

## 호흡률 및 송풍기 제어 기반 포기조 최적 DO 농도 설정과 전력 비용 절감 연구

이광수\*\*\* · 김민한\*\* · 김종락\*\*\* · 유창규\*†

\*경희대학교 공과대학 환경학 및 환경공학과/환경연구센터

446-701 경기도 용인시 기흥구 서천동 1

\*\*팬지아이집일

463-400 경기도 성남시 분당구 삼평동 685

\*\*\*유엔유소프트

152-053 서울시 구로구 구로3동 222-3

(2014년 3월 14일 접수, 2014년 4월 10일 수정본 접수, 2014년 4월 26일 채택)

## Optimal DO Setpoint Decision and Electric Cost Saving in Aerobic Reactor Using Respirometer and Air Blower Control

Kwang Su Lee\*\*\*, Minhan Kim\*\*, Jongrack Kim\*\*\* and Changkyoo Yoo\*†

\*Department of Environmental Science and Engineering, Center for Environmental Studies, College of Engineering,

Kyung Hee University, Seochon-dong 1, Giheung-gu, Yongin-si, Gyeonggi 446-701, Korea

\*\*Pangaea21, Ltd., Sampyeong-dong 685, Bundang-gu, Seongnam-si, Gyeonggi 463-400, Korea

\*\*\*UnUsoft, Ltd., Guro3-dong 222-3, Guro-gu, Seoul 152-053, Korea

(Received 14 March 2014; Received in revised form 10 April 2014; accepted 26 April 2014)

### 요 약

하수처리장을 운영함에 있어 안정적인 방류수질 확보와 이에 따른 처리 비용을 최소화하는 것이 주요 목적이다. 하지만 유입수 유량 및 성분 농도의 변화와 미생물의 비선형적인 동특성, 기타 환경 요인에 의해서 최적의 운전 제어를 하기가 쉽지 않기 때문에, 기존의 하수처리장에서는 필요한 양 이상의 폭기 및 화학물질을 과량 주입하는 방법 등을 사용하였다. 본 연구에서는 포기조에서 미생물에 필요한 용존산소농도는 유지하면서 과폭기로 인한 전력 비용을 감소 하는 최적 제어 방법을 제안하였다. 하수조성과 포기조 미생물의 호흡률은 실시간 미생물 호흡률 측정기(Oxygen uptake rate, OUR)를 이용하여 측정하였고, 실시간 호흡률 측정값을 바탕으로 현재 미생물에 필요한 최적 DO 농도를 제안하였다. 유입수 부하변동에 따라 변화하는 미생물 호흡에 필요한 산소량 만큼만 폭기하도록 구성함으로써, 방류수 수질 기준을 만족함과 동시에 전력 비용을 최소화할 수 있는 방안을 제시하였다.

**Abstract** – Main objects for wastewater treatment operation are to maintain effluent water quality and minimize operation cost. However, the optimal operation is difficult because of the change of influent flow rate and concentrations, the nonlinear dynamics of microbiology growth rate and other environmental factors. Therefore, many wastewater treatment plants are operated for much more redundant oxygen or chemical dosing than the necessary. In this study, the optimal control scheme for dissolved oxygen (DO) is suggested to prevent over-aeration and the reduction of the electric cost in plant operation while maintaining the dissolved oxygen (DO) concentration for the metabolism of microorganisms in oxic reactor. The oxygen uptake rate (OUR) is real-time measured for the identification of influent characterization and the identification of microorganisms' oxygen requirement in oxic reactor. Optimal DO set-point needed for the micro-organism is suggested based on real-time measurement of oxygen uptake of micro-organism and the control of air blower. Therefore, both stable effluent quality and minimization of electric cost are satisfied with a suggested optimal set-point decision system by providing the necessary oxygen supply requirement to the micro-organisms coping with the variations of influent loading.

Key words: Process Optimization, Microbial Respiration, Oxygen Uptake Rate, DO Set-point Optimization, Air Blower Control

†To whom correspondence should be addressed.

E-mail: ckyoo@khu.ac.kr

‡이 논문은 서울대학교 윤인섭 교수님의 정년을 기념하여 투고되었습니다.

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

## 1. 서 론

2012년 하수처리장의 방류수 수질기준의 규제가 강화되면서, 방류수질을 안정적으로 유지시키면서 동시에 처리 비용을 절감시키기 위하여 하수처리시스템의 고도화 및 최적 운전의 필요성이 대두되고 있다. 하수처리공정에서 유입 원수 내 오염물질을 제거하기 위해 생물학적 처리를 주로 수행하며, 오염물질 중 탄소와 질소는 생물반응조 내 산소를 이용한 산화반응을 통해 제거된다. 즉, 미생물이 유기물을 제거(유기물 산화)하거나 질소를 변환(질산화)하기 위해서는 산소가 반드시 필요하며, 일반적으로 산소는 송풍기를 통해 생물반응조로 공급되는 공기에 포함된다.

