

< 논 문 >

크랭크축 각속도의 변동을 이용한 기관 이상 진단 방법 비교

김세웅* · 배상수** · 임병진*** · 김응서****

(1995년 1월 20일 접수)

Comparison of Engine Fault Diagnostic Techniques Using the Crankshaft Speed Fluctuation

S. W. Kim, S. S. Pae, B. J. Lim and E. S. Kim

Key Words: Engine Diagnostic Technique (기관 진단법), Pressure Torque (압력 토크), Integrated Torque Index (토크 적분지수), Maximum Acceleration Index (최대 가속도지수), Angular Velocity Fluctuations (각속도 변동)

Abstract

In this paper, diagnostic techniques for detecting the engine faults, especially misfire, are introduced and compared with each other under the same conditions. With all of them the instantaneous angular velocities, measured at the flywheel, were analyzed. The techniques include the frequency analysis, auto-correlation function, velocity index, acceleration index, maximum acceleration index, and integrated torque index. Since the main driving components for the angular velocity fluctuation are both the pressure and the inertia torque, the component of the inertia torque in it must be excluded to extract the information of the combustion from the angular velocity. To do this, it is required to consider only the first half of the combustion period in the angular velocity fluctuations, which has never been proposed in the existing methods. On the basis of this fact, the results show that the most effective diagnostic technique is maximum acceleration index.

기 호 설 명

ϕ : 위상 이동
 C_n : 파워 스펙트럼
 AC : 자기 상관 계수
 $MEAN$: 각속도의 사이클 평균값
 VAR : 각속도의 사이클 분산
 Δw_i : i 번 실린더의 각속도 최대값과 최소값 차

$w_{p,i}, w_{a,i}$: i 번 실린더의 각속도 최대값과 최소값
 VI_i : i 번 실린더의 각속도 지수
 AI_i : i 번 실린더의 각가속도 지수
 AC_i : i 번 실린더의 평균 각가속도
 \bar{w} : 평균 각속도
 MA_i : i 번 실린더의 순간 최대 각가속도 지수
 MC_i : i 번 실린더의 순간 최대 각가속도
 T^* : 토크 적분값
 J_{crank} : 크랭크축 어셈블리의 총 관성 모멘트
 p : 압력
 B : 실린더 지름

*회원, 금오공과대학교 기계공학과

**회원, 서울대학교 대학원 기계공학과

***회원, 터보동력기계 연구센터

****회원, 서울대학교 기계공학과

$k_{s,j}$: 피스톤 운동의 기하학적 변수
 n : 실린더 수

1. 서 론

작동중인 기관에는 불완전한 연소로 말미암아 많은 종류의 결함(faults)이 발생된다. 이러한 결함에는 헤드 개스킷과 밸브 등에서의 누출이나 링의 마모 등으로 생기는 낮은 압축 압력, 연료 공급 장치나 점화 장치의 결함에 의한 실화(misfire) 및 급격한 압력 상승에 의한 노킹 등이 있는데,⁽⁶⁾ 연소 정보가 포함된 실린더내 압력에 대한 해석이 가능하다면 이에 대한 관정이 용이할 것이다. 그러나 장착상의 어려움이나 비용 때문에 실제 적용이 어렵다. 또한 이런 기관 결함으로 기관 성능과 내구성이 저하되고 연료 소비율이 증가하여 배출물 증가 등을 초래하게 된다. 따라서 조기에 이런 결함을 판정하여 적절한 조치를 취할 수 있도록 하는 것이 기관 성능과 효율을 유지하기 위해 필요하다. 이러한 기관 결함 중에서 특히 최근에 캘리포니아 대기 자원국(CARB)에서 정한 OBD II 규정 중에 실화 판정 및 실화 실린더 판별이 포함되어⁽¹⁾ 이에 대한 관심이 증대되고 있다. 실화는 미연 탄화 수소소물의 배출을 근본적으로 증가시킬뿐만 아니라, 산화·환원 촉매기내에 축적된 이 탄화 수소는 촉매기의 온도를 상승시켜 산화·환원 촉매기에 치명적인 영향을 주기 때문에⁽²⁾ 배출물 제어하는 관점에서 실화의 검출은 매우 중요하다.

이러한 요구에 부응하기 위하여 실화 판정을 위한 기관 진단 방법들에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.⁽³⁻¹⁰⁾ 이 중에서 크랭크축 각속도의 변동을 이용하는 방법은⁽⁵⁻¹⁰⁾ 기관을 특별히 개조하지 않고 적은 비용으로 실차에 적용할 수 있기 때문에 가장 주목받는 방법이다. 그러나, 이러한 연구들에서 제시한 방법들 중에서 최적의 방법을 선택하기 위해 동일한 조건에서 각 방법들을 비교, 고찰한 연구는 거의 없으며, 발표된 연구도⁽¹¹⁾ 공회전이라는 제한된 조건에서 수행되어 그 결과의 일반성이 부족하다.

따라서, 본 논문에서는 크랭크축 각속도의 변동을 이용하여 실화를 판정하는 기존 방법들과 본 연구에서 새롭게 제시한 방법간의 비교, 검토를 통하여 각 방법들의 특성 및 한계 등에 대해서 고찰하

었다. 이때 기관의 회전 속도는 공회전에서 3500 rpm 까지 변화시키면서 특정 실린더에 실화를 발생시켜 다양한 조건에서 비교하여 각 방법들의 범용성도 검토하였다. 또한 제시한 방법들 중 속도 지수, 가속도 지수, 최대 가속도 지수, 토크 적분 지수 등은 한 연소 주기내에서 분석 범위에 따른 영향도 검토하여 각 방법들의 효율성도 비교하였다. 이러한 비교를 통하여 최적 판정법 및 조건 등을 검토하였다.

