

LPG엔진에서 이온프로브를 이용한 노킹 발생 위치 추정에 관한 연구

이정원^{*1)} · 최희명¹⁾ · 조훈²⁾ · 황승환¹⁾ · 민경덕¹⁾

서울대학교 기계항공공학부¹⁾ · 한국과학재단 신진연구자²⁾

Study on the Estimation of Knock Position in a LPG Engine with Ion-probe Head Gasket

Joungwon Lee^{*1)} · Hoimyoung Choi¹⁾ · Hoon Cho²⁾ · Seunghwan Hwang¹⁾ · Kyoungdoug Min¹⁾

¹⁾School of Mechanical Aerospace Engineering, Seoul National University, Seoul 151-744, Korea

²⁾Research Intern Program, Korea Science Engineering Foundation, Seoul National University, Seoul 151-744, Korea

(Received 17 September 2002 / Accepted 27 November 2002)

Abstract : LPG has been a broad concern of pro-environmental alternative fuel for vehicles. Recently, the new Liquid Phase LPG Injection(LPLI) system extends the limit of power of LPG engine and gives a chance to substitute LPG engine for diesel engine of heavy duty vehicles that are the main resources of air pollution in urban area.

Large bore size of heavy duty LPG engine derives a serious knock problem. To find an optimal MBT conditions, it is necessary to know how the flame develops in the combustion chamber and find where the knock positions are.

In this study, the ion-probe head gasket was used to estimate the knock position. Inverse operation of the ion-probe signal provides the flame developing characteristics. The further the position is from the spark plug, the later the flame arrives and the more times knock occurs. The main factor that effects knock position is inferred a flow situation of mixed gas in the combustion chamber.

Key words : LPG engine(LPG 엔진), Ion-probe head gasket(헤드 가스켓형 이온프로브), Flame developing(화염 전파), Flame arrived time(화염 도달 시간), Knock position(노킹 발생 위치)

1. 서론

버스나 화물차 등의 대형상용디젤차량에서 배출되는 입자상 물질과 질소 산화물은 대도시 대기오염에 주된 원인으로 인식되고 있다. 이에 대한 대안으로 최근 각광을 받고 있는 것이 LPG 엔진이다. LPG 연료는 기존의 연료들에 비해 단위 중량당 발열량이 높고 옥탄가가 높으며, 특히 유해 배기가스를 적게 배출하는 청정 연료로 알려져 있다.¹⁾ 최근

에는 LPG 연료를 액상으로 흡기 포트에 직접 분사해 주는 방식(LPLI)을 통하여 체적효율을 향상시키고 연소실의 형상을 최적화하고 압축비를 증가시켜, 기존의 LPG엔진보다 출력 및 응답 특성을 개선한 엔진을 개발하는 연구가 활발히 진행중이다.²⁾

그러나, 대형 LPG엔진을 개발하는데 있어 가장 큰 제약이 되는 것은 실린더의 내경이 커짐에 따라 발생하는 말단 가스의 자발화에 의한 노킹 현상이다. 엔진 연소실 내의 화염의 전파와 노킹 발생 위치는 실린더 내의 유동과 스파크 플러그의 위치에 따라 영향을 받게 된다. 따라서 본 연구에서는 헤드 가

*To whom correspondence should be addressed.
cavin9@hotmail.com

스켓형 이온프로브를 제작하여 화염의 전파 특성을 파악하고, 노킹 현상이 일어나는 위치를 추정하여 대형 LPG엔진의 형상 설계에 필요한 기초자료를 제공하고자 한다.

2. 실험 장치

2.1 엔진 및 제반 장치

본 연구에 사용된 엔진은 전기점화 LPG 실험용 단기통 1858CC 엔진으로 그 제원은 Table 1과 같다.

이 엔진은 상용 디젤 엔진을 기초로 제작된 단기통 엔진으로서 인젝터 위치를 가공하여 스파크 플러그를 설치하였다. 연료는 프로판으로서, 액상으로 공급해 주기 위해 질소를 이용하여 20bar까지 가압해 주었고, 인젝터(DEKA-II, bottom feed type)를 통해 포트에 액상으로 분사하였다. 연소실의 압력으로부터 노킹 현상을 측정하기 위하여 압력센서를(6016B, Kistler)설치하였다. 공연비 측정을 위해 광역 산소센서를(Mexa-110 λ, Horiba), 오일과 냉각수 온도 측정을 위해 K형 열전대를 설치하였다.

