

상향류식 바이오비드 공법을 이용한 오·폐수 처리특성 및 부착 생물막의 형태적 특징

Treatment Kinetics of Wastewater and Morphological Characteristics of Biofilm in Upflow Biobead® Process

염규진 · 이정훈 · 김선미 · 최원석

Kyu-Jin Yum · Jeong-Hun Lee · Sun-Mi Kim · Weon-Seok Choi

(주) 바이오엔텍 기술연구소

Bioentech Research Institute

Abstract

The objective of this study was to investigate the treatment efficiency, kinetics, and morphological characteristics of biofilm in upflow Biobead® process, a kind of biological aerated filter(BAF). The Biobead® system showed high removal rates of COD_{Mn}(76~83%), BOD₅(67~88%) and SS(71~91%) for food wastewater with high salt concentration(>4,000mg/ℓ) under short reaction times(2~3hrs). Even at aerobic condition, the system had high treatment efficiency for both T-N(51~63%) and T-P(62~81%). The removal kinetics of COD_{Mn}, BOD₅, T-N, T-P, and Cl⁻ in the Biobead® system showed a plug-flow pattern with reaction rate constants(hr⁻¹) of 0.58, 0.63, 0.30, 0.48, and 0.38 respectively. A backwashing process to remove excess biomass and filtered solids was needed at least once during 22-hour operation at 0.5kg BOD m⁻³ · d⁻¹ loading. At the higher loading(1.0kg BOD m⁻³ · d⁻¹) the backwashing interval was shorten by 8 hours. The COD, BOD, T-N, and T-P were removed from 43 to 66% only by aerobic biodegradation. The SS was removed over 70% by the filtering of Biobead® media in the treatment system. The first one of three serial Biobead reactors showed the highest removal values for COD_{Cr}(52.3%), COD_{Mn}(38.8%), BOD(62.5%), and T-N(40.0%). The SS and T-P had the highest removal values(47.5% and 29.2%) at the second one of the serial reactors. The biofilm had non-homogeneous spatial distribution and the colonies were embedded in the sunk area of the Biobead. The thickness of the biofilm was very thin(5.0~29.4μm) compared to the biofilm thickness(20 0~300μm) used in other BAF systems

Keywords : Biofilm, Biobead® Process, Biological aerated filter(BAF), Plug-flow pattern, Aerobic biodegradation

1. 서 론

최근 활발히 연구되고 있는 생물막처리 시스템은 반응기 내에서의 미생물 양의 조절 및 동력학적 해석이 어려운 점 등 몇 가지 불리한 조건을

내포하고 있으나 장치내의 높은 활성미생물 농도, 작은 부지소요 등의 장점으로 인해 부유 성장시스템과의 복합공정 또는 신소재 계통의 여재 및 반응 공정 개발 등 많은 연구가 진행되고 있다.¹⁾

국외에서는 1970년 이후부터 생물학적 처리와 2차 침전조의 역할을 동시에 수행할 수 있는 생물

막여과장치(Biological Aerated Filter)에 대한 연구가 활발히 진행되었고 1980년대 유럽에서 실증규모의 처리장치가 보급되기 시작하였으며 1990년대에는 생물막 시스템에 대한 기술개발 및 적용이 급격하게 늘어나게 되었다.

향후 2000년대에는 시설의 소형화, 영양염류의 처리 및 오·폐수 처리효율 향상을 위해 생물막처리 시스템이 더욱 늘어날 전망이다 특히 BAF(Biological Aerated Filter)의 경우 다른 생물막 시스템에 비해 SS, BOD, 영양염류 처리효율이 높고 2차 침전조의 역할을 단일 반응조에서 동시에 수행할 수 있으며 짧은 체류시간에 대량의 오·폐수를 처리할 수 있는 장점이 있어 그 적용 범위가 더욱 확대될 것으로 예상하고 있다.^{2) 3) 4)}

본 실험에서는 K공사 S지사 발생 오수와 김치제조공정에서 배출되는 폐수를 생물막여과공법의 일종인 상향류식 바이오비드® 공법을 적용하여 처리하였다. 오수를 처리하는 경우 BOD 부하량에 따른 역세주기 변화와 직렬로 연결된 반응조별 처리효율 및 호기성 조건에서 바이오비드(Biobead) 여재 표면에 형성된 생물막의 형태적 특성을 살펴 보았으며, 염분농도가 높은 김치공장폐수의 경우 염적수와 세척수를 동시에 처리하고자 하였고 반응시간을 매우 짧게(2~3hrs)한 상태에서의 처리효율과 각각의 수질항목별로 바이오비드 시스템에서의 동력학적인 처리 모델을 제시하고자 하였다.

2. 실험재료 및 방법

2.1 실험재료 및 장치

직렬로 연결된 바이오비드 반응조별 처리특성과 정확한 역세주기 및 부착 생물막(Biofilm)의 특성을 알아보기 위한 연구의 시료는 경기도 S시 소재 K공사 지사에서 발생하는 오수로 전량이 수세식 화장실 배수, 식당오수 및 기타 잡배수였다. 바이오비드 시스템에 의한 폐수 처리효율과 동력학적 처리모델을 알아보기 위한 연구에 사용된 시료는 강원도 H군에 소재한 김치 공장장에서 발생하는 폐수로서 스크린을 거쳐 포기조로 유입되기 직전의 세척수와 김치를 절일 때 사용하는 염적수를 각각 채수하여 현장에서 실제 발생비율과 동일한 부피비로 혼합(40:1)하여 사용하였다. 온도는 폐수 유입시의 온도를 고려하여 온도가 자동으로 조절되는 수중히터를 사용하여 $15 \pm 1^\circ\text{C}$ 로 일정하게 유지하였다.

