

iMBR 공정을 이용한 수산물가공폐수 처리에 관한 실증적 고찰 The Practical Study for the Treatment of Fish Processing Saline Wastewater Using Immersed MBR

박성균 · 이동준[†]

Seung Kyun Park · Dong Jun Lee[†]

현대엔지니어링 인프라환경사업부

Division of Infrastructure Environmental, Hyundai Engineering Co., Ltd.

(Received June 14, 2016; Revised August 2, 2016; Accepted August 12, 2016)

Abstract : The study is the result of an practical operation analysis for the full scale fishery product wastewater treatment plant with immersed MBR (iMBR) process. Since fishery product industries show a wide range of wastewater generation by the season, design and operation of the equalization basin are very important factor. The aeration system for the equalization basin mixing can save the chemical consumption for followed system through the restriction of acid fermentation. The concentrations of wastewater primary DAF process treated were BOD 2,291 mg/L, COD_{Mn} 530 mg/L, SS 256.8 mg/L, T-N 38 mg/L, T-P 13.5 mg/L respectively. It was considered that iMBR is the most efficient biological process for high salinity content wastewater since It is irrelevant to the capability of the sludge precipitation. SADp and SADm were 0.31, 26.5 m³/hr·m³ respectively. In iMBR process, the critical F/M ratio was derived at 0.08~0.10 gBOD/gMLSS by analysing the correlations between MLSS, normalized TMP and temperature. The effluent concentrations were BOD 1.8 mg/L, COD_{Mn} 12.4 mg/L, SS 1.0 mg/L, T-N 7.85 mg/L, T-P 0.1 mg/L and removal efficiencies were 99.9%, 97.6%, 96.3%, 95.7%, 97.8% respectively.

Key Words : Saline Wastewater, iMBR, SADm, Normalized TMP, Permeability

요약 : 본 연구는 실제 운영되는 수산물 가공 산업폐수의 immersed MBR (iMBR)공정을 이용한 폐수처리시설 운영 결과에 대한 실증적 고찰을 수행한 것이다. 수산물 가공 산업의 특성상 일별, 월별 유량 변동이 심하여 유량조정조의 설계 및 운전 방법이 중요하며, 유량조정조 교반시 포기식 교반을 적용하면 산발효 방지를 통하여 후속 응집/부상 공정의 약품비 절감이 가능하다. 동 현장은 유량조정조, 가압부상조, iMBR을 거쳐 방류하며, 이때 가압부상조를 거쳐 iMBR로 유입되는 BOD, COD_{Mn}, SS, T-N, T-P의 농도는 2,291 mg/L, 530 mg/L, 38 mg/L, 256.8 mg/L, 13.5 mg/L으로 나타났다. 수산물 가공 폐수와 같이 고농도의 염이 함유된 폐수의 생물학적 처리는 슬러지의 침강성과 관계없는 침지식 중공사막을 이용한 iMBR 공법을 적용하는 것이 바람직한 것으로 나타났다. iMBR 공정의 주요 에너지 소모 요인인 공기세정에 대한 운영 값의 검토 결과 SADm값이 0.31 m³/hr·m² membrane area이었으며, SADp값은 26.5 m³/hr·m³ permeate으로 상용화된 평막 대비 월등히 에너지 효율이 우수한 것으로 나타났다. 무산소, 혐기, 호기 탈기조로 구성된 침지식 중공사막이 결합된 iMBR 공정에서 막오염 지표인 Normalized TMP와 온도, MLSS 등을 비교 분석한 결과 F/M비가 0.08~0.10 gBOD/gMLSS에서 임계 F/M 값을 나타냈다. 생물반응조에서의 BOD, COD_{Mn}, SS, T-N, T-P의 처리수질은 각각 1.8 mg/L, 11.0 mg/L, 1.1 mg/L, 11.0 mg/L, 0.24 mg/L으로 운전되었으며, 제거율은 99.9%, 97.9%, 96.3%, 95.7%, 97.8%으로 나타났다.

주제어 : 수산물 가공폐수, 침지식 iMBR, SADm, Normalized TMP, Permeability

1. 서론

산업의 발달과 건강 증진에 대한 관심이 고조될수록 최근 well being 식품으로 각광받는 것이 수산물이다. 수산물 소비에 대한 세계적 추세는 개발도상국의 경우 1977년 7.3 kg/capita/yr에서 1997년 14.0 kg/capita/yr으로 약 2배 가까이 증가하였으며 2020년 예상되는 소비량은 16.2 kg/capita/yr으로 보고된바 있다.¹⁾ 우리나라의 경우에는 2001년에는 42.2 kg/capita/yr에서 2013년 53.8 kg/capita/yr으로 꾸준히 증가 추세에 있다.²⁾ 2011년 기준 1일 1인당 어패류 소비량으로 보면 한국 159 g, 일본 147 g, 중국 890 g, 프랑스 95 g, 뉴질랜드 71 g, 노르웨이 146 g, 스페인 116 g, 미국 59 g으로 우리나라가 월등히 높은 수준이다.

수산물 산업은 어업중심의 1차 산업에서 수산업의 유통, 식품공급 및 가공 등을 포괄하여 중요성이 부각되고 있으며, 이와 맞물려 산업이 확대되면서 부가적으로 발생하는 폐수 및 악취발생에 대한 문제제기는 지역사회 민원으로 대두되는 실정이다. 특히 미처리된 상태로 배출되거나 불완전하게 처리된 처리수가 연안해역에 배출되는 경우 적조현상이 발생하여 연안 수산업 양식 산업을 심각하게 저해한다.³⁾ 또한 해양수산부는 단순원료 판매위주의 산업구조에서 고부가가치 창출 구조로 전환하기 위해 최근 수산가공식품산업 발전대책(2014.9.4)을 발표한바 있어⁴⁾ 이에 따른 수산물 가공폐수의 발생량은 증가할 것으로 판단된다.