2. 기관 진단 방법⁽¹⁶⁾

크랭크축 각속도의 변동은 연소에 의한 압력 토크, 부하 토크, 마찰 토크 및 회전 속도의 제곱에 비례하는 관성 토크간의 상호 작용으로 생긴다.^(11,12) 즉, 팽창 행정 중에는 압력 토크에 의하여 가속되고, 그 이외의 행정 중에는 부하나 마찰 토크 및 관성 토크에 의하여 감속되는데, 이 중에서 관성 토크가 가장 주된 것이다. 다시 말하여 여러 토크 중 관성 토크와 압력 토크의 상호 작용에 의하여 크랭크축의 가속과 감속에 의한 각속도 변동이 일어난다. 이러한 특성은 Fig. 1에서 보듯이 각속도의 변동 파형과 압력과 관성의 합성 토크 파형의 경향이 거의 일치하고 있다는 사실에서 알 수 있다. 따라서 이러한 크랭크축 각속도의 해석을 통하여 기관 진단을 위한 연소 정보를 얻기 위해서는 관성 토크의 영향을 제거해야 한다.

이러한 연소 정보가 포함된 크랭크축 각속도의 변동을 이용한 기관 진단 방법에는 크게 각속도 신

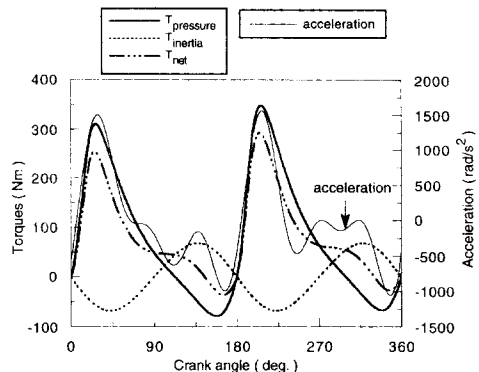


Fig. 1 Comparison of the torques, such as the pressure, the inertia, and the net torque, and the acceleration under the condition of 2000rpm and WOT.

호만을 처리하는 방법과 동역학적 모델링의 입력 인자로 각속도를 이용하는 방법으로 구분된다.

2.1 각속도 신호의 처리에 의한 방법

● 각속도의 스펙트럼 해석

연소에 의한 압력 성분은 실린더 수가 n개일 경우, 1사이클에 해당하는 주파수를 기본으로 했을 때 n배 성분이 가장 지배적이며 이를 점화 주파수라고 한다. 따라서 정상적인 기관에서는 점화 주파수 및 이것의 배수 성분이 가장 중요하며, 실화시 이러한 특성에 변화가 생기므로 실화를 판정할 수 있다. 이를 위하여 식 (1)이나 식 (2)와 같이 각속도 신호를 푸리에 급수로 전개한 뒤, 파워 스펙트럼 C_k 와 위상 이동 ϕ_k 를 고려한다.^(5,7)

$$f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^m (a_k \cos k\omega t + b_k \sin k\omega t) \quad (1)$$

$$= \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^m C_k \sin(\omega t + \phi_k) \quad (2)$$

$$\phi_k = \tan^{-1}\left(\frac{a_k}{b_k}\right) \quad (3)$$

● 각속도의 자기 상관함수(Auto-correlation function)

자기 상관 함수는 주기적인 신호간의 유사성을 판단하는 데 이용된다. 실화가 발생하면 1사이클 내에서 각속도의 극대값과 극소값의 수가 변화하고, 실화 실린더와 정상 실린더 간의 불균일에 의하여 모든 실린더에 실화가 발생하지 않을 때와 차이가 생겨 신호간의 유사성이 결여되게 된다. 따라서 식 (4)로 정의된 식으로부터 신호의 유사성을 판단하여 기관 진단에 이용할 수 있다.⁽⁵⁾

$$AC(\tau) = \frac{1}{N} - \frac{1}{VAR} \sum_{k=0}^{N-1} \{ [w(k) - MEAN] \cdot [w(k+\tau) - MEAN] \} \quad (4)$$

$$MEAN = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} w(k) \quad (5)$$

$$VAR = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} [w(k) - MEAN]^2 \quad (6)$$

여기서, $\tau=0, 1, \dots, N-1$ 이고, N 은 사이클 당 샘플 수를 의미한다.

● 자기 상관계수의 스펙트럼 해석

앞서 기술한 방식으로 각속도 자기 상관 함수를 푸리에 변환하고, 파워 스펙트럼을 구하여 실화를 판정한다.⁽¹¹⁾ 각속도 파형에 비해서 자기 상관 함수는 주기성이 더욱 뚜렷하게 표시되기 때문에 각

속도의 스펙트럼 분포와 동일하나 지배적인 주파수 성분이 더욱 분명하므로 각속도 스펙트럼에 비하여 관별이 용이하다.

