

외부탄소원 주입시 영양염류의 생물학적 제거를 위한 자동제어 SBR 공정에 관한 연구

A Study on Autocontrolled SBR for Biological Nutrient Removal with External Carbon Sources

이병헌 · 강성재 · 임성일 · 유평종*

Byung-hun Lee · Seong-jae Kang · Sung-il Lim · Pyung-jong Yoo*

부경대학교 환경공학과 · *부산광역시 환경보전과

Division of Environmental System Engineering, Pukyong National University

*Department of Environmental Conservation, Pusan Metropolitan City

Abstract

The purpose of this study is to develop effective operating process in order to achieve more suitable conditions of Anoxic-Oxic-Anoxic-Stripper(AOAS) SBR through real-time control.

To improve the removal efficiency, glucose, methanol and synthetic food waste acid fermentant were added as an external carbon source. In the case of glucose and synthetic food waste acid fermentant, TN, TP were removed to average 86.9%, 73.0% respectively. Methanol was removed to average 64.6%, 55.4% respectively. The synthetic food waste acid fermentant proved to be the most efficient and allowed for the substitution of an external carbon source. The removal rate of COD_C was approximately 90% at all cases.

The results of the study that a correlation between ORP (Oxidation-Reduction Potential), pH and DO and nitrification or denitrification when an external carbon source is added and when it isn't was showed that ΔORP is suitable parameter.

ORP reacted properly to denitrification ($\Delta ORP < -10$) and nitrification ($\Delta ORP < 0$).

The use of real-time control saved anywhere between 61 and 67 minutes at the anoxic(1) stage and 26 to 52 minutes at the oxic(1) stage. When the time saved from the anoxic(1) and oxic(1) was added to the anoxic(2) stage for the removal efficiency of TN and TP increased from 0.7 to 13.9 % and 12 to 35 % respectively.

Keywords : SBR(Sequencing Batch Reactor), ORP(Oxidation Reduction Potential), Real time control, External carbon, Nutrient removal

1. 서 론

SBR(Sequencing Batch Reactor)은 충격부하에 강하며 슬러지 반응량이 적고 침전조가 필요치 않

다는 장점과 우수한 공정을 mode 조작을 통해 적용할 수 있다는 장점을 가진다. 또한 하나의 반응조내에서 mode의 설정에 의해 진행된다는 점에서 DO, pH, ORP 같은 인자들의 제어를 통한 자동제

어 기법이 적용되고 있다.

DO의 breakpoint를 이용한 자동제어 기법이 현재 많이 이용되고 있으나 90년대에 들어와서는 ORP 측정의 신뢰도가 점차 개선됨에 따라 영양염류의 생물학적 제거에 ORP값을 이용한 자동제어가 활발히 연구되고 있다¹⁻⁴⁾.

유기물질과 질소, 인의 동시 제거를 목적으로 할 때에는 무산소 및 혐기와 호기조건의 반복이 필수적이다. 질소제거에 대한 기술에는 유입수에 포함된 유기물질을 이용하는 전탈질공정과 메탄올이나 아세테이트와 같은 외부탄소원을 이용하는 후탈질공정이 있다.

국내하수는 C/N 비가 상대적으로 낮기때문에 탈질과 인제거를 위한 분해가능한 유기물질이 부족한 형편이다. 이에 대한 대응으로 외부탄소원을 주입하고 있다. 이는 유지 관리비의 증대를 초래하므로 대체 약품이 요구되어 1차 슬러지, 주정폐수, 분뇨, 음식물쓰레기의 이용에 대한 연구가 진행되고 있다⁵⁾.

최(2000)에 의해 보고된 AOAS공정 무산소-호기-무산소-탈기 순서로 이루어진 공정으로 전탈질과 외부탄소원의 공급을 통한 후탈질을 병행할 수 있는 우수한 공정이다⁶⁾.

이상의 근거로 본 연구에서는 AOAS공정을 SBR공법에 적용하여 외부탄소원을 주입할 때, Δ ORP를 통한 자동제어의 적용가능성과 이때 유기물과 질소, 인의 제거특성을 관찰하며, 외부탄소원별 영양염류 제거특성의 고찰에 그 목적을 두고 연구를 수행하였다.

