

## 지질 구조에 의한 사면의 불안정성에 관한 연구: 충북 피반령 부근

정상원 · 최병렬\*

충북대학교 사범대학 과학교육학부

### Study of Structurally Controlled Slope Instability: Pibanryeong, Chungbuk, S. Korea

Sang-Won Cheong and Byoung-Ryol Choi\*

Department of Science Education, Chungbuk National University

절토사면의 안정과 관련하여 충북 청원군에서 보은군을 가로지르는 국도 25번을 따라 지질구조에 의하여 형성된 여러 종류의 사면 파괴유형을 사례 분석을 통하여 해석하고 사면의 불안정성에 영향을 끼치는 요인을 연구하였다. 노두의 발달이 양호한 3 지점을 선정하였으며, 정면적법을 이용하여 불연속면의 방향성, 연장성, 절리의 표면 거칠기 및 암석의 일축압축강도 등 공학적 특성을 분석하였다. 연구지역은 옥천습곡대에 해당되며, 미동산층의 석영편암과 규암과 운교리층의 천매암으로 구성된다. 이들 암석은 미약한 변성작용을 받은 변성퇴적암으로 구성되기 때문에 절리구조 이외의 불연속면 즉 편리와 벽개구조 등의 면구조와 습곡작용에 의한 지층의 굴곡현상이 잘 발달되어 있다. 초기의 광역습곡구조와 후기의 중첩습곡구조의 발달에 따른 절리구조의 형성으로 지층의 주향에 평행하거나 수직인 절리군 및 췌기형 또는 가위형 절리군 등 다양한 형태의 절리가 형성되었으며 절리와 벽개구조 및 층리와 사면의 방향성이 서로 교차하여 여러 종류의 파괴양상을 일으키는 불안정 요인이 되었다. 습곡구조에 의해 사면의 방향과 층리의 방향성이 서로 일치하는 경우 평면파괴를 비롯하여 대규모 파괴를 유발시킬 수 있는 요인이 많았으며, 사면과 층리의 방향성이 서로 교각으로 교차하는 지역에서는 절리군과 벽개의 교차에 의하여 지역적인 소규모의 파괴양상을 보이는 것으로 분석되었다.

**주요어** : 절토사면, 지질구조, 파괴유형, 공학적 특성, 습곡구조의 발달에 따른 절리구조

Types of slope failure related to cut slope stability are interpreted through case analyses, and also factors affecting structurally controlled instability investigated, which are developed by geologic structures along a national road No. 25 across the Cheongwon and Boeun-Guns, Chungbuk. Engineering properties such as orientation, persistence, roughness and uniaxial compressive strength of joints are analyzed by square-inventory method in three areas with well-preserved outcrops. The study area is located in Ogcheon folded bet, and are composed of quartzschist and quartzite in the Midongsan Formation and phyllite in the Ungyori Formation. Flexural beds by folding, schistosity and cleavage besides joints are developed due to slight metamorphism. Various types of joints developed by folding are formed such as strike-parallel, strike-perpendicular, wedge and wrench joint sets by both initially regional and later superposed folding. Factors of slope instability are created by crossing the orientations of joint, cleavage, bedding and slope one another. In the case that the orientation of a slope is coincident with one of beds, factors causing large-scale failure including plane failure are increased greatly. Also in the region that orientations of the slope and bed are crossed each other at high angle, only local and minor failures are shown in the slope.

**Key words** : cut slope, geologic structures, types of failure, engineering properties, joints developed by folding

#### 서 론

연구지역은 행정구역상 충북 청원군 가덕면의 동남

지역에서 보은군 회북면 북서지역에 해당되며 국도 25번 도로가 지나는 지역에 속한다. 또한 경위도상 위도 36° 30' 00" - 36° 34' 06"와 경도 127° 32' 42" - 127°

\*Corresponding author: choibr@chungbuk.ac.kr

36' 08"의 범위에 속하는 지역이다. 북서-남동 방향으로 국도 25번 도로를 따라 최고봉인 피반령(皮盤嶺: 해발고도 360 m)이 있으며 피반령을 기점으로 북서 방향(청주시 방향)의 절취 사면들은 모두 동쪽과 북서 방향으로 경사하며, 남동 방향(보은읍 방향)의 절취 사면들은 도로의 굴곡으로 기인하여 여러 방향의 사면이 존재하지만 대부분 북서 방향과 남서 방향으로 경사한다.

연구지역에 분포하는 지층은 하부로부터 미동산층, 운교리층, 화전리층 및 구룡산층으로 모두 북동-남서 방향으로 분포하고 있으며 이들 지층의 구성암석은 연구지역의 최하부 지층인 미동산층은 석영편암과 규암으로 구성되며, 운교리층, 화전리층 및 구룡산층은 흑색 점판암, 사질 셰일 및 천매암 등의 이질기원과 석회질 셰일과 호상 석회암 등의 석회질 기원의 다양한 암석으로 구성된다(이중혁 외, 미원도폭, 1980). 북서 방향의 운교리층과의 경계에는 청주 화강암이 관입되어 있다. 상기한 지층 중에서 운교리층은 연구지역에 4차례 반복되어 나타나며 이는 광역적 습곡작용에 기인한다(Fig. 1).

연구지역 내의 사면안정에 대한 직접적인 연구는 없

으나 연구지역 주변의 학술논문으로 지형분석, 지하수유로조사 그리고 암석의 탄성과 탐사와 이방성의 연구(최병렬, 1998; 최병렬, 2000; 최병렬, 2001)가 있으며, 사면안정에 관한 지질학적 및 공학적 연구 외 GIS를 이용한 사면안정에 관한 연구가 있다(Hoek and Bray, 1981; Priest, 1993; Hoek, 2007; 이지수 외, 2001; 이연희 외, 2003; 김경수 외, 2004; 최재원 외, 2004). 최병렬과 정상원(2008)은 충북 보은군 창리 지역에 대하여 정면적 방법을 이용하여 사면 안정을 연구한 바 있다.

연구지역인 국도 25번을 따라 존재하는 사면 중 몇몇 사면은 2002년 여름 집중호우에 의해 대규모 산사태가 발생하기도 하였으며 현재 대부분 사면에 대해 다양한 보강과 보호가 이루어져 있으나 산사태의 발생 원인 규명은 연구된 바 없다. 연구지역은 화성암과는 달리 변성 퇴적암으로 구성되기 때문에 절리구조 이외의 불연속면 즉 변성작용과 변형작용의 결과물인 층리(또는 편리)구조와 벽개구조 등의 면구조와 습곡작용에 의한 지층의 굴곡현상이 잘 발달되어 있다. 사면의 안정과 관련하여 국도 25번을 따라 여러 종류의 사면파괴 양상을 잘 보여 주며 따라서 이번 연구에서는 지형 즉 사면의 방향성과 암석의 물리적 성질 그리고 지질구조의 영향 등 복합적인 영향으로 사면의 불안정성을 유발하는 요소와 그에 기인하여 발생한 파괴유형을 평사투영법(Wyllie and Mah, 2004)을 이용하여 분석하고 연구하고자 한다.

Fig. 1은 연구지역의 지질도이며 국도 25번 도로와 대체로 평행하게 또한 여러 지층의 주향 방향에 수직하게 그린 단면도이다. GIS 프로그램을 이용하여 연구지역의 3차원적 지형도를 보여주기 위하여 우선 1m 간격의 DEM(Digital Elevation Map)을 형성한 후 DEM 위에 연구지역의 지질도를 작성한 그림이다.

