

〈논 문〉 SAE NO. 96370024

크랭크축 각속도의 변동을 이용한 실화 판정(1)

Misfire Detection by Using the Crankshaft Speed Fluctuation(1)

배 상 수,* 임 병 진,** 김 세 응,*** 김 응 서****
 S. S. Pae, B. J. Lim, S.W.Kim, E. S. Kim

ABSTRACT

The crankshaft speed fluctuation was measured every crank angle. In order to detect the misfire, the engine and the dynamometer were considered as a single-degree of freedom system. From this modeling, the detection criteria were derived and examined by the engine test. By this method the single misfire or multiple misfires can be detected. Even on the condition of low load and high speed than 3000rpm, where it was difficult through the other methods, misfire detection was carried out steadily. From this results, the method proposed by this paper proved reasonable.

주요기술용어 : Misfire Detection(실화 판정), Crankshaft Speed Fluctuation(크랭크축 각속도의 변동), SDOF modeling(1자유도 모델링), Integrated Pressure Torque(압력토크 적분), Roughness Index(안전성 인자)

기 호 설 명

로마문자

B : 실린더 내경 (Bore)

J : 관성 모멘트

k_s : $\left(\frac{\dot{s}}{\theta}\right)$

P : 압력
 S : 행정 길이
 T_m : 모터링 토크
 T_r : 부하 토크
 T_f : 마찰 토크
 T : 토크
 T_m^* : 모터링 토크의 적분값
 T_p^* : 압력 토크의 적분값
 T_w^* : 관성 토크의 차
 T_r^* : 부하 토크의 적분값
 T_f^* : 마찰 토크의 적분값
 T_{motor} : 모터링 시험에 의한 마찰 토크

* 정회원, 서울대학교 대학원 기계공학과

** 정회원, 서울대학교 터보 동력 기계연구소

*** 정회원, 금오공과대학교 기계공학과

**** 정회원, 서울대학교 공과대학 기계공학과

N : 기관 회전 속도

t : 시간

희랍문자

θ : 크랭크 각도

하첨자

atm : 대기 상태 (atmospheric state)

crank : 크랭크축 어셈블리

e : 배기

i : 흡기

j : 실린더 번호

p : 피스톤

I.C : 흡기밸브 닫힘

1. 서 론

가솔린 기관에 있어서 도시 공기 오염의 주된 요인인 NO_x, CO, HC 등의 오염물을 효과적으로 제거하기 위하여 산화-환원 촉매 장치가 사용되고 있는데, 이것의 성능은 자동차 배출물에 직접적으로 영향을 미친다. 이와 같은 차량의 배출물 제어 시스템의 성능을 감시하여, 배출물의 유해 성분을 최소화시키도록 만든 규정 중의 하나가 캘리포니아 대기 자원국(CARB)에서 정한 OBD II (on board diagnostics II)이며¹⁾, 실화 판정 항목을 포함하고 있다. 실화는 미연 탄화수소물의 배출을 근본적으로 증가시킬 뿐만 아니라, 산화-환원 촉매기내에 축적된 미연의 탄화수소는 산화-환원 촉매기의 온도를 상승시켜 치명적인 영향을 준다²⁾.

이러한 요구에 부응하기 위하여 실화 판정을 위한 기관 진단 방법들에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 이러한 연구 동향 중 연소에 의해 주기적인 가속, 감속을 하는 크랭크축의 각속도를 이용하는 방법이 다른 방법에 비해서 비용이 저렴하고 실차 적용시 특별한 개조없이 이용할 수 있기 때문에 가장 주목 받는 방법이다. 즉, 정상적인 각속도의 변동¹⁷⁾과 달리 실화가 발생하면, 그에 따라 각속도의 주기적인 변동에 변화가 발생하므로 이를 이용하여 실화를 판정한다. 이

방법은 다시 각속도의 통계적 처리에 의한 방법³⁾~⁶⁾과 동역학적 모델링에 의한 입력 인자로 각속도를 이용하는 방법^{7)~11)}으로 구별된다.

본 연구에서는 실화시의 각속도 특성을 파악하기 위하여 부하 및 회전속도를 변화시키면서 그 영향을 고찰하였다. 또, 각속도를 측정하여 압력 토크의 적분값을 구하고 이 값과 흡기 압력을 초기 조건으로 하여 폴리트로픽 과정으로 계산한 모터링시 압력 토크의 적분값과 비교하는 새로운 실화 판정 방법을 제시하였다. 그리고 이 방법의 타당성을 검증하기 위하여 기관 회전속도와 부하 및 실화 기동을 변화시키면서 실화 판정 결과를 고찰하였으며, 각속도로부터 구한 압력 토크의 적분값과 실제로 압력을 측정하여 얻은 압력 토크의 적분값을 서로 비교하여 각속도로부터 구한 압력 토크값이 실화 판정을 위하여 이용될 수 있음을 확인하였다. 또 실제로 기관 운전 안전성 인자를 정의하여 실화 판정에 적용하였다.

