

활성슬러지 폐수처리장 폭기조 DO제어를 위한 퍼지 제어 알고리즘 연구

손 건 태 · 김 성 덕 · 고 주 형*
부산대학교 통계학과 · 부산대학교 환경공학과
(1999년 5월 25일 접수)

Fuzzy algorithm of Automatic control for dissolved oxygen in Activated sludge aeration tank

Keon-Tae Sohn, Sung-Duk Kim, and Joo-Hyung Ko*

Dept. of Statistics, Pusan National University, Jangjeon-dong, Keumjung-ku, Pusan,

*Dept. of Environmental Engineering, Pusan National University, Jangjeon-dong, Keumjung-ku, Pusan, 609-735, Korea

(Manuscript received May 25, 1999)

Fuzzy algorithm of automatic control for dissolved oxygen(DO) concentration in the aeration tank of an activated sludge process is proposed. Among variables respirometry and air flowrate are selected as significant input factors and the relationship with DO is estimated using a multiple regression model. The DO concentration and the amount of respirometry are fuzzified and the fuzzy rule base are determined. Using the fuzzy algorithm, the change of amount of air flowrate are determined and the change of amount of DO is derived.

Key words : DO control, Activated sludge process, Fuzzy controller

1. 서 론

우리나라 폐수·하수처리장에서 가장 많이 적용되고 있는 활성슬러지공정에서 용존산소(DO)농도는 유입수 내의 기질과 함께 호기성 미생물의 가장 기본적인 성장 조건이다. 반응기 내 DO 농도는 유입되는 유기물 및 질소 부하에 크게 영향받으며, 대부분의 하·폐수 처리장에서 일간 및 월간 부하 변동이 크기 때문에 DO 농도의 변화 역시 크다. DO 농도가 지나치게 낮으면 활성슬러지공정 반응기 내 미생물의 성장 속도 및 유기물 산화·질산화 속도가 느려진다. 이런 상태가 장시간 지속되면 처리장의 전체 성능이 크게 저하될 수 있다. 일반적으로 폐수처리장에서는 DO 농도를 일정수준 이상으로 유지하기 위해 적정량 이상의 공기를 공급하며, 따라서 많은 에너지의 손실이 발생한다.

바람직한 용존산소 자동 제어 전략은 시간에 따라 변하는 산소 요구량을 충분히 만족시킬 수 있는 정도의 공기만을 공급하는 것이며, 이를 통해 에너지 절약과 안정적인 폭기조 운전을 동시에 성취할 수 있다. 폭기에 사용되는 에너지 비용은 폐수처리장 전체 전력비의 약 50%에 달하며, 두 번째로 전력소모가 많은 단위 공정인 유입수 pumping과 비교해서도 4배 이상 많다.⁴⁾ 실험실 규모 연구에서 용존산소 농도의 자동 제어를 통해 송풍기 전력비의 60~77%를 절감할 수 있다고 보고되었고²⁾ 100 MGD (3,800 톤/일) 규모의 폐수처리장의 경우 용존산소 자동 제어시스템을 도입함으로써 연간 \$ 65,500의

운전 관리비가 감소되고 투자비용의 감가상각을 고려하더라도 연간 \$ 36,300의 비용절감을 가져올 수 있는 것으로 보고되었다.⁵⁾

국내에서는 D그룹의 한 식품 공장⁶⁾과 P제철 화성공정 폐수처리장⁷⁾에 DO 제어가 적용되어, 운전비용 감소와 공정 안정성 증대에 기여한 예가 있다. 이외에도 Choi⁸⁾ 등은 안료 공장의 폐수처리장에서 DO를 제어하고 OTR을 추정하였고, 허남효³⁾ 등은 활성슬러지 폭기공정 제어 시스템의 성능 평가를 수행하였다. 이러한 몇몇 예를 제외하고 현재 국내의 거의 모든 폐수처리장에서 DO 농도는 전혀 제어되지 않거나 또는 현장 작업자의 경험과 직관에 의해 공기 유량을 조절하고 있다. 용존산소 농도는 유입되는 폐수의 성상 및 유량에 따라 빠르게 큰 폭으로 변화하므로 따라서 수동 조절은 항상 뒤늦은 조치가 되기 마련이다.

