

주정폐수 처리를 위한 SBR 운전주기에 관한 연구

최유현* · 엄한기* · 김성철** · 주현종**†

*경기대학교 일반대학원 환경에너지공학과

**경기대학교 환경에너지공학과

A Study on Operation Cycle of SBR for the Treatment of Distillery Wastewater

Yoo Hyun Choi* · Han Ki Eom* · Sung Chul Kim** · Hyun Jong Joo**†

*Department of Environmental Energy Engineering, Graduate of School Kyonggi University

**Department of Environmental Energy Engineering, Kyonggi University

(Received 4 February 2016, Revised 7 March 2016, Accepted 8 March 2016)

Abstract

This study aimed to evaluate SBR operation cycle for removing the high-concentration organic matter of distillery wastewater in the ginseng processing plant. The experiment was conducted with the use of a laboratory scale SBR reactor and distillery wastewater as the influent. The results indicated an increase in pH from 4.08 to 7.59 of distillery wastewater after aeration for 2 hours. Also, the optimum SBR operation cycle for the removal of organic matter and nitrogen was 2 hr of aeration and 6 hr of anaerobic conditions. Adjustment of proper pH through aeration time is most critical in the SBR operation for distillery wastewater treatment. In this study, we presented an efficient method for distillery wastewater treatment.

Key words : Distillery wastewater, Operation cycle, pH change, SBR

1. Introduction

식물을 원료로 사용하는 식품 제조업에서 발생하는 폐수는 대체로 특정한 유해물질을 포함하고 있지 않지만 고농도의 유기물을 함유하고 있다는 공통적 특징이 있다(Kim, Won et al., 1991). 이 중 주정폐수는 주정의 원료 및 가공법에 따라 발생하는 성분이 상이하지만 일반적으로 고농도의 유기물을 함유하고 있다. 주정폐수의 BOD, COD 및 SS 등 유기물 성분은 모두 약 20,000 mg/L 이상인 것으로 알려져 있다(Kim, Jang et al., 1991). 이에 따라 주정폐수는 처리수를 법적수질기준인 BOD 10 mg/L, T-N 20 mg/L 이하로 만족시키는데 많은 어려움과 비용을 요구한다. 또한 인삼 가공공장에서 발생하는 주정폐수는 낮은 pH와 포기시 산발효 및 알코올 분해작용에 의해 pH가 지속적으로 증가하는 특징을 갖고 있다.

주정폐수의 처리에는 혐기성 소화, 활성슬러지, 응집침전 및 증발법 등이 적용되고 있다. Kim, Won et al. (1991)은 혐기성 소화 후 배출수의 유기물이 여전히 고농도(BOD 6,500 mg/L)를 보인다고 보고하고 있다. 활성슬러지는 침전성이 불량하고 유기물 부하변동에 민감하여 미생물 농도

를 높게 유지할 수 없는 단점이 있다. 또한 응집침전 및 증발법 등의 물리·화학적 처리방법은 고가의 처리비용이 소요되기 때문에 적용이 어려운 실정이다.

미생물을 이용한 주정폐수의 처리에는 A²/O, MLE, MBR, SBR 등의 생물학적 처리방법이 적용될 수 있다. 이 중 SBR은 운전조건의 변화에 따라 유기물과 질소를 효과적으로 제거할 수 있는 장점이 있으며, cycle 변화에 따라 무산소, 호기 구간을 조절하여 수질변화가 심한 곳에 적용이 가능하다고 알려져 있다(Lee and Lee, 2005). 본 연구는 주정폐수가 갖는 특성을 고려하여 고농도 유기물을 제거하기 위해 호기성 생물학적 처리가 아닌 탈질 반응 시 유기물의 소모를 이용하는 탈질 메카니즘을 이용하였다. 이에 따라 본 연구에서는 인삼 가공공장에서 발생하는 주정폐수를 처리하기 위해 SBR 공정을 이용하여 무산소 cycle 변화에 따른 처리효율을 비교하고, 최적의 SBR 운전조건을 도출하고자 한다.