2. 실화 판정을 위한 이론적 해석

각속도의 신호만을 분석하여 얻은 파워 스펙트럼과 위상 이동(phase shift)을 이용하여 실화를 판정하는 방법^{3),6)}은 통계적이므로 기관이나 실화 조건에 따라서 달라져서 절대적인 기준에 의한 판정은 불가능하다. 또한 압력 토크 자체를 이용하는 방법¹⁴⁾도, 연소 주기마다 압력 토크를 구하기 위해서 각속도를 계산해야 되는데, 이는 이산 데이터의 미분이므로 기관 운전 조건에 따라 큰 영향을 받는다.

또한 측정된 각속도 변동에도 교란(noise) 성분이 포함되어 있으므로¹⁸⁾, 적분이 미분보다 이에 대한 영향이 적고 디지털 신호의 처리는 적분이 계산도 쉽고 정확하기 때문에 크랭크축 어셈블리에 대한 토크 평형 방정식인 (1)식을 적분하여 얻은 식을 이용하는 것이 더 유리하다. 즉,

$$\frac{d}{dt} \left[\frac{1}{2} J_{crank}(\theta) \dot{\theta}^2 \right] = -P_s - T_i \dot{\theta} - T_o \dot{\theta} \quad (1)$$

식 (1)을 시간 t 의 함수에서 크랭크 각 θ 의 함수로 변환하여 적분하며,

$$\frac{d}{d\theta} \left[\frac{1}{2} J_{crank}(\theta) \dot{\theta}^2 \right] \dot{\theta} = -P\dot{s} - T_r \dot{\theta} - T_f \dot{\theta} \quad (2)$$

$$\int_0^\theta \left[\frac{1}{2} J_{crank}(\theta) \dot{\theta}^2 \right] d\dot{\theta} = \int_0^\theta \left[-P\frac{\dot{s}}{\theta} - T_r - T_f \right] d\theta \quad (3)$$

$$\begin{aligned} & \frac{1}{2} J_{crank}(\theta) \dot{\theta}^2(\theta) - \frac{1}{2} J_{crank}(0) \dot{\theta}^2(0) \\ & = \int_0^\theta -Pk_s d\theta - \int_0^\theta T_r d\theta - \int_0^\theta T_f d\theta \quad (4) \end{aligned}$$

$$T_p^* = T_w^* + T_r^* + T_f^* \quad (5)$$

여기서,

$$T_p^* = \int_0^\theta -Pk_s d\theta = \int_0^\theta \left[-\frac{\pi}{4} B^2 \sum_j k_{s_j} (p_j - p_{alm}) \right] d\theta \quad (5a)$$

$$T_w^* = \frac{1}{2} J_{crank}(\theta) \dot{\theta}^2(\theta) - \frac{1}{2} J_{crank}(0) \dot{\theta}^2(0) \quad (5b)$$

$$T_r^* = \int_0^\theta T_r d\theta \quad (5c)$$

$$T_f^* = \int_0^\theta T_f d\theta \quad (5d)$$

여기서 마찰 토크의 적분값인 T_f^* 는 실화시에 는 기관을 각 회전속도별로 모터링시켜 측정한 모터링 마찰 토크 T_{motor}^* 로 근사시켜 생각할 수 있으므로 T_p^* 는

$$T_p^* = T_w^* + T_r^* + T_{motor}^* \quad (6)$$

로 표현될 수 있다.

여기서 부하 토크의 적분값, T_r^* 는 기관 실험에 의하여 측정하였고 T_{motor}^* 는 기존의 모터링 실험 데이터를 이용하였는데 실험한 대부분의 회전속도에서 다음의 식¹³⁾으로 변형시켜 계산한 값과 대체로 일치하였다.

$$T_{motor}^* = \int_0^\theta 0.11903 \left[97 + 15 \left(\frac{N}{1000} \right) + 5 \left(\frac{N}{1000} \right)^2 \right] d\theta \quad (7)$$

이렇게 계산한 압력 토크의 적분값을 실화시와 비교하여 실화 판정의 기준으로 삼았다. 이 때 실화시의 압력 토크인 모터링 토크의 적분값을 구하기 위하여 다음과 같은 가정으로 모터링시의 압력을 계산하였다.

