

〈論 文〉

이온전류법에 의한 가솔린엔진 연소실 형상별 급속연소효과 연구

강건용* · 서승우* · 정동수* · 장영준**

(1993년 1월 28일 접수)

A Study on the Effect of Fast Burn for Different Combustion Chamber Geometries of Gasoline Engine Using an Ion Current Method

Kern-Yong Kang, Sung-Woo Suh, Dong-Soo Jeong and Young-June Chang

Key Words : MSH(마스크부착 헤드), Fast Burn(급속연소), Lean Burn(희박연소), Swirl(와류), Ion Probe(이온탐침계), Air/Fuel Ratio(공연비), Flame Propagation Speed(화염 전파속도)

Abstract

In spark ignition engine, EGR of lean mixture operation has advantage in emission, but disadvantages in power output and combustion flame propagation. Fast burn system is known to be a useful method to solve these disadvantages. This paper presents the characteristics of in-cylinder flow for different combustion chamber geometries, and the correlation between the in-cylinder flow and the combustion flame speed using an ion current method.

1. 서 론

엔진에서의 연소현상은 엔진성능과 배기가스를 결정하는 중요한 과정으로서, 연소현상을 규명하고 연소시 화염진행을 필요에 따라 최적화하려는 연구가 활발히 진행되고 있다. 현재 가솔린 엔진에 많이 활용되고 있는 연소기술은 급속식 연소방식으로, 연소속도가 빨라지면 공기연료의 혼합기를 최대로 압축시킬 수 있는 상태까지 연소 시작점을 늦출 수 있으므로 연소 최고온도와 압력을 더욱 높일 수 있고, 따라서 엔진성능을 향상시킬 수 있다.⁽¹⁾ 또한 최근 들어 배기감소와 연비향상을 위하여 배기가스 재순환(EGR)방식과 희박 연소방식 등이

사용되면서 늦어지는 연소속도를 빠르게 하기 위하여 급속 연소방식이 본격적으로 사용되기 시작하였다.^(2,3,4)

본 연구에서는 급속연소기술의 가솔린엔진에 적용을 목적으로 흡입과정시 강한 와류(swirl)를 생성하는 마스크부착 헤드(masked shroud head, MSH)형을 급속연소형으로 제작하여, 마스크부착 헤드형에서의 급속연소효과를 이온전류법에 의한 화염속도를 측정하므로써 규명하려한다. 이온전류는 이온탐침계(ion probe)를 연소실 표면의 두 지점에 설치하여 검출하며, 이온전류 신호를 정성적인 방법으로 검증한 후 표준 헤드형과 마스크부착헤드형을 장착한 엔진에 대해서 화염전파 속도를 비교 측정한다. 측정된 화염 전파속도는 정확한 연소특성 분석을 위해 각 사이클에서의 값을 표본으로 하는 통계적 방법으로 처리한다.

*정회원, 한국기계연구원 동력기계실

**정회원, 부산대학교 정밀기계공학과

2. 마스크부착 헤드형과 표준 헤드형

2.1 연소실 형상

흡입공기 유입시 강한 선회류를 생성시키는 방법에 슈라우드밸브(shroud valve), 스윙링(swirl ring), 스윙베인(swirl vane), 스윙조절밸브(swirl control valve), 헬리컬포트(helical port) 등의 방법이 있으나 흡입공기량의 감소의 최소화, 구조변경의 용이성 등을 고려하였을 때 2밸브 엔진 시스템에서 스윙의 증가를 위해서는 마스크부착 헤드형이 가장 적합한 것으로 판명되었다.⁽⁵⁾

2000 cc급 승용차용 가솔린엔진에 정착된 기존의 헤드를 표준 헤드형으로 정의했고, 이 실린더 헤드에 마스크를 장착하므로써 흡입공기 유입시 실린더 접선방향으로 공기를 유동시킴으로써 강한 선회류를 생성시키고자 설계한 것이 마스크부착 헤드형이다. Fig. 1은 표준 헤드형과 마스크부착 헤드형의 기하학적 형상을 비교하고 있다. 두 헤드 형상 모두 반구형의 연소실로 흡기와 배기밸브를 각각 1개

씩 가지며, 실린더 중심으로부터 20 mm에 점화플러그를 25 mm 편심된 곳에 공기분사(air jet) 밸브를 갖는 형상이다.

