



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공학석사 학위논문

페놀 오염토양처리공정의 환경영향평가

Environmental Impact Assessment for Phenol
Contaminated Soil Remediation processes

울산대학교 대학원

친환경산업·에너지자원융합전공

김 가 희

폐놀 오염 토양처리공정의 환경영향평가

지도교수 경대승

이 논문을 공학석사학위 논문으로 제출함

2024년 2월

울산대학교 대학원

친환경산업·에너지자원융합전공

김 가 희

김가희의 석사학위 논문을 인준함

심사위원 경 대 승 (인)

심사위원 오 석 영 (인)

심사위원 이 병 규 (인)

울 산 대 학 교 대 학 원

2024 년 02 월

국 문 요 약

폐놀 오염 토양처리공정의 환경영향평가

급격한 산업화로 화학제품 원료로 사용되는 유류의 공급과 소비가 급증하면서 유출 사고가 빈번하게 발생하고, 이로 인해 토양, 해양, 지하수 등에서 발생하는 유출사고가 환경오염 문제를 더욱 악화시키고 있다.

본 연구는 유류오염물질 정화기술 중 4가지(열, 과황산염, 과황산염/열, 초음파) 기술의 환경영향을 평가하여 가장 영향이 적은 공법을 선정하였다. 또한, 열화학적 산화 공법의 온도, 산화제(과황산염) 및 첨가제 주입량에 따른 토양에서의 폐놀 분해 효율을 평가하였다. 초기 폐놀 농도, 과황산염 주입량, 반응온도가 열화학적 분해반응에 미치는 영향을 규명하고, 동시에 환경친화적인 조건 설정을 위해 환경영향 평가를 수행하였다.

토양 시스템에서의 폐놀 분해를 위해 깨끗하게 세척한 토양을 건조시켜 준비하였고, 4가지 분해 방법(열적, 과황산염, 과황산염/열, 초음파)을 사용하여 실험을 진행하였다. 실험 조건은 Soil mass(kg) = 37.50, TPH = 30g/kg, Water = 5L/kg Soil, PS = 80g/l water이었으며, 환경영향을 평가하기 위해 Recipe 2016 Midpoint(Hierarchical) 및 Recipe 2016 Endpoint (Hierarchical) 방법을 선택하였고, Recipe 2016 Endpoint 방

법을 통해 18개의 중점 범주를 3개의 평가 영역으로 통합하였다.

각 분해 공법에 대한 환경영향 평가 결과, 과황산염/열 처리 기술의 환경 영향이 가장 적은 것으로 나타났다. 과황산염/열 처리로 인한 생태계의 전반적인 환경부하는 과황산염 단독 처리와 비교했을 때 23%(2.64점)로 나타났으며, 인체 건강에 미치는 악영향은 과황산염 처리 기술과 비교했을 때 최소 28%(3.39점)로 나타났다. 또한, 과황산염/열 처리로 인한 자원 고갈은 과황산염 처리 기술과 비교했을 때 24% 미만(2.90점)으로 전반적으로 가장 영향이 적은 것으로 확인되었다.

이후, 과황산염/열 처리 공법의 최적화된 조건 도출을 위해 폐놀 분해 효율을 달성 가능한 시나리오를 도출하고, 해당 시나리오별 환경영향 정량평가 및 Sankey Diagram 기반 시나리오별 물질 및 에너지 흐름 분석을 실시하였다. 결과적으로, 환경영향 지표 중에서는 인체 건강 및 지구온난화 지수에 가장 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다. 특히, Sankey Diagram을 통한 분석 결과에 따르면, 히팅봉 가열, PDS 및 TPP 합성을 위한 단위공정 운영 과정에서 사용되는 전기에너지가 지구온난화 영향의 86.95%를 차지한다는 결과가 도출되었다.

Abstract

Environmental Impact Assessment for Phenol

Contaminated Soil Remediation processes

The rapid industrialization has led to an increase in the supply and consumption of hydrocarbons, which are used as raw materials for chemical products. Consequently, incidents of hydrocarbon leakage have become frequent, exacerbating environmental pollution issues in soils, oceans, and groundwater.

This study evaluates the environmental impacts of four hydrocarbon remediation technologies (thermal, sulfuric acid, sulfuric acid/thermal, ultrasonic) to identify the most environmentally friendly method. Additionally, it assesses the efficiency of thermal-chemical oxidation methods by varying parameters such as temperature, oxidant, and additive amounts for the decomposition of phenols in soil. The influences of initial phenol concentration, sulfuric acid injection amount, and reaction temperature on the thermochemical decomposition reaction are

elucidated. Environmental impact assessments are conducted to establish eco-friendly conditions for the remediation process.

Statistical experimental design and response surface methodology were employed to derive optimal decomposition conditions for optimization.

To facilitate the phenol decomposition in the soil system, thoroughly cleaned soil was prepared by drying. Experiments were conducted using four decomposition methods (thermal, sulfuric acid, sulfuric acid/thermal, ultrasonic). The experimental conditions included Soil mass(kg) = 37.50, TPH = 30g/kg, Water = 5L/kg Soil, and PS = 80g/l water. For environmental impact assessment, both Recipe 2016 Midpoint (Hierarchical) and Recipe 2016 Endpoint (Hierarchical) methods were employed, with the latter integrating 18 midpoint categories into three protection areas.

The environmental impact assessment for each decomposition method revealed that, in the midpoint analysis, the impact on the environment ranked in the order of sulfuric acid > thermal > ultrasonic > sulfuric acid/thermal. However, in the endpoint analysis, the sulfuric acid/thermal treatment exhibited the least

impact. The overall ecological impact of sulfuric acid/thermal treatment was only 23% (2.64 points) compared to sulfuric acid treatment alone, and the adverse impact on human health was minimal, with a reduction of at least 28% (3.39 points) compared to sulfuric acid treatment. Moreover, the resource depletion attributed to sulfuric acid/thermal treatment was less than 24% (2.90 points) compared to sulfuric acid treatment, indicating an overall minimal impact.

Subsequently, to derive the optimized conditions for the sulfuric acid/thermal treatment method, scenarios achieving achievable phenol decomposition efficiency were identified. For each scenario, a quantitative environmental impact assessment was conducted, and an analysis of material and energy flows based on Sankey Diagram was performed. As a result, it was revealed that among the environmental impact indicators, the most significant influence was observed on human health and the global warming index. In particular, the analysis based on the Sankey Diagram indicated that the electrical energy used in the unit processes for heating rod heating, PDS, and TPP synthesis accounted for 86.95% of the impact on global warming.

목 차

국문요약.....	i
영문요약.....	iii
표 목 차.....	vii
그림목차.....	viii
I. 서론	1
1.1 연구배경	1
1.2 폐놀에 의한 토양오염	3
1.3 폐놀 정화 기술.....	5
II. 처리공법별 LCA.....	9
2.1 Life Cycle Assessment.....	9
2.2 진행 과정.....	11
2.3 영향평가 결과.....	15
III. 실험조건별 LCA.....	32
3.1 실험재료와 방법.....	32
3.2 영향평가 결과.....	34
IV. 결론.....	38
참고문헌.....	39

표 목 차

Table 2.1 토양 열용량 계산식.....	12
Table 2.2 TPH 오염토양 1kg 분해를 위한 기술별 물질-에너지량.....	13
Table 3.1 페놀 농도별 분해효율 조건 달성을 위한 인벤토리 및 시나리오(1-1~2-5)...	34
Table 3.2 페놀 농도별 분해효율 조건 달성을 위한 시나리오(1-1~2-5)....	36

그림목차

[Fig. 1.1] 페놀 오염 현장 분해에 대한 기존 접근방식.....	5
[Fig. 1.2] 열화학적 산화를 이용한 TPH 분해.....	6
[Fig. 1.3] 온도에 따른 이과황산염과 오염물질의 반응 속도.....	7
[Fig. 1.4] 열활성화를 통한 과황산염의 라디칼 생성 기작.....	8
[Fig. 2.1] Life Cycle Assessment framework.....	10
[Fig. 2.2] TPH 오염 토양 복원을 위한 전과정환경영향(LCA) 평가 실험장치..	11
[Fig. 2.3] LCA system boundary.....	12
[Fig. 2.4] LCA 평가를 위한 Midpoint 및 Endpoint 지표.....	14
[Fig. 2.5] TPH 오염 토양 처리기술별 Midpoint 환경영향평가 비교...	15
[Fig. 2.6] TPH 오염 토양 처리기술별 지구온난화지수(GWP) 비교.....	17
[Fig. 2.7] TPH 오염 토양 처리기술별 오존층파괴지수(ODP) 비교.....	18
[Fig. 2.8] TPH 오염 토양 처리기술별 입자상물질 생성지수(PMFP) 비교..	19
[Fig. 2.9] TPH 오염 토양 처리기술별 방사선 이온화 지수(IRP) 비교....	19
[Fig. 2.10] TPH 오염 토양 처리기술별 광화학적 산화제 생성 지수(POFP) 비교..	20
[Fig. 2.11] TPH 오염 토양 처리기술별 육상 산성화 지수(TAP) 비교.....	21
[Fig. 2.12] TPH 오염 토양 처리기술별 담수 및 해수 부영양화 지수(FEP 및 MEP) 비교	22
[Fig. 2.13] TPH 오염 토양 처리기술별 인체(HTP) 및 생태 독성 지수 비교..	23

[Fig. 2.14] TPH 오염 토양 처리기술별 토지점유지수(ALOP, ULOP) 비교.....	25
[Fig. 2.15] TPH 오염 토양 처리기술별 토지점유지수(NLTP) 비교.....	25
[Fig. 2.16] TPH 오염 토양 처리기술별 물, 금속 및 화석고갈지수(WDP) 비교.....	26
[Fig. 2.17] TPH 오염 토양 처리기술별 물, 금속 및 화석고갈지수(MDP, FDP) 비교..	27
[Fig. 2.18] TPH 오염 토양 처리기술별 Endpoint 환경영향평가 비교.....	28
[Fig. 2.19] TPH 오염 토양 처리기술별 생태계품질 환경영향평가 비교.....	29
[Fig. 2.20] TPH 오염 토양 처리기술별 인체건강 환경영향평가 비교..	30
[Fig. 2.21] TPH 오염 토양 처리기술별 자원 환경영향평가 비교.....	31
[Fig. 3.1] 폐놀 오염 토양 복원을 위한 열화학적 실험장치.....	33
[Fig. 3.2] 폐놀 2,000ppm을 90% 이상 분해 조건의 환경영향 평가.....	35
[Fig. 3.3] 폐놀 5,000ppm을 90% 이상 분해 조건의 환경영향 평가.....	35
[Fig. 3.4] Sankey Diagram 기반 시나리오별 물질 및 에너지 흐름 분석.....	37

I. 서론

1.1 연구배경

매년 대량의 석유가 소비되며, 이를 이용하여 제품을 생산하고 정제된 석유는 전 세계로 운송된다. 원유의 사용은 현대 사회에서 불가피한 필수 요소로, 이 사용량은 연간 증가 추세이다. 국내 석유 의존도는 2010년 27.9%에서 13년에는 37.8%, 그리고 14년에는 37.3%로 측정되었다(한국 석유공사). 원유의 지속적인 사용은 토양, 수질, 대기 등에서 심각한 환경 오염을 일으켰으며, 이에 따른 부정적인 영향은 생태계의 모든 생물과 인간에게 직·간접적으로 악영향을 미쳤다.

토양 오염은 다른 종류의 오염과 달리 노출이 어려워 인지하기 어렵고, 오염물질이 다른 매체로 확산될 수 있는 특성이 있다. 그러나 이러한 특성에도 불구하고, 토양 오염의 심각성은 크게 주목받지 못하는 경향이 있다. 2015년 환경부 자료에 따르면, 국내의 특정 토양 오염 관리 대상 시설 중 연평균 2.4%가 토양 오염 기준을 초과하였다(환경부, 2015). 특히, 주유소가 148곳으로 보고되어 있어 이는 인간의 실생활과 매우 밀접하게 관련되어 있고, 또한 기준을 초과한 물질 중 60% 이상이 유류 (TPH, BTEX) 항목으로 나타나, 이 물질은 가장 시급한 처리가 필요한 물질로 간주된다.

또한, 원유 또는 정제유와 같은 폐놀은 시추, 제조, 저장, 관리 등 다양한 과정에서 해양 환경으로 유입되어 해양 환경 오염을 발생시킬 수 있다. 예를 들어, 파이프라인 파열이나 해양 유정 분출, 유조선의 충돌 등은 해양 환경으로 엄청난 양의 폐놀을 방출할 수 있으며, 이는 복잡한 물리적, 화학적, 생물학적 변환을 야기할 수 있다.