퍼지제어는 복잡한 수학적 모델에 의존하지 않고도 전문가의 직감이나 경험상의 법칙, 실제실험 또는 모의 실험의 데이터를 통해서 제어시스템의 제어규칙을 만들 수 있는 장점이 있다. 퍼지제어는 불확실한 영역에 대해 매끄럽고 강인한 지능적 추론을 가능케하는 구조이다. 최근에는 자동화 기법에 퍼지제어를 적용하는 추세이다. 가변구조제어나 PID제어 등의 기존 제어법칙을 이용하거나 신경망의 학습방식 또는 유전알고리즘/진화연산 등의 방식을 사용하여 안정된 제어규칙이나 최적의 제어규칙을 만드는 연구가 시도되고 있는데 이는 이른바 'Soft

Computing'이라는 큰 범주 안에서 각기의 장점을 살린 혼합형의 제어기법이 유리하다고 판단되기 때문이다. 퍼지제어의 장점은 (1) 허용오차 범위내에서 빠르게 결과를 얻을 수 있고 하드웨어가 비교적 쉽게 저가로 구성할 수 있으며, (2) 서로 다른 제어대상에 대해 힘 안들이고 같은 구조의 제어기를 사용할 수 있고, (3) 전문가시스템을 사용하여 규칙기반을 만드는 것보다 퍼지시스템을 사용하는 것이 자료압축율을 높이기도 하며, (4) 전문가 지식을 손쉽게 수용하여 높은 차원의 자동화 시스템을 구현하는 것이 가능하며, (5) 외란이나 파라미터 변화에 대해 기존의 제어방법보다 강인한 성능을 보여주며, (6) 내재된 비선형성 때문에 선형제어기에 비해 효과적인 제어가 가능하고, 많은 경우 비선형 프로세스의 제어에 효과적으로 대처할 수 있다. 시스템의 구현 개발 측면에서는 퍼지제어기는 설계 기술을 배우기가 쉽기 때문에 개발비 및 유지비가 적게 들며, 신기술로서 기존의 방법들을 피하여 특허등록이 용이하고 마케팅에 이점이 있다.

하드웨어적으로 제어시스템을 구축하기 전에 소프트웨어적으로 제어 시뮬레이터를 개발하는 것은 비용절감과 효율 향상 면에서 필요한 단계이므로, 본 연구에서는 DO 농도를 안정적으로 일정하게 유지하기 위하여 PID 제어기 개발시 조사된 자료에 대하여 퍼지알고리즘¹⁾을 적용하여 소프트웨어적으로 폭기조 내 용존산소 농도를 제어하는 프로그램을 개발하였다.

2. 퍼지 제어 알고리즘 개발에 사용된 자료

폭기조 내의 용존산소 농도(DO, 단위 mgO₂/l)를 제어하기 위한 목적으로 온도, 유기물 농도, 폭기조 깊이, 미생물 농도, 공기유량과 같은 교란변수 중 제어변수로 폭기조 내의 DO 농도와 호흡율(Ra, 단위 mgO₂/l-hr) 그리고 공기유량(Air, 단위 m³/min)을 자료로 사용한다. 자료는 울산의 S 안료공장의 폐수처리장에서 설치된 pilot plant에서 수집되었다. 일반적으로 PID 제어기는 Ra를 제어시킨 후 DO를 제어시키는 단계로 구성이 되는데, 본 연구에서는 (1) Ra가 제어된 경우와 (2) Ra가 제어되지 않은 경우로 나누어 퍼지 제어 알고리즘 개발을 하고자 하였으며, 이를 위하여 Ra 자료를 두 가지 형태로 사용하여 PID 제어 결과와 퍼지 제어 결과를 비교하고자 하였다. 1997년 11월 12-13일과 11월 13-14일(2분 간격 조사)에 선택 변수들에 대하여 각각 663개와 723개씩 조사된 자료는 Ra가 제어된 경우이며 1997년 10월 3일(1분 간격 조사)에 조사된 600개 자료는 Ra가 제어되지 않은 경우이다.