- 1) 흡기 행정중의 실린더 내의 압력은 흡기 포트내의 압력 p_i 와 같으며 일정하다.
- 2) 배기 행정중의 실린더 내의 압력은 대기 압력 p_{alm} 과 같으며 일정하다.
- 3) 압축 행정과 폭발 행정 중인 실린더 내의 압력은 흡기 밸브가 닫힌 이후에 폴리트로픽 과정으로 압축 및 팽창된다. 즉,

$$p = p_{i,c} \left(\frac{V_{i,c}}{V(\theta)} \right)^n \quad (8)$$

여기서 $p_{i,c}$ 는 흡기 밸브가 닫힐 때의 실린더 내의 압력이며 흡기 압력 p_i 를 사용하였고, n 은 폴리트로픽 지수이며 공기만의 값을 사용하였다. 그리고 실제의 매 크랭크 각에 대한 각 기통의 모터링시 압력 계산을 위하여 실험에 사용한 기관의 밸브타이밍¹⁴⁾을 이용하였다.

그런데 Fig.1에서 보듯이 실화시의 연소실 압력은 위의 가정으로 계산된 모터링시의 압력과 차이가 적다. 따라서 본 연구에서는 이렇게 각속도로부터 계산한 T_p^* 값과 흡기 압력으로부터 계산된 모터링시의 압력 토크의 적분값인 T_{motor}^* 값의 최대값을 연소 주기인 180° 마다 구하여 그 비율을 이용하여 실화를 검출하고 실화 기통을 판별하였다.

3. 실험 장치 및 방법

3.1 실험 장치

크랭크축 각속도로부터 연소실내 실화 정보를 얻기 위하여 4개의 실린더내 압력, 크랭크축 각속도, 기관 부하를 크랭크 각도 단위로 측정하였

고, 흡기 압력, 배기 온도, 냉각수 온도 등을 각 실험 조건마다 측정하였다. 각 측정 장치는 PC에 연결되어 있어 측정 시기를 사이클 단위로 발생하는 페이즈 센서(phase sensor) 신호에 동기시켰다. 또한 실화를 및 실화 모드에 따른 각속도 변동도 측정하였다. Fig.2는 전체 실험 장치의 개략도이다.

실험에 사용된 기관은 실린더 직경 75.5mm, 피스톤 행정 83.5mm, 압축비 10, 배기 체적 1.495L, 점화 순서가 1-3-4-2인 상용 4기통 4행정 전기 점화 기관이고, 기관 동력계는 수냉식 와전류 방식으로 최대 흡수 토크가 35kgm이다. 연소실내 압력 측정을 위하여 Kistler사의 압전형 압력 변환기를 플러시 마운트(flush mount) 방식으로 설치하였다. 크랭크축의 각속도를 측정하기 위하여 106개의 칫수를 가진 플라이휠 링기어(flywheel ring gear)에 Line Seiki사의 마그네틱 픽업형 센서를 장착하였다. 측정된 데이터는 연속 DMA(direct memory access) 방식으로 PC로 전송되는데 40kHz 범위까지 안정된 측정이 가능하였고 이는 각속도 측정을 위하여 충분한 범위이다. 또 속도 측정용 타이머 보드는 28비트의 해상도를 갖고 있으며, 10MHz의 기준 클럭을 사용한다. 측정된 기관 회전 속도는 상자 점보정에 의해 연소 해석기에서 측정된 압력 데이터와 동기시켜 비교할 수 있으며 실화 발생 장치는 ECU와 인젝터 사이의 신호만을 제어하고 나머지 제어는 기존의 ECU신호를 그대로 사용하였다. 실화 발생 신호는 페이즈 신호를 반전시킨 신호를 실화율에 따라 분주시켜 실화를 발생시킨다.

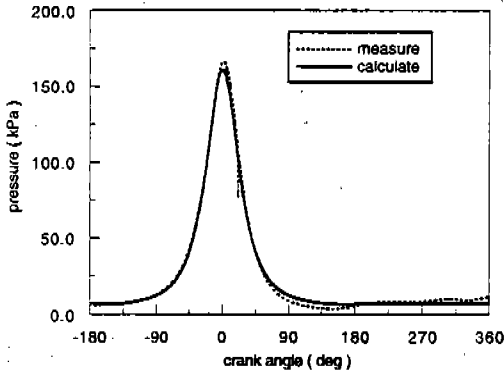


Fig.1 Comparison of measured and calculated pressure at misfire with the 2000rpm and the intake pressure 72.4kPa.

