

오·폐수 처리를 위한 생물막 여과법의 원리 및 적용

염 규 진

(주)바이오엔텍 기술연구소

국내 상황 및 생물막 여과공법 적용의 필요성

현재 우리나라 대부분의 하수처리장은 지나치게 대규모 위주로 설치됨에 따라 처리의 효율성이 떨어지며 하천의 건천화까지 야기하고 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해 정부에서는 소규모의 하수처리장을 건설하여 작은 지역 단위의 하수처리를 계획하고 이를 실행 중에 있다.

소규모 위주의 오수 및 하수 처리를 위해서는 전제되어야 할 조건이 있는데, 우선 처리효율이 좋아야 하고 운전이 쉬워 비정규 인력에 의한 운영이 가능하여야 할 뿐만 아니라 주변 지역에 미치는 환경적 영향, 즉 악취나 소음의 발생이 적고 외관상 혐오감을 주지 않아야 한다. 또한, 소규모의 건물 등에서 발생하는 오수를 처리하기 위한 오수처리시설에 있어서는 2001년 이후부터는 전 시설이 BOD 20ppm 이하로 처리되어야 하며 상수원보호구역 등 특정지역에 대해서는 지자체의 결정에 의해 BOD 5ppm 이하까지의 처리수질을 요구하기도 한다.

우리나라 대부분 지역에서 하수배제구역 이외의 지역의 생활 오수는 그 방류수 규제치가 BOD 20mg/L로 상당히 낮은 반면, 일일 오수의 발생 시간대는 상당히 불규칙하여 그대로 처리장에 유입된다면 부하변동이 상당히 심하게 된다. 따라서 생활오수 처리장치에 유입되는 부하변동을 줄일 수 없다면 보다 부하변동에 잘 견디며 안정적으로 처리할 수 있는 처리공법을 개발하여야 한다.

이러한 중·소규모의 오수처리시설이나 하수처리장에서의 적용을 목표로 개발된 것 중의 하나가 생물학적 오·폐수처리의 최첨단 기술이라고 할 수 있는 생물막 여과공법(Biological Aerated Filter: BAF)이다.

개발배경

지난 10여 년 간 폐수처리분야의 기술이 발전하고 자연환경에 배출되는 처리수의 수질에 대한 고도화가 요구되면서 침전조를 없애고 하나의 반응기에서 모든 오염물질을 처리하게 되는 생물막 여과공법(Biological Aerated Filter: BAF)이 개발되고 발전되면서 많은 연구자들이 각기 다른 종류의 BAF 공법을 개발하여 보급하고 있다[1].

BAF 공법은 1980년대 유럽에서 처음 개발된 새로운 형태의 수처리 공법으로 반응기 형태의 생물처리조 안에 여러 가지 종류의 여재를 충전하여 여재에 부착된 미생물에 의해 오염물질을 분해하게 하는 공법으로 다양한 종류의 여재 개발과 더불어 다양한 형태의 BAF 공법이 개발되고 있고 좀 더 효율적이고 좀 더 빠른 시간에 오염물질을 처리할 수 있는 장치를 개발하기 위하여 많은 연구자들이 노력하고 있다.

BAF 공법은 넓은 부지를 필요로 하는 고전적인 활성슬러지법을 대체할 수 있는 대체 공법으로 각광받고 있으며 생물학적 처리와 여과를 동시에 수행하고 침전조를 필요로 하지 않는 특징 등 많은 장점이 있다[2,3].

