

# Ziegler-Nichols를 이용한 실수코딩 유전 알고리즘 기반의 PID 튜닝 PID Tuning Based on RCGA Using Ziegler-Nichols Method

박 지 모\*·김 고 은\*·김 진 성\*·박 성 만\*·허 훈†  
Ji-Mo Park, Go-Eun Kim, Jin-Sung Kim, Sung-Man Park and Hoon Heo

(2009년 3월 3일 접수 ; 2009년 4월 2일 심사완료)

**Key Words :** Genetic Algorithm(유전 알고리즘), PID Gain Tuning(PID 이득 튜닝), Ziegler-Nichols Tuning (지글러-니콜스 튜닝), Reverse Osmosis Process(역삼투 공정)

## ABSTRACT

Real-coded genetic algorithm(RCGA) has better performances than conventional genetic algorithm about dealing with a large domain, the precision and the constrain problem. Also the RCGA has advantage of operation time because it doesn't have to following about decoding operation<sup>(1)</sup>. In this paper the ranges of PID gains are limited based on Ziegler-Nichols method to consider a long operation time problem that is the main problem of genetic algorithm. Result shows proposed method represents better performance without ignored about result of ZN tuning method and reduces the calculation time.

## 1. 서 론

전 세계적으로 지구온난화와 물 낭비에 따른 물 부족현상이 대두된 지 이미 오래되었고 이에 따라 지속적인 수자원 확보가 매우 중요하게 되고 있다. 해수 담수화 기술은 생활용수 및 공업용수 부족으로 인한 문제를 해결하기 위한 효과적인 기술이다. 담수화란 바닷물에 녹아 있는 염분을 제거하여 사람이 먹고 사용할 수 있는 담수로 바꾸어 주는 기술로 담수화 공정에는 역삼투법(reverse osmosis), 증발법(distillation) 그리고 전기 투석법(electro dialysis) 등이 개발되었다<sup>(2)</sup>. 그 중 역삼투 공정은 정화되지 않은 물로부터 불순물을 정화하는 기술로 물에 압력을 가해 물만 통과할 수 있는 반 투과막을 통과시켜 불순물을 제거한다.

PID 제어기는 오랜 기간 여러 분야에서 안정성 및 성능을 인정받고 일반적으로 많이 사용되는 제

어기이다. 이 PID 제어 로직은 플랜트를 운전하는데 필수적이며 분산제어 시스템(DCS)에 내장되어 있다. PID 제어기에서 이득은 성능에 큰 영향을 미친다. 같은 구조의 시스템이라도 이득 값에 따라 좋은 성능의 안정적인 시스템이 되기도 하고 제어 불가능한 상태로 되기도 한다. 이 때문에 실제 현장에서는 PID 제어기의 이득을 튜닝 하는데 많은 비용과 인력, 시간을 투자한다<sup>(3,4)</sup>.

이 논문에서는 앞서 제시한 상황을 고려하여 공정의 효율성과 안정성을 높이고자 해수 담수화 플랜트에 사용되는 PID 제어기의 이득 튜닝 기법 중 유전 알고리즘에 의한 튜닝 기법에 대해서 연구하였다. 일반적인 유전 알고리즘의 경우 세대 수와 해 집단의 크기가 충분히 크지 않으면 좋은 해를 보장할 수 없으므로 필연적으로 긴 연산 시간을 요구하고 이 점이 실시간 제어에 적용하기 어렵게 만든다. 이에 연산 시간 단축을 위해서 대상에 대한 Ziegler-Nichols 이득 값을 유전 알고리즘의 탐색 범위를 줄이는 기준으로 사용하는 방법을 제안하였다. 제안된 방법은 해수 담수화 플랜트의 역삼투 공정 모델에 적용하였고 계단시험을 통하여 일반적으

† 교신저자; 정회원, 고려대학교 제어계측공학과  
E-mail : heo257@korea.ac.kr

Tel : (02)3290-3995, Fax : (02)929-7808

\* 고려대학교 제어계측공학과

로 많이 사용되는 Ziegler-Nichols 방법과 비교하여 성능개선을 확인하였다.

