

## **경상분지내 이암 및 셰일지역에서의 붕괴사례**

### **Case Studies for Collapse at Mudstone and Shale Region in Kyungsang basin**

노병돈<sup>1)</sup>, Ro Byung Don

1) 삼성물산 건설부문 품질경영본부 TA팀 전문위원/부장

## 경상분지내 이암 및 셰일 지역에서의 붕괴사례

### Case Studies for Collapse at Mudstone and Shale Region in Kyungsang basin

노병돈1), 깨 Byung Don

삼성물산 건설부문 품질경영본부 TA팀 전문위원/부장, Technical Adviser, Technical Advisory Team, Quality Management Div. Samsung Corporation

#### 1. 경상분지의 지질

##### 1.1 광역지질구조

1960년대 이후 지질조사 및 연구가 활발히 진행됨에 따라 새로운 지구조(地構造)의 설정이 이루어졌는데(1987, 김옥준), 한반도의 지체구조(地體構造)는 추가령 열곡을 중심으로 현격한 차이를 보이고 있음이 확인됐다. 그림 1.1은 한반도의 조구조선을 나타낸 것으로서 북측은 요동방향에 지배되는 평남분지, 두만분지, 관모봉 육괴, 단천 습곡대 및 낭림육괴 등이, 동남쪽은 경상분지가 주체를 이루고 있다.

이들 중 낭림육괴, 단천습곡대, 경기 및 영남 육괴는 선캠브리아의 변성암류와 고기(古期) 화강암류(또는 화강암과 그 이전의 고생대, 중생대 화강암)로 구성되어 있다. 평남분지와 옥천대는 고생대 및 중생대의 저변성 퇴적암류로 구성되어 있으나 평남분지에서는 원생대 상원누층군이 기저를 이루고 옥천대에는 상원누층군이 존재하지 않는다. 한반도의 동남쪽에 위치하는 경상분지는 백악기 지층으로 구성되어 있으며 남서 일본의 내대(Inner arc zone)의 지질조건과 유사하다.

한반도는 북동 아시아에 위치하고 있어 중국대륙 및 일본열도의 지체구조와 밀접한 관계가 있으며 반도의 대부분은 중국-한국지괴(Sino-Korean Paraplatform)에 속하고 옥천대는 중국의 양쯔지괴와 연속된다고 알려져 있다.

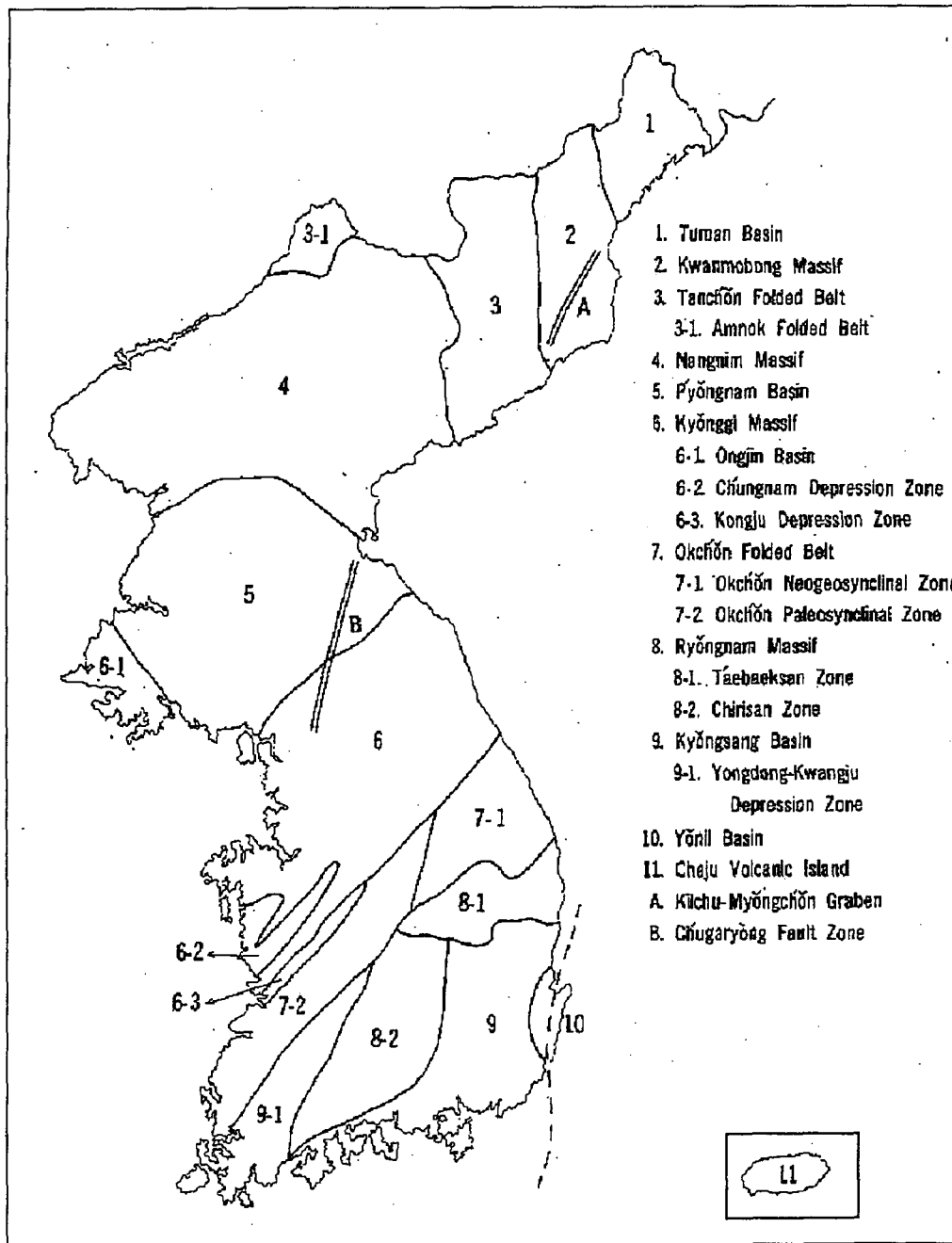


그림 1.1 한반도 조구조선도

## 1.2 지질 및 층서

### 1.2.1 지질

경상분지는 대보조산운동 이후 쥐라기-백악기 초에 한반도의 남서-남동부에 생성된 커다란 육성퇴적분지이다. 분지의 북쪽과 서쪽 가장자리에서 백악기 퇴적암이 선캄브리아 편마암복합체

와 주라기 관입암을 부정합적으로 피복하고 있고, 동측부에는 제 3기 퇴적암이 중생대 퇴적암을 부정합적으로 피복하고 있다. 그리고 경상분지의 동쪽과 남쪽의 가장자리는 동해 및 남해에 접해 있어서 그 층서가 분명하지 않다.

탄성파자료에 의하면 경상분지는 수직 두께가 5km이상으로 알려져 있으며 당시 한반도 남단에서 활발하던 섭입과 관련된 조구조적 운동이 장력단층을 발생시켰고 이 증거는 현재도 경상분지 외곽에서 발견되고 있다.

경상분지를 구성하는 암석들은 주로 육성쇄설성 퇴적암과 화산분출암류, 심성관입암, 화성쇄설암류들이다.

경상분지의 특징은 지층 분류기준이 명확하지 않은 점을 들 수 있는데 실제로 홍색퇴적층의 유무를 기준으로 지층의 상/하위를 구분할 수도 있다. 또한 시준화석이 존재하지 않고 퇴적환경이 호성환경과 축방변화가 심한 하성환경인 점이다.

경상분지내에 백악기 암석은 퇴적작용과 화산분출작용, 그리고 화성활동에 근거하여 4개의 층군으로 나뉘어진다. 그들은 각각 화산활동이 드물게 발달한 신동층군, 화산활동과 동시기에 퇴적작용이 일어난 하양층군, 주로 격렬한 화산활동으로 인해 화산분출암으로 구성되어 있는 유천층군, 그리고 불국사관입암 등으로 구성된다.

신동층군은 순수 쇄설성 퇴적물로 구성되어 있다. 하지만 하양층군부터는 화산활동의 영향을 받아 소규모의 화산활동에 의한 화산 쇄설물이 포함된다. 그리고 유천층군은 화산쇄설물에 의한 것으로만 형성된 화산암 복합체를 이루고 있으며 이들 3개 층군을 묶어 경상누층군이라 한다. 하양층군은 신동층군 위에 정합으로 놓이지만 다른 지역에서는 신동층군 없이 기반암 위에 부정합으로 놓이는 경우도 있다.

## 1.2.2 층서

### 1) 신동층군

본 층은 하부로부터 낙동층, 하산동층 그리고 진주층으로 구성된다.

○ 낙동층 : 역암, 사암, 미사암, 셰일 및 탄질셰일로 구성되며 홍색층을 거의 협재하지 않는다. 하부는 역암과 사암으로 구성되어 신동층군의 기저역암을 이룬다.

○ 하산동층 : 사암, 역암, 홍색 미사암 및 회색셰일로 구성되며, 층후는 1,400m 내지 700m 이고 홍색층의 빈번한 협재가 특징이다.

○ 진주층 : 회색사암, 암회색 셰일 및 역암으로 구성되며 층후는 1,200m 내지 750m이다. 홍색층을 함유하지 않음이 특징이다.

## 2) 하양층군

본 층은 하부로부터 칠곡층, 신라층, 함안층 그리고 진동층으로 세분된다.

○ 칠곡층 : 사암, 세일 및 역암으로 구성되며 최대 층후는 650m이다. 홍색층을 함유함으로써 하위의 진주층과 구별된다. 최하부의 역암층들을 제외하고는 화산암 역을 가지는 것으로 역암은 상위로 갈수록 조립이 되고 우세해지다가 마침내 신라층으로 전이된다.

