

전기부상법을 이용한 토양세정 유출수 처리에 관한 연구

소정현^{1*} · 최상일¹

¹광운대학교 환경공학과

A Study on the Treatment of Soil Flushing Effluent Using Electrofloatation

Jung-hyun So^{1*} · Sang-il Choi¹

¹Department of Environmental Engineering, Kwangwoon University

ABSTRACT

The optimal operation conditions, including voltage applied, reaction time, distance between electrodes, and electrode material, were investigated for the treatment of soil flushing effluent using electrofloatation. When 3V was applied for 1 hour, 88% oil-water separation efficiency was achieved. In case of 6V and above, 90% efficiencies were achieved. As reaction time and distance between electrodes were longer, separation efficiencies were higher and lower, respectively. Separation efficiencies for different anode materials were copper > aluminum > iron > titanium. It might result from the differences of their electrical conductivities.

Key Words : Flushing effluent, oil-water separation, electrolysis, electrofloatation, electrical characteristics

* Corresponding author : junghyun94@yahoo.co.kr

원고접수일 : 2002. 7.22 게재승인일 : 2002. 8.29

요약문

전기분해에 의한 부상현상을 이용하여 토양세정 후 발생하는 유출수 중의 유수를 분리하기 위한 적정 운전조건에 관하여 고찰하였다.

전압에 의한 유수분리 효율을 관찰한 결과, 전기분해 1시간 후 3V의 전압만으로도 88% 정도의 효율을 나타내었으며 6V 이상의 전압에서는 90% 정도로 거의 비슷한 효율을 나타내어 대부분의 에멀전이 분리됨을 확인할 수 있었다. 동일조건에서는 전기분해 시간이 길수록 분리효율이 향상되었으며, 전극 간격이 넓어질수록 같은 효율을 얻기 위해 소요되는 전압의 크기가 커짐을 알 수 있었다.

전기분해 시 양극에서는 OH⁻의 방전으로 발생하는 산소에 의해 산화반응이 일어나며, 음극에서는 H⁺가 방전되어 발생하는 수소에 의해 환원반응이 일어나 미세한 기포가 형성된다. 유분의 부상분리 현상은 유분의 (-)전하와 전기분해에 의해서 발생하는 양이온의 결합으로 인한 중화반응 및 음극에서 발생하는 미세 수소기포로 인한 부상분리가 대부분을 차지하기 때문에 전압 및 전기분해 시간이 증가하고 전극 간격이 좁을수록 음극에서 발생하는 미세 기포의 양이 증가되어 부상효과가 크게 나타나는 것으로 판단된다. 전극 종류는 구리 > 알루미늄 > 철 > 티타늄 순으로 효율을 나타내었으며, 이는 금속들의 전기전도도 차이에 의해 일어나는 현상으로 판단된다.

주제어 : 토양세정 유출수, 유수분리, 전기분해, 전기부상, 전기특성

1. 서론

우리나라는 지속적인 경제개발과 이에 따른 환경보전 미흡으로 인하여 토양 및 지하수 오염문제가 심각한 수준에 와 있으며, 현재 12,472개소의 주유소 및 4,631개소의 석유통 저장 시설이 유류 관련 토양오염 유발시설로 관리되고 있다¹⁾. 설비의 노후화 및 취급 부주의 등의 이유로 누출된 유류는 토양 생태계를 파괴하고 지하수를 오염시키는 등의 심각한 환경문제를 야기 시키고 있다. 전국적으로 약 5,800 여개의 유류 및 유독물질 지하저장탱크가 누출되고 있을 것으로 추정하고 있다²⁾.

원위치 토양세정기법(in-situ soil flushing)은 유류 등으로 오염된 토양에 계면활성제 등의 세정제를 주입함으로써 소수성 오염물질의 용해도를 높여 오염물질의 이동현상을 가속화시키는 기법이다³⁾. 그러나 이 기법은 세정 후 발생하는 유출수를 적절히 처리하지 않을 경우 주변 지하수를 오염시키는 문제점을 가지고 있다.

