

탄성과 굴절법 토모그래피 방법을 이용한 노은 폐기물 매립장의 지반 구조 분석

김 준 경*

세명대학교 자원환경공학과, 390-711 충청북도 제천시 신월동

Analysis of the Basement Structure of Noeun Waste Landfill Site Using a Refracted Elastic Wave Tomography Survey

Junkyong Kim*

Department of Earth Resources and Environmental Geotechnics Engineering, Semyung University,
Chungbuk 390-711, Korea

Abstract: A seismic tomography using refraction waves is applied to provide information on depth of basement rocks and leachate distribution of the Noeun waste landfill site for the stage of preliminary environmental survey. This method is generally applied to civil and environmental areas. Three lines, apparently perpendicular to the potential leachate flow direction in this site, were installed to investigate the waste landfill site in pseudo three dimensional geometry. The results show that the site is composed of 3 layers and depth of basement becomes shallower at the upstream area of the landfill site than that of the downstream area. Moreover, some parts of the second layer and the basement at the down stream area are partially infiltrated by the leachate, probably related to the disturbed distribution of the different velocity materials within the second layer. In Conclusion, refraction wave tomography is found to be one of the most efficient way to investigate waste landfill site.

Keywords: leachate, refraction wave tomography, inverse modeling

요 약: 본 논문에서는 노은 생활 폐기물 매립장의 사전 환경 영향 평가 단계에서 수행되었고 주로 기반암 깊이와 침출수 분포를 조사하기 위해 굴절법 토모그래피 방법이 수행되었다. 본 탐사 방법은 토목 분야와 환경 분야에 응용되어 왔다. 굴절법 토모그래피 방법을 수행하기 위해 침출수의 예상 유동방향과 직각으로 추정되는 3개의 축선을 설정하여 적용하였다. 본 연구 지역인 노은 생활 폐기물 매립장은 개략적으로 3층 구조로 구성되어 있고 하류에서 상류 지역으로 갈수록 기반암까지 깊이가 점진적으로 알아지고 특히 하류 지역에서는 부분적으로 침출수 등이 충전되어 있는 지층이 존재하고 있음이 확인되었다. 따라서 생활 폐기물 매립장 하부 지반의 침출수의 분포 뿐만 아니라 매립장 하부의 전체적인 지반 구조를 분석하기 위해 굴절법 토모그래피 탐사가 효과적인 방법으로 확인되었다.

주요어: 침출수, 탄성과 굴절법 토모그래피, 역산 모델링

서 론

충북 충주시에 위치하고 있는 노은 생활 폐기물 매립지에 대해 탄성과 굴절법 토모그래피 방법을 적용하였다. 폐기물 매립장의 내부에서 지표로부터 기반암 표면까지 심도 분포를 조사하고 매립장 내부

지반층의 복잡한 탄성과 속도 분포 등을 해석하였다. 본 매립장에 대해 2003년에 이미 환경 영향 평가가 수행되었고 다시 일반 공장부지로서 적합성에 대한 조사를 위해 홍상표(2004)가 2004년 기초 단계 환경 영향 평가를 수행하였다. 이후 보다 효과적인 사전 환경 영향 평가를 수행하기 위해 여러가지 환경 관련 항목에 대한 조사와 더불어 탄성과 굴절법 토모그래피방법도 부가적으로 수행되었다.

폐기물 매립지에 대한 탐사방법은 전기비저항 탐사, GPR 탐사 및 탄성과 탐사와 같은 다양한 지구물리

*Corresponding author: kimjkl@unitel.co.kr

Tel: 82-43-649-1319

Fax: 82-43-648-7853

학적 방법이 존재하며 이러한 방법들이 최근 계속 적용되어 왔다. 지구물리학적 방법은 주로 매립지의 지반 구조와 층서, 매립지의 규모·상태 및 지하 오염 물질의 분포범위와 거동, 매립지의 구조적 안정화 정도, 매립장 토지의 재활용 가능성을 위한 진단을 위해 보완적으로 적용되어 왔으며 그 세부 탐사목적에 따라 다양한 탐사 방법이 선택적으로 적용되었다.

최근 국내에서는 장연수와 이광열(1994), 이재영과 김학수(1996), 최오순(1997), 김지수 외(2002), 송성호 외(2003)가 생활 및 산업 폐기물 매립장에서 전기탐사, 중력, 자력, VLF탐사와 같은 지구물리탐사 방법을 적용하여 폐기물 매립지 특성에 관한 연구를 수행하였다. 특히 최근에 단파장 및 장파장의 전자기파의 특성을 이용한 GPR(지표투과 레이더) 탐사도 폐기물 매립지 탐사에 적용되고 있다.

본 논문에서 적용하고자 하는 탄성과 굴절법 토모그래피를 이용한 지구물리탐사는 최근까지 주로 택지 개발 및 도로, 터널 개발 등과 같은 토목지질분야 뿐만 아니라 폐기물 매립지를 위한 조사를 위해 역시 적용되어 왔다(임해룡, 1992; 조창수 외, 2002). 본 논문에서는 매립장 구성물과 탄성과 속도분포와 관련성을 조사하기 위해 탄성과 굴절법 토모그래피를 이용한 지구물리탐사 방법을 폐기물 매립장에 대한 적용을 시도하였다. 또한 동일 매립장에 대해 김준경 외(2004)에 의해 전기비저항 탐사를 수행하여 얻어진 연구결과를 본 연구 결과와 비교하여 분석하였다.

