

## 스파크점화 기관의 노킹측정에 관한 연구

### A Study on Spark-ignition Engine Knock Measurements

전 광 민\* 장 원 준\*\*  
K. M. Chun, W. J. Jang

#### ABSTRACT

Spark-ignition engine knock is an abnormal combustion phenomenon originated from auto-ignition of a portion of or the entire end-gas during the later stage of combustion process. And engine knock is accompanied by a vibration of engine cylinder block and a high-pitched metallic noise. Engine knock is characterized in terms of its intensity, its occurrence crank angle and the percentage of engine knock cycles. To characterize engine knock, a precise measurements of cylinder pressure and a statistical analysis of cylinder pressure data are needed. The purpose of this study is to develop a technique to measure engine knock and its characteristics as a function of ignition timing change.

A 4-cylinder spark-ignition engine and unleaded gasoline, whose octane number was 94, were used for experiments. To measure engine knock and to analyze engine knock characteristics, cylinder pressure data were sampled by a high speed data acquisition system which was developed in this study. Cylinder pressure data were sampled at each  $0.1^\circ$  crank angle and the number of cycles continuously sampled was 80.

#### 1. 서 론

##### 1.1 연구배경

스파크점화 기관의 노킹현상은 기관 실린더 블록의 진동과 날카로운 금속성 소음을 수반하는 비정상적인 연소현상이다.<sup>1,2)</sup> 일반적으로 스파크점화 기관의 노킹현상은 스파크점화 이후에 연소과정의 후반부에서 타지 않은 채로 남아 있던 엔드-가스의 일부분 또는 전체

가 자연발화하는 데에 발생원인이 있다. 이러한 엔드-가스의 자연발화는 스파크점화에 의해 시작된 화염이 연소실 내부 전체로 완전히 전파되기 이전에 화염의 전면 하나 이상의 지점에서 발생한다.

노킹이 발생하면 연소실 내부압력의 최고치가 급격히 상승하고 열전달 손실이 증가하여 기관의 성능과 효율이 크게 저하된다.<sup>1,2,3)</sup> 그리고 연소실내부에서 국부적으로 발생하는 급

\* 정회원, 연세대학교 기계공학과

\*\* 연세대학교 대학원 기계공학과

격한 압력상승은 기관 실린더블록의 진동 및 금속성 소음을 발생시키는 연소실 내부압력의 진동현상을 유발하게 된다. 이러한 노킹현상에 의한 연소실 내부압력의 진동현상이 지속될 경우, 연소실 내부압력의 진동현상에 의한 충격과 각종 기관부속품에 대하여 반복응력으로 작용하게 되며 연소실 내부압력의 최고치와 연소실 내부가스의 온도가 크게 증가하게 되어 연소실 표면, 피스톤, 개스킷, 흡배기밸브 그리고 스파크플러그 등과 같은 각종 기관부속품들의 강도를 약화시킨다. 그리고 노킹강도가 심한 경우에는 기관부속품의 피로파괴를 유발하기도 한다.<sup>4)</sup>

연료자원의 양은 제한되어 있고, 그 수요는 계속 증가하는 관계로 연료의 질은 시간이 흐름에 따라 저하되고 반면에 그 가격은 상승할 것이다. 이러한 이유들로 인하여 최근에는 저품질의 연료에 대해서는 고효율과 고성능을 유지할 수 있는 스파크점화 기관, 즉 저옥탄가의 연료를 사용하면서도 고효율과 고성능을 발휘할 수 있는 스파크점화 기관에 대한 요구가 대두되기 시작함에 따라서 노킹연구에 대한 관심이 다시 고조되고 있다.<sup>1)</sup>

## 1.2 연구목적 및 범위

본 연구는 스파크점화 기관의 노킹특성을 실험적으로 규명하기 위하여 연소실 내부압력을 정확히 측정하여 얻은 연소실 압력자료로부터 노킹의 발생을 확인할 수 있는 기술을 개발하는 데에 그 목적을 두었다. 여기에서 스파크점화기관의 노킹특성은 노킹강도, 노킹발생시기 그리고 노킹발생확률 등으로 대표된다. 이러한 노킹특성은 연소실 내부압력의 정확한 측정과 취득한 연소실 압력자료의 통계적 해석으로 규명될 수 있다.<sup>1)5)6)</sup>