오염물질을 지상으로 추출하여 처리하는 방식

(pump and treat)은 오염 토양과 지하수를 정화하기 위하여 일반적으로 이용되고 있지만, 수두차이로 인하여 하류 구배의 오염되지 않은 지하수도 일정부분 동시에 양수되는 문제점을 가지고 있다.

전기분해에 의한 오염물질의 제거 기작은 전기적 응집 (electrocoagulation), 전기적 부상 (electrofloatation), 전기적 산화 (electrooxidation), 표면착화 (surface complexation), 정전기적 인력 (electrostatic attraction), 화학적 전환 (chemical modification), 화학적 침전 (chemical precipitation) 등이 있다⁴⁾.

본 연구에서는 보다 효율적으로 세정 유출수를 정화 처리하기 위하여 지중처리 방식인 전기부상법을 적용하면서 전압, 전기분해 시간, 전극 간격 및 전극 종류 등과 같은 적정 운전조건을 도출하고자 하였다.

2. 실험재료 및 방법

2.1 실험장치

본 실험에 사용된 전기분해 반응장치의 개략도는

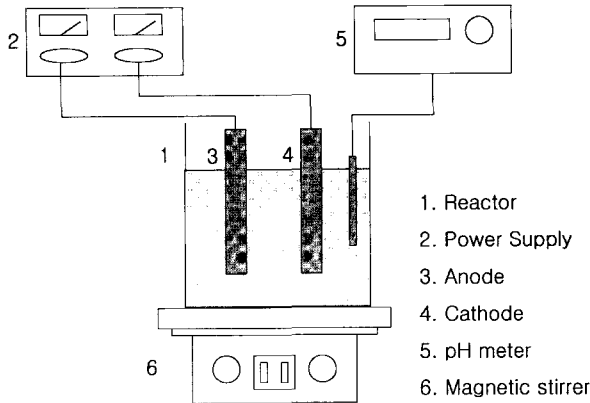


Fig. 1. Schematic diagram for electrofloatation.

Fig. 1과 같으며, 5mm 두께의 아크릴판을 이용하여 길이 200cm, 폭 10cm, 깊이 15cm 전기분해 반응조를 제작하여 사용하였다.

양극 전극으로는 철, 알루미늄, 구리, 티타늄 등을 음극 전극으로는 스테인레스를 적용하였으며, DC power supply를 이용하여 전류 및 전압을 일정한 값으로 유지시켰다. pH의 변화를 측정하기 위하여 반응기내에 pH meter를 설치하였다. 전극은 10cm × 3cm × 0.1cm의 크기로 제작하였다. 전극판의 유효 접촉면적은 30cm²가 되도록 하였으며, 전극간격은 1cm에서 18cm까지 조절이 가능하도록 하였다.

POE5와 POE14 혼합계면활성제 (1%, 1:1) 용액에 디젤을 첨가한 후 충분히 용해시켜 TPH 기준으로 농도가 1,000 mg/L 정도 되도록 하였으며, pH는 5.6으로 유지시켰다. 반응용액은 1,000mL를 사용하였다.

2.2 분석방법

부상분리 시 상층부에 형성되는 유분을 제거한 후 반응용액 5mL를 vial에 채취하였다. 미셀(micelle)을 깨기 위하여 채취된 시료에 NaCl 3g과 추출용매인 n-hexane 5mL를 첨가하여 교반하고 1시간 동안 초음파 추출장치를 이용하여 추출한 후 10분간 정치시켜 분리된 상등액을 가스크로마토그래피(GC, Hewlett Packard 5890 Series II, USA)를 이용하여 분석하

였다. GC분석을 위한 검출기(detector)는 FID(flame ionization detector)를 사용하였으며 길이 25m인 HP-1 capillary 컬럼(Hewlett Packard)을 사용하였다. 시료 주입량은 1 μ L(split ratio 70), 주입부의 온도 조건은 280 $^{\circ}$ C이며 초기 오븐온도는 80 $^{\circ}$ C, 10 $^{\circ}$ C/min으로 290 $^{\circ}$ C까지 승온시켜 10분간 유지하였으며 검출기의 온도는 290 $^{\circ}$ C로 하였다. 컬럼내 이동가스는 질소(순도 99.999%)를 사용하였으며 컬럼내 유량은 4.0mL/min 이었다.

