

암반 내부에서의 절리분포 예측을 통한 사면해석

조태진 (부경대학교 환경탐사공학과)

원경식 ((주)지오텍컨설파트)

이창섭 ((주)동해기초)

1. 서론

개착 사면의 안정성 확보는 국토개발의 원활한 추진과 개착 지역의 효율적 이용을 위하여 절대적으로 요구된다. 사면 안정성 해석은 개착 지역에 분포된 불연속면들의 역학적 특성과 분포양상을 조사하여 수행되어져 왔으며 현장 암반에 분포된 불연속면들은 공학적 측면에서 절리로 대표된다. 절리들의 전단 강도 측정방법은 Barton et al.(1985)와 Ladanyi and Archambault(1970) 등에 의하여 심도 있게 연구되었다. 개착 사면의 파괴양상을 결정짓는 대표적인 절리군 방향성은 개별 절리들의 방향성 측정자료에 대해 통계적 기법(Fisher, 1953) 및 반구투영기법(Priest, 1985)을 적용하여 분석된다. 그러나, 대표 절리군 방향을 활용하는 사면해석은 절리분포 속성 중에서 방향성만을 고려하는 정성적인 결과만을 도출하는 한계성을 지니고 있다. 본 연구에서는 DOM시추기법(Yoon et al., 2003)을 이용하여 시추공에서의 절리 방향성과 위치를 산정하고 개착면에서의 절리 trace 표출상태를 예측하여 국지적 안정성을 분석할 수 있는 기법을 개발하였다. 특히, 개착면 내부에 설정된 임의의 횡단면에서의 절리 trace 분포를 예측하고 파괴를 유발시킬 수 있는 절리들을 추출하여 해당 구역에서의 세부적 안정성을 분석하였다. 이와 같은 절리 trace 분포 예측기법을 인장케이블이 설치될 예정인 사면해석에 적용하여 정착부의 암반 절리상태를 분석하고 보강의 효율성을 고찰하였다.

2. 절리 Trace 예측

DOM 시추코어에서 관찰된 절리면을 확장시켜 개착면에 투영시키기 위하여 다음의 가정을 설정하였다. 첫째, 절리면은 반경=R인 원형 disk이며 절리면의 중심은 시추공 축 상에 위치한다. 둘째, 개착면은 평면이며, 외곽 경계는 convex 형태이다. 개착면에 대해 절리면을 투영하여 trace 분포를 예측하기 위하여 Fig. 1에 도시된 바와 같이 3차원 Cartesian 좌표계를 임의의 지점에 설정하고 시추공 축상에 경사방향/경사 = α_J / β_J 인 절리면 좌표 (x_J, y_J, z_J) 를 설정한다. 동일한 좌표계 원점을 기준으로 개착면 경계부의 점 A-F의 좌표들을 산정하고, 개착면의 평면식을 구성한다.

$$a_s x + b_s y + c_s z = d_s \quad (1)$$

여기서,

$$a_s = \cos \theta_s \cos \beta_s, \quad \theta = 90 - \alpha (+360)$$

$$b_s = \sin \theta_s \cos \beta_s$$

$$c_s = \sin \beta_s$$

$$d_s = a_s x_A + b_s y_A + c_s z_A$$

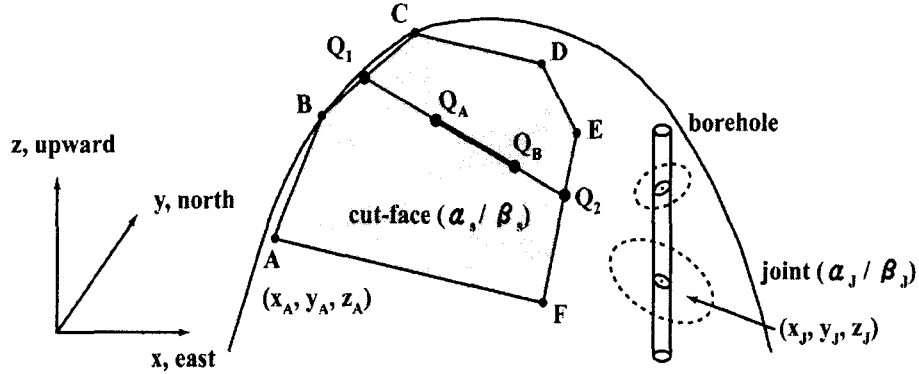


Fig. 1. Joint trace on a cut-face.

