

ORIGINAL ARTICLE

섬유여과기와 전기분해조를 병합한 물 재이용 시스템 설계

신춘환*

동서대학교 에너지환경 공학과

Design of a Water Reuse System Combined with a Fiber Filtration and Electrolysis

Choon-Hwan Shin*

Department of Energy & Environmental Engineering, Dongseo University, Busan 607-716, Korea

Abstract

A water reuse system was designed for a demonstration plant by combining fiber filtration and electrolysis. A discharged dye wastewater after treated with biomedica was used in this study. It was found that an additional removal of suspended solids (SS) was feasible with 2-stage filtration while electrolysis was not effective. Also, COD_{Cr} and COD_{Mn} were not removed with 2-stage filtration but electrolysis resulted in about 26.9% additional removal. This indicates that electrolysis play an important role in organic removal. Removal of T-N and T-P was negligible with 1 and 2-stage fiber filtration and low-level electrolyte. However, with 2000 ppm of electrolyte, their removal efficiencies were about 83.1 and 60%, respectively, suggesting that the removal rates are well associated with the electrolyte concentrations. With high-level electrolyte, colority was removed about 82% while chlorine ions were removed only about 10%. Therefore, to treat underground water containing high-level salinity in the follow-up study, based on the results in this paper, a combined system with selection of additional unit process and reverse osmosis will be designed.

Key words : Fiber filtration, Electrolysis, Combined system, Removal efficiency, Water reuse

1. 서론

지구상에 존재하는 담수의 0.26%만이 용수로서 사용이 가능한 물 자원으로 평가되고 있다. 여기에 지구온난화에 따른 물 자원의 고갈과 수질오염의 가속화 현상 등으로 인하여 이마저 급속히 줄어들 것으로 예상하고 있다. 이에 따라 물 자원은 석유, 석탄 등의 소모성 에너지 자원과는 달리 순환자원으로서의 가치를 인정받고 있기 때문에 수자원의 개발 및 수자원을 확보한다는 차원에서

물 재이용에 관한 세계적인 노력이 전개되고 있다 (Achilli et al., 2014; Shannon et al., 2008). 이는 빗물 재이용, 하·폐수 재이용, 발전소 온배수 재이용 및 해수 담수화 등의 다양한 분야(Donghae, 2015; Shin, 2010; POSCO, 2014; Greenlee et al., 2009)에 걸쳐 기술적인 타당성을 제시하고 있다. 특히 물 재이용을 위해서는 원수의 수질 및 재이용수의 용도에 따라 접근 기술이 차별성을 가지고 있기 때문에 물 재이용을 위한 시스템 설계의 경우에는 시스템 구성의 근본적인 설계 방향이 우선

Received 11 August, 2015; Revised 3 November, 2015;

Accepted 9 November, 2015

*Corresponding author: Choon-Hwan Shin, Dept. of Energy & Environmental Engineering, Dongseo University, Busan 607-716, Korea

Phone : +82-51-320-1787

E-mail : 6116shin@dongseo.ac.kr

© The Korean Environmental Sciences Society. All rights reserved.

© 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.

되어야한다. 즉 일차적으로 suspended solid(SS)의 처리, 염분 및 total dissolved solid(TDS)의 제거, 주로 Ca^{+2} 와 Mg^{+2} 에 의해 유발되는 경도 제거, 중탄산 등의 탄산염제거, 때에 따라서는 색도 및 석유화합물의 제거, total organic carbon(TOC) 으로서의 유기물 처리 등을 위한 기능성 소재의 선택 및 적용방법이 설정되어야하며 공업용수, 농업용수, 가정용수, 조경용수, 생활용수 및 식수 등의 용도에 따라 요구 수질을 만족하는 재이용수 생산 시스템의 구성 및 운전 기술이 정립되어야 한다(Shin and Bae, 2012; Shin et al., 2014).

