



교차흐름식 모듈 충전 hybrid 혐기성여상의 기·액·고 분리능 및 슬러지보유능

Role of Crossflow Module Media in Gas-liquid-solid Separation and Biomass Retention in Hybrid Anaerobic Filter

장 덕^{1*} · 채희왕¹ · 배형석¹ · 정 인¹ · 한상배² · 허준무² · 홍기호³

Chang, Duk^{1*} · Chae, Hee-Wang¹ · Bae, Hyung-Suk¹ · Chung, In¹ · Han, Sang-Bae² · Hur, Joon-Moo² · Hong, Ki-Ho³

1 건국대학교 환경공학과, 2 (주)그린기술산업, 3 건국대학교 신기술융합학과

(2009년 11월30일 접수, 2009년 12월7일 채택)

Abstract

Performances and internal behaviors of the upflow hybrid anaerobic filters treating a dairy wastewater were analyzed to identify the functions and roles of the modular crossflow media and sludge bed layer and to discover their interrelationship in the filter. The media could perform independent biological and physical separation role without buildup of sludge bed, while the role of sludge bed was dependent on the function of the media. The filter packed with the crossflow media did not necessarily require the formation of sludge bed when treating a dairy wastewater. Biological contribution of the media was controlled by that of biologically active sludge bed complementing mutually each other. The gas-liquid-solid separation capability of the media was indispensable to ensure the active biological role of sludge bed, since sludge bed buildup without the media had no independently effective biological function. It was believed that the filter in itself could also function as a selector for physical gas-liquid-solid separation resulting in selectively concentrating particles with superior settleability in sludge bed. The sludge bed in the filter played a key role in the physical solids capture from influent as well as biological organics removal.

Key words : hybrid anaerobic filter, crossflow module, gas-liquid-solid separation, sludge bed, dairy wastewater

주제어 : 하이브리드 혐기성여상, 교차흐름식 모듈, 기·액·고 분리능, 슬러지베드, 유기공폐수

1. 서론

최근의 하폐수처리는 수자원보호 차원뿐만 아니라 지구 온난화 등 지구적 차원의 문제와 연결되면서, 저에너지소비형 나아가 에너지생산형 처리기술의 개발 및 실용화 필요성이 더욱 높아지고 있다. 재생에너지를 효과적으로 회수하는 동시에 유기물을 경제적으로 안정화시킬 수 있어 과거부터 연구되어온 혐기성처리공정은 이러한 새로운 시대적 요구

에 부응할 수 있는 유력한 기술의 하나이지만, 호기성공정에 비해 반응속도가 느리고 처리효율이 낮으며 환경조건에 민감하다는 등의 이유로 그 적용상 제한을 받아오고 있다. 혐기성반응의 단점을 극복하기 위하여 필요한 핵심기술은 고농도의 혐기성 미생물을 안정되게 확보하는 데 있다. 따라서 고효율 혐기성처리에 관한 연구 및 개발은 혐기성여상(anaerobic filter)이나 상향류식 혐기성 슬러지블랭킷(upflow anaerobic sludge blanket, UASB) 반응조 등으

* Corresponding author Tel:+82-2-2201-6392, Fax:+82-2-2201-6392, E-mail: dchang@konkuk.ac.kr(Chang, D.)

로 대표되는 부착성장식 공정의 개발에 집중되어 왔다. 이 중 혐기성여상은 반응조내 매체를 충전하여 부착미생물의 고형물체류시간을 장기간 유지함으로써 고농도 유기폐수를 고효율로 처리할 수 있으며, 부하의 변동이 큰 경우에도 운전이 매우 안정적이고 장시간의 가동중지 이후에도 신속한 재가동이 가능하며, 슬러지 생산량이 적고 구조가 간단한 장점을 가지고 있다 (Speece, 1996). 그러나 비균일 충전식(random packing) 혐기성여상에서는 매체 및 충전방법에 따른 폐쇄나 단회로현상 발생 문제점 등의 심각한 운전상 단점에 따른 일부 현장적용 실패사례도 찾아볼 수 있어 적용상에 제약을 받아왔다. 따라서 고농도SS에 불리한 UASB를 제외한 유력한 부착성장식 혐기성공정은 상부에 모듈형식의 공극율이 높은 매체를 충전하여 기·액·고 분리가 뛰어나고 하부에는 고농도 슬러지층을 보유할 수 있는 상향류식 hybrid형 혐기성여상이라 할 수 있다 (Miyahara *et al.*, 1995). Hybrid형 혐기성여상에 사용가능한 여러 매체중 유력한 것의 하나는 무게감소와 공극율 및 매체비표면적 등을 극대화할 수 있는 모듈형식의 교차흐름식 매체(modular crossflow media)이며, 이를 충전한 여상의 다양한 폐수에 대한 충전율별 처리효율 중심의 처리특성이 보고되어 왔다 (Young and Young, 1991; Di Berardino *et al.*, 1997; Bello-Mendoza and Castillo-Rivera, 1998; Wu and Tay, 2000). 최근에는 생활하수의 처리에 hybrid 혐기성여상을 적용하려는 시도가 이루어지고 있으며(Chang *et al.*, 2004; Ioannis and Sotirios, 2006), 높은 수리학적 부하에 견딜 수 있는 교차흐름식 모듈충전 hybrid 혐기성여상의 장점을 이용하여 이를 호기성여상과 결합한 시스템의 만족할 만한 유기물 및 질소 동시제거가 보고된 바도 있다 (Chang *et al.*, 2004). 그러나, hybrid 혐기성여상 공정의 설계 및 운전 최적화를 위해서는 운전조건에 따른 여상구성 각 부분의 내부거동과 물리적 및 생물학적 기능을 보다 면밀히 파악할 필요가 있다.

따라서 본 연구에서는 유기공폐수를 대상으로 모듈충전율별 hybrid 혐기성여상과 매체 비충전 혐기성반응조의 처리특성과 운전조건별 여상내부의 거동 변화에 대한 비교분석을 통하여, 교차흐름식 모듈과 하부슬러지층 각각의 물리적, 생물학적 기능 및 역할과 기여도, 그리고 모듈과 하부슬러지층간의 상호관계를 파악하고자 하였다.

