

## 해석적 중복을 이용한 내연 기관 엔진의 동기화 처리 이상 진단

김 용 민<sup>\*1)</sup> · 서 진 호<sup>1)</sup> · 박 재 홍<sup>1)</sup> · 윤 형 진<sup>2)</sup>

서울대학교 전기공학부<sup>\*1)</sup> · 현대자동차 남양연구소<sup>2)</sup>

### A Method of Fault Diagnosis for Engine Synchronization Using Analytical Redundancy

Yongmin Kim<sup>\*1)</sup> · Jinho Suh<sup>1)</sup> · Jaehong Park<sup>1)</sup> · Hyoungjin Yun<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>School of Electrical Engineering, Seoul National University, Seoul 151-742, Korea

<sup>2)</sup>Powertrain Electronic Development Team, Hyundai Motor Company, 772-1 Jangdukdong, Whasungsi, Gyeonggi-do 445-706, Korea

(Received 14 September 2002 / Accepted 5 February 2003)

**Abstract :** We consider a problem of application of analytical redundancy to engine synchronization process of spark ignition engines, which is critical to timing for every ECU process including ignition and injection. The engine synchronization process we consider here is performed using the pulse signal obtained by the revolution of crankshaft trigger wheel (CTW) coupled to crank shaft. We propose a discrete-time linear model for the signal, for which we construct FDI (Fault Detection & Isolation) system consisting residual generator and threshold based on linear observer.

**Key words :** Engine synchronization(엔진 동기화), Fault diagnosis(고장 진단), ECU(엔진 전자 제어기), Analytical redundancy(해석적 중복), Crank position sensor(크랭크축 위치 측정 센서), Cylinder identification(기통 판별)

#### 1. 서론

내연 기관의 엔진 성능은 엔진 동력 이외에도 유해 물질 배출 등의 복잡한 요소가 복합적으로 관계되어 있다. 이러한 엔진 성능을 효율적으로 향상시키기 위해서는 정교한 엔진 제어가 필요하며, 이를 위해 ECU(엔진 전자 제어기)는 엔진과의 정확한 동기화(synchronization)를 통해 ECU의 제어 루틴이 엔진의 상태를 시간적 오차 없이 파악하는 것이 가장 중요한 문제가 된다. 현재 생산 중인 차량에서는 엔진 동기화를 위해 CPS(Crank Position Sensor)를 이용하여 크랭크축의 TDC(Top Dead Center)로부터의 상대 각도를 측정하며, 복합적으로 CID(Cylinder

Identification Sensor)를 이용하여 기통을 판별하는 방식이 많이 이용된다.<sup>1)</sup>

이 중에서도 CTW(Crankshaft Trigger Wheel)과 인덕티브 센서를 이용한 방식은 ECU가 다른 추가적인 센서 등이 없이도 엔진 회전 속도, 크랭크축의 위치 정보 및 기통 판별 정보 등을 얻을 수 있으며 높은 정밀도를 유지할 수 있어 Bosch사에서 개발한 Motronic 계열의 SI(Spark Ignition) 엔진에 주로 적용되고 있다.<sup>1-3)</sup>

이러한 구조는 크랭크축의 한 회전을 한 주기로 하여 연속적인 pulse의 집합을 측정함으로써 정보를 추출한다. 한 주기 내에는 TDC의 절대 위치를 표시하기 위한 다른 PT(Pulse Time; 한 pulse가 입력되는 시점부터 다음의 pulse가 입력되는 시점까지의 시간 간격)을 가지는 신호가 포함된다. 이 신호

\*To whom correspondence should be addressed.

kym@camus.snu.ac.kr

를 추출하기 위한 가장 간단한 방법 중 하나가 신호가 입력될 때 마다 이전에 입력된 두개 또는 세개의 연속적인 PT를 측정하여 비교하는 방식이다. 이는 processor의 부담이 적으며 구현이 간편하여 현재의 많은 ECU에 채용되고 있는 방식이기도 하다. 그러나 이러한 방식은 잡음의 간섭에 취약하며 간섭을 보정하기 위한 유연성이 비교 대상의 PT 개수에 의해 제한되는 등 시스템의 견실성(robustness)이 떨어진다는 단점을 지적할 수 있다.