폐놀로 오염된 현장을 복원하기 위한 기존의 물리화학적 처리 방법에는 토양증기추출법(soil vapor extraction), 양수처리법(pump & treatment), 공기분무법(air sparging), 투수반응벽체(permeable wall) 등이 포함된다. 그러나 이러한 기술은 비용이 많이 들고 환경에 심각한 영향을 미칠 수 있으며, 폐놀의 완전 분해에 한계가 존재한다. 따라서 친환경적이고, 상대적으로 비용 효율적이며 유지보수가 용이한 추가적인 기술 개발이 요구되고 있는 상황이다.

1.2 페놀에 의한 토양오염

페놀에 의한 토양오염은 산업화가 진행되는 가운데 빈번하게 일어났다.

페놀오염의 예시로 4가지 정도를 들 수 있다.

- 화학 공장 오염 사례: 일부 화학 공장에서는 페놀 사용 중 발생한 폐수나 배출물로 인해 토양 오염이 발생할 수 있다. 이는 주로 공장 주변 지역에서 발견되며, 페놀이 지하수와 함께 토양으로 스며들 수 있다.

- 세계적인 산업 오염 사례: 산업 지구에서는 다양한 공장이 존재하기 때문에 토양 오염 사례가 발생할 수 있다. 페놀은 일부 산업 공정에서 중요한 화학물질로 사용되어 해당 지역에서 발생할 수 있다.

- 수질 및 하수 오염 사례: 도시 지역에서는 페놀이 공장, 제조업 또는 화학 공정에서 발생한 폐수를 통해 물과 하수관을 통해 배출될 수 있다. 이는 주로 공장, 제조업 또는 화학 공정에서 발생한 폐수에 기인한다.

- 산림 및 농지 오염 사례: 어떤 경우에는 농업 활동에서 비롯된 페놀 오염이 산림 지역이나 농지에서 발견될 수 있다. 살충제나 소독제에서 유래된 페놀이 표면 오염물질로 작용할 수 있다.

국내 뿐만 아니라 해외에서도 많은 사례가 있다.

미국 - Love Canal 사건 (1978): 미국 뉴욕 주 니아가라 폭포 근처의 Love Canal 지역에서는 화학 폐기물, 특히 페놀이 포함된 폐기물이 지하에 묻혀 있었다. 이로 인해 지역 주민들이 건강 문제를 겪고 환경 오염이

발생하였다. 이 사건은 미국에서 환경보호법과 환경규제에 대한 중요성을 부각시키는 계기가 되었다.

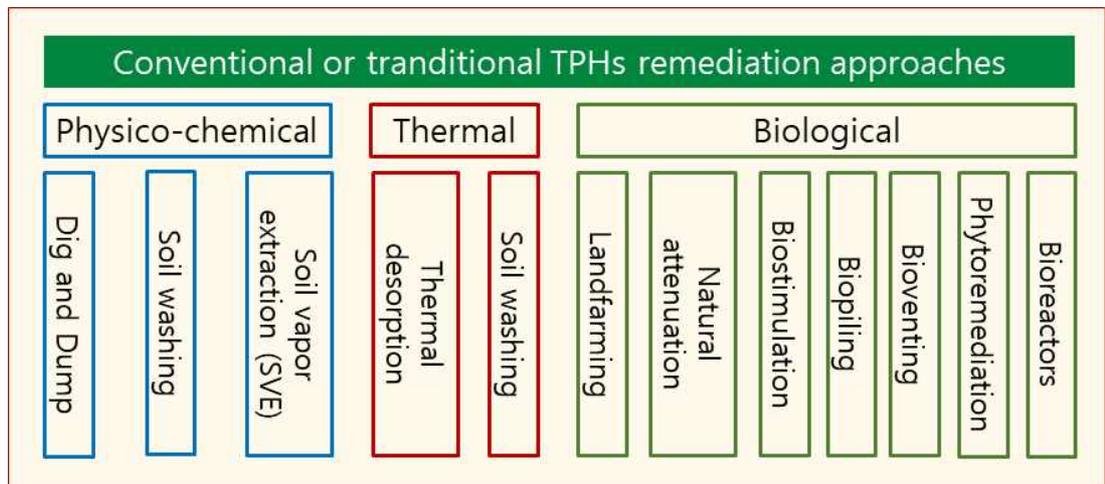
중국 - 2013년 동단 독성 폐기물 사건: 중국 광둥성 동단에서는 불법적으로 처리된 독성 폐기물이 지하에 유출되면서 토양오염 사건이 발생하였다. 이 폐기물에는 페놀 및 다른 화학물질이 포함되어 있었고, 이로 인해 주변 지역에서 환경 문제와 건강 문제가 발생하였다.

인도 - Bhopal 가스 유출 사건 (1984): 비프고리스 사에서 페놀을 비롯한 다양한 화학 물질을 생산하던 공장에서 독가스가 유출되어 수천 명의 사망자를 낸 비극적인 사건으로, 이 사건은 토양뿐만 아니라 대기와 물에서도 화학물질로 인한 오염이 발생하였다.

위와 같은 사례들로 인해 최근에는 미국 등 선진국에서 페놀 정화 기술의 발전을 위해 열을 활용한 정화 기술과 과황산염, 과산화수소 등 산화제를 복합적으로 활용하여 종래의 기술보다 높은 효율을 추구하는 연구가 활발히 이루어지고 있다. 열화학적 산화기술은 유류오염물질과의 높은 반응성을 통해 라디칼 전환을 가속화시켜 반응속도를 향상시킴으로써 오염 부지의 정화 기간을 현저히 단축시킬 수 있다. 따라서 본 연구에서는 최근 주목받고 있는 열화학적 산화기술을 활용하여 페놀의 분해 효율을 평가하고자 한다. 페놀 분해를 위한 최적의 방법과 조건을 도출하고, 각 기술에 대한 전과정 환경영향 평가를 통해 환경에 미치는 영향을 정량적으로 비교·평가하고 합리적인 기술을 선별하고자 한다.

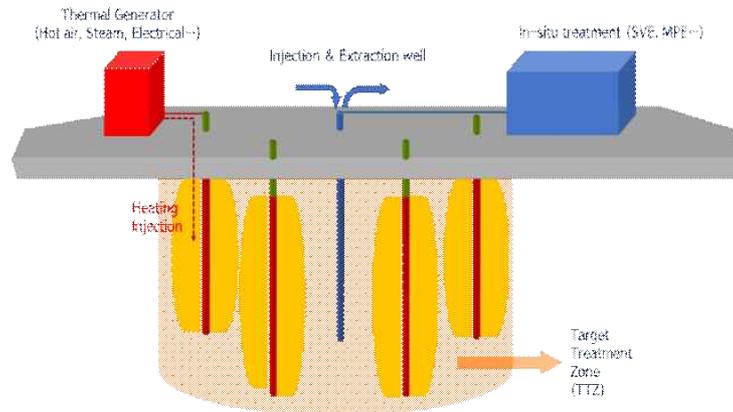
1.3 폐놀 정화 기술

폐놀로 오염된 환경을 정화하기 위해 다양한 기술이 사용되고 있으며, 폐놀 오염 현장에 사용되는 기존 처리공법은 크게 3가지로 나눌 수 있다.



[Fig. 1.1] 폐놀 오염 현장 분해에 대한 기존 접근방식

최근에는 고도 산화 공정이 주목받고 있는데, 이는 폐놀 분해를 위해 주로 활용되는 산화제로 과산화물, 과망간산염, 오존, 펜톤, 수산화라디칼 및 과황산염(persulfate) 등이 일반적으로 사용된다. 특히, 과황산염은 강력한 산화제일 뿐만 아니라 알칼리, 전이금속, 전기, 초음파, 열에 의해 활성화될 때 다양한 유기오염 물질을 분해하는 능력을 갖추고 있어 폐놀 분해에 탁월한 효과를 나타낸다.



[Fig. 1.2] 열화학적 산화를 이용한 TPH 분해 (김수홍 외, 2021)

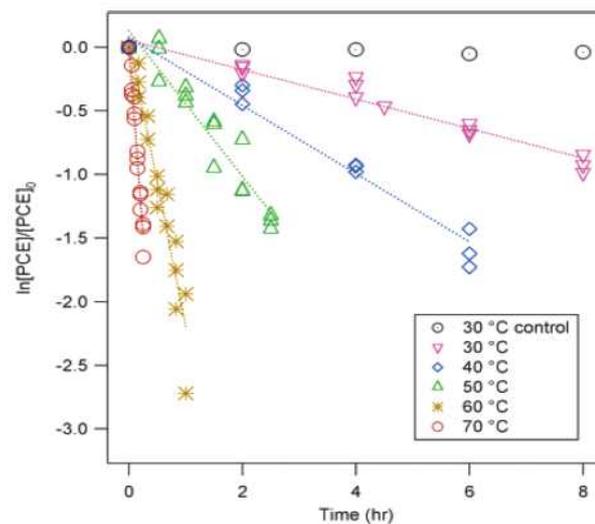
화학적 원리에 기초해서 신속히 오염물질을 처리하기 위한 방법은 토양이나 지하수에 포함된 오염물질을 화학적인 방법으로 산화 분해하여 무해한 물질(H_2O , CO_2)로 전환하는 것이다. 대표 산화제로는 과산화수소 (Hydrogen peroxide, H_2O_2), 과망간산염 (Permanganate, MnO_4^-), 오존 (Ozone, O_3), 과황산염(Persulfate)등이 있다. 이 중, 과황산염은 일과황산염(Peroxymonosulfate, PMS, HSO_5^-)과 이과황산염(peroxydisulfate, PDS, $S_2O_8^{2-}$)로 구분된다.



과황산염(Persulfate)을 사용한 산화 기술은 상대적으로 최근에 사용되기 시작한 ISCO 공법으로 과황산 이온($S_2O_8^{2-}$)이 강한 산화제(+2.1 V)이긴 하지만, 황산 라디칼($SO_4^{\cdot-}$)이 $S_2O_8^{2-}$ 보다 강력한 산화제(+2.6 V)이기 때문에 열에너지(heat), 화학에너지(Fe^{2+}), 빛에너지(Ultraviolet) 등 여러 물리

화학적 방법에 의해 과황산 이온을 황산 라디칼로 전환 시켜 사용한다. 과황산염 중 과황산칼륨은 용해도가 낮아 환경복원의 사용에는 적합하지 않으며, 과황산암모늄은 반응 후 암모니아를 방출하기 때문에 응용에 적합하지 않다. 이런 문제점이 없다는 점에서 과황산나트륨($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_8$)이 가장 일반적으로 사용된다. 과황산염은 열에 의해 활성을 통해 분해반응을 일으켜 2개의 황산 라디칼을 생성한다.

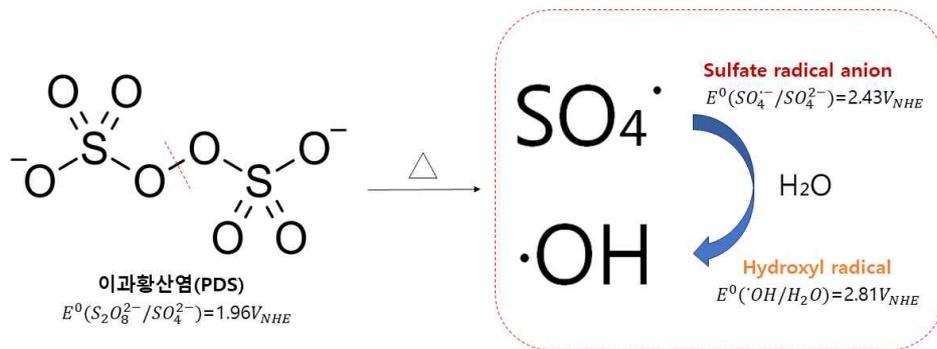
이과황산염의 열 활성화는 온도, 산화제 농도 등 여러 실험 조건의 영향을 받지만 일반적으로 온도가 증가함에 따라 산화제의 활성화 속도와 오염물질의 분해속도가 빨라진다. 아래 [그림 1.3]은 온도에 따른 이과황산염의 열 활성화의 반응 속도 그래프이다. 온도가 증가할수록 테트라클로로에틸렌(Tetrachloroethylene, PCE)의 분해속도가 증가하는 경향이 뚜렷하다.



[그림 1.3] 온도에 따른 이과황산염과 오염물질의 반응 속도 (Waldmer et al., 2007)

기존 연구들로부터 이과황산염 열 활성화를 통해 황산 라디칼이 LNAPLs를 효과적으로 분해할 수 있으며, 열 활성화가 없는 시스템 대비 높은 오염물질 분해 효율을 보임을 확인할 수 있다. 이를 바탕으로 위에 설명한 이과황산염을 활용한 ISCO와 열을 이용한 과황산염의 열 활성화와 더불어 가열에 의한 오염물질의 열적 처리의 효과를 동시에 내며 높은 효율을 기대할 수 있다.

