

불확실성을 고려한 디젤엔진의 견실한 이상검출

Application of Robust Fault Detection Method for Uncertain Systems to Diesel Engine System

유경상*, 김대우**, 권오규**

(Kyung-Sang Yoo, Dae-Woo Kim and Oh-Kyu Kwon)

* 두원공업전문대학 전기과 (Tel: 0334-70-7162 ; Fax: 0334-70-7102)

** 인하대학교 공과대학 전기공학과 (Tel: 032-860-7395 ; Fax: 032-863-5822)

Abstract : This paper deals with the Application of robust fault detection problem in uncertain linear systems, having both model mismatch and noise. A robust fault detection method presented by Kwon *et al.* (1994) for SISO uncertain systems. Here we experimented this method to the diesel engine systems described by difference ARMA models. The model mismatch includes here linearization error as well as undermodeling. Comparisons are made with alternative fault detection method which do not account noise. The new method is shown to have good performance.

Key words : Fault detection, diesel engine systems, parameter estimation, model mismatch, bias error.

1. 서론

디젤엔진은 자동차, 배, 발전기, 농·공업용 엔진 등 동력원으로 많은 분야에 응용되고 있다. 그런데 대부분의 디젤엔진들은 정속운전을 유지하기 위하여 단순역학 구조의 플라이휠 방식의 정속기를 사용하고 있다. 이러한 엔진들은 정속기의 구조적 특성때문에 종종 성능에 큰 문제가 발생하고 있다[16]. 컴퓨터 기술의 발전과 에너지 자원의 감소로 인하여 엔진의 성능을 향상하기 위한 새로운 제어기법들이 제어기의 종류에 따라 엔진의 효율을 증대하기 위한 방법들을 중심으로 제안되고 있다[16]. 최근들어 점차 환경 오염 문제가 세계적으로 많은 문제를 야기하자 디젤엔진도 기존의 기계적인 연료분사 방식을 떠나 가솔린 엔진과 같이 전자분사방식을 채택하여 연료를 분사하는 방식으로 전환되고 있는 실정이다[16]. 이에 따라 디젤엔진의 이상검출이 디젤엔진 자동차의 전자제어(ECU)화에 대비하여 상당히 중요한 요소로 대두되고 있는 실정이다. 이미 잘알려진 바와 같이 디젤엔진은 출력, 속도, 온도 등에 따라 특성이 변화하는 비선형성이 강한 장치이다. 이러한 비선형 특성은 엔진 제어 시스템 설계를 매우 어렵게 하고 있다. 디젤엔진은 엔진속도가 연료분사 시간, 압축, 배기과정에 따른 고유의 시변 이산형 시스템이다. 이에 따라 드로틀 밸브 동작 위치와 엔진 응답 속도 사이에 순수한 시간 지연이 존재하게 된다. 시간지연은 엔진속도가 증가함에 따라 감쇄하게 되고, 이러한 바람직하지 않은 특성들이 디젤엔진의 제어를 어렵게 하는 문제점으로 제기되고 있는 실정이다. 이러한 문제점에도 불구하고 최적제어를 이용한 디젤엔진의 제어 방식이 여러 연구자에 의하여 제안되고 있다[16]. 디젤엔진의 과도응답을 제어하기 위하여는 타코-제너레이터와 배기센서가 이용되고 있다[16]. 엔진의 제어 알고리즘은 비례적분 제어 방식을 많이 사용하고 있다. 제어변수는 엔진 오버슈트와 같은 엔진의 과도현상을 억제하는 방향으로 선택한다.

이상검출 및 진단에 관한 이론적 연구는 지난 20년간 많은 연구가 진행되어 왔다. 최근들어 이상검출 및 진단이 실제 시스템 및 공정 분야에 응용되면서 시스템의 수학적 모델에 존재하는 모델링 오차와 불확실성 등이 문제점으로 부각되고 있는 실정이다. 이에 따라 제어기 설계 분야에서 한창 논의되고 있는 견실성 문제론 이상검출 분야에도 도입되어 많은 연구가 진행되고 있다. 견실한 이상검출을 행하기 위하여 고려해야 할 사항은 모델링 오차, 모델 불확실성, 잡음, 알고리즘의 처리 속도, 기준 신호 및 이상 발생 신호의 종류 등으로 생각할 수 있으며, 견실한 이상검출 기법 연구에 필요한 사항들은 여러 저자에 의해 연구되고 있다[1-3]. 모델 및 잡음 또는 외란에 의해 발생되는 불확실성에 대해 견실성을 얻기 위한 연구는 최근에 많은 결과들이 발표되고 있다 [1]-[7].

