

전기유압식 조속기를 가진 디젤기관의 속도제어에 관한 연구

\* 김필재\*, 김창남\*\*, 노영오\*\*\*, 박진길\*  
 한국해양대학교\*, 제주대학교\*\*, 목포해양대학\*\*\*

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

\* Pii-Jae Kim\*, Chang-Nam Kang\*\*, Young-Oh Roh\*\*\*, Jin-Gil Park\*  
 Korea Maritime Univ.\*, Cheju Univ.\*\*. Mokpo Maritime Univ.\*\*\*

**Abstract** - Recently, it was very difficult for 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.

1. 서 론

최근, 선박에 주기관으로 채용되고 있는 디젤기관은 연료비 절감 및 고효율을 목적으로 대형화, 저속화, 장행정화되어감에 따라<sup>(1)</sup> 특히, 저속운전 영역에서 연소계통의 지연시간이 길어짐으로 인해 효율적인 속도제어에 어려움을 느끼게 되었다. 본 연구에서는 널리 사용되고 있는 전기유압식 조속기를 장착한 디젤기관을 모델로 선정하고 연소계통 지연시간의 변동에 따른 영향을 주파수 영역에서 해석하며, 저속운전 영역에서의 속도제어 성능을 향상시키고자 PID 제어기 및 퍼지제어기의 장점만을 결합시킨 간단한 알고리즘의 혼성제어기를 제안, 모의실험에 의해 그 유효성을 입증하고자 한다.

2. 디젤기관의 속도제어 시스템 모델링

Fig. 2.1은 전기유압식 조속기를 가진 디젤기관 속도 제어 시스템의 구성도이다. 속도지령은 제어반에서 제어 및 증폭되어 조속기 액츄에이터를 구동시키며, 액츄에이터의 파워피스톤과 연결된 연료랙에 의해 연료분사량의 증감이 이루어지고, 운전 중 속도신호는 주파수/전압 변환기를 거쳐 제어반으로 반환됨으로써 목표회전수를 유지하게 된다.

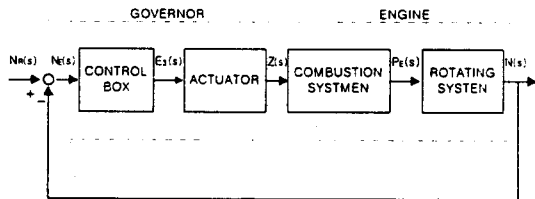


Fig. 2.1 Block diagram of speed control system with electro-hydraulic governor

Fig. 2.2는 Woodward사의 전기유압식 조속기의 액츄에이터 부분만을 개략적으로 나타내고 있으며 그 전달 함수는 식 (2.1)과 같이 표현될 수 있다.<sup>(2)</sup>

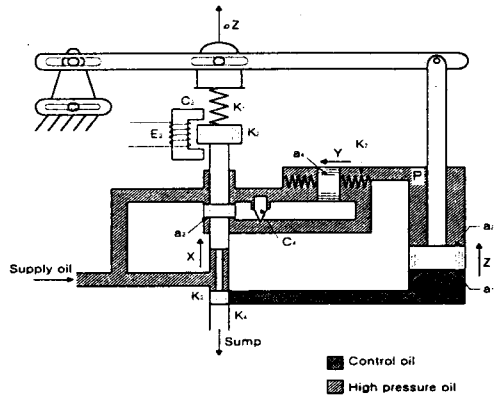


Fig. 2.2 Schematic diagram of electro-hydraulic actuator

$$G_A(s) = \frac{Z}{E_3} = \frac{a_2(s + a_3)}{s^2 + \beta_1 s + \beta_2} \quad (2.1)$$

단,

$$a_2 = \frac{a_4^2 C_2 K_4}{a_1 (a_3^2 K_7 + a_4^2 K_5)} \quad \langle K_5 = K_1 - K_2 + K_3 \rangle$$

$$a_3 = \frac{C_4 K_7}{a_4^2}$$

$$\beta_1 = a_1 + a_2 a_d$$

$$\langle a_1 = \frac{K_7 (a_1 C_4 K_5 + a_2 a_3 K_4)}{a_1 (a_3^2 K_7 + a_4^2 K_5)}, a_d = \frac{K_1}{C_2} \rho \rangle$$

$$\beta_2 = a_2 a_3 a_d$$

연소계통은 지연요소를 수반한 단순 증폭요소로써 식 (2.2)와 같이 모델링될 수 있다.<sup>(3)</sup>

$$G_E(s) = K_e e^{-Ls} \quad (2.2)$$

단,  $K_e$  : 연소계통의 정상상태 이득  
 $L$  : 연소계통의 지연시간 (sec)