이러한 열적 활성화는 반응온도, 산화제 농도 등 다양한 환경 인자의 영향을 받는 것으로 알려져 있으며, 일반적으로 온도가 상승함에 따라 산화제 활성화 속도와 오염물질 분해속도가 향상된다. 이론상으로 생성된 라디칼이 열에너지를 받아서 활성화된 페놀의 하이드록시기를 공격하여 페놀이 분해되는 것이다.



[Fig. 1.4] 열활성화를 통한 과황산염의 라디칼 생성 기작 (김수홍 외, 2021)

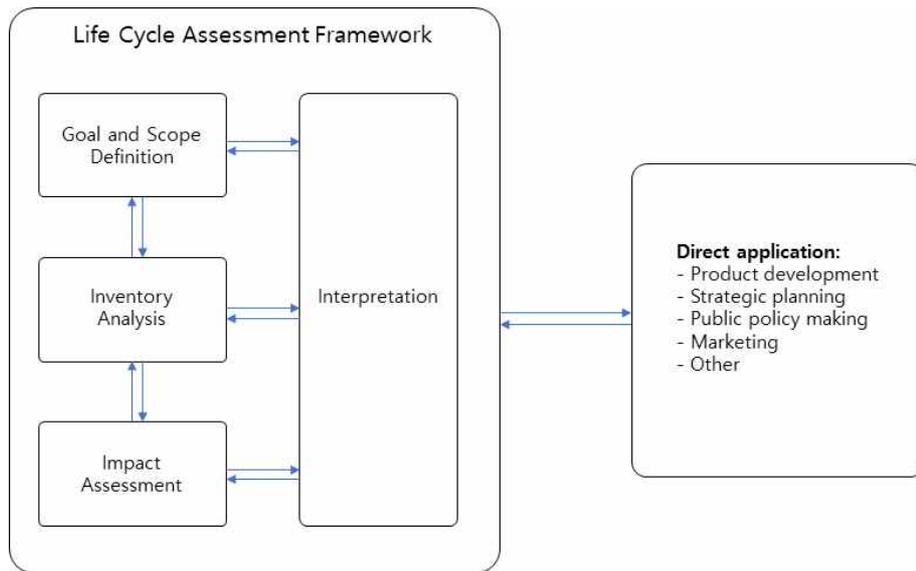
II. 처리공법별 LCA

2.1 Life Cycle Assessment

Life Cycle Assessment란 제품 또는 시스템의 모든 과정인 원료채취 단계, 가공, 조립, 수송, 사용, 폐기의 모든 과정에 걸쳐 에너지와 광물자원의 사용과 이로 인한 대기 및 수계, 토양으로의 환경 부하량을 정량화하는 기법이다. 즉, 제품 또는 시스템이 환경에 미치는 잠재적 악영향을 규명하고, 환경부하가 환경에 미치는 영향을 평가하여, 이를 저감, 개선하고자 하는 기법이다. 이 기법의 대상으로는 단순한 제품에서 복잡한 시스템에 이르기까지 목적에 따라 자유롭게 설정할 수가 있으며, 환경에 대한 영향은 국지적인 환경오염물의 배출뿐만 아니라 자원, 에너지의 소비 또는 인간의 건강, 생태학적 영향까지 포함한다.

이 기법의 목적은 인간 활동의 다양한 국면에서 환경부하를 저감하는 방향으로 의사결정을 하기 위한 판단재료를 제공하는 데 있으며, 이러한 측면에서의 평가방법이 지역환경문제와 동시에 지구환경문제를 억제하는 데 있어 유효하다. 전 과정 평가에서는 관련된 투입물과 산출물에 대한 목록을 작성하고 이들과 연관된 잠재적인 환경영향을 평가하며, 연구목적과 관련해서 목록분석 결과와 영향평가 결과를 해석함으로써 제품과 연관된 환경측면

과 잠재적인 환경영향을 평가한다. 기본적인 구성은 (1) 목적 및 범위의 설정, (2) 목록 분석, (3) 영향평가, (4) 결과해석으로 이루어져 있다.



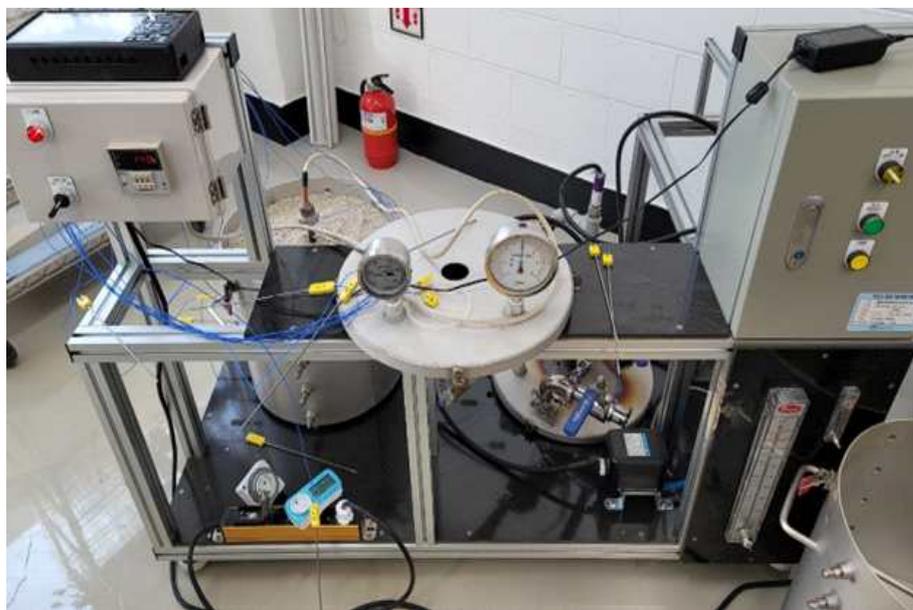
[Fig. 2.1] Life Cycle Assessment framework

본 논문에서는 두 가지 주요 분석 방법, 즉 처리공법별 생애주기평가(LCA)와 실험조건별 LCA를 수행한다. 처리공법별 LCA에서는 과황산염, 열, 과황산염/열, 초음속 네 가지 처리공법에 대한 환경영향을 평가하고, 이를 통해 각 처리공법의 환경적 영향을 비교하여 최적의 처리공법을 도출하고자 한다. 실험조건별 LCA에서는 처리공법별 LCA에서 가장 환경영향이 적은 공법을 선택하여, 해당 공법의 최적 조건을 도출하기 위한 환경영향 평가를 수행하고자 한다.

2.2 진행 과정

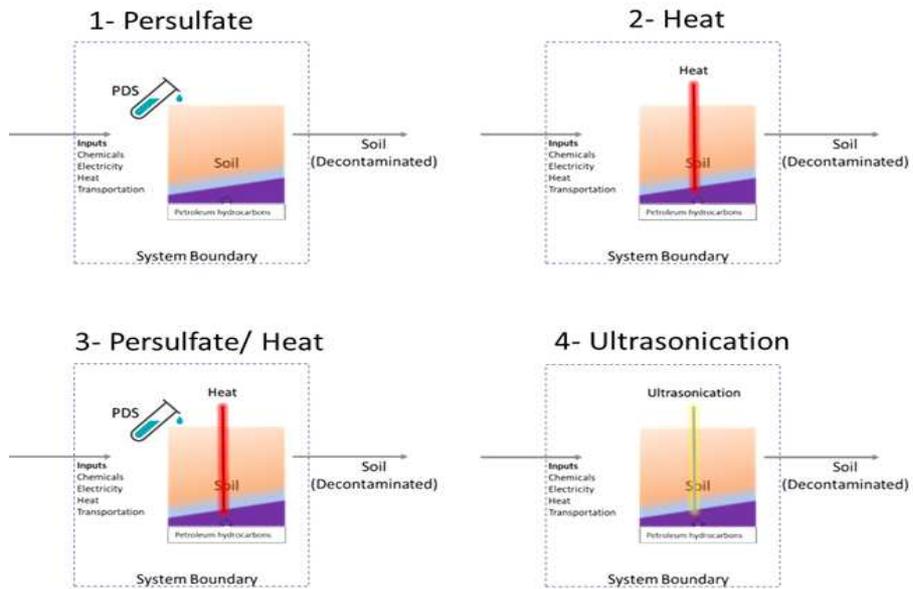
1) Goal, Scope, and Functional Unit

폐놀 오염 토양을 정화하기 위해 할 수 있는 4가지 처리 기술의 Life Cycle Assessment(LCA)를 수행하였다. LCA는 ISO 14040:2006 - Environmental Management - Life Cycle Assessment - Principles and Framework (ISO 14040, 2006)에 따라 수행된다.



[그림 2.2] TPH 오염 토양 복원을 위한 전과정환경영향(LCA) 평가 실험장치

LCA system boundary는 그림 2.3과 같다. 기능 단위는 토양에서 1kg의 TPH를 분해하는 것으로 하였다(토양 내 TPH 초기농도 30g/kg, 과황산염 농도 1M 고정).



[Fig. 2.3] LCA system boundary

모든 처리는 TPH 오염 토양에서 24시간 동안 수행되었으며, 60% 효율을 갖는 전기히터를 사용하여 토양을 가열하고 Abu-Hamdeh(2003)의 방정식을 이용하여 실제 토양의 열용량을 계산하였다.

$$C_{soil} = -0.224 - 0.00561N + 0.753\zeta + 5.81w$$

C_{soil} : 토양의 열용량 ($J \cdot m^{-3} \cdot C^{-1}$), N : 모래와 점토의 함 (%) , ζ : 토양의 부피밀도 ($kg \cdot m^{-3}$), w : 중량함수량 ($kg \cdot kg^{-1}$)

[Table 1.1] 토양 열용량 계산식

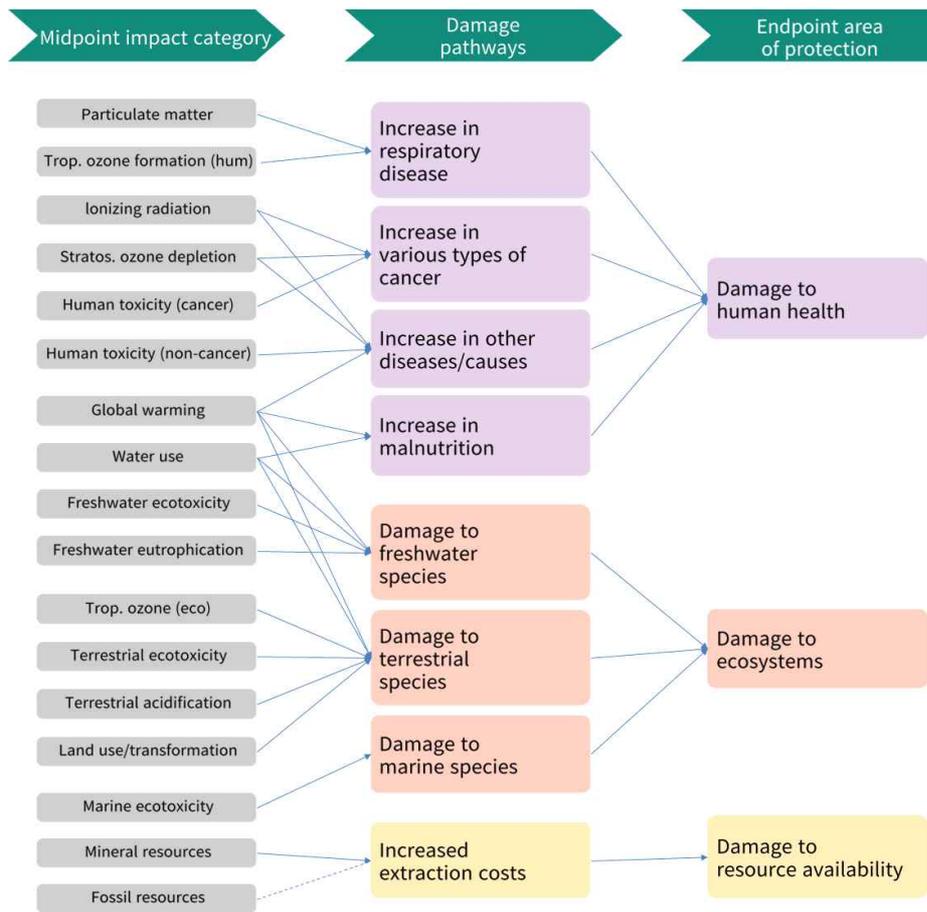
실험에 사용된 토양의 부피밀도는 $0.995 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, 중량함수량은 $0.2 \text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 로 전기히터가 토양 온도를 40°C (10°C 에서 50°C) 높이는데 필요한 에너지를 계산하였으며 계산 결과는 아래의 [Table 1.2]와 같다.

