

# RCGA에 기초한 선박 디젤 엔진의 최적 속도제어

소명옥<sup>+</sup>·이윤형·안종갑<sup>++</sup>·진강규<sup>+++</sup>·조권희<sup>++++</sup>

## RCGA-Based Optimal Speed Control of Marine Diesel Engine

Myung-Ok So<sup>+</sup>, Yun-Hyung Lee, Jong-Kap Ahn<sup>++</sup>, Gang-Gyoo Jin<sup>+++</sup> and Kwon-Hae Cho<sup>++++</sup>

**Abstract** : The conventional PID controller has been widely used in many industrial control system because engineers can easily understand how to deal with three parameters of PID controller. The conventional tuning methods, however, have a tendency depend on experience and experiment. In this paper a real-coded genetic algorithm is used to search for the optimal parameters of PID controller for marine diesel engine. Simulation results compared with conventional PID controller tuning methods show the effectiveness and good performance of proposed scheme.

**Key words** : Real-coded genetic algorithm(실수코딩 유전알고리즘), Diesel engine(디젤 엔진), PID controller(PID 제어기), Tuning(동조)

### 기호설명

$K_D$  : Derivative gain

$K_I$  : Integral gain

$K_P$  : Proportional gain

$K_e$  : Gain of diesel engine

$L$  : Time delay of diesel engine

$T_e$  : Time constant for diesel engine

### 1. 서 론

PID 제어기는 고전적인 제어기이기는 하나, 실용적인 면에서 많은 연구가 축적되어 산업현장에서 가장 많이 사용되고 있다. PID 제어기는 비례이득, 적분시간, 미분시간의 값에 따라 제어특성이 크게 달라지므로 이 세 파라미터를 적절히 조정할 필요가 있으며 이러한 일을 동조(Tuning)라고 한다. PID 제어기의 동조에는 지금까지 여러 방법들이 제안되어 왔으나, 대

부분은 경험적이고 실험적인 접근법이 보편적이다.

대표적인 방법으로는 Ziegler-Nichols (Z-N)의 페루프 동조법과 개루프 동조법, Cohen-Coon(C-C) 동조법, IMC 동조법등이 있다<sup>[1-3]</sup>.

최근에는 평가함수를 통해 주어진 조건에서 최적으로 탐색할 수 있는 유전알고리즘(Genetic Algorithm : GA)을 사용하여 PID 제어기 파라미터를 최적으로 동조하는 연구가 진행되고 있다.

따라서 본 연구에서도 GA의 한 종류인 RCGA (Real-coded genetic algorithm)를 이용하여 오프라인(Off-line)으로 선박 디젤 엔진의 회전수 설정치 변화에 따른 PID 제어기를 동조하기로 한다.

RCGA로 동조된 제어기의 성능을 검토하기 위해 시뮬레이션을 실시하고, 앞의 세 가지 동조법과 비교 검토한다. Z-N의 개루프 동조법 적용시 발생하는 제어 대상의 1차 시간지연 시스템(과감쇠 시스템)으로의 근사화 작업 메커니즘도 역시 RCGA를 사용 한다.

+ 소명옥(한국해양대학교 선박전자기계공학부), E-mail: smo@mail.hhu.ac.kr, Tel: 051)410-4248

++ 이윤형, 안종갑(한국해양대학교 대학원 메카트로닉스공학과)

+++ 진강규(한국해양대학교 IT 공학부)

++++ 조권희(한국해양대학교 기관시스템공학부)

## 2. 선박 디젤 엔진의 모델링

본 연구의 제어대상은 액추에이터 시스템을 포함한 디젤 엔진이며 여기서는 이를 모델링 한다.