폐기물 매립장에 적용한 결과 본 탐사방법은 폐기물 매립장의 지표로부터 기반암까지의 심도분포를 탐지하는 목적에 매우 효과적이었으며, 매립장의 물질 구성 상태와 탄성과 속도분포와의 상관관계를 조사하기 위한 목적을 위해서도 역시 효과적인 방법으로 확인되었다.

탐사 지역, 방법 및 자료 측정

연구지역인 노은 폐기물 매립지는 충주시 신니면과 충주시 노은면의 경계지점인 덕고개에 위치해 있는 계곡형 매립지이며 상세한 위치는 Fig. 1에 제시되어 있다. 본 매립지를 수리적으로 살펴보면 매립지 주위의 자연수는 수로를 타고 1.5 km 정도를 흘러가 남한강 지류인 한포천에 합류하고, 12 km 정도 다시 흘러 충주 조정지댐 아래인 충주시 양성면 능암리에서 남한강(한강 하구 지점 181 km)에 합류된다. 주변

지역은 풍화정도가 아주 잘 발달되어 농경지가 대부분이다.

노은 생활 폐기물 매립지는 1992년 6월부터 1999년 6월까지 약 7년 동안 주로 충주시에서 발생하는 생활 폐기물 폐기를 위해 운영되었고, 전체 평균 매립고는 약 4 m, 매립면적은 9,034 m², 매립용적은 27,102 m³이고 현재 매립은 종료되었다.

조사지역은 일반적으로 지형 기복이 완만하나 지역 특성에 적합한 양질의 현장자료를 효과적으로 얻기 위해서는 지오폰 간격 및 탐사측선의 길이 등을 포함한 측선설계가 필요하다. 탄성과 굴절법 토모그래피의 역산모델링에 있어서 초기치의 설정은 매우 중요하며, 만약 지반하부에 대한 초기 속도치가 상대적으로 저속도로 설정이 되면 하부로 파선경로가 형성되지 않아서 정확하게 수렴하지 않는다. 따라서 조사지역과 유사한 조건의 지반의 속도분포를 고려할 필요가 있고 지반하부로 갈수록 점차 속도를 증가시키거나 매우 높은 초기값으로 설정하여 파선이 하부의 속도에 대한 초기값을 적절하게 선정하는 것이 중요하다(조창수 외, 2002). 따라서 이러한 조건을 고려하여 연구 대상지역에 대하여 우선 여러가지 조합의 추정된 초기 속도값에 대해 수치적으로 순차모델링(forward modeling)을 수행하여 파선이 심도에 따라 분포하고 있는 모양을 분석하였고 이를 통해 보다 효과적으로 탐사하기 위한 측선을 설계하였다.

매립장 주변지역의 지형특성을 고려할 때 침출수의 유동 방향은 북동방향(상부)에서 남서방향(하부)으로 추정되었다. 따라서 속도 단면을 효과적으로 얻기 위하여 측선배열은 침출수의 추정유동 방향과 거의 직교하도록 3개의 측선을 설정하였다. 각 측선에 대한 자료수집 인자 및 위치는 Table 1 및 Fig. 2에 각각 제시하였다. Fig 2에서 하부로 표시되어 있는 부분의 좌우 연장선상으로 외부인의 접근을 제한하기 위해 좌우방향으로 철조망이 설치되어 있다.

Fig. 1에서 측선 Line 1, Line 2, 및 Line 3의 위치는 매립지 출입구 경계면(Fig. 1에서 하부라고 표시되어 있는 경계면과 일치)으로부터 상류방향으로 각각 약 10 m, 25 m 및 40 m 만큼 떨어져 위치하고 있다. 탐사장비는 미국 Geometrics사의 12채널 Smartseis를 사용하였다.

또한 본 연구에서 탄성과 굴절법 토모그래피 해석을 위한 프로그램은 조창수 외(2002) 프로그램을 적용하였다. 본 연구를 위해 적용된 프로그램은 굴절과

Table 1. Length, geophone space, location, and source numbers for 3 survey lines for the refraction wave tomography

	Length of survey line	Geophone separation	Distance from lower fence boundary	Total hammer source numbers and source position coordinate at each line
Line 1	66 m	3 m	10 m	10 (from -10 m to 71 m, every 9 m)
Line 2	66 m	3 m	25 m	10 (from -10 m to 71 m, every 9 m)
Line 3	55 m	5 m	40 m	7 (from -2.5 m to 57.5 m, every 10 m)