○ 신라층 : 역암과 이에 협재하는 사질암과 이질암으로 구성되는데 층후는 약 240m이다. 화산암 역을 함유함이 특징이다.

○ 함안층 : 홍색 세일, 회색 세일, 실트암이 주된 암상으로 여기에 응회질 사암, 이회암 및 역암이 부수적으로 협재한다. 본층은 신라역암층 위에 정합적으로 놓이며 층후는 800m내외이고, 함안층의 하한은 신라역암층의 역질 사암이 끝나고 홍색 이암과 실트암이 협재되기 시작하는 층준이며, 상한은 암회색 내지 흑색이암이 협재되는 최상위 홍색이암 층준이다.

○ 진동층 : 암회색 세일과 사암으로 구성되며 층후는 약 1,500m이다. 칠곡층, 신라층, 함안층이 홍색층을 특징으로 가지는 것과는 대조적으로 진동층은 암회색으로 구성된다. 특히 대구-경주간의 진동층은 다시 세분되는데 하부로부터 반야월층, 송래동층, 건천리층 등이다.

## 3) 유천층군

유천층군은 화산활동이 활발한 때의 퇴적물로 주로 화산암 복합체로 구성되어 있다.

다음 그림 1.2 및 1.3은 경상누층군의 분포지와 개략 지질도이며 표 1.1은 본 역의 지질 계통 표이다.

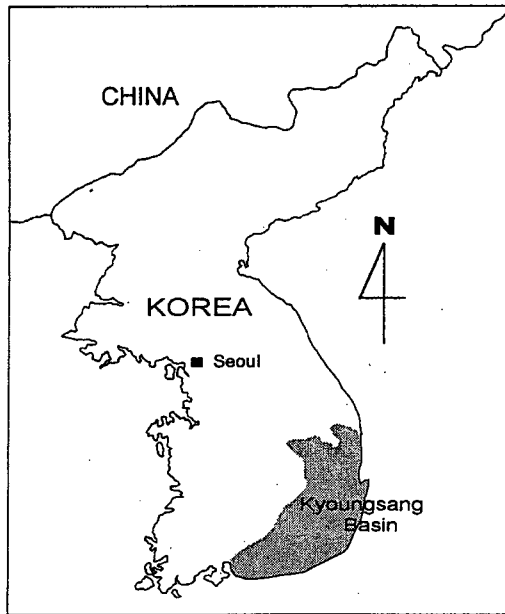


그림 1.2 경상누층군의 분포

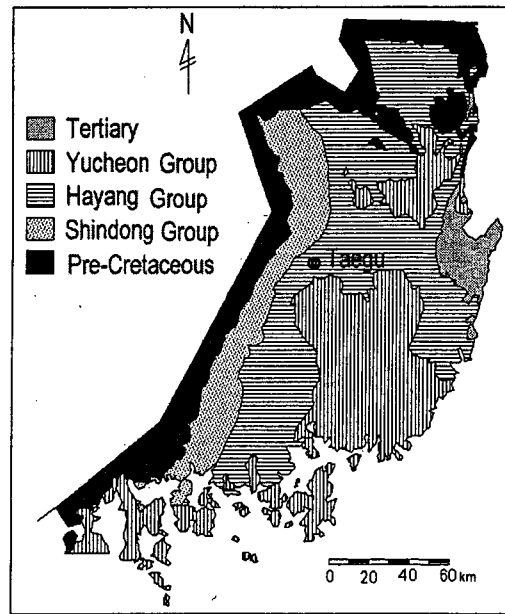


그림 1.3 경상누층군의 지질도

표 1.1 경상누층군의 층서적 대비

Yongyang Block	Uiseong Block	Milyang Block
Yucheon Volcanic Group		
Shinyangdong Fm.		Keoncheonri Fm.
Kisadong Fm.	Chunsan Fm.	Chaeyaksan Volc. Fm.
Togyedong F.		Songnaedong Fm.
Osippong Volc. Fm.	Sagok Fm.	Panyawol Fm.
Cheongryangsan Cg. Fm.	Choengok Fm.	Haman Fm.
Kasongdong Fm.		Hakpong Volc. Fm.
Tonghwachi Fm.		Silla Conglomerate Fm.
Ullyeonsan Fm.		Chilgok Fm.
	Ilchik Fm.	Chindong Fm.
		Haman Fm.
		Chinju Fm.
		Hasandong Fm.
		Nakdong Fm.

## 2. 사례연구

### 2.1 지형 및 지질

#### 2.1.1 지형

A 지역은 지리 좌표 상으로 동경 128° 26′ 00″ ~ 128° 27′ 00″, 북위 35° 57′ 30″ ~ 35° 58′ 00″, 행정구역상으로 경상북도 칠곡군 왜관읍 일대에 해당되며, 왜관 I. C 남동쪽 2.3km 지점에 위치하고 있다.

백악기 퇴적암류가 분포하는 본 붕괴사면은 남동향의 대체로 완만한 산사면을 이루고 있으며, 남동부에 길이 200m에 달하는 돌고개골이라는 계곡이 위치하고 있고 붕괴지역 서쪽으로는 가파른 사면이 형성되어 있다. 붕괴사면이 위치하는 사면의 연장은 산 정상부에서 기저부까지 약 150m이며, 폭은 붕괴사면 경계부인 양쪽 계곡을 기준으로 약 60m이다. 산사면의 지형경사는 약 20~25°의 저각이다. 이중 붕괴사면은 연장 100m, 폭 약 31~37m 정도의 규모로 발생하여 변위가 발생한 균열부는 폭이 수 m에 이르고, 균열의 깊이는 약 10m에 달하는 곳도 있다.

B 지역은 지리 좌표상으로 동경 128° 27′ 50″ ~ 128° 28′ 30″, 북위 35° 52′ 70″ ~ 35° 53′ 50″, 행정구역상으로 대구광역시 달성군 일대에 해당되며, 남쪽으로 금호강과 접하고 있다. 본 붕괴사면은 정동향의 산사면 능선부에 위치하고 좌우로 계곡이 있으며 남서부에는 해발 193.8m의 마천산이 위치하고 동남부에는 이천들이라는 평야가 위치하고 있다. 산사면 붕괴가 일어난 규모는 폭과 상하 연장부가 약 40m이다. 이전에 분묘가 있었던 본 역은 사면의 배향과 사교하는 남동쪽 방향으로 붕괴가 발생하여 현재 묘를 이장한 상태이며, 붕괴사면 아래에는 소규모 전답과 민가가 위치하고 있다.

#### 2.1.2 지질

A 지역은 중생대 백악기 경상누층군 신동층군중 낙동층에 해당된다. 신동층군은 기저역암이고기암(선캄브리아편마암) 위에 부정합적으로 놓이고 주로 쇄설성 퇴적암으로 구성되어 있으며 화산활동의 산물이 없는 것이 특징이다. 낙동층은 역암, 사암, 미사암, 셰일, 탄질셰일로 구성되며 본 역에서는 사질역암, 중·조립사암, 셰일등이 확인된다. 층리면은 N19~60E/10~22SE로 발달하며 절리는 3개조로 N44~34W/76~86NE, N19~28E/84~90SE, N50~54E/75~86NW의 방향성을 갖는다.

B 지역은 중생대 백악기 경상누층군 하양층군중 칠곡층에 해당되는 지역으로 화산성 물질을 포함한다. 칠곡층은 사암, 셰일 및 역암으로 구성되며 화산암 역을 갖는 것이 특징이고 홍색층을 함유함으로써 하부의 진주층과 구별된다. 본 역에서는 적색 셰일, 세립 내지 중립질 사암, 역암 등이 확인된다. 칠곡층의 역암은 상위로 갈수록 조립이 우세해지고 신라역암층으로 전이된

다. 층리면은 N45~53E/25~31SE로 발달하며 주절리는 NS~N12W/79~89SW, N60~81E/75~85NW의 방향성을 갖는다(그림 2.1).

## 2.2 조사 및 실험

### 2.2.1 지표지질 및 정밀지질구조조사

#### 1) 지표지질조사

A 지역의 사암은 주로 밝은 회색을 띠며 입자는 중간정도의 크기이며 구성성분은 석영과 장석 등이다. 사암류에서는 사층리가 발달하고 있어 수성쇄설성 환경이었음을 지시하고 있다. 역암은 주로 회백색의 사질역암이며 층후 3-5m로 2매가 확인되며 장경 2-3m로 원마도는 양호하나 구형도와 분급은 불량한 편이다. 역과 기질간의 결합력이 불량하여 적은 충격에도 쉽게 분리되는 경향이 있다. 역은 주로 세일로 구성되어 있고 간혹 규암과 혼펠스도 확인된다. 세일은 주로 황갈색 내지 암회색을 띠며 박리성이 매우 잘 발달되어 있고 중·조립 사암과 세일이 상향세립으로 발달한다. 노두에서는 사질역암, 중·조립 사암, 세일등이 고루 나타나고 간혹 녹회색 이암이 얇은 두께로 나타난다. 층리면은 N19~60E / 10~22SE로 발달하며 절리는 3개조로 NE와 NW방향의 고각의 절리가 주로 나타나고 절리 간극은 주로 방해석으로 충전되어 있다. 본역에서 확인되는 단층은 N78E / 67SE, N39W / 76NE 방향의 정단층으로 특히 이들은 이동 블록에서 확인되는 인장균열의 방향과 일치하고 있어 블록의 이완 및 활동에 영향을 미쳤을 것으로 판단된다.

