

플라즈마 블라스팅, 공압파쇄, 진공추출이 활용된 지중 토양정화공법의 정화 개선 효과에 대한 실증연구

송재용¹ · 이근춘^{2,3} · 강차원⁴ · 김은섭¹ · 장현식⁵ · 장보안⁶ · 박유철^{7*}

¹주식회사 산하이앤씨 상무, ²주식회사 산하이앤씨 이사, ³강원대학교 지구물리학과 박사과정,
⁴주식회사 산하이앤씨 부장, ⁵강원대학교 지구물리학과 연구교수, ⁶강원대학교 지구물리학과 명예교수,
⁷강원대학교 지구물리학과 교수

An Empirical Study on the Improvement of In Situ Soil Remediation Using Plasma Blasting, Pneumatic Fracturing and Vacuum Suction

Jae-Yong Song¹ · Geun-Chun Lee^{2,3} · Cha-Won Kang⁴ · Eun-Sup Kim¹ · Hyun-Shic Jang⁵ · Bo-An Jang⁶ · Yu-Chul Park^{7*}

¹Executive Director, SanHa Engineering & Construction Co., Ltd.

²Director, SanHa Engineering & Construction Co., Ltd.

³Ph.D. Student, Department of Geophysics, Kangwon National University

⁴General Manager, SanHa Engineering & Construction Co., Ltd.

⁵Research Professor, Department of Geophysics, Kangwon National University

⁶Honorary Professor, Department of Geophysics, Kangwon National University

⁷Professor, Department of Geophysics, Kangwon National University

Abstract

The in-situ remediation of a solidified stratum containing a large amount of fine-texture material like clay or organic matter in contaminated soil faces limitations such as increased remediation cost resulting from decreased purification efficiency. Even if the soil conditions are good, remediation generally requires a long time to complete because of non-uniform soil properties and low permeability. This study assessed the remediation effect and evaluated the field applicability of a methodology that combines pneumatic fracturing, vacuum extraction, and plasma blasting (the PPV method) to improve the limitations facing existing underground remediation methods. For comparison, underground remediation was performed over 80 days using the experimental PPV method and chemical oxidation (the control method). The control group showed no decrease in the degree of contamination due to the poor delivery of the soil remediation agent, whereas the PPV method clearly reduced the degree of contamination during the remediation period. Remediation effect, as assessed by the reduction of the highest TPH (Total Petroleum Hydrocarbons) concentration by distance from the injection well, was unclear in the control group, whereas the PPV method showed a remediation effect of 62.6% within a 1 m radius of the injection well radius, 90.1% within 1.1~2.0 m, and 92.1% within 2.1~3.0 m. When evaluating the remediation efficiency by considering the average rate of TPH concentration reduction by distance from the injection well, the control group was not clear; in contrast, the PPV method showed 53.6% remediation effect within 1 m of the injection well, 82.4% within 1.1~2.0 m, and 68.7% within 2.1~3.0 m. Both ways of considering purification efficiency (based on changes in TPH maximum and average contamination concentration) found the PPV method to increase the remediation effect by 149.0~184.8% compared with the control group; its average increase in remediation effect was ~167%. The time taken to reduce contamination by 80% of the initial concentration was evaluated by deriving

OPEN ACCESS

*Corresponding author: Yu-Chul Park
E-mail: parkyc@kangwon.ac.kr

Received: 3 March, 2023
Revised: 27 March, 2023
Accepted: 28 March, 2023

© 2023 The Korean Society of Engineering Geology



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

a correlation equation through analysis of the TPH concentration: the PPV method could reduce the purification time by 184.4% compared with chemical oxidation. However, the present evaluation of a single site cannot be equally applied to all strata, so additional research is necessary to explore more clearly the proposed method's effect.

Keywords: plasma blasting, pneumatic fracturing, vacuum suction, PPV method, in situ

초 록

점토와 같은 세립질 또는 유기물을 다량으로 함유하거나 다져진 지층을 대상으로 지중(in-situ) 정화를 진행하는 경우, 정화효율이 떨어져 정화비용이 증가하는 등의 한계가 발생한다. 또한, 토양조건이 양호하더라도 균일하지 않은 토질특성과 낮은 투수특성으로 인해 장기간에 걸쳐 정화를 수행하여 완료되는 것이 일반적이다. 본 연구는 기존 지중정화의 한계를 개선하기 위한 방법으로 공압파쇄, 진공추출, 플라즈마 블라스팅을 접목한 기술(PPV공법)의 정화효과 확인과 현장 적용성을 평가하고자 수행하였다. 상대적인 비교를 위하여 본 연구에 적용된 기술을 실험군으로 하고 기존 공법인 화학적산화공법을 대조군으로 하여 TPH로 오염된 토양에서 80일에 걸쳐 각각 지중정화를 수행하였으며, 총 4차에 걸쳐 모니터링 시료를 채취하여 정화효과를 비교 평가하였다. 모니터링 결과, 대조군은 정화제 전달효과가 불량하여 오염도의 감소 경향성을 보이지 않는 반면 실험군(PPV공법) 적용에서는 정화시간이 경과함에 따라 뚜렷한 오염도 저감효과가 나타난다. 주입정으로부터 거리별 TPH 최고농도 저감율을 평가하면, 대조군은 경향성이 없으나 PPV공법은 주입정 반경 1 m 이내에서는 62.6%, 1.1~2.0 m에서 90.1%, 2.1~3.0 m에서 92.1%의 정화효과를 보인다. 주입정으로부터 거리별 TPH 평균농도 저감율을 평가하면, 대조군은 실질적인 정화효과가 없으나 PPV공법은 주입정 반경 1 m 이내에서는 53.6%, 1.1~2.0 m에서 82.4%, 2.1~3.0 m에서 68.7%의 정화효과가 확인되었다. TPH 최대 및 평균 오염농도의 변화를 토대로 실험군과 대조군의 정화효율을 평가한 결과, PPV공법은 대조군 대비 149.0~184.8%의 정화효과가 상승하는 것으로 평가할 수 있으며 평균 정화효과 상승률은 약 167%이다. 시간경과에 대한 TPH 농도를 분석을 통해 상관관계식을 도출하고 이를 활용하여 최초 농도 대비 80% 저감기간을 평가한 결과 PPV공법을 적용하는 경우 화학적산화공법 적용시보다 184.4%의 정화시간 단축이 가능할 것으로 평가되었다. 다만, 단일 부지에 대한 평가 결과이기 때문에 모든 지층에 동일하게 적용될 수 없으므로 향후 이에 대한 추가적인 연구를 수행하여 그 효과를 보다 면밀히 검토할 필요가 있다.

주요어: 플라즈마 블라스팅, 공압파쇄, 진공추출, PPV공법, 지중정화

서론

오염된 부지의 오염토양정화기술은 국내 및 국외에서 매우 다양한 형태로 개발되어 현장에 적용되고 있다. 오염토양정화공법은 우선 오염부지 내에서 처리가능한지 여부에 따라 부지 내 처리(on-site)와 부지 외 처리(off-site)로 구분하고 부지 내 처리는 굴착 후 처리(ex-situ)와 굴착하지 않고 지중에서 처리하는 지중 처리(in-situ)로 구분된다(Kim, 2009). 2005년 반출정화제도가 국내에 도입된 이후, 반출정화가 부지 내 정화보다 비용이 더 소요됨에도 불구하고 지속적으로 확대되고 있다. 또한, 반출처리는 오염물질별 특성이 정화되지 않은 토양정화 운영 처리기술의 적정성 검토없이 '토양오염우려기준'만으로 정화검증을 완료 및 용도에 맞지 않게 운영 등 다양한 문제점이 발견되었다(Hwang, 2014). 따라서 부지 내 지중 처리에 대한 기술의 연구가 필요한 것으로 보인다.

점토와 같은 세립질 또는 유기물을 다량으로 함유하거나 다져진 지층을 대상으로 지중(in-situ) 정화를 진행하는 경우, 정화효율이 떨어져 정화비용이 증가하는 등의 한계가 발생한다. 또한, 토양조건이 양호하더라도 균일하지 않은 토질특성과 낮은 투수성으로 인해 장기간에 걸쳐 정화를 수행하여 정화가 완료되는 것이 일반적이다. 이러한 지중정화의 한계를 극복하기 위하여 파쇄기술, 추출기술, 플라즈마 발파 등 다양한 기술들이 접목되고 있으나 단일 기술로써는 복잡한 지중 환경의 대응이 어려워 정화효율을 높일 수 있도록 다양한 기술을 복합적으로 활용할 수 있는 기술개발이 필요한 실정이다.

현재 환경적으로 응용되는 파쇄기술에는 수압파쇄기술과 공압파쇄기술이 있으며, 이러한 기술은 미국 환경보호국 지원 하에 슈퍼펀드 사이트를 중심으로 다수의 기술적용과 평가가 이뤄졌고, 우리나라에서도 환경부에서 공압파쇄기술 개발의

일환으로 “지중파쇄를 이용한 원위치정화기술 개발(Ministry of Environment, 2011)” 연구를 수행한 사례가 있다(Jang et al., 2020). 플라즈마 발파기술은 세일가스 개발에서 수압파쇄 기술의 대안이나 광업 및 토목 분야에서 화약발파의 대안 기술로서 주로 암반을 적용 대상으로 하였다. 최근에는 지반의 개량, 오염 지층의 정화, 폐기물의 처리 등에 플라즈마 기술이 적용되고 있으며 적용 원리는 고온의 플라즈마를 이용하여 쓰레기나 폐기물 및 오염된 지층을 용융시켜 오염물질을 정화시키는 방법이다(Han, 1998). 또한 플라즈마 발파는 상대적으로 낮은 에너지를 사용하여 지반에 효과적으로 균열을 형성하기 때문에, 오래전부터 화약을 대신하여 암반을 파쇄시키는 공법으로 연구되어 왔고(Lee et al., 1997; Chae et al., 2006; Chen et al., 2012), 최근에는 수압파쇄법을 대신하여 플라즈마발파를 이용한 세일 암반층 파쇄 가능성에 대한 연구가 시행되었다(Riu et al., 2019).

토양증기추출법(SVE)은 진공추출이라고도 하며, 불포화대수층위에 추출정을 설치하여 토양을 진공상태로 만들어 줌으로써, 토양 내 오염물질을 제거하는 지중처리기술이다(Ministry of Environment, 2007).

