

# 혼성제어기에 의한 전기유압식 조속기를 가진 디젤기관의 속도안정성에 대한 연구

강 창 남

제주대학교 해양과환경연구소

## A Study on the Speed Stability of Diesel Engine with a Electro-Hydraulic Governor

Chang-Nam Kang

Marine & Environmental Research Institute, Cheju National University, Jeju-do, 695-814, Korea

Recently, it was very difficult for Electro-hydraulic governor to regulate the speed of high power engine with long stroke at low speed and low load, because of the jiggling phenomena by rough fluctuation of rotating torque and the hunting phenomena by long dead time occurred in fuel combustion process in the engine cylinder. In this paper, the influence of engine dead time is investigated by Nichols chart, and hybrid controller selected advantages of PID and fuzzy logic controller is provided to improve the performance of speed control of a low speed and long stroke diesel engine.

**Key words** : hybrid controller

### 서 론

선박의 주기관으로 사용되는 디젤기관은 기관 및 추진시스템의 효율을 높이고, 연료비를 절감하기 위하여 저속 장행정화 되어가고 있는 추세이다. 1회전 내에서의 기관의 토오크와 회전수의 순시변동으로 인한 연료펌프의 랙크구동부에 발생하는 지글링현상 때문에 심한 마모가 발생할 뿐 아니라 지연시간이 길어지고 또한 운전영역에 따라 파라미터값의 변화가 커서 효율적인 속도제어가 어렵다. 본 연구에서는 널리 사용되고 있는 전기유압식 조속기를 가진 디젤기관을 모델로 선정하여 연소계통의 지연시간 변동에 따른 영향을 주파수 영역에서 분석하였고, 저속 운전 영역에서 속도제어 성능을 향상시키기 위하여 PID제어기와 퍼지제어기의 장점을 이용하여 결합시킨 혼성제어

기를 설계하여 시스템의 응답특성을 모의 실험을 통하여 유효성을 입증하고자 한다.

### 디젤기관의 속도제어 시스템 모델링

디젤기관의 속도 제어 시스템은 제어반, 액츄에이터, 연소계통, 회전계통으로 크게 나뉜다(유와 하, 1990). 브릿지나 기관제어실의 속도제어반에서 속도지령에 따라 회전수의 목표치가 주어지면 조속기의 레버를 통하여 연료분사계통에 신호가 전달되어 연료랙크를 움직여 연료를 증감하고, 이에 따르는 연소계통의 마력수 증감으로 추진기의 회전수를 조종하여 목표치 회전수에 도달할 때까지 주파수/전압 변환기를 거쳐 제어반으로 케환되어 목표회전수를 유지한다.

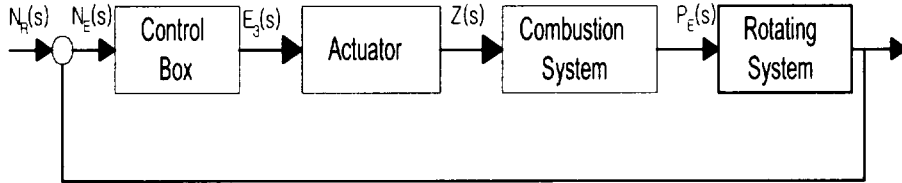


Fig. 1. Speed control system of diesel engine with electro-hydraulic governor.

Fig. 1 은 전기 유압식 조속기를 가진 디젤기관의 속도 제어 시스템 구성도이다.

Fig. 2 는 Woodward사의 전기유압식 조속기의 액추에이터 부분만을 개략적으로 나타내고 있다(Woodward, 1981).