### 연구방법

충북 청원군 가덕면에서 보은군 회북면 사이를 관통하는 국도 25번 도로를 따라 사면 안정에 관한 수많은 보강과 보호가 이루어져 있다. 연구지역은 한국의 지체 구조상 옥천습곡대로 알려져 있으며 이 지역을 따라 정밀 지질조사를 실시하여 지층과 구조의 발달 및 암석의 분포를 파악하였다. 야외지질조사를 수행함과 동시에 각 암석의 시료를 채취하여 편광현미경을 이용하여 각 암석의 구성광물과 입자의 크기 및 조직을 연구하였다.

국도 25번 도로를 따라 발생한 사면의 대부분은 여러 종류의 보강과 보호로 이루어져 있기 때문에 사면의 안

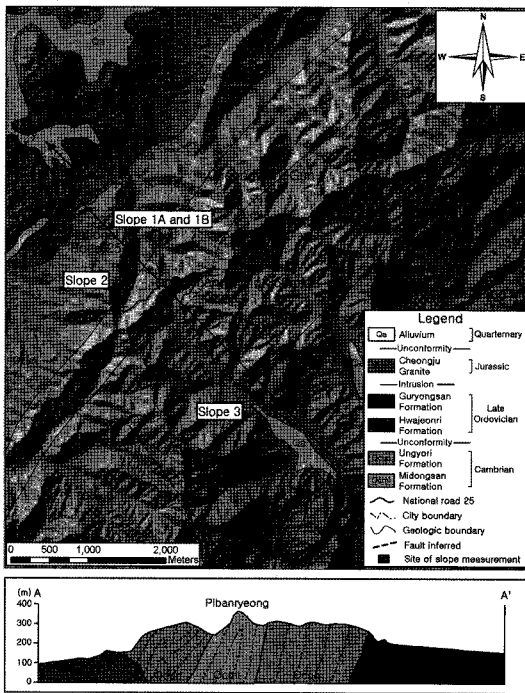


Fig. 1. Geologic map and cross section around the Pibanryeong area, a boundary between Cheongwon-Gun and Boeun-Gun, Chungbuk(modified from the geologic map of Miweon sheet(Lee, et al.(1980)). 2.5x vertical exaggeration in cross section.

정성 연구를 위하여 노출된 암반은 찾기 어렵다. 연구지역 사면의 안정성 연구를 위하여 노두의 발달이 양호한 3 지점(Slope 1A와 1B, Slope 2 및 Slope 3)을 선정하였으며(Fig. 1), 각 사면에 대하여 정면적법을 이용하여 불연속면의 방향성, 길이, 연장성, 절리의 표면 거칠기 및 암석의 일축압축강도 등 공학적 특성을 분석하여 여러 종류의 사면파괴유형을 연구하였다. 특히 층리(또는 편리)구조나 벽개구조 및 습곡구조 등의 다른 불연속면과 지질구조가 존재할 경우 절리구조와의 상호관계에 따라 사면의 안정성이 달라지는 현상을 검토하였다.

정면적법의 연구에 있어 사면 1의 지역은 과거에도 대규모 산사태가 여러 차례 발생한 지역으로 현재 어떤 사면의 보강도 이루어져 있지 않으며 단지 국도 25번 도로를 약 10~20 m 북동쪽으로 이동하여 재건설되어 있다. 따라서 사면 1A와 1B의 경우 노두의 관찰이 용이하며, 석영 편암과 규암으로 구성된 미동산층으로 각각  $2.0 \times 2.0$  m와  $1.5 \times 1.5$  m의 정면적법을 이용하여 절리구조의 특성을 연구하였다. 또한 사면 2와 3은 각각 규암과 천매암으로 구성된 운교리층으로서 노두의 관찰이 비교적 용이하며 사면 1과 비교 연구를 위하여 선정하였으며  $1.5 \times 1.5$  m의 정면적법을 이용하였다.

## 연구 지역의 지질 개요

### 지층의 분포 및 암석의 특징

연구지역의 지층은 한국의 지구조상 육천누층군에 속하는 변성퇴적암류로서 연구지역의 중앙부에 고생대 캄브리아기의 미동산층과 운교리층이 북동-남서방향으로 분포하며 후기 오르도비스기의 화전리층과 구룡산층 역시 북동-남서방향으로 분포한다. 중생대 쥐라기의 대보 화강암 중의 하나인 청주화강암이 연구지역의 북서부에 운교리층의 주향방향과 대체로 평행하게 관입되어 있다(Fig. 1).

국도 25번 도로를 따라 청주화강암이 분포하는 지역은 지형상 해발고도 100 m 내외의 저지대나 구릉지를 형성하지만 남동쪽으로 갈수록 급경사를 이루며 운교리층과 미동산층을 관통하며 도로의 굴곡이 매우 심하다. 피반령(해발고도: 360 m)을 지나 다시 운교리층이 반복되며 화전리층과 구룡산층 및 운교리층을 관통하지만 화전리층과 구룡산층이 나타나는 지역은 해발고도 150 m 내외의 저지대를 이루기 때문에 사면이 발달이 미약하다. 연구지역의 사면안정성을 연구하기 위해 선정한 지역은 도로의 굴곡이 심한 미동산층(사면 1A와 1B)과 운교리층(사면 2와 3)에 속한 암석으로 이루어진다.

연구지역의 최하위 지층인 캄브리아기의 미동산층은 주로 석영편암과 규암으로 구성되며 규암대와 천매암이 호층을 이루기도 한다. 석영편암과 규암은 피반령을 기점으로 북서부에 나타나며 남서부는 규암과 사질 천매암이 호층을 이룬다. 석영편암과 규암은 대부분 석영 입자로 구성되며 백색에서 회백색을 띤다. 석영입자의 크기는 육안상 관찰되지 않으며 편광현미경의 관찰로 장경 0.1~0.2 mm의 극세립질인 석영입자로 구성되어 있음을 알 수 있다.

캄브리아기의 운교리층은 미동산층의 상위 지층으로 연구지역에 4차례 반복하여 나타나며 이질 또는 사질 천매암으로 구성되며 대부분 짙은 회색에서 흑색 및 녹색을 띤다. 입자의 크기는 극세립질로 매우 작아 육안상 입자의 크기를 볼 수 없으며 편광현미경의 관찰에서 주 성분 광물은 장경 0.1 mm 내외의 크기를 갖는 석영, 견운모 및 흑운모로 구성되며 부성분 광물로는 녹리석과 적철석으로 구성되어 있다. 운교리층을 구성하는 암석은 대부분 천매암이기 때문에 층리를 고각도로 절단하는 파랑벽개가 잘 발달되어 있으며 파랑벽개가 우세하게 발달된 지역에서는 층리와 서로 혼동되기도 한다. 운교리층은 미동산층의 양쪽에 분포하며 미동산층과의 경계부에서는 일부 규암층과 호층을 이루기도 한다. 청주화강암과의 경계부에서 두께 약 5 m의 결정질 석회암을 포함한다.

후기 오르도비스기의 화전리층은 층서상 운교리층과 부정합관계이며 흑색 점판암, 사질 셰일 및 천매암 등의 이질기원과 석회질 셰일과 호상 석회암 등의 석회질 기원의 암석으로 구성된다. 화전리층은 암회색의 천매암으로 층리구조가 잘 발달되어 있으며 이를 고각도로 절단하는 파랑벽개 내지 불연속 벽개(fracture cleavage)가 조밀하게 발달된다.

