

## 증공사 정밀여과 MBR공정을 이용한 제직폐수의 재이용

정용준 · 배종홍 · 민경석<sup>†</sup>

경북대학교 환경공학과

### Reuse of Weaving Wastewater by Membrane Bioreactor Equipped with a Hollow-fiber MF Membrane

Yong-Jun Jung · Jong-Hong Bae · Kyung-Sok Min<sup>†</sup>

Dept. of Environmental Engineering, Kyungpook National University

(Received 20 April 2004, Accepted 1 June 2004)

**Abstract** : Submerged membrane bio-reactor equipped with a hollow fiber microfiltration was applied to reuse weaving wastewater of water jet loom, where two parameters such as the concentration of MLSS and the flux were controlled. While the flux at the concentration of MLSS around 900mg/L was constantly kept over 0.4m/d and 0.8m/d in a short time, the stable flux at around 300mg/L of MLSS was shown at the 8 days later. Regardless of MLSS and flux, BOD, COD<sub>Cr</sub> and Turbidity of the permeate were 1~2mg/L, 7~10mg/L and below 1 NTU, which were 85~90%, 87~90% and 98% of removal efficiency, respectively. The stable operation without fouling was achieved because the contents of ECP were smaller than those of common MBR processes and the composition(saccharide/protein) was kept constantly. In this study, 0.5~1.0m/d of flux and 400~900mg/L of MLSS were considered as the most recommendable operating condition for the reuse of weaving wastewater.

**keywords** : Membrane Bio-reactor, Hollow-fiber, Weaving wastewater, Reuse, ECP

## 1. 서 론

국내서 발생하는 하·폐수발생량의 배출원별 구성을 보면, 생활하수 68%, 산업폐수 31.2%, 축산폐수 0.8%로서 생활하수가 많은 부분을 차지하고 있으며, BOD 발생부하량으로는 생활하수가 50.7%로서 40.8%의 산업폐수보다 높은 비중을 차지하고 있다. 산업폐수는 발생량에 비해 발생부하량이 크며, 그 성상이 매우 복잡하고 업종에 따라서 차이가 크다(Eckenfelder, 2002).

우리나라 최대의 섬유산업지로 알려진 대구지역의 섬유업체 현황을 보면, 전체 산업중 섬유업체가 업체수로는 20.6%, 종업원수로는 23.5%, 생산액으로는 23.2%, 수출 비중으로는 28.6%를 차지하고 있다. 특히 대구지역의 직물산업은 우리나라 직물(제직)시설의 61.8%, 종업원수로는 45.0%, 생산현황으로는 43.4%, 수출 비중으로는 42.2%를 차지하는 지역의 주중산업일 뿐만 아니라, 합성직물의 경우 세계 1위의 생산 및 수출지역으로 전국 직기 대수의 70.3%, 화섬생산 능력의 43.7%를 점유하고 있다(대구 염색 산업단지 관리공단, 2003).

2003년 현재, 대구광역시와 경상북도에 가동중인 제직공장은 약 600개소의 영세한 업체들로서 각 회사별 제직기계의 보유량은 평균 50대(Water Jet Loom)정도이다. Water

Jet Loom 한 대당 제직폐수의 발생량은 1일 약 4.5톤 정도 되어, 각 공장별 폐수발생량은 1일 약 225톤 정도 된다(대구 염색 산업단지 관리공단, 2003). 발생 폐수는 BOD 약 20mg/L, 탁도 30 NTU이하로 저농도 산업폐수인데, 대부분은 공단종말폐수처리장에 전량 위탁처리하거나, 자체 처리 시설을 거쳐 방류하고 있으며, 일부 회사에서는 지하수와 처리수를 혼합하여 공업용수로 사용하고 있다. 그러나, 자체 처리시설이 기술적으로 낙후되고, 관리와 공정 운영상의 문제 등으로 인하여 양호한 처리 수질 확보가 곤란하기 때문에 전량 공정수로 재이용하기는 어려운 실정으므로, 공정수로서 일부 처리수와 지하수를 혼합하여 사용하고 있는 실정이다.

한편 지하수의 수질이 점차로 불량한 경우가 많고, 높은 경도 때문에 노즐에 스케일이 형성되어 물분사시 직선 방향이 유지되기 어려울 뿐만 아니라, 공정수 확보에 대다수의 제직 업체가 어려움을 겪고 있는 실정이다.

