

호기성 생물여과 공정을 이용한 하천수 전처리

최동호 · 최형주* · 배우근†*

한국수자원공사 수자원연구원 · *한양대학교 토목환경공학과

(2005년 8월 30일 접수, 2006년 2월 20일 채택)

Pre-treatment of River Water Using Biological Aerated Filtration

Dong-Ho Choi · Hyung-Joo Choi* · Wookeun Bae†*

Korea Water Resources Corporation Water Resources Research Institute

*Department of Civil and Environmental Engineering, Hanyang University

ABSTRACT : When polluted stream water was treated with biological aerated filter(BAF) in pilot plant, all operation with 90, 60, 45 and 30 min of EBCT at fixed $0.1 \text{ m}^3 \text{ air/m}^2 \text{ min}$ of aeration showed 80% or higher treatment efficiency of particle materials(SS, turbidity and Chl.-a) and 85% or higher efficiency of ammonia nitrogen removal. It was thought that, in case of BOD, biological stability may sufficiently be assured with BAF because grade III or IV inflow water was changed to grade I for outflow water. In case of COD_{Mn} , about 60% of removal efficiency was found. When the mechanism of the result was investigated, about 30% of COD materials was produced by algae clogged in the reactor. There was almost no biological decomposition because specific substrate utilization rate of algogenic organic materials were $0.0245 \text{ mg} \cdot \text{COD}_{\text{Mn}}/\text{mg} \cdot \text{VSS} \cdot \text{day}$, thus partial backwashing(washing the media in 1 m upper of the reactor once a day) was required. It is thought that elevation of removal rate about 10% of COD_{Mn} and 5.5% of BOD_5 could be obtained with partial backwashing resulting in assurance of biologically more stable raw water and that saving backwashing water may be significant.

Key Words : Biological Aerated Filter, Empty Bed Contact Time, Algogenic Organic, Biofilm, Partial Backwashing

요약 : 오염 하천수 수질개선 연구를 위해 pilot plant 규모의 호기성 생물여과 공정을 이용하여 실제원수를 적용한 경우 유입 공기량을 $0.1 \text{ m}^3 \text{ air/m}^2 \text{ min}$ 으로 고정하고 EBCT를 90, 60, 45, 30 min으로 운전 시 입자성 물질(SS, Turbidity, Chl.-a)의 경우 EBCT와 관계없이 80% 이상의 처리효율을 나타냈으며 암모니아성 질소의 경우 85% 이상의 처리효율을 보였다. BOD의 경우 하천수수질 환경기준 III-IV 급수로 유입되어 I 급수 미만으로 유출되 본 처리 공법 사용 시 생물학적 안정성을 충분히 확보할 수 있을 것으로 판단되었다. COD_{Mn} 의 경우 약 60%의 제거효율을 보여 BOD 제거율에 비해 효율이 저하되는 것으로 나타났는데 이러한 원인을 규명한 결과 전체 COD 물질 중 30% 정도가 반응기 내부에 clogging된 조류에 의해서 발생하는 것으로 조사되었으며 이들 조류기원성 유기물질의 기질 비 소비율이 $0.0245 \text{ mg} \cdot \text{COD}_{\text{Mn}}/\text{mg} \cdot \text{VSS} \cdot \text{day}$ 로 생물학적 분해가 거의 되지 않는 것으로 나타나 이에 대한 대책으로 부분역세(partial backwashing)에 대한 필요성이 요구되었다. 이에 부분역세(상부 1 m 여재에 대한 1일 1회 역세)를 통해 BOD 5.5%, COD_{Mn} 10% 정도의 제거율 상승을 얻을 수 있었고 이를 통해 생물학적으로 좀더 안정된 원수 확보가 가능해졌으며 역세 기간의 연장으로 역세수 절감 및 유량 확보 효과를 가져 올 것으로 판단된다.

주제어 : 호기성 생물여과, 공탐 체류시간, 조류기원성 유기물, 생물막, 부분역세

1. 서론

환경부는 2000년 2월 유럽기술로부터 도입한 강변여과수(江邊濾過水, bank filtration) 취수방식을 적용하여 이 기술로 생산한 수돗물을 공급하고 있다.¹⁾ 그러나 강변여과방식은 토양이 물을 잘 거를 수 있는 층적토가 발달되어 있어야 하고, 취수정을 포함한 시설 설치를 위해 폭 500 m 이상의 넓은 부지가 확보되어야 하며, 비료나 농약으로 인한 토양·지하수 오염을 피해야 하기 때문에 농경지도 대상에서 제외된다는 단점을 가지고 있다.²⁾ 이 때문에 우리나라에서 강변

여과기술을 채택할 수 있는 지역은 상당히 한정되어 있다고 할 수 있다. 따라서, 강변여과에 버금가는 유사한 수질 안정성과 경제성을 가지면서 넓은 층적토양부지가 불필요한 기술의 필요성이 요구되어진다. 호기성생물여과공정(Biological Aerated Filter, BAF)은 강변여과 공정을 대체하면서 장소의 제약성을 받지 않고 화학약품을 사용하지 않는 자연정화적 방법으로 2차오염의 우려가 없고, 입자성물질과 용존성 물질을 동시에 제거할 수 있는 장점이 있다.³⁻⁶⁾ 광과 호수가 부영양화로 인한 맛·냄새, 축산폐수 등으로 인한 용존 유기물질로 오염된 우리나라의 실정에 비추어 효과적으로 적용될 수 있을 것으로 판단된다.

생물여과 공정을 이용한 처리법은 유기물뿐만 아니라, 암모니아성질소의 제거율이 뛰어나 정수공정중의 염소소독을

† Corresponding author

E-mail: wkbae@hanyang.ac.kr

Tel: 031-400-5148

Fax: 031-417-8139

최소화 시킬 수 있으며 원수에 포함된 부유물질 및 조류 등의 효과적 제어로 인해 후단 응집공정에서의약품 투입량 등이 감소된다고 알려져 있다.⁷⁻⁹⁾

이에 본 연구는 비교적 오염이 된 대상원수(하천 및 호수 기준: III-IV 급수)를 호기성 생물여과 공정을 이용해 하천수 수질 환경기준 I-II 급수로 정화하여 생물학적으로 안정된 원수 확보가 가능한지의 여부를 판단하고자 하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1. 유입원수 성상

시화호의 수질개선을 목적으로 시화호로 유입되는 3개하천(반월천, 동화천, 삼화천)이 모이는 합류부 간석지에 갈대 등의 수생식물을 식재한 인공습지가 조성되어, 하천 주변에서 유입되는 비점오염을 자연적 정화방법으로 처리한 후 시화호로 유입시키고 있다.¹⁰⁾ 습지 유출수 농도가 하천수 수질 환경기준 III-IV 급수(BOD 기준)로 본 논문의 유입수로서 적당하다는 판단 하에 이 지역에 pilot plant를 설치·운전하였다.

