

가솔린 엔진에서 급가속 운전시 노킹 측정 및 분석

Measurement and Analysis of Knock for Rapid Throttle Opening in SI Engines

이종화*, 박경석**, 김현용***
Jonghwa Lee, Kyunguk Park, Hyunyong Kim

ABSTRACT

In this study, investigation of transient knock characteristics in a spark-ignition engine has been carried out. The universal knock threshold values were found by a DFDD method and a NSDBP method which is a non-dimensional version of the SDBP method. Also modified NSDBP method could be used for transient knock detection.

In a commercial ECU, spark timing was retarded from the steady-state spark timing during rapid throttle opening to avoid uncomfortable feeling and knock. Knock usually occurred just after the start of rapid throttle opening when spark timing was set as values for the steady state condition. We found that air/fuel ratio deeply involved with the knock during transient condition. Due to the difference of initial heat release rate, knock occurred more easily at rich air/fuel ratio than at lean air/fuel ratio.

주요기술용어 : Knock intensity(노킹강도), Threshold(노킹 판단 기준값), Back-ground noise(배경 잡음), Rapid throttle opening(급가속), Knock retard(급가속 점화시기 지각)

Nomenclature

λ : air excess ratio($(A/F) / (A/F)_s$)
NSDBP : Normalized Sum of Divided Band

Passed Filter knock intensity
DFDD : Degree base first derivative
differential knock intensity (bar/deg.)

Subscripts

-
- * 정회원, 아주대학교 기계 및 산업 공학부
 - ** 정회원, 금오공과대학교 기계공학부
 - *** 정회원, 아주대학교 대학원

1. 서론

엔진의 노킹은 미연발단가스의 자발화나, 동시 다발적인 점화로 급격한 열발생을 일으키는 것으로 실린더 내부의 열경계층을

파괴하여 열손실을 증가시키며 또한 고압의 압력파에 의해서 피스톤, 밸브 등 엔진 부품을 파손시키게 된다. 따라서 노킹을 방지하기 위하여 정확한 노킹측정 및 엔진제어 방법이 연구되고 있다. 급가속 운전시 빠른 트로틀 개방으로 인하여 흡기압이 급격히 상승되고 이에 따라 급격한 부하의 증가 및 공연비의 변동등으로 정상상태의 점화시기로 설정되어 있을 경우 급가속 노킹이 발생하게 된다. 따라서 상용 ECU에서는 급가속 노킹방지 및 운전성 향상을 위하여 정상상태의 점화시기보다 지각시키게 된다. 이러한 급가속 점화지연으로 노킹은 방지할 수 있으나 토크의 손실을 가져오게 된다. 따라서 급가속으로 인한 노킹 방지와 차량에서 충격(shock) 등의 운전성 문제를 방지하면서 최적의 토크를 얻을 수 있는 적절한 점화시기설정이 필요하며 이러한 점화시기 설정을 위해 급가속 운전 기간동안의 정확한 노킹 측정 및 판단 방법이 필요하다. 기존의 연구⁶⁾는 트로틀과 엔진회전속도를 동시에 제어하여 연속적으로 엔진 회전속도를 변화하면서 각 엔진회전속도별로 설정되어 있는 노킹 판단 기준값을 이용하여 노킹을 측정하였다. 그러나 가속도 센서는 설치위치와 부하의 변화에 많은 영향을 받기 때문에 먼저 실험을 통하여 노킹판단 기준값을 설정해야하는 번거로움이 있다. 즉 가속도 센서는 엔진블록의 설치 위치에 따라 특정 주파수가 증폭되거나 감쇄된다.⁵⁾ 따라서 본 연구에서는 급가속 운전시 가속도 신호를 이용하여 설치 위치나 부하의 영향을 배제하고 실험을 통하여 미리 노킹 판단 기준값을 설정하지 않고 매 사이클마다 노킹판단 기준값을 설정하여 노킹을 판단 할 수 있는 알고리즘을 연구하였으며 신뢰성을 높이기 위하여 압력신호로부터 측정된 결과와 비교 분석하였다. 실험 방법은 저속 급가속 운전에서 노킹이 많이 발생하기 때문에 엔진회

