

지구물리탐사자료의 지리정보시스템 해석

한수형* · 김지수** · 신재우*** · 권일룡****

*지오제니컨설턴트 · **충북대학교 · ***유니보스 GIS · ****캐드랜드

요 약

충북 초정지역에 대하여 지하수부존과 연관된 파쇄대 분포 양상을 파악하기 위해 지리정보시스템을 이용한 각종 지구물리탐사 속성자료들을 상관해석하였다. 위성영상으로부터 얻어진 선구조밀도, 수직탐사와 검층에 의한 전기비저항, 전기비저항 표준편차분석, 방사능, 탄성과 속도, 기반암의 심도 등의 속성자료들은 복합해석을 위해 ARC/INFO를 이용한 데이터베이스로 구축하였다. 특히 전기비저항 수직탐사결과는 심도별 비저항 값들을 수평적으로 내·외삽시켜 입체적으로 재건하는 기법을 적용하였다. 전기비저항 수직탐사 자료들을 이용하여 재건한 합성결과와 GIS를 이용한 각종 물리탐사자료의 복합해석결과로 연구지역의 천부 파쇄대 분포 특성을 효과적으로 파악할 수 있었고, 특히 지하수부존과 연관된 파쇄대는 연구지역의 남동부에 발달되어 있는 것으로 확인되었다.

주요어: 파쇄대, 지하수부존, 지구물리탐사, 속성자료, 지리정보시스템

Soo-Hyung Han, Ji-Soo Kim, Jae-Woo Shin and Il-Ryong Kweon, 2002, GIS interpretation on the multi-attributes from the various geophysical surveys. Journal of the Korean Geophysical Society, v. 5, n. 1, p. 29-39

ABSTRACT: Geophysical data sets from the Chojeong area in the Chungbuk-Do are composely studied in terms of multi-attribute interpretations for the subsurface mappings of shallow fracture zones, associated with groundwater reservoir. Utilizing a GIS software, the attribute data were implemented to a database; a lineament from the satellite image, electrical resistivities and its standard deviation, radioactivity, seismic velocity, and bedrock depth. In an attempt to interpret 1-D electrical sounding data in 3-D views, 1-D data are firstly performed horizontal and vertical inter- and extrapolation. Reconstruction of a resistivity volume is found to be an effective scheme for subsurface mapping of shallow fracture zones. Shallow fracture zones are located in the southeastern part of the study area, which are commonly correlated with the various exploration data.

Key words: fracture zone, groundwater reservoir, geophysical survey, attribute data, GIS

(Soo-Hyung Han, GeoGeny Consultants Group Inc. 938-7 BangbaeDong SeochoGu, Seoul, 137-060, Korea; Ji-Soo Kim, Department of Earth and Environmental Sciences Chungbuk National University, Cheongju, 361-763, Korea; Jae-Woo Shin, Uniboss GIS. 23-5 YoidoDong YoungdeungpoGu, Seoul, 150-010, Korea; Il-Rong Kweon, Cadland, Inc. 1376-1 Diplomatic Center Seocho2Dong SeochoGu, Seoul, 137-072, Korea; e-mail: vincentsh@hanmail.net, geop22@chungbuk.ac.kr, jwshin@uniboss.com, irkweon@cadland.co.kr)

1. 서 론

최근 들어 도형자료와 관련된 정보를 효율적으로 관리, 분석하기 위해 다양한 분야에 지리정보시스템(geographic information system, GIS)이 적용되고 있으며, 주요한 응용분야로는 국토이용 계획, 지역계획, 환경오염발생원 추적, 환경영향평가, 유역관리, 수자원관리, 작황관리, 토지자원관리 등 매우이 대표적이며(김윤중 외, 1993; 김경

숙 외, 1995), 지질학과 관련되어서는 산사태 분석(이사로, 1992; 원종석 · 이영훈, 1997), 지하수 관리(민경덕 외, 1996; 이사로 · 최순학, 1997), 종합지질정보관리시스템 개발(지광훈 외, 1997) 등의 연구가 진행되는 추세이다.

이 연구에서처럼 지하수 유동 경로와 같은 지반환경조사를 위해서는 지하물리검층과 더불어 정밀도가 높은 지표물리탐사를 복합적으로 수행하는 것이 필수적인데 이는 천부의 지하매질이 심부에

비해 물성 변화가 심하기 때문에 최근의 물리 탐사는 특히 천부환경의 지하구조를 해석할 때는 각종 탐사방법들을 최대한 동원하고 여기서 해석된 물성자료들을 서로 조합·상관시켜 탐사대상에 대한 종합적인 해석을 내리는데 초점을 두고 진행되는 추세이다(이태섭, 1997). 또한 특정 지역에 대한 각종 탐사자료를 서로 상관시켜 복합해석하는 작업은 최근들어 시도되고 있다(한현철 외, 1996; 권일룡, 1999; 송성호 외, 2002).

이 논문에서는 화강암으로 구성된 충청북도 초정지역에서 얻어진 원격탐사, 전기비저항 수직탐사, 탄성과탐사 굴절법, 방사능탐사, 전기검층 등의 지구물리탐사 자료(권일룡 외, 1998; 농업기반공사, 1998)들을 지리정보시스템을 이용한 데이터베이스로 구축하여 해석하였으며, 천부 파쇄대의 예측을 위하여 여러 속성자료들을 파쇄대 반응을 고려한 등급과 가중치를 부여한 후, 지리정보시스템을 활용하여 연구지역에 대한 복합해석을 실시하였다. 또한 전기비저항 수직탐사 자료들은 일차원의 수직적 전기비저항 분포와 변화만을 판단할 수 있는 한계를 극복하기 위해 심도별 비저항값을 수평적으로 내·외삽시켜 입체적으로 재건하여 심부 연장성을 보고자 하였다.

