

시추공벽 영상을 이용한 암반내 절리구조 해석

김재동¹⁾ · 김종훈²⁾

Interpretation of Fracture Network in Rock Mass Using Borehole Wall Image

Jae-Dong Kim and Jong-Hun Kim

ABSTRACT In this study, fracture network in rock mass was interpreted using borehole wall images obtained by televiwer. The orientation and JRC value of major joint set were evaluated adopting image analysis techniques, of which process were written in macro-program code. As linking JRC to joint stiffness using Barton-Bandis model, fracture network map was produced for application to jointed rock modelling in numerical analysis of underground structure.

Key words : borehole televiwer, image analysis, joint roughness, joint stiffness, fracture network map

초 록 본 연구에서는 시추공 텔레뷰어(Borehole televiwer)에 의해 획득된 시추공벽 영상을 이용하여 암반내 절리 구조 특성을 해석하고자 하였다. 절리구조의 특성으로서 발달된 절리군의 방향성 및 거칠기의 산정은 영상분석을 통한 절리체적의 추적에 의하였으며, 산정된 절리군의 JRC 값과 추정된 역학적 상수들로부터 Barton-Bandis 모델에 의해 절리 강성을 추정하고 자료들을 종합하여 암반 수치해석 모델링용 절리구조도를 작성하였다. 시추공벽 절리체적의 추적 효율성을 높이기 위하여 영상분석기에 내장된 함수를 이용한 최적의 매크로 프로그램과 거칠기 산정 프로그램, 절리구조도 작성용 프로그램을 완성하였다.

핵심어 : 시추공 스캐너, borehole televiwer, 영상 분석, 절리 거칠기, 수직 강성, 전단 강성, 절리구조도

1. 서 론

암반의 역학적 거동은 암반을 구성하고 있는 암석의 물리적 역학적 성질에도 영향을 받으나 공학적인 관점에서 볼 때 암반 내에 존재하고 있는 절리의 특성에 크게 좌우된다고 할 수 있을 것이다. 따라서 이러한 절리의 역학적 특성에 대한 정량적 평가가 최근 매우 중요한 문제로 대두하고 있다.

절리가 발달되어 있는 암반의 구조적, 역학적 특성을 파악하기 위해 현재까지 수행되어오고 있는 지질조사에는 지표지질조사, 시추 코어에 의한 검층 및 물리탐사 등과 각종 실험실 및 현장시험 등이 포함된다. 특히 심부 지질상태를 정확하게 파악하기 위해서는 상기 방법 가운데 암석 코어에 대한 검층이 현재까지 가장 신뢰성이 있고 직접적인 조사 방법이라고 할 수 있을 것이다. 그러나 시추공 굴착이나 코어 회수 과정에서 절리의 발달 방향이나 상태, 절리면 내의 충전물 등이 손실되거나 왜곡되는 현상이 불가피하게 일어나고 있

며, 이는 중요한 지질 정보가 유실되는 것을 의미한다.

이러한 문제점을 해결하기 위하여 시추 코어가 아닌 시추공벽 영상을 대상으로 지질 구조를 파악하고자 하는 연구가 시작되었으며 이는 1990년대 들어 시추공벽 영상 획득 장비와 컴퓨터를 이용한 영상분석 장비의 발달에 의해 구체화되어 가고 있다.

시추공벽 영상 획득 장비는 공내의 상태나 왜곡 정도를 정성적으로 확인하는 정도의 기본적인 성능을 지니고 있는 시추공 카메라에서부터 최근 시추공벽 영상을 정량적으로 좌표화할 수 있는 정도의 고해상 시추공 스캐너로 발전하고 있다. 현재 국내에서는 시추공 카메라가 국산화되어 사용되고 있으며, 스캐너의 경우 텔레뷰어(Borehole televiwer)와 BIPS(Borehole Image Processing System)와 같은 종류가 도입되어 적용되고 있다.

1) 정회원, 강원대학교 공과대학 자원공학과 부교수
2) 강원대학교 대학원 자원공학과 박사과정
원고 접수일 : 1998년 11월 24일
원고 심사 완료일 : 1998년 12월 20일

현재까지 국내외에서 시추공 스캐너를 이용한 연구 결과는 BIPS 장비에 의해 획득된 시추공벽 영상을 대상으로 한 절리 특성 연구^{1,2)}가 최근 본 연구자들에 의해 발표되었으나, 텔레뷰어에 의해 획득된 영상에 대한 연구는 장비의 국내 적용 초기에 그 활용성에 대해 발표된 결과³⁾ 외에는 이루어진 바가 없다.

따라서 본 연구에서는 텔레뷰어에 의해 획득된 시추공벽 영상을 이용하여 암반내 절리 구조 특성을 파악하고자 하였다. 본 연구에서 목표로 하는 절리구조의 특성에는 발달된 절리군의 방향성 및 거칠기에 대한 해석과 이로부터 Barton-Bandis 모델에 의한 절리강성의 추정 그리고 이러한 자료들을 종합한 암반 수치해석 모델링용 절리구조도의 작성(mapping)이 포함된다.

연구 과정에서 텔레뷰어에 의해 획득된 시추공벽 절리체적의 추적 효율성을 높이기 위하여 영상분석기에 내장된 함수를 이용한 최적의 매크로 프로그램과 거칠기 산정 프로그램, 절리구조도 작성용 프로그램을 완성하였다.

