

상수원수 전처리 시 효율향상을 위한 생물여과 반응기 위치선정

최형주 · 최동호* · 배우근†

한양대학교 토목환경공학과 · *한국수자원공사 수자원연구원

(2006년 1월 17일 접수, 2006년 6월 28일 채택)

Evaluation of Biological Aerated Filter Position on Water Treatment Processes for Water Quality Improvement

Hyung-joo Choi · Dong-ho Choi* · Wookeun Bae†

Department of Civil and Environmental Engineering, Hanyang University

*Korea Water Resources Corporation Water Resources Research Institute

ABSTRACT : This study was the effectiveness of two downflow BAF(Biological Aerated Filter) systems at conventional water treatment system. A BAF reactor placed in front of coagulation and sedimentation tanks(Mode A) and after coagulation and sedimentation tanks(Mode B) that were compared in terms of removal of suspended particles, organic matters, and ammonia nitrogen. The suspended particles removal efficiency was over 80% for both Mode A and B, although Mode A gave slightly better results. BOD₅ removal and nitrification efficiencies were more than 90% for both reactor. The organic matter and ammonia removals were also superior in the Mode A. The biofilm thickness and biomass increased as increment of EBCT and the upper part of reactor more about 30% than lower part. The specific oxygen uptake rate(SOUR) was higher the upper part of reactor and Mode A than the lower part of reactor and Mode B. A cost analysis showed that the Mode A system was more cost effectiveness. It could save the coagulant dose by about 67% and the chlorine demand by about 95%. The ideal place to put the BAF reactor was in front of the coagulation/sedimentation process.

Key Words : Biological Aerated Filter(BAF), Empty Bed Contact Time(EBCT), Specific Oxygen Uptake Rate(SOUR), Coagulation/Sedimentation, Biofilm

요약 : 본 연구의 목적은 기존 정수처리 공정에 하향류식 호기성 생물여과 공정을 설치하였을 때 적정 위치를 선정하고자, 응집/침전 전(Mode A)에 BAF 공정을 설치하였을 때와 응집/침전 후(Mode B)에 BAF 공정을 설치하였을 때의 부유성 입자물질, 유기물, 암모니아성 질소 제거효율을 비교하고자 하였다. 운전결과 입자성물질(turbidity, SS)의 제거효율은 모든 EBCT에 걸쳐 Mode A, B 모두 약 80% 정도의 효율을 보였으며 Mode A에서의 효율이 다소 높은 것으로 조사되었다. 유기물질(BOD₅) 제거 및 질산화 효율도 90% 이상으로 나타났으며 Mode A에서의 효율이 더 좋은 것으로 나타났다. 생물막 두께 및 양은 EBCT가 증가할수록 커졌으며, 기질이 유입되는 상부에서 하부에 비해 약 30% 이상 미생물량이 많았다. 비산소소비속도(SOUR)는 기질이 유입되는 반응기 상부, Mode A에서 증가하는 경향을 나타내었으며 약품주입량 비교 시 Mode A가 경제적인 것으로 나타났다. 기존상수처리공정과 Mode A에 대한 경제성 분석결과 연간 응집제를 67%, 염소주입량을 95% 가량 절감할 것으로 조사되었다.

주제어 : 호기성 생물여과(BAF), 공탁체류시간(EBCT), 비산소소비속도(SOUR), 응집/침전, 생물막

1. 서론

현재 우리나라는 상수 취수원의 90% 정도를 하천, 호수 등의 지표수에 의존하고 있는 반면에, 물 사용량은 점차 증가하고 있어 오염물질의 증가와 더불어 자정능력이 저하되고 있다. 이에 기존의 상수처리공정에 오염물질의 유입이 증가되면서 처리효율 저하에 따른 응집제 및 염소의 주입량이 증가되고 있다. 외국의 경우 국내보다 일찍 고도정수에 대한 연구가 진행되었으며 이에 대한 기술 축적 및 보급률이 높아

지고 있다. 고도처리방법으로는 BAC(Biological Activated Carbon), Membrane filtration, Ozone 등이 쓰이고 있다.^{1~3)} 그러나, 국내 상수처리 방법은 거의 대부분이 물리·화학적 처리 방법 즉 응집, 침전, 여과 및 소독처리에 의존하고 있는 실정이다. 특히 여름철 홍수기의 경우 탁도물질의 증가로 인한 응집제 투입량의 증가로 사여과 폐색등의 여과 장애를 초래하며 산화 및 살균을 위해 염소의 과다 투입으로 비경제적 처리가 되고 있다. 이러한 문제로 인하여 최근에는 생물학적 처리의 연구개발이 국내·외적으로 활발히 이루어지고 있다.⁴⁾ 생물처리법이란 미생물의 신진대사를 이용하여 수중의 유기물질을 분해·제거하는 방법으로 정수과정에서는 대부분 호기성 생물막에 빈영양성 세균을 부착하여 이용한다.^{5,6)} 생물여과 기술은 기존의 처리장에 전처리 공정으로 활용되어 원

† Corresponding author
E-mail: wkbae@hanyang.ac.kr
Tel: 031-400-5148

Fax: 031-417-8139

수의 여러 오염성분들을 일차적으로 경감시키며 원수의 수질변화에 대하여 대응 폭이 넓어 선진국에서 많이 사용하고 있다.⁷⁾ 그 중 생물여과 기술인 호기성 생물여과법(Biological Aerated Filter, BAF)은 유기물질, 암모니아성 질소뿐만 아니라, 탁도물질의 제거에도 뛰어나 상수처리과정 중 염소소독을 최소화할 수 있고, 응집제의 주입량도 현저히 저감할 수 있는 공정으로 주목받고 있다.⁸⁻¹⁰⁾

이에 본 연구에서는 실제 하천수를 BAF 공정을 이용하여 EBCT(Empty bed contact time)를 60 min, 45 min, 30 min으로 변화시키면서 응집/침전 전(Mode A)과 후(Mode B)에 설치하여 두 공정의 처리효율, 생물학적·물리학적 특성 및 경제성 평가를 통해 기존 정수처리 공정에 도입 시 적정위치를 제안하고자 한다. 실험기간은 각각의 EBCT 당 약 45일 동안 운전하였으며 1일 1회의 시료채취 및 분석을 실시하였다. 원수의 성상은 시기에 따라 변동이 있었다.

2. 실험재료 및 방법

2.1. 실험장치 및 운전조건

본 연구에 사용된 반응기는 acryle 재질로 직경 5 cm, 높이 200 cm, 총 용적은 약 4L이며, 유입수는 downflow, 유입 air는 upflow 방식으로 운전되었다(Fig. 1). 반응기로의 원수 유입 후 응집(Mode A)과 응집 후 반응기 유입(Mode B) 방식으로 각각 운전하였다(Fig. 2). 사용된 여재의 직경은 약 5 mm, 비표면적 1,000~1,500 m²/m³인 clay 성분의 구형 여재((주)덕산, 한국)를 반응기 용적의 80%(약 1.6 m) 충전하였다. 이는 여재 팽창율을 20%로 고려하여 역세척 효율을 높이기 위함이었다. EBCT의 변화에 따른 호기성 생물막의 변화 특성을 관찰하기 위해 각 반응조에서 여재를 채취하여 실험하였다. 미생물 부착을 위해 경기도 A하수처리장의 포기조 슬러지를 순환시키면서 부착을 용이하게 하였으며 안정화 될 때까지 식중하였다.

