

KIMM의 가솔린 엔진 급속연소 연구 및 관련 측정기술(II)



정 동 수 (동력기계 실장)

'70-'77	서울대학교 기계공학과 졸업(학사)
'86-'88	한국과학기술원 기계공학과 졸업(석사)
'78.2-'79.1	독일 OPEL 자동차 엔진공장(기술연수)
'82.1-'82.6	미국 SWRI 내연기관 연구부(공동연구)
'84.1-'84.6	영국 Ricardo 엔진연구소(공동연구)
'77.1-현재	한국기계연구원 책임연구원

1. 서론 : 4권 1호에 게재
2. 실린더내 가스유동 측정 : 4권 1호에 게재

3. 엔진연소실내 화염전파의 측정

3.1. 개 요

스파크 점화 기관 내에서의 연소를 특징짓는 화염전파의 측정은 운전 조건과 그 외의 인자가 전파시간이나 전파속도에 미치는 영향, knocking 이나 pre-ignition 등의 이상 연소에 의한 화염거동 등, 엔진내 연소과정의 시간적, 공간적 진행상황에 관한 많은 지식을 제공해 준다. 따라서 이러한 측정 결과는 연소실의 설계나 운전조건의 선정 등에 활용되어 스파크 점화기관의 성능향상에 큰 역할을 하게 되지만 측정기술상의 제한이 따르게 된다.

최근 배기가스에 의한 대기오염의 문제가 심각해짐에 따라 오염물질의 발생에 직접 관여하는 화염전파 과정의 정밀한 지식이 요구되고 있으므로 이 측정기술은 스파크 점화기관의 연구에 중요한 수단이라고 여겨진다. 측정 방법으로는 1930년대부터 사용되어 온 이온 전류법과 화염 사진법 그리고 최근에 널리 이용되고 있는 광섬유 이용법 등으로 크게 나누어진다.

이온전류방법은 이온화 현상을 이용한 것으로 이 방법은 연소실 벽에 설치된 이온 프로브를 이용하여 연소실의 화염을 검출해 내는데, 화염 전면에서 이온집중 현상이 발생하여 전기 전도도가 변화하는 원리를 이용한 것이다. 이 방법은 이온 프로브와 전선의 크기가 매우 작기 때문에 냉각수나 윤활유 통로 등으로 제한받는 곳에 설치하기가 용이하다. 이온 프로브에서 발생하는

전류는 증폭기에서 증폭되고 I/V converter를 통해 PC에 저장된다.

화염사진 촬영법은 연소실에 창을 설치하여 화염의 진행 상황을 사진으로 촬영하는 것으로 화염면의 진행 상황이나 화염 전파시간을 측정할 수 있다. 이 방법도 1930년대 부터 시도되어 그 당시 L. Withrow는 slit 모양의 석영창을 엔진 헤드부에 설치하여 석영창을 통과하는 화염의 유동사진을 측정하였고 G. M. Rassweiler는 연소실 측면에 가늘고 긴 창을 설치하여 화염 유동사진과 동시에 spectrum을 측정하였다. 또한 30년대말 경에 C. F. Taylor는 이와 유사한 방법으로 화염의 10%에서 95%까지의 진행시간 동안 knocking에 의한 화염의 거동등 화염속도와 운전조건의 영향을 광범위하게 측정하였으며 60년대에는 A. S. Sokolik에 의해 엔진 헤드부에 7개의 평행한 slit형 창을 내어 화염 전파의 상세한 pattern을 얻을 수 있었다. 이보다 발전된 방법으로는 전면 촬영법이 있는데 이 방법 역시 1930년대에 L. Withrow, Rassweiler, Rothrock 등에 의해 엔진 head부에는 석영창, 피스톤 크라운 부에 거울을 설치하여 Schliren법에 의한 고속촬영으로 수행되었다. 50년대에는 G. A. Ball이 side valve형 CFR 엔진을 사

용하여 앞에서와 같은 장치로 Schliren과 직접 사진을 동시 촬영하였고 60년대에 들어 F. W. Bowditch에 의해 연장된 피스톤의 크라운 부위에 석영창을 부착하고 피스톤 가운데 거울을 설치하여 Over Head Valve 기관의 연소 과정을 전면 촬영하는 방법을 고안하였는데 이런 모양의 피스톤은 Bowditch-type Piston이라 불리면서 이 방법은 최근까지 널리 이용되고 있다.

