

# 내부 모델 제어기에 의한 중형 디젤 기관의 속도 제어계의 설계에 관한 연구\*

양 주 호 · 김 영 복\*

(부산수산대학교 · \*神戶大學)

## I. 서 론

선박용 디젤기관은 특성상 시간지연을 갖는 엔진으로 특히 저속시 헌팅(hunting)이 심해 회전수(R.P.M)를 안전하게 유지시키기 어렵고, 연속 연소 폭발을 위한 최저 회전수 근처에서는 엔진이 정지하는 경우가 많다. 그리고 해상 상태의 변화에 따라 부하가 급변하므로 부하에 관계없이 엔진의 회전수를 일정하게 유지 시키는 조속장치가 필요한데, 최근 선박자동화 추세에 따라 기관효율을 상승시키고 내구성과 신뢰성이 뛰어난 조속장치가 요구되는 바, 마이크로 컴퓨터의 제어 프로그램에 따라 제어되는 전자식 가버너(governor)가 출현하게 되었으며, 그에 대한 제어설계방법도 PID제어<sup>1)</sup>, 최적제어<sup>2,3)</sup>, 적응제어 및 게인 스케줄링(gain scheduling)<sup>4,5)</sup> 등 여러 가지 제어 알고리즘을 제안하고 있다.

특히 선박용 디젤기관은 그 특성상 저속으로 인해 시간지연이 큰 엔진을 임의로 제어하는데는 어느 정도 제한적이다. 그러므로 기상악화, 부하변동 등의 외란이 존재하는 경우에도 목표 회전수에 잘 추종하는 강인한 안정성과 강인한 성능을 만족하는 제어기의 구성이 절실히 요구되는 바이다.

그래서 본 논문에서는 시간지연이 큰 선박용 디젤엔진에 대해 내부 모델 제어기에 의한 강인한 속도제어계를 구성하여, 운전조건 변화에 대해서도 목표 회전수에 잘 추종하는 강인한 안정성과 강인한 성능을 만족하는 IMC(Internal Model Control) 제어기를 설계하여 제어계를 구성한 다음, 컴퓨터 시뮬레이션으로 그 결과를 비교 검토한 후 실시간 제어를 위해 제어대상인 엔진부를 아날로그 컴퓨터로 모의하고 PC를 제어기로 구성하여 응답실험을 통해 그 타당성을 조사한다.

## II. 선박용 디젤기관의 모델링

선박용 엔진을 모델링하기 위해 그 특성을 살펴보면 다음과 같다.

랙크 스케일에 따라 연료펌프의 연료가 엔진에 분사, 폭발하여 토크가 발생한다. 그리고 연료소비량 Q는 회전수 랙크눈금에 비례하는데 연료펌프의 랙크가 조정된 순간부터 증감된 연료가 분사, 착화(着火)

\* 본 연구는 논문문화재단의 연구비 지원에 의하여 이루어졌습니다.

되어 엔진 토크의 변화를 가져오는 데 까지 걸리는 시간, 즉 지연 시간(Delay time :  $L$ )은 식(2.1)과 같다.

$$L(s) = \frac{15}{N} + \frac{30}{n} \quad (2.1)$$

여기서,  $N$  : 회전수(RPM)

$n$  : 실린더수(Cylinder no.)

식(2.1)의 지연 시간은  $s$ 영역에서  $e^{-Ls}$ 의 형태로 표현되고, 실린더 내에 분사된 연료가 착화 연소되어 기관축의 토크로 변할 때까지를 1차계로 보고 이 때 이득을  $K_r$ , 시정수를  $T_r$ 이라고 하면 연소 계통의 전달함수는 식(2.2)와 같다.

$$G_r = \frac{K_r}{1 + T_r \cdot S} \cdot e^{-Ls} \quad (2.2)$$

또한 연소, 폭발로 발생한 토오크에 의해 기관축이 회전하여 목표 회전수까지 도달하는 데 까지 시스템을 1차계로 볼 수 있으며 이 때 이득을  $K_e$ , 시정수를  $T_e$ 라 하면 회전 계통의 전달함수  $G_e(s)$ 는 식(2.3)와 같다.

$$G_e = \frac{K_e}{1 + T_e \cdot S} \quad (2.3)$$

따라서 위의 식(2.2), 식(2.3)에서 연료펌프의 래크 조정입력  $U(s)$ 으로 부터 기관축의 목표 회전수  $Y(s)$ 까지의 각 전달함수에 대한 블록 선도(Block diagram)는 Fig. 2.1과 같다.