본 연구는 공압파쇄, 플라즈마 블라스팅, 진공추출이 활용된 지중정화공법인 PPV공법(PPV method: pneumatic fracturing / plasma blasting / vacuum suction method)의 정화효율 개선 효과와 현장적용성을 평가하기 위한 연구이다. 본 연구에 적용된 공압파쇄기술(pneumatic fracturing)은 고압의 공기를 분사하여 지중 내에 존재하는 균열을 확장시키거나 미세 균열을 형성하여 채널 네트워크를 형성하는 기술로 이때 형성된 채널은 기체 액체의 투수성을 증가시켜 오염물질 처리 효율을 향상시킨다(U.S. EPA, 1995). 또한, 플라즈마 블라스팅(plasma blasting)의 경우 물속에서 전극에 고전압을 인가하여 아크방전을 일으키면 전기 에너지는 나노초 또는 마이크로초 사이에 전극 주변의 물을 통해 소멸되고, 이 때 전극 주변의 물은 온도가 급격히 상승하여 플라즈마 기포를 생성하면서 폭발적인 부피팽창을 일으켜 부피팽창에 따른 충격파를 주변 지반에 전달하여 균열을 발생시키는 방법을 적용한다. 즉, 플라즈마 블라스팅(plasma blasting)을 활용하여 균열망을 형성시킴으로써 유체 투과율을 개선할 수 있다. 진공추출(vacuum suction)은 지중 내 정화제를 투입하고 압력구배를 주어 정화제의 주입 방향성 제어를 통해 오염원에 대한 집중 정화가 가능하고 불필요한 정화제의 확산을 방지하고 정화제의 이동성을 증대키는 역할을 한다. 기존 사례를 종합하면, PPV공법은 공압파쇄와 플라즈마 블라스팅을 통한 촘촘한 균열망 형성하고 진공추출을 통해 정화제의 이동효과를 개선함으로써 지중오염토양의 정화효율을 높일 수 있을 것으로 기대된다(Lee et al., 2022).

본 연구의 목적은 PPV공법의 정화효과 확인과 현장 적용성을 평가하고 기존 공법 대비 효과를 검증하기 위함이다. 상대적인 비교를 기존 공법인 화학적산화공법을 대조군으로 하고 이를 개선시킨 본 연구에 적용된 기술을 실험군으로 하여 TPH(total petroleum hydrocarbon)로 오염된 토양에서 80일에 걸쳐 각각 지중정화를 수행하였으며, 총 4차에 걸쳐 모니터링 시료를 채취하여 정화효과를 비교 평가하였다. PPV공법 적용이 화학적산화공법 적용보다 상대적으로 양호한 정화 특성을 보여 개선 효과가 뚜렷이 확인되는 성과를 얻게 된다면 국내에서 지중처리시 지층 특성에 따라 낮은 투과율로 인해 정화효율이 떨어져 정화 기간이 길어지고 결국 정화비용이 증대하는 등의 지중처리 기술의 한계점을 극복할 수 있어 향후 오염토양의 지중처리 기술에 보다 적극적으로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

연구지역

연구지역은 강원도 춘천시 근화동 일대의 반환미군기지로 토양오염정화가 진행되고 있는 곳이며 해당부지는 토양정화가 계획된 부지이다. 지질은 춘천화강암인 중생대 류라기의 흑운모화강암이 넓게 분포하고 상기 지층을 제4기 충적층이 피복하고 있다.

연구지역의 토양오염도를 사전조사하기 위해 토양오염조사기관에서 TPH 항목에 대한 분석을 수행하였다. 조사지점은

5~10 m 간격으로 총 32개 지점에서 이루어 졌으며 지점별 1심도(0.0~1.0 m), 2심도(1.0~2.0 m), 3심도(2.0~3.0 m), 4심도(3.0~4.0 m), 5심도(4.0~5.0 m), 6심도(5.0~6.0 m), 7심도(6.0~7.0 m)까지 토양시료를 채취하여 총 224개의 토양시료에 대해 오염도를 분석하였다(Fig. 1, Table 1). Table 1은 조사위치에서 TPH항목의 농도를 표시하였으며 측정치 이하로 확인된 경우는 제외하였다.

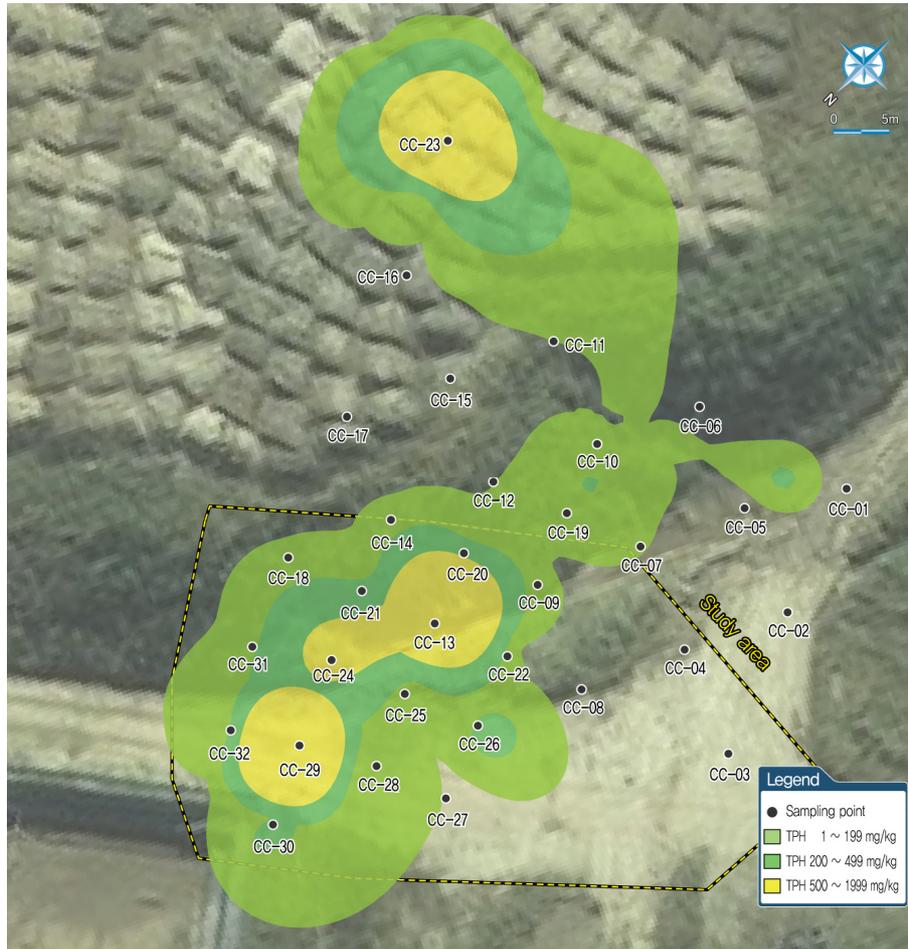


Fig. 1. Map of soil contamination survey locations.

Table 1. Preliminary soil contamination survey results at the research site

Sample No.	Depth step	TPH (mg/kg)	Sample No.	Depth step	TPH (mg/kg)	Sample No.	Depth step	TPH (mg/kg)	Sample No.	Depth step	TPH (mg/kg)
CC-05	2	250	CC-20	3	53	CC-24	3	708	CC-28	2	173
CC-10	3	78	CC-21	2	64	CC-24	4	147	CC-29	2	178
CC-11	2	192	CC-21	3	88	CC-24	5	60	CC-29	3	119
CC-11	3	130	CC-21	5	53	CC-25	1	52	CC-29	4	1,010
CC-13	2	184	CC-22	1	55	CC-25	2	79	CC-29	5	68
CC-13	3	972	CC-22	4	52	CC-25	3	79	CC-30	2	214
CC-13	4	1,621	CC-23	2	413	CC-25	5	52	CC-31	2	50

Table 1. Continued

Sample No.	Depth step	TPH (mg/kg)	Sample No.	Depth step	TPH (mg/kg)	Sample No.	Depth step	TPH (mg/kg)	Sample No.	Depth step	TPH (mg/kg)
CC-13	5	1,634	CC-23	3	1,990	CC-26	1	265	CC-31	3	65
CC-13	6	320	CC-23	4	62	CC-26	2	50	CC-31	4	67
CC-16	1	150	CC-23	5	58	CC-26	3	74	CC-32	1	51
CC-19	3	256	CC-23	6	65	CC-26	4	53	CC-32	2	77
CC-19	5	51	CC-24	1	68	CC-26	5	67	CC-32	3	132
CC-20	2	142	CC-24	2	127	CC-27	2	87	CC-32	4	91

Depth Step: 1 (ground level (GL) 0.0 to -1.0 m), 2 (GL -1.0 to -2.0 m), 3 (GL -2.0 to -3.0 m), 4 (GL -3.0 to -4.0 m), 5 (GL -4.0 to -5.0 m), 6 (GL -5.0 to -6.0 m).

TPH 분석결과, 19개 지점 52개 토양시료에서 50~1,990 mg/kg 범위의 농도가 확인되었으며 토양오염우려기준(1지역 기준) 40% 이상의 오염도가 확인된 구간에 대해 확인한 결과, 8개 지점 12개의 토양시료에서 214~1,990 mg/kg 범위의 농도가 확인되었다. 연구지역은 오염분포도를 작성한 후 오염이 확인되는 지역을 대상으로 실험이 가능한 지역을 선정하여 연구부지로 선정하였다(Fig. 1).

연구지역의 지층분포 및 지반상태를 확인하기 위해 5공(NX)의 시추조사를 수행하였다(Fig. 2). 시추조사 결과 지층구성은 매립층, 퇴적층, 풍화암 순으로 분포한다. 본 연구에서 주요 시험대상이 되는 오염지층은 퇴적층으로 실트질 점토층과 실트질 모래층이 대상이며 표준관입시험 결과, 해당지층은 연약-매우 견고한 연경도를 보이는 점성토층과 느슨-매우 조밀한 상대밀도를 보이는 사질토이다. 지하수위의 분포는 GL -3.07~4.38 m에 위치하여 시험대상 지층에서 확인된다 (Table 2).



Fig. 2. Locations of drilling survey sites and geology of the study area.

