

## 로프형 미생물 담체 침전조를 이용한 상수원수중의 NOM 제거

†<sup>1</sup>심 상 준 · <sup>1,2</sup>강 연 석 · <sup>2</sup>김 우 식 · <sup>1</sup>박 대 원  
한국과학기술연구원 수질환경 및 복원연구센터<sup>1</sup>, 경희대학교 화학공학과<sup>2</sup>  
(접수 : 2001. 6. 1., 게재승인 : 2001. 8. 20.)

## Removal of NOM Using Biological Rope Media Sedimentation Tank

Sang Jun Sim<sup>†</sup>, Youn Seok Kang<sup>1,2</sup>, Woo Sik Kim<sup>2</sup>, and Dae Won Pak<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Water Environment & Remediation Research Center, Korea Institute of Science and Technology, Seoul 136-791, Korea

<sup>2</sup>Department of Chemical Engineering, Kyunghee University, Yongin 449-701, Korea

(Received : 2001. 6. 1., Accepted : 2001. 8. 20.)

This paper is intended as an application of the biological rope media sedimentation tank using biodegradability of BAC(Biological activated carbon) to the drinking water treatment system for the removal of NOM. The removal of DOC(Dissolved organic carbon), UV absorbance(UV<sub>254</sub>), and turbidity were evaluated under various operation condition of a biological rope media sedimentation tank such as raw water-media process (Media 1), ozonation-media process (Media 2), and ozonation-coagulation/sedimentation-media process (Media 3). The raw water had DOC concentration of 1.3~3.4 mg/L, UV<sub>254</sub> of 0.027~0.039 cm<sup>-1</sup>, and turbidity of 0.3~4.5 NTU, respectively. The average DOC concentration were 2.2 mg/L in media 1, 1.8 mg/L in media 2, and 1.3 mg/L in media 3 from raw water, respectively. On the other hand, the DOC concentration in conventional sedimentation tank was 1.5 mg/L. Higher removal of the DOC was noted in media 3 than media 1 and media 2. The UV<sub>254</sub> of the treated water were 0.037 cm<sup>-1</sup> in media 1, 0.027 cm<sup>-1</sup> in media 2, and 0.014 cm<sup>-1</sup> in media 3 from raw water, respectively. The UV<sub>254</sub> in conventional sedimentation tank was 0.014 cm<sup>-1</sup> which is similar to that of media 3. Average turbidity of the treated water was 1.1 NTU in media 1, 0.9 NTU in media 2, and 0.5 NTU in media 3, respectively. It is expected that the biological rope media sedimentation tank is a good alternative over the conventional sedimentation process from these results.

**Key Words** : biological drinking water treatment, media, NOM removal

### 서 론

최근에 적용되고 있는 정수처리 공정은 병원성 미생물의 불활성화를 위하여 소독과정을 필수 거치게 된다. 그러므로 염소와 같은 소독제로 소독을 실시하게 되는데 이때 상수원수중에 존재하는 천연유기물질(Natural organic matter ; NOM)과 소독제가 반응하여 소독부산물(Disinfection by-product ; DBP)을 생성하게 된다. 소독부산물로는 트리할로메탄(Trihalomethanes ; THMs), 할로아세트산(Halo Acetic Acids ; HAAs), 할로아세트나이트릴(Halo Acetic Nitriles ; HANs), 할로케톤(Haloketons ; HKs) 등이 있는데 이러한 소독부산물이 발암물질로 판명됨에 따라 미국환경청(USEPA)의 소독제/소독부

산물규정(Disinfectant/Disinfection By-Product rule ; D/DBP rule)의 제정과 같이 선진국에서의 소독부산물의 대처방안에 대한 규제 및 연구가 활발히 진행되고 있다(1,2).