본 연구의 결과로써 작성된 절리구조도는 터널 굴착에서와 같이 특정 방향에 대한 절리의 발달 구조를 구체화하고 포함된 절리군의 역학적 특성을 파악할 수 있도록 함으로써 수치해석에 필요한 절리구조 모델링 등의 부분에 활용될 수 있을 것으로 기대한다.

2. 영상장비

시추공 영상자료의 획득을 위해서는 지금까지 여러 가지 장비들이 개발되어 활용되고 있다. 특히 1990년대에 개발된 시추공 스캐너인 텔레뷰어와 BIPS는 시추공벽의 상태를 정량적인 위치 좌표하에서 영상으로 포착함으로써 절리구조를 해석하는데 매우 유용한 것으로 판단되고 있다.

이 두 장비의 특징은, BIPS의 경우 카메라의 광학적 특성을 이용하여 공벽의 실영상을 포착하는 반면, 텔레뷰어는 초음파가 공벽의 암층에 반사되어 오는 세기를 측정하여 공벽의 상태를 영상화한다. Table 1은 텔레뷰어와 BIPS의 특성을 비교한 것이다.

본 연구에서는 BIPS를 이용한 연구^{1,2)}에 이어 텔레뷰어를 연구장비로 채택하여 절리구조해석에 대한 연구를 수행하고자 하였다.

텔레뷰어³⁾는 탄성파를 쏘아 되돌아오는 시추공벽의 반사계수를 측정하여 공벽의 상태를 파악한다. 사용되

Table 1. Comparison the features of borehole televiewer with BIPS

	Televiewer		BIPS
	Acoustic		Optic
Source			
Acquisition	Time-distance data converted to image		Direct optic natural image
Resolution	144-288 pixels/ -horizontal 360deg. -vertical (0.1)-1 pixel/mm		360-720 pixels/ 360deg. 1-10 pixels/mm
Scan velocity	1-10 m/hr		6-60 m/hr
Operation state	needs water as traveling media. Irrelevant water turbidity.		Water unrelated Relevant water turbidity
Scanning direction	Unavailable horizontal, upward hole		Available any direction
Image	Converted image from seismic reflection feature		Natural borehole wall image

는 탄성파는 초음파로서 보통 1.4 Mhz의 대역이다. 텔레뷰어의 모니터 상에서는 반사계수의 범위 구간에 따라 미리 설정된 색상 단계에 의해 시추공 벽면의 상태를 영상으로 나타낸다. 텔레뷰어의 구성은 탄성파를 시추공 벽면에 발사하는 probe, probe를 시추공을 따라 하강시키는 윈치, 획득된 자료를 영상으로 전환시키고 출력, 저장하는 중앙처리부의 세부분으로 구성되어 있다.

획득된 시추공벽 영상을 절리 체적 특성 파악에 적합한 상태로 변조하고, 체적의 정량적인 위치를 추적하여 좌표화하기 위해 사용된 영상분석기는 미국 Media Cybernetic 사의 ImagePro Plus. ver 3.0으로서 컴퓨터 영상처리분야에서 사용되는 대부분의 필터와 해석기구를 내장하고 있다. 각각의 기능은 매크로 명령문으로 모듈화되어 있어 디지털 영상 획득 장치로부터 획득한 영상을 사용자의 목적에 따라 매크로 명령문들을 이용하여 프로그램화할 수 있다. 따라서 본 연구에서 수행된 영상분석은 내장된 매크로 명령어를 이용하여 프로그램화 되어 순차적으로 진행되도록 하였다.

3. 영상 분석에 의한 절리 추적

검층대상으로 선정된 시추공은 한국자원연구소내에 연구용으로 굴착된 CAES-1의 NX 공으로, 검층구간은

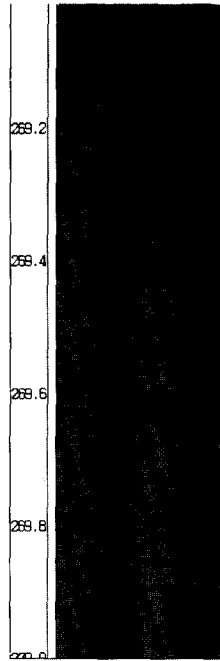


Fig. 1. Borehole wall image obtained by borehole televiuew

지표로부터 250~300 m 구간이다. Fig. 1은 텔레뷰어에 의해 검출된 공벽 영상의 예로서, 원주형의 시추공벽 영상을 북쪽 방향부터 평면상에 펼친 것이다. 텔레뷰어의 최대 해상도는 Table 1에 기재된 것과 같으나, 본 연구에서 영상획득시의 해상도는 현장 여건상 수평 방향인 원주방향으로 2.5 degree/pixel, 수직방향으로 1.672 mm/pixel이었다.

획득된 전체 영상으로부터 절리 궤적이라고 판단되는 영상 부분을 Fig. 2(a)와 같이 분리하여 영상분석기에 의해 궤적을 정량적으로 추적할 수 있도록 하였다. 분리된 Fig. 2의 영상의 크기는 144(가로)×130(세로) 화소이었다. 분리된 영상에서 절리의 궤적을 효과적으로 인식하기 위하여 절리 궤적 부분과 배경의 암석 부분의 명암차가 강조될 수 있도록 영상을 변조하였다. Fig. 2(b)는 영상분석기의 'Equalize' 매크로를 적용하여 영상을 변조한 결과이다. 그림에서와 같이 시추공벽 상에서 절리의 윤곽이 더욱 뚜렷해진 것을 알 수 있다.

