

디젤기관의 On-line 파라미터 추정에 의한 적응 속도제어

유 희 한* · 하 주 식**

An Adaptive Speed Control of a Diesel Engine
By Means of the On-line Parameter Estimation

H. H. Yoo · J. S. Ha

Key words : Adaptive Speed Control(적응속도제어), Parameter Estimation(파라미터추정), Least Square Method(최소자승법), Diesel Engine(디젤엔진), PID Controller(비례/적분/미분 제어기), Digital Governor(디지털 조속기), Model matching Method(모델매칭법)

Abstract

Recently, for the speed control of a diesel engine, some methods using the modern control theory such as LQ control technique, Fuzzy control technique, or H_{∞} control theory etc., have been reported. However, most of speed controllers of a diesel engine ever developed are still using the PID control algorithm. And, as another approach to the speed control of a diesel engine, the authors proposed already a new method to adjust the parameters of the PID controller by a model matching method. In the previous paper, the authors confirmed that the proposed new method is superior to Ziegler & Nichols's method through the analysis of results of the digital simulations under the assumption that the parameters of a diesel engine are known exactly. But, actually, it is very difficult to find out the value of parameters of a diesel engine accurately. And the parameters of a diesel engine are changing according to the operating condition of a diesel engine. So, in this paper, a method to estimate the parameters of a diesel engine by the least square method and a method to adjust the parameters of the PID controller for the speed control of a diesel engine by means of the model matching method are proposed. Also, the digital simulations are carried out in cases either with or without measurement noise. And this paper confirms that the proposed method here is superior to Ziegler & Nichols's method through the analysis of the characteristics of indicial responses.

* 정희원, 포항공대 가속기 연구소

** 정희원, 한국해양대학교

1. 서 론

디젤기관은 원래, 운전영역에 따라 그 파라미터 값들의 변화가 크므로, 제어장치의 파라미터 값들이 거의 고정되거나 비교적 단순한 제어알고리즘(비례제어)만을 가지고 있는 종래의 유압기계식 조속기로서는 효율적인 속도제어를 행하기가 어렵게 되었다. 따라서, 최근의 저속화, 장행정화 되어가고 있는 선박 추진용 디젤기관에 대해서는 속도제어를 거의 행할 수 없게 되었다¹⁾. 이에 대한 대책으로 최근에 마이크로 프로세서를 이용한 전자 조속기 즉 디지털 조속기(Digital Governor)가 개발되어 선박에 활용되고 있다²⁾.

이 디지털 조속기에 채용하고 있는 제어알고리즘으로서의 현재까지 거의 PID제어알고리즘이 이용되고 있다^{3,4,5)}. 이 PID제어기는 그 파라미터 값들을 여하히 조정하느냐에 따라 그 성능이 현저하게 달라지므로 파라미터 조정문제가 매우 중요하다. 현재로서는 오랜 전통을 지닌 Ziegler & Nichols의 방법⁶⁾이 아직도 많이 이용되고 있으며, 평가함수를 정의하여 그 평가함수의 값이 최소가 되도록 PID제어기의 파라미터를 조정해주는 방법도 활용되고 있다³⁾.

또한, 최근에는 디젤기관에 있어서 LQ최적제어 기법을 이용하여 속도제어를 행하는 방법⁷⁾, 퍼지 제어기를 이용하는 속도제어 방법⁸⁾, H 제어기법을 이용하는 속도제어방법⁹⁾, 보조제어기를 이용하여 속응성이 양호한 속도제어를 행하는 방법¹⁰⁾ 등도 제안되고 있다.

저자들은 또하나의 디젤기관의 속도제어방법에 대한 접근으로서, 모델매칭법(Model Matching

Method)에 의한 속도제어 방법¹¹⁾을 제안 한 바 있으며, 디젤기관의 파라미터 값이 정확히 파악 되었을 때와 그렇지 못한 경우에 대하여 각각 디지털 시뮬레이션을 행하고, 그 인디셜 응답 특성을 Ziegler & Nichols 의 방법과 비교, 분석하여, 모델매칭법에 의한 속도제어 방법의 그 우수성을 입증한 바 있다.

