

흡기중의 수증기분압과 점화시기 및 연료 변화에 따른 스파크 점화기관의 화염 전파 특성 분석

An Experimental Analysis of the Effects of Water Vapor Partial Pressure in Inlet Air, Spark Advance and Fuel Type on the Flame Propagation in a Spark Ignition Engine

이 택 현*, 전 광 민**
T. H. Lee, K. M. Chun

ABSTRACT

In this study, the effects of water vapor in inlet air, spark advance and fuel type on the spark ignition engine were investigated through the experiments of combustion and flame arriving pattern analysis using ionization probe. The results of flame propagation experiment using ionization probe show that the flame which ignited from spark plug located at the center of the combustion chamber propagated faster in exhaust side than in intake side due to the mixture flow motion inducted into combustion chamber from intake tumble port at all conditions. And as the partial vapor pressure increased, the flame propagation became slower in all direction. Especially effects were greater for intake side than the exhaust side.

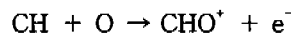
주요기술용어 : SI Engine(스파크 점화기관), Ion Probe(이온 프로브), Flame Propagation(화염 전파), Water Vapor Partial Pressure(수증기 분압), Spark Advance(점화진각)

1. 서 론

연소실 내부의 화염 전파 검출 기술로서 광섬유에 의한 방법등 여타 방법과 아울러 이온 프로브에 의한 방법이 그 중 손쉽고 일반적으로 많이 사용되고 있다. 화염에 전기적 성질이 있다는 것은 17세기말경에 알게 되었고 이온 프로브(探針)를 이용한 화염 검출 기술은 이미 18세기부터 행

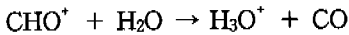
하여지기 시작했다.

내연기관 화학 전리의 주요 반응은 탄화수소(C_mH_n)가 산화하면서 화염 전면에 CHO⁺, H₃O⁺, C₂H₃⁺ 등의 이온이 생성되어 다른 중간 생성 이온보다 비교적 긴 시간 존재하는데, Calcote¹⁾는 CHO⁺ 이온의 생성구조를

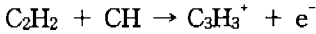


와 같이 밝히고 있고, Deckers²⁾ 등은 위 CHO⁺ 반응의 2차 반응으로서

* 정희원, 연세대학교 대학원
** 정희원, 연세대학교 기계공학과



의 기구를 제안하였으며, 이 외에 Knewstubb³⁾ 등에 의하면 C_3H_3^+ 이온은,



의 생성기구에 의해 만들어진다고 고찰하였다. 이러한 화염의 화학적 특성을 이용하여 최근 해석 목적에 따라 스파크 플러그, 배기 밸브, 실린더 헤드 및 실린더 헤드 가스켓등에 이온 프로브를 삽입하여 화염 전파해석의 도구로써 사용하고 있다. 이온 프로브는 접지(Ground)와의 전압 퍼텐셜에 연결된 절연 전도선으로서 화염 반응대의 자유 이온, 전자에 접촉되어지면 전도선을 통해 전류가 흐르게 되어 여기서 얻어진 전기 신호를 시간의 함수 또는 엔진의 크랭크각 함수로 표현하면 기준 시간으로부터 화염 도달 시간을 알 수 있고 프로브의 수와 배열에 따라 화염 형태를 2차원 또는 3차원으로 해석할 수 있다. 이온 프로브를 통한 신호의 세기는 바이어스 전압의 크기, 이온 프로브의 표면적, 기연가스의 이온 농도에 비례한다.

국내에서도 이미 이온 프로브 기술을 내연기관 화염 연구에 적용하여 많이 쓰고 있을 뿐 아니라 최근 이온 프로브를 이용하여 말단가스부의 자발화 검출과 함께 실화(Misfire) 판정 기술을 개발 중에 있기도 하다.

윤한호⁴⁾ 등은 7개의 이온 프로브를 실린더 헤드 가스켓에 부착하여 사이클별 연소 변화를 측정하였고 D. E. Nicholson 등⁵⁾은 상용 실린더 헤드 가스켓 대신 폴리마이드 수지로 만든 PCB(Printed Circuit Board)에 이온 프로브를 삽입하여 화염 도달 시간을 크랭크각 함수로 측정하였으며 P. O. Witze 등⁶⁾은 실린더 헤드 가스켓에 심은 이온 프로브를 이용하여 노킹 발생시 연소압력을 동시에 측정함으로써 말단 가스 자발화의 위치를 추정하였다.

