

활성탄 담체가 포함된 Jet-Loop Reactor를 이용한 종합염색폐수처리

¹박 종 탁·이 길 호·류 원 룰·*조 무 환
영남대학교 응용화학공학부, ¹대구보건대학 소방안전관리과
(접수 : 2002. 4. 12., 게재승인 : 2002. 6. 17.)

Biological Treatment of Dyeing Wastewater Using Jet Loop Reactor with Activated Carbon Supports

Jong Tack Park¹, Kil Ho Lee, Won Ryul Ryu, and Moo Hwan Cho*
School of Chemical Engineering & Technology, Yeungnam University, Kyongsan 712-749, Korea
¹Department of Fire Safety Management, Daegu Health College, Daegu 702-260, Korea
(Received : 2002. 4. 12., Accepted : 2002. 6. 17.)

Today, many problems of dye-processing wastewaters were raised due to industry of dyeing and textiles. It is difficult to treat them perfectly because they contain many poorly degradable matters, such as surfactants, ethylene glycol, polyvinyl alcohol, and so on. To improve the performances of conventional physicochemical treatment and activated sludge process, new systems of combining jet-loop reactor (JLR) with physicochemical treatment were developed. Volumetric oxygen transfer coefficient (k_La) of JLR was significantly larger than that of air-lift reactor. Also, for the effective treatment of dye-processing wastewater, JLR with active carbon supports (JLRAS) were investigated. Removal efficiency of BOD, COD_{Mn}, COD_{Cr} and color were found as 99, 86, 84, 83%, respectively, when HRT was 8 hrs. And performance of JLRAS was rapidly restored after step change of COD_{Mn} loading late. The optimal coagulant and dosage of second physicochemical treatment after JLRAS were polyferric sulfate and 130 mg/L, respectively, when removal efficiencies of COD_{Mn} and color were 85 and 73%, respectively. In conclusion, this system enables the reduction of operation cost, and the effective removal of many organics.

Key Words : dyeing wastewater, jet loop reactor, activated carbon support

서 론

산업의 발전과 공업화로 인해 각종 오염 물질이 문제시되고 있는 현실에서 염색공장에서 배출되는 폐수에는 PVA (polyvinyl alcohol), 염료, 보조약품과 계면활성제를 비롯한 다량의 TPA (terephthalic acid) 및 EG (ethylene glycol) 등 난분해성 물질의 농도가 높아 수질환경을 악화시키고 있다(1-3). 현재 종합염색폐수에 대한 처리 방법으로 응집처리, 활성오니처리, 흡착처리, 산화처리 등 여러 가지 방법이 사용되고 있으나 단독으로 충분한 처리가 곤란하여 대부분 복합 공정으로 처리하고 있다(4-6). 기존의 염색폐수 처리공정은 응집제의 과잉 사용으로 인한 슬러지의 과다 발생과 활성오니 공정의 산소전달효율의 한계성으로 고농도의 염색폐수를 처리하는 시간이 길어지며 현장에서의 bulking과 scum 등의 빈

번한 발생이 일어나고 있다. 또한 생활환경이 발전해 나감에 따라 염색폐수의 색도가 큰 문제점으로 부각되고 있는 등 기존 공정만으로는 효율적인 처리를 하는 데 어려움이 많다. 그리고 bulking에 의한 활성오니의 침강성의 악화로 폭기조내의 오니농도의 저하를 가져오며 처리수의 수질을 악화시킨다. 이와 같은 단점을 개량하기 위하여 집축산화법이나 회전원판법 등이 개발되었지만 폭기조의 체류시간을 오히려 길게 해야 되며 장치가 차지하는 부지 면적 또한 커졌다(7-10). 이와 같은 단점을 보완하기 위하여 본 연구에서 산소전달효율이 아주 우수하고 공기를 공급하기 위한 별도의 장치가 필요 없는 jet-loop reactor (JLR)를 개발하였다(11-16). 뿐만 아니라 정화에 관여하는 미생물의 다양성을 높이고, 생물막을 형성하여 수질, 수량의 변동에 강하고 고액분리가 우수하며, bulking의 문제가 적으며 슬러지 발생량이 적은 활성탄 담체를 사용하였다(17-18).

