

산업폐수 중의 질소 성분의 제거를 위한 고도처리 공정의 응용

¹방 성 훈 · ^{1,2}임 은 태 · ^{3,4,9}정 귀 택 · ^{3,4,9}박 재 희 · ^{3,4,9}박 석 환 · ⁵김 성 준 · † ^{3,4,6,7,8,9}박 돈 희
¹(주)태림인더스트리, ²전남대학교 물질·생물화학공학과, ³생명과학기술학부, ⁴바이오에너지 및 바이오소재 협동과정,
⁵환경공학과, ⁶기능성식품연구센터, ⁷생물공학연구소, ⁸축매연구소, ⁹공업기술연구소
(접수 : 2008. 5. 20., 게재승인 : 2008. 11. 3.)

Application of Advanced Treatment Process for Nitrogen Compounds Removal of Industrial Waste-water

Sung-Hun Bhang¹, Eun-Tae Lim^{1,2}, Gwi-Taek Jeong^{3,4,9}, Jae-Hee Park^{3,4,9}, Seok-Hwan Park^{3,4,9},
Seong-Jun Kim⁵, and Don-Hee Park^{3,4,6,7,8,9†}

¹Taerim Industry Co., Ltd, Jeonnam 520-340, Korea, ²Department of Material Chemical and Biochemical Engineering,
³School of Biological Sciences and Technology, ⁴Interdisciplinary Program of Graduate School for Bioenergy & Biomaterials,
⁵Department of Environmental Engineering, ⁶Functional Food Research Center, ⁷Biotechnology Research Institute,
⁸Research Institute for Catalysis, ⁹Engineering Research Institute, Chonnam National University, Gwangju 500-757, Korea
(Received : 2008. 5. 20., Accepted : 2008. 11. 3.)

This paper was studied to research regarding the removal of contained nitrogen in industrial wastewater which uses the A2O4 advanced water treatment process. The field researches of two companies' wastewater occurred in each wastewater treatment site to apply the A2O4 process system, it was observed them for 20 days. As a result of the A2O4 system advanced wastewater process which applied an altitude control process obtained 10~76 mg/L, and 20 mg/L total nitrogen compound concentration in the two wastewater plants. In conclusion, it applied the A2O4 system in the two companies' wastewater system.

Key Words : nitrogen compound, industrial wastewater, advanced treatment, A2O4 process

서 론

최근 우리나라는 산업화에 따른 용수사용량의 증가로 물 부족 현상과 오염물질의 부하량 증대를 유발하고 이에 따라 하천 및 호수수의 부영양화를 발생시키는 등 자연정화능력은 한계에 달하고 있다. 이러한 과도한 영양염류의 유입으로 인한 하천의 부영양화와 바다의 적조 발생은 환경문제뿐만 아니라, 경제적으로도 큰 피해를 유발하고 있는 실정이다(1).

질소와 인은 폐수를 처리하여 배출시 고려하여야 할 주요 영양염류들이다. 특히 질소를 포함한 유출수는 얇은 하천에서 조류와 수생식물의 성장을 촉진시키고, 이는 수자원의 이용을 저해하게 된다. 처리된 유출수 내에 질소 농도가 높은 경우 수자원의 용존산소(dissolved oxygen)를 고갈시키고, 수중생물에 독성

(toxicity)을 유발하고 염소소독의 효율에 영향을 끼치며, 공공보건상의 위해(hazard)를 야기하고, 하수 재사용(reuse) 여부를 결정하는데 부정적 영향을 나타낼 수 있다(1, 2).

이에 따라 정부는 공공수역에 유입되는 질소를 저감하기 위하여 1997년 1월 1일 부터 팔당호, 대청호 및 낙동강 유역을 총 질소 배출허용기준 적용지역으로 지정(환경부고시 제1995-143호, 1995.12.26) 관리하여 왔다. 그러나 일부지역에 대한 규제만으로는 수질개선 효과가 미흡하여 2003년 1월 1일 부터는 전국의 모든 폐수배출시설에 총 질소배출허용기준을 적용하여 법적 방류수 내의 총 질소(T-N) 농도를 60 mg/L이하로 규제를 강화하였다. 그러므로 각 사업장의 폐수처리장에서의 적절한 질소 처리 대책이 요구되고 있다(1, 3).

