

초정지역의 풍화대 조사 및 단층파쇄 지역의 불연속면 조사를 위한 지표물리탐사

김지수^{1*} · 한수형²

¹충북대학교 지구환경과학과 기초과학연구소

²한국수자원공사, 지하수조사팀

Surface Geophysical Survey for Delineation of Weathered Zone of Chojeong Area and Investigation of Fault Fracture Zones

Ji-Soo Kim^{1*} and Soo-Hyung Han²

¹Dept. Earth and Environmental Sciences Institute for Basic Sciences, Chungbuk University

²Department of Groundwater Investigation, Korea Water Resources Corporation

이 연구에서는 초정지역의 충적층 지하수와 관련된 풍화대분포를 파악하고 단층파쇄대 조사를 위해 복합물리탐사(탄성파굴절법, 전기비저항, 지하투과레이더탐사)를 수행하였다. 탄성파속도 정보로부터 풍화대는 대상지역의 남서부로 갈수록 깊어지는 것으로 나타나는데 기반암까지의 심도 즉 풍화대의 두께는 또한 기존의 시추자료 및 지하수위 자료와 거의 일치한다. 소규모 단층과 관련된 파쇄대 조사에서는 탄성파굴절법, 전기비저항, 레이더탐사 자료를 속도와 비저항 구조를 복합적으로 천부까지 해석하여 단층파쇄대의 지표 경계 등을 파악하였다. 복합 지구물리탐사로 정확히 제시된 풍화대와 파쇄대 등에 대한 정보는 충적층 지하수의 분포를 알아내는데 충분히 활용될 수 있을 것으로 보인다.

주요어 : 지구물리탐사, 풍화대, 파쇄대, 통기대수

Geophysical surveys(seismic refraction, electrical resistivity, and ground penetrating radar) were performed to delineate the weathering zone associated with vadose water in Chojeong area and investigate the fault related fracture zones. On the basis of seismic velocity structures, weathering layer for the southwestern part is interpreted to be deeper than for the northeastern part. The depth to bedrock(i.e., thickness of weathered zone) from seismic refraction data attempted to be correlated with drill-core data and groundwater level. As for the investigation of geological discontinuities such as fault related fracture zone, seismic refraction, electrical resistivity, and ground penetrating data are compositely employed in terms of velocity and resistivity structures for mapping of surface boundary of the discontinuities up to shallow depth. Surface boundaries of fracture zone are well indicated in seismic velocity and electrical resistivity structures. Accurate estimation of weathered zone and fracture zone can be successfully available for mapping of attitude of vadose water layer.

Key words : geophysical method, weathered zone, fracture zone, vadose water

서 론

지하 불연속면은 암반내의 역학적 분리면을 일컫는 것으로서 암반내의 흠결, 물리적으로 불균질한 곳, 불연속면 주위에 응력이 집중되어 초래되는 변형 결과이다. 불연속면은 정압, 지체구조, 높은 압력에 반응하여 형성

되며 아주 미세한 것부터 큰 규모에 걸쳐 다양한 크기로 발달한다(대한지질공학회, 2003). 이와 같은 불연속면은 연속체로서의 암반을 물리적으로 분리시키기 때문에 역학적으로 약대에 해당되고, 지하수의 유동경로 역할을 하기 때문에 지질공학, 지반공학, 수리지질학에서 중요한 요소가 된다. 불연속면은 생성당시의 지체구조적 환경 및

*Corresponding author: geop22@cbnu.ac.kr

암상 등이 변화에 따라 체계적으로 발달하지만 자연상태의 노두에서는 불규칙하게 분포하기 때문에 그 구조를 명확히 파악하기에는 많은 제약이 따른다. 따라서 일반적으로 불연속면을 규모에 따라 선구조선과 지질현장에서 흔히 조사되는 절리규모의 형태로 구분하는 것이 일반적이다.

