

## BAF 공정을 이용한 제직폐수의 재이용

정용준 · 배종홍 · 권구호 · 민경석<sup>†</sup>

경북대학교 환경공학과

## Reuse of Weaving Wastewater with BAF Process

Yong-Jun Jung · Jong-Hong Bae · Koo-Ho Kwon · Kyung-Sok Min<sup>†</sup>

Dept. of Environment Engineering, Kyungpook National University

(Received 26 August 2004, Accepted 20 October 2004)

**Abstract** : An upflow BAF(Biological Aerated Filter) equipped with an expanded clay media was applied to reuse weaving wastewater of water jet loom. The performance of lab-scale biofilter was investigated by the adjustment of EBCTs(Empty Bed Contact Time) and the packing ratio of media, which were changed 1.1 to 3.7hr and 38 to 63%, respectively. In most conditions except 1.1hr of EBCT, BOD, COD<sub>Cr</sub>, SS and Turbidity of the effluent were 1~4mg/L, 7~16mg/L, 1~5mg/L and 5~14NTU, where their removal efficiencies were 76~95%, 82~93%, 63~94% and 59~81%, respectively. From the observation of SEM(Scanning Electron Microscope) photographs of porous clay media, it was revealed that this media provided good performance of retaining microbes effectively. In addition, 0.44~0.49kgVSS/kgBOD<sub>rem.</sub> of low sludge reduction was expected. The most efficient back washing cycle and procedure were once per 4 to 9 days and air including collapse-pulsing method, respectively. Therefore, this system can be of use as an weaving wastewater treatment for reuse

**keywords** : BAF, Weaving wastewater, EBCT, Reuse

### 1. 서론

약 600 개소의 영세한 제직업체들(2003년 현재)이 평균 50대 정도의 기계(Water Jet Loom)를 보유하면서 대구광역시와 경상북도에 가동되고 있다. 이들로부터 발생하는 평균 폐수량은 1일 약 4.5톤 정도지만, BOD(20 mg/L)와 탁도(30 NTU)를 기준으로 보면 저농도 산업폐수에 속한다(대구 염색 산업단지 관리공단, 2003).

이 같은 성상의 제직폐수를 자체적으로 처리하여 재사용하기에는 기술적으로 낙후되고, 관리와 공정 운영상의 문제 등으로 양호한 처리 수질 확보가 곤란하기 때문에 전량 공정수로 재이용하기는 어려워, 일부 처리수와 지하수를 혼합하여 공정수로 사용하고 있는 실정이다.

최근 들어 산업폐수의 재이용을 위하여 고농도의 미생물 유지가 가능하고, 처리효율이 높으며, 장치의 소형화가 가능한 MBR(Membrane Bio-Reactor)공정이 도입되고 있다(Urbain et al., 1996; Davies et al., 1998; 안 등, 1993). 중공사 정밀여과막을 이용한 제직폐수의 처리(정 등, 2004)에서는 양호한 처리수질을 확보하여 재이용수로 사용이 가능하였으나, 시설비의 절반이상을 차지하는 고비용의 막모듈과 일정한 투과유속을 확보하기 위한 부가적인 펌프의 사용으로 인하여 시설투자 및 운전비용이 높아져 대부분의 영세한 업체들이 운영하기는 큰 부담이 된다.

우리나라의 하·폐수처리공정에서 가장 많이 사용되고 있는 활성슬러지공법은 처리량에 비례하여 넓은 부지가 필요하며, 2차 침전지에서 가끔 발생하는 슬러지 별킹 등의 문제로 인해 폐수발생량이 많아 넓은 부지를 필요로 하여, 대부분 영세한 제직업체에 적용하기에는 문제가 있다. 따라서 제직폐수를 처리하기 위해서는 활성슬러지공법 이상의 처리효율을 가지면서 부지가 적게 소요되는 compact한 방식, 운전자동화가 가능하여 운전비를 절감할 수 있는 방식, 기존의 폐수처리 설비에 쉽게 증설할 수 있는 방식과 아울러 MBR공정에 상용할 만한 처리수질을 확보할 수 있는 처리공정이 필요하다.