2.3 운전조건에 의한 영향

전기분해 시간을 30분 및 1시간으로 하고 구리전극(전극 간격 1cm)을 이용하여 3, 6, 9, 12V로 전압을 변화시켜 가면서 전압에 의한 분리효율을 파악하였다.

전압 6V, 구리전극(전극 간격 1cm)을 이용하여 전기분해 시간 10, 20, 30, 60분에 대한 분리효율을 파악하였다.

전기분해 시간은 10, 20, 30, 60분으로 하고 전압 6V 구리전극을 이용하여 2, 4, 6, 8, 10, 15, 18cm 전극 간격에 대하여 분리효율을 파악하였다.

전기분해 시간 60분, 전압 6V, 전극 간격 10cm에 대하여 양극을 철, 알루미늄, 구리, 티타늄 등으로 바꾸어 가며 전극에 의한 분리효율을 파악하였다.

3. 결과 및 토의

3.1 전압에 의한 영향

전압에 의한 유수분리 효율을 관찰한 결과(Fig. 2), 전기분해 1시간 후 3V의 전압만으로도 88% 정도의 효율을 나타내었으며 6V 이상의 전압에서는 90% 정도로 거의 비슷한 효율을 나타내었다.

전기분해 시 양극에서는 OH⁻의 방전으로 발생하는 산소에 의해 산화반응이 일어나며, 음극에서는 H⁺가 방전되어 발생하는 수소에 의해 환원반응이 일어나 미세한 크기의 기체 방울이 형성된다⁹. 알루미늄 전극을 사용하였을 때의 반응 기작은 다음과 같다⁹.

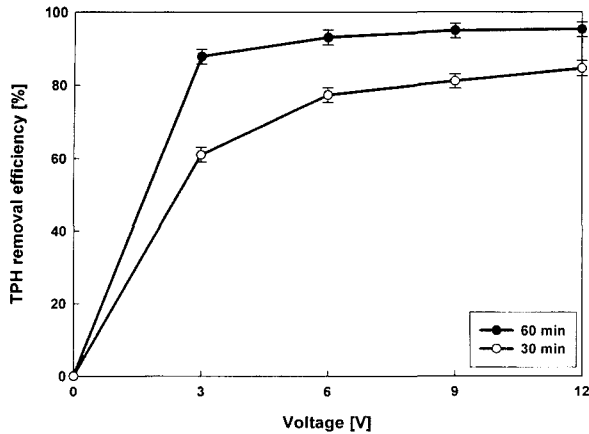


Fig. 2. Separation efficiencies of oil-water emulsion vs. voltages (pH, initial TPH conc., volume of surfactant solution, and type/distance of electrodes are 5.6, 1,000mg/L, 1,000mL, and copper/1cm, respectively).

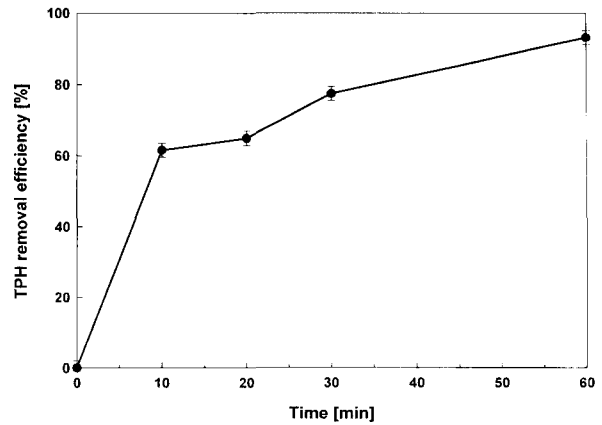
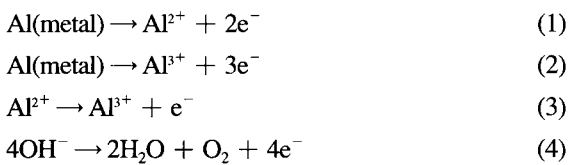
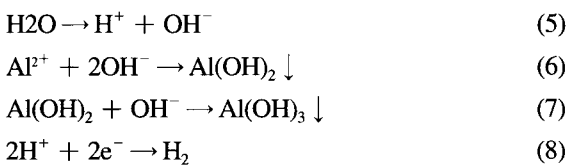


Fig. 3. Separation efficiencies of oil-water emulsion vs. reaction times (pH, initial TPH conc., volume of surfactant solution, voltage, and type/distance of electrodes are 5.6, 1,000mg/L, 1,000mL, 6V, and copper/1cm, respectively).