후기 오르도비스기의 구룡산층은 상기한 화전리층의 상위에 놓이며 천매암, 운모편암, 흑색 점판암 및 합탄 저면성 셰일로 구성된다(이종혁 외, 미원도폭, 1980). 구룡산층은 암회색의 천매암으로 대부분 구성되며 일정한 방향의 층리(또는 편리)구조가 파랑벽개와 함께 잘 발달되어 있다. 상기한 화전리층과 구룡산층은 연구지역에서 저지대에 속하며 풍화가 많이 진행되어 대부분 토양화 또는 푸석바위화 되어 있다. 따라서 사면의 발달이 적으며 소규모로 존재한다.

### 현미경적 미구조

사면안정에 영향을 끼칠 수 있는 현미경적 미구조 요소를 파악하기 위하여 각 노두별로 암석 표본을 채취하

여 박편제작을 하였으며 편광현미경을 이용하여 암석의 미구조와 광물의 종류, 크기, 형태, 방향성 그리고 층리 구조와 파랑 벽개의 관계 등 물리적 요인을 연구하였다. 특히 천매암의 경우 층리와 벽개구조를 관찰하기 위하여 암석 표본을 층리면에 수직한 방향으로 절단하여 편광현미경 관찰을 시도하였다.

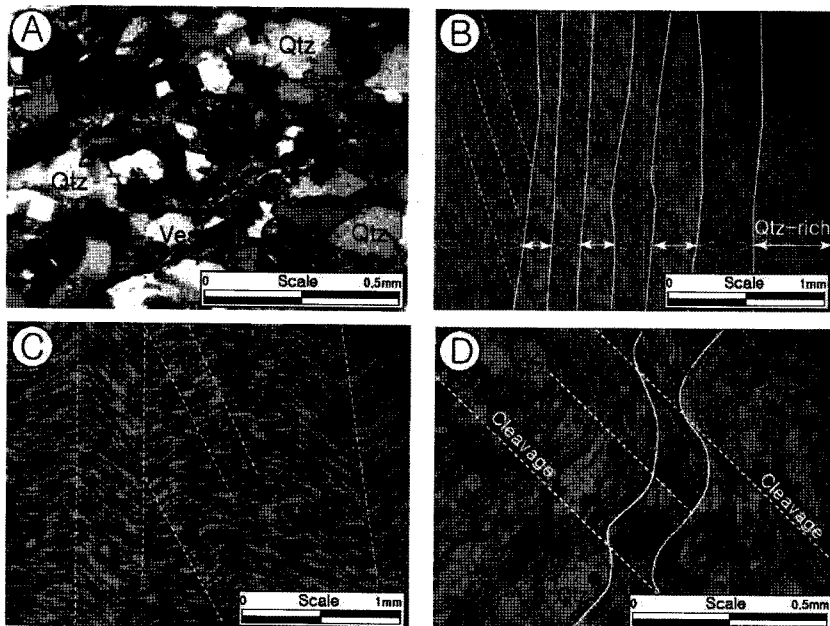
연구지역에 분포하는 대부분의 암석은 석영편암과 천매암으로 편리와 벽개구조가 잘 발달되어 있으며 편리와 벽개구조는 아직 파괴되지 않은 면구조이지만 암석이 지표에 노출될 때 잠재적인 불연속면이 된다. 사면에 노출된 암석에서 편리와 벽개는 절리구조와 더불어 또 하나의 불연속면으로 작용하여 절리의 불연속면만 고려할 때의 파괴양상과는 다른 파괴양상이 나타날 수 있다. 따라서 이러한 잠재적인 불연속면의 방향성이 절리의 방향성을 관통할 때 예상하지 못한 사면 파괴를 유발할 수 있다. 또한 편리와 벽개구조에는 미세한 운모광물이 편리나 벽개면을 따라 집중되어 있으므로 그 방향에 따라서 쉽게 미끄러지게 되는 원인이 되기도 한다.

앞서 설명한대로 연구지역의 사면에 분포하는 지층은 주로 규암으로 구성된 미동산층과 천매암으로 구성된 운교리층이다. 미동산층의 주구성암석인 규암 또는 석영편

암은 사암이 변성작용을 받아 형성되었으며 장경 0.1~0.2mm의 석영이 주구성 광물이며 석영입자 사이에 장경 0.1mm 이하의 백운모가 그 사이를 채우는 조직으로 이루어져 있다. 규암의 경우 엽리가 발달되지 않은 괴상의 형태이나 석영편암은 신장된 석영입자를 극세립질의 백운모가 감싸는 형태를 보여주며 백운모와 신장된 석영의 방향이 편리구조를 나타낸다(Fig. 2(A)).

운교리층의 주구성암석인 천매암은 극세립질의 세일이 미약한 변성작용을 받아 광물의 입자 역시 장경 0.1mm 이하의 크기로 매우 미세하다. 대부분의 광물은 극세립질의 석영, 견운모(또는 백운모) 및 흑운모로 구성되며 부성분 광물로는 녹리석 및 소량의 적철석이 존재한다. 광물 입자의 크기는 대부분의 광물에 있어 장경 0.1mm 이하의 극세립질이며 석영과 견운모나 흑운모 및 녹리석 등의 운모광물이 층리면에 평행하게 서로 교호하여 나타나며 층리면을 따라 약간 신장되어 있다. 따라서 이러한 면구조를 갖는 암석이 풍화작용을 받는 경우 층리(또는 편리)나 파랑벽개를 따라 얇은 면구조로 쪼개진다.

석영편암의 편리는 층리와 평행하게 발달되지만 천매암의 파랑벽개는 지역에 따라 층리와 벽개가 이루는 각



**Fig. 2.** Photomicrographs of rock samples mostly present in the study area. (A) Quartz-schist from the rock sample in slope 1A, (B) Phyllite from the rock sample near slope 3, (C) Crenulation cleavage from the rock sample near slope 2, (D) Crenulation cleavage from the rock sample in slope 3 (Qtz: quartz; Py: pyrite; Hm: hematite). Minerals in matrix are composed of micro-crystalline biotite and sericite).

도가 다르나 대체로 층리의 방향성과 30-80°의 각도로 서로 교차하며 발달되어 있다. 파랑벽개는 미약한 변성 작용을 받은 암석 내에 발달한 쪼개진 엽리구조로서 변성암 중 천매암에서 잘 나타나며 현미경적 미세 습곡구조로 물질모양을 보여준다. 파랑벽개 사이의 간격은 암석마다 다르며 편광현미경상에서 0.3~1.0 mm의 간격을 갖지만 암석의 노두관찰에서는 최대 50~100 mm의 간격으로 나타난다(Figs. 2(B), 2(C) and 2(D)).

**지질구조**

**절리구조**

습곡구조의 형성에 따른 절리구조의 발생 양상에 대한 연구는 여러 학자에 의해 연구되어는 왔지만 그 중 대표적인 예는 Stern(1968)과 Hancock(1985)에 의한 절리의 발달과 형성과정이다. Stern(1968)은 습곡에 의한 절리의 발달을 4가지 형태로 구분하였으며 Hancock (1985)은 습곡의 발생에 따른 절리구조의 형성 양태를 6 가지로 구분한 바 있다.

옥천습곡대의 지층이 습곡구조의 발달에 따른 연구지역에 분포하는 절리구조의 형성에는 주향에 평행하거나 수직인 절리군(strike-parallel or perpendicular joint set)

그리고 췌기형 또는 가위형 절리군(wedge or wrench joint set) 등 다양한 형태의 절리가 형성될 수 있음을 보여준다(Fig. 3). 이러한 절리군은 층리(또는 편리)와 파랑벽개 및 사면의 방향성과 더불어 사면의 불안정성에 영향을 끼치는 중요한 요소가 된다. 이러한 절리군은 연구지역의 각 사면에서 연장성이 크고 절리간격이 일정한 규칙절리(systematic joint)를 구성한다.