상기의 논문에서는 제어대상인 특정디젤기관(B&W 4L80MC)에 대한 파라미터들을 정확히 파악하고 있다는 전제하에 PID제어기의 파라미터 값들을 조정하는 방법을 제안 하였다. 그러나, 실제로는 제어대상이 되는 디젤기관의 파라미터의 값들을 정확히 파악하기가 어렵고, 이 파라미터 값들은 운전조건에 따라 수시로 변화 한다. 따라서, 본논문에서는, 최소자승법(Least Square Method)에 의하여 디젤기관의 파라미터 값들을 운전 데이터를 이용하여 연속적으로 추정하고, 이 값들을 이용하여 전술한 모델매칭법에 의해서 PID제어기의 파라미터들을 자동적으로 조정해주는 적응속도제어 방법을 제안한다.

또한, 응답 시뮬레이션을 수행하여 Ziegler & Nichols 방법과 비교, 분석을 행하고, 제어성능에 대한 고찰을 통하여 본논문이 제안하는 방법의 우수성을 입증코자 한다.

2. 디젤기관의 적응속도제어 시스템의 설계

2. 1 모델매칭법에 의한 디젤기관의 속도제어

필자들은, Fig. 2.1처럼 PID제어기를 이용하여

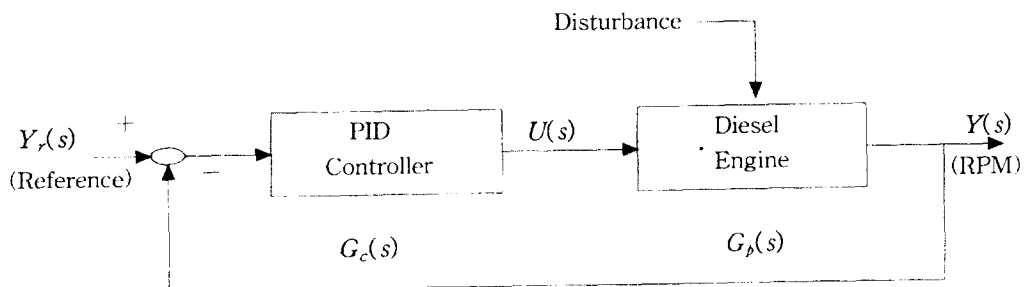


Fig. 2.1 PID Control system of a diesel engine

디젤기관의 속도제어를 행하고, PID제어기를 모델매칭법을 이용하여 설계하는 방법을 제안한 바 있는데, 디젤기관의 적응속도 제어계통에 대해서는 논하기 전에 여기에서는 그 요점만을 약술하기로 하고 상세한 것은 참고문헌¹⁾을 참조해주시기 바란다.

즉, 식(2.1)의 전달함수로서 표시되는 디젤기관에 있어서 그 파라미터 값 K , T_f 및 T_r 의 값이 정확히 파악되었을 때, 식(2.2)의 PID제어기의 파라미터 K_p , T_i 및 T_d 의 값을 각각 식(2.3)과 같이 결정하면 Fig. 2.1의 피드백제어계통의 폐회로 전달함수를 $G(s)$ 는 식(2.4)와 같이 정상이득이 1이고 시정수가 T 인 1차계통이 된다는 것이 그 요지이다.

$$G_p(s) = \frac{K}{(1+T_f s)(1+T_r s)} \quad (2.1)$$

$$G_c(s) = \frac{K_p}{T_i s} (1+T_i s+T_d s^2) \quad (2.2)$$

- 단, K_p : 비례감도,
- T_i : 적분시간,
- T_d : 미분시간,
- K : 디젤기관의 정상이득
- T_f : 디젤기관 연소계통의 시정수
- T_r : 디젤기관 회전계통의 시정수

$$\left. \begin{aligned} T_i &= T_f + T_r \\ T_d &= \frac{T_f T_r}{T_i} \\ K_p &= \frac{T_i}{K T} \end{aligned} \right\} \quad (2.3)$$

$$G(s) = \frac{1}{1+Ts} \quad (2.4)$$

2.2 적응속도제어시스템의 구성

서론에서도 언급한 바 있지만 디젤기관의 파라미터 K , T_f 및 T_r 의 값은 운전조건에 따라 심하게 변화한다. 따라서, 전절에서 설명한 모델매칭법에 의하여 PID제어기의 파라미터 값을 결정해 주려면 디젤기관의 운전조건(회전수, 부하 등)이 바뀌어 질 때 마다 그 파라미터의 값을 추정하여 PID 제어기의 파라미터를 재조정 해주는 적응제어를 행하여야 한다. 적응제어의 방법은 MRAC¹²⁾를 비롯하여 여러 가지 방법이 있으나, 본 연구에서는 Fig. 2.2와 같이 최소오차자승법을 이용하여 디젤기관의 운전 데이터로부터 디젤기관의 파라미터를 On-line으로 추정하고, 그 값에 따라 제어기의 파라미터를 재조정 해주는 자기동조형 적응제어 시스템을 구성하는 방법을 제안한다.

