

공학석사 학위논문

2자유도 PID 제어기의 RCGA기반 동조에 관한 연구

A Study on the RCGA-Based Tuning of
the 2DOF PID Controller

지도교수 황 승 욱

2008년 2월

한국해양대학교 대학원

제어계측공학과 송 세 훈

목 차

제 1 장 서 론	1
1.1. 연구배경	1
1.2 연구목적 및 구성	1
제 2 장 2자유도 PID 제어기	4
2.1 기존의 PID 제어기	4
2.2 2자유도 PID 제어기	8
2.3 2자유도 PID 제어기의 변환	10
제 3 장 RCGA를 이용한 2자유도 PID 제어기의 동조	12
3.1 유전알고리즘	12
3.1.1 유전알고리즘의 소개	12
3.1.2 유전알고리즘의 구조	12
3.2 2자유도 PID 제어시스템의 무차원화	14
3.3 2자유도 PID 제어기의 동조과정	15
3.4 성능지수의 선택	16
3.5 2자유도 PID 제어기의 최적 파라미터 탐색	18
3.6 동조규칙의 유도	23

제 4 장 시뮬레이션과 실험 및 결과검토 26

4.1 시스템 I 26

 4.1.1 시스템의 근사화 26

 4.1.2 동조규칙에 따른 파라미터 27

 4.1.3 제어기에 따른 성능비교 28

4.2 시스템 II 30

 4.2.1 시스템의 근사화 30

 4.2.2 동조규칙에 따른 파라미터 31

 4.2.3 제어기에 따른 성능비교 31

4.3 선박용 동요안정식 야간감시장비의 페데스탈 33

 4.3.1 선박용 동요안정식 야간감시장비 33

 4.3.2 페데스탈의 모델링 34

 4.3.3 동조규칙에 따른 파라미터 36

 4.3.4 제어기에 따른 성능비교 37

제 5 장 결 론 39

참고문헌 40

A Study on the RCGA-Based Tuning of the 2DOF PID Controller

Se-Hoon Song

*Department of Control & Instrumentation Engineering,
Graduate School, Korea Maritime University*

Abstract

The conventional PID controller has been used at wide range since it is familiar and easy parameter tuning for field engineers. Although there are many tuning approaches for the conventional PID controller, the conventional PID controller has some limits. If the disturbance response is optimized, the set-point response is often found to be poor, and vice versa. For this reason, some of the classical researches on the optimal tuning of the PID controllers gave two tables : one for the 'disturbance optimal parameters' and the other for the 'set-point optimal parameters'.

The 2DOF PID controller can solve the problem of the conventional PID controller that the optimal tuning for the disturbance response and the one for the set-point response are not compatible in most cases of practical importance.

In the thesis, tuning rules of the 2DOF PID controller are proposed incorporating with RCGAs. A set of simulation and experimentation works are carried out on three high order processes with time delay and a stabilized pedestal with direct drive servo-motors to verify the effectiveness of the proposed rules.

제 1 장 서론

1.1. 연구배경

현대사회에서 고전적 PID 제어기는 매우 광범위하게 사용되고 있다. 현대적 제어이론의 급속한 발전이 있었지만 고전적 PID 제어기는 현장 기술자에게 매우 친숙하며 동시에 설정해야할 파라미터의 수가 적은 장점이 있기 때문이다.[1] 고전적 PID 제어기의 최적화에 관해서 많은 연구가 진행되어 왔지만,[2]–[4] 근본적으로 고전적 PID 제어기는 설정치추종 성능과 외란억제 성능을 동시에 만족하지 못하는 태생적인 한계를 지니고 있다.

본 논문에서는 이러한 한계를 극복하기 위해 2자유도(2DOF, Two-Degree-Of-Freedom) PID 제어기를 사용한다.[5] 2자유도 PID 제어기의 동조방법과 제어대상에 따른 파라미터의 동조방법에 관한 연구는 진행되었으나[6]–[8] 일반적인 동조규칙에 관해서는 연구가 부족하였다.

1.2 연구목적 및 구성

고전적 PID 제어기의 한계를 극복한 2자유도 PID 제어기는 1960년대 I.M. Horowitz가 5가지의 모델을 제시한 후[5] 설정해야할 파라미터의 수가 많다는 점과 실제 성능상의 유효성이 의문시되어 1980년대 전반까지 큰 관심을 갖지 못했으나, 최근에 플랜트에 대한 실효성이 인식되어 많은 연구가 진행되고 있다.[9] 2자유도 PID 제어기는 종래의 PID 제어기의 특성인 설정치추종 성능이 최적화 되도록 파라미터를 설정하면 외란억제 성능이 약해지고, 반대로 외란억제 성능이 최적화 되도록 파라미터를 설정하면 설정치추종시 진동이 발생하는 단점을 보완한 형태로 설정치추종 성능과 외란억제 성능을 동시에 만족시킬 수 있다.

2자유도 PID 제어기는 설정해야할 파라미터의 수가 $K_p, \tau_i, \tau_d, \alpha, \beta$ 5개로서 고전적 PID 제어기보다 파라미터의 수가 2개 더 많으나 5개의 파라미터 중 상호 의존적이지 않은 쌍이 존재하여 복잡도가 현격하게 증가하지는 않는다. 동조과정은 먼저 외란억제

성능과 연관이 있는 3개의 파라미터(K_p, τ_i, τ_d : 고전적 PID 제어기와 동일)를 최적화한 후, 설정치추종 성능과 연관이 있는 나머지 2개의 파라미터(α, β)를 최적화는 순서로 진행한다.

최적화 도구로서는 RCGA를 사용한다[10]. 유전알고리즘은 문제의 해결을 위해 자연 진화를 모방한 도구로서 집단의 해를 다루는데 유리하며, 목적함수 값만을 필요로 하여 연속성이나 미분가능성, 단봉성 등에 관계없이 다양한 분야에 적용되어 질 수 있다. 특히 실수코딩 유전알고리즘은 종래의 이진코딩 유전알고리즘과 달리 그 정밀도가 오직 알고리즘을 수행하는 컴퓨터의 정도에만 제약을 받을 정도로 높은 정밀도로 해에 접근할 수 있다.[11]–[13] 이러한 유전알고리즘의 장점을 이용하여 2자유도 PID 제어기의 최적의 동조규칙을 찾는다.

얻어진 2자유도 PID 제어기의 동조규칙의 성능을 확인하기 위하여 다양한 제어대상을 통한 시뮬레이션을 실행한다. 이와 함께 실제 플랜트에서의 유효성을 검증하기 위해 얻어진 동조규칙을 선박용 동요안정식 야간감시장비의 페테스탈 제어부에 적용한다. 선박용 동요안정식 야간감시장비는 선박의 항해 및 감시를 위한 선박기자재로서 대상을 지속적으로 모니터링하기 위해 빠른 시스템 응답성능과 더불어 해상의 파도, 강함바람 등의 외란에서도 짧은 시간 내에 정상상태로 돌아오는 외란억제 성능이 모두 중요시 되는 시스템이다.

선박용 동요안정식 야간감시장비의 페테스탈을 이루고 있는 2개의 AC 서보모터는 기본적으로 서보모터 드라이버 내부에 PI 제어를 내장하고 있어 외부의 제어가 필수 사항은 아니다. 하지만 모터 축에 부착된 부하의 관성모멘트가 커질 경우 작은 외란에도 자체 공진 등에 의해 진동의 가능성이 높기 때문에 안정된 외란억제 성능을 보장하기 위해 서보모터 드라이버 내부의 제어기 게인을 높이는데 한계가 있으며, 이로 인해 서보모터의 응답이 무척 느려지는 단점이 있다. 특히 본 장비에서 사용하는 AC 서보모터는 DD(Direct Drive)타입으로 토크 출력이 일반적인 AC 서보모터보다 수 배~수십 배 높은 장점을 지니고 있어 정밀도 향상을 위해 기계적인 기어 없이 부하를 직접 모터 축에 연결할 수 있다. 하지만 페테스탈 모터 부하축의 하우징의 무게(약 100kg)와 탑재된 각종 감시장비(1000mm Zoom Lens, Day/Night Camera, Laser Search Light 등)의 무게(약 20kg)로 내부의 제어루프만 사용할 경우 제어가 불가능할 정도는 아니나, 안정된 제어를 위해선 내부 PI 제어기의 루프 게인을 높이는데 한계가 있

다. 이를 극복하기 위해 내부 PI 제어기와 별도로 외부에 2자유도 PID 제어기를 위치시켜 AC 서보모터의 토크를 최대한으로 사용하면서 원활한 외란억제 성능과 신속한 설정치추종 성능을 동시에 구현하였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 제2장에서 기존의 PID제어기와 2자유도 PID 제어기를 비교한다. 제3장에서는 RCGA와 2자유도 PID 제어기의 동조과정에 대해 간략하게 설명하고 RCGA를 이용하여 2자유도 PID 제어기가 가지는 최적의 동조규칙을 찾는다. 제4장에서는 다양한 제어시스템을 통한 시뮬레이션과 선박용 동요안정식 야간감시장비의 실험을 통해 제안된 동조규칙의 타당성을 검증하고 제5장에서 결론을 맺는다.

제 2 장 2자유도 PID 제어기

2.1 기존의 PID 제어기

그림 2.1은 기존의 PID 제어기의 구조를 나타낸 것이다.

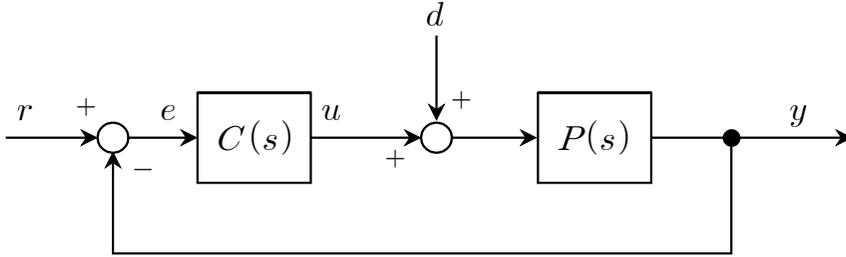


그림 2.1 기존의 PID 제어시스템의 블록선도

Fig. 2.1 Block diagram of a conventional PID control system

r 은 설정치, y 는 출력, d 는 외란, $C(s)$ 는 기존의 PID 제어기, $P(s)$ 는 플랜트에 해당하며, $C(s)$ 의 전달함수는 다음과 같이 주어진다.

$$C(s) = K_p \left\{ 1 + \frac{1}{\tau_i s} + \tau_d s \right\} \quad (2.1)$$

여기서 K_p 는 비례이득, τ_i 는 적분시간, τ_d 는 미분시간을 의미한다. 비례동작은 기본 동작으로서 도달시간을 줄여주지만 정상오차를 제거하는 기능이 없으며, 적분동작은 정상오차를 제거해주나 계수를 잘못 조정하면 과도응답이 나빠진다. 이 때 미분동작을 잘 활용함으로써 오버슈트를 줄이고 과도응답을 개선할 수 있다.

r 에 대한 출력 y 의 전달함수 $G_{yr1}(s)$ 와 외란 d 에 대한 출력 y 의 전달함수 $G_{yd1}(s)$ 는 다음과 같이 주어진다. 여기서 아래첨자 '1'은 'One-Degree-Of-Freedom'의 의미에서 기존의 PID 제어기를 지칭한다.

$$G_{yr1}(s) = \frac{P(s)C(s)}{1 + P(s)C(s)} \quad (2.2)$$

$$G_{yd1}(s) = \frac{P(s)}{1 + P(s)C(s)} \quad (2.3)$$

사용자는 만족할 만한 출력 y 를 얻기 위해서 설정치 r 과 관계가 있는 $G_{yr1}(s)$ 그리고 외란 d 와 관계가 있는 $G_{yd1}(s)$ 2개의 전달함수를 각각 최적화 하여야 한다. 하지만 2개의 전달함수는 서로 상관관계에 있으므로 각각의 전달함수를 독립적으로 최적화 하는 것은 불가능하며, 단지 $C(s)$ 의 파라미터만이 사용자에게 의한 동조가 가능하다. 2개의 전달함수에서 $C(s)$ 의 치환을 통해 그 상관관계를 살펴보면 그 한계가 명확해진다.

$$G_{yr1}(s)P(s) + G_{yd1}(s) = P(s) \quad (2.4)$$

식 (2.4)와 같이 플랜트의 전달함수인 $P(s)$ 가 주어질 때, $G_{yr1}(s)$ 와 $G_{yd1}(s)$ 의 관계는 서로 종속관계에 있으므로 원하는 설정치에 빠르게 추종하도록 $G_{yr1}(s)$ 를 최적화 하면 $G_{yd1}(s)$ 역시 불가분하게 정해지므로 외란억제 성능이 떨어지고 반대로 외란억제 성능이 우수하도록 $G_{yd1}(s)$ 를 최적화 하면 $G_{yr1}(s)$ 가 임의의 형태로 고정되어 설정치 추종 성능이 좋지 않다. 이러한 이유로 기존의 PID 제어가 두 가지 성능을 동시에 개선할 목적으로 사용될 경우에는 설정치추종 성능을 중요시하는 파라미터와 외란억제 성능을 중요시하는 파라미터 목록을 동시에 가지게 된다.

