

〈논 문〉 SAE NO. 97370020

스파크 점화 기관의 실린더 블록 진동 신호를 이용한 노킹 제어

Knock Control Using Cylinder Block Vibration Signals in a Spark-Ignition Engine

함 윤 영*, 전 광 민**
Y. Y. Ham, K. M. Chun

ABSTRACT

The objective of this study is to develop knock control algorithms which can increase engine power without causing frequent knock occurrence. A four cylinder spark-ignition engine is used for the experiments to develop knock control algorithms which use block vibration signals. Knock occurrence is detected accurately by using knock threshold values which consider the difference of transmission path of each cylinder.

Spark timing is controlled both simultaneously and individually. With the simultaneous control, torque gain is achieved by retarding the spark timing on knock occurrence in proportion to the knock intensity. The individual knock control algorithm results in higher torque gain than the simultaneous knock control algorithm. The knock occurrence frequency of the individual knock control algorithm is about twice the value of the simultaneous knock control algorithm results. Both control algorithms give similar torque gain of about 3% when they are optimized.

주요기술용어 : Knock control, Knock threshold value, Knock occurrence frequency, Torque gain

1. 서 론

엔진의 출력과 효율을 높이기 위해서는 압축비를 증가시키는 것이 효과적인 방법이나 압축비의 증가는 노킹 현상에 의해 제한을 받는다.

노킹 현상은 연소 과정의 후반부에서 미연 혼합기가 자연 발화함으로써 발생하는 날카로운 금속성 소음을 수반하는 비정상 연소로서 심할 경우 엔진에 심각한 손상을 초래하게 된다. 따라서 노킹에 의한 엔진 손상을 피하면서 엔진의 출력을 향상시키기 위해서는 노킹 특성에 대한 정확한 이해와 적절한 노킹 제어가 필요하다.^{1)~9)}

* 연세대학교 대학원

** 정희원, 연세대학교 기계공학과

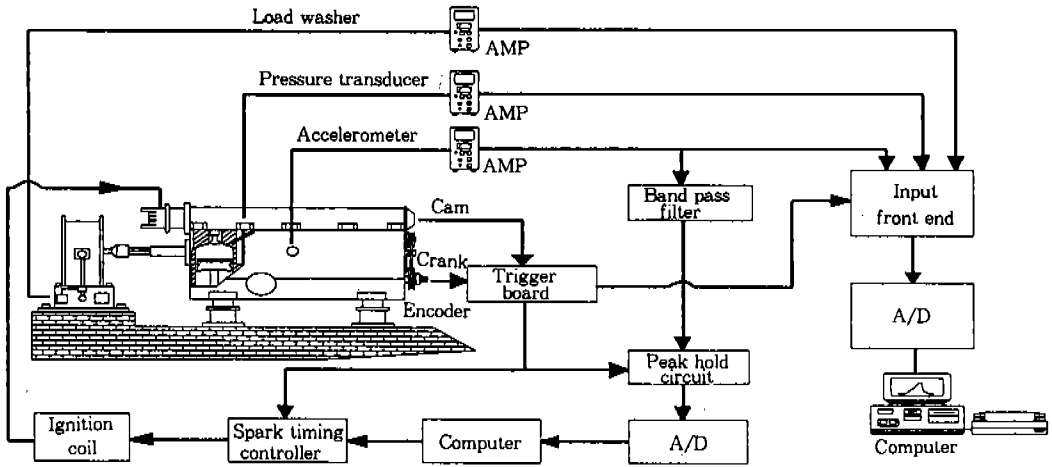


Fig.1 Schematic diagram of experimental equipment

본 연구에서는 4 기통 스파크 점화기관을 대상으로 실린더 블록 진동 신호를 이용한 노킹제어시스템을 개발하여 노킹 제어를 통해 노킹의 발생을 억제하고 엔진의 출력을 향상시키고자 하였다. 노킹제어는 노킹 발생 여부에 따라 모든 실린더의 점화시기를 동시에 조절하는 동시실린더 제어방식과 각 실린더의 점화시기를 개별적으로 조절하는 개별실린더 제어방식을 사용하였다.