이 논문에서는 견실한 이상검출 기법을 이용한 디젤엔진의 이상을 검출한다. 디젤엔진 시스템을 모델링 하기 위해서는 특정한 부하를 내포하는 동작점을 지정하여 선형화해야 한다. 이러한 과정에서 원래 디젤엔진이 갖는 비선형성이 사라지고 특성이 없어지는 모양을 나타내게 된다. 따라서 선형화된 모델자체가 많은 불확실한 요소를 내포하게 된다. 따라서 이러한 선형화된 모델을 이용하는 경우 불확실성을 전혀 고려하지 않은 기존의 이상검출 기법을 이용하는 경우 결과의 신뢰성을 보장하지 못하게 된다. 그리하여 이 논문에서는 권 등[7]이 제안한 견실한 이상검출 기법을 이용하여 디젤엔진의 이상을 검출한다. 이 논문에서 디젤엔진 시스템의 동적 모델집합은 실험을 통하여 몇가지의 엔진속도와 출력에 대해서 얻어진 데이터를 가지고 시스템 식별법(system identification)을 통하여 구한다. 구해진 엔진 모델은 적당한 시간지연을 갖는 차분 방정식 형태의 5차 자기회귀 이동평균(ARMA) 모델이다. 5차 모델은 정규 2차 시스템으로 다시 만들어지고 정규 2차모델을 사용하여 오프라인에서 이상검출을 수행한다.

이 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 권 등[7]이 제안한 시스템 표현 및 계수추정문제와 추정된오차를 평가하는 방법 및 견실한 이상검출 기법에 대해 간략히 다룬다. 3장에서는 디젤엔진의 이상검출 특성을 기존의 방법과 실험을 통하여 비교 검토하며, 4장에서 결론을 맺는다.

2. 견실한 이상검출기법

모든 수학적 모델은 실제 시스템의 근사적 표현이다. 이러한 모델 불확실성을 표현하는 한가지 방법으로써 다음 그림 2.1과 같이 덧셈형 오차 표현법을 쓸 수 있다.

여기서 실제 시스템 G_T 와 공칭모델 G 는 안정하고 인과적(causal)이라고 가정한다. 또 측정잡음 v 는 영평균이고 분산이 σ_v^2 인 백색 잡음이라 가정한다.

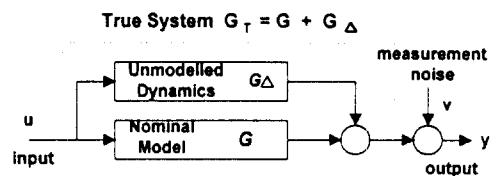


그림 2.1 비모델링 동특성과 측정잡음을 고려한 시스템 표현
공칭모델은 다음과 같은 형태를 갖는다.

$$G(z^{-1}, \theta) = \frac{B(z^{-1}, \theta, n_b)}{F(z^{-1}, n_f)} \quad (2.1)$$

여기서,

$$B(z^{-1}, \theta, n_b) := b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2} + \dots + b_n z^{-n}$$

$$F(z^{-1}, n_f) := 1 + f_1 z^{-1} + f_2 z^{-2} + \dots + f_n z^{-n}$$

$$\theta := [b_1 \ b_2 \ \dots \ b_n]^T$$

$F(z^{-1}, n_f)$ 의 분모는 고정된 것인데, 이는 시스템에 대한 사전 경험에 의한 계수 추정에 의해 얻어진 사전 정보(예를 들면, 지배 극점)로부터 결정할 수 있다. 여기서 공칭모델 식(2.1)이 안정하다고 가정했으므로 F 는 안정한 다항식이어야 한다. 시스템의 출력은 다음의 식을 만족한다.

