

전기비저항 모니터링과 난지도 매립지의 침출수 거동

김 영화* 김 형 수** 장 승 익*

(*강원대학교 지구물리학과 **한국수자원 공사, 수자원연구소)

1. 서 언

1.1 침출수 거동과 모니터링

매립지에서 생성되는 침출수는 주변의 지표수계, 토양 및 지하수를 오염시키는 가장 큰 요인이다. 매립지에 있어서 침출수 발생의 양상은 폐기물의 종류 및 분포 뿐만 아니라 표면 피복 상태, 폐기물의 분해 및 용해 특성에 의하여 좌우되며 발생된 침출수의 흐름은 매립장 라이너 상태와 하부 지층의 수리적 특성에 지배를 받으면서 주변의 지층 중으로 확산하므로써 오염이 진행된다. 이와 같은 오염원에 의한 주변 토양 및 지하수 오염은 오염물질-흙-수계 사이에서 나타나는 복잡한 상호 반응의 결과로서 이를 규명하는 일이 쉽지가 않다. 따라서 매립지 주변에서의 오염 범위와 정도를 확인하고 향후 진행의 양상을 예측하기 위한 지속적인 계측의 필요성이 크며 이러한 의미에서 매립지를 대상으로 하는 모니터링 시스템의 구축이 필요하다.

매립지에서 예상될 수 있는 모니터링 방법은 주로 시추공을 이용하는 수리학적 내지 지화학적 방법을 비롯해서 역학적, 지구물리검층 방법 및 지표면에서 이루어지는 지구물리탐사 기법 등이 대상이 될 수 있다. 그 중에서도 지구물리학적 방법은 비파괴 조사 방법이라는 점에서 이점이 있으며 경제적이면서 동일한 기준으로 반복 계측이 가능하다는 관점에서 매우 효율적인 모니터링 기법으로 알려져 있다. 매립지 자체의 특성 파악을 위해서라면 원리적으로 거의 대부분의 지구물리학적 방법이 적용 가능하지만 침출수 거동 추적과에 연관된 모니터링을 목적으로 하는 경우의 지구물리학적 방법은 전기탐사 전자탐사가 주로 이용되고 있으며 현장 조건에 따라 지온탐사, 지오레이다 및 방사능탐사가 가능할 수 있다.

1.2 지전기 모니터링의 특성

지전기 방법은 측정 대상이 가지고 있는 지전기적 특성 특히 전기전도도 특성에 근거를 두고 전계 또는 전자계를 계측하므로써 탐사대상의 존재 여부, 크기,

모양 등을 밝히는 조사 방법이다. 오염 물질이 일반적으로 지층, 또는 지하수와는 다른 특징적인 전기 전도도 특징을 가지고 있다는 관점에서 환경문제 조사에 있어서 지전기 방법의 탐사효율성은 널리 인정되고 있다. 지전기 방법 중에서는 전기비저항법을 비롯하여 자연전위법, IP법 등이 있으며 넓은 의미로는 지전류법 및 전자파법 등이 포함된다. 그 중에서 오염물질의 모니터링으로서는 전기비저항법과 전자파탐사법이 매우 효과적이며 SP법이 적용 가능한 것으로 알려지고 있다. 이에 비하여 모니터링 기법으로서의 IP법의 효과는 기대하기가 곤란하다.

그 중에서도 전기비저항법은 가장 쉽게 잘 적용할 수 있는 대표적인 모니터링 기법으로 오염원의 형성과 이동의 위치, 범위 및 방향, 그리고 농도를 추적할 수 있는 매우 경제적이며 안전한 방법이라 할 수 있다. 이는 지구 구성물질의 전기비저항 결정이 공극율과 공극을 충전하고 있는 유체의 전기전도도의 함수로 표현할 수 있으며, 오염물질의 전기전도도는 수용성(APL)이던 비수용성(NAPL)이던간에 오염되지 않은 지층수와는 큰 차이를 보이고 있음에 근거를 두고 있다. 즉 오염 플룸의 형태로 이동되는 수용성 오염물질의 계측은 비저항 이상대로, 지하수의 상부 또는 하부에 물과 분리되어 나타나는 비수용성 오염물질들은 주로 고비저항 이상대의 형태로 지전기 모니터링에서 효과적으로 검출될 수 있다. 따라서 전기비저항 모니터링은 매립지 내의 오염 플룸의 발생과 이동 및 매립지 인접 지역에서의 오염 플룸의 이동까지 효율적으로 추적할 수 있게 한다.

2. 난지도 매립지에서의 지전기 모니터링

2.1. 난지도 매립지의 개요

난지도 매립지는 서울시 마포구 상암동 한강변에 위치하고 있으며 선 캠프리아기의 편마암과 제4기 충적층 위에 성토된 두개의 매립지로 구성된다(Fig. 1). 오염 방지 대책이 전혀 강구되지 않은 상태에서 매립이 진행되었으며 최상부는 인위적으로 피복된 얇은 토양층으로 라이너 기능을 대신하고 있는 상태로 폐기물로부터 생성된 오염물질이 이 일대의 지표와 지하 수계를 크게 오염시키고 있는 것으로 알려지고 있다(김철호, 1994). 1992년 말의 난지도 매립지 폐쇄를 계기로 매립지의 안정화 및 환경오염 방지 대책의 요구와 사후 관리 및 토지이용의 필요성이 대두되었으며 이에 부응하여 시추 조사를 비롯하여 각 부문에서의 조사가 수행되었거나 진행되고 있는 상태이다. 난지도 쓰레기 매립지에 대한 지구물리학

연구로는 권병두 외(1995)와 김형수의(1995), 이기화, 윤종열(1996), 이기화의 (1996) 등의 연구결과가 발표되어 있다.

