

## 원위치 지반오염정화사업에서의 실시간 모니터링 시스템의 적용 사례 Application of Real-Time Monitoring System to In-Situ Soil Remediation Project

정승용<sup>1)</sup>, Seung-Yong Jung, 김병일<sup>2)</sup>, Byung-Il Kim, 한상재<sup>3)</sup>, Sang-Jae Han,  
김수삼<sup>4)</sup>, Soo-Sam Kim, 홍상기<sup>5)</sup>, Sang-Ki Hong

- 1) (주)지구환경전문가그룹 대표이사, President, Expert Group for Earth & Environment
- 2) 한양대 토목환경공학과 박사과정, Ph.D Candidate, Dept. of Civil & Env. Eng., Hanyang Univ.
- 3) 한양대 토목환경공학과 연구교수, Research Professor, Dept. of Civil & Env. Eng., Hanyang Univ.
- 4) 한양대 토목환경공학과 교수, Professor, Dept. of Civil & Env. Eng., Hanyang Univ.
- 5) (주)지구환경전문가그룹 선임연구원, Senior Researcher, Expert Group for Earth & Environment

**SYNOPSIS :** A real-time monitoring system for in-situ soil remediation technologies is developed and then applied to electrokinetic remediation technique in the field trial tests during 150days. The developed system is consisted the controlled program based on internet web page, data logger, measurement instruments and so on. In the measured items there are pH, temperature, electrical current and potential, vacuum pressure. The results indicated that the system is successively applied to electrokinetic remediation technique, and further research considering economic view and multi purpose system for in-situ soil remediation technologies is needed.

**Key words :** real-time monitoring system, in-situ soil remediation, electrokinetic remediation

### 1. 서 론

지반오염에 대한 관심이 증대되면서 수많은 지반정화기술이 개발되고 있다. 특히, 원위치 지반정화기술은 오염지반을 굴착이나 제거 없이 원지반 상태 그대로 정화기술이 적용되기 때문에 관련 기술의 수요가 증대되고 있다. 그러나 정화사업이 진행됨에 따라 실제 샘플링을 통해 분석하지 않으면, 토양정화 진행도나 문제점을 평가하기 매우 어렵고, 실제 샘플링이 이루어 진다하더라도 그 회수와 비용이 총 사업 비용에 큰 비중을 차지하게 된다. 또한, 현장위치가 격오지나 격리된 특수지역, 위험지역인 경우 그리고 계측자가 상주하거나 빈번한 출입이 불가능한 경우도 다수 상존하고 있다. 따라서 정화사업이 진행되고 있는 동안 총 정화 비용에 큰 부담을 가하지 않으면서 정화 진행도 평가 및 시스템의 유기적 운영을 위한 관련 파라미터의 원격·무인 실시간 계측을 통해 이를 해결해야할 필요가 있다.

본 현장 시험 시공은 중금속으로 오염된 지반에 동전기 정화기술을 적용하여 지반속의 오염물을 음극으로 이동 배수시켜 복원하기 위해 수행되었다. 원위치 동전기 정화 기술의 적용시 온도의 상승이나 전력의 설계 용량 초과 등이 발생하여 원하는 목적을 달성할 수 없는 경우가 자주 발생하며 설계에 반영된 오염지반의 거동이 실제 상황과 일치하지 않는 경우가 빈번하다(김병일 등, 2004). 이러한 단점들을 극복하기 위해서는 세밀한 지반조사 및 정밀한 설계를 필요로 하며 세심한 시공이 반드시 뒤따라야 하나 실제 정밀한 설계에 따라 시공이 완벽하게 이루어졌다 하더라도 이러한 불일치는 상존하는 것이 현

실이다. 불일치 발생원인은 설계과정에서의 단순화 및 이상화가 행해지고 그 결과로 인한 불확실성이 개입되기 때문이며 이러한 불확실성을 최소화하고 시공시 발생하는 문제점들을 예측, 제거하기 위한 방안의 하나로 현장계측(실시간 모니터링)에 근거한 시공관리가 이루어지도록 하였다.