Fig. 2.2에서 Parameter estimator는 디젤기관의 입출력에 대한 측정치 u_i, z_i 로부터 디젤기관의

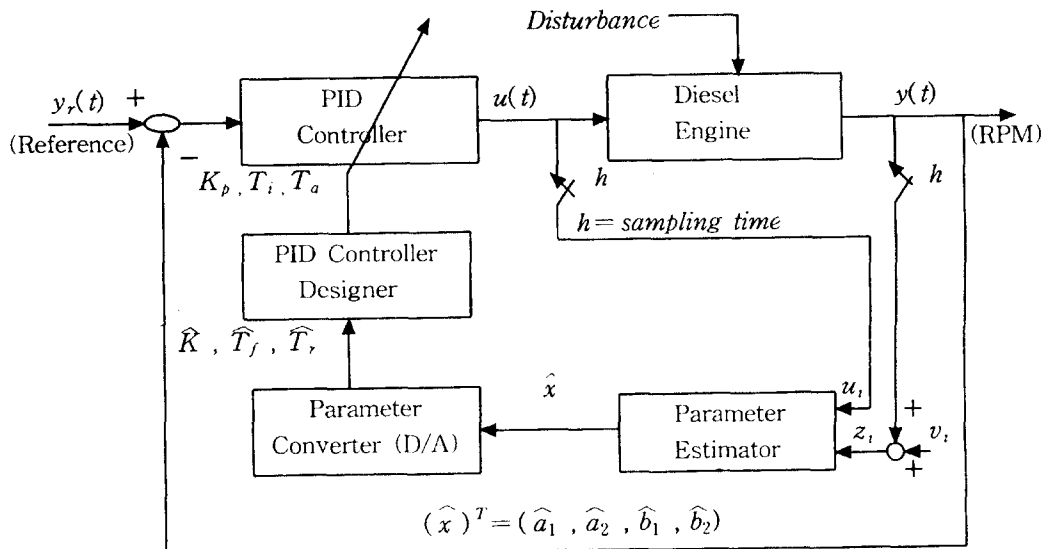


Fig. 2.2 The adaptive speed control system of a diesel engine

이산치형 파라미터 a_1, a_2, b_1, b_2 (식(3.1)참조) 의 값을 추정하는 기구이다. 또한, Parameter converter는 이산치형 파라미터 벡터 x 즉 $(a_1, a_2, b_1, b_2)^T$ (식(3.4)참조)의 추정치인 $(\hat{a}_1, \hat{a}_2, \hat{b}_1, \hat{b}_2)^T$ 로 부터 연속형 파라미터의 추정치 $\hat{K}, \hat{T}_f, \hat{T}_r$ 를 계산하는 부분이고, PID Controller designer는 전절에서 설명한 모델매칭법에 의해서 PID제어기의 파라미터 K_p, T_i, T_d 의 값을 식(2.3)에 의해서 결정해주는 기구이다. 적응제어방법으로는 MRAC¹²⁾를 비롯하여 여러 가지 방법¹³⁾들이 있으나, 본 연구에서는 Fig. 2.2와 같이 디젤기관의 적응제어 시스템을 구성하는 것을 제안한다.

3. 디젤기관의 파라미터 추정법

식(2.1)과 같이 표시되는 디젤기관을 샘플링간격 시간 h 의 이산치형으로 표현하면 식(3.1)과 같이 된다.