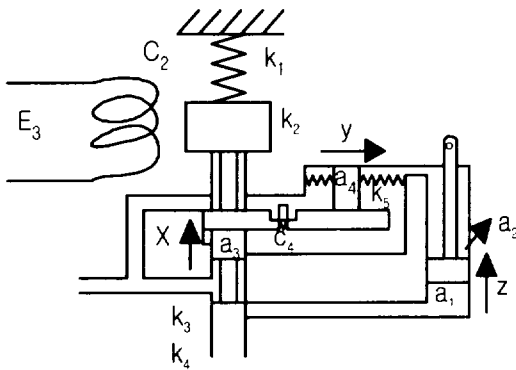


Fig. 2. Schematic diagram of electro-hydraulic actuator.

$$\text{액추에이터의 전달함수 } G_A(s) = \frac{Z}{E_3} = \frac{\alpha_2(s + \alpha_3)}{s^2 + \beta_1 s + \beta_2}$$

이다.

$$\text{단 } \alpha_2 = \frac{k_2 c_2 a_4^2}{a_1 (a_4^2 k_6 + a_3^2 k_5)} \quad \alpha_3 = \frac{k_5 c_4}{a_4^2}$$

$$k_6 = k_1 - k_2 + k_3$$

$$\beta_1 = a_1 + a_2 a_d$$

$$\left( \alpha_1 = \frac{k_5 (a_1 k_6 c_4 + a_2 a_3 k_4)}{a_1 (a_4^2 k_6 + a_3^2 k_5)} \right)$$

$$a_d = \frac{k_1}{c_2} \rho$$

$$\beta_2 = a_2 a_3 a_d$$

연소계통은 파워피스톤의 변위에 비해하고 과도상태에서 지연시간이 L(sec)라고 하면 전달함수  $G_F(s) =$

$K_e e^{-ls}$  이다. 시정수는 회전계통의 시정수에 비해 아주 작은 값이어서 무시했고  $K_F$ 는 정상상태 이득이다.

회전계통은 회전 계통의 정상 이득 및 시정수로 이루어진 1차식으로 근사화되고 전달함수는

$$G_R(s) = \frac{N(s)}{P_F(s) - P_s(s)} = \frac{\frac{1}{K_T}}{\frac{(J/75)(2\pi/60)^2}{K_T} s + 1} = \frac{K_T}{T_s s + 1} = \frac{K_T}{s + \alpha_r}$$

여기서  $K_R$ 은 회전계통의 정상이득이고  $T_s$ 은 시정수이다.

액추에이터, 연소계통, 회전계통을 포함한 개루프 전달함수는 다음과 같다.

$$G(s) = \frac{\alpha_2(s + \alpha_3)}{s^2 + 2\beta_1 s + \beta_2} K_e e^{-ls} \frac{K_T}{s + \alpha_r}$$

### 안정도 및 과도응답 특성해석

대상기관의 해상 시운전 결과 측정된 파라미터를 대입하고 변경가능한 값들을 조정하면서 니콜스선도를 그려보면  $L = 0.5(s)$ , Total gain = 26,  $\alpha_r = 0.069$ ,  $\omega_n = 10.47$  (rad/s),  $\alpha_3 = 5.24$ ,  $\zeta = 1.8$ 의 값이 주어질 때, 안정한계 영역이라 할 수 있는 원점을 지나는 파라미터를 구할 수 있다. Fig. 3은 안정한계 파라미터를 기준으로 연소계통의 지연시간만을 변경했을 경우에 니콜스선도이다(하, 1983). 연소계통의 시간지연 전달함수  $e^{-ls}$ 는 메트랩에서 지원하는 PADE의 2차 근사법을 택하여 해석 하였다(Bishop, 1993). 지연시간이 클수록 시스템은 불안정 해지고 안정한계값인 0.5(s)를 지나면 시스템은 발산한다. 이는 대형 저속 기관이 저속에서 운전 될 수록 시간지연이 커지게 되

므로 동일한 조속기인 경우라도 중고속인 경우에는 불안정한 헌팅 현상들이 발생할 수 있음을 알 수 있다. 따라서 저속 운전 영역에서 불안정한 속도 제어 특성을 보상해주고 안정한 응답특성을 얻을 수 있는 제어기의 설계를 제안한다. Fig. 4는 시스템이 안정한 계 파라미터에서 연소계통의 지연시간을 변경했을 경우에 단위계단 응답곡선이다.

