

석유화학폐수 처리장 방류수의 재이용을 위한 고정생물막 공정에서 Fenton 산화전처리의 적용가능성

이규훈 · 김미화 · 박태주

부산대학교 환경공학과
(1995년 8월 4일 접수)

Applicability of the Fenton's Reagent Oxidation to Biological Fixed-Film Process for Reuse of Effluents from the Petrochemical Wastewater Effluent Treatment Plant

Kyu-Hoon Lee, Mi-Hwa Kim and Tae-Joo Park

*Dept. of environmental engineering, College of Engineering,
Pusan National University, Pusan, 609-735, Korea
(Manuscript received 4 August 1995)*

Abstract

Reuse of industrial effluents through the cooling systems in a petrochemical complex was described. The partial oxidation of the effluents from the biological treatment plant was examined, using Fenton's reagent as a pretreatment step prior to a next treatment of the effluents. Next tertiary treatment using fixed-film reactor resulted in marked reductions in COD and suspended solids. The continuous fixed-film process with Fenton oxidation pretreatment showed a 23% increase in the COD removal efficiency when compared to that without pretreatment of Fenton oxidation under the volumetric organic loading rate of 0.1 kg COD/m³/day. The Fenton oxidation treatment seemed to be a possible method for tertiary biological treatment to reduce the residual toxicity with the enhanced biodegradation of the effluents.

Key Words : partial oxidation, Fenton's reagent, tertiary treatment, fixed-film biological reactor, biodegradation

1. 서 론

지속적인 인구의 증가, 지표수 및 지하수의 오염, 수자원의 불공정한 분배와 주기적인 가뭄 등으로 인하여 관련기관에서는 용수의 적절한 공급을 위한 새로운 용수원을 찾아왔다. 폐수의 배출 허용기준 강화추세에 따라 그동안 하천이나 바다

등으로 방류되어 왔던 공장폐수처리장 폐수의 적절한 처리를 거친 유출수가 최근에는 새로운 용수원으로 주목받고 있다.

석유화학계열공장에서는 제품생산에 필요한 용수의 수요가 급격히 증가하고 있으며, 따라서 적정 처리시설에서 방류되는 유출수를 고차처리하여 공장공정수(보일러 보충수, 냉각용수, 냉각탑 보충

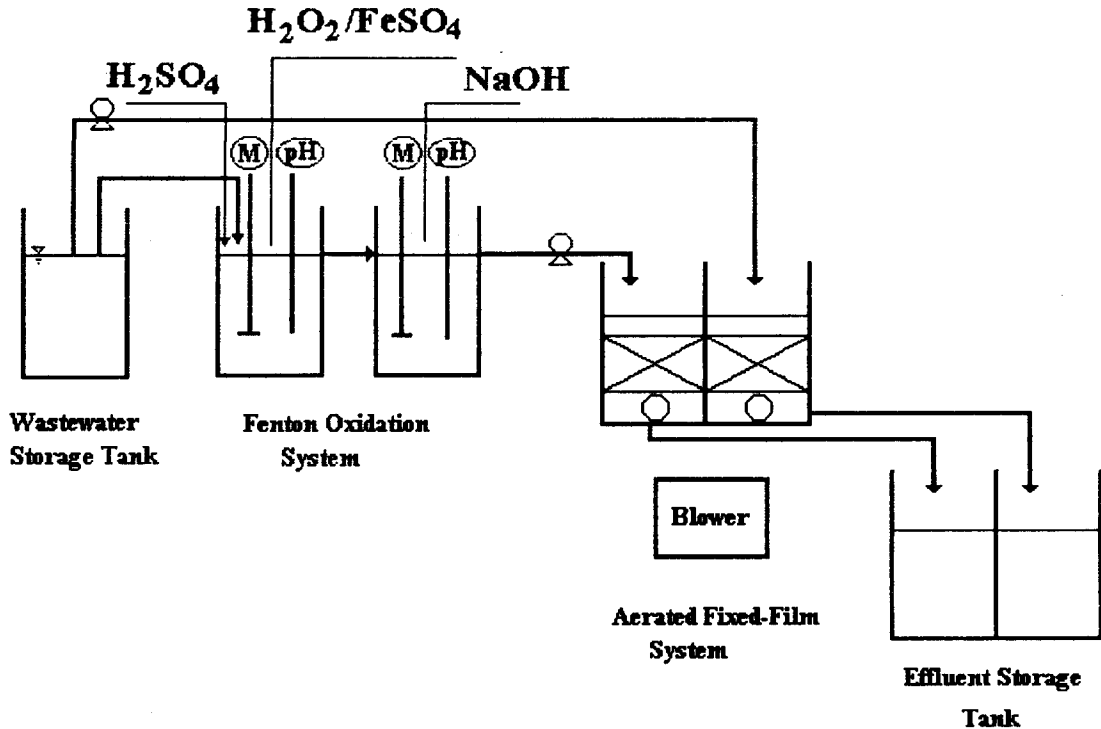


Fig. 1. Schematic diagram of the aerated submerged fixed-film reactor.

