

고도정수처리공정에서 오존처리공정의 성능

이강춘*, 윤태경, 노병일¹, 문병현²
 동의대학교 환경공학과, 동서대학교 화학공학과¹, 창원대학교 환경공학과²
 (glee001@dongeui.ac.kr*)

Performance of Ozonation in Advanced Water Treatment Process

Gangchoon Lee*, Taekyung Yoon, Byeongil Noh¹, Byunghyun Moon²
 Dept. of Environmental Eng., Dongeui Univ.
 Dept. of Chemical Eng., Dongseo Univ.¹
 Dept. of Environmental Eng., Changwon National Univ.²
 (glee001@dongeui.ac.kr*)

1. 서론

원수에 응집제를 첨가하여 혼화→응집→침전→여과→소독공정을 거쳐 수돗물을 생산·공급하는 표준정수처리공정으로 수중에 일반적으로 존재하는 입자성 물질과 용존 물질은 제거된다. 그러나, 인구과밀과 급속한 산업화로 인하여 미량이지만 상수원수의 수질을 악화시키는 용존유기물, 특히 발암성 물질로 알려진 소독부산물 트리할로메탄(THMs) 등과 같은 유기염소화합물 또는 이취미 유발물질이 발생하는 경우 이들을 표준정수처리공정으로 쉽게 제거되지 않으므로 추가적인 처리공정을 도입하여 제거하여야 한다. 이와 같이 미량의 유기물 제거를 위한 추가적인 정수처리공정을 고도정수처리(Advanced water Treatment)라 한다.

현재 주로 사용되고 있는 고도정수처리기술로 활성탄 단독공정 또는 오존처리공정 이후에 입상활성탄(Granular activated carbon) 표면에 부착미생물을 생성시켜 미생물과 활성탄 흡착에 의한 유기물 제거기구를 동시에 이용하는 오존-생물활성탄(Biological activated carbon, BAC) 공정이 도입되어 이용되고 있다[1,2]. 또한 최근에는 nano-filtration(NF) 또는 역삼투압(Reverse Osmosis, RO) 공정과 같은 막분리기술을 사용하여 먹는 물을 생산하는 사례가 외국에서 보고되고 있다.

현재의 정수처리공정에서는 소독공정으로 미생물에 의한 오염을 최소화함과 동시에, 소독공정에서 발생하는 소독부산물(disinfection by-products, DBPs) 생성의 최소화가 요구되고 있다. 오존을 정수처리공정에 도입한 공정에서는 오존의 강력한 산화능에 의해 용존유기탄소(DOC) 중 비생분해성 용존유기탄소(NBDOC)의 일부가 생분해성 용존유기탄소(BDOC)로 변환되어 물 중 BDOC의 양이 증가하게 된다. 이러한 오존처리수에 바로 염소소독을 시행할 경우 DBPs 생성이 발생한다. 따라서 오존처리공정과 염소소독공정 사이에 BDOC와 NBDOC를 제거할 수 있는 생물활성탄공정을 도입하여 이러한 문제를 해결한다[3].

본 연구에서는 국내에서 고도정수처리공정으로 가장 많이 채택되고 있는 오존-생물활성탄 공정 중 오존처리공정의 성능을 평가하기 위하여 UV-254 흡광도, DOC와 BDOC 농도변화 등을 실험하였고, 최적 오존주입율 선정을 위한 기초자료로 활용하고자 오존주입율에 따른 DOC 제거율 및 BDOC 농도변화가 측정되었다. 실험은 scale 영향을 최소화하기 위하여 pilot plant를 이용하여 수행되어 졌다.

2. 실험

본 연구에 사용된 실험장치는 “B”시 D정수장 내 건설되어 있는 고도정수처리 pilot plant가 사용되었다. Pilot plant 오존처리공정에 대한 공정도는 Fig. 1과 같다. 사용된 오존접촉조는 내부 투시를 위해 아크릴 재질로 만들어 졌고, 크기는 300 ID×7000 H이다. 오존은 최대오존생산량이 18 g O₃/hr인 오존발생기(PCI Ozone & Control System Inc., Model No. G-1)로 생산되었고, 오존 발생에 공기를 사용하였다. 발생된 오존의 농도는 오존분석기(IN USA Excellence instrumentation, Model : Mini Hicon)로 측정되었다. 오존처리수 체류조는 1.5m³ PE tank 2기가 직렬로 연결되어 사용되었다.

