한국지반환경공학회 논문집
제11권 제10호 2010년 10월 pp. 49~55

DAF와 펜톤 산화 공정을 이용한 유류 오염 지하수 처리

Treatment of Oil Contaminated Groundwater Using DAF and Fenton Oxidation Process

이 채 영†
Lee, Chaeyoung

ABSTRACT : The oil spill occurred frequently due to probably the increased consumption of oil as the energy source and the raw materials of various chemicals. For the treatment of oil contaminated groundwater, DAF(Dissolved Air Flotation) is being used but the removal efficiency is low. Therefore it is necessary to reduce the free phase oil, oil-in water type or water-in oil type emulsified oil, and soluble oil which are the main sources of contaminated groundwater. In this study, treatment of contaminated groundwater was performed using the Fenton oxidation process. The optimum conditions for the removal of THP(Total Petroleum Hydrocarbon) were 3 of pH, 25mM of H_2O_2 concentration and 25mM of Fe^{2+} concentration. THP and COD(Chemical Oxygen Demand) concentrations decreased less than 1.5mg/L and 40.0mg/L in 7 minutes using DAF and Fenton oxidation process. However it is necessary to install the settling basin as the sludge concentration increased approximately 5 times.

Keywords : Contaminated groundwater, Dissolved air flotation, Total petroleum hydrocarbon, Fenton oxidation process

요 지 : 에너지원 및 다양한 화학제품의 원료로 유류의 소비량이 증가함에 따라 유류의 유출사고가 빈번하게 발생하고 있다. 유류 오염 지하수 처리를 위해 용존공기부상법이 사용되어지고 있으나 용해성 기름을 효과적으로 제거하지 못하고 있는 실정이다. 따라서 지하수내 주오염원인 자유상 유류와 친수성(oil-in water) 또는 친유성 에멀젼(water-in oil) 상태의 기름과 용해성 기름을 효과적으로 저감하는 것이 필요하다. 본 연구에서는 용존공기부상법에 펜톤 산화 공법을 사용하여 효과적인 유류 오염 지하수 처리를 연구하였다. 펜톤 실험 결과 TPH(Total Petroleum Hydrocarbon) 제거를 위한 최적 조건은 pH 3, H_2O_2 주입농도 25mM과 Fe^{2+} 주입농도 25mM으로 나타났다. DAF와 펜톤 산화 실험을 수행한 결과 7분내에 TPH(Total Petroleum Hydrocarbon)와 COD(Chemical Oxygen Demand) 농도가 각각 1.5mg/L와 40.0mg/L 이하로 감소하는 것으로 나타났다. 하지만 펜톤 산화 반응으로 인하여 슬러지 농도가 약 5배 가량 증가하여 후단에 침전조를 설치하는 것이 바람직하다.

주요어 : 오염지하수, 용존공기 부상법, 총석유계탄화수소, 펜톤산화공정

1. 서 론

에너지원 및 다양한 화학제품의 원료로 유류의 소비량이 증가함에 따라 유류의 유출사고가 빈번하게 발생하고 있다(임명희 등, 2006). 그 결과 오염된 지하수 및 토양의 복원을 위해 성능이 우수하고 안전한 기술개발에 대한 관심이 증가되고 있다(Whang 등, 2008). 최근 이러한 문제를 해결하고자 일부 유류로 오염된 지하수 처리를 위해 가압부상법이 사용되어지고 있으나 용해성 기름을 효과적으로 제거하지 못해 후단에 흡착포 또는 활성탄을 이용하여 처리를 하고 있는 실정이다. 따라서 지하수내 주오염원인 친수성(oil-in water) 또는 친유성(water-in oil) 에멀젼 상태의 기름과 용해성 기름을 효과적으로 저감하는 것이 필요하다. 화학적 산화는 오염된 토양 및 지하수 정화를 위해 점점 대중화되고 있는 방법이다(Watts 등, 1990). 화학적 산화 공법은 타 공법에 비해 오염물질을 빠른 시간 내에 분해하여 처리할 수 있으며, 표 1에 제시된 것과 같은 다양한 산화제가 이용되고 있다(임명희 등, 2006). 특히 펜톤 산화 공법은 상대적으로 높은 산화 능력을 보여 오염물질 처리에 효과적이다. 과산화수소(H_2O_2)는 일반적으로 2가철과 함께 사용하여 펜톤 반응을 일으킨다. 펜톤 반응은 2가철에