미생물이 유기물 산화와 질산화를 수행하기 위해서는 포기조 내 용존산소(Dissolved Oxygen, DO)가 적절한 농도로 유지되어야 한다. 만약 용존산소농도가 미생물이 성장하기에 부족한 경우 사상균이 우점하게 되어 활성슬러지의 침전성이 나빠져 방류수 수질이 악화되는 요인이 되며, 용존산소가 필요 이상으로 존재할 경우 처리수 수질의 개선 효과는 거의 없으나 과량의 용존산소는 미생물에 의해 사용되지 않고 공기 중으로 빠져나가게 된다. 그러므로, 미생물이 필요로 하는 용존산소농도를 유지시키며, 필요 이상의 공기를 주입하여 폐기되는 용존산소를 줄이는 등 처리능력 향상 및 적정 공기공급에 의한 운전비용을 감소할 필요가 있다[1].

특히 하수처리장 전체 운영비용 중 전력비가 약 40%를 차지하며, 전력비용 중 송풍기에 의한 전력비용이 적지 않은 부분을 차지한다. 그렇기 때문에 송풍기 가동에 의한 전력비용을 절감함으로써 하수처리공정의 전체 운영비용을 상당부분 절감할 수 있다.

1980년대 이후 International Water Association(IWA) 산하 task 그룹에서 활성슬러지 공정에 대한 수학적 모델 (Activated sludge model, ASM)을 개발함으로써 모델링 기법을 사용한 하수처리장의 공정 모사 등에 대한 연구가 활발히 진행되었다[2]. 호흡률 측정법 등을 이용하여 활성슬러지모델에서 유입하수의 성상 분석과 미생물의 동특성을 파악하여 공정에서 발생하는 여러 상황에 대한 모사를 수행하였다[3]. 하수의 특성 및 환경 요인이 다르기 때문에 활성슬러지 모델을 적용하기 위해서는 특성별 유입수 성상분석 또는 모델 보정 등이 선행되어야 한다. 국내에서도 호흡률 측정법을 이용하여 유입수의 성상분석과 모델 동특성을 파악, 매개변수 추정, 공정 최적화 등에 대한 연구가 진행되었다[4-6].

본 연구에서는 미생물의 산화반응에 필요한 포기조 내 최적 용존산소농도를 산정하여 그에 따른 송풍량을 제어하고자 한다. 생물학적 하수처리공정에서의 미생물 동특성은 하수의 성분, 발생 및 배제 등 다양한 조건에 영향을 받기 때문에 지역 및 환경에 따라 매우 상이하게 보고되고 있다[7,8]. 또한, 생물학적 처리에 있어서 산소는 미생물의 호흡과 기질의 분해에 직접적으로 관여하고 있기 때문에 호흡률 측정법은 미생물과 하수의 특성을 밝히는 데 좋은 방법으로 알려져 있다[5]. 따라서 본 연구에서는 호흡률 측정법을 사용하여 미생물 동특성을 파악하여 최적 용존산소농도를 산정함으로써 효율적이고 경제적인 하수처리공정의 운전조건을 제시하고자 한다.

## 2. 연구 방법

본 연구에 사용된 호흡률 측정을 통한 최적 DO 산정 및 송풍량 제어 프로세스는 Fig. 1에 나타난 흐름도와 같다. 포기조의 하수를

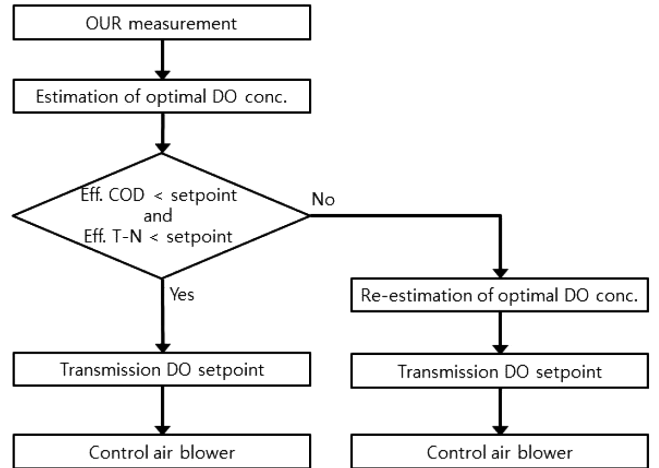


Fig. 1. The flowchart of the proposed DO optimal set-point decision and air blower control based on OUR measurement.

