

# 하·폐수 처리장의 원격 모니터링 및 지식 기반 무인 자동화 시스템

## Knowledge-Based Unmanned Automation and Control Systems for the Wastewater Treatment Processes

배현, 정재룡, 서현용, 김성신, 김창원\*

Hyeon Bae, Jae-Ryong Jung, Hyun-Yong Seo, Sungshin Kim, and Chang-Won Kim\*

부산대학교 전자전기통신공학부

\*부산대학교 환경공학과

School of Electrical and Computer Eng., Pusan National Univ.

\*Dept. of Environmental Eng., Pusan National Univ.

(baehyeon@pusan.ac.kr)

### ABSTRACT

This paper introduces unmaned fully automation systems, which are applied for the CSTR (Continuously Stirred Tank Reactor) and SBR (Sequencing Batch Reactor) wastewater treatment system. The pilot plant is constructed in the country side which is little far from a main city. So networks and wireless modules are employed for the data transmission. The SBR plant has a local control and the remote monitoring system which is contained communication parts which consist of ADSL (Asymmetric Digital Subscriber Line) network and CDMA (Code Division Multiple Access) wireless module. Remote control and monitoring systems are constructed at a laboratory in a metropolis.

**Key Words** : CSTR, SBR, remote monitoring, fuzzy inference system

### 1. 서 론

본 논문에서는 연속식반응기 (CSTR)와 축산 폐수장에서 널리 사용되는 연속회분식반응기 (SBR)를 대상으로 국지 제어와 여러 하·폐수처리장을 한 곳의 중앙 제어센터에서 제어 및 관리하는 중앙 집중식 관리자 제어를 통해 하·폐수처리 시설의 효율적이고 합리적인 운전, 안정적인 유출 수질 확보 및 운전비용 절감을 위한 전체 플랜트 제어 시스템을 적용하고자 한다.

CSTR 플랜트는 실제 운전중인 플랜트가 아닌 모델을 이용한 가상 플랜트를 사용한다. 본 플랜트는 이전의 연구를 통해 검증된 거친 벤치마크 플랜트이다. 가상 플랜트의 데이터 전송은 FTP (File Transfer Protocol) 서버를 이용하여 특정 시간 간격으로 전송할 수 있도록 구성하였다. SBR 플랜트는 실제 현장에서 운전중인 파일럿 플랜트를 대상으로 하였다. 현장의 특성상 데이터 전송의 안정성을 위하여 FTP를 이용한 방법과 CDMA 무선 모듈을 이용한 두 방법을 함께 사용하였다. 전용선의 전

송이 불가능할 경우 무선 모듈이 데이터를 전송함으로써 관리자 제어시스템이 원활하게 운용될 수 있도록 구성하였다.

각 공정의 최적화를 위하여 CSTR의 경우 각 반응기의 DO (Dissolved Oxygen)농도 제어를 위한 송풍기의 세기를 조절하도록 구성하였고, 제어기는 퍼지제어기를 사용하였으며 최적화를 위해 simulated annealing (SA)을 적용하였다. SBR의 경우 실시간 플랜트로 반응기의 특정 센서 신호를 이용하여 유입량과 ON/OFF 제어에 사용되는 ORP 미분값의 문턱값 (threshold value)을 결정하기 위해 퍼지추론 시스템을 구성하여 함께 운전할 수 있도록 구성하였다.

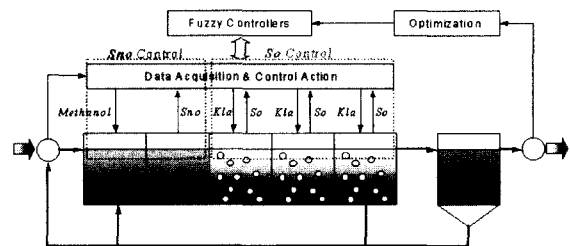


그림 1. CSTR 플랜트 제어를 위한 간략도.

접수일자 : 2001년 11월 1일

완료일자 : 2001년 12월 1일

감사의 글 : 본 논문은 한국과학재단 지정 환경기술·산업개발연구센터(RRC-IETI)의 지원(과제번호: 99-10-01-03-A-3)에 의하여 연구되었으며 이에 감사드립니다.