1980년대 유럽에서 처음 개발된 생물여과공법(BAF, Biological Aerated Filter)은 부착성장식 폐수처리공법(M'coy, 1997)으로서, 반응조내의 미생물량을 부유성장식공법보다 높게 유지할 수 있으므로, 단위 시설용량당 미생물량이 많아 처리량을 획기적으로 향상시킬 수 있기 때문에 부하변동에 강하다. 또한 단일반응조내에서 여과를 실시하여 유기물질과 SS의 제거뿐만 아니라 침전조가 불필요하게 되므로 설치면적을 감소시킬 수 있는 공법으로 알려져 있다.

따라서 본 연구에서는 폐수발생량이 많고, 저농도인 제직폐수를 처리할 수 있도록 구형의 clay 여재를 충전한 실내 실험의 상향류식 BAF공정을 도입하여 제직폐수의 처리 및 재이용 가능성과 최적의 운전인자를 도출하고자 하였다.

<sup>†</sup> To whom correspondence should be addressed.

ksmin@knu.ac.kr

## 2. 실험재료 및 방법

### 2.1. 반응장치 및 여재특성

본 연구에 사용된 상향류식 BAF 반응기는 높이 170 cm, 내경이 7 cm인 투명 아크릴 원형관으로 제작되었으며, 자세한 구성은 Fig. 1과 같다.

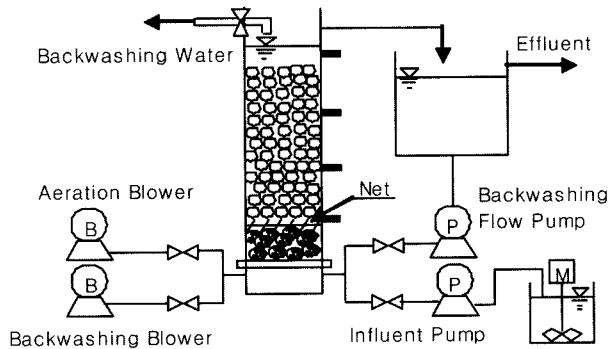


Fig. 1. Schematic diagram of BAF process.

여재층은 여재지지판으로부터 10 cm 높이까지 여재에 의해 산기관등이 막히는 것을 방지하기 위하여 약 10~15 mm 정도 크기의 자갈을 채운 뒤, 그 위에 그물을 설치한 뒤 여재를 충전하였다. 본 연구에는 4000 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>의 비표면적을 가진 expanded clay 여재를 사용하였다. 충전된 여재의 구체적인 특징은 Table 1에 나타내었다.

Table 1. Characteristics of Media

Parameters	Characteristics
Material	expanded clay
Density(kg/m <sup>3</sup> )	1500
Porosity(%)	30~50
Specific surface(m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup> )	4000
Size(mm)	2.5~5

### 2.2. 유입수 성상

본 연구에 사용된 폐수는 대구시에 위치한 제직공장에서 발생된 것으로, 전처리 시설로 설치된 25 mm의 미세스크린을 통과하여 배출되는 폐수를 유입원수로 사용하였다. 미세스크린을 통과한 각 항목별 수질은 Table 2와 같이 일반적인 산업폐수보다는 현저하게 낮은 농도이다(산업폐수처

Table 2. Characteristics of influent weaving wastewater

Parameters	Concentration
BOD	15~22(19)
CODcr	78~102(90)
Turbidity	26~32(29)
SS	11~15(13)
NH <sub>4</sub> -N	<1
T-P	<1

※ unit : mg/L except Turbidity(NTU), ( ) : average

리, 1993). 산업폐수를 공업용수로 재이용하기 위해서는 10 NTU로 설정된 탁도기준(죽곡정수사업소, 2001)이 중요하므로, 이에 대한 제거가 필요한 것으로 분석되었다.