2.2. 실험장치 및 운전조건

본 연구에서 사용된 반응조는 철 구조물의 원통형 반응기로 내경 48 cm, 높이 5 m이며 상부에는 역세척 시 여재의 원활한 팽창을 위해 반응기 상부에 내경 72 cm의 turbulence zone을 설치하였다. 반응기 내부에는 직경 3.0~5.0 mm, 비표면적 1,500 m²/m³의 clay 재질 여재(주) 덕산, 한국)를 반응기 용적의 80%(높이 4 m)까지 충전 하였으며 역세척 여재 팽창율을 약 20%로 고려하여 충전율을 결정하였다. 운전 기간은 2003년 1월~2004년 8월까지 약 20개월간이었다. 유입수는 상부에서 하부로 들어가는 downflow system을 채택 하였으며 유입 공기는 하부에서 상부로 주입하였다(Fig. 1).

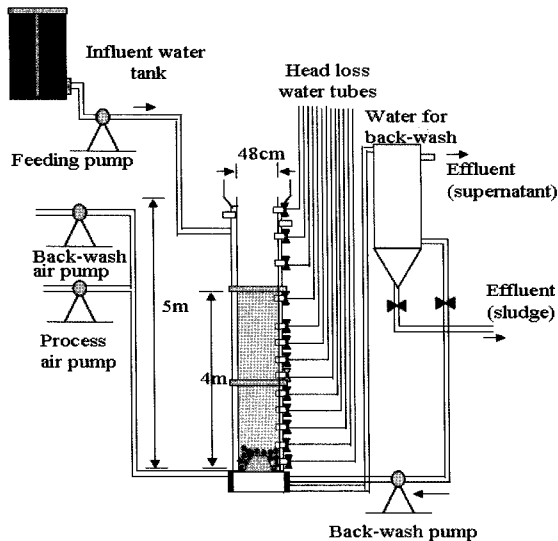


Fig. 1. Schematic diagram of pilot plant-scale BAF reactor.

Table 1. Characteristics of pilot plants scale BAF reactor

Parameters		Conditions
Reactor design	Dimensions of reactor	48 cm dia×500 cm height
	Cross sectional area of reactor	0.1809 m ²
	Volume of reactor	0.9 m ³
	Void ratio	0.53
	Diameter of clay media	5-3 mm
	Specific surface area of clay media	1,200-2,000 cm ²
Operating conditions	Empty bed contact time	90-30 min
	Feed flow rate, Q	14.5-43.4 m ³ /day
	Maximum COD volumetric loading	1.0 kg COD _{Mn} /m ³ · day
	Maximum NH ₄ ⁺ -N volumetric loading	0.37 kg NH ₄ ⁺ -N/m ³ · day
	Process air flow rate	0.08-0.1 m ³ air/m ² · min
	Backwash air flow rate	0.80 m ³ air/m ² · min
	Backwash water flow rate	0.35 m ³ water/m ² · min

Table 2. Characteristics of treatment parameters

Parameters	Q (m ³)	Linear velocity (m/day)	backwashing water/treated water(%)
EBCT			
90 min	14.5	80	0.88
60 min	21.7	120	0.58
45 min	28.9	159	0.44
30 min	43.4	240	0.30

역세척은 물과 공기를 병행하여 공기(0.8 m³ · air/m² · min, 3 min) → 공기(0.8 m³ · air/m² · min, 5 min) + 물(0.35 m³ · water/m² · min, 5 min) → 물(0.35 m³ · water/m² · min, 5 min)의 순서로 유입하였고 총 역세척 수량은 약 640 L였으며 역세척수는 처리수를 이용하였다. 반응기 운전 조건은 Table 1 과 같으며 처리수 대비 역세척 수량은 Table 2에 나타내었다.

Table 3. 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
PO ₄ -P	Standard Methods	Ascorbin acid Method
SS, VSS	Standard Methods	MLSS: 105 °C MLVSS: 550 °C
UV ₂₅₄	UV analyser	SHIMADZU(1601)
Turbidity	HACH	DR 2010
Color	HACH	DR 2010

2.3. 분석 및 실험 방법

2.3.1. 일반항목

모든 수질분석은 Standard Methods¹¹⁾에 준하여 실시하였다. 시료채취는 반응조 유입수 및 유출수에서 1일 1회 분석을 목적으로 채수하였고, 필요에 따라 각 segment별로 실시하였다.

2.3.2. 비산소 섭취율(Specific Oxygen Uptake Rate)

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 부착되어있는 미생물을 탈리시킨 후 미생물의 MLVSS를 측정하였다.

적정량의 시료를 BOD bottle에 나누어 담은 후 nutrient가 함유된 DO 포화의 증류수를 bottle에 기포가 유입되지 않게 주입하여 heterotrophs와 autotrophs의 활성도를 측정을 위해 기질의 종류를 달리하여 실험하였다.

기질주입은 반응시간동안 부족하지 않도록(기질이 제한요소로 작용하지 않도록) 충분히 주입하였다. 또한 기질의 영향을 받지 않고 미생물 자체의 산화율(자산화율)만을 알아보기 위해 nutrient(유기물질과 암모니아 성분)를 제거하고 cell 만을 넣어 실험하였다.

- A. nutrient + BOD 성분 함유(heterotroph 측정)
- 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 주입 후 stirring 하면서 시간에 따른 DO의 감소농도를 측정하였다. 각 실험을 마친 후 C의 실험에서 얻어진 자산화율을 A와 B에서 빼주어 dO_2/dt 소비율을 구할 수 있다.

2.3.3. 생물막 두께(Biofilm thickness)

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 핀셋으로 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 흡수율은 빼 주었다.

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

$$\text{Biofilm density}(\text{mg}/\text{cm}^3) = \frac{\text{dry weight of attached biofilm on media}}{\text{volume of water}} \quad (2)$$

3. 실험결과 및 고찰

3.1. 수질

3.1.1. 부유물질(SS)

약 20개월간의 pilot plant 운전 기간 동안의 운전 변화를 Fig. 1에 도시하였다. 전체기간 중 운전 변화는 EBCT를 기준으로 90 min → 60 min → 45 min → 30 min이었다.

전반적으로 살펴 볼 때 EBCT에 관계없이 SS 제거효율은 평균 80%를 상회하였다. EBCT 90 min에서 역세척은 동파 등으로 인해 미생물이 사멸되어 잦은 역세척을 실시하여 운전효율이 안정적이지 못했다. EBCT 60 min 부터는 여재 상부에 clogging 현상이 발생하여 유입수가 원활히 반응조로 유입이 되지 못하고 상부로 overflow 될 때(head loss: 1 m)를 기준으로 역세척을 실시하였다.

