

## 유전 알고리즘을 이용한 폭기조내 용존산소농도 제어

김창현\* · 허동렬 · 김상호 · 정형환  
동아대학교 전기공학과

### Control of the Dissolved Oxygen Concentration in the Aeration Using Genetic Algorithms

Chang-Hyun Kim · Dong-Ryol Hur · Sang-Hyo Kim · Hyeng-Hwan Chung  
Department of Electrical Engineering at Dong-A University

**Abstract** - It is the time-varying dissolved oxygen (DO) dynamics that requires controlling for maintaining the DO concentration in the aeration tank. Many linear controllers have thus been applied. Because of the nonlinearity of the oxygen transfer function together with the time-varying respiration rate, however, the linear controllers are found to poorly perform in many cases. To overcome this limitation, a number of advanced controlling techniques have been developed and applied.

In this study, designed GA-PI Controller using genetic algorithm(GA). Genetic algorithms (GAs) are search algorithms based on the mechanics of natural selection and natural genetics. As result of computer simulation, GA-PI controller shows the better control performance especially under the condition of the continuously changing DO set-point. This result represents that GA-PI controller can be a good measure to control the DO concentration in the SBR process which requires the sequential DO set-point change to accomplish the nitrification and denitrification in a single reactor.

#### 1. 서 론

공정제어 기술의 발전과 컴퓨터 및 자동화기기의 개발에 따라, 1970년대 이후 폐하수 처리를 위한 여러 가지 자동제어 기술들이 연구되어 왔다. 이러한 기술 발전은 계속되는 수질 규제 강화, 경제성 확보의 필요성, 처리장 복잡성의 증가, 그리고 운전을 위한 처리공정 모델의 필요성 등에 의해 더욱 가속화되고 있다[1]. 최근에는 이러한 기술들을 대규모 폐수처리장에서 적용하여, 실제로 처리수질이 개선되고 운전비용이 절감되었음을 보여주는 결과들이 발표되고 있다.

폐수처리 자동제어 기술을 사용하여 폐수처리장으로 유입되는 외부로부터의 부하 변동에 의한 처리장 내부 상태를 실시간으로 파악하여 대응함으로써 처리장의 비정상 운전을 방지하고, 안정적으로 운전 조건을 관리하여 처리수질을 개선할 수 있다[2].

용존산소(DO : dissolved oxygen) 농도는 활성슬러지 공정이 호기성 공정이기 때문에 제어되어야 할 가장 중요한 변수이다. 그러나 DO 자체의 동특성은 비교적 간단함에도 불구하고, 유입 부하의 변동, 비선형성, 시간에 따라 변하는 동특성, 그리고 공정과 센서의 잡음(noise) 때문에 제어에 어려움을 겪고 있다. 시간에 따라 변화하는 유입 부하는 DO 제어의 필요성을 야기하고, 산소 전달 속도는 일정하게 유지되지 않기 때문에 DO의 동적인 특성은 시간에 따라 계속적으로 변하게 된다. 또한 산소 전달량은 낮은 DO 농도에서는 비교적

크지만, 포화농도에 가까워지면, 급격히 줄어드는 비선형 특성을 가지고 있다[3-5]. 이러한 특성 때문에 일반적인 PID 제어기에 의한 DO 제어가 어려운 것으로 알려져 왔다. DO 제어는 처리하고자 하는 폐수에 적합한 미생물이 잘 성장할 수 있도록 적정 수준으로 DO 농도를 유지하는 것이 목적이다. 비용절감 측면에서도 활성슬러지 공정에서의 에너지 비용중 대부분이 DO 공급을 위한 모터와 펌프, 송풍기 등이 차지하고 있기 때문에, 최적 DO 제어는 필수적이다. 따라서 본 논문에서는 자연 생태계의 진화를 모의한 유전 알고리즘을 이용하여 운전조건변화에 따른 제어효과를 제시하고자 한다.

