

마을단위 소규모 하·폐수처리 공정의 효율적 유지관리를 위한 전문가 시스템에 관한 연구

김승준^{*,***} · 최용수^{*} · 홍석원^{*,***} · 권기한^{*} · 정익재^{*}

^{*}한국과학기술연구원 수질환경 및 복원연구센터

^{**}한양대학교 토목환경공학과

^{***}서울대학교 지구환경시스템공학부

An Innovative Expert System for the Maintenance of On-site Wastewater Treatment Process for Small-scale Residential and Commercial Sites

Seung-jun Kim^{*,***} · Yong-su Choi^{*} · Seok-won Hong^{*,***} · Gi-han Kwon^{*} · Ik-jae Chung^{*}

^{*}Water Environment and Remediation Research Center, Korea Institute of Science and Technology

^{**}Department of Civil and Environmental Engineering, Hanyang University

^{***}School of Civil Urban & Geosystem Engineering Department, Seoul National University

(Received 14 September 2004, Accepted 3 December 2004)

Abstract

The pilot test of a new alternative for small wastewater treatment system has been conducted for two years. It consists of a hybrid bioreactor and the expert system including the process control logic, PLC system, and HMI for the process automation. In order to monitor and remote control its status, the real-time data was transferred from the on-site control center to the central station via a wireless local area network. More efficient and stable performances were observed at automatic operating mode compared with the manual. On an average, COD, SS, T-N and T-P concentrations in the effluent from the hybrid bioreactor were less than 14, 7, 12 and 0.9 mg/L, respectively. According to the result from pilot tests, the quality of treated wastewater with sand filtration was enough to be utilized again.

keywords : Hybrid bioreactor, Expert system, Process control logic, PLC system, HMI system, Small wastewater treatment system

1. 서 론

중·대규모의 도시지역과 달리 마을단위 소규모 지역들은 단위 면적당 인구의 밀집도가 낮고, 넓은 지역에 분포되어 있다. 또한, 대부분의 하수관거가 합류식으로 되어 있어서 하천, 호소수 및 상수원 보호구역 등 주변 수계의 오염을 심화시키고 있다. 이러한 소규모 지역에서 발생하는 하·폐수의 특성은 발생 유량 및 수질 농도의 변화가 심한 것이 가장 큰 특징이며, 계절별 온도의 변화와 상주 전문 인력의 부재로 인하여 수처리 시설 및 공정의 유지관리 측면에서 많은 어려움이 있다. 따라서 마을 단위 소규모 지역의 하·폐수처리시설은 (1) 공정의 단순화를 통한 운전 및 유지관리가 편리하고, (2) 유지관리 비용이 낮으며, (3) 고효율의 처리능을 갖추어야 한다.

본 연구는 이러한 특성을 고려하여 마을 단위 소규모 지역에 적합한 하·폐수처리 공정 및 중수 재이용, 그리고

소규모 하·폐수처리시설의 합리적인 유지관리 기술에 대하여 연구하였다.

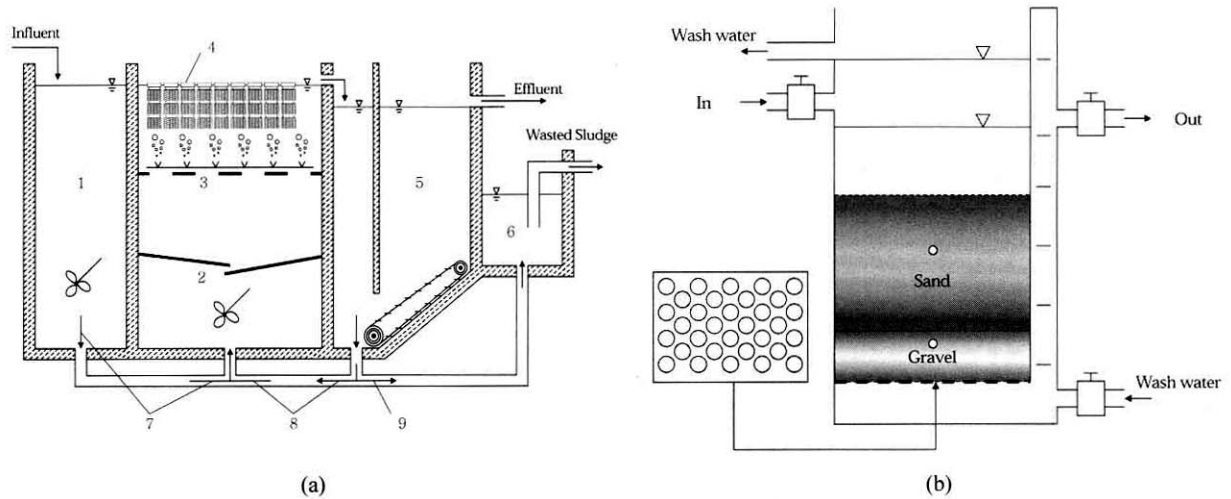
2. 재료 및 방법

본 연구에서 사용한 유입수는 서울시 소재의 S하수처리장내로 유입되는 하수를 원수로 사용하였으며, 약 1년간 실험실 규모의 연구를 수행하여 기본 설계 및 운전 조건을 도출하였고, 현장에서 약 2년간 파일럿 규모의 생물학적 처리시설을 설치하여 연구하였다.

2.1. 생물반응조

본 연구의 마을단위 소규모 수처리 공정은 유입 하·폐수내 유기물 및 질소, 인을 제거하는 공정으로서, Fig. 1에 나타난 바와 같이 파일럿 시설의 처리용량은 10 m³/d 규모로써, 하단부터 무산소조, 호기조로 구성하였고, 유입수와 반송 슬러지는 하단 무산소조로 유입되어 상단 호기조로 유출되는 수직형 상향류식 생물 반응조 공정이며, 또한 처

* To whom correspondence should be addressed.
ksjun@kist.re.kr



1. Flow equalization tank, 2. Anoxic zone, 3. Aerobic zone, 4. Biocarrier, 5. Sedimentation tank, 6. WS storage tank, 7. Inlet, 8. Recycle, 9. Waste sludge

Fig. 1. Schematic diagram of wastewater treatment process; (a) hybrid bioreactor and (b) sand filter for reuse.