이러한 기존의 PID 제어기의 한계를 시뮬레이션을 통해 확인하기 위하여 다음과 같은 제어 시스템을 가정하고 RCGA를 통한 제어기 $C(s)$ 의 최적화를 통해 설정치추종 성능 및 외란억제 성능을 살펴본다. (RCGA에 관해서는 제3장에서 자세하게 다룬다.)

대부분의 고차 시스템은 1차 시스템과 시간지연요소의 결합으로 근사화 할 수 있다. 이 때문에 다음과 같은 시간지연요소를 가지는 1차 시스템의 시뮬레이션을 통해 다양한 시스템 시뮬레이션을 간단히 확인 할 수 있다. 시뮬레이션을 위한 임의의 플랜트 $P(s)$ 의 전달함수는 식 (2.5)이며, 기존의 PID 제어기 $C(s)$ 의 전달함수는 식 (2.1)이다.

$$P(s) = \frac{1}{s+1}e^{-0.3s} \quad (2.5)$$

RCGA를 이용하여 주어진 플랜트 $P(s)$ 를 위한 최적화된 $C(s)$ 의 파라미터는 표 2.1과 같으며, 각각의 파라미터에 의한 설정치응답과 외란응답을 그림 2.3과 그림 2.4에 나타내었다. 단 단위계단입력 인가 시, 외란은 '0'으로 간주하였으며 마찬가지로 단위계단외란 인가 시, 입력은 '0'으로 간주하였다. 시뮬레이션을 위한 MATLAB Simulink의 블록선도는 그림 2.2와 같다.

표 2.1 1차 시간지연 시스템을 위한 최적화 파라미터

Table 2.1 Optimized parameters for 1st-order system with time delay

	Set-point Optimal	Disturbance Optimal
K_p	2.150964	3.962996
τ_i	1.086310	0.532224
τ_d	0.073522	0.116848

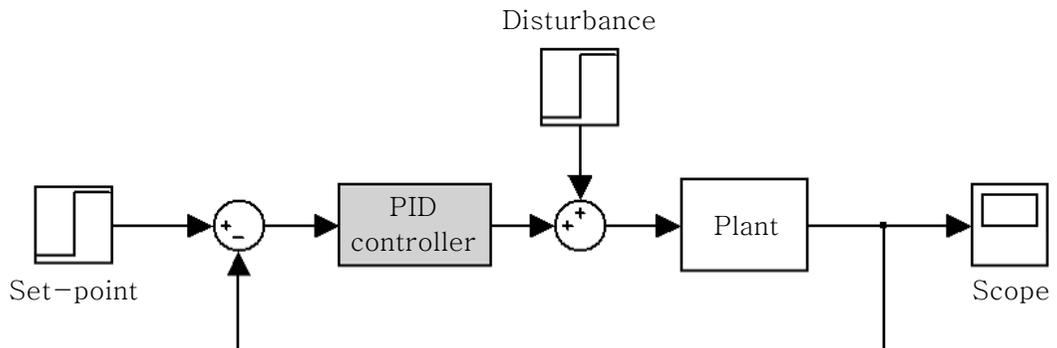


그림 2.2 PID 제어기의 Simulink 블록선도

Fig 2.2 Simulink-block diagram of the PID controller

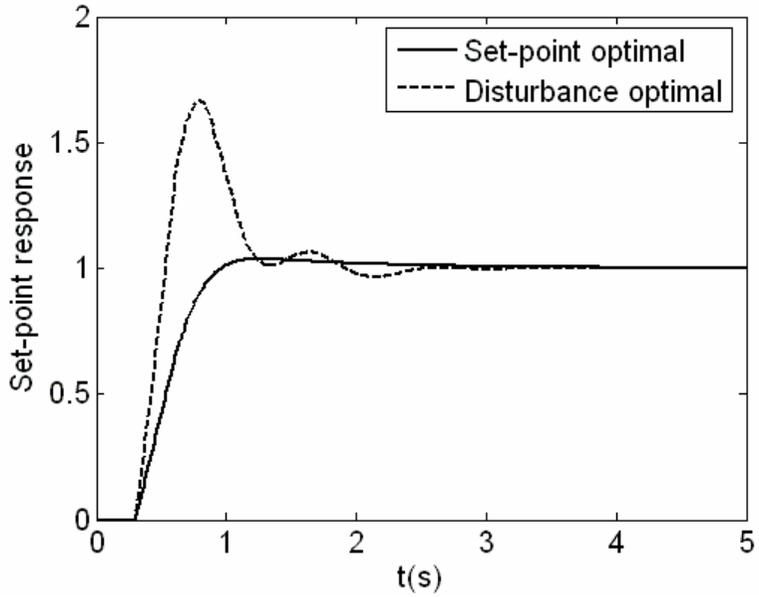


그림 2.3 설정치추종 응답
 Fig 2.3 Set-point tracking response

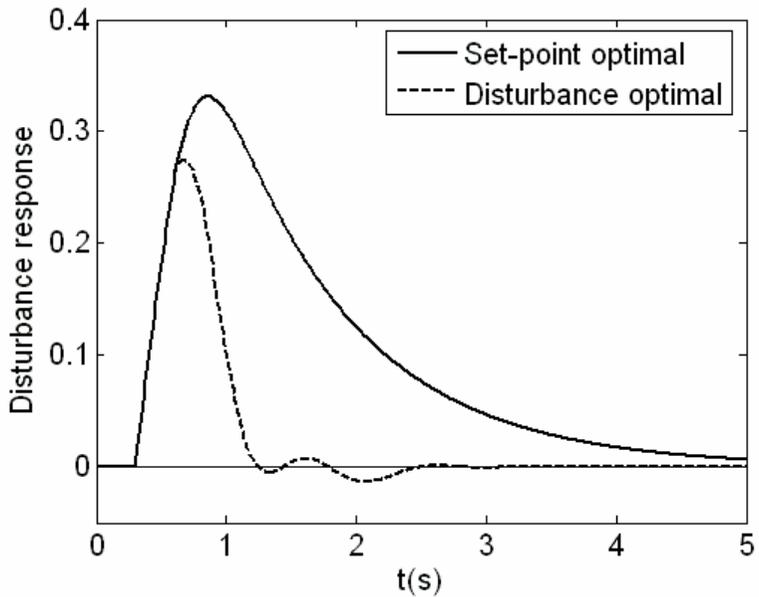


그림 2.4 외란억제 응답
 Fig 2.4 Disturbance rejection response

실선은 설정치추종 성능이 우수하도록 파라미터를 선정한 결과이며, 점선은 외란억제 성능이 우수하도록 파라미터를 선정한 결과이다. 그림에서 보는 것과 같이 단위계단입력에 대해 설정치추종 성능이 우수하도록 파라미터를 선정한 경우 단위계단입력에 추종하는 속도는 무척 빠르나, 단위계단외란이 가해졌을 때 정상상태로 복귀하는데 매우 오랜 시간이 걸린다. 반대로 외란억제 성능이 우수하도록 파라미터를 선정한 경우 단위계단외란이 가해졌을 때는 신속하게 정상상태로 돌아오지만 단위계단입력에 추종하는 속도는 상대적으로 느리고, 동시에 상당한 오버슈트가 발생한다. 여기서 기존의 PID 제어기의 한계가 드러난다.

2.2 2자유도 PID 제어기

2자유도 PID 제어기는 기존의 PID 제어기 형태의 주제어기인 $C_1(s)$ 와 이와는 독립적으로 피드포워드 계인의 역할을 담당하는 보조제어기 $C_2(s)$ 로 이루어진다. 통상 $C_1(s)$ 는 외란을 억제하며, $C_2(s)$ 는 설정치에 빠르게 추종하도록 돕는다.

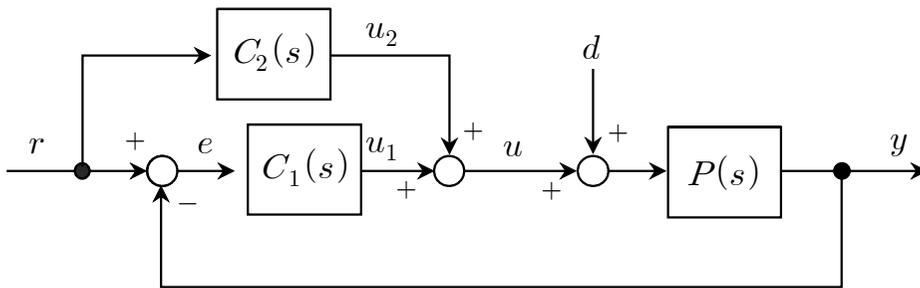


그림 2.5 2자유도 PID 제어시스템의 블록선도

Fig 2.5 Block diagram of a 2DOF PID control system

r 은 설정치, y 는 출력, d 는 외란이고 2자유도 PID 제어기의 전달함수 $C_1(s)$, $C_2(s)$ 는 각각 다음과 같다.

$$C_1(s) = K_p \left\{ 1 + \frac{1}{\tau_i s} + \tau_d s \right\} \quad (2.6)$$

$$C_2(s) = -K_p \{ \alpha + \beta \tau_d s \} \quad (2.7)$$

식 (2.6)의 주제어기에서 K_p , τ_i , τ_d 는 각각 비례이득, 적분시간, 미분시간을 의미하고 식 (2.7)의 보조제어기에서 α , β 는 0과 1사이의 값으로 주제어기의 비례동작과 미분동작을 적절히 제어하는 파라미터이다.

식 (2.6)에는 $K_p\tau_d s$ 형태의 미분기가 있어 설정치나 외란이 급격하게 변하거나, 센서로부터 내부 제어회로로 잡음이 입력될 경우에는 플랜트에 인가되는 u 를 지나치게 크게 할 가능성이 있으므로, 실제 제어 환경에서는 필터링 효과를 가미한 식 (2.8)의 형태가 자주 사용된다.

$$C_1(s) = K_p \left\{ 1 + \frac{1}{\tau_i s} + \tau_d L(s) \right\} \quad (2.8a)$$

$$\text{단, } L(s) = \frac{s}{1 + \frac{\tau_d}{N}s} \quad (2.8b)$$

여기서 $\frac{\tau_d}{N}$ 는 미분동작의 필터링 효과를 주는 요소이고, N 은 최대미분이득(Maximum derivative gain)으로 고주파 성분에 대하여 미분이득이 N 으로 제한되며, N 이 τ_d 에 비해 상대적으로 클 경우에는 기존의 PID 제어기 전달함수와 같은 구조를 갖게 된다.

2자유도 PID 제어기에서 r 에 대한 출력 y 의 전달함수 $G_{yr2}(s)$ 와 외란 d 에 대한 출력 y 의 전달함수 $G_{yd2}(s)$ 는 다음과 같이 주어진다. 아래첨자 '2'는 2자유도 PID 제어기를 의미한다.

$$G_{yr2}(s) = \frac{P(s)C_1(s) + C_2(s)}{1 + P(s)C_1(s)} \quad (2.9)$$

$$G_{yd2}(s) = \frac{P(s)}{1 + P(s)C_1(s)} \quad (2.10)$$

2자유도 PID 제어기는 $C_1(s)$, $C_2(s)$ 두 개의 제어기를 독립적으로 동조가 가능하므로 이를 통해 설정치-응답의 전달함수인 $G_{yr2}(s)$ 와 외란-응답의 전달함수인 $G_{yd2}(s)$ 의 독립적인 최적화가 가능하다. 이를 통해 기존의 PID 제어기가 가지는 한계를 극복

하여 설정치추종 성능과 외란억제 성능을 동시에 만족시킬 수 있다.