과거 수십 년간 하·폐수 처리공정의 수는 급격히 증가하였으며, 이중에서 많은 종류의 처리 공정이 질소화합물(nitrogen compound)을 다른 물질로 전환하거나, 제거하는 공정으로 지속적으로 개발되어 왔다. 질소 제거가 주목적이 아닌 다른 하·폐수 처리공정들(water-treatment process)도 질소화합물을 포함한 고농도의 다른 화합물을 제거하는데 사용되고 있지만,

† Corresponding Author : School of Biological Sciences and Technology, Chonnam National University, Gwangju 500-757, Korea
Tel : +82-62-530-1841, Fax : +82-62-530-1910
E-mail : dhpark@chonnam.ac.kr

이와 같은 처리공정으로는 단지 적은 양만이 처리될 뿐 아니라, 특수한 형태의 질소화합물은 거의 제거되지 못하고 있다. 일반적으로 질소화합물의 처리공정을 도입하는 계획을 수립할 때에는 유입수의 질소화합물의 형태와 농도, 요구되는 처리수의 수질, 현 처리공정, 비용, 신뢰도, 적용 가능성과 같은 세밀한 검토가 필요하다. 기존의 하·폐수 내의 질소제거를 위해 사용되는 공정은 물리화학적 방법과 생물학적 방법으로 대별할 수 있다(2, 4, 5).

물리화학적 방법 (physical and chemical method)으로는 breakpoint chlorination, 암모니아 stripping, 이온교환법 등 기타 방법과 단백질, 요소와 같은 유기물의 형태와 암모니아와 같은 무기물 형태로 존재하는 질소원 중에서 유기질소는 미생물에 의해 암모니아로 분해되고 분해된 암모니아는 미생물 증식에 필요한 영양소로 흡수되거나 에너지원 (energy source)과 전자수용체 (electronic acceptor)로 사용되어 질소가스로 제거되는 생물학적 처리방법이 있다(6, 7).

현재까지 개발된 폐수의 고도처리 기술은 생물학적 처리법과 물리화학적 처리법을 단독 또는 병합하여 적용하고 있으며, 그 선택에 있어서는 각 사업장의 제조 공정 중 발생하는 폐수 내 오염물질의 성상과 농도에 따라 가장 효과적인 방법을 활용하는 것이 필요하다. 특히 고농도 질소 함유 폐수의 경우 질산화에 성공하더라도 함유하고 있는 유기탄소원의 함량에 따라 탈질 효율에 큰 차이를 보이고 있다(4, 8).

생물학적인 질소제거의 경우에는 자가영양균에 의한 암모니아성 질소의 질산화 (nitrification)와 산소가 존재하지 않는 무산소 조건에서 산화질소를 전자수용체로 사용할 수 있는 종속 영양균에 의한 탈질화 (denitrification)로 인해서 질소기체로 환원시켜 제거할 수 있는 것으로 알려져 있다(4, 5). 생물학적 2차 처리시나 질산화 과정에서 약간의 질소가 세균의 세포로 동화되는 현상이 발생하는데 이를 차단하기 위해서는 잉여 슬러지를 제거함으로써 질소제거의 효과를 높이게 된다. 그러나 이와 같은 공정에서의 총 질소 제거율은 10~20%에 불과하므로 활성 슬러지 공법을 일부 변형한 질소 제거 공정이 사용되고 있다. 이것은 하수 중의 암모늄이온이 호기성 (aerobic) 상태에서 미생물에 의해 생물학적으로 질산화 (nitrification) 되었다가, 다시 무산소 (anoxic) 상태에서 탈질화 (denitrification) 반응이 일어나 질소화합물이 질소 가스로 환원됨으로 질소 제거가 이루어진다. 하·폐수 중의 질소를 제거하기 위해서는 질산화와 탈질화가 모두 필요하며, 이 반응들을 위한 공정들은 침전조의 수에 따라 single sludge process, dual sludge process, triple sludge process로 구분되며, 이외에도 4단 bardenpho process 등이 있다(8-11).

