

저속 장행정 박용디젤기관의 속도제어에 관한 연구 (제2보 : ENGINE DEAD TIME을 고려한 경우)

유영호* · 하주식**

A STUDY ON THE SPEED CONTROL OF A LOW SPEED-LONG STROKE MARINE DIESEL ENGINE

(Part 2 : In the case of regarding the Engine Dead time)

Y.H. Yu* · J.S. Ha**

Abstract

Recently digital governor system is commonly adapted for the speed control of the marine diesel engine because of too much fluctuation of rpm resulted by the low speed, long stroke, high efficiency and a small number of cylinder of it, and versatile studies on the development of digital governor system are progressed.

On this subject the new control method in which the fuel is controlled by feedforwarding the change of load as well as the feedback of angular velocity in case of disregarding the engine dead time and influence of scavenging air was proposed by the authors, and found the method has shown quite a good control performance in comparison to the conventional control method by the simulation using a digital computer for various load change.

In this paper the speed control system of a diesel engine is simulated in case of regarding the engine dead time by the proposed method, and also confirm a good control performance of it under even more realistically simulated environment.

1. 서 론

최근의 박용디젤기관은 고효율, 저속, 장행

정, 소수실린더화 됨에 따라 기관회전수의 불안정으로 디지털 가바나의 채택이 불가피하게 되었고 이의개발이 다각적으로 시도 되고 있

* 정희원, 한국해기연수원

** 정희원, 한국해양대학

다. 1.3)

본고와 관련하여 기관의 *dead time*과 소제 공기의 영향을 무시한 경우 부하변동에 의한 회전수 변화가 일어나기 전에 부하 변동을 *feedforward*하여 연료를 조절하여 줌으로서 회전수를 일정하게 유지하는 제어 알고리즘을 개발하고 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 제안한 알고리즘의 우수성을 입증하는 연구가 저자들에게 의해서 이미 발표된바 있다. 2)

기관의 *dead time*과 각종 *parameter*는 기관회전수에 따라 크게 차이가 있으므로 이를 무시할수 없기 때문에 본고에서는 이들을 고려한 알고리즘을 개발하고, 이를 이용하여 보다 실제 기관에 가까운 상태에서 컴퓨터 시뮬레이션을 행하였다.

2. 시스템 모델링 및 제어기 설계

2.1 시스템 모델링

2.1.1. 부하를 측정 하지 않는 경우의 시스템 모델링

디지털 가바나를 이용한 기관의 속도 제어 시스템의 구성은 Fig 2.1과같고

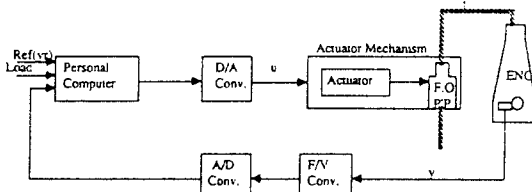
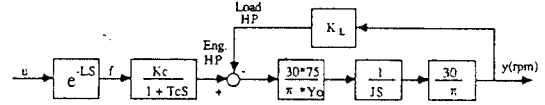


Fig 2.1 Schematic Diagram of the Diesel Engine Speed Control System

조작량 u 에 대해서 *actuator mechanism*에서 동작지연이 있으며 F.O 펌프에서 지연은 회전수에 따라 변한다. 이 두 요소의 지연시간을 L 이라 하고 계통의 각 계수는 y 의 함수이므로 제어회전수에서 선형화 하여 블록선도를 그리면 Fig 2.2와 같다.



K_c ; Steady state gain of combustion system
 T_c ; Time constant of combustion system
 Y_c ; Coefficient to convert corresponding rpm to HP
 J ; Moment of inertia of eng. and propeller including additional water
 K_L ; Linearized gain of propeller law curve

Fig 2.2 Block Diagram of the Controlled System

Fig. 2.2의 블록선도에서 계통을 최적제어하기 위하여 *dead time*을 일차 근사화 하면 Fig. 2.3과 같다.

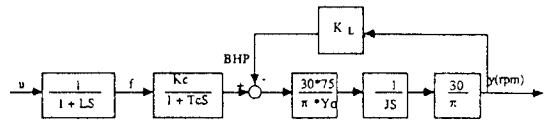


Fig 2.3 Block Diagram of the Linearized System

Fig. 2.3의 블록선도에서

$$\ddot{y} = -a_1\dot{y} - a_2y + b_1u \quad (1)$$

단,

$$a_1 = \frac{(L + T_c) T_r + T_c L}{T_r T_c L},$$

$$a_2 = \frac{L + T_c + T_r}{T_r T_c L}, \quad a_3 = \frac{1}{T_r T_c L}, \quad b_1 = \frac{K_r K_c}{T_r T_c L}$$

상태 x_1, x_2, x_3 를

$$\begin{aligned} x_1 &= y \\ x_2 &= \dot{y} \\ x_3 &= \ddot{y} \end{aligned} \quad (2)$$

와 같이 도입하면 위의 시스템은

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + Bu \\ y &= Cx \end{aligned} \quad (3)$$

$$A = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ -a_3 & -a_2 & -a_1 \end{pmatrix} \quad B = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ b_1 \end{pmatrix}$$

$$C = [1 \ 0 \ 0]$$

과 같이 모델링 할 수 있다.