## 2. 역삼투 공정

### 2.1 역삼투 공정 모델

대상 공정은 참고문헌 (5)에서 모델링된 Doha 역삼투 플랜트(DROP)를 사용되었다. 해당 시스템은 식 (1)~(5)과 같이 MIMO 시스템으로 표현되며 시스템의 구조와 블록 다이어그램은 Figs. 1, 2와 같다. SP는 설정 값, Y는 출력을 나타내며 U는 각각의 루프의 입력 신호를 나타낸다. 첨자 F와 C는 각각의 출력을 나타낸다.

$$\begin{bmatrix} F \\ C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{11} & G_{12} \\ G_{21} & G_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P \\ pH \end{bmatrix} \quad (1)$$

F : 삼투 유량 (m<sup>3</sup>/h)

C : 삼투 전도도 (μs/cm)

P : 공급 담수의 압력 (kPa)

pH : 공급 담수의 pH (pH)

$$G_{11} = \frac{F}{P} = \frac{0.002(0.056s+1)}{(0.003s^2+0.1s+1)} \quad (2)$$

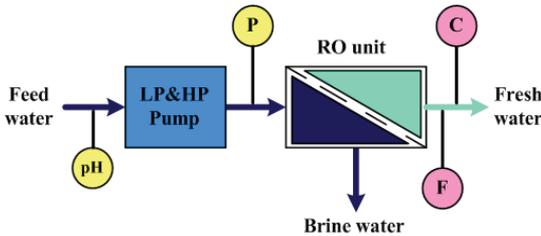


Fig. 1 Reverse osmosis process

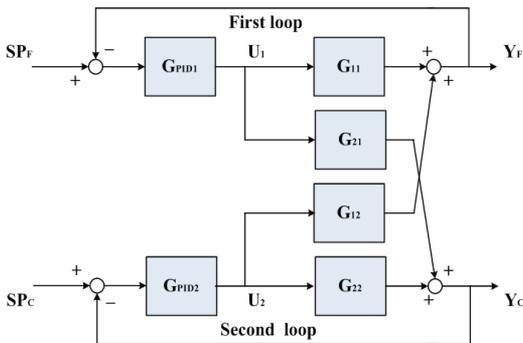


Fig. 2 Structure of system

$$G_{12} = \frac{F}{pH} = 0 \quad (3)$$

$$G_{21} = \frac{C}{P} = \frac{-0.51(0.35s+1)}{(0.213s^2+0.7s+1)} \quad (4)$$

$$G_{22} = \frac{C}{pH} = \frac{-57(0.32s+1)}{(0.6s^2+1.8s+1)} \quad (5)$$

pH와 전도율은 역삼투 공정에 있어서 가장 중요한 반 투과막의 상태에 영향을 미친다. 일반적으로 반 투과막은 셀룰로스 아세테이트로 이루어져 있기 때문에 알칼리성 즉, 높은 pH에 의해서 막의 손상과 스케일링 현상이 발생하게 된다. 이는 역삼투 공정의 효율성을 떨어지게 하는 요인이 되므로 일정하게 pH를 유지하도록 제어하는 것이 중요하다.

막을 손상시키는 다른 원인으로 급수되는 물에 포함되어 있는 불순물이 있다. 그러므로 급수의 부피당 들어있는 불순물의 양을 적절히 유지하도록 제어하는 것은 전체 공정의 효율에 큰 영향을 미치게 된다. 이 과정에서 전도도는 불순물의 양을 나타내는 척도로 이용된다.