2. 실험재료 및 방법

본 연구에 사용한 혐기성여상시스템의 구성은 Fig. 1과 같다. 모듈화된 교차흐름식 매체를 각각 55% 및 85%로 충

진한 두 개의 소규모 파일릿급 혐기성여상시스템과 매체가 충전되지 않은 한 개의 비충전 혐기성반응조시스템을 동시에 운전하였다. 비충전 혐기성반응조는 혐기성여상내 충전된 교차흐름식 모듈의 기능을 명확히 규명하기 위한 대조 반응조(control reactor)로 사용하였으며 모듈 비충전을 제외하면 혐기성여상과 동일하게 제작하였다. 각 반응조의 유효수심은 1,125mm, 공탑용적은 36.8L이다. 폐수유입은 상향류식으로 peristaltic 펌프를 사용하였다. 또한, 여상하부에 유입되는 폐수의 흐름을 균등화시켜 편류현상을 방지하기 위하여 유입관말단을 수평축에 대하여 90° 각도로 여상 바닥방향으로 설치하였다. 여상하부는 슬러지생성확인 및 슬러지배출이 용이하고, 유입수가 잘 분산될 수 있도록 역사각별 형태로 제작하였다. 반응조 높이별 내부거동을 파악하기 위하여 여상하부로부터 5cm간격으로 시료채취구를 8개, 그 이상의 높이에서는 11cm간격으로 5개를 설치하였다. 또한, 외부공기의 침입 및 발생가스의 누출을 방지하기 위하여 여상상부 유출수 배출부에 U자형 water trap을 설치하였다. 소화가스의 포집은 가스치환식 부상형 포집장치를 이용하였으며, 반응조 온도를 35±1°C로 유지하기 위하여 외부에 피복니크롬선을 부착시키고 반응조하부의 온도센서와 연결된 자동온도조절장치를 이용하였다.

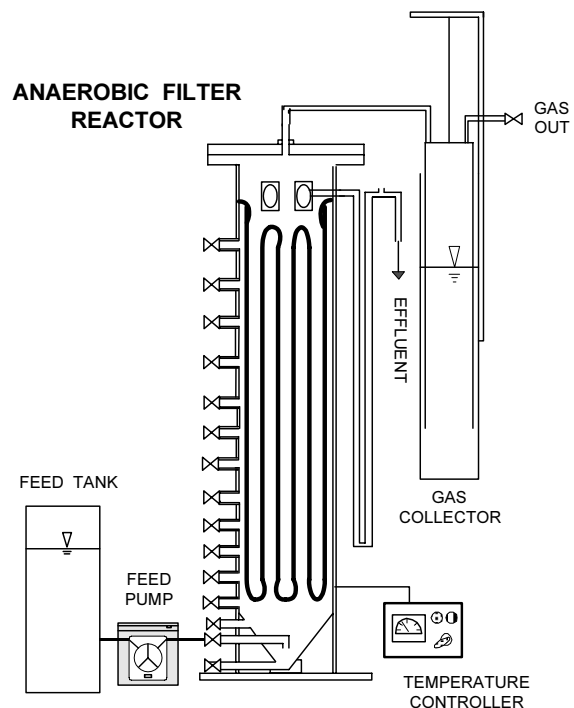


Fig. 1. Schematic diagram of anaerobic filter system.

교차흐름식 모듈의 모식도 및 물리적 특성은 Fig. 2 및 Table 1과 같고, 모듈은 골(flute)이 파진 파형판을 교차로 붙여 제작하였으며, 단위 모듈의 가로×세로×높이를 190×190×110mm로 하여 설계 및 제작하였다. 모듈충전율은 수심기준으로 각각 55% 및 85%가 되도록 여상 수면 하 상부에 균일하게 충전하였다.

반응조는 체류시간 1~5일, 유기물부하율은 1~13kg COD/m³/d범위에서 운전하였다. 유입수는 A유업폐수를 사용하였는데 고농도 유지류에 의한 영향을 최소화하기 위하여 폐수처리장 부상분리조 유출수를 사용하였으며, 그 성상은 Table 2와 같다. 유가공폐수는 생산공정 특성상 일변화 및 계절적 변화가 매우 크므로 유입수 기준COD를 10,000 mg/L로 설정하고 이보다 낮은 경우 실제폐수에 A유업의 유유제품을 추가하여 조정하였다.

식중물질은 본 연구의 목적상 외부 혐기성소화슬러지의 투입 및 인출 효과를 알아보기 위하여 도시하수 혐기성소화슬러지 및 기존의 유가공폐수 혐기성처리 유출수를 혼합한 후 5일간 보관한 후 1일간 침전시킨 후 그 상정액만을 사용하였다. 모든 분석방법은 미국공중보건협회의 표준시험법(APHA, 2000)에 따랐고, 혐기성여상 높이별 실험은 높이별 각 시료채취관에서 정채되어 있는 초기시료 20 mL정도를 배제한 후 채취하여 분석하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 매체모듈 충전여상 및 비충전 반응조의 처리성능

유가공폐수를 대상으로, 교차흐름식 모듈 충전 hybrid 상향류식 혐기성여상과 비충전 대조 혐기성반응조의 처리성능을 비교하여 모듈충전 효과를 파악하고자 하였다. 모듈충전율 55% 및 85% 혐기성여상 모두 체류시간 1일에서도 처리수의 pH, ORP 및 알칼리도 등 화학적 특성은 양호한 혐기성 상태하의 값을 유지하였으나, 비충전 대조 혐기성반응조의 경우에는 체류시간 5일에서도 pH가 5.6으로 급격히 저하하는 등 정상적인 운전이 어려웠다. 모듈충전 여상 및 비충전 대조반응조에서의 유기물부하율에 따른 COD제거효율은 Fig. 3과 같다. 혐기성여상은 유기물부하율이 증가하면서 충전율에 관계없이 처리효율이 다소 감소하는 경향을 보였으나 적용 유기물부하율내에서의 COD제거는 매우 안정적이었다. 8kgCOD/m³/d이하의 부하율에서 충전율 85% 혐기성여상은 90%이상의 높은 COD제거효율을 보였고, 충전율 55%의 경우는 충전율 85% 여상에 비하여 다소 낮기는 하지만 평균 84%의 양호한 수준의 COD제거효율을 보였으며, 12kgCOD/m³/d의 부하율에서도 충전율 85% 및