Schliren 방식은 빛의 물리적인 굴절현상에 기초를 두고 있는데 투명화된 엔진의 일부분에 빛을 쏘아 밀도나 온도에 따라 다르게 굴절되는 빛을 연소실의 벽면에 부착되어 있는 거울로 반사시켜 고속의 카메라로 녹화하게 된다. 이 방법으로 최근에는 J. C. Keck, J. B. Heywood, G. Noske 등이 고속 Schliren movie를 이용하여 사이클마다 압력이 변화하는 주된 원인이 초기 화염 kernel의 위치와 성장율이라고 밝히고 있다.

직접사진과 Schliren 사진의 특징은 일반적으로 전자는 고속도에서 감광도 면에서 약하므로 Na 염 등에 의한 착색이 필요한데 대하여 후자는 고속도에서도 쉽게 선명한 상을 얻을 수 있는 반면에 거울이나 마주 보는 경우에는 2개의 창을 설치할 필요가 있다.

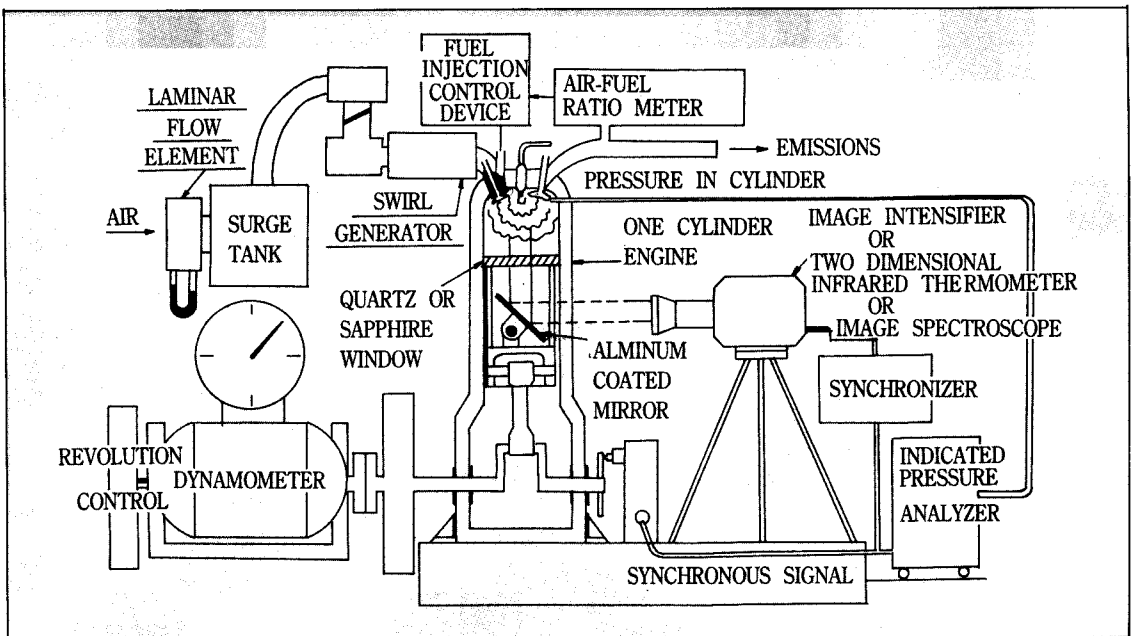


그림 1) Experimental Apparatus

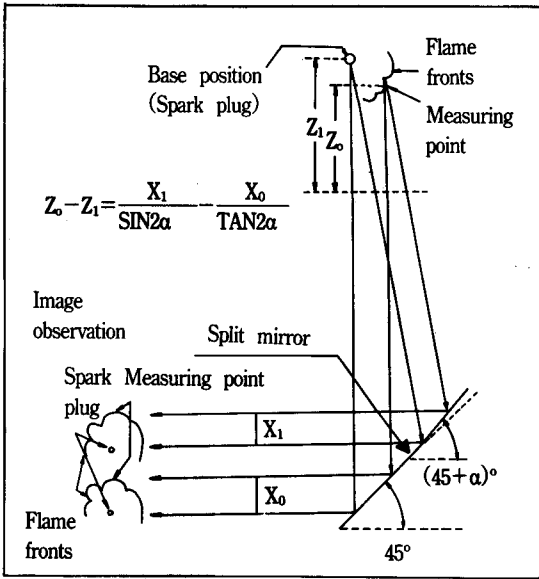


그림 2) 화염의 삼차원 측정법