### 2.1 연소계와 회전계

디젤 엔진은 크게 연소계와 회전계로 구분하여 모델링할 수 있다. 연소계는 1차 시간지연 시스템으로 간주하여 연료랙 위치  $z$ 에 대한 엔진의 구동토크  $q_e$ 로 표현하면 (1)과 같은 전달함수로 나타낼 수 있다<sup>[4]</sup>.

$$G_c(s) = \frac{K_c e^{-Ls}}{1 + T_c s} \quad (1)$$

여기서  $K_c$ 와  $T_c$ 는 각각 정상이득과 시정수이고  $L$ 은 연소계통에서의 시간지연이다. 시간지연은 다음과 같이 표현할 수 있다<sup>[5]</sup>.

$$L = \frac{15}{R} + \frac{60}{R \cdot n} \quad (2)$$

여기서  $R$ 과  $n$ 은 각각 엔진의 회전수와 실린더 수이다.

또한 회전계는 연소실에 연료랙의 위치에 상응하는 연료가 분사되면 폭발이 일어나고, 구동토크  $q_e$ 가 발생하며 토크가 부하에 걸려서 엔진이 회전하게 되므로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Omega_e(s) = \frac{K_r}{1 + T_r s} (Q_e(s) - Q_1(s)) \quad (3)$$

여기서  $K_r$ 은 회전계통의 이득으로서  $1/B_e$ 이고,  $T_r$ 은 회전계통의 시정수로서  $J_e/B_e$ 이다.  $B_e$ 는 엔진의 축계 마찰 계수이고,  $Q_1$ 은 부하토크이다.

(2)와 (3)을 부하토크를 무시하고 결합하여 정리하면 연소계통과 회전계통을 통합한 디젤 엔진은 최종적으로 (4)와 같이 표현된다.

$$\frac{Q_e(s)}{Z(s)} = \frac{K_e e^{-Ls}}{1 + T_e s} \quad (4)$$

여기서  $K_e = K_c K_r$ ,  $T_e = T_c + T_r$ 이다. 이때  $T_c$ 는 아주 작은 값이므로  $T_c T_r$ 항은 무시할 수 있다.

### 2.2 액추에이터 시스템

액추에이터 시스템은 전기자제어식 DC 모터, 볼-스크루(Ball-screw) 메커니즘, 그리고 자체 제어기로 구성되며, 다음과 같은 선형 모델로 표현될 수 있다.

$$G_a(s) = \frac{K_a}{1 + T_a s} \quad (5)$$

여기서,  $K_a$ 와  $T_a$ 는 각각 액추에이터 시스템의 이득과 시정수이다.

Fig. 1은 액추에이터 시스템을 포함한 전체 제어대상을 나타낸 것이며,  $u$ 는 제어입력이다.

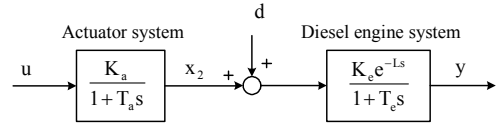


Fig. 1 Block diagram of a diesel engine system

### 2.3 제어대상의 상태공간 표현

제어대상을 상태공간으로 표현하기 위하여 상태변수  $x_1$ 과  $x_2$ 를 도입하면 다음 식을 얻는다.

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A}\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}u(t-L) \quad (6)$$

$$y(t) = \mathbf{C}\mathbf{x}(t)$$

여기서

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{T_e} & \frac{K_e}{T_e} \\ 0 & -\frac{1}{T_a} \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{K_a}{T_a} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{C} = [1 \quad 0] \text{이다.}$$

$y$ 는 엔진의 회전수를 의미한다.

### 3. RCGA 기반의 PID 제어기 동조법

본 연구에서 주기관의 회전수 설정치 변화에 최적의 추종 성능을 나타내는 PID 제어기의 동조에는 RCGA가 사용된다. Fig. 2는 RCGA와 제어대상을 기반으로 PID 제어기를 최적 동조하는 과정을 보여주고 있으며, 목적함수는 IAE를 사용하였다.

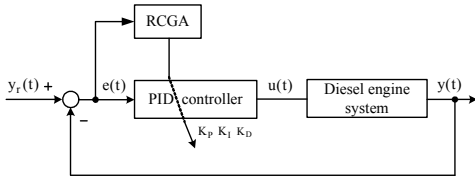


Fig. 2 Optimal tuning of the PID controller using a RCGA

$$J = \int_0^{t_f} |e(t)| dt \quad (7)$$

여기서  $t_f$ 는 이후의 적분 값을 무시해도 좋을 정도의 충분히 큰 시간이다.