Table 1 Engine specification

Engine type	SI LPLI single cylinder engine
Combustion system	Bowl-in-piston chamber
Bore × Stroke	130 × 140 (mm)
Displacement volume	1858 CC
Compression ratio	10
I/O	BTDC 18°
IVC	ABDC 50°
EVO	BBDC 50°
EVC	ATDC 18°

2.2 헤드 가스켓형 이온프로브

이온프로브는 일정한 바이어스 전압이 걸려 있는 두 도선 사이에 화염이 발생하는 이온에 의한 전류를 감지하는 장치이다. 기존의 연구에서 흔히 사용되는 이온프로브는 신호선과 접지선을 엔진 헤드나 가스켓 사이에 삽입하거나 엔진 바디 자체를 접지로 쓰는 형식을 취했다.³⁾ 이러한 방법은 헤드 가공에 어려움이 따르고 신호에서 엔진노이즈가 심한 문제가 있다. 이에 본 연구에서는 PCB기판형식으로 제작한 헤드 가스켓형 이온프로브를 사용하였

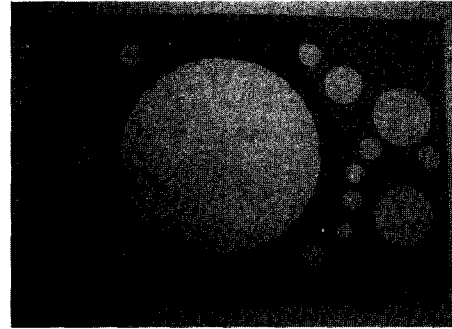


Fig. 1 Picture of PCB printed ion-probe head gasket

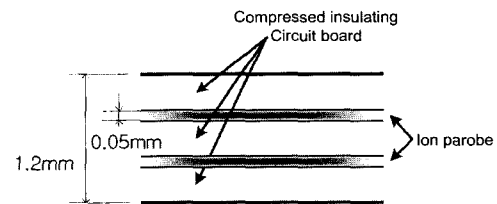


Fig. 2 Sectional diagram of ion-probe circuit board

다.⁴⁾ Fig. 1은 제작한 이온프로브의 형상을 보여주는 사진이다.

기판형 이온프로브는 24개의 채널과 총 5개의 레이어로 이루어져 있다. 24개의 채널은 실린더 둘레에 15도 간격으로 배치되어 공간적인 화염의 성장을 측정할 수 있다. 가스켓과 같은 모양으로 가공된 기판 위에 구리를 위아래 양면에 인쇄한 후 다시 엔진 바디와의 절연을 위해 압축된 기판을 덮는 방식으로 제작하였다. 이는 엔진에 의한 노이즈를 방지하고, 강한 압착을 통한 엔진 연소실 압력의 유실을 막고, 전극사이의 간극을 최소화하여 신호를 극대화하는데 목표가 있다. Fig. 2는 제작된 기판형 이온프로브의 단면도이다.

2.3 신호 획득 장치

우선 연소실 내의 압력을 측정하기 위해서 헤드를 가공하여 압력센서를 장착해 주었다. 센서에서 나오는 신호는 앰프를 거쳐 신호처리 컴퓨터로 들어 간다. 압력신호를 통해 노킹의 강도와 그 일어나는 시점을 측정할 수 있다.

이온프로브의 신호 획득을 위해 바이어스 전압으로 직류 192Volt를 공급한다. 발생하는 전류는 수 μA 로 매우 미약하므로 증폭회로를(OP-27) 이용하

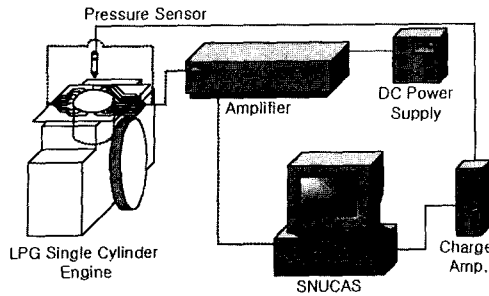


Fig. 3 Schematic diagram of ion-probe signal acquisition system

여 증폭시킨다. 이온프로브의 신호는 압력 신호와 같이 30kHz로 받고 화염 시작 시점을 위해 TDC 신호도 같이 받았다. Fig. 3는 이온프로브 신호 획득을 위한 실험 장치도이다.