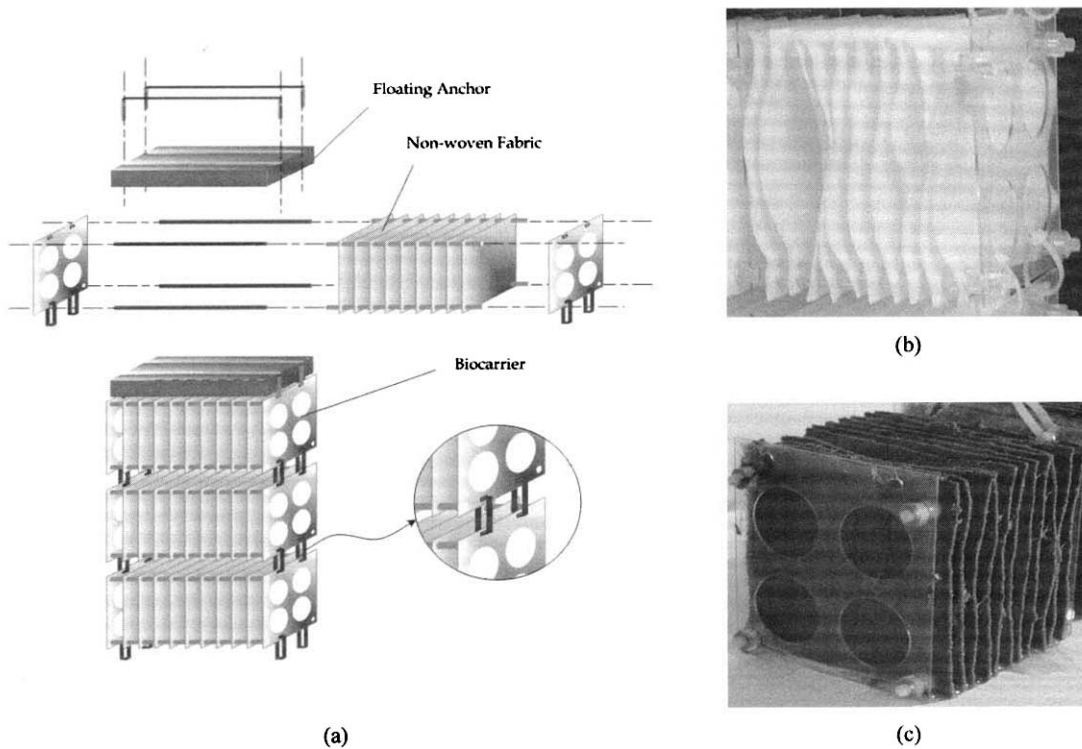


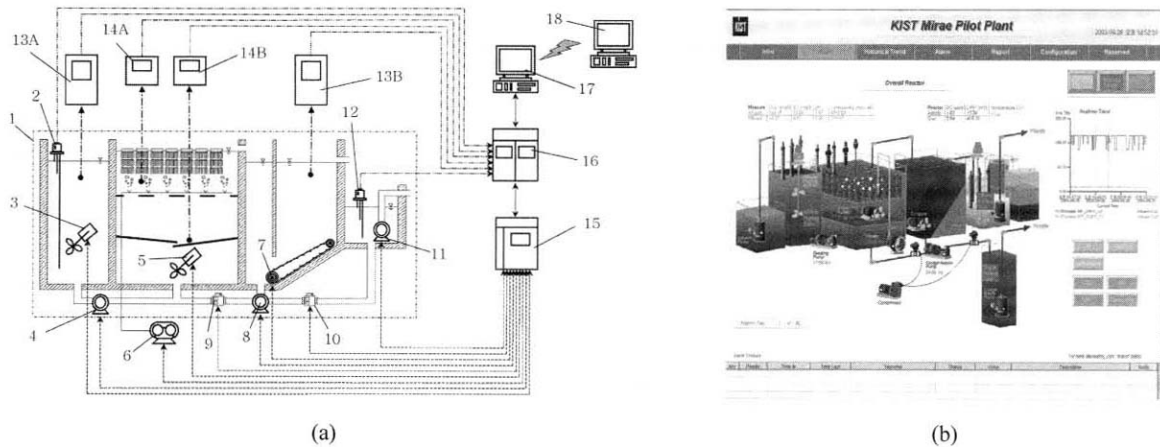
Fig. 2. Semi-floating media; (a) biocarrier assembly, (b) before and (c) after coating with sludge.

리수의 재이용을 위하여 생물 반응조 후단에 모래여과장치를 설치하였다. 생물막법의 예로 활성탄을 이용한 PACT 공정은 질산화 방해 작용 물질을 흡착하여 활성슬러지 공정에 비하여 질산화를 향상시켰고(Dietrich et al., 1988; Marina et al., 2000), 질산화 박테리아를 여러 가지 재질 (cellulose, 유리, 우레탄 등)에 부착 성장시켜 기존의 활성 슬러지 공정에 비하여 질산화를 향상시켰다고 보고되었다 (Matatoshi et al., 1997; Sumino et al., 1992). 이 방법을 응용하여 생물 반응조 수면에는 Fig. 2에 나타낸 바와 같이 유입수의 부하변동 등 외부의 영향에 대한 미생물의 충격

을 완화하고, 고농도의 미생물이 부착 및 생존할 수 있도록 얇은 부직포막 소재의 부유식 반고정상 생물막 담체를 개발하여 호기조의 수면에 설치하였다.

2.2. 유지관리 시스템

수처리 공정의 유지관리는 처리 효율을 극대화하는데 매우 중요한 요소이다. 더욱이 소규모 마을단위 수처리 시설의 경우 전문 인력의 부재로 인하여 수계의 오염을 가중시키고 있다. 따라서 본 연구의 수처리 공정에 대한 효율적 관리를 위하여 유지관리 전문가 시스템(Expert system)을



1. Hybrid bioreactor, 2. Level sensor, 3. Agitator, 4. Influent pump, 5. Agitator in reactor, 6. Blower, 7. Scraper, 8. Return pump, 9. Pneumatic valve for return, 10. Pneumatic valve for waste, 11. Waste pump, 12. Level sensor, 13A,B. In and out analyzer, 14A,B. Reactor analyzer, 15. I/O converter, 16. PLC system, 17. Primary server PC at the site, 18. Remote control PC at the office

Fig. 3. (a) Schematic diagram of expert system and (b) HMI main screen of expert system for O/M(Operation/Maintenance).