3. 퍼지 제어기 개발

3.1. 퍼지제어기 구성도

퍼지 제어기는 현실점에서의 DO 농도와 (외부로부터 결정되어 들어오는) 호흡율(Ra) 값을 입력으로 하여 퍼지 알고리즘을 통하여 공기유량(Air) 값을 결정해주는 것으로 구성된다. 즉, 공기유량을 조절해 줌으로써 DO를 제어하도록 알고리즘이 구성된다. 그러나 본 연구는 실제로 하드웨어적인 제어기 제작에 앞서 소프트웨어적으

로 제어기를 구성하여 모의실험함으로써 시스템의 비용효과를 높이는 데 목적을 두고 있기 때문에, 조절된 공기유량과 호흡율이 DO에 얼마나 영향을 주는지를 추가로 모형 분석하여 피드백(feedback)개념인 다음 단계의 DO를 추정하도록 퍼지 제어기를 구성하였다. 실제로 자동제어기를 제작하는 경우 Fig. 1의 피드백 단계는 생략하게 된다.

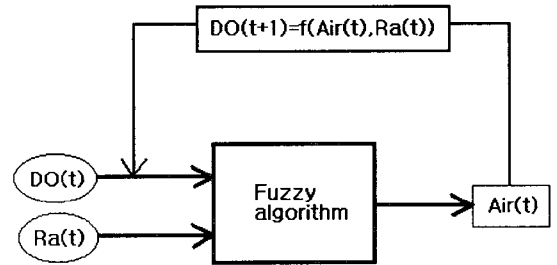


Fig. 1. Fuzzy Controller.

3.2. DO에 대한 Ra와 Air 관계 분석

3.2.1. Ra가 제어된 경우

DO와 Ra를 입력변수로 하여 퍼지제어로 부터 공기유량을 조절하고 제어된 DO 값을 생성하기 위하여, Ra가 제어된 경우에 기개발된 PID 제어기에 의해 제어된 자료 중 1997년 11월 12-13일 자료의 552-651번째 자료 100개를 이용하였다. 제어변수가 제어된다는 것은 적정 값으로 가까이 가며 그 값을 유지하는 것이므로 제어되어 가는 과정에서 제어변수들의 차(설정치-측정치)가 점점 작아진다. 즉, 공기유량을 조절하여 DO와 Ra를 제어하므로 공기유량의 변화량과 DO와 Ra의 변화량 사이의 관계를 살펴보는 것이 의미가 있을 것이다. 따라서 제어 변수들의 차에 대한 변화패턴을 살펴보기 위하여 각 변수를 1차 차분(difference)한 후, 중회귀 모형(multiple regression model)으로 분석하였다. Ra가 제어된 경우의 중회귀 모형식은 다음과 같다.

$$\nabla DO_{t+1} = \beta_0 + \beta_1 \cdot \nabla Ra_t + \beta_2 \cdot \nabla Air_t + \epsilon_t$$

$$\text{여기서 } \nabla DO_t = DO_t - DO_{t-1},$$

$$\nabla Ra_t = Ra_t - Ra_{t-1},$$

$$\nabla Air_t = Air_t - Air_{t-1}.$$

Table 1를 살펴보면, Ra가 제어된 경우, 상수항이 있는 중회귀모형을 적합한 결과 상수항이 유의하지 못하여 상수항을 제거시킨 중회귀모형으로 분석한 결과 최종적으로 추정된 중회귀 모형식은 $\nabla DO_{t+1} = 0.00901 \cdot \nabla Ra_t - 0.26744 \cdot \nabla Air_t$ 가 되었다. 제안된 모형은 매우 유의(유의확률 $p = 0.000$)하며, 두 변수 Ra(차분된 호흡율, $p = 0.024$)와 Air(차분된 공기유량, $p = 0.000$) 모두 유의하여 DO의 변화량에 영향을 주는 것으로 나타났다. 모형의 설명력을 나타내는 결정계수 R^2 는 0.61정도로 양호한 설명력을 지니고 있다고 판단된다.

