

C. I. Reactive Blue 114의 분해에 미치는 혐기성 UASB 반응기 운전조건의 영향

오유관 · 이성호 · 김효섭 · 박태주 · 박성훈

부산대학교 응용화학공학과 및 환경기술 · 산업개발 연구소

(1999년 6월 21일 접수, 2000년 1월 5일 채택)

Effect of Operating Conditions of UASB Reactor on Biodegradation of C. I. Reactive Blue 114

You-Kwan Oh · Sung-Ho Lee · Hyo-Seob Kim · Tae-Joo Park · Sung-Hoon Park

*Division of Chemical Engineering and Institute for Environmental Technology and Industry,
Pusan National University*

ABSTRACT

Biodegradation of the C. I. Reactive Blue 114 was investigated in an upflow anaerobic sludge blanket (UASB) reactor. Important parameters studied include dye concentration, the kind and concentration of carbon source, hydraulic retention time (HRT), and influent pH. Glucose was found to be a better co-substrate than the mixture of volatile fatty acids (VFAs), although its concentration did not affect dye removal efficiency in the range of 1000~3000 mg/ℓ. When HRT increased from 6 hr to 24 hr, dye removal efficiency increased up to 12 hr and remained almost constant thereafter at about 40%. When influent pH was varied in the range of 6.0~8.0, the effluent pH was varied in the range of 6.8~7.5 with maximum efficiency at pH 7.0. The highest dye removal rate obtained was 52 mg/ℓ · day, while the maximum dye load to meet the discharge limit of color intensity was estimated to be 46 mg/ℓ · day at HRT of 12 hr and an influent glucose concentration of 2200 mg/ℓ.

Key Words : Biodegradation of C. I. Reactive Blue 114, UASB Reactor, Effect of Operating Conditions, Maximum Dye Loading Rate

요 약 문

혐기성 UASB 반응기를 이용하여 C. I. Reactive Blue 114 생분해를 위한 운전조건을 구하고자 하였다. 운전조건의 중요한 변수로서 염료농도, 탄소원의 종류 및 농도, HRT, 유입 pH의 영향을 조사하였다. 보조탄소원인 포도당은 염료제거에 있어 휘발성 지방산보다 더 우수하였으며, 포도당 1000~3000 mg/ℓ 범위에서 염료제거율에 거의 영향이 없었다. HRT가 6시간에서 24시간으로 증가하였을 때 염료제거율은 HRT 12시간까지 증가하였으며 그 이상에서는 거의 일정한 값인 40%를 유지하였다. 유입 pH가 6.0~8.0 범위에서 변화하였을 때 유출수 pH는 6.8~7.5로 나타났고, pH 7.0에서 최대 염료제거율을 보였다. 본 연구에서 획득한 최대 염료제거속도는 52 mg/ℓ · day이었지만 색도 환경기준치를 만족하는 최대 염료부하량은 46 mg/ℓ · day로 나타났고, 이때의 운전조건은 HRT 12시간, 포도당 농도 2200 mg/ℓ 이었다.

주제어 : C. I. Reactive Blue 114의 생분해, 혐기성 UASB 반응기, 운전조건의 영향, 최대 염료부하량

1. 서 론

염료폐수는 높은 pH, 높은 온도와 색도를 나타내는 염료를 다량 함유하고 있어서 환경미관상 좋지 않으며 수중생물에 독성을 나타낸다고 알려져 있다.¹⁾ 지금까지 물리·화학적 처리방법이 주로 사용되고 있지만 이들 방법은 고비용과 2차적인 오염물질 배출의 단점 때문에 새로운 방법, 즉 저비용이며 염료를 완전히 무기화할 수 있는 공정이 모색되어 왔다.²⁾

현재 가장 저비용으로 운전 가능한 생물학적 처리 방법은 대부분 호기성 활성슬러지법에 의존하고 있다. 이 경우 BOD는 80% 이상 잘 처리되는 반면 염료는 거의 분해되지 않는다는 단점이 있다.^{3,4)} 100종류 이상의 염료를 대상으로 활성슬러지의 염료 분해능을 조사한 Pagga와 Shaul 등^{5,6)}은 단지 몇 종류만이 분해 가능하였다고 보고하였다. 그러나 최근에 혐기성 미생물에 의해 azo계 염료가 분해된다는 사실이 밝혀짐에 따라 혐기성 반응기를 이용한 염료 분해 공정이 많은 주목을 받고 있다.⁷⁻⁹⁾ 혐기성 처리기술은 주로 고농도 유기성 폐수, 즉 식품공장, 팜유제조공장, 피혁공장, 양조공장, 펄프공장 및 제지공장 등의 처리에 주로 사용되어 왔으며, 고농도 유기물을 메탄으로 회수한다는 장점이 있다. 난분해성 물질이 포함된 염료폐수 등 산업폐수를 분해한 혐기성 반

