

## 개착과정에서 인장균열이 발생한 동해고속도로 건설현장 암반사면의 거동 해석

### An Analysis of the Behavior of Rock Slope with Excavation-Induced Tension Cracks Located in DongHae Highway Construction Site

조 태 진<sup>1</sup> Cho, Tae-Chin

이 창 영<sup>2</sup> Lee, Chang-Young

고 기 성<sup>3</sup> Koh, Ki-Sung

#### Abstract

Sliding aspects of rock slope, where large-scaled tension cracks are induced during preliminary excavation, have been analyzed. Structure of rock mass is investigated by performing the electrical resistivity survey and the orientations and positions of discontinuities are measured from DOM-drilled core log. Geological evidence for primary failure movement has been detected and clay minerals which possess swelling properties are identified through XRD analysis. Slope stability is examined by considering the orientations of discontinuities and their trace distributions on the cut-face and neighboring natural slope surface. Both orientations and positions of failure-invoking discontinuity planes, traces of which are exposed within the anticipated sliding region, are concerned for analyzing the preferred sliding directions. Regional sliding vectors are assessed based on the relative positions of potential sliding planes in the boreholes and the general trend of anticipated failure movement of rock slope is also investigated.

#### 요 지

개착과정에서 대규모 인장균열이 발생한 암반사면의 파괴거동 양상을 분석하였다. 사면지역 암반의 구조적 특성 분석을 위하여 전기비저항 탐사를 수행하였으며, DOM 시추작업을 수행하여 불연속면의 방향성과 시추공 내의 출현 위치를 측정하였다. 회수된 코어를 관찰하여 개착면 및 인근 자연사면의 파괴 거동이 진행되었을 것으로 추측되는 예상 활동면의 존재성을 확인하였으며, 협재된 팽윤성 점토광물의 조성을 XRD 회절분석을 통하여 조사하였다. 사면 안정성 분석은 사면지역에 표출되는 절리들의 trace 분포 및 방향성을 고려하여 수행하였으며, 사면파괴를 유발시킬 수 있는 절리들의 시추공 내에서의 위치 및 방향성에 의거하여 심도별 지반 거동특성을 분석하였다. 시추공 별 예상 파괴 활동면의 3차원 위치 좌표에 의거하여 구역별 거동 벡터를 산정하고 예상되는 전체적인 사면거동 양상을 고찰하였다.

**Keywords** : DOM, Failure movement, Joint orientation, Rock slope, Sliding, Tension crack

1 정희원, 부경대학교 환경·해양대학 환경탐사공학과 교수 (Member, Prof., Dept. of Env. Explo. Engrg., Pukyong National Univ., chote@pknu.ac.kr)

2 정희원, 지오테크컨설파트(주) 이사 (Member, Senior Manager, Geotech Consultant Co., Ltd.)

3 정희원, LG건설 부장 (Member, Senior Manager, LG Construction Co.)

## 1. 서론

국가산업 발전을 위한 인프라 구축 및 교통망 확충 사업에 위해 개착사면의 수효와 규모가 증가하고 있다. 사면의 안정성 확보는 개착지역의 효율적 이용 측면만이 아니라 산업 정책의 원활한 추진을 위하여 필수적으로 요구되는 사항이다. 국내에서 수행된 기존의 사면해석에서는 개착지역에서 조사된 불연속면의 방향성 자료에 의존하여 반구투영법(Hoek and Bary, 1974)에 의거한 예비 안정성 해석과 Swedge 모델 등을 사용하여 개착면에 형성 가능한 썩기블록들에 대한 해석을 일률적으로 수행하여 현실성이 결여된 결과들이 도출되기도 하였다. 개착사면의 안정성 해석을 위하여는 개착 암반의 구조적 특성 분석이 수행되어야 하며, 파괴유발 요인에 대한 정밀한 분석을 위하여 불연속면의 분포 특성과 역학적 거동 양상 등이 고찰되어야 한다. 암반의 구조적 특성 해석에 대하여 Woodcock(1977)은 불연속면 법선 벡터들의 eigenvalue 산정에 의한 fabric shape 분석법을 제시하였으며, Oda(1982)는 풍화된 암반의 균열상태를 측정하여 fabric tensor를 해석하는 방법을 고안하였다. 또한, Read et al.(2003)은 반구투영도 상의 극점분포에 대한 1% contour 면적( $A_{1\%}$ )과 최대 집중도( $C_{max}$ )를 산정하여 절리분포패턴(defect pattern)을 규명하고, 사면 개착 방향성에 연관된 암반강도 추정방법을 개발하였다. 암반사면의 거동에 직접적으로 영향을 끼치는 불연속면의 전단 특성은 Barton et al.(1985)을 위시한 수많은 학자들에 의해 연구되었으며, 절리면 풍화에 의해 생성된 팽윤성 점토광물의 존재성과 사면 안정성에 대한 영향이 황등(1999)에 의해 조사되어 절리면의 전단강도 저하 및 지하수 유입에 의한 수압 효과에 의해 저경사 불연속면에서의 미끄러짐 거동 가능성이 고찰되었다. 한편, 예상 파괴면에 부분적으로 분포될 수 있는 무결암 영역에 의한 자연적 지보 효과를 고려하기 위하여 Einstein et al.(1983)은 절리암반 사면에서의 rock bridge 영향을 Lajtai(1969)의 영속성 이론에 기초하여 분석하였다.

본 연구에서는 동해고속도로 건설 현장에 위치한 일차 파괴가 진행된 절취사면의 거동 특성을 사면암반 상태 및 지반구조 조사 결과에 의거하여 분석하였다. 이를 위하여 사면 개착부와 상부 인장균열 발생지역에 대하여 지표지질조사 및 지구물리탐사를 수행하여 표층과 심부 암반의 암질 분포를 조사하였으며, DOM(Discontinuity Orientation Measurement) 시추 기법(Yoon et al., 2003)

을 활용하여 개착사면에 발달된 불연속면의 분포양상을 분석하였다. 특히, 지반구조 해석에 대한 fabric shape 및 defect pattern 산정을 DOM 시추 해석 결과를 직접적으로 활용하는 방안을 고려하여 수행하였으며, 사면 상부에 직교하는 2가지 방향으로 발달된 인장균열의 분포 원인을 사면 거동양상과 암반구조 해석 결과에 의거하여 고찰하였다.

## 2. 사면 현황

연구지역은 강원도 동해시 옥계면 동해고속도로 4차선 확장공사 현장에서 개착이 진행 중인 암반사면이다(그림 1 참조). 사면지역의 지질 현황은 고생대 평안누층군의 만항층, 금천층, 장성층 및 함백산층이 분포하고, 개착사면은 장성층 상부의 함백산층에 해당하며 변성작용을 많이 받아 상당한 부분이 편암화 내지 규암화되어 갈철광(limonite), 홍주석(andalusite), 치아스토라이트(chiastorite), 백운모(muscovite) 및 견운모(sericite) 등의 변성광물을 다량 함유한다. 세일층의 일부는 천매암화 내지 편암화 되어 편리의 발달성이 시추코아에서 육안으로 관찰되기도 하며, 1차 퇴적기원의 조암광물이나 2차 변성과정에서 생성된 광물 결정들이 풍화과정에서 이탈되어 수 mm 이내의 미세한 충식구조를 보여줄 수도 있다. 또한, 층리가 잘 발달하고 있어 퇴적암의 특징을 유지하고 있으며, 흑색 세일이나 사질 세일에는 수 cm - 30cm 두께의 탄질 세일이 협재하기도 한다. 지층은 층리면을 교차하는 절리군과 층리면에 협재하는 점토화된 탄질세일 및 지하 하부에 분포하는 석탄광 채굴적의 영향 등이 상호 복잡하게 작용하여 심한 파쇄현상

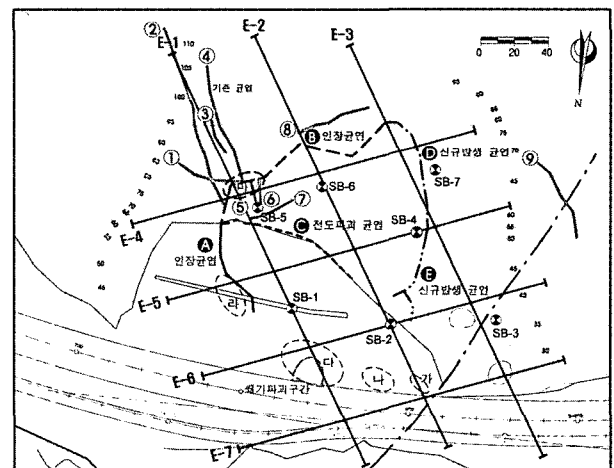


그림 1. 조사 현황도

을 보여주고 있으며, 지하수의 침투현상에 의한 차별풍화를 받아 연경이 교호하여 암질상태가 매우 불량한 분포 양상을 나타낸다.

