

# 퍼지 시스템을 이용한 비선형 질소제거 SBR 공정의 모델링

## Modeling of Nonlinear SBR Process for Nitrogen Removal Using Fuzzy Systems

김동원\* · 박장현\*\* · 이호식\*\*\* · 박영환\*\*\*\* · 박귀태\*

Dong-Won Kim, Jang-Hyun Park, Ho-Sik Lee, Young-Whan Park, and Gwi-Tae Park

\* 고려대학교 전기공학과

\*\* 목포대학교 전기 및 제어공학부

\*\*\* 충주대학교 환경공학과

\*\*\*\* 충주대학교 정보제어공학과

### 요 약

본 논문에서는 비선형 생화학적 공정의 모델링을 위해 퍼지시스템이 응용된 것을 보인다. SBR 반응조에서 질소제거를 위한 수처리 공정이 제시되었으며, 이 공정의 ORP값을 모델링하고 동정하기 위해 서로 다른 후반부 다항식을 가진 퍼지시스템이 소개되었다. 퍼지모델링 결과를 비교하고 분석하며 또한 제안된 방법에 의해 비선형 공정이 합리적이고 효율적으로 모델링 될 수 있음을 본 논문에서 보인다.

### Abstract

This paper shows the application of fuzzy system for a modeling of nonlinear biochemical process. A wastewater treatment process for nitrogen removal in a sequencing batch reactor (SBR) is presented and fuzzy systems with different consequent polynomials in the fuzzy rules to model and identify the oxidation reduction potential (ORP) of the process are introduced. The paper compares, analyzes the results of fuzzy modeling, and shows the nonlinear process can be modeled reasonably well by the present scheme.

**Key words** : Fuzzy system, modeling of nonlinear process, fuzzy rules, SBR, ORP

### 1. 서 론

우리나라 수계의 주요 오염원은 인구, 산업시설, 가축, 양식장등이며, 여기서 배출되는 오염물질의 물리, 화학적 성상은 발생원에 따라 현저한 차이를 보인다. 비록 농도는 다르지만 거의 모든 오염발생원에서 질소, 인등과 같은 영양염류 오염물질이 배출되고 있다. 이렇게 하천과 호수등의 수계에 유입되는 영양염류 오염물질들은 수계 생물상을 변화시켜 생태계 교란을 야기하는 부영양화를 초래한다. 부영양화된 수계는 오락용수로 사용할 수 없을 뿐만 아니라 상수원수, 공업용원수, 농업용수로도 사용하기 어렵다 [1]. 그러므로 하수처리장에서 생물학적 질소제거는 수계의 보존과 부영양화 방지를 위한 목적으로 수행된다. 활성오니는 공해물질을 정화하기 위해 폐수가 미생물의 부유물과 혼합된 생물학적 공정이다. sequencing batch reactor (SBR)[2-5] 공정은 소규모 오수처리 시설에 적용되는 것중 하나로 운전방법의 변화에 따라 유기물질의 제거뿐 아니라 영양소 까지 제거되는 공정이다. SBR은 시간에 따른 주기적인 공정으로 하나의 반응기에서 모든 반응이 일어나며 부하의 처리 효율이 높다 [6]. 그

러나 간단한 장치에 비해 반응기내에서 발생하는 반응은 복잡하고 다양한 메커니즘을 가진다. 또한 반응물질의 농도에 따라 다양한 변화를 보인다. 그러므로 이러한 다양한 메커니즘과 복잡한 반응관계를 통하여 공정의 특성을 이해하고, 더 나아가 자동제어 시스템을 구현하여 전반적인 질소 제거 효율을 증가시키고, 유지비 절감과 효율적인 유지 관리를 위해선, SBR 공정을 모델링하여 효율적으로 공정의 제어와 감시, 그리고 최적화를 수행할 수 있는 환경을 만드는 것은 중요한 작업이다. 따라서 최근 들어 SBR 공정모델링에 대한 연구가 이차다항식과 유전자 알고리즘을 이용하여 진행되고 있다 [8-9]. 하지만 모델의 정밀도 [8]와 많은 연산시간을 필요로 하는 것 [9]은 해결해야 할 과제로 여전히 남아있다. 이를 위해 본 논문에서는 정확도가 높은 퍼지 시스템을 이용하여 질소제거를 위한 SBR 공정의 ORP 모델링에 목적을 둔다. 또한 질소제거를 위한 DO, ORP, pH의 실시간 변화를 관찰하여 질소제거특성을 검토하였으며 이를 통해 얻은 실제의 입출력데이터를 가지고 SBR 반응조의 질소제거 공정을 모델링 하였다. 설계된 모델의 성능비교를 위해 고차 선형시스템을 이용하여 질소제거 SBR공정을 모델링하여 비교 설명하고, 새로 제안된 모델의 성능이 보다 우수함을 보인다.

