

# PADÉ의 근사법에 의한 선박용 디젤기관에 탑재된 기계유압식 조속기의 성능개선에 관한 연구

심 기 우<sup>1)</sup>, 박 進 吉<sup>2)</sup>

A Study on the Performance Improvement of Mechanical-Hydraulic  
Governor used a Marine Diesel Engine by Padé Approximation

SIM, GI-WOO, PARK, JIN-GIL

## ABSTRACT

The maritime diesel engine has been widely applied with a mechanical-hydraulic governor to control the ship speed for a long time. However it is very difficult for the mechanical-hydraulic governor to control the speed of engine under the condition of low speed and low load.

To solve these problems of control systems, the performance improvement of mechanical-hydraulic governor is required. In this paper, dead time in the transfer function of the given control system, which is occurred between fuel injection and power output in diesel engine, is converted into a 2nd order Padé approximation which linearize the control system for analysis and design of the speed control systems through frequency response method. The influence of the dead time, gain, damping ratio is discussed by using Nichols chart and the optimal parameters are investigated through the computer simulations.

---

1) 한국해양대학교 기관공학과 석사과정 전기제어 전공

2) 한국해양대학교 기관공학과 교수

## 1. 서 론

최근의 선박용 디젤기관은 장행정화 및 평균유효압력의 증가로 효율을 향상시키고 있지만, 저속화 및 연소실당 배기량을 크게하여 소수 실린더화하므로써 시간 지연(Dead Time)과 토크(Torque) 변동으로 인한 지글링(Jiggling) 및 헌팅(Hunting) 현상 등이 발생하여 효율적으로 속도제어를 하기에는 곤란하다.

본 연구에서는 기계-유압식 조속기의 성능을 개선하기 위하여 선박 속도제어 계통을 조속기, 기관, 회전계통으로 구분하고, 각 계통의 동특성 방정식을 유도한다. 그리고 이들 동특성 방정식으로부터 선박의 주기관 속도제어 시스템에 대한 전달함수를 유도하여, 디젤기관에서 나타나는 비선형 요소인 시간지연을 Padé의 2차 근사식으로 대체하여 시스템을 선형화하였다.

니콜스 선도를 이용하여 선박 속도제어 시스템에 대한 파라메타의 영향을 분석하였고, 컴퓨터 시뮬레이션에 의한 과도응답(Transient Response)으로부터 최적의 조속기 파라메타 값을 찾아내어 이를 조정하면 기존의 기계-유압식 조속기도 제어성능을 향상시킬 수 있음을 확인하고자 한다.

## 2. 선박 속도제어 계통의 수학적 모델링

### 2.1 선박 속도제어 계통의 구성

선박의 속도제어계통은 크게 조속기, 기관, 회전계통으로 구성된다.

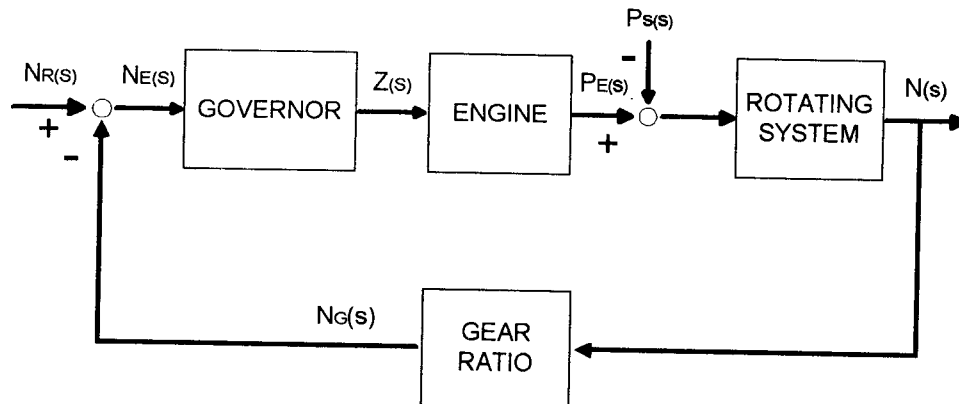


Fig. 2.1 Block Diagram of the Ship Propulsion Speed Control System

## 2.2 조속기의 수학적 모델링

### 2.2.1 조속기의 구성 및 동작원리

Fig. 2.2는 대부분의 선박 추진기관에 사용되고 있는 Woodward사의 기계-유압식 조속기의 개략도이다.