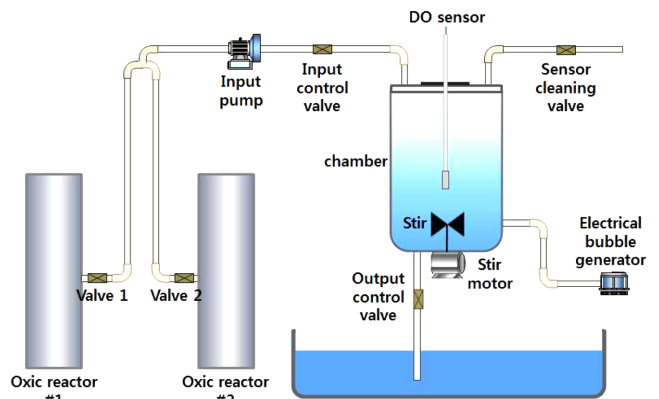


Fig. 2. The schematic diagram of the respirometry used in this study.

자동 샘플링하여 미생물의 호흡률(oxygen uptake rate, OUR)을 측정하고, OUR을 바탕으로 최적 DO 농도를 산정 및 검증하였다. 방류수의 수질기준을 만족시키기 위해 방류 COD와 TN 농도를 운영자가 설정한 기준 농도값과 비교하여 기준 농도값 이하일 경우 방류수 수질을 만족하는 것으로 판단되어 최적 DO 농도값을 송풍기로 전달하여 DO 제어를 수행하였다. 방류 COD와 TN 농도가 기준 농도값보다 높을 경우에는, 산정된 DO 농도를 보정하여 최적 DO 농도를 재 산정함으로써 실제 가동 중인 테스트베드에서의 시운전 안정성을 향상시켰다. 이렇게 산정된 최적 DO 농도는 송풍기로 전달하여 송풍기 자체에서는 최적 DO 농도 이하로 운전되도록 한다.

### 2-1. 미생물 호흡률(OUR) 측정

미생물이 기질(Substrate)을 분해할 때 소모시키는 산소량은 일반적으로 단위시간당 소모되는 산소량인 호흡률 또는 산소섭취속도(OUR, Oxygen Uptake Rate)로 측정된다. 호흡률은 포기조 내의 미생물의 대사활동을 직접 측정하는 상대변수로써, 미생물량의 증가 및 기질 제거와 직접적인 연관이 있으므로 이를 측정하는 것은 활성슬러지 공정의 운전을 위해서 유용한 기술이다[9]. 흔히, 포기조로 유입되는 생물학적 분해 가능물질의 농도가 높을수록 포기조 내 미생물의 활성이 높을수록 OUR은 높은 값을 나타낸다.

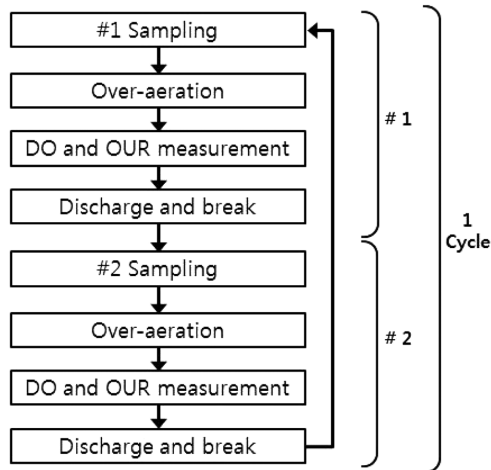


Fig. 3. The operating sequence of the respirometry based on DO and OUR measurements.

미생물의 호흡률을 측정하는 방법에는 대표적으로 두 가지가 있다. 첫째는 미생물이 존재하는 액상에서의 산소농도 감소율을 측정하는 것으로, DO 센서를 사용하여 액상의 용존산소 농도의 변화를 측정한다. 포기조에서의 하수를 샘플링하여, 반응기에 넣고 일정 시간 간격으로 액상의 DO 농도를 측정하면, 미생물이 일정시간 간격으로 얼마만큼의 DO를 소비하는지 파악할 수 있다. 이 때, 미생물이 단위 시간당 소비하는 DO 농도값을 OUR로서 계산되며, 본 연구에서 사용한 방법도 이와 같다. 또 다른 방법으로는 미생물이 존재하는 액상에서의 산소 전달률을 측정하는 것으로 기상의 산소 농도와 액상의 산소 농도가 평형을 이룬다는 가정 하에 기상의 산소농도의 변화를 측정하는 것이다. 이 또한, 일정시간 간격으로 미생물이 소비하는 DO 농도를 산출함으로써 OUR을 계산한다[10-12].