2. 재료 및 방법

2.1 실험재료

본 실험에 이용된 반응장치는 Fig. 1에 나타내었으며 두께 10mm 아크릴을 이용하여 총 50L가 되도록 제작하였으며 실 용적은 30L에 해당하였다. 반응조 외부에는 항온수조를 설치하여 내부의 온도가 $20 \pm 2^\circ\text{C}$ 를 유지하도록 하였고, 반응조의 완전 혼합을 위해 자동제어장치가 부착된 교반기를 설치하여 호기단계와 무산소단계 때 교반을 일정하게 유지할 수 있도록 하였다. 반응조에는 pH sensor(Dongil instrument, pH-100), DO sensor(Dongil instrument DO-100) 및 ORP sensor(US Filter, Strantrol 880)를 설치하여

Control Panel과 연결된 컴퓨터(IBM PC로 Pentium II)를 통하여 반응조의 상태를 연속적으로 monitoring 할 수 있도록 하였다. 또한 교반장치(panasonic, M6RA6G4Y) 및 폭기장치(동하통상, DH-40)를 설치하였으며, 하수의 유입, 유출은 정량 펌프(masterflex, 7518-10)를 이용하였다. SBR 공정의 각 stage 제어 프로그램은 BASIC으로 작성하여 설정된 시간 및 제어 point에서 변환되도록 하였다(Fig.2).

반응조의 미생물은 S하수처리장의 미생물을 식종하였으며 상온($20 \sim 27^\circ\text{C}$)에서 MLSS농도를 4000 mg/L 정도에서 운전을 하였다. 시료의 조성은 Table 1에 나타내었다. 외부탄소원은 Glucose, Methanol과 모의 음식물 산발효액을 1500 mgCOD/L로 조성하여 주입하였다.

모의 음식물 산발효액은 부산 S하수처리장에 유입되는 음식물을 이용하여 산발효실험을 수행한 이(2001)⁵⁾의 결과를 기초로 Table 2와 같이 조제하였다.

본 공정은 제1 무산소(탈질)단계, 제1 호기(질산화)단계, 제2 무산소(탈질)단계, 탈기단계, 침전단계, 유출단계로 배열되어 있으며, 유입은 제1 무산소단계에서 30분간 이루어졌고 외부탄소원은 제2 무산소단계에 500 mL/min으로 5분간 주입하였다.

처음 각 단계의 time-schedule은 각각 102분, 138분, 50분, 10분, 30분, 30분으로 주어졌으며, 1 cycle의 전체 시간은 6시간으로 하였다. 공정제어 단계의 연구에서는 제1 무산소단계와 제1 호기단계에서 Δ ORP를 측정하여 단계를 전환하였으며 제2 무산소단계에 시간의 유동성을 두었고 탈기

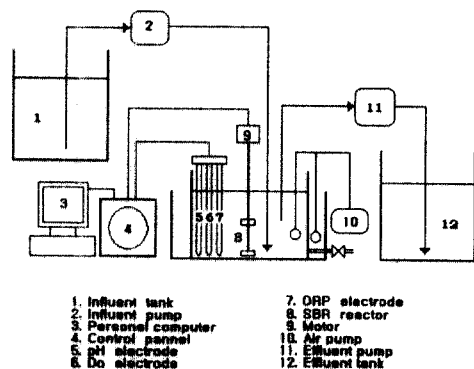


Fig. 1. Schematic diagram of SBR process.

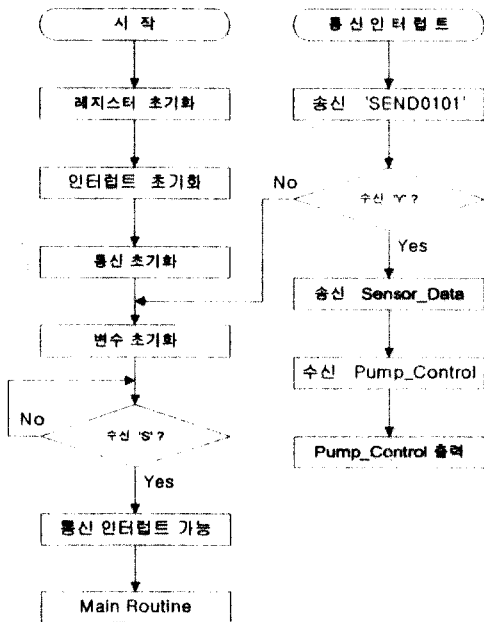


Fig. 2. Flowchart of microprocess.

