〈논 문〉 SAE NO. 98370110

4-Valve SI 엔진의 Knock 특성 및 Knock 발생부위 측정

Knock Characteristics and Measurement of Knock Location in a 4-Valve SI Engine

이 경 환*, 이 시 훈**
K. H. Lee, S. H. Lee

ABSTRACT

The knock in a spark ignition engine has been investigated to avoid the damage to the engine and unpleasant feeling caused by the pressure waves propagating across the combustion chamber. Knock intensity and knock onset angle were used as physical parameters to quantify the knock characteristics. The knock intensity is defined as a peak to peak value of the band pass filtered combustion pressure signal and the knock onset angle is determined as the crank angle at which this signal exceeded the threshold level on each cycle. The cyclic variation of knock in a four valve single cylinder engine was investigated with these two parameters.

The location of autoignition was also examined by ion probes in the cylinder head gasket and squish region in the combustion chamber. For this measurement, a single cylinder engine was modified to accept the pressure transducer, 18 ion probes in the squish region and 8 ion probes in the specially designed PCB (Printed Circuit Board) cylinder head gasket.

주요기술용어 : Knock, Knock Intensity, Knock Onset Angle, Knock Location, Autoignition, DBL, Ion Probe

1. 서 론

일반적으로, 가솔린엔진의 knock은 "그 명칭이 의미하는 바와 같이 특징적인 소리와 진동을 동반한 엔진 내에서의 간헐적인 혹은 연속적인 비정상 연소현상"[1]이라고 포괄적으로 정의할 수 있는데, 점화플러그로부터 점화되어 전파하는 화염전단의 미연가스가 특정조건(thermally stressed condition)에 이르러 한 지점 혹은 여러 지점에서 급속히 자발화하는 현상(autoignition)으로도 설명할 수 있다. 이러한 급속한 자발화는 연소실을 가

* 정회원, 순천대학교 자동차공학과
** 현대자동차 중앙연구소

로질러 전파되는 정상파로서의 압력진동 및 국부적인 높은 압력을 유발하게 되며, 그 정도에 따라 엔진에 유해한 영향을 미치게 된다. 이러한 엔진 knock은 엔진 성능 및 연료 선택을 제한하는 중요한 변수로서 많은 내연기관 엔지니어들이 오랫동안 연구해온 과제였지만, 아직도 그 특성이나 발생구조에 대하여 충분히 해명되어 있지 않은 상태이다.

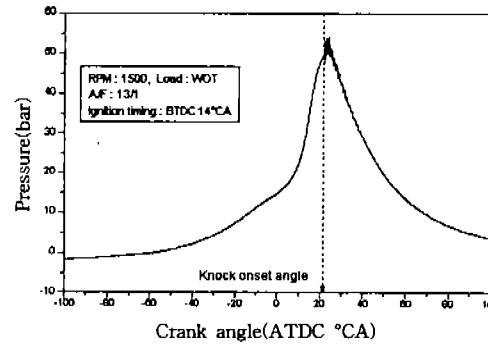
최근 가속도계나 압력변환기를 이용한 센서를 장착하여 knock을 감지하고 그에 따라 점화시기를 적절히 제어하는 알고리즘을 양산차량에 적용하여 knock발생을 제어하므로써 엔진 성능을 향상시키고 있다. 이에따라 엔진의 기본적인 knock 특성 이해는 연소실 형상, 냉각 기구 등 엔진 설계에 있어서 중요한 지침이 되므로 지속적으로 연구되어야 할 과제로 인식되고 있다.

이러한 요구를 충족시키기 위하여, 본 연구는 가솔린엔진의 기본적인 knock특성을 정량화하여 그 사이클 변동과 연소특성의 상관성을 검토하고, 특히 실린더 내에서 knock이 발생하는 영역을 이온프로브를 통하여 구체적으로 규명하고자 하였다.