Table 1. The results of Multiple regression analysis

Regression Analysis					
The regression equation is $DO = -0.00901 Ra - 0.26744 Air$					
Predictor	Coef	StDev	T	P	
Noconstant					
Ra	-0.009011	0.003925	-2.30	0.024	
Air	-0.26744	0.02255	-11.86	0.000	
S = 0.03042					
Analysis of Variance					
Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	2	0.140226	0.070113	75.78	0.000
Residual Error	98	0.090674	0.000925		
Total	100	0.230900			

3.2.2. Ra가 제어되지 않은 경우

Ra가 제어되지 않은 경우에서 DO제어가 가능하다면 제어 단계를 줄일 수 있는 이점이 있다고 생각하여, Ra가 제어되지 않은 경우를 고려하였다. Ra가 제어되지 않은 경우는 1997년 10월 3일 자료 전체를 이용하였다. 다음 단계의 DO 생성은 전 단계의 DO 값에 의하여 영향을 받으므로 전 단계의 DO와 Ra 그리고 공기유량을 이용하여 다음 단계의 DO 생성을 위해 중회귀 모형식으로 분석하였다. Ra가 제어되지 않은 경우의 중회귀 모형식은 다음과 같다.

$$DO_{t+1} = \beta_0 + \beta_1 \cdot DO_t + \beta_2 \cdot Ra_t + \beta_3 \cdot Air_t + \varepsilon_t$$

Table 2. The results of Multiple regression analysis

The regression equation is					
$DO = 1.35 + 0.848 LDO - 0.00834 Ra - 0.0220 Air$					
Predictor	Coef	StDev	T	P	
Constant	1.3496	0.2157	6.26	0.000	
LDO	0.84798	0.02294	36.96	0.000	
Ra	-0.008337	0.001757	-4.75	0.000	
Air	-0.022047	0.006094	-3.62	0.000	
S = 0.05782 R-Sq = 98.1% R-Sq(adj) = 98.1%					
Analysis of Variance					
Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	3	101.473	33.824	10116.56	0.000
Residual Error	596	1.993	0.003		
Total	599	103.466			

Table 2를 살펴보면, Ra가 제어되지 않은 경우, 중회귀 모형을 분석한 결과 최종적으로 추정된 중회귀 모형식은 $DO_{t+1} = 1.35 + 0.848 \cdot DO_t - 0.00834 \cdot Ra_t - 0.0220 \cdot Air_t$ 가 되었다. 제안된 모형은 매우 유의(유의확률 $p = 0.000$)하며, 변수 현 단계의 DO($p = 0.000$), Ra($p = 0.000$)와 Air($p = 0.000$) 모두 유의하여 DO의 변화량에 영향을 주는 것으로 나타났다. 모형의 설명력을 나타내는 결정계수 R^2 는 0.98정도로 매우 양호한 설명력을 지

니고 있다고 판단된다. 결정계수가 이처럼 높은 것은 Table 2의 결과에서 보듯이 전 단계의 DO가 주는 영향이 매우 크기 때문인 것을 알 수 있다. 따라서 이 모형식의 결과를 이용하여 퍼지 제어알고리즘의 시스템화하였다. 즉, 시간의 흐름에 따라 호흡율이 (제어되지 않은 상태에서) 변화하므로 퍼지 제어 알고리즘을 반복적으로 수행하면서 다음단계의 DO 농도를 제어해 나가는 것으로 퍼지 제어가 구성된다.