2.2 와류생성 비교

Fig. 2는 표준 헤드형과 마스크부착 헤드형에서의 정상유동 실험시 흡기밸브 양정에 따른 와류비(swirl ratio)를 보여준다. 와류크기는 페달형 와류메타를 실린더 헤드로부터 120 mm하단의 실린더 단면에 설치하여, 흡입시 페달의 회전수를 광스트로브로 측정하였으며, 와류비는 식(1)과 같이 페달의 선속도를 유체의 실린더 축방향 속도로 나누어 무차원화 시킨 값이다.

$$\text{와류비} = \frac{\text{페달의 선속도}}{\text{유체의 실린더 축방향 속도}} \quad (1)$$

실린더의 흡입공기 유동조건은 엔진이 2000 rpm 전부하(wide open throttle)상태로 운전될 때 실린더 1개에 대해 1사이클의 흡입과정 동안 실린더로 유입되는 평균공기량과 흡기밸브를 최대양정으로 했을 때 송풍기(roots blower)로부터 정상상태로

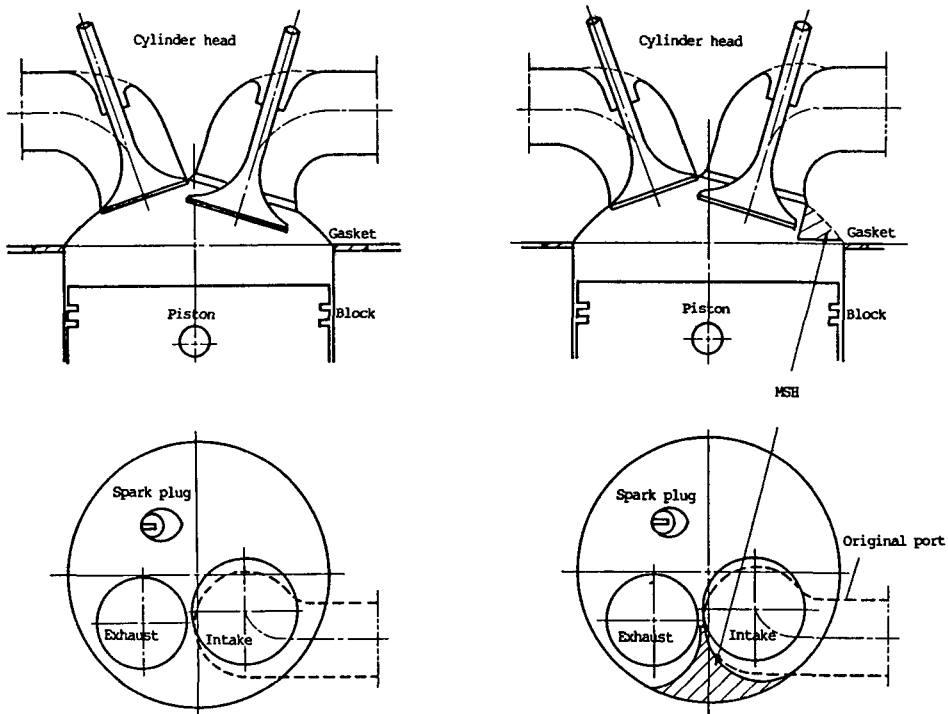


Fig. 1 Combustion chamber geometries

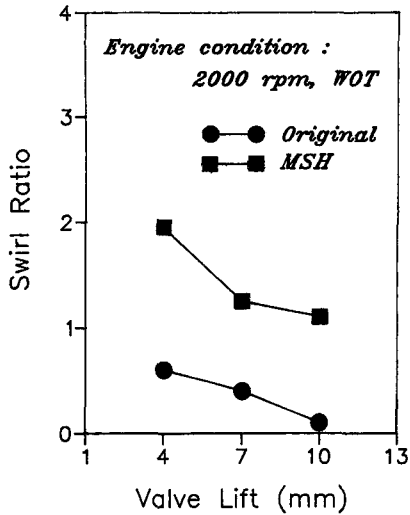


Fig. 2 Swirl ratio of original and MSH engine for different valve lifts

실린더로 유입되는 공기량이 같아지도록 하였다.