암석의 풍화과정은 성인에 따라 다양한 형상으로 진행되는데 이는 암석을 이루고 있는 각 광물들이 열역학인 반응경로가 서로 다르고 이에 수반되는 물리적 풍화의 진행속도가 차이가 있으며 암석의 균질성, 투수성, 등이 암종별로 다양하기 때문이다. 따라서 공학적인 문제에서 풍화암반을 서술하기 위해서는 암석의 풍화특성과 절리주위에 분포하는 암석의 풍화정도가 중요하다. 다시 말하면 암석의 풍화는 암반내의 무결암 풍화를 뜻하는 것이고 암반의 풍화는 이것뿐만 아니라 암반 내 절리분포나 절리면의 풍화까지를 모두 함축하는 의미로 사용되고 있다(대한지질공학회, 2003).

지구물리학적 관점에서 볼 때 불연속면 및 풍화대의 조사는 일반적으로 지질현장에서 절리 규모부터 단층대까지의 규모를 포함하여 미고결층의 두께와 연장, 기반암의 깊이까지를 포함한다. 또한 탐사방법과 이에 따른 측정대상 물성에 따라 불연속면의 특성과 풍화대의 분포가 달리 나타날 수 있다. 일반적으로 지구물리학적 측정 반응은 각 단열이나 절리의 단열 반응보다는 군집된 구조의 특성 반응으로 나타나는 바 예를 들어 탄성파의 진폭은 단열 절리 보다는 여러개의 단열이 군집된 군단열의 반응특성이 크게 부각되어 나타나는 것이 일반적인 현상이다(Barazangi and Brown, 1986). 풍화대의 경우도 탄성파속도가 지반을 구성하는 토질, 풍화암 자체의 광물조성이나 입자구성, 입자의 고결도, 공극률, 풍화변질 상태, 풍화암반의 균열상태, 지압 등에 의해 반영되므로 각각 탄성파속도, 전기전도도, 유전율과 관련된 탄성파탐사, 전기비저항탐사, 레이더탐사는 대상지역의 풍화도를 분석하기 보다는 각 영역에 따른 이상대를 찾아 암질계수와 같은 비교인자와 상관시키는 것이 효과적이다.

이 연구에서는 탄성파굴절법탐사, 전기비저항탐사, 레이더탐사 등을 이용하여 탄산염 지하수의 주생산지인 충북 초정리지역에 대한 풍화대 분포 조사를 실시하여 시추 및 지하수위 자료와 상관시켜보았고, 단층파쇄대에 대한 불연속면의 탐사 반응을 살펴보았다.

연구지역 및 목적

충북 초정리대는 광천수 생산지의 하나로서 이러한

명망은 결국 초정리 일대에 많은 지하수 활용 업체를 불러들여 국내 먹는 물 생산의 절반 이상을 집중시킨 관계로 약 10년 전부터 청원군내 지하수 부존량을 정량적으로 파악하는 계기가 있었다(농촌진흥공사, 1999).

연구대상 지역은 청주화강암과 옥천대에 속하는 시대 미상의 운교리층이 접촉하는 곳으로서 쥐라기 화강암체와 제4기 충적층으로 구성된다. 이 지역의 화강암은 주로 반상화강암으로 구성되며 석영, 정장석, 사장석, 흑운모, 각섬석으로 이루어진 4기 충적층은 청주화강암을 부정합으로 덮고 있으며 하천을 중심으로 피복되어 평야지대를 형성하고 있다(나기창, 1986)(Fig. 1).

이 연구에서는 지하수회복과 관련된 풍화대 분포를 탐지하기 위하여 기존 자료(권일룡 외, 1999)의에 비중, 형동 지역을 새로이 추가하여 탄성파굴절법탐사를 수행하였고 그 해석결과를 지하수위와 상관시켜 보았다. 또한 복합탐사의 적용성을 살펴보기 위해 단층파쇄대가 발달한 지역을 대상으로 탄성파 굴절법탐사, 전기비저항탐사, 레이더탐사를 실시하여 그 상관관계를 알아보았다.