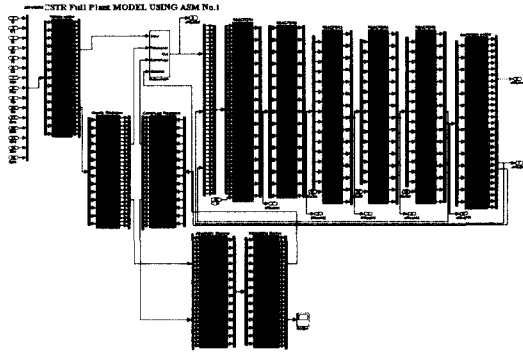


그림 2. ASM No.1 Benchmark Plant.

## 2. 이론적 배경

### 2.1 CSTR 플랜트

CSTR 가상 플랜트는 연속식반응기 모델로서 IWA (International Water Association)에서 제안한 Benchmark를 기반으로 Activated Sludge Process No. 1 (ASM No.1)을 적용하였다 [1]. 모델은 Matlab5.3/Simulink3.0을 이용하여 구현하였다. 외부탄소원과 DO제어를 위한 전체적인 구성은 그림 1에서 보여주고 있다. 호기조에서의 DO제어는 각 반응기내의 산소농도를 측정하여 퍼지 논리로 구성된 제어기를 통하여 폭기량 (KLa)을 조절하여 반응기내의 DO농도를 제어하는 것이다. 퍼지제어기의 구성은 기준값과 현재 상태값의 차를 오차로 정의하였고 이전 표본추출시간에서의 오차와 현재상태의 오차를 표본추출시간으로 나눈값을 오차의 변화율로 정의하였다. 이를 바탕으로 21개의 규칙을 만들었다 [2].

### 2.2 SBR 플랜트

SBR 플랜트는 주기적인 시간에 따라 질산화와 탈질화 공정을 반복함으로써 암모니아 성분을 질소가스로 배출하는 생물학적 처리 시스템으로서 운전 조건이 주기적으로 바뀐다는 것이 특징이다. 다시 말해, 호기조 (aerobic reactor)와 무산소조 (anoxic reactor)가 분리되지 않고 하나의 반응기 안에서 정해진 시간이나 ORP (oxidation reduction potential)나 DO 곡선을 이용한 실시간 제어를 통해 하 · 폐수를 처리하는 플랜트이다. 본 논문에서 사용된 플랜트는 축산폐수를 처리하는 플랜트이다.

탈질 미생물은 에너지원으로 탄소를 반드시 필요로 하는데, 일반적으로 탄소 산화반응이 질산화 반응보다 빨리 일어나므로 호기 단계에서 질산화가 완료되었을 경우 무산소 단계는 거의 모든 탄소가 소비된 상태이다. 전통적인 방법으로 반응기를 운전하는 경우 무산소 단계에서 외부탄소원을 주입한다. 무산소 반응 동안에 원수를 유입시킴으로써 부족한 탄소원을 원수로 보충함으로써 운전비용을 절감할 수 있다. 원수는 유기물 이외에도 많은 질소 등을 함유하고 있으므로 추가로 공급되는 원수의 특성을 충분히 고려하여 무산소 단계에서 얼마만큼 유입할지를 결정하여야 한다. 본 논문에서는 현재 반응기의 DO농도를 분석하여 현재 부하량을 추정하고 부하량에 따라 유입량을 결정할 수 있는 퍼지 추론 시스템을 이용하여 유입량을 결정하고자 하였다.

## 2.3 퍼지 논리

많은 실제 시스템에서 중요한 정보의 획득은 전문가의 지식이나 센서와 같은 측정 장비를 통해서 이루어진다. 따라서 시스템을 설계하기 위해 중요한 것은 이 두 가지를 적절하게 접목시키는 일이다. 그리고 인간의 지식을 수학적 공식으로 어떻게 변화시키는지 하는 것이 중요한 문제이다. 이러한 변환을 수행할 수 있는 것이 퍼지 시스템이다.

퍼지 시스템의 핵심은 IF-THEN 규칙을 포함하고 있는 지식에 기초한 것이다. 이러한 규칙은 인간의 전문 지식 등에 기초하여 구성할 수 있다. 본 논문에서는 CSTR 플랜트의 DO농도 제어와 SBR 플랜트의 유입량과 문턱값 결정을 위한 추론 시스템에 퍼지 논리를 적용하였다.