본 연구에서는 액상에서의 산소농도 감소율을 측정하는 방법으로써, Fig. 2와 같은 구성과 Fig. 3과 같은 절차에 의해 OUR을 측정하였다. 첫 단계에서는 포기조 1계열에 설치된 설치밸브와 유입펌프가 가동되며 반응조 유입조절밸브가 열리면서 하수가 5분여간 전량 반응기에 채운다. 5분여간의 시간동안 이전 과정에서 배관에 남아있던 공기 및 하수를 배출하고, 순수 1계열의 하수만 반응기에 유입되도록 한다. 다음으로 1분 동안 반응기 내 전기기포발생기 및 산기관에 의해 미세한 산소가 연속적으로 공급되어 하수 내 용존산소농도를 증가시키며, 교반모터 작동에 의해 하수의 완전혼합을 유지한다. 수질계측센서로 DO를 측정하며, 본 연구에서는 1분 간격으로 약 20분간 DO 농도를 측정하도록 설정하였다. 측정이 완료되면 반응기 하부에 연결되어 있는 배출배관의 전동구동밸브가 열리면서 3분 동안 공압식으로 센서를 세척하고, 반응기에 있는 하수는 모두 배출이 되고 1분의 휴지기를 거친 후, 포기조 2계열의 샘플밸브가 열리면서 앞의 기작이 연속적으로 수행된다[13]. 이렇게 2계열의 측정을 1 cycle로 정하고, 1 cycle은 매 시간마다 연속적으로 측정된다. Fig. 4는 본 연구에서 사용된 호흡률 측정기이며, 하수의 유입과 유출 라인, 반응기, DO 센서, 기포발생기와 유입 라인을 확인할 수 있다.

## 2-2. 미생물 호흡률에 기반한 산소호흡률과 최적 DO 농도 선정

포기조 내 미생물이 전자수용체로 산소를 사용함으로써 유기물 산화와 질산화가 진행된다. 전자수용체로 사용되는 적당한 양의 산소

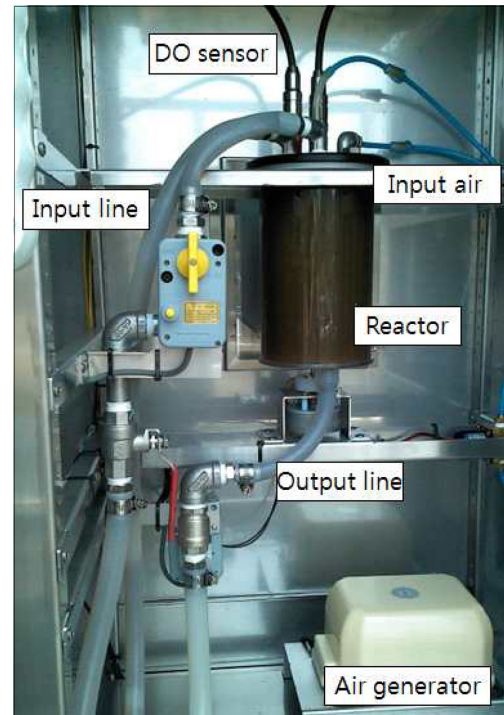


Fig. 4. The respirometry installed in D-wastewater treatment plant.

가 지속적으로 미생물에게 공급되어야 하는데, 이 때의 필요한 산소량을 측정하기 위하여 호흡률측정법을 사용한다. 반응기에 유입하수 주입 후, 과폭기를 하여 시간당 소비되는 DO 농도 추이를 통한 산소섭취속도를 측정하는 이유는 미생물에게 필요한 적정 용존산소를 산정하기 위함이며, 여기에서 측정된 최적 DO 농도를 유지하게 됨으로써 안정적이고 효율적인 포기조 운영이 가능하게 된다.

OUR 측정 과정 중 유입하수를 반응기 안에 채우고 과폭기하여 DO 농도를 최대한 높인 후 폭기를 중단하면 DO 농도가 감소하는데, 이를 통해 미생물이 산소를 소비한다는 것을 확인할 수 있다. 그에 따라 단위 시간당 OUR이 계산되며, 이는 다음 식 (1)에 의해서 계산된다.

$$OUR = \frac{DO_{t-1} - DO_t}{\Delta t} \quad (1)$$

Fig. 5는 일반적인 미생물의 호흡률 측정 결과 그래프를 나타내며, 그래프를 통해 최적 DO 농도를 산정할 수 있다. 기포발생기를 통해

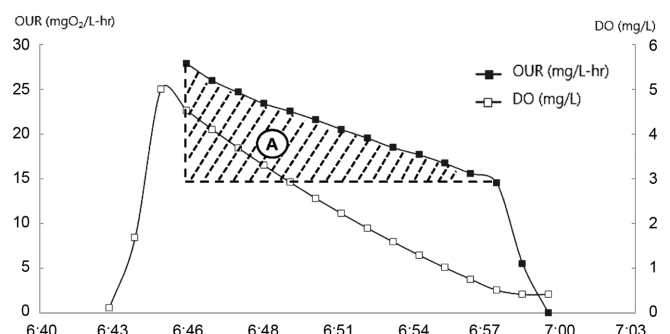


Fig. 5. The respirogram results of DO and OUR for influent characterization of readily biodegradable component.