자료수집 및 처리

탄성파굴절법

연구 지역에 대한 탄성파 굴절법탐사는 조사 지역 내의 풍화대 분포조사 및 예상 단층의 탐지와 관련하여

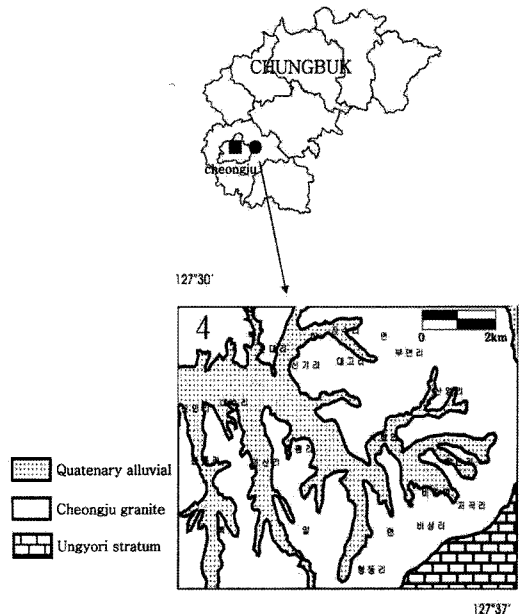


Fig. 1. Location and geological map of study area.

전기비저항 탐사 결과와의 상관해석을 위해 실시하였다. 탐사측선들은 조사지역 내에서 기존의 지표지질조사 및 선구조분석에서 해석된 자료와 탐사조건을 고려하여 설계하였다.

자료수집은 24 채널 ABEM Terraloc Mark 6 시스템을 사용하였다. 에너지원으로는 4.7 kg의 해머를 사용하였다. 탐사에 사용된 지오폰 규격은 각 100 Hz로서 모두 1 m 간격으로 설치하였다. 기록시간은 400 ms이었으며 고주파 성분을 충분히 유지하기 위하여 샘플링 간격은 0.5 ms로 설정하였다. 자료처리는 GRM(Reynolds, 1997)을 수록한 Gremix(1990)를 사용하였다.

전기비저항

전기비저항 쌍극자탐사는 단층 파쇄대의 탐지와 관련하여 단층의 위치와 그와 관련된 파쇄대 분포를 파악하는데 그 목적을 두었다. 탐사측선은 위성자료 및 지질조사에서 해석된 선구조에 거의 수직되는 방향으로 측선들을 설계하였다.

전기비저항 쌍극자탐사의 자료수집은 ABEM Terrameter SAS 300C 및 Booster시스템을 사용하였으며 전극배열은 다른 전극배열에 비해 신호대 잡음비는 낮으나 상대적으로 분해능이 좋은 쌍극자 배열을 사용하였다. 전류는 신호대 잡음(S/N)을 최대한 높이기 위해 최대 250 mA까지 투입하였다. 전극간격은 전계조건과 측정간의 거리 및 예상 단층의 발달 폭을 고려하여 15m를 적용하여 측선길이가 300 m가 되도록하여 이에 따른 가탐심도가 각각 75m가 되도록 하였다.

자료처리는 역산을 위해 각 면적 셀과 이에 대한 전기비저항을 추정 변수로 작성된 자료처리 소프트웨어인 Diprowin(2000)를 사용하였다.

지하투과레이더

전기비저항 및 탄성파굴절법 탐사자료에서 나타나는 이상대가 풍화퇴적층이나 층적층까지의 연장성을 알아 보기 위해 지하투과레이더탐사를 실시하였다. 특히 지하투과레이더 탐사법은 고분해능 탐사법으로서 5m 이내에 발달할 것으로 예상되는 층적층이나 토양층에 나타나는 단층 파쇄대의 특성을 파악하고자 실시하였다. 탐사에 사용된 장비는 가탐심도 및 분해능을 고려하여 pulse-EKKO 100 시리즈의 50 MHz의 송·수신 안테나를 사용하였다. 자료수집인자는 공간적 알리아싱(spatial aliasing)을 고려하여 안테나 간격 2m, 안테나 이동간격 0.5m로 하였다.

현장에서 취득된 자료들은 S/N을 높이기 위해 자료처리 소프트웨어인 Radpro(2001)를 사용하여 처리하였으며 인공잡음을 최대한 억제하기 위해 자료처리과정은 디와우잉, 대역통과필터, 이득회수 조절 등의 기본적인 과정만을 수행하였다.

