

## 경남 사천시 곤명면에서 발생한 재활성된 산사태에 관한 연구

### The Study of A Reactivated Landslide That Occured in Gonmyeong-myeon, Sacheon city, Kyeongnam-do

김춘식<sup>1)</sup>, Choon-Sik Kim, 김성욱<sup>2)</sup>, Sung-Wook Kim, 김근수<sup>3)</sup>, Kun-Soo Kim, 이현재<sup>4)</sup>, Hyun-Jae Lee, 이상원<sup>5)</sup>, Sang-Won Lee

<sup>1)</sup> 한국건설기술연구원 건설기술품질센터, Ph. D, Construction Quality Management Center, KICT.

<sup>2)</sup> 동아대학교 건설기술연구소, Research Institute of Construction Technology, Dong-A Univ.

<sup>3)</sup> 부산대학교 환경문제연구소, Researcher, Institute of Environmental studirs, Pusan National Univ.

<sup>4)</sup> 지반정보연구소, Institute of Groud Imformation Co., Ltd.

<sup>5)</sup> 부산대학교 지구과학교육과 교수, Professor, Dept. of Earth Science Edu., Pusan National Univ.

**SYNOPSIS :** This study was carried out to understand the cause and processes of a reactivated landslide that occurred in Gonmyeong-myeon, Sacheon City, Kyeongsangnam-do. For the study, geologic mapping, geophysical exploration, boring, laboratory testing, and slope stability analyses were conducted. The landslide area has geologic conditions that are prone to slope failure, due to the past landslide. The trigger that caused the landslide was removal of lateral support by excavation of the toe of slopes.

## 1. 서론

우리나라의 산사태는 대부분 산사면의 모양이 풍화되어 형성된 얇은 표피 토층이 흘러내리는 토석류(debris flow)로 규모가 작은 것이 특징이며, 6월에서 8월 사이의 집중호우 기간에 많이 발생하고 있다(Hong et al., 1994). 그러나 최근에 부산 황령산 산사태와 경북 칠곡 산사태를 비롯하여 경상남북도 일대에 분포하는 백악기 퇴적암 지역에서 토석류와는 전혀 다른 유형의 산사태가 잇달아 발생하고 있고, 이에 따른 피해가 크므로 이에 대한 연구가 시급한 실정이다.

2000년 3월 경남 사천시 곤명면 신산마을 방장사 배후사면에서 산사태가 발생하였다(그림 1). 20° 정도의 저각도의 경사면에서 발생한 이 산사태로 인해 암반의 변위가 크게 나타나고 대규모의 인장균열이 수반 발달되었다. 이 산사태는 부산 황령산과 경북 칠곡에서 발생한 산사태와 같이 층리가 잘 발달한 퇴적암 지역에서 발생하였으나, 앞의 두 산사태와는 달리 강우와 관계없이 붕괴가 일어났다. 산사태가 발생한 지역은 과거(1980년)에도 산사태가 발생한 이력이 있는 곳이다.

본 연구는 강우와 관계없이 기존의 산사태 지역이 재활성되어 발생한 경남 사천 산사태의 원인과 기구를 규명함으로써 유사한 종류의 산사태 발생을 사전에 예방하는데 도움이 되고자 수행되었다.

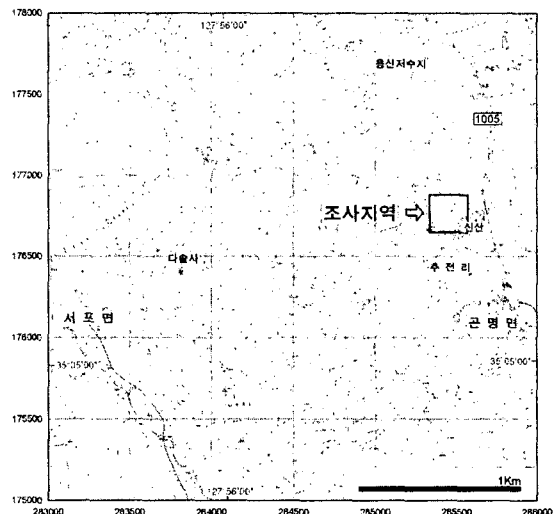


그림 1. 조사지역의 위치도

## 2. 지형, 지질 및 산사태 발생현황

산사태가 발생한 지역은 지질학상 경상분지에 쌓인 중생대 백악기 퇴적암층의 최하부층에 해당하는 곳으로, 좁은 간격의 층리가 잘 발달한 적갈색 또는 회색의 사암, 실트암, 셰일 등으로 구성되어 있다. (김남장, 강필중, 1965)