집적 촬영법과 유사한 방법으로 최근 화염 전파 속도의 3차원 계측법이 Y. GOTO[1]에 의해 그림 1과 같이 수행되었다. 화염은 반구형 연소실을 3차원으로 전파하는 데도 불구하고 bottom view로 연소실내 화염전파를 관찰하는 경우 피스톤 상면에 투영된 2차원적인 화염의 상태 밖에 관찰할 수 밖에 없다. 그래서 벽면 근방의 연소화염속도를 계측하기 위해 새롭게 3차원 측정과 이중 노광법을 이용해서 연소실 화염속도의 3차원 계측을 수행하고 있다. 그림 2에서와 같이 알루미늄 증착 거울을 상하에 나누어 설치하되 하부 거울의 경사는 45° 이고 상부 거울의 경사는 $(45 + \alpha)^\circ$ 로 두며 두개의 거울에 의해 반사된 각 화염상은 기준위치(점화 프러그 위치)에서 각 화염상의 동일점까지의 거리가 다르므로 그 차에서 화염의 깊이 방향 Z의 위치가 구해진다. 또 45° 거울에서 피스톤 상면과 평행한 평면에서의 화염 위치좌표(X, Y)가 구해진다. 연속한 2개의 gate pulse를 image intensifier에 입력해서 이중 노광하고 중복 촬영된 화염상이 대응하는 2점에 있어서 좌표(X, Y, Z)에서 3차원의 2점간 거리를 구할 수 있고 화염 속도는 gate pulse 시간 간격과 화염의 3차원 이동거리에서 구하게 된다.

