

〈논 문〉 SAE NO. 97370063

전기점화기관에서 마이크로폰 센서를 이용한 노킹 측정 및 분석

Measurement and Analysis of Knock Using a Microphone Sensor in a S. I. Engine

황 승 환*, 이 종 화**, 임 진 수***
S. H. Hwang, J. H. Lee, J. S. Lim

ABSTRACT

The knocking is one of major parameters to improve engine performance in a spark ignition engine. Many researches have been carried out to identify them using cylinder pressure, vibration signal and so on. In the present study, measurement and analysis was conducted to set up the criteria of knock occurrence by using microphone signal. Cylinder pressure was measured for the reference signal of knocking. It has been observed that resonance frequencies of pressure wave are nearly independent of engine operating conditions such as engine speed, air fuel ratio, load and octane number of fuel within to limited experimental conditions. SDBP(sum of different band-pass data) method using resonance frequency of knock was proposed for estimating knock intensity. SDBP method is superior to identify knock occurrence and its intensity in case of sound pressure measurement.

주요기술용어 : Knock Intensity, Knock Frequency, Cylinder Pressure, microphone Signal

1. 서 론

노킹은 엔진의 효율을 저하시킬 뿐 아니라 피스톤과 같은 부품들을 손상시켜 엔진 수명을 저하시킨다.^{1,2)} 따라서 노킹 현상은 엔진의 성능 및

수명에 직접적인 영향을 주는 중요한 요인이므로 엔진성능 향상 및 개발과정에서 그 정도를 정확히 판단하는 것이 필요하다.

노킹을 측정하기 위하여 압력 센서, 가속도 센서, 광센서 및 이온프로브 센서 등이 이용되어 왔으며, 노킹 강도를 정량화하기 위해 해석방법도 다각도로 연구되어 왔다.^{3~9)} 압력센서를 이용한 방법은 신뢰성 측면에서 가장 우수한 방법이나 센서의 장착을 위해 엔진에 별도의 가공이 필

* 정회원, 아주대학교 대학원

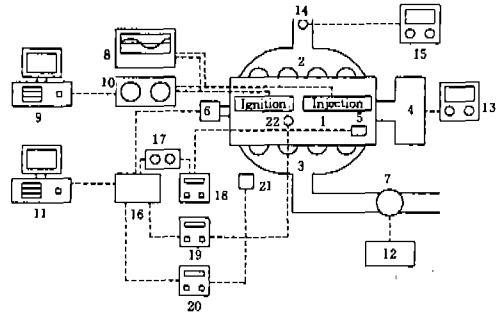
** 정회원, 아주대학교 기계공학과

*** 아주대학교

요하므로 센서의 장착에 어려움이 있다.

노킹이 발생하면 연소실에 충격파가 형성되며 이 충격파는 엔진을 가진시키고 그로 인해 노킹음이 발생하게 된다. 그러므로 마이크로폰을 이용하여 노킹을 측정하고 적절한 해석방법을 개발한다면 손쉽게 노킹을 측정할 수 있을뿐만 아니라 비접촉식 방법으로 측정하므로 센서의 손상없이 노킹의 발생 및 강도를 측정할 수 있을 것이다.

본 연구에서는 연소실 압력을 이용하여 노킹 특성을 파악하고 이를 이용하여 적절한 해석방법을 개발하여 음압 신호를 해석하고, 압력신호로부터 측정된 결과와 비교하여 음압을 이용한 노킹측정의 타당성과 신뢰성을 검증하였다.