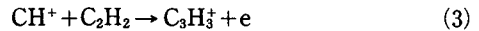
Fig. 2에서 보면 흡기밸브양정 증가에 따른 두 헤드형에서의 와류비의 감소현상은 같게 나타나고 있지만, 양정 4 mm일 때 마스크부착 헤드형의 경우 와류비가 2.0으로 표준 헤드형보다 3배이상 크게 나타나고 있고, 최대양정인 10 mm에서는 마스크부착 헤드형은 1.1, 표준 헤드형은 0.1로 10배이상 마스크부착 헤드형 엔진내 와류가 높게 나타나고 있다. 그러므로 흡입공기가 가장 많이 유입되는 최대밸브양정에서 와류생성은 표준 헤드형은 거의 없는 반면에 마스크부착 헤드형은 강한 와류를 생성시킴을 알 수 있다.

3. 이온전류 실험

3.1 이온전류 원리

연소중의 화염면은 이온화되어 도전성을 가지게 되므로 직류전압과 직렬저항을 가하여 이온갭에서 생기는 전류를 기록할 수 있는 이온탐침계법은 Langmuir 등⁽⁶⁾이 사용하기 시작했으며, 이 방법을 화염중에서 일어나는 연소반응에서 +, - 이온농도를 측정하여 화염에 적용한 것은 Calcote⁽⁷⁾이다. 산소를 산화제로서 탄화수소계 연료를 연소시킨 경우 예혼합화염 또는 확산화염의 화염내 근방에 예측되는 것보다 훨씬 많은 이온농도의 영역이 존재한다는 것이 알려져 있다.^(8,9) 이 영역중 이온은 주

로 화학이온화 반응에 의해 발생하며, 발생기구로서는 여러 학설이 있지만, 가장 일반적으로 생각되는 것은 식 (2) 또는 식 (3) 등이다.^(10,11)



이와같은 화학 이온화반응에서 발생한 이온은 재결합에 의해 급속히 소멸하기 때문에 이온농도가 높은 영역은 화염 반응대 근방의 비교적 좁은 영역이다. 이 사실을 기초로 정전침계 (electrostatic probe) 또는 이온탐침계로 내연기관 연소실이나 관내를 전파하는 화염의 속도측정, 난류화염과 진동화염 검출 등에 사용되어져 오고 있다.⁽¹²⁾ 兵本嘉輔 등은 이온전류 파형의 연소와의 관계를 밝혔고,⁽¹³⁾ 平野敏右 등은 이온전류 파형과 연소상태를 관계 지우기 위한 기초적인 지식을 얻기 위해 슈린렌 사진법으로 동시 측정해서 이 두 방법에 의해 검출된 화염면 위치의 차이를 조사했다.⁽¹¹⁾ 정전침계와 이온탐침계는 주로 화염면의 통과를 기록하여 화염 전파속도를 구할수 있지만 화염반응대 부근의 이온은 화학반응에 의해 발생하기 때문에 연료의 종류 및 연소상황에 따라 발생하는 이온농도와의 사이에는 정량적인 관계가 존재한다고 볼 수 있으나 이온전류를 이용한 내연기관내에서의 연료의 종류 및 연소상황과 이온 농도와의 상관관계에 대한 연구는 아직 충분히 행하여지지 않고 있다.

3.2 실험장치

Fig. 3은 이온전류를 이용한 표준 헤드형 엔진과 마스크부착 헤드형 엔진의 화염 전파속도를 측정하기 위한 실험장치의 개략도이다. 실험에 사용된 엔진은 Table 1과 같이 4기통, 1977 cc의 다중연료 분사장치 (multi-point injection, MPI) 가솔린엔진이다. 마스크부착 헤드형 장착시 틈새체적의 감소로 압축비가 증가하므로 실린더헤드 가스켓을 추가로 장착하여 압축비에 대한 보정을 하였다. 실험엔진은 전자조절장치 (ECU)에 의해 엔진부하와 회전수에 대한 조건에서 산소센서 신호로 피드백되어 연료분사량 및 점화시기를 자동적으로 조절하기 때문에 표준 헤드형 및 마스크부착 헤드형 장착엔진 실험시 같은 연료분사량 및 점화시기를 갖게 된다. 크랭크각도 검출을 위해 엔진의 캠축에 회전당 360 개 펄스가 발생되는 회전식 엔코더를 장착하여 크랭크각도 2도의 해상도를 갖는다. 엔진에 연결된