접수일자 : 2003년 8월 6일  
완료일자 : 2004년 2월 27일

## 2. 질소제거를 위한 SBR공정

본 논문에서는 폐수에서 질소나 인을 제거하기 위해 생물학적인 SBR 공정이 사용되었다. 활성오니에 있는 박테리아는 유해한 성분을 물이나 질소가스등의 무해한 성분으로 바꾸며 반응조에서 폐수는 활성오니와 섞여진다. 그러므로 활성오니는 폐수와 섞인 상태로 유지되기 위해 혼합작업이 필요하다. SBR 공정에서 폐수처리 작업은 채우고 제거하는(Fill and Draw)식의 활성오니 처리공정이며, 유입(Fill), 반응(React), 침전(Settle), 배출(Draw), 휴지(Idle)의 5단계로 이루어진다. 유입단계는 폐수를 반응조에 주입하는 것이며, 반응단계는 주입단계에서 시작된 반응을 완결시키는 것이다. 고형물이 분리되어 침전되는 침전단계와 침전된 상등액을 유출수로서 배출하여 반응조로부터 제거하는 배출단계, 시간적인 휴식기인 휴지단계로 구분된다. 전체 시스템의 구성은 다음과 같다. 본 논문에서 사용된 반응조는 단일 반응조에서 무산소, 혐기, 호기반응이 연속적으로 일어나는 SBR 반응조이다. 반응조는 아크릴로 제작하였으며 반응조의 용적과 실용적은 각각 15L 와 10L 이며, 처리용량은 3L 이다. 미생물의 혼합은 반응조내에 설치된 60rpm의 믹서를 이용하였고 동시에 반응조 바닥에 설치된 산소주입 포기장치에 의해 혼합이 이루어진다. 유출수는 솔레노이드 밸브를 달아 자동으로 조절되고 유입수량은 masterflux tubing pump (cole parmer model 7553 80)를 이용하여 조정되었으며 이들은 타이머에 의해 제어되었다. ORP, pH, DO 센서를 반응조의 벽면에 일정하게 고정시켜 track study시 연속모니터링 하였고 2주에 한번씩 보정하였다. 전체동작은 6시간을 한 주기(1cycle)로 해서 운전이 이루어진다. 무산소, 호기조건은 운전시간이 고정되어 있지 않고 반응조의 ORP나 DO 센서의 실시간 모니터링 자료에 의해 변화 운전되었다. 아울러 침전과 배수, 휴지기 시간은 각각 0.33hr, 0.17hr로 고정하였다. 반응조의 실험장치와 운전조건은 각각 그림 1과 표 1과 같다.