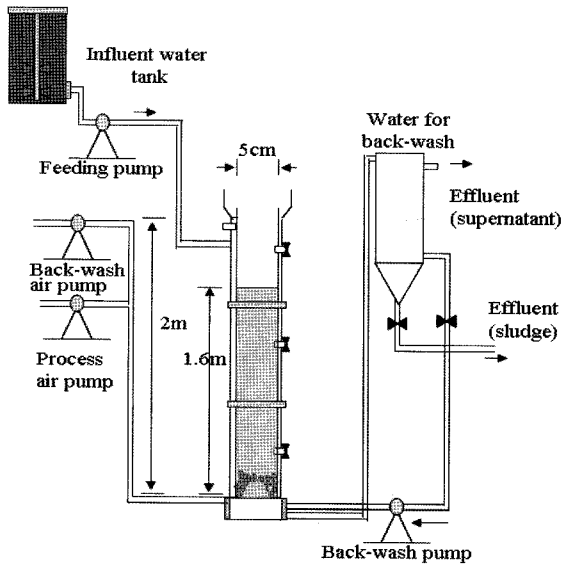


Fig. 1. Schematic diagram of BAF reactor.

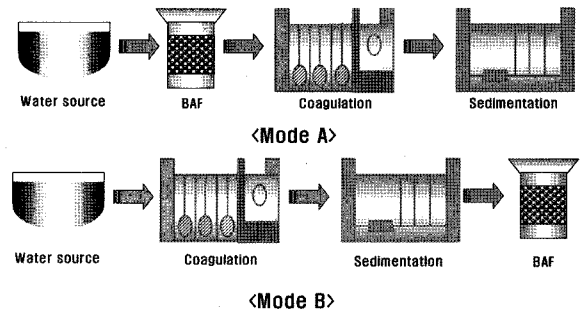


Fig. 2. Position of BAF reactor in Mode A and Mode B.

Table 1. Operating conditions of reactors

parameters	conditions
Flow rate(L/day)	96.0 ~ 192.0
COD volumetric loading(kg COD/m ³ day)	0.14 ~ 0.50
NH ₄ ⁺ -N volumetric loading(kg NH ₄ ⁺ -N/m ³ day)	0.01 ~ 0.09
Empty bed contact time(min)	60, 45, 30
Backwashing frequency(day)	5 ~ 7
Linear velocity(m/day)	48.0 ~ 96.0
Process air flow(m ³ /m ² /min)	0.1
Backwashing air flow(m ³ /m ² /min)	0.8
Height of filter media(m)	1.6

응집에 사용된 응집제는 PAC(Poly Aluminum Chloride; Al₂O₃ 17%)였으며, Jar-test를 이용하여 최적 응집제 주입량을 결정하였다. 유입수는 경기도 안산시에 위치한 시화호 인공습지 최종 유출수를 이용하였고, EBCT는 60 min, 45 min, 30 min으로 변화시켰으며 운전조건은 Table 1과 같다.

2.2. 실험 방법

본 실험은 각 EBCT당 약 45일간 실험을 진행하였으며 유입수는 시화호 인공습지중 반월천 저습지의 유출수를 유입 원수로 사용하였다. 이에 습지의 처리 효율에 의해 유입원수의 성상이 가변적이었다. 반응기 유입·유출 시료는 1일 1회 sampling하여 각 항목당 시험법에 준하여 실험하였다.

2.2.1. 일반항목

모든 수질분석은 Standard Methods¹¹⁾에 준하여 실시하였으며 시료채취는 반응조 유입수, 유출수 및 필요에 따라 각 segment별로 실시하였다.

2.2.2. 응 집

Mode A와 B에서 최적 응집제 투여량을 결정하기 위하여 Jar-test를 실시하였다. 원수와 BAF의 유출수에 대한 최적응집제 주입량을 산정하여 처리수질을 비교하였다. 응집교반 조건은 급속교반(5 min), 완속교반(15 min) 그리고 침전(30 min)으로 하였다. Fig. 3은 Jar-test를 통하여 탁도에 따른 적정 응집제 주입량을 graph화한 것이다. Mode A와 Mode B는 실제 원수의 탁도를 기준으로 주입된 PAC 양을 기입하였다. 실제 낙동강 물금정수장의 경우 고탁도(80 NTU)로 유입될 때 PAC의 양을 약 30 mgAl₂O₃/L로 주입하고 있다.

Table 2. Water quality index and analysis methods

Parameters	Methods	Apparatus or conditions
DO	DO Meter	YSI-5100
pH	pH Meter	YSI-60
COD _{Cr} and COD _{Mn}	Standard Methods	K ₂ Cr ₂ O ₇ Reflux and Standard Methods
BOD ₅	Standard Methods	Winkler azide Method
NH ₄ -N	Standard Methods	Nesslerization Method
NO ₂ -N	Standard Methods	Ethylenediamine Method
NO ₃ -N	Standard Methods	Brucine Method
Chl-a.	Standard Methods	Acetone(9+1)
SS, VSS	Standard Methods	MLSS: 105 °C MLVSS: 550 °C
UV ₂₅₄	UV analyser	SHIMADZU(1601)
Turbidity	HACH	DR 2010
Color	HACH	DR 2010

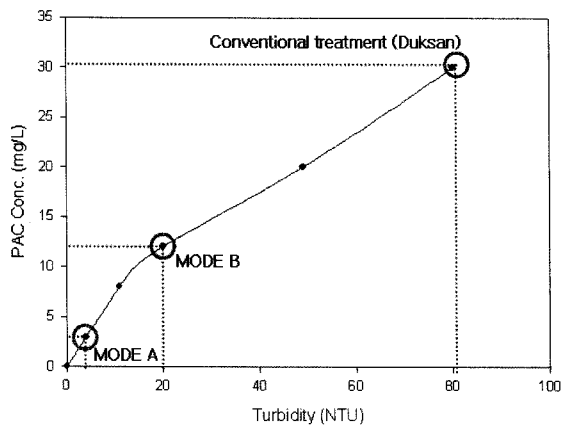


Fig. 3. Optimal PAC dose with varing raw water turbidity.

2.2.3. 미생물 두께측정¹¹⁾

생물막은 99% 이상이 수분¹²⁾으로 되어있어 여재 표면의 수분의 양과 여재의 표면적을 측정하면 생물막의 평균 두께를 측정할 수 있다.

$$\text{Volume of water(V)} =$$

$$\text{surface area(A)} \times \text{mean thickness of biofilm(t)} \quad (1)$$

여기서 물의 부피는 여재의 무게를 제외한 것이기 때문에 전체무게에서 미생물 탈리 후 여재의 무게를 빼주면 순수 물의 무게가 된다. 물의 무게를 잴 때 여재 채취 시 여재에 붙어있는 생물막 외의 수분은 제거해야하기 때문에 편셋으로 잡고 가볍게 한번 씩 털어준 후 측정하였다. 실험의 정확성을 위해 여재는 크기별로 20개 내외를 선정하여 평균값을 구했다. 여재 자체의 수분 흡수율을 제외하기 위해 생물막이 부착되지 않은 빈여재를 수중에 넣어 자체의 수분 흡수율을 빼 주었다.

생물막 밀도는 부착 미생물의 건조무게를 측정하여 생물막 내의 물의 부피로 나누어 측정하였다.

$$\text{Biofilm density(mg/cm}^3\text{)} =$$

$$\frac{\text{dry weight of attached biofilm on media}}{\text{volume of water}} \quad (2)$$

2.2.4. 비산소소비속도(Specific Oxygen Uptake Rate)¹³⁾

반응기 각 부분의 제거효율에 따른 미생물 특성을 알아보기 위하여 유기물 분해균(heterotrophs)과 질산화 균(autotrophs)으로 나누어 호기성 조건에서 미생물량에 따른 산소이용율을 파악할 수 있는 SOUR 실험을 수행하였다. 실험을 위하여 반응기 각 부분의 여재를 꺼내 미생물량 측정에서와 마찬가지로 일정량의 여재에 부착되어있는 미생물을 탈리시킨 후 미생물의 MLVSS를 측정하였다.