Fig. 1은 본 실험에 사용된 상향류식 바이오비드 시스템의 실험장치로 각 반응조는 높이 2m, 직경 0.1m의 투명 아크릴로 제작하였다. 3개의 바이오비드 반응조를 직렬로 연결시켰고 반응조의 총 용량은 30 l(여재 총부피 15 l)이며 각 반응조의 50%를 비표면적이 $>2,000\text{m}^2/\text{m}^3$, 직경이 2~3mm인 입상형 폴리스티렌 여재(바이오비드, Table 1)로 충전하였다. 공기압축기를 이용한 공기 주입, 반응

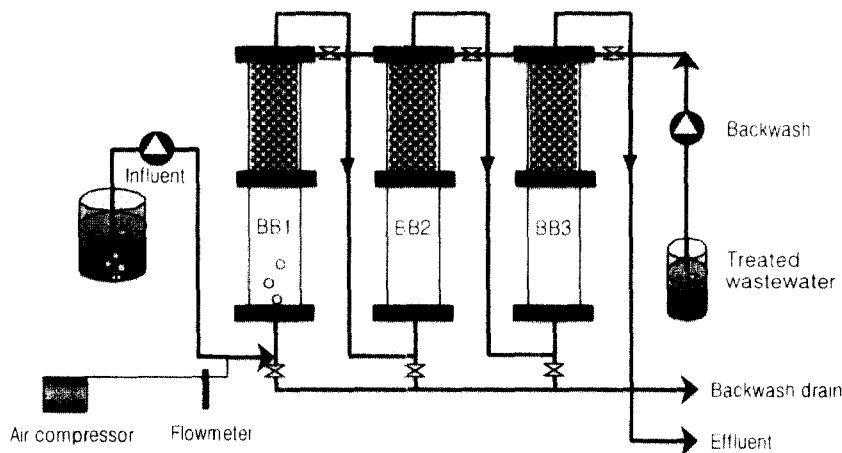


Fig. 1. Schematic diagram of Biobead® system.

Table 1. Media specification

Media shape	granular
Media size(mm)	2-3
Media density(kg/m ³)	25
Media material	Polystyrene
voidage(%)	33
Specific surface area(m ² /m ³)	>2000

Table 2. Characteristics of sewage sample

Parameter	Concentration*(mg/l)
SS	70.2
COD _{Mn}	77.9
BOD ₅	191.5
T-N	59.0
T-P	4.7

* Mean value of 5 samples

조로의 원수 유입과 처리수 방류 및 역세척 공정이 자동으로 제어될 수 있도록 실험장치를 구성하였다.

2.2 실험방법

처리수 수질을 기준으로 반응조내 바이오비드 여재에 호기성 미생물들이 부착·안정화되는데 약 7일 정도 소요되었으며 이후 모든 실험 값들은 역세전 처리수 수질이 평형상태(steady state)를 나타낼 때의 값을 이용하였다.

반응조 각 단별 처리특성과 부착 생물막의 형태적 특징을 알아보기 위한 실험은 유량을 조정하여 BOD 용적부하를 0.5와 1.0kg BOD/m³·d로 변화시켜서 역세주기와 바이오비드조 각단(BB1, BB2, BB3)의 처리효율을 조사하였다.

생물학적 분해와 물리적인 여과 작용에 의한 처리효율을 알아보기 위하여, 미생물은 부착되어 있으나 공기 공급이 없는 상태로 유지시켜 호기성 미생물에 의한 분해 작용을 최소로 유지한 상태에서 여재(φ 2~3mm)에 의한 응집 및 흡착으로 제거되는 처리효율과 공기를 연속적으로 공급하여 미생물의 호기적 분해 및 세포동화작용에 의한 처리효율을 조사하여 비교하였다.

바이오비드 반응조 각 단별 DO 농도는 반응조 상부에서 유출되는 각 단별 처리수의 용존산소 농도를 DO meter(YSI 55/12FT, YSI Co., Inc. USA)를 이용하여 측정하였으며 호기성 미생물의 형성에 따른 여재표면의 생물막 특성은 전자현미경(SEM)과 공초점레이저주사현미경(Confocal Laser Scanning Microscope)을 이용하여 살펴보았다.

폐수처리특성을 알아보기 위한 실험에서는 김치공장 폐수의 유입수량을 4.8~7.2 l/hr로 빠르

게 유지시켜 바이오비드조에서 2~3시간 정도의 짧은 반응시간(표면부하율 23.0~34.6m³/m³·day)을 갖도록 하였다. 예비실험 결과에 근거하여 역세주기는 24시간의 바이오비드 반응조 운전시간을 기준으로 첫단(BB1)은 3회, 두 번째(BB2) 및 세 번째(BB3)는 각각 2회씩, 각 회당 약 30초간 시행하였다.

원수 및 처리수의 분석은 SS, COD_{Mn}, BOD, Cl⁻는 수질오염공정시험법으로⁵⁾ COD_{Cr}, T-N, T-P는 DR-2010(Hach)를 이용하여 EPA Standard Methods⁶⁾에 따라 분석하였고, 동력학적인 모델의 검증은 이론적인 모델식에 의하여 구한 값과 실험에 의해 얻어진 결과를 비교하여 제시하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 역세주기

실험에 사용한 K공사 S지사 발생 오수의 수질 분석 결과는 Table 2와 같다. 생물막여과시스템(Biological aerated filter)을 연속하여 운전하는 경우 고형물질이 여재층에 축적되어 처리효율이 저하되므로 주기적으로 역세척을 해주어야 하는데 상향류식 바이오비드 공법에서 역세주기를 결정하는 가장 중요한 운전인자는 처리수내의 SS 농도 변화이다. 그 이유는 바이오비드 공법에 사용하는 여재(φ 2~3mm)의 특성상 압력손실이 크게 발생하지 않으므로 압력차에 의하여 역세주기를 결정하는 것은 효과적이지 못하기 때문이다. 따라서 역세주기를 결정하기 위해 운전기간 중에 발생하는 처리수내의 SS농도 변화를 조사하였다. 현장에서 주로 발생하는 오수의 BOD 부하량을 기준으로 0.5kg/m³·d와 1.0kg/m³·d의 두 가지를 이용

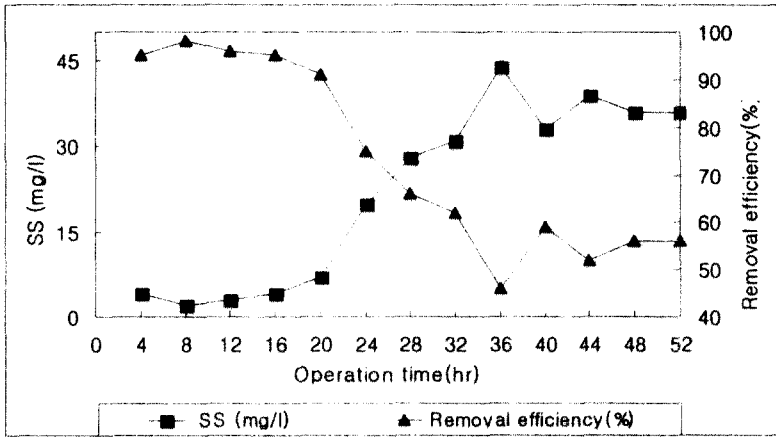


Fig. 2. Treatment efficiency and effluent concentration of SS (0.5kgBOD/m³ · d).

