

초미세기포-용존오존부상(DOF)공정을 이용한 염색폐수 처리수의 재이용

정병길 · 이기형¹⁾ · 정진희²⁾ · 장성호³⁾ · 조도현⁴⁾ · 성낙창^{2)*}

동아대학교 환경공학과, ¹⁾부산광역시 수영구청, ²⁾동아대학교 환경공학과,

³⁾부산대학교 지역환경시스템전공, ⁴⁾(주)네가트론

(2010년 4월 1일 접수; 2010년 12월 15일 수정; 2011년 1월 10일 채택)

Reclamation of Effluent Textile Wastewater Using Micro/nano Bubbles-Dissolved Ozone Flotation Process

Byung-Gil Jung, Ki-Hyung Lee¹⁾, Jin-Hee Jung²⁾, Seong-Ho Jang³⁾,
Do-Hyun Cho⁴⁾, Nak-Chang Sung^{2)*}

Department of Environmental Engineering, Dong-Eui University, Busan 614-714, Korea

¹⁾*Suyeong Busan Metropolitan, Busan 613-702, Korea*

²⁾*Department of Environmental Engineering, Dong-A University, Busan 604-714, Korea*

³⁾*Department of Regional Environmental System Engineering, Pusan National University, Busan 627-706, Korea*

⁴⁾*Negatron Co., Ltd, Busan 617-844, Korea*

(Manuscript received 1 April, 2010; revised 15 December, 2010; accepted 10 January, 2011)

Abstract

The main objectives of this research are to investigate characteristics of ozone solubility due to low solubility of conventional bubbles-ozone generators, evaluate the treatment characteristics of reclaiming textile wastewater for industrial water by means of micro/nano bubbles-dissolved ozone flotation(MNB-DOF) process. The textile wastewater used in this research was obtained from final effluent of the textile wastewater in B city. There is a 400L reactor which consists of a micro-nano bubble system and a ozone generator for experiments. As a result of generating micro-nano bubbles (below 0.5 μm) by using of MNB-DOF process, it improved ozone solubility due to higher ozone transfer rates. Consequently, the shorter ozonation time clearly indicates the lower power costs. The reported results clearly indicated that MNB-DOF process can be effectively and inexpensively. Results of the experiments through MNB-DOF process in this study satisfy all reclaiming standards as industrial water: pH 6.5~8.5, SS 10 mg/L or below, BOD₅ 6 mg/L or below, turbidity 10 NTU or below, *Coliforms* 1,000/100 mL or below. Therefore there is a possibility of the reclaiming of the textile wastewater as industrial water.

Key Words : Conventional bubbles, Dissolved ozone flotation, Effluent textile wastewater, Industrial water, Micro/nano bubbles, Reclamation, Ozonation

*Corresponding author : Nak-Chang Sung, Department of Environmental Engineering, Dong-A University, Busan 604-714, Korea
Phone: +82-51-200-7681
E-mail: ncsung@dau.ac.kr

1. 서론

우리나라는 고도성장 위주의 산업정책과 세계 섬유 1위국을 목표로 섬유산업을 발달시킨 결과, 섬유산

업은 선진국의 대열에 들어서는 큰 발전을 획득한 만큼 그에 못지않은 환경오염을 유발시켰다(김과 이, 2004). 염색폐수는 유기물 농도는 낮지만 탈색이 잘 되지 않는 염료가 다량 함유되어 있어 색도가 높고 강한 알칼리성을 띠므로, 기존 수처리 처리기술로는 많은 시간과 넓은 공간을 차지할 뿐만 아니라 처리비용 또한 매우 높다. 또한 폐수의 온도가 20~40℃ 정도의 고온이므로 적정처리에 어려움을 겪고 있다(오와 윤, 1991). 이들 오염물질은 생물학적 처리법이나 흡착법으로는 완전한 처리가 매우 어렵기 때문에 염색폐수를 처리할 수 있는 다른 방법의 적용이 필요하다. 난분해성 유기물을 함유한 폐수를 처리하기 위한 방법으로 전기분해법, 오존산화법, 펜톤산화법 등의 산화법을 적용시킬 수 있다. 이 중 오존은 강력한 산화력으로 물속의 착색물질을 산화시켜 탈색하므로 색도제거에 효율적인 산화법(Tuga와 Gurol, 2002)으로 염소, 과산화수소 등의 탈색 및 표백반응보다 훨씬 빠르게 진행된다. 오존은 강력한 산화제이지만 유기물의 물과 탄산가스로의 완전한 분해가 일어나지 않아 유기물을 무기물화 하거나 완전히 제거하는데 한계가 있고(황 등, 1991), 일부 유기물과는 반응이 느리거나 어떤 유기물과는 전혀 반응하지 않는 결점이 있어(Koyuncu와 Afsar, 1996) 유기물의 산화분해에는 효율적이지 못하여, 오존 처리 후의 색도 제거율은 높지만 COD의 제거율이 낮다는 연구결과가 보고되고 있다. 종래에는 오존을 수중에 접촉 투입하여 산화촉진, 용해촉진 또는 유해물질 분해 등을 하여 왔지만 산소용해효율 조차 높이기 어려웠으며, 더구나 산소보다 용해율이 낮은 오존을 효과적으로 용해시키는 것은 더욱더 곤란하였다.