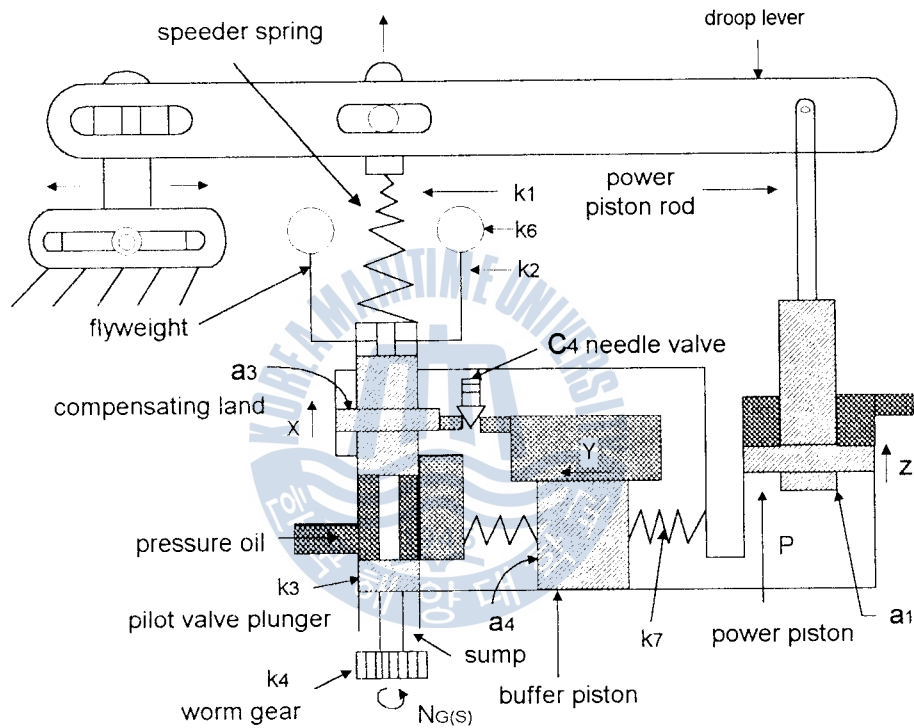


Fig. 2.2 Schematic Diagram of Mechanical-Hydraulic Governor

조속기의 입력은 기관의 속도이고 출력은 기관의 에너지를 제어하는 터미널 레버의 움직임으로 표현된다. 기관은 플라이웨이트(Flyweight)가 수직위치에 있고 플라이웨이트의 원심력과 스피더스프링(Speeder Spring)이 힘의 균형을 이룰 때 일정속도의 정속운전을 한다.

### 2.2.2 조속기의 동특성 방정식

조속기의 동특성 방정식은 다음과 같이 전형적인 2차계로 표현되고 그 블록선도는 Fig. 2.3과 같다.

$$\begin{aligned} \frac{\Delta Z(s)}{\Delta N_E(s)} &= \frac{\Delta Z(s)}{\Delta N_R(s) - \Delta N_G(s)} \\ &= \frac{\alpha_2(S + \alpha_3)}{S^2 + \beta_1 S + \beta_2} = \frac{\alpha_2(S + \alpha_3)}{S^2 + 2\zeta\omega_n S + \omega_n^2} \end{aligned}$$

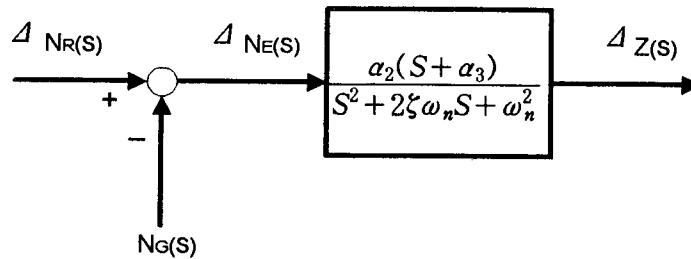


Fig. 2.3 Block Diagram of the Governor

## 2. 3 기관의 전달함수

기관의 대략적인 전달함수와 블록선도를 구하면 다음과 같다.

$$G_E(s) = \frac{\Delta P_E(s)}{\Delta Z(s)} = K_e e^{-Ls}$$

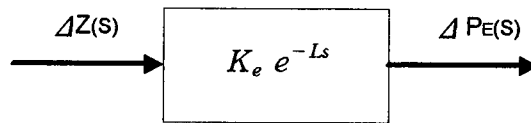


Fig. 2.4 Block Diagram of an Engine

여기서, 기관의 시간지연은  $e^{-Ls}$ 로 표현하며 Padé의 2차 근사법을 적용하면 다음과 같다.

$$e^{-Ls} = \frac{1 - \frac{L}{2}s + \frac{L^2}{12}s^2}{1 + \frac{L}{2}s + \frac{L^2}{12}s^2}$$

### 2. 4 회전계통의 전달함수

회전계통의 전달함수를 구해보면 다음과 같다.

$$G_R(s) = \frac{\Delta N(s)}{\Delta P_e(s) - \Delta P_s(s)} = \frac{\frac{1}{K_L}}{\frac{(J/75)(2\pi/60)^2}{K_L} s + 1} = \frac{K_r}{T_r s + 1} = \frac{K_T}{\alpha_r + s}$$

