

## 피스톤 형상이 연소와 화염전파에 미치는 영향

### The Effect of Piston Configuration on Combustion and Flame Propagation

지명석\*, 강기영<sup>1</sup>

Myoung-Seok Jie\*, Ki-Young Kang<sup>1</sup>

#### 〈Abstract〉

Two type pistons which had different configuration were made to find out the effects on combustion and flame propagation. Flame propagation speed was obtained by use of the cylinder head gasket ionization probe. Ionization Probe voltage output and flame propagation speed were increased according to the air fuel mixture ratio increase. Exhaust direction flame propagation speed was fastest in combustion chamber and next was front direction, rear direction and intake direction cause of tumbling motion in cylinder. In case of remove the valve pocket in piston, average flame propagation speed changed slowly and spark timing was advanced. Also emission was decreased.

*Keywords : Piston valve pocket, Flame propagation speed, Ionization probe*

---

\* 정회원, 아주자동차대학 교수, 공학박사 충남대학교 대학원 졸업 충남 보령시 주포면 대학길 106  
E-mail: jms@motor.ac.kr Tel: +82-41-939-3163  
Fax: +82-41-939-3163

<sup>1</sup> 대덕대학교 교수, 공학석사, 아주대학교 대학원졸업 대전광역시 유성구 가정북로 68 (장동 48)  
E-mail: kangky21@ddu.ac.kr Tel: +82-42-866-0362  
Fax: +82-42-866-0389

\* Professor Dept. of Automobile Engineering, Ph.D. Ajou Motor College 106 Daehaggil Jupo-myeon Boryung-si. Chungnam  
E-mail: jms@motor.ac.kr Tel: +82-41-939-3163  
Fax: +82-41-939-3163

<sup>1</sup> Professor Dept. of Precision Mechanical Engineering Daeduk University 68, Gajeongbuk-ro, Daejeon-si  
E-mail: kangky21@ddu.ac.kr Tel: +82-42-866-0362  
Fax: +82-42-866-0389

### 1. 서론

연소실에서 유동과 연소특성은 엔진의 성능을 결정하는데 중요한 역할을 하기 때문에 이에 관한 연구가 그동안 많이 진행되어왔다. 특히 성능과 연비를 개선하기 위하여 연소실내의 선회유동과 텀블 유동에 의한 연소특성을 이해하기 위한 실험이 많이 진행되어왔다<sup>1)</sup>. 그러나 엔진의 성능을 향상시키기 위하여 고압축비의 엔진이 적용되며 연소실이 축소되었다. 그리고 피스톤의 밸브포켓이 적용되게 되었으며 이에 따라 연소실의 유동이 영향을 받게 되었다. 따라서 본 연구에서는 엔진의 피스톤 형상을 두 가지로 변경하며 피스톤 형상이 연소에 미치는 영향을 비교하였다.

실제 엔진의 연소 상태를 측정하기 위하여 연소압력 측정에 의한 열역학적 해석이 주로 사용되고 있다. 연소압력은 연소특성을 파악하기 위한 필수적인 데이터이지만 연소압력 측정에 의해서는 화염 전파과정을 알 수 없고 연소된 가스 체적만을 알 수 있으므로 다차원적인 해석에 제약이 따른다. 따라서 연소실내의 화염전파과정을 측정하기 위하여 고속 카메라를 사용하기도 하지만 장비의 가격이 매우 고가이고 측정된 데이터도 정성적인 값만을 얻을 수 있으므로 한계가 있다. 그러나 이온 프로브를 이용한 화염전파 측정기술은 값싸고 측정하기 편리하며 연소압력과 함께 사용될 때 연소현상을 더욱 상세하게 분석할 수 있게 한다<sup>2,3)</sup>. 본 실험에서는 실린더 헤드 개스킷에 이온프로브를 장착하여 연소실내의 화염 전파특성을 측정하였다.

### 2. 실험장치 및 실험방법

#### 2.1 엔진 제원

본 실험에서 연소실내의 화염전파특성과 연소현상을 파악하기 위하여 단기통 엔진을 사용하였으며 엔진의 제원은 다음과 같다.

