



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

碩士學位論文

曝氣에 의해 廢水가 內部 循環되는
沈澱形 膜生物反應器의 廢水處理 特性

濟州大學校 産業大學院

建設環境工學科

清淨工程工學專攻

張東龍

2009年 7月

碩士學位論文

曝氣에 의해 廢水가 內部 循環되는
沈澱形 膜生物反應器의 廢水處理 特性

指導教授 李 皓 遠

濟州大學校 産業大學院

建設環境工學科

清淨工程工學專攻

張 東 龍

2009年 7月

曝氣에 의해 廢水가 內部 循環되는
沈澱形 膜生物反應器의 廢水處理 特性

指導教授 李 皓 遠

이 論文을 工學 碩士學位 論文으로 提出함

2009年 7月

濟州大學校 産業大學院

建設環境工學科 清淨工程工學 專攻

張 東 龍

張東龍의 工學碩士學位 論文을 認准함

2009年 7月

審査委員長 玄 榮 珍 印

委 員 金 珉 潔 印

委 員 李 皓 遠 印

Characteristics of a Wastewater Treatment in Submerged Membrane Bioreactor with Internal Circulation by Aeration

Dong-Lyong Jang

(supervised by professor Ho-Won Lee)

A thesis submitted in partial fulfillment of
the requirement for the degree of Master of
Engineering

2009. 7.

Department of Building Environmental
Engineering
Graduate School of Industry
Jeju National University

목 차

LIST OF FIGURES	iii
LIST OF TABLES	vi
SUMMARY	v
I. 서론	1
II. 이론적 배경	
2.1 고도처리의 일반적 공법	3
2.2 생물학적 고도처리 방법	5
2.2.1 생물학적 질소(T-N)의 제거	5
2.2.2 생물학적 인(T-P)의 제거	6
2.3 막 생물반응기	7
III. 실험 장치 및 방법	
3.1 실험장치	10
3.2 실험방법	19
3.3 수질분석방법	21
IV. 실험 결과 및 고찰	
4.1 반응기 내에서의 폐수 순환 관찰	22
4.2 활성 슬러지의 MLSS 변화	24
4.3 유기물의 제거	26

4.4 총질소(T-N)의 제거	29
4.5 총인(T-P)의 제거	32
V. 결론	35
참고문헌	37



LIST OF FIGURES

Fig. 1. Schematic processes of submerged membrane bioreactor system.	13
Fig. 2. Schematic diagram of submerged membrane bioreactor system.	14
Fig. 3. Schematic of submerged membrane bioreactor structure.	15
Fig. 4. Schematic of submerged membrane bioreactor anaerobic internal baffle.	16
Fig. 5. Variations of MLSS as a function of operation time.	25
Fig. 6. Variations of MLSS and COD _{Cr} as a function of operation time.	27
Fig. 7. Variations of MLSS and COD _{Cr} removal efficiency as a function of operation time.	28
Fig. 8. Variations of MLSS and T-N as a function of operation time.	30
Fig. 9. Variations of MLSS and T-N removal efficiency as a function of operation time.	31
Fig. 10. Variations of MLSS and T-P as a function of operation time.	33
Fig. 11. Variations of MLSS and T-P removal efficiency as a function of operation time.	34

LIST OF TABLES

Table 1. Specification of membrane	18
Table 2. Composition of synthetic wastewater	20



Characteristics of a Wastewater Treatment in Submerged Membrane Bioreactor with Internal Circulation by Aeration

Dong-Lyong Jang

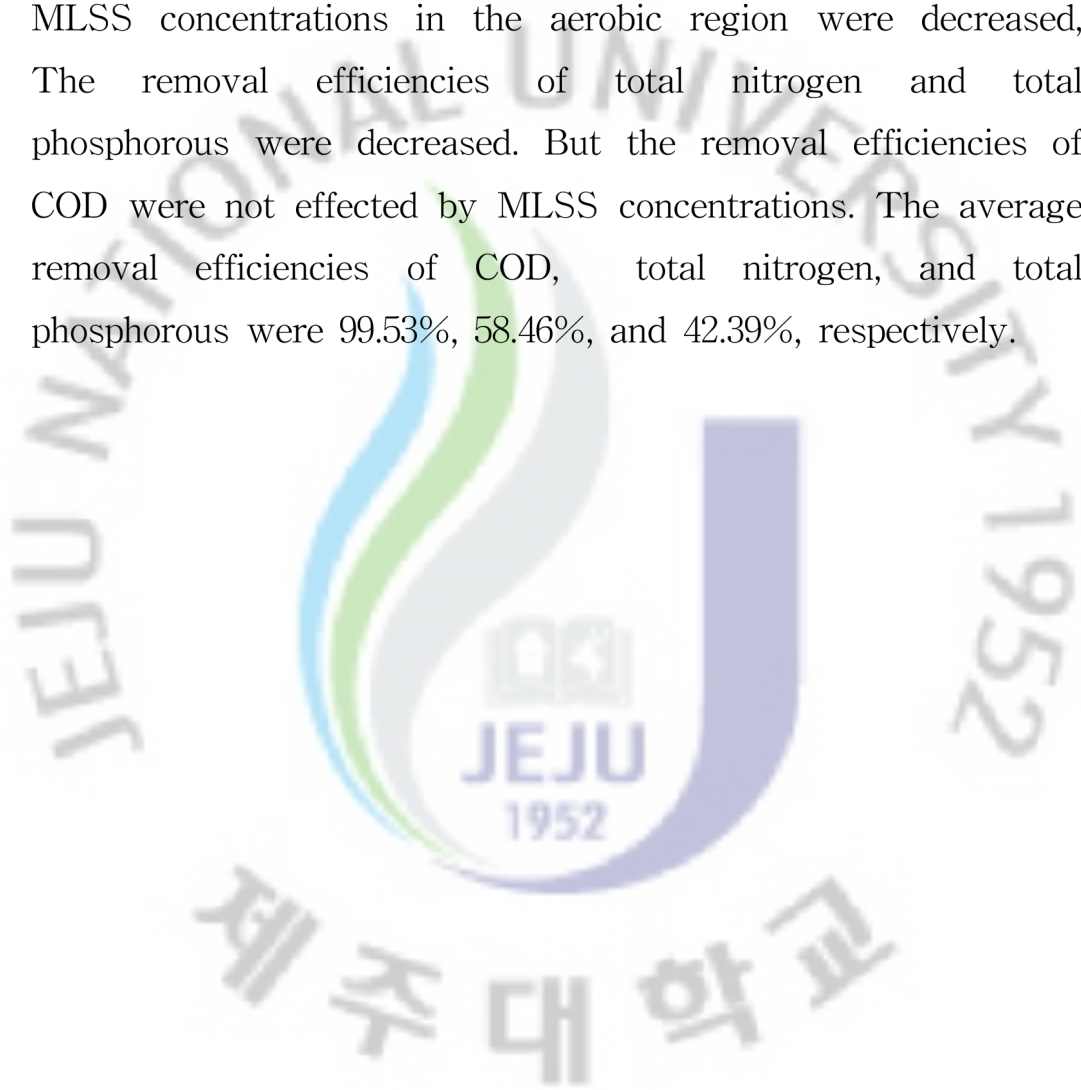
Department of Construction and Environmental Engineering
Graduate School of Industry
Jeju National University

Supervised by Professor Ho-Won Lee

Summary

The objectives of this research were to develop submerged membrane bioreactor(SMBR) being capable of internal circulation by aeration. The wastewater treatment characteristics of SMBR designed in this study were investigated. In this experiments, a couple of flat-sheet microfiltration membranes made of PVC with a pore size of 0.4 μm were used. It was confirmed that wastewater in anaerobic region was circulated to aerobic region by aeration. Mixed liquor suspended solid(MLSS) concentrations in the aerobic region of MSBR were decreased with operation time. To prevent the decrease of MLSS concentrations in the aerobic

region, various kinds of method were tried. In this experiments, MLSS concentrations in the aerobic region were in the range of 3,030~506 mg/L during 43 days of run. As MLSS concentrations in the aerobic region were decreased, The removal efficiencies of total nitrogen and total phosphorous were decreased. But the removal efficiencies of COD were not effected by MLSS concentrations. The average removal efficiencies of COD, total nitrogen, and total phosphorous were 99.53%, 58.46%, and 42.39%, respectively.



I. 서론

사회구조 및 산업 생산시설의 변화 속에서 급속한 도시화로 인한 인구증가 및 과밀화, 생활수준향상, 농업용수의 증가 등으로 물수요량은 끊임없이 늘어나고 있는 반면, 가용할 수 있는 물 사용량은 강우의 계절적 편중으로 경제적이용가능한 물자원의 총량은 한정되어 안정된 수자원의 확보를 위한 경제적 비용이 중요시 되고 있다. 특히, 우리나라는 하천 취수율이 36%로 물에 대한 스트레스가 높은(中~高) 국가군에 속하며 가뭄 시 물이용에 취약한 실정이다. 따라서 장래 부족할 것으로 예상되는 수자원을 확보 방안으로 다목적 댐 건설은 댐 건설 지역 선정, 공사비용, 주변 환경 생태계 영향으로 많은 어려움이 있는 상황에서 하수 또는 폐수를 발생 현장에서 적정 처리하여 재활용하는 방안이 현실적 대안으로 추진되고 있다. 발생하는 오폐수는 하수관거 정비, 하수종말처리장의 시설용량 확충 및 방류수질 강화 조치로 처리량의 상당수가 방류수질 기준 이하로 방류되고 있다. 기존의 도심지역 및 분류식 하수관거 미설치 지역의 단독오수처리시설이 설치된 건물의 처리수 방류수질 기준이 BOD 기준으로 만 완화되어 방류수계의 부영양화를 유발하는 총질소(T-N)과 총인(T-P) 제거는 전혀 고려되고 있지 않은 상황이다. 따라서 효율적인 수질오염 방지를 위하여 소규모 처리시설을 이용하여 오염배출원에서 직접 고도처리 방식을 적용하여 다시 사용하는 재활용 시스템(wastewater reclamation and reuse system)이 필수적인 현실적 대안으로 이에 대한 연구 및 각계의 응용이 점차 증가하고 있는 실정이다. 또한 오염 배출원에서의 직접처리와 재활용 시스템을 적용하기 위해서는 기존의 처리시설에도 적용할 수 있게 설치면적을 적게 차지하면서도 유출수의 수질을 안정적으로 처리수 방류수질 기준에 적합한 시스템을 구비하여야 한다. 기존의 생물학적 처리방

법에 막분리 기술을 도입한 분리막 생물반응기(membrane bioreactor)에 대한 연구 및 처리시설이 실제 적용되고 있는 상황이다.(조순행, 2002; 김갑수와 김영란, 2002)

분리막 생물반응기 시스템은 기존의 활성슬러지 시스템에 분리막을 결합한 활성슬러지 시스템으로 분리막에 의해서 고·액분리가 이루어지고 침전조의 슬러지 침강성에 의한 처리수 분리 유출이 아니므로 슬러지 팽화(sludge bulking)등의 운전상의 문제와 상관없이 일정농도 이하의 깨끗한 유출수를 얻을 수 있다. 또한 침지형 분리막에 의해 시스템내의 미생물의 농도를 높게 유지할 수 있으므로 처리효율을 높일 수 있다. 그러나 막여과 시 농도분극(concentration polarization) 현상과 막 오염(membrane fouling) 현상으로 인하여 시스템의 효율성과 경제성이 급격하게 저하되므로 이를 해결할 수 있는 지속적인 연구가 필요하다.(환경부, 2002, 2007, 2009)

침지형 막생물반응기(SMBR:submerged membrane bioreator)는 일반적인 폐수처리 공정의 소요 공간, 처리시간 및 유지관리비를 최소화 시킬 수 장점이 있으며, 침지형 분리막 사용은 운전이 간단하고 슬러지 팽화로 나타나는 사상성 미생물의 성장을 방지하여 유량변동에도 불구하고 처리수의 수질을 일정하게 확보할 수 있다.