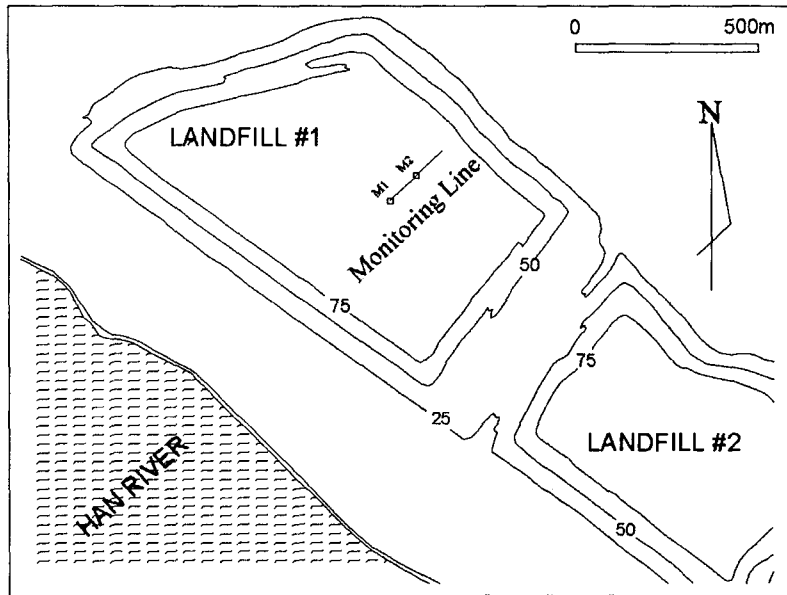


그림 1. 위치도

전기탐사 결과 매립지는 상부로부터 표토층(surface variable zone), 부분 포화대(Partially saturated zone), 점이대(Transitional zone), 포화대(Saturated zone) 및 기반암(Basement)으로 구분되었다. 표토층은 비저항의 변화가 심하나 하부층에 비해서는 현저히 높은 층준으로 인위적으로 피복된 토양과 매립물질의 혼합층이다. 부분 포화대는 20-200 ohm-m 범위의 비저항으로 부유 침출수나 강수에 의하여 포화 또는 비포화가 혼재되는 매립층준이며 포화대는 10 ohm-m이하의 비저항으로 기저 침출수에 의하여 완전히 포화된 영역으로 간주되고 있다. 아울러 전기탐사 결과는 상부 부분 포화대와 하부 포화대 사이에 점이대의 존재를 시사하고 있으며 최하부에 기반암 또는 침출수의 영향을 거의 받지 않은 층적층에 대비할 수 있는 200 ohm-m 이상의 고비저항층의 존재가 보고되고 있다.

2.2 적용방법 및 자료획득

지전기모니터링은 제1 매립지 내에서 이루어졌으며 두 지점에서의 수직탐사(VES 1 & 2) 및 하나의 모니터링 축선에서의 자연전위 측정과 2차원비저항 측정으로 구성된다(Fig.1). 수직탐사는 Schlumberger 배열법을 사용하였으며 최대 전류전극 간격 AB는 280m(VES 1) 와 200m(VES 2)였다. 2차원 비저항의 측정은 Wenner, 슬럼버저 및 쌍극자의 세 가지 배열법을 중복하여 관측하였다. 2차원

비저항 측정을 위한 측선의 설정은 측선 길이 200에 10미터 간격으로 21개의 전극을 설치하였으며 전극과 연결 케이블은 측정기간 동안 고정된 상태를 유지하도록 하였다. 모든 배열법에서 측정점 간격은 10미터이며 전극 간격은 21개의 전극 사이에서 가능한 모든 경우의 배열이 선택되었다.

측정 작업은 1996년 2월 24일부터 1996년 10월26 사이의 6회에 걸쳐서 계절과 강수현상을 감안하여 시행되었으며 지표 조건을 일정하게 유지하기 위하여 강우 후 2-3일 경과한 시점을 선택하였다. 탐사기는 OYO사의 McOhm Resistivitymeter가 사용되었다. 전류량은 Wenner와 Schlumberger배열에서 50mA, dipole-dipole배열에서는 100 mA로 고정하여 측정하였으며 낮은 비저항 지역에서의 정밀 비교를 위하여 전위값을 읽는 방법을 사용하였다.