Table 1. Engine Specification

Engine Type	Single Cylinder
Displacement(cc)	1599
Number of Valve	Intake:2, Exhaust:2
Bore(mm)	77.40
Stroke(mm)	85.00
Compression Ratio	9.0
Combustion Chamber	Semi-wedge

실험 엔진에 사용된 피스톤은 밸브포켓이 있는 표준사양과 밸브포켓을 제거하고 흡기밸브 방향의 squish height를 표준사양 대비 3mm 증가시킨 두 가지 사양을 사용하였으며 피스톤 형상은 Fig. 1과 같다.

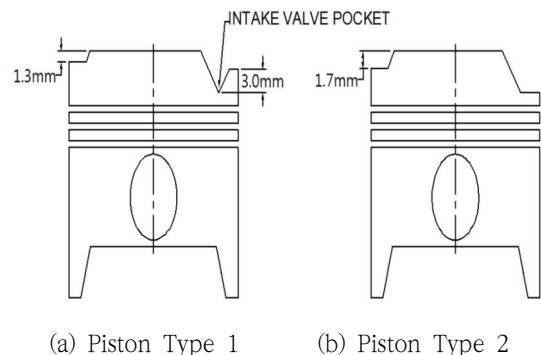


Fig. 1 Piston Configuration

그리고 본 실험에서는 연소실내의 화염전파특성

을 파악하기 위하여 실린더 헤드 개스켓 이온프로브를 사용하였다. 본 실험에 사용된 측정 장치의 구성도는 Fig. 2와 같다.

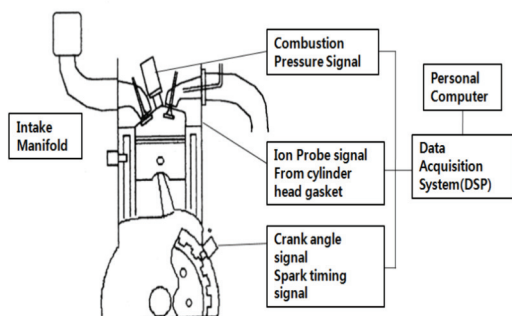


Fig. 2 Experimental Diagram

## 2.2 실험 방법

본 실험에서는 피스톤의 형상을 두 가지 사양으로 변경하며 연소실내의 유동을 변화시킴으로써 엔진의 성능에 미치는 영향을 비교하였다. 엔진의 압축비를 동일하게 조절하기 위하여 피스톤 Type 1을 적용할 경우 실린더헤드 개스켓을 0.2mm 두께로 조정하였다. 엔진성능의 비교는 1800RPM 2.0bar BMEP와 2400RPM 2.5bar BMEP 부하에서 공연비를 14:1에서 17:1까지 변화시키며 공연비에 따른 연소특성을 비교하였다. 그리고 1800RPM에서 엔진부하를 2.0bar BMEP, 4.0bar BMEP, 6.0bar BMEP로 변화시키며 부하변경에 따른 연소특성을 비교하였다.

또한 연소압력을 측정하기 위하여 Piezo Electric 압력센서(Kistler 6001)를 사용하였고 DSP의 Data Acquisition System(ACAP 3.0)을 이용하여 200개의 사이클을 연속적으로 측정하였고 앙상블 평균값(ensemble average)을 취하였으며 열역학적 해석에 의해 질량연소율을 구하였다.

## 2.3 실린더헤드 개스켓 이온프로브

연소실내의 난류 평균 화염전파속도를 측정하기 위하여 실린더 헤드 개스켓에 이온프로브를 장착한 실린더헤드 개스켓 이온프로브의 Wiring Pattern은 Fig. 3과 같다.