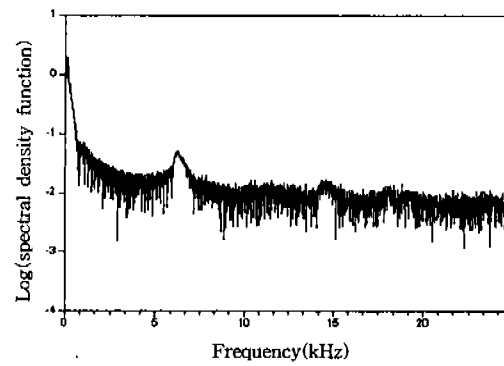
2. 본 론

2.1 Knock 특성의 정의[2)]

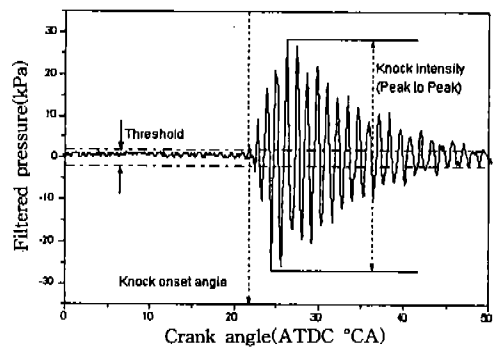
Knock의 일반적인 특성은 knock의 강도(knock intensity)와 knock이 일어난 사이클의 knock 발생시기(knock onset angle)로 구분할 수 있는데, 이들을 정의하는 방법은 매우 다양하지만 Fig. 1의 (a)와 같이 실린더내 연소압력 측정이 기본적으로 요구된다. 그러나, 연소압력 신호로부터 knock의 강도와 knock 발생시기를 정확히 측정하기 위해서는, knock이 발생하는 위치에 압력센서도 함께 장착하는 것이 가장 바람직하다. 이는 knock 강도의 경우 knock에 의한 압력파가 정상파이므로 압력센서의 장착 위치에 따라 그 진폭이 다르게 나타나며, knock 발생시기는 압력센서 위치가 knock 발생부위에서 멀어질수록 그 압력파의 진행속도에 따라 압력센서의 신호가 지연되기 때문이다.



(a) Engine combustion pressure with knock



(b) FFT analysis



(c) Band pass filtered pressure

Fig.1 Analysis of engine combustion pressure trace with knock

본 연구에서는 장착 편의상 연소실 rear 하단부에 압력센서를 장착하고, 그 신호를 Fig.1의 (b)와 같이 Fast Fourier Transform(FFT)하여 지배적인 knock 주파수 영역을 파악한 다음 그 주파수 영역을 포함하는 대역필터를 통과시킴으로서 Fig.1의 (c)와 같이 필터링된 압력신호를 구

한 뒤, 그 신호의 최고치를 측정하여 knock의 강도로 정의하였다. 가장 일반적인 방법으로 사용되고 있는 이 방법은 계산 과정이 복잡하고 knock의 기준이 명확하지 않으며, 노이즈에 영향을 받는 반면 그 값 자체가 knock의 강도를 잘 반영하고 있으며 엔진 운전 조건과 무관하게 적용할 수 있다는 장점이 있다.

Knock 발생시기의 경우, Fig.1의 (c)와 같이 상기 필터링된 신호를 이용하여 이 값이 일정 threshold를 넘어서는 점에서 knock이 일어났다고 정의하였다. 이 방법은 각 엔진조건에 따른 노이즈수준을 파악하여 그 threshold를 설정해야 하는 번거로움이 있으며 knock의 강도가 약할수록 더욱 세심한 주의가 필요하다.

2.2 Knock의 강도와 knock 발생시기의 사이클변동

본 연구에 사용된 엔진은 4밸브 가솔린엔진이며, 그 사양은 Table 1에 서술하고 있다. 시험은 각 사이클에서의 knock의 강도, knock 발생시기와 기타 연소특성의 관련성을 파악하고자 실시되었다. 시험조건은 Table 2와 같고 연소압력은 0.1℃A(Crank Angle)단위로 100 사이클 동안 Kistler 6121 압력센서를 이용하여 샘플링하였다.

Table 1 시험 엔진 사양

Type	4-Valve Engine
연소실 형상	Semi Wedge
배기량	374cc
Bore×Stroke	75.5mm×83.5mm
실린더 수	1
압축비	9.5 : 1
밸브개폐시기	5/35 43/5
연료 장치	Port Injection