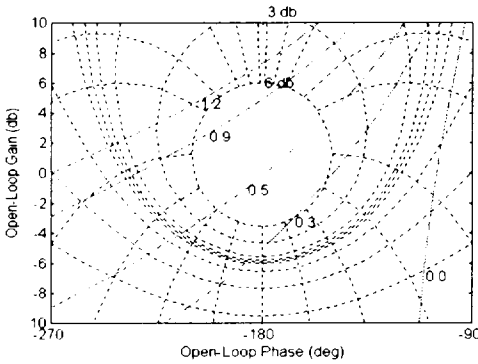


Fig. 3. Nichols chart under the variation of dead time.

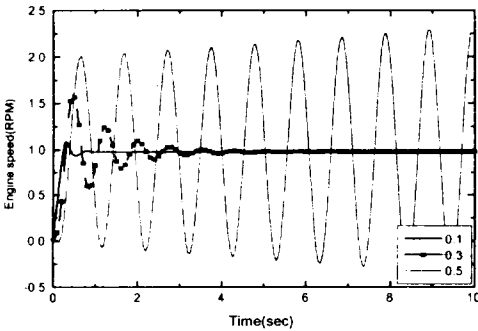


Fig. 4. Unit step responses under the variation of dead time.

### 제어기 설계

PID 제어기는 가장 일반적이고 대표적인 제어기이며 조정 가능한 3개의 파라미터를 제어대상에 따라 적절히 조정함으로써 전체적으로 유효한 제어 특성을 갖도록 할 수 있다. 반면에 초기 과도응답은 대체로 바람직하지 못한 특성을 지닌다. 또한 주파수 응답법에

기초하고, 시스템이 선형이라는 가정하에 설계되기 때문에 비선형이나 시변시스템에서는 적절히 대처하지 못하는 경우가 많다. PID 제어기의 이러한 단점으로 인하여 성능개선을 위한 보조제어기를 부가하는 경우가 늘고 있으며(양과 정, 1993). 최근에는 비선형 시변 시스템에 강인한 것으로 알려지고 있는 퍼지제어기와 결합이 시도되고 있다(강, 1996). 그러나 알고리즘 및 제어기수 증가로 인한 복잡화로 인하여 실용화에는 미흡한 것이 현실이다. 본 논문에서 검토하는 혼성제어기는 초기응답 성능이 양호한 퍼지제어기로 구동하고 설정된 시간 후에는 토글 스위칭 동작을 통하여 PID 제어기로 전환된다. 여기서 PID 제어기는 정상상태 오차를 제거하는 역할만을 수행하고 기관운전중에 허용치 이상이 속도 오차가 발생할 경우에는 외란에 강인한 퍼지제어기로의 전환이 필요하다. 이를 위하여 오차비교기를 부가하고, 오차가 설정치 이상이면 PID 제어기에서 퍼지제어기로 전환이 이루어 질 수 있게 하였으며 오차비교기는 설정치 이후에 작동하도록 하여 초기 응답시에 발생할 수 있는 오동작을 방지하였다. PID 제어기의 전달함수는  $G_c(s) = K_p + K_d s + K_i/s$  이다.

여기서,  $K_p, K_d, K_i$  는 각각 비례(Proportional), 미분(derivative), 적분(integral) 이득 파라미터 상수이다. 일반적으로 미분이득은 페루프시스템의 감쇠를 향상시키고 적분이득은 정상상태 오차를 감쇠시키는 효과가 있으나, 정해진 설계기준을 따르기 보다는 기초적인 제어원리를 사용하여 적용시스템에 따라 적절히 조정해주는 시행착오법이 널리 사용되고 있다.

본절에서는 Ziegler-Nichols의 튜닝 방법을 기준으로 하여 몇번의 시행착오적 수정을 통하여, 비례이득은 0.32, 적분이득은 0.02, 미분이득은 0.11으로 조정하였다. 그리고 토글스위치를 이용한 모드전환시간은 0.5(sec)로 정하였다.