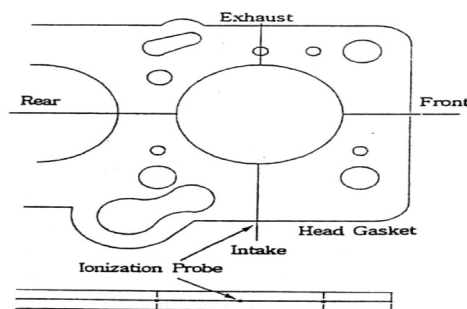


Fig. 3 Cylinder Head Gasket Ionization probe

실린더 헤드 개스켓 이온프로브에는 DC Power Supply에 의해서 그라운드와 250V의 전위차를 두었으며 화염 면이 이온프로브에 도달하게 되면 화염에 존재하는 많은 이온들  $CHO^+$ ,  $CH_3O^+$ ,  $C_3H_3^+$ ,  $H_3O^+$ ,  $NO^+$  등에 의해 이온프로브에 대기하고 있던 고전압이 이온들을 통해 흐르게 되며 이것을 이온 전류증폭기(Sokken HG-164)로 증폭하여 Voltage로 출력한다. 이때 최대 출력 값은 약 15V이다. 화염 면이 이온프로브에 도달하면 출력 값이 급격하게 상승되므로 Thresh hold를 3V로 정하였으며 Thresh hold를 지나는 시점의 크랭크 각도를 화염이 이온 프로브에 도달한 시간으로 하였다.

## 3. 실험 결과 및 검토

본 실험에서는 피스톤의 형상을 2가지 사양으로 적용하고 공연비와 부하를 변경시키며 실험을 하였으며 실험 결과는 다음과 같다.

Fig. 4는 Piezo-Electric Type 압력센서(Kistler 6001)와 실린더 헤드 개스킷 이온프로브를 사용하여 얻어진 대표적인 연소압력과 이온프로브 출력을 보여준다.

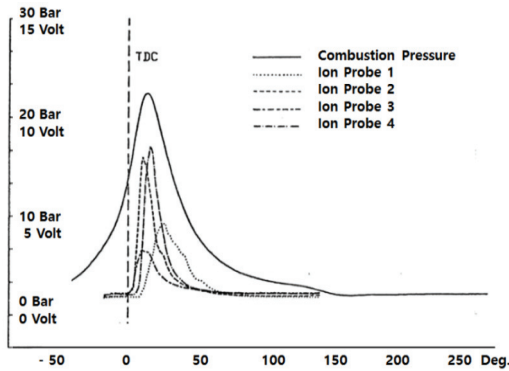


Fig. 4 Combustion Pressure and Ionization Output Voltage at 1800RPM 2.0Bar BMEP

연소압력 그래프로부터 연소실의 최고압력과 이 때의 크랭크각도 그리고 질량연소율을 구하며 이온 프로브 출력 값으로부터 각 프로브 방향의 난류 평균화염속도와 출력전압크기에 따른 난류 화염의 강도 즉 공연비의 상태(농후, 희박)를 구분할 수 있다.

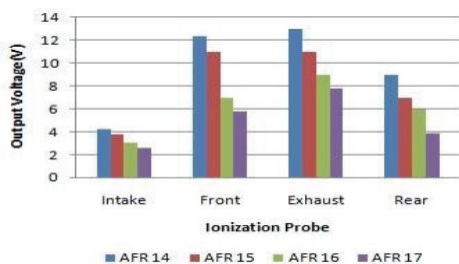
Fig. 5와 Fig. 6은 1800RPM 2.0Bar BMEP와 2400RPM 2.5Bar BMEP에서 공연비를 14:1에서 17:1로 변화시킬 때 각 프로브의 출력전압과 평균 난류 화염속도를 보여준다. 공연비가 희박해 질수록 이온프로브 출력값은 감소하였으며 평균 난류 화염속도는 감소하는 경향을 보인다. 이온프로브의 출력 값은 Exhaust 방향이 제일 크게 나타났고 Front 방향, Rear 방향, Intake 방향 순으로 나타났다. 그리고 난류 평균 화염속도도 Exhaust 방향이 제일 빠르게 나타났고 Front 방향, Rear 방향, Intake 방향 순으로 나타났다. 이것은 실린더 내의 텀블 유동으로 인해 화염이 Exhaust 방향으로 먼저 진행되고 Intake 방향으로 화염이 나

중에 돌아오는 것으로 판단된다. Front 방향이 Rear 방향보다 이온프로브 출력 값과 난류 평균 화염속도가 높은 것으로 보아 실린더 내 유동이 Front 방향으로 치우치고 있다는 것을 알 수 있다.