- 1. Engine
- 2. Exhaust Port
- 3. Inlet Port
- 4. Dynamometer
- 5. Pressure Transducer
- 6. Rotary Encoder
- 7. Throttle Valve
- 8. Oscilloscope
- 9. P. C
- 10. Controller(PC-ECU)
- 11. P.C
- 12. Throttle
- 13. Dynamometer Controller
- 14. λ Sensor
- 15. λ Sensor Displayer
- 16. Data Acquisition
- 17. Reference Signal Generator
- 18. Charge Amplifier
- 19. Charge Amplifier
- 20. Power Supply
- 21. Microphone
- 22. Accelerometer

2. 실험장치 및 방법

실험에 사용한 엔진은 4기통 1,500cc DOHC 엔진이며, EC 동력계를 사용하여 회전속도 및 부하를 제어하였다. 점화시기 및 공연비 등의 엔진운전 조건변경을 위하여 별도의 PC-ECU를 사용하였으며 공연비는 광역역 λ 센서(Horiba, Mexa-110λ)를 사용하여 측정하였다. 4번 실린더에 압력센서(Kistler, 6051B)를 설치하였고 마이크로폰 센서(B & K, 2669B)는 엔진 블럭 3-4번 실린더 상단부에서 3cm 떨어진 위치에 설치하였다. 음의 집진성과 주위소음의 영향을 줄이기 위하여 고무와 스폰지로 만든 나팔모양의 관을 마이크로폰 앞에 붙였다. 실험장치의 개략도는 Fig.1과 같다.

실린더 압력신호와 마이크로폰 신호는 A/D 변환기(DT2833)에 의해서 동시에 기록되어지며 이때 측정 주파수는 100kHz로 하였다.

본 연구의 목적상 노킹 주파수특성에 대한 분석이 중요하며, 이들 신호의 특성은 엔진 운전 조건 변화에 따라 달라질 수 있다. 따라서 엔진 운전 조건에 따른 신호특성을 알아보기 위하여 엔진 회전속도, 부하 및 공기 연료비를 변화시키며 실험하였다. 또한 연료의 옥탄가에 대한 영향을 알아보기 위하여 옥탄가 88 및 94를 사용하여 실험하였다. 이때 점화시기는 각각의 조건에서 설정된 값에서 진각시키면서 4~5가지의 경우

Fig.1 Schematic Diagram of Experimental Apparatus

Table 1 Engine Operating Condition

엔진운전 조건변수	운전조건
회전속도	1500, 2000, 2500, 3000, 4000, 5000 rpm
부하(계동토크)	60, 80, 100(Nm), WOT
공기 과잉률	0.9, 1.0, 1.1
연료 옥탄가	88, 94

에 대하여 실험하였다. 실험 조건 Table 1과 같다.

3. 실험결과 및 분석

3.1 녹 원도우 설정

실린더 압력신호에는 점화시의 전기적 노이즈, 밸브 개폐 등 여러 요인에 의해 노이즈 신호가 내포될 수 있다. 따라서 이러한 신호가 노킹 해석에 포함되지 않도록 구간을 미리 설정할 필요가 있으며 이를 녹 윈도우라 한다. 이는 노킹이 발생되기 시작하여 지속되는 동안의 구간을 말하며 실린더 압력을 통하여 비교적 정확하게 찾을 수 있다. Fig.2에 표시한 것과 같이 노킹 발생 위치는 최고 피크값의 3° 앞으로 하였고, 지속구간

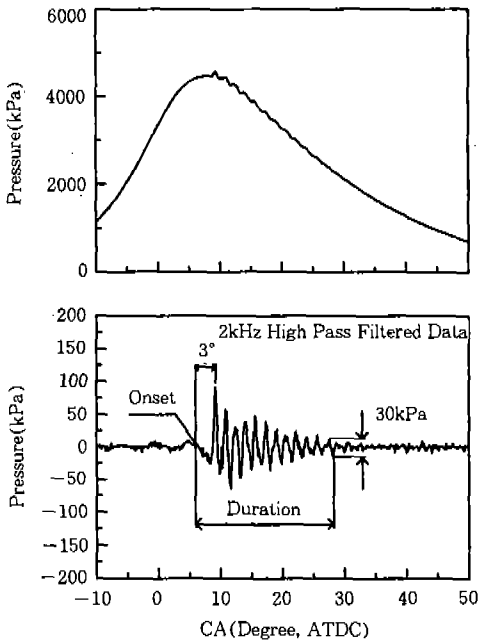


Fig.2 Definition of knock Onset and Duration

은 노킹 발생점으로부터 진폭이 30kPa 이하로 떨어지는 지점까지의 구간으로 정의하였다. 여러 실험 조건으로부터 측정된 압력 신호를 분석한 결과 노킹발생 및 끝나는 지점은 Fig.3에서 볼 수 있듯이 ATDC 0°~50° 안에 모두 포함되었다. 노킹의 지속구간은 15°~30° 정도였으며 노킹의 발생 지점과 노킹의 지속구간 사이에는 연관성이 없는 것으로 나타났다.(Fig.4) 따라서 본 연구에서는 ATDC 0°~50°를 녹 윈도우로 정의하고 신호해석시 이 구간만을 사용하여 해석하였다.