개착사면과 우측부 자연사면에는 기존에 발생된 인장균열 및 파쇄 지역이 분포한다. 그림 1에 표기된 ㉠와 ㉡ 지역의 인장균열은 서로 연결되어 있으며, ㉢ 구간은 개착사면 상단의 절취선을 따라 발생한 전도파괴에 의한 균열이다. ㉣ 구간의 끝에서 시작된 인장균열이 사면의 좌측 상단 ㉠ 구간으로 올수록 파괴 정도가 점차 심해져서 변위가 커지는 양상을 나타내며, 사면의 중앙부 중간 소단까지 확장되어 탄질 세일이 협재된 층리면 을 따라 평면파괴 형태로 진행되어 있다. 파괴면에는 점토질화된 탄질 세일이 0.1 - 0.3m 두께로 협재되어 있고, 파괴 활동면을 중심으로 약 10m 가량의 파쇄대 또는 암반 이완대를 수반하고 있다(그림 2 참조). ㉤ 구간의 인장균열은 사면절취에 의해 표토층에서 발생한 전도파괴에 수반되었으나 규모가 미약하여 사면 안정성에는 심각한 영향을 미치지 못할 것으로 판단되었다. 그림 1에 표시된 ㉥ 구간에서는 조사기간 동안에 신규로 인장균열이 자연사면의 등고선을 거의 직각으로 횡단하는 방향으로 발달하면서 시추조사공 SB-7 호공과 SB-4 호공의 인접지역을 통과한다. 연장 약 80m인 ㉥ 구간 인장균열은 ㉣ 구간 균열의 연장선이며, 조사지역 사면 파괴활동의 지표 경계면으로 판단되었다.

사면 개착부 및 인근지역에서 기존 균열의 이력을 조사하여 9개의 균열 흔적을 발견하였으며, 분포 현황을 그림 1에 도시하였다. 9개의 기존 균열 중 등고선에 직각 방향으로 발달된 균열은 6개로 총 연장이 282m 이고, 등고선 방향으로 발생한 3개 균열의 연장은 113m로

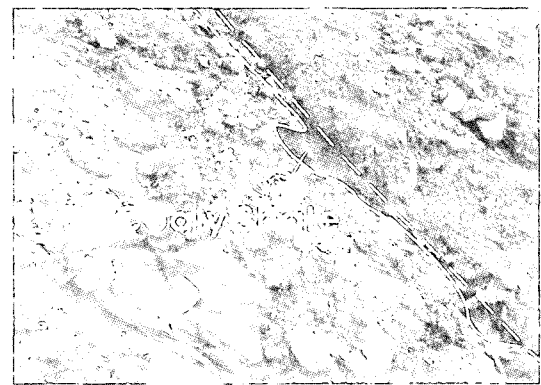
서 횡방향으로 발달되어 있다. 기존 균열의 규모는 대부분 0.2 - 0.5m의 깊이와 0.3 - 1.0m의 폭으로 발달되어 있으나, 일부 구간에서는 깊이 0.8m, 폭 1.5m 가량으로 다소 큰 규모로 관찰되기도 하였다. 이상과 같이 조사된 인장균열 및 기존 균열의 발달 양상과 개착면 일대의 지형고도 변화를 고려할 때 사면 거동은 북향인 개착면에서 뿐만 아니라 우측 상부의 자연사면에서도 발생할 수 있다고 판단되었다.

개착사면은 인장균열에 의하여 심하게 교란되었거나 파쇄현상 및 풍화작용에 의하여 양호한 암질상태를 유지하지 못하고 있어서 조사지역 일대에 분포하는 층리, 절리 및 지질구조대 등의 방향성 측정을 암질상태가 비교적 양호한 가 - 마 구역에서(그림 1 참조) 수행하였다. 절개면에 분포하는 층리면의 대표적인 방향성은 N26E/20NW 이며, 5개 구역에서 점진적인 변화 양상을 나타낸다. 개착면 우측 하부인 가 구역에서의 층리면 방향성은 N10W/25SSW 로 측정되었다. 층리면의 주향은 개착면 좌측 상부 지역으로 갈수록 시계방향으로 회전하여 최상부인 마 구역에서의 층리면 주향은 N48E 이다. 한편, 가 구역에서 25SSW인 층리면의 경사는 나 - 다 구역에서 20NW - 13NW 로 경사각이 감소하다가 라 - 마 구역에서는 27NW - 46NW 로 급격하게 상승하여 전체 구역에 분포된 층리면에 습곡구조가 형성되어 있는 것을 지시한다. 가 - 마 구역에서 조사된 절리면들도 구역별로 2-3 개의 절리군을 형성하고 있으며, 대표 군 방향성도 서로 상이하다. 이들 절리군들은 층리면과 사교하면서 암반을 블록으로 깨어지게 하여 암질 상태가 불량하게 되는 요인으로 작용하고 있다.

3개 조의 단층면이 개착된 암반사면의 우측 하단부인



(a) 미끌림면과 미끌림조선(Slickenside : N47E/50NW, Striation : 340/48)



(b) 협재된 점토질화된 탄질 세일

그림 2. 인장균열의 파괴면

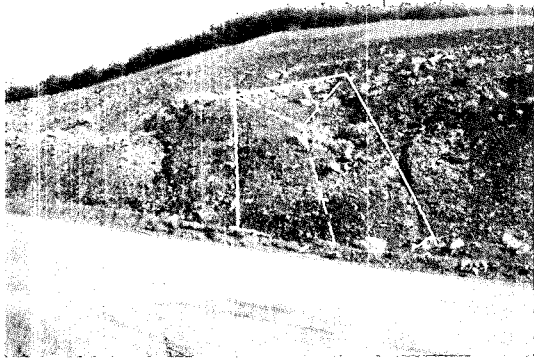


그림 3. 단층면에 연계되어 형성된 썩기파괴

가, 나 및 다 구역에서 관찰되었다. 암반사면의 절개면과 거의 평행하게 발달된 나 구역 단층면의 방향성은 N82E/43NW이고, 단층 이동방향을 지시하는 단층조선의 방향성은 352/43이다. 사면의 좌측 상단에서 중앙 하단부로 발달된 다 구역 단층에는 단층활면(slickenside)이 잘 발달되었으며, 단층면의 방향성은 N50W/50NE이고 단층조선의 방향성은 047/48을 나타내고 있다. 특히 다 구역 단층면은 이와 교차하는 층리면 및 절리군에 의하여 제 2소단까지 썩기파괴를 유발하였다(그림 3 참조).

### 3. 지반구조

#### 3.1 전기비저항 탐사

절취사면 지역에 7개 탐사측선을 설정하여(그림 1 참조) 전기비저항 탐사를 수행하였으며, 종합된 탐사 결과를 그림 4에 도시하였다. 본 조사에서는 쌍극자 배열(Dipole-Dipole array) 방법을 사용하였으며, 총연장 1,640m를 격자 상으로 설정하여 단위 전극간격 10m로 탐사를 시행하였다. 탐사 진행방향에 따른 왜곡현상이나 지형영향으로 오인될 수 있는 이상대의 정밀한 위치 선정을 위하여 각 측선에 대하여 측선 중간부 25m 간격으로 측량된 자료를 이용하여 지형보정을 수행하였다.