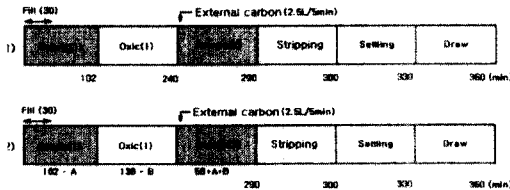


Fig. 3. Time schedule during a cycle
[with 1) External carbon 2) Automatic control].

10분, 침전 30분, 유출 30분으로 고정하여 1 cycle 총 시간은 6시간으로 하였다(Fig. 3).

본 연구에서 사용된 항목은 수질 오염 공정 시험방법 (수질편)에 수록된 분석방법 및 Standard method(20th, 1997)에 따라 분석하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 외부탄소원 첨가시 영양염류 제거특성

3.1.1 유기물질 제거특성

글루코오스, 메탄올, 그리고 모의음식물 산발효액을 외부탄소원으로 주입하였을 때 유기물질 제거특성은 Fig. 4와 같은 결과를 나타내었다. 수리학적 체류시간은 10시간으로 고정하였으며, 외부

Table 1. Composition of influent wastewater

Item	Stage I	Stage II	Stage III
Influent	Glucose	100mg/L	
	NH ₄ Cl	40mg/L	
	KH ₂ PO ₄	6mg/L	
	NaHCO ₃	400mg/L	
E.C	Glucose	Methanol	F.W.
Total	C	250mg/L	
	N	40mg/L	50mg/L
	P	6mg/L	10mg/L
	A	400mg/L	

Table 2. Composition of synthetic food waste acid fermentant

Items	Concentration	Total
Acetic acid	588 mgCOD/L	6000 mgCOD/L
Butyric acid	1796 mgCOD/L	
Valeric acid	1746 mgCOD/L	
Glucose	1870 mgCOD/L	
TN(NH ₄ Cl)	400 mgN/L	400 mgN/L
TP(KH ₂ PO ₄)	140 mgP/L	
		140 mgP/L

탄소원은 제1무산소(1) - 제1호기 (1) - 제2 무산소(2) - 탈기 - 침전 - 유출단계 중 제2무산소 단계에만 5분간 주입하였다.

제2무산소 단계에서 별도로 외부탄소원을 주입하였음에도 불구하고 평균 89%정도의 제거효율을 나타내었으며, 안정적인 처리수를 얻을 수 있었다. 유기물질은 제1무산소 단계에서 대부분 탈질화와 인방출에 소모되어 제거 되었으며, 외부탄소원으로 주입한 유기물질 역시 제2무산소 단계에서 탈질화 및 인방출에 소모되어 제거되었다. 외부탄소원별 유기물질 제거효율은 비슷하였으나, 모의음식물 산발효액 > 글루코오스 > 메탄올의 순서로 약간 높게 나타났다.

3.1.2 질소제거 특성

암모니아성 질소의 제거특성은 Fig. 5에 나타내었다. 글루코오스와 메탄올을 외부탄소원으로 주입하였을 때 99%이상의 제거효율을 얻었다. 그러나 모의음식물 산발효액을 넣었을 때는 제거효율

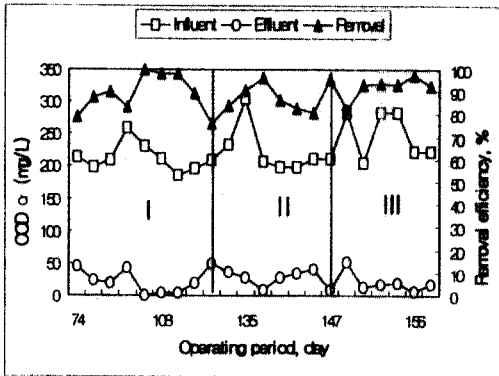


Fig. 4. Effect of external carbon source on COD_{Cr} removal efficiency (I: Glucose, II: Methanol, III: Synthetic food waste acid fermentant).

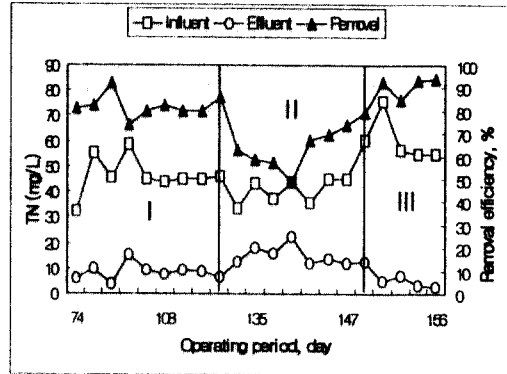


Fig. 6. Effect of external carbon source on TN removal efficiency.