다음은 광섬유를 이용하여 화염 전파를 검출

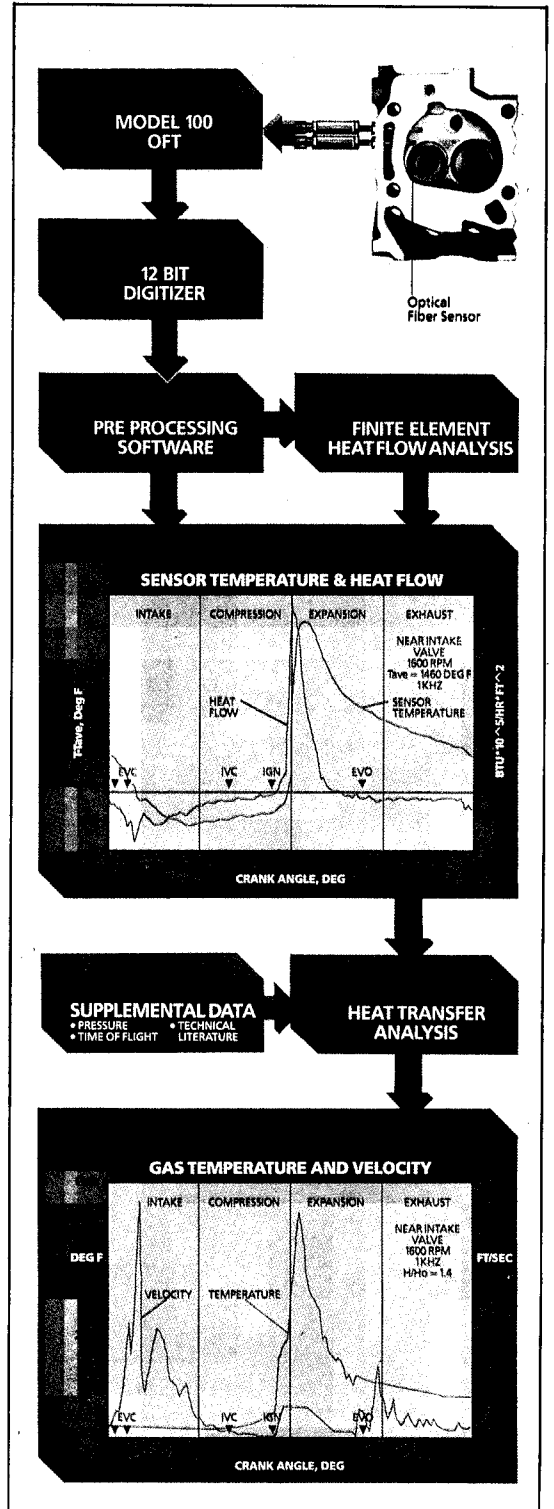


그림 3) 광섬유 Sensor를 엔진에 적용하여 상품화한 예

하는 방법으로, 연소시 화염에서 방출되는 빛은 연소실 벽에 적절하게 배치되어 있는 광섬유를 통하여 포토 다이오드로 전송된다. 포토 다이오드에서 빛은 전기 신호로 변환되며, 이 아날로그적인 신호는 증폭기에서 증폭되고, 전압 비교기에서 디지털화되어 PC에 저장된다. 이 방법을 이용하면 많은 사이클에 걸쳐서 높은 시간 해상도로 화염 전파를 기록할 수 있으므로 결과적으로 통계적 연구와 녹킹에 대한 연구가 가능해진다. 특히 매 사이클 마다의 변화에 대해서는 더욱 효과적이다. 이 방법으로 최근 Peter, Witze, Matthew 등은 광섬유가 장착되어 있는 스파크 프러그를 이용하여 초기 화염 전파에 대해 연구하였고, U. Spicher, Kollmeier는 연소실 벽에 다수의 광섬유를 심어 녹킹에 대해 연구하였다. 그림 3은 광섬유 sensor를 이용하여 엔진에 응용하도록 상품화된 제품의 한 예이다.

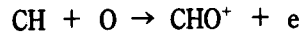
3.2. KIMM의 이온전류법에 의한 화염 전파속도 측정 실험

스파크 점화기관의 연소는 점화원에서부터 화

염이 전파되는 것으로서 본격적인 화염전파의 측정이 시작된 것은 1930년대 부터인데, 그 당시 사용된 이온 갭이나 사진촬영에 의한 방법이 지금도 사용되고 있다.

연소중의 화염면은 이온화 되어 도전성을 가지게 되므로 직류전압과 직렬저항을 가하여 이온 갭에서 생기는 전류를 기록할 수 있는 이온 probe법은 Langmuir[2] 등이 사용하기 시작했으며, 이 방법을 화염중에서 일어나는 연소반응에서 +, - 이온의 정체 농도를 측정하여 화염에 적용한 것은 Calcote이다[3].

산소를 산화제로서 탄화수소계 연료를 연소시킨 경우 예혼합화염 또는 확산화염의 화염내 근방에 예측되는 것보다 훨씬 많은 이온 농도의 영역이 존재한다는 것은 잘 알려져 있다[4][5]. 이 영역중 이온은 주로 화학이온화 반응에 의해 발생하며, 발생기구로서는 여러 학설이 있지만, 가장 일반적으로 생각되는 것은



