

Estimation of principle stress field by Televierer data analysis

¹⁾, Jungyul Kim, ²⁾, Yoosung Kim, ³⁾, Jiyeon Nam

¹⁾ () , C.E.O., SOAM Consultant Co.,Ltd.

²⁾ () , Director of research and services, SOAM Consultant Co.,Ltd.

³⁾ () , Team manager, SOAM Consultant Co.,Ltd.

SYNOPSIS : A knowledge of in situ stress state is important to design various engineering structures such as dams, tunnels and so on. There are about three wellknown indicators that is, borehole wall breakouts, hydraulic fracturing, ellipsoidal cross section of borehole that have been attributed to the state of stress in the vicinity of borehole. Fortunately, Televierer traveltime image can be used as a caliper log with 144 or 288 arms, which allows to determine the borehole shape. Televierer amplitude image will give detailed information about the distribution and character of breakouts and hydraulic fracturing as well. For investigation purposes, a series of boreholes(total 195 boreholes: 12,239m) that have been logged all over the country during past 10 years are analyzed. The primary objectives of this paper are to examine the ability of a Televierer to determine the shape of borehole, to present data inferred by stress indicators, to indicate their possible relationship with the anisotropic horizontal stresses. It is shown that in most cases the fracture orientation statistically estimated from observed fractures denotes an excellent correlation with the orientations inferred by stress indicators. Many intervals of breakouts are terminated at the intersection of oblique fracture with the borehole. The results from Televierer data are further compared with those of hydraulic fracturing techniques.

Key words : breakouts, hydraulic fracturing, ellipsoidal cross section, Televierer image, horizontal principal stress

1. 서 론

암반 내 작용하는 응력은 상부 암반의 밀도 특성과 지형적인 영향에 따른 상부 자중 응력(gravitational stress), 지각 운동에 의한 지체 응력(tectonic stress) 및 지각을 구성하는 매질 자체의 변형, 변성, 침식작용에 의해 형성되는 잔류응력(residual stress) 등에 의해 형성된다. 암반 내에서 작용하는 응력의 방향 및 크기는 암반내 구조물 설계 및 시공에 있어 구조물 배치 및 형태 결정, 지보패턴 결정, 안정성 평가 등에 사용되는 매우 중요한 매개변수라 할 수 있다. 따라서, 암반 내 초기 응력을 측정하기 위한 다양한 방법(예: 시추공 변형 측정법, 수압파쇄법, Flatjact 법 등)이 제안된 바 있다(Obert and Duvall, 1967).

암반 내 작용하는 응력은 크게 3 성분으로 구분할 수 있다. 즉, 지표면과 거의 수직(수직에서 20°이내)하게 작용하는 수직 응력과 지표면과 대체로 수평하게 작용하는 두 개의 수평 응력으로 구분할 수 있다. 만일 암반 내에 시추공이 천공되면, 두 개의 수평 응력들은 시추공 벽에 거의 수직하게 작용하게 되고, 그로 인해 시추공의 변형이 유발될 수 있다(그림 1 참조). 여기서 그 변형은 흔히 최대 수평 주응력

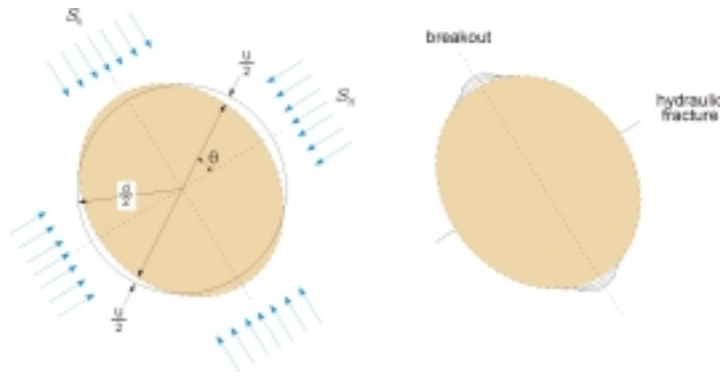


그림 1. 응력 분포에 따른 공벽의 변형.