Table 2. Drilling survey results

Index	Fill soil (m below GL)	Deposit soil (m below GL)			Weathered rock (m below GL)	Drilling depth (m)	Groundwater depth (m below GL)
	Gravel silty sand	Silty clay	Silty sand	Gravel sand			
BH-1	0.0~1.6 (1.6)	1.6~3.8 (2.2)	3.8~4.7 (0.9)	4.7~11.3 (6.6)	11.3~15.3 (4.0)	15.3	3.07
BH-2	0.0~1.8 (1.8)	1.8~3.9 (2.1)	3.9~4.8 (0.9)	4.8~12.4 (7.6)	12.4~30.0 (17.6)	30.0	3.28
BH-3	0.0~2.9 (2.9)	2.9~5.7 (2.8)	5.7~6.6 (0.9)	6.6~12.6 (6.0)	12.6~15.0 (2.4)	15.0	4.35
BH-4	0.0~2.5 (2.5)	2.5~4.6 (2.1)	4.6~6.0 (1.4)	6.0~12.6 (6.6)	12.6~15.0 (2.4)	15.0	4.38
BH-5	0.0~2.8 (2.8)	2.8~5.5 (2.7)	5.5~6.9 (1.4)	6.9~12.7 (5.8)	12.7~15.0 (2.3)	15.0	4.37
N-value	2/30~40/30	3/30~24/30	5/30~35/30	28/30~50/3	50/4~50/2	-	-

연구 내용 및 방법

오염정화 구역 설정

사전조사에서 확인된 TPH항목의 오염조사 결과를 바탕으로 오염이 확인 심도 및 분석 농도 등을 고려하여 대조군 부지(control site)와 실험군 부지(PPV site)를 선정하여 오염정화 구역을 설정하였다(Fig. 3). 오염조사에서 확인된 지점 중 CC-13 지점과 CC-29 지점의 4심도(GL -3.0~-4.0 m)에서 TPH항목의 농도가 각각 1,620 mg/kg, 1,010 mg/kg으로 확인되어 모두 토양오염우려기준(1지역) 우려기준인 500 mg/kg 이상의 농도를 보이는 것으로 확인되었고 주변으로 우려기준 40% 이상의 오염도가 확인되는 것으로 조사되어 해당 지점을 중심으로 서로 유사한 오염 경향성을 보이고 있다. 따라서 CC-13 지점을 중심으로 시험군 부지와 CC-29 지점을 중심으로 대조군 부지로 구분하여 오염정화 실험을 진행할 수 있도록 구역을 설정하였다(Fig. 3).



Fig. 3. Site selection for study area according to soil contamination survey results.

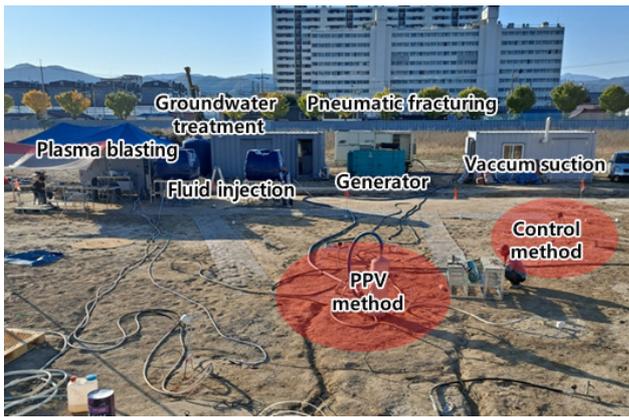
또한, 시추조사를 통해 확인된 오염 심도인 4심도의 토성은 실트질 점토와 실트질 모래 등으로 유체 투과율이 낮은 지층의 특성을 보인다. 이는 화학적산화공법의 적용시 정화효율이 떨어지는 문제점을 보이는 지층으로 연구기술인 PPV공법을 적용하여 그 효과를 비교 및 분석하기에 적합한 지점인 것으로 판단된다.

전체 조사 면적에서 정화대상 구역 내에 오염부지의 면적과 주입정, 추출정의 설치 및 공정시스템 설치 등을 고려해 부지 평탄화 작업을 수행하고 강우 또는 외부의 유입 및 유출을 예방하기 위한 배수로 등의 우수배제 시설을 설치하여 보다 안정적인 시험이 진행될 수 있도록 하였다.

공정시스템 설치 및 운영

주입정과 추출정의 천공 구경은 150 mm, 천공 심도 GL -4.5 m, 관정 구경 75 mm, 스크린관 적용 심도 GL -3.0~-4.5 m, 가운데 주입정과 주변 4방위 추출정 간 설치 간격은 4 m로 설정하였다.

대조군 및 실험군 각각 1 set를 설치하였으며, 천공 홀 주변 교란 방지와 약액 및 압력 유출 방지를 위해 관정 상부에 압력차단장치를 설치하였다. PPV공법 공정 실험을 위해 현장실증 규모의 공압파쇄용 에어컴프레셔(air compressor), 플라즈마 블라스팅 장치, 진공추출장치, 수처리장치, 발전기, 주입/추출 프로브 등 주요 장치와 분배기, packer용 에어공급장치, 실험용 약품 주입장치, 압력차단판 등 부속장치를 설치하였다(Fig. 4).



(a)

Apparatus	Spec
Plasma blasting	Maximum discharge energy 125 KJ (at 50 kV, 100 μF)
Pneumatic fracturing	Wind pressure : 260 psi, air volume : 21 m ³ /min (750 CFM)
Vaccum suction	Vacuum pressure : 6,200 mmAq, air volume : 10 m ³ /min
Groundwater treatment	EPS oil and water separation type, processing capacity : 5 m ³ /hr
Fluid injection	Gravity injection

(b)

Fig. 4. Soil remediation process system of PPV method and control (chemical oxidation method). (a) Photos of main equipment, and (b) Spec of main equipment.

TPH항목으로 오염된 구역을 대상으로 PPV공법을 적용하지 않는 대조군과 PPV공법을 적용하는 실험군으로 구분하여 실험을 진행하였다. 부지조건은 주로 4심도(GL -3.0~-4.0 m)에서 유류로 오염되어있어 대조군인 화학적산화공법과 실험군인 PPV공법을 적용하여 토양 내 TPH를 정화하여 그 효과를 비교하는 방식으로 진행하였다.

화학적산화공법은 과산화수소 5% 농도의 산화제를 중력주입하고 주입정 주변 토양시료를 채취하여 TPH항목의 오염도를 분석하였다. PPV공법은 화학적산화공법과 동일한 농도의 산화제를 중력중입방식으로 주입하였다. 공압파쇄는 5 kgf/cm²에서 10 kgf/cm²로 변경하면서 각각 5회씩 공압파쇄를 진행하였으며 플라즈마 방전압 또한 20 kV에서 25 kV로 변경하면서 각각 5회의 플라즈마 방전을 수행하고 추출정에서는 진공압을 -0.2 bar 적용하여 주입정에서 주입되는 산화제를 유도하는 방식으로 진행하였으며 화학적산화공법의 정화효율 개선 효과 평가와 마찬가지로 주입정 주변 토양시료를 채취하였다.

시스템운영은 오전 09시부터 오후 17시까지 일 8시간 운영을 기준으로 대조군과 실험군이 동일하게 운영되었다. PPV 공법의 공압파쇄, 플라즈마블라스팅 및 진공추출은 오전과 오후 각각 1회씩(1회 적용시 30~40분 소요) 일일 총 2회씩 적용하였고 동일 시간 대조군의 경우, 계속하여 산화제인 과산화수소를 주입하는 방식으로 운영되었다(Table 3).

Table 3. Operating conditions of the PPV method and chemical oxidation

Index	Control (chemical oxidation)	PPV method
Contaminants		TPH in soil
Depth of soil remediation		Fourth depth step (-3.0 to -4.0 m below GL)
Fluid injection (oxidizing agent)		H ₂ O ₂ 5%
Soil remediation agent injection method		Gravity injection
Pneumatic fracturing pressure	-	5 kgf/cm ² →10 kgf/cm ²
Number of pneumatic fracturings	-	5 times each (2 times/day)
Vacuum suction pressure	-	-0.2 bar (2,000 mmAq ≅ 150 mmHg = 150 torr)
Plasma discharge voltage	-	20 kV→25 kV
Number of plasma discharges	-	5 shots (2 times/day)
Operating time		8 h/day
Monitoring items	Soil sample collection around the injection well and analysis of TPH item contamination	

토양정화 모니터링 방법

대조군과 PPV공법의 토양정화 운영기간 동안 실험구역 내 TPH 농도 저감에 따른 정화효율 평가를 위해 지오프로브 장비(Geoprobe system)를 이용하여 토양 시료를 채취하고 분석하는 방식으로 모니터링하였다. 토양시료 채취는 주입정과 추출정 사이 반경 4 m 내에서 이루어졌으며 화학적산화공법과 PPV공법의 토양정화시스템 운영 후 80일 동안 2주(14일), 5.3주(37일), 8.3주(58일), 10.4주(80일)가 경과한 시점에서 총 4차에 걸쳐 이루어졌으며 주요 정화대상 지층인 4심도 (GL -3.0~-4.0 m)에서 채취된 시료를 모니터링하여 토양오염 분석결과를 바탕으로 대조군과 실험군의 주입정과 추출정의 거리에 따른 토양 오염도 변화를 확인하여 저감효과 및 저감율을 분석하였다.

TPH 항목 오염도 분석은 신뢰성 확보를 위해 토양오염조사기관과 실증평가기관의 입회하에 채취가 이루어졌으며 분석 또한 2개의 토양관련전문기관에 의뢰하여 보다 정확한 토양오염도 모니터링이 되도록 하였다.

시험결과 및 분석

토양오염 분석결과

대조군(기존의 화학적산화공법)과 시험군(PPV)의 시간에 따른 정화정도를 비교하고 분석의 신뢰성을 충분히 확보하기 위하여 국내의 2개 토양오염조사기관(분석기관 A, 분석기관 B)에 의뢰하였으며, 분석기관 A의 경우 3차, 분석기관 B의 경우 4차에 걸쳐 분석을 실시하였다. 4차에 걸친 시료채취는 각각 정화시작 후 2주(14일), 5.3주(37일), 8.3주(58일), 10.4주(80일)가 경과한 시점이며 분석항목은 TPH로 하였다. 연구지역 오염도 분석을 위한 시료채취는 대조군의 경우 전 달특성이 불량하여 주입정으로부터 2.0 m 이내에서 주로 수행하였으며, 시험군(PPV)의 경우 3.5 m 이내에서 대부분 이루어졌다. 시료채취 시 채취장비(Geoprobe system)를 사용하기 때문에 1~4차까지의 시료채취 지점의 방향 및 주입정에서의 채취 거리는 부분적으로 차이가 발생할 수 밖에 없다. 간격 및 방향 변화를 고려하여 주입정으로부터 거리에 따른

오염도를 나타내면 다음과 같다(Table 4).