한편, 우리나라는 UN의 국제인구행동연구소에서 정한 물부족 국가(Water Stress Country)로 분류되어 있는 만큼 곧 다가올 물부족 상황에 대해 인식의 개선과 이에 대한 대책이 시급한 실정이다(박과 안, 2001). 하수 및 폐수 처리수의 재이용 용도별 수질기준에 의하면 재이용 처리프로세스에서 처리하여야 하는 오염물질은 주로 부유성 유기물, 용해성 유기물, 색도성분, 취기성분 및 대장균 등으로 각 오염물질의 처리방법은 매우 다양할 수 있는데, 사여과 공정과 염소처리 공

정을 기본으로 하고 오존처리, 활성탄 흡착, 막분리 공정 등을 추가하는 방식이 일반적으로 이용될 수 있다. 이 중 용존오존부상(DOF, Dissolved Ozone Flotation) 공정은 하·폐수처리공정의 생물반응조를 거친 2차 침전지 유출수 또는 최종방류수를 대상으로 부유물질, 인 등을 제거하고, 오존의 강력한 산화력과 오존 접촉효율의 극대화로 색도와 COD 제거 및 미생물 제거에 의한 소독이 동시에 이루어지는 하·폐수처리장 방류수의 고도처리 기술이다. Lee 등(2008)은 마이크로버블크기의 DOF 공정을 이용한 도시하수처리장 방류수의 실험결과 최적 오존주입량은 6.1 mg/L, 제거효율은 탁도 86.9%, SS 81%, 색도 72.6%, BOD 82.4% 등 높은 제거효율을 얻을 수 있었다고 보고하였다.

따라서, 본 연구에서는 이러한 CB-DOF 공정(Conventional bubbles-dissolved ozone flotation process)의 단점인 오존용해효율을 증가시키기 위한 방안으로 MNB-DOF 공정(Micro/nano bubbles-dissolved ozone flotation process)을 이용하여 염색폐수 처리수에 함유된 유기물, 색도, 탁도, 부유물질 등을 평가하여 공업용수로의 재이용 가능성을 평가하는데 그 목적이 있다.

2. 재료 및 방법

2.1. 실험재료

본 실험에 사용된 염색폐수 처리수는 B시 소재 염색폐수처리장에서 물리·화학·생물학적 처리(밀폐식 순산소 포기법)공정으로 처리되어 방류되는 최종 유출수로 인근 K하수처리장으로 유입시켜 연계처리하고 있다. 하수처리장으로 유입되기 전 염색폐수 최종처리수를 이용하여 마이크로-나노버블-용존오존부상 처리 후의 수질특성을 분석하여 공업용수로서의 재이용 가능성에 대하여 평가하였다. 본 연구에 사용된 염색폐수 유출수의 성상을 Table 1에 나타내었다. 염색폐수처리장으로 유입되는 염색폐수 발생업체는 화섬·면직 24개, 모(wool) 13개, 사염 11개, 니트 4개 및 나염 3개 업체로 총 55개 업체가 있다.

Table 1. Characteristics of effluent textile wastewater

| Items | Units | Effluent | Items | Units | Effluent |
|-------------------|-------|-----------|-------------------|-------------|--------------|
| pH | - | 7.4 | Temperature | ℃ | 33 |
| DO | mg/L | 5.5 | BOD ₅ | mg/L | 4.1~4.2 |
| COD _{Cr} | mg/L | 60.0 | COD _{Mn} | mg/L | 30.0 |
| T-N | mg/L | 6.5 | T-P | mg/L | 0.005 |
| SS | mg/L | 25.0 | Color | PCU | 115.5~178.0 |
| Turbidity | NTU | 43.8~44.2 | E. coli | Cells/100mL | Not detected |

2.2. 실험장치 및 방법

2.2.1. 실험장치

MNB-DOF 공정은 CB-DOF 공정에 비하여 산소의 용존 효율을 혁신적으로 향상시킬 수 있는 포기장치로서 유입 오존을 마이크로-나노크기(직경 0.5 μm 이하)의 버블로 만들어 액체 내에 오존을 공급하는 장치이며, 공기의 유입대신 오존을 유입시켜 물과 혼합되어 오존의 용해효율을 증가시킬 수 있도록 제작되었다. 공급된 물이 진공영역에서 2~3 kgf/cm^2 의 압력으로 고속선회하여 진공영역의 진공도가 400 mmHg가 되도록 유도되며 진공이 형성되면 오존발생장치에서 공급되는 오존이 유입되어 오존과 물이 혼합되면서 오존은 기포화 된다. Fig. 1에 마이크로-나노버블 오존 반응조의 사진을 나타내었다. 오존산화 반응조는 D 790 mm \times H 990 mm로 용량은 500 L이며, 유효용량은 400 L로 하여 실험을 실시하였다.

