

연료의 옥탄가 변화에 따른 스파크 점화기관의 노킹특성의 변화

Effect of Fuel Octane Number on Knock Characteristics in a Spark-Ignition Engine

이 홍 철*, 전 광 민**
H. C. Lee, K. M. Chun

ABSTRACT

Knock phenomenon is an abnormal combustion originated from autoignition of unburned gas in the end-gas region during the later stage of combustion process and it accompnys a high pitched metallic noise. Engine Knock is accompanied with a vibration of engine cylinder and when it is severe, it can cause major engine damage. Engine Knock is characterized in terms of knock crank angle, knock pressure, pressure jump and knock intensity.

In this study, a 4-cylinder spark ignition engine was used for experiment and eighty consecutive cycles were analyzed statistically. The purpose of this study is to characterize spark ignition engine knock as a function of ignition timing and fuel research octane number.

The result of this study can be summerized as follows. Knock occurrence angle approached TDC as ignition timing is advanced. Pressure and knock intensity gradually increased as spark timing is advanced. Mean knock occurrence angle gradually approached TDC as fuel research octane number is decreased for identical spark timing. Knock intensity increased linearly as RON is decreased.

1. 서 론

노킹(knocking)은 날카로운 금속성음을 동반하는 현상으로써 이는 난류화염의 전단부에 위치한 미연소가스(end-gas) 영역에서의 급격한 열방출에 기인하는 것으로 여겨지고 있다.

노킹현상이 일어나면 연소실 내부의 최고압력이 정상연소일 때 보다 상승하고, 연소실과 실린더 벽면 사이에 형성되어 있던 열 경계층

이 파괴됨으로써 실린더벽으로의 열전달이 급격히 증가하여 실린더 헤드가 과열되고 아울러 엔진의 성능과 효율이 저하되게 된다.¹⁾ 그리고 연소실 내부에서 국부적으로 발생하는 급격한 압력상승은 실린더 불력의 진동을 야기시키며, 이와 같은 현상이 지속되면 충격파가 각종 엔진부품의 기계적, 열적 응력을 증가시켜 피스톤이나 링, 연소실 표면, 가스킷, 흡·배기밸브, 스파크 플러그와 같은 부품들을 손상시키게 된다.²⁻⁴⁾

* 연세대학교 대학원

** 정희원, 연세대학교 기계공학과

노킹을 피하기 위한 한가지 방법으로 점화 시기를 변화시키는 경우가 있지만 지나치게 점화를 지연시키면 토오크의 손실을 초래하게 된다. 그밖에 기계적으로 연소실 형상을 개선함으로써,⁵⁾ 혹은 화학적으로 연료의 분자구조를 바꾸어줌으로써 노킹을 방지하기 위한 많은 노력이 있었지만, 스파크 점화기관에서의 노킹의 한계를 확장시키려는 노력은 노킹을 발생시키는 과정 특히 자발화를 유발하는 화학적인 메카니즘에 대한 정확한 현상 파악이 어려워 국부적으로 제한되어 왔으며, 또한 노킹특성이 매 사이클마다 변함으로써 더욱 어려움에 직면하고 있다.⁶⁻⁹⁾

미연소가스에서 급격한 에너지 방출은 강한 압력파를 형성하고 연소실내에서 압력진동을 초래하게 되며 노킹의 고유진동수는 연소실의 크기 그리고 작동조건에 따라 달라진다. 노킹강도(knock intensity)는 많은 요소들에 의해 특징지어지며 이러한 요소들은 또한 매 사이클마다 변하기 때문에 노킹의 특성을 규정하는 데는 통계적인 방법을 이용해야 한다.

