

## 고분해능 텔레뷰어 검층기법의 기능 High Resolution Borehole Acoustic Scanner (Televiewer)

김 중 열 (Kim, Jung Yul)  
Schepers, R.

한국자원연구소  
DMT-ILG Germany

### 요약/Abstract

최근, 암반내에 형성된 절리 및 단층에 대한 정확한 규명은 무엇보다 암반분류 내지 암반내 용질유동연구에 서 대단히 중요한 과제로 되고 있다. 본 연구에서 소개된 텔레뷰어 검층장치는 주사되는 초음파를 초점화함으로써 절리상태를 고분해능으로 파악할 수 있는 기능을 갖고 있다. 즉, 초음파 발생원이 시추공 축상에서 선회하는 동안 시추공내벽으로 조밀하게 초음파빔을 주사하고 그로 인해 반사되는 초음파의 ① 진폭변화는 바로 절리 및 단층의 크기, 경사 및 방향은 물론 상대적인 암석강도변화도 정확하게 추출하게 하며, ② 주시변화는 바로 고분해능 공경검층기능을 대변하게 되어 시추공 내벽상태 내지 암석의 응력장 분포도 쉽게 판단하게 하는 것이다.

본 논문은 국내 청양군 실험시추공에서 얻게 된 텔레뷰어 현장탐사결과를 예시함으로써 텔레뷰어의 다양한 응용성을 입증하고 있다.

Fracture detection has always been very attractive to the log, because it is important in many of our prospecting activities, e.g. in understanding the underground rock formation and also the fluid flow as a high permeability path. This paper demonstrates the use of high resolution borehole acoustic scanner for the detection of fractures. The tool, known as Televiewer, is the first acoustic borehole imaging system to use a focussed beam. The acoustic beams generated by a single transducer are sent toward the borehole wall, scanning the wall in a tight helix as the tool moves along the borehole. The amplitudes and travel times of the reflected signals are then measured, which produces the corresponding images. The highly resolved amplitude image allows to recognize various size of fractures and in addition to derive the rock strength from the image. Meanwhile, the travel time image itself can be directly converted to a precise caliper image, providing detailed information of deviations of the borehole shape. It also allows correction of and explanations for amplitude variations. Field measurements were carried out at the Cheongyang study sites in Korea to illustrate the efficiency of the televiewer log.

서 론

암반에 형성된 절리나 단층은 용질유동을 위한 주요 통로가 된다. 원자력폐기물 저장시설과정에서는 어떠한 미소 절리라도 철저히 규명되어야 할 것이며 석유나 가스 비축기지 설계는 우선 자연방벽으로써 절리구조에 바탕을 둔 지하수 유동해석결과를 요구하고 있다. 절취사면 안정성은 바로 단층 및 절리의 경사, 방향, 경사각 및 충전물질에 직결된다. 터널굴착을 대상으로 한 암반분류법으로 외국에서 널리 알려진 Q-System이나 RMR(Rock Mass Rating)은 거의 절리에 대한 정보(예 : 주향, 경사, 간격, 거침울 등)에 의존하고 있다. 대체로 암석의 공학적인 성질(예 : 암석강도)은 절리의 존재로 인하여 급격하게 변하기 때문에 대형구조물(예 : 교층빌딩, 댐) 지반조사에서 절리상태 파악은 대단히 바람직한 것이다. 최근 국내 도처에서 대두되고 있는 지반침하문제에도 대체로 절리 및 단층의 발달상태와 침하를 직접적으로 유도하는 지하공동(예 : 갱도 혹은 채굴적)과의 연관성을 찾는 연구에 귀결된다. 이외에도 암반생수, 지열, 콘크리트 구조물의 부식상태, 광맥(예 : 탄층, 형석광)의 주향 및 경사, 터널 굴착시 대두되는 발파기법 내지 유수문제에서도 절리 탐지와 유관한 기법에 의해 쉽게 접근될 수 있는 것이다. 이러한 절리구조 규명은 이미 오래전부터 대단히 중요한 과제로 간주되어 여러차례 "borehole acoustic scanner (Televiewer)"라는 이름으로 다각적인 개발이 시도되었으나 수년전까지만 하여도 그의 분해능은 바람직한 수준에 미치지 못한 실정이었다.

지난 수년간의 한·독 국제공동연구는 상대국의 DMT-Institute of Deposits, Surveying and Applied Geophysics에서 이미 개발된 텔레뷰어 시스템 FACSIMILE(Focussed ACoustic System to Image the Inside of borehoLEs and pipes)를 크게 보완하여 현장응용성을 극대화한 소위 FACSIMILE-40을 낳게 하였다. 즉, 주파수 약 1.4MHz에 달하는 초음파 빔(beam)이 시추공 구경 50mm에서 400mm까지 자유자재로 초점화하여 시추공 공벽에 주사되며 그로부터 측정되는 반사파의 진폭 및 주시는 방대한 전산처리시스템에 의해 분석된다. 그 결과는 우선 절리(단층 및 암층경계면 포함)의 주향 및 경사각은 물론 나아가서 암석의 상대적인 강도, 암석의 응력장 분포 등을 정확하게 묘사하는 것이다. 이들 각개의

기능은 최근 국내에서 공동으로 수행한 현장실험(충청남도 청양시 근교)에서도 입증된 바 현존하는 국제기술수준에서 최대의 분해능을 보여주게 되었다. 본 논문은 바로 이번 현장실험결과를 바탕으로 텔레뷰어의 주요기능 및 응용성을 서술하고 있다.