2.1.2 부하를 측정하는 경우의 시스템 모델링
 부하를 측정하는 경우에 Fig 2.1과 같은 시스템을 제어회전수에서 선형화하면 Fig 2.4와 같고

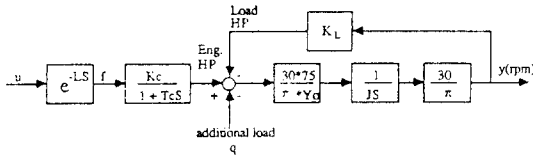


Fig 2.4 Block Diagram of System in case of Load measured

Fig 2.4의 블록선도에서 시스템을 최적제어하기 위하여 *dead time*을 일차로 근사화 하면 Fig 2.5와 같다.

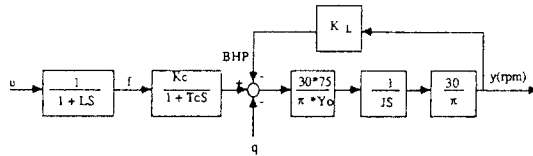


Fig 2.5 Block Diagram of the Linearized System of Fig 2.4

Fig 2.5의 블록선도에서

$$\ddot{y} = -a_1\dot{y} - a_2\dot{y} - a_3y + b_1u - (d_1\ddot{q} + d_2\dot{q} + d_3q) \dots \dots \dots (4)$$

$$\text{단, } a_1 = \frac{(L + T_c)T_r + T_cL}{T_rT_cL},$$

$$a_2 = \frac{L + T_c + T_r}{T_rT_cL}, \quad a_3 = \frac{1}{T_rT_cL}, \quad b_1 = \frac{K_rK_c}{T_rT_cL}$$

$$d_1 = \frac{K_r}{T_r}, \quad d_2 = \frac{(L + T_c)K_r}{T_rT_cL}, \quad d_3 = \frac{K_r}{T_rT_cL}$$

식(2)와 같이 상태를 도입하면

$$\left. \begin{aligned} \dot{x} &= Ax + B\bar{u} \\ y &= Cx \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (5)$$

$$\text{단, } A = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ -a_3 & -a_2 & -a_1 \end{pmatrix} \quad B = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ b_1 \end{pmatrix}$$

$$C = [1 \ 0 \ 0]$$

$$\bar{u} = u - u_q$$

$$u_q = (d_1\ddot{q} + d_2\dot{q} + d_3q) \frac{1}{b_1}$$

과 같이 모델링 할 수 있다.

2.2 제어기 설계

식(5)의 시스템에서 q 가 영이면 식(3)의 시스템과 같게 됨으로 식(5)의 시스템에 대해서 제어기를 설계한다.

$\Delta x, \Delta y, \Delta u$ 를

$$\left. \begin{aligned} \Delta x &= x - x_r \\ \Delta \bar{u} &= \bar{u} - \bar{u}_r \\ \Delta y &= y - y_r \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (6)$$

단, x_r, \bar{u}_r 는 정상상태에서의 x, \bar{u} 의 값

과 같이 정의하고 y 의 목표치 y_r 이 계단상일 때, 정상상태에서 y 는 y_r 이 된다고 하면 \dot{x}_r 는 영이므로 식(5), (6)에서

$$\left. \begin{aligned} Ax_r + B\bar{u}_r &= 0 \\ Cx_r &= y_r \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (7)$$

이 되어 x_r, \bar{u}_r 는

$$\begin{pmatrix} x_r \\ \bar{u}_r \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A & B \\ C & 0 \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} 0 \\ y_r \end{pmatrix} \dots \dots \dots (8)$$

이 되며 $\begin{pmatrix} A & B \\ C & 0 \end{pmatrix}$ 는 시스템(5)의 개회로 전달함수행렬 $C(SI - A)^{-1}B$ 가 원점에 영점을 가지지 않는 경우에는 역행렬이 존재하므로 x_r, \bar{u}_r 는 일의적으로 구할 수 있다.^{4,5,6)}