스파크 점화기관의 노킹특성에 영향을 미치는 인자에는 연소실의 형상, 운전속도, 점화시기, 흡입공기의 온도, 그리고 연료의 옥탄가 등이 있으며 특히 연료의 옥탄가의 변화는 직접적으로 노킹에 영향을 준다.¹⁰⁾

본 연구의 목적은 국내에서 양산되고 있는 배기량 1500cc의 4기통 스파크 점화기관을 대상으로 이러한 변수들이 엔진의 노킹특성에

어떤 영향을 미치고 있는가를 체계적인 실험을 통하여 규명하는 데에 그 목적을 두고 있다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

본 연구에 사용된 실험장치는 엔진, 동력계, 압력센서, 연료량측정장치, 공기량측정장치, 온도측정장치 그리고 자료취득장치 등으로 구성되어 있으며 실험장치에 대한 개략적인 구성은 Fig.1과 같다.

아울러 노킹 측정을 위한 각종 계측장비 및 그외의 부대장비들에 대한 구체적인 내용은 다음과 같다.

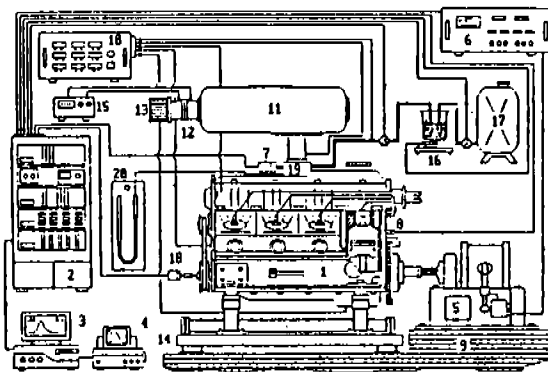
2.1.1 엔진

실험용 엔진은 OHC 4기통 1498cc 카브레타 가솔린 엔진을 사용했다. 연소실의 형상은 욕조형(Bathtub and wedge)이며, 스파크 플러그는 피스톤 중심축으로부터 19mm 떨어진 곳에 위치하고 있다. 공기와 연료는 자연흡입 방식(Natural aspiration)이며, 점화방식은 전자식 점화 시스템에 의해 이루어진다.

2.1.2 압력 측정 센서

본 실험에 사용한 센서는 압전형(Piezoelectric Type) 센서로서 이는 엔진 연소실 내부 압력 측정용으로 널리 사용되고 있다.

본 연구에서는 Kistler사의 6053 플러쉬 마운트형 센서(Flush Mount Type Sensor)와



- | | |
|----------------------------|----------------------------|
| 1. Test Engine | 15. Digital Manometer |
| 2. Data Acquisition System | 16. Fuel Consumption Meter |
| 3. IBM PC/386 | 17. Fuel Tank |
| 4. Printer | 18. Encoder |
| 5. Dynamometer | 19. Carburetor |
| 6. Dynamometer Controller | 20. U-Type Manometer |
| 7. Step Motor | |
| 8. Pressure Transducer | |
| 9. Test Bed | |
| 10. Temp. Indicator | |
| 11. Surge Tank | |
| 12. Air Flow Meter | |
| 13. Air Cleaner | |
| 14. Heat Exchanger | |

Fig.1 Schematic diagram experimental equipment

5011 전하 증폭기를 사용하여 연소실의 내부 압력을 측정하였다. 플러쉬 마운트형 센서는 냉각과 별도의 엔진가공이 요구되긴 하지만 스파크 플러그 어댑터형 센서에 비해 압력과 동으로 인한 영향을 배제할 수 있으며, 미연소 가스 영역으로 예상되는 지점에 직접 장착함으로써 노킹 측정을 위한 좀더 정확한 실린더 내의 압력을 측정할 수 있다.

압력센서를 연소실 내에 삽입하는 과정은 각별한 주의가 요구된다. 연소실내의 고온의 연소가스가 직접 센서 표면과 접촉하는 경우 thermal shock에 의해 센서 output 이 영향을 받기 때문이다. 일반적으로 piezoelectric transducer의 output은 온도가 올라갈 때 감소한다. 이와 같은 thermal shock을 방지하기 위해서는 센서 표면을 냉각하거나 연소가스와의 직접 접촉을 피하여야 한다.^{11, 12)}

따라서 본 실험에서는 이와 같은 thermal shock을 방지하기 위해 연소실 표면과 센서 부위 사이에 길이 3mm, 지름 3mm의 통로(Passage)를 두었다. 이 통로내에서 발생될 수 있는 공진 압력파의 주파수는 약 30kHz로서 이 공진 압력파 성분은 실제 압력파에 더하여지나 노킹 1.2차 모드보다 상당히 높아 노킹 해석에 거의 영향을 미치지 않는다.