따라서 본 연구의 목적은 기존의 1차 응집처리 후 활성오니법으로 생물학적 처리를 하던 공정을 개선하여, 산소전달효율이 아주 우수하다고 알려진 JLR과 여기에 활성탄 담체를 적용한 생물학적 공정(JLRAS)을 이용하여 종합염색폐수

* Corresponding Author : School of Chemical Engineering and Technology, Yeungnam University, Kyongsan 712-749, Korea
Tel : +82-53-810-2517, Fax : +82-53-814-8790
E-mail : mwcho@yucc.yeungnam.ac.kr

Table 1. Characteristics of the granular activated carbon

Properties	Specification	Units
Density	2.1	g/cm ³
Apparent density	0.59	g/cm ³
Packing density	0.49	g/cm ³
Total pore volume	0.71	cm ³ /g
Specific surface area	1,100	cm ² /g
Mean pore radius	12.3	Å
Thermal conductivity	0.17	kcal/m.hr.°C
Specific heat	0.244	cal/g.°C
Raw material	coconut	

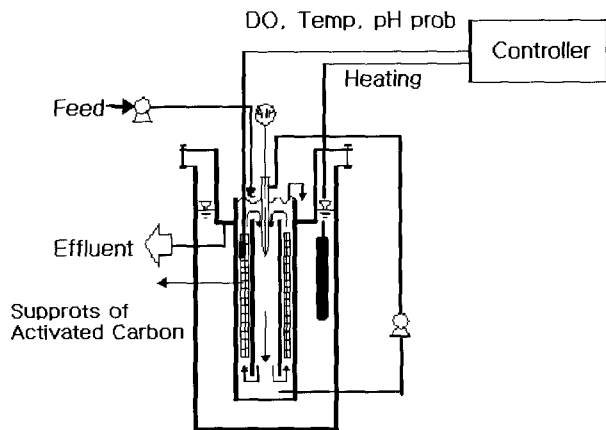


Figure 1. Schematic diagram of jet-loop reactor with activated carbon supports.

를 효율적으로 처리한 후에, 2차 응집공정으로 보다 높은 효율로 처리를 행하는데 있다.

재료 및 방법

실험장치

본 연구에 사용된 폐수처리 반응기는 활성탄 담체가 포함된 jet-loop reactor (JLRAS)며 Figure 1에 나타내었다. 담체로 사용한 활성탄의 특징은 Table 1과 같다. 반응기의 용량은 8 L이며, 아크릴 수지로 제작하였으며 침전조를 따로 두지 않았다. Figure 1에서 보는 바와 같이 반응기의 중앙부에 원통형의 tube를 두어 미생물을 회전시켰고, 바깥쪽의 tube는 처리수의 수질을 양호하게 하고 입자의 침강성을 좋게 하기 위하여 격벽을 설치하였다. 또한, nozzle은 반응기의 상부에 고정시켜 반응기 내부의 폐수를 하부에서부터 상부의 nozzle 중앙으로 순환시켰다. Nozzle의 가운데 부분은 steel관을 관통시켜 폐수의 유입시 공기가 자연적으로 주입되도록 하였으며 폐수가 유입됨과 동시에 공기와 접촉시켰다. 또한 폐수의 공급은 미량정량펌프를 사용하여 혼합이 용이하도록 공급하였다. 활성탄 담체는 관망안으로 입자상 활성탄을 반응기 부피의 15% 정도 충전하여 8개를 반응기 내부에 고정시켰다. 종합염색폐수처리장에서 활성슬러지를 순용시킨 후 고정화하였다. 반응기의 온도는 water jacket를 설치하여 현재 T시 종합염색폐수처리장에서 운영되고 있는 30±2 °C를 유지하였다.

DO meter와 pH meter를 설치하여 변동을 각각 조절하였으며 DO는 항상 2 ppm 이상을 유지하였다.

산소전달계수의 측정

산소전달효율이 고품질로 알려진 세라믹 재질의 다공성 관형 산기관을 이용한 air-lift반응기와 본 실험 장치의 산소전달계수(k_{La})를 비교하였다. k_{La} 는 비정상상태 방법을 사용하여 측정하였다. 즉, 운전하기 전에 반응기를 순수한 물로 가득 채운 후, 반응기 안의 산소는 N₂를 분사하여 시스템으로부터 완전히 제거하였다. 그리고 공기를 주입하여 용액이 포화될 때까지 용존 산소의 변화를 측정하였다(19). 그리고 $\ln(C^* - C_L)$ 대 시간(t)의 도사로 k_{La} 를 계산하였다.

