

상향류 및 하향류 생물막여과공정의 처리특성에 관한 연구

Treatment Characteristics of Biological Aerated Filter Process Using the Upflow and Downflow System

이양규^{1*} · 김건협²

Yang-Kyoo Lee^{1*} · Gun-Hyub Kim²

1 대림대학 토목환경과

2 SK건설

(2006년 7월 10일 논문 접수; 2006년 11월 7일 최종 수정논문 채택)

Abstract

This paper presents the test results of biological aerated filtration(BAF) process to replace activated sludge process by enhancing treated effluent quality and reducing the costs. In BAF process both BOD and SS compounds in wastewater are degraded and removed by biological reaction and filtration. Upflow BAF with expanded polypropylene media and downflow BAF with ceramic media were used to investigate the effects of hydraulic and organic loads on effluent quality. As a result, in BAF processes which has different media, upflow BAF reactor shows 5% higher efficiency than downflow BAF and this phenomena caused by backwashing methods and operational conditions. The results of influence factors analyzed by Factor Analysis Method in BOD and SS treatment efficiency are the size of media, height of media bed and type of media. The quantitative effects of media size are 5.73% in TBOD, 5.78% in SBOD and 7.65% in TSS, so we confirmed the main factor is media size.

Key words: Biological Aerated Filter Process, Polypropylene, Ceramic, Factor Analysis

주제어: 생물막여과공정, 폴리프로필렌, 세라믹, 상향류, 하향류, 요인분석

1. 서 론

생물막여과법의 운전은 비교적 탄력적으로 운전이 가능하다. 즉 질산화, BOD, TSS 제거가 목적인 경우는 필터의 하부로부터 공기가 주입되며, 탈질이 필요한 경우는 무산소부분의 확보를 위하여 여재층 중

간부분에 주입함으로써 한 반응조 내에서 질산화와 탈질이 동시에 일어 날 수 있도록 한다. 그러나 이와 같은 생물막여과법의 장점에도 불구하고 아직 국내에 적용되지 못한 이유는 생물막 반응의 핵심이라 할 수 있는 여재의 조건과 미생물의 부착특성, 처리특성의 조건 등 많은 부분에서 기초 실험자료가 부족한 상태이기 때문이다.

*Corresponding author Tel: +82-31-467-4917, Fax: +82-31-467-4917, E-mail: yklee@daelim.ac.kr (Lee, Y.K.)

따라서 본 연구에서는 국내 하수의 성상과 유사한 폐수를 대상으로 Lab규모의 BAF장치를 활용하여 여재종류에 따른 처리특성을 비교분석하였다. 즉, EPP(expanded polypropylene)를 이용한 Upflow BAF 반응기(상향류)와 세라믹을 이용한 Downflow BAF 반응기(하향류)에 대해 운전의 효율성 및 경제성을 확보하고자 처리효과 및 유기물 부하조건에 따른 처리효율을 실험하였다. 또한 BAF공정에서 여재크기, Bed 높이와 여재종류에 대해 요인분석법을 적용하여 각 인자들 사이에 존재하는 상호작용 및 처리효율에 미치는 영향을 정량적으로 제시하였으며, 이를 통해 유사 실험에 대한 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 사료된다.

2. BAF공법에 관한 이론

2.1. BAF공법의 원리

BAF공법은 1980년대 유럽에서 처음 개발된 새로운 형태의 수처리공법으로 합성수지 여재의 개발과 더불어 고속여과 장치를 개발하게 되었고 넓은 부지를 필요로 하는 활성슬러지법을 대체할 하수처리방법으로 생물학적처리와 여과를 동시에 행하는 공법을 개발하게 되었으며, BAF공법은 생물막공법과 여과공법이 한 시스템에서 동시에 일어나도록 설계한 공법으로 활성슬러지법의 부유성장 시스템(suspended growth system)과는 달리 여재에 부착된 미생물의 작용에 의해 폐수를 처리하는 것이다(Boller M., Guger W. and Tschui M., 1993). 또한 고차원의 영양수준에 있는 생물이 많아지면 에너지로 손실되는 비율도 커지므로 슬러지의 발생량이 적어지는 결과로 나타난다.

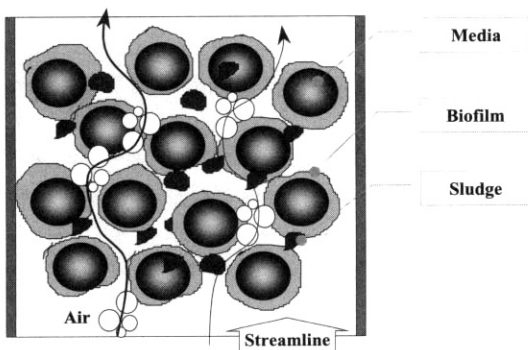


Fig. 1. 생물막여과처리의 모식도.

다. 따라서 수량, 수질, 수온 등의 변동에 강하며 고액분리능이 뛰어나 사상성 미생물이 상당히 증식해도 활성슬러지공법과 같은 팽화현상이 없으므로 생물막여과법은 활성슬러지공법의 대응책으로 제시되고 있으며, 생물막여과처리의 모식도는 Fig. 1과 같다(Kelly, 1987).

2.1.1. BAF의 형식

BAF의 형식중 하향류식의 경우, 원수가 상부에서 유입되어 여재층을 통과하여 하부로 처리되어 배출되고 여재층내 포기는 여재층 바닥으로부터 일정높이에 산기관을 설치하여 상부로 포기하며, Fig. 2(a)와 같다.

Fig. 2(b)는 상향류(Orr, P. and Lawty, R., 1990)로서 폐수가 하부에서 유입되어 여재층을 통과하여 상부로 처리되어 배출되고, 여재층내 포기시 하부에서 상부로 포기하며, 역세척공정도 하향류와 동일하지만 상향류의 충전매질의 경우 어느 정도의 유동이 필요하므로 상대적으로 가벼운 매질이 적당하다(Canler, J.P. and Perret, J.M., 1994; McCoy, W.S., 1997).

2.2. 생물막여과법의 모델

2.2.1. 생물막 모델

생물막 내부의 기질농도 분포도인 Fig. 3으로부터 미생물막 내부에서의 기질의 확산은 Fick의 법칙을 사용하고 생물학적반응을 고려하여 Mass balance식으로 나타내면 다음과 같다. 일반적으로 수막은 하나의 층으로 간주되며, 그것을 통과하는 질량이동은 Fick의 제1법칙에 의해 식 2.1과 같이 표현된다.