자료해석

풍화대

탄성파 굴절법탐사에서 얻어진 대부분의 발파점 모음 자료(Fig. 2a)에서는 직접파, 표면파, 선두파가 뚜렷한 진폭으로 나타나 초동을 잡기 수월하였다. 그러나 부분적으로 선두파의 초동이 모호한 경우도 있는데 이것은 주변 환경으로 인해 모래와 자갈 등의 축적으로 다른 지역에 비해 더 많은 회절과 흡수가 일어난 것으로 해석된다. 이 경우에는 각 자료들을 진폭보상(AGC)하고 대역 필터링시켜 초동을 최대한 정확히 발췌하였다.

풍화대 깊이와 속도정보는 GRM(Generalized, Reciprocal Method)(Reynolds, 1997)으로 자료처리를 거친 후 해석하였다. 풍화대 깊이는 대략 3.4-6.5m의 범위를 보이며 풍화대의 탄성파속도는 380-600 m/s에 달한다. 기반암의 탄성파 속도는 대략 3300 m/s이다(Fig. 2b)

대상지역의 풍화대의 연속성을 더욱 공간적으로 파악

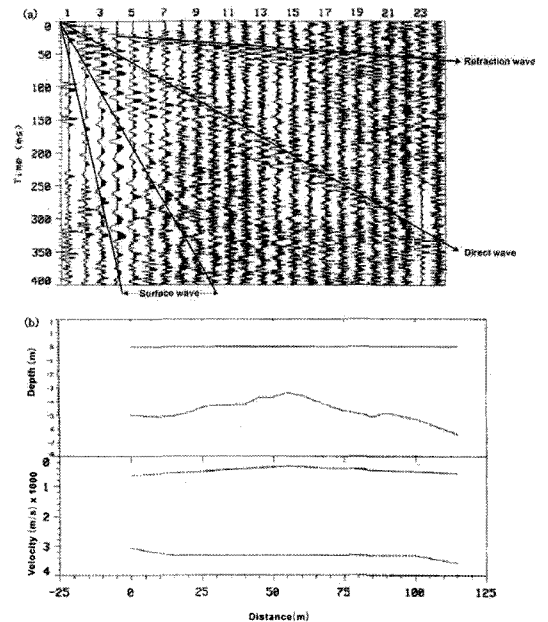


Fig. 2. Seismic refraction data: (a) typical shot gather (b) estimated thickness and velocity of the layer.

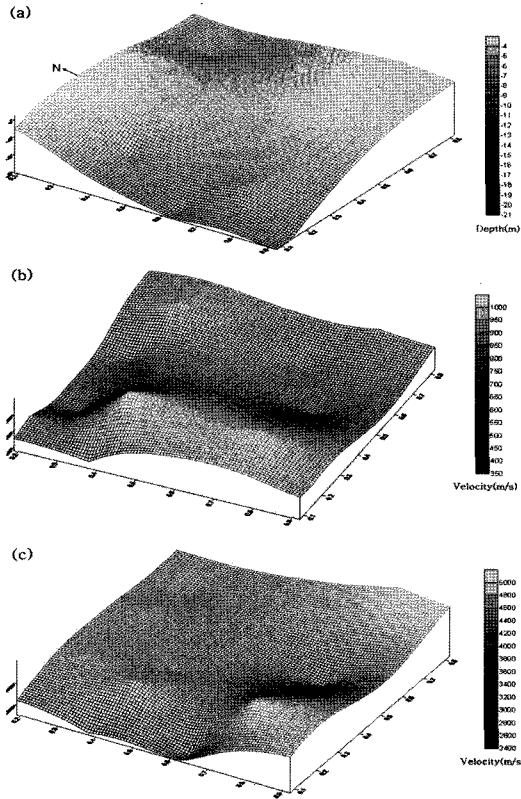


Fig. 3. Seismic attribute volume: (a) thickness of weathering zone, velocity of (b) weathering layer and (c) bedrock.