전속도는 별 변화가 없으나 부하만이 급격히 변화하는 조건 즉, 엔진회전속도를 고정하고 트로틀을 급격히 열어 급가속 운전상태를 모사하여 실험하였다. 또한 급가속 운전시 노킹 발생에 영향을 줄 수 있는 공연비 변화에 대한 영향을 연구하였다.^{1)~3)}

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

실험에 사용한 엔진은 DOHC, 4기통, 2000cc, MPI(Multi Point Injection)가솔린 엔진이고, EC(eddy current) type의 동력계를 사용하여 회전속도를 제어하였고 트로틀 바디에 스텝 모터를 설치하여 부하를 제어하였다. 점화시기 및 공연비 등의 엔진 운전조건 변경을 위하여 별도의 제어장치(PC-ECU)를 사용하였으며, 노킹 발생에 따른 각종 신호를 계속 분석하기 위하여 실린더 압력센서, 가속도센서를 설치하였다. 실험 장치에 대한 개략도는 Fig. 1과 같다.

압력 측정용 센서로는 Kistler 사의 제품(6051B, 7.47 pC/bar)을 사용하였으며, 4번 실린더에 장착(플러쉬 마운팅)하였다. 센서면에 가해지는 열유속변화에 따른 드리프트를 줄이기 위해서 냉각수 통로를 지나가도록 설치하였으며, 고주파의 노이즈를 제거하기 위해서 전하 증폭기에서 30kHz Low Pass Filter를 통과시켜 측정하였다.

가속도센서로는 Kistler 사의 제품(8614A500M1, 3.42 mV/g)을 사용하였으며 가진기를 이용하여 주파수 대역에 대한 계인을 검증하였다. 가속도센서의 설치 위치는 실린더 헤드로부터 2cm 아래의 3~4번 실린더 중간부분에 붙여서 실험하였다.

실린더 압력 신호와 가속도는 PC based Data Acquisition System에 의해 동시에 기록하였으며, 사용한 A/D변환기(DT2833)

의 변환 능력이 최대 12bit 250kHz였으므로 각 채널 당 샘플링 주파수(Sampling Frequency)를 노킹 주파수의 알리아징(aliasing) 현상을 배제하기 위하여 100kHz로 설정하여 2채널(압력, 가속도)을 동시에 측정하였다. 경향의 분석 및 통계적 처리 등을 위하여 각 엔진 회전속도 별로 100사이클 정도의 연속적인 자료를 취하여 분석하였다.

2.2 실험방법

급가속시 발생하는 노킹을 해석하기 위하여 엔진 회전속도 2000rpm에서 정속도(Constant speed-mode)로, 급가속 시간은 사람이 0° → 90°로 트로틀을 변환하는데 최소 약 0.2초가 걸리므로 급가속운전시 트로틀 열림 속도를 450deg/sec 속도로 하였다. 이때 부하는 0에서부터 전부하(full load)까지 즉 흡입 압력이 1bar 정도지점까지 트로틀을 급격히 열어 실험하였다. 또한 트로틀이 열리는 위치에 따라 측정하는 실린더의 사이클별로 공연비가 바뀌게 되므로 항상 일정한 위치(BTDC 180°)에서 트로틀을 열어서 실험하였다.

상용 ECU의 경우 급가속 판단 기준은, 트로틀 열림량의 급격한 변화에도 엔진 회전속도의 변화가 별로 없는 경우를 급가속으로 판단하여 개회로 제어(open-loop control)을 하게 된다. 따라서, 급가속이후 노킹을 발생 시키기 위하여 실험시 급가속 후 임의의 점화시기로 보정하였다. 따라서 PC-ECU를 사용하여 트로틀 값이 급변하기 시작하면 다음 사이클부터 임의의 미리 정해진 점화시기를 주어 노킹을 발생시켰다.

또한 급가속으로 인하여 공연비가 급격히 변화하기 때문에 공연비의 변화가 노킹에 미치는 영향을 알아보기 위하여 회전속도는 2000rpm, 전부하 조건으로 흡기압을 맞추었

고, 공기과잉률을 0.8에서 1.2 까지 0.1씩 변화시키면서 노킹이 발생하는 점화시기까지 2°씩 진각하며 노킹을 측정하였다.