이에 따라 기능성 합성막을 이용한 SS제거 및 역삼투를 이용한 염분 유래 TDS 제거 등의 고액 분리 기술(Shin and Johnson, 2009; Gude et al., 2010; Hong et al., 2011; Kim and Kim, 2005; Matsumura, 2001)과 유기물 제거를 위한 산화 분해 기술(Chen et al., 2002; Lee and Park, 2013)에 관한 다양한 연구가 수행되어 왔

으며 맞춤형 수질을 만족하기 위한 현장 적용형 실증 plant(Sseng, 2012; Saito et al., 2012) 또한 검증되고 있는 실정이다. 이러한 관점에서 본 연구에서는 이미 SS의 제거에 탁월한 효과가 검증된 S사의 섬유여과 실증 plant를 모방한 간이 섬유여과기를 제작하고 여기에 전기분해 반응조를 연결한 병합 시스템의 설계와 함께 염색폐수를 표본 원수로 선택하여 재이용수 생산 가능성에 대한 기초자료를 마련하고자 하였으며 단위 반응 시스템의 병합에 대한 타당성 및 사용 원수의 변화에 따른 병합 조건의 설계 방법을 제시하고자 하였다.

2. 재료 및 장치제작

2.1. 실증 plant의 여과 및 역세 원리 분석

굵기가 40 μm 인 polypropylene(PP) 재질의 미세섬유를 원통형 다공성 strainer 표면에 두께 약 6.0 cm 압착하

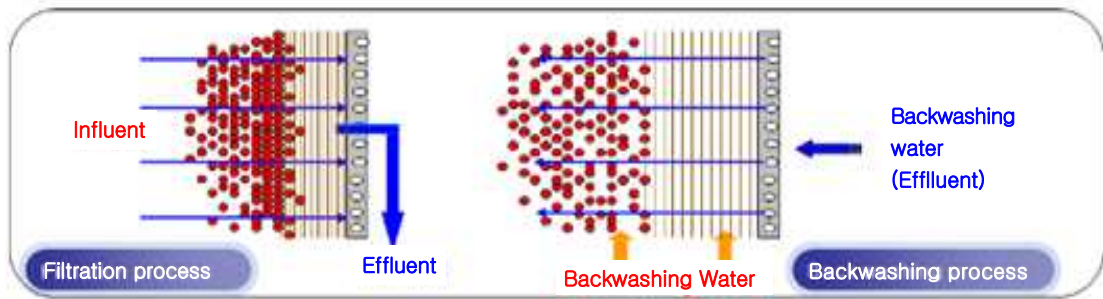


Fig. 1. Principle of fiber filtration and back washing.

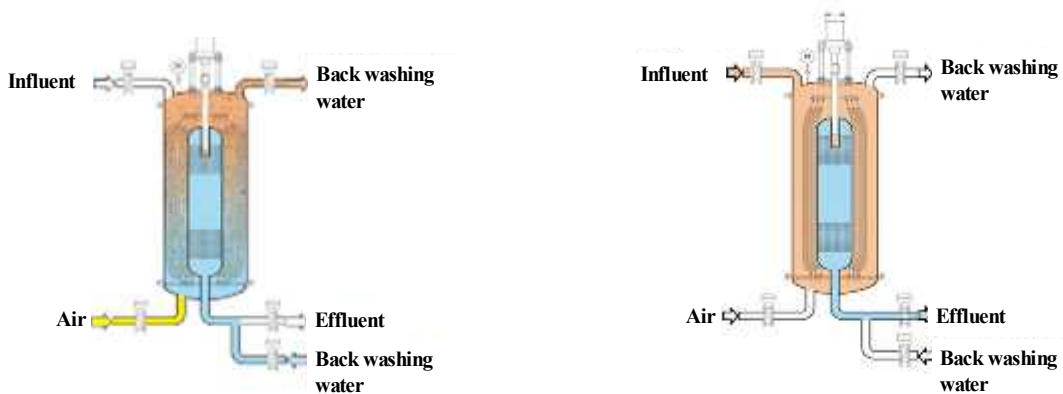


Fig. 2. Schematic diagram of real plant for filtration and back washing.