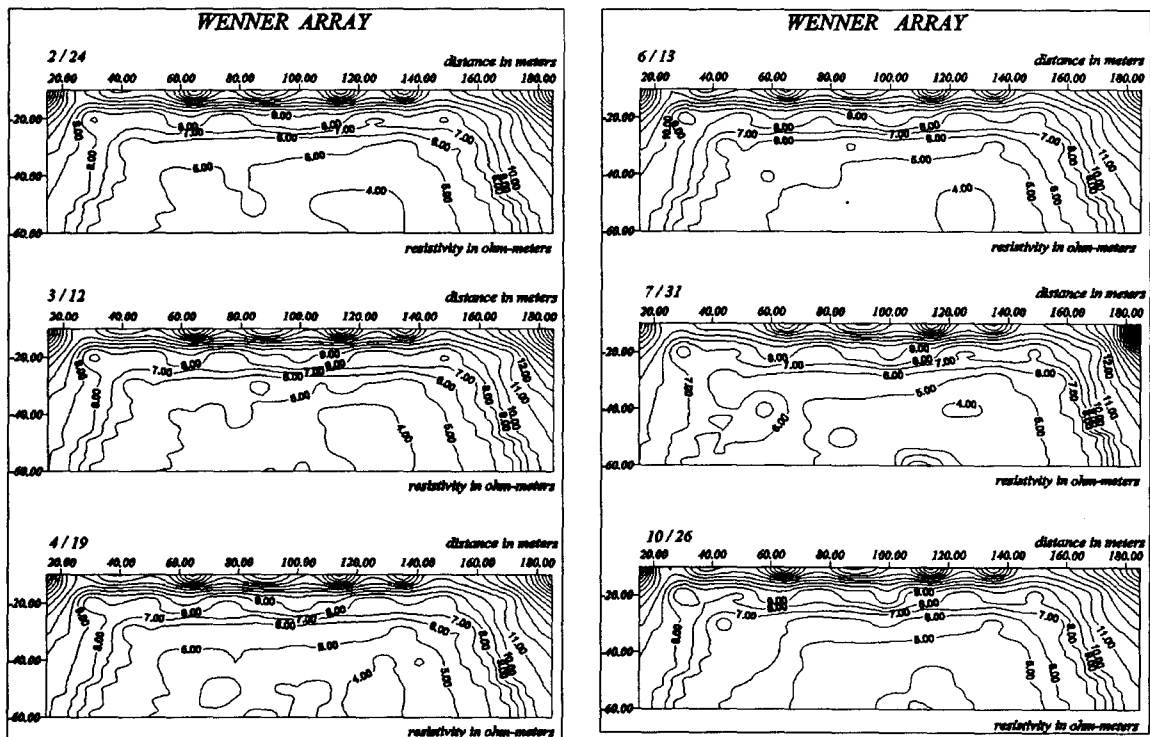


그림 2-1. Wenner법 비저항Monitoring (2월24일, 3월12일, 4월19일 측정결과)

그림 2-2. Wenner법 비저항 Monitoring (6월12일, 7월31일, 10월26일 측정결과)

2.3 Wenner 및 슬럼버저 모니터링 결과

각기 측정 시간을 달리하는 6개의 웨너 비저항단면도 (2월 24일, 3월 12, 4월 19일, 6월13일, 7월31일, 10월 26일)가 얻어졌다. 6개의 비저항 단면(그림2)은 거의 동일한 비저항단면을 보여주고 있다. 비저항단면도의 형태는 20 ohm-m 내외의 상부 비저항값으로부터 4 ohm-m 이하의 하부 비저항값에 이르기까지 심도 증가

에 따라 점이적인 비저항 감소 현상을 보인다. 시간의 경과에 따른 비저항 단면도의 변화 양상은 매우 미약하며 단지 40미터 하부 층준에서의 저비저항대에서의 비저항 감소현상이 인지된다고 볼 수 있는 상태이다. 한정된 축선에서 탐사 심도 증대 효과를 감안하여 얻어진 슬럼버저 비저항 단면(그림 3)에서도 Wenner 단면에서도 비슷한 현상이 나타났다.

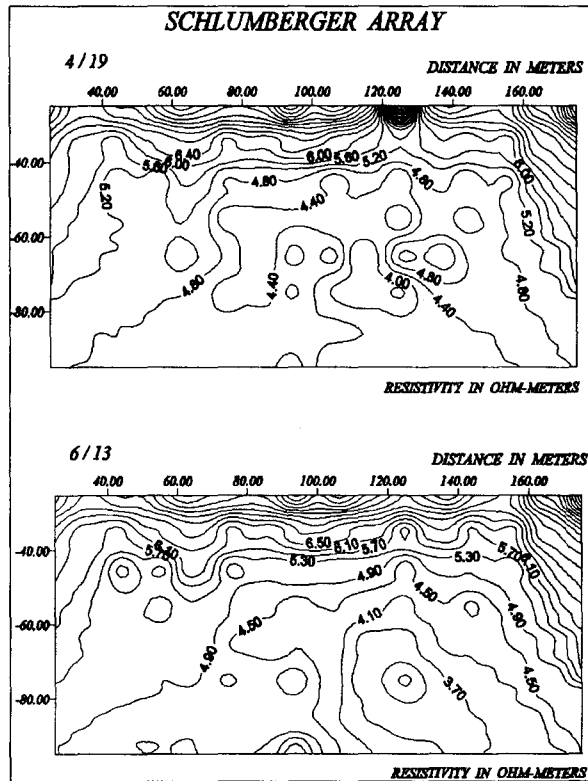


그림 3. Schlumberger법 비저항 Monitoring (4월19일, 6월13일)

2.4. 쌍극자 비저항 모니터링 결과

쌍극자비저항 모니터링으로부터 쌍극자의 길이를 10미터로 한 것(그림 4)과 20미터로 한(그림 5) 두 종류의 비저항단면이 얻어졌다. 상대적으로 해상도가 높게 나타난 10미터 쌍극자 비저항 단면도로부터는 30미터 이내에서의 상부 비저항 분포를 파악하였으며 20미터 쌍극자비저항 단면은 30미터 이하의 비저항 분포 양상을 판단하는데 활용되었다.