S_H 및 S_h : 최대 및 최소 수평 응력, d : 공경, U : 변형

방향으로는 수직 절리(hydraulic fracture) 형태로, 최소 수평 주응력 방향으로 breakout 형태로 나타난다. 따라서, 암반 내에 형성된 응력장(rock stress field) 분포는 단순히 시추공 내부 모양의 변형을 조사함으로써 판단될 수 있는 것이다. 만일, 얇고 무한한 평판에서 원형 구멍이 천공되었다면 그 직경방향의 변형은 그 평판에 작용하는 응력의 방향과 크기에 따라 결정된다. 그림 1(a)에서 직경이 d 인 시추공 축에 수직하게 작용하는 두 개의 주응력이 각각 S_H , S_h 라 하면, 변형량 U 는

$$U = \frac{d}{E} [(S_h + S_H) + 2(S_h - S_H) \cos 2\theta] \quad (1)$$

가 된다. 여기서, E 는 암반의 영률(Young's modulus)이고, θ 는 최대 수평 응력 방향으로부터 반시계 방향의 각도이다. 이 식은 평판의 평면에 수직한 방향으로의 응력이 0이라는 소위, 평면 응력(plane stress) 가정 하에서 유도된 것이다(Obert and Duvall, 1967). 이는 시추공 내부 모양의 변형과 그 매질의 탄성상수(영률)를 안다면 그로부터 최대 수평 주응력 S_H , 최소 수평 주응력 S_h 의 크기 및 그의 방향까지도 산출할 수 있다는 것을 의미한다.

시추공에 대한 텔레뷰어 탐사에서 얻게되는 주요 데이터 내용은 초음파 빔이 공벽에 의해 반사되는 초음파의 진폭 및 주기를 담은 진폭이미지 및 주시이미지이다. 여기서, 텔레뷰어 주시이미지는 시추공 단면 중심에서 시추공 벽에 이르는 거리(단면이 원형일 경우는 반경)로 환산될 수 있기 때문에 그로부터 시추공의 내부 모양을 고분해능으로 표현(2D 및 3D caliper log)할 수 있다. 한편, 텔레뷰어 진폭이미지에서는 수직절리 및 breakout 상태가 쉽게 관찰된다. 따라서, 본 연구에서는 지난 10여년간 전국에서 취득한 텔레뷰어 자료(총 시추공수 195공: 12,239m)로부터 수평 주응력 방향을 추정하고 동시에 그 결과와 수직절리 방향 및 수압파쇄 결과와의 연계성을 찾고자 하였다.

2. 텔레뷰어 주시이미지에 의한 공경 검출 기능

그림 2는 대표적인 breakout 현장사례를 예시하고 있다. (a)는 캐나다 지하 연구 실험실(URL; Underground Research Laboratory) 심도 약 420m 지점에 있는 직경 약 3m의 터널에서 관찰되는 breakout(화살표로 표시)을 보여주고 있다. 직경방향으로 서로 반대에 있는 두 개의 breakout은 이 지하 연구실(URL)의 최소 주응력 방향인, 거의 수직 응력 방향과 일치하고 있다. (b)는 일본 지열조사를 위한 시추공(직경 약 76mm)의 심도 약 825m에서 측정된 텔레뷰어 주시이미지로 산출된 시추공 단면 모양을 보여주고 있다. 여기서 텔레뷰어의 고분해능 공경검출 기능은 서로 반대 방향으로 발달하고 있는 breakout 모양(화살표로 표시)을 정확하게 표현하고 있음을 보여주고 있다.

텔레뷰어에서는 동일 심도에 대해 144개(혹은 288개)의 시추공벽에 대한 초음파 반사파의 진폭치와 주시치가 측정된다(그림 3(a) 참조). 그림 3(b) 및 (c)는 이러한 주시치와 진폭치가 심도 약 5mm 간격으

로 방위각(144점)에 대해 영상화된 진폭이미지 및 주시이미지를 보여주고 있다. 여기서 동일 심도의 주시치들은 바로 로거 중심으로부터 시추공벽까지의 거리 R로 다음과 같이 환산될 수 있다.

$$R(\theta) = \frac{1}{2} [TT(\theta) - T_i] \times V_w + \frac{D}{2} \quad (2)$$

식 (2)에서 $R(\theta)$ 는 초음파 방사각 θ 에 대한 텔레뷰어 로거 중심으로부터 시추공벽까지의 거리를, $TT(\theta)$ 는 초음파 방사각에 따른 주시치를, T_i 는 텔레뷰어 로거 내에서의 전달되는 주시치를, V_w 는 시추공 내 물의