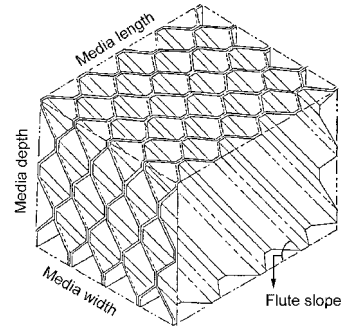


Fig. 2. Crossflow module.

Table 1. Physical characteristics of modular crossflow media.

Parameters	Values
Specific surface area (m ² /m ³)	110~120
Porosity (%)	95
Flute(Channel) slope (°)	60
Materials	Polyvinylchloride
Sheet thickness (mm)	3

Table 2. Typical characteristics of a dairy waste.

Parameters	Average	Range
pH	6.8	5.5~8.5
ORP (mV)	-168	-270~-113
Chloride (mg/L)	200	150~250
TCOD (mg/L)	10,500	8,500~14,600
SCOD (mg/L)	4,300	2,450~6,460
BOD (mg/L)	7,400	5,600~10,300
TSS (mg/L)	2,600	1,660~3,640
VSS (mg/L)	2,480	1,560~2,820
Volatile Acids (mg HAc/L)	1,180	300~2,820
Alkalinity (mgCaCO ₃ /L)	1,250	190~2,600

55% 여상 각각 80% 및 70% 수준의 안정적인 COD제거효율을 유지하였다. Fig. 3에서의 모듈충전 여상의 결과는, 동일폐수를 대상으로 세라믹튜브 및 패킹형플라스틱 매체를 65%(V/V) 비균일 충전(random packing) 상향류식 혐기

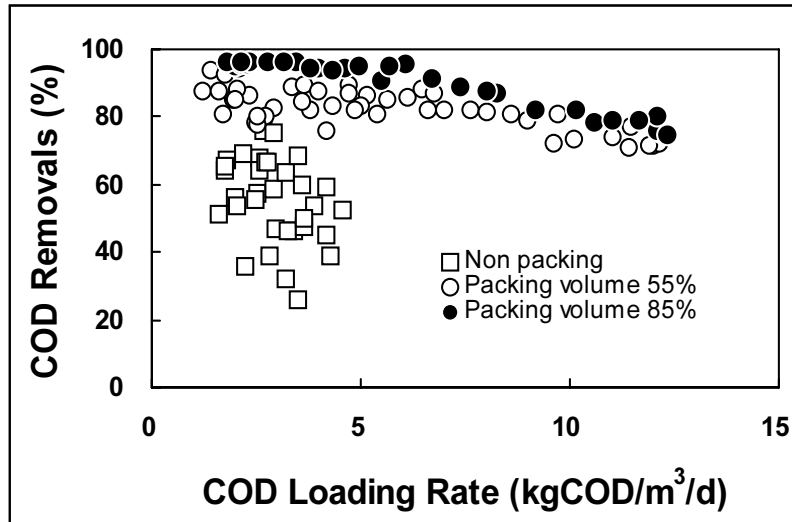


Fig. 3. Effects of organics loading rate on COD removals.

성여상(허 등, 2000)의 부하에 따른 제거효율 변화와 거의 동일하였으나, 모듈충전 여상에서는 비균일 충전 여상에서 관찰된 여상내 대형기포의 정체와 간헐적 분출 문제는 발생하지 않았다.

충전율 55%의 여상은 부하율 2.5kgCOD/m³/d전후(체류시간 4일)의 운전기간중에는 Fig. 3에서와 같이 효율이 다소 낮았는데, 이는 반응조온도가 일시적으로 최고 62°C까지 상승하여 미생물에의 온도충격뿐 아니라 단위모듈의 가로규격이 열적변형에 의해 평균 50%로 수평수축하여 여상에 편류현상이 발생하였기 때문이다. 그러나 모듈 교체후의 부하율 4.2kgCOD/m³/d전후(체류시간 2.5일)에서는 다시 안정적이고 높은 효율을 유지할 수 있었다. 이러한 모듈의 수평 수축변형의 악영향은 hybrid 혐기성여상에서 모듈의 역할이 매우 중요함을 입증하는 것이다.

모듈충전 혐기성여상은 고부하율에서도 안정적인 처리효율을 보이고 있었던 반면, 비충전 대조 혐기성반응조는 4.5 kgCOD/m³/d이하의 부하율에서도 26~76%의 매우 불안정하고 낮은 유기물제거효율을 보이고 있어, 모듈충전 없이는 정상적 운전이 불가능함을 확연히 보여주고 있다. 비충전 대조 반응조 하부의 슬러지층은 운전시간이 경과함에 따라 백색으로 변하면서 반응조내에서 차지하는 부피가 크게 증가하였다. 우유는 pH 3~5에서 유지방과 케이스인(casein)이 80%인 단백질의 응결체인 커드(curd)를 형성하여 침전함으로써 유가공폐수로부터 분리된다고 알려져 있는데 (Blanc

and Navia, 1991), 바로 이 응결체들이 반응조하부에 계속적으로 축적된 것으로 판단되었다. 이렇게 다량 축적된 응결체는 다시 기질과 미생물의 원활한 접촉을 방해함으로써 유기물제거효율을 더욱 감소시켰을 뿐 아니라, 층내에 발생가스를 포획하고 있다가 일시에 분출함으로써 가스발생량 및 유출수질의 변동이 커져 처리의 안정성 확보가 불가능하였다.