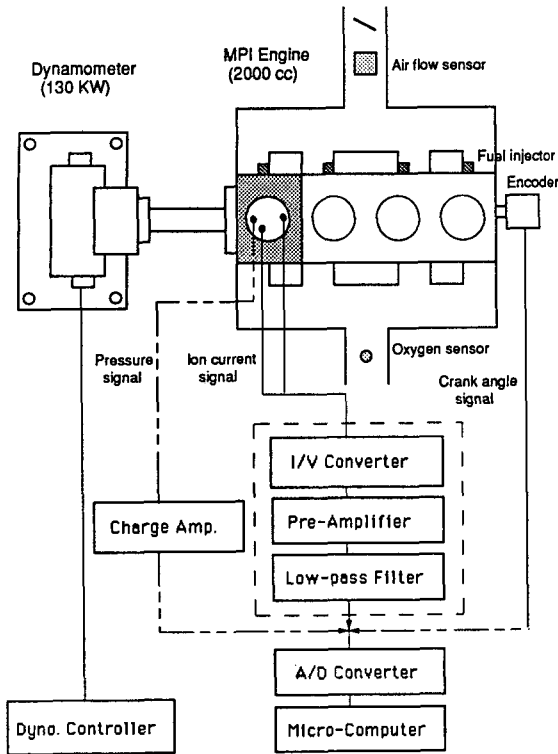


Fig. 3 Schematic diagram of experimental setup for flame speed measurement

동력계는 Schenck제품으로 130 Kw의 와전류 방식으로 엔진회전수와 부하상태를 정밀조절하도록 되어있다. 엔진의 4번 실린더 연소실 표면에 장착된 이온탐침계로부터 발생된 신호는 전류-전압 변환기를 거쳐 이온농도에 해당되는 직류전류가 전압신호로 바뀌어진다. 이 신호는 앰프를 통해 증폭되고

Table 1 Principal characteristics of the engine

Type of engine	MPI engine, 1977 cc
Bore	85.0 mm
Stroke	88.0 mm
Compression ratio	8.6
Intake valve	
Number	1
Open	19 deg. BTDC
Close	57 deg. ABDC
Exhaust valve	
Number	1
Open	57 deg. BBDC
Close	19 deg. ATDC

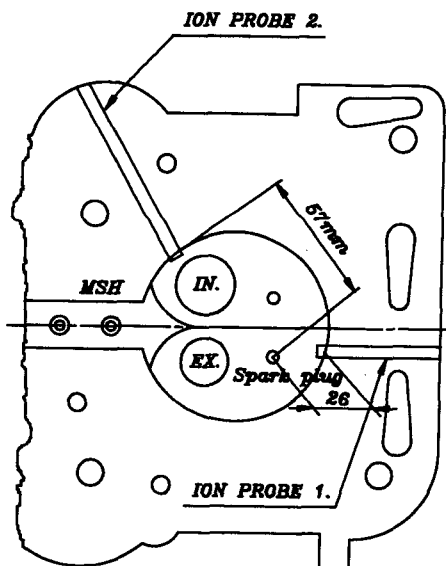
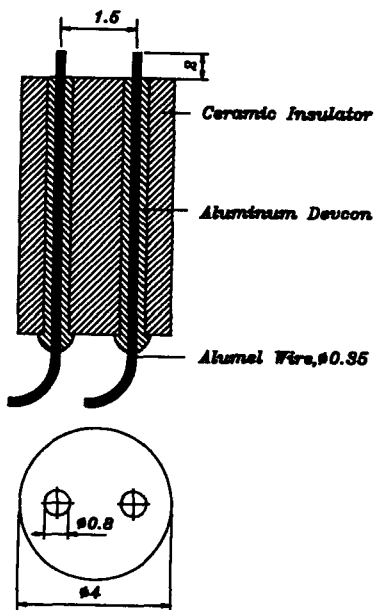


Fig. 4 Ion probe shape and positions fixed on combustion chamber

다시 노이즈제거를 위해 저역역통과 필터를 지나 고속의 데이터 처리장치를 통해 엔코더신호와 함께 컴퓨터에 저장된다. 데이터 처리장치는 16채널 1 MHz의 속도이며, 16비트의 해상도를 갖는다.