탄성과 속도를, D 는 텔레뷰어 로거의 직경을 의미한다. 그림 4는 텔레뷰어 주시이미지로부터 산출된 거리 R이 시추공축으로부터 로거의 이탈정도 및 시추공 모양에 따라 각각 달리함을 보여주고 있다. (a)

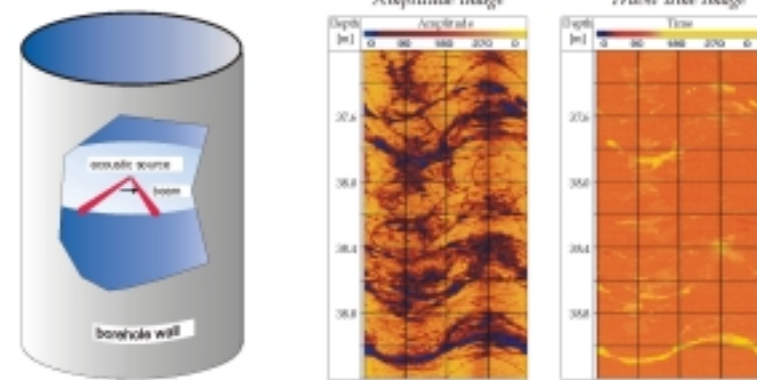


그림 3. 텔레뷰어 측정 및 그에 따른 진폭 및 주시이미지

이탈된 경우, 이를 중심으로 이동시키는 과정 즉, 주시 교정 방법은 이미 발표된 바 있다(김중열 외, 2002). 시추공의 변형 모양을 정확하게 파악하기 위해서는 측정된 주시 이미지를 상기 주시교정 방법에 의해 교정하고 교정된 주시치로부터 식(2)에 의해 계산된 R의 변화를 관찰하면 된다. 즉, 시추공이 원형이면 R은 일정한 값을 나타낼 것이며(그림 3(a) 참조), 타원형인 경우에는 R은 타원의 장축과 단축에 따라 변하게 될 것이다(그림 3(c) 참조). 그러나, 국내에서 측정되는 대부분의 텔레뷰어 자료는 대체로 심도 약 300m 미만에서 취득되고 있기 때문에 응력으로 인한 시추공 모양의 변형 정도가 과연 텔레뷰어 주시이미지에서 관찰될 수 있는지가 관심의 대상이 되고 있다. 이를 확인하기 위해 국내 심도 300m 미만에서 수압파쇄법에 의해 측정된 수평 주응력의 크기 및 실내 암석 실험을 통해 얻게된 그 매질의 영률을 이용하여 시추공의 변형량을 계산해 보았다. 수평 응력에 의한 시추공의 직경방향으로의 최대 변형량은 식(1)로부터 유도될 수 있다. 즉, 식(1)에서 θ 가 $\pi/2$ 일 때 시추공의 직경방향으로의 최대 변형량은 다음과 같이 표현된다.

$$U = \frac{d}{E} [3S_H - S_v] \quad (3)$$

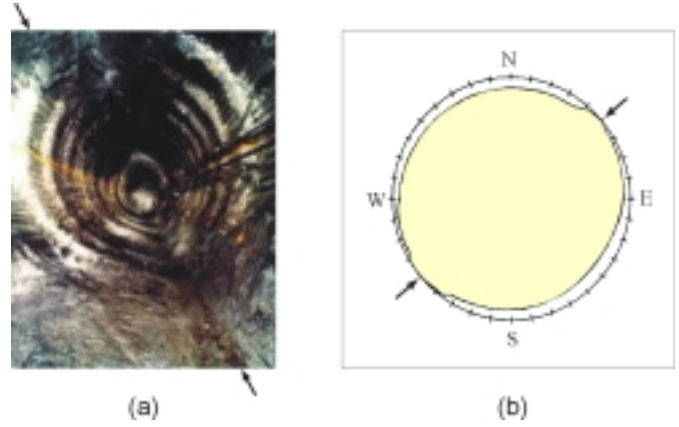


그림 2. Breakout 현장 사례.