수산물 가공 및 저장 처리업은 가공자재에 따라 수산동물 및 수산식물로 분류하고, 가공방법에 따라 식용, 공업용으로

[†] Corresponding author E-mail: jun20lee@hec.co.kr Tel: 02-2134-7128 Fax: 02-2038-6438

분류할 수 있다. 본 연구는 수산동물중 식용 가공을 주업으로 하는 처리업장에서 발생하는 폐수에 국한하였다.

수산물 가공 공정은 제품형태에 따라 건제품·염장품·통조림·냉동품·해조가공품·연제품(어묵)·조미가공품 등으로 구별할 수 있는데, 건제품 공정은 염장·세척·건조 과정을, 폐류는 해수 세척 및 탈각 공정을 거쳐 자숙·조미·건조 과정 등을 거치게 된다. 수산물 가공업은 어종과 계절의 변화에 따라 그 종류가 다양하여 여러 형태의 가공 공정 별로 발생하는 폐수 특성 또한 상이하다.

수산물 가공업에 종사하는 대부분은 중소기업이며 폐수처리의 법적 규제가 엄격하여 사업주의 폐수처리에 대한 경영 부담은 가중되고 있는 상태이다. 따라서 국가에서는 업종 전문화 및 특성에 맞는 산업단지를 조성하여 업체에서 발생하는 폐수를 차집하여 산업폐수 처리시설에서 일괄적으로 처리하도록 추진하고 있다. 수산물 가공 폐수처리는 물리, 화학적 처리와 생물학적 처리 및 이들을 조합한 공정들이 주로 구성되어 있다. 그러나 수산물 가공폐수의 경우 계절별, 요일별, 조업별로 성상의 변동이 심한 폐수 발생 특성과, 고농도 유기물, 질소 및 인 농도와 높은 염 성분은 생물학적 처리에 충격부하 및 이차침전지에서의 낮은 침강성을 초래하여 폐수처리시설의 안정적 운전이 곤란한 실정이다.³⁾

따라서 본 연구에서는 부하변동에 대처가 뛰어나고, 생물반응조 슬러지의 침강성과 관계없이 운전 가능한 침지식 분리막이 생물반응조와 결합한 iMBR (immersed Membrane Bioreactor) 공정의 실증 플랜트인 G시 소재 수산물 가공 산업단지 폐수처리시설의 운영 결과에 대한 실증적 고찰을 통하여 향후 유사현장 설계시 기초자료를 확보하고자 수행되었다.

2. 실증 처리시설 운영 방법

2.1. 폐수 특성

2.1.1. 폐수 배출

본 산업단지내에는 23개업체가 상주하여 이중 20여개 업체에서 폐수종말처리시설로 폐수가 배출되고 있으며, 전체 폐수 배출업체중 상위 9개 업체가 수산물 가공업체로서 전체 폐수발생량의 80~90%를 배출하고 있다. 폐수 발생 업체

의 업태현황은 오징어 및 명태관련 가공산업이 주를 이루고 있다.

2.1.2. 폐수 농도 특성

운전 특성 검토를 위하여 약 24개월간 운전한 자료를 분석하였으며, 이를 통하여 일별, 월별 배출특성을 고찰하였다. 각 단위 공정별 BOD, COD_{Mn}, SS, T-N, T-P는 수질오염 공정시험법에 준하여 분석하였다.⁵⁾

2.2. 수산물 산업단지 폐수처리시설 공정 구성

폐수처리시설은 2010년 3월 준공하여 가동중에 있으며 시설규모는 일 최대 2,600 m³/일이며 주처리공정인 iMBR (immersed Membrane Bioreactor) 반응조는 2계열로 운전하고 있다. Fig. 1에서 보여주는 황탈질(Sulfur Denitrification Tank) 반응조의 경우 iMBR 반응조만 운전하여도 방류수 수질기준을 만족하는 상태에서 별도의 운전을 하지 않는 관계로 본 연구에서는 별도의 고찰을 하지 않았다.

2.3. 침지식 MBR 공정 운전

2.3.1. 분리막 구성

실증 플랜트에서 사용된 분리막 사양은 Table 1과 같다. Fig. 2는 본 현장에 설치된 분리막 프레임 보여주는 것으로 25 m²의 모듈 18EA가 1개의 Frame으로 프레임당 막면적은 450 m²이다. 프레임은 각 계열별 6 Sets가 설치되어, 인버터가 설치된 자흡식 펌프와 연동되어 운전된다.

또한 프레임 하부에 설치된 분리막 세정용 산기관을 통한 공기공급은 24시간 연속적으로 이루어지며, 가역적 막오염 원인인 중공사막 표면에 슬러지가 퇴적되는 것을 제어함과 동시에 호기조내 유기물 제거에 관여하는 종속영양미생물과 질산화에 관여하는 독립영양미생물의 전자수용체인 산소를 공급하는 역할을 동시에 수행하고 있다.

Table 1. The specification of submerged membrane

Manufacturer	Mitsubishi rayon
Membrane material	polyvinylidene fluoride MF
Membrane configuration	Hollow fiber
Outer diameter	2.8 mm
Inner diameter	1.1 mm
Membrane area per module	25 m ²
Nominal pore size	0.4 μm

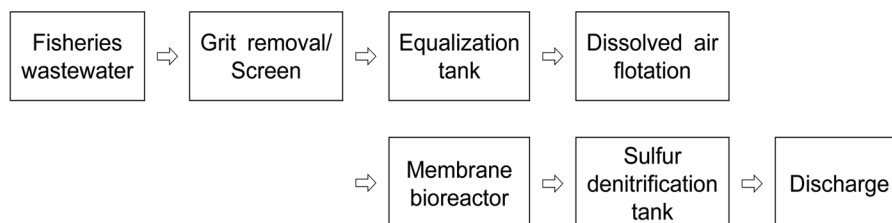


Fig. 1. The schematic diagram of full scale plant process.