이를 위해 본 연구에서는 토질조건에 큰 제약을 받지 않고 특히 세립지반에 특히 효율적인 동전기 정화 기술의 현장 적용시 주요 변수인 pH, 전류 및 전압 등을 실시간으로 모니터링해서 인증된 관련자가 정화 진행도를 열람 및 평가하고, 측정된 변수를 이용하여 시스템을 최적화 시키는 자료로 활용할 수 있는 인터넷 원격 실시간 모니터링 기술에 대한 적용 사례를 제시하고자 하였다.

## 2. 실시간 모니터링 시스템의 적용

### 2.1 계측항목 및 방법

실시간 모니터링을 위해서는 계측의 목적을 명확히 하는 것이 계측 계획 수립시 매우 중요하다. 즉, 불필요한 계측을 방지하여 경제적이고 신뢰성 있는 결과를 획득할 수 있도록 계획이 수립되어야 한다(조삼덕 등, 2004). 일반적으로 동전기 정화시 주요 계측항목으로는 전압, 전류, 압력(부압), pH 및 온도 등이 있다. 전압은 오염물의 이동 상황을 파악하기 위해 계측되며, 전류의 경우 경제성 및 정화작업 완료시점 등을 판단하기 위함이다. 또한, 온도의 경우 지반내 저항 증가에 따라 온도가 상승하면 지반내 건조 현상 등이 발생하여 전류가 흐를 수 없는 부도체 조건이 될 수 있으므로 온도 측정을 통해 건조현상의 발생 유무를 판단하기 위함이다.

각 섹션별 전류, 깊이에 따른 전압 및 온도 분포를 측정하기 위하여 측정봉을 제작하였다. 측정봉은 각 목에 굵은 구리전선을 부착한 형태로 편의성과 측정위치(그림 1)를 고려하여 미리 실내에서 제작하여 시험 시공시 설치하였다. 또한, 진공압의 효율을 파악하고자 추출시스템내에 진공압 측정기를 설치하여 실시간 계측이 이루어지도록 하였다. 특히, 온도는 지중 온도(배경온도)와 양극 전극봉 인접부의 온도를 Thermocouple을 사용하여 측정하였으며, 온도가 원 지반상태의 온도(배경온도)보다 10℃이상 상승했을 때는 주입유량을 늘리거나 강제 주입을 실시할 수 있도록 하였으며, 부가적으로는 전원 차단까지도 가능하도록 하였다.

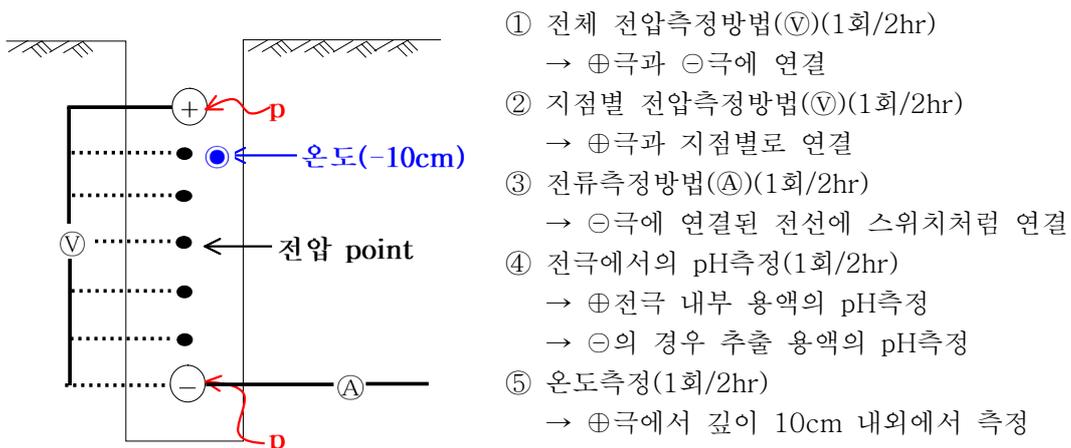


그림 1. 측정 지점 상세 및 방법

## 2.2 계측분석 시스템

현장계측의 결과는 시공간적인 제약 때문에 현장을 벗어나서는 파악하기가 어렵다. 따라서 현장계측의 내용을 필요로 하는 곳까지 전달하기 위해서는 자료의 실시간 전송이 가능해야 한다. 또한 실시간 현장계측이 가능해지면 자료의 분석이 실시간으로 가능해져 현장계측이 제대로 수행되고 있는지를 파악할 수 있고 그에 따른 적절한 조치를 취할 수 있다(지구환경전문가그룹, 2004; 한양대학교, 2004).

