전기비저항, 탄성파 그리고 GPR 탐사를 활용한 총적층 탐사

The Investigation of Alluvium by Using Electrical Resistivity,
Seismic Survey and GPR박 충 화¹ Park, Chung-Hwa원 경 식² Won, Kyung-Sik변 지 환³ Byun, Ji-Hwan민 대 홍³ Min, Dae-Hong윤 형 구⁴ Yoon, Hyung-Koo

Abstract

The geophysical methods have an advantage for investigating the wide area with low cost, and thus the application of these methods has been increased. The objective of this paper estimates the characteristics of alluvium through the geophysical methods including elastic wave, electrical resistivity and ground penetration radar. And the standard penetration test is also carried out for verifying the geophysical data with comparison. The sources of elastic wave method are divided into hammer and sissy and the electrical resistivity method is applied with different sizes, shapes and arrays of electrode for deciding the effective way. The center frequency is determined to be 270 MHz for considering the characteristics of soil. The results of ground penetration radar are also compared with those of standard penetration test. The high resolution shows when the source is a sissy in elastic wave method, however, the water level is not identified. In the electrical resistivity method, the non-polarizable electrode and schlumberger array show highly reliable data and the resolution of ground penetration radar is low. Thus, the results of this study are widely applied for determining the appropriate method when investigating the characteristics of alluvium.

요 지

물리탐사 기법은 적은 비용으로 광범위한 영역을 간접적으로 해석할 수 있는 장점이 있어 다양한 분야에 활용성이 높다. 본 논문의 목적은 물리탐사 기법을 총적층 평가에 적용하고 그 결과를 고찰하고자 하는 것이다. 이번 연구에서는 다양한 물리탐사 방법 중 활용성이 높은 탄성파 탐사, 전기비저항 탐사 그리고 레이더 탐사를 활용하였다. 또한 시추조사도 함께 실시하여 측정한 물리탐사 데이터의 신뢰성을 검증하였다. 발진 에너지원의 종류에 따른 탄성파 탐사의 해상도 비교를 위해 햄머와 땅속발파(sissy)로 나누어 실험결과를 비교하였으며, 전기비저항 탐사는 전극 길이, 형상 그리고 배열방법을 변화시켜 비교 실험을 통해 나타나는 결과의 해상도를 비교 및 검증하였다. 레이더 탐사는 중심 주파수 270MHz를 활용하여 획득한 결과를 시추조사 데이터와 비교하였다. 실험결과 탄성파 탐사는 땅속발파를 활용하였을 경우 큰 에너지원이 발생하여 가진원 Hammer보다 굴절과 감쇄 현상이 적게 발생하여 해상도가 높게 나타났으며, 지하 구조는 시추자료와 유사하게 나타났다. 전기비저항 탐사 결과는 점지비저항 변화가 작은 비분극 전극과 총적층의 경계를 신뢰성 있게 파악 할 수 있는 슬럼버저 배열 방법에서 해상도 높은 결과가 나타났으며, 레이더 탐사

1 정희원, 대전대학교 지반방재공학과 교수 (Member, Prof., Dept. of Geotechnical Disaster Prevention Engrg., Daejeon Univ.)

2 정희원, 지오선택컨설팅(주) 대표이사 (Member, President, Geotech Consultant CO.,LTD.)

3 비희원, 대전대학교 지반방재공학과 학부연구생 (Undergraduate Student, Dept. of Geotechnical Disaster Prevention Engrg., Daejeon Univ.)

4 정희원, 대전대학교 지반방재공학과 조교수 (Member, Assistant Prof., Dept. of Geotechnical Disaster Prevention Engrg., Daejeon Univ., Tel: +82-42-280-2578 Fax: +82-42-280-2570, hyungkoo@dj.ac.kr, 교신저자)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2014년 3월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

는 심도의 제약이 많아 해상도가 많이 부족한 것으로 나타났다. 따라서 본 연구는 물리탐사 기법을 활용하여 충적층 탐사에 적용한 결과로 추후 충적층 탐사에 활용성이 높을 것으로 판단된다.

Keywords : Alluvium, Electrical resistivity method, Ground penetration radar, Seismic survey, Standard penetration test

1. 서 론

최근 토목공사는 해안 근처의 연약지반 외에 하천과 강 주변 등의 수변지역에도 활발히 수행되고 있다. 하천과 강 주변에는 유수의 작용으로 형성된 쇄설성 퇴적층인 충적층(alluvium)이 존재하며 이와 같은 지층은 자갈, 모래 그리고 점토 등이 쌓여 복잡한 거동을 보이고 있다. 따라서 충적층은 대체적으로 미고결 지층으로 구성되어 있으며 지표부는 불포화된 모래 혹은 자갈 등으로 이루어져 있다. 수변지역의 퇴적층 및 지하수를 활용하기 위해서는 퇴적층 바닥내의 수직방향 및 수평방향의 지층 구조를 선행적으로 규명해야 하며, 주로 표준관입시험등의 시추조사를 활용하고 있다.

