

침지식 MBR을 이용한 수산물 폐수처리장 운영에 관한 연구

최용범¹, 이해승², 한동준², 권재혁^{1*}

¹강원대학교 지구환경시스템공학과, ²강원도립대학 소방환경방재과

A Study on Management of Seafood Wastewater Treatment Facility using Submerged MBR

Yong-Bum Choi¹, Hae-Seung Lee², Dong-Joon Han², Jae-Hyoun Kwon^{1*}

¹Dept. of Earth and Environmental Engineering, Kangwon National University

²Dept. of Five-Environmental Disaster, Gangwon Provincial College

요약 수산물 가공폐수의 배출특성 결과, 불규칙한 유입부하로 안정적인 처리에 어려움이 있는 것으로 조사되었다. 수산물 가공폐수와 같은 고농도 유기성 폐수처리에는 가압부상조 운영이 매우 중요하다. 가압부상조의 운전 factor를 조사한 결과, A/S ratio 0.05(설계기준 0.01), 가압공기 압력은 8bar(설계기준 6bar), 가압탱크 압력은 6bar(설계기준 4.5bar), HRT는 60sec(설계기준 10sec)로 운영하였다. 또한 재순환율은 40% 이상(설계기준 30%), 표면 부하율은 13.7m³/m²·hr 이하(설계기준 17.7m³/m²·hr 이하)로 변경하여 최초 설계기준에 비하여 운전 factor를 유입특성에 따라 변화시켜 가압부상조의 성능을 향상시켰다. 유입부하 검토결과, BOD는 유입 설계기준 대비 140.7%, COD_{Mn}는 120.32%, SS는 106.3%로 조사되었으며, T-N은 135.5%, T-P는 173.3%로 설계기준보다 높게 유입되고 있었다. 처리시설의 연간 운영비를 조사한 결과, 슬러지 처리비(27.7%)와 약품비(26.0%)가 높은 비중을 차지하였으며, 슬러지 처리비는 해양투기 금지로 더욱 상승할 것으로 판단된다. 수산물 가공폐수 처리단가는 1톤당 3,858원으로 하수처리비용(142.6원/ton)에 비해 27배 이상으로 높게 조사되었는데, 이는 고농도의 유기물과 영양염류를 포함하고 있기 때문으로 판단된다.

Abstract The survey revealed that, due to the discharge characteristics of seafood wastewater, irregular inflow loads were caused, making it difficult to treat the wastewater safely. It is crucial for the operation of pressure and floating tanks for the treatment of high-concentration organic wastewater such as seafood wastewater. The survey of operation factors for the pressure and floating tanks revealed this: A/S ratio 0.05 (design criteria 0.01), the pressurized air pressure 8bar(design criteria 6bar), the pressure tank pressure 6bar (design criteria 4.5bar), and HRT 60sec(design criteria: 10sec). Also, the recirculation rate was changed to over 40%(design criteria: 30%), and the surface load rate was changed to under 13.7m³/m²·hr(design criteria: under 17.7m³/m²·hr); thus, compared to the initial design criteria, the operation factors were changed according to inflow characteristics, thus enhancing the pressure and floating tank performance. The survey of inflow load revealed BOD 140.7%, COD_{Mn} 120.32%, and SS 106.3%, compared to the inflow design criteria, as well as T-N 135.5% and T-P 173.3%, higher than the design criteria. The survey of the treatment facility annual operation cost revealed high portions in sludge treatment cost(27.7%) and chemicals costs(26.0%), and the sludge treatment cost will likely further increase due to the ban on ocean dumping. The unit cost for the treatment of seafood wastewater was found to be KRW 3,858 per ton, more than 27 times higher than the sewage treatment cost(KRW 142.6/ton), presumably because the seafood wastewater contains high-concentration organic substances and nutritive salts.

Keywords : DFA process, High organic wastewater, Membrane bioreactor, Saline wastewater, Seafood wastewater

2015년도 강원대학교 대학회계 학술연구조성비로 연구하였음(관리번호-201510017)

This study is supported by 2015 Research Grant from Kangwon National University(No. 201510017)

*Corresponding Author : Jae-Hyoun Kwon(Kangwon Univ.)

Tel: +82-33-570-6577 email: environ4@kangwon.ac.kr

Received October 5, 2015

Revised November 6, 2015

Accepted November 6, 2015

Published November 30, 2015

1. 서론

우리나라 수산물 가공업체는 대부분 소규모 형태로 유지되고 있으며, 가공공정에서 발생하는 폐수는 대부분 재래식 처리공법으로 처리되고 있다[1-3]. 그러나 수산물 가공폐수는 고농도의 부유물질과 유기물 그리고 영양염류뿐 아니라 염분과 유분까지 포함하고 있어 재래식 폐수처리 방식으로는 안정적인 유출수를 확보하기 어렵다. 또한 수산물 가공품 원료 특성상 계절적으로 성수기(peak season)와 비수기(off-season)로 구분되어 폐수 발생량 및 수질농도가 매우 불규칙한 특성을 가지고 있다[4].

현재 수산물 가공산업이 활발한 지자체에서는 지역특성에 적합한 수산물가공단지를 조성하고 있는데, 이는 각 지역에 산재해 있는 수산물 가공업체를 한 곳으로 통합함으로써 타 지자체와 산업적으로 차별화 시키고 발생폐수를 통합처리 하여 지역의 환경오염도 예방할 수 있는 장점이 있다. 일반적으로 농공단지 조성시 입주 업체에서 발생하는 폐수 특성을 파악하여 폐수종말처리시설을 설계하게 되는데, 농공단지 특성상 오염물질 농도가 하수에 비하여 매우 높기 때문에 하수처리에 적용되고 있는 처리 공법의 설계인자로는 수산물 가공폐수를 처리할 수 없다.