스파크점화 기관의 노킹특성을 측정하기 위해서는 자연발화로 인한 연소실 내부압력의 변화를 정확히 측정하는 것이 필요하다.<sup>7)8)9)</sup> 여기에서 연소실 내부압력의 변화라 함은 자연발화로 인한 연소실 내부압력의 불규칙한 상승 및 연소실 내부압력의 진동현상으로서 이러한 연소실 내부압력의 변화를 정확히 측정

하기 위해서는 연소실 압력자료를 고속으로 취득하는 것이 필요하다.

그리고 스파크점화 기관의 연소현상은 각각의 사이클에 따라 변화를 나타낸다. 각 사이클에 대하여 연소현상이 변화를 보이는 이유는 연소실 내부가스의 압력과 온도 등이 각각의 사이클에 대하여 변화하기 때문이며 노킹의 발생시각과 노킹강도도 각각의 사이클에 대하여 변화를 보이게 된다.<sup>1)2)10)</sup> 그러므로 스파크점화 기관의 노킹현상을 측정기 위해서는 많은 사이클의 연소실 압력자료를 연속적으로 취득하여야 하며 취득한 연소실 압력자료의 해석에는 통계적인 처리가 필요하다.

## 2. 실험장치 및 실험

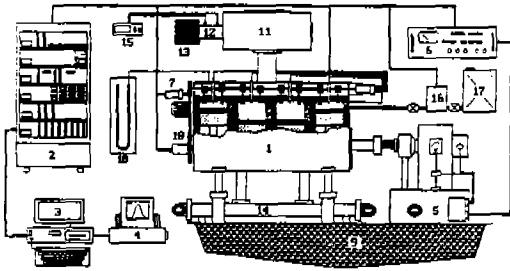
### 2.1 실험장치

각종 계측장치 및 그 외의 부대장비들로 이루어진 노킹실험을 위한 장치는 Fig.1과 같이 구성되었으며 고속 자료취득장치, 실험용 스파크점화 기관, 동력계 그리고 압력센서 등의 중요 실험장치의 구체적인 내용은 다음과 같다.

#### 2.1.1 자료취득장치

연소실 내부압력의 고속측정을 위한 자료취득장치는 본 연구과정 중에 개발하였으며 Fig.2와 같이 세 영역으로 이루어져 있다. 변환부는 연소실에 설치된 압력센서로부터의 아나로그신호를 디지털신호로 변환시키는 A/D 변환기(DT2821-G-16 SE, Data Translation)이다. 제어부는 I/O 인터페이스회로와 연소실 압력자료 취득의 시작과 종료 명령을 명령하는 트리거회로로 구성되어 있다. 컴퓨터부는 퍼스널컴퓨터(IBM PC/80386 SX)로서 취득한 자료의 저장 및 변환부와 제어부의 전반적인 통제를 담당한다. 그리고 테스트부는 실험용 기관, 동력계 그리고 샤프트엔코더 등으로 구성되어 있으며 자료취득장치를 이용하여 연소실 내부압력, 기관속도 그리고 토오크 등의 각종 자료를 취득하게 된다.

이와같은 자료취득장치의 개발결과로 180 kHz의 고속 자료취득속도를 달성하였으며 연



- |                            |                        |                            |
|----------------------------|------------------------|----------------------------|
| 1. Test engine             | 7. Step motor          | 14. Heat exchanger         |
| 2. Data acquisition system | 8. Pressure transducer | 15. Digital anemometer     |
| 3. IBM PC/386              | 9. Test bed            | 16. Fuel consumption meter |
| 4. Printer                 | 10. U-type anemometer  | 17. Fuel tank              |
| 5. Dynamometer             | 11. Surge tank         | 18. Encoder                |
| 6. Dynamometer controller  | 12. Air flow meter     |                            |
|                            | 13. Air cleaner        |                            |