본 연구에서 사용한 A2O4 공법(Fig. 1)은 질소순환 공정을 이용하는 방법으로 호기적 조건에서 암모니아성 질소 및 유기성 질소 (아민계열 포함)등은 질산화 미생물의 작용에 의한 질산화 공정을 거쳐 아질산성 질소 및 질산성 질소로 전환시킨다. 암모니아성 질소나 유기성 질소로부터 전환된 아질산 및 질산성 질소 등을 무산소 조건에서 혐기성 미생물에 의하여 탈질화 공정을 거쳐 최종적으로 N₂ 가스로 대기 중에 방출하는 원리를 이용하고 있다(9).

본 연구에서는 각종 산업 폐수 중 총질소의 고도처리를 위하여 A2O4 공정을 실제 현장에 적용하여 폐수 종류에 따른 총 질소 처리효율을 검토하였다.

재료 및 방법

실험재료

본 실험에서는 첨가탄소원으로 메탄올, 부탄올, 부탄올폐수 (나주 L화학), 당밀, 광주 D 유지폐수, 대구 J 물산 염색폐수를 실험에 사용하였다.

시료폐수의 성상

실험의 재료로 사용된 각각의 원폐수의 성상과 질산화가 완료된 상태의 폭기조 수의 성상은 다음과 같다(Table 1~2). 또한 실험에 사용한 유지, 염색, 피혁, 침출수 폐수는 원폐수의 총질소 함량은 매우 높으나, 원폐수 속에 함유된 유기물의 함량은 낮아 C/N비가 1.0 이하인 폐수로서 총질소의 처리 시 첨가탄소원이 필요하였다.

D 유지공장 폐수

유지폐수는 동물성 폐유를 모아 재가공하는 과정에서 발생하는 폐수로 광주광역시 D 유지에서 발생하는 폐수를 분석한 결과를 나타내었다(Table 1).

J 염색공장 폐수

염색 (날염)폐수는 안료, 합성수지 (초기축합물), 용제, 물 등으로 날염풀을 만들고, 이것을 날인 롤러 또는 스크린을 써서 날염하고자 하는 섬유물에 날인하는 과정에서 발생하는 폐수로 대구광역시의 J 물산에서 발생하는 폐수를 분석한 결과를 나타내었다(Table 1).

Table 1. Properties of waste-water

Component	Item D oil & fat Co. waste-water		J dyeing Co. waste-water	
	Raw water	Nitrified water	Raw water	Nitrified water
pH	7.8	6.7	7.65	6.44
BOD (mg/L)	106	48	250	40
COD (mg/L)	122	37	300	102
MLSS (SS) (mg/L)	(50)	4,800	(115)	7,300
T-N (mg/L)	285	70	460	93
NH ₄ -N (mg/L)	250	20	130	3.2
NO ₂ -N (mg/L)	0	0	0	0
NO ₃ -N (mg/L)	0	45	5	72.5

첨가탄소원

실험에 사용한 첨가탄소원은 메탄올, 부탄올, 부탄올폐수 (나주 L화학 부탄올 생산공정에서 배출되는 부탄올 폐수), 당밀 (원당밀)을 실험에 사용하였다. Table 2에 실험에 사용한 각각의 첨가탄소원의 특성을 나타내었다.

Table 2. Properties of three added carbon sources

Component	BOD	COD	T-N
Methanol	1,050,000	149,100	NT
Butanol	NT	146,000	NT
Waste butanol	105,000	12,600	560
Molasses	NT	93,400	5,090

NT : No Test.