[양극]



[음극]



유분의 부상분리 현상은 유분의 (-)전하와 전기분해에 의해서 발생하는 양이온의 결합으로 인한 중화반응 및 음극에서 발생하는 미세 수소기포로 인한 부상분리가 대부분을 차지하는 것으로 판단되며⁷⁾, 전압이 클수록 음극에서 발생하는 미세기포의 양이 증가되어 부상효과가 크게 나타나는 것으로 사료된다.

3.2 전기분해 시간에 의한 영향

Fig. 3에서 보는 바와 같이, 전기분해 시간이 클수록

우수한 분리효율을 나타내었다. 10분간의 체류시간으로 전기분해 시켰을 경우 60% 정도의 효율을 나타내었는데 이는 반응 체류시간이 너무 짧기 때문에 전기 화학적 반응이 충분히 일어나지 않았음을 의미한다. 체류시간을 60분으로 증가시켰을 경우 분리효율이 95% 정도로 증가함을 알 수 있었다.

3.3 전극 간격에 의한 영향

전극 간격에 의한 유수 분리효율은 전압 크기와 밀접한 관계가 있다. 일반적으로 전극 간격이 넓어질수록 전극간의 저항이 증가하여 효율적인 전류가 흐르지 못하기 때문에 동일한 유수 분리효율을 얻기 위해 소요되는 전압의 크기가 커진다. 식(9)에서 볼 수 있듯이 이론적으로 같은 전압일 경우 전기력은 전극간 거리가 멀어질수록 단순히 멀어진 만큼 감소하는 것이 아니라 멀어진 거리의 제곱으로 감소되는 경향을 보인다⁸⁾.

$$F = k \frac{q_1 q_2}{r^2} \tag{9}$$

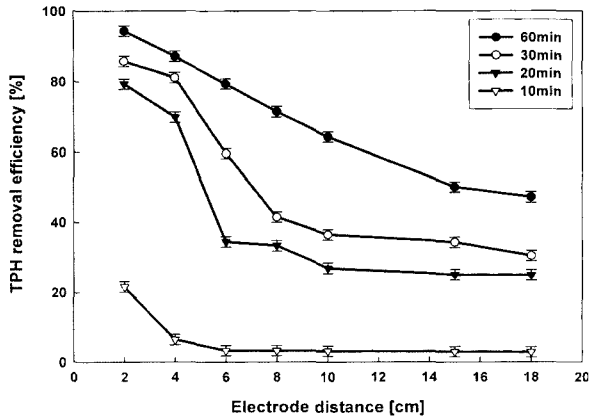


Fig. 4. Separation efficiencies of oil-water emulsion vs. electrode distances (pH, initial TPH conc., volume of surfactant solution, voltage, and type of electrode are 5.6, 1,000mg/L, 1,000mL, 6V, and copper, respectively).

여기서, $F = \text{전기력 [N]}$

$$k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} [\text{Nm}^2/\text{C}^2]$$

$q_{1,2} = \text{입자 1, 2의 전하 [C]}$

$r = \text{입자간 거리 [cm]}$

실제 실험 결과(Fig. 4)에서도 전극 간격이 넓을수록 분리효율이 급격히 감소되는 경향을 나타내었다. 따라서 전기부상법을 저비용·고효율로 운전하기 위하여는 전극간격과 소요전압간의 적정관계를 파악하는 것이 필수적이라 판단된다.

3.4 전극 종류에 의한 영향

전극 종류는 구리 > 알루미늄 > 철 > 티타늄 순으로 효율을 나타내었다(Fig. 5). 전압이 걸리면 전자(electron)는 이동하여 직접적으로 전기전도(electrical conduction)를 일으키거나 간접적으로 이온전도(ionic conduction)를 일으키게 되므로 금속들의 전기전도도 차이(Table 1)에 의한 것으로 판단된다.

