

## 석회암지역에서 불연속면의 물리검층반응

김영화\* · 양영근\*\* · 김종열\*\*\* · 김유성\*\*\*

\*강원대학교 지구과학부 · \*\* (주)아시아지오컨설팅 · \*\*\*한국지질자원연구원

### 요 약

물리검층기법에 기초한 질리 및 파쇄대 연구의 일환으로, 암질이 비교적 균일한 석회암에서 질리 및 파쇄대의 물성반응을 측정, 분석하였다. 사용된 물리검층방법은 지반 공학적 특성에 민감한 음파, 밀도 및 비저항 검층방법이며 얻어진 불연속면의 물성 반응 특성은 초음파 텔레뷰어검층과 코어검층 결과와 비교되었다. 심도 보정을 전제한다면 코어검층과 초음파 텔레뷰어검층 결과와의 상관성은 상당히 좋은 것으로 나타났으며 물성곡선에 근거한 불연속면 인지 또한 상당히 효과적인 것으로 나타났다. 대체로 비저항, 밀도 및 속도의 순서로 효과가 증대되는 것으로 나타났으며 그 중에서도 속도와 밀도의 두 가지 검층곡선을 함께 이용하는 것이 불연속면의 탐지에서 누락과 오류의 위험을 최소화할 수 있는 방법으로 나타났다.

주요어: 불연속면, 물리검층, 음파검층, 밀도검층, 비저항검층, 강도지수

Yeonghwa Kim, Young Gun Yang, Jung-Yul Kim and Yoo-Sung Kim, 2001, Geophysical Log Response of Discontinuities in Limestone Geology. Journal of the Korean Geophysical Society, v. 4, n. 2, p. 95-102

**ABSTRACT:** As a basic study of characterizing fracture condition in bore hole, conventional geophysical well log data consisting of sonic, gamma-gamma and resistivity logs were compared with geological core log and acoustic televiewer log in limestone geology. Discontinuities shown on the acoustic televiewer log and the core log show fairly good correlation. The conventional geophysical log is also shown to be effective in locating discontinuities in limestone geology; sonic log shows the best result and resistivity shows the worst. Particularly, the combination method of density and sonic logs is shown to be the most effective in delineating discontinuities.

**Key words:** discontinuity, geophysical log, sonic log, density log, resistivity log, strength index

(Yeonghwa Kim, Dept. of Geophysics, Kangwon National Univ. Chunchon, Kangwondo, 200-701, Korea, Email: yhkim@kangwon.ac.kr; Young Gun Yang, Asia Geoconsultant Ltd, Email: nobia@chullian.net; Jung-Yul Kim, Geophysical Exploration and Mining Research Division, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, Email: jykim@kigam.re.kr; Yoo-Sung Kim, Geophysical Exploration and Mining Research Division, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, Email: yskim@kigam.re.kr)

### 1. 서 언

지구물리검층은 다른 모든 지구물리탐사와 마찬가지로 대상 지질의 물성반응을 이용하는 탐사 방법이다. 일반적으로 대상지질의 물성 반응은 유일반응(unique response)이 되지 못하며(Keys, 1989) 암반의 고유한 지질특성과 이차적인 풍화 특성에 의한 영향을 함께 반영하고 있다. 대부분

의 지반 공학적 특성이 구성지질에 의한 일차적 요인과 풍화 변질 등에 의한 이차적 요인에 의하여 결정되며 특히 이차적 요인에 의하여 민감하게 영향을 받고 있다. 이는 물성반응이 암반의 지반 공학적 분류에 매우 효과적인 접근 수단이 되어온 근거로서 특히 구성지질에 의한 물성반응 특성과 풍화 변질 등에 의한 물성반응 특성의 분리가 비교적 용이한 물리검층(김영화, 양영근, 1999)

이 풍화 변질의 기본 요소인 불연속면의 탐지에 효과적일 수 있음을 보인다.

오늘날 대부분의 불연속에 관한 연구는 초음파나 가시광선을 이용하는 텔레뷰어기법(김종열 외, 1995; 황세호, 이상규, 1999)에 의존하고 있다. 그러나 일반물리검층에 의한 불연속면 즉, 절리 및 파쇄대 연구의 필요성은 적지 않은바, 이는 텔레뷰어에 의한 절리연구의 크로스 체크뿐만 아니라 시추공벽 표면에 국한된 불연속면 정보를 그 내부로 확장시키는 의미를 부여한다. 아울러 기왕의 다른 목적으로 실시되는 일반물리검층의 효용성을 높이는 차원에서 그 필요성이 크다고 할 수 있다.