정 전기 점화 기관이고, 기관 동력계는 수냉식 와전류 방식으로 최대 흡수 토크가 35kgm이다. 연소실내 압력 측정을 위하여 Kistler사의 압전형 압력 변환기를 플러시 마운트(flush mount) 방식으로 설치하였다. 크랭크축의 각속도를 측정하기 위하여 106개의 칫수를 가진 플라이휠 링기어(flywheel ring gear)에 Line Seiki사의 마그네틱 픽업형 센서를 장착하였다. 측정된 데이터는 연속 DMA(direct memory access) 방식으로 PC로 전송되는데 40kHz 범위까지 안정된 측정이 가능하였고 이는 각속도 측정을 위하여 충분한 범위이다. 또 속도 측정용 타이머 보드는 28비트의 해상도를 갖고 있으며, 10MHz의 기준 클럭을 사용한다. 측정된 기관 회전 속도는 상자 점보정에 의해 연소 해석기에서 측정된 압력 데이터와 동기시켜 비교할 수 있으며 실화 발생 장치는 ECU와 인젝터 사이의 신호만을 제어하고 나머지 제어는 기존의 ECU신호를 그대로 사용하였다. 실화 발생 신호는 페이즈 신호를 반전시킨 신호를 실화율에 따라 분주시켜 실화를 발생시킨다.

3.2 실험 방법

크랭크축 각속도 변동으로부터 기관의 실화를 판정하기 위한 방법을 검증하기 위하여, 각 기통

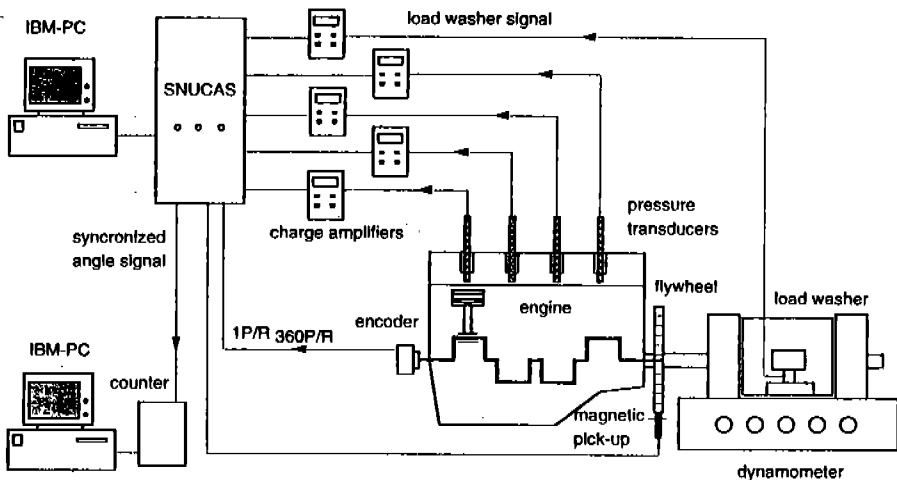


Fig.2 Schematic diagram of experimental apparatus

에 플러시 마운트형의 압력 변환기용 어댑터를 설치하여 연소실내 압력을 측정하고 로드 셀과 직렬로 연결된 로드 와서를 이용하여 기관 부하도 측정하여 각속도로부터 계산한 값과 비교하였다.

본 실험에서는 기관의 마찰력이 측정값에 큰 영향을 미치고, 이는 같은 운전 조건(부하, 기관 속도가 동일한 조건)에서는 냉각수 온도에 좌우되므로, 모든 실험 조건에서 냉각수 온도를 $80 \pm 1^\circ$ 로 유지하였으며, 공연비는 이론 공연비 14.7을 유지하였다.

또한 기관 회전수는 공회전에서 3000rpm까지, 부하는 무부하에서 전부하까지 7단계로 나누어 각종 값들을 측정하였다. 실화 특성을 알아보기 위해 단수 기통, 복수 기통 실화 및 연속, 불연속 실화에 대한 실험을 수행하였다. Table 1, Table 2에 실험조건과 실화 모드를 나타내었다.

Table 1 Experimental test matrix

Item	Variations
Engine speed	idle, 1500, 2000, 2500, 3000
Load	no load, 30, 60, 85, 95, 110Nm, WOT

Table 2 Mode settings to the misfire generator

Mode 1	Mode 2	Mode 3
Continuous misfire	Intermittent misfire	Multiple misfire
Each cylinder misfire	Each cylinder misfire by the misfire rate	Each mode (#1 & #3 cylinder, #1 & #4 cylinder)
Muti-cylinder misfire mode 3 (#1 & #3 cylinder, #1 & #4 cylinder)	Muti-cylinder misfire by the misfire rate mode 3 (#1 & #3 cylinder, #1 & #4 cylinder)	

4. 결과 및 검토¹⁶⁾

4.1 실화시 부하 및 회전속도에 따른 각속도 변동

실화시의 각속도의 변동은 정상적일 때의 각속도 변동¹⁷⁾과 다르다. 따라서, 부하 및 회전속도의 변동에 따라 그 영향을 살펴보기 위하여 평균값으로 표준화하여 비교하였다.