3. 실험 결과와 고찰

3.1 압력실패 및 가속도 신호

해석방법

노킹 측정에 사용한 방법은 압력신호를 이용하여 해석한 경우 압력신호를 대역통과 필터링 후 엔진회전속도로 미분하고 최고값 및 최소값의 차이로 정의(DFDD 법)하여 노킹강도가 3bar/deg 이상 발생하면 노킹으로 판단하였다. 또한 가속도 신호의 경우 노킹에 직접적인 영향이 아니기 때문에 노이즈의 영향을 많이 받는다. 따라서 가속도신호 중 노킹 주파수 대역의 성분만을 취하여 노킹강도 최고값 및 최소값의 차이들을 더하여 노이즈 성분을 최소로 한 새로운 노킹강도로 정의 하였다(SDBP 법). 또한 가속도 신호의 경우 엔진회전속도나 부하에 따라 노킹 판단 기준 값이 변화하기 때문에 연속적인 100 사이클을 이용한 통계적인 방법(NSDBP 법)을 이용하여 노킹 판단 기준값을 3으로 설정하여 노킹강도가 3 이상 발생하면 노킹으로 판단하였다.⁴⁾

3.2 급가속 운전시 현상 및 노킹강도 측정

Fig. 2 에는 급가속 운전시 상용 ECU-mode 일 때 각 사이클별 노킹 강도를 나타내었다. 그림에서 노킹 방지를 위하여 급가속 이후 점화시기가 급격히 지각된 것을 볼 수 있다. 이와 같이 점화시기의 급격한 지각으로 인하여 압력신호를 이용하여 해석한 결과, 압력신호의 해석인 경우 노킹의 직접적인 영향을 측정하는 것이기 때문에 노킹이 발생하지 않을 경우 고주파 성분이 없기 때문에 부분부하와 전부하 조건에 따라 큰 노킹강도 값이 나타나지 않는다.

하지만 가속도 신호를 이용하여 해석한 경우 가속도 신호는 노킹의 직접적인 영향이 아니기 때문에 부하의 변화의 영향이 많이 포함 되어 부하증가에 따라 노킹 강도들이 증가하는 것을 볼 수 있다.

이와 같이 가속도 신호를 이용하여 급가속 운전 기간동안 노킹을 측정하려할 경우 각 조건이 급변하여 배경잡음(back-ground noise)의 크기가 변화하므로 부분 부하와 전부하(WOT)조건 모두를 포함하여 사용할 수 있는 해석방법이 필요하다. 따라서 가속도 신호를 이용하여 급가속시 노킹을 측정할 경우 흡기압 비례방식으로 노킹 강도들을 무차원하여 일정한 값(노킹강도 3)으로 노킹을 측정하였다.

3.3 정상상태에서 공연비 변화가

노킹에 미치는 영향

정상상태와 비교하여 급가속 운전기간동안 노킹에 영향을 줄 수 있는 변수는 여러 가지가 있을 것이다. 예를 들어 전부하(WOT) 정상상태일 때와 급가속 직후 흡기압이 1bar가 된 경우의 사이클들을 비교한다면, 잔류가스량, 난류강도, 체적효율, 공연비 등이 차이가 날 것이다. 그 중에 노킹이 발생하는 데 가장 큰 영향을 주는 인자는 공연비 일 것으로 판단된다. 따라서, 급가속 운전상태의 노킹을 해석하기 위하여 공연비에 따른 노킹 발생률에 대한 연구가 선행 되어져야 한다.

공연비에 따른 노킹을 알아보기 위하여 각 공기과잉률에 대하여, 엔진 회전속도와 흡기압을 고정하고 점화 시기를 노킹이 발생할 때까지 2° 씩 진각하면서 노킹을 측정하였다. Fig. 3에 각 공기과잉률에 따른 노킹 발생률을 도시하였다. 이때 발생률을 구하기 위해 사용한 해석법은 압력 신호를 이용한 DFDD 해석법이며 노킹 판단 기준값은

3으로 하였다. 실험 결과는 공기과잉률 0.9 일 때 노킹이 가장 먼저 발생하였으며, 다음으로 1.0, 1.1, 0.8, 1.2 순서로 노킹 발생 시기가 늦어지는 것을 알 수 있다.