산사태가 발생한 사면은 준 산악지형의 기저부에 해당하며, 최고높이가 해발 75m 정도인 구릉지형을 나타낸다. 사면의 경사방향은 동향이며, 전체 경사는 20°정도로 완만하다. 사면을 바라 보았을 때 사면의 우측(북쪽) 가장자리는 급사면을 형성하며 바닥에 하천이 흐르고 있고, 사면의 좌측(남쪽) 가장자리는 완만한 계곡부와 접하고 있다(그림 2). 1984년의 수치지형자료를 바탕으로 제작한 조사지역 일대의 음영기복도를 보면 붕괴사면의 중앙에 지표수가 모이기 쉬운 집수지형이 발달해 있었음이 관찰된다.

산사태는 2000년 3월 초에 부지조성을 위해 사면의 선단부(toe)를 일부 절취한 1일 후에 발생하였다. 그 규모는 길이가 최대 70m 정도이고, 폭이 최대 60m에 이른다(그림 2). 산사태로 인해 사면의 하부 좌측부에서 최대변위량 2m 정도의 침하가 발생하고, 최대 폭 4m, 연장 30m의 인장균열이 발달하였으며, 사면의 중, 상부에도 다수의 인장균열이 발달하였다. 사면의 중·상부에 발달한 인장균열은 대부분 길이가 10m 이상이며, 균열폭이 15cm 이상이고, 사면의 주향방향과 같은 남-북 방향으로 발달하고 있다.

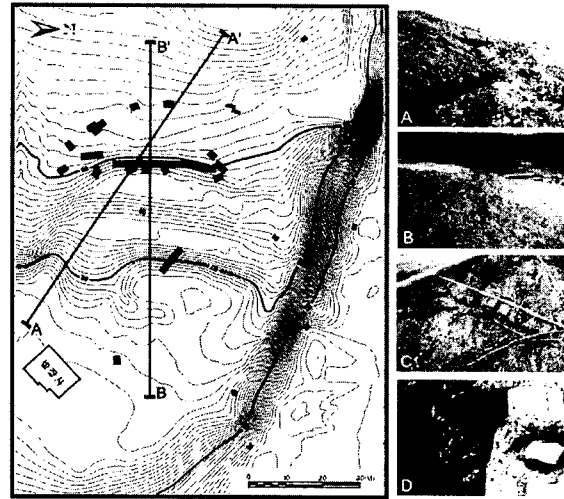


그림 2. 산사태 지형(붕괴후) 및 인장균열분포도와 인장균열

## 3. 조사 및 연구 방법

지형 및 지질구조와 사면구성 암석의 강도특성 등을 파악하기 위해 지표지질조사를 수행하였다. 사면에 발달한 불연속면과 산사태로 인해 형성된 인장균열의 방향, 연속성, 간격, 특성(분리도, 거칠기, 충전물 등) 등을 조사하고, 암석시료와 절리충전물을 채취하였다. 이외에도 암반의 풍화상태와 지하수상태 그리고 집수지형 발달유무 등을 조사하였다.

지하지질구조 및 파쇄대 또는 활동면의 위치파악, 그리고 지층의 수직분포특성을 파악하기 위하여 시추조사와 함께 지구물리탐사(전기비저항탐사와 굴절법 탄성파탐사)를 수행하였다. 전기비저항탐사는 웬너배열(Wenner array)과 쌍극자배열(Dipole-dipole array)을 이용하여 5개 지점에서 각각 실시하였고, 굴절법 탄성파탐사는 4개 측선에 대하여 실시하였다(그림 3).

시추조사는 붕괴시 활동(sliding)이 일어난 방향과 같은 방향을 따라 사면의 선단부에서 1개소 그리고 사면의 중, 상부에서 각각 1개소를 선정하여 수행하였다(그림 3). 시추심도는 산사태를 일으킨 활동면 아래의 기반암을 확인할 수 있는 깊이까지로 하였다. 실내시험은 암석과 절리충전물내의 점토광물 함량과 점토광물 종류를 파악하기 위하여 편광현미경 관찰과 X-선회절분석(XRD)을 각각