본 실험에서 사용한 6053 압력 센서의 장착과정은 Fig. 2, Fig. 3과 같다.

2.1.3 자료 취득 장치

연소실내에서 발생하는 압력을 측정하는 데에는 압력센서, BNC 케이블, 전하증폭기, A/D 컨버터 그리고 퍼스널컴퓨터 등이 필요하다.

압력센서에서 발생한 미약한 전류를 전하 증폭기로 보내는 데에는 높은 인슐레이션 값을 갖는 BNC 케이블을 이용함으로써 외부로부터 발생될 수 있는 노이즈(noise)의 영향을 가능한한 배제하였다.

이렇게 전송된 미약한 전류는 5011 전하증폭기를 지나면서 적절한 게인(Gain)값에 의해 증폭되며 이 증폭된 전하는 이어 DT 2821-G-16SE A/D 컨버터에 보내어진다.

이와 동시에 샤프트 엔코더(Shaft Encodor)

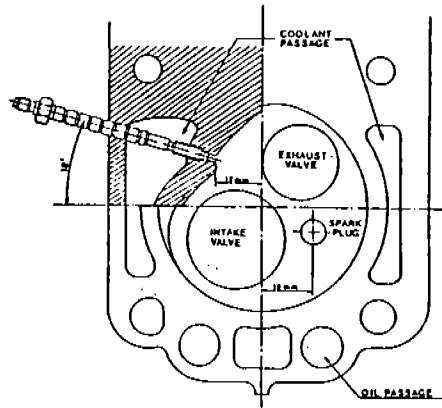


Fig. 2 Schematic of combustion chamber equipped with pressure transducer

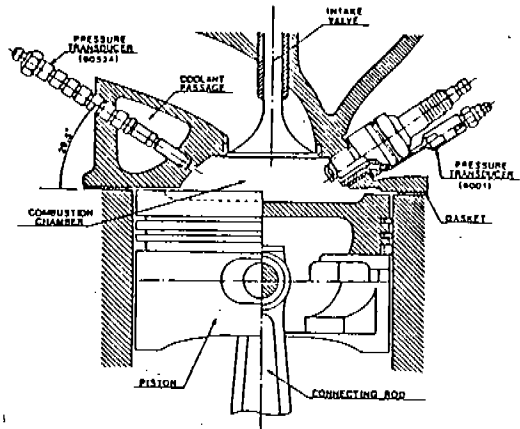


Fig. 3 Schematic of combustion chamber equipped with two pressure transducers

에서 발생된 크랭크각 클럭(1회전당 3600 Pulse)도 A/D 컨버터의 외부 클럭(External Clock)으로 보내어지며, A/D 컨버터에서는 이 클럭을 기준으로 하여 5011 증폭기로부터 입력되는 아날로그형의 압력 신호를 디지털화하여 퍼스널 컴퓨터의 램(Ram) 확장 메모리에 실시간으로 저장한다. 1회의 실험에서 연속적으로 취득할 수 있는 압력 데이터의 양은 7200 Data/Cycle일 때 80 사이클이다.^{12, 13)}

2. 2 실험방법

실험은 엔진의 각 부분의 온도가 정상상태

에 이르기까지 충분한 아이들링 시간을 주었다. 노킹 실험은 스파크 점화기관의 노킹특성을 연소실 내부압력 측정을 통해 관찰 규명하기 위한 실험으로써 본 실험에서는 연료의 옥탄가와 점화시기를 변화시키면서 트로틀을 전개(WOT)한 상태에서 실시하였다. 연료의 옥탄가는 Table 1에 나타낸 것처럼 8가지 경우로 변화시켰으며, 점화시기는 5°에서 45°까지 5° 간격으로 다양하게 변화시키면서 실험을 실시하였다.