본 연구는 분리식 하수관거 미 설치지역의 오수처리시설에서 폐수가 처리된 후 방류되는 지역에 간이형 처리시설을 설치하여 고도처리 방류수 수질기준에 적합하게 처리하기 위한 처리시스템 개발의 일환으로서 단순히 폭기 시설만으로 폐수가 반응기 내부에서 자연 순환하는 침지형 막생물반응기를 개발하고 이에 대한 폐수처리 특성을 조사하는데 그 목적이 있다. 이를 위하여 폭기에 의해 폐수가 순환되도록 장치를 설계 제작하고 분말활성탄을 사용하여 폭기만으로 분말활성탄이 반응기 내에서 자연 순환되는 것을 확인하였다. 또한 이반응기를 사용하여 운전시간에 따른 반응기내의 활성 슬러지 농도 변화와 COD_{CR}, 총질소(T-N) 및 총인(T-P) 등의 제거효율을 측정 분석하였다.

II. 이론적 배경

2.1. 고도처리의 일반적 공법

일반적인 폐수처리방법에서 유입폐수의 협잡물 제거용 스크린(screen)과 침전지에 의한 기계적인 불순물제거를 1차 처리라 하고, 활성 슬러지 혹은 살수 여상에 의한 생물학적 처리를 2차 처리라 하며, 이상의 1, 2차 처리공정 다음에 질소, 인 등의 영양염류 물질과 난분해성 물질을 제거하기 위하여 새로운 3차 고도처리공정을 도입하거나 2차 처리로 생물학적 고도처리공법을 도입하는 공정을 고도처리라 한다. 3차 고도처리공정에는 응집침전법, 급속사여과법, 활성탄흡착법, 오존산화법을 기본으로 생물학적 처리공정(A/O 공법, A₂O 공법, SBR 공법, Bardenpho 공법, UCT 공법, VIP 공법, Sidestream 공법), 응집제첨가 활성슬러지법, 연속 SBR법, 접촉탈인법, Phostrip공법 등이 일반적이며, 최근 주목받고 있는 생물학적 고도처리 공정으로는 ICEAS(Intermittent Cycle Extend Aeration System), CASS(Cyclic Activated Sludge System), CAST(Cyclic Activated Sludge Technology), OMNIFLO(Omniflo Sequencing Batch Reactors System), AqualMSBR(Aqua Modified Sequencing Batch Reactors System), Fluidyne SBR(Sequencing Batch Reactor), PSBR(Pumyang Sequencing Batch Reactors System), KIDEA(Kumho & KIST Intermittent Dcanted Extended Aeration), PAD(Phase Isolation Ditch), DNR(Daewoo Nutrient Removal) 및 B₃(Bio-Best Bacillus System)등이 적용되고 있다.(첨단환경기술, 2006 ; 대한상하수도학회. 2007 ; 대한환경공학회지. 29권 ; Octave Levenspiel, 2000 ; Fane, a.g., 1996 ; Hang-Sik Shin, 1991 ; Tanya A et. al, 1996 ; Ueda T. et. al, 1996 ; Vogelpohl. A., 2000 ; Wilen, et. al, 1999 ; Xia Huang. et. al,

2001 ; Krampe, 2001 ; Zhimin Fu et .al, 2000)

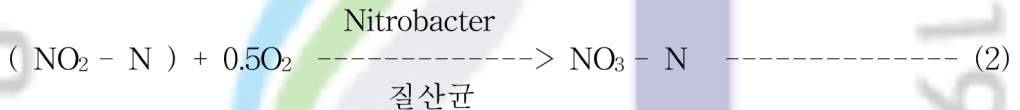
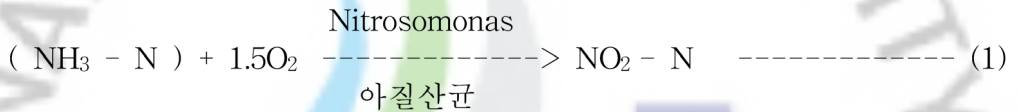


2.2. 생물학적 고도처리 방법

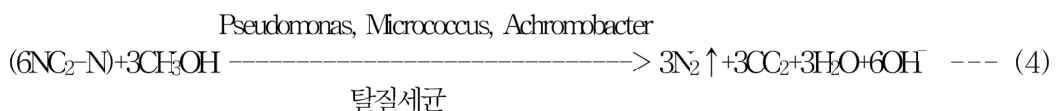
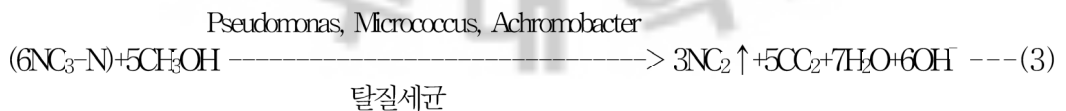
2.2.1. 생물학적 질소(N)의 제거

질소제거 방법으로는 2차 처리수의 질소를 제거하는 물리화학적 방법과 2차 처리공정에서 질소를 제거하는 생물학적 질소제거 방법이 있다. 생물학적 질소제거를 단계적으로 나타내면 다음과 같다.

제 1단계(질산화 단계) : 폐수중의 암모늄이온이 호기성 조건에서 질산세균에 의해 생물화학적 산화반응으로 질산성질소($\text{NO}_2\text{-N}$, $\text{NO}_3\text{-N}$)로 산화된다.



제 2단계(탈질단계) : 제 1단계 반응결과 생성된 질산성질소($\text{NO}_2\text{-N}$, $\text{NO}_3\text{-N}$)가 무산소 상태에서 통성 혐기성균인 탈질균(*Pseudomonas*, *Micrococcus*, *Achromobacter* 등)에 의해 질소가스로 환원하여 제거된다. 이때 탈질세균의 영양원으로 탄소가 부족하므로 메틸알코올과 같은 유기물을 첨가하여야 한다. 질산성질소의 환원반응은 다음과 같다.



이 반응에서 질산이온이 수소수용체, 메탄올이 수소공여체가 된다. 유기탄소원은 초산, 펩톤, 메탄올, 당류(글루코스) 등이 사용되며 유지관리 비용이 많이 들지만 이 중에서 메탄올이 가장 경제적이다. 유기 탄소원으로 하수의 BOD를 이용하거나 미생물의 세포분해에 의해 생성되는 유기물을 이용할 수도 있다. 질산화반응에서는 알칼리도[HCO₃⁻]가 소비되므로 pH가 낮아지고, 탈질과정에서는 반대로 알칼리도가 생성되어 pH는 증가하게 된다. 메틸알코올을 주입했을 때 반응은 식(6)과 같다.



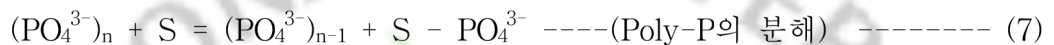
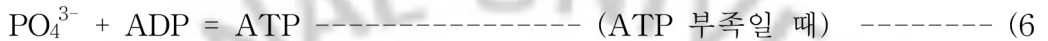
2.2.2. 생물학적 인(P)의 제거

인(P) 제거방법으로는 처리대상을 2차 처리수로 할 경우에는 물리화학적 처리공법인 석회응집(Ca₅OH(PO₄)₃)침전법, 정석탈인법 및 철-알루미늄염 응집법 등이 있으며, 2차 처리공정을 대상으로 할 경우에는 생물학적 처리공법인 혐기·호기 활성 슬러지법, Phostrip법 및 응집제첨가 활성 슬러지법 등이 있다. 생물학적 인 제거를 단계적으로 나타내면 다음과 같다.

제 1단계 : 혐기상태(anaerobic condition)에서 인제거 미생물(PAOs: phosphate assimilating organisms)은 세포 내의 폴리인산(Poly-P)이 가수분해되어 정인산(PO₄-P)으로 혼합액에 방출되며, 동시에 하수 내 유기물은 글리코젠 등의 기질(PHB; poly-β-hydroxybutyrate)로 세포 내에 저장된다. 인의 방출속도는 일반적으로 혼합액 중의 유기물 농도가 높을수록 크다. 보통 유입 정인산(PO₄-P) 농도의 3~5배 정도까지 방출된다.

제 2단계 : 호기상태(aerobic condition)에서는 세포내 저장된 기질이 산화, 분해되어 감소된다. 인제거 미생물(PAOs; phosphate assimilating organisms)은 이때 정인산(PO₄-P)을 흡수하는데 미생물의 생성에 필요한 양 이상으로 과잉섭취(luxury uptake)하여 폴리인산(Poly-P)으로 재합성된다.

혐기·호기 조건을 연속적으로 반복하면서 활성 슬러지의 인 함량이 증가하게 된다. 즉, 호기상태만을 거치는 표준 활성 슬러지법의 슬러지 인 함량이 1~2% 정도인 것에 비하여 인제거기작(혐기·호기 조합법)을 거친 슬러지 인 함량은 3~8% 정도까지 증대되어 생물학적으로 인을 제거하게 된다.