현재 이러한 농공 또는 산업단지에서 발생하는 고농도 폐수에 가장 많이 적용되고 있는 공법이 MBR(Membrane Bio-Reactors) 공법이다. MBR 공법은 재래식 활성슬러지 공정보다 소요부지 면적이 적고, 수질규제에 능동적으로 대응할 수 있으며, 효율적으로 시스템을 운영할 수 있는 것으로 평가되고 있다[5]. 또한 인구증가와 도시화로 인해 물 수요 증가로 보다 엄격해지는 수질규제에 맞추기 위해 MBR 기술은 지속적으로 증가될 것으로 전망되고 있다[6].

MBR 공법은 일반적으로 침지식(Immersed type)과 순환식(Side stream)으로 구분할 수 있는데, 침지식 형태가 순환식 보다 상대적으로 낮은 운전압력과 운전비용(에너지 비용 약 1/40~1/10 수준), 높은 플럭스와 투과율 때문에 2003년부터 2005년까지 유럽에서는 99% 이상이 침지식 형태가 설치되었다[7]. 국내는 하·폐수 재이용을 정책적으로 선도하기 위해 2010년 「물의 재이용 촉진 및 지원에 관한 법률」이 제정되었고, ‘물 재이용 기본계획(2011~2020)’이 수립되어 본격적인 하·폐수 재

이용을 추진함에 따라 국내 MBR 시장이 급성장할 것으로 예상된다.

본 연구는 현재 G시에서 운영하고 있는 농공단지 폐수종말처리시설에 대한 운영 실태에 대하여 연구하였다. 현재 운영중인 농공단지 폐수처리시설은 침지식 분리막 공법을 수산물 가공폐수처리에 적용되고 있다. 본 연구는 현재 가동 중인 수산물 가공폐수처리시설의 건설당시 제시한 운전인자와 실제 가동 중인 운전인자를 비교함으로써 효율적인 수산물 가공폐수처리 방안을 제시하고자 한다.

2. 공정개요 및 실험방법

2.1 공정개요 및 유입수질

연구대상 폐수처리시설은 도시생활 환경개선 및 공공보건 향상에 기여하고 방류수역의 생태계 보전을 위하여 2,600m³/day 규모의 처리시설을 2010년 11월 30일에 준공하여 가동하고 있다.

본 폐수종말처리장의 공정흐름은 전처리 시설로 스크린, 침사지 및 유량 조정조, 1차 전처리 시설로 가압부상조(DAF; Dissolved Air Flotation System)가 설치되었다. 주처리 공정인 침지식 막여과 공법은 기존 생물 반응조에서 최종 침전지를 설치하지 않고 무산소조/혐기조/호기조(분리막조)/탈기조로 구성되어 있으며, 3차 처리시설은 미처리된 질소를 제거하기 위하여 황탈질조를 운영하고 있다. 2013년도 유입 월평균 수질농도는, SS는 843.7~1,806.7mg/L, BOD는 3,303.3 ~ 4,643.3mg/L로 고농도의 유기물을 함유하였다. 영양염류인 T-N은 357.3~542.0mg/L, T-P는 62.52~78.0mg/L로 조사되었으며, 수산물 가공폐수 특성상 유분(n-Hexan)이 30~500mg/L, 염분농도가 1,000~1800mgCl/L로 조사되었다.

Table 1. Characteristics of raw wastewater.
(unit : mg/L, except pH)

Items	Range	Average
pH	4.3 ~ 6.6	5.6
SS	843.8 ~ 1,806.7	1,309.8
TBOD ₅	3303.3 ~ 4,643.3	3,936.1
COD _{Mn}	1376.1 ~ 1,924.2	1,537.1
T-N	357.3 ~ 542.0	422.5
T-P	62.5 ~ 78.0	67.7
n-Hexane	30 ~ 300	185
Salinity(as Cl)	1,160 ~ 2,250	1,600

2.2 운전 및 분석방법

연구기간동안 유입유량은 $560 \sim 2,028 \text{ m}^3/\text{day}$ 로 매우 불규칙하게 유입되고 있으며, 생물 반응조 체류시간(HRT)도 불규칙한 유입특성에 따라 $60 \sim 218 \text{ hr}$ 로, 미생물 농도는 $6,350 \sim 16,000 \text{ mg/L}$ 폭넓게 운전되었다. 이러한 운전 이유는 수산물 가공폐수의 발생이 비수기와 성수기로 구분되기 때문으로 판단된다.

Table 2. Operational conditions of biological reactor.

Items	Range
Influent flow rate(m^3/day)	560 ~ 2,028
HRT(hr)	60 ~ 218
MLSS	6,350 ~ 16,000
SRT(day)	21.8 ~ 89.6
Recycling rate(%)	500 ~ 700
Temperature($^{\circ}\text{C}$)	16.4 ~ 35.6
Organic loading rate($\text{kgTBOD}/\text{m}^3/\text{d}$)	0.264 ~ 1.159
F/M ratio($\text{kgBOD}/\text{m}^3 \cdot \text{MLSS} \cdot \text{day}$)	0.022 ~ 0.098

3. 결과 및 고찰

3.1 유입폐수 특성

Fig. 1은 연구기간동안의 월별 유입유량 분포를 제시하였다. 일별 유입유량은 $560 \sim 2,028 \text{ m}^3/\text{day}$ 로 조사되었으며, 일최대 폐수 발생량은 $2,028 \text{ m}^3/\text{day}$ 로 설계용량($2,600 \text{ m}^3/\text{day}$)의 78.0%였으며, 최소유량은 $560 \text{ m}^3/\text{day}$ 로 설계용량의 21.5%로 유입유량의 편차가 큰 것으로 조사되었다. 이러한 이유는 수산물 가공폐수의 경우 계절적인 비수기와 성수기가 뚜렷하기 때문에 폐수발생량의 변동폭이 크기 때문이다[1],[8-9].