본 연구에서 모델로 택한 엔진은 6L80MCE 기관으로 카탈로그<sup>3)</sup>에 명기된 엔진의 각 파라미터의 값들은 Table 1과 같다.

### Ⅲ. IMC 제어 설계

$P(S)$ 를 플랜트,  $\hat{p}(s)$ 를 플랜트의 공칭모델,  $q$ 를 제어기라 할 때 내부모델 제어기의 구조는 Fig. 3.1과 같다.

Fig. 3.1의 IMC 시스템에 대한 알고있는 정보는

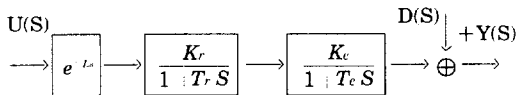


Fig. 2.1 Block diagram of modeled marine diesel engine

Table 1. Parameter values of marine engine

정수\회전수	25	45	65
Delay thim L(sec)	0.800	0.444	0.308
$K_e$ (r.p.m/mm)	25.0/23.1	45.0/39.5	65.0/65.3
$T_e$ (sec)	2.13	2.13	2.13
$K_r$	1	1	1
$T_r$ (sec)	0.05	0.05	0.05

다음과 같다.

1) 선박용 디젤기관의 모델링에 관한 정보로 연료 레크 조정 입력에 대한 기관축의 목표 회전수 출력에 대한 전달함수 즉, 공칭모델을  $\bar{p}$ 로 표시하면 식(3.1)과 같다.

$$\bar{p}(s) = \frac{K_p \cdot e^{-\tilde{L}s}}{(1+T_r \cdot S)(1+T_e \cdot S)} \quad (3.1)$$

여기서,  $K_p = K_e \cdot K_r$

이때 선박용 디젤기관의 각 파라미터 값 Table 1을 참조하면  $T_r=0.05(\text{sec})$ ,  $T_e=2.13(\text{sec})$ ,  $K_p \approx 1$ ,  $L \approx 0.30 \sim 0.80$ 이다.

2) 기준 입력은 단위 계단 입력(Unit step input)으로 한다.

3) 성능의 특성에 관한 내용으로는

① 페루프 시스템의 Type을 step입력에 대하여 offset를 없애기 위해 prefilter의 형을 Type 1로 선정한다.

② 감도함수의 주파수 성능 weight은 전형적으로  $0.3 < W_s < 0.9$ 으로써 본 실험에서는  $W_s=0.4$ 로 선정한다.

4) 모델 불확실성의 정보에 관한 내용으로 지연시간  $L = \tilde{L} + \delta$ 으로  $\tilde{L}$ 는 선박용 디젤기관의 회전수 변동에 따른 지연시간 정수값  $L=0.30 \sim 0.80$ 의 중간값  $\tilde{L}=0.55$ 로 모델링하고, 그때  $\delta$ 는 중간값  $\tilde{L}=0.55$ 에서 최소, 최대값  $\delta=0 \sim 0.25$ 의 중간값  $\bar{\delta}=0.125$ 로 한다.

여기서 모델링 오차  $l_m$ 를 곱셈형으로 표시하면 식(3.2)와 같이된다.

$$l_m(s) = \frac{p - \bar{p}}{\bar{p}} = \frac{p}{\bar{p}} - 1 = e^{-\delta s} - 1 \quad (3.2)$$

$\delta = \bar{\delta}$ 에서  $l_m$ 의 크기는 식(3.3a)와 식(3.3b)로 표시된다.

$$|l_m| = \bar{l}_m(\omega) = |e^{j\omega\bar{\delta}} - 1|, \quad \omega\bar{\delta} \leq \pi \quad (3.3a)$$

$$\bar{l}_m(\omega) = 2, \quad \omega\bar{\delta} \geq \pi \quad (3.3b)$$

$|l_m|$ 의 주파수 영역에서의 크기를 그려보면 Fig. 3.2와 같이 되고  $\bar{l}_m(\omega)$ 의 최대 bound는  $6.02[\text{dB}]$  즉,  $\bar{l}_m(\omega)=2$ 가 되는 것을 Fig. 3.2로부터 알 수 있다.

