

The Removal of Petroleum Hydrocarbon from Fine Soil in Soil Washing Water using Advanced Oxidation Processes

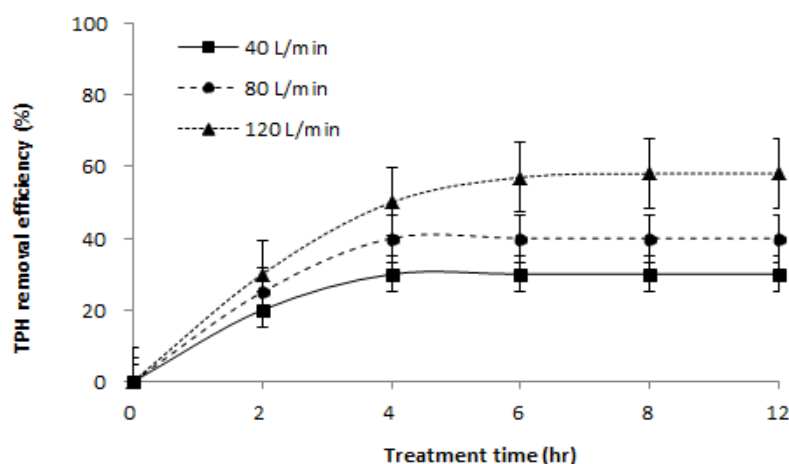
Gwan-Soon Jang*

Department of Environmental Health, Daejeon Health Sciences College

(Received: July 13 2014, Revised: October 1 2014, Accepted: October 2 2014)

This study was performed to test the applicability of the ozone/hydroxy radical reaction system, which applied advanced oxidation processes, to remove total petroleum hydrocarbon (TPH) from the fine soil in washing water of the soil washing process. Removal efficiency was tested on 40 L of washing water in a pilot reaction tank. Fine soil contaminated with 800 mg kg⁻¹ TPH was prepared at 5% and 10% suspended solids. Testing conditions included ozone/hydroxy radical flow rates of 40, 80, and 120 L min⁻¹, and processing time of 2 to 12 hours. The removal efficiency of petroleum hydrocarbon from water waster by ozone/hydroxy radical was increased with higher flow rates and lower percentages of suspended solids. Optimal efficiency was achieved at 80 L min⁻¹ flow rate for 4 hours for the 5% suspended solids, and 120 L min⁻¹ for 6 hours for the 10% suspended solids. These results verified the efficiency of hydroxy radical in removing TPH and the applicability of the ozone/hydroxy radical reaction system in the field.

Key words: Ozone/hydroxy radical, Advanced oxidation processes, Total petroleum hydrocarbon, Soil washing



Removal efficiency of TPH from fine soil on soil washing water with 5% suspended solid by Ozone/hydroxy radical system.

*Corresponding author : Phone: +82426709224, E-mail: kschang@hit.ac.kr

§Acknowledgement: This study was supported by 2012 Research Fund of Taejeon Health Sciences College (No; 2012017).

Introduction

토양은 암석의 풍화산물과 유기물이 섞여지고 이것들이 자연환경의 영향을 받아 특정한 토양단면 (soil profile)을 형성한 자연체로서 각종 토양생물에게 안식처가 되는 중요한 환경자원이다. 이러한 토양환경으로 오염물질이 유입되면 토양입자로부터 오염물질을 제거하기가 어렵기 때문에 원래의 모습으로 토양이 재생되기까지 토양생물은 오염물질로부터 심각한 해를 받거나 생존자체가 어렵다. 이와 같은 토양오염은 다양한 오염원으로부터 비가시적으로 발생하는 경우가 많기 때문에 오염여부가 확인되는 시점에서는 오염지역 및 오염물 부하량이 크게 증가함으로써 오염토양을 정화하는데 시간, 비용이 많이 소요될 뿐만 아니라 정화자체를 더욱 어렵게 한다. 현재 국내에서 각종 지하유류저장시설로부터 빈번하게 발생하는 토양오염은 수준이 심각해지면서 여러 가지 현장에 적용할 수 있는 유용한 토양정화기술의 실용화에 관심이 집중되고 있다.

