

CSTR 하·폐수처리장의 국지 제어 및 원격 최적화 시스템

Local Control and Remote Optimization for CSTR Wastewater Treatment Systems

배현, 서현용, 김성신
부산대학교 전자전기통신공학부

Hyeon Bae, Hyun-Yong Seo, Sungshin Kim
School of Electrical and Computer Engineering, Pusan National University

ABSTRACT

Activated sludge processes are widely used in biological wastewater treatment processes. The main motivation of this research is to develop an intelligent control strategy for activated sludge process (ASP). ASP is a complex and nonlinear dynamic system because of the characteristic of wastewater, the change in influent rate, weather conditions, and so on. The mathematical model of ASP also includes uncertainties which are ignored or not considered by process engineer or controller designer. The ASP model based on Matlab/Simulink is designed in this paper. The performance of the model is tested by IWA (International Water Association) and COST (European Cooperation in the field of Scientific and Technical Research) data that include steady-state results during 14 days. In this paper, fuzzy logic control approach is applied to control the DO (dissolved oxygen) concentration. The fuzzy logic controller that includes two inputs and one output can adjust air flowrate. Also, this paper introduces the remote monitoring and control system that is applied for the CSTR (Continuously Stirred Tank Reactor) wastewater treatment system. The CSTR plant has a local control and the remote monitoring system which is contained communication parts which consist of LAN (Local Area Network) network and CDMA (Code Division Multiple Access) wireless module. Remote control and monitoring systems are constructed in the laboratory.

Keywords : CSTR, SBR, remote monitoring, fuzzy inference system

1. 서론

현재 사용중인 대부분의 하·폐수 처리장은 미생물을 이용한 활성슬러지공정을 이용하고 있는데, 이러한 공정은 미생물의 반응을 이용하여 유기물, 질소, 그리고 인등과 같은 폐수 내에 포함된 유해물질을 처리하는 것으로 효율적인 처리를 위해서는 미생물의 활발한 활동에 필요한 최적의 조건을 제공하는 것이 중요하다.

생물학적 영양염 제거를 위한 연속식반응기는 혐기조, 무산소조, 그리고 호기조를 적절히 배치하여 각 반응조의 목적에 따른 반응환경을 제공해야 한다. 일반적으로 공정의 관리는 운전자의 경험과 지식에 의하여 주관적으로 수행되고 있으며, 설계과정에서 결정된 운전 방법을 바꾸는 것이 사실상 불가능한 실정이다. 본 논문에서는 이러한 문제점을 개선하기 위하여 지능제어적 기법을 이용하여 연속식반응기를 보다 효율적으로 운전·관리하기 위한 방법을 제안하고자 한다.

활성슬러지를 이용한 연속식반응기 공정의 최적 운전조건을 도출하기 위한 방법을 제시하기 위하여 활성슬러지 모델 No.1 (activated sludge model no.1: ASM No.1) [1]에 의한 기본적인 연속식반응기 시스

템의 모델을 구현하였다. 퍼지 논리 (fuzzy logic)를 이용하여 운전자의 지식과 경험을 바탕으로 제어규칙을 결정하고 [2], [3], 이를 모델에 적용하여 성능을 분석하고자 한다.

본 논문에서는 또한 설계된 모델을 실제 플랜트처럼 운전되도록 구성하여, 국지 제어와 여러 하·폐수 처리장을 한 곳의 중앙 제어센터에서 제어·관리하는 중앙 집중식 관리자 시스템을 통해 하·폐수처리 시설의 운전비용 절감을 위한 전체 플랜트 제어 시스템을 적용하고자 한다.

연속식플랜트는 실제 운전중인 플랜트가 아닌 모델을 이용한 가상 플랜트를 사용하는데, 본 플랜트는 기존의 연구를 통해 검증된 거친 벤치마크 플랜트이다. 가상 플랜트의 데이터 전송은 FTP (file transfer protocol) 서버를 이용하여 특정 시간 간격으로 전송할 수 있도록 구성하였다. 또한 CDMA 무선 모듈을 이용한 두 방법을 함께 사용하였다. 전용선의 전송이 불가능할 경우 무선 모듈이 데이터를 전송함으로써 관리자 제어시스템이 원활하게 운용될 수 있도록 구성하였다. 제어기의 최적화를 위하여 유전자 알고리즘과 simulated annealing (SA)을 적용하였다.

