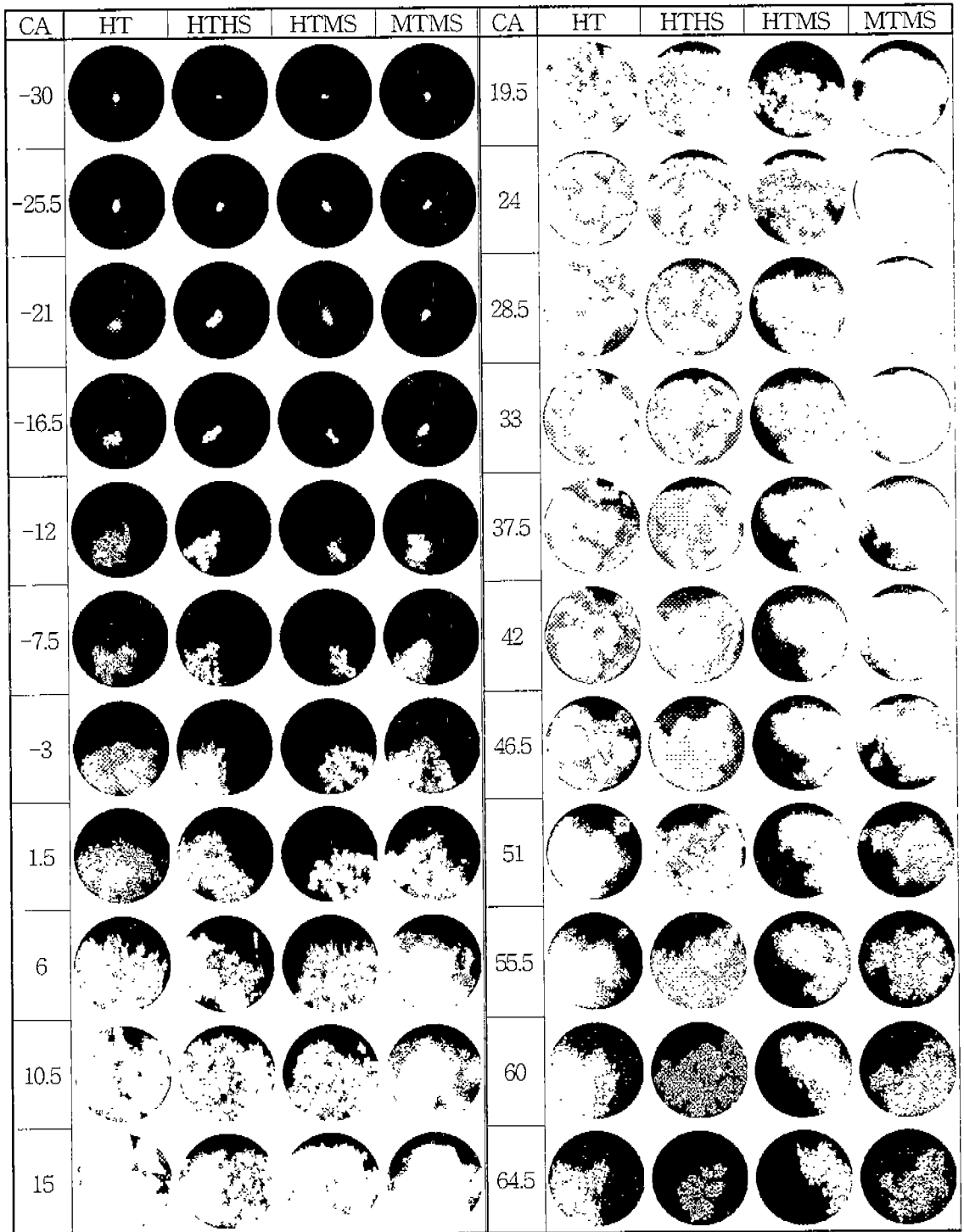
Fig. 8 Initial flame area as function of crank angle

특히 점화핵이 소멸된 직후 화염면적이 줄어들지 않고 계속 성장하는 것을 알 수 있다. 이러한 이유로 HTHS조건외의 초기화염전파가 HT의 경우보다 앞서는 것으로 판단하였다. 이는 전술한 열발생률과 일치함을 알 수 있다.