#### 2. 용존산소 동특성 모델

DO는 대부분의 생물학적 공정의 상태변수와는 다르게 물리적 변수로서 깊은 생물학적 지식이 필요치 않다. 1개의 폭기조에 대해 물질수지식을 세우면 다음 식 (1)과 같다.

$$\frac{dDO}{dt} = OTR - OUR - \frac{F}{V}(1+r)DO + \frac{F}{V}DO_{in} \quad (1)$$

여기서 DO는 폭기조내의 용존산소 농도(mg/l), F는 유입되는 폐수의 유량(m<sup>3</sup>/hr), V는 폭기조의 체적(m<sup>3</sup>), r은 반송슬러지의 반송비, DO<sub>in</sub>은 유입되는 폐수의 용존산소 농도이다. 위 식에서 첫 항 OTR(oxygen transfer rate)은 폭기 시설에 의해서 기상의 산소가 액상으로 전달되는 속도이다. 셋째 항과 넷째 항은 수리학적인 물질수지 항이다.

OUR(oxygen uptake rate)은 미생물의 유기물 섭취로 인한 mixed liquor내에서의 DO 소비속도로서 미생물의 농도와 증식 속도, 그리고 사멸속도의 복합적 함수로 알려져 있다. 일반적으로 OUR은 미생물 농도(X)와 미생물의 사멸율(X<sub>d</sub>)에 비례한다. 즉, 산소 소비속도( $\mu_x \cdot X$ )와 미생물의 사멸 속도(X<sub>d</sub> · X)의 합으로 계산된다.

$$OUR = \gamma_S \cdot \mu_x \cdot X + \gamma_e \cdot X_d \cdot X \quad (2)$$

OUR은 들어오는 유기물의 농도, 유속, 미생물의 상태, DO 농도에 따라 크게 변하기 때문에 수분마다 계속적으로 변하고 공정의 외란으로 작용한다. OUR은 respirometer로 직접 측정할 수 있으며, 공정부하의 지표로서 해석되고, DO의 설정값 결정과 반송슬러지량 제어에 유용하게 쓰일 수 있다.

OTR은 액상이 근접한 기상으로부터 산소를 받아들이는 능력을 나타내고 산소 전달계수(oxygen transfer coefficient, K<sub>L</sub>a)와 포화 용존산소와 현재 용존산소 농도의 차(DO<sub>sat</sub> - DO)의 함수로 표현된다.

$$OTR = K_{L,a}(DO_{sat} - DO) \quad (3)$$

K<sub>L</sub>a는 공정에서 폭기용량의 척도로서 공기량, 교반 정도, 온도, pH, 폐수의 특성에 영향을 받는다. 이 중 온도와 공기량(air flow rate, AFR)의 영향이 가장 크다. 먼저 온도의 K<sub>L</sub>a에 대한 영향은 다음의 식 (4)와 같다.

$$K_{La}(T) = K_{La}(20)\theta^{(20-T)} \quad (4)$$

여기서  $K_{La}(T)$ 는 주어진 온도 T에서의  $K_{La}$ 이고,  $K_{La}(20)$ 는 20°C에서  $K_{La}$ 이고  $\theta$ 는 1.01에서 1.037 사이의 상수이다.  $K_{La}(20)$ ,  $\theta$ 는 각 폐수 처리 공정마다 다른 상수값이다. 공기량이  $K_{La}$ 에 미치는 영향은 지수 함수, 비선형 함수, 선형 함수로 나타낼 수 있으나, 일반적으로 선형으로 표현된다.

$$K_{La} = K_0 + K_a U_{air} \quad (5)$$

일반적으로 자연적인 재폭기 항인  $K_0$ 는  $K_a U_{air}$  항에 비해 매우 작기 때문에 무시된다. 공기량에 따른 영향을 알기 위해서는 폭기조에서의 일련의 실험이 필요한데 공기량의 인위적인 step 변화를 준 다음 시간에 따른 용존산소 농도를 측정하여 구한다. 구해진 자료로부터 최소자승법이나 nonlinear fitting으로  $K_{La}$ 와 공기량의 관계를 구한다.  $K_{La}$ 는 계속적으로 변화하기 때문에 주기적으로 재 계산해 주어야 한다.