2. 연구지역 및 지질

연구지역은 충북 청원군 북일면에 위치한 초정 지역으로 예로부터 광천수의 생산지로 명망이 높아 지하수 관련 업체의 난립에 따라 한정된 범위에서의 집중적인 지하수 개발·생산에 따른 지하수 고갈, 폐공방치, 오염현상 등의 환경지질학적 피해가 대두되는 곳이다. 이 일대는 북으로는 273m의 고도를 갖는 비교적 경사가 완만한 성재산이 있으며 남동으로는 높이 484m의 구녀산이 비교적 급경사를 이루고 있고 지형적으로는 분지특성을 보이고 있다. 이 분지 안으로는 주로 농경지가 발달되어 있으며, 북서로는 작고나미, 증말, 남동으로는 인평, 교재 등의 소류지들이 분포하고 있다.

연구지역의 지질은 청주화강암과 옥천대에 속하는 시대미상의 운교리층이 접촉하는 곳으로서 쥐라기화강암인 청주화강암체와 제4기 충적층으로 이루어져 있다(Fig. 1). 이 지역의 화강암은 주로 반상화강암으로 구성되어 있으며 석영, 정장석, 사장석, 흑운모, 각섬석으로 이루어진 충적층은 청주화강암을 부정합으로 덮고 있으며 하천을 중심으로 피복되어 평야지대를 형성하고 있다(나기창, 1986). 연구지역 동남부에 위치하는 운교리

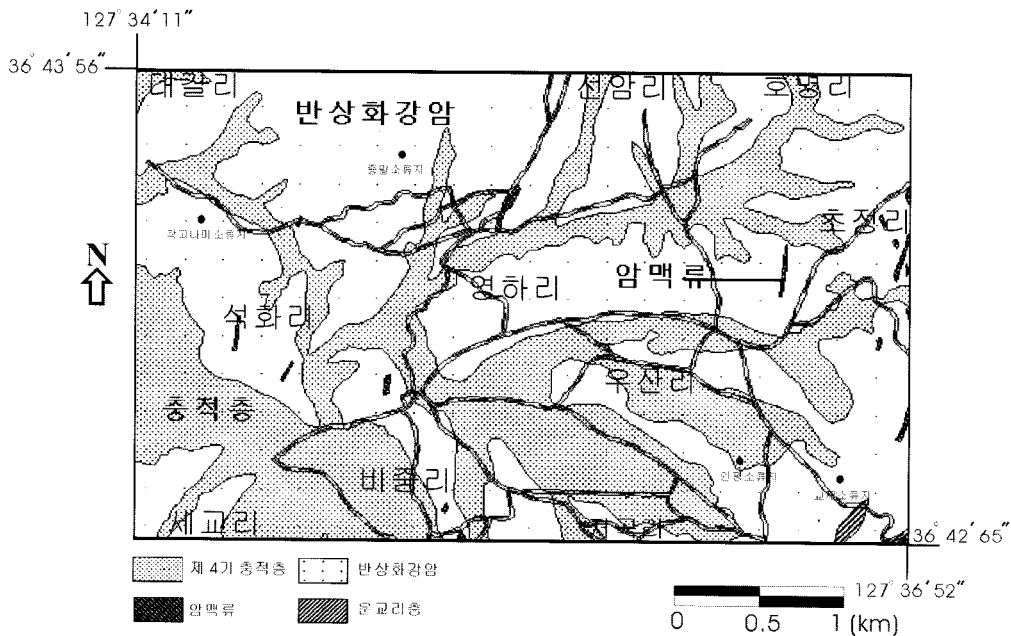


Fig. 1. Geologic map of study area.

층은 옥천대에 속하는 시대미상의 층으로 주로 사질 천매암이나 석영, 사장석, 흑운모 등으로 구성된다. 또한 국부적으로 백악기의 맥암류가 이들을 관입하고 있으며, 주로 암맥류로서 석영반암과 규장질암맥 및 고철질암맥 등이 있다.

3. 연구범위

초정지역의 지하수부존 파쇄대 분석을 위한 물리탐사자료의 상관해석은 권일룡(1999)에 의해 이미 수행된 적이 있으나 일부 지표물리탐사 자료(전기비저항 수직탐사, 굴절법탐사, 방사능탐사)에 국한되었으며 상관해석은 속성자료의 비교분석을 위주로 하였으며, 따라서 전기비저항 수직탐사자료의 3차원 확장을 위한 해석 역시 심도에 따른 합성단면도만을 제시하였으므로 파쇄대의 공간적 분포를 정확하게 규명하기에는 어려웠다. 그 후에 송성호 외(2000)와 송성호 외(2002)는 전기비저항 쌍극자탐사, 물리검층, 시추자료, 수리지질학자료 및 CSMT탐사 등을 종합적으로 수행하여 청원지역에 대한 수리지질구조를 광역적으로 해석한 바

있다.

이 연구에서는 GIS를 이용한 물리탐사자료의 복합해석을 통한 지하 균열대의 정확한 분포를 규명함으로써, 파쇄대와 연관된 지하수부존 현황을 마련하는데 초점을 두었다. 이를 위하여 선구조자료 외에 전기비저항 수직탐사, 방사능탐사, 단성파탐사 굴절법, 전기비저항 검층 등의 각종 물리탐사자료를 이용하였다.

Fig. 2는 이 연구의 흐름도로서 지하수부존과 연관된 파쇄대의 위치 규명을 위해 지리정보시스템 소프트웨어인 ARC/INFO(1997)를 이용해 각종 지표속성자료들의 복합해석을 실시하였고, 파쇄대의 공간적 분포를 정확히 규명하기 위하여 전기비저항 수직탐사 자료들은 IDL(1997)을 이용한 수평·수직적 내·외삽을 수행하여 임의 축선별 및 각도별로 전기비저항 영상을 재건하였다.