Fig. 4 에는 각 공기과잉률별로 사이클별 실린더 최고압의 평균값을 점화시기의 함수로써 나타내었다. 노킹이 발생하였을 경우 최고압이 노킹으로 인해 너무 높게 해석될 수 있는 것을 방지하기 위하여 5kHz 저역 통과 필터링을 한 후 데이터 중 최고값을 취하였다. 동일한 점화시기의 경우, 공기과잉률 0.9일 때 최고압이 가장 높게 나타났다. 즉 공기과잉률 0.9에서 연소실내의 온도가 다른 공기과잉률에서 실험한 데이터보다 가장 클 것이라 판단된다. 따라서, 노킹은 미연 탈탄가스의 자발화이기 때문에 공기과잉률 0.9에서 연소실 내의 온도가 가장 높아 노킹이 쉽게 일어날 환경이 조성되어 노킹이 가장 먼저 발생한 것으로 판단된다. 그러나, 공기과잉률 0.9과 0.8 일때의 연소실 최고압을 비교하여 보았을 때 동일 점화시기에서 연소실 최고압은 큰 차이가 나지 않는 것을 볼 수 있다. 하지만, 노킹 발생률에서는 큰 차이를 나타내었다. 이는 연료량의 증가로 인한 연소하지 않은 연료가 흡열부(heat sink)으로써 연소실 내의 온도를 떨어뜨리고 연료가 실린더내에서 기화 할 때 연료의 기화 잠열이 연소실내의 온도를 떨어뜨렸기 때문인 것으로 판단된다.

또한, 너무 농후한 경우 미연탄화수소가 자발화 할 수 있는 산소의 양이 너무 적기 때문에 노킹이 적게 발생한 것으로 판단된다. 따라서, 연소실 내의 최고압이 동일하다 하더라도 공연비 변화에 따라 노킹 발생률이 차이가 나는 것을 알 수 있다.

이와 반대로 공연비가 희박하게되면 동일한 점화시기에서 최고압이 떨어지기 때문에 연소실 내의 온도가 상대적으로 낮게 되어 노킹 발생 확률이 적어지게 된다. 또한 미

연말단가스 속에 포함 되어 있는 미연탄화수소의 양이 상대적으로 공기과잉률 1 보다 적으므로 노킹이 발생할 수 있는 확률이 더 적어 지는 것으로 판단된다.

Fig. 4에서 실린더내의 최고압이 40 bar 이상인 경우를 살펴보면 Fig.3 에서 모든 공기과잉률 영역에서 대부분 노킹이 발생하였다. 그러나, 실린더내의 최고압이 비슷하다고 하여도 노킹 발생률에서는 차이를 나타내었다. 따라서, 노킹은 연소실 내의 연소압이 일정한 값 이상 발생하게 되면 노킹이 발생하며 노킹 발생률은 공연비에 영향을 많이 받는다는 것을 알 수 있다.

이상의 결과로부터 급가속이후 점화시기를 조절하여 노킹을 방지하려할 때 실린더별로 공연비를 고려하여 점화시기를 조절해야 된다고 판단된다.

3.4 급가속 운전이후 회박 및 농후한 공연비가 노킹에 미치는 영향

정상상태에서 점화시기를 고정하고 공연비만을 변화시켜 실험하였을 때 농후한 경우에만 노킹이 발생하였다. 따라서, 노킹을 발생시키지 않으려면 농후한 혼합기의 경우 점화시기를 지각하여야하고 희박한 혼합기의 경우 점화시기를 진각하여도 노킹은 발생하지 않을 것이라 판단된다. 따라서, 급가속 직후 연료 분사량을 농후한 혼합기 또는 희박한 혼합기로 고정하고 점화시기를 노킹이 발생하지 않는 운전조건까지 진각 또는 지각하여 실험하였다.