2. Materials and Methods

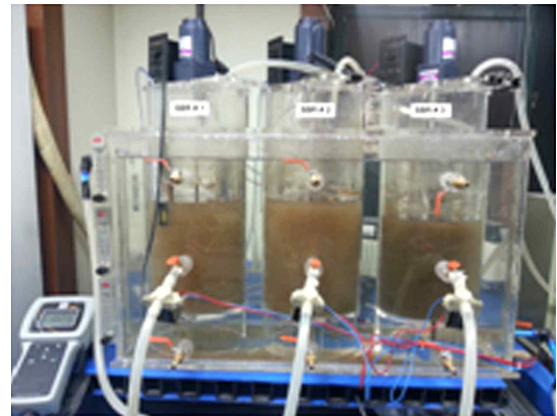
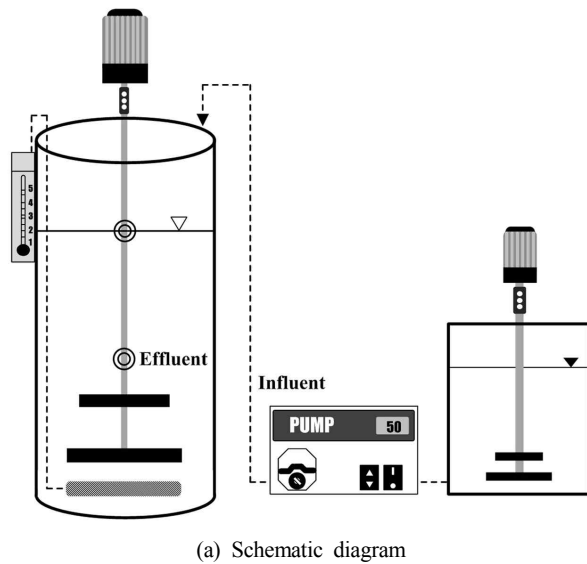
2.1. Lab. scale SBR 운전

SBR 반응기 체적은 10 L (Diameter 0.2 m × Height 0.32 m)로 구성하였으며, 완전혼합이 가능한 교반기와 산기장치로 이루어져 있다. SBR 반응기 운전 종료 후 처리수의 50%를 방류하고, 50% 원수를 유입시키도록 설정하여 전체 용적의 5 L 지점에 방류 포인트를 설치하였다. Fig. 1에 실험장치의 구성을 나타내었다.

* To whom correspondence should be addressed.

hjoo@kyonggi.ac.kr

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.



(a) Schematic diagram

(b) SBR equipment

Fig. 1. Configuration of experimental equipment.

2.2. 주정폐수 성상

아래 Table 1에 인삼 가공공장에서 발생된 주정폐수의 성상을 나타내었다. 주정폐수의 pH는 최소 3.96, 최대 5.25, 평균 4.52로 나타났으며, 전반적으로 낮은 pH 특성을 보이는 것으로 나타났다. 또한 주정폐수의 평균 COD_{Cr} 농도는 16,500 mg/L, T-N 7.2 mg/L, T-P 3.0 mg/L, SS 22 mg/L로 분석되었다.

주정폐수의 성상을 분석한 결과 대체적으로 유기물 함량이 매우 높은 반면, 질소와 인 함량은 매우 낮은 것으로 나타났다. 이는 주정폐수를 처리함에 있어 pH 조절과 유기물 제거가 반드시 필요하다는 것을 의미한다.

