

Research Paper

현장토양내 다환방향족탄화수소 저감을 위한 과산화산 산화효율 평가

정상락 · 장윤영
광운대학교 환경공학과

Assessment of Peroxy-acid Oxidation for Reduction of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Field Soil

Sang-Rak Jung · Yoon-Young Chang

Department of Environmental Engineering, Kwangwoon University

요약: 과산화산(peroxy-acid)을 산화제로 사용하여 현장 오염토양내 존재하는 다환방향족탄화수소의 산화분해 효과를 알아보기 위하여 실험실 규모의 연구를 진행하였다. 대상 토양의 토성은 19.2%의 토양 유기물을 포함한 pH 6.8의 사양토(sandy loam)로 확인되었으며 토양 내 다환방향족탄화수소 중 벤조(a)피렌(benzo(a)pyrene)의 농도가 평균 2.23 mg/kg으로 국내 토양환경보전법의 1 지역 우려 기준치의 3배 정도 높게 나타났다. 따라서 벤조(a)피렌 오염 토양에 대하여 유기산과 과산화수소를 이용한 과산화산 산화(peroxy-acid oxidation)처리에 의한 토양내 벤조(a)피렌의 농도 저감효과를 유기산의 종류와 유기산 및 과산화수소의 농도조건별로 평가하였다. 선정된 유기산 중 프로피온산(propionic acid)의 산화 효과가 가장 큰 것으로 확인되었으며 토양 중 벤조(a)피렌의 농도를 최종적으로 1 지역 우려 기준치 이하로 저감하였다.

주요어: 토양오염, 다환방향족탄화수소, 고급산화공정, 과산화산 산화, 유기산

Abstract: Laboratory-scale experiments were conducted to assess the effect of oxidative decomposition of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in field soil using peroxy-acid. The study soil texture is sandy soil containing 19.2% of organic matter at pH 6.8. Among polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in the study soil, the concentration of benzo(a)pyrene is 2.23 mg/kg which is three times higher than the Korea standard level. Therefore benzo(a)pyrene was selected as the target study PAH for the treatment by peroxy-acid oxidation using peroxy-acid coupled with hydrogen peroxide, and the efficiency of the oxidative decomposition of benzo(a)pyrene was assessed for the different organic acids and dosages of an organic acid and hydrogen peroxide. Propionic acid among the tested organic acids showed the highest efficiency of benzo(a)pyrene reduction in the peroxy-acid oxidation treatment and finally satisfied the Korea standard level.

Keywords: Soil contamination, polycyclic aromatic hydrocarbons, advanced oxidation process, peroxy-acid oxidation, organic acid

I. 서론

과거에는 마룻바닥 및 기둥 등의 목재에 천연기름으로 기름칠을 주기적으로 하여 목재의 부식을 방지하였다. 방부제의 종류는 수용성 방부제, 유용성 방부제 및 유성 방부제로 구분되며, 그중 유성 방부제로 사용되는 크레오소트(creosote)는 19세기 중반 이후 널리 사용되고 있다. 크레오소트는 석탄 같은 화석연료나 목재에서 얻은 타르를 열분해 및 증류하여 만들어지며, 탄화수소로 이루어진 유기화합물로 냄새가 나는 흑색 또는 갈색의 액체로 존재한다. 또한, 크레오소트는 고비점 화합물 비율이 높고, 수분에 대한 용해도와 휘발성이 낮아 처리 목재가 잘 썩지 않도록 하는 성질을 가지고 있어 철도 침목, 광산용 갱목, 말뚝 등의 목재 방부제로 널리 사용되고 있다(Mateus 2008; Černí 2015). 이러한 크레오소트는 벤조(a)피렌(BaP)과 같은 다환방향족탄화수소(Polycyclic Aromatic Hydrocarbons, PAHs)가 75~80% 이상 함유되어 있고(Canadian EPA 1993), 이 물질들은 인체에 흡수되면 폐암 또는 피부암을 유발한다(Cavaliere and Rogan, 1998). 위와 같은 유해성으로 인해 미국에서는 Best Management Practices를 적용하여 크레오소트의 PAHs 성분에 대한 처리방법을 규정하여 환경에 대한 영향을 최소화하고 있다(WWPI, 1996).