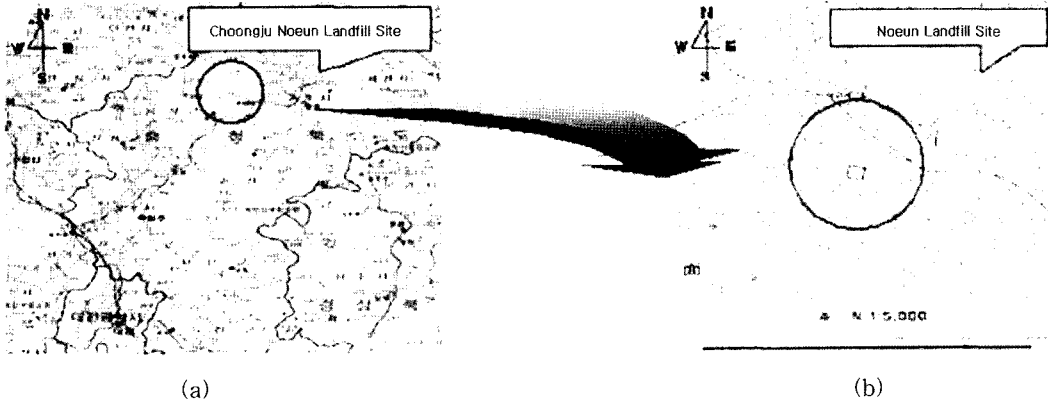


Fig. 1. Geographic map of the survey area of the Noeun waste landfill (Lat. 37.3° Lon. 127.33°) for the refraction wave tomography for (a) 1 : 800,000 scale and (b) 1 : 5,000 scale.

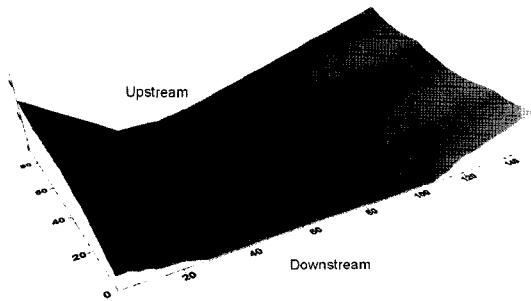


Fig. 2. Location map of 3 survey lines for the refraction wave tomography.

주시에 결과를 제공하는 파면확장법(Qin et al., 1992)을 사용하고 있고 역산모델링은 일반적으로 적용되는 SIRT방법(Dines and Lytle, 1979)을 사용하고 있기 때문에 지형의 변화가 심한 조건에서도 singularity 조건을 피하여 역산모델링이 효과적으로 가능하다. 또한 Fig 2에서 탄성파 굴절법 토모그래피 역산 모델링을 위한 지반의 격자분포에 대한 일반적인 예를 나타내고 있고, 지반하부로 내려 갈수록 단위 격자의 크기가 점차 증가함을 보여주고 있다.

각 측선에 대해 상세한 설명은 Table 1에 제시되어 있고 탄성파의 전파거리가 비교적 가깝기 때문에 탄성파의 감쇠조건과 최대 측정거리 등을 고려하여 탄

성과 발생원으로 해머를 금속 플레이트에 타격시키는 방법을 선택하였다. 각 측정점에서 9회의 Stacking을 실시하여 S/N비를 약 3배 정도 증가시켰다. 측정된 탄성파의 시간축에서 Sampling 간격은 0.005 ms로 설정하였다. 따라서 본 연구에서 측정된 탄성파 자료의 Nyquist 주파수는 100 Hz이다.

본 폐기물 매립장 지역에서 탄성파 굴절법 토모그래피 탐사를 보다 효과적으로 수행하기 위해 발파원 및 수신원의 상대적인 위치가 Fig 4에 제시되어 있다. 그림에서 역삼각형으로 표시된 부분이 발파원의 위치이고 스케일의 눈금으로 표시된 부분이 수신기의 위치이다. 하류에 위치하고 있는 2개의 측선(측선 Line 1 및 Line 2) 길이는 각각 66 m이고 상류로 갈수록 매립장 계곡의 폭이 좁아져 가장 상부(측선에서는 측선길이 55 m)이다. 지오폰의 간격은 하류 2개 측선은 3 m이고 상류 측선(측선 Line 3)에 대해서는 5 m가 되도록 설치하였다.

탄성파 토모그래피 탐사를 효과적으로 수행하기 위하여 측선 Line 1에서는 측선위치 -10 m부터 71 m 까지 9 m 간격을 유지하면서 10회에 걸쳐서 해머를 타격하여 지반진동을 발생시켰고 각각의 지반진동이 발생할 때마다 12개 지오폰을 이용하여 측정하였다.

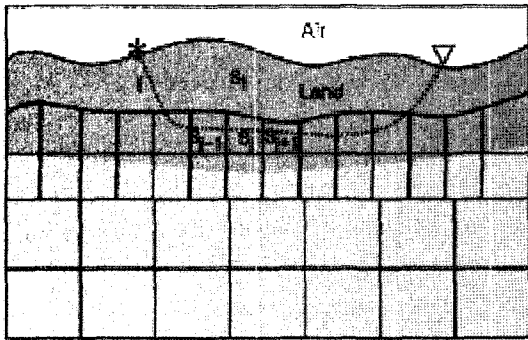


Fig. 3. An example of velocity model for refraction wave tomography. Velocity model is composed of many large and small blocks.

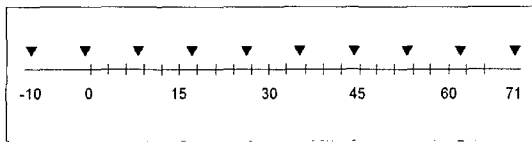


Fig. 4. One of the example of the location of receivers (scale hairs) and source points for the survey Line 1. For this survey line, 10 hammer seismic sources and 12 receivers for each hammer source were used. Numbers represent distances(m) from the origin.