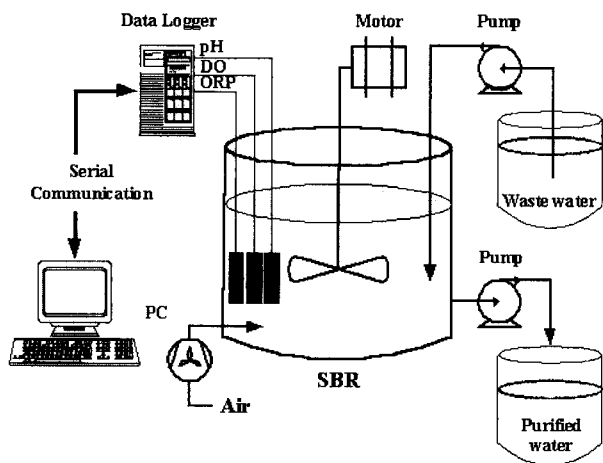


그림 1. 질소제거를 위한 반응조의 실험장치

Fig. 1. Experimental setup of SBR for nitrogen removal

그림 1에서 반응조인 SBR은 원통형으로 센서부와 구동부의 기기들이 장치되어 있다. 센서부는 항상 폐수에 잠겨있으며, ORP, DO, pH값을 주기적으로 읽어 들인다. 데이터 수집기는 센서부에서 측정된 값을 직렬통신으로 PC에 전달한다. SBR 상단에는 폐수를 공급하는 펌프가 있으며, 하단에는 정화수를 배출하는 펌프와 산소를 공급하는 펌프가 각각 연결되어 있다. 믹

서는 모터와 연결되어 폐수를 저어서 화학반응을 촉진시키는 역할을 한다. 각각의 펌프와 모터는 전기계전기와 연결되어 있으며 PC에서 내보내는 제어신호에 의해 on/off 된다.

표 1. SBR의 운전조건  
Table 1. Working condition of SBR

Parameter	Average
volume	10 l
SRT	30 d
MLSS	2500 mg/l
MLVSS/MLSS	0.701
Temperature	23± 2℃

실험에 사용한 시료는 충주 처리장에 유입되는 생활하수로서 시료의 종류와 상태는 표 2와 같다.

표 2. 시료의 종류와 상태  
Table 2. Constituent and state of material

Constituent	Range	Average	Standard deviation
pH	6.7~7.5	7.1	0.12
BOD <sub>5</sub>	50~85	63	14.4
COD <sub>Cr</sub>	112~152	131	18.8
TSS	31~52	45	6.9
VSS	23~46	36	7.4
NH <sub>4</sub> -N	18~28	22	3.5
TP	2.18~2.22	2.3	0.05

수질분석 항목으로는 BOD(total), COD<sub>Cr</sub> (total), TSS/VSS, TKN, NH<sub>4</sub>-N, NO<sub>2</sub>-N, NO<sub>3</sub>-N, TP 등으로 모든 분석방법은 수질오염공정시험법과 standard methods 및 일부 기기분석법에 의해 수행되었다. ORP, DO, pH의 실시간 측정은 ALMEMO사의 센서 (pH: FY8PHK, ORP: FYA8RXEN, DO:FYA64002)를 사용하여 data logger (ALMEMO 20090-8)에 연결하여 측정하였다. 실험주기는 유입수는 일주일에 1회, 유출수는 2일에 1회, 반응조 MLSS분석은 3일에 1회 분석하였고, SRT는 30일로 유지하였다.

## 3. 퍼지 시스템

퍼지시스템은 퍼지집합, 퍼지 if-then 규칙, 퍼지추론등의 개념에 기반한 연산구조로 이루어졌다. 본 논문에서는 비퍼지화시 연산시간의 부담을 피할 수 있는 TS타입의 퍼지시스템을 이용한다. 일반적인 퍼지시스템은 Mamdani가 제안한 형태의 모델로 [10] 퍼지규칙의 전반부와 후반부 모두 퍼지 집합을 이용하고 있다. 그러므로 입력변수에 대하여 전반부 멤버쉽 함수의 연산과 후반부 멤버쉽함수의 연산을 함으로써, 많은 연산시간을 필요로 하게 된다. 따라서 이러한 단점을 해결하고, 성능개선을 위해 최근에는Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System (ANFIS) [11]나 TS [12,13] 퍼지모델과 같이 퍼지규칙의 후반부를 멤버쉽함수가 아닌 선형식을 이용한 경우가 연구되었다. 그러므로 본 논문에서는 위와 같은 장점을 이용하기 위해 TS 퍼지시스템을 이용하였으며, 퍼지규칙의 다항식으로 일차선형식뿐만 아니라, 다양한 형태의 모델을 이용한다. 표 3에서 규칙의 다양한 후반부 다항식 형태를 나타내었으며, 간단하게 2 입력에 대한 다항식 형태와 퍼지규칙을 설명한다. 시뮬레이션 결과에서 알 수 있듯이 이

의 형태에 따라 다양한 결과를 기대할 수 있다. 멤버십 함수로는 가우시안형을 사용하였으며 그림 2에서 멤버십 함수형태와 파라미터를 나타내었다.