공기를 최대한 주입함으로써 하수 내 산소농도는 과포화상태가 된다. 그 후, 미생물이 유기물 산화 및 질산화를 위해 산소를 사용하게 되고, DO 농도는 감소한다. DO 농도가 감소하면서 미생물이 더 이상 유기물 산화 및 질산화를 할 수 없을 때에 DO 농도는 일정해진다. 호흡률 곡선을 보면, DO 농도가 높을 때에는 미생물의 활성도가 증가하여 그에 따라 산소호흡률이 높다. DO 농도가 감소하면서 미생물의 호흡률이 서서히 낮아지는 것을 확인할 수 있고, DO 농도가 일정해지면서 호흡률은 0으로 감소한다. DO 농도가 일정하다는 것은 이미 미생물이 산소를 사용할 필요가 없다는 것을 의미하며, 그 직전까지의 호흡률, 즉 호흡률 곡선이 급격히 감소하기 직전까지가 미생물에게 필요한 최대 DO 농도가 될 수 있고, 최대 DO 농도 이상으로 공기가 주입되어도 미생물은 더 이상 산소를 사용하지 않는다. 이때의 (A) 면적을 통해 최적 DO 농도를 계산할 수 있으며, 면적과 최적 DO 농도는 비례한다. (A) 면적은 다음 식과 같이 지점에서의 중간높이를 구한 후, 사각형 넓이의 합으로 계산한다.

$$A = \left( \Delta t \times \frac{y_1 + y_2}{2} + \Delta t \times \frac{y_2 + y_3}{2} + \dots + \Delta t \times \frac{y_{n-1} + y_n}{2} \right) - ((n-1) \times \Delta t \times y_n) \quad (2)$$

### 2-3. 방류수질 농도 검증을 통한 최적 DO 농도 산정

생물학적처리 공정 특성으로 인해 하수처리 공정의 미생물 기작이나 하수 오염물질 제거에 영향을 주는 요인으로 온도, pH, 유입부하 등 여러 가지가 있지만, 공정의 비선형성으로 인하여 이러한 요인들의 최적 조건을 제시하는 데에는 한계가 있다[9,14]. 그 결과 현재까지의 하수처리장의 운전은 경험이 풍부한 전문가의 판단에 의해서 대부분 수행되고 있으며, 결국 최적 관리는 한계를 가질 수밖에 없었다[14,15]. 본 연구에서는 실제 가동 중인 D 하수처리장을 테스트베드로 하여 실운전을 수행하였고, 실운전을 수행함에 있어 안정성을 강화하기 위하여, 방류수질의 상태에 따라 산정된 DO 농도의 적용 여부를 결정하고 보정함으로써, 공정의 신뢰성 및 안정성을 높일 수 있도록 하였다.

대부분의 하수처리장에는 원격수질감시체계(Tele-Monitoring System, TMS)가 구축되어 TSS, COD, TN, TP 농도의 방류수질을 실시간으로 측정 및 모니터링하고 있다. 이 중, 포기조 DO 농도에 의해 영향을 받을 수 있는 방류 COD와 TN 농도가 방류수질 기준 또는 운영자가 임의로 지정한 농도보다 낮을 경우 정상으로 간주되어 이전단계에서 제시된 최적 DO 농도를 송풍기 제어시스템으로 전송하여 제어 운전되도록 하였으며, 방류수 COD와 TN 농도가 기준 농도보다 높을 경우, 이는 비정상적으로 간주되어 이전 단계에서 산정된 최적 DO 농도를 적용하지 않고 DO 농도를 재산정하여 적용하였다.

방류수의 COD 및 TN 항목 중, 어느 하나의 항목이 기준 농도보다 높을 경우에는 이미 산정된 DO 농도를 높여 산화반응이 더 많이 일어나도록 유도하였다. 식 (3)과 같이 현재 방류수의 COD 농도(COD<sub>t</sub>)와 COD 기준 농도(COD<sub>c</sub>)의 비가 방류수 TN 농도(TN<sub>t</sub>)와 TN 기준 농도(TN<sub>c</sub>)의 비 중 큰 값을 현재 DO 농도(DO<sub>t</sub>)에 곱한 후 안전계수(safety factor, s.f)를 적용하여 보정된 최적 DO 농도로 재산정하였다.

$$DO = \max \left[ \frac{COD_t}{COD_c}, \frac{TN_t}{TN_c} \right] \times DO_t \times s.f \quad (3)$$

여기에서 COD 및 TN의 기준 농도는 운영자가 방류수질 변동 범위를 고려하여 설정할 수 있으며, 일반적으로 방류수질기준의 70~80%로 사용할 것을 제안한다.

방류수질을 통해 최적 DO 농도를 재산정함으로써 호흡률 측정을 통한 최적 DO 농도 산정 결과를 실 처리장에 적용을 하더라도 혹시 모를 사고에 대비할 수 있고, 최종적으로는 하수처리장의 운영에 가장 중요한 기준이 되는 방류수질기준을 만족시키는 안정적인 방법을 제시하였다. 본 연구 내용은 호흡률 측정의 기기 오류 및 문제점 발생 시, 또는 공정 이상 및 급격한 유입 부하 등이 발생하였을 때에도 안정적인 방류수질을 제공하도록 최적 DO 농도 설정이 가능하다.

