

생물막공법에 의한 고농도 유기폐수 처리시 생물막 과부착 제어

〈1〉

임재명

강원대 환경공학과 교수

I. 서론

생물학적 처리공정의 대표적 공법인 활성슬러지공법은 1917년 Andern과 Lockett에 의하여 개발되어 도시하수를 중심으로 과거 80여년간 많은 연구가들에 의하여 연구가 수행되어 왔으며, 실제 다양한 규모의 처리시설에 적용되어 수질오염 방지에 많은 기여를 하였다. 또한 도시하수외에 축산폐수와 같은 고농도 유기폐수와 일부 전처리과정을 동반한 산업폐수까지도 적용되고 있다. 그러나 활성슬러지와 같은 부유증식(suspended growth)공정들은 운전 및 운영상에 있어 슬러지반송, 팽화(bulking), 과다한 슬러지 발생, 그리고 제한된 부하조건 등의 몇가지 문제점을 내포하고 있다. 따라서 최근에는 운전의 어려움을 해결하고, 반응조내의 미생물 확보에 유리함 등의 많은 장점을 지닌 생물막공정(biological film process)¹⁾에 대한 관심이 고조되고 있다.

생물막공정은 1865년 Alexander Muller에 의한 연구를 시작으로 하여 부유성장공정인 활성슬러지공법보다 더 오랜 역사를 지녔음에도 불구하고 1970년대 후반에 이르러 연구가 활성화 되기 시작하였는데, 최근에는 공정의 개발과 더불어 새로운 여재(media)의 개발로 고농도 폐수의 적용과 다양한 미생물을 확보할 수 있게 되었다. 그러나 모든 생물막공정들은 고농도의 유기폐수를 적용하여 처리할 경우 시간이 경과함에 따라 미생물의 과다 증식으로 인하여 생물막이 탈리되고 처리수의 수질이 악화되며, 여재의 특성에 따라 공극이 폐쇄되어 처리효율 감소등의 문제를 유발하게 된다. 그러므로 공정개발과 더불어 생물막공정의 단점을 보완하기 위한 운전시스템의 개발도 중요한 연구과제로 대두되었다.

본 연구는 고농도 유기폐수인 돈사폐수를 이용하여 생물막공정 적용시 발생하는 생물막의 과부착을 제어하기 위한 인위적 자산화단계(endogenous respiration phase)를 도입하여 실험실 규모 반응조에서의 처리도 및 설계를 위한 기초자료 도출에 중점을 두었다.

II. 실험

본 연구의 실험은 생물막의 부착특성과 관계하여 처리수질 및 인위적 자산화에 의한 슬러지 감소 등을 평가하였고, 이를 토대로 인위적 자산화 단계가 도입된 호기성 고정생물막/준혐기성 고정생물막 반응조(aerobic fixed biofilm reactor / anoxic fixed biofilm reactor; 이하 AFBR/ANFBR) 공정 실험이 수행되었다.

1. 실험장치

생물막 실험에 이용된 반응조는 부착실험과 탈리실험의 목적으로 10ℓ 용량의 5mm plexiglass를 사용하여 2개조를 제작하였고, 그림 1에 나타낸 바와 같이 침적형 생물막 포기조와 침전조로 구성되어 있으며, 일정 수운을 유지하기 위하여 항온시설을 갖추었다. 또한 침전조는 유량에 따라 HRT를 2시간으로 유지할 수 있도록 하였다. 반응조의 운전은 20℃의 항온상태에서 실시되었고, 운전기간중의 DO 농도는 2~3mg/ℓ로 유지되었다. 반응조 내부는 4.4cm×6.6cm×2cm의 망상형 여재를 운전기간 중 부착 및 탈리 미생물량 측정이 가능하도록 각 반응조에 45개씩, 총 90개를 채웠다. 시료는 정량펌프를 이용하여 부하의 변화를 주어 주입하였고 유입수의 온도와 농도의 변화를 최소화하기 위하여