근 본 원 리

탄성파(텔레뷰어에서는 초음파)가 지층경계면에 수직으로 입사되면(Fig. 1 참조) 그에 따른 반사파의 에너지(진폭)는 그 경계면의 반사계수 R에 의해 결정된다.

$$R = \frac{\rho_2 V_2 - \rho_1 V_1}{\rho_1 V_1 + \rho_2 V_2} = \frac{I_2 - I_1}{I_2 + I_1} \dots\dots\dots(1)$$

$V_1, V_2$  : 각 매질의 탄성파속도 (P파)

$\rho_1, \rho_2$  : 각 매질의 밀도

$I_1, I_2$  : 입사 및 굴절매질의 임피던스

R은 일반적으로 입사각, 탄성파의 주파수, 매질의 흡수성에 따라 변화하게 되나 입사각이 임계각보다 작을 경우(약 6° 미만)에는 식 (1)이 일차근사로써 대변된다. Fig. 1의 아랫부분은 초음파 빔이 물에서 암반에 연직으로 입사하는 상태를 보여주고 있다. 만약 이러한 빔이 바로 절리위에 입사된다면 반사되는 진폭의 크기는 산란(절리가 열려있을 경우) 내지 충전물질의 임피던스에 의해 상대적으로 극히 미약하게 관찰된다. 여기서 절리크기에 대한 분해능은 무엇보다 빔의 초점화와 상관되는 것이다. Fig. 2는 텔레뷰어 응용시 초음파 빔이 방사되는 상태를 시각적으로 보여주고 있다. 즉, 초음파 발생원이 시추공 중심축상에서 선회하며 일정시간 간격으로 시추공벽을 향하여 초점화된 빔(beam)을 밀집하게 방사한다. 이러한 측정과정을 하나의 구체적인 보기에 의해 살펴보기로 한다. HQ 시추공 크기(직경 약 96mm)에서 발생원이 초당 6회 회전하며, 한번 회전하는 동안 빔을 288차례 방사한다면 각 빔이 방사되는 시간 간격은 약 0.58ms이고 시추공벽위 입사된 각 빔 사이의 거리는 약 1.05mm(96mm ×  $\pi$ /288)가 된다. 만약, 매 회전시 발생원이 수직으로 4mm 선회한다면

$$4\text{mm} \times 6\text{회/sec} \times 60\text{초/min} \times 60\text{분/hour} \approx 86\text{m/hour}$$

으로써 시간당 약 86m 시추공연장에 대한 검층이 가

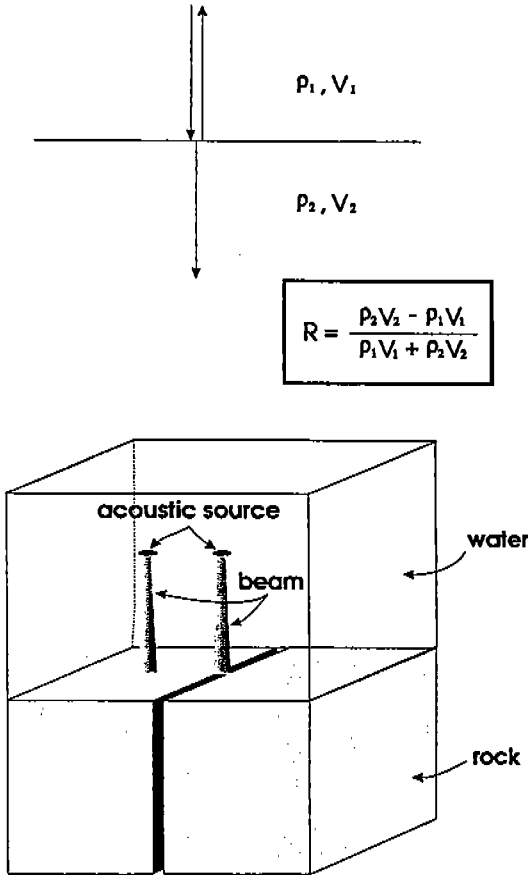


Fig. 1. Principle of borehole acoustic scanner (Televiewer).  
When an acoustic beam of ultrasonic transducer strikes the interface normally, the reflected acoustic energy changes from specularly reflected to back scattered(due to the fracture) energy.

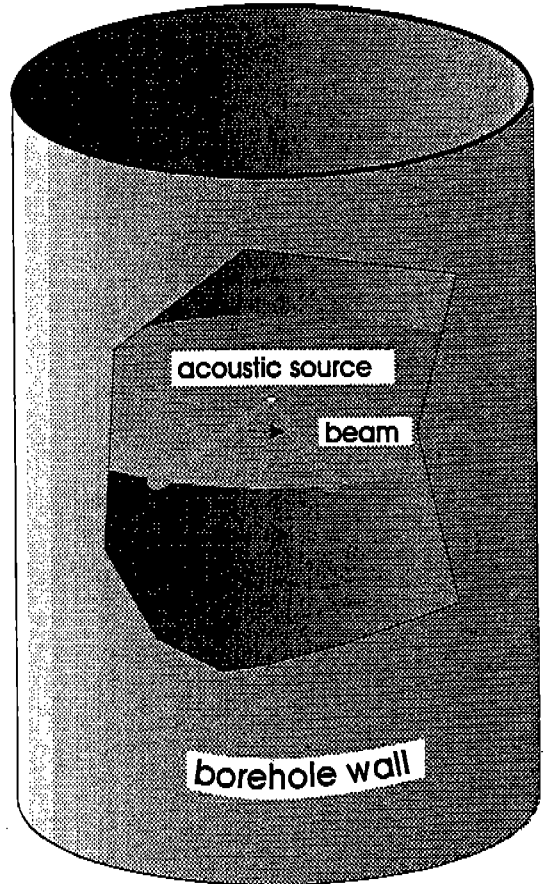


Fig. 2. Principle of borehole acoustic scanner (Televiewer).  
An acoustic source(piezoelectric transducer) fires an ultrasonic beam at the borehole wall as the tool is pulled up the hole. The pulses reflected from the borehole wall are recorded, and from these an unwrapped image of the wall of the hole is constructed with the borehole azimuth on the horizontal axis and the depth on the vertical axis.

능하게 되는 것이다.

