

Technical Article

TPH와 6가 크롬으로 오염된 지하수 처리를 위한 실내 실험

이규범 · 장윤영
광운대학교 환경공학과Treatability Study on the Remediation Groundwater Contaminated
by TPH Cr⁶⁺ : Lab-Scale Experiment

Gyu-Beom Lee · Yoon-Young Chang

Department of Environmental Engineering, Kwangwoon University

요약: 이 연구의 목적은 TPH 또는 Cr⁶⁺이 함유된 오염 지하수의 처리 가능성을 평가하는 데 있다. 오일과 물의 분리, 용존 공기 부유 (DAF), 응고 및 침전, 모래와 활성탄으로 각각 여과를 위한 실험실 규모 테스트가 수행되었다. 총 40 분간의 분리 시간 동안 오일과 물의 분리 시험을 2 회 실시한 결과 TPH 제거율은 90.2 %였다. 높은 농도의 TPH 샘플에 대한 DAF 테스트의 경우, TPH 제거율은 미세 기포 크기의 변화에 따라 크게 변하지 않았다. 그러나 낮은 TPH 샘플에 대한 테스트는 미세 기포가 작을수록 TPH 제거율이 증가함을 보여준다. DAF 테스트를 위해 응집제를 샘플에 첨가했을 때 TPH 제거율은 12.3 % 증가했다. DAF에 의한 SS 제거율은 16 ~ 40 μ m에서 97.9 %였으며 미세 기포의 크기가 감소함에 따라 증가했다. 지하수에서 Cr⁶⁺의 제거를 평가하기 위해 응집 및 침전 시험을 수행했다. FeSO₄ 투여량을 증가하였을 때 응집 및 침전 공정에서 Cr⁶⁺ 제거율이 증가하였다. 필터 매체에서 활성탄의 비율이 높을수록 여과 공정에서 TPH 제거율이 증가한다. 여과에 의한 SS 제거율은 DAF 공정 시험 결과와 비슷한 96.7 %였다. 여과 과정은 TPH와 SS 농도가 감소하였다. 모래의 크기가 425 ~ 850 μ m이고 활성탄과 모래의 비율이 50:50일 때 최적의 처리효율을 나타냈다.

주요어: 유수 분리, 용존 공기 부상, 응집 및 침전, 여과

Abstract: The purpose of the study is to evaluate the treatability of contaminated groundwater with TPH and (or) Cr⁶⁺. Laboratory scale tests were performed for oil/water separation, dissolved air flotation (DAF), coagulation and precipitation, and filtration with sand and activated carbon respectively. Two times of oil/water separation tests for total 40 minutes of separation or separating time shows 90.2 % of TPH removal rate. In case of DAF test for high TPH sample, the TPH removal rates were not varied significantly by the variation of microbubble size. However, tests for low TPH samples show that TPH removal rate increases as microbubbles are smaller. When coagulant was added to sample for DAF test, TPH removal rate was increased 12.3 %. SS removal rate by DAF was

First Author: Gyu-Beom Lee, Tel: +82-02-940-5496, E-mail: knrlec7788@gmail.com, ORCID : 0000-0002-3021-0362

Corresponding Author: Yoon-Young Chang, Tel: +82-02-940-5496, E-mail: yychang@kw.ac.kr

Received: 22 May, 2019. Revised: 31 May, 2019. Accepted: 7 June, 2019.

www.kci.go.kr

97.9 % at 16-40 μm and it was increased as the size of microbubble is reduced. Tests for coagulation and precipitation were performed to evaluate the removal of Cr^{6+} in groundwater. The increase of FeSO_4 dosage increased Cr^{6+} removal rate in the coagulation and precipitation process. As the amount of activated carbon in the filter media increased TPH removal rate in the filtration process. SS removal rate by the filtration was 96.7 % similar to the results of DAF process tests. The filtration process treats TPH and SS. Best design parameters are determined as the size of sand is 425-850 μm and the ratio of activated carbon and sand is 50:50.

Keywords : Oil water separation, Dissolved air floater, Coagulation and sedimentation, filtration

I. 서론

우리나라는 인구 증가 및 산업발달로 인해 폐기물 발생량 및 화학물질, 유류 등의 사용량이 증가하고 있다. 따라서 유류 오염이 토양 및 지하수의 가장 일반적인 오염 원인으로 나타나고 있다. 토양 및 지하수 오염문제는 대기나 수질오염과 비교하여 지하에서 발생하는 오염이므로 직접 눈으로 확인하기 어렵고, 지하 매질의 분포가 불규칙하여 오염 범위와 정도를 판단하기가 쉽지 않을 뿐만 아니라 일단 오염된 지하수의 정화는 물리적, 기술적, 경제적으로 매우 어렵다.

국내·외적으로 유류 및 중금속으로 오염된 지하수에 대한 관심과 규제가 증대되어 오염된 지하수를 복원하기 위한 여러 가지 복원방법이 개발되어 현장에 적용되고 있다. 국내에서는 군부대 오염부지, 철도부지 및 정유사 유류저장시설 부지 등에서 오염정화사업이 수행되었고 대부분 지하수 정화는 토양정화의 부수 공정으로 수행되어 왔다. 그러나 국내에서도 지하수 오염에 대한 다양한 연구와 보고가 지속적으로 이루어지고 있다(Lee et al, 2001; Cheon & Lee 2004; Chang & Kim 2006).

지하수오염은 토양오염과 매우 밀접하며 크게 중금속 오염과 유류 오염으로 구분할 수 있다. 중금속 오염은 특히 산업단지에서 각종 약품과 금속 연마 및 제련 과정에서 발생하는 폐금속 성분 및 각종 기계 부품 성형·주물시 누출되는 물질들이 주요 오염물질로 분류될 수 있다. 석유계총탄화수소(Total Petroleum Hydrocarbon, TPH)오염으로 대변되는 유류오염은 휘발유, 경유 등 연료로 사용되는 유류의

운송, 보관 및 취급과정에서 발생하는 누유 및 누출, 각종 기계에 사용되는 윤활유가 주된 오염원이다.

최근의 산업단지, 철도부지 등의 지하수 오염조사 결과를 보면 TPH와 6가크롬(Hexavalent chromium, Cr^{6+}) 등이 수질기준을 초과하는 것으로 보고되는 사례들을 찾을 수 있다.

TPH의 경우 지하수의 수질보전 등에 관한 규칙에 따른 지하수 정화기준이 1.5 mg/L이고 6가 크롬의 경우 동규칙 제7조 별표4(2009)의 생활용수 기준인 0.05 mg/L를 정화기준을 적용하고 있어 이를 오염지하수 처리목표로 고려하여야 한다. 또한 토양 및 지하수 오염 지역에서 양수된 오염지하수에는 미세토 등의 부유물질(Suspended Solid, SS)이 다량 함유되어 있어 부유물질의 처리도 함께 고려해야 한다.

국내·외에서 TPH와 중금속으로 오염된 지하수의 다양한 정화방법에 대한 연구가 지속적으로 이루어지고 있다. 3가 비소와 폐놀로 오염된 지하수 처리를 위하여 망간점착 활성탄을 이용한 연구를 통하여 활성탄에 망간을 점착시킴으로서 복합오염물을 갖는 폐수의 동시처리에 적용될 수 있음을 확인되었다(Yu et al, 2008). 3가 비소, 2가 망간, 2가 철의 각각의 오염수에 대해서 산화망간 코팅 모래와 산화철 코팅 모래를 여과재로 이용한 산화와 흡착 연구로 PO_4^{3-} 를 이온세기 화학종으로 사용한 경우가 다른 이온세기 화학종이 존재하는 경우에서 보다 오히려 3가 비소 산화력이 높게 나타났는데 이것은 PO_4^{3-} 가 5가 비소와 산화망간 코팅사 표면에 대한 경쟁흡착을 함에 따른 결과로 확인되었다(Chang & Yang 2006; Lee & Chang, 2010; Lee et al 2010). TPH와 SS로

Table 1. Evaluation parameters of selected treatment processes

| | Oil water separation | Dissolved air floater | Coagulation and sedimentation | Filtration |
|--------|--------------------------------------|---|--|--|
| Method | Physical | | Chemical | Physical · Chemical |
| Factor | Contaminant weight Residence time | Size, quantity, residence time of micro-bubble | pH Amount of reducing agent Species, amount, and residence time of coagulants | Species and size of media Flow rate Residence time |
| Target | LNAPL | SS/Colloid | Cr ⁶⁺ | SS |

* LNAPL : Light non-aqueous phase liquid, SS : Suspended solid.