### 2.3. 운전 및 분석방법

본 연구에서는 유입수량과 여재 충전율의 변화에 따른 제거효율을 평가하기 위하여, Table 3에 나타낸 바와 같이 유입수량과 EBCT를 변화시키면서 운전하였다. 반응조는 20±2℃가 유지되는 항온실에서 운전되었으며, 3~5 L/min의 공기를 공급하여 미생물의 활동에 충분한 산소를 공급하였다. 폐수는 masterflux pump를 사용하여 feed tank에서 BAF반응기의 하부유입구로 공급되어 여재층을 통과하면서 상부로 배출되었고, 이때 여재층에 필요한 공기공급은 air pump를 통해 여재층 하단부로 공급되었다. 또한 역세척은 처리효율을 고려하여 4~9일에 한번 air pump와 backwashing flow pump로 공기세척→공기세척+물세척→물세척 순서로 실시하였다.

여재는 미생물 부착과 안정화를 위해 S하수처리장의 반송슬러지를 채취하여 제직폐수로 식중시키면서 BAF반응기에 약 1개월 동안 적응시켰다. 육안으로 관찰하여 충분한 미생물이 부착된 것을 확인한 후에 본 장치의 운전 특성을 평가하였다.

또한 항목별 수질분석은 Standard methods(APHA, 1998)에 준하여 BOD, CODcr, NH<sub>4</sub>-N, T-P등을 분석하였으며, 탁도는 기기분석장치(HACH)를 사용하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1. 유기물제거

운전기간동안 각 mode별 유출수의 BOD, CODcr, SS 및

Table 3. Operating conditions of BAF

Mode	Influent (L/d)	EBCT (hr)	Media (cm)	Packing ratio (%)	Air (L/min)
I	50	1.1	60	38	5
II	50	1.8	100	63	5
III	25	3.7	100	63	5

Note) Operating temperature: 20±2℃

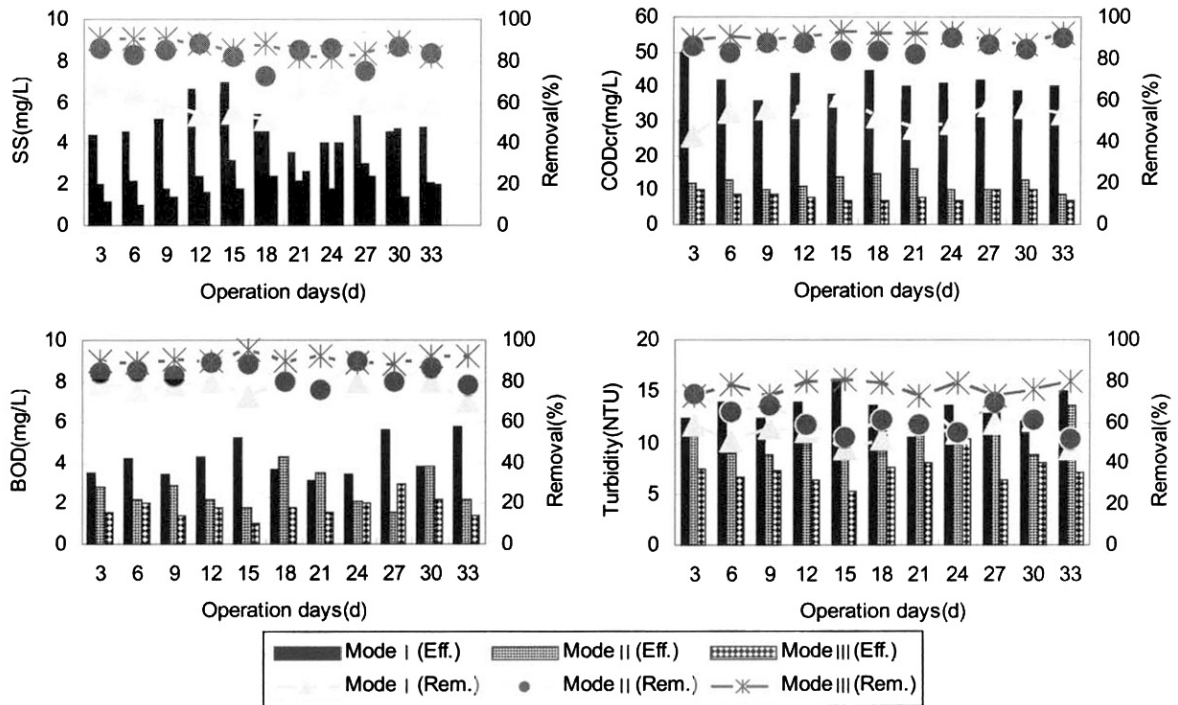


Fig. 2. Monitoring of removal efficiency (SS, CODcr, BOD, Turbidity).