표 3. 퍼지규칙의 다양한 후반부 다항식 형태  
Table. 3 Different forms of the polynomials in the fuzzy rule.

Input Types	1	2	3
Type 1	Constant	Constant	Constant
Type 2	Linear	Bi-linear	Tri-linear
Type 3	Quadratic	Bi-quadratic	Tri-quadratic
Type 4	Modified Type 3		

- Bi-linear =  $b_0 + b_1x_1 + b_2x_2$
- Bi-quadratic = Bilinear +  $b_3x_1x_2 + b_4x_1^2 + b_5x_2^2$
- Modified Bi-quadratic = Bilinear +  $b_3x_1x_2$

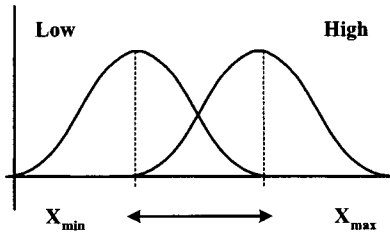


그림 2. 가우시안 멤버십 함수와 파라미터  
Fig. 2. Gaussian membership function and its parameter

퍼지규칙과 관련하여, 2 입력과 각 입력에 대하여 2개의 멤버십 함수를 고려하면 다음과 같은 규칙형태를 보인다.

- Rule 1: If  $x_1$  is  $A_1$  and  $x_2$  is  $B_1$ , then  $y_1 = f_1^k(x_1, x_2)$
- Rule 2: If  $x_1$  is  $A_1$  and  $x_2$  is  $B_2$ , then  $y_2 = f_2^k(x_1, x_2)$
- Rule 3: If  $x_1$  is  $A_2$  and  $x_2$  is  $B_1$ , then  $y_3 = f_3^k(x_1, x_2)$
- Rule 4: If  $x_1$  is  $A_2$  and  $x_2$  is  $B_2$ , then  $y_4 = f_4^k(x_1, x_2)$

여기서,  $A_i$ 와  $B_i$ 는 규칙의 전반부 멤버십 함수로 입력변수인  $x_1$ 과  $x_2$ 와 관련되며,  $f_j^k(x_1, x_2)$ , ( $k=1, \dots, 4$ )는  $j$ 번째 규칙에서 표 3에서 보여진 Type K 를 갖는 규칙의 후반부 다항식이다.

최종적인 추론값  $\hat{y}$ 는 다음과 같다.

$$\hat{y} = \frac{\sum_{j=1}^n w_{ji}y_j}{\sum_{j=1}^n w_{ji}} = \frac{\sum_{j=1}^n w_{ji}f_j^k(x_1, x_2)}{\sum_{j=1}^n w_{ji}} \quad (1)$$

여기서,  $n=1, \dots, 4$ ,  $w_{ji}$ 는  $j$ 번째 규칙,  $i$ 번째 데이터에 대한 전반부 멤버십함수의 적합도를 의미한다. 후반부 파라미터의 동정은 주어진 입출력데이터를 이용하여 최소자승법에 의해 구한다.

#### 4. 시뮬레이션 및 결과고찰

위에서 언급한 SBR 공정에서 급변하는 ORP를 모델링하

기 위해 그림 1과 같이 질소제거를 위한 반응조의 실험장치를 갖추었다. 이때 반응조의 DO, ORP, pH의 실시간 변화를 관찰하여 실제의 입출력데이터를 얻었으며, 이것을 이용하여 모델링을 수행한다. 시스템의 입력변수로는 반응조에 딸린 각 펌프를 on/off 시키는 스위치와 이에 따라 변화하는 ORP, DO, pH값이 사용되었으며, 출력변수로는 비선형성과 불확실성이 강한 ORP값이 사용되었다. 입력변수로 사용된 ORP는 출력변수로 사용된 것보다 한 샘플링이 지연된다. 총 데이터 개수는 71개가 사용되었으며, 모두 학습용 데이터로 이용하였다. 모델의 정밀도와 성능을 평가하기 위한 성능지수 (PI)는 평균자승오차 (mean squared error: MSE)를 사용하였으며, 다음과 같이 계산된다.

$$PI = \frac{1}{71} \sum_{i=1}^{71} (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (2)$$

여기서,  $y_i$ 는 실제측정치이며,  $\hat{y}_i$ 는 모델의 출력값이다.