$$y(k) = G_T(q^{-1})u(k) + v(k)$$

$$= B(q^{-1}, \theta, N_B)u_F(k) + \eta(k) + v(k)$$

$$= G(q^{-1}, \theta)u(k) + G_d(q^{-1})u(k) + v(k) \quad (2.2)$$

여기서, q^{-1} 는 지연 연산자(backward shift operator)이다. 그리고

$$u_F(k) := \frac{1}{F(q^{-1}, N_F)} u(k)$$

$$\eta(k) := G_d(q^{-1})u(k) \quad (2.3)$$

이고, G_d 의 임펄스 응답을 $\{h(\cdot)\}$ 로 표기하면 식(2.3)은 다음의 식으로 나타낼 수 있다.

$$\eta(k) = \sum_{i=0}^{N_d-1} h(i)u(k-i) \quad (2.4)$$

여기서, $u(k) = 0, k \leq 0$ 이고, $h(\cdot)$ 는 N_h 의 유한 주기를 갖는다.

2.1 계수 추정법

식(2.2)와 식(2.4)는 식(2.5)로 다시 쓸 수 있다.

$$Y = \Phi \theta + \Psi H + V \quad (2.5)$$

여기서,

$$Y := [y(1) \ y(2) \ \dots \ y(N)]^T$$

$$\Phi := \begin{bmatrix} u_F(0) & u_F(-1) & \dots & u_F(1-N_B) \\ u_F(1) & u_F(0) & \dots & u_F(2-N_B) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ u_F(N) & u_F(N-1) & \dots & u_F(N-N_B) \end{bmatrix}$$

$$\Psi := \begin{bmatrix} u(1) & 0 & \dots & 0 \\ u(2) & u(1) & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ u(N) & u(N-1) & \dots & u(N-N_h+1) \end{bmatrix}$$

$$H := [h(0) \ h(1) \ \dots \ h(N_h-1)]^T$$

$$V := [v(1) \ v(2) \ \dots \ v(N)]^T$$

이고, N 은 주어진 데이터 개수, $\{v(\cdot)\}$ 는 분산이 σ^2 인 백색잡음이다. 공칭 계수 벡터 θ 에 대한 최소 자승 추정자는 다음과 같이 정의된다.

$$\hat{\theta} = (\Phi^T \Phi)^{-1} \Phi^T Y \quad (2.6)$$

여기에서 식(2.5)의 잡음 V 와 저차화 모델링오차 ΨH 로 인한 식(2.6)의 추정자 $\hat{\theta}$ 에 나타나는 효과를 알기 위해 식(2.6)과 (2.5)의 차를 구하면 다음과 같다.

$$\hat{\theta} - \theta = (\Phi^T \Phi)^{-1} \Phi^T [\Psi H + V] \quad (2.7)$$

윗 식으로부터 전체 추정 오차는 다음과 같이 분해된다.

$$\hat{\theta} - \theta = \tilde{\theta}_1 + \tilde{\theta}_2 \quad (2.8)$$

여기서, $\tilde{\theta}_1$ 과 $\tilde{\theta}_2$ 는 각각 분산 오차, 편향 오차이다.

$$\tilde{\theta}_1 := (\Phi^T \Phi)^{-1} \Phi^T V \quad (2.9)$$

$$\tilde{\theta}_2 := (\Phi^T \Phi)^{-1} \Phi^T \Psi H \quad (2.10)$$

2.2 분산 오차와 편향 오차의 계산

2.2.1 분산 오차의 계산

회귀(regression)벡터 Φ 와 Ψ 는 입력만의 함수로서 분산 오차의 상호 분산 $E[\tilde{\theta}_1 \tilde{\theta}_1^T]$ 은 식(2.9)로부터 다음과 같이 구할 수 있다.

$$E[\tilde{\theta}_1 \tilde{\theta}_1^T] = (\Phi^T \Phi)^{-1} \sigma^2 \quad (2.11)$$

여기서, σ^2 은 측정 잡음 $v(\cdot)$ 의 분산이다. 이후부터는 σ^2 은 알고 있는 것으로 가정한다.