그림 2.6은 2자유도 PID 제어기의 효과를 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 기존의 PID 제어기를 통해 발휘할 수 있는 최적의 외란억제 성능을 유지하면서 동시에 설정치추종 성능을 향상시킬 수 있다.

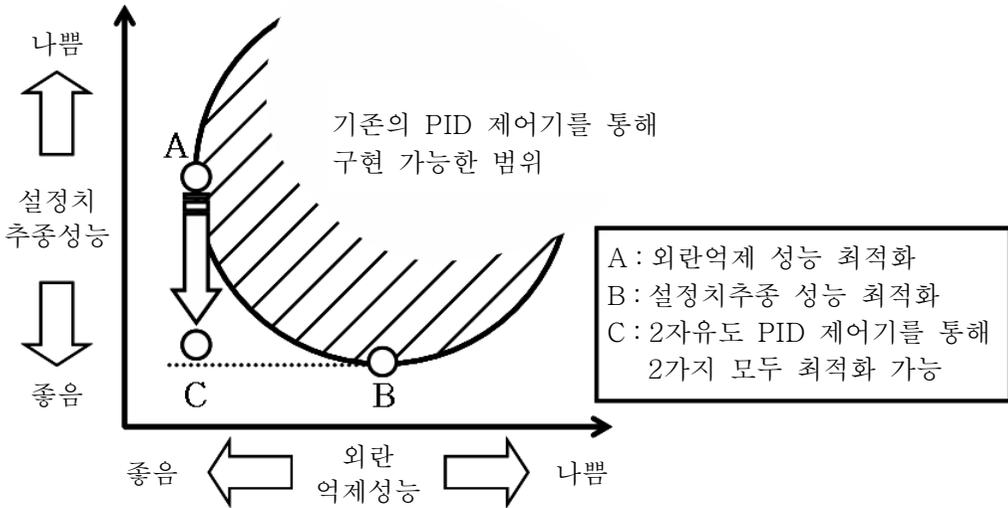


그림 2.6 2자유도 구조의 효과의 도시도

Fig 2.6 Conceptual illustration of the effect of the 2DOF structure

2.3 2자유도 PID 제어기의 변환

2자유도 PID의 기본적인 구조인 그림 2.5는 미분기를 2개 포함하고 있어 시뮬레이션 시에 오차를 유발하며 실제 실험에서도 고주파 노이즈 및 설정치 및 외란의 급격한 변화로 인해 응답이 과도하게 진동할 가능성이 있으므로 하나의 미분기로 표현하는 것이 바람직하다.

그림 2.5와 같이 플랜트에 가해지는 u 는 u_1 과 u_2 의 합으로 표현될 수 있으며, $C_1(s)$, $C_2(s)$ 의 비례이득 부분, 미분기 등을 단일 블록으로 구성할 수 있다. (식 (2.11)~(2.17))

$$U(s) = U_1(s) + U_2(s) \quad (2.11)$$

$$U(s) = C_1(s)\{R(s) - Y(s)\} + C_2(s)R(s) \quad (2.12)$$

$$U(s) = \{C_1(s) + C_2(s)\}R(s) - C_1(s)Y(s) \quad (2.13)$$

$$U(s) = K_p \left\{ 1 + \frac{1}{\tau_i s} + \tau_d s - \alpha - \beta \tau_d s \right\} R(s) - K_p \left\{ 1 + \frac{1}{\tau_i s} + \tau_d s \right\} Y(s) \quad (2.14)$$

$$\frac{U(s)}{K_p} = \left\{ (1 - \alpha) + \frac{1}{\tau_i s} + (1 - \beta)\tau_d s \right\} R(s) - \left\{ 1 + \frac{1}{\tau_i s} + \tau_d s \right\} Y(s) \quad (2.15)$$

$$\frac{U(s)}{K_p} = \{(1 - \alpha)R(s) - Y(s)\} + \frac{1}{\tau_i s} \{R(s) - Y(s)\} + \tau_d s \{(1 - \beta)R(s) - Y(s)\} \quad (2.16)$$

$$U(s) = K_p \left[\{(1 - \alpha)R(s) - Y(s)\} + \frac{1}{\tau_i s} \{R(s) - Y(s)\} + \tau_d s \{(1 - \beta)R(s) - Y(s)\} \right] \quad (2.17)$$

도출된 식 (2.17)로부터 등가 블록선도로 나타내면 그림 2.6과 같다.

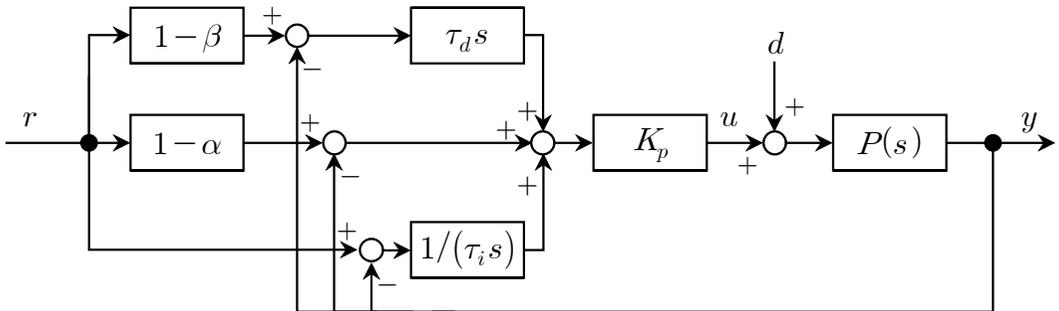


그림 2.7 2자유도 PID 제어시스템의 등가 블록선도

Fig 2.7 Equivalent block diagram of a 2DOF PID control system

실제 2자유도 PID를 통한 시스템 입력 u 를 계산할 때에는 그림 2.7의 블록선도를 이용하였다.

제 3 장 RCGA를 이용한 2자유도 PID 제어기의 동조

3.1 유전알고리즘

RCGA를 이용하여 2자유도 PID 제어기를 동조하기에 앞서 최적화 기법으로서의 유전알고리즘과 유전알고리즘의 한 형태인 실수코딩 유전알고리즘에 대해 간략하게 설명한다.

3.1.1 유전알고리즘

유전알고리즘은 자연 진화과정 그 자체가 하나의 탐색 메커니즘이고 여기에 살고 있는 생물들은 계속적으로 변하는 환경에 효율적으로 적응해 간다는 사실에 착안하여 이를 이진화 원리로 모사하려는 노력에 의해 탄생되었다. 유전자로 표현된 염색체 집단은 재생산과 교배, 돌연변이 등의 연산자를 통해 세대가 거듭할수록 보다 해에 가까운 집단으로 진화해 간다. 이를 위해 해에 가까운 염색체를 판단하기 위한 적합도 평가를 계속적으로 실시한다.

이러한 유전알고리즘은 문제의 해결을 위해 목적함수 값을 필요로 하며 연속성이나 미분가능성, 단봉성 등에 관계없이 다양한 분야에 적용되어 질 수 있다. 특히 실수코딩 유전알고리즘은 기존 이진코딩 유전알고리즘과 달리 그 정밀도가 오직 알고리즘을 수행하는 컴퓨터의 정도에만 제약을 받을 정도로 높은 정밀도로 해에 접근할 수 있다.

3.1.2 유전알고리즘의 구조

유전알고리즘은 크게 재생산, 교배, 돌연변이 연산자를 이용하여 전개된다. 각각의 연산자는 자연계의 유전을 모방하였으며, 적합도 평가에 의해 보다 나은 해에 근접해 간다. 유전알고리즘의 구조는 다음 그림과 같다.

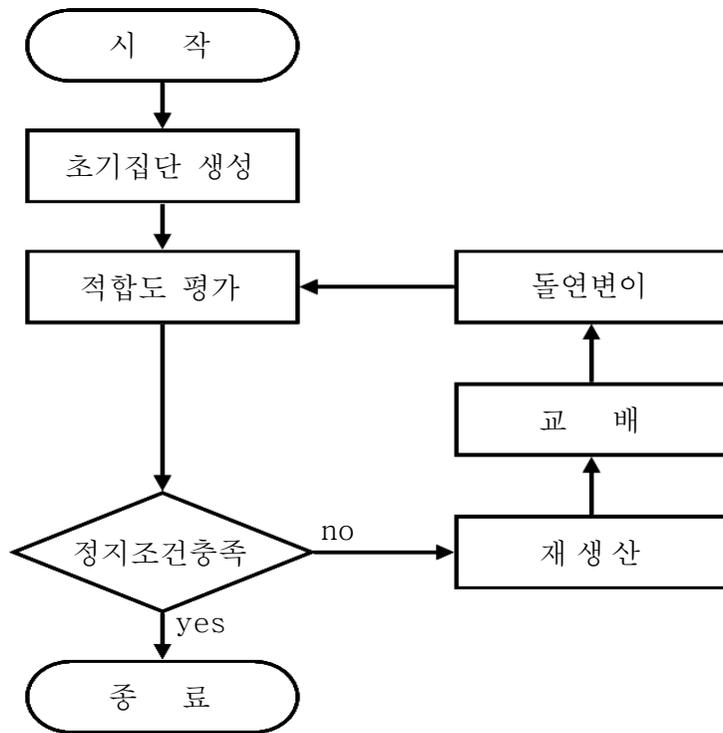


그림 3.1 유전알고리즘의 구조

Fig 3.1 Structure of a genetic algorithm

유전알고리즘의 대표적인 특징은 다음과 같다.

- 1) 문제의 파라미터를 직접 이용하기 보다는 이를 적절히 기호 표현하여 이용한다.
- 2) 하나의 해를 다루기보다는 집단을 취급하다.
- 3) 이득함수 또는 목적함수 값만을 필요로 하고, 연속성, 미분가능성, 단봉성 등과 같은 다른 보조정보를 요구하지 않는다.
- 4) 유전 연산자들을 사용하다.
- 5) 얻어진 결과는 결정적이기 보다는 확률적이다.

3.2 2자유도 PID 제어시스템의 무차원화

고차시스템을 포함하여, 현장에서 사용되고 있는 많은 시스템들은 식 (3.1)과 같이 근사화될 수 있으므로 본 논문에서도 식 (3.1)의 제어대상을 고려한다.

$$P(s) = \frac{K}{1 + \tau s} e^{-Ls} \quad (3.1)$$

여기서 K 는 제어대상의 이득, τ 는 시정수, L 은 시간지연을 의미한다. 동조규칙을 얻기에 앞서 3 파라미터로 표시되는 제어대상을 하나의 파라미터 L/τ 로 간단히 표기하도록 $t' = \frac{t}{\tau}$ (즉, $s' = \tau s$) 로 두고 무차원화 하면 제어대상과 제어기는 다음과 같다.

1) 제어대상

$$P(s') = \frac{1}{1 + s'} e^{-\frac{L}{\tau} s'} \quad (3.2)$$

2) 제어기

$$C_1(s') = KK_p \left\{ 1 + \frac{1}{\frac{\tau_i}{\tau} s'} + \frac{\tau_d}{\tau} L(s') \right\} \quad (3.3a)$$

$$\text{단, } L(s') = \frac{s'}{1 + \frac{\tau_d}{\tau N} s'} \quad (3.3b)$$

$$C_2(s') = -K_p \left\{ \alpha + \beta \frac{\tau_d}{\tau} L(s') \right\} \quad (3.4)$$

3.3 2자유도 PID 제어기의 동조과정

앞에서 알 수 있듯이 2자유도 PID 제어기는 $\{K_p, \tau_i, \tau_d, \alpha, \beta\}$ 다섯 개의 파라미터를 가지므로 적절한 성능을 갖도록 하기 위해서 동조가 필요하며 동조과정은 다음과 같다.

단계1 : 미분동작부의 필터링 효과 N 을 경험적으로 결정한다.

단계2 : 최적화를 위해 성능지수를 선택한다.

단계3 : 설정치를 '0'으로 유지한 상태에서 RCGA를 이용하여 외란억제 성능이 우수하도록 $C_1(s)$ 의 $\{K_p, \tau_i, \tau_d\}$ 를 최적화한다.

단계4 : 외란을 '0'으로 유지하고 최적화된 $C_1(s)$ 를 고정한 상태에서 RCGA를 이용하여 설정치추종 성능이 우수하도록 $C_2(s)$ 의 $\{\alpha, \beta\}$ 를 최적화한다.

미분동작부의 필터링효과 N 은 제어환경에 따라 경험적으로 결정될 수 있으며, 본 논문에서는 N 을 '10'으로 선정하였다.