**Fig. 1.** Photographs of CB-DOF and MNB-DOF processes.

2.2.2. 실험방법

2.2.2.1. 오존용해효율

오존 발생장치와 마이크로-나노버블 발생장치를 조합하여 수중에 용해효율이 높은 초미세의 마이크로-나노버블 오존을 발생시켜 물에 투입 접촉시켜 강산화작용이나 살균작용을 이용하여 수질정화를 용이하도록 할 필요가 있다. 기존 오존 접촉방식과 비교하여 마이크로-나노버블 접촉방식에 의한 오존의 용해성 평가를 실시하기 위해 시간에 따른 오존농도를 측정하면서 오존이 포화될 때까지 흡수시켰다. 오존주입은 무성아크방전방식의 오존발생기(model JEOG-5G)를 이용하여 1.0 L/min(오존주입량 3.43 gO_3/hr)의 유량으로 주입하였다. 수중에 함유된 용존 오존의 농도는 Indigo method로 측정하였다(정 등, 1997). 오존은 반감기가 짧고, 수중에 유·무기물질과 급속하게 반응하는 관계로 Indigo reagent II와 Mallonic acid reagent를 넣은 용기에 검수를 바로 취하여 혼합시키고 혼합시킨 시료는 즉시 600 nm에서 흡광도계로 측정하여 오존농도를 산출하였다.

2.2.2.2. 염색폐수 처리특성

CB-DOF 공정과 MNB-DOF 공정을 이용한 염색폐수의 오존산화 처리에 따른 염색폐수 처리수의 수질을 분석하였다. 유량 400 L의 염색폐수 처리수에 1.0 L/min(오존주입량 3.43 gO_3/hr)의 유량으로 일정한 오존을 주입하면서 처리수질을 분석하였다. 분석된 데이터를 바탕으로 오존산화 처리된 염색폐수 처리수의 처리효율 및 공업용수로 재이용 가능성에 대하여 평가하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 오존용해효율

오존은 강한 산화력을 가지고 있어 고도 수처리 공정에서 탈색, 탈취, 살균, 응집성 개선과 하수처리에서의 슬러지 감량화 등에 널리 사용되고 있다. 그러나 오존은 불안정하여 대기 중에서 분해되어 산소가 되어 발생농도가 낮고 발생비용 또한 높다. 따라서 오존의 이용효율을 향상시키기 위해서는 어떻게 효율적으로 오존을 수중에 용해시킬 것인가가 중요하다. 마이크로-나노 발생시스템을 이용하여 1.0 L/min(오존주입량 3.43 gO₃/hr)의 유량으로 수중 오존용해실험을 실시하였다. 기존버블 용존오존부상공정(CB-DOF process)과 마이크로-나노버블 오존부상공정(MNB-DOF process)을 이용한 염색폐수 처리수에서의 운전시간에 따른 용존오존농도 및 용해도의 변화를 Fig. 2에 나타내었다. 염색폐수 처리수에 대하여 운전시간 240 min 동안 운전시 기존버블 용존오존부상공정의 경우 포화오존농도는 0.629 ppm으로, 마이크로-나노버블 오존부상공정의 경우 포화오존농도인 1.579 ppm보다 약 2.5배 정도 낮은 용해도를 나타내었다. 또한 MNB-DOF 공정에서의 초기 오존용해효율은 약 32.5%로, CB-DOF 공정의 5.0% 정도에 비해 약 6배 이상의 높은 용해효율을 보였으며, 오존이 상대적으로 미세기포로 형성되어 반응조 내 체류시간이 길어져 나타난

결과로 판단된다. 이는 짧은 시간에 마이크로-나노버블 오존을 이용하여 많은 양의 오존을 용해시킬 수 있음을 보여준다. 오존발생장치와 마이크로-나노버블 발생장치를 조합하는 것에 의해, 수중에 용해효율이 높은 미세한 마이크로-나노버블 오존을 공급함으로써 수중 오존농도를 높여 살균, 유해물질의 분해 및 수중 유기물의 산화촉진 등에 의해 수질 정화의 향상을 꾀할 수 있을 것으로 판단되며 오존 발생에 소비되는 비용 또한 절감할 수 있을 것으로 기대된다.