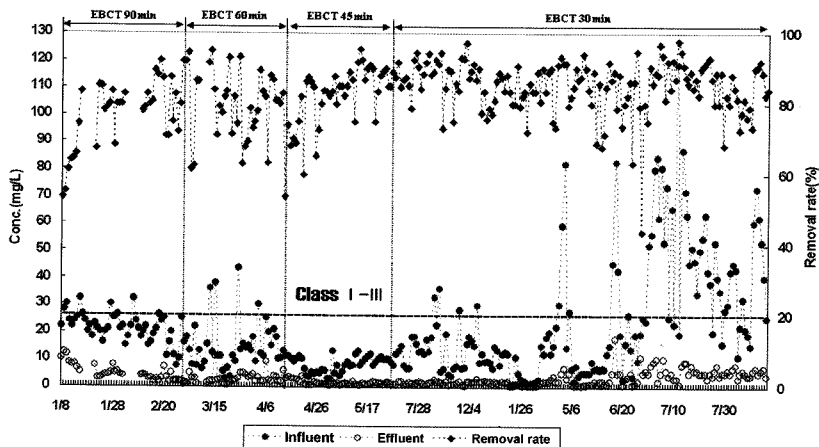


Fig. 2. SS removal with EBCT.

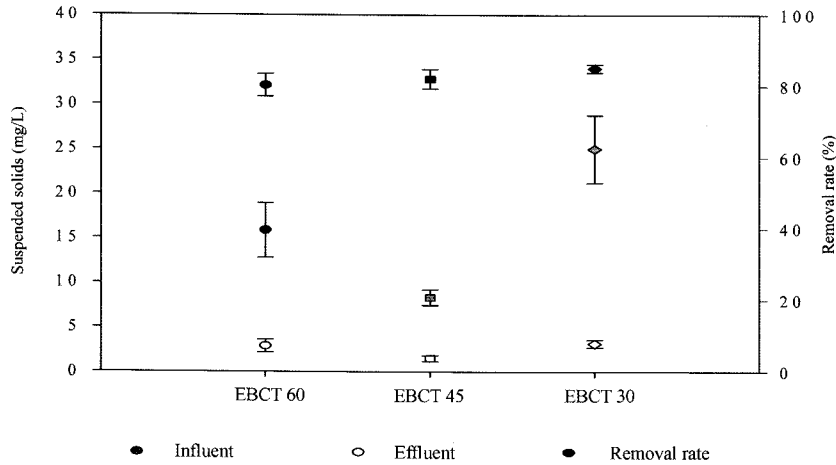


Fig. 3. Average of SS removal with EBCT (The error bars stand for \pm 95% 2 standard deviation).

EBCT가 빨라질수록 역세 주기가 짧아졌으며 이는 처리유량이 많아지면서 SS 부하율이 증가되어 반응기 상부의 clogging 현상이 빨리 발생하기 때문으로 판단된다. 유입 SS의 경우 대부분 하천수 수질환경기준 I-III 급수 이내(25 mg/L)로 유입되었으며 유출수가 5 mg/L 이내로 처리되어 방류되었다.

유입부하는 전체적으로 $0.07 \sim 5.65 \text{ kg} \cdot \text{SS}/\text{m}^3 \cdot \text{day}$ 의 값을 보였으며 유입부하의 대부분이 $1 \text{ kg} \cdot \text{SS}/\text{m}^3 \cdot \text{day}$ 미만의 분포를 보였다. 전반적인 제거율은 평균 80% 이상의 값을 보여 생물여과 반응기에서의 SS 제거효율은 부하율에 관계없이 좋은 효율을 보이는 것으로 나타났다. 특히 2004년 5월 이후에 유입수 농도의 변화폭이 상당히 큰 것을 볼 수 있는데 이 기간은 집중호우로 인한 SS의 증가가 많았으며 고탁도 원수가 유입되면서 부유물질 변화가 많았다고 판단된다.

전반적으로 유입수의 농도 분포가 3~125 mg/L로 넓게 분포함에도 불구하고 유출수 농도의 76%가 5 mg/L 이하였으며 약 97%가 10 mg/L 이하로 나타났다. 본 공정이 실제 처리 공정에서 사용되어진다면 여름철 집중호우 시 5 mg/L 이하로 처리할 수 있을 것으로 판단된다.

3.1.2. 탁도(Turbidity)

운전기간 중 유입수 탁도에 대한 농도 변화폭이 6~87 NTU로 컸으나 평균 제거율은 약 75% 정도의 효율을 보였다. 물질의 대부분은 SS 농도와 관련이 있는 것으로 보이며 유입수내 조류 및 탁도유발 물질인 clay, silt 등에 기인한 것으로 판단된다. SS와 유사하게 2004년 5월 이후에 유입수 농도의 변화폭이 상당히 큰 것을 볼 수 있다. 유출수 농도는 EBCT와 상관없이 10 NTU 미만의 값을 얻어 원수의 탁도 변화에 대해 안정적으로 대처함을 보여주고 있다.

전반적으로 유입수의 농도 분포가 상당히 넓은에도 불구하고 반응기를 통과한 유출수 농도의 93%가 10 NTU 이하 값을 보였으며 평균적으로 6 NTU 값을 나타냈다. 이를 통해 볼 때 향후 생물여과 반응기를 사용한다면 고탁도에 충분한 대처 능력을 가지고 있다고 말할 수 있으며 탁도의 제거만을 고려한다면 후단의 약품용집 양을 상당량 줄일 수 있을 것으로 판단된다.

3.1.3. 클로로필 a(Chlorophyll-a)

유입수의 대부분이 조류 주의보(2회 연속 채취 시 15~25

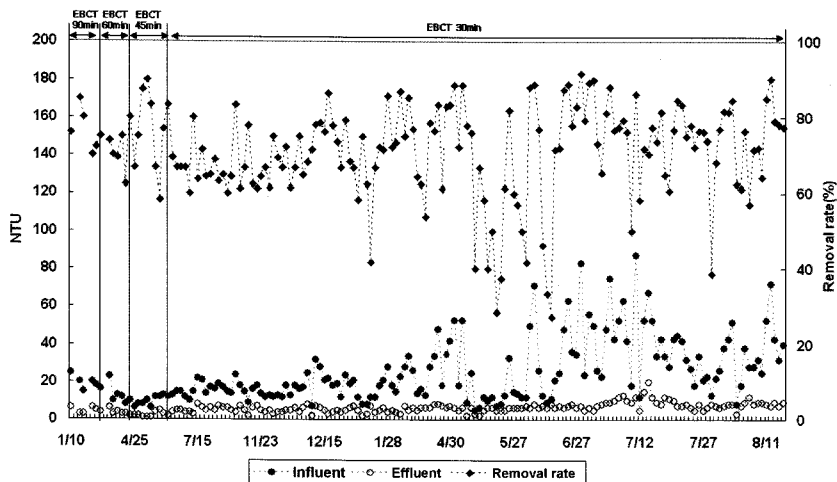


Fig. 4. Turbidity removal with EBCT.