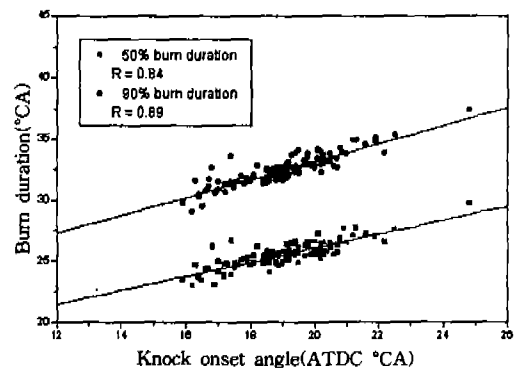
Table 2 시험 조건

엔진 회전수(RPM)	부 하
1,500	전부하
점화시기	공연비
14℃A BTDC	13 : 1

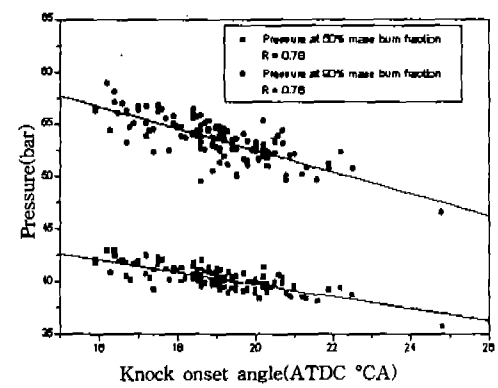
Fig.2에서와 같이 각 사이클당 knock 발생시기의 경우, 50%와 90% 연소기간 및 그때의 연소압력과 밀접한 관계를 나타내며, 이것은 연소속도가 빠를수록 연소압력이 클수록 knock 발생시기가 빨라짐을 나타낸다. 그러나 실제 엔진성능에 영향을 주는 knock 강도의 경우, 연소상태를 나타내는 어떤 변수와도 그 연관성을 찾기가 어려웠다. 이것은 knock 강도가 knock 발생시의 말단가스량과 분포 형태, 온도, 가스성분의 분포, 압력측정 위치와 knock 발생부위 등에 종합적으로 영향 받는 것을 의미한다.[3)]

2.3 Knock 발생부위의 측정

지금까지의 연구 보고에 의하면, 광섬유, 압력



(a) Knock onset angle against burn duration on individual cycle



(b) Knock onset angle against pressure on individual cycle

Fig.2 Cyclic variation of knock onset angle

센서, 이온프로브등이 knock 발생부위의 파악을 위하여 일반적으로 사용되어져 왔다. Spicher[4]의 경우, 실린더헤드, 라이너 및 피스톤에 120여개의 광섬유를 장착하여 화염전파특성과 knock 발생부위를 파악하였고, 최근에는 Liiva등[5]에 의해 다수의 압력센서를 이용한 삼각형분할법도 소개된 바 있다. 그러나, 실제 엔진에 있어서 100여개의 광섬유를 장착한다는 것은 매우 어려운 일이며, 엔진 운전에 의한 오염 등을 고려할 때 시험의 난이도가 매우 높은 단점이 지적되어 왔다. 또한, 삼각형분할법의 경우에 있어서도 장착의 어려움뿐만 아니라 knock 발생부위의 정확한 계측이 불가능한 단점이 있다.

반면 장착이 쉽고 경제적이며 화염도달 유무를 정확히 알 수 있는 이온프로브의 경우, 헤드가스켓에 장착하는 방법이 이미 확립되어져 있으며 이온프로브가 장착된 PCB를 이용하여 실제 엔진에서의 화염전파를 성공적으로 측정한 경험을 갖고 있다.[6] 이 이온프로브를 이용하여 knock 발생부위를 측정하는 방법이 최근 Witze등에 의하여 자세히 소개되었는데,[7] 사용된 엔진은 원통형의 비교적 간단한 형상을 한 Sandia Research Engine이었다. 그 원리를 간단히 설명하면 Fig.1의 (a)와 같이 연소압력신호에 의해 knock이 발생되었다고 판단된 시점(knock onset angle)에서 Fig. 3에서와 같이 특정 이온프로브에 화염도달신호가 발생하면 그 부분의 미연가스가 자발화되었다고 볼 수 있으므로, 그 부분이 해당 사이클의 knock 발생부위가 될 가능성이 크다고 할 수 있다. 이때 이온프로브 신호는 화염도달 유무에 따라 그 형상이 매우 급격히 변화하므로 적당한 threshold로서 화염도달 시점을 정확히 파악할 수 있다.