활성슬러지

생물학적 탈질공정에 사용한 활성슬러지는 광주 D 유지와 대구

J 물산에서 질산성질소 성분의 농도가 최대치인 호기조에서 각각 채취하여 각각의 현장실험에 사용하였다.

A2O4 고도처리공법 현장 적용

총 질소를 처리하고 있는 A2O4 고도처리 공법 현장 중 메탄올을 첨가탄소원으로 사용하던 유지폐수 현장에 본 실험에서 메탄올을 사용한 경우와 비교하여 우수한 효율을 보인 당밀과 폐부탄올을 적용하여 그 처리효율을 확인하고자 하였다. A2O4 공정과 첨가탄소원의 투입점을 Fig. 1에 나타내었다.

유지공장 폐수에 적용

유지폐수는 동물성 폐유를 모아 재가공하는 과정에서 발생하는 폐수로 광주 D 유지 폐수처리 현장에 A2O4 고도처리 공정을 적용하고 첨가탄소원으로 폐부탄올을 사용하여 탈질효율을 분석하였다. 현장실험에 사용된 폐수처리설비의 규모는 Table 3에 나타내었다. 하루에 유입되는 폐수의 유입량은 35 m³/d이었다.

J 염색공장 폐수에 적용

염색 (날염)폐수는 안료, 합성수지, 용제, 물 등으로 날염품을 만들고, 이것을 날린 롤러 또는 스크린을 써서 날염하고자 하는 섬유물에 날인하는 과정에서 발생하는 폐수로 대구의 J 물산에서 발생하는 염색 폐수처리 현장에 A2O4 고도처리 공정을 적용하고 첨가탄소원으로 메탄올을 사용하여 탈질효율을 분석하였다. 현장 실험에 사용된 폐수처리설비의 규모는 Table 3에 나타내었다. 하루에 유입되는 폐수의 유입량은 350 m³/d이었다.

분석방법

pH

폐수의 pH는 Ecomet사의 IC-324 table pH meter를 사용하여 측정하였다.

총질소 (T-N)

폐수 및 처리수 중의 총질소는 수질오염 공정시험법중의 한 방법 자외선흡광광도법을 이용하여 분석하였다(12). 분석에 사용한 분광광도계는 UV-1601 (SHIMADZU, Japan)을 사용하였다. 총질소의 분석방법은 분해병에 증류수+시료를 50 mL 넣은 후 알칼리성 과황산칼륨용액 (증류수 50 mL에 NaOH 2 g과 K₂S₂O₈ 1.5 g을 녹인다. 사용시 조제)을 10 mL씩 첨가하여 멸균기에서 120℃, 30분 가열하여 전처리 후 방냉한다. 전처리된 시료를 비색관에 25 mL 취하여 HCl (1+16) 5 mL (검량선 작성용 시료에는 HCl (1+500) 5 mL 첨가)를 첨가한 후 분광광도계를 이용하여 220 nm에서 측정한다. 검량선은 질산성 질소 표준액을 사용하여 검량선을 작성하였다.

화학적 산소요구량 (COD)

폐수 및 처리수 중의 화학적 산소요구량은 산성 100℃ KMnO₄ 법을 사용하여 측정하였다(12).

