

DOM 시추코어를 이용한 절리분포 해석모델 개발

조태진¹⁾, 유병욱²⁾, 원경식³⁾

¹⁾부경대학교, ²⁾한국도로공사, ³⁾지오텍 컨설턴트(주)

1. 서론

최근 도로, 터널, 철도 등 대부분의 국가기간시설에 대한 건설공사가 산악지형에서 이루어지게 됨으로서 암반 사면 및 터널에서의 안정성 문제가 더욱 중요하게 대두되고 있다. 암반구조물의 경우 암반 자체의 역학적 특성보다는 암반에 발달되어 있는 불연속면의 분포 양상이 암반구조물의 안정성에 주된 영향을 미치게 된다. 현재 각종 토공 및 구조물 설계를 목적으로 수행되는 지반조사에 있어 시추 조사시 지하 암반에 발달된 불연속면 분포해석은 공내 영상촬영기기인 Borehole Image Processing System (BIPS), Optical Borehole Image (OBI) 및 Acoustic Televiwer (ATV)를 활용하여 수행되고 있으나 (이창영, 2001; 구민호 외, 1999; 송무영 외, 1999; Haller & Porturas, 1998; Raax, 1997; William et al., 1997; Hornby et al., 1992), 시추공 상태 및 장비 해상도 등에 의해 자료 취득이 제약된다. BIPS 및 OBI는 광학적으로 시추공벽을 촬영하는 관계로 공내수가 혼탁하면 해상도가 매우 떨어지는 화상을 얻거나 불연속면을 인식할 수 없는 경우도 발생하며, ATV 경우에는 촬영매체가 초음파를 이용하기 때문에 공내 지하수의 존재성이 장비 활용성을 좌우한다(김중렬, 19995). 본 연구에서는 시추조사시 간편하게 불연속면의 방향을 측정하여 신뢰성 있는 지반정보 자료를 제공할 수 있는 Discontinuity Orientation Measurement (DOM) 시추장비 및 불연속면 분포해석 모델을 개발하였다. DOM 시추 장비에서 기 설정된 방향성을 지시하는 기준선이 표시된 시추 코어가 회수되면 코어 상의 절리 단면에서 측정된 3개 지점의 좌표를 이용하여 절리면의 경사방향 및 경사각을 산정한다. 또한 코어 축이 절리면을 관통하는 지점의 좌표를 산정하여 절리 위치를 설정한다. 절리군 형성은 clustering algorithm을 활용하여 분석한다. 코어 축을 조사선으로 설정하여 전체 절리 간격 및 군 간격을 해석한다. 전체 시추구간 및 특정 구역에서의 RQD를 산정하여 암반의 공학적 활용도 고찰을 위한 기본 자료를 도출한다.

2. 코어절리 방향성 산정

DOM 시추코어에 분포된 절리면의 방향성을 산정하기 위하여 시추 방향성에 의거한 국지 좌표계를 코어 상에 설정하였다(Fig. 1 참조). 국지 좌표계에서 x-축 방향은 수평면에 평행하며, y-축 방향은 시추방향이고, z-축 방향은 원형 시추 단면의 최상부 방향을 지시한다. 일차적으로 코어 절리면이 기준선(DOM Line)과 교차하는 지점인 P_{DOM} 에서의 3개 국지 좌

표값 (x_{DOM} , y_{DOM} , z_{DOM})을 산정한다. y_{DOM} 은 시추코어 상에서 직접 측정되며(Fig. 2 참조), (x_{DOM} , z_{DOM})은 Fig. 2에 도시된 바와 같이 시추작업시 설정된 기준선 회전각(DOM Angle, δ_{DOM})을 이용하여 산정된다. 이차적으로 절리면내 임의의 2 지점(P_1 , P_2)을 선정하고, P_{DOM} 경우와 동일한 방법을 사용하여 국지좌표값 (x_1 , y_1 , z_1) 및 (x_2 , y_2 , z_2)을 산정한다.

