

A study on the Detection of Misfire in Gasoline Engine via Walsh Transform

李泰杓* · 金種夫** · 安斗守***
 (Tae-Pyo Lee · Jong-Boo Kim · Doo-Soo Ahn)

Abstract - The primary cause of air pollution by vehicles is imperfect combustion of fuel. One of the most usual causes of this imperfect combustion is the misfire in IC(Intenal Combustion) engine. Recently it is obligated for an ECU to monitor the emission level and warn the driver in case of exceeding specified emission standards. Therefore, in order to comply with this OBD-II regulations, car makers are investing a considerable amount into technology which would enable the detection of misfire and the particular cylinder in which misfire is taking place. So far, it has been able to detect misfire using engine speed, which can be obtained crank angle. However, such a method posed a problem in analyzing at high speed and in recognizing the misfire from the load impact at bumpy road.

In this paper, misfire detection is made possible by simple arithmetic using WDFT, especially at high engine speed. In addition, the moving window method of a Walsh function is applied to determine the cylinders under misfire in case of multiple misfires. An actual experiment was conducted to prove that WDFT is applicable to effective in computation speed and to same result in misfire detection and cylinder determination at idle, part load and bumpy road conditions.

Key Words : OBD-II(on board diagnosis-II), WDFT(Walsh Discrete Fourier Transform)

1. 서 론

내연기관의 주된 사용은 자동차로써, 근래에 와서 자동차의 급격한 증가로 그 공해가 우리나라 뿐만 아니라 세계 각국에서 크게 부상되어 그 대책이 절실이 요구되고 있다. 자동차의 배기가스에 의한 대기오염은 1943년 9월 미국의 로스앤젤레스시에서 광화학 스모그의 발생으로 사람들에게 기침, 두통, 현기증 등의 건강장애를 일으키는 문제가 발생하여 이것을 계기로 1950년 이후 자동차 배기가스는 법으로 규제받게 되었다[1,2].

이러한 이유로 자동차 생산업자들은 강화되는 배기가스 규제에 대응하는 엔진제어장치의 개발이 필요하게 되었고, 배기가스를 감지 할 수 있는 각종 센서들로부터 신호를 받아 배기가스의 상태를 감지하여 이상유무를 운전자에게 알려주는 전자화시스템을 개발하여 현재 차량에 적용하고 있다[3]. 최근에는 배기가스의 규제가 더욱 심화되어 배기가스의 상태를 ECU가 스스로 식별하고 경고하도록 의무화하는 OBD-II 규정을 적용받게 되었으며, 이 규정을 만족하지 못할 경우 주요 자동차 시장인 미국으로의 자동차 수출은 불가능하게 되며, 현재 OBD-II 시스템을 전량 수입에 의존하고 있는 우리나라

에서는 이러한 기술의 하나인 실화(misfire) 진단 항목의 연구없이는 기술의 독자적 구축은 가능하다고 할 수 없다.

엔진실화(misfire)를 감지하는 시스템에 대한 기존의 연구는 엔진의 출력측인 크랭크 각도마다 감지되는 엔진회전수 또는 엔진 회전주기 신호의 변동률을 이용하였다[4,5]. 그러나, 이 방법은 고속의 엔진 회전시 실화로 인한 미세한 토크 변동이 엔진의 회전관성에 묻혀 검출이 어렵고, 노면이 불안정할 경우 노면으로부터의 충격이 실화로 인식될 수 있는 등의 실화검출이 매우 불확실하다는 문제가 있었다[6]. 이러한 문제를 해결하기 위해서 주기신호를 시간의 함수가 아닌 주파수 성분의 크기와 위상각으로 해석하는 이산푸리에변환(DFS) 방식이 검토되어 왔지만, 이 방법 또한 미리계산된 정현, 여현 함수 테이블을 엔진제어장치내의 메모리에 설정하여 저장하여야 하며, 주파수 성분 분석을 위하여 감지되는 엔진회전수 즉, 데이터의 갯수 만큼의 곱셈과, 신호의 크기 계산을 위한 곱셈, 위상관별을 위한 계산을 위한 처리루틴이 필요하게 되어 메모리의 소모와 루틴 처리시간이 길어지는 단점이 있다. 또한 연소현상의 정확한 규명을위해 레이저 유도형광법(LIF, Laser Induced Fluorescence), 고속 카메라법(High Speed Camera) 및 광섬유를 이용[6,7]하여 연소실의 연소현상을 규명하였으나, 이러한 방법들을 실제 엔진에 장착하기에는 장착문제, 신호처리의 난이도, 광학계자체의 측정오차, 장비의 고가 등과 같은 문제가 있어 실제에서 적용하는데는 많은 문제가 있다.

따라서, 상기문제들을 해결하기위해 이산푸리에변환(DFT, Discrete Fourier Transform)의 기저함수를 월쉬(Walsh) 함수[8-10]로 변환시킨 이산 월쉬-푸리에변환(WDFT, Walsh

* 正 會 員 : 現代自動車 파워트레인研究所 研究員
 ** 正 會 員 : 人德大學 메카트로닉스과 教授 · 工博
 *** 正 會 員 : 成均館大 電氣電子컴퓨터工學部 教授 · 工博
 接受日字 : 2000年 1月 27日
 最終完了 : 2000年 5月 15日

Discrete Fourier Transform)을 이용하여 단순한 가감산 계산만으로 실화발생여부를 판정할 수 있고, 고속의 엔진회전수에서도 실화판별을 가능하게 하였다. 또한 월쉬(Walsh)함수의 이동창(Moving window)방식을 이용[11]하여 단기통 및 다기통 실화에 대한 기통판별까지 가능하게 하였다. 그리고, 이산 월쉬-푸리에변환(WDFFT)을 무부하 아이들(Idle)상태, 부하 운전 상태 및 험로주행상태에서 시험을 하여 실제 시스템에서의 실화 발생 감지여부를 판별하고, 실화발생 기통판별까지 가능한지를 시험을 통하여 살펴보았다.