적정량의 시료를 BOD bottle에 나누어 담은 후 nutrient가 함유된 DO 포화의 증류수를 bottle에 기포가 유입되지 않게 주입하여 활성도를 측정하였다.

기질은 반응시간동안 제한요소로 작용하지 않도록 충분히 주입하였다. 또한 기질의 영향을 받지 않고 미생물 자체의 산화율(자산화율)만을 알아보기 위해 nutrient(유기물질과 암모니아 성분 제거)와 cell만을 넣어 실험하였다.

- A. nutrient + BOD 성분 함유(heterotroph 측정) + NaNO₃(미생물세포성장을 위한 N source 주입)
- B. nutrient + 암모니아 성분 함유(autotroph 측정)
- C. nutrient 성분만 함유(control)

실험은 BOD bottle의 하부에 magnetic bar를 넣고 유입부에 DO meter를 꽂은 후 각각의 성분이 들어있는 유입수를 주입하여 stirring 하면서 시간에 따른 DO의 감소농도를 측정하였다. 각 실험을 마친 후 C의 실험에서 얻어진 자산화율을 A와 B에서 빼주어 dO₂/dt 소비율을 구할 수 있다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1. EBCT의 변화에 따른 Mode A와 Mode B에서의 입자성 물질 제거효율

Fig. 4는 각 EBCT에서 약 45일 동안 운전 시 Mode A와 Mode B에서의 탁도물질에 대한 유입수 및 각 단위공정별 평균 농도와 편차(ave. ± 95%)를 나타낸 결과이다. 또한 막대그래프 위의 숫자는 유입수의 평균 농도를 100으로 보았을 때 각 단위공정에서 제거하고 남은 처리수의 분율을 나타낸 것이다. 이는 실제 원수의 농도 변화가 심해 Mode A와 Mode B의 효율적 비교 평가를 위해 표현한 방법이다. 모든 EBCT 60, 45, 30 min에서 Mode A가 Mode B보다 입자성 물질의 제거효율이 좋은 것으로 나타났다. 이는 Mode A의 유출수 탁도가 응집에 의해서 제거됨으로써 탁도물질이 안정적인 것으로 나타났다. EBCT 30 min에서 Mode B의 효율이 최종유출수에서 다소 저하되는 것으로 나타났는데 이는 BAF 반응기 내에서 EBCT 감소로 인해 선속도가 증가되어 미생물 및 여재 일부분의 유출이 증가되었기 때문으로 판단된다.

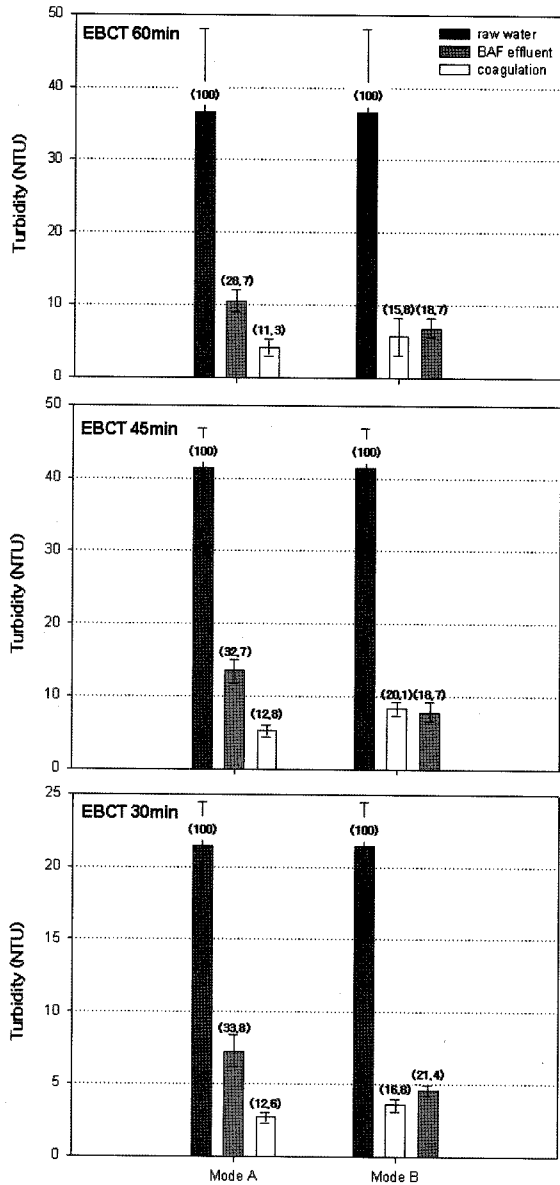


Fig. 4. Effluent concentration of turbidity and removal efficiency with EBCT.

Fig. 5는 각 EBCT에서 SS에 대한 유입수 및 각 단위공정별 평균 농도와 편차(ave. ± 95%)를 나타낸 결과이다. EBCT 60 min의 경우 Mode A에서의 평균 제거효율은 약 90%로 Mode B의 제거효율보다 약 7% 정도 좋은 것으로 나타났다. EBCT 45 min과 30 min에서도 역시 Mode A에서 높은 제거효율을 보였으며, 체류시간에 따른 농도변화에 있어 EBCT 60 min, Mode A가 조금 더 안정적인 효율을 보이고 있다. 그리고, EBCT가 감소할수록 효율이 다소 저하되는 것으로 나타났는데 이는 탁도와 유사한 원인으로 판단된다.

입자성 물질(Turbidity, SS)의 제거에 대한 EBCT에 따른 Mode A와 Mode B의 비교 실험결과 전체적으로 Mode A의 처리방식이 Mode B에 비해 효율적인 것으로 나타났으며 상당량이 Mode A의 BAF 공정(turbidity : 68%, SS : 67%)에서 제거되는 것을 확인할 수 있었다. Mode B에서와 같이

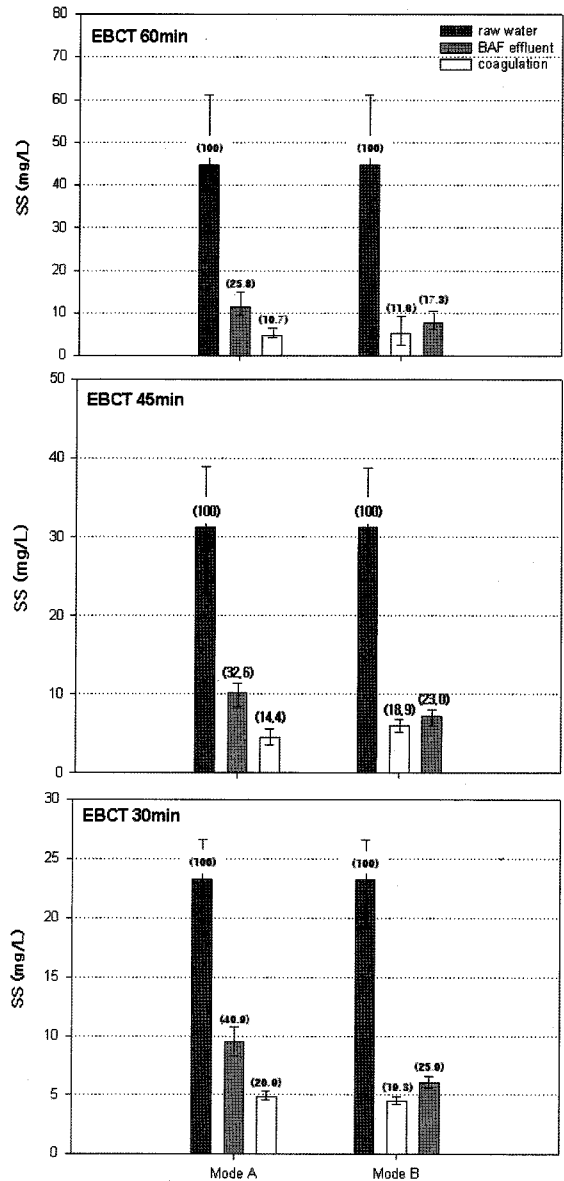


Fig. 5. Effluent concentration of SS and removal efficiency with EBCT.