## 3. 시스템 구현 및 적용

### 3.1 전체 플랜트 제어시스템

전체적인 시스템의 제어는 그림 3에서 보는 것과 같이 4대의 컴퓨터로 이루어진다. 하부 플랜트의 실제적인 제어는 PLC (programmable logic controller)를 기반으로 이루어지고 플랜트의 각 성분들의 값은 센서들을 통해 PC1의 하부 제어기로 저장된다. SBR 플랜트의 측정 파라미터들은 ORP, DO, 유입수량, 펌프 상태 등이다. 본 논문에서는 공정제어를 위해 ORP와 DO값을 이용하였다. 하 · 폐수 처리 시스템의 특성상 폭기량이 중요한 변수로 작용하므로 폭기 상태를 평가할 수 있는 두 센서 값을 사용하였다.

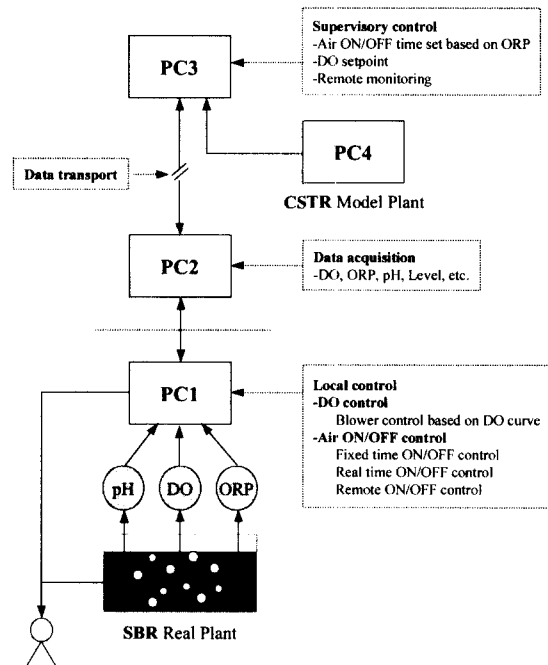


그림 3. 전체 플랜트제어 구성도.

센서로부터 저장된 데이터는 원활한 조작을 위하여 PC2의 데이터베이스로 저장된다. 이렇게 저장된 데이터 값들은 FTP 서버와 CDMA 무선 모듈을 통해 원격지에

있는 관리자 시스템으로 전송된다. 관리자 시스템에서는 전송된 데이터들을 모니터링하게 되고, 데이터 분석을 통해 현재 공정 상태를 분석할 수 있다. 본 그림에서는 PC3이 관리자 시스템으로 사용된다.

PC4는 벤치마크 모델로 구성된 가상 플랜트로서 각 운전 결과값들은 FTP를 이용하여 SBR 플랜트와 마찬가지로 관리자 제어 시스템으로 전송된다.

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 메시지를 전송할 수 있으므로 운전자가 자리를 비우는 경우에도 플랜트를 관리하는 것이 용이하다.

### 3.2 CSTR 가상 플랜트의 제어 및 최적화

CSTR 가상 플랜트로부터 전송된 DO, NO 등과 같은 결과값들은 관리자 시스템에서 그래프와 수치 등으로 표현된다. 그림 4에서 보는 바와 같이 공정 분석에 필요한 중요한 데이터들을 그래프로 표현함으로써 변화되는 추이를 쉽게 관찰할 수 있도록 구성하였다. 이러한 관리자 시스템의 목적은 공정 플랜트를 직접 감시하고 데이터의 변화들을 분석하여 현재 플랜트의 상태를 진단하는데 있다.

본 논문에서 가상 플랜트의 경우 퍼지제어를 통해 폭기량을 제어하는 것이 목적이다. 따라서 가상 플랜트의 실시간 데이터는 관리자 시스템의 플랜트 모델을 통해 최적화를 수행하여 최적의 제어를 설계하고자 하는 모델 기반 제어 방법을 적용하였다. 본 논문에서는 SA를 통해 퍼지제어의 소속함수 파라미터들을 최적화하고 최적화된 값들은 다시 가상 플랜트로 전송되어 새로

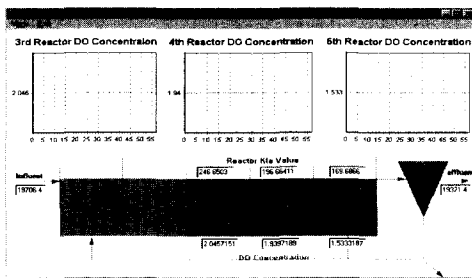


그림 4. 질산화 과정에서의 DO 농도.