3.2. 염색폐수 처리특성

3.2.1. BOD₅

Fig. 3에 CB-DOF 공정과 MNB-DOF 공정을 이용한 염색폐수 처리수의 BOD₅ 처리특성을 비교하여 나타내었다. CB-DOF 공정의 경우 초기 BOD₅ 농도는 4.2 mg/L로 처리시간 10 min에서 3.6 mg/L로 가장 제거효율이 높은 13.7%를 나타낸 반면에, 처리시간 20 min에서는 6.3 mg/L로 증가함을 알 수 있었다. 또한 MNB-DOF 공정의 경우 초기 BOD₅ 농도 4.1 mg/L에서 처리시간 20 min에서 2.7 mg/L로 가장 높은 제거효율인 33.7%를 나타내었다. 처리시간이 증가함에 따라 BOD₅ 농도가 점차적으로 감소하다가 증가하는 경향을 보였으며, 이는 일부 강력한 오존의 산화력에 의하여 제거된 부분이 있으나 오존의 산화력에 의하여 용존성 물질이 부유성 물질로 변화되면서 제거가 된

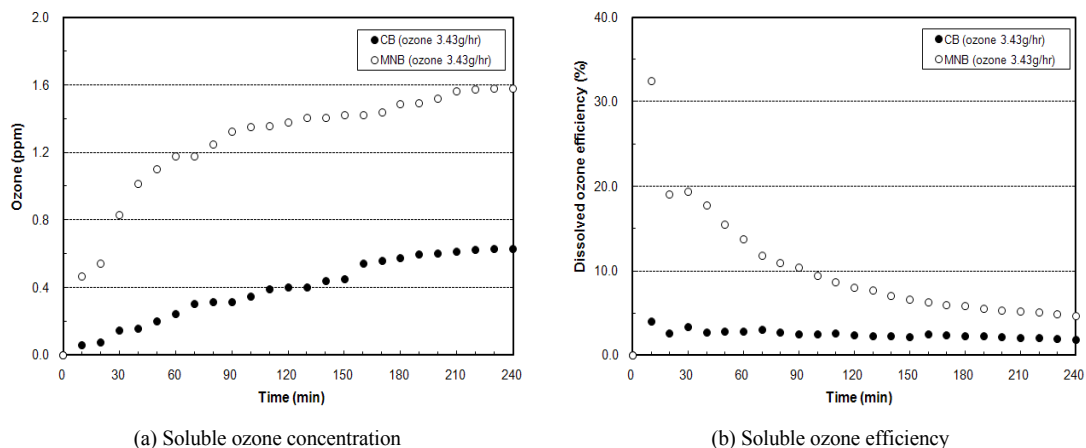


Fig. 2. Comparison of soluble ozone concentration and ozone efficiency between CB-DOF and MNB-DOF processes in effluent textile wastewater.

부분이 큰 것으로 분석되며 증가하는 경우는 염색폐수 처리수에서의 분석결과와 마찬가지로 난분해성 물질이 오존에 의해 산화되어 이산화탄소와 물로 완전히 산화되지 않고 분해성 유기물질 등 중간생성물로 변화되었기 때문인 것으로 판단된다. 오존은 강한 산화제이지만 유기물질의 물과 탄산가스로의 완전한 분해가 일어나지 않아 유기물질을 무기물화 하거나 완전히 제거하는데 한계가 있고(Banet 등, 1996), 일부 유기물질과는 반응이 느리거나 어떤 유기물질과는 전혀 반응하지 않는 결점이 있어(박과 안, 2001) 유기물질의 산화 분해에는 효율적이지 못하여, 오존처리후의 COD 제거율이 낮다는 보고가 있다(Weber, 1973). 또한 CB-DOF 공정에서 오존에 의한 난분해성물질의 분해율이 높은 이유는 MNB-DOF 공정의 경우 빠른 시간 내에 입자상물질의 부상분리가 이루어지는데 반해 CB-DOF 공정의 경우 상대적으로 부상분리효율이 낮기 때문에 물속에 잔류하고 있는 입자상물질이 오존에 의해 대부분 용해성 물질로 전환되었기 때문으로 판단된다.

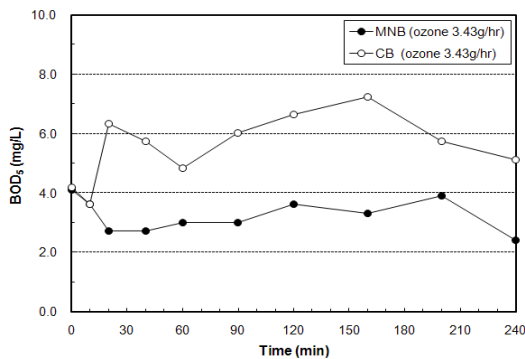


Fig. 3. Comparison of removed BOD₅ concentration between CB-DOF and MNB-DOF processes in effluent textile wastewater.