[Table 1.2] TPH 오염토양 1kg 분해를 위한 기술별 물질-에너지량

정화기술	물질-에너지 흐름				
	물 (kg)	과황산염 (kg)	열 에너지 (MJ)	전기 에너지 (MJ)	비고
과황산염 분해	625	148.75	0	0	-
열분해	200	0	2,064	0	50°C
과황산염 /열분해	67	15.95	691.4	0	50°C
초음파분해	500	0	0	1,080	250W

전과정영향 평가 수행의 목적은 확립된 환경 지표와 관련하여 TPH 처리 기술의 영향을 비교평가하는 것으로 영향 평가를 위해 Recipe 2016 계층적 Midpoint 및 Endpoint 방법을 선택하였다.

Recipe 2016 Midpoint 방법은 환경 영향을 기후변화, 오존층파괴, 산성화, 부영양화(담수, 해수), 인간 독성, 광화학 산화제 형성, 입자상 물질 생성, 육상 생태 독성, 담수 생태 독성, 해양 생태 등 18가지 범주로 포괄적으로 표현하며, Endpoint 방식은 18개의 중간 범주를 생태계, 인간건강, 자원고갈의 3가지 영역으로 통합하였다.



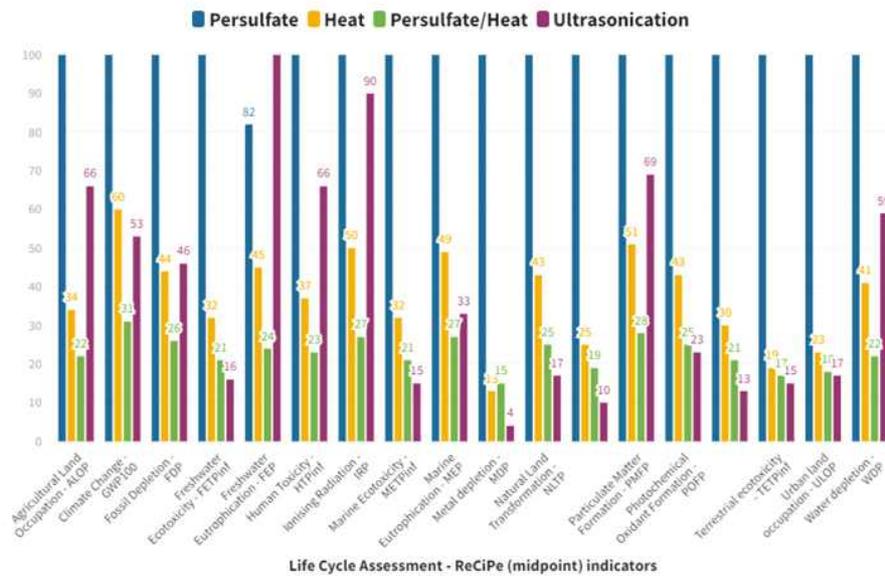
[그림 2.4] LCA 평가를 위한 Midpoint 및 Endpoint 지표

분석 대상 시스템과 연관될 수 있는 단일 영향 범주를 강조하기 위해 Midpoint 방법의 영향 영역을 선택하였으며, 최종 영향 결과는 Endpoint 를 사용하여 더 높은 집계 수준에 대한 영향을 제시하였다.

2.3 영향평가 결과

1) Midpoint 특성화 지표 분석

TPH 오염토양 복원을 위한 기술별 Midpoint 환경영향 평가를 위해 각 환경 범주의 최대값을 100%로 설정하였으며, 분석결과 환경에 미치는 영향은 과황산염 분해, 열분해, 초음파 분해, 과황산염/열분해 순으로 낮아지는 것으로 나타났다.

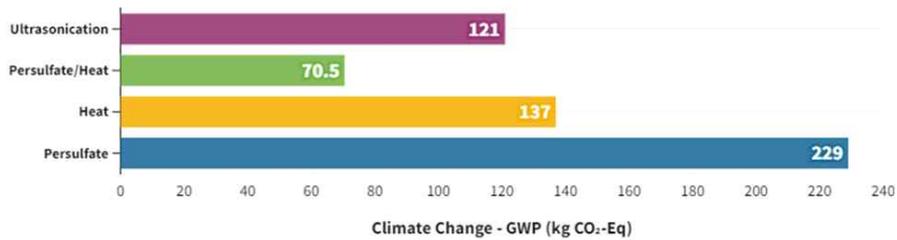


[그림 2.5] TPH 오염 토양 처리기술별 Midpoint 환경영향평가 비교

① 기후변화

기후변화에 대해 선택된 Midpoint 특성화 인자는 지구온난화지수 (GWP: Global Warming Potential) 이며 온실가스에 의한 적외선 복사 강제력 증가를 kgCO₂-eq로 정량화하였고, 기후변화에 대해 선택된 Midpoint 특성화 인자는 지구온난화지수(GWP: Global Warming Potential) 이며 온실가스에 의한 적외선 복사 강제력 증가를 kgCO₂-eq로 정량화하였다.

TPH 과황산염/열분해 처리의 GWP는 70.5 kgCO₂-eq로 4가지 기술 중 가장 낮은 값을 보였으며 GWP의 57%는 에너지 사용, 42%는 과황산나트륨 생산 공정에서 기인하는 것으로 분석되었고, 가장 높은 GWP는 과황산염/열분해 처리보다 ~325% 더 높은 과황산염 처리에서 발생하였으며 이와 관련된 GWP의 99% 이상이 과황산나트륨 생산 공정에서 기인한다 (1kg의 과황산나트륨 생산은 1.5 kgCO₂-eq를 생성하며, 이 중 0.9 kgCO₂-eq는 화석 연료 연소에 기여하므로 TPH 처리 기술의 GWP는 과황산나트륨 사용량을 저감함으로써 크게 줄일 수 있다).



[그림 2.6] TPH 오염 토양 처리기술별 지구온난화지수(GWP) 비교

② 오존층파괴

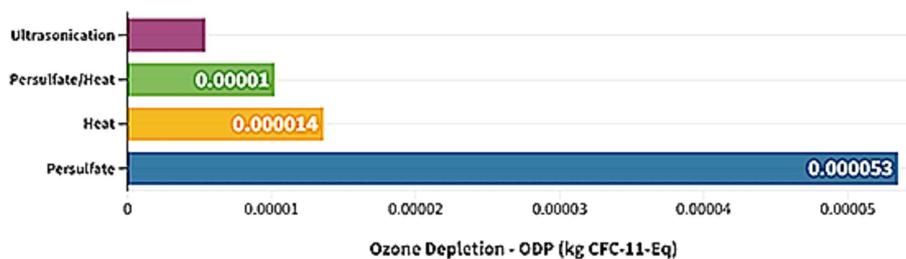
오존층파괴지수(ODP: Ozone Depletion Potential)는 kgCFC-11-eq로 특성화되며, 시간의 흐름에 따라 성층권 오존 농도의 감소를 나타낸다.

TPH 과황산염/열분해 처리의 ODP는 0.00001 kgCFC-11-eq로 과황산염 분해처리와 열처리에 비해 각각 400%, 40% 낮았으나, 초음파 분해 기술에 비해서는 2배 가량 높은 것으로 나타났다 (오존층 파괴 측면에서는 열화학적 산화분해 대체 기술 활용 유리).

과황산염/열처리에 필요한 열은 총 ODP에 45% 기여하는 것으로 나타났다으며, 과황산나트륨 합성과정에서 발생하는 테트라클로로메탄과 1,1,2-트리클로로에탄, 1,2,2-트리플루오르에탄은 오존층 파괴의 주요 원인으로 분석된다 (과황산염/열처리 공정의 ODP를 줄이기 위해서는 과황산나트륨 사용량과 히트 펌프를 모두 최적화 해야한다).

과황산염/열처리에 필요한 열은 총 ODP에 45% 기여하는 것으로 나타

났으며, 과황산나트륨 합성과정에서 발생하는 테트라클로로메탄과 1,1,2-트리클로로에탄, 1,2,2-트리플루오르에탄은 오존층 파괴의 주요 원인으로 분석되었다 (과황산염/열처리 공정의 ODP를 줄이기 위해서는 과황산나트륨 사용량과 히트 펌프를 모두 최적화 해야한다).

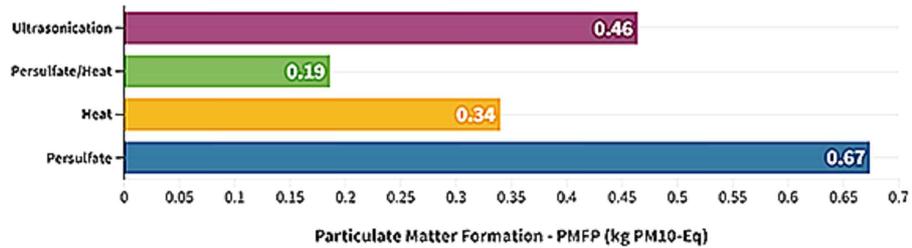


[그림 2.7] TPH 오염 토양 처리기술별 오존층파괴지수(ODP) 비교

③ 입자상물질(PM) 생성

입자상물질 생성지수(PMFP: Particulate Matter Formation Potential)는 kgPM10-eq로 특성화되며, 연료 연소 시 생성되는 PM10, PM2.5, PM1.0 입자 질량의 척도로 사용되며, PM2.5 이하의 물질은 호흡에 의한 흡입에 따른 발암 효과로 최근 관심이 높아지고 있어, 연료의 연소는 입자상 물질 형성의 주요 원인으로 언급되고 있다.

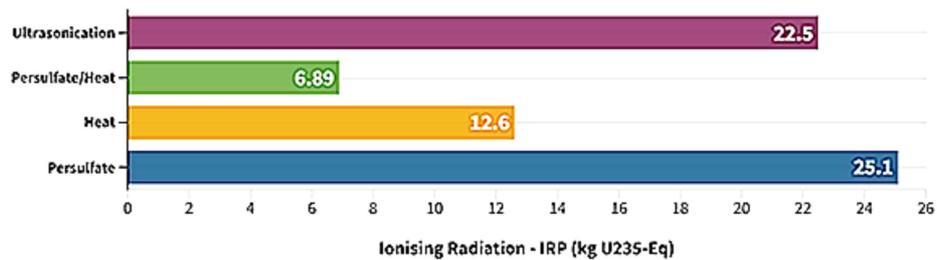
과황산염 처리에 의한 PMFP가 0.67 kgPM10-eq로 가장 높은 반면, 과황산염/열처리의 PMFP는 0.19 kgPM10-eq로 가장 낮은 것으로 나타났으며, 과황산염과 열의 기여도는 각각 0.11 kgPM10-eq 및 0.07 kgPM10-eq로 분석된다.



[그림 2.8] TPH 오염 토양 처리기술별 입자상물질 생성지수(PMFP) 비교

④ 방사선 이온화

방사선 이온화 지수(IRP: Ionizing Radiation Potential)는 방사성핵종 방출로 인한 집단선량으로써 Midpoint 특성화 계수는 kgU235-eq로 표현되며, 과황산염/열처리에 의한 IRP는 6.89 kg U235-eq로 4가지 기술 중 가장 낮았으며, 이 중 4.2 kgU235-eq는 열에너지에서 2.69 kgU235-eq는 과황산염나트륨 합성에서 유래된 것으로 분석된다.

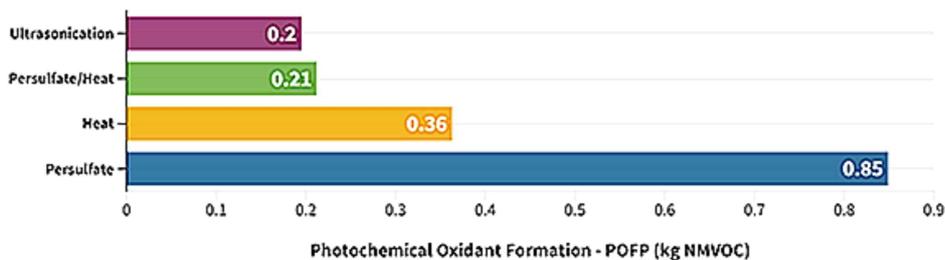


[그림 2.9] TPH 오염 토양 처리기술별 방사선 이온화 지수(IRP) 비교

⑤ 광화학적 산화

광화학적 산화제 생성 지수(POFP: Photochemical Oxidant Formation Potential)는 질소산화물(NOx)이 대기 중으로 방출됨에 따라 생성되는 비메탄 휘발성 유기화합물(NMVOOC: Non- Methane Volatile Organic Compound)의 양을 kg 단위로 측정하여 나타낸 특성화 지수로 단위는 kgNMVOC로 표현되며, 과황산염 처리에 의한 POFP는 0.85 kgNMVOC 였으며, 과황산염/열처리는 과황산염 단독 처리와 비교할 때 1/4 수준(0.21 kgNMVOC)으로 나타났다 (0.12 kgNMVOC는 열에너지 사용에서 0.09 kgNMVOC는 과황산염에서 유래됨).