기관의 회전계통은 식 (2.3)과 같이 회전계통의 정상 이득 및 시정수로 이루어진 1차식으로 근사화될 수 있고, 액츄에이터, 연소계통, 회전계통을 포함한 개루프 전달함수는 식 (2.4)와 같다.

$$G_R(s) = \frac{K_r}{T_r s + 1} = \frac{K_T}{s + a_r} \quad (2.3)$$

단,

$K_r$  = 회전계통의 정상이득  
 $T_r$  = 회전계통의 시정수  
 $K_T = K_r / T_r, \alpha_r = 1 / T_r$

$$G_P(s) = \frac{a_2(s+a_3)}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} K_e e^{-Ls} \frac{K_T}{s + \alpha_r} \quad (2.4)$$

### 3. 안정도 및 과도응답 특성 해석

식 (2.4)에 대상기관의 해상시운전 결과 측정된 파라미터들을 대입하고, 변경가능한 값들을 조정해가면서 니콜스도표를 그려보면, 응답곡선이 도표의 원점을 지나는 안정한계 파라미터들을 구할 수 있다. Fig. 3.1과 Fig. 3.2는 안정한계 파라미터들을 기준으로 하고 연소계통의 지연시간만을 변경시켰을 경우의 니콜스도표 및 단위계단 응답곡선이며, 안정도 및 과도응답 해석결과를 Table 3.1 및 Table 3.2에 나타내었다. 지연시간이 클수록 시스템은 불안정해지고 오버슈트도 증가하게되며 한계값 0.5이상 이 되면 시스템은 발산한다.

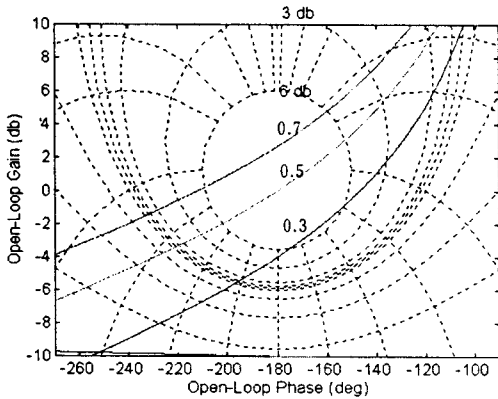


Fig. 3.1 Nichols chart under the variation of dead time

Table 3.1 Results of nichols chart under the variation of dead time

Dead time (sec)	Mp (db)	Bandwidth (rad/sec)	Gain margin (db)	Phase margin (db)	Remarks
0.3	7.22	6.25	3.99	33.19	Stable
0.5	71.50	4.92	0.01	0.01	Stable
0.7	12.56	4.03	-2.69	-31.85	Unstable

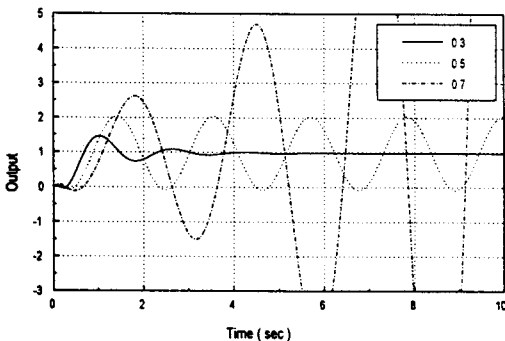


Fig. 3.2 Unit step response under the variation of dead time

Table 3.2 Results of unit step response under the variation of dead time

Dead time (sec)	POS (%)	Peak time (sec)	Rise time (sec)	Settling time (sec)	Ess
0.3	46.72	1.02	0.29	4.42	0.02
0.5	103.81	1.41	0.31	9521	0.02
0.7	Unstable				

기관이 장행정화, 저속화될수록 연소계통의 지연시간은 증가하게되며, 같은 기관이라도 저속운전 영역에서는 지연시간의 증가를 피할 수 없다. 따라서, 본 연구에서는 저속 운전영역에서의 불안정한 속도제어 특성을 보완해 줄 수 있는 효율적인 제어기의 설계를 제안한다.