3.2.2. TOC

Fig. 4에 CB-DOF 공정과 MNB-DOF 공정을 이용한 염색폐수 처리수의 TOC 처리특성을 비교하여 나타내었다. CB-DOF 공정의 경우 240 min 운전 후 TOC 농도는 초기 농도인 21.7 mg/L 보다 감소된 19.1 mg/L로 11.9%의 제거효율을 나타내었다. MNB-DOF 공정의 경우 초기 농도 21.1 mg/L에서 처리 후 17.3

mg/L로 17.7%의 제거효율을 나타내었다. 이러한 결과는 마이크로-나노버블 형태로 오존을 주입할 경우, 오존이 유기물질의 일부를 완전 산화에 의해 제거하는 것에 기인하고, 더욱 많은 양의 오존이 유기물질의 분해에 이용되었음을 나타내는 것이다. 특히 COD_{Cr}의 제거에 최적 조건인 20 min에서의 처리효율은 33~40%임을 감안할 때 TOC의 제거는 거의 변화가 없는 것을 볼 수 있다. 이것은 오존처리에서는 산화성의 상승은 생기지만 수중의 유기물질을 CO₂와 H₂O로 완전히 산화된 것 보다는 유기산 및 기타의 물질로 저분자화 되어 TOC의 감소에는 기여하지 못한 것으로 판단된다. Galapate 등(2001)의 연구에 의하면, 오존처리에 의하여 소수성 유기물질은 감소하고 친수성 유기물질은 증가한다고 보고하였다. 미국수도학회의 연구결과(AWWA Research Foundation, 1991)에서도 오존처리에 의하여 용존성 유기물질의 성상변화에 의하여 친수성 유기물질과 높은 상관관계를 가지고 있는 BDOC의 생성이 전체 유기물질을 나타내는 DOC 변화보다는 더 크게 나타난다고 보고하였다. 즉, 오존산화에 의한 용존유기물질의 저분자화와 용존유기물질의 화학적인 특성과 구조적인 특성이 변화하기 때문에 TOC의 변화가 거의 없는 것으로 판단된다.

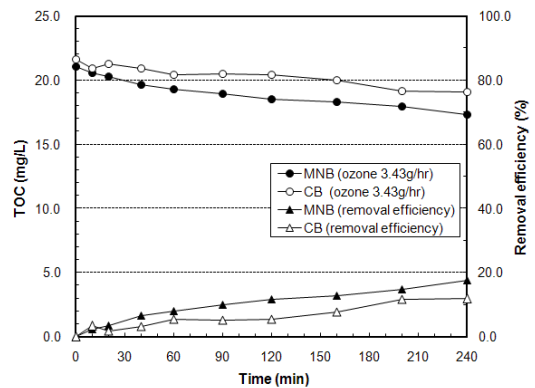


Fig. 4. Comparison of removed TOC concentration between CB-DOF and MNB-DOF processes in effluent textile wastewater.

3.2.3. SS

Fig. 5에 CB-DOF 공정과 MNB-DOF 공정을 이용한 염색폐수 처리수의 SS의 처리특성을 비교하여 나

타내었다. CB-DOF 공정의 경우 초기 SS 농도 30.0 mg/L에서 처리시간 240 min 처리 후 25.0 mg/L로 약 14.4%의 제거효율을 나타낸 반면에, MNB-OZ 시스템의 경우 처리시간 240 min 후 90.0%의 SS 제거효율을 나타내어, 마이크로-나노버블에 의한 부상분리 효과가 훨씬 뛰어남을 확인할 수 있었으며, 이는 용존 오존부상공정에서의 응집제의 사용량을 현격히 줄일 수 있음을 의미한다.

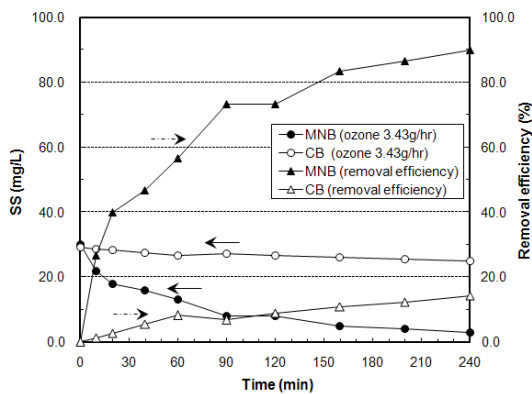


Fig. 5. Comparison of removed SS concentration between CB-DOF and MNB-DOF processes in effluent textile wastewater.

3.2.4. 색도

염색폐수에는 각종 염료, 호제, 계면활성제 등이 함유되어 있지만 탈색 반응은 수용성 염료 불포화 결합의 산화반응으로 우선적으로 일어난다. 이 반응은 염소, 과산화수소등의 탈색·표백 반응보다 훨씬 더 빠르게 진행되는 것으로 알려져 있다.