탁도의 수질과 처리효율을 Fig. 2에 나타내었다. EBCT를 1.1hr로 운전한 mode I의 경우, BOD, CODcr, SS 및 탁도의 제거효율은 각각 70~83%, 48~62%, 52~69% 및 41~69%로 나타났으며, EBCT 1.8hr로 운전한 mode II의 경우 BOD, CODcr, SS 및 탁도의 제거효율은 각각 76~92%, 82~90%, 73~88% 및 61~74%로 나타났다. Mode II에서는 mode I보다 여재의 충전율이 증가하여 전반적으로 제거 효율이 향상되었는데, 특히 BOD 보다는 CODcr의 제거 효율이 증가하였다. 이는 BOD5로 측정되지 않았던 난분해성 유기물질이 증가된 여재 충전층에 의하여 어느 정도 흡착제거된 원인으로 사료된다. 제올라이트를 BAF공정의 매질로 사용하여 염색폐수를 처리한 연구(장 등, 1998)에서도 여재층에 의한 흡착현상에 의하여 BOD와 CODcr의 제거 효율 차이를 확인할 수 있었다.

다공질 세라믹 담체를 충전한 하향류 BAF반응기를 본 연구에서 사용한 유입수 농도보다 높은 BOD 100~130 mg/L정도의 제지폐수에 적용한 결과(김 등, 1997), 약 80~90%정도의 제거 효율을 나타내어 본 연구 결과와 유사하였다.

또한 여재의 높이는 mode II와 같이하고 유입수의 양을 변화시켜 EBCT를 3.7hr로 운전한 mode III의 처리효율은 mode II에 비하여 조금 더 높게 나타났지만 그 차이는 크지 않았다. 따라서, 본 연구에서는 여재의 충전율에 의한 EBCT의 차이가 유입수량의 변화에 따른 EBCT의 차이보다 처리 효율에 더 많은 영향을 미치는 것으로 나타났고, 유입수량 증가에 따른 영향은 미비한 것으로 나타났다. 이는 본 연구에 사용된 clay 여재내에 미생물이 안정적으로 부착성장함으로써 활성오니법 등의 부유성장방식에 비해

저농도의 유입수임에도 불구하고 고농도의 미생물을 반응기내에 유지할 수 있었던 원인 뿐만 아니라, 여재의 여과 작용에 기인할 수 있는 여재 충전율이 전체 처리효율에 큰 영향을 미친 것으로 사료된다.

BAF공정에서의 처리효율은 여재 특성에 상당한 영향을 받는 것으로 알려지고 있다. Rebecca 등 (2001)은 여재의 크기에 따른 처리효율을 비교한 연구에서 사용한 담체와 같은 성분의 여재(입경 1.5~3.5 mm, 2.5~4.5 mm)를 충전한 생물막법으로 처리한 결과, COD 및 SS의 제거율은 입경 1.5~3.5 mm에서는 각각 85~97%, 83~87%로, 입경 2.5~4.5mm에서는 각각 73~93%, 63~81%로 보고하고 있다. Rebecca 등(2001) 결과와 본 연구의 mode II의 제거율을 보면 본 연구에서 사용한 여재(입경 2.5~5 mm)와 비슷한 크기인 입경 2.5~4.5 mm에서의 제거율은 유사한 경향을 나타냈지만, 입경 1.5~3.5 mm보다는 다소 낮은 제거율을 나타냈다. 이는 운전 조건의 차이에서 발생하는 요인도 있겠지만, 여재의 입경이 작을수록 비표면적이 더 넓어지므로 미생물의 부착증식량이 많을 가능성과도 관련 있을 것으로 사료된다. 본 연구에 사용된 여재는 비표면적이 800~1600  $m^2/m^3$ 인 규산알루미늄을 주성분으로 한 다공질 세라믹 여재(김 등, 1997)와 960  $m^2/m^3$ 의 비표면적을 가진 EPP (Expanded Polypropylene)여재(김 등, 1997)보다 훨씬 큰 1600  $m^2/m^3$ 으로 나타났다.