표 1. 산화제 특성

기술특징	펜톤	과망간산칼륨	오존
주요 산화제	OH•	MnO_4^-	O_3
산화능	2.8V	1.2V	1.5V
상대적인 산화능력	2.1	1.2	1.5
산화제 주입농도	5~50wt%	0.02~4.0wt%	가변적

† 정회원, 수원대학교 공과대학 토목공학과 교수(E-mail : chaeyoung@suwon.ac.kr)

의한 과산화수소의 분해로 식 (1)에 제시된 것과 같은 OH•을 형성한다.

$$Fe^{2+} + H_2O_2 = Fe^{3+} + OH\bullet + OH^- \quad (1)$$

산 조건과 Fe^{2+}의 초과의 조건에서는 OH•과 Fe^{2+}가 함께 반응하면서 Fe^{3+}가 생성된다(Metelitsa, 1971).

$$Fe^{2+} + OH\bullet = Fe^{3+} + OH^- \quad (2)$$

또한 정확히 제어된 실험 조건에서 제3가철은 또 다른 과산화수소의 분자와 다음의 반응에 의해서 제2가철로 다시 재생될 수 있다.

$$Fe^{3+} + H_2O_2 = Fe^{2+} + HO_2\bullet + H^+ \quad (3)$$

HO_2•는 OH•에 비해서는 매우 작은 반응이지만 일부 유기화합물과 산화반응에 관여한다. Huang 등(1993)은 유해물질에 대한 펜톤 산화와 UV 공법을 적용한 결과 상대적으로 경제적이며 독성이 없고 반응의 균질성으로 물질 교환의 제한이 없으며, 촉매로 빛이 필요없다고 제시하고 있다.

따라서 본 연구에서는 DAF(Dissolved Air Flotation) 공정과 화학적 산화 기술 중 비교적 경제적이고 산화력이 우수한 펜톤 산화 기술을 이용하여 지하수내 TPH(Total Petroleum Hydrocarbon)를 효율적으로 제거할 수 있는 방안을 제시하고자 한다.

2. 실험 재료 및 방법

2.1 지하수 시료채취

본 실험에 사용되어진 지하수 시료는 과거 주유소로 이용되었던 곳으로 유류의 유출로 인하여 토양과 지하수가 오염된 지역이다. 시료채취는 테프론 베일러를 사용하여 기존 굴착관정에서 채취하였다.

2.2 분석 방법

TPH는 이채영 등(2010)이 수행한 방법에 따라 분석하였다. 철을 포함한 중금속은 ICP-MS(Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometer, Shimadzu ICP-7500)를 사용하여 분석하였다. COD 분석 시 과산화수소에 의한 영향은 Talinli 등(1992)의 방법을 사용하여 배제하였다. COD(Chemical Oxygen Demand)와 기타 분석 방법은 standard methods(Eaton 등, 2005)에 따라 실험을 수행하였다.

2.3 실험 조건

2.3.1 펜톤 산화 실험

펜톤 산화 실험은 회분식 반응조를 이용하여 25℃에서 2시간 동안 120rpm으로 교반하면서 수행하였다. 우선적으로 최적의 pH를 구하기 위하여 pH를 2～7로 변화시켜 펜톤 산화 실험을 수행하였다. pH 조절을 위해서는 1N H_2SO_4와 5N NaOH를 사용하였으며 Fe^{2+}:H_2O_2 농도비는 1mM:1mM로 고정하고 실험을 수행하여 최적의 pH를 선정하였다. 최적의 pH를 선정한 후 최적의 H_2O_2의 주입농도를 선정하는 실험을 수행하였다. Fe^{2+}의 농도를 1mM로 고정하고 H_2O_2(35 wt%, Showa Chemical, Japan)의 주입농도를 Fe^{2+}:H_2O_2=1:1, 1:10, 1:25, 1:50, 1:75, 1:100으로 변화시켜 실험을 수행하였다. Fe^{2+} 주입 농도를 선정하기 위해서는 H_2O_2 주입 농도에서 결정된 주입농도로 고정하고 Fe^{2+}:H_2O_2=1:1, 2:1, 4:1, 5:1, 10:1, 25:1로 변화시켜 실험을 수행하였다.

2.3.2 DAF+펜톤 산화 실험

DAF+펜톤 산화 실험을 위한 반응조는 그림 1과 같이 가압조(∅ 100mm × H 300mm × T 5mm, STS304), 부상조(∅ 80mm × H 200mm × T 5mm, acrylic), 콤퓨레샤(0.75KW)와 탈부착이 가능한 분사노즐(∅ 0.2mm, 0.4mm, 0.6mm)로 구성되어 있다. 분사노즐은 부상조 내부에 총 4개까지 장착이 가능하며 압력은 0～8atm 까지 조정이 가능하도록 제작하였다. 부상조는 상부가 탈부착이 가능하도록 제작하였다(이채영 등, 2010). DAF 실험은 앞서 선행된 이채영 등(2010)의 DAF 실험 결과와 같이 최적의 조건인 노즐크기 0.2mm와 노즐 수 4개 그리고 압력 6atm에서 실험을 수행하였다.