B 지역은 중생대 백악기 경상누층군 하양층군의 칠곡층에 해당된다. 칠곡층은 사암, 세일, 역암으로 구성되며, 홍색층을 함유함으로써 하부의 진주층과 구별된다. 칠곡층의 역암은 상위로 갈수록 조립질이 우세해지고 신라역암층으로 전이된다. 본 지역은 적색세일, 중립질 사암, 역암 등이 확인된다. 역암은 최대장경 1cm 내외로 원마도와 분급이 대체로 양호하다. 또한 결합력이 우수하여 역들이 쉽게 분리되지 않으며 역의 성분은 주로 세일 및 규암으로 구성되어 있다. 후층의 홍색 세일과 박층의 암회색 사암이 교호하여 나타나며, 간혹 녹회색 이암이 나타난다. 세일은 흑색 세일과 암회색 세일이 주를 이루며 파쇄가 심해 판상으로 떨어지는 양상으로 나타나며 박층의 탄층을 수매 협재하고 있다. 또한 본 역에 협재하는 다수의 엽층(laminar)은 층간에 점토물질을 함유함으로써 단위층간의 결합력을 저하시키고 있다. 층리면은 N45~53E / 25~31SE로 발달하며 주절리는 NS방향과 N60~81E방향의 고각으로 나타나고 간혹 N45W / 40SE, N86E / 82SE 의 공액절리가 나타난다. 또 층리면을 경계로 굴절현상을 보이는 신장성 절리들이 나타난다. 블록의 활동은 암회색 세일과 중립질 사암 사이에서 층리면을 따라 발생한 것으로 보인다.



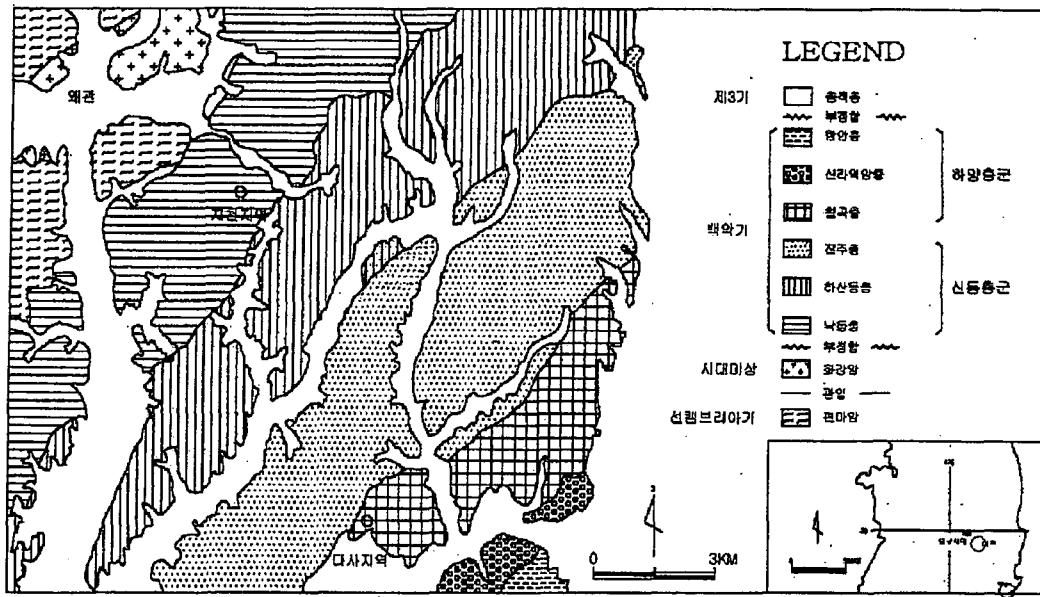


그림 2.1 조사지역 지질도

## 2) 분리면 방향성

A 지역에는 사암, 셰일, 역암 등에 주요 절리 5개조가 인지된다(그림 2.2). 분리세트의 구분은 먼저 모든 현장자료에 대하여 분리면 처리 프로그램인 DIPS를 이용하여 하반구 투영법 (Low hemisphere projection)으로 각 세트별 극점(pole)을 점시하고 대표적인 집중 방향성을 결정한다. 또 이들 집중 방향성을 다시 대원으로 표현한 것이 그림 2.3이다. 방향성 자료의 분석결과 본 지역은 총 3개의 절리조와 임의절리군 2개가 확인되는데 set1(108~170/10~36), set2(038~063/70~90, 225~231), set3(314~326/68~90), RD1(105~125/80~90), RD2(330~347/80~90)이다.

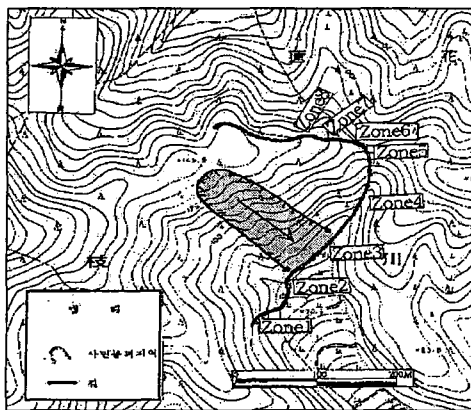


그림 2.2 A 지역 분리면 측정 위치도

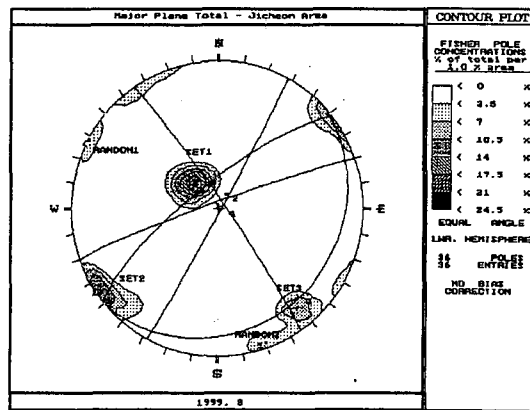


그림 2.3 A 지역 분리세트별 대원

B 지역에는 사암, 세일, 역암 등에 대표 절리 4개조가 인지된다(그림 2.4). 분리세트의 구분을 위해 각 세트별 극점(pole)을 점시 하고 대표적인 집중 방향성을 그림 2.5에 나타내었다. 방향성 자료의 분석결과 본 지역은 총4개의 절리조가 확인되는데 set1(130~170/30~15), set2(180~196, 360~034/70~90), set3(230~280, 080~095/75~90), set4(310~353, 145~170/65~90)이다.

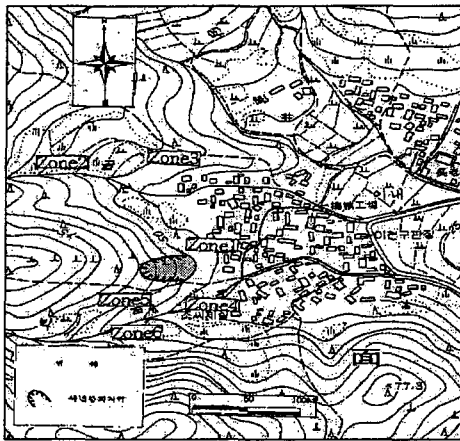


그림 2.4 B 지역 분리면 측정 위치도

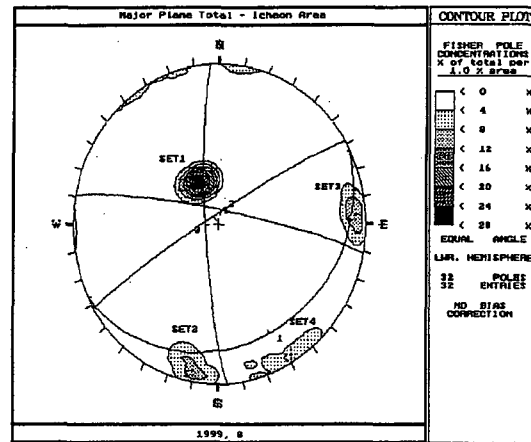


그림 2.5 B 지역 분리세트별 대원

### 3) 분리면 발생빈도

본 조사지역들에서 각각 확인된 분리세트별 평균 분리간격을 이의 역수인 분리빈도로 표현하여 각 측정별로 나타내며  $\lambda$ 는 평균분리빈도,  $J_v$ 는 분리면 체적지수를 나타낸다.

A 지역에서 확인된 총 3개조의 분리면 세트에 대한 평균 분리빈도는 set1( $Sm=13.44$ ,  $\lambda=7.44$ ), set2( $Sm=10.31$ ,  $\lambda=9.7$ ), set3( $Sm=6.98$ ,  $\lambda=14.33$ ), RD1( $Sm=12.1$ ,  $\lambda=8.26$ ), RD2( $Sm=5.34$ ,  $\lambda=18.73$ )등으로 나타나 분리빈도에서는 set3-set2-set1의 순으로 확인되었다. 그리고 평균체적분리빈도( $J_v$ )는 40.42로 very small blocks에 속한다.

B 지역에서 확인된 총 4개조의 분리면 세트에 대한 평균 분리빈도는 set1( $Sm=6.67$ ,  $\lambda=14.99$ ), set2( $Sm=16.75$ ,  $\lambda=5.97$ ), set3( $Sm=21.41$ ,  $\lambda=4.66$ ), set4( $Sm=10.66$ ,  $\lambda=9.38$ )등으로 나타나 분리빈도에서는 set1-set4-set2-set3의 순으로 확인되었다. 그리고 평균체적분리빈도( $J_v$ )는 98.16으로 crushed rocks에 속한다.

### 4) 분리면 특성 요약

A 지역 중 봉피지와 직접 관계 있는 zone 2에서는 set1, set2, 임의절리군1의 3개의 절리조가 확인되었다. 사면 전체의 주향은 N36E이고 경사는 48SE이다. set1의 방향성은 주향이 N52E이고 경사가 27SE이다. set2의 방향성은 주향이 N34W이고 경사는 86NE이다. 임의절리군1의 방향성은 주향이 N28E이고 경사는 90SE이다. 거칠기 상태는 set1은 평탄한 면에 미세거칠기는 약간 거친 상태를 보이고 있고 set2는 계단상의 약간의 미세거칠기를 보이고 있다. 임의절리

군1은 불규칙적으로 거친면에 약간의 미세거칠기를 보이고 있다. 절리면의 상태는 set1은 신선하고 set2는 calcite로 피복이 되어 있다. 임의절리군1은 녹슨 상태이다. 풍화정도는 절리군 모두 약간 풍화를 받은 상태이다. 절리의 간극은 set1은 0.1mm이내이고 set2와 임의절리군1은 1mm 이내이다. 지하수의 상태는 건조한 상태를 보이고 있다.