4. 데이터베이스 구축 및 복합해석

지리정보시스템의 활용에 있어서 데이터베이스 설계 및 구축은 복잡하고 방대한 자료들을 관리하

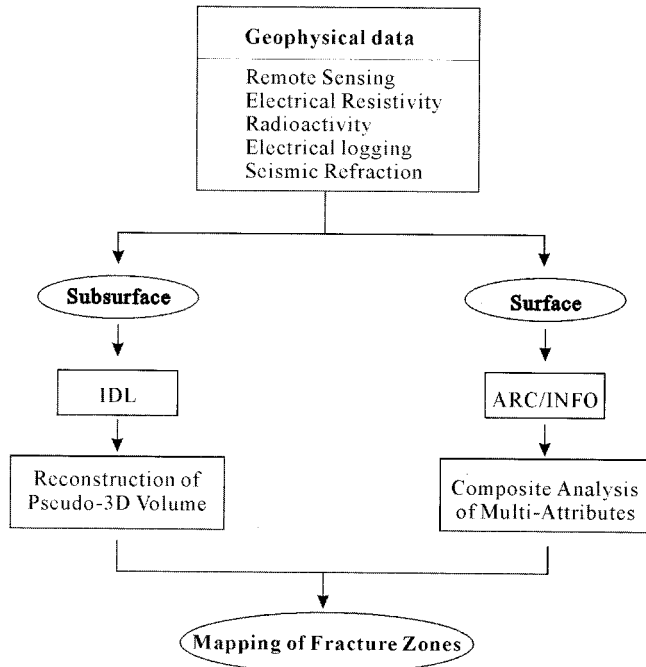


Fig. 2. Working flow chart.

기 위해 매우 중요하다. 이 연구를 위하여 ARC/INFO 시스템을 이용하여 데이터베이스를 구축하였고 또한 속성자료의 내삽을 통한 중첩이나 분석을 위해 래스터방식의 ARC/INFO GRID 모듈을 사용하였다. 이 연구에서 복합해석을 위한 속성자료들의 데이터베이스 구축과정은 Fig. 3과 같다.

4.1. 선구조 분석

연구지역의 광역적인 선구조분석을 위하여 다수의 열극대, 단층, 지질학적인 접촉대, 기타의 기반암불연속면과 같은 지하의 경계특성을 분석할 수 있는 Landsat 위성 영상자료를 이용하였다.

선구조모도는 Hardcastle(1995)이 제안한 선구조의 발생빈도와 총길이의 정규화된 합을 이용하는 다음과 같은 분포밀도로써 정량화하였다.

$$\text{분포밀도값} = w_1 \frac{\text{격자당선구조갯수}}{\text{평균격자당선구조갯수}} + w_2 \frac{\text{격자당선구조의총길이}(km)}{\text{평균격자당선구조의총길이}(km)}$$

이를 위해 연구지역을 일정한 크기의 격자로 나누었으며, 각 격자에 대하여 선구조의 길이와 빈도값을 도출한 후에 그 매개변수 값들은 평균값을 사용하여 정규화시켰다. 여기서 평균값은 대상지역내의 전체의 선구조를 대상으로 한 것이고, 각각의 매개변수에 대하여 정규화된 값은 가중치 w_1 과 w_2 를 각각 곱하여 합쳐진 값으로 표현된다.

여기에서는 속성자료를 얻기 위하여 연구지역을 500 m×500 m 크기의 격자로 나누어 분포밀도를 분석하였으며 ARC/INFO GRID 모듈에서 20 m×20 m 셀크기의 GRID 자료로 변환하였다. 분석결과 총 선구조 개수는 177개, 평균 격자당 선구조 개수는 2,725개, 평균 격자당 선구조의 총길이는 685,591 m로, 분포밀도 값의 평균은 1.999, 최소값은 0, 최대값은 5.482, 표준편차는 1.387이었다. 상관해석을 위해 등급(grade)은 선구조 분포밀도 값을 구한 후 빈도수를 고려하여 10등분하였다(Fig. 4a).

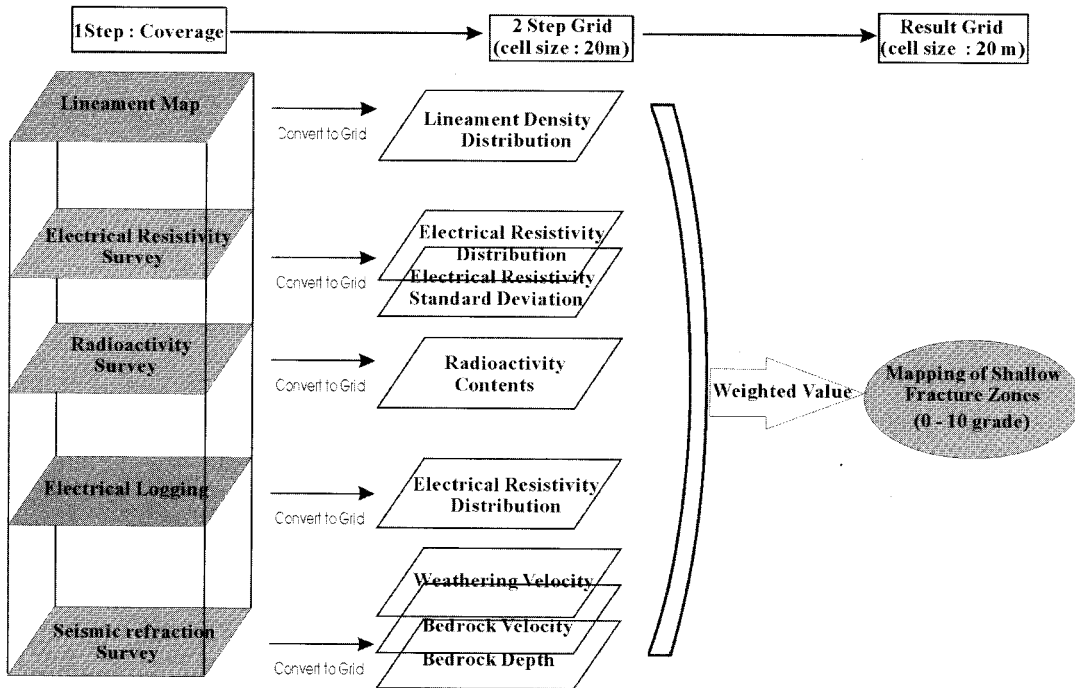


Fig. 3. Processing flowchart for GIS implementation.