3.3. 퍼지 알고리즘 개발 과정

Ra를 제어한 경우와 제어하지 않은 경우 모두 퍼지 알고리즘 개발과정은 동일하며 다음으로 이루어진다.

[단계 1] 퍼지화(fuzzifier) 단계 : 퍼지 싱글톤법을 사용하여 DO와 호흡율을 퍼지화 한다.

[단계 2] 퍼지 규칙 베이스(fuzzy rule base) 결정 단계 : 퍼지화된 입력값과 요망되는 출력값의 관계를 전문가들의 지식기반을 바탕으로 함의(implication)적 규칙으로 구성한다.

[단계 3] 퍼지추론(fuzzy inference) 단계 : 퍼지 규칙을 이용하여 퍼지 입력에 대한 출력을 추론해 내는 알고리즘으로, 퍼지 추론 방법으로는 제어시스템과 관련하여 가장 많이 이용되고 있는 Mamdani의 Min-Max 직접법(direct method)에 의하여 추론을 수행한다.

[단계 4] 비퍼지화(defuzzifier) 단계 : 퍼지한 제어 출력값을 연속형 제어 출력값으로 변환하는 과정으로, 출력 퍼지량으로부터 무게중심법(center of gravity method)을 사용하여 제어 출력값 공기유량(Air)을 구한다.

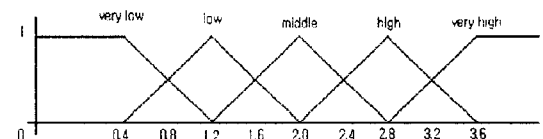
[단계 5] 피드백(feedback) 단계 : 3.1절에서 구한 회귀 추정식에 구해진 공기유량과 호흡율을 대입하여 다음 단계의 DO를 구한다.

3.4. Membership 함수와 퍼지 규칙 베이스

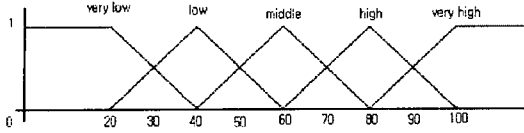
3.4.1. Membership 함수

알고리즘 개발을 위하여 조사된 자료에 대한 분포와 전문가들의 지식 정보를 종합하여 DO, 호흡률과 공기유량 각각에 대하여 퍼지알고리즘의 기본 membership 함수를 다음과 같이 결정하였다. 예를 들면, 용존산소 농도가 0.8이면 언어변수값은 very low와 low이며 membership 함수값은 각각 0.5, 0.5이다. 호흡률(Ra)이 53이면 언어변수값은 low와 middle이며 membership 함수값은 각각 0.7, 0.3이다. 공기유량(Air)의 변화량이 3이면 언어변수값은 high와 very high이며 membership 함수값은 각각 0.5, 0.5이다.

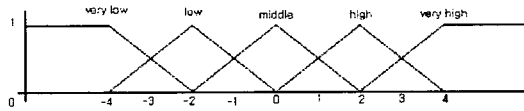
① 용존산소 농도(DO)



② 호흡율(Ra)



③ 공기유량의 변화량 (ΔAir)



3.4.2. 퍼지 규칙 베이스

DO의 퍼지값과 호흡율(Ra)의 퍼지값이 주어질 때, 공기유량 변화량(ΔAir)의 퍼지값을 결정하는 규칙으로 Table 3을 결정하였다. 예를 들면, Table 3에 의하여, DO의 언어변수값이 VL(very low)이고 Ra의 언어변수값이 M(middle)이면 공기유량 변화량(ΔAir)의 언어변수값은 H(high)이다. 즉, 퍼지 싱글톤법을 사용하여 DO와 호흡율을 퍼지화하고 언어변수값을 구하여 전문가들의 지식기반을 바탕으로 IF-THEN-형태인 함의(implication)적 규칙을 적용하여 공기유량에 대한 언어변수 값을 구한다.