Table 1. Characteristics of distillery wastewater

Parameter	Concentration (mg/L)		
	Min.	Max.	Ave.
pH	3.96	5.25	4.52
COD _{Cr}	14,500	22,700	16,500
T-N	5.4	9.6	7.2
NH ₃ -N	0.7	1.7	1.1
NO ₃ ⁻ -N	0.8	2.6	1.7
T-P	2.5	3.8	3.0
PO ₄ ³⁻ -P	2.15	3.55	2.85
SS	17.0	30.0	22.0

2.3. 포기시간에 따른 주정폐수의 pH 변화 관찰

인삼 가공공장에서 발생하는 주정폐수의 pH는 약 4.0~5.0 범위를 나타내며, 기존 문헌에서도 일반적으로 낮은 pH 특성을 보이고 있다고 이야기하고 있다(Sheehan and Greenfield, 1980).

Table 3. Operation conditions of lab. scale SBR

Influent flow (L)	HRT (hr/cycle)	Cycle (cycle/day)	F/M ratio (mgCOD/mgMLVSS·day)	MLVSS (mg/L)
5	12	2	4.125	5,000

SBR 운전 중 초기 유입과정에서 주정폐수 유입과 동시에 포기가 이루어질 경우 주정폐수에 포함된 알코올 성분이 분해되어 pH가 증가하는 경향을 보인다. 알코올의 산화 반응은 RCH₂OH + 0.5 O₂ → H₂O + RCHO로 일차알코올이 분해되어 알데히드를 생성한다. 알데히드는 탄산염 시스템에 의해 H₂CO₃, CO₃²⁻으로 전환되며 pH를 증가시키는 원인으로 알려져 있다(Yang, 1991).

이에 따라 초기 주정폐수 유입 시 pH 변화를 관찰하여 생물학적 처리의 적정 pH 범위인 7.0~8.0까지 도달하는데 필요한 포기시간을 도출하고자 한다. 포기를 해주었을 경우 용존산소 농도는 2.0~3.0 mg/L로 유지하였으며, 실험조건을 아래 Table 2에 나타내었다.

Table 2. Experimental conditions of pH change for aeration time

Parameter	Experimental conditions				
	Mode 1	Mode 2	Mode 3	Mode 4	Mode 5
Aeration time	30	60	90	120	150

2.4. SBR 운전주기 변화에 따른 주정폐수 처리효율 평가

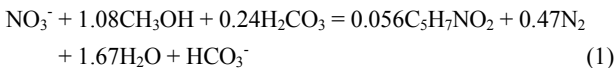
주정폐수의 효율적인 처리를 위해 SBR 운전주기 변화에 따른 유기물 제거효율을 평가하였으며, Table 3에 SBR 운전조건을 나타내었다. 유입유량은 5 L/cycle로 설정하였으며, HRT (Hydraulic Retention Time)의 경우 12 hr/cycle로 하루에 2 cycle 운전되도록 구성하였다. F/M ratio는 4.125 mg COD/mg MLVSS·day, MLVSS 5,000 mg/L로 운전조건을 설정하였다. 미생물은 주정폐수에 약 2주간 적응시킨 후 실험에 이용하였다.

Table 4. Experimental conditions of operating cycle in SBR

Step	HRT (hr)		
	Mode 1	Mode 2	Mode 3
Influent (Oxic)	3	2	1
Anoxic	5	6	7
Oxic	1	1	1
Settle	1	1	1
Effluent	1	1	1
Idle	1	1	1

SBR 운전 구성은 포기→무산소→재포기→침전→방류→휴지로 총 6단계로 이루어져 있다(Eom, 2014). Table 4에 나타난 바와 같이 SBR 운전주기에 따라 실험조건을 구분하였으며, 초기 포기, 무산소 단계를 제외한 나머지 단계는 모두 1 hr으로 고정하였다. 침전 단계 전 재포기 단계를 두어 슬러지 침전율을 높이고자 하였다.