자동화 계측은 센서, 데이터로거, Multiplex Module-Bus Cable(Rs 232/485), 컴퓨터로 구성된다. 컴퓨터에서 계측에 관한 정보를 입력한 후 데이터로거로 전송하면 데이터로거에 입력된 정보에 따라 계측 명령을 Multiplex Module에 전송하고, Multiplex Module는 그에 따라 계측을 수행하여 센서의 계측데이터를 데이터로거로 전송하여, 다시 현장컴퓨터로 전송한다. 현장 컴퓨터에 저장된 데이터는 설정된 일정한 시간간격으로 중앙 데이터 베이스에 전송되며, 이는 웹서버에 접속되어 실시간으로 웹페이지를 통하여 규정된 그래프 양식으로 보여진다. 데이터로거는 계측데이터를 메모리에 저장하고, 중앙제어프로그램에서 입력된 한계값을 초과하면 벨이나 무선표출을 할 수 있다. 데이터로거를 원거리에서 조절함으로써, 현장에서 무인으로 모든 계측이 이루어 질 수 있다(그림 2 참조).

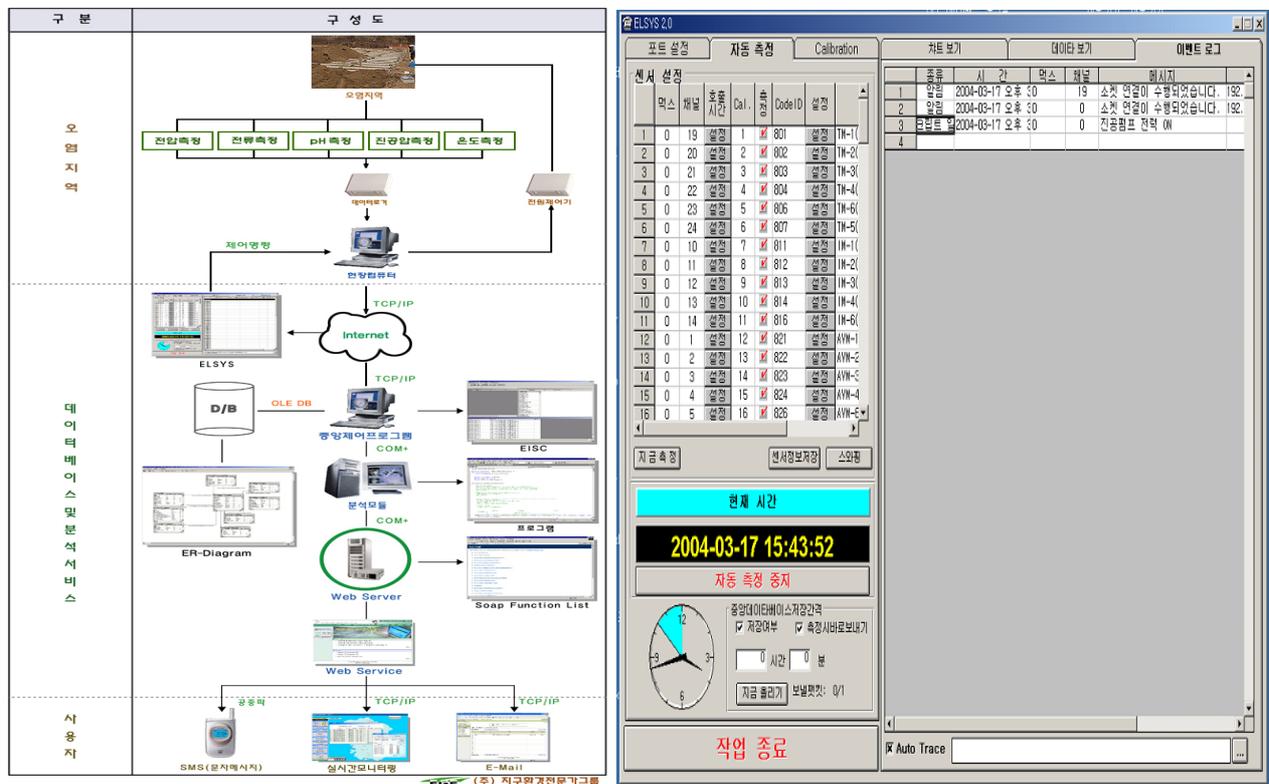


그림 2. 실시간 모니터링 시스템의 전체 구성도

본 연구에서 적용된 계측분석 시스템은 현장에서 계측된 방대한 자료를 체계적으로 데이터베이스화 하여 신속하고 정확한 분석이 수행되는 것을 추구하였으며, 관리자 및 사용자에게 보다 안정하고 신속하며 정확하게 경고할 수 있는 시스템을 구축하였다. 이때 중앙제어프로그램은 IT 서버를 중심으로 운영되고 현장의 정보를 수집할 수 있는 환경을 설정하며 자료의 수집을 제어하여 데이터베이스를 효율적으로 관리하는 중앙통제 기능을 담당한다. 이때 데이터베이스에 자료화 된 정보들은 분석모듈에 의해 실

시간으로 분석되어 지고 만약 설정된 한계값을 초과할 경우 경보시스템 즉, 메일서버 또는 SMS 서버를 통제하여 E-Mail이나 문자 메시지로 관리자 및 사용자에게 경고를 전달한다(그림 2 참조).

일련의 과정을 거친 모든 데이터는 웹서버를 통하여 관리자 및 사용자에게 실시간으로 제공할 수 있으며 동시에 데이터베이스에 자료화되어 필요에 의해 자료의 재사용을 가능하게 한다.