Park(2009)는 표준관입시험의 적용방법에 대해 지도 및 규제가 이루어지지 않아 발생하는 오차에 대한 지반 조건 및 상태에 따른 적용방법을 제시하였다. 따라서, 표준관입시험은 비교적 지반의 정확한 특성을 평가할 수 있는 장점이 있지만 표준화 되지 않은 조사 방법과 광범위한 지형을 탐지하기 위해서는 비경제적인 단점이 있다. 하지만 지표 물리탐사 방법은 시추조사 보다 다소 적은 비용으로 넓은 지형을 탐지 할 수 있는 장점이 있어 활용성이 높다(Beres and Haeni, 1991; Bano et al., 2000; Gourry et al., 2003).

물리탐사 기법은 경제적인 측면에서 기존의 시추공 탐사 방법들보다 장점을 지니고 있지만, 각 지층간의 임피던스 차이가 확연히 구별되지 않는다면 신뢰성이 부족한 단점도 있다. 따라서 현재 미고결층 혹은 모래지층의 특수성을 띄고 있는 충적층 탐사에는 제한적으로 물리탐사 기법이 활용되고 있다. Kim et al.(2002-a)는 탄성과 탐사 중 굴절법 탐사 방법을 적용하여 충적층 내부 지층과 지하수위 탐사에 활용하였으며 그 이후에는 물리 탐사 기법 중 레이더 기법을 적용하여 충적층의 지하 구조를 탐사하였다(Kim et al., 2002-b). 하지만 모두 시추 데이터 없이 결과를 증명하기 어려워 간접적인 해석만을 시도하였다. 또한 Kim et al.(2003)은 탄성과 탐사

와 레이더 탐사를 복합적으로 적용하여 충적층의 퇴적 구조 파악에 활용하였으며 탄성과 탐사는 지하수위 탐사에 유용하고, 레이더 탐사는 조사심도가 제한적이지만 정밀성은 높다는 것을 보여줬다. 시추조사 결과와 물리탐사 결과를 직접적으로 비교하여 분석한 연구결과도 제시되고 있으며, Ham et al.(2003)은 전기비저항 탐사와 시추 결과를 이용하여 각 데이터의 연관성 및 물리탐사 기법의 신뢰성을 도출했다. Yoo et al.(2005)도 전기비저항 탐사와 시추조사 결과를 비교하여 전기비저항 탐사시 적절한 전극간격을 제시하였다. 또한, Oh and Sun(2004)은 표준관입시험의 N값과 전기비저항분포의 비교를 통해 일반적으로 전기비저항이 낮은 경우에는 N값도 낮은 범위를 보이는 것을 확인하여 필댐의 안정성을 평가 하였다. 선행 연구를 종합해 보면 충적층 특성을 평가하기 위해 활용하고 있는 물리탐사 기법은 대체적으로 단일 기법으로 획득한 데이터와 시추결과와 비교하고 있으며, 전체적으로 복합적인 물리탐사를 적용한 사례는 아직 미흡한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 탄성과 탐사, 전기비저항 탐사 그리고 레이더 탐사를 모두 충적층 평가에 적용하여 데이터의 신뢰성을 비교하고자 하였으며, 참값을 도출하기 위하여 추가적으로 시추조사도 수행하였다.

본 논문은 다양한 물리탐사 기법 중 이번 연구에 활용한 탄성과 탐사, 전기비저항 탐사 그리고 레이더 탐사에 대한 간략한 소개로 시작하며 현장 개요와 현장 물리탐사 실험 방법에 대해서도 서술하였다. 또한 탐사실험 결과와 시추조사 결과를 상호 비교하여 활용한 물리탐사 기법 중 신뢰성이 높은 물리탐사 기법을 제시하였으며 추후 본 연구의 내용을 발전시켜 충적층 탐사에 효과를 증대시킬 수 있는 물리탐사 기법의 고찰에 관한 내용도 수록하였다.

2. 탐사 개요

본 연구에서 활용한 물리탐사 기법은 탄성과 탐사, 전

기비저항 탐사 그리고 레이더 탐사로 이번 절에서는 각각의 탐사 방법에 대해 소개하고자 한다. 각각의 방법에 대한 자세한 설명은 참고문헌으로 대체하고자 하였으며, 여기서는 간략한 내용만을 언급하였다.

2.1 탄성과 탐사

탄성과 탐사는 지표 부근의 인공적인 소스를 이용하여 서로 다른 임피던스를 가지고 있는 지층에서 반사 혹은 굴절되어 오는 파형을 획득하고 이를 분석하는 방법이다. 인공적인 소스는 주파수 대역과 가탐심도(Skin depth)를 고려하여 다이내마이트, weight-drop, 땅속발파(sissy), 햄머 등이 활용되고 있다. 본 연구에 사용된 땅속발파는 최대 수신거리가 280m로 햄머에 의한 가진원보다 최대 수신거리가 200m 더 길어 수신의 해상도가 높다. 수신거리에 따른 표준 화약량은 0.1km 이하에서 0.1~0.2kg, 0.1km 이상에서 0.4~0.7kg의 화약량이 필요하다. 이와 같은 인공적인 소스는 입자의 운동과 파동의 진행방향이 서로 평행(P-wave)하고 수직(S-wave)하게 전파하는 특성으로 지하매질의 특성을 평가한다. 임피던스 차이에 의한 반사파와 굴절파는 스넬의 법칙(Snell's law)과 임계각(critical angle)등의 원리로 분석된다. 가진원에 의해 수신기에는 P파가 처음 도착하고, S파, 지층 경계로부터의 반사파, 표토층 근처를 달라 전파되는 표면파 등과 같은 파동이 차례로 감지된다. 처음 도착한 파동을 초동(first arrival)이라 부르며, 가진원에 따른 초동 도착 시간을 표시한 시간 곡선(travel time curve)를 통해 표층의 두께 측정이 가능하다. 즉, 직접파와 굴절파의 전파 시간을 이용해 지층의 속도와 두께를 측정하는 탐사법이 굴절법 탐사이다.