Table 3. Fuzzy Rule Base

DO \ Ra	VL	L	M	H	VH
VL	H	M	L	VL	L
L	H	M	M	L	L
M	H	M	M	M	L
H	H	H	M	M	L
VH	VH	VH	H	M	L

* VL=very low, L=low, M=middle, H=high, VH=very high

3.5. Fuzzy 제어 알고리즘에 의하여 제어된 결과

앞 절의 membership 함수와 규칙 베이스를 바탕으로 한 퍼지 제어를 개발하였고, 이를 이용한 용존산소 농도 제어에 대한 모의실험을 수행하였다. 또한 Ra가 제어된 경우와 Ra가 제어되지 않은 경우로 나누어 PID 제어에 대한 모의실험을 수행하여 서로 비교하였다.

3.5.1. Ra가 제어된 경우

Ra가 제어된 경우에 두 종류의 자료를 사용하였으며, 제어 결과로 나타난 DO 농도 값을 Fig. 2와 Fig. 3에 나타내었다. 첫 번째 자료에 대한 Test 1의 경우 PID 제어가 퍼지 제어기보다 조금 더 나은 안정성을 가지는 것으로 보인다. 퍼지 제어의 경우 DO 농도는 설정치 ± 0.25%의 표준편차 범위 내에서 유지되었고, PID 제어의 경우는 ± 0.12%의 표준편차를 보였다. 두 번째 자료에 대한 Test 2의 경우, 측정되는 호흡율의 잦은 변동이 나

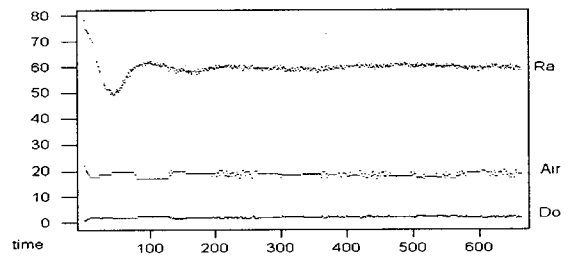
타는 초기 400 분 이전 시간 동안에는 PID 제어기(설정치 ± 0.16% [전체 시간], ± 0.21% [초기 400 분])가 퍼지 제어기(설정치 ± 0.25% [전체 시간], ± 0.34% [초기 400 분])보다 훨씬 안정적이지만, 그 이후로는 두 제어기 모두 뛰어난 안정성을 보인다. 특히 퍼지 제어기의 경우 공기 유량의 변화 없이 일정한 DO 농도를 유지시키고 있는 것이 특징적이다.

3.5.2. Ra가 제어되지 않은 경우

Ra가 제어되지 않은 경우, 제어 결과로 나타난 DO 농도 값을 Fig. 4에 나타내었다. Ra가 제어되지 않은 경우에는 PID 제어와 관련된 결과가 없으므로 세 번째 자료에 대한 Test 3의 경우 PID 결과와 비교하지 않고 퍼지 제어 결과를 나타내었다. 퍼지 제어 결과를 보면 DO 농도는 설정치 ± 0.26%의 표준편차 범위 내에서 유지되었다. 따라서 Ra가 제어된 경우와 제어되지 않은 경우의 표준편차가 비슷함을 알 수 있다.

두 제어기에 대한 모의실험 결과를 비교함에 있어, Fig. 5들과 Table 1의 통계치를 보면 퍼지 제어의 경우 사용된 membership 함수는 매우 단순한 형태의 것임에도 제어 결과가 양호하다 볼 수 있으며, 공기 유량 및 호흡율과 DO 농도 사이의 관계에 대하여 엄밀한 함수가 도출되면, 퍼지 제어기의 성능이 더욱 향상될 것으로 기대할 수 있다. 이상의 연구는 퍼지 논리에 기반한 DO 농도 제어를 개발하고 소프트웨어적으로 수행능을 평가한 것이다. 물론 실제 현장에 적용되었을 때 조금은 다른 결과가 나타날 수 있지만, 시뮬레이션 결과는 개발된 퍼지 제어기가 충분히 좋은 적용성과 안정성을 가질 수 있음을 말해주고 있다.