구성하였다(Paraskevas et al., 1999).

유지관리 시스템은 Fig. 3(a)에 나타난 바와 같이 생물 반응조 공정상에 설치한 측정장치, 센서류 및 각 기기류들의 전기신호를 수신하고 제어할 수 있는 PLC(Programmable Logic Controller) 시스템 및 PLC에 내장한 공정제어 프로그램, 그리고 생물 반응조 공정의 운전상태를 현장 혹은 원격지에서 확인하고 통제할 수 있는 컴퓨터 및 HMI(Human Machine Interface) 프로그램으로 구성하였다. PLC 시스템에는 공정의 정보와 조건별 운전방법에 대한 공정제어 로직을 프로그램화하여 내장하였으며, 각 센서들로부터 실시간으로 얻어진 정보를 분석하여 처리시설에 설치된 각 기기류의 구동을 자동으로 제어할 수 있도록 하였다.

또한, Fig. 3(b)에 나타난 바와 같이 HMI 프로그램은 PLC 시스템에 입출력되는 모든 정보의 저장, 공정 모니터링, 각 기기류들의 구동상태 확인 및 공정 관리, 데이터의 저장 및 변화 추이, 비상 정보 및 공정 이상 경고 메시지, 데이터 일지, 운전 상황 표시 등을 실시간으로 표시하고, 현장 서버용 컴퓨터에서 공정의 비정상 운전 경고와 함께 메시지 확인시 자동운전 모드에서 수동운전 모드로 전환하여 공정 운전방식을 직접 통제할 수 있도록 하였으며, 원격관리용 컴퓨터에서는 인터넷을 통하여 현장서버용 컴퓨터와 동일한 업무를 원격지에서 수행할 수 있도록 하였다.

2.3. 실험방법

본 연구에서는 생물 반응조의 효율적 유지관리를 위하여 조건별 운전방법에 대한 공정제어 로직을 순차제어방식으로 구성하였다. 공정제어 로직의 구성은 첫째, 온도 변화의 고려, 둘째, 유입되는 하·폐수의 성상 고려, 셋째, 온도의 변화 및 유입수 성상에 따라 각 기기류의 구동용량을 각 모드별로 세분화하여 설정하였다. 이를 위하여 Standard Methods 20th ed.(1998)에 의한 방법으로 유입수질에 대하여 성상분석 실험과 반응조 운전시 필요한 수질 분석 실험

을 약 1년간 실시하였고, 실험결과를 통계학적으로 분석하여 공정제어 로직을 구성하는데 활용하였다.

3. 연구결과

3.1. 유입수 성상 해석

공정제어 로직의 구성에 있어 유입수 성상의 해석은 가장 중요한 단계로서, 유입수질에 대한 모든 항목을 실시간 수질 분석기의 데이터에만 의존하여 공정을 직접 제어할 경우, 예상치 못한 오류의 발생으로 인하여 공정 전반에 악영향을 미칠 수 있으므로, 실시간 수질 분석 항목을 COD 항목만으로 최소화함으로써 효율적인 공정 유지관리를 할 수 있다.

1차년도 연구기간 동안 유입수의 COD, SS, TKN, NH₃-N, T-P 항목에 대하여 일별 수질분석 실험을 지속적으로 시행하였다. Fig. 4는 유입수 수질분석에 의하여 얻어진 결과를 유입 SS, TKN, NH₃-N, T-P 농도를 추정하기 위하여 COD 농도별 기준으로 각 항목을 통계 분석한 결과이고, Table 1은 유입수 수질에 대하여 각 항목별 통계 분석한 결과를 수식화한 것이다. COD_i 농도에 따른 수질항목별 SS_i, TKN_i, NH₃-N_i 추정 농도의 일치도는 각각 66.2%, 65.2%, 57.3%로 분석되었고, T-P_i의 경우는 26.9%로 가장 낮게 나타났으며, 이는 유입수의 부하변동에 의한 것으로서, 이러한 부하변동에 의한 생물 반응조내 완충능력을 향상시키기 위하여 생물막 담체를 활용하였다. 그러나 실제 유입수 농도와 추정 농도의 일치도 향상을 위한 추가적인 연구가 필요한 것으로 사료된다.

3.2. 공정제어 조건

Table 2는 본 생물 반응조 공정의 기본 운전 조건으로서, 상기 실험방법에서 언급한 바와 같이 온도 및 유입수 성상에 따라 다시 세분화하여 공정제어 조건을 구성하였다. 기

Table 1. Corresponding equations and coefficients for influent characteristics

Function	Equations and coefficients
<i>Influent concentration</i>	
$f_0(x) = COD_i$	$f_0(x) = f_0(0) + f_0(x)$ $f_0(0) = 0.0000, x = \text{variable } COD_i$
$f_1(x) = SS_i$	$f_1(x) = f_1(0) + a \cdot e^{bx} + c \cdot e^{dx}$ $a = 30.607, b = 0.0004, c = 33.592, d = 0.0041$ $f_1(0) = -28.281, x = \text{variable } COD_i$
$f_2(x) = TKN_i$	$f_2(x) = f_2(0) + a \cdot e^{bx} + c \cdot e^{dx}$ $a = 17.302, b = 0.0005, c = 17.571, d = 0.0027$ $f_2(0) = -15.897, x = \text{variable } COD_i$
$f_3(x) = NH_3-N_i$	$f_3(x) = f_3(0) + a \cdot e^{bx} + c \cdot e^{dx}$ $a = 13.894, b = 0.0011, c = 13.623, d = 0.0015$ $f_3(0) = -14.395, x = \text{variable } COD_i$
$f_4(x) = TP_i$	$f_4(x) = f_4(0) + a \cdot e^{bx} + c \cdot e^{dx}$ $a = 2.7893, b = 0.0007, c = 2.5583, d = 0.0008$ $f_4(0) = -2.7699, x = \text{variable } COD_i$

Table 2. Operating conditions for hybrid bioreactor

Parameter	Value
Q, m ³ /day	10
Reactor volume, m ³	2.5
Clarifier volume, m ³	1.3
HRT of reactor, hr	6
HRT of clarifier, hr	3
Return Sludge, m ³ /day	10~20
SRT, day	15~35
MLSS, mg/L	2,000~4,500
VSS/TSS, %	85
Temperature, °C	11~38

본 운전 조건은 공정 개발자의 지식과 경험을 바탕으로 도출한 결과로서, 세부 공정제어 조건은 기본 조건의 범위를 벗어나지 않는 조건하에서 다음과 같이 구성하였다.

