

물리탐사자료를 이용한 수리지질구조 해석 - 충청북도 청원지역

송성호* · 정형재* · 권병두**

An Interpretation of Hydrogeologic Structure Using Geophysical Data from Chungwon Area, Chungcheongbuk-Do

Sung-Ho Song*, Hyung-Jae Chung* and Byung-Doo Kwon**

ABSTRACT: A set of geophysical survey results over an area in Bookil-myun, Chungwon-Gun, Chungcheongbuk-Do is presented; resistivity logging, d.c. sounding, dipole-dipole resistivity, and controlled-source magnetotelluric (CSMT) surveys. These surveys were chosen in this research for the estimation of the basement depth and the delineation of the hydrogeologic structure over the survey area. The results provide an optimal input to a hydrogeologic modeling analysis using the strategies built in GIS software. A total of 14 lines of dipole-dipole resistivity surveys, 25 stations of d.c. sounding and 6 stations of CSMT sounding were performed. In addition 10 boreholes were chosen for resistivity logging to correlate the logs to the surface data. A quantitative information on the hydrogeologic structure over the area is provided by synthesizing the results from various geophysical data and attribute layers are constructed by utilizing a GIS software Arc/Info. The constructed layers match well to the hydrogeologic structures, which were outlined from the drilling data. The methodology tested and adopted in this study would be useful for providing a more reliable input to the hydrogeologic model setup.

서 언

최근 지하수와 관련되어 수문지질도 구축, 지하수부존량 조사 및 지하수환경영향조사 등 응용지질학적인 연구·조사가 많이 진행되고 있는 추세이다. 그러나 대상지역의 대수층 특성 등과 연관된 수리지질학적 구조 해석을 수행할 때에는 주로 제한된 관정 자료를 기초하여 기반암 심도, 대수층 심도 및 지하수 유동 방향 등을 추정하여 이용하는 실정이다. 또한 지구물리탐사 자료를 이용하는 경우에도 수리지질조사 결과와의 연관성에 대한 고려없이 탐사결과만을 별도로 제시하여 해석함으로써 조사자료를 이용한 객관적인 해석에는 제한성이 있어 왔다 (김강주, 1999).

물리탐사의 기법을 이용한 지리지질구조 파악은 지

하 구성물질의 각기 다른 물성의 차이를 효과적으로 파악할 수 있는 방법을 이용함으로써 그 정확도를 높일 수 있는데, 지하수와 관련되어서는 지하의 전기적인 물성 차이에 의한 반응을 지표 또는 토모그래피 등의 기법을 이용 지하에서 측정하여 지하구조를 영상화시키는 방법으로 전기비저항 탐사가 많이 이용되고 있다 (이기화 등, 1996; 정연문 등, 1998; 권일룡 등, 1999; 김건영 등, 1999). 또한 퇴적층을 대상으로 전기비저항 탐사를 이용한 대수층의 수리상수 추정 연구들도 계속되고 있는 추세이다 (Kelly, 1977; Singhal and Niwas, 1985; Mazac *et al.*, 1985; 농어촌진흥공사, 1996; Yang and Lee, 1998).

그러나 우리나라와 같이 대수층이 불규칙한 파쇄대로 구성된 경우 지하수 물수지 분석을 위한 수리지질학적 수치모델을 구축하는데 기반암 심도 및 대수층의 구조 등이 가능한 한 정량적으로 제시되어야 함이 필수적이다.

본 연구에서는 기반암과 천부 대수층의 구조에 대한 정량적 분석을 위하여 충청북도 청원군 북일면에 분포

* 농업기반공사 농어촌연구원 (Rural Research Institute, KARICO, Ansan 420-174, Korea), E-mail: shsong@karico.co.kr

** 서울대학교 지구과학교육과 (Department of Earth Science Education, Seoul National University, Seoul 151-742, Korea)

하는 반상화강암지역에서 14축선의 쌍극자배열 전기비저항 탐사와 25축점의 슬립배열 전기비저항 수직 탐사를 수행하였고, 10개 시추공에 대하여는 노말전기 비저항 검층 및 온도검층을 실시하였다. 또한 주파수 영역 전자탐사의 일종인 CSMT (controlled-source magnetotelluric) 탐사를 쌍극자배열 전기비저항탐사 1 개 축선에 대하여 복합적으로 실시하여 자료의 신뢰도를 높이고자 하였다. 현장에서 얻어진 전기비저항 탐사 및 CSMT 탐사 자료는 역산처리하여, 시추공에 대한 전기비저항검층 자료와의 비교 해석을 통하여 시추공 및 그 주변의 심도별 전기비저항 값을 추출하였다.

이러한 결과를 토대로 최근 수리지질학에서 많이 이용되고 있는 GIS software Arc/info를 이용 기반암과 천부대수층의 추정 등고선을 작성하여, 이를 시추공 데이터와 상관시켰다.

지질개요

본 연구지역은 광천수로 유명한 초정리를 포함하는 충청북도 청원군 북일면과 북이면이 만나는 지역으로, 지질학적으로는 시대미상의 변성퇴적암인 옥천층군(운교리층)을 관입한 중생대 유라기의 반상화강암 지역