3.2 매체모듈충전부만의 기능

교차흐름식 매체모듈 자체만의 미생물 보유능과 그 기여를 파악하기 위하여, 본 연구에서는 초기운전이 원활치 않은 모듈충전율 55% 혐기성여상과 모듈 비충전 대조 혐기성반응조를 대상으로, 인위적으로 외부로부터 혐기성소화슬러지를 동시에 투입하여 운전을 정상화한 후 다시 투입슬러지를 모두 인출하고 계속 장기간 운전하면서 하부 혐기성슬러지 인출의 영향을 알아보았다. 즉, 하부슬러지베드층이 없는 경우의 여상의 성능은 매체모듈내의 보유 미생물만에 좌우될 것이고 본 연구에서 그 기여도를 파악할 수 있을 것이다.

외부 혐기성소화슬러지 투입·인출에 따른 가스발생량의 변화와 유출 COD의 변화는 Fig. 4 및 Fig. 5에서와 같다. 대조를 위해 함께 그 거동을 제시한 충전율 85% 혐기성여상은 외부 혐기성슬러지의 투입이 없이 초기의 소화슬러지 상정액 식종만으로도 순응이 용이하였으나 순응이 어려운 충전율 55% 혐기성여상과 비충전 대조 혐기성반응조에는 운전시작 30일째에 반응조 하부에 혐기성소화슬러지를 투입하였다. 투입슬러지는 과천하수처리장 혐기성소화슬러지를

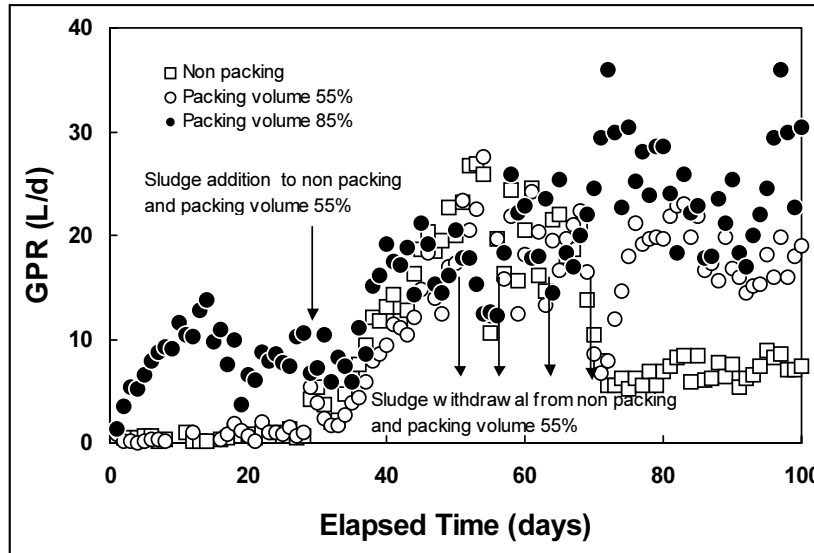


Fig. 4. Effect of seeding and sludge withdrawal on gas production during the start-up period.

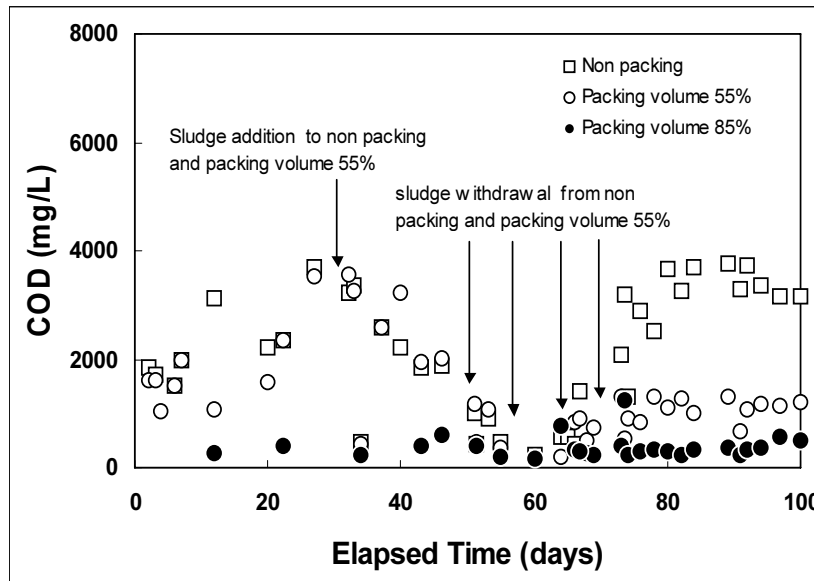


Fig. 5. Effects of seeding and sludge withdrawal on effluent COD during the start-up period.

채취후 #20체로 걸러 $35 \pm 1^\circ\text{C}$ 의 항온조에서 1일간 보관한 것으로 두 반응조에 각각 반응조유효용적의 30%(11L)씩 투입하였다.

충전율 55% 혐기성여상과 모듈 비충전 대조 혐기성반응조 모두 외부의 소화슬러지 투입이후 인위적인 하부슬러지베드 형성에 의하여 가스발생량 및 유기물제거가 급격하게 증

가하면서 충전율 85%의 대조 혐기성여상과 거의 동일한 수준으로 정상화되었다.