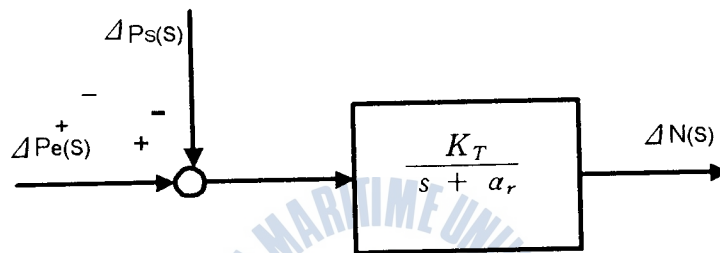


Fig. 2.5 Block Diagram of Rotating System

또한 저속의 기관과 고회전의 조속기 스피드 스피들 사이에 있는 워엄기어(Worm Gear)의 치차수 비를  $K_f$  라 하면 이들의 속도비는

$$\Delta N_G(s) = K_f \Delta N(s)$$

### 2. 5 속도제어 시스템의 전달함수

앞 절에서 유도한 각 전달함수를 이용하여 선박 주기관의 속도제어 계통의 전달함수와 블록선도를 그려보면 다음과 같이 표시된다.

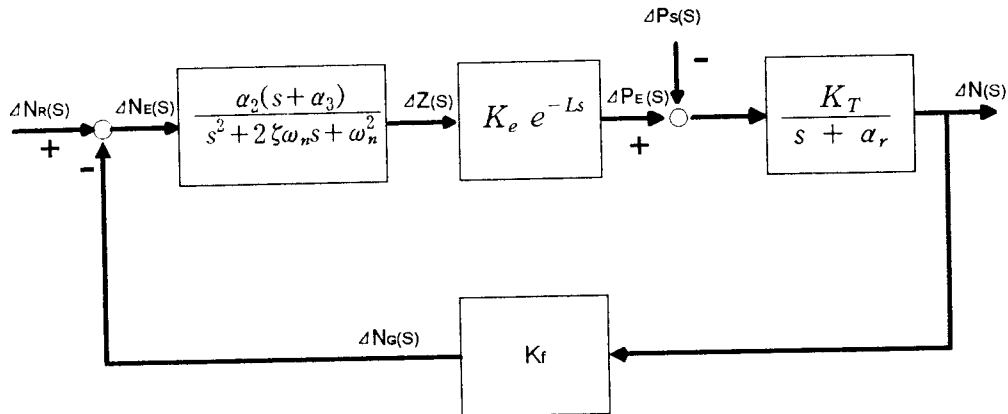


Fig. 2.6 Block Diagram of the Speed Control System

$$G_N(s) = \frac{\Delta N(s)}{\Delta N_R(s)} = \frac{G(s)}{1 + K_r G(s)}$$

$$G(s) = \frac{\alpha_2(s + \alpha_3)}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} K_e e^{-Ls} \frac{K_T}{s + \alpha_r}$$

## 2. 6 속도제어 시스템의 파라메타

본 연구에 적용된 기관과 프로펠러의 사양 및 파라메타는 다음과 같다.

Type	: MAN-B&W 6L60MCE
No. of Cylinder	: 6
Stroke × Bore	: 1944 mm × 600 mm
M.C.R	: 10,800 BHP at 111 RPM
Mean Effective Pressure	: 13.3 Kg/cm <sup>2</sup>
Total Moment of Inertia	: 5,816 Kg · m · sec <sup>2</sup>
F.O Consumption Rate	: 123 g/BHP · Hr
Dia. of Propeller	: 6,150 mm
Material	: Ni-AL-Bronze
Moment of Inertia	: 3,975 Kg · m · sec <sup>2</sup>

위 기관의 해상시운전 결과 측정된 파라메타 상수는 Table 2.1과 같다.

Table 2.1 Parameters of Propulsion System

BHP	9671	7300	5395	3840	2606	1663	975
RPM	110	100	90	80	70	60	50
Parameter							
Ke	29.26	29.26	29.26	29.26	29.26	29.26	29.26
K <sub>L</sub>	248.6	237.1	190.5	155.5	123.4	94.3	68.8
K <sub>r</sub>	0.004	0.005	0.006	0.008	0.010	0.015	0.020
Tr	6.3	7.2	7.3	8.7	10.1	11.9	14.5
K <sub>T</sub>	0.0006	0.0007	0.0008	0.0008	0.0009	0.0010	0.0013
α <sub>r</sub>	0.159	0.139	0.137	0.115	0.099	0.084	0.069
L(sec)	0.22	0.25	0.28	0.31	0.36	0.41	0.50

### 3. 속도제어 계통의 안정도 해석

본 연구에서는 니콜스 선도를 이용하여 선박 속도제어 시스템을 분석하고, 컴퓨터 시뮬레이션으로 부터 과도응답상태에서 최적의 파라메타 값을 찾아 이들을 조정하면 좋은 제어결과를 얻을 수 있음을 확인하고자 한다. 앞장에서 주어진 파라메타 값을 개루프(Open Loop) 전달함수에 대입하면 니콜스 선도를 그릴 수 있고,  $\zeta=1.0$ ,  $\alpha_3=5.24$ ,  $\omega_n=10.47$  (rad/sec), K=6, L=0.5(sec)의 값이 주어질 때 시스템은 안정한계에 이른다 이때의 응답곡선은 니콜스선도의 원점 부근을 통과하므로, 이를 기준 파라메타로 하고 시간지연, 전체이득, 감쇄계수의 변화에 따른 속도제어 시스템의 안정도 관계를 해석하였다.