수 등)로 재사용하는 것이 바람직할 것이다. 그러나 폐수의 배출허용기준 강화추세에 대비하고 공장공정수로의 재이용을 위해서는 비교적 높은 수준의 수질이 요구되고, 이는 경제적 비용증가와 직결되고 있어 현재 우리나라에서의 고차처리 공정개발은 미미한 수준에 있다. 또 유출수에는 상당한 양의 난분해성 유기물, 부유 및 용존성 고형물질등을 함유하고 있어 재사용하기 위한 생물학적 공법 도입시는 이러한 유기물질이 생물학적으로 분해가 용이한 상태로 되어야만 한다.

폐수처리장 최종 방류수에 포함된 난분해성 유기물질을 분해하기 위해 화학적 산화제를 사용할 수 있는데, 일반적으로 난분해성 유기물질을 함유한 폐수에 전처리로 화학적 산화를 실시할 경우 후처리의 생물학적 산화는 성공적으로 수행될 수가 있고 경제적으로도 화학적 산화만 하는 것보다 더 효율적이라고 하였다(Walling과 Kato, 1971;

Wang, 1992). 대체로 화학적 산화제로는 오존, 과산화수소, 과망간산칼륨, 염소 또는 차아염소산 등이 사용되고 있으며, 이산화염소가 산업폐수의 산화처리에 가장 적합하다고 알려져 있다(Morook *et al.*, 1988; Sedlak과 Anderson, 1991). Sims(1981)는 폐물분해를 위한 산화제 중 과산화수소가 가장 경제적이며 취급하기 쉽고 독성물질이나 발색물질을 생성하지 않는 잇점을 가진다고 하였다. 화학적 산화법에 의한 유기물질의 생분해도 변화와 독성 감소에 대한 Wang(1992), Bowers *et al.*(1989)과 Zepp(1992)의 연구결과를 보면 오존, 과산화수소, 과망간산칼륨 중 과산화수소가 가장 독성이 적고 경제적인 산화제라는 것으로 알려졌다.

본 연구자는 석유화학공장의 폐수처리장 2차 방류수를 사용하여 Fenton 산화 전처리를 통한 연구결과를 보고한 바 있으며, Fenton 산화 전처리를 실시할 경우 방류수내 난분해성 물질이 생물학적

으로 분해가능한 상태로 일부 전환된다고 하였다 (Fenton, 1984; 박태주, 1995). 이러한 연구결과를 토대로 본 연구에서는 고급산화공정(AOP)중의 하나인 Fe^{2+} 와 H_2O_2 를 조합한 Fe^{2+}/H_2O_2 시스템(오동규, 1993)을 이용하여 폐수내에 존재하는 난분해성 물질의 생분해도를 높인 폐수를 바로 후속처리공정인 고정생물막 반응기에 적용하여 Fenton 산화처리가 고정생물막 공정에 미치는 영향을 고찰하였으며, 유출수질도 관찰하여 방류수의 재사용 가능성을 검토하였다.

2. 실험재료 및 방법

2.1 실험장치, 사용 미디어 및 분석방법

고정생물막 공법 실험장치로는 Fig. 1에서와 같이 아크릴로 제작된 반응조 부피가 18 L인 2개의 반응기를 사용하였으며, 공기공급과 폐수의 원활한 혼합을 위해 공기량 140 L/min(135 W)인 송풍기(영남(주), LP-140A)를 이용하여 반응조 하부에 설치된 2개의 diffuser를 통해 각 반응기당 16 L/min의 공기를 공급하였다. 각 반응기내 DO(dissolved oxygen) 농도는 실험기간 동안 2~6 mg/L로 유지하였으며, 운전기간 동안의 pH와 온도는 매일 측정하였고, 유입수와 유출수의 TCOD(total chemical oxygen demand), SCOD(soluble chemical oxygen demand), TSS(total suspended solid) 및 VSS(volatil suspended solid)는 2일에 1회씩 측정하였다. 모든 측정에 있어 분석방법은 Standard methods(Cleseri *et al.*, 1989)의 방법으로 분석하였다.