발암물질로 분류되는 벤조(a)피렌(BaP)은 5개의 벤젠 고리가 결합한 화합물로서 다환방향족탄화수소(PAHs) 그룹에 속하는 화합물질 중 하나이며 PAHs로 오염된 환경 매체에서 일상적으로 검출되므로 PAHs에 대한 노출을 측정하는 지표 화합물질로 자주 사용되며, 특히 국제암연구소(IARC, International Agency for Research on Cancer)에서는 BaP의 발암성을 인체 발암물질(Group 1)로 분류하여 관리하고 있다.

대표적인 난분해성 물질인 BaP를 포함한 PAHs는 분해가 잘되지 않아 처리하는데 많은 시간이 필요하며, BaP로 오염된 토양을 복원하기 위해서 주로 열탈착 또는 소각, 토양세척, 산화제 등의 약품처리, 미생물에 의한 생분해 방법이 활용되고 있다(Alderman and Nyman 2009; Peng et al. 2011; Tejada and

Masciandaro 2011; Fu et al. 2012; Gupta and Gupta 2015; Cao et al. 2016; Hicknell et al. 2018). 하지만 소각 등의 열적 처리방법은 처리 후 토양이 훼손된다는 단점이 있으며, 토양세척이나 용매추출 등의 방법은 2차 오염을 방지하기 위해 후처리 과정이 필요하다. 또한, 미생물 등을 이용한 생물학적 처리방법의 경우 고농도로 오염된 토양이나 장기간 걸쳐 오염된 토양의 처리에는 한계가 존재한다(Shin 2015).

해외에서는 벤조(a)피렌과 같은 계통의 PAH 오염 토양 정화방안으로 화학적 산화 기술 적용이 활발히 진행되고 있는데, 크게 과산화수소를 이용한 라디칼 반응에 의한 산화와 과망간산 계통의 반응 지속성을 높이는 산화 방법 두 가지로 분류될 수 있다. 기존 과산화수소를 이용한 라디칼 반응은 대상물질이 불특정하여 토양 중 유기물이 존재할 경우 처리효율이 급속히 낮아지며, 과망간산 계통의 반응 지속성 산화 반응의 경우는 PAH의 다수의 벤젠 고리를 끊기에는 산화력이 떨어지는 단점을 보여주고 있다. 최근 높은 산화력과 지속성 그리고 다환족 화합물에 대한 선택적 산화력을 가진 peroxy-acid(과산화산) 혼합 산화제를 이용하여 PAH 오염 토양의 높은 처리효율을 보여준 사례가 보고되었으며 기존 라디칼 반응에 의한 PAH 처리효율보다 2~3 배 높은 처리효율을 나타내었다(Alderman and Nyman 2009).

본 연구의 목적은 현장토양 내 PAH 중 BaP를 대상으로 유기산과 과산화수소 혼합 산화제인 과산화산을 산화제로 사용하여 과산화산 산화(peroxy-acid oxidation)에 의한 BaP의 분해 효과를 유기산의 종류와 유기산 및 과산화수소의 농도조건별 평가하였다.

II. 연구방법

1. 시약 및 재료

Formic acid(99.0%), acetic acid(99.5%), propionic acid(99.0%), 과산화수소(30% v/v), Na_2SO_3 , Na_2SO_4 는 삼전화학에서, 노말헥산 및 아세톤은 Honeywell International Inc.에서 각각 구매하였다. BaP 분석을 위한 가스 크로마토그래피-질량 분광법(Gas

Chromatography–Mass Spectrometry) 표준용액 및 pyrene-d₁₀ 내부 표준용액은 AccuStandard Inc.에서 구매하였다.