절리의 방향성과 거칠기를 해석하기 위해서는 절리 궤적의 정량적 위치를 추적할 필요가 있다. 본 연구에서는 디지털타이저를 이용하여 절리 궤적의 좌표쌍을 수동으로 추적하였다. Fig. 2(c)는 수동 추적된 절리 궤적

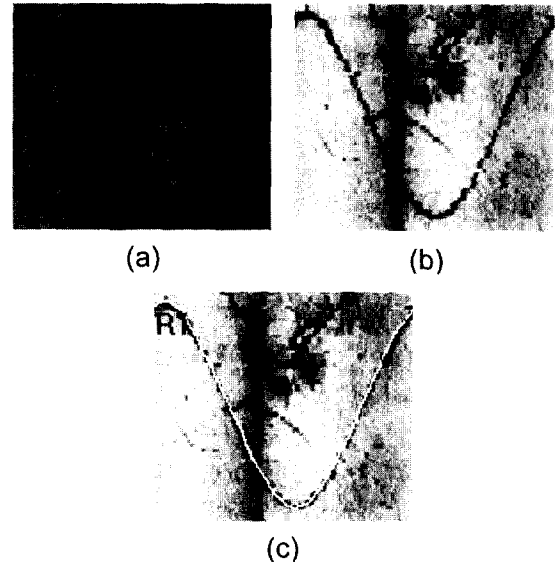


Fig. 2. Image processing sequence (a) Separated joint image, (b) Best fit for high contrast, (c) Joint profile trace

이 영상에 중첩되어 나타난 것이다. 궤적을 구성하는 좌표는 이후 화면의 좌측으로부터 궤적을 따라 화소단위로 자동 입력되어 저장된다.

영상분석에 의해 획득된 절리 궤적의 좌표쌍은 화소단위로 기록되나, 텔레뷰어로부터의 원영상은 시추공벽을 평면상에 펼친 상태이므로 x 좌표의 경우 0~360도의 범위에 해당되며, y 좌표의 경우는 시추공에서 수직방향 검출속도에 의해 결정된다.

Fig. 2에서 개략적으로 나타난 영상에서의 절리 궤적 추적과정은 ImagePro Plus 내에 내장된 매크로 명령문들로 구성된 프로그램으로 작성되었다. 본 연구에서는 CAES-1공의 심도 250~300 m 구간에서 인식된 총 46개의 절리에 대해 작성된 매크로 프로그램을 적용하여 절리 궤적 자료를 구하였다.

4. 절리 해석

본 연구에서 수행된 영상분석에 의한 절리 거칠기 산정은 시추공벽에 나타난 절리 궤적을 기초 자료로 하고 있어 지중에 존재하는 절리면 전체의 거칠기를 충분히 반영하고 있다고는 단언할 수 없으나, 이러한 문제를 극복하기 위하여 유사한 특성을 지니고 있을 것이라는 가정하에 절리군집성 분석을 통한 절리군의 거칠기를

산정함으로써 개별절리의 산정에서 발생할 수 있는 오차를 통계적으로 극복하고자 하였다.

본 연구에서의 절리 해석에는 절리 궤적 자료로부터 절리의 방향성 해석, 절리군 분석, 절리군에 대한 거칠기 계수(JRC) 산정 그리고 산정된 JRC를 Barton-Bandis 모델에 적용하여 강성을 추정하는 과정을 포함한다.

4.1 군집성 분석

절리의 발달 방향에 대한 해석은 Lebenberg-Marquardt 법을 이용하여 절리 궤적 좌표를 주기함수에 curve-fitting하는 방법을 사용하였다. Lebenberg-Marquardt 법은 비선형 함수에 대한 curve-fitting에서 가장 빈번히 사용되는 방법들 중 하나이다.

과약된 총 46개 절리 방향으로부터 절리군 분석을 실시한 결과 Fig. 3과 같은 결과를 얻었다. 분석 결과 가장 중심의 contour에 39.6%의 절리들이 집중된 1개의 절리군이 존재하였으며 그 경사 방향과 경사각은 203/69으로 분석되었다.

4.2 JRC 산정

절리군에 속하는 절리들의 특성이 유사하다고 가정하고 절리군의 경사 방향과 경사각에 가장 군집되어 있는 10개의 절리를 선택하여 거칠기를 산정함으로써 절리군에 대한 대표적인 거칠기를 산정하고자 하였다.