Fig. 4는 이온탐침계의 형상 및 연소실 표면 장착위치를 보여준다. 이온탐침계는 직경 0.35 mm의 K형 열전대 와이어중 알루멜(Alumel) 와이어를 사용하였으며, 직경 4인 절연재를 통과시켜 연소실 표면에 장착시키도록 되어 있다. 알루멜 와이어가 절연재로부터 돌출된 길이는 2 mm 정도로 하였다. 이온탐침계의 장착방향은 실린더헤드 가스켓 면과 평행하도록 하였다. 엔진연소실내 이온탐침계의 장착 위치는 점화플러그를 중심으로 26 mm 떨어진 (1)지점과, 57 mm 떨어진 (2)지점에 각각 설치하였다. (2)지점은 점화플러그로부터 직선거리로 가장 멀리 떨어진 연소실 표면으로 생각될 수 있다.

3.3 실험방법

엔진실험은 부하에 따른 화염 속도변화를 보기 위해 1/3부하인 40 Nm, 3/2부하인 80 Nm, 그리고 전부하인 120 Nm으로 변화시켰으며, 엔진회전수는 2000 rpm과 3000 rpm에서 이온전류 신호를 측정하였다. 측정된 이온전류 신호로부터 화염속도 산출을 위해 다음의 방법을 사용하였다. 먼저 화염속도는 점화가 시작된 후 화염이 점화플러그로부터 가장 먼 (2)지점에 도달할때까지의 시간을 측정해서 두지점간의 직선거리를 나누어줌으로서 평균 화염속도를 구했다. 따라서 화염 전파시간에 점화 지연 시간도 포함되어 있으므로 평균 화염속도는 다소 오차를 갖지만 마스크부착 헤드형과 표준 헤드형에서의 상대적인 화염 전파속도의 비교는 가능하다. 사이클 변동에 따른 화염 전파속도의 오차를 줄이기 위해 연속적인 9개 사이클의 앙상블(ensemble) 평균 화염속도를 식(4)와 같이 계산하여 그 대표값을 정했다. 여기서 N 은 사이클 수이며, 첨자 i 는 i 번째 사이클을 나타내며, S_f 는 화염 전파속도를 나타낸다.

$$\overline{S_f} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N S_{f,i} \quad (4)$$

4. 실험결과 및 고찰

4.1 이온전류 신호 검증

이온탐침계 실험으로부터 얻어진 데이터의 신뢰

성을 확인하기 위해 다음의 예비실험을 통해 실험 데이터를 검증하였다. 먼저 연소진행에 따른 이온전류 신호를 검증하기 위해 연소압력과 이온전류 신호를 동시에 메모리타입 오실로스코프를 통해 관측하므로써 매 사이클이 진행됨에 따라 연소압력의 상승지점과 이온전류 신호발생 지점이 일관성 있게 나타나는지를 확인하였다.⁽¹⁴⁾ 그리고 이온탐침계 장착위치에 대해서 연소가 진행됨에 따라 그 발생지점의 차이 및 이온전류의 발생강도가 매 사이클마다 일관성 있게 계속되는지를 검증하였다.

Fig. 5는 탐침계(1)과 탐침계(2)에서의 이온전류 신호의 도달시간 및 강도를 나타낸 그림이고, Fig. 6은 마스크부착 헤드형과 표준 헤드형에서의 탐침계(2)까지의 도달시간을 비교한 그림이다. 이들 그림에서 이온강도가 갑자기 증가하는 위치를 화염이 이온탐침계에 도달하는 시각으로하여 화염전파 속도를 계산하였다. Fig. 6에서 마스크부착 헤드형의 이온신호가 잘려진 부분은 양극성(polarity)이 ±5