● 각속도 지수, VI

각 실린더의 팽창 행정에 해당하는 각속도 파형의 극대값 w_p 와 극소값 w_a 의 차이 Δw_i 를 전체 실린더의 평균 변동량에 대한 비율로 표시한 것이다.^(6,11) 즉,

$$\Delta w_i = w_{p,i} - w_{a,i} \quad (7)$$

$$VI_i = \frac{\Delta w_i}{\left(\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \Delta w_j\right)} \quad (8)$$

● 각가속도 지수, AI

각 실린더의 팽창 행정에 해당하는 각속도 파형의 최대값과 최소값 사이의 평균 각가속도를 전체 실린더의 평균 각가속도에 대한 비율로 표시한 것이다.^(6,11) 즉,

$$AC_i = \bar{w} \left(\frac{\Delta w_i}{\theta_{p,i} - \theta_{a,i}} \right) \quad (9)$$

$$AI_i = \frac{AC_i}{\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n AC_j} \quad (10)$$

● 최대 가속도 지수, MAI

각 실린더의 팽창 행정이 시작되는 상사점(top dead center)으로부터 일정 크랭크 각까지의 구간에 대한 각가속도의 최대값 MAC_i 와 전체 실린더의 최대 각가속도 평균값의 비율로 표시한 것이다.⁽¹⁶⁾ 즉,

$$MAI = \frac{MAC_i}{\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n MAC_j} \quad (11)$$

위에서 언급한 방법 이외에도 각속도 파형의 최대값 변동이나 최소값 변동, 상사점 전후 일정 크랭크 각에서의 각속도 변동 차 등을 이용하는 방법 등⁽¹¹⁾이 있으나, 기본적으로 위에서 언급한 방법과 큰 차이가 없기 때문에 이에 대해서는 고려하지 않았다.

2.2 동역학적 모델링에 의한 방법

연소에 의해 발생된 에너지는 실린더 내의 압력 상승을 일으키고, 이 압력은 크랭크축을 가속시킨다. 그러므로, 크랭크축으로 전달되는 에너지 전달 과정을 모델링하면 크랭크축 각속도로부터 실린더

내 연소 관련 정보를 추정할 수 있고, 이를 기관 진단에 이용하는 것이다. 이때 사용하는 모델링에 따라 크랭크축 비틀림 진동 모델,⁽¹³⁾ 1자유도 에너지 모델,^(10,12) 등가 전기 회로 모델⁽¹⁵⁾ 등이 있다. 이 중 크랭크축 비틀림 진동 모델은 실린더 수가 많거나 고속 운전 조건과 같이 비틀림 정도가 상당히 클 경우에만 적용될 수 있고, 축의 비틀림을 측정하기 위하여 기관 앞쪽과 뒤쪽에 동일한 치수의 플라이휠이 필요하므로 기관의 개조가 불가피하다. 또한 등가 전기 회로 모델은 전기 회로의 직류와 교류 성분으로 기관을 모델링하고, 이 중 교류 성분은 확률적 모델(stochastic model)로 해석하기 때문에, 대상 기관이 달라지면 그 모델도 수정되어야 하므로 일반성이 결여된다. 따라서 본 연구에서는 기관의 기하학적 조건만의 변동으로 모든 기관에 적용 가능하고, 해석이 용이한 1자유도 에너지 모델 중의 하나인 압력 토크의 적분값을 이용하는 방법^(12,16)만 고찰하기로 한다. 즉,

$$T_p^* = T_w^* + T_r^* + T_f^* \quad (12)$$

$$T_p^* = \int_0^\theta -Pk_s d\theta$$

$$= \int_0^\theta \left[-\frac{\pi}{4} B^2 \sum_j k_{sj} (p_j - p_{atm}) \right] d\theta \quad (13)$$

$$T_w^* = \frac{1}{2} J_{crank}(\theta) \dot{\theta}^2(\theta)$$

$$- \frac{1}{2} J_{crank}(0) \dot{\theta}^2(0) \quad (14)$$

$$T_r^* = \int_0^\theta T_r d\theta \quad (15)$$

$$T_f^* = \int_0^\theta T_f d\theta \quad (16)$$

여기서, 기관의 연소 정보가 포함된 압력 토크의 적분값인 T_p^* 를 구하기 위하여 관성 운동의 적분값인 T_w^* , 기관 부하의 적분값인 T_r^* , 기관 총마찰 토크의 적분값인 T_f^* 를 측정값으로부터 계산한다.⁽¹²⁾ 이렇게 구한 T_p^* 와 모터링시의 압력 토크의 적분값인 T_{motor}^* 사이의 비값을 각 실린더에 대해서 구하여 이들과 평균값과의 비를 토크 적분 지수(ITI)라 정의하여⁽¹⁶⁾ 실화를 판정한다.

3. 실험 장치 및 방법

실험에 사용된 기관은 4기통, 4행정, 12밸브인 전기 점화 기관으로, 배기 체적은 1495cc이고, 점

Table 1 Specifications of magnetic pick-up sensor.

Items	Specifications
Manufacturer	Line Seiki
Model	WS-02
Maximum counting pulse	3000 counts/second

Table 2 Specifications of CTM timer board.

Items	Specifications
Model	KEITHELEY CTM-PER
Reference clock	10 MHz
Measurement bit	28 bit
Data acquisition mode	Programmed, interrupt or DMA