토양정화기술 중에 토양세척 (soil washing)은 오염토양을 굴착 후, 토양을 세척수로 기계적인 마찰을 일으켜 토양입자에 결합되어 있는 오염물질의 표면장력을 약화시켜 토양으로부터 분리, 처리하는 방법이다. 오염물질은 작은 미세토양에 많이 흡착되어 있기 때문에 미세토양만을 분리하면 오염토양의 부피가 현저히 감소되고, 토양입자와 화학적으로 강하게 결합되지 않은 오염물질은 물리적인 세척으로 쉽게 분리할 수 있다는 점에서 국내에서 토양세척이 널리 사용되고 있다 (Moon *et al.*, 2002; Lee and Jang, 2010; Choi, 1997) 세척공정에서 경제적으로 중요한 과정중 하나가 세척수를 재활용하는 것인데 이를 위해서는 최종공정에서 세척수정화조로 유입되는 작은 미세토양 입자 (75 μm 정도)에 분해되지 않고 남아 있는 오염물질을 효과적으로 제거하는 것이다 (Seo *et al.*, 2009; Bhandari *et al.*, 2000; Reinert *et al.*, 1995).

고도산화처리 (advanced oxidation process)는 염소나 오존과 같은 산화력이 강한 물질을 투입하여 오염물질을 처리하는 것으로 정수나 폐수처리에 흔히 사용한다. 그러나 오존은 유기물과 선택적으로 반응하기 때문에 완전히 처리하지 못한다. 이러한 단점을 극복하는 방법으로 강력한 산화력으로 OH 라디칼을 $\text{O}_3/\text{H}_2\text{O}_2$, O_3/UV , $\text{TiO}_2/\text{H}_2\text{O}_2$, $\text{UV}/\text{H}_2\text{O}_2$, O_3/TiO_2 , $\text{O}_3/\text{Metallic oxides}$ 등과 같은 여러 가지 방법으로 생성시켜서 비선택적으로 유기물을 분해 제거하는 방법이 적용되고 있다 (Agustina *et al.*, 2005; Hoigne 1998; Sanchez *et al.*, 1998; Zhang *et al.*, 2005) 이러한 기술은 1970년대 이후 미국, 유럽 등지에서 연구되어 1980년대 후반부터 상수나 하수처리에 상용화되기 시작하였으며, 현재는 캐나다, 프랑스 등을 중심으로 폐수처리 공정에 적용하고 있다 (Guzzella *et al.*, 2002; Mamesh *et al.*, 2006; Vogelpohl and Kim,

2004).

본 연구에서는 강한 산화력을 갖는 OH 라디칼을 유기성 오염물질에 접촉시켜서 최종적으로 CO_2 와 H_2O 로 분해시키는 AOPs 기술을 활용하여 유류오염토양을 정화하는 세척공정에서 세척수에 남아있는 미세토양의 유류를 효율적으로 제거하는 가능성을 평가하고자 하였다.

Materials and Methods

시료 채취 대전지역에서 디젤유에 의해서 오염된 부지에서 토양세척으로 오염토양을 정화처리 하는 현장에서 채취하였다. 채취시료의 분획입자는 토양세척 공정에서 75 μm 이하의 미세토양으로 정하였으며, 채취한 시료는 시험실로 옮겨 유류오염농도를 분석하였고, 토양세척 공정에서 발생하는 세척수의 미세토양에 결합되어 있는 잔존 유류를 처리하는 pilot 실험에 시료로 사용하였다. 또한 정화대상 토양의 특성을 파악하고자 오염부지에서 오염되지 않은 지점을 선정하고 채취한 토양을 실험실에서 자연풍건 상태로 건조시킨 후에 나무망치로 분쇄하여 0.5 mm의 표준체를 통과한 시료를 각각 균등하게 취하여 분석용 시료로 사용하였다.