## 3. 연구 결과

본 연구에서는 실제 가동 중인 D 하수처리장을 테스트베드로 이용하였다. D 하수처리장은 용량 4,000 m<sup>3</sup>/일 규모의 처리장으로, 음식물쓰레기 산발효액을 이용한 하수처리고도처리 공법인 TEC-BNR 공법이 적용되었으며, 유입수 및 방류수 현황은 Table 1과 같다. 2013년 11월 ~ 2014년 2월의 4개월 동안 테스트베드에 호흡률 측정기를 설치하고 모니터링하여 연구, 분석하였다. 연구 결과를 적용한 시기는 1월 11일이며, 전/후 비교를 중심으로 결과를 정리하였다.

호흡률측정 장비는 포기조 1계열과 2계열에서 배관을 연결하여 샘플링하여 분석하였고, 계열별로 하수 샘플링 및 반응기 내 유입, 과폭기, 1분 단위의 OUR 측정, 하수 유출 및 휴지 단계로 연속측정하였으며, 1, 2계열을 1 cycle(1시간)로 측정하였다.

Fig. 6은 본 연구를 수행하기 위한 전체 공정을 나타낸다. 포기조 1, 2 계열에서 샘플링해 OUR 분석기에서 호흡률을 측정하여 현장 PLC (Programmable Logic Control), 감시제어시스템, 통신서버를 통해

Table 1. Influent and effluent conditions in D-wastewater treatment plant

Influent conditions		Effluent conditions	
flow	4,000 m <sup>3</sup> /d	-	
BOD	198.2 mg/L	BOD	4.2 mg/L
COD	114.5 mg/L	COD	10.2 mg/L
SS	196.4 mg/L	SS	4.6 mg/L
TN	59.673 mg/L	TN	10.075 mg/L
TP	6.245 mg/L	TP	1.156 mg/L

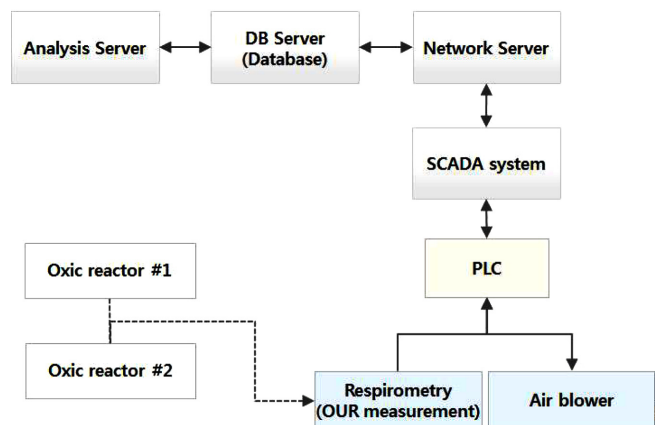


Fig. 6. The SCADA system configuration with the respirometry in the plant.



**Table 2. The results of the DO concentration, optimized DO set-point at aerobic reactors (#1,2) and effluent COD, effluent TN, air flowrate and electrical consumption**

Contents	unit	2013.12.11. ~ 2014.01.10			2014.01.11. ~ 2014.02.10		
		Min.	Max.	Avg.	Min.	Max.	Avg.
#1 DO conc.	mg/L	2.20	3.90	3.14	1.59	2.85	1.96
#1 Opt. DO conc.	mg/L	1.11	2.15	1.78	1.21	2.15	1.70
#2 DO conc.	mg/L	2.10	4.15	3.19	1.59	2.58	1.97
#2 Opt. DO conc.	mg/L	1.12	3.02	1.73	1.31	2.34	1.75
Eff. COD conc.	mg/L	8.50	15.10	11.23	10.30	15.90	13.17
Eff. TN conc.	mg/L	8.20	12.4	9.95	9.50	14.30	11.66
Air flowrate	m <sup>3</sup> /hr	642	889	766	480	681	567
Electrical energy consumption	KW	13.8	19.1	16.5	10.3	14.5	12.2

DB (Database) 서버에 저장된다. 분석서버에서 실시간 호흡률 값을 가져와 분석하여 최적 DO 농도가 산정되고, 이 DO 설정치를 최종적으로 송풍기로 보냄으로써, 송풍기에서는 포기조의 DO 농도를 제한한 설정치로 유지되도록 송풍량을 제어한다. Database 프로그램은 MS-SQL을 사용하였고, 분석서버에서의 최적 DO 산정 시스템은 JAVA 기반으로 (주)팬시아21에서 직접 개발하였다.