### 4. 시뮬레이션 및 검토

본 연구에서 제안하는 동조법과 기존의 동조법을 비교하기 위해서 시뮬레이션을 실시한다.

#### 4.1 제어대상 시스템

본 연구에서 사용된 디젤 엔진의 사양은 Table 1과 같다<sup>[7]</sup>.

Table 1 Characteristics of a diesel engine

|           | Description        | Value | Unit  |
|-----------|--------------------|-------|-------|
| $N_{max}$ | Max. engine speed  | 65.00 | [rpm] |
| $N_{min}$ | Min. engine speed  | 19.00 | [rpm] |
| $z_{max}$ | Max. rack position | 80.00 | [%]   |
| $z_{min}$ | Min. rack position | 20.00 | [%]   |
| $T_e$     | Time constant      | 1.85  | [sec] |

디젤 엔진에 대한 파라미터  $L$  과  $K_e$ 는 각각 (2) 및 프로펠러 커브를 참고하여 Table 2와 같이 5단계의 회전수로 나누어서 설정했으며,  $L$ 은 시뮬레이션 시작 시점의 시간으로,  $K_e$ 는 프로펠러 커브의 수식을 고려하여 디젤 엔진의 회전수가 변화함에 따라 변화하도록 하였다.

Table 2 Parameters values of a diesel engine

| Speed             | 20      | 30      | 40      | 50      | 60      |
|-------------------|---------|---------|---------|---------|---------|
| $L$<br>[sec]      | 1.35    | 0.9     | 0.68    | 0.54    | 0.45    |
| $K_e$<br>[rpm/mm] | 20/20.6 | 30/28.3 | 40/39.2 | 50/53.2 | 60/70.2 |

#### 4.2 PID 제어기 동조

##### 4.2.1 기존의 동조법

기존의 방법으로 PID 제어기를 동조하려면 다루는 디젤 엔진의 응답은 다음과 같은 1차 시간지연 모델의 응답으로 근사화 되어야 한다.

$$G_p(s) = \frac{K e^{-Ls}}{1 + \tau s} \quad (8)$$

여기서  $K$ 는 정상이득이고,  $\tau$ 는 시정수,  $L$ 은 시간지연이다.

일반적으로 세 파라미터는 경험적인 방법으로 얻어지나 본 연구에서는 모델조정기법(Model adjustment technique)과 RCGA를 사용하여 추정하기로 한다. Fig. 3은 이를 보여주고 있다.

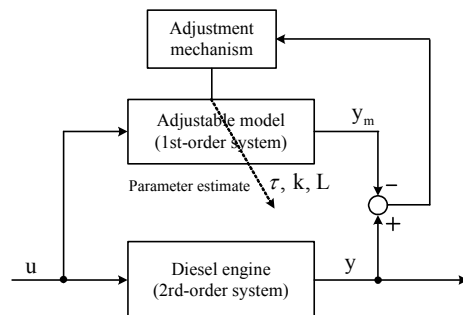


Fig. 3 Block diagram of an estimator based on RCGA

(9)는 개체의 적합도를 평가하기 위한 목적함수로서 (7)과 동일한 IAE를 사용하였으며, RCGA는 이 목적함수가 최소가 되도록 1차 시간지연 시스템 미지의 파라미터  $K$ ,  $\tau$ ,  $L$ 을 탐색하게 된다.

$$J = \int_0^{t_f} |y(t) - y_m(t)| dt \quad (9)$$

여기서  $y(t)$ 와  $y_m(t)$ 는 각각 제어대상과 조정모델의 출력이고,  $t_f$ 는 최종 적분시간으로서 충분히 큰 시간이다.