2. 실험 장치

본 연구에 사용된 실험 장치는 엔진, 동력계, 진동 센서, 노킹제어장치 등으로 구성되어 있으며, 개략적인 구성은 Fig.1과 같다.

2.1 엔진 및 측정 센서

실험용 엔진은 SOHC 직렬 4기통 1498cc의 MPFI 가솔린 엔진을 사용하였으며, 압축비는 8.6이다. 엔진의 연소실 압력을 측정하기 위해 4번 실린더에 Kistler 6053 플러쉬 마운트형 센서를 장착하였고, 진동 센서로 B & K 4371 가속도계를 실린더 블록의 중앙 위치에 나사못으로 고정, 설치하였다. 본 실험에 사용한 연료는 옥탄가(RON) 95인 시판용 가솔린 연료를 사용하였다.

2.2 노킹 제어 장치

노킹 제어 장치는 구간통과필터, Peak 검출 장치, 리셋 신호 발생부, A/D 변환기, 점화시기 조절장치로 구성된다. 가속도계로부터의 진동 신호는 노킹 고유주파수 대역인 5~10kHz 구간에서 필터링된 후, Peak 검출 장치에 의해 필터를 거친 진동 신호의 최대값이 구해지며 Peak 검출은 각 실린더에서 압축상사점을 기준으로 BTDC 10°에서 ATDC 70° 사이에서 행하여진다. Fig.2는 필터링된 진동 신호와 Peak 검출된 신호를 나타낸다. A/D 변환기는 Peak 검출기에서 나오는 진동 신호의 아날로그 최대값을 디지털 값으로 변환시키며, 제어용 PC는 진동신호 최대값과 기 설정된 노킹판정기준값을 비교하여 노킹판정기준값보다 크면 노킹발생으로 판정하고 작으면 노킹발생이 아닌 것으로 판정한다. 노킹발생 판정 여부에 따라 노킹제어 알고리즘에 의해 점화시기가 결정된다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 노킹 판정 기준값의 설정

가속도계는 하나의 센서로 4개 실린더의 노킹 발생을 감지할 수 있지만 각 실린더로부터

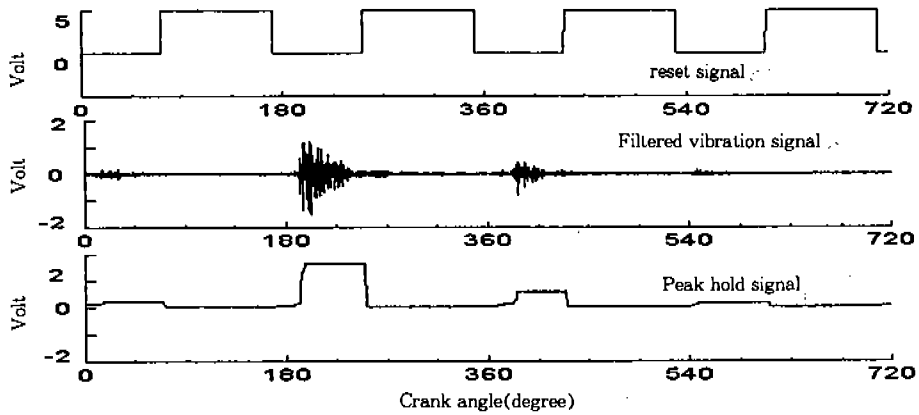


Fig.2 Output signals of band pass filter and peak detector

의 신호 전달 경로가 다르기 때문에 반응 감도가 서로 틀리게 된다. 이러한 현상을 무시하고 노킹 판정 기준값을 4개 실린더에 일정한 값으로 설정하게 되면 반응감도가 좋지 않은 실린더는 실제 노킹이 발생하였음에도 정상연소로 판정될 수 있으며, 노킹의 제어 대상이 반응 감도가 좋은 실린더에 국한될 가능성이 많아 정확한 노킹발생을 판정하기 어렵게 된다. 따라서 노킹 판정 기준값은 실린더간의 전달 경로 차이에 의한 반응 감도 차이를 고려하여 각 실린더마다 적절한 값으로 보정하여 개별적으로 설정할 필요가 있다.