본 실험에 사용된 원수는 D정수장에서 표준정수처리공정인 혼화→응집→침전 후 사(沙)여과를 거친 물을 사용하였다. 오존과 원수는 counter-current로 접촉되었다. 오존함유 공기는 물과의 접촉면적을 최대로 하기 위하여 접촉조 바닥에 설치된 다공성 세라믹 분산기를 통하여 작은 기체방울로 분산되었고, 원수는 접촉조 상부에서 투입되어 처리수는 하부로 배출되었다. 오존접촉조에서 일정 수위를 유지하기 위하여 처리수 배출관의 높이(head)를 접촉조 상단까지 높여 주었다. 접촉조에 용해되지 않은 공기와 잉여오존은 오존 파과기를 거친 후에 외부로 배출되었다.

오존처리수는 용존오존농도를 저감시키기 위하여 다음 공정인 생물활성탄공정으로 유입되기 전에 체류조에서 체류하였다. 유입 공기 중 목표 오존농도는 오존발생기에서 input power를 조절하여 달성하였고, 그 농도는 온도와 압력을 보상할 수 있는 on-line 오존분석기를 사용하여 실시간으로 분석되었다. 사여과수는 정수장 사여과수 체류조로부터 pump를 통하여 pilot plant 원수 tank에 저장되었다. 오존접촉조로 원수의 투입은 원수 tank와 오존접촉조 사이 원심펌프에 의해 실시되었고, 목표 유량은 유입관에 부착된 밸브와 유량계를 사용하여 유지되었다.

오존접촉조에서 원수 유입속도는 60 L/min이었고, 이를 접촉조에서 체류시간을 의미하는 공탑접촉시간(Empty bed contact time, EBCT)으로 환산하면 8.05 min이다. 또한 유입 가스유속은 7.0 L/min이었고, 농도는 0.98 mg O₃/L 였다. 오존처리수는 배출관을 통하여 체류조로 유입되고, 체류조에서 체류시간은 25분이 유지되었다.

오존농도별 실험은 오존접촉조에서의 공정조건을 그대로 유지한 상태에서 오존농도만을 변경하며 수행되었다. 다양한 오존농도는 오존발생기에서 오존생성량을 조절하여 달성했고, 실험 농도는 0.43, 0.84, 1.16, 1.39 그리고 1.7 mg O₃/L 였다.

3. 결과 및 토론

본 pilot plant test는 실제 정수장 공정수를 사용하는 관계로 우기(雨期)나 계절적 요인으로 인한 운전 중 원수의 수질과 수온에 어느 정도의 변화가 있었다.

오존접촉 공정에서 오존의 역할은 다음 네 가지로 요약할 수 있다.

- 일부 유기물을 완전 산화로 제거 (DOC 감소 효과)
- 다음 공정인 BAC공정에서 부착미생물에 의한 유기물 제거성능을 향상시키기 위하여 NBDOC를 저분자 크기로 분해시켜 BDOC로 전환
- BAC에서 미생물의 활동에 필요한 산소를 공급, 항상 호기성 상태를 유지하기 위하여 처리수에서 용존산소의 농도를 증가
- 오존의 살균작용에 의한 사여과수 중 bacteria의 살균제거

오존접촉공정에서 그 함량이 증가된 BDOC뿐만 아니라 일부 NBDOC가 다음 공정인 BAC공정에서 효과적으로 제거됨으로 오존접촉조에서의 최적 운전조건은 BDOC의 함량을 최대로 하는 조건이다. 각 항목별 결과는 다음과 같다.

유기물 제거능

DOC의 직접분석과 UV-254 흡광도 측정을 통하여 DOC 제거능이 측정되었다. UV-254 흡광도는 수중에 존재하는 유기물이 주사된 자외선을 상당량 흡수하는 것을 이용하여 유기물 농도의 반 정량적 측정을 가능하게 한다.

Fig. 2는 실험기간 중 사여과수와 오존처리수에서 DOC, BDOC, 그리고 NBDOC 농도의 변화를 보여준다. 사여과수와 오존처리수에서 DOC 농도차이는 거의 없었다. 이는 오존접촉공정에서 오존의 역할 중 완전산화에 의한 DOC 제거 부분은 매우 미약하고, NBDOC의 BDOC로의 전환이 주요 역할이라는 것을 설명해 준다.