본 논문에서는 CTW 장치를 사용하는 동기화 방식에 대하여 해석적 중복(analytical redundancy)을 이용한 이상 진단 시스템의 구조를 제안한다. CTW 장치를 통해 추출되는 PT 신호는 이산 시간 입력을 가진 1차 선형 시스템으로 모델링하고, 이에 대한 해석적 중복을 관측기(observer)를 통해 구현한다. 잡음 또는 이상 신호에 의해 PT의 개수가 하나 이상 누락되거나 추가되는 경우를 확률 변수(random variable)의 형태로 추가 입력시킴으로써 이에 대한 관측기의 반응을 고려하였다.

관측기의 반응 특성을 통해 신호의 이상 유무를 판정하고 또한 신호의 누락이나 추가 여부와 함께 그 개수를 확인할 수 있다. 이러한 선형 관측기의 lowpass 필터 특성을 통해 이상 진단 시스템은 이상 신호나 잡음에 대한 반응을 고려한 적절한 threshold를 설정함으로써 견실성을 확보할 수 있다.

본 논문에서 제안된 입력 신호의 모델은 시간에 대한 분포가 아닌 크랭크축의 회전 각도에 대한 사건의 분포로 이루어져 있다. 이러한 이유로 본 이상 진단 시스템을 실제 ECU의 RTOS(Real-Time Operating System)에 구현하는 경우, 동일 주기의 시간적인 작업 스케줄링(time-driven task scheduling)보다는 CTW pulse의 입력에 대한 인터럽트 작업(interrupt task scheduling)에 더 적합하다.

## 2. 대상 시스템 모델링

### 2.1 엔진 기통 판별 방법

본 논문에서 다루게 될 엔진 동기화 신호 처리 방식은 Fig. 1과 같이 인덕티브 센서인 CAS(Crank Angle Sensor)와 기계적으로 신호를 발생시키기 위한 CTW(Crank Trigger Wheel)로 이루어진다. 이 시

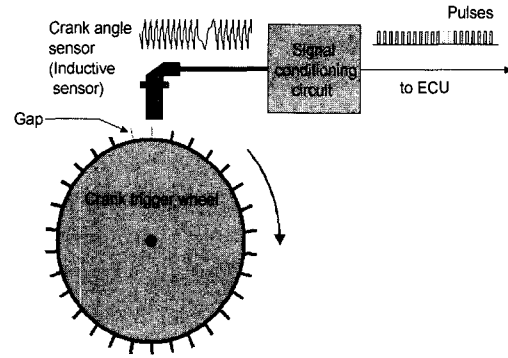


Fig. 1 Engine synchronization signal generated by the CTW and CAS

스템을 통해 입력되는 pulse 신호를 이용하여 ECU는 엔진의 회전 속도(rpm), 크랭크축의 TDC에 대한 상대적인 각도, 기통 판별 등의 정보를 추출하고 엔진 동기화에 이용한다. CTW는 정해진 개수의 톱니가 있으며 TDC에 대한 기준각을 판정하기 위해 일정 지점의 톱니를 두개 제거하여 gap으로 사용하는 형태이다.

CAS는 전자기 장치로 전자장의 변화를 감지하여 전압을 발생시키는 역할을 한다. CTW는 크랭크축과 물리적으로 고정되어 크랭크축과 동일한 각속도로 회전한다. CAS는 이러한 CTW의 톱니가 근접함에 따라 AC 전압을 유도한다. 이러한 AC 전압은 신호 성형 회로(Signal Conditioning Circuit)에 의하여 ECU가 사용하기에 알맞은 형태로 변환되어 ECU에 전달된다.

CTW의 gap이 CAS를 지나는 경우에 유도되는 전압의 형태는 다른 톱니가 지날 때 유도되는 전압과는 다른 형태로, 이에 따른 PT(Pulse Time; 한 pulse가 입력되는시점부터 다음의 pulse가 입력되는 시점까지의 시간 간격)의 값이 다르다. ECU는 이 gap을 검출함으로써 크랭크축의 기준을 설정하고 동기화한다. 크랭크축의 회전각은 TDC에 대한 상대적인 각도로, gap 이후 통과한 톱니의 개수를 통해 계산되며 해상도는 CTW의 전체 톱니 개수에 의해 결정된다. CTW의 전체 톱니 개수는 30개에서 60개가 사용되는 것이 일반적이다. 톱니에 대한 PT는 엔진 회전 속도를 계산하기 위해 사용되기도 한다.