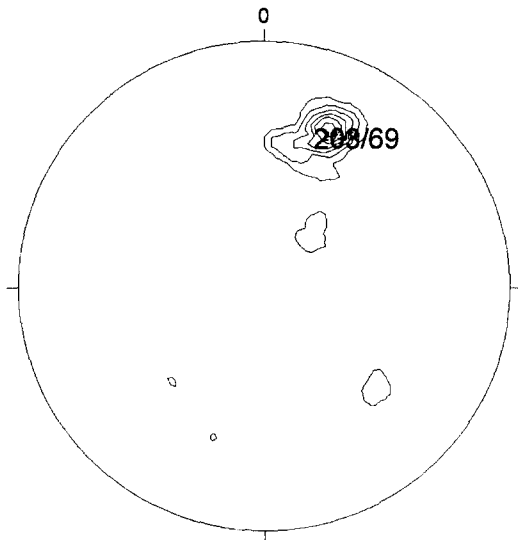


Fig. 3. Lower hemisphere projection of normals of 46 joints

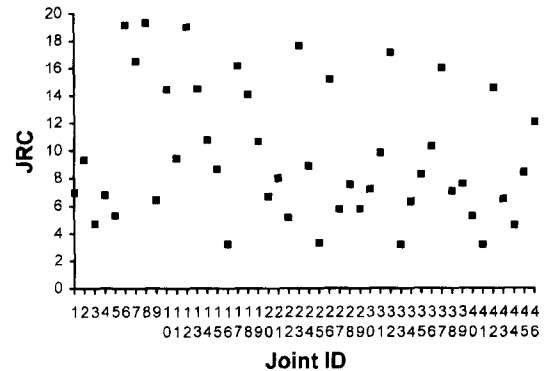


Fig. 4. Results of JRC evaluation of 46 joints

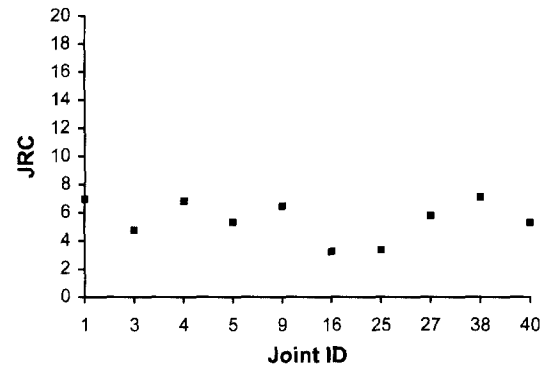


Fig. 5. Results of JRC evaluation for joint set

절리의 거칠기는 각 절리의 경사방향 및 경사각에 근거한 평면에 대해 영상분석을 통하여 구한 절리궤적의 차이를 의미한다. 그러나 거칠기는 수평면상에서 요철의 정도를 나타내는 것이므로 경사진 절리면에 대해서는 몇 단계의 기하학적인 보정과정을 거칠 필요가 있으며 본 연구자는 이에 관한 연구 결과¹⁾를 이미 보고한 바가 있다.

본 연구 대상 총 46개 절리에 대해 JRC 산정 방향을 방위각 0도로 하여 산정한 결과를 Fig. 4에 나타내었다. Fig. 5는 절리군에서 추출한 10개의 절리에 대해 JRC 산정 방향을 절리군의 경사방향인 203°로 하여 산정한 결과이다. 산정된 평균 거칠기 값은 5.4 ± 1.4 이었다.

본 연구에서는 영상분석에 의한 JRC 산정 결과를 검증하기 위하여, 절리군의 JRC 산정에서 채택한 10개 절리를 대상으로 해당 절리의 암석코어에 나타난 거칠기를 mechanical roughness profilometer를 사용하여 궤적을 구한 후 육안으로 감정하고 그 결과를 서로 비교하였다. 이때 거칠기를 산정한 방향은 두 방법에서 모두 절리군의 주 경사방향을 기준으로 하였다. Fig.

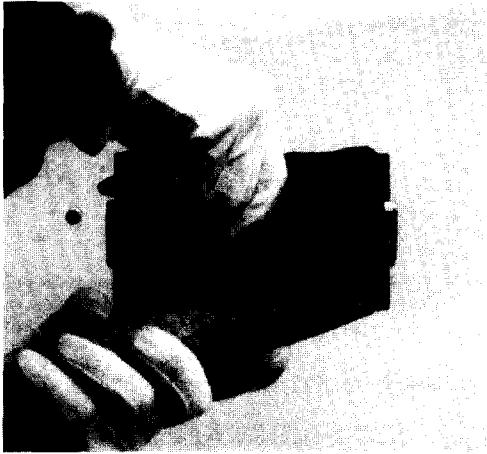


Fig. 6. Roughness measurement using mechanical profilometer

Table 2. Comparisons of JRC evaluation results obtained from using image analysis and mechanical profilometer

Joint ID	JRC from image analysis	JRC range from profilometer	Roughness profile traced by profilometer(Scale : 1/2)
1	6.961	6~8	
3	4.731	4~6	
4	6.813	-	Fracturing
5*	5.317	4~6	
9	6.437	4~6	
16**	3.239	2~4**	
25	3.336	2~4	
27	5.780	2~4	
38	7.091	-	Fracturing
40	5.273	-	Altered vein

* : evaluation of JRC at center part of joint surface of core as loss of filling material and broken rock piece core edge exists

** : evaluation of JRC at center part of joint surface of core as loss of broken rock piece core edge exists

6은 profilometer에 의한 절리의 거칠기 측정장면이며 Table 2는 비교 결과이다.

Profilometer를 사용하여 절리의 거칠기를 산정한 결과 10개의 절리 가운데 4번과 38번 절리는 절리면의 절반이상이 파쇄되어 거칠기를 산정할 수 없었고, 5번과 16번 절리는 경사방향 절리면의 양쪽 끝 부분의 충

진물질과 암편의 손실로 인해 절리면의 가운데 부분으로 절리 거칠기를 산정하였다. 40번 절리는 변질된 맥(vein)으로 판명되어 거칠기를 산정할 수 없었다.

영상분석에 의한 절리의 거칠기와 profilometer에 의한 절리 거칠기를 비교해 본 결과 27번 절리를 제외하면 Barton과 Choubey⁴⁾가 제안한 절리 거칠기 범위에 해당하였다. 따라서 Table 2의 비교 결과에 의하면 영상분석에 의한 절리의 거칠기 산정방법의 타당성을 확인할 수 있으며, mechanical profilometer에 의한 육안 감정에서 야기될 수 있는 조사자의 모호성을 정량적으로 배제할 수 있다는 점은 영상분석에 의한 방법의 장점이 될 수 있다고 판단된다.