연구지역에 분포하는 암석은 상기한 대로 석영편암, 규암, 점판암 및 천매암 등 다양한 암석으로 구성되며, 절리의 발달 양상은 암석의 단단한 정도(competence contrast)에 영향을 받는다. 따라서 암석의 종류가 변하는 경우 절리의 방향성, 간격, 연장성, 표면거칠기 및 암석의 압축강도 등 암석의 공학적 특성에 미치는 영향이 매우 크다고 할 수 있다.

**습곡구조**

연구지역의 광역적 습곡구조는 옥천습곡대의 지층이 초기에는 중생대 트라이아스기의 송립변동에 의해 습곡되었으며 그 후 주라기의 대보 조산운동에 의해 가해진 응력에 기인하여 복습곡대와 비대칭 습곡대를 형성하였다(미원도복, 이종혁 외 2인, 1980). 이로 인하여 습곡대의 습곡축면의 주향은 북동 방향이며 북서쪽으로 경사하며 그리고 습곡축은 남서 방향으로 경사하는 대규모의 synclinorium 양상의 습곡을 형성하게 되었다. 일반적인 광역적 습곡축면의 주향과 경사는 각각 N35-40°E/50-70°NW이다.

연구지역은 남동부로 갈수록 미동산층의 상위 지층인 윤교리층이 네 번 반복되며 그 사이에 연구지역의 최하부 지층인 미동산층이 나타나며 그리고 화전리층 및 연구지역의 최상위 지층인 구룡산층이 나타난다. 따라서 동일 지층이 반복되기 때문에 이 지역에서의 지층은 습곡구조에 의해 형성되었음을 나타낸다(Fig. 1).

연구지역의 습곡구조는 덜 단단한(incompetent) 암석인 천매암과 점판암 등의 암석으로 구성된 구룡산층, 화전리층 및 윤교리층에서 잘 발달되어 있으나 야외조사시에는 발견되지 않았으며 대신에 수많은 소규모의 파랑 습곡은 잘 관찰된다. 하지만 규암 또는 석영편암 등의 단단한 암석으로 구성된 미동산층에서는 광역적 습곡구조의 양상을 지시하는 기생습곡이 다수 발견되었다(Fig. 4). 기생습곡의 모양은 S-형이며 이러한 사실은 미동산층이 비대칭 배사구조로 형성되었으며 습곡축면이 북동 주향과 북서 방향으로 경사하는 지층으로서 연구지역의 사면 1A와 1B는 이 지역에 해당된다.

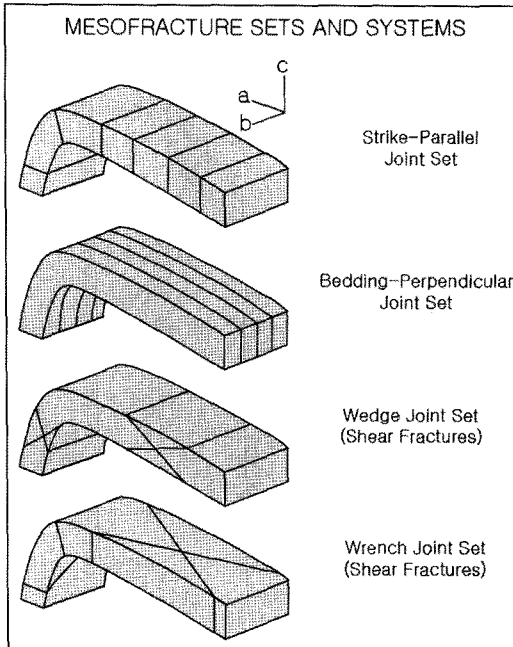


Fig. 3. Aspects of fractures developed by regional folds (adapted from Hancock, 1985).

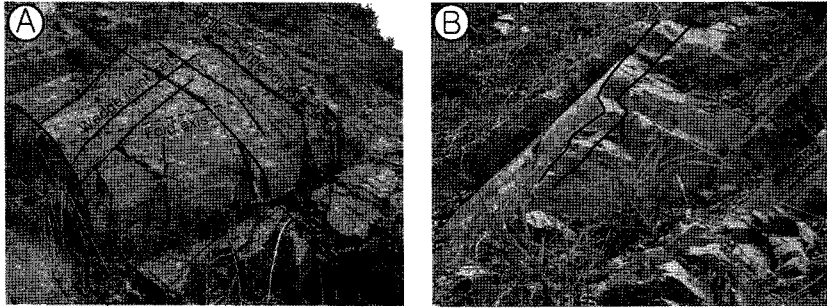


Fig. 4. Formation of joints developed by folding. S-type parasitic folds indicate regional fold structure, asymmetrical anticline in quartz-schist. (A) Strike-perpendicular joint and wedge joint set, (B) Relationship between strike-parallel joint set and bedding associated with folds.

Table 1. Relations among geologic properties such as bedding(or schistosity), crenulation cleavage, fold axis, average thickness of the bedding, rock type and joint spacing in X and Y direction measured in each site for slope stability analysis.

Slope No.	Bedding or schistosity (dip/dip dir)*	Cleavage (dip/dip dir)*	Fold axis (trend/plunge)	Average thickness of bedding(cm)	Rock type	Joint spacing (X) (cm)	Joint spacing (Y) (cm)
Slope 1A	51°/321°	50°/120°	050°/18°	32.9	Quartz schist	12.1	12.2
Slope 1B	45°/350°	78°/140°	058°/20°	32.0	Quartzite	7.8	14.3
Slope 2	30°/000°	-	-	33.0	Quartzite	12.2	12.8
Slope 3	46°/343°	65°/122°	121°/08°	13.5	Phyllite	8.5	12.3

(dip/dip dir)\* above indicates dip and dip direction of plane structures.

연구지역에서 미동산층의 습곡축의 방향성(trend/plunge)은 각각 050~058° 방향이며 18~20°로 저각도로 북동방향으로 경사하지만 미동산층의 상위 지층인 운교리층의 사면 3에서는 각각 121°/08°로 측정되었다(Table 1). 동일 지층인 구성된 운교리층의 사면 2에서는 습곡구조가 발견되지 않았다. 사면 2는 지층 구분상 운교리층에 해당되지만 구성 암석은 편리나 엽리의 발달이 없는 괴상의 규암으로 구성되어 있어 습곡구조가 발견되지 않는다.

습곡축면과 습곡축의 방향성은 지역과 암석에 따라 다르며 이는 연구지역이 광역적 습곡구조의 형성 이후 다중변형작용(multiple deformation)을 받았음을 시사한다. 연구지역의 사면 1A와 1B는 비대칭 습곡구조의 남동부의 날개부에 해당되며 사면의 방향성과 거의 동일하다(see cross section of Fig. 1).

#### 엽리구조

연구지역의 암석에 나타나는 엽리구조는 석영편암에 존재하는 편리와 천매암과 점판암에 나타나는 파랑벽개 및 점판벽개가 있으며 규암에는 엽리의 발달이 관찰되지 않는다. 석영편암과 점판암에 나타나는 편리나 점판벽개의 경우 층리의 방향성과 평행하게 발달되어 층리

와 구별하기 쉽지 않다. 하지만 천매암에 형성된 파랑벽개는 천매암의 층리를 미습곡화되어 있어서 층리와 쉽게 구별된다. 또한 천매암을 구성하는 지층은 대부분 이질과 사질의 층리가 호층을 이루는 경우가 많아 벽개의 관찰이 용이하며(Figs. 2(B), 2(C) and 2(D)) 소습곡구조의 관찰도 용이한 편이다.