그 후, 매체모듈만의 미생물보유능을 알아보기 위해 외부 투입 소화슬러지로 형성된 하부슬러지베드층을 제거하였다. 하부 슬러지인출량은 투입량과 동일하며, Fig. 4 및 Fig. 5에서와 같이, 운전 52일부터 70일 사이에 인출에 의한 반응상 충격을 방지하기 위하여 단계적으로 4회에 걸쳐 첫회 2L,

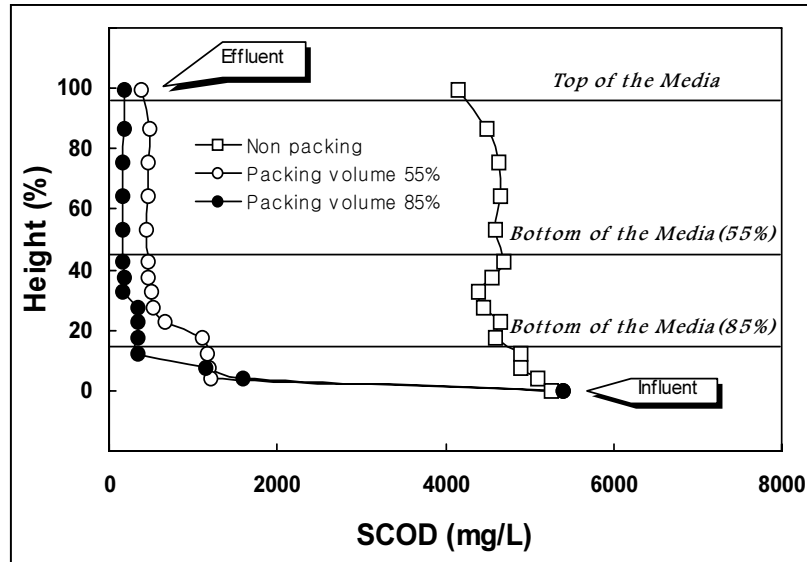


Fig. 6. Profiles of SCOD distribution.

그후 3회는 각각 3L씩 인출하였다. 최종 인출직후 하부슬러지베드층이 관찰되지 않음을 확인하고 인출을 종료하였다. 충전율 55% 혐기성여상에서는 가스발생량과 유기물제거가 하부슬러지베드층 인출 직후에는 하락하였다가 곧 다시 회복되어 하부슬러지베드 없이도 원활한 운전이 가능함을 확인할 수 있었다. 반면에 하부슬러지베드층 인출 직후부터 매체 비충전 대조 반응조는 성능이 급격히 하락한 후 반응조 하부에 지속적으로 유지방과 단백질 응결체의 농축이 일어나고, 휘발산 축적 등의 현상과 더불어 유기물제거효율, 가스발생량 및 메탄량 등이 크게 저하하여 원활한 혐기성반응이 더 이상 진행되지 못하였다. 한편, 하부슬러지베드층의 인출이후에는 운전이 계속됨에 따라 모든 반응조에서 자연적으로 하부에 슬러지베드층이 형성되었다.

이와 같이, 외부 혐기성소화슬러지의 인위적인 투입 및 인출 영향을 알아봄으로써, 매체모듈내만의 미생물 보유능과 그 기여도를 파악할 수 있었다. 교차흐름식 모듈을 충전한 혐기성여상은 모듈내에 혐기성미생물을 효과적으로 보유할 수 있어 하부슬러지베드층 없이도 모듈내의 보유미생물만에 의해서도 충분히 정상운전이 가능하다는 사실을 확인할 수 있었다. 모듈내 보유미생물은 매체표면 부착미생물뿐 아니라 모듈내 포획, 퇴적되거나 매체간 공극내에 존재하는 부유미생물을 포함한다. 따라서, hybrid 혐기성여상에서는 슬러지베드가 확보되

어야 한다고 일반적으로 알려진 바와는 달리 유가공폐수처리시 인위적인 슬러지베드층은 반드시 필요한 것은 아니었다. 물론 슬러지베드가 운전에 지장을 초래하지 않는 한 이를 굳이 제거할 필요는 없을 것이다. 한편, 혐기성여상의 식종물질로는 도시하수처리장의 혐기성소화슬러지 및 그 상정액 모두가 가능하나, 소화슬러지가 보다 효과적이고 정상운전 도달한 후 필요시 하부슬러지를 인출 가능함도 알 수 있었다.

3.3 매체모듈충전부 및 슬러지베드의 기능 및 기여
교차흐름식 모듈 충전 hybrid형 상향류식 혐기성여상의 기·액·고 분리능과 하부슬러지베드의 거동을 파악하기 위하여, 모듈충전 여상과 비충전 대조 반응조를 대상으로 높이별 각부의 유기물 및 고형물 수직분포 내부거동을 체류시간 2.5일 조건에서 알아보았다. 본 실험은 하부슬러지 투입·인출실험(Fig. 4 및 Fig. 5)을 통하여 매체모듈내 미생물만으로도 정상운전이 가능함을 확인한 이후 자연적으로 여상하부에 슬러지베드층이 충분히 형성된 후에 실시하였다.

각 반응조에서의 높이별 SCOD의 수직분포 거동은 Fig. 6과 같다. 모듈충전 혐기성여상 모두 SCOD가 유입수 하부 유입직후부터 급격히 감소하여, 충전율 55% 여상에서는 여상유효수심기준 하부높이 4%까지 78%, 충전율 85% 여상에서는 하부높이 12.5%(모듈충전부 하단 직전)까지 93%

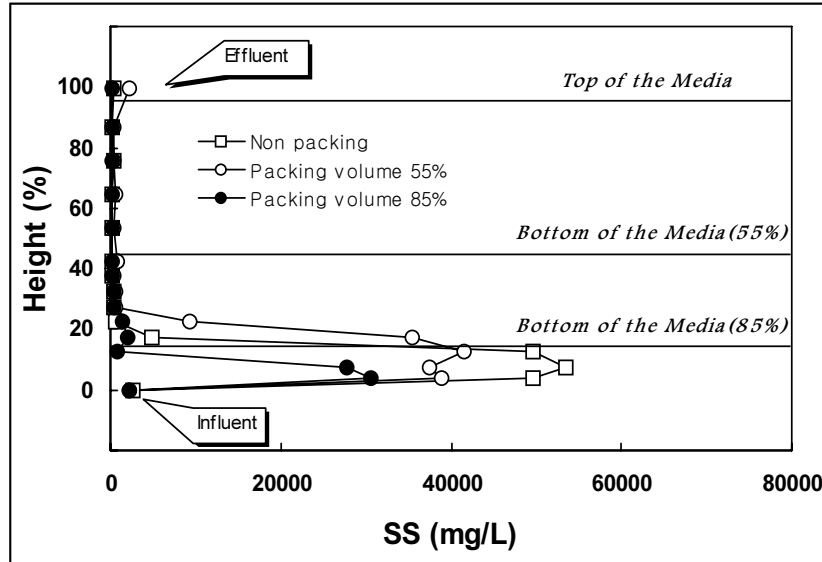


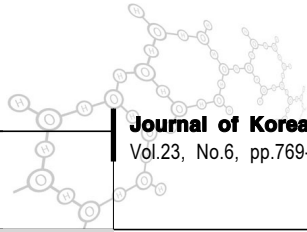
Fig. 7. Profiles of SS distribution.