또는

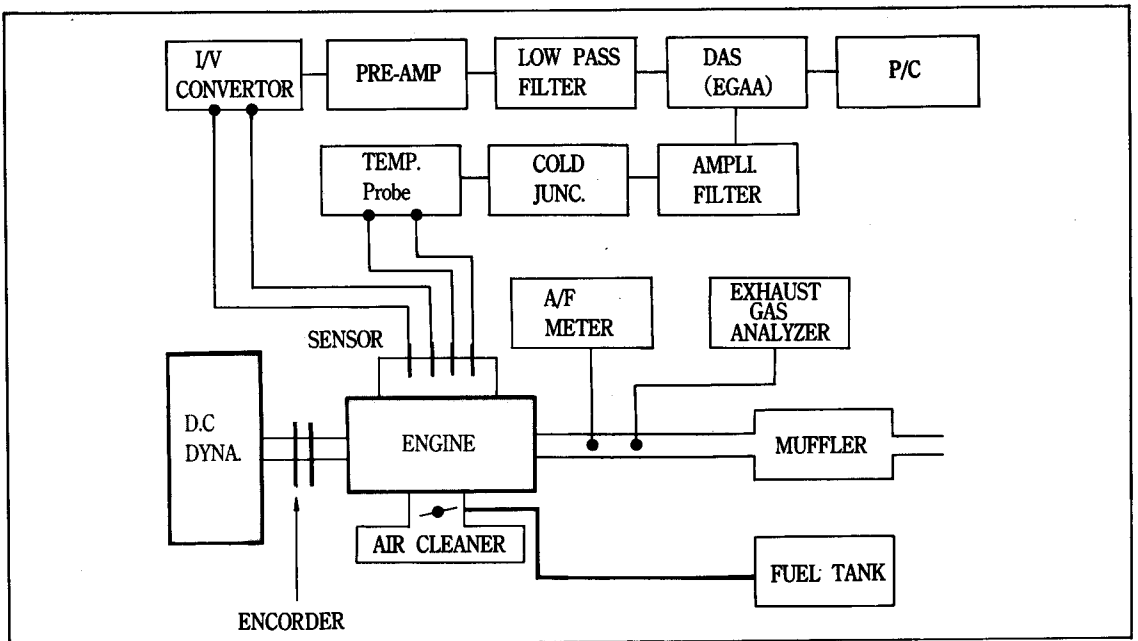


그림 4) 화염전파속도 측정을 위한 실험장치도

$CH^+ + C_2H_2 \rightarrow C_2H_3^+ + e$ 등이다[6][7].

이와 같은 화학 이온반응에서 발생한 이온은, 재결합에 의해 급속히 소멸하기 때문에 이온농도가 높은 영역은, 화염 반응대 근방의 비교적 좁은 부분이다. 이 사실을 기초로 정전침계(Electrostatic probe) 또는 이온 probe(Ionization probe)로 내연기관 연소실이나 관내를 전파하는 화염의 속도 측정, 난류화염과 진동화염 검출등에 사용되어져 오고 있다[8].

田中[9] 등은 이온전류 파형의 연소와의 관계를 밝혔고, 平野[7] 등은 이온전류 파형과 연소상태를 관계지우기 위한 기초적인 지식을 얻기 위해 슈리켄 사진법으로 동시 측정해서 이 두 방법에 의해 검출된 화염면 위치의 차이를 조사했다.

정전침계와 이온 probe는 주로 화염면의 통과를 기록하여 화염전파속도를 구할수 있지만, 화염반응대 부근의 이온은 화학반응에 의해 발생하기 때문에, 연료의 종류 및 연소상황에 따라 발생하는 이온 농도와의 사이에는 정량적인 관계가 존재

한다고 볼 수 있으나, 이온 전류를 이용한 내연기관 내 연소의 정량적인 해석은 아직 충분히 행하여지지 않고 있다.

그림 4는 이온전류법에 의한 화염전파속도 측정을 위한 엔진실험장치도이다. 연소실 표면에 장착된 이온푸르브에서 발생한 신호는 I/V 변환기를 거쳐 전류신호가 전압신호로 바뀌어지고 이 신호는 앰프를 통해 증폭되어 다시 노이즈 제거를 위해 저역역통과 필터를 지나 고속데이터 처리장치를 통해 컴퓨터에 저장되며 크랭크 각도는 엔코더를 통해 이온 전류와 같이 저장된다.

3.2.1. Swirl형과 기존형 엔진 연소실내의 화염 전파 속도 비교

그림 5는 연소실내 Swirl 유동이 많이 생성되는 MSH엔진에 이온푸르브를 장착한 위치를 보여준다. 이온푸르브는 점화플러그를 중심으로 26mm 떨어진 #1지점에, 그리고 57mm 떨어진 #2지점에 각각 설치하였으며 #2지점은 점화플러그로부터