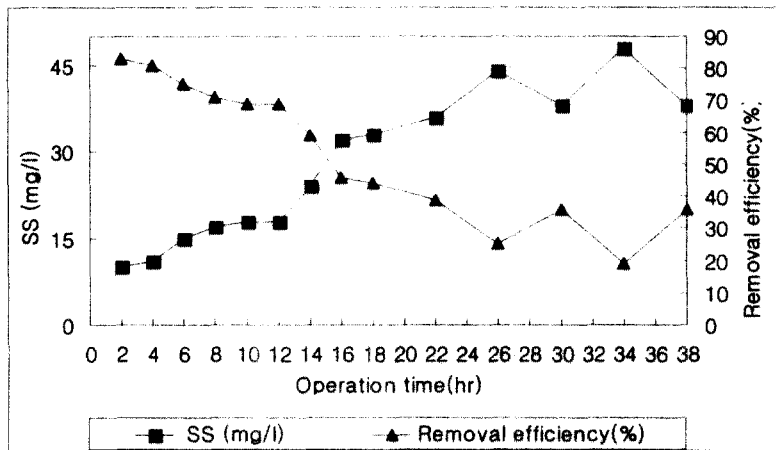


Fig. 3. Treatment efficiency and effluent concentration of SS (1.0kgBOD/m³ · d).

하여 실험하였으며 그 결과는 Fig. 2, 3과 같다.

위의 실험 결과에서 보는 바와 같이 0.5kg BOD/m³ · d의 경우에는 운전시작 후 22시간 경부터 SS의 처리효율이 60% 이하로 낮아지기 시작하였으며 처리수내의 SS농도가 상승하기 시작하므로 운전시간 기준으로 22시간 안에 적어도 한번의 역세 과정이 필요한 것을 알 수 있다. 또한 1.0 kg BOD/m³ · d의 경우에는 운전시작 후 14시간 경부터 처리효율은 60% 이하로 처리수내의 SS농도는 20mg/l 이상으로 증가하기 시작하므로 운전시간 기준으로 14시간 안에 적어도 한번의 역세가 필요하다.

BOD값 보다 측정 오차 범위가 좁으며 빠르게

값을 구할 수 있는 COD_{cr}값을 이용한 역세주기 결정의 가능성 여부를 판단하기 위하여 처리수내의 SS농도를 이용한 역세주기 결정 실험과 같이 0.5kg BOD/m³ · d와 1.0kg BOD/m³ · d의 두 가지 BOD 부하량 조건에서 처리수내의 COD_{cr}값을 측정 한 결과는 Fig. 4, 5와 같았다. SS농도를 이용한 역세주기 결정 실험 결과와 비슷한 양상을 나타냈는데 0.5kg BOD/m³ · d의 경우 운전시간 기준으로 20시간 이후부터 처리수내의 COD_{cr} 농도가 45 mg/l 이상으로 증가하기 시작하였으며 이에 따라 처리효율도 90% 이하로 낮아지기 시작하였다. 1.0kg BOD/m³ · d의 경우에는 12시간 이후부터 처리효율이 80% 이하로 떨어지기 시작하면서 처

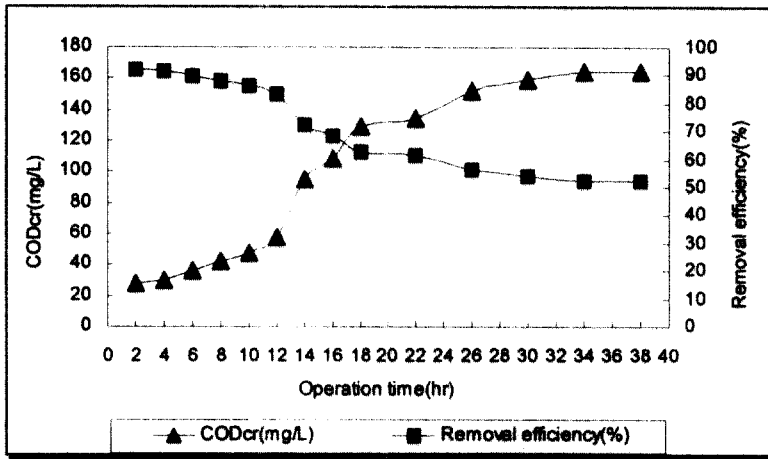


Fig. 4. Treatment efficiency and effluent concentration of COD_{cr} (0.5kgBOD/m³ · d).

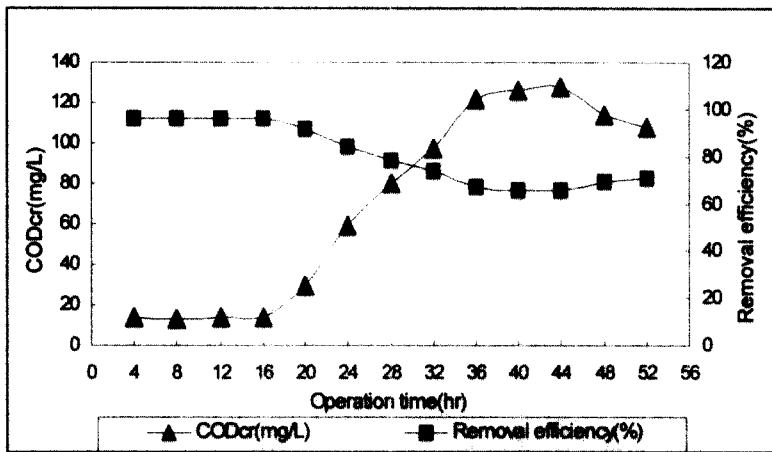


Fig. 5. Treatment efficiency and effluent concentration of COD_{cr} (1.0kgBOD/m³ · d).