3.2 노킹주파수 특성분석

본 연구에서는 압력파의 특성을 이용하여 노킹 판단에 대한 신뢰성을 높이는 방안을 모색하기 위하여 노킹이 발생될 때의 실린더 압력에 대한 주파수 특성을 분석하였다. 측정된 압력신호 중 노킹이 발생한 사이클을 선별하여 2kHz 고주파 통과 필터(Butterworth, 10차)로 필터링한 후 스펙트럼을 구하였으며 이때 주파수 사이의 간격이 크므로 지수보간법을(Cubic Spline) 사용하

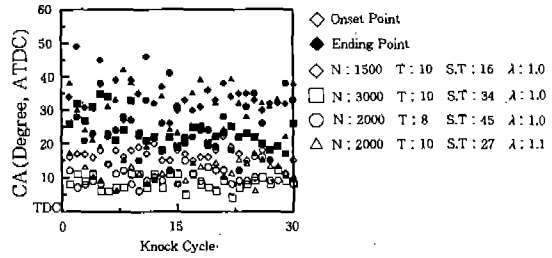


Fig.3 Variation of Knock Onset and Ending Point

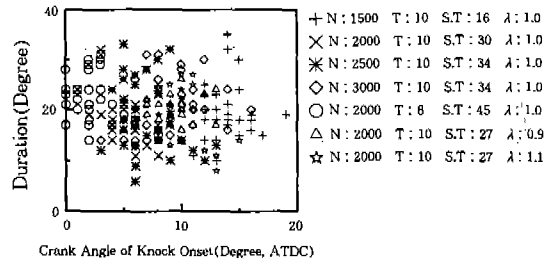
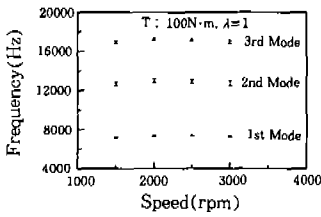


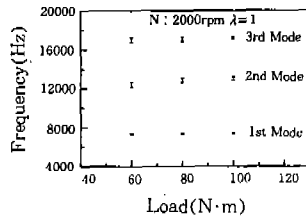
Fig.4 Knock Onset Point and Duration

여 후처리한 후 각 노킹 주파수에서 최대 피크값을 나타내는 노킹 중심 주파수를 구하였다.

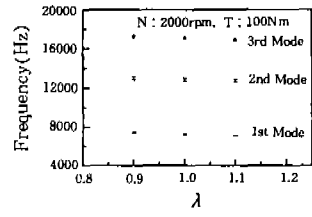
Fig.5는 각 운전 조건마다 발생한 50사이클로부터 구한 노킹중심 주파수의 평균값과 표준편차를 나타낸 것이다. 1차 노킹 중심 주파수의 경우 각 실험조건에서 구한 평균값이 7.3 ± 0.1 kHz 정도의 범위에 있으며 표준편차의 값도 70Hz미만의 값으로 나타났다. 2차 3차 노킹 중심 주파수는 각각 12.8 ± 3.0 kHz, 17.1 ± 0.3 kHz의 값을 나타내어 1차 노킹 중심주파수보다 변화범위가 약간 크다는 것을 알 수 있다. 그 이유는 노킹의 1차 중심주파수와는 달리 2, 3차 중심주파수의 크기가 상대적으로 작아 노킹 강도가 작을 경우 노킹 중심주파수에 근접한 영역에 있는 노이즈 성분이 오히려 노킹 중심 주파수의 값보다 크게 나타나 측정상 에러를 발생시키기 때문이다. 그러나 2, 3차 노킹 중심주파수에서의 표준편차도 0.3kHz 미만의 값으로 나타나고 있어 노킹 중심 주파수는 엔진운전 조건에 따라 거의 변화하지 않는 것을 알 수 있다. 노킹 주파수는 음속에 비례하며 음속은 온도에 비례하므로 노킹주파수의