2.2.2 편향 오차의 계산

식(2.10)의 편향 오차를 구하기 위해서는 H 를 알아야 한다. 저모델링에 대한 유사한 값은 사전 자료로부터 얻어질 수 있고, 이 사전 정보로부터 미리 H 의 분포를 구성할 수 있다(Goodwin and Salgado, 1989). H 의 사전 분포가 영평균이고 상호 분산이 C_h^0 일 때 편향 오차의 상호 분산은 다음과 같다.

$$E[\tilde{\theta}_2 \tilde{\theta}_2^T | \Phi, \Psi] := (\Phi^T \Phi)^{-1} \Phi^T \Psi C_h^0 \Psi^T \Phi (\Phi^T \Phi)^{-1} \quad (2.12)$$

최근의 건설한 적응 제어에 관한 연구에서는 비모델동특성이 지수 함수적으로 유계값을 갖는다고 가정하였다(Middleton and Goodwin, 1988). 이에 따른 통계적 가정은 다음과 같다.

$$[C_h^0]_k = E[h(k)h(j)] = r(k) \delta_{kj} \quad (2.13)$$

$$r(k) = \sigma_0^2 e^{-\beta k}, \quad k = 0, 1, \dots, N_h-1 \quad (2.14)$$

식(2.14)에서 σ_0^2 과 β 를 사전 정보로부터 알려진 값이라고 한다면, C_h^0 는 식(2.13)과 식(2.14)에 의해 계산된다. σ_0^2 과 β 를 모를 경우에는 정상시스템에 대한 사전 실험으로부터 추정할 수 있다(Kwon and Goodwin, 1990). 여기서는 ML(Maximum Likelihood) 기법을 이용한다. 식(3.1.5)로부터 H 의 추정자를 구성하면 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} \hat{\theta}_{FULL} \\ \hat{H} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Phi^T \Phi & \Phi^T \Psi \\ \Psi^T \Phi & \Psi^T \Psi \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \Phi^T Y \\ \Psi^T Y \end{bmatrix}$$

윗 식으로부터 추정자 \hat{H} 은 다음과 같이 구해진다.

$$\hat{H} = (\Psi^T \Pi \Psi)^{-1} \Psi^T \Pi Y$$

여기서,

$$\Pi := I - \Phi (\Phi^T \Phi)^{-1} \Phi^T$$

또한,

$$E[(\hat{H} - H)(\hat{H} - H)^T] = (\Psi^T \Pi \Psi)^{-1} \sigma^2 \quad (2.15)$$

따라서 편향 오차의 상호 분산은 다음의 식으로 구해진다.

$$E[\tilde{\theta}_2 \tilde{\theta}_2^T | Y] = (\Phi^T \Phi)^{-1} \Phi^T \Psi C_h^0 \Psi^T \Phi (\Phi^T \Phi)^{-1}$$

여기서,

$$C_h^0 \equiv E[HH^T | Y]$$

C_h^0 를 추정하기 위해 독립 자료 집합을 이용하였다면, 전체 상호 분산은 식(2.11)과 식(2.12)의 합 형태에 나타난다. 그러므로 C_h^0 (H 에 대한 사전 자료 사용시)와 C_h^0 (H 에 대한 사후 자료 사용시)는 C_h 로서 나타낼 수 있다.

2.2.3 이상 검출 방법

본 논문에서 사용하는 이상검출법은 앞에서 구한 편향 오차 및 분산 오차를 이용하여 수행된다. 이상이 있는 시스템의 자료 집합을 $I_n = \{Y_n, \Phi_n, \Psi_n\}$, 이상이 없는 시스템의 자료 집합을 $I_f = \{Y_f, \Phi_f, \Psi_f\}$ 로 놓았을 때, 자료 I_n 과 I_f 를 이용하여 두 번째 자료인 I_f 에 이상이 있는지의 여부를 판단한다. 앞에서처럼 최소 자승 추정기에 의한 $\hat{\theta}_n$ 과 $\hat{\theta}_f$ 는 다음과 같이 된다.

$$\hat{\theta}_n = (\Phi_n^T \Phi_n)^{-1} \Phi_n^T Y_n$$

3. 실험 및 결과

$$\widehat{\theta}_f = (\Phi_f^T \Phi_f)^{-1} \Phi_f^T Y_f$$

윗 식으로부터의 관측 오차 $\widehat{\theta}_n - \widehat{\theta}_f$ 와 이상이 없을 때의 잡음과 저 모델링에 의한 오차를 비교함으로써 관측 오차가 잡음 및 저 모델링에 의한 오차보다 커지는가를 판단함으로써 이상 유무를 알 수 있다.