Table 4. Concentration of TPH contamination by distance from the injection well during the remediation time (based on an interval of 0.5 m from the injection well)

Index	Injection radius	Range of TPH concentration (mg/kg) by remediation time period			
		1st (14 day)	2nd (37 day)	3rd (58 day)	4th (80 day)
Control	≤0.5 m	79~255	97~254	71~136	-
	0.6~1.0 m	97~527	66~3,893	86~351	-
	1.1~1.5 m	-	85~168	55~72	-
	1.6~2.0 m	75~278	-	69~71	-
	2.6~3.0 m	61~130	-	-	-
Agency A PPV method	≤0.5 m	445~1,235	392~1,129	69~1,270	-
	0.6~1.0 m	291~3,399	329~9,123	168~750	-
	1.1~1.5 m	-	219~2,558	-	-
	1.6~2.0 m	62~6,877	160~4,266	236~547	-
	2.1~2.5 m	-	2,429	-	-
	2.6~3.0 m	57~6,922	103~6,278	481	-
	3.1~3.5 m	-	1,617	583~1,581	-
Agency B Control	≤0.5 m	52~210	52~176	50~613	-
	0.6~1.0 m	75~278	67~237	-	177~567
	1.1~1.5 m	-	64	52~401	-
	1.6~2.0 m	95	-	-	-
	2.1~2.5 m	-	-	-	148~683
	2.6~3.0 m	102	-	-	-
Agency B PPV method	≤0.5 m	202~1,064	94~1,475	106~506	-
	0.6~1.0 m	70~2,327	50~4,044	87~1,257	136~541
	1.1~1.5 m	-	99~2,919	465~1,289	124~511
	1.6~2.0 m	2,531~5,163	70~3,755	53~1,923	-
	2.1~2.5 m	-	1,665~4,425	-	40~779
	2.6~3.0 m	152~5,281	202~6,613	246~1,149	-
3.1~3.5 m	-	420~2,331	214~1,747	184	

대조군에 대한 분석기관 A의 분석결과, 오염이 확인된 지점의 TPH 평균농도는 1, 2, 3차 시료에서 각각 151 mg/kg, 402 mg/kg, 114 mg/kg의 평균농도를 보이고 있다. 2차 시료에서 1차 및 3차 시료에 비해 오염농도가 높게 평가되는데 이는 2차 시료 중 1개 시료에서 TPH오염도가 3,893 mg/kg 높게 평가된 결과에 기인한 것이다. 이상 값을 보이는 시료를 제외한 1~3차의 평균농도는 151 mg/kg, 152 mg/kg, 114 mg/kg으로 파악되어 마지막 차수(3차) 시료의 평균농도는 초기 평균농도(1차) 대비 약 75% 수준으로 평가되었다. 분석기관 B의 분석결과, 오염이 확인된 지점의 TPH 평균농도는 1, 2, 3, 4차 시료에서 각각 123 mg/kg, 133 mg/kg, 194 mg/kg, 322 mg/kg의 평균농도를 보이고 있다. 전반적인 경향은 오염도가 상승하는 양상을 보이며, 마지막 차수(4차) 시료의 평균농도는 초기평균농도(1차) 대비 260% 높은 값을 보이는 것으로 나타났다. 대조군의 오염도 분석결과를 종합해 볼 때, 분석기관에 따라 오염도가 부분적으로 감소되는 경향과 증가되는 경향이 동시에 나타나는 것을 확인할 수 있다. 이는 시료채취 지점이 각 차수별 다소 차이가 있어 지반 및 오염의 불균질성

에 기인한 것으로 판단된다. 또한, 화학적산화공법을 적용한 대조군에서는 지층에서의 정화제 전달효과가 불량하여 정화제 주입량이 적고 투수성이 좋은 사질 지반으로만 정화제가 이동되기 때문에 실질적으로 오염이 집중되어 있는 세립질 토사부분에서 실질적인 정화가 이루어지지 않기 때문으로 판단된다.

PPV 공법을 적용한 시험군에 대한 분석기관 A의 분석결과, 오염이 확인된 지점의 TPH 평균농도는 1, 2, 3차 시료에서 각각 1,333 mg/kg, 1,565 mg/kg, 508 mg/kg의 평균농도를 보이고 있다. 평균 오염도 분포를 볼 때, 2차에서 가장 높은 값을 보이며, 3차에서 급격히 저하되는 특성을 보이고 있다. 2차 시료에서 1차 및 3차 시료에 비해 오염농도가 높게 평가되는데 이는 2차 시료중 1개 시료에서 TPH오염도가 9,123 mg/kg 높게 평가된 결과에 기인한 것이다. 높은 값을 보이는 시료를 제외한 1~3차의 평균농도는 1,333 mg/kg, 1,263 mg/kg, 508 mg/kg으로 파악되어 마지막 차수(3차) 시료의 평균농도는 초기평균농도(1차) 대비 약 38.1% 정도 수준으로 평가되었다. 분석기관 B의 분석결과, 오염이 확인된 지점의 TPH 평균농도는 1, 2, 3, 4차 시료에서 각각 1,599 mg/kg, 1,176 mg/kg, 570 mg/kg, 314 mg/kg의 평균농도를 보이고 있다. 전반적인 경향은 오염도가 지속적으로 하강하는 뚜렷한 양상을 보이고 있으며, 3차에서 분석기관 A와 마찬가지로 높은 저감율을 나타내고 있다. 분석기관 A와 동일 날짜에 채취된 3차 시료의 평균농도는 초기평균농도(1차) 대비 약 35.6% 수준으로 분석기관 A와 상당히 일치되는 경향을 보이고 있다. 마지막 차수(4차) 시료의 평균농도는 초기평균농도(1차) 대비 약 19.5% 수준으로 높은 저감율을 나타내고 있다. 시험군의 평균오염도 분석결과를 종합해 볼 때, 전반적으로 뚜렷한 오염도

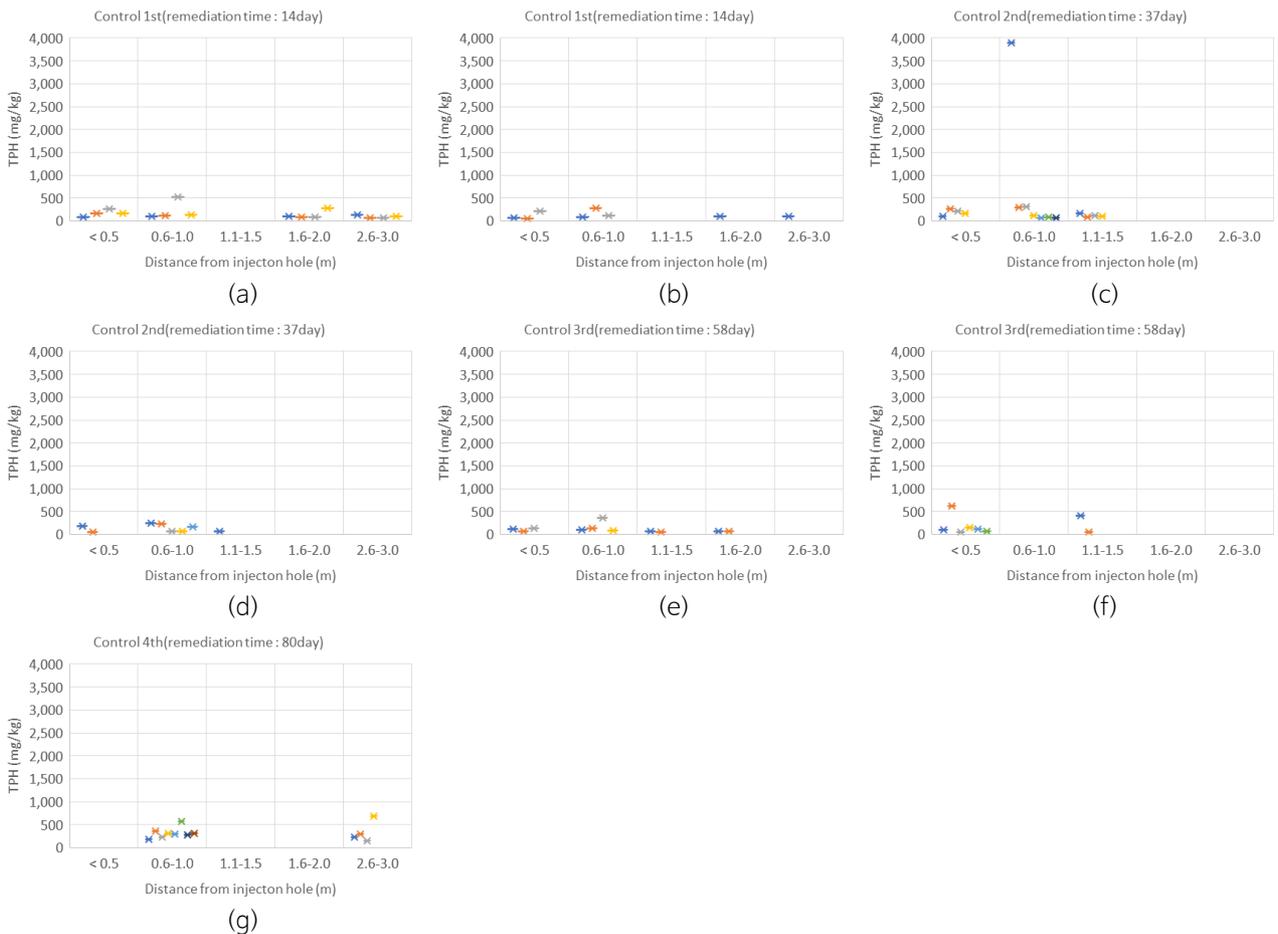


Fig. 5. TPH contaminant concentration according to the distance from the injection well by agency for the control method: (a), (c), (e) Agency A; (b), (d), (f), (g) Agency B.

저감효과가 발휘되는 것을 확인할 수 있다. 이는 PPV공법 적용시 지속적인 블라스팅과 추출을 병행함으로써 정화제 전달 효율을 일정하게 유지시키며, 공법 적용으로 형성된 균열을 통해 대조군 대비 많은 양의 정화제가 주입되어 조립 및 세립 지반 모두에서 정화효과를 발휘하기 때문인 것으로 판단된다. 아래 그래프는 분석기관별 주입정부터의 거리에 따른 TPH 오염도를 나타내고 있다(Figs. 5 and 6).