여 섬유 간격을 줄인 섬유층을 만들고 최대 0.7 kgf/cm²의 수위차로 섬유여과사의 외부로부터 내부로 여과하는 공정과 blower를 통해 하부로부터 공기를 유입하여 섬유층을 이완시키면서 역세수를 strainer를 통해 섬유층의 내부에서 외부로 공급하여 역세하는 공정을 특징으로 하고 있기 때문에 막여과 공정 보다는 운전의 수월성이 인정되고 있다. 이와 같은 섬유여과 특성을 분석하여 장치 제작의 기본으로 하였으며 공정원리를 Fig.1에, 실증 plant의 모형을 Fig.2에 나타내었다(Sseng, 2012).

2.2. 실증 여과 장치의 규격 및 운전 조건 분석

Fig. 2와 같은 실증 plant는 처리량이 1,200 m³/day, 여과속도 11.4 m/hr로 운전되는 대용량의 장치이기 때문에 실험실 규모로는 적합하지 않지만 여과면적이 4.4 m², 부피가 1.3 m³의 조건이 제시되어 있으며 0.74 m²의 소요 부지가 필요한 것으로 확인되기 때문에 이러한 조건을 본연구의 bench scale 형 장치제작을 위한 기본 자료로 활용하였다(Sseng, 2012).

2.3. 장치제작

2.3.1. 여과장치 제작 및 운전

PP 재질의 섬유사를 수동형 레버가 장착된 지름 30 cm, 높이 60 cm의 아크릴 반응조에 충전시키고 압착하여 여과층이 20 cm 되도록 조절하였다. 또한 유량조절용 정량펌프로 100 L/day 처리용량으로 조절하였고 압력을

제거하는 역세공정으로 운전하였다.

2.3.2. 전기분해 반응조 제작 및 연결

망상형 Ti/IrO₂를 양극으로, SUS316L을 음극으로 설치한 유효용량 15 L의 직접산화조와 유효용량 37 L의 간접 산화조로 구성하고 전해질 공급용 저장조를 부착하여 제작하였으며 D.C. Power Supply(50A-30V, 단상)로 직류전원을 공급하여 10 V, 30 mA의 조건으로 운전하였다.

2.3.3. 병합시스템 구성 및 운전

2개의 섬유여과 장치 및 전기분해 반응조를 연결하여 Fig.3과 같이 제작하였으며 선행연구의 결과(KOFAC, 2015)에 따라 1단 및 2단 섬유여과기는 각각 60분, 전기분해 반응조는 전해질을 100, 500, 2,000 ppm으로 농도를 조절하여 30분의 체류 시간으로 운전하였다. 또한 섬유여과 단독에 의한 제거효율과 전기분해 병합에 의한 제거효율을 제시하기 위해 방류수를 구분하여 분석하였다.

2.4. 인공하수 제조 및 분석

2.4.1. 인공하수 제조

생물메디아로 처리된 염색폐수의 방류수(Park and Chung, 2010)를 원수로 선정하여 가장 높은 농도를 기준으로 Table 1과 같이 인공하수를 제조하였으며 색도는 Blue BNG(λ=641 nm)을 사용하여 흡광도로서 10.0