Table 1. Characteristics of SARAN media(20%)

Media type	SARAN 1000D
Media size (mm)	320x200x20
No. of packed media	3ea
Specific surface area (m^2/m^3)	400
Specific gravity (kg/m^3)	0.08
Media surface area (m^2)	0.512
Porosity (%)	95.59

반응조에 설치된 미디어는 망상형 SARAN 1000D(神鋼ファウドラ-株式會社)로 Table 1에 나타난 바와 같이 비표면적이 $400 m^2/m^3$, 공극율이 95.59%이며, 반응기 부피를 기준으로 각각 20%씩 충전하였으며, 미디어는 완전히 물에 잠기도록 하였다.

2.2 실험방법

본 실험에 사용한 폐수는 울산소재 석유화학공장에서 배출되는 2차 생물학적 처리를 거친 것으로 생산공정에서 촉매로 사용되는 Mn과 Co가 미량 포함되어 있다(Table 2). 실험원수는 1주일에 한번씩 채수하여 분석후 사용하였으며, COD_{Cr} 기준으로 50 mg/L이하인 경우는 보조기질로 글루코스(glucose)를 50~70 mg/L씩 원수에 추가로 주입하여 사용하였다.

Table 2. Characteristics of petrochemical plant effluent

	Content	Average	Range
pH	(mg/L)	8.16	
COD_{Cr}	(mg/L)	112	184~42
COD_{Mn}	(mg/L)	54	86~20
SS	(mg/L)	24	46~18
Mn	(mg/L)	2.8	4~2
N	(mg/L)	15	17~12
P	(mg/L)	7	9~6

Fenton 산화전처리가 고정생물막 공정에 미치는 영향은 회분식과 연속식 실험으로부터 검토하였다. 회분식 실험의 경우 우선 22일간 고정생물막 반응기를 석유화학 폐수처리장의 반송슬러지를 사용하여 순화시킨 후 체류시간 변화에 따른 유기물 제거효율을 비교하였다. Fenton 산화전처리(오동규, 1993)는 H_2O_2 200 mg/L와 Fe^{2+} 100 mg/L를 주입하고 산화반응시 pH 3의 최적조건에서 30분간 반응을 시켰으며, Fenton 산화반응을 진행시키는 동안 교반기로 150 rpm의 속도로 교반하였다. 실험은 상온(20~30°C)에서 실시하였고 Fenton 산화반응이 상온(20~30°C)에서는 큰 영향이 없는

것으로 보고되었기에(Sedlak과 Anderaon, 1991; 오동규, 1993) 별도의 온도조절은 하지 않았다. 산화반응이 끝난 시료에는 NaOH를 첨가하여 다시 pH를 8.0~8.5로 조정해서 약 2시간 침전시킨 후 상등수를 고정생물막 반응기에 유입시켰다. 계속해서 사용된 H_2O_2 의 양이 적정한가를 확인하기 위하여 Fe^{2+} 량은 100 mg/L으로 일정하게 하고 H_2O_2 의 양을 100, 200, 300, 500 mg/L로 주입후 Fenton 산화반응을 시키고 위와 같은 과정을 통하여 회분식 고정생물막 반응기에 적용하였으며 시료는 매 2시간 단위로 채취하여 COD를 분석하였다.

연속식 실험의 경우는 Fenton 산화전처리를 한 유출수와 하지 않은 유출수를 유기물 부하율 0.05~0.4 kg COD/m³/day로 조정하여 약 100일간 운전하였으며, 이 공정과 비교하기 위해 동일한 반응기 부피와 동일한 운전 부하율조건에서 활성슬러지 반응기를 운전하여 유출수의 COD와 SS를 분석비교하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 회분식 고정생물막 반응기