### 2.2 전치 보상기를 적용한 디커플러 설계

전치 보상기를 적용한 디커플러를 적용하기 위해

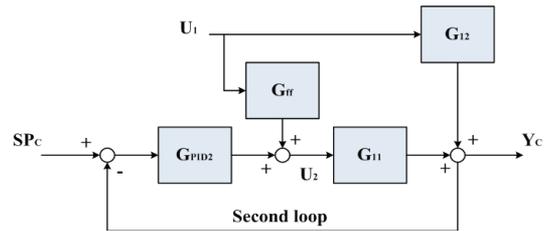


Fig. 3 Structure of system viewed as second loop with feedforward compensator

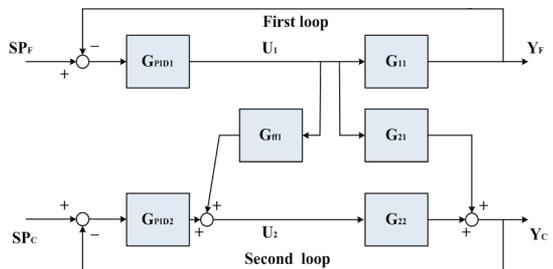


Fig. 4 Structure of system with feedforward compensator

서는 적용하고자 하는 대상 시스템이 안정할 필요가 있다. 이 논문의 제어 대상인 MIMO 시스템의 경우 각각의 내부 구성 요소가 안정하면 전체 시스템도 안정하게 된다. 각각의 전달함수는 개루프에 대해서 음의 실수를 갖는 극점으로 구성되어 있으므로 전체 시스템은 안정한 시스템이라는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 3과 같이 두 번째 단일 루프의 관점에서 보면 전체 시스템은 첫 번째 루프와 측정 외란  $U_1(s)$ 에 영향을 받는 두 번째 루프, 두 개의 폐루프 시스템으로 각각 나누어 살펴볼 수 있다. 외란에 대한 영향을 제거하기 위해 전치 보상기를 적용하면 Fig. 4와 같이  $U_1(s)$  입력에 대한 영향을 제거할 수 있다. 보상기의 전달함수는 식 (6)과 같다.

$$G_{ff} = - \frac{G_{21}(s)}{G_{22}(s)} \quad (6)$$

### 3. 실수코딩 유전 알고리즘

#### 3.1 실수코딩 유전 알고리즘 구조

일반적인 유전 알고리즘에 비해서 실수코딩 유전 알고리즘은 넓은 정의역을 표현할 수 있고 정밀도 및 제약조건을 다루는데 우수한 성능을 보인다. 또한

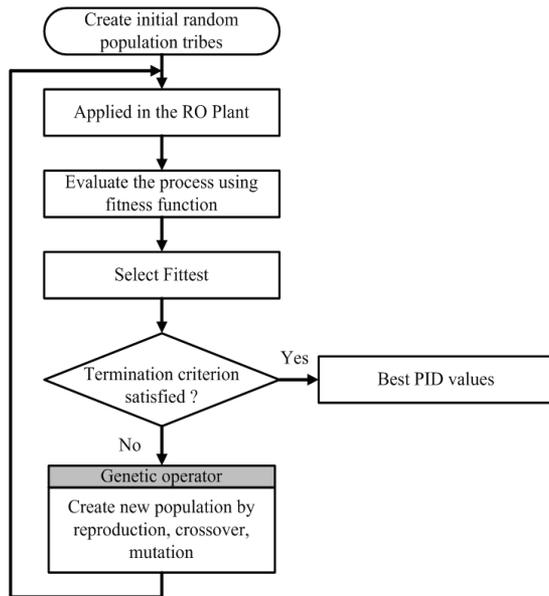


Fig. 5 Flow chart of the RCGA

디코딩 과정이 필요 없으므로 시간문제에서 일반 알고리즘에 비해서 장점을 가진다. 이 논문에서 사용한 실수코딩 유전 알고리즘의 구조는 Fig. 5와 같다.