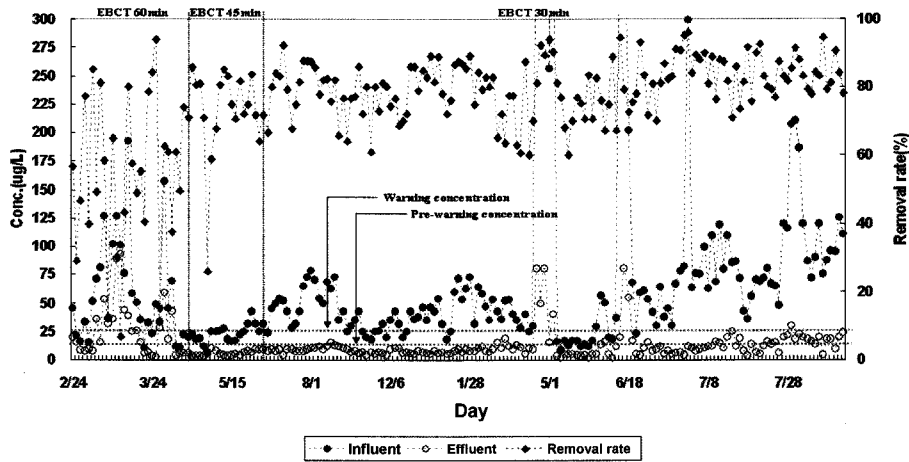


Fig. 5. Chl.-a removal with EBCT.

mg/m³) 이상의 농도로 유입되고 있다. 특이할 만한 점은 12~2월의 동절기에도 조류의 농도가 상당히 높다는 것이다. 이는 습지내의 원수가 긴 시간동안 체류하면서 풍부한 영양염류에 노출되어 농도가 높아진 것으로 판단된다.

전반적으로 살펴 볼 때 전구간 동안 평균 유입 Chl.-a 농도는 약 70 mg/m³이며 유출 농도는 13.6 mg/m³로서 약 76%의 제거효율을 보이는 것으로 나타났다. 조류제거 효율도 SS 제거효율과 마찬가지로 상부의 부분적 clogging 현상에 의해 제거된 것으로 판단되어지며 여재 상부의 막힘 현상을 주도하는 주요 인자로 판단된다. 특히, 2004년 5월 12일, 16일, 18일에 반응기 위치내 조류 종류를 분석한 결과 *Cyclotella*, *Fragillaria*, *Melosira*, *Navicula*, *Nitzschia* 등의 규조류가 거의 대부분을 차지했으며 이중 *Cyclotella*가 우점하는 것으로 나타났다. 그외에 *Chlorella*, *Closterium*, *Coelastrum*, *Cosmarium* 등의 녹조류 및 선상조류, 편모충류, 육질충류, 섬모충류, 후생동물들도 발견되었다.

3.1.4. 암모니아성 질소(NH₄⁺-N)

Fig. 6은 반응기 운전 기간중의 NH₄⁺-N 농도 변화를 나타

낸 것으로 유입 NH₄⁺-N은 동절기 최대 13 mg/L에서 하절기 최소 0.1 mg/L까지 그 변화폭이 매우 크다.

낙동강 원수의 동절기 평균 유입 농도 0.73 mg/L와 반응기 유입 농도를 비교해 볼 때 유입 농도의 대부분이 이 값을 상회하고 있어 현장에 적용하기에는 큰 무리가 없었다고 판단된다. 초기 동파에 따른 일부 data와 5 mg/L 이상의 고농도 유입을 제외하고는 대부분 유출수 농도가 EBCT에 상관없이 평균 0.1 mg/L 미만의 유출수를 유지하였으며 전체적으로 운전 기간 중 평균 85% 이상의 처리효율을 얻을 수 있었다. 특히 하절기 보다 동절기의 NH₄⁺-N 농도가 높은 것으로 나타났는데 이는 겨울철 온도저하로 인해 미생물의 활성이 저하되었기 때문으로 판단된다. 처리수의 대부분은 NO₃-N의 형태(98% 이상)를 띠는 것으로 나타났으며 NO₂-N의 형태는 거의 존재하지 않았다.

Fig. 7은 운전기간동안의 NH₄⁺-N 유입부하와 제거된 NH₄⁺-N 부하율을 나타낸 것이다. 삼각형으로 표시된 부분은 운전초기(2003년 1월 초-2월 말)의 data로서 초기 동파등의 문제로 미생물의 활성이 저하되었기 때문으로 판단된다. 그러나 2004년 같은 기간에 비해 약 80% 이상의 효율을 보였다. 특

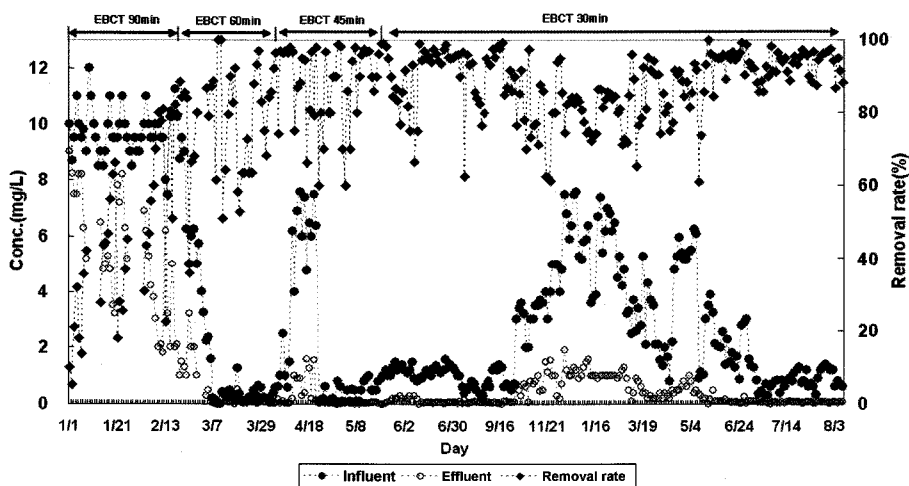


Fig. 6. NH₄⁺-N removal with EBCT.

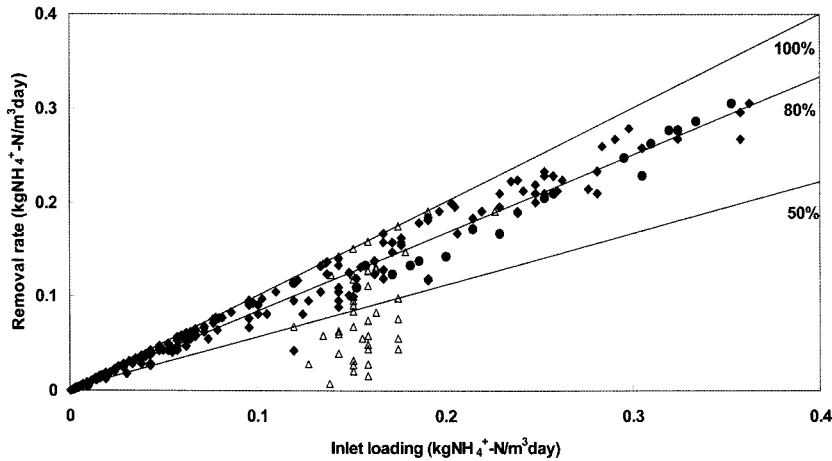


Fig. 7. Removal rate with inlet NH₄⁺-N loading.