기관정수의 추정이 부정확하거나 목표치 또는 부하가 변동할 경우에는 정상상태에서 y 가 y_r 이 되지 않을 수도 있음으로 새로운 상태 z 를

$$\dot{z} = y - y_r \dots \dots \dots (9)$$

와 같이 두고 시스템(5)을 확장하면

$$\left. \begin{aligned} \dot{x} &= \tilde{A}x + \tilde{B}\bar{u} + \tilde{E}y_r \\ y &= \tilde{C}x \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(10)$$

단,

$$\begin{aligned} x &= \begin{pmatrix} x \\ z \end{pmatrix}, \quad \tilde{A} = \begin{pmatrix} A & 0 \\ C & 0 \end{pmatrix}, \quad \tilde{B} = \begin{pmatrix} B \\ 0 \end{pmatrix}, \\ \tilde{C} &= [C \ 0], \quad \tilde{E} = \begin{pmatrix} 0 \\ -1 \end{pmatrix}, \quad 0; 3 \text{ order} \end{aligned}$$

null vector

이 되고 시스템 (10)의 시스템은 확장하기전의 시스템의 식 (3), (5)가 가제어이고 $rank \begin{pmatrix} A & B \\ C & 0 \end{pmatrix}$ 가 4이므로 역시 가제어이다.⁸⁾ 시스템 (10)을 최적제어하기 위하여

$$\left. \begin{aligned} \Delta \tilde{x} &= \tilde{x} - \tilde{x}_r \\ \Delta \tilde{u} &= \tilde{u} - \tilde{u}_r \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(11)$$

단, x_r, \bar{u}_r 는 x, \bar{u} 의 정상 상태의 값으로 두면 시스템 (10)의 과도 성분은

$$\left. \begin{aligned} \Delta \dot{\tilde{x}} &= \tilde{A} \Delta \tilde{x} + \tilde{B} \Delta \tilde{u} \\ \Delta y &= \tilde{C} \Delta \tilde{x} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(12)$$

이 되고 평가함수 J를

$$J = \int_0^{\infty} (\Delta \tilde{x}^T Q \Delta \tilde{x} + r \Delta \tilde{u}^2) dt \dots\dots\dots(13)$$

단, Q; *weighting matrix*,
r; *weighting factor*

로 두면 J는 수렴하며 이를 최소로 하는 제어 입력 $\Delta \tilde{u}^*$ 는

$$\left. \begin{aligned} \Delta \tilde{u}^* &= -K \Delta \tilde{x} \\ K &= \frac{1}{r} \tilde{B}^T P \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(14)$$

$$\tilde{A}^T P + P \tilde{A} + Q - \frac{1}{r} P \tilde{B} \tilde{B}^T P = 0$$

이 된다.

따라서 시스템 (10)의 최적 제어 입력 u^* 는 식 (5)와 식 (11)에서

$$\begin{aligned} u^* &= \Delta \tilde{u}^* + \tilde{u}_r + u_0 \\ &= -K_1 x_1 - K_2 x_2 - K_3 x_3 - K_4 z + K_{ur} y_r + u_0 \end{aligned} \dots\dots\dots(15)$$

단, $K_i (i=1\sim 4)$; 피이드백 게인 K 의 성분 K_{ur} ; 식 (8)에서 \bar{u}_r 의 성분이며 \bar{u}_r 는 식 (8)에서 구할수 있다.

2.3 부분 관측기 (reduced order observer)의 설계

상태 피이드백의 경우 모든 상태를 측정하여 야하나 실제 *system*의 경우 모든 상태를 측정할 수 없는 경우가 있으므로 상태관측기가 요구된다.

식 (5)에서 x_1 은 y 로써 측정이 가능하여 x_2, x_3 만 추정하면 되므로 부분관측기를 설계한다. 측정불가능한 상태 x_2, x_3 를 x_0 라 하면 시스템 식은

$$\left. \begin{aligned} \begin{pmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_0 \end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} O \\ B_1 \end{pmatrix} \bar{u} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(16)$$

$$\left. \begin{aligned} \dot{x}_0 &= A_{22}x_0 + A_{21}y + B_1\bar{u} \\ y_0 &= A_{12}x_0 = \dot{y} - A_{11}y \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(17)$$

식 (17)로 Luenberger observer를 구성하면 ⁷⁾

$$\begin{aligned} \dot{\hat{x}}_0 &= (A_{22} - GA_{12}) \hat{x}_0 + A_{21}y + Gy \\ &\quad - GA_{11}y + B_1\bar{u} \end{aligned} \dots\dots\dots(18)$$

으로 식 (18)에는 y 의 미분항이 있으므로 이를 제거 하기 위하여 W 를

$$W = \hat{x}_0 - Gy \dots\dots\dots(19)$$

로 정의하고 식 (19)와 (18)에서

$$\begin{aligned} \dot{W} &= (A_{22} - GA_{12}) W + \{A_{22}G + A_{21} \\ &\quad - G(A_{12}G + A_{11})\}y + B_1\bar{u} \\ \hat{x}_0 &= W + Gy \end{aligned} \dots\dots\dots(20)$$