Fig.3은 부하를 일정하게 하고 3번 기통에서 실화가 발생하였을 때의 각속도 변동을 회전속도

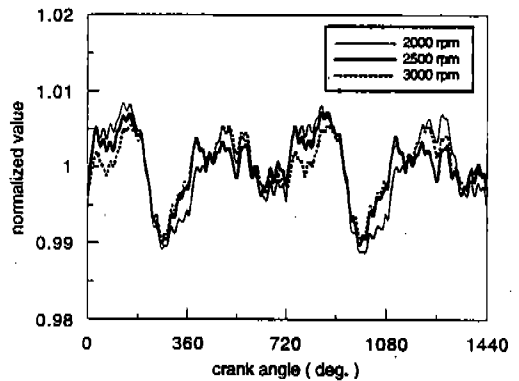


Fig.3 Comparison of the angular velocities at the fixed intake pressure 43.4kPa in case of the 3rd cylinder misfire as the engine revolution varied.

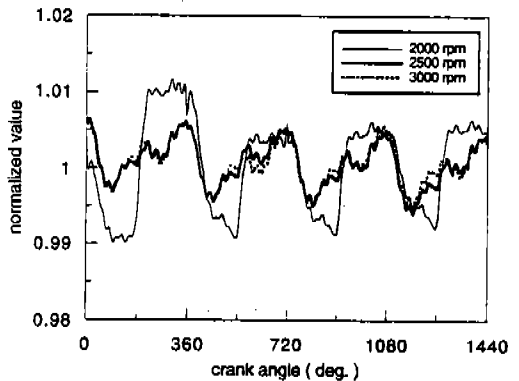
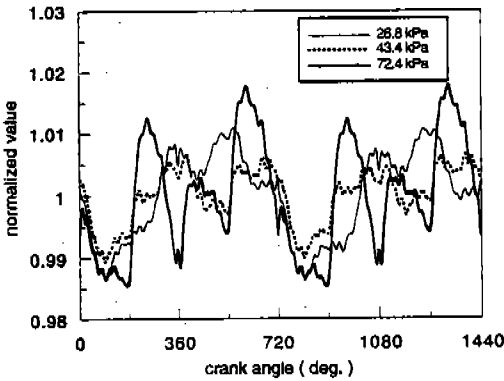


Fig.4 Comparison of the angular velocities at the fixed intake pressure 26.8kPa in case of the 1st and 4th cylinders misfires as the engine revolution varied.

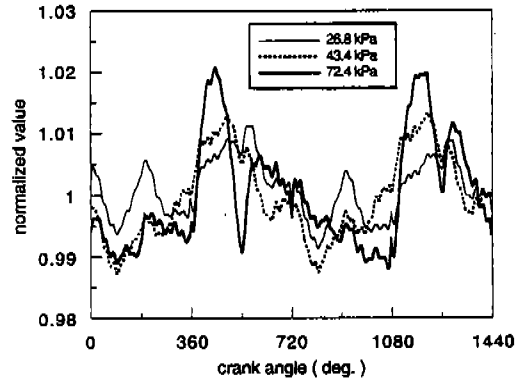
별로 표시한 것이고 1번과 4번의 복수 기통 실화는 Fig.4에 표시하였다. 실화 기통의 각속도 감소와 실화가 발생하지 않은 기통에서의 각속도 변동은 실화 기통수와 회전속도에 관계없이 동일하다. 이는 주로 압력 토크의 변동에 의해서 각속도 변동이 유발되고 부하가 일정하면 압력 토크도 일정하기 때문이다.

이번에는 회전속도를 일정하게 고정시키고 부하를 변화 시킬 때의 각속도 변동을 살펴보았다. Fig.5와 Fig.6은 2000rpm일 때 각각 단수 기통 실화와 복수 기통 실화를 표시한 것이다. Fig.5