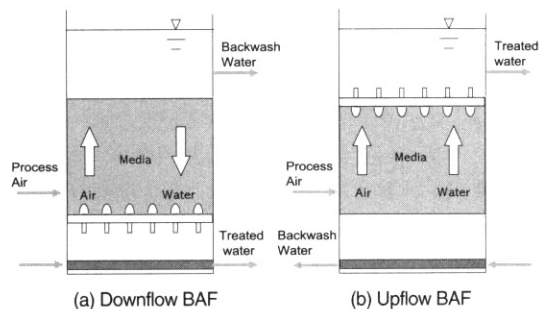


Fig. 2. 유입형태의 BAF형식.

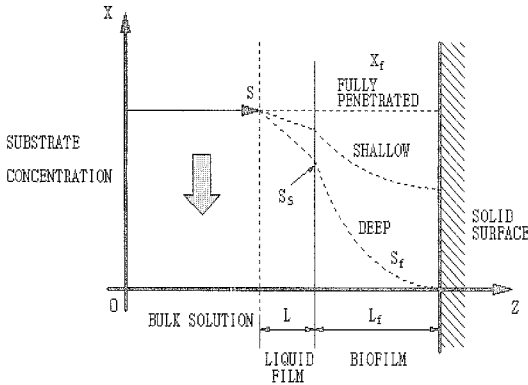


Fig. 3. 생물막에서의 기질변화 모식도.

$$j = -D \cdot A \frac{S - S_s}{\Delta L} \quad (\text{식 2.1})$$

여기서, j : 기질, flux(mg/day)

A : 기질의 수송방향에 수직인 생물막의 표면적(cm^2)

S : 용액의 기질농도(mg/l)

S_s : 생물막 표면의 기질농도(mg/l)

ΔL : 생물막두께(cm)

수막을 통과한 기질의 확산속도는 Fick's의 제2법칙에 의하여 표현하면 식 2.2와 같다(Rittmann and McCarty, 1971).

$$\frac{\partial S_f}{\partial t} = D_f \left(\frac{\partial^2 S_f}{\partial Z^2} \right) \quad (\text{식 2.2})$$

여기서, $\frac{\partial S_f}{\partial t}$: 기질의 이용속도(mg/day)

S_f : 생물막 내의 기질농도(mg/l)

Z : 기질 침투방향의 길이(cm)

D_f : 생물막 내의 기질확산계수(cm^2/day)

생물막 내부의 어느 지점이든지 기질은 부유성장과 같은 방식으로 이용되며 최대 기질이용률은 다음 식 2.3으로 나타낼 수 있다.

$$\text{최대 기질이용률} = \frac{k_{\max} \cdot S_f \cdot X_f}{(K_s + S_f)} \quad (\text{식 2.3})$$

생물막 내에서 분산과 기질의 이용이 동시에 일어날 경우 정상상태의 기질농도는 식 2.2와 식 2.3을 결합하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$0 = D_f \left(\frac{\partial^2 S_f}{\partial Z^2} \right) - \frac{k_{\max} \cdot S_f \cdot X_f}{(K_s + S_f)} \quad (\text{식 2.4})$$

$$\frac{\partial^2 S_f}{\partial Z^2} = \frac{k_{\max} \cdot S_f \cdot X_f}{(K_s + S_f)} \quad (\text{식 2.5})$$

여기서, K_s : μ 가 1/2 μ_{\max} 일 때의 기질농도 또는 제한 기질포화농도(mg/l)

k_{\max} : 미생물의 최대 기질제거속도(1/day)

X_f : 미생물농도(mg/l)

3. 실험내용 및 방법

3.1. 실험장치 및 운전조건

3.1.1. Lab규모의 BAF실험

(1) 장치의 구성

BAF공법의 흐름형태에 따른 성능평가를 위해 상향류 생물막여과장치(upflow BAF)와 하향류 생물막여과장치(downflow BAF)의 흐름도를 Fig. 4와 같이 나타내었다. Upflow BAF장치는 내경이 15cm, 높이가 6.0m로 아크릴관을 사용하여 제작하였다. Upflow BAF장치는 위로부터 처리수저장조가 1.5m, 생물여과층이 2.0m, Air Distributer와 원수도입관이 포함된 역세척시 여재층의 팽창을 위한 공간이 약 1.5m, 향온용으로 2cm 간격을 두고 같은 아크릴관으로 자켓을 설치하여 향온수(20°C)를 순환시켰다. Upflow BAF반응기 아래로 도입된 원수는 상승하면서 생물여과층을 통과하여 처리되고, 처리수는 위의 저장조를 지나 처리수탱크로 이송된 후 월류(overflow)시킨다.

Downflow BAF장치는 내경이 15cm, 높이가 5.0m로 아크릴관을 사용하여 제작하였고, 향온 반응을 위해 Upflow BAF방식과 동일하게 향온수(20°C)를 순환시켰으며, 위로부터 원수유입조 및 여재층의 팽창을 감안한 공간이 1.5m, 생물여과층이 2.0m, Air Distributer와 스트레이너 설치할 수 있는 공간 0.5m로 되어 있다.

Upflow 및 Downflow BAF의 처리특성을 최대한 동

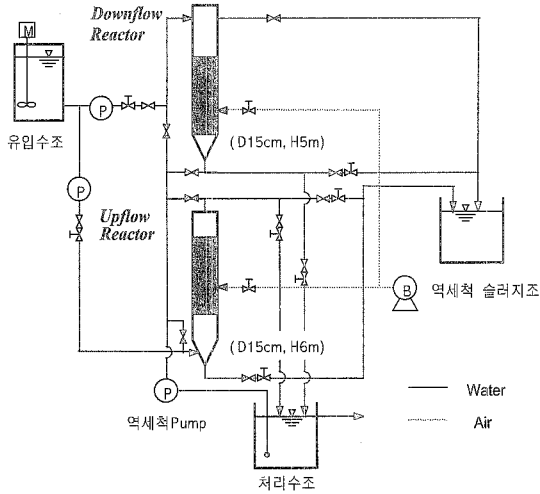


Fig. 4. Lab규모 생물막여과 실험장치의 흐름도.

일조건에서 분석하기 위해 처리효율에 영향을 미칠 수 있는 생물여과층 높이를 동일하게 확보(2m)하였으며, 구조적으로 효율적인 역세척을 위해 Upflow BAF장치가 1m 크게 구성되었으나 이는 처리효율에 극히 미미한 제약으로 가정하여 본 실험에서는 이로 인한 영향은 무시하였다.