OUR과 OTR의 수식을 원래 DO 물질수지식에 대입하면 다음의 식 (6)~(8)과 같다.

$$\frac{dDO}{dt} = K_0(DO_{sat} - DO) + K_a \cdot U_{air}(DO_{sat} - DO) - OUR - M(1+r)DO + M \cdot DO_{in} \quad (6)$$

$$\frac{dS}{dt} = -\frac{1}{Y} \cdot \mu(S) \cdot X - M(1+r)S + M \cdot S_{in} \quad (7)$$

$$\frac{dX}{dt} = \mu(S) \cdot X - X_d \cdot X - M(1+r)X + r \cdot X_r \quad (8)$$

여기서,

$$M = \frac{F}{V}$$

$$OUR = \gamma_S \cdot \mu(S) \cdot X + \gamma_e \cdot X_d \cdot X$$

$$\mu(S) = \frac{\mu_{max} \cdot S}{K_s + S}$$

### 3. 유전 알고리즘을 이용한 최적 PI 제어기 설계

컴퓨터 제어 시스템은 외란의 감지, 측정 잡음의 여과, 간접 변수의 계산, 측정 정보의 축약 그리고 제어 전략의 계산 등의 여러 가지 역할을 가지고 있다. 처리장에는 많은 측정점과 조작 변수들이 있지만, 대부분의 제어 회로들은 분리될 수 있다. 이는 보통의 경우에는 복잡한 다중입력/다중출력 제어기를 적용할 필요없이, 다수의 간단한 제어기들에 의해 대신 제어될 수 있다는 것을 의미한다.

최근에 개발되고 있는 많은 현대제어 이론, 예를 들면 적응제어, 예측제어, 모델근거 제어 등은 정확한 모델이 보장될 때 원하는 제어성능을 낼 수 있다. 공정 산업에서 대부분의 제어 작업은 비례-적분-미분(proportional-integral-derivative, PID) 제어기에 의해 수행되고 있다. PID 제어기는 구조가 간단하고 현장 조업자들에게 익숙하고 강건하기 때문에 오랫동안 사용되어 왔고 앞으로도 계속 사용될 것이다. 따라서 본 논문에서는 PID 제어기의 종류 중에서 가장 널리 사용되는 비례-적분(proportional-integral, PI) 제어기를 유전알고리즘을 이용하여 설계하였다. 이는 이 제어기가 안정성(proportional)과 정상 상태의 오프셋(integral)을 제거하는 가장 간단한 형태이기 때문이다.

#### 3.1 유전알고리즘

유전 알고리즘(Genetic algorithms)은 자연계의 진화원리를 모방하여 강한 전역적인 탐색능력을 보유하고 있기 때문에 복잡한 최적화 문제를 해결하는 도구로 이용되고 있다(6).

1) 부호화 및 집단의 초기화

유전 알고리즘에서 염색체 상의 유전자(gene)는 2진 값을 갖는 비트(bit) 단위로 구성되며, 염색체는 유한길이의 2진 문자열로 표현된다. 이것은 초기에 길이가 M

이고 N개의 문자열을 갖는 집단을 생성시킨다.

2) 적합도(fitness)의 평가

유전 알고리즘은 해집단 내 개체간의 우열을 평가하여 더 나은 해집단을 형성하기 위하여 적합도를 필요로 하는데 이는 주로 목적함수로부터 계산된다.

3) 복제(reproduction)

복제 연산자는 잘 적응한 해들은 살아남고 잘 적응하지 못한 해들은 도태 되도록 유도함으로써 자연 선택(natural selection) 현상을 모델링한다. 즉, 높은 적합도를 가진 염색체일수록 다음 세대에 복제될 확률이 높다. 복제의 방법은 여러 가지가 있지만 보통 룰렛 휠에 의한 선택 방법(roulette wheel selection)을 사용한다.

4) 교배(crossover)

생태계에서 염색체는 각각의 일부 유전자를 서로 교환하는 현상이 발생한다. 이러한 현상을 교배라 한다. 교배를 통해 유전자가 교환되는 과정은 유한 개수의 염색체를 갖는 개체가 생식을 통한 유전적 다양성을 얻는 것과 관련하여 중요한 현상이다. 일반적으로 두 스트링간 교차가 일어날 확률은 0.6~0.95 범위로 설정한다.

5) 돌연변이(mutation)

유전자의 돌연한 형태 변화로 새로운 형질이 발생하게 되는 현상을 돌연변이라 한다. 돌연변이는 생물의 진화에서 교차와 마찬가지로 중요한 요인이 된다. 일반적으로 유전 알고리즘에서는 돌연변이에 의해 국부 탐색(local search)은 물론 탐색 공간을 다양하게 이동하는 것이 가능하다. 그러나, 한편으로 돌연변이는 환경에 대한 적응성과는 무관하게 랜덤하게 발생하므로 그 발생 확률은 0.001~0.01 범위에서 설정하고, 너무 크게 하면 중요한 형질을 잃을 가능성이 있다. 따라서 너무 크지 않도록 사전에 주의해서 선택해야 한다.