따라서 120 개의 지반진동을 측정하여 초동을 발췌하고 초동시간을 역산에 이용하였다. 측선 Line 2의 경우 측선 Line 1과 동일한 조건을 적용하여 120 개의 지반진동의 초동을 측정하였다. 측선 Line 3의 경우 측선위치 -2.5 m부터 57.5 m까지 10 m 간격을 유지하면서 7 회에 걸쳐서 해머를 타격하여 지반진동을 발생시켰고 각각의 지반진동발생시 12개 지오폰을 이용하여 측정하였다. 따라서 84개의 지반진동을 측정하여 초동을 발췌하고 이를 역산에 이용하였다.

Fig 5는 현장에서 얻은 원시자료 가운데 하나이고 측선 Line 1상에서 35 m에 위치한 발파원으로부터 측정된 12개 지반진동을 보여주고 있다. 측선 Line 1의 오른쪽 경계에서 측정된 3개의 자료, 측선 Line 2의 오른쪽 경계에서 측정된 1개, 또한 측선 Line 3의 오른쪽 경계에서 측정된 4개의 자료에 대해 신호보다 잡음이 현저하게 높아서 역산모델링을 수행할 때 해당 측정자료를 제외하였다.

결과 및 고찰

국내에서 굴절법 탐사를 수행할 경우 대부분의 경

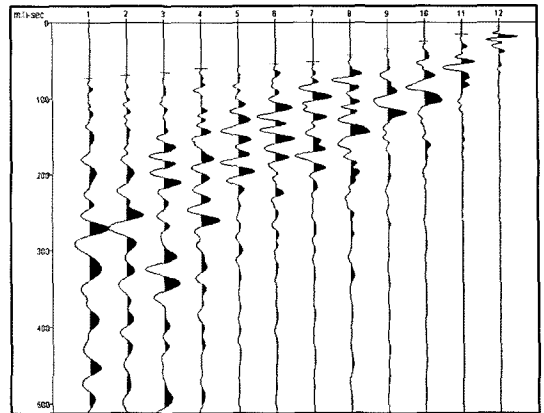


Fig. 5. 12 observed seismograms and the first arrival time pick from hammer source (35 m) for survey line 1. Vertical scale represent travel time (ms), and horizontal scale represents channel number.

우 지형의 굴곡이 많아 복잡하기 때문에, 속도 단면도에서 지형영향에 의한 왜곡현상을 제거하기 위해 역산모델링 수행시 지형 보정이 일반적으로 필요하다. 따라서 본 연구에서도 지형에 대한 정보를 고려한 결과와 고려하지 않은 경우에 대한 결과를 서로 비교하였다. Fig. 6는 측선 Line 2에 대해 역산모델링한 결과로서 지형보정을 한 경우와 보정하지 않은 경우에 대한 결과를 비교하여 보여주는 그림이다. 각각의 그림에서 매질의 탄성파 속도값을 표시하는 기준은 오른쪽 색인표에 주어져 있다. 또한 심도는 단면도의 세로축에 표시되어 있다.

Fig 6 (a)는 지형보정을 수행하지 않은 경우에 대한 속도 단면도 결과이고, Fig 6 (b)는 지형보정을 수행한 경우에 대한 결과이다. 특히 (b)의 경우 왼쪽 경계면에서 점차 높아지는 부분은 폐기물 매립장을 둘러싸고 있는 계곡의 경사면을 나타낸다. Fig 6(a) 및 (b)를 살펴보면 매립장이 개략적으로 상부층, 중간층 및 기반층 즉 3개의 층으로 이루어져 있고 공통적으로 거의 유사한 결과를 보여 주고 있다. 하지만 지형보정의 수행 유무에 따라 중간층의 중앙부분의 속도분포가 대단히 상이한 결과를 보여주고 있다. 따라서 본 연구에서는 3개의 측선에 대해 모두 지형보정을 고려하여 역산모델링을 수행하였다. Fig. 7, Fig. 8 및 Fig. 9은 앞서 제시한 3개의 탐사측선에 대해 지형보정을 고려하여 역산을 수행한 결과를 보여주는 탄성파속도 단면도이다.

역산모델링을 통한 속도분포를 효과적으로 구하기

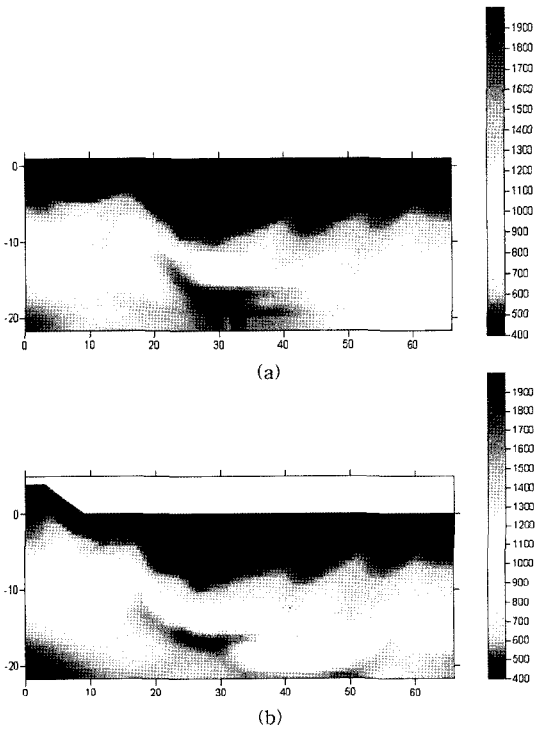


Fig. 6. Velocity section from refraction wave tomography inverse modeling for Line 2 (a) terrane correction (b) no correction with terrane. Velocity index is shown at the right scale bar (m/sec). Vertical scales represent depth(m) (left) and velocity (m/sec) (right).