1차 생물학적 처리

활성탄 담체가 충전된 jet-loop reactor (JLRAS)를 반응기의 순환에 의한 자연유입식의 폭기만을 사용하여 DO가 항상 2 ppm 이상으로 유지하면서 HRT를 48, 24, 12, 6시간까지 감소시키면서 운전하였다. 온도는 30±2 °C를 유지하였고 미생물의 식종은 T시 종합 염색폐수 처리장의 활성오니를 사용하였으며 폭기조 부피비의 15%를 투여하여 5~7일간 순용시킨 실험을 수행하였다. 이후 JLRAS의 생물학적 처리효율을 분석하였다.

2차 응집 실험

1차 생물학적 처리된 유출수를 용량 1 L의 비커에 종합염색폐수 500 mL를 취하여 pH를 조정후 각종 응집제, 응집 보조제를 일정량씩 투입하여 2분간 180 rpm으로 급속 교반한 후 15분간 20 rpm으로 완속 교반하여 flocc을 형성시킨 후, 20분간 정지하고 그 상등액을 취하여 2차 응집공정의 처리효율을 분석하였다.

분석 방법

본 실험에 사용된 시료는 모두 원심분리기에서 3,000 rpm으로 분리한 후 상등액을 취하여 분석하였다. BOD 측정에는 독일 TWT사의 OxiTop[®] IS 12 BOD 측정기로 하였다. COD 및 색도의 분석방법은 standard method에 의거하여 분석하였다(20).

결과 및 고찰

시료 채취

종합염색폐수는 시간별, 계절별로 폐수의 성상 및 발생량의 변화가 큰 특징이 있다. 또한 각 폐수의 배출 사업장의 작업시간과 여건에 따라 배출되어 지는 폐수의 종류와 오염원의 농도 역시 다양하다. 본 실험에서 사용된 종합염색폐수는 D시 염색공단지 종합 염색폐수처리장으로 유입되어지는 폐수를 채취하여 사용하였다. 폐수는 불특정한 시간마다 유입되어지는 원수와 응집 처리되어진 원수를 일정량으로 채취하였다. 그때마다의 농도가 일정하지는 않았지만 특정한 범위를 벗어나지 않았다.

D시 염색산업단지 폐수처리장을 대상으로 유입 폐수를 보면 이가 오이스트라이 변이가 많고 이가 오이스트라이 COD, 이

Table 2. Characteristics of complex dyeing wastewater

Item	Influent
COD _{Mn} (ppm)	760~900
COD _{Cr} (ppm)	1,700~2,000
BOD (ppm)	400~500
pH	10~12
Color	2,000~3,000
SS (ppm)	150~300
Temp. (°C)	45~35

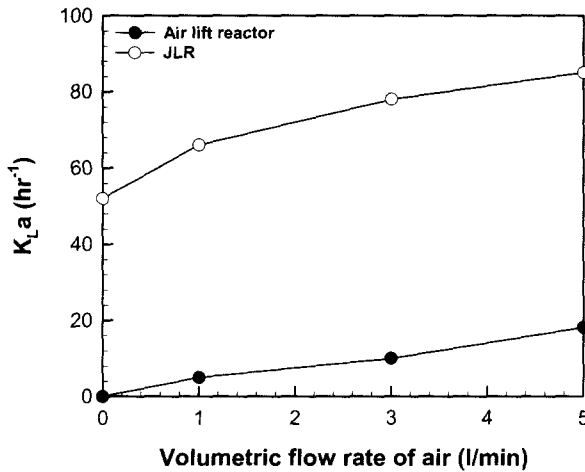


Figure 2. Influence of volumetric flow rate of air on k_{La} .

변화가 760~900 mg/L의 범위에 있으며 평균값은 800 mg/L 이었다(Table 2).

산소전달계수의 비교·분석

JLR의 산소전달력을 측정하기 위하여 air-lift reactor (ALR)와 비교하여 보았다. JLR에 인위적으로 공기를 주입하지 않고 폐수가 재순환되는 양만을 조절하여 공기가 자연적으로 유입되게 하면서 산소의 전달효율을 구한 결과와 또한 ALR 산기관에 주입되는 공기의 속도를 증가시켜 가면서 그리고 JLR 상부에 고정된 nozzle에 주입되는 공기의 속도를 증가시켜 가면서 산소의 전달효율을 비교한 결과를 Figure 2에 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 JLR는 인위적으로 공기를 주입하지 않고도 폐수의 유입과 더불어 공기가 자연적으로 들어감으로써 45 hr⁻¹ 정도의 뛰어난 산소전달효율을 보였다. 공기를 5 L/min으로 공급한 ALR과 비교하여서도 k_{La} 의 값이 3배 이상 높았다.