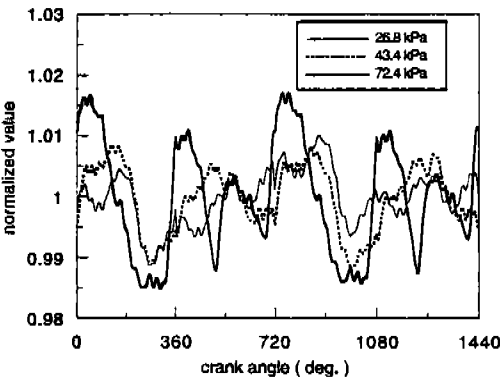
(a)와 Fig.5 (b)는 실화가 각각 1번과 3번 기통에서 발생한 경우로, 실화 기통에서의 각속도 변동은 부하 변화에 따라 큰 차이가 없으나 실화가 발생한 인접 기통에서의 각속도 변동은 큰 차이를 보인다. 이는 회전속도가 일정하여 이것의 계급에 비례하는, 크랭크축의 왕복 운동에 의한 관성 토크 값이 일정하지만, 부하가 증가함에 따라 압력 토크에서 차지하는 이 토크 값의 비율이 작아져서 각속도의 변동에 영향을 미치게 되기 때문이다¹⁴⁾. 또 Fig.6 (a)와 (b)는 복수 기통 실화일 경우로 동일 위상 기통간의 실화인 (b)



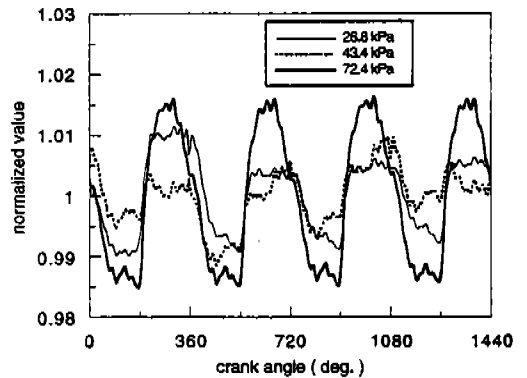
(a) 1st cylinder misfire



(a) 1st and 3rd cylinders misfires



(b) 3rd cylinder misfire



(b) 1st and 4th cylinder misfires

Fig.5 Comparison of the angular velocities at the fixed engine revolution 2000rpm in case of the sigle misfire as the intake pressure varied.

Fig.6 Comparison of the angular velocities at the fixed engine revolution 2000rpm in case of the mutiple misfires as the intake pressure varied.

는 위상이 다른 기통간의 실화와 달리 부하에 따라 각속도의 변동이 크게 다르지 않다. 이는 크랭크축 어셈블리간의 동역학적인 커플링에 기인한다¹⁴⁾.

따라서 실화시 각속도 변동에 미치는 영향은 부하 변화가 더 지배적이므로 실화 판정을 위해서는 이에 대한 고려가 필요하다.

4.2 실화 판정 이론의 검증¹⁵⁾

본 연구에서는 에너지 보존 법칙으로 유도된 1자유도 토크 평형 방정식을 이용하여, 측정된 각속도로부터 압력 토크의 적분값을 구하고 그 값을 흡기 압력을 초기값으로 계산한 모터링시 압력 토크의 적분값과 비교하여 실화를 판정한다. 이때 각속도로부터 구한 압력 토크의 정확성은 실화 판정의 관건이므로 각속도로부터 계산한 압력 토크의 적분값과 실측하여 얻은 압력 토크의 적분값을 각 실화 모드에 대해서 비교하였다. 이때 부하 토크의 적분값을 구하기 위하여 로드 와서를 이용하여 매 크랭크 각에 대해서 측정하였다¹⁵⁾. 단수 기통 실화에 대한 비교가 Fig.7에, 복수 기통의 실화는 Fig.8에 표시하였는데, 그림에서 보듯이 그 경향은 대체로 일치한다. 여기서

적분 구간은 1회의 연소 주기인 180°마다 이루어지기 때문에 그 주기마다 적분값이 불연속적이다. 또한 실화 기통과 정상 기통 간의 차이가 분명하게 구별되므로 실화 판정의 기준으로 압력 토크의 적분값을 이용할 수 있다. 따라서 각속도의 적분값으로부터 연소 정보를 얻을 수 있다.

4.3 실화 판정 결과

이러한 검증을 토대로 실화 검출 및 기통 판별을 각 실화 모드에 대해서 실시하였다¹⁶⁾. 실화 판정을 위하여 각속도로 계산된 압력 토크의 적분값과 모터링시 압력 토크의 적분값간의 비를 기관 운전 안정성 인자(roughness index)로 정의하여 실화를 판정한다.