3. 실험 결과

3.1 이온프로브 신호 처리 과정

이온프로브에 흐르는 전류는 수 μA 이므로 노이즈의 영향을 받기 쉽다. 이를 제거하기 위해 2.5kHz 저역 통과 필터를 사용하였다. 신호의 미처리 데이터와 필터링한 후의 데이터는 Fig. 4에 나타내었다.

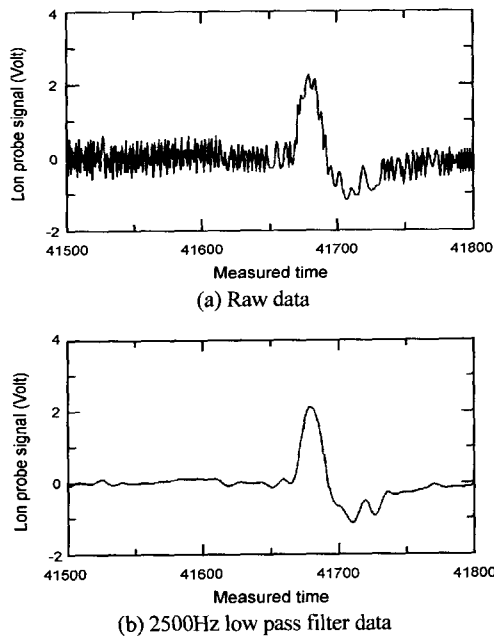


Fig. 4 The raw ion probe signal data and that after low pass filter

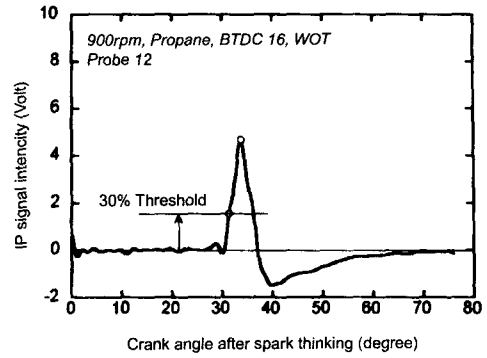


Fig. 5 30% threshold to the peak of ion-probe signal

각 이온프로브에는 같은 값의 바이어스 전압이 공급되지만 신호 감도는 이온프로브의 위치에 따라 다소 차이가 났다. 이러한 감도의 차이에 의한 오차를 최소화하기 위해 각 이온프로브의 화염 도달 시간은 저역 통과 필터링한 신호의 최대 신호값의 30%가 되는 가장 빠른 시간으로 설정하였다.^{4,5)} Fig. 5는 대표적 이온프로브 신호의 처리과정을 보여준다.

3.2 정상 연소시 화염 전파 특성

Fig. 6에 스파크 플러그와 각 이온프로브의 위치를 나타내었다. 스파크 플러그는 중앙에서 흡배기 밸브 반대편으로 조금 치우친, 11~17번에서는 가깝고 23~5번에서는 먼 곳에 위치하고 있다. 기판형 이온프로브에는 총 24개의 채널이 있으나 증폭회로의

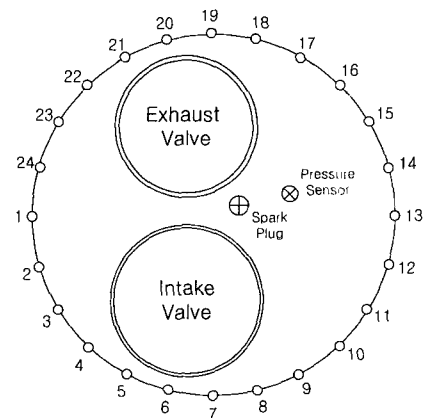


Fig. 6 Geometry of engine head and the position of ion-probe and spark plug

입출력 채널이 12개로 제한되어 있어 전체 연소실 경계를 12등분하여 30° 간격으로 떨어진 홀수 번째 채널 12곳에서 신호를 받았다. 스파크 플러그에서 각 이온프로브 단자까지의 거리와 그 상대적인 비에 대해서는 Table 2에 나타내었다.