SBR 운전 시작 시 원수유입과 동시에 포기를 실시하였으며, 포기 단계를 각 Mode별로 3, 2, 1 hr로 설정하였다. 또한 무산소 운전주기는 5, 6, 7 hr으로 구성하였다. 주정 폐수는 포기 시 알코올이 분해되어 pH가 증가하기 때문에 SBR 운전주기를 대부분 무산소 단계로 구성하였다. 무산소 단계에서는 KNO₃ 주입을 통해 질산성 질소의 농도를 인위적으로 높여주었으며, Mandt and Bell (1982)이 제시한 식 (1)에 나타난 탈질반응 시 탄소원 소모를 유도하여 주정폐수 내 고농도 유기물을 제거하고자 하였다.



KNO₃ 주입량은 Mandt and Bell (1982)이 제시한 아래의 식 (2)에 의해 COD와 NO₃⁻-N의 생분해 관계식을 참고하여 산정하였으며, 아질산성 질소(NO₂⁻-N)와 DO의 영향은 무시하였다.

$$COD_{req} = 3.71 NO_3^- - N + 2.3 NO_2^- - N + 1.3 DO \quad (2)$$

2.5. 수질분석방법

유기물 측정의 경우 Standard Methods(APHA, 2005)에 준하여 COD_{Cr}을 분석하였으며, 질산성 질소의 분석은 Ultra-violet spectrophotometric screening methods(APHA, 2005)를 이용하였다. 또한 pH는 Electronic sensor(Orion 3-star)를 PC와 연동하여 변화 추이를 측정하였다.

Table 5. Results of substrate removal efficiency of operating cycle in SBR

Parameter	COD _{Cr} (mg/L)			NO ₃ ⁻ -N (mg/L)		
	Min.	Max.	Ave.	Min.	Max.	Ave.
Mode 1	1,600	2,300	1,860	932	1,720	1,220
Mode 2	760	1,200	920	616	1,130	880
Mode 3	1,800	2,800	2,100	911	1,560	1,110

3. Results and Discussion

3.1. 주정폐수의 pH 변화 비교

생물학적 처리에 있어 pH는 매우 중요한 인자로 알려져 있다. 주정폐수는 pH가 약 산성을 띄고 있으며, 포기 시 알코올을 분해 작용에 의해 pH가 점차 증가하는 특징이 있다. 이에 따라 주정폐수의 pH 변화량을 비교하여 생물학적 주정폐수의 초기 pH는 4.08이었으며, 30분 후 pH가 4.45까지 증가하였다. 이후 60분이 경과한 후 pH는 5.01, 90분에서 6.23, 120분 후 7.59, 150분 후 8.98까지 증가하는 것으로 나타났다. 포기를 시작한 지 약 110분 후 pH가 7.0에 도달하는 것으로 나타났으며, 포기시간이 늘어날수록 pH는 지속적으로 증가하는 경향을 보였다.

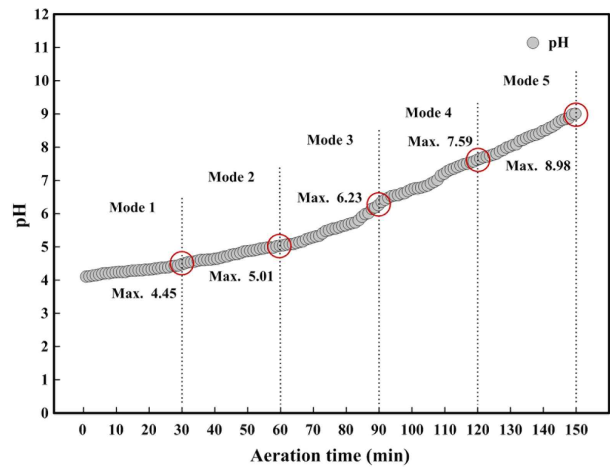
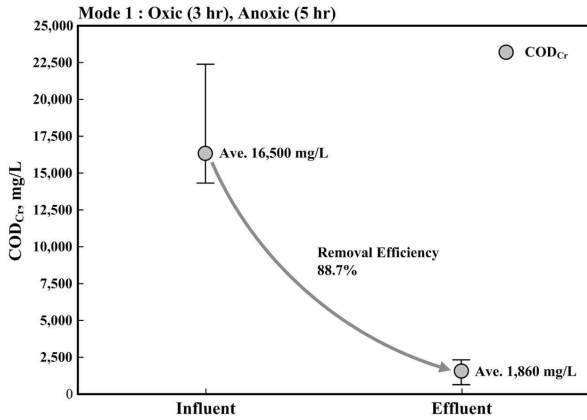