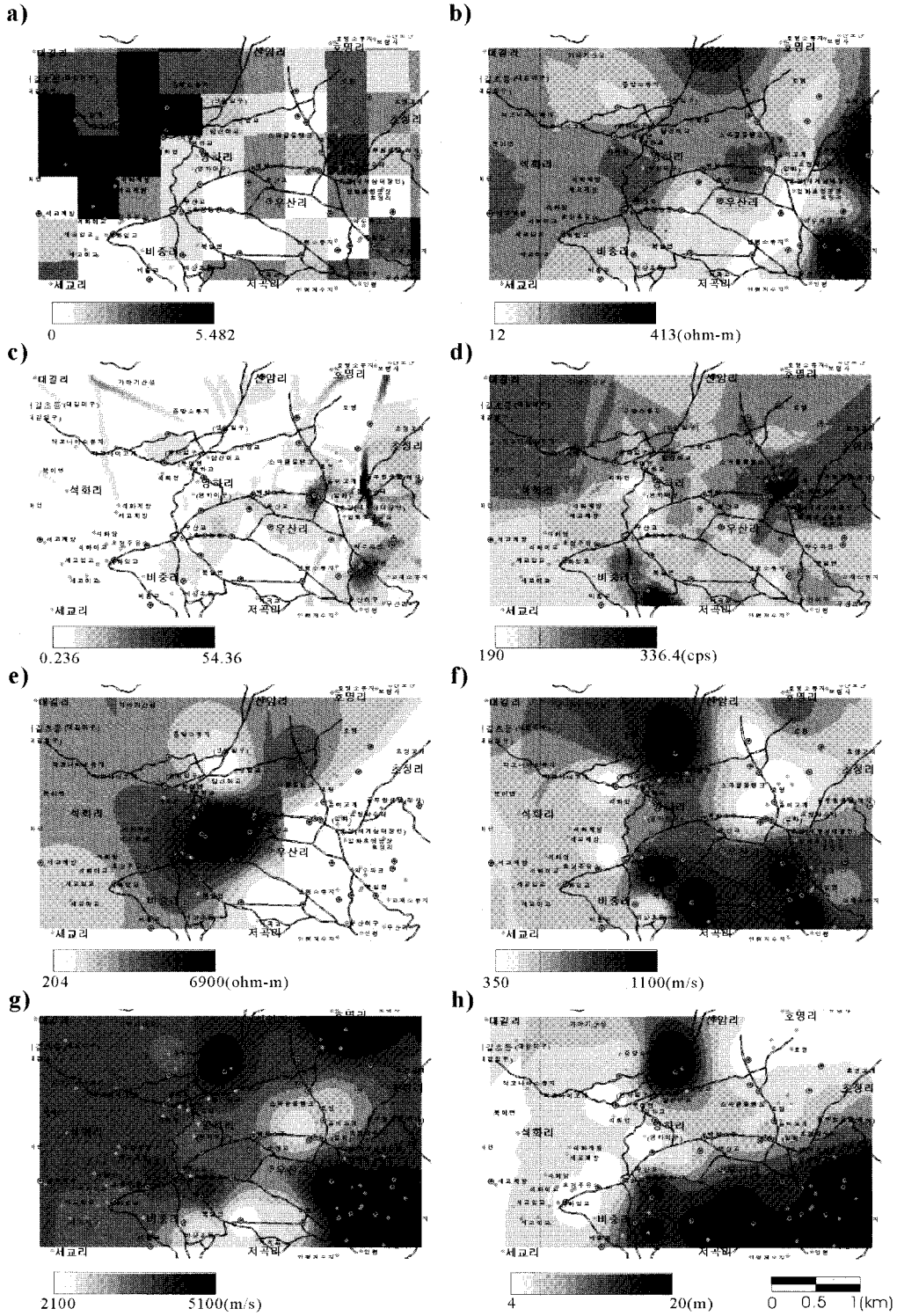


Fig. 4. Grey levels of the a) lineament, b) electrical sounding resistivity, c) standard deviation, d) radioactivity, e) electrical logging, f) weathering zone velocity, g) bedrock velocity, and h) depth of weathering layer.

4.2. 전기비저항 수직탐사자료

이 연구에서는 연구대상지역의 수리지질환경을 다양한 각도로 해석하기 위해 권일룡 외(1998)와 농업기반공사(1998)의 전기비저항 수직탐사(Fig. 5) 결과를 이용하였다.

여기서는 일차원의 수직적 전기비저항 분포와 변화만을 판단할 수 있는 전기비저항 수직탐사의 한계를 극복하기 위해 수직탐사 자료처리결과 얻어진 심도별 비저항값을 수평적으로 상관 삽입시켜 각 심도에서의 비저항분포도를 재건하는 기법(김지수 · 권일룡, 1997)을 적용시켜 각 측정별(0, 20, 50, 100, 150, 200, 300 m) 전기비저항 수치를 구하였으며, 지표 파쇄대 분포특성을 알아보기 위해 0 m의 전기비저항자료를 20 m×20 m 셀크기의 GRID 자료형태로 변환한 후 복합해석을 위해 전기비저항 값을 10등분하였다(Fig. 4b).

이 때 서로 다른 암질 및 단층 경계의 파쇄효과 등으로 인해 경계부에서는 전기비저항의 급격한 변화가 나타나는데, 김지수 · 권일룡(1997)과 Kim *et al.*(2001)은 이러한 파쇄대에 대한 전기비저항의 대비효과를 감안하여 통계분석을 실시하였으며, 이를 하나의 속성자료로 별도로 활용하였다.