이 기간은 유입수 농도가 평균 5.1 mg/L로 다른 기간의 평균 유입수 1 mg/L 보다 5배가 넘게 유입되었으나 2003년 같은 기간에 비해 효율이 좋은 것을 볼 수 있으며 이를 통해 겨울철 수온이 5℃ 이하일 때에도 질산화 효율저하의 문제는 없는 것으로 판단된다.

3.1.5. 생화학적산소요구량(BOD)

정수처리 공정에서 생물학적 분해 가능한 물질을 제거 한다는 것은 그 물질 제거뿐만 아니라 급·배수관망에서의 미생물 증식을 억제함으로써 2차 오염을 방지하고 안전한 음용수를 확보한다는 측면에서 매우 중요하다.

유입수의 BOD 농도는 평균 6.6 mg/L로 하천수 수질기준 III - IV 급수(6~8 mg/L)로 유입되고 있다. 유출수 평균 농도는 1.1 mg/L로 거의 I 급수 수질을 보이고 있다. EBCT 60 min에서의 효율이 EBCT 30 min 보다 낮은 이유는 반응기 운전 초반 생물막이 안정화 되지 않은 비 정상상태 하에서 운전되었기 때문으로 판단되며 EBCT 30 min의 운전 효율로 판단하여 볼 때 장기간 운전이 되었다면 그와 유사하거나 더 나은 효율을 보였을 것으로 판단된다.

이에 생물여과 반응기를 이용한 III - IV 급수의 하천수를 I - II 급수로 처리하는 것이 가능한 것으로 판단되며 좀더

나은 처리 효율을 위해 3.2절에서 부분역세를 통한 실험 및 고찰을 실시하였다.

3.1.6. 화학적산소요구량(COD_{Mn})

EBCT 90 min의 경우 유입수의 COD_{Mn} 농도는 대체로 18~20 mg/L 사이의 값을 보이며 낙동강 평균 원수 농도 5~7 mg/L보다 최대 4배 까지 높게 유입되었다. 유출수의 농도는 평균 15 mg/L의 농도를 보여 평균 20% 미만의 제거 효율을 나타내었다. 이는 앞서도 언급한 바와 같이 반응기의 운전이 동파등으로 인하여 원활치 못해 효율이 저조한 것으로 판단된다.

EBCT 60 min의 경우 유입수 평균농도는 11 mg/L 정도였으며 유출수의 농도는 평균 7 mg/L 정도로 약 36%의 제거 효율을 보이는 것으로 나타났다.

EBCT 45 min의 경우 유입수 농도가 다소 낮아져 평균 10 mg/L 정도로 유입되어 평균 5.2 mg/L 정도로 점차 효율이 증가되어 약 48%의 제거효율을 보이는 것으로 나타났는데 이는 수온이 증가되면서 반응조가 안정화되었기 때문으로 판단된다.

EBCT 30 min의 경우 유입수 농도는 약 8.3 mg/L이었고 평균 2.8 mg/L로 유출되어 약 66%의 효율을 보이는 것으

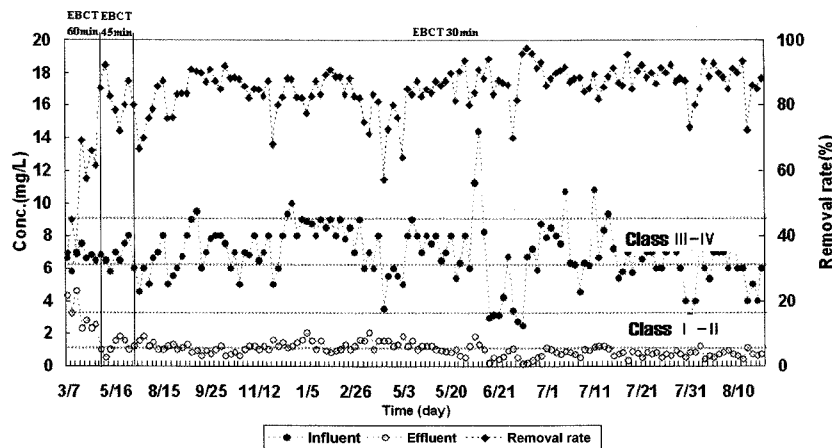


Fig. 8. BOD removal with EBCT.

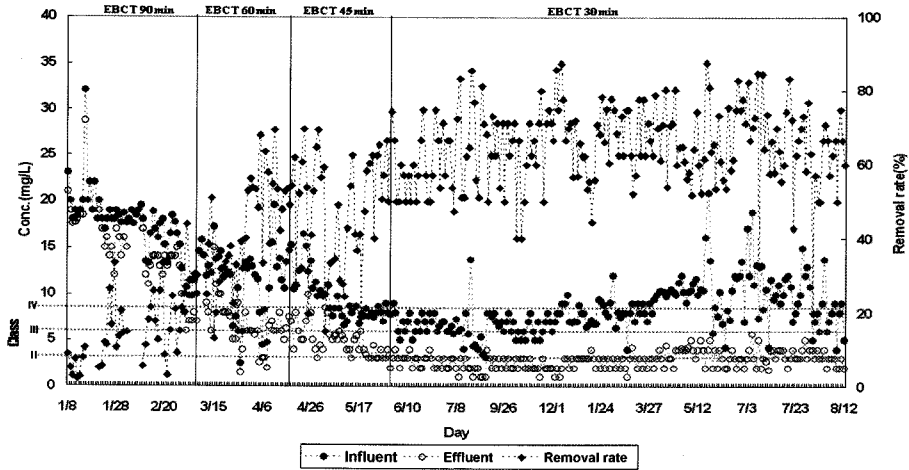


Fig. 9. COD_{Mn} removal with EBCT.

로 나타났다. 하천수 수질환경기준에는 COD 기준이 없기 때문에 호소수 기준을 적용하여 보면 EBCT 90 min과 60 min의 유출수 경우 III - IV 급수의 수질을 보였으며 EBCT 45 min과 30 min의 경우 II - III 급수의 효율을 보이는 것으로 나타났다.

전반적으로 살펴보면 다른 기질에 비해 상대적으로 COD 제거율이 낮은 것으로 나타났다. 이의 원인을 밝히기 위해 반응기 운전 후 역세슬러지 내의 미생물을 광학현미경을 통해 관찰($\times 1,000$)하였다. 관찰 결과 대부분 조류의 내부 핵이 없는 상태로 보여졌으며 이러한 기준으로 살펴 볼 때 대부분의 조류가 사멸된 것으로 보여졌다(Fig. 10).