본 연구에서는 이러한 문제점을 해결하고자 압력신호를 이용하여 결정한 노킹발생확률을 이용하였다. 먼저 점화시기를 변화시키면서 4번 실린더의 연소실 압력 및 실린더 블록 진동신호를 크랭크 각 0.2° 간격으로 각각 100 사이클씩을 동시에 취득하여, 압력신호의 노킹발생확률값을 구하고, 이 값과 일치하는 진동신호의 기준값을 구하였다. 이와 같이 구한 4번 실린더에서의 진동신호의 노킹 판정 기준값을 이용하여 다른 나머지 3 실린더의 노킹 판정 기준값을 구한다. 실린더 간의 반응 감도의 차이는 정상 연소인 경우는 진동신호의 차이로 보고 정상 연소일 때 4번 실린더의 평균노킹강도를 기준으로 하여 나머지 실린더들에서의

평균노킹강도를 구해 그 차이를 실린더 간의 보정치로 고려하였다. 이러한 방법으로 구한 각 실린더의 노킹 판정 기준값들은 Fig.3과 같다. 노킹 판정 기준값은 엔진회전수가 올라감에 따라 증가함을 알 수 있고, 정상연소조건에서 구한 평균노킹강도의 약 2배 정도의 크기를 갖는다.

이와 같은 노킹 판정 기준값의 설정 방법이 적절한지를 검증하기 위하여 스파크플러그 어댑터형 압력센서를 모든 실린더에 장착하여 점화시기를 변화시키면서 각 실린더의 압력 및 진동 신호를 크랭크 각도 0.2° 간격으로 100 사이클씩 동시에 취득하여 압력 신호에 의한 노킹발생확률을 구한 후, 이 값과 가장 일치하는 진동 신호의 노킹판정기준값을 구하였다. Fig.4는 2000rpm에서의 결과로서 실린더별로 노킹발생확률이 서로 다르며, 입력 신호에 의한 노킹발생확률과 가장 근접하는 각 실린더의 노킹 판정 기준값들은 앞에서 구한 값들과 비교적 잘 일치함을 보여 준다. 즉, 실린더 간의 노킹 판정 기준값의 차이를 노킹이 없는 정상 연소 조건에서의 평균노킹강도의 차이로 보상해주는 방법이 타당함을 알 수 있으며, 한 실린더의 노킹 판정 기준값만 정확히 설정한다면 나머지 실린더들에서의 노킹 판정 기준값들은 이러한 보상 방법으로 쉽게 설정할 수 있게 된다.