오염된 지하수를 가압부상과 응집을 이용하여 처리하는 연구를 수행하였다. 오염된 지하수에 함유된 중금속을 벤토나이트로 흡착제거하는 연구로 벤토나이트가 중금속 흡착에 가장 적합한 점토광물임을 확인하였으며(Jeong & Jeong 2000), 최근에는 유류로 오염된 유류오염 지하수 정화를 위한 양수처리법의 현장 적용성과 효율도 우수한 것으로 조사되었다(Jo et al. 2014; Kim et al. 2014).

최근까지 대부분의 연구가 유류 또는 중금속 단일로 오염된 지하수에 대해 주로 이루어 졌으나, 철도 지역에서 확인된 바와 같이 산업화된 지역의 지하수 오염은 유류와 중금속으로 동시에 오염되는 경우가 많아 유류오염과 중금속오염을 하나의 공정에서 연속으로 처리할 수 있는 공정의 개발이 필요한 상황이다. 본 연구에서는 TPH와 6가 크롬으로 오염된 지하수의 적절한 처리를 위해 적용 공정의 효율검증 및 적합한 설계인자를 도출하기 위한 실험실 규모의 실험(Lab Scale Test)을 수행하였다. 구체적으로 유수 분리, 가압부상, 응집·침전 및 모래·활성탄 여과 등 오염지하수 처리에 사용하는 주요 공법들의 오염도 저감 효율을 평가하였다.

1. 처리시험 및 공정

1. 처리시험 및 공정

오염된 지하수 정화를 위해 가장 전통적이고 보편적으로 사용되는 기본 공정은 Figure 1과 같으며, 주요 지하수 처리 공정으로는 ① 유수분리, ② 가압부상, ③ 응집·침전, ④ 모래·활성탄 여과이다.

유수분리의 가장 일반적인 원리는 비중이 1보다 낮은 유류를 수면으로 부상시켜 걷어내는 방법을 말한다. 일반적으로 부유된 기름을 제거하는 방법은 오일 스키머라고 불리는 유수분리장치를 사용하며, 본 장치에는 벨트, 디스크, 필터 등이 부착되어 있어 점성이 있는 유류를 흡착하게 된다.

가압부상을 이용한 부유물질 및 콜로이드제거의

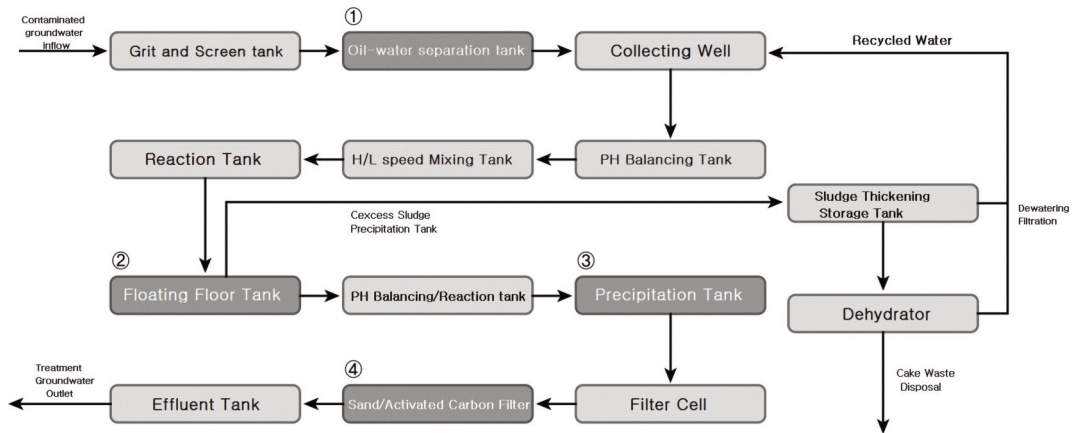
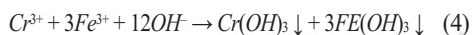
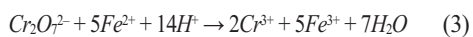
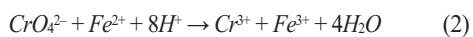


Figure 1. Proposed flow diagram of ground water treatment facility.

원리는 다음과 같다. 기체의 물에 대한 용해도는 압력을 가할수록 증가하게 되어 기체를 과포화 상태로 만들 수 있다. 이러한 원리로 물의 압력을 증가시켜 공기 또는 공기 중의 산소를 포화이상으로 용해시킨 후 대기 중으로 개방하면 수중에 용해되어 있는 공기는 다수의 미세한 기포(100 μm 이하)가 되어 상승하게 된다. 이때 물속의 부유물질 주위에 미세기포가 부착되어 부유물질의 비중을 감소시켜 부유물질이 물위로 떠오르게 되는데 이를 바탕으로 수중의 오염물질을 제거하는 방식이다. 용존공기 부상시스템에서 미세기포 크기의 측정에 따르면 미세기포는 일반적으로 10~120 μm 에서 일정한 크기를 가진다. 가장 적당한 기포의 평균크기는 40 μm (Edzwald 1995)부터 60 μm (Fukushi 1995)로 추정된다. 기포의 크기는 압력차와 노즐의 형상에 따라 변화한다. 일반적으로 미세한 기포를 만들기 위해서는 압력의 차이가 400~600 kPa(대략 4~6 atm)이면 적당하다.

화학적 침전법은 지하수에 암모니아수 또는 소석회 등 다량의 알칼리를 가하여 용액의 pH를 10이상 올리면 중금속 이온이 수산화물 형태로 침전되고 이를 분리하여 처리할 수 있다. 용해성 크롬은 입자상 크롬보다 훨씬 독성이 크다(Mearus et al, 1976). 용해성 크롬은 수용액상에서 2가, 3가, 6가의 형태로 다양하게 존재한다. 하지만 일반적으로는 Cr^{3+} 및 Cr^{6+} 이 존재하게 된다. Cr^{3+} 의 경우에는 다양한 pH 영역에서 존재하지만 6가크롬의 경우에는 산화조건에서만 존재하며 pH에 따라 수용액상에서 다양한 형태로 존재한다. 따라서 6가크롬을 포함한 오염수의 경우에는 먼저 Cr^{3+} 의 형태로 환원(식 1, 2, 3)시킨 후 소석회 등을 첨가하여 침전시킨다(식 4). 이러한 공정을 환원-침전공정이라고 한다. 일반적으로 크롬 폐수에 사용되는 환원제는 황산제1철, 황산나트륨 등이 있다. 크롬의 환원은 산성 pH에서 효과적이기 때문에, 산성특성을 가진 환원제가 필요하다.



콜로이드 크기의 입자들은 집합작용을 방해하는 성질을 갖고 있다. 따라서 콜로이드를 화학적으로 응집시켜 중력침강에 의하여 제거될 수 있는 크기로 만드는 것이 응집 침전이다. 응집제 중 무기계 알루미늄 응집제로 사용하고 있는 것은 황산알루미늄(Aluminium Sulfate, $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$), 폴리염화알루미늄(Poly Aluminium Chloride, $(\text{Al}_n(\text{OH})_m\text{Cl}_{3m-n})_x$) 등의 알루미늄염($\text{Al}(\text{OH})_3$)이다. 황산알루미늄은 콜로이드의 경우 효율적이다. 고탁도, 저수온 등에는 응집보조제를 병용하면 처리효과가 상승된다. 액체 황산알루미늄은 겨울에 산화알루미늄의 농도가 높으면 결정이 석출하여 송액관을 막히게 하는 경우가 있으므로 사용농도에 주의하여야 한다. 폴리염화알루미늄은 액체로써 그 자체가 가수분해로 중합되어 있으므로, 일반적으로 황산알루미늄보다 응집성이 우수하고 적정주입률의 범위가 넓으며, 알칼리도의 저감이 적은 특징 등이 있다. 최근에는 처리가 쉬워서 소규모 시설과 한냉지 수도에서도 상시 사용하는 곳이 많다. 처리 효율을 높이고 경제적인 면을 고려해보면, 평상시에는 황산알루미늄을 사용하고 고탁도, 저수온인 경우에는 폴리염화알루미늄을 사용한다.