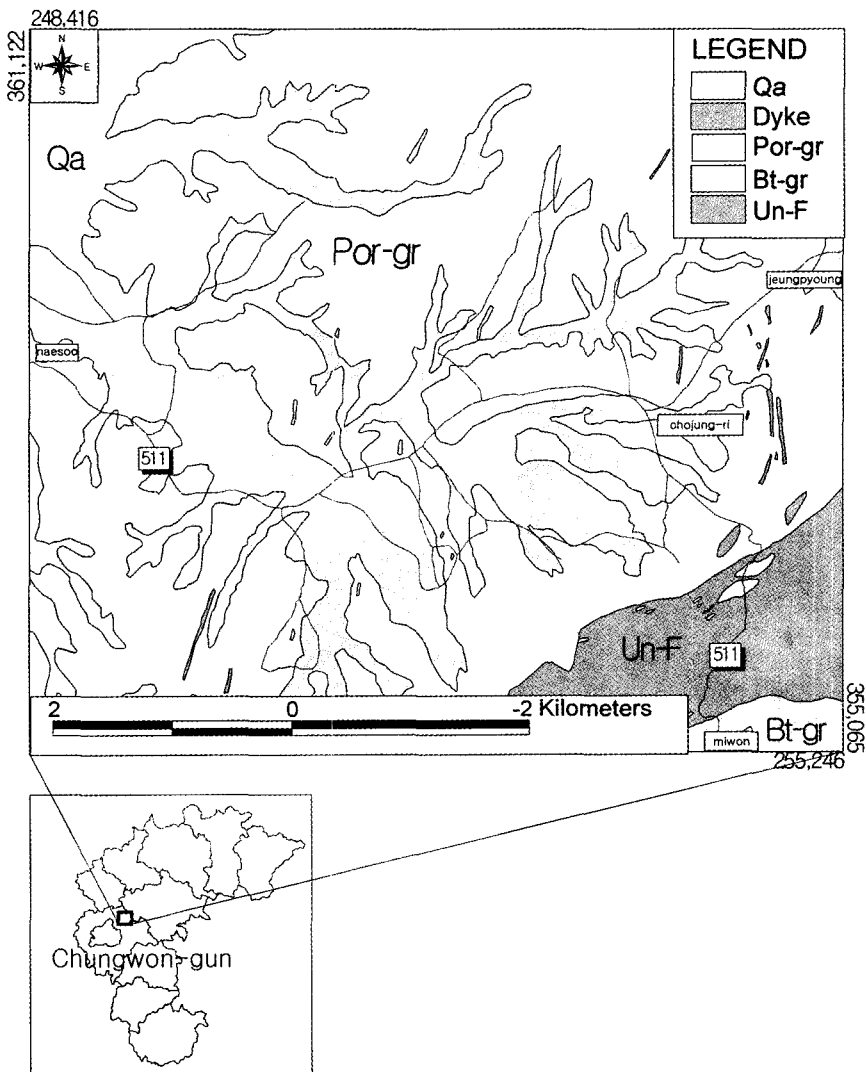


Fig. 1. Geological map of the study area (Qa : alluvium, Por-gr : porphyritic granite, Bt-gr : biotite granite, Un-F : ungyori formation) (after Chungwon-gun and RDC, 1998).

에 속한다 (Fig. 1).

반상화강암은 저반의 형태로 연구지역 전반적으로는 차별침식에 의해 주로 평야부를 이루고 있고, 풍화에 비교적 강한 옥천층군과의 경계부인 동측지역에는 상대적으로 고지대를 형성하고 있다. 본 연구지역의 지표지질조사에 의한 주 절리분포는 N50~70E, 65~80SE로, SPOT영상자료를 이용한 선구조와 유사한 양상을 보여준다 (정원근, 농어촌진흥공사, 1998).

자료취득 및 처리

이 연구에서 수행한 물리탐사는 25 m 간격의 쌍극자 배열 전기비저항 탐사로 14개 축선을 가능한 한 고르게 분포하도록 설정하여 실시하였고, 25개 축점에 대하여는 슬럼버져배열 전기비저항 수직탐사를 수행하였다. 전기비저항탐사에서 얻어진 참비저항값과 비교하기 위하여 일직선상에 있는 6개 축점에 대하여 주파수영역 전자탐사인 CSMT탐사를 실시하였고, 또한 수직탐사 측정 인근에 설치된 10개의 시추공 (Fig. 2)에 대하여는 지표에서 실시한 전기비저항 결과와의 상호비교를 위하여 단노말 (short normal) 및 장노말 (long normal) 전

기비저항 검층을 수행하였다. 본 연구에서 이용된 전기비저항탐사기는 ABEM사의 SAS 300C TERRAMETER와 Booster, 검층장비는 SAS LOG 200, 그리고 전자탐사기는 미국 EMI사의 IMAGEM이다.

연구지역에서 전기비저항 분포를 기초로 한 지질구조 파악은, 각 시추공들에 대한 전기비저항검층과 온도검층을 수행한 후 시추공들 주변에서 서로 직교하는 방향으로 전기비저항 수직탐사를 실시하고 현장에서 획득된 수직탐사자료는 Soundpro (1996)를 이용한 1차원 역산을 동원하여 지하의 심도별 참비저항값의 분포와 대비하였다. 이때 얻어진 참비저항값을 연구지역에 체계적으로 전개한 쌍극자배열 전기비저항탐사의 2차원 지하 전기비저항 구조도에 적용하여 각 축점에 대한 심도별 비저항값을 추출하였고, 1개 축선에 대하여는 CSMT탐사를 실시하여 얻어진 결과와 상호비교를 실시하였다.

전기비저항 수직탐사

전기비저항 수직탐사는 지표지질조사에서 얻어진 선구조를 고려하여 총 25개 지점에 대하여 실시하였는데,

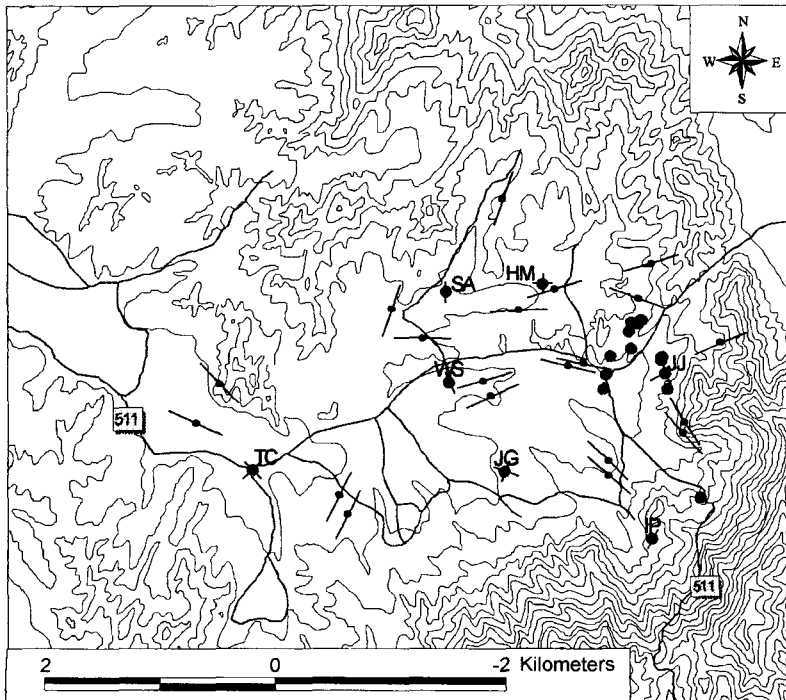


Fig. 2. Location map of the logging wells (large circles), the d.c. sounding stations (small circles) and the direction of sounding array (solid lines) along with layouts. IP, SA, TC, WS, JJ and JG are the well IDs in Table 1.