토양분석 오염토양의 특성을 알아보기로 토양 pH, 토양유기물, 양이온치환용량, 토성과 토양비중 등을 다음과 같이 분석하였다. 토양 pH는 H_2O 와 1N KCl 용액으로 처리하여 pH meter로 측정하였고, 토양유기물은 토양 0.5 g으로 하여 Tyurin법으로 분석하였으며, 양이온치환용량은 1N 초산암모늄 침출액 (1N- NH_4OAc , pH 7.0)과 1N-초산침출액 (1N-Acetic acid, pH 2.31) 50 ml에 풍건세토 5.0 g을 100 ml 삼각플라스크에 취하고 30분간 진탕 후, pH meter로 측정된 pH 값으로 계산하는 간이방법으로 실험하였다. 토성은 pipette법으로 분석하였고, 토양 가비중은 토양채취기로 채취한 토양을 0.1 gr 단위까지 정확히 칭량한 다음 105°C에서 8시간 건조 후 다음 식에 의하여 값을 산출하였다.

$$\rho d = M/V$$

여기서, ρd : 건조용적밀도(g/cm^3), M : 105°C에서 8시간 건조 후 토양의 질량(g), V : 토양시료채취기의 용적(cm^3)이다.

유류 분석 정화현장에서 채취한 토양시료와 실험실에서 정화처리 하는 세척수의 미세토양을 대상으로 유류농도를 분석하였다. 채취시료는 비이커에 넣고 무수황산나트륨을 적당량 넣어 잘 흔들어 섞은 후에 디클로로메탄 100 ml를 넣고 초음파추출기로 유류를 추출하였다. 추출액은 여지 (5B)를 깐 흡인깔대기로 진공 여과한 후에 무수황산나트륨

으로 충전한 컬럼을 통과시켜서 탈수시킨 후, 회전증발농축기로 약 2 ml가 될 때까지 농축한 다음에 방해물질의 제거를 위하여 실리카겔 0.3 g 을 넣고 정지시킨 후 상등액을 바이알에 옮겨 검액으로 사용하였다 (환경부 2008). 분석은 Gas chromatography (Varian CP-3800)으로 사용하였고, 분석조건은 Table 1로 정리하였다.

정확실험장치 AOPs의 O_3 /UV공정에서 유도되는 O_3 /OH 라디칼 정확실험장치의 개요는 Fig. 1에 나타났다. Fig. 1에서 보는 바와 같이 pilot 수준의 정확실험장치는 공기공급장치, O_3 발생장치, OH 라디칼 발생장치 및 주입장치로 구성하였다. OH 라디칼을 생성하기 위해 사용한 UV 광원은 200~280 nm의 파장영역, 중심파장 254 nm을 가지는 16 W 램프를 사용하였다. OH 라디칼은 자외선 조사 하에 광섬유를 촉매로 하여 O_2^- /HO $_2$ /H $_3$ O $_2$ 의 페록시라디칼을 생성하고, 생성된 라디칼은 O_3 과 신속한 반응에 의해 최종적으로 산화력이 강한 OH 라디칼이 생성하게 된다. 본 연구에서 사용한 O_3 발생장치는 순산소를 사용할 경우에 발생하는 O_3 은 약 15 g/hr 정도, 공기를 이용하게 하게 되면 O_3 생성수율은 약 30% (5 g/hr)정도가 되며 이때에 공기공급량은 120 L min $^{-1}$ 이다. O_3 /OH 라디칼에 의한 정확처리효율을 평가하기 위하여 공기주입량은 40 L min $^{-1}$, 80 L min $^{-1}$, 120 L min $^{-1}$

로 조절할 수 있도록 하였다. Pilot 반응조는 40 cm × 40 cm × 40 cm로 아크릴로 제조하였으며 분사노즐은 최적의 효과를 평가하여 ϕ 80 mm (0.02 mm) size로 선정하였다.

정확실험장치의 미세토양 유류제거 효율검증 토양 세척 (soil washing)공정에서 세척수의 미세토양 정확처리에 본 정확실험장치의 적용 가능성을 평가하기 위하여 실험실용으로 제작한 pilot 반응조에 미세토양 함량이 5%와 10% 현탁액이 되도록 40 L의 세척수를 조제하여 O_3 /OH 라디칼의 주입량과 처리시간 그리고 미세토양 함량에 따라 유류제거 효과를 검증하였다.