본 실험에서는 추발 및 점진적 가속 구간으로서 엔진 속도 1,200 및 2,000rpm, 부하 흡기관 절대 압력(이후 MAP) 90kPa에서 흡기중 수증기 함량(분압으로 1.07, 2.00, 3.07kPa)과 점화진각 및 연료형태(Gasoline과 CNG)를 변화시키면서 화염의 전파 양상을 관찰하였고 아울러 연소 신호 분석을 병행하여 자발화에 의한 발생 위치를 검출하였다.

2. 실험

2.1 실험장치

실험장치는 흡기온도 및 수증기 함량의 조절을 위한 항온 항습 장치, DC 동력계, 이온 프로브 자료 취득 장치, 연소 분석기 등으로 구성되어 있으며 Fig.1과 같이 실험에 사용된 엔진은 하이템플 및 가변흡기장치를 부착한 상용화된 1.6 DOHC

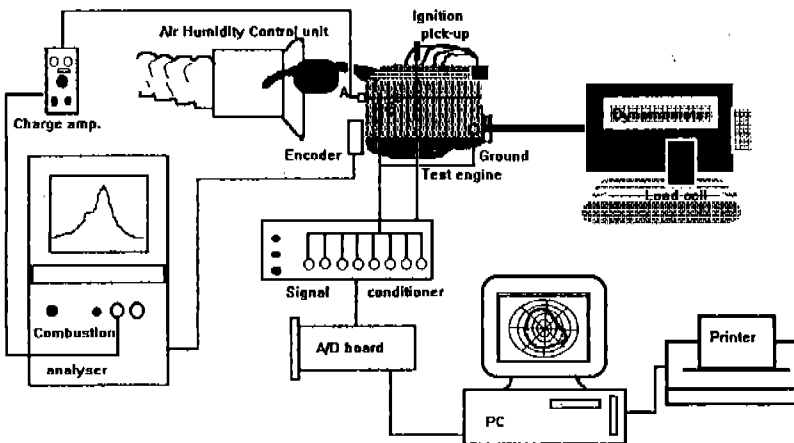


Fig.1 Schematic diagram of experimental equipment

Table 1 Test engine specification

Bore×Stroke		81.5mm×79mm
Swept volume		1,598cc
Combustion chamber		Pentroof
Compression ratio		9.5
Valve timing	Intake	IVO 11 BTDC, IVC 43 ABDC
	Exhaust	EVO 41 BBDC, EVC 13 ATDC

16 Valve 엔진으로서 제원은 Table 1과 같다.

2.2 화염 전파 검출 장치 및 이온 프로브

화염중의 이온 전류를 측정하기 위해 실린더 헤드 가스켓에 심어져 있는 이온 프로브에서 나오는 신호를 시그널 콘디셔너로 보내어 필터링, 증폭을 한 후 8비트 최대 100kHz 샘플링 속도를

가지는 DT2821 A/D board를 사용 데이터를 취득하였다. 본 연구에 사용 되어진 이온 프로브는 Fig.2와 같이 실린더 헤드 가스켓에 8개의 크로멜 프로브를 등간격으로 삽입하여 스틸 본드로 고정하고 울트라 카파 수지로 상부를 마감시켰으며 메탈 그로멧 부위로부터 테플론으로 절연한 후 0.8~1.0mm 만큼의 팁 포인트를 만들었는데 이 수치는 양질의 신호를 위한 경험적 판단에 의한 것이다. 상세한 단면은 Fig.3에 묘사되어 있으며 별도의 기밀 시험은 하지 않았으나 전부하시 동일 기관 속도에서의 토오크가 이온 프로브 미부착시와 비교하여 차이를 보이지 않았다. Fig.4에 신호 취득 회로를 개념적으로 도시하였는데, 크로멜 이온 프로브 팁 포인트가 실린더 헤드나 블럭에 대해 250 V_{DC} 전위차가 유지되도록 시그널 콘디셔너로부터 전원이 공급된다. 이온화된 화염이 이온 프로브에 도달되었을 때 순간적인 전위단락(Short)이 일어나면서 일시적인 전류유도에 의해 전압 스파이크를 발생시키면 이것이 시그널 콘디셔너에 보내어져 측정이 이루어진다.