생물 반응조 운전시 유입수 정상 및 온도 변화에 따른 반응조내 적정 미생물 농도의 유지는 매우 중요한 요소이다. Fig. 5는 생물 반응조의 운전기간동안 일별 실험에 의하여 얻어진 반응조내 MLSS와 MLVSS 농도를 나타낸 것으로서, 이는 공정의 특성에 맞는 미생물의 적정 수준을 나타내는 지표로 활용할 수 있었다. 그 결과, MLSS는 2,000~4,500 mg/L, MLVSS는 1,500~4,000 mg/L의 범위에서 유지되어야 함을 알 수 있으며, 이 때의 VSS/TSS 비는 약 85%였다.

이러한 운전조건에 근거하여, Fig. 6에 나타낸 바와 같이 온도의 변화에 따른 생물 반응조의 MLSS, MLVSS 농도 및 고형물 체류시간의 적정 조건을 설정하였다.

미생물은 계절별 온도의 변화에 따라 활성도가 다르게 나타난다. 따라서 15°C 이하의 낮은 온도조건에서는 MLVSS의 농도는 약 3,200 mg/L 이상, 고형물 체류시간은 23일 이상으로 설정하였고, 30°C 이상의 온도조건에서는 MLVSS 농도와 고형물 체류시간의 기준 설정치를 각각 2,600 mg/L, 18일 이하로 설정하였다.

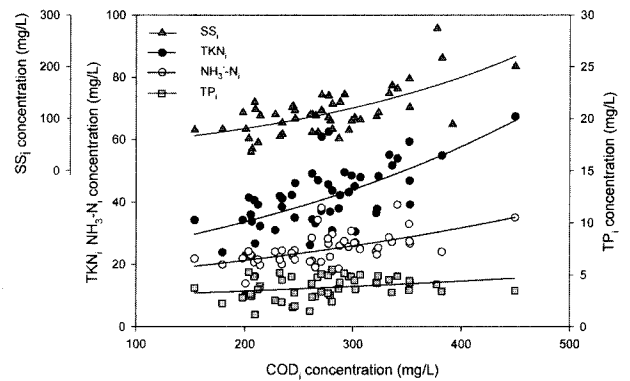


Fig. 4. Nonlinear regression analysis of SS, TKN, NH₃-N and T-P with the increment of COD.

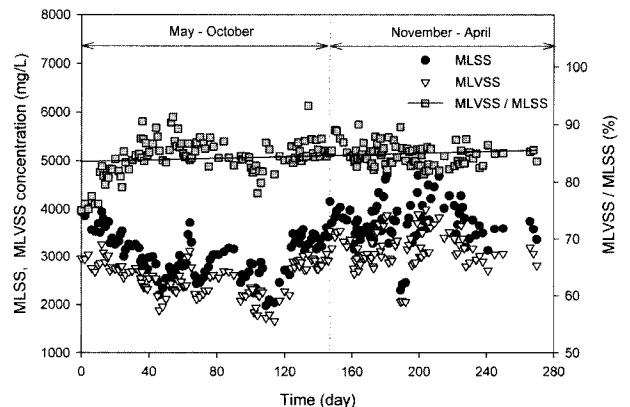


Fig. 5. Profiles of MLSS, MLVSS concentrations and MLVSS/MLSS ratio.

이는 생물 반응조 운전시 우선 판단 조건으로 활용되고, Fig. 7에 나타낸 바와 같이 온도에 대한 미생물의 활성도 변화가 크지 않은 범위로 다시 세분화하여 유입수의 농도에 따라 고형물 체류시간을 재설정하였다.

Table 3은 생물 반응조의 공정제어시 MLSS, MLVSS, 고형물 체류시간의 초기 기준 공정조건을 설정하는 관계식을 나타낸 것이며, 이를 다시 세분화하여 유입수 및 온도의

Table 3. Corresponding equations and coefficients for initial operating conditions, and SRT conditions depending on variations of temperature and COD

Function	Equations and coefficients
<i>Operating condition</i>	
$f_1(T) = MLSS$	$f_1(T) = f_1(0) + \frac{a}{T} + \frac{b}{T^2} + \frac{c}{T^3}$ $a = 274415.6601, b = -4310117.905, c = 23104329.87$ $f_1(0) = -2145.442100, T = \text{variable Temperature}$
$f_2(T) = MLVSS$	$f_2(T) = f_2(0) + \frac{a}{T} + \frac{b}{T^2} + \frac{c}{T^3}$ $a = 204334.7866, b = -3141116.932, c = 16577796.79$ $f_2(0) = -1338.735300, T = \text{variable Temperature}$
$f_3(T) = SRT$	$f_3(T) = f_3(0) + \frac{a}{T} + \frac{b}{T^2} + \frac{c}{T^3}$ $a = 563.96180, b = -6644.1897, c = 34219.227$ $f_1(0) = 5.9188000, T = \text{variable Temperature}$
<i>SRT</i>	
$f_5(x) = SRT$ at $Temp. < 14$	$f_5(x) = f_5(0) + a \cdot e^{-bx}$ $a = 36.4746, b = 0.00980$ $f_5(0) = 24.7218, x = \text{variable COD}_i$
$f_6(x) = SRT$ at $14 \leq Temp. < 20$	$f_6(x) = f_6(0) + a \cdot e^{-bx}$ $a = 32.8359, b = 0.00850$ $f_6(0) = 19.1146, x = \text{variable COD}_i$
$f_7(x) = SRT$ at $20 \leq Temp. < 28$	$f_7(x) = f_7(0) + a \cdot e^{-bx}$ $a = 25.3556, b = 0.00680$ $f_7(0) = 15.3465, x = \text{variable COD}_i$
$f_8(x) = SRT$ at $28 \leq Temp. < 34$	$f_8(x) = f_8(0) + a \cdot e^{-bx}$ $a = 28.7291, b = 0.00890$ $f_8(0) = 14.5425, x = \text{variable COD}_i$
$f_9(x) = SRT$ at $Temp. \geq 34$	$f_9(x) = f_9(0) + a \cdot e^{-bx}$ $a = 24.9327, b = 0.00960$ $f_9(0) = 13.9627, x = \text{variable COD}_i$