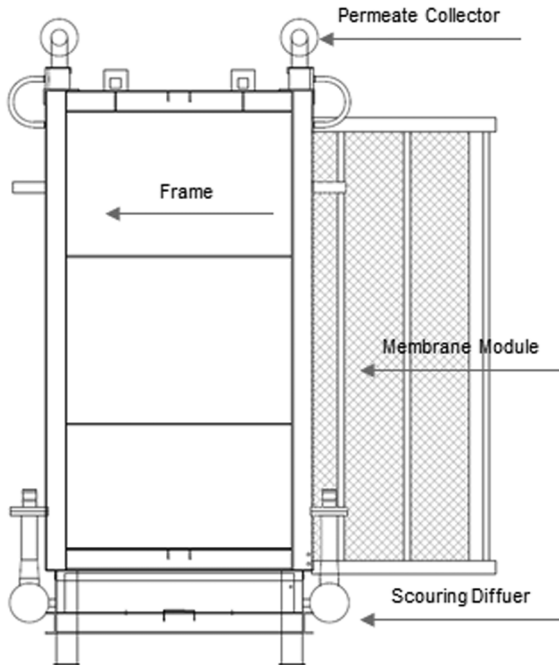


Fig. 2. The schematic diagram of membrane frame.

Table 2. The design criteria of iMBR

Influent flow	2,600 m ³ /d	Aerobic MLSS	6,000~15,000 mg/L
Anoxic	11.1	Internal recycle ratio	400%
Anaerobic	3.7	Membrane area (m ²)	5,400 m ²
HRT (hrs)	Oxic 30.5	Operating flux	0.5 m/d (20.8LMH)
	Exhausted tank 1.6	Operating permeating pump cycle	7 min On 1 min Off
	Total 46.9	SAD _p (Nm ³ /hr·m ³)	15.4
SRT (days)	35	SAD _m (Nm ³ /hr·m ²)	0.31

SAD_p : Specific Air Demand per Permeate
 SAD_m : Specific Air Demand per membrane area

2.3.2. iMBR 운전

iMBR 반응조는 질소 인 고도처리를 위해서 무산소, 혐기, 호기, 탈기조로 구성되며, 호기조내 Fig. 2의 분리막을 설치하고 자흡식 펌프를 이용한 정유량제어로 처리수를 배출하는 공정으로 구성되어 있다. 반응조 후단에 설치된 탈기조는 호기조에서 월류하는 MLSS내 존재하는 산소를 탈기하여 반응조 앞단 무산소조로 내부반송시 탈질을 극대화하기 위하여 설치되었다. 다음의 Table 2는 본 현장에 적용한 iMBR 설계 기준이다.

2.3.3. 분리막 세정

분리막설비의 세정방법은 크게 4가지로 구분되는데, 첫째 분리막 표면에 고형물 부착방지를 위한 공기 및 수류에 의한 상시 세정, 둘째 처리수를 활용하여 NaOCl 300 mg/L을 2 L/m²의 양을 약 20~30분간 In-Out 방식으로 역주입하는 방법으로 주기가 일주일 간격인 주간세정, 셋째 막오염이 누적되는 매분기 혹은 초기운전차압 7.2 kPa 대비 15~20

kPa 이상 상승시 NaOCl 3,000 mg/L을 주간세정과 동일한 방법으로 역주입하는 계내 세정, 넷째 필요시 호기조 밖으로 인양하여 세정조에 침지시켜 NaOCl 또는 Citric Acid 등으로 약액세정하는 계외세정(Out of system cleaning) 등이 있다. 분리막 오염을 대비한 약액세정설비로 NaOCl 저장탱크, 약품주입펌프를 설치하였으며, 처리수를 역세수로 이용하기 위하여 역세펌프가 운영되었다.

3. 결과 및 토의

3.1. 폐수 발생 특성

3.1.1. 유입수 특성

전술한 바와 같이 본 산업단지 주요 수산물 가공 공장은 오징어와 명태관련 가공식품을 주로 생산하는 공장이다. 오징어 가공처리공정에서의 주요 폐수는 해동, 할복 후 내장 제거, 세척공정 등에서 배출되고, 명태 가공처리 폐수는 수세 및 바닥청소에 의한 폐수가 주로 배출되며 오징어 가공처리와의 차이점은 별도 내장 제거 공정이 없는 것이다.⁶⁾ 수산물 가공폐수는 고농도의 유기물 및 질소와 고농도의 염(2,000~18,000 mg/L as NaCl)을 함유하고 있다. 수산물 가공폐수는 지방성분, 단백질등이 다량 포함되어 유기물 질소인의 농도가 높다. Table 2는 2014년 1월부터 2015년 12월 까지 24개월 동안 유량조정조에서의 폐수 특성을 분석한 것이다.

유량조정조 내에서 침적되는 슬러지는 부패가 빠르고 악취 발생과 함께 위생상의 문제를 동반하여 민원을 야기하므로 유량조정조 설계시 구조물 복개가 필요하고, 유량조정조의 균질화를 위한 교반은 산기방식 적용으로 산발효 억제 유도하는 것이 바람직할 것으로 판단된다. 고농도 수산물 가공폐수의 경우 유량조정조에서 체류시간 경과에 따라 산발효가 진행하여 pH가 낮아지는 경향이 있으므로 후속 공정인 가압부상조 공정에서 과량의 NaOH 약품이 소요될 우려가 있다.