Fig. 2는 Fenton 산화전처리를 실시한 경우와 하지 않은 경우에 있어서 COD 제거효율을 나타낸 것으로, 방류수의 COD는 184 mg/L이었다. Fenton 산화전처리를 하지 않은 경우 반응시간 12시간에서 COD제거효율은 58.1%로 나타났으며, Fenton 산화전처리를 한 경우 반응시간 12시간에서 COD제거효율은 77.8%로 나타나 폐수를 Fenton 산화에 의해 전처리를 실시하여 고정생물막 공법에 적용하는 경우가 Fenton 산화를 실시하지 않은 폐수를 유입하는 경우보다 19.7% 높은 COD 제거효율을 나타내었다. 이러한 결과는 Fenton 산화에 의한 폐수의 전처리가 다음 단계의 생물학적 반응기에서의 COD 제거효율을 향상시킬 수 있는 요건, 즉 Fenton 산화에 의해 난분해성 유기물질이 저분자 물질 혹은 생물학적으로 분해가능한 물질

로 전화되는 것으로 추정할 수 있다. 석유화학 폐수처리장 방류수는 대부분 난분해성이고 미생물에 대해 독성효과를 유발할 것으로 예상하였으나 Fenton 산화전처리를 할 경우 유기물의 약 80%까지 생물학적으로 분해가능한 물질로 전환될 수 있는 것으로 사료되었다.

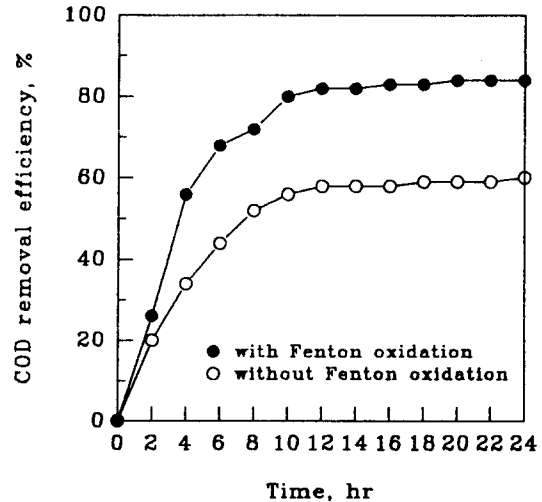


Fig. 2. COD removal efficiency with/without Fenton oxidation in batch fixed-film reactor.

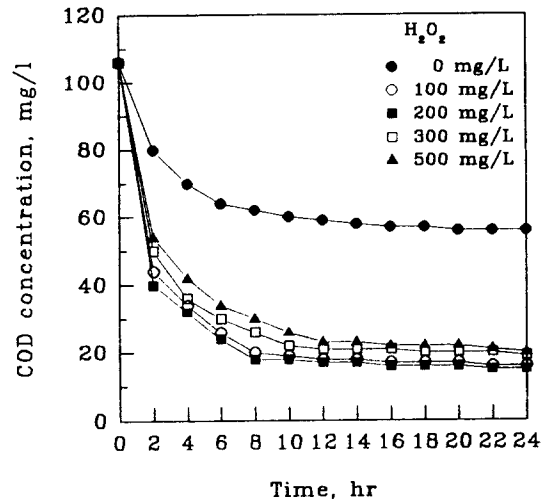


Fig. 3. Change of COD in batch fixed-film reactor at various H_2O_2 dosages after Fenton oxidation. (Inf. COD, 106 mg/L ; Fe^{2+} , 100 mg/L ; pH, 3 ; reaction time, 30 min)

Fig. 3은 COD가 106 mg/L인 방류수에 Fenton 산화방법을 전처리로 하여 Fe²⁺ 주입량(Fe²⁺ 농도로) 100 mg/L, pH는 3, 반응시간을 30분으로 고정 한 후 H₂O₂ 주입량을 변화시켜 처리수 상등수를 회분식 고정생물막 반응기에서 처리하였을 때, COD 농도변화를 나타낸 것이다. 실험을 실시한 모든 반응기에서 체류시간 12시간까지는 COD의 농도감소가 빠르게 나타났으나 12시간이후에서는 COD의 감소는 거의 보이지 않는 경향을 나타내었다. 또한 H₂O₂ 주입량이 200 mg/L와 500 mg/L인 경우를 비교하면 오히려 200 mg/L 주입시 COD 감소효과가 양호한 것으로 나타났으나 그 차이는 6 mg/L에 불과하였다. 따라서 Fenton 산화전처리시 경제성을 고려하면 본 실험대상 폐수의 경우 Fe²⁺를 100 mg/L로 주입한 조건에서는 H₂O₂의 농도가 200 mg/L로 주입시 최대의 COD 감소효과를 볼 수 있을 것으로 판단되었다.