정확실험장치의 미생물처리적용 정확실험장치를 수질정화처리에 적용하기 위하여 수질오염의 지표생물인 대장균군 (coli form group)을 활용하여 수중미생물의 처리효과를 검증하고자 하였다. 실험방법은 수질 및 수생태계 보전에 관한 법률에서 규정한 대장균군 시험방법에 준하여 peptone 10.0 g, lactose 10.0 g, sodium desoxycholate 1.0 g, sodium chloride 5.0 g, dipotassium phosphate 2.0 g, ferric ammonium citrate 1.0 g, sodium citrate 1.0 g, agar 15.0 g, neutral red 0.03 g으로 구성되어 있는 Desoxycholate agar를 사용한 평판배양법으로 하였다.

Table 1. Analysis conditions of TPH by gas chromatography.

Parameters	Conditions
Gas Chromatograph	Varian CP 3800,
Detector	Flame Ionization Detector (FID)
Column	DB-5 (30 m × 0.32 mm × 0.25 μ m)
Carrier gas (flow rate)	Helium(2 ml /mln)
Detector temperature	320°C
injector temperature	300°C
Temperature program	50°C (2 min) to 320°C (10 min)
Rate	8°C/min

Results and Discussion

토양분석 결과 토양세척 (soil washing)에서 토양 pH, 토양의 입도분포, 토양유기물 그리고 양이온치환용량 등은 정확처리 효율에 영향을 미치는 중요한 인자이다. 세척제의 종류와 양을 결정하는데 토양 pH는 영향을 주며, 미세토양 함유율이 20~30% 이상, 양이온치환용량 100 cmol $^+$ kg $^{-1}$ 이상인 경우 그리고 유기물 함량이 높을수록 세척효율은 현저히 낮아진다 (Moon *et al.*, 2002; Choi, 1997; Reinert 1995).

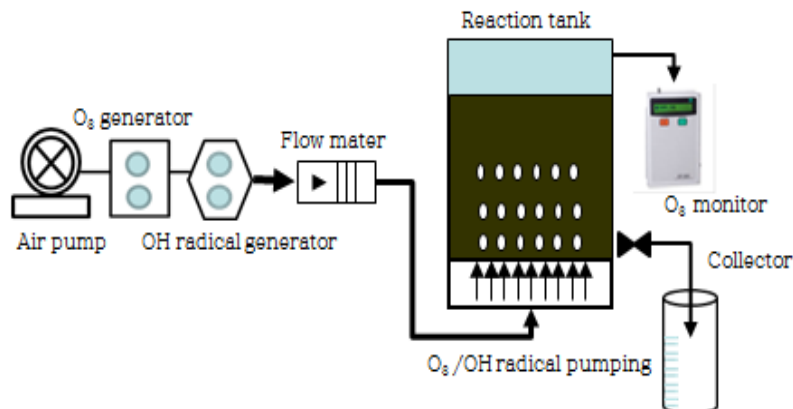


Fig. 1. Ozone/hydroxy radical reaction system to test removal efficiency of TPH from fine soil on soil washing water.

Table 2. Chemical and physical properties of soil sample.

Soil properties	Analysis Value
Soil pH (1:5)	5.46 (H ₂ O), 4.98 (1N-KCl)
Soil organic matter	3.7 g kg ⁻¹
Cation exchange capacity	5.5 cmol ⁺ kg ⁻¹
Soil Texture	Sand 62.5%
	Silt 20.0%
	Clay 17.5%
Soil density	1.23 g/cm ³
Soil particle density	2.45 g/cm ³

오염토양은 Table 2로 나타낸 바와 같이 pH는 5.46으로 약 산성, 유기물함량과 양이온치환용량은 3.7 g kg⁻¹와 5.5 cmol⁺ kg⁻¹ 모래, 미사, 점토의 비율은 각각 62.5%, 20.0% 및 17.5%로 사질양토 (sandy loam)에 해당되어 세척정화 처리를 하여도 무리가 없는 토양특성을 나타내었다. 그리고 실험용 미세토양은 약 800 mg kg⁻¹ 정도의 유류가 남아 있는 것으로 분석되었으며, 이 수준은 토양오염물질 기준에 따르면 1 지역의 토양오염우려기준치인 500 mg kg⁻¹을 초과하는 수준으로 정화처리 대상이 된다.

