

〈논문〉 SAE NO. 933760

4 기통 스파크 점화 기관의 노킹 신호 해석 방법

Methods of Knock Signal Analysis in a S.I. Engine

김 경 윤,* 전 광 민**
K. W. Kim, K. M. Chun

ABSTRACT

In recent years, high efficiency, high performance, and low pollutant emission engines have been developed. Knock phenomenon has drawn interests because it became an hinderance to engine power and efficiency increase through higher compression ratio.

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 accompanied a high pitched metallic noise. And this phenomenon is characterized by knock occurrence percentage, knock occurrence angle and knock intensity.

A four cylinder spark ignition engine is used in our experiment, and its combustion chamber pressure is measured at various engine speeds, ignition timing. The data are analyzed by numerous methods in order to select the optimum methods and to achieve better understanding of knock characteristics.

Methods using band-pass filter, third derivative and step method are shown to be the most suitable, while methods using frequency analysis are shown to be unsuitable. Because step method only uses signals above threshold value during knocking condition, pressure signal analyses with this method show good signal-to-noise ratio.

주요기술용어 : Knock Detection(노킹 검출), Knock Analysis Methods(노킹 해석 방법들), Pressure Signal (압력 신호)

1. 서 론

최근 고효율, 고성능 및 저공해 유지를 위한 엔진에 대한 요구가 대두됨에 따라 효율과 출력을 동시에 높이기 위해 엔진의 압축비가 계속 증가

하고 있다. 그러나 압축비 증가에는 노킹이 발생되기 쉬워진다는 문제가 따르고 있다. 이에 엔진의 출력 및 열효율의 향상에 가장 문제가 되는 노킹 현상에 대한 관심이 고조되고 있으며,¹⁾ 더욱 정확한 노킹 분석을 위하여 고정밀도의 센서

* 대우국민차

** 정희원, 연세대학교 기계공학과

2)와 정작 방법³⁾, 자료 취득 방법⁴⁾ 그리고 자료 보정 기법⁵⁾ 등이 활발히 개발되고 있다.

실제 상용 엔진에서는 노킹을 방지하기 위해 출력의 손실을 감수하면서 점화 시기를 최적 점화 시기(MBT timing)로부터 어느 정도 지연시켜 노킹을 방지하고 있는 경우가 많다. 그러므로 노킹에 의한 엔진 손상을 피하면서 노킹 한계 근방에 점화 시기를 설정하여 연비 손실 및 출력 손실을 최소화하기 위해서는 노킹 특성에 대한 정확한 이해와 노킹 검출 방법 및 제어가 요구된다.

본 연구에서는 4 기통 스파크 점화 기관을 대상으로 엔진 회전수와 점화 시기 등의 실험 변수 변화에 따라 연소실 압력을 측정하고, 이를 다양한 노킹 해석 방법으로 해석한 후 가장 우수한 노킹 해석법을 선택하여 노킹 특성 해석의 정확성 및 신뢰도 여부를 조사하고자 한다.

2. 실험 장치

본 연구에 사용된 실험 장치는 엔진, 압력 센서(Kistler Model 6001 : 스파크 플러그 어댑터형, 6053 : 플러시 마운트형), 전하 증폭기(Kistler Model 5011), 연료량 측정 장치, 공기량 측정 장치, Wideband A/F 센서, 온도 측정 장치, 흡입 공기량은 항습 장치 그리고 자료 취득 장치 등으로 구성되어 있다. 실험 장치에 대한 개략적인 구성은 Fig.1과 같으며, 압력 센서의 주요 제원은 Table 1에 있다.

3. 실험 방법

실험은 전하 증폭기 및 디지털 압력계(digital manometer)를 미리 작동시키고 항온항습장치를 통해 흡입공기 온도를 20°C로 유지하며, 부분 부하 상태에서의 엔진 구동에 의해 엔진 각 부분의 온도가 정상상태로 되도록 한 후 행하였다.

정상 및 노킹 상태에서의 정확한 연소실 압력 측정은 실험용 엔진의 연소 특성 및 성능 예측에 매우 중요하며, 엔진의 상태 변화와 환경 변수들(매 실험마다의 대기 온도, 습도, 압력 등) 및 엔진

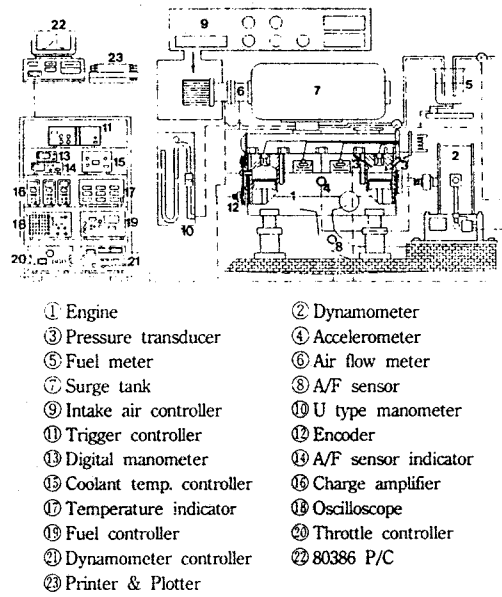


Fig.1 Schematic diagram of experimental equipment.