B 지역에서 붕괴지와 관계있는 zone 5에서는 set1, set2, set3의 3개의 절리조가 확인되었다. 사면 전체의 주향은 N50E이고 경사는 45SE이다. set1의 방향성은 주향이 N58E이고 경사는 25SE이다. set2의 방향성은 주향이 N74W이고 경사는 70NE이다. set3의 방향성은 주향이 N08W이고 경사는 77SW이다. 절리조들 모두 굴곡진 상태의 거칠기를 보이고 있으며 미세 거칠기는 set1과 set2는 약간 거칠고 set3는 보통거칠기를 보이고 있다. 절리면의 상태는 모두 녹슨 상태를 보이고 있다. 풍화정도는 약간 풍화를 받은 상태이다. 절리의 간극은 set1은 0.1mm, set2는 0.3mm, set3는 0.2mm이내이다. 지하수의 상태는 건조한 상태를 보이고 있다.

### 2.2.2 암반분류 결과 분석

A 지역에서의 암반분류 결과 Q값은 0.32~3.03 사이로 암반등급으로는 Very Poor~Poor의 분포를 보이며 기초 RMR은 48.35~56.92, SMR값은 68.45~88.72 사이로 Good~Very Good으로 나타났다. 따라서 대체로 균질한 암반구성으로 인하여 암반등급의 편차는 미약한 편이다. SMR의 적용은 각 조사지점 중에서 최대로 위험한 절리를 기준으로 값을 정했고 다시 평면파괴나 전도파괴가 예상되는 혹은 잠재적 파괴요인을 내포하고 있는 지점에 대하여만 분석을 한 결과 RMR 값과는 대체로 비례적 관계를 가지며 점수로는 15~25정도 높은 것으로 나타났다.

B 지역에서의 암반분류 결과 Q값은 0.23~13.05 사이로 암반등급으로는 Very Poor~Good의 분포를 보이며 기초RMR은 39.74~60.94, SMR값은 61.32~96.34 사이로 Good~Very Good으로 나타났다. 따라서 대체로 균질한 암반구성으로 인하여 암반등급의 편차는 미약한 편이다. SMR의 적용은 각 조사지점 중에서 최대로 위험한 절리를 기준으로 값을 정했고 다시 평면파괴나 전도파괴가 예상되는 혹은 잠재적 파괴요인을 내포하고 있는 지점에 대하여만 분석을 한 결과 RMR 값과는 대체로 비례적 관계를 가지며 점수로는 15~30정도 높은 것으로 나타났다.

### 2.2.3 GPR 탐사

본 조사에 사용된 GPR 조사 장비는 미국 GSSI(Geophysical Survey System Inc.)의 제품 SIR(Subsurface Interfacing Radar) System 이다. 본 시스템은 다양한 탐사 목적에 적합하게 사용할 수 있도록 여러 종류의 안테나가 개발되어 있다. 지하 매질물 조사는 깊은 심도를 조사할 수 있으며, 중심 주파수를 가변적으로 조절할 수 있는 MLF(Multi Low Frequency) 안테나를 사용하였고, 탐사에 사용된 중심 주파수는 45MHz, 30MHz이며, 기록 시간은 450~600ns로 설정

하여 자료를 획득하였다.

A 지역에서는 축선의 고저를 고려하여 각각 다른 주파수를 적용하여 탐사하였다. 산 정상부에서는 심도를 고려하여 30MHz의 저주파를 사용하였으며, 도로와 계곡의 파곡부에서는 45MHz를 사용하여 해상도를 높이려 하였다. 축선의 구성은 시추 자료와 비교 검토하기 위하여 시추위치를 포함하여 축선을 설정하였고, 사면붕괴 지역과 건전한 구간을 축선에 포함시켜 설정하였다. 또 B 지역에서 사용된 중심 주파수는 45MHz를 사용하여 심도 약 26m를 조사하였다. 축선의 구성은 침하 및 산사태가 발생한 지점을 중심으로 4개의 축선을 격자형으로 나열하여 조사 축선들의 교차점 자료를 비교 분석하여 신뢰도를 높이려 하였다. 그리고 시추공과 연관성을 파악하기 위하여 시추공의 위치를 축선상과 일치시켜 탐사를 수행하였다(그림 2.6-7).

표 2.1은 A, B 지역 탐사에 사용된 안테나 특성 및 투과 심도이며 그림 2.8-11은 그 해석단면이다.

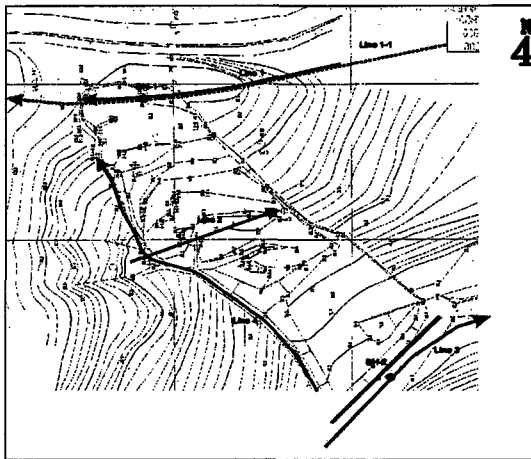


그림 2.6 A 지역 GPR 축선도

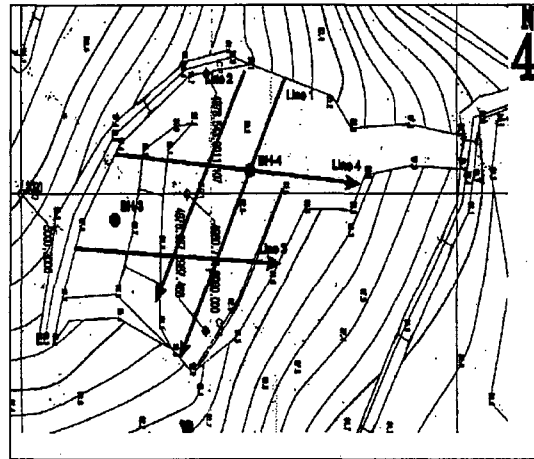


그림 2.7 B 지역 GPR 축선도

표 2.1 A, B 지역 탐사에 사용된 안테나 특성 및 투과 심도

축선	사용주파수	기록시간	축점간격	중합수	최대조사심도
A-1	30MHz	600ns	25cm	16	35m
A-1-1	16MHz	1000ns			58m
A-2	30MHz	600ns			35m
A-3	45MHz	450ns			27m
A-4	45MHz	450ns			27m
B-1	45MHz	450ns	25cm	16	22m
B-2					
B-3					
B-4					