Fig. 1 Schematic of experimental system

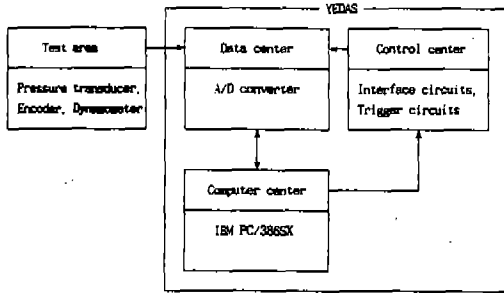


Fig. 2 Developed data acquisition system, YEDAS

속적으로 취득 및 저장할 수 있는 연소실 압력자료의 용량은 1.2MByte이다. 여기서 180 kHz의 자료취득속도는 크랭크각 0.1°의 해상도로 연소실 압력자료를 취득하는 경우에는 최고 3000rpm에서 노킹실험이 가능한 자료취득속도이다. 그리고 1.2 MByte의 연소실 압력자료 저장용량은 크랭크각 0.1°의 해상도로 연소실 압력자료를 취득할 경우에 80사이클에 해당하는 연소실 압력자료를 연속적으로 취득할 수 있는 용량이다. 또한 연소실 압력자료를 취득함과 동시에 동력계로부터 기관의 토오크 및 기관속도에 관한 신호를 취득하도록 하였다.

### 2.1.2 실험용 스파크점화 기관

노킹실험의 대상으로 선택한 스파크점화 기관은 대우자동차의 Lemans 엔진으로 압축비

는 9.0이고 배기량은 1497cc이다. 연소실의 직경과 행정거리는 각각 76.5mm, 81.5mm이며 스파크플러그는 피스톤의 중심축으로 부터 19mm 떨어진 곳에 위치하고 있다.공기와 연료의 공급은 자연흡기방식으로 2배럴, 하향식의 피어버그기화기를 장착하고 있다. 점화시기는 전자식 점화시기 제어모듈에 의하여 제어된다.

### 2.1.3 압력센서

본 연구에서 연소실 내부압력의 측정에는 스파크플러그 어댑터형의 압전식 압력센서(6001, Kistler)와 전하증폭기(5007, Kistler)를 사용하였다. 스파크플러그 어댑터형의 압력센서는 플래쉬 마운트형에 비하여 장착이 매우 용이하여 센서장착을 위한 연소실의 가공이 요구되지 않으며 실린더의 선택에 있어서도 매우 편리하다. 또한 플래쉬 마운트형과는 달리 별도의 냉각이 필요치 않은 장점을 가지고 있다. 그러나 연소실과 압력센서가 좁고 긴 관으로 연결되어 있어서 연소실 내부압력의 정확한 측정을 어렵게 한다.

## 2.2 실험방법

노킹실험은 스파크점화 기관의 노킹현상을 연소실 내부압력의 관찰을 통하여 측정하기 위한 실험으로 스토틀을 전개한 실험용 스파크점화 기관의 기관속도와 점화시기를 변화시키며 실시하였다. 연소실 내부압력에 대한 측정은 1500, 2000, 2500, 3000rpm의 기관속도에서 점화시기를 20, 25, 30, 35, 40° BTDC (Before Top Dead Center)로 변화시키며 실시하였다. 노킹실험에서 기관속도의 변화에는 동력계 제어장치를 이용하였으며 점화시기의 변화에는 실험용 스파크점화 기관의 배전기를 회전시켜 조정하는 방법을 이용하였다.

노킹실험에서 연소실 압력자료는 크랭크각 0.1°의 해상도로 취득하였으며 동일 실험 조건에서 80 사이클에 해당하는 연소실 압력자료를 연속적으로 취득하였다. 노킹실험에 사용한 연료로는 옥탄가 94의 무연휘발유를 사용하였다. 그리고 모든 실험은 연료의 성분및 혼합비의 변화에 따른 노킹특성의 변화를 배

제하기 위하여 실험 개시전에 확보해 두었던 동일 연료를 사용하여 실시하였다.