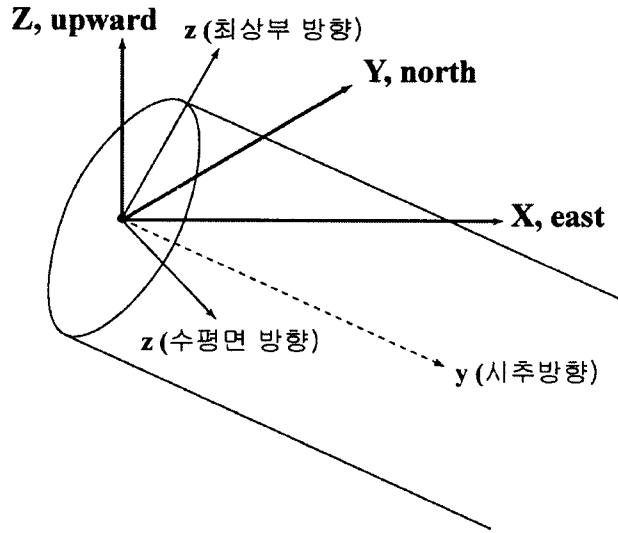


Fig. 1. Global and local coordinate systems on the core log.

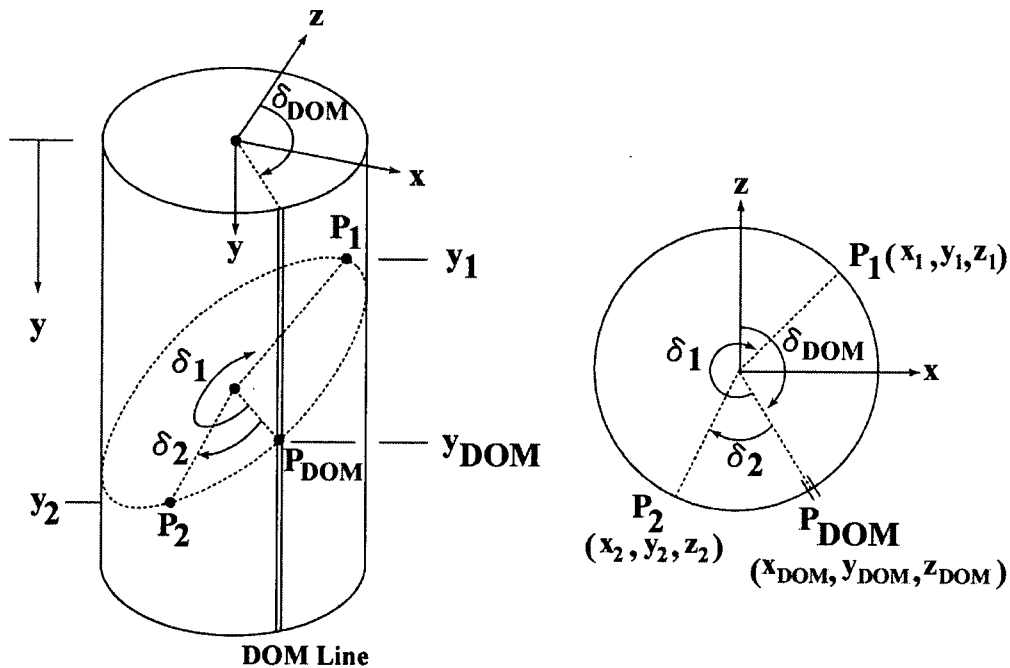


Fig. 2. Measurement of local coordinates for 3 points on the joint plane.