목적함수는 식 (7)과 같이 평균제곱오차(mean square error, MSE)를 이용하였다. 단위 계단 함수 입력과 응답의 차를 에러로 정의하였고 적합도는 평균제곱오차의 역수로 에러가 작을수록 큰 값이 나오도록 정의하였다. 또한 종료 조건으로 일정이하의 에러를 만족하면 프로그램이 종료되도록 하였다.

$$MSE = \frac{1}{t} \int_0^{\tau} e^2(t) dt \quad (7)$$

$t$  : 전체 공정 시간(s)

$\tau$  : 현재 시간(s)

$e(t)$  :  $\tau$ 시간의 단위 계단 입력과의 오차

#### 3.2 교배

교배과정은 각각의 부모 해를 선택하여 값들의 평균을 구하는 산술적 교배 방법을 적용하였다. 좋은 부모 해끼리 교배하기 위해서 적합도가 높은 해를 교배 대상으로 적용하였다.

#### 3.3 돌연변이

일반적인 유전 알고리즘에서의 돌연변이는 돌연변이율(mutation rate)이라 부르는 낮은 확률에 의해서 한 개의 bit를 변환하고 이를 통해서 탐색범위를 넓게 하고 국부 수렴에 빠지는 것을 방지하게 된다. 그러므로 돌연변이율이 높게 되면 탐색범위가 넓어지는 장점이 있는 반면 수렴시간에 영향을 미치게 된다. 이 논문에서는 일정확률로 해를 랜덤 값으로 바꿔주는 방법이 아닌 각 세대에서 적합도가 낮은 해를 랜덤 값으로 대체하는 방법을 사용하여 기존 해 집단에 다양성을 부여하였다<sup>(7,8)</sup>. 해 집단의 얼마의 비율을 돌연변이 할 것인가는 돌연변이 비율(mutation ratio)로 나타내었다.

### 4. Ziegler-Nichols를 적용한 유전 알고리즘 탐색 방법

#### 4.1 Ziegler-Nichols 방법

Ziegler-Nichols 방법은 계전기 자기 동조법(relay auto-tuning) 기법을 사용하여 이득 값을 구하는 방법이다. 제어 대상 플랜트는 안정한 시스템이므로

이 기법을 적용하여 견실성 있는 튜닝을 할 수 있다. 일반적으로  $\pi/6 \sim \pi/3$ 의 위상이득을 가지도록 튜닝을 하는데 대상 시스템은 지연시간이 큰 공정이므로 이득여유에 문제가 발생할 수 있기 때문에 가능한 크도록  $\pi/3$ 로 설정하고 이득 값을 구하였다. 이에 대한 이득 값은 Table 1과 같다.

#### 4.2 Ziegler-Nichols를 적용한 유전 알고리즘 방법

유전 알고리즘은 최적화 문제를 다룸에 있어서 매우 우수한 방법이지만 서론에서 언급한 바와 같이 충분히 사용가능한 해를 학습하기 위해서는 필연적으로 긴 연산시간을 가져야만 하고 이는 실시간 제어 문제에 있어서 유전 알고리즘을 적용하기 어렵게 한다. 때문에 이 논문에서는 대상에 대한 Ziegler-Nichols 이득 값을 유전 알고리즘의 탐색 범위를 줄이는 기준으로 사용하는 방법을 제안하였다.

Fig. 6과 같이 Ziegler-Nichols 방법에 의해서 미리 얻어진 이득 값을 기준으로 그 주변의 탐색범위를 제한함으로써 Ziegler-Nichols 방법의 기본적인 튜닝 값은 보장하면서 이를 더 좋은 값으로 갱신할 수 있다. 또한 돌연변이 비율을 적용함으로써 탐색 범위 밖의 더 좋은 해에 대해서도 고려하였다.

반면 탐색 범위를 줄인 만큼 일반적인 유전 알고리즘에 비해 실시간 제어기에 적용할 수 있을 만큼

크게 연산 시간을 단축하는 것이 가능하다.

### 5. 시뮬레이션 결과

#### 5.1 일반적인 실수코딩 유전 알고리즘

유전 알고리즘의 파라미터는 Table 2와 같다. 100개의 해 집단과 100세대를 일반적인 유전 알고리즘의 조건으로 설정하였다. 또한 D 이득이 너무 크면 외란에 민감해지므로 범위를 작게 설정해 주었다. 설정된 파라미터에 의해서 얻어진 유전 알고리즘에 의해서 얻어진 이득 값은 Table 3과 같다. 이득 값을 살펴보면 상당히 값이 큰 것을 볼 수 있는데 그 이유는 적합도 판별을 위한 에러의 기준이 되는 모델이 단위 계단 함수이기 때문에 실제 응답과 차이를 보이기 때문이다.