점화시기의 변화는 엔진의 디스트리뷰터(Distributor)와 타이밍 라이트(Timing Light)를 이용하여 변화시켰으며, 엔진 회전속도의 변화는 동력계를 이용하였다. 또한 본 실험에서 가장 축점이 되는 연료의 옥탄가 변화에 있어서는 연료 교체시 옥탄가가 서로 다른 연료들 사이에 영향을 완전히 배제하기 위하여 연료 계통에 남아있는 연료가 완전히 제거될 때까지 교체된 연료의 상당량을 (500cc에서 1000cc 정도) 소비시키면서 무부하 상태에서 엔진을 아이들링 시켰다.

노킹실험에서 연소실의 압력자료는 크랭크 각 0.1°마다 취득하였으며, 동일 실험조건하에서 80 사이클에 해당하는 연소실의 압력자료를 연속적으로 취득하였다. 또한 각각의 실험조건마다 대기온도, 습도, 압력 그리고 엔진 각 부위의 온도, 공기소비율, 연료소비율,

공기연료비 등을 측정하였으며, 또한 동력계로부터 토오크와 회전속도를 측정하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 노킹특성 요소와 노킹강도의 결정

노킹을 특징짓는 요소로는 노킹이 발생될 때의 크랭크 각도와 압력 그리고 노킹강도를 이용하였다. 노킹의 발생시점은 연소실내의 압력증가율이 급격한 불연속점을 나타낼 때의 크랭크 각도와 압력으로써 결정된다. 노킹강도를 결정하는 방법에는 여러가지 방법이 이용된다. 즉 $P-\theta$ 선도상의 압력상승값, 압력진동의 적분값, 압력진동에너지, 스펙트럼 분석의 적분값 그리고 밴드패스 필터링 결과 나타나는 압력진동의 최대진폭 등이 이용된다.

본 실험에서는 압력자료를 디지털 밴드패스 필터링(Digital Bandpass Filtering)을 수행한 뒤 나타나는 압력진동의 최대진폭으로 결정하였다. 밴드패스의 범위는 스펙트럼 분석 결과 나타난 노킹 주파수 영역중 1차 모드(mode) 주위인 5~10kHz를 선택하였다.

실린더내에서 연소가 정상적인 경우 압력곡선은 완만한 변화율을 나타낸다. 그러나 노킹이 발생할 경우 Fig. 4에 나타난 것처럼 어느 임계점을 지나면서 압력곡선은 불연속점을 갖게 되며 이 시점에서 압력이 급격히 상승하

Table 1 Specification of experimental fuel

Octane Number (RON)	Specific Gravity (15/4 °C)	MTBE (%) Percentage
81.5	0.7070	5
84.8	0.7170	5
87.7	0.7291	5
91.7	0.7441	5
95.1	0.7613	5
97.8	0.7738	5
98.2	0.7780	3.2
101.6	0.7793	5

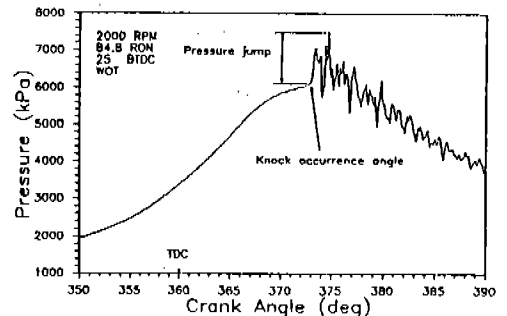


Fig. 4 One cycle cylinder pressure vs. crank angle for knocking combustion (2000 rpm, 25 BTDC, 84.8 RON, WOT)

고 이후 압력진동이 상당기간 동안 지속되고 있음을 알 수 있다. 그림에 나타나 있는 것처럼 압력상승치(**pressure jump**)는 노킹이 발생된 시점에서의 압력과 최대 압력값과의 차이로써 결정하였다.