RCGA의 제어 변수로는 집단의 크기  $N=30$ , 재생산계수  $\eta=1.8$ , 교배 확률  $P_c=0.9$ , 돌연변이 확률  $P_m=0.05$ 이 사용되었다. 미지의 파라미터는 구간  $0.05 \leq K \leq K^{UL}$ ,  $0.05 \leq \tau \leq \tau^{UL}$ ,  $0.1 \leq L \leq L^{UL}$ 에서 탐색된다.

여기서  $K^{UL}$ ,  $\tau^{UL}$ ,  $L^{UL}$ 는 탐색되어야 할 파라미터의 상한 경계값을 의미한다.

본 연구에서 최종적으로 사용하는 추정된 파라미터 값은 독립된 씨드(Seed)로 프로그램을 5번 실행하고 평균하여 얻기로 한다.

Table 3은 얻어진 1차 시간지연 시스템의 파라미터를 나타낸다.

Table 3 Estimated parameters of the model

| parameters<br>speed | Plant |        |      |
|---------------------|-------|--------|------|
|                     | K     | $\tau$ | L    |
| 20→30[rpm]          | 1.057 | 2.165  | 1.29 |
| 30→40[rpm]          | 1.019 | 1.563  | 0.88 |
| 40→50[rpm]          | 0.939 | 1.318  | 0.64 |
| 50→60[rpm]          | 0.853 | 1.192  | 0.50 |

Table 4, 5 와 6은 각각 Z-N, C-C, IMC 동조법<sup>[1]-[3]</sup>을 적용하여 계산된 PID 제어기의 파라미터를 나타낸다.

Table 4 PID parameters tuned by the Z-N rule

| Parameters<br>speed | Controller |       |       |
|---------------------|------------|-------|-------|
|                     | $K_P$      | $K_I$ | $K_D$ |
| 20→30[rpm]          | 1.614      | 0.631 | 1.033 |
| 30→40[rpm]          | 2.089      | 1.306 | 0.835 |
| 40→50[rpm]          | 2.632      | 2.056 | 0.842 |
| 50→60[rpm]          | 3.293      | 3.289 | 0.823 |

Table 5 PID parameters tuned by the C-C rule

| Parameters<br>speed | $K_P$      | $K_I$ | $K_D$ |
|---------------------|------------|-------|-------|
|                     | 20→30[rpm] | 2.020 | 0.827 |
| 30→40[rpm]          | 2.566      | 1.587 | 0.677 |
| 40→50[rpm]          | 3.191      | 2.411 | 0.682 |
| 50→60[rpm]          | 3.947      | 3.745 | 0.666 |

Table 6 PID parameters tuned by the IMC rule

| Parameters<br>speed | $K_P$      | $K_I$ | $K_D$ |
|---------------------|------------|-------|-------|
|                     | 20→30[rpm] | 1.307 | 0.532 |
| 30→40[rpm]          | 1.487      | 0.817 | 0.464 |
| 40→50[rpm]          | 1.795      | 1.094 | 0.462 |
| 50→60[rpm]          | 2.078      | 1.453 | 0.428 |

#### 4.2.2 RCGA 기반의 동조법

PID 제어기의 동조에 사용된 RCGA의 제어 변수는 집단의 크기  $N=40$ , 재생산계수  $\eta=1.7$ , 교배확률  $P_c=0.9$ , 돌연변이 확률  $P_m=0.1$ 이며, PID 제어기 파라미터들은 각각 구간  $0 \leq K_P \leq K_P^{UL}$ ,  $0 \leq K_I \leq K_I^{UL}$ ,  $0 \leq K_D \leq K_D^{UL}$ 에서 탐색된다. 여기서  $K_P^{UL}$ ,  $K_I^{UL}$ ,  $K_D^{UL}$ 는 탐색될 PID 제어기 파라미터의 상한 경계값이다. Fig. 4-Fig. 7은 RCGA가 주기관의 각 회전수 설정치에 따라 PID 제어기 파라미터를 탐색해가는 과정이다. 시뮬레이션 결과 60 세대를 전후하여 최적의 파라미터를 찾고 있음을 알 수 있다. Table 7은 RCGA에 기초한 PID 제어기 파라미터를 나타낸다.