표 4에서, 제안된 퍼지시스템으로 비선형 SBR 반응조의 질소제거 공정을 모델링한 결과를 나타내었다. 그림 3에서는 각 입력변수당 2개 멤버십 함수를 할당하고 이때의 파라미터 범위를 보여준다. 또한 그림 4와 5에서는 각 입력변수당 [2, 2, 3, 3] 혹은 [3, 3, 2, 2]개의 멤버십 함수를 설정했을때의 파라미터와 범위를 볼 수 있다.

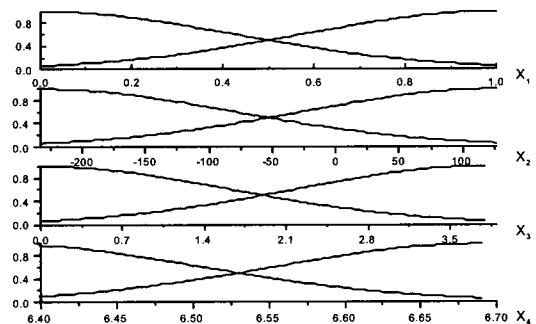


그림 3. 각 입력변수당 2개의 멤버십 함수를 할당했을때의 파라미터와 범위  
Fig. 3. Parameters and its range of membership function of each input variable assigned with 2 membership functions

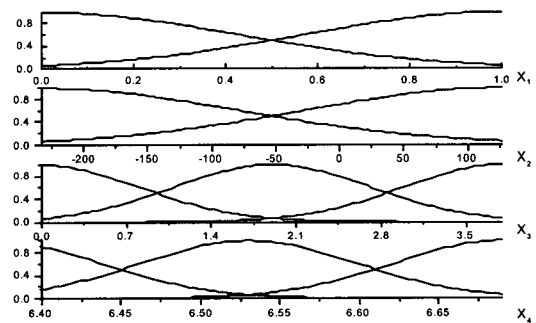


그림 4. 각 입력변수당 [2,2,3,3]개의 멤버십 함수를 할당했을때의 파라미터와 범위  
Fig. 4. Parameters and its range of membership function of each input variable assigned with [2,2,3,3] membership functions

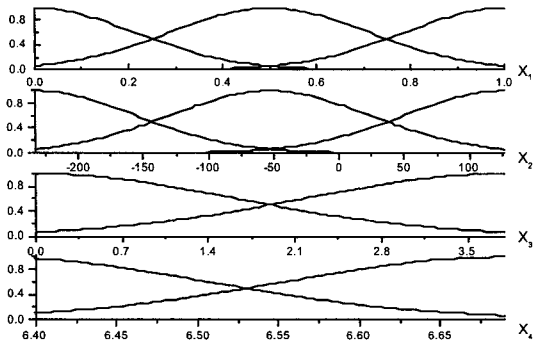


그림 5. 각 입력변수당 [3,3,2,2]개의 멤버쉽 함수를 할당했을때의 파라미터와 범위

Fig. 5. Parameters and its range of membership function of each input variable assigned with [3,3,2,2] membership functions