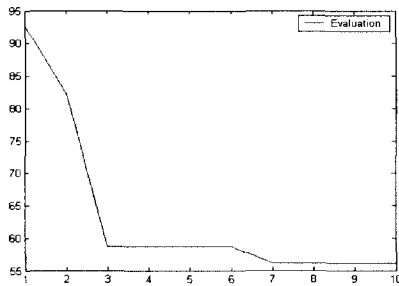


그림 5. 목적함수의 최적화 추이.

운 소속함수 파라미터를 이용하여 운전되도록 구성하였다. 그림 5에서 보는 바와 같이 SA를 통해 오차로 구성된 목적함수의 값이 줄어들고 있음을 알 수 있다. 다시 말해 최적화를 통해 제어 성능을 높이는 퍼지 소속함수의 값을 찾을 수 있다는 것이다. CSTR 플랜트의 DO농도 제어와 최적화는 참고 논문 [2]에서 볼 수 있다.

### 3.3 SBR 파일럿 플랜트의 제어 및 진단

본 논문에서 적용한 또 다른 플랜트로 실제 현장에서 운전 중인 SBR 플랜트의 원격 감시 및 진단 시스템을 구성하였다. 전용선이 들어오지 않는 농촌 지역에 위치한 플랜트의 데이터 전송이나 전용선의 보완 장치로서 CDMA 무선 모듈을 사용하였다. 본 논문에서 사용한 무선 모듈은 휴대용 전화와 같은 제품으로서 직렬 포트를 통해 쉽게 연결·접속할 수 있고 개발도 용이하다. 또한 무선 모듈의 경우 필요한 데이터 전송 뿐만 아니라 필요에 따라 경고 문자 등을 운전자의 휴대 전화로 전송할 수 있기 때문에 비상시에 유용하게 사용될 수 있다. 그림 6과 7은 무선 모듈을 이용한 데이터 전송과 시스템에 사용된 CDMA 모듈들을 보여주고 있다. 그림 8은 각 공정 상태와 센서 값들을 수치와 그림으로 보여지고 있으며 그림 9는 본 연구에서 SBR 공정 제어를 위해 사용한 ORP와 DO 곡선의 패턴을 보여주고 있다.

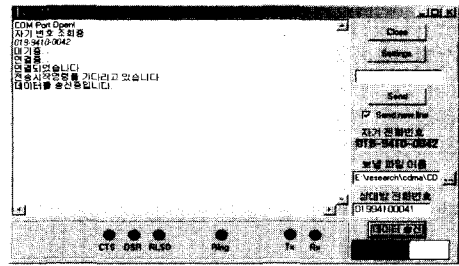


그림 6. 무선 데이터 전송 제어창.

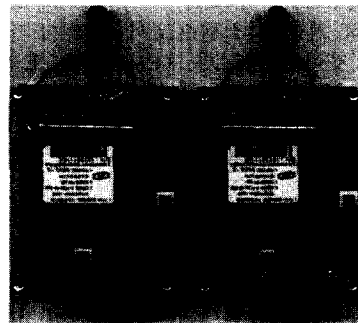


그림 7. CDMA 모듈.

CDMA 모듈과 ADSL을 통해 전송된 데이터들은 CSTR 가상 플랜트에서와 마찬가지로 그래프와 수치들로 표현된다. SBR 플랜트의 경우 CSTR 가상 플랜트와는 달리 송풍기의 연속적인 제어 대신 단지 ON/OFF 제어만 수행함으로써 제어 변수들이 아닌 각 공정의 운전 시간, 운전 횟수, 유입량, DO 곡선을 이용한 ON/OFF 제어를 위한 문턱값 등이 관리자 시스템으로부터 현장 플랜트로 전송된다. 유입량과 문턱값은 퍼지 추론 시스템을 통해 현재 반응기의 부하량을 유추하여 결정하게 된다.

플랜트의 DO농도 곡선을 분석하면 부하량이 높고 낮음에 따라 패턴이 다르게 나타난다. 다시 말해 DO의 농도가 순간적으로 상승하기까지의 시간이 고부하시 길어지고, 반대로 저부하시는 짧게 나타난다. 이러한 패턴을 퍼지 추론 시스템의 입력으로 사용하여 앞서 언급한 두 값을 결정하게 된다. 실제 시스템 운영을 통해 획득한 지식에 기반하면 저부하시 문턱값은 0.75, 유입량은 0.4m<sup>3</sup>이고 고부하시는 0.5, 0.2m<sup>3</sup> 사이의 값으로 각각 결정된다.