의 유입SCOD가 제거되었다. 모듈충전부에 도달하기전에 이미 거의 대부분의 SCOD가 제거되어, 모듈충전부 하단 직전까지 그 제거효율이 충전율 55% 및 85% 여상에서 각각 91% 및 93%에 달하였다. 그 이상의 높이 즉 모듈충전부 내부에서는 충전율 55%의 경우 추가적인 SCOD제거가 거의 없었고 충전율 85%에서는 모듈하부 10%높이에서만 잔존 SCOD가 일부 추가적으로 제거되었으며, 전체 SCOD제거량중 모듈충전부만의 기여율은 충전율 55% 및 85%에서 각각 1.2% 및 3%에 불과하였다. 총COD제거 수직분포 거동도 이와 동일한 경향을 보였다. 따라서 대부분의 유기물제거는 모듈충전부 도달 이전에 이루어짐을 알 수 있었다. 물론 고부하운전시나 충격부하시에는 모듈충전부의 추가적인 유기물제거가 최종 유출수질을 결정하여 공정의 안전성 확보에 기여하는 역할을 할 것이다. 한편, 비충전 대조 반응조의 경우는 Fig. 6에서와 같이 모듈충전 여상과 크게 대비되는 매우 저조한 유기물제거를 보였고 전체 SCOD제거효율이 21%에 불과하고 휘발산농도가 반응조 높이 전체에 걸쳐 2,200~2,500 mg/L으로 높게 유지되어, 비충전 대조 반응조는 모듈충전의 효과를 역으로 극적으로 입증하여 주었다.

모듈충전 여상 하부에서의 활발한 유기물분해는 활성화된 혐기성 하부슬러지베드층이 형성되었음을 의미하고 Fig. 6에서의 유기물 분해능의 높이별 분포는 곧 혐기성 미생물 분포의 결과일 것이므로, Fig. 7와 같이 높이별 고행물질의

수직분포 거동을 함께 알아보았다.

Fig. 7은 세 반응조 모두 하부에 고농도의 슬러지베드층이 형성되어 있음을 명확히 보여준다. 또한, 모듈충전 혐기성여상의 경우 슬러지베드층이 모두 모듈충전부 하부에만 존재하고, 충전율 55% 여상에서는 여상유효수심기준 하부높이 약 23%까지, 충전율 85% 여상에서는 하부높이 약 8%까지 존재하여, 모듈충전율이 증가하면 하부슬러지베드층 높이가 축소되는 현상을 보여주었다. 이는 Fig. 6에서와 같이 비록 모듈내에서의 유기물분해는 미미한 경우에도, 매체모듈이 하부슬러지베드층의 상승 또는 팽창을 억제하는 기능이 있음을 시사하는 것이다. 그 원인으로는 지그재그식으로 이루어진 교차흐름식 매체 모듈내의 경사침전관 기능과 같은 고액분리 기능과 아울러 가스부착부유물이 매체와의 충돌시 gas와 부유물이 분리되는 기능 그리고 발생gas가 미생물부착면 윗쪽의 매체관을 따라 지그재그식의 궤적을 그리며 상승함으로써 부착 또는 퇴적된 고행물을 교란시키지 않는 기능 등 교차흐름식 매체 모듈의 우수한 기액고 분리능에 기인하는 것으로 판단된다. 또한 이러한 기능은 고부하운전시나 충격부하시에 공정의 안전성 확보에 큰 기여하는 역할을 할 것이다. 일반적으로 혐기성처리하는 슬러지의 침강성 불량으로 고액분리능이 나쁘다고 알려져 있지만, 본 연구에서는 높은 하부슬러지 농도에도 불구하고 슬러지의 침강성불량은 발견되지 않았는데, 이는 여상의 슬러지베드층내



에서는 폐수유입과 가스발생으로 혼합이 일어나고 침강성이 불량한 부유물은 모듈충전부로 상승, 제거되면서 슬러지베드내에는 침강성이 우수한 입자들이 선택적으로 농축되기 때문에 생각된다. 즉 모듈충전 혐기성여상 자체가 가액고의 물리적 분리를 위한 하나의 선택적 역할을 동시에 수행한다고 할 수 있다.

또한, Fig. 7에서의 모듈충전 여상내 고농도 슬러지베드층의 형성 높이와 Fig. 6에서의 주된 유기물분해층의 높이는 각 충전율별로 정확히 일치하여 하부슬러지베드층이 부유 혐기성미생물로 활성화되어있음을 분명히 알 수 있다. 미생물의 활성을 나타내는 DHA(dehydrogenase activity)도 모듈하부 슬러지베드층에서 모듈내 부유고형물과는 비교할 수 없이 높았다. 한편, 슬러지베드층은 유입SS의 포획에도 상당량 기여하고 있을 것으로 판단되고, 슬러지베드층과 매체표면에서는 입상화슬러지가 일부 관찰되었다. 또한, 모듈충전 여상의 체류시간을 1일까지 감소한 경우에도 안정적인 하부슬러지베드층 유지가 가능하여 교차흐름식 모듈의 가액고 분리능과 하부슬러지보유능을 다시 입증할 수 있었는데, 생활하수처리 혐기성여상에서 동일형식의 교차흐름식 모듈충전시 하부슬러지베드층은 체류시간 2시간에서도 수리학적으로 안정되게 유지가능하였다(Chang *et al.*, 2004). 한편, 유기공폐수를 대상으로 한 비균일 매체 충전 혐기성여상(허 등, 2000)에서는 매체내부 및 매체공극사이의 다량의 대형 발생기포 정체가 발생하여 그로 인한 사수부와 기질 전달방해, 단회로현상 발생, 간헐적 대형기포분출에 의한 처리수질 악화, 매체부피증가로 인한 유효용적감소 등이 발생하였으나, 본 교차흐름식 모듈충전여상에서는 이러한 문제점으로부터 자유로울 수 있었다.