Table 1 Specification of pressure transducer

Type	6053 A 60	6001
Range	0~200bar	0~250bar
Sensitivity	-2.05pC/bar	-15pC/bar
Natural Frequency	200kHz	150kHz
Linearity	±1%/FSO	±0.8%/FSO
Temperature Range	-196~350°C	-196~350°C

각 부위의 온도, 흡입 공기량과 연소 소비율등의 정확한 측정이 이루어져야 한다. 이와 더불어 엔진 운전 조건의 변화(엔진 회전수, 트로틀 밸브 개도량, 점화 시기, 흡입공기의 온도 및 습도 등)들의 정확한 제어는 실험에 있어서 매우 중요한 변수들이므로 특히 주의를 기울여 실험하였다.

엔진 회전수는 동력계 제어기의 정속 운전 모드로 제어하였으며, 트로틀 밸브 개도량은 DC motor를 사용한 트로틀 밸브 제어기로 제어하였다. 점화 시기의 변화는 엔진의 디스트리뷰터(distributor)와 타이밍 라이트(timing light)를 이용하여 4 실린더 모두의 점화 시기를 변화시켰다. 이 외에도 열교환기를 이용하여 냉각수의 입구

온도를 80°C로 일정하게 제어하였다.

4. 노킹 신호 해석

노킹은 노킹 발생 확률, 노킹 발생 각도 그리고 노킹 강도로 특징지어진다. 그러나 이러한 노킹 특성값들은 해석 방법에 따라 차이가 있으므로 본 연구에서는 기존에 사용되는 여러 가지 노킹 해석법들과 개발된 노킹 해석법을 비교하여 압력 신호 및 진동 신호의 노킹 분석에 가장 좋은 해석법을 찾고 해석값들의 신뢰도를 확인하고자 한다. 각각의 노킹 해석법들의 특징에 대해서 알아본다.

4.1 저역 통과 필터(Low-pass filter)를 사용한 분석법(LPD)

주파수 분석을 통하여 노킹 성분들은 5kHz 이상의 고주파 성분들임을 알 수 있다. 이 방법은 취득 데이터로부터 취득 데이터들을 저역 통과 필터(0~5kHz)를 통과시켜 얻은 신호를 뺀 값의 최대값을 노킹 강도로 정의하는 방법으로, 노킹 성분과 관계없는 저주파 성분을 제거하여 고주파의 노킹 성분들만을 취득하는 방법이다.⁶⁾ 그러나 이 방법은 압력 증가가 해석 결과값에도 나타나므로 노킹 강도(K.I; Knock Intensity)가 약할 경우 노킹 발생 여부의 판단이 어려운 단점이 있다.

$$K.I. = \text{Max.} | \text{Data}_{\text{raw}} - \text{Data}_{\text{lpf}} |$$

4.2 큐빅 스플라인 보간법(Cubic spline fit)을 이용한 분석법(CSD)

노킹이 발생할 경우 취득 데이터값들의 심한 요동(oscillation)을 관찰할 수 있는데 이에 0.1° 해상도로 취득한 데이터들에서 각 1° 마다 큐빅 스플라인 보간법을 통하여 요동이 정제된 데이터를 구하여 이 두 값의 차이로써 노킹 강도를 정의하는 방법⁷⁾이다.

$$K.I. = \text{Max.} | \text{Data}_{\text{raw}} - \text{Data}_{\text{cf}} |$$

4.3 구역 통과 필터(Band-pass filter)를 사용한 분석법(MAX)

노킹 주파수 분석을 통하여 고유 노킹 주파수 값이 결정되면 취득 데이터를 고유 노킹 주파수 값을 중심으로 한 구역의 필터를 통과시켜 노킹 성분만의 데이터를 얻어 노킹 강도를 결정하는 방법으로, 구역 통과 필터를 계산에 의하지 않고 하드웨어적으로 처리할 수 있어 실차 적용시 매우 유리한 잇점이 있으며 결과 처리의 단순함에 비해 그 값의 신뢰도가 높아 가장 많이 사용되고 있다.⁸⁾

$$K.I. = \text{Max.} | \text{Data}_{\text{bpf}} |$$

4.4 적분 해석법(Integral method, INT)

노킹이 발생할 경우 어느 한 시점에서 일어나는 것이 아니고 어느 기간동안 지속된다. 그러므로 이 방법은 구역 통과 필터 결과의 최대값으로 노킹 강도를 정의하는 방법의 모순을 보완하기 위하여 노킹 발생 기준값을 처음으로 넘는 크랭크각에서부터 마지막으로 기준값을 넘는 크랭크각까지의 적분값으로 노킹 강도를 정의하는 방법이다. 노킹 강도의 신호 대 노이즈비 및 노킹 강도의 대표값으로의 정확도가 매우 우수한 반면, 계산 시간이 매우 많이 소모되어 실시간 제어 모드시 사용의 어려움이 있다.¹⁰⁾

$$K.I. = \int_a^b (\text{Data}_{\text{bpf}}) dCA$$

4.5 진폭 해석법(Step method, STP)