리수내의 COD_{cr} 농도도 60mg/ℓ 이상으로 증가하기 시작하였다. 이와 같은 실험결과를 볼 때 BOD 부하량에 따른 역세주기 결정시 처리수내의 SS농도와 COD_{cr}농도 중 어느 하나를 기준으로 하여 결정할 수 있으나 바이오비드 공법의 특성상 SS성분 처리의 경우에는 반응조내에 오·폐수 유입시 바이오비드조 상부로 밀착되는 여재에 의한 여과가 중요한 처리기작 중 하나이므로 처리수내의 SS 농도를 기준으로 역세주기를 결정하는 것이 보다 안정적인 처리수질을 얻을 수 있을 것으로 판단된다.

3.2 처리특성 및 각단별 처리효율

직경 2~3mm 크기의 여재를 사용하는 상향류식 바이오비드 공법의 특성상 한 반응조에서 물리적인 여과와 생물학적인 분해가 동시에 일어나게 되는데 이때 전체 처리시스템에서 각각의 기작에 대한 처리효율을 알아본 실험결과는 Table 3과 같으며 이때의 BOD 부하량은 1.0kg/m³ · d였다. COD_{cr}, COD_{Mn}, BOD, T-N, T-P는 주로 생물학적 분해와 세포동화작용에 의하여 43~66%가 제거되었으며 SS는 70% 이상이 물리적 여과 및 흡착 등에 의하여 처리되는 것으로 나타났다.

각 단별 유출수의 DO농도를 측정된 결과 각각

Table 3. Comparison of treatment efficiency(%) between filtering and aerobic biodegradation

Parameter	Filtering	Aerobic biodegradation/ Assimilation	Total
COD _{cr}	21	61	82
COD _{Mn}	30	43	73
BOD	24	66	90
T-N	12	52	64
T-P	8	60	68
SS	73	5	78

Table 4. Treatment efficiency(%) of each Biobead[®] reactor

Parameter	BB1	BB2	BB3	Total
COD _{cr}	52.3	19.6	13.4	85.3
COD _{Mn}	38.8	24.8	12.6	76.2
BOD	62.5	9.8	17.8	90.1
T-N	40.0	25.0	10.0	75.0
T-P	13.5	29.2	16.5	59.2
SS	27.1	47.5	6.1	80.7

BB1 : #1 Biobead[®] reactor; BB2 : #2 Biobead[®] reactor; BB3 : #3 Biobead[®] reactor

2.97, 2.35, 2.30mg/ℓ로 나타났다. 공기가 직접 공급되는 바이오비드 반응조 1단(BB1)과 나머지 2, 3단(BB2, BB3)에서 유출되는 처리수의 DO 농도가 큰 차이를 보이지 않았는데 이는 공기가 제일 먼저 공급되는 반응조 첫단(BB1)에서 주로(전체 BOD 처리량의 70% 이상) 호기성 미생물들에 의한 분해가 일어나므로 폐수에 공급된 산소가 제일 많이 소모되었기 때문인 것으로 판단된다.

이와 같은 실험결과를 볼 때 생분해성이 양호한 오·폐수의 경우 COD와 BOD는 호기성 조건에서 생물학적 분해작용에 의해서 주로(>70%) 제거되며 T-N과 T-P의 경우도 전체 처리량의 80% 이상이 호기적 조건에서 여재에 부착된 미생물에 의한 세포동화작용에 의하여 미생물 체내로 흡수 처리되어지는 것으로 판단되어 진다. 질소 및 인 처리 기작에 대한 자세한 내용은 김치공장폐수 처리 부분에서 다시 한번 설명하였다. 하지만 미생물에

의해서 쉽게 분해되지 않는 SS의 경우는 전체 처리량의 약 90% 이상의 바이오비드 반응조내에 담겨 있는 구형(φ2~3mm) 여재에 의하여 여과 처리되는 것으로 나타났다. 이와 같은 결과는 아래의 바이오비드 반응조 각 단별 처리효율을 알아본 실험결과에서 다시 한번 설명되어 질 수 있다.

Table 4에서는 바이오비드 반응조의 각 단별 처리효율을 비교한 결과이다. 이때의 BOD부하량은 1.0kg/m³·d이었다. 위의 결과를 볼 때 호기적 조건에서 생물학적으로 분해 처리되는 COD와 BOD 항목은 바이오비드 반응조 3개를 직렬로 연결한 경우, 공기가 제일 먼저 주입되는 1단에서의 처리효율이 가장 높았고, 물리적 여과 기능에 의해서 주로 제거되는 SS는 2단에서 처리효율이 높았는데 바이오비드 반응조에 채워진 여재의 크기가 일반적으로 이용되는 sand나 carbon filter 보다 크기 때문에 여재가 채워진 앞 부분 보다는 SS성분

이 깊숙이 여재층 사이로 들어와 전체 여재층의 중간부분에서 주로 여과기능이 일어나는 심층여과 기능에 의해서 SS성분이 제거되므로 세 개의 연속된 바이오비드 반응조 중 중간 부분인 두 번째 반응조(BB2)에서 가장 많이 제거되는 것(전체 처리량의 약 60%)으로 판단된다.

역세시 슬러지 방출로 제거되거나 호기적 조건에서 미생물 체내로 흡수되는 비율이 높은 인의 경우 또한 2단에서 처리되는 비율이 높게 나타났다. 질소의 경우 공기가 먼저 투입되는 1단에서 주로 처리되는 결과(전체처리량의 약 50% 이상)를 볼 때 탈질 보다는 호기적 조건에서 바이오비드 여재 표면에 형성된 미생물의 세포동화작용(assimilation)에 의해서 주로 제거되는 것으로 판단된다.