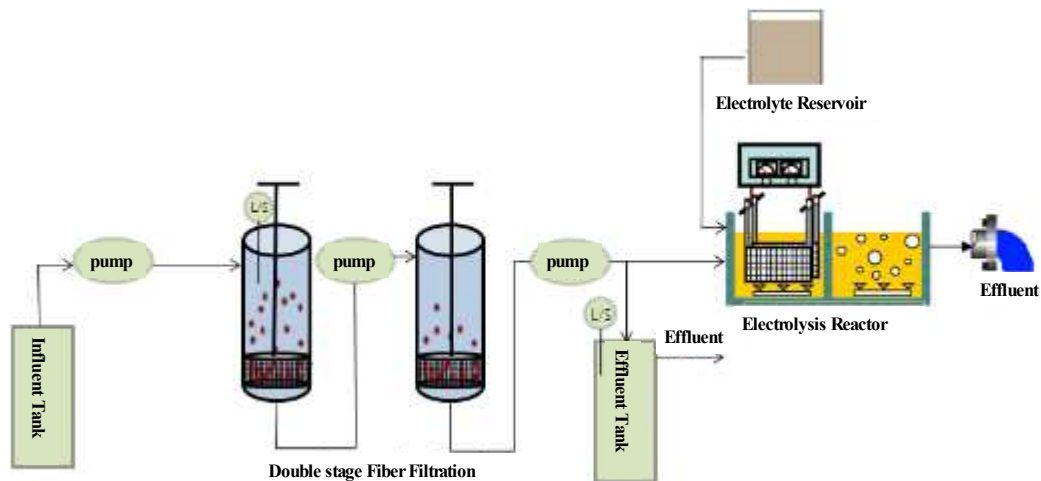


Fig. 3. Schematic diagram of co-treatment system.

Table 1. Compositions of synthetic wastewater

Analysis items	Agents	Injection amount(mg/L)	Concentration(mg/L)
COD _{cr} (mg/l)	Glucose	420.0	408.0
COD _{Mn} (mg/l)			194.0
Color	Disperse Blue	10.0	10.0
T-N (mg/l)	NH ₄ Cl	89.2	23.6
T-P (mg/l)	K ₂ HPO ₄	5.5	1.0
Cl ⁻ (mg/l)	CaCl ₂ ·2H ₂ O	0.5	1,037
SS (mg/l)	H ₂ Al ₂ Si ₂ O ₈ ·2H ₂ O	24.0	240

을 초기 색도로 설정하였다. 또한 특정 지하수의 Cl⁻ 제거효율에 관한 선행 연구를 위해 방류수의 260.0 ppm보다 높은 1,037 ppm으로 농도를 조절하였다.

2.4.2. 농도분석 및 측정

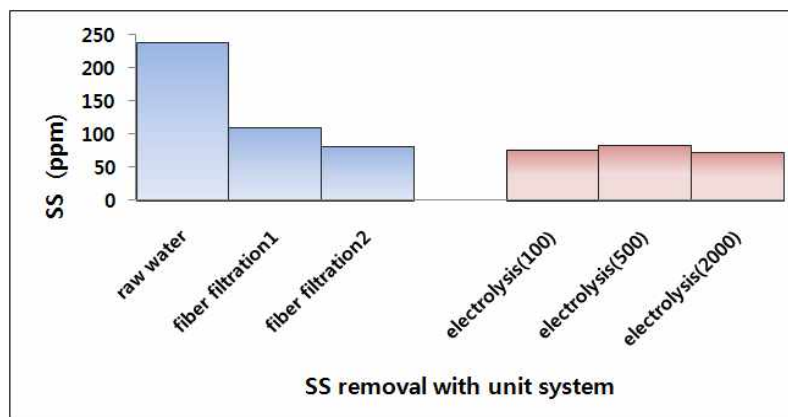
COD, T-N, T-P, Cl⁻은 휴마스 지시약(Humas, Korea)을 사용하여 분석하였으며 색도는 흡광광도계(Shimadzu, Japan), SS는 탁도계(HACH, USA)를 사용하여 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. SS의 제거효율

SS가 240 ppm인 인공하수를 원수로 사용하여 1단 여과, 2단 여과의 제거효율과 전기분해 반응조의 전해질 농도를 100, 500, 2,000 ppm으로 조절하여 제거효율을