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 점화시기의 변화에 따른 연소실 내부 압력의 변화

Fig. 3은 기관속도 3000rpm, 스토틀전개의 운전상태에서 점화시기 변화에 따른 연소실 내부압력의 변화를 보여주는 P- $\theta$  선도로서 점화시기가 앞당겨짐에 따라서 연소실 내부압력의 최고치는 증가하게 됨을 보여주고 있다. 또한 점화시기의 변화에 따른 최고압력의 발생시기도 점화시기가 앞당겨짐에 따라 빨라지고 있음을 보여주고 있다.

Fig. 4는 기관속도 1500rpm, 40° BTDC의 점화시기 그리고 스토틀전개의 운전상태에서 90kHz의 자료취득속도로 측정한 80사이클의 연소실 압력자료 가운데서 강한 강도의 노킹이 발생한 사이클에 대한 P- $\theta$  선도이다. 이 사이클에서 연소실 최고압력은 6665 kPa 이고 그 발생시기는 8.8° ATDC (After Top Dead Center)로서 연소실 내부압력의 불연속적인 상승과 함께 상사점 이후에 큰 진폭을 갖는 연소실 내부압력의 진동현상이 발생하였음을 보여주고 있다. 그리고 압축과정에서는 압력센서가 장착된 스파크플러그 어댑터의 관에 의한 영향으로 보이는 압력진동이 나타나고 있음을 알 수 있다.

Fig. 5는 Fig. 4에 도시된 연소실 압력자료에 대하여 FFT (Fast Fourier Transformation)를 실시한 스펙트럼분석의 결과이다. 노킹에 의한 연소실 내부압력의 진동주파수는 연소실의 직경에 의하여 결정되며 그 1차 진동주파수는 일반적으로 5-10kHz이다. Fig. 5의 결과를 보면 약 2-7 kHz의 상당히 넓은 주파수영역에서 압력신호의 스펙트럼이 강하게 나타나고 있는데 이는 노킹에 의한 연소실 압력진동의 신호에 압력센서가 장착된 스파크플러그 어댑터의 관내부에서 발생한 압력진동에 의한 신호가 포함되어 나타나는 결과로 보인다.

Fig. 6은 기관속도 1500rpm, 35° BTDC의 점화시기 그리고 스토틀전개의 운전상태에서 90kHz의 자료취득속도로 측정한 80사이클의 연소실 압력자료 가운데에서 노킹이 발생한 3사이클에 대한 P- $\theta$  선도로서 동일 운전조건하에서도 각각의 사이클의 연소실 내부압력의 진동현상과 그 발생시기가 크게 변화하고 있음을 보여주고 있다.

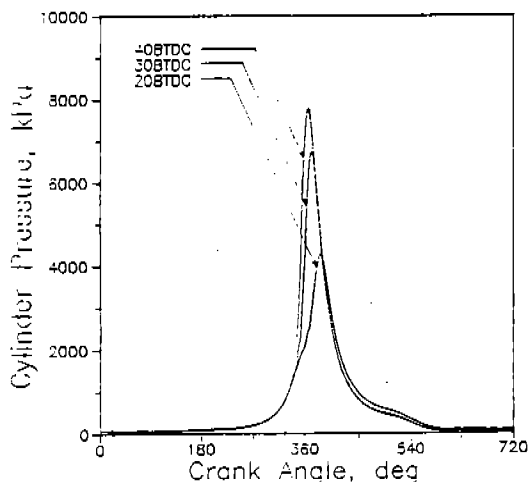


Fig. 3 Cylinder pressure vs. crank angle as a function of ignition timing (WOT, 3000 rpm)

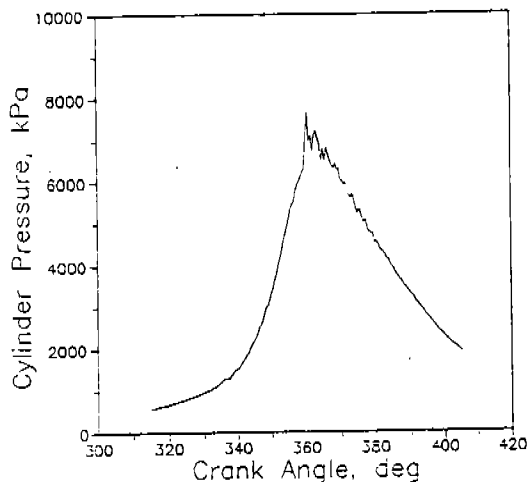


Fig. 4 Cylinder pressure vs. crank angle - heavy knock cycle (WOT, 1500 rpm, 40° BTDC spark timing)