4.3 절리 강성의 추정

절리면에 수직응력이나 전단응력이 작용하면 이에 따른 수직변위 또는 전단변위가 발생하며 이때의 변형성은 절리면의 특성에 좌우된다. 본 연구에서는 시추공벽 영상내 절리해석에 의해 산정된 거칠기 계수를 Barton-Bandis⁵⁾ 모델에 적용하여 절리의 변형성을 나타내는 수직강성과 전단강성을 유도하였다. 절리의 강성을 유도하기 위해서는 몇 가지 실험 및 측정자료들이 필요하나 현장 여건상 획득하지 못하여 실제값과 가장 근접한 추정값들을 적용하였다.

Barton-Bandis 모델은 다양한 JRC를 갖는 절리면에 대한 실험결과로부터 구한 것으로, 풍화되지 않고 이격이 없이 맞물려 있는 절리면의 경우 접선수직강성($k_{n, \tan}$), 최대수직변위(Δv_{\max}), 초기접선수직강성($k_{ni, \tan}$) 사이의 관계는 (1)식과 같다.

$$k_{n, \tan} = k_{ni, \tan} \left(1 - \frac{(\sigma_n - \sigma_{ni})}{(\sigma_n - \sigma_{ni}) + (k_{ni} \Delta v_{\max})} \right)^{-2}$$

$$\Delta v_{\max} \approx A + B(JRC) + C \left(\frac{\sigma_d}{e_i} \right)^D$$

$$k_{ni, \tan} \approx -7.15 + 1.75 JRC + 0.02 \left(\frac{\sigma_d}{e_i} \right) \quad (1)$$

여기서, σ_{ni} : 초기수직응력(1 kPa)

σ_d : 절리면 구성 암석의 압축강도(MPa)

e_i : 절리면간의 초기 간극(mm)

$$e_i \approx JRC \left(\frac{0.04 \sigma_c}{\sigma_d} - 0.02 \right)$$

σ_c : 모암의 압축강도(MPa)
 A, B, C, D : 실험상수(A=-0.2960, B=-0.0056,
 C=2.2410, D=-0.2450)⁵⁾

전단강성의 경우는 기본마찰각(Φ_b)과 수직응력사이의 관계로부터 전단강도(τ_f)를 유도한 Barton⁶⁾의 연구결과와 Duncan과 Chang,⁷⁾ Kulhaway,⁸⁾ Bandis 등⁵⁾이 실험적으로 구한 초기접선전단강성($k_{si, tan}$), 실험상수인 failure ratio($R_f = \tau_f / \tau_{ult}$, τ_{ult} = ultimate shear stress) 등으로부터 유도된 (2)식을 이용하여 구할 수 있다.

$$\Delta u = \left[k_{si, tan} \left(\frac{1}{\tau} - \frac{R_f}{\tau_f} \right) \right]^{-1}$$

$$k_{s, tan} = k_{si, tan} \left(1 - \frac{\tau R_f}{\tau_f} \right)^2 \quad (2)$$

여기서, Δu : 전단변위(mm)
 $k_{s, tan}$: 접선전단강성(MPa/mm)
 $k_{si, tan} \approx k_j (\sigma_n)^{n_j}$
 $k_j \approx -17.19 + 3.86 JRC$, for $JRC > 4.5$
 (실험상수)
 n_j : stiffness exponent
 (실험상수, $0.761 \text{ MPa}^2 \text{ mm}^{-1}$)⁵⁾
 R_f : failure ratio (실험상수 0.783)⁵⁾

연구대상지역의 시추 주상도에서 암반강도에 따른 암반분류호가 S-2 기준(강도 범위 50~200 MPa)이 우세하게 나타나 물성을 $\sigma_c=140 \text{ MPa}$, $\sigma_d=112 \text{ MPa}$ (σ_c 의 약 80% 추정), $\Phi_b=35^\circ$ 로 가정하였다. 또한 Bandis 등⁵⁾의 전단 실험 결과에 의하면 수직응력 0.23~2.36 MPa 범위에서는, n_j 의 경우 $0.615 \sim 1.118 \text{ MPa}^2 \text{ mm}^{-1}$ 의 값을 가지며, R_f 는 0.652~0.887의 값을 갖는 것으로 보고되어 본 연구에서는 각각의 평균값인 0.761과 0.783을 적용하였다.

Table 3에는 수직 및 전단 강성에 대한 (1)식 및 (2)식의 계산과정에서 나타나는 중요한 값들을 정리한 것이다.