쌍극자 단면에서의 비저항분포 특성은 10미터와 40미터 심도를 개략적인 경계로 10 ohm-m 이상의 고비저항대, 4 ohm-m 이하의 저비저항대 그리고 10 ohm-m 이상의 고비저항

대로 3 구분할 수 있다. 10m 쌍극자비저항 단면도와 20m 쌍극자비저항 단면을 비교한 결과, 심도 40 미터 하부의 고비저항대는 쌍극자배열의 특성에 기인하여 비저항이 과장된 현상이 인지되고 있으나 중간 부분에 비하여 비저항의 증가 경향은 분명하다. 웨너와 슬럼버저 배열의 경우와는 달리 쌍극자 비저항단면에서 국부적으로 나타나는 비저항 이상 현상은 이 지역의 비저항이 전반적으로 낮으며 거리에 따라 급격히 감소하는 쌍극자 신호의 감소 경향으로 S/N비가 높지 못함에 기인한 소위 쌍극자 잡음에 의한 교란일 가능성도 있다. 그러나 시간에 따른 모니터링 결과의 일관성이 상당히 높게 나타나고 있는 점을 감안한다면 일단 신호의 변화로 간주할 수 있으며 이러한 관점에서 일단 상대적으로 높은 쌍극자 배

열의 해상도 문제로 결론지었다.

시간의 경과에 따른 비저항 변화 양상은 우선 외견비저항 단면도에서 나타나는 국부적인 고비저항과 저비저항 분포 형태의 점이적인 변화 양태에서 살펴볼 수

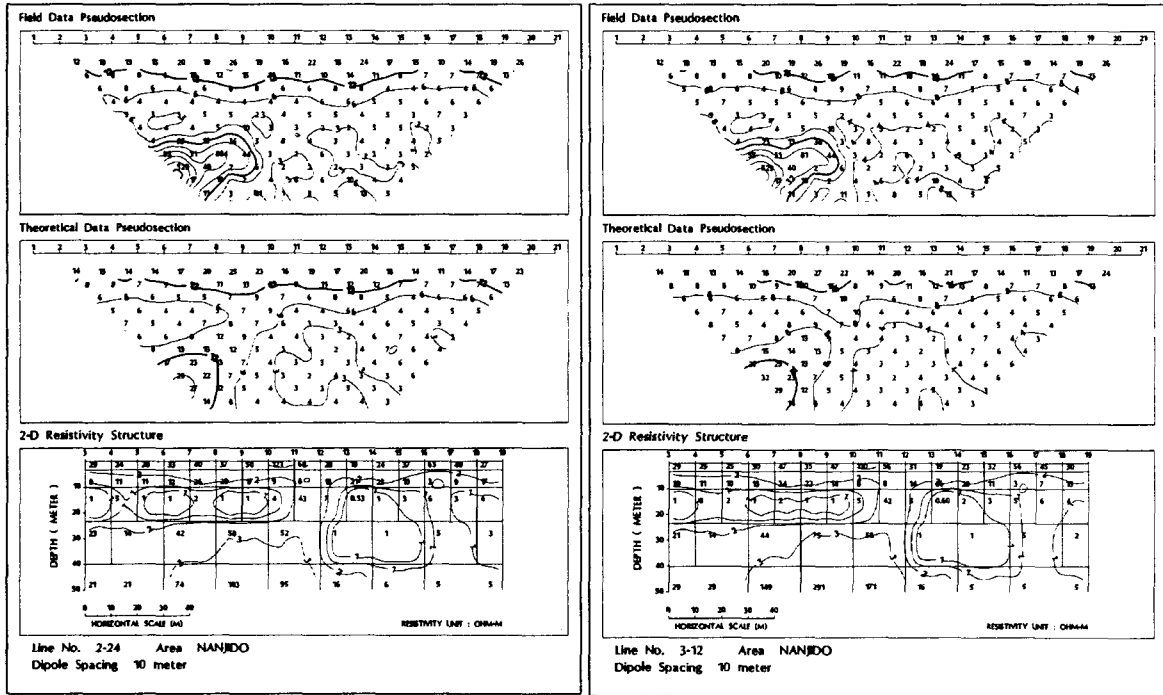


그림 4-1. 쌍극자법 비저항 Monitoring (a=10m, 2월24일 측정결과)

그림 4-2. 쌍극자법 비저항 Monitoring (a=10m, 3월12일 측정결과)

있으며 이는 2차원 비저항 단면도 상에서 저비저항 분포의 수직 하향 이동과 좌향 이동의 경향으로 요약될 수 있다. 이는 10m 쌍극자 비저항단면의 경우 1996년 2월 24일의 최초 측정에서 1-2 ohm-m 범위의 저비저항대의 분포가 측정점 3(웨너와 슬럼버저에서의 20m 지점에 해당)에서의 약 10미터 심도로부터 측정점 18(170m 지점에 해당)의 50미터 심도 쪽으로 경사진 대상분포를 형성하고 있었으며 이러한 경향이 3월 12일의 측정에서 그대로 유지되다가 4월 19일 이후로 저비저항대가 점차 측선의 좌측으로 이동하였음을 보이며 그 범위 또한 확대되고 있음에서 잘 나타나고 있다. 10m 쌍극자 비저항 단면에서 나타나는 40-50m 고비저항대의 하부에 다시 저비저항대가 존재할 가능성은 20m 쌍극자 비저항단면과 수직탐사 결과를 종합할 때 이 지역에서는 가능성이 희박하다.