이상에서 산정된 3개 지점의 국지좌표계에서의 위치좌표를 전체 좌표계에서의 위치좌표로 변환시킨다. DOM 시추방향의 선추향/선경사 = α_D/β_D 이면 국지좌표계에서 전체좌표계로

의 변환은 다음의 변환행렬을 이용하여 수행된다.

$$[T] = \begin{bmatrix} \cos \alpha_D & \sin \alpha_D \cos \beta_D & \sin \alpha_D \sin \beta_D \\ -\sin \alpha_D & \cos \alpha_D \cos \beta_D & \cos \alpha_D \sin \beta_D \\ 0 & -\sin \beta_D & \cos \beta_D \end{bmatrix} \quad (1)$$

전체좌표계에서 P_{DOM} 지점의 위치좌표 (X_{DOM}, Y_{DOM}, Z_{DOM})는 다음과 같이 산정된다.

$$\begin{pmatrix} X_{DOM} \\ Y_{DOM} \\ Z_{DOM} \end{pmatrix} = [T] \begin{pmatrix} x_{DOM} \\ y_{DOM} \\ z_{DOM} \end{pmatrix} \quad (2)$$

동일한 방법으로 P₁ 및 P₂ 지점의 전체좌표계에서의 위치 좌표 (X₁, Y₁, Z₁) 및 (X₂, Y₂, Z₂)가 산정되면, P_{DOM}을 기준으로 P₁ 및 P₂ 지점을 연결하는 벡터 \vec{V}_1 과 \vec{V}_2 를 산정한다.

$$\vec{V}_1 = (X_1 - X_{DOM})\hat{i} + (Y_1 - Y_{DOM})\hat{j} + (Z_1 - Z_{DOM})\hat{k} \quad (3)$$

$$\vec{V}_2 = (X_2 - X_{DOM})\hat{i} + (Y_2 - Y_{DOM})\hat{j} + (Z_2 - Z_{DOM})\hat{k} \quad (4)$$

\vec{V}_1 과 \vec{V}_2 는 절리면 상에서 형성된 벡터이다. 따라서, 절리면에 법선 방향인 벡터 \vec{N} 이 \vec{V}_1 과 \vec{V}_2 의 외적으로 산정된 후 단위벡터 \vec{n} 이 형성될 수 있다.

$$\vec{N} = \vec{V}_1 \times \vec{V}_2 \quad (5)$$

$$\vec{n} = \vec{N} / \|\vec{N}\| \quad (6)$$

단위 법선벡터 \vec{n} 의 k-성분이 음인 경우에는 전체 성분의 방향을 역전시켜 항상 상부 방향을 지시하도록 조정한다. 절리면에 대한 단위 법선벡터 \vec{n} 의 \hat{i} -, \hat{j} -, \hat{k} -성분 a, b, c는 절리면의 경사방향(α) 및 경사(β)와 다음의 관계를 갖는다.

$$\theta = 90 - \alpha (+360)$$

$$a = \cos \beta \cos \theta \quad (7)$$

$$b = \cos \beta \sin \theta$$

$$c = \sin \beta$$

절리면 단위 법선벡터 \vec{n} 의 성분값 a, b, c를 이용하여 절리면의 경사방향 및 경사를 관계식(7)에 의거하여 환산하고, 전체 좌표계에서의 P_{DOM} 위치(X_{DOM}, Y_{DOM}, Z_{DOM})을 활용하여 절리면의 위치 상수 d를 결정하여 평면식을 구성한다.

$$d = a \cdot X_{DOM} + b \cdot Y_{DOM} + c \cdot Z_{DOM} \quad (8)$$

3. 절리분포 해석 모델

DOM 시추코어에 발달된 절리들은 방향성과 위치 좌표가 산정되어 관계식 (8)에 기술된 평면식이 구성된다. 시추공 내의 한정된 구역에서 측정된 절리면이 주위 암반 영역에 평면적으로 확장된다는 가정하에 절리분포 및 암반구조해석을 절리 평면식을 이용하여 수행할 수 있는 모델 RoSA-DOM을 개발하였다. RoSA-DOM은 절리자료 입력 및 평면식 구성, DOM 시추현황도 작성 및 절리암반의 구조해석을 독립적으로 수행하는 3개의 module로 구성되어 있다(Fig. 3 참조).