응기 연구의 예로 FitzGerald 등¹⁰⁾과 Seshadri 등¹¹⁾은 혐기성 유동층 반응기를 이용하여 azo계 염료를 분해하고 염료제거속도를 10 mg/ℓ · day 정도라고 보고한 바 있다. Donlon 및 Razo-Flores 등^{12,13)}은 Lettinga 등¹⁴⁾에 의해 개발된 고효율 혐기성 UASB (upflow anaerobic sludge blanket) 반응기를 이용하여 Mordant Orange 1등의 azo계 염료를 100 mg/ℓ 까지 효과적으로 처리하였으며, 염료제거속도는 273 mg/ℓ · day까지 가능하였다고 보고하였다. 그러나 이들 연구는 azo계 염료의 혐기성 분해 증명에 주력하였을 뿐, 실제 처리공정에 필요한 최적화 조건이나 환경기준치를 만족하는 처리조건을 제시하지는 않았다. 더 나아가 azo계 염료보다 복잡한 구조를 가진 안트라퀴논계 염료의 경우는 연구가 전무한 상태이다.

본 연구진은 전보에서 안트라퀴논계 염료인 Reactive Blue 114가 혐기성 UASB 반응기에서 분해된다는 사실을 증명하였다.¹⁵⁾ 이 사실을 토대로 본 연구에서는 염료처리에 있어서 혐기성 UASB 반응기의 최적 운전조건을 조사하고자 하였다. 먼저 염료제거에 효과적인 보조탄소원을 알아보고 염료농도에 따른 혐기성 UASB 반응기의 성능을 평가하고자 하였다. 또한 HRT의 영향, 보조탄소원 농도의 영향, 유입 pH의 영향으로 혐기성 UASB 반응기를 이용한 염료분해의 최적조건을 구하는 동시에

환경기준치 만족을 위한 혐기성 UASB 반응기에 유입되는 염료의 부하량과 염료의 농도를 알아보고자 하였다.

2. 실험방법

2.1. 염료

본 연구의 대상염료인 반응성 염료 C. I. Reactive Blue 114는 부산소재 T회사에서 제공받았으며, 정확한 화학적 구조는 알려져 있지 않으나 발색단은 안트라퀴논기이다. 염료의 g당 COD 값은 1.1 g이었다.

2.2. 식종 슬러지 및 합성폐수의 조성

UASB 반응기의 식종 슬러지로는 부산 장림 하수처리장의 소화조 슬러지와 수원 K사의 pilot 규모 UASB 반응기에서 채취한 입상 슬러지를 2:1로 혼합하여 사용하였다. 식종 슬러지의 VSS 농도 및 VSS/TSS 비는 각각 21,000 mg/ℓ 및 0.6 이었다. 합성폐수는 탄소원으로 포도당 2200 mg/ℓ를, 그리고 질소원으로 beef extract, yeast extract, peptone 및 urea를 각각 50, 55, 50, 50 mg/ℓ 포함하고 있고, 기타 금속이온을 포함하고 있었다.¹⁵⁾ 탄소원으로 포도당대신 휘발성 지방산을 사용할 경우 유입농도를 2500 mg VFA/ℓ로 하였고, 휘발성 지방산의 조성은 COD를 기준으로 acetate: propionate: butyrate를 2:1:1의 비율로 조정하였다.

2.3. 반응기를 이용한 연속적 처리

Pyrex 유리로 제작한 0.55 ℓ 용량의 동일한 UASB 반응기를 2대 운전하였다.¹⁵⁾ 반응기의 온도는 항온수조를 이용하여 35℃로 조절하였다. 먼저 염료가 생략된 폐수를 공급하여 반응기가 충분히 활성화되도록 하였고, 이때 보조탄소원의 영향을 조사하기 위하여 첫 번째 반응기는 포도당을, 두 번째 반응기는 휘발성 지방산을 넣어주었다. 각각의 반응기는 메탄생성속도 및 SCOD 제거율이 각각 1.1 ℓ/day

및 95% 이상에 도달하였을 때 염료를 공급하기 시작하였다. 본 실험동안 반응기내 입상슬러지의 크기는 대략 1~5 mm였고 양은 대략 10 g VSS로 유지되었다. 또한 운전변수에 따른 반응기 거동을 측정할 경우 각 조건에서 충분한 기간동안 운전하여 정상상태에 도달하도록 하였다.

2.4. 분석방법

염료농도는 UV/VIS spectrophotometer (Lambda 20, PERKIN-ELMER, USA)를 이용하여 600 nm에서 측정된 흡광도를 염료농도로 환산하여 사용하였다. 가스(CH₄, CO₂, Air(N₂+O₂)) 조성 분석은 thermal conductivity detector (TCD)가 장착된 가스크로마토그래피(680D, Young-In, Korea)로 행하였다. Soluble chemical oxygen demand (SCOD) 분석은 미국 Hach사의 지침서를 따라 실시하였다. 색도(ADMI), total suspended solids (TSS), volatile suspended solids (VSS) 등은 수질오염공정시험법¹⁶⁾과 Standard methods¹⁷⁾에 따라 분석하였다.