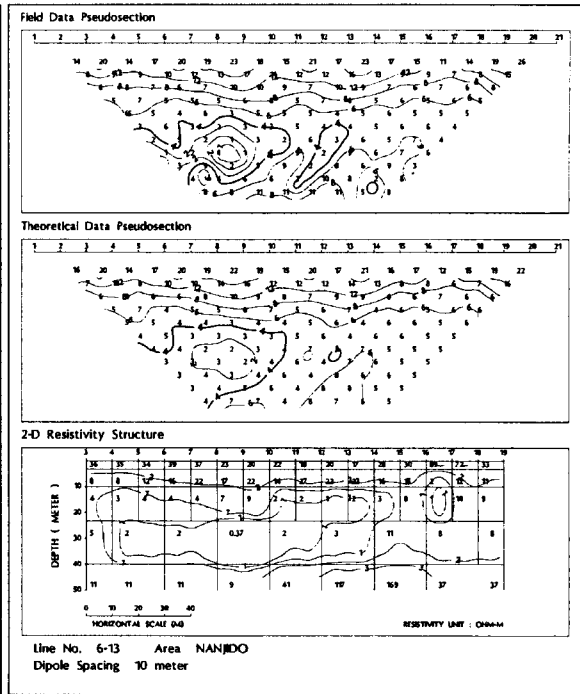
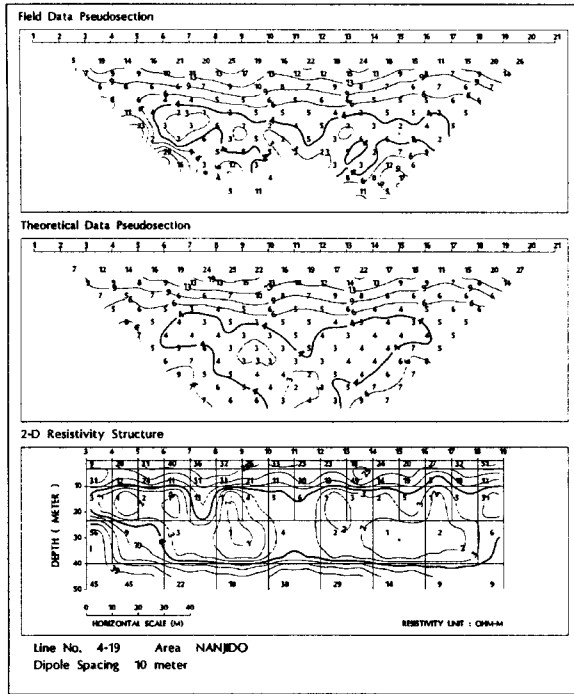


그림 4-3. 쌍극자법 비저항 Monitoring
(a=10m, 4월19일 측정결과)

그림 4-4. 쌍극자법 비저항 Monitoring
(a=10m, 6월13일 측정결과)

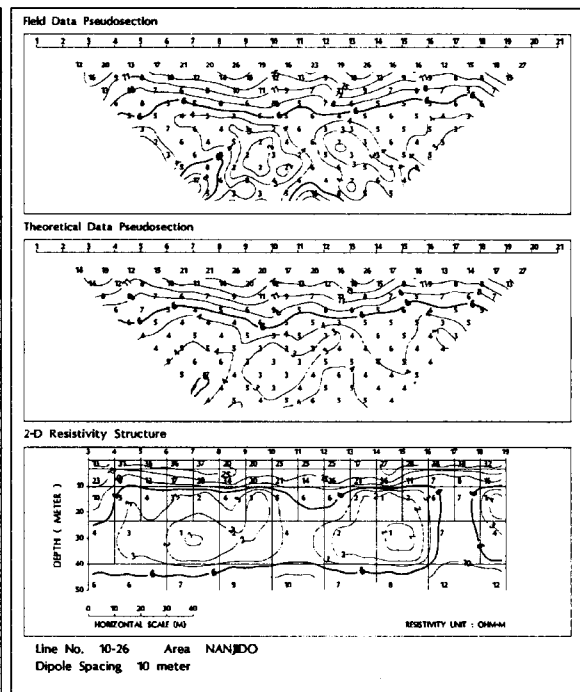
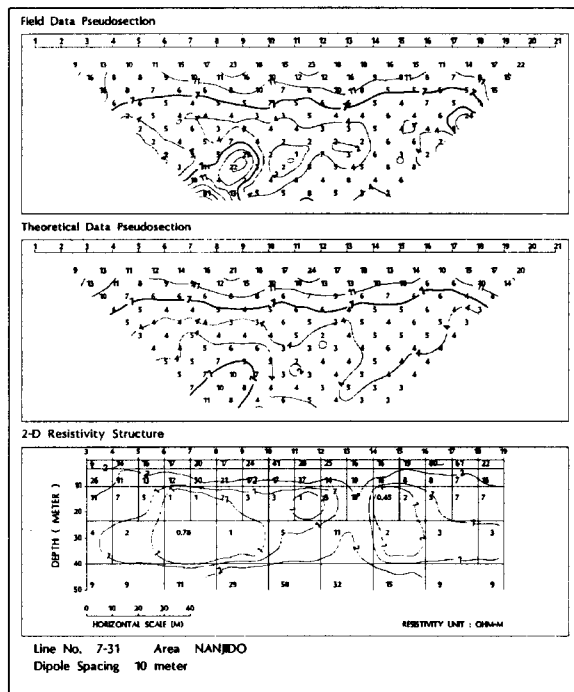


그림 4-5. 쌍극자법 비저항 Monitoring
(a=10m, 7월31일 측정결과)

그림 4-6. 쌍극자법 비저항 Monitoring
(a=10m, 10월26일 측정결과)