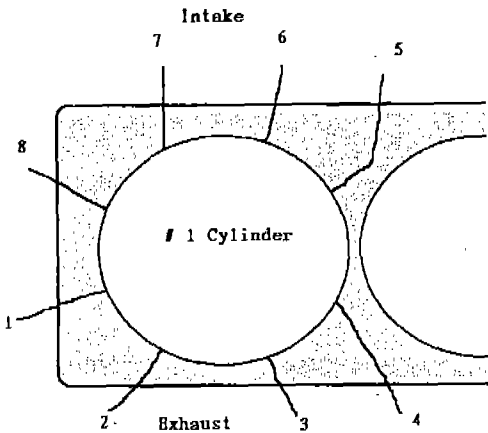


Fig.2 Ionization probe head gasket

2.3 이온 프로브 신호처리

Fig.5는 점화 시기와 이온 프로브 전압 스파이크 신호를 오실로스코프를 통하여 예시해 놓고 있는데 점화 시기 신호의 폴링 에지로부터 Fig.6의 기준 측정 레벨(Threshold level)을 통과하는 이온 프로브 전압 스파이크 신호를 Fig.7의 극좌표를 이용하여 스파크 플러그 점화로부터 연소실 말단부까지의 화염 도달시간을 크랭크각 함수로 표현하면 대체적인 화염 경로를 알 수 있다. 실제

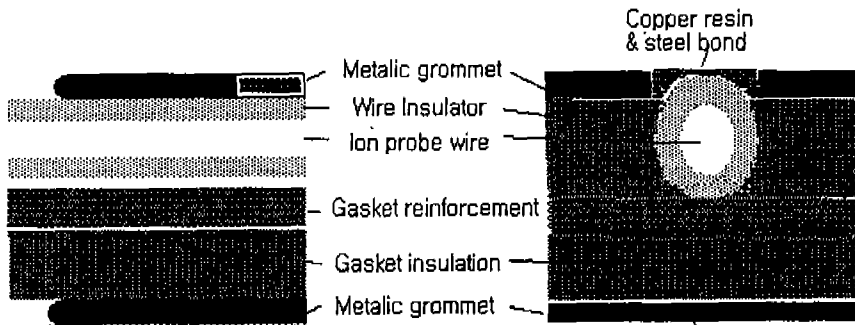


Fig.3 Cross section of head gasket with ionization probe

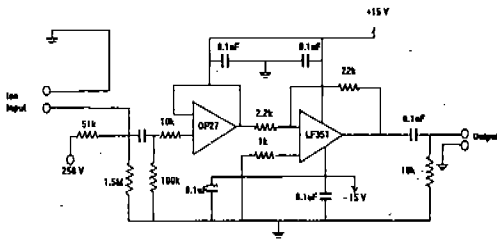


Fig.4 Electronic circuit for achieving ionization probe signal

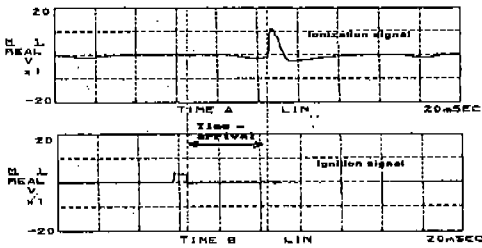


Fig.5 Example of flame propagation time definition by measuring the time between ignition and ionization probe signal

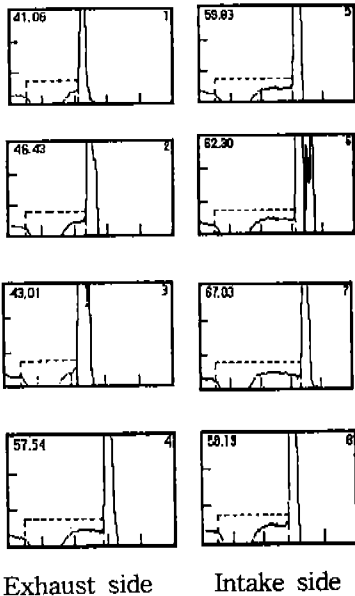


Fig.6 Ionization signals of a cycle from spark ignition, the number on the upper left corner shows flame arrival angle and the other on the right corner probe No.