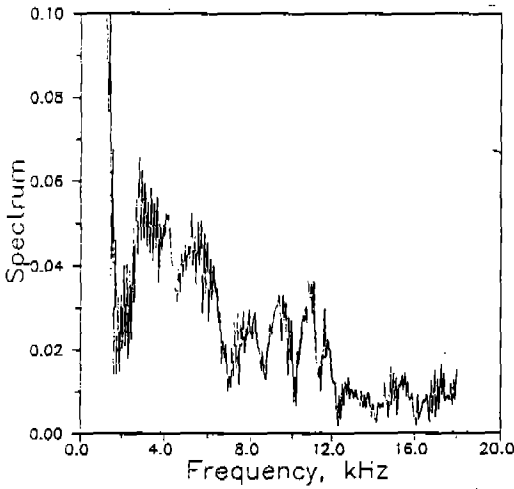


Fig. 5 Result of spectrum analysis of pressure signal (WOT, 1500 rpm, 40° BTDC spark timing)

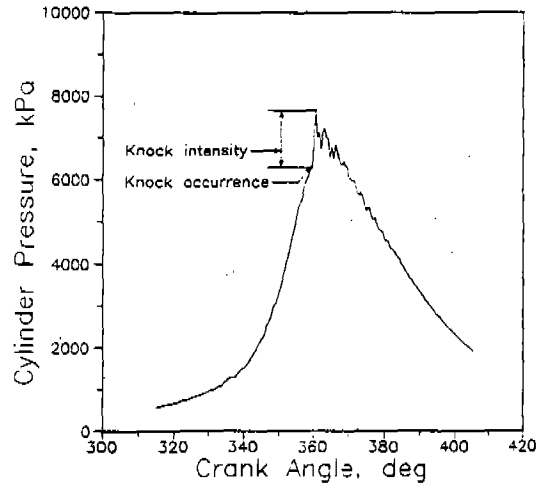


Fig. 7 Determination of knock Intensity and its onset time

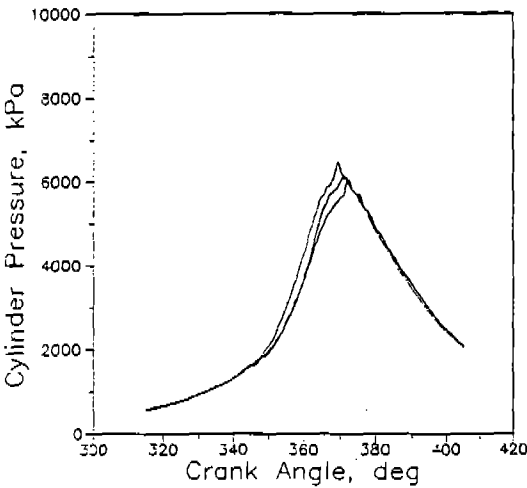


Fig. 6 Cyclic variation of knock Intensity and its onset time (WOT, 1500 rpm, 40° BTDC spark timing)

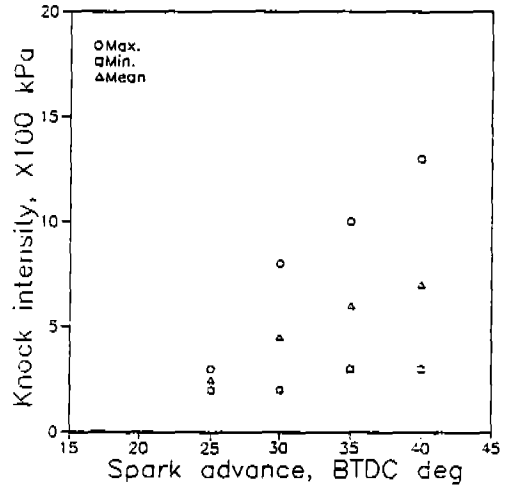


Fig. 8 Spark advance vs. knock Intensity (WOT, 1500 rpm)