특히 선구조의 발달이 미약한 4개 지역 (TC, HM, JG, JJ)에 대하여는 이방성의 영향을 검토하기 위하여 동일 축점에서 직각방향으로 축선을 전개하여 이방성의 영향을 검토하였다. 탐사심도는 천부지질구조 파악을 위한 10개 축점에 대하여는 50 m 내외로 설정하여 천부에 대한 자료를 중점적으로 취득하였고, 나머지 15개 축점에 대하여는 탐사심도를 250 m로 설정하여 상대적으로 심부까지의 자료를 취득하였다.

현장자료에 대한 역산결과는 가로축에 전류전극 간격 (AB/2), 세로축에는 비저항값의 형태로 나타내었다. 획득된 자료의 해석을 위하여 지하를 수평 다층구조로 가정하고 감쇠최소사승법을 이용한 1차원 역산을 동원하였는데, 층은 12개로 가정하여 시추공에 대한 검층

Table 1. Observation data for bedrock depth and shallow aquifer depth range.

Well ID	bedrock depth (m)	shallow aquifer depth range (m)
IP (N35E)	28.6	42.0-48.0
SA (NS)	3.6	4.0-10.0
TC (N46W)	1.8	19.5-32.0
WS (N10W)	12.0	-
JJ (N75E)	10.9	18.5-35.0
JG (N10E)	17.0	20.0-25.0

자료와 역산에 의한 이론치가 일치할 때까지 조건을 변화시키면서 반복적인 역산을 실시하였다.

본 연구에서는 시추공 인근의 대표적인 6개 지점에

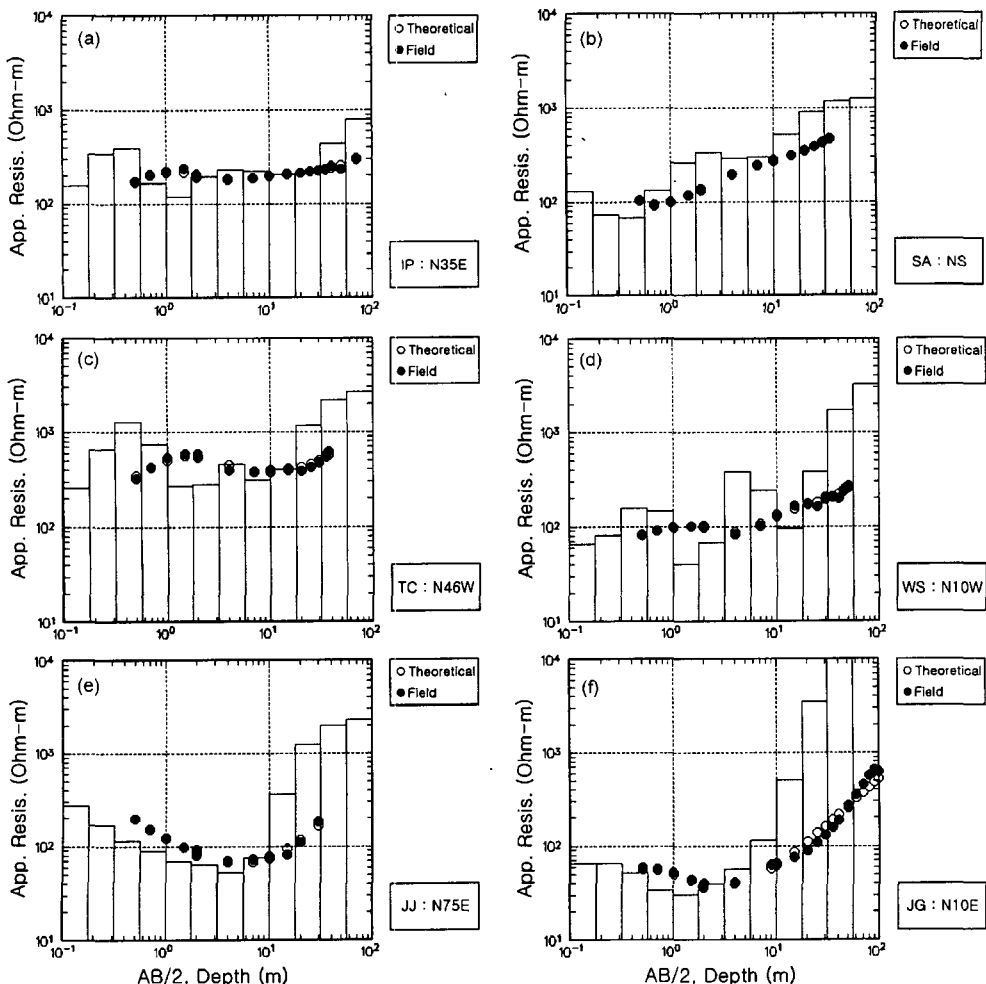


Fig. 3. DC sounding data and one-dimensional inversion results in the vicinity of the wells of (a) IP, (b) SA, (c) TC, (d) WS, (e) JJ, and (f) JG