적분 해석법의 계산 시간 문제의 단점을 보완하기 위하여 본 연구에서 개발된 진폭 해석법은 Fig.2와 같이 필터링된 신호값을 임의로 구간으로 나누어 구간마다 대표값을 정리하고 구역통과 필터를 거친 데이터값들에 대한 대표값들을 구한 후 그 값들의 합으로 노킹 강도를 정의하는 방법이다. 이 방법은 나누는 구간 수를 늘려 정확도를 높일 수 있으며 구간 수를 줄여 계산 시간을 짧게 할 수도 있어, 사용자의 사용 용도에 따라

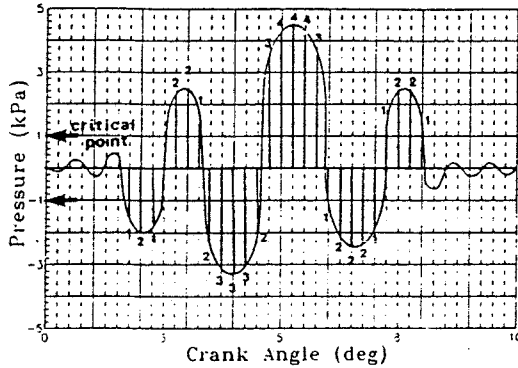


Fig.2 Step method

선택의 폭이 넓어질 수 있는 장점이 있다.

예를 들어 Fig.2의 경우는 압력값 1kPa을 기준값으로 선택하고 대표값의 구간을 1kPa로 한 경우로서, 크랭크각의 간격을 0.2°로 하면 노킹 강도는 36kPa이 됨을 보여준다.

$$KI = \sum_{\theta=a}^{b \text{ deg}} (Data_{hpf+sup})_0$$

4.6 고속 푸리에 변환의 크기비를 통한 분석법(SPC)

FFT 결과 해석을 통하여 고유 노킹 주파수를 포함하는 구역을 미리 선정한 후 이 구역에서의 최대 진폭값으로 노킹 강도를 정의하는 방법^{11, 12)}으로 노킹 강도가 강한 경우에는 적용이 가능하나 노킹 강도가 약한 경우에는 해석 구간 시작점의 진폭값이 최대 진폭값으로 인식되는 문제점이 있으며, 사이클마다의 변동이 심하여 그 정확도에 문제가 있다.

$$KI = \text{Max.} |Data_m|$$

4.7 고속 푸리에 변환값의 적분에 의한 분석법(POW)

노킹이 발생하였을 경우 노킹 고유 주파수 영역에서 심한 주파수 변동을 관찰할 수 있다. 그러므로 고유 노킹 주파수 구간에서의 적분값으로

노킹 강도를 정의하는 방법이다.⁷⁾ 이 방법은 미리 반복적인 실험을 통하여 고유 노킹 주파수를 포함한 적분 구간을 정의해야 하는 문제 및 사이클마다의 변화로 고유 노킹 주파수값에서의 강도 차이가 심하여 그 절대값의 문제점이 있다.

$$KI = \int_{f_1}^{f_2} (Data_{in}) df$$

4.8 고속 푸리에 변환 데이터의 1차 미분을 통한 분석법(FFS)

FFT 결과 데이터의 크기비에 의한 방법의 오차 및 적분값에 의한 계산 문제 해결의 대안으로 노킹이 발생할 경우, 그 값의 일차 미분값을 계산하여 이 값의 최대값으로 노킹 강도를 정하는 방법이다.

$$KI = \text{Max.} |Data_{df}|$$

4.9 1차 미분 데이터를 통한 분석법(FST)

노킹이 발생할 경우 압력 및 진동 데이터가 심하게 변동하므로 이에 데이터의 일차 미분값을 계산하여 변화 정도에 따라 노킹 결과를 해석하는 방법^{13, 14)}으로 연소에 의한 압력 증가가 일차 미분값의 증가로 나타나기 때문에 약한 노킹이 발생할 경우 그 판단 정확도에 문제가 있다.

미분 계산에 사용되는 미분 계수는 계산점 전후 9점의 구간에서의 최상의 곡선 보간을 통한 기울기들로서 각 점에서의 미분을 수행하는 아래식의 큐빅 스플라인 보간 미분계수(Cubic spline fit differentiator)를 사용하였으며, 노킹 강도는 최대값으로 정의하였다.

$$\frac{dP}{d\theta} = \{86 \times [P(\theta-4) - P(\theta+4)] + 142 \times [P(\theta+3) - P(\theta-3)] + 193 \times [P(\theta+2) - P(\theta-2)] + 126 \times [P(\theta-1) - P(\theta+1)]\} / (1188 \times d\theta)$$

$$KI = \text{Max.} |Data_{df}|$$

4.10 3차 미분 데이터를 통한 분석법(THD)