### 3.2 스파크점화 기관의 노킹 측정결과

실험을 통하여 취득한 연소실 압력자료를 이용하여 스파크점화 기관의 노킹강도, 노킹발생시기 그리고 노킹발생확률로 대표되는 노킹특성의 경향을 관찰하였다. 연소실 압력자료의 해석에 있어서 노킹강도는 자연발화에 의한 연소실 내부압력의 상승량으로 정하였다. 그리고 노킹의 발생시기는 연소실 압력자료의

P-θ선도로부터 자연발화에 의한 연소실 내부압력의 불규칙한 상승이 발생하는 순간의 크랭크각도로 결정하였다. Fig. 7은 본 연구에서 채택한 연소실 압력자료를 이용한 노킹강도와 노킹발생시기의 결정방법에 대한 실패이다. 그리고 노킹의 발생확률은 취득한 연소실 내부압력의 사이클수에 대해서 노킹이 발생한 사이클수의 비로 결정하였다.

Fig. 8은 기관속도 1500rpm, 스톱틀전개의 운전조건에서 점화시기의 변화에 따르는 노킹강도의 변화를 보여주고 있다. 측정결과를 보

면 30° BTDC의 점화시기에서 최고 노킹강도와 평균 노킹강도는 각각 799kPa, 495kPa 이고 40° BTDC의 점화시기에서 최고 노킹강도와 평균 노킹강도는 각각 1301kPa, 710kPa이다. 이러한 결과를 통하여 동일 기관속도에서는 점화시기가 앞당겨짐에 따라서 최고 노킹강도와 평균 노킹강도가 증가하고 있음을 알 수 있다. 이와같이 저속운전조건에서 노킹강도가 증가한 것은 고속운전조건에 비하여 연소실 내부에서의 연소속도, 즉 화염의 전파속도가 상대적으로 느리기 때문이며 결과적으로 이는 자연발화할 수 있는 미연개스의 양을 증가시키기 때문이다.

Fig. 9는 기관속도 1500rpm, 점화시기 40° BTDC, 스로틀전개의 운전조건에서 측정된 노킹강도와 연소실 최고압력의 관계이다. 측정 결과를 보면 연소실 최고압력에 비례하여 노킹강도가 증가하는 경향을 나타내고 있다.

Fig. 10은 기관속도 1500rpm, 스로틀전개의 운전조건에서 점화시기의 변화에 따르는 노킹발생시기의 변화를 보여주고 있다. 측정 결과를 보면 30° BTDC의 점화시기에서 평균 노킹발생시기는 11.9° ATDC이고 40° BTDC의 점화시기에서 평균 노킹발생시기는 3.5° ATDC이다. 이러한 결과를 통하여 동일 기관속도에서는 점화시기가 앞당겨짐에 따라서 평균 노킹발생시기가 빨라지고 있음을 알 수 있다. 그 이유는 점화시기가 앞당겨짐에 따라서 연소실 최고압력이 증가하며 노킹의 발생시기에 영향을 끼치는 연소실 최고압력의 발생시기도 빨라지기 때문이다.

Fig. 11은 기관속도 1500rpm, 점화시기 40° BTDC, 스로틀전개의 운전조건에서 측정된 노킹강도와 노킹발생시기의 관계이다. 측정 결과를 보면 노킹발생시기가 빠를수록 노킹강도가 증가하는 경향을 나타내고 있다.

Fig. 12는 기관속도 1500, 2000, 2500, 3000 rpm, 스로틀전개의 운전조건에서 점화시기와 기관속도의 변화에 따르는 스파크점화 기관의 노킹발생확률의 변화를 보여주고 있다. 측정 결과를 보면 기관속도 1500rpm, 30° BTDC의 점화시기에서 노킹발생확률은 30.1%이고 40°