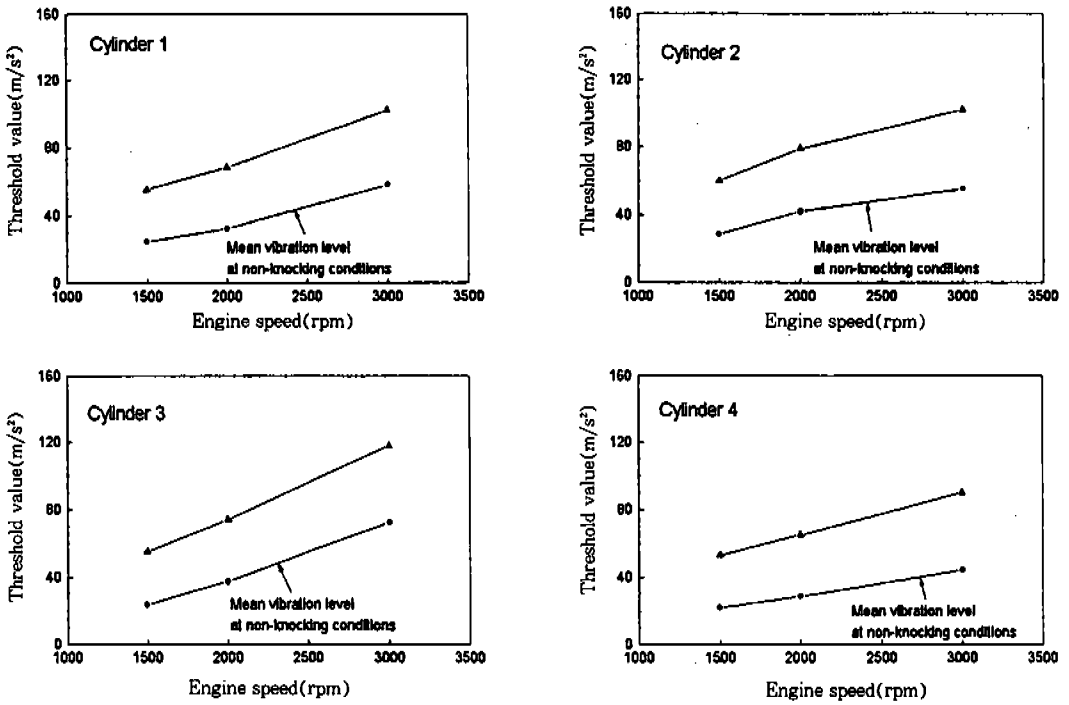


Fig.3 Knock threshold value of vibration signal

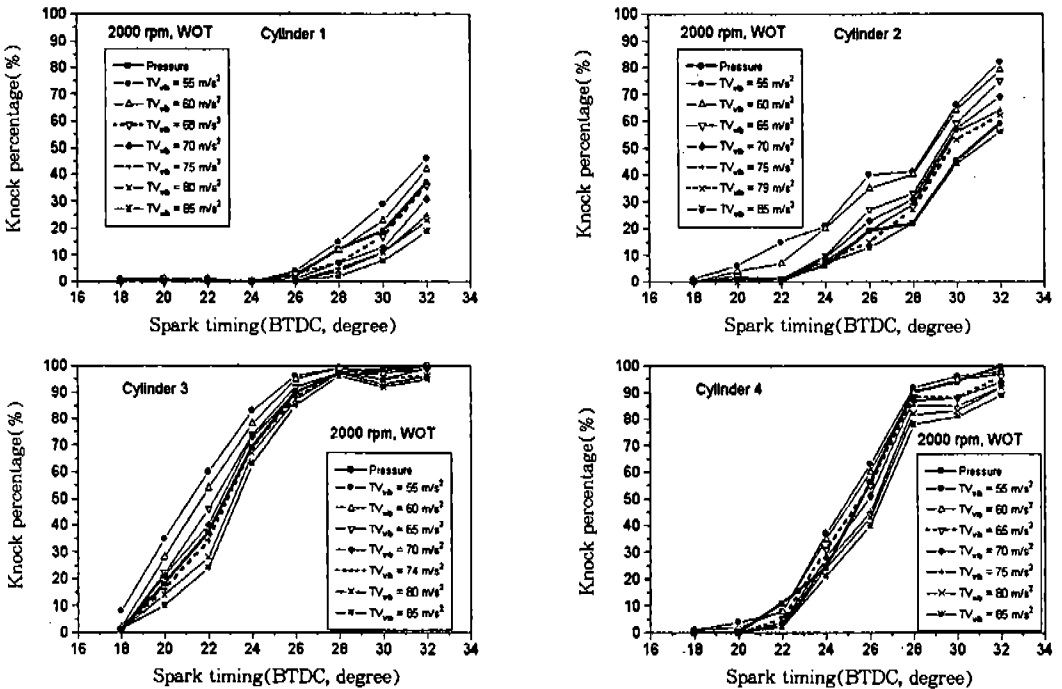


Fig.4 Comparison of knock percentage using pressure signal and using the threshold value of vibration signal at each cylinder

3.2 동시 실린더 제어

동시 실린더 제어 방식은 어느 실린더에서 노킹이 발생할 때 모든 실린더의 점화시기를 동시에 지각시키는 방식이다. 노킹이 발생할 때 점화시기 지각량은 크랭크 각도 1°~4° 범위에서 일률적으로 지각시키는 단순지각 방법과 노킹강도의 크기에 따라 지각량을 변화시키는 방법을 사용하였다. 노킹강도에 따른 지각량은 노킹강도와 노킹판정기준값을 이용하여 다음과 같이 결정하였다.

$$\text{Retard angle} = (KI - TV) / TV \times CV + MR$$

여기서,

KI : 현 사이클의 노킹 강도

TV : 노킹판정기준값

CV : 지각 수정량(2°)