2.2 PT 신호의 모델링

이번 절에서는 해석적 중복을 이용하기 위한 실시간 모델을 결정한다. Pulse가 하나씩 들어올 때마다 PT를 계산하는 경우, 엔진 회전수가 일정하면 전달되는 PT는 일정하며 이를 다음과 같은 이산시간(discrete-time) 시스템으로 모델링할 수 있다.

$$x_{k+1} = x_k + u_k + f_k, x_0 = \alpha \tag{1}$$

여기서  $x_k$ 는 상태변수이고,  $u_k$ 는 입력,  $x_0$ 는 초기값이다.  $x_0$ 는 편의상 gap이 아닌 틱니를 지날 때 발생하는 PT로 하며,  $\alpha$ 는 CTW의 회전 속도에 의해 결정되는 임의의 양수이다.  $f_k$ 는 잡음 등에 의한 PT의 이상 신호로, 예측할 수 없는 것으로 가정한다.

센서의 출력  $y_k$ 는 다음과 같이 설정한다.

$$y_k = x_k + n_k \tag{2}$$

여기서  $n_k$ 는 평균이 0인 가우시안 백색잡음으로 공분산(covariance)은  $\epsilon \langle n_k^2 \rangle = \bar{\gamma}$ 이다.  $\epsilon$ 는 확률 변수의 평균을 의미하며  $\bar{\gamma}$ 은 적절한 양의 실수이다.  $n_k$ 는  $x_0$ 와 무관(uncorrelated)하다고 가정한다.

$x_k$ 를 gap의 영향을 포함한 PT 신호로 표현하기 위해 입력인  $u_k$ 를 다음과 같이 설정한다.

$$u_k = \begin{cases} 0 & , (n+1)\Pi < k < n\Pi - 1 \\ \beta - \alpha & , k = n\Pi - 1 \\ \alpha - \beta & , k = n\Pi \end{cases} \tag{3}$$

여기서  $\beta (> \alpha)$ 는 gap에 대한 PT이며,  $\Pi$ 는 CTW의 1회전에 해당하는 pulse 신호의 주기,  $n$ 은 임의의 자연수를 나타낸다.

특히  $f_k = n_k = 0$ 인 경우 상태변수  $x_k$ 와 출력  $y_k$ 는  $\alpha$ 와  $\beta$ 의 두 값 중 하나가 된다.

이제 (1)의 시스템에 대한 이상 신호의 모델을 (2)의 입력을 이용하여 결정한다. 대부분의 이상 발생은 CAS가 pulse의 개수를 정확히 세지 못하여 ECU에 이상 정보를 전달하는 경우이다. 이 경우 이상 발생 이후에는 pulse를 이용한 크랭크축의 각도 계산이 어긋나게 되며 또한 ECU가 실제 크랭크축의 위

치와 비동기되어 정확한 제어 시점을 찾지 못하게 된다.

Pulse를 하나 누락하는 경우나 pulse를 하나 추가하는 경우를 각각  $f_k^{-1}, f_k^{+1}$ 라고 하면 식 (3)의 입력에 대해 다음과 같이 정의된다.

$$f_k^{-1} = \begin{cases} 0 & (n-1)\Pi < k < n\Pi - 2 \\ \beta - \alpha & k = n\Pi - 2 \\ 2(\alpha - \beta) & k = n\Pi - 1 \\ \beta - \alpha & k = n\Pi \end{cases} \tag{4}$$

$$f_k^{+1} = \begin{cases} 0 & (n-1)\Pi + 1 < k < n\Pi - 1 \\ \alpha - \beta & k = n\Pi - 1 \\ 2(\beta - \alpha) & k = n\Pi \\ \alpha - \beta & k = n\Pi + 1 \end{cases} \tag{5}$$

두 이상 신호와 함께 pulse가 두 개 누락되거나 추가될 경우에 대한 이상 신호의 형태를 Fig. 2를 통해 제시하였다. 이 그림을 통해 pulse가 누락되는 경우에는 이상 신호가 양의 값으로 시작하며, 추가되는 경우에는 음의 값으로 시작하는 공통점이 있음을 확인할 수 있다. 어떤 경우에도 시간축에 대한 이상 신호 PT의 합은 항상 0이다.