이러한 조류의 사멸이 반응기내에 어떠한 영향을 미치는지를 알아보기 위해 습지 원수의 조류를 약 30일간 배양하고 초음파 파쇄기(VLH-700s, Korea)로 20kHz에서 5분 동안 파쇄 후 centrifuger(Hanil MF 600, Korea)를 이용해 20,000 rpm, 15 min 조건에서 물리적으로 세포를 lysis 시켰다.¹³⁾

COD_{Mn} 측정결과 centrifuge를 통해 조류를 lysis 시켰을 때 초기에 133 mg/L 였던 SCOD_{Mn} 농도가 480 mg/L로 약 3.6배 가량 증가하는 것으로 나타났다. 이를 통해 조류물질의 lysis가 COD_{Mn} 증가에 큰 영향을 미치는 것을 알 수 있었다.

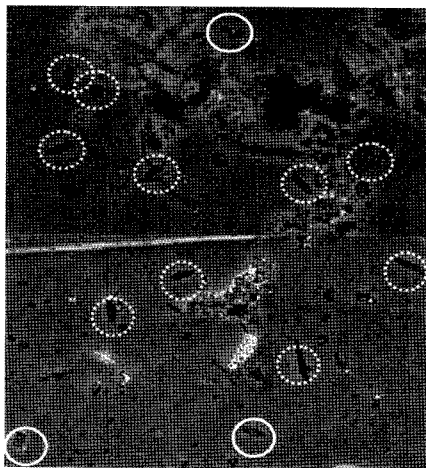


Fig. 10. Microscopic observation of backwashed sludge.

Table 4. SCOD before and after centrifuge of cultivated algae

Conditions	SCOD before centrifuging	SCOD after centrifuging
Parameter	133	480
concentration(mg/L)		

Table 5. COD concentration after 5 days in dark condition

Conditions	Initial COD _{Mn}		COD _{Mn} of after 5 days
Parameter	TCOD _{Mn}	SCOD _{Mn}	SCOD _{Mn}
dark conditions (after 5 days)	146	80	133

반응기 내의 조건이 햇빛이 투과되지 않는 암조건 상태이기 때문에 조류가 사멸했을 가능성을 알아보기 위해 암조건 하에서 5일 동안 DO를 공급하며 COD_{Mn} 증가에 대해 조사하였다. 초기 TCOD_{Mn} 값은 146 mg/L였고 SCOD_{Mn} 값은 80 mg/L였다. 5일 후 암조건 하에서 SCOD_{Mn} 값이 133 mg/L로 증가되어 조류에 의한 COD 생성량이 확인되었다.

이를 통해 반응기 내에서 조류로 인해 충분히 COD 물질이 증가할 수 있음이 증명되었고 이를 토대로 조류의 양에 따른 COD 증가율에 대한 실험을 실시하여 Fig. 11과 같이 배양 조류에 대한 COD 증가율의 관계식을 얻을 수 있었다.

운전 기간 동안 조류로 인한 반응기 내의 COD_{Mn} 발생량은 유입조류의 농도가 평균 50 ug/L로 유입된다고 하면 Fig. 11에서 약 2.56 mg/L의 SCOD_{Mn}가 발생한다고 볼 수 있다. 이는 유입 COD_{Mn}(평균 8 mg/L)의 30%에 해당하는 수치로서 상당량의 COD_{Mn}이 조류로 인해 재용출되는 것을 알 수 있다.

조류 기원성 유기물과 glucose의 생물분해 특성을 비교해 보기위해 기질 비소비 속도(q)를 측정된 결과 glucose의 $q = 0.2234 \text{ mg} \cdot \text{COD}_{Mn} / \text{mg} \cdot \text{VSS} \cdot \text{day}$ 의 값을 나타냈고 조류 기원성 유기물의 경우의 $q = 0.0245 \text{ mg} \cdot \text{COD}_{Mn} / \text{mg} \cdot \text{VSS} \cdot \text{day}$ 로 나타나 제거 속도가 10배 가까이 늦어지는 것을 볼 수 있었다(Fig. 12). 이를 통해 COD_{Mn} 제거율이 낮은 이유는 조류 및 조류가 lysis되면서 유출되는 조류 기원성 유기물에 기인된 것으로 판단할 수 있다.

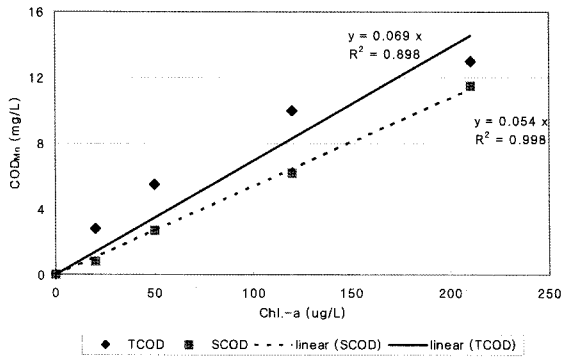


Fig. 11. Correlation between Chl.-a and COD_{Mn}.

이로서 조류기원성 유기물의 효과적인 제어를 위해서는 반응기내 여재 상부에 축적되는 조류를 여재상부 일부분의 부분역세를 통해 반응기 밖으로 유출시키는 것이 COD_{Mn} 증가율을 제어하는데 효율적일 것으로 판단된다.

3.1.7. 미생물군집 다양성 평가

미생물 두께는 전반적으로 살펴볼 때 반응기 하부보다는 기질이 유입되는 상부에서 약 1.5배 정도 두꺼운 것으로 나타났다. 이는 기질의 농도가 하부보다 상부에서 높아 기질 이용율이 커지면서 단위 미생물 량이 증가된 것으로 보여진다. 또한 EBCT가 증가할수록 두께가 다소 증가하는 경향을 보였다. 생물막 밀도는 EBCT와 거의 무관하게 56~58 mg·VS/cm³의 값을 나타내었다. Rittmann and McCarty의 연구 결과¹⁴⁾인 호기성 생물막에서의 전형적인 값인 40 mgVS/cm³ 보다는 다소 큰 값을 나타내었다. EBCT에 따른 heterotrophs 및 autotrophs의 활성도 측정을 위해 SOUR을 측정한 결과 EBCT가 빨라질수록 SOUR 값이 증가하는 경향을 보였다. 이는 EBCT가 빨라질수록 기질 이용율이 많아져 미생물의 활성이 증대되어 SOUR 값이 커진 것으로 판단된다. 또한, 기질이 유입되는 상부에서의 값이 하부보다 약 1.8배 가량 높았다.