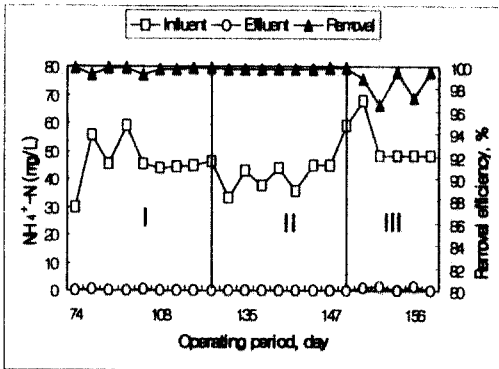


Fig. 5. Effect of external carbon source on NH₄⁺-N removal efficiency

이 다소 떨어지는데 이는 모의음식물 산발효액에 TN성분으로 NH₄⁺-N이 100 mg/L정도 들어있기 때문에 유출수에 높게는 2 mg/L 정도 포함되어 있었다.

총질소의 제거효율은 Fig. 6에 나타내었다. 제거효율은 50~96%정도로 나타났으며, 제거속도는 글루코오스가 0.46 kgTN/m³·d, 메탄올이 0.45 kgTN/m³·d, 모의 음식물 산발효액이 0.52 kgTN/m³·d으로 나타나, 모의 음식물 산발효액 > 글루코오스 > 메탄올 순으로 높게 나타났다. 모의 음식물 산발효액 주입의 경우, 제2무산소 단계에 추가로 TN이 주입되었음에도 불구하고 가장 높은 제거효율을 보였다. Tam(1992)과 Gerber(1986)는 아세트산, 메탄올, 글루코오스 순

으로 높은 탈질속도를 갖는다고 보고하였으며^{7,8)}, 이(2001)⁵⁾는 음식물 산발효액을 외부탄소원으로 주입하였을 때 메탄올보다 나왔고 acetate와 비슷한 값을 얻었다고 하였다. 이러한 결과는 음식물 산발효액에는 acetic acid, propionic acid, butyric acid 등 다량의 VFAs 물질들이 함유되어 있어 미생물이 빠르게 효과적으로 이용할 수 있기 때문이다(박, 2001)⁹⁾. 메탄올의 경우, 기질에 충분히 순용되어있는 미생물에게는 높은 탈질속도를 보인다는 보고도 있으나 본 실험의 경우 순용하지 못한 경우인지 합성폐수 주입을 통해 충분히 순용된 글루코오스를 주입하는 것보다 처리효율이 낮았다.

외부탄소원의 주입은 SBR 공정의 탈질효율을 외부탄소원의 주입이 없을 때 얻어진 결과보다 30% 이상 상승시키는 결과를 보였다. 이것은 제1호기 단계에서 생성된 NO₃⁻-N이 외부탄소원의 주입이 없을 때 제2무산소 단계에서 제거되지 못한 것에 비해 외부탄소원의 주입시는 제2무산소 단계에서 주입되는 유기물질로 제1호기 단계에서 생성되는 NO₃⁻-N을 충분히 제거해 주기 때문이다.

3.1.3 인의 제거 특성

외부탄소원을 주입했을 때 총인의 처리특성을 Fig. 7에 나타내었다.

외부탄소원별 총인 제거효율은 큰 차이를 나타내었다. 메탄올의 경우 40~80%정도로 큰 폭의 제거특성을 나타내었으며, 글루코오스와 모의 음식물 산발효액이 80%이상으로 높은 제거효율을 나타내었다. 외부탄소원의 주입이 없었을 때 얻어진 10%이하의 제거효율과 비교해보면 인의 농도 변

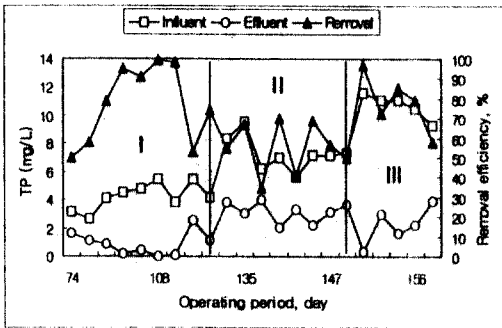


Fig. 7. Effect of external carbon source on TP removal efficiency.