2. 오염 토양 성상 분석

실험을 위한 BaP로 오염된 토양 시료는 오염부지 현장에서 US EPA 절차(US EPA 1995a; US EPA 1995b)에 따라 토양 표면에서 약 10 cm 깊이까지 토양과 식물을 제거한 후 수집 지점을 기준으로 원뿔꼴 4분할로 약 30 cm 깊이까지 토양을 채취하여 야외에서 72시간 동안 실온에서 균일하게 혼합 후 건조하였다. 이후 2 mm 이상의 굵은 자갈 및 이물질을 제거한 후 재차 충분히 교반한 후 입경별 입자 선별을 한 후 토성 분석을 하였다.

3. 실험방법

먼저 peroxy-acid 용액 성분인 유기산 종류별로 BaP 오염 토양의 peroxy-acid oxidation 효과를 알아보기 위하여 formic acid(99.0%, SAMCHUN Inc.), acetic acid(99.5%, SAMCHUN Inc.), propionic acid(99.0%, SAMCHUN Inc.)을 실험대상 유기산으로 선정하였으며 기존 산화제로 널리 쓰이는 펜톤산화제와 반응효과를 비교하였다. 실험은 입경 75~200 µm 범위의 10 g 오염 토양과 peroxy-acid 용액 30 mL (물(10 mL) + 유기산(10 mL) + 과산화수소 30%(10 mL))을 100 mL 삼각 플라스크에 먼저 주입하고 Jar tester에서 200 rpm 조건에서 24 시간 동안 교반하며 반응을 진행하였다. 펜톤산화의 경우 유기산 대신 동일 토양에 대해 0.5 M FeSO₄·7H₂O 용액 10 mL를 첨가하여 진행하였으며 모든 조건에서 반응 종료 후 1.0 M의 Na₂SO₃ 2 mL를 첨가하여 잔류 과산화수소의 반응을 억제하였다. 실험 간 오차와 측정 오류를 최소화하기 위해 세 번의 실험을 반복 수행하여 평균값을 구하였다. 다음으로 peroxy-acid 용액중 유기산과 과산화수소의 농도비율별 peroxy-acid oxidation의 반응효과를 알아보기 위하여 유기산 종류별 반응실험에서 주입한 10 mL 유기산의 농도를 0, 1, 5, 10, 100, 200, 300 g/L로 10 mL 과산화수소의 농도를 20, 50, 100 g/L로 조

절하여 입경 75~200 µm 범위의 10 g 오염 토양에 대해 peroxy-acid 용액 30 mL (물(10 mL) + 유기산(10 mL) + 과산화수소(10 mL))을 주입하여 반응을 진행하였다.

4. 분석

반응 후 토양 중 잔류 BaP의 농도는 다음과 같은 방법으로 측정하였다. 먼저 토양 및 peroxy-acid 용액을 냉동 원심 분리기(1580R, Gyrogen, Inc.)를 사용하여 4,000 rpm에서 5 분 동안 고액분리를 진행하였다. 분리된 고상 시료 5 g과 충분한 양의 무수황산나트륨(Na₂SO₄)을 잘 혼합하여 과량의 물을 제거한 후 아세톤과 노말헥산을 1:1 (v/v) 비율로 혼합한 용액 100 mL를 첨가한 다음 초음파 장치(VCX500, Sonics & materials, Inc.)를 사용하여 토양 중 BaP를 추출하였다. 이때 초음파 추출기는 3 분 동안 duty cycle의 50%인 출력을 최대화하도록 설정하였다. 추출용액은 무수황산나트륨 컬럼과 4 µm의 크기의 기공 여과지(No. 5B, Advantec)로 여과한 후, 회전 증발 농축기로 최대 1 mL까지 농축시켰다. 농축된 시료는 flame ionization detector(FID)의 GC-MS(Gas Chromatography–Mass Spectrometry, Agilent GC/MSD(7890A/5975C))를 사용하여 분석하였다. 분석 세부조건으로, HP-5ms의 모세관 컬럼 (15 m, 0.53 mm ID, 0.50 mm 필름)을 사용하여 시료를 분리하였으며, 주입기와 검출기 온도는 각각 260°C와 300°C로 조절하였다. 오븐 온도를 70°C에서 10°C/분의 승온 속도로 최종 온도 300°C까지 승온시키고 7분 동안 유지하였다. 토양 유기물 분석은 Tyurin법을 사용하였다.