(a) 심도 약 420m 위치(캐나다)

(b) 심도 약 825m(일본)

는 시추공이 원형이고, 로거가 시추공 중심에 놓여 있을 경우를 나타내고 있다. 이 때 R은 시추공의 반경이 되기 때문에 일정한 값을 보여주고 있다. (b)는 시추공은 원형이나 로거가 시추공의 중심으로부터 이탈된 경우를 보여주고 있으며, 이 때 R의 변화는 정현곡선(sine curve) 형태를 띠게 된다. (c)는 만일 시추공이 응력에 의해 타원형으로 변형되었고 로거가 그 중심에 놓여 있을 경우 R의 변화를 보여주고 있다. 텔레뷰어 로거가 시추공 중심으로부터

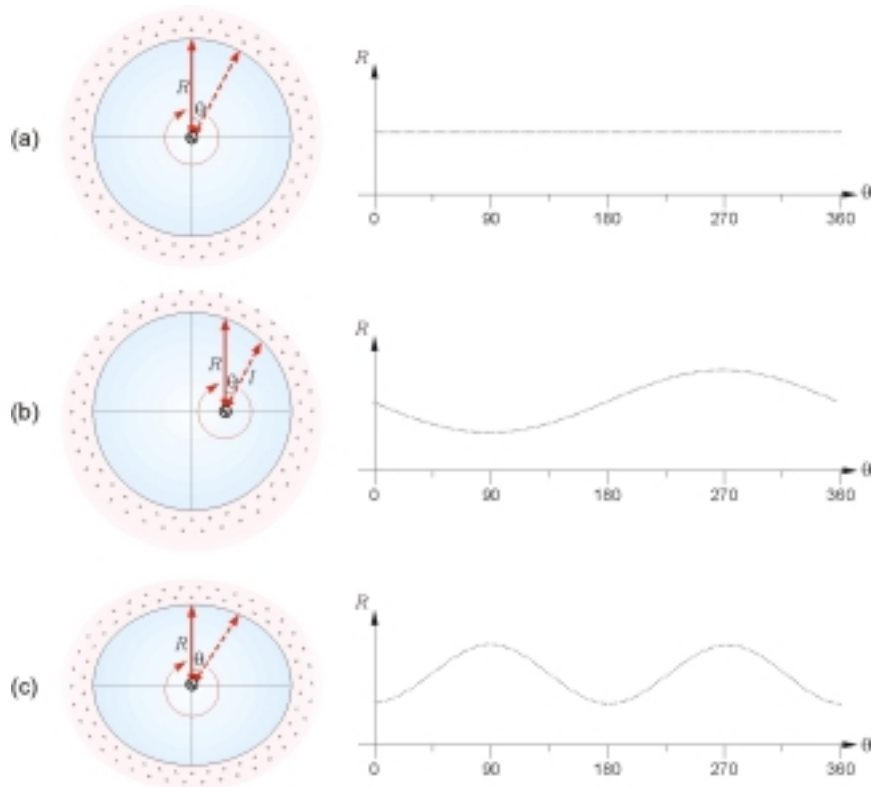


그림 4. 시추공 변형 및 센서 이탈에 따른 공경 변화

표 1은 국내에서 수행된 수압과쇄 시험 및 실내 암석실험을 통해 얻게 된 수평 주응력의 크기 및 암반의 영률을 토대로 식(3)에 의해 산출된 최대 시추공 변형량을 단지 일부지역을 대상으로 나타내고 있다.

표 1. 수압과쇄 시험 및 실내 암석실험을 통한 시추공 변형량 계산

	[m]	S_h [MPa]	S_H [MPa]	Young's modulus[GPa]	[mm]
	42.5	3.79	7.37	31.51	0.045
	48.0	3.27	4.47	47.85	0.017
	102.1	3.16	3.87	42.24	0.016
	21.5	0.94	1.63	22.96	0.013
	38.5	0.77	1.15	50.41	0.004
	105.5	3.48	5.04	46.02	0.020
	73.2	4.43	7.56	42.55	0.033

표 1은 국내 심도 약 300m 미만의 천부 심도에서 수평 주응력에 의한 최대 시추공 변형량이 0.1 mm 를 초과하지 않고 있음을 보여주고 있다. 그림 5는 텔레뷰어 로거(logger)가 시추공 중심으로부터 이탈 된 경우, 로거를 시추공 중심으로 이동하는 주시이미지 교정 과정(김중열 외, 2002)을 나타내고 있다. (a)는 로거가 시추공 중심으로부터 이탈된 경우의 주시이미지 및 주시이미지 교정 후 결과를 상호 대조 하고 있다. 전체적으로 주시이미지가 훌륭하게 교정되었음을 볼 수 있다. (b)는 시추공 벽에서 반사된 초음파 반사파를 예시하고 있다. 여기서 주시치는 바로 반사파의 초동을 발췌함으로써 결정된다. (c)는