모래 및 활성탄을 사용한 여과는 일반적으로 원수의 여과가 아닌 화학·생물학적 처리수의 침전처리 후 후단에 설치하거나 정수(순수) 처리의 전처리로 실시한다. 본 공정은 정수 및 각종 폐수의 정화에 필수적인 장치이나 잦은 막힘 현상으로 역세척이 필요하며 수질변동에 따라 처리수의 수질이 변한다는 단점이 있다. 주로 부유물질(SS), 저농도 탁도, 콜로이드성 물질, 일부 박테리아를 제거하는데 효과적이며 사용되는 여재, 가압속도/압력, 여과방식에 따라 처리효율이 달라진다. 여재는 주로 모래 또는 활성탄을 단일 여재, 이중 여재 또는 적절한 비율로 섞은 복합 여재로 사용할 수 있으며, 압력은 1.5~3.0 kg/cm^2 정도이고, 갈럼에 작용하는 유속은 하향흐름(Down-Flow)의 경우 5~50 m^3/hr , 상향흐름(Up-Flow)의 경우는 30~50 m^3/hr 로 현장에서 사용하게 된다.

하향흐름(Down-Flow)의 경우 초기 유속이 일정하지 않아 균일한 처리효율을 얻기까지 시간이 소요되지만 동력비가 적게 든다는 장점이 있으며, 상향흐

름(Up-Flow)의 경우에는 유량조절이 쉽고 처리효율이 일정하다는 장점이 있어서 현장조건에 맞게 설계해야 한다.

2. 오염지하수 처리 영향인자 및 효율평가 항목 선정

처리공정에 영향을 미치는 주요 인자를 Table 1과 같이 선정하여 본 연구에서 평가하였다. 물보다 비중이 작고 물에 대한 용해도가 낮은 유류는 유수분리를 통해 상당부분 제거될 수 있으며 가압부상방법은 부유물질, 콜로이드성 물질, 용존되어 있는 유류성분(TPH, n-Hexane 등)을 제거하는데 탁월한 효과를 나타낸다. 또한 화학적 처리공정인 pH 조절 및 응집·침전 공정은 용존된 중금속(본 실험에서는 6가크롬)을 제거하는데 효과적이며 모래 및 활성탄을 이용한 여과는 부유물질의 처리에 효과적일 것으로 판단된다.

II. 연구방법

1. 실험대상지하수 및 실험재료

실험에 사용한 지하수는 공정의 최적조건 도출을 위해 현장 지하수 시료를 이용하였다. 지하수 대표 시료 3가지에 대해서 이화학적 분석을 우선 실시한 결과 TPH 및 부유물질만이 검출되었고 그 외 오염물질이 검출되지 않았다. 따라서, 중금속 오염에 대한 처리효율 평가를 위해 위에서 준비한 지하수에 6가크롬을 인위적 주입하여 중금속 오염조건을 형성하였다.

실험에 사용한 시약은 황산알루미늄18 수화물(Aluminum sulfate octadecahydrate, $Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O$, 순도 98%)은 시그마(Sigma Aldrich) 제품을 사용하였으며 추출에 사용된 노르말헥산(n-Hexane, C_6H_{14} , 순도 $\geq 95\%$) 및 염화메틸(Methyl Chloride, CH_3Cl)은 베이커(J.T.Baker) 제품을 사용하였다. 6가 크롬의 환원시 사용되는 황산제일철7수화물(Iron Sulfate Heptahydrate, $FeSO_4 \cdot 7H_2O$ 순도 99%)은 대정(DAEJUNG)사의 제품을 사용하였으며, 6가 크롬 표준용액은 쇼와(Showa)사의 1,000 ppm 중크롬산칼륨(Potassium Dichromate, $K_2Cr_2O_7$)을 사용하였다. 모래는 주문진사를 사용하였으며 모래의 최대입경은 2 mm로 사용하였다. 활성탄은 (주)삼천리카보텍에서 구입한 식물성입상활성탄 및 분말 활성탄을 사용하였다. TPH 표준용액은 레스텍(Restek)사에서 구입하였으며, 염화메틸렌에서 안정화된 경유(Diesel fuel #2) 표준으로 농도 5,000 mg/L를 사용하였다. 실험에 사용된 증류수는 정제된 3차 초순수를 사용하였다.

2. 실내 실험

1) 유수분리

유수분리 실험에 사용된 오염 지하수의 TPH 농도를 균일하게 유지하기 위하여 오버헤드 스티러(Overhead Stirrer)로 500 rpm으로 고속으로 회전시켜 정량이송펌프로 원수통의 1/2지점에서 시료를 500 ml 채취하였다(Figure 2). 1,000 ml의 분별갈대

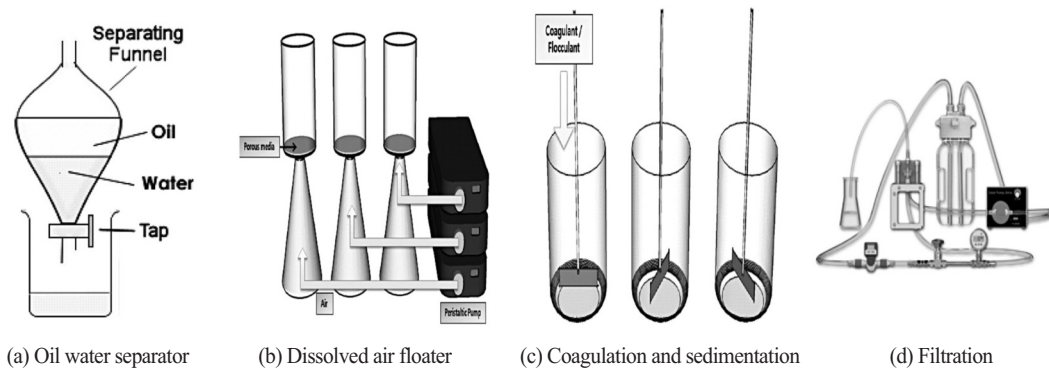


Figure 2. Methods of laboratory tests.

기에 원수 500 mL를 넣고 0, 2, 4, 6, 10, 20분에 각각 하등수에서 5 mL씩 시료를 채취하였다.

2) 가압부상

가압부상에 의한 용존 TPH, SS, 6가 크롬의 제거 효율을 알아보기 위하여 미세기포 사이즈를 변화시켜 물리적 제거 실험을 수행하였다(figure 2). 미세기포의 지름은 압력변화에 반비례하므로 높은 압력 변화에 의해 더 작은 미세기포가 발생하게 되며 이는 TPH의 제거효율에 가장 큰 영향을 미치게 된다. 따라서 가압부상의 실내실험에서 가압부상장치의 압력 조절 설계를 다공성 여재(1~100 μm)로 다양하게 조절하였다. 공기량을 일정하게 조절하기 위하여 튜브 연동식 정량이송펌프를 사용하였다. 회전속도는 100 rpm으로 고정하였다.