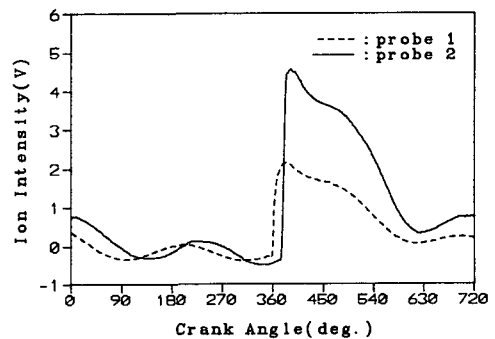


Fig. 5 Ion signals of original head engine at probe1 and probe2

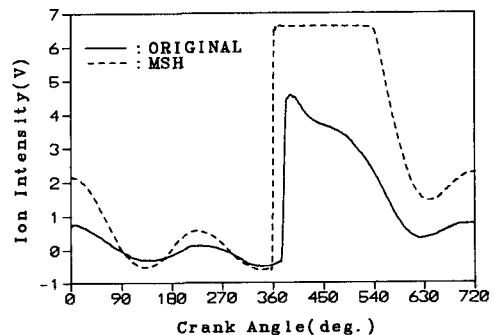


Fig. 6 Ion signals of original and MSH engine at probe2

V인 데이터 처리장치를 넘어서는 이온강도의 검출로 인한 것이다. 위와 같은 방법으로 다소 정량적이지는 못하지만 정성적 방법으로 이온전류 신호를 검증하고 난 후, 표준 헤드형 및 마스크부착 헤드형 엔진에서의 화염 전파속도를 측정해 상대적인 비교를 하였다.

4.2 화염 전파속도 비교

Fig. 7과 Fig. 8은 엔진회전수 2000 rpm과 3000 rpm에서 엔진부하 변화에 따른 표준 헤드형과 마스크부착헤드형 엔진에서의 평균화염 전파속도의 비교를 보여준다. 마스크부착 헤드형 엔진에서 평균화염 전파속도가 표준 헤드형 엔진에 비해 실험 조건에서 빠르게 나타나고 있다. 2000 rpm의 경우 부하가 40 Nm일때 표준 헤드형은 10 m/s, 마스크부착 헤드형은 17 m/s이고, 80 Nm일때는 표준 헤드형은 16 m/s, 마스크부착 헤드형은 21 m/s, 120 Nm일때는 표준 헤드형은 14 m/s, 마스크부착 헤드형은 26 m/s로 나타나고 있다. 3000 rpm인 경우는 40 Nm일때 약 20 m/s로 두 헤드에서 비슷하게 나타나고, 80 Nm일때 표준 헤드형은 22 m/s, 마스크부착 헤드형은 29 m/s, 전부하에서는 표준 헤드형이 28 m/s, 마스크부착 헤드형이 32 m/s로 나타났다.

엔진회전수가 2000 rpm일때가 3000 rpm에서 보다 큰 차이로 화염이 빠르게 진행되고, 엔진부하가

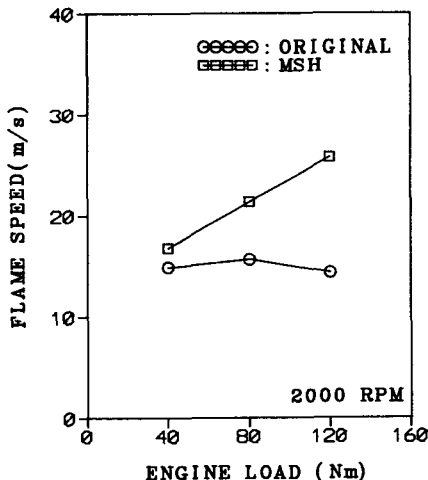


Fig. 7 Flame speeds of original and MSH engine under 2000 rpm, 40 Nm, 80 Nm, and 120 Nm

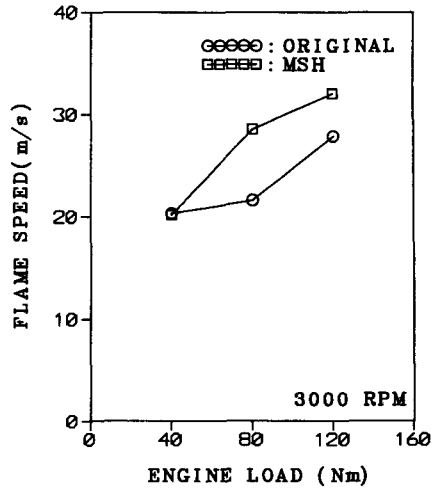


Fig. 8 Flame speeds of original and MSH engine under 3000 rpm, 40Nm, 80 Nm, and 120 Nm

증가할수록 각 엔진회전수에 대해서 마스크부착 헤드형에서의 화염 전파속도가 표준 헤드형보다 빨라지는 폭이 점차 커짐을 보여준다. 이와 같이 엔진회전수가 낮을수록, 엔진부하가 증가할수록 표준 헤드형에 비해 마스크부착 헤드형에서의 화염속도 증가폭이 크게 나타나는 것은 연소실내 유체유동의 특성에 기인한 것이다. 즉 예혼합 연소조건에서 화염 전파속도는 혼합기의 난류강도에 지대한 영향을 받으며,⁽¹⁵⁾ 그 난류강도는 엔진 흡입와류에 거의 비례하게 생성되고, 마스크부착 헤드형이 스로틀 밸브가 적게 열릴 경우의 부하가 낮을 때 흡입시 와류발생이 낮아지기 때문에 표준 헤드형과의 화염 전파속도 차이가 줄어든다. 그리고 엔진회전수가 증가하면서 피스톤운동에 의한 난류강도 생성이 증가되어 표준 헤드형에서도 높은 난류강도를 유지하므로서 화염 전파속도가 빨라지므로, 마스크부착 헤드형과의 화염 전파속도 차이가 줄어든다.