본 연구는 충청북도 제천시 대성광업주식회사 광업소 내 JC-1 시추공에서 하부 고생대 석탄기의 갑산층 석회암을 주 대상으로 이루어졌다. 조사 대상지역의 선정은 석회암의 암상이 균질하여 불연속면의 기초연구의 대상으로 적합할 것으로 판단되어 이루어졌다. 갑산층은 갑산에서 가창산 방향으로 연장된 북북서-남남동 방향의 대상 분포를 보이며 구조변형작용에 의하여 심하게 교란되어 있다(김준호, 이기무, 1998). 이 층의 하부는 주로 적색의 조립사암과 실트로 구성되며 중부는 담회색 내지 백색의 석회암이, 상부는 적색 이암 내지 담회색 석회암의 호층으로 나타난다. 갑산층은 특히 중부에 품위가 높은 양질의 석회암이 발달하고 있다.

시추코어는 주로 적색 내지 녹색을 띠는 이암과 탄산염암의 호층으로 이루어져 있으며 부분적으로 세립질 사암이 협재되고 있다. 이러한 암상 분포는 이 구간이 갑산층의 중상부 구간에 해당됨을 시사하고 있으며 본 연구에서는 석회암이 특히 우세한 심도 30~90 미터의 구간을 이용하였다.

## 2. 방법

시추공벽의 직접 관찰 기법으로서 시추공 벽면에서 반사되는 반사파의 진폭 및 주기를 측정하고 분석하여 지반 내에 발달한 단층 및 절리의 크기, 경사각 및 경사방향을 알아내는(Schepers,

1996) 초음파 텔레뷰어검층을 수행하고 아울러 절리의 간접적인 관찰기법으로 전기비저항검층, 음파검층, 밀도검층으로 구성되는 물성물리검층을 수행하여 그 결과를 비교하는 방법을 적용하였다.

텔레뷰어검층은 독일 DMT사의 Facmile 40 Acoustic Borehole Televiwer를 사용하여 수행되었다. 1.4 MHz대역의 주파수를 사용하여 얻어진 각 심도별 진폭 이미지를 분석함으로써 시추공벽의 절리 및 파쇄대에 대한 정량적 정보가 획득되었다. 초음파 텔레뷰어는 가장 효과적인 절리 관찰 기법이지만 텔레뷰어반응 중에서는 공벽 표면에만 국한된 정보가 포함되는 경우가 있다. 따라서 상대적으로 심부 정보를 포함하는 일반 물리검층자료와 비교하기 전에 코어검층에 의한 불연속면 확인 작업을 수행하였다.

코어 불연속면 분석에서 가장 어려운 부분은 시추작업과정 또는 그 이후의 인위적 요인으로 파쇄된 것들을 자연적인 절리와 분리하는 일이라고 할 수 있다. 본 연구에서는 코어상의 깨어진 면들에 대한 연결 작업을 수행하고 불연속면의 연결상태, 녹슬음(stain) 또는 변질의 유무, 매끄러운 정도를 기준으로 판단하였다. 이 단계에서는 특히 일반물리검층에서 특징적인 이상치를 보일 수 있을 정도의 규모에 상당하는 불연속면의 확인에 중점이 두어졌으며 정밀 분석 작업으로 획득된 심도별 불연속면 자료들이 물리검층 자료와의 비교 분석 자료로 이용되었다.

일반 물리검층에서는 영국 Geologging사의 Micro-logger System을 사용하여 자료를 획득하였다. 검층기는 검층기 본체와 원치, 엔코더, 축전지 및 손드로 구성된다. 전기비저항검층에서는 짧은 이극법(Short Normal)과 긴 이극법(Long Normal) 검층 곡선이 함께 얻어졌으며 Sonde의 이동속도는 6 m/min을 기준으로 하였다. 밀도검층은 Cs<sup>137</sup> 감마 소스를 부착한 손드를 2.4~3 m/min 속도로 상향 이동시키면서 공경 검층과 동시측정으로 이루어졌다. 음파검층의 경우 시추공 내에서 검층기가 정중앙에 위치할 수 있도록 중심잡이(centralizer)를 부착한 후에 상향식으로 측정했으며 측정속도를 3.3 m/min 이하로 유지하였다.

전기비저항 자료의 보정은 PCL2와 ViewLog

소프트웨어를 사용하여 이루어졌으며 감마감마검층으로부터 획득된 LSD 채널 자료와 공경채널 자료를 이용하여 밀도 값을 계산하였다. 이때 인공 감마 소스에 대한 보정작업과 공경 변화에 따른 보정작업이 수반되었다. 음파검층의 자료처리는 제조사에서 제공한 자동 주시읽기 소프트웨어를 사용하였으며 공벽 보정된 주시를 획득하였다. 필터링은 이동평균법(Moving Average Method)으로 11에서 301까지의 N 값이 사용되었고 전반적인 그래픽 작업은 코렐드로그가 사용되었다.