통계분석을 위한 대표적인 모멘트는 평균, 표준

편차, 비대칭도, 첨도 등이 있는데(Davis, 1986), 이 연구에서는 ARC/INFO GRID 모듈 FOCALSTD 함수를 이용하여 지표 전기비저항 수직탐사자료의 표준편차를 계산하였다(Fig. 4c).

4.3. 방사능탐사자료

측점간 거리는 일반적으로 100 m로 설계하였으며 지하수 집수원이 집중된 곳에서는 50 m 간격으로 총 259점에서 수행하였다(Fig. 5). γ -선의 함량에 관련되는 탐사는 발생하는 에너지 준위에 따라 0.08MeV 이상을 측정하는 tc1, 0.40MeV 이상을 측정하는 tc2, K, U, Th의 5개의 성분을 측정하는데 이 연구에서는 모든 성분을 포함하는 tc1자료 만을 사용하였다. 방사능탐사자료 역시 ARC/INFO GRID 모듈에서 서로 보간하여 20 m×20m 셀크기의 GRID 자료형태로 변환 후 10 등분하였다(Fig. 4d).

4.4. 물리검층자료

일반적으로 결정질암의 대수층은 파쇄대, 단층 및 절리 등의 2차 유효공극이 잘 발달된 구간으로서 대수층 구간이 타구간에 비해 전기비저항이 상대적으로 낮게 나타나는 것이 특징이다(Paillet

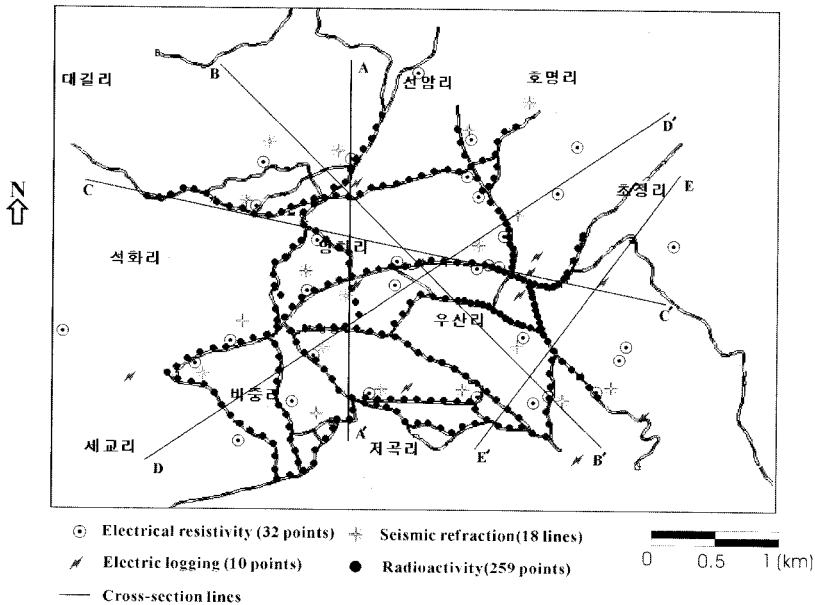


Fig. 5. Geophysical survey lines and points.

· Duncanson, 1994). 이 연구에서는 농업기반공사(1998)의 전기비저항검층 자료를 이용하여 풍화된 화강암 구간의 저비저항의 단노말과 장노말값의 이상을 기초로 한 대수층 구간과 주변 대수층과의 연결성을 추정하였다. 전기검층 자료는 10개 측정점(Fig. 5)에서 수행된 것이며 복합해석을 위해 지하 20 m의 단노말과 장노말 전기비저항값을 ARC/INFO GRID 모듈에서 서로 보간하여 20m×20 m 셀크기의 GRID 자료형태로 변환 후 10등분하였다(Fig. 4e).

4.5. 탄성과 굴절법자료

연구지역의 탄성과속도, 풍화대 깊이에 대한 자료들을 천부의 파쇄대 위치 규명에 이용하고자 권일룡 외(1998)의 탄성과 굴절법자료를 이용하였다. 속성자료들의 복합분석을 위해 18개 축선에서 얻은 결과(풍화대속도; Fig. 4f, 기반암속도; Fig. 4g, 풍화대깊이; Fig. 4h)들은 ARC/INFO GRID

모듈에서 서로 보간하여 20 m×20 m 셀크기의 GRID 자료형태로 변환한 후 10등분하였다.

4.6. 복합해석

그리드 형태로 변환된 속성자료들은 지리정보시스템을 이용한 복합해석을 위해 각각 등급과 가중치를 부여하였다(Table 1). 또한 모든 속성자료들은 속성값의 최대값과 최소값의 차를 균등히 10등급으로 나누어 이를 우선 각각의 속성자료별로 파쇄대 인식을 위한 구분자로 삼았다(Table 2). 즉 위성자료로부터 추출된 선구조밀도가 높을수록, 전기비저항탐사자료는 전기전도도가 높을수록, 전기비저항표준편차가 클수록, 방사능탐사자료는 방사능 함량이 작을수록, 물리검층자료는 전기전도도가 높을수록, 탄성파탐사자료의 풍화대속도가 클수록, 기반암의 속도가 작을수록, 풍화대 깊이가 깊을수록 높은 등급을 부여하였다(Fig. 6). 또한 전기검층자료를 제외한 모든 속성자료들

Table 1. Grade and weighted values used in the construction of the composite plot.

탐 사	속 성 자 료	등 급	가 중 치
원격탐사	선구조 밀도 분포	10	10
전기비저항탐사	지표 전기비저항 분포	10	10
	지표 전기비저항의 표준편차분석	10	10
탄성파탐사	풍화대 속도	10	10
	기반암 속도	10	10
	풍화대 깊이	10	10
방사능탐사	방사능 함량	10	10
물리검층	심도 20 m에서의 전기비저항 분포	10	3

Table 2. General correlation of the respective attribute with fracture density. The symbols △ and ▽ represent the positive and negative correlation, respectively.