O₃/OH 라디칼 주입량과 유류성분 제거효율 Pilot 반응조의 하단부에서 상층부로 공기를 분사하여 반응조 안의 미세토양과 O₃/OH 라디칼을 접촉시켜서 세척수의 미세토양이 함유하고 있는 유류가 제거되는 효과를 검증한 결과, Fig. 2와 3에서 보는 바와 같이 공기주입량을 40 L min⁻¹에서 80 L min⁻¹, 120 L min⁻¹까지 증가시켰을 경우에 유류제거율도 유의적 (P<1%)으로 증가하는 경향을 나타냈다. 이것은 공기주입량이 증가함에 따라 OH 라디칼의 공급도 증가하여 OH 라디칼의 생성은 유류분해에 영향을 미치는 것으로 판단된다.

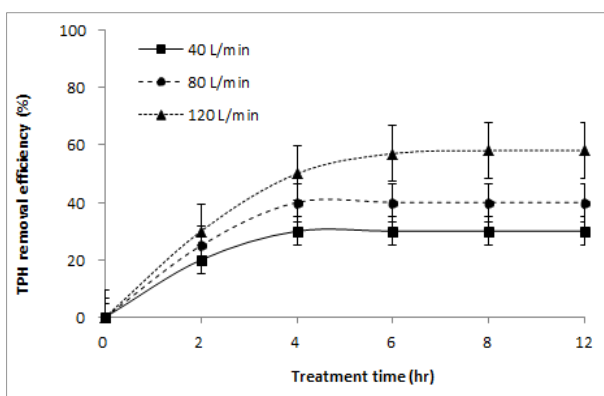


Fig. 2. Removal efficiency of TPH from fine soil on soil washing water with 5% suspended solid by Ozone/hydroxy radical system.

O₃/OH 라디칼의 처리시간과 유류성분 제거효율

Pilot 반응조에 2시간 간격으로 12시간까지 공기를 주입하여 O₃/OH 라디칼을 미세토양과 접촉시킨 결과, 미세토양의 유류제거율은 O₃/OH 라디칼과 접촉이 일어나는 초기단계에 가장 높은 제거효과를 나타냈다. 초기단계 이후에 처리시간이 지속됨에 따라 유류제거는 서서히 증가하나 각 처리시간 대비 증가 폭에는 큰 변화가 없이 거의 일정한 패턴을 유지하였고, 이러한 패턴은 공기주입량을 달리하였을 경우에도 같았다. 그러나 전체적인 처리시간과 유류제거율은 유의적인 (P<1%) 관계가 있었으며, 처리시간이 늘어남에도 제거율이 증가하지 못하는 이유는 O₃/OH 라디칼이 미세토양과 접촉하여 유류를 분해시키는 되는 공기주입량, 처리시간, 미세토양 함량 외에도 오염물질의 특성, 농도, 흡착력 그리고 OH 라디칼의 잔존시간 등과 같은 여러 가지 요인들이 함께 작용하는 것으로 사료된다.