점화 시작 후 화염이 각 프로브에 도달하는 시간의 평균값과 표준편차를 Fig. 7에 나타내었다. 스파크 플러그에서 가까운 11번과 13번 위치에서 화염이 가장 빨리 도달하는 것을 관찰할 수 있고, 비교적 위치가 먼 1,3,21,23번에서 가장 늦게 도달하는 것을 확인할 수 있다. 화염도달 시간의 표준편차는 모든 지점에서 약 4°의 값을 나타내고 있다.

Fig. 8에는 같은 실험조건에서 측정된 200사이클의 점화 시작 후 최고 압력에 도달한 시간과 이온프로브 신호를 1번 19번 이온프로브에 대하여 비교하

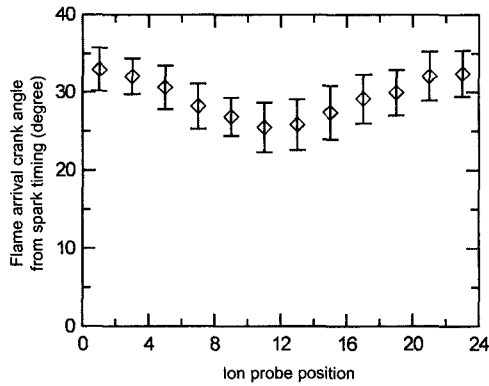
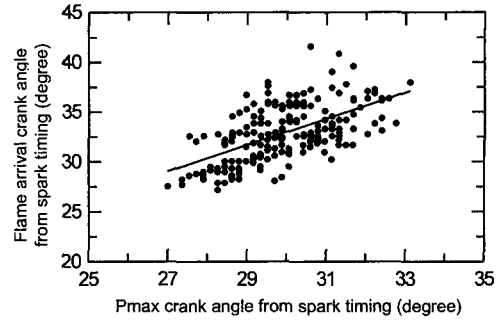


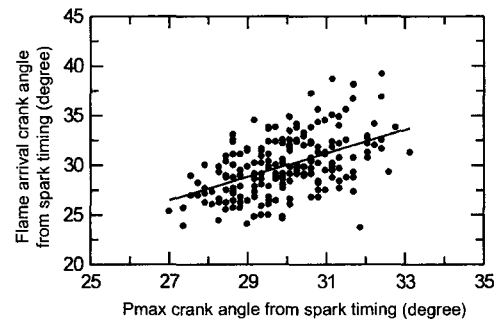
Fig. 7 Flame arrival crank angle from spark timing to each ion-probe position, 900rpm, propane, WOT

Table 2 Distance from spark plug to each ion-probe

Ion probe position	Distance from spark plug(mm)	Relative distance
1	73.58	0.992
3	74.14	1
5	72.63	0.977
7	69.36	0.936
9	65.02	0.877
11	60.67	0.818
13	57.60	0.777
15	56.88	0.767
17	58.79	0.793
19	62.66	0.845
21	67.11	0.905
23	71.07	0.959



(a) Ion probe position 1



(b) Ion probe position 19

Fig. 8 The correlation of flame arrival crank angle and Pmax timing from ignition timing

였다. 최고 압력에 도달하는 시간과 화염도달 시간이 선형적으로 비례하는 경향을 보이는데, 이는 사이클마다 여러 조건에 의한 연소율의 변화에 따라 화염 도달 시간이 변화하는 것을 의미한다.⁵⁾

각 사이클마다의 화염 전파 양상을 파악하기 위해 우선 화염이 가장 먼저 도달하는 시간을 측정하였다. 그 시간을 기준으로 화염의 벽면에 도달하는 시점을 정하고 정해진 시점에 각 방향으로의 화염이 스파크 플러그로부터 전파된 거리를 구하였다. 실제 연소에서는 화염이 전파되는 속도가 1cycle 동안 일정하지 않으나, 이온프로브를 이용한 기존의 연구들에서와 같이 평균속도의 개념을 적용하여 화염이 전파될 때 화염이 발달한 거리를 각 위치에서의 이온프로브를 통해 측정된 벽면 도달 시간과 절대적인 기준 시간과의 비에 비례하는 것으로 나타내었다.^{4,5)} 이런 관계를 이용하여 계산한 화염 도달 거리를 바탕으로 연소실 내에서 동일 시점에서의 화염면의 위치를 계산하여 각 사이클마다 화염이 전파되는 양상을 Fig. 9에 나타내었다. 마지막 형상은