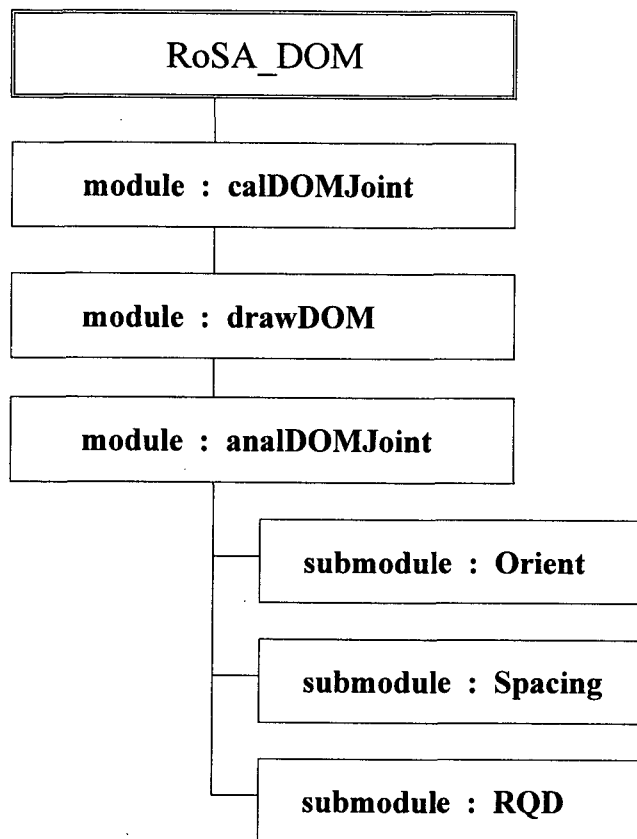


Fig. 3. Flowchart of core joint analysis model RoSA_DOM.

Module calDOMJoint에서는 DOM 시추 기준선을 중심으로 산정된 3개 지점의 절리면 좌표값을 전체 좌표계에서의 위치 좌표로 변환시켜 절리 방향성을 산정하고 평면식을 구성한다. Module drawDOM에서는 DOM 시추작업에 대한 현황도(Fig. 4 and 5), 시추코어에 발달된 절리분포 상태(Fig. 6), 시추공 인근 영역에서의 절리 trace 개착도와 코어 박스 및 시추공 내의 절리 trace (Fig. 7 - 10) 등을 제도한다. Module analDOMJoint는 절리분포 및 암반구조 해석을 수행하는 3개의 submodule로 구성되어 있다. Submodule Orient에서는 절리 방향성 분포(Fig. 11)에 대해 clustering algorithm(Mahtab & Yegulalp, 1982)을 적용하

여 절리군 형성에 대한 균집 상태를 분석하고(Fig. 12), 각 절리군에 대해 Fisher 분포 해석(Fig. 13)을 수행한다. 또한 시추공 깊이에 따른 균별 절리 분포를 가시적으로 확인할 수 있는 그래프(Fig. 14 - 15)를 제도하며, 경사방향 및 경사에 대한 rosette diagram(Fig. 16)을 제도하여 절리 방향성 분포 해석에 대한 기본자료를 제공한다. Submodule Spacing 에서는 시추공 축을 조사선으로 활용하여 전체 절리들의 간격 분포(Fig. 17)를 산정한다. 절리군을 형성하는 절리들의 간격(Fig. 18)은 시추공 축상에서 산정된 간격을 대표 절리면 방향을 고려하여 보정한 후 분포 양상을 분석한다. Submodule RQD에서는 시추코어 축을 기준으로 절리분포 위치를 고려하여 전체 구간(Fig. 19) 및 10m, 5m, 2m 코어 간격(Fig. 20)으로 RQD를 산정한다. 시추과정에 발생된 코어 미회수 부분 및 파쇄대 구간도 RQD 산정에 고려된다.