III. 결과 및 고찰

1. 토양 특성평가

본 실험에 사용한 현장토양의 특성을 Table 1에 요약하였다. 토성은 사양토(sandy loam)로 나타났으며 토양 pH는 6.88로 중성에 가까웠다. 토양 입경별 분석한 BaP의 농도는 작은 입경일수록 더 큰 표면적에 의해 높은 농도를 나타내었으며 다른 연구에서도

Table 1. Characteristics of the study soil

Particle size range (μm)	Size distribution (%)	pH	SOM (%)	BaP (mg/kg)
Raw	100.0	6.88	19.3	2.23
200~2,000	60.6	-	-	1.62
75~200	27.1	-	-	4.06
2~75	8.17	-	-	4.89
<2	4.09	-	-	

이와 유사한 결과를 보고한 바 있다(Kitsa 1992; Yarlagadda 1995). 토양중 유기물 함량은 19.3%로 일반적인 자연상태에서의 토양중 유기물 함량에 비하여 높은 편이었으며 실험토양을 채취한 부지가 수십년간 철도부지로 사용되어 오면서 다양한 유기물의 혼입이 진행되어 왔기 때문에 추정된다.

2. 유기산 종류에 따른 peroxy acid oxidation 효과

Formic acid, acetic acid, propionic acid를 각각 적용하여 유기산 종류에 따른 BaP에 대한 peroxy-acid oxidation 효과를 알아보았다. 또한, 유기물 산화에 가장 일반적으로 적용되는 Fenton 산화 반응시험도 일반적인 적정 조건(pH 3, 0.5 M $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 10 mL, 30% of H_2O_2 10 mL)에서 함께 수행하였다(Lee 2001). Peroxy-acid oxidation에 의한 BaP 분해 효과는 propionic acid > acetic acid > formic acid 순으로 지방족 유기산의 사슬이 증가함에 따라 peroxy-acid oxidation에 의한 토양의 BaP 제거 효율이 향상되었다(Figure 1). 기존 Fenton 산화 반응

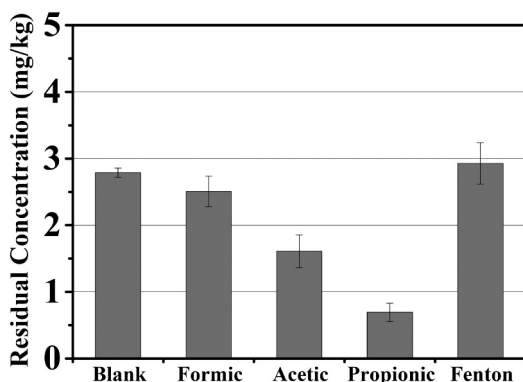


Figure 1. Reduction of BaP in soil by peroxy-acid oxidation using different type of organic acids and Fenton oxidation (Blank; 30 mL water)

을 적용한 경우, BaP 분해 효과는 미미한 것으로 나타났다.