(1) 미세기포 사이즈에 따른 오염물질 제거효율 평가

가압부상에서 침전물(Floc)의 형성은 부유물질 및 다른 오염물질을 부상시키는데 효과가 좋다고 알려져 있다. 하지만 응집제의 첨가는 전체적인 처리비용의 증가를 초래하여 경제적이지 못하다. 따라서 본 실험에서는 최대한의 현장조건을 고려하여 우선 응집제를 첨가하지 않은 상태에서 미세기포만을 이용하여 오염물질 제거효율을 평가하였다. 다량의 TPH로 오염되어 있는 지하수 시료에 6가 크롬 표준용액을 이용하여 6가 크롬 2 mg/L로 인공오염 시켰으며, 반응기에 500 mL의 시료를 넣은 후 정량이송펌프로 반응기 하부에 있는 공기탱크에 공기를 주입하였다. 미세기포가 발생한 후 5, 15, 30, 60, 120분에 각각 샘플 5 mL를 반응기의 1/2지점에서 일정하게 채취하였다.

(2) 응집제 첨가에 따른 오염물질 제거효율 평가

미세기포를 이용한 가압부상방식 초기실험에서 SS는 원하는 수질기준에 도달하였으나 TPH의 경우 가압부상 제거 실험을 실시하였을 때 72.6%의 제거효율은 얻는데 그쳐 목표 수질기준(1.5 ppm)까지 처리하지 못하였다. 따라서 가압부상에서 응집침전물의 형성을 통해 SS 및 다른 오염물질의 부상처리 효율이 증대되는지 확인하는 실험을 추가적으로 실시

하였다. 본 실험에서는 대표적인 응집제인 황산알루미늄과 흡착제인 분말활성탄을 이용하여 실험을 실시하였다. 응집제인 황산알루미늄을 넣었을 때와 황산알루미늄과 분말활성탄을 동시에 넣었을 때 TPH의 오염제거효율을 비교하였다. 실험방법은 위와 동일한 조건에서 황산알루미늄 50 mg을 넣고 실험을 실시하였다. 또한 추가적으로 황산알루미늄 50 mg에 분말활성탄 50 mg을 추가적으로 넣었을 때 가압부상방식의 TPH의 제거효율을 추가적으로 살펴보았다.

3) 응집침전

(1) 응집제를 이용한 6가 크롬의 제거

중금속의 응집 및 침전 실험은 Figure 2와 같이 1,000 mL 유리비커에 2 ppm으로 인공 오염된 지하수를 1,000 mL를 넣고 1 M 수산화나트륨(NaOH)을 이용해 침전에 용이한 pH 8~9 영역으로 적정하여 수산화물을 형성시켰다. 10분 동안 비이커 실험(Jar Tester)의 회전속도를 150 rpm으로 일정시간 교반시킨 후 침전물을 침전시켰다. 10, 20, 30분에 각각 샘플 5 mL를 비이커의 상등수의 1/3지점에서 채취하여 6가크롬의 농도를 측정하였다.

(2) 응집제와 환원제를 동시에 이용한 6가크롬 제거

회분식 실험에서 응집제와 환원시키지 않은 6가 크롬은 응집침전방법으로 제거되지 않았다. 이에 대표적인 환원제인 황산제일철(FeSO_4)과 아황산수소나트륨(NaHSO_3) 중 황산제일철을 첨가하여 환원시킨 후 실험을 실시하였다. 위와 같은 방법으로 황산제일철을 주입하여 10분 동안 교반시킨 뒤 응집제인 황산알루미늄을 주입하여 주어진 시간에 시료를 채취하였다. 2 mg/L의 크롬을 환원시키는 최적의 황산제일철의 양을 측정하기 위하여 황산제일철을 10, 20, 30, 50 mg으로 다르게 주입한 뒤 실험을 실시하였다.

4) 모래/활성탄 여과

실험에 사용된 모래는 주문진사로 최대입경이 2mm인 것을 사용하였다. 3종류의 체를 이용하여 모

래를 입경별로 분리하였다. No.20, 40, 80의 3종류의 체를 사용하였으며 체에 남는 모래의 최소 및 최대 입경은 각각 No.20체는 850~2,000 μm , No.40체는 425~850 μm , No.80체는 250~425 μm 이다. 체거름한 모래를 증류수 및 약산으로 씻어주어 모래에 흡착되어 있을지도 모르는 부유물질 및 유기물들을 충분히 제거시켰다. 스테인레스 스틸(Stainless steel) 재질의 건조 접시에서 105 $^{\circ}\text{C}$ 의 오븐에서 하루 동안 말려주었다. 활성탄은 별도의 전처리 없이 그대로 사용하였다.

각 컬럼에 체거름한 모래를 채운 뒤 지하수에 6가 크롬 2 mg/L을 인공 오염시킨 뒤 인공오염시료를 정량이송펌프를 사용하여 20 ml/분의 속도를 유지하였다. 정량펌프로 초기유량부터 일정하게 유량이 유지되는 상황이므로 실험운영이 손쉬운 하향흐름(Top-down) 방식으로 컬럼 실험을 실시하였다. 5, 15, 30, 60, 120분에 샘플 5ml를 주사기(Syringe)로 반응기의 개봉 없이 채취하여 오염물질의 농도를 분석하였다.

모래의 컬럼실험 결과 부유물질은 여재의 공극을 통해 제거가 되었고 TPH는 모래와의 흡착을 통해 제거가 되나 오염수내 이온으로 존재하는 6가 크롬의 경우에는 전혀 제거가 되지 않았다. 6가크롬과 다른 오염물질의 동시제거를 위하여 활성탄과 모래와의 혼합하여 실험을 실시하였다. 위의 실험에서 사용된 입경이 다른 3개의 모래 중 No.40체에 걸러지는 425~850 μm 모래일 때 공극으로 침투하는 오염수의 흐름이 좋으며 또한 여과에 사용된 입상 활성탄과의 입경이 비슷하여 이 모래를 사용하여 활성탄과 3개의 부피비율로 섞어 실험을 실시하였다. 모래 및 활성탄은 비커에서 3가지의 비율은 25:75(v:v), 50:50(v:v), 75:25(v:v)로 혼합하였으며 오버헤드 스틸러(Overhead Stirrer)로 충분히 교반하여 균일하게 하였다. 오염수의 주입 및 샘플의 채취는 위의 실험과 동일하게 하였다(Figure 2).

컬럼의 재질은 유리로 유리의 재질은 50 mm이고 길이는 250 mm로 제작하였으며 컬럼내 온도를 일정하게 유지하기 위하여 자켓을 입혀 워터배스(Water Bath)의 물로 순환시켰다. 반응기 아랫부분

에는 유리섬유 5 mm를 설치하였다.

3. 측정 및 분석방법

오염지하수의 TPH의 농도를 측정하기 위하여 수질오염공정시험방법을 바탕으로 애질런트(Agilent Technologis)사의 가스 크로마토그래프(Gas chromatography, GC)를 이용하여 분석하였으며, 칼럼(Column)은 HP-5를 사용하였고, 검출기는 불꽃이온화검출기(Flame Ionization Detector, FID)로 측정하였다. 수질오염시험공정법상에 6가 크롬의 농도는 흡광광도계를 이용하여 흡광광도법으로 6가 크롬의 농도를 측정하였다. 흡광광도계는 HACH사의 DR-2800 기기를 사용하여 측정하였으며, 측정 범위는 0.003~0.7 mg/L 이며 측정파장은 540 nm로 고정하였다. SS는 수질오염공정시험법상의 유리섬유 거름종이법을 적용하였다.

III. 연구결과 및 고찰

1. 오염 지하수시료의 이화학적 특성

대표시료의 pH를 측정한 결과 충분히 교반한 시료의 pH는 7.9~8.1의 약염기성을 지니고 있으며, 침전물에서 분리된 중간층에서는 pH를 측정한 결과 6.8~7.1의 중성 범위를 나타내었다. 부유물질(SS)을 측정한 결과 최소 932.3 mg/L에서 최대 1,277.7 mg/L의 분포를 보였으며 평균 SS는 1,188.8 mg/L로 분석되었다. TPH의 분석은 유수가 분리된 하층에서 샘플을 채취하여 분석하였으며 분석된 TPH는 147.9 mg/L에서 153.6 mg/L의 분포를 보였다. 6가 크롬은 검출되지 않았으며, 결과는 Table 2와 같다.