#### 조사 자료 획득 및 분석 결과

연구지역 사면의 불안정성에 영향을 끼치는 불연속면에는 층리, 파랑벽개 및 절리가 있으며 지질구조에는 습곡구조가 있다. Fig. 1의 3곳의 연구지점(사면 1A와 1B, 2 및 3)에 대하여 정면적법(최병렬과 정상원, 2008)을 사용하여 이들 불연속면의 방향성과 발달 상태를 측정하였으며 그리고 암석의 공학적 특성을 분석하였다.

#### 층리(또는 편리)와 파랑벽개의 방향성

층리의 일반적인 방향성은 각 사면에 대해 큰 변화를 보이지 않고 일정하게 나타나지만 각 사면마다 그리고 한 사면에서의 측정 위치가 다를 경우 약간의 변화가 있다. 이러한 방향성에서의 변화는 광역습곡작용 중 또는

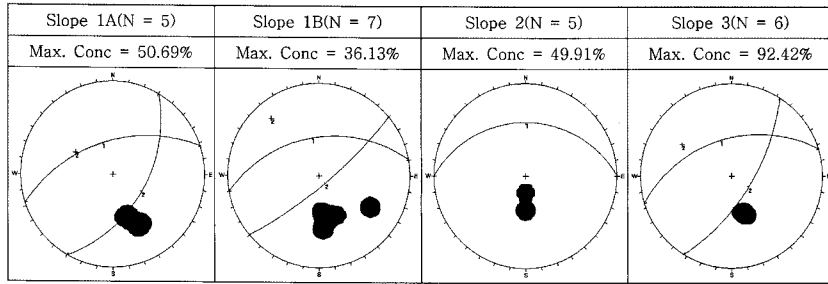


Fig. 5. Contour diagram of bedding and crenulation cleavage(lower hemisphere). Numbers 1 and 2 in the figure indicate the orientation of bedding plane and crenulation cleavage, respectively, and N indicates the number of measurements of bedding planes in each slope.

Table 2. Parameters of engineering properties measured and/or calculated in each set of joints for slope stability(values of friction angles are calculated on the basis of JRC values measured in each joint plane).

Slope No. (area)	Slope orientation (dip/dip dir)*	No. of joint measured	Joint (dip/dip dir)*	JRC*	Friction angle (°)	Joint density (cm/cm <sup>2</sup> )
Slope 1A (2.0x2.0m)	60°/310°	57	J1 75°/097°	0-4	30.1	0.1016
			J2 52°/347°	6-10	36.4	
			J3 87°/026°	0-2	29.0	
			J4 83°/069°	4-6	33.3	
Slope 1B (1.5x1.5m)	60°/310°	50	J1 81°/246°	4-6	33.3	0.1188
			J2 87°/084°	2-4	31.2	
			J3 88°/131°	2-4	31.2	
			J4 86°/212°	0-4	30.1	
Slope 2 (1.5x1.5m)	60°/095°	40	J1 81°/071°	0-2	29.0	0.1146
			J2 89°/253°	0-2	31.2	
			J3 30°/019°	2-4	31.2	
Slope 3 (1.5x1.5m)	62.5°/233°	48	J1 63°/116°	0-2	29.0	0.0766
			J2 68°/328°	0-2	29.0	
			J3 64°/006°	2-4	31.2	
			J4 88°/109°	0-2	29.0	

JRC\* above indicates Joint Roughness Coefficient of each joint set.

후기의 중첩속곡작용에 의해 지층이 휘어진 결과이다.

파랑벽개의 방향성은 각 사면마다 일정하게 분포하며, 층리의 방향성에서 측정의 정확성을 위하여 각 사면마다 최소 5개 이상을 측정하여 평시투영망에 투영한 결과 최대 집중군의 방향성을 산출하여 사면 안정분석에 이용하였다. 층리의 최대집중군의 방향성(주향/경사)은 사면 1A에서 N72°E/51°W, 사면 1B에서 N80°E/45°W, 사면 2에서 EW/30°N 및 사면 3에서는 N73°E/46°W로 측정되었다(Fig. 5 and Table 1).

### 절리의 방향성

정면적법을 이용한 절리구조의 방향성은 층리구조나

벽개구조와는 달리 일정한 방향성을 보이지 않으며 각 사면마다 서로 다른 방향성을 보여준다. 측정된 사면에서 3 또는 4 방향성의 최대집중군(J1, J2, J3 and/or J4)으로 나타나며 대부분 60° 이상의 고각도로 경사한다(Table 1). 특히 사면 1B의 경우 세 방향의 최대 집중군이 모두 80° 이상의 고각도 경사하는 절리군으로 이루어져 있다(see Table 2).

절리군의 방향성을 판단할 때 단지 측정된 절리의 빈도수만을 고려한 절리군(unweighted)과 절리의 길이에 가중치를 고려한 절리군(weighted)과의 비교에서 절리군의 방향성에는 변화가 없었으며 단지 최대집중군의 내의 절리 빈도수에만 변화가 있었다. 이러한 사실은 각

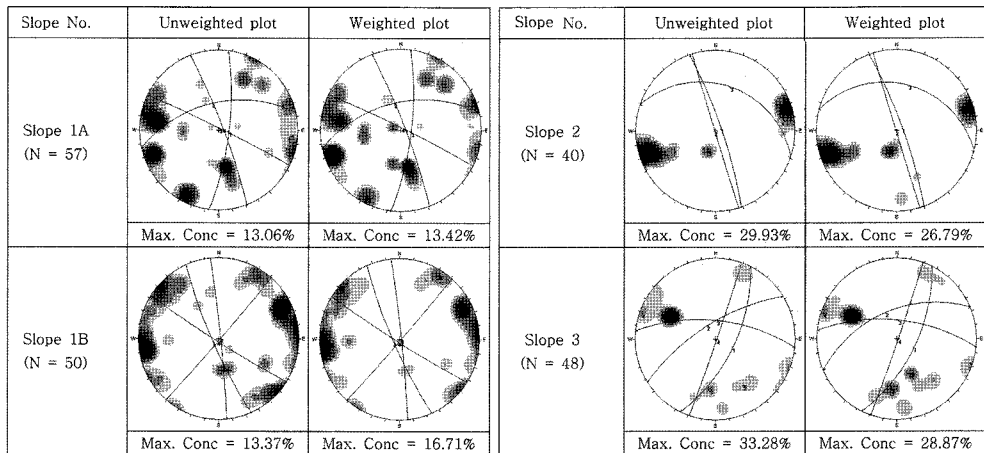


Fig. 6. Contour diagram of joint plane in each slope (lower hemisphere). Numbers 1, 2, 3, and 4 in the stereonet projection indicate set of joint plane, and N indicates the number of measurements of joints in each slope.

사면에서 절리군의 빈도수와 방향성에 있어서 균질하게 절리군이 분포하고 있음을 시사한다(Fig. 6).

습곡작용과 관련하여 발생한 절리군은 사면 1A의 절리군 중에서 J3는 주향에 평행한 절리군이며, J2는 층리에 평행한 절리군이고, J1과 J4는 썩기형 절리군을 형성한다. 사면 1B의 절리군에서 J4는 주향에 평행한 절리군이며, J3는 주향에 수직인 절리군이고, J1과 J2는 썩기형 절리군을 형성한다. 사면 2의 경우 습곡구조가 발견되지 않았지만 광역적 습곡구조의 방향성으로 판단할 때 J1과 J2의 절리군은 하나의 절리군에 해당되는 규칙 절리이며, J3 절리는 빈도수에서 작지만 주향에 대체로 평행한 절리군으로 사료된다. 사면 3의 절리군에서 J2 절리군은 주향에 수직인 절리군이고, J1과 J3은 가위형 절리군으로 형성된 것으로 판단된다(Fig. 6).