이상과 같은 DOM 시추코어를 이용한 절리분포 및 암반구조 해석에 대한 모델 RoSA-DOM은 대수학적 이론에 근거하여 정확한 분석을 수행하고 결과에 대한 가시적인 도표를 제공하여 암반의 공학적 활용도 평가에 대한 신뢰성 있는 자료를 도출한다.

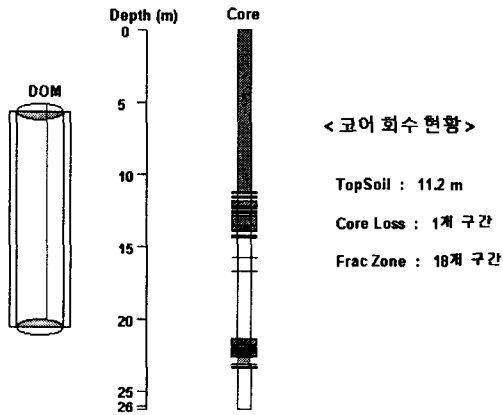


Fig. 4. DOM Core retrieval.

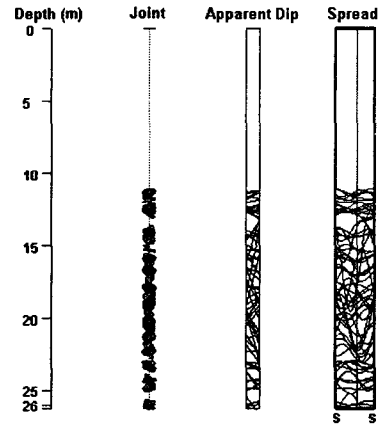


Fig. 5. Apparent view of core log.

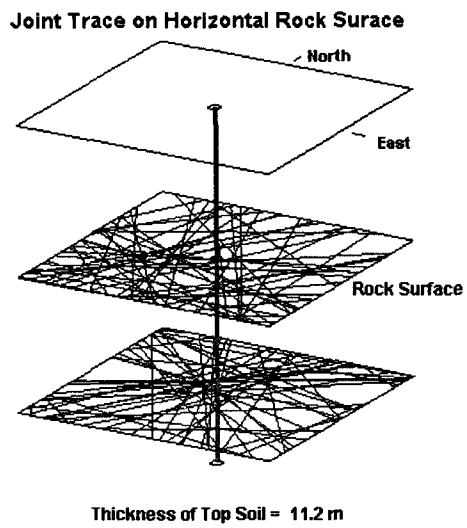


Fig. 6. Joint traces on Horizontal Rock Surfaces.

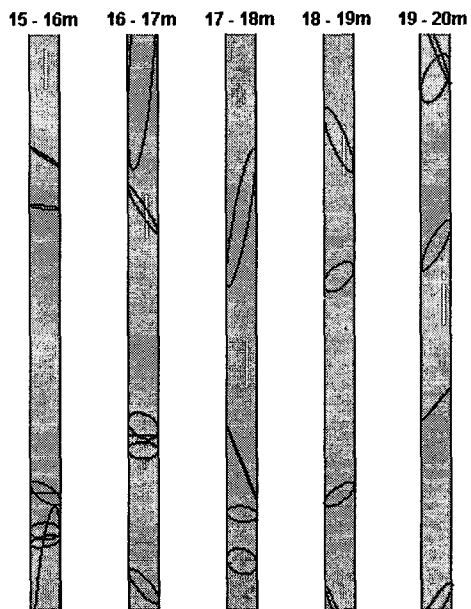


Fig. 8. Core log.