### 3. 텔레뷰어 불연속면과 코어불연속면

Fig. 1은 텔레뷰어 불연속면과 코어불연속면 관찰 결과를 함께 표시한 것이다. 초음파 텔레뷰어 자료는 먼저 반사파의 에너지 정보인 진폭이미지와 주시이미지로 표현되었으며 이로부터 불연속면의 주향, 경사 등 정량적인 불연속면 정보가 유도되어 시추공 불연속면의 존재를 확인하고 심도 대비의 기준으로 활용되었다. 텔레뷰어 불연속면은 진폭 이미지와 주시 이미지의 선명도에 따

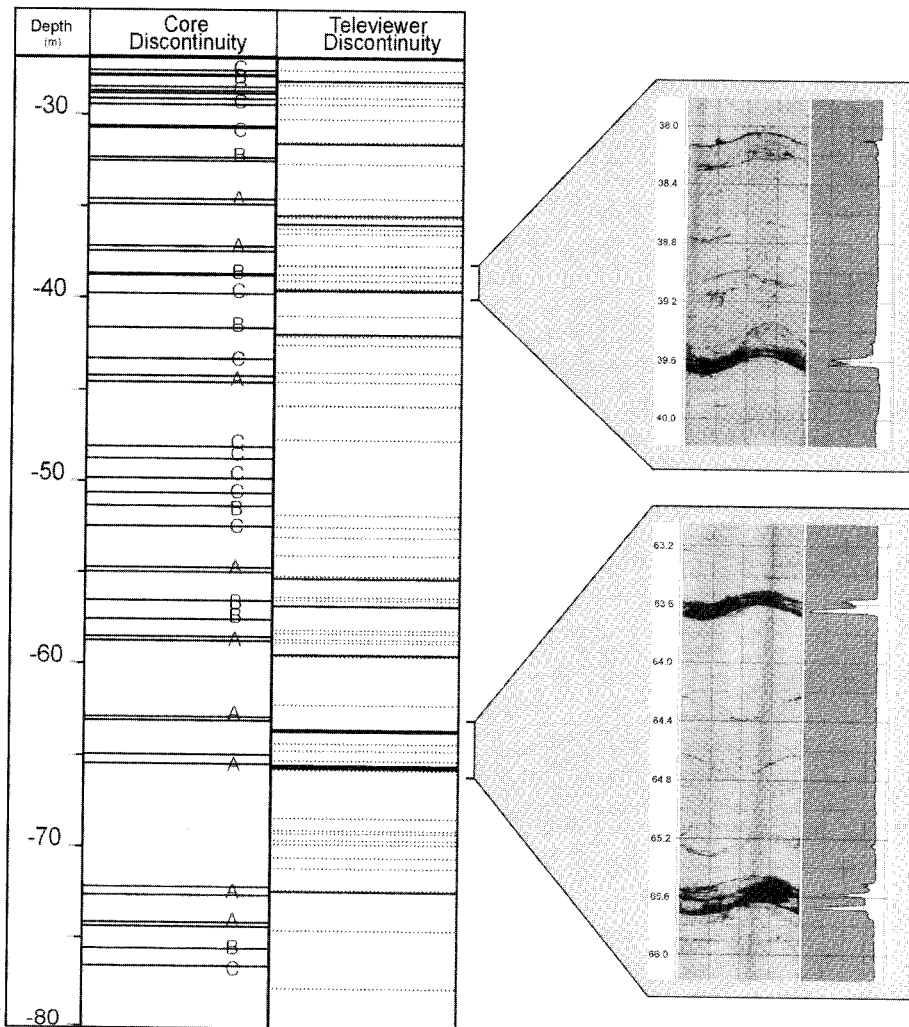


Fig. 1. Distribution of discontinuities obtained from borehole JC-1 using core log and acoustic televiewer log. Enlarged views of two section on the right show televiewer amplitude image(left) and strength index(right) obtained from televiewer data.

른 분류(김종열 외, 1995) 중에서 주시이미지가 전혀 인지되지 않는 불연속면(Acceptable fracture)을 제외하고 1, 2등급의 불연속면만을 분석 대상으로 삼았다. Fig. 1의 우측에는 얻어진 진폭이미지와 텔레뷰어 암석강도(김종열 외 1996)를 예시한 것이다. 좌측에 구분, 표시된 1등급 불연속면(Clear fracture)과 2등급 불연속면(Normal fracture)은 각기 진폭 이미지나 주시 이미지 양쪽 모두에서 선명하게 나타나는 뚜렷이 열린 절리와 진폭 이미지에서는 선명하게 나타나나 주시 이미지에서는 희미하게 나타나는 약하게 열린 절리를 나타낸다.