3.4 성능지수의 선택

최적의 파라미터 조합을 찾기 위해 제어기의 성능을 정량적으로 나타낼 수 있는 지표가 필요하다. 아래의 4가지 함수는 대표적인 성능지수의 예이다.

$$ISE = \int_0^T e^2(t)dt, \quad (\text{Integral of the Square of the Error})$$

$$IAE = \int_0^T |e(t)|dt, \quad (\text{Integral of the Absolute magnitude of the Error})$$

$$ITSE = \int_0^T t e^2(t)dt, \quad (\text{Integral of Time multiplied by the Squared Error})$$

$$ITAE = \int_0^T t |e(t)|dt, \quad (\text{Integral of Time multiplied by Absolute of the Error})$$

ISE의 경우 오차의 제곱을 적분한 형태로서, 큰 오차에는 큰 벌점을, 작은 오차에는 작은 벌점을 부과하여 가능한 변동폭이 적은 목록을 도출해내는 장점이 있으나, 최솟값 부근의 감도가 낮아 제어기의 파라미터를 얻는 데는 부족함이 있다. IAE의 경우 오차의 절댓값을 적분한 형태로서 오차에 비례하는 벌점을 부과한다. 이 때문에 오차값이 작은 최적의 파라미터 부근에서도 충분한 감도를 지닌다. ITSE, ITAE는 각각 ISE, IAE에 시간을 곱한 형태로서 시간에 비례한 벌점을 추가적으로 곱해줌으로서 빠르게 정상상태에 수렴하는 파라미터 목록을 얻을 수 있다.

이러한 성능지수의 감도를 확인하기 위해 임의의 플랜트를 가정하고 τ_i , τ_d 를 고정된 상태에서 K_p 를 점차적으로 변화시켜 성능지수에 따른 결과값을 그래프로 도시하였다. 그림 3.2에서 보는바와 같이 ITAE의 경우 다른 성능지수보다 최적의 K_p (점상으로 표현) 부근에서 충분한 감도를 보여준다. 특히, K_p 의 변화에 따른 성능지수 값을 미분하여 그린 그림 3.3에서 보는 바와 같이 ITAE의 경우 여타 성능지수보다 최적의 K_p (x 절편을 지나는 지점)에 가장 빠른 속도로 접근 후, 가장 빠른 속도로 이탈한다. 이러한 근거를 바탕으로 2자유도 PID 제어기의 동조규칙 유도를 위해 ITAE를 사용하도록 한다.

$$\frac{1}{1+s} e^{-0.3s} \quad (\tau_i = 0.53, \tau_d = 0.12 \text{로 고정}) \quad (3.5)$$

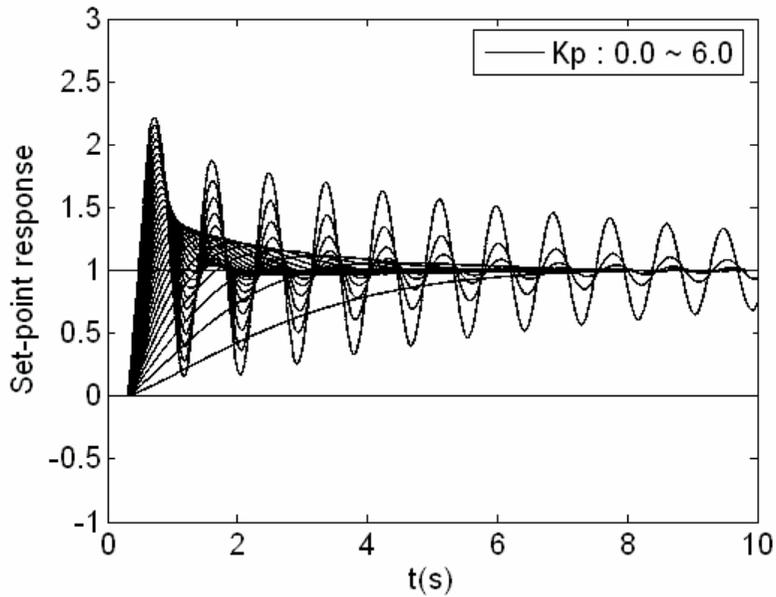


그림 3.2 K_p 변화에 따른 설정치 응답
 Fig 3.2 Set-point responses to K_p changes

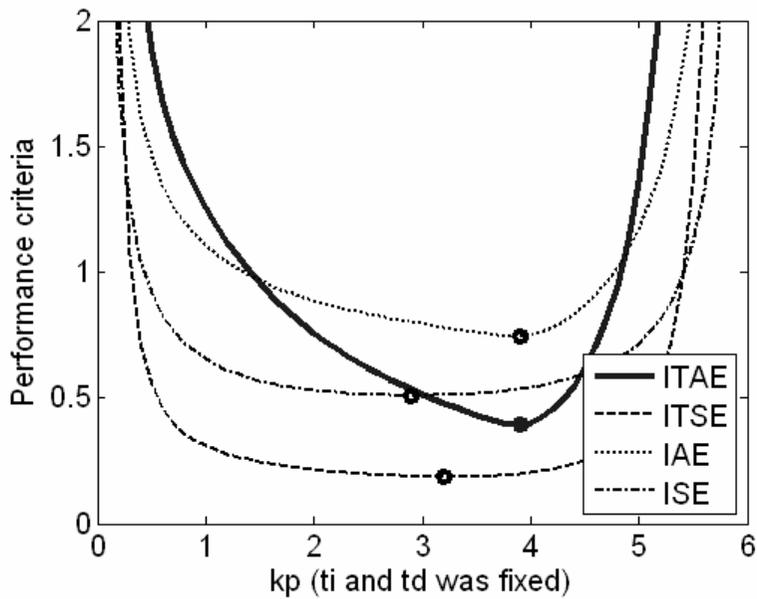


그림 3.3 K_p 변화에 따른 성능지수
 Fig 3.3 Performance criteria to K_p changes

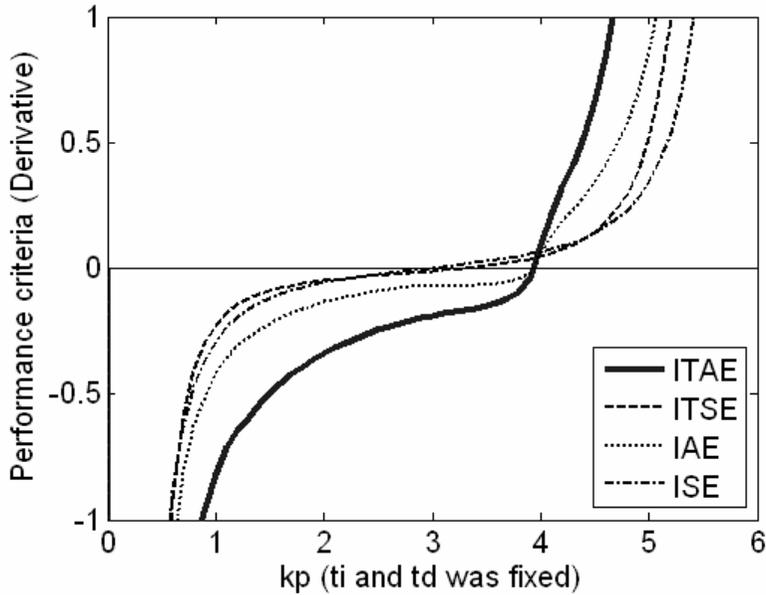


그림 3.4 K_p 변화에 따른 성능지수의 도함수

Fig 3.4 Derivative of performance criteria to K_p changes

3.5 2자유도 PID 제어기의 최적 파라미터 탐색

앞서 말한바와 같이 $C_1(s)$ 의 최적화를 위해 설정치는 '0'으로 고정한 상태에서 단위 계단외란을 인가하여 제어대상의 매개변수 L/τ 을 변경해 가면서 최적의 파라미터 집합 $\{KK_p, \tau_i/\tau, \tau_d/\tau\}$ 을 찾았고, 유사한 방법으로 설정치추종에 대한 최적의 파라미터 $\{\alpha, \beta\}$ 를 찾는다.

그림 3.5는 RCGA와 제어대상의 모델을 기반으로 $C_1(s)$ 의 파라미터를 최적 동조하는 과정을 보여주고 있다. 앞서 주지하다시피 목적함수는 식 (3.6)의 ITAE를 사용하였다. 여기서 $\phi = \{KK_p, \tau_i/\tau, \tau_d/\tau\}$ 이고 t_f 는 최종적분시간으로서 t_f 이후의 적분 값을 무시해도 좋을 정도의 충분히 큰 시간이다.

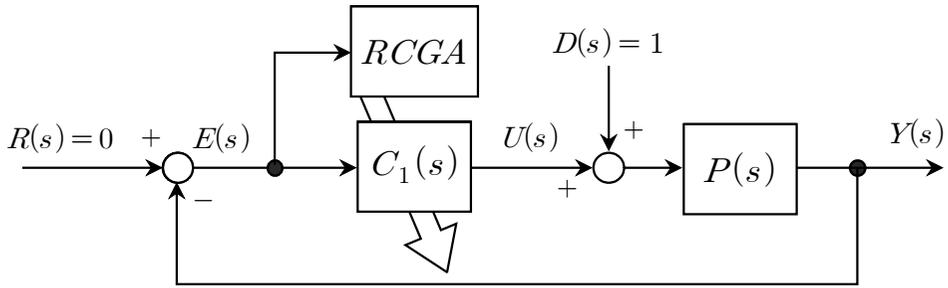


그림 3.5 RCGA를 이용한 $C_1(s)$ 의 최적 동조
 Fig 3.5 Optimal tuning of $C_1(s)$ using a RCGA

$$J_1(\phi) = \int_0^{t_f} t|e(t)|dt \quad (3.6)$$

다음 그림 3.6, 3.7, 3.8은 L/τ 를 변경해 가면서 얻은 최적의 $\{KK_p, \tau_i/\tau, \tau_d/\tau\}$ 값이다. ‘×’로 표기된 값이 RCGA를 이용해 얻는 비연속적인 최적의 계수집단이며, 실선은 동조규칙에 의해 추정된 연속된 값이다.

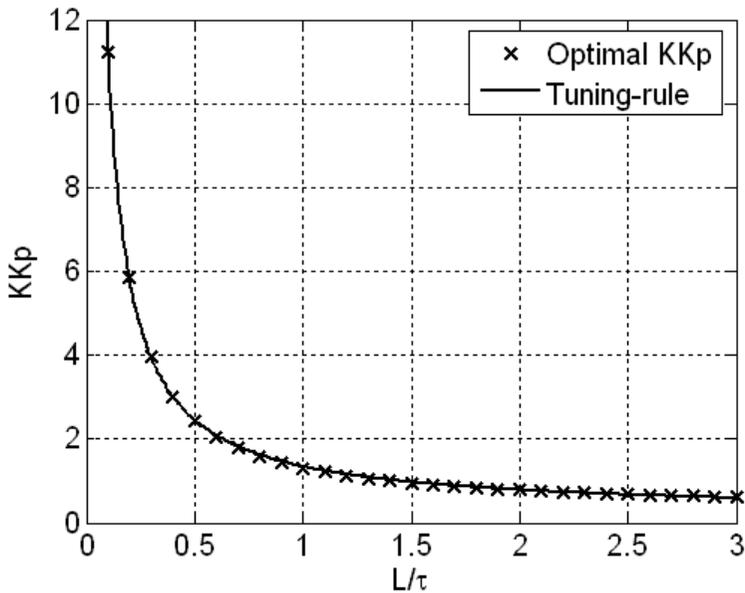


그림 3.6 2DOF PID 제어기를 위한 최적의 KK_p
 Fig 3.6 Optimal KK_p for the 2DOF PID controller