응집 → BAF 공정으로 이루어진 system에서는 응집으로 좋은 처리효율을 얻었다 하더라도 BAF 유출수에서의 입자성 물질 증가로 전반적인 효율이 Mode A에 비해 저하되는 것으로 나타났다. 또한 turbidity를 기준으로 응집제 투입량을 Mode A가 Mode B보다 약 1/3~1/5정도 줄일 수 있는 것으로 나타났다.

3.2. EBCT의 변화에 따른 Mode A와 Mode B에서의 유기물질 제거효율

Fig. 6은 각 EBCT에서 BOD₅에 대한 유입수 및 각 단위공정별 평균 농도와 편차(ave. ± 95%)를 나타낸 결과이다. BOD₅의 유출수를 비교해보면 EBCT 60 min, 45 min, 30 min 모두 Mode A에서 낮은 농도를 보였다. 그리고 생물학적으로 분해가능한 유기물인 BOD₅의 제거효율은 모든 EBCT에서

1 mg/L 이하의 안정된 효율을 보였다. 그리고 유기물의 일시적인 고농도 유입에도 효과적으로 대처할 수 있는지 판단하기 위하여 각 EBCT 마다 운전시작 25일 경과 후 10일 동안 glucose를 첨가하여 BOD₅를 15~20 mg/L로 증가시켰을 때에도 유입부하가 낮을 때의 유출농도와 비슷한 90% 정도의 제거효율을 보임으로써 생물학적으로 분해가능한 유기물에 대해 약 2배에 달하는 충격 부하에도 안정적인 유출수를 얻을 수 있는 것으로 나타났다.

각 단위 공정별로 살펴볼 때 EBCT별 평균 제거효율은 Mode A의 BAF에서 평균 92%의 제거효율을 보였고 응집으로 약 2.5%의 제거효율을 보여 최종 유출수는 유입수 대비 94.5%의 효율을 보였다. Mode B의 경우 응집으로 약 60%의 효율을 보였으며 BAF 공정에서 약 32%의 제거효율을 보여 최종

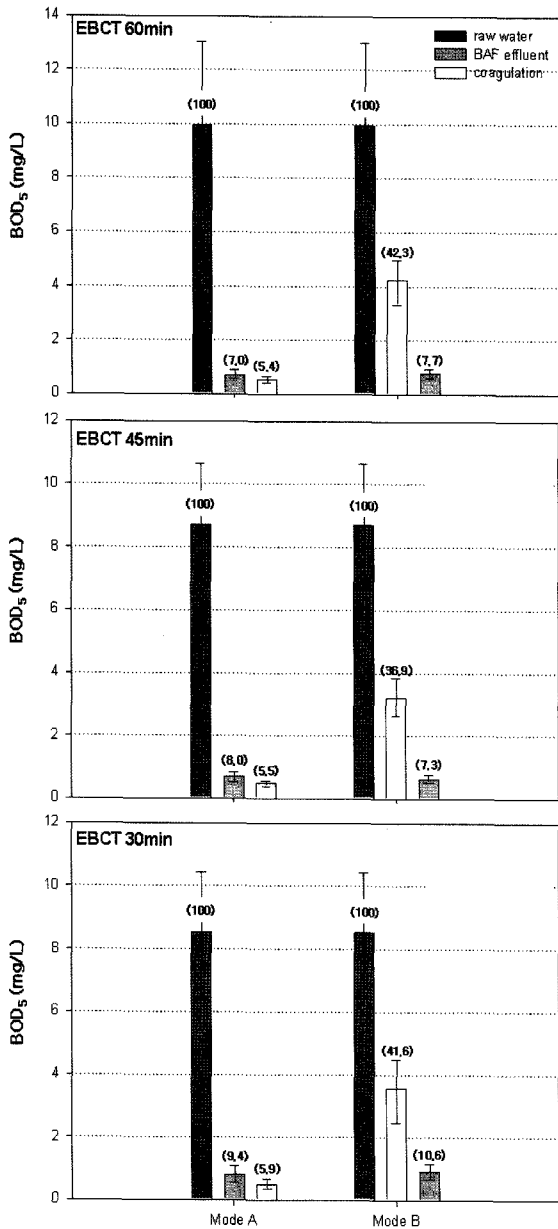


Fig. 6. Effluent concentration of BOD₅ and removal efficiency with EBCT.

유출수는 유입수 대비 92%의 효율을 보이는 것으로 나타났다. 이로서 응집·침전에 의한 제거보다는 BAF에 의한 생물학적 유기물 제거가 대부분으로 판단할 수 있다.

Fig. 7과 같이 EBCT 60 min, 45 min, 30 min에서 각 단위 공정에 대한 COD_{Mn}의 제거효율을 보면 Mode A의 BAF에 의해 약 40% 정도 제거가 되었으며 Mode B의 응집·침전에 의하여 약 45% 정도 제거가 이루어졌다. 그리고 최종 유출수를 비교해보면 평균 농도에서 Mode A가 Mode B보다 약 0.5 mg/L 정도 낮게 유지되었다. 이는 체류시간에 따른 농도 변화에 있어 Mode A가 조금 더 효율적으로 대응함을 보여주는 것이다. EBCT 60 min이 45 min이나 30 min의 평균제거효율보다 높은 것으로 나타났는데, 이는 COD_{Mn}의 경우 반응기내에서 체류시간이 긴 EBCT 60 min에서 안정적인 제거효율을 보인 것으로 판단된다. 유출수의 평균 농도 값에 대한 편차가 EBCT 60 min일 때가 적은 경향을 보여 유출수의 안정성 면에서도 EBCT 60 min, Mode A일 때

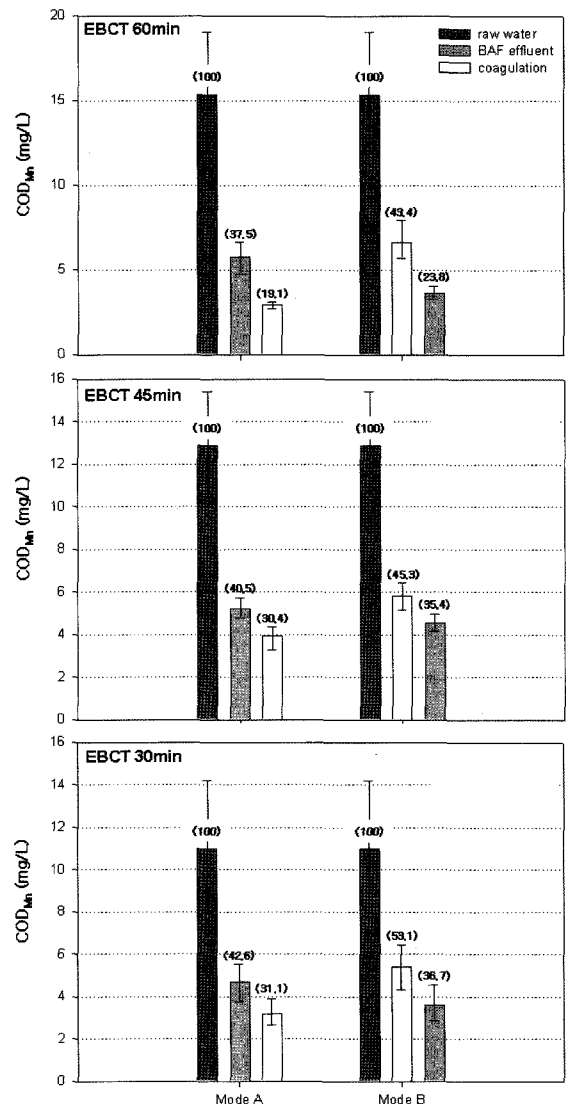


Fig. 7. Effluent concentration of COD_{Mn} and removal efficiency with EBCT.