2. 이론적 배경

2.1 연속식 반응기

현장에 적용할 제어전략과 구체적인 방법을 제안하기에 앞서, 제어대상이 되는 플랜트의 특성을 분석하고, 전체적인 시스템을 이해하는 과정은 필수적이다. 이를 위해서 Modelling Aspects of WWTP [4]와 IWA (International Water Association)와 COST (European cooperation in the field of scientific and technical association)에서 제시한 벤치마크 플랜트 [5], [6]을 기반으로 하여 ASM No.1을 적용한 연속식반응기 시스템을 모델링하였다. IWA와 COST에서 제시한 Benchmark plant는 ASM No.1을 적용한 5개의 반응조와 이중지수 침전속도함수 [7]을 이용한 2차 침전조로 구성되어 있다. 본 연구에서는 IWA에서 제안한 질산화공정과 IWA와 COST에서 공통으로 채택하여 사용하는 전탈질화공정을 Matlab/Simulink [8], [9]로 구현하였고, 이를 이용하여 여러 제어기법들을 적용하고 평가 해 볼 수 있는 기본적인 모델로 선정하였다.

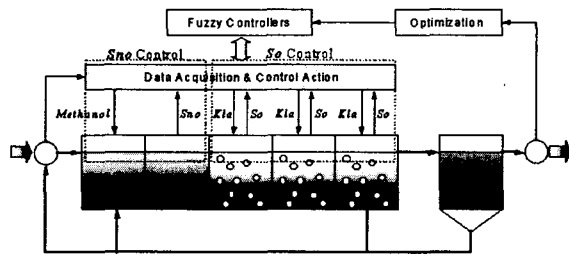


그림 1. CSTR 플랜트 제어를 위한 간략도.

2.1.1 활성슬러지 모델 No. 1

1986년에 발표된 ASM No.1은 heterotrophs 및 autotrophs의 성장과 사멸 및 가수분해 등 8개의 공정과 4종류의 탄소성 물질 및 질소성 물질 등 시스템의 입력변수로서 13개의 성분을 포함한 행렬형태로 제공되었다. 유기물질 제거의 동력학식은 성장제한 기질에 대한 Monod식 형태로 나타내었다. 각 반응조는 ASM No.1에 기초한 각 성분별 반응과 유입수와 내부 반응수를 고려한 물질 수지식으로 구성하였다.

2.2 퍼지 논리

실제 일상에서 발생하는 자연적 현상을 정확하게 묘사하기는 무척 어렵다. 따라서 알맞은 모델을 구하기 위해 근사화가 필요하다. 대부분의 공학적 이론에서도 실제 세계를 특성화하기 위하여 근사화 방법을 이용한다. 그 예로 대부분의 비선형 시스템을 선형시스템의 영역에서 연구하기 위하여 시도하고 있다. 좋은 공학 이론은 실제 세계의 중요한 특징을 잘 특성화시키는 동시에 수학적 분석을 잘 추정해야한다. 많은 실제적 시스템에서 중요한 정보의 획득은 먼저 자연어를 통해 시스템을 표현할 수 있는 전문가 지식과 물리적인 법칙에 의해 유도되는 수학적 모델과 센서를 통한 측정 등이 있다. 따라서 시스템을 설계하기 위해 중요한 것은 이 두 가지를 적절하게 접목시키는 일이다. 그리고 인간의 지식을 수학적 공식으로 어떻게 변화시키는가 하는 것이 중요한 문제인데, 이러한 변환을 수행할 수 있는 것이 퍼지 시스템

이다. 퍼지 시스템은 지식에 기초한 것 (knowledge base)과 규칙에 기초한 것 (rule base)을 나눌 수 있는데, 퍼지 시스템의 핵심은 IF-THEN 규칙을 포함하고 있는 지식에 기초한 것이다. 퍼지 IF-THEN 규칙은 인간의 전문가적 지식 등에 기초하여 획득할 수 있다.