공업용수의 가격은 지자체 마다 다소 차이가 있으나, K시에서는 현재 톤당 350원이고, 폐수처리 비용이 100~150원으로 생산원가(경산시 진량공단 사업소, 2003)에 크게 부담이 되고 있을 뿐만 아니라, 앞으로는 정부의 상수도 요금 현실화 방침과 낙동강 수질보전 대책을 위한 물이용 부담금 상승으로 인하여 더욱 용수사용에 부담을 받게 될 것이다.

따라서 지하수를 대신할 안정적인 제직 공정수를 확보하고, 폐수처리 비용과 용수 사용료를 절감할 수 있으며, 현

<sup>†</sup> To whom correspondence should be addressed.  
ksmin@knu.ac.kr

장의 노동자들이 호소하는 재이용수의 사용에 따른 가려움증과 피부병을 일으키는 박테리아와 병원균의 완벽한 제거 및 보다 경제적인 재이용수 생산 처리공정의 개발이 절실히 필요하게 되었다.

본 연구에서는 저농도로 배출되는 제직폐수에 운전의 자동화와 무인화가 가능하여 인건비가 절약되고, 밀폐화할 수 있어 쾌적한 주위환경을 유지할 수 있으며, 세균이나 바이러스의 대부분이 분리막에 의해 제거되어 별도의 소독 공정이 필요없는 MBR(Membrane Bio-reactor)공정의 장점들(Urbain et al., 1996; Davies et al., 1998; 안규홍 등, 1993)을 활용하게 되었다. 중공사 정밀여과 MBR공정으로 제직폐수를 처리하여 재이용 가능성을 검토하였으며, 운전 인자를 구할 수 있는 기초 자료를 조사하였다.

## 2. 실험

### 2.1. 막

안정적인 처리수 생산을 위해서 생물반응조내에 Table 1에 나타난 바와 같은 사양을 가진 M사의 분리막을 설치하였다. 분리막의 재질은 표면에 친수화 코팅이 되어있는 폴리에틸렌(polyethylene)계 중공사 정밀여과막(hollow fiber microfiltration membrane)으로서 공칭공경(particle cut-off)은 0.1 μm이고, 유효 막면적은 0.2m<sup>2</sup>/module이다. 본 연구에서는 공정 운전상의 안정성을 확보하기 위하여 흡입(60분)/정지(15분) 간헐 운전방식을 채택하여 막폐색을 최대한 억제하였다.

Table 1. Membrane specification

Classification	Specification
Material	Polyethylene (hydrophilic)
Particle cut off	0.1 μm
Module	Hollow fiber
Effective surface area	0.2m <sup>2</sup>

### 2.2. 반응 장치

본 연구에 사용된 장치는 전체용량 30L, 유효용량 27L, 두께 1cm의 아크릴로 제작된 단일 반응조에 침지형 중공사 정밀여과막을 설치한 후, 하단부의 산기관을 통해 공기를 포기하고, 흡입펌프를 사용하여 여과수를 배출할 수 있도록 Fig. 1과 같이 구성하였다. 각 반응조에는 유입펌프, 흡입펌프, 송풍기, 막대형산기관, 타이머, 기타 전자제어장치를 적절히 설치하여 연속적인 자동운전이 이루어지도록 하였다. 막오염 방지와 세정을 위해 설치한 송풍기로부터

Table 3. Operating conditions of MBR

Mode	HRT(d)	MLSS(mg/L)	Suction on/off	Air(L/min)	Initial flux(m/d)	DO(mg/L)	SRT(d)
I	0.270	890~985	60/15	20	0.5	5.3	65
II	0.270	255~285	60/15	20	0.5	6.8	84
III	0.135	870~950	60/15	20	1.0	4.5	53
IV	0.135	240~270	60/15	20	1.0	6.1	72

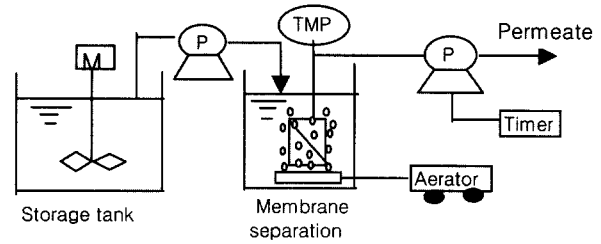


Fig. 1. Schematic diagram of submerged MBR.