3.2 연속 고정생물막 반응기 실험

Fig. 4는 회분식 결과에 기준하여 방류수를 Fenton 산화전처리한 것(H₂O₂ 200 mg/L, Fe²⁺ 100 mg/L 주입처리)과 Fenton 산화전처리하지 않은 시료에 COD 70 mg/L에 상당하는 글루코스를 첨가하여 만든 기질을 사용하여 고정생물막 반응조에 유기물 부하 0.1 kg COD/m³/day로 연속운전 하였을때 유출수의 COD를 나타낸 것이다. 전 운전기간 동안의 유입수와 유출수의 COD_{Cr}를 살펴 보면, 두 반응조 모두 30일까지는 적응단계로서 높은 COD의 유출수질을 나타내었으나 30일이 지나면서 유출수질이 안정되는 것으로 나타났다. 30일이 지난 후의 유출수질은 Fenton 산화전처리를 실시한 경우는 유출수의 평균 SCOD_{Cr}가 26.4 mg/L이었고, Fenton 산화전처리를 실시하지 않은 경우는 평균 SCOD_{Cr}가 49.7 mg/L로 23.3 mg/L의 차이를 보여 Fenton 산화처리가 방류수내의 난분해성물질의 생분해도를 높인 것으로 사료되었다. 또한 유출수의 변동폭도 Fenton 산화전처리를 실시한 경우는 평균 18.4 mg/L이나, 전처리를 하지 않은 경우는 평균 28.7 mg/L의 변동폭을 나타내어 Fenton 산화전처리를 실시할 경우 대체로 유출

수질의 COD 값의 안정화에도 도움을 줄 수 있는 것으로 사료되었다.

한편, Fenton 산화처리를 한 고정생물막 반응기의 COD 제거율은 48.0%~85.7%로 평균 74.0%였고, 전처리하지 않은 고정생물막 반응조는 20.8%~68.7%로 평균 50.7%로 나타나 산화전처리를 한 고정생물막 반응조가 전처리를 하지 않은 반응조보다 제거효율이 평균 23.3% 더 높게 나타나, 산화처리를 한 반응기의 경우가 보다 효과적으로 유기물질을 제거할 수 있는 것으로 판단되었다.

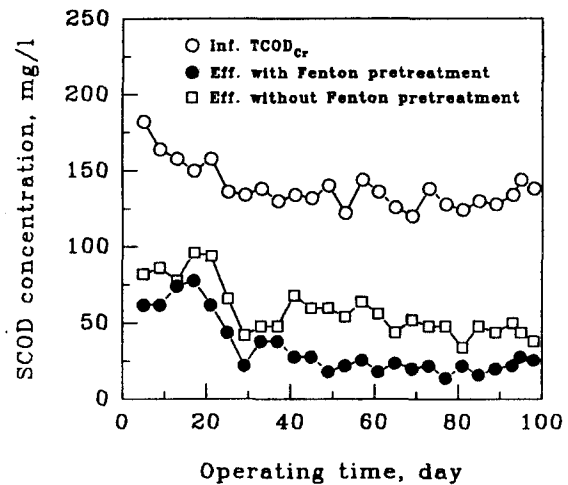


Fig. 4. SCOD_{Cr} concentration with/without Fenton oxidation pretreatment in continuous fixed-film reactor.

Fig. 5와 6은 운전기간 동안의 유입수 COD_{Cr}에 대해 유출수의 COD_{Mn}을 비교하여 나타낸 것이다. 난분해성 물질의 분해율을 비교하기 위해서는 BOD₅ 값을 이용하는 것이 타당하나 BOD₅의 분석에는 많은 시간이 소요되므로 COD_{Mn} 값을 COD_{Cr} 값과 비교하여 상대적인 난분해성 물질의 분해정도를 살펴보았다. 먼저 TCOD를 보면 산화전처리한 고정생물막 반응조의 TCOD_{Mn}은 10~25 mg/L로 평균 17.2 mg/L이었고, 산화전처리하지 않은 고정생물막 반응조의 TCOD_{Mn}은 18~50 mg/L로 평균 30.4 mg/L로 나타나 산화처리를 한 경우가 COD_{Mn}의 경우도 평균 13.2 mg/L정도 낮게 나타났다.