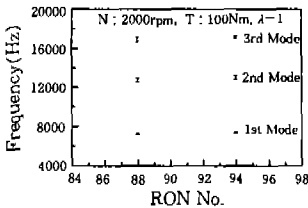
(a) Effect of Speed



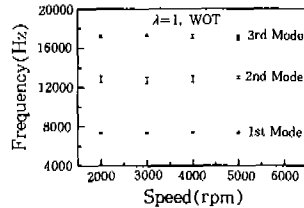
(b) Effect of Load



(c) Effect of λ



(d) Effect of RON No.



(e) Effect of Speed, WOT

Fig.5 Knock Frequencies and Their Deviation Based on the Cylinder Pressure

변화가 작다는 것은 노킹이 발생한 후 연소가스의 온도가 비슷한 상황일 것이라고 예상된다.

노킹 주파수의 스펙트럼 분포를 살펴보기 위하여 각 노킹 중심 주파수 최대값의 1/2 지점의 폭을 Half Power Band Width(ΔW_{hp})로 정의하고 이를 구하였다. Fig.6은 ΔW_{hp} 의 평균값과 이 값에 표준편차를 가감산하여 나타낸 것으로 엔진운전 조건이 달라짐에 따라 각 노킹 주파수의 ΔW_{hp} 가 크게 변화되지 않고 있음을 알 수 있으며 각 실험조건에서 구한 평균값들은 고속에서 1kHz이상인 경우도 있지만 대개 1kHz이하의 값을 가지고 있다.

노킹주파수와 그 폭은 엔진운전 조건에 따라 거의 변화하지 않으므로 노킹주파수를 고려한 필터를 사용하면, 보다 정확히 노킹 신호만을 추출하여 해석할 수 있을 것이다.

3.3 음압을 이용한 노킹 측정 및 해석

음압 신호의 특성을 알아보기 위하여 압력신호를 기준으로 하여 그 상관관계를 알아보았다. Fig.7은 노킹강도가 증가될 때 압력신호와 음압신호를 비교한 것이다.엔진주위의 암소음이 노킹에 의한 음압에 비해서 상대적으로 크롬 5~

20kHz 구역 통과 필터를 이용하여 노킹 이외의 성분을 제거 시켰다. 압력신호 진폭이 커질수록 음압 신호의 진폭도 비례하여 커지고 있다. 압력신호의 경우는 진폭값 변화가 짧은 시간에 발생하고 또한 노킹발생 초기에 상대적으로 큰 피크값이 존재하지만 음압신호의 경우는 노킹 전구간에서 완만한 증가와 감소를 보인다.

주파수 특성을 알아보기 위하여 위의 데이터를 주파수 분석하였다. Fig.7은 그 결과를 도시한 것으로써 압력신호와 비교할 때 1, 2, 3차 중심 주파수별 스펙트럼의 크기비는 다소 달라지나 노킹 중심주파수는 거의 같은것으로 나타났다. 노킹주파수 이외의 주파수 영역에서 높은 에너지를 갖고 있는 피크점들이 보이는데 이는 엔진의 공진주파수와 주위의 암소음으로 인하여 생긴것으로 생각된다. 이와같은 성분들은 부하와 엔진속도가 증가하면 함께 증가한다. 그러므로 신호해석에 있어서 음압 신호속에서 노킹 신호만을 선별하는 것이 중요한 요인이 된다. 음압을 이용한 노킹강도는 다음의 3가지 방법으로 구하였다.