과황산염/열처리 기술의 POFP는 초음파 처리보다 약간 높았지만 그 차이는 $\pm 5\%$ 이내로 미미한 것으로 나타났다.



[그림 2.10] TPH 오염 토양 처리기술별 광화학적 산화제 생성 지수(POFP) 비교

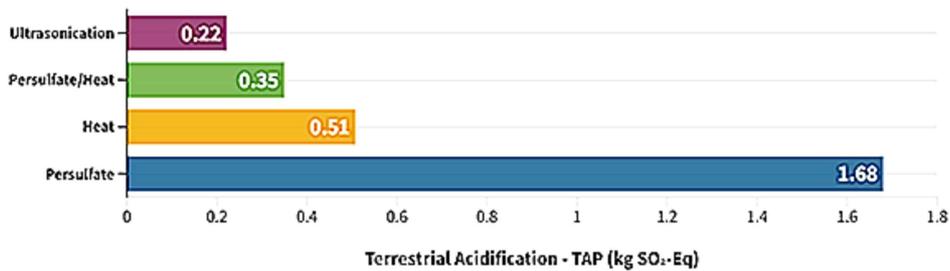
⑥ 육상 산성화

육상 산성화 지수(TAP: Terrestrial Acidification Potential)는 주로 질소산화물(NOx), 암모니아(NH3), 이산화황(SO2), 황화수소(H2S) 등에 의해

발생하며 산성화된 환경을 초래할 수 있는 정도를 kgSO₂-eq로 나타내었다.

과황산염 처리에 의한 TAP가 1.68 kgSO₂eq로 가장 높았고, 열처리 (0.51 kgSO₂-eq), 과황산염/열처리(0.35 kgSO₂-eq), 초음파 처리(0.22 kgSO₂-eq) 순으로 TAP가 낮아졌다.

과황산염 처리를 이용한 1kg TPH 분해 시 TAP(1.68 kgSO₂eq)는 주로 SO₂ 대기 배출(1.31 kgSO₂-eq)에 의해 발생하였으며, 다음은 NO_x(0.33 kgSO₂-eq), NH₃(0.02 kgSO₂-eq)에 의한 것으로 나타났다.

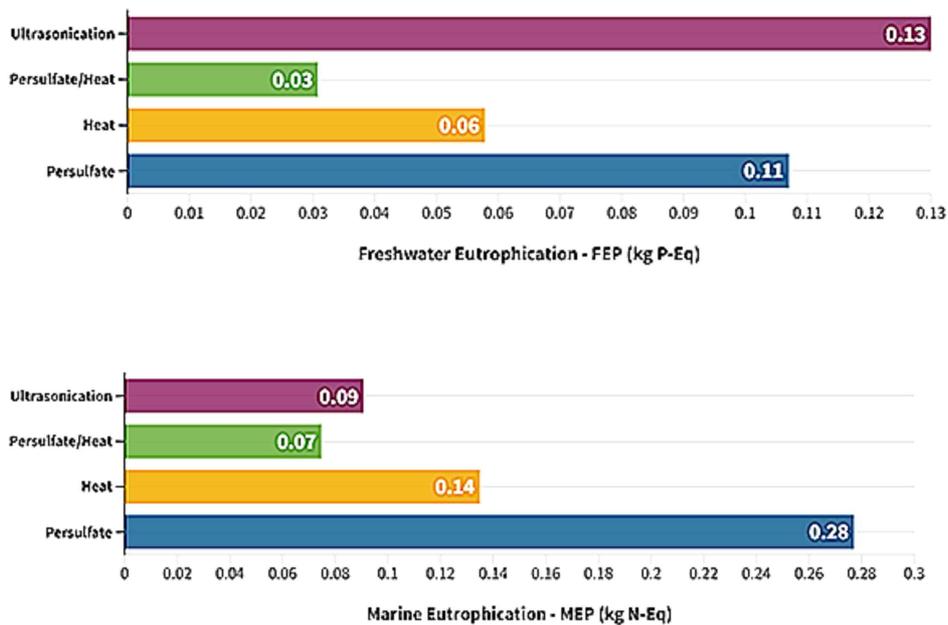


[그림 2.11] TPH 오염 토양 처리기술별 육상 산성화 지수(TAP) 비교

⑦ 담수 및 해양 부영양화

부영양화는 인이나 질소와 같은 과도한 양의 미네랄이 생태계에 유입되어 조류가 과도하게 성장하여 용존 산소를 낮추고 생태계에 피해를 주는 것으로 부영양화 지수는 담수(FEP: Freshwater Eutrophication Potential) 부영양화 지수와 해양 부영양화 지수(MEP: Marine Eutrophication Potential)로 구분되고 각각의 단위는 kgP-eq 및 kgN-eq에 해당한다.

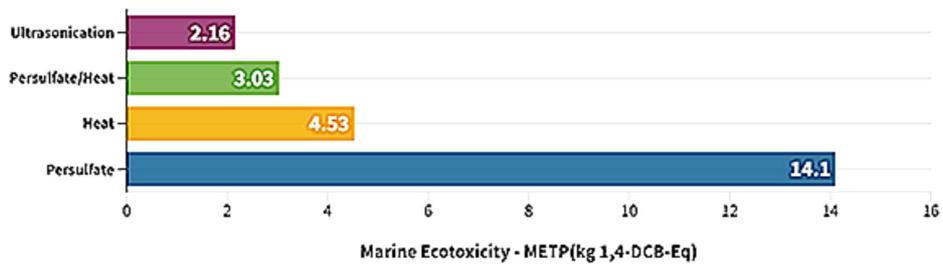
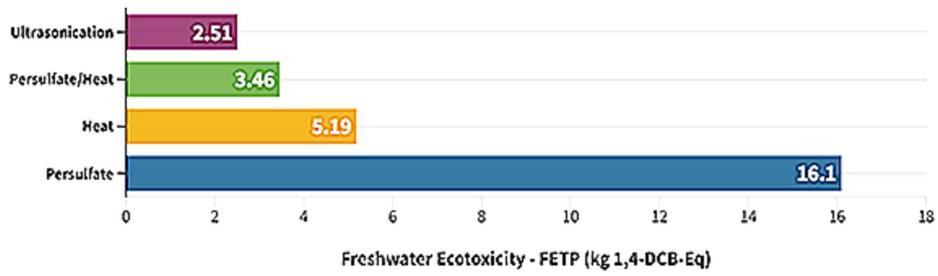
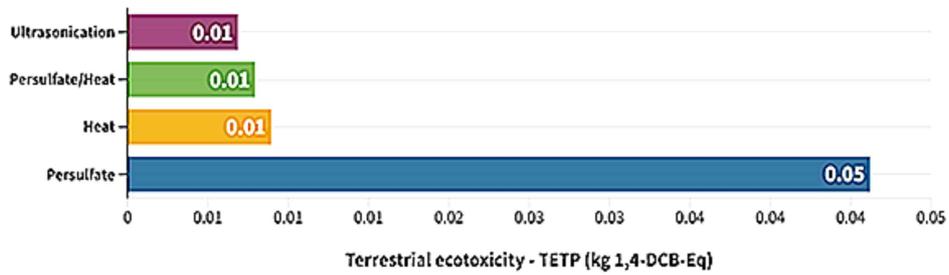
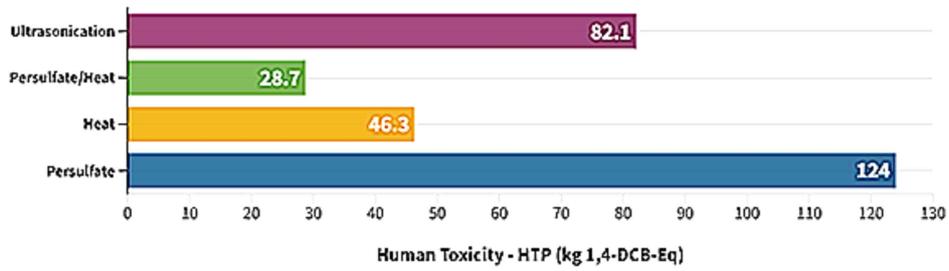
과황산염/열처리의 FEP(0.03 kgP-eq) 및 MEP(0.07 kgN-eq)는 평가된 기술 중에 가장 낮게 평가된 반면 초음파 처리의 FEP(0.13 kgP-eq)는 지하수의 인산염 배출로 인해 가장 높았고, 과황산염처리 MEP(0.28 kgN-eq)는 대기 및 지하수·지표수로의 질소산화물 배출에 의해 가장 높은 것으로 나타났다.



[그림 2.12] TPH 오염 토양 처리기술별 담수 및 해수 부영양화 지수(FEP 및 MEP) 비교

⑧ 독성

인체 독성 지수(HTP: Human Toxicity Potential)는 화합물의 발암성 및 비발암성 영향을 평가하며, 육상(Terrestrial)·담수(Freshwater)·해양(Marine) 생태독성(Ecotoxicity) 지수(TETP, FETP, METP)는 각각의 생태계에 대한 피해가능성을 평가하는 지표로 단위는 kg 1,4-DB(디클로벤젠)-eq를 사용한다.



[그림 2.13] TPH 오염 토양 처리기술별 인체(HTP) 및 생태 독성 지수 비교

과황산염/열처리의 HTP는 28.7 kg1,4-DB-eq로 가장 낮았으며 관련 독성은 과황산나트륨 및 열에너지 생산과정에서 중금속(망간, 비소, 셀레늄, 바륨, 납 등)이 지하수로 배출되어 발생하는 것으로 나타났고, TETP 및 FETP의 크기는 HTP보다 낮은 수준으로 전체적인 독성을 고려할 때 인체 영향에 중점을 둘 필요가 있다.

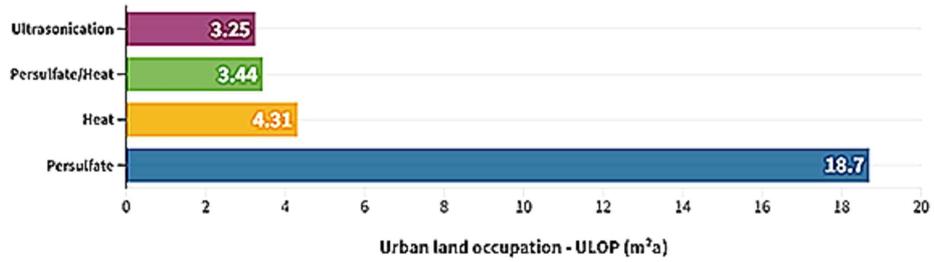
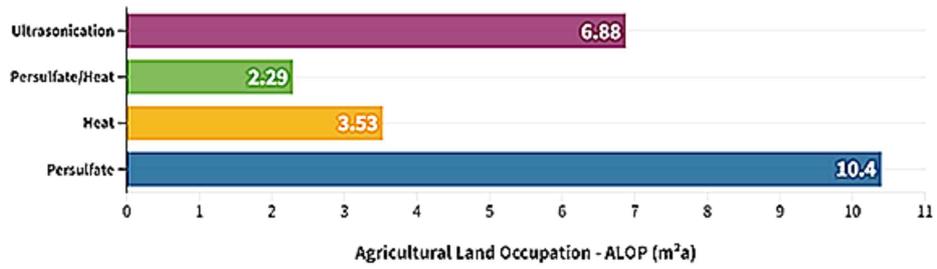
⑨ 토지이용

토지점유지수(LOP: Land Occupation Potential)는 사용된 토지의 척도로 농지(Agricultural) 토지점유 지수(ALOP)와 도시(Urban) 토지점유 지수(ULOP), 자연토지변환지수(NLTP: Natural Land Transformation Potential)로 구분되며, 연간 m²으로 측정하고, 토지점유지수(LOP: Land Occupation Potential)는 사용된 토지의 척도로 농지(Agricultural) 토지점유 지수(ALOP)와 도시(Urban) 토지점유 지수(ULOP), 자연토지변환지수(NLTP: Natural Land Transformation Potential)로 구분되며, 연간 m²으로 측정한다.