시간대별 유량분포는 Fig. 2에 제시하였는데, 새벽(0:00~03:00)에 폐수 발생량이 많고, 낮 시간대에 발생량이 감소되는 경향을 나타냈는데, 이는 수산물 가공시간이 주로 야간에 이루어지기 때문으로 조사되었다. 일부 주간에 유량이 증가하는 경향을 나타냈는데 이는 작업종료 이후 청소수의 유입에 기인한 것으로 조사되었다

수산물 가공폐수는 배출공정(세척, 해동, 가공, 청소)에 따라 발생하는 유량 및 농도의 차이가 매우 심하고, 성수기와 비수기시에는 폐수 발생량이 매우 불규칙한 특성이 있다. 또한 자동화 작업보다 수작업이 많기 때문에 배출공정별 발생하는 폐수의 유량과 농도는 용수 사용량

등의 작업조건에 따라 매우 다양하게 조사되었다[10-11]. 특히 폐수 유입이 적은 휴가 및 연휴, 비수기의 불규칙한 폐수유입은 폐수처리시설의 안정적인 운영을 어렵게 하는 요인으로 작용하고 있다.

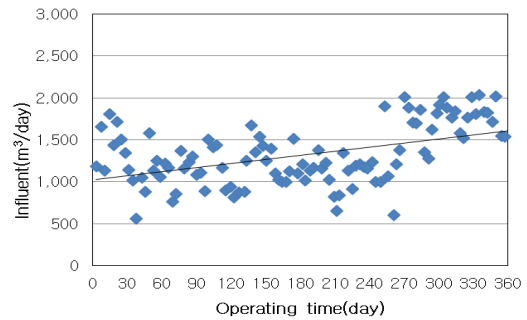


Fig. 1. Variation of influent during operating time

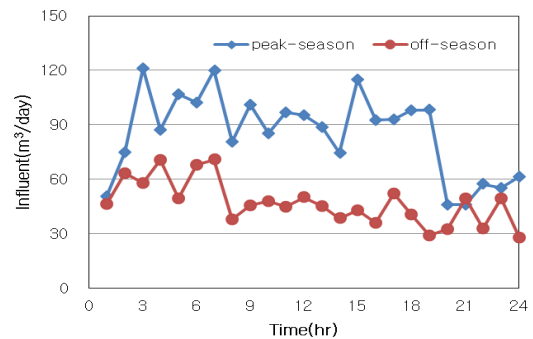


Fig. 2. Variations of hourly influent.

3.2 생물반응조 운전 현황

Fig 3은 운전기간동안의 생물 반응조내 미생물 농도와 수온 변화에 대한 추이를 제시하였다. 생물 반응조 수온은 $16.4 \sim 35.6^{\circ}\text{C}$ 로, 미생물 농도는 $6,350 \sim 16,000 \text{ mg/L}$ 로 고농도를 유지하는 것으로 조사되었다. 생물 반응조내 미생물 농도를 높게 유지할 수 있는 원인은 2차 침전조 대신 침지식 분리막이 설치되어 있기 때문이다. 생물 반응조 수온은 고농도의 미생물이 유기물질을 분해되는 과정에서의 발열반응으로 인하여 높게 유지되고 있는데, 이는 생물학적 처리에서 동절기에 처리효율이 감소되는 것을 방지할 수 있는 장점으로 작용 할 수 있다. 일반적인 처리장은 동절기에는 온도 저하로 미생물 활성도 저하를 대비하여 미생물 농도를 비교적 높게 유지하고, 하절기에는 낮게 운영하나, 본 처리장은 미생물 농도를 동절기와 하절기에 관계없이 성수기에는 높게 비수기에는

낮게 유지하는 것으로 조사되었다.

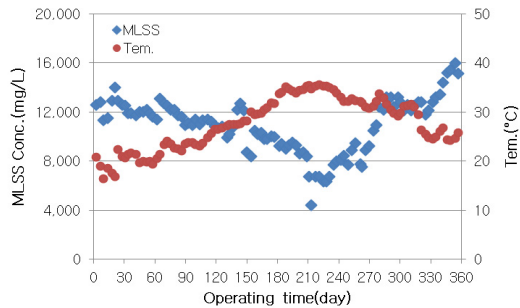


Fig. 3. Variations of Temperature & MLSS concentration during operating time.

3.3 전체 처리효율 검토

Fig. 4에서 8에는 처리시설의 유기물과 영양염류의 유입·유출 농도변화를 제시한 것이다.

유입 BOD는 3,303.3~4,643.3mg/L의 고농도였으나, 유출농도는 1.5~2.2mg/L로 평균 제거효율이 99.9%로 매우 높은 제거효율을 나타냈다. COD_{Mn}은 유입이 1,376.4~1,924.2mg/L이었으나 유출이 9.3~19.5mg/L, 제거효율은 98.7~99.4%로 BOD와 마찬가지로 높은 제거효율을 보였다. SS의 유입농도는 843.8~1,806.7mg/L이었으나 유출은 0.4~1.7mg/L로 평균 99.9%의 제거효율을 나타내 대부분의 부유물질이 제거되었다. 유기물 제거효율이 매우 높은 것은 생물 반응조로 유입되는 유입수가 DAF에서 1차적으로 화학적 처리를 거치고, 후속 공정인 생물 반응조에서 충분한 체류시간을 유지하였기 때문으로 판단된다. 특히 호기조 내부에 침지되어 있는 준공사막은 pore size가 0.4 μ m 이기 때문에 고액 분리시 대부분의 부유물질의 제거가 가능하다.

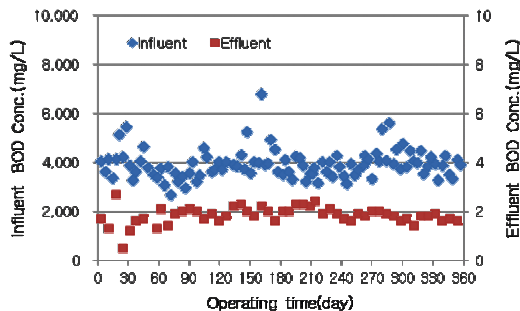


Fig. 4. Variations of BOD concentration of operating time.