Fig. 2. pH variation of the aeration time.

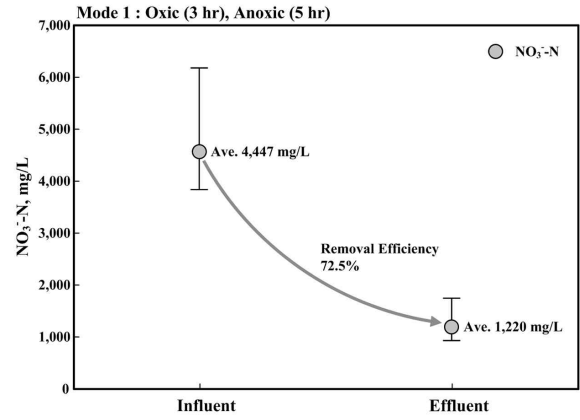
Ryu (2013)의 연구에서는 생물학적 유기물 및 질소 제거 시 pH 6.6 이하에서 제거속도가 급격히 감소하고, pH 5.5 이하 및 9.6 이상에서 생물학적 유기물 및 질소 제거가 정지된다고 보고하고 있다. 또한 미생물을 미용한 생물학적 처리는 일반적으로 중성의 pH에서 가장 높은 활성도를 보인다. 이에 따라 주정폐수를 처리하기 위해서는 초기 포기를 통해 pH를 올려주어야 할 필요가 있으며, 적정 pH 범위를 맞추기 위해서는 SBR 운전 초기에 포기시간을 약 2 hr으로 설정해야 할 것으로 판단된다.

3.2. SBR 운전주기에 따른 주정폐수의 유기물 및 질소 제거

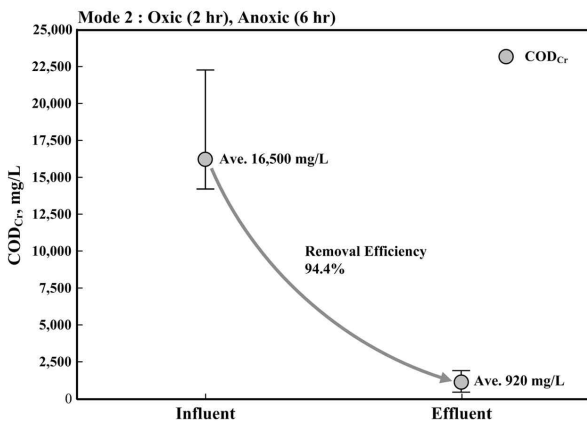
Lab. scale SBR의 운전주기 변화에 따른 유기물 및 질소 제거 특성을 평가한 결과를 Table 5와 Fig. 3~4에 나타내