#### 3.1 기관의 시간지연(Dead Time)에 의한 영향

기준 파라메타 값 중에서 기관의 시간지연(L)을 각각 0.1, 0.3, 0.5, 0.7초로 변경하여 니콜스 선도를 그리면 Fig. 3.1과 같고, 최대공진치, 대역폭, 이득여유, 위상여유 등을 Table 3.1에 정리하였다.

Table 3.1 Results of Nichols chart under variation of dead time

Dead Time (sec)	Mp	Bandwidth	Gain Margin	Phase Margin	비 고
	최대공진치	대역폭 (rad/ sec)	이득여유 (dB)	위상여유 (Degree)	
0.1	0.9772	3.25	3.1361	70.6347	안 정
0.3	2.5263	6.42	1.4765	34.4617	안 정
0.5	99.6167	4.6	0.9891	-1.1533	불안정
0.7	4.2774	3.95	0.7410	-34.9744	불안정

#### 3.2 정상이득(Gain)에 의한 영향

시스템의 기준 파라메타에서 전체이득(Total Gain)을 10, 15, 20, 26, 30으로 변경시켜 니콜스선도를 그리면 Fig 3.2와 같으며, 최대 공진치, 대역폭, 이득여유, 위상여유등을 Table 3.2 에 정리하였다.

Table 3.2 Results of Nichols chart under gain variation

Total Gain 전체이득	Mp 최대공진치	Bandwidth 대역폭	Gain Margin 이득여유	Phase Margin 위상여유	비 고
10	1.00424	2.47	2.5715	60.4097	안 정
15	1.7966	3.85	1.7144	41.7234	안 정
20	4.1702	4.5	1.2858	22.7020	안 정
26	99.6167	4.6	0.9891	-1.1533	불 안 정
30	7.8258	0.14/4.6	0.8572	-17.5586	불 안 정

### 3.3 감쇄계수( $\zeta$ )에 따른 영향

시스템의 기준 파라메타에서 감쇄계수(Damping ratio)를 0.1, 0.5, 1.0, 2.0, 5.0으로 변경시켜 시스템의 니콜스선도를 그리면 Fig. 3.3과 같고, 이 경우 최대공진치, 대역폭, 이득여유, 위상여유 값들은 Table 3.3 과 같다.

Table 3.3 Results of Nichols chart under variation of damping ratio

$\zeta$ 감쇄계수	Mp 최대공진치	Bandwidth 대역폭	Gain Margin 이득여유	Phase Margin 위상여유	비 고
0.1	18.9981	7.2	0.9471	inf	불안정
0.5	29.0865	5.5	0.9637	-6.9848	불안정
1.0	103.3981	4.6	0.9889	-1.1659	불안정
2.0	44.0991	3.62	1.0304	1.9390	안 정
5.0	17.1475	2.5	1.1105	3.9235	안 정