유기산 특히 카르복실산(RCO_2H)과 과산화수소(H_2O_2)의 반응($\text{RCO}_2\text{H} + \text{H}_2\text{O}_2 \rightleftharpoons \text{RCO}_3\text{H} + \text{H}_2\text{O}$)을 통해 얻어진 과산소산(RCO_3H)은 산성 과산화기($-\text{OOH}$)를 포함하고 있는 약산성 강력 산화제로서 방향족 또는 지방족 화합물의 ketone 또는 alkene의 이중결합을 선택적으로 공격하여 방향족의 고리를 깬 ester 형태(Prilezhaev reaction)나 지방족인 경우 epoxide형태(Baeyer-Villiger oxidation)로 전환하는 반응특성을 가진다(Ena Madalina et al., 2019).

과산소산의 강한 산화력은 치환기의 전기음성도에 연관되어 있는데 친전자성 과산소산은 강한 산소전달자로 알려져 있다. 이러한 과산소산의 산소전달경향은 O-H 결합의 산성도가 증가할수록 커지고 과산소산과 반응하는 물질(alkene)내의 이중결합과 같은 전자제공 치환기들에 의해 촉진되어 이중결합이 많은 방향족 고리와 같이 전자밀집구조를 가진 PAHs 등에 대해 선택적 산화반응이 용이하다(Alderman et al., 2004). Figure 1에서 나타난 바와 같이 모든 반응 물질에 대해 비선택성 반응특성을 나타내는 기존의 펜톤산화에 비하여 과산소산의 BaP의 높은 산화분해 효율은 전자밀집구조인 이중결합에 대한 높은 선택적 산화반응때문인 것으로 판단되며, 다른 유기산에 비하여 propionic acid의 높은 산화력은 상대적으로 높은 전기음성도에 기인한 것으로 추정된다.

3. Peroxy-acid 용액중 유기산과 과산화수소의 농도조건별 토양 BaP의 산화분해 효과

Peroxy-acid 용액중 유기산과 과산화수소의 혼합 비율별 토양 내 BaP의 산화분해 효과를 알아보기 위한

회분식 peroxy-acid oxidation 시험을 수행하였다. 유기산 종류별 BaP 산화분해 실험에서 얻은 결과를 바탕으로 적용한 유기산 중 산화 효과가 높은 acetic acid와 propionic acid를 대상으로 과산화수소와의 혼합비율에 따른 BaP의 peroxy-acid oxidation을 수행하였다. 이때 단순한 세척 효과를 알아보기 위한 순수 물로 처리한 물 처리구(water; 30 mL), 유기산만 주입하였을 때의 효과를 알아보기 위한 유기산 처리구(Acid; water 20 mL+유기산 10 mL), 과산화수소 단독의 영향을 확인하기 위한 과산화수소 처리구(H₂O₂; water 10 mL+H₂O₂(30%) 10 mL)를 함께 수행하여 peroxy-acid 산화 처리와 비교하였다.

먼저, 토양 10 g에 대해 peroxy-acid 용액 30 mL 중 10 mL 과산화수소 주입농도가 20 g/L일 때, 10 mL acetic acid의 주입농도별 BaP의 처리결과를 보면(Figure 2a), acetic acid의 농도가 0 g/L에서 100 g/L까지는 peroxy-acid oxidation에 의한 BaP의 저감은 미미하게 나타났으나 100 g/L 이상에서는 acetic acid의 주입농도를 증가할수록 BaP의 저감효

과가 다소 증가하였다. 50 g/L의 과산화수소 주입조건에서는 acetic acid의 농도가 0 g/L에서 100 g/L까지는 큰 변화가 없었지만 100 g/L 이상의 주입조건에서는 급격한 BaP의 저감효과를 확인할 수 있었다(Figure 2b). 그러나 과산화수소의 농도를 100 g/L까지 증가시켜 적용하였을 때에는 acetic acid의 농도 증가에 따른 BaP의 저감효과는 큰 변화가 없었다(Figure 2c). 따라서 peroxy-acid 용액중 과산화수소의 과도한 주입농도는 오히려 peroxy-acid oxidation의 효과를 감소시킬 수 있었다.