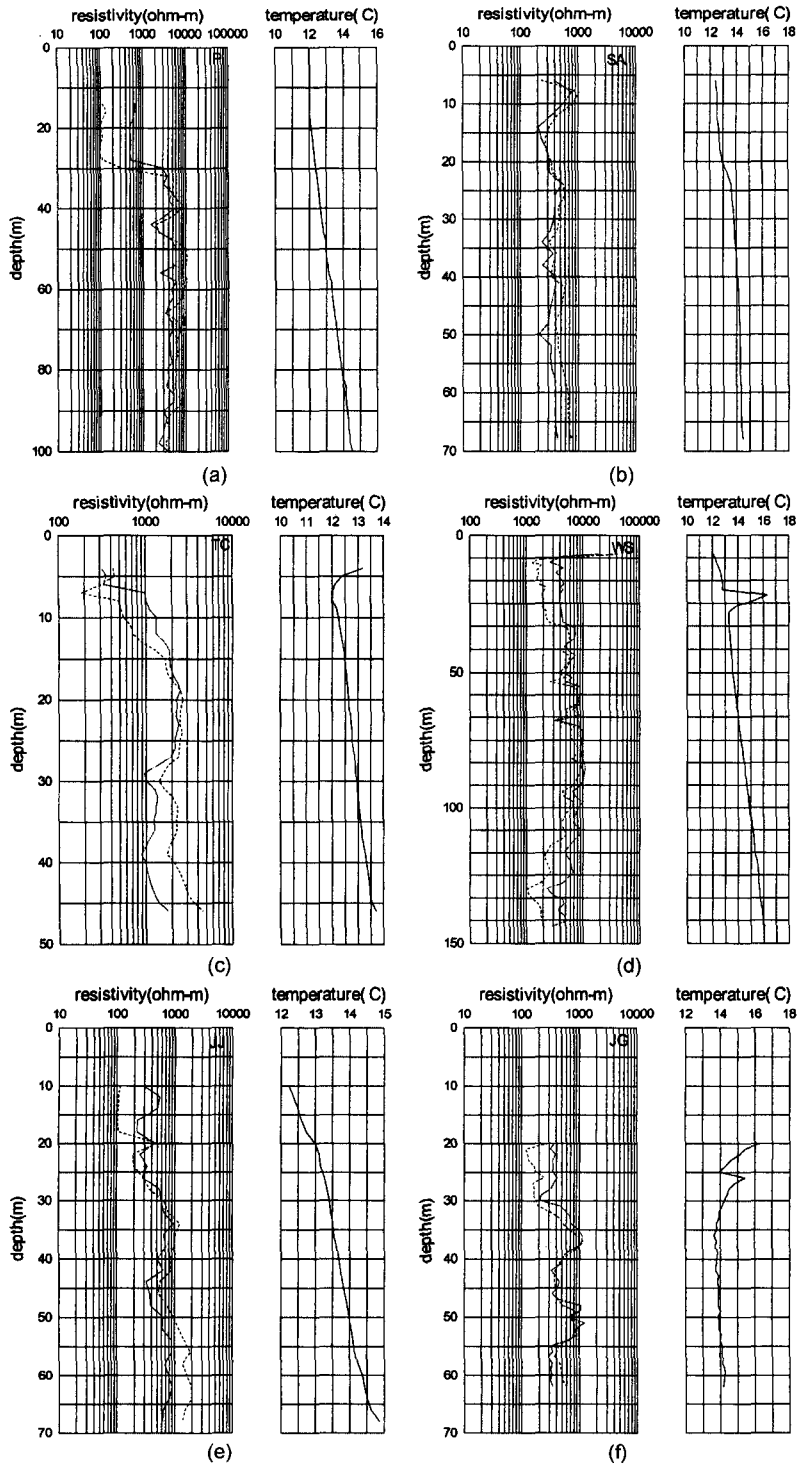


Fig. 4. Normal resistivity logs and temperature logs for the wells of (a) IP, (b) SA, (c) TC, (d) WS, (e) JJ and (f) JG (dot line : short normal resistivity, solid line : long normal resistivity)

대하여 역산에 의한 지하 층서구조의 전기비저항 값과 시추공에서 얻어진 기반암의 심도 및 50 m 내외의 천부대수층 심도와와의 비교를 실시하였는데 (Table 1, Fig. 3), 시추조사에서 천부대수층이 나타나지 않은 WS 지점의 경우를 제외하고는 대체로 일치됨을 확인할 수 있었다. 탐사결과 기반암의 전기비저항 값은 대체로 2,000 ohm-m 이상의 범위를 나타내고 있으며, 대수층의 경우는 전체적으로 1,200 ohm-m 이하로 분석되었다.

노말전기비저항 (normal resistivity) 검층

앞에서 설명한 전기비저항 탐사법은 지표에서의 송수신을 이용하여 지하의 수리지질구조 파악을 목적으로 한 간접적 방법으로 동원된데 반하여, 본 노말전기비저항 검층법은 시추공내에서의 송수신을 이용함으로써 심도별 이상 (anomaly) 구간을 찾는 직접적 방법으로 동원하였다. 10개 시추공에서의 노말전기비저항 검층 결과는 Fig. 4에 보여진다.

일반적으로 결정질암의 대수층은 파쇄대, 단층 및 절리 등의 2차 유효공극이 잘 발달된 구간으로 이러한 구간을 통한 지하수의 유동을 가정한다면, 대수층 구간이 타 구간에 비해 전기비저항이 상대적으로 낮게

나타나는데, 풍화된 화강암 구간에 걸쳐 상대적으로 저비저항 이상이 보고된 바 있다 (Paillet and Duncanson, 1994).

본 연구지역에서 수행된 노말전기비저항 검층 결과는 전반적으로 단노말 및 장노말 값의 경향이 비슷하게 나타나며, IP지점의 경우는 40~50 m (Fig. 4(a)), TC지점은 25~32 m (Fig. 4(c)), WS지점은 10~30 m (Fig. 4(d)), JJ지점은 15~28 m (Fig. 4(e)) 및 JG지점은 20~27 m (Fig. 4(f))로 각 구간에 대한 시추자료 (Table 1)에서 얻어진 대수층 구간에서 저비저항 이상으로 나타나고 있다. 또한 동시에 실시한 온도검층 결과는 대수층 구간에서 정 (+)의 이상대가 일관되게 나타나므로 전기비저항검층의 결과를 신뢰할 수 있었다. 다만 SA지점의 경우는 대수층 구간이 10 m 이내에 분포하여 전기비저항 검층이 불가능하였다.