호기조 하부에 있는 산기관을 통하여 공급되는 공기가 조내의 포기와 동시에 막분리 여과조로 공급되어 막을 진동시켜 막면 퇴적물을 제거할 수 있도록 설계하였다.

### 2.3. 폐수 성상

본 실험에 사용된 폐수는 경상북도 K시에 소재한 제직공장의 폐수로서, 수질은 Table 2와 같이 BOD 13~17mg/L, COD<sub>cr</sub> 79~90mg/L, Turbidity 23~27NTU 그리고 NH<sub>4</sub>-N와 T-P가 각각 1mg/L이하로 나타났다. 일반적인 산업폐수보다는 현저하게 낮은 농도를 유지하였으나, 제직폐수를 재이용수로 사용하기 위해서 가장 문제가 되는 탁도 성분의 제거가 필요한 것으로 분석되었다.

Table 2. Characteristic of influent weaving wastewater

Parameter	Concentration (mg/L)
BOD	13~17(15)
COD <sub>cr</sub>	79~90(85)
Turbidity	23~27(25)*
NH <sub>4</sub> -N	<1
T-P	<1

\* unit: NTU, ( ): average

### 2.4. 운전 및 분석 방법

본 연구에서 수행한 구체적인 운전방법은 Table 3에 제시한 것과 같이, 동일한 조건하에서 HRT와 MLSS의 농도를 조절한 4가지 mode로 설정하였으며, 각 mode별 운전기간은 1개월로 하였다. Mode변환시에는 이전 운전 mode와 동일한 상태의 module을 유지하기 위하여 module을 호기조 외부로 드러내어 NaOCl용액으로 세정한 후 하루정도 경과한 뒤에 재사용하였다.

MBR반응조는 20±2°C로 유지되는 항온실에서 운전하였고, 20L/min의 공기를 주입하여 미생물의 활동에 필요한 공기를 공급함과 동시에 막면에 부착된 오염물질을 제거하도록 하였다. 식중슬러지는 대구광역시 S하수처리장의 반송슬러지를 채취하여 실내에서 본 실험에 사용한 유입수와

동일한 폐수로 1개월 이상 배양한 미생물을 이용하였다.

본 연구에서는 Standard Methods(APHA, 1998)에 준하여 BOD, COD<sub>cr</sub>, NH<sub>4</sub>-N, T-P등을 분석하였으며, 탁도는 기기 장치(HACH, 2100Turbidimeter)를 이용하여 측정하였다. 막 오염에 미치는 영향인자를 검토하기 위하여 투과유속 변화와 세포외 체외물질(ECP, Extra Cellular Polymer)과의 관계를 조사하였다. ECP는 반응조내의 미생물을 채취하여, 냉온추출법으로 ECP를 추출한 뒤, 단백질은 Lowry method, 탄수화물은 페놀-황산법으로 각각 정량 분석하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1. 투과유속(Flux) 변화

막분리 여과조내에서의 흡입펌프는 운전 mode에 관계없이 60분 가동/15분 정지 형태의 간헐방식으로 운전되었는데, 이때 운전경과일에 따른 투과량의 변화를 Fig. 2에 나타내었다. 각 운전 모드별로 초기에는 약간의 차압 변화가 있었으나, flux가 안정화 된 시점 이후로는 10 cmHg이하의 일정한 막간 차압을 유지하였다.

Mode I은 운전시작 후 5일째까지 초기 투과유속이 0.5m/d에서 0.4m/d로 서서히 감소한 이후, 투과유속의 변화 없이 안정적인 여과수를 구할 수 있었다. 또한 mode II는 운전경과일이 10일째까지 0.35m/d로 감소하였지만, 그 이후에는 mode I 과 같이 안정적인 여과수를 구할 수 있었다. 초기의 설정 투과유속을 1.0m/d로 증가시킨 mode III과 IV에서도 mode I 과 II에서 나타낸 결과와 유사한 경향을 나타냈다. 즉 MLSS를 상대적으로 높게 운전한 mode III에서는 보다 짧은 시간에 0.85m/d의 안정적인 투과유속을 확보하였지만, mode IV에서는 0.75m/d의 투과유속을 나타냈다.