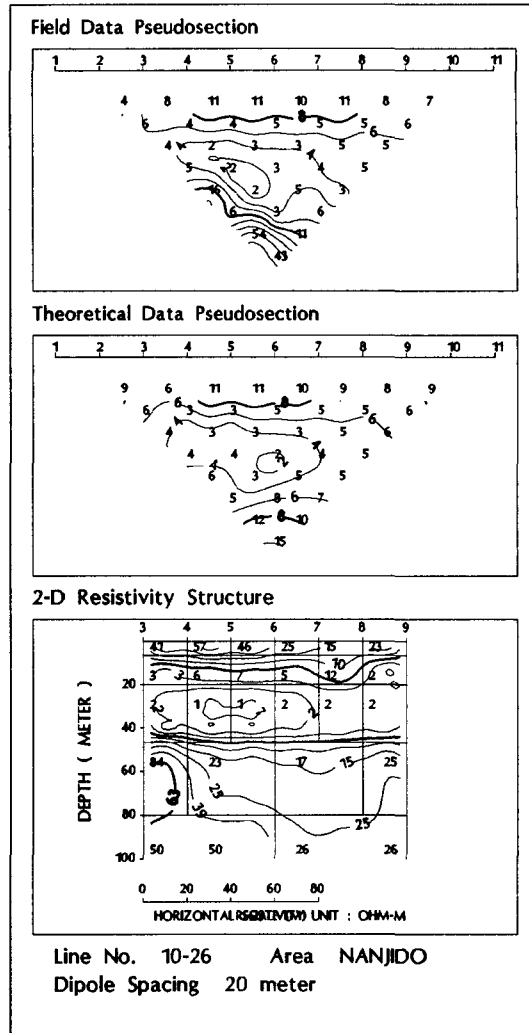
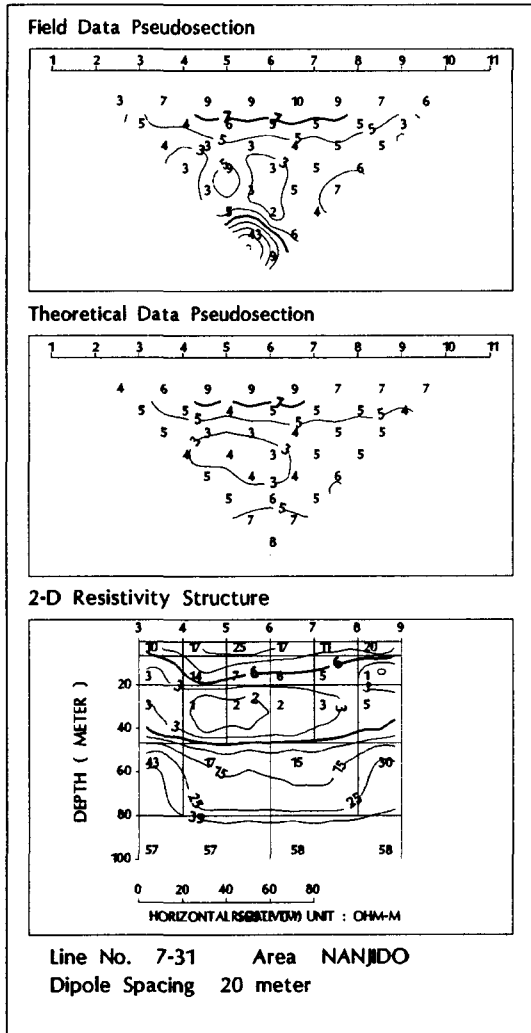


그림 5. 쌍극자법 비저항 Monitoring (a=20m, 7월31일, 10월26일 측정결과)

2.5 수직탐사 모니터링 결과

두 지점에서의 수직탐사 모니터링의 결과는 그림 6에서 나타난 바와 같다. 50m 내외의 심도를 기준으로 그 상부에서는 비저항이 감소하다가 하부에서 다시 증가하는 경향을 보이고 있어 쌍극자 모니터링 단면도에서 나타난 상부 고비저항, 중부 저비저항, 하부 고비저항의 구조와 개략적으로 일치하고 있다. 그러나 6회의 측정기간 동안 현저한 변화의 징후는 보이지 않았으나 의도적으로 변화 양상을 확대시키는 경우에는 저비저항대의 심도가 시간의 경과에 따라 깊어지는 경향을 인지할 수 있었다. 측정점 M1에 비하여 측정점 M2의 경우의 측정치가 안정되어 있음을 보였으며 이는 VES 1이 매 측정 때마다 전극 설치를 새로이 한 반면에 VES2의 경우는 고정 설치된 전극을 이용 한데 기인된 결과이다.