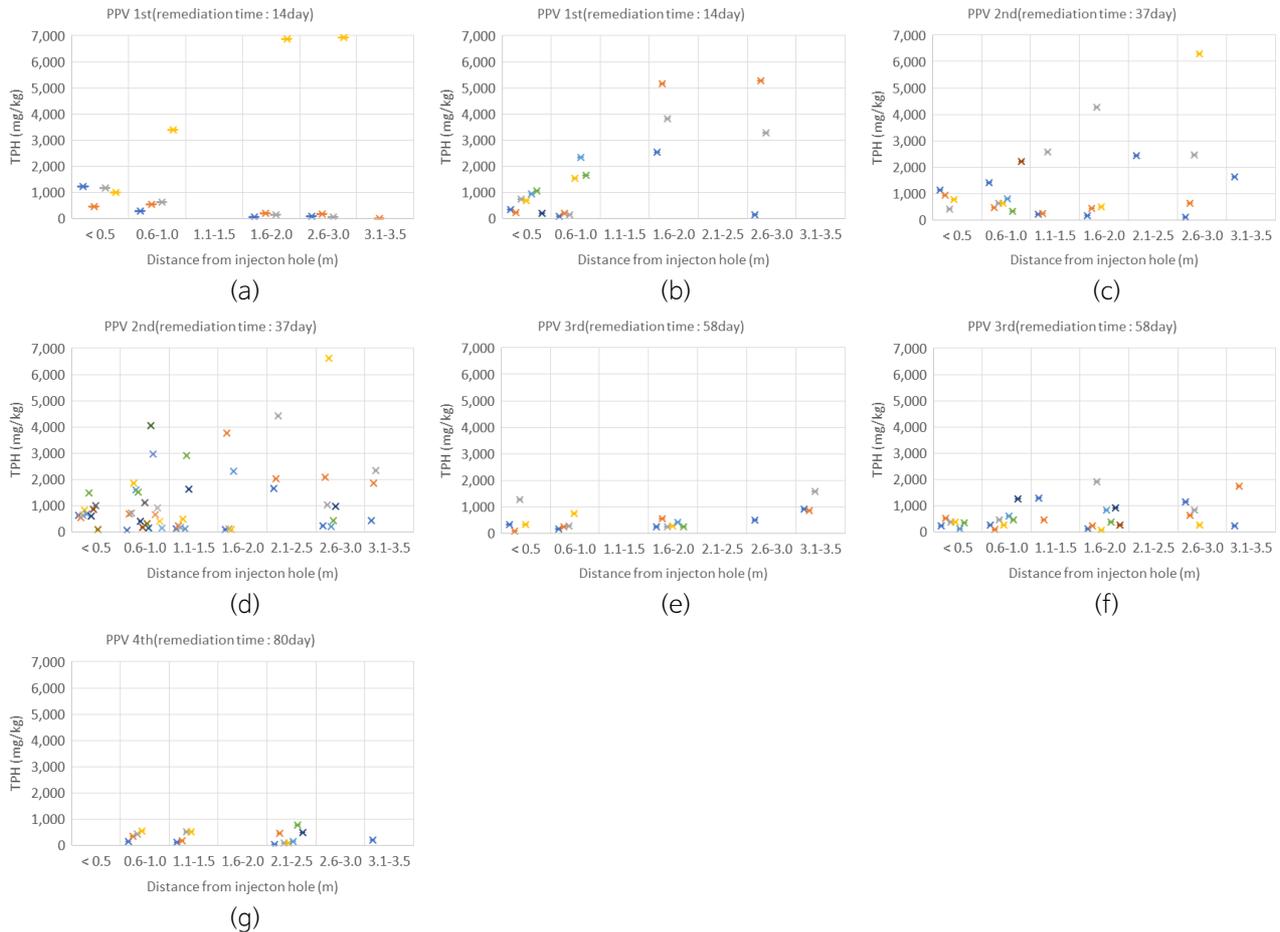


Fig. 6. TPH contamination concentration according to the distance from the injection well by agency for the PPV method: (a), (c), (e) Agency A; (b), (d), (f), (g) Agency B.

토양오염 정화효율 분석

토양정화 목표를 달성하기 위해서는 최고농도가 정화목표 기준치 이내로 평가되어야 한다. 따라서, 평가기준은 최고농도를 기준으로 설정하여야 한다. 그러나 최고농도의 경우 일부 구간에서 과대평가가되어 전반적인 정화효과를 평가하는데 착오를 불러일으킬 수 있는 여지가 있어 정화효율에 대한 객관성을 확보하기 위해서는 오염지점에 대한 평균농도 또한 분석을 수행하여야 할 필요성이 있다. 이를 감안하여 본 연구에서는 대조군과 실험군간의 동일 거리조건과 동일 정화기간에 따른 오염지점의 TPH 최고농도와 평균농도를 각각 분석하여 기를 기반으로 TPH 제거율을 산정하였다. 평가 과정에서 앞서 언급한 과다하게 평가된 대조군 2차 시료 분석결과(3,893 mg/kg)와 실험군 2차 시료 분석결과(9,123 mg/kg)는 신뢰성 확보를 위해 분석에서 제외하였다.

TPH 최고농도 저감율에 따른 정화효율 평가

TPH 최고농도를 기준으로 초기 오염농도 대비 정화효율을 분석하였다. 대조군을 볼 때, 분석기관 A에서는 주입정에서의 반경 1 m 이내 구간의 경우, 초기 최고농도 527 mg/kg에서 58일이 경과된 후 351 mg/kg까지 저감되어 33.4%의 오염 저감율을 나타내는 것으로 분석되었다. 1.1~2.0 m 구간에서는 278 mg/kg에서 72 mg/kg로 74.1% 저감되는 것으로 나타나 분석기관 A의 평균 저감율은 53.7%로 평가되었다. 분석기관 B는 반경 1.0 m 이내 구간의 경우, 최초 278 mg/kg에서 80일 후 567 mg/kg, 1.1~2.0 m 구간에서는 최초 95 mg/kg에서 58일후 401 mg/kg, 2.1~3.0 m 구간에서는 최초 102 mg/kg에서 80일 후 683 mg/kg으로 오염도가 104.0~596.6% (저감율 -104.0~-596.6%)까지 증가하는 양상을 보이고 있다(Table 5, Fig. 7). 대조군을 대상으로 2개 분석기관 결과를 종합해 볼 때, 정화과정에서의 강우에 의한 지하수위 변화로 인한 오염도의 변동가능성을 배제할 수는 없다. 그러나 장시간인 80일간의 정화기간 동안 뚜렷한 저감양상이 확인되지 않는 것은 기존공법인 화학적산화공법에서의 정화제 이동이 투수성이 양호한 사질지반에 편중되고 오염도가 집중되는 세립토사 분포지역에서는 실질적인 효과가 발생하지 않음에 기인한 것으로 보인다.

실험군(PPV) 결과를 볼 때, 분석기관 A에서는 주입정에서의 반경 1 m 이내 구간의 경우, 초기 최고농도 3,399 mg/kg에서 58일이 경과된 후 1,270 mg/kg까지 저감되어 62.6%의 오염저감율을 나타내는 것으로 분석되었다. 1.1~2.0 m 구간에서는 6,877 mg/kg에서 58일 후 547 mg/kg로 92.0%의 매우 높은 저감율을 나타내고 있다. 또한 2.1~3.0 m 구간에서는 58일후 904 mg/kg 2차(37일 후) 대비 85.6% 오염농도의 저감효과를 보인다. 3.1 m 이상에서는 뚜렷한 저감효과가 확인 되지 않는다. 분석기관 B는 반경 1.0 m 이내 구간의 경우, 최초 2,327 mg/kg에서 80일 후 541 mg/kg, 1.1~2.0 m 구간에서는 최초 5,163 mg/kg에서 80일후 511 mg/kg, 2.1~3.0 m 구간에서는 최초 5,281 mg/kg에서 80일 후 779 mg/kg, 3.1~4.0 m 구간에서는 2,331 mg/kg (37일 후)에서 80일 후 184 mg/kg으로 76.8~92.1%의 정화효과를 나타내고 있다(Table 5, Fig. 8). 대조군과는 달리 실험군의 분석결과를 종합할 때, 2차(37일) 이후에는 뚜렷한 정화효과가 나타나고 있음을 확인할 수 있다. 이는 앞서 언급했듯이 정화 초기에는 정화제의 주입효과가 오염지역 전반에 작용하기 보다는 일부지역에 국한되기 때문으로 판단된다.

Table 5. TPH reduction for change in maximum TPH concentration by injection radius

Index	Injection radius	Maximum TPH concentration (mg/kg)				TPH reduction (%)
		1st (14 day)	2nd (37 day)	3rd (58 day)	4th (80 day)	
Control	≤ 1.0 m	527	303	351	-	33.4
	1.1~2.0 m	278	168	72	-	74.1
	2.1~3.0 m	130	-	-	-	-
Agency A PPV method	≤ 1.0 m	3,399	2,214	1,270	-	62.6
	1.1~2.0 m	6,877	4,266	547	-	92.0
	2.1~3.0 m	-	6,278	904	-	85.6
	3.1~4.0 m	-	1,617	1,581	-	2.2
Control	≤ 1.0 m	278	237	613	567	-104.0
	1.1~2.0 m	95	64	401	-	-322.1
	2.1~3.0 m	102	-	-	683	-569.6
Agency B PPV method	≤ 1.0 m	2,327	4,044	1,257	541	76.8
	1.1~2.0 m	5,163	3,755	1,923	511	90.1
	2.1~3.0 m	5,281	6,613	1,149	779	85.2
	3.1~4.0 m	-	2,331	1,747	184	92.1

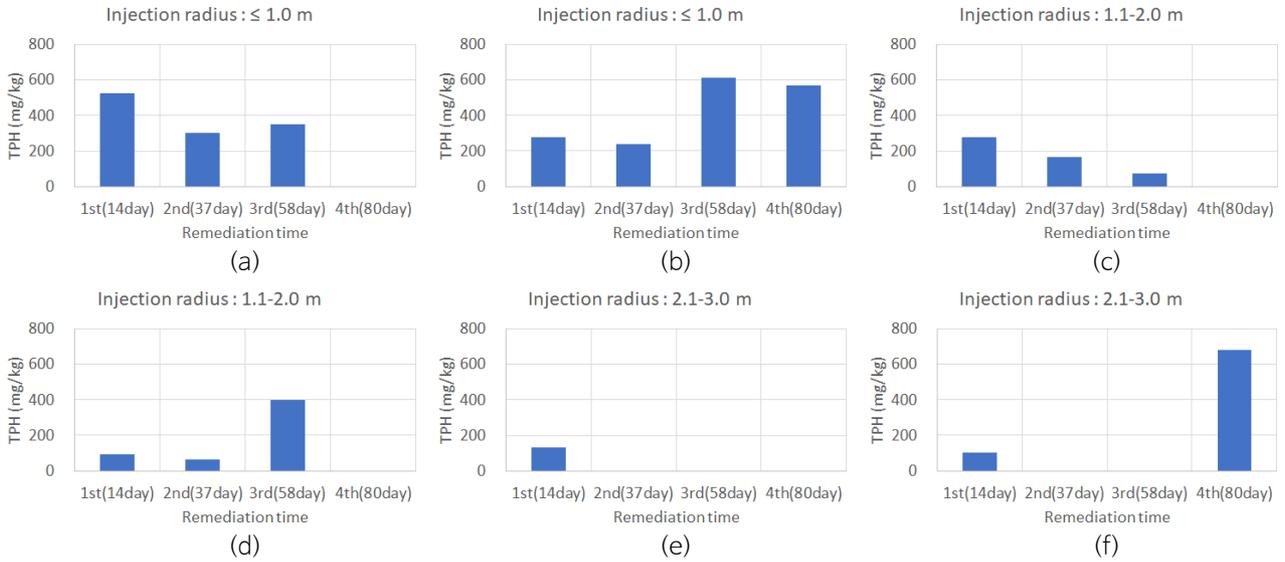


Fig. 7. Change in maximum TPH concentration during soil remediation using the control method: (a), (c), (e) Agency A; (b), (d), (f) Agency B.