쌍극자배열 전기비저항 탐사

쌍극자배열 전기비저항 탐사는 국내에서 지하수 조사와 관련되어 가장 많이 이용되는 대표적인 물리탐사 방법으로 수평 및 수직탐사를 동시에 수행함으로써 지하의 2차원적 구조를 밝혀줄 수 있는 방법이다. 본 탐사

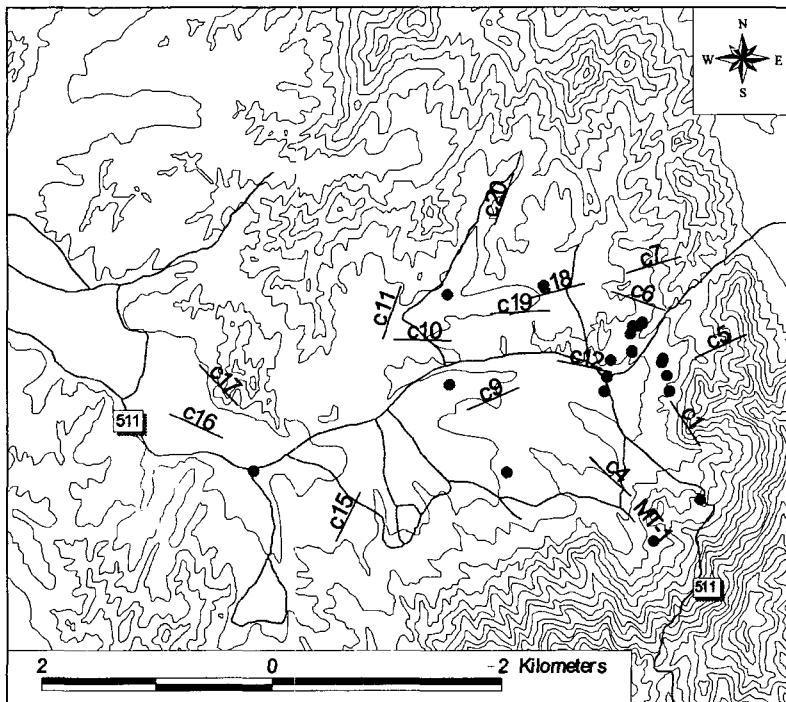


Fig. 5. Location map of dipole-dipole resistivity survey lines. Solid circles represent the logging wells.

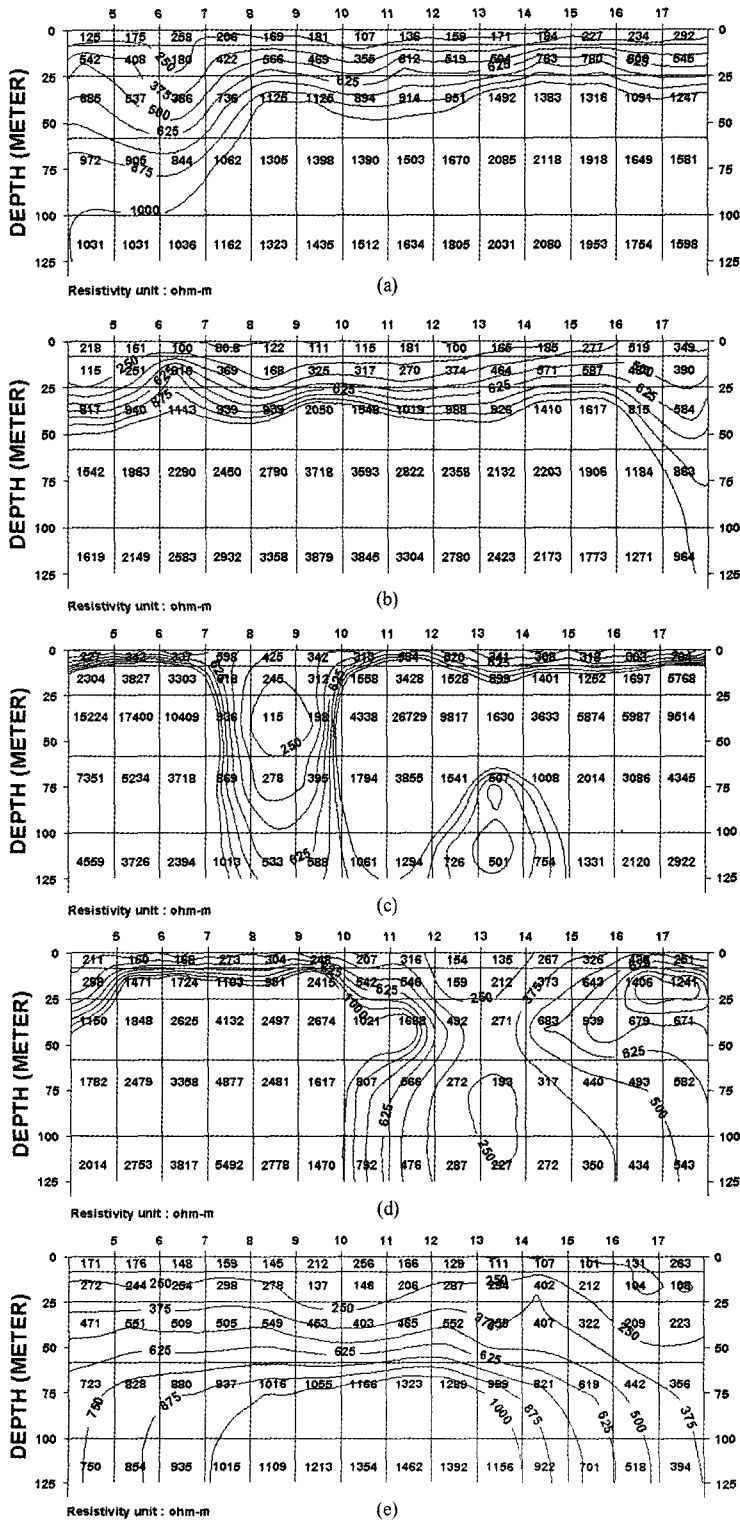


Fig. 6. Two-dimensional resistivity structures for the survey lines of (a) C1, (c) C15, (c) C6, (d) C7, and (e) C4.

는 측선 방향으로 물성의 변화가 없다는 가정으로 해석되기 때문에, 일반적으로 측선의 배열을 지질구조의 주향방향에 대해 직교하도록 설정한다.

본 연구에서의 쌍극자배열 전기비저항 탐사는 지표 지질조사에서 얻어진 선구조 방향에 직교하도록 설정된 14개 측선에 대해 실시하였고, 전극간격 a 는 본 연구지역의 전반적인 비저항 분포 파악을 목적으로 25 m, 거리계수 n 은 8로 하였다. 또한 측정의 정확도와 잡음 (noise)의 영향을 최소화하기 위하여 부스터를 이용 송신전류를 100 mA 이상으로 가능한 최대로 하였다 (Fig. 5).