동일한 방법으로 절리면의 평면식을 구성한다.

$$a_j x + b_j y + c_j z = d_j \quad (2)$$

개착면과 절리면이 무한 평면일 경우 2개 면이 교차하여 형성되는 교선의 단위 vector \vec{i} 은 아래와 같이 산정된다.

$$\vec{L} = \vec{S} \times \vec{J} \quad (3)$$

여기서,

$$\vec{S} = a_s \hat{x} + b_s \hat{y} + c_s \hat{z}$$

$$\vec{J} = a_j \hat{x} + b_j \hat{y} + c_j \hat{z}$$

$$\vec{i} = \vec{L} / \|\vec{L}\| = l_1 \hat{x} + l_2 \hat{y} + l_3 \hat{z} \quad (4)$$

교선 상의 임의의 기준 점에 대한 좌표 (x_l, y_l, z_l) 를 선정하여 교선식을 형성한다.

$$(x_l, y_l, z_l) + a_l (l_1, l_2, l_3) \quad (5)$$

여기서 a_l 은 임의의 상수이다.

식 (5)로 표현된 교선은 무한 개착면 상의 직선을 나타내며, 실제 개착면 범위 내에 위치할 경우 Fig. 1에 도시된 임의의 2개 지점 $Q_1(x_Q, y_Q, z_Q)$ 와 $Q_2(x_Q + \Delta x_Q, y_Q + \Delta y_Q, z_Q + \Delta z_Q)$ 을 연결하는 선분 $\overline{Q_1 Q_2}$ 는 다음과 같이 표현된다.

$$(x_Q, y_Q, z_Q) + \alpha_Q (\Delta x_Q, \Delta y_Q, \Delta z_Q) \quad 0 \leq \alpha_Q \leq 1 \quad (6)$$

절리의 연속성이 무한대인 경우에는 상기한 선분(Q_1Q_2)가 개착면에 표출될 절리 trace 이다. 절리 반경을 R로 설정하여 연속성을 고려할 경우 절리 중심을 기준으로 다음의 원 공식을 고려해야 한다.

$$(x_Q + \alpha_Q \Delta x_Q - x_j)^2 + (y_Q + \alpha_Q \Delta y_Q - y_j)^2 + (z_Q + \alpha_Q \Delta z_Q - z_j)^2 = R^2 \quad (7)$$

식 (7)을 만족시키는 2개의 α_Q 실근이 구해지면 $0 \leq \alpha_Q \leq 1$ 조건을 고려하여 $0 \leq \alpha_A \leq \alpha_B \leq 1$ 범위에서 α_A 와 α_B 를 산정한다. 결과적으로 절리면의 연속성이 고려된 개착면 상의 절리 trace 양단 지점 QA와 QB의 좌표는 아래와 같이 산정된다.

$$\begin{aligned} Q_A (x_Q + \alpha_A \Delta x_Q , y_Q + \alpha_A \Delta y_Q , z_Q + \alpha_A \Delta z_Q) \\ Q_B (x_Q + \alpha_B \Delta x_Q , y_Q + \alpha_B \Delta y_Q , z_Q + \alpha_B \Delta z_Q) \end{aligned} \quad (8)$$

이상의 과정을 시추공에 분포된 전체 절리들에게 적용하여 개착면 상의 절리 trace 분포를 예측할 수 있다.

3. 사면 모델 해석

시추코어에서 측정된 절리들의 위치와 방향성에 근거하여 개착면에서의 trace 분포를 도출한 후 사면 안정성 해석을 수행하기 위하여 Fig. 2에 도시된 개착 사면 모델을 설정하였다. 사면 개착 이전에 2개 시추공에서 코어를 회수하여 BH-1호 공에서 7개, BH-2호 공에서 9개의 무한 연속성을 갖는 절리가 관찰되었고, 경사방향/경사 = 120/73.3 인 사면이 150m 연장과 71.8m 높이로 개착되는 것을 가정하였다.