상기 주시이미지에서 심도 37m에서 추출된 144개 텔레뷰어 주시치 및 그에 대한 주시 교정 결과를 보여주고 있다. 주시 교정 결과에서는 그림 4(c)와 같이 미약하게나마 타원 형에 의한 형태를 보이고 있다. 그러나, 이러한 미세한 변화는 그림 5(b)에서 관찰되는 초음파 반사파의 초동 발체 과정에서 발생하는 오차(예: 반사파 이전에 관찰되는 미세한 장비 자체에 의한 잡음 및 초동발체 알고리즘에 의해 유발되는 오차 등) 범위 내에 있기 때문에 반드시 시추공 변형에 의한 것이라고 단언할 수는 없다. 즉, 텔레뷰어가 고분해능 공경검층 기능을 가지고 있다고는 하나, 0.1 mm 미만의 시추공 변형 정도는 텔레뷰어 측정 오차 범위에 속하기 때문에 이를 텔레뷰어 주시이미지로 구별한다는 것은 무리가 있다고 하겠다. 하지만, 시추공 천공과정에서 응력에 의해 발생된 시추공벽에 표출되는 수직절리(hydraulic fracture) 및 breakout은 텔레뷰어 진폭이미지에서 쉽게 관찰될 수 있다. 다음은 텔레뷰어 진폭이미지에서 관찰되는 수직절리 및 breakout을 통해 수평 주 응력 분포, 특히 주응력 방향을 추정하는 과정을 서술하고 있다.

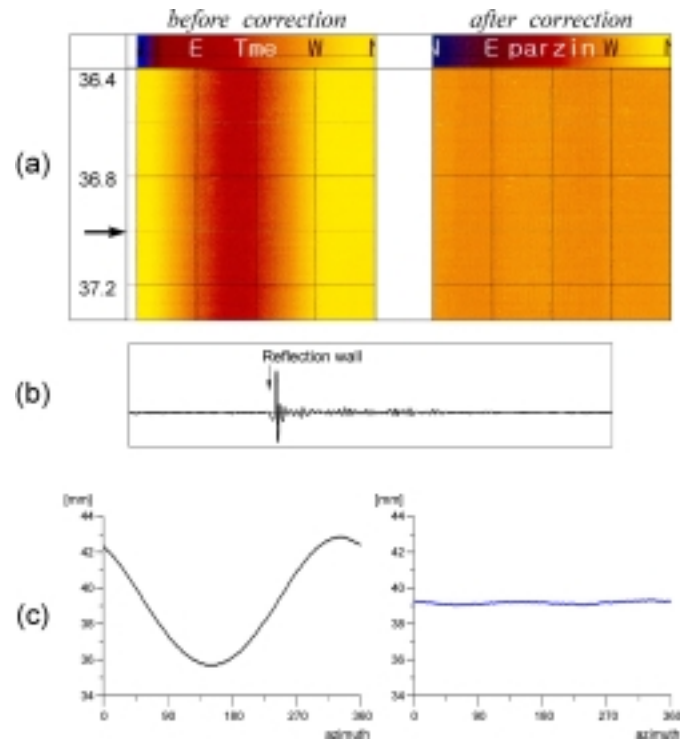


그림 5. 주시이미지 교정 과정

- (a) 주시이미지 교정 결과
- (b) 초음파 반사기록
- (c) 심도37m에서의 주시치 교정 과정

3. 텔레뷰어 진폭이미지에서 관찰된 수직절리 및 breakout에 의한 응력분포 산출

가, breakout
 (1). 6 breakout()
 rose diagram, density distribution
 breakout
 breakout ()
 (rose diagram) (stress state)
 breakout()
 가
 breakout 가
 가
 breakout 가
 21m breakout
 breakout

그림 7은 우리나라 남한 전역에서 본 연구팀에 의해 텔레뷰어 탐사가 수행된 시추공의 위치를 나타내고 있다. 텔레뷰어 탐사가 수행된 총 시추공의 수는 195공이며, 그의 총 심도 연장은 12,239m에 달하고 있다. 그림 8은 상기 시추공들에 대한 텔레뷰어 탐사 결과에서 관찰된 breakout 및 수직 절리의 방향으로부터 산출된 각 지역의 최대 수평 주 응력 방향(적색 실선으로 표시)을 나타내고 있으며, 여기에는 비교효과를 위해 수압과쇄 시험에 의해 산출된 수평 주 응력 방향(파란 점선으로 표시)(최성웅, 1997)과 상호 대조하여 나타내고 있다. 일별하여, 텔레뷰어 탐사 결과에 의한 수평 주 응력 방향(대체로 동서 방향)은 수압과쇄 시험 결과에 의한 것과 상당 부분 일치를 보이고 있다. 일부 지역에서는 남북 방향의 응력 분포를 보이는 것이 매우 특징적이다.