이때 해석범으로는 압력신호의 경우 부하에 상관없는 DFDD법을 사용하였고 가속도 신호의 경우 압력신호와 가장 상관성이 깊은 SDBP 법을 사용하였다. 하지만 이때 가속도 신호 해석의 경우 부하의 영향을 받기 때문에 부하에 따른 영향을 배제하기 위하여 흡기압 비례방식으로 노킹강도를 무차원

하여 나타내었다. Fig.5 ~ 6에서 부하변화에 상관없이 노킹이 발생하지 않을 경우 일정한 노킹강도를 가지는 것을 볼 수 있다.

Fig. 5 에는 급가속이후 공연비가 희박한 경우 공기 과잉을 1.1에 가깝도록 연료를 분사하였고 공연비가 희박하기 때문에 점화시기를 노킹이 발생하지 않는 점화시기까지 진각 시켰다. 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 공연비가 일정해진 이후에야 노킹이 발생하였다. Fig. 6 에는 급가속이후 공연비가 농후한 경우로 공기과잉률 0.9에 가깝도록 연료를 분사하였고 공연비가 농후하기 때문에 점화시기를 노킹이 발생하지 않는 점화시기까지 지각 시켰다. 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 점화시기를 지각하여 급가속 운전 초기에 노킹이 발생하지 않았다.

Fig. 7에는 Fig. 6 과 Fig. 5 에서 급가속 전 사이클과 이후 11 사이클만의 도시평균 유효압력을 나타내었다. 급가속이후 농후한 혼합기로 점화 시기를 지각한 경우와 희박한 혼합기로 점화 시기를 진각한 경우, 도시평균 유효 압력의 차이가 적어지는 것을 볼 수 있다.

이상의 결과로부터 급가속이후 공연비를 정확히 제어한다면, 즉 약간 희박하게 제어하면서 점화시기를 진각하면 급가속이후 공연비를 농후하게 제어하면서 점화시기를 지각하는 것과 비슷한 토크를 나타낼 것이라 판단된다. 또한 급가속일 때 공연비를 희박하게 제어하는 쪽이 공해문제(미연 HC, CO)에서도 이득이 있을 것이라 판단된다.

4. 결 론

1. 급가속 운전 구간에서 압력신호를 이용하여 노킹 강도를 계산 하였을 때, 부하 변화에 대하여 노킹 강도의 크기는 큰 변화를 보이지 않았다. 이는 압력신호의 경우, 노킹의 직접적인 영향을 해석하는 것이기 때문

에 부하의 변동에 영향을 받지 않는 것이라 판단된다. 따라서, 엔진 정상 상태운전의 경우에 노킹 해석에 사용한 방법과 기준을 급가속 운전 조건에서도 동일하게 적용할 수 있었다.

2. 급가속 운전 구간에서 가속도신호를 이용하여 노킹을 측정할 경우, 부하 변동으로 인하여 배경잡음(back-ground noise)이 변화하므로 노킹 판단 기준값이 변화하는 것을 확인할 수 있었다. 그러므로, 급가속구간 즉 배경잡음(back-ground noise)이 연속적으로 변하는 구간에서는 각 사이클별로 배경잡음(back-ground noise)의 크기를 구하여 무차원화 노킹 강도를 구하는 방법이 필요하다. 따라서, 부하에 따른 흡기압 비례방식 계수를 사용하여 노킹 판단 기준값을 설정할 수 있었으며, 그 결과 압력신호로 해석한 결과와 잘 일치하는 것을 확인할 수 있었다.

3. 엔진 운전조건 중 공연비가 노킹 발생률에 미치는 영향을 연구한 결과, 공연비가 농후한 조건이 희박한 조건보다 노킹 발생률이 크게 나타났다. 이는 공연비가 농후한 경우 연소 초기의 열발생량이 커서 미연 말단가스의 온도를 상승시키므로 자발화가 쉽게 발생할 수 있는 조건이 형성되었기 때문으로 판단된다.