다음으로 acetic acid의 실험에서와 같이 과산화수소를 20 g/L, 50 g/L, 100 g/L로 각각 주입한 조건에서 propionic acid의 주입농도를 변화시켜가며 BaP의 저감효과를 알아보았다. 먼저 과산화수소 주입농도 20 g/L 조건에서 propionic acid의 주입농도를 0 g/L에서 50 g/L까지 증가시켰을 때 BaP의 저감효과는 크지 않았으나 50 g/L에서 300 g/L까지 증가시킨 경우 BaP의 저감효과가 뚜렷하게 나타나기 시작하였다(Figure 3a). 50 g/L의 과산화수소 주입

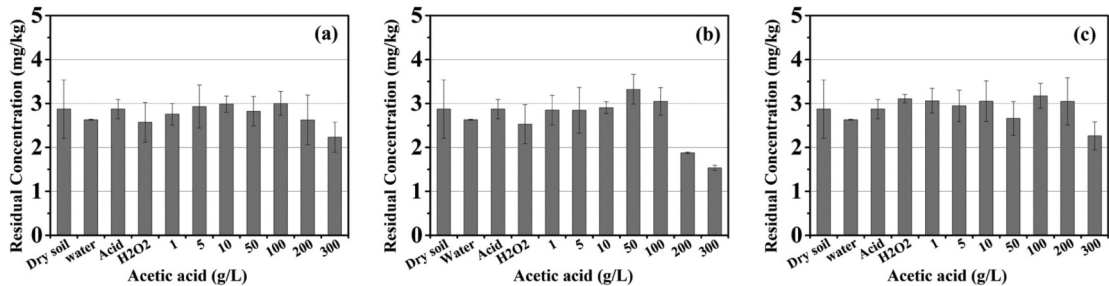


Figure 2. Reduction of BaP in soil by peroxy-acid oxidation using different mixing ratio of acetic acid for 20 g/L(a), 50 g/L(b) and 100 g/L(c) of hydrogen peroxide.

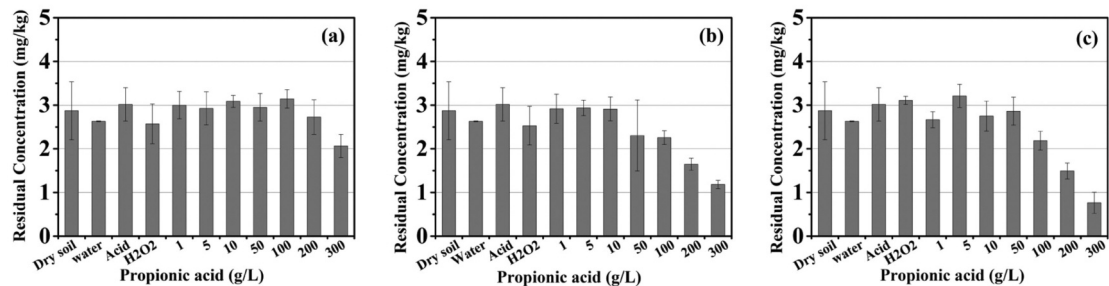


Figure 3. Reduction of BaP in soil by peroxy-acid oxidation using different mixing ratio of acetic acid for 20 g/L(a), 50 g/L(b) and 100 g/L(c) of hydrogen peroxide.

시, propionic acid의 농도가 0 g/L에서 10 g/L까지는 BaP의 농도변화는 미미하였으나 50 g/L이상의 propionic acid 주입 시, BaP 농도가 propionic acid의 농도에 비례하여 감소함을 알 수 있었다(Figure 3b). 과산화수소 100 g/L 주입조건에서는 propionic acid를 300 g/L로 증가시킨 조건에서 토양환경보전법의 토양 중 BaP의 1 지역 우려기준 이하 조건을 만족하는 결과를 얻을 수 있었다(Figure 3c).