1차 생물학적 처리효율

D시의 종합염색폐수처리장으로 유입되는 유입수를 분석한 결과 COD_{Mn}의 농도는 760~900 mg/L, BOD는 400~580 mg/L, COD_{Cr}은 1,750~2,230 mg/L, 색도는 2,200~2,600으로 부하변동이 아주 심하고 난분해성 물질이 다량 함유되어 있으며 색도가 진한 고농도의 유기성 폐수임을 알 수 있었다. JLRAS에서 체류시간이 24~8시간이고 담체로 사용된 입자성 활성탄의 양이 반응기 부피의 15%로 충전되었을 때 미생물의 양이 5,400~6,700 mg/L로 많은 유용미생물을 생산시킬 수 있

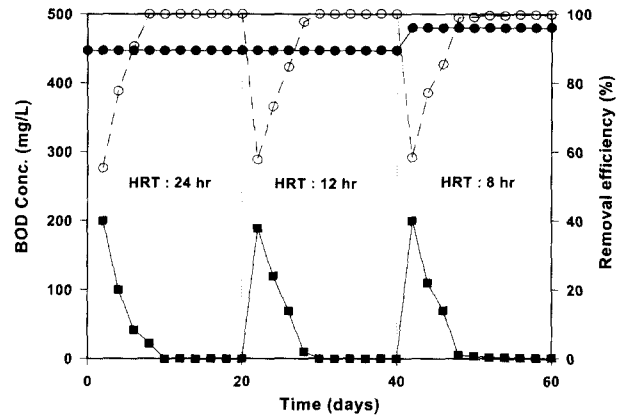


Figure 3. Variation of BOD concentration and removal efficiency for the jet-loop reactor with active carbon supports (-●- influent, -■- effluent, -○- removal efficiency).

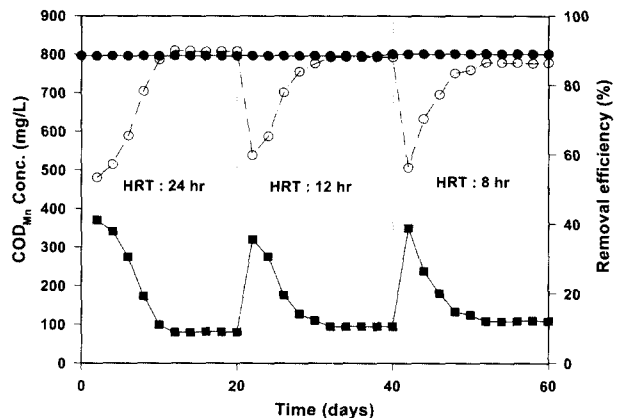


Figure 4. Variation of COD_{Mn} concentration and removal efficiency for the jet-loop reactor with active carbon supports (-●- influent, -■- effluent, -○- removal efficiency).

었으며 이로 인하여 생물학적공정의 시간을 단축하여도 높은 제거효율을 유지할 수 있었다. 반응조에 고정화시킨 담체에 부착된 미생물양을 측정하기 위해 처리수의 수질이 일정한 때에 반응조내의 관망의 활성탄 담체를 임의로 채취하여 미생물의 건조 중량을 측정하였다. 용적 부하량이 0.78 kg COD_{Mn}/m³·day일 때 미생물의 양이 약 6,000 mg/L로 증가하였다. 또한 고정화된 미생물들은 부하량이 증가하여도 그 제거 효율이 크게 감소되지 않아, 보다 안정적으로 유지됨을 알 수 있다.