비교하였다. Fig.4에서 볼 수 있는 바와 같이 유출수의 SS농도는 1단 섬유여과기에서 111 ppm, 2단 섬유여과기에서 82 ppm으로 나타나 제거효율은 각각 53.8 %, 65.8 % 임을 확인하였다. 따라서 2단 섬유여과기에서 12%의 추가적인 여과효율을 보이고 있음을 알 수 있다. 또한 전기분해조 유출수는 전해질 농도 100, 500, 2,000 ppm에서 각각 76, 84, 72 ppm로 나타나 SS 제거효율 면에서는 확실한 효과가 검증되지 않음을 알 수 있다. 이는 섬유여과 실증 plant의 경우에는 섬유여과기 전단에 응집제를 투입하여 응집 floc 형성에 의한 제거효율이 1단 여과에서 약 88%, 2단 여과에서 98%인 결과(Sseng, 2012)와는 제거효율 면에서는 차이가 있으나 2단 여과에서 추가적인 여과효율을 기대 할 수 있다는 면에서는 일치하고 있다.

**Fig. 4.** SS removal with a unit system.

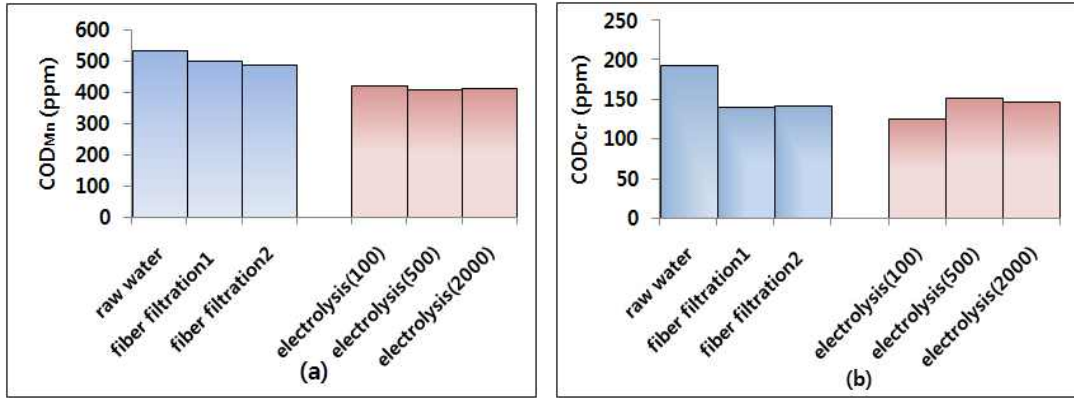


Fig. 5. COD_{cr}(a) and COD_{Mn}(b) removal with a unit system.

3.2. COD_{cr} 및 COD_{Mn}의 제거효율

Fig.5에 COD_{cr}와 COD_{Mn}의 제거효율을 나타내었다. 여기서 보면 COD_{cr}은 1단 섬유여과기 및 2단 섬유여과기의 유출수 농도가 각각 500.0, 488.5 ppm으로 6.8%, 8.9%의 제거효율을 나타내고 있으며 COD_{Mn}의 제거효율 역시 27.8%, 26.8%로 나타나고 있어 SS의 제거와는 달리 2단 여과의 효과가 거의 없음을 알 수 있다. 또한 한의 여과막(MF)의 평균 제거효율인 60%에 비하면 (Pendergast et al., 2011) 아주 미미한 제거효율인 뿐 아니라 실증 plant의 50%와 비교하여도 아주 낮은 제거효율을 보이고 있다. 이는 섬유여과기의 평균 공경이 MF에 비해 크기 때문에 나타나는 현상이기도 하지만 bench scale로 제작된 섬유여과기는 수동형 레버를 사용하여 섬유층의 충고를 20 cm로 조절하였기 때문에 유압식으

로 충고를 조절하는 실증 plant 보다는 충진층의 밀도가 낮아 기인하는 영향이 클 것으로 판단된다. 전기분해 반응조의 유출수는 전해질 농도가 100, 500, 2,000 ppm에서 COD_{cr}은 421, 410, 416 ppm로 나타나 평균 22.5%의 제거효율을, COD_{Mn}은 125, 152, 148 ppm으로 나타나 평균 26.9%의 제거효율을 보이는 것으로 확인되었기 때문에 유기물의 산화에 의한 효과가 나타나지는 않지만(Shin and Bae, 2012; Shin et al., 2014; Song et al., 2007) 전해질 농도에 따른 유기물 분해 효과를 제시하기는 어렵다는 것을 확인하였다.