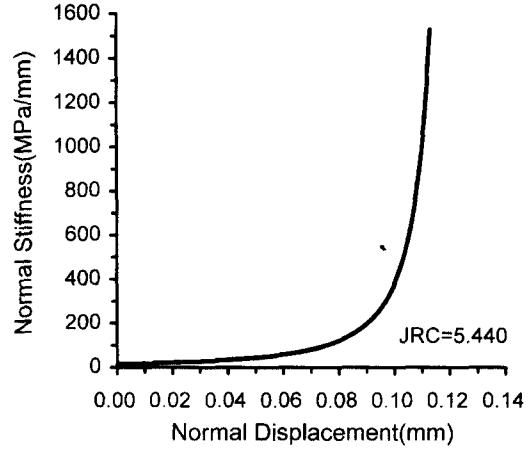


Fig. 7. Normal stiffness vs. joint closure curve for joint set

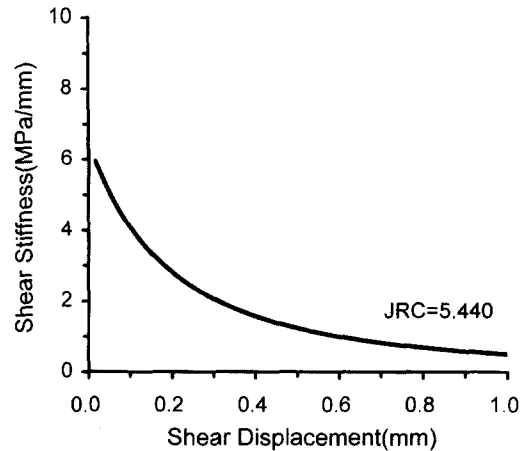


Fig. 8. Shear stiffness vs. shear displacement curve for joint set

Fig. 7은 Table 3의 결과와 (1)식의 관계에 의해 수직변위에 따른 수직강성의 변화를 도시한 것이다. 최대 수직변위(Δv_{max}) 0.126 mm의 1/2 수준에서의 수직강성을 평균치로 가정하여 보면 수직강성치는 63.441 MPa/mm이다.

Fig. 8은 수직응력이 2 MPa인 경우, Table 3과 (2)식에 의해 얻어진 전단변위와 전단강성과의 관계를 도시

Table 3. Results of stiffness and other factor calculated JRC, σ_c , σ_d , Φ_b

JRC	e_i (mm)	Δv_{max} (mm)	$k_{ni, tan}$ ($\text{MPa} \cdot \text{mm}^{-1}$)	τ_f (MPa)	k_j ($\text{MPa} \cdot \text{mm}^{-1}$)	$k_{si, tan}$ ($\text{MPa} \cdot \text{mm}^{-1}$)
5.440	0.163	0.126	16.095	1.966	3.808	6.454

한 것이다. 전단 변위 1.0 mm 이상에서는 강성의 변화가 거의 없다고 판단하고 1.0 mm의 1/2 수준에서의 전단강성을 평균치로 가정하면 전단강성치는 1.263 MPa/mm이다.

5. 절리구조도

본 연구에서는 이상에서 기술한 바와 같이 절리의 영상분석을 통하여 절리군에 대한 방향성 분석, 거칠기 산정 및 강성의 추정에 관한 연구를 진행하였으며 이러한 결과들을 종합하여 절리 암반 모델링에 필요한 구조도를 작성하였다. 절리구조도는 터널 굴착에서와 같이 특정 방향에 대한 절리의 발달 구조를 구체화하여 암반 모델링에서 보다 정확한 요소망을 구성하고 절리군의 역학적 특성을 파악할 수 있도록 하는데 목적을 두었다.

본 연구에서는 먼저 절리의 방향을 자료로 하여 이를 특정 방향에 투영하여 이차원 수직 평면에 나타내는 과정을 프로그램화 하였다.

절리구조도는 절리면이 임의 기준면과 교차함으로써 형성되는 단면을 말하는 것으로, 공학적인 측면에서 기준면은 터널단면으로 간주할 수 있다.

먼저, 절리면 및 기준면의 방정식을 구하기 위해 각 면의 경사 방향, 경사각 및 심도를 자료로 하여 각 면의 방정식을 유도하였다. 얻어진 두 면의 방정식에 연립방정식의 해법을 적용하면, 3차원 공간상에서 두 면이 교차하는 선의 방정식을 유도할 수 있고 여기서 구한 3차원 공간상의 좌표를 2차원 좌표로 변환함으로써 2차원 상의 선의 방정식을 구할 수 있다. 따라서 절리구조도는 일정한 기준면과 여러 절리면들 간의 교선을 2차원 상에 투영한 형태라고 할 수 있다.

이러한 과정을 수식으로 유도하기 위하여 시추공 입구를 기준점(0, 0, 0)으로 설정하고, 기준면은 기준점을 포함하고 특정 방위각을 가지는 수직면으로 설정하였으며 폭은 ±10 m로 하였다. 절리면의 심도는 기준면의 중앙 수직선의 수직 심도에 해당한다고 가정하였다. 좌표축의 설정은 Fig. 9와 같으며 z 축은 지하심부방향으로 음의 값을 가지며, x 축은 N 방향, y 축은 E 방향이다. 본 연구에서 개발한 절리구조도 작성 프로그램에서는 터널의 굴진 방향을 입력자료로 하기 위하여 기준면의 법선의 방위각을 절리의 경사 방향 표시방법과 같이 정북을 기준으로 시계방향으로 0~360°의 범위를 갖도록 하였다.