퍼지 제어기는 제어규칙에 해당하는 퍼지 규칙 기반과 계산장치에 해당하는 추론 장치를 주축으로 구성되어 있다(wang, 1997). 기본구성은 Fig. 5와 같다.

퍼지제어기는 플랜트 또는 운전자와 주고받는 데이터는 퍼지량이 아닌 크리스프(Crisp)한 수치적 데이터이므로 퍼지량과 크리스프량을 상호 바꿀 수 있는 변환장치가 필요하게 되고, 구성도의 퍼지화기(Fuzzifier)와 비퍼지화기(Defuzzifier)가 그 변환을 담

당하게 된다.

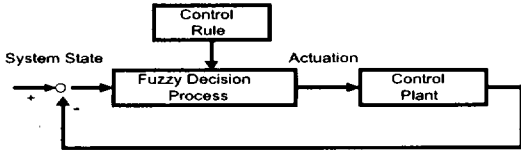


Fig. 5. Basic scheme of fuzzy control system.

Fig. 6은 퍼지추론의 원리를 나타내고 있다. 퍼지제어기의 입출력 변수로는 E, dE, U를 사용하

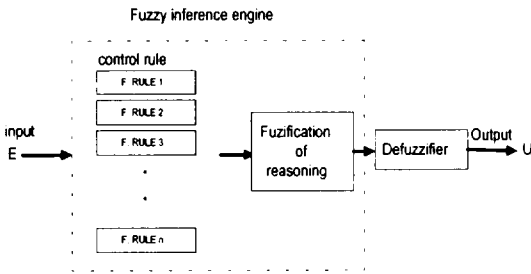


Fig. 6. Principle of fuzzy reasoning process.

고 이들을 각각 7개의 부분집합 NB, NM, NS, ZE, PS, PM, PB로 분할한 후  $E = [-1 \ 1]$ ,  $DE = [-3 \ 3]$ ;  $U = [-1 \ 1]$ 로 정규화 하였으며 소속함수 모양은 삼각형을 선택 하였다. 퍼지화는 싱글톤법(Singleton method)을 사용하였고, Mamdani의 min-max추론, 그리고 무게중심법(Center of Gravity method)에 의한 비퍼지화를 행하였다. 추론을 위한 제어규칙은 21개 규칙을 사용하였고 Fig. 7은 수치적 입력으로 퍼지제어기를 거쳐 시스템에 가해지는 최종제어량으로 출력 되는 과정을 나타내었다.

$$\text{최종제어량 } U = \frac{w_1 u_1 + w_2 u_2}{w_1 + w_2} \text{ 이다}$$

이상과 같이 PID제어기를 주제어기로 하고 토글스위치를 이용하여 퍼지제어기를 부가한 혼성제어기를 가진 속도제어 시스템의 구성도는 Fig. 8과 같다.

모의 실험에서는 오차비교기를 부가하여 오차가 어느정도 이상이면 PID제어모드에서 퍼지제어 모드로 전환이 이루어질 수 있게 하였다. 비교기는 설정시간 후에 작동하도록 설계되어 오동작을 방지하였으며 모의실험에서는 3초후에 비교기가 작동하도록 하였으며