Fig. 3은 임의의 경사를 가진 절리면이 존재할 경우 그것이 텔레뷰어 측정데이터에 반영되는 상태를 나타내고 있다. 여기서 인식되는 sine curve는 시추공내에서 검층기가 상향 혹은 하향됨에 따라 시추공벽에 표출된 절리에 대한 반응을 나타낸 것이다. 만약, 이러한 sine curve가 지자기 북극을 기준(N-E-S-W-N)으로 관찰되었다면 절리면 경사방향은 sine curve의 진폭치가 최소가 될 때의 위상이 되며 그에 따른 절리면 경사각 는 다음과 같이 표현된다.

$$\alpha = \tan^{-1}\left(\frac{2h}{D}\right) \dots\dots\dots(2)$$

### 텔레뷰어 현장실험

#### 측정시스템

텔레뷰어 측정을 위한 주요 기본기능(Schepers, 1991 ; 김중열 외, 1993, 1995)은 ① 초음파를 발생하고 또한 수신하는 기능, ② 방사된 각 빔에 의해 초래된 반사파(공벽에 의한)의 진폭과 주시를 발채하는 기능, ③ 방사되는 각 빔의 방향을 가늠하는 기

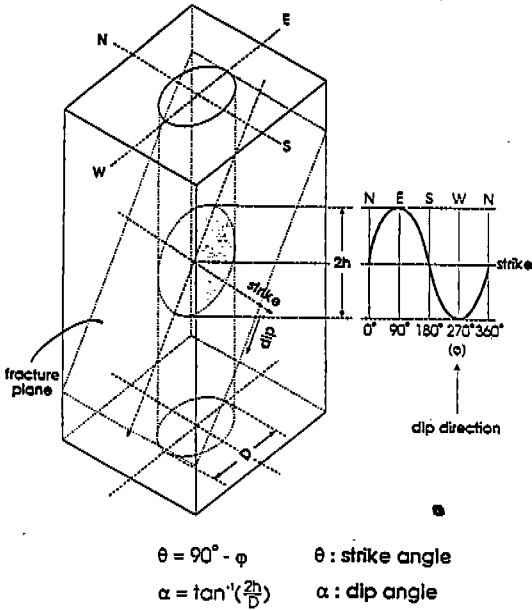


Fig. 3. Principle of borehole acoustic scanner (Televiewer).  
 Perspective view of a single planar fracture intersecting a round borehole and the resulting schematic fracture signature.

능, ④ 데이터 교정(예 : Decentralization)을 위한 inclinometer 기능, ⑤ 시추공내 센서(초음파 발생원)의 위치를 알리는 depth counter 기능, ⑥ 상기 기능에 따른 데이터의 호환 제어 및 영상화 내지 도면화 기능으로 대별될 수 있다. 그런데, FACSIMILE-40의 측정시스템이 현존하는 세계적인 기술수준에서 최대의 분해능을 보여주고 있는 것은 그의 Hardware 및 Software 측면에서 다음과 같은 우월성을 보여주고 있기 때문이다.

- 센서장치가 Fig. 4에서 나타난 바 Transducer-lense-mirror system으로 구성되어 있기 때문에 그의 초점화를 위한 제어가 용이하며, 그에 따라 0.3mm 크기의 절리도 인식될 수 있는 분해능을 갖고 있다. 한편, 이러한 시스템 개발은 검층기기(logger)의 몸체 규격을 극소화하게 하여(직경 40mm) 모든 규격의 시추공에도 응용될 수 있는 효과를 초래하였다.
- 측정시스템에 구성된 각 Hardware는 서로 독립되어 있기 때문에 (modular design of hardware) 시스템의 보완 내지 다른 검층기기

(예 : sonic log)와의 호환이 용이하다.  
 ○ 온도 및 압력에 대한 내구성이 높다.  
 다음은 상기 FACSIMILE-40에 의한 주요 텔레뷰어 기능 내지 기대효과를 요약하고 있다.

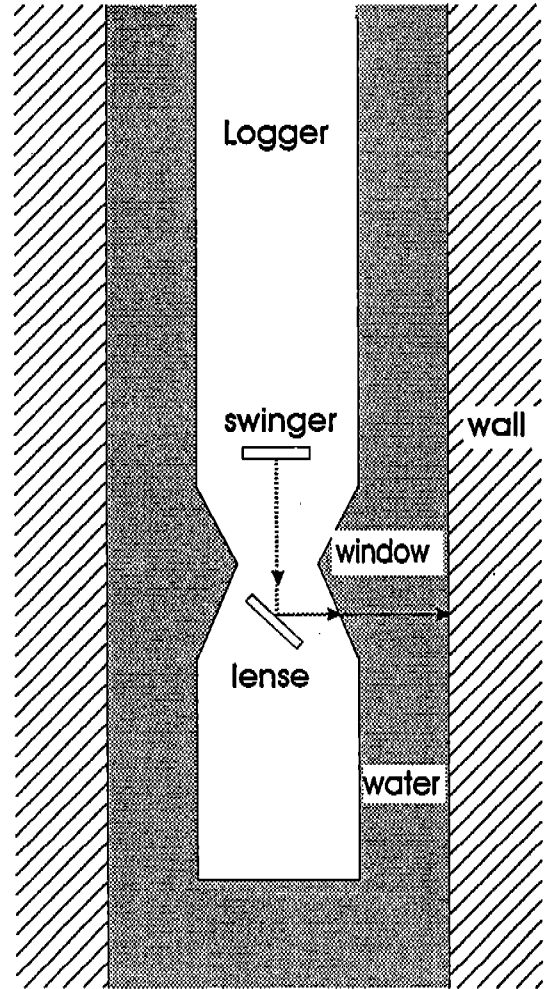


Fig. 4. Principle of a focussed acoustic system using a single piezoelectric transducer and a concave mirror.

텔레뷰어 이미지

상기 FACSIMILE-40은 국내 최초로 충청도 청양군에 소재한 시추공 (NX규격 : 약 75mm, 심도 약 97m)을 대상으로 응용되었으며 이 지역의 지질은 대체로 편마암에 해당한다. Fig. 5는 하나의 보기