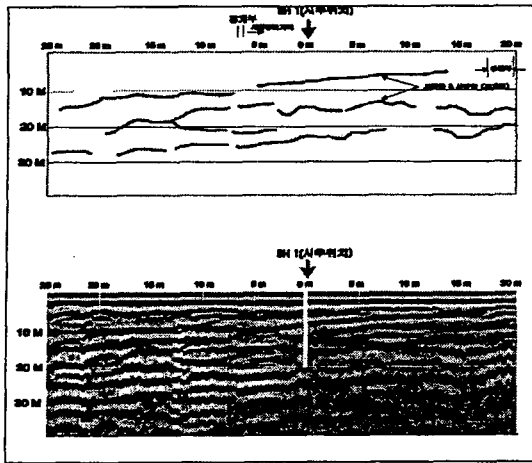


그림 2.8 A 지역 Line 1의 분석도 및 단면도

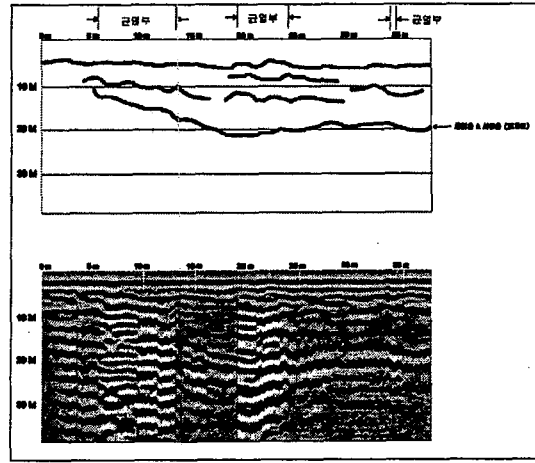


그림 2.9 A 지역 Line 2의 분석도 및 단면도

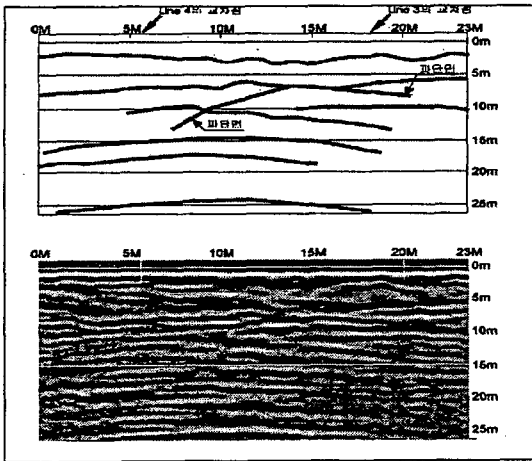


그림 2.10 B 지역 Line 2의 분석도 및 단면도

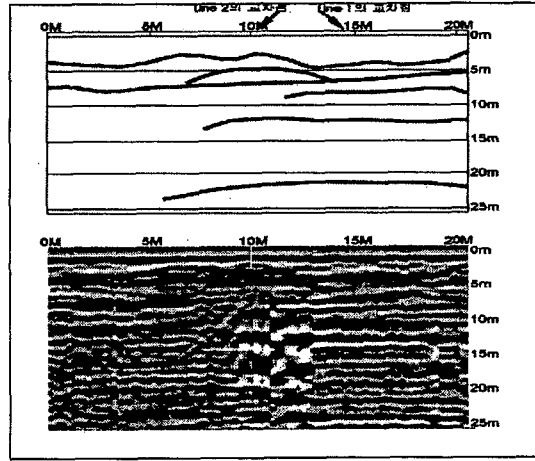


그림 2.11 B 지역 Line 3의 분석도 및 단면도

GPR 탐사결과 A 지역의 축선 1에서는 1호공을 중심으로 동측 15m 지점의 심부 5m에서 발달하여 완만한 서측 경사를 이루는 파쇄면은 시추공 서측 20m 부근까지 연장하고 그 하부 14-17m 지점에서 단속적인 불연속대가 확인된다. 축선 2에서는 12m 심부에서의 불연속대는 중앙부로 가면서 심도가 깊어져 22m에 달하고 다시 동측으로 가면서 완만한 상향경사를 보인다. 따라서 본 지역은 붕괴지 침두부에서는 5m 이내, 중앙부에서는 약 20m, 선단부에서는 5m 내외의 심부에 주요 파쇄대가 존재하며 이는 주로 퇴적암의 층리면에 기인한 것이라 판단된다.

B 지역의 축선 2에서 심도 0~4m에서의 토사층 외에 측정거리 2~10m 구간 및 15~20 구간에서 나타나는 사선의 불연속대가 뚜렷한데 이는 침하로 인한 파단면으로 판단된다. 축선 2에서 측정거리 10~15m 구간에서 지층 파단면 또는 소규모의 단층이 확인되며, 이는 심도 12~13m 까지 진행된다. 축선 3은 토사층의 두께가 비교적 두터워 거의 10m에 달한다. 따라서 본 지역은 전체적으로 남동향으로 풍화심도가 깊고 특히 1,3번 축선의 교차점 부근이 깊다. 또 3번 축선을 따라 풍화심도가 깊은데 이는 남동향으로 경사하는 층리면을 따른 토사의 활동과 3번 축선을 따르는 방향으로의 균열대를 유추할 수 있다.

## 2.2.4 전자력 탐사

극저주파 탐사를 위한 측선설계는 조사의 효율성 향상을 물론 측정된 자료의 신뢰성을 향상 시키는데도 매우 중요하다. 금번 연구에서는 GPR 탐사와의 결과 및 지표 지질조사 결과에 따라 측선을 설계하였는데 A지역의 경우 NW 방향의 구조선 및 이에 수직하는 균열의 방향인 NE방향의 구조선을 추출하고자 동서방향의 측선 5개, 500m를 설정하였고 참고 측선으로 NW방향 1개(70m), NE방향 1개(90m)등 총 7개 측선 660m가 적용되었다(그림 2.12).

또 B지역은 지표상에서 확인되는 뚜렷한 기지의 구조선은 확인되지 않았으나 현재 사면의 배향과 토사 활동방향, 지층의 주향 등을 고려하여 주로 남북방향의 측선을 설계하였다. 이는 전체적으로 동서방향의 파쇄균열의 발달을 고려하기 위함이었다. 즉 남북방향 측선 8개 417m, 참고측선으로 동서방향 2개 측선, 90m가 적용되어 총 10개 측선, 507m를 적용하였다(그림 2.13).

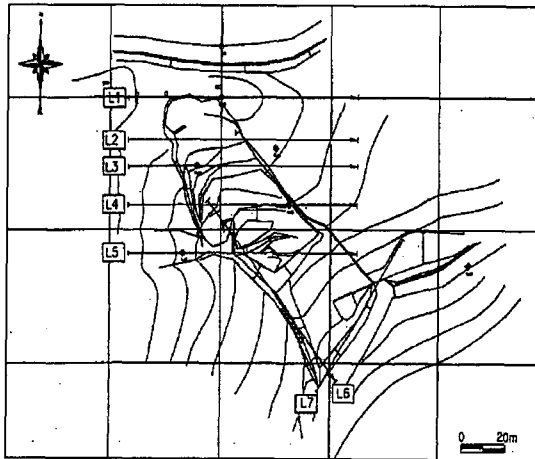


그림 2.12 A 지역 VLF 탐사측선도

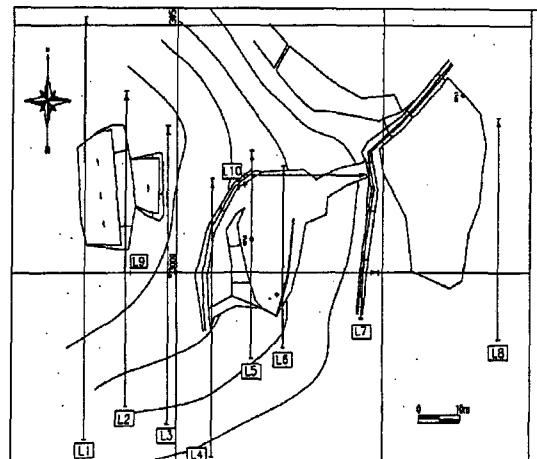


그림 2.13 B 지역 VLF 탐사측선도

A 지역에서는 기 확인된 북서향의 균열 연장부가 잘 확인되고 있으며 측선 1-5에서의 말단부 이상대는 완만한 계곡에서 능선부로 전이되는 지점에 해당하므로 이를 무시하면 측방으로 대규모 잠재 균열의 발달은 없는 것으로 보인다. 따라서 기존의 폭 40여 m에 해당하는 균열부만이 독립적인 활동을 일으킨 것으로 판단된다. 또한 북서향의 주 균열부에 수직하는 수반 균열의 발달이 사면 상부에서 4개가 확인된다(그림 2.14).

B 지역은 지표상에서는 균열 흔적이 매몰되어 확인이 불가능하나 극저주파 탐사 결과 전체적으로 북동향 균열 발달이 수매 확인된다. 이는 퇴적암 층리면의 주향 방향과 일치하는 것으로 이 층리면을 따른 활동 경향을 시사하고 있다. 본 지역 역시 각 측선 말단부에서의 이상대는 사면에서 능선으로 전이되는 지점에 해당하거나 분묘 이장으로 인한 이상대로 판단되므로 구조선 해석시 무시되었다(그림 2.15).

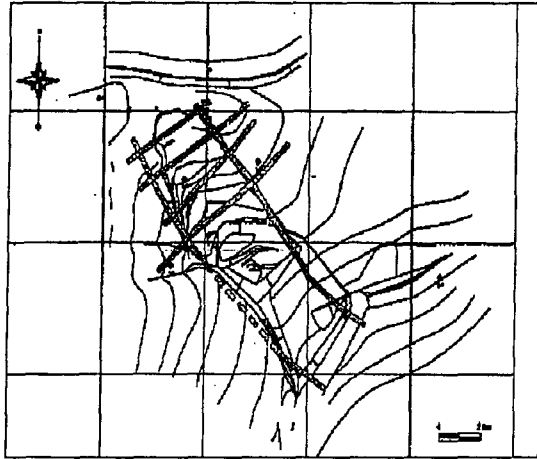


그림 2.14 A 지역 VLF 탐사 해석도

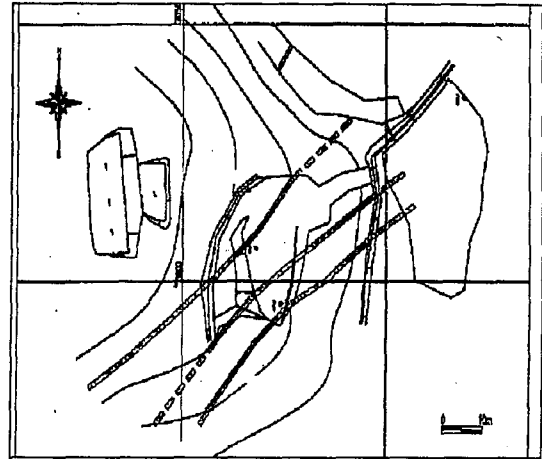


그림 2.15 B 지역 VLF 탐사 해석도

## 2.2.5 시추조사

다음 표 2.1 및 그림 2.16-17은 A, B지역에 적용된 시추공에 대한 위치정보이다. 또 그림 2.18-19는 양 시추공에 대한 지질주상도이다.