3.2. 부분역세를 통한 수처리 효율 향상

하향류식 여과지 운영에서 여과가 진행됨에 따라 유입수

Table 6. Biofilm thickness, density, and SOUR values with EBCT

Parameters EBCT	Biofilm thickness (um)	Biofilm density (mg/m ³)	SOUR (mgO ₂ /gMLVSS · hr)	
			Heterotrophs	Autotrophs
60 min	105	54	8.4	6.9
45 min	110	54	9.6	6.7
30 min	125	49	12.5	8.6

내 입자성 물질들이 표층에 대부분 역류되어 표면에 손실수두가 집중되고 그 결과 유량확보가 줄어들어 빈번한 역세가 불가피하다.¹⁵⁾

이에 안정된 생물막과 처리수량의 확보를 위해 여재 하부 1 m 지점에 부분역세 장치를 설치하여 1일 1회 역세를 실시하였다. 이는 안정된 생물막 형성의 관점에서 뿐만 아니라 조류 및 조류의 사멸로 인한 조류 기원성 난분해성 유기물을 효과적으로 없앨 수 있는 대안이 될 수 있다. 역세는 기존 방식과 동일하였으며 수량은 기존 역세 수량(640 L/5~7 day)의 10% 만을 사용하였다. Fig. 13은 기존 역세와 부분역세를 통해 headloss가 어떻게 변화하는지를 보여주고 있다.

결과에서 보는 바와 같이 기존에는 5~7일 정도가 되면 headloss가 증가하여 이 이후에는 역세작을 실시하였다. 특히 약 4~5일 동안은 headloss 증가가 서서히 이루어지다가 이 기간이 지나고 수일 사이에 급격한 증가가 나타남을 볼 수 있다. 이는 표층 여재에 역류되어 있던 입자들의 양이 증가하면서 여재 사이의 공극이 점점 작아져 한계 역류량에 도달해 급격한 headloss의 증가를 가져온 것으로 판단된다. 이와는 다르게 1일 1회 상부 1 m 여재만을 부분역세 하였을 때는 여과 지속시간이 최대 2배까지 증가하는 것으로 나타났다. 또한, headloss도 점진적으로 서서히 증가하였다.

COD_{Mn}의 경우 기존 EBCT 30 min과의 운전 효율을 비교해보면 부분역세를 시행 후 COD_{Mn} 제거율이 약 10% 정도 상승해 약 74.3%의 효율을 보였다. 이는 기존의 역세 방식과 달리 1일 1회의 부분 역세를 통해 조류등의 입자성 물질과 조류자체에서 형성되는 조류기원성 유기물질의 배출이 원활히 이루어졌기 때문으로 판단된다.

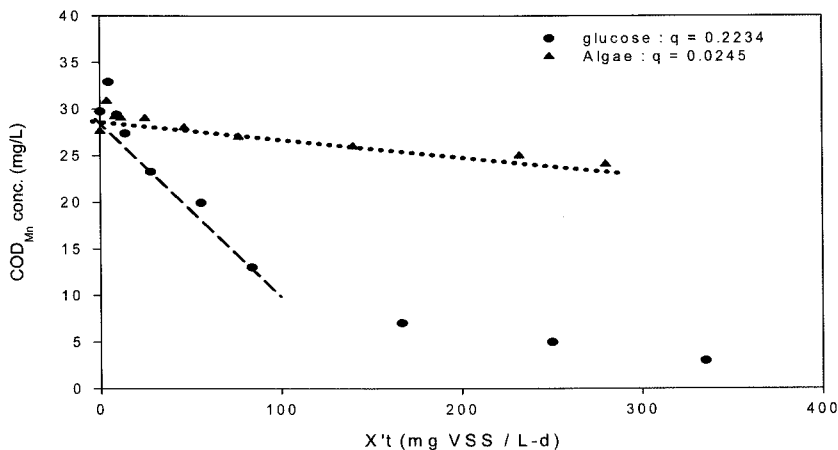


Fig. 12. Specific substrate utilization rate of glucose and algogenic organic matters.

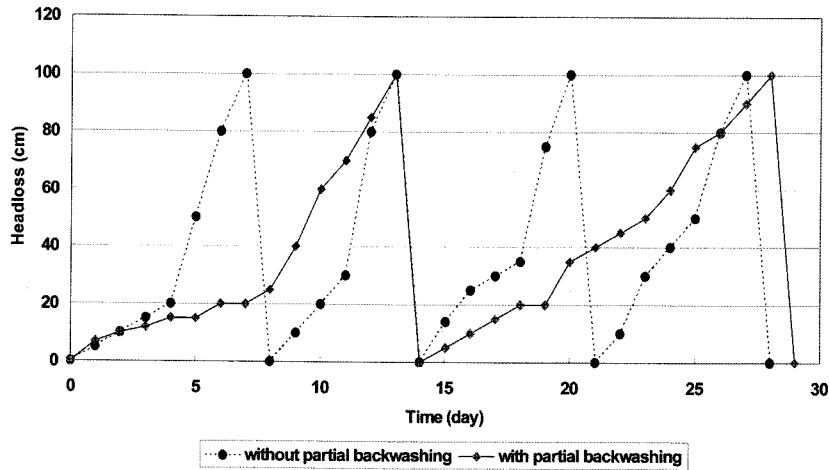


Fig. 13. Headloss development with or without partial backwashing.

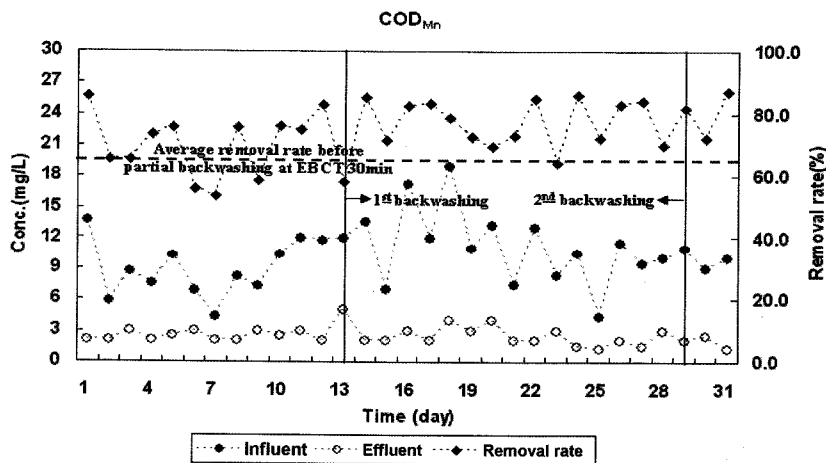


Fig. 14. COD_{Mn} concentration with partial backwashing.

BOD의 경우 기존 유출수 농도가 1 mg/L 근처의 값을 보였으나 부분 역세 후 거의 대부분 data가 0.5 mg/L 이하의 값을 보여 생물학적으로 분해 가능한 물질 대부분이 분해되는 것으로 보여진다. 전반적인 BOD 제거 효율의 향상은 기존 EBCT 30 min 평균 88%에서 93.5%로 약 5.5% 향상되었다.