Table 2 Parameter of genetic algorithm

Parameter	Value
Population size	100
Generation	100
PI gains range	-1000~1000
D gain range	-1~1
Objective function	MSE
Mutation ratio	30 %
Crossover ratio	40 %
Crossover method	Arithmetical crossover

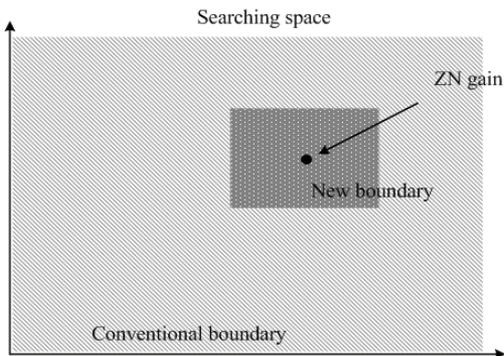


Fig. 6 Concept of proposed method

Table 1 PID gains by Ziegler-Nichols method

Gains	$G_{11}$	$G_{22}$
P	649.8072	-0.7242
I	0.0276	0.0276
D	0.0069	0.0069

Table 3 PID gains calculated by genetic algorithm

Gains	$G_{11}$	$G_{22}$
P	949.6115	-67.2117
I	994.9963	-768.4991
D	0.7282	-0.0021

Table 4 Operation time of RCGA without terminal condition (unit : s)

Population Generation	Population				
	30	40	50	100	200
10	2.79	3.49	4.40	8.28	16.08
20	5.29	7.05	8.48	16.56	33.27
30	7.85	10.38	12.81	25.17	49.41
40	10.29	13.79	16.56	33.39	67.37
50	13.26	17.05	21.60	41.59	85.11
100	25.72	34.04	42.86	85.89	169.80
200	51.87	68.13	85.88	166.17	338.69

### 5.2 Ziegler-Nichols 이득 값 범위를 적용한 유전 알고리즘

#### (1) 파라미터에 따른 수렴시간 비교

유전 알고리즘의 파라미터 설정에 따른 연산 시간은 Table 4와 같다. 일반적으로 대상 공정의 제어 동작은 15~20초의 제어 주기에 의해서 이루어진다. 연산하는 하드웨어에 따라 달라지지만 20초의 제어 주기를 기준으로 튜닝에 필요한 시간을 고려하면 세대 수 50, 해 집단 40을 적합한 값으로 볼 수 있다. 또한 각각의 시간 측정은 최대 연산 시간을 확인하기 위해서 종료 조건이 동작하지 않은 상태에서 이루어졌으므로 종료 조건까지 고려하게 되면 더 짧은 연산시간을 가지게 된다.

#### (2) 탐색 범위 설정

Table 5와 같이 Ziegler-Nichols 이득 값의 스케일에 따라서 범위를 정해주었고 이때 이득 값은 Table 6과 같다.  $G_{11}$ 에 비해서  $G_{22}$ 는 탐색 범위가

Table 5 Range of PID gains for GA tuning

Gains	$G_{11}$	$G_{22}$
P	500~700	-10~10
I	-1~1	-1~1
D	-0.1~0.1	-0.1~0.1

Table 6 PID gains of proposed method

Gains	$G_{11}$	$G_{22}$
P	698.4126	-6.6588
I	0.9369	-0.4706
D	0.0702	-0.0025

Table 7 Comparison of performances

Transfer function	Method	Rising time(s)	Settling time(s)
$G_{11}$	ZN	56000	119000
	Proposed	1600	3200
$G_{22}$	ZN	0.10	non
	Proposed	0.017	0.02

Table 8 Comparison of GA operation times

Transfer function	Method	Generation	Population	Operation time(s)
$G_{11}$	GA	100	100	84.8678
	Proposed	50	40	17.2718
$G_{22}$	GA	100	100	85.7909
	Proposed	50	40	17.3725