쌍극자배열 전기비저항 탐사 자료처리에 대한 결과는 역산결과 해석된 2차원 비저항 분포도 (Fig. 6)로 나타내었는데 (김정호, 1987), 현장측정치와 수학적 이론치와의 차이에 의해 나타나는 rms 오차의 한계는 0.1 이하 수준으로 현장 측정자료의 신뢰도를 확인할 수 있었다. 본 연구에서 이용된 역산은 2차 미분 평활화제한 (2nd order smoothness constraint) 조건에서 Lagrange multiplier를 공간적으로 변화할 수 있도록 한 ACB (Active Constraint Balancing)법이다 (Yi and Kim, 1998).

쌍극자탐사 측선의 역산결과는 대부분의 지역에서 비저항의 분포가 수평층으로 나타나므로 대표적인 5개 지점을 제시하였다. 연구지역 전반적으로 대수층의 발달은 수평방향으로 우세한 것으로 판단되며 (C-1, C-15), 상대적으로 경사가 급한 고지대에서 실시한 C-6 및 C-7 측선의 경우는 중심부에서 수직방향의 구조대 발달이 나타나는데 이는 국부적으로 기반암에 발달된 파쇄대로 해석된다.

CSMT탐사

본 탐사는 주파수 영역 수직탐사에 속하는 전자 탐사로, 저주파수의 겉보기 비저항은 심부 자료에, 고주파수의 겉보기 비저항은 천부 자료에 해당된다. 본 탐사는 기본적으로 1차원 지하구조를 가정한 수직탐사를 목적으로 개발되었으나, 결정질암과 같은 경우 지질조건을 대상으로 한 1차원 구조를 찾기가 어려워 여러 측정의 수직탐사를 수행한 결과를 토대로 각 측선에 대한 2차원적 단면을 작성하여 해석한다.

본 연구에서는 전기비저항 탐사 결과 얻어진 비저항 값의 상호비교를 위하여 C-4 측선에 대하여 복합탐사를 실시하였다 (Fig. 5 참조, MT-1 측선). 본 연구에

서 사용된 IMAGEM 장비는 10 Hz~1 kHz, 500 Hz~3 kHz 그리고 750 Hz~92 kHz의 세 부분의 주파수 대역을 이용하도록 되어있어, MT-1 측선의 6개 측정점에 대해 이들 주파수 대역을 이용 각각 탐사를 실시하였다. 본 측선에 대한 2차원 비저항단면도 작성을 하기 전 단계로 본 연구에서는 1차원 탐사자료 중 주변의 잡음 (noise)에 의한 자료와 coherency가 매우 나쁜 자료는 편집과정을 통하여 제거하였고, Bostick inversion을 통해 1차원 MT sounding의 참 비저항값을 계산하였다 (Fig. 7).

탐사결과와 2차원 해석단면도는 세로축은 깊이를 나타내며, 가로축은 측선에서 수행된 6개 측정점을 도시하였고 측정 간의 간격은 15 m이다 (Fig. 8). 1차원 및 2차원 역산결과는 동일측선에 대해 실시한

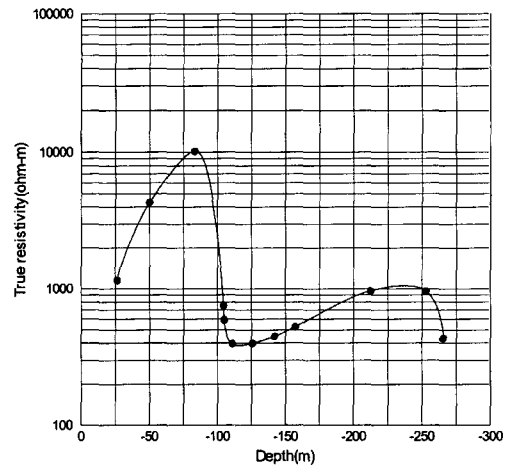


Fig. 7. One-dimensional inversion result of CSMT sounding data at a station of MT-1 line (at 15 m station).

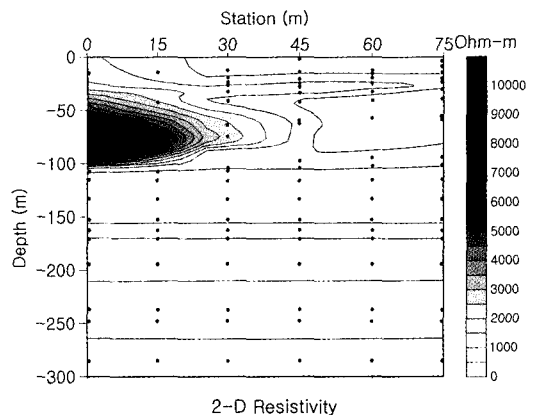


Fig. 8. Resistivity structure for the MT-1 line interpolated with inversion result.

C-4 축선 (Fig. 6(e))과 유사한 수평층의 구조를 나타낸다.

자료해석

본 연구지역은 중생대 류라기의 반상화강암으로 구성되어 있는데, 이들 지역에 대하여 서로 직교하는 방향으로 실시한 전기비저항 수직탐사 결과 (TC, HM, JG, JJ)는 두 경우가 거의 일치되는 양상을 보여주어 천부지질은 이방성의 발달이 미약하고 수평적인 변화가 심하지 않은 전반적인 층서구조로 나타났다. 또한 이러한 결과는 쌍극자배열 전기비저항탐사의 결과와 일치된다.

연구지역내 기반암 경계에서의 전체적인 참 비저항 값은 신선한 화강암의 평균값인 수천 ohm-m보다 낮은 값들을 나타낸다. 이는 시추공에서 수행된 전기검층의 자료와 일치되며, 이들 지역이 지하수에 의해 완전히 포화되어 낮은 것으로 판단된다. 연구대상 지구내의 동남쪽으로 형성된 북동-남서방향의 산맥쪽과 가까운 곳에서는 기반암 경계부에서 하류부의 평탄지역에 비해 비저항값이 신선한 화강암의 평균값들 보다 상대적으로 높게 나타나는데, 시추공에 대한 전기검층 결과와 비교해 볼 때 탐사지점의 지형적인 효과에 의한 것으로 보인다.