위해 매립장 주변의 암석의 풍화상태 등을 고려하였고 이에 따라 여러가지 조합의 초기 속도값을 이용하여 역산모델링을 여러 차례 반복하여 예비적으로 수행하였다. 그리고 역산결과를 주변 지질상태와 개략적으로 비교하고 분석하였다. 예비수행한 결과를 이용하여 3개 층선 공통적으로 속도 초기값을 최저 200 m/s에서 최대 2,000 m/s까지 제한하였다.

Fig. 7은 Fig. 1에서 주어진 가장 하부에 위치하고 있는 층선 Line 1에 대해 굴절법 토모그래피 방법을 수행한 결과인 탄성과 속도 단면도이다. Fig. 7에서 알 수 있는 바와 같이 각각의 지층들이 다른 색깔로 뚜렷하게 구분되어 개략적으로 3개의 층으로 구분할 수 있다. 3개 층에 대한 각각의 탄성과 속도는 상부 표층은 약 400~500 m/s, 중간층은 약 500~900 m/s, 그리고 최하부층은 약 900 m/s 이상의 속도를 가지고 있다.

3개 층 각각에 대한 탄성과 속도분포 및 상대적인 위치 등을 종합적으로 고려하여 분석하였다. 가장 상

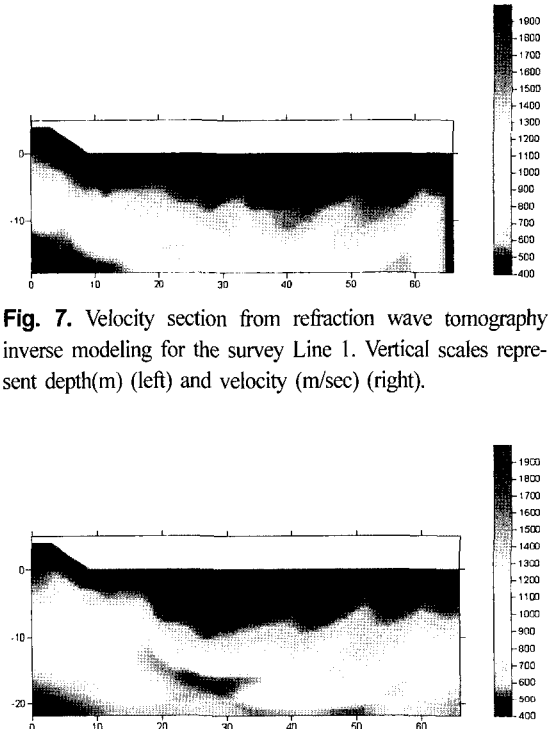


Fig. 7. Velocity section from refraction wave tomography inverse modeling for the survey Line 1. Vertical scales represent depth(m) (left) and velocity (m/sec) (right).

Fig. 8. Velocity section from refraction wave tomography inverse modeling for the curve Line 2. Vertical scales represent depth(m) (left) and velocity (m/sec) (right).

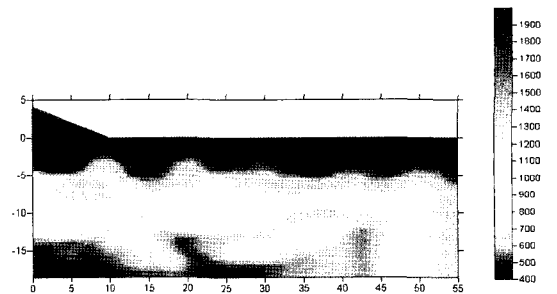


Fig. 9. Velocity section from refraction wave tomography inverse modeling for the curve Line 3. Vertical scales represent depth(m) (left) and velocity (m/sec) (right).

부층은 3개의 지층 가운데 속도가 가장 작은 값을 갖고 있으며 일부는 복토물질과 주로 매립물질로 이루어져 있는 층이다. 속도 단면도로부터 알 수 있는 바와 같이 매립물질의 두께는 층선의 경계부분에서 약 2m이고, 층선의 중앙부분에서 약 6m에서 8m의 두께의 분포를 가지고 있는 것으로 해석된다. 또한 폐기물 매립장 주변의 풍화정도 및 중간층의 속도분포를 고려할 때 하늘색으로 표시되는 중간층은 풍화