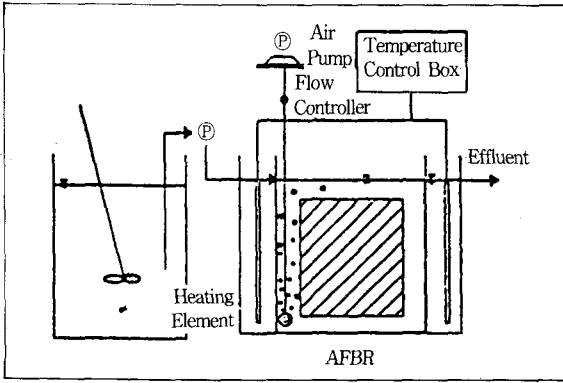


그림 1. Schematic diagram of aerobic fixed biofilm reactor(AFBR) for attachment and endogenous respiration, experiment.

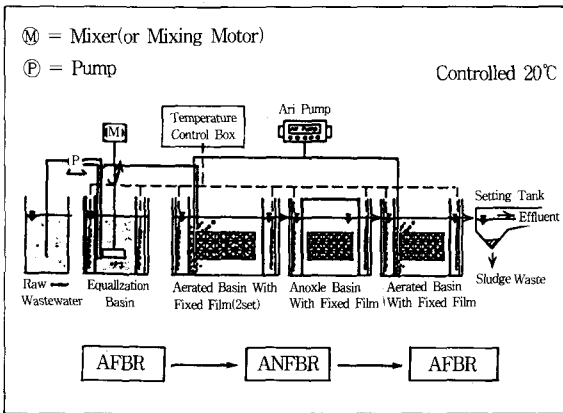


그림 2. Schematic diagram of AFBR / ANFBR process.

항온시설과 교반장치를 동반한 균등조를 설치하였다.

인위적 자산화를 도입한 AFBR / ANFBR의 배치는 그림 2에 제시된 바와같이 유기물 제거와 질산화를 위한 호기성 고정생물막(AFBR)과 직렬로 탈질공정을 위한 준혐기성 고정생물막(ANFBR), 탈질 gas로 인한 침전효율 저감 및 미처리 유기물의 산화를 위한 호기성 고정생물막(AFBR), 그리고 침전조로 이루어졌다. 반응조의 용량은 초기 AFBR조의 경우 인위적 자산화단계를 두게 되므로 10 l 용량이 2조로서 20 l의 용량을 가지고 있으나, 항시 운전되는 반응조의 용량은 10 l 이고, 준혐기성 생물막조와 최종 호기성 고정층생물막 반응조는 5 l 용량으로 제작되었다. 내부의 여재는 초기 접촉조에 20×22×2cm 크기의 Sun Lock 여재 3매가 연직방향 3cm 간격으로 설치되었고 여재의 부착면적은

모든 생물막공정들은 고농도의 유기폐수를 적용하여 처리할 경우 시간이 경과함에 따라 미생물의 과다 증식으로 인하여 생물막이 탈리되고 처리수의 수질이 악화되며, 여재의 특성에 따라 공극이 폐쇄되어 처리효율 감소등의 문제를 유발하게 된다. 그러므로 공정개발과 더불어 생물막공정의 단점을 보완하기 위한 운전시스템의 개발도 중요한 연구과제로 대두되었다.

1,056m²이며, ANFBR과 최종 AFBR은 동일 규격의 여재를 각각 2판을 설치하여 각 반응조의 부착면적이 0.704m²이다. 호기성 반응조는 산기식 포기기(aerator)를 이용하여 운전기간중 DO농도를 2~3mg/l로 유지하였다. 준혐기성조는 공기를 차단하기 위하여 덮개로 밀봉하였고, 반응조 내부의 DO농도는 0.2mg/l 이하를 유지할 수 있었다. 최종 침전조는 체류시간을 2시간으로 유량에 따라 조절할 수 있도록 제작하였다.