생물막 여과공법의 원리 및 특징

생물막 여과공법(BAF)은 종전까지 주종을 이루던 활성슬러지 공법이나 접촉산화법과는 처리 기작이 근본적으로 다르다. 활성슬러지 공법에서는 부유 미생물을 이용하여 미생물과 오·폐수가 함께 혼합된 상태에서 오염물질이 처리되지만, BAF공법은 생물막에 의한 유기물질 분해 공정과 물리적인 방법에 의한 여과 공정이 한 반응조 안에서 동시에 일어나도록 고안한 공법으로, 미생물이 부착하여 성장할 수 있는 담체(media)로서 여재를 사용하여 여재의 표면에 미생물을 부착시켜 오·폐수의 유기성 오염물질(BOD)을 처리하는 공법으로 여재의 크기가 작은 특성에 의해 부유물질(SS)까지 동시에 제거되는 특징을 가지고 있다. 이와 같은 두 가지 기능이 한 반응기에서 일어나도록 하기 위해서는 특성이 우수한 여재를 사용하여야 하고 여재의 입경이 작아야 한다[4,5].

생물막 여과공법을 인류의 생활에 비유하면 활성슬러지 공법에서는 미생물이 유목생활을 하는 반면 이 공법에서는 정착 생활을 하는 것으로 비유할 수 있다. 따라서 BAF공법에서 미생물은 보다 풍요로운 대사활동을 하게 되어 오염물질을 처리하는 속도가 빠르게 된다[1,6]. 미생물 슬러지의 처리방법에 있어서도 기존의 활성슬러지 공법은 미생물 슬러지를 생물처리조 후단에 설치된 침전조의 침전 기능에 의해 슬러지를 분리하여, 슬러지의 고액분리를 위한 침전 시설이 거대해지고 자칫하면 슬러지의 분리가 불량하여 생기는 팽화 현상(bulking)

에 의해 슬러지가 부상 월류하여 처리수질이 악화되는 등의 문제가 발생하기도 하고, 슬러지의 반송율에 따라 포기조의 미생물 양이 달라져 슬러지 반송율의 결정이 유지관리상 매우 중요한 요인 중 하나였다[7]. 그러나 BAF공법은 슬러지 처리 공정이 간단하여 생물막 여과조에서 발생한 미생물 슬러지를 여과조의 역세척 공정에 의해 주기적으로 인출해 주고 인출한 슬러지를 전단에 설치한 부패저류조로 이송하기만 하면 된다.

또한, BAF공법은 여과조의 설비 구조가 간단하고 공장에서 제작하여 현장에서는 설치만 하면 되므로 시공하기 쉬우며 완전 밀폐형으로 제작하여 악취의 발생이 없고 운전은 완전 자동화하여 무인운전이 가능하고 컴팩트(compact)한 반응기 형태로 생물막 여과조를 제작하여 전체 설비의 크기를 줄이는 효과가 있다.

포기조에서 부유하는 미생물 집단에 의해 유기성 오염물질을 처리하는 활성슬러지법과는 달리 매질에 부착하여 성장하는 생물막에 의해 오염물질을 처리하게 되는 생물막법에서는 실제 여러 가지 대사작용이 일어난다.

초기에 식충 되었거나 자연적으로 형성된 생물막이 점차 성장하여 일정한 두께 이상이 되면 외부의 생물막은 생물산화 기능을 갖는 호기성 층과 호기성 층의 산소차단 효과에 의한 내부의 혐기성 층으로 나뉘어진다. 호기성 층에서는 유기물이 계속해서 흡착되며 산화·분해되는 동화작용에 의하여 CO₂와 H₂O가 생성되며, 내부의 혐기성 층에서는 흡착된 유기물과 미생물이 혐기성 미생물에 의해 분해되어 CH₄, CO₂, N₂, H₂S가 방출되어 생물막의 접도를 감소시키고 결과적으로 미생물의 부착력을 감소시킴으로 생물막의 탈리를 촉진하기도 한다(그림 1). 생물막 내층의 혐기성 미생물에 의한 작용은 폐수 중의 유기물 농도를 낮추기보다는 증식된 슬러지를 산화시키는 역할을 함으로써 생물막 공법에 있어서 슬러지의 발생을 감소되는 한 이유가 되기도 한다[8].