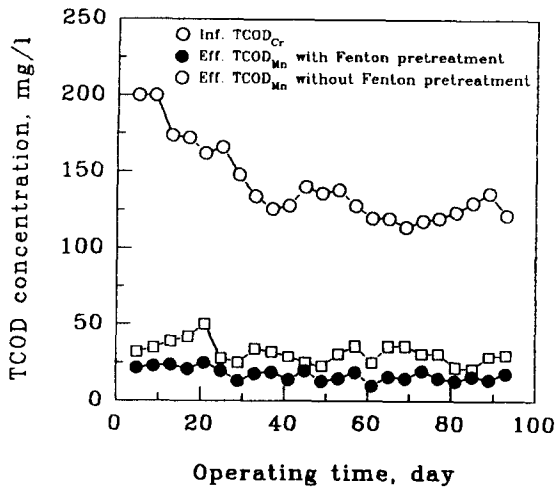


Fig. 5. $TCOD_{Mn}$ concentration with/without Fenton oxidation pretreatment in continuous fixed-film reactor.

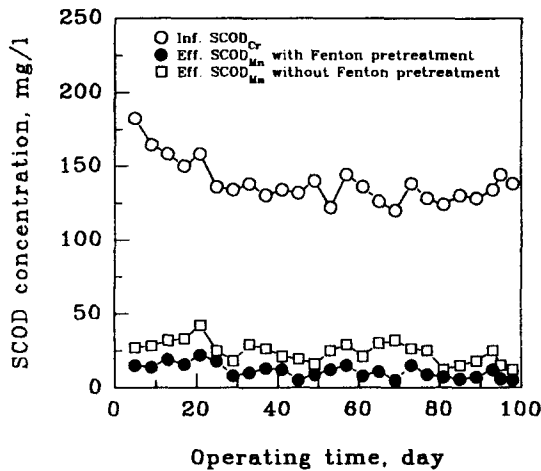


Fig. 6. $SCOD_{Mn}$ concentration with/without Fenton oxidation pretreatment in continuous fixed-film reactor.

또한 Fig. 6에 나타난 바와 같이 유출수의 $SCOD_{Mn}$ 은 산화전처리한 고정생물막 반응조의 경우 5~22 mg/L로 평균 11.2 mg/L로 나타났으며, 산화전처리하지 않은 경우 $SCOD_{Mn}$ 은 12~42 mg/L, 평균 19.0 mg/L로 산화전처리한 고정생물막 반응조가 산화처리하지 않은 고정생물막 반응

조보다 7.8 mg/L가 낮게 나타났다.

위의 결과로부터 Fenton 산화전처리한 경우 유출수의 $TCOD_{Cr}/TCOD_{Mn}$ 비는 2.23, $SCOD_{Cr}/SCOD_{Mn}$ 비는 3.04이고, Fenton 산화전처리하지 않은 경우 $TCOD_{Cr}/TCOD_{Mn}$ 비는 2.40, $SCOD_{Cr}/SCOD_{Mn}$ 비는 3.50로 나타났다. 따라서 Fenton 산화처리가 고정생물막 반응기에서 난분해성 유기물의 제거에 효과적임을 알 수 있었고, 냉각수로 이용가능한 수질의 기준에서 COD_{Cr} 농도는 75 mg/l 이하이고(Tchobanoglous와 burton, 1991) 이를 COD_{Mn} 으로 환산할 경우 15~20 mg/l정도가 되므로 본 실험에서의 유출수의 $SCOD_{Mn}$ 농도가 10 mg/L내외임을 볼 때 냉각수로서의 재이용 가능성이 충분한 것으로 판단되었다. 이는 Park과 Song (1992)의 호기성 고정생물막 반응기를 이용한 염색폐수 처리시 유기물부하율 0.625~5.53kg $COD/m^3/day$ 로 운전하였을 때 유출수의 $TCOD_{Cr}/TCOD_{Mn}$ 비가 2.67, $SCOD_{Cr}/SCOD_{Mn}$ 비가 2.85로 상대적으로 유출수내 난분해성 유기물질이 비교적 높게 나타난 것과 비교된다.