3. 결과 및 토의

3.1. 염료농도와 보조탄소원의 영향

Fig. 1은 유입수 염료농도에 따른 UASB 운전상태의 변화를 보여준다. 유입수 pH는 7.0, HRT는 12 시간으로 고정하였고 유입폐수 중 탄소원은 포도당을 사용하였으며 이때 포도당 농도는 2200 mg/ℓ였다. 유입수내 염료의 농도는 5~80 mg/ℓ 범위에서 변화시켰는데 염료농도의 변경시 입상슬러지에의 흡착이나 변화된 염료농도에 대한 granule의 불충분한 적응이 염료제거 속도나 SCOD 제거속도에 영향을 미칠 것을 고려하여 동일한 염료농도에서 최소 3주일 운전하였다.

Fig. 1(a)는 염료농도에 따른 유출수의 염료농도, 염료제거율, 그리고 염료제거속도를 나타내고 있다. 유입 염료농도가 5 mg/ℓ일 때 유출수내 농도는 1 mg/ℓ로 제거효율이 약 80%였으나 유입 염료농도

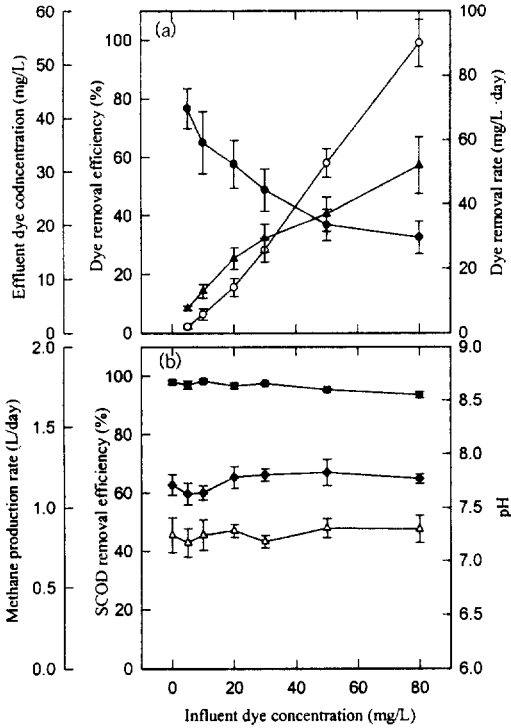


Fig. 1. Effect of influent dye concentration when glucose was used as co-substrate (symbols: (a) effluent dye concentration (○), dye removal efficiency (●), and dye removal rate (▲); and, (b) methane production rate (◆), SCOD removal efficiency (■) and effluent pH (△)).

증가에 따라 제거효율이 점차 감소하여 유입수내 농도가 80 mg/l 일 때는 유출수내 농도가 54 mg/l 로 제거효율이 약 33%에 불과하였다. 반면 유입 염료농도 5 mg/l 일 때 염료제거속도는 7.7 mg/l · day이었으나 유입농도의 증가에 따라 점차 증가하여 유입 염료농도 80 mg/l 에서는 52 mg/l · day로 높아졌다. 분해속도의 증가는 초기 20 mg/l까지는 직선적으로 이루어졌으나 그후 증가속도가 감소되는 추세를 보여 주었다.

Fig. 1(b)는 유입수내 염료농도에 따른 SCOD 제거율, 메탄발생속도, pH의 변화를 보여준다. 염료를 투입하지 않았을 때 메탄발생속도, SCOD 제거율, 유출수의 pH는 각각 1.14 l/day, 98.0%, 7.2로 나타났다. 염료투입시 이들 값은 큰 변화가 없었

고 농도에 관계없이 거의 일정한 값을 보여주지만 SCOD 제거율은 염료농도 5 mg/l 일 때 약 98%에서 염료농도 80 mg/l 일 때 93.4%로 점차 감소하는 경향을 보여준다. 이것은 미분해 염료가 유입수내 염료농도증가에 따라 증가하기 때문으로 판단된다 (염료 80 mg/l 는 COD를 3.8%정도 높이는 효과가 있음). 염료농도에 관계없이 메탄발생량이 거의 일정한 이유는 염료분해량이 너무 미미하여 전체 메탄발생량에 영향을 주지 않기 때문이다. 일례로 유입염료농도가 가장 높은 80 mg/l 인 경우 제거된 염료농도는 26 mg/l 정도이고 이들이 모두 메탄으로 전환된다고 해도 유입 포도당의 1.2% 밖에 되지 않는다. 여기에서 주목할 보다 중요한 사실은 염료의 존재가 UASB granule의 메탄생성활성, 즉 포도당의 메탄전환을 거의 방해하지 않았다는 것이다. 이 결과는 회분식 독성실험에서 Reactive Blue 114가 100 mg/l 농도까지 granule의 비메탄생성속도(specific methanogenic activity)에 영향을 주지 않는다는 실험결과와 일치한다.¹⁵⁾