앞의 정보를 이용하여 선박용 디젤기관의 IMC제어기를 다음과 같이 설계한다<sup>6)</sup>.

1) 1단계 : 공칭성능을 만족하는 제어기  $\hat{q}$ 는 오차의 2차 Norm  $\|(1 - \bar{p} \cdot \hat{q}) \cdot v\|_2$ 을 최소가 되게  $\hat{q}$ 를 구한다. 여기서  $v$ 는 외란 또는 기준입력이다. 본 연구의 제어대상에 대해서  $\hat{q}$ 를 구하면 식(3-4)와 같이

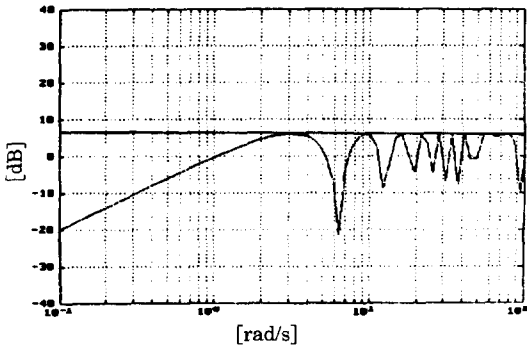


Fig. 3.2 Multiplicative uncertainty  $l_m$  for  $\delta = \bar{\delta}$  and bound  $\bar{l}_m$  versus  $\omega \bar{\delta}$

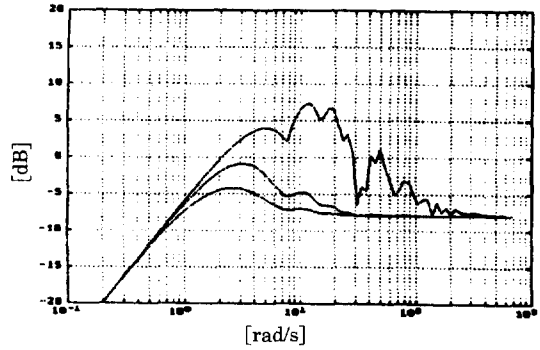


Fig. 3.3 Robust stability bound diagram

된다.

$$\bar{q} = \tilde{P}_m^{-1} = \frac{(1 + T_r \cdot S) \cdot (1 + T_e \cdot S)}{K_p} \quad (3.4)$$

2) 2단계 : prefilter  $f$ 에 의해서 확장된 제어기  $q$ 는 식(3-5)와 같이 된다.

$$q = \bar{q} \cdot f \quad (3.5)$$

여기서, 강인한 안정성과 강인한 성능을 동시에 만족하도록 즉, 식(3-7)과 식(3-8)을 만족하는 필터 파라미터  $\lambda$ 값을 선정한다.

$$\text{Type filter : } f = \frac{1}{(\lambda \cdot S + 1)^2} \quad (3.6)$$

$$\text{강인한 안정성 : } |\bar{p} \cdot \bar{q} \cdot f \cdot \bar{l}_m| = |f \cdot \bar{l}_m| < 1 \quad (3.7)$$

$$\text{강인한 성능 : } |\bar{p} \cdot \bar{q} \cdot f \cdot \bar{l}_m| + |(1 - \bar{p} \cdot \bar{q} \cdot f) \cdot W_s| < 1 \quad (3.8)$$

필터 파라미터  $\lambda$ 값을 선정하기 위하여, 식 (3.8)의 강인한 성능의 지표를 주파수에 대해 여러가지의  $\lambda$  값에 따라 그린 것이 Fig. 3.3이고 이 그림으로부터  $\lambda$ 값을 0.2로 선정한다. 이 때 이용된 대상 기관의 제정수는 Table 1에 명시된 것이다.