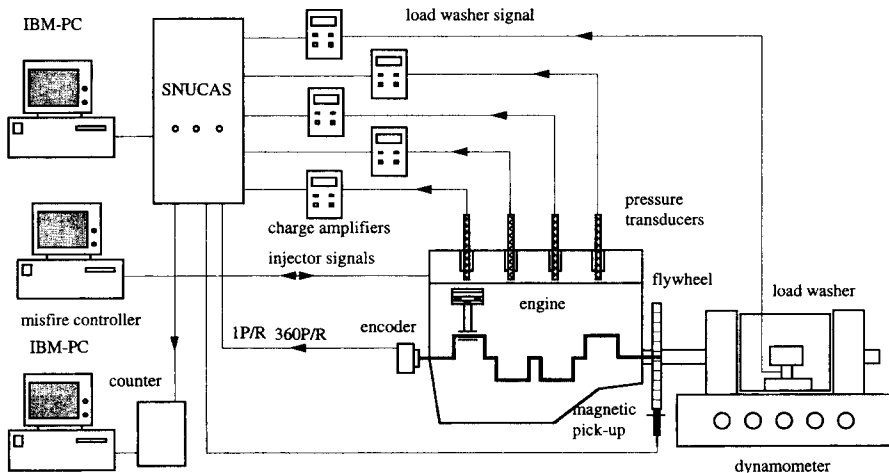


Fig. 2 Schematic diagram of experimental apparatus

화 순서는 1-3-4-2이다. 크랭크축 각속도는 플라이휠(flywheel)에 설치한 마그네틱 픽업 센서 신호를 이용하여 측정하였는데, 그 제원은 Table 1에 나타내었다. 또한 크랭크축 각속도 변동을 측정하기 위해 데이터의 DMA(direct memory access) 전송이 가능한 타이머 보드를 사용하였고,⁽¹²⁾ Table 2는 사용된 보드의 제원이다. 또 특정 실린더에 원하는 실화를 발생시키기 위하여 실화 제어 장치도 제작하였는데, 이는 ECU에서 인젝터로 보내지는 신호만 사이클 기준 신호에 따라 제어함으로써, 각 실린더로의 연료 분사 유무를 조정하여 실화를 발생시킨다. 이때, ECU에서 보내지는 다른 신호는 그대로 이용하였다. Fig. 2는 전체 실험 장치의 개략도이다.

본 실험에서 냉각수의 온도는 $80 \pm 1^\circ$ 로 일정하게 하였고, 기관 회전 속도를 각각 공회전에서 3500 rpm까지 500 rpm 단위로 변화시켰을 때의 각속도 변동을 정상 운전시와 실화시 측정하였다. 이때, 실화는 크게 단수 실화와 복수 실화로 구분하여 실험하였다.

4. 실화 검출법 분석

4.1 각가속도 분석

정상적인 운전 조건에서의 각속도의 변동은 앞서 언급했듯이 연소 압력과 관성 토크에 의하여 생기고, 각각의 상대적 영향에 의하여 세 가지 영역이 존재한다.^(12,14,16) 이것은 Fig. 3에서 보듯이, 이 두 가지 토크의 영향 때문에 각 연소 주기마다 크게 두 번의 가속 영역이 존재하는데, 연소 주기 전반부는 연소 압력에 의하여 후반부는 관성 운동에 의하여 가속된다. 특히 동일한 회전 속도에서 관성 있다. 이러한 각가속도 변동으로부터 각속도 변동의 영역 존재가 설명될 수 있다. 즉, 흡기 압력이 26.3kPa일 때는 Fig. 3에서 보듯이, 연소 압력에 의해 가속되는 전반부보다는 관성에 의해 가속되는 후반부가 더 크므로, 관성 지배 영역에 해당하는 각속도 변동을 보인다. 또, 43.4kPa일 때는 관성과 압력 토크의 영향이 비슷하여 전반부와 후반부에 비슷한 크기의 가속이 존재한다. 따라서 각속도 토크는 일정하므로, 이에 의해 가속되는 후반부는 부하의 변화에 따라 큰 차이를 보이지 않지만, 연소 압력에 의해 가속되는 전반부는 부하가 커짐에 따라 그 가속 정도가 더욱 증가한다는 것을 알 수

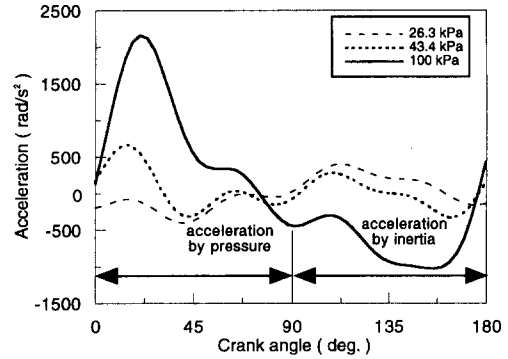


Fig. 3 Comparison of angular accelerations without misfires at 2000rpm as the intake pressures varied.

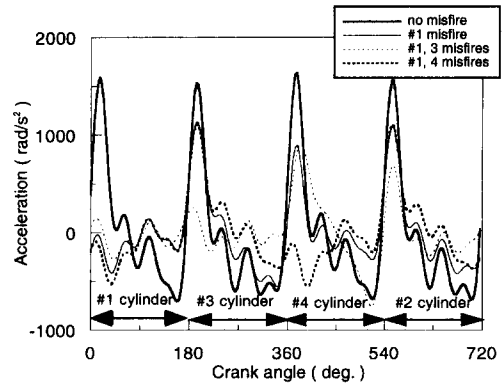


Fig. 4 Comparison of angular accelerations with misfires under the condition of 2000rpm and the intake pressure 72.4kPa.

변동이 한 연소 주기 동안 두 번의 극대값을 가지는 복합 영역에 해당하는 각속도 변동을 보인다. 반면에 전부하(WOT)에서는 Fig. 3처럼 연소에 의해 가속되는 전반부가 더 크기 때문에 압력 지배 영역에 해당하는 각속도 변동을 나타낸다. 따라서, 관성의 영향을 배제하고 연소에 의한 정보만을 얻기 위해서 연소 압력의 영향이 뚜렷이 나타나는 연소 주기 전반부만 고려함으로써 가능하다는 것을 알 수 있다.