(2) 적용 여재

여재표면 다공성의 확보로 미생물의 부착이 용이하고, 여재와 여재의 공간이 균일하게 배열되어 원수와 공기가 생물막접촉에 균등히 이루어질 수 있도록 실험에 사용된 여재는 Downflow BAF장치의 여재로 규산알루미늄을 주성분으로 하고, 입경 2.5~5mm, 비표면적이 약 800~1,600m²/m³인 구형의 다공질 세라믹여재(여재, 비중 2.49)를 사용하였다. 또한 Upflow BAF 장치에서는 Expanded Polypropylene으로 입경 3~5mm, 비표면적이 약 960~1,350m²/m³인 구형의 발포성 폴리프로필렌 여재(EPP여재, 비중 0.07)를 사용하였다(Capdeville, B., Melo, L.F. and Bott, T.R., 1992).

(3) 유입원수의 성상 및 운전조건

본 실험에 사용한 원수는 H공장의 유출폐수로서 침전조를 거친 1차 처리수이다. 원수의 평균 BOD농도는 120mg/l, COD 150mg/l, SS 130mg/l 정도로 하수의 성상과 흡사하며, 1차침전조를 지난 후 수질은 pH 6.7~7.5, BOD 69~135mg/l, COD 103~161mg/l, SS 78~144mg/l이고 질소와 인의 성분은 BOD

Table 1. 실험에 사용된 유입원수의 성상

항 목	농도(mg/l)	항 목	농도(mg/l)
COD	TCOD 103~161	N	TN 15~25
	SCOD 53~126		NH ₃ -N 8~20
BOD	TBOD 69~135	P	TP 4~6
	SBOD 42~85		SP 2~4
SS	TSS 78~144	PH	6.7~7.2
	VSS 52~120		Alcalinity 80~170

Table 2. Lab규모 BAF장치의 운전조건

구 분	Downflow	Upflow
Wastewater(ml/min)	2 ~ 25	2 ~ 25
Process air(l/min)	0.2 ~ 5	0.2 ~ 5
Backwash water(l/min)	5 ~ 10	5 ~ 10
Backwash air(l/min)	5 ~ 10	5 ~ 10
Backwash frequency	1/day	1/day
Temperature(°C)	20	20

에 대해서 상황에 따라 적정비율(100:3:0.5)로 원수에 주입하였으며, 실험에 사용된 원수의 성상은 Table 1과 같다.

Lab규모 생물막여과장치의 유입유량 및 운전조건은 Table 2와 같으며, 이중 공기 및 물에 의해 역세가 행해진 시간은 유입수량변화에 따라 2~5분 정도로 행하였다.

3.2. 측정항목 및 분석방법

수질분석은 정상상태가 되었을 때 1일에 1~2회 분석하였으며, 분석항목은 COD_{Cr}, BOD, SS, TKN, Amonia, Nitrate, Phosporus, Alkalinity, MLSS, MLVSS, pH, DO 등이다. 분석시간이 오래 걸리는 BOD는 매번 분석을 하지 않고 주기적으로 분석하였으며, 운전은 COD_{Cr}, SS농도를 이용하여 제어하였다. 모든 수질분석방법은 Standard Method에 의해 실시하였으며, 이들 각각에 대한 실험항목과 방법은

Table 3에 제시하였다(PHA, AWWA, WEF, 1995).

4. Lab규모 BAF반응기의 처리특성

4.1. 실험조건에 따른 처리효과

고정된 유입수 고농도로부터 유입유량을 정량펌프

Table 3. 실험분석방법

Item	Method and apparatus
Temp.(°C)	Mercuric thermometer(1°C MESH)
pH	TOA electronic ltd, Japan, pH Meter
DO(mg/l)	Oxygen meter YSI model 51B
BOD(mg/l)	Winkler method azide modification (standard methods, section 507)
CODcr(mg/l)	K2Cr2O7 Open reflux method: (standard methods, section 508A) K2Cr2O7 Close reflux method: (standard methods, section 508B)
SS(mg/l)	Gravimetric method, electric dry oven(103 ± 2°C)
MLSS(mg/l)	Volatile & fixed matter in nonfiltrable residue at 550°C
MLVSS(mg/l)	Glass-fiber filter : Whatman international Ltd
TKN(mg/l)	Macro-Kjeldahl method (standard methods, section 420A)
NH ₃ -N(mg/l)	Neslerization method (standard methods, section 417B)
NO ₃ -N(mg/l)	IC method (Ion Chromatography, Dionex IonPac AS4A-SC) (standard methods, section 4110B) Brucine Method (standard methods, 14th Ed., p. 427)
TP/SP(mg/l)	Vanadomolydophosphoric acid colorimetric method (standard methods, section 424D) Ascorbic acid method (standard methods, section 424F)
Alkalinity	O'Brein and Dolan method (Orion Reserch model 407 A)

및 유출밸브를 조절하여 LV(linear velocity) 및 EBCT(empty bed contact time)를 설정하였으며, Table 4와 같이 저부하조건부터 고부하조건까지 6단계에 걸쳐 실험을 진행하였다. 단계별 실험은 15~20일 간격으로 초기충격부하 및 안정화된 상태의 반응 실험을 진행하였고, 실험온도는 20°C를 유지하였다. 운전초기에는 반응기내 미생물 증식을 위해 LV를 1 m³/m²hr, EBCT 2시간으로 운전을 하여 안정화시켰으며, 2주경과 후부터 Upflow BAF는 정량펌프에 의해 LV를 조절하였고, Downflow BAF는 유입부 수위 레벨 및 유출밸브에 의해 EBCT기준에 따라 유입 유량을 조절하여 운전하였다. 실험말기는 높은 유기물부하에서의 처리효과를 평가하기 위해 LV를 최대 4.04m³/m²hr로 유지하였으며, 이때 EBCT는 0.5시간이었다.

Fig. 5, Fig. 6, Fig. 7에는 실험기간 동안의 원수 및 처리수의 여재의 특성에 따른 BOD, COD, SS농도와

Table 4. 각 Case별 운전조건

Case	Water velocity (m ³ /m ² hr)	EBCT (hr)	비고
1	0.38	5	
2	0.48	4	
3	0.57	3	
4	0.96	2	
5	1.92	1	
6	4.04	0.5	

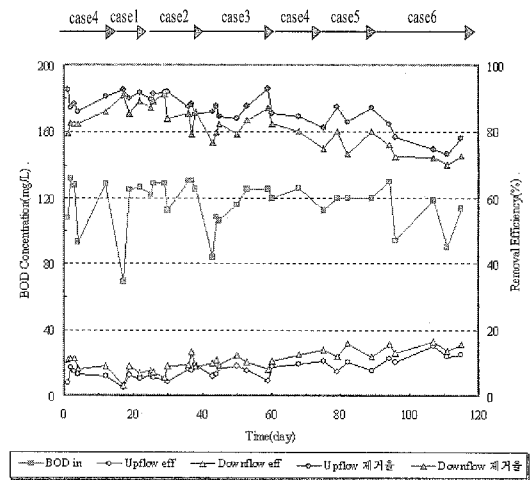


Fig. 5. 실험조건에 따른 BOD농도 및 제거율.