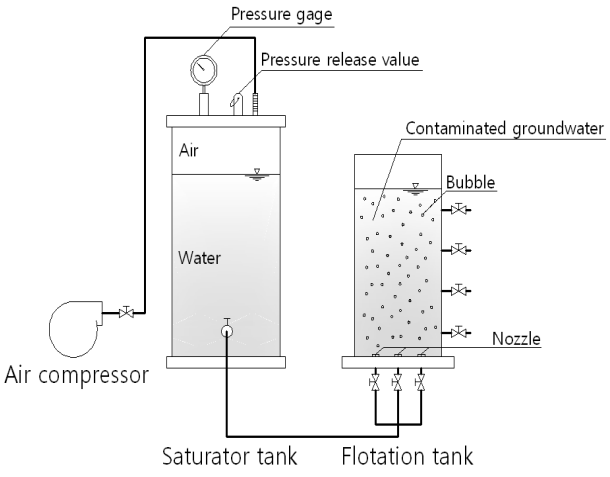

그림 1. DAF 반응조

3. 실험 결과 및 토의

3.1 지하수 특성

지하수 시료의 경우 이채영 등(2010)의 시료와 동일한 것으로 표 2에 나타난 것과 같이 화학적 산소요구량(COD; Chemical Oxygen Demand)와 현탁성 고형물 농도가 높은 것으로 나타났다. 또한 환경부령이 정하는 오염지하수 정화기준은 특정유해물질의 경우 생활용수 기준이며 석유계 총탄화수소(TPH)의 경우 생활용수 기준인 1.5mg/L를 초과하는 16.1 및 18.9 mg/L로 나타났으며 지하수 시료에 포함된 고형물의 경우 이채영 등(2010)의 실험과 마찬가지로 표 3에 제시된 것과 같이 0.425mm 입경 크기가 가장 많았고 통일분류법에 의하여 SM(Silty Sand), 즉 실트질의 모래로 모래와 실트의 혼합토인 것으로 나타났다.

표 2. 지하수 수질분석 결과

Parameter	Concentration		
	S1*	S2*	DL*
pH	6.5	6.9	-
ORP(mV)	-246.9	-333.7	-
Alkalinity	152	154	-
TSS	780.3	680.0	-
VSS	107.0	96.0	-
COD	175.0	181.0	-
TPH	16.1	18.9	-
TN	2.60	2.10	-
NH_4-N	0.8	0.6	0.01
1.1.1-TCE	N.D.	N.D.	0.001
PCE	N.D.	N.D.	0.001
TCE	N.D.	N.D.	0.001
Benzene	N.D.	N.D.	0.001
Toluene	N.D.	N.D.	0.001
Ethylbenzene	N.D.	N.D.	0.001
Xylene	N.D.	N.D.	0.001
Fe	7.9	8.3	0.05

*mg/L except for pH & ORP
DL: Detection Limit
N.D.: Not Detected

3.2 펜톤 산화 실험

3.2.1 최적의 pH 선정

Haber 등(1934)은 pH 변화에 따라 주된 이온의 형태와 하이드록시 라디칼이 생성되는 산화·환원의 전위가 바뀌기 때문에 펜톤 산화에서 pH는 중요한 영향인자라고 제시하고 있다. 중성이나 알칼리성 pH 영역에서는 과산화수소 자체 분해 반응이 촉진되어 라디칼이 생성되는 반응은 진행되지 않는다. Gogate 등(2004)에 의하면 OH•은 pH에 따라 활성이 증가하거나 감소하는 것으로 나타나 있으며 펜톤 산화 반응은 초기 pH 3～5 정도에서 OH•의 활성이 가장 좋은 조건으로 완전산화 반응이 잘 이루어진 것으로 알려져 있다. 따라서 본 연구에서는 pH에 따른 펜톤 반응 성능 향상과 경제성을 평가하기 위하여 pH에 따른 펜톤 산화 실험을 수행한 뒤 TPH와 COD 실험을 실시하였다. Kang 등(1999)에 의하면 과산화수소가 포함된 시료를 대상으로 COD 실험을 할 경우 산성화 용액에 중크롬산염 이온과 과산화수소가 반응하여 COD 분석을 방해하게 되서 이를 방지하기 위해서는 pH를 10 이상으로 증가시켜 과산화수소를 산소와 물로 분해시킨다. 따라서 본 실험에서는 TPH와 COD 실험을 실시하기 위하여 시간대별 시료 채취 후 pH를 10 이상으로 올려주었다. 그림 2에서 보여지는 것과 같이 pH가 낮아짐에 따라 TPH 농도가 감소하는 경향을 보였다. pH=2와 pH=3에서는 반응시간 15분에 TPH가 검출이 되지 않는 것으로 나타나 다른 pH 조건들과 비교하였을 때 TPH 제거효율이 좋은 것으로 나타났다. COD의 결과 그림 3에 제시되어 있는 것과 같이 pH=2와 pH=3에서 COD 농도가 각각