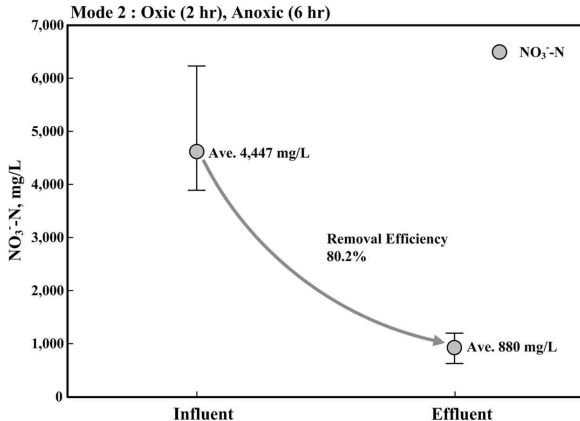
(a) Mode 1



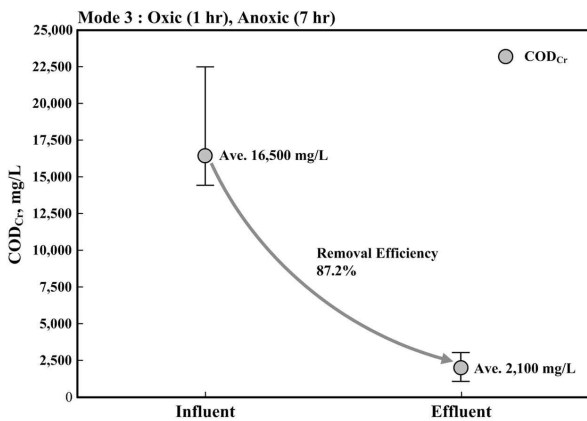
(a) Mode 1



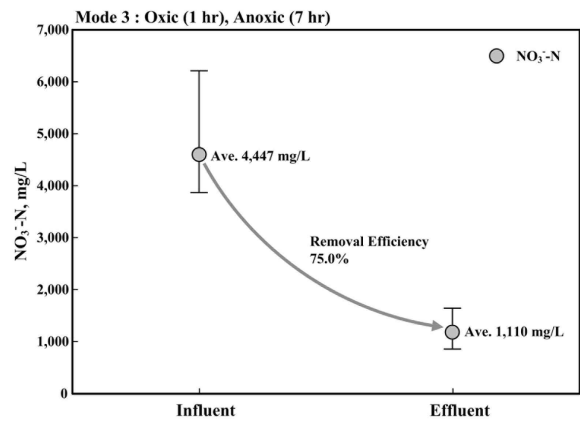
(b) Mode 2



(b) Mode 2



(c) Mode 3



(c) Mode 3

Fig. 3. Results of COD_{Cr} removal characteristic for SBR operation cycle.

Fig. 4. Results of NO₃-N removal characteristic for SBR operation cycle.

었다. 실험에 사용된 유입수는 충청남도 에 위치한 D인삼 가공공장에서 발생된 주정폐수를 사용하였으며, 질산성 질소는 식 (2)을 적용하여 KNO₃ (SAMCHUN Chemical, Korea) 를 가지고 최소 3,908 mg/L, 최대 6,118 mg/L, 평균 4,447 mg/L의 농도로 주입하였다.

SBR 운전주기를 Influent (Oxic) 3 hr, Anoxic 5 hr으로 설정한 후 유기물 제거효율을 확인한 결과 방류수의 COD_{Cr} 농도는 1,600~2,300 mg/L 범위에서 평균 1,860 mg/L로 약 88.7%의 제거효율을 보였다. Influent (Oxic) 2 hr, Anoxic 6 hr

으로 운전주기를 설정하였을 경우 방류수의 평균 COD_{Cr} 농도는 920 mg/L로 94.4%의 가장 높은 유기물 제거효율을 보였으나, Influent (Oxic) 1 hr, Anoxic 7 hr에서는 87.2%로 제거효율이 다시 감소하는 것으로 나타났다. 실험 결과를 통해 Mode 3 조건에서는 포기 시간 부족으로 pH 불균형이 발생하여 pH가 생물학적 처리에 영향을 미친 것으로 나타났다. 또한 질산성 질소의 농도를 보정한 후 탈질반응에 따른 유기물 소모와 동시에 질산성 질소의 제거효율을 확인하였다.