3.3.1 구역 통과필터를 사용한 진폭해석법

노킹 음은 노킹에 의해서 생긴 압력파에 의한 것이므로 입력신호에서 구한 노킹 주파수성분을

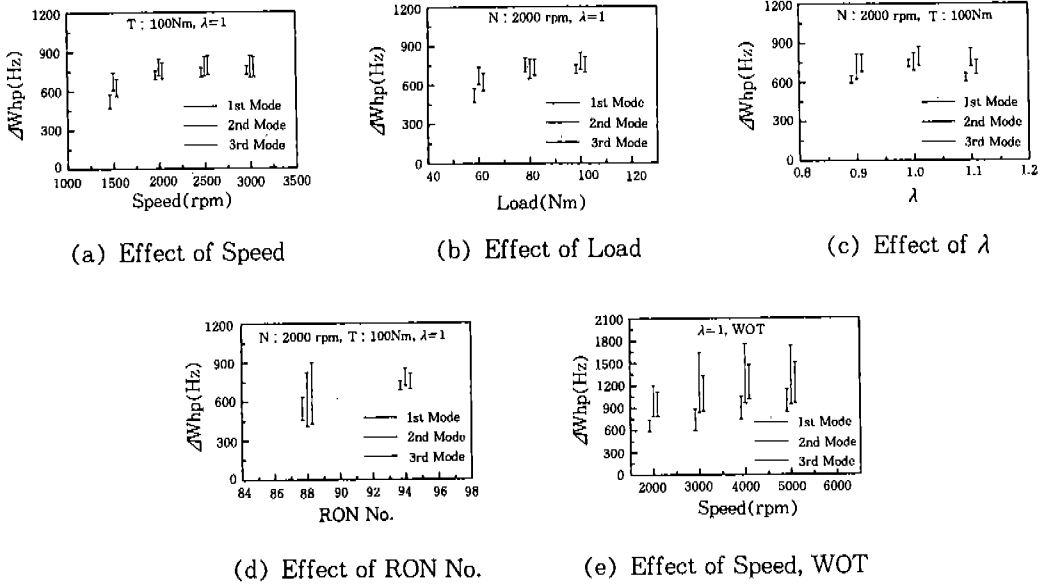


Fig.6 Half Power Band Width of Spectrum and Their Deviation Based on Cylinder Pressure

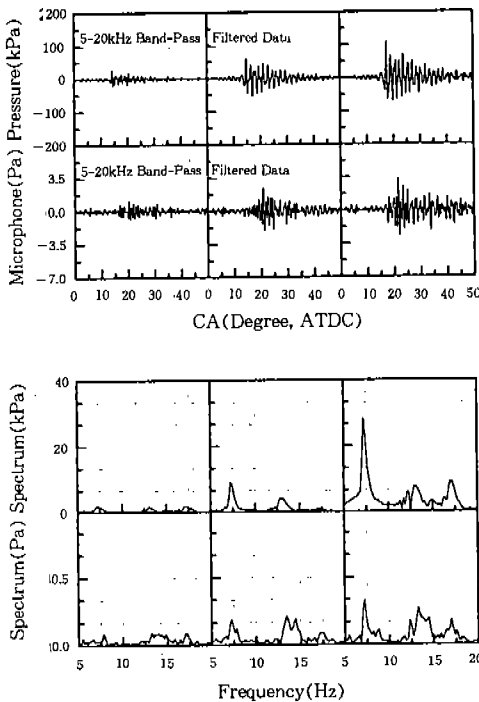


Fig.7 Correlation Between pressure and Microphone N : 2000rpm, T : 119.2Nm, S. T : BTDC 21, WOT

비교적 잘 반영하고 있다. 그러므로 적절한 필터를 사용하여 노킹 이외의 성분을 제거한다면 정확성이 향상된 노킹강도를 얻을 수 있을 것이다. 노킹 주파수의 1, 2, 3차 모드는 7~18kHz 범위에 있으므로 5~20kHz 구역통과 필터(Butterworth, 10차)로 필터링한 후 그 최대 진폭값을 구역통과 필터를 사용한 진폭해석법으로 정의한다(BPD).