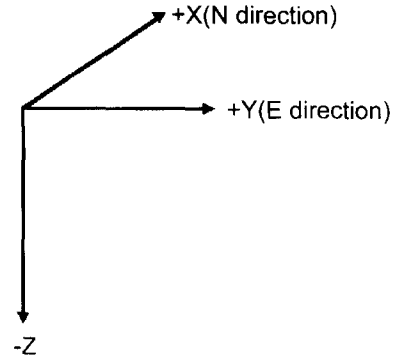


Fig. 9. The assumption of coordinates

절리면의 경사 방향을 α, 경사각을 β, 심도를 d라고 하면, 면에 대한 법선 벡터는 (3)식과 같다.

$$\vec{N} = ai + bj + ck \tag{3}$$

여기서, $a = m \cos \alpha$, $b = m \sin \alpha$, $c = |d|$,
 $m = |d| \cdot \tan \beta$

좌표(0, 0, d)를 포함하고, 법선 벡터 \vec{N} 을 갖는 절리면의 방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\cos \alpha \sin \beta x + \sin \alpha \cos \beta y + \cos \beta z = d \cos \beta \tag{4}$$

기준면의 경우에는 경사각이 90°이므로, 면의 방정식은 (5)식과 같이 나타낼 수 있다.

$$\cos \alpha_p x + \sin \alpha_p y = 0 \tag{5}$$

여기서 α_p: 기준면의 법선의 방위각

(4)식과 (5)식의 두 방정식에 대해 연립방정식의 해법을 적용하면 3차원 공간상에서의 교선의 방정식을 구할 수 있다. 이를 기준면 상의 2차원 평면에 도식하기 위해서는 (6)식과 같이 x 및 y 좌표를 r 좌표로 전환하여 회전시킨다.

$$r = \sqrt{x^2 + y^2} \tag{6}$$

그러므로, 회전된 3차원 상의 (x, y, z) 좌표는 기준면 상에서 (r, z) 좌표로 나타낼 수 있으며, 이 좌표를 기준면 상에서 표시하면 각각 가로축과 세로축에 대응된다. 따라서, 절리면은 기준면의 좌우 폭 ±10 m의 수직선과 절리면의 교차점인 두 점(y₁, z₁), (y₂, z₂)을 지나는 직선의 방정식으로 나타낼 수 있다. 두 점이 기준면의 중앙수직선과 절리면의 교점에 대하여 점대칭이라면

(6)식의 정의에 따라 $y_1=-r, y_2=r$ 로 대응시킬 수 있다. 따라서 직선의 방정식은 (7)식과 같다.

$$z = \frac{z_2 - z_1}{2r} y + \frac{1}{2} (z_2 + z_1) + z_1 \quad (7)$$

단, $\alpha = \alpha_p$ 인 경우,

$$0^\circ \leq \alpha \leq 180^\circ \rightarrow z = -\tan \beta y + d$$

$$180^\circ < \alpha < 360^\circ \rightarrow z = \tan \beta y + d$$

절리구조도는 각각의 절리에 대해 (7)식을 통해 얻어진 좌표값을 도출함으로써 구할 수 있다. 절리 구조도 작성 프로그램에서는 기준면의 법선 방향을 입력변수로 하여 터널 굴착 등에서 굴진방향이 법선방향, 구조도의 기준면이 터널 단면이 되도록 하였다.

Fig. 10은 절리 추적에 의해 획득된 46개 전체 절리의 경사 방향 및 경사각을 자료로 하여 작성된 절리구

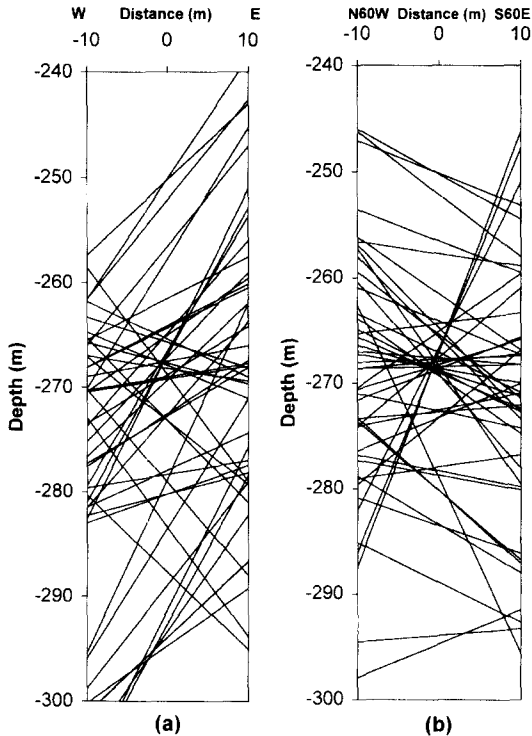


Fig. 10. Overall joint map (a) Reference direction 0°, (b) Reference direction 30°

구조도로, (a)는 기준면의 법선의 방위각이 0°(기준면의 방향은 동서방향)인 경우이며, (b)는 기준면의 법선의 방위각이 30°인 경우를 도시한 것이다.

Fig. 11은 균집성 분석에서 구한 10개 절리로 이루어진 절리군의 구조도를 나타낸 것이다. 절리군의 구조도 분석 결과로부터 절리군의 주된 발달 간격은 5 m 내외로 나타났다.

최종 절리 해석을 통해 얻어진 절리군의 특성과 해석에 적용된 암반의 주요 물성을 요약하면 Table 4와 같다.