여기서, $(PO_4^{3-})_n$ 는 폴리인산(Poly-P)이고, $(PO_4^{3-})_{n+1}$ 는 초과 축적된 폴리인산(Poly-P)이고, S는 세포내로 운반된 기질(PHB:poly-β-hydroxybutyrate)이며, X는 인 제거 미생물(PAOs:phosphate assimilating organisms)세포물질이다. (이종형 등, 2008)

2.3. 막 생물반응기(membrane bioreactor)

막 생물반응기를 이용한 오염물질 제거 메커니즘은 활성슬러지에 의한 유기물의 흡착, 흡착된 유기물의 산화 및 동화, 활성슬러지의 침강·분리의 3가지로 구분되어 유기물을 분해·처리하는 공법과 가압 또는 감압된 원수를 다공성 여과막을 통과(표면여과 또는 내부여과)시켜 용질입자의 크기와 분리막의 공극에 의한 물리적인 체분리(sieving)에 의해 처리되는 물리적 분리막 공정을 결합한 것이다. 수처리에 사용하는 분리막 기술에는 정밀여과(MF, microfiltration), 한외여과(UF, ultrafiltration), 나노여과(NF, nanofiltration), 역삼투(RO, reverse osmosis)등이 있는데, 막 생물반응기에 주로 사용되는 분리막은 정밀여과막(MF, microfiltration)이다.

분리막 여과 공정은 운전조건(운전압력, 운전유량, 온도), 분리막의 특성(친

수성, 소수성), 여과액의 성질(입자의 크기, 막 투과 유체의 점도)등의 요소에 따라 결정된다. 막의 오염 현상을 설명하는 데에는 식(11)과 같은 직렬여과 저항모델(Resistance in series model)이 사용되며, 막 투과 유량과 막 투과 압력의 관계는 다음 식과 같다.

$$J = \frac{\Delta P}{\mu \times R_t} \quad \text{-----} \quad (10)$$

여기서 J 는 투과선속(Permeate flux($\text{m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{s}$))이고, ΔP 는 막간차압(Transmembrane pressure(N/m^2))이고, μ 는 용액의 점도(Viscosity of permeate($\text{N} \cdot \text{s}/\text{m}^2$))이며, R_t 는 총 저항(Total filtration resistance(m^{-1}))이다.

총 막 여과 저항은 다음과 같이 이루어진다.

$$R_t = R_m + R_f + R_c \quad \text{-----} \quad (11)$$

여기서 R_m 는 막저항(Membrane resistance)이고, R_f 는 투과저항(Fouling resistance)이며, R_c 는 케이크저항(Cake resistance)이다.

막 저항값을 막 투과 유량과 막 투과 압력으로 표시하고 있으며 전체 막 저항은 막 자체의 저항과 케이크(Cake)의 저항 및 막 내부의 오염으로 발생하는 저항으로 구분된다. R_m 은 구입한 상태의 분리막을 증류수로 여과할 때 측정할 수 있으며 R_f 는 운전이 종료된 후 최종 막 투과 유량과 막 투과 압력을 이용하여 측정할 수 있으며, 운전이 종료된 후 막 표면의 케이크 층을 세정수로 세척 후 여과저항을 측정한 값은 $R_m + R_f$ 가 되므로 각각의 여과 저항을 구할 수 있다. 막 생물반응기에서 케이크저항(R_c)은 분리막의 재질 또는 미생물 플럭의 형태와 관계없이 총 저항에서 가장 큰 부분을 차지하고 있으며 케

이크 저항의 비율은 총 여과저항의 약 51~97%를 차지하는 것으로 보고되고 있다.(장인성, 1996 ; 신동환 등, 2008 ; Chang, 1999 ; In-Jong Kang, 2003 ; 김옥란, 2005)



Ⅲ. 실험 장치 및 방법

3.1. 실험장치

본 반응기 내에서의 폐수 순환과 반응단계를 좀더 상세히 설명하면 다음과 같다. 전체적인 시스템 구성은 오수처리시설에서 방류되는 방류수를 수질기준에 적합하게 처리하거나 처리수를 재활용하기 위하여 Fig. 1과 같이 구성할 계획이다. 오수처리시설 방류수역에서 미 처리수를 펌프로 흡입하여 각종 이물질 등의 고형물을 걸음장치(strainer)로 전 처리를 거친 후, 본 실험에 적용된 침지형 막생물 반응기에서 고도처리를 실시하고, 처리수에 용해되어 있는 병원성 세균 및 박테리아를 제거하기 위하여 살균장치로 살균처리 한 후 재활용하거나 방류수계로 방류된다. 또한 폐수처리시스템에서 발생하는 고형물 및 반응기의 농축 슬러지는 농축 보관 된 후 하수종말처리장의 슬러지 혐기조로 이송 처리한다.

본 연구 실험에 사용한 반응기의 개략도를 Fig. 2 와 Fig. 3에 나타내었다. 반응기의 상부의 호기조 및 내부의 평막(flate membrane), 산소공급용 공기공급장치(blower), 처리수를 유출시키기 위하여 분리막에 연결된 감압펌프(suction pump) 등의 구성은 Fig. 2와 같으며, 운전공정 구성은 흡입펌프(feed pump)로 폐수를 이송 시킨 후 반응기 하부의 혐기조로 폐수를 유입하였다. 본 연구에서 사용된 반응기의 크기는 Fig. 3과 같이 가로 245mm, 세로 334mm, 높이 983mm로 실험의 편리성 및 관찰성을 감안하여 투명 아크릴 수지를 사용하여 실험목적에 적합하게 만들었다. 반응기의 유효부피(working volume)는 호기조 및 혐기조 부피 비율을 약 1:1로 하였다. 호기조 25.67 L, 혐기조 25.84 L로 구성하여 반응기 상부의 호기조 내부 중앙에 평막(flate membrane)을 설치하여 처리수를 감압펌프 작동으로 통과유량을 약 2.8

L/min로 일정하게 유지하기 위하여 차압밸브를 수시로 조정하였다. 호기조 내부 하단에 산기관을 일렬로 배치하고 폭기량 15 L/min을 유지하며 계속 폭기를 실시하였다. 처리수 유출은 호기조 반응기에서 overflow 되어 자연스럽게 혐기조로 유입되며 시간이 경과하면서 혐기조 하부에서 농축되며, 반응기 하부 혐기조에서 인을 방출하게 되며 반응을 거친 처리수는 Fig. 4에 도식된 호기조 반응기 내부 혐기조 배플(baffle)에 뚫어진 지름6mm 구멍을 통하여 호기조로 유입되면서 인 제거 미생물에 의하여 인 과잉섭취를 유도하며 잉여 슬러지로 유출시키게 된다. 다음 과정으로 호기조 내부 중앙에 설치된 분리막(flate membrane)을 통해서 처리수가 최종 유출된다. 실험 시작 준비 단계로 반응기 하단부 혐기조에 실험실에서 배양된 농축 슬러지를 투입, 실험조건에 적응시키면서 혐기조에 절반 정도 축적하였다. 호기조 내의 활성슬러지 농도는 평균 2,000mg/L 이상 유지하도록 배양된 농축슬러지를 지속적으로 투입, 운전을 하면서 실험조건에 적합하게 유지하였다. 또한 분리막에 의해 유출되는 처리수의 만큼 실험실에서 합성폐수를 만들어 feed tank에서 자동으로 공급되게 하였다.

폭기에 의해 혐기조에서 호기조로 자연 순환되는 연속식 반응기는 폐수를 혐기조 하부로 유입하여 생물학적 인 제거 반응을 활성화 시키는 첫 번째 단계인 혐기성 상태에서 미생물에 의한 유기물의 흡수가 일어나면서 인을 방출하게 된다. 두 번째 단계로 호기조 내부에 설치한 혐기조 처리수 배출 공간 배플(baffle)에 지름6mm 구멍을 다수 설치하여 호기조의 폭기에 의한 상승부력과 배플(baffle)면의 전단력으로 하부 혐기조의 처리수를 상승 유출시킨다. 세 번째 단계는 호기조 하부의 산기관 폭기(aeration)작용으로 폐수에 산소를 공급하여 호기성 조건을 형성함과 동시에 공기의 상승부력을 이용하여 폐수를 호기조 내부에서 혐기조 배플(baffle)면을 기준으로 연속 순환시킨다. 폐수의 일부는 overflow에 의하여 활성슬러지(MLSS)와 함께 혐기조 하부로 유입되는 반복 사이클이 형성된다. 이와 같이 반응기 하부의 혐기조에서는 폐

수 유입으로 인 방출 및 탈질화 반응이 이루어지고 상부의 호기조에서는 인의 과잉 축적 현상, 유기물 산화, 인 과잉섭취(luxury uptake)로 생성된 잉여 슬러지 축출 및 질산화 반응이 형성됨과 동시에 호기조의 내부에 설치된 분리막(flate membrane)을 통하여 처리수가 유출되는 연속적인 반복 사이클 반응기이다.