3.3.2 고유주파수 필터를 통한 진폭해석법

구역 통과 필터를 사용한 진폭해석법은 각 노킹 주파수 사이에 있는 노이즈 성분들이 포함되어 있으므로 이를 제거하기 위하여 각 노킹 주파수별로 필터링한 후 그 최대 진폭값의 합을 고유주파수 필터를 통한 진폭해석법으로 정의한다. 그 예를 Fig.8에 도시하였다. 압력신호 해석을 통하여 각 운전조건에서의 노킹 주파수를 알고 있으므로 이것을 기초로 하여 1차 Mode 영역은 6.6~8.0kHz, 2차 Mode는 12.0~13.5kHz로 그리고 3차 Mode는 16.4~17.8kHz로 필터링 구간을 설정하였으며 이는 각 주파수에 Half Power Band Width의 평균값인 700Hz를 가감한 것이다.

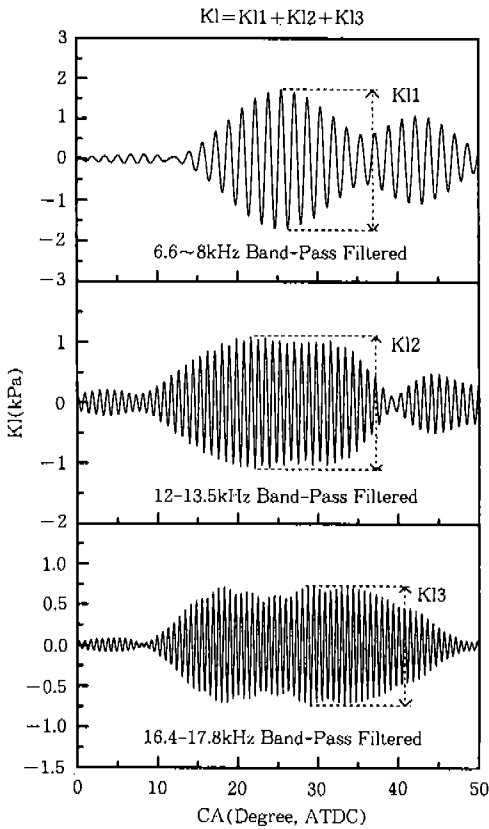


Fig.8 Definition of SDBP Method

3.3.3 미분을 통한 진폭해석법

단위 시간당 음압변화량의 크기를 노킹강도로 정의하는 방법으로 음압신호를 시간으로 미분하고 미분한 값의 최대값과 최소값의 차이를 미분을 통한 진폭해석법으로 정의한다.

음압신호의 신뢰성을 확인하기 위하여 압력신호와 비교하였다. 이때 압력신호 해석방법은 가장 일반적으로 사용하고 있는 구역통과 필터를 사용한 진폭해석법으로 하였다. Fig.9는 3가지 방법으로 구한 노킹 강도를 압력신호와 비교한 것이다. 2,000rpm의 경우 상관관계 계수값이 (Correlation Coefficient : CC) 0.927~0.95로써 압력 신호로부터 구한 결과와 상당히 유사하다. 5,000rpm의 경우 상관관계 계수값이 0.651~0.82로 엔진회전 속도가 증가할수록 상관성이 떨어지는 경향을 보이며 또한 각 해석 방법에 따라 차이도 커지고 있다. 이는 엔진 회전속도가 증가할수록 엔진에서 발생하는 암소음이 커질 뿐만 아니라 주파수도 높아져 노킹 주파수와 비슷한 영역의 음압 강도가 증가하기 때문이다. 해석 방법중 고유주파수 필터를 통한 진폭해석법이 (SDBP)이 가장 좋은 결과를 보여주는데 이는 신호중 노이즈 성분을 가장 잘 제거한 해석방법이기 때문이다. 고유주파수 필터를 통한 진폭해