식 (2.5)의 모델은 다음과 같이 확장된다.

$$\begin{bmatrix} Y_n \\ Y_f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Phi_n & 0 \\ 0 & \Phi_f \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_n \\ \theta_f \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Psi_n & 0 \\ 0 & \Psi_f \end{bmatrix} \begin{bmatrix} H_n \\ H_f \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_n \\ V_f \end{bmatrix}$$

여기에서 앞의 기법으로부터 다음의 값을 얻는다.

$$E \left\{ \begin{bmatrix} \widehat{\theta}_{n1} \\ \widehat{\theta}_{f1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \widehat{\theta}_{n1} \\ \widehat{\theta}_{f1} \end{bmatrix}^T \right\} = \begin{bmatrix} (\Phi_n^T \Phi_n)^{-1} \sigma^2 & 0 \\ 0 & (\Phi_f^T \Phi_f)^{-1} \sigma^2 \end{bmatrix} \quad (2.16)$$

$$E \left\{ \begin{bmatrix} \widehat{\theta}_{n2} \\ \widehat{\theta}_{f2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \widehat{\theta}_{n2} \\ \widehat{\theta}_{f2} \end{bmatrix}^T \right\} = \begin{bmatrix} \alpha & \beta \\ \beta^T & \gamma \end{bmatrix} \quad (2.17)$$

여기서,

$$\begin{aligned} \alpha &= (\Phi_n^T \Phi_n)^{-1} \Phi_n^T \Psi_n C_k^1 \Psi_n^T \Phi_n (\Phi_n^T \Phi_n)^{-1} \\ \beta &= (\Phi_n^T \Phi_n)^{-1} \Phi_n^T \Psi_n C_k^{12} \Psi_f^T \Phi_f (\Phi_f^T \Phi_f)^{-1} \\ \gamma &= (\Phi_f^T \Phi_f)^{-1} \Phi_f^T \Psi_f C_k^2 \Psi_f^T \Phi_f (\Phi_f^T \Phi_f)^{-1} \\ E \left\{ \begin{bmatrix} H_n \\ H_f \end{bmatrix} \begin{bmatrix} H_n \\ H_f \end{bmatrix}^T \right\} &= \begin{bmatrix} C_k^1 & C_k^{12} \\ (C_k^{12})^T & C_k^2 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (2.18)$$

이상이 발생하지 않았을 때 $\widehat{\theta}_n - \widehat{\theta}_f$ 의 크기를 알기 위해 식(2.5), 식(2.18)에서 $H_n = H_f$ 로 가정하여 계산하면 아래와 같다.

$$C_k^1 = C_k^{12} = C_k^2 =: C_k^1 \quad (2.19)$$

보조 정리 1. 이상이 없을 때 다음의 값을 얻는다.

$$E[(\widehat{\theta}_{n1} - \widehat{\theta}_{f1})(\widehat{\theta}_{n1} - \widehat{\theta}_{f1})^T] = (\Phi_n^T \Phi_n)^{-1} \sigma^2 + (\Phi_f^T \Phi_f)^{-1} \sigma^2 \quad (2.20)$$

$$E[(\widehat{\theta}_{n2} - \widehat{\theta}_{f2})(\widehat{\theta}_{n2} - \widehat{\theta}_{f2})^T] = (Q_n - Q_f) C_k (Q_n - Q_f)^T \quad (2.21)$$

여기서

$$Q_n := (\Phi_n^T \Phi_n)^{-1} \Phi_n^T \Psi_n, \quad Q_f := (\Phi_f^T \Phi_f)^{-1} \Phi_f^T \Psi_f$$

식(2.21)에서 만약 이상이 발생하지 않았을 때에는 $(\widehat{\theta}_n - \widehat{\theta}_f)$ 의 소거로 인하여 저 모델링에 의한 오차의 기대치는 0이 된다. 그리고 C_k 는 단원 다에서의 두 가지 방법, 즉 사전 자료를 이용하거나 C_k^0 의 정의식으로부터 추정하여 구해진다. 앞의 모델에서 V 와 C_k^0 이 서로 독립이면 결합 항은 없어지며, 따라서 다음의 식을 얻는다.

$$\begin{aligned} C &:= E[(\widehat{\theta}_n - \widehat{\theta}_f)(\widehat{\theta}_n - \widehat{\theta}_f)^T] \\ &= [(\Phi_n^T \Phi_n)^{-1} + (\Phi_f^T \Phi_f)^{-1}] \sigma^2 \\ &\quad + (Q_n - Q_f) C_k^0 (Q_n - Q_f)^T \end{aligned} \quad (2.22)$$