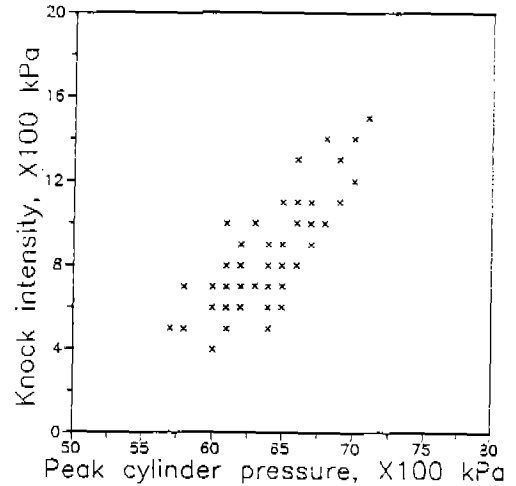


Fig. 9 Peak Cylinder pressure vs. knock intensity (WOT, 1500 rpm, 40° BTDC spark timing)

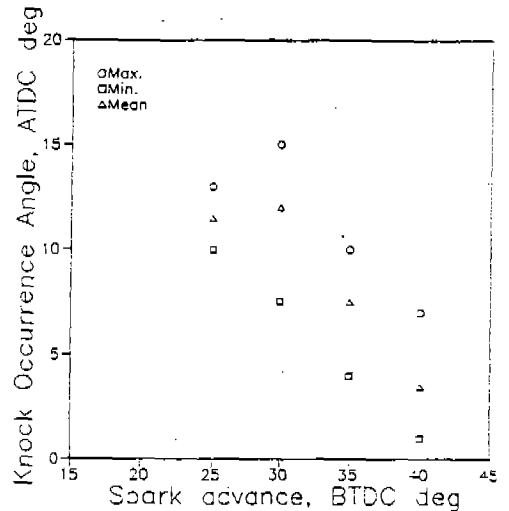


Fig. 10 Spark advance vs. knock occurrence angle (WOT, 1500 rpm)

BTDC의 점화시기에서 노킹발생확률은 94.0%이다. 이러한 결과를 통하여 동일 기관속도에서는 점화시기가 앞당겨짐에 따라 노킹발생확률이 증가함을 알 수 있다. 그리고 점화시기 40° BTDC, 3000rpm의 기관속도에서 노킹발생확률은 12.5%이고 1500rpm의 기관속도에서 노킹발생확률은 94.0%로서 동일 점화시기에서는 고속 운전조건에서 보다는 저속 운전조건에서 노킹발생확률이 높음을 알 수 있

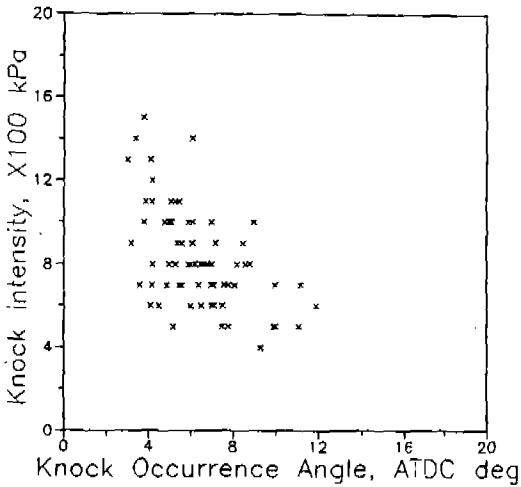


Fig. 11 Knock intensity vs. knock occurrence angle (WOT, 1500 rpm, 40° BTDC spark timing)

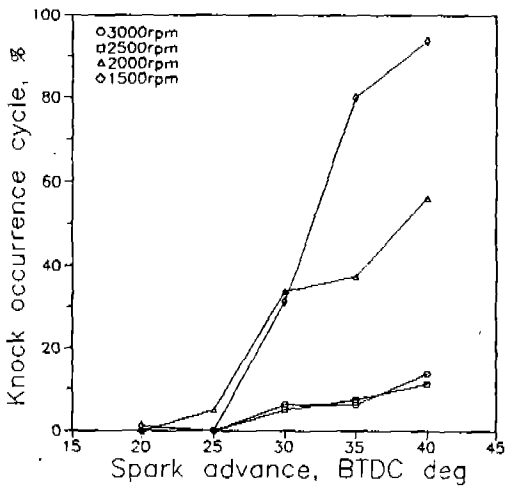


Fig. 12 Spark advance vs. knock occurrence cycle percentage

다. 이와같이 저속 운전조건에서 노킹발생확률이 높은 것은 고속운전조건에 비하여 연소실내부에서의 연소속도, 즉 화염의 전파속도가 상대적으로 느리기 때문이며 결과적으로는 미연가스가 가열되는 시간을 길게 하여 자연발화가 쉽게 발생하게 하기 때문이다.