2.3 제어기 최적화

2.3.1 유전자 알고리즘

유전자 알고리즘은 다양한 분야에 적용되고 있는데 이와 같은 많은 응용의 배경에는 몇 가지 이유가 있다. 그 한 가지는 알고리즘의 단순성과 일반성에서 찾을 수 있다. 아무리 복잡한 문제라도 염색체 형태로 표현이 되면, 염색체의 복제와 재조합 및 적합도의 평가 등과 같은 비교적 단순한 연산과정의 반복을 통해 계산이 수행된다. 또 하나의 이유는 기존의 문제 해결방법과 결합하여 사용하기가 쉽다는 것이다. 이것은 진화 알고리즘이 문제해결에 특수한 정보를 많이 사용하지 않고 또한 문제에 대한 배경지식이 있으면 이를 쉽게 수용할 수 있기 때문이다. 유전자 알고리즘이 흥미를 끄는 또 하나의 이유는 계산 모델이 자연 현상에 기반을 두고 있다는 것이다. 인간이 오랫동안 풀려고 했던 많은 실제계의 문제들을 자연은 실제로 유연하게 해결하고 있다.

2.3.2 Simulated annealing

SA는 미분이 필요 없는 최적화 방법으로서 연속적인 것과 이산적인 최적화 방법에 알맞기 때문에 최근에 있어서 많은 관심을 받고 있다. SA가 처음 제안되었을 때 큰 범위의 조합적인 최적화 문제에 있어서 최적에 가까운 해를 찾는 데 효과적이라고 알려졌다.

SA의 원리는 반복적 개선법을 기본으로 하는 것으로 고체 물리학에서 에너지 수준이 가장 낮은 상태인 결정을 얻기 위해서 이용하고 있는 어닐링과정을 그대로 조합적 최적화문제에 모사 하는 것이었다. 고체를 열탕에 넣어 고체가 녹아서 액체상태가 될 때까지 가열한 후 열탕의 온도를 서서히 낮추어 가장 안정된 결정상태의 고체를 얻는 과정을 고체물리학에서 어닐링 (annealing)이라고 부른다. 액체상태에서는 분자들이 자유롭게 움직이다가 온도를 내림에 따라 점점 일정한 구조로 배열하게 되는데 온도를 급격히 내리면 가변적 안정 상태의 비정질의 구조가 얻어지게 된다. 이 때 물질의 각 상태마다 에너지 수준이 다른 값을 갖게 되는데 물리적인 구조를 조합적 문제에서의 하나의 가능해의 구조로 대응시키면 가장 낮은 에너지 수준을 주는 상태에 대응하는 것이 바로 최적해가 될 것이고 온도를 급격히 내려 에너지 수준을 급하게 내리면 국부탐색법이고, 서서히 내리면서 분자들이 배열을 바꾸면서 에너지 수준을 오르내리도록 허용하는 어닐링에 대응하는 것이 시뮬레이티드 어닐링 알고리즘이 된다.

3. 실험 및 결과

3.1 Matlab/Simulink 모델

본 연구에서는 제어 및 수치해석 분야에서 그 성능을 인정받고 있으며 널리 사용되고 있는 Matlab®

5.3/Simulink[®]3.0을 이용하여 세 가지 기본적인 플랜트 구성 중 질산화공정과 전 탈질화공정을 구현하였다. 각 모델의 구성은 그림 2에 나타내었으며, 모델의 타당성 및 성능 평가를 위한 모의실험은 Matlab에서의 ODE45 (4차 Runge-Kutta 방법)를 이용하여 상대 허용 오차를 $1e^{-6}$ 으로 두고, 플랜트에 유입되는 유량과 각 성분별 농도는 IWA에서 성능평가를 위해서 제안한대로 맑은 날에서 14일간의 평균값을 사용하였다 [10].