본 연구에서는 4가지의 운전 mode에 모두 동일한 양(20L/min)의 공기를 주입하였으므로, 생물반응조내의 MLSS 농도가 비교적 낮은 mode II와 IV에서 점성이 비교적 작아 포기로 인한 수리적 강도가 상대적으로 컸고(Nagaoka et al., 1998), 계속된 공기주입에 의하여 미생물과 무기물, 유기물, ECP, 이온물질 등으로 구성된 floc이 mode I 과 III에 비해 많이 파괴되었기 때문에 투과유속의 변화폭이 상대적으로 크게 나타난 것(Ohya et al., 1988)으로 분석된다.

한편, Fig. 2에서와 같이 각 운전 mode별로 초기 5일과 10일 정도까지는 소폭의 투과유속 변화가 있었는데, 이 같은 현상은 슬러지 floc이나 미생물 대사산물 등의 막면부착과 탈리에 의한 저항층의 변화와 막 자체의 물성 변화 등의 영향으로 설명될 수 있다. 또한 막면부착층의 형성에 의해 막투과유량이 시간적으로 감소하는 문제점이 있기 때문에 막투과성능에 대한 생물대사 성분의 영향(신항식 등, 1999), 막을 이용한 활성슬러지 공정에서 용해성 유기물질의 거동(Nagaoka et al., 1998; 서정범 등, 1994) 및 pore size가 분리효과에 미치는 영향(Ohya et al., 1988)등에 관한 연구들이 MBR운전에서 주된 관심사가 되고 있다.

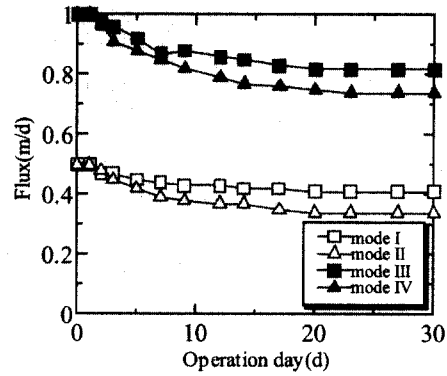


Fig. 2. Variation of flux during the operating days.

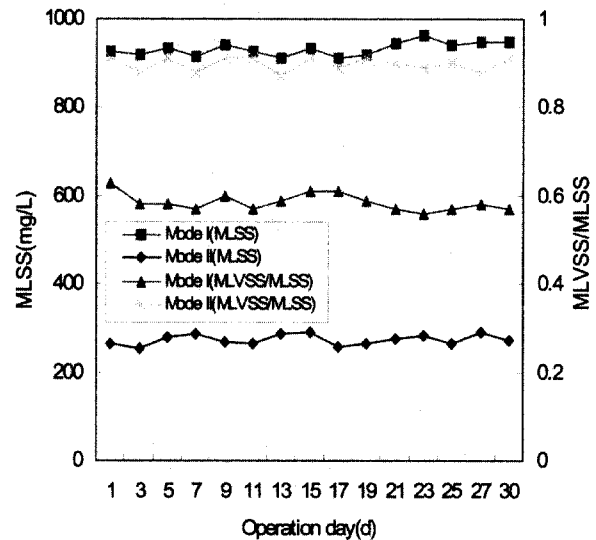


Fig. 3. Profiles of MLSS and MLVSS concentration with operating days.

운전경과일에 따른 MLSS와 MLVSS의 농도변화를 Fig. 3과 같이 도시하여 투과유속에 미치는 영향을 검토하였다. MLVSS와 MLSS의 농도비가 높게 나타난 mode II에서는 mode I 보다 투과유속이 다소 많이 감소하였는데, 이는 Shimizu 등(1996)이 침지형 MBR을 이용한 실험에서 투과유속은 반응조내의 MLVSS 농도의 제공에 반비례한다고 보고한 내용과 유사한 경향을 나타내었다. 그러므로 실제 MBR공정의 운전에서 안정적인 투과유속을 확보하기 위해서는 적절한 MLSS의 유지뿐만 아니라 MLSS와 MLVSS의 농도비도 중요한 인자로 고려되어야 한다.