먼저 300사이클 50% 불연속 실화 모드에 대한 실화 판정 결과들 Fig.9에 표시하였다. 처음 170사이클은 1번 기통에서, 그 이후의 사이클은 3번 기통에서 실화가 발생하였을 경우로 정상적인 기통과 실화 기통간의 기관 운전 안정성 인자의 차이가 분명하여 실화 판정 및 기통 판별이 가능하다. 특히 1번 기통 실화가 3번 기통 실화보다 더 큰 인자값을 보이는데 이는 1사이클을 기본 주기로 하여 필터링하였기 때문에 필터링

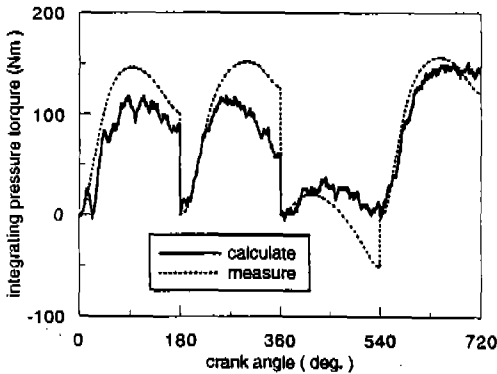


Fig.7 Comparison of the integrated pressure torque by measuring the pressure and that by calculating the pressure from the crankshaft speed fluctuation in case of the single misfire at the intake pressure 43.4kPa, 1500rpm, and 4th cylinder misfire.

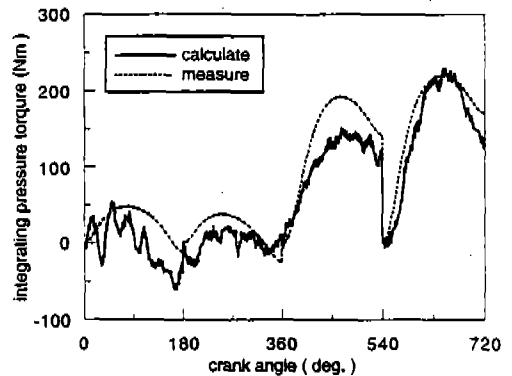


Fig.8 Comparison of the integrated pressure torque by measuring the pressure and that by calculating the pressure from the crankshaft speed fluctuation in case of the multiple misfires at the intake pressure 54kPa, 2000rpm, 1st and 3rd cylinders misfires.

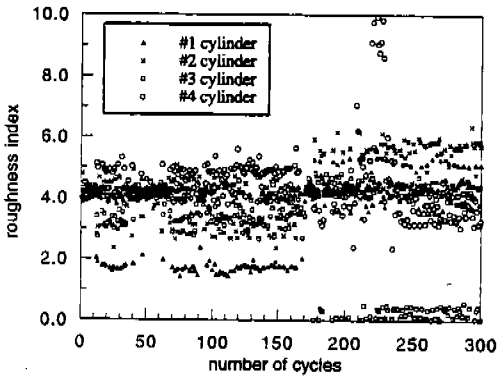
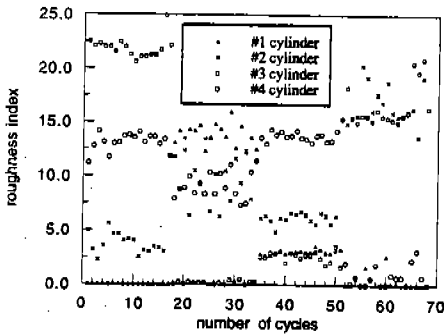
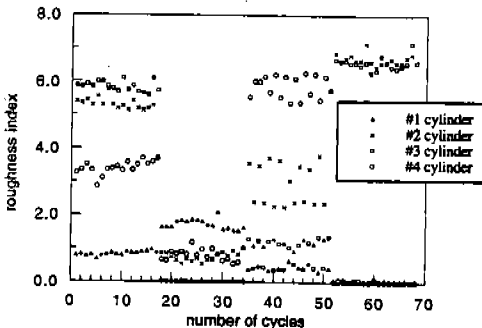


Fig.9 Engine roughness index in case of the discontinuous 1st cylinder and 3rd cylinder misfire at 2000rpm and WOT.



(a) at the intake pressure 26.8kPa



(b) at the intake pressure 72.4kPa

Fig.10 Engine roughness index as misfire cylinder or cylinders varied at 2000rpm in case of the continuous misfire.

윈도우 효과에 의해 경계에 해당하는 1번 기통에서의 값이 실제보다 값이 커지기 때문이다. 이와 같은 결과는 2번 기통의 실화시에도 적용된다.