E-1 측선은 개착사면의 상부에서 북서방향으로 하향 하면서 개착면 중앙부를 통과하는 270m 연장을 갖는다. 탐사결과 측선의 시·종점부는 높은 비저항값을 가지는 비교적 양호한 암반상태이나 측선 중앙부에는 상대적으로 낮은 비저항값을 나타내는 구간이 광범위하게 발달하고 있다. 사면 파괴영역과 관련될 것으로 예상되는 이상대 영역이 측선 중앙부 60 - 195m 구간, 지표 10 - 15m 심도에 1,000ohm-m 이하의 저비저항값으로

나타나며, 측선 시점에서 60m, 80m, 215m 부근에서 지질구조대로 예상되는 이상대가 분포한다. 개착면 상부 지역에 설정된 E-2 측선에서는 사면파괴 활동영역으로 예상되는 이상대가 측선 중앙부 40 - 220m 구간의 지표 하 15 - 20m 지점까지 저비저항값으로 나타난다. 시추 조사에 의하면 파쇄가 심한 암반상태로 이루지고 있으며 탄질을 협재한 흑색세일층이 분포되어 있다. 종점부 240m 지점의 지질구조는 폭 30m 정도의 파쇄대를 수반하며 정밀지질조사에서 파악된 가 구역의 단층으로 연장성이 양호하여 E-3측선에서도 동일한 지질구조대가 나타난다. E-4 측선에서는 사면 파괴 활동영역과 관련될 것으로 예상되는 이상대가 측선 중앙부 50 - 180m 구간의 심도 10m 정도에서 나타난다. 시추조사 결과와 비교하면 이상대 영역은 탄질세일이 나타나고 매우 파쇄가 심한 암반으로 사면파괴에 대한 예상 활동영역으로 추정된다. 측선 중앙부 예상 평면파괴 활동영역 하부에서 낮은 비저항값을 나타내는 구간이 부분적으로 나타난다. 저비저항값을 나타내는 원인은 측선 주변에 발달한 인장균열이 강우시 지표수의 이동 통로 역할을 하여 하부의 절리틈에 점토질 물질을 침전시켜 낮은 비저항값을 나타내는 것으로 판단되었다. E-5 측선 시점부는 높은 비저항값이 분포하는 균질한 암반상태가 분포하나 중앙부 이후는 불규칙적인 비저항값 분포를 나타낸다. 사면 파괴 영역과 관련될 것으로 예상되는 저비저항 영역이 측선 중앙부 40 - 175m 구간의 15 - 25m 심도에서 나타난다. 지질구조대는 측선 시점부 35m에서 주

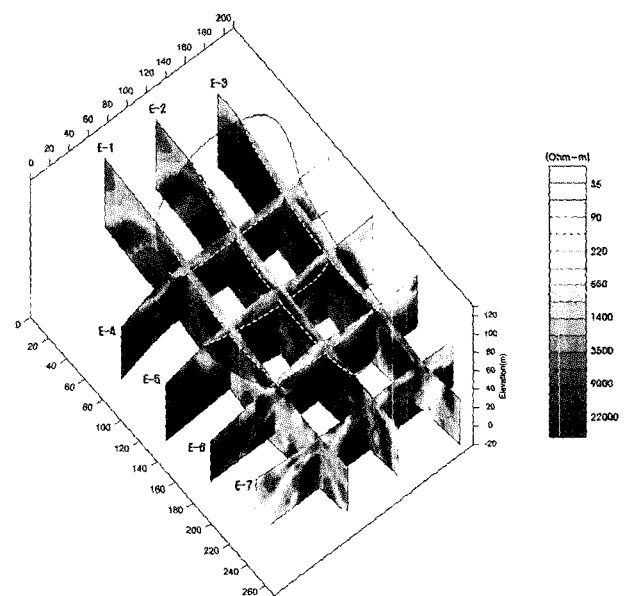


그림 4. 전기비저항 탐사 결과

변부 파쇄대 구간을 수반하여 나타나며, 연장성이 매우 양호하여 E-4, 6, 7 축선에서 모두 관찰된다. E-6 축선 시점부 30 - 50m 구간의 상부 파쇄대 지역은 지표에서 관찰된 계획사면 하단에서 나타난 켜기파괴 영역으로 지하 하부까지 연장되지는 않는다. E-7 축선 중앙부에서는 가장 높은 비저항대가 위치하고, 시·종점부에는 상대적으로 낮은 비저항대가 분포하고 있다. 사면 파괴면과 연관되는 비저항 경계면이나 이상대는 나타나지 않았다. 중앙부 125m 지점의 지질구조대는 E-2, 3, 6 축선에서도 관찰된 가 구역에서의 단층이다. 이상과 같은 탐사결과를 종합할 때 조사지역은 국지적으로 복잡한 구조양상을 보여주고 있으며, 전반적으로 하부 보다는 상층부에서의 암반이 파쇄가 진행된 불량한 상태를 나타낸다. 예상파괴 활동면은 대체로 표층 심도 10 - 20m 구간에서 형성되는 것으로 고찰되며, 활동면 영역은 장경 200m, 단경 150m의 타원형 형상으로 나타난다.

### 3.2 DOM 시추조사

조사지역은 암질상태가 매우 불량하며 일차적 사면 거동 및 광산 채굴적 영향에 따른 이완대가 분포하여 시추공 영상촬영(BIPS : Raxx, 1997)이나 초음파주사 텔레뷰어 검층(ATV : Zemanek & Caldwell, 1969)을 수행하여 암반의 불연속면 특성을 조사하기는 불가능하였다. 이와 같은 기존 시추공 탐사 장비들의 현장 적용성 한계를 극복하기 위하여 시추코어를 직접 관찰하여 사면의 실제 위치에 대비한 불연속면의 방향성을 측정할 수 있는 DOM 시추조사를 수행하였다. 시추공의 위치는 전기비저항탐사에서 조사된 파괴활동면, 이완대 및 지질구조대 등의 위치를 확인할 수 있는 7개 지점을 선정하였으며(그림 1 참조), 시추심도는 코어 관찰을 통해 인장균열의 파괴면이나 예상 파괴활동면을 확인할 수 있도록 사면 하단의 개착 계획고까지 굴진하였다.

절취사면 중앙부(SB-1 호공)에서 지하 36m 깊이까지 DOM 시추조사를 수행하였으며, 시추공내의 불연속면(이하 절리로 지칭) 발달 양상을 개별 절리면의 방향성과 위치에 근거하여 대수적으로 모사하여(Yoon et al., 2003) 그림 5에 도시하였다. 절리들은 표토층 이하 깊이에서 비교적 일정한 출현 빈도를 나타내며, 일부 구간에서는 70° 내외의 높은 겹보기 경사를 지니고 있으나 대체적으로 40° 이내의 저경사로 발달되어 있다. SB-1 호공에서 관찰된 총 177개 절리면을 대상으로 군집(clustering)

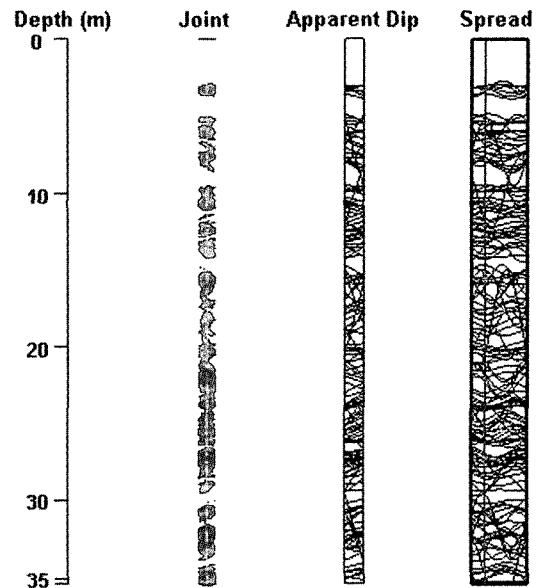


그림 5. SB-1 호공에서의 절리 발달 상태

알고리즘(Mahtab & Yegulalp, 1982)을 활용하여 절리군 집성을 분석하였으며, 군집 알고리즘에 제시된 cone angle = 15°를 적용하여 해석된 절리군 방향성 결과와 경사방향에 대한 rosette diagram을 그림 6에 도시하였다. 전체적으로 절리 극점들이 1개의 중심축에 군집되어 분포하며, 대표적인 방향성은 경사방향/경사 = 300.0/7.9로 해석되었다. 절리 방향성 해석 결과에 의거하면 절리들의 경사는 일반적으로 낮으며, 경사방향은 230 - 070°의 넓은 범위에서 분포되어 있다. 이와 같은 현상은 시추 코어에서 관찰된 절리들이 대부분 구조작용을 받은 층리면을 따라 발달하였기 때문인 것으로 판단되었다. 시추 조사에 의해 파악된 SB-1 호공 하부에서의 예상파괴 활동면은 지표하 7.7 - 9.5m 구간에 위치하며, 탄질세일이 협재되어 있다. DOM 시추작업에 의해 코어 회수율은 89.9%로 양호하였으나, 전체적인 암반 상태는 평균 RQD = 30.7%로 불량한 상태를 나타내었다.