1차 미분 방정식에 의한 노킹 해석 결과에서 노이즈 성분에 의한 영향을 최소화하여 신호 대 노이즈 비가 최대가 되도록 하기 위하여 계산점 앞뒤 4점에서의 큐빅 스플라인 보간에 의한 1차 미분을 3회 반복하는 방법이다.¹⁵⁾ 이 방법은 특히 노이즈가 많이 포함되어지는 고속 회전에서의 데이터 해석에 있어서 매우 좋은 결과를 보여준다. 본 프로그램에서는 노이즈 성분을 제거하기 위한 필터링과 3회의 일차 미분을 반복하는 계산 시간의 문제를 해결하기 위하여 이 4단계의 계산 과정을 하나의 식으로 표현한 M.D Checkel의 식¹⁵⁾을 사용하였으며, 1차 미분에서 나타나는 연소에 의한 압력 변동분이 소거되어 매우 우수한 노킹 해석이 가능하다.

$$\frac{d^3P}{d\theta^3} = \{1272112 \times [P(\theta-16) - P(\theta+16)] + 43932 \times 24 \times [P(\theta+15) - P(\theta-15)] + 5067808 \times [P(\theta+14) - P(\theta-14)] + 10302620 \times [P(\theta-13) - P(\theta+13)] + 30889588 \times [P(\theta-12) - P(\theta+12)] + 31167114 \times [P(\theta-11) - P(\theta+11)] + 19489100 \times [P(\theta+10) - P(\theta-10)] + 120235553 \times [P(\theta+9) - P(\theta-9)] + 225356606 \times [P(\theta+8) - P(\theta-8)] + 223838505 \times [P(\theta+7) - P(\theta-7)] + 77354261 \times [P(\theta+6) - P(\theta-6)] + 149585072 \times [P(\theta-5) - P(\theta+5)] + 352659296 \times [P(\theta-4) - P(\theta+4)] + 431730834 \times [P(\theta-3) - P(\theta+3)] + 365576347 \times [P(\theta-2) - P(\theta+2)] + 194997696 \times [P(\theta-1) - P(\theta+1)]\} / (1188 \times d\theta)^3 \times 33$$

$$KI = \text{Max.} \left| \text{Data} \frac{d^3}{d\theta^3} \right|$$

4.11 노킹 해석 프로그램(YEKAP)

보다 다양하고 정확한 노킹 해석을 위하여 기존의 여러 노킹 해석 방법들과 새로운 노킹 해석 방법을 하나의 프로그램으로 구성함으로써 사용자가 비교 분석을 통하여 사용 노킹 해석법을

선택하고 선택한 해석법의 신뢰도 여부등을 확인할 수 있도록 구성되었다.

YEKAP(Yonsei Engine Knock Analysis Program)으로 명명되어진 본 프로그램은 주 실행 파일, 8개의 유니트 파일 및 3개의 지원 파일로 구성되어 있고, 사용 프로그래밍 언어는 터보 파스칼 버전 6.0이다. 이 프로그램의 구성은 12가지의 해석법을 통한 노킹 강도, 노킹 발생 확률 및 노킹 발생 각도 그리고 노킹 주파수 해석 영역으로 구분되어지며, 노킹 강도 해석 방법은 다시 크게 취득 데이터 자체를 사용하는 해석법, 디지털 신호 처리를 통한 해석법, 그리고 수학적 계산을 통한 해석 방법으로 나뉘어지며 각각의 방법은 앞에서 설명한 것과 동일하다.

5. 실험 결과 및 고찰

5.1 노킹 발생 확률

엔진 회전수 2000rpm일 때 압력 신호로 부터 계산된 노킹 발생 확률은 Fig3(a)와 같다. 결과 그래프에서 알 수 있듯이 노킹 발생 확률이 0%에서 100%로 되는 점화 시기 변화 구간은 크랭크 각으로 약 10°의 매우 짧은 기간임을 알 수 있다. 이로 부터 노킹이 점화 시기 변화와 매우 밀접한 관계가 있으며, 노킹 제어시에도 매우 빠른 응답이 요구되는 제어가 필요함을 알 수 있다.

결과 그래프의 전체적인 개형은 전형적인 S자형을 나타내고 있으며, 해석 방법에 관계없이 거의 유사한 결과를 보여주므로 사용된 노킹 해석 방법들의 타당성이 보여졌다. 결과를 자세히 살펴보면 원 데이터(raw data)의 최대값으로 노킹을 정의한 방법(PPD)은 사용상 매우 간편하나 예상처럼 다른 방법들에 비해 오차폭이 큰 편임을 알 수 있으며, 큐빅 스플라인 보간법에 의한 방법(CSD)은 점화 시기가 기준값보다 앞당겨졌을 때에는 정확도가 높지만 점화 시기가 기준값보다 늦추어졌을 때에는 오차폭이 크게 나타남을 알 수 있다. Fig3(b)는 엔진 회전수 3000rpm의 경우로서 사이클당 시간이 짧고 화염 전파가 빨라 노킹 발생 점화 시기가 2000rpm 경우에 비해 매우