Table 7은 기존 EBCT 30 min과 부분역세 후 유출수 평

균 농도와 평균 제거율 농도를 나타내었다. 전반적으로 입자성 물질을 제외한 대부분 물질들의 제거율이 향상된 것을 볼 수 있는데 이는 부분역세를 통해 반응기 전체에 기질이 분산되어 생물막의 원활한 성장이 이루어졌고 조류 및 조류 기원성 유기물들의 제거가 바로 이루어져 반응기내 유기물의 재 생산량이 줄어들었기 때문으로 판단되어진다.

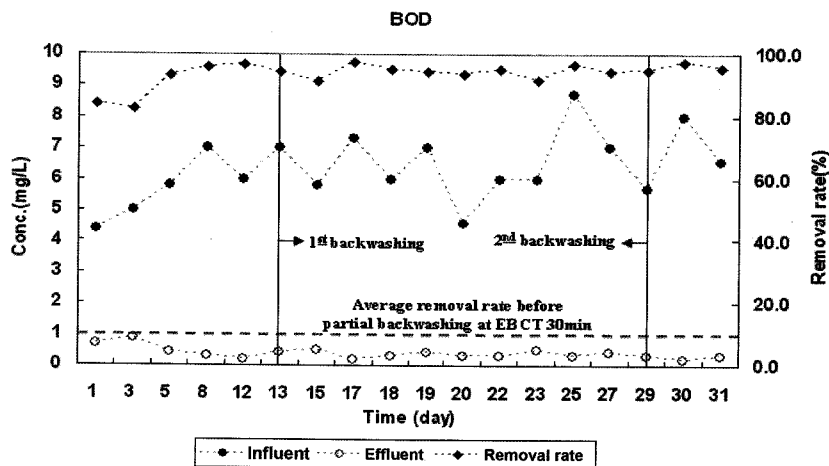


Fig. 15. BOD concentration with partial backwashing.

Table 7. Removal of pollutants with or without partial back-washing

Pollutants	Backwashing methods	without partial backwashing	with partial backwashing
	Suspended solids(SS)	influent(mg/L)	40.7
effluent(mg/L)		5.2	5.4
removal(%)		85	84
Turbidity	influent(mg/L)	36.8	38.2
	effluent(mg/L)	8.1	6.7
	removal(%)	72.7	78.4
Chl.-a	influent(ug/L)	94.8	54.1
	effluent(ug/L)	14.5	7.35
	removal(%)	83.5	82.8
BOD ₅	influent(mg/L)	6.48	6.33
	effluent(mg/L)	0.74	0.38
	removal(%)	88.0	93.5
COD _{Mn}	influent(mg/L)	8.32	10.2
	effluent(mg/L)	2.82	2.5
	removal(%)	64.7	74.3

4. 결론

III-IV급수의 하천수를 전처리 하기위해 BAF pilot plant를 설치하여 운전한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

유입 공기량을 0.1 m³ · air/m² · min으로 고정하고 EBCT를 90 min, 60 min, 45 min, 30 min으로 운전 시 입자성물질(SS, turbidity, Chl-a)의 경우 80% 이상의 처리효율을 보여 기존 처리장에 본 공법을 적용시 후단의약품 주입량을 다량 줄일 수 있을 것으로 판단된다. 암모니아성 질소의 경우 EBCT에 관계없이 85% 이상의 처리효율을 보여 염소 주입량을 기존의 약 56% 정도 줄일 수 있을 것으로 판단된다. BOD의 경우 하천수 수질 환경기준 III-IV 급수로 유입되어 I 급수 미만으로 유출되고 암모니아 유입농도범위 0.1~13 mg/L에서 평균 0.3 mg/L 미만으로 유출되어 본 처리공법 사용시 생물학적 안정성을 충분히 확보할 수 있을 것으로 판단된다. 전체 COD 물질 중 30% 정도가 반응기 내부에 clogging된 조류에 의해서 발생하는 것으로 조사되었다. 이들 조류기원성 유기물들의 기질 비 소비율이 0.0245 mg · COD_{Mn}/mg · VSS-d로 생물학적 분해가 거의 되지 않는 것으로 나타나 이에 대한 대책으로 부분역세를 실시한 결과 COD 10%, BOD 5.5% 정도의 제거율 상승을 얻을 수 있었고 이를 통해 생물학적으로 좀 더 안정된 원수 확보가 가능해졌다.

본 연구를 통해 III-IV 급수의 하천수를 호기성 생물여과 공정을 이용해 전처리시 I 급수 이내로 정화하여 깨끗한 원수 확보가 가능했으며 이에 오염 하천수 전처리로서 생물여과 반응기의 이용은 매우 효과적인 것으로 평가되었다.

사 사

본 연구는 환경부 차세대 핵심환경기술 연구비 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. http://www.changwon.go.kr/works/sanghasudo/chamyeo/chamyeo_03.jsp, “강변 지하수 개발사업의 추진현황과 개발방향,” 7월(2005).
2. Kuehn, W., Mueller, U., “Riverbank filtration, an overview,” *J. AWWA*, **92**(8), 60~69(2000).
3. Ahmad, R., Amirtharajah, A., and Huck, P. M., “Effects of backwashing on biological filters,” *J. AWWA*, **90**(12), 62~73(1998).
4. Benson, D., “An emerging technology: the biological aerated filter, a promising biological process,” *Water Engineering Res. Lab., Cincinnati, OH*, pp. 3~10(1983).
5. Billen, G., Servais, P., Bouillot, P., and Ventresque, C., “Funtion of biological filters used in drinking water treatment: the CHABROL Model,” *J. Water SRT-Aqua*, **41**, 231(1992).
6. M'coy, W. S., “Biological aerated filters: a new alternative compact system,” *Water Environ. Technol.*, **9**(2), 39~43(1997).
7. 임경호, 생물막을 이용한 상수원수내 오염물 제거에 관한 연구, 한국과학기술원 박사학위 논문(1996).
8. Bouwer, E. J. and Crowe, P. B., “Biological processes in drinking water treatment,” *J. AWWA*, **80**(9), 82~93(1988).
9. Montgomery, J. M., Technology assessment of biological aerated filter, *Water Engineering Res. Lab., Cincinnati, OH*, pp. 5~25(1990).
10. 한국수자원공사, 시화호 인공습지 운영관리방안 연구, pp. 7~10(2002).
11. APHA, AWWA, WEF., Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 20th ed., Washington, D.C., U.S.A.(1998).
12. Characklis, W. G. and Marshall, K. C., Biofilms, Wiley, New York, pp. 2~4(1989).
13. Campbell, D. A., Cockshutt, A. M., and Porankiewicz-Asplund, J., Analysing photosynthetic complexes in uncharacterized species or mixed microalgal communities using global antibodies, *Physiologia Plantarum*, **119**, pp. 322~327(2003).
14. Rittmann, B. E. and McCarty, P. L., Environmental biotechnology: Principal and Application, McGraw-Hill, New York, pp. 271~281(2000).
15. Raymond, D. L., “Filtration strategies to meet the surface water treatment rule,” *J. AWWA*, **83**(6), 37~38(1991).