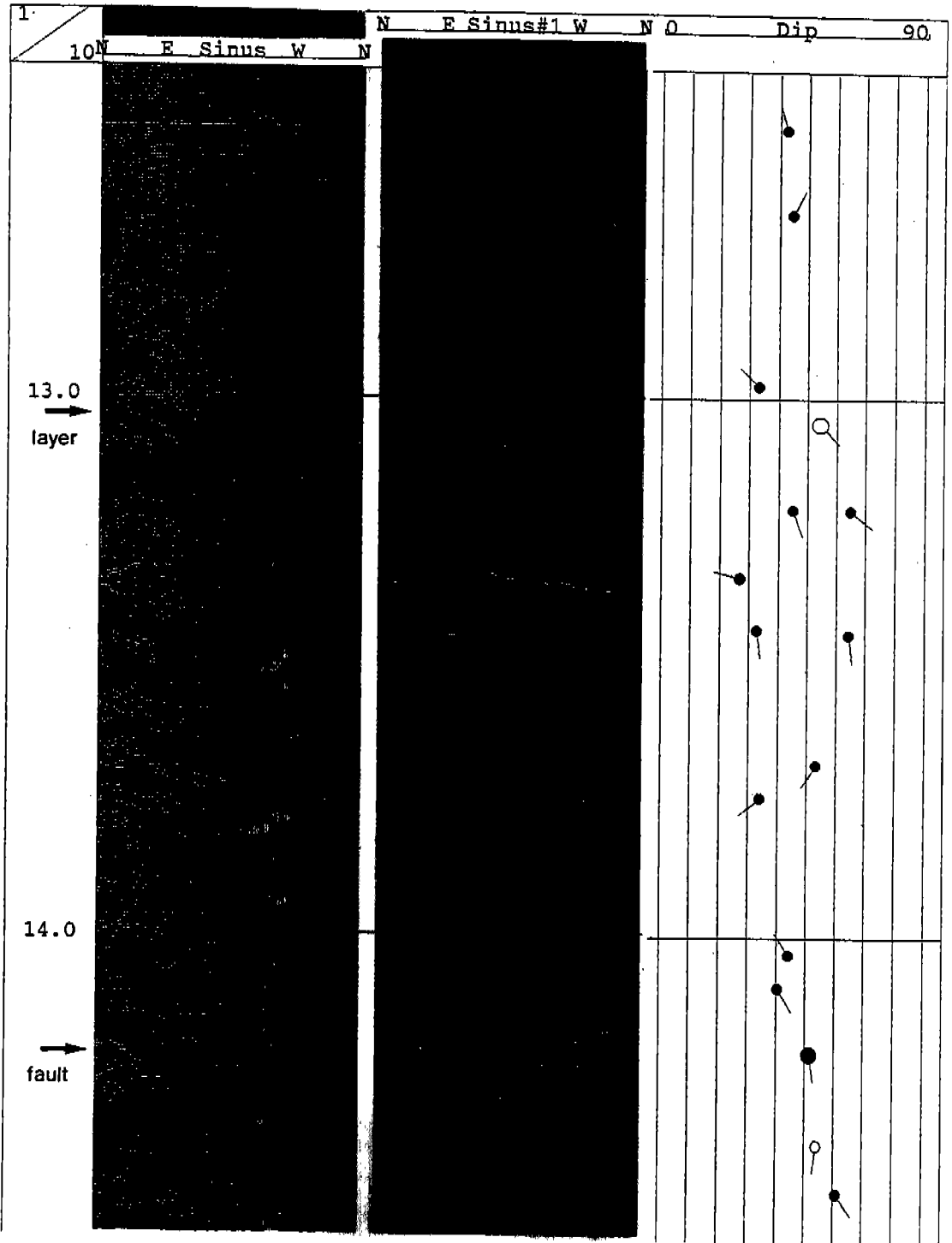


Fig. 5. Televiewer image log measured at the study site Cheongyang, Korea. Diverse type of fractures, faults and layer boundary can be clearly observed. Left : amplitude image. Middle : traveltime image. Right : arrow plot for the tectonic elements

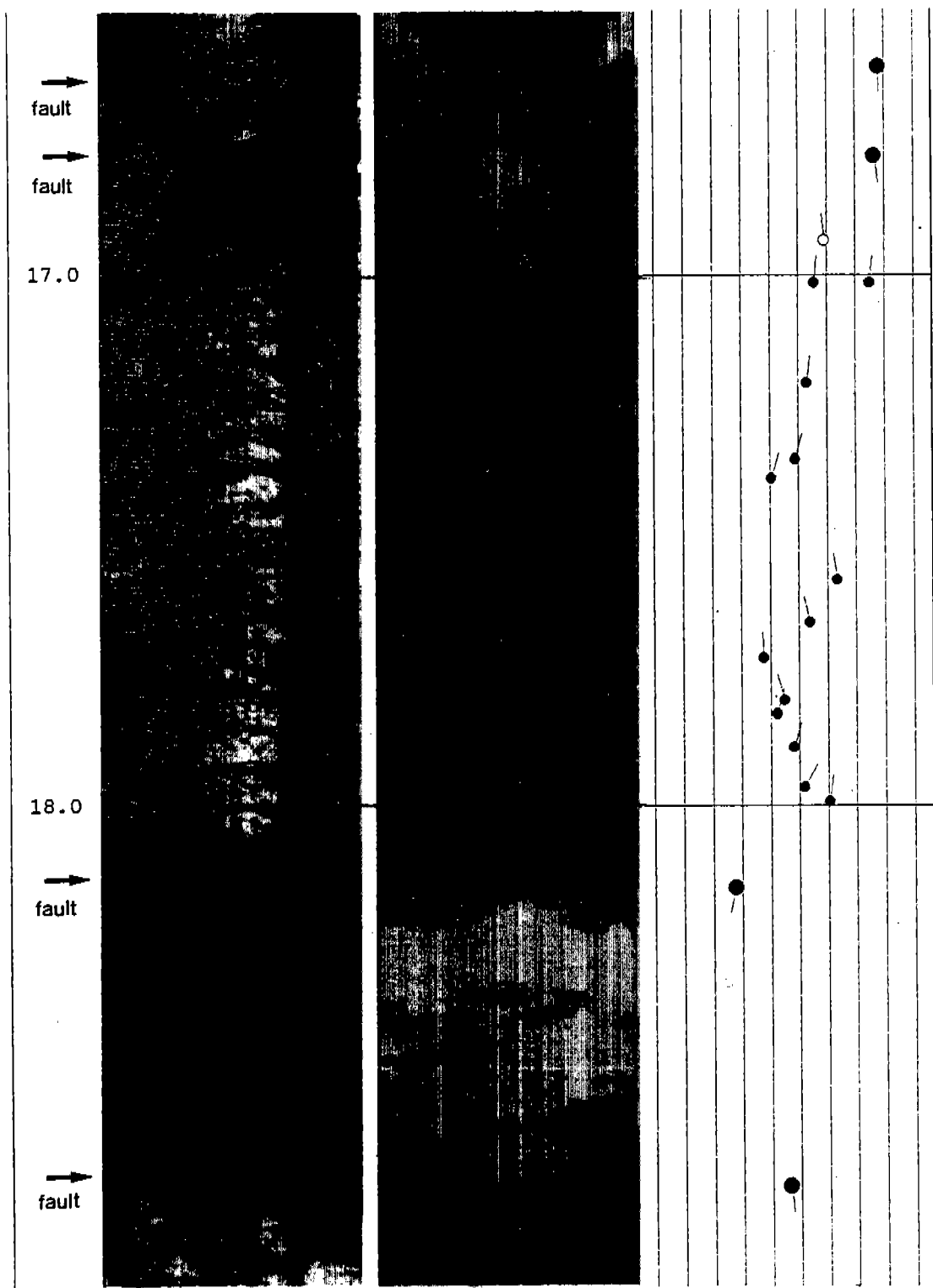


Fig. 5. (continued)