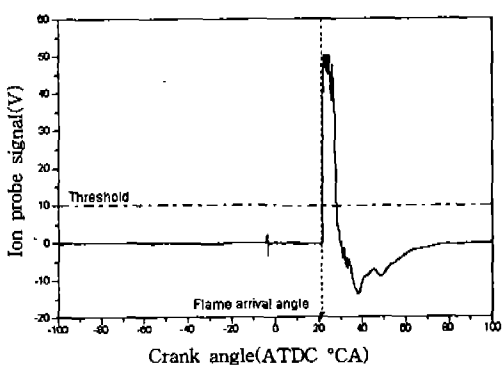


Fig.3 Example of ion probe signal

Fig.4는 가스켓 주위에 장착된 8개의 이온프로브로 부터의 화염도달 신호와 그 사이클의 knock 발생시기를 polar plotting한 것으로서, 그림에 나타난 바와같이 1, 2, 3, 6, 7, 8번 이온프로브위치에서는 knock이 발생하기 이전에 이미 정상화염이 도달하였으므로 knock 발생부위가 될 수가 없다. 그러나, 5번 이온프로브 위치에서는 knock 발생과 거의 동시에 화염이 감지되었고 4번 이온프로브의 경우 이보다 1℃A정도 후에 화염이 감지되었다. 이를 볼 때 5번 이온프로브지역은 knock에 의해 화염이 급속히 전파된 것으로 추정할 수 있다. 따라서 이 사이클에서의 knock 발생부위는 5번 근처가 된다. 이와 같이 각 사이클의 knock 발생부위를 파악하여 전 사이클들에 걸쳐 통계처리하면 그 엔진에 있어서 전반적인 knock 발생부위를 추정할 수 있다.

본 연구의 목적은 이러한 방법을 실제적인 엔진에 적용하는 것이며, 더 나아가 말단가스 영역을 명확히 규명하여 그 부위에서 좀더 구체적인 knock 발생부위를 측정하기 위한 것이다. 이를 위해 먼저 PCB 이온프로브를 이용하여 대략적인 knock 발생부위를 파악하고, 다시 그 부위에 다

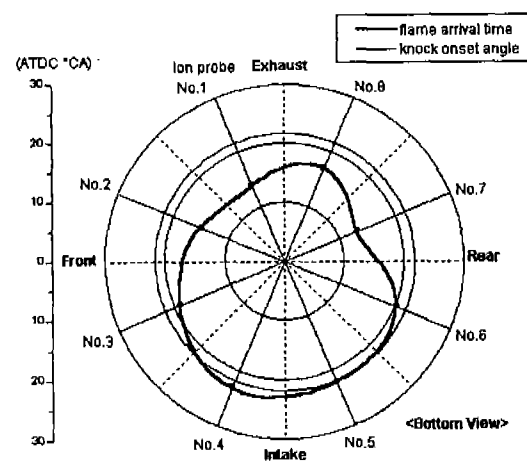


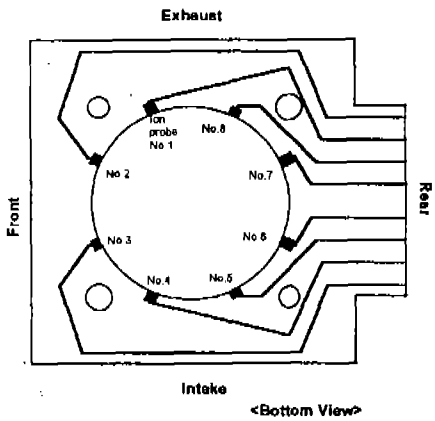
Fig.4 Polar diagram of flame arrival time with gasket ion probes to determine end gas region

수의 이온프로브들을 장착하여 말단가스내에서의 knock 특성을 구체적으로 관찰하고자 하였다.

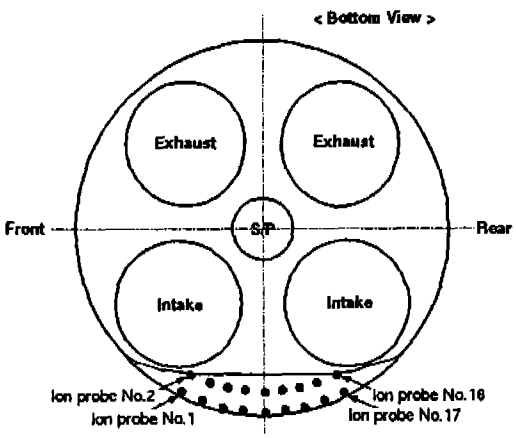
2.3.1 시험 장치

전술한 바와 같은 측정방법을 이용하기 위하여 Fig.5의 (a)와 같이 PCB 헤드가스켓을 제작하였다. 이것은 실린더 헤드와 블럭사이에서 가스켓의 역할을 함과 동시에 연소실 내에 이온프로브가 노출되어 있어 화염의 존재 여부를 규명할 수 있다. Fig 5의 (b)는 이 이온프로브를 연소실의 흡기 스퀴시영역에 장착한 모습을 나타낸다.

Fig.6은 엔진 및 기타 측정장치의 구성도를 나타낸 것이다. 이온프로브로 부터 검출된 신호는 이온전류 증폭기를 통해 증폭되고, 연소 압력신호



(a) PCB ion probes head gasket



(b) Combustion chamber with 18 ion probes in the squish region

Fig.5 Ion Probe 장착도

및 크랭크각 신호와 함께 knock모듈이 장착되어 있는 데이터 저장장치에 입력되어 knock 강도 등을 구한 뒤, 최종적으로 PC에서 polar plot diagram으로 재구성되며, knock 발생부위 파악을 위해 통계 처리된다.