표 2.2 시추조사 위치 및 표고

지역	공번	위치	표고(m)	심도(m)	비고
A 지역	BH-C-1	사면 상부	145.0	20.0	
	BH-C-2	사면 하부	111.6	"	
B 지역	BH-D-3	CP1의 남서	61.1	"	
	BH-D-4	CP1의 북동	56.5	"	

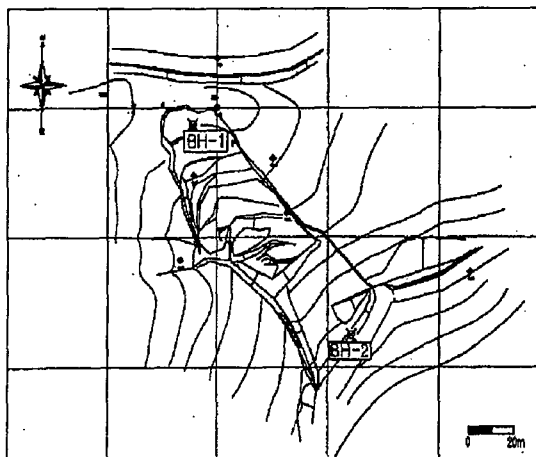


그림 2.16 A 지역 시추위치도

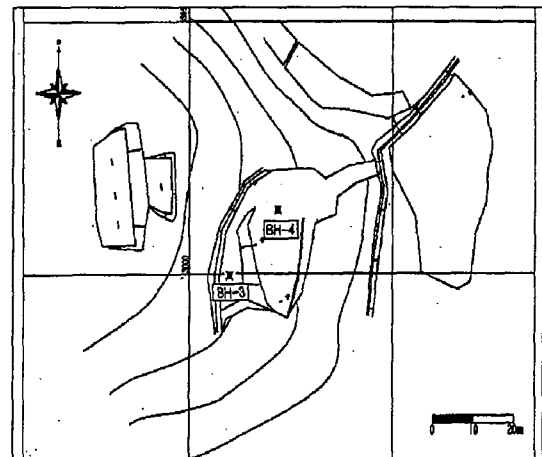


그림 2.17 B 지역 시추위치도

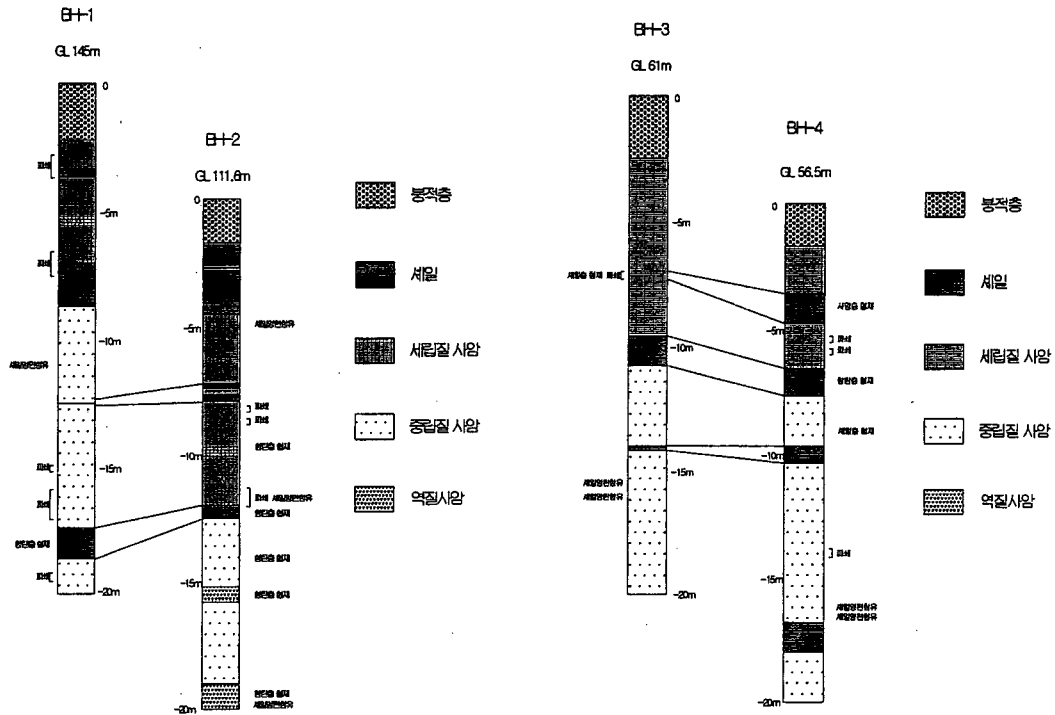


그림 2.18 A 지역 지질 주상도

그림 2.19 B 지역 지질 주상도

A지역 1호공은 사면 상단부의 GL.145m에 위치하고 있으며 시추심도는 20m이다. 지표 하 2.2m까지는 풍화잔류토 및 봉적층이 분포되며 하부의 기반암인 세립질 사암층이 완전 풍화되어 약간의 암편을 내포하는 사질토로 구성되어 있다. 표준관입시험 결과 깊이 1.5m에서 21회/30cm의 값을 가진다. 하부 황색 세립질 사암층은 2.2m~6.8m 사이에 분포하여 층후가 4.6m이다. 3.3m 지점에서는 약 15cm의 세일층이 협재된 양상을 보이고 세일과 상 하부의 사암층에서 다수의 파쇄대가 형성되며, 절리면의 충전물은 산화철과 점토성 물질이 피복되고 있고 RQD 값은 43.26%로 시추공 중 최고값을 보인다. 흑색 세일이 6.8m~8.7m까지 1.9m의 층후를 가지며 세일에서부터 상부에 인접하는 세립질 사암에 걸쳐서 파쇄대를 형성한다. 층리방향의 분리면이 발달하고 이에 수직인 절리가 발달하여 풍화도가 높고 24.5%의 RQD값을 가진다. 중립질의 사암층이 8.7m~17.4m까지 층후가 8.7m로 두텁게 분포하며 수직의 고각 절리가 발달하고 있다. 하부 함탄질 세일층이 17.4m~18.6m로 두 지층의 인접한 부분에는 층리 방향의 절리가 발달하여 파쇄대를 형성한다. 특히 심도 약 11m 부근에는 흑색 세일암편을 협재하는 층이 국부적으로 나타나는 특징을 보이고 있고 12m 부근에는 파쇄대가 나타나며 세일층의 일부가 관찰되고 있다. 전반적으로 풍화도가 적으며 평균 30%의 RQD값을 나타내고 있다. 흑색 탄질세일 하부에 회색의 중립질 사암층이 18.6m~20.0m까지 분포하며 전반적으로 세일과 사암층이 존재하고, BH-2공의 하부에 나타나는 역질사암은 지층대비 결과 시추심도(20m) 하부에 분포할 것으로 추정된다.



2호공은 사면 하단부의 GL.111.6m인 현재 임도변 옹벽부근에 위치하고 있으며 시추심도는 20m이다. 0~1.7m의 지표에는 풍화잔류토 및 붕적층이 분포하며 하부의 세립질 사암층이 완전 풍화되어 약간의 압편을 내포하는 사질토로 구성되어 있다. 1.7~4.5m 지점에는 흑색 세일이 층후 약 3m 정도로 쌓여 있다. 이 세일층은 층리를 따라 절리가 발달되어 있으며 3.2m 부근에는 파쇄대가, 3.3m 지점에는 미끄럼면이 존재하고 있어 사면의 활동면으로 추정된다. 전반적으로 풍화도가 높으며 54.6%의 RQD값을 가진다. 세립질 사암층이 7.2m까지 층후 2.7m로 분포한다. 이 세립질 사암층의 5m 부근에는 세일 압편이 함유되어 있다. 전반적으로 고각의 수직절리가 발달하고 있으며 RQD는 44.4%이다. 7.2~8.4m에서는 세일을 주로 하는 사암과의 호층대가 분포하며 이러한 암질들 사이를 파쇄대가 형성하고 있고, 7.8m 지점에서 미끄럼면이 형성되어 있다. 전반적으로 풍화가 진행되어 있으며 RQD는 42.5%이다. 회색 세립질 사암층이 8.4~11.5m까지 분포하며 깊이 8.9m 정도에서 국부적으로 수매의 탄층이 협재되어 나타난다. 파쇄대를 제외한 부분에서는 대체로 풍화도가 낮으며 전체의 RQD는 56.3%이다. 11.5~15.6m에서 회색 조립질 사암층으로 이어지며, 특히 12.2m, 12.8m 부근에서 탄층이 수매 협재하고 있다. 전체적으로 신선한 암석으로 나타나며 86.6%의 높은 RQD값을 가진다. 탄층을 협재하는 약 50cm의 역질 사암층이 분포하며 하부에는 회색의 조립질 사암층이 19m까지 나타나고 있다. 조립질 사암은 약간의 풍화도를 가지며 86.9%의 높은 RQD값을 가진다. 19m지점으로부터 최하부 20m까지는 박층인 수매의 함탄층과 규질성분의 퇴적암편이 협재하는 회백색의 역질사암층이 분포하고 있으며 이들의 RQD값은 59%이다..

B 지역 3호공은 사면 상부의 서쪽에 위치하고 있으며 GL.61.0m의 지점이다. 지표로부터 2.5m에는 사질토와 풍화토로 이루어진 붕적층이 놓여 있다. 표준관입시험치는 지표로부터 1.4m 지점에서 34회/30cm의 값을 나타내고 있어 조밀한 상대밀도값과 매우 단단한 지반의 특성을 보이고 있다. 2.5~9.6m에는 황색 세립질 사암층이 분포하고 있다. 이 층의 상부는 지표로부터 상당한 풍화가 진행된 양상을 보이며 40%의 RQD값을 보였고 중부는 층후 1.5m에 달하는 상당한 파쇄대가 형성되어 있으며, 하부인 4.8~9.6에서는 층리면을 따라 절리가 발달하고 있어 10.1%의 낮은 RQD값을 가진다. 국부적으로 8.7m 부근에서 파쇄대 및 세일이 협재되고 있으며 특히 미끄럼면이 나타난다. 층후 1.2m 정도의 흑색 세일이 층리면을 따라 절리가 잘 발달되어 높은 풍화도를 보이고 있으며 세일의 상부와 사암층의 일부가 파쇄대를 형성하고 있다. 10.8~14m 지점에 회색 중립질 사암이 수직절리의 발달로 파쇄되어 나타나고 있으며, 전반적으로 풍화가 진행된 상태이고 43.3%의 RQD값을 가진다. 그 하부에 세일 및 사암이 호층으로 배열하여 층후 20cm정도로 나타나고, 전체적으로 하부절리와 비슷한 고각으로 절리가 발달하고 있다. 황색 중립질 사암층이 15m까지 위치 있으며 주된 특징으로는 고각의 수직절리가 발달하고 있다. 절리면은 비교적 높은 풍화도를 보이고 있으며 RQD는 상대적으로 72%의 높은 값을 보인다. 시추심도 최하부 20m에서 15.5m에는 암색의 중립질 사암이 놓여있다. 이 층의 16m 지점에서는 흑색 세일암편이 함유된 두 층을 관찰할 수 있다.