오염물질의 제거효율면에서도 Figure 3에서 보는 바와 같이 체류시간을 8시간까지 감소시켰을 때에도 정상상태에서의 BOD의 농도가 1 mg/L로 99% 이상 제거되었다. 따라서 Jet loop reactor에 의해 충분한 DO의 확보와 담체에 고정화된 미생물량의 증가로 인해 좀더 높은 제거효율을 얻을 수 있었다. Figure 4에서와 같이 체류시간이 24시간일 때 COD_{Mn}의 제거효율은 89%, 12시간일 때 87%였으며, 8시간으로 감소하였을 때 86% 이상의 높은 제거율을 보였다. COD_{Cr}과 색도의 경우도 체류시간이 8시간으로 짧을 때에도 제거효율이 각각 84, 83%로서, 부하변동이 심하고 고농도의 유기오염원을 함유한 종합염색폐수를 짧은 체류시간 안에 높은 효율로서

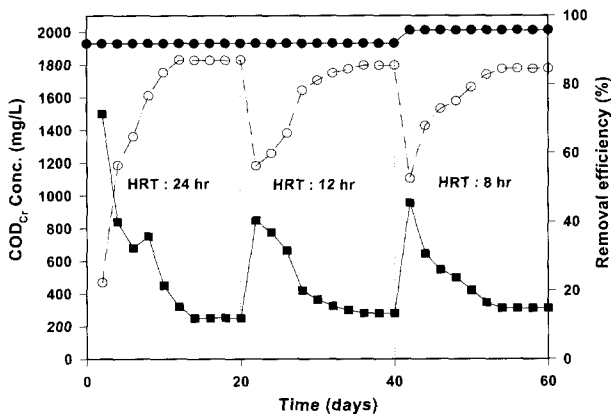


Figure 5. Variation of COD_{Cr} concentration and removal efficiency for the jet-loop reactor with active carbon supports (●- influent, ■- effluent, ○- removal efficiency).

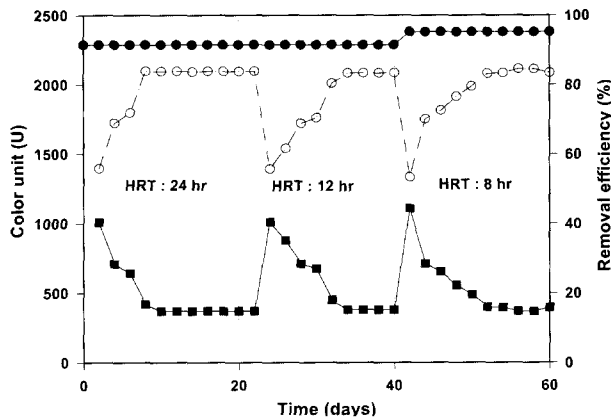


Figure 6. Variation of color concentration and removal efficiency for the jet-loop reactor with active carbon supports (●- influent, ■- effluent, ○- removal efficiency).

처리할 수 있으므로 기존의 1차 응집공정의 응집제의 과다 사용을 개선한 생물화학적 1차 처리 공정으로 사용할 수 있을 것으로 판단되었다(Figure 5, 6).

충격부하 실험

High COD_{Mn} loading rate로의 급격한 변화: 종합염색폐수처리장으로 유입되어지는 염색폐수의 성상은 시간에 따라 급격히 달라지기도 하고 또 작업시간대와 비작업시간에 따라 그 유량의 변화 또한 심한 것으로 알려져 있다. Figure 7에서는 가상적으로 유량 혹은 성상의 급격한 변화를 예상하여 COD_{Mn} loading rate를 급격하게 변화를 시킴으로 활성탄 담체가 포함된 JLR 반응기내의 안정화 정도를 파악하였다. 활성슬러지공정을 조절하기 위해 COD_{Mn} loading rate를 사용하는 경우가 현장에서 많으며 실질적으로 사업장에서 들어오는 feed의 변화를 시설이 큰 처리장에서 즉각적으로 탐지하여 이에 대처하기란 상당히 어려운 운전상의 문제점이 따른 것으로 알려져 있다. 낮은 COD_{Mn} loading rate로 운전되어지던 반응기 내에 feed의 급격한 증가로 높은 COD_{Mn} loading rate로 빠르게 변화하면 미생물의 대사 속도가 0차 반응식에 도 다차에 인자하게 유지되어 질 때까지 상당한 문제점을 유발

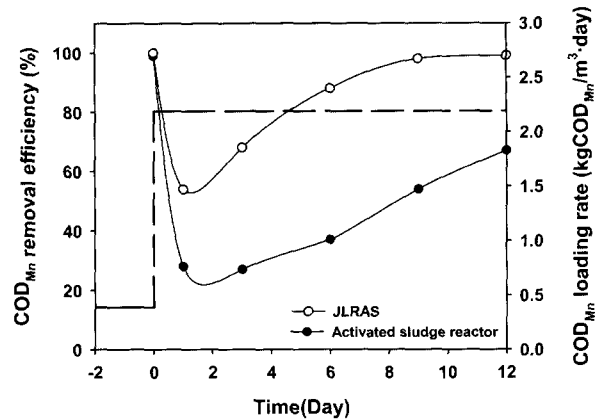


Figure 7. Changing of COD_{Mn} removal efficiency after increase step change of COD_{Mn} loading rate.