코어 시료를 이용하여 관찰된 불연속면의 분류는 장승익(1998)에 의한 분류기준을 이용하여 A, B, C의 3가지 유형으로 구분된 것으로 코어 상에서 불연속면으로 나타나나 녹슬음 또는 변질의 흔적이 없는 것들은 분석에서 제외시켰다. A형은 파쇄로 인해 코어가 나타나지 않거나, 부서진 압편들의 존재하는 파쇄대를 나타낸다. B형과 C형은 단순히 절리면에서 녹슬음 또는 변질 받은 흔적이 관찰되는 것으로 상, 하부의 불연속면이 연결되지 않는 경우(B형)와 상, 하부의 불연속면 연결 상태가 완벽한 경우(C형)로 구분된다. 본 연구에서는 불연속면에서의 녹슬음 및 풍화 흔적을 열린 절리의 근거로 삼았다. 제시된 코어관찰 결과는 상당규모의 심도 보정이 가해진 것이며(김영화, 김기주, 1999), 텔레뷰어검층 결과와의 비교에서 코어 불연속면 A형은 텔레뷰어 불연속면 1등급과 일치하고 B형과 C형은 대부분 텔레뷰어 2등급에 일치하는 것으로 나타나고 있다.

#### 4. 밀도, 비저항 및 속도검층에 나타난 불연속면

밀도와 비저항, 지진파속도가 특히 이차적 풍화특성에 민감하게 반응함을 감안하여 이 세 검층을 중심으로 불연속면의 존재와 그 특징을 추적하였다. 본 연구에서의 기본적인 접근 방향은 검층 곡선에서 나타나는 저주파 및 고주파 성분이 각기 지질별 고유 물성특성과 2차적 풍화특성을 반영하는 것으로 가정하고, 고주파 성분을 분리함으로써 절리 및 파쇄대의 존재를 찾고자 하였다. Fig. 2, 3 및 4는 각기 공벽보정형 음파검

층에 의한 속도곡선과, 밀도곡선 및 짧은 이극법에 의한 비저항곡선을 분석한 결과이다. 각 곡선들은 이동 평균법에 의하여 저주파 성분(n=21)과 고주파 성분(n=301)으로 분리된 것으로 시각적 효과를 높이기 위하여 색채움을 사용하였다. 각 검층 곡선간의 비교에서도 저주파 성분의 경우에 상관성이 낮은 반면에 고주파 성분에서는 상관성이 높게 나타나고 있다. 본 연구에서는 한 가지 물성을 이용하는 경우를 비롯하여, 두 가지 또는 세 가지 물성의 조합을 이용하여 불연속면 탐지 효과를 비교하였다.

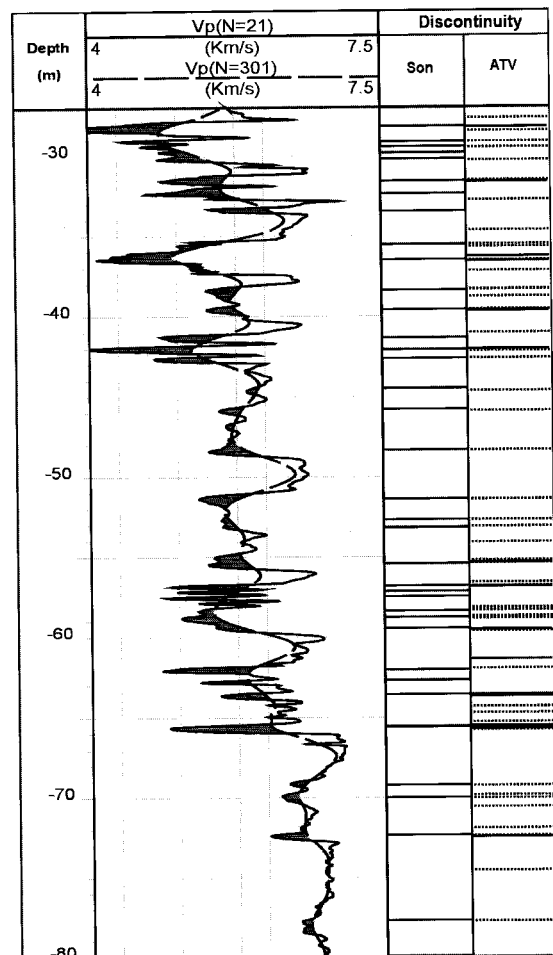


Fig. 2. Discontinuities delineated from sonic log(Son). Televiwer(ATV) discontinuities are shown together for comparison.