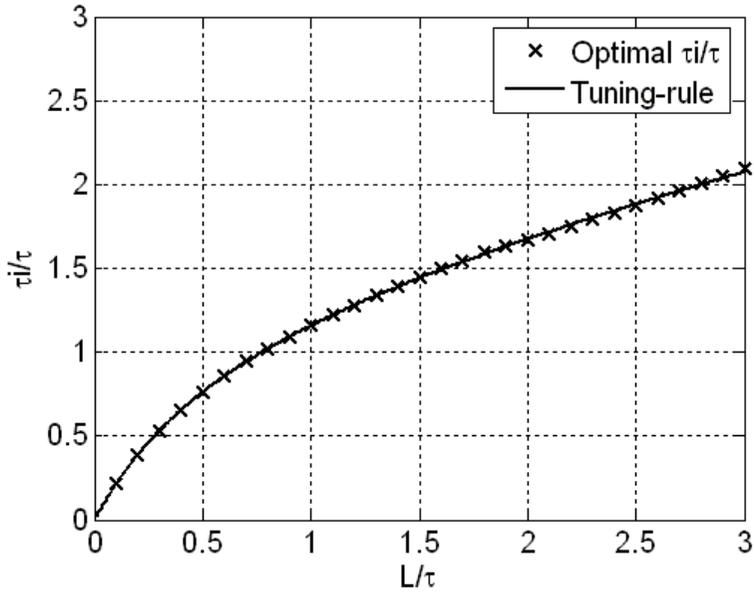


그림 3.7 2자유도 PID 제어를 위한 최적의 τ_i/τ
 Fig 3.7 Optimal τ_i/τ for the 2DOF PID controller

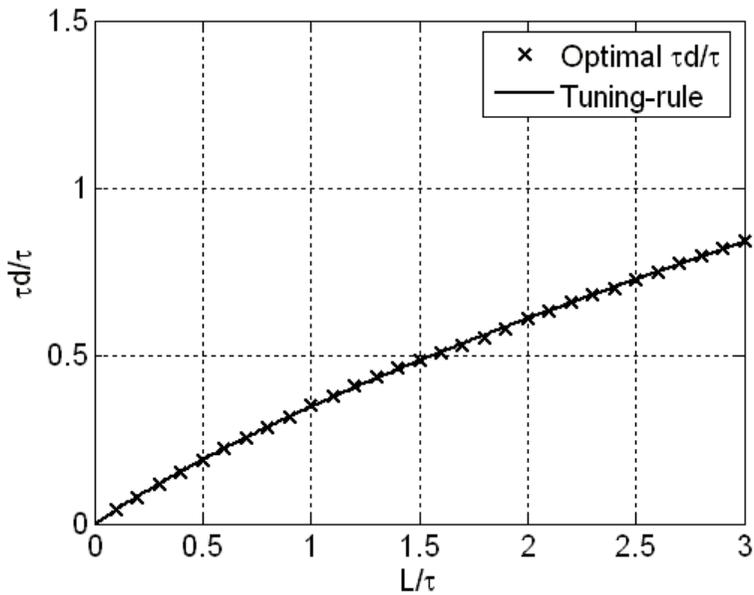


그림 3.8 2자유도 PID 제어를 위한 최적의 τ_d/τ
 Fig 3.8 Optimal τ_d/τ for the 2DOF PID controller

그림 3.9는 RCGA와 제어대상의 모델을 기반으로 $C_2(s)$ 의 파라미터 $\{\alpha, \beta\}$ 를 최적 동조하는 과정을 보여주고 있다. 목적함수는 식 (3.7)의 ITAE를 사용하였다. 여기서 $\phi = \{\alpha, \beta\}$ 이고 t_f 는 최종적분시간으로서 t_f 이후의 적분 값을 무시해도 좋을 정도의 충분히 큰 시간이다.

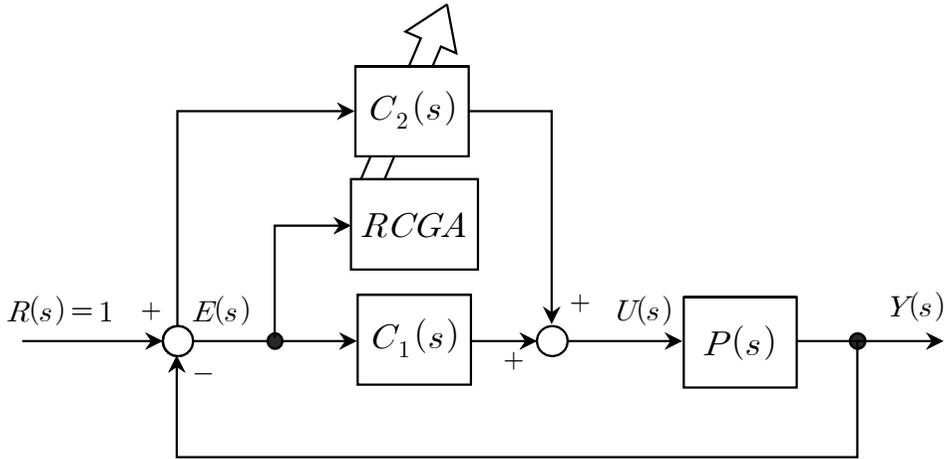


그림 3.9 RCGA를 이용한 $C_2(s)$ 최적 동조

Fig 3.9 Optimal tuning of $C_2(s)$ using a RCGA

$$J_2(\phi) = \int_0^{t_f} t|e(t)|dt \quad (3.7)$$

다음 그림 3.10, 3.11은 L/τ 를 변경해 가면서 얻은 최적의 $\{\alpha, \beta\}$ 값이다. 역시, ‘×’로 표기된 값이 RCGA를 이용해 얻는 비연속적인 최적의 계수집단이며, 실선은 동조규칙에 의해 추정된 연속된 값이다.

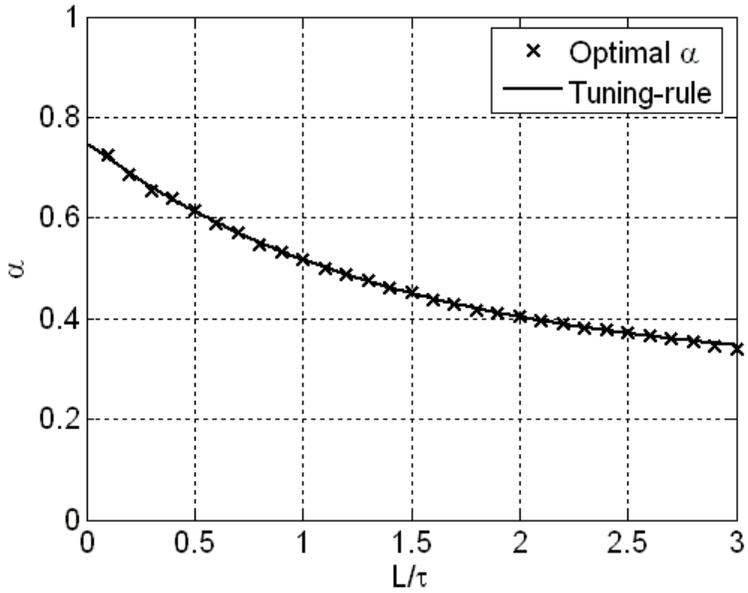


그림 3.10 2자유도 PID 제어기를 위한 최적의 α
 Fig 3.10 Optimal α for the 2DOF PID controller

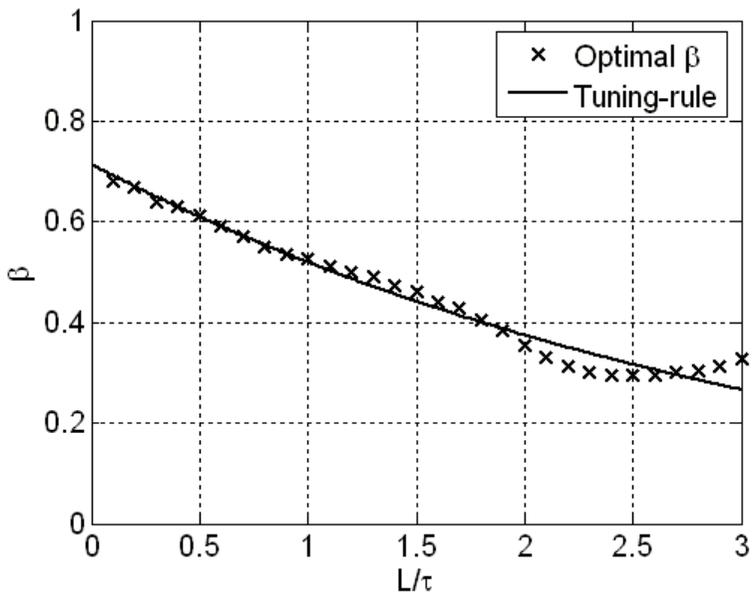


그림 3.11 2자유도 PID 제어기를 위한 최적의 β
 Fig 3.11 Optimal β for the 2DOF PID controller

3.6 동조규칙의 유도

앞 절에서 구한 2자유도 PID 제어기의 최적의 파라미터 계수 집합을 이용하여 그림 3.12의 블록선도로부터 새로운 동조규칙을 얻는다.

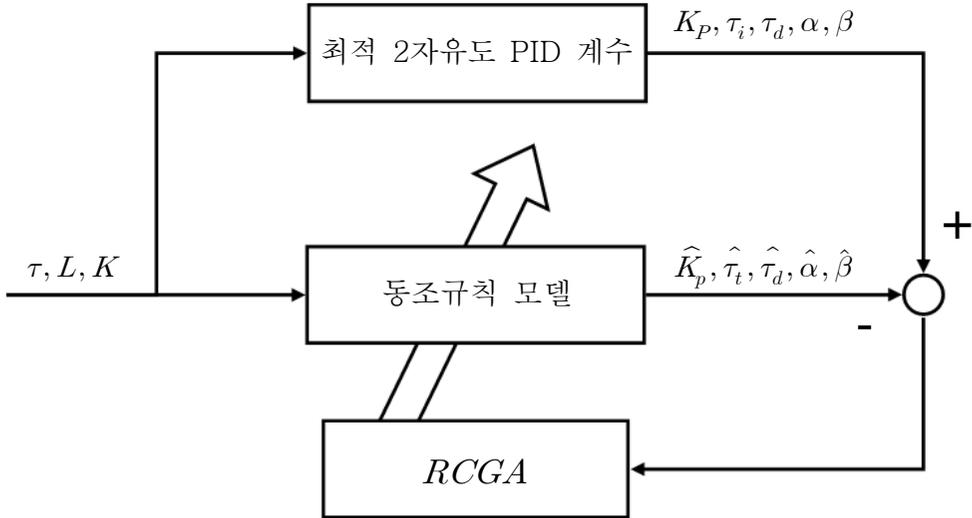


그림 3.12 RCGA를 이용한 동조규칙 모델의 계수조정
Fig.3.12 2DOF PID parameter tuning using a RCGA

L/τ 를 변화해가면서 얻는 2자유도 PID 제어기의 최적의 파라미터 계수집단과 동조규칙의 결과가 서로 동일하게 동조규칙의 모델 파라미터를 최적화한다. 동조규칙 모델은 기존의 연구결과를 참고하여 다양한 형태의 모델을 적용한 결과 가장 근사한 형태의 모델을 사용하였다.

최적의 동조규칙 모델을 찾기 위해 RCGA를 이용하였으며, 아래의 성능지수가 최소화 하도록 고려하였다.

$$J_2(\phi) = \sum_j (KK_p - K\hat{K}_p)^2 \tag{3.8}$$

$$J_3(\phi) = \sum_j \left(\frac{\tau_i}{\tau} - \frac{\hat{\tau}_i}{\tau} \right)^2 \tag{3.9}$$

$$J_4(\phi) = \sum_j \left(\frac{\tau_d}{\tau} - \frac{\hat{\tau}_d}{\tau} \right)^2 \quad (3.10)$$

$$J_5(\phi) = \sum_j (\alpha - \hat{\alpha})^2 \quad (3.11)$$

$$J_6(\phi) = \sum_j (\beta - \hat{\beta})^2 \quad (3.12)$$

성능지수로서는 오차의 자승을 적분한 값을 최소화하는 방법을 선택하였다. 이러한 이유는 계수집단을 토대로 전체를 아우르는 근사곡선을 구하기 위한 것으로서, 큰 폭의 오차에 대해 보다 더 큰 벌점 부여 하여 비교적 변동 폭이 적은 근사곡선을 구할 수 있다. 동조규칙 모델은 표 3.1과 같이 과거 연구결과를 참고하였다.

표3.1 기존의 동조규칙 모델
Table 3.1 Conventional tuning rule models

2자유도 파라미터	동조규칙
KK_p	$a_0 + a_1 \left(\frac{\tau}{L} \right)^{a_2}$
$\frac{\tau_i}{\tau}$	$b_0 + \frac{b_2 \frac{L}{\tau}}{1 + b_1 \frac{\tau}{L}}$
$\frac{\tau_d}{\tau}$	$c_0 + \frac{c_2 \frac{L}{\tau}}{1 + c_1 \frac{\tau}{L}}$
α	$d_0 + d_1 \exp\left(-d_2 \frac{L}{\tau}\right)$
β	$f_0 + f_1 \exp\left(-f_2 \frac{L}{\tau}\right)$

앞의 과정을 통해 구해진 2자유도 PID 제어기를 위한 최적의 동조규칙 모델은 표 3.2와 같다. 이로서 제어대상의 매개변수 K, τ, L 을 구하면 표 3.2의 동조규칙을 이용하여 최적의 2자유도 PID 계수를 손쉽게 얻을 수 있다.