더 작기 때문에 좀 더 짧은 시간을 고려할 수 있지만 이 논문에서는 두 경우 모두 같은 세대 수 50,

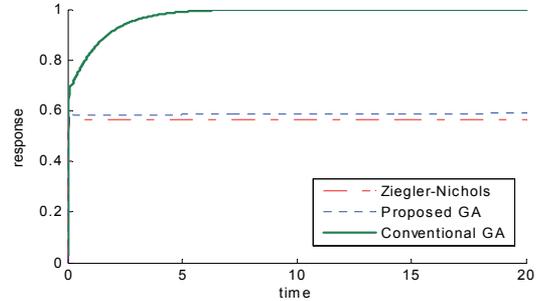


Fig. 7 Response of  $G_{11}$

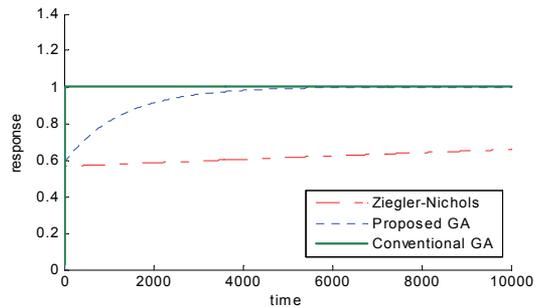


Fig. 8 Response of  $G_{11}$  with long time

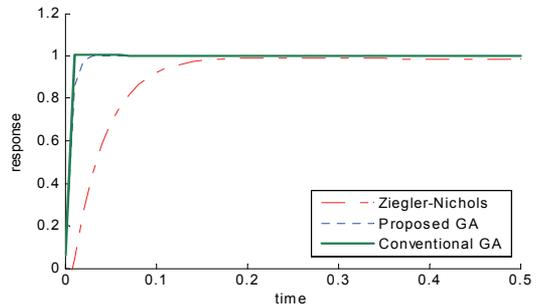


Fig. 9 Response of  $G_{22}$

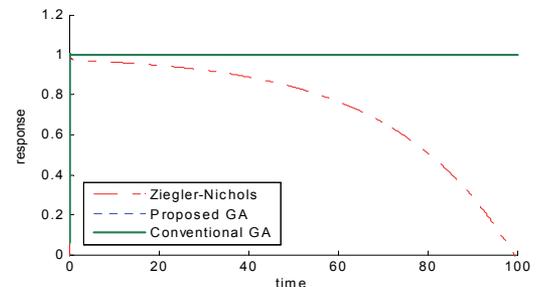


Fig. 10 Response of  $G_{22}$  with long time

해 집단 40을 적용하였다.

### 5.3 응답 비교

각각의 응답을 비교한 결과는 Figs. 7~10과 같다. Ziegler-Nichols 방법을 이용한 응답의 경우 수렴 시간이 너무 길어 마치 off-set이 발생한 것처럼 보이기 때문에 시간을 길게 설정하여 두 번 결과를 확인하였다.  $G_{22}$ 의 경우 I 이득 값이 양수이기 때문에 시간이 지남에 따라서 점차 발산하는 현상을 보였지만 제안한 방법을 적용하여 이러한 현상이 사라지는 것을 확인할 수 있다. Table 7에서 보듯이 제안된 방법이 Ziegler-Nichols 방법에 비해서 상승 시간과 수렴 시간이 크게 향상된 것을 확인할 수 있다.

일반적인 유전 알고리즘의 경우 성능 면에서 거의 이상적인 계단 함수에 가까운 응답을 보이고 있으나 비정상적으로 큰 I 이득 값과 Table 8에서 확인할 수 있듯이 긴 연산 시간을 가지게 되므로 실제로 구현하기에 큰 문제를 가지게 된다.