$$y_i = -a_1 y_{i-1} - a_2 y_{i-2} + b_1 u_{i-1} + b_2 u_{i-2} \quad (3.1)$$

단, $u_i = u(ih), y_i = y(ih)$

$$a_1 = -(e^{-hT_i} + e^{-hT_r}), a_2 = e^{-h(1/T_i + 1/T_r)}$$

$$b_1 = K(1 + a_1 + c), b_2 = K(a_2 - c)$$

$$K = K_c K_r$$

$$c = \frac{T_f e^{-hT} - T_r e^{-hT_r}}{(T_r - T_f)}$$

h : sampling time

식(3.1)에서, 제어대상 디젤기관으로의 입력 u_i 는 정확히 측정 할 수 있다고 가정하고, 식(3.2)와 같이 측정값 z_i 는 출력값 y_i 에, 평균값이 0이고 분산이 S^2 인 정규분포 $N(0, S^2)$ 인 측정잡음 v_i 가 부가된 것으로 한다. 또한, 측정잡음 v_1, v_2, v_3, \dots 는 서로 통계적으로 독립이라고 한다.

$$z_i = y_i + v_i \quad (3.2)$$

여기서,

v_i : measurement noise of $N(0, S^2)$

v_i, v_j : statistically independent(when, $i \neq j$)

디젤기관의 파라미터를 추정하는 방법은 여러 가지 있을 수 있으나, 본 연구에서는 디젤기관의 입출력 관계를 식(3.1)과 같이 표시하고 입출력 데

이터로부터 이산치형 파라미터 a_1, a_2, b_1, b_2 를 연속적으로 추정하는 방법을 제안한다.

디젤기관의 이산치형 파라미터 a_1, a_2, b_1, b_2 를 식(3.4)와 같이 벡터 x 로 정의하고, 디젤기관의 입출력데이터 $u_1, u_2, \dots, u_i, z_1, z_2, \dots, z_i (i \geq 6)$ 까지를 이용하여 최소자승법으로 구한 x 의 추정치 즉, 식(3.3)의 J 를 최소로 하는 x 의 값을 \hat{x}_i 라 하면 \hat{x}_i 는 식(3.5)와 같이 구해진다¹⁴⁾.

$$J = \| Z_i - H_i x \|^2 \quad (3.3)$$

$$x^T = (a_1, a_2, b_1, b_2) \quad (3.4)$$

$$\hat{x}_i = (H_i^T H_i)^{-1} H_i^T Z_i \quad (3.5)$$

여기서,

$$H_i = \begin{bmatrix} -z_2 & -z_1 & u_2 & u_1 \\ -z_3 & -z_2 & u_3 & u_2 \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ -z_{i-2} & -z_{i-3} & u_{i-2} & u_{i-3} \\ -z_{i-1} & -z_{i-2} & u_{i-1} & u_{i-2} \end{bmatrix} : (i-2) \times 4 \text{ matrix} \quad (3.6)$$

$$Z_i^T = [z_3, z_4, \dots, z_i] : (i-2) \text{ vector} \quad (3.7)$$

식(3.5)에서 알 수 있는 바와 같이 x 의 추정치를 구하려면 새로운 측정치를 얻을 때마다 역행렬을 계산 하여야 하는데, 사용하는 측정 데이터의 수가 많아 질수록 수치계산이 힘들게 된다. 따라서, 큰 차원의 역행렬을 구하지 않고 \hat{x}_{i-1} 과 z_i 를 이용하여 \hat{x}_i 를 계산하는 Recursive form을 구하면 식(3.8)과 같이 된다.

$$\left. \begin{aligned} \hat{x}_i &= \hat{x}_{i-1} + P_{i-1} h_i (h_i^T P_{i-1} h_i + \mathbf{1})^{-1} (z_i - h_i^T \hat{x}_{i-1}) \\ P_i &= (H_i^T H_i)^{-1} = P_{i-1} - P_{i-1} h_i (h_i^T P_{i-1} h_i + \mathbf{1})^{-1} h_i^T P_{i-1} \\ z_i &= h_i^T x + v_i \\ h_i^T &= [-z_{i-1}, -z_{i-2}, u_{i-1}, u_{i-2}], (i = 7, 8, \dots) \end{aligned} \right\} \quad (3.8)$$

$$\text{단, } \hat{x}_6 = (H_6^T H_6)^{-1} H_6^T Z_6 \quad (3.9)$$

$$P_6 = (H_6^T H_6)^{-1} \quad (3.10)$$

$$H_6 = \begin{bmatrix} -z_2 & -z_1 & u_2 & u_1 \\ -z_3 & -z_2 & u_3 & u_2 \\ -z_4 & -z_3 & u_4 & u_3 \\ -z_5 & -z_4 & u_5 & u_4 \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

$$Z_6^T = [z_3, z_4, z_5, z_6] \quad (3.12)$$

위에서 설명한 방법으로 추정한 디젤기관의 이산치형 파라미터 x 의 추정치 \hat{x} 로부터 디젤기관의 연속형 파라미터를 구하면 식(3.13)과 같이 된다.