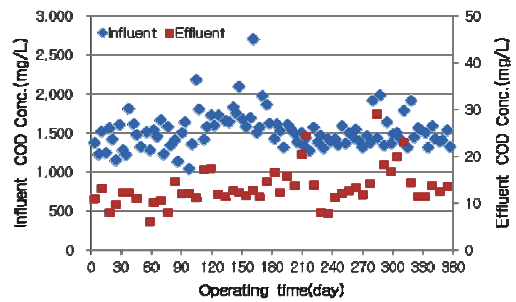


Fig. 5. Variations of COD concentration of operating time.

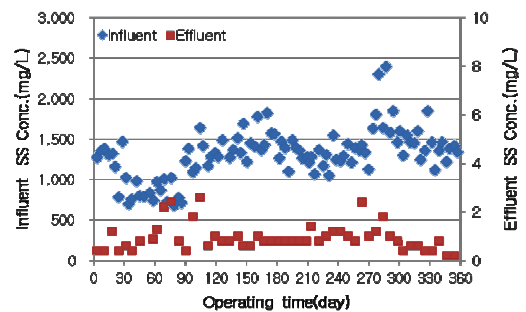


Fig. 6. Variations of SS concentration of operating time.

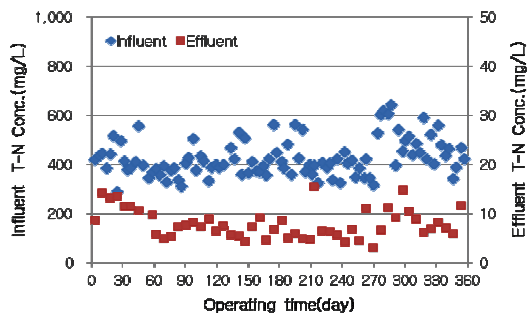


Fig. 7. Variations of T-N concentration of operating time.

영양염류인 T-N의 유입농도 범위는 357.3~542.0mg/L로 고농도의 질소를 함유하고 있었으나, 유출농도는 5.8~12.2mg/L로 평균 제거효율이 98.1%로 매우 높은 것으로 조사되었다. 이러한 이유는 생물반응조에서 충분한 체류시간을 통하여 유기물이 제거되고, 질산화와 탈질 반응이 효과적으로 이루어 졌기 때문으로 판단된다. 또한 수산물 가공폐수와 같이 염분이 함유된 폐수에서 아질산염(NO₂-N)의 축적이 발생하는데 이는 아질탈질(Denitritation)공정을 통하여 질소를 제거할 수 있

다고 보고하고 있는데[12], 본 연구대상 폐수의 경우 염분농도가 평균 1,600mg/L(as Cl)로 조사되어 일부 질소는 아탈질 공정으로 제거되었을 것으로 판단된다.

T-P의 유입농도는 62.5~78.0mg/L 매우 높았으나, 유출 농도는 0.1~0.5mg/L로 평균 제거효율은 99.7%로 높게 조사되었다. 이러한 이유는 DAF에서 적절한 T-P의 제거와 생물 반응조에서 미생물에 의한 세포합성에 이용되는 인(P)의 소모량이 많기 때문이다.

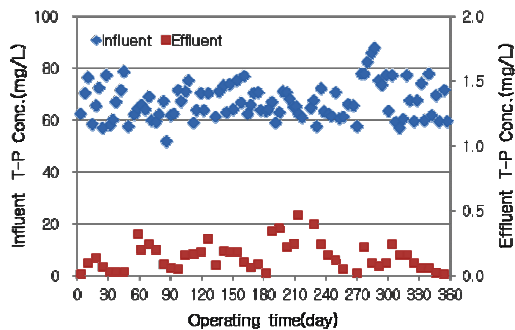


Fig. 8. Variations of T-P concentration of operating time.

3.3 설계 및 실제운전 비교

수산물 가공폐수는 배출유량이 불규칙하고 비수기와 성수기가 구분되기 때문에 폐수처리장 설계당시의 설계 기준과 실제 운영현황에 많은 차이가 발생할 수 있다. 따라서 본 절에서는 실제 운영 자료를 본 처리시설의 설계 기준 인자와 비교·검토하였다.

3.3.1 가압부상조(DAF) 설계인자 검토

DAF의 성능에서 중요한 factor는 A/S ratio (Air/Solids) 이다. A/S ratio는 고형물 농도에 따라 설계 되는데 일반적으로 lab scale의 실험을 통하여 결정한다 [13]. 일반적으로 생활하수와 같이 고형물의 농도가 낮은 경우 A/S ratio를 낮게 유지하나, 수산물 가공폐수와 같이 고농도 고형물을 함유하는 경우에는 A/S ratio를 높게 조정하여야 한다. 수산물 가공폐수와 같이 고농도의 고형물을 함유할 경우, 가압된 공기포화수가 순간적으로 감압될 때 발생하는 미세기포가 부유물질과 충분히 접촉하여 부상되어 제거되어야 한다. 그러나 A/S ratio가 낮을 경우 오염물질과 미세기포의 접촉이 원활하지 않아 안정적인 처리효율을 얻기 어렵다. 일반적으로

로 하수처리장 슬러지의 농축에 사용되는 A/S ratio는 0.005~0.060으로 보고되고 있으며, 본 처리장의 설계기준은 0.01로 제시하고 있었으나, 실제 운영시 만족할 만한 처리효율을 얻기 어려웠다. 따라서 설계기준에서 제시하고 있는 30%의 재순환율을 40% 이상 증가시키고 미세공기 접촉조의 체류시간을 설계기준인 10sec에서 60sec로 증가시켜 A/S ratio를 0.01에서 0.05로 증가시켰다. 또한 A/S ratio 조정에 따라 가압공기 압력은 6bar에서 8bar로, 가압 탱크 압력은 4.5bar에서 6bar로 증가시켰다.

Table 3. Comparison of DAF design criteria and currency condition of operational of operation factor.