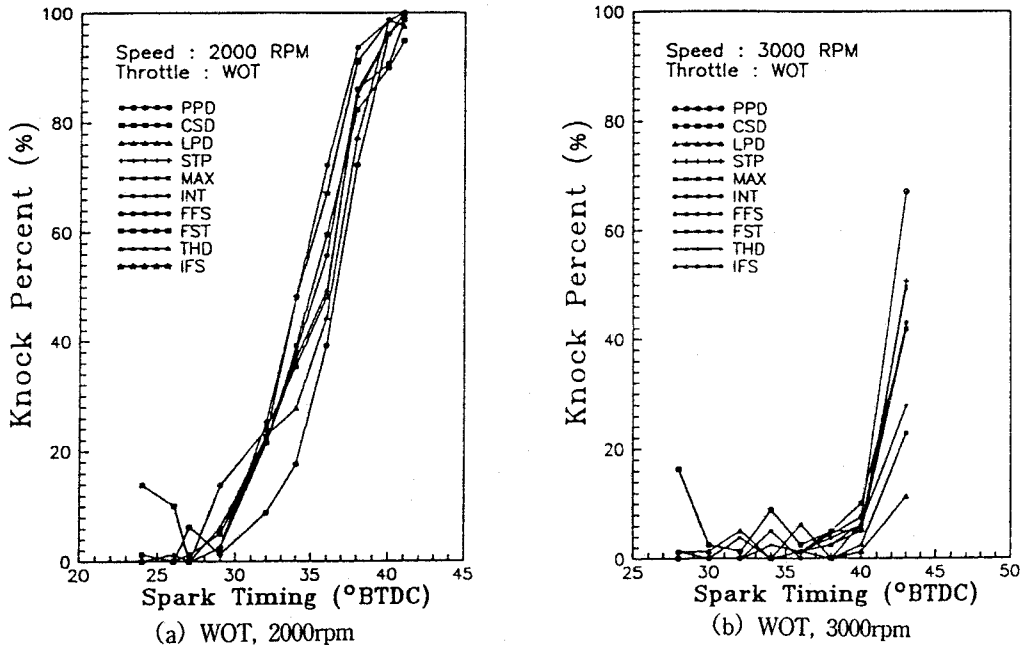


Fig.3 Knock Percentage based on pressure data as a function of sprk timing

앞당겨졌음을 알 수 있으며, 역시 매우 짧은 기간 동안에 노킹 발생 확률이 증가됨을 알 수 있다.

5.2 노킹 강도

노킹 강도는 단위 차이로 각 방법간의 직접 비교가 곤란하므로, 노킹 강도를 기준 노이즈 (back-ground noise)로 나눈 무차원수인 신호 대 노이즈비(signal to noise ratio)를 계산하여 그 값들을 비교하였다.

Fig4는 엔진회전수 2000rpm에서 점화 시기 변화에 따른 신호 대 노이즈비에 대한 결과 그래프이다. 최대 압력값에 의한 분석법(PPD)을 제외하고는 S/N 비가 양호함을 볼 수 있으며, 특히 구역 통과 필터의 결과를 사용하는 방법들(MAX, INT, STP)과 3차 미분에 의한 해석 방법(THD)이 우수한 S/N비를 보인다. 그러나 3차 미분에 의한 해석 방법은 본 실험에서 데이터 취득을 0.1°로 하였기에 높은 값을 보이지만, 실제 제어 모드에서는 데이터 취득 개수의 한계때문에 S/N 비가 나빠질 것을 예상할 수 있다.

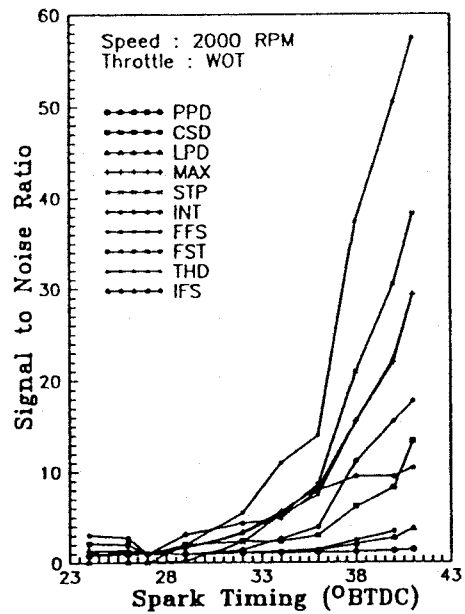


Fig.4 Signal to noise ratio based on pressure data as a function of sprk timing(WOT, 2000rpm)