하기 위해 모두 20개의 축선에 대한 풍화대의 깊이와 속도, 기반암의 속도를 입체적으로 나타내 보았다. 풍화대의 깊이(Fig. 3a)는 3~20m의 범위를 보였으며, 남서쪽으로 갈수록 깊게 나타났고 풍화대 속도(Fig. 3b)는

350~1050 m/s로서 풍화대의 깊이가 얇게 발달한 지역에서 600 m/s이하의 저속도대가 보인다. Fig. 3c는 기반암의 속도로서 2400~5200 m/s의 범위를 보인다.

전체 지역에서 풍화대의 깊이는 3~20 m의 범위로서, 풍화대가 깊은 지역은 산지 지형에 인접한 곳에서 특징적으로 나타나고 있으며 기반암의 속도는 대략 2400~5200 m/s, 풍화대의 속도는 평균 600 m/s로 나타나는데, 풍화대가 얇게 발달한 지역은 600 m/s이하의 저속도대, 풍화대가 깊은 지역은 약 1000 m/s의 높은 속도를 보였다.

풍화대와 지하수위의 상관해석을 위하여 초정지역의 지하수환경조사자료(농촌진흥공사, 1999)를 살펴보자(Table 1; Fig. 4). 여기에 표현된 “제1대수층”은 지층구조 중 충적층과 풍화암층의 지하수를 대상으로 한 것으로서 일명 통기대수층(vadose water)이다. 시추조사에서 남서부(우산, 저곡)로 갈수록 풍화대의 깊이는 큰 것으로 나타나고 있으며(Table 1) 이 양상은 탄성파탐사자료에서 해석된 풍화대깊이 입체도(Fig. 3a)와도 잘 상관된다. 초정리 조사공의 기반암은 반상화강암(청주화강암)으로 이루어져 있으며 기반암 상부를 덮고 있는 충적층도 기반암으로부터 잔류 풍화된 토사로 구성되며 비교적 풍화도에 대한 저항도가 약하여 풍화층의 두께 또한 두터운 편이다. 기반암에서는 산성암맥과 중성암맥이 관입되어있고 이 암맥을 통하여 지하수 유동이 이루어지는 것으로 해석된다.

단층파쇄대

축선사이의 간격이 약 200 m. 전개길이가 300m인 3개 축선(남쪽에서 북쪽방향으로 Line1, Line2, Line3)에 대한 전기비저항 탐사결과(Fig. 5) 1000ohm-m 이상의

Table 1. Major aquifer and boreholes in chojung area (modified from Korea Rural Develop. Corp., 1999).

지구명	공번	위치	규격		간이수량	대수층구분
			심도 (m)	구경 (Inch)		
초정	초정B-1	북이초정	10	Φ6"	50	제1대수층
	초정B-2	"	102	"	27	제2대수층
	초정B-3	"	165	"	55	제3대수층
	호명B-1	북이호명	7.8	"	20	제1대수층
	호명B-2	"	20	"	40	제2대수층
	호명B-3	"	144	"	50	제3대수층
	저곡B-1	북일 저곡	17	"	10	제1대수층
	저곡B-2	"	25	"	50	제2대수층
	저곡B-3	"	65	"	100	제3대수층
	우산B-1	북일 우산	12	"	10	제1대수층
	우산B-2	"	106	"	15	제2대수층
	우산B-3	"	145	"	67	제3대수층

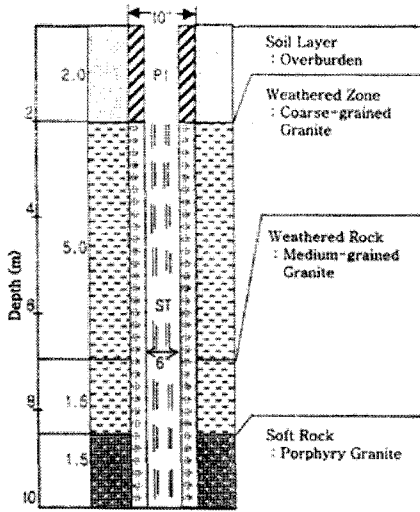


Fig. 4. Lithological description of drill core in Chojeong area (modified from Korea Rural Develop. Corp., 1999).