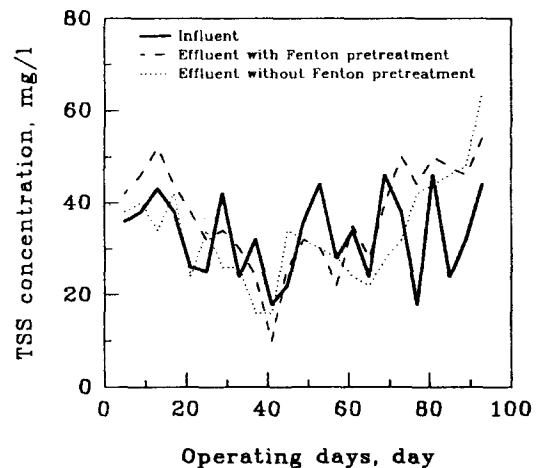


Fig. 7. TSS concentration with/without Fenton oxidation pretreatment in continuous fixed-film reactor.

Fig. 7은 운전기간 동안의 TSS농도 변화를 나타낸 것으로 Fenton 산화전처리한 고정생물막 반응조의 TSS는 10~54 mg/L의 범위로 평균 37.3

mg/L, 산화전처리하지 않은 고정생물막 반응조의 TSS는 16~64 mg/L, 평균 33.5 mg/L로 Fenton 산화전처리로 인한 유기물 제거효과에 변화가 있음에도 불구하고 TSS에는 거의 영향이 없는 것으로 나타나 본 실험에 사용된 매디아는 실험한 유기물 부하조건에서는 충분한 양의 미생물을 함유할 수 있는 표면적을 가진 것으로 추정되었다.

3.3 활성슬러지공법과 연속 고정생물막 공법의 비교

Fig. 8은 Fenton 산화법으로 전처리한 폐수를 생물학적으로 처리한 경우에 경제성을 고려하기 위하여 활성슬러지 공법과 고정생물막공법으로 처리시의 처리효율을 비교한 것이다. 활성슬러지 반응기는 고정생물막 반응기에 충전된 매디아를 꺼낸 후 사용하였으며, 고정생물막 반응기는 산화처리한 경우와 하지 않은 경우도 비교하기 위하여 2대의 반응기를 설치·운전하여 그 결과를 비교하였다.

먼저 유기물 부하율 0.05~0.4 kg COD/m³/day의 범위에서 COD 제거효율은 Fenton 산화전처리한 폐수를 유입한 고정생물막 반응기의 경우 34.7~88.0%, Fenton 산화전처리 하지 않은 폐수를 유입한 고정생물막 반응기의 경우 26.0~62.5%, Fenton 산화전처리한 폐수를 유입한 활성슬러지 반응기의 경우 23.9~55.8%를 나타내었다. 고정생물막 반응기의 경우 Fenton 산화처리 유무에 따라 COD 제거효율이 8.7~25.5%의 차이를 나타내었으며, Fenton 산화전처리한 폐수를 유입한 활성슬러지 반응기는 Fenton 산화전처리한 폐수를 유입한 고정생물막 반응기에 비해 10.8~26.2%의 COD 제거효율의 차이를 나타내었다. 이러한 결과는 동일한 반응기 부피와 동일한 유기물 부하조건에서 고정생물막 공법이 활성슬러지 공법에 비해 COD 제거능이 큰 것을 의미하며 이는 고정생물막 공법이 활성슬러지 공법에 비해 반응조내 높은 미생물 농도를 유지할 수 있는 것으로 판단되었다.

또한 3 반응기 모두 유기물 부하율 0.1 kg COD/m³/day까지는 제거효율의 변화가 거의 없었으나 Fenton 산화전처리후 고정생물막 반응기 운

전시 부하율이 0.4 kg COD/m³/day로 증가되면 제거효율이 급격히 감소하는 경향을 보였는데, 이는 체류시간이 짧아짐에 따라 유기물의 분해가 충분히 이루어 지지 않은데 기인하는 것으로 추정되었다.

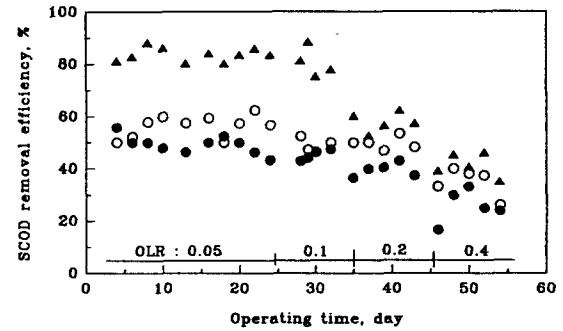


Fig. 8. Comparison of SCOD removal efficiency between continuous fixed-film reactor and activated sludge reactor.