가 된다. 따라서 추정상태 \hat{x} 는

$$\hat{x} = \begin{pmatrix} y \\ \hat{x}_0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} O \\ W \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 1 \\ G \end{pmatrix} y \dots\dots\dots(21)$$

이며 상태 x_0 와 추정치 \hat{x}_0 와의 오차 x_0 는

$$\dot{\hat{x}}_0 = (A_{22} - GA_{12}) \hat{x}_0 \dots\dots\dots(22)$$

가 되고 G 를 적절히 선정함으로서 추정오차

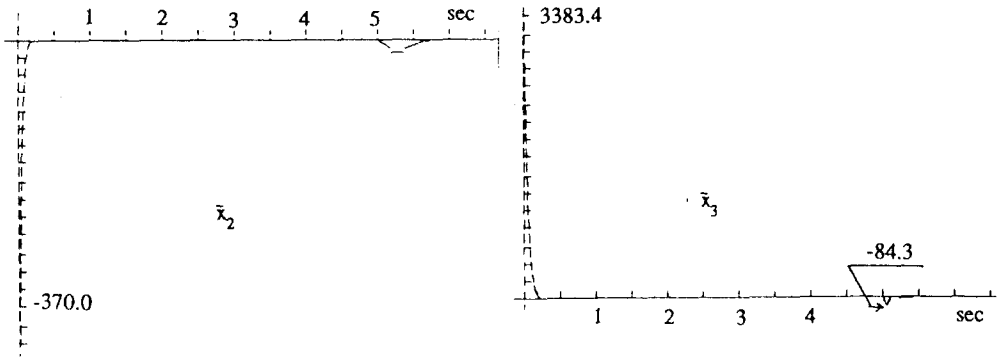


Fig 2.6 Curves of \hat{x}_2, \hat{x}_3 which is difference of true value x_2, x_3 and observed value \hat{x}_2, \hat{x}_3

\hat{x}_0 를 원하는 시간에 영이 되도록 할수 있다.

Fig. 2.6은 관측기의 pole을 -20.0 으로 하여 $80rpm$ 에서 5초 간 운전한 후 목표치를 $75rpm$ 으로 변화 시켰을때 진치 x_2, x_3 와 추정치 \hat{x}_2, \hat{x}_3 의 차를 그린 것으로 1.0sec 후에는 진치에 수렴함을 알 수 있다.

또 시뮬레이션 초기에 나타나는 바와 같이 처음 추정할 때는 큰 오차를 발생하나 일단 추정하고 난뒤에는 목표치의 변화에 대해서 초기 추정오차에 비해 월등히 작은 것을 알 수 있다.

본 절에서 설계한 부분 관측기를 이용하여 부하를 측정하는 경우의 제어계를 구성하면 Fig. 2.7과 같다.

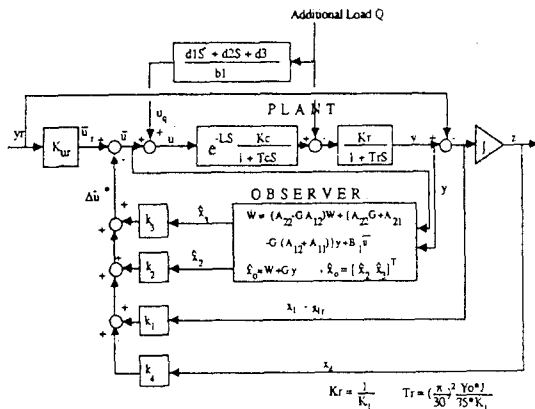


Fig 2.7 Block Diagram of the Speed Control System with a Reduced order observer

3. 컴퓨터시뮬레이션

컴퓨터 시뮬레이션 대상기관으로 최근 많이 사용되고 있는 4L80MC기관을 채택하였으며 사양은 다음과 같다.