세척수의 미세토양 함량과 유류성분 제거효율

오염토양 세척에서 미세토양의 발생량이 많으면 오염물질 제거효율이 현저히 낮아지며, 세척수의 재활용에도 큰 영향을 주게 된다 (Bhandari *et al.*, 2000). 세척수의 미세토양 함량을 5%와 10%로 조절하여 함량에 따라서 유류가 제거되는 효과를 비교한 결과, 미세토양 함량이 낮은 것은 높은 것보다 유류제거율이 훨씬 높게 나타나 미세토양 함량에 따라서 O₃/OH 라디칼 처리효과는 다르게 나타났다. 즉, 세척수에 공기주입량을 각각 40 L min⁻¹, 80 L min⁻¹, 120 L min⁻¹씩 12시간 처리한 후에 미세토양 함량에 따라 유류제거율을 평균값으로 비교해 보면 Fig. 2와 3에서 보는 바와 같이 미세토양 함량이 5%인 경우는 10%인 경우보다 유류제거율이 각각 10%, 15%, 18% 높았다. 그리고 미세토양 함량별 처리시간에 따른 유류제거율 변화를 보면, O₃/OH 라디칼의 처리시간과 유류성분 제거효율에서 전술한 바와 같이 초기단계에 유류제거율이 증가하면서 미세토양 함량이 5%인 경우는

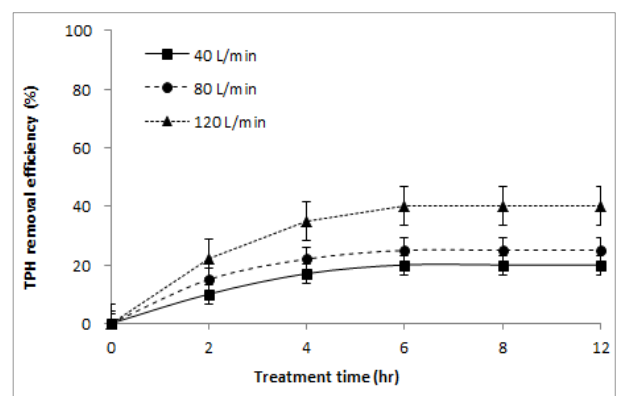


Fig. 3. Removal efficiency of TPH from fine soil on soil washing water with 10% suspended solid by Ozone/hydroxy radical system

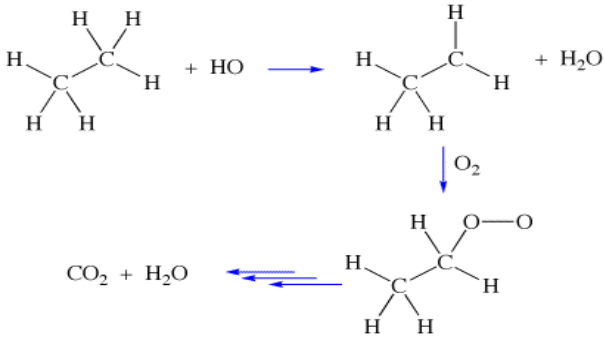


Fig. 4. The mechanism of chemical decomposition of petroleum hydrocarbon by hydroxy radical reaction.

처리시간 4시간, 10%인 경우는 처리시간 6시간을 변곡점으로 해서 제거율에 큰 변화가 일어나지 않았다. 따라서 O_3/OH 라디칼 정화실험장치를 통하여 OH 라디칼 주입량, 처리시간, 미세토양 함량을 달리하여 세척수의 유류제거 효과를 평가한 결과에서 실험용 미세토양에 대한 최적 정화처리 조건은 다음과 같다. 미세토양 함량이 5%인 경우는 공기주입량을 80 L min^{-1} 에서 4시간, 미세토양 함량이 10%인 경우는 공기주입량을 120 L min^{-1} 에서 6시간 처리하였을 때에 오염토양처리기준을 만족하는 제거효과를 얻을 수 있었다.