2013년 1월 11일 기점으로 시스템을 적용하였고, 시스템을 적용하기 이전과 이후의 한달 데이터 결과는 Table 2와 같다. 시스템 이전의 1계열과 2계열에서의 실제 DO 농도는 2.20~3.90 mg/L로 운전되었고, 평균 DO 농도는 1계열이 3.14 mg/L, 2계열이 3.19 mg/L이다. 시스템 적용 이후 최적 DO 농도는 1계열이 평균 1.70 mg/L, 2계열이 평

균 1.75 mg/L로 나타났으며, D 하수처리장의 경우 1개의 송풍기가 동일한 양의 공기를 계열별로 주입하는 구조였기 때문에, 1계열 최적 DO 농도와 2계열 최적 DO 농도 중 큰 값을 사용하였다.

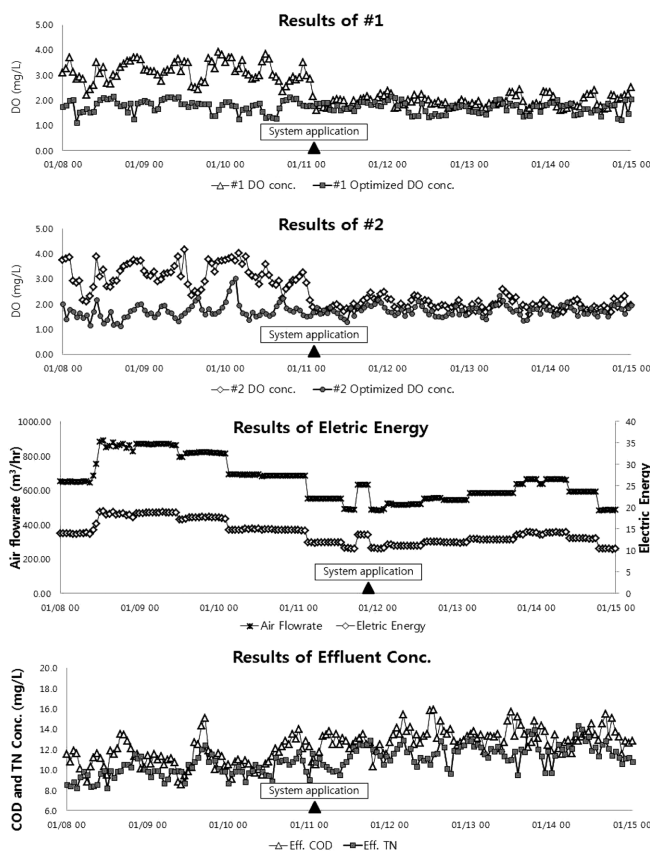
호흡률은 한시간 단위로 측정되기 때문에 가시적으로 보기 용이하도록 시스템 적용 이전과 이후 3~4일 그래프로 나타내면 Fig. 7과 같다. 적용 결과 실제 DO 농도는 1계열과 2계열의 평균값이 1.96 mg/L와 1.97 mg/L로 낮아졌다. 시스템 설치 전에는 산소공급량이 642~889 m<sup>3</sup>/hr인 반면 시스템 적용 이후에는 480~681 m<sup>3</sup>/hr, 평균 567 m<sup>3</sup>/hr로 25% 가량 감소하였다. 한편 전력량의 경우 산소공급량과 거의 비례한 결과를 보이고 이전에는 13.78~19.09 KW였으나, 시스템 적용 이후에는 10.27~14.54 KW, 평균 12.18 KW로 산소공급량과 마찬가지로 25% 가량 적어진 것을 알 수 있다. 반면, 방류수 COD 농도는 평균 11.23 mg/L에서 13.17 mg/L로, 방류수 TN 농도는 평균 9.95 mg/L에서 11.66 mg/L로 다소 높아졌지만, 그 차이가 적으며 방류수질 기준을 넘지 않음을 알 수 있다.

즉, 기존의 높은 DO 농도는 미생물에게 필요 이상의 공기가 공급되었다는 것을 알 수 있으며, 호흡률을 이용한 최적 DO 농도 산정을 통한 송풍기 제어 운전으로 미생물이 활용 가능한 적정의 산소량을 포기조에 공급할 수 있었다. 위 기간 동안의 포기조 DO 농도는 기존 대비 약 35%로 낮아졌으며, 약 25%의 공기유입량이 적게 주입됨으로써 송풍기 가동을 위한 전력 비용을 감소시킨 것으로 나타났다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 하수처리장 내 포기조의 미생물 호흡률을 측정함으로써, 미생물이 유기물 제거 및 질소 변환을 위해 필요한 적정 산소량을 계산하고, 포기조의 최적 DO 농도를 산정하였다. 최적 DO 농도를 기반으로 송풍기를 제어 운전한 결과, 방류 COD 및 TN 농도는 방류수질 기준 이하로 유지되면서, 시스템 적용 전의 DO 농도에 비해 약 35% 감소된 DO 농도 범위로 운전됨과 동시에 약 25%, 시간당 평균 4.32 KW의 전력량을 감소함을 알 수 있다. 이는 한국 전력에서 제시한 전기요금의 산업용전력(을) 고압 A 선택 III형, 겨울철 최대부하 기준 155.5원/KWH 적용하였을 경우, 1일 16,000원, 1년 590만원 상당의 금액으로 환산될 수 있다[16]. 이것은 기존 하수처리장 운영 시 포기조에 공기가 과량 공급되고 있었다는 것을 의미하며, 최적 DO 산정 시스템을 적용한 결과 송풍기 전력비용을 크게 절감할 수 있을 것으로 판단된다.