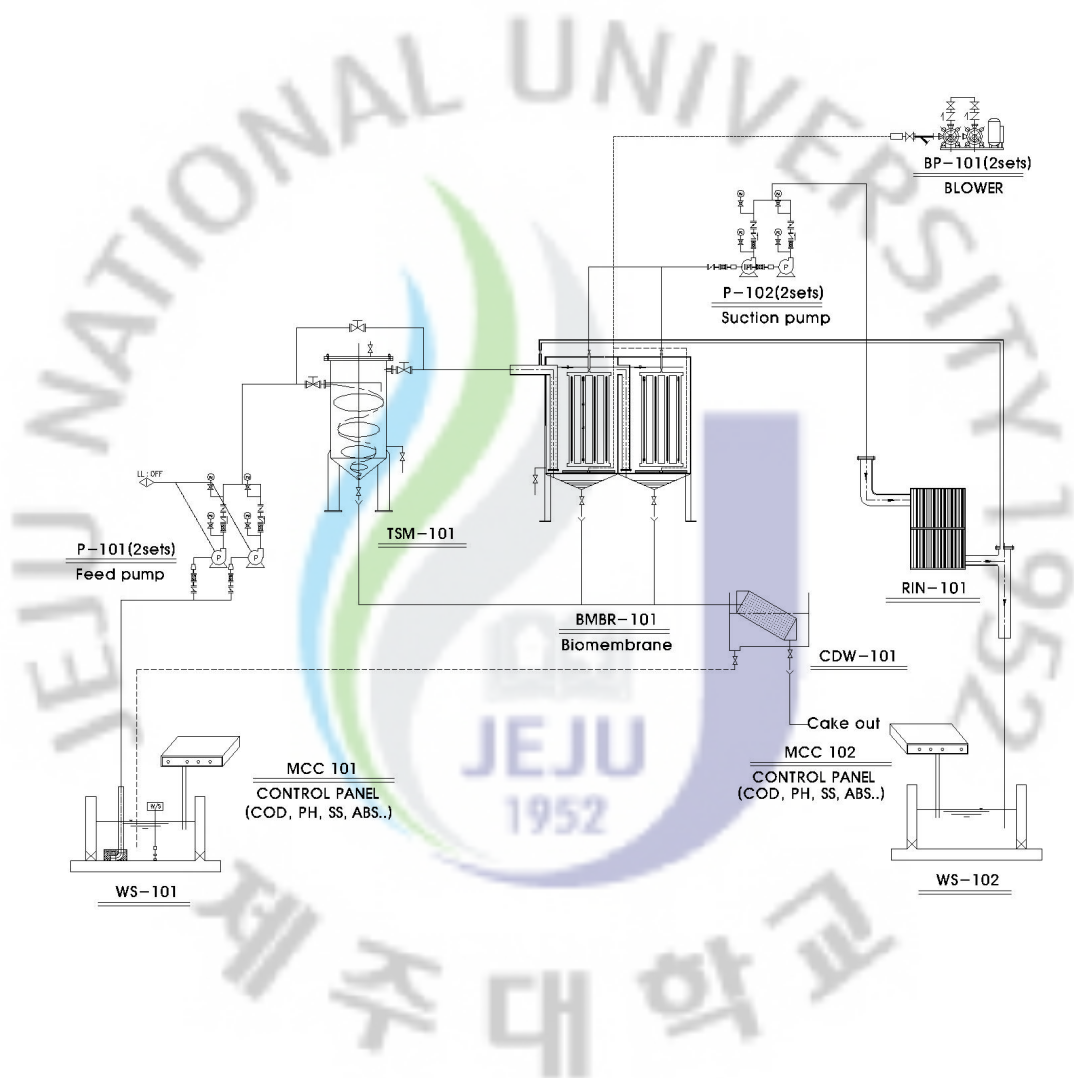


Fig. 1. Schematic processes of submerged membrane bioreactor system.

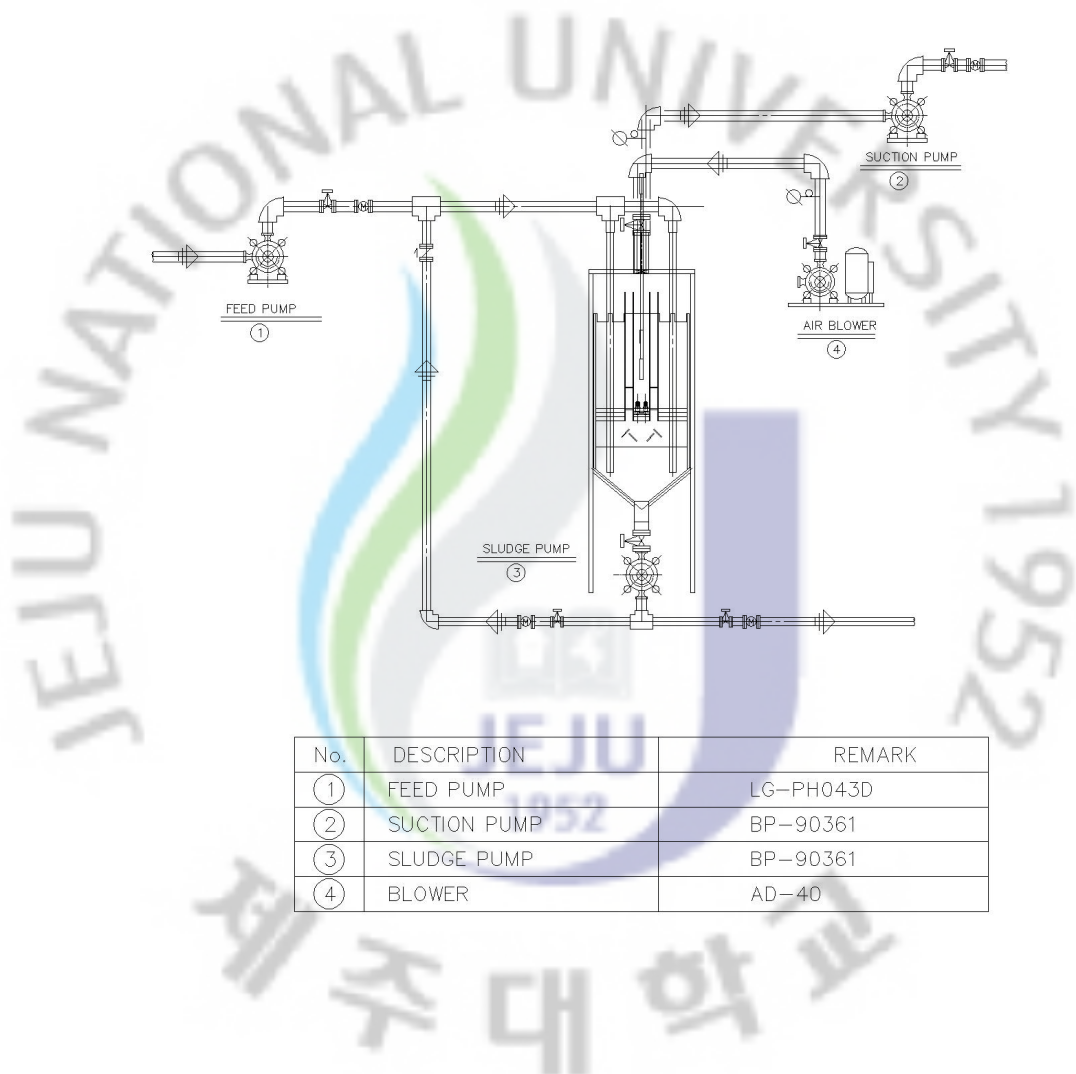


Fig. 2. Schematic diagram of submerged membrane bioreactor system.

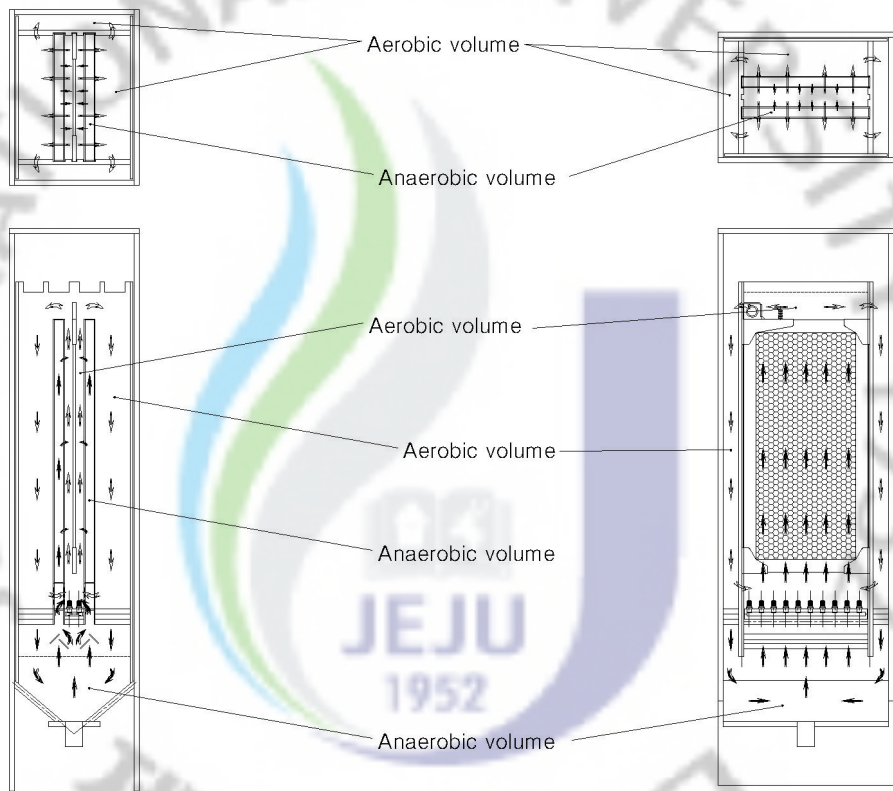


Fig. 3. Schematic diagram of submerged membrane bioreactor structure.

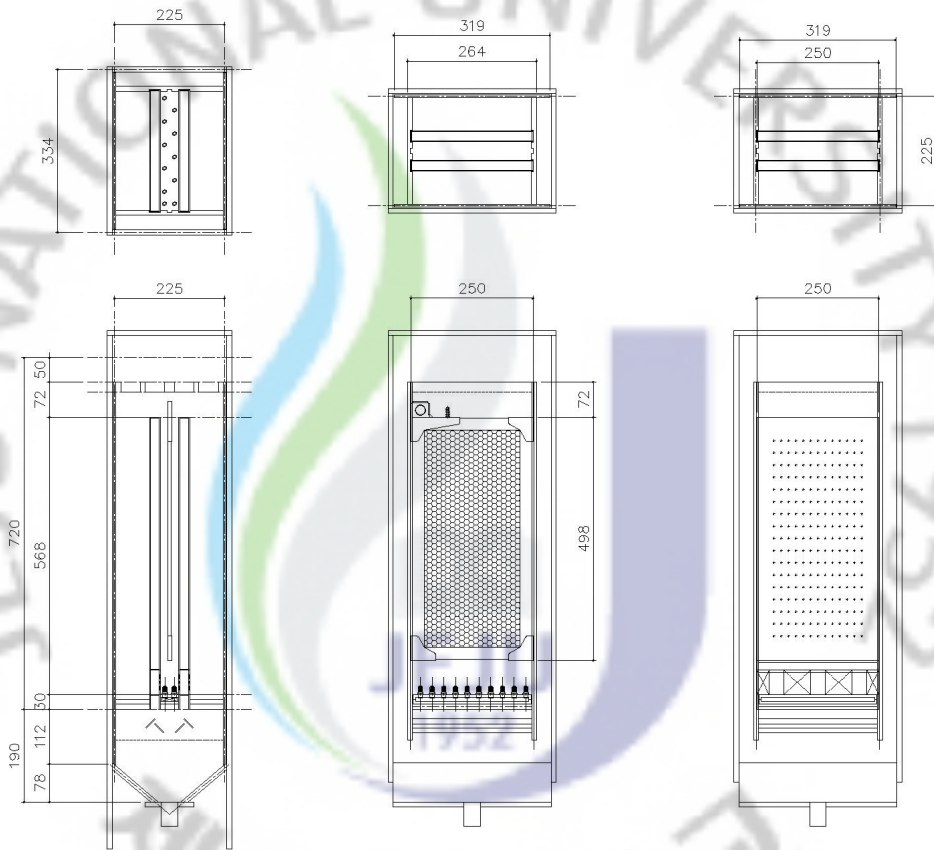


Fig. 4. Schematic diagram of internal baffle.