탐 사	속성자료	파쇄대 반응
원격탐사	선구조 밀도 분포	△
전기비저항탐사	전기비저항 분포	△
	전기비저항 표준편차	△
탄성파탐사	풍화대 속도	△
	기반암 속도	△
	풍화대 깊이	▽
방사능탐사	방사능 함량	▽
물리검층	전기비저항 분포	△

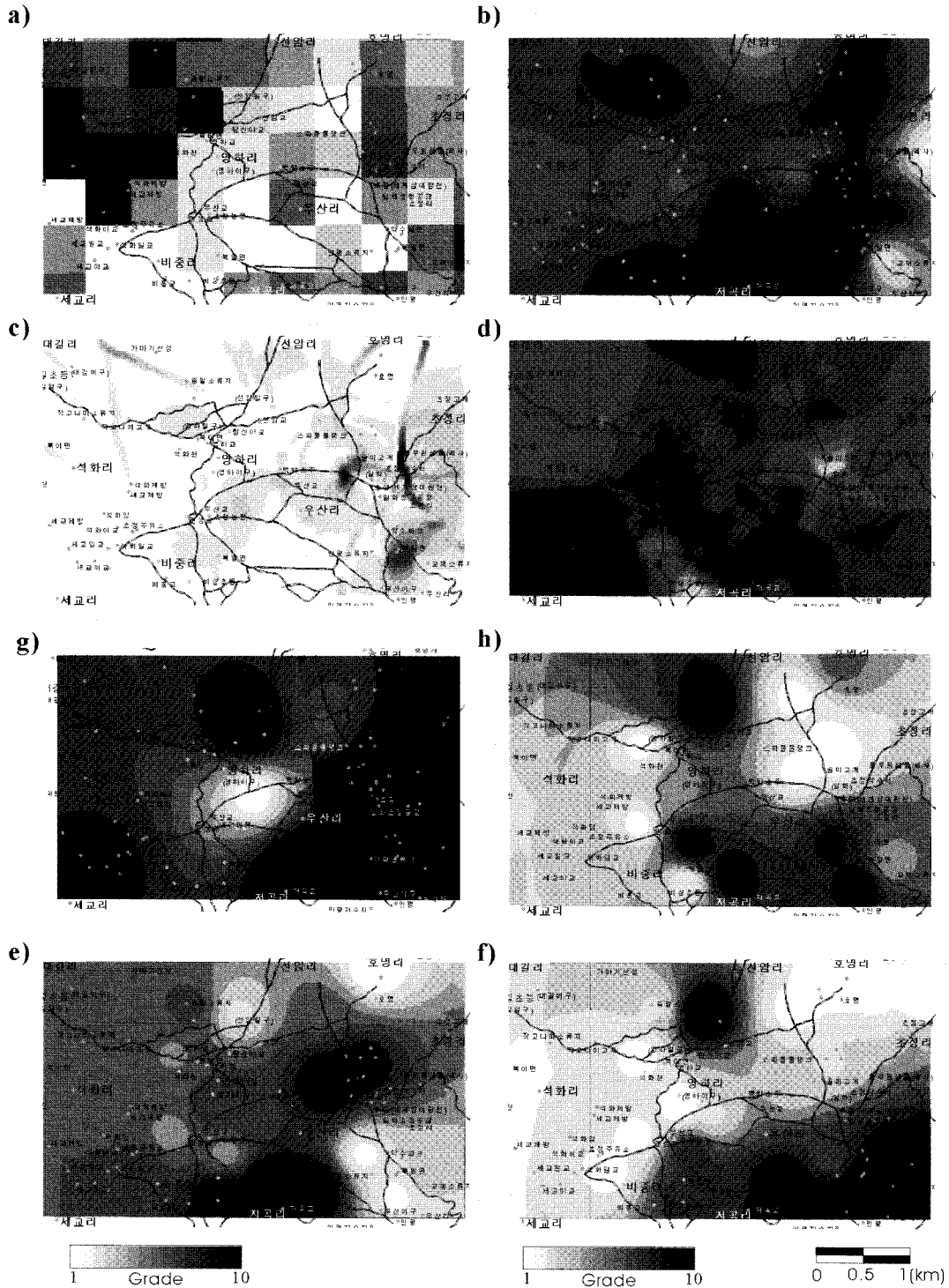


Fig. 6. Attribute plot from the grade and weighted values: a) lineament, b) electrical sounding resistivity, c) standard deviation, d) radioactivity, e) electrical logging, f) weathering zone velocity, g) bedrock velocity, and h) depth of weathering layer.

의 가중치를 10으로 부여하였는데, 이 연구에서 이용된 전기검층자료는 적은 양의 측정들을 이용한 내삽자료이므로, 상대적으로 신뢰성 낮은 가중치인 3을 부여하였다.

여러 속성자료들의 분석자료들을 이용해 복합 분석한 결과(Fig. 7) 천부 파쇄대의 분포양상은 연구지역 남부의 저곡리 일대에 걸쳐 가장 넓게 분포하며 남동부 초정리, 우산리, 저곡리 일대와 북서부의 선암리와 대길리 일대에서 높은 등급을 보인다. 또한 주요 파쇄대의 방향은 대체적으로 N40 E의 방향성을 보이고 있다.