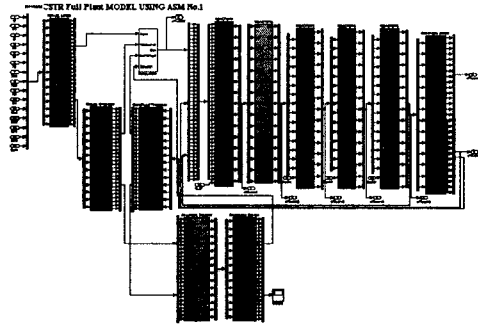


그림 2. ASM No.1 Benchmark Plant.

3.2 관리자 제어시스템 구성

전체적인 시스템의 제어는 그림 3에서 보는 것과 같이 구성하였다. 국지 제어의 경우 사이버 플랜트에서 직접 수행되고, 플랜트 출력은 네트워크를 통해 전송된다. 제어 대상으로 하·폐수 처리시스템의 특성상 폭기량이 중요한 변수로 작용하므로 DO 농도를 제어하는데 목적을 두었다. 플랜트로부터 저장된 데이터는 FTP 서버와 CDMA 무선 모듈을 통해 원격지에 있는 관리자 시스템으로 전송된다. 관리자 시스템에서는 전·원 데이터를 모니터링하게 되고, 데이터 분석을 통해 현재 공정 상태를 분석할 수 있다.

이러한 플랜트 구성을 통해 원격지에 있는 관리자 제어 시스템은 두 개의 플랜트를 동시에 모니터링하고 현재 공정 상태를 분석함으로써 실제 현장에 적용할 경우에 적은 수의 운전자가 여러 곳으로 분산된 플랜트를 운전·관리할 수 있으므로 경제적인 효과를 유도할 수 있다. 특히 소규모 처리장의 경우 상주 운전원을 두기 힘들므로 이러한 원격 감시 및 진단 시스템이 유용할 수 있다. 또한 비상시에 무선 모듈을 통해 경고 메시지 등을 전송할 수 있으므로 운전자가 자리를 비우는 경우에도 플랜트를 관리하는 것이 용이하다.

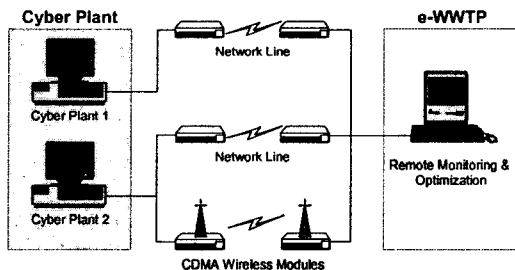
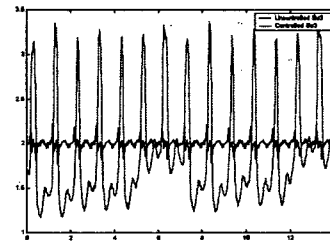


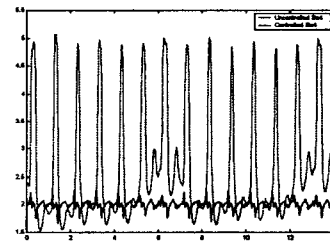
그림 3. CSTR 원격 시스템 구성도.