Items	DAF operating factor	
	Design criteria	Operating
A/S ratio	0.01	0.05
Pressure tank	4.5bar	6bar
Recycling rate	30%	40%~
pH	6~7	5.6~5.7
Pressure tank HRT	10sec	60sec
Compressed air pressure	6bar	8bar
Surface loading($m^3/m^2 \cdot hr$)	~17.7	~13.7
SS removal(%)	68.8%	95.3%

이러한 유입폐수 특성에 적합한 운전인자의 조정으로 실시설계에서 제시한 SS 제거효율 68.8%를 95.3%까지 상승시킴으로서 DAF의 성능을 향상시켰다. 2013년 유량 조정조에서 DAF로 유입되는 평균 유입 SS 농도는 1,348.7mg/L이었으며 평균 유출농도는 58.4mg/L로 조사되었다. 그러나 실시설계에서 제시하고 있는 설계 기준인 68.8%가 제거된다면 420.8mg/L의 부유물질이 후단 공정인 생물 반응조로 유입되어 안정적인 유출수를 확보하기 어렵다.

Table 4는 실시설계에서 제시하고 있는 DAF 유입·유출 오염물질 농도와 제거효율을 실제 운영하고 있는 자료와 비교하여 제시하였다. 2013년 평균 유입농도 자료를 검토한 결과, 설계대비 DAF 유입 SS 농도는 104.4%, COD_{Mn} 농도는 110.1%로 조사되어 설계 농도와 유사하게 조사되었으나, BOD는 설계농도보다 137.6%, T-N은 122.8%로 조사되었으며 특히 T-P는 173.7%로 매우 높게 유입되었다.

Table 4. Comparison of design criteria and currency condition of operational with data.

(Unit : mg/L)

Items	DAF Influent		DAF Effluent		Removal efficiency(%)	
	Design criteria	Operating	Design criteria	Operating	Design criteria	Operating
BOD	2,898.2	3,988.9	1,355.1	2,413.1	53.2	39.3
COD	1,407.0	1,550.5	730.9	572.9	48.1	62.5
SS	1,291.4	1,348.7	402.5	58.4	68.8	95.3
T-N	348.5	427.9	217.3	279.4	37.6	34.6
T-P	39.2	68.1	10.2	8.1	74.0	88.1

설계대비 실제 제거효율을 검토한 결과, BOD의 제거효율은 38.4%로 설계기준 53.2%보다 낮게 조사되었으며, T-N은 설계기준 37.6%와 유사한 34.6%의 제거효율을 나타냈다. 그러나 COD_{Mn}의 실제 제거효율은 62.5%로 설계기준 48.1% 보다 높게 조사되었으며, SS는 설계기준은 68.8%였으나 제거효율은 95.3%로 매우 높게, T-P의 설계기준은 74.0%나 제거효율은 88.1%로 높게 조사되었다.

설계대비 실제 DAF 유출수 농도를 비교한 결과, BOD의 설계기준은 1,355.1mg/L였으나 실제 유출 평균 농도는 2,413. mg/L로 178% 높게 나 설계기준 보다 높게 유출되고 있었다. COD_{Mn}의 설계농도는 730.9mg/L였으나 유출농도는 572.9 mg/L로, SS는 설계유출 농도는 402.5mg/L 였으나 실제유출 농도는 58.4 mg/L로 낮은 것으로 조사되었다. T-N의 설계 유출 농도는 217.3 mg/L였으나 실제 유출은 279.4mg/L로 29%나 설계기준 보다 높게 유출되고 있었고, T-P는 10.2mg/L가 설계농도였으나 실제 평균 유출농도는 8.1 mg/L로 조사되었다.

DAF 유출수 농도를 조사한 결과, 유기물의 경우 SBOD의 비율이 높은 것으로 조사되었으며, C/N ratio는 충분하나, 인(P)의 경우 생물 반응조에서 이용되는 유입량 이하가 유입됨으로서 상황에 따라 생물 반응조에 인산염(PO₄-P)을 투입하여 미생물 성장에 필요한 부분을 보충하고 있는 것으로 조사되었다.

DAF 공정의 성능을 검토한 결과, 실제 유입농도가 설계농도보다 모두 높은 것으로 조사되었으며, 제거효율의 경우 BOD는 설계기준보다 낮은 것으로 조사되었다. 이러한 이유는 BOD 성분 중 SBOD 성분 많아 화학적 처리로는 제거율을 높이기 어렵기 때문인 것으로 판단된다. 특히 T-N의 경우 생물 반응조로 유입되는 농도가 설계기준보다 높아 생물 반응조에서의 질소제거에 어려움이 있는 것으로 판단되어 탈질보다는 질산화를 최대한

유도한 후, 후단 황탈질 공정에서 질소를 제거하는 운전방식이 적정한 것으로 판단된다.

3.3.2 생물반응조 설계인자 검토

Table 5는 생물 반응조의 설계기준과 실제 생물 반응조로 유입되는 유입·유출농도 및 2013년 최대(2,028m³/day)·최소(560m³/day) 유량을 적용하여 설계농도와 실제 농도에 대한 유입 부하량을 비교하여 제시하였다.

Table 5. Comparison of design criteria and operating condition.

Items	Influent			Effluent	
	Design criteria	Operating		Design criteria	Operating
		Max.	Min.		
BOD	3,300.0	4,643.6	3,303.3	8.0	1.8
COD	1,600.0	1,924.2	1,376.4	32.0	13.2
SS	1,700.0	1,806.7	843.8	8.0	0.9
T-N	400.0	542.0	357.3	16.0	7.9
T-P	45.0	78.0	62.5	1.6	0.2

2013년 월별 평균 유입·유출량과 생물 반응조 유입부하를 설계기준에 의한 자료를 검토한 결과, BOD는 유입농도가 유입 설계기준 대비 178.1%로 조사되었으나, 실제 최종 제거효율은 설계대비 444.4%(8.0 → 1.8mg/L)의 효율을 나타내는 것으로 조사되었다. COD_{Mn}는 유입 설계기준 대비 78.4%로 유입되었으나, 최종 제거효율은 242%(32.0 → 13.2%)의 효율을 나타냈으며, SS는 유입농도가 유입 설계기준 대비 14.5% 였으나, 최종 제거효율은 888.9%(8.0 → 0.9mg/L)의 효율을 나타냈다. 유기물(BOD, COD_{Mn}, SS) 제거효율을 검토한 결과, 최종 방류수질은 유출 설계농도에 비하여 월등히 낮게 유출되는 것으로 조사되었다.