2.2 전기비저항 탐사

전기탐사는 지층을 구성하는 물질의 전기비저항, 유전율 그리고 전기의 화학적 성질 차이를 이용하여 지하 구조상태나 지하자원의 존재 여부 등을 판단하는 방법이다. 본 연구에서는 전기탐사 중 지층의 전기비저항 차이를 이용하여 탐사지역의 이상대 확인 및 개략적인 지층 현황을 조사하였다. 전기비저항 탐사의 주된 측정 원리는 한쌍의 전류전극에 다른 한쌍의 전위전극을 사용하여 측정하는 것으로 2쌍(4개)의 전극의 거리를 다양하게 배치하여 슬럼버저 배열(Schlumberger array), 웨너

배열(Wenner array), 단극 배열(Pole-pole array) 그리고 쌍극자 배열(Dipole-dipole array)등이 활용되고 있다. 각 전극배열에 대한 전기비저항 계산 방법(거리계수)은 다음과 같다(Reynolds, 2003).

$$\text{Schlumberger} \quad \pi n(n+1)a \quad (1)$$

$$\text{Wenner} \quad 2\pi na \quad (2)$$

$$\text{Pole-pole} \quad 2\pi na \quad (3)$$

$$\text{Dipole-dipole} \quad 2\pi n(n+1)(n+2)a \quad (4)$$

여기서, π 는 3.14, n 은 전극 계수, a 는 전극간의 거리 이다.

2.3 레이더 탐사

레이더 탐사는(Ground Penetration Radar)일반적으로 GPR 탐사라 불리며, 송신 안테나로부터 발산된 전자기파가 지하의 불균질대에서 반사 혹은 투과되어 수신 안테나에 감지된 시계열 신호로 지반구조 및 지하 매설물 등을 영상화하는 기법이다. 레이더 탐사는 지표탐사 방법과 시추공탐사 방법으로 구분되나 실제적으로는 이동성이 높은 지표탐사 방법의 활용성이 좋다. 레이더 탐사는 수 MHz~수 GHz에 걸친 고주파수 전자기파를 사용하며, 펄스 형태의 전자기파를 이용하는 시간영역탐사와 단일 주파수의 연속파를 이용하는 연속파 레이더 탐사로 분류된다. 레이더 탐사는 지하 매질의 유전율의 차이를 이용하므로 금속 매설물등을 제외하면 대체적으로 매질이 다른 경계면에서 반응한 데이터를 측정한다.

3. 현장 실험

현장실험은 경상남도 의령군 낙서면 여의리의 낙동강 일원으로 의령군 강변여과수 개발사업 부지 내에서 수행되었다. 지층의 수직적인 분포 특성 및 그 범위를 파악하기 위하여 표준관입시험(Standard Penetration Test: SPT)도 수행하였으며 측정 결과는 물리검층 결과와 비교하여 신뢰성을 검증하고자 하였다.

3.1 표준관입시험

표준관입시험은 지층의 수직적 특성 평가에 활용성

이 높고 실험방법이 비교적 간편하여 본 연구에 적용하였다. 표준관입시험이 수행된 지역은 Fig. 1과 같이 YB-1~YB-6까지 총 6개 지점이며, 일정한 간격을 유지하여 하부지반의 특성을 평가하였다. 또한 Fig. 1은 실험이 진행된 부지가 낙동강과 상당히 가깝게 위치하고 있음을 시사하며 이를 통해 대상지반은 본 연구의 목적에 부합되는 충적층임을 간접적으로 확인할 수 있다.

Fig. 1. Site description (○ demonstrates the position of SPT)

3.2 탄성과 탐사

탄성과 탐사는 선행적으로 실시한 시추조사의 결과와 데이터를 비교할 수 있도록 시추공과 시추공 사이를 지나갈 수 있도록 측선을 설정하였다(Fig. 1 참조). 본 탄성과 탐사 실험에서는 충적층에 효율적인 인공신호를 제시하고자 일반적으로 사용하고 있는 햄머와 상대적으로 에너지가 큰 땅속발파(sissy) 소스를 번갈아 이용하며 실험을 진행하였다(Fig. 2 참조). 측선 S-1, S-2, 그리고 S-3의 경우는 햄머와 땅속발파 이용 시 타격 에너지가 충분히 전달되었지만, S-4와 S-5의 경우 햄머는 측선 연장길이 길어져 충분히 에너지가 반영되지 못하는 것으로 탐사 도중 확인하였다. 따라서 S-4와 S-5의 측선에서는 땅속발파만을 가진원으로 이용하여 실험을 진행하였다. 측선거리가 짧은 S-1, S-2 그리고 S-3는 총 5회를 타격 및 발파하여 탄성파를 가진시켰으며 상대적으로 측선거리가 긴 S-4와 S-5는 13회 발파로 데이터를 획득하였다. 수신기는 Geospace사의 GS-20DH제품이며 고유주파수는 20~40Hz($\pm 5\%$) 탐사에 사용된 총 수신기의 수량은 57개로서 5.0m(S-1, S-2, S-3: 24개 지오폰, S-4, S-5: 33개 지오폰)의 간격으로 설치하였다. 반사법 탐사는 지층 내부 경계에 대한 분해능이 높아 지층구조의 단면을 정밀 측정이 가능하다. 굴절법 탄성과 탐사는 지층의 물성인 속도를 도출함으로써 지층 속도에 의해 지하영상화가 가능하여 연약지반의 위치, 기반암의 심도등을 정확히 측정 할 수 있는 장점이 있다(Shin et al., 2008). 본 논문에서는 충적층 탐사시 지하수위면 조사