3.3. T-N, T-P의 제거효율

Fig.6에서 볼 수 있는바와 같이 T-N 및 T-P의 제거는 1단 및 2단 섬유여과에서 10% 미만의 제거효율을 보이

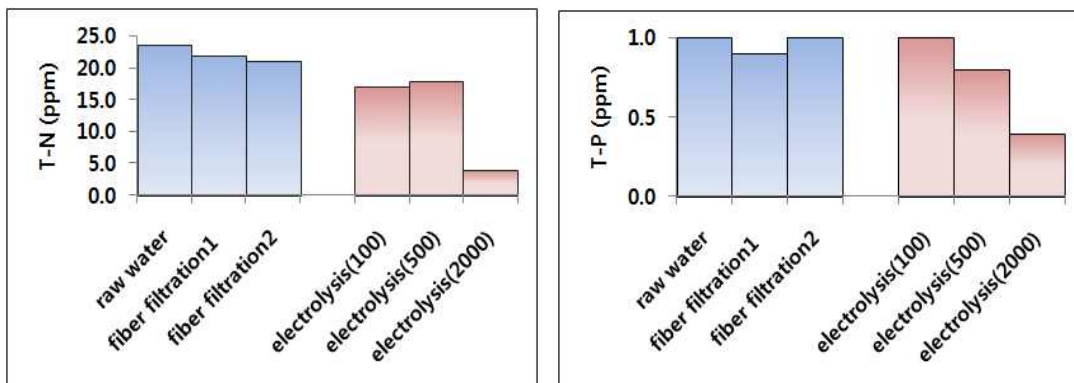


Fig. 6. T-N, T-P removal with a unit system.

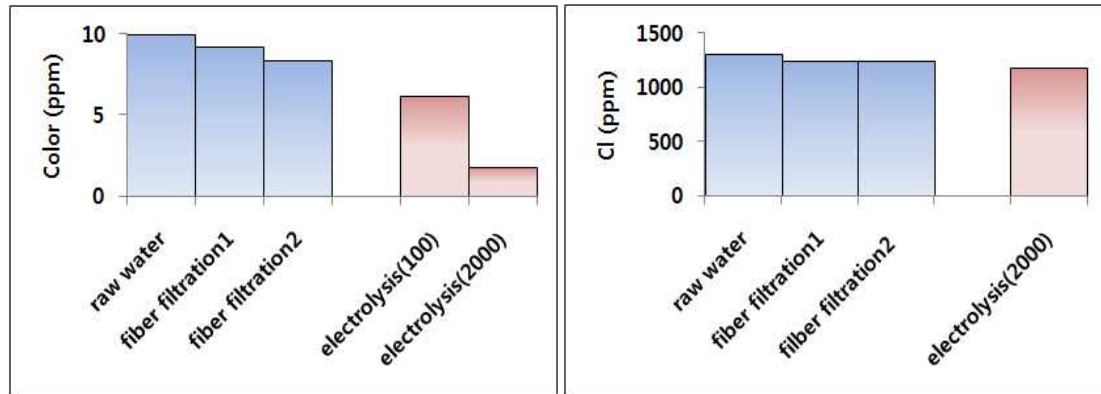


Fig. 7. Color and chlorine removal with a unit system.

고 있다. 또한 전기분해 반응조에서도 전해질이 100, 500 ppm에서는 섬유여과에 의한 제거 효율 이상의 결과는 보이지 않지만 전해질 농도가 2,000 ppm으로 상승하면 T-N은 83.1%, T-P는 60%의 제거효율을 보이고 있어 전해질 농도의 상승에 따라 제거효율이 급속히 상승하는 현상을 확인하였다. 이는 COD_{cr} 과 COD_{Mn} 의 제거는 글루코스의 산화에 의해 작은 분자량을 가지는 용존성 유기물이 수중에 잔류하면서 그다지 높지 않은 제거효율을 나타내는 사실과는 비교가 된다.