슬러지베드내 최고SS농도는 충전율 55% 및 85%에서 유입SS 대비 각각 19배 및 14배로서 충전율 55% 여상에서 더 높았다. 슬러지베드층의 보유 SS 총질량은 두 여상이 유사하리라는 예상과 달리 충전율 55% 여상에서 충전율 85% 여상보다 약 2.2배 더 많았다. 이러한 현상의 원인은 충전율 85% 여상이 Fig. 6에서와 같이 유기물제거효율이 더 좋았고 입자상유기물의 분해능에 두 여상이 차이도 있을 수 있어서 정확한 규명은 어려우나, 유출수 SS의 차이가 크지 않으므로 두 여상의 여상전체 보유 SS총질량이 유사하여야 한다면, Fig. 7에서와 같이 모듈충전부내 SS농도 차이는 거의 없는 것으로 보아 SS로 축적되지 않는 매체표면 부착 또는 모듈내 퇴적, 포획된 고형물량의 차이에 기인하는 것으로 판단된다. 충전율 85% 여상의 충전매체 표면적은 충전율 55% 여상 보다 1.6배 더 많아 부착미생물량 증가뿐 아니라

모듈에 의한 가액고 분리능이 증가하여 모듈충전부내에 더 많은 포획 및 퇴적 고형물이 존재하였다고 믿어진다.

한편, 비충전 대조 혐기성반응조에서도 Fig. 7에서와 같이 고농도의 슬러지베드층이 하부높이 20%까지 형성되었고 그 SS농도는 모듈충전 여상에서 보다는 높았지만, 그 슬러지베드층은 Fig. 6에서 확인 알 수 있는 바와 같이 SCOD 제거에 기여도가 매우 낮아서 모듈충전 여상의 활성화된 슬러지베드층과 구별되었다. 또한 슬러지층의 DHA도 충전여상의 슬러지베드의 값에 비하여 매우 낮았다. 비충전 대조 반응조의 하부슬러지베드층은 백색의 유지방, 단백질의 화학적 응결침전물로서, 쉽게 분해되지 않고 시간이 경과할수록 응결층의 유입수 SS 포획기능에 의해 물리적 축적만이 이루어 졌다. 또한, 응결층내에서의 기질과 미생물의 접촉이 불량하였으며 하부슬러지베드층에 형성되는 대형정체기포의 간헐적 급격한 분출에 의하여 선속도가 증가하고 그에 따른 편류현상 및 고형물의 유실 등 수리학적으로 불안정한 상태가 발생하였다. 비충전 대조 혐기성 반응조의 이러한 성능 불량을 통하여, 교차흐름식 모듈에 의한 우수한 가액고 분리능과 함께 부유 및 부착미생물의 보유능을 보다 뚜렷이 입증할 수 있었다.

이상과 같이 유기공폐수처리를 위한 교차흐름식 모듈 충전 hybrid형 혐기성여상에서의 상부 매체충전부와 그 하부 슬러지베드의 기능과 기여를 파악할 수 있었는데, 이를 분류, 체계화하면 다음과 같다:

- (1) 교차흐름식 모듈의 기능은 모듈 고유의 가액고 분리의 물리적 기능과 모듈내 보유미생물에 의한 생물학적인 기능으로 나눌 수 있고, 이러한 물리적 및 생물학적 기능을 가지는 모듈충전부의 여상내 실제 역할은 하부슬러지베드층의 유무에 따라 다시 두가지 경우로 구분될 수 있었다. 그 두 경우에 따라 모듈 고유기능중 주된 기능이 결정되었다.
 - (1.1) 하부슬러지베드층이 형성되지 않는 경우에는, 모듈충전부의 역할은 생물학적 유기물분해 및 물리적 고형물 제거이었고, 모듈기능으로서의 생물학적 기능과 물리적 기능 모두 필요하였다. 역으로 말하면, 혐기성여상에서 반드시 하부슬러지베드층이 필요한 것은 아니었다.
 - (1.2) 슬러지베드층이 형성되는 경우에는, 모듈충전부의 주역할은 그 하부에 안정된 하부슬러지베드층의 물리적 형성 및 유지이었고, 이때 모듈 고유의 물리적인 우수한 가액고 분리능이 필요하였다. 즉 모듈충전부는 유기물제거에 핵심역할을 하는 하부슬러지

층의 상승 또는 팽창을 억제하여 그 하부에서 수리학적 안정된 슬러지베드층 형성촉진 및 유지의 물리적 역할이 주이었고, 생물학적 분해역할에 기여는 미미하였다. 안정된 하부슬러지베드층 보유만을 위한 모듈충전율은 적어도 되나 하부슬러지베드의 억류효과를 높이기 위해서는 충전율이 높을수록 좋았다. 물론, 유기물처리효율의 극대화를 위해서는 모듈충전율이 높을수록 유리하다.

- (2) 하부슬러지베드층의 기능은 축적 부유미생물에 의한 활발한 생물학적 분해와 유입고형물의 물리적 포획이었다. 단, 모듈충전 없이 수리학적으로 불안정한 슬러지응결층 자체만으로는 지속적이고 정상적인 유기물제거는 불가능하였다.

4. 결론

교차흐름식 모듈 충전 혐기성여상과 비충전 혐기성반응조를 대상으로 상부 모듈충전부 및 하부 슬러지베드층의 기능과 역할에 대하여 연구하여 얻은 결론을 요약후 설명하면 다음과 같다.