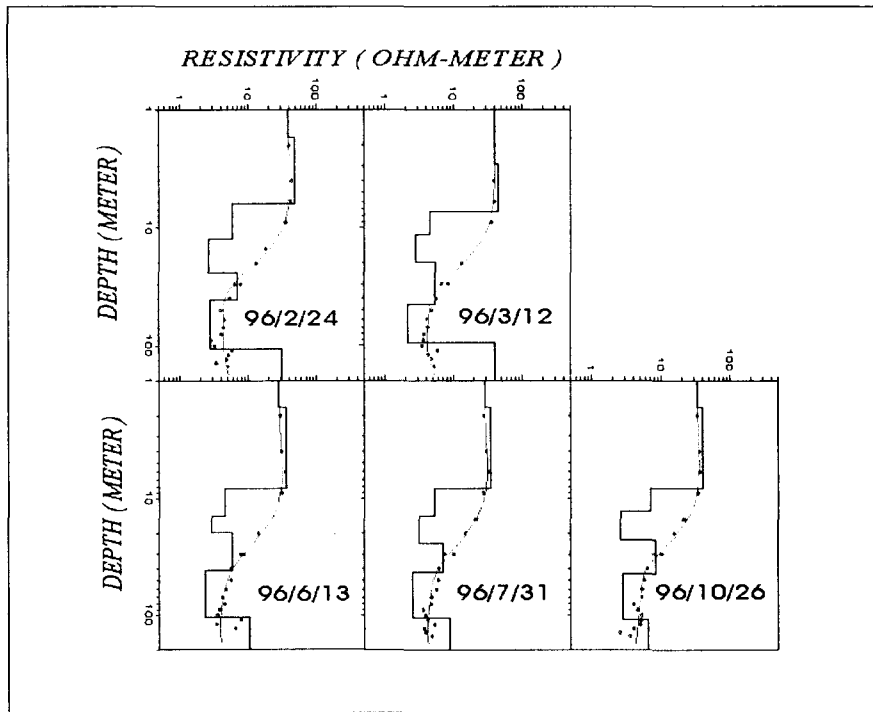


그림 6-1. VES Monitoring 결과 (M1 지점)

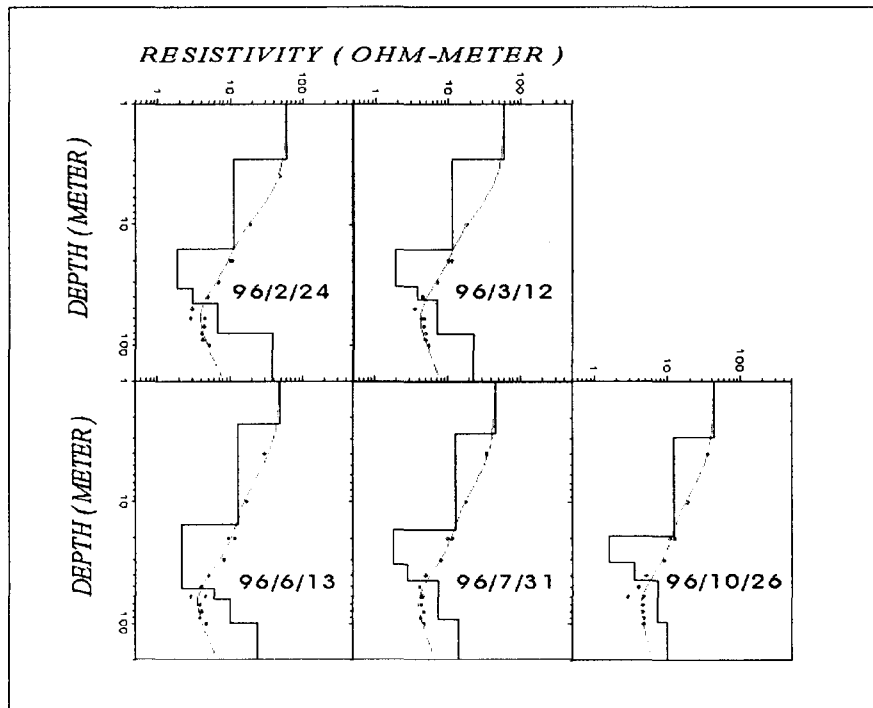


그림 6-2. VES Monitoring 결과 (M2 지점)

2.6. 자연전위 모니터링 결과

10미터 간격으로 설치된 전기비저항 모니터링용 전극을 이용하여 자연전위 측정을 실시하고 그 결과를 도시해 보았다(그림 7). 측정 결과 전위 분포는 -500mV 에서 600mV에 이르는 큰 전위 차이를 나타내었으며 대체로 일정한 분포 양상을 보였다. 시간에 따른 전위의 변화 양상은 측선의 우측 부분에 있어서는 거의 일정한 형태를 유지하고 있음에 비하여 좌측 부분에 있어서는 변화가 인지되고 있다. 좌측 부분에서의 자연전위 분포의 변화는 비저항 모니터링에서 저비저항대가 시간의 경과에 따라 점차 좌측 부분으로 이동하는 것과 위치적으로 일치되고 있음이 주목된다. 자연전위의 발생 미커니즘이 다양한 가능성을 가지고 있는 매립지에서의 자연전위분포에 의미를 부여하기가 현재로서는 무리이나 결과 자체가 시사하는 바는 크다고 할 수 있다. 아울러 이상적인 비분극성 전극을 사용하지 못한 여건에서도 비교적 일관성 있는 결과가 나왔음은 전해질 물질이 풍부한 매립지에서의 전기탐사시에 동일한 stainless steel 전극 사용에 의한 자연전위 측정으로도 비교적 신뢰성 있는 결과를 제공할 수 있음을 보인다.