본 시험은 Table 3에 나타난 시험조건에서 0.1℃A의 단위로 100사이클의 연소압력을 Kistler 6121 압력센서를 이용하여 샘플링하였다.

2.3.2 1차 시험

1차 시험은 Fig.5 (a)의 PCB 이온프로브헤드 가스켓을 사용하여 실린더 내에서 발생하는 대강의 knock 발생부위를 파악하고자 하였다.

Fig.7은 1차 시험의 대표적인 사이클을 나타낸 것으로서, PCB 이온프로브 4번을 제외한 나머지 이온프로브 위치에서는 knock이 발생하기 이전에 이미 화염이 도달하였고, 상기 이온프로브만이 knock 발생시기와 거의 일치하고 있으므로 이 부분의 미연가스가 정상화염이 도달하기 이전 자발화에 의하여 knock을 유발하였음을 알 수 있

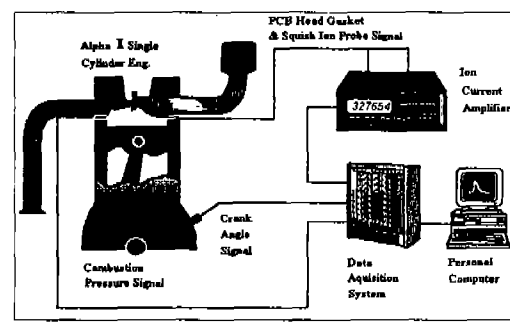


Fig.6 시험장치 구성도

Table 3 시험 조건

	RPM	부하
1차시험	1,500	전부하
2차시험		
3차시험		
	점화시기	공연비
1차시험	14℃A BTDC	13:1
2차시험	14℃A BTDC	
3차시험	5, 8, 14℃A BTDC	

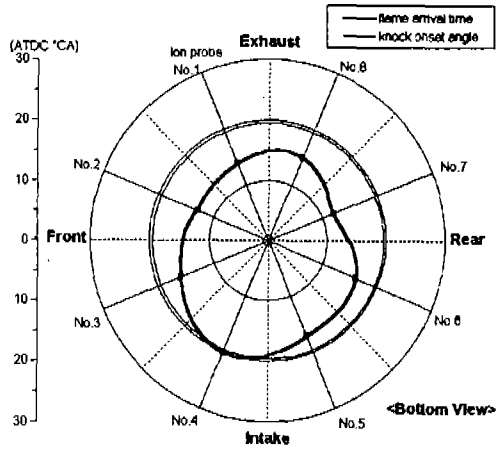


Fig.7 Representative polar diagram of 1st test

Table 4 PCB 이온프로브에 의한 화염도달시기의 linear fitting 결과

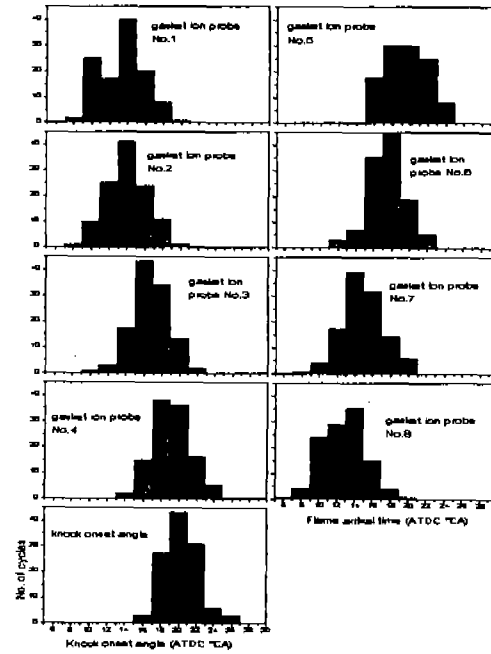
Y=Ax+B,

R : correlation coefficient

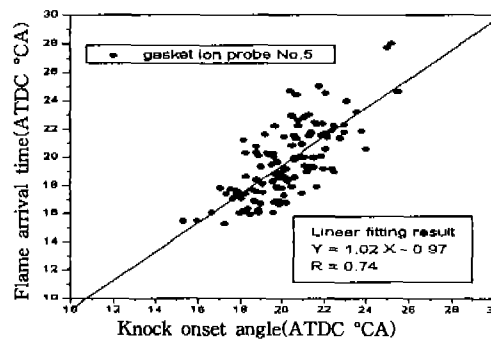
	No. 1	No. 2	No. 3	No. 4
A	0.74	0.73	0.89	0.92
B	-1.66	-0.74	-1.18	0.57
R	0.56	0.60	0.79	0.72
	No. 5	No. 6	No. 7	No. 8
A	1.02	0.76	0.64	0.76
B	-0.97	2.02	1.98	-2.50
R	0.74	0.72	0.51	0.59