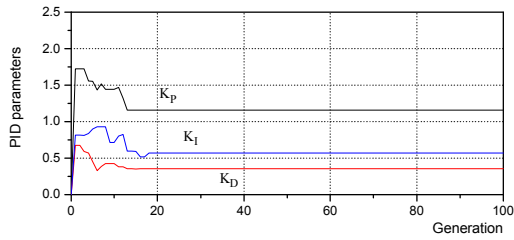


Fig. 4 Tuning process for first rpm change

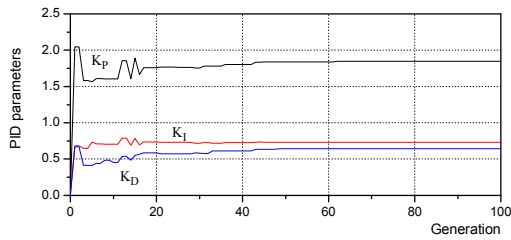


Fig. 5 Tuning process for second rpm change

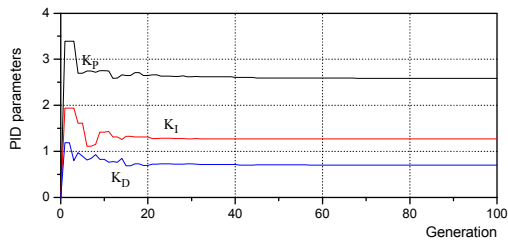


Fig. 6 Tuning process for third rpm change

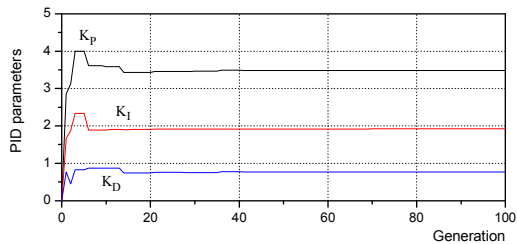


Fig. 7 Tuning process for fourth rpm change

Table 7 PID parameters tuned by a RCGA

| Parameters speed | $K_P$ | $K_I$ | $K_D$ |
|------------------|-------|-------|-------|
| 20→30[rpm]       | 1.256 | 0.359 | 0.654 |
| 30→40[rpm]       | 1.844 | 0.731 | 0.645 |
| 40→50[rpm]       | 2.584 | 1.265 | 0.698 |
| 50→60[rpm]       | 3.482 | 1.918 | 0.756 |

### 4.3 응답성능 비교

Fig. 8~Fig. 11은 RCGA 동조법의 PID 제어기와 기존의 동조법의 응답성능을 비교한 것이다. 시뮬레이션을 통해 알 수 있듯이 RCGA에 기초한 PID 제어기는 오버슈트가 거의 발생하지 않고, 정상상태 도달시간도 5초 전후로 다른 동조법의 제어기보다 훨씬 양호한 응답특성을 보이고 있다.

특히 Z-N 동조법과 C-C 동조법은 전반적으로 오버슈트가 크고, IMC 동조법은 회전수가 증가 할수록 상승시간이 길어지는 현상을 보이고 있다.

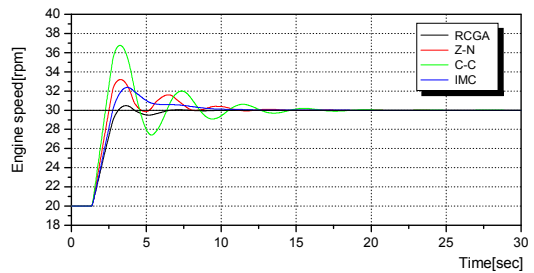


Fig. 8 Step responses PID controllers (20→30[rpm])

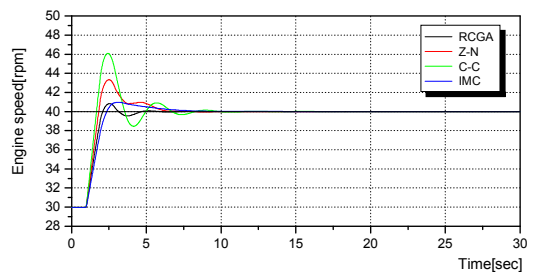


Fig. 9 Step responses PID controllers (30→40[rpm])