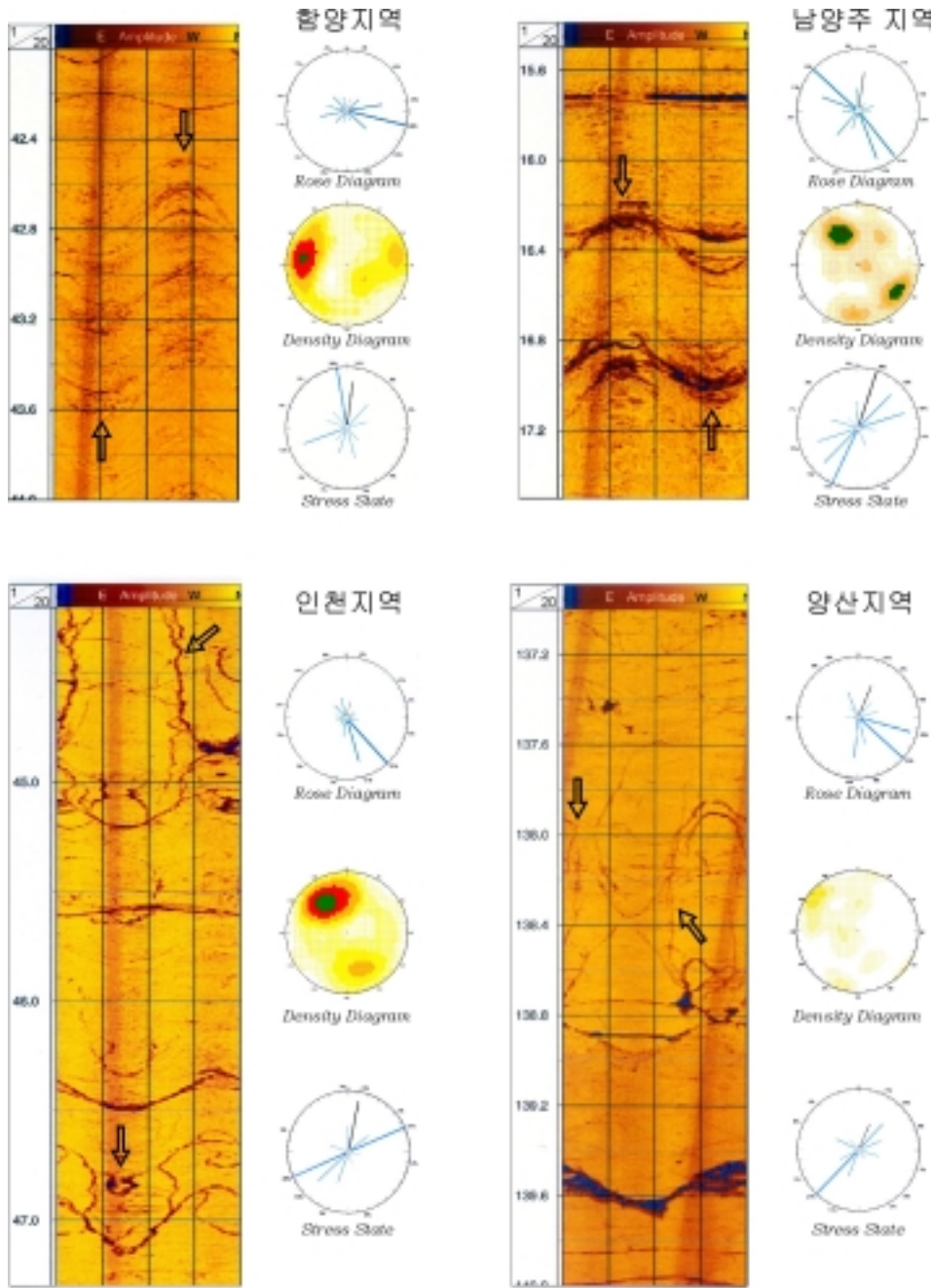