표 4에서 보듯이 전체 4입력에 대하여 각각 멤버쉽 함수를 2개 혹은 3개를 할당했을 때 퍼지 규칙의 후반부 다항식에 따른 결과값이 모두 상이함을 알 수 있다. 여기서 가장 좋은 성능은 규칙의 후반부가 일차다항식인 Type 2이며, 멤버쉽 함수를 각 입력변수당 각각 2,2,3,3 씩 할당했을 때 1.9303을 얻었다. 그러나 후반부 다항식이 2차식인 Type 3인 경우에는 다항식의 파라미터가 너무 많은 관계로 좋은 성능을 내지 못하고 발산함을 알 수 있다. 퍼지시스템과 성능을 비교하기 위해 가장 일반적인 형태인 선형모델을 이용하여 같은 공정인 SBR 반응조의 질소제거 공정을 모델링 하였다. 선형모델은 일차식과 이차식을 이용하였으며, 각각의 선형모델 구조는 식 (3)과 식 (4)에서 나타내었다. 선형모델의 파라미터인 각 계수들은 최소자승법 (least square estimation)을 이용하여 구했으며, 최종적으로 식 (3)은 350.94, 식 (4)는 119.33을 얻었다. 따라서 상대적으로 퍼지모델이 선형모델에 비해 더욱 우수한 정밀도를 가지는 것을 알 수 있으며, 퍼지시스템과 같은 지능기법을 이용하면 합리적이고 효율적으로 비선형 시스템을 모델링 할 수 있음을 확인하였다.

표 4. 퍼지시스템의 시뮬레이션 결과  
Table 4. Simulation results of fuzzy system

consequent type	Fuzzy system		
	No. of fuzzy rules		
Type 1	2x2x2x2	2x2x3x3	3x3x2x2
Type 2	41.01	17.46	20.71
Type 3	3.663	1.930	4.076
Type 4	2.073	1.529e8	1.088e1
Type 4	2.476	2.540	6.764

$$y = 2411.6 + 41.773x_1 + 0.65552x_2 + 23.423x_3 - 376.61x_4 \quad (3)$$

$$y = 32693 - 936.09x_1 + 0.52771x_2 + 100.54x_3 - 9854.4x_4 + 984.49x_1^2 - 0.0011349x_2^2 - 24.122x_3^2 + 741.38x_4^2 \quad (4)$$

그림 6에서는 시스템의 실제 출력값인 ORP와 퍼지시스템, 그리고 선형모델의 출력값을 나타낸 것이다. 그림에서 보듯이 퍼지시스템이 실제의 값과 매우 유사함을 알 수 있다.

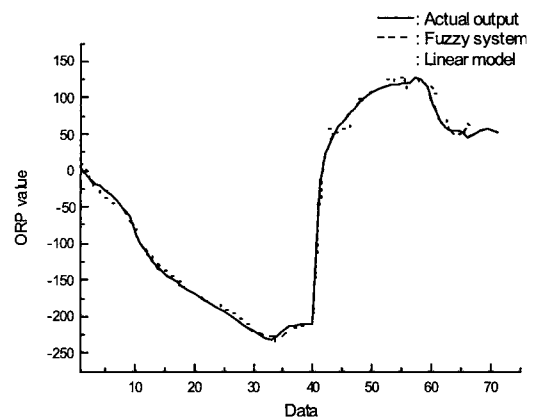


그림 6. 실제데이터와 퍼지 및 선형모델의 출력값 비교  
Fig. 6. Comparison of actual data, fuzzy and linear model

### 5. 결론 및 추후과제

본 논문에서는 질소제거를 위한 SBR 공정에서 유입수질에 따라 매우 민감하게 반응하는 ORP를 모델링 하기 위해 퍼지시스템이 사용되었다. 퍼지시스템은 규칙의 후반부 다항식에 따라 각각 4가지 형태로 구성되었으며 이를 이용하여 비선형 시스템인 SBR공정을 합리적이고 효율적으로 모델링 할 수 있었다. 앞으로의 과제는 효율적인 모델링 결과를 바탕으로 SBR 공정을 최적화 할 수 있는 제어기의 구현을 실행하는 것이며, 또한 유전자 알고리즘과 같은 최적화 이론을 이용하여 퍼지시스템의 구조를 최적화 하여 모델링을 수행하고 이의 결과를 비교 분석하는 것이다.