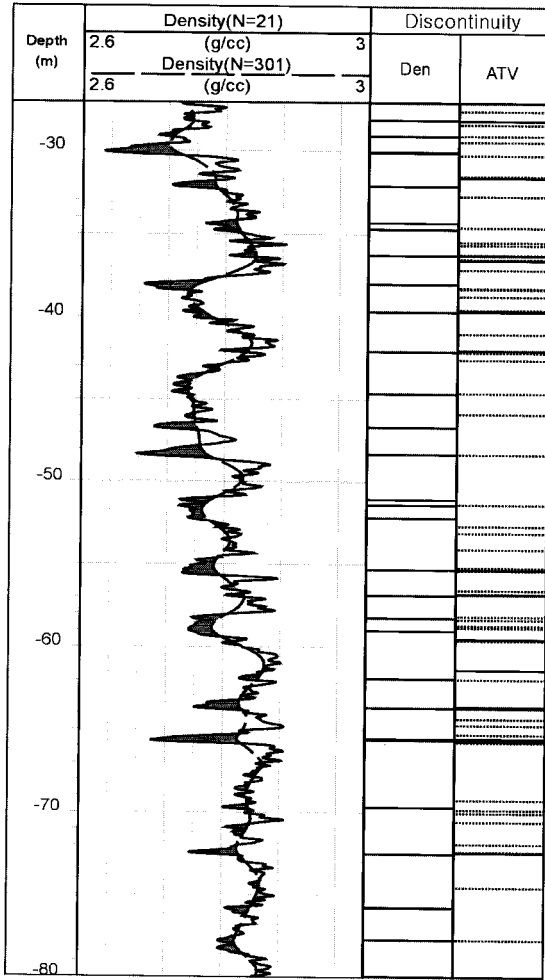


Fig. 3. Discontinuities delineated from density log(Den). Televiver(ATV) discontinuities are shown together for comparison.

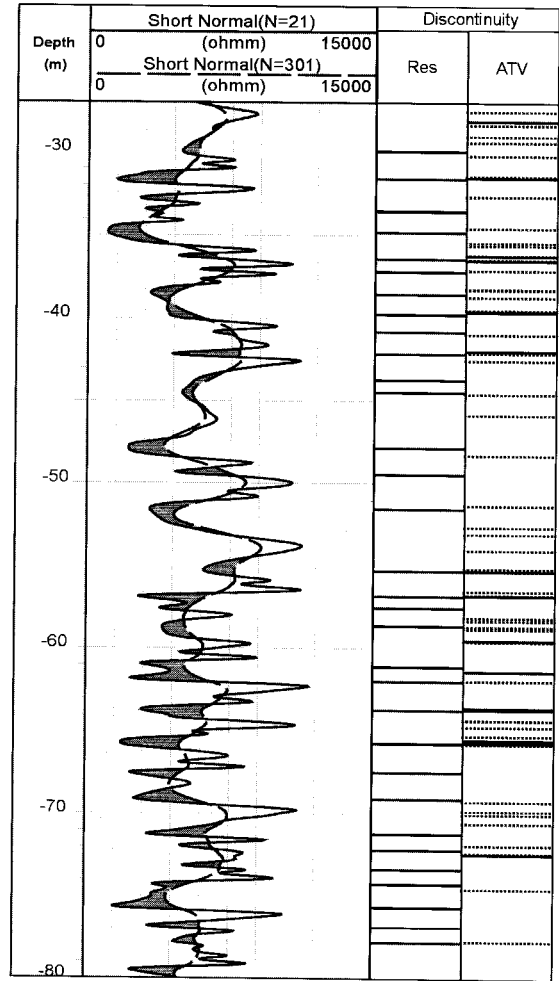


Fig. 4. Discontinuities delineated from resistivity log(Res). Televiver(ATV) discontinuities are shown together for comparison.

#### 4.1. 단위 물성을 이용한 불연속면 인지

불연속면의 존재는 갑작스런 저속도대, 저밀도대 저비저항대의 존재로 인지될 수 있다. Fig. 2는 속도 곡선에 의한 불연속면의 인지가 텔레뷰어에 의한 불연속면 확인 결과와 비교된 것으로 텔레뷰어와 음파검층의 결과 사이에 상관성이 비교적 양호하게 나타나고 있음을 보인다. 1등급 텔레뷰어 불연속면의 경우는 예외 없이 음파검층에서 이상대로 나타나고 있으며 일부 2등급 텔레뷰어 불연속면에서 불일치가 인지되고 있다.

밀도곡선으로부터 구해진 불연속면의 존재(Fig. 3) 또한 텔레뷰어에 의한 불연속면과 전반적으로

잘 일치되고 있으나 앞에서 제시된 음파검층에 비해서 심도 상관성이 약간 상관 정도가 떨어지는 편이다. 물리검층에서의 심도 불일치가 특히 경사가 큰 불연속면일 때 심하게 나타날 수 있음을 감안할 때 충분히 예상될 수 있는 범위로 판단된다. 한편 비저항곡선은 앞에서 제시된 속도와 밀도의 경우보다 텔레뷰어 결과와의 상관성이 훨씬 낮게 나타나고 있다(Fig. 4). 이는 지질요인, 특히 점토의 함량에 민감한 비저항 반응특성과 비저항 역전 현상의 분리가 어려운 것 등의 요인들에 기인할 것으로 판단된다.