소독부산물의 대처방안으로는 소독부산물의 전구물질인 NOM 제거, 염소 이외의 대체소독제 투입, 생성된 소독부산물의 직접적인 제거 등이 있는데 이중에서 전구물질인 NOM의 제거가 가장 효율적인 방법으로 제시되고 있다. NOM 제거방법으로는 응집(coagulation), 활성탄에 의한 흡착(granular activated carbon adsorption), 막 여과(membrane filtration) 등이 있다. 이중 활성탄 공정에서는 활성탄의 운용을 연장시키기 위하여 생물활성탄(biological activated carbon ; BAC)의 개념을 도입하여 NOM 성분 중 생물분해 가능한 부분을 미생물이 제거하며 흡착에만 의존한 유기물 제거의 한계를 극복하는 방안으로 활용중이다(3,4).

상수원수 내에 존재하는 NOM은 수없이 많은데 크게 육상 및 수중생물을 포함한 생물체 유기물과 토양 유기물로 분류되며, 이러한 물질이 수계에 유입되어 수질을 오염시키게 된다. 또한 NOM의 크기에 따라 입자상 유기물(particulate

†Corresponding Author : Clean Technology Research Center, Korea Institute of Science and Technology, P.O. Box 131, Cheongryang, Seoul 130-650, Korea  
Tel : +82-2-958-5264, Fax : +82-2-958-5269  
E-mail : simsj@kist.re.kr

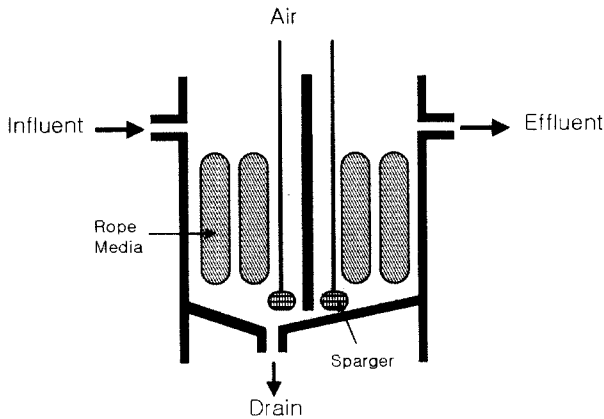


Figure 1. Schematic diagram of biological rope media sedimentation tank.

organic carbon, POC)과 용존 유기물(dissolved organic carbon, DOC)로 나눌 수 있다. 이 중 DOC는 보통 0.45 μm membrane filter로 여과된 용액에 존재하는 유기물을 말하며, POC와 DOC의 합을 총 유기물의 양인 TOC(total organic carbon)로 나타내게 된다(5,6).

본 연구에서는 BAC 처리의 생물분해능과 같이 NOM의 생분해성 부분을 제거하기 위하여 로프형 미생물 담체를 침전조에 적용하는 공정으로 NOM 제거를 시도하여 기존 정수처리공정에서의 응집-침전 과정만으로 제거되지 못하는 NOM부분의 추가적인 제거 효과를 기대하였고, NOM의 생분해도를 높이기 위하여 전처리 과정으로써 전 오존 처리를 도입하였다.

재료 및 방법

로프형 담체 및 미생물 담체 침전조

미생물 담체는 로프형 고정상 접촉재 형태로 나일론 섬유질의 고리와 폴리프로필렌 로프사의 내심을 가지고 있으며 직경은 40~45 mm 정도로 이 담체를 15 cm씩 잘라 사용하였다. 미생물 담체 침전조 운용전에 따라 저류조를 마련해 팔당원수와 식중수를 이용하여 담체에 20일 정도 미생물을 부착 배양시킨 후 침전조에 적용시켜 사용하였다. 미생물 담체 침전조는 8 ℓ 부피의 직육면체 형태로 아크릴을 사용하여 제작되었고, 가운데에는 방패판을 달아 유입수가 담체와 충분히 접촉한 후 흘러 나가도록 하였다. 양 끝단에 유입 및 유출구를 설치하였으며, 바닥은 경사지게 하여 축적된 슬러지를 빼낼 수 있게 유출구를 설치하였다 (Figure 1).