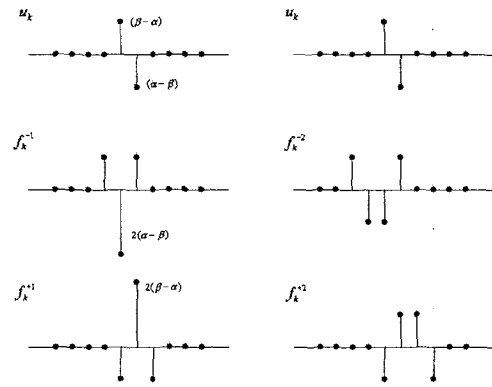


Fig. 2 Shape of the fault signals

3. 관측기의 설계 및 반응 분석

본 논문에서 제안하는 이상 진단 시스템은 실제 신호와 모델간의 불일치를 잔차(residual)로 산출하는 관측기에 기반한다.<sup>4,6)</sup> 이 절에서는 2절에서 제시한 CAS의 PT 신호에 대한 선형 모델을 위한 관측기를 설계한다. 또한 이상 신호 또는 잡음에 대한 관측기의 반응을 분석한다.

### 3.1 관측기의 설계

관측기는 식 (1)의 시스템 모델과 동일한 형태로 다음과 같이 구성한다.

$$\begin{aligned} \hat{x}_{k+1} &= \hat{x}_k + u_k + D(y_k - \hat{y}_k) \\ y_k &= \hat{x}_k \end{aligned} \quad (6)$$

여기서  $\hat{x}_k$ 는 추정된 상태변수를 나타내고,  $D$ 는 관측기의 이득이며 초기값의 차이 및 기타 요인에 의한 추정오차를 보정한다.

관측기의 초기조건은 차량의 시동 후 펄스 신호가 정상 상태에 도달한 직후부터 관측기가 작동하는 것으로 간주하여 식 (1)에서 제시된 상태변수의 초기값을 그대로 적용한다.

상태변수와 추정된 상태변수 사이의 추정오차를 다음과 같이 정의한다.

$$e_{k+1} = (1-D)e_k + f_k - Dn_k, e_0 = 0 \quad (7)$$

그러면 추정오차에 대한 잔차는 다음과 같다.

$$r_k = y_k - \hat{y}_k = e_k + n_k \quad (8)$$

$f_k = n_k = 0$ 인 경우  $e_k$ 와  $r_k$ 는 모두 0이 된다. 그러나 정상적인 동작 영역에서는 잡음의 영향은 잔차에 포함되어 나타나며 이때 이상 발생은  $r_k$ 에 0이 아닌 바이어스를 더하는 형태로 반영된다.

이득  $D$ 는 추정오차의 동특성인 (7)식의  $e_k$ 가 초기 조건의 변화 및 임의의  $n_k$ 에 대해서 발산하지 않도록 다음의 조건을 만족시키도록 한다.

$$|1-D| < 1 \quad (9)$$

다른 조건은 이상이 발생한 경우( $f_k \neq 0$ )가  $e_k$ 를 통해 검출되고 분석될 수 있어야 한다는 것으로, 이는  $D$ 가 위의 안정화 조건을 만족시키는 경우 만족된다.

### 3.2 관측기의 반응 분석

잔차  $r_k$ 를 통해 관측기의 반응을 분석한다. 관측기의 반응은  $f_k$ 와  $n_k$  외에도 초기 추정 오차인  $e_0$ 에 의해 결정된다.  $D$ 가 (9)의 조건을 만족하는 경우 추정 오차는 근사적으로(asymptotically) 0에 접근한다. 충분한 시간이 지나  $x_0$ 의 영향이 잔차를 통해 검출

될 수 없는 경우를 가정한다.