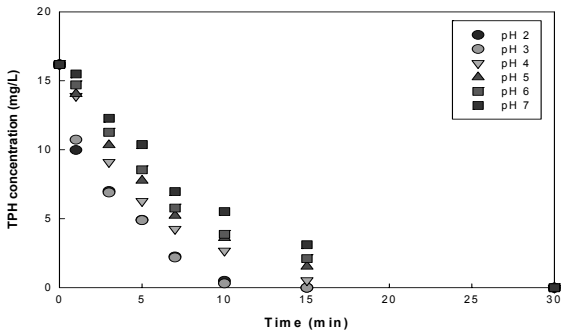

그림 2. pH에 따른 TPH 농도 변화

표 3. 지하수 시료에 포함된 고형물의 물리적 특성

Grain Size Distribution(%)							
No.4 (4.76mm)	No.10 (2.0mm)	No.16 (1.18mm)	No.40 (0.425mm)	No.60 (0.25mm)	No.100 (0.15mm)	No.200 (0.075mm)	No.200 이하
0	10.14	11.81	35.25	7.98	10.69	17.83	6.30

액성한계(%)	소성지수(%)	비중	흙의 성질
45.36	24.88	2.65	SM

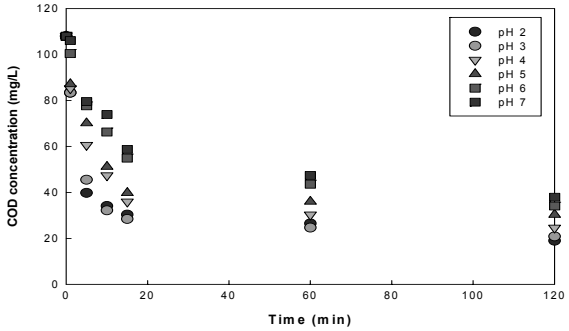

그림 3. pH에 따른 COD 농도 변화

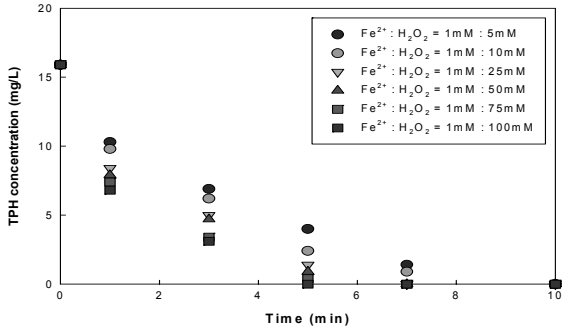

그림 4. H_2O_2 주입 농도에 따른 TPH 농도 변화

표 4. pH에 따른 TPH 동력학적 상수 값

pH	TPH 동력학적 상수(min^{-1})
2	0.2920
3	0.2887
4	0.1884
5	0.1526
6	0.1354
7	0.1057

82.5%와 80.7%로 가장 많이 감소하는 것으로 나타났다. 표 4에서는 pH에 따른 TPH의 1차 동력학적 상수에 대한 값을 제시하고 있다. 그림 4에서 보여지는 것과 같이 pH 2와 pH 3에서 동력학적 상수 값은 0.2920(min^{-1})과 0.2887(min^{-1})로 크게 차이가 없는 것을 보여주고 있다. 그러나 pH 2와 pH 3에서 들어가는 H_2SO_4의 양은 각각 3mL와 0.28mL로 약 10배 정도의 들어가는 양의 차이를 보였다. 따라서 본 연구에서는 pH 3을 최적으로 선정하여 펜톤 산화 실험을 수행하고자 하였다.