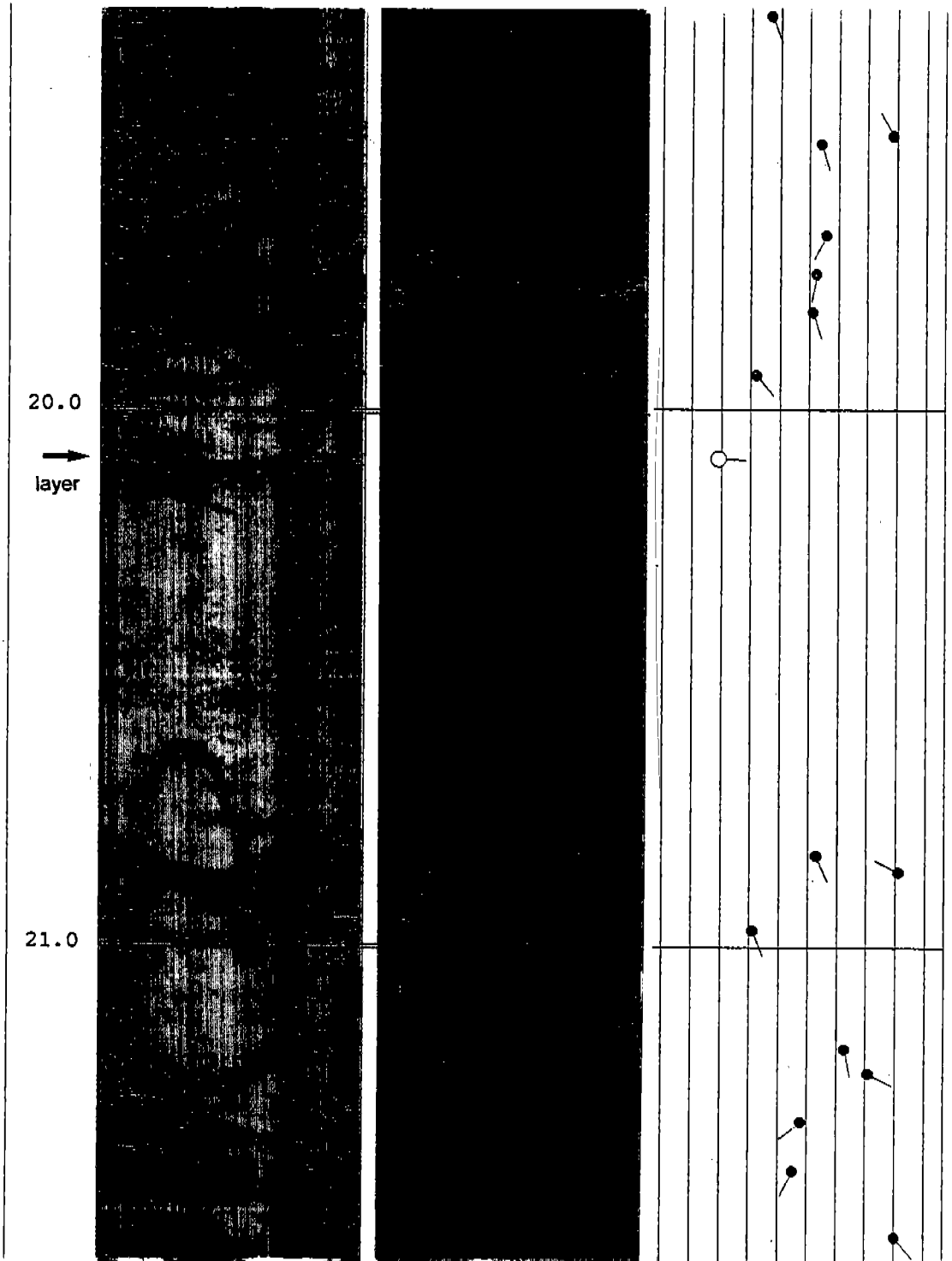


Fig. 5. (continued)

로써 심도구간 약 12.5m~21.5m에 대한 데이터만 선정한 텔레뷰어 측정데이터를 보여주고 있다. 왼쪽 그림은 각 빔에 대한 반사파의 진폭치를 나타내고 있다(진폭이미지). 여기서 상대적으로 낮은 진폭치는 그만큼 짙은 색깔로 표현되고 있다. 중간 그림은 반사파의 주시치를 보여주고 있으며(주시이미지) 이번에는 밝은 색깔이 주시가 상대적으로 느림을 나타낸다. 절리, 단층 및 암층경계면에 대한 판단은 주로 진폭이미지에서 이루어지며 이에 부응하여 주시이미지는 대체로 절리의 열린상태이나 단층충진물에 대한 정보를 제시한다. 예를 들면, 심도 약 16.7m 주위에는 비교적 큰 단층이 관찰되며 이보다 더 큰 규모(약 23cm두께의 파쇄대)의 단층은 심도 약 18.5m 주위에서 인식된다. 한편, 진폭이미지는 그의 높은 분해능으로 인하여 심도 약 13m 및 20.1m에서 암층경계면이 존재하고 있음도 여실히 보여주고 있다. 오른쪽 그림에 나타난 소위 arrow plot은 이미지로부터 발췌된 지질구조자료(tectonic elements)를 그들의 경사방향 및 경사각으로 표현하였다(흰색 큰원 : 암층경계면; 흑색 큰원 : 단층; 흑색 작은원 : 뚜렷한 절리; 회색 작은원 : 보통 절리; 흰색 작은원 : 미소 절리). 본 텔레뷰어 탐사에서는 도합 621개의 자료(567개 절리, 20개 단층, 34개 암층경계면)를 얻게 되었으며 그들 전체에 대한 경사방향 및 경사각은 통계학적 자료처리에 의해 rose diagram 및 평사투영법(polar projection)으로 나타내었다(Fig. 6 참조). 절리에 대한 전반적인 방향성은 뚜렷이 인식되고 있으며 그들의 경사각은 대체로 크게 나타나고 있다. 이러한 통계학적 자료처리는 때에 때

라 심도구간별로도 수행되며 예를 들어 Fig. 7은 Fig. 5에서 예시한 구간(심도 약 12.5m~21.5m)에 대한 결과를 나타내고 있다.