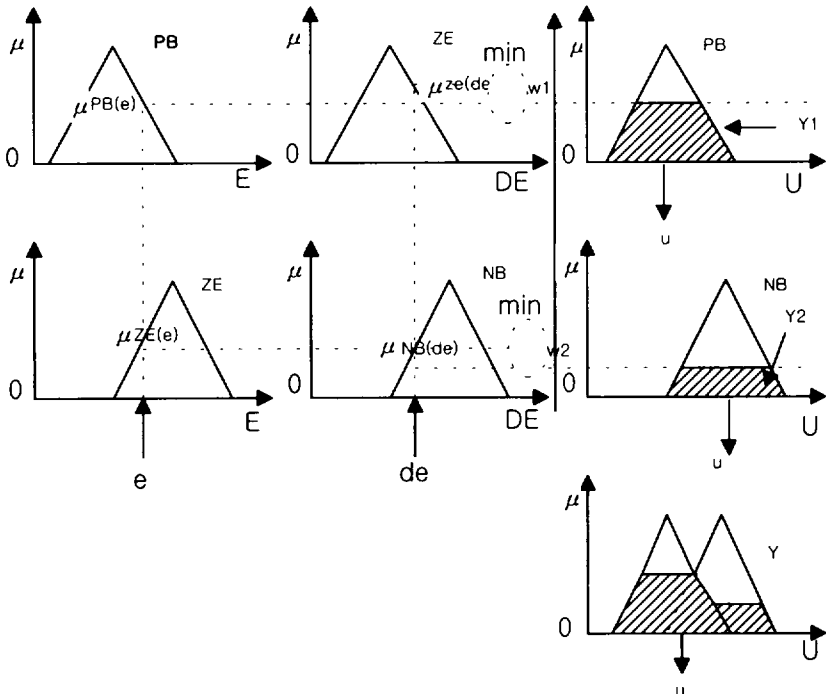


Fig. 7. Fuzzy reasoning process by max-min composition and centroid of gravity method.

혼성제어기에 의한 전기유압식 조속기를 가진 디젤기관의 속도안정성에 대한 연구

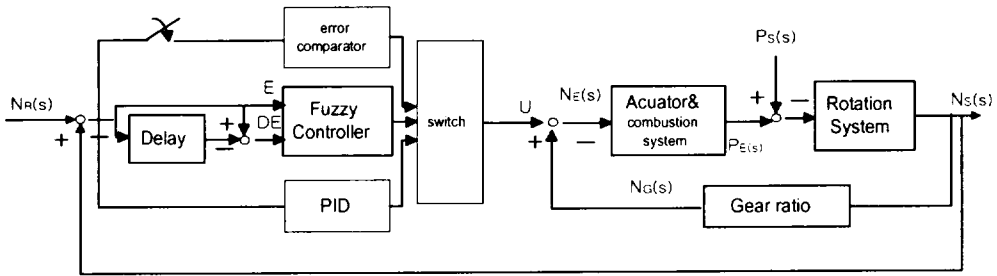
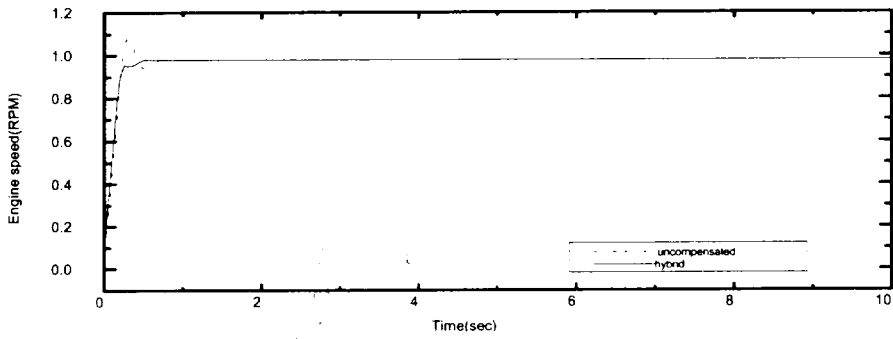
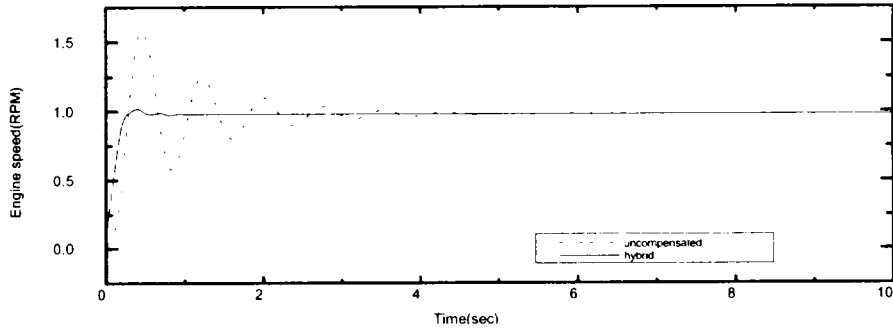