좋았다고 판단할 수 있다. 또한, 충격 부하 실험을 하기 위해 각 EBCT마다 운전후 25일 경과후 10일 동안 glucose를 COD_{Mn}으로 15~20 mg/L 첨가하여 실험을 하였을 때도 평상시와 같이 약 3~4 mg/L 정도의 유출수 농도를 나타내었다. 이 결과는 생물학적으로 분해가능한 물질에 대해서는 충분히 제거할 수 있음을 보여주는 것으로 판단할 수 있다. EBCT 30 min의 경우 EBCT 45 min과 60 min과는 다르게 glucose 주입시 약 2~3 mg/L 가량의 COD_{Mn}이 높게 유출되었는데 이는 빠른 선속도의 증가로 인해 제거가 원활하지 못했기 때문으로 판단된다.

BOD₅에 비해 COD_{Mn}의 제거효율이 낮은 원인을 파악하기 위해 EBCT 45 min의 상부여재에 부착되어 있는 미생물을 탈리시켜 여러 가지 유기물질에 대한 분해실험을 수행하였다. 유기물 시료로는 정수처리장의 탈수슬러지에서 추출한 humic substances, 배양한 조류를 암조건에서 약 5일간 방치 후 용출된 조류기원성 유기물(Algogenic organic matters, AOMs), 생물학적으로 분해가 쉬운 glucose등 세 종류에 대해 미생물 비기질소비속도를 측정하였다.

Glucose에 대한 비기질소비속도는 0.22 mgCOD_{Mn}/mgVSS · day였으며, AOMs에서는 0.02 mgCOD_{Mn}/mgVSS · day, humic substances는 0.0026 mgCOD_{Mn}/mgVSS · day였다. Glucose에 대한 비기질소비속도에 비해 조류기원성 유기물이 10배 느린 것으로 나타났고, humic substances는 약 100배 정도 느린 것으로 나타났다. 유입원수가 습지 유출수였고 원수 내 평균 조류 농도가 약 62.6 mg/m³이었음을 고려한다면 AOMs 및 humic substances 등의 물질로 인해 원수내에 nonbiodegradable COD 물질이 다량 포함되어져 분해가 어려웠던 것으로 사료된다.

3.3. EBCT의 변화에 따른 Mode A와 Mode B에서의 암모니아 제거효율

현재 일반적인 상수처리 공정에서 NH₄⁺-N는 염소소독과정에서 제거되는데 암모니아에 의한 염소소비로 살균력이 저하되고 염소요구량이 커져 과과점 염소주입(breakpoint chlorination)을 실시하기 위해서는 과량의 염소가 주입이 되어야 하므로 비경제적이 될 수 있다. 이에 NH₄⁺-N의 제거를 위해

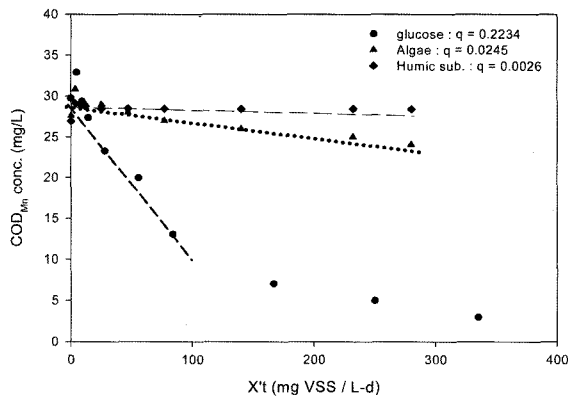


Fig. 8. Specific organic substances utilization rate(q).

생물학적인 질산화를 고려하여 Mode A와 Mode B에서의 질산화능을 살펴보았다. 음용수에서 문제를 일으키는 질소의 형태는 대부분 NH₄⁺-N과 NO₃⁻-N⁽⁴⁾이나 일반적으로 하천수 NH₄⁺-N의 농도는 3 mg/L를 초과하는 경우가 드물며 대부분 NO₃⁻-N의 형태로 존재한다.⁽⁵⁾ Fig. 9는 Mode A와 Mode B에서의 NH₄⁺-N 제거효율을 나타낸 결과이다. Mode A는 BAF에서 약 90% 이상 제거됨으로써 생물학적인 질산화에 의해서 제거가 이루어지는 것을 확인할 수 있었다. NH₄⁺-N은 Mode A와 Mode B에서 모두 응집에 의해서 제거되기 보다는 생물학적 처리에 의한 제거가 대부분임을 나타내었다. 이는 기존처리공정에서 NH₄⁺-N을 응집을 통해 효과적으로 제거할 수 없음을 보여주는 것이라고 할 수 있다. 전반적으로 EBCT 60 min, 45 min, 30 min 모두에서 Mode B의 유출수 평균 농도가 약 0.3 mg/L 정도 높은 것을 볼 수 있다. 암모니아 충격부하에 대한 질산화 효율을 살펴보기 위해 각

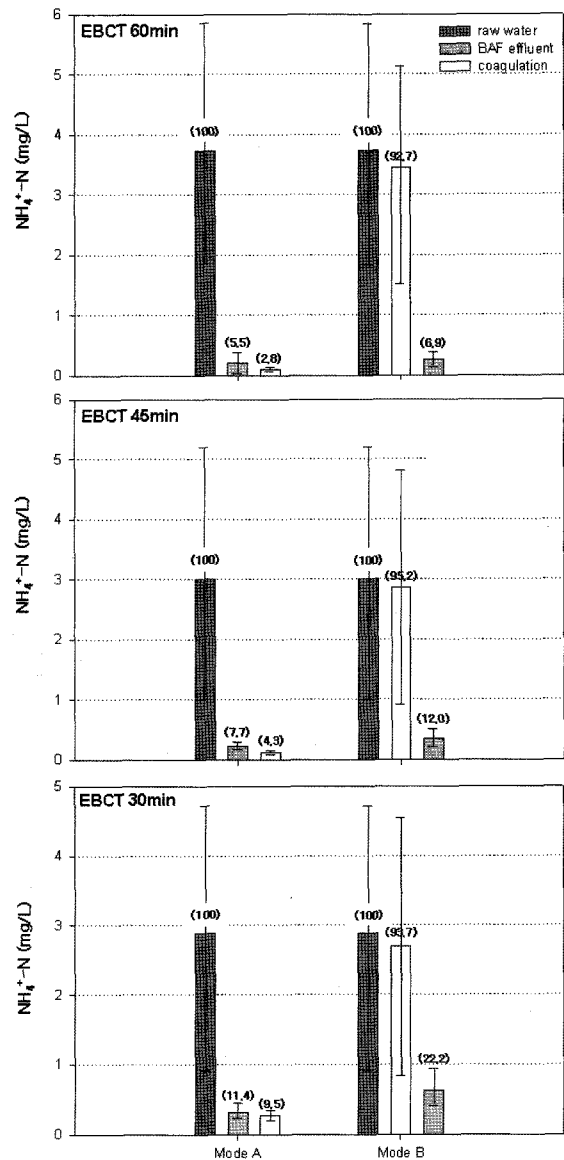
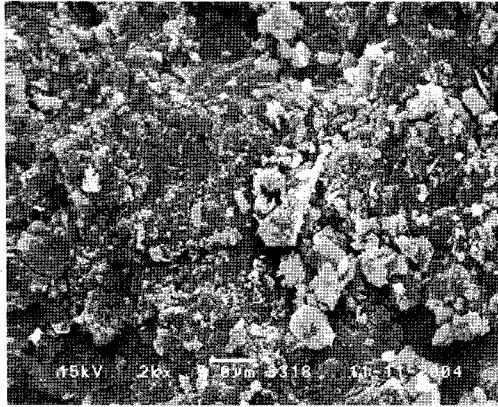
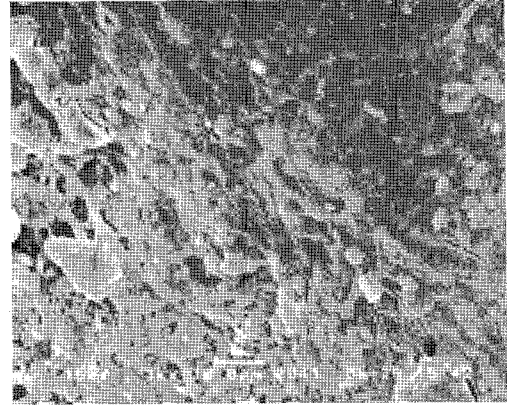