MR : 최소 지각량(1°)

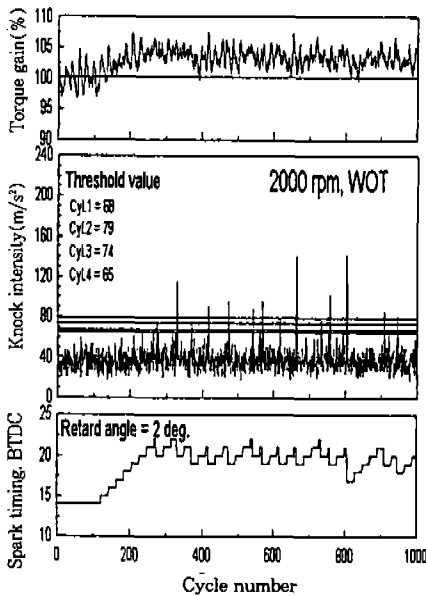
두 지각방법에서 노킹이 20 사이클동안 계속 발생하지 않을 경우 점화시기를 1° 진각시키도록 하였다. 점화시기는 각 엔진회전수에서

ECU에 저장된 기준점화시기와 MBT 점화시기 사이를 제어 범위로 하였다. 노킹제어는 1000 사이클에 걸쳐 이루어졌으며 처음 100 사이클은 기준점화 시기를 유지하도록 하였다.

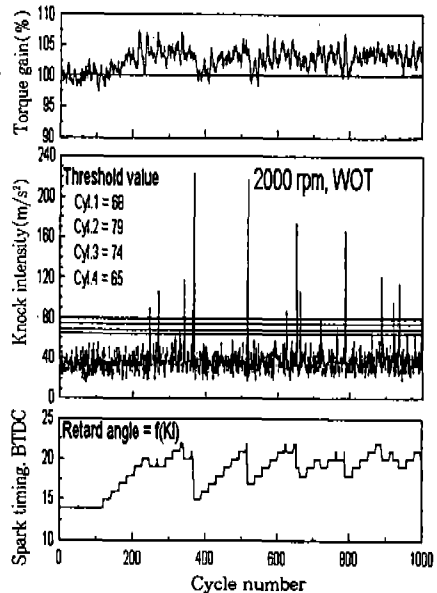
Fig.5는 2000rpm에서의 실험 결과이다. 기준점화시기에서 점화시기가 진각함에 따라 토오크는 향상되며 MBT 점화시기 근방에서 노킹 발생에 따라 점화시기가 지각되어 연속적인 노킹의 발생을 억제시킨다. 노킹강도에 따라 지각량이 변하는 경우 강한 노킹 발생시 점화시기가 크게 지각되며 이에 따라 노킹이 일정 기간동안 발생하지 않으나 토오크가 급격히 떨어지는 현상이 나타난다.

3.3 개별 실린더 제어

개별 실린더 제어방식은 어느 실린더에서 노킹이 발생될 때 모든 실린더의 점화시기를 동시에 지각시키는 동시 실린더 제어방식과는 달리 노킹이 발생한 실린더의 점화시기만을 지각시키는 방법이다. 따라서, 동시 실린더 제어방



(a) retard angle is constant



(b) retard angle is proportional to knock intensity

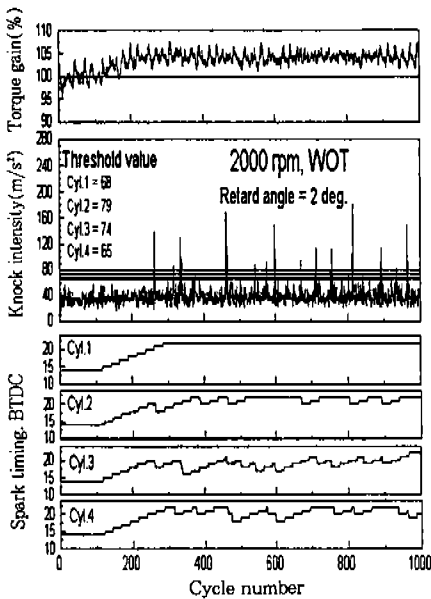
Fig.5 Results of simultaneous knock control

식을 사용할 경우에 노킹이 발생하지 않는 실린더까지 지각시킴으로써 발생하는 토오크의 손실을 방지할 수가 있다.