3.3 연속식 반응기의 국지제어

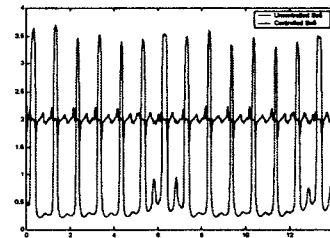
호기 상태의 폐수처리에서 DO는 유입수 내의 기질과 함께 미생물의 가장 기본적인 생육조건이다. DO가 부족한 경우 미생물의 활성이 감소하여 충분한 기질제거가 이루어지지 않아 유출수질의 악화를 초래한다. 하·폐수처리장 유지비의 상당부분이 폭기를 위해 사용되고 있으므로, 에너지의 효율적인 사용을 위해서라도 반드시 제어되어야 한다. 호기조에서의 DO농도 제어를 위해 기존에 PID제어기가 주로 사용되고 있지만, 아직까지 대부분의 하·폐수처리장에서는 숙련된 기술자가 직접 유입수를 관측하고 반응기의 상태와 유출수의 수질 등을 고려하여 수동으로 제어하고 있는 실정이다. 본 논문에서는 안정적인 유출수의 수질을 확보함과 동시에 전체적인 공정의 효율을 향상시키기 위하여 퍼지 제어기를 이용하여 현장기술자의 지식을 구현하였다. 본 논문에서 제어기를 사용하여 DO 농도를 제어한 결과들을 아래의 그림에서 보여주고 있다.



(a) 3번째 호기조의 DO 제어.



(b) 4번째 호기조의 DO 제어.



(c) 5번째 호기조의 DO 제어.

그림 4. 각 호기조에서의 DO 제어.

3.4 원격 모니터링 시스템

현장에서 플랜트가 정상적으로 동작할 경우에는 기존에 사용하고 있는 국지 제어기를 통하여 시스템을 원활하게 제어할 수 있지만 시스템에 갑작스런 외부 변동이 생기거나 비정상적인 상태에 들어가게 되면 국지 제어기만으로 시스템을 제어하는 것이 어렵게

된다. 이러한 경우 운전자의 경험적 지식을 바탕으로 불안정한 시스템을 제어하게 되는데 이러한 제어 기법을 자동화하기 위하여 관리자 제어 시스템을 구축하였다. 관리자 제어 시스템을 구축하기 위한 기본적인 환경으로 그림 5에서 보는 것처럼 네트워크를 이용한 FTP프로그램을 개발하여 적용하였다. 또한 유선 네트워크의 경우 속도가 빠르고 가격이 저렴한 장점이 있는 반면 네트워크의 접속이 끊어지거나 비정상적으로 작동할 수 있다. 이러한 경우를 대비하여 CDMA 무선 모듈을 보조 통신 수단으로 사용함으로써 갑작스런 상황에서도 원활하게 데이터를 송·수신할 수 있도록 구성하였다. 이렇게 구축된 시스템을 이용하여 CSTR 모델 플랜트의 출력 데이터를 모니터링한 것이 그림 6에서 볼 수 있다.

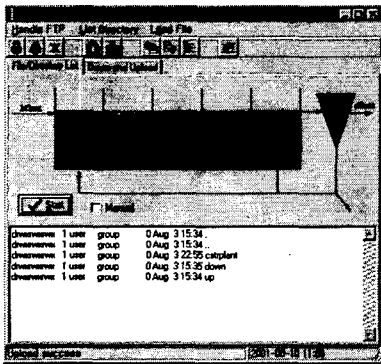


그림 5. FTP 데이터 전송 시스템.

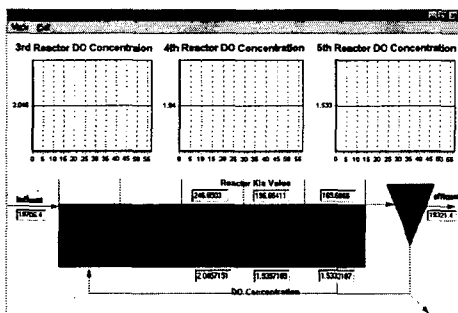


그림 6. 원격 모니터링 시스템.

3.4 원격 최적화

본 논문에서는 최적화를 통해 조정된 제어기 소속함수 파라미터들은 FTP를 통해 원격지에 있는 플랜트로 재 전송되고 플랜트는 수정된 제어기 파라미터를 통해 운전된다. 다시 말해, 감시 시스템이 구성된 컴퓨터에서 이미 만들어진 모델을 이용하여 현재 플랜트의 상태에 알맞은 최적화를 수행하여 그 결과를 실제 플랜트로 전송하여 원격 제어를 하고자 하는 것이 본 연구의 목적이다.