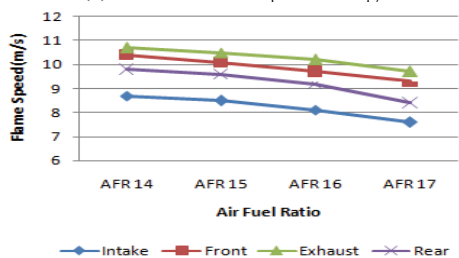
Fig. 7은 1800RPM에서 공연비를 14:1로 고정하고 부하를 2.0, 4.0, 6.0 Bar BMEP로 변화시킬 때 각 프로브의 출력전압과 난류 평균 화염속도를 보여주고 있다. 이온프로브의 출력 값은 공연비가 일정한 상태에서 부하가 증가할 때 부하에 따라 출력 값이 증가하는 경향을 보여준다. 그리고 부하가 증가하면서 실린더내의 공기유동속도가 빨라져서 평균 난류화염속도는 빨라짐을 알 수 있다.

Fig. 8은 1800RPM 2.0Bar BMEP에서 공연비가 14:1일 때 두 종류 피스톤에 대하여 이온프로브 출력과 난류 평균 화염속도를 비교하였다. 이온프로브의 출력값은 Exhaust 방향이 제일 크게 나타났고 Front 방향, Rear 방향, Intake 방향 순으로 나타났다. 그리고 평균 난류화염속도도 Exhaust 방향이 제일 빠르게 나타났고 Front 방향, Rear 방향, Intake 방향 순으로 나타났다. Intake 방향의 Squish Height를 증가시킨 피스톤 Type 2를 적용한 엔진의 경우 피스톤 Type 1을 적용한 엔진보다 Intake 방향의 이온 프로브 출력 값이 증가하였음을 보여준다. 이 결과로 부터 Intake 방향의 Squish Height를 증가시킴으로써 Intake 방향으로 유동이 더 많이 이동하였음을 알 수 있다. 난류 평균 화염속도는 피스톤 Type 2를 적용한 엔진이 피스톤 Type 1을 적용한 엔진보다 연소실 체적이 증가하며 감소하는 것을 보여준다.

Fig. 9는 두 종류 피스톤 형상에 대한 MBT 에서의 점화시기를 보여준다. 피스톤 Type 2를 적용한 엔진이 피스톤 Type 1을 적용한 엔진보다 점화시기는 2°정도 진각 되어 피스톤 Type 2를 적용할 때 연소속도가 느리게 진행됨을 알 수 있다.

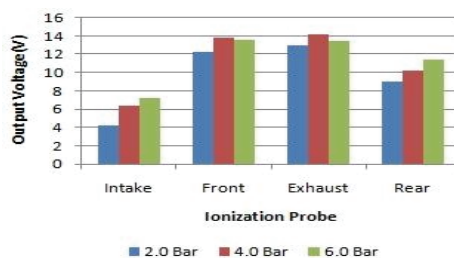


(a) Ionization output voltage

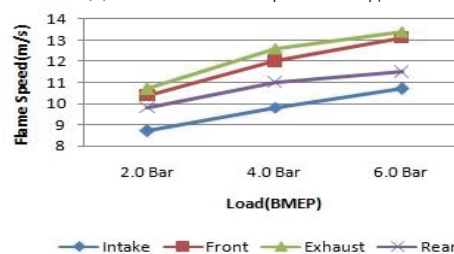


(b) Flame speed

Fig. 5 Ionization output voltage & flame speed for different A/F ratio at 1800RPM 2.0Bar BMEP with piston type 1