4호공은 사면 상부의 북동쪽, GL. 56.5m 지점에 위치하고 있으며 시추심도는 20m이다. 0~1.7m의 지표에는 사질토와 풍화토로 구성된 붕적층이 놓여 있으며, 1.7~3.6m에는 황색 세립질

사암층이 분포하면서 2m 부근에서 수 개의 세일층과 파쇄대를 가지고 있다. 전반적으로 풍화가 진행된 상태이며 37.9%의 RQD값을 가진다. 층후 1.2m의 흑색 세일층이 그 하부에 위치하며 일부 사암층을 협재하고 수직절리가 발달해 있어 높은 풍화도와 8.3%의 낮은 RQD값을 가진다. 4.8~6.6m의 심도에는 황색의 세립질 사암층으로 구성되어 있으며 얇은 세일층을 협재한다. 풍화가 전반적으로 진행된 상태이며 29.7%의 RQD 값을 가진다. 흑색 세일이 6.6~7.7m에 층후 1.1m의 두께로 나타나며 얇은 탄층과 사암층이 협재되고 있다. 전반적인 풍화양상을 보이며 9.8%의 낮은 RQD값을 가진다. 9.7m까지 2m의 회색 중립질 사암층이 적은 풍화상태와 58.8%의 RQD값을 가지며, 이어 9.7~10.4m에 분포하는 흑색 세일은 고각의 절리가 발달해 있고 하부로 갈수록 조립화 되는 경향을 보인다. 풍화도가 다소 현저하며 53.8%의 RQD값을 가진다. 또한 BH-3의 14m 부근의 얇은 세일층과 같은 층으로 대비가 되고 있다. 세일층 하부에 다시 10.4~16.8에 이르는 회색 중립질 사암층이 15.5m 에서 국부적으로 세일암편을 함유하고 하부의 세일층과 접하는 부분에 일부 파쇄대를 이루며 나타나고 있다. 적은 풍화도를 보이며 76.1%의 RQD 값을 가진다. 16.8~18m까지는 흑색 세일이 분포한다. 세일층은 층리면을 따라 방해석의 충전작용이 있었으며 전반적인 풍화도와 56.8%의 RQD값을 가진다. 최하부 20mm까지는 수직절리가 발달한 회색의 중립질 사암층이 놓여 있으며 적은 풍화도를 가지며 96.6%의 높은 RQD값을 가진다.

## 2.2.6 실내시험

다음 표 2.3-5는 지역 시추암추 시료에 대한 실내시험 결과이다.

표 2.3 암반시료 일축압축시험 결과표

시료번호	암종	심도 (m)	직경 (mm)	길이 (mm)	일축강도 (kgf/cm <sup>2</sup> )	비고
J-R <sub>UCS</sub> -1	s.s	4.10	52.2	107.0	110	BH-1
J-R <sub>UCS</sub> -2	s.s	6.30	52.2	102.1	296	
J-R <sub>UCS</sub> -3	s.s	10.70	52.2	101.1	1096	
J-R <sub>UCS</sub> -4	s.s	12.90	52.2	106.8	976	
J-R <sub>UCS</sub> -5	sh	17.80	52.2	69.9	570	
J-R <sub>UCS</sub> -6	sh	3.30	52.2	54.4	107	BH-2
J-R <sub>UCS</sub> -7	s.s	6.70	52.2	102.2	1400	
J-R <sub>UCS</sub> -8	s.s	13.85	52.2	102.5	1559	
J-R <sub>UCS</sub> -9	s.s	15.15	52.2	105.3	328	
J-R <sub>UCS</sub> -10	s.s	18.60	52.2	104.0	596	
D-R <sub>UCS</sub> -1	s.s	11.70	52.2	83.5	651	BH-3
D-R <sub>UCS</sub> -2	sh	13.20	52.2	67.8	162	
D-R <sub>UCS</sub> -3	s.s	15.60	52.2	103.1	2455	
D-R <sub>UCS</sub> -4	s.s	12.00	52.2	98.55	1383	BH-4
D-R <sub>UCS</sub> -5	s.s	17.00	52.2	81.05	490	

\* ss : sandstone

sh : shale

표 2.4 암반시료 삼축압축시험 결과표

시료번호	암종	심도 (m)	직경 (mm)	길이 (mm)	삼축강도 (kgf/cm <sup>2</sup> )	비고
J-R <sub>TCS</sub> -1	s.s	5.00	52.0	109.9	580	BH-1
J-R <sub>TCS</sub> -2	s.s	5.90	52.2	109.5	527	
J-R <sub>TCS</sub> -3	s.s	10.30	52.2	104.6	1478	
J-R <sub>TCS</sub> -4	s.s	13.00	52.4	76.6	1800	
J-R <sub>TCS</sub> -5	sh	3.90	48.8	48.8	436	BH-2
J-R <sub>TCS</sub> -6	s.s	6.60	52.4	105.0	2177	
J-R <sub>TCS</sub> -7	s.s	13.60	52.3	103.2	1991	
J-R <sub>TCS</sub> -8	s.s	19.25	52.2	107.4	1196	
D-R <sub>TCS</sub> -1	s.s	12.10	52.2	61.2	526	BH-3
D-R <sub>TCS</sub> -2	s.s	15.50	52.2	104.6	1944	
D-R <sub>TCS</sub> -3	sh	7.60	52.2	66.7	410	BH-4
D-R <sub>TCS</sub> -4	s.s	11.90	52.2	105.8	1862	
D-R <sub>TCS</sub> -5	sh	16.90	52.2	90.7	515	

\* ss : sandstone                      sh : shale

표 2.5 암반시험 결과표

시료번호	암종	심도 (m)	일축강도 (kgf/cm <sup>2</sup> )	내부마찰각 (°)	점착력 (kgf/cm <sup>2</sup> )	인장강도 (kgf/cm <sup>2</sup> )	비고
J-1-1	s.s	4.1~5.0	110	47.8	21.2	19.3	BH-1
J-1-2	s.s	5.9~6.3	296	32.3	81.5	128.7	
J-1-3	s.s	10.3~10.7	1,096	43.7	234.6	245.9	
J-1-4	s.s	12.9~13.0	976	57.5	142.2	90.6	
J-2-1	sh	3.3~3.9	107	40.5	24.7	289.0	BH-2
J-2-2	s.s	6.6~6.7	1,400	57.9	200	126.0	
J-2-3	s.s	13.6~13.8	1,559	46.2	313.8	301.5	
J-2-4	s.s	18.6~19.2	596	52.3	101.8	78.7	
D-4-1	s.s	11.9~12.0	1,383	47.8	26.7	242.3	BH-4

\* ss : sandstone                      sh : shale

## 2.3 안정성 분석

### 2.3.1 도해적 분석

A 지역에서 각 지점별로 Dips program을 이용한 평면파괴 및 전도파괴 분석을 한 결과, zone 4에서 절리군 set1(층리면)에 의한 평면파괴와 절리군 set3에 의한 전도파괴가 예상되고, 그 외에는 대체로 안정한 것으로 분석되었다. 또한 사면과 절리군 set1(층리면)의 배향이 유사한 zone 1-2, 2의 경우, 내부마찰각이 감소되면 층리면에 의한 평면파괴가 예상된다. 절리조들의 평균방향성을 고려하여 분석해 본 결과 산사면의 방향이 층리면과 일치할 때 내부마찰각이 20° 이하가 되면 평면파괴 발생의 가능성이 확인되었다. 실제로 현장에서의 사면의 붕괴가 일어

난 양상이 평면파괴이고, 집중호우 이후에 붕괴가 일어난 것으로 보아 내부마찰각 감소에 의한 전단저항력 저하가 암반사면 붕괴의 주원인이 된 것으로 추정된다.

B 지역의 각 site 별 평면파괴 및 전도파괴 분석을 한 결과, zone 2, 4에서 전도파괴가 예상되고, 그 외에는 대체로 안정한 것으로 분석되었다. 또한 사면과 절리군 set1(층리면)의 배향이 유사한 zone 4,5 의 경우, 내부마찰각이 감소되면 층리면에 의한 평면파괴가 예상된다. 평균적인 절리군의 배향과 현장에서 붕괴가 일어난 방향의 사면을 선택하여 분석한 결과, 사면의 경사가 25° 이상이고 내부마찰각이 25° 이하가 되면 층리면에 의한 평면파괴가 예상되었다. 집중호우 직후에 산사면의 균열이 발생하였다는 현지 주민의 전언으로 미루어 볼 때, 지하수 수위 상승에 의한 암반사면 내부마찰각 감소에 따른 전단저항력 저하가 붕괴의 주원인으로 추정된다.

### 2.3.1 한계평형 해석

사면안정성 해석은 PCSTABL5M 프로그램에 의해 수행하였다. 사면안정성 해석은 Simplified Janbu's Method(Sliced Method)에 의한 원호활동 파괴방식으로 100회 반복 해석하여 최소안전율을 가지는 파괴예상면을 추적하였다. 적용 물성치는 각 조사지역에 대하여 표 2.6 및 표 2.7과 같이 지질조건이 유사한 지역에서 적용하는 경험적인 정수를 입력하였다. 해석은 실제로 산사면 붕괴가 발생한 방향으로의 측량 단면을 기준으로 수행된 것으로 해석 조건은 각각의 지역에서 평상시 지하수위가 낮은 경우와 집중호우시 지하수위가 높아지는 경우를 가정하여 수행하였으며, 또 지하수위가 낮은 경우에 대해서는 지진력의 작용을 고려하여 안정성을 검토하였다. 지진력은 중력 가속도의 10%인 0.1g의 수평력으로 가정하였고 수직력은 무시하였다. 여기서, 중력가속도 1g는 980cm/s<sup>2</sup>에 해당된다.