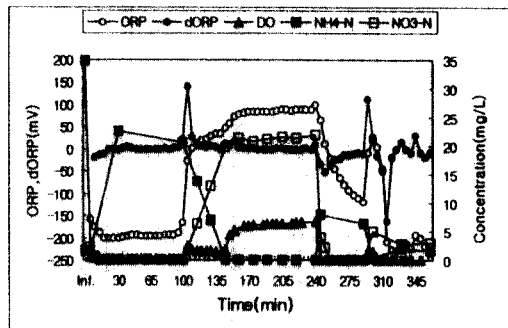


Fig. 8. The variation of ORP, Δ ORP, DO, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ and $\text{NO}_3^-\text{-N}$ at full cycle.

화에 가장 영향을 주는 인자는 시스템내의 탈인성 미생물의 비율과 혐기상태의 초기단계 즉, 인이 방출되는 단계에 있어 유기물의 농도이라고 보고 한 윤(1996)¹⁰의 결과에서처럼 인의 제거에 탄소원의 영향을 실감할 수 있다. 또한 제거속도도 외부탄소원의 첨가가 없었을 때 $0.002 \text{ kgTP/m}^3 \cdot \text{d}$ 에서 글루코오스가 $0.008 \text{ kgTP/m}^3 \cdot \text{d}$, 메탄올이 $0.009 \text{ kgTP/m}^3 \cdot \text{d}$, 모의 음식물 산발효액이 $0.017 \text{ kgTP/m}^3 \cdot \text{d}$ 로 나타나 최소 4배이상 높게 나타났다.

3.2 외부탄소원 주입시 자동제어조건 선정

3.2.1 적정제어 point

외부탄소원별 적정제어 인자 및 제어point를 조사한 결과, 질산화 반응과 탈질 반응이 완료된 시점에서 Δ ORP값이 독특한 변화를 나타내었는데, 그 예를 Fig. 8에 나타내었다.

탈질 반응은 제1 무산소단계의 초기 단계인 유입시간 내에 빠르게 일어났는데, 탈질이 완료된 시점 즉, $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 의 농도가 0 mg/L 가 되는 지점에서의 Δ ORP 값은 -10mV 이하를 나타내었다. 이것은 유입수를 분할주입하여 실험한 이(2001)¹¹의 결과와 일치하였다. 따라서 탈질반응 종료의 제어값은 Δ ORP가 -10mV 이하인 것으로 판단하였다.

질산화 반응의 경우, 모든 조건에서 제1 호기단계에서 질산화가 끝나는 지점까지 ORP 값은 지속적으로 상승하여 최고점에 이르며, 그 후 감소하는 것으로 나타났다. 즉 질산화 완료 시점까지 Δ ORP는 (+)를, 완료 후에는 (-)를 나타내고 있어 Δ ORP 값이 (-)로 변하는 시점을 질산화 완료, 즉, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 의 농도가 0 mg/L 로 되는 시점 제어점으

로 판단할 수 있었다. 이 또한 이(2001)¹¹의 결과와 일치하였다.

3.3 자동제어시 영양염류 제거특성

3.3.1 영양염류 제거특성

제1무산소 단계의 제어점 Δ ORP < -10 , 제1호기 단계의 제어점 Δ ORP < 0 으로 자동제어하여 운전한 결과, 처리수의 농도 및 제거효율을 Fig. 9~12에 나타내었다.

자동제어를 하였을 경우, 유출수의 COD_{Cr} 은 평균 25.1 mg/L 정도였으며 제거효율은 자동제어를 하지 않은 경우보다 0.4% 정도 향상된 평균 89.2% 의 제거효율을 보였다.

암모니아성 질소의 경우는 자동제어 유무에 큰 차이없이 98% 이상의 안정적인 값을 얻을 수 있었다.

총질소의 경우, 유출수의 농도가 평균 6.3 mg/L 정도로 안정적인 값을 얻을 수 있었고, 제거효율면에서도 자동제어를 하지 않은 경우보다 평균 8% 정도 향상된 87% 의 값을 얻을 수 있었다.