흡입펌프를 계속 가동하면 중공사막의 내경이 좁아지게 되고, 그 외경에는 부착물이 형성되기 때문에, 간헐운전으로 정지 시간을 두게 되면 막의 내경이 복원되어 안정된 투과유속을 구할 수 있게 된다. 山本和夫 (1992)의 연구결과에 따르면, 고농도 활성슬러지 막분리법에서 막오염 감소 대책으로는 여과가 막면의 케이크층에서 지배되는 경우가 대부분이므로 케이크층의 제거가 중요하게 되어 crossflow 유속을 향상시켜 오염물질을 제거하지만 이럴 경우 에너지 소비가 크게 된다는 결점이 동반된다고 하였다. 하지만 본 연구에서는 침지형 막분리 장치를 사용하였으므로 호기조

내의 포기와 동시에 막면 부착물을 일정하게 제어할 수 있도록 하는 산기관 위치와 포기강도의 조절이 바람직할 것으로 사료된다. 따라서 본 연구에서와 같이 저농도 제직폐수의 재이용을 위해 MBR로 처리할 경우에 장기간 연속적이고 안정적인 투과유속을 구하려면, 한계유속 이하에서 운전하는 정압운전과 막면 유속에 영향을 미칠뿐만 아니라 적절한 규모의 floc을 유지하기 위한 포기량의 조절(Kiso et al., 2000) 등에 관하여 운전인자로 고려해야 할 것으로 사료된다.

3.2. 유기물제거

활성슬러지의 입자성분은 0.5 μm~15 μm의 크기가 대부분을 차지하며, 0.1 μm 이하의 입자 체적은 단지 0.3%에 불과하므로, 본 처리공정의 막분리 여과조에 적용한 0.1 μm MF막의 분획특성을 고려할 경우 98% 이상의 탁도 제거를 기대할 수 있었다. 전체 반응조 운전기간동안 막투과수의 탁도는 Fig. 4에 나타낸 바와 같이 운전 mode에 관계없이 평균 1NTU 이하의 안정된 수질을 확보할 수 있었다.

대구광역시가 처음으로 공업용수 정수장을 건설하여 공단에 공급할 당시 공단과 맺은 수질기준은 일본 공업용수의 기준과 동일한 탁도 10 NTU이었으나(죽곡정수사업소, 2001), 본 연구 결과는 이보다 훨씬 양호한 1 NTU이하의 처리수질을 기대할 수 있었으며, 보다 양호한 수질을 필요로 하는 타용도로의 사용도 가능한 것으로 나타났다. 또한 제직폐수를 공정수로 재이용할 경우 문제점들 중의 하나로 지적되었던 탁도 성분의 완벽한 제거가 가능하며, 세균, 바이러스 및 콜로이드 성분등에 기인한 현장의 근로자들에게 발생하는 가려움증이나 피부병 같은 문제점을 제거할 수 있을 것으로 사료된다.

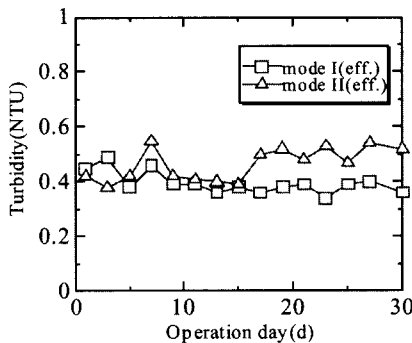


Fig. 4. Turbidity of permeate of each mode.

Fig. 5에는 30일간 연속 가동한 침지형 분리막 투과수의 COD<sub>cr</sub>과 BOD농도를 나타내었다. COD<sub>cr</sub>과 BOD의 제거율은 운전 조건에 관계없이 유사한 경향을 나타내어 운전 시작 후 계속하여 각각 9~14mg/L와 1~2mg/L의 상당히 양호한 안정된 수질을 나타내었다. 유기물질인 COD<sub>cr</sub>과 BOD의 제거율은 각각 87~90%와 85~91%를 나타내어 호기조에 분리막을 사용할 경우 저농도의 유기성 제직폐수에도 안정적으로 대응할 수 있을 것으로 사료된다.

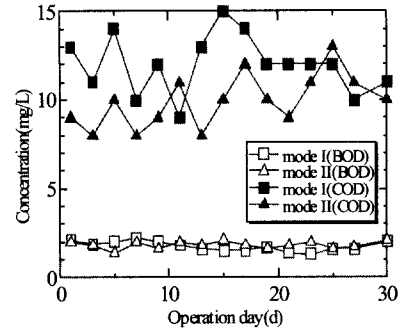


Fig. 5. Profiles of BOD & COD<sub>cr</sub> concentrations of permeate.