3.2.2 최적의 H_2O_2 주입 농도 선정

그림 4에 제시되어 있는 것과 같이 TPH 제거를 위한 최적의 H_2O_2 주입비 선정을 실험을 수행하였다. Fe^{2+}:H_2O_2를 각각 1:1, 1:10, 1:25, 1:50, 1:75, 1:100으로 변화시켜 실험을 수행하였다. 그림에 제시된 것과 같이 H_2O_2의 농도가 높을수록 TPH 제거효율이 높게 나타났다. 그림 5에 제시된 것

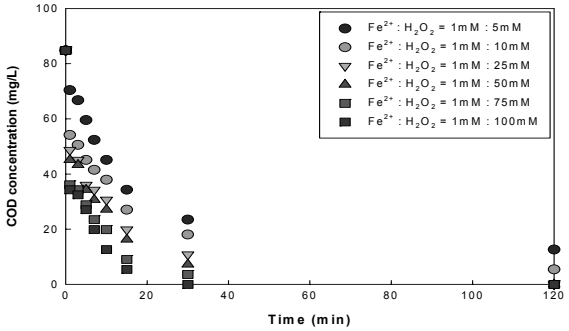

그림 5. H_2O_2 주입 농도에 따른 COD 농도 변화

표 5. H_2O_2 주입 농도에 따른 TPH 동력학적 상수 값

H_2O_2 : Fe^{2+}	TPH 동력학적 상수(min^{-1})
5 : 1	0.3144
10 : 1	0.3753
25 : 1	0.4906
50 : 1	0.5395
75 : 1	0.6557
100 : 1	0.7359

과 같이 COD 제거효율은 TPH와 마찬가지로 H_2O_2 농도가 높을수록 높게 나타났다. COD 값은 앞에서 언급한 것과 같이 Talinli 등(1992)이 제시한 방법을 이용하였으며 H_2O_2의 측정은 Iodometry, UV-TiSO 방법을 이용하여 측정하였다. 표 5에 제시된 것과 같이 H_2O_2 주입 농도에 따른 TPH 동력학적 상수 값과 주입량을 고려 시 H_2O_2 농도 25mM과 75mM인 경우가 효과적인 것으로 나타났다. 그러나 본 연구에서는 H_2O_2 양이 적게 쓰이는 25mM을 최적의 농도로 선정하여 실험을 수행하였다.

3.2.3 최적의 Fe^{2+} 주입 농도 선정

최적의 H_2O_2 주입 농도 조건인 25mM로 고정을 시키고 Fe^{2+}:H_2O_2는 각각 25:25, 50:25, 100:25, 125:25, 250:25, 625:25로 변화시켜 실험을 수행하였다. 그 결과 그림 6에서 제시된 것과 같이 철 촉매 농도가 높을수록 TPH 제거효율은 높은 것으로 나타났다. 그러나 그림 7에 제시된 것과 같이 촉매 농

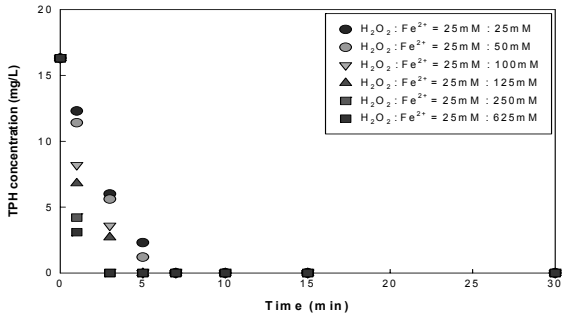

그림 6. Fe^{2+} 주입 농도에 따른 TPH 농도 변화

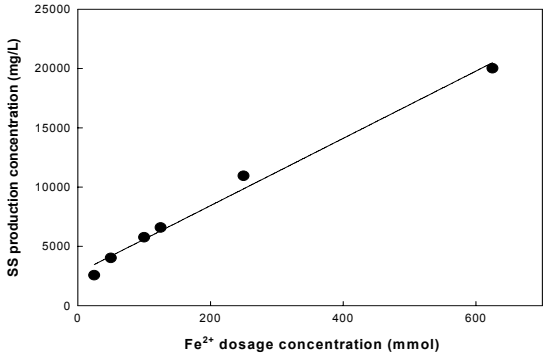

그림 7. Fe^{2+} 주입 농도에 따른 슬러지 발생 농도

표 6. Fe^{2+} 주입 농도에 따른 TPH kinetic 값

Fe^{2+}:H_2O_2	TPH kinetic 상수(min^{-1})
25 : 25	0.3515
50 : 25	0.4061
100 : 25	0.6195
125 : 25	0.7841
250 : 25	1.3687
625 : 25	1.6636

도가 높을수록 슬러지양이 증가하는 경향을 보였다. 그림 6과 표 6에서 보는 것과 같이 철 250mM을 주입하였을 때 TPH 농도저감이 효율적인 것으로 나타났다. 그러나 앞에서 언급했던 것과 같이 철 250mM을 주입하였을 경우 11,480 mgSS/L의 많은 슬러지가 발생하였다. 따라서 Fe^{2+} 주입량 대비 kinetic 상수와 슬러지 발생량을 고려하여 본 실험에서는 최적의 촉매 농도를 25mM로 선정하였다.