총인의 경우는 유출수 농도가 0.6 mg/L 정도로 91% 의 제거효율을 얻을 수 있었다. 이것은 자동제어를 하지 않았을 때보다 평균 24% 정도 향상된 결과이다.

3.3.2 운전시간 비교

Fig. 13과 14에는 자동제어를 실시한 후 Time schedule에 의한 운전했을 때와 운전시간을 비교하여 단축된 시간을 나타내었다.

자동제어를 실시한 결과 제1무산소 단계에서는 평균 $61 \sim 67$ 분까지 운전시간을 절약할 수 있었고,

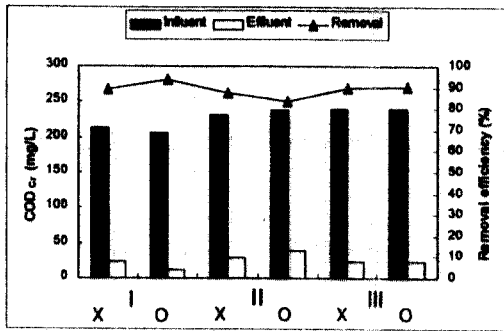


Fig. 9. The removal efficiency of COD_{Cr} with/without automatic control (I : Glucose, II : Methanol, III : Synthetic food waste acid fermentant, X : without automatic control, O : with automatic control).

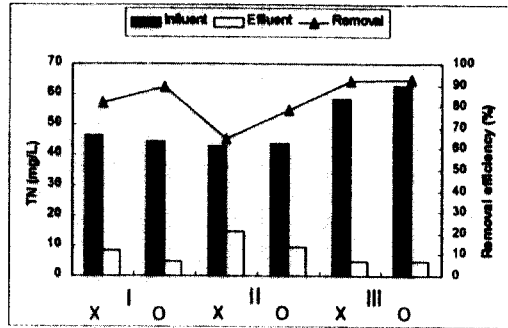


Fig. 11. The removal efficiency of TN with/without automatic control.

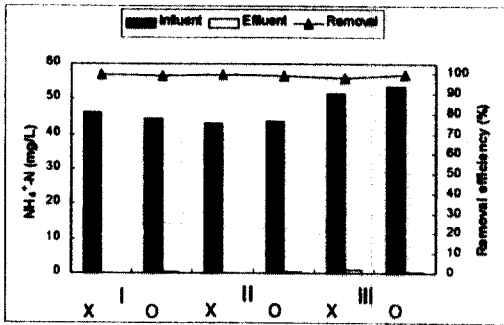


Fig. 10. The removal efficiency of NH₄⁺-N with/without automatic control.

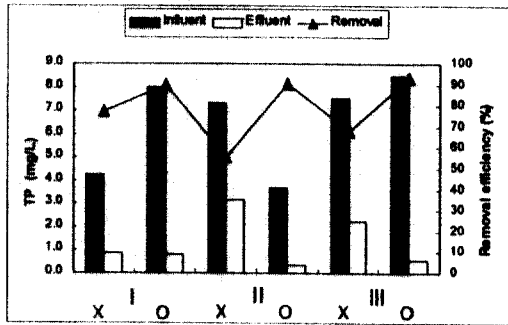


Fig. 12. The removal efficiency of TP with/without automatic control.

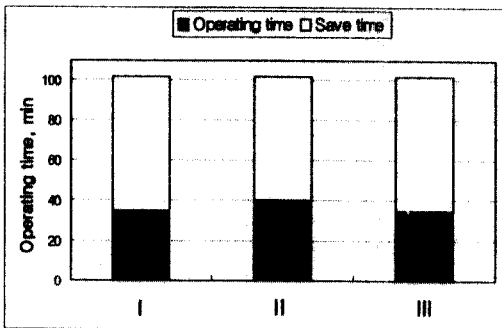


Fig. 13. Comparison of operating time in Anoxic(1) with external carbon sources(I : Glucose, II : Methanol, III : Synthetic food waste acid fermentant).

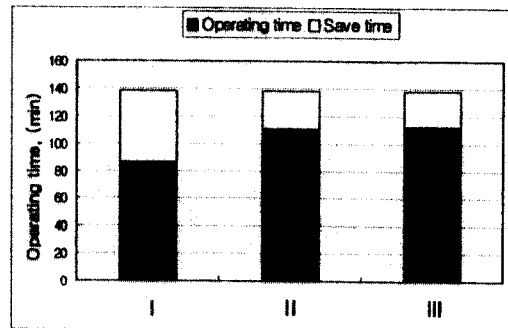


Fig. 14. Comparison of operating time in Oxic(1) with external carbon sources.