5. 전기비저항 수직탐사자료의 복합해석

심도별(0, 20, 50, 100, 150, 200, 300 m)로 재건된 전기비저항 분포도로부터 예상 파쇄대 특성과 연구지역 전반에 걸친 전기비저항의 수직분포양상을 파악하기 위해 수평단면영상에서 드러난 관심지역을 임의의 축선 A-A', B-B', C-C', D-D', E-E'로 선정한 후(Fig. 5) 각 축선별로 가로 200m 간격으로 전기비저항값을 샘플링한 후 다시 심도별로 반복수행하여 얻어진 수치들을 내·외삽시켜 수직 2차원 전기비저항 영상을 재건하였고 측

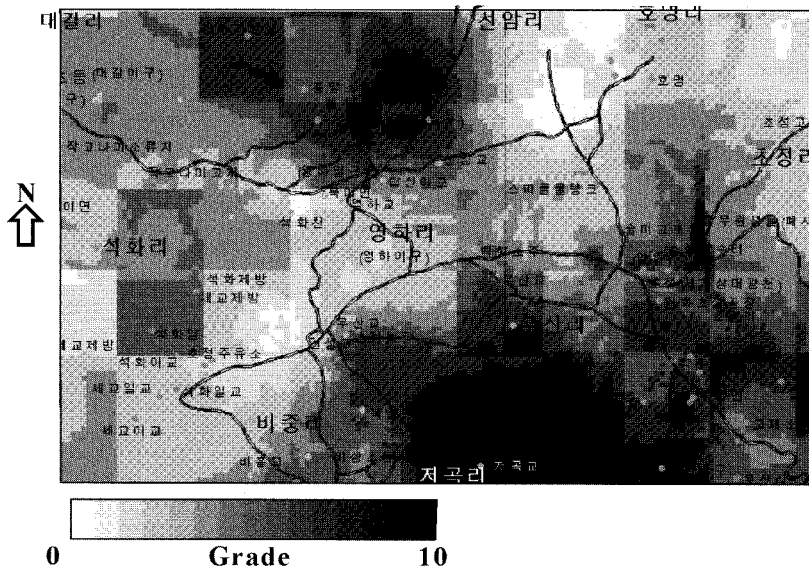


Fig. 7. Composite interpretation plot.

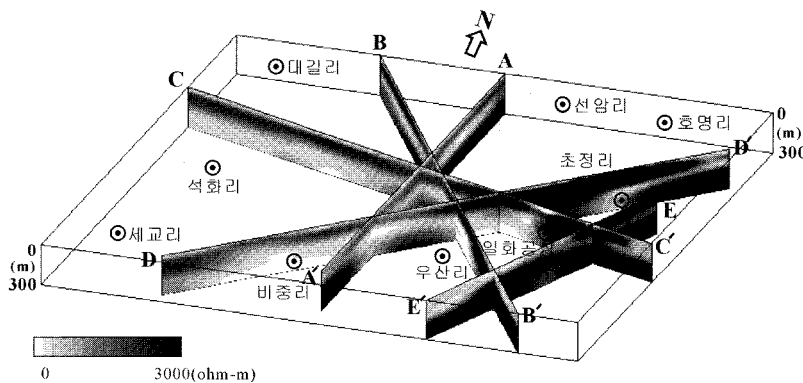


Fig. 8. Fence diagram constructed from electrical sounding resistivity profiles.

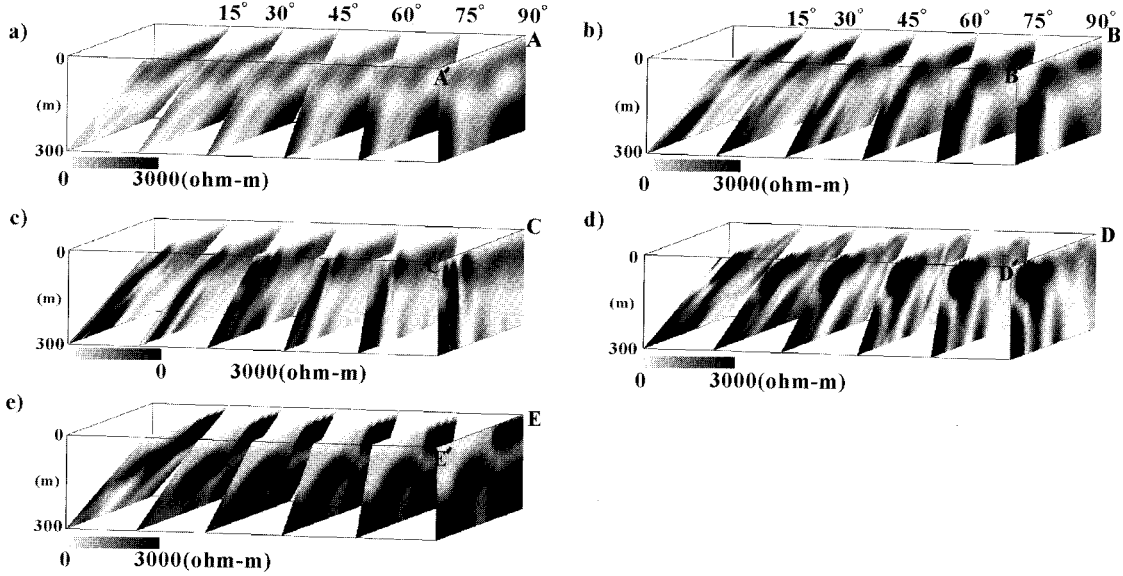


Fig. 9. Electrical resistivity sections with variant projection angles: a) line A-A', b) line B-B', c) line C-C', d) line D-D', e) line E-E'.

선별 전기비저항 영상들은 자료구현 소프트웨어인 IDL(1997)을 이용해 전기비저항 입체도를 재건하였다(Fig. 8). 심도별 수평단면을 내·외삽시켜 재건한 수직단면영상 해석결과 연구지역의 서쪽은 저비저항대가 우세하고 동쪽은 고비저항대가 우세하나 지하수부존 파쇄대의 분포양상은 남쪽이나 남동쪽에서 잘 발달하는 것으로 해석된다.