Fig. 2. Elastic wave oscillation

에 유용하고 내부 퇴적 구조 평가에 효율적으로 알려진 굴절법탐사를 선택하여 수행하였다(Kim et al., 2003).

3.3 전기비저항 탐사

본 연구에서는 충적대수층 전기비저항 탐사시 전극과 지층의 접지가 불완전한 단점을 개선하고 적합한 방법을 연구하고자 접지전극 형태, 전극 길이, 전극 배열 그리고

측점 간격을 구분하여 측정 방식을 상이하게 적용하였다. 접지전극의 경우는 일반적으로 전기비저항 탐사에 활용되고 있는 일반적인 전극과 비분극전극을 동시에 이용하였다. 비분극전극은 전극 내부에 황산구리 전해질을 포함하고 있어 금속과 물이 접촉하여 발생하는 분극작용을 없애고 전극 전위의 영향도 극히 작게 하여 전극과 지층이 최대한 일체가 될 수 있는 장점이 있다. Fig. 3(a)는 비분극전극의 모식도와 지표에 설치된 전경을 보여준다.

Fig. 3. Electrode

Table 1. Summary of experiments

	Name	Point interval (m)	Line length (m)	Electrode	Measurement	Array
E-1	ED1	5	135	Original	RES	Dipole-Dipole
	ED1-10	10	130	Original	RES	Dipole-Dipole
	EDL1	5	135	Long	RES	Dipole-Dipole
	ES1	5	135	Original	RES	Schlumberger
	ES1-10	10	130	Original	RES	Schlumberger
	ESL1	5	135	Long	RES	Schlumberger
	ID1	5	135	Non polarizable	RES	Dipole-Dipole
	IS1	5	130	Non polarizable	RES	Schlumberger
E-2	ED2	5	135	Original	RES	Dipole-Dipole
	ED2-10	10	130	Original	RES	Dipole-Dipole
	EDL2	5	135	Long	RES	Dipole-Dipole
	ES2	5	135	Original	RES	Schlumberger
	ES2-10	10	130	Original	RES	Schlumberger
	ESL2	5	135	Long	RES	Schlumberger
	ID2	5	135	Non polarizable	RES	Dipole-Dipole
	IS2	5	130	Non polarizable	RES	Schlumberger
E-3	ED3	5	135	Original	RES	Dipole-Dipole
	ES3	5	135	Original	RES	Schlumberger
	ID3	5	135	Non polarizable	RES	Dipole-Dipole
	IS3	5	130	Non polarizable	RES	Schlumberger
E-4	ED4	5	205	Original	RES	Dipole-Dipole
	ES4	5	205	Original	RES	Schlumberger
	ID4	5	205	Non polarizable	RES	Dipole-Dipole
	IS4	5	205	Non polarizable	RES	Schlumberger
E-5	ED5	5	205	Original	RES	Dipole-Dipole
	ES5	5	205	Original	RES	Schlumberger

전극 길이는 Fig. 3(b)와 같이 일반적인 전극 크기(직경 x 길이: 1cm x 40cm)외에 장대전극(직경 x 길이: 1cm x 100cm)을 활용하여 최대한 접지저항이 작아질 수 있도록 유도하였으며 일반적인 전극은 약 20~30cm 그리고 장대전극은 약 50~70cm를 지표에 관입시켰다. 전극 배열 방법은 수평법에 적합한 것으로 알려진 Dipole-Dipole 배열방법과 지층의 수직탐사에 적합한 Schlumberger 배열방법을 활용하여 각각의 해상도 차이도 비교하고자 하였다. 마지막으로 측점 간격은 5m와 10m로 구별하여 측점 간격 차이에 따른 충적대수층 탐사의 정확도도 평가하고자 하였다. 전기비저항 탐사 위치는 탄성과 탐사와 유사하게 표준관입실험을 수행한 시추공과 시추공 사이를 지나갈 수 있도록 배열하였다. 총 5개(E-1~E-5)의 측선을 선정하였고 E-1, 2 그리고 3의 길이는 모두 135m이며 나머지 E-4 그리고 5는 205m로 설정되었다. 각 방향에 대한 자세한 전극형태, 배열방법 그리고 측점간격은 Table 1과 같으며 총 26번의 지표 전기비저항 탐사 실험을 진행하였다. Table 1은 일반적인 전극(쌍극자배열: ED1~ED5, 슬럼버저배열: ES1~ES5), 장대전극(쌍극자배열: EDL1~EDL2, 슬럼버저배열: ESL1~ESL2), 비분극전극(쌍극자배열: ID1~ID4, 슬럼버저배열: IS1~IS4) 그리고 10m 측점간격(쌍극자배열: ED1-10 그리고 ED2-10, 슬럼버저배열: ES1-10 그리고 ES2-10)을 보여준다. E-1과 E-2 측선은 거의 모든 조건을 실험에 반영하였지만 E-3~5 측선은 현장여건상 장대전극을 설치하기 어려워 일반전극과 비분극전극만을 설치하여 실험을 진행하였다.