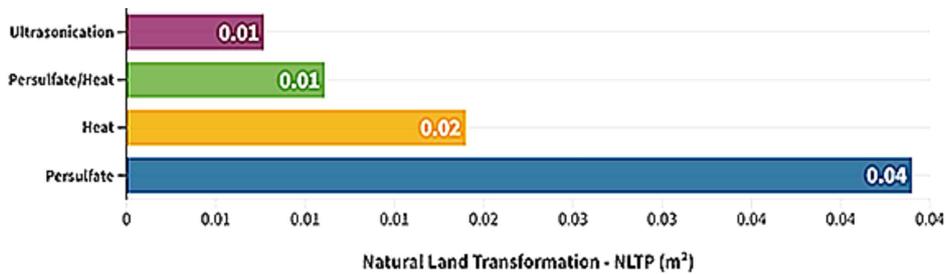
과황산염/열처리의 ALOP(연간 2.29 m²)는 과황산염 처리(연간 10.4 m²)과 비교할 때 22%에 불과하며 열처리(연간 3.53 m²) 및 초음파 처리(연간 6.88 m²)에 비해서도 현저히 낮으며, 과황산염/열처리의 ULOP(연간 3.44 m²)는 과황산염 처리(연간 18.7 m²)에 비해 훨씬 낮고 열처리(연간 4.31

m²)에 비해 약간 적으며, 초음파 처리(연간 3.21 m²) 보다는 조금 높았다.

과황산염/열처리의 NLTP도 타 기술에 비해 낮은 것으로 평가되어, 토지이용 관련 환경 영향 측면에서 유리한 기술인 것으로 나타났다.



[그림 2.14] TPH 오염 토양 처리기술별 토지점유지수(ALOP, ULOP) 비교

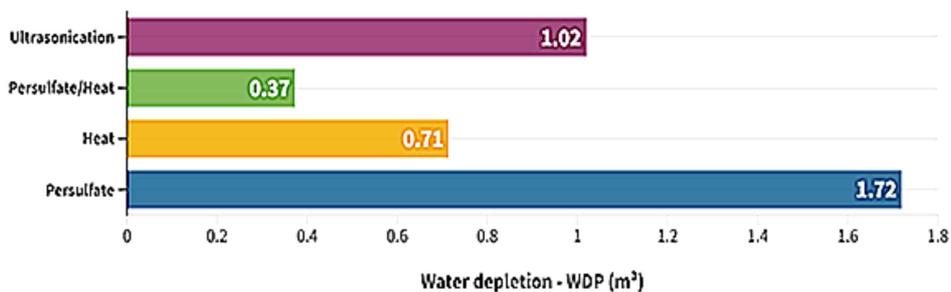


[그림 2.15] TPH 오염 토양 처리기술별 토지점유지수(NLTP) 비교

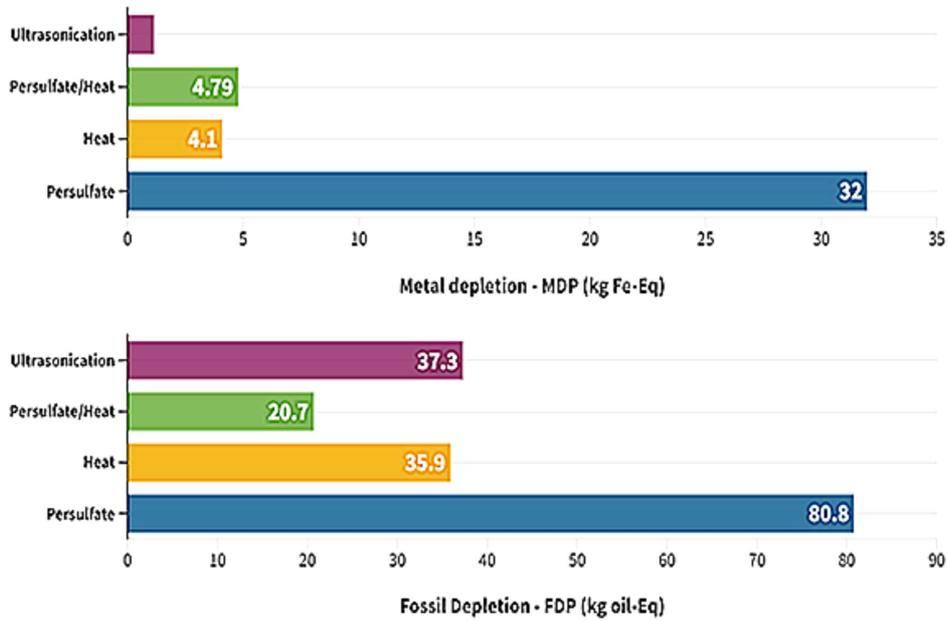
⑩ 물(수분), 금속 및 화석연료 고갈

수분 고갈 지수(WDP: Water Depletion Potential)는 공정 전반에 걸쳐 사용되는 물의 양으로써 m³으로 측정되며, 금속 고갈지수(MDP: Metal Depletion Potential)는 표준화된 공정 전반에 걸쳐 사용되는 금속 자원의 척도로써 kgFe-eq로 측정되고 화석연료 고갈지수(FDP: Fossil Depletion Potential)는 표준화된 재료 처리에 사용된 화석 에너지의 양으로 kgoil-eq로 나타낸다.

과황산염/열처리의 WDP 및 FDP는 타 기술에 비해 낮았으나 MDP의 경우 초음파 처리보다 높고 열처리와 유사한 것으로 나타났으며, 1 kg의 TPH를 처리하는데 총 373 L의 물이 소비되었으며, 과황산나트륨 생산에 134 L, 가열에 189 L, 탈이온수 생산에는 48 L가 사용된 것으로 분석된다 (담수는 과황산나트륨 생산 및 열 생성에 사용되는 반면 지하수는 탈이온수 생산에 사용).



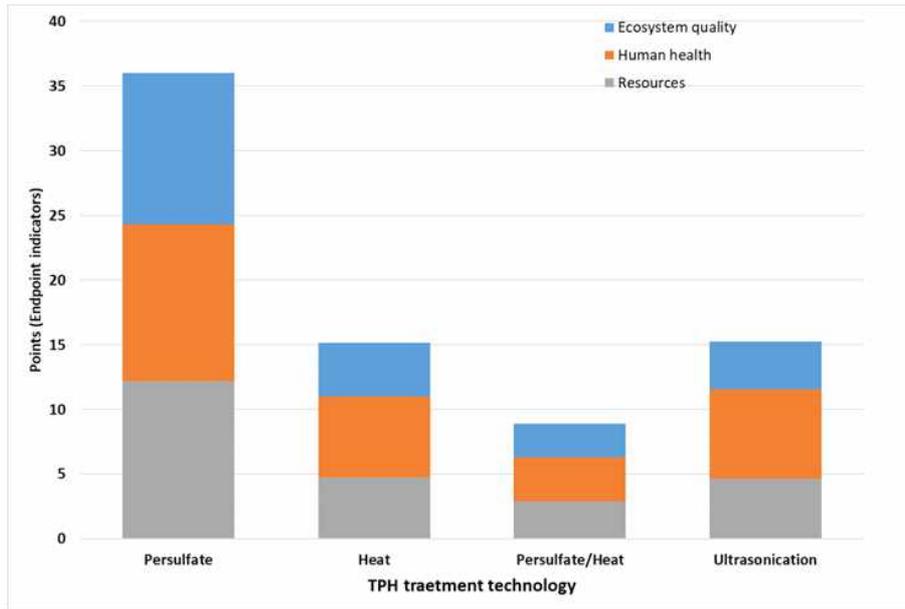
[그림 2.16] TPH 오염 토양 처리기술별 물, 금속 및 화석고갈지수(WDP) 비교



[그림 2.17] TPH 오염 토양 처리기술별 물, 금속 및 화석고갈지수(MDP, FDP) 비교

2) Endpoint 특성화 지표 분석

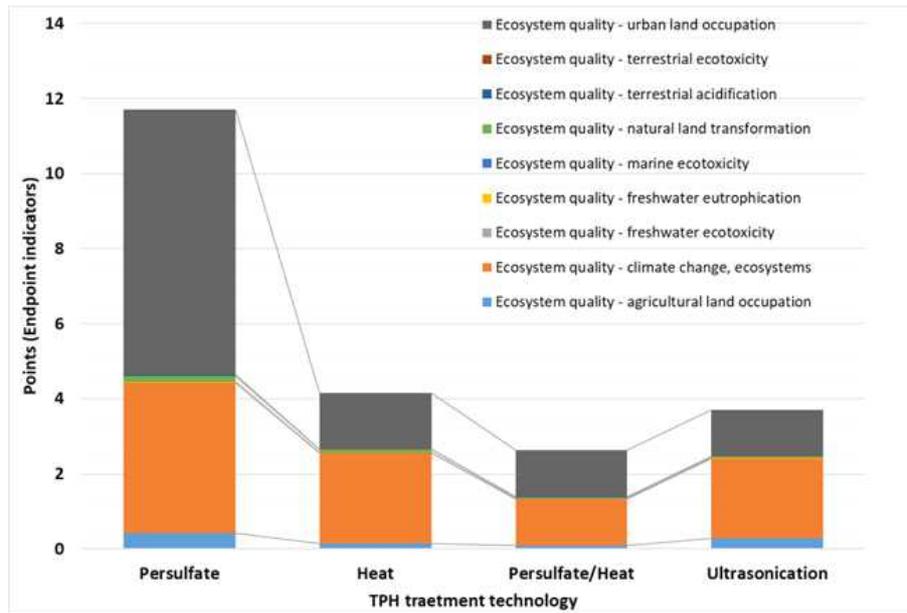
TPH 오염토양 복원을 위한 기술별 Endpoint 환경영향 평가를 위해 생태계, 인체건강 및 자원의 3가지 영역에 대한 영향을 비교평가한 결과 과황산염/열처리의 누적 영향점수(생태계: 2.64점, 인체건강: 3.38점, 자원: 2.89점)는 8.91점으로 환경에 대한 부작용이 낮은 가장 친환경적인 복원 기술인 것으로 확인되었다.



[그림 2.18] TPH 오염 토양 처리기술별 Endpoint 환경영향평가 비교

① 생태계 품질

ReCipe 2016 Endpoint 생태계품질 평가는 Midpoint에서 농경지 점유, 기후변화, 생태계, 담수 생태독성, 담수 부영양화, 해양 생태독성, 자연 토지 변형, 육상 산성화 및 생태 독성의 9개 범주를 누적하여 수행하였다.



[그림 2.19] TPH 오염 토양 처리기술별 생태계품질 환경영향평가 비교

과황산염만 처리한 경우(11.71점)와 비교했을 때 과황산염/열처리가 생태계에 미치는 전반적인 영향은 23%(2.64점)에 불과하며, 생태계 파괴의 약 98%는 도시 토지점유, 기후변화 및 농경지 점유의 3가지 범주에 의해 발생하는 것으로 나타났다.

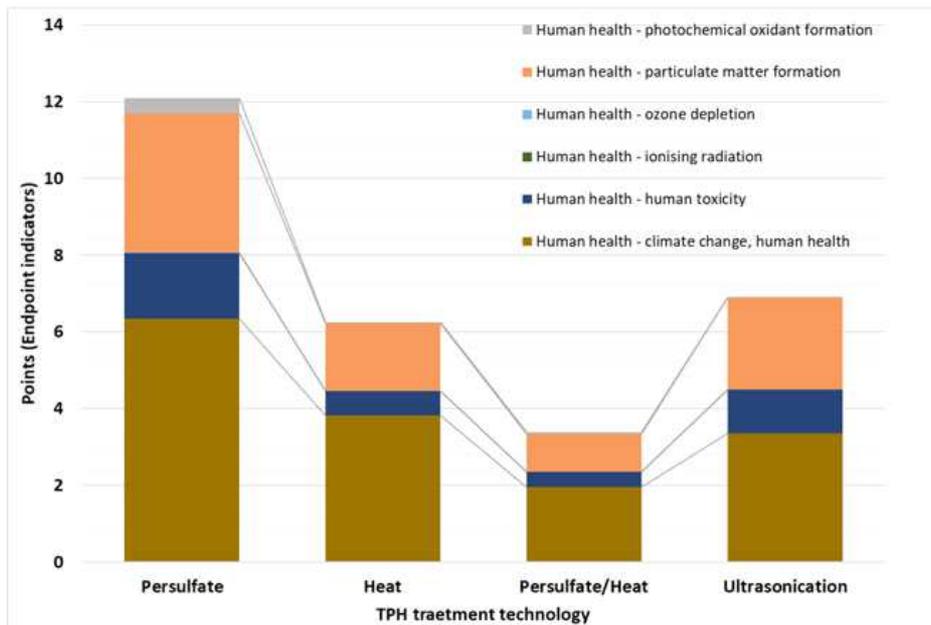
과황산염/열처리에 의한 1kg TPH 분해는 연간 2.86 m²의 도시지역 토지에 영향을 미치며 62 kg의 온실가스 배출에 기여하는 것으로 나타났으며 이는 과황산나트륨 생산과 열 생성 과정에서 유래하는 것으로 분석된다.