개착 예정면 좌측하단에 3차원 Cartesian 좌표계 원점을 설정하여 시추공에서 관찰된 절리들의 중심 좌표를 산정하였다. 개착면의 방향성을 고려하여 식 (1)을 이용하여 평면식을 구성하였으며, 시추공에 중심이 위치한 원형 절리면의 trace를 개착면 상에 투영하였다(Fig. 2 참조). 개착면이 2개 시추공과 교차하게 설정되어 16개 절리들의 trace가 모두 개착면에 표출되었다. 개착면 상에 표출된 절리 trace 분포를 활용한 사면 해석을 수행하기 위하여 cone angle 15°를 clustering algorithm(Mahtab & Yegulalp, 1982)에 적용하여 군집 상태를 분석하였다. Fig. 3에 도시된 절리 극점들은 매우 분산되어 있으며, 1개 절리군을 형성하는 것으로 나타났다. 절리들의 마찰각을 30°로 가정하였을 경우 대표 절리군 방향성을 고려하는 기존의 반구투영해석에서는 사면 안정성이 확보되는 것으로 고찰된다. 그러나, 개별 절리들의 방향성에 의거할 때 2개 절리면은 평면파괴를, 3개 절리면은 전도파괴를 유발시킬 가능성이 있다. 이들 절리면의 시추공 내에서의 자세를 Fig. 4에 도시하였으며, 개착면에서의 표출 상태를 Fig. 5에 도시하였다.

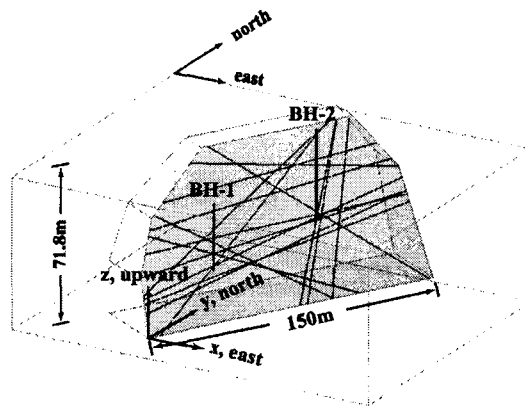


Fig. 2. Diagram of rock slope model.

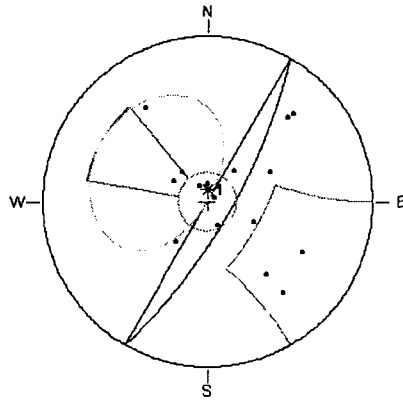


Fig. 3. Pole distribution of joints exposed on the cut-face

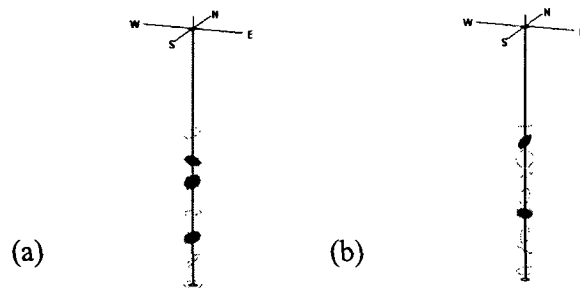


Fig. 4. Joints likely yielding slope failure.

(a) BH-1, (b) BH-2.

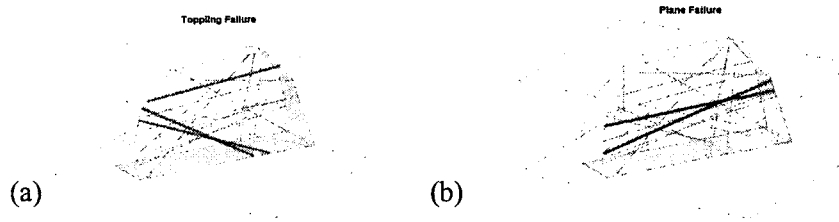


Fig. 5. Joint traces likely yielding slope failure.
(a) plane failure, (b) toppling failure.

기존의 사면해석기법을 이용할 때 대표 절리군이 1개 존재하는 경우에는 썩기파괴 해석이 불가능하다. 그러나, 본 연구에서는 절리들의 방향성과 위치를 대수학적으로 고려할 수 있어서 개착면에 표출된 절리 trace 분포에 의거하여 썩기블록 해석을 수행할 수 있다. 일차적으로 개착면에 표출된 2개 절리의 교선 벡터를 산정하여 미끄러짐 거동성을 확인하였으며, 이차적으로 제 3의 절리 trace와의 교차점이 개착면 내부에 위치하는 지를 판별하여 잠재적 블록의 위치와 규모를 산정하였다. Fig. 6(a)에 개착면 상에서의 블록 위치를 도시하였으며, 사면 내부에서의 블록 규모와 형상을 Fig. 6(b)에 도시하였다.