Pilot plant

경기도 K정수장에 설치된 pilot plant는 일반적인 정수처리공정을 모사한 것으로 시간당 0.5 톤의 처리 용량으로 유입되는 팔당원수를 10분간 오존으로 전처리한 후 PACl(poly aluminum chloride)을 응집제로 하여 2분간의 급속교반과 30분간의 완속교반을 거쳐 3시간동안 침전조에서 침전시킨 후 모래여과를 통과시켜 최종처리수를 얻게 된다. 응집제 투입량은 원수 수질의 탁도 변화에 따라 Jar test의 최적치를 이용하여 운용하였다.

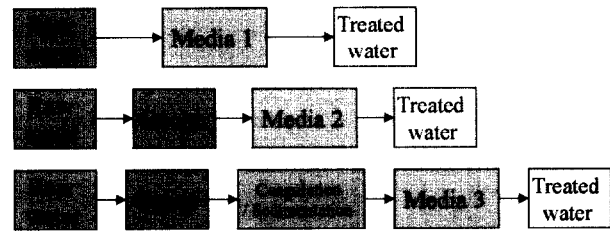


Figure 2. Schematic of media treatment system.

미생물 담체 침전조의 운용

일반적인 정수처리 공정과 연계된 미생물 담체의 NOM 및 탁도 제거효과를 알아보기 위하여 미생물 담체 침전조는 pilot plant의 모두 세 지점에 설치하였는데, 첫 번째는 아무 전처리도 거치지 않은 팔당원수를 바로 통과하도록 설치하였고(Media 1), 두 번째는 팔당원수를 오존으로만 전처리한 후 통과하도록 설치하였으며(Media 2), 세 번째는 침전과정이 끝난 후 통과하도록 설치하였는데(Media 3) 이 때 모래여과는 거치지 않았다 (Figure 2).

충분한 유기물의 분해를 위해 미생물 담체 침전조의 유량을 22~33 mL/min으로 하여 체류시간을 4~6시간으로 조정하였다. 겨울철의 수온저하와 산소결핍으로 인한 미생물 활성 둔화를 방지하기 위해 인위적인 Heating을 시켜 20~25℃의 수온을 유지함과 동시에 충분한 산소공급을 위해 폭기를 시켜 침전조 내에서의 DO를 6~7.5 mg/L로 유지하며 실험하였다. 샘플링은 일주일에 한번 실시하여 NOM의 간접적 지표로 사용되는 DOC(dissolved organic carbon)와 UV 흡광도(UV<sub>254</sub>) 및 탁도 등을 분석하였다.

분석방법

UV 흡광도는 Ultraviolet-Visible Spectrophotometer(UV-2000, Shimadzu, Japan)를 사용하여 10 mm×45 mm Quartz Cell로 254 nm에서 측정하였고, DOC는 TOC-Analyzer(Pharma TOC, Analytikjena, German)의 NPOC(Non-purgeable organic carbon) mode로 시료에 0.2 N HCl을 첨가하여 pH를 2이하로 조정하였고, Oxygen을 이용하여 무기탄소(CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>, HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, 용존 CO<sub>2</sub>)를 제거한 후 분석하였다. 위의 분석시료들은 측정전에 0.45 μm membrane filter(25 mm, Advantec MFS, Inc.)로 여과하였다. 탁도는 HACH Company(Model-16800, U.S.A) 탁도계를 사용하여 측정하였고, 담체 사진은 주사전자현미경(SEM; S-4200, Hitachi, Japan)을 이용하였으며, 나머지 분석항목은 모두 '먹는 물 수질 공정시험방법'에 따라서 분석하였다.