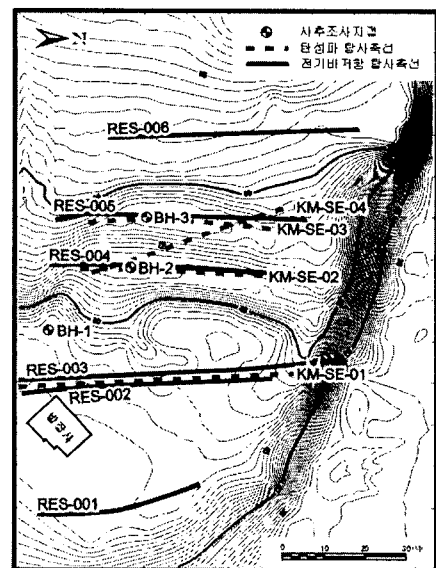


그림 3. 시추조사와 지구물리 탐사 위치

실시하였다. 사면 안정성해석은 산사태 발생기구를 규명하기 위하여 수행하였으며, 평사투영해석과 한계 평형해석법을 이용하였다.

## 4. 연구결과

### 4-1. 주요 지질구조

산사태가 발생한 사면은 '보통 풍화' (Moderately Weathered) 정도의 퇴적암으로 구성되어 있고, 주요 지질구조로 층리(bedding)와 세 방향의 절리가 나타난다. 퇴적암의 층리는 수 cm 정도의 좁은 간격으로 발달되어 있다. 층리면은 매끄러우며(smooth), 물에 젖어 있고, 적갈색의 점토로 피복되어 있다. 층리의 자세는 위치에 따라 조금씩 변하지만 주향과 경사가 대체로 N7W, 19NE 정도로서 사면의 주향/경사방향과 거의 일치한다.

붕괴사면에 발달한 절리 중, 층리면과 평행한 층상 절리를 제외한 2방향의 절리들은 층리를 자르며 서로 직교하고 있다. 이들 절리의 주향과 경사는 각각 N17W, 72~75SW와 N75E, 75~86SE로, 수직에 가까운 고각의 경사각을 가진다. 절리 간격은 0.1~0.3m이며, 절리 연장은 2~6m 정도로 연장성이 좋은 편이다. 절리면은 매끄러우며, 물에 젖어 있다. 절리틈(aperture)은 최고 10mm까지 벌어져 있고, 그 사이는 수분을 다량 함유한 점토로 충전되어 있다

### 4-2. 물리탐사 및 시추조사 결과

웬너베열에 의한 전기비저항 수평탐사결과에 의하면 RES-004, 005, 006 지점에서 심도 4m를 전후하여 북서-남동 방향의 저비저항대가 뚜렷하게 관찰되며(그림 4), 사면 선단부의 저지대인 RES-003에서도 심도 7.5m 정도에서 북서-남동 방향의 저비저항대가 나타난다. 저비저항대의 심도가 일정하고 사면활동 방향과 같은 북서-남동방향으로 이어져 나타난다는 사실은 저비저항대가 산사태 활동면 또는 파쇄대와 일치함을 나타낸다. 쌍극자배열에 의한 전기비저항탐사 결과 역시 RES-004 지점 중앙부의 심도 4~5m 부근에서 가장 낮은 비저항대가 나타남을 보여준다. 사면의 남측(좌측)은 비교적 높은 비저항이 나타나는 것으로 미루어보아 파쇄의 정도가 다른 부분에 비해서는 미약한 것으로 보인다.