2. 각 공정별 실험 결과

1) 유수분리

유수분리조를 이용한 실험의 TPH 제거효율을 알아보기 위해 총 2회의 실험을 실시하였으며 1차 시험과 2차 시험의 분리시간별 TPH 농도변화를 Figure 3의 (a)와 (b)에 각각 나타내었다.

1차 시험은 TPH 초기농도 204.4 mg/L의 지하수

Table 2. Chemical properties of contaminated groundwater.

| | Average | Sample #1 | Sample #2 | Sample #3 |
|-------------------------|----------|-----------|-----------|-----------|
| pH (uniform mixing) | 7.97 | 7.88~8.00 | 7.88~7.91 | 8.11~8.09 |
| pH (after separation) | 6.95 | 7.10~6.95 | 6.83~7.12 | 6.99~6.75 |
| SS (mg/L) | 1,188.84 | 1,073.17 | 1,273.17 | 1,220.17 |
| TPH (mg/L) | 162.65 | 147.87 | 186.43 | 153.64 |
| Cr ⁶⁺ (mg/L) | N.D | N.D | N.D | N.D |
| Total coliforms | N.D | N.D | N.D | N.D |

* TPH: Total petroleum hydrocarbon, N.D: Not detected

시료를 대상으로 실시하였다. 반응기에 시료를 넣은 다음 기름과 물이 분리되기 시작하여 10분이 지났을 때 78.6 mg/L까지 TPH 농도가 낮아졌으며, 20분까지 유수분리를 진행시킨 결과 TPH 농도의 변화가 거의 없는 평형상태에 이르른 것으로 판단되어 실험을 종료하였다. 1차 시험의 동력학(Kinetic) 분석결과 단순 유수분리에 의한 TPH의 물리적 제거기작은 1차반응식을 따르며 식 5와 같다. 유수분리 실험결과 C_{min}의 값은 83.2 mg/L 이고, 모델식의 초기농도 값 C₀는 204.4 mg/L이며, k값은 0.58/분으로 분석되었다.

$$C = C_{min} + (C_0 - C_{min})e^{-kt} \quad (5)$$

여기서 C는 시간 t일 때 TPH 농도(mg/L), C₀는 초기농도, C_{min}은 유수분리조에서 평형을 이루는 최저농도(mg/L), k는 속도상수(/분), t는 시간(분)이다.

유수분리조 1차 실험 후 시료의 TPH 초기농도가 높다는 판단 하에 초기농도가 1차 실험의 최종보다

낮은 2차 유수분리 실험을 실시하여 재현성을 확인하고자 하였다. 2차 유수분리 실험에서는 TPH의 초기농도를 71.95 mg/L로 유수분리 실험을 실시하였으며 20분 후 20.0 mg/L까지 TPH 농도가 낮아진 것으로 나타났다.

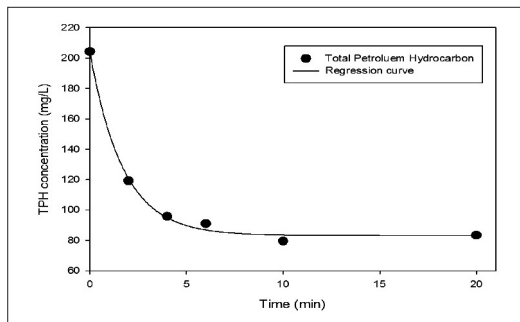
2차 유수분리 실험의 k 값은 0.17/분으로 1차에 비해 낮은 것으로 분석되었다. 초기농도 204.4 mg/L로 시작한 1차 유수분리 실험의 제거효율은 59.2%이며, 71.0 mg/L의 저농도로 실시한 2차 유수분리 실험 최종 제거농도는 20.0 mg/L로 제거효율은 71.8%로 나타났다.

1, 2차 실험의 40분간의 1, 2차 유수분리의 총 제거 효율은 90.2%로 판단된다.

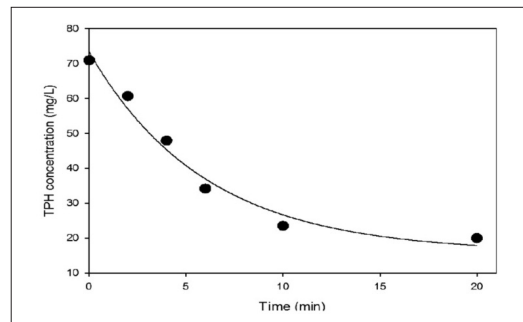
2) 가압부상조

(1) 가압부상에 의한 TPH 제거

본 실험에서는 유리섬유 미디어 사이즈로 미세기포 사이즈를 조절하였다. 1차 가압부상 실험에서는



(a) First experiment
(Initial concentration : 204.4 mg/L)



(b) Second experiment
(Initial concentration : 71.0 mg/L)

Figure 3. TPH removal results of oil water separation tests.

유리섬유 미디어 크기는 16~40 μm , 40~100 μm , 100~600 μm 의 3가지 조건에서 정량이송펌프의 회전속도는 100 rpm으로 고정하였으며 이때 발생하는 공기의 양은 80 mL/분으로 각 조건에서 일정하게 유지하였다. 1차 가압부상 실험의 결과는 Figure 4의 (a), (b), (c)와 같다. 실험에 사용된 지하수의 TPH 초기농도는 평균 751.3 mg/L로 가압부상을 시작하였으며 가압부상의 결과 평균 36.1% 제거효율을 나타내었다. 가압부상 120분 후에는 평균 TPH 482.3 mg/L의 농도로 분석되었다. 실험결과 30분 이후부터는 처리시간이 증가함에도 TPH 농도의 감소가 매우 적게 나타났다. 따라서 체류시간 30분 내외에서 체류시간 대비 최적의 처리효율을 나타내는 것으로 판단된다.

1차 실험 후 추가적으로 1~1.6 μm , 10~16 μm , 16~40 μm 의 미세기포 사이즈로 2차 가압부상 실험을 실시하였다. 시험대상 지하수의 초기 TPH 농도는 평균 132.8 mg/L이었다. 실험결과 낮은 TPH 농도일 때 가압부상의 TPH 제거효율은 미세기포 사이즈가 1~1.6 μm 및 10~16 μm 때에는 73.6%와 75.2%의 제거효율을 나타냈다(Figure 4 (d) 및 (e)).

실험군 중 가장 큰 16~40 μm 의 기포에서는 상대적으로 낮은 47.3%의 제거효율을 보였다(Figure 4 (f)).

가압부상시 응집제를 투여하는 경우에 TPH 제거효율이 증대하는 효과를 판단하기 위해서 평균 초기 농도 634.4 mg/L의 고농도 오염지하수를 처리하는 실험을 실시하였다. 실험은 16~40 μm 기포사이즈에 황산알루미늄 50 mg/L을 첨가하는 조건으로 실시하였다. 응집제를 첨가하지 않았을 때는 72.6%의 효율을 보였으나 응집제를 첨가한 실험에서는 84.9%의 제거효율을 보였다(Figure 5 (a)). 따라서 가압부상 공정을 운영 시에는 응집제를 첨가하는 것이 효율을 높이는데 도움이 되는 것으로 판단되며, 특히 폴리머와 같은 고효율의 응집제를 상황에 따라 적용한다면 보다 높은 효율을 기대할 수 있으리라 판단된다.

또한 초기 저농도(16.4 mg/L) 오염지하수에 16~40 μm 의 기포를 적용하고 분말활성탄과 황산알루미늄($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$)을 50 mg/L을 첨가하여 추가적인 실험을 실시하였다. 분말활성탄과 응집제를 동시에 넣었을 때 기포의 크기별로 처리 후 TPH 농도가 6.2~3.1 mg/L로 낮아졌다(Figure 5).