표 2.6 A, B 지역 토층구분 및 해석 입력치

지 층	단위중량 $\gamma$ (t/m <sup>3</sup> )	내부마찰각 $\phi$ (°)	점착력 c(t/m <sup>2</sup> )
A-표 토	2.2	30.0	5.0
A-연약대	2.2	22.0	0.0
A-연암층	2.4	30.0	10.0
A-경암층	2.4	40.0	100.0
B-표 토	2.0	22.0	1.0
B-연약대	2.2	18.0	0.0
B-연암층	2.5	30.0	10.0
B-경암층	2.6	40.0	100.0

해석은 두 조사지역에서 평상시 지하수위가 낮은 경우와 호우시 지하수위가 높은 경우를 가정하여 수행하고, 각각의 경우에 수평지진력 0.1g를 고려하여 분석을 수행하였다.

표 2.7 조건별 사면의 안정성 해석 결과

조사지역	지하수위	지진하중	최소안전율	평가
A 지역	높음	-	0.966	불안정
	낮음	-	1.260	안정
		0.1	0.931	불안정
B 지역	높음	-	0.992	불안정
	낮음	-	1.512	안정
		0.1	1.098	불안정

해석결과 A 지역은 평상시 수위가 낮은 경우에 어느 정도 사면의 안정성이 유지되나 집중호우에 의해 수위가 높아진 경우는 불안정하게 나타났다. 또한 지진하중이 고려될 경우 지하수위가 낮아도 불안정하게 나타났다. B 지역 역시 평상시 수위가 낮은 경우에는 안정하나 수위가 높아진 경우와 지하수위가 낮더라도 지진하중이 고려될 경우는 불안정하게 나타났다.

따라서 본 조사지역들은 집중호우에 의한 지하수위 상승이 산사면 붕괴의 원인으로 추정되며, 평상시에도 지진 등의 동하중이 작용할 경우 불안정 할 것으로 예상된다.

### 3. 종합분석

#### 3.1 결론

##### □ A 지역

- 본 지역은 역암, 사암, 미사암, 셰일, 탄질셰일로 구성되며 층리면은 N19~60E/10~22SE로 발달하여 최대 위험 분리면으로 작용한다.
- GPR탐사결과 붕괴지 침두부에서는 5m 이내, 중앙부에서는 약 20m, 선단부에서는 5m 내외의 심부에 주요 파쇄대가 존재하며 이는 주로 퇴적암의 층리면에 기인한 것이라 판단된다.
- 극저주파 탐사결과 기 확인된 활동사면의 측방으로 대규모 잠재 균열의 발달은 없는 것으로 보이며 기존의 폭 40여 m에 해당하는 균열부만이 독립적인 활동을 일으킨 것으로 판단된다.
- 시추조사 결과 활동사면 선단부에서는 심도 3m 정도에서 파쇄대 및 셰일층의 협재와 미끄럼면이 확인된다.

- 토질시험 결과 세립이 거의 없는 조립의 사질토(SP)이며 암석시험 결과 전체적으로 풍화암~경암의 범위로 주로 풍화암에 해당된다.

- 한계평형해석 결과 평상시 수위가 낮은 경우에 어느 정도 사면의 안정성이 유지되나 집중호우에 의해 수위가 상승하면 불안정해 지며 지진하중이 고려될 경우 지하수위가 낮아도 불안정하다.

- 도해적 해석 결과 사면과 set1(층리면)의 배향이 비슷한 zone 1-2, 2 의 경우, 내부마찰각이 20° 이하로 감소되면 층리면을 따른 평면파괴가 예상되며 실제 현장에서도 집중호우 이후에 붕괴가 일어난 것으로 보아 내부마찰각 감소에 의한 전단저항력 저하가 암반사면 붕괴의 주 원인이 된 것으로 추정된다.

## □ B 지역

- 본 지역은 사암, 셰일로 구성되며 층리면 방향은 N45~53E/25~31SE로서 본 층리면을 따른 기반암 상부 표토의 활동이 추정된다.

- GPR 탐사결과 붕괴사면 상부 및 가장자리에서의 토사층 심도는 약 4m, 중앙부에서는 약 10m에 달하며 전체적으로 남동향으로 풍화심도가 깊다. 따라서 남동향으로 경사하는 층리면을 따른 토사의 활동과 붕괴사면 남동측에서 동서향의 균열대 발달이 추정된다.

- 극저주파 탐사 결과 전체적으로 북동향 균열 발달이 수매 확인된다. 이 역시 퇴적암 층리면의 주향 방향과 일치하는 것으로 이는 층리면을 따른 활동 경향을 시사하고 있다.

- 시추조사 결과 사면 중앙부에서 파쇄 및 풍화심도가 가장 깊으며 지표의 지반 낙차로 인한 지층의 미끌림이 확인되고 10m 이하 심도에서는 변위발생은 없었던 것으로 판단된다.

- 토질시험 결과 세립~조립의 사질토(SW-SM)이며 암석시험 결과 풍화암~극경암의 범위로 활동 예상 심도 부근에서는 풍화암~연암의 범위이다.

- 도해적 해석 결과 사면과 절리군 set1(층리면)의 배향이 유사한 경우, 내부마찰각이 감소되면 층리면을 따른 평면파괴가 예상되며 특히 사면 경사가 25° 이상, 내부마찰각이 25° 이하가 되면 층리면에 의한 평면파괴가 예상된다. 따라서 집중호우시 지하수 수위 상승에 의한 암반사면 내부마찰각 감소에 따른 전단저항력 저하가 붕괴의 주원인으로 추정된다.

- 한계평형해석 결과 평상시 수위가 낮은 경우에는 안정하나 수위가 높아진 경우와 지하수위가 낮더라도 지진하중이 고려될 경우는 불안정하게 나타나 집중호우에 의한 지하수위 상승이 산사면 붕괴의 원인으로 추정된다.

### 3.2 제 언

따라서 이상의 현장조사 및 안정성 분석 결과를 종합하여 다음을 제안한다.

#### □ A 지역

활동사면의 하부로 갈수록 풍화 및 파쇄심도가 깊어지므로 표토에 대한 보강만으로는 장기적인 안정성을 기대하기 어렵다. 또한 지층의 층리면을 따른 사면활동이므로 기존의 지표균열들을 장기간 방치할 경우 지표수 유입 등에 의한 풍화작용의 가속화로 활동면의 심부화를 초래할 수도 있다.

따라서 본 지역에 대한 보강공법으로 억지공법을 검토할 경우 보강심도에 대한 고려가 반드시 필요하며 사면 붕괴의 주요 원인이 집중호우에 의한 것으로 확인된 만큼 현재 지표에 발달한 균열들은 강우 유입을 차단하기 위하여 점토물질 등을 이용한 봉합조치가 필요하다. 또한 붕괴사면 좌측부의 계곡은 집중호우시 지표수 집중이 우려되며 사면 첨두부 북측의 기존 임도 역시 집중 호우시 지표수 배출에 불리하게 작용할 수 있다. 따라서 계곡 중앙부로 지표수의 집적을 유도하기 위한 붕괴사면 좌측 계곡부 및 우측사면에 배수로를 설치하여 지표수를 신속히 배출시킬 수 있도록 하고 사면 첨두부 북측 임도는 배수로 설치시 북측사면으로 지표수가 유도될 수 있도록 고려해야 한다.

#### □ B 지역

층리면을 따른 표토의 포행성 활동과 이에 수반된 균열 발달이 확인되었으므로 이에 대한 조치가 요구된다. 즉 남측 사면으로의 활동을 억제할 필요가 있다. 특히 본 지역은 붕괴지에 인접한 민가의 밀집으로 보강방법 및 보강범위에 각별한 고려가 필요하다.

따라서 기본적으로 토사활동의 억제를 위하여 사면 남측 및 동측에 억지공법의 적용이 검토될 수 있으며 지반 자체에 대한 직접 보강공법으로 어스앵카 혹은 그라우팅등의 지반개량공법도 적용할 수 있다. 특히 노출된 토사면은 녹생토 공법을 적용하여 표면토사의 유실을 방지하고 축방으로의 배수로 설치로 집중강우에 대비하여야 한다.

### 3.3 종합제언

사면 안정성을 평가하고 그 대비책을 수립함에 있어 현장조사방법의 표준화 및 조사자료의 정량적 처리를 통하여 현장조사의 질적 향상 및 조사자료의 신뢰성을 향상시키기 위한 노력이 필요하다. 즉, 광역적인 사면 안정성 검토를 위한 위성영상자료 분석 및 항공사진 분석과 같은 원격조사법 적용의 활성화, 국지적 안정성 평가를 위한 각종 지구물리탐사법의 효과적 적용, 분

리면 특성조사를 포함하는 정밀지질구조조사 등을 지역적 특성에 적합하게 적용함으로써 조사의 효율성 및 신뢰성을 향상시킬 수 있을 것이다.

국내 사면 붕괴의 특성이 대부분 강우에 의한 것으로 확인되고 있으며 특히 퇴적암 등 저각도의 판상 불연속면을 따른 평면파괴 양상이 두드러진 특성으로 지적되고 있는 만큼 자연사면을 포함한 기존 사면의 안정성이 전반적으로 검토될 필요가 있다. 즉, 층리면, 엽리면 등의 방향성과 사면의 방향성간의 기하학적 관계에 따라 사면의 안정등급을 체계화함으로써 기존 사면은 물론 향후 조성대상 사면의 기본적인 불안정성을 사전에 파악하여 고질적인 지질재해에 대비해야 할 것이다.

또 이러한 자료는 기상·수문 자료와 함께 사면 안정성 등을 포함하는 자연재해 예방을 위한 자연재해 경보 시스템의 개발에 적극 활용될 수 있을 것이다.