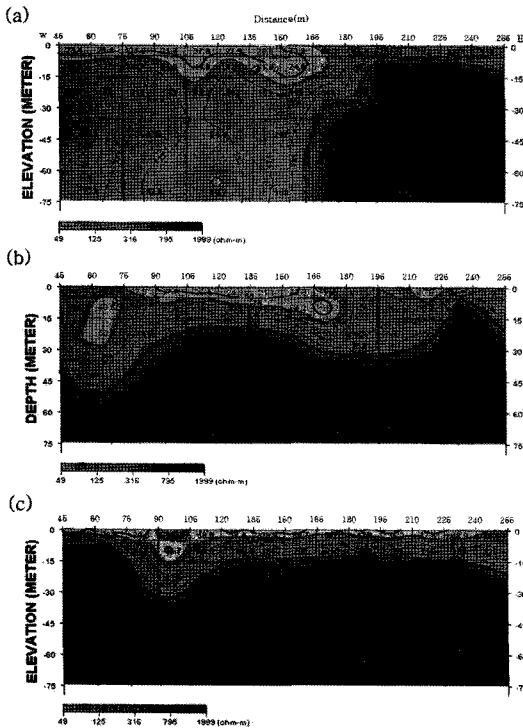


Fig. 5. Resistivity structures for (a) Line1 (b) Line 2 (c) Line3. Spacing of electrodes and lines are 15 m and 200m, respectively.

고비저항대는 기반암, 800ohm-m 이하의 저비저항대는 단층 파쇄대에 의한 영향으로 해석된다.

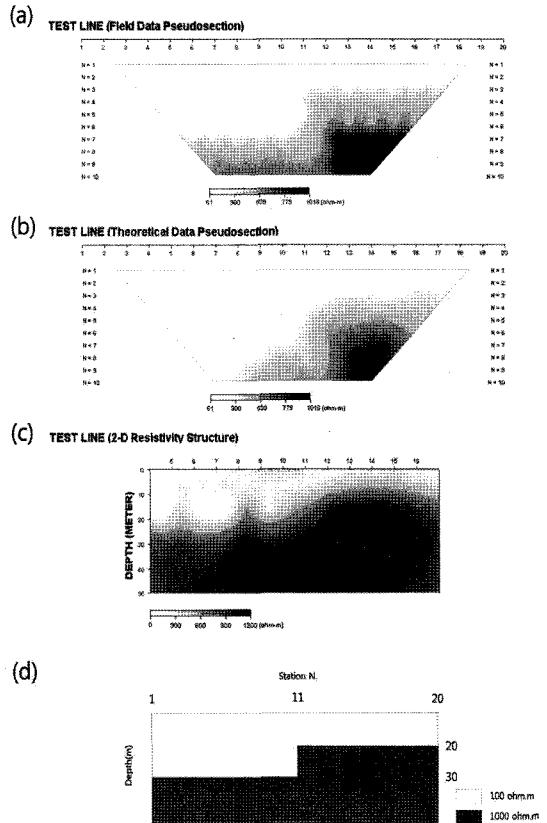


Fig. 6. Modeling and inversion for vertical fault : (a) field data (b) theoretical data (c) resistivity structure (d) input model.

Line1에서는 북쪽의 다른 측선들에 비해 단층파쇄구간이 100 m 이상의 비교적 넓은 폭으로 나타나며 Line2에서는 측선구간 30~90m에서 75 m 폭으로 발달하고 있는데 이는 Line3에서도 같은 양상을 보인다.

파쇄대의 수직경계 구조에 대한 쌍극자배열 모델링 및 역산결과(Fig. 6) 제시된 모형과 해석단면도를 비교할 때 파쇄대 효과가 잘 보이고 있으며 따라서 현장자료의 단면도에서 해석된 비저항구조(Fig. 5)는 중간심도까지에서 수직에 가까운 것으로 보인다.