### 3.2 GA-PI 제어기 설계

본 논문에서는 PI 제어기의  $K_p$ ,  $K_i$ 의 파라미터를 구하기 위하여 유전 알고리즘을 적용하였다. 활성슬러지 공정은 구체적인 수식모델을 구하기에는 유입폐수의 변화가 너무 심하고 계산되어야 할 변수가 너무나 많다. 그래서 수식모델을 필요로 하는 model-based 제어기를 사용하는 것은 어려운 일이고 대부분의 화학공정에서 원하는 공정 출력은 대부분이 어떤 한 값으로 고정되어 있기 때문에 적응제어나 예측제어를 사용하기도 곤란하다. 반면 GA-PI 제어기는 현장 조업자들이 이해하기 쉬워 조업자들의 경험이나 직감을 충분히 활용할 수 있고 공정의 변화에 대해 상당히 안정된 제어기이므로 활성슬러지 공정에는 GA-PI 제어기가 적합한 것으로 사료된다.

따라서 본 논문에서 유전 알고리즘을 합성하는 방법은 다음과 같다. GA-PI 제어기의 파라미터 모듈을 1개의 문자열로 만들어 총 N개의 문자열로 해집단을 구성하였다. 그리고 해집단의 각 스트링을 평가하기 위하여 사용된 적합도 함수는 용존산소농도 설정값을 변화시키면서 제어기의 제어 효과를 비교하기 위해서는 각 단계에서의 오차 제곱의 합이 제어성능을 가장 잘 반영해 줄 수 있는 지표로 오차 제곱의 합을 사용하였다.

$$\text{fitness} = \frac{1}{1 + \sum_{k=1}^M [e(t)]^2} \quad (9)$$

여기서, k는 한 문자열이 PI 제어기 파라미터와 합성하여 시스템에 적용되었을 경우의 한 샘플링을 말하며 M은 총 샘플링 개수이다.

### 4. 시뮬레이션 결과 및 고찰

컴퓨터 시뮬레이션에 사용한 반응기의 구성 및 운전조건은 다음과 같다.

$$F=1000 : \quad \% \text{ Flow} = 1000 \text{ l/hr}$$

V=630 : % Volume=630 l  
 DO<sub>sat</sub>=10 : % Saturated DO=10 mg/L  
 DO<sub>ref</sub>=2 : % DO setpoint value=2mg/L  
 DO<sub>in</sub>=0 : % Influent DO=0 mg/L  
 h=1/360 : % Sampling time=1/360 hr(10sec)

또한 GA-PI 제어를 이용한 용존산소농도 제어의 Block diagram을 그림 1. 나타내었다. 또한 시뮬레이션을 위한 운전 조건은 표 1과 같다.

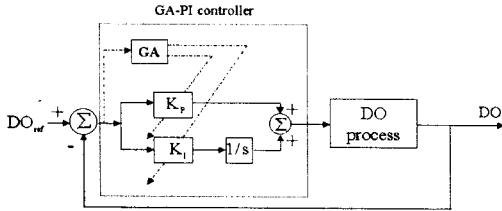


Fig 1. Block diagram of DO using GA

Table 1. The operating conditions used of for simulation

	DO set-point	Load (Respiration)	Control
Condition 1	No	Sine	No
Condition 2	DO(2)->DO(4)	Sine	Yes
Condition 3	DO(2)->DO(1)	Sine	Yes

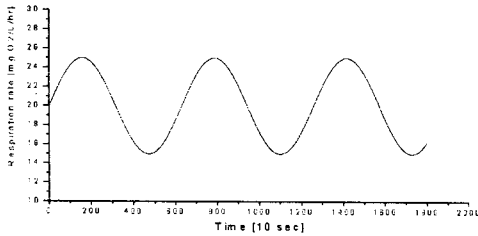


Fig 2. The pattern of respiration rate in the aeration tank at operating condition 1.