총질소대비 유기성 질소와 암모니아성 질소의 구성비가 3:1~1:3으로 업체내 개별저류조에서 배출되는 시기, 유량조정조내 체류시간 및 반응형태에 따라 상당한 성상변화가 이루어지고 있음을 알 수 있다. 특히 가공공정 중에서 발생하는 탈염 및 염장공정에서 유출되는 NaCl은 폐수의 염분농도를 증가시키는 주원인으로 이는 후속 생물학적 공정에서 호염성 미생물이 우점하여 미생물 상이 단순해지고, 원생동

Table 3. Characteristics of fisheries process wastewater such as cuttlefish and pollack (unit : mg/L)

Concentration	BOD	COD _{Mn}	TSS	T-N	T-P
Maximum	4,787	1,843	2,395	568.4	94.7
Minimum	3,118	1,124	933	282.7	44.0
Average	3,698	1,345	1,325	398.8	64.7
Standard deviation	433	164	277	68.3	10.7

물의 증식이 억제되어 슬러지의 침강성을 저해하는 가장 큰 원인이 된다.³⁾ 또한 폐수내 포함된 염분은 삼투압 현상으로 미생물 세포벽을 파괴시킴으로서 용존성 유기물의 농도를 증가시킨다고 보고하였다.⁷⁾ 본 현장에서는 유입수내 높은 염 농도로 인한 슬러지의 침강성 불량과 관련 없이 생물학적 고도처리 공정을 운전할 수 있는 iMBR 공정 적용의 결정적 배경이 되었다. 또한 고농도 염이 존재하는 폐수에서 생물학적 질산화시 질소화합물은 암모니아성 질소에서 아질산성 질소까지만 전환되는 경향이 있다고 보고하였는데 이러한 원인으로 염분이 Nitrosomonas보다 Nitrobacter에 더 큰 저해작용을 한다고 보고하였으며⁸⁾ 염도가 증가할수록 포기조내 산소용해도에 직접적인 영향을 미치는 것으로 보고된바 있다.⁹⁾ 본 현장에서는 운전초기 안정적 운전을 유지할 수 있는 용존산소 공급이 부족하여 공기공급시스템을 보강한 사례가 있는데 이는 운전 염분 농도와는 무관한 단순 보강이었다.

3.1.2. 유입 유량 및 가압부상조 제거 특성

우리나라 수산물 가공업체는 대기업에서 운영하는 일부를 제외하곤 대부분 영세하게 운영되고 있고, 단지를 조성하기 때문에 업체에 따라 조업 시간별, 계절별, 가공 형태별 농도 편차가 크다.¹⁶⁾ Fig. 3은 1일 유입량을 보여주는 것으로 최대 유입량은 2,619 m³/일, 최소 518 m³/일 평균 1,511 m³/일로 일별 유입 변동이 매우 큼을 알 수 있다, Fig. 4는 월별 유입 특성을 보여주는 것으로 조업 특성상 10월부터 이듬해 1월까지 폐수발생량이 급격히 증가하는 것을 볼 수 있으며, 7

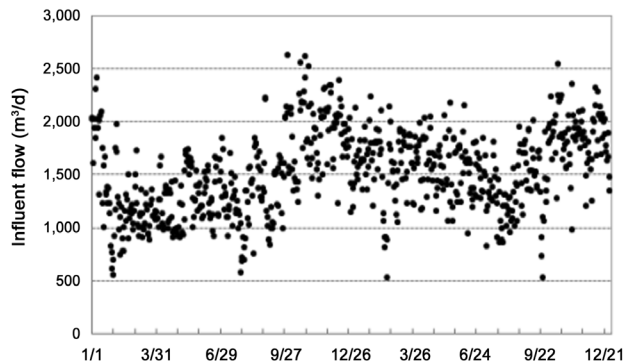


Fig. 3. Influent flow of equalization tank.

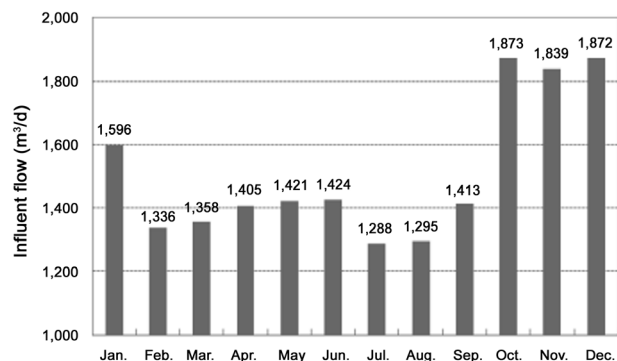


Fig. 4. Production of Influent flow as months.

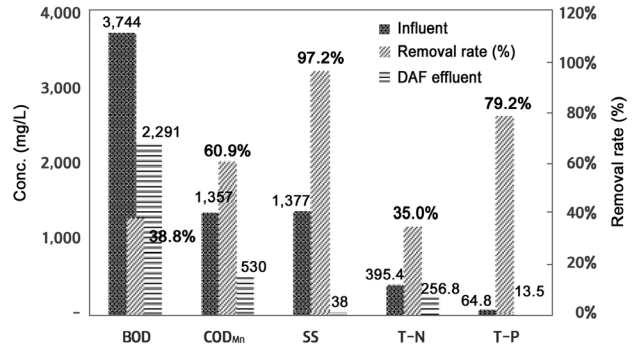


Fig. 5. The removal rate of organics and nutrients on DAF process.

월 최소발생량 대비 10월 최대발생량은 145.4%로 월별 유입량의 편차가 심하다는 것을 알 수 있다.

이는 운영시 유량조정조의 역할이 중요하고, 비수기와 성수기에 따른 최적의 운전조건에서 운영이 필요함에 따라 생물학적 공정 특성상 계절별 분리 구성 및 외부의 충격부하를 효율적으로 저감할 수 있는 iMBR 공정의 운영이 중요하다고 할 수 있다. 또한 유량조정조에서의 pH는 최소 pH 4.51, 최대 pH 8.56으로 운영되어 최적 응집/부상 조건 도출시 pH 조절에 필요한 NaOH, Alum 및 고분자 응집제의약품소모량이 증가하였다. 따라서 유량조정조 설계시에는 pH 저하가 일어나는 산발효가 진행되지 않도록 공기 교반 방식이 바람직할 것으로 사료된다.