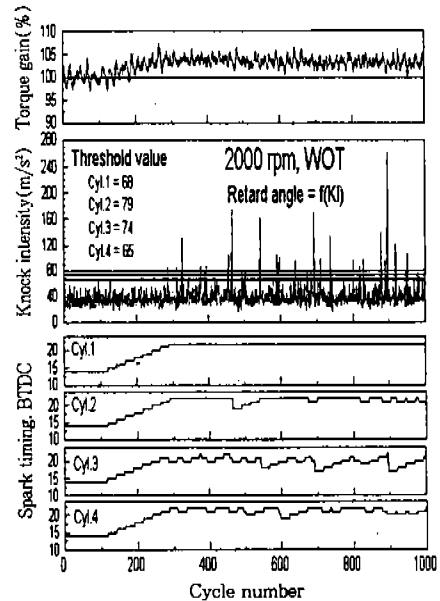
Fig.6은 2000rpm에서의 실험 결과이다. 각 실린더는 노킹발생에 따라 개별적으로 점화시기가 제어되기 때문에 동시 실린더 제어방식의 경우보다 점화시기가 MBT 점화시기에 많이 접근하여 엔진 토오크가 다소 향상됨을 알 수 있다. 그러나 전체 노킹발생빈도는 동시 실린더 제어방식에 비해 약 2배 정도 많이 발생한다. 사이클에 따른 토오크의 변화를 보면 동시 실린더 제어방식에서는 점화시기가 크게 지각될 때 급격한 감소 현상을 보였지만 개별 실린더 제어방식에서는 한 실린더의 점화시기가 크게 지각되더라도 나머지 실린더의 점화시는 그대로 유지되기 때문에 큰 변화가 없다.

동일한 실험조건에서 개별 실린더 제어방식과 동시 실린더 제어방식을 이용하여 구한 평균토오크 이득 및 노킹발생횟수의 비교 결과를 Fig.7와 Fig.8에 나타내었다. 점화시기 지각량

에 상관없이 평균토오크는 개별 실린더 제어방식의 경우가 동시 실린더 제어방식의 경우보다 향상되며 점화시기 지각량이 클 수록 개별 실린더 제어방식의 효과가 우수함을 확인할 수 있다. 즉, 동시 실린더 제어방식의 경우는 점화시기 지각량이 1°에서 2°로 될 때 평균토오크의 이득이 약간 감소하다가 2°에서 3°로 증가할 때 급격히 감소하는 경향을 보이는데 개별실린더 제어방식에서는 점화시기 지각량이 1°에서 4°로 변하는 동안 평균토오크의 이득은 서서히 감소한다. 두 제어방식의 토오크 이득의 차이가 가장 큰 점화시기 지각량 4°일 때 개별 실린더 제어방식은 동시실린더 제어방식보다 약 1% 정도 토오크 증가가 높다. 노킹 강도에 다른 지각방법의 결과에서도 개별 실린더 제어방식이 동시 실린더 제어방식에 비해 약 0.3%의 토오크 향상이 있음을 알 수 있다. 개별 실린더 제어방식의 경우 평균토오크 이득은 단순점화시기 지각량이 1°일 때 보다는 작고 2° 일 때 보다는 큰 값을 가진다. 노킹발생