② 인체건강

ReCipe 2016 Endpoint 인체건강 평가는 Midpoint에서 기후변화, 인체독성, 방사선 이온화, 오존층 파괴, 입자상물질 형성, 광화학적 산화제

형성의 6개 범주를 누적하여 수행하였다.

과황산염만 처리한 경우(12.1점)와 비교했을 때 과황산염/열처리가 인체건강에 미치는 전반적인 영향은 28%(3.39점) 수준이었으며, 기후변화는 4가지 TPH 오염 토양 처리 기술에서 인체건강에 기여도가 가장 높은 것으로 분석된다.



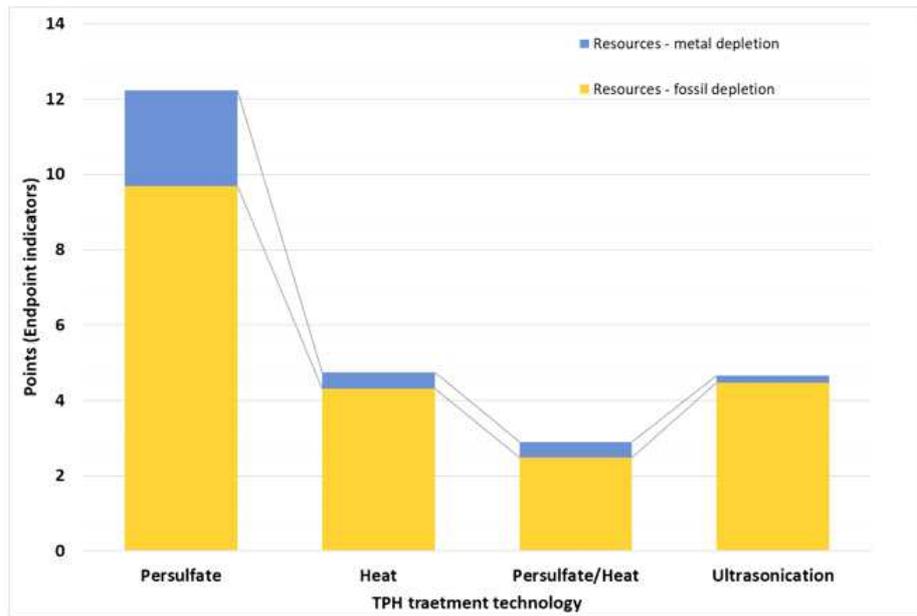
[그림 2.20] TPH 오염 토양 처리기술별 인체건강 환경영향평가 비교

③ 자원

ReCipe 2016 Endpoint 자원 평가는 Midpoint에서 화석 고갈 및 금속 고갈의 2개 범주를 누적하여 수행하였고, 과황산염/열처리가 자원고갈에 미치는 전반적인 영향은 2.90 점으로 과황산염 처리 기술(12.22점)의 24% 미만이었으며, 자원고갈은 주로 화학 연료 고갈에 의해 발생하는 것으로 나타났다.

TPH 1kg 분해에 필요한 과황산나트륨 생산을 위해 무연탄(5.71 kg),

갈탄(1.89 kg), 원유(1.53 kg) 및 천연가스(4.22 m³)이 소모되며, 유사하게 열에너지 생산을 위해 14.42 kg의 무연탄, 3.73 kg의 갈탄, 1.08 kg의 원유와 3.58 m³의 천연가스가 사용되는 것으로 분석된다.



[그림 2.21] TPH 오염 토양 처리기술별 자원 환경영향평가 비교

페놀로 오염된 토양을 처리하기 위해 4가지 기술에 대한 LCA 평가를 수행한 결과 전과정 관점에서 열화학적 산화분해(과황산염/열처리) 기술이 가장 환경 친화적인 기술이며, 과황산염만 사용한 방식의 효율이 가장 낮은 것으로 분석된다. 또한 과황산나트륨 생산 및 열 생성 과정에서 발생하는 온실가스는 환경, 생태계 품질 및 인체 건강에 부정적인 영향을 미치는 가장 중요한 요소였으며, 이를 완화하기 위해서는 과황산나트륨 생산 공정 및 열 발생 공정의 최적화가 필수적으로 이루어져야 보여진다.

Ⅲ. 실험조건별 LCA

페놀로 오염된 토양을 처리하기 위한 4가지 기술 중 열화학적 산화분해(과황산염/열처리) 기술이 가장 환경친화적인 기술로 분석되었다. 이번 실험은 화학적 산화분해(과황산염/열처리) 기술의 조건별 분해효율을 확인하고자 한다.

3.1 실험재료 및 방법

1) 토양 조건

오염되지 않은 토양을 깨끗하게 세척하여 40°C 오븐에서 24시간 이상 건조시켜서 사용하였다.

2) 페놀 및 측정 장비

페놀은 Junsei Chemical Co., Ltd. (Tokyo, Japan)에서 구입하여 사용하였으며, 측정 장비는 UV-Vis spectrophotometer; GENESYS™ 40 Vis/UV-Vis Spectrophotometer (Thermo Fisher Scientific, USA)로 수행하였다. 액상 시스템에서 페놀 농도는 흡광도를 이용하여 나타내었고, 페놀 정량한계는 250~0.12 mg/L 수준이었다.



[Fig. 3.1] 페놀 오염 토양 복원을 위한 열화학적 실험장치

열화학적 분해실험은 그림 3.1과 같은 실험 장치를 사용하였다. 토양 가운데에 히팅봉을 설치하여 중심으로부터 열이 퍼져나갈 수 있도록 설계하여 진행하였다.

기능 단위는 토양에서 1kg의 페놀을 분해하는 것으로 하여 이전 실험과 동일한 조건에서 진행하였고(토양 내 페놀 초기농도 30g/kg, 과황산염 농도 1M 고정), 72시간 동안 수행하였다.

페놀 분해 효율 달성 가능 시나리오 도출하기 위해 페놀 농도별 (2,000 & 5,000 ppm) 90% 이상 분해 효율 조건 달성을 위한 온도, 산화제 및 첨가제 주입량 시나리오 (1-1~2-5)까지 설정하여 진행하였다.

3.2 영향평가 결과

1) 실험 결과

페놀 분해효율 달성 가능 시나리오 도출을 위해 페놀 농도별 (2,000ppm & 90% 이상 분해효율 조건 달성을 위한 온도, 산화제 및 첨가제 투입량을 시나리오별로 나누어 진행한 결과는 표 3.1과 같다.

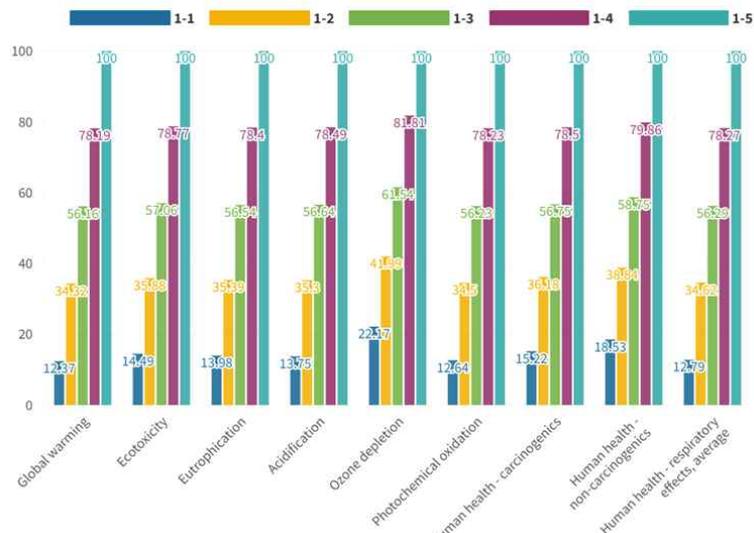
[Table 3.1] 페놀 농도별 분해효율 조건 달성을 위한 시나리오별 실험결과

No.	Phenol (ppm)	Temp. (°C)	PDS (g/kg)	TPP (g/kg)	Removal (%)
1-1	2000	30	90	15	91.06
1-2	2000	40	75	10	91.69
1-3	2000	50	60	2	91.76
1-4	2000	60	45	5	92.81
1-5	2000	70	10	12	90.38
2-1	5000	30	106	5	95.73
2-2	5000	40	85	5	91.01
2-3	5000	50	70	0	91.15
2-4	5000	60	55	10	92.84
2-5	5000	70	50	18	95.69

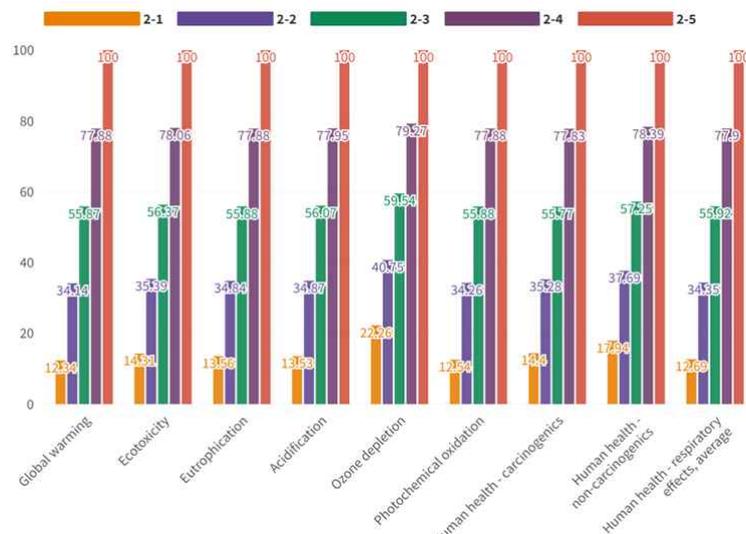
2) 결과 분석

- 페놀 분해 효율 달성 가능 시나리오별 환경영향 비교평가

페놀 2,000ppm을 90% 이상 분해할 수 있는 조건 (1-1~1-5)과 페놀 5,000ppm을 90% 이상 분해할 수 있는 조건 (2-1~2-5)의 환경영향 평가를 진행하였다.



[Fig. 3.2] 페놀 2,000ppm을 90% 이상 분해 조건의 환경영향 평가



[Fig. 3.3] 페놀 5,000ppm을 90% 이상 분해 조건의 환경영향 평가

- 폐놀 분해 효율 달성 가능 시나리오별 환경영향 정량평가

다음으로 폐놀 분해 효율 달성 가능 시나리오별 환경영향 정량평가를
 진행하였다(표 3.2).

[Table 3.2] 폐놀 농도별 분해효율 조건 달성을 위한 시나리오(1-1~2-5)

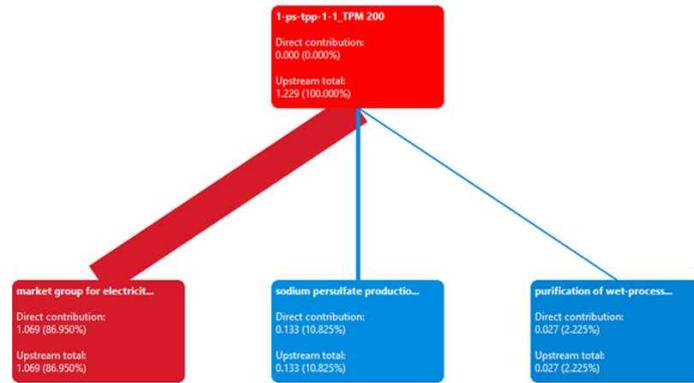
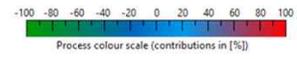
Indicator	Unit	Systems				
		1-1	1-2	1-3	1-4	1-5
Global warming	kg CO ₂ -Eq	1.23E+00	3.41E+00	5.58E+00	7.77E+00	9.94E+00
Ecotoxicity	kg 2,4-D-Eq	5.65E-01	1.40E+00	2.23E+00	3.07E+00	3.90E+00
Eutrophication	kg N	1.97E-04	4.98E-04	7.96E-04	1.10E-03	1.41E-03
Acidification	moles of H ⁺ -Eq	3.18E-01	8.17E-01	1.31E+00	1.82E+00	2.32E+00
Ozone depletion	kg CFC-11-Eq	6.58E-08	1.25E-07	1.83E-07	2.43E-07	2.97E-07
Photochemical oxidation	kg NO _x -Eq	2.83E-03	7.74E-03	1.26E-02	1.75E-02	2.24E-02
Human health - carcinogenics	kg benzene-Eq	1.93E-03	4.59E-03	7.20E-03	9.95E-03	1.27E-02
Human health - non-carcinogenics	kg toluene-Eq	5.24E+00	1.10E+01	1.66E+01	2.26E+01	2.83E+01
Human health - respiratory effects, average	kg PM _{2.5} -Eq	2.53E-03	6.84E-03	1.11E-02	1.55E-02	1.98E-02

Indicator	Unit	Systems				
		2-1	2-2	2-3	2-4	2-5
Global warming	kg CO ₂ -Eq	1.23E+00	3.42E+00	5.59E+00	7.80E+00	1.00E+01
Ecotoxicity	kg 2,4-D-Eq	5.68E-01	1.40E+00	2.24E+00	3.10E+00	3.97E+00
Eutrophication	kg N	1.94E-04	4.97E-04	7.98E-04	1.11E-03	1.43E-03
Acidification	moles of H ⁺ -Eq	3.17E-01	8.18E-01	1.32E+00	1.83E+00	2.35E+00
Ozone depletion	kg CFC-11-Eq	6.94E-08	1.27E-07	1.86E-07	2.47E-07	3.12E-07
Photochemical oxidation	kg NO _x -Eq	2.84E-03	7.74E-03	1.26E-02	1.76E-02	2.26E-02
Human health - carcinogenics	kg benzene-Eq	1.86E-03	4.56E-03	7.21E-03	1.01E-02	1.29E-02
Human health - non-carcinogenics	kg toluene-Eq	5.25E+00	1.10E+01	1.68E+01	2.29E+01	2.93E+01
Human health - respiratory effects, average	kg PM _{2.5} -Eq	2.53E-03	6.85E-03	1.11E-02	1.55E-02	1.99E-02

분석결과, 환경영향 지표 9가지 중에 인체 건강 및 지구온난화 지수에
 가장 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다. 그리고 히팅기 온도 상승에 따
 른 전기 에너지 사용량 증가가 가장 큰 영향 인자로 나타났고, 적정 온도
 조건에서 산화제 및 첨가제 주입 비율을 통한 분해 효율 제고가 바람직할
 것으로 판단된다.