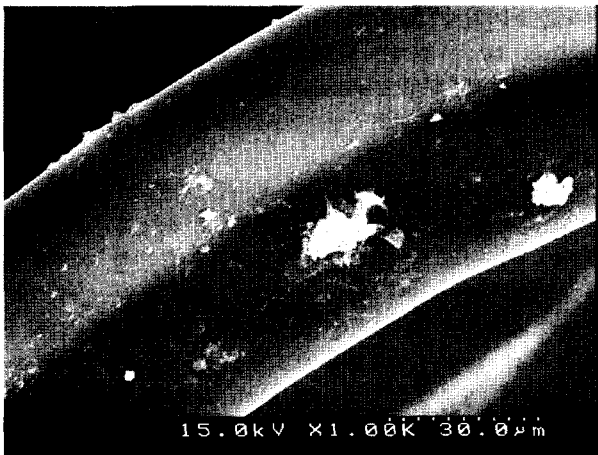
결과 및 고찰

대상원수의 특성

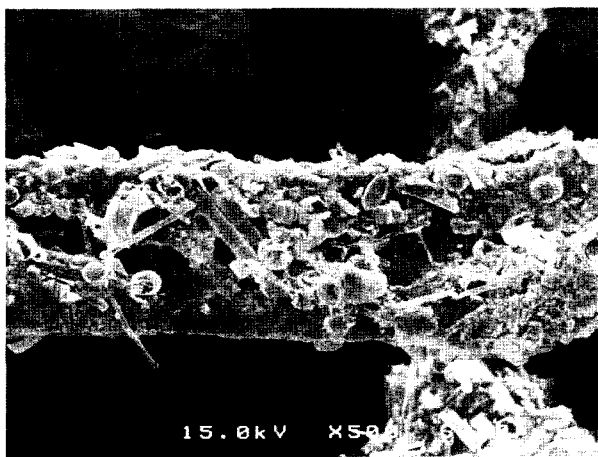
본 실험은 2000년 10월부터 실시하여 그때부터 취수한 팔당원수를 일주일에 한번씩 분석하였다. 본 실험에서 사용한 팔당원수의 특성은 Table 1과 같다. 팔당원수는 운용초기에서 80일째인 겨울철로 접어들수록 유기물의 농도와 탁도가 낮아짐을 보이다가 다시 봄철인 150일째부터는 높아짐을 나타내었다.

Table 1. Raw-water quality for pilot plant and media treatment system

Parameter	Value	Average
pH	6.7 - 8.1	7.6
Dissolved oxygen [mg/L]	7.1 - 7.8	7.6
Temperature [°C]	2 - 25	-
Alkalinity [mg as CaCO <sub>3</sub> /L]	48 - 55	53
Hardness [mg as CaCO <sub>3</sub> /L]	52 - 66	56
Turbidity [NTU]	0.3 - 4.5	2.0
UV <sub>254</sub> [cm <sup>-1</sup> ]	0.027 - 0.039	0.033
DOC [mg/L]	1.31 - 3.42	1.9
T-N [mg/L]	3	3
T-P [mg/L]	0.03	0.03



(A)



(B)

Figure 3. Scanning electron micrographs of rope media. (A: the initial stage of operation, B: after 60-day operation)

로프형 미생물 담체

Figure 3는 본 실험에서 사용한 로프형 미생물 담체의 주사전자현미경(SEM) 사진이다. Figure 3에서 보는 바와 같이 담체는 섬유사 형태로 미생물이 부착하여 서식할 수 있게 되어 있다. Figure 3-(A)는 미생물의 사전 배양 후 담체 침전조 운용 1일째의 담체 외부에 부착된 미생물의 모습을 찍은 주사전자현미경 사진이다. 담체에 약간의 미생물이 부착된 모습이 관찰되는데, 초기의 불안정한 결과가 나타남을 볼 때