BAF공정은 점차 강화되고 있는 방류수 수질 기준을 맞추기 위하여 기존의 활성슬러지 공정의 3차 처리용으로 주로 사용되었으나(Chudoba et al., 1998; Rodgers, 1999), 본 연구에서와 같이 적절한 운전 조건에 따라 재이용수로 사용되는 공업용수 수질기준(10 NTU)을 만족하며, 소요부지

면적이 적고, 별도의 침전지가 필요하지 않아서 제직폐수와 같은 저농도 산업폐수의 재이용수 생산공정으로 적합한 것으로 사료된다.

### 3.2. 미생물상 고찰 및 슬러지 생산량

BAF 공정은 여재에 다양한 종류의 미생물을 부착, 성장 시켜서 생성된 생물막으로 오염물질을 처리하는 부착성장 공법의 일종이므로, 여재에 형성되는 미생물이 전체 공정의 처리효율을 결정하는 요인이 된다고 볼 수 있다. Polystyrene을 여재로 사용한 부상식 상향류 생물여과장치에서도 안정된 공정 운영을 위하여 운전 기간과 역세척 전후에 따라 변화하는 여재상의 미생물막을 관찰하였다(김 등, 1996).

따라서 여재에 부착되는 미생물막을 고찰하기 위하여 clay 여재의 표면을 SEM사진으로 관찰하여 Fig. 3에 나타내었다. (a)는 여재에 미생물을 부착시키기 전의 사진으로 표면이 거칠고 세공이 비어있는 것을 알 수 있지만, (b)는 미생물 부착후의 사진으로서 표면에 미생물이 부착되어 매끈하게 보이며 세공에도 미생물이 부착되어 있는 것을 볼 수 있다. (c)는 역세척후의 사진으로 (b)와 마찬가지로 표면

이 매끈하며 담체의 세공도 미생물이 부착되어 있는 것을 관찰할 수 있다.

기존의 플라스틱 여재 같은 경우는 표면에만 주로 미생물이 부착증식하기 때문에 과잉 증식할 경우 쉽게 탈리되는 반면, 본 연구에서 사용한 caly 여재는 세공내부에도 미생물이 부착하고 있어 단위부피당 미생물 보유량이 높음을 알 수 있으며, 역세척후에도 미생물 보유능력이 우수함을 알 수 있다.

Table 4는 전체 운전 단계에서의 슬러지 발생량을 나타낸 것이다. 본 연구에서는 0.44~0.49 kgVSS/kgBOD<sub>rem.</sub>의 정도로 슬러지가 발생되었는데, 이는 활성슬러지 공법의 슬러지 발생량인 0.4~0.7 kgVSS/kgBOD<sub>rem.</sub>에 비해 다소 적은 양이다. 이는 부유성장공법인 활성슬러지와 달리, BAF공법은 부착성장식 공법이므로 미생물이 반응조에 체류하는 시간이 더 길기 때문인 것으로 생각된다.

### 3.3. 역세척 주기 및 역세수량

생물학적 여과공정에서 주기적인 역세척은 안정적인 처리효율을 유지하기 위한 중요한 인자이므로, 역세척 전후의 수질변화를 최소화할 수 있는 역세척 방법 및 적정주기의