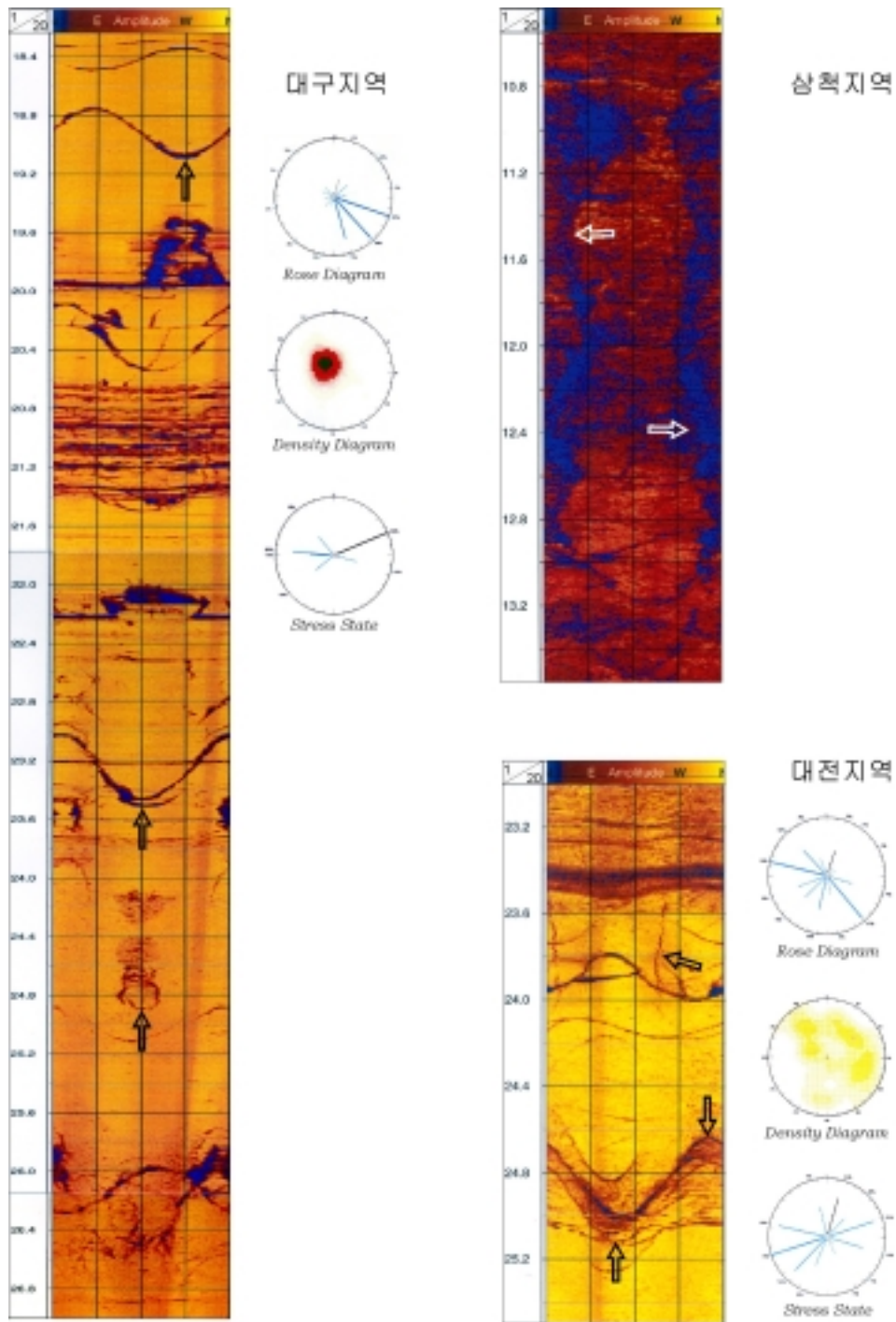