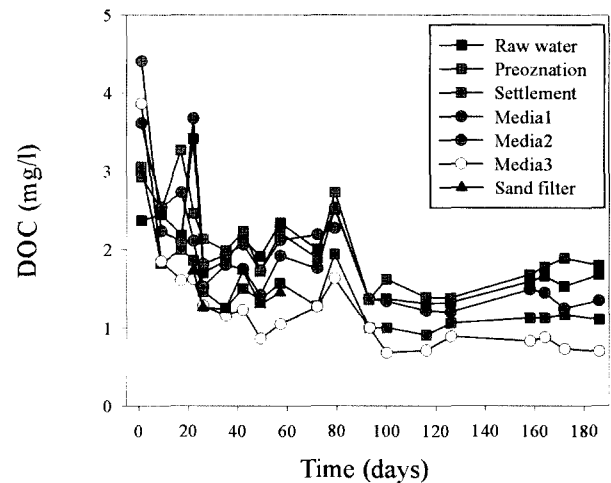


Figure 4. DOC concentration of each process. (media 1 - direct raw water, media 2 - after ozone contact, media 3 - after settlement)

미생물이 담체에 완전히 부착될 수 있는 안정화 기간이 필요하였다. Figure 3-(B)는 담체 침전조를 운용한지 60일이 경과한 후 담체 외부에 부착된 미생물의 모습을 찍은 사진이다. 운용 초기 사진과 비교해 볼 때 고농도의 미생물 군집의 모습을 관찰할 수 있었으며, 다양한 크기의 미생물과 작은 슬러지 입자들이 엉켜 있는 것을 볼 수 있었다.

로프형 미생물 담체 침전조별 NOM제거 효과

NOM(Natural Organic Matter)의 간접 지표로 나타내는 항목 중 DOC(Dissolved Organic Carbon)와 UV 흡광도(UV<sub>254</sub>)를 이용하여 NOM 제거를 비교해 보았는데, 각 공정별 DOC 농도는 Figure 4에 나타내었다. 담체별 DOC 농도를 살펴보면 실험 초기에는 DOC제거의 효과가 보이질 않다가 미생물의 안정화가 끝난 20일 정도 경과한 후부터 NOM제거 효과가 나타나기 시작하였다. 운전초기에는 미생물의 안정화가 완전하지 않기 때문에 유입수의 DOC를 모두 처리하지 못하고, 미생물이 유동중인 물에서 담체에 완전히 부착 적응되기 전까지는 오히려 탈리 현상도 많이 일어날것으로 생각되어 초기에는 DOC 값의 불안정화 현상이 관찰되는 것으로 사료된다. 원수의 평균 DOC 농도는 1.9 mg/L였다. Media 1의 경우에는 DOC 값이 원수와 거의 비슷하여 제거효과가 나타나질 않았다. 이는 원수자체의 SS(Suspended Solid)성분이 미생물 담체를 오염시켜 미생물의 활성을 저해함으로써 유기물의 감소가 저해된 것으로 사료되며, 이 공정에서는 별도의 다른 전처리 공정이 필요할 것으로 보인다. Media 2의 경우 원수에서 오존을 거치면서 DOC 농도가 높아져 2.1 mg/L를 나타내었고, 그 후 담체를 거치면서 DOC 제거효과를 보여 1.8 mg/L의 농도를 나타내었다. 이는 오존의 산화력으로 고분자 물질을 저분자화 하거나 저분자 물질을 용존상으로 변화시켜 SS의 부하를 줄임과 동시에 DOC의 농도가 약간 상승된 것이며, 이 오존산화로 유기물의 생분해도를 높히게 되어 미생물 담체로 인한 처리효율도 향상된 것으로 사료된다. 오존으로 인한 NOM의 산화작용은 NOM 분자를 작게 분해시켜 분자량을 감소시키거나, 산화된 작용기의 수를 증가시켜 NOM의 생분해도를 높힌다고 알려져 있다(7,8). Media 3의