제거율을 나타내었다. 실험기간동안 원수의 BOD는 69~135mg/l, Soluble BOD 성분은 42~85mg/l 범위로 전체 BOD의 60%가 Soluble BOD이었다. COD는 103~16mg/l, SS는 78~144mg/l 사이였다. 값의 변화가 큰 것은 처음 운반해온 원수가 짧게는 1일에서 길게는 5일 정도까지 원수탱크에 체류하다가 BAF에 도입되므로 그 사이에 일부 분해가 될 수 있기 때문이다.

또한 Upflow BAF 실험기간 동안 BAF처리수의 BOD 평균농도는 16.1mg/l, COD 평균농도는 24.1 mg/l, SS 평균농도는 12.1mg/l로 유지되었으며, 평균 BOD, COD, SS제거율은 86%, 82%, 90% 정도 유지되었다. Downflow BAF의 실험결과는 BOD 평균농도는 22.5mg/l, COD 평균농도는 31.3mg/l, SS 평균농도는 16.8mg/l로 유지되었으며 평균 BOD, COD, SS 제거율은 81%, 77%, 86% 정도 유지되었다. 실험조건은 BAF생물여과층 EBCT기준으로

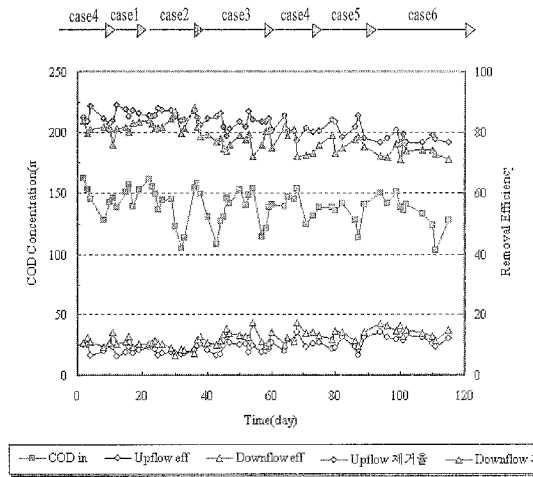


Fig. 6. 실험조건에 따른 COD농도 및 제거율.

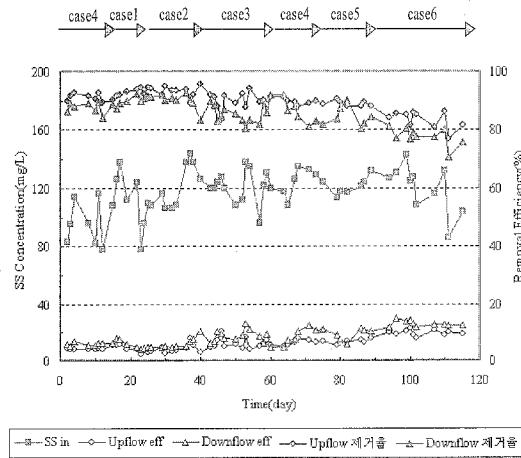


Fig. 7. 실험조건에 따른 SS농도 및 제거율.

0.5hr에서 5hr이며, Linear Velocity(empty bed기준, bed 공극율 40%)로는 9에서 96m/day이다.

실험조건에 따른 처리효과에서 볼 수 있듯이 여재의 종류와 상관없이 BOD의 제거효율이 COD보다 약간 높은 효율을 보이고 있으며, 유입수량이 단계별로 크게 증가함에도 수질변화에 적은 영향을 보이고 있다. 이것은 여재내 부착된 미생물이 안정적으로 증식하여 유기물질 부하변동 및 수리학적 영향이 상대적으로 적은 것이라 판단할 수 있으나 실험 후반(Case 6)과 같이 빠른 LV일 경우 제거율이 점차 줄어드는 것은 높은 수리학적 부하로 처리효율을 저하시킨 것으로 사료되며, 이는 수리학적부하와 유기물부하조건

이 설계요소중 중요한 요인으로 판단할 수 있다.

Fig. 7과 같이 실험조건에 따른 SS 제거효과는 Downflow 및 Upflow의 흐름방식에 상관없이 수리학적부하가 발생하여도 안정적인 제거효율을 나타내고 있다. 이는 생물막여과장치의 특징 중의 하나인 생물학적 제거기능 이외에 물리적으로 여재의 여과작용 및 여재에 부착된 Biomass에 의해 제거되었기 때문이다. 또한 상대적으로 Upflow방식이 Downflow 방식보다 좋은 이유는 운전방식의 차이라고 생각할 수 있다. Upflow BAF 운전시 하부에서 상부로 원수가 흐를 경우 무거운 고형질은 하부로 가라앉는 특성을 가지고 있으므로 사전 제거효과를 가지고 있으나, Downflow BAF 경우는 상부에서 투입함에 따라 지속적으로 하부로 가라앉는 고형물의 영향 때문이라 사료된다. 다만 본 실험에서는 여재 종류로 인한 매질의 특성(다공성 등)의 차이가 얼마만큼 처리능에 미칠 수 있는 분석은 실험조건상 이루어지지 않았으나 흐름방향별 운전조건(역세척)과 같은 요소도 처리 성능에 큰 영향으로 작용할 수 있다고 판단되었다.

4.2. 유기물부하 변화에 따른 처리 효과

체류시간에 따른 BOD, COD, SS제거효율은 Fig 8, Fig 9, Fig 10과 같다. 대체적으로 Downflow의 짧은 EBCT를 제외하고 EBCT 1시간 이상일 경우 제거효율은 80% 이상의 안정적인 수질을 나타내고 있으며, EBCT 증가시에도 반응기내 체류시간의 증가로 유기물과 미생물막의 접촉시간이 길어짐에 따라 미생물에 의한 분해작용으로 제거효율을 확보할 수 있는 것으로 나타난 반면에 EBCT를 1시간 이내로 짧게 한 경우(Case 6) 높은 LV에 따른 유입수의 유출로 인해 처리효율이 감소하는 것으로 나타났다.