(a) retard angle is constant



(b) retard angle is proportional to knock intensity

Fig.6 Results of individual knock control

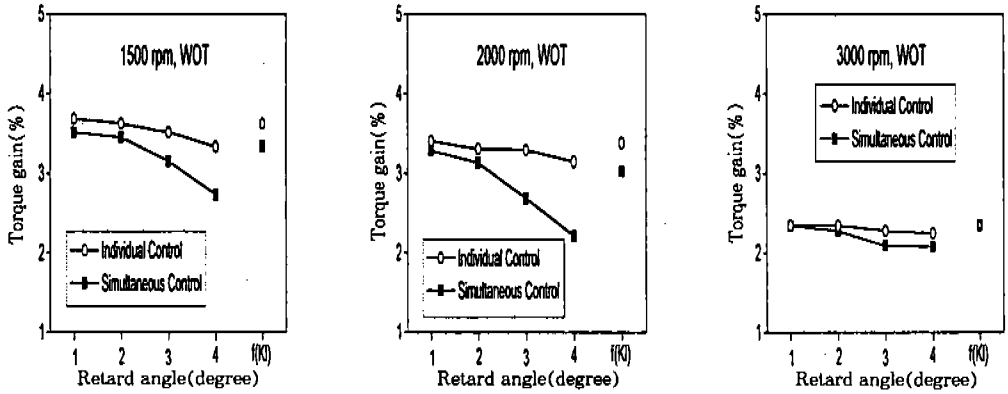


Fig.7 Comparison of torque gain for simultaneous and individual cylinder control

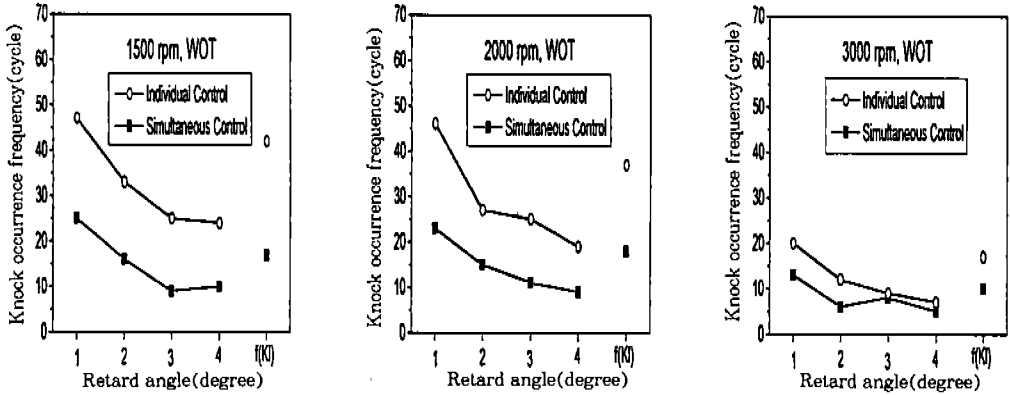


Fig.8 Comparison of knock frequency for simultaneous and individual cylinder control