다. 그러나, 앞서 언급한 바와 같이 knock 발생 시기를 정확히 파악하는 것은 압력센서의 위치와 관련이 있어 연소실 뒤쪽 하단부에 장착된 현 압력센서의 위치로는 어느 정도의 오차가 있을 것이므로, 측정결과를 통해 유의한 결론을 얻기 위해서는 전체 사이클에 대한 통계처리가 필수적이었다.

Fig.8의 (a)는 각 이온프로브의 사이클별 화염도달시기 및 knock 발생시기에 대한 히스토그램이며 (b)는 이온프로브 5번의 사이클별 화염 도달시기를 전체 사이클에 대해서 표시하고 그것을 linear fitting하여 그 계수들을 나타낸 것이다. 전 사이클에 걸쳐 knock이 발생하고 또한 그것이 특정 이온프로브가 장착된 위치에서만 항상 발



(a) Histogram of PCB ion probes



(b) Linear fitting result of No. 5 ion probe

Fig.8 Analysis of PCB ion probe signal

생한다고 가정하면, 그 화염 도달시기들은 linear fitting의 결과 y=x 주위에 존재해야 한다. 따라서 각 이온프로브의 linear fitting 결과를 나타낸 Table 4를 참고하면 이온프로브 3, 4, 5번, 즉 흡기쪽의 스퀴시부위가 knock 발생 가능성이 가장 높은 것으로 나타났다.

2.3.3 2차 시험

본 시험에서는 1차 시험에서 주된 발단가스의 자발화 지역이라고 판명된 흡기쪽 스퀴시부위에

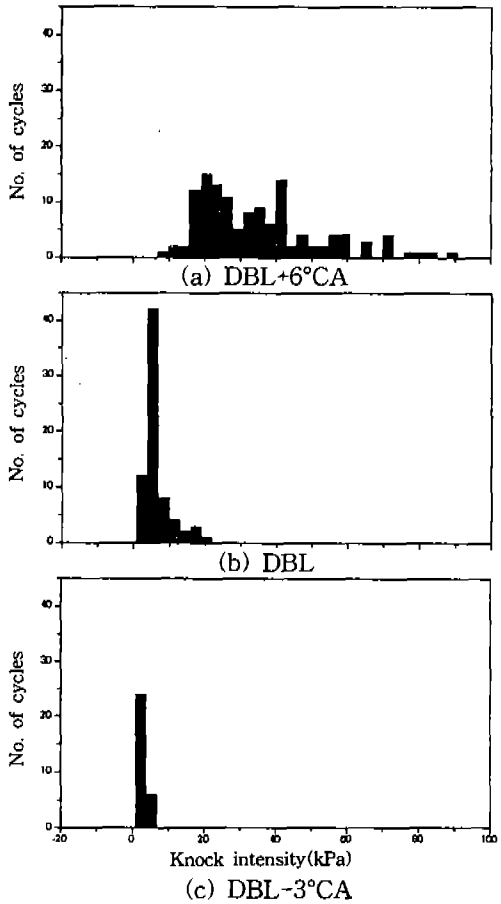


Fig.9 Histogram of knock intensity at different spark timings

18개의 이온프로브를 Fig.5의 (b)와 같이 2열로 배치하여 knock 발생부위를 좀더 구체적으로 파악하고자 하였다. 시험조건은 Table 3과 같고, 특히 점화시기를 DBL(detonation border line), DBL-3℃A, DBL+6℃A로 변화시키면서 knock 강도의 특성을 함께 살펴보았다. 먼저, 각 점화시기에 대한 knock의 강도를 비교하여 Fig.9의 histogram으로 나타냈다.