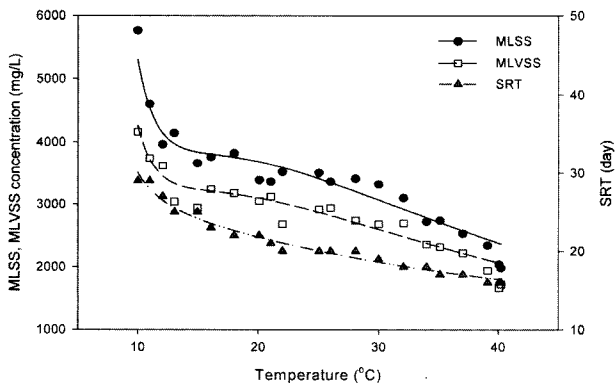


Fig. 6. Plots for determination of initial operating conditions for MLSS, MLVSS and SRT depending on temperature.

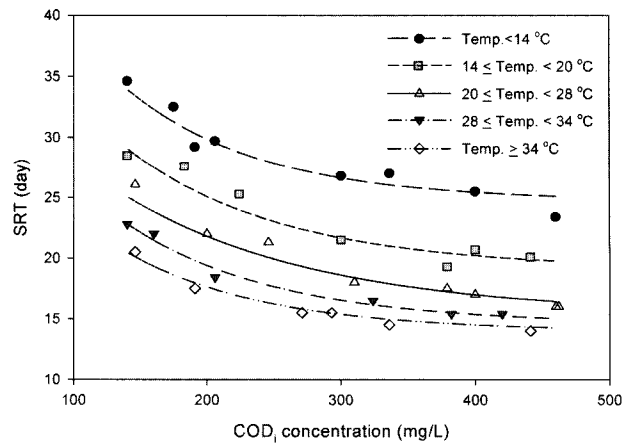


Fig. 7. Plots for determination of SRT conditions depending on influent COD at each temperature.

변화에 따른 실제 고형물 체류시간을 설정하는 관계식을 나타낸 것이다.

생물학적 하·폐수처리시 처리유량은 항상 일정하여야 함으로, 본 연구의 생물 반응조 운전시 유량은 10 m³/d로 항상 일정하게 유지하였으며, 이러한 상태에서 부하변동에 따른 운전 대응 방안으로 반응율을 조절하였다. Fig. 8은 유입수의 농도에 따라 슬러지 반응율의 변화를 나타낸 것으로서, 반응율은 유입유량 대비 100~200%로 조절하여

미생물에 의한 기질 소비율이 증가 할 수 있도록 하였다. 이러한 방법은 일시적인 부하변동에 효과적인 대응방안으로 활용할 수 있다. 그러나, 고농도의 유입수가 지속적으로 유입이 될 경우 반응조내 MLVSS의 농도를 높게 유지하여야 한다. 따라서 본 공정에서는 이에 대한 대응방안으로 부하변동에 대한 반응율의 변화와 함께 고농도의 미생물이 유지될 수 있도록 부직포 재질의 부유식 반고정상 생물막

Table 4. Corresponding equations and coefficients for plant flow, sludge return flow, and amount of wasted sludge at each X/X_r ratio

Function	Equations and coefficients
<i>Plant flow</i>	
$f_{10}(x) = Q_i$	$f_{10}(x) = f_{10}(0)$ $f_{10}(0) = 100.00, x = \text{variable } COD_i$
<i>Sludge return flow</i>	
$f_{11}(x) = \frac{Q_r}{Q_i}$	$f_{11}(x) = f_{11}(0) + \frac{a}{[1 + \exp(-\frac{x-x_0}{b})]^c}$ $a = 77.487, b = 29.253, c = 108.20, x_0 = 160.16$ $f_{11}(0) = 99.221, x = \text{variable } COD_i$
<i>Wasted sludge flow</i>	
$f_1(z) = \frac{Q_w}{Q_i}$ at $\frac{X}{X_r} \geq 0.8$	$f_1(z) = f_1(0) + \frac{a}{z} + \frac{b}{z^2} + \frac{c}{z^3}$ $a = 19.92, b = 0.000, c = -0.000$ $f_1(0) = 0.000, z = \text{variable } SRT$
$f_2(z) = \frac{Q_w}{Q_i}$ at $0.7 \leq \frac{X}{X_r} < 0.8$	$f_2(z) = f_2(0) + \frac{a}{z} + \frac{b}{z^2} + \frac{c}{z^3}$ $a = 17.43, b = 0.000, c = -0.000$ $f_2(0) = 0.000, z = \text{variable } SRT$
$f_3(z) = \frac{Q_w}{Q_i}$ at $0.6 \leq \frac{X}{X_r} < 0.7$	$f_3(z) = f_3(0) + \frac{a}{z} + \frac{b}{z^2} + \frac{c}{z^3}$ $a = 14.94, b = 0.000, c = -0.000$ $f_3(0) = 0.000, z = \text{variable } SRT$
$f_4(z) = \frac{Q_w}{Q_i}$ at $0.5 \leq \frac{X}{X_r} < 0.6$	$f_4(z) = f_4(0) + \frac{a}{z} + \frac{b}{z^2} + \frac{c}{z^3}$ $a = 13.28, b = 0.000, c = -0.000$ $f_4(0) = 0.000, z = \text{variable } SRT$
$f_5(z) = \frac{Q_w}{Q_i}$ at $\frac{X}{X_r} < 0.5$	$f_5(z) = f_5(0) + \frac{a}{z} + \frac{b}{z^2} + \frac{c}{z^3}$ $a = 12.45, b = 0.000, c = -0.000$ $f_5(0) = 0.000, z = \text{variable } SRT$

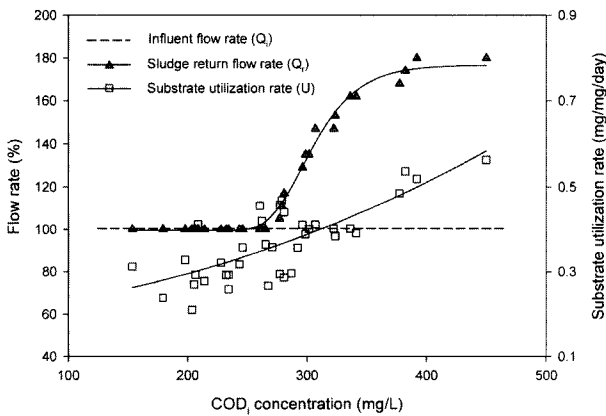


Fig. 8. Plots for determination of operating conditions for recycle rate at various levels of influent loading.