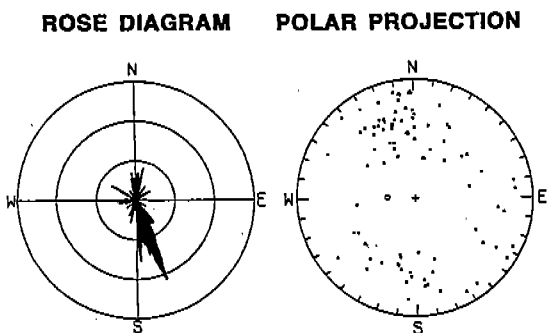


Fig. 7. Rose diagram(dip direction) and polar projection(dip) for the tectonic elements derived from the borehole range from 12.5m to 21.5m.

#### 응력장 분포(rock stress field)

지각에 존재하는 응력장 분포는 지질공학 측면에서 대단히 중요한 척도가 되며 이에 대한 크기는 흔히 시추공 내부모양의 변형을 조사함으로써 판단된다. Fig. 8은 주어진 최대 및 최소응력(SH 및 Sh) 하에서 원형의 시추공 단면이 최소응력 Sh 방향으로 늘어지는 상태(breakout)를 나타내고 있다. 여기서 표시된 hydraulic fracture는 시추과정에서 생성되는 절리를 의미한다.

텔레뷰어 주시치는 시추공단면 중심에서 공벽에 이르는 거리(단면이 원형일 경우는 반경에 해당함)를 구할 수 있는 기본자료가 되기 때문에 이에 대한 도면화는 바로 고분해능(144개 다리를 갖는) 공경검측(caliper logging) 기능을 대면하는 것이 된다. Fig. 9는 하나의 현장용용 실례(층정도 청양군)로써 시추공 심도 40m, 50m, ....., 90m에 대한 시추공단면을 계산하여 나타내고 있다. 즉, logger의 중심축은 주어진 시추공축으로부터 미소하게 이탈되고(decentralization) 있으며 또한 측정된 단면형태는 거의 원형을 띄고 있기 때문에 어느 특정방향에 대한 응력장 변화는 관찰되지 않고 있음을 볼 수 있다.

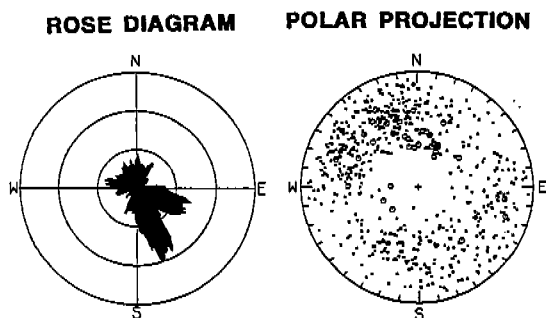


Fig. 6. Rose diagram(dip direction) and polar projection(dip) for the tectonic elements derived from the whole borehole (range from 5.7m to 97m).



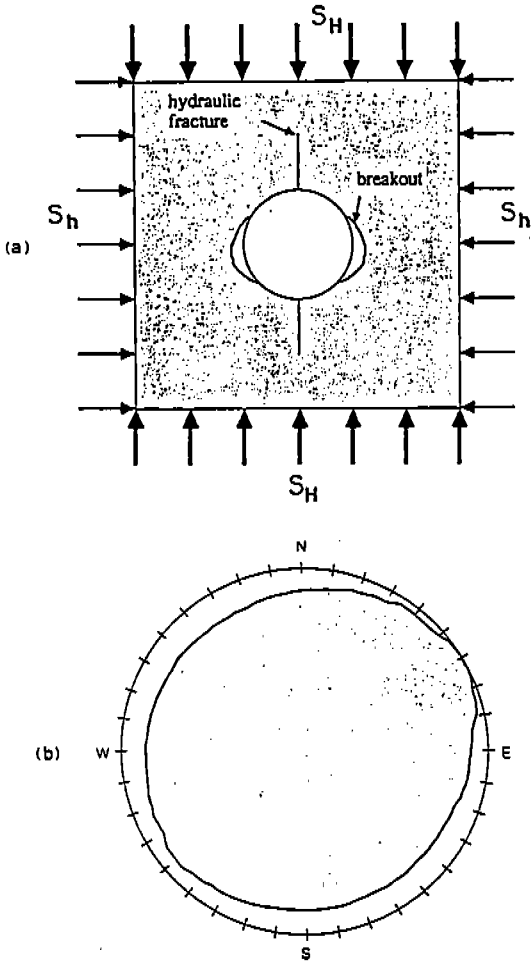


Fig. 8. Study of rock stress field.  
 (a) Illustration of the stress concentration around a vertical borehole in an elastic body subject to the most compressive and least compressive far field stresses  $S_H$  and  $S_h$  respectively (b) Example of borehole cross section showing breakouts.