실험에 사용된 평막(flate membrane)은 국내 P사의 PVC 재질의 침지형 평막으로 공극의 크기(pore size)는 $0.4\mu\text{m}$ 이며, 막 면적은 0.17m^2 이다. 본 연구에 사용된 분리막의 사양은 Table 1에 나타내었다.



Table 1. Specification of membrane

Membrane material	PVC
Membrane type	Flate-sheet type
Pore size(μm)	0.4
pH	2 ~ 10
Temperature($^{\circ}\text{C}$)	2 ~ 38
Hydrophobicity or Hydrophilicity	Hydrophilicity
Total surface area (m^2)	0.17

3.2. 실험방법

본 실험의 반응순서는 feed tank에 연결된 feed pump가 작동하면서 폐수가 반응기 하단의 혐기조로 유입하게 된다. 반응기 하부의 혐기성 조건에서 인 방출 및 탈질화 작용으로 각각 반응한 후 반응기 상부의 호기조 내부에 설치된 혐기조 배플(baffle) 구멍을 통하여 혐기조의 처리수가 호기성 반응조로 유출된다. 이때 호기성 조건에서 폐수의 유기물 산화, 인 제거 미생물에 의하여 인 과잉 흡수 및 질산화 반응을 일으킨다. 호기조 하단부의 산기관에 의하여 폭기작용을 일으키므로 하단부의 혐기조 처리수를 배플(baffle)을 통하여 유출시키는 작용과 함께 호기조 내의 폐수를 순화시키는 힘으로 작용하게 된다. 호기조의 폐수 순환과 함께 순환폐수의 상부의 활성슬러지는 overflow 작용으로 하부의 혐기조로 유입된다. 반응기 하부의 혐기조로 유입된 활성슬러지는 폐수의 유입과 함께 반복적 사이클을 형성하게 된다. 상부의 호기조 중앙에 수직으로 설치된 평막(flate membrane)에 의하여 처리수가 유출된다. 처리수 유출 방법은 20분 동안 suction pump 운전으로 분리막을 통하여 처리수를 유출시키고 20분 동안 suction pump를 정지시킴으로 반복적인 감압운전과 정지 사이클을 유지하였다. 유출되는 처리수량 만큼 합성폐수를 공급펌프(feed pump)로 자동적으로 공급되도록 하였다. 호기조의 폭기량은 15 L/min으로 일정하게 유지하였으며, 반응기의 미생물 반응 온도조건을 일정하게 유지하기 위하여 반응기 실험실 운전온도를 $25\pm 2^{\circ}\text{C}$ 로 일정하게 유지하였다. 실험에 사용한 합성폐수는 Table 2에 나타내었으며, 탄소, 인, 질소원은 각각 Glucose, KH_2PO_4 및 NH_4Cl 을 사용하였다. 합성폐수의 CODcr은 410mg/L 이었고, T-N 및 T-P는 각각 42mg/L 및 3.95mg/L 이었다.

실험에 사용된 활성 슬러지는 실험실에서 계속하여 배양되고 있는 슬러지를 사용하였으며 합성폐수에 접종 후 적응기간을 30일 정도 배양 한 후 실험에 사용하였다.

Table 2. Composition of synthetic wastewater

Composition	Concentration(mg/L)
Peptone	30
Glucose	400
NH ₄ Cl	172
KH ₂ PO ₄	14
FeCl ₃ · 6H ₂ O	1
CaCl ₂	4
MgSO ₄ · 7H ₂ O	50
MnSO ₄ · H ₂ O	3
NaHCO ₃	750
CODcr	410
T-N	42
T-P	3.95

3.3. 수질 분석 방법

본 실험에 사용된 수질분석 방법은 Standard Methods(DR-5000, HACH, USA) 절차에 따라 분석을 하였다.

화학적 산소요구량(CODcr: Oxygen Demand, Chemical)은 CODcr는 DRB200 Reactor, Method 8190로 측정하였다. 시료를 황산산성으로 하여 $K_2Cr_2O_7$ 일정과량을 넣고 2시간 가열반응 시킨 다음 소비된 중크롬산칼륨의 양을 구하기 위해 환원되지 않고 남아 있는 $K_2Cr_2O_7$ 을 황산제일철암모늄 용액으로 적정하여 시료에 의해 소비된 중크롬산칼륨을 계산하고 이에 상당하는 양을 측정하였다.

혼합액 부유고형물(MLSS: mixed liquor suspended solid)농도는 반응조 내의 미생물 농도를 MLSS로서 측정하였다. 시료 10mL를 유리섬유(GF/C)에 여과한후 105°C에서 1시간 방치한 후 무게를 측정하여 구하였다. 총 켈달질소(TKN:Total Kjeldahl Nitrogen)는 TKN은 DRB200 Reactor, Method 10071로 측정하였다. 총 인(Total Phosphorus)은 TP는 DRB200 Reactor, Method 8190로 측정하였다.

IV. 실험 결과 및 고찰

4.1. 반응기 내에서의 폐수 순환 관찰

본 연구에 사용된 반응기는 혐기조·호기조 공간을 별도의 구획 없이 폐수 흐름만으로 각각의 구획을 구분하였으며, 분말활성탄을 사용하여 각 반응조별 폐수의 순환과정을 관찰하였다. 호기조는 호기조 내부 양쪽에 설치된 각각의 혐기조 배플(baffle) 하부에 개구부 4개소를 설치하였으며, 폐수의 흐름을 관찰하기 위하여 정상운전 상황인 호기조 하단부에서 폭기를 시켜 호기조 상부에 분말활성탄을 투입하였다. 호기조 하부에 설치된 산기관에서 발생하는 공기의 상승에 의해서 호기조의 폐수가 혐기조 배플(baffle)을 경계로 타원형의 유체 흐름으로 순환되는 것을 관찰할 수 있었다. 또한 호기조 내에서 순환되는 분말활성탄이 호기조 상부에서 overflow 되어 호기조 외부공간과 연결된 반응기 하단부의 혐기조로 유입되는 것을 관찰할 수 있었다. 그리고 반응기 하단의 혐기조에 축적된 활성 슬러지에 폐수가 유입되고 호기조 하부에 연결된 혐기조 배플(baffle) 구멍 주위로 산기관의 폭기 작용으로 상승부력과 배플(baffle)면에 작용한 전단력으로 혐기조 내의 분말활성탄이 상승하면서 배플(baffle) 구멍을 통하여 유출되면서 호기조 내에서 순환되는 것을 확인하였다.

기존의 반응기 구조는 호기조, 혐기조를 구조적으로 구분하여 순환펌프로 폐수를 강제적으로 순환시키면서 폐수를 처리하는 시스템으로 내부 순환 펌프 동력에 많은 에너지가 소비될 뿐만 아니라 호기조, 혐기조를 각각의 공간으로 구분 설치하여야 하므로 설치공간도 많이 소요되었다. 본 연구에 사용된 반응기는 호기조, 혐기조를 단일 구조로 구성하여 반응기 상부는 호기조 반응, 하부는 혐기조 반응으로 구분하여 호기조 하부의 산기관의 폭기에 의하여 폐수를 순환시키면 폐수가 반복 순환되면서 산소를 공급하는 호기성조건을 형성

하고 상부의 overflow 작용으로 폐수는 호기성 외부 공간을 따라 하부 혐기조로 유입된다. 하부 구조는 산소공급이 차단되므로 자연스럽게 혐기성 상태를 유지하게 되는 단일구조이다. 폐수의 유입은 혐기조 하부로 유입시킴으로 혐기성 상태에서 인을 방출함과 동시에 탈질화 과정을 유도하였으며, 상부의 호기성 조건에서 유기물의 산화 및 질산화 과정을 유도함과 동시에 잉여슬러지에 인의 과잉섭취(luxury uptake)를 유도하여 배출하므로 처리수에서 인의 함유량을 최소화 시킨 후 분리막(membrane)에 의해서 처리수가 유출하게 된다.



4.2. 활성 슬러지의 MLSS 변화

실험 준비단계에서 실험실 내에 배양된 농축 슬러지를 반응기에 계속 투입하였으며 운전시간에 따른 활성 슬러지 변화를 Fig. 5에 나타내었다. 활성 슬러지 농도가 3,030mg/L 유지되었을 때 실험을 시작(지점 a)하였으며, 외부의 활성슬러지 공급 없이 반응기운전을 계속하였다. 운전시간의 경과함에 따라 MLSS 농도가 떨어지기 시작하면서 실험 시작 12일 경과후에는 최저 532mg/L에 도달하였다. 활성 슬러지를 이용한 생물반응에서는 호기조 내에서 일정 농도 이상의 MLSS를 유지하는 것이 중요하다. 호기조의 MLSS의 일정 농도를 유지하기 위하여 반응기 하부 혐기조에서 활성슬러지를 채취하여 호기조 상부에 500mL씩 하루에 1회 투입(지점 b)하면서 호기조의 MLSS 양을 측정하였다. 그러나 호기조에 MLSS를 500mL씩 투입하여도 반응기의 MLSS 농도 증가현상이 뚜렷하게 나타나지 않으므로 실험실의 배양된 농축슬러지 500mL를 채취하여 호기조에 투입(지점 c)하였다. 또한 호기조 내 폐수의 순환 작용으로 overflow되어 혐기조로 유입되는 활성슬러지의 양을 조절하기 위하여 호기조 상부에 걸음망(sieve : 200mesh, sus 304)을 설치(지점 c)하고 MLSS 농도를 일정량 이상 유지하도록 하였다. 호기조의 MLSS 농도가 증가하다가 떨어지는 현상을 방지하기 위하여 농축슬러지 1,000mg/L를 다시 투입(지점 d)하면서 호기조의 MLSS 농도를 유지하였다. 반응기 운전시간 경과와 MLSS 농도 변화가 큰 차이를 보이지 않으므로 호기조에 투입되는 농축슬러지를 500mg/L씩 감소 투입(지점 e)하며 시험 조건들을 면밀히 관찰하면서 실험을 계속하였으며, 반응기 운전시간이 경과할수록 실험장치의 구조적 문제점들을 분석, 보완할 필요성이 있어 반응기의 실험을 끝냈다(지점 f).