**절리군의 특징**

연구지역 불연속면의 방향성은 각 사면마다 다르나 각 사면마다 최대집중군이 3 또는 4 방향의 방향성을

보인다. 상기한 대로 측정된 절리의 빈도수와 절리의 길이가 긴 절리군은 대부분 절리간격이 일정한 규칙절리로 형성되었다. 이러한 규칙절리군은 습곡작용과 더불어 형성된 절리군이다. 규칙절리는 실제 사면에서 연장성이 수 m에서 수십 m에 이르지만 절리의 길이가 작은 절리군은 대부분 규칙절리군 사이에 발달하며 연장성이 약 10 cm 이내로 미약한 것이 특징이며 규칙절리를 절단하지 못한다.

불연속면의 틈새 및 간격은 각 사면마다 약간씩 다르나 사면 1A와 1B 지역에서와 같이 파괴양상이 발생한 지역에서는 수 mm에서 최대 수 cm의 틈새를 보이지만 사면 2와 사면 3의 절리에서는 대체로 닫힌 절리에 해당된다. 절리간격은 각 사면의 절리군마다 다르나 가로축(X)에서는 7.8~12.2 cm이며 세로축(Y)에서는 12.2~14.3 cm으로 측정되었다(see Table 1).

닫힌 절리의 틈새는 물질의 충진이 없으나 틈새가 있는 절리군의 경우 특히 사면 1A와 1B의 토양이나 석영 맥으로 충진되기도 하지만 사면 2와 3의 경우 대부분

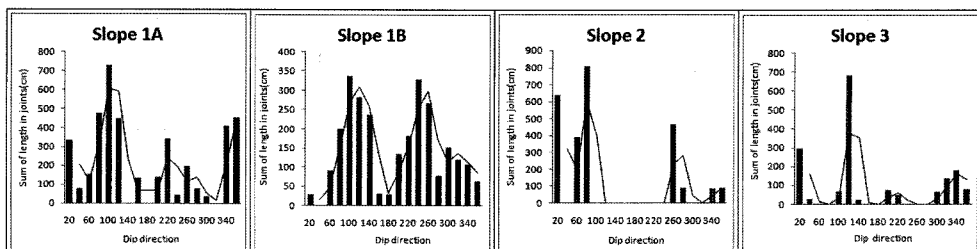


Fig. 7. Relation between dip direction and sum of joint lengths with the same orientation in each slope.



단한 절리군에 해당되므로 절리 틈새에 충전물이 발견되지 않는다.

Fig. 7은 각 사면에서 같은 경사방향(20° 간격)에 따른 절리길이의 합을 보여주는 그래프이며 각 방향에서의 절리의 연장성을 지시한다. 사면 1A의 경우 경사 방향이 80~120°인 절리와 340~020°인 절리에서 최대의 연장성을 보여준다. 사면 1B에서는 80~140°와 220~260°의 방향에서, 사면 2에서는 0~20°와 60~100°의 방향에서 그리고 사면 3에서는 0~20°와 100~120°의 방향에서 최대의 연장성을 갖는다.

**공학적 특성**

사면 3개소의 조사 사면에 대하여 절리면의 표면거칠기(JRC)와 절리밀도 및 일축압축강도를 측정하였다. 불연속면의 표면거칠기 측정시 profile gauge를 이용하였으며, 내부마찰각은 야외조사시 및 실험실에서 암석표본을 최소 5차례 이상 실험한 결과와 측정한 주요 불연속면의 표면거칠기(Barton and Chouby, 1977)를 이용하여 각 불연속면의 내부마찰각(Hoek, 2007)을 경험식에 기초하여 계산한 방법과 서로 비교하여 구하였다. 또한 슈미트해머의 반발값을 이용하여 주요 불연속면의 일축압축강도를 계산하였다(ISRM, 1981; Cheong and Lee, 1998).

절리면의 표면 거칠기는 0~10의 범위를 나타내지만 대부분 절리면의 표면거칠기는 0~4의 범위로 일정하며 매우 낮은 값을 갖는다(Table 2). 낮은 값의 표면거칠기는 암석의 내부마찰각을 감소시키기 때문에 파괴의 범위를 증가시키는 요인이 된다. 사면 1A의 절리군(J2)의 표면 거칠기는 6~10의 범위로 나타나며 다른 절리군과 비교하여 현저하게 높은 거칠기를 보여주는데 이는 절리군 J2 층리에 평행하게 발달된 절리이며 습곡작용에 의하여 층리와 벽개가 서로 교차하는 습곡축에 평행하게 발달되었기 때문이다.

내부마찰각은 29~33°의 범위를 나타내며 대체로 일정한 분포를 보여준다. 또한 정면적법을 이용하여 계산한 절리밀도는 0.0766~0.1146(cm/cm<sup>2</sup>)의 범위에 속한다. 특히 사면 3의 경우 절리밀도는 0.0766(cm/cm<sup>2</sup>)로 다른 곳에서보다 낮은 값을 보여주며 즉 연장성이 긴 규칙절리의 발달이 미약하기 때문인 것으로 판단된다(Table 2).

슈미트해머의 반발값을 이용하여 계산된 암석의 일축 압축강도는 79~354 MPa의 범위에 해당되며 각 사면 또한 절리군마다 압축강도의 변화가 심하다(Table 3). 암석의 일축압축강도는 지역에 따라 큰 차이를 보이며 이는 지역에 따른 암석의 종류와 또한 절리간격 및 암석

**Table 3.** Uniaxial compressive strength of each joint set calculated on the basis of Schmidt hammer rebound values(J1, J2, J3, and B1 indicate major joint sets and bedding plane, respectively).

Slope No.		Orientation of joint set (dip/dip direction)	Uniaxial compressive strength (MPa) (standard deviation)
Site 1A	J1	75°/097°	172(2.43)
	J2	52°/347°	90(8.86)
	J3	87°/026°	97(3.16)
	B1	83°/069°	156(1.93)
Site 1B	J1	81°/246°	103(2.50)
	J2	87°/084°	100(3.30)
	J3	88°/131°	87(3.26)
	J4	86°/212°	93(3.55)
Site 2	J1	81°/071°	354(1.12)
	J2	89°/253°	184(3.36)
	B1	30°/019°	198(2.72)
Site 3	J1	63°/116°	268(1.41)
	J2	68°/328°	183(3.12)
	J3	64°/006°	79(14.39)
	B1	88°/109°	262(1.28)

의 풍화정도에 크게 좌우된다. 동일한 암석에서는 대체로 일정한 압축강도를 보이며 특히 가면 1A에서는 층리(또는 편리)면의 압축강도는 절리면의 압축강도보다 약 80 MPa의 낮은 값을 갖는다. 또한 사면 3의 절리군 J3은 압축강도(표준편차)가 79(14.39)로 특히 낮은 값을 보여주며 이는 동일한 절리군이 사질암과 이질암이 서로 교호하는 지층에 대해 측정하였기 때문에 사질암에서는 높은 값이, 또한 이질암에서는 낮은 값의 압축강도로 측정되었기 때문이다.

**사면의 불안정성 요인 분석**

연구지역 사면의 안정 분석을 위하여 세 곳의 사면(Slope 1A, 1B, 2 and 3)을 선정하였다. 정면적법을 이용하여 각 사면의 파괴 유형을 해석함으로써 분석된 파괴 유형과 실제 사면에서 발생한 파괴 유형과의 연관성을 분석하여 사면의 불안정 요인을 파악하였다.