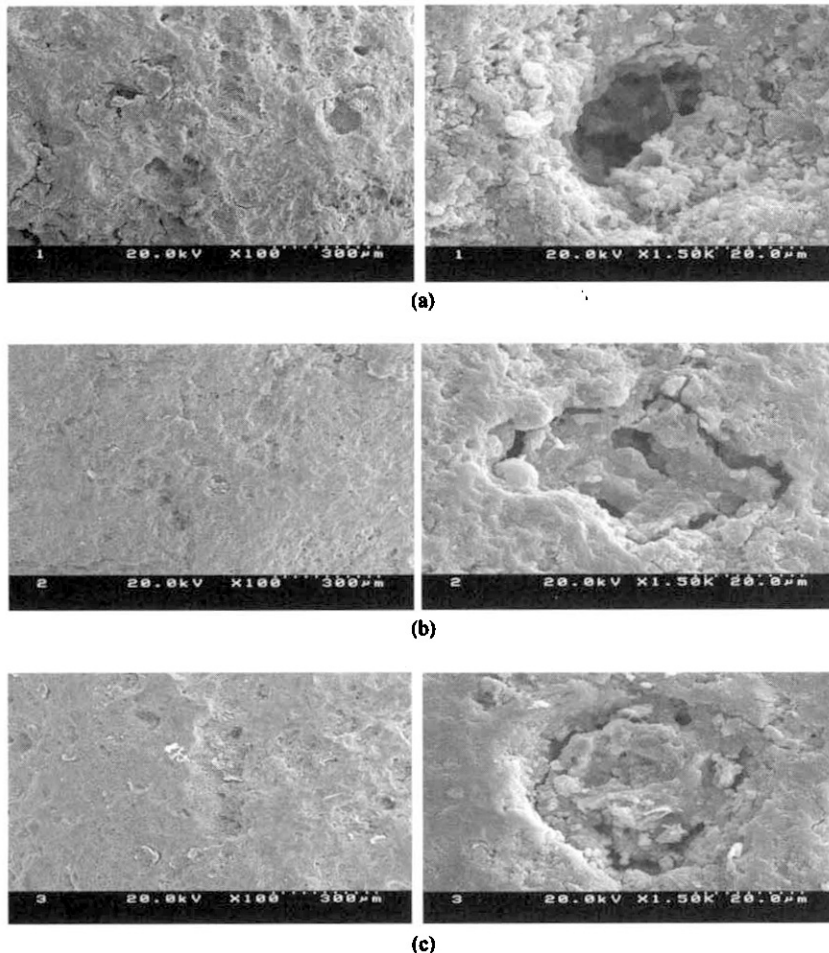


Fig. 3. Scanning electron microscope photographs of porous clay media: before(a), after(b) biofilm formation and after backwashing(c).

Table 4. Sludge production

Mode	BOD <sub>inf.</sub> (mg/L)	BOD <sub>eff.</sub> (mg/L)	BOD <sub>rem.</sub> (mg/L)	SS <sub>inf.</sub> (mg/L)	SS <sub>eff.</sub> (mg/L)	SS accumulation (mg/L)	Sludge Production (kgVSS/kgBOD <sub>rem.</sub> )
I	19	7	12	13	6	7	0.4375
II	19	3	16	13	3.5	9.5	0.4453
III	19	1.5	17.5	13	2.5	11.5	0.4929

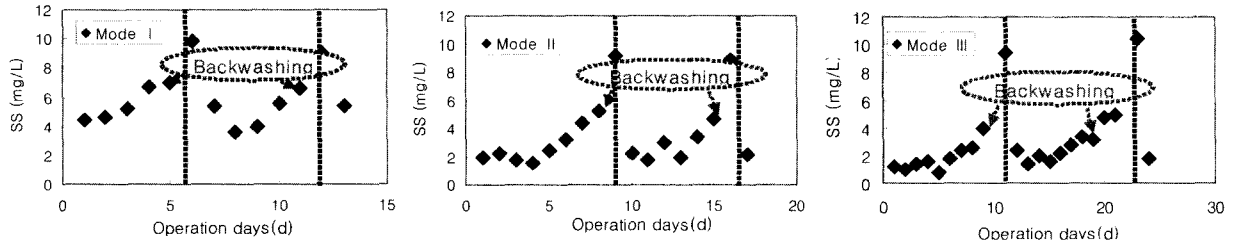


Fig. 4. Determination of backwashing cycle at each mode.

선정이 필요하다.

일반적인 역세척 방법은 물과 공기를 사용한다. 물세척 (water washing)은 수리학적 전단력만이 작용하기 때문에 세척력이 약하며(Cleasby et al., 1975), 물세척과 공기세척 (air scour)을 별도로 할 경우 여재간의 충돌빈도를 높여 세척효율이 증가하게 된다. 그러나 여재간의 충돌이 여상의 하단부에만 국부적으로 일어나기 때문에 공기세척과 물세척을 동시에 수행하면 가장 효율적인 결과를 얻을 수 있다 (Amirtharajah et al., 1993). 이와 같이 공기세척과 물세척을 동시에 수행하는 것을 collapse-pulsing이라 하며, 이는 여재에 붙어있는 입자성 물질을 가장 효율적으로 탈리시킨다(Stevenson et al., 1995).