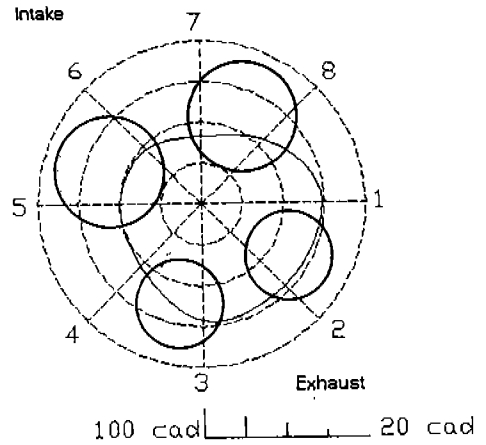


Fig.7 Polar coordinate exhibition of the cycle data from Fig.6

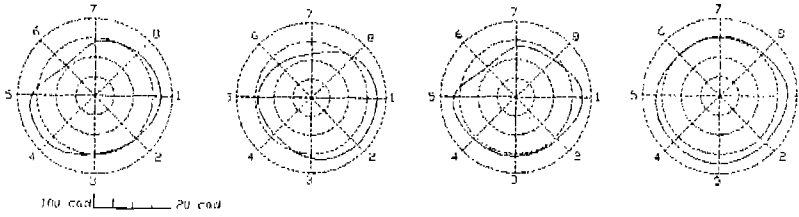
화염 전파의 형태를 구현하기 위해 화염전파의 시간을 좌표 바깥쪽 20°CAD로부터 안쪽으로 구성하였다. 한편 기준 레벨은 Fig.6의 파선과 같이 노이즈 레벨을 3V 미만으로 판정하였고 이 레벨 선과 만나는 신호를 화염 도달로 규정하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

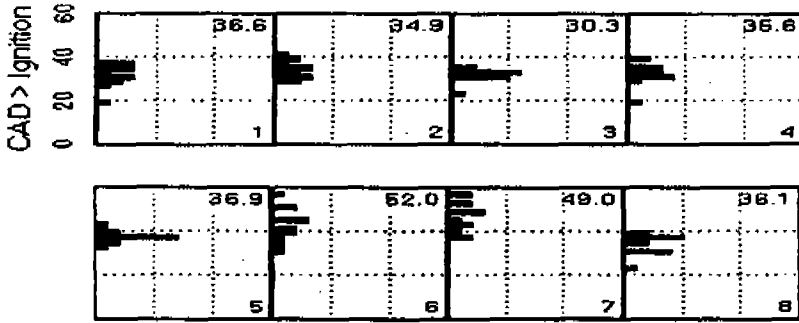
3.1 수증기 분압에 따른 특성

Fig.8~Fig.9에 1,200rpm 90kPa, 점화 진각 6.3의 화염 도달을 스파크 점화로부터 이온 프로브가 기연 경계 영역의 화염 표면 이온 현상에 의해 통전 될 때까지의 시간으로 40사이클을 취득하여 신호 양호 판정을 거쳐 크랭크 각에 대한 분포도와 그 중 4개 사이클의 데이터를 극좌표로 나타내었다.

1~4번은 배기측(Anti-thrust)이며 5~8은 흡기측(Thrust)이다. 분포도에서 배기측의 화염이 흡기측 화염보다 빠르게 보이는데 이는 배기 밸브와 흡기 밸브간의 온도차에 의한 요인과 아울러 흡기 밸브를 통해 들어오는 텀블(Tumble) 신기(新氣)가 배기측 영역으로 입사되어 혼합기 순간 속도가 흡기측에 비해 상대적으로 높고 실린더내 유동에 의해 화염 컨투어에서 볼 수 있는 바와 같이 화염 면적 중심점이 배기측으로 다소 이동함으로써 배기측의 화염도달이 흡기측보다