2. WDFFT의 이론

2.1 직교함수[12]

실수 또는 복소수 값을 갖는 연속(continuous)함수의 집합 $\{\phi_i(t)\}(i=0, 1, 2, \dots)$ 가 정의구간 $[t_0, t_0+T]$ 에서 다음 식과 같은 직교특성을 가질 때 이를 직교함수집합(orthogonal function set)이라고 한다.

$$\int_{t_0}^{t_0+T} \phi_i(t) \phi_j(t) dt = \begin{cases} k, & i=j \\ 0, & i \neq j \end{cases} \quad (2.1)$$

여기서 첨자 i 와 j 는 양의 정수이고 가중치(weight) k 는 양의 정수 또는 한정된(fixed) 함수이다. 만약 k 가 1이면 정규(normalized)직교라고 하며 그렇지 않은 경우에는 비정규(non-normalized)직교라고 한다. 비정규 직교함수는 k 를 변화하여 정규직교로 할 수 있다.

정의구간 $[t_0, t_0+T]$ 에서 적분 가능한 임의의 함수 $f(t)$ 는 그것의 급수 전개된 근사값 $\hat{f}(t)$ 와 사이의 평균자승오차(mean-square error)를 최소로 할 때에 다음과 같이 급수로 전개될 수 있다.

$$f(t) \approx \hat{f}(t) = \sum_{i=0}^{\infty} F_i \phi_i(t) \quad (2.2)$$

이때 평균자승오차는 다음과 같이 정의되며 F_i 는 직교계수라고 한다.

$$\epsilon = \int_{t_0}^{t_0+T} \left[f(t) - \sum_{i=0}^{\infty} F_i \phi_i(t) \right]^2 dt \quad (2.3)$$

식(2.3)의 평균자승오차가 0으로 수렴할 경우를 완전(complete)직교라고 하며, 그렇지 않을 경우를 불완전(incomplete)직교라고 한다. 따라서 식(2.2)의 F_i 는 평균자승오차를 최소로 한다는 필요조건으로 얻을 수 있다. 평균자승오차를 최소로 하기 위해서는 다음과 같이 F_i 에 대한 편미분값이 0이 되어야 한다.

$$\frac{\partial \epsilon}{\partial F_i} = 2 \int_{t_0}^{t_0+T} \left[f(t) - \sum_{i=0}^{\infty} F_i \phi_i(t) \right] \phi_i(t) dt = 0 \quad (2.4)$$

2.2 푸리에-월쉬 함수관계[8-10,13]

푸리에함수는 기저함수가 복소지수(complex exponential)형태이므로 연산속도가 저하되어 연속적인 신호를 실시간 고속 처리 하는 데는 많은 문제점이 있으며, 실제에서 하드웨어로 구성하는데 많은 어려움이 있다. 이에 정현 및 여현함수 형태의 아날로그 신호를 디지털 신호로 변환하여 고속처리하고자 할 경우에 직교변환을 이용하였다. 월쉬함수는 기저함수가 +1과 -1의 2진 디지털 성분의 값을 가지고, 두 개의 월쉬함수를 곱해도 다른 하나의 월쉬함수 형태로 표현되므로 복소수 계산이 필요없어서 연산량이 적고 계산이 빠르며, +1과 -1을 0과 1의 비트로 처리함으로써 시스템의 해석 및 하드웨어 설계가 간편하여진다.

정현 및 여현함수로 푸리에 급수 전개된 일반적인 신호를 월쉬함수로 변환하여 나타내기 위하여 우선 임의의 함수 $f(t)$ 의 샘플링값을 이산 푸리에 급수로 표현하면 다음과 같다.

$$f(\theta_k) = a_0 + \sum_{n=1}^{\frac{m}{2}-1} [a_n \cos n \theta_k + b_n \sin n \theta_k] + b_{\frac{m}{2}} \sin \frac{m}{2} \theta_k \quad (2.5)$$

여기서,

$$\theta_k = \left(\frac{2\pi k}{m} \right), \quad k = 0, 1, 2, \dots, m-1, \quad n = 1, 2, \dots, \frac{m}{2} - 1$$

또한, 푸리에계수를 이산값으로 표현하면 다음과 같다.

$$a_0 = \frac{1}{m} \sum_{k=0}^{m-1} f(\theta_k) \quad (2.6)$$

$$a_n = \frac{2}{m} \sum_{k=0}^{m-1} f(\theta_k) \cos n \theta_k, \quad n = 1, 2, \dots, \frac{m}{2} - 1$$

$$b_n = \frac{2}{m} \sum_{k=0}^{m-1} f(\theta_k) \sin n \theta_k, \quad n = 1, 2, \dots, \frac{m}{2}$$

식(2.6)의 $f(\theta_k)$ 를 월쉬함수로 대체하면 월쉬함수의 푸리에계수는 다음과 같다.

$$Ta_0 = \frac{1}{m} \sum_{k=0}^{m-1} \text{Wal}(p, k) \quad (2.7)$$

$$Ta_n = \frac{2}{m} \sum_{k=0}^{m-1} \text{Wal}(p, k) \cdot \cos n \theta_k, \quad n = 1, 2, \dots, \frac{m}{2} - 1$$

$$Tb_n = \frac{2}{m} \sum_{k=0}^{m-1} \text{Wal}(p, k) \cdot \sin n \theta_k, \quad n = 1, 2, \dots, \frac{m}{2}$$

여기서, $p = 0, 1, \dots, m-1$ 이다.