Fig. 11, Fig. 12, Fig. 13은 유기물 부하변동에 따른 처리수의 BOD, COD 및 SS농도와 제거율을 나타낸 것이다. 유기물부하속도는 단위 BAF 부피당 단위 시간당 BAF에 도입되는 kgBOD, kgSS, kgCOD로 나타내었다. 유기물 부하변동에 따른 제거효율의 변화도 체류시간과 유사한 경향을 나타내고 있다. 즉 유기물부하에 따른 제거효율의 변화는 Upflow의 경우 4.5kgBOD/m²day과 4.0kgCOD/m²day까지 80% 이상의 제거효율을 보여주고 있으며, Downflow의 경우 같은 유기물 부하조건일 경우약 75% 이상의 제거효

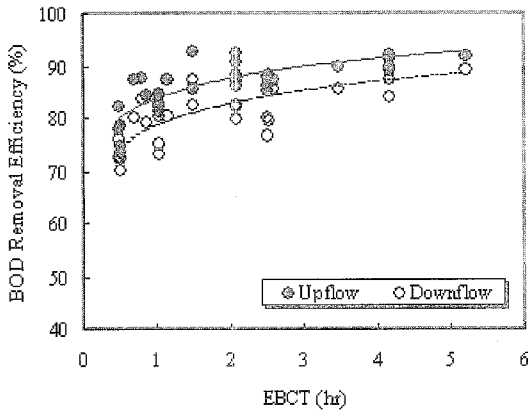


Fig. 8. EBCT에 따른 BOD제거효율.

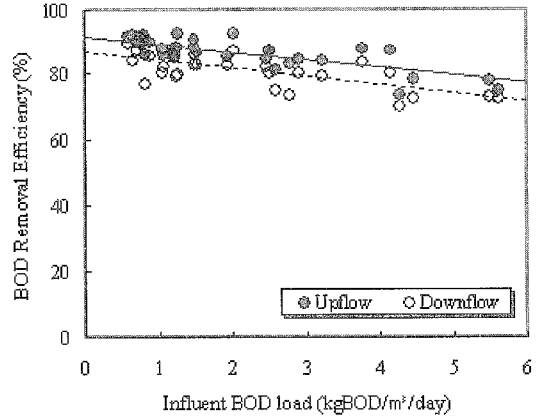


Fig. 11. 유기물부하에 따른 BOD제거효율.

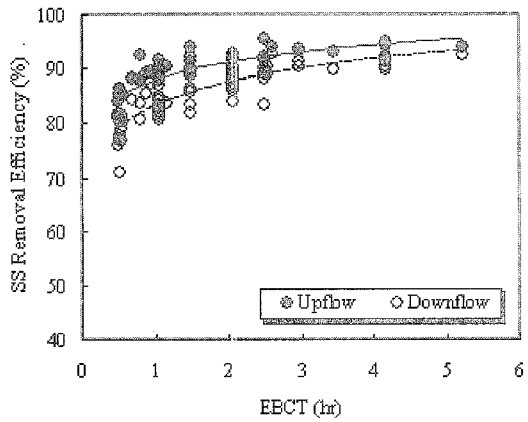


Fig. 9. EBCT에 따른 COD제거효율.

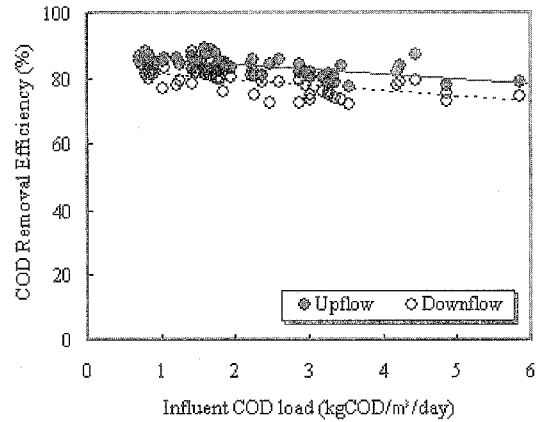


Fig. 12. 유기물부하에 따른 COD제거효율.

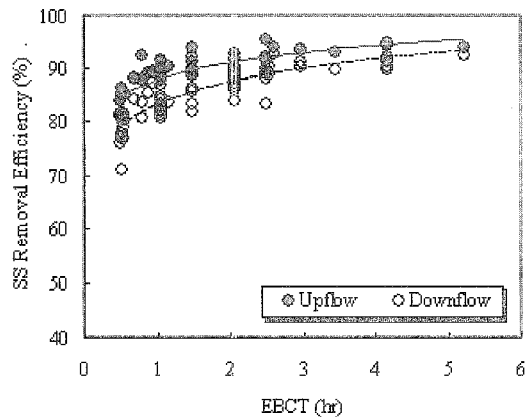


Fig. 10. EBCT에 따른 SS제거효율.

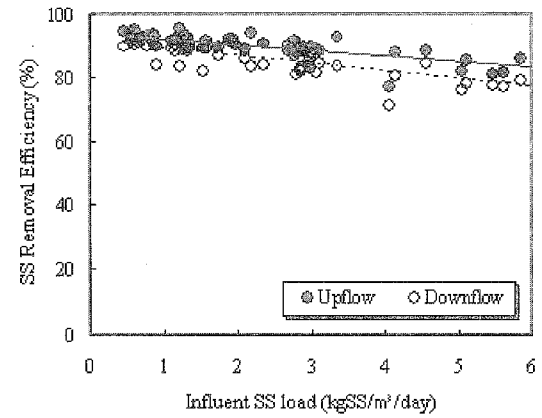


Fig. 13. 유기물부하에 따른 SS제거효율.

Table 5. 유기물부하에 따 BAF 제거효율 비교

EBCT (hr)	유기물질부하 KgBOD/ m ³ day/ KgCOD/ m ³ day	제 거 효 율 (%)					
		COD		BOD		SS	
		UP	DW	UP	DW	UP	DW
5	0.5/0.7	85.7	84.2	91.9	89.2	93.9	92.4
4	0.7/0.8	86.4	83.2	91.3	88.0	93.8	91.0
3	0.8/1.1	85.3	83.2	90.0	85.5	93.5	91.0
2	1.5/1.9	85.7	81.0	89.5	84.0	91.3	87.8
1	2.6/3.5	81.7	76.2	84.7	79.1	89.0	84.2
0.5	6.3/7.3	77.8	73.4	79.0	74.0	83.3	77.7

율을 보여 주었다. 이러한 결과는 7.5kgCODm³day에서 80% 이상의 제거효율을 나타내는 결과는 원수의 농도가 높은 유입의 경우 낮은 수리학적부하에 높은 유기물부하를 적용할 수가 있어 상대적으로 수리학적 부하의 영향이 적은 반면 본 실험에 이용된 원수는 낮은 농도로 인하여 높은 유기물부하를 적용하기 위해 EBCT를 짧게 한 결과로 수리학적부하가 커짐으로써 수리학적부하가 효율을 결정하는 인자로 작용한 결과이다