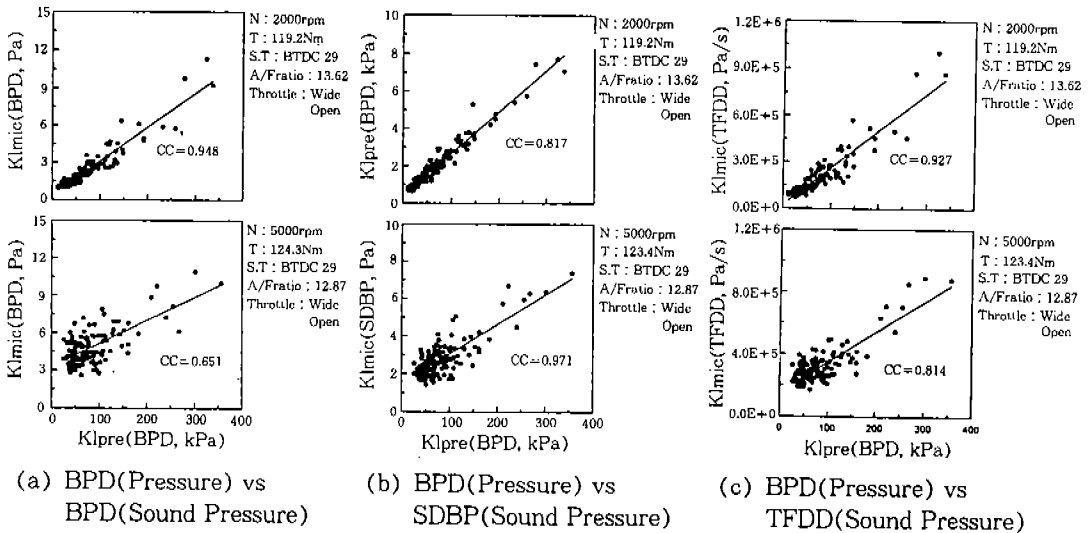


Fig.9 Comparison of Knock Intensity Using Pressure Data and Microphone Data

석법의 경우 상관관계 계수값이 0.82~0.95로써 전 구간에 걸쳐 압력신호와 상관성이 우수함을 알 수 있다.

4. 결 론

- 1) 연소실의 압력을 주파수 분석한 결과 압력 파의 고유 진동수는 엔진 운전조건에 의한 영향을 거의 받지 않았으며 비교적 큰 왜곡 없이 음압 신호에서도 잘 반영되어 나타났다.
- 2) 노킹 주파수 필터를 통한 진폭 해석법으로 음압 신호를 해석할 경우 압력 신호와 좋은 상관성을 나타내었다.
- 3) 엔진 속도가 증가할수록 노이즈에 의한 영향으로 신뢰성이 다소 떨어지나 강한 노킹에 대해서는 압력신호에 의한 결과와 잘 비례하므로 음압을 이용한 노킹 검출이 가능함을 확인하였다.

후 기

본 연구는 현대자동차(주) 지원에 의하여 수행되었습니다. 도움을 주신 관계자 여러분들께 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

1. John B. Heywood, "Internal Combustion Engine Fundamentals", Mc-Graw Hill, 1988.
2. 전광민, 이종화, "노킹과 엔진손상", 한국자동차공학회지 제18권 제4호, pp. 1~5, 1992.
3. A. By, B. Kempinski and J. M. Rife, "Knock in Spark Ignition engines", SAE 810147, 1981.
4. G. Benson, E. A. Fletcher, T. E. Murphy, H. C. Scherrer, "Knock(Detonation) Control by Engine Combustion Chamber Shape", SAE 830509, 1983.
5. U. Spicher, H. P. Kollmeier, "Detection of Flame Propagation during Knocking Combustion by Optical Fiber Diagnostics", SAE 902134, 1990.
6. W. R. Leppard, "Individual Cylinder Knock Occurrence and Intensity in Multicylinder engines", SAE 820074, 1982.
7. Carlo V. Ferrar, Mario Marzar and Patrizio Nucc, "Knock-Limit Measurement in High-Speed S. I. Engines", SAE 85012.
8. K. W. Kim, K. M. Cuun, "Measurement and Analysis of Knock in a SI Engine Using the Cylinder Pressure and Block Vibration Signals", SAE 940146, 1994.
9. Robert L. Anderson, "In-Cylinder Measurement of Combustion Characteristics Using Ionization Sensors", SAE 860485, 1986.

1. John B. Heywood, "Internal Combustion