수직탐사의 결과에서 얻어진 비저항 대표값들은 시

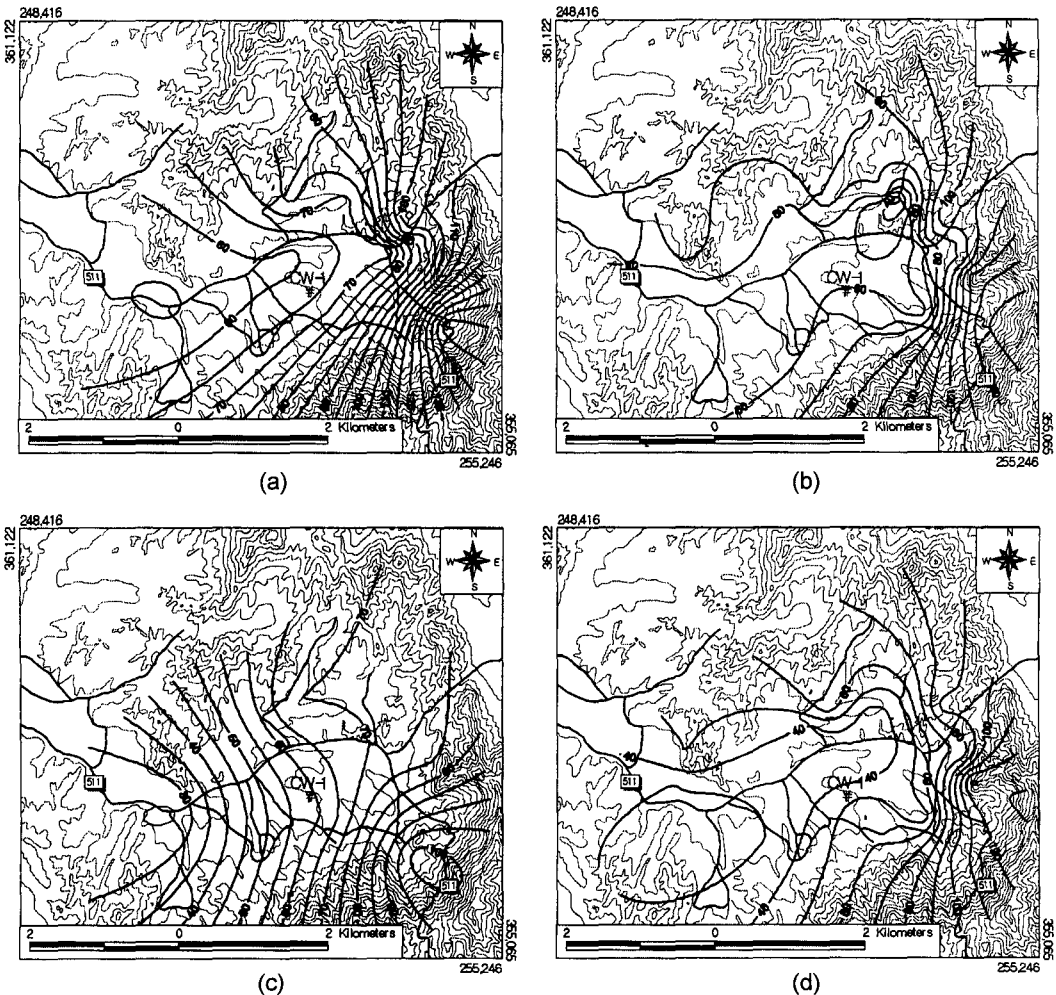


Fig. 9. Contour maps of bedrock and shallow aquifer depth. The results of (b) and (d) are more accurate than those of (a) and (c) for the pilot well (CW-1) respectively. (a) bedrock depth from drilling hole data, (b) bedrock depth from resistivity survey data, (c) shallow aquifer depth from drilling hole data, (d) shallow aquifer depth from resistivity survey data.

추공 주변에서 실시된 쌍극자배열 전기비저항 탐사 자료의 역산결과와 등치선에 적용하여 연구지역의 전체에 대한 기반암과 천부 대수층에 대한 비저항값을 추출하였고, 이를 Kriging 보간법 (Isaaks and Srivastava, 1989)을 이용하여 내삽하였다. 또한 10공의 시추공으로부터 얻어진 자료를 이용하여 천부 지질구조에 대하여 내삽한 후 Arc/info를 이용 layer화 하여 지형과의 관계를 검토하였다 (Fig. 9).

전기비저항 검층을 실시한 10공의 자료를 기초로 내삽한 기반암 심도 및 천부대수층에 대한 등심도선은 전체적인 지형과 유사한 양상을 보여주지만, 연구지역 동측 및 동남측지역의 경우 시추자료의 부족으로 등심도선이 밀집되는 결과를 보여준다 (Fig. 9(a), (c)). 그러나 시추자료가 부족한 지역에 대해 본 연구에서 수행한 전기비저항탐사 자료를 추가하여 내삽한 등심도선의 경우는 연구지역 전체적으로 지형구조를 잘 반영하고 있으며 (Fig. 9(b), (d)), 특히 농업용수 목적으로 연구지역내에 개발된 시추공 CW-1 자료 (청원농지개발조합, 1998)가 본 연구에서 얻어진 결과와 일치되므로 이러한 결과는 쌍극자배열 전기비저항탐사에서 밝혀진 수평적인 천부지질구조를 잘 반영하는 것으로 해석된다.

따라서 천부지질구조 파악을 위하여 본 연구지역에서 수행한 전기비저항탐사 자료의 역산결과는 연구에

이용된 제한된 시추공의 자료를 보완할 수 있음을 보여주며, 본 연구에서는 수리지질학적 수치모델링의 기초작업 중 기반암 심도와 천부 대수층의 수리지질학적 구조 파악에 전기비저항탐사 및 전기비저항검층 자료를 이용한 방법을 다음과 같이 제시한다 (Fig. 10).

첫 번째로 조사 및 연구지역에 대한 체계적인 전기비저항 수직탐사를 실시하는데, 이때 시추공이 있는 경우는 그 지역을 포함한다. 두 번째로 시추공에 대해 실시한 노말전기비저항 검층 결과와 비교하여 지하 지질구조에 대한 참 비저항값을 추출하고, 조사지역에 전반에 대해 실시한 쌍극자배열 전기비저항탐사 결과 얻어진 2차원 비저항 분포도를 이용 천부지질구조별 심도를 결정한다. 마지막으로 기반암 및 대수층 심도에 대한 등심도선을 작도하여 지형 및 시추자료와 비교 검증한 후 이를 수치 파일로 저장하여, 수치모델의 기초자료로 이용한다.