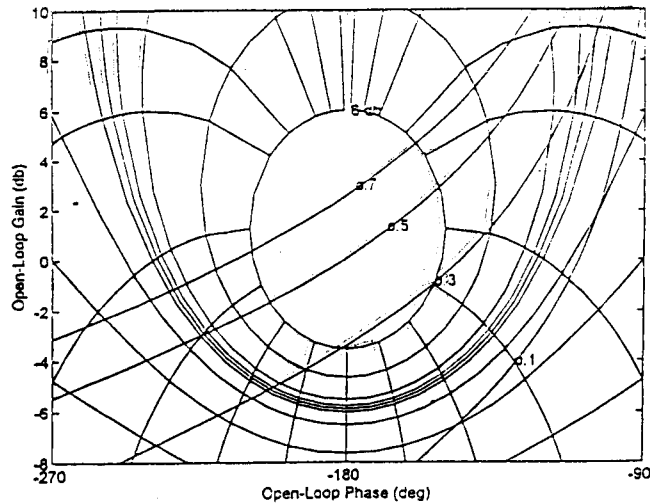


Fig. 3.1 Nichols chart to the variation of dead time



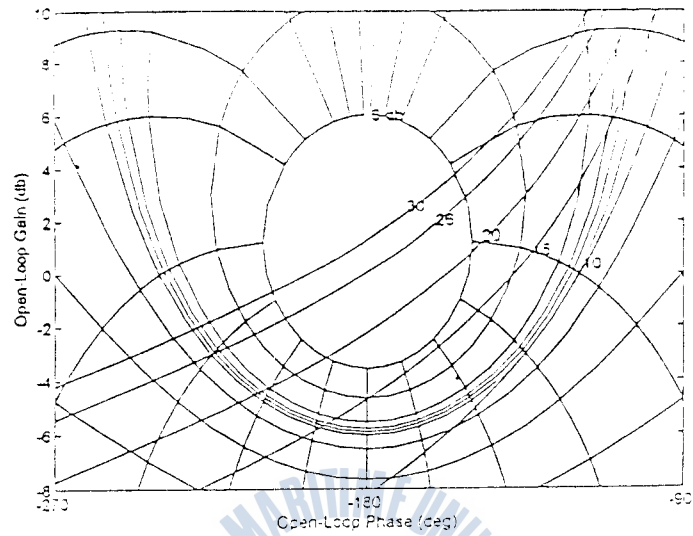


Fig. 3.2 Nichols chart to total gain variation

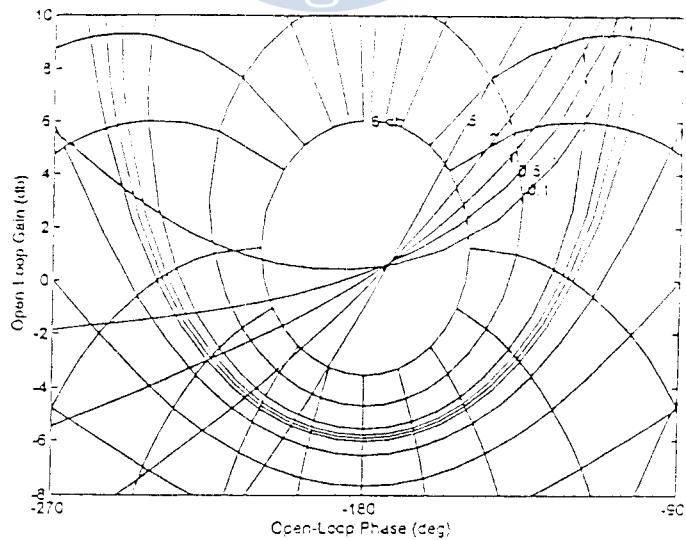


Fig. 3.3 Nichols chart to the variation of damping ratio

## 4. 컴퓨터 시뮬레이션 결과 및 고찰

### 4.1 컴퓨터 시뮬레이션에 의한 분석

이 장에서는 니콜스 선도에서 파라메타의 변동시 단위계단상 입력이 주어졌을 때 어떠한 과도특성을 갖는지 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 분석하고 빠른 상승시간과 정정시간을 갖는 최적의 파라메타를 구해 보고자 한다.

#### 4.1.1 기관의 시간지연(Dead Time)

기준 파라메타 중에서 기관의 지연시간만을 0.1, 0.3, 0.5초로 변경하였을 경우 단위계단 입력에 대한 응답곡선을 Fig. 4.1에 나타내었다. 이 그림에서 필요한 자료를 정리하면 Table 4.1 과 같다. 시간지연이 감소함에 따라 오버슈트, 정정시간, 정상상태 오차값, 최대치까지 걸리는 시간은 감소하고 상승시간은 차이가 거의 없으며, 시간지연이 시스템의 과도특성에 커다란 영향을 미침을 확인하였다.

Table 4.1 Results of indicial response under variation of dead time

Dead Time (sec)	Overshoot (%)	Time to Peak (sec)	Rise Time (sec)	Settling Time (sec)	Steady-state Error (%)
0.1	11.2539	0.6	0.3538	1.4	0.0045
0.3	51.0473	1	0.267	4.7	0.0035
0.5	120.9094	9.4	0.2856	inf.	52.1136

#### 4.1.2 전체이득(Total Gain)

기준 파라메타 중에서 시스템의 전체이득만을 10, 15, 20, 26 으로 변경했을 경우의 단위계단 입력에 대한 응답곡선을 Fig. 4.2에 나타내었다. 이 그림에서 시스템 성능에 필요한 자료를 뽑아보면 Table 4.2와 같다. 표와 그림에서 보면 알수 있는 것처럼 이득이 증가할수록 오버슈트, 정정시간, 정상상태 오차는 증가하여 제어시스템의 전체이득을 조정하면 좋은 과도응답을 얻을 수 있음을 알 수 있다.

Table 4.2 Results of inditional response under variation of total gain

Total Gain	Overshoot (%)	Time to Peak (sec)	Rise Time (sec)	Settling Time (sec)	Steady-state Error (%)
10	10.6272	1.9	0.71	2.8	0.0045
15	39.8355	1.6	0.4501	5.4	0.0025
20	66.8132	1.4	0.3552	9.7	0.0002
26	120.9094	9.4	0.2856	inf.	52.1136

4.1.3 감쇄계수( $\zeta$ )

기준 파라메타에서 감쇄계수만을 1, 2, 5로 변경하였을 경우의 단위계단 입력에 대한 응답곡선을 Fig. 4.3에 나타내었다. 시스템 성능에 관계된 자료를 정리하면 Table 4.3 과 같다. 감쇄계수가 증가할수록 다소 개선은 되나 과도응답 개선에 별 영향을 미치지 않음을 알 수 있다.