3.3 DAF+펜톤 산화 실험

DAF와 펜톤 산화를 동시에 수행하는 경우 시스템이 단순화 될 뿐만 아니라 첨가한 H_2O_2가 기포를 미세화하여 DAF의 성능을 향상시킬 수 있는 장점을 지니고 있다(Steiner 등, 1992). DAF 실험 시 도출되었던 최적의 운전 조건(노즐 0.2 mm×4개, 압력=6atm)과 펜톤 산화 반응의 최적 운전(pH 3, Fe^{2+}:H_2O_2=25mM:25mM)에서 실험을 수행하였다. 또한 경제성을 고려하여 pH를 조정하지 않고 약품도 가장 적게 들어가는 Fe^{2+}:H_2O_2=1mM:1mM의 조건에서 실험을 추가적으로 수행하였다.

3.3.1 DAF+펜톤(Fe^{2+}:H_2O_2=25mM:25mM)

그림 8에 제시된 것과 같이 Fe^{2+}:H_2O_2=25mM:25mM을 주입하였을 경우 7분에 TPH 농도가 1.5mg/L 이하로 감소하는 것으로 나타났다. COD의 경우에도 15분에서 COD 농도가 40mg/L 이하로 감소하는 것으로 나타났다. 그러나 그

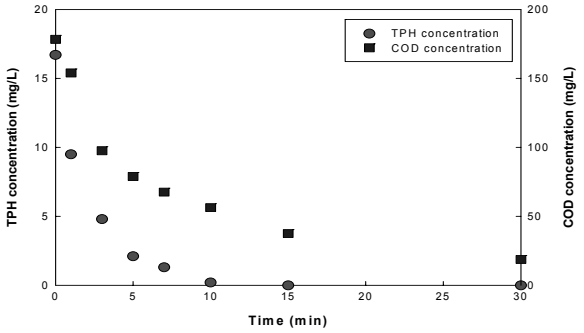

그림 8. DAF+펜톤 25mM:25mM 주입 시 TPH, COD 농도 변화

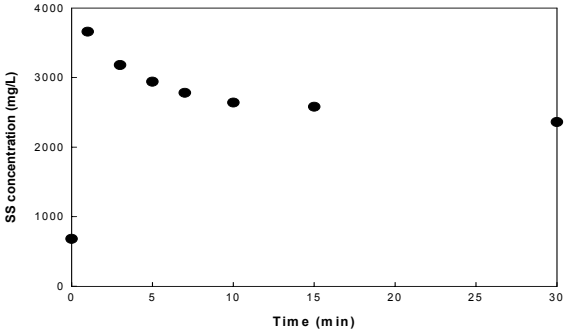

그림 9. DAF+펜톤 25mM:25mM 주입 시 SS 농도 변화

림 9에 제시된 것과 같이 기존 고형물 농도에서 펜톤 반응에 의해 슬러지 농도가 5배 가량 늘어나는 것으로 나타났다.

3.3.2 DAF+펜톤(Fe^{2+}:H_2O_2=1mM:1mM)

그림 10에 제시된 것과 같이 Fe^{2+}:H_2O_2=1mM:1mM를 주입하였을 경우에도 마찬가지로 Fe^{2+}:H_2O_2=25mM:25mM을 주입하였을 경우보다는 반응 속도는 느리지만 15분에서 30분 사이에 TPH와 COD 농도가 각각 1.5mg/L와 40mg/L 이하로 나타났다. 그림 11에 제시된 슬러지 농도는 25mM:25mM을 주입하였을 경우보다는 많이 늘어나지는 않았으나 2,000 mgSS/L의 고형물이 생기는 것으로 나타났다. 따라서 DAF와 펜톤 반응을 동시에 수행하였을 경우에는 부상한 슬러지를 효과적으로 제거하거나 후단에 침전조를 설치하는 것이