한편 가압부상조는 고농도 취기가 발생하여 악취 발생에 따른 주요 민원의 대상이 될 뿐만 아니라 동절기 기온 급강하에 따른 동파 문제가 발생하므로 건축구조물 내에 설치하는 것이 바람직하다. 가압부상조의 세부적인 운전조건은 타 연구에 의해서 보고된바 있어 본 논문에서는 생략하였다.¹⁰⁾

Fig. 5는 분석 기간 중 가압부상조에서 제거되는 유기물, 영양물질의 농도 및 제거율을 나타낸 것으로 가압부상조에서 유출되는 처리수는 후속 공정인 iMBR 공정으로 유입하며 평균 농도는 BOD 2,291 mg/L, COD_{Mn} 530 mg/L, SS 38 mg/L, T-N 256.8 mg/L, T-P 13.5 mg/L으로 나타났다. BOD, COD_{Mn}, SS, T-N, T-P는 각각 38.8%, 60.9%, 97.2%, 35.0%, 79.2%의 제거율을 보여주고 있다. 생물학적 처리시 일반적으로 보고되고 있는 종속영양미생물의 BOD : N : P 비율은 100 : 5 : 1이며, 가압부상조 처리수의 평균 비율은 100 : 11.2 : 0.6로 후속 생물학적 공정에서 추가적인 PO₄³⁻-P의 주입이 요구된다. 동 현장의 초기시운전 당시 유입폐수의 영양물질 균형을 고려하지 않아 생물학적 처리의 안정성을 확보하지 못하였으나 이후 추가적인 인(PO₄³⁻-P)주입으로 처리의 안정화를 도모하였다.

3.2. 침지식 중공사막 MBR 운전

3.2.1. iMBR 운전 특성

iMBR 공정의 성공 여부는 분리막 오염의 효율적 억제로서 침지막에 대한 Gas(air) sparging에 의한 세정이 현재까지는 상용화되어 주로 사용되고 있다. 최근에는 일부 연구자들

에 의해 공기 세정 없이 진동에 의해 세정하는 방법에 대한 연구가 진행되고 있으나 현재까지 상용화된 사례는 보고되지 않고 있다.¹⁰⁾ 본 현장에서는 상시 공기 세정 및 NaOCl에 의한 약품세정을 정기적으로 수행하고 있다. 또한 9월경에는 성수기 유입유량 증가를 대비하여 제외세정을 실시하고 있다. iMBR 공정에서 공기세정에 대한 이론적인 최적값은 정의할 수 없는 것으로 상용화된 분리막 성능 비교시 적정 SADm은 0.2~0.4 m³/hr·m² membrane area으로 보고된 바 있다.¹¹⁾ 본 현장에서는 Table 2에서 보여주는 바와 같이 SADm값이 0.31 m³/hr·m² membrane area으로 일반적인 설계값에서 중간 정도의 에너지 효율을 나타냈다. 또한 설계 SADp 값은 15.4 m³/hr·m³ permeate이며, 실제 평균 유입유량이 년평균 1,511 m³/일로 58.1%임을 고려할 경우 26.5 m³/hr·m³ permeate으로 SADp값이 60~90 m³/hr·m³ permeate인 K 사의 상용화된 평막과 대비하여 에너지 효율이 월등하게 우수한 것으로 나타났다. 이는 분리막의 형태가 다발형 중공사형으로 potting되어 있어서 packing density가 크기 때문이다. 침지식 중공사막 MBR 공정의 막오염을 나타내는 지표로는 중공사 내부에 작용하는 driven force를 나타내는 TMP (Trans Membrane Pressure)가 중요한 지표로 활용된다. 본 현장에 활용한 iMBR 운전 시스템은 정유량제어 방식으로 일정한 유량의 여과수를 생산하며, 운전시간이 경과함에 따라 차압이 증가하는 경향으로 운전된다.

본 현장의 경우 침지식 중공사막의 TMP를 나타내는 압력계가 지하 공동구에 설치되어 생물반응조 운전수위보다 아래에 위치함으로 위치 수두에 따른 현장 측정값은 33.3 kPa을 나타내었으나, 운전 초기 운전정지시 계측기가 26.1 kPa을 나타내는 것을 고려할 경우 초기 차압은 7.2 kPa으로 산정할 수 있다. 따라서 초기 운전시 TMP는 7.2 kPa이며, 운전시간이 경과함에 따라 Fig. 6에서 보여주는 바와 같이 7.2 kPa~23 kPa으로 운전하였다. 또한 전술한 바와 같이 9월경에는 성수기 유량증가를 고려하여 제외세정을 실시하였으며, Fig. 6에서 보여주는 바와 같이 매년 비슷한 시기의 fouling rate를 분석하면 시간이 경과함에 따라 차압의 증가속도(dTMP/dt)가 0.101에서 0.124 kPa/d으로 증가하는 것으로 나타났다.

Field R. W. 등¹⁵⁾에 의하면 MBR 공정에서는 임계플럭스 (Critical Flux= $\frac{dTMP}{dt}=0$) 이하에서는 foulants의 축적이 이

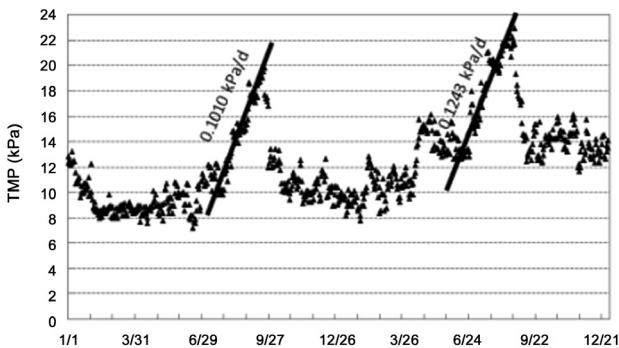


Fig. 6. The characteristics of TMP during 2 yrs.