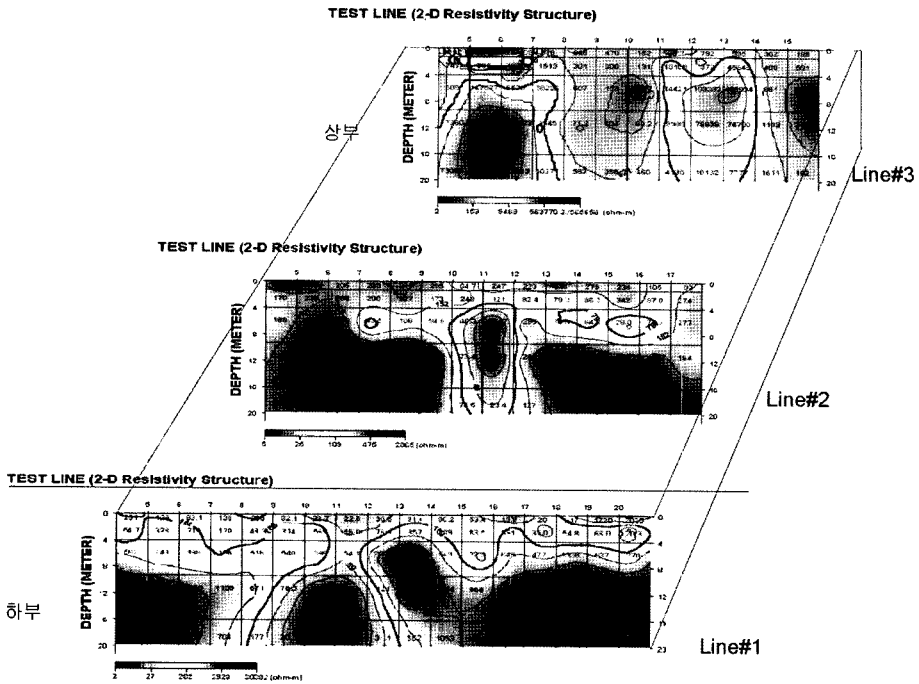


Fig. 10. Three resistivity 2D sections of the Nocun landfill site. The uppermost one represents 2D resistivity section of the most upstream area (line 3). The 2nd and 3rd section represent resistivity section of the line 2 and 1. Blue and red color represent low and high resistivity regions, respectively.

층으로 분석된다. 특히 속도 단면도의 중앙에서 중간층이 본 탐사의 가탐심도인 약 20m까지 연장되어 깊게 분포하고 개략적으로 점시모양을 이루고 있다. 그리고 노란 색에서 붉은 색의 범위를 가지고 있고 가장 하부에 위치하고 있으며 왼쪽 및 오른쪽 경계 아래 부분에서 위치하고 있는 층은 위치 및 속도분포를 고려할 때 폐기물 매립장 지역의 기반암으로 해석된다.

또한 본 측선의 중앙부분에서 중간층의 내부에서 부분적으로 색깔이 복잡하게 뒤섞여 특이하게 교란되어 보이는 부분이 다수 관찰되고 있다. 이는 물론 역산의 분해능과도 관련되지만 실제 매립장 구성물질의 속도 차이의 복잡성에 의해 기인되는 현상으로 해석된다. 매립완료 후 약 7년 정도의 상당한 기간이 경과하여 상부의 매립물질로 이루어진 층으로부터 층간 이동이 비교적 쉬운 침출수가 하부에 위치하고 있는 중간층 및 기반암층 일부까지 부분적으로 서로 다르게 복잡한 양상으로 침투한 것으로 분석된다.

김준경 외(2004)는 쌍극자 배열을 이용한 전기비저항 탐사를 수행하였고 Fig 10에서 제시된 바와 같이 측선 Line 1의 2차원 전기비저항 단면도에서 주변

지층보다 아주 낮은 전기비저항 이상대가 측선 Line 1의 중앙하부에 집중하여 분포하고 있음을 보여주고 있어 유사한 결과를 확인할 수 있었다. 본 연구에서 수행한 3개의 측선 위치는 김준경 외(2004)가 쌍극자 전기비저항 탐사를 수행한 측선 위치와 다소 차이가 있을 수 있으나 위치 확인을 위해 말뚝을 이용하였기 때문에 위치적으로 커다란 차이는 없는 것으로 판단된다.

측선 Line 1의 속도 단면도의 오른쪽 경계면에서 속도구조 이상현상을 보여주고 있다. 앞에서 제시한 바와 같이 오른쪽 경계면에서 측정된 3개의 측선 기록에서 잡음이 과도하고 해당 현장에서 철제 경계망 등으로 인하여 측정여건이 용이하지 못하였다. 따라서 잡음이 과도하게 섞여 있는 측정자료를 제외하고 역산처리를 수행하였기 때문에 측정자료가 충분하지 못하여 경계면에서 나타나는 결과로 해석된다.

Fig. 8은 3개 측선의 중앙에 위치하고 있는 측선 Line 2에 대한 탄성과 속도 단면도이다. 각각의 지층들이 다른 색깔로 뚜렷하게 구분되어 개략적으로 3개의 지층구조를 보여주고 있고 층의 속도값 역시 전체적으로 Fig. 7(측선 Line 1)과 유사하다. 상부층

은 Fig. 7과 유사하게 복토 및 매립물질로 이루어져 있는 것으로 분석되며 층의 두께는 속도단면도에서 알 수 있듯이 축선의 경계부분에서 얇고 축선의 중앙부분에서 점차 두꺼워지고 있다.