본 실험에서 필터링 결과 정상연소의 경우 노이즈(**noise**)의 영향으로 평균 4.9kPa(0.049 atm)의 압력진동이 관찰되었으며, 따라서 본 실험에서는 이 압력진동의 4배이상(20kPa)의 압력상승값을 갖는 경우 노킹 발생사이클로 규정하였다.

노킹이 발생될 때의 압력자료에 대한 스펙트럼 분석(**Fast Fourier Transform**) 결과가 Fig.5에 나타나 있다. 스펙트럼분석 결과 나타난 노킹의 주파수영역은 그림으로부터 제1차 모드(mode)가 7.5kHz 부근에 분포하고 있음을 알 수 있다.

따라서 본 실험에서는 이 주파수영역을 노킹주파수 영역으로 규정하고 이 영역내에서 필터링을 수행하였으며 그 결과가 Fig.6에 나타나 있다. 노킹발생 시점에서 압력은 일반적으로 불연속성을 나타내게 되며, 필터링 결과 나타난 자료에서도 이에 상응하는 급격한 증가율을 보이고 있음을 Fig.6으로부터 확인할 수 있다. Fig.6에 나타나 있는 압축과정에서의 미세한 압력진동은 정상연소의 경우와 동일한 진폭을 보였다. 그리고 본 실험에서 사용된 노킹강도는 Fig.6에 나타나 있는 것처럼 필터링 결과 나타난 압력진폭의 최대값으로 결정하였다.

3.2 노킹특성 요소의 일반적인 경향

동일한 실험조건하에서 취득된 압력자료라 하더라도 압력곡선은 매 사이클마다 변하며 따라서 앞서 논의되었던 노킹특성 요소들 또한 매 사이클마다 다른 양상을 보이게 된다.

Fig.7에 같은 조건하에서 취득된 4사이클의 압력자료가 나타나 있다. 그림에서 알 수 있는 것처럼 동일한 실험조건이라 하더라도 노킹발생시점, 압력상승값이 매 사이클마다 변화되고 있음을 알 수 있다.

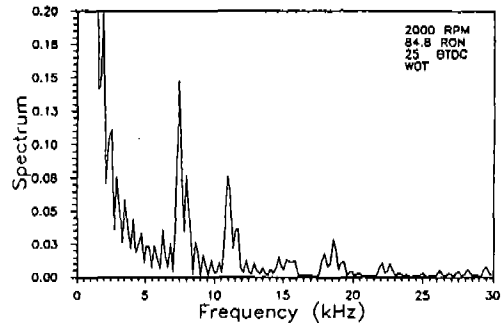


Fig.5 Spectrum of knocking pressure (2000 rpm, 25 BTDC, 84.8 RON, WOT)

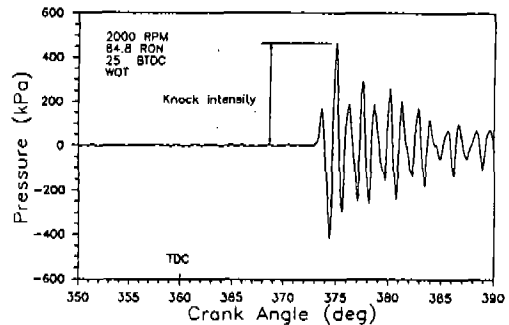


Fig.6 Band-pass filtered pressure of knocking pressure (2000 rpm, 25 BTDC, 84.8 RON, WOT)

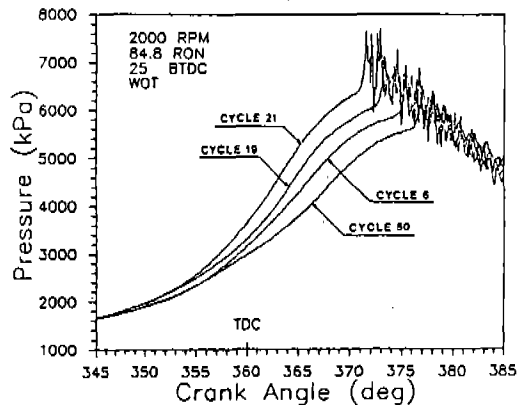


Fig.7 Four pressure trace of 84.8 RON firing at 2000 rpm cycle 6, 19, 21, 50

이처럼 노킹특성 요소들이 매 사이클마다 불규칙적으로 변화되고 있음을 고려해 볼 때 노킹을 특징짓는 요소들을 결정하기 위해서는 통계적인 방법을 이용해야 한다.