오존처리수에서 BDOC 농도는 사여과수에 비해 50% 이상 증가하였다. 이는 오존 산화에 의한 NBDOC의 BDOC로의 전환효과를 의미한다. 또한 동일한 오존주입량, 0.98 mg O₃/L을 적용하였지만 사여과수에서 DOC 농도의 변화로 인하여 오존접촉조에서 BDOC 농도변화는 심하였다. 오존주입량을 현재 실제 정수장에서 주입을 표시단위인 mg O₃/mg TOC로 나타내면, 평균 2.2 mg TOC에서 0.45 mg O₃/mg TOC가 된다. NBDOC의 농도는 BDOC와 반대로 오존산화에 의하여 일정량이 BDOC로 제거되므로 오존처리수에 비해 사여과수에서 더 높은 농도를 보였다.

Fig. 3은 UV-254 흡광도 변화를 보여준다. 사여과수가 오존처리수에 비하여 훨씬 높은 흡광도를 보였다. 이는 오존의 유기물 완전산화에 의한 제거는 미약하지만, 흡광도가 높은 방향족 유기물 및 불포화지방산을 포화에 가까운 BDOC로의 전환에 의한 것으로 사료된다.

오존주입량에 따른 BDOC 변화

오존접촉조에서 운전조건에는 원수유입속도, 접촉조 내 오존농도, 유입공기 유속 등이 있다. 최적 운전조건 선정실험의 일환으로 원수유입속도와 유입공기 유속은 고정시키고, 유입공기 중 오존농도 즉, 접촉조 내 오존농도를 변화시켜 처리수의 DOC와 BDOC의 변화를 보았다. 그 결과는 Fig. 4와 같다. BDOC의 농도는 오존농도가 0.84 mg O₃/L로 증가함에 따라 증가하는 경향을 보였다. 한편 더 이상의 오존농도 증가에서는 BDOC가 감소하여 1.39 mg O₃/L 이상에서는 본 pilot공정의 원수인 사여과수에서의 BDOC 농도와 거의 같아 졌다. 이는 낮은 오존주입율에서 오존의 역할은 주로 NBDOC의 산화에 의한 BDOC생성이라는 것을 보여주는 결과이다. 또한 일정 오존농도 이상에서는 DOC의 제거가 오존에 의한 완전산화에서 비롯된다는 것을 의미하는 결과이다. 즉, 높은 오존농도에서는 BDOC로 변환될 수 있는 NBDOC의 부분이 없는 관계로 생성된 BDOC가 완전산화되기 때문인 것으로 추정된다.

이러한 결과는 Clipparone 등[3]의 결과와 일치한다. 그들은 오존접촉과 모래부착미생물에 의한 TOC 제거실험에서 오존주입율에 따른 BDOC의 증가는 1 mg O₃/mg TOC 이상의 오존주입율에서 멈추고, 3 ~ 5 mg O₃/mg TOC의 높은 오존주입율에서는 오존에 의한 유기물 완전산화에 의한 TOC제거부분이 점차 증가하게 된다는 것을 보였다.

한편 Calson과 Amy[4]는 오존접촉에 의해 증가되는 BDOC는 biofiltration 공정에서 제거될 수 있는 rapidly degradable fraction(BDOC_{rapid})과, biofiltration 공정에서 거의 제거되지 않고 distribution system으로 빠져나가는 slowly degradable fraction(BDOC_{slow})으로 나누어진다고 주장하였다. 따라서 기존 고도정수처리공정의 효율을 극대화하기 위하여 BDOC_{rapid} 함량을 최대화하는 오존접촉공정에서의 조건이 추천된다.

오존처리공정의 최적오존주입율 즉, 최적오존농도의 결정이 오존처리공정의 최적화와 직결된다 할 수 있다. 최적오존농도 결정에 BDOC 증가가 최대가 되는 오존농도가 사용될 수 있다. 이러한 공정조건의 선정은 원수의 성상에 영향을 받으므로, 이를 고려하여 최적공정조건에 대한 결정기준을 마련하는 것이 필요하다.