결과 및 고찰

본 연구에서 사용한 A2O4 공법(Fig. 1)은 질소순환 공정을 이용

하여 호기적 조건에서 암모니아성 질소 및 유기성 질소 (아민 계열 포함)등은 질산화 미생물의 작용에 의한 질산화 공정을 거쳐 아질산성 질소 및 질산성 질소로 전환시킨다. 암모니아성 질소나 유기성 질소로부터 전환된 아질산 및 질산성 질소 등을 무산소 조건에서 혐기성 미생물에 의하여 탈질화 공정을 거쳐 최종적으로 N₂ 가스로 대기 중에 방출하는 원리를 이용하여 타 공법에 비하여 경제적이면서도 효과적인 질소처리를 수행하고자 하였다. 실험에 사용한 장치는 2개의 무산소조와 4개의 호기조로 구성되어 있으며, 호기조로부터 각각의 무산소조로 일정량의 내부반송 (1.5 Q~2.5 Q)을 통하여 질산화에 따른 pH 저하나 독성물질의 유입 등에 따른 충격부하를 최소화할 수 있도록 생물학적 조를 구성하였다. 질산화 미생물의 생육 조건 (성장속도가 현저히 느린 점, pH에 민감한 반응을 받는 점, 유기물의 농도가 높은 생물조에서의 활성이 대단히 느린 점, 산소농도가 낮은 생물조에서는 성장을 거의 하지 않는 점 등)을 고려하여 설계하였다(9).

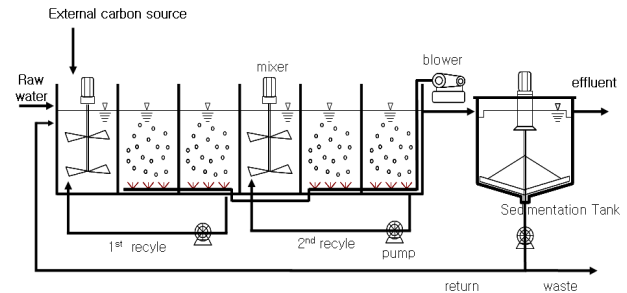


Figure 1. Schematic diagram of A2O4 advanced treatment process and adding place of carbon source.

A2O4 공정을 적용한 유지폐수 처리현장에서의 질소 처리

유지폐수는 동물성 폐유를 모아 재가공하는 과정에서 발생하는 폐수로 광주광역시 D유지에서 발생하는 폐수이다. 첨가탄소원으로 기존의 메탄올을 사용하던 유지폐수 현장 (광주 D유지)(Table 2)에 첨가탄소원으로 폐부탄올을 적용하여 탈질효율을 시험하였다. 광주 D 유지의 처리시설은 Table 3에 나타낸 것과 같이 용량 35 m³/d이며, A2O4 공정으로 수행하여 얻은 결과를 Fig. 2~4에 나타내었다.

Table 3. Waste-water treatment facilities

Facility	D oil & fat company	J dyeing company
Treatment quantity (m ³ /d)	35	350
Biological treatment facilities (m ³)		
• 1 st anaerobic basin	14	50
• 1 st aerobic basin	26	150
• 2 nd aerobic basin	22	220
• 2 nd anaerobic basin	14	100
• 3 rd aerobic basin	16	506
• 4 th aerobic basin	16	50
• Sedimentation tank	9	57

Fig. 2는 유지폐수의 탈질공정에서 처리기간의 경과에 따른 COD의 변화를 나타낸 것이다. 원폐수 중의 COD는 처리

기간 내에 최대 110 mg/L에서 최소 58 mg/L 수준으로 처리 시설에 공급되었다. A2O4 처리공정을 거친 처리수 중의 COD는 초기 1일 때에 54 mg/L를 제외하고는 시험기간 20일 동안 18-34 mg/L 정도를 유지하였다. COD 제거율은 39.3% (1일)~80% (15일) 정도를 유지하였다. 일반적으로 60% 이상의 COD 제거율을 나타내었다.

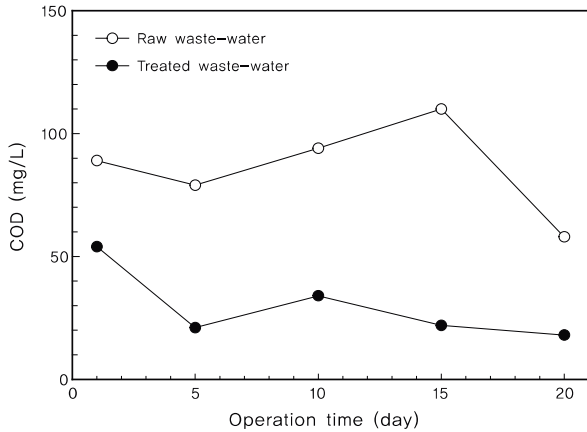


Figure 2. Time course trajectory of COD change in D oil & fat Co. waste-water denitrification process.