Fuzzy Controller(Test 1)



PID Controller(Test 1)

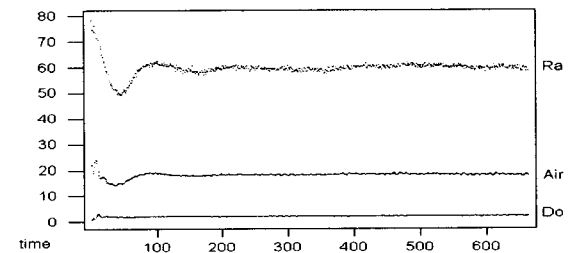


Fig. 2. Fuzzy Controller and PID Controller(test1).

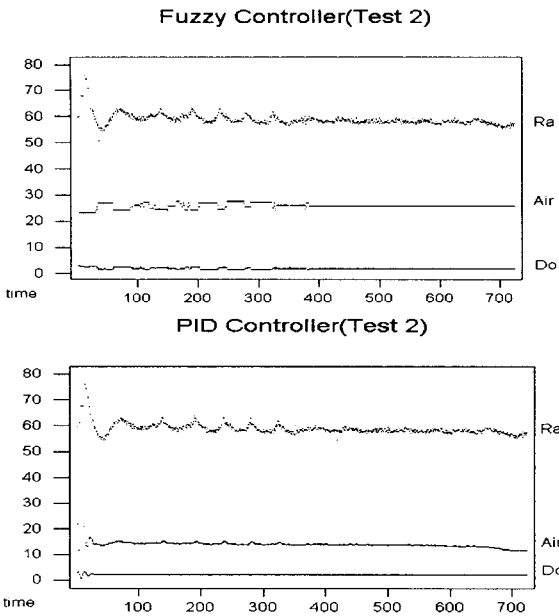


Fig. 3. Fuzzy Controller and PID Controller(test2).

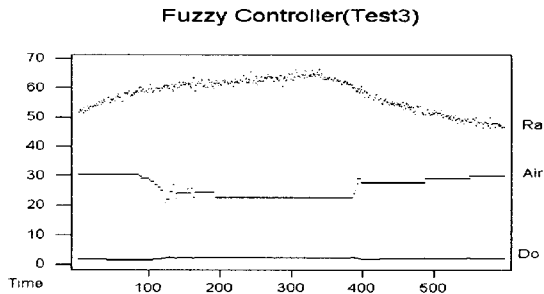


Fig. 4. Fuzzy Controller(test3).

Table 1. Comparison of Fuzzy Controller and PID controller
(test 1 : PDO1, FDO1, test 2 : PDO2, FDO2,
test 3 : FDO3)

TYPE	Mean	Std
PDO1	1.9967	0.1159
FDO1	1.9540	0.2510
PDO2	2.0068	0.1545
FDO2	1.9651	0.2540
FDO3	1.9121	0.2622

4. 결 론

활성슬러지 공법 폐수처리장 폭기조 내의 일정 DO 농도를 유지하기 위하여 퍼지 알고리즘을 이용한 퍼지 제어를 소프트웨어적으로 개발하였다.

(1) 현 상태의 DO와 Ra 값을 이용하여 제안된 퍼지

규칙에 따라 공기유량을 결정하는 과정에 대하여 퍼지 알고리즘을 적용하였다.

(2) Ra가 제어된 경우, 퍼지 알고리즘에 의하여 결정된 공기유량치 변화량과 호흡을 변화량이 다음 상태의 DO변화에 얼마나 영향을 주는지 알아보기 위하여 차분자료를 이용한 중회귀모형식을 추정하여 $\nabla DO_{t+1} = 0.00901 \cdot \nabla Ra_t - 0.26744 \cdot \nabla Air_t$ 의 식을 얻었다.