이 때 식(2.7)은 식(2.8)의 월쉬함수 연산특성에 의하여 식(2.9)와 같이 Cal과 Sal 성분으로 분리하여 표시할 수 있다.

$$\left. \begin{aligned} \sum_{k=0}^{m-1} \text{Sal}(p, k) \cdot \cos n \theta_k &= 0 & p = 1, 2, \dots, \frac{m}{2} - 1 \\ \sum_{k=0}^{m-1} \text{Cal}(p, k) \cdot \sin n \theta_k &= 0 & n = 1, 2, \dots, \frac{m}{2} - 1 \end{aligned} \right\} \quad (2.8)$$

$$Ta_0 = \frac{1}{m} \sum_{k=0}^{m-1} Cal(p, k) \quad (2.9)$$

$$Ta_n = \frac{2}{m} \sum_{k=0}^{m-1} Cal(p, k) \cdot \cos n \theta_k, \quad n = 1, 2, \dots, \frac{m}{2} - 1$$

$$Tb_n = \frac{2}{m} \sum_{k=0}^{m-1} Sal(p, k) \cdot \sin n \theta_k, \quad n = 1, 2, \dots, \frac{m}{2}$$

여기서, $p = 0, 1, \dots, m-1$ 이다.

이 식을 월쉬함수로 나타내기위해 식(2.6)에 대입하면 다음과 같다.

$$a_0 = \frac{1}{m} \sum_{k=0}^{m-1} \sum_{p=0}^{m-1} Cc_p Wal(p, k) \quad (2.10)$$

$$a_n = \frac{2}{m} \sum_{k=0}^{m-1} \sum_{p=0}^{m-1} Cc_p Wal(p, k) \cos n \theta_k, \quad n = 1, \dots, \frac{m}{2} - 1$$

$$b_n = \frac{2}{m} \sum_{k=0}^{m-1} \sum_{p=0}^{m-1} Cc_p Wal(p, k) \sin n \theta_k, \quad n = 1, 2, \dots, \frac{m}{2}$$

그러므로 식(2.10)을 식(2.9)의 월쉬함수 연산 특성을 고려하여 정리하면 다음과 같이 푸리에계수를 월쉬계수로 표시할 수 있다.

$$a_0 = \sum_{p=0}^{\frac{m}{2}-1} Ta_0 Cc_p \quad (2.11)$$

$$a_n = 2 \sum_{p=0}^{\frac{m}{2}-1} Ta_n Cc_p, \quad n = 1, 2, \dots, \frac{m}{2} - 1$$

$$b_n = 2 \sum_{p=0}^{\frac{m}{2}-1} Tb_n Sc_p, \quad n = 1, 2, \dots, \frac{m}{2}$$

따라서, 본 연구에서는 엔진회전 주기신호의 주파수 분석 방식으로, 기저함수를 월쉬함수로 대체한 이산 월쉬-푸리에변환(WDFT)을 사용한다.

3. 이산 월쉬-푸리에변환에 의한 엔진 실화 분석

3.1 이산 월쉬-푸리에변환에 의한 엔진신호 표현

정상적인 엔진주기신호(그림 1)는 4기통 엔진인 경우, 엔진 1회전당 4회의(4기통일 경우) 폭발행정을 맞이하므로 4회의 주기 정점(peak)지점이 나타나게 된다. 하지만 그림1에서 보는 바와 같이 기통간의 기계적 특성이 다르기 때문에 4회의 정점(peak) 파형이 동일하게 나타나지는 않고 조금은 비대칭적으로 나타난다.

만약, 그림2와 같이 실화가 발생된다면 4회의 정점 파형은 엔진 토크 저하로 주기의 변형이 일어나고, 실화를 유발한 실린더에 따라 변형의 위치가 이동된다.

엔진 1회전을 주파수 측면에서 보면 4회의 정점은 주파수 4에 인접하고 한번의 실화 발생은 주파수 1에 인접하게 된다. 즉, 실화성분이 정확히 주파수 1을 나타내지는 않지만, 주파수 스펙트럼분석시 주파수 1에 가장 지배적인(dominant)

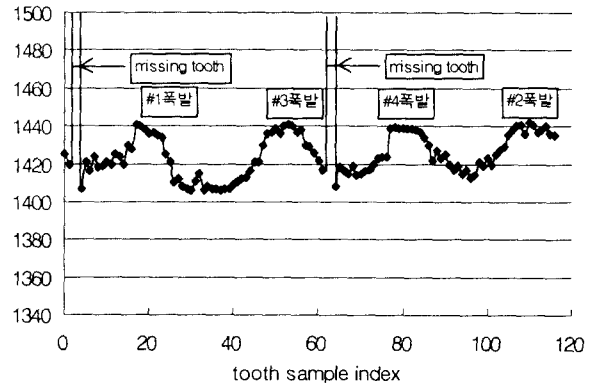


그림 1 정상적인 엔진주기 신호
Fig. 1 Normal engine signals

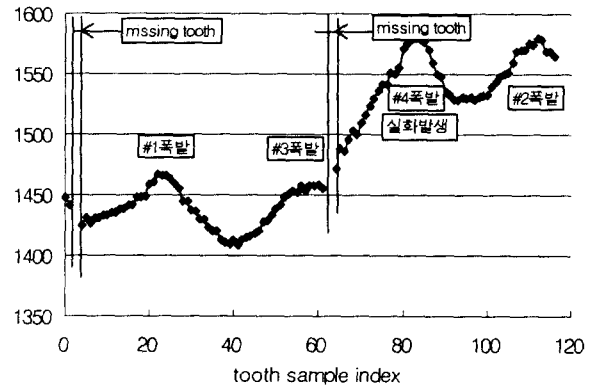


그림 2 실화발생시 엔진주기 신호
Fig. 2 Misfire engine signals

성분이다.

그러므로, 이산 월쉬-푸리에변환을 이용하여 전체 스펙트럼 분석중 주파수 1에 대한 진폭(Amplitude) 스펙트럼만을 따로 분리하여 실화판정에 사용한다. 즉, 이산 월쉬-푸리에변환 방식을 사용하여 주파수 1의 스펙트럼 성분 추출이 가능하고, 실화가 있을 경우 진폭에 대한 스펙트럼은 큰값을 나타내고, 실화가 없는 경우 작은값을 나타낸다.