개착면을 포함한 잠재적 활동 영역에 설정된 6개 시추공(SB-2 - SB-7)에 대해서도 동일한 분석을 수행하였으며, 각 시추공별 절리 군집성 및 예상 파괴 활동면 현황을 표 1에 수록하였다. 전체 시추공에서 절리면들은 경사방향/경사 = (296 - 316)/(08 - 33) 범위에서 유사한 방향성을 나타내고 있으나, 잠재적 활동 영역의 우측 경계부에 설정된 SB-3 및 SB-7 호공에서는 상이한 방향성을 갖는다. 상대적으로 사면 활동영역 상부에 위치한 SB-7 호공에서는 저심도 구간의 절리들이 경사방향 220 - 250° 범위에 분포하기도 하지만 대체로 030 - 060°

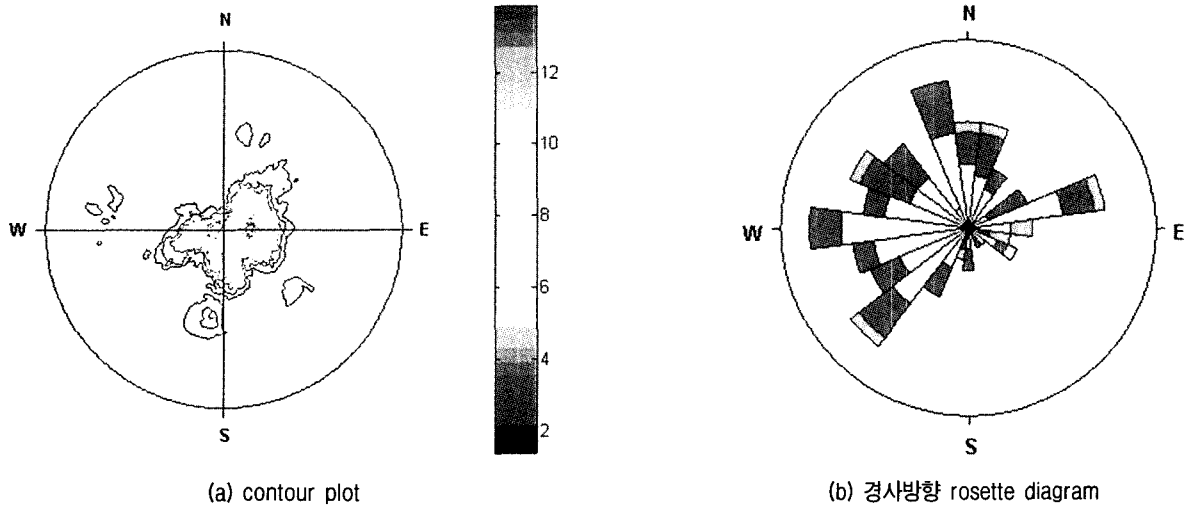


그림 6. SB-1 호공의 불연속면 방향성 분석 결과

표 1. 시추공별 조사 현황

공 번	대표 방향성	예상 활동면 심도(m)	RQD(%)
SB-1	300/08	7.7~9.5	30.7
SB-2	301/01	13.0~14.5	32.5
SB-3	241/20	-	16.6
SB-4	316/10	19.4~21.4	19.0
SB-5	296/22	7.8~9.8	19.4
SB-6	307/33 236/45	6.5~8.5	14.8
SB-7	040/07	-	35.8

사이에 집중되는 양상을 나타내고, 경사도 저경사에서 고경사까지 다양하게 분포한다. 대표적인 절리군 방향성은 040/07이며, 이와같이 층리면에 연관된 절리 방향성이 변화된 것은 전술한 습곡 구조의 영향을 지배적으로 받았기 때문인 것으로 고찰되었다. 특히, SB-3 호공은 지질구조대에 인접되어 단층 변위의 영향을 받았으며, 대표적 절리군 방향성은 241/20을 갖는 것으로 분석되었다.

DOM 시추 코어에서 측정된 절리 자료에 근거하여 현장암반의 fabric shape(Woodcock, 1977)을 분석하였다. 이를 위하여 시추공 별로 절리 방향성에 대한 orientation tensor(Sheidegger, 1965)를 형성하고 3개의 eigenvalue ( $S_1 \geq S_2 \geq S_3$ )를 산정하였으며, 3개 변수를 2차원적으로 제도하는 two-axis ratio 도해법을 활용하여 7개 시추공에 대한 해석 결과를 그림 7에 도시하였다. Watson(1966)은 3개 eigenvalue의 상대적인 크기와 fabric shape이 직접적으로 연관된다고 보고하였다 : 불연속면의 분포양상에 따른 암반구조가 cluster 형상인 경우  $S_1 > S_2 \approx$

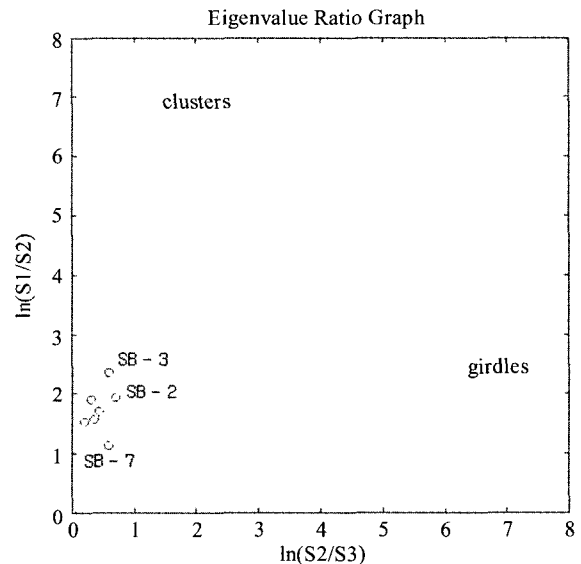


그림 7. 시추공별 fabric shape 해석 결과

$S_3$ , girdle 형상인 경우에는  $S_1 \approx S_2 > S_3$ . 그림 7에 도시된 결과에 의하면 조사지역 암반은 cluster 형상이 우세한 구조적 특성을 나타내며, 편향도 강도 지수  $C = \ln(S_1 / S_3)$  도 2 정도이어서 절리 방향성이 random - strongly preferred 분포 양상을 보여준다.

조사지역 암반에 분포된 절리들의 편향성은 Read et al.(2003)이 제시한 defect pattern 분석 결과에 의해서도 확인된다. McMahon(1968)의 초기 Joint Dispersion Index 개념을 바탕으로 Read et al.(2003)은 반구투영도 상에서 1% contour 면적( $A_{1\%}$ )을 산정하여 defect pattern을 구분하였다. 본 연구에서는 반구투영도에서 경사각에 따른 투영면적 왜곡과 contour 면적 산정에 대한 부정

확성을 타파하기 위하여 투영도 상에 100개의 동일한 투영 영역을 갖는 격자를 설정하고 7개 시추공에서 조사된 절리 방향성에 따른 defect pattern을 산정하여 그림 8에 도시하였다. 조사 영역의 중앙부에 위치한 시추공 SB-1, 2, 4, 5에서는(그림 1 참조)  $A_{1\%} \approx 40\%$  정도이며, Read et al.(2003)의 분류에 의하면 random - moderately

regular pattern 으로 해석된다. 조사지역 최상부에 위치한 시추공 SB-6, -7 및 최하부의 SB-3 에서는  $A_{1\%} = 18 - 26\%$ 이며 highly regular pattern을 나타낸다. 이상과 같은 분석 결과에 의거할 때 조사지역의 암반구조는 구역별로 상당 수준 편향되어 있는 것으로 고찰되었다.