선형 시스템의 중첩의 원리를 관측기의 반응에 적용하면  $f_k$ 와  $n_k$ 에 대한 반응을 구분할 수 있다. 먼저 잡음  $n_k$ 을 고려하면 평균이 0이므로  $\epsilon\langle n_k \rangle = 0$ 이다.  $e_k$ 의 공분산을  $p_k \equiv \epsilon\langle n_k^2 \rangle$ 로 정의하면  $p_k$ 는 다음의 식과 같이 변화하게 된다.<sup>7,8)</sup>

$$p_{k+1} = (1-D)^2 p_k + D^2 \bar{\gamma}, P_0 = \langle x_0^2 \rangle \quad (10)$$

추정 오차  $e_k$ 가 초기값과 잡음에 대해 정상 상태에 도달하면  $p_k$ 는 다음과 같이 상수로 결정된다.

$$\bar{p} = (1-D)^2 \bar{p} + D^2 \bar{\gamma} \rightarrow \bar{p} = \frac{D}{2-D} \bar{\gamma} \quad (11)$$

이상 진단을 위해 사용하는 잔차  $r_k$ 의 공분산을  $q_k \equiv \epsilon\langle r_k^2 \rangle$ 로 정의하면 다음의 식이 만족된다.

$$\begin{aligned} q_k &= \epsilon\langle r_k^2 \rangle = \epsilon\langle (e_k + n_k)^2 \rangle \\ &= \epsilon\langle e_k^2 \rangle + 2\epsilon\langle e_k n_k \rangle + \epsilon\langle n_k^2 \rangle \end{aligned} \quad (12)$$

$q_k$ 의 정상 상태 값  $\bar{q}$ 는 다음과 같다.

$$\bar{q} = \bar{p} + \bar{\gamma} = \frac{2}{2-D} \bar{\gamma} \quad (13)$$

여기서  $e_k$ 와  $n_k$ 가 무관(uncorrelated)하므로  $\epsilon\langle e_k n_k \rangle = 0$ 이 된다.  $0 < D < 2$ 인 경우 식 (9)의 안정화 조건에 의하여  $\bar{q}$ 는 단조 증가한다.

다음으로 이상 신호에 대한 반응을 보면 Fig. 2와 같이 pulse가 누락될 때와 추가될 때의 차이는 잔차 진행의 방향이다. 이상 신호의 방향과 잔차의 반응 방향은 동일하기 때문에 pulse가 하나 누락되면 최초 반응이 양의 방향으로 추가되면 음의 방향으로 진행하기 때문에 이를 통해 즉시 펄스의 누락 및 추가 여부를 확인할 수 있다.  $f_k$ 에 대한 반응으로 나타나는 잔차의 0이 아닌 절대값의 최소값은 시작점부터의 이상 신호를 이용하여 계산이 가능하다.

$$\begin{aligned} e_{k+1} &= (1-D)0 + (\beta - \alpha) = \beta - \alpha \\ \rightarrow r_{k+1} &= \beta - \alpha \end{aligned} \quad (14)$$

따라서 이상 신호가 존재할 때의 잔차의 최소 크기는  $|\beta - \alpha|$ 이다. 이상 신호에 대한 초기 반응이  $D$ 와 독립적일 지라도 연이은 반응의 변화는  $|1-D|$ 가

0에 접근할수록 빨라진다.

이상 신호의 발생 시작점부터 끝점까지의 시간 간격을 이용하여 pulse의 개수가 제대로 측정되었는지를 판정할 수 있다. 이는 Fig. 2에서 2개의 pulse 이상 시의 시간 간격이 1개의 pulse 이상보다 한 step 만큼 증가한 것으로 확인할 수 있다.

이를 바탕으로 이상 검출을 위한 가장 간단한 방법을 threshold 검사에서 찾을 수 있다. 0이 아닌 잔차가 threshold를 넘는 경우 이상이 발생하였음을 판정할 수 있다. 그러나 식 (13)에서 본 바와 같이 잡음의 존재를 무시할 수는 없으므로 잔차 검사를 위한 적절한 0이 아닌 threshold를 선정할 필요가 있다. Threshold는  $\beta - \alpha$ 와 식 (13)을 이용하여  $r_k$ 의 확률 밀도 함수에 대한 표준 편차의 정수배 사이의 값으로 결정될 수 있다. 이 threshold는 잡음만을 걸러내기 충분한 값으로 입력 신호의 형태를 따라 설정하여 사용한다.

이러한 threshold의 값을 초과하는 신호가 발견될 경우, 앞서 논의한 바와 같이 첫 번째 초과 신호의 방향이 양인지 음인지를 이용하여 이상이 누락 혹은 추가에 의해 발생하였는지를 판단한다. 다음으로 이상 신호의 지속 간격을 이용하여 이상 신호의 개수까지 판별할 수 있다.