SBR 운전주기별 질산성 질소의 제거특성을 평가한 결과

Mode 1에서 방류수의 NO₃⁻-N 농도는 평균 1,220 mg/L로 약 72.5%의 제거효율을 보였다. Mode 2의 경우 방류수 평균 NO₃⁻-N 농도는 880 mg/L, Mode 3에서는 평균 1,110 mg/L를 나타내었다. 제거효율은 각각 80.2%, 75.0%를 나타냈다. 질소 제거효율 역시 Influent (Oxic) 2 hr, Anoxic 6 hr으로 SBR 운전주기를 설정하였을 때 가장 우수한 제거효율을 확인할 수 있었다.

효율적인 탈질을 위해서는 C/N비가 클수록 탈질에 유리하며, 그만큼 탄소원의 주입이 매우 중요하다. 기존 연구에서 적정량의 유기물은 질소와 기질 제거에 효과적이며, C/N비가 너무 크거나 적을 경우 처리수의 COD가 높고, 탈질효율이 저하된다고 보고하고 있다(Kim et al., 2008).

3.3. SBR 운전주기별 U, SDNR 도출 결과

SBR 운전주기에 따른 미생물의 기질소모율과 비탈질을 비교하기 위해 U (Specific substrate utilization rate)와 SDNR (Specific denitrification rate)을 도출하였다. U, SDNR 값의 경우 아래의 식 (3), (4)에 의해 계산하였다(Metcalf and Eddy, 2003).

$$U = \frac{(S_0 - S)}{HRT \times X} \quad (3)$$

$$SDNR = \frac{(N_0 - N)}{HRT \times X} \quad (4)$$

- S₀ : Influent COD_{Cr}, mg/L
- S : Effluent COD_{Cr}, mg/L
- N₀ : Influent NO₃⁻-N, mg/L
- N : Effluent NO₃⁻-N, mg/L
- HRT : Anoxic hydraulic retention time, day
- X : MLVSS, mg/L

Mode 1에서 U값은 14.05 mg COD/mg MLVSS·day, SDNR은 3.10 mg NO₃⁻-N/mg MLVSS·day를 나타내었다. Mode 2의 경우 U값은 12.46 mg COD/mg MLVSS·day, SDNR 2.85 mg NO₃⁻-N/mg MLVSS·day, Mode 3에서는 U값이 9.87 mg COD/mg MLVSS·day, SDNR 2.29 mg NO₃⁻-N/mg MLVSS·day의 제거속도율을 보이는 것으로 나타났다. Metcalf and Eddy (2003)가 제시한 자료에 의하면 메탄올에 대한 탈질율은 20°C에서 0.208~1.56 mg NO₃⁻-N/mg MLVSS·day로 제시하였으며, 주정폐수를 대상으로 한 SDNR 값이 높은 것으로 나타났다. SBR 운전주기에 따른 단위미생물당 유기물 및 질소제거율은 결과에 대해 큰 의미를 두기는 어려울 것으로 판단된다. SBR 운전주기별 유기물 제거효율을 알아보기 위해 탈질반응을 이용한 유기물 소모를 유도하였으며, 주정폐수 내 함유된 고농도의 유기물을 효율적으로 처리하기 위해 적절한 SBR 운전주기를 선정해야 할 것으로 사료된다.

4. Conclusion

본 연구에서는 주정폐수 내 고농도 유기물을 제거하기 위한 SBR 운전주기 설정에 관한 연구로 연구의 진행을 위해 Lab. scale SBR 반응기를 이용하여 실 주정폐수를 대상으로 실험을 실시하였다. 본 연구를 통해 도출된 결론은 다음과 같다.