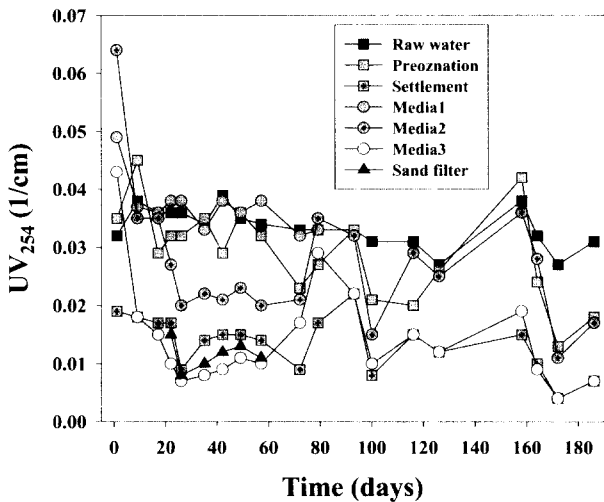


Figure 5. UV<sub>254</sub> of each process. (media 1 - direct raw water, media 2 - after ozone contact, media 3 - after settlement)

Table 2. SUVA value for each process

NOM Source	SUVA [L/mg · cm]	SUVA [L/mg · cm] latest 5 times
Raw water	0.017	0.020
Ozonation	0.014	0.014
Settlement	0.009	0.009
Media 1	0.015	0.017
Media 2	0.015	0.017
Media 3	0.012	0.013
Sand filter	0.008	0.008

경우 DOC의 농도가 1.5 mg/L인 침전조를 지나 평균 1.3 mg/L로 떨어짐이 관찰되었다. 침전처리를 거치기까지 오존접촉 및 응집과정을 지나기 때문에 탁도제거의 효과와 함께 NOM 제거가 어느 정도 이루어지며 침전처리 후 제거되지 않은 용존성 유기물질은 추가적으로 미생물 담체에 의해서 제거된 것으로 보인다.

NOM의 또 하나의 간접 지표를 나타내는 각 공정별 UV<sub>254</sub>의 감소 실험결과는 Figure 5에 나타내었다. UV<sub>254</sub>값은 DOC와는 달리 침전조와 Media 3에서 비슷한 수치를 나타내었다. 원수의 평균 UV<sub>254</sub>는 0.033 (cm<sup>-1</sup>)이고, 오존을 거치면서 0.029 (cm<sup>-1</sup>)로 약간 낮아짐을 알 수 있었다. Media 1에서는 DOC와 마찬가지로 UV<sub>254</sub>값의 감소 효과가 거의 나타나지 않았으며, Media 2에서는 0.027 (cm<sup>-1</sup>)의 값을 나타내었다. 이것 역시 오존의 산화작용에 의한 영향으로 사료된다. 침전조에서의 UV<sub>254</sub>값은 0.014 (cm<sup>-1</sup>)를 나타내었는데 Media 3에서도 침전조와 비슷하게 0.014 (cm<sup>-1</sup>)를 나타내어 침전조를 거치면서 추가적인 UV<sub>254</sub>감소는 관찰되지 않았다. 여기서 UV와 DOC의 비(specific UV absorbance or SUVA)를 살펴볼 수 있는데, 이 값은 254 nm에서의 UV 흡광도를 DOC 농도로 나눈 것으로 Table 2에 결과를 나타내었다. SUVA 값은 NOM의 Aromaticity 정도를 나타내는데, 유기물질을 크게 Aromatic 과 Aliphatic compound로 나누었다면 높은 SUVA 값을 가질수록 방향성구조를 가진 불포화 탄소 결합이 주를 이룬다고 할 수 있다(9). 원수에서 오존을 거치면서는 SUVA

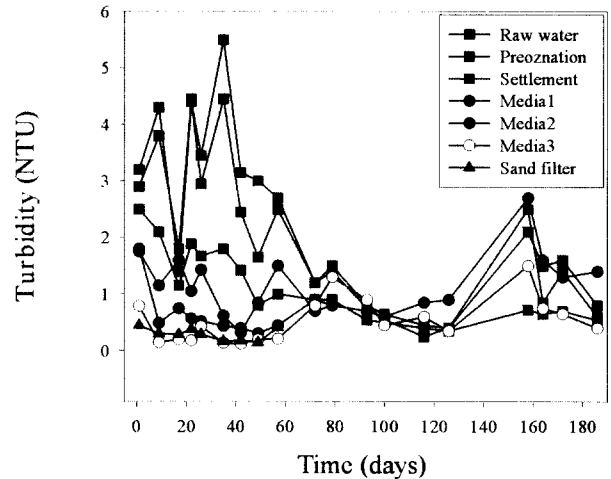


Figure 6. Change of turbidity for each process.