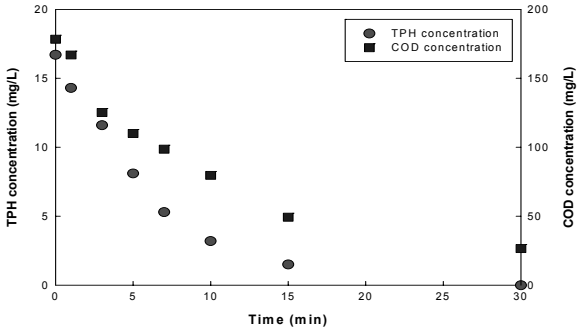

그림 10. DAF+펜톤 1mM:1mM 주입 시 TPH, COD 농도 변화

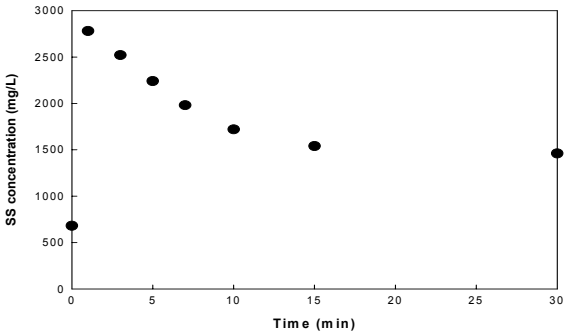

그림 11. DAF+펜톤 1mM:1mM 주입 시 SS 농도 변화

바람직하다. 본 실험에서는 DAF와 펜톤 동시 산화 실험을 수행하여 발생된 슬러지 저감을 위하여 침전특성 평가를 수행하였다.

3.3.3 DAF+펜톤 산화 실험 후 침전실험

DAF와 펜톤 산화 반응을 동시에 수행하여 생성된 슬러지를 대상으로 침전실험을 수행하였다. 약품을 첨가하지 않은 경우와 침전 속도를 향상시키기 위하여 양이온 폴리머(Z-7530,(주)크린켐) 2mg/L를 주입한 경우를 구분하여 실험을 수행하였다. 그 결과 자연 상태로 침전을 시킨 경우에는 그림 12에 보여지는 것과 같이 1mM:1mM과 25mM:25mM의 경우 각각 6시간과 8시간 만에 20mg/L 이하로 측정되는 것으로 나타났다. 이채영 등(2010)의 응집실험에서 최적 고분자 응집제 주입 농도인 2mg/L를 주입하여 침전실험을 수행한 경우 그림 13에 제시된 것과 같이 1mM:1mM의 DAF와 펜톤 반응에서 발생한 슬러지가 15분 만에 20mg/L 이하로 측정되었고 25mM:25mM으로 주입한 실험에서 발생한 슬러지는 20분이 지나야 20mg/L 이하로 떨어지는 것으로 나타났다.

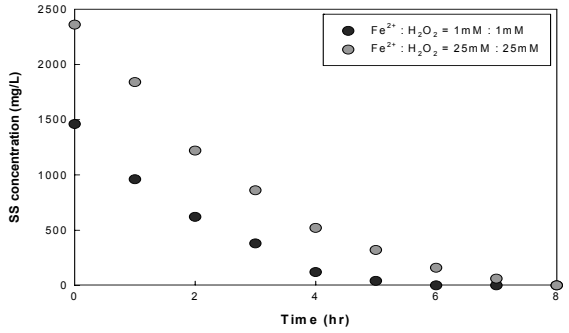

그림 12. DAF와 펜톤 산화 실험 후 자연 침전 실험

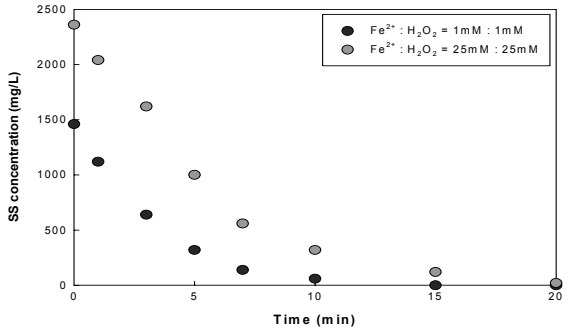

그림 13. DAF와 펜톤 산화 실험 후 양이온 폴리머 주입 침전 실험

4. 결 론

펜톤 실험과 DAF 실험을 통한 최적의 조건을 가지고 수행한 DAF+펜톤 실험을 통하여 아래와 같은 결론을 얻었다.