3.4. 색도 및 염소의 제거 효율

Fig.7에서 볼 수 있는 바와 같이 색도는 1,2단의 섬유여과기를 통과하여 최종적으로 16% 정도의 제거효율을 보이고 있다. 이는 섬유 표면에 이온성 염료의 흡착에 의한 효과도 동반하고 있어 여과에 의한 결과로 제시하기는 무리가 있다. 그러나 전기분해의 경우에는 전해질 농도가 100 ppm에서 38%로 나타나 22%의 상승효과를, 2,000 ppm에서 82%의 제거 효율을 보이고 있어 66%의 상승효과를 보이고 있기 때문에 이온성 염료의 산화에 의한 제거효과가 나타나고 있음을 확인 할 수 있다. 그러나 이온성 염료는 BOD/COD의 비율에 따라 처리 방법이 다르기 때문에(Shin and Bae, 2012) 후속 연구에 의해 BOD/COD의 비율 확인 및 이온성 염료의 재분산 방식을 위한 처리기술을 설계하고자한다. 더욱이 염소이온에 대해서는 2,000 ppm의 고농도 전해질에서도 13%의 낮은 제거효율을 보이는 결과는 NaCl의 분해에 의한 수중 염소 이온의 증가현상으로 해석이 가능하기 때문에

제거효율 상승에는 도움을 주지 못하고 있다는 결론을 얻을 수 있다. 따라서 후속 연구인 고농도 염분 함유 지하수의 처리를 위해서는 선택할 만한 공정이 아닐 것으로 판단이 가능하며 역삼투(RO) 공정 등을 병합한 시스템의 설계를 검토할 필요가 있음을 암시하고 있다.

4. 결론

1. SS 제거효율은 1단 섬유여과기에서 53.8%, 2단 섬유여과기에서 65.8%로 확인되어 2단 섬유여과기에서 12%의 추가적인 여과효율을 보이고 있음을 알 수 있으나 전기분해조는 SS 제거효율에는 그다지 영향을 미치지 못하고 있기 때문에 SS의 제거에는 섬유여과기가 주도적인 역할을 하고 있음을 확인하였다.

2. COD_{cr} 의 제거효율은 1단 섬유여과기 및 2단 섬유여과기에서 6.8%, 8.9% 나타나고 있으며 COD_{Mn} 의 제거효율 역시 27.8%, 26.8%로 나타나고 있어 섬유여과에 의한 유기물 제거효율은 낮으며 2단 여과의 효과도 거의 없음을 알 수 있다.

3. T-N, T-P의 제거효율은 섬유여과기에서는 10% 미만으로 나타났으며 전기분해 반응조에서 전해질 농도가 고농도 일 때 T-N은 83.1%, T-P는 60%의 제거 효율을 보이고 있어 최적 전해질 농도를 확인 할 수 있었다.

4. 전기분해조의 전해질 농도가 100 ppm에서 색도 제거 효율이 38%, 2,000 ppm에서 82%의 제거 효율을 보이고 있어 이온성 염료의 산화에 의한 제거효과가 나타나고 있음을 확인 할 수 있지만 이온성 염료는 BOD

/COD의 비율에 따라 처리 방법이 다르기 때문에 BOD/COD의 비율 확인 및 이온성 염료의 재분산 방지기술에 대한 후속 연구가 필요할 것으로 판단된다.

5. 결과적으로 후속 연구인 고농도 염분 함유 지하수의 처리를 위해서는 본 연구의 결과를 기반으로 SS 제거, 유기물 제거, TDS 제거, 이온성 물질 등의 제거효율 상승을 위한 단위공정의 선정과 함께 역삼투(RO) 공정 등을 병합한 시스템의 설계를 검토할 필요가 있음을 확인하였다.