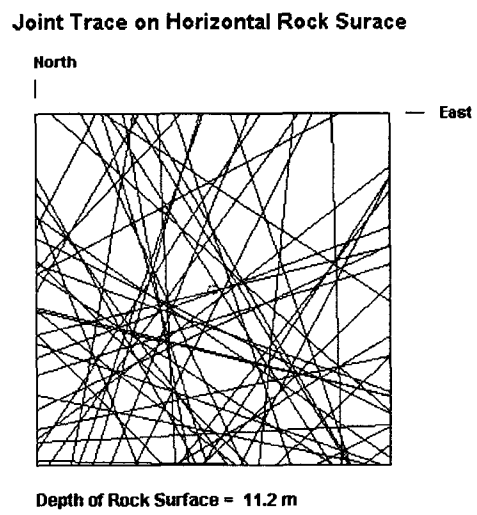


Fig. 7. Joint traces on the rock surface at the depth of 11.2m.

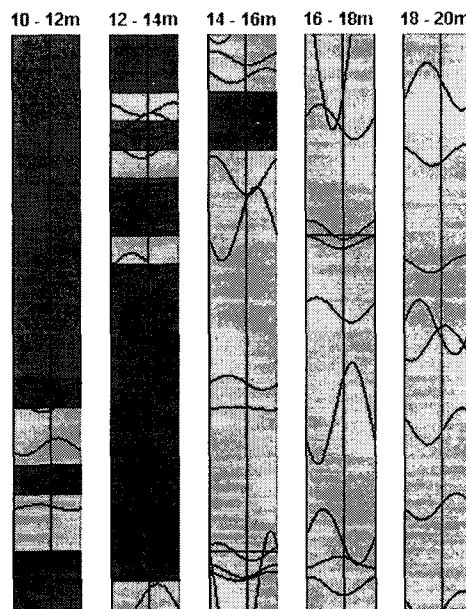


Fig. 9. Spreaded joint traces around the borehole.

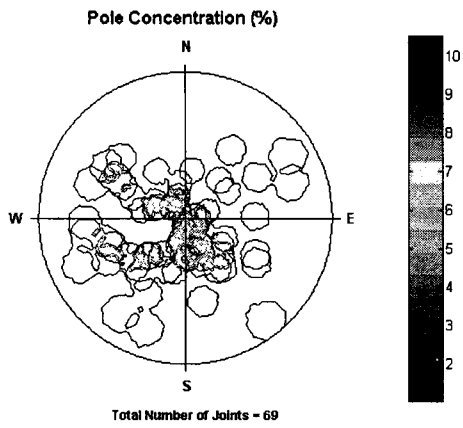


Fig. 10. Contour map of pole concentration.

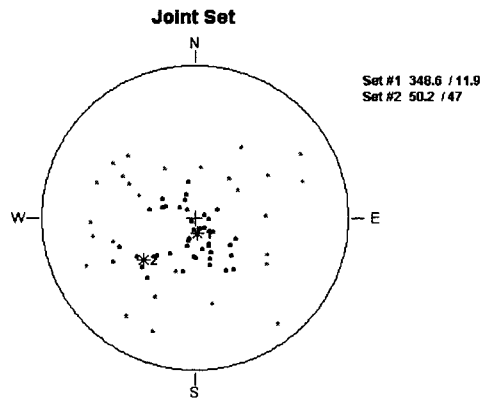


Fig. 11. Pole distribution illustrating the formation of joint set.

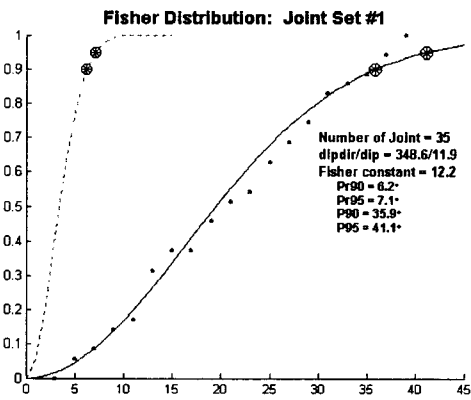


Fig. 12. Fisher distribution of joint set 1.