또한 Fig. 13과 같이 SS부하가 5.0kgSS/m³day까지 처리수 SS농도가 20mg/l 정도의 제거율 80% 이상의 효율로 유지되었다. 처리수의 SS농도는 사용한 여재의 지름에 비례하고 여과층 깊이에 반비례하는데, 즉 여재가 작을수록 그리고 여과층이 깊을 수록 처리수 질이 좋게 나타나고 있다. 그러나 상기조건인 경우 역세척빈도(1일 1회 이상)가 너무 잦아져 경제성이 낮아지고 이로 인해 처리효율이 저하될 경우도 보일 수 있음에 따라 최적의 여재크기 및 깊이 산정으로 적정역세척조건(1일 0.5~1회)을 형성하는 것이 중요하다. Table 5는 Upflow 및 Downflow 반응조의 각 Phase별 유기물부하에 따른 제거효율을 정리 하면 Lab규모 실험결과를 볼 때 국내 하수처리장에 BAF 공정을 적용할 경우 유기물부하는 2.5kgBOD/m³day, 3.5 kgCOD/m³day까지의 범위가 적절한 것으로 나타나고 있으며, 전체적으로 제거효율은 Upflow가 Downflow보다 약 5% 정도 더 좋게 나타나고 있다. 이것은 운전시 Upflow는 어느 정도 일정한 선속도를 유지하였지만 Downflow에서는 수두손실에 따라 선속도의 변화가 있었기 때문이다. 또한 EBCT 2시간에 비해 EBCT 1시간시의 제거효과가 흐름방향과 상관없이 상대적으로 크게 낮아진 것은 높은 유기물부

하를 적용하기 위하여 수리학적부하를 강제적으로 증가시킨 원인이라 판단된다.

그러나 SS제거효율의 경우 흐름방향과 상관없이 EBCT 0.5시간에서도 80% 이상의 안정적인 수질을 보여주고 있다. 또한 SS처리수의 농도가 매우 낮게 유지되고 있는데 이는 BAF 반응기의 가장 큰 장점이라고 할 수 있는 생물분해반응과 여과의 동시 수행능력을 잘 보여주는 결과이다.

이와 같이 SS제거효율과 BOD제거효율이 거의 유사한 경향을 나타난 것으로 판단되며, 유기물과 고형물을 동시에 제거하기 위해서 흐름방향에 상관없이 최소 BECT는 0.5시간 이상을, 적정 EBCT는 유입수의 부하조건에 따라 1~4시간 범위로 설계인자를 결정해야 할 것으로 판단된다.

5. 요인분석

5.1. 실험장치 및 방법

실험장치는 처리용량 100liter/day인 생물막반응기 4개를 제작하여 실험을 실시하였다. 생물막반응기 지름은 0.15m, 단면적은 0.01767m²의 아크릴로 제작·설치하였으며, 미생물을 접종 후 안정화된 후 실험을 실시하였다. 생물막반응기에 충전된 여재는 폴리스틸렌과 폴리프로필렌을 사용하였다. 또한 생물막 반응기내 유입폐수 및 처리수의 TBOD, SBOD, TSS를 1일 1회를 기준으로 하여 측정하였으며, 실험분석방법에 의하여 실시하였다. 실험에 사용된 폐수는 합성폐수를 대상으로 실시하였으며, 실험운전조건은 Table 6과 같다. 생물막 반응기를 이용한 합성폐수의 처리 효율 실험에서 처리효율에 영향을 미치는 인자의 독립영향과 인자와 인자 간에 존재하는 상호작용의 영

Table 6. 실험운전조건

항목	단 위	농 도
평균 유입 BOD	(mg/l)	150
평균 유입 COD	(mg/l)	270
평균 유입 SS	(mg/l)	150
온도	°C	20
pH		6~8

향을 규명하기 위해 3가지의 주요독립변수, 즉 여재의 크기(X1; mm), Bed 높이(X2; m), 그리고 여재의 종류(X3)를 대상으로 2가지의 수준(high (+), low (-))에서 실험을 실시하였다.

5.2. 처리효과 분석

각 인자들의 실험범위를 설정하여 요인분석 실험을 수행하였다. 이러한 요건의 실험을 요인분석에서는 2 요인분석(Paul, 1994)이라고 하며, 본 실험에서 가능한 모든 실험의 횟수는 8가지로 나타낼 수 있다. 반응기의 운전조건을 Case 1~8로 구분하여 실험한 결과를 Table 7에 나타내었으며, 반응기별 처리특성을 보면 TBOD 제거율은 94.6~85.0%, SBOD 제거율 96.6~88.0%, TSS제거율은 95.7~81.8%를 갖는 것으로 나타났다. 각 조건별로 실험결과에서 TBOD 제거율이 90% 이상이 되는 생물막반응기의 운전조건은 R-6, R-2, R-5, R-1, R-8 순으로 나타났으며, 이들 각각의 BOD제거율은 94.6%, 94.0%, 92.8%, 91.5%, 90.1%로 나타나 최소 90% 이상의 제거율을 보임으로서 안정적인 처리효율을 나타내고 있다.

한편 이를 운전조건에 따라 구분하여 보면 여재의 크기가 2~3mm인 것이 4가지 경우(R-6, R-2, R-5, R-1), bed높이가 2m인 경우가 3가지인 (R-6, R-2, R-8)로 나타났으며, 그리고 여재종류가 P.P인 3가지

경우(R-6, R-5, R-8)로 나타났다. SBOD제거율은 R-6, R-2, R-5, R-8, R-1순으로 제거율이 96.6%, 95.2%, 94.0%, 92.4%, 91.9%의 처리효율을 보임으로서 최소 90% 이상의 제거율을 갖는 것으로 나타났다. TSS제거율은 R-6, R-2, R-5, R-1순으로 제거율이 95.77%, 94.7%, 92.7%, 91.7%의 처리효율을 보임으로서 최소 90% 이상의 제거율을 갖는 것으로 나타났다.

제거율이 가장 저조한 R-3의 운전조건(여재크기 5~7mm, bed높이 1m, 여재 P.S)에서는 TBOD제거율이 85.0%, SBOD제거율 85.5%, 그리고 TSS제거율이 81.8%로 나타나 처리효율이 가장 좋은 R-6(여재크기 2~3mm, bed높이 2m, 여재 P.P)와 비교하면 TBOD제거율은 9.6%, SBOD제거율은 11.1%, TSS제거율은 13.9%가 감소한 것으로 나타났다.