이상의 설계절차에 의해 설계된 제어기는 식(3.9)와 같다.

$$\lambda = 0.2,$$

$$q(s) = \frac{(1 + T_r \cdot S) \cdot (1 + T_e \cdot S)}{K_p(\lambda \cdot S + 1)^2} \quad (3.9)$$

식 (3.9)로 설계된 제어기를 동적 보상기와 같은 형식으로 표현한 제어기는 식 (3.10)과 같다.

$$C = \frac{q}{1 - \bar{p} \cdot q} \quad (3.10)$$

#### IV. 응답 시뮬레이션 및 고찰

앞장에서 설계된 제어기로 제어계를 구성하여 지연 시간을  $L=0.3, 0.55, 0.8$ 에 대해 디지털 컴퓨터 상에서 응답 시뮬레이션한 결과는 Fig. 4.1과 같다. 그림에서 알 수 있는 바와같이  $L=0.3$ 에서는 단 한번에 목표치에 도달하지 못함을 보이고 있는데 이것은 제어입력의 크기가 작기 때문이고,  $L=0.8$ 에서는 약 26%의 오버슈트를 보이고 있으나 곧 목표치에 추정하게 된다.

그리고 본 연구에서 설계된 제어기의 우수성을 입증해 보이기 위해 Ziegler-Nichols법에 의해 PID 제어기를 설계하여 응답실험을 한 결과는 Fig. 4.2와 같다. Fig. 4.1과 Fig. 4.2를 비교해 보면 알 수 있는 바와 같이 공칭지연시간의 경우 뿐 만 아니라 그 이외의 경우도 IMC제어기의 응답성이 우수함을 알 수 있다.

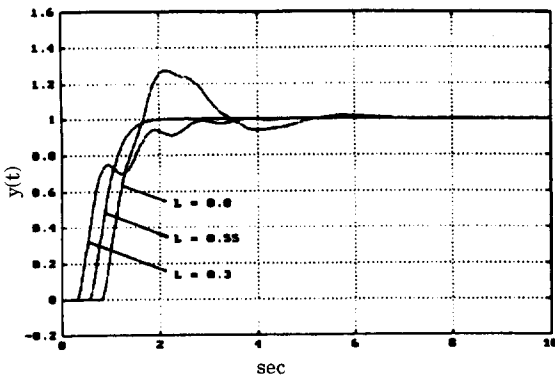


Fig. 4.1 Digital computer simulation with IMC

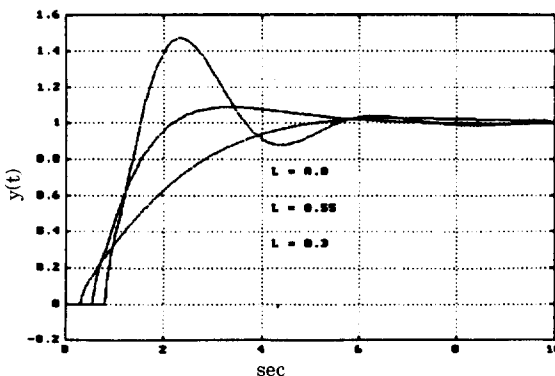


Fig. 4.2 Digital computer simulation with PID controller

다음 좀더 실제적인 엔진의 제어에 근접하기 위해 본 연구의 모델링에 이용된 엔진을 아날로그 컴퓨터로 모의하고 PC를 제어기로 하여 Fig. 4.3과 같이 실험장치를 구성하여  $L=0.3, 0.55, 0.8$ 에 대해 실시간 응답실험을 한 결과는 Fig. 4.4와 같다. 이때 샘플링 시간은 0.02초로 하였다.

또한 기관이 40RPM의 정속운전 중 0.4초 동안 30%의 외란을 가했을 경우의 응답은 Fig. 4.5와 같다.

디지털 컴퓨터 상에서 시뮬레이션한 Fig. 4.1과 실시간 응답 실험한 Fig. 4.4를 비교해 보면 알 수 있는 바와 같이 두 결과가 잘 일치함을 보이고 있다.