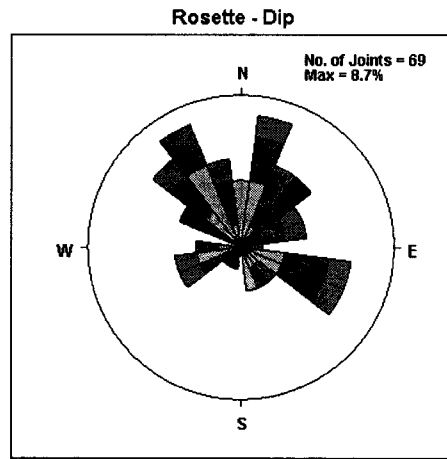


Fig. 13. Rosette diagram of dip direction.

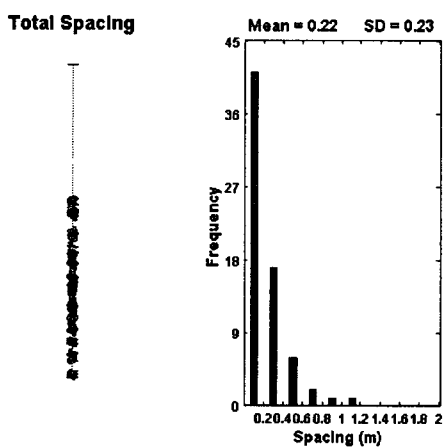


Fig. 14. Total spacing.

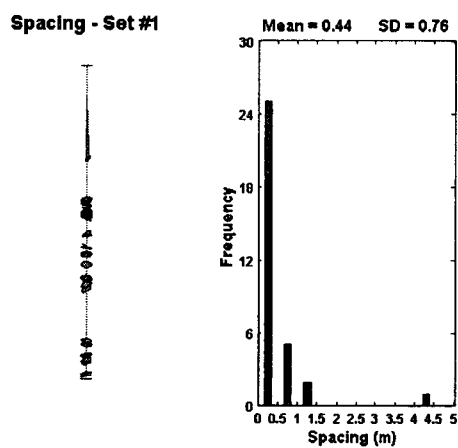


Fig. 15. Spacing of Set 2.

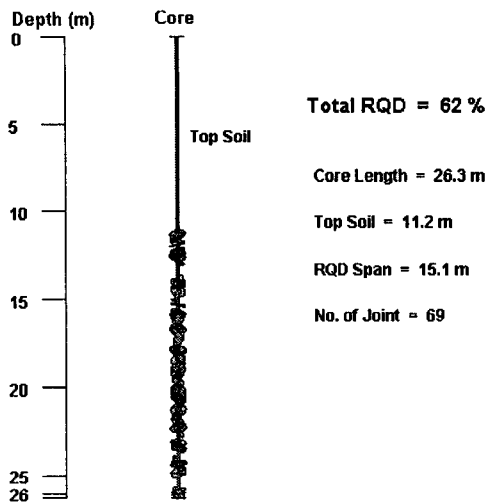


Fig. 16. Total RQD.

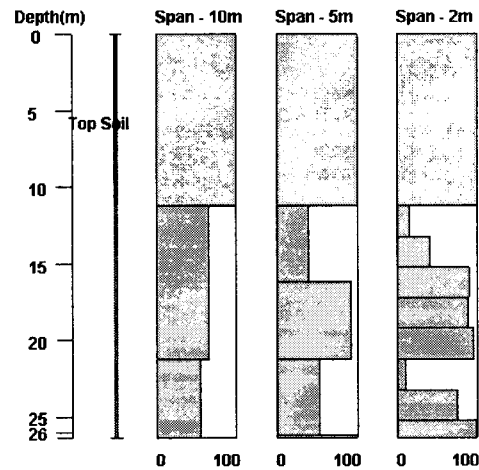


Fig. 17. RQD measured in different span along the borehole axis.