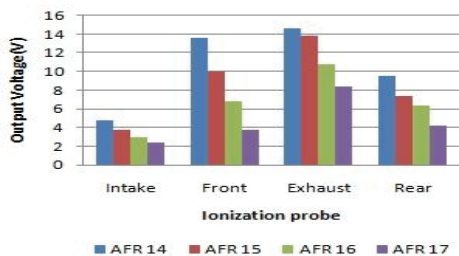


(a) Ionization output voltage

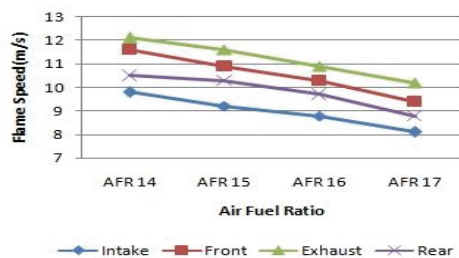


(b) Flame speed

Fig. 7 Ionization output voltage & flame speed for different load at 1800RPM AFR 14.0 with piston type 1

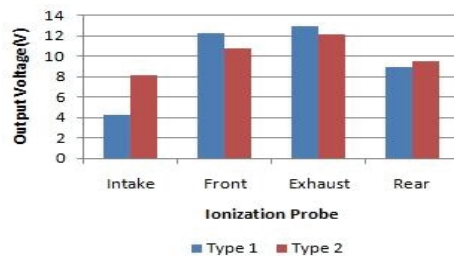


(a) Ionization output voltage

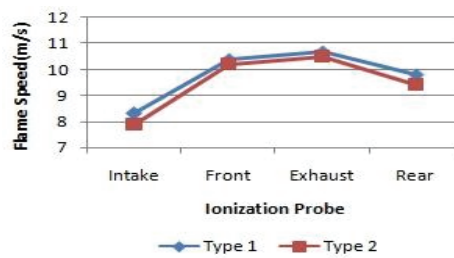


(b) Flame speed

Fig. 6 Ionization output voltage & flame speed for different A/F ratio at 2400RPM 2.5Bar BMEP with piston type 1



(a) Ionization output voltage



(b) Flame speed

Fig. 8 Ionization output voltage & flame speed for different piston at 1800RPM 2.0Bar BMEP AFR 14.0

Fig. 10은 연료소모량과 배기가스 결과를 보여 준다. 피스톤 Type 2를 적용한 엔진이 피스톤 Type 1을 적용한 엔진보다 연비는 2.46%정도 좋게 나타났으며 BSHC는 5%, BSNOx는 8.1% 정도 감소되었다. 이것은 피스톤 Type 1을 적용한 엔진보다 피스톤 Type 2를 적용할 때 피스톤 Valve pocket이 없어지며 흡기밸브 방향의 Squish Height가 증가하게 되어 실린더 내의 유동이 변화되며 연소성능이 향상된 것으로 판단된다.

Fig. 11은 1800RPM 2.0Bar BMEP에서 공연비가 14:1일 때 두 종류 피스톤의 Mass Burn rate를 보여준다. 피스톤 Type 2를 적용한 엔진이 피스톤 Type 1을 적용한 엔진보다 초기 질량연소율은 3.4% 정도 높게 나타났으나 주 연소구간인 10~90% 구간은 거의 비슷한 결과를 보여주고 있다.

#### 4. 결론

- 1) 연소실내에서 화염이 도달한 순서는 텀블 유동의 영향에 의해 배기밸브방향이 가장 빠르게 나타났으며 전, 후방향, 흡기밸브 방향 순으로 나타났다.