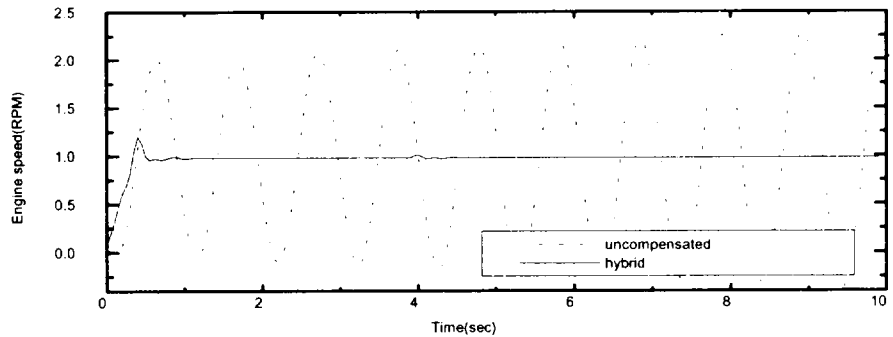
Fig. 8. Block diagram of speed control system with hybrid controller.



(a) 0.1 (sec)



(b) 0.3 (sec)



(c) 0.5 (sec)

Fig. 9. Unit step response of uncompensated and hybrid controller system under dead time.

속도지령치와 현재치의 오차가 0.03이상일 경우에 퍼지제어 모드로 자동 전환되도록 설정되었으며 오차비교기의 설정치는 선박운항시 해상상태조건에 따라 조정가능할 것이다. Fig. 9는 연소계통의 지연시간이 0.1(sec), 0.3(sec), 0.5(sec)인 경우에 혼성제어기를 부가한 경우와 비보상인 경우의 응답곡선을 비교하였다. 대상 시스템의 파라미터는 안정적인계 영역 값들을 사용하였으며 초기응답 특성이 양호하고 정상상태 오차도 영(0)임을 알 수 있다.

### 결 론

이상과 같이 전기유압식 조속기를 가진 디젤기관의 속도 제어시스템의 모델링을 행하고, 안정적인계 파라미터 값을 구한후, 시간지연이 시스템에 미치는 영향을 분석 하였다. PID제어기와 퍼지제어기의 장점만을 결합시킨 혼성 제어기를 제안하고 속도안정성을 위한 모의 실험을 행하였다. 초기 응답 특성 및 정상 상태에서 뛰어난 응답특성을 나타난 것을 알 수 있었으며, 저속에서도 성능개선이 가능함을 보여주었다. 단 불규칙한 해양파동에 대한 모델링 자료의 부족으로 외란 부하를 정확히 고려하지 못한점, 조속기를 2차계로 모델링한점, 회전수 제어계통의 여러 정수들

의 정확성 그리고 실선에 적용가능한 추론법과 제어 규칙은 차후 검토가 더 필요할 것으로 사료된다.

### 참고문헌

- 강창남. 1996. 퍼지제어 기법에 따른 선박용 유압 조속기의 제어특성 및 성능개선에 관한 연구. 한국박용기관학회지, 20(3): 269-275.
- 양주호·정병건. 1993. H $\infty$  제어기법을 이용한 저속 디젤기관의 속도제어. 한국박용기관학회지, 17(5): 63-70.
- 유영호·하주식. 1990. 박용디젤기관의 속도제어에 관한 연구. 한국해양대학 박사학위논문.
- 하주식. 1983. 自動制御工學. 한국해양대학 해사도서출판부, pp. 146-151.
- Li-Xin Wang. 1997. A course in Fuzzy systems and control. Prentice-Hall, pp. 257-263.
- Robert H.Bishop. 1993. Modern control systems analysis and Design using MATLAB. Addison-Wesley Publishing Co., pp. 103-113.
- Woodward Governor (Japan) LTD. 1989. 機械油壓式及び電氣油壓式ガバナ PMCC F-7. pp. 1-9