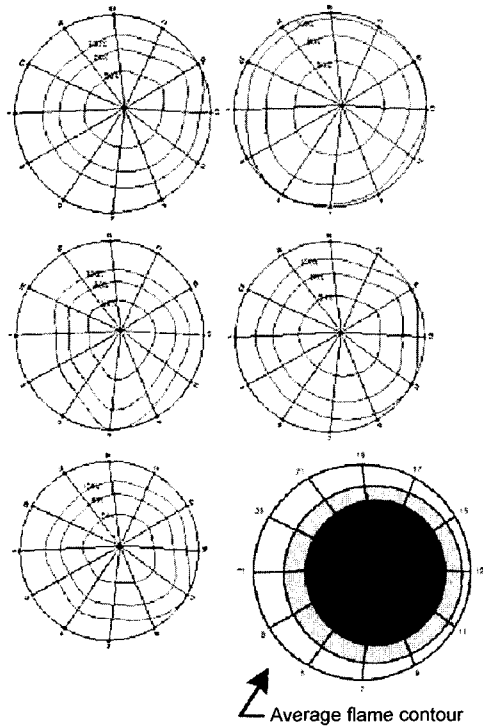


Fig. 9 Various flame developing contours and average flame contour at 900rpm, propane, WOT

계산된 200cycle의 평균 화염면을 나타낸 것이다. 각 사이클마다 화염면의 위치가 변하는 것을 확인할 수 있다. 평균 화염면을 보면 점화 플러그로부터 가까운 9~15지역에 도달했을 때 거리가 먼 21~3지역에는 아직 미연가스가 많이 남아 있는 것을 확인할 수 있다. 스파크 플러그와 평균 화염면까지의 거리를 비교해 보면 상대적으로 화염 속도는 9~11에서 빠르게 나타났고, 5~19번에서 느리게 나타나고 있다. 이는 스웰 또는 텀블에 의한 혼합가스의 유동속도가 지역별로 차이가 나기 때문으로 추정된다.

3.3 노킹 발생 위치 추정

노킹이 발생하는 위치를 추정하기 위해 압력신호와 이온프로브 신호를 동시에 측정하였다. 연소실 내에 노킹이 발생하면 급격한 압력 변동에 의하여 압력파가 발생하게 된다. 이 때 정상 연소와는 다른 고주파 성분이 발생하게 되는데, 이런 압력 신호의 특징을 이용하여 노킹 발생 시점을 찾을 수 있다.

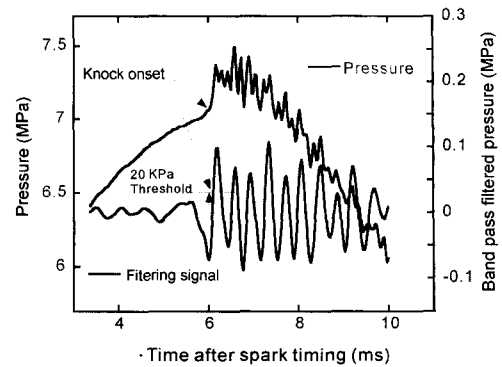


Fig. 10 In-cylinder pressure and band pass filtered pressure

Fig. 10과 같이 압력 신호로부터 노킹 발생 시점을 찾기 위해 대역 통과 필터(3~14kHz)로 압력 신호를 필터링한 후 최초 20kPa에 도달하는 시점을 노킹 발생 시점으로 정의하였다.⁶⁾

압력신호로부터 측정된 노킹 발생 시점은 연소실 내 미연가스 영역에서 자발화가 일어났다는 것을 의미한다. 노킹은 점화 플러그에 의한 정상적인 화염이 도달하기 전에 말단 가스가 자발화를 일으켜 발생하므로 노킹 발생 시점 이전에 화염이 도달한 위치에서는 자발화가 발생하지 않는다고 할 수 있다. 정상적인 화염 전파시 느리게 도달해야 하는 지점에서 평균 도달 시간보다 빨리, 압력 신호로부터 측정된 노킹 발생 시간과 일치하는 순간에 이온프로브로부터 화염이 도달했다는 신호가 나온다면 그 지점에서 노킹이 발생한다고 판단할 수 있다.⁶⁾