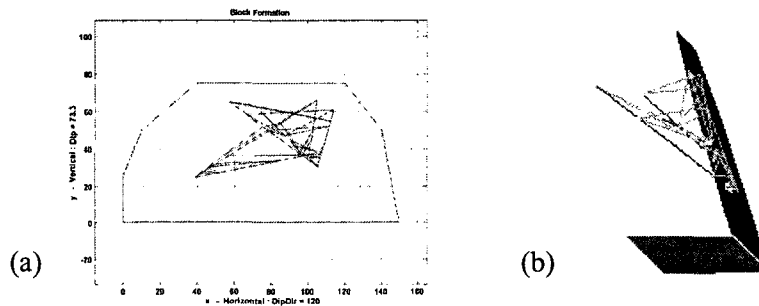


Fig. 6. Formation of potential blocks.
(a) on the cut-face, (b) inside the cut-face.

개착면에 설정된 좌표계 원점을 기준으로 $x = 50\text{m}$, 100m , 150m 지점에 3개의 횡단면을 설정하고 사면 내부에서의 파괴 양상을 고찰하였다(Fig. 7 참조). 횡단면은 개착면에 법선 방향으로 설정되어 있으며 개착 경사도 변화를 고려할 수 있다. 본 연구에서는 사면 하부에서의 경사가 73.3° , 중앙부에서 63.4° , 상부에서는 45° 로 변화되는 경우에 대한 횡단면을 형성하였다. 우선 각 횡단면에서의 절리 trace 분포를 산정하여 도시하였으며, 표출된 절리들의 방향성을 고찰하여 평면 및 전도 파괴를 유발시킬 수 있는 절리 trace들을 추출하였다. 또한 잠재적 썩기블록들의 위치 자료를 이용하여 횡단면과 교차되는 썩기블록의 형상을 도출하여 Fig. 8에 도시하였다. 이와 같은 횡단면 해석을 수행하여 대규모 사면에서의 국지적 파괴 양상을 세밀하게 분석할 수 있으며, 해석 결과는 보강 및 계획 수립에 대한 기본적인 자료로 활용될 수 있다.

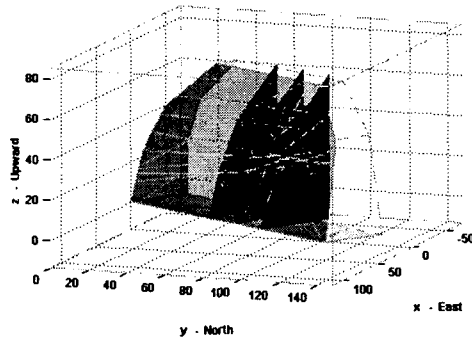


Fig. 7. Cross sections normal to the cut-face.

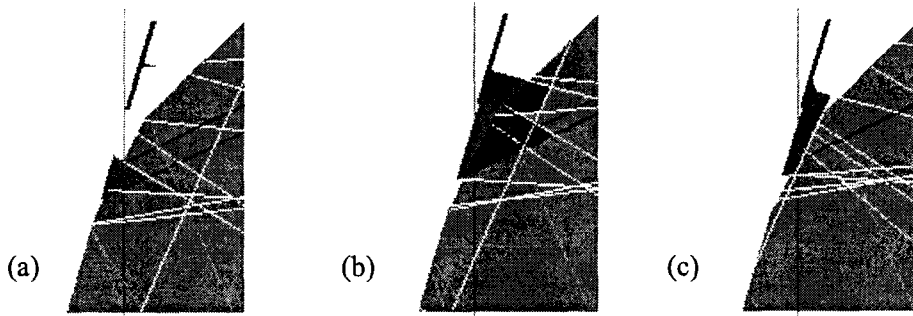


Fig. 8. Joint traces and blocks yielding slope failure.

(a) section 1 (x=50m), (b) section 1 (x=100m),
(c) section 1 (x=150m).