4. 참고문헌

[1] Clark, R. M. and Lykins Jr., B. W., "Granular Activated Carbon: Design, Operation and Cost", Lewis Publishers, Inc.(1998).
 [2] 한무영, 강창호, "생물활성탄(Biological Activated Carbon, BAC)공정과 이 공정의 음용수처리에의 사용", 대한상하수도학회지, 7(1), 77-103(1993).
 [3] Clipparone, L. A., Diehl, A. C. and Speitel Jr., G. E., "Ozonation and BDOC removal: effect on water quality", J. AWWA, 89(2), 84-97(1997).
 [4] Calson, K. H. and Amy, G. L., "The Formation of Filter Removable Biodegradable Organic Matter During Ozonation", Ozone Sci. & Eng., 19(2), 179-199(1997).

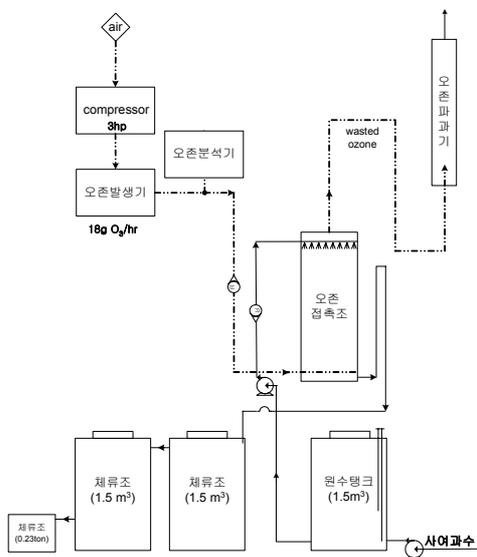


Figure 1. Process diagram for ozonation

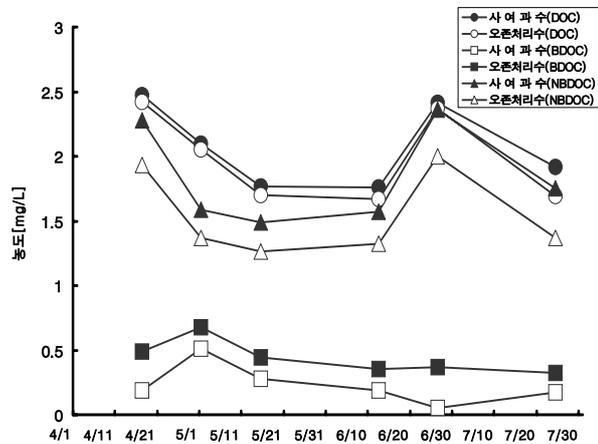


Figure 2. Pilot plant 운전기간 중 원수와 처리수에서 DOC, BDOC 그리고 NBDOC 변화

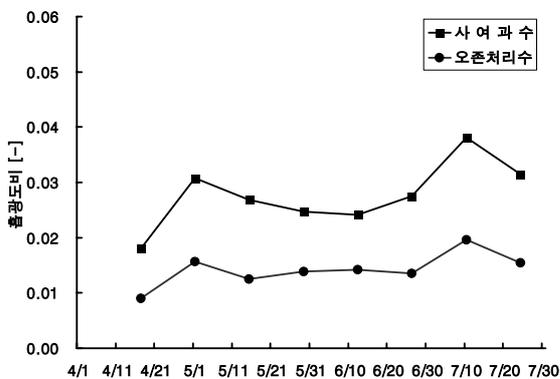


Figure 3. UV-254 흡광도 변화

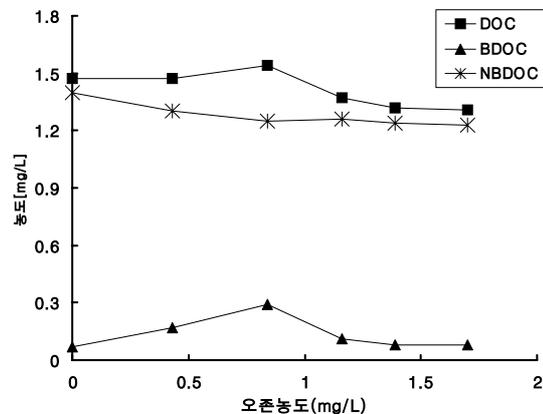


Figure 4. 오존농도에 따른 DOC와 BDOC농도 변화