이러한 과정에는 몇 가지 오차가 있을 수 있다. 우선 말단가스의 자발화에 의해 발생된 압력파가 압력센서까지 도달하는데 일정한 시간이 소요된다. 엔진의 형상과 압력센서의 위치, 연소실의 일반적인 조건에서의 압력파가 센서에 도달하는데 최대 0.1ms(900rpm에서 0.6CA)가 소요된다. 또한 자발화한 화염이 이온프로브단면까지 도달하는 데에도 일정 시간이 소요되기 때문에 노킹이 일어났다고 하여 발생한 위치에서의 이온 프로브로부터 측정된 화염도달 시점과 압력 신호 시점이 정확히 일치하기는 어렵다. 따라서 Fig. 11과 같이 노킹 발생한 시간에서 $\pm 1^\circ$ 의 구간을 정하고, 이를 노킹 발생 시간 대역으로 설정하여 이온프로브 신호가 그 구간 내에 들어오는 위치에서 노킹이 일어나는 것으로 정

의하였다.

이렇게 정의한 노킹 발생 시간 대역으로 운전 조건을 변화시켜 가면서 실험을 수행하였다. 스파크 타이밍을 조절하여 노킹의 발생 빈도와 강도를 조절하고 압력신호를 동시에 측정하여 노킹의 세기에 따라 분류하여 분석하였다. Fig. 12는 압력신호로부터 측정된 노킹의 강도가 약한 사이클에서의 압력신호로부터의 노킹 발생 시점과 이온프로브로 측정된 화염 도달 시점의 차이를 나타낸 것이다. A case에서는 1,17,21번 지점에서 B case에서는 1,5,9번 지점에서 구간 내에 들어오는 것을 확인할 수 있다. 노킹의 강도가 약한 운전 조건의 경우, 평균화염면에서 확인한 미연가스가 많이 남아 있는 스파크에서 먼 지점에서 주로 노킹이 발생함을 알 수 있다.

이에 반해 Fig. 13에 나타난 노킹의 강도가 강한

사이클의 경우에는 노킹이 일어나는 위치가 훨씬 광범위하다는 사실을 확인할 수 있다. A case의 경우에는 한 지점을 제외한 전 지역에서, B case의 경우에는 전 지역에서 노킹이 일어나는데, 이는 실험에 사용한 엔진이 대형 SI 엔진이기 때문이다. 즉 화염 전파 속도에 비해 실린더의 보 사이즈가 크기 때문에 운전 조건이 심한 경우, 화염이 벽면에 도달하기 전에 말단 가스 영역에서 동시다발적으로 자발화가 일어날 수 있기 때문에 분석할 수 있다.

Fig. 14는 노킹 사이클의 각 이온프로브의 화염 도달 시간과 압력으로 구한 노킹 발생시간과 일치하는 개수를 백분율로 나타내었다. 정상 연소시 화염면 분석을 통해 가장 화염이 늦게 도달하는 지점인 1번과 5번의 위치에서 약 80%로 가장 많이 노킹이 발생하였으며, 반대의 위치인 9번과 13번 위치에

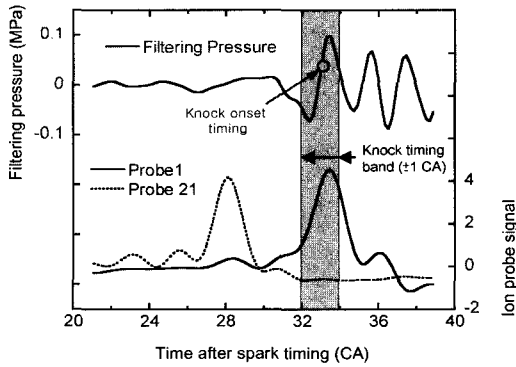


Fig. 11 Settlement of knock timing band with pressure signal and ion-probe signal

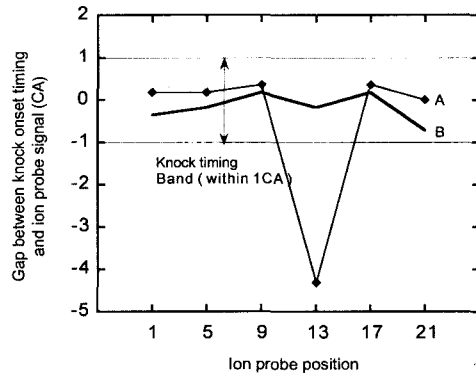


Fig. 13 Individual cases of gap between knock onset and ion-probe signal of each position at heavy knock