- Bore×Stroke ; 800mm×2592mm
- P_{mean} ; 18.11Kg/cm²
- BHP(MCR) ; 15880BHP(83rpm)
- Moment of Inertia ; 8130.9Kg.m.sec
- F.O.Consumption ; 125g/BHP Hr

시뮬레이션은 시뮬레이션 시작 rpm에서 5초 간 운전하여 부분관측기가 현상태를 추종하여 정상상태로 운전하고 난뒤 변화를 주어 응답을 관찰하였다.

table 1과 2는 파도에 의한 외란을 정현파로 가정하고 $80rpm$ 에서 $5rpm$ 을 변경시킬 수 있는 크기의 외란이 Pw 주기로 인가되었을 때 25초간 시뮬레이션 하여 실제 연료량과 조작량 u 는 일치한다고 보고 편차이승 면적($error^2 sum$)과 소모된 연료량($u sum$), 회전수의 최대, 최소(y_{max}, y_{min}) 및 순간 연료량의 최대, 최소치(u_{max}, u_{min})를 본고에서 제안한 제어알고리즘, 즉 상태 feedback 제어와 부하를 feedforward하여 제어한 경우와 상태 feedback 제어만으로 제어한 경우를 비교하였다.

table 3은 해당 rpm에서 $5rpm$ 변화시켰을 때 15초간 시뮬레이션하여 table1,2와 같은 량

Table 1. Response characteristics obtained by the Proposed control method when external load is $q = 2501.0 \cdot \sin(2\pi/Pw) \cdot t$

Ref	Pw	item	weighting matrices	Q=diagonal(10, 1, 1, 10) r(10)		Q=diagonal(10, 1, 1, 10) r(10)	
50rpm	6sec	error ² sum, u sum		1, 1	2542, 3	1, 3	2544, 1
		y _{max} , y _{min}		50, 5	49, 6	50, 7	49, 7
		u _{max} , u _{min}		211, 6	30, 6	209, 5	30, 2
	8sec	error ² sum, u sum		0, 6	2626, 1	0, 8	2626, 5
		y _{max} , y _{min}		50, 3	49, 6	50, 5	49, 7
		u _{max} , u _{min}		208, 4	32, 0	207, 4	31, 9
	10sec	error ² sum, u sum		0, 3	2405, 4	0, 5	2406, 1
		y _{max} , y _{min}		50, 3	49, 7	50, 5	49, 7
		u _{max} , u _{min}		208, 6	33, 0	207, 0	32, 6
80rpm	6sec	error ² sum, u sum		8, 9	9883, 7	*8, 4	9875, 2
		y _{max} , y _{min}		80, 3	78, 4	80, 2	78, 0
		u _{max} , u _{min}		551, 7	408, 7	551, 7	407, 2
	8sec	error ² sum, u sum		9, 4	9963, 7	8, 9	9957, 7
		y _{max} , y _{min}		80, 3	78, 4	80, 2	78, 4
		u _{max} , u _{min}		551, 7	407, 9	551, 7	406, 8
	10sec	error ² sum, u sum		7, 9	9764, 8	7, 5	9755, 3
		y _{max} , y _{min}		80, 4	78, 4	80, 2	78, 4
		u _{max} , u _{min}		551, 7	407, 4	551, 7	406, 7

Table 2. Response characteristics obtained by the conventional control method when external load is $q = 2501.0 \cdot \sin(2\pi/Pw) \cdot t$

Ref	Pw	item	weighting matrices	Q=diagonal(10, 1, 1, 10) r(10)		Q=diagonal(10, 1, 1, 10) r(100)	
50rpm	6sec	error ² sum, u sum		544, 0	2604, 0	705, 9	2614, 4
		y _{max} , y _{min}		57, 5	41, 9	58, 1	40, 6
		u _{max} , u _{min}		221, 0	50, 1	201, 5	63, 4
	8sec	error ² sum, u sum		368, 1	2678, 2	508, 4	2684, 3
		y _{max} , y _{min}		56, 3	43, 5	57, 2	42, 1
		u _{max} , u _{min}		210, 9	40, 2	195, 2	58, 9
	10sec	error ² sum, u sum		279, 7	2490, 3	398, 5	2522, 4
		y _{max} , y _{min}		55, 6	43, 9	56, 6	42, 9
		u _{max} , u _{min}		219, 0	31, 1	200, 9	51, 8
80rpm	6sec	error ² sum, u sum		238, 3	9796, 7	*167, 1	9864, 5
		y _{max} , y _{min}		86, 7	75, 4	85, 3	76, 0
		u _{max} , u _{min}		551, 7	432, 2	551, 7	431, 3
	8sec	error ² sum, u sum		174, 5	9931, 3	111, 4	9996, 7
		y _{max} , y _{min}		85, 8	75, 8	84, 0	76, 5
		u _{max} , u _{min}		551, 7	425, 0	551, 7	425, 5
	10sec	error ² sum, u sum		132, 6	9880, 8	80, 9	9891, 4
		y _{max} , y _{min}		84, 7	76, 2	83, 0	76, 9
		u _{max} , u _{min}		551, 7	419, 9	551, 7	419, 8

Table 3. Respnse characteristics obtained by the Proposed control method in the case of 5rpm Ref change