전기비저항측선 Line1, Line2의 역산결과 나타난 측선구간 210 m(45-255 m)에서 실시한 탄성과 굴절법탐사자료(Fig. 7)를 보면 지층의 속도구조는 대체로 300 m/s 이하, 300~600 m/s 사이, 600 m/s 이상의 3층구조로 구분되며 특히 지층이 치밀한 논바닥에서 수행된 Line2에서는 비교적 높은 속도 값을 갖는 것을 볼 수 있다 (Fig. 7b). 따라서 전기비저항 탐사자료에서 단층파쇄대 경계의 구조는 탄성파속도단면도에서 재해석해볼 때 수

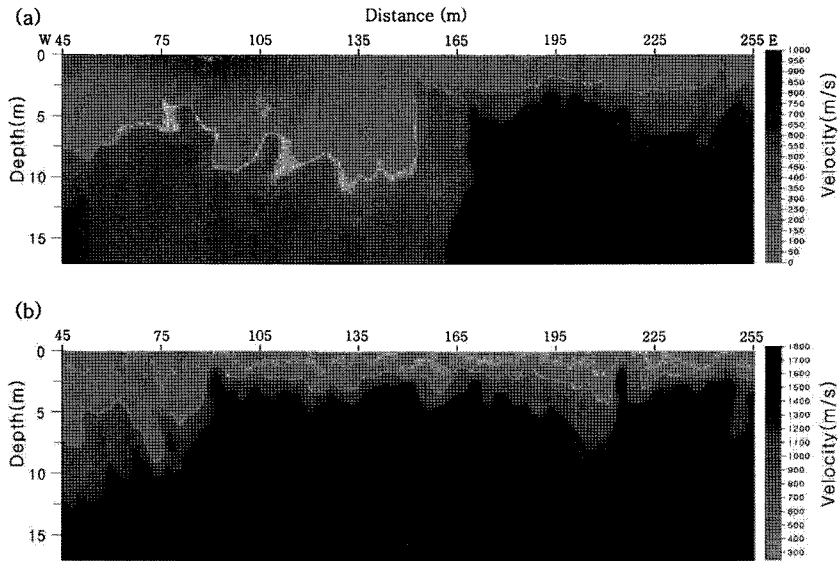


Fig. 7. Seismic refraction results for the lines of (a) Line1 and (b) Line2.

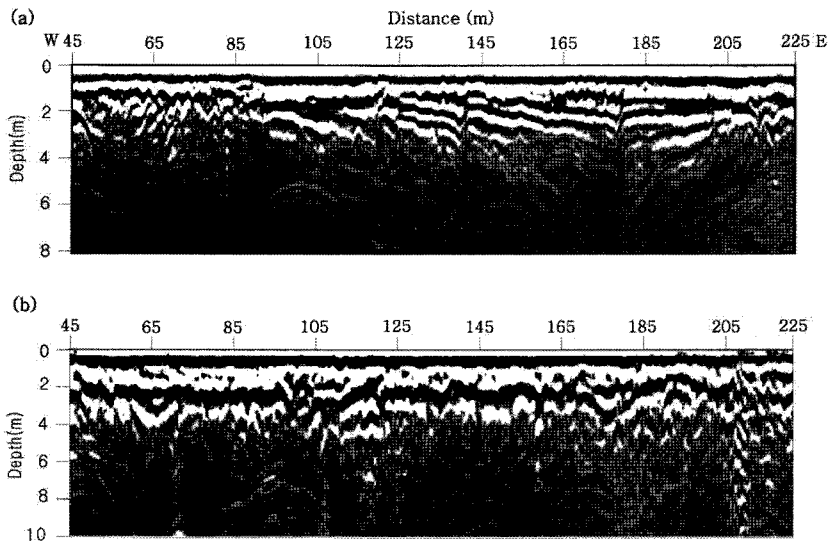


Fig. 8. GPR sections for the (a) Line1 and (b) Line2.

직구조이기보다는 완만한 경사를 가진 구조로 보이며 이것은 북쪽 전기비저항측선 자료의 양상에 가깝게 나타난다.