### 4. 제어기 설계

일반적으로 PID 제어기는 단순, 용이하게 구현될 수 있고, 정상상태 오차를 제거하는 능력이 탁월하다는 장점을 지닌 반면, 초기 과도응답은 대체로 바람직하지 못한 특성을 보인다. 또한, 주파수 응답법에 기초하고, 시스템이 선형이라는 가정 하에 설계되기 때문에 비선형이나 시변시스템 등에는 적절히 대처하지 못하는 경우가 많다. 물론, 과도응답법에 의한 각 이득 파라미터의 적절한 조정으로 초기응답 성능을 개선시키는 것이 가능하지만, 이 경우 어느 정도의 정상상태 오차는 감수해야만 하며 부하외란에도 더욱 민감해지고 만다.

따라서, PID 제어기의 성능 개선을 위해 보조제어기를 추가하는 경우가 늘어나고 있으며, 최근에는 비선형 시변시스템에 강인한 것으로 알려지고 있는 퍼지제어기와 결합이 많이 시도되고 있으나<sup>[4]</sup>, 이 또한 제어기 수의 증가 또는 구현 알고리즘의 복잡화로 인하여 실용화에는 미흡한 점이 많은 것이 사실이다.

Fig. 4.1은 본 연구에서 제안하는 혼성제어기에 의한 속도제어 시스템의 구성을 나타내고 있다. 여기에서의 플랜트(PLANT)는 식 (2.4)로 표시되는 조속기 액츄에이터 및 기관의 연소계통, 회전계통을 포함하는 부분이다. 시스템은 초기 응답성능이 양호한 퍼지제어기로써 구동되며, 설정된 시간 후에 토글 스위칭 동작을 통하여 PI 제어 모드로의 전환이 이루어진다. 여기에서의 PI 제어기는 정상상태 오차 제거를 위한 역할만을 수행하므로 기관 운전 중 허용치 이상의 속도오차가 발생할 경우에는 외란에 강인한 퍼지제어기로의 전환이 필요하다. 이를 위해 오차비교기를 추가하고 오차가 설정치 이상이면 PI 제어 모드에서 퍼지제어 모드로의 전환이 이루어질 수 있게 하였다. 비교기는 설정시간 이후에 작동하도록 하여 초기응답시에 발생할 수 있는 오동작을 방지하였다.

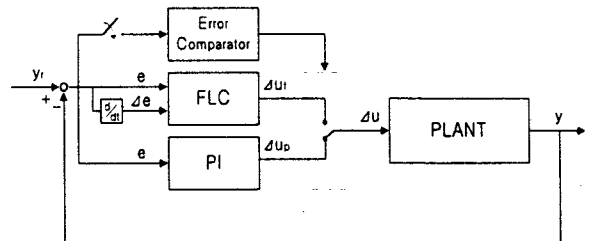


Fig. 4.1 Block diagram of speed control system with hybrid controller

PI 제어기의 비례 및 적분이득은 과도응답법에 의해 각각 0.2, 0.03으로 조정되었다. 퍼지제어기의 입·출력변수로는  $E, \Delta E, \Delta U$ 를 사용하고, 이들은 각각 7개의 퍼지

부분집합으로 분할한 후,  $E=[-1,1], \Delta E=[-3,3], \Delta U=[-1,1]$ 로 정규화(Normalization)하였으며, 소속함수(Membership function)의 모양은 삼각형을 선택하였다. 퍼지제어기는 퍼지싱글톤법(Fuzzy singleton method)에 의한 퍼지화, Mamdani의 min-max추론, 그리고 무게중심법(Center of Gravity method)에 의한 비퍼지화를 거치는 구조로 설계되었다. Table 4.1은 추론을 위해 사용된 전체 제어규칙을 나타내고 있으며, 그 아래에는 정의된 각 퍼지 부분집합의 의미를 정리하였다. Fig. 4.2는 수치적 입력  $e, \Delta e$ 가 퍼지제어기를 거쳐 플랜트에 가해지는 최종적인 제어량  $\Delta u$ 로 출력되는 과정을 설명하고 있으며, 설명을 위한 제어규칙은 Table 4.1의 굵은 이탤릭체 부분만을 고려하였다.