Table 4.3 Results of inditional response under variation of damping ratio

Damping Ratio	Overshoot (%)	Time to Peak (sec)	Rise Time (sec)	Settling Time (sec)	Steady-state Error (%)
1	120.9094	9.4	0.8568	inf.	52.1136
2	20.8885	2.4	0.8568	5.2	0.0046
5	29.1093	2.2	0.8028	10	0.0030

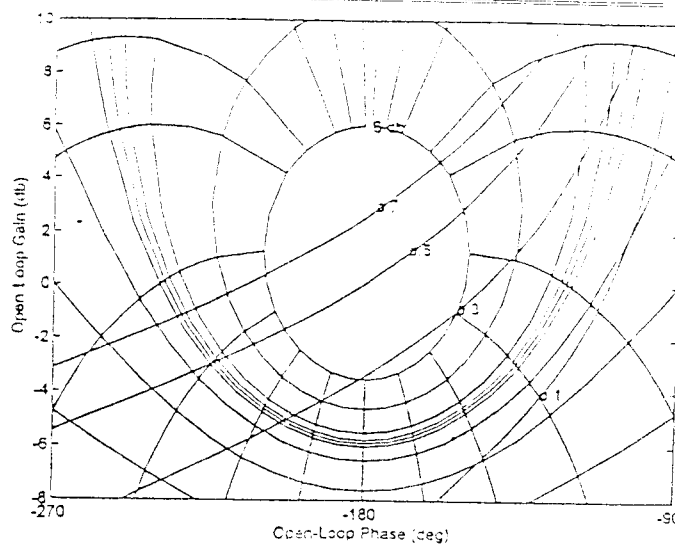


Fig. 4.1 Indicial responses to the variation of dead time

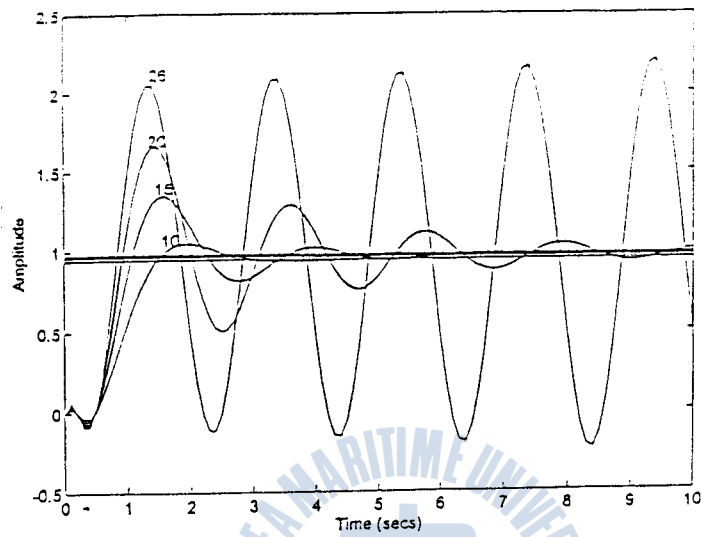


Fig. 4.2 Indicial responses to the variation of total gain

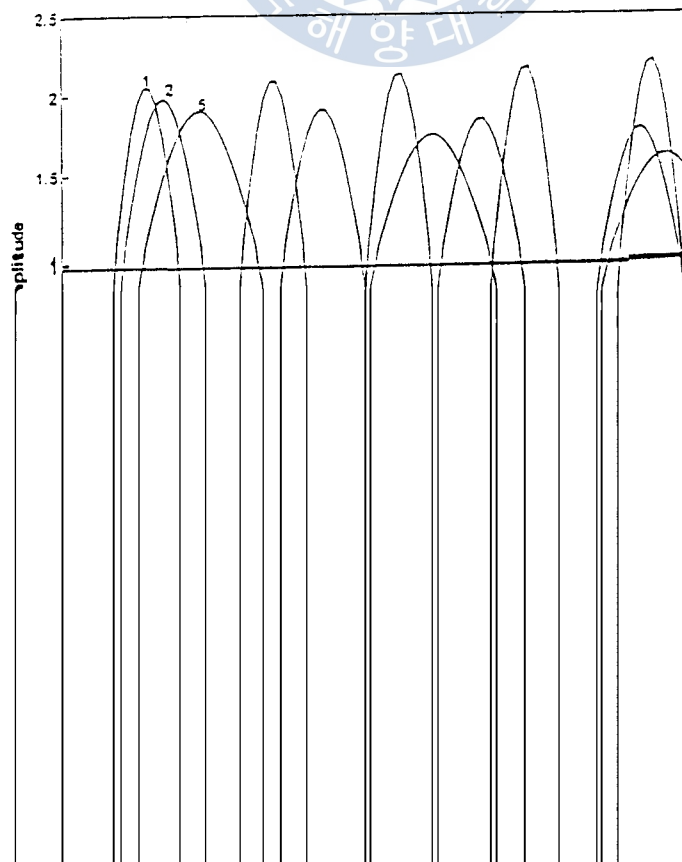


Table 4.2 Results of inditional response under variation of total gain

Total Gain	Overshoot (%)	Time to Peak (sec)	Rise Time (sec)	Settling Time (sec)	Steady-state Error (%)
10	10.6272	1.9	0.71	2.8	0.0045
15	39.8355	1.6	0.4501	5.4	0.0025
20	66.8132	1.4	0.3552	9.7	0.0002
26	120.9094	9.4	0.2856	inf.	52.1136

4.1.3 감쇄계수( $\zeta$ )

기준 파라메타에서 감쇄계수만을 1, 2, 5로 변경하였을 경우의 단위계단 입력에 대한 응답곡선을 Fig. 4.3에 나타내었다. 시스템 성능에 관계된 자료를 정리하면 Table 4.3 과 같다. 감쇄계수가 증가할수록 다소 개선은 되나 과도응답 개선에 별 영향을 미치지 않음을 알 수 있다.

Table 4.3 Results of inditional response under variation of damping ratio

Damping Ratio	Overshoot (%)	Time to Peak (sec)	Rise Time (sec)	Settling Time (sec)	Steady-state Error (%)
1	120.9094	9.4	0.8568	inf.	52.1136
2	20.8885	2.4	0.8568	5.2	0.0046
5	29.1093	2.2	0.8028	10	0.0030