한편 Fig. 4에서 보듯이 특정 실린더에 실화가 발생하면 그 실린더의 압력에 의해 가속되는 영향이 크랭크축 각속도 변동에 나타나지 못하여, 정상 실린더에 존재하는 연소 주기 전반부의 가속 영역이 없어진다. 그러나, 관성에 의해 가속되는 연소 주기 후반부의 가속 영역은 실화 유무에 관계 없이

존재한다. 따라서, 연소 주기 전반부만의 가속 영역의 존재 유무에 의하여 실화 판정이 가능하며, 이러한 고려가 없는 실화 판정법들은 관성의 영향 때문에 판정의 오류가 발생할 수 있다.

4.2 각속도 스펙트럼 분석

크랭크축의 각속도 변동을 일으키는 가장 중요한 두 가지 토크는 연소에 의한 압력 토크와 관성 토크이다. 이 중 전자는 기관 부하, 즉 흡기 다기관 압력의 변화에 의해서, 후자는 기관 회전 속도에 의하여 변화될 수 있다. 따라서, 이 두 가지 조

건의 변화에 의해 4.1절에서 언급한 것처럼 각속도의 변동 양상이 세 가지 영역으로 구분될 수 있다. (16) 따라서, 각속도 스펙트럼 분석도 각 영역에 대해서 구분해 실시하여 실화가 발생하지 않았을 때 결과를 Table 3에 정리하였다. 지배적인 스펙트럼이 나타나는 주파수는 점화 주파수 성분인 4배수 성분이 압력 혹은 관성 지배 영역에서는 지배적이고, 복합 영역에서는 점화 주파수뿐만 아니라 8배수 성분도 중요해진다. 이는 복합 영역의 각속도 변동은 다른 영역과 달리 앞서 언급한 것처럼 압력과 관성의 영향이 비슷하여 한 연소 주기내에서 2

Table 3 Dominant power spectrum components for angular velocities and auto-correlations without misfires.

Load Speed	27.6 (kPa)	41.45 (kPa)	55.0 (kPa)	65.04 (kPa)	77.38 (kPa)	88.66 (kPa)	100 (kPa)
1500 rpm	4&1	4&8	4&8	4&8	4&8	4&8	4&8
2000 rpm	4&1	2&8	4&8	4&8	4&8	4&8	4&8
2500 rpm	4&1	4&8	8&4	4&8	4&8	4&8	4&8
3000 rpm	4&2	4&8	4&8	4&8	8&3	8&4	4&8
3500 rpm	4&2	4&8	4&8	4&8	4&8	8&3	8&3

Table 4 Dominant power spectrum components for angular velocities and auto-correlations with misfires

misfire cylinder (s) speed	Single Misfire			Multiple Misfires		no misfire	
	#1 misfire	#2 misfire	#3 misfire	#1&3 misfires	#1&4 misfires		
idle	1&4	4&2*		1&3	4&2*	4&1	
2000 rpm	26.3kPa	1&4	1&8	1&4	1&3	2&1	4&1
	43.4kPa	2&1	2&1	2&1	1&3	2&1	2&8
	55.3kPa	2&1	2&1	2&1	1&3	2&1	4&8
	72.4kPa	2&1	2&4*	2&1	1&3	2&4*	4&8
2500 rpm	26.3kPa	4&1	2&1	4&1	1&4	2&4*	4&1
	51.3kPa	4&1	8&1	4&1	1&4	2&4*	8&4
	75kPa	2&1	4&1	2&1	1&2	2&1	4&8
300 rpm	26.3kPa	4&1	2&4*	4&1	1&4	2&4*	4&2
	63.2kPa	4&1	2&4*	4&1	1&4	2&4*	4&2

(note) 1, 2, 3, 4, 8: frequency components (1: fundamental frequency component, 1 cycle)

first & second dominant frequency component

* Third dominant frequency component is fundamental one.

변의 극대값이 존재하기 때문이다.

반면에 특정 실린더에 실화가 발생했을 경우의 각속도 스펙트럼 분석 결과를 Table 4에 정리하였다. 단수 실린더 실화인 경우는, 부하나 회전 속도에 따라 차이는 있는데, 기본 주파수나 이것의 2배수 성분 및 점화 주파수 성분이 가장 지배적이다. 반면 복수 실린더 실화의 경우, 연속 실린더인 1번과 3번 실화에서는 기본 주파수, 대칭 실린더인 1번과 4번 실화에서는 2배수 성분이 지배적이다. 그런데, 이 결과에서 보듯이 단수 실린더 실화는 그 경향이 부하나 회전 속도에 따라 일정하지 않기 때문에 스펙트럼의 분석에 의해 실화 판별 및 실화 실린더 판별은 어렵다는 것은 알 수 있다. 그러나 복수 실린더 실화의 판정은 단수 실린더 실화에 비하여 그 경향이 일정하므로 이 방법의 적용이 가능하다. 이는 복수 실화가 단수 실화에 비해서 각속도 감소가 더 커서 관성의 영향을 덜 받기 때문이다. 그러나, 이 방법은 본질적으로 관성의 영향을 완전히 배제시킬 수 없기 때문에, 지배적인 스펙트럼의 상대적인 크기 변화를 이용하여 판정이 가능하다는 연구는^(5,6) 낮은 회전수라는 제한된 조건에만 한정되며, 특히 이 방법을 이용하여 단수 실린더 실화에서의 실화 실린더 판별은 불가능하다.