### 3. 적용 결과

그림 3은 정화과정 중 현장에서 발생한 상황(event)을 제시한 것으로, 정화시작 후 2일과 30~34일 그리고 83~84일 지점에서 현장 관련 시설의 보수로 인한 정전으로 시스템의 전력공급이 이루어지지 못했다. 또한, 43일 지점에서 10일 동안 동절기에 발생한 급격한 온도저하로 인해 현장으로 유입되는 전체 수도가 동파됨으로써 수압식 진공펌프로의 물공급과 세척제 등의 주입이 이루어 지지 못했으며, 시스템의 안전을 위해 실시간 모니터링 역시 중단하였다. 그러나 이 기간 중에도 전극에의 전원공급은 이루어지도록 하였다.

그림 4(a)와 (b)에는 시간경과에 따른 전류 및 심도별 전압분포를 나타내었다. 정화기간 내내 5~8mA 정도로 유사한 전류가 유지되었고, 전압은 양극에서 음극 방향으로 깊이가 증가할수록 감소하는 경향을 보였다(2~25V).

그림 5(a)는 진공압 분포를 음극 전극봉(추출시스템)의 길이에 따라 시간의 함수로 나타낸 그림이다. 초기 진공압  $-0.5\text{kg}/\text{cm}^2$ 에 대해 전체 길이가 10m인 음극 전극봉의 중간(5m) 지점에서는 대략  $-0.4\sim-0.5\text{kg}/\text{cm}^2$  범위의 값을 보였으며, 끝부분(9m)에서의 진공압은  $-0.3\sim-0.4\text{kg}/\text{cm}^2$  범위의 값을 보여 진공추출 원점에서부터 거리가 증가함에 따라 약간의 진공압 손실이 발생됨을 보였다. 그러나 시험 결과에 영향을 미칠 정도로 크지는 않는 것으로 판단된다. 그림 5(b)는 유입수(anolyte)와 유출수(catholyte)의 pH변화를 제시한 것이다. 유입수의 pH는 2정도로 유지되었으며, 유출수의 경우에는 pH 7정도의 값을 보였다. 유출수의 pH가 7정도로 유지된 이유는 첫째, 양극부(주입시스템)에 주입된 구연산(citric acid)가 음극부에서 발생하는 염기전선을 중화시켰기 때문이며, 둘째, 음극 시스템에서 진공추출을 병행하고 있기 때문에 음극에서 형성된  $\text{OH}^-$ 이온이 상대적으로 시료내부로 침투하지 못하였기 때문이다.