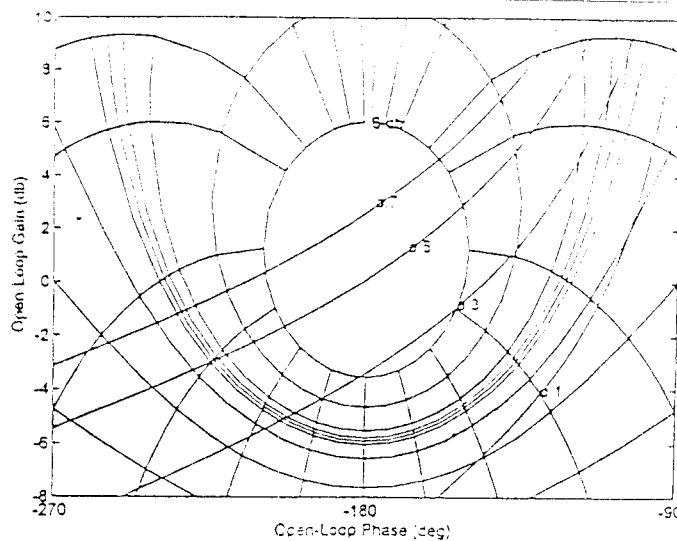


Fig. 4.1 Indicial responses to the variation of dead time

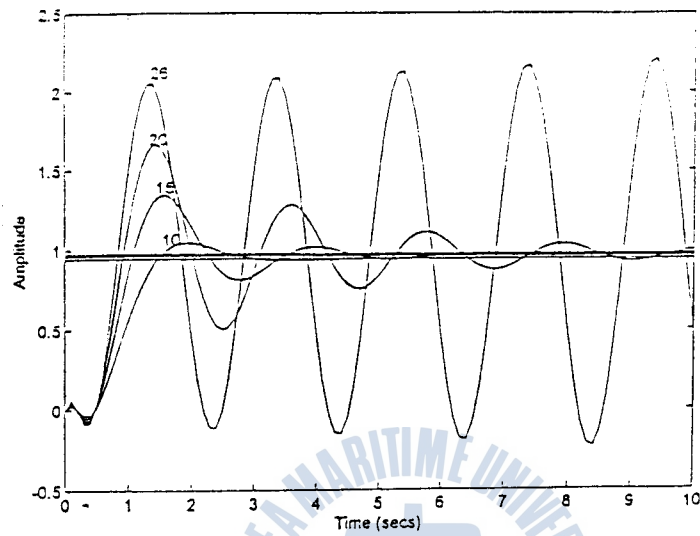


Fig. 4.2 Indicial responses to the variation of total gain

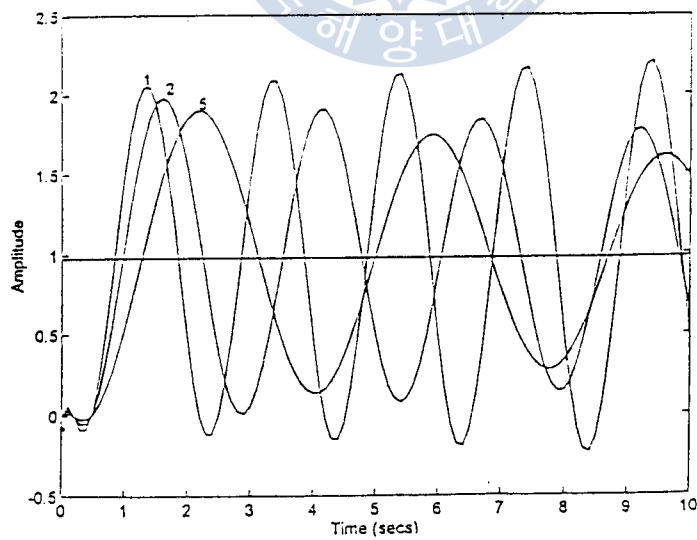


Fig. 4.3 Indicial responses to the variation of damping ratio

4.2 속도제어 계통의 최적 파라메타 고찰

컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 안정한계집에서 구한 기준 파라메타 중에서 시스템 성능에 큰 영향을 미치는  $\alpha_3$ 와  $\omega_n$ 을 적절히 조정함으로써 가장 좋은 응답특성을 나타내는 최적의 파라메타 값에 대한 니콜스선도는 Fig. 4.4와 같고 단위계단 입력에 대한 응답곡선은 Fig. 4.5와 같으며, 이 경우 필요한 자료를 정리하면 Table 4.4와 같다. 그림과 표에서 보면 알 수 있듯이 거의 유사한 응답특성을 나타내고 있으며 불안정한 시스템도  $\alpha_3$ 와  $\omega_n$ 의 조정으로 안정화 시킬수 있다는 것을 알 수 있으며, 이들을 구성하는 요소인  $C_4, K_4, K_1, K_7, \rho$ 의 요소들을 적절히 조정하면 기존의 기계-유압식 조속기도 성능개선이 가능하다는 것을 알 수 있다

Table 4.4 Comparison of simulated results

$\alpha_3$	$\omega_n$ (rad/sec)	Mp	Phase Margin (dB)	Rise Time (sec)	비 고
		Band Width	Overshoot	Settling Time	
		Gain Margin	Time to peak	Steady-state err.	
5.24	10.47	99.6167	-1.1533	0.2856	불안정
		4.6	120.9094	inf.	
		0.9891	9.4	52.1136	
11	11	0.9263	70.6924	1.17	안정
		0.89	0.4624	2.3	
		3.7237	3	0.0002	