먼저 퍼지 제어기의 최적화를 위해서 목적함수를 정의하여야 한다. 본 논문에서는 호기조의 DO 농도를 이용한 오차값으로 구성된 다음과 같은 목적함수를 사용하였다. 실제 반응기의 DO 값들이 다음 반응기에도 영향을 미칠 수 있기 때문이다. 그리고 본 과제에서 제어기를 최적화하는데 있어서 독립적인 유전자 알고리즘을 적용한 것이 아니라 세 개의 폭기량을 동시에 최적화하는 방법을 사용하였기 때문에

각 반응기의 오차값이 서로 연관관계에 있다. 따라서 세 반응기의 오차가 모두 좋아지는 최적화 값을 찾기 위하여 아래와 같이 조합된 식을 사용하여 제어기를 최적화하였다.

3.4.1 유전자 알고리즘을 이용한 최적화

유전자 알고리즘을 이용한 최적화 결과를 보면 초기 110.44에서 목적함수 결과값이 최적화 이후 78.26까지 줄어든 것을 볼 수 있다. 목적함수의 구성이 오차의 제곱에 대한 합으로 구성되었기 때문에 값이 줄어들수록 전체적인 오차가 감소하는 결과라고 할 수 있다. 아래의 그림을 보면 초기 빠르게 오차가 줄어드는 것을 볼 수 있다. 유전자 알고리즘의 특성상 초기에 넓은 범위에서의 검색에 유리한 장점을 본 실험에서도 확인할 수 있었다. 반면 후반부로 갈수록 오차가 감소하는 비율이 줄어드는 추이를 통해 국부적인 탐색에서의 취약점을 볼 수 있다. 특히 원하는 오차 범위 내로 탐색하기 위해서는 과도한 연산량으로 인한 시간적인 효율이 떨어진다고 할 수 있다. 그러나 초기에 특정 영역을 탐색하는데 있어서는 좋은 성능을 보인다.

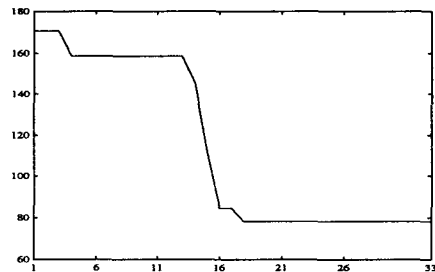


그림 7. GA를 이용한 최적화 결과.

3.4.2 SA를 이용한 최적화

SA를 이용한 최적화 결과를 보면 초기에 목적함수의 결과값이 84.53으로 시작하여 40회의 반복을 거친 후 57.59로 줄어들었다. 결과를 볼 때 SA를 이용한 최적화 결과가 유전자 알고리즘을 이용한 최적화 결과보다 다소 성능이 좋지 않은데, 이것은 SA의 특성상 유전자 알고리즘보다 다방향 탐색능력이 떨어지기 때문이다. 그러나 최적화를 수행하는데 소요된 시간은 약 8시간 20분 정도로 유전자 알고리즘의 수행 시간인 약 48시간에 비하면 연산량에서 훨씬 유리한 최적화 방법이다. 즉, SA의 경우 실시간으로 플랜트 공정의 최적화를 수행할 수 있다는 것을 의미한다. 물론 초기 조건에 대한 정보가 없다면 SA 또한 현재의 성능을 보이기 위해서는 보다 많은 탐색을 수행해야 할 것이다. 그러나 개체를 이용한 다방향 탐색이 아니기 때문에 GA에 비해서는 훨씬 적은 연산량으로 좋은 최적화 성능을 얻을 수 있다. 물론 유전자 알고리즘의 전역 탐색에 대한 우수한 성능을 적용하기 위하여 초기에 유전자 알고리즘을 이용하여 전역 탐색을 한 후 국부 탐색에 우수한 성능을 보이는 simplex method와 같은 알고리즘을 적용한 하이브리드 유전자 알고리즘을 이용한 탐색도 가능하다.