$$\left. \begin{aligned} \hat{T}_r &= \frac{-h}{\log_e C_1} \\ \hat{T}_r &= \frac{-h}{\log_e C_2} \\ \hat{K} &= \frac{\hat{b}_1 + \hat{b}_2}{1 + \hat{a}_1 + \hat{a}_2} \end{aligned} \right\} \text{단, } C_1 = \frac{\hat{a}_1 + \sqrt{\hat{a}_1^2 - 4\hat{a}_2}}{2}, C_2 = \frac{\hat{a}_1 - \sqrt{\hat{a}_1^2 - 4\hat{a}_2}}{2} \quad (3.13)$$

4. 시뮬레이션 및 검토

여기에서는 B&W 4L80MC 디젤기관을 대상으로 하여 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 본 논문에서 제안하는 방법에 의한 적응속도제어 시스템에 대하여 검토해 보기로 한다. B&W 4L80MC 디젤기관의 제원과 파라미터 변동상황은 참고문헌¹¹⁾을 참조해 주기 바란다.

4.1 응답 시뮬레이션

Fig. 4.1은 디젤기관의 동작점이 60rpm일 경우, 제어기의 파라미터와 디젤기관의 파라미터가 맷칭되었을 때와 맷칭되지 않았을 경우의 적응속도 제어시스템에 대하여 시행한 시뮬레이션 결과로 얻은 인디셜 응답들이다. Fig. 4.1에서 E60은 디젤기관의 파라미터가 60rpm에 해당하는 값을 가지는 경우, C60은 60rpm일 때의 디젤기관의 파라미터 값에 PID제어기의 파라미터 값을 설정한 경우를 나타내며, Adaptive(E60+C60 : S=a)는 디젤기관의 동작점은 60rpm인데 PID제어기의 파라미터는 100rpm일 때의 값으로 설정되어 있을 때, 60rpm일 때의 디젤기관의 파라미터 값을 측정값 v_r 의 표준편차 S가 S=a일 때, 추정된 추정치에 맷칭시켜 PID제어기의 파라미터를 재설정하여 적응속도제어를 한 경우를 나타낸다. 그럼에서 알 수 있듯이 디젤기관의 파라미터 추정을 통하여 적응속도 제어를 행하였을 경우, 그 인디셜 응답이 대폭 개선됨을 확인 할 수 있다.

또한, Fig. 4.2는 Fig. 4.1과 똑같은 경우에 Zie-

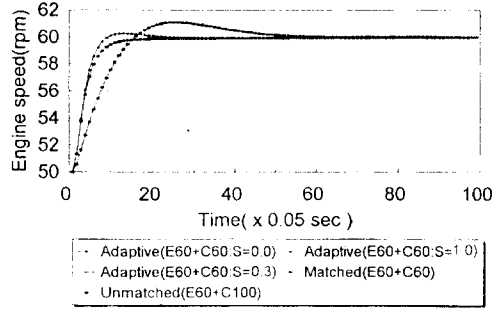


Fig. 4.1 Indicial response of the adaptive speed control system(proposed)

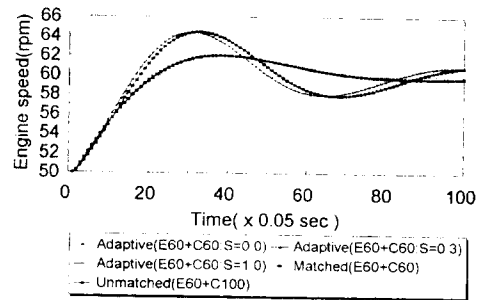


Fig. 4.2 Indicial response of the adaptive speed control system(Ziegler & Nichols)

gler & Nichols의 방법으로 PID제어기의 파라미터를 조정해준 경우의 시뮬레이션 결과이다. Fig. 4.1과 Fig. 4.2를 비교해 보면, 본 연구에서 제안하는 모델맷칭법에 의해서 PID제어기의 파라미터를 조정하는 것이 인디셜 특성으로 볼 때 Ziegler & Nichols의 방법보다 월등히 성능이 우수 함을 알 수 있다.