본 연구에서 개발된 진폭 해석법과 다른 해석 방법들의 비교를 위하여 진폭 해석법이 구간 통과 필터를 사용하므로 구간 통과 필터를 사용해서 분석하는 방법들과 비교하여 보았다. 진폭 해석법(STP), 구역 통과 필터를 사용한 해석법(MAX) 그리고 적분 해석법(INT)의 비교 결과가 Fig.5에 나타나 있다. 노킹 강도는 적분 해석법에 의한 값이 가장 크며 진폭 해석법에 의한 값이 가장 작지만, S/N비는 진폭해석법이 가장 우수함을 알 수 있다. 이는 구역 통과 필터를 사용한 해석법은 한 대표값인 최대 진폭값으로 노킹 강도를 정의하였고, 적분 해석법은 노킹 기준값을 처음으로 넘는 크랭크 각에서부터 노킹 기준값을 넘는 마지막 크랭크 각까지의 구간에서 모든 데이터를 노킹 발생 여부를 생각하지 않고 무조건 적분하여 노킹 강도를 정의하면 반면, 진폭 해석법은 노킹이 일어난 데이터들만의 조합으로 이루어졌으며 노킹 지속 기간을 고려하였기 때문이다. 계산 시간을 비교하여 보면 구역 통과 필터를 사용한 해석법이 가장 우수하며, 진폭 해석법과 적분 해석법은 진폭 해석법에서 구간을 몇 개로 나눌 것인가에 따라 달라진다. 즉, 진폭 해석법에서

계산 시간을 줄이기 위해서는 구간을 줄여야 하지만 이 경우 S/N 비가 나빠지며, S/N비를 좋게 하려면 구간 수가 늘어나 계산 시간이 비례적으로 길어진다. 그러므로 사용자가 사용목적에 따라 선택하여야 하며, 본 실험에서는 두 방법의 계산 시간을 일치시키고 S/N비를 비교하였다.

해석 방법에 대한 압력 데이터의 노킹 강도 결과 그래프를 Fig.6에서 보여주고 있다. 이 그래프들은 엔진회전수 2000rpm, 완전 개도량에서 점화 시기를 BTDC 27°, 40°로 하였을 때의 노킹 비율, 노킹 강도 그리고 노킹 발생 각도에 대한 결과이다. 여기서 노킹 비율은 1사이클 동안 노킹 기준값을 넘는 데이터수를 총 취득 데이터로 나눈 결과로 노킹 지속 기간의 의미이다. 한 예로서 저역 통과 필터를 이용한 해석법(LPD)의 경우 점화 시기 변화에 따른 노킹 특성(노킹 비율, 노킹 강도, 노킹 발생 각도)을 살펴보면, 27°BTDC(0%, 0kPa, 0°), 32°BTDC(0.08%, 162.3kPa, 376.9°), 36°BTDC(0.57%, 206.6kPa, 375.7°), 40°BTDC(0.94%, 479.4kPa, 367.4°)로 점화 시기가 앞당겨 질수록 노킹 비율과 노킹 강도는 증가하며 노킹 발생 각도도 상사점으로 선형적으로 접근하는

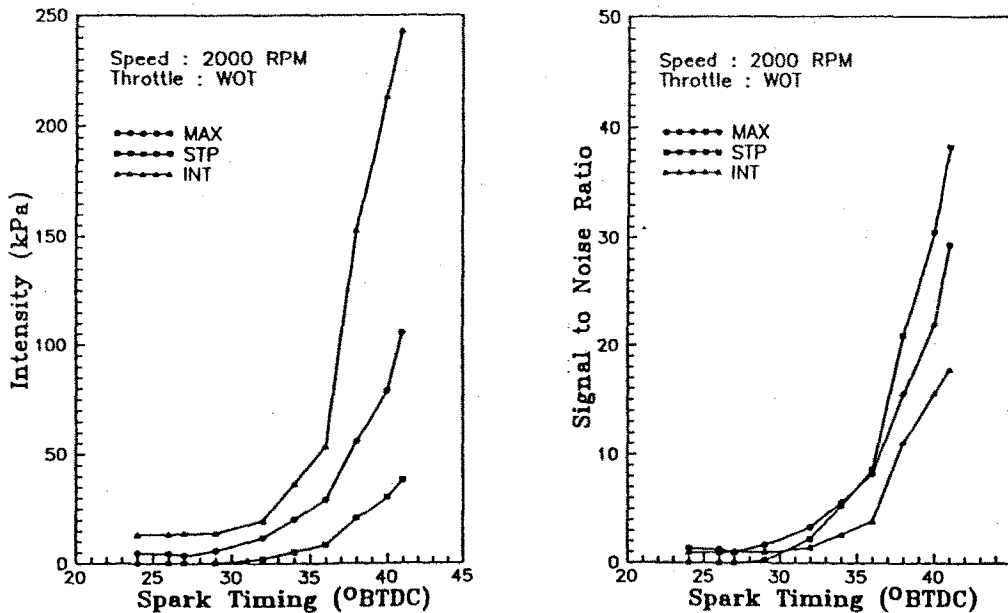


Fig.5 Comparison of knock intensity and signal to noise ratio(WOT, 2000rpm)