이는 밀도와 속도가 모두 이차적 풍화에 가장

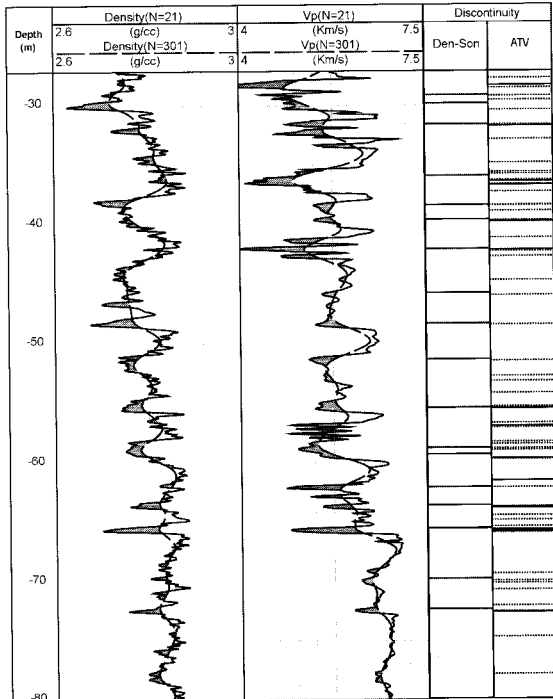
민감한 물성 특성임에 비하여 비저항은 이차적인 풍화현상 외에도 지질적 특성에도 민감한 특성을 가지고 있음을 감안할 때 충분히 예상될 수 있는 결과라 할 수 있다. 결과적으로 비저항검층의 경우가 불연속면 검출 능력이 가장 떨어지는 것으로 나타났다.

**4.2. 검층곡선의 조합을 이용한 불연속면 인지**

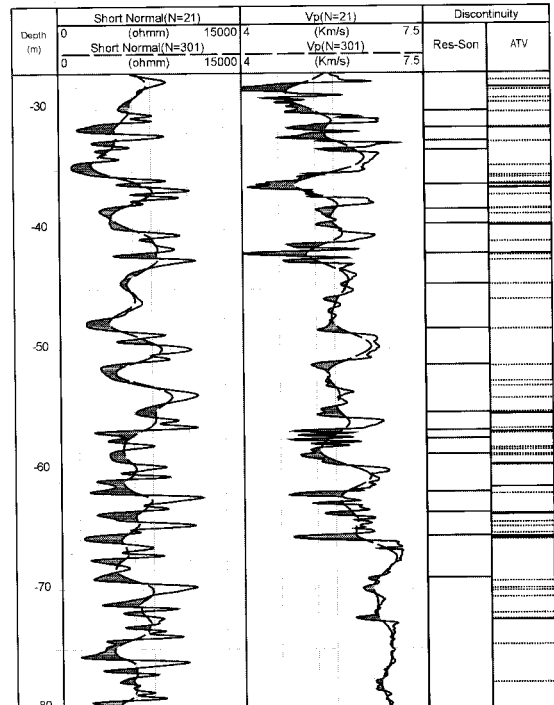
Fig. 5에서 Fig. 9까지는 세 가지 물리검층곡선들이 독자적으로 불연속면의 존재를 구체화시키는데 한계가 있음을 감안하여 복수의 검층곡선 조합을 이용하여 불연속면 검출 능력을 비교한 것이다. Fig. 5에서 Fig. 7까지는 속도, 밀도 및 비저항으로 구성되는 물성 조합 중에서 2가지의 물성 조합, 즉 속도-밀도, 밀도, 비저항, 및 비저항-속도의 조합을 이용한 것으로 두 물성곡선에서 함께 이상대가 나타난 경우를 구하여 텔레뷰어검층 결과와 비교한 것이다. 그 중에서는 속도-밀도 곡선의 조합(Fig. 5)에서 텔레뷰어 결과와

상대적으로 좋은 상관이 얻어지고 있음을 보인다. 이는 음파검층과 밀도검층이 모두 불연속면 인지에 효과적으로 반응하고 있음을 의미하며 두 검층 결과의 상호검증으로 보다 신뢰성 있는 불연속면 자료가 얻어질 수 있음을 시사하고 있다. 한편 속도-비저항 또는 밀도-비저항의 경우에는(Fig. 6, 7) 상관 정도가 크게 떨어지고 있는바 이는 비저항 자료의 비효율성에 기인한 것으로 판단된다.