루어지지 않는다고 정의하였다.¹³⁾ 그러나 현실적으로 이론적인 critical flux는 존재하지 않는다고 주장하였으며, MBR 설계 및 운전 조건이 상이한 상태에서는 초기투자비와 유지관리비를 고려하여 절충값을 결정하는 것이 중요하며 이에 대한 개념을 Sustainable flux로 정의하였다.¹⁴⁾ 동 현장에서는 Sustainable flux (design flux)를 Table 2에서 제시한 바와 같이 0.5 m/d로 설계하였지만 실제 운영 Flux는 유입유량을 고려할 경우 월등히 낮은 0.26 m/d로 갑작스런 TMP 증가가 이루어지기 전까지는 이는 충분히 안정된 Sustainable flux로 운전된 것으로 판단된다.

일반적으로 막투과유속은 분리막 공극을 통과하여 배출되는 여과수의 점도에 반비례한다. 따라서 막투과유속, TMP 및 Permeability는 다음 식 (1), (2)¹⁷⁾에 따라 특정 온도에 대하여 Normalization 할 수 있다.

$$\mu_T = -9.802 \times 10^{-6}T^3 + 1.130 \times 10^{-3}T^2 - 5.79310^{-2}T + 1.785 \quad (1)$$

$$J_{T_0} = \frac{\mu_T}{\mu_{T_0}} J_T \quad (2)$$

where, μ_T : Water viscosity at current temperature
 μ_{T_0} : Water viscosity at reference temperature
 J : Flux observed
 J_{T_0} : Flux at reference temperature

Fig. 7에서 보여주는 TMP는 25℃를 기준으로 온도변화에 따라 Normalized TMP로 표현한 것이다. 식 (2)에서 나타낸 바와 같이 막투과유속은 온도가 증가함에 따라 감소하는데 본 현장에서는 정유량 제어 방식에서의 운전으로 차압이 증가하는 것을 볼 수 있다. 또한 온도증가와 Normalized TMP는 정비례 관계에 있으며 지금까지 많은 연구에서 밝혀졌듯이¹⁸⁾ 정상적인 공기세정 및 운전조건하에서는 MLSS 자체가 막오염에 영향을 미친다기보다는 SRT 및 F/M비가 월등히 많은 영향을 미친다고 볼 수 있다.¹⁷⁾ 본 연구에서는 별도의 SMP는 분석하지 못하였지만 Fig. 7에서 보여주는 바와 같이 F/M비 변화 경향과 Normalized TMP 변화가 유사

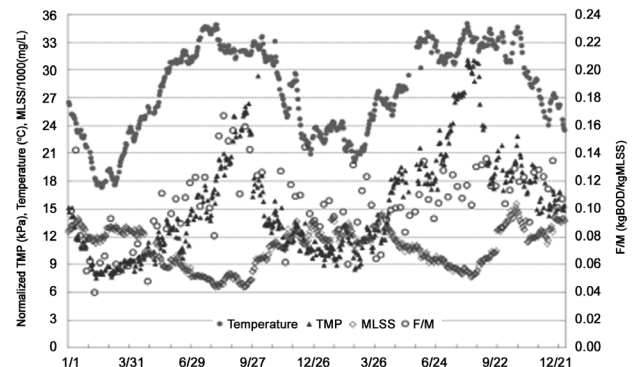


Fig. 7. The comparison of Temperature, Normalized TMP (@25℃), MLSS and F/M ratio.

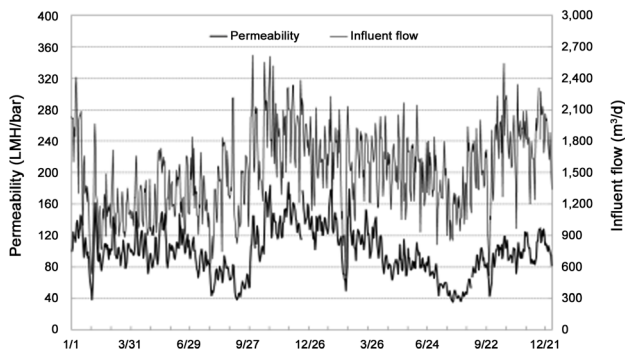


Fig. 8. The comparison of Permeability and Influent flow.

한 경향을 보여주고 있으며, Normalized TMP가 갑자기 증가하는 임계 F/M비는 0.08~0.10 gBOD/gMLSS으로 나타났다. 이 값은 향후 유사현장 폐수처리 MBR 적용시 중요한 운전인자일 것으로 판단된다. 본 현장에서는 비수기인 3월부터는 무산소조 및 혐기조에서 인방출을 억제하기 위하여 슬러지 인발량을 증가시켜 결국 SRT를 감소시킴으로서 안정적 운영을 도모할 수 있었다. 또한 매년 9월경에는 분리막의 제외세정을 실시한 후 이어지는 성수기를 대비하여 MLSS를 높게 유지함으로써 임계 F/M비 이하로 운전하므로 동절기의 상대적 낮은 수온에도 불구하고 안정적 TMP를 유지할 수 있었다.

Fig. 8은 처리장의 단위압력당 막투과유속 관계를 나타내는 Permeability와 유입유량과의 관계를 나타낸 것으로 그림에서 보여주는 바와 같이 분석기간 내내 유사한 경향을 나타내는 것으로 보아 심각한 막오염 현상은 발생하지 않은 것으로 판단된다.