그림 6은 양극 부근의 지반내 온도분포와 기상 변화에 따른 대기 온도변화를 나타낸 그림이다. 대상 정화 영역이 동결심도에 해당되고 있음에도 불구하고 지반내 온도가  $0^\circ\text{C}$ 이상의 값을 보이고 있어 대기 온도보다 지반 내 온도가 더 높은 경향을 보였다. 이는 동절기 정화 작업을 고려하여 모든 주입 배관에 대하여 열선을 처리한 결과로, 약  $20^\circ\text{C}$ 로 주입용액의 온도를 유지할 수 있었기 때문이다.

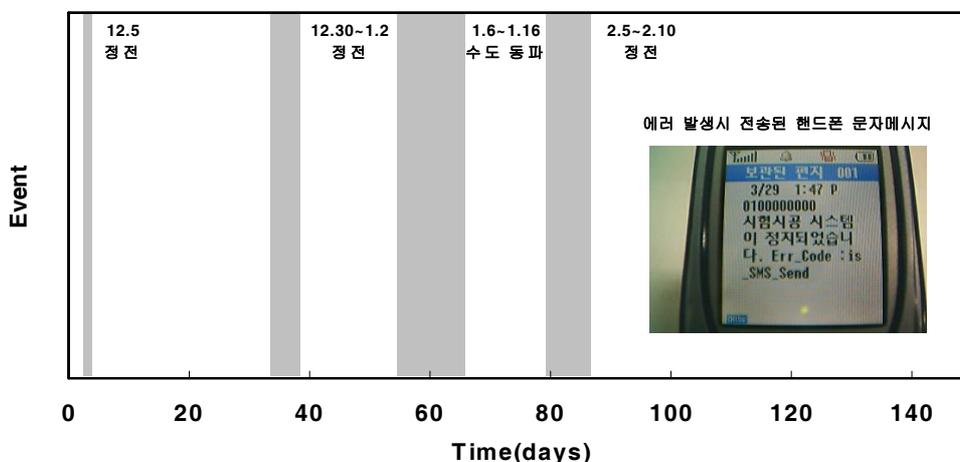
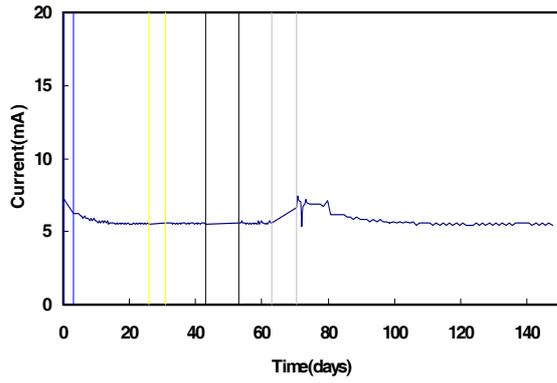
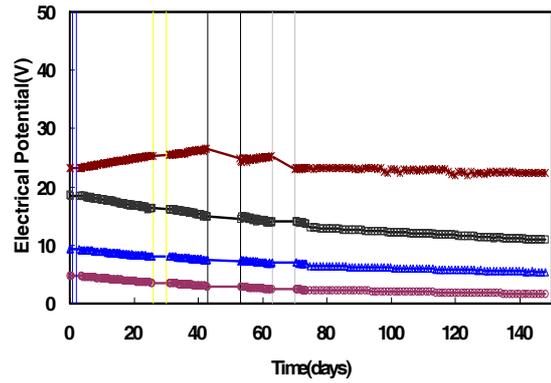