Fig. 9. Effluent concentration of NH₄⁺-N and removal efficiency with EBCT.



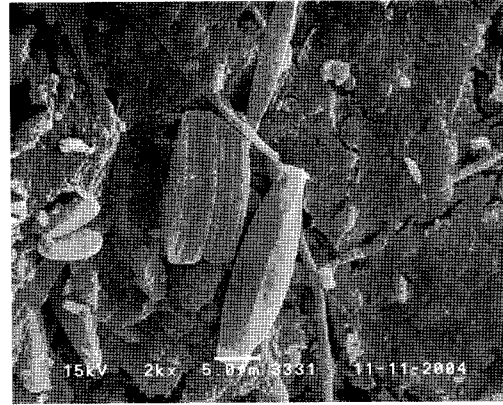
(a) blank media(×2,000)



(b) covered with PAC on media(×1,000)



(c) Mode A upper part(×2,000)



(d) Mode B upper part(×2,000)

Fig. 10. Photos of medium surface by SEM.

EBCT에 대해 운전시작 후 약 25일~35일 사이에 ammonium sulfate를 10 mg/L의 높은 농도로 1일 1회 주입하였다. 그 결과 약 90% 이상의 질산화 효율을 나타내어 기존의 원수에 대한 효율과 유사함을 알 수 있었다. 처리수의 대부분은 NO₃-N의 형태(98% 이상)를 띠는 것으로 나타났으며 NO₂-N의 형태는 거의 존재하지 않았다. Mode B에서는 높은 NH₄⁺-N의 유입이 있을 시 유출수 농도가 다소 높았다. 이는 Mode B에서의 약품 응집 전처리로 인해 상대적으로 미생물이 적었으며 응집·침전되지 않는 미량의 PAC가 반응기로 넘어가 여재의 표면에 덮여 미생물의 활동 공간이 상대적으로 줄어들었기 때문으로 판단된다(Fig. 10).

3.4. EBCT의 변화에 따른 Mode A와 Mode B에서의 미생물 특성

3.4.1. 생물막 두께(Biofilm thickness)

실험 종료 시 반응기 상부(0~60 cm), 중부(60~120 cm) 및 하부(120~180 cm)에서 여재를 채취하여 biofilm의 두께를 측정된 결과를 Fig. 11에 나타내었다. EBCT 60 min에서 30 min으로 갈수록 생물막 두께가 다소 감소하였는데 총 유기물 제거효율이 체류시간에 관계없이 거의 일정하였던 점으로 미루어 보아 미생물의 생성량과는 관계가 적고 유속에 의한 전단력 증가로 인해 물리적인 탈리가 이루어진 것으로 판단된다.

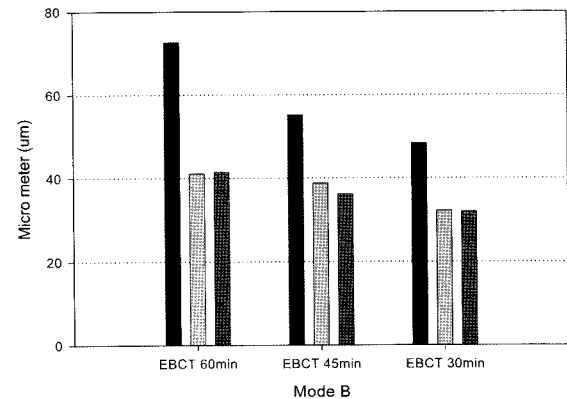
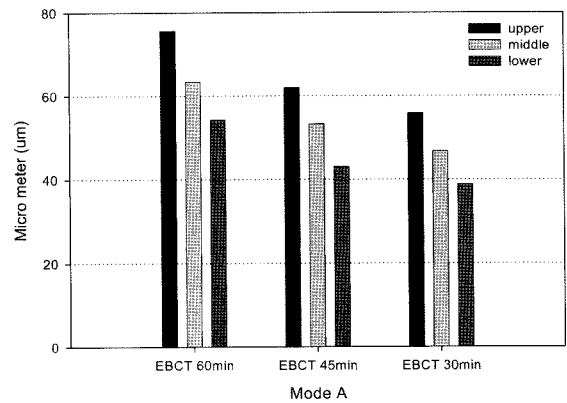


Fig. 11. Biofilm thickness of different locations with EBCT.

미생물 두께는 반응기 하부보다는 기질이 유입되는 상부가 Mode A의 경우 약 30% 이상, Mode B의 경우 약 40% 정도 두꺼운 것을 볼 수 있었다. 이는 기질의 농도가 높은 상부에서의 기질 이용율이 커지면서 단위 미생물량이 많아졌기 때문으로 판단된다. 그리고 Mode A 보다는 Mode B에서의 미생물 두께가 얇았는데, Mode B의 유입수에서 응집·침전에 의한 기질의 제거가 사전에 이루어졌기 때문에 Mode A보다 기질의 농도가 낮아 두께가 상대적으로 적은 것으로 판단된다.

3.4.2. 총 미생물량(Total biomass)

실험 종료시 반응기 높이별(상부: 0~50 cm, 중부: 50~100 cm, 하부: 100~150 cm)로 여재를 채취하여 total biomass를 측정된 결과를 Fig. 12에 나타내었다. Biomass는 유입이 되는 상부에서 유기물 및 입자성 물질이 높게 유입됨으로써 미생물의 성장이 중·하부보다 많았다. Mode A의 경우 EBCT 60 min일때 유입이 되는 상부에서 총량으로 2,300 mgVSS 정도 측정되었고 하부에서는 총량으로 970 mgVSS 정도 측정됨으로써 상부에서의 biomass가 높게 유지됨을 알 수 있었다. 그리고 EBCT 45 min 보다는 60 min에서 높게 유지되었는데, 이는 유량이 증가함으로써 미생물이 media에서 탈리되거나 clogging 되었던 미생물이 씻겨나감으로써 biomass가 높게 유지되지 못한 것으로 판단된다. Mode B에서도 같은 경향을 나타내었는데, 상부에서 약 1,700 mgVSS으로 하부에서는 약 1,100 mgVSS 정도 유지되었다. Mode B에서도 역시 EBCT 45 min에서 60 min 보다는 약 30% 정도 적게 유지되었다.