값이 감소되는 것으로 보아 Aromatic compound가 Aliphatic compound로 많이 전환되었음을 알 수 있고, 미생물 담체를 거친 후에는 담체 바로 전 공정보다 모든 SUVA값이 상승됨이 관찰되어 미생물 담체내에서는 유기물 중의 Aliphatic compound 부분이 상대적으로 높은 제거율을 나타내는 것으로 보여진다. 이것으로 미생물 담체의 효율적인 운용을 위해서는 오존과 같은 강력한 산화제를 이용하여 유기물 중의 Aromatic compound를 미생물이 섭취하기 용이한 Aliphatic compound로 산화시킬 수 있는 효과적인 산화공정이 필요하다는 것을 입증하였으며, 전 오존 처리 외에 응집-침전공정 후단에 후 오존처리 공정 도입을 검토해 볼 수 있을 것이다.

로프형 미생물 담체 침전조별 탁도제거 효과

일반적인 처리 공정에서의 탁도변화와 각 공정별로 설치된 미생물 담체의 탁도 변화를 살펴보았는데 그 결과는 Figure 6과 같다. 원수의 평균 탁도는 2.0 NTU 이고, 오존 전처리를 지나면서 2.2 NTU로 약간 상승하였으며, 이는 오존의 산화력으로 인하여 탁도유발요인이 가중되었기 때문인 것으로 사료된다. 침전과정에서는 응집 후 침전되지 않은 미세 floc의 작용으로 1.1 NTU 정도의 탁도를 보였고, 최종 모래여과를 통과하면서 수질기준치에 적합한 수준인 0.3 NTU 정도를 유지할 수 있었다(정수 수질 기준치 - 2001년 7월부터 0.5 NTU 이하). Media 1, 2, 3에서는 각각 평균 1.1 NTU, 0.9 NTU, 0.5 NTU 정도의 탁도를 나타내었다. 미생물 담체 침전조는 말 그대로 침전조에 미생물 담체 역할을 병합해 놓은 것이므로 탁도제거 효과를 볼 수 있는데 Media 1에서는 원수를 바로 처리한 것이므로 원수중의 커다란 입자성분만을 침전조에서 제거할 뿐 나머지는 그대로 유출되었기에 다소 높은 수치의 탁도를 나타낸 것으로 보인다. Media 2에서는 오존 전처리에 의한 산화력으로 고분자 유기물질을 저분자화 하거나 저분자 물질을 용존상으로 변화시킨 후 처리하게 되므로 오존의 작용으로 인한 SS(Suspended Solid)의 부하를 줄일 수 있게 되기에 좀더 높은 탁도 제거 효과를 보일 수 있던 것으로 사료되며, Media 3은 모래여과를 거친 수질과 비슷한 결과를 보였는데 이는 침전조에서 제거할 수 없는 미세 floc이 추가적으로 침전되었거나 담체에 의하여 흡착 제거된 것으로

사료된다.

위 모든 결과로부터 로프형 미생물 담체 침전조를 이용하여 좀 더 높은 NOM 제거 역할을 할 수 있었으며, 일반적인 침전공정에 새로운 공정을 따로 추가하지 않고 바로 적용가능한 경제적인 장치로 활용 가능할 것이다.