하게 된다. 과잉의 기질이 유입되어지면 미생물의 대사속도는 최대로 되며 미생물은 대수 증식하게 되고 이에 따라 단단하고 큰 플러키 형성되지 않으므로 슬러지 침강성이 크게 불량해진다. 폭기조 내에는 균의 농도가 급격히 증가하는데 COD_{Mn} loading rate 0.39에서 $2.19 \text{ kgCOD}_{Mn}/\text{m}^3 \cdot \text{day}$ 까지 증가함에 따라 미생물의 농도가 약 $1,500 \sim 2,500 \text{ mg/L}$ 더 증가하였으며 이런 세균의 증가는 편모충류의 수를 증가시켜 슬러지를 형성하지 않게 된다. 따라서 반응기내가 안정화되어 질 때까지 폐수처리 상등액 즉 방류수에 무수한 편모충류가 세균과 함께 부유되어 방류되므로 방류수가 혼탁해지게되고 방류수의 SS, BOD가 증가된다. Figure 7에서 활성슬러지 반응기내의 제거효율로 보아 그 안정한 상태로의 회복이 많은 시간을 필요로 하는 반면에 JLRAS에서는 실험기간내 약 9~10일 정도에 반응기내의 안정화를 찾고 있다. 이는 활성탄 담체에 흡착된 많은 양의 미생물이 유기물의 증가에 따라 급격히 안정적으로 증식하여 유기물 부하량의 증가에 잘 대처하는 것으로 보여진다.

Low COD_{Mn} loading rate로의 급격한 변화: 높은 COD_{Mn} loading rate ($2.19 \text{ kgCOD}_{Mn}/\text{m}^3 \cdot \text{day}$)에 적응되어진 반응기가 급격하게 낮은 COD_{Mn} loading rate ($0.39 \text{ kgCOD}_{Mn}/\text{m}^3 \cdot \text{day}$)로 변화가 된다면 미생물반응기내에는 상당히 많은 문제점을 유발하게된다. COD_{Mn} loading rate가 낮아지면 대수증식 대신에 미생물의 자가산화가 일어나므로 대체로 슬러지의 침강성은 우수해진다고 보지만 급작스럽게 COD_{Mn} loading rate가 낮아지면 슬러지 bulking 현상을 유발시키게 된다. 이는 사상균의 성장을 유발하고 이후 침전조의 침전속도가 느려지며 슬러지의 농축성이 크게 나빠진다. 또한 미생물반응기내에서 사상균류가 성장하여 우점종을 형성하고 급격하게 양호한 슬러지가 유실되어진다. 이런 상태를 유지할수록 반응기의 효율은 감소하고 인위적인 조사를 통하지 않고서는 쉽게 안정화되어지진 않는다. Figure 8에서 활성슬러지조는 2차 그래프 상 많은 시간이 경과후 안정화 될 것처럼 보이지만 실상 반응기내에는 상당한 bulking 현상을 보이며 좀처럼 실험기간 안에 안정화되지 않았다. 하지만 JLRAS에서는 처음에서 상당히 많은 용액중의 미생물이 유실되었지만 이내 발생되어진 미생물들이 활성탄에 흡착되어지고 활성탄내에 존재하는 양충화 화석수그러지이 서자오르 다시 안정화되어지는 것을 보

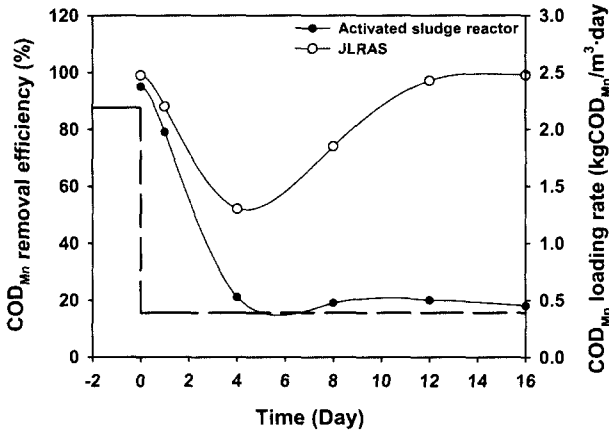


Figure 8. Changing of COD_{Mn} removal efficiency after decrease step change of COD_{Mn} loading rate.