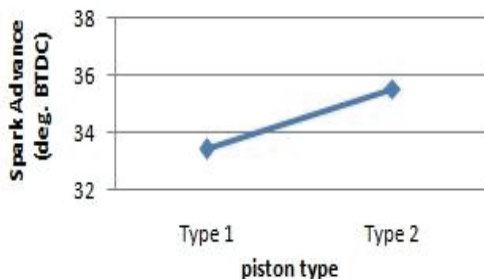


Fig. 9 Spark Advance for different piston type at 1800RPM 2.0Bar BMEP AFR 14.0

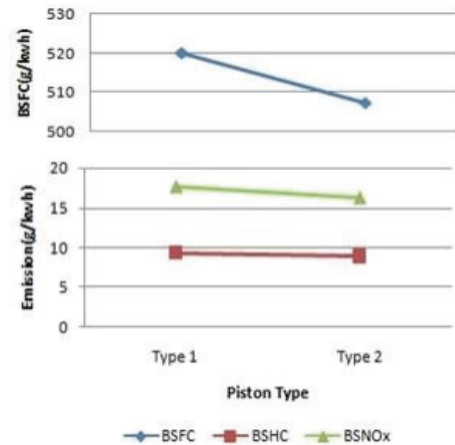


Fig. 10 Fuel Consumption and Emission for different piston type at 1800RPM 2.0Bar BMEP

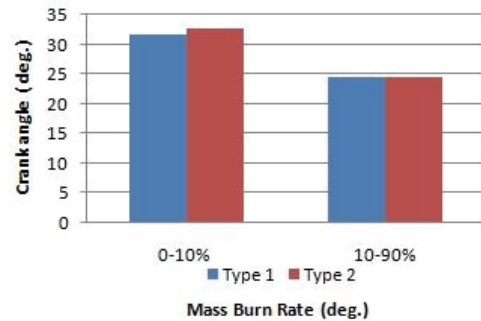


Fig. 11 Mass burn rate for different piston at 1800RPM 2.0Bar BMEP AFR 14.0

- 2) 이온프로브 출력 값과 난류 평균 화염 속도는 공연비가 농후하고 부하가 증가할수록 증가하였다. 공연비가 농후할 때 이온의 양이 많아 출력과 스피드가 증가하는 것으로 판단된다.
- 3) 피스톤형상 Type 1과 Type 2에 대하여 엔진회전수와 부하를 변경하며 실험을 수행하여 피스톤의 밸브포켓이 없는 피스톤 Type 2를 적용한 엔진이 연비는 2.46%정도 좋게

나타났으며 BSHC는 5%, BSNO<sub>x</sub>는 8.1% 정도 감소되어 연비와 배기가스 배출 면에서 양호한 결과를 얻었다.

- 4) 피스톤의 밸브포켓을 없애고 Squish Height를 높일 경우 연소실 공간이 넓어짐에 따라 연소실 내 난류 평균화염속도는 2~4.8% 정도 느려졌고 점화시기는 2°정도 진각 되었으며 배출가스는 BSHC는 5%, BSNO<sub>x</sub>는 8.1% 정도 감소하였다.

## 약어

AFR : Air Fuel Ratio

BMEP : Brake Mean Efficient Pressure

MBT : Minimum Advance for Best Torque

## 참고문헌

- [1] O. Hadded, I. Denbratt, Turbulence Characteristics of Tumbling Air Motion in Four-valves S.I. engines and Correlation with Combustion Parameters, SAE Paper No. 910478, (1992).
- [2] Peter O. Witze, Stefan C Bopp, Investigation of in cylinder Fluid Motion Using a Head Gasket Instrumented with Ionization probes, SAE Paper No. 910719, (1991).
- [3] Peter O. Witze, Cycle-Resolved Multipoint Ionization probe Measurements in a Spark Ignition Engine, SAE Paper No. 892099, (1989).
- [4] U. Spicher, H. Backer, Correlation of Flame Propagation and In-Cylinder Pressure In a spark Ignited Engine, SAE No. 902126, (1990).
- [5] Hidetosi Kudou, Hiroyuki Yamamoto, and Yoshihiko iida, A Study about In-Cylinder Flow and Combustion in a 4-Valve S.I. Engine, SAE No. 920574, (1992).

(접수: 2019.05.25. 수정: 2019.08.23. 게재확정: 2019.09.04.)