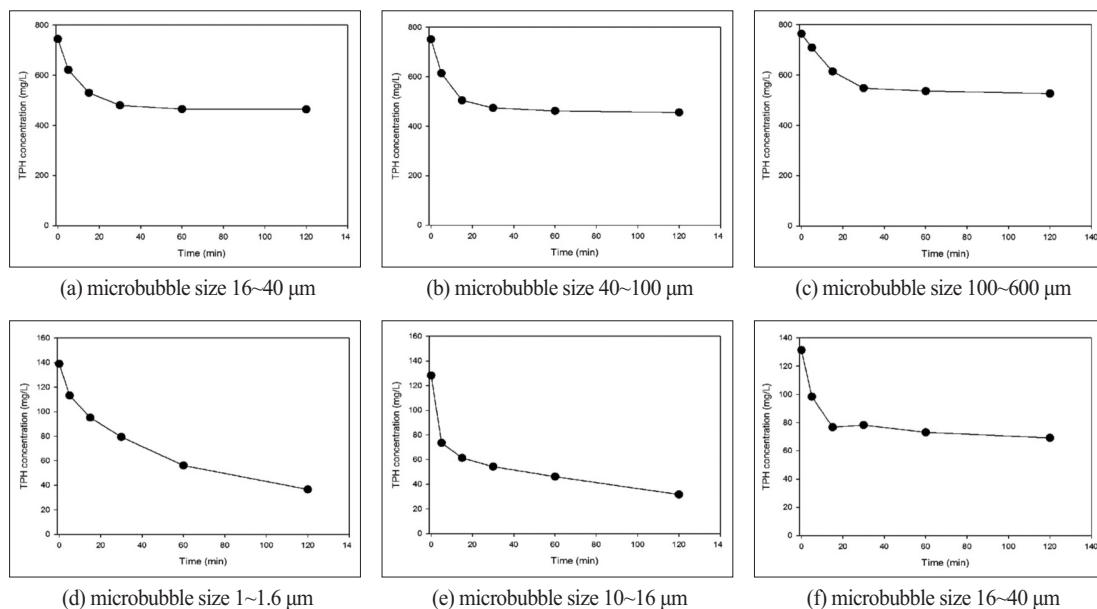


Figure 4. TPH removal results of dissolved air floater tests according to microbubble sizes. (a), (b), (c) initial TPH concentration 751.33 mg/L, (d), (e), (f) initial TPH concentration 132.84 mg/L.

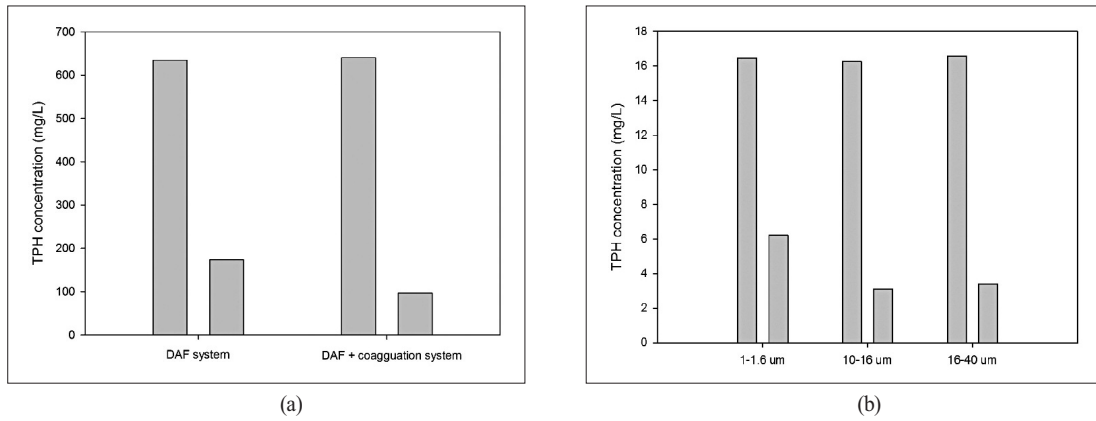


Figure 5. TPH removal results of dissolved air floator tests with (a) coagulant ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$)microbubble size 16 \times 40 μm , (b) coagulant ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$) and powdered activated carbon (PAC).

Table 3. SS removal results of dissolved air floator tests according to micro-bubble sizes

| Micro-bubble size | 1~1.6 μm | 10~16 μm | 16~40 μm | 40~100 μm | 100~600 μm |
|------------------------------|---------------------|---------------------|---------------------|----------------------|-----------------------|
| Initial concentration (mg/L) | 1,220 | 1,273 | 1,189 | 1,073 | 1,073 |
| Final concentration (mg/L) | 18.0 | 23.5 | 24.5 | 26.5 | 30.0 |
| Removal efficiency (%) | 98.5 | 98.2 | 97.9 | 97.5 | 97.2 |

(2) 부유물질의 제거

가압부상에 의한 부유물질(SS)의 제거효율을 평가하기 위해서 원시료를 오버헤드 스티러로 고속 교반시켜 보관시간 동안 침전된 물질을 균일하게 분포하도록 만들어 주었으며, 초기농도는 시료통의 중간 깊이인 1/2지점에서 채취한 시료를 분석하여 구하였다. 120분간의 가압부상으로 부유물질 제거실험을 실시한 결과 100~600 μm 기포사이즈의 SS 제거율은 97.2%, 40~100 μm 의 경우는 97.53%, 16~40 μm 의 경우는 98.0%의 제거율을 나타냈으며, 추가적으로 실시한 실험에서 10~16 μm 는 98.2%, 1~1.6 μm 는 98.5%의 제거율을 나타내었다(Table 3).

3) 응집침전조

환원제인 황산제일철 또는 아황산수소나트륨을 넣지 않고 단순한 응집침전 실험을 실시하여 6가크롬 제거효율을 판단하였다. 응집제인 황산알루미늄을 10, 50, 100 mg을 각각 1L의 비이커에 각각 넣고 pH미터 및 1M 수산화나트륨을 이용하여 pH를 8.33~8.41의 약염기성 영역으로 조절하였다. 6가크롬은

단순 응집만으로 처리하는 경우 황산알루미늄 10 mg일 때 1.4%, 50 mg일 때 1.5%, 100 mg일 때 1.7%로 응집제의 증가 시 미미한 증가는 보였지만 충분한 제거효율을 보이지는 못하였다.

대표적인 환원제인 황산제일철과 아황산수소나트륨 중 황산제일철을 선정하였고, 응집제인 황산알루미늄을 각각 10 mg, 50 mg, 100 mg을 투여하는 조건에서 실험을 실시하였다. 각 조건에서 황산제일철 투여량을 10 mg에서 50 mg까지 증가 시킬수록 제거효율도 증대되었다. 환원제인 황산제일철 10 mg 투여 시 각각 16.5%, 18.2%, 24.5%의 제거효율을, 20 mg 넣었을 때 각각 59.6%, 65.5%, 69.0%의 제거효율을, 30 mg 넣었을 때 각각 79.8%, 85.1%, 87.7%의 제거효율을 나타내었으며, 마지막으로 50 mg을 넣었을 때 각각 99.5%, 99.8% 및 100%의 제거효율을 보였다(Table 4).

100 %의 제거효율은 분광광도계의 검출 한계인 0.003 mg/L 이하로 판단되며 이를 제거효율로 환산했을 때는 99.9%이상 제거된 것으로 판단된다.

6가크롬의 환원 및 응집제거에 있어서 제거효율에

Table 4. Cr⁶⁺ removal efficiency (%) of coagulation and sedimentation tests according to the amount of Al₂(SO₄)₃ and FeSO₄

| | | Cr ⁶⁺ removal efficiency (%) | | |
|-------------------|---------|---|---|--|
| | | Al ₂ (SO ₄) ₃ 10 mg | Al ₂ (SO ₄) ₃ 50 mg | Al ₂ (SO ₄) ₃ 100 mg |
| FeSO ₄ | 0 mg/L | 1.23 | 1.50 | 1.63 |
| | 10 mg/L | 16.5 | 18.2 | 25.4 |
| | 20 mg/L | 59.6 | 65.5 | 69.0 |
| | 30 mg/L | 79.8 | 85.1 | 87.7 |
| | 50 mg/L | 99.5 | 99.8 | 99.9 |

영향을 미치는 인자는 응집제인 황산알루미늄의 양보다 환원제인 황산제일철의 양으로 판단된다.