Ref	Pw	item	weighting matrices	Q=diagonal(10, 1, 1, 10) r(10)	Q=diagonal(10, 1, 1, 10) r(100)
30		state feedback gain		10.3, 3.5, 0.35, 9.4	6.7, 2.6, 0.24, 5.2
	30-35	error ² sum, u sum		65.6 491.2	34.9 455.4
		y _{max} , y _{min}		40.4 30.0	38.8 30.0
		u _{max} , u _{min}		99.7 25.5	78.9 25.5
	30-25	error ² sum, u sum		19.6 300.3	18.2 297.2
		y _{max} , y _{min}		30.3 23.9	30.3 23.9
u _{max} , u _{min}			39.2 25.5	37.0 25.5	
50		state feedback gain		10.5, 2.9, 0.22, 10.2	7.4, 1.9, 0.12, 6.7
	50-55	error ² sum, u sum		8.9 1619.1	6.5 1618.6
		y _{max} , y _{min}		57.5 50.0	56.5 50.0
		u _{max} , u _{min}		218.0 120.4	199.2 120.4
	50-45	error ² sum, u sum		16.9 861.6	8.7 858.8
		y _{max} , y _{min}		50.0 41.0	50.0 42.5
u _{max} , u _{min}			120.5 30.2	120.5 49.0	
60		state feedback gain		10.5, 2.5, 0.18, 11.1	8.1, 1.8, 0.1, 8.3
	60-65	error ² sum, u sum		5.7 2660.4	5.6 2660.5
		y _{max} , y _{min}		66.6 60.0	66.1 60.0
		u _{max} , u _{min}		319.7 208.1	307.1 208.1
	60-55	error ² sum, u sum		7.3 1576.3	6.4 1576.1
		y _{max} , y _{min}		60.6 52.6	60.6 53.3
u _{max} , u _{min}			208.2 105.2	208.1 117.9	
70		state feedback gain		10.8, 2.3, 0.15, 12.8	9.2, 1.7, 0.08, 11.2
	70-75	error ² sum, u sum		5.0 4076.3	5.0 4076.4
		y _{max} , y _{min}		76.1 70.0	76.0 70.0
		u _{max} , u _{min}		463.8 330.5	455.3 330.5
	70-65	error ² sum, u sum		5.6 2610.1	5.5 2610.1
		y _{max} , y _{min}		70.0 63.3	70.7 63.6
u _{max} , u _{min}			330.5 207.4	330.5 215.9	
80		state feedback gain		10.1, 1.9, 0.13, 11.8	10.4, 1.7, 0.07, 15.1
	80-83	error ² sum, u sum		1.9 5486.2	1.9 5486.2
		y _{max} , y _{min}		83.0 80.0	83.0 80.0
		u _{max} , u _{min}		551.7 493.4	551.7 493.4
	80-25	error ² sum, u sum		1277.4 318.2	1277.4 318.5
		y _{max} , y _{min}		80.0 23.8	80.0 23.9
u _{max} , u _{min}			493.4 25.5	493.4 25.5	

Table 4. Response characteristics obtained by two kinds of control method in the case of 50% stepwise load off at 80rpm

rpm	item	weighting matrices	Q=diagonal(10, 1, 1, 10)r(10)		Q=diagonal(10, 1, 1, 10)r(100)		REMARK
80	error ² sum, u sum		67.5	4797.7	61.3	4807.7	by proposed method
	y _{max} , y _{min}		91.4	76.1	91.0	75.8	
	u _{max} , u _{min}		551.7	25.5	551.7	25.5	
80	error ² sum, u sum		645.5	4779.4	477.1	4781.7	by conventional method
	y _{max} , y _{min}		107.1	77.7	105.1	76.2	
	u _{max} , u _{min}		493.4	25.5	493.4	25.5	

을 비교한 것이고 table 4는 80rpm에 해당하는 부하의 50%크기의 부하가 계단상으로 감소하였을 때의 table 1,2와 같은 량을 비교한 것이다.

Fig 3.1(table1에서 *의 경우를 그린것)은 운전회전수가 80일때 본고에서 제안한 제어방법으로, 또 Fig 3.2(table2에서 *의 경우를 그린것)는 피이드 백 제어만으로 제어한 경우 파도의 주기가 6초이고 하중행렬 Q의 대각요소가 10, 1, 1, 10, 하중계수 r이 100일때 회전수의 변화와 조작량을 그린 것이다.

Fig 3.3과 3.4(table4의 *의 경우를 그린것)는 80rpm에 해당하는 부하의 50%가 스텝으로 감소한 경우에 하중행렬 Q의 대각요소가 10, 1, 1, 10이고 하중계수 r이 100일때 Fig 3.2, 3.3에서와 같이 두가지 제어방법에 의해 25초간 시뮬레이션한 결과를 그린것이다.