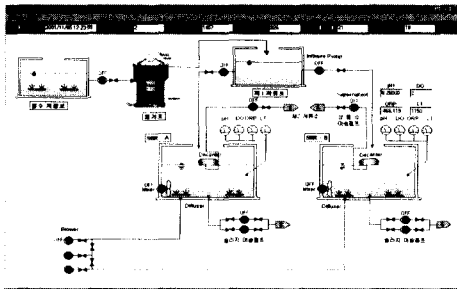


그림 8. SBR 플랜트의 원격 감시창.

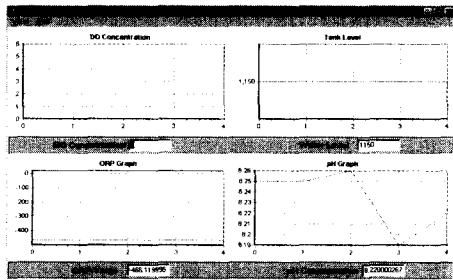


그림 9. DO, ORP 데이터 그래프.

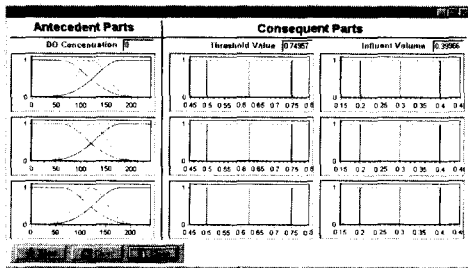


그림 10. 퍼지 추론 시스템.

#### 4. 결론

본 연구를 통해 현장에서 운전되고 있는 플랜트의 공정 데이터를 ADSL과 CDMA 모듈을 이용하여 중앙 관리 시스템까지 원활하게 전송하고 획득된 데이터를 기반으로 하여 전체 공정을 감시·제어할 수 있는 전체 플랜트 제어 시스템을 구축할 수 있었다. 특히 여러 개의 플랜트를 함께 관리할 수 있는 시스템을 적용함으로써 소규모 시스템의 관리·제어가 용이함을 확인할 수 있었다.

#### 참고 문헌

- [1] IAWQ Scientific and Technical Report Task Group : *Respirometry in Control of the Activated Sludge Process Interim Report #1, 2, 1999.*
- [2] 천성표, 김성신, 김창원, "생물학적 영양염 제거를 위한 연속식반응기 모델구현," *대한환경공학회 '99추계 학술연구발표회*, pp. 197-198, 1999.

#### 저자 소개



##### 배현(Hyeon Bae)

2001년 : 부산대학교 전기공학과 졸업  
(공학석사)

2001년~현재 부산대학교 전기공학과  
박사과정

관심분야 : 지능제어, 퍼지 논리,  
공정자동화

Phone : +82-51-510-2367

Fax : +82-51-513-0212

E-mail : baehyeon@pusan.ac.kr



##### 정재룡(Jae Ryong Chung)

2001년 : 부산대학교 기계공학과 졸업  
(공학석사)

2001년~현재 부산대학교 전기공학과  
박사과정

관심분야 : 메카트로닉스, 공정자동화

E-mail : jrjung@pusan.ac.kr



##### 서현용(Hyun-Yong Seo)

2002년 : 경상대학교 전기공학과 졸업  
(공학사)

2002년~현재 부산대학교 전기공학과  
석사과정

관심분야 : 지능형 하폐수 처리, 퍼지 제어



**김성신(Sungshin Kim)**

1996년 : Georgia Institute of Technology  
전기공학과 졸업(공학박사)  
1998년~현재 부산대학교 전기공학과  
조교수

관심분야 : 지능제어, 데이터 마이닝,  
공정최적화

Phone : +82-51-510-2374  
Fax : +82-51-513-0212  
E-mail : sskim@pusan.ac.kr



**김창원(Changwon Kim)**

1985년 : University of Florida 환경공학  
과 졸업 (공학박사)  
1986년~현재 부산대학교 환경공학과 교수

관심분야 : 생물학적 하폐수처리, 생물막  
공정