본 연구결과 그래프에서 일부 처리구에서의 BaP의 토양중 농도가 무처리구에 비하여 높게 나타나고 있는데 이는 다양한 요인들이 복합적으로 영향을 미친 것으로 추정된다. 여러 반복하여 분석한 결과인 점을 고려할 때 주요 원인으로 추정되는 것은 다음과 같다. 본 연구대상 토양은 BaP의 오염이 수 십년간 진행된 부지에서 채취한 토양으로서 토양중 BaP가 상당기간 aging이 진행되었으며 유기오염물질의 토양내 이상 흡착(biphasic sorption)과정중 유기용매로 추출이 어려운 탈착저항성 상태인 S2 단계로 들어선 것으로 판단된다. 이러한 현상은 BTEX, PCBs, PAHs 등 다양한 형태의 유기화합물에서 흔하게 관찰된다(Nam and Kim, 2002). 이러한 형태의 비가역(irreversible) 혹은 비평형흡착(nonequilibrium sorption)상태는 여러 가지 반응에 의해 가역적 상태로 전환되기도 하는데, 수십년간 aging이 진행된 본 연구대상 토양의 경우 분석용 용매로 추출이 어려운 비가역적 상태의 BaP 성분들이 처리반응과정에서 가역적 상태로 전환되어 분석용매에 의한 추출이 가능해져 원토양에 비하여 높은 농도 검출이 이루어진 것으로 추정된다.

IV. 결론

본 연구에서는 BaP와 같이 여러 개의 벤젠 고리로 이루어진 PAHs 계통의 유기화합물에 대한 선택적 산화 및 분해를 기대할 수 있는 peroxy-acid oxidation 반응효과에 대하여 알아보았다. 기존 화학적 산화처리제로 널리 쓰이는 비선택적 반응성을 갖는 펜톤산화제와 비교하여 과산화산의 BaP의 산화분해효과는 매우 높게 나타났으며 이는 과산화산의 전자밀집구조를 갖는 BaP의 이중결합의 선택적 산화반응효과에

의한 것으로 판단되며, 과산화산의 성분인 유기산의 종류별 BaP의 산화분해효과는 propionic acid의 경우에 가장 높게 나타났다. 이는 전자를 받고 산소전달을 용이하게 도와주는 전기전도도의 크기에 영향을 받기 때문인 것으로 판단된다.

Propionic acid을 이용한 과산화산 용액의 최적 조건인 propionic acid 300 g/L, 과산화수소 100 g/L 주입조건에서 토양중 BaP의 농도를 토양환경보전법에서 규제대상인 1 지역 우려 기준 농도(0.7 mg/kg) 이하로 효과적으로 낮출 수 있음을 보여주었다.

기존의 산화처리제인 펜톤산화제로 처리가 어려운 수십년간 토양중에서 aging 과정을 거치며 비가역적 흡착단계로 들어선 BaP 오염 현장토양에 대해 과산화산의 효과적인 산화분해 성능을 확인할 수 있었으며, 기존의 많은 에너지가 소요되는 기술과 비교하여 경쟁력있는 방안으로 기대된다.

사사

본 연구는 2021년도 광운대학교 우수연구자 지원 사업에 의해 연구되었음.

References

- Adeola LN, Jeffrey S, Marianne CN. 2004. Remediation of benzo(a)pyrene in contaminated sediments using peroxy-acid, Chemosphere 55: 1413-1420.
- Alderman NS, Nyman MC. 2009. Oxidation of PAHs in a simplified system using peroxy-acid and glass beads: Identification of oxidizing species. Journal of Environmental Science and Health Part A 44(11): 1077-1087.
- Canadian EPA. 1993. Creosote-impregnated Waste Materials. Priority Substances List Assessment Report, 11.
- Cao Y, Yang B, Song Z, Wang H, He F, Han X. 2016. Wheat straw biochar amendments