또한 역세척 후 연속적으로 유입되는 원수내의 유기물을 제거하기 위해서는 일정한 생물막을 유지해야 할뿐만 아니라 생물막의 두께를 조절해야 할 필요성이 있다. 따라서 단순한 세척을 통해 압력수두를 낮추는데 주안점을 두는 것보다, 역세척 직후 처리수가 역세척 하기전과 유사한 수질을 갖도록 하는 것이 가장 중요하다. 역세척 주기를 산정하기 위해서 수두손실, 유출수의 수질 등을 주로 사용하고 있지만, 본 연구에서는 Fig. 4에 나타낸 바와 같이 유출수의 SS농도(10 mg/L 이상)를 기준으로 역세척 주기를 설정하였다.

Fig. 4에 나타낸 바와 같이 유출의 SS농도가 mode에 따라 각각 5~6일, 7~8일, 및 10~12일 사이에서 갑자기 증가하여 이 기간을 역세척 주기로 설정하였으며, 여층의 폐색 및 생물막 두께의 과잉 형성을 방지하기 위하여 각 mode 당 4일, 6일, 9일에 일회 정도 역세척을 실시함으로써 공정 운전의 안정성을 도모하였다.

또한 역세척후의 유출수 SS 농도는 대략 4mg/L 이하의 양호한 수질로 회복된 것으로 나타났는데, 이는 본 연구에서 사용된 clay 여재의 우수한 미생물 부착과 역세척에 의한 탈리능력에 기인한 것으로 사료된다.

Figure 5에 mode II에 대한 역세척수의 탁도와 SS의 농

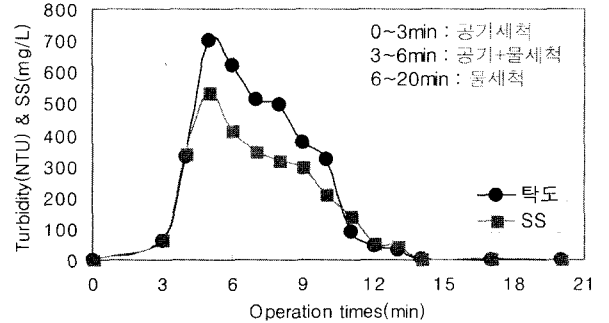


Fig. 5. Profile of backwashing water(SS & Turbidity).

도 변화를 표시하였다. 역세수량은 유입수의 약 14%(7L)가 소요되었으며, 공기세척(3분)후의 전체 역세척수의 SS와 탁도가 각각 66 mg/L, 63 NTU였고, 공기+물세척(3분)시 그 농도가 증가하다가 차츰 감소하였으며, 물세척(8분)후에 그 농도가 각각 4 mg/L, 2 NTU까지 감소하여 20분까지 안정된 수질을 나타내어, 총 역세척 소요시간은 14분이면 충분할 것으로 사료된다. LV(Linear velocity)가 9.3 m/hr로 나타났으며, mode I 과 mode III의 역세척수의 탁도와 SS의 변화는 mode II와 비슷한 경향을 나타내었다.

#### 4. 결론

Expanded clay 여재가 충전된 상향류식 BAF 반응기를 이용한 제적폐수의 재이용 가능성을 검토한 결과는 다음과 같다.

1. Mode I에서는 BOD, COD<sub>Cr</sub>, SS 및 탁도가 각각 70~83%, 48~62%, 52~69% 및 41~69%로 다소 낮은 제거효율을 나타내었으나, EBCT가 1.8시간인 mode II에서는 각각 76~92%, 82~90%, 63~88% 및 59~74%로 나타나 재이용수로서 적합한 수질이였다.
2. 반응조의 최적효율을 얻기 위해서는 역세척을 mode별로 각각 4일, 6일, 9일에 일회씩 실시해야 하고, 총 역세척

소요시간은 14분 정도이며, LV가 9.3 m/hr로 나타났다.