따라서 본 실험에서는 이와같은 점을 고려하여 취득된 80사이클에 대해 각각의 사이클의 노킹 특성 요소들을 구하고 이들 요소들에 대해 평균값을 취하여 결정하였다.

3.3 점화시기 및 옥탄가 변화에 따른 노킹특성의 변화

Fig.8는 점화시기와 평균노킹발생 각도 사이의 함수관계를 보여주고 있다. 두 변수는 거의 선형적인 관계가 있으며, 점화시기가 앞당겨짐에 따라 평균 노킹발생각도도 빨라짐을 알 수 있다. Fig.9은 점화시기가 진각됨에 따라 8가지 성상의 연료에 있어서 노킹발생 확률을 보여주고 있다. 8가지 연료에 대해 점화시기가 진각됨에 따라 노킹발생확률이 노킹발생시작 점화시기후 대략 5°의 천이구간을 거치면서 이후 급격히 증가되고 있음을 알 수 있으며 동일한 노킹확률이 발생하는 점화시기 진각량이 옥탄가가 감소됨에 따라 감소되고 있음을 알 수 있다.

또한 95.1 RON 이하의 연료에서 옥탄가의 차이에 따라 다소 차이는 있지만 0% 노킹발생확률과 100% 노킹발생확률 사이의 점화시기 범위는 대략 10°에서 15°사이임을 알 수 있다. 만약 노킹특성 요소들이 사이클마다의 변동이 감소된다면 이 점화시기 범위 또한 더욱 감소할 것이다. 한편 본 실험결과 귀로 확인할 수 있는 노킹의 발생확률은 대략 20% 정도로 나타났다.

Fig. 10은 평균 노킹강도와 노킹 발생확률과의 관계를 보여주고 있다. 노킹강도는 90% 정도의 사이클이 노킹을 일으키는 점까지는 완만한 증가율을 보여주고 있으며 증가양상도 거의 선형적인 관계를 보여준다. 그러나 대략 90% 이상 노킹이 발생하는 경우에는 노킹강도가 급격히 증가되고 있음을 알 수 있으며 옥탄가가 감소됨에 따라 이러한 현상은 더욱 현저히 나타나고 있음을 알 수 있다. 이것은 노킹발생확률이 90%이상일 때는 여러 곳에서 자발화가 동시에 일어나고 있음을 제시해 준다.

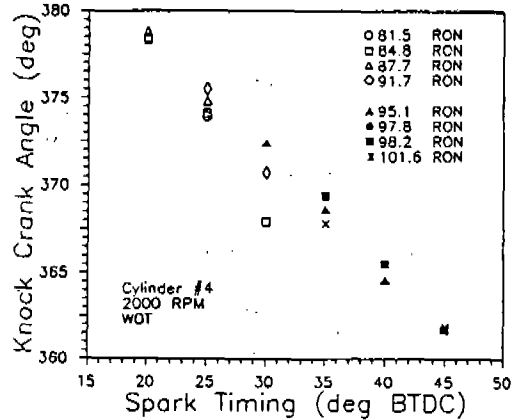


Fig.8 Mean knock occurrence crank angle vs. spark timing (2000 rpm, A/F 12.3, WOT)

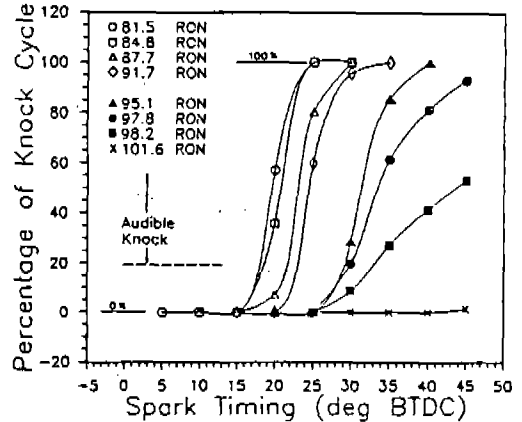


Fig.9 Percent of knocking cycles as a function of spark timing (2000 rpm, A/F 12.3, WOT)