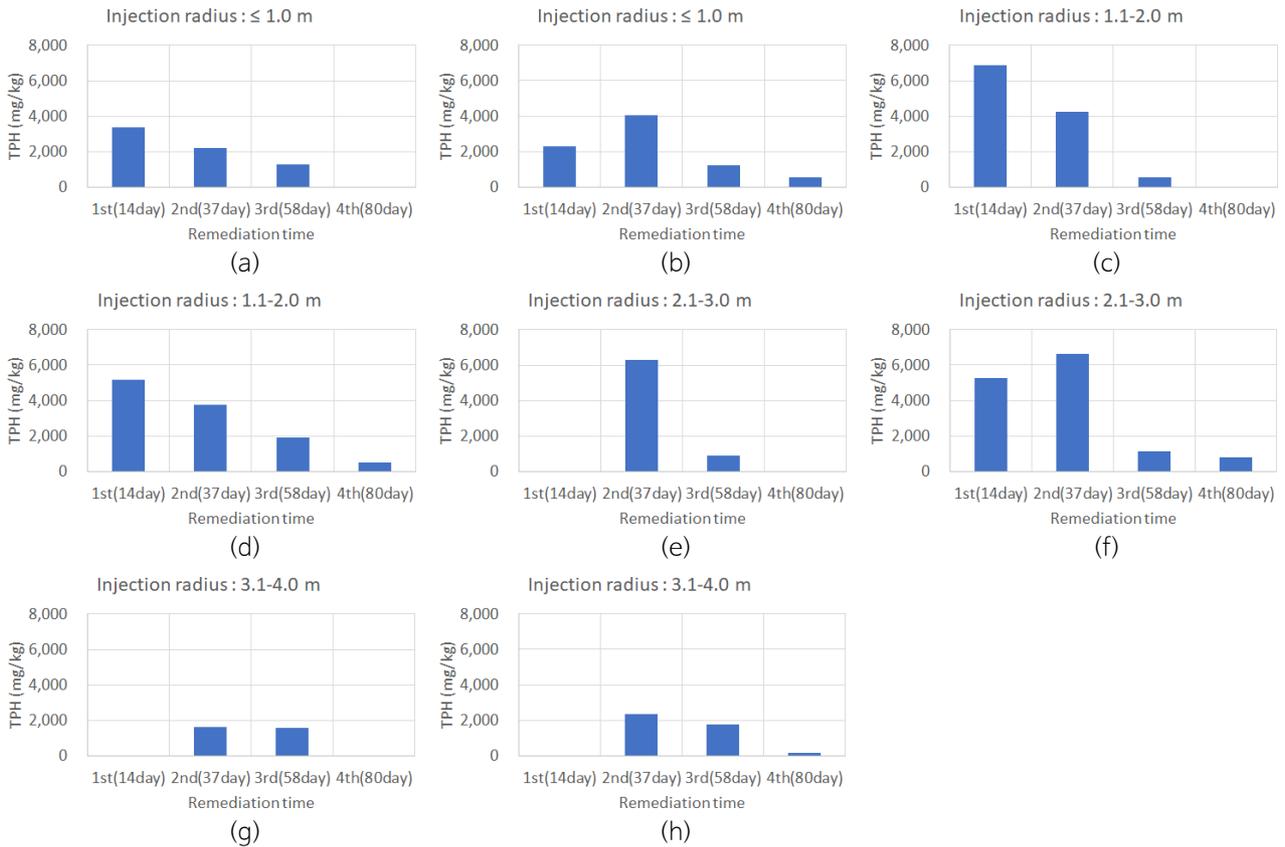


Fig. 8. Change in maximum TPH concentration during soil remediation using the PPV method: (a), (c), (e), (g) Agency A; (b), (d), (f), (h) Agency B.

본 연구에서는 실험군과 대조군간의 상대적인 정화효과를 평가하여야 하기 때문에 분석기관 2의 대조군에 대한 정화효율은 오염이 가중되어 실질적인 비교가 불가능하다. 따라서, 대조군의 경우 분석기관 1의 정화효율을 기준으로 하였다. 실험군인 PPV공법 정화효과를 볼 때, 3.1~4.0 m 구간은 분석기관 1의 경우 정화효과가 미미하고 분석기관 2의 경우에는 높은 정화효율을 보이거나 샘플의 개수가 1개로 신뢰성에 문제가 발생할 수 있다. 현재까지 수행한 결과를 볼 때, 본 연구지역에서의 PPV공법 영향반경은 3.0 m 이내로 설정하는 것이 타당할 것으로 판단되어 3.0 m 이내 구간의 정화효율을 대조군과의 비교대상으로 하였다. 이렇게 하여 비교하였을 경우 분석기관 A의 경우 PPV공법이 대조군 대비 149.0%까지 상대적인 정화효율을 나타내는 것으로 분석되었다. 또한 분석기관 B의 경우 음의 정화효율을 나타내기 때문에 PPV공법의 정화효율은 무한대가 된다.

TPH 평균농도 저감율에 따른 정화효율 평가

TPH 평균농도를 기준으로 초기 오염농도 대비 정화효율을 분석하였다. 대조군을 볼 때, 분석기관 A에서는 주입정에서의 반경 1 m 이내 구간의 경우, 초기 평균농도 191 mg/kg에서 58일이 경과된 후 141 mg/kg까지 저감되어 26.0%의 오염 저감율을 나타내는 것으로 분석되었다. 1.1~2.0 m 구간에서는 135 mg/kg에서 67 mg/kg로 50.5% 저감되는 것으로 나타나 분석기관 A의 정화후 58일 경과후 평균 저감율은 38.2%로 평가되었다.

분석기관 B는 반경 1.0 m 이내 구간의 경우, 최초 131 mg/kg에서 80일 후 315 mg/kg, 1.1~2.0 m 구간에서는 최초 95 mg/kg에서 58일후 227 mg/kg, 2.1~3.0 m 구간에서는 최초 102 mg/kg에서 80일 후 336 mg/kg으로 오염도가 138.4~228.9% (저감율 -1,138.4~-228.9%)까지 증가하는 양상을 보이고 있다(Table 6, Fig. 9).

Table 6. TPH reduction rate for change in average TPH concentration by injection radius

Index	Injection radius	Average TPH concentration (mg/kg)				TPH reduction (%)		
		1st (14 day)	2nd (37 day)	3rd (58 day)	4th (80 day)			
Control	≤ 1.0 m	191	166	141	-	26.0		
	1.1~2.0 m	135	117	67	-	50.5	38.2	
	2.1~3.0 m	88	-	-	-	-		
Agency A	≤ 1.0 m	1,088	879	425	-	60.9		
	PPV method	1.1~2.0 m	1,824	1,047	321	-	82.4	70.7
		2.1~3.0 m	-	2,383	746	-	68.7	
		3.1~4.0 m	-	1,617	1,581	-	2.2	2.2
Control	≤ 1.0 m	131	143	184	315	-139.5		
	1.1~2.0 m	95	64	227	-	-138.4	-168.9	
	2.1~3.0 m	102	-	-	336	-228.9		
Agency B	≤ 1.0 m	780	922	404	362	53.6		
	PPV method	1.1~2.0 m	3,841	997	645	327	91.5	78.3
		2.1~3.0 m	2,908	1,968	713	294	89.9	
		3.1~4.0 m	-	1,534	981	184	88.0	88.0

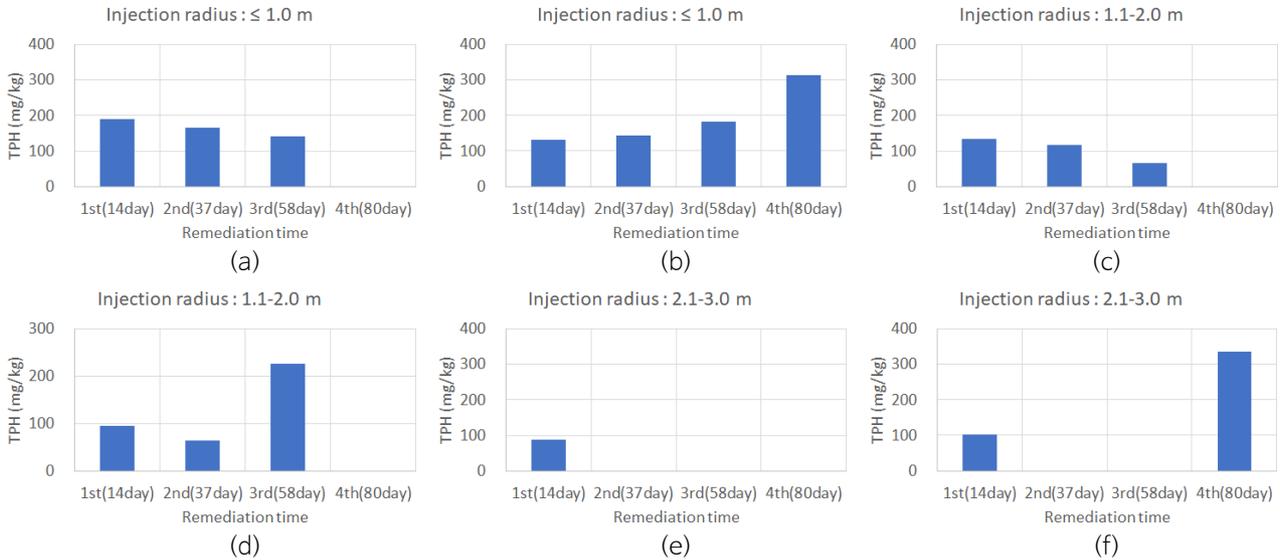


Fig. 9. Change in average TPH concentration during soil remediation using the control method: (a), (c), (e) Agency A; (b), (d), (f) Agency B.