Fig. 6에 CB-DOF 공정과 MNB-DOF 공정을 이용한 염색폐수 처리수의 색도 처리특성을 비교하여 나타내었다. CB-DOF 공정의 경우 염색폐수 처리수의 초기 색도 농도인 171.0 PCU에서 처리시간 240 min 동안 처리한 후 115.5 PCU로 32.5%의 제거효율을 보인 반면에, MNB-DOF 공정의 경우 초기 색도 농도는 178.0 PCU에서 처리 후 37.8 PCU로 78.8%의 색도 제거효율을 보여 MNB-DOF 공정에 의한 색도 제거효율이 더 우수함을 알 수 있었다. 이는 미세한 마이크로-나노버블에 의해 오존의 수중 주입율이 상승됨으로써 오존산화에 의한 색도 유발물질의 산화가 더 빠

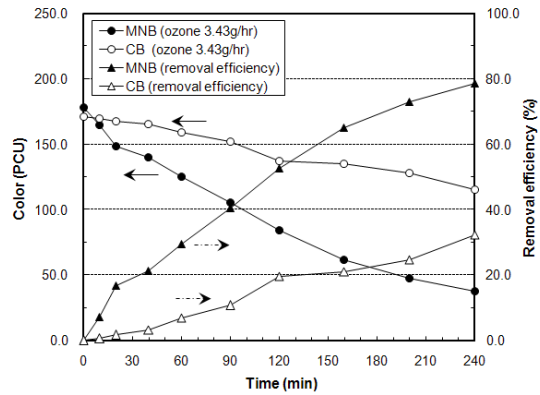


Fig. 6. Comparison of removed color concentration between CB-DOF and MNB-DOF processes in effluent textile wastewater.

르게 일어났기 때문에 판단된다.

3.2.5. 탁도

Fig. 7에 CB-DOF 공정과 MNB-DOF 공정을 이용한 염색폐수 처리수의 탁도 농도변화를 비교하여 나타내었다. 탁도는 일차적으로 물속에 존재하는 입자성 물질이 유발하는 것이다. 탁(濁)하다는 말은 빛의 통과를 방해하거나 가시심도(visual depth)를 제한하는 부유물질을 포함하고 있다는 뜻이다. 따라서 SS가 제거됨에 따라 탁도가 감소함을 알 수 있다. CB-DOF 공정의 경우 초기 탁도 농도는 43.8 NTU로 240 min 간 처리 후 29.8 NTU로 32.0%의 제거효율을 보였다.

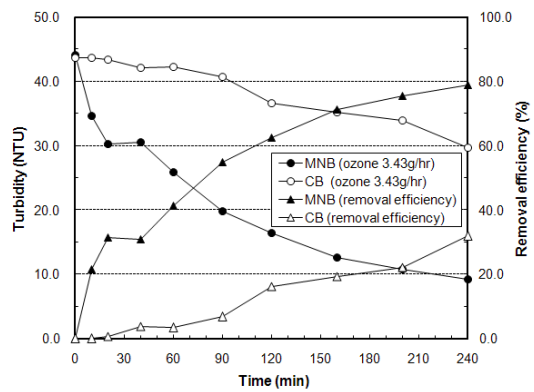


Fig. 7. Comparison of removed turbidity concentration between CB-DOF and MNB-DOF processes in effluent textile wastewater.

반면에, MNB-DOF 공정의 경우 초기 탁도 농도는 44.2 NTU에서 240 min간 처리 후 탁도는 9.3 NTU로 79.0%의 제거효율을 보여 SS의 경우와 마찬가지로 MNB-DOF 공정에서 탁도 제거효과가 현저히 우수함을 알 수 있었다.

3.2.6. UV₂₅₄

자외선 영역인 254 nm 파장의 흡광도는 수중에 존재하는 유기물이 조사된 자외선을 상당부분 흡수한다는 것을 이용한 총유기탄소(TOC)의 농도를 간접적으로 측, 반 정량적으로 측정할 수 있는 지표로 이용되거나, 유기물질 형태의 변화 상태를 간접적으로 측정하는데 사용된다. 자외선 영역의 파장을 흡수하는 유기물질은 aromatic 계열(이중결합을 가지고 있는 방향족 화합물질과 불포화 및 포화 지방족 화합물 등 탄소 고리가 이중결합 이상을 구성하고 있는 물질)의 이중결합을 주로 검출하게 된다. 물질의 농도에 비례하여 UV를 흡수하기 때문에 UV₂₅₄를 측정함으로써 수중의 방향성 유기물 및 불포화탄소의 양을 측정할 수 있으며 따라서 UV₂₅₄ 흡광도는 함유하고 있는 유기물의 특성을 나타내므로 이중결합 이상을 가진 물질의 정량적 척도가 될 수 있다. 특히 UV₂₅₄의 정량은 오존 산화와 생물반응을 연계한 처리를 고려할 경우 유용한 데이터로 이용될 수 있다. 예를 들어 오존 산화에 의해 유기물의 직접적인 감소량이 관측되지 않더라도 UV₂₅₄ 값은 변할 수 있고, 또한 생물처리에 있어서도 미생물에 의한 유기물의 감소량이 관측되지 않더라도 UV₂₅₄ 값이 감소하게 되면 미생물의 활동은 감지되는 것으로 판단할 수 있다(박, 2007).