3.2.1. 생물반응조 운전 효율

생물학적 공정은 Table 2에서 제시한 조건을 기준으로 운영하였다. Fig. 7에서 보여준 MLSS 변화는 비수기에는 6,000~9,000 mg/L, 성수기에는 10,000~15,000 mg/L으로 운전하여 F/M비를 0.08 kgBOD/kgMLSS 이하로 유지하면서 성공적인 운영을 도모할 수 있었다. Fig. 9는 가압부상조 처리후의 MBR 생물반응조에서 처리된 후 분리막으로 여과된 투과수에 대한 BOD, COD_{Mn}, SS, T-N, T-P의 농도를 보여주는 것이다. BOD의 경우 1.2~1.8 mg/L에서 평균 1.5 mg/L를 보여주고

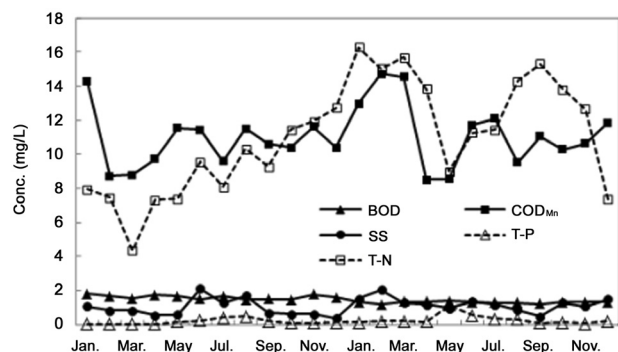


Fig. 9. The concentration of effluent pollutants on iMBR process.

있으며, 제거효율은 99.9% 이상의 높은 효율을 보여주고 있다. COD_{Mn}의 경우 8.5~14.7 mg/L에서 평균 11.0 mg/L을 보여주고 있으며, 제거효율은 폐수임에도 불구하고 97.6%의 높은 효율을 보여주고 있다. 비교적 높은 유기물 농도에 비해 안정적 처리효율을 보여줄 수 있는 것은 수산물 가공폐수의 높은 생분해도에 기인한 것으로 사료된다. 반면 타 연구자들은 수산물 가공폐수의 생물학적 처리에 대한 문제점으로 높은 염농도로 인한 삼투압 현상으로 미생물 세포벽이 파괴됨으로써 MLSS의 침전성 불량으로 이차침전지에서의 슬러지가 유실된다는 점을 주장한다.⁴⁾ 이는 결국 생물반응조에서 안정적인 SRT를 유지하기 곤란하여 원활한 운전이 이루어지지 않았기 때문으로 사료된다. 또한 본처리장에서 고농도 유기물에서 발생하는 SMP (Soluble Microbial Products)에 의한 COD_{Mn} 잔류 현상이 관찰되지 않은 이유는 침출수와 축산폐수와 같은 생물학적 body를 거쳐 기질로서 유입되는 폐수와는 달리 수산물 가공폐수의 경우 높은 생분해도로 인하여 안정적 처리가 가능하였던 것으로 판단된다. 한편 합성폐수를 적용하여 CI이 생물학적 유기물 제거에 미치는 영향을 연구한 보고에 의하면, 연속식 흐름을 가지는 SBR 공정의 COD_{Mn} 실험에서 NaCl 8,000 mg/L 이하에서는 생물학적 처리에 영향을 받지 않지만, 8,000 mg/L 이상에서는 유기물 제거에 영향을 미친다고 보고되었다.⁸⁾ SS의 경우 0.4~2.1 mg/L, 평균 1.1 mg/L으로 동 현장에 사용한 분리막의 공극크기가 Table 1에서 제시한바와 같이 평균 0.4 μm임을 고려할 경우 이론적으로는 처리수에서 SS가 검출되지 않아야 한다. 그러나 현장에서 중공사막의 파단에 의하여 SS가 유실될 가능성이 있으며, 이 역시 별도의 조치 없이 지속적으로 운전시 중공사막 파단면에 슬러지가 침적되어 파단 현상이 복구되는 경향이 있으며, 이로 인하여 더 이상의 슬러지 유실이 제어된다. 또한 분리막에서 고농도 염이 함유된 상태로 배출된 처리수는 저류조에서 체류시간이 경과함에 따라 화학적 반응에 의해 침전물을 형성하는 것으로 추정한다.

T-N의 경우 유출수질범위는 4.3~16.3 mg/L이며, 평균 11.0 mg/L를 보여주고 있으며, 제거효율은 평균 95.7%이다. 이는 일반적인 하수처리시설에서 T-N 제거율이 평균 75~80%의 수준에서 처리되는 것에 비하여 월등히 우수한 효율로 수산물 가공폐수와 같이 고농도의 염을 함유한 폐수 경우에도 안정적 운전 조건을 확립할 경우 완벽한 생물학적 질소 제거를 할 수 있음을 시사한다고 할 수 있다. 연구 보고에 의하면 CI 농도가 증가할수록 NO₂-N이 높게 검출된다고 보고하였으며, CI 농도가 18,200 mg/L 이상에서 질산화에 영향을 준다고 하였다.¹²⁾ 따라서 본 현장에 유입되는 CI의 농도가 2,500~4,000 mg/L임을 고려할 때 초기 순운기간만 경과하면 생물학적 처리 및 완벽한 질소제거에는 영향이 없는 것으로 나타났다. T-P의 경우 가압부상조에서 응집/부상시 제거되는 양으로 인하여 오히려 후속공정에서 안정적 생물학적 처리를 위하여 인위적으로 첨가하고 있는 실정으로 운전기간 동안 처리수의 T-P 농도는 0.03~1.14 mg/L에서 평균 0.24 mg/L를 보여주고 있으며 이때의 제거율은 97.4%를 나타냈다.

4. 결론

수산물 가공 산업단지 폐수처리시설의 현장 운영 자료에 대한 실증적 고찰을 통하여 다음과 같은 결과를 도출하였다.