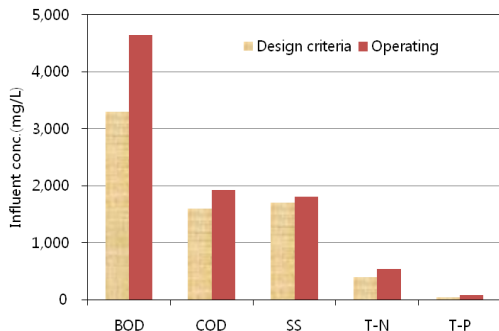


Fig. 9. Comparison of design criteria and operating influent water concentration.

T-N은 유입농도가 설계기준 대비 128.6%로 높게 유입되었으나, 최종 제거효율은 설계 방류수 기준보다 202.5%(16.0 → 7.9mg/L), T-P는 설계기준대비 79.4%로 유입되고 있었으나, 최종 제거효율은 설계기준 방류수 1.6mg/L보다 매우 낮은 0.2mg/L가 유출되어 설계 유출 대비 800.0%의 효율을 나타냈다. 최종 유출수의 T-N과 T-P 제거에 대한 성능을 검토한 결과 방류수 설계기준보다 월등히 낮은 것으로 조사되었다.

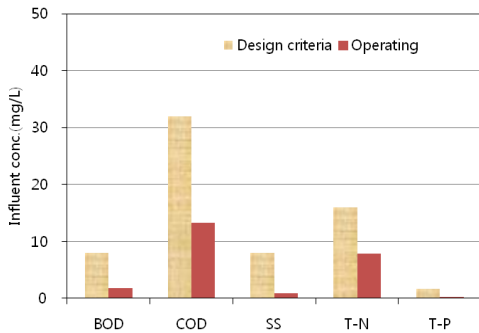


Fig. 10. Comparison of design criteria and operating effluent water concentration.

3.3.3 분리막 운영 설계인자 검토

막여과 공정의 주요 수처리 기작은 오염물의 크기에 따른 체거름으로 막의 공극보다 큰 물질을 확실하게 제거할 수 있어 안정적인 수질의 처리수를 얻을 수 있다. 그러나 체거름으로 인하여 막 표면 및 막의 공극에 오염물이 부착되어 처리수량을 얻을 수 있는 능력이 점차 감소되는 막 오염 문제가 발생한다. 막 오염은 막여과 공정에서 가장 취약한 문제점이며, 이렇게 수처리 능력이 저하된 막을 원래의 상태로 회복시키기 위하여 물리적 세

정과 화학적 세정을 실시하고 있다[14].

Table 6은 2013년 설계대비 분리막 막간 차압(TMP, Trans Membrane pressure)과 막여과 면적에 대한 투과 유량(Flux)의 운영현황을 제시하였다. 설계기준에 의한 기본 차압은 160mmHg로 제시하고 있으나, 2013년 실제 현장에서 운영된 차압을 살펴보면, A 계열은 160~175mmHg, B 계열은 155~170mmHg로 조사되었다. 또한 설계기준의 막 여과 유속은 $0.0229\text{m}^3/\text{m}^2\cdot\text{hr}$ 로 제시되고 있으며, 실제 운영된 막여과 유속은 A 계열은 $0.0231\sim 0.0244\text{m}^3/\text{m}^2\cdot\text{hr}$, B 계열은 $0.0232\sim 0.0241\text{m}^3/\text{m}^2\cdot\text{hr}$ 로 설계기준과 유사하게 조사되었다.

막 여과 공정에서 막의 성능을 최상으로 유지하기 위해 제어할 수 있는 요소는 막간 차압, 수온조절 및 우점 미생물 배양을 통한 점도의 조절, 전처리를 통한 막 유입 수질의 개선으로 구분할 수 있다[14]. 실제 폐수처리 현장에서는 가압 부상조에서 부유물질을 최대한 제거시키고, 미생물의 성장단계를 일정하게 유지하고, 막분리 공정 하단에 공기 송풍기를 설치하여 지속적으로 막에 부착된 고형물을 제거함으로써 안정적인 막 상태를 유지하는 것으로 조사되었다. 차압과 막여과 유속은 생물 반응조 미생물 상태에 따라 많은 영향이 미치는데, 미생물의 유지단계는 미생물을 대수단계 보다 내생단계 부근에서 운전하는 것이 양호한 차압과 막여과 유속을 나타냈다. 또한 막간 차압이 감소되면, 약품세정을 통하여 차압을 회복시켜야 하는데, 연구대상 처리시설의 경우 공기세정과 미생물의 유지관리를 통하여 막간 차압을 유지하는 것으로 조사되었다.

Table 6. Comparison of membrane pressure difference and flux.

Items	Operating factor		Notice
	Design criteria	Operating condition	
Stand pressure difference (mmHg)	160	160~175	A array
	160	155~170	B array
Flux ($\text{m}^3/\text{m}^2\cdot\text{hr}$)	0.0229	0.0231~0.0244	A array
	0.0228	0.0232~0.0241	B array

3.5 경제성 검토

Table 7에는 처리시설의 2013년도 운영비 현황을 제

시하였는데, 폐수처리시설 운영비는 총 176,4301,070원이었으며, 이중 슬러지 처리비가 27.7%, 약품비가 26.0%, 인건비가 21.2% 순으로 조사되었다.

운영비중 슬러지 처리비와 약품비가 53.7%로 가장 많은 부분을 차지하였는데, 이는 유입 폐수인 수산물 가공폐수가 고농도의 유기물을 함유하여 DAF에서 많은 약품이 소모되며, 화학적 슬러지가 많이 발생되어 슬러지 탈수에도 많은 약품이 소모되기 때문이다.