그림 3. 정화사업 기간내 현장 Event 발생 현황

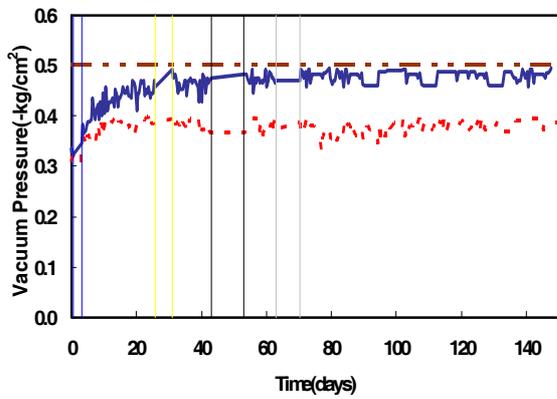


(a) 전류

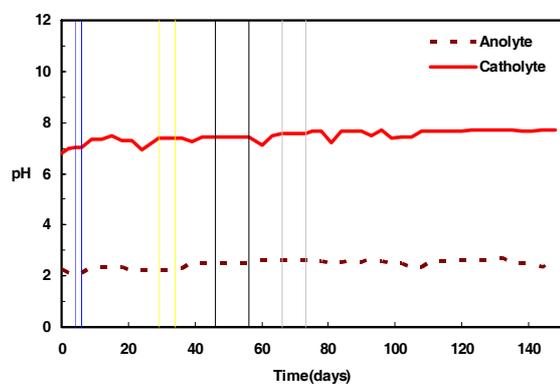


(b) 깊이별 전압

그림 4. 시간경과에 따른 전류와 전압 계측 결과



(a) 진공압



(b) 저수조 pH

그림 5. 시간경과에 따른 진공압과 저수조 pH 계측 결과

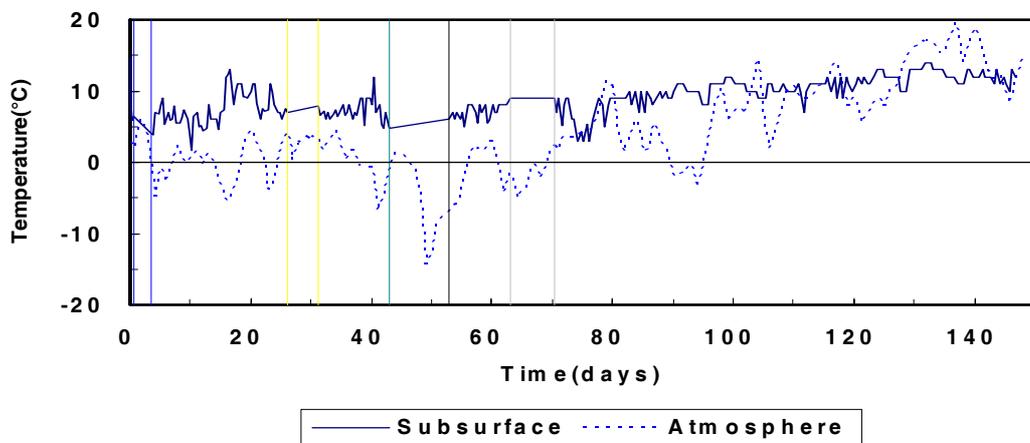


그림 6. 시간경과에 따른 온도 계측 결과

## 4. 결론 및 요약

본 연구에서는 원위치 정화 기술 중의 하나인 동전기 정화 기술에 대한 실시간 모니터링 시스템의 적용 사례를 제시하였다. 본 연구에서 적용된 실시간 모니터링 시스템은 계측데이터의 수집부터 이벤트 전송까지 각 시스템의 연동이 원활이 이루어져 비교적 성공적으로 적용되었다. 그러나 향후 경제성을 고려한 시스템의 개발, 대상 지역에서의 이벤트 발생 상황에 유기적으로 대응할 수 있는 방안 강구 및 다양한 원위치 지반정화기술에 적용 가능한 범용 시스템의 개발 등이 요구된다.

## 참고문헌

1. 김병일, 이호진, 이규득, 김수삼 (2004), “남으로 오염된 사격장에 대한 원위치 동전기 정화 기술의 적용-현장 시험시공을 중심으로”, **대한토목학회 정기학술대회**, pp. 4189-4194.
2. 조삼덕, 이광우, 윤수호, 김춘식 (2004), “도로사면 관리 및 붕괴 예경보를 위한 실시간 무인감시시스템 개발”, **대한토목학회논문집**, 제 24권 1C호, pp. 1-10.
3. (주)지구환경전문가그룹 (2004), “인터넷 실시간 계측관리 분석시스템”, <http://www.egait.co.kr>.
5. 한양대학교, 한국환경기술진흥원 (2004), “사격장의 중금속 오염 토양복원을 위한 태양에너지를 이용한 환경친화형 복합 동전기 정화기술 개발”, 차세대 핵심환경기술개발사업 2차년도 최종보고서.