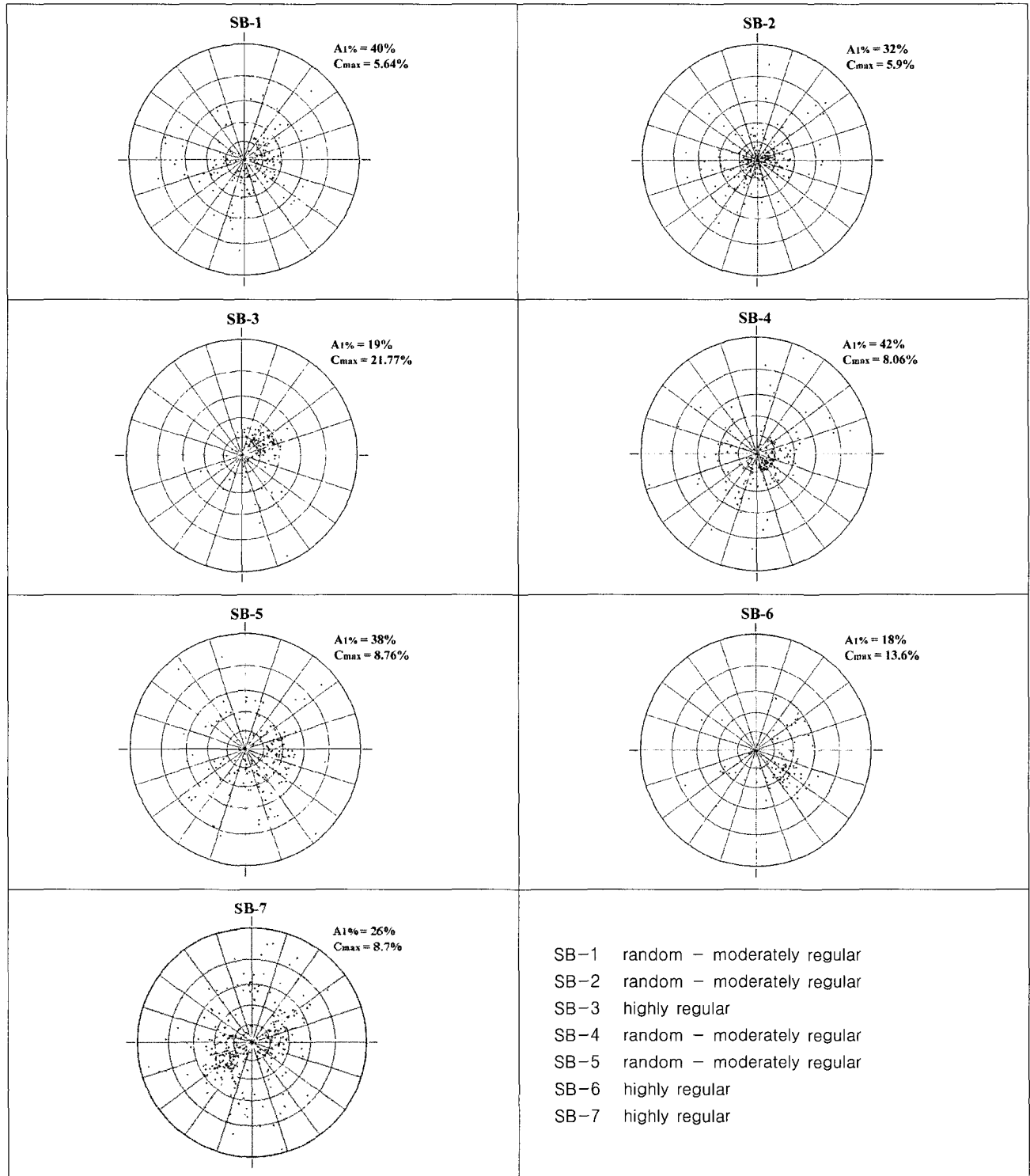


그림 8. 시추공별 defect pattern 분석 결과

### 3.3 X-ray 회절분석 및 전자현미경 관찰

조사지역의 층리면에는 수 cm - 30cm 내외의 두께를 갖는 탄질 셰일이 협재되어 있으며, 인장균열 파괴면에서도 탄질 셰일이 거의 점토질화된 상태로 육안 관찰되고 있다. 예상파괴 활동면에 분포하는 탄질 셰일의 구성 광물 내에 팽윤성 점토광물의 존재성 확인을 위하여 DOM 시추 조사공에서는 SB-2 호공의 14.2m, SB-5 호공의 9.2m 심도와 개착사면의 좌측 상단부 및 우측 하단부에서 4개 시료를 채취하여 X선 회절(XRD) 분석 및 주사전자현미경(SEM) 관찰을 실시하였다. SB-2 호공에서 채취된 시료에 대한 XRD 분석회절도와 SEM 촬영사진을 그림 9에 수록하였으며, 4 개 채취시료에 대하여 XRD 분석에 의해 판별된 구성 광물을 표 2에 수록하였다. XRD 분석결과 조사지역의 예상 파괴활동면에 분포하는 점토질화된 탄질 셰일에는 전반적으로 팽윤성 점토광물인 카올린나이트(kaolinite)가 함유되어 있으며, 판상으로 쪼개지는 성질을 갖는 백운모(muscovite)와 미끌림 성질의 납석(pyrophyllite) 등의 변성광물도 함유되어 있다. 점토광물들은 지표수 및 지하수와 반응하여

팽윤되어 전단강도를 급격히 저하시키고 변성광물의 미끄러짐 거동을 촉발시켜 사면 파괴활동에 유해한 요소로 작용하였을 것으로 판단되었다.

### 4. 사면 안정성

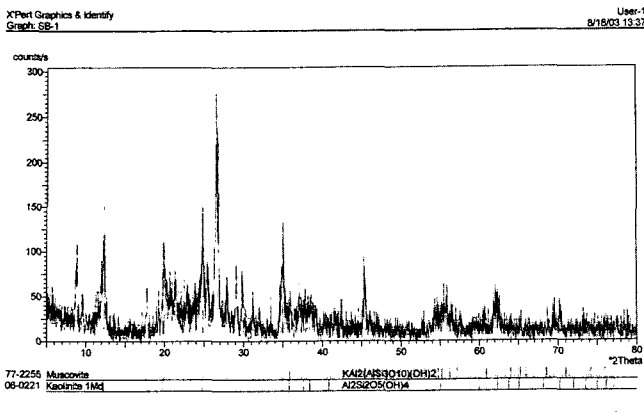
조사지역의 지반구조 특성과 DOM 시추코어에서 조사된 불연속면들의 방향성에 의거하여 사면 안정성 해석을 수행하였다. 7개 시추공에서의 불연속면 극점 분포는 대체로 30° 이내의 저경사에서 높은 집중성을 나타내며 경사방향도 개착지역의 미끄러짐 거동을 유발시킬 수 있는 범위 내에서 우세한 편향성을 나타내어 사면 해석은 개착된 암반사면 및 개착면과 인접한 자연사면을 대상으로 수행하였다. 예상 파괴활동면에 협재된 탄질 셰일에는 카올린나이트(kaolinite) 등의 팽윤성 점토광물이 함유되어 있으며 조사지역에 분포하는 암반의 상태가 파쇄대 및 풍화작용을 심하게 받고 있는 점을 고려하여 사면안정 해석에 대한 절리 마찰각( $\phi$ )은 15°로 적용하였고 점착력은 무시하였다.

#### 4.1 개착사면

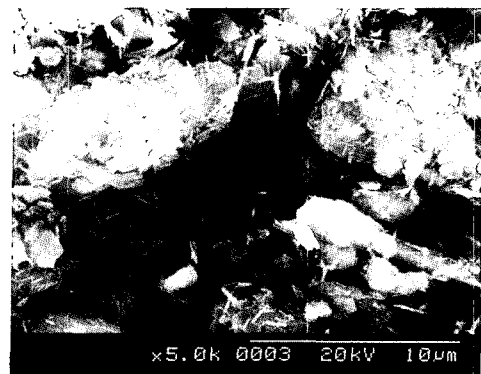
현장 측량자료를 기준으로 개착사면의 방향성은 경사방향/경사 = 359.9/28.1로 산정되었다. DOM 시추 코어에서 관찰된 조사지역에 분포하는 전체 1354개 불연속면들은 단일 절리군을 형성하고 있으며, 대표 방향성은 경사방향/경사 = 302/09으로 분석되었다. 대표 절리군 방향성을 이용하는 기존의 반구투영법에 의거한 사면해석으로는 평면파괴나 전도파괴가 발생되지 않을

표 2. XRD 분석 결과

채 취 장 소	구 성 광 물
SB-2 호공 (심도 14.2m)	kaolinite, muscovite
SB-5 호공 (심도 9.2m)	kaolinite, muscovite, quartz
개착 사면 (좌측 상단부)	quartz, pyrophyllite, muscovite
개착 사면 (우측 하단부)	kaolinite, muscovite, quartz