- on the removal of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in contaminated soil. *Ecotoxicology and Environmental Safety* 130: 248-255.
- Cavalieri. 1997. Mechanisms of Tumor Initiation by Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Mammals. *PAHs and Related Compounds, Biology* 3(Part J): 81.
- Černi S, Kalambura S, Jovičić NIVES, Grozdek M, Kreč M. 2015. Energy recovery of hazardous wooden railway sleepers-experimental investigation in Croatia In Sardinia, 2015. 15th International waste management and landfill symposium.
- Eena M, Adalina P, Octav P, Daniela G, Rami D. 2019. Hydrogen Peroxide and Peracetic Acid Oxidizing Potential in the Treatment of Water. *REV. CHIM.* 70(6): 2036-2039.
- Fu D, Teng Y, Luo Y, Tu C, Li S, Li Z, Christie P. 2012. Effects of alfalfa and organic fertilizer on benzo [a] pyrene dissipation in an aged contaminated soil. *Environmental Science and Pollution Research* 19(5): 1605-1611.
- Gupta H, Gupta B. 2015. Photocatalytic degradation of polycyclic aromatic hydrocarbon benzo [a]pyrene by iron oxides and identification of degradation products. *Chemosphere* 138: 924-931.
- Hicknell BN, Mumford KG, Kueper BH. 2018. Laboratory study of creosote removal from sand at elevated temperatures. *Journal of Contaminant Hydrology* 219: 40-49.
- Kitsa V, Liroy PJ, Chow JC, Watson JG, Shupack HT, Sanders. 1992. Particle-size distribution of chromium: total and hexavalent chromium in inspirable, thoracic, and respirable soil particles from contaminated sites in New Jersey. *Aerosol Science and Technology* 17(3): 213-229.
- Korean Ministry of Environment. 2018. Designation and management of soil conservation countermeasure areas. Enforcement Regulations of the Soil Environment Conservation Act [Korean Literature].
- Lee BD, Iso M, Hosomi M. 2001. Prediction of Fenton oxidation positions in polycyclic aromatic hydrocarbons by Frontier electron density. *Chemosphere* 42(4): 431-435.
- Mateus, EP, da Silva MDG, Ribeiro AB, Marriott PJ. 2008. Qualitative mass spectrometric analysis of the volatile fraction of creosote-treated railway wood sleepers by using comprehensive two-dimensional gas chromatography. *Journal of Chromatography A* 1178(1-2): 215-222.
- Nam K, Kim J. 2002. Aging and bioavailability and their impact on risk-based remedial endpoint. *J. of KSEE.* 24(11): 1975-2000 [Korean Literature].
- Peng S, Wu W, Chen J. 2011. Removal of PAHs with surfactant-enhanced soil washing: influencing factors and removal effectiveness. *Chemosphere*, 82(8): 1173-1177.
- Shin. 2015. Subcritical water application study for benzo[a]pyrene and crude oil contaminated soil, Master degree dissertation. Chonnam National University, Gwangju. [Korean Literature]
- Tejada M, Masciandaro G. 2011. Application of organic wastes on a benzo(a)pyrene polluted soil. Response of soil biochemical properties and role of *Eisenia fetida*. *Ecotoxicology and Environmental Safety* 74(4): 668-674.
- US EPA. 1995. Compilation of air pollutant emission factors. procedures for sampling surface and bulk materials.
- US EPA. 1995. Compilation of air pollutant emission factors. Appendix C-2. Procedures for laboratory analysis of surface/bulk dust

- loading samples.
- WWPI. 1996. Best management practices for the use of treated wood in aquatic environments. Western Wood Preservers Institute, p. 33.
- Yarlagadda PS, Matsumoto MR, VanBenschoten JE, Kathuria A. 1995. Characteristics of heavy metals in contaminated soils. *Journal of Environmental Engineering* 121(4): 276-286.