4. 급가속 구간에서 발생하는 노킹은 급가속 운전시의 공연비와 점화시기에 의해 영향을 받았다. 동일한 공연비로 제어될 경우 점화시기를 진각시킬 때, 동일한 점화시기로 제어할 경우 공연비가 농후할 때 노킹이 많이 발생하였다. 급가속 이후 공연비를 적절히 제어한다면, 일반적으로 급가속시 노킹방지를 위하여 행해지는 점화시기 지각(knock retard)을 줄일 수 있을 것이다. 급가속 구간에서의 공연비, 점화시기 제어의 최적화는 효율 및 배출물 저감에 기여할 수 있을 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 현대자동차(주) 지원에 의하여 수행되었습니다. 도움을 주신 관계자 여러분께 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. John B. Heywood, "Internal Combustion Engine Fundamental", Mc-Graw Hill, 1988.
2. B.Stiebels,m.Schreiber, and A. Sadat Sakak, "Development of a New Measurement Technique for the Investigation of End-Gas Autoignition and Engine Knock",SAE 960827.
3. J.Pan and C.G.W. Sheppard, "A Theoretical and Experimental Study of the Modes of end-gas Autoignition Leading to Knock in a SI Engine", SAE paper 942026,1994.
4. J H Lee, S H Hwang, J S Lim, D C Jeon, Y S Cho, "A New Knock Detection Method using Cylinder Pressure, Block Vibration and Sound Pressure Signals from a SI Engine", SAE 981436, 1998.
5. James W. Forbes, Kevin R. Calstrom, and William J. Graessley "Engine Knock Control Via Optimization of Sensor Location", SAE 951237, 1995.
6. Baik, S. H. and Chun, K. M. "A study on the transient knock control in a spark-ignition engine",SAE 981062, 1998.

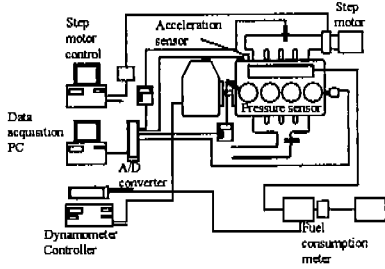


Fig.1 Schematic diagram of test engine

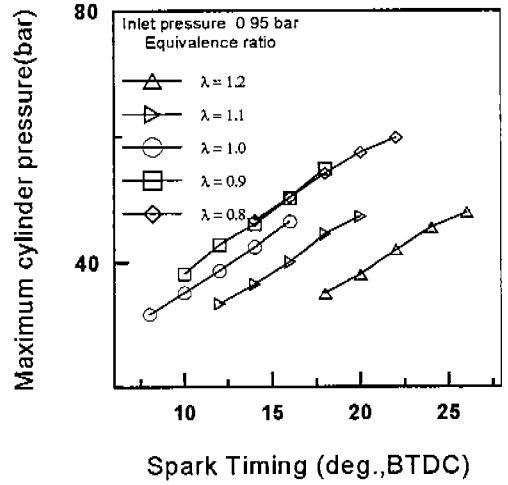


Fig.3 Knock occurrence percentage for different equivalence ratio at 2000 rpm

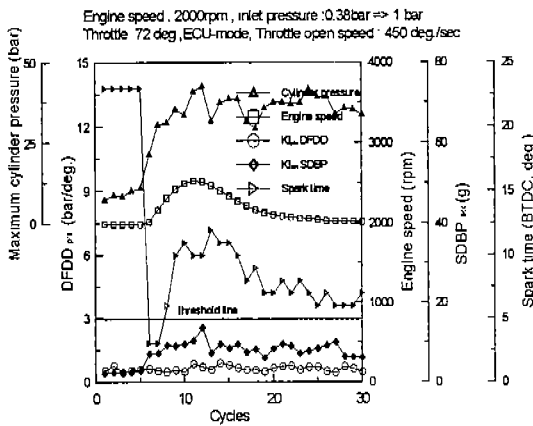


Fig.2 Knock intensity of pressure(DFDD) and acceleration data (SDBP) for rapid throttle opening