(a) XRD 회절도



(b) SEM 사진

그림 9. SB-2 호공에서 채취된 시료에 대한 XRD 분석 및 SEM 촬영 결과



것으로 분석된다(그림 10 참조). 그러나, 개별 절리들의 방향성을 고려할 때 약 30여 개의 불연속면들이 평면파괴를 유발시킬 가능성이 있으며, 전도파괴와 연관된 불연속면은 6개가 분포하는 것으로 나타났다. 층리면과 연관되어 발달된 불연속면의 형상을 원형으로 가정하고 절리 반경을 75m로 설정하여 개착된 암반사면 영역에 표출되는 불연속면의 trace를 고찰한 결과 평면파괴 유발 요인을 갖는 불연속면은 15개, 전도파괴에 연관된 불연속면은 1개가 발달하는 것으로 나타났다(그림 11). 이들 불연속면 가운데 절개부의 우측 중간부에 분포하는 전도파괴와 관련된 불연속면은 출현 빈도수가 낮아 파괴유발 가능성이 낮고, 평면파괴의 유발 가능성은 상대적으로 높은 것으로 판단된다. 개착면 좌측 상단에서부터 우측 하단부로 평면파괴를 유발시킬 수 있는 절리 수효가 증가하는 양상을 나타내며, 우측 최하단부에 미

끌어짐 면이 집중되어 분포하고 있음을 보여주고 있다. 사면해석에 대한 반구투영이론(Hoek & Bray, 1974)에서는 단일 절리군이 형성된 경우 썩기파괴 해석이 불가능하지만 본 연구에서는 개착사면에 표출되어 교차되는 2개 절리면의 교선 방향을 산출하여 썩기블록 형성 가능성을 고찰하였다. 그림 12(a)에 도시된 바와 같이 개착면 상에서 불연속면의 trace 교차선에 의해 다수의 썩기블록 형성이 가능한 것으로 분석되었다. 3개 절리들의 상호 교차에 의해 형성되는 사면체 블록들은 개착면 중심부에 집중되어 분포되며, 우측 하단부에도 다소 발달한다. 잠재적 썩기블록들은 밑면들의 교차선인 썩기블록 기저선을 따라 거동한다. 개착면에 분포하는 잠재적 블록들의 기저선 방향을 산정하여 rosette diagram 상에

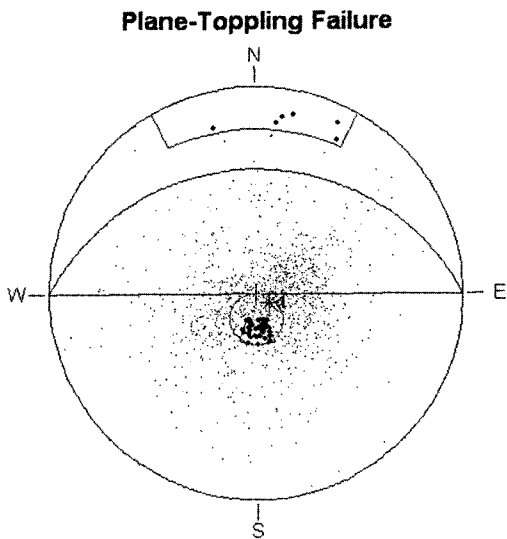
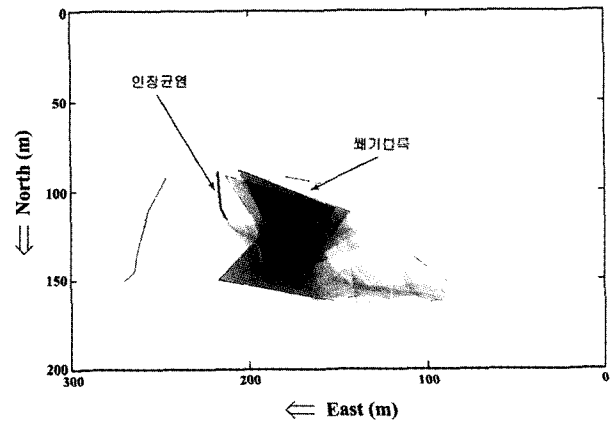


그림 10. 개착사면에 대한 평면 및 전도파괴 해석 결과



(a) 썩기블록 분포

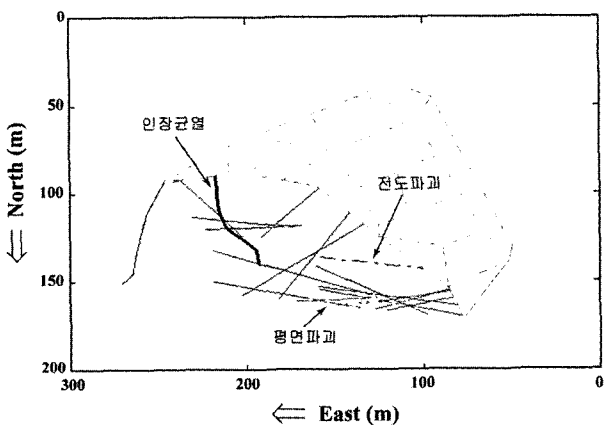
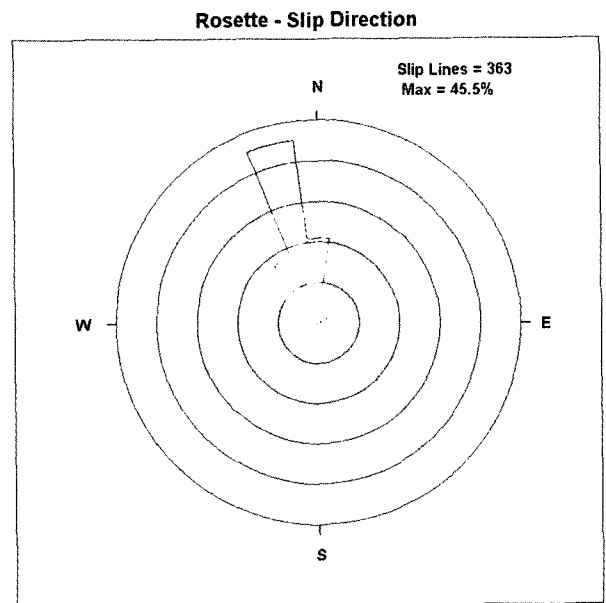


그림 11. 개착사면의 평면파괴 및 전도파괴와 관련된 불연속면 trace



(b) 기저선 방향

그림 12. 개착사면에서의 썩기파괴 해석 결과

도시하였다(그림 12(b)). 썩기블록 기저선의 미끄러짐 방향을 고려할 때 썩기블록들은 절개면의 법선 방향인 북쪽을 기준으로 약간 우측인 서쪽방향으로 지동하는 양상을 보이는 것으로 분석되었다(그림 12(b)).

#### 4.2 자연사면

개착사면 우측부의 자연사면에 대한 안정성 해석을 수행하였다. 미개착 지역인 자연사면의 현장 실측자료에 의거할 때 SB-4 호공을 포함하는 4각형 구역이 평탄하여 사면 안정성 검토를 위한 영역으로 설정하였다(그림 13). 자연사면의 경사방향/경사는 실측된 측량자료를 기준으로 325.0/17.0으로 산정되었다.

DOM 시추 조사에서 측정된 총 1,354개의 불연속면 중에서 절리 반경을 75m로 설정하였을 때 357개의 절리 trace가 자연사면에 표출되었다. 자연사면의 방향성을 고려한 반구투영해석 결과 불연속면의 대표 방향성에 따른 평면파괴나 전도파괴의 가능성은 희박한 것으로 분석되었으나, 약 10개의 절리면들이 사면경사 17° 및 마찰각 15°의 매우 제한된 파괴영역에서 평면파괴를 유발시킬 수 있으며, 전도파괴에 연관된 절리들은 발견되지 않았다. 평면파괴에 연관된 절리 중에서 자연사면에 표출된 4개 절리의 trace들을 그림 13에 도시하였다. 평면파괴에 연관되는 불연속면들은 자연사면의 좌측 상단부에서 우측 중앙부로 발달하는 분포 양상을 나타내고 있다. 자연사면에 표출된 불연속면의 수효는 4개에 불과하지만 사면해석에 적용된 파괴기준이 매우 제한되어 있으며 절리 trace들의 연장성도 매우 커서 평면파괴를 유발시킬 수 있는 가능성은 높은 것으로 판단되었다.