Fig. 2는 보조탄소원으로 휘발성 지방산을 사용한 경우, 유입 염료농도에 따른 UASB 운전상태의 변화를 보여준다. Fig. 2(a)에서 보는 바와 같이 유입 염료농도가 5~80 mg/l 범위에서 증가함에 따라 유출수내 잔존 염료농도와 염료제거속도가 선형적으로 증가하였다. 반면 염료제거효율은 낮은 농도에서 많은 오차가 관찰되었지만 33~37% 범위에서 일정하게 유지되었다. 그 결과 유입수내 염료농도가 낮을 때는 염료제거효율이 포도당을 탄소원으로 사용한 경우보다 매우 낮았으나 80 mg/l 의 높은 농도에서는 거의 비슷하였다. 그러나 유출수의 색도 규제치를 감안할 때 높은 농도의 유입수를 분해하는 것은 무의미하므로 색도 분해에 관련한 포도당이 휘발성 지방산보다 우수하다고 할 수 있으며 추후의 실험에서는 포도당을 사용하였다. Donlon 등¹²⁾도 Mordant Orange 1을 분해할 때 보조탄소원으로 휘발성 지방산보다 포도당이 좋다고 보고한 바 있다. Fig. 2(b)는 염료 농도에 따른 메탄생성속도, SCOD 제거율과 유출수의 pH를 나타낸다. 염료를 투입하지 않았을 때의 메탄생성속도, SCOD 제거율과 유출수의 pH는 각각 1.10 l/day, 98.7%, 8.3으로 나타났으며 이 값은 유출수의 pH를 제외하고는 포도당을 탄소원으로 사용하였을 때와 거의 같았다.

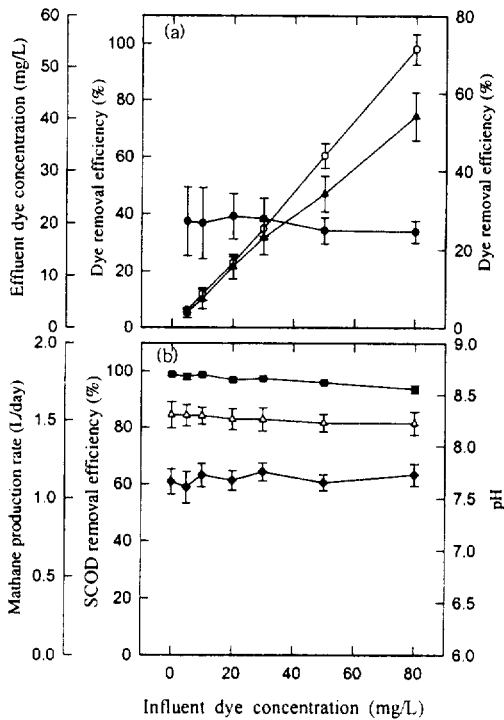


Fig. 2. Effect of influent dye concentration when VFA mixture was used as co-substrate (symbols: (a) effluent dye concentration (○), dye removal efficiency (●), and dye removal rate (▲); and, (b) methane production rate (◆), SCOD removal efficiency (■), and effluent pH (△)).

또한 염료 투입후의 메탄생성속도, SCOD 제거율, 유출수 pH 등도 염료 투입전과 큰 차이가 없었고 단지 SCOD 제거율만 유입염료가 증가함에 따라 조금씩 감소하여 유입염료 농도 80 mg/l였을 때 93.6%까지 감소하였다. 포도당을 사용하였을 때 보다 유출수의 pH가 높게 나타난 것은 유입수내 휘발성 지방산이 소모된데 따른 것으로 판단된다.

3.2. 보조탄소원 농도의 영향

Fig. 3은 염료농도 30 mg/l에서 포도당 농도에 따른 UASB 거동을 보여준다. 염료농도가 너무 높거나 낮을 경우 포도당 농도의 영향이 나타나지 않을 가능성이 크고 또 유출수 방류수질 색도 규제치가 ADMI (American Dye Manufacturers' In-