생물막 여과공법은 포기조 내에 생물막의 형성을 위한 여러 가지 형태의 담체를 투입하는 생물막법과는 달리 고정된 생물막층(fixed film)에 의하여 오염물질을 처리하는 공법으로 밀폐된 반응조 안에 여재를 채워 고정된 미생물층(granular fixed bed reactor)을 형성하게 하는 공법으로 생물 반응조에 충전되

는 여재의 종류에 따라 다양한 공법이 개발되어 있고 여재의 특성에 따라 상향류 또는 하향류의 흐름으로 오·폐수를 처리하게 된다(표 1).

생물막 여과의 Kinetics

생물막 여과공법에서 여재층의 작용을 원리적으로 살펴보면 여재층 표면의 미생물막에 의한 기질의 제거는 대체적으로 다음 과정에 따라 진행되는 것으로 알려져 있다.

- (1) 유체층의 기질이 미생물막과 접촉하면서 액막에서 미생물막으로 전달되는 과정
- (2) 기질이 미생물막에서 확산하는 단계
- (3) 미생물 세포의 성장을 위하여 기질이 이용되는 단계
- (4) 기질이 세포의 유지기능을 위해 이용되는 과정

Williamson과 McCarty[9,10]에 의해 처음으로 제안된 유체층 기질의 제거과정을 Rittmann과 McCarty[11]는 미생물막 표면에 정체된 액막을 가상하여 미생물막에 의한 용해성 기질의 제거과정을 그림 2와 같이 표현하였다.

정체된 액막을 통하여 미생물막으로 이동하는 용해성 기질

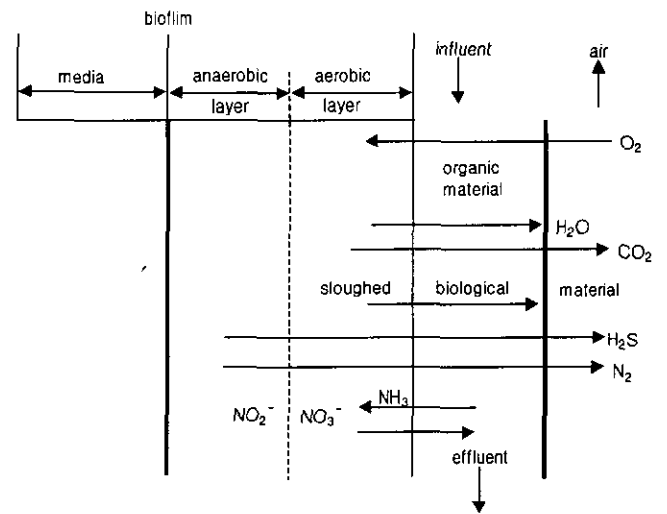


그림 1. Organic removal process by biological aerated filter.

표 1. 생물막 여과공법의 종류

공법	여재 종류	설비 형태	오·폐수 흐름
Biopur	파도형 플라스틱판	콘크리트, 노출형	하향류
Biocarbon	입상형 슬레이트	콘크리트, 노출형	하향류
Biofor	입상형 점토	콘크리트, 노출형	하향류
Biobed	입상형 플라스틱	콘크리트, 노출형	하향류
Biostyr	입상형 플라스틱	콘크리트, 밀폐형	상향류
SBAF	입상형 폴리프로필렌	콘크리트, 밀폐형	상향류
BATU Biofilter	발포성 플라스틱 폼	PE, 밀폐형	하향류
BioBead	입상형 폴리스티렌	철구조물, 밀폐형	상향류

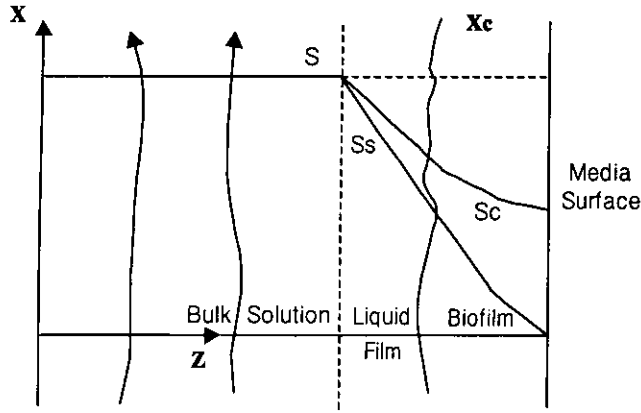


그림 2. Three characteristic substrate concentration profiles within idealized biofilms.