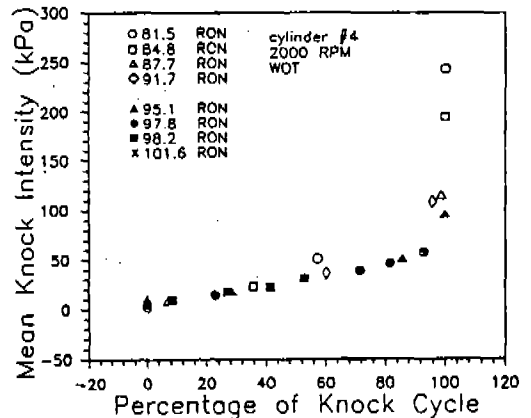


Fig.10 Mean knock intensity vs. Percent of knocking cycle (2000 rpm, A/F 12.3, WOT)

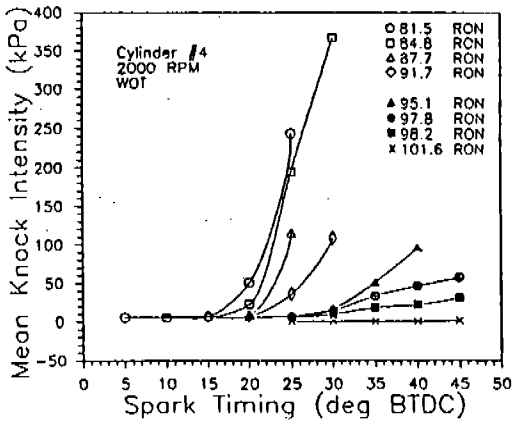


Fig.11 Mean knock Intensity as a function of spark timing (2000rpm, A/F 12.3, WOT)

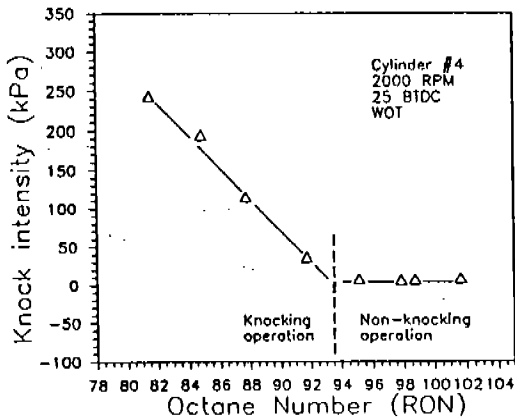


Fig.12 Mean of knock intensity as a function of octane number (2000 rpm, A/F 12.3, WOT)

점화시기가 진각될수록 노킹강도는 일반적으로 증가하며 8가지 연료에 대한 이러한 일반적인 경향이 Fig.11에 나타나 있다. 95.1 RON을 기준으로 이보다 옥탄가가 낮은 곳에서는 임계 점화시기를 지나면서 급격히 증가하는 양상을 보이는 반면 이보다 높은 옥탄가에서는 완만한 상승곡선을 나타내고 있음을 알 수 있다. 특히 101.6 RON의 경우 노킹발생확률은 1.4%에 불과했으며 노킹강도 또한 9.3kPa로서 사실상 노킹현상이 발생되지 않았음을 알 수 있다.