2. 실험방법

생물막 부착 및 탈리 실험의 시운전은 초기 glucose와 돈사폐수를 희석 혼합하여 batch형으로 운전하였고 옅은 생물막 형성이 육안으로 관찰된 후 돈사폐수만을 연속적으로 주입하였다. 부하의 변화는 낮은 부하에서 높은 부하로 3개의 부하에서 수행되었는데, 각각의 운전조건은 다음 표 1과 같다. 자료의 분석은 정확도를 위

표 1. Operation condition of attachment and endogenous respiration experiment.

	RUN 1	RUN 2	RUN 3
Temp(°C)	20	20	20
pH	7.8~8.9	7.8~8.9	7.8~8.9
DO(mg/l)	2~3	2~3	2~3
Media surface area(m ²)	1,056	1,056	1,056
HRT(days)	2.0	1.0	0.5
Loading rate (g COD / m ² · day)	14.1~21.6 (6.77~8.29)	25.2~38.0 (12.4~16.2)	38.6~57.0 (18.6~24.8)

()은 BOD loading rate.

하여 미생물이 부착된 후 인위적 자산화를 통한 부착생물막의 탈리반응을 2회 실시된 이후에 수행되었다. 여재에 부착된 생물막의 두께는 micrometer를 이용하여 측정하는 방법과 물의 밀도, 생물막의 비중, 여재의 표면적과 미생물막의 습윤중량을 이용하여 측정하는 방법이 있는데, 본 실험에서는 후자의 방법으로 분석하였다.

AFBR/ANFBR공정은 유입부하량의 변화에 따라 AA1에 AA5로 구분하였고, 운전조건은 표 2와 같다. 인위적 자산화단계와 처리단계는 15일 간격으로 1개 반응조씩 교대로 운전하였는데, 자산화단계로서의 전환은 주입시료를 차단하고 포기만을 수행하였고 증발로 인한 수위 감소시 유출수 일부를 보충하였다. 반응조의 운전은 20°C 이상의 수온에서는 온도조절을 하지 않았으며, 온도가 20°C 이하로 낮아지는 계절에는 20°C 이상을 유지하도록 가온을 실시하였다.

본 연구에 사용한 media는 Sun Lock^(TM) 여재로서 두께 2cm에 비표면적이 400m²/m³이고, 구성형태는 망상(網狀: Lock, Luffa)형으로 기타 플라스틱 여재에 비하여 비표면적과 공극율이 크고, 생화학적으로 안정하며 가벼운 특징이 있다.

표 2. Operation conditions of AFBR / ANFBR process.

Conditions	AA1	AA2	AA3	AA4	AA5
HRT (days)	2.0	1.0	0.67	0.5	0.4
Surface Loading Rate (g BOD / m ² · day)	7.12	14.7	21.9	28.6	35.6
Volumetric Loading Rate (kg BOD / m ³ · day)	0.75	1.56	2.31	3.02	3.76

3. 시료의 성상 및 분석

본 실험에서는 고농도 유기폐수로 돈사폐수를 이용하였는데, 일반적으로 돈사폐수는 축사의 형태에 따라 성상이 상이한 것으로 알려져 있다. 본 실험의 돈사폐수는 400두 규모의 시멘트형 돈사 배출수로서, 분 성분은 인력으로 수거되며 유출되는 폐수는 주로 뇨 성분과 청소수 및 잔류식수로 구성된 것이다. 연구기간 중 AFBR/ANFBR 공정에 사용한 시료는 돈사의 유출부에 위치한 침전 저류조로부터 채취된 것으로 폐수의 성상은 표 3에 제시한 바와 같다.

시료분석은 Standard Methods²⁾에 준하여 측정하였으며, BOD 실험은 질산화에 의한 산소의 소모량을 없

애기 위하여 제품화된 질산화방지제(nitrification inhibitor formula 2533: HACH Company)를 사용하였다.