4. 적용사례

김해 내삼농공단지 사면(Fig. 9)은 기존에 붕괴가 발생되어 매우 불안정한 상태이며, 상부에 안산암과 하부에 화강암이 분포되어 있다. 사면 안정성 확보를 위한 보강계획 수립을 위하여 No.7과 No.9 기준선을 따라 일반 시추작업과 NSSP-1과 NSSP-2 축선을 기준으로 탄성과 탐사가 수행되었다. 이상의 암반구조 조사결과에 의거하여 잠재적 거동면이 설계된 절취면 하부 20m 지점에 위치하는 것으로 판단되었으며, 사면구배 완화에 병행하여 앵커 설치에 의한 거동 억지책이 가장 효율적일 것으로 제안되었다(Fig. 10 참조). 앵커 정착부가 위치할 지점은 설계 절취면 하부 20-30m 구간이다. 이 부분에 파쇄대가 존재하거나 절리들이 밀집되어 앵커 정착부로 불량하다면 보강 효과가 매우 저하될 수 있다. 본 연구에서는 Fig. 9에 도시된 3개 지점에서 DOM 시추작업을 수행하여 No.7 기준선을 따라 설치 예정인 앵커 정착부의 암반구조 상태와 사면 내부에서의 절리면 거동 양상을 분석하였다. 경사 60°로 시추된 BH-D호 공에서는 상부 20개 시추심도까지 파쇄대 및 코어 미회수 구간이 분포하며, 하부에서는 매우 신선하고 양호한 코어가 회수되었다(Fig. 11).

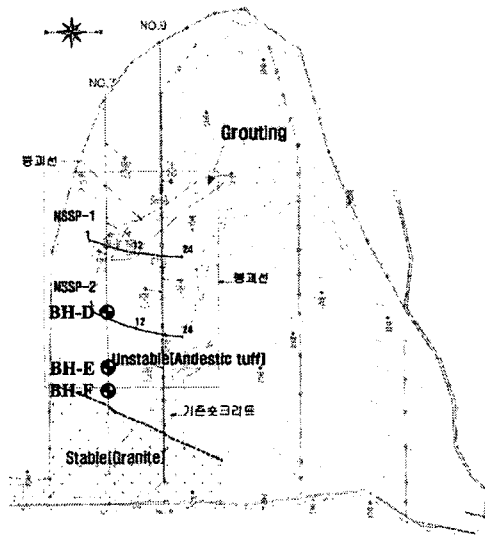


Fig. 9. Layout of Kimhae Naesam rock slope.

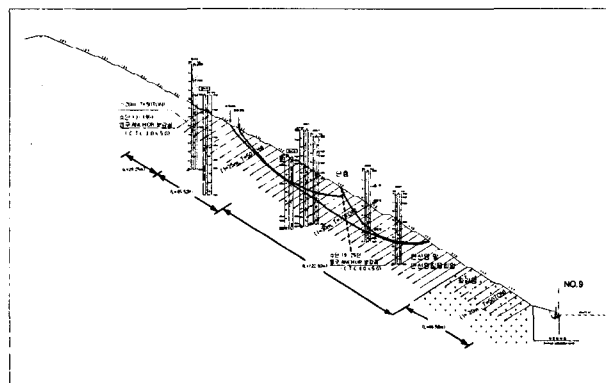


Fig. 10. Anker installation design.

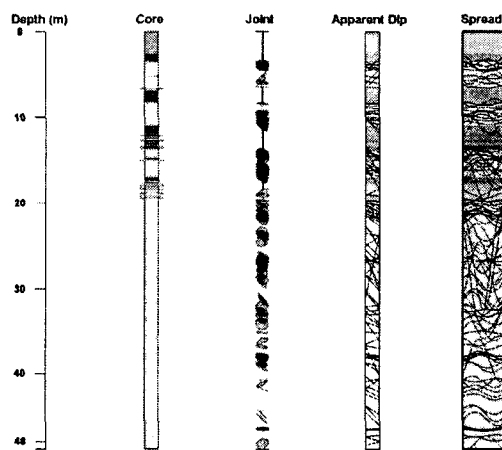


Fig. 11. Joints and borehole image of BH-D.

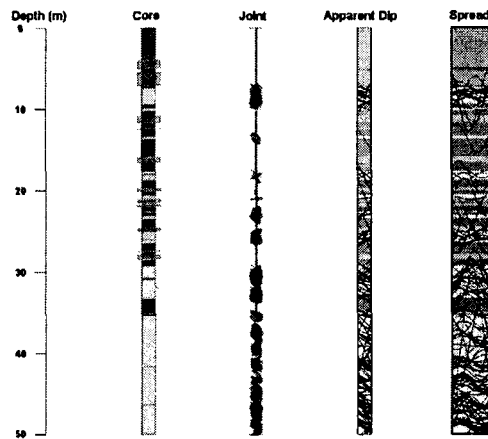


Fig. 12. Joints and borehole image of BH-E.