3. Expanded Clay 여재는 미생물 부착성이 우수하여 생물 여과 처리에 효율적인 것으로 나타났으며, 본 연구에서의 슬러지 발생량은 0.44~0.49 kgVSS/kgBOD<sub>rem</sub>의 범위를 나타내었다.
4. 저농도의 제직폐수를 공업용수(탁도 10 NTU 이하)로 재이용하기 위한 최적의 BAF 운전조건은, 공업용수 재이용수의 수질면에서는 mode 3보다는 다소 떨어지지만, 제직공정에서의 막대한 용수사용량을 감안한다면, EBCT 1.8시간, 여재 충진율 63% 및 역세척주기 7일로 나타난 mode 2가 적절한 것으로 사료된다. 따라서 BAF공정은 소요부지 면적이 적고, 별도의 침전지가 필요하지 않아서 제직폐수와 같은 저농도 산업폐수의 재이용수 생산 공정으로 적합한 것으로 사료된다.

### 참고문헌

- 김동진, 김건협, 유익근, 이규현, 이태진, 이용택, 차기철, 하향류 BAF 반응기에 의한 제지폐수 처리, *한국물환경학회지*, **13**(2), pp. 177-182 (1997).
- 김동진, 김건협, 차기철, 이규현, 이용택, 이태진, 부상식 상향류 생물여과장치 설계에 관한 연구, *화학공업과 기술*, **14**(1), pp. 40-48 (1996).
- 김성표, 최의소, BAF를 이용한 하수처리시 질소제거에 관한 연구, *한국물환경학회 연구발표회 논문초록집*, B-7 (1997).
- 대구염색 산업단지 관리공단 (2003).
- 산업폐수처리, *동화기술* (1993).
- 안규홍, 권지향, 막분리를 이용한 중수도 기술, *화학공업과 기술*, **11**(6), pp. 446-471 (1993).
- 장원석, 윤태일, 박대원, 제올라이트를 매질로 사용한 BAF 공법에 의한 염색폐수처리, *대한환경공학회지*, **20**(5), pp. 723-734 (1998).
- 정용준, 배종홍, 민경석, 중공사 정밀여과 MBR공정을 이용한 제직폐수의 재이용, *한국물환경학회*, **20**(4), pp. 365-369 (2004).
- 죽곡정수사업소, *공업용수의 신뢰도평가 및 업종별 요구수질 조사*, 2001년 연구보고서 (2001).
- Amirtharajah, A., Optimum backwashing of sand filters with air scour. *Wat. Sci. Tech.*, **17**(10), pp. 195-211 (1993).
- APHA, *Standard Method for the Examination of Water and Wastewater*, 20<sup>th</sup>, ed., American Public Health Association, Washing, DC (1998).
- Chudoba, P., and Pujol, R., A three-stage biofiltration process: Performances of a pilot plant, *Wat. Sci. Tech.*, **38**, pp. 257-265 (1998).
- Cleasby, J.L., Sangyl, E.W., and Rice, G.A., Development in backwashing of granular filter. *J.Am. Wat. Works Assoc.*, **101**(EE5), pp. 715-727 (1975).
- Davies, W. J., Le, M. S., and Heath, C. R., Intensified activated sludge process with submerged membrane micro-filtration, *Water Science & Technology*, **38**(4-5), pp. 421-428 (1998).
- M'coy, W. S., Biological aerated filters: a new alternative compact system, *Water Environment & Technology*, **9**(2), pp. 39-43 (1997).
- Rebecca, M., Joanne, Q., and Tom, S., The effects of media size on the performance of biological aerated filters, *Wat. Res.*, **35**(10), pp. 2514-2522 (2001).
- Rodgers, M., Organic carbon removal using a new biofilm reactor, *Wat. Res.*, **33**, pp. 1495-1499 (1999).
- Stevenson, D. G., Process conditions for the backwashing of filters with simultaneous air and water, *Wat. Res.*, **29**(11), pp. 2594-3597 (1995).
- Urban, V., Benoit, R., and Manem, J., Membrane bioreactor : a new treatment tool, *JAWWA*, May, pp. 75-86 (1996).