5.3. EPP여재 분석

생물막반응기의 처리효율에 영향을 미치는 인자인 여재의 크기(mm), Bed높이(m), 여재의 종류가 처리효율에 얼마나 큰 영향을 미치는지를 규명하기 위해 각 인자의 수준을 2가지로 하여 실험한 결과를 제시하였다. Fig. 14와 같이 각 꼭지점은 실험조건을 의미하며 각 요인의 높고 낮은 수준을 (+1)과 (-1)의 기호로 표시하여 입방 실험구로 표시한 것이다. 즉 입방체의 윗면은 Bed높이가 큰 조건(2m)을 나타내며, 아래 면은 Bed높이가 작은 조건(1m)을 나타내는 것이다. 또한 입방체의 앞면은 여재의 종류 중 처리효율이 낮은 조건(P.S)을, 그리고 뒷면은 여재의 종류 중 처리효율이 높은 조건(P.P)을 나타내며, 입방체의 왼쪽은 여재의 크기가 큰 조건(5~7mm)을, 그리고 오른쪽은 작은 경우(2~3mm)를 나타내는 것이

Table 7. 반응기별 처리효율 분석

Case	여재크기	BED높이	여재종류	TBOD제거율	SBOD제거율	TSS제거율
RUN-1	2~3	1	P.S	91.5	91.9	91.7
RUN-2	2~3	2	P.S	94.0	95.2	94.7
RUN-3	5~7	1	P.S	85.0	85.5	81.8
RUN-4	5~7	2	P.S	87.7	88.0	84.7
RUN-5	2~3	1	P.P	92.8	94.0	92.7
RUN-6	2~3	2	P.P	94.6	96.6	95.7
RUN-7	5~7	1	P.P	87.2	88.7	88.1
RUN-8	5~7	2	P.P	90.1	92.4	89.6

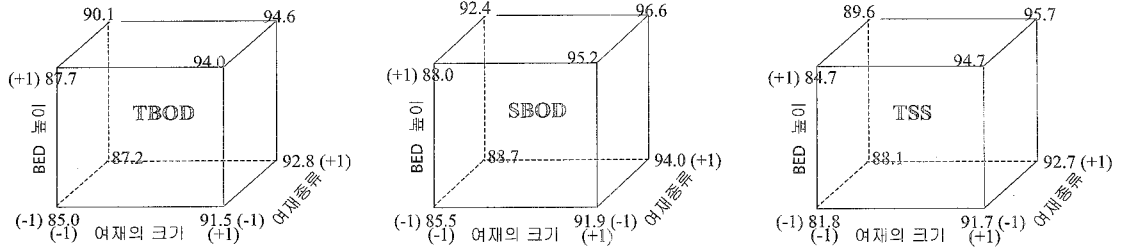


Fig. 14. 실험요인의 조건.

Table 8. 2⁸ 요인실험을 위한 계획 모형행렬

구분	X0	X1	X2	X3	X12	X13	X23	X123	y
1	+1	+1	-1	-1	-1	-1	+1	+1	y1
2	+1	+1	+1	-1	+1	-1	-1	-1	y2
3	+1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	-1	y3
4	+1	-1	+1	-1	-1	+1	-1	+1	y4
5	+1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	-1	y5
6	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	y6
7	+1	-1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	y7
8	+1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	-1	y8

X0 : TBOD 전체평균, X1 : 여재 size의 주 효과, X2 : Bed높이의 주 효과, X3 : 여재의 종류의 주 효과, y : 반응값, X12, X23, X13, X123 : 각 인자간의 상호작용

Table 9. 각 인자의 영향도 및 랭킷값

크기순서(i)	1	2	3	4	5	6	7
TBOD 영향도	-0.675(X13)	-0.325(X12)	-0.225(X123)	-0.125(X23)	1.625(X3)	2.475(X2)	5.725(X1)
SBOD 영향도	-1.025(X13)	-0.075(X12)	-0.475(X123)	0.126(X23)	2.775(X3)	3.025(X2)	5.775(X1)
TSS 영향도	-2.3(X13)	-0.35(X23)	0.35 (X123)	0.4(X12)	2.6(X2)	3.3(X3)	7.65(X1)
영향인자의 확률 ^a	0.07	0.21	0.36	0.50	0.64	0.79	0.93
정규순서값 ^b	-1.35	-0.76	-0.35	0	0.35	0.76	1.35

a : $P = (i-0.5)/7$, b : 랭킷값(Rankit value)

다. 실험조건에 따른 각 요인의 효과를 구하기 위하여 각 요인별 주 효과와 상호작용을 낮은 수준은 (-1)로 그리고 높은 수준은 (+1)로 표시하여, 각행은 실험회수를 나타내며, 열은 실험모형에 포함되어 있는 요인의 주 효과와 상호작용을 나타낸 것이다. Table 8에서 실험번호 1, 2, 5, 6은 실험요인인 X1(여재의 크기)이 높은 수준이며, 실험번호 3, 4, 7, 8은 X1이 낮은 수준을 나타낸 것이다. 따라서 실험번호 1, 2, 5, 6과 실험번호 3, 4, 7, 8은 상호 평균차이가 바로 X1의 주 효과가 된다. 이를 이용하여 각 요인에 대한 주 효과와 상호작용을 구한 값은 Table 9에 나타내었다.

TBOD 전체평균(X0)은

$$\frac{1}{8}(y \cdot X0) = \frac{1}{8}(y1+y2+y3+y4+y5+y6+y7+y8) = y \quad 90.36$$

여재 size(X1)의 효과

$$\begin{aligned} \frac{1}{4}(y \cdot 1) &= \frac{1}{4}(y1+y2-y3-y4+y5+y6-y7-y8) \\ &= \frac{1}{4}(91.5+94.0+92.8+94.6) \\ &\quad - (85.0+87.8+87.2+90.1) = 5.725 \end{aligned}$$

Bed높이(X2)의 효과

$$\begin{aligned} \frac{1}{4}(y \cdot 2) &= \frac{1}{4}(-y1+y2-y3+y4-y5+y6-y7+y8) \\ &= \frac{1}{4}(94.0+87.7+94.6+90.1) \\ &\quad - (91.5+85.0+92.8+87.2) = 2.475 \end{aligned}$$

여재의 종류(X3)의 효과

$$\begin{aligned} 1/4(y \cdot X3) &= 1/4(-y1-y2-y3-y4+y5+y6+y7+y8) \\ &= 1/4((92.8+94.6+87.2+90.1) \\ &\quad - (91.5+94.0+85.0+87.2))=1.625 \end{aligned}$$

따라서 본 실험의 처리효율에 영향을 미치는 각 인자의 주 효과 및 상호작용에 대해 각 인자의 중심점(여재의 크기: 4.5mm, bed높이: 1.5m, 여재의 종류: 1)에서의 처리효율은 각각의 평균 TBOD 90.36%, SBOD 91.54%, TSS 89.88%으로 나타났으며, 영향인자에 대해서는 여재크기 > Bed높이 > 여재의 종류 > Bed 높이 + 여재종류 > 3가지 요소의 복합요인 등의 순으로 영향을 미치는 것으로 나타났다. 이를 정량적으로 평가해 보면, 실험에서 여재의 크기를 5~7mm에서 2~3mm로 줄이면 처리효율은 각각 약 TBOD 5.73%, SBOD 5.78%, TSS 7.65% 향상되고, bed높이를 1m에서 2m로 높이면 TBOD 2.48%, SBOD 3.03%, TSS 3.3% 향상되는 것으로 나타났으며, 그리고 여재의 종류를 PS에서 PP로 향상시키면 TBOD 1.63%, SBOD 2.78%, TSS 2.6% 향상되는 것으로 나타났다.