표 3.2 2자유도 PID 제어기를 위한 동조규칙
Table 3.2 2DOF PID controller tuning rules

2자유도 파라미터	동조규칙
KK_p	$0.217 + 1.125\left(\frac{\tau}{L}\right)^{0.992}$
$\frac{\tau_i}{\tau}$	$1.620 + \frac{0.303\frac{L}{\tau}}{1 + 0.659\frac{\tau}{L}}$
$\frac{\tau_d}{\tau}$	$0.903 + \frac{0.173\frac{L}{\tau}}{1 + 2.084\frac{\tau}{L}}$
α	$0.293 + 0.457\exp\left(-0.713\frac{L}{\tau}\right)$
β	$0.718\exp\left(-0.326\frac{L}{\tau}\right)$

제 4 장 시뮬레이션과 실험 및 결과검토

앞서 제3장에서 가장 감도가 뛰어난 성능지수 ITAE에 근거한 최적의 2자유도 PID 제어기의 동조규칙을 얻었다. 제안한 새로운 동조규칙의 효용을 입증하기 위해 시뮬레이션을 실시하였고, 그 결과를 기존의 동조규칙인 Ziegler-Nichols 개루프법, Cohen-Coon법, Lopez-ITAE법과 함께 응답을 비교하였다. 이와 함께 실제 선박용 동요안정식 야간감시장비의 페테스탈 제어부에 제안한 새로운 2자유도 PID 제어기와 함께 동조규칙을 적용하여 그 효용을 검증하였다. 시뮬레이션에 사용되는 제어대상 시스템은 문헌에 자주 인용되는 고차 시간지연을 가지는 모델을 사용하였다.

4.1 시스템 I

먼저 시간 지연을 갖는 3차 시스템을 고려하였다.

$$P(s) = \frac{1}{(1+0.5s)(1+s)(1+2s)} e^{-s} \quad (4.1)$$

4.1.1 시스템의 근사화

시스템 I을 식 (3.1)의 제어대상과 같은 형태로 표현하기 위해 RCGA를 이용하여 근사화 하였다. 각각의 파라미터는 각각 $0 \leq K \leq 10$, $0 \leq \tau \leq 10$, $0 \leq L \leq 10$ 의 구간에서 탐색되었다. 샘플링 시간을 0.01초로 설정하고 근사화한 결과는 다음과 같다.

$$\hat{P}(s) = \frac{1.000}{1+2.173s} e^{-2.473s} \quad (4.2)$$

얻어진 모델 식 (4.2)와 주어진 시스템 식 (4.1)이 유사한 시스템인지 확인하기 위해 단위계단입력을 인가하고 두 시스템의 응답을 그린 것이 그림 4.1이다. 이를 통해 근사화한 모델과 시스템이 거의 유사함을 확인할 수 있다.

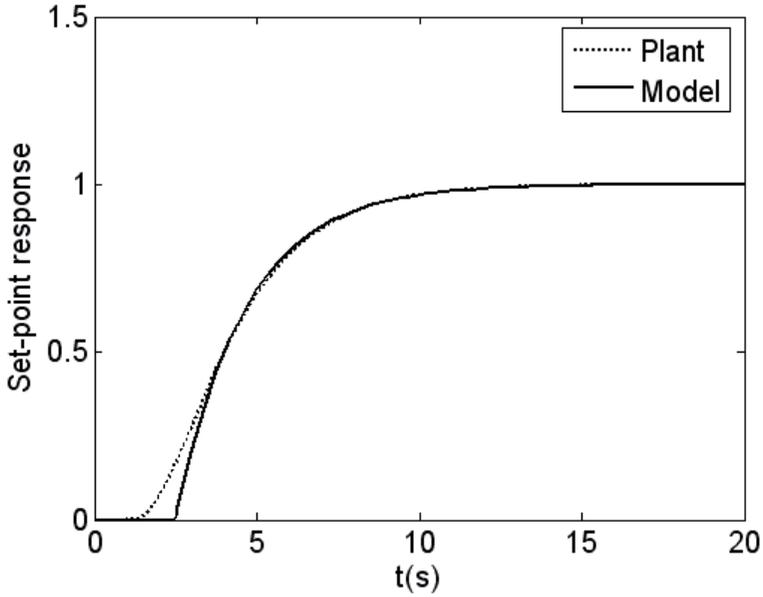


그림 4.1 추정된 모델의 검증

Fig 4.1 Verification of the estimated model

4.1.2 동조규칙에 따른 파라미터

추정된 모델을 대상으로 기존의 동조규칙과 본 논문에서 제안한 RCGA를 이용한 2자유도 PID 제어기 동조규칙을 통해 얻어진 제어기의 파라미터는 표 4.1과 같다.

표 4.1 동조규칙에 따른 파라미터 목록

Table 4.1 Parameter-list according tuning rules

동조규칙	K_p	τ_i	τ_d	α	β
RCGA	1.206	2.704	0.844	0.496	0.495
Ziegler-Nichols	1.054	4.946	1.237	×	×
Cohen-Coon	1.422	4.344	0.745	×	×
Lopez-ITAE	1.201	2.839	0.942	×	×

4.1.3 제어기에 따른 성능 비교

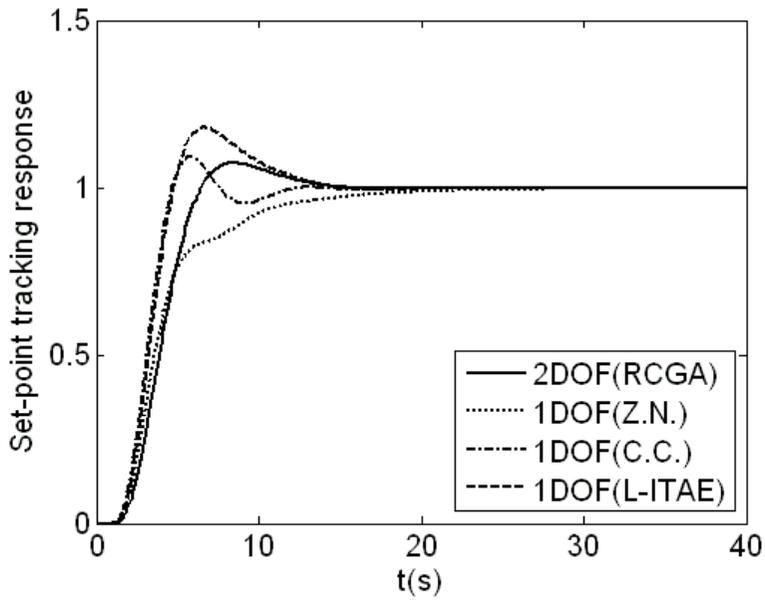


그림 4.2 설정치추종 응답
Fig 4.2 Set-point tracking response

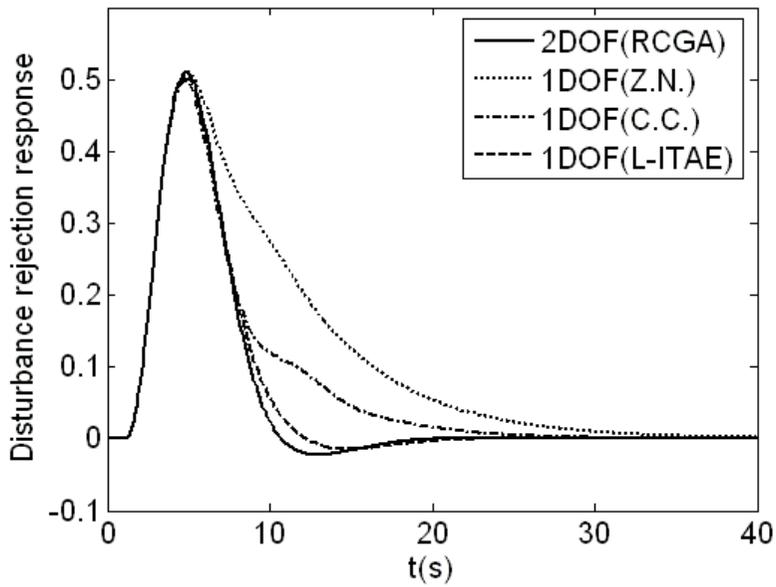


그림 4.3 외란억제 응답
Fig 4.3 Disturbance rejection response

각각의 파라미터에 따른 제어기의 성능을 확인하기 위해 먼저 모델에 단위계단입력을 인가한 결과는 그림 4.2와 같으며, 이어서 모델에 단위계단외란을 인가한 결과는 그림 4.3과 같다. 이때, 정량적인 비교치는 표4.2와 같다.

표 4.2 시스템 I 에 대한 정량적인 성능비교
Table 4.2 Performance comparison for System I

동조규칙	Settling time (Disturbance response)	Settling time (Set-point response)	Overshoot (Set-point response)
RCGA	14.00s	12.67s	7.42%
Ziegler-Nichols	25.92s	16.60s	0.00% 0.00%
Cohen-Coon	18.92s	10.95s	9.41% 9.41%
Lopez-ITAE	11.21s	13.14s	18.04% 18.04%

응답곡선과 정량적인 비교치에서 보는 것과 같이 Ziegler-Nichols 동조규칙의 경우 설정치추종 성능과 외란억제 성능 양쪽 모두 좋지 못하였으며, 설정치추종 성능이 우수하게 나타난 Cohen-Coon 동조규칙은 외란 인가시 정상상태로 돌아오는데 오랜 시간이 소요되었다. 반면 외란억제 성능이 우수하게 나타난 L-ITAE 동조규칙은 설정치 인가시 오버슈트가 비교적 크게 나타났다. 이에 반해 2자유도 PID를 바탕으로 RCGA 를 이용한 동조규칙은 단위계단입력에 대한 설정치추종 성능과 단위계단외란에 대한 외란억제 성능 모두 양호한 응답을 보여주었다.

4.2 시스템 II

다음은 시간지연이 다소 큰 3차 시스템을 고려하였다.

$$P(s) = \frac{1}{(1+1.0s)^2(1+2s)} e^{-5s} \quad (4.3)$$

4.2.1 시스템의 근사화

시스템 II를 식 (3.1)의 제어대상과 같은 형태로 표현하기 위해 RCGA를 이용하여 근사화 하였다. 각각의 파라미터는 각각 $0 \leq K \leq 10$, $0 \leq \tau \leq 10$, $0 \leq L \leq 10$ 의 구간에서 탐색되었다. 샘플링 시간을 0.01초로 설정하고 근사화한 결과는 다음과 같다.

$$\hat{P}(s) = \frac{1.000}{1+2.375s} e^{-6.778s} \quad (4.4)$$

얻어진 모델 식 (4.4)와 주어진 시스템 식 (4.3)이 유사한 시스템인지 확인하기 위해 단위계단입력을 인가하고 두 시스템의 응답을 그린 것이 그림 4.4이다. 이 그림을 통해 근사화한 모델과 시스템이 거의 유사함을 확인할 수 있다.

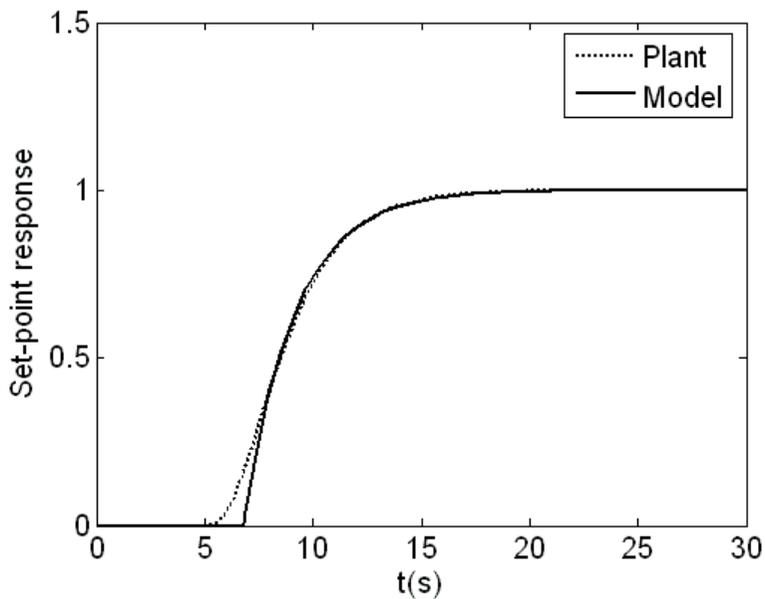


그림 4.4 추정된 모델의 검증

Fig 4.4 Verification of the estimated model

4.2.2 동조규칙에 따른 파라미터

추정된 모델을 대상으로 기존의 동조규칙과 본 논문에서 제안한 RCGA를 이용한 2자유도 PID 제어기 동조규칙을 통해 얻어진 제어기의 파라미터는 표 4.3과 같다.