3.2 이동창(MOVING WINDOW)법

실화(Misfire)에 의한 tooth주기 변동성분이 이산 월쉬-푸리에변환 구간경계에서 다음 이산 월쉬-푸리에변환구간과 양분되는 경계조건문제(Boundary Condition Problem)을 해결하기 위한 방법이다. 즉, 본 연구에서는 이산 월쉬-푸리에변환 계산이 4개의 상사점단위로 계산되어지므로 4번째 상사점에서 변동성분이 발생되었다면 실화에 대한 검출이 불가능하므로 이를 해결하고자 이산 월쉬-푸리에변환 계산이 1 상사점(TDC, Top Dead Center) 단위로 이동하면서 중복 계산하는 것을 말한다.

예를 들어 Tooth 데이터를 1번 실린더 폭발행정으로부터 받아들인다면 처음의 이산 월쉬-푸리에변환(WDFT) 구간은 1-3-4-2 실린더의 값을(폭발행정 기준)나타내고, 상사점(TDC)간격으로 이동시키면 다음의 이산 월쉬-푸리에변환구간은 3-4-2-1 실린더의 값을 나타내게 된다.

3.3 이산 월쉬-푸리에변환을 이용한 엔진실화판별법

본 연구에 사용된 엔진은 가솔린엔진으로써 냉각방식은 수냉식이며 4기통 4사이클 엔진이고, 인젝터(Injector)가 각 실린더의 흡기 다기관에 1개씩 장착되어 연료를 분사하는 MPI(Multi Point Injector)방식의 연료분사장치가 장착되어 있다. 또한 본 엔진은 엔진블럭에 장착되어 있는 크랭크축위치센서(CPS, Crankshaft Position Sensor)로부터 크랭크축(crankshaft) 1회전당 58개의 Tooth 주기(missing tooth 1개 포함)를 출력(output)으로 내보낸다. 즉, 엔진 1회전이란 크랭크축 2회전에 해당하므로 116개의 Tooth 신호(missing tooth 2개 포함)를 내보낸다. WDFT 계산을 위한 tooth 데이터의 합산은 moving window적용을 위하여 식 (3.1)과 같이 매 29개의 단위로 합산후, 합산 결과를 출력하고 덧셈기(adder)를 소거(Reset)시킨다. 이 과정에서 합산된 결과값을 16 바이트 버퍼(Byte buffer)에 순차적으로 저장한다.

$$SUM_j = \sum_{i=0}^{29} Tooth_i \tag{3.1}$$

16 바이트 버퍼의 저장이 완료되면 식(3.2), 식(3.3)과 같이 RLL_j 와 IMM_j를 계산하고, 16 바이트 버퍼의 최상위 4바이트(SUMRRL_{j-3})를 지우고, 새로운 SUMRRL_{j,1} 4 바이트를 채워 식(3.4)와 같이 j번째의 이산-푸리에변환(WDFT_j)를 계산한 후 실화(misfire) 한계값(Threshold)과 비교한다.

$$RLL_j = (SUMRRL_{j-3} - SUMRRL_{j-2} - SUMRRL_{j-1} + SUMRRL_j) \tag{3.2}$$

$$IMM_j = (SUMRRL_{j-3} + SUMRRL_{j-2} - SUMRRL_{j-1} - SUMRRL_j) \tag{3.3}$$

$$WDFT_j = |RLL_j| + |IMM_j| \tag{3.4}$$

j번째 이산 월쉬-푸리에변환의 한계값 초과 횟수가 연속적으로 나타낼 때 실화 발생을 판정하게 된다. TDC 간격으로 이동하는 이동창(Moving window)방식을 적용하므로 위상(phase)에 대한 계산은 필요 없다.

3.4 기통판별과정

경계선 조건 문제(Boundary condition problem)에 의해서 한번은 소멸되므로, 단기통 실화가 발생하게 되면 이동창(Moving window)에 의해서 큰값이 연속적으로 3회 발생하는 지점이 생길 것이고, 연속 3회 미만일 경우는 잡음(Noise)로 판단한다. 여기서, 실화를 유발한 실린더는 이 3회중 마지막 큰값에 해당하는 실린더가 된다. 초과횟수가 연속 4, 5, 6 회이면 2기통에서 실화가 발생한 다기통 실화 (Multiple Misfire)이므로 다기통실화 기통판별 과정이 수행되는데, 연속 4회 큰값이 발생하게 되면 마지막 큰값의 실린더와 바로

뒤 실린더가 실화를 유발한 실린더가 된다. 표1에 단기통 및 다기통실화가 발생할 경우 실화가 발생한 실린더를 나타내었다. 이러한 이동창(Moving window)방식은 기통판별 문제를 해결해주며 특히, 다기통 실화 검출 및 기통판별까지도 새로운 로직(Logic)의 구성없이 가능하게 해준다는 장점이 있다.

표 1 이동창(Moving window)에 의한 기통판별 방법

Table 1 Cylinder decision method using moving window

	큰값 발생 빈도	misfire cylinder 위치	EX.
Single misfire	연속 3 회	마지막 큰값	1
Multiple misfire	연속 4 회	마지막 큰값, 바로뒤	1, 3
	연속 5 회	마지막 큰값, 두번째 뒤	1, 4
	연속 6 회	마지막 큰값, 세번째 뒤	1, 2

3.5 이산 월쉬-푸리에변환 스케일보정

크랭크축위치센서(C.P.S)의 Tooth 주기 데이터는 엔진회전수(rpm)과 공기량(Load)의 함수이므로, 엔진회전수와 공기량의 변화에 따라 Tooth 주기 데이터의 크기가 변화된다. 또한 이산 월쉬-푸리에변환 계산에서도 진폭은 원래 신호가 가지고 있는 자체 진동폭(ripple)에 큰 영향을 받는다.