의 양은 Fick의 확산법칙을 적용할 수 있으며 다음의 식으로 표현된다.

$$J = -D \frac{ds}{dz} = D \frac{S - S_c}{L} \quad (1)$$

$J = Z$ 방향으로의 기질 유동량($ML^{-2} T^{-1}$)

$S =$ 액막에서의 기질의 농도(ML^{-3})

$S_c =$ 미생물막 표면에서의 기질의 농도(ML^{-3})

$L =$ 액막의 깊이(L)

$D =$ 미생물막 표면에서의 기질의 확산계수($L^2 T^{-1}$)

$ds/dz = Z$ 방향으로의 기질농도 기울기(ML^{-4})

또한 미생물막내에서의 박테리아에 의한 기질 이용률은 다음과 같이 Monod 식을 이용하여 나타낼 수 있다.

$$D_c \frac{d^2 S_c}{dz^2} = \frac{k S_c X_c}{K_s + S_c} \quad (2)$$

$D_c =$ 미생물막내에서의 기질의 확산계수($L^2 T^{-1}$)

$k =$ 기질의 최대이용율(T^{-1})

$X_c =$ 미생물농도(ML^{-3})

$K_s =$ Monod의 반응속도 계수(ML^{-3})

이후에도 미생물막에 의한 2중의 기질제거에 대한 모델이 Namkung과 Rittmann[12]에 의하여 개발되었다.

미생물이 유기물을 이용함에 따라 전체 미생물막의 두께는 점점 두꺼워지게 된다. 결과적으로 유기물이 미생물막 내부까지 침투할 수 없을 때 생물막의 두께는 최대가 될 것이며, 유기물이 생물막을 침투하는 깊이는 오·폐수의 생물막에서의 통과속도, 유기물의 농도, 막에 대한 유기물 분자의 확산계수, 미생물의 유기물 이용률 등에 영향을 받으므로 여재층의 생물막을 아주 얇게 유지하는 것은 생물막 여과공법에서 매우 중요한 요소가 된다.

여재층에서의 산소 소비는 주로 생물막과 추가적으로 포착된 미생물에 의한 산소 섭취에 기인하며 공기 대신 순산소를 사용하면 고농도의 폐수도 처리할 수 있다.

일반적인 생물학적 처리법과 마찬가지로 생물막 여과공법에서도 처리성능에 가장 크게 영향을 주는 것은 장치 내에 유지되는 미생물의 양이다. 생물막 여과공법에서 여과기 내에 보존되는 미생물의 양은 여재의 비표면적(m^2/m^3)과 직접적인 관계가 있다. 입상 여재의 비표면적은 입자의 크기에 반비례하므로 여재의 입경을 작게 할수록 비표면적이 증가하고 이에 비례하여 여과기 내에 보존할 수 있는 미생물 막의 양이 증가하여 그만큼 처리효율을 높일 수 있다.

생물막 여과공법의 국내 적용 및 전망

생물막 기능과 여과기능을 결합시킨 생물막 여과법에 대한 연구가 활발히 진행되어 유럽을 중심으로 한 환경 선진국에서는 4-5년 전부터 적용이 확산되고 있는 추세이다. 국내에서도 외국 기술 도입과 자체 개발로 2-3년 전부터 본 사를 비롯한 몇 개사에서 하수 및 오·폐수 처리 현장에 성공적으로 적용해 오고 있다(표 2).