### 참고문헌

- [1] 김창원, “생물학적 질소제거 공정개발”, 연세환경심포지움 발표 논문 요약집.
- [2] J. Moreno, “Optimal time control of Sequencing Batch Reactors for industrial wastewaters treatment,” Proceedings of the 36th Conference on Decision & Control, pp. 826-827, 1997.
- [3] V.V. Lira, P.R. Barros and J.S. Neto, “Automation of an Anaerobic-Aerobic Wastewater Treatment Process,” IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference, pp. 1177-1182, 2001.
- [4] 김창원, “활성슬러지 공정 연속호흡율 측정기 및 MLSS meter와 이를 이용한 활성슬러지 공정제어,” Eco-2 상하수도 정보화 세미나, 2001.
- [5] H. Kim, and O. J. Hao, “pH and oxidation-reduction potential control strategy for optimization of nitrogen removal in an alternating aerobic anoxic system,” Water Environ Res, vol 73, pp. 95-102, 2001.
- [6] 심문용, 부경민, 박지영, 전병희, 김창원, 우혜진, “On-line sensor (ORP, DO, pH)를 이용한 SBR (Sequencing Batch Reactor) 공정진단에 대한 기초평가,” 대한환경공학회 춘계학술연구발표회 논문집, pp. 163-170, 2003.

- [7] 이호식, "TKN/COD비가 높은 소규모지역 오수의 생물학적 영양소 제거,"충주대학교 논문집, 2001.
- [8] 김동원, 박장현, 이호식, 박영환, 박귀태, "이차다항식을 이용한 질소제거 SBR공정의 모델링," Proceedings of KFIS Fall Conference , pp. 145-148, 2003.
- [9] 김동원, 박장현, 이호식, 박영환, 박귀태, "유전자 알고리즘 기반 다항식 뉴럴네트워크를 이용한 비선형 질소제거 SBR 공정의 모델링,"Journal of Control, Automation and Systems Engineering, (in press)
- [10] E. M. Mamdani, "Application of fuzzy logic to approximate reasoning using linguistic synthesis," IEEE Trans. Comput., vol. 26, pp. 1182-1191, 1977.
- [11] J. S. Jang, "ANFIS: Adaptive-network based fuzzy inference system,"IEEE Trans. Syst., Man, Cybern., vol. 23, pp. 665-684, 1993.
- [12] M. Sugeno and T. Yasukawa, "A Fuzzy-logic-based approach to qualitative modeling," IEEE Trans. Fuzzy Syst., vol. 1, pp. 7-31, 1993.
- [13] T. Takagi and M. Sugeno, "Fuzzy identification of systems and its application to modeling and control," IEEE Trans. Syst., Man, Cybern., vol. 15, pp. 116-132, 1985.



**박 장 현 (Jang-Hyun Park)**

2003년~현재 목포대학교 제어시스템 공학과 전임강사

관심분야 : 비선형제어, 지능제어, 퍼지추론, 신경망 이론.



**이 호 식 (Ho-Sik Lee)**

2002년~현재 : 충주대학교 환경공학과 부교수

관심분야 : 소규모 마을 하수도관리, 자동제어를 이용한 질소, 인, 폐수처리.



**박 영 환 (Young-Whan Park)**

2002년~현재 : 충주대학교 정보제어공학과 조교수

관심분야 : 적응제어, 비선형제어, 지능제어 이론

**저 자 소 개**



**김 동 원 (Dong-Won Kim)**

2002년~현재 고려대학교 대학원 전기공학과 박사수료

관심분야 : 소프트 컴퓨팅 기반 뉴로-퍼지 시스템, GMDH-Type 알고리즘, 유전자 알고리즘, 지능 로봇

Phone : 02. 929. 5185  
 Fax : 02. 929. 5185  
 E-mail : upground@korea.ac.kr



**박 귀 태 (Gwi-Tae Park)**

1981년~현재 : 고려대학교 전기공학과 교수  
 2000년~현재 : (사) IBS Korea 회장

관심분야 : 소프트 컴퓨팅 기법(퍼지이론, 신경망 이론, 유전자 알고리즘), 적응 신호처리, 컴퓨터 및 제어 네트워크, 홈 오토메이션, 보안시스템, 스마트 카, 지능 로봇, 지능제어, 인텔리전트빌딩 시스템

Phone : 02. 3290. 3218  
 Fax : 02. 929. 5185  
 E-mail : gtpark@korea.ac.kr