#### 4. 결 론

노킹강도, 노킹발생시기 그리고 노킹발생확률로 대표되는 스파크점화 기관의 노킹특성을

실험적으로 규명하기 위하여 연소실 내부압력의 측정에 필요한 각종 기관 실험장치를 구성하고 노킹실험을 통하여 노킹현상을 측정하였다. 노킹측정의 결과는 다음과 같다.

(1) 노킹실험을 통하여 스파크점화 기관의 기관속도와 점화시기변화에 따른 노킹현상을 연소실 내부압력의 측정을 통해 관찰하였다. 그리고 취득한 연소실 압력자료를 통해 스파크점화 기관의 노킹현상에 수반되는 실린더블록의 진동 및 금속성 소음을 야기시키는 연소실 내부압력의 진동현상이 발생하였음을 확인하였다.

(2) 점화시기 변화에 따른 스파크점화 기관의 노킹특성의 변화를 관찰하였다. 그 결과로 점화시기가 앞당겨짐에 따라서 최고 노킹강도와 평균 노킹강도가 증가함을 확인하였으며 점화시기가 앞당겨짐에 따라서 평균 노킹발생시기도 앞당겨짐을 확인하였다. 그리고 점화시기가 앞당겨짐에 따라서 노킹발생확률이 증가함을 확인하였고 동일 점화시기에 대해서는 고속 운전조건에서 보다는 저속 운전조건에서 노킹발생확률이 높음을 확인하였다.

(3) 스파크점화 기관의 노킹특성을 실험적으로 정확히 규명하기 위해서는 정확한 연소실 압력자료가 요구된다. 이를 위하여서는 스파크플러그 어댑터형의 압력센서에서 나타나는 관 영향을 배제할 수 있는 플래쉬 마운트형의 압력센서를 채택하여 보다 정확하게 연소실 내부압력을 측정하는 것이 필요하다. 그리고 적절한 압력센서의 선택외에도 압력센서의 장착 방법과 장착위치 등에 대한 연구가 필요하다.

#### 후 기

이 연구는 한국기계연구소, 대우자동차, (주) 유공의 지원하에 수행되었다. 관계자 여러분께 감사 드립니다.

#### 참 고 문 헌

1. Kwang Min Chun, "Characterization of Knock and Prediction of Its Onset in a Spark-Ignition Engine", M.I.T., Ph.D Thesis, 1988.

2. John B. Heywood, *Internal Combustion Engine Fundamentals*, McGraw-Hill, 1988.
3. Thomas Kaelblein, Y.I. Jeong and T.K. Rhee, "Knock Effects on Spark-Ignition Engine Emission and Performance", SAE 900712, 1990.
4. Rudolf R. Maly, "Theoretical and Experimental Investigation of Knock Induced Surface Destruction", SAE 900025, 1990.
5. W.R. Leppard, "Individual-Cylinder Knock Occurrence and Intensity in Multi-cylinder Engines", SAE 820074, 1982.
6. M.D. Checkel and J.D. Dale, "Computerized Knock Detection from Engine Pressure Records", SAE 860028, 1986.
7. David R. Lancaster, Roger B. Krieger and John H. Linesch, "Measurement and Analysis of Engine Pressure Data", SAE 750026, 1975.
8. Russel V. Fisher and James P. Macey, "Digital Data Acquisition with Emphasis on Measuring Pressure Synchronously with Crank Angle", SAE 750028, 1975.
9. Andrew L. Randolph, "Methods of Processing Cylinder-Pressure Transducer Signals to Maximize Data Accuracy", SAE 900170, 1990.
10. Charles A. Amann, "Cylinder-Pressure Measurement and Its Use In Engine Research", SAE 852067, 1985.