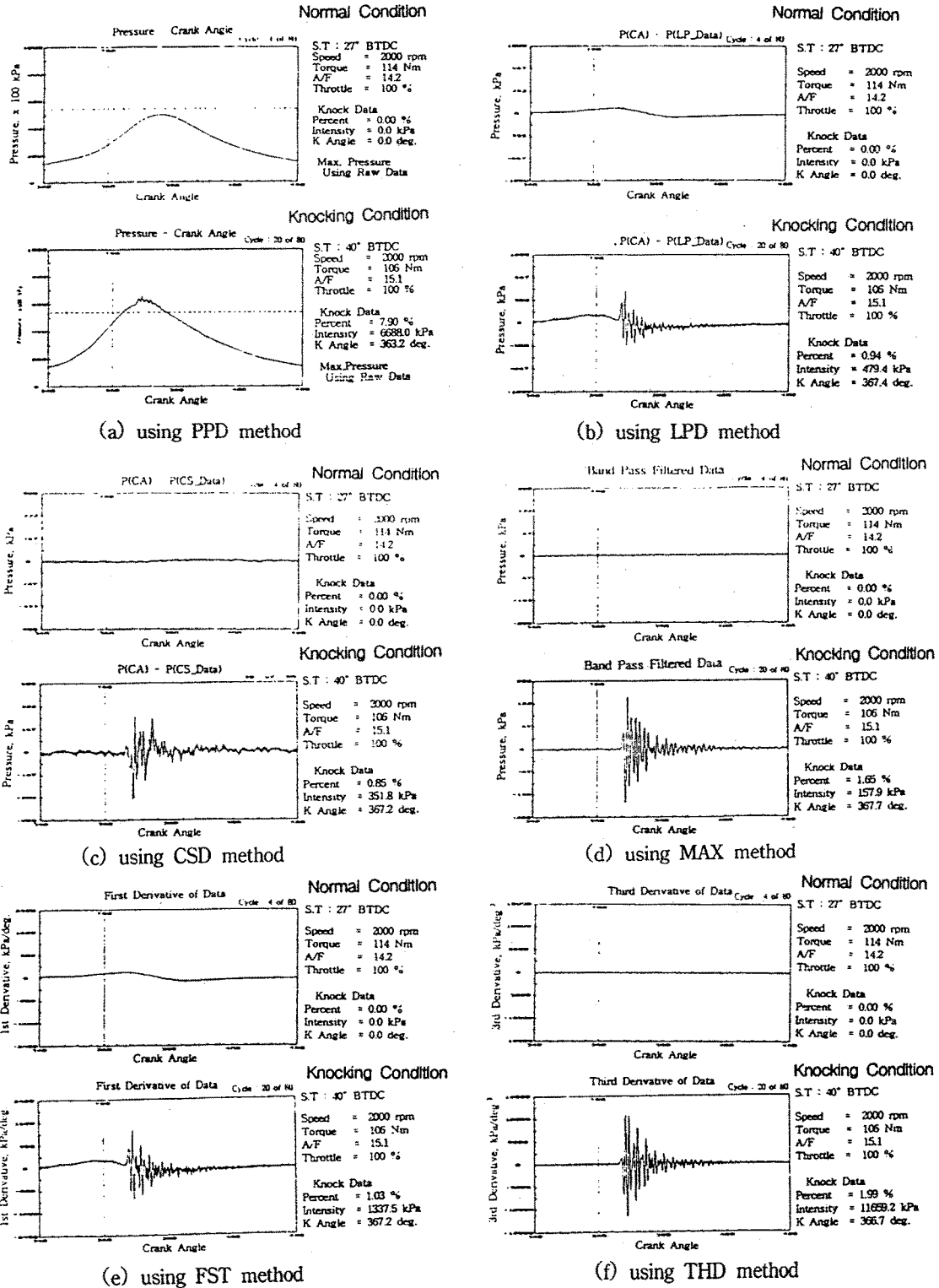


Fig.6 Variation of knock intensity based on pressure data

경향을 잘 보여주고 있으며, 다른 해석 방법들에서도 유사한 결과를 뚜렷이 볼 수 있다.

5.3 노킹 발생 각도

노킹 발생 각도는 노킹 발생 기준값을 최초로 넘는 크랭크 각으로 정의하였으며, 저역 통과 필터를 사용한 분석법(LPD)과 1차 미분 데이터를 통한 분석법(FST)에서는 연소에 의한 압력 증가 영향이 값의 증가로 나타나기 때문에 노킹 강도가 최대인 점에서 3° 앞의 크랭크 각에서부터

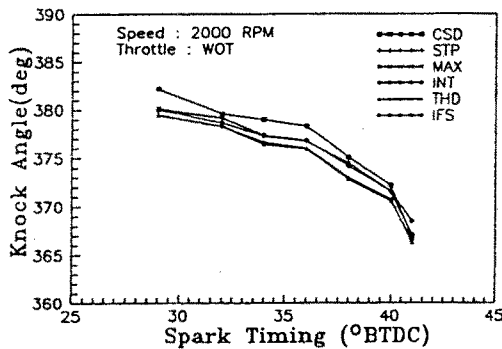


Fig.7 Mean knock occurrence angle of pressure data as a function of spark timing(WOT, 2000rpm)