- 1) 인삼 가공공장에서 발생하는 주정폐수의 pH는 약 4.52로 나타났으며, 생물학적 처리의 적정 pH 범위인 7을 고려할 때 포기시간을 약 120분으로 설정하는 것이 적절할 것으로 판단된다.
- 2) 주정폐수는 포기를 할 경우 pH 증가로 인해 고농도 유기물을 생물학적으로 처리하기 어려운 문제를 해결하고자 인위적으로 질산성 질소의 주입을 통해 탈질반응에 의한 유기물 소모를 유도하였으며, 이에 따라 SBR 운전주기 중 무산소 단계 비중을 높여야 할 것으로 판단된다.
- 3) SBR 운전주기별 유기물 제거효율을 평가한 결과 Influent (Oxic) 2 hr, Anoxic 6 hr으로 운전주기를 설정하였을 때 가장 우수한 유기물 제거효율을 보이는 것으로 나타났으며, 초기 유입과정에서 포기를 통한 pH 증가와 충분한 탈질시간을 동시에 고려하여 포기 및 무산소 단계를 설정해야 할 것으로 판단된다.
- 4) SBR 운전주기에 따른 동역학적 인자를 도출한 결과 주정폐수의 유기물을 탄소원 사용하였을 경우 비탈질이 매우 우수한 것으로 나타났으며, 탈질 반응 시 외부탄소원으로 대체가 가능할 것으로 판단된다.
- 5) 인삼 가공공장에서 발생된 주정폐수의 처리는 원수성상에 따라 운전조건의 변화가 가능한 SBR 공정의 적용이 적합할 것으로 판단되며, 초기 원수 유입 시 포기가 반드시 필요할 것으로 판단된다.

Acknowledgement

본 연구는 수도권매립지공사의 환경에너지 대학원 인력양성 프로그램의 지원으로 수행된 연구이며, 이에 감사드립니다.

References

American Public Health Association (APHA). (2005). *Standards Methods for the Examination of Water and Wastewater*, 21th Ed., New York.

Eom, H. K. (2014). *Effects on Biological Treatment in Reverse Osmosis Concentrate with DBNPA Content*, Master's Thesis, Kyonggi University, pp. 48-50. [Korean Literature]

Kim, Y. C., Won, C. H., and Chung, P. G. (1991). On the Treatment Conditions and Analysis of Distillate Wastewater, *Journal of Korean Society on Waste Quality*, 7, pp. 1-8. [Korean Literature]

Kim, D. S., Jang, H. J., An, K. H., Suh, M. G., and Song, S. K. (1991). The Treatment of Concentrated Organic Alcoholic

- Distillery Wastewater by the Fluidized-Bed Biofilm Reactor, *Journal of Biotechnology Bioengineering*, 6, pp. 345-350. [Korean Literature]
- Kim, D. K., Kim, T. S., Ryu, H. D., and Lee, S. I. (2008). Treatment of Low Carbon-to-Nitrogen Wastewater Using Two-stage Sequencing Batch Reactor with Independent Nitrification, *Process Biochemistry*, 43, pp. 406-413.
- Lee, K. H. and Lee, J. K. (2005). Characteristics of Nitrogen State with the Variation of Time Distribution in SBR Process, *Korean Society of Civil Engineering*, 25, pp. 173-179. [Korean Literature]
- Mandt, M. G. and Bell, B. A. (1982). *Oxidation Ditches in Wastewater Treatment*, Ann Arbor Science Publishers, Washington DC, pp. 61-62.
- Metcalf and Eddy. (2003). *Wastewater Engineering Treatment, Disposal and Reuse*, 4th ed., McGraw Hill, New York, N. Y., pp. 630-631.
- Ryu, J. H. (2013). *The study on Application with Biological Treatment Process and Chemical Flocculation Process for the Removal of Nitrogen and Non-degradable Organic Matters Contained in RO Retentate Water*, Master's Thesis, Kyonggi University, pp. 56-57. [Korean Literature]
- Sheehan, G. J. and Greenfield, P. F. (1980). Utilization, Treatment and Disposal of Distillery Wastewater, *Water Research*, 14, pp. 257-277.
- Yang, Y. J. (1991). *Aquatic Chemistry*, Singwang Publisher, pp. 127-135. [Korean Literature]