4.3 각속도 자기 상관 함수 및 자기 상관 함수 스펙트럼 분석

자기 상관 함수를 사용하면 각속도 신호의 주기성을 더욱 잘 표시할 수 있다. 실화가 발생하지 않을 경우, Fig. 5(a)에서 보듯이 회전 속도가 2000 rpm으로 동일할 때 관성 지배나 압력 지배 영역에 해당하는 26.3 kPa이나 72.4 kPa에서의 파형은, 1 사이클 동안 네 개의 주기적인 파형을 보이며, 이는 4.1절에서 언급했던 관성과 압력 토크의 상호 영향에 기인한다. 따라서 스펙트럼 분석시 이 영역들에 해당하는 자기 상관 함수는 4배수 성분이 지배적이게 된다. 반면 복합 영역인 43.4 kPa에서는 연소 주기마다 두 개의 극대점을 가지는 파형이므로 스펙트럼 분석시 8배수 성분이 지배적이게 된다. 따라서, 4.2절에서 언급한 각속도의 스펙트럼 분석과 그 경향이 동일하나 보다 뚜렷히 그 경향을 파악할 수 있다.

반면에 실화시의 각속도의 자기 상관함수를 표시한 것이 Fig. 5(b)이고, 이것은 압력 지배 영역인 흡기 압력이 72.4 kPa일 때이다. 실화 실린더에 따

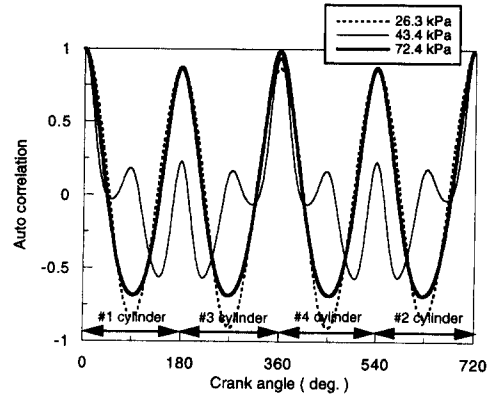


Fig. 5 (a) Comparison of auto-correlations at 2000 rpm without misfire as the intake pressures varied.

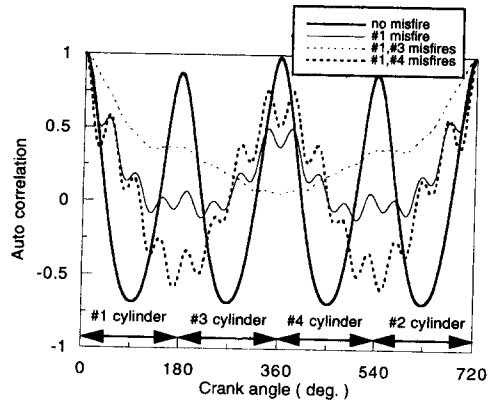


Fig. 5 (b) Comparison of auto-correlations under 2000rpm and the intake pressure 72.4kPa as the misfire cylinder or cylinders varied.

라 정상인 경우와 파형이 다르기 때문에 실화 판별은 가능하나, 4.2절에서 언급했듯이 그 경향이 부하나 회전 속도에 따라 일정하지 않을뿐만 아니라 실화 실린더의 수나 위치에 따라서도 그 경향이 다르다. 따라서 자기 상관 함수 및 이것의 스펙트럼을 이용한 실화 판정은 각속도의 스펙트럼과 동일한 한계가 존재한다. 실화가 없을 때와 있을 때의 자기 상관 함수의 스펙트럼은 각속도의 스펙트럼과 동일하므로 Table 3과 Table 4에 함께 나타내었다.

4.4 실화 검출 인자의 특성 분석

2장에서 언급한 방법들 중 속도 지수, 가속도 지수, 최대 가속도 지수 및 토크 적분 지수의 실화

검출 특성을 비교, 분석하였다. 즉, 각 검출 인자에 관성이 미치는 영향을 살펴보기 위하여 연소 주기를 5등분하여 분석 범위를 변화시키면서 실화 판정 여부를 비교하였다. 여기서, 연소 주기는 각 실린더의 팽창 행정을 일컫고, 이는 상사점에서 하사점까지이며, 크랭크 각으로 180°에 해당한다. Table 5는 공회전 조건이며, Table 6은 복합 영역에 해당하고, 기관 회전 속도가 2000 rpm, 흡기

다기관 압력이 43.4 kPa일 조건일 때 각 지수값들의 변화를 정리한 것이다. 각 지수들 모두 실화는 기준값인 1을 기준으로 그보다 작으면 실화, 1 근처에 분포하면 정상이라고 판정한다.

속도 지수와 가속도 지수는 Table 5에 표시한 것처럼 공회전일 때는 관성에 의한 영향이 작기 때문에 모든 연소 구간에 대해서 판정이 가능하나, 회전 속도가 빠른 복합 영역에서는 Table 6에서

Table 5 Comparison of misfire detection methods at idle.

Misfire Cylinder	Range (deg.)	VI				AI				MAI				ITI			
		#1	#2	#3	#4	#1	#2	#3	#4	#1	#2	#3	#4	#1	#2	#3	#4
1st cylinder	36	0.26	1.19	1.24	1.32	0.34	1.16	1.21	1.29	0.28	1.22	1.21	1.29	0.99	1.22	0.77	1.02
	72	0.42	1.06	1.13	1.38	0.51	1.13	1.12	1.24	0.39	1.18	1.17	1.25	0.88	1.12	0.92	1.08
	108	0.48	1.03	1.10	1.39	0.56	1.17	1.23	1.04	0.47	1.54	1.15	1.23	0.79	1.15	0.94	1.12
	144	0.56	0.96	1.19	1.29	0.64	1.07	1.22	1.06	0.49	1.15	1.14	1.22	0.53	1.16	1.05	1.26
	180	0.62	0.96	1.29	1.13	0.73	0.93	1.18	1.16	0.49	1.15	1.14	1.22	0.41	1.12	1.12	1.35
1st and 4th cylinder	36	0.55	1.62	1.44	0.39	0.55	1.62	1.44	0.39	0.59	1.62	1.40	0.39	1.13	0.96	0.85	1.06
	72	0.74	1.38	1.31	0.58	0.63	1.54	1.35	0.48	0.59	1.57	1.35	0.48	1.00	1.04	1.00	0.96
	108	0.76	1.32	1.25	0.68	0.59	1.57	1.38	0.46	0.59	1.57	1.35	0.48	0.85	1.21	1.16	0.78
	144	0.75	1.32	1.25	0.68	0.65	1.48	1.36	0.50	0.59	1.57	1.35	0.48	0.85	1.21	1.16	0.78
	180	0.69	1.42	1.28	0.60	0.84	1.27	1.19	0.69	0.59	1.57	1.35	0.48	0.83	1.22	1.16	0.79