5. 결 론

흡입과정시 강한 와류를 생성시키는 마스크부착 헤드형과 와류생성이 거의 없는 표준 헤드형을 동일 엔진블록에 장착하여 연소과정시 화염 전파속도를 이온전류법으로 측정한 결과는 다음과 같다.

(1) 마스크부착 헤드형 엔진에서의 급속 연소효과는 스로틀이 많이 열리는 큰 엔진부하일수록 증가하고, 2000 rpm전부하에서 마스크부착 헤드형은

26 m/s로 표준 헤드형의 14 m/s보다 현저하게 증가하였다.

(2) 마스크부착 헤드형 엔진에서의 급속 연소효과는 표준 헤드형 엔진이 화염 전파속도가 느려지는 저 회전수 영역에서 더욱 증대된다.

(3) 체적효율의 감소가 적으면서 유동이 증가되는 마스크부착 헤드형 연소실 형상은 2밸브형 엔진에서 선회류를 증가시키고 아울러 급속 연소효과를 증가시켰다.

참고문헌

- (1) Mattavi, J. N., 1980, "The Attributes of Fast Burning Rates in Engines," SAE Paper, 800920.
- (2) Mattavi, J. N., 1982, "Effects of Combustion Chamber Design on Combustion in Spark Ignition Engines," SAE Paper, 821578.
- (3) Witze, P. O., 1982, "The Effect of Spark Location on Combustion in a Variable Swirl Engine," SAE Paper, 820044.
- (4) Matsushita, S., Inoue, T., Nakanishi, K., Okumura, T. and Isogai, K., 1985, "Effects of Helical Port with Swirl Control Valve on the Combustion Performance of S. I. Engine," SAE Paper, 850046.
- (5) 정동수 외, 1990, "고성능 가솔린 엔진용 배기 가스 감소기술 개발(Ⅱ)," 과학기술처 연구보고서 UCN292~1400. C.
- (6) Langmuir, I. and Mott-Smith, H. M., 1923, Gen. Elec. Rev. 31, p. 358.
- (7) Calcote, et. al., 1965, "10th Symp. (International) on Combustion," the Combustion Institute, pp. 605~607.
- (8) 平野敏右 외 3인, 1975, "화염전파의 탐침측정," 일본기계학회논문집 Vol. 41, No. 346, pp. 1899~1907.
- (9) Hanamoto Y., Yoshiyama S., Tomita E. and Izumi M., 1989, "Measureent of Turbulent Premixed Flame in a Closed Vessel by Using an Ion Gap," JSME Vol. 55, No. 512, pp. 1244~1227.
- (10) 최병륜, 1983, "난류 예혼합화염의 구조에 관한 연구," 오오사카대 학위논문.
- (11) 平野敏右 외 3인, 1976, "전파화염의 탐침측정(제2보)," 일본기계학회논문집, Vol. 42, No. 364, pp. 3974~3982.
- (12) Furukawa, J., Maruta, K. and Hirano, T., 1991, "A Fundamental Study of Electrostatic Probe Measurements to Explore the Microstructure of Turbulent Premixed Flames," JSME Vol. 57, No. 536, pp. 1463~1468.
- (13) 田中豊, 兵本嘉輔, 富田榮二, 1985, "구형 용기내 화염전파의 해석," 일본기계학회논문집, Vol. 51, No. 469, pp. 2964~2972.
- (14) 정동수의 3인, 1991, "이온전류에 의한 천연가스 및 가솔린의 엔진 연소 실내화염 전파속도 비교측정," 한국연소학회 제7회 학술강연회 초록집 pp. 40~43.
- (15) Rask, R. B. 1979, "Laser Doppler Anemometer Measurements in an Internal combustion Engine," SAE Paper, 790094.