Fig.12는 2000rpm, 점화시기 25°에서 옥탄가가 평균노킹강도에 미치는 영향을 나타내고 있다. 옥탄가가 91.7RON 보다 높은 경우 노킹강도의 증가폭은 1.5 kPa 이하였다. 반면 91.7RON의 경우 36.2kPa, 87.7 RON의 경우 115.3kPa, 84.8 RON의 경우 194.5kPa, 81.5 RON의 경우 243.2kPa로서 옥탄가가 감소됨에 따라 노킹강도가 급격히 증가되고 있음을 확인할 수 있으며 그 관계는 그림으로부터 거의 선형적인 양상을 나타냄을 확인할 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 4기통 스파크 점화기관을 대상으로 플러쉬 마운트형 압력센서를 이용하여 점화시기 및 연료의 옥탄가를 변수로 하여 노킹실험을 한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 각각의 사이클에서의 노킹발생시점, 노킹강도 그리고 최고압력값은 일정한 엔진 운전조건에서 매우 불규칙적으로 변화되었다.

2. 점화시기의 변화는 연료의 노킹강도 뿐만 아니라 노킹발생시점 및 노킹발생확률 그리고 최고압력값에 커다란 영향을 미쳤다. 즉, 동일한 운전조건에서는 점화시기가 진각됨에 따라 노킹발생 시점이 빨라졌으며, 최고압력값도 증가하였다. 또한, 점화시기가 진각됨에 따라 평균노킹강도는 높은 옥탄가 연료인 경우 완만한 상승률을 보이는 반면 낮은 옥탄가 연료에서는 급격한 증가율을 보였다.

3. 동일한 운전조건하에서 평균 노킹발생 각도는 옥탄가가 증가됨에 따라 TDC에서 멀어졌으며, 동일한 점화진각에서 노킹강도와 노킹발생확률은 옥탄가가 낮아질수록 급격한 증가율을 보였다. 2000 rpm, 점화시기 25° BTDC에서는 옥탄가가 91.7 RON 보다 높은 경우 노킹은 발생되지 않았으며, 이 보다 낮은 경우에는 옥탄가가 10 RON 감소에 따라 평균 노킹강도는 195.2kPa 증가되었으며 선형적인 관계를 나타냈다.

후 기

본 연구는 (주)유공, (주)대우자동차의 도움으로 이루어졌으며 실험에 필요한 8가지 성상의 연료를 제공해주신 (주)유공 석유연구소의 연구실원들과 대우자동차 여러분들께 심심한 사의를 표합니다.

참 고 문 헌

1. John B. Heywood, "Internal Combustion Engine Fundamentals", Mc-Graw Hill, 1988.
2. Francois Renault, "A new Technique to Detect and Control Knock Damage", SAE 820073, 1982.
3. R.R.Maly, R. Klein, N. Peters and Gerhard König, "Theoretical and Experimental Investigation of Knock Induced Surface Destruction", SAE 900025, 1990.
4. U. Spicher, H.P.Kollmeier, "Detection of Flame Propagation during Knocking Combustion by Optical Fiber Diagnostics", SAE 861532, 1986.
5. G. Benson, E.A. Fletcher, T.E. Murphy, H.C. Scherrer, "Knock(Detonation) Control by Engine Combustion Chamber Shape", SAE 830509, 1983.
6. Kwang Min Chun, "Characterization of Knock and Prediction of its Onset in a Spark-Ignition Engine", Ph.D. Thesis, M.I.T., 1988.
7. W.R. Leppard, "Individual-Cylinder Knock Occurrence and Intensity in Multicylinder Engines", SAE 820074, 1982.
8. A. By, B. Kempinski and J.M. Rife, "Knock in Spark ignition Engines", SAE 810147, 1981.
9. P.M. Najt, "Evaluating Threshold Knock with a Semi-Empirical Model-Initial Results", SAE 872149, 1987.
10. M.Haghgoie, "Effects of Fuel Octane Number and Inlet Air Temperature on Knock Characteristic of a Single Cylinder Engine", SAE 902134, 1990.
11. A.L. Randolph, "Cylinder-Pressure-Transducer Mounting Techniques to Maximize Data accuracy", SAE 900171, 1990.
12. 최세진, "4행정 가솔린 엔진에서의 실린더 압력 측정에 관한 실험적 연구", 연세대학교 대학원 석사학위 논문, 1990.
13. 장원준, 전광민, "스파크 점화기관의 노킹 측정에 관한 연구", 자동차공학회지, 제13권, 제6호, 1991, pp.57~64