사면 1 지역은 분석의 정확성을 위하여 사면 1A와 1B로 구분하여 분석하였으며 이는 이 지역이 길이가 약 100 m 정도이고 사면의 높이가 약 20 m 이상의 대규모 사면이기 때문이다. 또한 습곡구조가 발달되어 층리나 벽개 및 절리의 방향성이 측정지역에 따라 또는 습곡구조의 위치에 따라 다를 수 있기 때문이다. 이 지역은

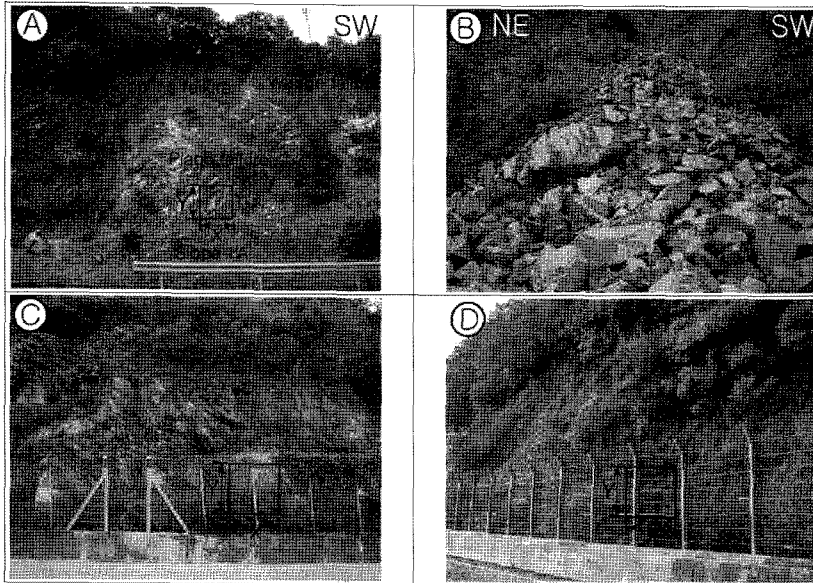


Fig. 8. Outcrop photographs in three different slopes. (A) Slope 1A, (B) Area between slope 1A and 1B, (C) Slope 2, (D) Slope 3 (see Fig. 1 for location of the slopes). X and Y indicate direction of measurement in joint spacing in each slope (see Table 1).

Slope No.	Failure aspects	Types of possible failure Failure observed	Remarks related to rocks and geologic structures
Slope 1A		Wedge and toppling failures	1. Very fine grained quartz-schist. 2. Located at south-east limb of asymmetrical anticline in fold structure. 3. Wedge failure between cleavage and joint set 3.
		Plane, wedge and toppling failures	4. Occurrence of plane failure along bedding plane at the top of the slope.
Slope 1B		Plane, wedge and toppling failures	1. Very fine grained quartzite. 2. Located at south-east limb of asymmetrical anticline in fold structure.
		Plane, wedge and toppling failures	3. Great possibility of toppling and wedge failures.
Slope 2		Toppling failure	1. Very fine grained quartite with alternating layers of phyllite. 2. No folds found.
		Toppling failure	3. Orientation of bedding and slope plane almost perpendicular to each other
Slope 3		Wedge failure	1. Very fine grained phyllite 2. Located at south-east limb of asymmetrical anticline in fold structure
		Toppling failure	3. Well developed crenulation cleavage. 3. Great possibility of wedge failure among bedding, cleavage and several joint sets.

Fig. 9. Results of failure aspects analyzed in three different regions of the study area by using square-inventory method (region (A): plane failure; region (A) + (B): wedge failure; region (C): toppling failure).

2002년 여름 집중호우로 대규모 산사태가 발생한 사면으로 현재 어떠한 사면 안정화를 위한 보강도 이루어져 있지 않다(Fig. 8(A)).

사면 1A 지역은 미약한 편리가 발달된 석영편암으로 구성되며, S-형 기생습곡의 발달로 광역 습곡구조가 비대칭 배사구조임을 알 수 있는 지역이다. 이 지역은 비대칭 배사구조의 남동쪽 날개에 위치하며 또한 사면의 방향성과 층리(또는 편리)의 방향성이 서로 일치하는 사면에 해당된다. 이 사면은 습곡구조로 형성된 사면이기 때문에 사면의 하부와 상부의 층리의 경사각도가 매우 다를 수 있다. 즉 상부의 사면에서는 사면의 경사

각이 높아 접근할 수 없어 층리의 경사각도는 측정할 수는 없었으나 상부로 갈수록 높아짐을 확인할 수 있었다(Fig. 8(A)).

이 사면의 경우 평사투영에 의한 분석 결과 절리군 J3과 벽개면에 의하여 쉼기파괴와 절리군 J1에 의한 전도파괴가 일어날 가능성이 있으며 평면파괴는 발생하지 않을 것으로 분석되었으나(Fig. 9), 실제 사면의 경우 모든 종류의 파괴 양상이 발생했음을 확인하였다. 이와 같은 차이점은 정면적법으로 분석한 지역이 사면의 하단이며 사면의 상부로 갈수록 습곡구조에 의해 층리면의 경사가 높아지며 또한 층리면의 방향이 달라지게 때문

이다. 따라서 이 사면에서 평면파괴가 실제 발생하였으나 평사투영의 분석결과에는 나타나지 않은 이유이다.

사면 1B 지역은 사면 1A 지역의 남서쪽 약 80m 하단에 나타나며 사면 1A 지역의 남서쪽 연장에 해당된다. 암석의 종류와 지질구조, 벽개 및 층리의 방향성에서 사면 1A와 큰 변화는 없으나 평사투영으로 분석한 결과 평면파괴, 썩기파괴 및 전도파괴가 발생한 가능성이 큰 것으로 분석되었다(Fig. 9). 특히 습곡작용에 의하여 주향에 평행하게 발달된 절리군(J3)의 대부분이 전도파괴의 가능성이 매우 높은 것으로 파악되었다. 또한 절리군 J1과 J2는 빈도수와 연장성이 큰 규칙절리(Fig. 7(B))이며 서로 교차하여 썩기 파괴를 발생할 가능성이 매우 크며 실제 사면에서 이러한 현상이 발생했음을 알 수 있다(Fig. 8(B)).

사면 2 지역은 운교리층이 분포하는 지역이나 미동산층과의 경계지역이므로 극세립질의 사질과 이질의 천매암과 또한 규암층이 교호하여 나타나는 지역이다. 정면적법을 이용하여 분석한 사면 2는 규암층이 분포하는 지역으로 습곡구조와 벽개구조는 발견되지 않으며 두 방향성의 절리군이 잘 발달된 지역이다(Fig. 8(C)). 사면과 층리의 방향은 서로 수직(85~95°)한 방향으로 발달하고 있어 평면파괴나 썩기파괴는 일어날 가능성이 없으나 절리군(J2)의 일부는 전도파괴의 가능성을 시사한다(Fig. 9).

사면 3 지역은 층리를 따라 박층으로 쪼개지는 특성을 갖는 극세립질의 천매암으로 구성되는 운교리층에 해당된다. 이 지역은 광역습곡구조의 비대칭 배사구조의 남동쪽 날개부에 해당되며 천매암은 파랑벽개가 잘 관찰되며 오히려 층리면으로 오인되기도 한다(Fig. 8(D)). 파랑벽개는 고각도의 남동방향으로 경사하며 층리와 절리군 J3과 J4, 절리군 J1과 J3, 절리군 J3과 파랑벽개는 서로 교차하여 썩기파괴가 발생할 가능성이 있으나 평면파괴나 전도파괴는 없는 것으로 분석되었다(Fig. 9). 현재 이러한 썩기파괴의 양상은 노두상에서 발견되지 않지만 사면 3의 허부에 전도파괴에 의한 낙석이 일부 관찰된다. 전도파괴는 사면 3에서 발생하지 않을 것으로 분석되었으나 이러한 현상은 북서방향으로 경사하는 사면과 남동방향으로 고각도 경사하는 파랑벽개와의 관계에서 즉 서로 반대 방향으로 경사하는 사면의 상부에 이러한 현상이 발생할 수 있기 때문이다.