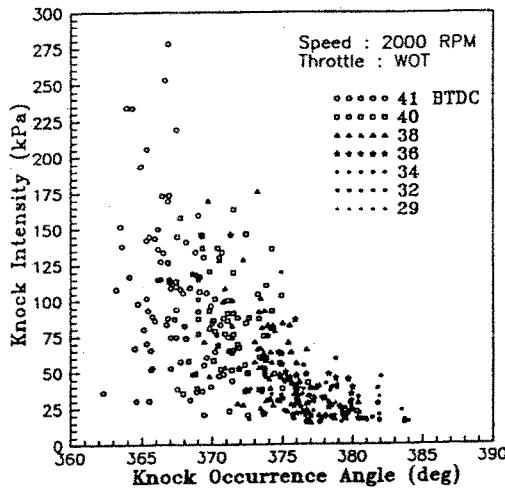


Fig.8 Knock intensity against knock occurrence crank angle based on pressure data on cycle-by-cycle basis

기준값을 넘는 최초의 크랭크 각을 구하였다. 이와 같은 방법으로 점화 시기의 변화에 따른 노킹 발생 각도의 관계를 구한 결과가 Fig.7이다. 이 그래프는 80사이클의 평균 노킹 발생 각도를 점화시기의 함수로 도시한 결과로서 엔진 회전수에 관계없이 점화 시기를 앞당길수록 노킹 발생 각도는 상사점(TDC) 방향으로 접근하며, 점화 시기와 노킹 발생 각도와의 관계는 거의 선형적임을 보여 준다.

또한 Fig.8은 노킹 강도와 노킹 발생각도의 관계를 알아보기 위하여 점화 시기별로 80 사이클의 압력 데이터를 취득하여 각사이클의 노킹 강도와 노킹 발생 각도와의 관계를 도시한 결과이다. 그래프처럼 노킹 강도가 증가할수록 노킹 발생 각도는 상사점으로 이동함을 알 수 있으며, 앞의 점화 시기와의 관계와 잘 일치한다.

6. 결 론

본 연구에서는 노킹 특성을 규명하고 적절한 노킹 해석 방법을 찾기 위하여 4기통 점화 기관을 대상으로 엔진 회전수와 점화 시기 등의 실험 변수에 따라 연소실 압력 신호를 측정, 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 노킹 해석 방법으로는 기존에 사용되는 저역 통과 필터의 결과를 이용한 분석법들 및 3차 미분을 이용한 분석법과 새로 개발된 진폭 해석법이 가장 적당하였으며, 주파수 분석 결과를 이용하는 방법들은 부적당하였다. 특히, 개발된 진폭 해석법은 노킹 지속 구간동안 노킹 기준값 이상의 신호들만을 고려하기 때문에 압력 신호 분석시 모두 신호 대 노이즈 비가 매우 우수하였다.
- 2) 노킹 발생 확률은 일부 사이클에서 노킹이 발생하기 시작하는 점화 시기에서부터 약 3° 진각될 때까지 완만히 증가하다가 약 10° 진각될 동안 90% 이상 급격히 증가하였다.
- 3) 노킹 발생 각도는 점화 시기가 앞당겨질수록 그리고 노킹 강도가 증대될수록 상사점으로 접근하였다.

참 고 문 헌

1. John B. Heywood. "Internal Combustion Engine Fundamentals", Mc-Graw Hill, 1988.
2. H. Kusakabe, M. Takigawa, "A Cylinder Pressure Sensor for Internal Combustion Engine", SAE 920701, 1992.
3. Andrew L. Randolph, "Cylinder-Pressure-Transducer Mounting Techniques to Maximize Data Accuracy", SAE 900171, 1990.
4. R.H. Kuratle, Balz Märki, "Influencing Parameters and Error Sources During Indication on Internal Combustion Engines", SAE 920233, 1992.
5. Andrew L. Randolph, "Methods of Processing Cylinder-Pressure Transducer Signals to Maximize Data Accuracy", SAE 900170, 1990.
6. U. Spicher, H.P. Kollmeier, "Detection of Flame Propagation During Knocking Combustion by Optical Fiber Diagnostics", SAE 861532, 1986.
7. M. Haghgooie, "Effects of Fuel Octane Number and Inlet Air Temperature on Knock Characteristics of a Single Cylinder Engine", SAE 902134, 1990.
8. Kwang Min Chun, "Characterization of Knock and Prediction of Its Onset in a Spark-Ignition Engine", Ph.D Thesis. M.I.T., 1988.
9. W.R. Leppard, "Individual Cylinder Knock Occurrence and Intensity in Multicylinder Engines", SAE 820074, 1982.
10. Paulius V. Puzinauskas, "Examination of Methods Used to Characterize Engine Knock", SAE 920808, 1992.
11. Cuttler, D.H., Girgis, N.S., "Photography of Combustion During Knocking Cycles in Disc and Compact Chambers", SAE 880195, 1988.
12. H. Tokuda, M. Kaneyasu, N. Kurihara, "Engine Knock Detection Using Multi-Spectrum Method", SAE 920702, 1992.
13. G. Benson, H.C. Scherrer, "Knock(Detoration) Control by Engine Combustion Chamber Shape", SAE 830509, 1983.
14. T. Valtadoros, V. W. Wong, J. B. Heywood, "Engine Knock Characteristics at the Audible Level", SAE 910567, 1991.
15. M.D. Checkle, J.D. Dale, "Computerized Knock Detection from Engine Pressure Records", SAE 860028, 1986.