1) 수산물 가공 산업 특성상 일별, 월별 유량 변동이 심하여 유량조정조의 설계 및 운전방법이 중요하며, 유량조정조 교반시 폐수의 산발효 방지를 위하여 교반 방식을 포기 방식으로 할 경우 pH 저감 방지를 통하여 후속 응집/부상 공정 약품비 절감이 가능하다.

2) 가압부상조를 거쳐 iMBR 반응조로 유입되는 BOD, COD_{Mn}, SS, T-N, T-P는 각각 2,291 mg/L, 530 mg/L, 38 mg/L, 256.8 mg/L, 13.5 mg/L이며 이때의 제거효율은 각각 38.6%, 60.8%, 97.2%, 33.9%, 78.7%을 보여주었으며, 이때 T-P의 경우 후속 생물학적공정의 안정적 운영을 위하여 PO₄³⁻-P의 별도 주입이 필요하다.

3) 수산물 가공 폐수와 같이 고농도의 염이 함유된 폐수의 생물학적 처리 공법은 슬러지의 침강성과 관계없는 침지식 중공사막을 이용한 MBR 공법이 바람직하며 설계시 산소공급량은 충분한 용량으로 설계되어야 한다.

4) SAD_m 값이 0.31 m³/hr·m² membrane area으로 일반적인 설계값인 20~40 m³/hr·m² membrane area의 중간값을 보여주고 있다.

5) SAD_p 값은 31.8 m³/hr·m³ permeate으로 용화된 평막 대비 SAD_p값이 60~90 m³/hr·m³ permeate임을 고려할 경우 월등히 에너지 효율이 우수한 것으로 나타났다.

6) 수산물 가공폐수 iMBR 공정을 대상으로 현장 적용시 온도, MLSS, TMP 등을 비교분석한 결과 F/M비 0.08~0.10 gBOD/gMLSS에서 Normalized TMP가 급속히 증가하는 임계 F/M비 값을 나타냈다.

7) 무산소, 혐기, 호기 탈기조 구성된 침지식 중공사막이 결합된 MBR 반응조에서의 BOD, COD_{Mn}, SS, T-N, T-P의 처리수질은 각각 1.5 mg/L, 11.0 mg/L, 1.1 mg/L, 11.0 mg/L, 0.24 mg/L으로 운전되었으며, 제거율은 99.9%, 97.9%, 96.3%, 95.7%, 97.8%으로 나타나 안정된 처리효율을 확인할 수 있었다.

8) 이후, 수산물 가공폐수의 iMBR적용시 분리막의 오염 형태와 원인에 대한 상세 연구가 더 수행되어 막오염이 저감된 iMBR 공법으로 발전시켜야 할 것이다.

KSEE

References

1. Chowdhury, P., Viraraghavan, T. and Srinivasan, A., "Biological treatment processes for fish processing wastewater - A review," *Bioresour. Technol.*, **101**, 439~449(2010).
2. Statistics Korea 「Fisheries production statistics」, Korea Rural Economic Institute 「Food Balance Sheet」.
3. Choi, Y. B., "Effects of Salt on the Biological Treatment of Seafood Wastewater"(2011).
4. Ministry of Oceans and Fisheries, "A Study on fostering for competitive processing industry"(2015).
5. Ministry of Environment official announcement No. 2004-188, "Standard method of water pollution inspection"(2004).
6. National Institute Of Environmental Research "A Study on the Unit Mass Discharge from Wastewater Producing Facilities (3)"(1998).
7. Lefebve, O. and Molketta, R. "Treatment of organic pollution in industrial saline wastewater: a literature review," *Water Res.*, **40**, 3671~3682(2006).
8. Moon, B.-H., Yun, J.-H., Seo, G.-T. and Kim, S.-S., "Effects of C/N Ratio and Salt Concentration on Pollutant Removal in SBR," *Korean Soc. Environ. Eng.*, **24**(2), 251~260(2002).
9. Lay, W. C. L., Liu, Y. and Fane, A. G., "Impacts of salinity on the performance of high retention membrane bioreactors for water reclamation: A review," *Water Res.*, **44**, 21~40(2010).
10. Choi, Y.-B., Lee, H.-S., Han, D.-J. and Kwon, J.-H., "A Study on Management of Seafood Wastewater Treatment Facility using Submerged MBR," *J. Korea Academia-Industrial Cooperation Soc.*, **16**(11), 7227~7236(2015).
11. Slade, A. H., Thorn, G. J. and Dennis, M. A., "The relationship between BOD : N ratio and wastewater treatability in a nitrogen-fixing wastewater treatment system," *Water Sci. Technol.*, **63**(4), 627~632(2011).
12. Doosan Hydro Technology, LLC, "Low energy no aeration MBR for mining wastewater treatment," AMTA technology transfer workshop, keystone, CO, Dec. 9(2014).
13. Simon Judd, "The MBR Book: Principles and applications of membrane bioreactors in water and wastewater treatment," Elsevier Ltd.(2006).
14. Chen, G. H. and Wong, M. T., "Impact of increased chloride concentration on nitrifying - activated culture," *J. Environ. Eng. - ASCE*, **130**(2), 116~125(2004).
15. Field, R. W., Wu, D., Howell, J. A. and Gupta, B. B., "Critical flux concept for microfiltration fouling," *J. Membr. Sci.*, **100**, 259~272(1995).
16. Field, R. W. and Pearce, G. K., "Critical, sustainable and threshold fluxes for membrane with water industry applications," *Adv. Colloid and Interface Sci.*, **164**, 38~44(2011).
17. Yoon, S. H., OnlineMBR homepage, <http://onlinembr.info/>.
18. Leeavb, Y. H., Cho, J. W., Sea, Y. W., Lee, J. W. and Ahn, K.-H., "Modeling of submerged membrane bioreactor process for wastewater treatment," *Desalination*, **146**, 451~457(2002).