표 3. Characteristics of piggery wastewater

(unit: mg / l)

Constituents	Range	Average
pH	7.8~8.9	8.2
TBOD ₅	1,190~1,850	1,640
SBOD ₅	830~1,360	1,080
TCOD _{Cr}	2,940~3,800	3,200
SCOD _{Cr}	1,660~2,600	2,460
TBOD ₂₀	1,760~2,810	2,540
SBOD ₂₀	1,180~1,960	1,820
SS	345~542	464
VSS	218~455	384
TKN	486~754	540
NH ₃ -N	384~586	430
NO ₂ -N	-	-
NO ₃ -N	-	-
T-P	29~52	43
Alkalinity(asCaCO ₃)	2,850~3,600	3,250

III. 결과 및 고찰

1. 생물막의 부착특성

생물막의 부착특성 및 과부하에 의한 생물막의 변화를 고찰하기 위하여 생물막의 두께, 여재 표면적당 VSS 함량 그리고 처리수질 등이 분석되었다.

그림 3은 운전기간에 따른 생물막의 두께변화를 제시한 것으로 운전초기에는 부하량에 관계없이 생물막의 두께 증가는 완만하게 이루어지나 운전 4일후 부터는 부하량이 큰 RUN 3의 두께 증가가 뚜렷하게 빨리 이루어졌고 1,200 μm 두께의 막형성 이후부터 다시 완만한 증가를 하는 것으로 나타났다. 200 μm 이상의 막 두께를 형성하는데 RUN 3은 약 4일이 소요되었으며 RUN 1과 RUN 2는 약 6일이 소요되는 것으로 나타났고, 1,200 μm의 두께에 이르는 시간은 약 15일이 소요되었다.

그림 4는 생물막의 두께 증가에 따른 여재 표면적당 VSS 함량을 나타낸 것으로 RUN 1과 RUN 2는 200 μm 두께의 생물막에 이르는 동안 급격한 증가를 보였고 200 μm 이상의 생물막에서는 부하에 따라 다소 차이는 있으나 일정한 VSS량을 유지하였으며, 또한 1,000~

1,100 μm 이상에서는 VSS 함량이 감소하는 것으로 나타났다. RUN 3은 500 μm 이상의 두께에서는 급격하게 떨어지는 것으로 나타났다. 따라서 1,000~1,100 μm 이상에서의 VSS 함량의 감소는 망상형 여재의 외부를 덮은 생물막이 너무 두꺼워 산소 전달능력의 감소로 인하여 호기성 미생물이 상대적으로 작아진 것을 의미한다. 또한 일정량의 두께 이상에서의 생물막의 운전은 미생물의 활성도가 증진되지 않으며, 오히려 내부층으로의 기질의 이동이 미약하여 기질의 제한이 일어나며, 이로 인한 내호흡이 촉진되어 생물막의 탈리현상이 초래될 수 있다고 판단된다.

그림 5는 생물막의 증가에 따르는 COD 제거율(농도 \times 유량 / 시간)을 나타낸 것으로 막의 두께가 200 μm 까지는 COD 제거율이 급격한 증가를 하여 최대의 제거율을 나타내고 200 μm 이상에서는 막두께가 증가함에 따라 일정한 제거율을 유지하였다. 또한 1,100~1,200 μm 이상에서는 제거율이 감소하는 것으로 나타났는데 이러한 결과는 외부여재의 막두께 증가로 인한 내부여재에서의 VSS 함량의 감소에 기인한 것으로 판단된다. 생물막 두께 증가에 따른 기질의 제거 연구인 Huang 등³⁾의 연구결과에서는 1,500 μm 의 생물막 두께에 도달할 때까지도 계속 기질의 제거율이 증가한다고 하였는데, 이 결과는 반응조 내의 DO농도를 16mg/l 까지 상승시켜 과다한 DO하에서 이루어진 것이고 DO농도가 3~5mg/l 의 조건하에서는 본 연구 결과와 일치한 약 1,000 μm 까지 막의 두께 증가와 더불어 일정한 기질 제거율을 나타낸다고 하였다.