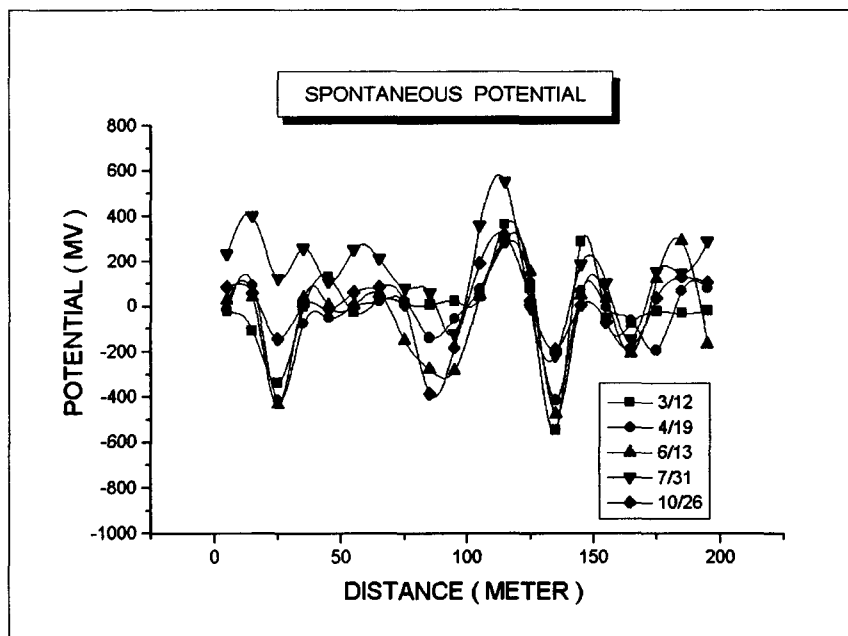


그림 7. 자연전위 Monitoring 결과

3. 토의 및 결론

제시된 모니터링의 결과는 난지도 매립지가 침출수의 부분적 포화 상태로부터

완전 포화상태로 이행하고 있는 과정에 있음을 잘 보여주고 있다. 난지도 매립지가 부분적 포화상태에서 완전 포화상태로 이행하고 있으리라는 점은 기존의 조사 결과(김형수 외, 1995)에서 예측되어온 것으로 금번 모니터링에 의하여 그 모습이 보다 구체적으로 나타났다고 할 수 있다.

비저항 모니터링 결과에서 저비저항대의 분포가 모니터링 측선의 좌측 방향, 즉 남쪽으로 이동하고 있는 경향이나 자연전위 모니터링에서 측선의 남쪽 동일 구간에서 타 지역에 비하여 자연전위의 변화가 심한 점등은 침출수의 유동 방향과 연관시킬 수 있다. 즉 저비저항대의 하향 방향으로의 확대 및 남향 이동 현상이 강수의 침투와 침출수의 형성 및 이동의 결과임은 매립지에서의 매립 물질과 토양 및 지하수간의 예상되는 상호작용과 연관하여 충분한 가능성을 가진다고 할 수 있다. 이러한 판단은 매립지 남쪽 사면 하부에서 침출수 유출 지점이 집중되고 있는 현상과 연관되어 더욱 가능성을 가질 것으로 판단된다.

매립지에서의 지전기적 방법의 적용은 매립지와 그 주변의 오염의 진행 상태를 파악하기 위한 매우 효과적인 방법이며 제시된 난지도에서의 모니터링의 결과는 그 가능성을 제시한 것으로 생각된다. 물론 금번의 지전기 모니터링이 매우 제한된 지역에서 실시된 것으로 난지도 매립지 내에서의 전반적인 변화 양상이 도출된 것은 아니다. 오히려 이번의 연속 계측 결과는 난지도 매립지의 토층 분포가 지금까지 보고된 것보다도 한층 더 복잡함을 시사하고 있으며 계측된 지역이 매립지 배수로에 인접해 있음을 감안한다면 전해질 물질의 공급이 상대적으로 더 활발한 지역의 상태를 반영한 특정 지역의 결과일 수도 있다.

이러한 관점에서 모니터링 측선을 매립지 남쪽 끝 부분까지 연장하고 현재의 측선과 직교하는 방향으로의 측선을 설정, 운영한다면 난지도 매립지에서의 전반적인 침출수 거동이 보다 확실하게 파악이 될 것이다. 아울러 시추공 내에서의 계측 자료, 특히 지구물리검층과 같은 연속 계측 자료의 확보와 매립지 구성물질에 대한 실내실험자료, 매립지 주변에서의 모니터링 필요성도 요구되고 있다. 아무쪼록 매립지에서의 조사가 장기적인 관점에서 보다 체계적이고 종합적으로 이루어져야 할 필요성이 절실하다.

참고문헌

- 권병두, 김차섭, 정호준, 오석훈, 1995, 난지도 매립지 및 그 주변의 지질환경 연구: 중력 및 자력탐사, 자원환경지질, 469-480.
- 김철효, 1994, 난지도 매립지 침출수에 의한 지하수오염 특성분석. 서울대학교 석사학위논문, 94p.
- 김형수, 이기화, 한정상, 1995, 난지도 일대의 침출수 양태조사를 위한 전기비저항탐사. 지질공학 5권 259-276.
- 이기화, 권병두, 오석훈, 김차섭, 1996, 난지도에 인접한 한강변에서의 쌍극자 쌍극자 전기탐사. 자원환경지질 29권, 335-343
- 이기화, 윤종열, 1995, 난지도 폐기물 매립장과 그 주변지역에서의 전기탐사. 대한지하수환경학회, 2권, 64-71.
- Cartwright, K., 1974, Tracing shallow groundwater system by soil temperature. Water Resources Res., 10, 847-855.
- Schumeider, R., 1962, An application of thermometry to the study of groundwater. U.S. Geol. Survey Water-Supply Paper 1544-H, H36-H46.
- Yong, R.N., Mohamed A.M.O. and Warkentin, B.P, 1992, Principles of Contaminant Transport in Soils(福江正治, 加藤義久, 小松田精吉 譯). 東海大學出版會, 310p.