Fig. 8은 앞에서의 세 가지 물리 검층 곡선을 모두 사용하여 저밀도-저비저항-저속도가 일치되는 지점을 체크함으로써 불연속면의 위치를 결정 한 것이다. 나타난 바와 같이 속도-밀도-비저항 곡선을 모두 이용한 경우에는 확인된 불연속면의 빈도수가 크게 떨어지고 있다. 이는 우선 불연속면 확인에 있어서의 비효율성으로 지적되고 있다. 그러나 세 가지 물성이 모두 일치되는 경우는 가장 확실한 불연속면의 존재로 판단할 수 있어 텔레뷰어 검층에서 확인된 불연속면의 성격을 파악 하는데 효과적으로 활용될 가능성이 크다. 이는



**Fig. 5.** Discontinuities delineated from combination of density and sonic logs(Den-Son). Televueer(ATV) discontinuities are shown together for comparison.



**Fig. 6.** Discontinuities delineated from combination of resistivity and sonic logs(Res-Son). Televueer(ATV) discontinuities are shown together for comparison.

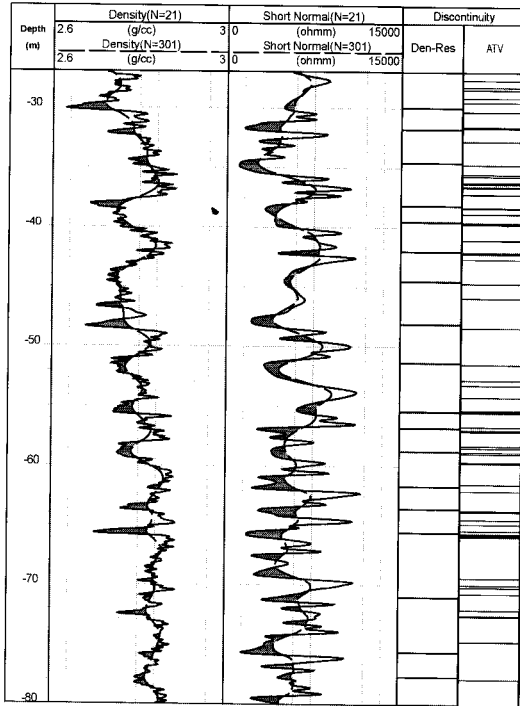


Fig. 7. Discontinuities delineated from combination of density and resistivity logs(Den-Res). Televiver(ATV) discontinuities are shown together for comparison.

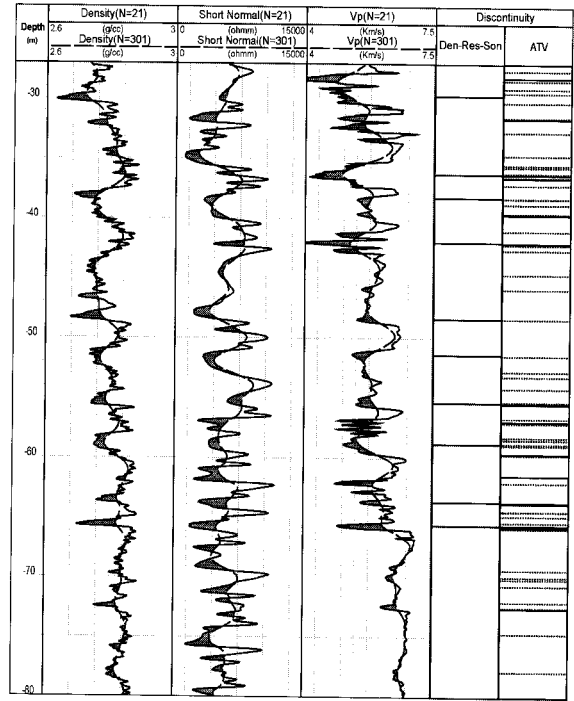


Fig. 8. Discontinuities delineated from combination of density-resistivity-sonic logs(Den-Res-Son). Televiver(ATV) discontinuities are shown together for comparison.

세 가지 물성곡선의 조합에 의해 탐지된 불연속면들이 모두 강도지수(Strength Index)로부터 구해진 텔레뷰어 불연속면과 일치하는(Fig. 9) 사실로부터 간접적인 지지를 받고 있다.