또한 속도단면도에서 하늘색으로 표시되는 중간층의 층후가 축선 Line 1에서 제시된 속도단면도에 비해 상대적으로 얇아지고 있음을 보여주고 있다. 또한 중간층 및 최하부 지층 역시 Fig. 7에서 제시된 속도단면도에 비하여 상대적으로 지표면으로부터 가깝게 위치하고 있다. 이는 매립장의 상류방향으로 올라갈수록 중간층 및 기반암층이 지표 가까이에 위치하고 있음을 의미하고, 이는 계곡형 매립장에 전형적으로 나타나는 특징적인 현상이다.

본 축선에서 중간층이 2차원 축선중앙에서 축선경계지역 보다 상대적으로 깊은 심도까지 연장되어 두께가 두꺼워진 형태를 보여주고 있어 역시 개략적으로 접시모양을 이루고 있다. 또한 중간층의 접시모양 부분에서 부분적으로 속도가 상대적으로 대단히 불균질하게 교란되어 보이는 특징을 보이고 있고 이러한 현상은 축선 Line 1에서 얻어진 결과와 유사하다. 이러한 특징은 침출수가 장기간 동안 중간층까지 부분적으로 침투하여 중간층의 구성물질이 속도교란을 보여주는 것으로 해석된다.

김준경 외(2004)가 수행한 축선 Line 2의 2차원 전기비저항 단면도에서 아주 낮은 전기비저항 이상대가 축선의 중앙하부에 집중하여 분포하고 있음을 보여 주었다. 또한 하류 축선(축선 Line 1)에 비해 전기비저항 이상대의 폭이 훨씬 좁아지고 전기비저항 이상대 중심의 심도 역시 하류 축선에 비하여 얇아지고 있음을 보여주고 있다. 따라서 본 연구결과와 유사한 현상을 다시 한번 더 확인할 수 있었다.

Fig. 9는 3개의 축선중에서 지리적으로 최상류에 위치하는 축선 Line 3에 대한 속도 단면도이다. 3개 축선에 대한 속도 단면도를 상호 비교하면 매립층과 2번째 지층 두께는 상류 축선으로 갈수록 상대적으로 점차 얇아지고 있음을 보여주고 있다. 또한 최상류에 위치하고 있는 축선 Line 3의 속도 단면도에서 하류의 2개 축선결과와 비교할 때 중간층 및 기반암이 지표면으로부터 가장 가깝게 발달되어 있음을 보여주고 있다. 또한 축선 Line 1 및 축선 Line 2에서 공통적으로 속도가 상대적으로 보다 불균질하게 교란되는 특징을 보여 주었으나 본 축선에서는 이러한 특징은 거의 보이고 않고 있다. 이러한 현상은 가장 상류지

역이기 때문에 침출수가 생성되었다 하더라도 하류의 축선 Line 1 및 Line 2 지역으로 이동 가능성이 대단히 높아서 침출수 침투로 인하여 발생하는 속도교란 현상이 거의 없는 것으로 분석된다.

김준경 외(2004)가 수행한 전기비저항 탐사결과와 비교하면 축선 Line 3의 2차원 전기비저항 단면도는 축선 Line 1 및 Line 2에 비하여 전기비저항 이상대 중심핵이 거의 사라지고 이상대의 전기비저항값이 주변매질과 차이가 훨씬 감소되었다. 하지만 아직 축선의 중앙부에 전기비저항 이상대의 흔적을 희미하게 보여주는 결과를 얻고 있다. 또한 전기비저항 이상대의 심도가 하류 2개 축선에 비하여 보다 훨씬 얇아지고 있음을 보여주고 있어 본 연구결과와 대단히 유사하다는 것을 확인할 수 있었다.

축선 Line 3에 대한 속도 단면도에서는 Fig. 7과 마찬가지로 오른쪽 경계면에서 속도 이상현상을 보여주고 있다. 앞서 지적한 바와 같이 오른쪽 경계면에서 잡음이 과도하게 지배하는 관측자료를 다수 제외하고 역산처리를 수행하였기 때문에 자료의 부족으로 경계면에서 나타나는 결과로 해석된다.

3개 축선 중에서 하류로 내려갈수록 중간층 내부의 속도교란 현상이 집중적으로 심하게 나타나고 가장 상류 축선에서는 중간층 내부의 속도교란 현상이 거의 발견되지 않고 있다. 이러한 속도교란이 하류 축선에 집중하여 나타나는 현상은 특히 계곡형 폐기물 매립장의 경우 장기간 생성된 침출수가 집적되기 쉬운 하류의 풍화층 및 기반암 일부 지반에 집중되어 분포하는 현상과 매우 잘 일치한다. 이러한 교란 현상은 기존의 연구결과인 전기비저항 탐사 단면도를 통해 역시 확인할 수 있었다.

또한 중간층 내부의 속도교란 현상이 하류 2개 축선에서도 각 축선의 경계부분이 아닌 거의 축선의 중앙부분에서 공통적으로 관찰이 된다. 이러한 중앙부 집중 현상은 기존의 연구결과인 전기비저항 탐사 단면도를 통해 역시 확인할 수 있었다. 이러한 현상을 종합적으로 고려하면 상부의 매립층으로부터 침출수 등과 같이 층사이로 이동이 쉽게 가능한 물질이 중간층 및 기반암까지 장시간 동안 선택적으로 침투하여 부분적으로 분포하고 있는 현상으로 분석된다.