답체로 반응조 부피의 약 20%를 충전하였다.

실제 공정제어시, 적정 고�형물 체류시간은 침전조의 농축 슬러지를 폐기함으로써 유지할 수 있다. 슬러지 폐기량 설정에 있어서 고려할 사항은 반응조 부피와 반응조 슬러지 농도 및 반송슬러지의 농도이다. 반응조의 부피는 일정한 상태이므로 부피에 대한 변수는 고정시킨 상태에서 Fig. 9

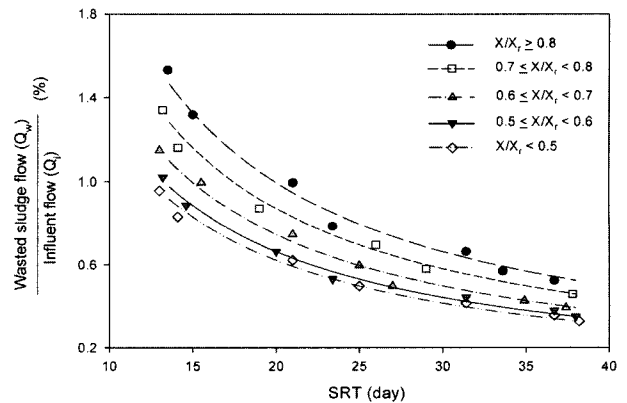


Fig. 9. Plots for determination of operating conditions for amount of wasted sludge depending on SRT at each X/X_r ratio.

에 나타낸 바와 같이 반응조내 슬러지 농도 대비 반송 슬러지 농도의 비(X/X_r)에 따른 폐기량을 각각 설정하였다. 이는 부하변동에 의하여 슬러지 반송율이 변화하면 농도비(X/X_r)가 일정치 않으므로 10% 단위로 0.5~0.8까지 구분하여 고�형물 체류시간에 따른 적정 슬러지 폐기량을 산정하였다. Table 4는 유입유량에 대비 슬러지 반송 및 고�형물

체류시간 조절을 위한 슬러지 폐기량에 대한 관계식으로서, 유입펌프와 반송 펌프의 구동 조건을 수식화한 것이다.

3.3. 공정제어 로직

생물 반응조 공정의 제어 로직은 유입수의 성상과 공정 운전 조건에 대한 정보를 수식화 및 프로그램화하여 안정적이고 효율적으로 공정을 유지관리하는데 활용하기 위한 것이다.

Fig. 10은 본 생물 반응조 공정의 프로그램 순서도로서, 첫 번째 단계에서, 온도의 변화에 따라 공정의 기본 운전 조건을 설정하였다. 이는 생물 반응조의 초기 조건 설정시 현재 온도에 대한 MLSS, MLVSS, 고형물 체류시간의 기준치를 설정하기 위한 것이다. 두 번째 단계에서, 유입펌프의 가동은 100%로 설정하였으므로 유입유량에 대한 변수는 고정 값으로 설정하였다. 세 번째 단계에서, 유입수의 성상에 대한 판단을 실시한다. 일반적인 하·폐수의 경우 pH는 7~8 사이를 유지하므로 일시적인 독성폐수의 유입으로 인하여 pH 설정 범위인 7~8 사이를 벗어날 경우에

대비하여 pH 점검을 실시한다. 그러나, pH는 유입수의 상세한 성상을 파악하는데 큰 역할을 하지는 않는다. 유입수의 성상 결정은 COD 측정기의 실시간 데이터를 기준으로 설정하였으며, COD의 농도에 따라 유입 SS, TKN, NH₃-N, T-P의 관계식으로 각 항목의 농도를 동시에 산정한다. 네 번째 단계에서, 유입 COD와 온도를 비교하여 초기 조건과 고형물 체류시간을 재설정함으로써 실제 고형물 체류시간을 산정한다. 다섯 번째 단계에서, 설정된 유입 부하에 따른 슬러지 반송 유량을 설정하여 반송펌프의 가동율을 결정한다. 여섯 번째 단계에서, 반응조내 미생물 농도와 반송 슬러지의 미생물 농도를 분석하여 X/X_r을 설정하여 슬러지 폐기량을 설정하고, 슬러지 폐기 밸브의 on/off 시간을 산정한다. 이때 미생물 농도의 측정은 주 1~2회씩 측정하여 입력하며, MLSS 측정기가 있는 경우 이를 활용할 수도 있다. 이와 같은 순서로 전체 공정의 제어주기는 4시간 단위로 세부적인 운전조건을 재설정하여 일 6회 반복 제어할 수 있도록 설정하였다. 또한 폐기량 설정과 동시에 포기 공정을 설정하는데, 포기량 설정은 반응조내 DO와 ORP