윗 식의 C_k^0 는 단원 다에서 C_k^0 를 추정하는 것처럼 C_k^0 으로 대체할 수 있다. 본 논문에서 사용하는 이상검출법은 추정 계수 변화 $\widehat{\theta}_n - \widehat{\theta}_f$ 에 대한 상호 분산의 함수인 시험 변수를 비교함으로써 수행된다. 시험 변수 T_1 은 다음과 같이 구성된다.

$$T_1 \equiv (\widehat{\theta}_n - \widehat{\theta}_f)^T C^{-1} (\widehat{\theta}_n - \widehat{\theta}_f) \quad (2.23)$$

또한 이상에 대한 상세한 정보를 얻기 위해 추정 계수를 상호연관 이 없게 만드는 시험 변수 α 를 구성한다.

$$\begin{aligned} C &= U \Sigma U^T \\ \alpha &\equiv U^T (\widehat{\theta}_n - \widehat{\theta}_f) \end{aligned} \quad (2.24)$$

본 논문에서는 우선 시스템의 실험데이터 [13]로부터 식별과정을 통하여 모델을 얻은후 모델로부터 입력 및 출력 자료를 생성하여 그 자료로부터 기존에 권 등[7]이 제안한 이상검출법을 이용하여 모의실험을 하였다. 먼저 식(2.1)로부터 공칭모델을 다음과 같이 설정하고, 사전 실험에 의해 분모를 고정시킨다.

$$G(q^{-1}, \theta) = \frac{b_1 q^{-1} + b_2 q^{-2}}{1 + f_1 q^{-1} + f_2 q^{-2}} \quad (2.25)$$

시험 변수로는 이 연구에서 제시한 식(2.23), 식(2.24)와 기존의 시험 변수인 잡음 입력만을 고려한 T_n 과 교차 평가 시험 변수 (Soderstrom and Kumamamaru, 1985) T_c 를 서로 비교하여 이 연구의 우수성을 보인다. 시험 변수 T_c 는 다음과 같다.

$$T_c := \|Y_n - \Phi_n \widehat{\theta}_n\|_2^2 - \|Y_n - \Phi_n \widehat{\theta}_f\|_2^2$$

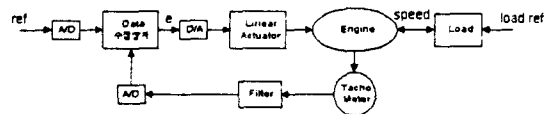
모델에 대한 모의실험 결과는 다음과 같다.

3.1 실험데이터의 취득

본 논문에서 사용한 디젤엔진(모델 : Peter diesel 모델 - PH2W)의 사양은 다음과 같다.

- 2 실린더,
- 1800 rpm에서 15 정지마력,
- 100 mm 스트로크,
- 0.65L 실린더 용량,
- 16.5:1의 압축비,
- 1800 rpm의 최대속도.

엔진 주축에 다양한 부하실험을 하기위하여 동력계를 부착하였고 부하의 변화는 동력계의 여자장을 변화시킴으로써 수행한다. 엔진은 열교환기를 통해 수냉식으로 냉각된다. 컴퓨터 데이터 수집장치를 포함한 전체 시스템은 다음그림과 같다.



시스템 식별을 위한 알고리즘의 입력신호는 속도의 설정치(Set point)가 아닌 엔진속도의 오차신호이다.

출력신호는 타코미터에서 축의 비틀림진동에 의한 신호를 제거한 엔진의 속도이다. 샘플링시간은 0.1초이고 모두 400개의 Data를 RTI-815A 시스템으로 수집했고 Math works 사의 MatLabTM의 System ID ToolBox를 사용하여 식별하여 차분방정식의 형태로 만들었다. 엔진의 동력학 모델은 ARMA 형태로써 1500 rpm에서의 모델은 다음과 같다.

$$\frac{Speed(z^{-1})}{Error(z^{-1})} = \frac{b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2} + b_3 z^{-3} + b_4 z^{-4}}{1 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2} + a_3 z^{-3} + a_4 z^{-4} + a_5 z^{-5}}$$

엔진의 비선형성으로인해 위 모델의 계수는 엔진속도와 출력의 비선형 함수이고, 최소자승 계수추정에 의해 다음 Table 과 같은 값을 갖는다.