3.3 부착 생물막의 형태적 특징

여재의 형태적 특성은 주사전자현미경(SEM)을 이용하여 운전 전·후의 여재 표면을 분석하였다. 미생물이 부착되어 있지 않은 바이오비드 여재들은 Fig. 6에서 보는 바와 같이 표면 구조가 울퉁불퉁하여 미생물들이 잘 부착 성장할 수 있는 표면을 제공하고 있으며, 운전 후에 형성된 미생물들이 여재 표면의 오목한 곳에 얇게 형성된 것을 볼 수 있었다. 여재 표면에 형성된 생물막 두께를 측정하기 위하여 실험에 사용되었던 여재를 인발하여 Acridine Orange로 부착미생물만을 염색한 후 공초점레이저주사현미경(Confocal Laser Scanning Microscope)으로 측정하여 Computer로 계산한 결과 최대두께 29.4 μ m, 최소두께 5.0 μ m였으며 평균값은 14.89 μ m로 여타 BAF공법의 생물막 두께인 200~300 μ m보다 매우 얇게 형성된 것을 알 수 있었다(Fig. 7, 8). 이처럼 호기성의 미생물층이 얇게

형성되면 바이오비드조의 미생물층 안쪽까지 산소가 고루 투과되어 전체 표면의 90%이상이 호기적 조건이 되므로 호기성 미생물에 의한 처리효율이 증가하는 것으로 판단되며 여재에 부착 성장하는 호기성 미생물이 항상 높은 활성을 갖게되어 세포동화작용에 의한 질소·인 처리 효율도 높게 나타나는 것으로 판단된다.⁷⁾

3.4 김치공장 폐수의 처리효율 및 처리특성

본 실험에 이용된 폐수의 성상은 Table 5에 제시하였으며 3회의 시료 채취에서 유입폐수의 농도 변화가 BOD₅ 기준으로 2배정도 차이가 있는 것으로 나타났고, Cl⁻농도는 4,000mg/l 이상인 것으로 나타나 생물학적 처리시 염분의 저해작용이 우려되었다. 그러나 BOD₅값이 COD_{Mn}값에 비하여 1.6 배 이상인 것으로 나타나 생분해성은 좋을 것으로 판단되었다. 본 실험을 수행하기에 앞서 첫 번째 채수한 폐수를 이용하여 순차적으로 유입량을 늘려준 결과 5일이 경과한 후 점차적으로 시스템이 안정화되어 처리효율이 일정하게 유지된 것을 확인할 수 있었다.

실험시 공기의 투입량은 10ml/min로 유지하였는데 이는 일반적인 생물학적 처리시스템에서의 공기 주입량의 약 1/20~1/50에 해당하는 매우 적은 양이다. 이와 같이 공기 투입량을 적게 한 이유는 생물반응기내에서의 공기 흐름이 많을 경우 발생할 수 있는 전단력과 wall effect를 최대한 줄여서 여재 표면에 형성된 미생물들의 폐수와의 반응 효율을 높게 유지하고자 한 것이며, 적은 양의 공기 주입으로 원하는 처리수질을 얻도록 하여 현장에 대응량으로 본 시스템을 적용하는 경우 운전비를 감소시키려는 것이다. Mann과 Stephenson(1997)⁸⁾ 역시 공기 대 유량비가 10 : 1

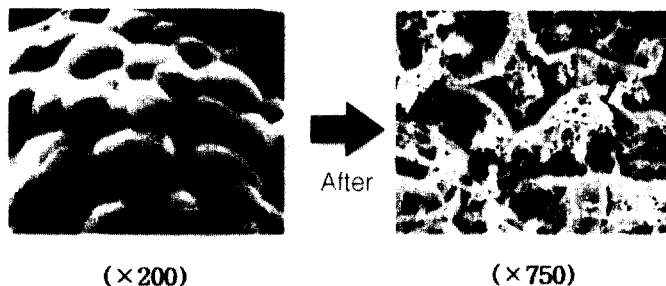


Fig. 6. Aerobic microbes on Biobead[®] medium.



Fig. 7. CLSM image of the microbe attached to the Biobead[®] media (×400).

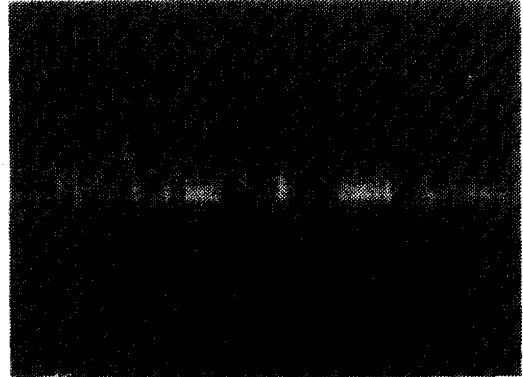


Fig. 8. CLSM image of the thickness of microbe attached to the Biobead[®] media (×400).

Table 5. Characteristics of kimchi plant wastewater

Parameter	Concentration(mg/ ℓ)		
	Influent #1	Influent #2	Influent #3
SS	365	243	290
Cl	4,331	4,083	4,154
COD _{Mn}	199	389	333
BOD ₅	330	700	586
T-N	44	51	60
T-P	3.8	8.8	6.2

보다 클 경우 본 실험에 사용된 것과 같은 packed-bed reactor 시스템에서는 오히려 산소 전달율이 낮아지고 wall effect의 영향을 크게 받아 처리효율이 감소한다고 보고한 바 있다.

Table 6과 7은 유입수질 및 반응시간을 변화시켜 운전하였을 때 각각의 처리수 농도 및 처리효율을 나타낸 것이다. 실험 결과 높은 염분농도(4,000mg/ℓ 이상)와 짧은 반응시간(2~3hrs)에도 불구하고 COD_{Mn}, BOD₅, SS 모두 높은 처리효율을 보였는데 COD_{Mn}의 경우 76~83%, BOD₅의 경우는 67~88%, SS의 경우 71~91%인 것으로 나타났다. 이와 같은 결과는 본 실험에 사용된 여재의 비표면적이 2,000m²/m³ 이상으로서 생물반응기 부피당 높은 미생물 농도가 유지되었기 때문인 것으로 판단되며 공기가 접촉하는 여재의 표면적이 상대적으로 큰 것도 또 다른 이유인 것으로 생각된다.