그림 3의 두께 증가 변화곡선에서 부하에 관계없이 부착 결과일수 약 15일경인 두께 1,100 μm 에서 완만한 증가추세를 보여주고 있으며, 그림 4와 그림 5에서 VSS 함량과 COD 제거율은 생물막의 두께 약 1,100~1,200 μm 에서 감소 추세를 보였는데, 이때의 경과일수는 그림 3과 비교하여 볼 때 약 15일 부근임을 알 수 있다. 일반적으로 부하의 변화에 따라 생물막의 부착일수와 과부착 정도는 차이가 있을 것으로 판단되나, 본 실험이 수행된 부하범위내에서는 큰 차이를 찾아 볼 수 없었다. 이는 부하의 범위가 작은 이유도 있겠지만, 인위적 자산화를 수행한 후에 고찰되었으므로 미생물의 활성도가 부하의 변화에 잘 적응된 것으로 판단된다.

따라서 본 실험의 결과 생물막의 과부착과 처리수질의 악화는 약 15일경 부터였으며, 이때의 과부착 생물막의 두께는 약 1,100 μm 이상이였다.

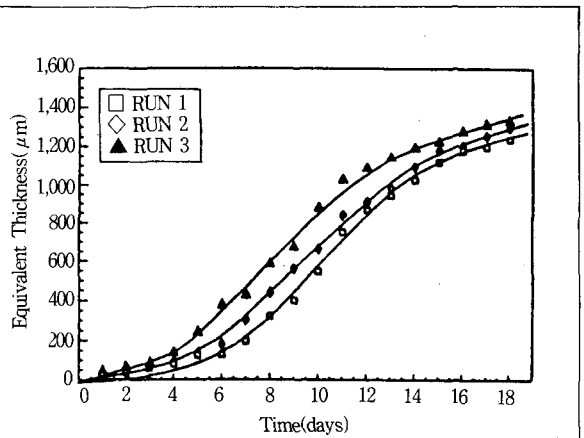


그림 3. Variations of biofilm thickness according to operating time.

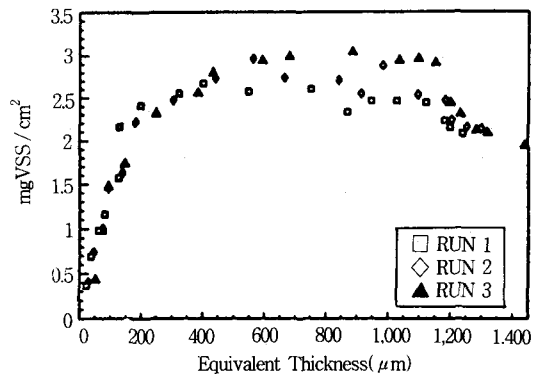


그림 4. Variation of VSS contents per unit area according to biofilm thickness

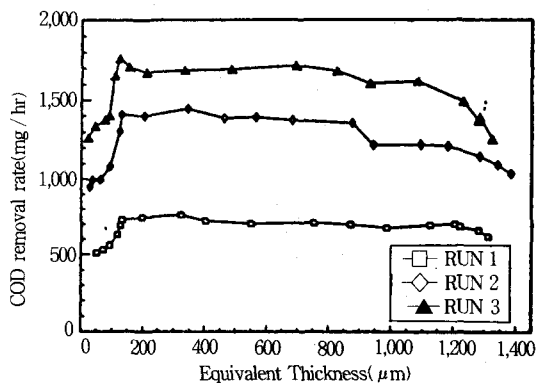


그림 5. COD removal rate according as thickness increased