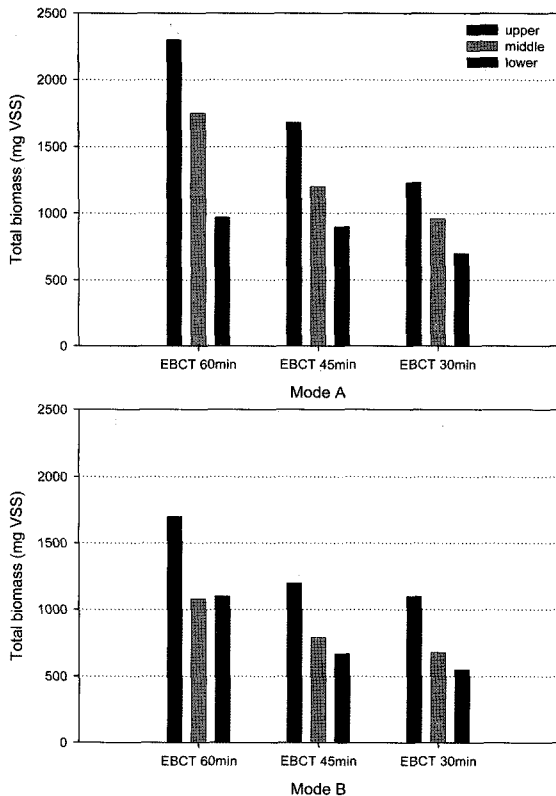


Fig. 12. Total biomass at different locations with EBCT.

Table 3. Composition of feeds for SOUR tests

Contents	Compound	Influent mass(mg/300 mL)		Final conc. (mg/L)
		Heterotrophs	Autotrophs	
Substrates	C ₆ H ₁₂ O ₆	8.44	—	30 as COD
	(NH ₄) ₂ SO ₄	—	14.14	10 as NH ₄ ⁺ -N
Nutrients	NaHCO ₃	25.2	25.2	61 as HCO ₃ ⁻
	NaNO ₃	2.06	—	5 as NO ₃ ⁻
	K ₂ HPO ₄	6.74	6.74	4 as P 10 as K
	MgSO ₄ · 7H ₂ O	7.69	7.69	2.5 as Mg
	MnSO ₄ · H ₂ O	2.40	2.40	2.6 as Mn
	FeSO ₄ · 7H ₂ O	1.79	1.79	1.2 as Fe
	CaCO ₃	2.85	2.85	3.8 as Ca

Table 4. SOUR with EBCT and location

unit : mgO₂/gVSS · hr

Location	EBCT	60 min		45 min		30 min	
		COD	NH ₄ ⁺ -N	COD	NH ₄ ⁺ -N	COD	NH ₄ ⁺ -N
Mode A	upper	9.9	24.1	8.2	15.5	12.3	18.7
	middle	9.5	6.7	7.3	6.4	9.8	7.5
	lower	7.7	6.5	6.2	5.3	7.5	6.4
Mode B	upper	6.0	5.7	4.2	6.0	6.5	8.4
	middle	5.9	4.8	3.5	4.3	5.3	6.7
	lower	5.0	4.3	2.4	4.1	4.8	5.4

3.4.3. Specific Oxygen Uptake Rate(SOUR, 비산소섭취율)

각 EBCT마다 운전이 종료된 후 반응기 내 여재를 이용하여 유기물 산화균(heterotrophs)과 질산화균(autotrophs)의 SOUR를 측정하였으며 실험 방법은 Table 3에, 결과값은 Table 4에 나타내었다.

Heterotrophs의 SOUR 값은 반응기 하부로 갈수록 다소 감소하였다. 각 EBCT에서 Mode A와 B의 경우 반응기 상부가 하부보다 높았으며, Mode A가 Mode B보다 높게 나타났다. 이는 반응기 상부 및 Mode A에서 기질 농도가 높아 최대 비기질소비속도가 증가되고 이로 인해 미생물의 활성이 증가되었기 때문으로 판단된다. Mode A의 경우 유입부하가 약 0.36 kgCOD_{Mn}/m³ · day으로 Mode B의 유입부하 약 0.16 kgCOD_{Mn}/m³ · day보다 2배 이상 높았으며 EBCT 45 min 일 때가 EBCT 60 min과 30 min일 때보다 낮았다.

Autotrophs의 SOUR 값은 EBCT 60 min, Mode A의 반응기 상부에서 Mode B의 상부보다 약 40% 정도 높게 나타났다. EBCT 45 min과 EBCT 30min에서도 반응기 상부에서의 SOUR 값이 상대적으로 높았으며 Mode A에서의 값이 높게 나타났다.

3.4.4. 미생물 비기질소비속도

Heterotrophs의 활성을 알아보기 위하여 유기물질에 대한 비기질소비속도를 측정하였다. 초기 유기물질(COD_{Mn})의 농도는 30 mg/L를 주입하고, 미생물의 세포성장에 필요한 N source를 위해 sodium nitrate(NaNO₃)를 미량 주입하여 실험하였다.

Table 5. Specific substrate utilization rate(q) with EBCT and location

unit : mg/mgVSS · day

Location	EBCT	60min					
		60min		45min		30min	
		COD	NH ₄ ⁺ -N	COD	NH ₄ ⁺ -N	COD	NH ₄ ⁺ -N
Mode A	upper	0.35	0.05	0.18	0.04	0.40	0.09
	middle	0.32	0.04	0.15	0.02	0.35	0.05
	lower	0.27	0.03	0.14	0.01	0.27	0.03
Mode B	upper	0.25	0.02	0.15	0.03	0.27	0.06
	middle	0.25	0.02	0.13	0.02	0.26	0.04
	lower	0.22	0.01	0.13	0.01	0.23	0.02

Batch test 기간동안 pH는 7.5±0.3, 온도 20℃±1℃, 그리고 반응기 내 용존산소(DO)는 제한인자로 작용하지 않게 하기 위해 충분한 양(0.2 m³air/m²min, 6 mg/L ± 1 mg/L)을 공급 하였다.

반응기 상부에서의 COD_{Mn} 비기질소비속도를 보면 Mode A에서 EBCT 60 min이 45 min에 비교하여 약 2배 정도 빠른 것으로 나타났다. 그리고 Mode B의 경우 역시 약 1.7 배 정도 빠른 것으로 나타났다. 이는 미생물의 활성을 나타내는 SOUR(Table 4)값과 비교하여 볼 때, 반응기 위치, EBCT에 따라 유사한 결과를 보이는 것이다. Mode A의 상부에서 가장 높은 활성을 보였으며, COD_{Mn} 비기질소비속도는 0.3530 mgCOD_{Mn}/mgVSS · day로 가장 높게 나타내었다. EBCT가 60 min이고 Mode A의 상부에서 가장 빠른 비기질소비속도를 나타내는 것은 Mode A의 상부에서 유입 부하가 가장 높고, 미생물의 활성도가 상대적으로 좋기 때문으로 판단된다.

반응기 상부에서의 NH₄⁺-N 비기질소비속도는 Mode A에서 EBCT가 60 min(0.05 mgNH₄⁺-N/mgVSS · day)일 때 Mode B(0.02 mgNH₄⁺-N/mgVSS · day)보다 높게 나타났다. 이는, Mode B에서의 약품 응집 전처리로 인해 상대적으로 미생물이 적었으며 응집 · 침전되지 않는 미량의 PAC가 반응기로 넘어가 여재의 표면적에 덮여 미생물의 활동 공간이 상대적으로 줄어들었기 때문으로 판단된다.