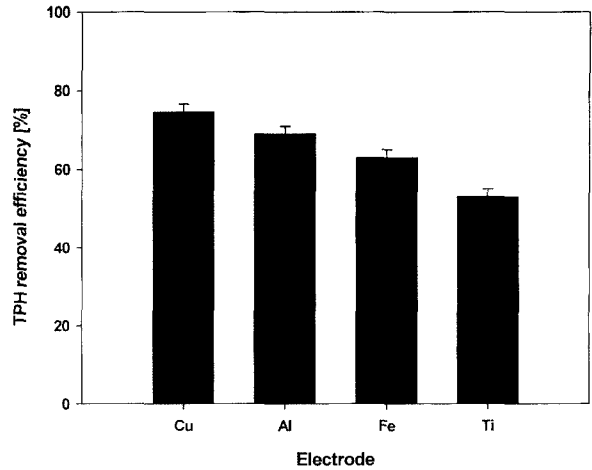


Fig. 5. Separation efficiencies of oil-water emulsion vs. types of electrode (pH, initial TPH conc., volume of surfactant solution, voltage, reaction time, and distance of electrodes are 5.6, 1,000mg/L, 1,000mL, 6V, 60min, and 10cm, respectively).

Table 1. Relative electrical conductivity of each electrode⁹⁾

	Cu	Al	Fe	Ti
Relative electrical conductivity [$\mu\text{s}/\text{cm}$]	100	64	18	3.1

4. 결 론

1. 전기분해 1시간 후 3V의 전압만으로도 88% 정도의 효율을 나타내었으며 6V 이상의 전압에서는 90% 정도로 거의 비슷한 효율을 나타내었다.
2. 10분간의 체류시간으로 전기분해 시켰을 경우 60% 정도의 효율을 나타내었는데 이는 반응 체류시간이 너무 짧기 때문에 전기 화학적 반응이 충분히 일어나지 않았음을 의미한다. 체류시간을 60분으로 증가시켰을 경우 분리효율이 95% 정도로 증가함을 알 수 있었다.
3. 일반적으로 전극 간격이 넓어질수록 전극간의 저

항이 증가하여 효율적인 전류가 흐르지 못하기 때문에 동일한 유수분리효율을 얻기 위해 소요되는 전압의 크기가 커진다. 따라서 전기부상법을 저비용·고효율로 운전하기 위하여는 전극간격과 소요 전압간의 적정관계를 파악하는 것이 필수적이라 판단된다.

4. 전극종류는 구리 > 알루미늄 > 철 > 티타늄 순으로 효율을 나타내었다. 이는 금속들의 전기전도도 차이에 의한 것으로 판단된다.

사 사

본 연구는 2001년도 환경부 차세대핵심환경기술 개발사업 및 2002년도 광운대학교 교내학술 연구비 지원에 의해 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. 토양환경보전 정책방향, 환경부(2000).
2. 박용하, 이승희, 토양환경보전을 위한 오염방지기준 및 관리대책, 한국환경정책평가연구원 연구보

고서(RE)(1995).

3. Taylor, P. T., Kurt, D. P., Linda, M. A., and Jacob, H. D., "Surfactant enhanced recovery of tetrachloroethylene from a porous medium containing low permeability lenses 1. Experimental studies", *Journal of Contaminant Hydrology*, 48, 325~350(2001).
4. Acar, Y. B. and Alshawabkeh, A. N., "Principles of electrokinetic remediation", *Environ. Sci. & Tech.*, 27(2), 283~291(1993).
5. Boikess, S. R., and Edward, E., "Chemical Principles : Third edition", Harper & Row(1994).
6. 김성국, 박상원, 홍대일, "전기분해에 의한 염색폐수 처리공정에 관한 연구", *한국환경과학회지*, 8(4), 539~545(1999).
7. Hosny, Y. A., "Separating oil from oil-water emulsions by electroflotation technique", *Separations Technology*, 6, 9~17(1996).
8. Schaum, "Electromagnetics", McGraw-Hill : New York(1999).
9. <http://science.kongju.ac.kr/>