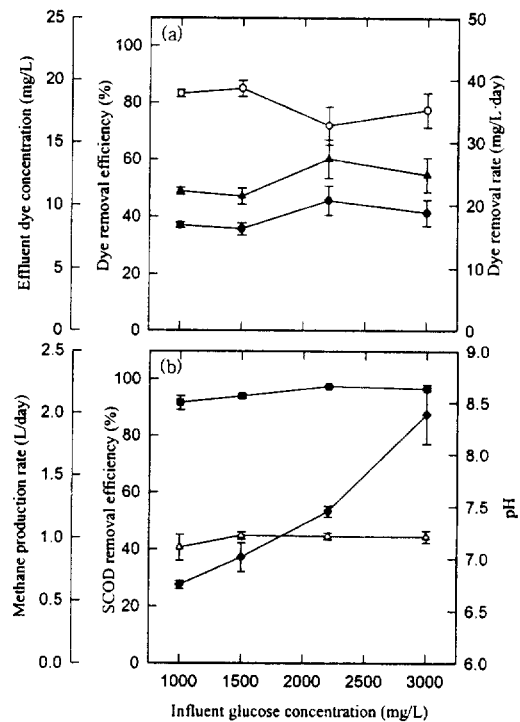


Fig. 3. Effect of influent glucose concentration (symbols: (a) effluent dye concentration (○), dye removal efficiency (●), and dye removal rate (▲); and, (b) methane production rate (◆), SCOD removal efficiency (■), and effluent pH (△)).

stitute) 값으로 400임을 고려하여 염료농도를 30 mg/l로 선택하였다. 유입수의 pH와 HRT는 각각 7.0 및 12시간으로 고정하였고 포도당의 농도는 1000~3000 mg/l의 범위에서 변화시켰다. 약간의 편차가 있었지만 염료 제거효율은 포도당 농도에 관계없이 35~42% 정도로 거의 일정하게 유지되었고 이에 따라 염료제거속도도 약 22~28 mg/l·day로 거의 일정하였다. 이 결과는 Blue 114 분해에 있어서 포도당 농도가 제한 요인이 아님을 의미한다. 즉 Blue 114 분해는 biomass의 분해능력에 따라 좌우되며 본 실험의 운전조건에서 첨가되는 탄소원에 의한 환원력 공급에는 영향을 받지 않는다는 뜻이다. 경제적인 UASB 운영을 위해서는 탄소원으로 사용되는 포도당 농도를 가능한 한 낮추는 것이 필요한데 Fig. 3(a)의 결과는 본 연구에서 실험한 최저값인 1000 mg/l 이하로 포도당 농도를 낮출

수 있음을 뜻한다. 최저 포도당 농도는 biomass의 활성유지와도 관련이 있으며 이는 추후 보다 자세한 실험을 필요로 한다. Fig. 3(b)는 보조탄소원 포도당 농도에 따른 SCOD 제거율, 메탄 발생량, pH 변화를 보여준다. 메탄생성속도는 포도당 농도 1000 mg/ℓ일 때 0.6 ℓ/day에 불과하였지만 포도당 농도 증가에 따라 증가하여 3000 mg/ℓ일 때는 2.0 ℓ/day로 나타났다. 한편 SCOD 제거율은 1000 mg/ℓ으로 유입하였을 때 91.6%로 나타났다지만 포도당 농도 증가에 따라 조금씩 증가하였다. 유출수의 pH의 경우 포도당 농도 1500~3000 mg/ℓ의 범위에서는 7.2로 일정하였으나 포도당 농도 1000 mg/ℓ에서는 소폭 감소하였다.

3.3. HRT의 영향

Fig. 4는 염료농도 30 mg/ℓ에서 HRT에 따른 UASB 성능을 보여준다. 유입수의 pH와 보조탄소원인 포도당의 농도는 각각 7.0 및 2200 mg/ℓ으로 고정하였고 HRT는 6~24시간의 범위에서 변화시켰다. Fig. 4(a)는 HRT에 대한 유출수의 염료농도, 염료제거율과 염료제거속도를 나타내고 있다. HRT 12시간까지는 HRT가 증가할수록 염료제거율은 증가하는 경향을 나타내었다. 그러나 HRT 12시간 이상에서는 약 40~50% 범위에서 대체로 일정한 경향을 나타내었다. 염료제거속도는 HRT 감소에 따라 증가하였는데 18시간 및 24시간에서는 약 10~15 mg/ℓ·day였고 6~12 시간에서는 약 25~30 mg/ℓ·day였다. 염료제거속도가 HRT 감소에 따라 증가하는 이유는 다음 두 가지로 추정된다. 첫째, 만일 염료분해속도가 염료농도의 함수이고 속도가 농도에 따라 증가한다면, HRT 감소에 따른 반응기내 염료농도 증가 때문에 분해속도가 증가할 수 있다. 둘째, 보다 가능성이 희박하지만, 유출되는 SS가 HRT 감소에 따라 증가하고 SS에 흡착된 염료 때문에 염료분해속도가 증가한 것처럼 보였을 수도 있다.¹⁵⁾ 이 원인을 명확히 규명하려면 추가적인 실험이 필요하다. Fig. 4(b)는 HRT에 따른 메탄발생속도, SCOD 제거율 및 유출수의 pH를 나타내고 있다. HRT가 감소함에 따라 유기물 부하율이 증가하므로 메탄발생속도는 점차 증가하였고 SCOD 제거율은 HRT에 상관없이 약 95%로 거의 일정하였