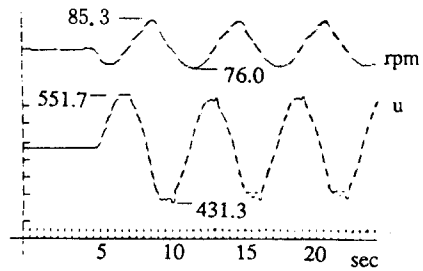


Fig 3.2 Response Curves of rpm and u when sinusoidal load added by the conventional control method

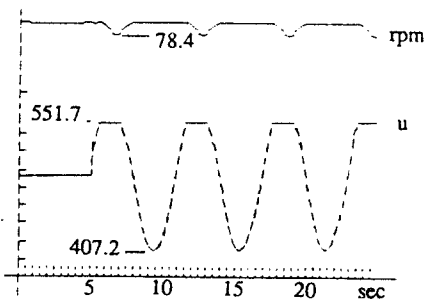


Fig 3.1 Response Curves of rpm and u when sinusoidal load added by the proposed control method

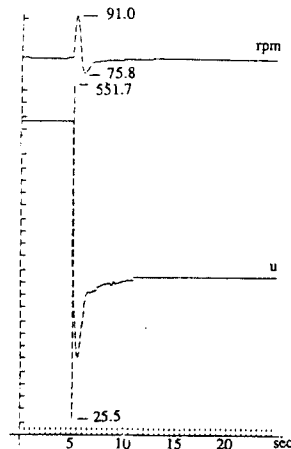


Fig 3.3 Response Curves of rpm and u by the proposed control method in case of stepwise load change

4. 검토 및 고찰

기관의 *dead time*을 고려하지 않는 경우에는 부과되는 부하를 *feedforward*하여 부하에 의한 상태변화를 완전히 상쇄 시킴으로써 부하가 변동하는 경우에도 회전수를 일정히 유지할 수 있었으나 기관 *dead time*을 고려하는 경우에는 *dead time*을 근사화함으로서 부하에 의한 상태 변화가 완전히 상쇄 될수없어 이의 영향이 나타난다. 그러나 부하를 피이드 포워드 하지 않는것 보다는 table1, 2, 3, 4 및 Fig 3.1, 3.2, 3.3, 3.4에서 보는바와 같이 제어 성능이 월등히 우수한 것을 알수 있다.

Fig 3.1에서 회전수의 저하가 큰것은 조작량의 그림에서 보는 바와같이 조작량의 최고치를 제한 하였기 때문으로 생각된다.

또 계단상으로 부하가 감소되었을때 Fig 3.4의 경우에는 회전수와 조작량의 심한 진동 현상이 발생하며, 이를 파악하기 위해 상태관측기의 오차를 그려보면 Fig 3.7, 3.8과 같이 진동후 어떤 값을 가지게 되어 상태 x_2 와 x_3 가 진치에 수렴하지 않는 것을 알 수 있다.

이는 실제 선박에서 *propeller*가 수선위에

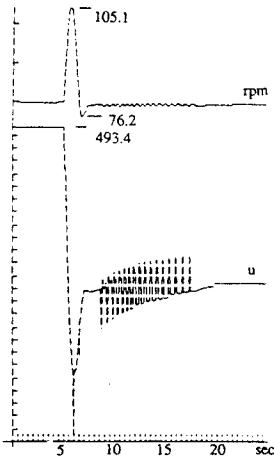


Fig 3.4 Response Curves of rpm and u by the conventional control method in case of stepwise load change