(3) Ra가 제어되지 않은 경우, 퍼지 알고리즘에 의하여 결정된 현 단계의 공기유량치, 호흡율과 DO가 다음 상태의 DO변화에 얼마나 영향을 주는지 알아보기 위하여 중회귀모형식을 추정하여 $DO_{t+1} = 1.35 + 0.848 \cdot DO_t - 0.00834 \cdot Ra_t - 0.0220 \cdot Air_t$ 의 식을 얻었다.

(4) 퍼지 알고리즘과 변화량 추정식을 이용하여 DO를 시간에 따라 변화시켜가며 제어 과정을 살펴보았다. PID 제어기의 변화 형태와 비교한 결과 매우 유사한 형태를 보이며 제어가 되는 것을 알 수 있었다.

(5) Ra가 제어된 경우와 제어되지 않은 경우 모두 DO제어에 양호한 결과를 보였다.

(6) 본 연구는 하드웨어적으로 DO 제어를 개발한 것이 아니며, PID 제어기 개발시 조사된 자료를 적용하여 소프트웨어적으로 개발된 것이다. 따라서 더 많은 다양한 자료에 대하여 검증(validation)되어야 하며, 하드웨어적으로 제어를 구성하여 실험해보아야 할 것이다. 호흡율, 공기유량이 DO에 RL치는 영향을 위해 좀더 엄밀한 관계식을 도출되면 DO 제어에 퍼지 제어를 적용하는 것이 매우 유용하리라 판단된다.

감사의 글

본 연구는 환경부에서 주관하는 환경기술개발사업(G-7 project), "폐수처리장 운전제어 자동화 기술 개발" 과제의 일부로서 수행되었으며, 관계자 여러분께 감사를 드린다. 특히 PID 제어기의 구성과 본 연구를 위한 분석 자료를 제공하여 주신 부산대학교 환경공학과 김창원 교수께 감사를 드린다.

참 고 문 헌

- 1) 변증남, 1997, "퍼지논리 제어", 홍릉과학출판사.
- 2) 이병국, 전희동, 성수환, 1996, "활성슬러지 공정에서 폭기조 내 용존산소 농도의 자동제어," 대한환경공학회지, 18(12), 1535~1546pp.
- 3) 허남효, 최광수, 고주형, 이해군, 김창원, 1999, "활성슬러지 폭기공정 제어시스템 개발 및 성능 평가," 대한환경공학회지, 21(1).
- 4) Evans, B. and P. Laughton, 1994, "Emerging trends in electrical energy usage at Canadian (Ontario) municipal wastewater treatment facilities and strategies for improving energy efficiency," Water Science and Technology, 30(4), 17~23pp.
- 5) Flanagan, M. J., B. D. Bracken, and J. F. Roesler, 1977, "Automatic dissolved oxygen control," Journal of the Environmental Engineering Division, ASCE,

103(EE4), 707~722pp.

- 6) Nam, S. W., N. J. Myung, and K. S. Lee, 1996, "On-line integrated control system for an industrial activated sludge process," *Water Environment Research*, 68(1), 70~75pp.
- 7) Lee, B. K., S. W. Sung, H. D. Chun, and J. K. Koo, 1997, "Automatic control for DO and pH in the activated sludge process in a coke wastewater treatment plant," in *Proceedings of 7th international workshop on instrumentation, control and automation of wastewater treatment and transport systems*, IAWQ, Brighton, 188~195pp.
- 8) Choi, K. S., N. H. Heo, S. J. Park, E. H. Choi, T. J. Park, and C. W. Kim, 1997, "Control of DO and oxygen transfer rate in activated sludge process treating pigment wastewater", In *Preprints of 7th IAWQ Workshop on Instrumentation, Control and Automation of Water and Wastewater Treatment and Transportation Systems*, Brighton, 6-9 July, 582-589pp.