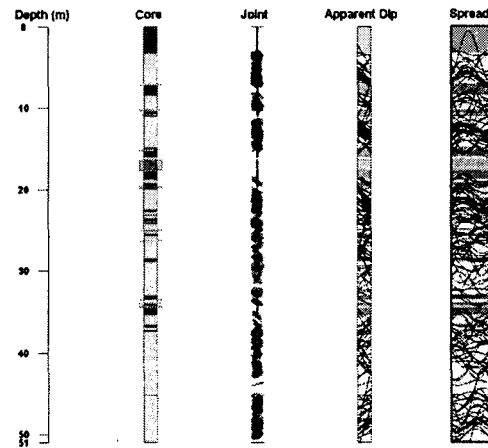


Fig. 13. Joints and borehole image of BH-F.

수직 시추된 BH-E호 공에서는 전체적으로 암반상태가 불량하여 심도 35m까지 파쇄대가 분포하고, 하부에서의 절리 출현 빈도도 상당히 높다(Fig. 12). 화강암 관입지역에 인접한 BH-F호 공에서는 암반상태가 양호하며 시추심도 15-20m 구간 및 35m 부근에서만 파쇄대가 분포한다(Fig. 13). 3개 시추공에 분포된 절리면들은 2개의 절리군을 형성하며 대표적인 방향성도 매우 유사하게 나타난다(Fig. 14 참조). 절취사면의 방향성(경사방향/경사 = 090/30.5)을 고려하여 평사투영 이론에 의거한 절리면의 거동양상을 분석하였다. 회수된 시추코어에서 관찰된 절리 충전물에는 팽윤성 점토 광물은 존재하지 않았으나 철산화물 및 방해석 등이 발견되었고 사면 전체가 일차적인 거동 이력을 지닌 점을 고려하여 내부 마찰각을 20°로 가정하였다. Fig. 14에 도시된 결과에 의거할 때 3개 시추공 내부에 분포된 절리면들은 평면 파괴를 유발시킬 가능성이 매우 높으며, 진도파괴나 썩기파괴는 유발되지 않는 것으로 분석되었다. 최상부 시추지점인 BH-D호 공에서는 시추심도 20m 영역에서 평면파괴 절리들이 집중적으로 분포하며, 하부에서는 안정한 상태를 나타낸다. BH-E호 공은 시추심도 10m 까지 코어 회수 상태가 매우 불량하며(Fig. 10 참조), 하부에서도 평면파괴 절리들이 지속적으로 분포되어 있다. BH-F호 공은 심도 10-20m 구간에서 매우 양호하며 평면파괴 절리도 제한적으로 분포되어 있다.

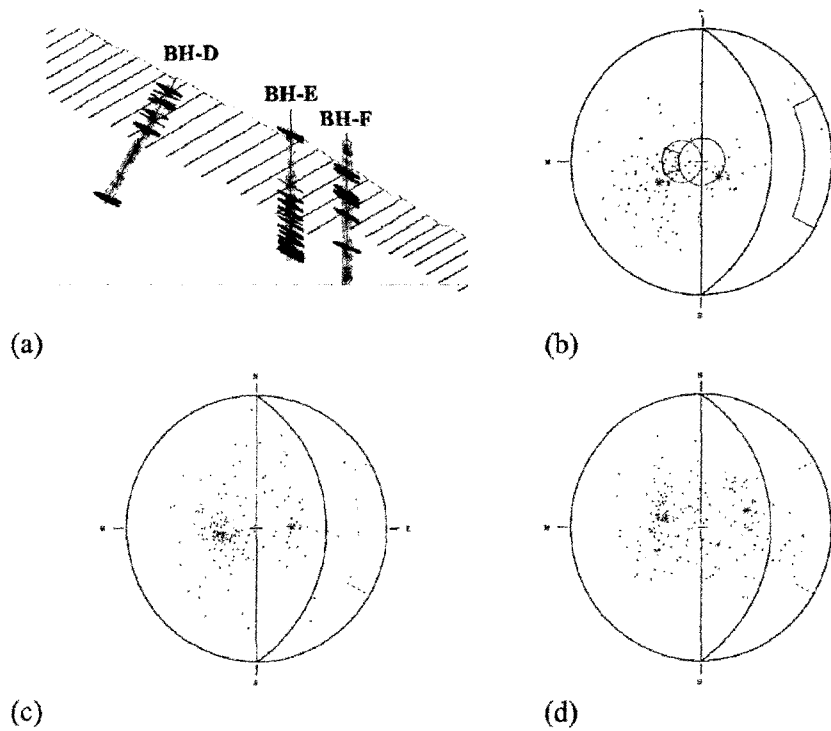


Fig. 14. Results of slope analysis using stereographic projection method.