3.4 레이더 탐사

충적층의 지층 두께 및 지하수위 파악에 레이더 탐사의 적용성을 평가하도록 선행적으로 실시한 물리탐사 기법과 유사하게 시추공 주위를 탐사하였다. 전체 측선은 G-1, G-2, G-3 그리고 G-4의 총 4개로 구성되며 각 측선 연장길이는 각각 40m(G-1~3)와 80m(G-4)이다. 탐사에 활용된 장비는 안테나 중심 주파수가 270MHz를 갖는 GSSI사의 Sir-3000이다. 측정된 자료는 신호대 잡음비를 향상시키기 위하여 적절한 신호처리를 거친 후 파형의 형태, 흑백 또는 칼라 명암도로 영상화하였다. 지하 단면 영상에서 나타나는 반사 패턴의 인식이 GPR 탐사 자료의 해석에서 중요한 위치를 차지한다. 따라서, 안테나 주파수, 조사 목적, 탐사 대상 등에 부합하도록 일련의 신호처리 과정을 구성하고 자료처리 변수를 설정하였다. 연속파를 이용한 레이더탐사 자료는 먼저 푸리에 변환 등을 이용하여 시간영역 자료, 즉 펄스 형태의 자료로 변환하였다.

4. 실험 결과 및 토의

4.1 시추조사

대상지역의 총 6개 공에서 수행된 표준관입실험 결과는 Fig. 4와 같이 모래, 자갈 그리고 연암층으로 구성되며, 모래지반은 측정된 N 값의 상대적인 크기를 가지고

Fig. 4. Boring investigation results

2개의 지층으로 재분류하였다. 표준관입시험 결과 모래층의 N값은 주로 30/30이하로 느슨~보통조밀 한 상태로 나타나고, 자갈층의 N값은 주로 30/30이상으로 조밀~매우조밀한 상태로 나타났다. 따라서 대상지반은 상부 하상퇴적층과 하부 기반암으로 구성되며 퇴적층은 주로 모래와 자갈, 기반암은 사암과 이암이 분포하고 있는 것으로 나타났다. 지하수위는 표준관입시험 후 3개의 위치(YB-1, YB-2 그리고 YB-3)에서 관측공을 추가적으로 설치하여 계측하였으며 측정결과 평균적으로 약 2.5m로 나타났다.

4.2 탄성과 탐사 결과

굴절법 탐사로 수행된 탄성과 탐사 결과는 해상도가 좋은 토모그래피 기법으로 해석하고자 수신점 간격인 각 cell의 역속도를 이용하였으며, 지형기록도 반영하여 지반의 탄성과 속도 분포를 예측하였다. 햄머로 타격한 결과가 질적인 만족도가 떨어져 여기서 해석한 결과는 모두 땅속발파(sissy)를 통하여 얻은 결과만을 이용하였으며, 추가적인 설명은 결론 및 토의 부분에 수록하였다. Fig. 5는 탄성과 탐사를 통하여 나타난 주시곡선이며, 주시곡선은 굴곡이 형성되는 곳이 대략 3구간으로 나누는 것을 보여준다. 주시곡선의 기울기를 통하여 각

Fig. 5. Travel-time graph

구간의 평균속도는 Table 2와 같이 각각 0.3km/sec 이하, 0.3~1.3km/sec 그리고 1.3~3.0km/sec로 나타났다. 또한 각 지층의 심도는 첫 번째 지층과 두 번째 지층이 각각 평균심도 7.0m와 12.8m 그리고 마지막 지층은 평균심도 14m임을 알 수 있다(Fig. 6 참조). 이와 같은 결과로 속도 범위에 따른 지층을 정확하게 예측하기 어렵지만 시추조사 결과와 비교하면 대상 지반은 대략 토사, 풍화암 그리고 암반으로 구성되어 있을 것으로 판단된다. 비록 시추자료 결과와 비교할 때 전체적으로 지층의 분포가 유사하게 나타났지만, 하부지층인 기반암은 자갈층과 구별하여 탐지하기 어려운 것으로 나타났다. 즉, 주시곡선에서의 기울기를 통하여 첫번째와 두번째 층의 구분이 확실하지만, 기반암에 해당하는 세번째 층은 그 경계선이 모호하여 지층 분류의 오차가 발생한 것으로 판단된다. 이와 같은 이유는 굴절법의 한계로 판단되며 추후에는 반사법도 함께 사용하여 데이터의 비교 분석이 필요할 것으로 사료된다.