따라서 AOPs 기술을 활용한 정화실험장치는 O_3/OH 라디칼 처리효과에서 미세토양 함량에 따라 다소간 차이는 있었지만 세척수 정화처리에 적용이 가능할 것으로 판단되었다. 이와 같이 정화실험장치로부터 생성되는 O_3/OH 라디칼에 의해서 유류분해가 일어나는 것은 Agustina *at el.* (2005), Zhang *at el.* (2005)이 실험을 통하여 제시한 것과 같이 UV 조사 하에 광촉매로 생성된 $\text{O}_2^-/\text{HO}_2/\text{H}_2\text{O}_2$ 페록시라디칼이 O_3 의 반응으로 최종적으로 생성되어 산화력이 강한 OH 라디칼에 기인한 것이며, OH 라디칼은 Fig. 4로 나타난 바와 같이 O_3 보다 더 강한 산화제로 작용하여 유류를 점차적으로 저 분자로 분해하여 최종에는 H_2O 와 CO_2 로 변화시키기 때문이다 (Agustina *at el.*, 2005; Zhang *at el.*, 2005; Hoigne, 1998; Sanchez *at el.*, 1998). 또한 공기주입량이 많을수록 유류성분 제거율이 높은 것은 Choi와 Kim (2010), Hoigne (1998), Sanchez *at el.* (1998)의 실험결과와 같이 O_3 의 농도 증가는 페록시라디칼의 생성을 촉진하고 이들의 반응에 의하여 OH 라디칼 생성이 증가한 것이 제거율에 기여한 것으로 판단된다. 그러나 Lee와 Jang (2010), Glaze와 Kang (1988)이 미세토양 함량이 많게 되면 미세토양과 O_3/OH 라디칼의 접촉이 제한되거나 방해되어 유류성분의 제거효과가 낮아진다고 지적한 것과 같이 본 실험에서도 같은 결과를 얻었다.

미생물 정화처리 효과검증 세척수와 같은 양의 일반 폐수에서 배출기준에 적용되는 대장균군을 대상으로 정화

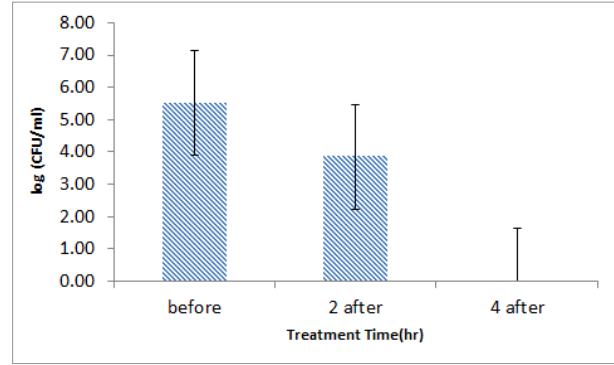


Fig. 5. Removal efficiency of E. coli from wastewater by Ozone/hydroxy radical system.

처리 전과 정화처리 후에 채취한 시료를 평판배양법으로 배양하여 형성한 생균수를 비교하여 정화실험장치의 미생물 정화처리 효과를 검증하였다. 실험결과는 공기공급량 120 L min^{-1} 을 주입하여 4시간 처리하였을 때에 Fig. 5에서 나타난 것과 같이 최고의 정화처리 효과를 얻을 수 있었으며, O_3/OH 라디칼 처리시간에 따른 미생물의 정화효과에 대한 검증은 고도의 유의성 ($P < 0.01\%$)이 있었다. 이런 결과는 Guzzella *at el.* (2002), Vogelphol와 Kim (2004)에 의해서 제시된 바와 같이 하수나 폐수정화처리는 물론 수계에서 질소와 인의 부영양화 원인 물질로 인하여 집단적으로 빠르게 발생하는 조류 등과 같은 수중미생물을 일시적으로 제거하는 용도로 적용이 가능할 것으로 사료된다.

Conclusion

유류오염토양을 토양세척으로 정화처리 하는 과정에서 제거되지 않고 세척수에 남아있는 미세토양의 유류를 효율적으로 제거하기 위한 방법으로 유기물과 강한 산화반응을 일으키는 O_3/OH 라디칼 정화실험장치를 활용하여 그 효과를 검증하였다. Pilot 반응조에서 유류농도가 800 mg kg^{-1} 인 미세토양이 5%와 10%의 현탁액이 되도록 40 L의 세척수를 만들어서 공기주입량을 40 L min^{-1} , 80 L min^{-1} 그리고 120 L min^{-1} 로 구분하여 각각 2시간 간격으로 12시간까지 O_3/OH 라디칼로 처리하였다. O_3/OH 라디칼 처리에 의한 세척수 미세토양의 유류제거율은 공기주입량이 증가할수록 그리고 현탁액이 낮은 것에서 더 높았다. 세척수의 미세토양 시료는 5% 현탁액인 경우는 공기주입량을 80 L min^{-1} 로 하여 4시간 처리하였을 때에 10% 현탁액인 경우는 공기주입량을 120 L min^{-1} 로 하여 6시간동안 처리하였을 때에 최적의 기준에 적합한 최적의 제거효율을 얻었다. 이러한 결과는 정화실험장치로부터 생성한 OH 라디칼이 유류제거에 기여한 것으로 정화실험장치는 현장적용의 가능성이 확인되었다.