(1) 펜톤 산화 반응에서 pH에 따른 펜톤 산화 실험 결과 pH=2와 pH=3에서 COD 농도가 각각 82.5%, 80.7%로 가장 많이 감소하는 것으로 나타났다. 그러나 pH 2와 pH 3에서 들어가는 H_2SO_4의 양은 각각 3mL와 0.28mL로 약 10배 정도의 들어가는 양의 차이를 보여 최적의 pH가 3인 것으로 나타났다.

(2) 최적의 H_2O_2 주입농도는 H_2O_2 주입 농도에 따른 TPH 동력학적 상수 값과 주입량을 고려하여 25mM이 최적의 농도로 나타났고 Fe^{2+} 최적 주입 농도는 주입량 대비 동력학적 상수와 슬러지 발생량을 고려하여 본 실험에서는 최적의 촉매 농도를 25mM로 나타났다.

(3) 단일 반응조를 이용한 DAF와 펜톤 산화 반응 적용 시 TPH와 COD 농도가 각각 1.5mg/L와 40mg/L 이하로 제거가 가능하였다. 그러나 펜톤 산화 반응에서 생성된 슬러지를 효과적으로 저감하기 위해서는 후속 공정에 침전조를 설치하는 것이 바람직하다.

(4) 침전조 설치 시 약품을 주입하지 않는 경우와 고분자 폴리머(2mg/L)를 주입한 경우 각각 최대 8시간 및 20분 이내에 20mg/L 이하로 떨어지는 것으로 나타났다.

참 고 문 헌

1. 이채영, 장영수(2010), DAF와 혼화응집공정을 이용한 현탁성 고형물 함유 유류 오염 지하수 처리, *한국지반환경공학회지*, Vol. 11, No. 8, pp. 25～32.
2. 임명희, 손영규, 윤준기, 김지형(2006), 펜톤 산화공법을 통해 디젤로 오염된 토양 처리 시에 과산화수소와 디젤의 주입비 영향에 관한 연구, *2006년도 춘계학술발표회 논문집*, 한국지하수토양환경학회, pp. 37～40.
3. Eaton, A.D., Clesceri, L.S., Rice, E.W. and Greenberg, A.E. (2005), *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, APHA., AWWA., WPCF., 21th ed., Washington, DC. pp. 5-16～5-18.

4. Gogate, P.R. and Pandit, A.B.(2004), Areview of Imperative Technologies for Wastewater Treatment I: Oxidation Technologies at ambient conditions, *Advances in Environmental Research*, Vol. 8, No. 3～4, pp. 501～551.
5. Haber, F. and Weiss, J.(1934), The Catalytic Decomposition of Hydrogen Peroxide by Iron Salt, *Proceedings of the Royal Society A*, Mathematical and Physical Sciences, London, Vol. 147, pp. 332～351.
6. Huang, C.P., Dong, C. and Tang, Z.(1993), Advanced Chemical Oxidation: Its Presrnt Role and Potential Future in Hazardous Waste Treatment, *Waste Management*, Vol. 13, No. 5～7, pp. 361～377.
7. Kang, Y.W., Cho, M.J. and Hwang, K.Y.(1999), Correction of Hydrogen Peroxide Interference on Standard Chemical Oxygen Demand Test, *Water Research*, Vol. 33, No. 5, pp. 1247～1251.
8. Metelitsa, D.I.(1971), Mechanisms of the Hydroxylation of Aromatic Compounds, *Russian Chemical Reviews*, Vol. 40, No. 7, pp. 563～580.
9. Steiner, N. and Gec, R.(1992), Plant-experience Using Hydrogen-peroxide for Enhanced Fat Flotation and BOD Removal, *Environmental Progress*, Vol. 11, No. 4, pp. 261～264.
10. Talinli, I. and Anderson, G.K.(1992), Interference of Hydrogen Peroxide on the Standard COD Test, *Water Research*., Vol. 26, No. 1, pp. 107～110.
11. Watts, R.J., Udell, M.D., Rauch, P.A. and Leung, S.W.(1990), Treatment of pentachlorophenol-contaminated soils using Fenton's reagent, *Hazardous Waste and Hazardous Materials*, Vol. 7, No. 4, pp. 335～345.
12. Whang, L.M., Liu, P.W., Ma, C.C. and Cheng, S.S.(2008), Application of Biosurfactants, Rhamnolipid, and Durfactin, for Enhanced Biodegradation of Diesel-Contaminated Water and Soil, *Journal of Hazardous Materials*, Vol. 151, No. 1, pp. 155～163.

(접수일: 2010. 8. 28 심사일: 2010. 9. 7 심사완료일: 2010. 9. 15)