Fig. 3은 유지폐수의 탈질공정에서 처리기간의 경과에 따른 원폐수 및 처리수 중의 pH 변화를 나타낸 것이다. 원폐수 중의 pH는 시험기간 20일 동안 7.2에서 8.4 정도로 유지하면서 공급되었다. 탈질 공정 후 배출되는 처리수 중의 pH는 5.6에서 7.4 정도를 유지하였다. 이는 처리수의 pH가 원폐수에 비하여 1~1.5 정도 낮게 유지 되는 것이다. 이는 탈질공정에서 최적의 pH가 7.0에서 7.5 사이인 것으로 보고된 것과 유사한 결과이다(8).

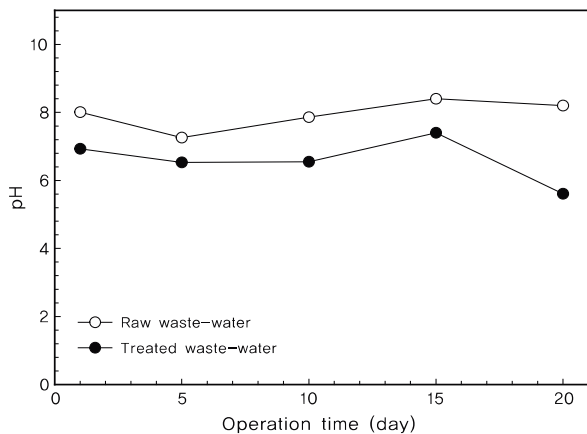


Figure 3. Time course trajectory of pH change in D oil & fat Co. waste-water denitrification process.

Fig. 4는 유지폐수의 탈질공정에서 처리기간의 경과에 따른 원폐수 및 처리수 중의 총질소 (T-N) 함량 변화를 나타낸 것이다. 공급되는 원유지폐수 중의 T-N 함량은 시험기간 20일 동안 220~300 mg/L 수준으로 공급되었다. 탈질공정 후 배출되는 T-N의 함량은 10~76 mg/L를 유지하였다. T-N 제거율은 처리시작 1일 후에 67.4%, 10일 후에 73.8%, 15일 후에 96.1%, 그리고 20일 후에 75%의 제거율을 나타내었다.

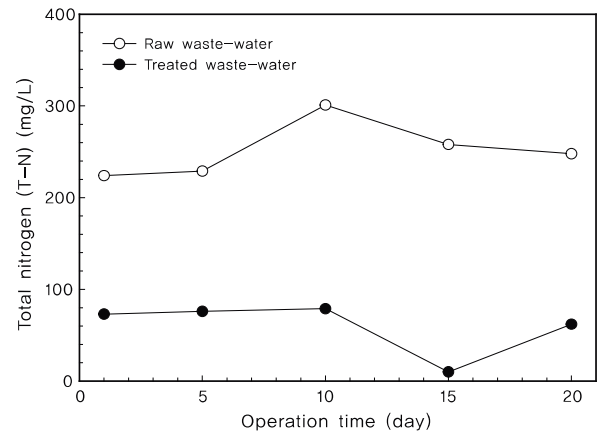


Figure 4. Time course trajectory of total nitrogen change in D oil & fat Co. waste-water denitrification process.

A2O4 공정을 적용한 염색폐수 처리현장에서의 질소 처리

염색 (날염)폐수는 안료, 합성수지 (초기축합물), 용제, 물 등으로 날염풀을 만들고, 이것을 날인 롤러 또는 스크린을 써서 날염하고자 하는 섬유물에 날인하는 과정에서 발생되는 폐수로 대구 J물산에서 발생하는 폐수(Table 2)를 A2O4 공법에 적용하여 처리를 수행하였다. 대구 J물산의 염색폐수 처리시설은 용량 350 m³/d이며, A2O4 공정을 적용하여 얻은 결과를 Fig. 5~7에 나타내었다.