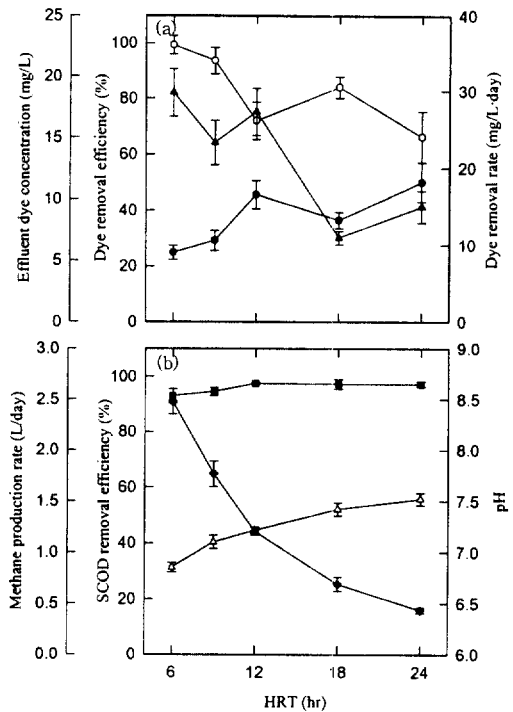


Fig. 4. Effect of HRT (symbols: (a) effluent dye concentration (○), dye removal efficiency (●), and dye removal rate (▲); and, (b) methane production rate (◆), SCOD removal efficiency (■), and effluent pH (△)).

다. 유출수의 pH는 HRT가 24시간일 때 7.5였으나 HRT가 감소함에 따라 pH가 감소하여 6시간이었을 때는 6.8까지 감소하였다. Kwong¹⁸⁾ 등은 HRT가 감소할수록, 즉 COD loading rate가 증가할수록 유출수의 pH가 감소한다고 보고하였으며 이것은 입상슬러지의 바깥층에 위치한 산생성균에 의해 빠르게 생성된 휘발성 지방산 (volatile fatty acids, VFAs)이 입상슬러지의 중심에 위치한 메탄생성균에 전달되지 못하고 유출되기 때문이라고 보고한 바 있다.

3.4. 유입 pH의 영향

Fig. 5는 염료농도 30 mg/ℓ에서 유입 pH에 따른 UASB 거동을 보여준다. HRT와 보조탄소원인 포도당 농도는 각각 12 시간 및 2200 mg/ℓ으로 고정하였고, 유입액수의 pH는 2N NaOH와 H₂SO₄

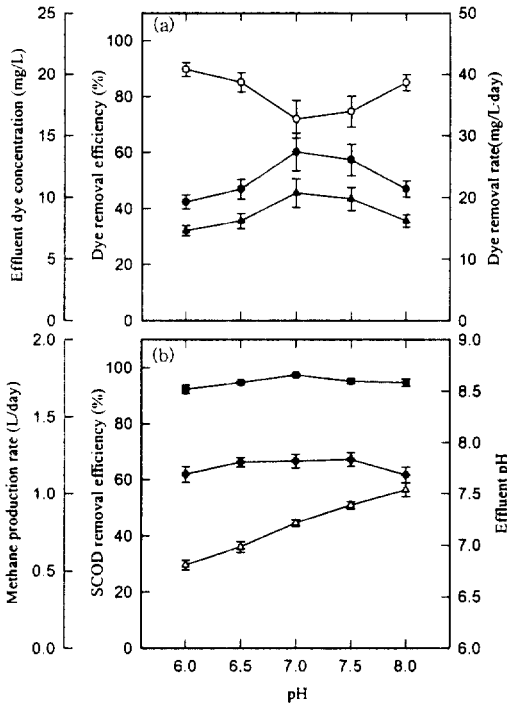


Fig. 5. Effect of influent pH (symbols: (a) effluent dye concentration (○), dye removal efficiency (●), and dye removal rate (▲); and, (b) methane production rate (◆), SCOD removal efficiency (■), and effluent pH (△)).