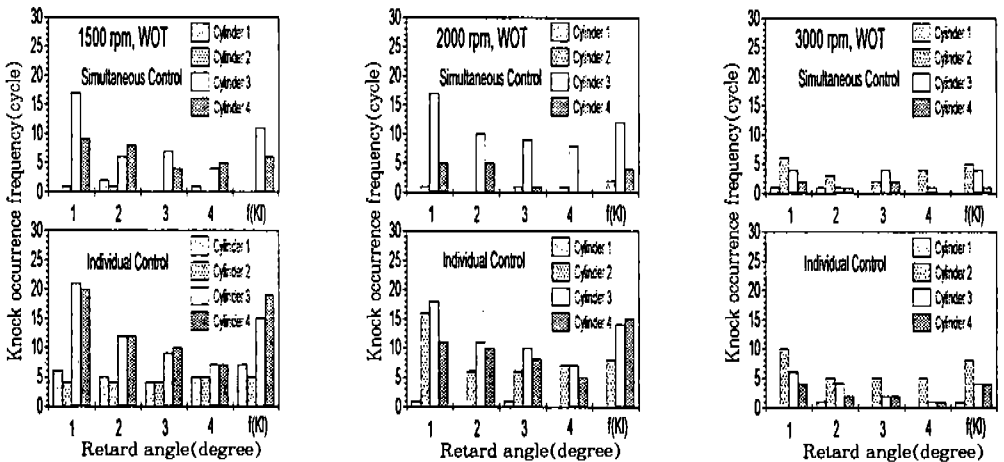


Fig.9 Comparison of knock frequency for each cylinder

횡수는 1000 사이클동안 실험하는 동안에 노킹이 발생한 사이클의 수이다. 전반적으로 개별 실린더 제어방식의 경우는 동시 실린더 제어방식의 경우보다 약 2배 정도로 노킹이 자주 발생하며 점화시기 지각량이 증가함에 따라 노킹발생횟수는 감소함을 알 수 있다. 노킹강도에 따른 지각방법의 경우는 단순점화시기 지각량이 1°와 2°의 중간 정도의 노킹발생횟수를 갖는다. 각 실린더 별 노킹발생횟수의 분포는 Fig.9와 같다. 동시실린더 제어방식의 경우 노킹발생확률이 비교적 큰 3번 실린더에서 노킹이 가장 많이 발생하며 결국 점화시기의 변화도 주로 3번 실린더의 노킹 발생에 의해 움직여지는 것을 알 수 있다. 개별 실린더 제어방식의 경우는 4개 실린더마다 점화시기가 개별적으로 제어되어 각각 노킹이 발생할 때까지 진각됨으로 인해 비교적 4개 실린더에서 골고루 노킹이 발생하는 경향을 나타낸다.

4. 결 론

본 연구에서는 4기통 스파크 점화기관을 대상으로 실린더 블록 진동 신호를 이용한 노킹 제어시스템을 개발하여 노킹 발생 여부에 따라 모든 실린더의 점화시기를 동시에 조절하는 동시 실린더 제어방식과 각 실린더의 점화시기를 개별적으로 조절하는 개별 실린더 제어방식을 사용하여 노킹의 발생을 억제하고 엔진의 출력을 향상시키고자 하였다. 실험 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 실린더별로 전달 경로의 차이를 고려한 노킹 판정 기준값을 설정하여 정확한 노킹 판정이 가능하였다.
- 2) 동시 실린더 제어방식에 비해 개별 실린더 제어방식은 노킹제어를 실린더별로 독립적으로 행하기 때문에 다른 실린더의 영향을 받지 않으며 불필요한 점화시기 지각이 없어 토오크 이득이 증가하였다. 또한 지각량이 클 경우 동시 실린더 제어방식에서 발견되는 급격한 토오크의 손실이 제거되었다. 노킹발생빈도는 개별

실린더 제어방식의 경우가 동시 실린더 제어방식에 비해 약 2배 정도 많이 발생하였다.

- 3) 점화시기 조절에 의한 노킹제어를 통해 1500rpm에서 3000rpm까지, 전개도 조건에서 엔진 토오크를 약 3%정도 향상시킬 수 있었다.

참 고 문 헌

1. Y. Boccadoro, T. Kizer, "Adaptive Spark Control with Knock Detection", SAE Paper 840447, 1984.
2. K. P. Schmillen, M. Rechs, "Different method of Knock Detection and Knock Control" SAE Paper 910858, 1991.
3. Heinz Decker, Hans-Ulrich Gruber, "Knock Control of Engines—A Comparison of solutions and Techniques, with Special Reference to future European Emission Legislation", SAE Paper 850298, 1985.
4. 김연준, 고상근, "노크 센서를 이용한 점화시기 피드백 제어에 관한 연구", 자동차공학회지, Vol.14, pp. 61~67, 1992.
5. K. M. Chun, K. W. Kim, "Measurement and Analysis of Knock in a SI Engine using the Cylinder Pressure and Block vibration Signals", SAE Transactions, Vol. 103, pp. 56~62, SAE 940146, 1994.
6. 함윤영, 전광민, 장광수, "실린더내 블럭 진동 신호를 이용한 스파크 점화 기관의 노킹 제어", '94 한국자동차제어 학술회의 논문집, Vol. 1, pp. 142~147, 1994.
7. 함윤영, 이재형, 전광민, 장광수, "실린더 블럭 진동 신호를 이용한 스파크 점화기관의 단순 노킹 제어", 한국자동차공학회 추계학술대회 논문집, pp. 305~311, 1994.
8. 이재형, 함윤영, 전광민, 장광수, "퍼지 제어를 이용한 스파크 점화기관 노킹 알고리즘 개발", 대한기계학회 논문집, Vol. 1,

pp. 856~861, 1995.

9. Y. Y. Ham, K. M. Chun, J. H. Lee, K. S. Chang, "Spark-Ignition Engine Knock Control and Threshold Value Determination", SAE Paper 960496, 1996.