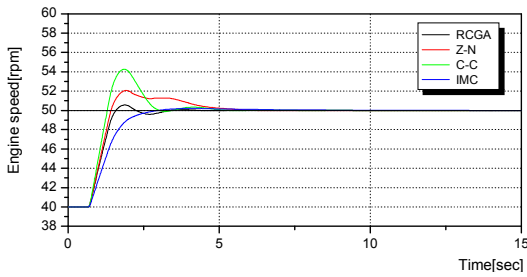


Fig. 10 Step responses PID controllers (40→50[rpm])

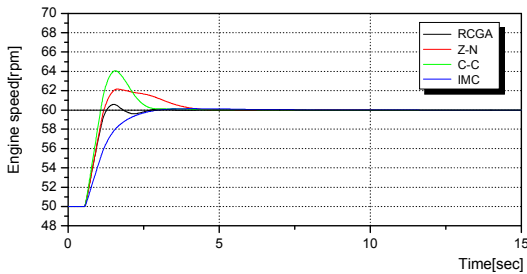


Fig. 11 Step responses PID controllers (50→60[rpm])

#### 4.4 외란 응답성능 비교

다음은 디젤 엔진이 60[rpm]으로 회전하고 있을 때 연료랙크 5[mm]에 해당하는 외란을 계단상으로 5초에서 15초간 가하여 보았다. Z-N 동조법과 C-C 동조법의 PID 제어기가 약간 빠른 응답특성을 보이나 모두 만족할만한 응답특성을 보이고 있다.

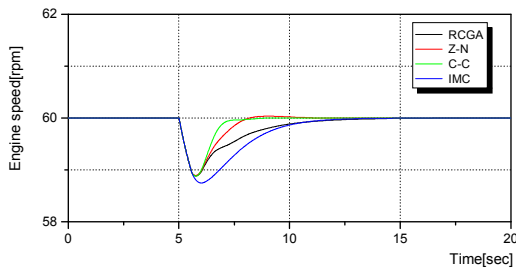


Fig. 12 Response of PID controllers to a step type disturbance

## 5. 결 론

본 연구에서는 선박 디젤 엔진의 수학적 모델링을 바탕으로 PID 제어기를 RCGA로 동조하는 문제를 다루었다. 비교 목적으로 기존의 PID 제어기 동조법인 Z-N의 개루프 동조법, C-C 동조법, IMC 동조법도 동시에 적용하였다.

시뮬레이션을 통해 기존의 동조법은 동조규칙에 사용되는 파라미터의 적절한 선정이 중요한 요소임을 확인할 수 있었다. RCGA에 기초한 PID 제어기는 경험적이고 실험적인 방법에 기반을 둔 기존의 동조법 보다 우수한 응답특성을 나타냄을 확인할 수 있었다.

## 참고문헌

- [1] J. G. Ziegler and N. B. Nichols, "Optimum setting for PID controllers", Trans. ASME, Vol. 64, 1942.
- [2] G. H. Cohen and G. A. Coon, "Theoretical considerations of retarded control", Trans. ASME, Vol. 75, 1953.
- [3] M. Morari and E. Zafiriou, Robust Process Control, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1989.
- [4] 강인철, "동적 이득설정 기법을 이용한 선박 주기관 디지털 거버너의 설계", 한국해양대학교대학원 기관시스템공학과 공학박사 학위논문, 2003.
- [5] 유영호, "舶用機關의 速度制御에 관한 研究", 한국해양대학교대학원 기관공학과 공학박사 학위논문, 1990.
- [6] 진강규, 유전알고리즘과 그 응용, 교우사, 2000
- [7] 北川正人, "舶用主機エンジンの回轉數制御システムの理論解析", ナブコ 技報 No. 61, pp. 3-8, 1986.