4) 모래 활성탄 여과조

모래 및 활성탄을 이용하여 TPH, SS, 6가크롬으로 복합적으로 오염된 오염수의 정화효율을 평가하였다. 여과는 여재와 오염물질간의 접촉시간에 영향을 많이 받으므로 여과 컬럼을 통과한 원수를 보내어 접촉시간을 증가시켰다. 시료채취 시 공기와의 접촉을 최소화하여 유류성분인 TPH의 휘발성을 억제하고 실험의 오차를 줄이기 위해서 주사기로 컬럼에서 직접 시료를 채취하고자 하였다. 이를 위해 컬럼에 3개의 샘플링 포트(Figure 2 (d))를 측면에 설치하였고, 이 포트에서 주사기로 시료를 채취하여 염화메틸(Methyl Chloride) 2 ml를 먼저 채운 5 ml의 바이알에 지하수 시료 2 ml를 주입하였다.

(1) 여과조에 의한 TPH 제거

TPH는 여과를 통해서 여재 내 물리적으로 흡착 가능하며 여재와의 접촉시간에 영향을 많이 받게 된다.

여과조는 본 실험의 말단 공정으로 전처리 과정에서 충분히 오염물이 제거되었다고 가정하여, 본 실험에 사용한 TPH는 현실을 최대한 모사하기 위해서 고농도의 현장 지하수를 희석해서 사용하였다. 80.0~56.3 mg/L의 TPH 농도를 가지고 있는 지하수를 활성탄 비율에 따라 실험을 실시하였으며 활성탄이 75%인 경우에 제거속도가 가장 빨랐으며 120분 후 최종적으로 제거되는 TPH의 농도는 8.2~8.9 mg/L의 분포를 보였다(Figure 6). 제거효율은 84.3%에서 89.3%의 효율을 나타내었다.

(2) 여과조에 의한 부유물질 제거

모래 및 활성탄 여과에 의한 부유물질(SS)의 제거 효율을 평가하기 위해서 원시료를 오버헤드 스테리로 고속 교반시켜 보관시간 동안 침전된 물질을 균일하게 분포하도록 만들어 주었으며, 초기농도는 시료통의 중간 깊이인 1/2지점에서 채취한 시료를 분석하여 구하였다. 여과를 통한 SS 제거실험을 실시한 결과 850~2,000 μm 순수모래여재는 96.7%, 450~850 μm는 97.0%, 160~450 μm는 97.5%의

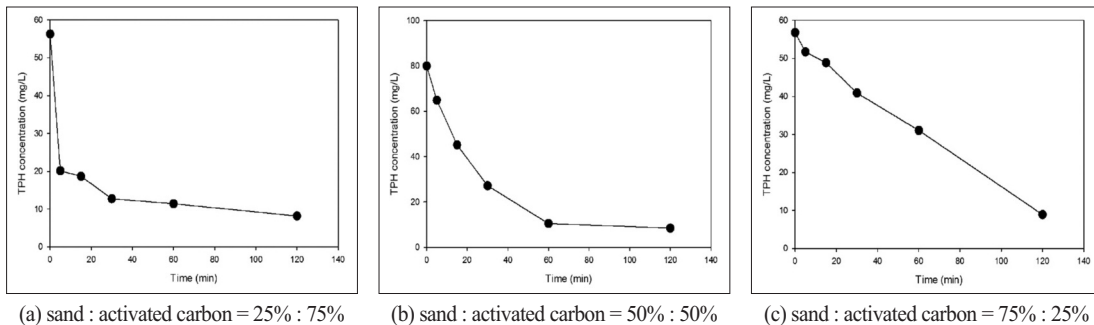


Figure 6. TPH removal results of filtration tests.

Table 5. SS removal results of filtration tests

| | Sand : Activated carbon (v : v) | | |
|------------------------------|---------------------------------|---------|---------|
| | 25 : 75 | 50 : 50 | 75 : 25 |
| Initial concentration (mg/L) | 1,076 | 1,045 | 1,023 |
| Final concentration (mg/L) | 2.15 | 4.25 | 6.42 |
| Removal efficiency (%) | 99.8 | 99.6 | 99.4 |

높은 제거효율을 나타내었다. 또한, 모래와 여재를 혼합한 시스템에서 부유물질(SS)제거 실험을 실시한 결과 모래여재 25%와 입상활성탄 75%의 비율로 혼합한 시스템은 99.8%의 가장 고효율을 나타냈으며, 모래여재 50%와 입상활성탄 50%의 비율로 혼합한 시스템은 99.6%의 효율을 모래여재 75%와 입상활성탄 25%를 혼합한 시스템은 99.4%의 효율을 보였다. 여과조 내 입상활성탄의 비율이 높을수록 더 미세한 SS까지 제거하여 부유물질의 제거효율을 향상시킬 수는 있으나 입상활성탄을 25%만 혼합하여도 SS 농도를 물환경보전법의 방류수수질기준인 10 mg 미만까지 충분히 낮출 수 있었다(Table 5).

3) 여과조에 의한 6가 크롬 제거

여과조에서 6가 크롬은 모래여과 방법으로는 충분한 제거가 되지 않는다. 오염 지하수 속에 포함된 미량의 6가 크롬을 제거하기 위해서는 활성탄 여과를 주로 사용하므로 본 실험에서 모래와 활성탄을 3가지 비율로 조절하여 실험을 실시하였다. 활성탄과 혼합할 모래 선택에 있어 450~850 μm 의 모래를 선택하였다. 모래와 활성탄의 비가 25% : 75%, 50% : 50%, 75% : 25% 일 때는 각각 66.2%, 67.5%, 68.0%의 제거효율을 보였다(Table 6).

입상 활성탄에 의한 6가 크롬 제거 시 0.05 mg/L 이하까지 제거가 가능해야 하나 본 실험의 결과는 컬럼 내 흐르는 유속이 빨라 오염수가 컬럼에 머무는

체류시간이 짧아서 흡착될 수 있는 시간이 충분하지 못했던 것으로 판단된다. 입상활성탄의 비율을 낮출수록 처리효율이 다소 증가하는 현상을 보여 활성탄이 6가 크롬의 제거에 오히려 악영향을 미치는 것으로 보일 수 있으나 금번 실험만으로 단정하기는 어렵다. 따라서 향후 모래 단독여과와 활성탄 단독여과 등 추가실험을 통해 그 원인을 분석할 필요가 있다.

IV. 결론

본 연구는 TPH, 6가 크롬 및 부유물질로 오염된 지하수 및 인공오염시료를 유수분리방법, 가압부상방법, 응집·침전방법, 모래·활성탄을 이용한 여과의 방법의 4개 공정별 처리효율평가 실험을 수행하였다. 공정별 실험에서 얻어진 결과를 토대로 실제 현장에서 운영되는 체류시간을 고려한 연속공정 설계인자를 도출하였다.

비중차를 이용한 물리적 처리방법인 유수분리의 경우 고농도 TPH 204.1 mg/L의 경우 1차 유수분리로 83.2 mg/L으로 제거효율은 59.2% 이었으며, 2차 유수분리 실험인 저농도 TPH 71.0 mg/L의 초기농도의 유수분리 실험은 20분 후 20.0 mg/L까지 제거되어 71.8%의 제거효율을 나타내었다. 따라서 총 40분에 걸친 1, 2차 유수분리의 총 제거 효율은 90.22%로 분석되었다.