대조군을 대상으로 2개 분석기관 결과를 종합해 볼 때, 정화과정에서의 강우에 의한 지하수위 변화로 인한 오염도의 변동가능성을 배제할 수는 없다. 그러나 장시간인 80일간의 정화기간 동안 뚜렷한 저감양상이 확인되지 않는 것은 기존공법인 화학적산화공법에서의 정화제 이동이 투수성이 양호한 사질지반에 편중되고 오염도가 집중되는 세립토사 분포지역에서는 실질적인 효과가 발생하지 않음에 기인한 것으로 보인다.

실험군(PPV) 결과를 볼 때, 분석기관 A에서는 반경 1.0 m 이내 구간의 경우, 최초 1,088 mg/kg에서 58일 후 425 mg/kg, 1.1~2.0 m 구간에서는 최초 1,824 mg/kg에서 58일후 321 mg/kg, 2.1~3.0 m 구간에서는 37일후 2,383 mg/kg에서 58일 후 746 mg/kg, 3.1~4.0 m 구간에서는 37일 후 1,617 mg/kg에서 58일 후 1,581 mg/kg으로 평가되어 실질적인 정화효과가 낮은 3.1~4.0 m를 제외하면 60.9~82.4%의 정화효과를 나타내고 있다.

분석기관 B는 반경 1.0 m 이내 구간의 경우, 최초 780 mg/kg에서 80일 후 362 mg/kg, 1.1~2.0 m 구간에서는 최초 3,841 mg/kg에서 80일후 327 mg/kg, 2.1~3.0 m 구간에서는 최초 2,908 mg/kg에서 80일 후 294 mg/kg, 3.1~4.0 m 구간에서는 1,534 mg/kg (37일 후)에서 80일 후 184 mg/kg으로 53.6~91.5%의 정화효과를 나타내고 있다(Table 6, Fig 10). 실험군의 정화효과는 구간마다 다르지만 최고농도 평가와 마찬가지로 2차(37일) 이후에는 뚜렷이 개선되는 효과를 보이고 있음이 확인된다.

최고 농도 평가에서와 같이 영향반경 3 m를 기준으로 대조군과 군의 정화효율을 비교하면 분석기관 A의 경우 PPV공법이 대조군 대비 184.8%까지 상대적인 정화효율을 나타내는 것으로 분석되었다. 또한 분석기관 B의 경우 음의 정화효율을 나타내기 때문에 PPV공법의 정화효율은 무한대가 된다.

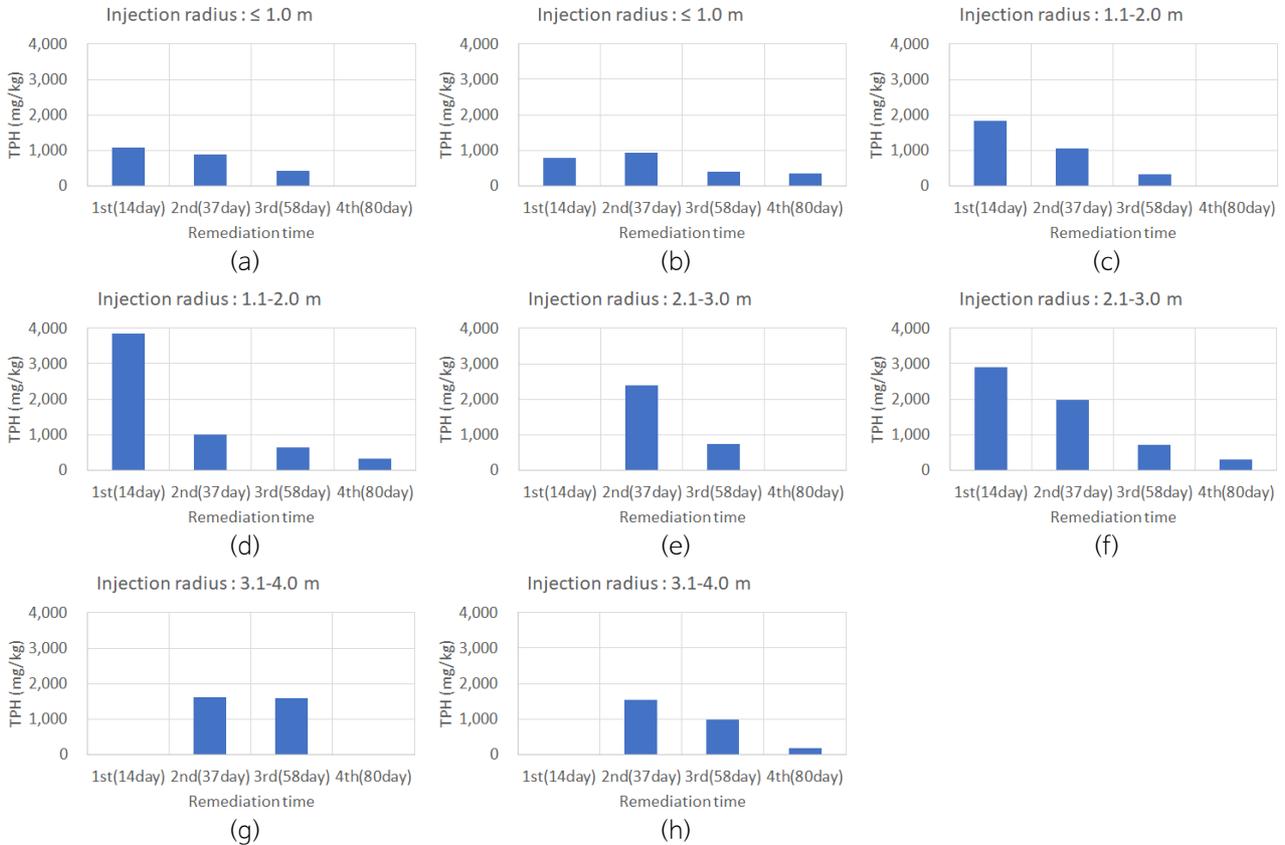


Fig. 10. Change in average TPH concentration during soil remediation using the PPV method: (a), (c), (e), (g) Agency A; (b), (d), (f), (h) Agency B.

대조군(화학적산화공법) 대비 실험군(PPV공법)의 정화효과 분석

앞서 분석한 주입점으로부터의 거리, 시간별 TPH 최대 및 평균 오염농도의 변화를 토대로 약 80일 동안 진행된 실험군과 대조군의 정화효율을 평가하였다. 평가결과, 초기 농도 저감율이 PPV공법은 대조군 대비 149.0% (최대농도 기준)~184.8% (평균농도 기준)의 정화효과가 상승하는 것으로 평가할 수 있으며 평균 약 167% 상승률을 보인다. 그러나 이와 같은 분석은 본 연구지역에서의 평가는 가능하나 대조군의 정화효율이 높은 경우 실험군의 정화효율 증대효과를 기대하기 어렵고 분석기관 B에서와 같이 대조군의 오염도가 가중되는 경우 정화가 무한대로 평가될 수 있는 문제점이 있어 실질적인 비교자료로 접목하기는 어려운 측면이 있다.

이를 보완하기 위하여 연구지역의 정화시험 시작후부터 운영이 완료된 80일까지의 오염도 분석결과를 바탕으로 정화효과를 검토하였다. 전체 데이터를 그래프에 모두 도시하면 대조군은 오염도가 상승하는 경향을 나타내며, PPV는 오염도가 뚜렷이 저감되는 양상을 나타내 상호 비교가 불가능하다(Fig. 11).

따라서, 총 4차(정화 시작 후 14일, 37일, 58일, 80일)의 분석결과 중에서 전 차수의 최대 농도보다 다음 차수에서 큰 농도값을 보이는 지점은 분석의 신뢰성을 높이기 위하여 검토에서 제외하였다(Fig. 12). 제외된 지점은 대조군의 경우 총 12개 지점(2차 3,893 mg/kg, 3차 356 mg/kg, 401 mg/kg, 613 mg/kg, 4차 8개 지점(177~567 mg/kg))이며, 실험군(PPV)은 1개 지점(2차 9,213 mg/kg)이다. 대조군에서 제외되는 지점이 많은 것은 그만큼 실질적인 정화가 이루어지지 않았기 때문이다.

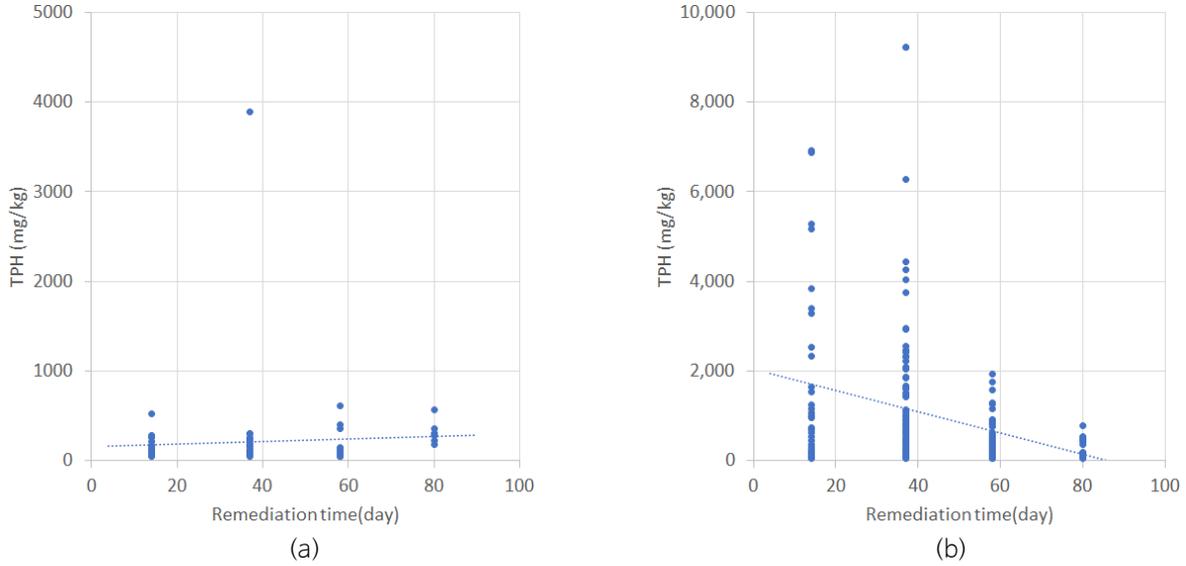


Fig. 11. TPH concentration distribution during the soil remediation period (total data): (a) control and (b) PPV method.