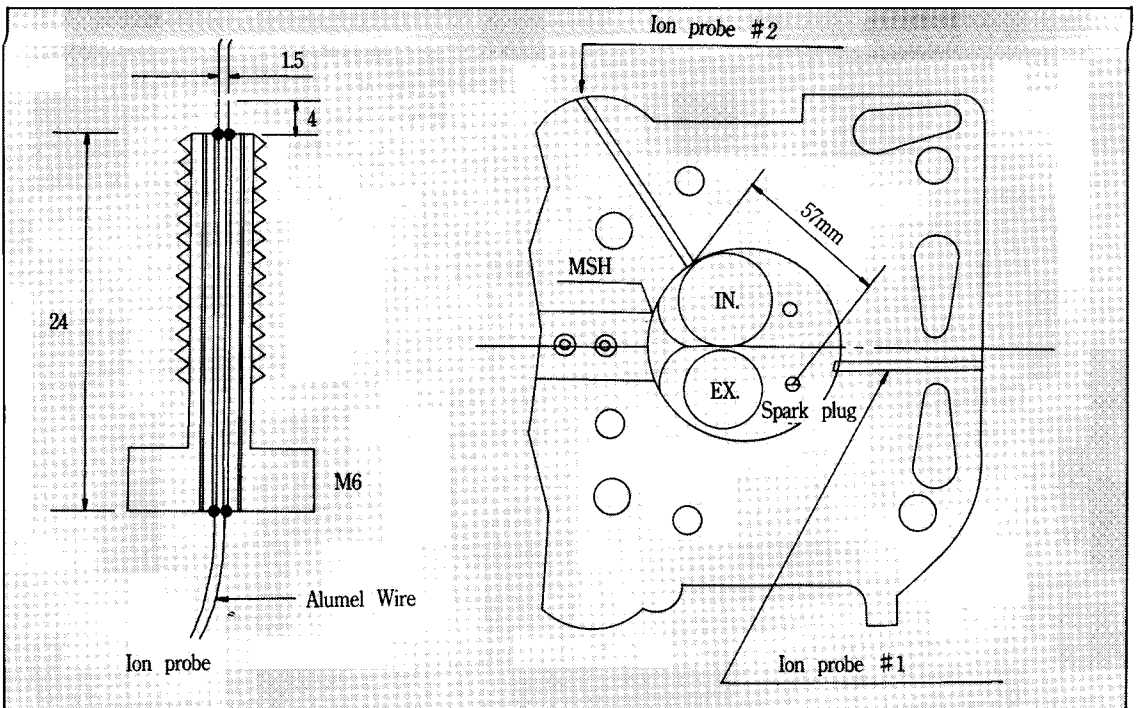


그림 5) 엔진연소실 형상 및 이온푸르브 장착위치

화염이 도달되는 가장 먼거리로 생각될 수 있다. 엔진실험은 부하 변화에 따라 엔진회전수 2000rpm, 3000rpm에서 수행하였다.

먼저 화염속도는 점화가 시작된 후 화염이 점화플러그로부터 가장 먼 2지점에 도달할 때까지의 시간을 측정해서 두지점간의 직선거리를 나누어 줌으로서 평균 화염속도를 구했다. 따라서 화염전파시간에 점화 지연시간도 포함되어 있으므로 평균 화염속도는 다소 낮게 나타나지만 MSH엔진과 기존 엔진에서의 화염전파속도의 상대적인 비교는 가능하다. 또한 사이클 변동에 따른 화염속도 오차를 줄이기 위해 연속적인 9개 사이클의 평균 화염속도를 계산해 이들 값을 ensemble 평균함으로써 그 대표값을 정했다. 연소의 안정성을 규명하기 위해 화염속도의 사이클별 변화량, 즉 사이클 변동을 계산하였다.

그림 6은 3000rpm일때 평균화염속도 및 화염전파 시간의 사이클 변동량을 보인다. 3000rpm에

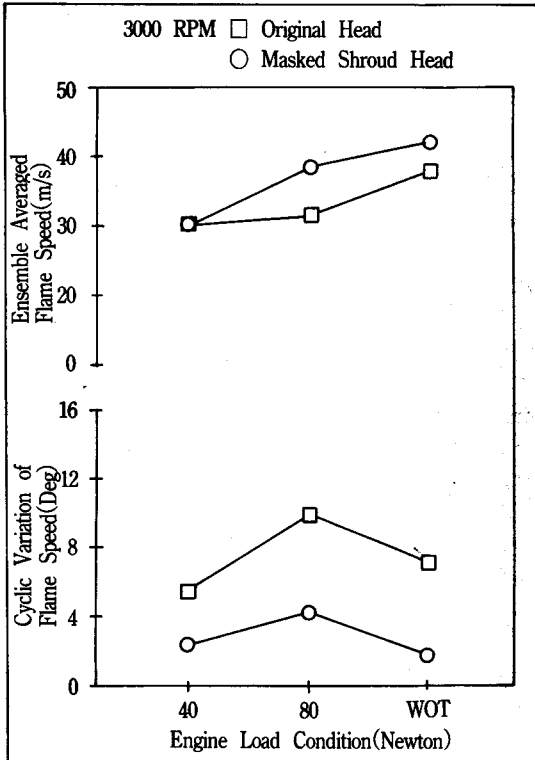


그림 6) 기존엔진과 MSH엔진의 평균화염속도 및 화염의 사이클변동 비교(3000rpm)