탄성과 탐사는 본 연구에서 굴절법 방법을 적용하였으며 이때 가진원을 햄머와 화약폭발 (sissy) 두가지로 사용하여 결과를 비교하였다(Fig. 7 참조). 비교 결과 햄머에 의한 타격은 느슨한 모래층에서 굴절과 감쇄현상이 발생하여 가진원으로부터 멀리 있는 수신기에 측정된 파형의 크기는 잡음보다 낮아 결과 해석이 잡음과 측정 파형의 구분이 모호했다. 반면 화약폭발 가진원은 Hammer에 의한 타격보다는 보다 정확한 결과를 얻을 수 있음을 확인하였다. 또한 자갈층과 기반암(이암)의 속도차이가 발생하지 않아 기반암의 경계는 탐사결과로 확인할 수 없었다. 기반암인 이암의 분포심도는 대수층인 자갈층의 분포심도를 의미하는 측면에서 중요한 지층이며 이는 탄성과 탐사 활용시 굴절법뿐만 아니라 반사법도 적용해야 신뢰성 높은 계측 값을 얻을 수 있을 것으로 판단된다. 또한, 본 논문은 층적층 내부 구조 파악에 목적을 두고 있어 지하수 측정에는 적합하지 않지만 Kim et al.(2002-a)에서 제안하였듯이 추 후 연구를

Table 2. Results of elastic wave method

	Stratum	S-1	S-2	S-3	S-4	S-5
Average velocity (km/sec)	1 Layer	0.3 km/sec $\geq$				
	2 Layer	0.3~1.3 km/sec				
	3 Layer	1.3~3.0 km/sec				
Layer divide (m)	1 Layer	5.3 m~7.6 m	6.2 m~8.2 m	6.7 m~7.4 m	6.9 m~7.5 m	7.0 m~7.5 m
	2 Layer	12.1 m~15.0 m	11.8 m~14.3 m	11.1 m~12.7 m	13.1 m~14.8 m	10.7 m~13.5 m
	3 Layer	15.0 m $\leq$	14.3 m $\leq$	12.7 m $\leq$	14.8 m $\leq$	13.5 m $\leq$

(a) S-1 Section

(b) S-2 Section

(c) S-3 Section

(d) S-4 Section

(e) S-5 Section

Fig. 6. Elastic wave prospecting results

Fig. 7. Comparison of the Sissy and Hammer blow

통하여 충적층 지하수 측정에 적합한 탄성과 탐사를 수행할 수 있을것으로 보인다.

4.3 전기비저항 탐사 결과

본 연구지역은 낙동강 수변의 평탄한 모래 지층으로 통상적인 지표 전기비저항 탐사에서 음의 겉보기 비저항이 나타날 수 없을 것으로 판단하였다. 따라서 현장 탐사 결과에서 나타난 음의 겉보기 비저항은 주변의

(a) ED1

(b) ED1-10

(c) EDL1

(d) ES1

(e) ES1-10

(f) ESL1

(g) ID1

(h) IS1

(i) ED2

(j) ED2-10

(k) EDL2

(l) ES2

(m) ES2-10

(n) ESL2

Fig. 8. Electrical resistivity results

(o) ID2

(p) IS2

(q) ED3

(r) ES3

(s) ID3

(t) IS3

(u) ED4

(v) ES4

(w) ID4

(x) IS4

(y) ED5

(z) ES5

Fig. 8. Electrical resistivity results (Continued)

잡음이나 측정 장비의 오류로 판단하여 해석 결과에서는 제외하였다(Cho et al., 2002). 전기비저항 탐사 해석은 Advanced Geosciences, Inc(AGI) 사의 EarthImager 2D프로그램을 활용하였으며 버전은 2.4.1이다. 26번의 실험을 통하여 역산된 전기비저항 단면도는 Fig. 8과 같

으며, 탄성과 탐사 결과와 동일하게 표준관입실험 실험 결과의 지층 분류를 함께 도시하였다. 심도 5m까지는 대체적으로 약 1000 Ω-m 이상의 고비저항대가 나타났으며, 그 이후 하부에는 약 300 Ω-m의 저비저항대가 산출되었다. 이와 같은 이유는 하부지반이 지하수에 의하

여 포화되어 있음을 암시하며 이와 같은 결과로 지하수위 위치가 약 5m임을 간접적으로 평가할 수 있다. 하지만 관측공 설치로 계측한 지하수 위치는 약 2.5m로 나타났으며 그 차이는 전기비저항 탐사시 활용한 전극간격 설정에서 나타난 오차로 볼 수 있다. 시추 조사 결과 하부 포화대층은 자갈섞인 모래층과 모래섞인 자갈층 및 기반암인 이암층으로 분류되어 분석되었다. 기반암인 함수율이 높은 이암층은 탐사결과에서는 저비저항대가 분포하는 구간으로서 충전대수층으로 오인될 수 있으며, 시추결과에서 기반암의 분포를 확인할 수 있었다. 본 연구에서 추가적으로 진행한 접지 전극 형태와 전극 배열에 따른 결과를 살펴보면 접지 전극은 비분극 전극을 사용할 때 가장 해상도가 높게 나타났으며 전극 배열은 슬럼버저(Schlumberger) 배열이 충전층 탐사에 적합한 것으로 나타났다(Fig. 8(h), (p), (t) 참조). 본 실험결과에서뿐만 아니라 Kim et al.(2011)에 의하면 슬럼버저(Schlumberger) 배열은 급격한 2차원적 구조적 변화를 갖는 지역에서 보다 층상구조를 갖는 지하구조에서 적합하다고 명시되어있다. 또한 전체적인 결과 데이터를 볼 때 측정 간격은 좁을수록 지층 분류와 지하수위 탐지에 합리적임을 알 수 있고 전극 길이에 대한 영향이 다소 작게 나타났다. 따라서 전기비저항을 충전층에 적용할 경우에 전극 간격으로 인해 수직적 분해능 차이를 최소화 되도록 조절한다면 지층분류뿐만 아니라 지하수위까지 합리적으로 파악할 수 있을 것으로 판단된다.