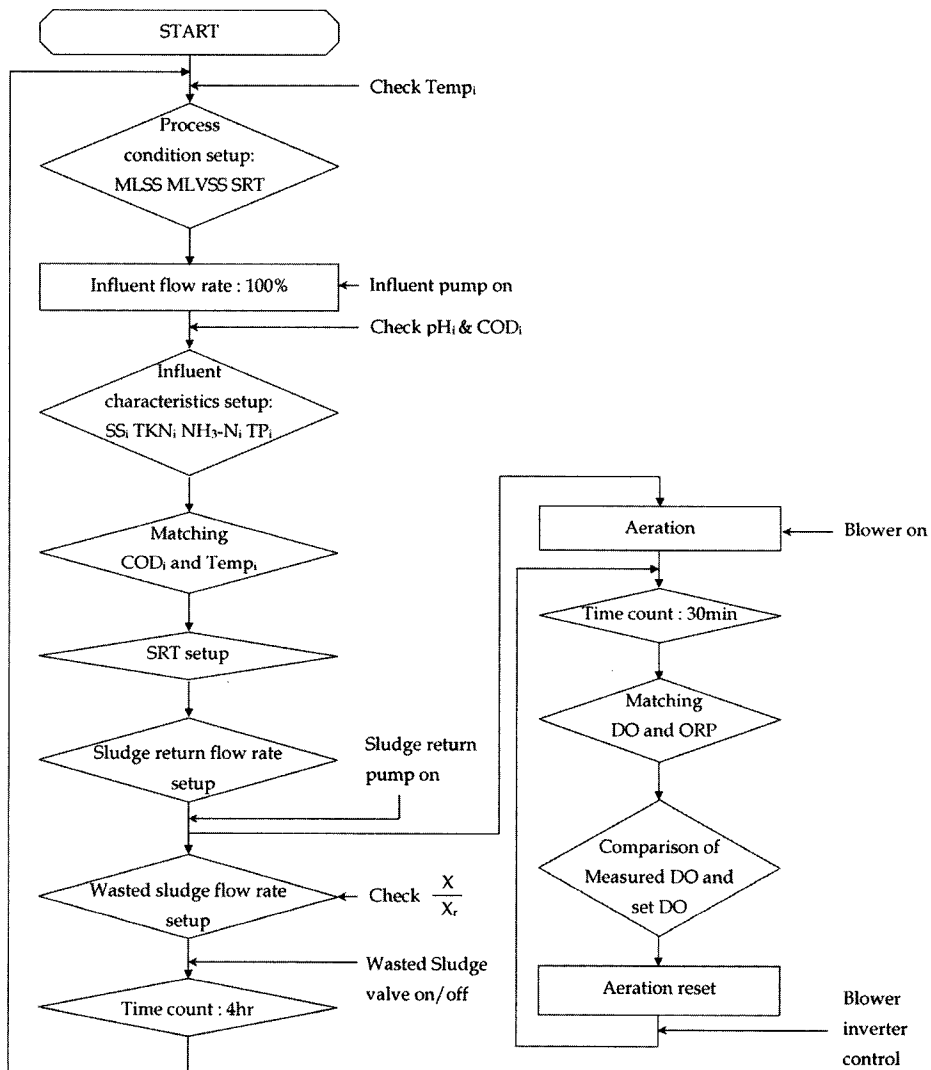


Fig. 10. Structured program flowchart for automatic control of the hybrid bioreactor.

값을 비교하여 30분 단위로 일 48회 반복 제어할 수 있도록 설정하였다. 이는 회분식 공정과 달리 연속흐름 공정에서는 유입수 성상의 순간 변화에 대한 완충능력이 높으므로 각 기기류의 구동조건을 간헐적으로 제어하는 것이 바람직하기 때문이다.

이와 같은 방법으로 기본 공정조건, 유입수 유입량, 유입수 성상, 실제 고형물 체류시간, 슬러지 반응율, 슬러지 폐기량 및 포기량 설정 등에 대한 관계식을 활용하여 공정제어 로직을 구성하고 프로그램화함으로써, 실제 생물 반응조 공정제어시, 유입펌프, 브로어, 교반장치, 슬러지 반송펌프, 전동 밸브, 슬러지 폐기펌프 등 각 기기류의 가동율과 가동시간 등을 세분화하여 구동 조건을 설정하였다.

3.4. 공정제어 결과

본 연구는 현장에 인력이 상주하지 않더라도 자동 공정제어에 의하여 수처리 시설이 안정되게 운전되고, 원격관리에 의하여 최소인력으로 수처리 공정을 효율적으로 운영하는데 있다.

생물 반응조 운전은 연구기간동안 주 1회씩 현장상태를 관찰하였고, 원격지에서 공정의 운전상태를 모니터링하고, 이상발생시 자동운전 모드를 수동운전 모드로 전환하여 설정치와 운전방식을 변경하여 직접 전 공정을 통제하였으며, 현장에서 이상상태를 확인하고 공정을 정상화시키는 방법

으로 운전하였다. 이러한 과정에서 예상치 못한 오류가 발생하였는데 주원인은 현장에 설치한 실시간 수질측정장비 및 센서류에서 비롯되었다.

Fig. 11은 생물 반응조 전체 운전기간 동안 유입수와 처리수의 결과를 나타낸 것이며, Table 5는 생물 반응조의 수동운전과 자동제어에 의한 운전 결과를 비교한 것으로서, 처리수질 및 처리효율에 있어서 안정된 상태로 큰 차이를 보이지 않았다.

또한, 처리수 재이용을 위하여 모래여과를 거친 후의 최종 방류수의 농도 및 처리 효율은 Table 6에 나타난 바와 같이, BOD는 3.8 mg/L, 97.3%, COD는 7.1 mg/L, 96.7%, SS는 1.2 mg/L, 99.3%로 나타났고, 또한 잔류 영양염류 농도 및 처리효율은 TN의 경우 10.8 mg/L, 63.7%이었고, TP의 경우 0.69 mg/L, 76.2%로 나타났으며, 이는 중수도 기준 BOD 10 mg/L를 넘지 않는 수질이므로 재이용이 가능한 것으로 나타났다.

4. 결론

본 연구는 마을단위 소규모 지역에 적합한 하·폐수처리 공정 및 중수 재이용, 그리고 소규모 하·폐수처리시설의 합리적인 유지관리 기술에 대하여 연구하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

Table 5. Comparison of overall performances between manual and automatic control mode

Item	Manual operating mode (1st year)			Automatic control mode (2nd year)		
	In (mg/L)	Out (mg/L)	Rem.(%)	In (mg/L)	Out (mg/L)	Rem.(%)
COD	286 (150~450)	22.5 (9.9~50.4)	92.1	215 (183~462)	13.7 (9.3~54.7)	93.6
SS	110 (50~210)	11 (5~28)	90.0	172 (43~285)	7 (4~20)	96.0
TN	25.9 (14.8~40.4)	15.4 (9.1~26.2)	40.5	29.8 (21.3~51.8)	12.2 (9.8~22.6)	59.1
TP	3.9 (2.1~5.9)	0.9 (0.3~2.4)	76.1	2.9 (1.9~5.6)	0.9 (0.4~2.1)	70.7

Table 6. Overall performance for sand filtration

Item	BOD	COD	SS	T-N	T-P
After sand filter, mg/L	3.8	7.1	1.2	10.8	0.69
Overall removal, %	97.3	96.7	99.3	63.7	76.2