[요약] 상향류식 hybrid 혐기성여상에 의한 유가공폐수처리시, 모듈은 독립적 역할이 가능하나 슬러지베드는 모듈의존적이었다. 즉, 충전모듈은 물리적 분리능 및 생물학적 분해능 면에서 하부슬러지베드 없이도 독립적 역할이 가능하였고, 그 생물학적 기여도는 슬러지베드의 기여도에 좌우되면서 상호보완적 관계에 있었다. 반면에, 슬러지베드는 모듈 없이는 독립적으로 생물학적 분해역할이 곤란하여 그 활성화에는 모듈의 물리적 분리능이 필수적이었다. 단, 슬러지베드의 형성정도, 모듈과 슬러지베드의 처리에의 각 기여도는 폐수성상, 모듈충전율, 운전조건 등에 따라 변화한다.

유가공폐수처리를 위한 모듈충전 혐기성여상에서 반드시 하부슬러지베드층이 필요한 것은 아니었다. 슬러지베드가 형성되지 않는 경우에도 모듈충전부는 생물학적 유기물분해 및 물리적 고형물 제거 역할 모두를 독립적으로 수행할 수 있었다. 하부슬러지베드의 생물학적 활성화에는 모듈의 물리적 가액고 분리능이 필수적이었다. 모듈 비충전시에는 유가공폐수성분이 주로 응결한 슬러지층만이 형성되고, 수리학적으로 불안정한 이러한 층만으로는 정상적인 유기물제거는 불가능하였다. 교차흐름식 모듈 충전 hybrid 혐기성여상은 그 자체가 가액고의 물리적 분리를 위한 일종의 선택적 역할을 동시에 수행하면서 슬러지베드내에 침강성이 우수한 입자들이 선택적으로 농축되는 것으로 생각된다.

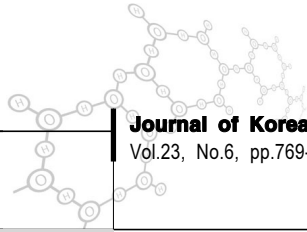
교차흐름식 모듈의 기능은 가액고 분리의 물리적 기능과 모듈내 보유미생물에 의한 생물학적인 기능으로 나뉘고, 여상내에서의 주된 기능은 활성화된 하부슬러지베드의 양과 기여도에 따라 결정되었다. 슬러지베드 형성시에는, 베드층의 증가에 따라 모듈충전부는 그 하부에 수리학적으로 안정된 슬러지베드의 형성촉진 및 유지를 위한 물리적 분리 역할이 커졌고, 모듈내 보유미생물에 의한 생물학적 분해 기여도는 슬러지베드의 유기물제거능이 커짐에 따라 작아졌다. 슬러지베드층높이와 활발한 유기물분해층의 높이는 정확히 일치하여 슬러지베드는 생물학적 분해 및 유입고형물의 물리적 포획에 핵심적 역할을 함을 확인하였다. 그러나 슬러지베드내 고형물량이 유기물처리효율을 지배하지는 않았다. 모듈충전율이 증가하여 슬러지베드량이 감소하더라도 모듈내 보유미생물량이 증가하여 오히려 처리효율과 공정의 안정성이 더 높았다. 슬러지베드의 보유만을 위한 모듈충전율은 적어도 되나 슬러지베드의 억류효과를 높이고 유기물제거의 극대화를 위해서는 충전율이 높을수록 좋았다.

사 사

이 논문은 2008학년도 건국대학교의 지원에 의하여 연구되었음.

참고문헌

1. 허준무, 장 덕, 배형석, 김수영 (2000) 세라믹튜브 및 패킹형플라스크 여재충전 상향류식 혐기성여상에 의한 유가공폐수처리. *상하수도학회지*, 14(1), pp.37-44.
2. American Public Health Association, American Water Works Association and Water Environment Federation (2000) *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, 21st Ed., American Public Health Association, Washington D.C.
3. Bello-Mendoza, R. and Castillo-Rivera, M.F. (1998) Start-up of an Anaerobic Hybrid (UASB/Filter) Reactor Treating Wastewater from a Coffee Processing Plant. *Anaerobe*, 4(5), pp.219-225.
4. Blanc, F.C. and Navia, R. (1991) Treatment of Dairy Wastewater by Chemical Coagulation. *Proc. 45th Ind. Was. Conf. Purd. Univ.*, pp.681-689.
5. Chang, D, Seo, S.C. Hong, K.H. (2004) Pre-denitrification and Post-nitrification in an Integrated Anaerobic/Aerobic Filter System for Advanced



- Treatment of Municipal Wastewater, *Jour. of Indust. and Eng. Chemistry*, **10**(3), pp.354-360
6. Di Berardino, S., Bersi, R., Converti, A. and Rovatti, M. (1997) Starting-up an Anaerobic Hybrid Filter for the Fermentation of Wastewater from Food Industry. *Bioprocess Eng.*, **16**(2), pp.65-70.
 7. Loannis D.M., Sotirios G.G. (2006) Municipal Wastewater Treatment Using Upflow-anaerobic Filters, *Wat. Environ. Res.*, **78**(3), pp.233-242.
 8. Miyahara, T., Takano, M. and Noike, T. (1995) Role of Filter Media in Anaerobic Fixed-bed Reactor. *Wat. Sci. Technol.*, **31**(9), pp.137-144.
 9. Speece, R.E. (1996) *Anaerobic Biotechnology for Industrial Wastewater*. Archae Press, Tennessee.
 10. Wu, M.W.F. and Tay, J.H. (2000) Influence of Media-packing Ratio on Performance of Anaerobic Hybrid Reactors. *Bioresour. Technol.*, **71**(2), pp.151-157.
 11. Young, J.C. and Young, H.W. (1991) Full-Scale Treatment of Chemical Process Wastes Using Anaerobic Filter, *Jour. Wat. Poll. Cont. Fed.*, **63**(2), pp.153-159.