제1호기 단계에서는 평균 26-52분까지 운전시간을 절약할 수 있었다. 이것은 각각 12~66%, 20~38%의 체류시간 절감을 나타내는 것이다.

이 결과는 Yu 등(1996)¹⁾의 연속유입 SBR공정의 실시간 제어를 통해 각각 15.5%, 45%의 절감효과가 있었다는 결과와 유사하며, 이(2001)¹¹⁾의 31~66%의 폭기 에너지 절감효과가 있었다는 결과와도 비슷하였다.

4. 결론

1) 외부탄소원 주입시는 유기물질, TN, TP제거효율은 89.4%, 86.9%, 73.0%로 비주입시의 86.7%, 44%, 8.4%보다 상당히 증가하였으며, 제거 속도는 유기물질이 $0.45\sim 0.52 \text{ kg COD}_C/\text{m}^3 \cdot \text{d}$, TN이 $0.07\sim 0.13 \text{ kg N}/\text{m}^3 \cdot \text{d}$ 이었다.

2) 외부탄소원 주입시 제어값은 Anoxic(1), Oxid(1)에서 각각 $\Delta\text{ORP} < -10$, $\Delta\text{ORP} < 0$ 이었다.

3) 외부탄소원(글루코오스, 모의 음식물 산발효액)을 주입하여 자동제어한 결과 유기물질, TN, TP의 제거효율이 각각 92.0%, 90.9%, 91.2%로 상승하였다.

4) 자동제어시 제1무산소 단계에서 61~67분까지 운전시간을 절약할 수 있었고, 제1호기 단계에서 26~52분까지 운전시간을 절약할 수 있었다.

5. 참고 문헌

1. R.F.Yu, S.L.Liaw, C.N.Chang, H.J.Lu and W.Y.Cheng, Monitoring and control using on-line ORP on the continuous flow activated sludge batch reactor system, *Wat. Sci. Tech.* 35(1), 57~66 (1997)
2. E.Paul, S.Plisson.Saune, M.Mauret and J.Cantet, Process state evaluation of alternating oxid-anoxic activated sludge using ORP, pH and DO, *Wat. Sci. Tech.* 38(3), 299~306 (1998)

3. N.H.Johansen, J.S.Andersen and J.la Cour Jansen, Optimun operation of a small sequencing batch reactor for BOD and nitrogen removal based on on-line OUR-calculation, *Wat. Sci. Tech.* 35(6), 29~36 (1997)
4. B.K.Lee, S.W.Sung, H.D.Chun and J.K.Koo, Automatic control for DO and pH in the activated sludge process in a coke wastewater treatment plant, *Wat. Sci. Tech.* 37(12), 141~148 (1998)
5. 이병헌, 이민규, 이재성, 최해경, 음식물 산발효액을 외부탄소원으로 이용한 A OAS공정의 하수처리특성, 수처리학회, 제 8권, 제 3호, 75~83 (2000)
6. 최해경, 무산소-호기-무산소-탈기공정을 이용한 고도 하수처리에 관한 연구, 부경대학교 환경공학과 박사학위논문, p 163 (2000)
7. Tam N. F. Y., Leung G. L. W. and Wong Y.S., The effects of External carbon loading on nitrogen removal in sequencing batch reactors, *Wat. Sci. Tech.*, Vol.30 73~81 (1994)
8. Gerber A., Mostert E. S. Winter C. T. and de Villiers R. H., Interactions between phosphate, nitrate and organic substrate in biological nutrient removal processes. *Wat. Sci. Tech.*, Vol.19 183~194 (1987)
9. 박승국, 김병균, 서인석, 이상일, 음식물쓰레기의 발효 및 탈질, 탈인 공정에 외부탄소원으로 활용, *한국물환경학회지*, 제17권, 제2호, 261-271 (2001)
10. 윤조희, SBR을 이용한 생물학적 탈인에 있어 유기물 및 거동에 관한 속도모델 *Environmental Research Institute, Kyungnam Uni.* 81-94 (1996)
11. 이동석, 생물학적 영양소 제거를 위한 분할주입 SBR공정의 자동제어, 부경대학교 환경공학과 박사학위논문, p 114 (2001)