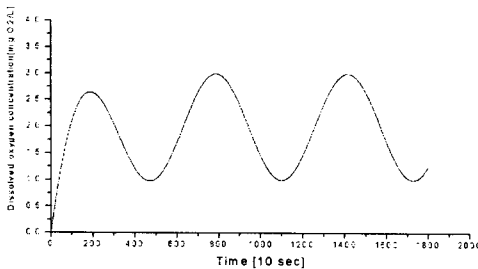


Fig 3. The dissolved oxygen dynamics in the aeration tank at operating condition 1.

운전 조건 1인 DO set-point의 변화는 주지 않고 폭기조내 호흡률 변화로 대표되는 외란이 있을 때 제어기 없이 일정한 공기유량을 공급하는 경우 폭기조내 용존산소농도의 변화를 보여주고 있다. 호흡률 변화는 sine 함수의 거동을 보이는 것으로 모사하였다. 그림 2와 3은 운전조건 1에서의 호흡률 변화와 용존산소농도 동특성을 보여준다.

운전조건 2는 요구되는 용존산소농도(DO set-point)를 2에서 4mg/L로 변화시키고 GA-PI제어기로 제어하여 그림 4에 나타내었고, 운전조건 3은 2mg/L에서 1mg/L로 변화시키고 GA-PI 제어를 적용한 경우에 대해서 그림 5

에 나타내었다.

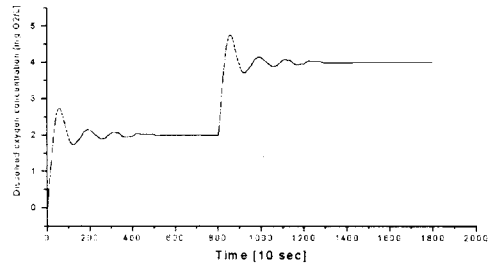


Fig 4. The dissolved oxygen dynamics in the aeration tank at operating condition 2.

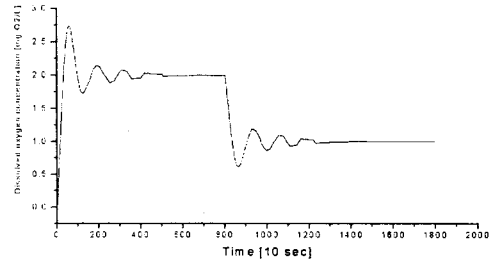


Fig 5. The dissolved oxygen dynamics in the aeration tank at operating condition 2.

## 5. 결 론

폭기조내 용존산소농도 동특성을 제어하기 위하여 자연 생태계의 진화를 모의한 유전 알고리즘을 이용하여 운전조건 변화에 따른 제어효과를 제시하고자 GA-PI 제어를 적용하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 유전알고리즘을 이용한 PI 제어기의 파라미터 선정이 매우 효과적임을 알 수 있었다.
  - 2) 호흡률 변화와 같은 외란이 지속적이고 요구되는 용존 산소농도 또한 계속 변화시킬 필요가 있는 폭기조 제어의 경우 운전조건에 따라 제안한 GA-PI 제어기법이 효과적인 제어 결과를 얻을 수 있었다.
- 향후 다양한 외란변화와 실제 현장 실험과 비교 검토가 이루어져야 할 것으로 사료된다.

## (참 고 문 헌)

- [1] Olsson Gustaf, "Advancing ICA Technology by elimination the constraints", Wat. Sci. Tech., Vol. 28, No. 11-12, 1993
- [2] Holmberg, U., Olsson, G. and Andersson, B., "Simultaneous DO control and respiration estimation," Wat. Sci. Tech., Vol. 21, pp. 1185-1195, 1989
- [3] Sorensen, J., Thorngerg, D. E. and Nielsen, M. K., "Optimization of a nitrogen-removal biological wastewater treatment plant using on-line measurements," Water Environment Research, Vol. 66, No. 3, pp. 236-242, 1994
- [4] 이병국, "코크스폐수 처리를 위한 표면폭기방식 활성슬러지 공정의 자동제어", 박사학위논문, 한국과학기술원, 1997
- [5] 주대성, 박희경, "Pole placement 방법으로 조율된 PI제어기를 이용한 폭기조내 용존산소농도 제어", 대한환경공학회지, Vol. 21, No. 3, pp. 589-597, 1999
- [6] N. Shimamoto, A. Hiramatsu and K. Yamasaki, "A Dynamic Routing Control Based on a Genetic Algorithm", Proc. of 1993 International Joint Conference on Neural Networks, pp. 1123-1128, 1993