Table 7. Wastewater treatment operating costs.

Items	Costs(won/year)	Rate(%)
Electricity	210,797,710	11.9
Reagent costs	458,476,467	26.0
Sludge treatment costs	487,930,453	27.7
Repair expenses	140,348,400	8.0
Miscellaneous	93,221,304	5.3
Labor costs	373,526,736	21.2
Total costs	1,764,301,070	100.0
Total treatment(m ³)	457,948	-
Cost/ton	3,853won/ton	-

본 처리장의 2013년 슬러지 처리 비용은 487,930,453원으로, 처리방식은 해양투기가 90.8%로 가장 많은 부분을 차지하고 있는데, 2015년부터 해양 투기가 전면금지 되기 때문에 슬러지 처리비용은 점차 더 증가할 것으로 판단된다.

같은 기간 사용된 약품비는 458,476,467원으로, 약품 사용은 가압 부상조, 슬러지 탈수, 탈취 및 막 세정에 사용하고 있었다. 황산알루미늄($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$), 응집제(Coagulant)와 소석회($\text{Ca}(\text{OH})_2$)는 유입폐수의 화학적 처리와 슬러지 탈수에 사용되고, 차아염소산나트륨(NOOCI)과 구연산나트륨($\text{C}_6\text{H}_5\text{Na}_3\text{O}_7$)은 막 세정에, 가

성소다(NaOH)는 pH 조절용으로, 탈취설비에는 차아염소산나트륨이 사용되며, 황산알루미늄과 가성소다는 단가 및 사용상의 편의 면에서 대부분 액상을 선호하는 것으로 조사되었다.

2013년 폐수처리장으로 유입된 폐수량은 457,948m³이며, 톤당 처리단가는 3,858원/톤으로 조사되었는데, 2013년 8월 환경부 생활하수과에서 보고한 “2012년도 공공하수처리시설 운영관리실태 분석결과”에 의하면 하수 1톤당 처리 비용은 142.6원/ton으로 하수처리 비용보다 수산물가공폐수의 톤당 처리단가가 27배 이상 필요한 것으로 조사되었다. 그러나 BOD 제거당 처리효율은 수산물 가공폐수는 966.3원/kgBOD 였으나 하수는 992.1원/kgBOD로 오히려 수산물 가공폐수의 유기물 제거비용이 다소 낮은 것으로 조사되었다. 특히 전력비는 BOD 1kg을 제거하는데 수산물 가공폐수는 115.4원/kgBOD, 하수는 198.1원/kg으로 하수의 전력비가 오히려 많은 것으로 조사되었다.

4. 결론

침지식 분리막 공정을 이용한 수산물 가공폐수처리에 대한 현장 운영방안에 대한 연구결과다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 수산물 가공폐수의 배출특성을 조사한 결과, 성수기와 비수기에 유입유량 및 오염물질 농도 차이가 현저한 것으로 조사되었다. 따라서 불규칙한 유입유량과 농도분포로 인하여 폐수처리장의 안정적인 유지관리에 신중한 운전이 요구된다.
- 2) 불규칙한 유입부하로 인하여 생물반응조의 MLSS는 6,350~16,000mg/L로 운전 폭이 크며, 연간 반

Table 8. Comparison of wastewater & sewage plant operating costs.

Items	Costs(won/ton)		Costs(won/kgBOD)	
	This plant	Sewage plant	This plant	Sewage plant
Electricity	460.3(11.9%)	28.5(20.0%)	115.4(11.9%)	198.1(20.0%)
Reagent	1,001.2(26.0%)	10.9(7.6%)	251.1(26.0%)	75.9(7.7%)
Sludge treatment	1,065.5(27.7%)	28.1(19.7%)	267.2(27.7%)	195.6(19.7%)
Repair expenses	306.5(8.0%)	19.0(13.3%)	76.9(8.0%)	132.1(13.3%)
Miscellaneous	203.6(5.3%)	22.1(15.5%)	51.1(5.3%)	153.7(15.5%)
Labor costs	815.7(21.2%)	34.0(23.8%)	204.6(21.2%)	236.7(23.9%)
Total	3,852.8(100%)	142.6(100%)	966.3(100%)	992.1(100.0%)

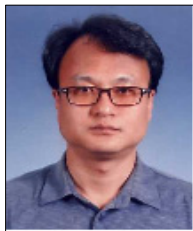
- 응조내 수온은 16.4~35.6℃로 동절기에 수온저하로 인한 처리효율 감소는 없을 것으로 판단된다.
- 3) 연구기간동안 방류수질 농도는, BOD는 1.5~2.2mg/L, COD_{Mn}은 9.3~19.5mg/L, SS는 0.4~1.7mg/L로 평균 제거효율이 99% 이상으로 조사되었으며, T-N은 5.8~12.2mg/L, T-P는 0.1~0.5 mg/L로 모두 방류수질을 하회하는 것으로 조사되었다.
 - 4) 가압부상조의 운영 factor를 조사한 결과, A/S ratio 0.05(설계 0.01), 가압공기 압력은 8bar(설계 6bar), 가압탱크는 6bar(설계 4.5 bar)로 운영하는 것으로 조사되었다. 또한 재순환율은 40% 이상(설계 30%), 표면 부하율은 13.7m³/m²·hr 이하(설계 17.7m³/m²·hr)로, 가압 부상조 pH는 5.6~5.7(설계 pH 6~7)로, 재순환수의 체류시간을 60sec(설계 10sec)로 변경하여 설계기준에 비하여 가압 부상조의 성능을 향상시켜 운전하고 있다.
 - 5) 유입부하를 설계기준과 비교한 결과, BOD는 유입 설계기준 대비 140.7%, COD_{Mn}는 120.32 %, SS는 106.3%로 조사되었으며, T-N은 설계기준 대비 135.5%, T-P는 173.3%로 매우 높게 유입되고 있었다. 이러한 이유는 수산물가공 폐수의 불규칙한 배출특성으로 기인한 것으로 판단된다.
 - 6) 연간 운영비용은 슬러지 처리비(27.7%)와 약품비(26.0%)가 대부분을 차지하는 것으로 조사되었는데, 슬러지 처리비는 해양투기 금지로 처리 비용이 더욱 상승할 것으로 판단된다. 또한 수산물 가공폐수 처리단가는 1톤당 3,858원으로 하수처리비용(142.6원/ton)에 비해 27배 이상으로 높은 것으로 조사되었다.