암석강도(rock strength)

텔레뷰어 측정시 얻게 되는 데이터 내용은 초음파 빔이 공벽에 의해 반사되는 초음파의 진폭과 주시이다. 여기서 진폭은 공벽의 반사계수  $R$ 과 직접적으로 연관되며,  $R$ 은 식(1)에 의거 단지 공벽에 인접한 두 매질의 임피던스 즉  $I_w (= \rho_1 V_1)$ ,  $I_r (= \rho_2 V_2)$ 에 의해 결정된다. 텔레뷰어 측정에서는 일반적으로 시추공 내에 물로 채워지기 때문에  $I_w$ 는 쉽게 측정된다( $\rho_1$

CALIPER CROSS SECTION

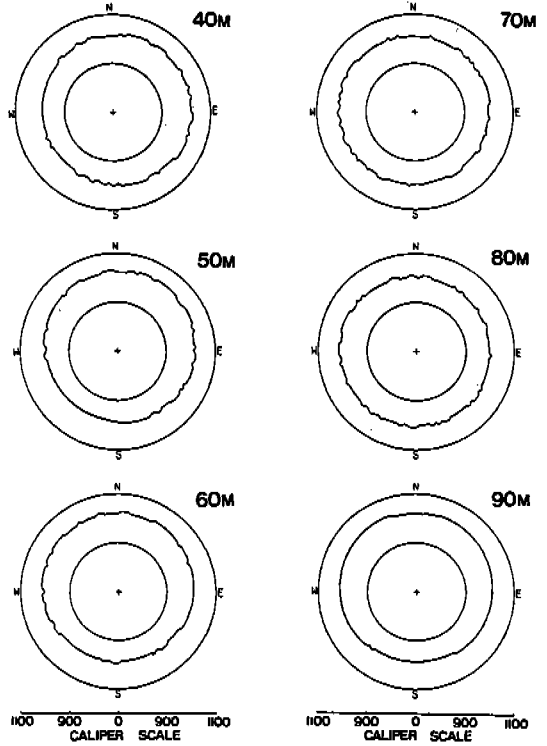


Fig. 9. Borehole cross sections of six depth intervals derived from the traveltime image at the study site Cheongyang, Korea.

$\sim 1$ ,  $V_1 \sim 1500\text{m/sec}$ ). 따라서  $I_r$ 은 바로 측정된 진폭치로부터 구할 수 있게 된다. 여기서 얻게 되는  $I_r$ 은 암석의 탄성과 속도와 밀도 정보를 잠정적으로 내포하고 있기 때문에 이것은 텔레뷰어 측정에서 부차적으로 얻게 되는 큰 수확이라 할 수 있겠다. 시추공 검층시 일반적으로 암석의 탄성과 속도변화는 밀도변화보다 훨씬 크기 때문에  $I_r$  자체의 상대적인 변화는 암층의 분리를 가능하게 한다. 즉, 견고한 암석(예:  $V \sim 5000\text{m/sec}$ ,  $\rho \sim 2.7\text{g/cm}^3$ )과 연약한 암석(예: 파쇄대  $V \sim 3000\text{m/sec}$ ,  $\rho \sim 2.5\text{g/cm}^3$ )의 임피던스는 상당한 차이(약 1.8배)를 나타내기 때문에 흔히  $I_r$ 은 reflectivity 혹은 rock strength로 대변된다.

일반적으로 "space modulus"  $M$ 은 속도 검층기(sonic log)에서 얻게 되는 P 및 S의 초동주시  $\Delta t_p$

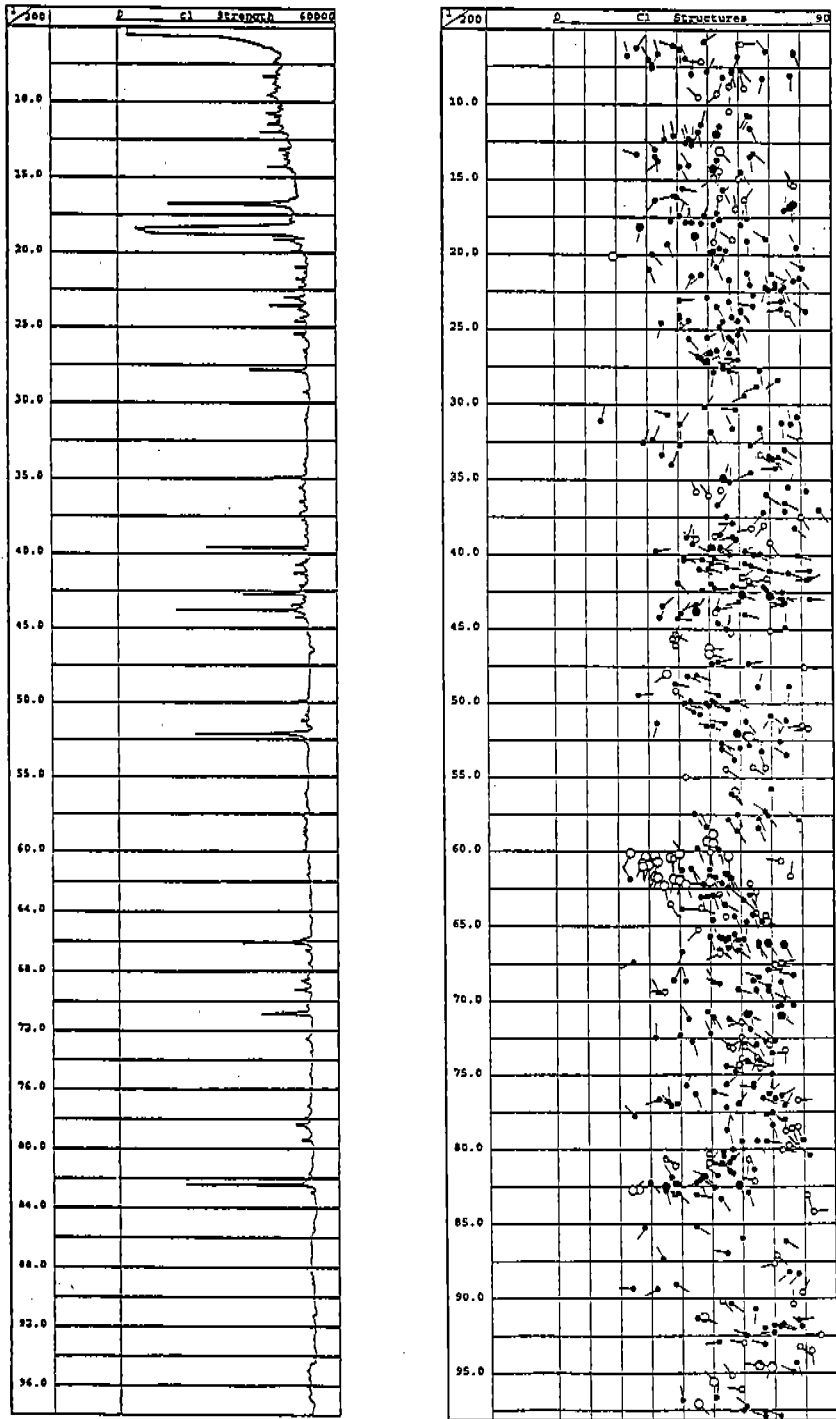


Fig. 10. Rock strength(left side) was evaluated from the amplitude image. The abrupt variation of the rock strength is well matched to the tectonic elements (faults) shown in the arrow plot(right side).