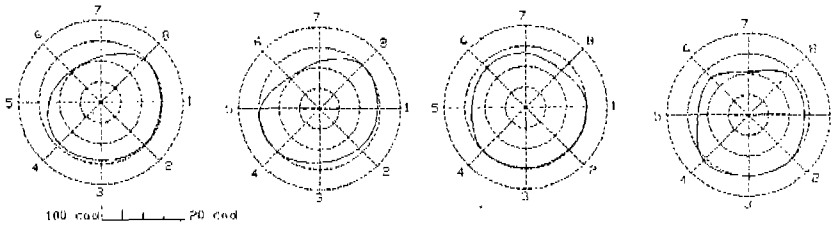


(a) Flame Contour

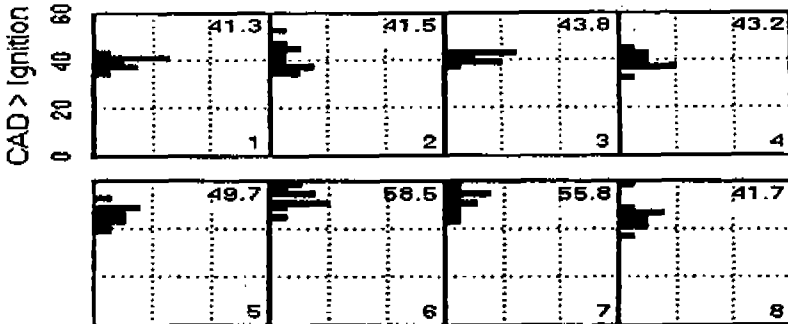


(b) Flame arrival angle distribution diagram (40 cycles)

Fig.8 Flame propagation of partial vapor pressure 1.07kPa, at 1,200rpm 90kPa, spark timing 6.3°BTDC



(a) Flame Contour



(b) Flame arrival angle distribution diagram (40 cycles)

Fig.9 Flame propagation of partial vapor pressure 3.07kPa, at 1,200rpm 90kPa, spark timing 6.3°BTDC

다소 빨라지는 것으로 판단된다.

Fig.8의 1,200rpm 수증기 분압 1.07kPa의 경우는 배기측 특히 2번, 3번 프로브의 화염 도달 신호가 점화로부터의 크랭크각으로 20°~40° 사이에 많이 분포되어 있고 흡기측 특히 6번, 7번 프로브의 신호가 40° 미만에 어느 정도 분포되어 있다. 이와 비교하여 Fig.9와 같이 수증기 분압이 3.07kPa로 증가하면서 배기측 특히 2번, 3번의 신호가 크랭크각 40° 주변 또는 그 이상의 크랭크각에서 지각되어 나타났고 흡기측 특히 6번, 7번 프로브의 신호 역시 40° 미만에는 전혀 분포하지 않은 결과를 보였다.

이로 미루어 수증기 함량이 증가하면서 화염 도달 시간이 길어졌음을 알 수 있고 2.00kPa 수증기 분압의 경우는 과도적인 양상을 보였다.

이택현 등⁸⁾은 연소 압력 신호를 이용하여 흡기측 수증기 함량이 증가할수록 화염 지연 시간이 길어지고 급속 연소 기간의 시간이 지연됨을 보인 바 있다.

분포도내 상단의 숫자는 임의로 선정한 4개씩의 극좌표중 좌측 상단의 컨투어(Contour) 값인데 스위핑(Sweeping) 면적이 커지고 있음으로써 지연 현상을 쉽게 알아볼 수 있다.

3.2 점화 진각에 따른 특성

점화진각에 따른 화염 도달 특성은 Fig.10의 분포도에서 알 수 있듯이 점화 시기 진각도가 클수록 화염 도달 시간이 짧아졌고 특히 싸이클 변동량이 확연히 줄었는데 그 양은 흡기측이 배기측보다 크게 나타났다. 이는 점화 시기가 진각되면서 연소실내 유동이 감소되기 전에 화염 전파가 이루어지고, 미연 가스부가 피스톤의 상승과 연동하여 동일 크랭크각에 대해 더 심한 압축상태가 되고 단위 체적당의 연소 열에너지를 상승시켜 화염 속도가 빨라진다고 생각된다.

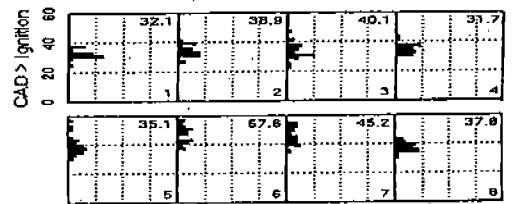
3.3 연료의 종류에 따른 특성

가솔린 연료와 압축 천연가스 연료의 화염 전파 특성 비교 데이터를 취득을 위해 동일 사양의 동일 압축비 천연가스 연료 공급장치 및 기관을 별도로 제작하여 이온 프로브를 이용한 압축 천

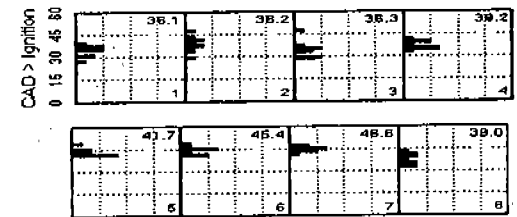
연가스(CNG, Compressed Natural Gas) 연료 사용시의 화염 도달 특성을 알아보았다.