		부하조건				
		No load	0.75Kw	1.85Kw	3.1Kw	4.4Kw
부하에 따른 엔진속도 1500rpm에서의 식별계수	a1	-1.9115	-1.8508	-1.7552	-1.7032	-1.6594
	a2	0.8867	0.8761	0.7881	0.6956	0.8301
	a3	0.0872	0.0055	-0.1014	0.0732	-0.1701
	a4	-0.0009	0.0308	0.1812	0.0486	-0.0501
	a5	-0.0533	-0.0555	-0.1069	-0.0089	0.0575
	b4	0.0168	0.0168	0.0167	0.0167	0.0156
	b5	-0.0008	0.0030	0.0030	0.0052	0.0083
b6	-0.0089	-0.0050	-0.0010	0.0018	0.0049	
b7	0.0018	0.0029	0.0017	0.0049	0.0070	

표 2 부하에 따른 1500 rpm에서의 식별계수

3.2 실험

3.2.1 입출력 자료의 수집

이상 이 없는 정상 자료의 시간역 특성은 다음과 같다.

(1) 공칭 모델

Maximum overshoot : 3.5 [%]

이상 자료는 다음과 같이 시스템의 특성을 변화 시키도록 전달 함수 상의 계수를 변화시켰다.

이상 : Maximum overshoot를 10% 증가.

3.2.2 고정 분모 설정

사전 실험에 의해 정상 입력력 자료로부터 식(3.1.24)와 같이 분모를 2차로 설정하여 계수를 얻었다.

$$f_1 = 1, \quad f_2 = 0.0024$$

3.2.3 초기 설정 계수

$$N_B = 2, \quad N_k = 10$$

$$\text{입력 잡음 표준편차 } \sigma_u = 0.02,$$

$$\text{출력 잡음 표준편차 } \sigma = 0.004$$

3.2.4 결과

실험 결과를 보듯이 정상 시스템으로부터 계수가 10%정도의 변화에 기존의 시험 변수들 보다 좋은 검출 성능을 보이고 있음을 알 수 있다. 이 연구에서 제안한 이상검출법의 특징은 분모를 사전 실험에 의해 미리 고정함으로써 이상발생시 시스템의 분자다항식의 계수변화를 이용하는 것으로 시험변수 T_1 에 의해 이상 판단이 이루어진다.

본 실험에서는 엔진에서 발생할 수 있는 이상 중에서 [3] 10%의 시간역 특성변화(Over shoot) 변화를 시스템의 이상으로 주입하였고 샘플링시간을 0.05초로 하였다.

여기서 $N_B=2, N_k=10, N=100$ 이고, 입력잡음의 분산 $\sigma_u^2 = 0.02^2$, 측정잡음의 분산 $\sigma^2 = 0.04^2$ 이었다. 이상검출을 위해 식 (23)의 시험변수 T_1 를 사용하였고, 잡음입력만을 고려한 시험변수 T_k 과 비교하였다. 그림3.1 ~ 그림3.2은 실험 결과이다. 이결과에서 볼수있듯이 이논문에서 제시하는 이상검출법은 다결연진과같은 실제 시스템에서도 우수한 성능을 보임을 알 수 있다. 특히 기존의 방법에 비해 이상검출감도가 매우 높고, 오경보등이 없어 다양한 실제 시스템의 적용이 가능하다는 것을 알 수 있다.

4. 결론

건설한 이상검출법에 대한 연구는 모델의 불확실성에 대한 연구가 주를 이루고 있다. 그러나 건설성은 이상검출 기법의 속도에도 관련되며, 모델링 오차를 최소화하기 위해 고차항 확장 등의 방안은 모델의 차수를 증가시키는 결과를 가져오게, 이는 최적의 건설성을 얻었다고 보기에는 어렵다. 최적의 건설성을 얻기 위한 한 방안으로 저차 모델을 사용하고 모델링 오차를 계수 추정과정에 영향을 고려하는 기법도 계산 속도 향상을 통한 건설성을 얻는 한 방안으로 여겨지고, 추후의과제는 분할고리즘의 다변수로의 확장등을 통한 현장에서의 응용이라 할수있겠다.