절리방향의 설정이나 연속성은 현재까지 확인하는데 기술적으로 많은 어려움이 있어 절리구조도에서는 단순히 시추공벽상에 나타난 자료를 선형적으로 연장하여 표현하였으나 이는 이후 인접된 여러 시추공에 대한 영상분석이나 물리탐사방법을 이용한 고해상 균열탐사

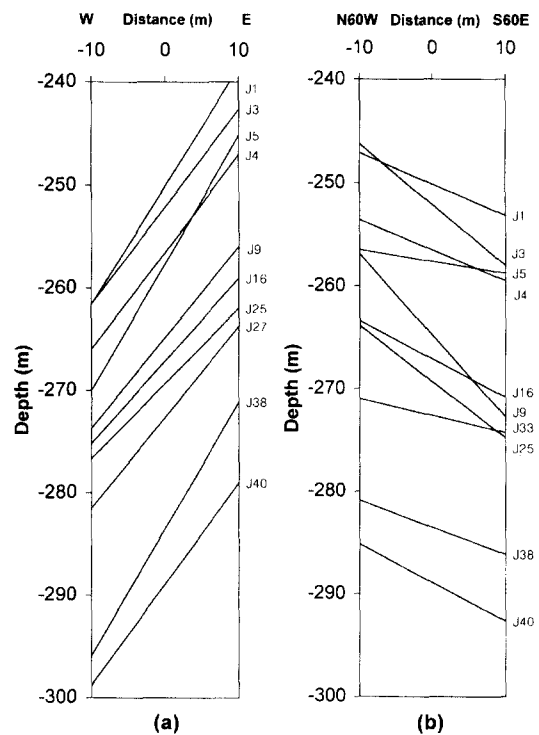


Fig. 11. Joint map of joint set (a) Reference direction 0°, (b) Reference direction 30°

Table 4. Summary of data for joint set

Joint Set	Orientation (degree)	JRC	σ_c (MPa)	σ_d (MPa)	Φ_b (degree)	K_n (MPa · mm ⁻¹)	K_s (MPa · mm ⁻¹)
1	203/69	5.4 ± 1.4	140	112	35	63.441	1.263

등의 방법에 의해 계속적인 연구가 이루어져야 할 것으로 사료된다.

6. 결 론

지하 암반내에 존재하는 절리구조는 지하 구조물의 안정성 평가에 중요한 영향을 끼친다. 본 연구에서는 시추공벽 영상획득 장비의 일종인 텔레뷰어에 의해 검출된 영상을 이용하여 절리면의 대표적 특성인 방향성, 거칠기, 강성을 유도하고 거칠기의 경우 실측된 육안 감정값과 비교하였다. 또한 절리의 경사방향과 경사각을 이용하여 해석용 절리 암반 모델로서 적용 가능한 절리구조도를 작성하였다.

한국 자원연구소 내에 굴착된 CAES-1 시추공의 심도 250~300 m 구간에서 포착된 46개의 절리에 대하여 영상분석을 실시하였으며 최종적으로 절리군에 대한 절리구조도를 작성하였다.

이상의 연구 결과 얻어진 결론을 정리하면 다음과 같다.

1) 연구대상 시추공의 검층구간에서는 1개의 뚜렷한 절리군이 존재하였으며, 절리군의 경사방향과 경사각은 203/69 이었다. 절리군의 거칠기를 경사방향 203°에 대해 산정한 결과 5.440 ± 1.379 이었다.

2) 절리군에 속하는 10개의 절리에 대해 영상분석에 의해 산정한 거칠기와 mechanical profilometer를 사용하여 육안감정값을 비교한 결과 대부분 일치하는 경향을 보였다. 따라서 영상분석에 의한 거칠기 산정 방법의 타당성을 확인할 수 있었다.

3) 절리 암반내 지하구조물에 대한 수치해석에 적용될 수 있는 절리구조도 작성 프로그램을 완성하였으며, 절리군에 대한 모델링에서 입력 변수로 적용될 수 있는 각종 물성을 추정하는 과정도 제시하였다.

사 사

이 논문은 1997년 한국학술진흥재단의 공모과제 연

구비에 의하여 연구되었으며, 시추공 검층자료획득에 협조해 주신 한국자원연구소 김종렬 박사님, 김유성 박사님께 심심한 감사의 뜻을 표한다.

참 고 문 헌

1. 김재동, 1997, 핵폐기물 처분장 주위 암반내 절리의 거칠기와 강성에 관한 연구, 한국자원공학회지, Vol. 34, pp. 453-462.
2. Jaedong Kim, O. Stephasson, 1997, Evaluation of JRC from image processing of borehole wall, Environmental and safety concerns in underground construction, Proceedings of the 1st asian rock mechanics symposium, Vol. 2, pp. 631-634.
3. 김종열, Schepers, R., 1995, 고분해능 텔레뷰어 검층기법의 기능, 대한지질공학회지, 제 5권, 제 3호, pp. 277-288.
4. Barton, N. and V. Choubey, 1977, The shear strength of rock joints in theory and practice, Rock Mechanics, vol. 10, pp. 1-54.
5. Bandis, S.C., A.C. Lumsden and N.R. Barton, 1983, Fundamentals of rock joint deformation, Int. Jour. of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts, vol. 20, pp. 249-268.
6. Barton, N., 1976, The shear strength of rock and rock joints, Int. Jour. of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts Rock Mechanics Review, vol. 13, pp. 255-279.
7. Duncan, J.M. and C.Y. Chang, 1970, nonlinear analysis of stress and strain in soils, Jour. of the Soil Mechanics and the Foundation Design of the ASCE, vol. 95, SM5, pp. 1629-1655.
8. Kulhaway, F.H., 1975. Stress deformation properties of rock and rock discontinuities, Engineering Geology, vol. 8, pp. 327-350.
9. Mary, L. Boas, 1983, Mathematical methods in the physical sciences, 2rd, pp. 81-127.