Table 6 Comparison of misfire detection methods under the condition of 2000rpm and the intake pressure 43.4kPa.

Misfire Cylinder	Range (deg.)	VI				AI				MAI				ITI			
		#1	#2	#3	#4	#1	#2	#3	#4	#1	#2	#3	#4	#1	#2	#3	#4
1st cylinder	36	0.87	1.19	1.27	0.67	0.82	1.16	1.20	0.81	0.37	1.62	1.67	1.08	1.06	0.86	0.87	1.21
	72	1.49	0.85	0.90	0.76	0.92	1.14	1.19	0.75	0.24	1.57	1.63	1.05	0.96	0.95	1.01	1.08
	108	1.51	0.75	0.81	0.93	0.91	1.34	1.04	0.70	0.46	1.31	1.35	0.87	0.93	0.96	1.04	1.07
	144	1.38	0.72	1.05	0.85	1.24	1.15	0.65	0.96	0.56	1.27	1.32	0.85	0.82	1.03	1.14	1.00
	180	1.36	0.72	1.06	0.86	1.32	1.20	0.66	0.83	0.56	1.27	1.32	0.85	0.65	1.18	1.30	0.97
1st and 4th cylinder	36	0.74	1.28	1.28	0.69	0.94	1.21	1.21	0.64	0.37	1.92	1.94	0.23	1.14	0.85	0.86	1.14
	72	1.20	0.81	0.80	1.19	0.97	1.08	1.11	0.84	0.43	1.89	1.91	0.22	1.03	0.98	0.97	1.03
	108	1.26	0.76	0.74	1.23	1.00	0.95	1.15	0.89	0.54	1.52	1.54	0.40	1.00	1.01	0.99	1.00
	144	1.13	0.90	1.86	1.11	1.13	0.94	1.93	1.01	0.61	1.43	1.45	0.52	0.92	1.09	1.07	0.91
	180	1.08	0.96	0.89	1.06	1.18	0.86	0.91	1.05	0.61	1.43	1.45	0.52	0.81	1.20	1.18	0.81

보듯이 속도 지수(VI)나 가속도 지수(AI)를 이용할 때는 연소 구간 중 관성의 영향을 최대한 배제할 수 있는 36°범위까지 고려해야 실화 판정이 가능함을 알 수 있다. 그런데, 이전 연구에서 제시한 결과⁽¹¹⁾는 관성에 의한 영향을 고려할 필요가 없는 공회전에서만 수행되어, 이러한 속도 지수와 가속도 지수의 한계를 고려하지 못했다. 그러나, 4.1절에서 언급한 대로 관성의 영향을 배제시키기 위하여 고려 범위를 연소 주기 전반부로 축소하면, 실화 판정이 가능하였기에 관성 영향의 배제 유무가 실화 판정 방법에 있어서 가장 중요한 개념이라는 것을 알 수 있다.

또 최대 가속도 지수는 각속도 영역이나 회전 속도에 관계 없이 실화 판정이 가능했으며, 이는 다른 방법과 달리 단순히 고려 범위를 연소 주기 전반부로 축소시킴으로써 가장 쉽게 각속도 변동에 포함된 관성의 영향을 제거하여 연소 정보를 얻을 수 있기 때문이다.

반면에 토크 적분 지수는 적분 범위가 작을 때는 실화를 검출하지 못하지만 이 범위가 연소 주기까지 확대되면 실화 실린더 수와 위치를 판별할 수 있다. 이는 압력 토크 적분의 최대값이 정상 운전 시에는 180°구간의 중간에 존재하나, 실화가 발생하면 이 값이 발생하는 위치가 운전 조건에 따라 이동하고, 미분과 달리 적분은 그 변화가 완만하기 때문에 관성의 영향을 배제하기 위하여 적분 구간을 축소할 수 없는 데 기인한다. 따라서, 관성의 영향이 매우 큰 영역에서 적용하려면, 그 방법의 보완이 필요하다.

4.5 최적 실화 검출 방법

이상의 진단 방법 비교를 통하여 스펙트럼 분석이나 자기 상관 함수의 경우는 관성에 의한 영향을 포함한 상태의 해석이고, 또한 실화 실린더와 운전 조건에 따라 그 특성이 일정하지 않으므로, 통계적인 처리에 의존하지 않고는 실화 실린더의 위치를 판별할 수 없는 한계를 가진다. 또, 속도 지수나 가속도 지수도 공회전을 제외하고는 관성 영향이 포함된 상태에서는 정확한 판별이 어렵다는 것이 판명되었고, 토크 적분 지수도 관성의 영향을 배제하기 위하여 이론적으로는 적분 구간의 축소가 필요하나 실제로는 전연소 주기를 적분 구간으로 설정해야 하며 그에 따라 고속의 관성 지배 영역에서 실화 판정의 어려움이 존재할 수 밖에 없다.