Fig.11에 2,000rpm의 수증기 분압 2.00kPa를 유지한 상태로 가솔린 및 천연가스 연료의 화염 도달 시간 분포도 및 극좌표 컨투어를 나타내었는데 천연가스 실험의 경우 1번 프로브 신호가 실험전 단락되어 2번부터 7번까지의 신호를 표기하였다.

결과에서 보여 주듯이 천연가스 연료의 화염 속도 평균이 가솔린의 경우보다 느리게 나타났는데 특히 2, 3, 4번의 화염 도달이 현저히 느려졌다. 일반적으로 천연가스의 종류 화염 속도가 가솔린의 경우보다 빠른 것으로 알려져 있으나 종류 화염 속도가 빠르다고 해서 연소실 화염 속도가 빠른 것은 아니다. 연소실내의 연소 현상은 주로 난류 화염에 의존하며 연소후의 분자수가 가솔린 연소후의 분자수보다 약 6% 가량 줄어든다. 따라서 연료에 의한 팽창 효과가 가솔린에 비해 작다. 천연가스의 이론 공연비가 16대 1을 넘으나 이것은 무케비로서 기체 연료의 특성으로 인하여 동일한 압축비, 흡기 부압 및 동일 배기량에서의 연료의(외) 신기 흡입 체적이 가솔린 연료 사용시보

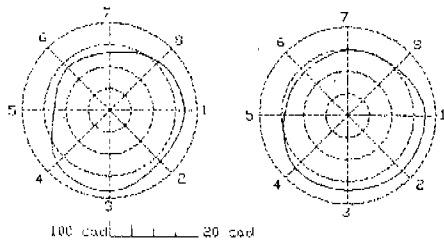


(a) Spark timing 18.6°CAD(40 cycles)

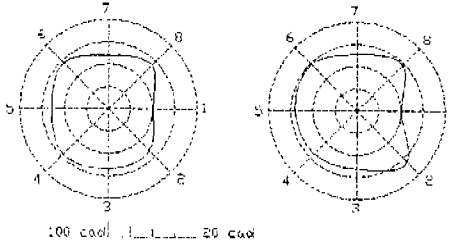


(b) Spark timing 30.6°CAD(40 cycles)

Fig.10 Flame propagation for different spark advance, comparison of arrival angle distribution at 2,000rpm 90kPa, partial vapor pressure 1.07kPa



(a) Gasoline



(b) CNG

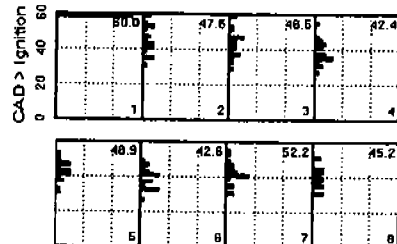


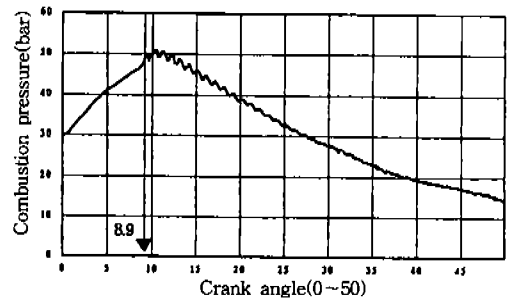
Fig.11 Flame propagation ion probe signal for gasoline and CNG fuel at 2,000rpm 90kPa, spark timing 20.3°BTDC

다 작을 것이므로 천연가스 연료의 화염 속도가 가솔린 연료의 경우보다 느려지는 것은 당연한 결과라고 여겨진다. 1,200rpm에서도 동일한 결과를 나타내었다.