Fig. 8은 CB-DOF 공정과 MNB-DOF 공정을 이용한 염색폐수 처리수의 UV₂₅₄의 변화를 나타내고 있다. CB-DOF 공정의 경우 240 min 운전 후 초기 1.055 cm⁻¹에서 0.848 cm⁻¹로 19.6% 정도로 감소된 반면에, MNB-DOF 공정의 경우 0.939 cm⁻¹에서 0.493 cm⁻¹로 감소되어 47.5% 정도로 감소되어 CB-DOF 공정보다 더 큰 감소율을 나타내었다. 고분자 유기물의 농도가 높을수록 UV₂₅₄ 흡광도가 높기 때문에 UV₂₅₄의 흡광도가 낮아진다는 것은 고분자 유기물질이 저분자 유기물질로 분해되었다는 것을 말해준다.

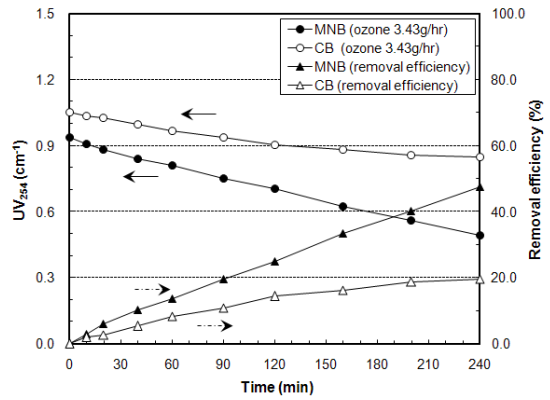


Fig. 8. Comparison of removed UV₂₅₄ concentration between CB-DOF and MNB-DOF processes in effluent textile wastewater.

3.2.7. 타 공정과의 처리결과 비교분석

다양한 하수처리수 및 폐수 재이용 방법에 따른 다른 연구자들과 본 연구의 결과를 비교·분석하여 Table 2에 나타내었다. 본 연구에 사용된 MNB-DOF 공정이 DOF 공정보다 SS 제거효율이 높음을 알 수 있었으며, 전체적으로 타 재이용기술에 비해 제거효율이 높음을 알 수 있었다.

4. 결론

본 연구에서 기존버블 오존부상분리(CB-DOF)공정의 단점인 오존용해효율을 증가시키기 위한 방안으로 마이크로-나노버블 오존부상분리(MNB-DOF)공정을 이용한 오존용해특성 및 염색폐수 처리수의 공업용수 재이용을 위한 처리특성을 비교·평가한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) CB-DOF 공정과 MNB-DOF 공정에서 포화오존 농도는 운전시간 240 min에서 각각 0.629 ppm과 1.579 ppm으로, CB-DOF 공정보다 MNB-DOF 공정에서 약 2.5배 정도 높은 용해효율을 나타내었다. 또한 MNB-DOF 공정에서의 초기 오존용해효율은 약 32.5%로, CB-DOF 공정의 5.0% 정도에 비해 약 6배 이상의 높은 용해효율을 나타내었다.

Table 2. Comparative performance of MNB-DOF techniques with some other reported works in removing water quality parameters from sewage and wastewater effluent

| Treatment techniques | Waste-waters | Conditions | Removal efficiency (%) | | | | | | References |
|---|--------------|--|------------------------|----|-----------|-------|-------------------|----------|----------------------------|
| | | | BOD | SS | Turbidity | Color | UV ₂₅₄ | Coliform | |
| MNB-DOF | Textile | O ₃ dose =3.43 gO ₃ /hr | 33.7 | 90 | 79 | 78.8 | 47.5 | - | This study |
| DOF(Dissolved ozone flotation) | Sewage | O ₃ dose =6.1 mg/L | 70 | 71 | 87 | 72.6 | 65.5 | 100 | Lee et al. (2008) |
| Sand filtration and chlorination | Sewage | Chlorine dose =10 mg/L | 61 | 55 | - | - | - | 100 | Mamoda et al. (2004) |
| O ₃ enhanced electroflocculation | Sewage | O ₃ dose =6~7 mg/L Current=300 Å | 50 ~60 | 45 | - | - | - | 100 | Nielson and Smith (2005) |
| Ozonation | Sewage | O ₃ dose =7.1 mg/L | - | - | 10 | - | 20 | <100 | Petala et al. (2006) |
| Ozonation | Sewage | O ₃ dose =9.2 mg/L HRT 4 min | 11 | - | 20 | 80 | 20 | 100 | Xu et al. (2002) |
| Electrodialysis | Sewage | - | 83 | 74 | - | - | - | 25 | del Pino and Durham (1999) |

2) 염색폐수 처리수의 재이용을 위한 MNB-DOF 공정 적용시 BOD₅ 33.7%, SS 90.0%, 색도 78.8%, 탁도 79.0%의 제거효율을 보인 반면에, CB-DOF 공정의 경우 BOD₅ 13.7%, SS 14.4%, 색도 32.5%, 탁도 32.0%의 제거효율을 각각 나타내었다.