참고 문헌

- [1] D. T. Horak, "Failure detection in dynamic systems with modeling error", AIAA paper 87-2604, pp 1545 - 1553, 1987
- [2] P. M. Frank, "Faults diagnosis in dynamical systems using analytical and knowledge-based redundancy- A survey and some new results", Automatica, Vol. 26, No. 3, pp 459-474, 1990
- [3] R. Isermann, "Fault diagnosis of machines via parameter estimation and knowledge processing-Tutorial paper", Automatica, Vol. 29, No. 4, pp 815-835, 1993

- [4] P. P. Khargonekar and Thomas L. Ting, "Fault detection in the presence of modeling uncertainty", Proc.of 31th IEEE CDC, pp 1716-1721, 1993
- [5] R. J. Patton and J. Chen, "Optimal unknown input distribution matrix selection in robust fault diagnosis", Automatic, Vol. 29, No. 4, pp 837-841, 1993
- [6] J. Chen, Ron J. Patton and H. Zhnag, "Design of unknown input observers and robust fault detection filters", Int. J. Control, Vol 63, No. 1, pp 85-105, 1996
- [7] O.K. Kwon, G. C. Goodwin and W. H. Kwon, "Robust fault detection method accounting for modeling errors in uncertain systems", Control Eng. Practice, Vol. 2 No. 5, pp 763-771, 1994
- [8] X. Ding, L. Guo and P. M. Frank, "A frequency domain approach to fault detection of uncertain dynamic systems", Proc. of 31th IEEE CDC, pp 1722-1727, 1993
- [9] A. Medvedev, "Fault detection and isolation by a continuous parity space method", Automatica, Vol 31, No. 7, pp 1039-1044, 1995
- [10] B. Ninness, Graham C. Goodwin, O.K. Kwon and Bengt Carlsson, "Robust fault detection based on low order models", SAFEPROCESS '91, 1991
- [11] D. W. Apley and J. Shi, "A fault detection, isolation, and identification technique for complex MISO linear systems", Proc. of ACC, pp 2633-2637, 1995
- [12] S. Bousghiri-Kratz, O. Malasse and W. Nuninger, "Fault detection using state estimation. Application to an electromechanical process", Proc. of the 31th IEEE CDC, pp 2397-2402, 1995
- [13] J. Jiang, "Optimal gain scheduling controller for a diesel engine," IEEE Control Systems Magazine, pp. 42-48, 1994.
- [14] J.O. Flower and P.K. Gupta, "Optimal control considerations of diesel engine discrete models," Int. J. Control, vol. 19, no.6, pp. 1057-1068, 1974.
- [15] G. Hong and N. Collings, "Design of diesel smoke feedback control using a combination of PI control algorithm and performance optimization," SAE Tech. paper, no. 890387, 1989.
- [16] N. Zhang, J.V. Perumpral, R.K. Byler, and S.D. Shaffer, "Diesel engine control based on an ARMA model," Trans. ASAE, vol. 32, no. 4, pp. 1112-1120, 1989.

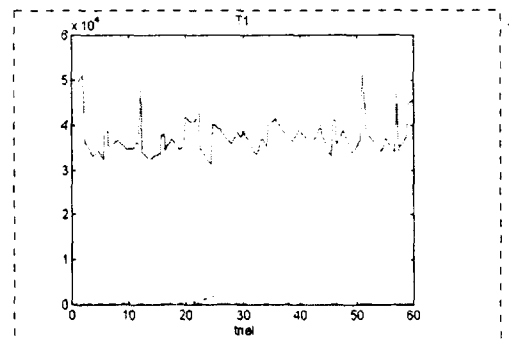


그림 3.1 건설한 이상검출법을 사용한 이상검출의

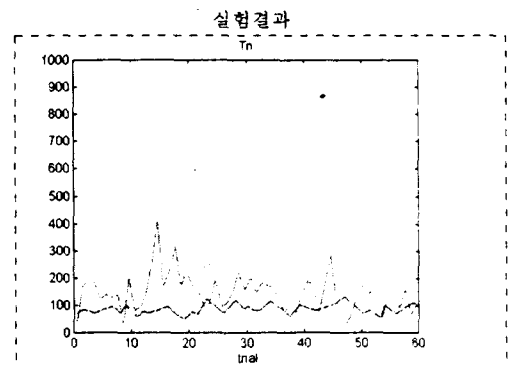


그림 3.2 기존의 잡음만을 고려한 경우의 실험 결과