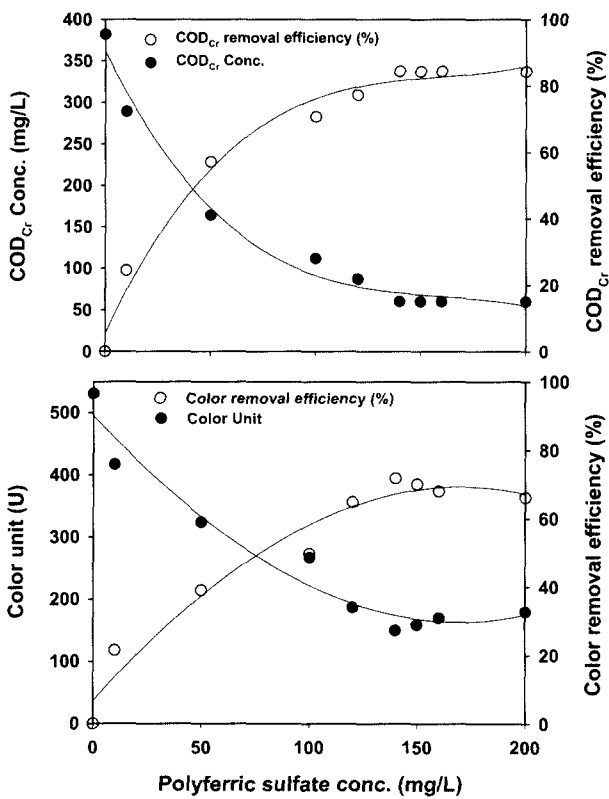


Figure 9. Variation of COD_{Cr} and color concentration and removal efficiency with changing amount of polyferric sulfate after JLRAS treatment.

수 있었다.

2차 응집공정

Figure 9에서와 같이 COD_{Cr}이 1차 생물학적 처리공정인 활성탄 담체가 충전된 Jet loop reactor (JLRAS)에서 원수가 2,400 ppm의 농도로 유입되어 84%의 제거효율을 보였고, 이후 2차 응집공정에서는 폴리 황산 제2철을 130 mg/L 투입하여 최종 유출수의 농도를 70 ppm으로 낮추었다. 이때 응집효율은 약 85% 이상이며 최종공정으로의 유입수의 95% 이

상의 제거를 이루었다. 또한 가장 문제시되고 있는 난분해성 물질들이 주 원인인 색도의 제거에서 1차 JLRAS 공정으로 유입되는 색도는 약 2,400이며 이때 1차 공정으로 83% 이상을 제거하였으며 이후 폴리 황산 제2철을 130 ppm 투입하여 67% 정도 제거하여 최종 유출수의 색도가 150 정도로 낮아졌다. 이때 응집효율은 73% 정도이며 또한 최종 반응기로의 유입수 중 93% 이상의 제거되었음을 알 수 있다. 또한 염색폐수의 법적 규제치와 비교하면 제1종 사업장의 경우 COD_{Mn} 90 ppm, BOD 80 ppm, 색도 400인데 반해서 본 연구는 아주 만족할 만한 결과를 나타내었다.

요약

오늘날 섬유 염색공정에서 발생하는 염색폐수로 인해 많은 문제점들을 야기한다. 염색폐수에는 난분해성의 EG, PVA, TPA, 여러 종류의 계면활성제가 포함되어 있어 완전하게 처리하기가 어렵다. 현재 일반적으로 사용하고 있는 물리화학적 처리와 활성오니공정의 처리성을 향상하기 위하여 jet-loop reactor (JLR)와 물리화학적 처리를 결합한 새로운 공정을 개발하였다. JLR의 부피산소전달계수는 air-lift 반응기에 비해 아주 우수하였다. 또한 좀더 효율적인 처리를 위하여 JLR에 활성탄 담체를 적용하여 (JLRAS) 실험하였다. 체류시간이 8시간일 때 BOD, COD_{Mn}, COD_{Cr}, 색도 제거율은 각각 99, 86, 84, 83%로 우수하였다. JLRAS 성능은 COD_{Mn}의 부하 변동에도 아주 빠르게 회복되었다. 2차 물리화학적 응집처리의 최적 응집제로는 폴리황산제2철이며 130 mg/L 투입하였을 때 COD_{Mn}과 색도의 제거율은 각각 85, 73%였다. 결론적으로 이 공정으로 난분해성의 많은 유기물을 효율적으로 처리할 수 있으며 운전비용도 감소시킬 수 있었다.