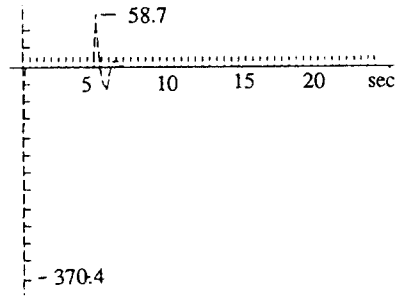


Fig 3.5 Curve of \hat{x}_2 in the response of Fig 3.3

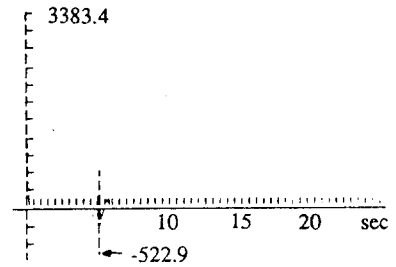


Fig 3.6 Curve of \hat{x}_3 in the response of Fig 3.3

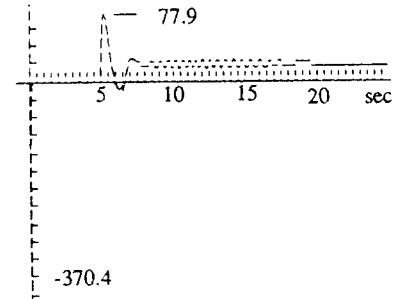


Fig 3.7 Curve of \hat{x}_2 in the response of Fig 3.4

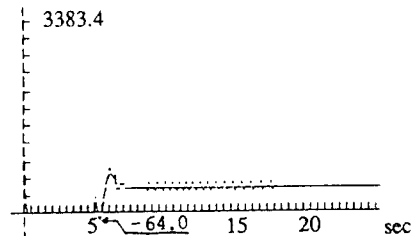


Fig 3.8 Curve of \hat{x}_3 in the response of Fig 3.4

노출되는 것을 가상한 것으로서 이런 경우에는 Fig 2.5의 K_L 의 특성이 변하게 됨으로 회전계통의 *parameter*는 *propeller*가 물속에 잠겨 있을 때와는 크게 달라, 식(16)의 시스템 행렬 A 가 변경 되어 관측기가 추종하지 못하게 된다. 그러나 이 경우에도 새로 도입한 상태 z 에 의해 목표치에 추종하는 제어계를 구성할 수 있음을 알 수 있다.

그러나 Fig 3.3에서 보는 바와 같이 본고에서 제안한 방법으로 제어한 경우에는 부하 q 를 측정함으로써 상태관측기는 Fig 3.5, 3.6에서와 같이 진치에 수렴하는 것을 알 수 있다.

Fig 3.9, 3.10은 Fig 3.3, 3.4의 경우에서, 상태 z 를 그린 것이다.

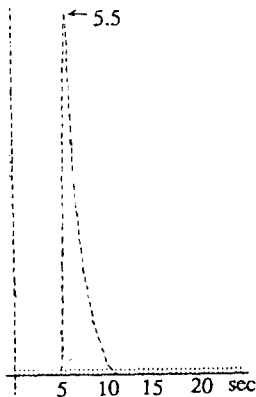


Fig 3.9 Curve of state z in the response of Fig 3.3

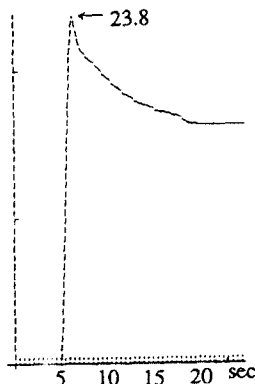


Fig 3.10 Curve of state z in the response of Fig 3.4

5. 결 론

이상의 시뮬레이션으로 다음과 같은 사실을 확인할 수 있었다.

- 1) 저속장행정디젤기관의 속도제어에는 상태 *feedback*제어와 부하를 *feedforward*하는 방법이 상태 *feedback*제어만으로 제어한 경우보다 제어성능이 우수하다.
- 2) 기관 *dead time*과 기관정수는 회전수에 따라 계수의 변화가 심하며, 운전회전수에 따라 최적 운전상태가 되도록 *weighting matrix*를 결정할 필요가 있다.
- 3) 황천때와 같이 선박의 *propeller*가 수면 위에 노출되는 경우나, 시스템 행렬이 미소하게 변하는 경우에도 *robust*한 제어계를 구성할 수 있다.
- 4) 기관 회전수에 따른 기관정수의 변화를 고려하여 시뮬레이션을 할 수 있는 컴퓨터시뮬레이션 프로그램을 개발하였으며, 소기공기의 영향을 고려한 경우와 실선 실험결과를 비교하여 시뮬레이션의 정확도를 확인할 필요가 있다.

참고문헌

- 1) 田村直樹 “電子ガバナ制御パラメータ決定システムの開発,” 나브코技報 1988, 1”
- 2) 유영호, 하주식 “저속 장행정 박용디젤기관의 속도제어에 관한 연구(제1보)” 박용기관학회지 1988, Nov, p247-255
- 3) 北川正人 “船用主機エンジンの回轉數制御システムの理論解析” 나브코技報 1986, 1, NO.6
- 4) Huibert Kwarkernaak, Raphael Sivan, “Linear optimal control system”, P270-275
- 5) Juraji Medanic, Zdravko Uskokovic, “The design of optimal output regulators for linear multivariable system with constant disturbances” Int.J.Control 1983, Vol.37, No.4, P809-830
- 6) H.Seraji, “A note on pole assignment with

- output feedback" Int.J.Control, 1978, Vol.27, No.1 P141-142
- 7) Thomas E.Fortmann, Konard L.Hitz "An introduction to Linear control systems" P534-541
- 8) B.Poter and H.M.power, "Controllability of multivariable Systems in co-operating integral feedback" Electronics Letter, Vol 6, No.22, p689~690, 1970.