3.4 이온 프로브에 의한 노킹 발생 위치 검출

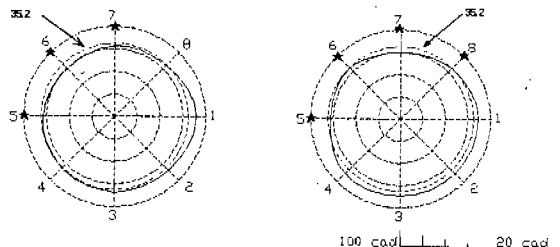
이온 프로브에 의한 말단 가스 영역에서 처음 발생하는 자발화 위치를 노킹 발생 크랭크각과 정상 화염 도달 시간으로 추론하였다. Fig.12(a) 크랭크각에 따른 연소실 압력(P-θ)선도에서 보는 바와 같이 연소 압력노킹 발생 크랭크각이 ATDC 8.9°임을 알 수 있고 이때의 점화 시기가 BTDC 26.7°이므로 점화로부터 노킹 발생까지의 시간은 크랭크각으로 35.2°이고, 이 값을 화염 권투어와 함께 극좌표에 표기하였다. 따라서 이 선에 미치지 못한 부분은 자발화에 의한 노킹 발생 시간보다 화염 도달 시간이 늦은 것이므로 자발화에 의한 노킹 발생 초기 위치로 간주하였다.

본 실험에서 사용된 기관의 노킹의 초기 발생 위치는 Fig.12(b)와 같이 별표식이 그려진 이온 프로브 번호 5, 6, 7 등의 홈기측으로 나타났다. 이러한 결과로 미루어 펜트루우프 타입의 4 밸브 연소실 설계에 있어 스파크 플러그를 정중앙보다



Knock Occurrence Location Line BTDC 26.7°+8.9°=35.2°

(a) P - θ Diagram



Start Mark : Knock Occurrence Location Point

(b) Flame contour

Fig.12 Knock occurrence location prediction in combustion chamber 1,200rpm 90kPa, spark timing 26.7°BTDC

는 흡기밸브 측으로 약간 이동시켜 위치시키는 것이 KBL을 다소 늦추는 방법이 될 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 소형 상용 엔진에 대해 흡기중 수증기 함량, 점화시기 및 연료 형태를 파라미터로 실린더 헤드 가스켓 이온 프로브에 의한 연소 실내 화염 전파 특성을 측정하여 다음과 같은 결과를 도출하였다.

- 1) 화염 전파 현상을 이용한 이온 프로브 화염 도달 시간을 크랭크각에 대해 측정하였는데 배기축(Anti-thrust)의 화염 도달이 흡기축(Thrust)보다 대체로 빨랐으며 수증기 함량이 증가할수록 화염 도달 시간이 길어졌다.
- 2) 점화 시기가 KBL까지 진각됨에 따라 화염 도달 시간도 빨라지며 특히 흡기축에서의 효과가 커서 점화후 전방향으로 화염 속도가 고른 특성을 보인다.
- 3) 천연가스 연료에 대해 동일 엔진으로 화염 도달 시간을 측정하고 가솔린의 실험 결과와 비교하였는데 가솔린보다 증류 화염 속도가 빠른 천연가스가 내연기관의 연소실에서의 연소 속도는 가솔린보다 다소 느리게 나타났다.
- 4) 본 실험에 사용된 엔진의 노킹 발생시 위치는 정상 화염의 도달 시간으로 미루어 대체로 흡기축에 분포하는 것으로 추정하였다.

참 고 문 헌

1. H. F. Calcote, 8th Symposium on Combustion P.184, 1962 ; Aerochem Research Lab. Inc. Princeton Report, Aerochem TP-24, 1960.
2. J. Deckers and A. Van Jегgeien, 7th Symposium on Combustion p. 254, 1959.
3. P.F. Knewstubb and T.M. Sudgen, 7th Symposium on Combustion p. 247, 1959.
4. 윤한호, "4기통 스파크 점화 기관에서 헤드 가스켓의 이온 프로브를 이용한 화염 전파의 사이클별 변화에 관한 연구", 연세대학교 대학원, 석사 학위 논문, 1994.
5. D. E. Nicholson and P. O. Witze, "Flame Location Measurements in a Production Engine Using Ionization Probes Embodied in a Printed Circuit Board Head Gasket", SAE paper No. 930390, 1993.
6. P. O. Witze and R. M. Green, "Determining the Location of End-Gas Autoignition Using Ionization Probes installed in the Head Gasket", Sandia National Laboratories, SAE paper No. 932645, 1993.
7. Nicolas G. Hadjiconstantinou and John B. Heywood, "A Model for Converting SI Engine Flame Arrival Signals into Flame Contours", SAE paper No. 950109, 1995.
8. 이택헌, 전광민, "흡기중 수증기 함량이 스파크 점화 기관의 연소 및 노킹에 미치는 영향에 관한 실험적 연구", 한국자동차공학회 논문집, 제6권, 제1호, pp. 205-212, 1998.