3) 염색폐수 처리수의 공업용수(재이용기준 : pH 6.5~8.5, SS 10 mg/L 이하, BOD₅ 6 mg/L 이하, 탁도 10 NTU 이하, 대장균 1,000 개/100 mL 이하) 재이용 가능성을 평가한 결과 CB-DOF 공정의 경우 SS(25.0 mg/L)와 탁도(29.8 NTU) 항목에서 공업용수 기준치인 SS 10 mg/L 이하 및 탁도 10 NTU 이하를 초과하는 것으로 나타난 반면에, MNB-DOF 공정의 경우 모든 항목에서 공업용수 기준치를 만족하는 것으로 나타나, MNB-DOF 공정을 이용한 염색폐수 처리수의 공업용수 재이용이 충분히 가능할 것으로 판단된다.

따라서, 염색폐수 처리수 재이용을 위한 MNB-

DOF 공정의 적용시 처리수질에 있어서 공업용수 재이용기준을 충분히 만족하는 것으로 나타났으나, 유기물(BOD₅)의 제거효율이 낮은 점과 실험조건이 Batch인 점 등을 감안할 때 대규모의 발생폐수 적용시 멤브레인 공정적용 등 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 2008년 중소기업청 기술혁신개발사업 및 동아대학교의 연구비 지원에 의해 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고 문헌

- 김선희, 이상호, 2004, 펜톤산화와 오존산화 조합에 따른 염색폐수의 유기물질 및 색도 처리효율 비교 평가에 관한 연구, 한국상하수도학회지, 18(6), 778-784.
- 박수경, 2007, 미세기포화된 오존을 이용한 1,4-Dioxane의 제거에 관한 연구, 석사학위논문, 영남대학교.
- 박영식, 안갑환, 2001, 응집, 오존 및 UV 후처리가 염색폐수의 COD와 색도제거에 미치는 영향, 한국환경위생학회지, 27(4), 93-98.

- 오동규, 윤태일, 1991, Fenton's Reagent를 이용한 염색 폐수의 처리, *대한환경공학회지*, 13(2), 123-129.
- 정팔진, 김민정, 현미희, 1997, 축산폐수와 하수의 혼합 처리 가능성 연구, *공학연구*, 28, 273-284.
- 황상용, 이규성, 김병석, 1991, 오존을 이용한 오·폐수 처리에 관한 연구, *대한위생학회지*, 6(1), 103-108.
- AWWA Research Foundation, 1991, *Ozone in water treatment : Application and engineering*, Lewis Publisher, Michigan.
- Banet, I. M., Nigam, P., Singh, D., Marchant, R., 1996, Microbial decolorization of textile-dye-containing effluents : A review, *Bioresource Technology*, 58(3), 217-227.
- del Pino, M. P., Durham, B., 1999, Wastewater reuse through dual-membrane processes: opportunities for sustainable water resources, *Desalination*, 124, 271-277.
- Galapate, R. P., Baes, A. U., Okada, M., 2001, Transformation of dissolves organic matter during ozonation : Effect on trihalomethane formation potential, *Water Research*, 35(9), 2201-2206.
- Koyuncu, I., Afsar, H., 1996, Decomposition of dyes in textile wastewater with ozone, *Journal of Environmental Science and Health*, 31, 1035-1041.
- Lee, B. H., Song, W. C., Manna, B., Ha, J. K., 2008, Dissolved ozone flotation (DOF) - a promising technology in municipal wastewater treatment, *Desalination*, 225, 260-273.
- Mamoda, M. F., Al-Ghusain, I., Al-Mutairi, N. Z., 2004, Sand filtration of wastewater for tertiary treatment and water reuse, *Desalination*, 164, 203-221.
- Nielson, K., Smith, D. W., 2005, Ozone-enhanced electroflocculation in municipal wastewater treatment, *Journal of Environmental Engineering and Science*, 4, 65-76.
- Petala, M., Tsiridis, V., Samaras, P., Zouboulis, A., Sakellariopoulos, G. P., 2006, Wastewater reclamation by advance treatment of secondary effluents, *Desalination*, 195, 109-118.
- Tuga, T., Gurol, M. D., 2002, Oxidation of diethylene glycol with ozone and modified Fenton process, *Elsevier*, 31, 293-301.
- Weber, W. J., 1973, *Physicochemical process for water quality control*, Wiley Interscience, New York.
- Xu, P., Janex, M. L., Savoye, P., Cockx, A., Lazarova, V., 2002, Wastewater disinfection by ozone: main parameters for process design, *Water Research*, 36, 1043-1055.