#### 4. 모의 실험

3절에서 제시한 이상진단 시스템에 대한 모의 실험 결과를 제시한다. 우선 식 (13), (14)의 관측기에 대해 이득  $D$ 를 선정하여 관측기 설계를 마무리한다. 본 논문에서는  $D=0.6$ 으로 선정하고 CTW는 30개의 톱니 신호 중 2개 톱니에 해당하는 gap이 존재하는 것을 사용하기로 한다. 또한  $\bar{\gamma}=0.16$ 으로 선정하였다. Fig. 3, 4, 5는 이상 신호의 각 조건에 대한 모의 실험 결과이다.

각각의 그림에 대하여 상단의 파형은 CAS를 통해 계산된 각 PT이며 하단의 파형은 이에 대한 관측기의 반응인 잔차이다. 제시된 결과는 3회의 크랭크 축 회전전 에 대한 실험 결과이다.

Fig. 3에서와 같이 이상이 없는 경우 잔차에는 잡음의 영향만이 나타난다. 그러나 Fig. 4, 5에서와 같

이 이상이 발생하면 Fig. 2와 유사한 형태의 이상 신호 파형이 잔차에 보이게 된다.

잡음이 정규 분포이므로 잡음의 영향의 최대값을 잡음 신호의 99%가 분포하는 범위인 표준 편차의 2.54배로 선정하도록 한다. 식 (13)을 이용하여 이 값을 계산하면  $0.4 \times 2.54 \approx 1.0$ 이다. 따라서 threshold

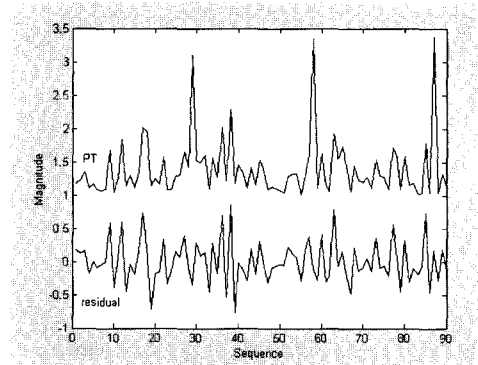


Fig. 3 Residuals when no error occurred

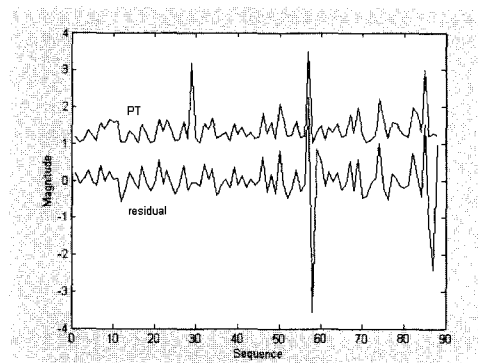


Fig. 4 Residuals when one pulse signal missed

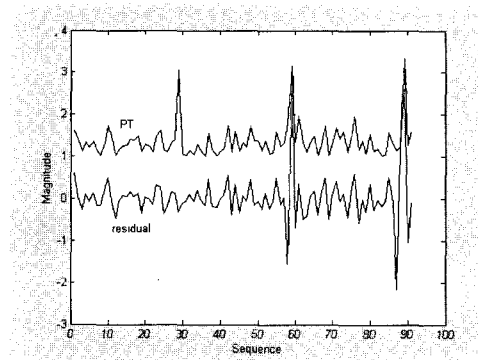


Fig. 5 Residuals when one pulse signal added

를 1로 선정하여 잔차의 절대값이 1을 초과하면 시스템은 이상이 발생하였음을 진단하고 ECU에 알리도록 한다.

만약 이상이 검출된 직후 적절한 보정이 이루어지지 않으면 이상의 영향이 이후에도 계속 반영된다. 예를 들면 Fig. 4에서는 60회 이전에 발생한 톱니 신호 누락에 따른 잔차의 영향이 나타나는데 이 이후에 이상 현상이 발생하지 않아도 100회 근처에서 다시 누락의 영향이 나타나는 것을 볼 수 있다. 따라서 정상적인 관측기의 동작을 보장하기 위해서는 다음 회전에서 입력 추정된 펄스의 오차 만큼  $u_k$ 에서 0의 개수를 늘이거나 줄이는 방법으로 입력을 수정하는 방법을 사용한다.