서는 평균화염속도가 40N일때 약 30m/s로 두엔진 모두 비슷하게 나타나고 있고, 80N에서는 MSH엔진이 약 29m/s, 기존엔진이 22m/s, WOT 상태에서는 MSH엔진이 약 32m/s, 기존엔진이 약 28m/s로 나타났다. 화염전파의 사이클변동량도 40N에서 MSH엔진이 기존엔진에 비해 약 3도 적게 나타나고, 80N 및 WOT에서는 약 5도 적다. 3000rpm의 평균 화염속도를 보면, 부하가 낮은 경우(30N) 드로틀 닫힘으로 인해 MSH엔진에서의 흡입시 swirl발생량이 적으므로 화염전파속도도 기존엔진에 비해 큰 차이를 보이지 않는다. 그러나 엔진부하가 증가함에 따라 MSH엔진 swirl 생성량의 증가로 기존엔진에 비해 화염속도가 상당량 증가하고 있다. 또한 MSH엔진에서 화염전파의 사이클 변동은 기존엔진에 비해 현저히 감소해 사이클별 연소가 안정되고 있음을 보여준다.

3.2.2. 천연가스와 가솔린 엔진 연소실내의 화염 전파속도 비교

본 연구에서는 가솔린 기관의 실린더 헤드부위에 이온 probe를 장치하여 가솔린에 비해 천연가스 기관의 출력감소 원인이 되는 화염전파속도 등의 차이를 비교 측정하고자 하였다.

본 실험에 사용된 기관은 4사이클 단기통 공냉식 가솔린 기관으로 측정에 필요한 장비로서 동력계는 D.C 동력계를 사용했으며, 공연비의 측정엔 Cusson사의 LAMDASCAN III을 사용하여 공기과잉을 값을 확인해 가면서 공기량과 연료량을 조

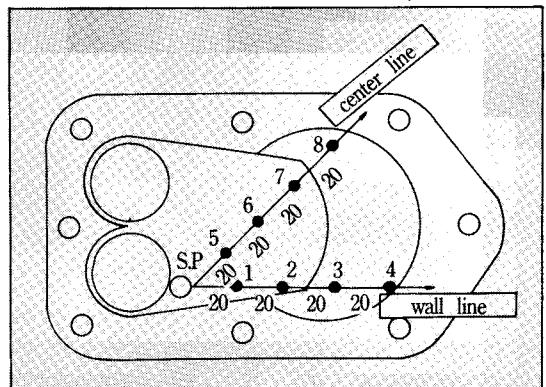


그림 7) 실린더 헤드에 장착된 이온 probe 위치

절했다.

이온 probe는 실린더 헤드위의 8곳에 장착하였으며, 장착 위치는 그림 7과 같다.

천연가스 및 가솔린 기관의 실험조건은 메탄과 가솔린 연료에 대해 각각 전 부하, 공기과잉율 1.1에서 기관회전속도가 각각 1000, 1200, 1400, 1600, 1800 rpm일때 화염전파 속도 및 이온농도(강도)와 연소상태 등을 측정했다.

측정된 데이터의 처리는 5CH I/V Converter를 거쳐서 data acquisition system으로 이송된다.

그림 8은 연료별로 압력을 계측해서 동시에 비교하여 본 것으로 압력의 최고점에서 연소가 일어나서 연소의 시작이 예측되는 지점에서 항상 급 피크를 이루고 있다. 또한 화염이 진행함에 따라 시간의 차이도 선명하게 나타나며 화염 강도의 크기도 비교가 가능했다.

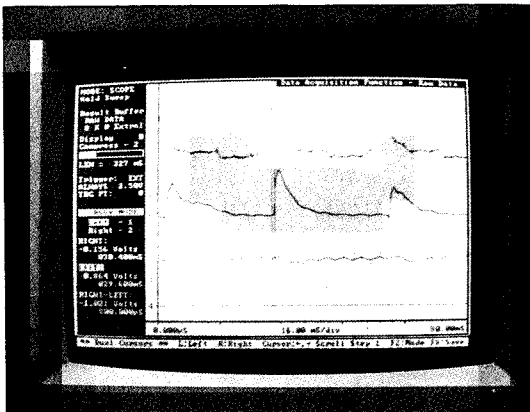


그림 8) 연료별 압력 및 이온 신호 비교

천연가스와 가솔린의 화염전파속도 비교를 위하여 4사이클 공냉단기통 가솔린 엔진에 의해 앞의 실험조건으로 실험한 후, 같은 조건에서 연료공급장치를 변경하여 93% 메탄을 연료로 사용하여 각각의 이온 probe에 화염이 통과할 때 검출되는 시간을 평균하였다. probe 1, 2, 3, 4의 위치는 벽 방향(Wall line)이고, probe 5, 6, 7, 8 위치는 연소실 중심 방향을 표시한다.