결론

노은 폐기물 매립장에 대해 탄성과 굴절법 토모그

래피 탐사를 수행하여, 특히 매립장 기반암구조 뿐만 아니라 매립장 구성물과 탄성과 속도분포를 공간적인 분포와 상호 관련성을 조사하였다.

탄성과 굴절법 토모그래피 탐사 단면도에 대한 결과를 종합적으로 살펴보면 노은 매립장은 개략적으로 3층의 속도층 구조로 구성되고 역산결과 400 m/s에서 500 m/s의 속도를 가지는 상부층(매립물질층)과 500 m/s에서 900 m/s의 속도를 가지는 중간층, 그리고 900 m/s이상의 하부 기반층으로 이루어져 있다.

가장 하부에 위치하고 있는 축선에서 상부에 위치하고 있는 축선으로 갈수록 중간층 및 기반암의 깊이가 지표로부터 점진적으로 알아지고 있음을 보여 주고 있다. 이는 계곡형 매립장에 나타나는 전형적인 현상이고 상류로 갈수록 중간층 및 기반암의 심도가 점차 알아지는 현상으로 분석된다.

3개 축선의 결과를 비교할 경우 공통적으로 표층에 비하여 중간층(특히 축선의 중앙부분 및 중간층과 기반암과의 접촉부)의 속도 교란 및 두께의 변화가 상대적으로 가장 심하다. 이는 침출수 등과 같이 층사이로 이동이 가능한 물질이 가장 집중되기 쉬운 중간층 및 기반암의 중앙부분까지 장시간 동안 선택적으로 침투하여 부분적으로 분포하고 있기 때문에 야기되는 현상으로 분석된다.

탄성파를 이용한 탄성과 굴절법 토모그래피 탐사방법을 이용하여 노은 매립장 하부지반의 침출수의 분포 현상(하류 및 중앙부)을 등을 효과적으로 파악이 가능하였고 폐기물 매립장 하부의 전체적인 지반구조에 대한 분석이 가능하였다. 일반적인 굴절법 탄성과 탐사법은 몇 개의 수평 혹은 경사층과 같은 단순한 수평층의 구성으로 지반을 모델링하기 때문에 지반의 평균적인 특성파악만 가능하나, 탄성과 굴절법 토모그래피 탐사를 폐기물 매립장에 적용할 경우 세부적인 속도변화의 분포에 대한 탐지까지도 가능한 것으

로 분석된다.

본 폐기물 매립장의 지반조사를 보다 효과적으로 수행하기 위해 더욱 많은 탐사축선을 통해 보다 많은 측정자료가 필요하다. 또한 폐기물 매립장에 일반적으로 적용해 오고 있는 전기비저항 탐사 뿐만 아니라 향후 탄성파를 이용한 탄성과 굴절법 토모그래피 탐사도 병행하는 것이 필요하다고 판단된다.

참고문헌

- 김준경, 홍상표, 김광렬, 조용진, 2004, 전기비저항탐사를 이용한 노은매립장 침출수 분포에 관한 연구. 환경영향평가학회지, 13(5), 223-230.
- 김지수, 한수형, 최상훈, 이경주, 이인경, 이평구, 2002, 장풍 폐광산의 산성광산폐수의 의한 침출수 유동에 대한 지구물리 및 지하화학탐사자료의 상관해석. 지구물리, 5(3), 19-28.
- 송성호, 용환호, 안중기, 김기표, 2003, 제주도 쓰레기매립장 침출수 조사를 위한 전기 및 소형루프 전자탐사의 적용. 물리탐사, 6(2), 1-10.
- 이재영, 김학수, 1996, 불량쓰레기 매립지에 대한 물리탐사 적용사례 연구(I). 한국토양환경학회지, 1(2), 29-38.
- 임해룡, 1992, Fermat 원리 및 수정된 파선경로를 이용한 비선형파선 토모그래피 연구. 서울대학교 공학박사학위논문, 205 p.
- 장연수, 이광열, 1994, 난지도 매립장 지반을 통한 오염이동 특성과 제어. 지하수환경, 1(1), 1-5.
- 조창수, 이희일, 서정희, 2002, 탄성과 굴절법 토모그래피를 이용한 지반의 속도분포 해석. 물리탐사, 5(1), 6-17.
- 최오순, 1997, 물리탐사를 통한 매립장 주변의 지하수분포에 관한 연구. 세명대학교 석사학위논문, 52 p.
- 홍상표, 2004, 충북지역 비위생 매립지 안정화 및 개선방안에 관한 연구. 충북지역환경개발센터, 70 p.
- Qin, F., Olsen, K.B., Cai, W., and Shuster, G.T., 1992, Finite-difference solution of the eikonal equation along expanding wavefronts. Geophysics, 57, 478-487.
- Dines, K.A. and Lyttle, R.J., 1979, Computerized geophysical tomography. Institute of Electrical and Electronic Engineers, 67, 1065-1073.

2006년 3월 15일 접수

2006년 4월 27일 수정원고 접수

2006년 6월 7일 채택