### 5. 이상 진단 시스템 구성

본 논문에서 제시한 해석적 중복을 이용하여 엔진 동기화를 위한 진단 시스템을 제안한다. 잔차는 CAS를 이용하여 추출한 PT 신호와 입력 생성기를 통해 발생시킨 식 (3) 형태의 신호를 관측기에 입력하여 계산한다.

이상의 유무는 잔차의 절대값과 threshold를 비교함으로써 판정한다. 이상이 발생한 경우 이상 신호의 시작점과 끝점의 시간 간격을 이용하여 pulse의 이상 개수를 계산하고 이에 대한 정보를 진단 메모리에 기록한다. 이 기록을 통해 입력 생성기에서 발생시키는 입력 신호의 주기를 조절하도록 한다. 엔진 제어의 타이밍을 결정하기 위한 ECU의 엔진 동기화는 입력 생성기의 정보를 이용하며, 이상이 발생했을 때에만 이상 pulse 개수 만큼 시점을 보정한다.

제안된 진단 시스템은 일정한 주기를 갖는 테스트

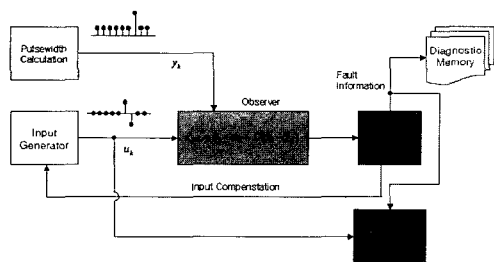


Fig. 6 Fault detection system proposed for the engine synchronization

크(time task) 형태로 동작하는 것이 아니라 CTW pulse의 입력에 대한 인터럽트를 이용하여 동기화를 이루고 엔진 회전 속도와 크랭크축의 위치 및 기통 판별 등을 행하는 형태이다. 따라서 RTOS에 적용할 때에는 CAS의 인터럽트 루틴에 해당하는 태스크에 할당하는 것(interrupt task scheduling)이 적합하다.

### 6. 결론

본 논문에서는 해석적 중복을 응용한 진단 시스템을 제안하였다. CAS를 통해 발생하는 펄스 신호는 1차의 이산 시간 선형 시스템으로 모델링하였다. 입력 신호는 CTW의 톱니와 gap을 표현할 수 있도록 적절한 주기 신호로 선정하였다. 이러한 입력을 통해 pulse가 누락되거나 추가될 때의 현상을 이상 신호로 나타내었다.

해석적 중복을 구현하기 위해 선형 관측기를 적용하고 관측기의 반응을 이용하여 이상 진단의 기본 정보인 잔차를 구하였다. 잔차에서 나타날 수 있는 잡음의 영향을 분석하여 잡음의 영향을 억제하고 이상 현상을 효과적으로 검출할 수 있는 방법을 제안하였다. 본 논문에서 제시한 진단 시스템은 1차 선형 시스템으로 구현되는 관측기와 threshold 판정을 기본으로 하기 때문에 구현이 간단하고 실제 엔진의 센서 잡음에 견실한 장점이 있다.

### References

- 1) C. O. Probst, "Ford Fuel Injection & Electronic Engine Control," Robert Bentley, 1993.
- 2) Bosch, "Automotive Electric/Electronic Systems," SAE, 1988.
- 3) W. B. Ribbens, Understanding Automotive Electronics, SAMS Publishing, 1992.
- 4) P. M. Frank, "Fault Diagnosis in Dynamic Systems Using Analytical and Knowledge-based Redundancy-A Survey and Some New Results," Automatica, Vol.26, pp.459-474, 1990.
- 5) R. Isermann, "Process Fault Detection Based on Modeling and Estimation Methods-A Survey," Automatica, Vol.20, No.4, pp.387-404, 1984.
- 6) X. Fang, Z. Kowalczyk, M. Kunwer, J. Gertler,

M. Costin, R. Monajemy, "Model Based Diagnosis for Automotive Engines-Algorithm Development and Testing on a Production Vehicle," IEEE Transactions on Control Systems Technology, Vol.3, No.1, pp.61-69, 1995.

7) A. Gelb, Applied Optimal Estimation, MIT Press, 1974.

8) M. S. Grewall, A. P. Andrews, Kalman Filtering: Theory and Practice Using MATLAB, John Wiley & Sons, 2001.