전체적으로 가솔린이 메탄 연료보다 4-11% 정도 화염전파 속도가 높게 나타나며 선형적으로 증가하는 경향을 보이고 있다. 1100rpm 이하에서는 가솔린과 메탄이 비슷한 화염전파속도를 보이며,

1300rpm 이상에서는 가솔린이 메탄보다 높게 나타나고 있다. 회전수가 증가할수록 거의 선형적으로 화염전파속도가 증가하는 것은 피스톤 속도에 의해서 난류효과가 증대되어, 난류화염 속도가 증가로 판단된다.

천연가스와 가솔린의 이온 농도 비교를 위하여 화염전파속도 측정과 같은 실험방법으로 실린더 헤드속에 이온 probe를 장착하여, 화염의 전기적 성질을 이용해서 화염중에 발생하는 이온농도를 정량적으로 측정비교 하였다. 반응영역속에 발생하는 이온량을 회전수별로 평균하여 이온 probe의 위치에 따라서 이온 농도(강도)를 정량적으로 해석한 결과 전체적으로 천연가스가 가솔린에 비해 큰 폭으로 이온 강도가 낮은 편으로 낮은 정도의 파악이 가능하였다. 같은 연료에 있어서도 벽쪽보다 중심쪽이 훨씬 높게 나타나고 있는데 이 원인은 실린더 벽 주위의 열전달 효과에 의한 quenching 효과 때문이라고 사료된다.

가솔린과 메탄의 이온농도의 차이는, 혼합물의 성분이 달라서 발생하는 가솔린과 메탄의 화학종(이온화 종)의 차이 때문이라 사료된다.

이와 같이 화염전파속도를 측정함으로써 연소실 내의 연소현상을 전반적으로 분석이 가능하므로 Knocking 및 Cycle Variation 등의 원인 분석, 급속연소의 정량적, 정성적 분석, 대체연료 이용시나 희박연소시의 연소속도와 misfire 계측 등 다양하게 이용할 수 있어 엔진 research에 크게 도움이 되는 측정기술이라 할 수 있다.

참 고 문 헌

- [1] Y. Goto, 1990, "Flame and Wall Temperature Visualization on Spark-Ignited Ultra-Lean Combustion Engine", International Symposium COMODIA 90, p. 147-152.
- [2] Langmuir, I and Mott-Smith, H.M., 1923, Gen. Elec. Rev. 31 pp. 358.
- [3] Calcote et al, 1965, 10th Symp. (International) on Combustion, The Combustion Institute, pp. 605-607.
- [4] 平野敏右 外 3人, 1975, "전파화염의 탐침측정"

- 일본기계학회논문집, 41권 346호, pp. 1899-1907.
- [5] Y. Hanamoto, S.Yoshiyama, E. Tomita, and M. Izumi 1989, "Measurement of Turbulent Premixed Flame in a closed Vessel by Using on Ion Gap" JSME, VOL. 55, No. 512, pp. 1244-1227.
- [6] 최병륜, 1983, "난류 예혼합 화염의 구조에 관한 연구", 오사카대 박사논문
- [7] 平野敏右 外 3人, 1976, "전파화염의 탐침측정(제2보)" 일본기계학회논문집, 42권 364호, pp. 3974-3982.
- [8] J. Furukawa, K. Maruta, and T. Hirano, 1991. "A Fundameatal Study of Electrostatic probe Measurement to Explore the Microstructure of Turbulent Premixed Flames" JSME, VOL. 57, NO. 536, pp. 1463-1468.
- [9] 田中 豊, 병本嘉輔, 富田榮二, 1985, "구형용기내 화염전파의 해석" 일본기계학회 논문집, 51권 469호, pp. 2964-2972.