## 6. 결 론

이 논문에서는 Ziegler-Nichols 이득을 구하여 이를 기반으로 유전 알고리즘의 탐색범위를 결정해 주었다. 일반적인 유전 알고리즘의 경우 세대 수와 해 집단의 크기가 작으면 좋은 해를 보장할 수 없다. 그러므로 필연적으로 긴 연산 시간이 필요하게 된다. 이 때문에 실시간 제어에 적용하기 위해서 대상에 대한 Ziegler-Nichols 이득 값을 유전 알고리즘의 탐색 범위를 줄이는 기준으로 사용되는 방법을 제안하였다. 이를 기준으로 시간을 줄여줌으로써 최소한 Ziegler-Nichols 튜닝의 이득 값과 응답을 보장하면서 유전 알고리즘 보다 짧은 연산 시간을 가지는 것을 확인하였다.

그러나 현재 적합도를 평가하기 위해서는 반드시 수학적 모델링이 필요하므로 모델링이 부정확하거나 어려운 경우에는 좋은 성능을 보장하기 힘든 문제점이 존재한다. 하지만 어느 경우에도 모델링 작업을 통하여 도출된 수학적 모델은 실제 모델을 완벽하게 재현해 주는 것은 불가능하며 어느 정도의 오차를 가지기 마련이다. 따라서 적합도 함수와 탐색 범위 설정 방법의 개선을 향후 연구로 진행하

여 어느 정도 완벽한 모델이 아닌 상황에 대해서도 좋은 성능을 낼 수 있는 강인한 제어 알고리즘 연구를 진행하고 있다.

## 후 기

이 연구는 국토해양부 플랜트기술고도화사업의 연구비지원(C106A15000106A 085700200)에 의해 수행되었습니다.

## 참 고 문 헌

- (1) Joo, S. R. and Jin, G. G., 1998, "Controller Tuning Using a Real Coding Genetic Algorithm," Journal of the Research Institute of Maritime Industry. Vol. 8, pp. 243~253.
- (2) Kwak, H. Y., Joo, H. J., Joo, M. C. and Kim, J. B., 2008, "Evaluation of Seasonal Performance for Single-stage Desalination System with Solar Energy," The Korean Solar Energy Society, pp. 221~226.
- (3) Kim, J. S., Kim, J. H., Park, J. M., Park, S. M. and Heo, H., 2008, "Auto Tuning Pid Controller Based on Genetic Algorithm for Reverse Osmosis Plant," 4th Asian Conference on Multibody Dynamics, pp. 232~237.
- (4) Kim, J. S., Kim, J. H., Park, J. M., Park, S. M., Choi, W. Y. and Heo, H., 2008, "Auto Tuning Pid Controller Based on Improved Genetic Algorithm for Reverse Osmosis Plan," Proceedings of World Academy of Science, Engineering And Technology, Vol. 30, pp. 232~237.
- (5) Alatiqi, I. M., Ghabris, A. H. and Ebrahim, B., 1989, "System Identification and Control of Reverse Osmosis Desalination," Desalination, Vol. 75, pp. 119~140.
- (6) Shi, X. W., 2008, "Decoupling Control of Three-tank Liquid Level Systems Based on Feedforward Compensation," Journal of Institute of Electronics Engineers of Korea, Vol. 45(IE), pp. 36~41.
- (7) Lee, D. H., Park, S. M., Lee, J. B., Chae, K. S., Yeo, U. K. and Heo, H., 2007, "Model Reduction

Using Stochastic Balance Technique,” Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 17. No. 10, pp. 912~917.

(8) Park, S. M., Lee, D. H., Lee, J. B., Kwon, O. S., Kim, J. S. and Heo, H., 2007, “System Identification Using Stochastic Output Only,” Transactions of the Korean Society for Noise and

Vibration Engineering, Vol. 17. No. 10, pp. 918~922.  
(9) Kim, S. H., Cho, D. C., Lee, M. S., Oh, B. S., Kim, J. H. and Kim, I. S., 2009, “SEAHERO R&D Program and Key Strategies for the Scale-up of a Seawater Reverse Osmosis(SWRO) System,” Desalination 238, pp. 1~9.