결 론

본 연구는 충청북도 청원군 북일면 지역에서 실시된 전기비저항 탐사와 전기비저항 검층의 결과를 이용하여 기반암 심도와 천부 대수층의 구조 및 심도를 밝혀 수리지질학적 지하수 수치모델링의 기본자료로 이용할 목적으로 수행하였는데, 이로부터 얻어진 결론은 다음과 같다.

1. 충청북도 청원군 북일면 지역에 대한 전기비저항탐사 결과는 본 지역의 천부지질구조가 수평적 변화가 심하지 않은 전반적인 층서구조로 밝혀졌고, 기반암 경계에서의 참 비저항 값이 전반적으로 1,200 ohm-m보다 낮아 지하수에 의해 포화된 것으로 판단된다.

2. 쌍극자배열 전기비저항탐사 결과에 의하면 경사도 1% 미만인 평탄지역의 대수층 발달은 수평방향에 우세한 것으로 나타났으며, 상대적으로 경사가 급한 고지대의 경우는 기반암에 발달된 파쇄대에 의한 수직방향의 구조대 발달이 우세한 것으로 밝혀졌다.

3. 지표에서 실시한 전기비저항 탐사 결과와의 상호 비교를 위한 전기비저항검층 결과 본 연구지역의 천부 지질구조에 대한 탐사결과는 신뢰성이 높은 것으로 나타났다.

4. 연구지역 전체에 대한 천부지질구조를 정량화하기 위하여 전기비저항탐사 결과를 근거로 기반암과 천부 대수층의 심도를 추출하여 내삽한 후 Arc/info를 이용 지형도와 상호 비교한 결과 제한된 시추자료를

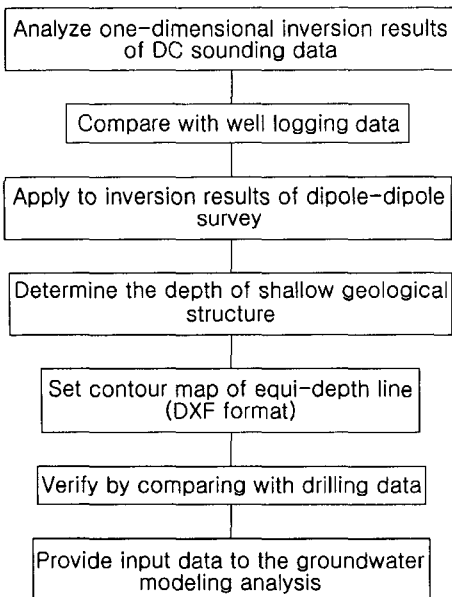


Fig. 10. Proposed procedure of quantitative data preparation for hydrologic analysis with geophysical data.

기초로 작성된 등심도선을 보완할 수 있음을 보여주었다.

사 사

본 연구는 청원군에서 시행한 초정·미원지구 환경영향조사 사업의 일부를 기초로 수행되었으며, 심사 과정에서 좋은 의견을 주신 충북대학교 김지수교수님께 감사 드린다.

참고문헌

권일룡, 김지수, 김경호 (1999) 지표물리탐사 자료의 상관 해석-충북 초정지역. 지구물리, 2권, p. 75-88.
 김강주 (1999) 지하수환경영향예측을 위한 지하수모델의 적용현황 및 문제점 : 환경영향평가서와 먹는샘물환경영향조사서를 중심으로. 지하수환경, 6권, p. 66-75.
 김건영, 이정모, 장태우 (1999) 전기비저항 탐사법을 이용한 지하 천부 파쇄대 조사. 지구물리, 2권, p. 217-224.
 김정호 (1987) 2차원 전기비저항 탐사자료의 역산. 서울대학교 박사학위논문
 농어촌진흥공사 (1996) 소유역지하담 개발에 관한 기술개발 연구. p. 146-180.
 정연문, 우 익, 김정호, 조성준 (1998) 폐기물 처분장 오염지반조사를 위한 전기비저항 영상화 기법의 적용. 물리탐사, 1권, p. 57-63.
 이기화, 권병두, 오석훈, 김차섭 (1996) 난지도에 인접한 한강변에서의 쌍극자-쌍극자 전기탐사. 자원환경지질, 29권, p. 335-343.

청원군, 농어촌진흥공사 (1998) 초정·미원지구 환경영향조사 보고서. 58p.
 청원농지개발조합 (1998) 지하수영향조사서 (인평지구).
 Isaaks, E.H. and Srivastava, R.M. (1989) An introduction to applied geostatistics. Oxford University Press, New York, 561p.
 Kelly, W.E. (1977) Geoelectric sounding for estimating aquifer hydraulic conductivity. Ground Water, v. 15, p. 420-425.
 Mazac, O., Kelly, W.E. and Landa, I. (1985) A hydrogeophysical model for relations between electrical and hydraulic properties of aquifers. Journal of Hydrology, v. 79, p. 1-19.
 Paillet, F. and Duncanson, R. (1994) Comparison of drilling reports and detailed geophysical analysis of ground-water production in bedrock wells. Ground Water, v. 32, p. 200-206.
 Singhal, D.C. and Niwas, S. (1985) Aquifer transmissivity of porous media from resistivity data. Journal of Hydrology, v. 82, p. 143-153.
 Soundpro (1996) 전기비저항 수직탐사자료처리 소프트웨어. (주)희송
 Yang, C.-H. and Lee, W.-F. (1998) Using resistivity sounding and geostatistics to aid in hydrogeological studies in the Choshuichi alluvial fan, Taiwan. 68th Ann. Internat. Mtg. Soc. Expl. Geophys., Expanded Abstracts, p. 436-439.
 Yi, M.-J. and Kim, J.-H. (1998) Enhancing the resolving power of the least squares inversion with active constraint balancing. 68th Ann. Internat. Mtg. Soc. Expl. Geophys., Expanded Abstracts, p. 485-488.

2000년 4월 17일 원고접수, 2000년 8월 3일 게재승인.