### 요 약

본 연구에서는 정수처리 중에서 BAC(Biological activated carbon) 처리의 생물분해능과 같이 NOM의 생물해성 부분을 제거하고자 로프형 미생물 담체를 침전조에 적용하는 공정을 시도하였다. 다양한 운전조건을 적용하여 DOC와 UV<sub>254</sub> 그리고, 탁도 제거효과를 평가하였는데, 담체 설치는 일반적인 정수처리 공정을 모사한 pilot plant에 첫 번째로 아무 전 처리도 거치지 않은 팔당원수를 바로 지나도록 하였고(Media 1), 두 번째는 팔당원수를 오존으로만 전처리한 후 지나도록 하였으며(Media 2), 세 번째는 전 오존과 응집-침전과정이 끝난 후 지나도록 하였다(Media 3). 원수의 DOC 농도는 1.3~3.4 mg/L이고, UV<sub>254</sub>는 0.027~0.039 (cm<sup>-1</sup>)이며, 탁도는 0.3~4.5 NTU 였다. 평균 DOC 농도는 media 1, 2, 3에서 각각 2.2 mg/L, 1.8 mg/L, 1.3 mg/L를 보였다. 반면에 침전조에서는 1.5 mg/L의 농도를 보여 media 3에서 가장 높은 제거량을 나타내었다. 평균 UV<sub>254</sub> 값은 media 1, 2, 3에서 각각 0.037 (cm<sup>-1</sup>), 0.027 (cm<sup>-1</sup>), 0.014 (cm<sup>-1</sup>)를 나타내었으며, 침전조에서의 UV<sub>254</sub> 값은 media 3와 비슷한 0.014 (cm<sup>-1</sup>)를 보였다. 평균 탁도는 media 1, 2, 3에서 각각 1.1 NTU, 0.9 NTU, 0.5 NTU를 나타내었다. 위의 결과를 보면 로프형 미생물 담체 침전조는 일반적인 침전 공정에 바로 적용할 수 있는 경제적인 장치로 활용 가능할 것이다.

### 감 사

본 연구는 한국과학기술연구원 기간고유사업 “금수강산

21” 프로젝트의 연구비 지원에 의해 수행되었으며 이에 감사를 드립니다.

### REFERENCES

1. Means, E. G. and Krasner, S. W. (1993), D-DBP regulation : Issues and ramifications, *J. of AWWA*, **85**, 68-73.
2. Pontius, F. W. (1993), D-DBP rule to set tight standards, *J. of AWWA*, **85**, 22-28.
3. Joseph G. Jacangelo, Jack DeMarco, Douglas M. Owen, and Stephen J. Randtke (1995), Selected processes for removing NOM : an overview, *Jour. AWWA*, **87**, 64-77.
4. Wataru Nishijima and Mitsumasa Okada (1998), Particle Separation as a Pretreatment of an Advanced Drinking Water Treatment Process by Ozonation and Biological Activated Carbon, *Wat. Sci. Tech.*, **37**(10), 117-124.
5. Thurman, E. N. (1985), Organic geochemistry of natural waters, Durdrecht, Netherlands : Nijhoff/Junk Publishers.
6. Schenitzer, M and Kahn, S. U. (1972), Humic substance in the environment, Marcel Dekker, Inc., New York.
7. Kaastrup, E. and Halmo, T. M. (1987), Removal of aquatic humus by ozonation and activated carbon adsorption, *Proc. 193<sup>rd</sup> Mtg. Div. Envir. Chem., ACS*, **27**(1), 355.
8. Raymond M. Hozalski, Edward J. Bower, and Sudha Goel (1999), Removal of natural organic matter(NOM) from drinking water supplies by ozone-biofiltration, *Wat. Sci. Tech.*, **40**(9), 157-163.
9. Chin, Y. P., Aiken, G., and O'Loughlin, E. (1994), Molecular weight, Polydispersivity, and Spectroscopic properties of aquatic humic substances, *Environ. Sci. Technol.*, **28**(11), 1853.
10. James P. Malley Jr., T. Taylor Eighmy, M. Robin Collins, Jennifer A. Royce, and Daniel F. Morgan (1993), The performance and microbiology of ozone-enhanced biological filtration, *J. of AWWA*, **85**, 47-57.