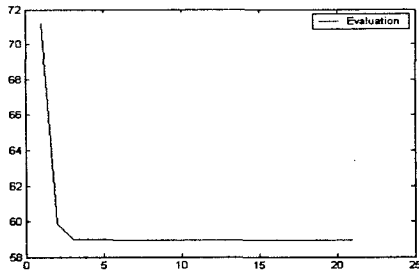


그림 8. SA를 이용한 최적화 결과.

4. 결론

본 논문에서는 효율적인 에너지 관리를 위해 호기조의 DO농도제어를 전탈질공정에 퍼지 제어를 적용하여 모의실험을 수행한 후 이를 분석하였다. 제어기의 최적화를 위하여 유전자 알고리즘과 simulated annealing을 이용하여 퍼지 소속도함수의 분산과 중심값, 그리고 출력 소속함수 값을 결정하는데 적용하여 최적화 가능성을 제시하였다. 모의실험 결과를 바탕으로 하·폐수 처리장의 건설 및 운영에 보다 합리적이며, 효율적인 방법을 제안하는 것이 가능하다. 특히, 전체 공정의 자동화를 통하여 보다 경제적이고 안정적인 운전이 가능하며 이를 바탕으로 엄격해지는 유출수의 수질기준에 적용할 수 있는 제어기의 구성이 가능하다. 또한 본 연구를 통해 국지 제어뿐만 아니라 현장에서 운전되고 있는 플랜트의 공정 데이터를 LAN과 CDMA 모듈을 이용하여 중앙 관리 시스템까지 원활하게 전송하고 획득된 데이터를 기반으로 하여 전체 공정을 감시·제어할 수 있는 전체 플랜트 제어 시스템을 구축하였다. 이러한 원격 모니터링 시스템을 바탕으로 여러 개의 플랜트를 함께 관리할 수 있는 시스템을 적용함과 동시에 원격지에서 모델을 이용하여 최적화도 함께 수행함으로써 원활한 공정 관리를 수행할 수 있는 통합 시스템을 구성하였다.

참고문헌

[1] Henze, M., Grady, C.P.L.Jr., Gujer, W., Marais, G.v.R and Matsuo, T. *IAWQ Task Group on Mathematical Modelling for Design and Operation of Biological Wastewater Treatment*. Activated sludge model No. 1, Scientific and Technical Reports No. 1, IAWQ, 1986.

[2] J. S. R. Jang, C. T. Sun and E. Mizutani, *Neuro-Fuzzy and Soft Computing*. Prentice-Hall, 1997.

[3] C. Lin and C.S.G. Lee, *Neural Fuzzy Systems*, Prentice Hall, 1996.

[4] Jeppson, U. *Modelling Aspects of Wastewater Treatment Processes*. Ph.D. Thesis, Dept. of Industrial Electrical Engineering and

Automation, Lund Institute of Technology, Sweden, 1996.

[5] Henri Spanjers, Peter A. Vanrolleghem, Gustaf Olsson, and Peter L. Dold, *Respirometry in Control of the Activated Sludge Process: Principle*, IAWQ task group on respirometry, 1998.

[6] <http://www.ensic.u-nancy.fr/COSTWWTP>

[7] Takacs, L., Party, G.G., and Nolasco, D. "A dynamic model of the clarification-thickening process." *Water Research*, Vol. 25, No. 10, pp. 1263-1271, 1991.

[8] The Mathworks, Inc. *Simulink[®] Dynamic System Simulation for Matlab[®] Using Simulink[®] version 2*, The Mathworks, Inc, 1996.

[9] Ned Gulley and J.-S. Roger Jang, *Fuzzy logic Toolbox for use with Matlab[®]*. The Mathworks, Inc., 1995.

[10] 천성표, 김성신, 김창원, "생물학적 영양염 제거를 위한 연속식반응기 모델구현," *대한환경공학회 '99추계학술연구발표회*, pp. 197-198, 1999.