그러므로 한계값(threshold)에 의한 실화 검출을 위해서는 엔진회전수(rpm), 진동폭 비례상수(Ripple factor)등에 대해 식 (3.5)와 같이 Scale 보정이 이루어져야 한다.

$$WALSH_j * (RPM_j / 1000) * RIPPLE FACTOR \tag{3.5}$$

아래 식(3.6)과 같이 크랭크축위치센서(C.P.S)의 tooth 주기가 엔진회전수와 역수 관계이므로 엔진회전수(rpm) 보정을 통해 전 운전영역에서 일정한 값을 가지나, 이산 월쉬-푸리에변환 처리를 하게 되면 진폭은 엔진회전수와 공기량의 변화에 따라 변화되므로 신호 자체의 진동폭(Ripple factor)에 대한 보정이 필요하다.

$$Tooth_i * RPM_i / 1000 = constant \tag{3.6}$$

진동폭 비례상수(Ripple factor)는 엔진회전수와 공기량의 함수이므로, 엔진회전수에 따른 진동과 공기량의 변화에 따라 변화되는 진폭(Ripple)을 보정해 주어야 한다. 표 2는 실험에 의해 구한 진동폭 비례상수 값이다.

표 2 이산 월쉬-푸리에변환 진동폭 비례상수

Table 2 The ripple factor of WDFT

RPM	850	1500	2000	2500	3000	3500	4000	5000	5500
R_FACTOR.	1	4	6	8	10	12	14	14	15
WIDTH	140	35	23.3	17.5	14	11.6	10	10	9.3

3.6 엔진실화검출 제한조건

배기가스 규제가 가장 엄격한 미국 CARB(California Air Resource Board)의 승인을 받아 다음과 같은 조건에서는 엔진실화 검출이 제외된다. 즉, 자동차는 기계적인 장치에 의해 구동되기 때문에 엔진에서 실화가 발생하더라도 표3과 같은 조건인 경우 엔진제어장치인 ECU에서는 실화로 판정하지 않도록 되어 있다.

표 3 엔진실화검출 제한조건

Table 3 The prohibit condition of engine misfire detection

조건	비고
1 엔진회전수가 5500rpm이상, 800rpm 이하	기계적인 대응 불가 구간
2 공기압이 초당 20Kpa이상 변화	급가속, 급감속구간
3 엔진회전수가 초당 1000rpm 이상 변화	급가속, 급감속구간
4 기어 변속후, 전기부하 작동후 5초동안	공기량 보정 구간
5 최고차속 제한에 따른 연료 차단	연료차단에 따른 실화발생 구간
6 초기시동후 5초동안	공기량보정 구간

4. 모의실험

4.1 시스템구성

시스템의 구성은 그림 3과 같이 엔진회전주기 신호(C.P.S)의 입력과 엔진기통의 진동을 전달하는 신호를 외부입력으로 받고, 실화발생장치로는 독일 BOSCH社의 점화계통을 조정하는 Ignition Induced Misfire Generator를 사용하였다. 엔진제어장치로는 현재 현대자동차 accent차량에 탑재되어 New- α 의 엔진부분을 제어하는 독일 BOSCH社의 M2.10.3 엔진제어장치를 사용하였다. 실화발생장치는 엔진을 제어하는 엔진제어장치로부터 점화신호를 인터페이스(Interface)하여 원하는 기통의 점화신호를 제어하여 실화를 발생시킨다. 월쉬-이산푸리에 변환을 이용한 실화검출장치가 정확히 실화발생 기통을 판별하는 것을 확인하기 위해 실화발생장치로부터 실화발생 기통의 신호를 받아 비교하였다. 또한 기통 진폭의 그래프 처리는 PC가 수행하도록 구성하였다.

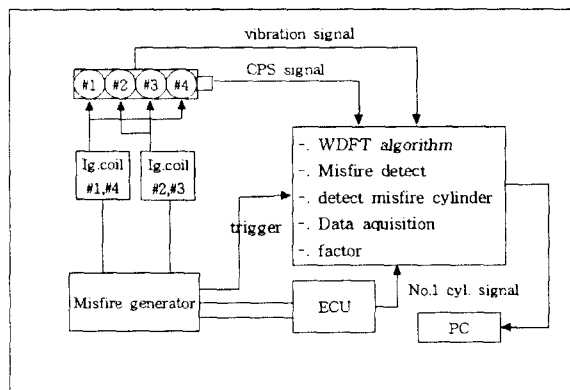


그림 3 시스템 구성도
Fig. 3 System configuration

시험항목은 무부하 Idle 상태, 운전상태로 하고, 실화발생 비율은 크랭크축(crankshaft) 10회전당 1번의 실화 발생으로 고정 즉, TDC(Top Dead Center) 20회당 1번으로 고정하였다.

4.2 이산푸리에변환과 이산 월쉬-푸리에변환 결과비교

두함수에 대한 결과를 동일한 축상, x-축은 위상(phase), y-축은 진폭(amplitude)으로 표현하였다.