운전기간 동안의 각 mode별 평균 MLSS는 mode I과 III에서 900 mg/L전후, mode II와 IV에서 250 mg/L전후, 막분리조로 유입되는 BOD는 13~17 mg/L, 유량은 각각 100L/d와 200L/d로 유지되어 mode IV를 제외하면 슬러지 자기산화까지 유도할 수 있는 장기포기법의 운영요소와 유사한 0.06~0.206 kgBOD/kgMLSS · d로 나타나, 낮은 유기물 부하 즉, 낮은 F/M비에서도 적정 MLSS농도 유지와 양호한 유출수 확보등과 같은 MBR공정의 전형적인 특징을 나타내었다.

3.3. ECP와 막오염과의 관계

ECP는 MBR반응조내의 미생물 상태나 운전조건등에 따라 그 성장과 양이 변하면서 막표면에 축적되어 막오염의 주된 원인(신항식 등, 1999)이 되고 있는데, 신항식 등(1999)의 연구결과에 따르면 ECP성분중에 탄수화물과 단백질의 비는 침지형 MBR공정의 안정적인 운전을 위해서는 모니터링 되어야 한다고 지적하였다. 따라서 본 연구에서도 비교적 막투과유속의 변화폭이 컸던 mode II를 대상으로 운전 경과일에 따른 막투과유속과 ECP의 농도 및 성분변화를 조사하였다.

신항식 등(1999)의 연구에서는 단백질/탄수화물의 비가 증가함에 따라 총저항이 증가하여 막오염에 영향을 미친다고 하였으나, 본 연구에서는 단백질/탄수화물의 비가 거의 일정하게 유지되었다. 본 연구에서는 저농도 제직폐수를 1000mg/L이하의 MLSS로 운전되는 MBR로 처리하였기 때문에 상대적으로 ECP의 발생량이 적었고, 또한 단백질/탄수화물의 비도 일정하게 유지되는 것으로 나타나서 연속적으로 안정된 운전이 가능하였던 것으로 사료된다.

ECP는 탄수화물, 단백질, 지질, 핵산등과 같은 형태의 복잡한 고분자 물질로 구성되어 있지만, 여기서는 ECP의 대부분을 탄수화물과 단백질(Bura et al., 1998)로 간주하였다. Fig. 6은 mode I에서 ECP내의 탄수화물과 단백질의 농도 변화와 막투과유속의 변화를 나타내고 있다.

4. 결론

제직폐수의 재이용을 위해 중공사 정밀여과막을 생물반응조에 침지시켜 HRT와 MLSS의 양을 조절하면서 연속적

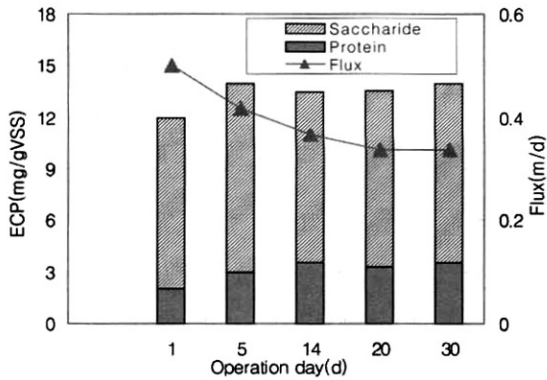


Fig. 6. The concentration of EPS at each mode.

으로 처리한 결과는 다음과 같다.