Table 4.1 Rule table of fuzzy control

$\Delta E \backslash E$	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
NB				NB	NM		
NM				NM	NS		
NS				NS	ZE		PM
ZE	<b>NB</b>	NS	NS	ZE	PS	PS	PB
PS	NM		ZE	PS			
PM		PS		PM			
PB			PM	<b>PB</b>			

NB : Negative Big, PB : Positive Big  
 NM : Negative Medium, PM : Positive Medium  
 NS : Negative Small, PS : Positive Small  
 ZE : ZEro

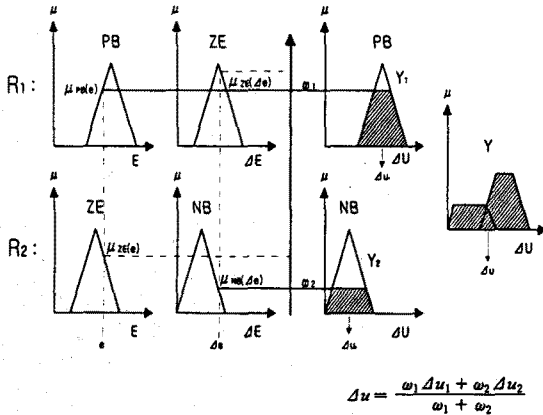


Fig. 4.2 Fuzzy inference process of Mamdani's inference method

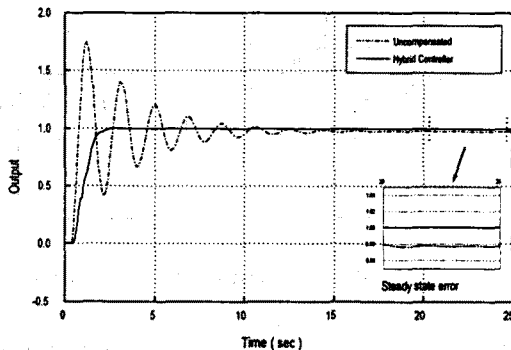


Fig. 4.3 Unit step response of uncompensated and hybrid system under the dead\_time=0.4 sec

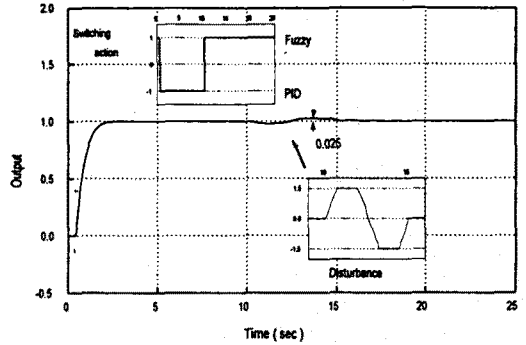


Fig. 4.4 Unit step response of hybrid system to the disturbance under the dead\_time=0.4 sec

Fig. 4.3은 혼성제어기에 의한 속도제어 시스템의 단위 계단 응답곡선을 비보상인 경우와 비교해서 나타내고 있다. 대상 시스템의 파라미터는 안정적인 영역의 값들이 사용되었으며, 연소시스템의 지연시간은 저속 운전 영역인 0.4초를 기준하였다. 응답곡선으로부터 설계된 혼성제어기에 의한 속도제어 시스템은 초기 응답 특성이 양호할 뿐만 아니라 정상상태 오차도 영(0)임을 알 수 있다. Fig. 4.4는 운전 중 외란이 가해졌을 때 제어모드의 전환 과정을 나타내고 있다.

## 5. 결 론

이상으로, 전기유압식 조속기를 장착한 저속 장행정 기관을 대상으로 모델링을 행하고, 주파수응답 및 과도 응답법을 통하여 기관 연소시스템의 지연시간이 시스템 성능에 미치는 영향을 파악하였다. 또한, PID 제어기와 퍼지제어기의 장점을 결합시킨 새로운 형태의 혼성제어기를 제안하고, 모의실험을 통하여 초기응답 및 정상상태에서 뛰어난 응답특성을 보임을 확인할 수 있었다. 전기유압식 조속기는 제어반을 통한 제어기의 이식 및 성능 개선의 여지가 많으므로 제안된 제어기를 채용함으로써 불안정한 저속 운전 영역에서도 효율적인 속도제어가 이루어질 수 있을 것이다.

### (참 고 문 헌)

- [1] 韓國舶用機關學會 機關管理研究會, "船舶의 經濟的 運航 管理", 태화출판사, pp.222, 1984..
- [2] Woodward Governor (Japan), LTD. Document N. PMCC F-7, 1989.
- [3] 한봉주, "機械油壓式 調速機를 가진 船舶用 디젤機關의 速度 安定性에 關한 研究", 한국해양대학 대학원 논문집, 1990.
- [4] Li-Xin Wang, "A Course in Fuzzy Systems and Control", Prentice-Hall, pp.257-263, 1997.