전기비저항 탐사는 접지전극 형태, 전극 길이, 전극 배열 그리고 측정 간격으로 구분하여 충전층 지하구조 특성을 파악하였다. 접지전극 형태는 전극 자체에서 전해질이 유출되는 비분극 전극이 접지비저항 값 변화가 작아 일반적인 전극보다 신뢰성 높은 데이터를 보였다. 전극 길이는 접지 면적을 높여 접지저항을 낮추기 위하여 시도하였지만 충전층 특성상 간극비와 투수계수가 큼에 따라 면적만을 이용하여 해상도를 증가시키기는 어려운 것으로 나타났다. 전극 배열은 슬럼버저 배열(Schlumberger array)과 쌍극자 배열(Dipole-dipole array)을 활용하였으며 측정 결과 슬럼버저 배열의 결과 값이 우수하게 나타났다. 국내 지형에서는 대체적으로 쌍극자 배열 방법이 추천되고 있지만 본 연구지역인 충전층에서는 접지저항이 낮아져 그에 따라 경계를 신뢰성 있게 파악할 수 있는 기법은 슬럼버저 배열로 나타났다. 마지막으로 측정간격은 측선위치에서 5m와 10m로 설정하였으며, 측정간격이 좁을수록 획득한 데이터의 양

이 많고 음의 저항값도 거의 없는 것으로 나타났다. 따라서 지층의 경계면과 지하수위가 표준관입실험 결과와 거의 유사하게 나타났다. 따라서 물리탐사 기법 중 전기비저항 탐사가 지층 및 지하수위 평가에 적합하다고 판단된다.

4.4 레이더 탐사 결과

레이더 탐사 결과는 Fig. 9와 같으며, Fig. 9의 가로 방향은 측정 거리 그리고 세로 방향은 지층심도를 나타낸다. 앞서 언급하였듯이 G-1, G-2 그리고 G-3의 측정 거리는 약 40m로 나타났으며 나머지 G-4는 약 80m를 보인다. 레이더 탐사 결과는 사용된 주파수 범위에 의하여 탐사심도가 제한적이므로 하부 지층 약 3m까지만 해상도가 나타났다. 따라서 레이더 탐사 결과는 타 물리탐사 기법처럼 다양한 지층을 도시하지 못하는 한계성을 보였다. 결과값을 보면 평균 약 1.5m 심도(빨간색 점선)에서 확연하게 지층이 구별되는 것을 알 수 있으며 평균 심도 약 2.0m 이하에서는 하부의 데이터가 상부보다 밀한 것도 유추할 수 있다. 이를 토대로 정확한 지층 분류를 하긴 어렵지만 표준관입실험결과를 토대로 분석하면 평균 심도 약 2.0m 이하에서는 지하수 층이 나타난 것으로 판단되며, 평균 심도 약 1.5m에서는 지하수의 모세관 현상으로 습윤상태로 분포하는 모래층의 임피던스 차이로 반사가 발생한 것으로 판단된다. 따라서 레이더 탐사결과는 가용할 주파수 범위가 충분하다면 더욱 면밀한 지층을 평가할 수 있을 것으로 판단되며, 본 연구결과와 지하수 위치를 대략적으로 파악할 수 있는 특성을 보였다.

레이더 탐사 해석에서 측정심도는 일반적으로 유전상수에 의해 계산된 속도값을 곱하여 심도가 결정된다. 하지만 매질이 비균질 및 이방성의 특성이 있어 정확한 유전상수 결정이 어렵고, 그에 따라 측정 심도에 오차가 동반된다. 이번 실험에서 레이더 탐사의 중심 진동수는 270MHz를 사용하였으며, 지하수면 아래에 존재하는 타 지층은 탐지하기 어려운 것으로 나타났다. 이와 같은 이유는 지하수면에서 큰 에너지가 반사되어 하부로 전파되는 전자기파의 에너지가 상대적으로 약해진 것으로 판단된다. 따라서 레이더 탐사를 이용하여 충전층의 지층특성을 파악하기 위해서는 중심 진동수가 270MHz 이하인 낮은 영역의 안테나를 이용하는 것이 바람직하며 또한 추가적인 실내실험을 진행하여 지층의 정확한

Fig. 9. GPR results

유전상수 값을 산정하는 것이 필요하다.