본 연구내용은 복잡한 장비의 도입이나 특이한 알고리즘을 사용하지 않으므로, 현장에 쉽게 적용가능하며, 현재 방류수질에 기반한



**Fig. 7. The results of the DO optimal set-point decision system based on OUR measurement (a) DO concentration #1, (b) DO concentration #2, (c) Air flowrate and electrical energy, (d) Effluent COD and TN.**

최적 DO 농도 보정이 수행되므로, 계절에 관계없이 적용 가능할 것으로 판단된다. 하지만, 시스템이 적용된 기간이 매우 짧은 점과 또한 동절기 운전 자료만 있다는 점이 한계점으로 판단되며, 향후 장기간 제어운전을 통해 연구 내용의 추가 검증하고자 한다.

## 감 사

본 연구는 글로벌환경기술개발사업(GT-11-B-01-109-0)의 지원을 받아 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

## References

1. Kim, B. G., Lee, T. H., Choi, G. S. and Kim, C. W., "Relationship Between Loading Rate and Respiration Rate for Control of Activated Sludge Process," *Journal of Korean Society of Environmental Engineers*, **18**(12), 1573-1582(1994).
2. Henze, M., Gujer, W., Mino, T. and Loosdrecht, M., "Activated Sludge Models ASM1, ASM2, ASM2d and ASM3," IWA Scientific and Technical report No.9, IWA, UK(1999).
3. Petersen, B., "Calibration, Identifiability and Optimal Experimental Design of Activated Sludge Models," Ph.D. thesis, BIOMATH, Gent Univ., Belgium(2001).
4. Kim, D. H., "Estimation of Nitrifiable Nitrogen Compounds in Municipal Wastewater by Respirometry," *J. of Korean Society of Water and Wastewater*, **21**(3), 295-303(2007).
5. Kim, M. H., "Development of An Integrated Protocol for Influent Characterization, Model Calibration, Process Optimization, and Plant Design Based on Activated Sludge Models," Ph.M. thesis, KyungHee Univ.(2012).
6. Lim, J. J., "A Study for Influent Characterization, Model Calibration and Optimization Using Activated Sludge Model, Ph.M. thesis, KyungHee Univ.(2012).
7. Kim, D. H., Kim, H. J. and Jeong, T. H., I. Respirometry = Respirometry for the Assessment of Organics Biodegradability in Municipal Wastewater, *Journal of Korean Society of Water and Wastewater*, **18**(1), 29-36(2004).
8. Henze, M., "Characterization of Wastewater for Modeling of Activated Sludge Processes," *Water Sci. Technol.*, **25**(6), 1-15(1992).
9. Spanjers, H. and Vanrolleghem, P. A., "Respirometry as a Tool for Rapid Characterization of Wastewater and Activated Sludge," *Water Sci. Technol.*, **31**(2), 105-114(1995).
10. Shin, H. S., Jeong, H. S. and Nam, S. Y., "Determination of Active Biomass Concentration in Sludge by Respirometry," *Journal of The Korean Society of Civil Engineers*, **21**(2), 165-170(2001).
11. Jeong, H. S., "Monitoring and Simulation of Biological Nitrogen Removal Process Using Respirometry," Ph. M. thesis, KAIST(2000).
12. Lee, D. S. and Woo, S. H., "The Realtime Monitoring Sensor in Biological Wastewater Treatment Process," *DICER Techinfo Part 1*, **5**(5), 68-86(2006).
13. DreamBios, The measurement respirometry of microorganisms (SRT-Meter), DreamBios, Ltd., 1-38(2011).
14. Kim, M. H. and Yoo, C. K., "Design and Environmental/Economic Performance Evaluation of Wastewater Treatment Plants Using Modeling Methodology," *Korean Chem. Eng. Res.*, **46**(3), 610-618(2008).
15. Zhou, Z., Wu, Z., Wang, Z., Tang, S., Gu, G., Wang, L., Wang, Y. and Xin, Z., "Simulation and Performance Evaluation of the Anoxic/anaerobic/aerobic Process for Biological Nutrient Removal," *Korean J. Chem. Eng.*, **28**(5), 1233-1240(2011).
16. <http://cyber.kepco.co.kr/kepco/front/jsp/CY/E/E/CYEEHP00101.jsp>.