Fig. 5는 염색폐수의 탈질공정에서 처리기간의 경과에 따른 COD의 변화를 나타낸 것이다. 원폐수 중의 COD는 시험기간 동안 248~440 mg/L 수준으로 처리시설에 공급되었다. A2O4 탈질 처리공정을 거친 처리수 중의 COD는 시험기간 초기 1일 후에 214 mg/L로 약 50.2%의 제거율을 나타내었다. 처리기간 이 경과함에 따라 처리수 중의 COD 농도는 214 mg/L에서 33 mg/L 까지 유입되는 원폐수의 COD 농도와 무관하게 거의 선형적으로 감소하는 경향을 나타내었다. 처리기간 20일 후에는 COD 농도 33 mg/L로 86.7%의 제거율을 나타내었다.

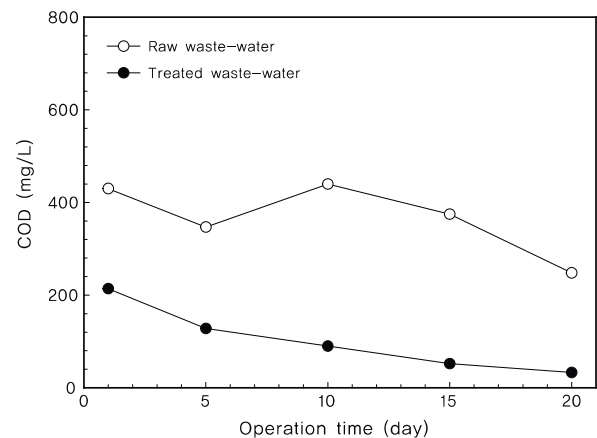


Figure 5. Time course trajectory of COD change in J dyeing Co. waste-water denitrification process.

Fig. 6은 염색폐수의 탈질공정에서 처리기간의 경과에 따른 원폐수 및 처리수 중의 pH 변화를 나타낸 것이다. 원폐수 중의 pH는 시험기간 20일 동안 6.3에서 8.5 정도로 유지하면서

공급되었다. 탈질 공정 후 배출되는 처리수 중의 pH는 6.2에서 8.0 정도를 유지하였다. 이는 처리수의 pH가 원폐수에 비하여 1.3~2 정도 낮게 유지 되는 것이다.

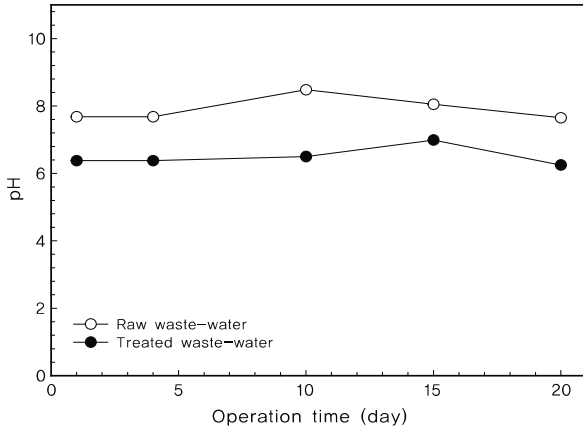


Figure 6. Time course trajectory of pH change in J dyeing Co. waste-water denitrification process.

Fig. 7은 염색폐수의 탈질공정에서 처리기간의 경과에 따른 원폐수 및 처리수 중의 총질소 (T-N) 함량 변화를 나타낸 것이다. 공급되는 원폐수 중의 T-N 함량은 시험기간 20일 동안 460~630 mg/L 수준으로 공급되었다. 탈질공정 후 배출되는 T-N의 함량은 491~25 mg/L를 유지하였다. T-N 제거율은 처리시작 1일 후에 491 mg/L (4.8%)에서, 10일 후에 400 mg/L (14.9%)를 나타내었다. 처리기간 10일 이후부터는 급격한 T-N 함량의 감소를 나타내어 처리기간 20일에는 처리수 중에 20 mg/L의 T-N 함량을 나타내었다. 이는 처리효율 96%를 나타내는 것이다.