생물막 여과공법의 경우 호기성 상태에서도 여재에 고농도

표 2. 국내 적용 BAF 공법

공법	BIOSTYR	SBAF	BATU Biofilter	BioBead
개발년도	1990년	1990년대 후반	1990년대 후반	1990년대 후반
시공 실적	유럽 내 다수 (고도처리 목적, 하수처리)	pilot 규모 시공	30-80톤/일 소규모 마을하수처리에 다수 적용	한국도로공사 휴게소 오수처리시설 등 다수 적용
여재의 종류	입상형 폴리스티렌	입상형 폴리프로필렌 (3-5mm)	발포성 플라스틱 Foam (흡수성 여재)	입상형 폴리스티렌 (2-3mm)
처리 효율	BOD, SS 20ppm 이하 T-N 70%	BOD, SS 20ppm 이하 T-N 70%	BOD, SS 20ppm 이하 T-N 17.6%	BOD, SS 20ppm 이하 T-N 60%
적용 대상	하수처리, 질소 인 고도처리	하수처리, 질소 인 고도처리	소규모 오수처리 마을하수 처리	오수 및 마을하수 처리 폐수처리

로 부착된 미생물에 의한 세포동화 작용으로 인하여 기존 공법에서는 기술적으로 처리가 어려운 질소와 인의 동시 처리가 가능하다.

앞에서 설명된 바와 같이 여러 가지 장점들을 가지고 있는 생물막 여과공법의 현장 적용성과 보급 확대를 위해서는 기초 연구로 여재에 형성된 생물막(biofilm)에 대한 물리·화학적 측면의 접근, 예를 들어 부하량에 따라 형성되는 생물막의 두께와 산소전달율 등에 대한 연구와 정확한 측정 기술의 개발, 그리고 전체 처리시스템에 대한 동력학적 분해 모델에 대한 보다 많은 연구가 필요하다. 이와 같은 생물막 여과공법에 대한 기초연구와 현장 적용의 범위를 넓혀 가는 노력이 계속된다면 생물막 여과 공법의 장점에 따른 국내 활용 전망은 매우 밝다 하겠다.

참고 문헌

- 오동규, 최원석. 1997. *첨단환경기술*, 1월호.
- Grady, J. and H.C. Lim. 1980. *Biological Wastewater Treatment*, Marcel Dekker, Inc.
- Stensel, H.C. and S.H. Reiber. 1833. "Industrial Wastewater Treatment with a new Biological Fixed-film System", *Environment program*, Vol. 2, No. 110.
- Young, J.C. and M.C. Stewart. 1979. RBR-A New Addition to the AWT Family, *Water and Wastewater Engineering*, Vol. 16, No. 20.
- 김형태. 1993. 유기성 폐수의 생물막 처리 기능과 향후 전망, *첨단환경기술*, 제1권, 제5호.
- Cho, K.M. 1981. Treatment of Organic Wastewater by SBriquette Ashes Fixed-film Process, *Jour. of Korea Sco. of Environmental Engineers*, Vol. 4, No. 1.
- 山本 泰弘. 1993. 생물여과 process에 의한 고도처리, *첨단 환경기술*, 제1권 제3호.
- Boller, M. W. Gujer, and M. Tschui. 1993. Parameters Affecting Nitrifying Biofilm Reactors, Second International Specialized Conference on Biofilm Reactors, September 29th-October, pp15-25(1993).
- Williamson, K.J. and P.L. McCarty. 1976. A Model of Substrate Utilization by Bacterial Films, *Jour. Water Pollution Control Fedration*, Vol. 48, No. 1.
- Williamson, K. and P.L. McCarty. 1976. Verification studies of the Biofilm model for Bacterial Substrate Utilization, *Jour. Water pollution Control Federation*, Vol. 48, No. 2.
- Rittmann, B.E. and P.L. McCarty. 1980. Model of steady-state Biofilm Kinetics, *Biotechnology and Bioengineering*, Vol. 22.
- Namkung, E. and B.E. Rittmann. 1987. Modling Biosubstrate Removal by Biofilms, *Biotechnology and Bioengineering*, Vol. 29.