3.5. 경제성 평가

경제성 평가는 기존 정수처리장에서의 약품 소요량과 Mode A와 B의 운전시 소요되는 비용을 대상으로 선정하였다. 응집제의 적정 응집조건은 Jar-test를 통하여 산정하였다. Table 6에서는 일 처리량이 5만톤인 중 · 소규모의 정수처리장을 기준으로 비용산정을 하였다. 응집제 주입량은 Fig. 3을 기준으로 하였으며, 암모니아성 질소의 경우 Mode A와 B 모두에서 질산화가 95% 정도 이루어져, 그에 따른 기존 정수처리장의 암모니아성 질소 처리를 위해 요구되는 Cl₂ 양으로 계산하였다.

본 연구를 통해 얻은 약품량 절감효과를 살펴보면 PAC의 경우 연간 사용량이 기존처리방법 및 Mode B의 공정에서는 219 ton/year로 연간 3억 6천만원 정도가 소요되는 반면 Mode A의 경우 73 ton/year로 1억 2천만원이 소요되어 약

Table 6. Chemical cost assessment

Contents		Conventional	Mode A	Mode B	
PAC	Dose(mg/L)	12	4	12	180,000 won/m ³
	Annual dose (ton/year)	219	73	219	
	Cost (thousand won)	360,000	120,000	360,000	
Cl ₂	Dose(mg/L)	10	0.5	0.5	388 won/kg
	Annual dose (ton/year)	182	9.1	9.1	
	Cost (thousand won)	70,000	3,500	3,500	
Total(thousand won)		430,000	123,000	363,000	

2억 4천만원의 PAC 절감효과를 가져오는 것으로 나타났다. Cl₂ 절감은 Mode A가 기존처리방법에 비해 약 173 ton/year을 줄일 수 있는 것으로 나타나 Mode A를 이용해 연간 6천 7백만원의 절감효과가 있을 것으로 판단된다. 종합적으로 살펴볼때, 기존 정수처리장에서 드는 비용에 비해 Mode A는 연간 약 3억 7백만원, Mode B에 비해서는 2억 4천만원의 약품 절감 효과를 가져올 수 있는 것으로 판단된다.

4. 결론

호기성 생물여과(Biological Aerated Filter, BAF) 반응기를 상수원수의 전처리 공정으로써 정수처리장의 응집공정 전/후에 위치할 때 EBCT의 변화에 따른 입자성 물질의 제거, 유기물 제거 및 질산화 효율을 비교 · 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

입자성 물질의 경우 원수의 변동이 심함에도 불구하고 유출수의 농도가 안정적이었으며, BAF 후 응집 · 침전(Mode A)의 유출수가 응집 · 침전 후 BAF(Mode B)의 유출수보다 좀더 안정적이었다. 응집제 주입량에서도 Mode A의 응집제 요구량이 1/3 ~ 1/5 정도로 적었다.

BOD₅의 평균 유입농도는 약 8 mg/L이었으며 Mode A와 Mode B system 모두 처리수의 농도가 0.5 ~ 1 mg/L으로 유출되었다. COD_{Mn}의 평균 유입 농도는 약 13 mg/L이었으며 유출수 농도의 경우 3 ~ 5 mg/L로 처리되었다. 유기물 부하에 효과적으로 대응하는지 판단하기 위하여 약 10일간 glucose를 COD로 15 ~ 20 mg/L로 첨가시켰을 때 90% 정도의 제거효율을 보임으로써 생물학적으로 분해가능한 유기물에 대한 충격부하에도 안정적인 유출수를 얻을 수 있었다. 암모니아성 질소는 응집에 의한 제거가 거의 이루어지지 않았으며 Mode A와 Mode B 모두 BAF 반응기 내에서 95% 정도의 질산화 효율을 나타내었다. 암모니아성 질소의 충격부하에 대한 질산화 효율을 살펴보기 위하여 약 10 mg/L의 농도를 첨가한 후 운전한 결과 약 90% 이상의 질산화 효율을 나타내어 고농도의 암모니아성 질소 유입 시 효과적으로 대응하는 것으로 나타났다. BAF 반응기 내의 생물막 두께와 미생물량은 유입기질 농도가 높은 Mode A에서, 동일

반응기 내에서는 기질 유입부 쪽에서 더 크게 나타났다. 그러나 EBCT가 작아질수록(즉, 유량이 증가할수록) 얇아지고 총 미생물량도 감소하였다. 이러한 결과로 미루어 볼 때 기질부하보다도 유속증가가 생물막 두께 및 량에 더 큰 영향을 끼치는 것으로 판단된다.

Mode A의 경우 기존 상수처리공정과의 약품첨가량에 대한 경제성 분석결과 응집제 요구량에서는 약 67% 정도 절감을 기대할 수 있었고, BAF에서의 암모니아 제거로 인하여 염소요구량 역시 약 95% 정도 절감되는 것으로 나타났다.

위와 같은 결과로서 호기성 생물여과 반응기를 기존 정수처리 시설에 도입 시 원수를 호기성 생물여과 반응기호 처리 후 응집처리를 거치는 것이 기질제거 및 경제성 면에서 좋은 것으로 연구되었다.

사 사

본 연구는 환경부 차세대 핵심환경기술 연구비 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고 문헌

- Ince, H. N., Apikyan, G. I., "Combination of activated carbon adsorption with light-enhanced chemical oxidation via hydrogen peroxide," *Water Res.*, **34**(17), 4169~4176(2000).
- Singer, P. C., Obolensky, A., and Greiner, A., "DBPs in chlorinated north carolina drinking waters," *AWWA*, **87**(10), 83~92(1995).
- Thorsen, T., "Membrane filtration of humic substances," *Water Res.*, **40**(9), 105~112(1999).
- Rittmann, B. E. and Huck, P. M., "Biological treatment of public water supplies," *CRC Critical Rev. in Env. Cont.*, 19, Issue 2, 119~184(1989).
- Rittmann, B. E., Crawford, L., Tuck, C. K., and Namkung, E., "In situ determination of kinetic parameters for biofilms: isolation and characterization of oligotrophic biofilms," *Biotechnol. and Bioeng.*, **28**, 1753(1986).
- Namking, E. and Rittmann, B. E., "Removal of taste and odor compounds by humic-substances-grown biofilms," *AWWA*, **79**(7), 107~112(1987).
- 신향식, 임경호, 이의신, 최계운, "생물막 공정에 의한 상수원수에서의 유기물 제거," *한국수질보전학회지*, **11**(4), 341~349(1995).
- Benson, D., "An emerging technology: the biological aerated filter, a promising biological process," U.S. R.P.A 832/R831/02 Water Engineering Res. Lab., Cincinnati, Ohio., 3~10(1983).
- Carlson, K. H. and G. L. Amy, "BOM removal during biofiltration," *AWWA*, **90**(12), 42~52(1998).
- Montgomery, J. M., "Technology assessment of biological aerated filter," U.S. E.P.A. 600/S290/015, Water Engineering Res. Lab., Cincinnati, Ohio., 5~25(1990).
- 최동호, 배우근, 박성준, 정진욱, "호기성 생물여과 공정에서 HRT와 DO 변화에 따른 폐수처리 특성," *대한환경공학회지*, **25**(11), 1337~1343(2002).
- Characklis, W. G. and Marshall, K. C., "Biofilms," John & Sons, Inc, 1, 3~15(1990).
- Johansen, N. H., Andersen, J. S., and La Cour Jansen, J., "Optimum operation of a small sequencing batch reactor for BOD and nitrogen removal based on on-line our-calculation," *Water Sci. Technol.*, **35**(6), 29~36(1997).
- Edward, J. B. and Patricia B. C., "Biological processes in drinking water treatment," *AWWA*, **80**(9), 82~93(1988).
- Rittmann, B. E. and Snoeyink, V. L., "Achieving biologically stable drinking water," *AWWA*, **76**(10), 106~114(1984).