13	30	0.9283	69.4	1.1023	안정
		1	1.16	2.1	
		3.5935	2.7	0.0041	

참 고 문 헌

1) 韓國 船舶機關學會 機關管理研究會, "船舶의 經濟的 運航管理", 大海출판사, pp.222, 1984.



## 5. 결 론

선박용 기계-유압식 조속기에서 시간지연을 Padé의 2차계로 근사하여 시스템을 모델링한 후 속도제어 시스템을 구성하였다. 니콜스 선도를 이용해 시간지연, 이득, 감쇄계수의 변화에 따른 영향을 분석하고, 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 최적의 파라메타 값을 찾아내었으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 시간지연이 증가할때 0.5초를 기준으로 기관은 불안정한 영역이 되므로 동일한 조속기라도 저속에서 불안정하고 헛팅현상이 발생하여 기관 시스템의 안정성에 큰 영향을 미치는 요인이 된다.
- 2) 시스템의 전체이득이 증가하는 경우 전체이득이 26을 기준으로 불안정해진다. 전체이득이 감소하는 경우에는 안정하기는 하나 정상오차가 커진다.  
따라서 동일한 조속기라도 대형 저속기관에서는 래크단위의 변위당 연료주입량이 커져 이득이 증가되는 요인이 되므로 기관 시스템은 불안정해짐을 알 수 있다.  
이와같이 전체이득은 시스템 안정성을 결정하는데 큰 영향을 미치는 요인이 된다
- 3) 감쇄계수를 변화시키는 경우 대역폭, 이득여유, 위상여유 등이 별로 변화하지 않으므로 기관 시스템의 안정성에 큰 영향을 주지 않지만 감쇄계수가 0.2보다 작은 값에서는 지글링이나 헛팅현상을 유발한다.

이상과 같이 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 시스템 성능에 영향을 미치는  $\alpha_3$ 와  $\omega_n$ 을 적절히 조정함으로써 가장 좋은 응답특성을 갖는 최적의 파라메타 값을 구하였으며, 불안정한 시스템도  $\alpha_3$ 와  $\omega_n$ 의 조정으로 안정화시킬 수 있다는 것을 알 수 있었다. 또한 이들을 구성하는 요소인  $C_4$ ,  $K_4$ ,  $K_1$ ,  $K_7$ ,  $\rho$ 의 요소들을 적절히 변동 조정하면 기존의 기계-유압식 조속기도 성능개선이 가능함을 알 수 있었다.