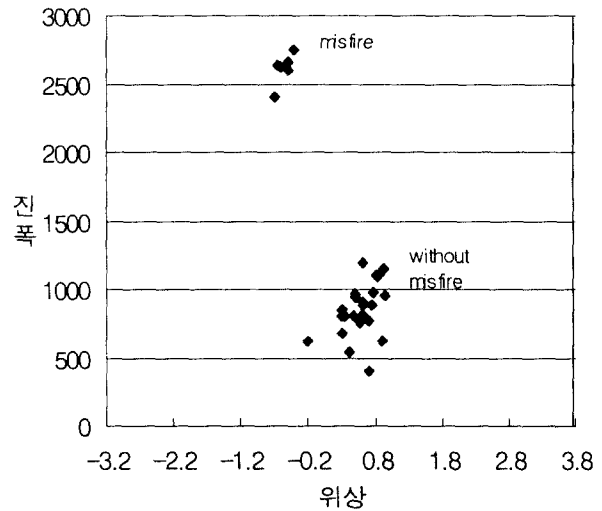


그림 4 이산푸리에 변환의 위상 대 진폭 그래프
Fig. 4 DFT PHASE vs. AMP. GRAPH

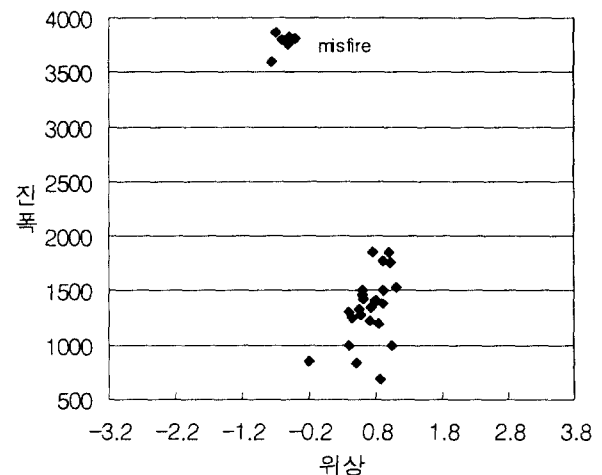


그림 5 이산 월쉬-푸리에변환의 위상 대 진폭그래프
Fig. 5 WDFE PHASE vs. AMP. GRAPH

두 결과를 비교하면, 이산 월쉬-푸리에변환(WDFE)에 의한 결과가 이산푸리에 변환(DFT)에 비해 전체적으로 약간씩 위쪽으로 이동(shift-up) 되는 것을 제외하고는 동일한 결과를 가짐을 볼수 있다.

4.3 무부하 아이들(idle)상태에서의 단기통 및 다기통 실화

이산 윌쉬-푸리에변환(WDFT)방식은 상사점(TDC) 간격의 이동창(Moving window) 방식을 적용하므로 단기통 실화(Single misfire) 발생시 변동성분이 연속적으로 3회 검출되고, 다기통 실화(Multiple misfire) 발생시 변동성분은 발생기통에 따라 4, 5, 6 회 검출된다.

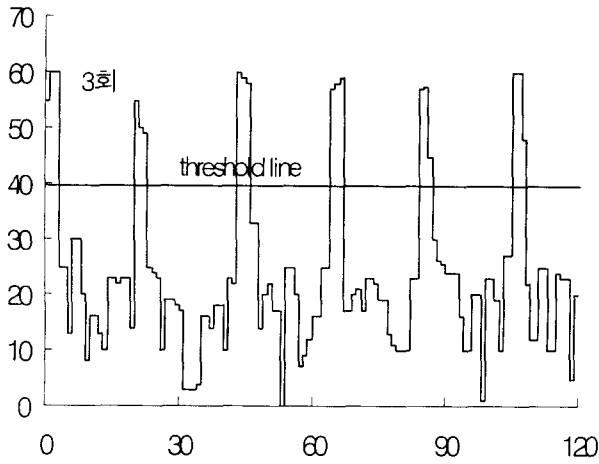


그림 6 Idle rpm 상태에서 No.1 단기통 실화 (비율=1/5)
Fig. 6 No-load, Idle rpm, No.1 single misfire (rate=1/5)

그림 6은 No.1 실린더 단기통 실화에 대해 실험한 결과이며, 상사점 간격의 이동창(Moving window)에 의해서 실화에 대한 변동성분은 이동시간 인덱스(Moving time index) 20회 당 3회의 한계값 초과 형태로 나타난다. 그림 7은 No.1과 No.4 실린더 다기통 실화발생에 대한 결과이며, 그림 8은 No.1과 No.2 실린더 다기통 실화발생에 대한 결과이다.

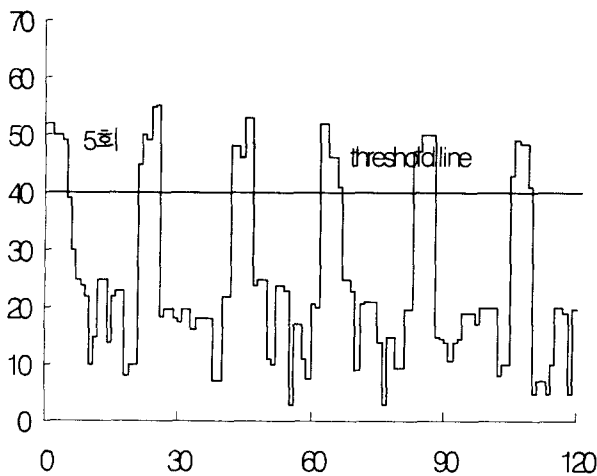


그림 7 Idle rpm상태에서 No.1,No.4 다기통실화 (비율=1/5)
Fig. 7 No-load, Idle rpm. No.1,4 multiple misfire(rate=1/5)

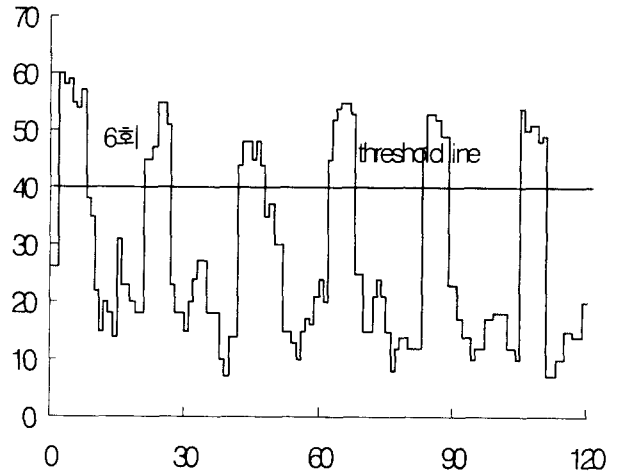


그림 8 Idle rpm상태에서 No.1, No.2 다기통 실화(비율=1/5)
Fig. 8 No-load, Idle rpm. No.1,2 multiple misfire (rate=1/5)

이상의 그림에서 보면 이산 윌쉬-푸리에변환에 의한 방법으로 실화 판별을 하였을 때 실화발생을 정확히 감지하는 것을 알 수 있었으며 실화발생 기통까지도 판별이 가능함을 알 수 있었다.