4.2 주파수 응답에 의한 적응속도제어 시스템의 성능검토

부하, 회전수 등에 따라 변화하는 디젤기관의 파라미터 값을 전질에서 논한 방법으로 추정한다 하더라도 추정에 사용되는 데이터의 한정성, 측정에 수반되는 잡음 등으로 인하여 추정치와 진치 사이에는 오차가 있을 수 있다. 따라서, PID제어기의 설정된 파라미터와 실제의 디젤기관과는 정확하게 맷칭되지 않을 수가 있다. 이러한 경우를 고려하여 필자들은 이미 Fig. 2.1의 속도제어시스템에 대해서 안정성의 검토를 행하여 안정성에 상당한 여

유가 있음을 밝힌 바 있으나¹⁴⁾, 여기에서는 좀더 구체적으로 Fig. 2.1의 피드백 제어계통에 대하여 주파수 응답의 위상여유를 계산함으로써 이 계통에 대한 제어성능을 검토해 보기로 한다.

지금, 실제의 디젤기관의 파라미터는 K, T_f, T_r 인데 PID제어기의 파라미터 값은 K_o, T_{fo}, T_{ro} 에 맞춰서 식(4.1)과 같이 설정되어 있는 경우를 생각해 보자.

$$\left. \begin{aligned} T_r &= T_{fo} + T_{ro} \\ T_d &= T_{fo}T_{ro} / (T_{fo} + T_{ro}) \\ K_p &= \frac{T_i}{K_o T} \end{aligned} \right\} \quad (4.1)$$

그러면, Fig. 2.1의 디젤기관의 PID제어 시스템에서의 일순주파수전달함수(Overall frequency transfer function)는 식(4.2)와 같이 된다.

$$G_c(j\omega)G_p(j\omega) = \frac{K}{K_o} \frac{(1 + j\omega T_{fo})(1 + j\omega T_{ro})}{j\omega T(1 + j\omega T_f)(1 + j\omega T_r)} \quad (4.2)$$

따라서, 식(4.2)의 주파수전달함수의 이득 (Gain) $|G_c(j\omega)G_p(j\omega)|$ 을 M , 위상(Phase) $\angle G_c(j\omega)G_p(j\omega)$ 를 ϕ 라 하면, M 과 ϕ 는 각각 식(4.3), (4.4)로 되며, Fig. 2.1의 피드백 제어계통의 위상여유(Phase margin) ϕ_m 은 식(4.5)와 같이 된다.

$$M = |G_c(j\omega)G_p(j\omega)| = \frac{K}{K_o} \frac{\sqrt{1 + \omega^2 T_{fo}^2} \sqrt{1 + \omega^2 T_{ro}^2}}{\omega T \sqrt{1 + \omega^2 T_f^2} \sqrt{1 + \omega^2 T_r^2}} \quad (4.3)$$

$$\phi_m = \angle G_c(j\omega)G_p(j\omega) = \tan^{-1} \omega T_{fo} + \tan^{-1} \omega T_{ro} - \frac{\pi}{2} - \tan^{-1} \omega T_f - \tan^{-1} \omega T_r \quad (4.4)$$

$$\phi_m = |-\pi - \phi_1| \quad (4.5)$$

단, ϕ_1 은 $M=1$ 일 때의 ϕ

식(4.3)~(4.5)를 이용하여 해석적으로 ϕ_m 을 계산하여 이 속도제어 계통의 안정성 등의 성능을 검토하기는 곤란하나, 수치계산으로는 용이하게 할 수 있다.

Fig. 4.3은 디젤기관 B&W 4L80MC에 있어서, 회전수 60rpm 일때의 디젤기관의 파라미터값을

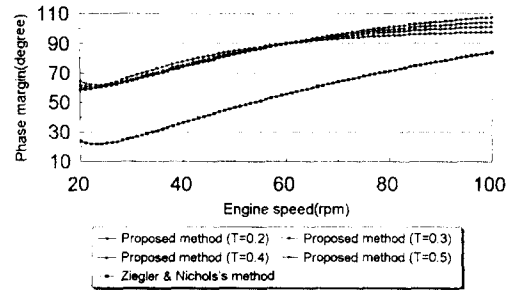


Fig. 4.3 Comparisons of phase margins

K_o, T_{fo}, T_{ro} 라 하고, 이 값을 이용하여 $T=0.2\sim 0.5$ 의 경우에 대하여 모델매칭법에 의해 제어기의 파라미터를 설정해 놓고, 실제의 rpm이 20~100으로 변화하는 경우, 식(4.5)의 ϕ_m 과 Ziegler & Nichols의 방법으로 PID제어기의 파라미터를 조정 하였을 때의 속도제어시스템의 위상여유를 수치계산하여 도시한 것이다.