2.2 실험방법에 나타낸 것과 같이 역세 회수 및 주기는 BOD 부하량에 따른 예비실험 결과에 근거하여 결정하였는데 이때 RT=2.83에서 가장 높은 SS 처리효율을 보인 결과를 볼 때 본 실험에 사용된 역세주기는 SS의 경우 RT=2.83 부근에서 가장 최적의 처리효율을 보이는 것으로 판단된다. 이는 앞에서(3.2 처리특성 및 각단별 처리효율)에서 설명한 바와 같이 바이오비드 공법의 특성상 SS성분은 미생물에 의한 분해작용 보다는 주로 침출여과(내부여과) 방식으로 처리되기 때문이다.

특히 별도의 탈질 공정을 구성하지 않고 호기적 조건만으로 운전하였음에도 불구하고 T-N, T-P의 제거효율이 각각 51~63%, 62~81%으로 높게 나타났다는데, 이는 여재의 물리적 여과작용 및 여재 표면에서 증식하는 미생물의 세포동화율이 높기 때문인 것으로 추측된다. 본 실험에 사용된 김치

Table 6. Effluent concentration and treatment efficiency at different reaction times(RT)

Parameter	Concentration(mg/ ℓ)			
	Influent #2	Effluent RT=3.13	Effluent RT=3.13	Effluent RT=2.83
SS	243	50(79%)	71(71%)	53(78%)
Cl	4,083	1,527(63%)	1,568(62%)	1,757(57%)
COD _{Mn}	389	80(79%)	93(76%)	67(83%)
BOD ₅	700	82(88%)	94(87%)	120(83%)
T-N	51	20(61%)	20(61%)	25(51%)
T-P	8.8	1.7(81%)	2.4(73%)	2(78%)

Surface-loading rate at RT = 3.13 : 23.00m³/m² · day

Surface-loading rate at RT = 2.83 : 25.44m³/m² · day

Table 7. Effluent concentration and treatment efficiency at different reaction times(RT)

Parameter	Influent #3	Concentration(mg/ ℓ)	
		Effluent RT=2.83	Effluent RT=2.08
SS	290	26(91%)	35(88%)
Cl	4,154	1,580(62%)	1,118(73%)
COD _{Mn}	333	57(83%)	83(75%)
BOD ₅	586	93(84%)	196(67%)
T-N	60	22(63%)	-
T-P	6.2	2.4(62%)	1.8(71%)

Surface-loading rate at RT = 2.08 : 34.62m³/m² · day

공장 폐수의 C/N 비율이 4.5~7.6 정도로 높아서 풍부한 탄소원이 공급되는 호기적 상태에서 미생물들의 세포동화작용이 왕성하여 상대적으로 많은 양의 질소와 인 성분이 이용되는 것으로 판단된다. Awadallah (1998)⁹⁾ 등도 미생물 세포동화작용에 의한 질소성분의 감소를 보고한 바 있으며, Westerman (2000)¹⁰⁾ 등은 본 처리공정과 비슷한 BAF 공법을 이용한 돈사폐수처리시 용존산소가 존재하는 상태에서 약 60% 이상의 T-N 제거가 가

능하였음을 보고한 바 있다.

BOD, SS, T-N, T-P 등의 처리효율을 볼 때 4,000mg/ℓ 정도의 염분농도는 바이오비드 시스템의 처리효율에 크게 영향을 주지 않는 것으로 나타났다으며, 특이한 점은 Cl⁻농도 또한 57~73% 정도 제거되었다는 점이다. 이에 대한 정확한 기작은 알 수 없으나 Awadallah⁹⁾ 등(1998)은 Cl⁻이온이 세균 등의 성장에 이용된다고 보고한 예를 보아 본 바이오비드 시스템에서도 여재에 부착된 미

생물의 성장에 따른 이용일 것으로 생각된다. CI의 제거 현상은 향후 제거농도의 한계치, 제거기작에 대하여 더 많은 연구가 필요할 것으로 생각된다.

3.5 동력학적 처리모델

본 실험 결과를 바탕으로 상향류식 바이오비드 시스템에 의한 김치공장 폐수처리에 대한 동력학적 처리모델을 제시하기 위하여 CMBR (Completely mixed batch reactor)과 PFR(Plug-flow reactor)의 두 모델에 의한 계산값을 실측값과 비교·검증하여 보았다. 그 결과 반응시간이 3시간 이내로 짧아질 경우에는 CMBR 모델에 의한 계산값과 실험값이 잘 맞지 않았고 PFR 모델이 적당하다는 것을 알 수 있었다. 따라서 PFR 모델에 근거한 처리모델 반응식을 아래와 같이 도출하였다.

평형상태(steady state)에서 PFR에 대한 물질수지(Mass balance)식은 아래와 같이 표현될 수 있다.

$$QC = Q(C-dC) + rdV \tag{1}$$

- Q : Volumetric flowrate ($\ell \cdot \text{hr}^{-1}$)
- r : Reaction rate ($\text{mg} \cdot \ell^{-1} \cdot \text{hr}^{-1}$)
- C : Concentration ($\text{mg} \cdot \ell^{-1}$)
- V : Total volume of Biobead media (ℓ)

생물막(Biofilm)에 의한 기질 이용시 전체 반응

속도(r)는 일차반응으로 표현되므로 위의 물질수지식(1)에 $r=kC$ 를 대입하여 정리하면 아래와 같은 최종 반응식(2)을 얻을 수 있다.

$$\ln C_2 - \ln C_1 = kt \tag{2}$$

여기서 k는 반응속도상수(hr^{-1})이며, C_1 은 유입수 농도(mg/ℓ), C_2 는 유출수 농도(mg/ℓ), t는 반응시간(hr)을 나타낸다. (2)식을 이용하여 COD_{Mn} , BOD_5 , SS, T-N, T-P, CI 각각에 대하여 실측값을 대입하여 k값을 구한 결과 각각의 반응속도상수(k)는 약 0.58, 0.63, 0.66, 0.30, 0.48, 0.38hr^{-1} 로 계산되었다.