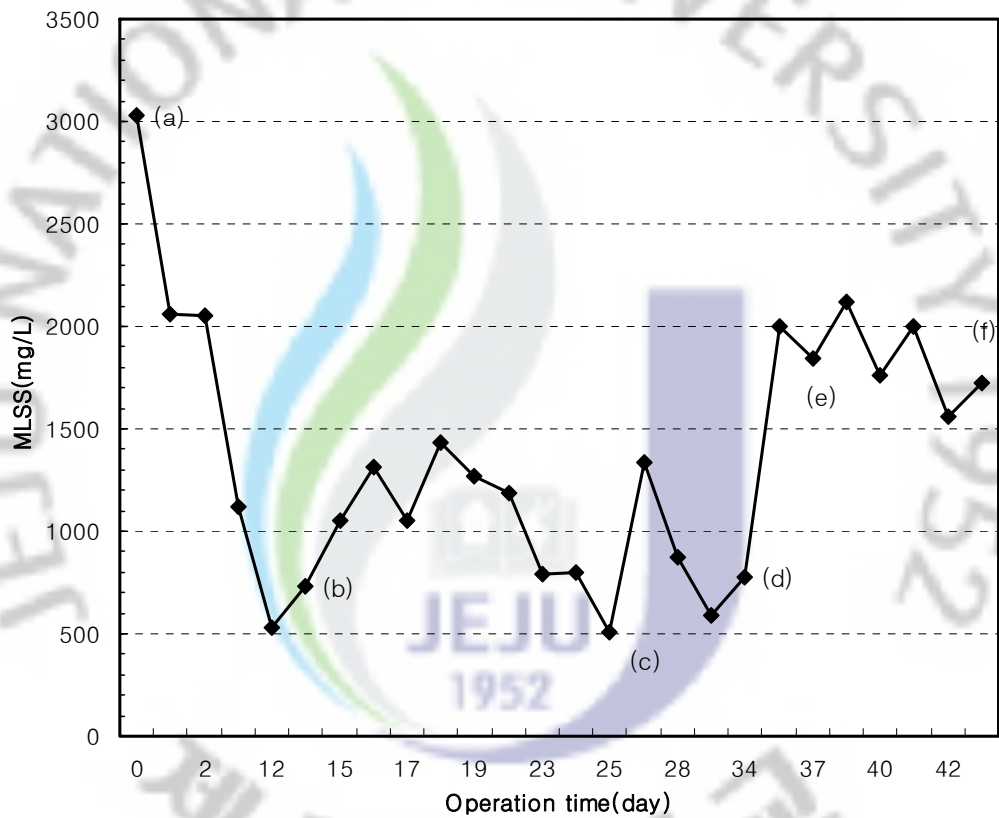


Fig. 5. Variations of MLSS as a function of operation time.

4.3. 유기물의 제거

운전시간에 따른 활성 슬러지의 농도 변화와 유입폐수의 유기물의 변화량 및 제거효율(%)의 변화를 Fig. 6 및 Fig. 7에 각각 나타내었다. 운전시간에 따라 활성 슬러지 농도는 많은 변화를 나타내었지만 유기물의 제거는 안정적으로 높은 제거율을 유지하였다. 실험에 사용한 합성폐수 CODcr 농도는 410mg/L으로 호기성 조건에서 생물학적으로 처리하므로 운전상의 문제점은 나타나지 않았다. 유기물제거는 호기조의 MLSS 농도의 변화에 관계없이 유기물이 산화되는데 필요한 산소가 충분히 공급된다면 유기물 제거효율에는 영향을 미치지 않는 것으로 확인되었다. 본 실험 조건하에서 처리수의 유기물 평균농도는 1.93mg/L이었고, 유기물의 평균 제거율은 99.53%로 높은 제거효율을 나타내었다. 또한 반응기 호기조 내 폭기(aeration)에 의해 유기물 대부분을 제거되었다는 사실로부터 호기조 내에서 폐수가 충분히 교반되며 순환이 원활히 이루어지고 있다는 것을 확인할 수 있었다.

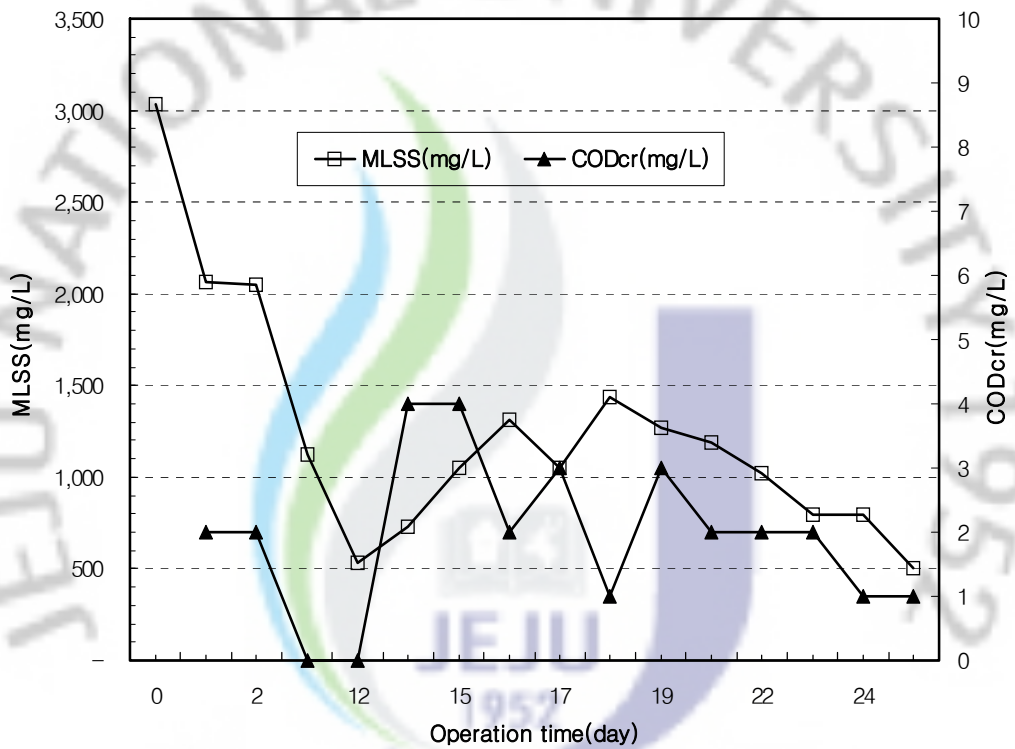


Fig. 6. Variations of MLSS and CODcr as a function of operation time.

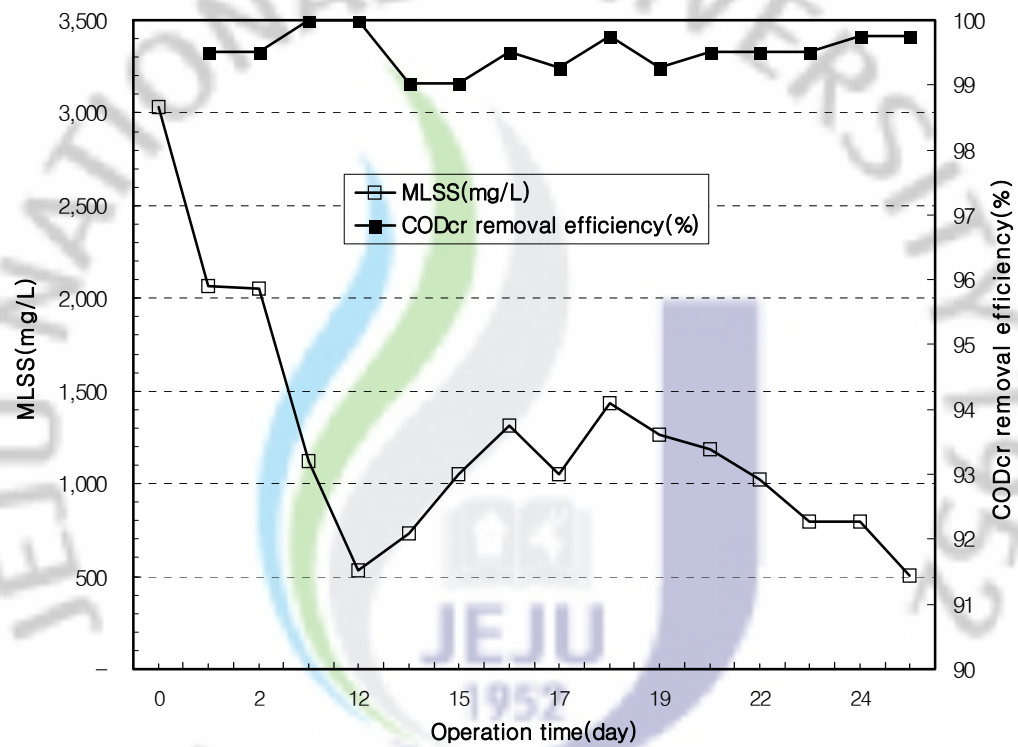


Fig. 7. Variations of MLSS and CODcr removal efficiency as a function of operation time.

4.3 총질소(T-N)의 제거

운전시간에 따른 활성 슬러지의 농도 변화와 유입폐수의 질소 농도 변화량 (mg/L) 및 제거효율(%)의 변화를 Fig. 8 및 Fig. 9에 각각 나타내었다. 유입 폐수 T-N의 농도는 42mg/L를 유지하면서 공급하였다. 처리수의 T-N의 농도는 최소 5.4mg/L(제거효율 87.14%)에서 최대 23.2mg/L(제거효율 44.76%)로 큰 변동을 보였으며, 평균 제거효율은 58.46%로 T-N의 제거율은 MLSS의 농도변화에 매우 민감하게 변함을 관찰할 수 있었다. 즉, 호기조의 MLSS 농도가 높을수록 T-N 제거효율이 높게 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 이는 호기성 조건에서 활성슬러지의 농도가 높을수록 질산세균에 의한 생물화학적 산화반응으로 질산성질소로 산화가 용이하게 이루어지기 때문으로 판단된다. 처리수의 평균 농도는 17.45 mg/L로서 고도처리방류수 수질기준인 20mg/L 와 비교할 때 처리효율은 다소 높지 않지만 본 연구에서 개발한 반응기가 폭기에 의한 일체형 연속식 반응기임을 고려할 때 T-N의 제거효율은 비교적 양호한 것으로 판단된다.