Fig.9 (a)와 같이 DBL+6 ℃A인 점화시기 14℃A BTDC에서는 전 사이클의 knock 강도가 매우 높았으며, 대부분 16 kPa 이상이었다. 점화시기가 DBL, 즉 8℃A BTDC인 Fig.9 (b)의 경우는 약 50%의 사이클에서 knock 강도가 7kPa 내외의 경미한 knock이 발생하였으나, 그중 10%

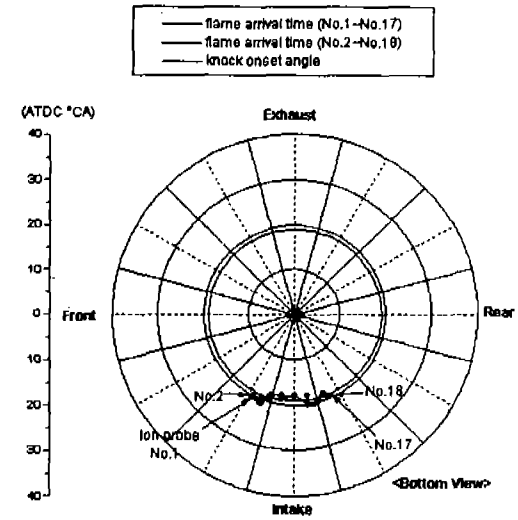
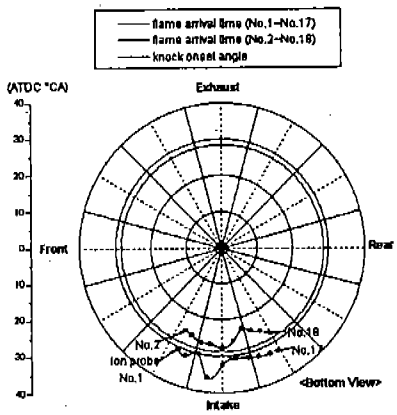


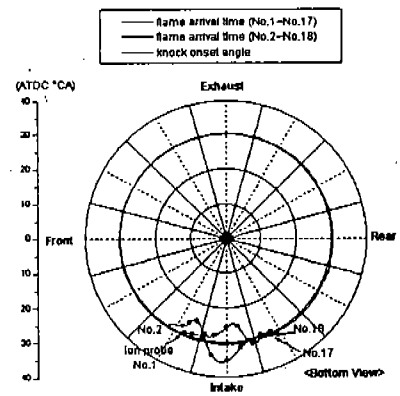
Fig.10 Typical flame arrival pattern in the end gas region at 14°CA BTDC spark timing

정도의 사이클에서는 knock의 강도가 16kPa 이상의 강한 knock이 발생되었다. 이 DBL은 audible knock에 의한 DBL과 일치하므로, 본 시험조건에서는 대략 이 정도의 knock 강도에서 시험자가 소리로 감지할 수 있을 것으로 판명되었다. Fig.9 (c)의 DBL-3℃A인 점화시기(5℃A BTDC)에서는, 대부분의 사이클에서 대역필터로 필터링한 압력신호의 최고치가 노이즈수준보다 낮아 knock이 발생했다고 판단하기 어려웠다. 즉, knock의 형태를 보이는 것은 전체 사이클 중 약 2%에 불과하였고, 이것은 매우 경미한 knock이라고 할 수 있다.

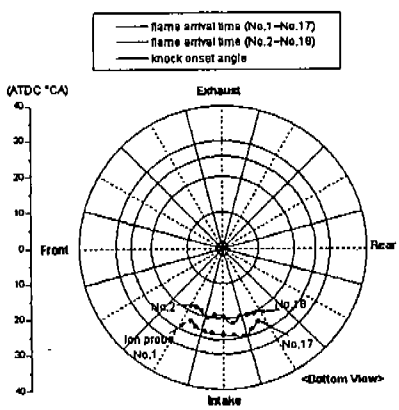
Fig.10은 점화시기가 14℃A BTDC인 경우의 각 이온프로브에의 화염도달시기를 표시한 것으로서 대표적인 사이클을 나타낸 것이다. 다수의 이온프로브에서 그 신호가 knock 발생시기와 거의 일치하고 있고, 대부분의 사이클에서 이러한 경향을 보이고 있다. 이것은 점화시기가 진각됨에 따라 knock 발생 시기도 빨라지므로 상대적으로 더 많은 양의 말단가스가 여러 곳에서 동시에 자발화하는 것을 의미하며 따라서 knock의 강도도 더 커지게 된다. 또한, knock 발생부위 파악을 위해 장착된 18개의 이온프로브는 그 signal들이 어느 특정한 부위에 주도적으로 나타났다고 할



(a) Type Ⅰ



(b) Type Ⅱ



(c) Type Ⅲ

Fig.11 Typical flame arrical pattern in the end gas region at 8°CA BTDC spark timing

수 없을 정도로 매우 불규칙하게 나타났다.