4.4 Part load 상태에서의 단기통 및 다기통 실화

Load, Rpm, Ripple에 의한 Scale 보정이 수행되어 실화(Misfire) 판단 기준선(Threshold)을 전운전영역에서 동일하게 한다. 즉, 실화 판단 진폭 기준선(Amplitude threshold)은 4000으로 하였다.

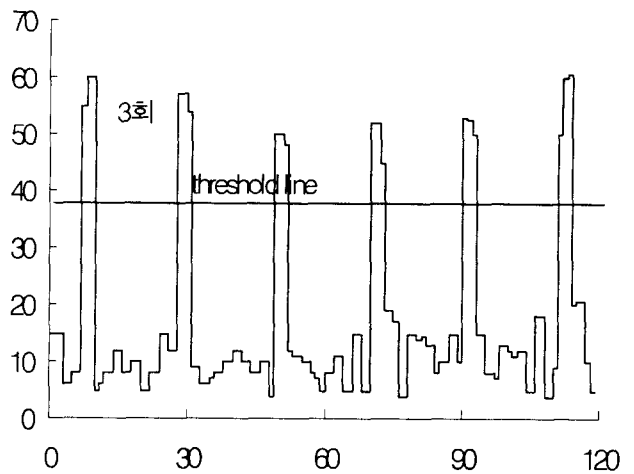


그림 9 부분부하상태 No.4 실린더 단기통 실화 (비율=1/5)
Fig. 9 Part load with 3000rpm, No.4 single misfire (rate=1/5)

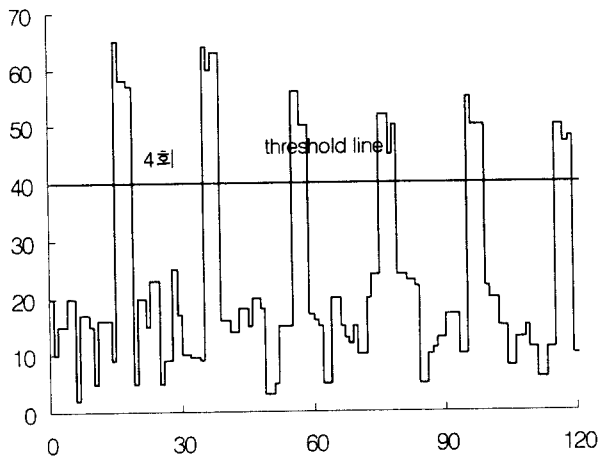


그림 10 부분부하상태 No.1, No.3 다기통 실화 (비율=1/5)
 Fig. 10 part load with 3000rpm, No.1,3 multiple misfire (rate=1/5)

그림9는 No.4 실린더 단기통 실화이며 실화에 따른 변동성 분은 이동시간 인덱스(Moving time index) 20회당 3회의 한계값 초과 형태로 아이들 상태와 동일함을 알 수 있다. 또한, 그림10은 4회의 한계값 초과 형태로 나타났다. 그림9와 그림10에서 알 수 있는바와 같이 엔진회전수, 공기량, 진동폭에 대한 이산 월쉬-푸리에변환의 스케일(Scale) 보정이 수행되었기 때문에 외란에 큰 영향을 받지 않으므로 무부하 아이들(Idle) 상태와 동일한 결과를 얻을 수 있었다.

4.5 험로 주행(Bumpy road)상태에서의 단기통 실화

비포장 도로를 주행하면서 외부에서의 충격이 엔진실화(misfire) 검출에 미치는 영향에 대해서 확인한 결과 그림 11과 같다.

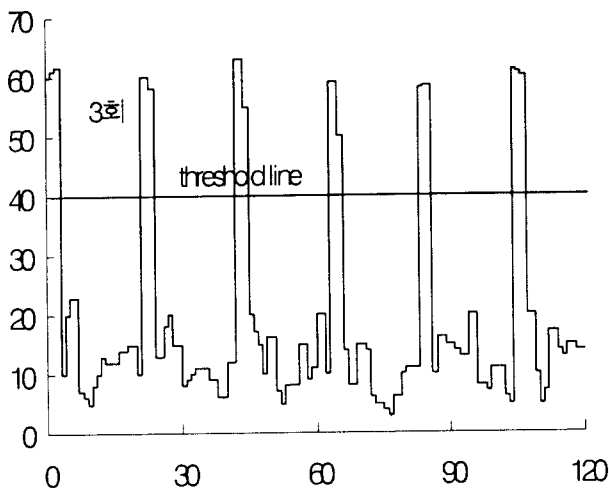


그림 11 험로주행상태(2000rpm) No.1 단기통 실화(비율=1/5)
 Fig. 11 Bumpy road with 2000rpm No.1 single misfire(rate=1/5)

위의 그림11에서 나타나는 바와 같이 험로주행(Bumpy road)주행시에도 이산 월쉬-푸리에변환에 의한 엔진실화 검출방식은 영향을 받지 않는다.

4.6 이산 월쉬-푸리에변환과 푸리에변환의 계산식 비교

이산 월쉬-푸리에변환과 푸리에변환의 성능을 평가하기 위한 하나의 지표로 계산상의 평가를 위해 본 시스템을 구성하는데 이용되는 월쉬 함수와 푸리에 함수에 대한 비교를 해 보고자 한다.