References

- Agustina, T. E., H. M. Ang, and V. K. Vareek. 2005. A review of synergistic effect of photocatalysis and ozonation on wastewater treatment. *J. photochem. photobio. C: Photochemistry reviews*. 6(4):264-273.
- Bhandari, A., J. T. Novak, and D. D. Dove. 2000. Effect of soil washing on petroleum hydrocarbon distribution on sand sources, *J. Haz. Sub. Res.* 2(7):1-13.
- Choi, S. P. and J. O. Kim. 2010. Oxidation of organics using a direct reaction of peroxy radical and ozone. *J. Kor. Geo-Env. Soc* 11(8):41-47.
- Choi, S. I. 1997. A study on the application of soil washing technology for HOCs-contaminated soil using mixed surfactants. *J. Soil Groundwater. Env.* (2):103-108.
- Glaze, W. and J. W. Kang. 1988. Advanced oxidation process for treating ground water contaminated with TEC and PCE : Laboratory studies. *J. AWWA.* May. Vol. 57-63.
- Guzzella, L., D. Feretti, and S. Monarca, 2002. Advanced oxidation and adsorption technologies for organic micro-pollutant removal from lake water used as drinking water supply. *Water Res.* 36(17):4307-4318.
- Hoigne, J. 1998. Chemistry of aqueous ozone and transformation of pollutants by ozonation and advanced oxidation processes, in : O. Hutzinger(ed). *The Handbook of environmental chemistry*, Springer-Verlag, Berlin, 5:84-141.
- Lee, C. Y. and Y. S. Jang. 2010. Treatment of contaminated groundwater containing petroleum and suspended solids using DAF and mixed coagulation process. *J. Kor. Geo-Environ. Soc* 11(8):25-32.
- Mamesh, T., T. O. Kwon, J. C. Jun, S. Balaji, M. Mathrswaran, and I. S. Moon, 2006. Application of several advanced oxidation process for the destruction of terephthalic acid (TPA). *J. hazard. Mater.* 142(1-2):308-314.
- Moon, H. J., Y. K. Lim, Y. K. Kim, C. S. Joo, K. Y. Bang, W. J. Chung, and S. W. Lee. 2002. A study on remediation of diesel-contaminated soil by biosurfactant-enhanced soil washing. *J. KoSSGE* 7(2):13-23.
- Reinert, G., E. Schuster, and D. Bryniok. 1995. Biodegradation of petroleum hydrocarbons in soil suspensions separated by soil washing. *Soil Environ.* 5:409-410.
- Sanchez, L., J. Peral, and X. Domenech. 1998. Anilin degradation by combined photocatalysis and ozonation, *Applied catalysis B: Environmental.* 19(1):59-65.
- Seo, Y. S., S. I. Choi, J. M. Kim, B. K. Kim, S. G. Kim, S. H. Park, and W. H. Ju. 2009. Full scale soil washing and Non discharged washing water treatment process of soil contaminated with petroleum hydrocarbon. *J. Soil Groundwater. Env.* 14(1):61-67.
- Vogelpohl, A and S. M. Kim. 2004. Advanced oxidation processes (AOPs) in wastewater treatment. *J. Indus. Eng. Chem.* 10(1):33-40.
- Zhang P., F. Liang, G. Yu, G. Chen, and W. Zhu 2003. A comparative study on decomposition of gaseous toluene by O₃/UV and O₃/TiO₂/UV. *J. Photochem. Photobio. A : Chemistry*, 156, pp. 189~194.