를 이용하여 6.0~8.0의 범위에서 변화시켰다. Fig. 5(a)는 유입 pH에 따른 유출수의 염료농도, 염료제거율 및 염료제거속도를 나타내고 있다. pH 7.0에서는 염료제거율 및 제거속도가 가장 높게 나타났으며 각각 45.5% 및 27.3 mg/ℓ·day로 측정되었다. 이것은 염료 분해에 있어서 최적 pH가 7.0이라는 것을 나타내며 이것은 UASB 반응기의 최적 운전 pH와도 일치한다. Fig. 5(b)는 유입 배지내 pH에 따른 메탄생성속도, SCOD 제거율과 유출수의 pH를 나타내고 있다. 유입수의 pH를 6.5~7.5에서 메탄생성속도는 1.2 ℓ/day로 일정한 값을 유지하였지만 pH 6.0과 8.0에서는 다소 감소한 값인 1.1 ℓ/day가 나타났다. SCOD 제거율의 경우 pH 7.0에서 최고값이 나타났지만 그 밖의 pH에서는 조금 감소하는 경향이 나타났다. 유입 pH가 증가함에 따라 유출수의 pH는 6.8에서 7.5로 증가하는 경향을 나타내었다. 본 연구의 결과는 Sandberg 등¹⁹⁾

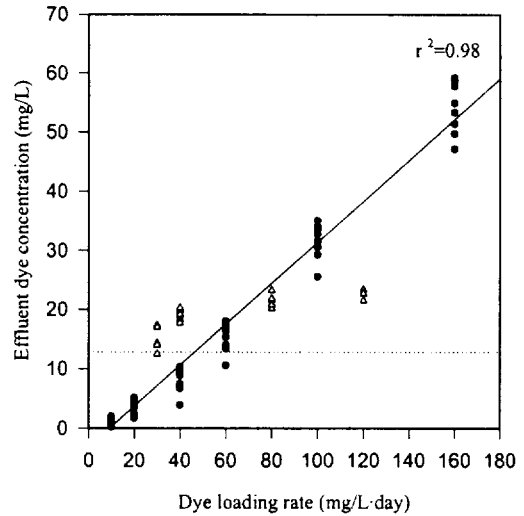


Fig. 6. Effect of dye loading rate on effluent dye concentration (broken line (---) represents maximum contaminant level (MCL) of wastewater. Symbols: Influent dye concentration (●) and HRT (△)).

이 fish meal 폐수를 처리하면서 pH 7.0~7.5 범위가 메탄생성속도, 처리효율 및 COD 제거율 등에서 최적이라고 보고한 것과 일치한다.

3.5. 환경기준치 운전조건

국내의 색도 환경기준치는 ADMI(American Dye Manufacturers Institute)값으로 400이며 이를 만족하는 Reactive Blue 114의 유출수 농도는 분광광도계 흡광도를 기준으로 계산할 때 12.8 mg/ℓ이다. 본 실험의 결과 색도의 환경기준치에 미치는 가장 큰 요소는 염료의 유입농도로 나타났고 HRT나 보조탄소원의 농도 및 유입수의 pH는 영향이 크지 않았다. Fig. 6은 포도당을 보조탄소원으로 사용한 경우 염료 부하량에 따른 혐기성 처리 후의 유출수 내 염료농도를 나타내고 있다. 염료 부하량은 염료 농도에 의하여 변하는 것(●)과 HRT에 의하여 변하는 것(△)을 동시에 나타내었다. 실험조건에 따라 다소의 오차가 존재하지만 염료 부하량과 유출수 내 염료 농도는 대체로 직선관계를 보여주었고, 상관계수(r^2)은 0.98 이었다. Fig. 6으로부터 환경기준치

를 만족하는 최대 유입 염료부하량은 약 $46 \text{ mg}/\ell \cdot \text{day}$ 임을 알 수 있다. 또한 최적의 운전조건은 유입 염료농도는 $23 \text{ mg}/\ell$, HRT 12시간, 유입 pH는 7.0이고, 탄소원인 포도당의 농도는 $1000 \text{ mg}/\ell$ 이었다. 그러나 방류수 기준을 만족하기 위한 염료 Blue 114의 유입농도는 그다지 높지 않고 또 유출수 방류기준을 만족하는 최대 유입농도에서의 분해율도 44.3% 정도 그치고 있으므로 본 UASB 반응을 Blue 114 분해를 위해 현장에 적용하려면 보다 정밀한 경제성 검토가 필요하다고 하겠다.

4. 결 론

본 연구에서는 난분해성 염료인 안트라퀴논계 Reactive Blue 114의 혐기성 UASB 반응기 처리에 있어서 운전변수의 영향을 조사하였다. 중요한 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 염료처리에 있어서 보조탄소원은 휘발성 지방산보다 포도당이 더 우수한 것으로 나타났으며, 유입 염료농도의 증가에 따라 염료제거 속도는 증가하였으나 염료제거율은 감소하였다.
- 2) 보조탄소원인 포도당 농도 $1000 \sim 3000 \text{ mg}/\ell$ 범위에서 염료제거율은 큰 변화가 없었다. HRT 6~24 시간 범위에서 증가할 때 12시간 이상에서는 염료제거율이 약 40~50%로 일정하였으나 12시간 이하에서는 HRT 감소에 따라 감소하였다. 유입 pH는 7.0이 최적이었다.
- 3) 환경기준치 만족을 위한 염료부하량은 $46 \text{ mg}/\ell \cdot \text{day}$ 이었다. 또한 UASB에 의한 Blue 114의 분해속도가 매우 낮으므로 본 연구의 현장적용에는 보다 정밀한 경제성 분석이 필요하다.