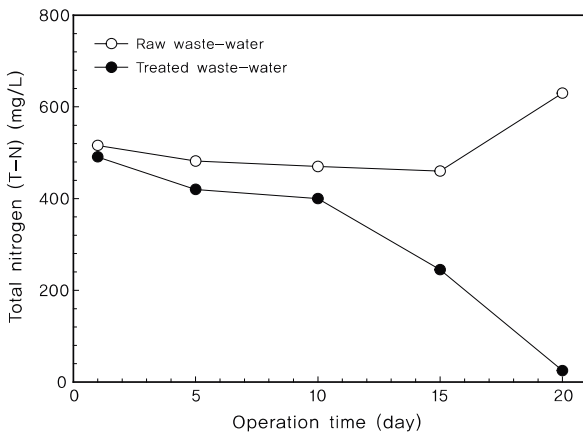


Figure 7. Time course trajectory of total nitrogen change in J dyeing Co. waste-water denitrification process.

결론

본 연구는 A2O4 고도처리 공정을 이용한 산업폐수 중의 질소 성분의 제거에 관한 현장연구이다. 현장연구를 위해 유지폐수, 염색폐수가 발생하는 각각의 폐수처리 현장에 A2O4 공정을 적용하여 20일의 처리기간 동안 질소 성분의 제거효율을 연구 하였다.

A2O4 고도처리 공정을 광주 D 유지 폐수처리 현장에 적용한 결과 탈질공정 후 배출되는 총 질소의 함량은 10~76 mg/L를 유지 하였다. 대구 J 염색 폐수처리 현장에 적용한 결과 10일 이후 부터는 급격히 총 질소 함량이 감소하여 20일 후에는 처리수 중의 총 질소 함량이 20 mg/L로 처리효율이 96%에 이르렀다. 결론적으로 본 실험에서 사용된 A2O4 고도처리 공법은 유지 폐수와 염색폐수 처리에 적용될 수 있다고 사료된다.

감사

본 연구는 본 연구는 교육과학기술부와 한국산업기술재단의 지역혁신인력양성사업으로 수행된 연구결과이며, 이에 감사드립니다. 또한 지식경제부와 한국에너지자원기술기획평가원의 특성화대학원사업의 지원에 감사드립니다.

REFERENCES

1. 환경부, 환경백서, 2006.
2. 조영일 외 6명 (1998), 환경공학, 동화기술, 한국.
3. <http://www.me.go.kr/>.
4. 김갑수 외 2명 (2000), 하수의 고도처리기술, 동화기술, 한국.
5. 배우근 외 2명 (2002), 생물환경공학 생물학적 처리 원리와 응용, McGraw-Hill Korea., 한국.
6. 이학성, 유익근, 박진도, 생물학적 폐수처리, UUP (울산대학교 출판부), 2003.
7. U.S. EPA (1993), Manual :nitrogen control, EPA/625/R-93/010.
8. Samsung Engineering Co. Ltd., Short-cut nitrogen removal technology using *Nitrosomonas* immobilized media, Research report, Ministry of Environment, 2001.
9. Bhang, S. H. (2007), Nitrogen Compounds Removal of Industrial Waste-water Using Advanced Treatment Process, Master thesis, Chonnam National University, Gwangju, Korea.
10. Focht, D. D. and A. C. Chang (1975), Nitrification and denitrification processes related to wastewater treatment, *Adv. App. Microbial* **19**, 153-186.
11. Barnes, D. (1979), A critical analysis of nitrification alternatives, *Wat. Res.* **13**, 185-195.
12. 환경부고시 제 1995-91, 1995.8.7. 수질오염공정시험방법.