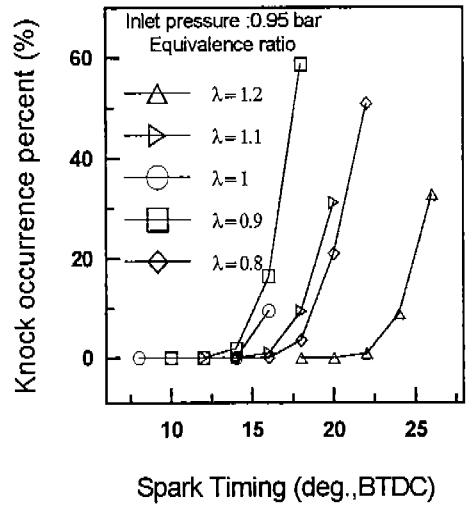


Fig.4 Maximum cylinder pressure for different equivalence ratio at 2000 rpm

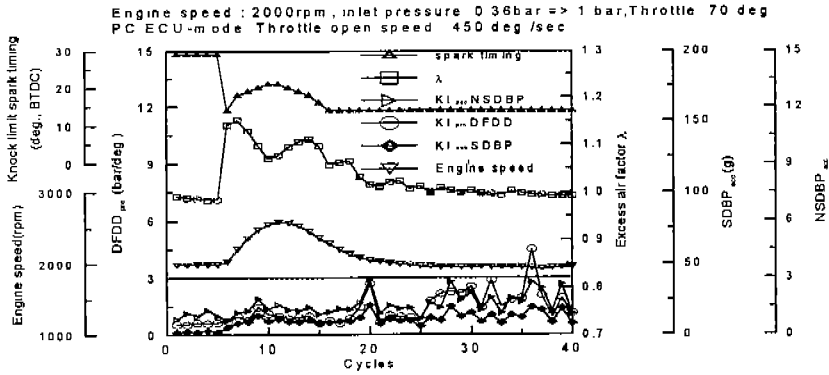


Fig. 5 Knock intensity of pressure (DFDD) and acceleration data (SDBP,NSDBP) for rapid throttle opening

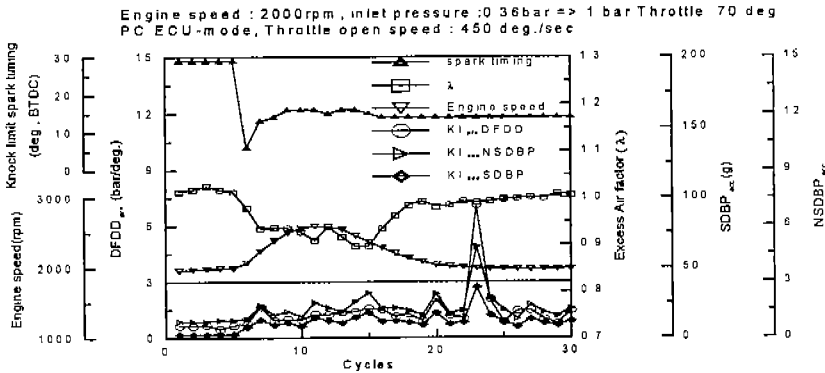


Fig. 6 Knock intensity of pressure (DFDD) and acceleration data (SDBP,NSDBP) for rapid throttle opening

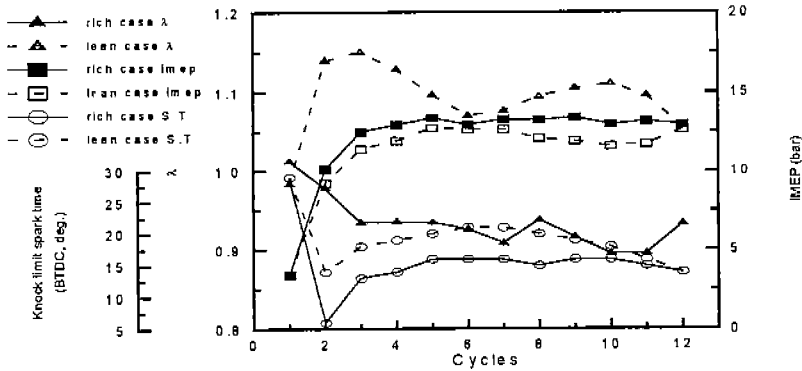


Fig. 7 Comparison of IMEP, knock limit spark time and excess air ratio (λ) at rapid throttle open