그림 6. 국내 각 지역에서 측정된 텔레뷰어 진폭이미지에서는 시추공에 작용하는 응력에 의해 형성된 수직절리 및 breakout 현상이 뚜렷하게 관찰되고 있다.



6. ()

4. 결 언

암반 내 응력 분포는 다양한 토목공사(예: 댐 및 터널 공사)의 설계를 위해 매우 중요한 매개변수 중의 하나이다. 암반 내 응력 분포는 대개 시추공을 이용한 다양한 측정기법(예: 수압파쇄법)에 의해 산출된다. 그런데, 시추공이 천공되면 암반에서 작용하는 응력에 의해 나타나는 3가지 뚜렷한 현상 즉, 시추



그림 7. 텔레뷰어 탐사 시추공 분포도

공 변형(borehole deformation), 수직절리(hydraulic fracture) 및 breakout이 관찰된다. 본 연구에서는 시추공에 대해 텔레뷰어 탐사가 수행된다면 상기 3가지 현상은 진폭이미지 및 주시이미지에 의해 정확하게 파악될수 있음을 보여주었다. 즉, 텔레뷰어 주시이미지는 144개(혹은 288개)의 다리를 갖는 고분해능 공경 검층 기능을 갖고 있기 때문에 시추공의 내부 모양을 정확하게 표현할 수 있으며, 진폭이미지에서는 수직절리 및 breakout 현상이 뚜렷하게 관찰된다는 것이다.

지난 10여년간 국내에서 수행된 텔레뷰어 탐사(총 195개 시추공, 총 심도 연장 12,239m)결과에서 관찰된 수직절리 및 breakout 분석을 통해 각 지역의 수평 주 응력 방향이 산출되었다. 그 결과는 전체적으로 수압파쇄 시험과 동일한 지역에서 얻게 된 것과 훌륭한 대조를 보여주었다. 이는 바로 텔레뷰어 탐사에 의해 암반 내 응력 분포(rock stress field)에 대한 정보도 제시할 수 있음을 시사하는 것이 되겠다.

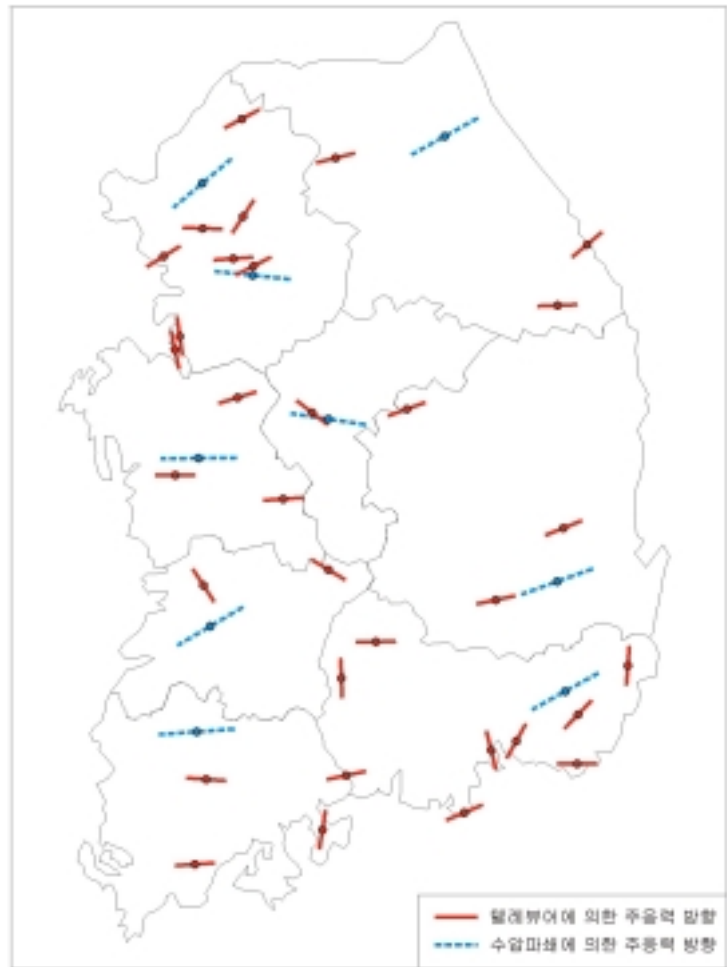


그림 8. 텔레뷰어에 의해 추정된 수평 주 응력 방향

참고문헌

1. 김중열, 김유성, 김형수, 백건하, 김기석(2002) “절리암반내 그라우팅 성과에 대한 정량적인 판단기법 개발”, 2002 한국지반공학회 봄학술발표회 논문집, pp. 695~702.
2. 최성웅(1997) “현지암반 초기지압의 분포특성 및 암반터널설계에의 적용”, 터널과 지하공간, 한국암반공학회, Vol. 7, pp.323~333.
3. Obert, L. and Duvall, W.I.(1967) *Rock Mechanics and the Design of Structures in Rock*, John Wiley and Sons, New York, pp. 413~429.