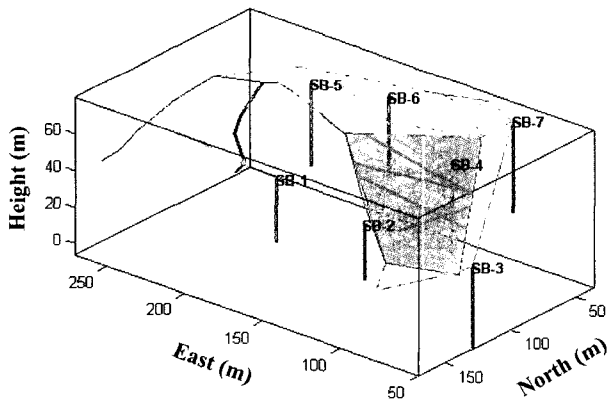


그림 13. 자연사면에서의 불연속면 trace 분포

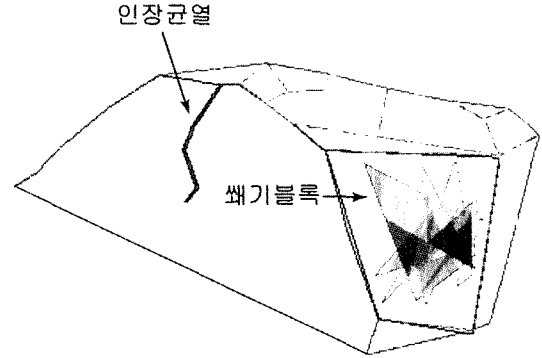


그림 14. 자연사면에서의 썩기블록 형성도

자연사면에 표출된 불연속면의 교차에 의해 다수의 썩기블록들이 형성될 가능성이 있는 것으로 분석되었다. 썩기블록들의 기저점은 개착사면과의 인접지역 일부에 분포하기도 하나 블록들은 전반적으로 자연사면 중앙부에 발달하고 있다(그림 14). 그러나, 거동 양상의 기준인 블록 기저선의 선경사가 매우 낮으며(15 - 17°) 썩기효과(Hoek & Bray, 1974)에 의한 자연 억제력 영향으로 실제 썩기파괴 가능성은 희박할 것으로 판단되었다.

#### 5. 사면거동 해석

개착면을 포함한 전체사면 영역에서의 파괴 활동면의 범위와 파괴형태 등을 고찰하기 위하여 개착사면 및 자연사면 영역에 대해 경사방향/경사 =  $(325 - 359)/(17 - 28)$ 의 포괄적인 사면 방향성 영역을 설정하여 거동양상을 분석하였다. 이를 위하여 일차적으로 전체 사면영역에서 평면 및 전도파괴를 유발시킬 수 있는 절리 trace 분포를 추출하고, 이들 불연속면들의 시추공별 분포도를 그림 15 및 16에 도시하였다. 개착사면 지역에서는 인장균열이 발생한 좌측 상단부와 우측 중앙 및 하단부에 파괴를 유발시킬 수 있는 불연속면이 집중되는 양상

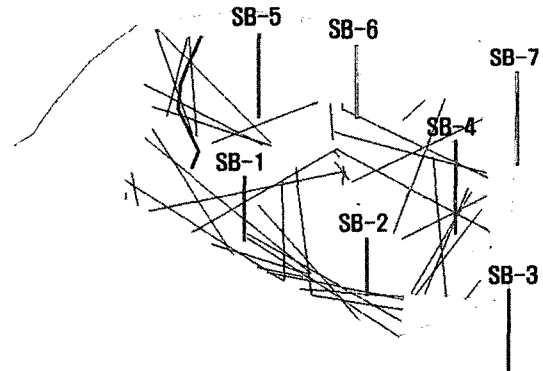


그림 15. 파괴 유발 불연속면들의 trace 분포

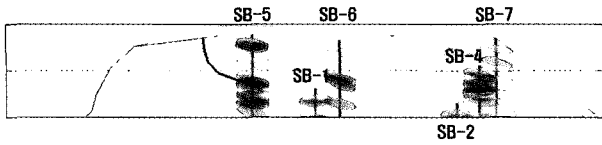
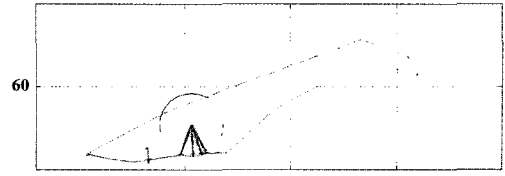


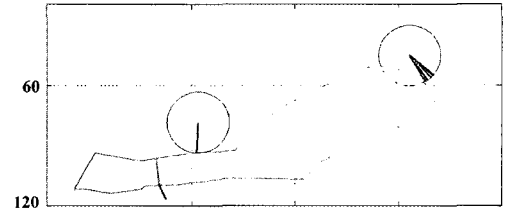
그림 16. 시추공별 파괴 유발 불연속면 분포

을 보이면서 자연사면 지역으로 분포 빈도가 증가하며, 자연사면 지역에서는 불연속면들의 연장성이 절개면으로 향하는 방향성을 보여준다. 이와 같이 인접한 경사면에서 파괴를 유발시킬 수 있는 불연속면 방향성의 점진적인 변화는 조사지역에 발달된 향사구조의 습곡과 연계되어 있는 것으로 사료된다. 시추공별 파괴유발 불연속면의 집중도를 고찰할 때, 개착사면에 발생한 인장균열의 파괴활동은 SB-5 호공 인접 구역에 분포하는 상대적으로 고경사각을 갖는 불연속면의 영향을 지배적으로 받았기 때문인 것으로 판단된다. 또한, SB-1, 6 및 SB-2 호공의 주변에 발달된 불연속면들에 의해 형성된 파괴 활동면은 서로 연결되어 미끌어짐면을 형성하고 있는 것으로 파악되며, SB-3 호공의 인접 구역에 발달된 불연속면은 사면거동에 대한 영향이 매우 미약한 것으로 분석되었다.

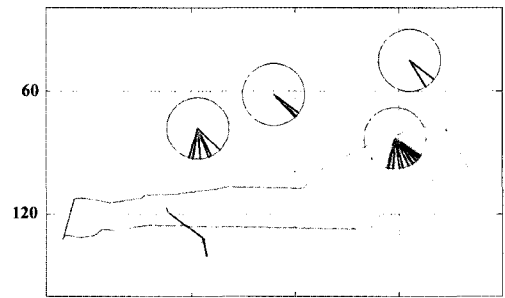
전체사면의 거동 양상을 파악하기 위하여 파괴유발 불연속면의 위치를 표고 구간별로 구분하고 사면의 거동 양상을 주도하는 불연속면 경사방향의 변화 추세를 고찰하였다. 전체사면의 거동에 직접적인 영향을 끼치지 않는다고 판단된 SB-3 호공은 분석에서 제외시켰으며, 사면파괴에 대한 고도 영역에 해당하는 표고 40 - 80m 사이에서 각 10m 구간마다 사면거동 방향을 분석하였다(그림 17). 최상부인 표고 70 - 80m 구간에서는 SB-5 호공에 분포하는 불연속면에 의하여 사면 거동이 유발되며, 거동 방향은 개착사면 방향을 기준으로 약간 오른쪽으로 향한다. 표고 60 - 70m 구간에서는 SB-7 호공 주변 지역에서 오른쪽 방향으로 경사진 불연속면에 의해 사면거동이 진행된다. 표고 50 - 60m 구간에서는 개착사면 및 자연사면 영역에서 파괴유발 불연속면이 발달하고 있으며, 전반적으로 오른쪽으로 경사방향이 발달된 불연속면이 우세하게 분포한다. 최하부인 표고 40 - 50m 구간에서는 전체 사면지역에서 파괴유발 불연속면이 분포하고 있으며, 중앙 하단부의 일부에서는 절개면 방향을 향하고 있으나, 그 외의 대부분에서는 경사방향이 우측으로 발달되어 있다. 이상의 구간별 파괴유발 절리들의 경사방향을 종합할 때, 6개의 시추조사공