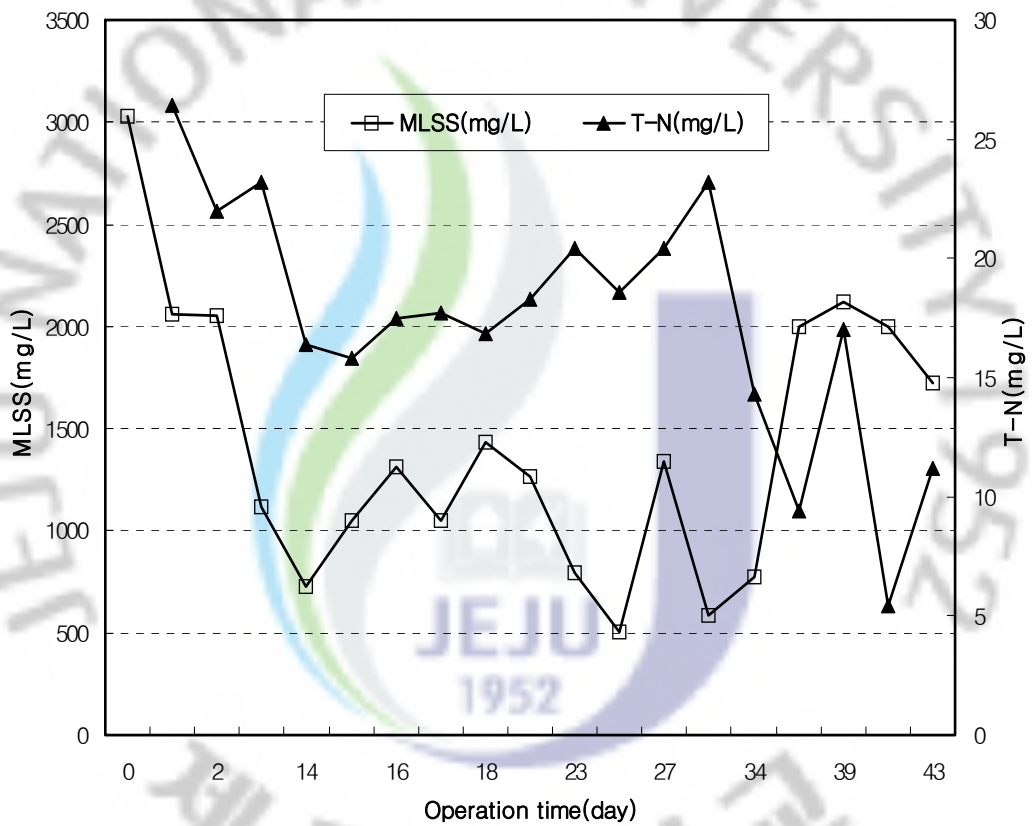


Fig. 8. Variations of MLSS and T-N as a function of operation time.

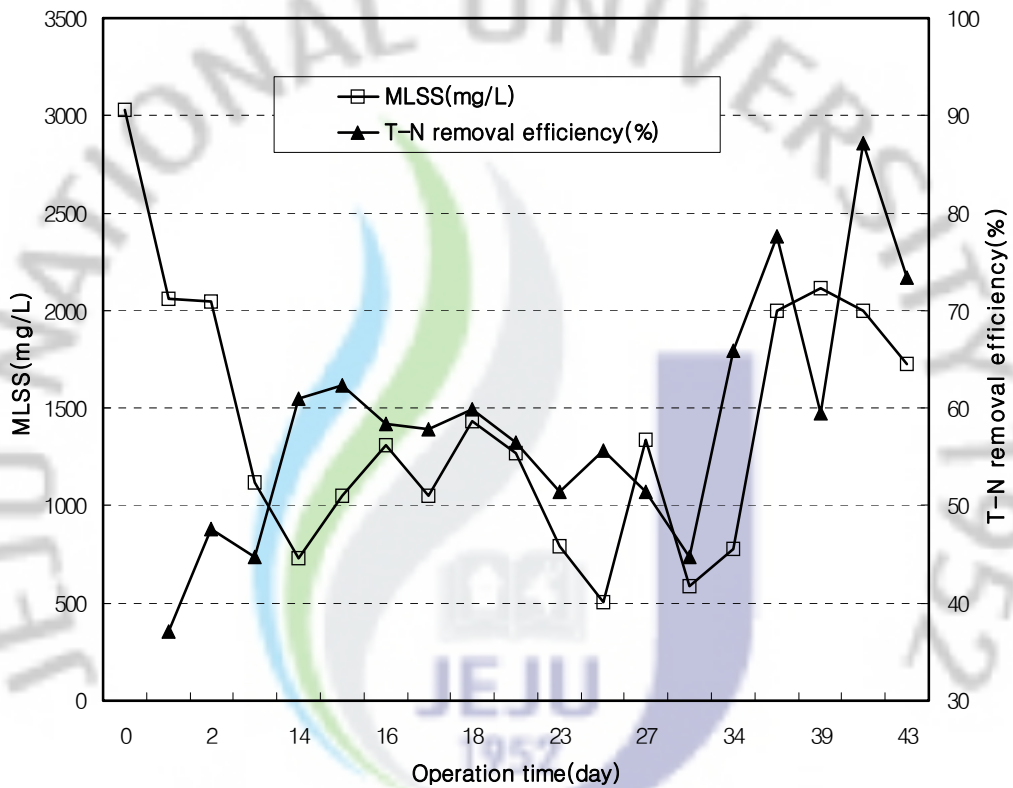


Fig. 9. Variations of MLSS and T-N removal efficiency as a function of operation time.

4.4 총인(T-P)의 제거

운전시간에 따른 활성 슬러지의 농도 변화와 처리수의 인 농도 변화량 (mg/L) 및 제거효율(%)의 변화를 Fig. 10 및 Fig. 11에 각각 나타내었다. 실험실 합성폐수 T-P의 농도는 3.95mg/L로서 폐수를 연속적으로 공급하였다. 운전시간의 경과에 따라 초기 처리수의 T-P 농도는 0.46mg/L(제거효율 88.44%)로 낮은 농도를 나타내다가 최대 3.62mg/L(제거효율 8.35%)로 높은 농도를 나타내면서 실험기간 동안 불규칙한 변화를 나타내었다. T-P의 평균 제거효율은 42.39%로 다른 공법에 비하여 낮게 나타는 문제점이 발생하였다. 생물학적 인 제거 반응은 활성 슬러지를 혐기성·호기성조건을 반복적으로 노출시킴으로서 혐기성 조건하에서 인을 방출하고 호기성 조건하에서 미생물이 인을 과잉섭취(luxury uptake)하게 하여, 잉여슬러지 상태로 외부에 배출하므로써 인을 제거하는 방식이다. 호기조의 MLSS 농도가 떨어질수록 처리수의 T-P 농도가 높게 나타났으며, 제거효율은 감소하였다. 실험 초기 MLSS 농도가 2,000mg/L 이상 높게 나타났을 때는 T-P 제거효율이 88% 이상 유지되었으나 MLSS 농도가 792mg/L로 낮은 상태에서는 T-P 제거효율이 19.9%로 낮게 나타났다. 이는 반응기의 혐기성 조건에서는 무기인 방출이 충분히 이루어지고 있으나 호기성 조건에서 활성슬러지 농도를 일정하게 유지할 수 없는 조건이 형성되어 미생물이 인을 충분히 흡수되지 않은 상태에서 처리수로 유출된 것으로 파악된다. 처리수의 인의 농도는 반응기의 활성슬러지 농도와 밀접한 관계에 있으므로 호기성 반응기 내에 활성슬러지 농도를 높게 유지할 수 있도록 T-N 및 T-P의 제거효율을 높일 수 있는 반응기의 구조적 개선에 대한 검토가 필요하다. T-P의 경우도 T-N과 유사하게 MLSS 농도변화에 매우 의존함을 알 수 있었다.

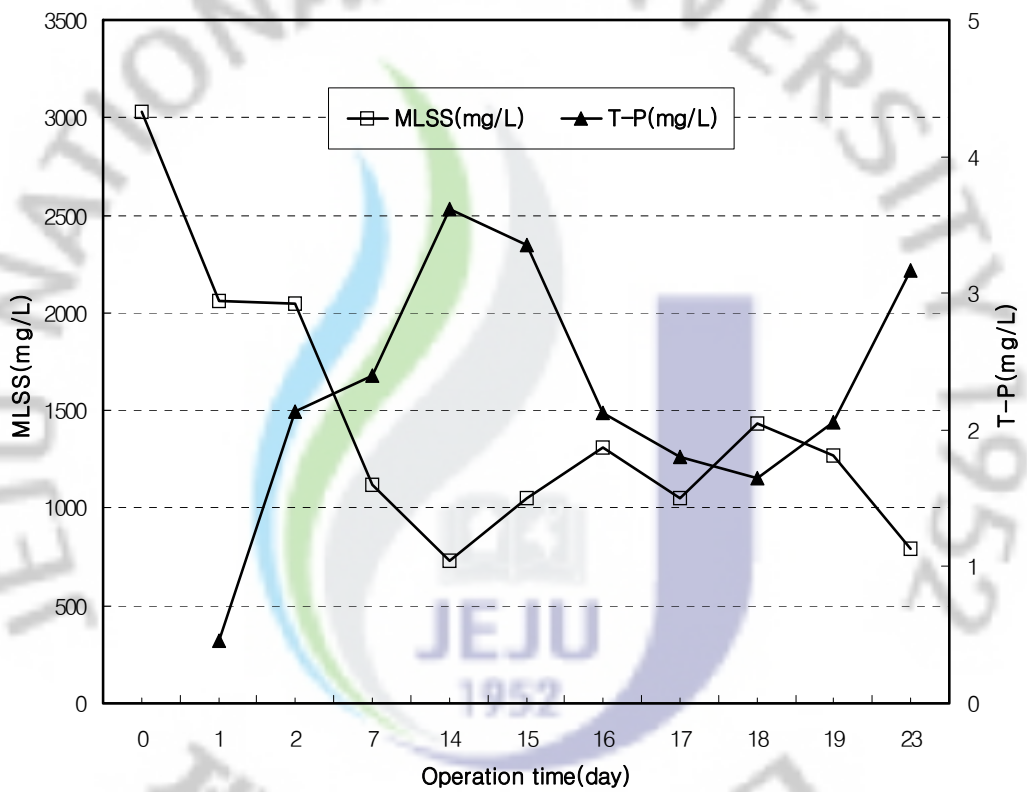


Fig. 10. Variations of MLSS and T-P as a function of operation time.