앵커 정착부에서의 절리분포 상태를 세밀하게 분석하기 위하여 3개 시추공 지역에서 절취면에 대해 법선방향으로 횡단면을 설정하고 절리 trace 분포를 예측하였다. Fig. 15에 도시된 결과에 의거할 때 BH-D호 공과 BH-F호 공에서는 평면파괴를 유발시킬 수 있는 절리 trace들이 앵커 정착부 상부에만 분포한다. 한편 BH-E호 공에서는 정착부 상부 암반의 상태가 매우 불량하고 정착부 및 하부에서 평면파괴 절리들이 다수 분포되어 있다. 결과적으로 앵커 지지력이 저하될 수 있을 가능성이 높으며, 정착부 암반구조를 개선시킬 수 있는 추가적인 보강 대책이 요구된다.

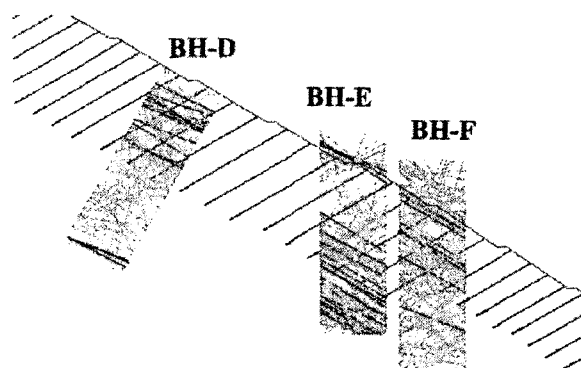


Fig. 15. Joint trace distributions on the anchor installation areas

5. 결론

현장에서 조사된 절리들의 방향성과 위치 자료를 이용하여 사면 개착면에서의 trace 분포를 예측하고 파괴거동 양상을 해석할 수 있는 기법을 개발하였다. 절리 trace 분포 예측에는 연속성을 고려할 수 있어 개별 절리면의 속성을 고려한 사면 해석을 수행할 수 있다. 또한, 사면 내에 임의의 횡단면을 설정하여 내부 암반에서의 절리분포 상태와 국지적 안정성 해석도 수행될 수 있다. 개발된 절리 trace 예측 기법을 실제 사면 현장에 적용하여 사면 안정성을 분석하였으며, 앵커 정착부에서의 암반구조 상태를 세부적으로 분석하여 보강계획의 적정성 검토가 가능하였다.

감사의 말씀

이 연구는 과학기술부 국책연구개발사업인 자연재해방재기술개발사업(과제번호: M1-0324-01-0000)의 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고 문헌

1. Barton, N., Bandis, S. C., and Bakhtar, K. 1985. Strength, deformation and conductivity of rock joints. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts*, 22(3), 121-140.
2. Fisher, R. 1953. Dispersion on a sphere. *Proceedings of the Royal Society of London*, A217, 295-305.
3. Ladanyi, B. and Archambault, G. 1970. Simulation of shear behavior of a jointed rock mass. *Proc. 11th Symp. Rock Mech.*, AIME, New York, 105-125.
4. Priest, S. D. 1985. *Hemispherical Projection Methods in Rock Mechanics*, George Allen and Unwin, London.
5. Mahtab, M. A. & Yegulalp, T. M. 1982. A rejection criterion for definition of clusters in orientation data. In R. E. Goodman and F. E. Heuze (eds), *In Issues in Rock Mechanics Proceedings of the 22nd Symposium on Rock Mechanics*, Berkeley. American Institute of Mining Metallurgy and Petroleum Engineers, New York: pp. 116-23.
6. Yoon, K.S., Cho, T.F., You, B.O. & Won, K.S. 2003. A new approach for borehole joint investigation Development of Discontinuity Orientation Measurement drilling system. *Proc. 10th Congress of the ISRM*: pp. 1355-1358.