그러나, 최대 가속도 지수는 모든 영역에서 실화 판정의 정확도나 관성의 영향을 제거하는 면에서 가장 우수하고 용이할뿐만 아니라, 실제 자동차에도 부가적인 장치 없이 적용이 가능하므로 가장 최적의 방법이라 판단된다.⁽¹⁶⁾

이와 같이 크랭크축 각속도의 변동을 기관 진단에 이용하려면, 관성에 의한 영향을 제거하는 것이 가장 중요하고, 이를 고려하지 않은 어떤 방법도 판정의 오류를 피할 수 없다. 그런데, 최대 가속도 지수를 제외한 기존의 어떤 방법들도 이를 고려한 것은 거의 없으나, 속도 지수나 가속도 지수처럼 본 논문에서 제시한 개념으로 관성의 영향을 고려하면 방법의 정확성을 향상시킬 수 있었다. 반면에 스펙트럼 해석이나 자기 상관 함수는 본질적으로 관성의 영향을 배제시킬 수 없기 때문에 실화 판정에 적용될 수는 없다. 따라서, 최적의 실화 판정 방법의 기준은 관성의 영향에 대한 고려 유무이며, 이를 고려하여 기존 방법에 수정을 가하면 판정 결과를 향상시킬 수 있다.

5. 결론

크랭크축 각속도의 변동을 이용하여 기관을 진단하는 여러 방법들을 비교, 고찰한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

① 크랭크축 각속도의 변동은 각 연소 주기의 후반부는 관성에 의하여, 전반부는 연소 압력에 의하여 지배되므로, 기관 진단을 위한 연소 정보의 획득을 위해서는 관성의 영향을 배제하기 위해 연소 주기 전반부만의 고려가 필요하다.

② 각속도나 자기 상관 함수의 스펙트럼 분석이나 자기 상관 함수에 의하여 실화 유무의 판정은 제한적 조건에서만 가능하나 실화 실린더 위치는 판별할 수 없다.

③ 속도 지수나 가속도 지수는 관성에 의한 영향이 가장 작은 공회전에서는 기관 진단에 이용될 수 있으나 그 이외의 조건에서는 관성의 영향을 제거하는 방법으로 수정되어야 판정이 가능해질 수 있다.

④ 토크 적분 지수는 특성상 연소 주기 전구간의 분석이 필요하므로, 관성의 영향이 큰 고속, 저부하 조건에서는 적용하기 어렵다.

⑤ 분석 결과, 최대 가속도 지수가 가장 효과적 인 실화 검출 인자이며, 부가적인 장치 없이 자동

차의 실화 검출에 이용될 수 있다.

참고문헌

- (1) California Air Resources Board, 1995, "Amendments to Regulations Regarding On Board Diagnostic System Requirements for 1994 and Later Passenger Cars, Light-Duty Trucks and Medium-Duty Vehicles and Engines - Mail Out #95~03," pp. 9~13.
- (2) Martin Klenk and Winfried Moser, 1993, "Misfire Detection by Evaluating Crankshaft Speed-A Means to Comply with OBDII," *SAE Paper* 930399.
- (3) Tyree, C. D., 1992. "Emission Levels and Catalyst Temperatures as a Function of Ignition-Induced Misfire," *SAE Paper* 920298.
- (4) Plapp, G., Klenk and M. Moser, W., 1990, "Methods of On Board Misfire Detection," *SAE Paper* 900232.
- (5) Arun K. Sood, 1985, "Engine Fault Analysis : Part I-Statistical Method," *IEEE Trans. Industrial Electronics*, Vol. IE 32 No.4, pp. 294~300.
- (6) Sohair F. Rezek, 1987, "A Diagnostic Technique for the Identification of Misfiring Cylinder (s)," *SAE Paper* 870546.
- (7) William B. Ribbens, "Road Tests of a Misfire Detection System," *SAE Paper* 940975, 1994.
- (8) Giorgio Rizzoni, 1989, "Diagnosis of Individual Cylinder Misfires by signature Analysis of Crankshaft Speed Fluctuation," *SAE Paper* 890884.
- (9) William B. Ribbens and Giorgio Rizzoni, 1990, "On Board Diagnosis of Engine Misfire," *SAE Paper* 901768.
- (10) Yaojung Shiao and John J. Moskwa, 1994, "Misfire Detection and Cylinder Pressure Reconstruction for SI Engines," *SAE Paper* 940144.
- (11) Naeim A. Henein, Walter Bryzik Clive Taylor and Angelo Nichols, 1993, "Dynamic Parameters for Engine Diagnostics:Effect of Sampling," *SAE Paper* 932411.
- (12) 배상수, 1995, "크랭크축 각속도의 변동을 이용한 실화 판정," 서울대학교 공학 석사 학위 논문.
- (13) Georg F. Mauer, 1989, "On-Line Cylinder Diagnostics on Combustion Engines by Non-contacting Torque and Speed Measurement," *SAE Paper* 890485.
- (14) 배상수, 임병진, 임인건, 박중범, 김응서, 1995, "사이클 내 크랭크축 각속도의 변동 해석," 한국 자동차 공학회 춘계학술대회 논문집 Vol. 1, pp. 34~39.
- (15) Giorgio Rizzoni, 1986, "A Dynamic Model for the Internal Combustion Engine," PhD Thesis, the University of Michigan.
- (16) 김세웅, 1996, "크랭크축 각속도 해석에 의한 자동차 기관의 실화 검출," 서울대학교 공학박사 학위 논문.