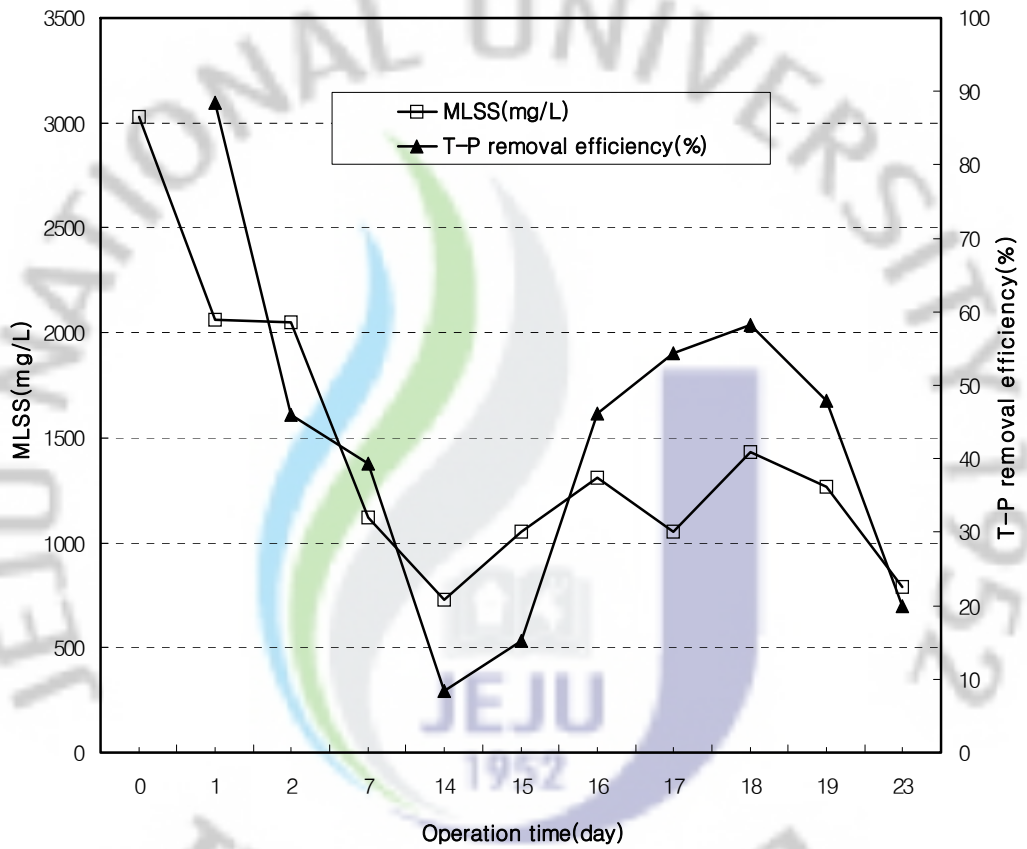


Fig. 11. Variations of MLSS and T-P removal efficiency as a function of operation time.

V. 결론

폭기에 의해 폐수가 혐기조에서 호기조로 내부 순환되는 침지형 막생물반응기를 설계 제작하고, 이반응기의 폐수 처리 특성을 살펴본 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 반응기는 상부의 호기조, 하부의 혐기조로 일체형 구조로 구성하였으며, 호기조 하단에 연결된 혐기조 배플(baffle)의 구멍을 통하여 폐수 순환이 원활히 이루어짐을 확인할 수 있었다.
2. 유입된 폐수의 유기물 제거는 호기조 폭기(aeration)에 의해서 유기물 대부분이 제거되었으며 활성 슬러지의 농도와는 관계가 없음을 알 수 있었다. 유기물 평균 제거효율은 98.24%로서 매우 높게 나타났으며, 처리수의 CODcr 평균농도는 1.93mg/L이었다.
3. 총질소 제거 효율은 호기조의 활성 슬러지 농도에 의존하였으며, 호기조의 활성 슬러지 농도가 높을수록 높게 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 유입폐수의 평균 질소 제거 효율은 58.46%이었으며, 처리수의 총 질소 농도는 평균 값으로 17.45 mg/L이었다.
4. 총인 제거 효율은 총질소 제거와 같이 활성 슬러지 농도에 의존하였으며, 호기조의 활성 슬러지 농도가 감소할수록 제거 효율이 낮게 나타났다. 이는 호기성 조건에서 활성 슬러지 농도를 일정하게 유지할 수 없어 미생물이 인을 충분히 흡수되지 않은 상태에서 처리수와 함께 인이 유출되기 때문임을 알 수 있었다. 유입폐수의 평균 인 제거 효율은 42.39%이었으며, 처리수의 총

인의 평균 농도는 2.28mg/L이었다.



참고문헌

Chang,I.S., Lee,C.H., Ahn, K.H., 1999, Membrane filtration characteristics in membrane-coupled activated sludge system: The effect of structure on membrane fouling, Separation Science and Technology, 34(9), pp1748~1758

첨단환경기술, 2006. 10, 환경관리연구소, pp91~96

첨단환경기술, 2006. 11, 환경관리연구소, pp58~66, pp96~103

대한상하수도학회. 2007, 한국물환경학회, pp87~100

대한환경공학회지. 29권. 12호, 2007, Special Feature, Case studies and R & D on membrane in K-water, pp1318~1325

Fane, A.G., 1996, Membrane for water production and wastewater reuse, Desalination Vol. 106, pp11~25

Hang-Sik Shin and Hung-Suck Park, 1991, Enhanced nutrient removal in porous biomass carrier sequencing batch reactor(PBCSBR), Wat. Sci. Tech., Vol. 23

환경부, 2002, 기존 하수처리장 고도처리시설 설치사업 업무처리일반지침수도법, pp9~12

환경부, 2007, 하수처리수 재이용 정책방향, pp49~85

환경부, 2009, 수질 및 수생태계 보전에 관한 법률 시행규칙, pp93~98

In-Jong Kang, Chung-Hak Lee, Kyu-Jin Kim, 2003, Characteristics of microfiltration membrane in a membrane coupled sequencing batch reactor system. Water Research. 37, pp1192~1197

장인성, 1996, Membrane fouling characteristics in membrane-coupled activated sludge system, 서울대학교 박사 학위 논문

조순행, 2002, 물환경개론, 도서출판 동화기술, pp27~68

Krampe, J. and Krauth, K., 2001, Sequencing batch reactor with submerged hollow fiber membranes for the biomass separation, Water Sci. Technol., Vol. 43, No. 3

김갑수. 김영란, 2002, 중수도·빗물처리기술 및 적용, 환경관리연구소, pp68~97

김옥란, 2005, 막결합형-생물반응기에서 생물막 특성연구, 서울대학교 석사 학위 논문, pp4~15

이종형. 신원욱. 박영진. 김이현. 남일기, 2008, 상하수도공학, 구미서관, pp362~404

Mark J.Hammer, 1977, Water and Waster water technology, john wiley and sonc inc.

Octave Levenspiel, 2000, Chemical reaction engineering. Third Edition, pp89~276

Ozaki, N. Yamamoto, K., 2001, Hydraulic effects on sludge accumulation on membrane surface in crossflow filteration, Water Res., 35, pp3137~3146

Stephenson, T., Judd, S., Jefferson, B., Brindle, K., 2000, Membrane bioreactor for wastewater treatment, IWA Publishing, London

신동환. 백병도. 장인성, 2008, 침지형 생물반응기 공정에서 플럭스 향상을 위한 공기 세척 효과에 관한 연구

Tanya A, Jeanne M, Sheldon J., 1996, Effect of HRT, SRT and temperature on the performance of activated sludge reactors treating bleached kraft mill effluent. Wat. Res. 30(4), pp799~810

Ueda T., Hata K. and Kikuoka Y., 1996, Treatment of domestic sewage from rural settlements by a membrane bioreactor, Wat.Sci.Tech,Vol.34, No.9, pp189~196

Vogelpohl. A., 2000, Wastewater treatment by the HCR Process, Acta biotechnol., Vol.20, No.5, pp119~128

Wilen, Britt-Marie, and PETER VALMER, 1999, The effect of dissolved oxygen concentration on the structure, size and size distribution of activated sludge flocs. *Water Research*, 33(2), pp391~400

Xia Huang, Ping Gui, Yi Qian, 2001, Effect of sludge retention time on microbial behaviour in a submerged membrane bioreactor. *Process Biochemistry*. 36, pp1001~1006

Zhimin Fu, Fenglin Yang, Feifei Zhou and Yuan Xue, 2000, Control of COD/N ration for nutrient removal in a modified membrane bioreactor(MBR) treating high strength wastewater, *Bioresource Technology*, Vol. 100, pp136~141

감사의 글

인생에 또 한번의 도전으로 시작된 대학원 생활, 내 삶의 최종 목적지를 향해 가는 순간순간마다 잠시 쉬어 가고 싶은 마음은 지금도 간절하다. 항상 시간에 쫓기는 듯한 일상에서 전공서적을 접하는 모습이 왠지 어색하게 느껴지던 2년 반의 수업시간들, 그리고 그 결실을 건으려는 듯 논문을 집필하는 자신이 바보인 듯 부끄럽게 느껴진다. 기계공학 학사학위를 받고서 20여년 시간이 지난 오늘에 화학공학 석사학위를 준비함은 시대의 기술자로서의 자존심을 건 투쟁인 듯 하다. 젊고 유능한 공학도들이 사회 여러 분야에 그 소임을 다하고 있으리라 믿지만 현세와 같은 복합적인 세상에서는 자신의 전공만을 고집하지 말고 관련 유사 전공에도 더한 열정을 갖고 공부할 것을 경험으로, 선배님들의 말을 빌어 간절히 바란다.

직장 생활하면서 틈틈이 공부했던 알은 지식만을 간직했던 자신에게 새로운 분야의 전공 지식 및 많은 가르침과 조언을 주신 교수님들께 감사의 마음을 전합니다. 특히, 기계공학 전공 출신이 화학공학을 공부하는 자신에 많은 의구심을 가지고 시간이 흘러감에 따라 자신감과 성취감을 일구워 내게 해주신 현영진 교수님, 이상백 교수님, 김민찬 교수님, 목영선 교수님 그리고 마지막 까지 저를 독려하여 이끌어 주신 이호원 지도 교수님께 진정 감사드립니다. 그리고 실험실에서 많은 것을 가르쳐주고 실험에 같이 참여하여 논문 작성에 절대적인 도움을 준 김승건 선생께 감사드립니다.

밤늦은 시간까지 업무와 공부를 병행함이 힘겨운 만큼, 저의 곁에서 집안 살림과 자녀들을 바른 품성으로 자랄 수 있도록 인고의 시간을 지낸 아내 김미영 그리고 나의 소중한 경필, 아미에게 고맙다는 마음을 전합니다. 이제는 보다 더 넓은 세상에서 진정한 기술자로서의 책무를 다할 것을 교수님, 주위의 은혜를 베풀어주신 분들 그리고 저의 회사 직원들에게 약속드립니다. 마지막으로 오래 전 먼 객지에서 혼자 공부할 때 아침저녁으로 촛불을 밝히시고 아들의 안녕과 성공을 기원하시던 어머니의 영전에 이 학위를 바칩니다.