- 저농도의 제직폐수를 대상으로 침지형 생물반응조의 투과유속을 0.5 m/d와 1.0 m/d로 설정하고, 흡입(60분)/정지(15분)을 포기와 연동하는 상태에서 운전한 결과, 250~280mg/L의 MLSS로 운전한 반응조는 890~980mg/L의 MLSS로 운전한 반응조보다 투과유속의 변화가 크게 나타나, 운전 시작 후 10일과 8일째부터 각각 0.35m/d와 0.75m/d를 일정하게 유지하여, 투과유속은 MLSS의 영향을 더 크게 받았다.
- 막투과수는 운전 형태와 관계없이 BOD<sub>5</sub> 1~2mg/L, COD<sub>cr</sub> 7~10 mg/L이었으며, 각각의 제거효율은 BOD가 85~91%, COD<sub>cr</sub>이 87~90%로 매우 안정된 수질을 나타냈다.
- 본 공정의 처리수 탁도는 1 NTU이하로 유지되어 10 NTU로 설정된 공업용수 기준을 만족하였으므로, MBR공정은 저농도 제직폐수의 재이용수 생산 공정에 적합한 것으로 나타났다.
- 본 연구에 사용된 설정 투과유속과 MLSS농도에 관계없이 저농도 제직폐수를 MBR로 처리한 결과, 막오염없이 안정된 운전이 가능하였는데, 이는 일반적인 MBR공정과 달리 ECP의 양이 적었을 뿐만 아니라, 단백질과 탄수화물의 조성비도 일정하게 유지된 요인으로 분석된다.
- 저농도 제직폐수를 공정수로 재이용하기 위한 MBR공정의 운전은 설정 투과유속 0.5~1.0m/d, MLSS 400~900mg/L 전후로 설정하는 것이 바람직할 것이다.

## 사 사

본 연구는 2003년도 산·학·연 공동기술개발 컨소시엄사업 연구비 지원의 일환으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

## 참고문헌

- W.W.Eckenfelder, Jr., Industrial wastewater pollution control, 3rd ed., McGraw (2002).

- 대구 염색 산업단지 관리공단 (2003).
- 경산시 진량공단 사업소 (2003).
- Urbain, V., Benoit, R., and Manem, J., Membrane bioreactor : a new treatment tool, *J.AWWA*, May, pp. 75-86 (1996).
- Davies, W. J., Le, M. S., and Heath, C. R., Intensified activated sludge process with submerged membrane microfiltration, *Water Science & Technology*, **38**(4-5), pp. 421-428 (1998).
- 안규홍, 권지향, 막분리를 이용한 중수도 기술, *화학공업과 기술*, **11**(6), pp. 446-471 (1993).
- APHA, Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 20th ed., American Public Health Association, Washington, DC (1998).
- 신항식, 안현희, 강석태, 침지형 막분리 공정의 막오염 요인 연구(I), *한국물환경학회지*, **15**(3), pp. 415-420 (1999).
- Nagaoka H., Yamanishi S and Miya A., Modelling of bio-fouling by extracellular polymers in membrane separation activated sludge system, *Proc. of IAWQ Conf.*, Vancouver (1998).
- 서정범, 윤조희, 임연택, 홍정선, 류재근, 서운수 활성슬러지와 UF막의 조합공법에 의한 폐수처리, *한국물환경학회지*, **10**(2), pp. 90-95 (1994).
- Ohya, H., Kim, J. J., Chinen, A., Aihara, M., Semenova, S.I., Negishi, Y., Moti, O., and Yasuda, M., Effects of pore size on separation mechanisms of microfiltration of only water using porous glass tubular membrane, *J. Memb. Sci.*, **145**, pp. 1-14 (1988).
- Shimizu, Y., Okuno, Y., Uryu, K., Ohtsubo, S., and Watanabe, A., Filtration characteristics of hollow fiber microfiltration membranes used in membrane bioreactor for domestic wastewater treatment, *Water Research*, **30**(10), pp. 2385-2392 (1996).
- 山本和夫, 高濃度活性汚泥膜分離プロセスによる高度處理, *用水と廢水*, **34**(11), pp. 911-917 (1992).
- Kiso, Y., Jung, Y. J., Min, K. S., Ichinari, T., Kitao, T., Park, M. S., and Nishimura, K., Wastewater treatment performance of a filtration bio-reactor equipped with a mesh as a filter material, *Water Research*, **34**(17), pp. 4143-4150 (2000).
- 죽곡정수사업소, 공업용수의 신뢰도평가 및 업종별 요구수질 조사, 2001년 연구보고서 (2001).
- 신항식, 안현희, 강석태, 최광호, 임성균, 침지형 막분리 공정의 막오염 요인 연구(II), *한국물환경학회지*, **15**(3), pp. 421-428 (1999).
- Bura, R., Cheung, M., Liao, B., Finlayson, J., Lee, B. C., Droppo, I. G., Leppard, G. G., and Liss, S. N., Composition of extracellular polymeric substances in the activated sludge floc matrix, *Water Science & Technology*, **37**(4-5), pp. 325-333 (1998).