및  $\Delta t_p$ 와 밀도( $\rho_b$ : bulk density)에 의해 다음과 같이 정의되며(Serra, 1984)

$$M = K + \frac{4\mu}{3} = \frac{\rho_b}{\Delta t_p^2} = \rho_b \cdot V_p^2 \dots \dots \dots (3)$$

$$\mu = \frac{\rho_b}{\Delta t_s^2}$$

$$K = \rho_b \left[ \frac{1}{\Delta t_p^2} - \frac{4}{3\Delta t_s^2} \right]$$

$\mu$  : shear modulus

K : compressional modulus

이 때 M은 암석 변형에 저항하는 소위, 암석 강도에 대한 척도(rock strength index)로 간주된다. 여기서  $\rho_b$  및  $V_p$ 는 속도 및 밀도 검층에 의해 구할 수 있으며 그로부터 M에 대한 절대치(absolute value)는 물론 반사계수 R도 계산될 수 있다. 그러나 텔레뷰어 진폭치 즉, reflectivity는 어디까지나 M이나 R과 직접적으로 상관되고 있으나 그들에 대한 절대치는 될 수 없다. 이에 대한 상관관계는 최근 다양한 수치 모형실험에 의해 추적되었으며(예 : Toumani, 1995) 그로부터 다음과 같은 연구 결실을 얻기에 이르렀다.

- 텔레뷰어 진폭치와 반사계수와의 선형 관계를 보여주고 있다.
- 텔레뷰어 진폭치로부터 유래된 rock strength의 변화 형태는 속도 및 밀도 검층에 의해 계산된 M의 것과 거의 일치하고 있다. 환원하면 두 매개변수는 바로 상수배 관계를 띠고 있다는 것이다.

Fig.10의 왼쪽그림은 상기 텔레뷰어 진폭이미지(시추공 전 구간 : 충청도 청양군 축정)로부터 계산된 암석강도를 보여주고 있으며, 오른쪽 그림에는 참고로 각 단층 및 절리에 대한 정보(경사 및 방향)를 arrow plot로 나타내고 있다. 천부구간의 암석강도는 심도가 깊어짐에 따라 점차 높아지고 있으며 대체로 심도 약 20m부터는 거의 균등한 암석강도가 관찰되고 있다. 여기서 강도가 크게 떨어지는 부분은 바로 단층에 의해 초래되었음이 인식되고 있으며 절리는 단지 미소한 암석강도 변화를 보여주고 있다.

## 결 언

본 논문은 텔레뷰어 기능이 훌륭하게 반영된 현장 응용 성공사례(국내 충청도 청양군)를 보여주고 있

다. 여기서 사용된 측정시스템 및 전산처리기법은 한·독 국제공동연구를 통하여 보다 선진화되었으며 그로 인한 고분해능 텔레뷰어 이미지는 무엇보다 지질구조(절리, 단층 및 암층경계면)에 대한 정확한 분석을 가능하게 하였다.

텔레뷰어 진폭이미지는 우선 절리, 단층 및 암층경계면의 분리는 물론 그들의 경사방향 내지 경사각을 제시할 수 있는 기본자료가 되었으며 나아가서 그로부터 추출된 상대적인 암석강도변화는, 비록 그것이 현 기술수준에서 바로 암석강도에 대한 절대치에는 대응될 수 없겠으나 어떤 물리검층기법으로도 다다를 수 없는 높은 분해능을 보여주는 것이 되었다.

텔레뷰어 주시이미지는 바로 고분해능 공경검층(caliper logging) 결과를 대변하기 때문에 그로부터 시추공 내벽의 원형상태가 정확하게 파악될 수 있다. 본 탐사지역에서는 전반적으로 시추공 내벽이 거의 원형을 유지하고 있음에 비추어 응력장(rock stress field)은 상호 균형을 이루고 있는 것으로 판단된다.

본 현장실험은 지금까지 난제로 간주되어 온 절리 문제를 효율적으로 대처할 수 있음을 실증하는 것이 되었으며 그로 인한 제반 지질구조 정보는 바로 암반분류의 정확성은 물론 암반내 용질유동에 대한 연구에도 보다 활성화를 기할 수 있는 바람직한 자료가 될 것이 확실시 된다.

## 사 사

본 연구결과는 과거처 특정과제(한·독 국제공동연구)사업 수행의 일환으로 이루어 졌다. 텔레뷰어 현장실험을 위해 청양군에 위치한 기존 test borehole 사용을 알선하여 주신 한국원자력연구소 부설 원자력 환경관리센터 김천수 박사님, 배대석 실장님께 감사드립니다.

## 참 고 문 헌

김중열, 장현삼, 김유성, 현혜자, 김기석, 1993, Geotomography에 의한 암반구조 연구(Ⅲ), 한국자원연구소, 과학기술처, 266p.  
 김중열, 김유성, 현혜자, 김기석, R. Schepers, J. Plessmann, 1995, LG 강남타워 신축부지 Geotomography 조사, 한국자원연구소, LG건설(주), 240p.

- Schepers, R., 1991, Development of a new acoustic borehole imaging tool, Scientific Drilling, Springer-Verlag Berlin, p.203-214.
- Serra, O., 1984, Fundamentals of well-log interpretation, The Acquisition of Logging data, Elsevier Publication, v.1.
- Toumani, A., 1995, Fuzzy klassifikation von geophysikalischen Bohrlochmessungen zur Lithologiebestimmung am Beispiel des Oberkarbons, Dissertation, Institut für Geophysik und Meteorologie der Universität zu Köln, Germany.

---

김중열  
한국자원연구소  
대전직할시 유성구 가정동 30  
305-350  
TEL : (042)868-3178  
FAX : (042)861-9720