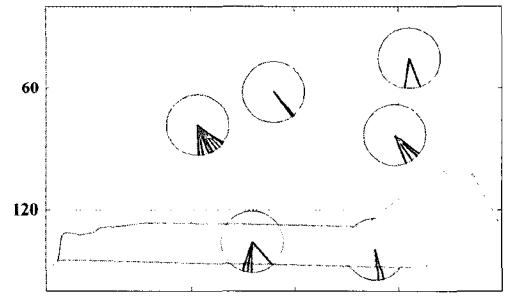
(a) 표고 70 - 80m



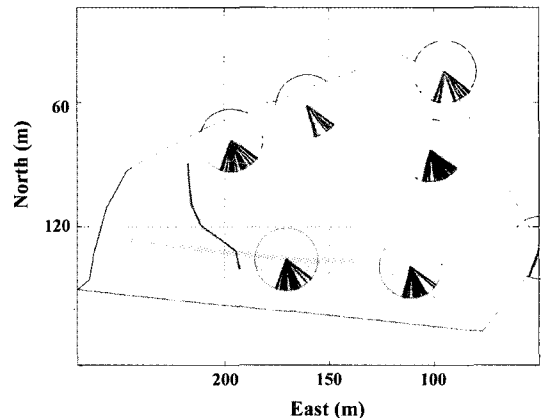
(b) 표고 60 - 70m



(c) 표고 50 - 60m



(d) 표고 40 - 50m



(e) 전체 구간(표고 40 - 80m)

그림 17. 파괴유발 불연속면의 경사방향 분포도

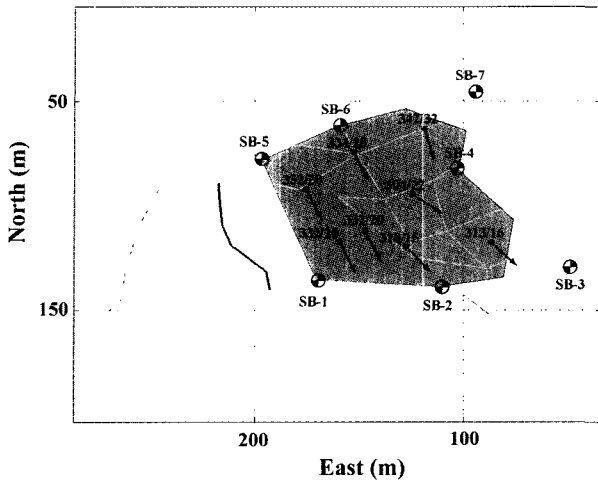


그림 18. 예상 파괴활동면의 거동 양상

에 분포하는 파괴 유발 불연속면들의 대표적인 경사방향은 개착된 암반사면을 기준으로 우측(NW)방향으로 발달하고 있어 사면 거동 시 주된 미끄러짐이 자연사면의 거동과 연계되어 발생할 것으로 판단되었다.

시추코어에서 관찰된 예상 파괴 활동면들의 상대적인 위치를 고려한 전체사면 거동해석 결과도 파괴를 유발시킬 수 있는 불연속면의 방향성에 의거하여 분석된 사면거동 양상과 매우 유사하였다. DOM 시추작업에 의해 확인된 5개 시추공에서의 예상 파괴 활동면의 표고를 산정하였으며, 파괴 활동면이 관찰되지 않는 SB-3 및 SB-7 호공에서는 전기비저항 탐사에 의해 파괴면 경계부의 표고를 추정하였다. 각 시추공 위치와 활동면 표고에 의해 설정된 3차원 좌표를 이용하여 예상 파괴활동면의 거동 방향을 추정하였다. 각 시추공에서의 예상 활동면 좌표를 기준으로 3개 활동면 지점을 연결하는 파괴면을 형성하고 중심 지점에서의 거동방향 벡터인 파괴면의 경사방향 및 경사를 산출하여 그림 18에 도시하였다. 자연 사면의 상부에서는 예상 파괴 활동면의 경사가 30° 정도를 나타내나 하부 쪽으로 내려가면서 점진적으로 감소하여 15° 정도의 완만한 경사각으로 변화되는 양상을 보여준다. 또한, 활동면 상부지역 및 개착사면의 인근 영역에서는 미끄러짐 방향이 330 - 342° 정도이나, 자연사면 하단부 영역에서는 304 - 318° 정도로 반시계 방향으로 회전하는 양상을 나타내고 있다.

## 6. 결론

(1) 조사지역의 불연속면들은 평면파괴를 일으킬 수 있

는 층리면을 따라 발달하고 있으며, 카올린 나이트(kaolinite) 등의 팽윤성 점토광물을 함유한 탄질 세일이 협재되어 있어 미끄러짐 거동에 취약한 특성을 나타낸다.

- (2) 전기비저항 탐사에 의거한 예상 활동면은 심도 10 - 20m 구간에서 타원형 형상을 하고 있는 것으로 조사되었으며, 시추조사에 의한 파괴 활동면 분석에 의해서도 매우 유사한 결과가 도출되었다.
- (3) 일차적인 사면 거동은 개착에 의해 하중이 제거되면서 점토질화된 탄질 세일을 협재한 층리면에서 발생하여 원래 지형의 능선 방향으로 평면파괴에 수반된 인장균열이 형성된 것으로 판단된다.
- (4) 개착사면 상부지역에서부터 자연사면 하단부 영역으로의 미끄러짐 거동은 층리면의 습곡구조 등의 영향으로 전반적으로 반시계 방향으로 회전하는 양상을 나타내며, 이에 수반되어 개착면과 평행한 방향뿐만 아니라 횡단면 방향으로도 개착면 상부 지역에 균열이 발생된 것으로 사료된다.

## 감사의 글

이 연구의 일부는 과학기술부 국책연구개발사업인 자연재해방재기술개발사업(과제번호: M1-0324-01-0000)의 지원으로 수행되었으며, DOM 시추자료를 제공한 지오택컨설팅(주)에게도 감사드립니다.

## 참고 문헌

1. 황진연, 김선경, 김춘식 (1999), "부산시 문현동 산사태지역의 지질 및 점토광물에 대한 연구", *한국지반공학회지*, 제15권, 제1호, pp.113-125.
2. Barton, N., Bandis, S. C. and Bakhtar, K. (1985), "Strength, deformation and conductivity of rock joints", *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, Vol.22, No.3, pp.121-140.
3. Einstein H. H., Veneziano D., Baecher G. B. and O'Reilly K. J. (1983), "The effect of discontinuity persistence on rock slope stability", *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, Vol.20, pp.227-236.
4. Hoek, E. and Bray, J. (1974), *Rock Slope Engineering*. The Institution of Mining and Metallurgy, London.
5. Lajtai, E. Z. (1969), "Strenght of discontinuous rock in shear", *Geotechnique*, Vol.19, pp.218-233.
6. McMahon, B.K. (1968), "Indices related to the mechanical properties of jointed rock", *Proc. 9th Symp. Rock Mech.*, Colorado, pp.117-133.
7. Mahtab, M. A. and Yegulalp, T. M. (1982), "A rejection criterion for definition of clusters in orientation data", *Proc. 22nd Symposium*

- on *Rock Mechanics*, R. E. Goodman and F. E. Heuze ed., Berkeley, pp.116-23.
8. Oda M. (1982), "Fabric tensor for discontinuous geological materials", *Soils and Foundations*, Japanese Society of Soil and Foundation Engineering, Vol.22, No.4.
  9. Raax (1997), *Borehole Image Processing System Information*. Sapporo, Japan.
  10. Read, S., Richards, L. and Cook, G. (2003), "Rock mass defect patterns and the Hoek-Brown failure criterion", *Proc. 10th Cong. ISRM*, South Africa.
  11. Scheidegger, A.E. (1965), "On the statistics of the orientation of bedding planes, grain axes, and similar sedimentological data", *U.S. Geological Survey Prof. Paper 525-C*, pp.164-167.
  12. Watson, G.S. (1966), "The statistics of orientation data", *Journal of Geology*, Vol.74, pp.786-797.
  13. Woodcock, N. H. (1977), "Specification of fabric shapes using an eigenvalue method", *Bulletin of the Geological Society of America*, Vol.88, pp.1231-1236.
  14. 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 Cong. ISRM*, South Africa.
  15. Zemanek, J. and Caldwell, R. L. (1969), "The Borehole Televiewer - A new logging concept for fracture location and other types of borehole inspection", *J. of Petroleum Technology*, pp.762-774.

(접수일자 2004. 3. 5, 심사완료일 2004. 10. 7)