사실 Fig. 9 에서는 여러 가지 방법으로 구해진 불연속면 분포 중에서도 강도지수(Strength Index)로부터 구해진 텔레뷰어 불연속면과 음파-밀도 곡선의 조합으로 구해진 물리검층 불연속면 사이에서 가장 좋은 일치가 나타나고 있음을 알 수 있다. 이러한 현상은 단위 물성만을 사용하는 방법이 불연속면의 수를 증가시키나 신뢰성에서 문제가 있을 수 있는 반면에 세 가지 물성을 모두 이용한 불연속면의 인지는 상대적으로 신뢰성이 보장되나 불연속면의 규모가 아주 크지 않는 경우에는 탐지과정에서 누락될 위험이 클 수 있음을 감안할 때, 충분히 예상될 수 있는 현상이라고 할 수 있다. 아울러 Fig. 9에서의 결과는 불연속면 연구에서 일반 물리검층에 의한 방법이 단순 이미지 이용보다는 강도지수 이용 결과와 좋은

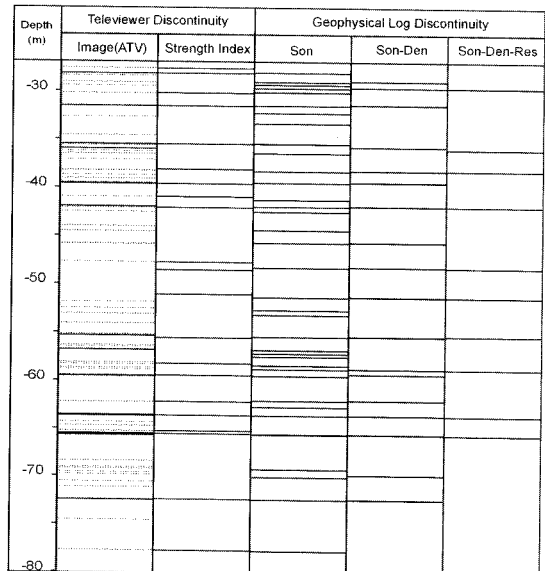


Fig. 9. Comparison of discontinuities obtained from different logging methods. Televiver discontinuities obtained from televiver amplitude and travel time images are compared with discontinuities delineated from conventional well log curves.

상관관계를 보이고 있다.

### 5. 결 론

지반 공학적 특성 반영에 민감한 음파검층, 밀도검층 및 비저항검층 곡선을 사용하여 암반 중의 불연속면을 확인하는 효과를 비교하였으며 그 중에서 밀도와 음파검층 곡선이 불연속면 탐지 효과가 큰 것으로 나타났다. 그러나 단위 물성만을 사용하는 방법은 탐지되는 불연속면의 수를 증가시키나 신뢰성에서는 문제가 있을 수 있으며 세 가지 물성을 모두 이용한 불연속면의 인지는 신뢰성이 돋보이나 불연속면의 규모가 아주 크지 않는 경우에는 탐지과정에서 누락될 위험이 큰 것으로 나타났다. 따라서 두 가지 검층곡선을 이용한 불연속면의 탐지는 누락과 오류의 위험을 최소화할 수 있는 효과적인 방법으로 간주되며 이 경우 특히 밀도-음파 곡선의 이용이 가장 효과적인 것으로 나타났다. 아울러 밀도-음파 곡선의 조합과 텔레뷰어 강도지수로부터 구해진 불연속면 사이에서 나타난 좋은 일치 또한 주목할 만하며, 향후 이 두 분야의 상관성에 대한 보다 자세한 연구가 요구된다.

### 사 사

본 연구는 강원대학교 자원개발연구소로부터

부분적 지원을 받았으며 자료처리 과정에서 강원대 지구과학부 박정빈 석사와 김기주 석사에게 특히 많은 도움을 받았다.

### 참고문헌

김중열, 김유성, 현혜자, 1995, Geotomography에 의한 암반구조연구(V). 과학기술처 특정연구개발사업보고서, KR-95(T)-17, 392p.

김영화 · 김기주, 1999, 갑산층 석회암 지역에서의 코어 물성과 검층 물성의 비교. 지질공학, 9, 3, p. 253-265.

김영화 · 양영근, 1999, 퇴적암에 있어서 검층물성의 반응 특성. 대한지구물리학회 제 2차 학술 발표회, 30p.

장승익, 1998, 풍암지역 시험시추공에서 수행된 물리검층결과의 종합해석. 강원대학교, 석사학위논문, 6p.

김준호 · 이기무, 1998, 영춘 122,123호 석회석광상 정밀조사보고서. 대한광업진흥공사, 41p.

황세호 · 이상규, 1999, 물리검층에 의한 파쇄대 인식과 동적지반정수의 산출. 한국지구물리탐사학회 1999년도 제2회 학술발표회- 건설현장에 필요한 물리탐사기술심포지움, p. 156-175.

Keys, W.S., 1989, Borehole Geophysics applied to groundwater Investigat-ions. National Water Well Association, 313p.

Schepers, R., 1996, Application of borehole logging to geotechnical exploration, 1st Hanwha Technique Symposium, p. 149-174.

---

2001년 9월 14일 원고접수  
 2001년 12월 20일 원고채택