전기비저항탐사와 굴절법 탐사에서 확인되는 이상대의 천부 연장성을 파악하기 위해 지하투과레이다탐사를 실시하였다. 탄성파측선에서 실시된 지하투과레이다탐사 결과(Fig. 8) 측선에서 단층효과로 생각되는 특징은 확인되지는 않았으나 지하투과레이다탐사에서 확인되는 천부 풍화 퇴적층이나 충적층의 깊이 2-4 m는 굴절법탐사

결과의 첫 번째 층의 경계면(Fig. 7)과 상관되고 Fig. 8a의 서쪽부분의 신호가 미약한 부분은 전기전도도가 높고 속도가 낮은 파쇄대(Fig. 5a, Fig. 7a)에 의한 감쇠로 해석된다.

결론

충적층 지하수의 분포대와 관련된 풍화대 조사 및 불

연속면의 조사를 위한 단층파쇄대의 위치, 연장성 등을 파악하고자 복합 지구물리탐사(전기비저항탐사, 탄성파탐사, 지하투과레이더탐사)를 수행하였다.

초정지역의 탄성파속도 정보 및 풍화대 두께는 남서쪽으로 갈수록 깊어지고 기존의 시추자료 및 지하수위 자료와 일치한 것으로 나타나 산정된 풍화대 두께 정보를 활용하면 광역적인 충적층지하수대에 대한 정보를 충분히 제공할 것으로 보인다.

전기비저항 쌍극자탐사결과 단층파쇄대로 추정되는 저비저항 이상대는 축선 전면에 걸쳐 심도 50 m 이하 60~100 m의 폭을 가지고 남북 방향으로 연장되고 있으나 이상대의 전기비저항값은 비교적 높게 나타난다. 탄성파굴절법탐사 결과 단층파쇄대 구간은 저속도이상대로서 전기비저항탐사 결과의 저비저항이상대와 상관되며 단층파쇄효과는 2 m까지 나타난다. 지하투과레이더탐사 결과, 단층파쇄대의 특성은 잘 나타나지 않지만 풍화퇴적층이나 충적층은 2~4 m의 두께로 발달하고 있어 탄성파속도정보와 상관된다.

사 사

이 논문은 2007년도 충북대학교 학술연구지원사업의 지원에 의하여 연구되었다. 도면정리를 도와준 이선중, 이재혁에게 감사한다.

참 고 문 헌

- 권일룡, 김지수, 김경호, 1999, 지표물리탐사 자료의 상관해석, 지구물리, 2, 75-88.
 김지수, 송영수, 윤왕중, 조인기, 김학수, 2003, 물리탐사의 활용, 시그마 프레스.
 나기창, 1986, 충북의 자연, 충청북도교육위원회.
 농촌진흥공사(Korea Rural Develop. Corp.), 1999, 초

- 정미원지구 환경영향조사 보고서.
 대한지질공학회, 2003, 압반의 조사와 적용, 대한지질공학회-한국지질조사탐사협동조합
 한국물리탐사학회, 2002, 토목환경 분야 적용을 위한 물리탐사 실무 지침, 한국지구물리탐사학회.
 Barazangi, M., and Brown, L., 1986, Reflection seismology, A global prospective: Am. Geophys. Union, Geodyn. Ser., 13.
 Burger, H.R., 1992, Exploration geophysics of the shallow subsurface, Prentice Hall, New York, 489.
 Diprowin, 2000, Electrical resistivity processing software, Hee Song Ltd.,
 Gremix, 1990, Seismic Refraction Strata Processing Software, Interpex Inc.
 Radpro, 2001, GPR processing software, Hee Song Ltd.
 Reynolds, J.M., 1997, An introduction to applied and environmental geophysics. John Wiley and Sons, New York, 789.

2007년 11월 23일 원고접수, 2007년 12월 12일 게재승인

김지수

충북대학교 지구환경과학과
 361-763 충북 청주시 흥덕구 성봉로 410(개신동)
 Tel: 043-261-3201
 Fax: 043-276-9645
 E-mail: geop22@cbnu.ac.kr

한수형

한국수자원공사 지하수조사팀
 대전광역시 대덕구 신탄지로 560(연축동 산 6-2)
 Tel: 042-629-2744
 Fax: 042-629-2749
 E-mail: vincentsh@kwwater.or.kr