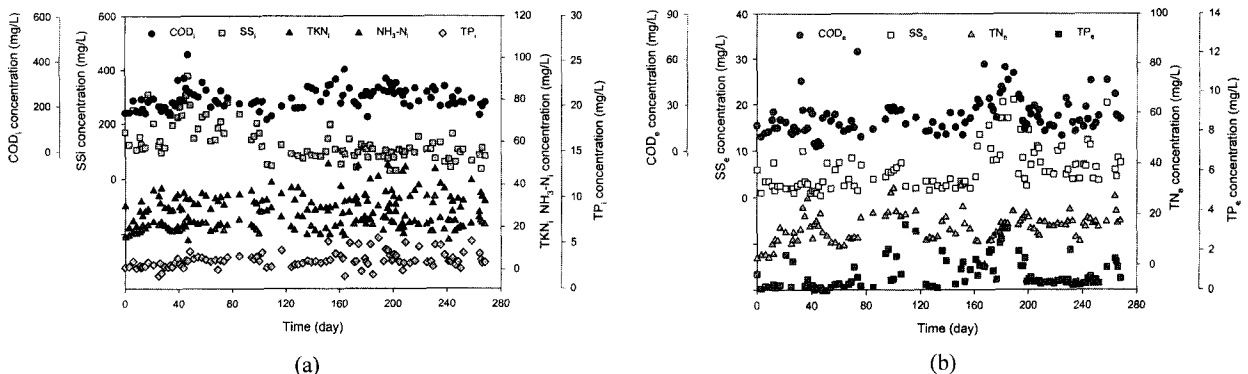


Fig. 11. Overall performance operated by the expert system; (a) influent and (b) effluent.

일반적으로 소규모 하·폐수처리 시설에 각 항목별 유입수 측정 분석기기를 설치하는 것은 비경제적이며, 또한 분석기기의 오류발생 빈도를 증가시키게 되어서 공정 유지관리에 많은 문제점들이 있을 것으로 사료된다. 따라서 부하변동이 심한 소규모 하·폐수처리 시설의 자동제어에 의한 유지관리시, 지역의 특성에 따라 다르게 나타나는 유입수의 특성을 장기간의 분석을 통하여 경향 및 성상을 파악하는 것이 가장 중요하다고 판단된다.

분석된 유입수의 성상은 통계학적인 해석방법을 사용함으로써, 유용하게 활용할 수 있다. 즉, 유입 COD와 유입 SS, TKN, NH₃-N, TP 등의 각 항목별 농도의 상관관계를 도출하여 수식화된 제어 로직을 구성하고, 이를 프로그램화함으로써 유입수 성상에 따른 생물 반응조 공정의 제어가 가능하였다. 이는 현장에서 빈번하게 발생하는 센서의 오류를 보완할 수 있는 대안이라고 사료된다.

본 연구의 생물 반응조에 대한 제어 로직은 공정 개발자의 지식과 오랜 기간 숙련된 운전 기술 정보를 조건별로 세분화하고, 수식화된 공정제어 로직으로 구성하여 프로그램화한 것으로서, 이를 이용하여 현장에 상주인력이 없이도 원격지에서 전 공정을 관리할 수 있었다.

이와 같이 공정제어 로직은 유입수의 성상과 생물 반응조의 조건별 운전조건을 수식화하여 구성하였다. 이러한 공정제어 로직을 활용하여 생물 반응조 공정을 자동 제어한 결과, 유지관리 측면에서 처리수질 및 처리효율은 전반적으로 안정된 상태를 유지하였으며, 또한 생물 반응조의 안정된 효율로 인하여 처리수의 재이용 실험을 수행한 결과 중수도로 사용 가능하다는 결론을 얻었다.

따라서, 본 연구에서 제안하는 유지관리 전문가 시스템은 마을 단위 소규모 지역의 하·폐수처리시설을 효율적으로 유지관리할 수 있고, 숙련된 조업자가 없거나 부재시에도 전반적인 시설의 운전 및 공정의 유지관리가 자동제어방식에 의하여 운용되므로 안정성과 효율성을 높이는 효과가 있을 것으로 사료된다. 또한 이러한 단위시설에 설치한 현장 서버컴퓨터를 인터넷을 통하여 중앙통제시설에서 감시

및 제어할 수 있도록 통합원격관리 함으로써 다수의 시설들을 최소한의 전문인력으로 효율적으로 관리할 수 있을 것으로 사료된다.

그 밖에 각 지역별 시설들로부터 획득한 통계자료를 바탕으로 계획적인 시설 운용과 향후 체계적인 물관리 지침자료로 활용할 수 있을 것으로 판단되며, 향후 환경기초시설의 방류수 수질기준이 더욱 강화되고 있는 바, 이에 대하여 공정제어 로직의 수정 및 변경을 통한 소프트웨어의 개선으로 시설의 처리효율을 극대화할 수 있고, 필요시 추가적인 보완 및 증축공사를 최소화하여 비용을 절감할 수 있는 효과가 있을 것으로 판단된다.

참고문헌

- APHA, AWWA, WEF, Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 20th edition, APHA, Washington D.C. USA (1998).
- Dietrich, M. J., Chowdhury, A. K. and Randall, T. L., Removal of Pollutants from Dilute Wastewater by the PACT Treatment Process, *Environmental progress*, **7**, pp. 143-149 (1988).
- Marina, I. S., Brian, A. and Zhiyao, S., Oxygen Uptake Rate Inhibition with PACT sludge, *J. of Hazard Materials*, **73**(2), pp. 129-142 (2000).
- Matatoshi, M., Tetsuya, Y., Pi-Chao, W., Kazuhiro, S. and Kimiaki, Y., Rapid Nitrification with Cellulose Cell Using Macro-Porous Cellose Csrrier, *Wat. Res.*, **31**, pp. 1027-1034 (1997).
- Paraskevas, P. A., Pantelakis, I. S. and Lekkas, T. D., An Advanced Integrated Expert System for Wastewater Treatment Plants Control, *Knowledge-Based Systems*, **12**(7), pp. 355-361 (1999).
- Sumino, T., Nakamura, H., Mori, N., Kawaguchi, Y. and Tada, M., Immobilization of Nitrifying Bateria in Porous Pellets of Urethane Gel for Removal of Ammonium Nitrogen from Wastewater, *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, **36**, pp. 556-560 (1992).