또한 IDL을 이용하여 각각의 축선별로 15°씩 변화를 주어가며 관심지역의 파쇄대 형태 및 연장성을 살펴보았다(Fig. 9). 축선 A-A'의 경우 경사각이 90°일 때 100 m 이하에 전반적으로 고비저항대가 나타나나 경사각이 작아질수록 A' 부근의 고비저항대는 서서히 사라지고 있다(Fig. 9a). 축선 B-B'의 경우 천부와 B' 부근은 모든 경사각에서 고비저항대가 분포하나 심부 중앙에 나타나는 고비저항대는 경사각이 작아질수록 줄어들며 30° 이하에서는 거의 사라짐을 볼 수 있다(Fig. 9b). 축선 C-C'의 경우 천부와 C' 부근을 제외하고는 저비저항대가 넓게 분포하고 있으며 경사각에 상관없이 일정한 경향성을 보여주고 있다(Fig. 9c). 축선 D-D'(Fig. 9d) 또한 축선 C-C'와 유사한 분포특성을 보여주고 있다. 축선 E-E'의 경우 축선 전반에 걸쳐 고비저항대가 나타나나 경사각이 30°이하에

서는 심부에 저비저항대가 살아나고 있다(Fig. 9e).

6. 결론

1. 지리정보시스템을 이용하여 다양한 지구물리탐사의 여러 속성자료들을 복합해석한 결과 지하불연속면의 영상을 효과적으로 얻을 수 있었으며, 연구 대상 지역인 초정지역에 대한 복합해석 결과 주요 파쇄대의 위치는 저곡리 일대와 초정지역의 지하수 집수원에 집중되며 방향성은 N40E로 나타났다.

2. 전기비저항 수직탐사자료들을 서로 내·외삽시켜 3차원으로 재건한 전기비저항 입체도는 천부 및 지하 파쇄대 및 풍화대의 공간적인 분포양상을 파악하는데 효과적으로 나타났으며, 각도별로 재건한 전기비저항 입체도는 파쇄대의 형태와 연장성을 파악하는데 유용한 것으로 밝혀졌다.

3. 향후 지하수 부존 분포를 정밀하게 파악하기 위해서는 지구물리탐사의 속성자료 이외에도 지하수위자료, 토양도, 경사도 등의 수치지질학적 속성자료를 모두 포함시켜 상호 연관성을 면밀히 분석한 복합적인 해석이 필요하다.

참고문헌

- 김지수, 권일룡, 1997, 월악산화강암체의 파쇄대규모를 위한 전기비저항탐사, 대한지질공학회, 7, 113~126.
- 권일룡, 1999, 지구물리탐사자료의 영상강화와 상관해석, 이학석사학위논문, 충북대학교.
- 권일룡, 신재우, 김지수, 김경호, 1998, 충북 초정지역에 대한 지구물리탐사자료의 복합해석, 제 53차 학술발표회, 대한지질학회.
- 김경숙, 박종현, 윤기준, 이상호, 1995, GIS를 이용한 분산형 강우-유출 모형의 개발, 한국원격탐사학회지, 11, 1-16.
- 김윤종, 김원영, 유일현, 1993, 지질재해 분석을 위한 GIS 응용연구, 한국GIS학회지, 1, 89-94.
- 나기창, 1986, 충북의 자연, 충청북도 교육위원회.
- 농업기반공사, 1998, 초정·미원지구환경영향조사보고서.
- 민경덕, 이영훈, 이사로, 김윤종, 한정상, 1996, DRASTIC을 이용한 오염가능성분석 및 그래픽 사용자 인터페이스 개발연구, 지하수환경학회지, 3, 101-109.
- 송성호, 정형재, 권병두, 2000, 물리탐사자료를 이용한 수리지질구조 해석-충북초정지역, 자원환경지질학회지, 33, 283-293.
- 송성호, 용환호, 김진호, 송승엽, 정형재, 2002, 전기 및 CSMT 탐사를 이용한 초정지역의 수리지질 구조 해석, 물리탐사학회, 5, 118-125.
- 원종석, 이영훈, 1997, 원격탐사와 지구정보시스템(GIS)을 이용한 이천분지의 사면안정평가, 자원환경지질학회지, 30, 241-248.
- 이사로, 1992, 지리정보시스템(GIS)를 이용한 청주지역의 광역적 산사태 분석 연구, 이학석사학위논문, 연세대학교.
- 이사로, 최순학, 1997, GIS 기법을 이용한 영광지역의 지하수 오염 취약성 평가, 한국지하수환경학회지, 4, 223-230.
- 이태섭, 1997, 물리탐사자료 복합처리 및 해석을 위한 전산정보 시스템 개발, 한국자원연구소.
- 지광훈, 서재영, 한종규, 1997, 지질정보관리시스템 개발, 한국원격탐사학회지, 13, 293-303.
- 한현철, 이사로, 전재화, 이성록, 최현수, 강중석, 김성필, 이치원, 1996, 해저지질 및 지구 물리자료 dB구축을 위한 기술개발연구(III), 한국자원연구소, KR-96(T)-11.
- ARC/INFO, 1997, 지리정보시스템 소프트웨어, ESRI.
- Davis, J. C., 1986, Statistics and data analysis in geology, John Wiley & Sons. Inc.
- Hardcastle, K.C., 1995, Photolineament Factor : A New Computer-Aided Method for Remotely Sensing the Degree Bedrock is Fractured, Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 61, 739-747.
- IDL, 1997, Interactive Data Language, Research Systems.
- Kim J.S., Han S.H., and Ryang W.H., 2001, On the use of statistical methods to interpret electrical resistivity data from the Eumsung basin (Cretaceous), Korea, Journal of Applied Geophysics, 48, 199-217.
- Paillet, F. and Duncanson, R., 1994, Comparison of drilling reports and detailed geophysical analysis of ground-water production in bedrocks wells, Ground Water, 82, 1-19.

2002년 1월 17일 원고접수

2002년 3월 25일 원고채택