표 4.3 동조규칙에 따른 파라미터 목록
Table 4.3 Parameter-list according tuning rules

동조규칙	K_p	τ_i	τ_d	α	β
RCGA	0.614	4.795	1.917	0.353	0.283
Ziegler-Nichols	0.421	13.556	3.389	×	×
Cohen-Coon	0.717	9.292	1.623	×	×
Lopez-ITAE	0.503	6.116	2.569	×	×

4.2.3 제어기에 따른 성능 비교

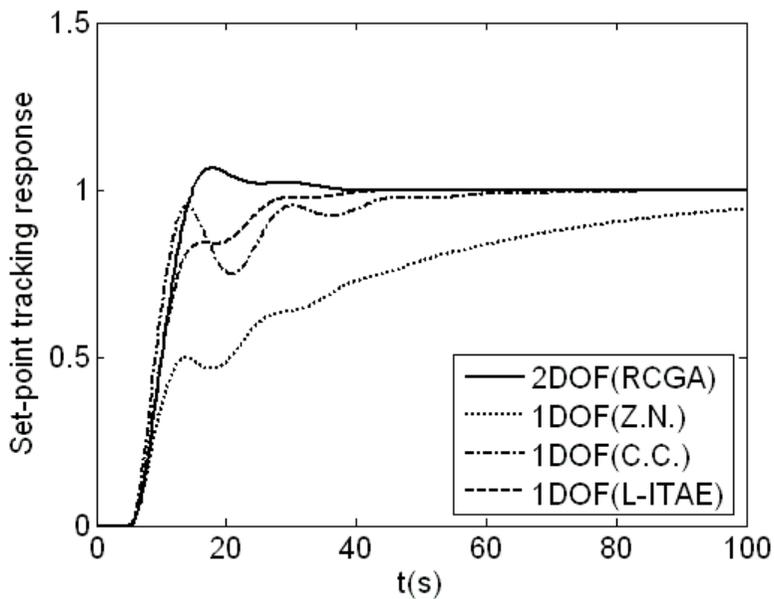


그림 4.5 설정치추종 응답

Fig 4.5 Set-point tracking response

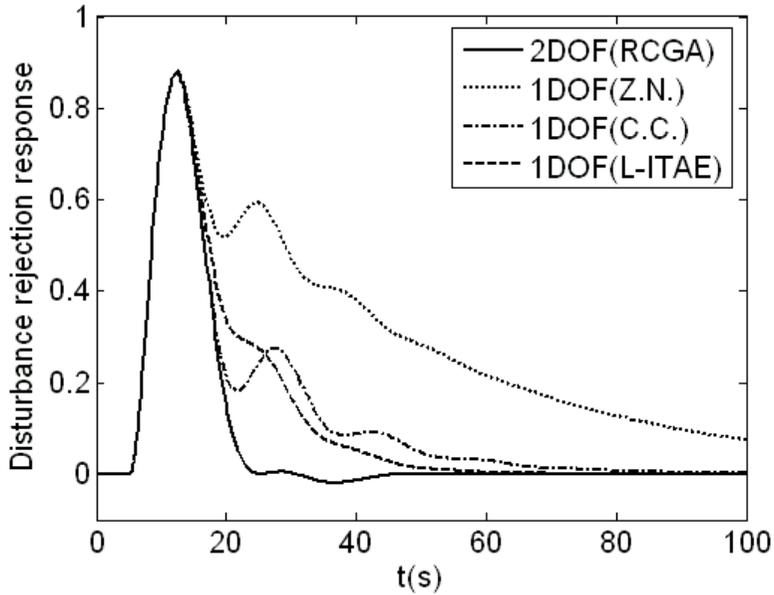


그림 4.6 외란억제 응답

Fig 4.6 Disturbance rejection response

MATLAB을 이용하여 각각의 파라미터에 따른 제어기의 성능을 확인하기 위해 먼저 모델에 단위계단입력을 인가한 결과는 그림 4.5와 같으며, 이어서 모델에 단위계단외란을 인가한 결과는 그림 4.6과 같다.

표 4.4 시스템 II에 대한 정량적인 성능비교

Table 4.4 Performance comparison for System II

동조규칙	Settling time (Disturbance response)	Settling time (Set-point response)	Overshoot (Set-point response)
RCGA	23.10s	31.27s	6.59%
Ziegler-Nichols	149.84s	139.11s	0.00%
Cohen-Coon	64.81s	55.18s	0.00%
Lopez-ITAE	47.11s	35.20s	0.00%

앞서 시뮬레이션한 시스템 I 과 같이 다소 시간지연이 큰 시스템 II에서도 2자유도 PID 제어기와 RCGA를 이용해 얻은 동조규칙의 경우 다른 동조규칙과 달리 단위계단 입력에 대한 설정치추종 성능과 단위계단외란에 대한 외란억제 성능 모두 양호한 형태를 보여주었다. 특히 기존의 동조규칙들은 그 성능이 현격하게 낮아졌으며, 이는 기존의 동조규칙의 모델이 긴 시간지연을 고려하지 않았기 때문으로 판단된다.

4.3 선박용 동요안정식 야간감시장비의 페데스탈

4.3.1 선박용 동요안정식 야간감시장비

선박용 동요안정식 야간감시장비는 선박의 운동을 보상하여 일정한 지향각을 유지하면서 대상을 연속적으로 모니터링하는 주·야간 겸용 감시장비이다. 그림 4.7의 위쪽에 보이는 것이 실제 선박용 동요안정식 야간감시장비의 페데스탈이며 중앙의 빈 공간에 주·야간 카메라, 열상카메라, IR Search Light 등의 관측장비와 선박운동 측정을 위한 광자이로 센서가 탑재된다. 아래쪽에 보이는 모션베이스는 6개의 독립적인 모터를 이용하여 선박의 움직임을 재현하는 장비이다.

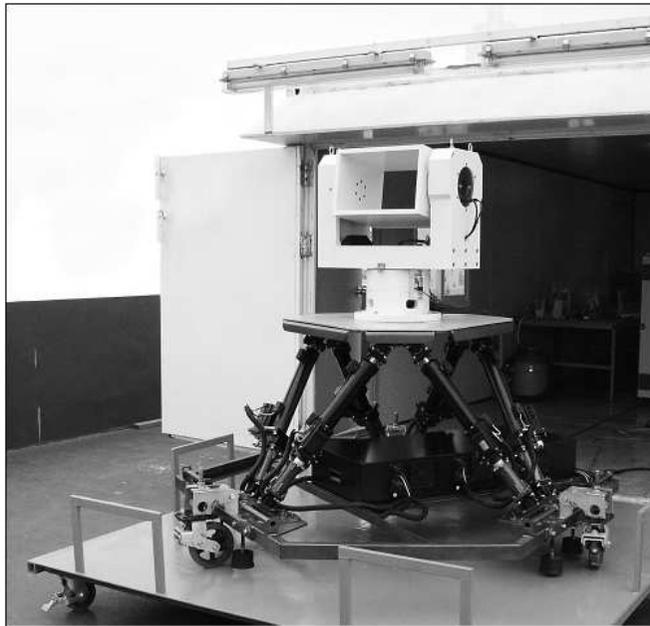


그림 4.7 페데스탈의 실제모습

Fig 4.7 The picture of a pedestal

그림 4.8은 선박용 동요안정식 야간감시장비의 제어 블록선도이다. 2자유도 PID 제어기는 PC에서 구현되었으며, 제어기에 의한 시스템 입력은 모션 컨트롤카드와 서보모터 드라이버를 거쳐 페데스탈의 Direct-Drive 서보모터로 인가된다.

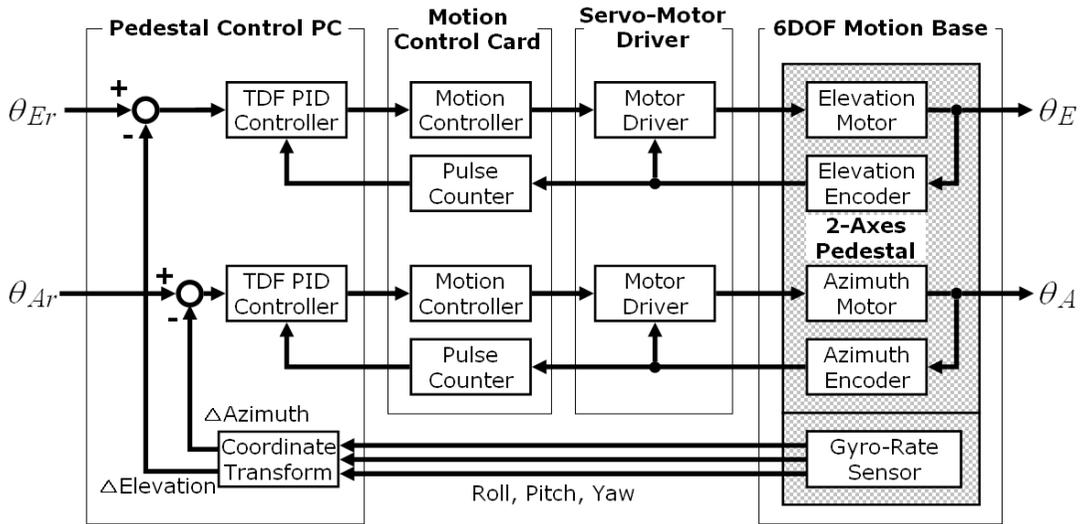


그림 4.8 선박용 동요안정식 야간감시장비의 제어 블록선도

Fig 4.8 Block diagram of stabilized night vision system's control part

4.3.2 페데스탈의 모델링

선박용 동요안정식 야간감시장비의 페데스탈은 2개의 서보모터로 이루어져 있다. 각각의 서보모터의 동특성은 서로 흡사하여 비슷한 결과를 보이므로 이 가운데 방위각을 담당하는 서보모터를 대상으로 진행한 실험을 서술한다. 페데스탈을 구성하는 서보모터 드라이버는 이미 내부에 각속도를 토크로, 토크를 모터를 구동하기 위한 전력으로 변화해주는 장치가 내장되어 있다. 특히 속도제어기를 포함하고 있어 사용자는 원하는 각속도만을 입력하면 서보모터와 서보모터 축에 부착된 부하의 관성모멘트가 변경되어도 그에 적절한 토크를 모터로 출력된다.

서보모터 드라이버와 AC모터 및 입출력 차원을 각도로 동일하게 하기 위한 미분기 등으로 구성된 전체 제어대상은 그림 4.7과 같은 블록선도로 표현될 수 있다.

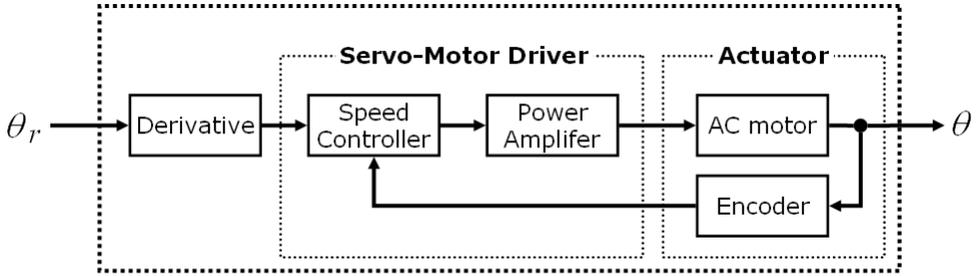


그림 4.9 전체 제어대상

Fig 4.9 Overall controlled object

제어대상에 인가한 θ_r 과 출력 θ 를 근거로 추정된 전체 제어대상의 전달함수와 그 파라미터는 식 (4.5)와 같다.

$$P_m(s) = \frac{1.000464}{1 + 0.020940s} e^{-0.004942s} \quad (4.5)$$

추정된 식 $P_m(s)$ 와 실제 제어대상의 비교를 위해 동일한 입력에 대한 각각의 출력을 나타낸 것이 그림 4.10이다. 그림과 같이 매우 흡사한 출력양상을 보인다.