가압부상에 의한 TPH 제거 실험은 1차적으로

Table 6. Cr⁶⁺ removal results of filtration tests

| | Sand : Activated carbon (v : v) | Cr ⁶⁺ concentration (mg/L) | | | | | |
|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------------|-------|--------|--------|--------|---------|
| | | 0 min | 5 min | 15 min | 30 min | 60 min | 120 min |
| Sand : Activated carbon (v : v) | 25 : 75 | 2.14 | 1.62 | 0.988 | 0.868 | 0.748 | 0.724 |
| | 50 : 50 | 2.09 | 1.50 | 0.923 | 0.824 | 0.732 | 0.681 |
| | 75 : 25 | 2.11 | 1.75 | 1.050 | 0.930 | 0.814 | 0.740 |

16~40 μm , 40~100 μm , 100~600 μm 기포사이즈로 실험하였으며, TPH는 미세기포의 효율을 확인하기 위해서 추가적으로 1~1.6 μm , 10~16 μm 의 미세기포로 확인하였다. 제거효율은 고농도의 TPH시료에서는 기포사이즈에 따른 영향이 거의 없었으며, 저농도의 TPH시료에서는 미세기포 사이즈가 작아질수록 좋은 효율을 보였다. 가압부상 시 응집제의 첨가는 제거효율을 높여주며 12.3%의 제거효율을 상승시켰다. 가압부상실험에 의해 부유물질은 평균 98.0%의 제거효율을 보였으며 작지만 미세기포일 때 제거효율이 다소 높았다.

응집침전에 의해 6가크롬 제거효율을 판단하였다. 6가 크롬은 일반적으로 환원을 시켜서 제거하는데 환원제인 황산제일철 또는 아황산수소나트륨을 넣지 않은 실험에서는 미량만이 제거되었으며, 환원제인 황산제일철을 넣은 실험에서는 황산제일철을 10 mg에서 50 mg으로 증가시킬 때마다 제거되는 효율이 점점 증가하여, 황산제일철 50 mg/L 넣었을 때는 측정 한계값인 0.003 mg/L 이하로 제거효율을 보였다. 실험결과로는 30 mg/L 황산제일철을 주입 시 약 80%의 저감효율을 얻을 수 있는 것으로 판단되었으며 이 처리효율은 현재 확인된 오염물질 농도를 법적 기준치 이내로 저감할 수 있는 최적 저감율이다.

모래 및 활성탄 여과조에서는 TPH, 6가 크롬, 부유물질 제거효율을 판단하였다. TPH는 활성탄의 비율이 높을수록 제거속도가 빨랐고 120분 후 최종 제거효율은 84.3%에서 89.3%로 비슷한 효율을 나타내었다. 부유물질은 가압부상과 마찬가지로 96.7%의 고효율을 나타냈다. 6가크롬은 모래여재만 있을 경우 제거가 되지 않았으며, 활성탄 비율의 증가에 따라 의미있는 제거효율 변화는 나타나지 않았다.

위의 개별 실험을 바탕으로 연속공정 설계를 위한 인자를 도출하였다. 오염지하수의 오염물질별 오염도에 따라 설계인자가 달라질 수 있지만, 이번실험의 조건을 바탕으로 설계인자를 도출하였다. 유수분리는 주요 처리 대상물질은 TPH이고, 20분의 체류시간으로 2회 연속 계획하여 총 40분 동안 처리하는 것이 효율적인 것으로 판단된다. 가압부상조의 경우는 처리대상물질은 TPH와 SS이고, 미세기포일수록 효

율이 좋아 미세기포 크기를 1~1.6 μm 로 설정하고, 응집제의 투입이 필요하다. 응집침전은 6가 크롬의 제거를 목적으로 하며, 황산제일철을 30 ppm 주입하는 것이 효율적인 것으로 판단된다. 여과는 TPH와 부유물질을 처리할 수 있으며, 활성탄의 비율이 높을수록 효과적이므로 모래입경 425~850 μm , 모래와 활성탄의 비율 50 : 50으로 설계하였다. 실험공정 중 여과조는 배출 전 최종 처리단계로서 보수적인 접근이 필요하며 배출수의 농도가 매우 낮아야 한다는 점이 고려되어야 한다. 또한 실험과는 달리 장기간 운전되는 현장에서는 역세 주기에 임박한 시점의 배출 농도가 처리 기준을 초과할 수 있다. 따라서 본 실험의 결과를 참조하되 현장 운영의 특성을 감안하여 일반적인 폐수처리시설에서 운영하는 것과 같이 2개의 여과조를 병렬식으로 운영하여 역세 시 여과공정의 중단 없이 운영될 수 있도록 하여야 한다.

References

- Chang YY, Kim KS, and Yang JK. 2006. Optimal condition for As(III) removal by filtration system packed with different ratio of iron-coated sand and manganese-coated sand, J. Kor. Soc. Environm. Eng. 28(11): 1186-1191. [Korean Literature]
- Cheon JY, Lee JY, and Lee KK. 2004. Characterization of the hydrogeologic environment at a petroleum hydrocarbon contaminated site in Korea, Environ. Geol. 45: 869-883. [Korean Literature]
- Jeong CH, Jeong GY. 2000. Effect of groundwater anions and pH on the sorption removal of heavy metals by bentonite. Econ. Environ. Geol. 33(1): 31-40. [Korean Literature]
- Jo JH, Kim JH, Park MK, Kim TH, Choi YS, Choi SI. 2014. Efficiency assessment of wastewater treatment plant and groundwater level by pump and treat technology applied

- for petroleum contaminated site. *J. Soil Groundw. Environ.* 19(3): 33-38. [Korean Literature]
- Kim CG. 2006. Attenuation of landfill leachate at two uncontrolled landfills, *Environ. Geol.* 51: 581-593. [Korean Literature]
- Lee CY, Jang YS. 2010. Treatment of contaminated groundwater containing petroleum and suspended solids using DAF and mixed coagulation processes, *J. Kor. Geo-Environ. Soc.* 11(8): 25-32. [Korean Literature]
- Lee JY, Cheon JY, Lee KK, Lee SY, Lee MH. 2001. Factors affecting the distribution of hydrocarbon contaminants and hydrogeochemical parameters in a shallow sand aquifer, *J. Contamin. Hydrol.* 50: 139-158. [Korean Literature]
- Lee JY, Choi JC, Yi MJ, Cheon JY, Kim JW, Lee KK. 2004. Evaluation of groundwater chemistry affected by an abandoned metal mine within a dam construction site, South Korea, *Quart. J. Engin. Geol. Hydrogeol.* 37(3): 241-256. [Korean Literature]
- Lee JY, Cheon JY, Kwon HP, Yoon HS, Lee SS, Kim JH, Park JK. 2006. Attenuation of landfill leachate at two uncontrolled landfills, *Environ. Geol.* 51: 581-593. [Korean Literature]
- Lim JW, Chang YY, Yang JK. 2010. Removal of soluble Mn(II) using multifunctional sand coated with both Fe- and Mn-oxides, *J. Kor. Soc. Environm. Eng.* 32(2): 198-200. [Korean Literature]
- Mamais D, Noutsopoulos C, Kavallari I, Nyktari E, Kaldis A, Panousi E, Nikitopoulos G, Antoniou K, Nasioka M. 2016. Biological groundwater treatment for chromium removal at low hexavalent chromium concentrations, *Chemosphere*, V. 152: 238-244.
- Min SY, Chang YY, Yang JK. 2011. Removal of soluble Fe(II) using reactive media coated with both Fe and Mn, *J. Kor. Soc. Environm. Eng.* 33(2): 85-92. [Korean Literature]
- Yang JH, Lee KK, Clement TP. 2012. Impact of seasonal variations in hydrological stresses and spatial variations in geologic conditions on a TCE plume at an industrial complex in Wonju, Korea, *Hydrol. Processes*, 26: 317-325. [Korean Literature]
- Yu MR, Hong SC, Yang JK, Chang YY. 2008. Removal of As(III) and phenol by multifunctional property of activated carbon impregnated with manganese, *J. Soil Groundw. Environ.* 13(3): 52-58. [Korean Literature]
- Kim JH, Park MK, Kim TH, Choi YS, Choi SL. 2014. Efficiency Assessment of Wastewater Treatment Plant and Groundwater Level by Pump and Treat Technology Applied for Petroleum Contaminated Site, *J. Soil Groundw. Environ.* 19(3): 33-38. [Korean Literature]
- Lionel JJC, Francis ALD. 1995. Application of Gravity Drainage to the Recovery of Residual LNAPL in Homogeneous and Lensed Sand Packs, *J. of Contaminant Hydrology* 18: 279-306.