References

- [1] Choi. Y. B, Han. D. J, Lee. H. S, Kwon. J. K, "Effect of the Salt Concentration in Seafood Wastewater on the High-Rate Anaerobic Digestion", J. Kor. Soc Environ. Eng. Vol.35, No.10 pp. 730-736, 2013.
DOI: <http://dx.doi.org/10.4491/ksee.2013.35.10.730>
- [2] Paik. B. C, Shin. H. S, "Treatment of Fish Processing Wastewater using Sequencing Batch Reactor(SBR)", J. Kor. Soc. Water Wastewater, 1, pp. 18-126, 1994.
- [3] Jeong. B. C, Park. K. S, Jeong. B. G, "Simultaneous Removal of Organic and Nitrogen in the Treatment of Fish Processing Wastewater using Entrapped Mixed Microbial Cell(EMMC) Process", J. Kor. Soc. Water Qua, Vol.22, No.3 pp. 492-497, 2006.
- [4] Choi. Y. B, "Effects of Salt on the Biological Treatment of Seafood Wastewater", Department of Environmental Engineering, Kangwon National University of Korea. TD 628-11-348, 2011.
- [5] Cho. I. H, Kim. J. T, "Trends in the Technology and Market of Membrane Bioreactors(MBR) for Wastewater Treatment and Reuse and Development Directions", The Membrane Society of Korea, Vol.23, No.1 pp. 24-44, 2013.
- [6] K. Sutherland, "The rise of membrane bioreactors", Filtration & Separation, Vol.47, No.5 pp.14-16, 2010.
DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0015-1882\(10\)70208-1](http://dx.doi.org/10.1016/S0015-1882(10)70208-1)
- [7] S. Judd, C. Judd, "The MBR book: Principles and applications of membrane bioreactors for water and wastewater treatment", pp. 4-5, 2nd Edition Elsevier, Oxford, UK, 2010.
- [8] Choi. Y. B, Kwon. J. K, Rim. J. M, "Effect of the Salt Concentration in Seafood Processing Wastewater on the Anaerobic Ultimate Biodegradability and Multiple Decay Rate of Organic Matter", J. Kor. Soc Environ. Eng, Vol.32, No.11 pp. 1038-1045, 2010.
- [9] Jeong. B. C, Park. K. S, Jeong. B. G, "Simultaneous Removal of Organic and Nitrogen in the Treatment of Fish Processing Wastewater using Entrapped Mixed Microbial Cell (EMMC) Process", J. Kor. Soc on Water Quality, Vol.22, No.3 pp. 492-497, 2016.
- [10] Choi. B. Y, Choi. Y. B, Han. D. J, Kwon. J. H, "Treatment of Seafood Wastewater using an Improved High-rate Anaerobic Reactor", Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society, Vol.15, No.12 pp. 7443-7450, 2014.
DOI: <http://dx.doi.org/10.5762/KAIS.2014.15.12.7443>
- [11] Choi. Y. B, Kwon. J. K, Rim. J. M, "Effect of Salt Concentration on the Aerobic Biodegradability of Sea Food Wastewater", J. Kor. Soc Environ. Eng, Vol.32, No.3 pp. 256-263, 2010.
- [12] Cui. Y. W, Peng. Y. Z, Peng C. Y, Gan X. Q, Ye. L, "Achieving biological nitrogen removal via nitrite by salt inhibition.", Water Sci. & Technol, Vol.53, No.6 pp. 115-122, 2006.
DOI: <http://dx.doi.org/10.2166/wst.2006.183>
- [13] METCALF & EDDY/Aecom, Wastewater Engineering Treatment and Resource recover, 5th ed, MCGraw-Hill, New York, 2014.
- [14] Lee. H. W, An. K. H, Choi. J. S, Kim. S. K, Oh. J. J, "Effect of Trans-Membrane Pressure on Reversible and Irreversible Fouling Formation of Ceramic Membrane", J. Kor. Soc Environ. Eng, Vol.34, No.9 pp. 637-643, 2012.
DOI: <http://dx.doi.org/10.4491/ksee.2012.34.9.637>

최 용 범(Yong-Bum Choi)

[정회원]



- 1999년 2월 : 강원대학교 환경공학과(공학석사)
- 2011년 2월 : 강원대학교 환경공학과(공학박사)
- 2014년 8월 ~ 현재 : 강원대학교 지구환경시스템과 겸임교수

<관심분야>

수질관리, 고도처리

권 재 혁(Jae-Hyouk Kwon)

[정회원]



- 1990년 8월 : 강원대학교 토목공학과(공학석사)
- 1994년 8월 : 강원대학교 토목공학과(환경공학 박사)
- 1995년 3월 ~ 현재 : 강원대학교 지구환경시스템과 교수

<관심분야>

수질관리, 고도처리

이 해 승(Hae-Seung Lee)

[정회원]



- 1989년 8월 ~ 1991년 11월 : (주) 유신코퍼레이션, 환경부
- 1994년 3월 ~ 1997년 3월 : Hokkaido University 환경위생과(환경공학 박사)
- 1999년 2월 ~ 현재 : 강원도립대학 소방환경방재과 교수

<관심분야>

폐기물처리, 매립지 관리

한 동 준(Dong-Joon Han)

[정회원]



- 1992년 2월 : 강원대학교 토목공학과(공학석사)
- 1996년 8월 : 강원대학교 토목공학과(환경공학 박사)
- 1997년 3월 ~ 현재 : 강원도립대학 소방환경방재과 교수

<관심분야>

수질관리, 고도처리