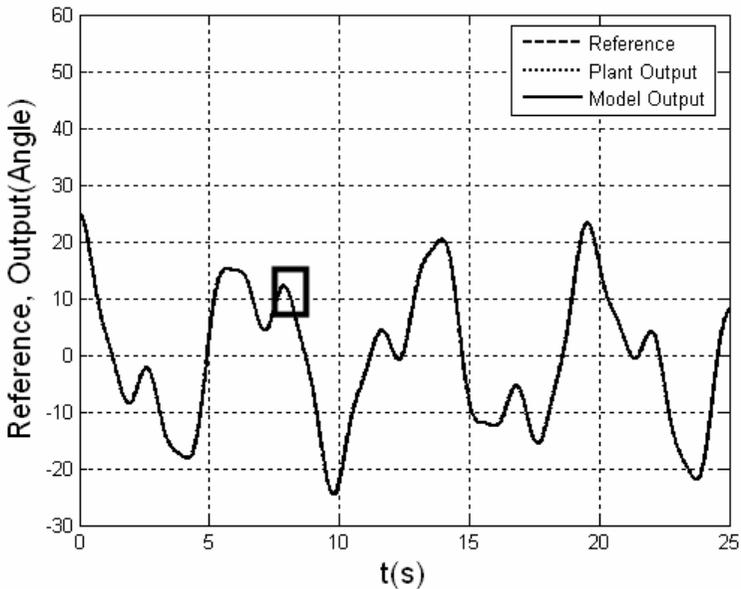


그림 4.10 추정된 모델의 응답

Fig 4.10 The response of the estimated model

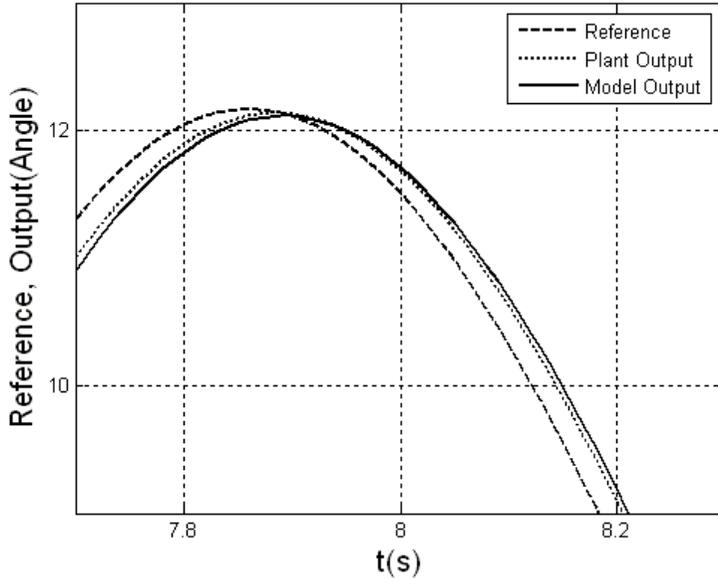


그림 4.11 추정된 모델의 응답(확대)

Fig 4.11 The response of the estimated model(zoom-in)

4.3.3 동조규칙에 따른 파라미터

기존의 동조규칙과 3장에서 제안한 새로운 동조규칙에 따른 페데스탈 모델을 위한 제어기의 파라미터 목록은 표 4.5와 같다.

표 4.5 동조규칙에 따른 파라미터 목록

Table 4.5 Parameter-list according tuning rule

동조규칙	K_p	τ_i	τ_d	α	β
RCGA	4.925	0.0093	0.0020	0.679	0.665
Ziegler-Nichols	5.082	0.0099	0.0025	×	×
Cohen-Coon	5.897	0.0111	0.0017	×	×
Lopez-ITAE	5.323	0.0086	0.0019	×	×

4.3.6 제어기에 따른 성능비교

제안한 동조규칙의 성능을 확인하기 위해 페데스탈에 단위계단입력과 단위계단외란을 인가한 결과는 다음과 같다.

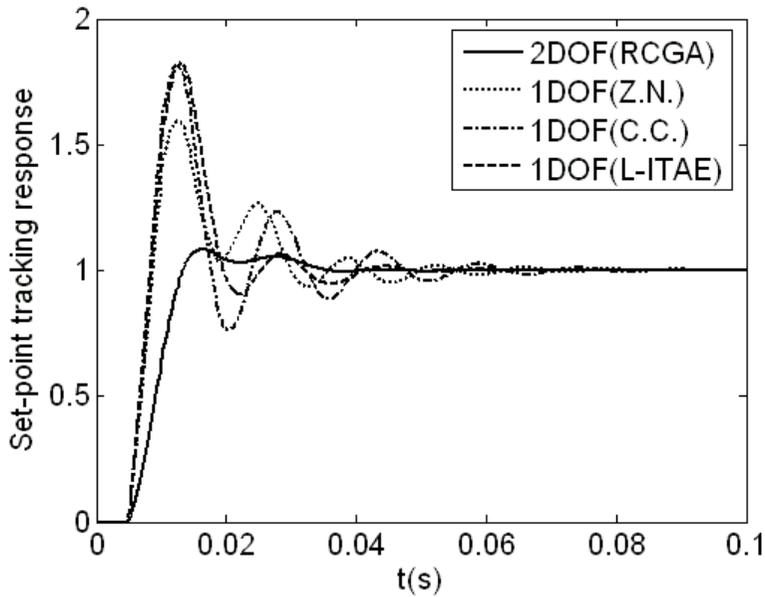


그림 4.12 설정치추종 응답

Fig 4.12 Set-point tracking response

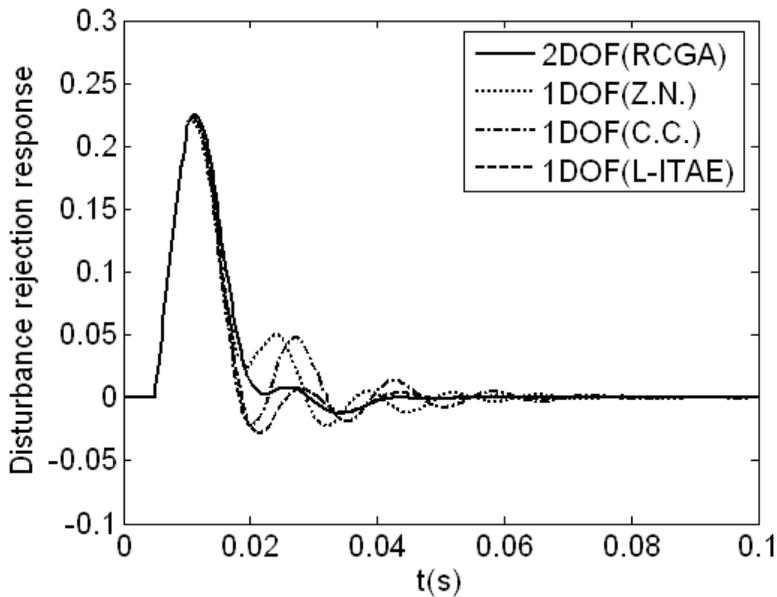


그림 4.13 외란억제 응답

Fig 4.13 Disturbance rejection response

응답에서 보는바와 같이 본 논문에서 제안한 새로운 동조규칙의 경우 단위계단입력 인가 시 낮은 오버슈트와 빠른 정착시간을 보였으며, 단위계단외란 인가 시 기존의 동조규칙에 비해 현격하게 적은 오버슈트를 보이며 빠르게 정상상태로 돌아오는 것을 확인할 수 있다.

표 4.6 페데스탈에 대한 정량적인 성능비교
Table 4.6 Performance comparison for the pedestal

동조규칙	Settling time (Disturbance response)	Settling time (Set-point response)	Over shoot (Set-point response)
RCGA	0.020	0.033	08.41%
Ziegler-Nichols	0.033	0.049	59.49%
Cohen-Coon	0.031	0.061	81.49%
Lopez-ITAE	0.023	0.040	82.36%

제 5 장 결 론

본 연구에서는 RCGA를 이용하여 2자유도 PID 제어기의 최적동조규칙을 얻었다. 2자유도 PID 제어기는 기존의 PID 제어기가 가지는 한계인 설정치추종 성능과 외란억제 성능을 동시에 만족시킬 수 없다는 점을 극복한 형태로서 설정해야할 파라미터의 수가 기존의 PID 제어기보다 2개가 더 많아 현장기술자가 이용하기에는 어려움이 있다. 하지만 본 논문에서 제안한 최적동조규칙을 이용하면 제어전문가가 아닌 현장기술자 등도 손쉽게 최적의 2자유도 PID 제어기를 이용할 수 있다.

이와 함께 제안된 동조규칙의 성능을 확인하기 위하여 다양한 시스템을 통한 시뮬레이션을 수행하여 그 효용성을 검증하였다. 또한 실제 플랜트에서의 성능을 확인하기 위해 선박용 동요안정식 야간감시장비의 페데스탈 제어부에 적용하였다. 페데스탈 제어부는 기본적으로 PI 제어를 포함하고 있는 서보모터 시스템이지만 페데스탈 자체의 무게와 탑재된 각종 감시장비의 무게를 극복하여 보다 높은 성능을 발휘하기 위해 외부에 2자유도 PID 제어를 구현하였다. 원거리의 대상을 지속적으로 모니터링하기 위해 빠른 시스템 응답성능과 더불어 해상의 파도, 강한바람 등의 외란에서도 짧은 시간 내에 정상상태로 돌아오는 외란억제 성능이 모두 중요시 되는 본 제어대상에서 2자유도 PID 제어기는 매우 적절하게 사용되었다. 특히 제안된 동조규칙을 적용한 결과 일반적인 제어대상보다 빠른 응답을 요구하는 본 시스템에서 기존의 동조규칙과 비교하여 오버슈트는 10%내로 유지하면서 설정치응답과 외란응답 모두 약 0.01초 빠른 정착시간을 보여줌으로서 전반적으로 45~55%의 성능향상을 이루어내었다.

참 고 문 헌

- [1] Y. Nozaka. (1993). Trend of new control theory application in industrial process control(survey). *Proc. IFAC 12th Triennial World Cong.* Vol. 4, pp.215- 218.
- [2] J. G. Ziegler and N. B. Nichols. (1942). Optimum setting for PID controllers. *ASME*, Vol. 4, pp. 759-768.
- [3] G. H. Cohen and G. A. Coon. (1953). Theoretical considerations of retarded control. *ASME*, Vol. 75, pp.827-834.
- [4] 김동화, 이은웅. (1995). PID 제어기 튜닝 기술에 대한 연구현황과 전망. *전기학회지*, 제44권, 제5호, pp.13-23.
- [5] I. M. Horowitz. (1963). *Synthesis of Feedback Systems*. Academic Press.
- [6] M. Araki. (1984). PID control system with reference feedforward (PID-FF control system). *Proc. 23rd SICE Annual Conference*, pp.31-32.
- [7] M. Kanda and K. Hiroi. (1991). Super two-degree-of-freedom PID algorithm. *Proc. 30th SICE Annual Conference*, pp. 465-466.
- [8] S. Yamazaki and K. Hiroi. (1987). Application of reference-filter type 2DOF PID to boiler control. *Instrumentation*. vol. 30, pp. 114-119.
- [9] Mituhiko Araki and Hidefumi Taguchi. (2003). Two-Degree-of-Freedom PID Controllers. *International Journal of Control, Automation, and Systems* Vol. 1, No. 4.
- [10] 진강규. (2000). *유전알고리즘과 그 응용*. 교우사.
- [11] 진강규, 주상래. (2000). 실수코딩 유전알고리즘에 관한 연구. *제어·자동화·시스템공학 논문지*, 제6권, 제4호, pp.268-275, 2000.
- [12] 김도웅, 진강규. (2002). RCGA를 이용한 PID 제어기의 모델기반 동조규칙. *제어·자동화·시스템공학회 논문지*, 제8권, 제12호, pp.1056-1060.
- [13] 김민정. (2007). 외란제거용 PID 제어기의 RCGA 기반 동조. 석사학위논문. 한국해양대학교 대학원.