위의 연구사례에서 사면 1의 경우 습곡구조에 의해 사면의 방향과 층리의 방향성이 서로 일치하는 경우 평면파괴를 비롯하여 대규모 산사태를 유발시킬 수 있는 요인이 많았으며, 사면 2와 3에서와 같이 사면과 층리

의 방향성이 서로 고각도로 교차하는 지역에서는 절리군과 벽개의 교차에 의하여 지역적인 소규모의 파괴양상을 보이는 것으로 분석되었다.

## 결론

이 연구는 사면의 안정과 관련하여 충북 청원군에서 보은군을 가로지르는 국도 25번을 따라 지질구조에 의하여 형성된 여러 종류의 사면파괴 양상을 사례 분석을 통하여 분석하고 사면의 불안정성에 영향을 끼치는 요인을 연구하였다. 연구지역은 한국의 지체구조상 옥천습곡대에 해당되며, 연구지역의 사면은 캄브리아기의 미동산층과 운교리층에 집중적으로 나타난다. 미동산층은 극세립질의 백색 내지 회백색의 석영편암과 규암으로 구성되며 운교리층 역시 극세립질의 녹색에서 흑색의 천매암으로 구성된다. 이들 암석은 미약한 변성작용을 받은 변성퇴적암으로 구성되기 때문에 절리구조 이외의 불연속면 즉 변성작용과 변형작용의 편리와 벽개구조 등의 면구조와 습곡작용에 의한 지층의 굴곡현상이 잘 발달되어 있다.

광역습곡작용에 의하여 운교리층은 연구지역에서 4차례 반복되어 나타나며 미동산층과 운교리층은 모두 광역적 습곡축과 평행한 북동-남서방향의 주향으로 발달되어 있다. 미동산층은 반복되어 나타나는 운교리층 사이에 분포하며, 기생습곡은 S-형으로 사면이 발달된 지역의 미동산층은 비대칭 배사습곡구조의 남동부 날개부에 해당된다. 사면의 방향과 습곡구조의 날개부에 나타나는 지층의 방향은 서로 일치하여 평면파괴의 원인이 되었다.

연구지역 암석의 공학적 특성으로 절리면의 표면 거칠기는 0-4의 범위로 일정하며 매우 낮은 값을 갖는다. 이러한 현상은 사면을 구성하는 암석이 극세립질의 석영과 견운모, 백운모 및 흑운모 등의 운모광물로 이루어졌기 때문이다. 내부마찰각은 29~33°의 범위를 나타내며 대체로 일정한 분포를 보여준다. 절리밀도는 0.0766~0.1146(cm/cm<sup>2</sup>)의 범위에 속하며 낮은 값의 절리밀도를 나타내는 지역은 연장성이 긴 규칙절리의 발달이 미약하기 때문인 것으로 판단된다. 암석의 일축압축강도는 79~354 MPa의 범위에 해당되며 절리군마다 압축강도의 변화가 심하다.

연구지역은 초기의 광역습곡구조와 후기의 중첩습곡구조의 발달에 따른 절리구조의 형성으로 지층의 주향에 평행하거나 수직한 절리군 및 썩기형 또는 가위형

절리군 등 다양한 형태의 절리가 형성되었으며 절리와 벽개구조 및 층리와 사면의 방향성이 서로 교차하여 여러 종류의 파괴양상을 일으키는 불안정 요인이 되었다.

## 사 사

이 논문은 2008년도 충북대학교 학술연구지원사업의 연구비 지원에 의하여 연구되었음을 밝힌다. 본 연구를 위해 야외조사 기간 동안 무더운 날씨에도 불구하고 야외조사에 도움을 주고 또한 GIS 프로그램의 도표화 작업을 도와준 충북대학교 사범대학 과학교육학부 대학원생에게 감사드린다.

## 참 고 문 헌

- 김경수, 김원영, 채병근, 조용찬, 2000, 강우에 의한 산사태의 지질공학적 특성 - 충청북도 보은 지역, 지질공학회, 10(2), 163-174.
- 이종혁, 이민성, 박봉순, 1980, 한국지질도, 미원도폭, 1:50,000, 자원개발연구소, 29p.
- 이지수, 박혁진, 민경덕, 구호본, 2001, 불연속면의 특성을 고려한 보은지역 암반사면 안정성 해석, 자원환경지질, 34, 601-615.
- 최병렬, 1998, 지하수 유로조사를 위한 절리계의 응용지질학적 분석, 대한지질공학회, 8, 131-143.
- 최병렬, 2000, 보은지역의 지형분석, 충북대학교 과학교육연구소, 49-55.
- 최병렬, 2001, 탐성파를 이용한 보은지역 암석의 공학적 성질과 이방성에 관한 연구, 대한지질공학회, 11, 215-227.
- 최병렬, 정상원, 2008, 정면적법을 이용한 불연속면의 특성화 및 사면안정해석: 충북 보은군 내북면 창리 지역, 암반공학회지 터널과 지하공간, 18(1), 20-32.
- 최재원, 이사로, 민경덕, 우익, 2004, 지리정보시스템(GIS) 및 베이직안 확률기법을 이용한 보은지역의 산사태 취약성도 작성 및 검증, 자원환경지질, 37, 207-223.
- Barton, N. R. and Chouby, V., 1977, The shear strength of rock joints in theory and practice, Rock Mechanics, 10, 1-54.
- Cheong, S. W. and Lee, C. Z., 1998, The rock mass rating(RMR) with joint spacing and its relation to slope stability, Jour. Korean Earth Science Society, 19(6), 641-648.
- Hancock, P. L., 1985, Brittle microtectonics, principles and practice, Journal of Structural Geology, 7, 27-43.
- Hoek, E., 2007, Practical Rock Engineering, Evert Hoek's Consulting Engineering Inc., 2007 ed., 326p.
- Hoek, E. and Bray, J. W., 1981, Rock slope engineering, 3rd ed. The Institution of Mining and Metallurgy, London, 402p.
- ISRM, 1981, International Sciences of Rock Mechanics.
- Priest, S. D., 1993, Discontinuity analysis for rock engineering, 1st ed. Chapman and Hall, 473p.
- Stern, D. W., 1968, Certain aspects of fracture in naturally deformed rocks, in: Riecker, R. E., ed., NSF Advanced Science Seminar in Rock Mechanics, Special Report Air Force Cambridge Research Laboratory, Bedford, Mass, 97-116.
- Wyllie, D. C. and Mah, C. W., 2004, Rock Slope and Engineering, Civil and Mining, 4th ed., Spon Press, 431p.

---

2008년 11월 3일 원고접수, 2008년 12월 11일 게재승인

### 정상원

충북대학교 사범대학 과학교육학부  
361-763 충북 청주시 흥덕구 성봉로 410(개신동)  
TEL: 011-9844-1265  
Fax: 043-271-0526  
e-mail: cheong1@dreamwiz.com

### 최병렬

충북대학교 사범대학 과학교육학부  
361-763 충북 청주시 흥덕구 성봉로 410(개신동)  
TEL: 043-261-2735  
Fax: 043-271-0526  
e-mail: choibr@cbu.ac.kr