4. 결론

시추 작업시 회수되는 코어에 기 설정된 방향성을 지시하는 기준선을 새겨서 코어절리의 방향성을 산정할 수 있는 DOM 시추장비를 개발하였다. 또한, 개별 절리들의 평면식을 활용하여 시추공 지역에서의 절리분포 및 구조 특성과 공학적 활용성 평가를 수행하는데 필수적인 자료를 제공하는 전산모델 RoSA_DOM을 완성하였다. 현장에서의 DOM 시추작업 및 예제적 자료를 이용한 RoSA_DOM 해석을 수행하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- 1) DOM 시추장비에는 이중관 로드 방식이 채택되어 와이어 라인(Wire Line)방식의 시추작업과 같이 매 굴진장마다 시료만 회수한 후 재굴진을 실시할 수 있었다. 이를 위하여 시료 채취관 및 워터 슈벨(Water Swivel)을 새롭게 고안하였으며, 매 굴진장(Run)마다 기준선의 방위각이 변화하지 않도록 기준선 라인 고정장치를 고안하여 장착하였다..
- 2) 이중관 로드 방식의 DOM 시추에서는 내관만 회수하여 코어를 채취하여 시추작업 능력이 향상되었으며, 점토층 및 탄층과 같은 매우 연약한 암반 구간에서도 코어 회수율이 증가되는 효과를 얻을 수 있었다.
- 3) DOM 시추공에 BIPS 및 ATV 조사를 병행하여 절리 방향성 해석 결과를 비교하였다. 시추공 영상 장비의 해상도에 따라 측정된 절리 수효는 상이하였으나, 절리군의 대표 방향은 유사하게 되었다.
- 4) DOM 시추코어를 이용한 절리자료 해석모델 RoSA-DOM을 개발하여 지반 시추조사시

간편하게 신뢰성 있는 지반정보 제공이 가능하여졌다.

참 고 문 헌

1. 구민호, 이동우, 원경식, 1999, 시추공텔레뷰어 및 BIPS의 영상 자료 해석을 통한 파쇄매질의 투수율 계산프로그램 개발 및 현장적용성 평가, 대한지질공학회지, 187-205.
2. 김중열, Schepers, 1995, 고분해능 텔레뷰어 검층기법의 기능, 지질공학 5(3), 277-288.
3. 이창영, 2001, 지하 불연속면 및 암상해석을 위한 시추공 영상 분석연구, 충남대학교 석사논문, 80 pp
4. 송무영, 고희재, 유병욱, 정형욱, 1999, BIPS에 의한 붕괴사면 활동성 추정, 한국물리탐사학회, 217-239.
5. Haller, D. & Porturas, F. 1998. How to characterize fractures in reservoirs using borehole and core images: case studies In : Harvey, P.K. & Lovell, M. A. (eds) Core-Log Integration, Geological Society, London, Special Publications, 135, 249-259.
6. Hornby, B.E., S.M. Luthi, and R.a. Plumb, 1992, Comparison of fracture aperture computed from electrical borehole scans and reflected Stoneley waves: an integrated interpretation, The Log Analyst, 33(1), 50-66.
7. Mahtab, M. A. & Yegulalp, T. M. 1982, A rejection criterion for definition of clusters in orientation data. In Issues in Rock Mechanics, Proceedings of the 22nd Symposium on Rock Mechanics, Berkeley. R. E. Goodman and F. E. Heuze (eds), American Institute of Mining Metallurgy and Petroleum. Engineers, New York, 116-23.
8. Raax, 1997, Borehole Image Processing System Information, Sapporo, Japan.
9. Williams, C.G., P.D. Jackson, M.A. Lovell and P.K Harvey, 1997, Assessment and interpretation of electrical borehole images using numerical simulations, The Log Analyst, 38(6), 34-44.
10. Zemanek, J. & Caldwell, R. L., 1969, The Borehole Televiewer - A new logging concept for fracture location and other types of borehole inspection, J. of Petroleum Technology, June, 762-774.