이보다 knock 강도가 더 낮은 DBL, 즉 점화시기가 8℃A BTDC인 경우의 화염전파특성은 Fig.11의 (a, (b), (c)와 같이 몇 가지의 유형으로 나눌 수 있었는데, 뚜렷하게 지배적인 경향은 찾을 수 없었고, (c)와 같은 유형이 다소 빈번히 나타났다. (a)와 (c)의 경우는 구체적인 knock 발생부위가 명확하지 않는데, 이것은 knock 강도가 매우 약할 경우 knock 발생부위에서의 화염전파가 유동, 온도, 미연가스의 분포와 같은 요소에 의한 영향 때문으로 추정되며, 특히 (c)의 경우가 다소 빈번한 것은 그것이 화염전파가 상대적으로 느린 곳에서 knock이 발생하는 일반적인 유형을 나타내기 때문으로 판단된다. (b)와 같은 경우는 주로 스퀴시의 오른쪽 부위에서 발생되는 것임을 알 수 있다. 또한, 각 사이클에서의 knock 강도는 그 사이클의 화염전파 유형이나 그때의 knock 발생부위와 큰 상관관계를 보이고 있지 않으며 knock 발생부위도 명확하게 구별하기는 곤란하였다.

그러나, 1차 시험을 통해 흡기쪽 스퀴시 부위의 말단가스 영역이 구체적으로 파악되었고, 그 영역 내에서 더 지배적인 knock location을 이온프로브를 통해 판명하는 것은 용이하지 않았으나, 이것은 오히려 현재의 스퀴시 부위내의 한 지점 혹은 여러 지점이 매우 불규칙하게 knock 발생부위가 되고 있음을 의미하는 것으로 사료된다.

3. 결 론

본 연구에서는 연소압력 측정과 이온프로브를 이용한 화염도달시간을 측정하여, knock 특성과 연소실내에서 knock이 발생한 영역을 파악하면서 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) Knock 발생시기와 knock 강도의 사이클변동을 살펴보면 각 사이클의 knock 발생시기는 연소속도가 빠를수록, 연소압력이 높을수록 더 빨라짐을 알 수 있으나 knock 강도의 경우에는 해당 사이클의 연소특성을 나타내는 어떠한 변수와도 상관관계가 없으며 이것은 knock 강도가 말단가스의 양과 분포, 온

도 및 기타 요인에 복합적으로 영향을 받고 있음을 의미한다.

2) 1,500rpm, 전부하에서 점화시기가 DBL-3℃A인 경우, 전체 사이클중 약 2% 정도 knock이 발생하였으나 그 강도는 매우 경미하였고, DBL에서는 전체 cycle의 50% 정도 경미한 knock이 발생하였으나 그중 10% 정도는 소리로 감지할 수 있을 정도의 knock이 발생하였다. DBL+6℃A에서는 전 사이클에서 강한 knock이 발생하였다.

3) PCB 가스켓과 스퀴시 부위에 장착된 이온 프로브를 통하여 본 시험에 사용된 단기통 엔진의 knock 발생부위가 주로 흡기밸브 스퀴시 부근이며, 특히 연소실 끝단으로부터 약 5 mm 전방까지가 말단가스의 주된 자발화 지역임을 알 수 있었다. 또한, 상기 영역에서 더 세부적인 knock 발생부위 파악은 다수 지점에서의 knock 발생, 유동등에 의한 영향 등으로 용이하지 않았다.

참 고 문 헌

1. Oppenheim, A. K., "The Knock Syndrome - Its Cures and Its Victims", Trans. SAE 93, Sec. 5, p. 874, 1984.
2. Puzinauskas, P. V., "Examination of Methods Used to Characterize Engine Knock", SAE Paper 920808, 1992.
3. Chun, K. M., Heywood, J. B., "Characterization of Knock in Spark-Ignition Engine", SAE Paper 890156, 1989.
4. Spicher, U. and Kollmeier, H. P., "Detection of flame Propagation During Knocking Combustion by Optical Fiber Diagnostics", Trans. SAE 95, Sec. 6, p. 552, 1986.
5. Liiva, P. M., Valentine, J. N., Cobb, J. M. and Acker, W. P., "Use of Multiple Pressure Transducers to Find In-Cylinder Knock Location", SAE Paper No. 922368, 1992.
6. 지명석, 이시훈, 이경환, "광섬유 장착 점화플러그와 이온 프로브에 의한 화염전파 측정," 한국자동차공학회 추계학술대회 논문집, p. 284, 1994.
7. Witze, P. O., Green, R. M., "Determining the Location of End-Gas Autoignition Using Ionization Probes Installed in the Head Gasket", SAE Paper 932645, 1993.