감사

이 논문은 2000년 대구보건대학의 학술연구비에 지원에 의해 연구되었으며 이에 감사드립니다.

REFERENCES

- Gorrafa, A. A. M. (1980), Caustic treatment of polyester filament fabrics, *Textile Chem. Color.* **12**(4), 83-90.
- Yoon, H. K. and C. N. Choi (1984), A study on the weight loss of polyester fabric in caustic soda solution of organic solvent/water, *J. Kor. Soc. Textile Eng. Chem.* **21**(2), 13-20.
- Song, S. K. and S. Y. Kim (1983), A study on the weight loss of polyester fiber by alkali treatment, *J. Kor. Soc. Textile Eng. Chem.* **20**(4), 9-15.
- Park Y. K., C. H. Lee, J. D. Rhee, M. K. Lee and B. R. Cho (1981), A systematic treatment of waste water for dyeing industry complex, *J. Environ. Res. Inst.* **1**(1), 24-30.
- Park Y. K., C. H. Lee, and M. K. Lee (1982), Optimization of activated sludge process design for the waste water from the large-scale dyeing industrial complex, *J. Environ. Res. Inst.* **2**(1), 25-32.

6. Park Y. K. and J. H. Kang (1982), Ozonolysis of acid dyes in aqueous solutions, *J. Environ. Res. Inst.* **2**(1), 33-40.
7. Chapman, T. D. and L. C. Matsch (1975), Effect of high dissolved oxygen concentration in activated sludge system, *J. Water Pollut. Control*, 151-161.
8. Irvine, A. W. (1979), Sequencing batch biological reactors-an overview, *WPCF*, **5**, 235-243.
9. Tyagi R. D. and K. Vembu (1982), Wastewater treatment by immobilized cells, p.15, CRC Press, Boston.
10. Hegemann, W. (1984), A combination of the activated sludge process with fixed film biomass to increase the capacity of wastewater treatment plant, *Wat. Sci. Tech.*, **16**, 119-130.
11. Blenke, H. (1985), Biochemical loop reactors fundamentals of biochemical engineering, p.465, Weinheim VCH Verlagsgesellschaft.
12. Velan, M. and T. K. Ramanujam (1991), Hydrodynamics in down flow jet loop reactor, *Can. J. Chem. Eng.* **69**, 1257-1261.
13. Liang, W. (1996), Flow characteristics and mixing properties in a high velocity liquid-solid loop reactor, *Chem. Eng. J.* **63**(3), 181-188.
14. Snape, J. B. (1995), Liquid-phase properties and sparger design effects in an external-loop airlift reactor, *Chem. Eng. Sci.* **50**(20), 3175-3186.
15. Kienle, A. (1995), On the dynamics of the circulation loop reactor numerical methods and analysis, *Chemical Eng. Sci.* **50**(15), 2361-2375.
16. Kersting, C. H. (1995), Residence time distribution of a screw-loop reactor : experiments and modeling, *Chem. Eng. Sci.* **50**(2), 299-308.
17. Seung, K. D., W. R. Ryu, I. H. Kim and M. H. Cho (2001), Removal of Ammonia Nitrogen and Organics from Piggery Wastewater Using BACC Process-II. Effect of COD/N on Removal of Nitrogen and Organics, *Kor. J. Biotech. Bioeng.*, **16**(2), 140-145.
18. Seung, K. D., W. R. Ryu, I. H. Kim and M. H. Cho (2001), Removal of Ammonia Nitrogen and Organics from Piggery Wastewater Using BACC Process- I. Comparison of Activated Sludge Process, *Kor. J. Biotech. Bioeng.*, **16**(2), 133-139.
19. Michael L. Shuler and Fikret Kargi (1992), Bioprocess Engineering, pp.307-311, Prentice-Hall, New Jersey.
20. APHA, AWWA, WEF (1992), Standard Methods for the Examination of Water Wastewater, 18th Ed., p5520.