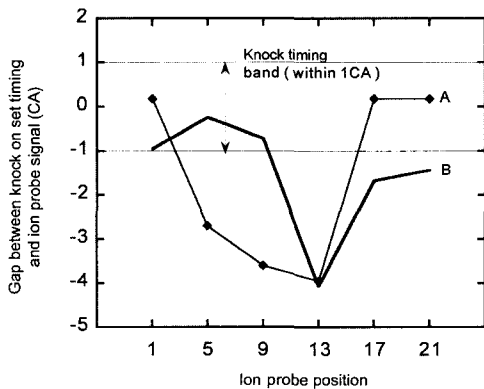


Fig. 12 Individual cases of gap between knock onset and ion-probe signal of each 1 position at light knock

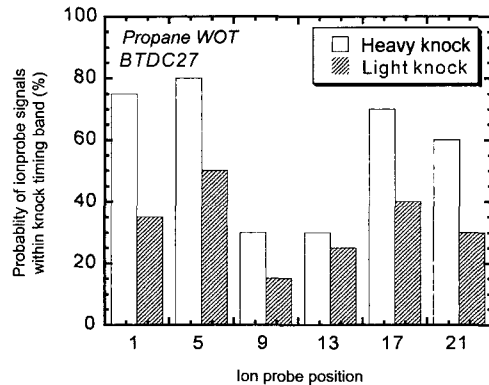


Fig. 14 Probability of ion-probe signals within knock onset timing band of each position

서는 가장 적게 노킹이 발생하고 있다. 또한 노킹이 한 지점에서만이 아니라 여러 지점에서 동시에 발생하는 것을 알 수 있다.

4. 결론

대형 LPG엔진에서 이온프로브 신호를 이용하여 화염전파 및 노킹 위치 추정을 수행한 결과로부터 다음의 결론을 얻었다.

1) 스파크 플러그로부터 먼 곳일수록 대체적으로 화염이 늦게 도달하였다. 사이클마다 발생하는 연소 특성과 화염 전파 양상이 차이가 났으며, 혼합 가스의 유동 특성에 의해 각 지점에 따라 화염 전파 속도가 차이가 남을 알 수 있었다.

2) 압력 신호로부터 노킹발생시점을 측정하고 이를 기준으로 노킹 발생 시간 대역을 설정하여 이온 프로브 신호로부터 노킹 위치를 추정할 수 있었다. 노킹은 화염 도달 시간이 늦은 지역일수록 발생 확률이 증가하였다. 또한 노킹 강도가 커질수록 연소실 전 영역에서 동시다발적으로 일어나는 경향이 증가하였다.

후 기

이 연구는 한국기계연구원의 지원에 의해 수행된 결과이며, 도움을 주신 관계기관에 감사드립니다.

References

- 1) D. Dardalls, R. D. Matthews, D. Lewis, K. Davis, "The Texas Project, Part5-Economic Analysis : CNG and LPG Conversion of Light-Duty Vehicle Fleets," SAE 982447, 1998.
- 2) Kern Yong Kang, Daeyup Lee, SengMook Oh and ChangUp Kim, "A Fundamental Study on a MPI LPG Engine for Heavy-duty Vehicle," 358, COMODIA, Nagoya, 2001.
- 3) K. M. Chun, I. Y. Choi, J. H. Kim, J. I. Park, "A Study if the Characteristics of Flame Propagation in a GDI Engine by using Ion-pr+obe," KSME99F220, KSME Autumn Conference Proceeding B, pp.128-133, 1999.
- 4) N. G. Hadjiconstantinou, J. B. Heywood, Russ, "A Model for Converting SI Engine Flame Arrival Signals into Flame Contours," SAE 950109, 1995
- 5) S. Russ, G. Peet, W. Stockhausen, "Measurements of Effect of In-Cylinder Motion on Flame Development and Cycle-to-Cycle Variation Using an Ionization Probe Head Gasket," SAE 970507, 1997.
- 6) Sungju Han, Yonggyu Lee, Kyoungdoug Min, Yengseo Kim, "Prediction of Autoignition Location in Spark Ignition Engine," Transactions of KSAE, Vol.8, No.6, pp.1-8, 2000.