마지막으로 Sankey Diagram 기반 시나리오별 물질 및 에너지 흐름
 분석하였다(그림 3.4).

Product system: 1-ps-tpp-1-1_TPM 200
 Impact category: environmental impact - global warming
 Don't show < 0.000%



[Fig. 3.4] Sankey Diagram 기반 시나리오별 물질 및 에너지 흐름 분석

흐름 분석 결과, 시나리오 1-1의 경우에 히팅봉 가열, 산화제 및 첨가제 합성을 위한 단위공정 운영과정에서 사용되는 전기 에너지가 지구온난화 영향의 86.95%를 차지하는 것으로 나타났다.

IV. 결론

본 연구에서는 페놀 오염된 토양의 처리를 위해 열적, 과황산염, 과황산염/열, 초음파 등 4가지 방법을 선택하고, 이들의 환경영향 평가를 진행하였다. 이 중에서 과황산염과 열을 이용한 열화학적 산화 방법이 가장 낮은 환경 영향을 미치는 것으로 나타났으며, 반대로 '과황산염' 처리방법이 가장 큰 환경영향을 미쳤다.

이후 열화학적 산화 처리방법에 대한 최적 조건을 찾기 위해 추가실험과 LCA를 진행하였다. 실험 결과에서는 히팅기의 온도가 페놀 분해 효율에 가장 큰 영향을 미쳤으며, LCA에서는 전기 에너지가 지구온난화 영향의 86.95%를 차지하는 것으로 확인되었다.

이에 따라, 적정 온도 조건에서 산화제 및 첨가제 투입 비율을 조절하는 것이 지속가능성을 고려하였을 때 페놀 오염 토양 정화 과정에서 가장 바람직한 방법이라는 결론이 도출되었다. 또한, 향후 재생에너지 활용을 통한 전기에너지 생산과 친환경 화학 공정을 접목한 산화제 및 첨가제 제조를 통해 현 수준보다 개선된 시스템 운영이 가능할 것으로 사료된다.

참고문헌

- 박윤수, “산화-생분해 연계 거품 도포공정에 의한 토양 TPH 제거 연구”, 군산대학교(2017), 전라북도
- 이소진, “산과황산나트륨 산화전처리와 생분해 연계를 통한 토양 TPH 정화 연구”, 군산대학교(2017), 전라북도
- 한정상. 2016. 오염지하수정화, 내하출판사
- 한정상. 2016. 수리지질과 지하수모델링, 내하출판사
- 한정상, 한찬, 2016. 지하수관리와 응용, 내하출판사
- Ahn, Y. Choi, J. Kim, M. Kim, M. Lee, D. Bang, W. Yun, E. Lee, H. Lee, J. Lee, C. Maeng, S. Hong, S. Lee, J. 2021. Chloride-Mediated Enhancement in Heat-Induced Activation of Peroxymonosulfate: New Reaction Pathways for Oxidizing Radical Production. Environ. Sci. Technol. 55(8), 5382-5392.
- Cavanagh, B. A., Wilson, S. T., Johnson, P. C. & Daniels, E. J. 2017. Interface Treatment of Petroleum Hydrocarbon-impacted Lower Permeability Layers by Activated Sodium Persulfate to Reduce Emissions to Groundwater. Gr. WATER Monit. Remediat. 37, 34-42.
- Chen, Y. Deng, P. Xie, P. Shang, R. Wang, Z. Wang, S. 2017. Heat-activated persulfate oxidation of methyl- and ethyl-parabens: effect, kinetics, and mechanism. Chemosphere, 168, 1628-1636.
- F.J. Rivas, 2006. Polycyclic aromatic hydrocarbons sorbed on soils : A short review of chemical oxidation based treatments, 138, 234-251.
- Fan, Y. Ji, Y. Kong, D. Lu, J. 2015. Zhou, Q. Kinetic and mechanistic investigations of the degradation of sulfamethazine in heat-activated PS oxidation process. J. Hazard. Mater. 300, 39-47.

- Gregory Beyke, David Fleming, 2015. Enhanced removal of separate phase viscous fuel by electrical resistance heating and multi-phase extraction. Thermal Remediation services INC.
- Ghauch, A. Tuqan, A.M. 2012. Oxidation of bisoprolol in heated persulfate/H₂O systems: kinetics and products. Chem. Eng. J. 183, 162-171.
- Lou, X. Wu, L. Guo, Y. Chen, C. Wang, Z. Xiao, D. Fang, C. Liu, J. Zhao, J. Lu, S. 2014. Peroxymonosulfate activation by phosphate anion for organics degradation in water. Chemosphere. 117, 582-585.
- Lominchar, M. A., Santos, A., de Miguel, E. & Romero, A. 2018. Remediation of aged diesel contaminated soil by alkaline activated persulfate. Sci. Total Environ. 622, 41-48.
- Liang, C.J. Wang, Z.S. Mohanty, N. 2006. Influences of carbonate and chloride ions on persulfate oxidation of trichloroethylene at 20 °C. Sci. Total Environ. 370, 271-277.
- Li, Y. T., Li, D., Lai, L. J. & Li, Y. H. 2020. Remediation of petroleum hydrocarbon contaminated soil by using activated persulfate with ultrasound and ultrasound/Fe. Chemosphere 238.
- Lei, Y. J. et al. 2020. Enhanced degradation of total petroleum hydrocarbons in real soil by dual-frequency ultrasound-activated persulfate. Sci. Total Environ. 748.
- Ma, J., Li, H. Y., Chi, L. P., Chen, H. K. & Chen, C. Z. 2017. Changes in activation energy and kinetics of heat-activated persulfate oxidation of phenol in response to changes in pH and temperature. Chemosphere 189, 86-93.
- Ma, J. et al. 2018. Impacts of inorganic anions and natural organic matter on thermally activated persulfate oxidation of BTEX in water. Chemosphere 190, 296-306.

- N. Zrinyi, A.L. Pham, 2017. Oxidation of benzoic acid by heat-activated persulfate : Effect of temperature on transformation pathway and product distribution, *Water Res.* 120, 43-51.
- Nie, M. Yang, Y. Zhang, Z. Yan, C. Wang, X. Li, H. Dong, W. 2014. Degradation of chloramphenicol by thermally activated persulfate in aqueous solution. *Chem. Eng. J.* 246, 373-382.
- Oh, S. Y. & Shin, D. S. 2014. Treatment of Diesel-Contaminated Soil by Fenton and Persulfate Oxidation with Zero-Valent Iron. *Soil Sediment Contam.* 23, 180-193.
- Pardo, F., Rosas, J. M., Santos, A. & Romero, 2015. A. Remediation of a Biodiesel Blend-Contaminated Soil with Activated Persulfate by Different Sources of Iron. *WATER AIR SOIL Pollut.* 226.
- Rodrigo, M. A., Dos Santos, E. V., 2021. *Electrochemically Assisted Remediation of Contaminated Soils: Fundamentals, Technologies, Combined Processes and Pre-Pilot and Scale-Up Applications*, Springer.
- Rauland, Vanessa, Newman, Peter, 2015. *Decarbonising Cities: Mainstreaming Low Carbon Urban Development*. Springer Verlag.
- Sun, H., Yang, X. R., Xie, J. Y., Li, X. Y. & Zhao, Y. S. 2021. Remediation of Diesel-Contaminated Aquifers Using Thermal Conductive Heating Coupled With Thermally Activated Persulfate. *WATER AIR SOIL Pollut.* 232.
- R. L. Siegrist, M. Crimi, T. J. Simpkin, 2011, *In Situ Chemixal Oxidation for Groundwater Remediation*, Springer.
- Silva, K. N. O., Araujo, K. C. F., da Silva, D. R., Martinez-Huitle, C. A. & dos Santos, E. V. 2021. Persulfate-soil washing: The green use of persulfate electrochemically generated with diamond electrodes for depolluting soils. *J. Electroanal. Chem.* 895.

- S. Cai, X. Hu, D. Lu, L. Zhang, C. Jiang, T. Cai. 2021. Science of the Total Environment Ferrous-activated persulfate oxidation of triclosan in soil and groundwater : The roles of natural mineral and organic matter, *Sci. Total Environ.* 762, 143092.
- Van Hullebusch, Eric D., Huguenot, David, Pechaud, Yoan, 2021. *Environmental Soil Remediation and Rehabilitation: Existing and Innovative Solutions.* Springer.
- Wu, H., Sun, L. N., Wang, H. & Wang, X. X. 2018. In situ sodium persulfate/calcium peroxide oxidation in remediation of TPH-contaminated soil in 3D-sand box. *Environ. Technol.* 39, 91-101.
- Waldemer, R.H. Tratnyek, P.G. Johnson, R.L. Nurmi, J.T. 2007. Oxidation of chlorinated ethenes by heat-activated persulfate: kinetics and products. *Environ. Sci. Technol.* 41, 1010-1015.
- Xu, Q. H., Shi, F., You, H. & Wang, S. T. 2021. Integrated remediation for organic-contaminated site by forcing running-water to modify alkali-heat/persulfate via oxidation process transfer. *Chemosphere* 262.
- X. Dong, X. Yang, S. Hua, Z. Wang, T. Cai, C. Jiang, 2021. Unraveling the mechanisms for persulfate-based remediation of triphenyl phosphate-contaminated soils : Complicated soil constituent effects on the formation and propagation of reactive oxygen species, *Chem. Eng. J.* 426, 130662.
- Y. Ahn, J. Choi, M. Kim, M.S. Kim, D. Lee, W.H. Bang, E. Yun, H. Lee, J. Lee, C. Lee, S.K. Maeng, S. Hong, J. Lee. 2021. Chloride-Mediated Enhancement in Heat-Induced Activation of Peroxymonosulfate: New Reaction Pathways for Oxidizing Radical Production.
- Yang, Y. Pignatello, J. Ma, J. William A. M. 2014. Comparison of Halide Impacts on the Efficiency of Contaminant Degradation by Sulfate and Hydroxyl Radical-Based Advanced Oxidation Processes

(AOPs). *Environ. Sci. Technol.* 48(4), 2344-2351.

- Yang, Y. Banerjee, G. Gary W. B. Kim J. Pignatello, J. 2018. Oxidation of Organic Compounds in Water by Unactivated Peroxymonosulfate. *Environ. Sci. Technol.* 52(10), 5911-5919.
- Y. Liu, Y. Zhang, B. Wang, S. Wang, M. Liu, Y. Wu, L. Lu. 2020. Degradation of ibuprofen in soil systems by persulfate activated with pyrophosphate chelated Fe (II), *Chem. Eng. J.* 379, 122145.
- Yen, C. H., Chen, K. F., Kao, C. M., Liang, S. H. & Chen, T. Y. 2011. Application of persulfate to remediate petroleum hydrocarbon-contaminated soil: Feasibility and comparison with common oxidants. *J. Hazard. Mater.* 186, 2097-2102.
- Zhang, B. W. et al. 2020. Combining chemical oxidation and bioremediation for petroleum polluted soil remediation by BC-nZVI activated persulfate. *Chem. Eng. J.* 382.