5. 결 론

본 연구에서는 물리탐사 기법을 활용하여 충적층 지하구조 특성을 평가하고자 하였으며, 활용한 기법은 탄성파 탐사, 전기비저항 탐사 그리고 레이더 탐사이다. 대상지반은 유수의 작용으로 형성된 쇄설성 퇴적층인 충적층(alluvium)으로서 자갈과 모래가 복합적으로 쌓여 있는 구조이다. 굴절법 탄성파 탐사 결과 햄머로 타격한 신호는 에너지가 감쇄되어 신호의 질이 떨어졌으며, 땅속발파는 상대적으로 양질의 데이터를 보여줬다. 전기비저항 탐사는 접지전극 형태, 전극 배열, 측정 간격 그리고 전극간격을 고려하여 충적층 지하구조 특성에 적용하였다. 접지전극 형태는 비분극 전극을 활용할 때, 전극배열은 슬림버저 배열(Schlumberger array)을 적용할 때 해상도가 높게 나타났다. 마지막으로 수행한 레이더 탐사는 측정 결과 지하수면 아래에 존재하는 지층은 탐지하기 어려운 것으로 나타났다. 뿐만 아니라 모세관 현상으로 지하수면 위에서도 반응이 나타나 신뢰성이 많이 부족한 것으로 판단된다. 표준관입시험 결과와 비교시 전기비저항 탐사가 제일 신뢰성 높게 나타났으며, 접지 전극형태, 전극 배열 그리고 측정 간격을 세

부적으로 고려한다면 충적층 지반 특성을 더욱 신뢰성 높게 평가할 수 있을 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부 건설기술혁신사업인 수변지하수 활용고도화 연구단 3세부과제(과제번호-11 기술혁신 C05-3)의 연구비를 지원받아 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. Bano, M., Marquis, G., Niviere, B., Maurin, J.C., and Cushing, M. (2000), "Investigation alluvial and tectonic features with ground-penetrating radar and analyzing diffractions patterns", *Journal of Applied Geophysics*, Vol.43, pp.33-41.
2. Beres, M.Jr. and Haeni, F. (1991), "Application of ground penetrating radar methods in hydrogeologic studies", *Ground Water*, Vol.29, pp.375-386.
3. Cho, I.K., Kim, J.H., Chung, S.H., and Seo, J.H. (2002), "Negative Apparent Resistivity in Resistivity Method", *Journal of Geophysics and Physics Exploration*, Vol.5, No.3, pp.199-205.
4. Gourry, Jc., Vermeersch, F., Garcin, M., and Giot, D. (2003), "Contribution of geophysics to the study of alluvial deposits: a case study in the Val d'Avaray area of the River Loire, France", *Journal of Applied Geophysics*, Vol.54, pp.35-49.
5. Ham, S.Y., Kim, H.S., Cheong, J.Y., Jang, S., Cha, Y.H., and Ryu,

- S.H. (2003), "Hydrogeological characteristics of Iryong area in Haman-Gun for developing bank-filtrated water", *Proceedings of KSEG 2003 Spring Conference*, pp.159-163.
6. Kim, H.S., Baek, G.H., Lee, D.K., and Oh, S.H. (2002-a), "창원시 강변 여과 취수 지역 충적 대수층 탄성파 조사", *Proceedings of KSSGE 2003 Fall Conference*, pp.269-272.
 7. Kim, H.S., Lee, C.W., and Baek, G.H. (2002-b), "지하투과레이다 (GPR)를 활용한 천부 충적 대수층 퇴적상 연구", *Proceedings of KSSGE 2003 Fall Conference*, pp.144-147.
 8. Kim, H.S., Seo, M.C., Lee, C.W., and Jin, S.H. (2003), "금강 부여 군수리 충적 대수층 조사를 위한 고해상도 지구물리탐사 -탄성파 탐사 및 GPR 조사를 중심으로-", *Proceedings of KSSGE 2003 Spring Conference*, pp.287-291.
 9. Kim, J.H., Lee, M.J., Song, Y.H., and Jung, S.H. (2001), "A Study on the Modified Electrode Arrays in Two-Dimensional Resistivity Survey", *Journal of Geophysics and Physics Exploration*, Vol.4, No.3, pp.59-69.
 10. Oh, S.H. and Sun, C.G. (2004), "Analysis of Geophysical and Geotechnical SPT Data for the Satety Evaluation of Fill Dam", *Journal of Geophy and Physics Exploration*, Vol.7, No.3, pp.171-183.
 11. Park, M.H. (2009), "A Study on the Standard Penetration Test in Accordance with Ground Conditions", *Thesis of master degree, Kyung-gi University*.
 12. Reynolds, J.M. (2003), "An introduction to applied and environmental geophysics", John Wiley & Sons.
 13. Shin, S.R., Kim, C.S., and Cho, C.H. (2008), "A Study on the Shallow Marine Site Survey using Seismic Reflection and Refraction Method", *Journal of Geophysics and Physics Exploration*, Vol.11, No.2, pp.109-115.
 14. Yoo, Y.J., Kim, J.N., and Yoo, I.K. (2005), "Industry-University-Research Collaborative Geoscientific Study in Pocheon Area for Groundwater Survey, Part III : Resistivity Technology", *Proceedings of Geophysics and Physics Exploration*, pp.129-136.
- (접수일자 2013. 1. 3, 수정일 2013. 7. 16, 심사완료일 2013. 9. 12)