Fig.9는 기관회전수 750rpm, 공연비 18.2:1인 조건에서 점화주파수20kHz, 방전기간 2.0ms, 1차 전압 120V를 점화조건으로 착화시킨 경우의 스웰조절밸브의 변화에 따른 화염의 초기착화 및 전파과정을 촬영한 영상이다. 영상에서 볼 수 있는 바와 같이 각각의 화염은 유동조건에 따라 차이는 있지만 초기부터 배기 밸브쪽으로 치우치면서 발달해 나간다. 이는 압축말기까지 턴플유동이 존재하고 있음을 알 수 있다. 또한 스웰유동의 방향에 따라 초기에 일정한 각도로 화염이 전파됨을 알 수 있다. HT인 경우는 화염전파가 수직방향으로 이동하는 반면 HTHS와 MTMS의 조건은 수직방향과 약 30~45°의 각도를 유지하면서 화염전파가 이루어진다. HTMS인 경우는 화염전파속도가 상대적으로 느다. 이는 화염전파가 이루어지는 각도가 점화플러그의 접지전극의 각도와 일치함으로써 접지전극이 초기 화염전파를 방해하여 화염전파가 타조건보다 늦어지는 것으로 판단된다. 또, 이와 같은 화염의 가시화는 연소실험으로부터 채취한 압력데이터의 분석결과와 잘 일치함을 알 수 있었다.

4. 결론

혼합기의 유동과 점화에너지 방전조건이 희박혼합기 착화에 미치는 영향을 밝히기 위하여 점화에너지의 크기와 분포특성의 변화가 가능한 고주파점화장치와 스웰조절밸브를 사용하였다. 이를 가시화 엔진에 적용하여 점화 및 혼합기의 유동 조건에 따른 초기화염의 전파특성을 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.



CA(Crank Angle)는 TDC를 기준으로 BTDC는 '-', ATDC는 '+' 기호를 사용

Fig.9 Images of the flame propagation process

1) 점화에너지의 방전기간에 따른 IMEP는 방전기간이 길어질수록 전반적으로 증가하였으며, 공연비가 희박해질수록 증가폭은 크게 나타났다. 또한 COVimep의 값도 낮아져서 엔진 구동범위의 가연한계를 확장할 수 있었다.

2) 텀블비와 스윙비의 크기가 상대적으로 적절한 값이 존재하였으며, 경사텀블의 유동의 형태는 화염전파를 촉진함을 알 수 있었다.

3) 압축말기까지 존재하는 텀블유동의 영향으로 연소화염은 초기부터 배기밸브쪽으로 치우치면서 발달해 가는 현상과 함께 스윙유동의 영향으로 수직방향에 대해 일정한 각도를 유지하면서 화염전파가 이루어졌다.

4) 순수텀블보다는 스윙을 가미한 경사텀블 유동의 형성이 초기화염전파에 유리하였으며 고텀블고스윙형(HTHS)와 고텀블(HT)가 양호한 초기연소특성을 보였다.

후기

본 연구는 '98년 동아대학교 교내학술연구 조성비에 의해 수행되었으며 학교당국에 감사의 뜻을 표합니다.

참고 문헌

1. I. Nagayama et.al., "Effects of Swirl and Squish on S.I. Engine Combustion and Emission", SAE Paper 770217.
2. C.Arcoumanis, et al., "Tumbling Motion : A Mechanism For Turbulence Enhancement In Spark-Ignition Engines" SAE Paper 900060.
3. Germane, G.J., Wood, C.G. and Hess, C.C., "Lean Combustion in Spark-Ignited Internal Combustion Engines", SAE Paper 831694, 1983.
4. Kalghtgi, G.T., "Spark-Ignition, Early flame Development and Cyclic Variation in IC Engines", SAE Paper 870163, 1987.
5. 김진영, 이종승, 이종순, 하종률, "혼합기 유동특성과 점화에너지 해석을 통한 신점화시스템 설계", 한국자동차공학회 추계학술대회, 97380220, 1997.
6. 김진영, 이종순, 정성식, 하종률, 배충식, "혼합기의 유동과 점화특성이 기관성능에 미치는 영향", 한국자동차공학회논문집 제6권 제5호, 98370097, 1998.