월쉬 함수는 기저함수(Basis function)가 ±1의 실수로 구성되어 있기 때문에 입력 데이터의 크기가 N일 때 $N \log_2 N$ 의 실덧셈과, N회의 곱셈이 필요하다. 그러나, 푸리에 함수는 기저함수(Basis function)가 복소 지수 형태이기 때문에 고속 푸리에 변환을 적용하였을 경우 복소계산은 $N \log_2 N / 2$ 회의 곱셈과 $2 \log_2 N$ 회의 덧셈이 필요하다. 따라서, 컴퓨터에 의한 계산에서는 계산시간은 거의 곱셈의 횟수에 좌우되므로 N값이 크면 클수록 월쉬변환 적용이 더욱 효과적이다[2][9]. 이것을 정리하면 표 4와 같다.

표 4 월쉬 함수 대비 이산 푸리에함수 곱셈 연산량 비교

Table 4 The comparison of multiple computation Walsh function vs. Fourier function

N (입력데이터의 크기)	Walsh	Fourier	연산량 비 (Fourier/Walsh)
4	4	4	1
8	8	12	1.5
16	16	32	2
32	32	80	2.5
⋮	⋮	⋮	⋮

5. 결 론

실화는 여러가지 원인에 의해서 발생하므로 나타나는 영향도 여러가지 형태로 나눌 수 있지만 어떤 원인의 실화일지라도 반드시 엔진 출력측에 영향을 미치므로 엔진 Roughness 측정방식은 가장 효과적인 실화 검출방법이라고 할 수 있다.

엔진 Roughness 데이터를 시간영역(time domain)에서 해석하는 초기의 방식에서는 엔진회전수의 변동성분으로부터 토크(Torque) 저감을 감지하여 실화의 지표로 삼아 고장여부를 판단하였으나, 험로주행(bumpy road)시 노면으로부터 충격을 실화로 인식할 수 있다. 따라서, 이를 개선하기 위해 별도의 DSP(Digital Signal Processing) IC를 ECU에 적용한 푸리에 변환을 이용한 주파수영역(frequency domain)에서의 분석방법이 제안되기에 이르렀다. 본 논문에서는 이산 푸리에 변환을 이용한 주파수 분석에 의한 검출과 동등한 정확성을 가지면서도 이산 월쉬-푸리에변환(WDFT)을 적용하여 별다른 하드웨어의 지원없이 실화검출이 가능함을 알 수 있었으며, 상사점 이동에 의한 이동창(Walsh moving window)법을 이용하면 실화발생 기통까지도 판별이 가능함을 알 수 있었다.

이러한 결과는 무부하 Idle상태, 부분부하(drive)상태 및 험

로주행(bumpy road)상태에서 같은 결과를 도출 할 수 있었다. 또한, 이산 월쉬-푸리에변환(WDFT)에 의한 계산은 월쉬 함수를 적용하므로써 이산 푸리에변환에 의한 계산보다 훨씬 단순한 형태이므로, 엔진속도의 범위를 넓혀 각각의 엔진회전수에 대한 실화 발생정도를 검출해내고 그 데이터들을 엔진 제어장치(ECU)로 보내 항상 완전연소가 이루어질 수 있도록 하게되면 향후 강화되는 북미 법규인 엔진회전수 전영역에서의 실화검출에 대한 대응뿐만 아니라 배기가스 저감에 큰 도움이 될 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

[1] Anders Unger and Kent Smith, "The OBD II System in Volvo 850 Turbo", R.BOSCH, SAE932665

[2] E. Kreyszic, "Advanced Engineering Mathematics", P205-P211, 1992

[3] G. Rizzoni, "Diagnosis of Individual Cylinder Misfires by Signature Analysis of Crankshaft Speed Fluctuations", University of Michigan, SAE 890884

[4] Clare D. Mcgille, Geroge R. Cooper, "Continuous and Discrete Signal and System Analysis", HRW series, USA, p41-p47

[5] W. B. Ribbens and G. Rizzoni, "On-Board Diagnostics of Engine Misfire", SAE paper no.901768, 1990

[6] W. B. Ribbens and G. Rizzoni, "Applications of Precise Crankshaft Position Measurements for Engine Testing, Control and Diagnosis", University of Michigan, SAE890885

[7] W. B. Ribbens and G. Rizzoni, "Method and System for Detecting the Misfire of an Internal Combustion Engine Utilizing Angular Velocity Fluctuations", University of Michigan, U. S. PATENT 5200899

[8] 안두수 저 "Walsh 함수와 시스템제어" 북두출판사

[9] Stavouladis, P., and S.Tzafestas, "Walsh series approach to Observer and Filter Design in Optimal Control Systems," Int. J. Control 26, pp.721-736, 1977

[10] Spyros G. Tzafestas, "Walsh Functions in Signal and Systems Analysis and Design", National Technical University, Greece, 1985

[11] B. Widrow and S.D. Sterns, "Adaptive Signal Processing", Englewood Cliffs, NJ: Prectice-Hall, 1985

[12] K. R. Rao, "Orthogonal Transforms for Digital Signal Processing", Springer-Verlag, N.Y, 1975

[13] K. G. Beuchamp, "Applications Walsh and Related Functions," Academic Press, 1984

저 자 소 개



이 태 표 (李泰杓)
 1967년 6월 11일생. 1992년 성균관대 공대 전기공학과 졸업. 1994년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 현대자동차 파워트레인연구소 연구원
 E-mail : ltpems@hyundai-motor.com



안 두 수 (安斗守)
 1937년 6월 9일생. 1960년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1991~ 1992년 대한전기학회 부회장. 현재 성균관대 공대 전자 및 컴퓨터공학부 교수
 E-mail : dsahn@ece.skku.ac.kr



김 종 부 (金種夫)
 1962년 5월 5일생. 1985년 성균관대 공대 전기공학과 졸업. 1988년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1993년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사).
 1988년~1991년 LG정보통신 연구소 근무
 1996년~1997년 오하이오 주립대학 교환교수 1991년~현재 인덕대학 전자응용계열 교수
 E-mail : jbkim@mail.induk.ac.kr