Fig. 9~13은 상기 모델의 예측치와 실측치를 비교한 결과를 그래프로 나타낸 것으로 그래프에서 보는 바와 같이 처리수질의 실측값과 PFR 반응모델에 의한 예측치가 잘 일치하는 것을 알 수 있었다. 한편 SS의 경우는 PFR 반응모델과 실험값이 잘 일치하지 않았다(Fig. 14). 채류시간을 짧게 하여 투입량을 증가시켰을 때 오히려 SS 농도가 낮게 유출되는 것으로 나타났는데 이는 유입속도가 증가할수록 여재 사이의 공극이 폐수 중의 SS성분에 의해 빠르게 폐쇄되면서 여과 기능이 오히려 더욱 더 증가되었기 때문인 것으로 해석할 수 있다. 앞 절(3.2)에서 설명한 바와 같이 상향류식 바이오비드 시스템에서 SS의 경우 여재 자체의 물리적인 여과작용으로 인하여 제거되는 부분이 생물학적으로 제거되는 부분보다 크기 때문에

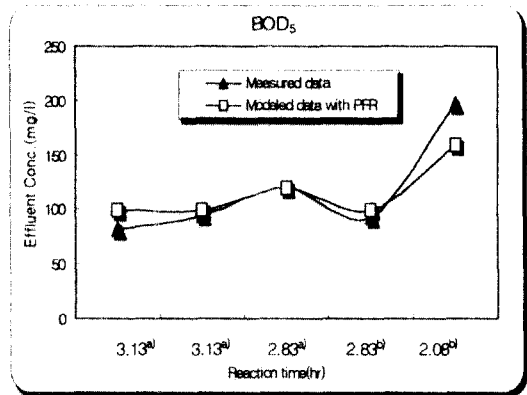
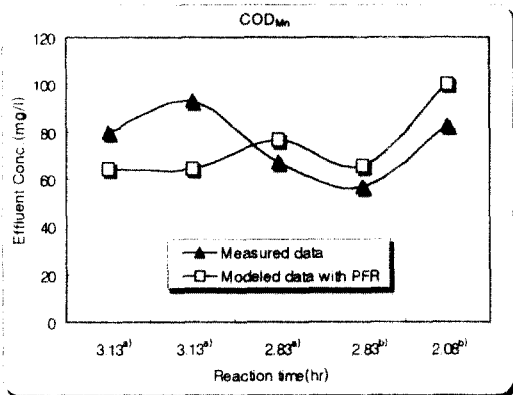


Fig. 9. Comparison of model predictions with measured data of COD_{Mn} .

a) Inf. Conc.: COD_{Mn} : 389mg/ℓ b) Inf. Conc.: COD_{Mn} : 333mg/ℓ

Fig. 10. Comparison of model predictions with measured data of BOD_5 .

a) Inf. Conc.: COD_{Mn} : 389mg/ℓ b) Inf. Conc.: COD_{Mn} : 333mg/ℓ

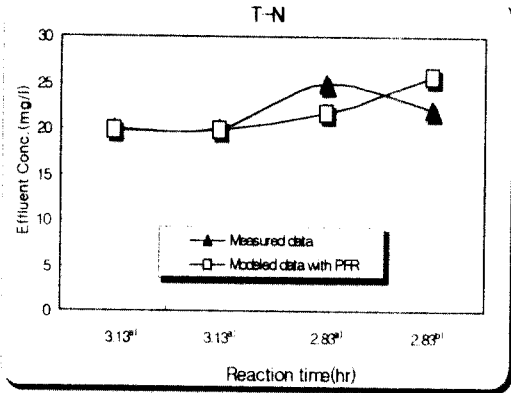


Fig. 11. Comparison of model predictions with measured data of T-N.

a) Inf. Conc.: COD_{Mn}: 389mg/ℓ b) Inf. Conc.: COD_{Mn}: 333mg/ℓ

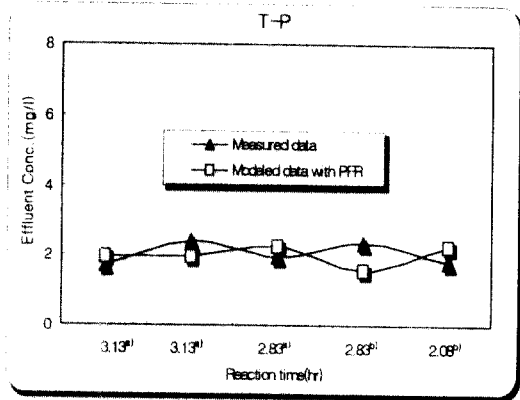


Fig. 12. Comparison of model predictions with measured data of T-P.

a) Inf. Conc.: COD_{Mn}: 389mg/ℓ b) Inf. Conc.: COD_{Mn}: 333mg/ℓ

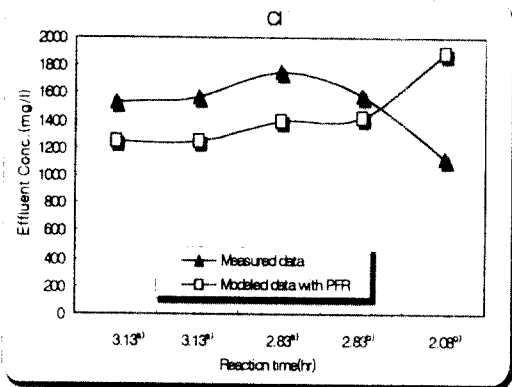


Fig. 13. Comparison of model predictions with measured data of Cl⁻.

a) Inf. Conc.: COD_{Mn}: 389mg/ℓ b) Inf. Conc.: COD_{Mn}: 333mg/ℓ

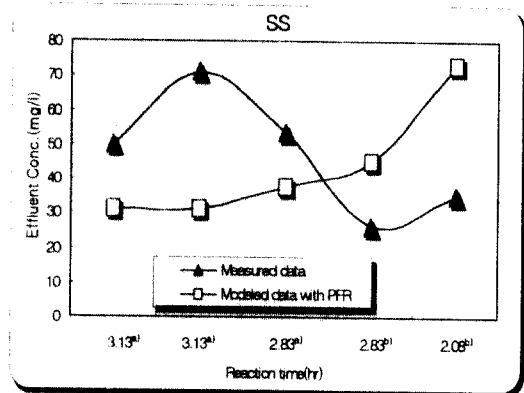


Fig. 14. Comparison of model predictions with measured data of SS.