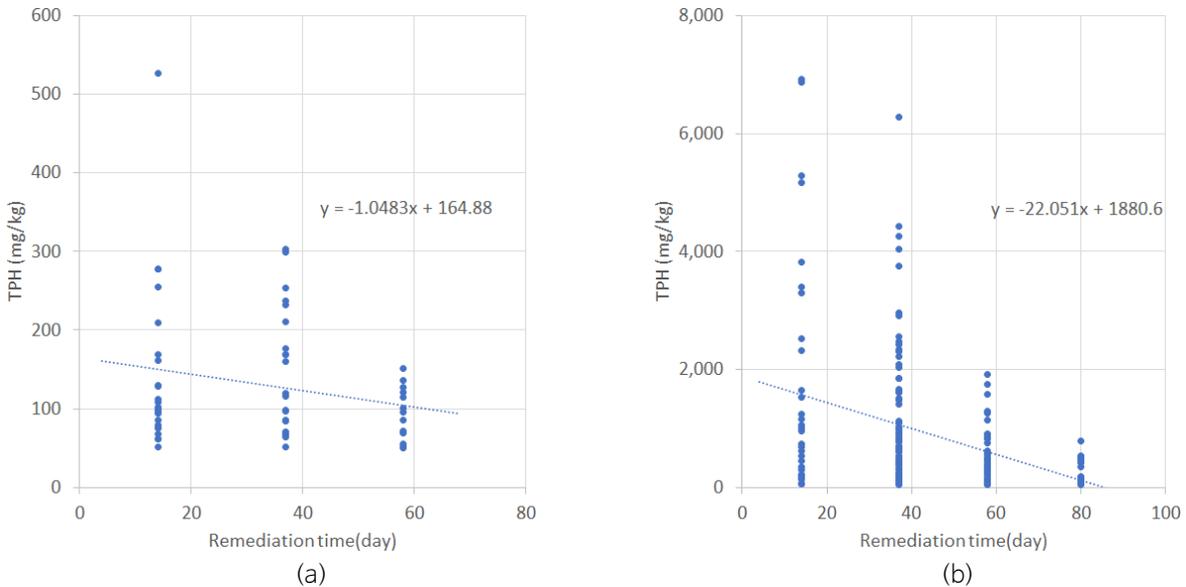


Fig. 12. TPH concentration distribution during the soil remediation period (selected data): (a) control and (b) PPV method.

시간경과에 대한 TPH 농도를 분석을 통해 상관관계식을 도출하고 이를 활용하여 최초 농도 대비 80% 저감기간을 평가한 후 대조군과 실험군간이 상대적 효과를 분석하였다. 분석결과 PPV공법을 적용한 실험군은 68.2일이 소요되는 것으로 평가되었으며 화학적산화공법을 적용한 대조군은 125.8일이 소요되는 것으로 분석되었다. 즉, 본 연구지역에서 PPV 공법을 적용하는 경우 화학적산화공법 적용시보다 약 1.84배의 정화시간 단축이 가능할 것으로 평가된다(Table 7).

지금까지의 분석결과와는 별도로 본 연구부지에서 대조군은 실트질을 포함한 세립질 지반에서의 실질적인 정화(오염도 저감)가 이루어지지 않음을 확인할 수 있었으며, PPV공법을 적용한 실험군의 경우 시간경과에 따라 매우 양호한 정화 특성을 보이는 것을 보여 기존 공법 대비 개선내용이 뚜렷이 확인되는 성과를 얻었다.

Table 7. Evaluation of 80% contamination reduction at the research site through correlation between the control and the PPV method

Index	Relational expression	Time for 80% soil remediation (day)	Improvement rate compared with the control (%)
Control	$TPH (mg/kg) = -1.0483 \times RT + 164.88$	125.8	-
PPV method	$TPH (mg/kg) = -22.051 \times RT + 1,880.6$	68.2	184.4

결론

본 연구는 오염토양 내에 점토와 같은 세립질 또는 유기물을 다량으로 함유하거나 고화된 지층을 대상으로 지층 처리 (in-situ) 정화를 진행하는 경우, 정화효율이 떨어져 정화비용이 증대하는 등의 한계가 발생하기에 이러한 적용성이 떨어지는 오염부지를 대상으로 공압파쇄, 진공추출, 플라즈마 블라스팅 등의 기술을 접목하여 개선하는 연구를 수행하여 대조군(화학적산화공법)과 동일한 정화시간을 주고 모니터링한 결과는 다음과 같다. 오염도 분석은 토양오염조사기관에서 수행하였으며 신뢰성 확보를 위해 2개기관(분석기관 A, B)에서 진행하였다.

- (1) 토양오염분석결과, 화학적산화공법은 지층에서 정화제 전달효과가 불량하여 오염도의 감소 또는 증가 등의 경향성을 보이지 않는 반면 PPV공법 적용에서는 분석기관 A의 분석결과, TPH 평균농도가 1,333 mg/kg (1차), 1,565 mg/kg (2차), 508 mg/kg (3차)의, 분석기관 B는 1,599 mg/kg (1차), 1,176 mg/kg (2차), 570 mg/kg (3차), 314 mg/kg (4차)로 확인되어 2차에서 상대적으로 높게 증가된 후 3차와 4차시료에서는 뚜렷한 오염도 감소효과가 나타난다.
- (2) 주입정으로부터 거리별 TPH 최고농도 저감율에 따른 정화효율 평가시 대조군은 경향성이 없으나 PPV공법은 분석기관 A, B에서 각각 주입정 반경 1 m 이내 62.6%, 76.8% 저감, 1.1~2.0 m는 92.0%, 91.0% 저감, 2.1~3.0 m는 85.6%, 92.1% 저감되는 정화효과가 확인된다.
- (3) 주입정으로부터 거리별 TPH 평균농도 저감율에 따른 정화효율 평가시 대조군은 마찬가지로 경향성이 없으나 PPV공법은 분석기관 A, B에서 각각 주입정 반경 1 m 이내 60.9%, 53.6% 저감, 1.1~2.0 m는 82.4%, 89.9% 저감, 2.1~3.0 m는 68.7%, 89.9% 저감되는 정화효과가 확인된다.
- (4) TPH 최대 및 평균 오염농도의 변화를 토대로 실험군과 대조군의 정화효율을 평가한 결과, 평가결과, 초기 농도 저감율이 PPV공법은 대조군 대비 149.0% (최대농도 기준)~184.8% (평균농도 기준)의 정화효과가 상승하는 것으로 평가할 수 있으며 평균 약 167% 상승률을 보인다. 그러나 지층의 불균질성과 동일 조건 및 오염농도를 가지지 못하는 부지 특성으로 인하여 오염도가 가중되는 경우 정화가 무한대로 평가될 수 있는 문제점이 있어 실질적인 비교자료로 접목하기는 어려운 측면이 있다. 또한 해당결과는 단일 부체에 대한 결과로 추후 추가적인 연구를 통해서 다른 부지에서도 정화효과를 확인할 필요성이 있다.

사사

본 연구는 지중환경 오염·위해 관리기술개발사업의 일환으로 한국환경산업기술원의 지원을 받아 수행된 연구사업(과제번호: 2020002480010)과 2022년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No. 2019R1A6A1A03033167)입니다. 이에 깊은 감사를 드립니다.

References

- Chae, J.O., Jeong, Y.J., Shmelev, V.M., Denicaev, A.A., Poutchkov, V.M., Ravi, V., 2006, Plasma discharge initiation of explosives in rock blasting application: A case study, *Journal of Mechanical Science and Technology*, 8, 443-446.
- Chen, W., Maurel, O., Reess, T., Ferron, A., La Borderie, C., Pijaudier-Cabot, G., Rey-Bethbeder, F., 2012, Experimental study on an alternative oil stimulation technique for tight gas reservoirs based on dynamic shock waves generated by pulsed arc electrohydraulic discharges, *Plasma Science and Technology*, 88, 67-74.
- Han, J.S., 1998, Groundwater environment and pollution, 239-240 (in Korean).
- Hwang, S.I., Moon, H.J., Ki, B.M., Yoon, S.J., 2014, A study on promotion of recycling of cleaned soil and improvement of management system on off-site remediation, *Korea Environment Institute*, 17(254), 136p (in Korean with English abstract).
- Jang, H.S., Kim, K.J., Song, J.Y., An, S.G., Jang, B.A., 2020, An experimental study to improve permeability and cleaning efficiency of oil contaminated soil by plasma blasting, *The Journal of Engineering Geology*, 30(4), 557-575 (in Korean with English abstract).
- Kim, J.H., 2009, Contaminated Soil Remediation Design: Focusing on the application cases of large-scale oil-contaminated soil remediation sites, *Journal of the Korean Geo-Environmental Society*, 10(2), 17-24 (in Korean with English abstract).
- Lee, G.C., Song, J.Y., Kang, C.W., Jang, H.C., Jang, B.A., Park, Y.C., 2022, Improvement of fluid transfer using pneumatic fracturing, plasma blasting, and vacuum suction, *The Journal of Engineering Geology*, 32(1), 127-142.
- Lee, K.W., Park, C.W., Synn, J.H., Ryu, C.H., 1997, Analysis of energy and ground vibration of plasma blasting, *Tunnel and Underground Space*, 7, 267-273 (in Korean with English abstract).
- Ministry of Environment, 2007, Guidelines for cleaning contaminated soil, 11-1480000-000841-01, 2-61 (in Korean).
- Ministry of Environment, 2011, Development of enhanced in-situ remediation technology using pneumatic fracturing, TRKO201800000388, 153p (in Korean).
- Riu, H., Jang, H.S., Lee, B., Wu, C., Jang, B.A., 2019, Laboratory-scale fracturing of cement and rock specimen by plasma blasting, *Episodes*, 42, 213-223.
- U.S. EPA (Environmental Protection Agency), 1995, In situ remediation technology status report: Hydraulic and pneumatic fracturing, Washington DC, EPA542-K-94-005, 16-17.