감사의 말씀

본 연구는 2014년 동서대학교 특별연구비와 2015년 부산 녹색환경 지원센터(과제번호:15-4-10-13)의 연구비 지원에 의해 수행 되었으며 이에 감사드립니다.

REFERENCE

Achilli, A., Prante, J. L., Hancock, N. T., Maxwell, E. B. and Childress, A. E., 2014, Experimental results from RO-PRO: A next generation system for low-energy desalination, *Environ. Sci. Technol.*, 48(11), 6437-6443.

Chen, G., Chen, X., and Yue, P. L., 2002, Electrochemical behavior of novel Ti/IrO₂-Sb₂O₅-SnO₂ Anode, *J. Phy. Chem. B.*, 106, 775-788.

Donghae corporation, 2015, Technical catalogue, Equipment for the reuse of rainwater.

Greenlee, L. F., Lawler, D. F., Freeman, B. D., Marrot, B., Moulin, P., Reverse osmosis desalination: Water sources, technology, and today's challenges, 2009, *Water Res.*, 43, 2317-2348.

Gude VG, Nirmalakhandan N, Deng S, 2010, Renewable and sustainable approaches for desalination renew. *Sust. Energ. Rev.*, 14, 2641-2654.

Hong, S. K., Lee, S. H., Kim, J. H., Kim, J. H., and Ju, Y.G., 2011, Evolution of RO process for green future," *Kor. Ind. Chem., News*, 14(6), 9-20.

Kim, D., and Kim, Y., 2005, Electrochemical characteristics of the sulfonated polysulfone cation-exchanger membrane at rotating disk electrode, *J. Ind. Eng. Chem.*, 11(4), 228-235.

KOFAC, 2015, Technical report, Manufacturing of

imitated real plant for the system of water reuse.

Lee, S. Y., Park, S. J., 2013, TiO₂ photocatalyst for water treatment applications, 19(6),1761-1768.

Matsuura, T., 2001, Progress in membrane science and technology for seawater desalination - a review. *Desalination*, 134, 47-54.

Park, D. H., Chung, J. S., 2010, Co-treatment with dyeing wastewater and food wastewater with a fluidized biological membrane, *K. J. Envir. Eng. spring conference*, 299-303.

Pendergast, M. T. M., Hoek, E. M. V., 2011, A review of water treatment membrane nanotechnologies. *Energ. Environ. Sci.*, 4, 1946-1971.

POSCO, 2014, Technical report, Reuse of warm drainage produced from power plant.

Saito, K., Irie, M., Zaitso, S., Sakai, H., Hayashi, H., and Tanioka, A., 2012, Power generation with salinity gradient by pressure retarded osmosis using concentrated brine from SWRO system and treated sewage as pure water," *Desalinat. water treat.*, 41(1-3), 114-121.

Shannon, M. A., Bohn, P. W., Elimelech, M., Georgiadis, J. G., Marinna, B. J., Mayes, A. M., 2008, Science and technology for water purification in the coming decades. *Nature*, 452, 301-310.

Shin C. H., 2010, Technical report, Development of advanced system for the reuse of dye wastewater.

Shin, C. H., Bae, J. S., 2012, A stability study of an advanced co-treatment system for dye wastewater reuse, *J. Ind. Eng. Chem.*, 20(6), 775-779.

Shin, C. H., Bae, J. S., Victor R., 2014, Co-treatment systems combined with unit processes for dyewaste-water recycling, *J. Ind. Eng. Chem.*, 20(1), 710-716.

Shin, C. H., Robert, J., 2009, Development and module design of a novel membrane process for the removal of chlorine and its associated forms from wastewater, *J. Ind. Eng. Chem.*, 15(5), 613-617.

Song, H. Y., Kondrikov N. B., and Kuryavy V. G., 2007, Preparation and characterization of manganese dioxide electrodes for highly selective oxygen evolution during diluted chloride solution electrolysis, *J. Ind. Eng. Chem.*, 13(4), 118-125.

Sseng corporation, 2012, Technical report, Development of 2-stage fiber filtration process for the reuse of sewage.