Fig. 4.3에서 알 수 있는 바와 같이 Ziegler & Nichols의 방법보다 본 연구에서 제안하는 방법에 의한 것이 훨씬더 위상여유가 크며, rpm이 20~100으로 변화하는 경우, 적응 속도제어를 행하지 않더라도 보통 자동제어계통에서 요구되는 위상여유의 범위 $32^\circ \sim 48^\circ$ ¹⁵⁾ 보다 위상여유가 더 커서 이 적응속도 제어계통은 매우 우수한 제어성능을 갖음을 알 수 있다.

5. 결 론

이상과 같이 본 논문에서는 디젤기관의 운전 데이터로부터 디젤기관의 파라미터값을 on-line으로 연속적으로 추정하고 이 추정된 파라미터값에 맞춰지도록 PID제어기의 파라미터값을 모델매칭법에 의해서 자동조정 해주는 디젤기관의 적응속도제어 방법을 제안하고 응답 시뮬레이션을 통하여 본 방법에 의한 결과가 종전의 Ziegler & Nichols의 방법 보다 월등히 우수함을 입증 하였다.

또한, 주파수응답의 위상여유에 대한 수치계산을 통하여, 본 논문에서 제안한 적응속도제어계통에 대한 안정성과 성능을 검토 하였다. 한 예로서, 대상기관 B&W4L80MC의 경우, 파라미터 추정에

오차가 있더라도 전 운전영역에서 제어성능이 우수함을 확인 하였다. 다만, 본 논문에서는 실제의 디젤기관을 이용한 실험을 수행하지 못하였는 바, 이는 앞으로의 연구과제로 남아 있다.

參考文獻

- 1) 韓國船舶機關學會 機關管理委員會, “船舶의 經濟的 運航管理”, pp. 222, 태화출판사, (1978. 5)
- 2) Norcontrol, “Digital governor DGS8800 system information”, (1985. 3)
- 3) 佐藤 勳, “電子ガバナによるディーゼル 機關의 最適 制御”, 內燃機關 Vol. 30, NO. 8, (1991. 8)
- 4) G. E. Harlang and K. F. Gill, “Design of a model reference adaptive control for an internal combustion engine”, Measurement and Control Vol. 6, pp. 173 - 176, (1973. 4)
- 5) 北川正人, 船舶主機 엔진의 回轉數制御 시스템의 理論解析”, 技報NO. 61, (1981. 1)
- 6) J. G. Ziegler & N. B. Nichols, “Optimum Settings for Automatic Controllers”, Trans. ASME, 64, pp. 759 - 768, (1942)
- 7) 劉永昊, “船舶機關의 速度制御에 관한 研究”, 韓國 海洋大學院 機關學科 博士學位論文, (199. 2)
- 8) 守田榮之 外 1人, “ファジィ ディーゼル ガバナとその設計”, 內燃機關, 第31卷, 第3號, PP. 53 - 62, (1992.3)
- 9) 양주호, 정병권, “HINF제어기법을 이용한 저속 디젤기관의 속도제어”, 한국박용기관학회지, 제17권, 5호, (1993. 12)
- 10) 김병덕, “디젤기관의 속도제어성능 개선에 관한 연구”, 한국해양대학교대학원 박사학위논문, (1994. 2)
- 11) 유희한, 하주식, “모델매칭법에 의한 디젤기관의 속도제어”, 한국박용기관학회지, 제20권, 3호, (1996. 8)
- 12) Hans Butler, “MODEL REFERENCE ADAPTIVE CONTROL”, Prentice Hall, (1992)
- 13) 金井 喜美雄, “로バスト適應制御入門”, 오름社, (1990)
- 14) ROBERT C. K. LEE, “OPTIMAL ESTIMATION, IDENTIFICATION, AND CONTROL”, THE M. I. T. PRESS, CAMBRIDGE, MASSACHUSETTS, (1964)
- 15) 河注植, 自動制御工學, 제7장, 太和出版社, (1993)