- : Activated sludge reactor with Fenton oxidation
- : Continuous fixed-film reactor without Fenton oxidation
- ▲ : Continuous fixed-film reactor with Fenton oxidation

4. 결론

공장폐수 처리장에서 배출되는 최종 방류수를 재이용하기 위한 공정개발의 일환으로 석유화학공장의 최종 방류수를 사용하여 Fenton 산화전처리 후 고정생물막 반응기에 적용결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 희분식 고정생물막 반응기를 운전한 결과 H₂O₂ 200 mg/L과 Fe²⁺ 100 mg/L를 주입하여 산화전처리하였을 때, 체류시간 12시간 이내에서 초기 COD의 83.3%가 제거되어 최적 Fenton 산화전처리 조건임을 알 수 있었다.

2. 연속식 고정생물막 반응기를 유기물 부하 0.1 kg COD/m³/day로 운전한 결과 COD 제거효율은 산화전처리한 경우 48.0%~85.7%, 산화전처리하지 않은 경우 20.8%~68.7%로 나타나 Fenton 산화전처리후의 적용결과가 평균 23.3% 더 높았고, 유출

수질도 안정되게 나타나 3차 처리공정으로 고정생물막 공법이 적용가능함을 알 수 있었다

3. 유기물 부하율이 0.05~0.1 kg COD/m³/day의 범위에서 연속운전시 활성슬러지 공법과 고정생물막 공법의 COD 제거효율을 비교한 결과, Fenton 산화전처리를 시행한 폐수를 유입한 고정생물막 반응기의 경우 74.8~88.0%, Fenton 산화전처리하지 않은 폐수를 유입한 고정생물막 반응기의 경우 46.0~62.5%, Fenton 산화전처리를 실시한 폐수를 유입한 활성슬러지 반응기의 경우 42.0~55.8%를 나타내어 고정생물막 공법이 Fenton 산화전처리에 가장 효과적인 것으로 나타났다.

감사의 글

본 연구는 1994년도 두산그룹 연강재단의 학술연구 지원에 의해 이루어진 것입니다. 연강재단의 연구비 지원에 감사드립니다.

참고문헌

- 박태주, 1995, 고정생물막 공법과 AOP 공법을 이용한 고차처리 공정개발에 관한 연구, 연강재단 보고서, 3~9.
- 박태주, 송승구, 1992, 호기성 고정생물막 반응기에서 난분해성 유기물질이 동력학 계수 및 COD/BOD비에 미치는 영향, *JKSEE*, 14(3), 243~251.
- 오동규, 1993, "펜턴試藥을 利用한 廢水중 有機物의 酸化處理", 인하대학교 대학원, 박사학위논문, p.153.
- Bowers, A. R., P. Gaddipati, W. W. Eckenfelder and R. M. Monsen, 1989, Treatment of toxic or refractory wastewaters with hydrogen peroxide, *Wat. Sci. Technol.*, 21, 477~486.
- Cleseri, L. S., A. E. Greenberg and R. R. Trussell, 1989, Standard methods, 17th edition, Port City Press, Baltimore, Maryland.
- Fenton H. J., 1984, Oxidation of tartaric acid in presence of iron, *J. Chem. Soc.*, Brit, 65, 892~899.
- Morook, S., K. Kusakabe, K. Ikemizu and Y. Kato, 1988, Degradation rate of polyoxyethylene in water by ozone under UV radiation, *Kagaku Ronbunshu* 14, pp.427~430.
- Sedlak, D. L. and A. W. Anderson, 1991, Oxidation of chlorobenzene with Fenton's reagent, *Environ. Sci. Technol.*, 25(4) 777~782.
- Sims, A. F., 1981, Phenol oxidation with hydrogen peroxide, *Effluent and Water Treatment Journal*, 21(3), 109~112.
- Tchobanoglous G. and F. L. Burton, 1991, Wastewater engineering, *McGraw-Hill, Inc.*, 1163pp.
- Walling, C. and S. Kato, 1971, The oxidation of alcohols by Fenton's reagent. The effect of copper ion, *J. Am. Chem. Soc.*, 93 (17), 4275~4281.
- Wang, Y. T., 1992, Effect of chemical oxidation on anaerobic biodegradation of model phenolic compounds, *Environ. Sci. Technol.*, 64(3), 268~273.
- Zepp, R. G., 1992, Hydroxyl radical formation in aqueous reactions(pH 3~8) of iron(II) with hydrogen peroxide : The Photo-Fenton reaction, *Environ. Sci. Technol.*, 26(2), 313~319.