6. 결 론

본 실험에서는 국내 하수의 성상과 유사한 폐수를 대상으로 Lab규모의 BAF장치를 활용하여 여재종류(EPP여재: 상향류, CB여재: 하향류)에 따른 처리효율의 변화특성을 비교·분석하고, 이를 통해 운전의 효율성 및 경제성을 확보할 수 있는 여재를 선정하기 위함이다. 따라서 각 흐름방향별 여재종류별에 따른 처리효과 및 유기물 부하조건에 따른 처리효율을 실험하여 다음과 같이 제시하였다.

1. 유입수 흐름방향별, 여재종류별 BAF 성능을 비교해 본 결과 유입수수질의 변동에 큰 영향없이 Upflow 및 Downflow BAF 모두 BOD 75~92%, COD 73~86%, SS 78~94%의 제거율을 보이고 있으며, 이를 EBCT별로 살펴보면, 수리학적부하가 높은 EBCT 0.5시간을 제외하고 EBCT 1시간 이상일 경우 대부분 80% 이상의 안정적인 처리효과를 나타내었다. 특히 SS의 경우는 BAF 반응기의 특성상 여과기능으로 인해 높은 제거효율(upflow 90%, down

86%)을 나타내고 있으며, 이는 여재의 Size, 여재층의 높이에 따라 상관관계가 있는 것으로 나타났다.

2. 전체적으로 제거효율은 Upflow가 Downflow보다 약 5% 정도 더 좋게 나타나고 있다. 이것은 운전시 Upflow는 어느 정도 일정한 선속도를 유지하였지만 Downflow에서는 수두손실에 따라 선속도의 변화가 있었기 때문이라 사료되며, SS제거효율의 경우에는 흐름방향과 상관없이 안정적인 수질을 보여주고 있는데 이는 BAF 반응기의 가장 큰 장점이라고 할 수 있는 생물분해 반응과 여과의 동시 수행능력을 잘 보여주는 결과이다.

3. 유기물부하에 따른 제거효율의 변화는 Upflow BAF의 경우 4.5kgBOD/m²day과 4.0kgCOD/m²day까지 80% 이상의 제거효율을 보여주고 있으며, Downflow BAF는 동일조건하에 약 75% 이상의 제거효율을 보여 주었다. 이것은 실험 제약사항으로 인한 결과이지만 SS는 5.0kgSS/m²day까지 처리수 SS농도가 20(mg/l) 정도로 제거율 80% 이상의 효율이 유지되었다.

4. 생물막 반응기 처리효율에 미치는 각 실험인자들의 주 효과 및 상호작용에 의한 영향을 분석한 결과, 처리조건중 각 인자의 수준을 여재크기 2~3mm, bed높이 2m, 여재의 종류 PP로 운전을 하였을 경우가 TBOD 94.6%, SBOD 96.6%, SS 95.7%로 가장 높은 제거율로 나타났으며, 가장 낮은 제거율을 보인 수준은 여재크기 5~7mm, bed높이 1m, 여재의 종류 PS로 운전을 하였을 경우가 TBOD 85.0%, SBOD 85.5%, SS 81.8%로 나타나 전자로 생물막여과장치를 구성한다면 처리효율에 있어 TBOD 10%, SBOD 11.5%, SS 14.5%의 향상된 처리효율을 보일 것으로 예측되었다.

또한 각 영향인자들이 유기물제거 및 고형물 제거에 어느 정도 영향을 미치는지에 대한 요인분석 결과, 여재크기 > Bed높이 > 여재의 종류 > Bed높이 + 여재종류 > 3가지 요소의 복합요인 등의 순으로 영향을 미치는 것으로 나타났으며, 그 중 여재크기로 인한 처리효율에 미치는 주 효과는 정량적으로 TBOD 5.73%, SBOD 5.78%, TSS 7.65%로 나타나 생물막 반응기의 처리효율이 여재의 크기에 의해 주로 영향을 받고 있음을 알 수 있었으며, 이는 유기물 제거효과 보다도 고형물 제거효과에 밀접히 연관되어 여재

크기가 작을수록 그 처리효율이 높아진다는 사실을 입증하였다.

참고문헌

1. Adachi, S. and Fuchū, Y. (1991) Reclamation and reuse of wastewater by biological aerated filter process, *Water Science and Technology*, 24, 195-204.
2. PHA, AWWA, WEF. (1995) *Standard methods for the examination of water and wastewater*. 19th Ed., APHA, Washington, DC.
3. Boller M., Guger W. and Tschui M. (1993) Parameter affecting nitrifying biofilm reactor. *Proc. IAWQ 2nd International Specialized Conf. on Biofilm Reactors*, Paris, 15.
4. Canler, J.P. and Perret, J.M. (1994) Biological aerated filter; assessment of the process based on 12 sewage treatment plants, *Water Science and Technology*, 29, 13-22.
5. Capdeville, B., Melo, L.F. and Bott, T.R. (1992) Introduction to Biofilm in Water and Wastewater Treatment, *Biofilm Science and Technology*, 13-20
6. Eckenfelder, W.W. (1961) *Biological Waster Treatment*, Pergamon press, New York.
7. McCarty, P. and Hang, R. (1971) Nitrogen Removal from Wastewater by Biological Nitrification and Denitrification. In: *Microbial Aspects of Pollution*, The Society for Applied Bacteriology Symposium Series, No. 1, Academic Press, pp. 215-232.
8. McCoy, W.S. (1997) Biological aerated filters; a new alternative compact system, *Water Environment & Technology*, 9, 39-43.
9. Orr, P. and Lawty, R. (1990) Operating experience with large random packed biofilm reactors, *Water Science and Technology*, 22, 203-214.
10. Paul Mac Berthouex, Linfield C. Brown (1994) *Statistics for Environmental Engineers*, Lewis publishers, 151-160.
11. Pujol, R., Canler, J.P., Vachon, A. and Vidou, P. (1992) Biological aerated filters. an adapted biological process for wastewater from coastal areas, *Water Science and Technology*, 25, 175-184.
12. Rittman, B.E., P.L. McCart (1980) Evaluation of Steady-State Biofilm Kinetics, *Biotechnol. Bioeng.*, 22, 2359-2373.