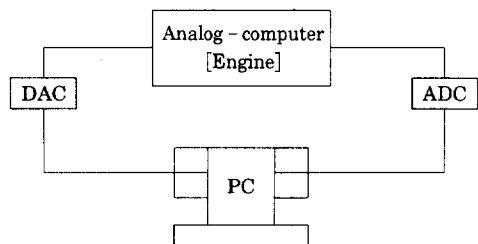


Fig. 4.3 Diagram of experimental apparatus

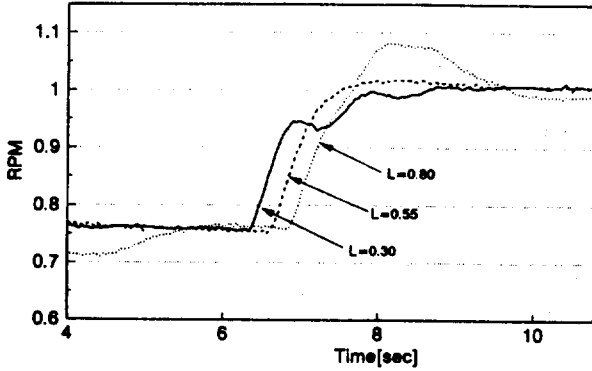


Fig. 4.4 Step response with IMC

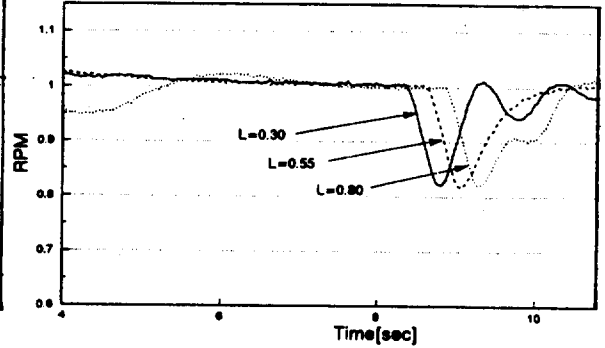


Fig. 4.5 Response at 30% disturbance

## V. 결 론

본 연구에서는 시간 지연에 대한 모델링 불확실성을 갖는 선박용 저속 디젤기관에 대해 목표 회전수에 잘 추종하도록 강인한 안정성과 강인한 성능을 갖는 IMC 제어를 설계하여 컴퓨터 시뮬레이션과 실시간 모의 응답 실험한 결과, 모델링의 불확실성과 외란에도 불구하고 목표 회전수에 잘 추종하였으며, 종래의 PID 제어기에 비해 IMC 제어기의 성능이 우수함을 확인할 수 있었다. 특히 지연시간의 변동이 큰 선박용 저속 기관의 속도 제어에 IMC 구조를 갖는 제어기를 이용함으로써 제어 성능이 우수한 제어제를 구성할 수 있었다.

## 참고문헌

- 1) Norcontrol, Technical Analysis of Governor for B&W 6L80MCE, 1988.
- 2) 유영호 · 하주식, "저속 장행정 박용디젤기관의 속도제어에 관한 연구", 한국박용기관학회지, 제13권 제3호, 1989, pp. 212~222.
- 3) 양주호 · 김창화 · 정병진 · 정해중, "자기동조에 의한 선박용 디젤엔진 제어에 관한 연구", 한국어업기술학회지, 제28권 제3호, 1992, pp. 262~273.
- 4) S. T. Lyngso, Electronic Governor System EGS, STL07.A.32, Ver. 2.01, 1987.
- 5) 김성환, "전기구동방식 디지털 가버너의 최적제어계 설계에 관한 연구", 부산수산대학교 대학원 논문집, 1990.
- 6) Manfred Morari · Evangelhos Zafiriou, "Robust process control", Prentice - Hall, Inc., 1989, pp. 57~84.
- 7) Gene F. Franklin · J. David Powell · Michael L. Workman, "Digital Control of Dynamic System", Addison - Wesley Publishing Co. Inc., 1990, pp. 224~230.
- 8) Richard Y. Chiang and Michael G. Safonov, "Robust - Control Tool Box", The Math Works Inc., 1988.