사 사

본 논문은 한국과학재단 지정 환경기술·산업개발연구센터(RRC-IETI)의 지원(과제번호 : 96A-10-03-02-3)에 의하여 연구되었으며 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. Meyer, U., "Biodegradation of Synthetic Organic Colorants," in *Microbial Degradation Xenobiotics Recalcitrant Compounds, FEMS symposium* 12 ed., Academic Press, London, pp. 371~385(1981).
2. Mishra, G. and Tripathy, M., "A critical review of the treatments of decolorization of textile effluent," *Colorage*, **10**, 35~38 (1993).
3. Kulla, H. G., Klausener, F., Meyer, U., Ludeke, B. and Leisinger, T., "Interference of aromatic sulfo groups in the microbial degradation of the azo dyes Orange I and Orange II," *Arch. Microbiol.*, **135**, 1~7 (1983).
4. Wuhrmann, K., Mechsner, K. and Kappeler, T., "Investigation on rate determining factors in the microbial reduction azo dyes," *European J. Appl. Microbiol. Biotechnol.*, **9**, 325~338(1980).
5. Pagga, D. and Brown, D., "The degradation of dyestuffs in aerobic biodegradation test," *Chemosphere*, **15**, 479~491(1986).
6. Shaul, G. M., Holsdworth, T. J., Dempsey, C. R. and Dostall, K. A., "Fate of water soluble azo dyes in the activated sludge process," *Chemosphere*, **29**, 2597~2607 (1991).
7. Haug, W., Schmidt, A., Nortemann, B., Hempel, D. C., Stolz, A. and Knackmuss, H. J., "Mineralization of the sulfonated azo dye Mordant Yellow 3 by a 6-aminonaphthalene-2-sulfonate-degrading bacterial consortium," *Appl. Environ. Microbiol.*, **57**(11), 3144~3149(1991).
8. Banat, I. M., Nigam, P., Singh, D. and Marchant, R., "Microbial decolorization of textile-dye-containing effluents: A review," *Biores. Technol.*, **58**, 217~227(1996).

9. Hollinger, C., Stames, A. J. M. and Zehnder, A. J. B., "Anaerobic degradation of recalcitrant compounds," in *Advances in Water Pollution Control, Anaerobic Digestion 1998*, Hall, E. R. and Hobson, P. N., (Eds.), Pergamon Press, pp. 211~224 (1987).
10. FitzGerald, S. W. and Bishop, P. L., "Two stage anaerobic/aerobic treatment of sulfonated azo dyes," *J. Environ. Sci. Health*, **A30**, 1251~1276(1995).
11. Seshadri, S., Agha, A. M. and Bishop, D. L., "Anaerobic/aerobic treatment of selected azo dyes in wastewater," *Waste Manage.*, **14**(2), 127~137(1994).
12. Donlon, B. A., Razo-Flores, E., Luijten, M., Swarts, H., Lettinga, G. and Field, J., "Detoxification and partial mineralization of the azo dye mordant orange 1 in a continuous upflow anaerobic sludge-blanket reactor," *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, **47**, 83~90(1997).
13. Razo-Flores, E., Luijten, M., Donlon, B. E., Lettinga, G. and Field, J., "Biodegradation of selected azo dyes under methanogenic conditions," *Wat. Sci. Tech.*, **36**, 65~72(1997).
14. Lettinga, G., van Velsen, A. F. M., Hobma, S. W., de Zeeuw, W. and Klapwijk, A., "Use of the upflow sludge blanket (USB) reactor concept for biological wastewater treatment, especially for anaerobic treatment," *Biotechnol. Bioeng.*, **22**, 699~734(1980).
15. 이성호, 오유관, 김효섭, 박태주, 박성훈, "이단계 혐기성/호기성 반응기를 이용한 C. I. Reactive Blue 114의 생분해," *대한환경공학회지*, **21**(10), 1933~1944(1999).
16. 동화기술 편집부, *공정시험방법*, 1판, 동화기술, 서울, pp. 131~174(1996).
17. American Public Health Association, *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, 19th ed., Washington, D. C.(1995).
18. Kwong, T. S. and Fang, H. H. P., "Anaerobic degradation of cornstarch in wastewater in two upflow reactors," *J. Environ. Eng.*, **122**, 9~17(1996).
19. Sandberg, M. and Ashring, B. K., "Anaerobic treatment of fish meal process wastewater in a UASB reactor at high pH," *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, **36**, 800~804(1992).