또한 연속적인 실화 모드에서의 운전 안정성 인자를 표시한 것이 Fig.10 (a)와 (b)인데, 차례로 1번과 3번의 단수 기통 실화와 1, 3번 또 1, 4번 복수 기통 실화에 대한 운전 안정성 인자를 기관 회전수 2000rpm일 때 나타낸 것이다. 불연속 실화와 마찬가지로 실화 기통 판별 및 실화 판정을 분명하게 할 수 있다. 특히 복수 기통 실화시, 1번과 3번 실화가 1번과 4번의 실화보다는 그 판별이 더 어렵다. 이는 앞서 지적한 크랭크축 어셈블리에서의 동역학적 커플링에 의한 각속도 변동 특성에 차이가 생기기 때문이다. 또한 Fig.10 (b)에서 보듯이 필터링 윈도우 효과에 의해 1번 기통 실화에 대한 운전 안정성 인자 판별 값이 3번 기통 실화보다 더 크다.

5. 결 론

기관과 동력계의 동역학을 고려한 1자유도 방정식을 유도하여 실화 검출을 위한 방법을 유도하였으며 기관 실험을 통하여 그 방법의 타당성을 검증하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 에너지 방법에서 유도된 방정식을 적분하여 각속도를 측정하여 계산된 압력 토크의 적분값과 측정된 압력 토크의 적분값 사이의 차이가 적다.
- 2) 실화시의 압력 토크의 적분값은 흡기 압력으로 계산된 모터링시의 압력 토크의 적분값과 큰 차이가 없으므로, 각속도로부터 계산된 압력 토크의 적분값과 계산된 모터링시의 압력 토크의 적분값을 비교하여 실화를 판정할 수 있다.
- 3) 실화 발생시 회전속도보다 부하가 각속도 변동에 미치는 영향이 더 지배적이므로 실화 판정을 위해서 부하에 따라 보정이 필요하다.

후 기

본 연구는 현대자동차 마북리 연구소의 과제 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. California Air Resources Board, "CARB-On Board Diagnostics-Mail Out #93-40-Final Rule", 1993.
2. Martin Klenk, Winfried Moser, "Misfire Detection by Evaluating Crankshaft Speed-A Means to Comply with OBD II", *SAE Paper* 930399, 1993.
3. Arun K. Sood, "Engine Fault Analysis: Part I-Statistical Method", *IEEE Trans. Industrial Electronics*, Vol. IE 32, pp. 294~300, 1985.
5. Sohair F. Rezeka, "A Diagnostic Technique for the Identification of Misfiring Cylinder(s)", *SAE Paper* 870546, 1987.
6. William B. Ribbens, "Road Tests of a Misfire Detection System", *SAE Paper* 940975, 1994.
7. Giorgio Rizzoni, "Diagnosis of Individual Cylinder Misfires by Signature Analysis of Crankshaft Speed Fluctuation", *SAE Paper* 890884, 1989.
8. William B. Ribbens, Giorgio Rizzoni, "On Board Diagnosis of Engine Misfire", *SAE Paper* 901768, 1990.
9. Francis T. Connolly, "Direct Estimation of Cyclic Pressure Variability Using Engine Speed Fluctuations in an Internal Combustion Engine", *SAE Paper* 940143, 1994.
10. Georg F. Mauer, "On-Line Cylinder Diagnostics on Combustion Engines by Noncontacting Torque and Speed Measurement", *SAE Paper* 890485, 1989.
11. Yaojung Shiao, John J. Moskwa, "Misfire Detection and Cylinder Pressure Reconstruction for SI Engines", *SAE Paper* 940144, 1994.
12. 임병진, 박종범, 임인건, 배상수, 김용서, "크랭크축 각속도의 변동을 이용한 실린더내 압력 추정(1)", 한국 자동차 공학회 논문집, Vol. 2, No. 3, 1994.
13. J. B. Heywood, Internal Combustion Engine Fundamentals, McGraw-Hill, p. 722, 1989.
14. 임병진, "크랭크축 각속도의 변동을 이용한 실린더내 압력 변화와 토크 추정", 서울대학교 공학 박사 학위 논문, 1994.
15. Byeongjin Lim, Inkeon Lim, Jongbum Park, Sangsoo Pae, Young S. Yon and Eungseo Kim, "SI Engine Misfire Detection Through the Energy Model", *SAE Paper* 942059, 1994.
16. 배상수, "크랭크축 각속도의 변동을 이용한 실화 판정", 서울 대학교 공학석사 학위 논문, 1995.
17. 배상수, 임병진, 임인건, 박종범, 김용서, "사이클내 크랭크축 각속도의 변동 해석", 한국자동차공학회 춘계학술대회 논문집, Vol. 1, pp. 34~39, 1995.
18. Apostrolos N. Fragoulis, Angelo H. Nichols, Maeim A. Henein, "Error Analysis of Time-Dependent Frictional Torque in Reciprocating Engines: Effect of Angular Velocity Measurement", *Lubr. Eng.*, Vol. 45, 7, pp. 493~499, 1988.