a) Inf. Conc.: COD_{Mn}: 389mg/ℓ b) Inf. Conc.: COD_{Mn}: 333mg/ℓ

PFR의 반응 특성을 나타내지 않는 것으로 설명할 수 있다. 이를 비추어 볼 때 바이오비드 공법의 여과특성은 심층내부여과 방식으로 SS성분이 여과층 깊숙이 침입하여 내부에서 포착 여과되는 방식으로 볼 수 있으며, 따라서 SS성분들이 여과층 전체에 광범위하게 분산되어 여과작용이 일어나므로 그에 따라 여과지속시간이 길어지는 장점이 있다.

결국 SS를 제외한 나머지 COD_{Mn}, BOD₅, T-N, T-P, Cl⁻의 경우 상향류식 바이오비드 시스템을 이용한 김치공장 폐수의 동력학적 처리기작은 PFR 모델을 따르는 것으로 판단되며 이는 Mann과 Stephenson⁸⁾가 제시한 상향류식 packed-bed

reactor의 반응특성과도 일치하는 결과이다.

이와 같은 반응모델을 이용하면 각 수질 항목별로 유입수의 농도와 생물반응기내에서의 반응시간만 가지고도 처리수질을 쉽게 예상할 수 있으므로 바이오비드 공법을 실제 현장에 설치하였을 때 그 처리효율 및 처리수질을 쉽게 예측할 수 있으며 현장에서 처리시설의 성능 파악에 매우 유용하게 활용할 수 있을 것이다.

4. 결론

바이오비드 공법을 이용하여 오·폐수의 처리특성과 부차 생물막의 형태적 특징을 알아보기 위

해 실험한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 바이오비드 공법에 의하여 김치공장 폐수를 처리한 결과 높은 염분농도(4,000mg/ℓ 이상)와 짧은 반응시간(2~3hrs)에서도 COD_{Mn}의 경우 76~83%, BOD₅의 경우는 67~88%, SS의 경우 71~91%로 높은 처리효율을 보였다.
2. 별도의 탈질과정 없이 호기적 조건에서 운전하였음에도 불구하고 T-N, T-P의 제거효율이 각각 51~63%, 62~81%으로 높게 나타났다.
3. 상향류식 바이오비드 시스템을 이용한 김치공장 폐수처리의 동력학적 처리모델은 SS를 제외한 모든 항목에서 PFR(Plug-flow Reactor)의 반응 특성을 나타내었다.
4. PFR의 처리모델에서 COD_{Mn}, BOD₅, T-N, T-P, Cl의 반응속도상수(k)는 각각 0.58, 0.63, 0.30, 0.48, 0.38hr⁻¹인 것으로 계산되었다.
5. 역세기준을 알아보기 위한 실험결과 처리수내의 SS농도 기준으로 0.5kg BOD/m³·d의 경우에는 운전시작 후 22시간 안에 한번 이상 또한 1.0kg BOD/m³·d의 경우에는 운전시간 기준으로 14시간 안에 역세를 해주어야 하는 것으로 나타났다.
6. 물리적 여과와 생물학적 분해에 의한 처리효율을 실험한 결과 바이오비드 반응조에서 COD, BOD, T-N, T-P는 생물학적 분해와 세포동화작용에 의하여 43~66%가 제거되었으며 SS는 70%이상이 물리적 여과 및 흡착 등의 여과기능에 의하여 처리되었다.
7. 각 단별 처리효율을 알아보기 위한 실험결과 3개의 바이오비드조를 직렬로 연결하여 운전하였을 경우 COD_{cr}, COD_{Mn}, BOD, T-N는 공기가 주입되는 1단에서 각각 52.3%, 38.8%, 62.5%, 40.0%로 가장 높은 처리효율을 보였고, SS는 2단에서 47.5%로 가장 높은 처리효율을 보였으며, T-P 또한 2단에서 29.2%로 가장 높은 처리효율을 보였다.
8. 여재에 형성된 생물막의 형태적 특징을 살펴본 결과 호기성 미생물층이 여재표면의 오목한 곳에 5.0 μ m~29.4 μ m의 범위로 매우 얇게 형성되어 있었다.

5. 참고 문헌

1. 조광명, 최의소, *환경공학*, 청문각 (1985).
2. Stensel, H. C., and Reiber, S. H., Industrial wastewater treatment with a new biological fix-film system, *Environment program*, Vol. 2, No. 110 (1983).
3. Legise, J. P., Gilles, P., and Mureand, H., A new development in biological aerated filter bed technology, *Paper presented at the 53rd Annual Water Pollution Control Federation Conference*, 3-6 Agust, Lasvegas, NV (1980).
4. Stephenson, T., Mann, A., and Upton, J., The small footprint wastewater treatment process, *Chem. Ind.*, 14, 533-536 (1993).
5. 환경부, *수질오염공정시험법* (1996).
6. APHA, AWWA, and WEF, *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, 19th Ed., UBP (1995).
7. Boller, M. W., Gujer, and Tschui, M., Parameters Affecting Nitrifying Biofilm Reactors, *Second International Specialized Conference on Biofilm Reactors*, September 29th-October, 15-25 (1993).
8. Mann, A. T., and Stephenson, T., Modeling biological aerated filters for wastewater treatment, *Wat. Res.* Vol. 31, No. 10, 2443-2448 (1997).
9. Awadallah, R. M., Soltan, M. E., Shabeb, M. S. A., and Moalla, S. M. N., Bacterial removal of nitrate, nitrite and sulphate in wastewater, *Wat. Res.* Vol. 32, No. 10, 3080-3084 (1998).
10. Westerman, P. W., Bicudo, J. R., and Upflow biological aerated filters for the treatment of flushed swine manure, *Bioresource Technology*, Vol. 74, 181-190 (2000).