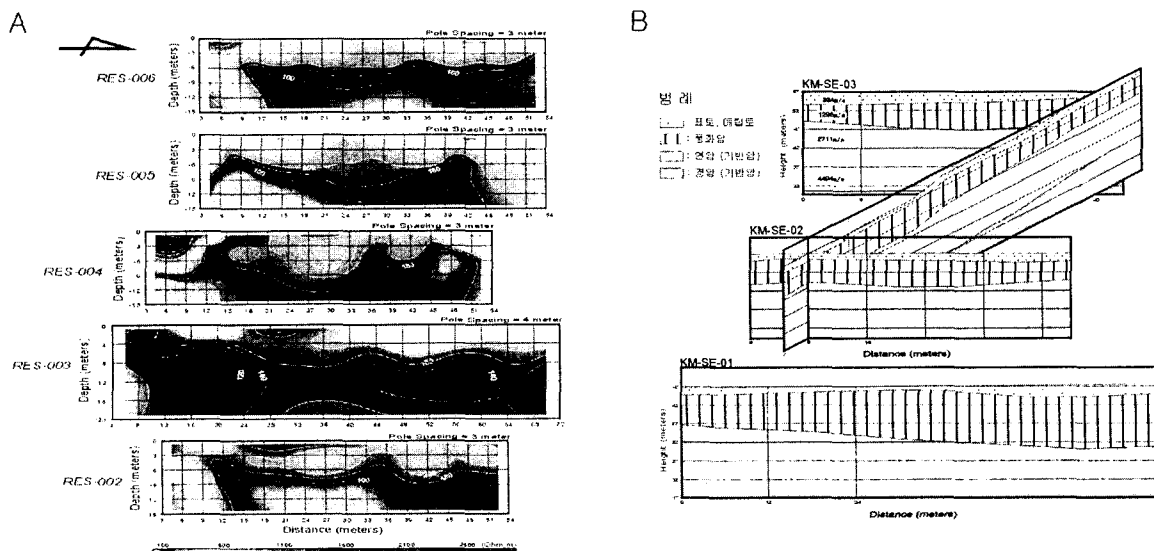


그림 4. 전기비저항 탐사 해석단면도와 탄성파 굴절법 탐사 해석단면도

탄성과 탐사결과에 의하면 붕괴사면의 지층은 4개의 속도층으로 구분된다. 제1속도층 (layer 1)은 p파 속도가 평균 300m/s 정도이고, 제2, 제3, 제4 속도층의 P파 평균속도는 각각 1400m/s, 2700m/s, >5000m/s 정도이다. 탄성과속도에 의한 암반분류에 따르면, 제1층은 매립토층 또는 잔류토층을 나타내며, 제2층은 균열이 심하게 발달한 풍화암, 제3층은 연암 또는 보통암, 제4층은 경암 또는 극경암에 각각 해당된다. 그림 4는 4개의 축선을 따라 수행한 탄성과탐사결과를 종합한 모식도이다. 이에 따르면 균열이 심하게 발달한 풍화암층(제 2층)은 사면의 좌우측에 비해 중앙부에 두껍게 나타나며, 사면의 중, 상부에서는 우측부(북측)로 갈수록 기반암의 경암부분이 지표 가까이 천부에 분포한다. KM-SE-01의 탄성과 탐사결과에 의하면 사면의 선단부 앞 평지 아래에도 균열이 발달한 풍화암층이 두껍게 나타난다. 이 풍화암층과 그 아래 극경암층과의 경계는 1980년에 일어난 산사태의 활동면으로 추정된다.

사면의 3개 지점에서 실시한 시추조사 결과에 의하면, 본 역의 암석은 상부로부터 하부로 잔류토층, 실트암, 충상사암과 실트암의 호층, 셰일, 그리고 조립사암으로 이루어져 있다 (표 1).

표 2를 보면 본 역의 지반구성은 강도특성으로 볼 때 크게 2가지로 구분할 수 있다. 즉, RQD가 매우 낮은 두께 7~8m 정도의 세립질 퇴적암층(실트암, 충상사암과 실트암의 호층, 셰일)과 그 아래에 발달하는 기반암, 즉, 불연속면의 발달이 거의 없는 괴상의 조립사암으로 구분할 수 있다. 탄성과탐사 결과를 시추조사 결과와 비교하면 제2속도층은 층리와 절리가 조밀하게 발달하거나 심하게 파쇄된 세립질 퇴적암층에 해당하며, 제3층과 제4층은 기반암의 상부와 하부에 해당한다.

표 1. 붕괴사면 암층의 수직분포

암종	두께	색깔	특성	RQD (%)		
				BH-1	BH-2	BH-3
잔류토층	최고 1.5 m	적갈색	-			
실트암	최고 3.3 m	적갈색	심하게 파쇄되어 있음	-	-	-
사암/실트암 호층	3.3~3.7 m	담회색~암회색	층리간격이 10cm 이하	16	8	23
셰일	약 1 m	암회색	수 mm 간격의 층리 발달	38	0	0
조립사암	> 3.5 m	담회색	불연속면이 거의 없는 괴상의 사암	78	69	75

### 4-3. 사면구성물질의 광물학적 특성

현미경관찰 결과에 의하면, 활동면 아래에 나타나는 조립의 괴상사암은 주로 석영과 장석으로 구성되어 있으며 점토광물은 미량이다. 이 사암은 풍화가 거의 진행되지 않은 신선하고 치밀견고한 특성을 보인다.

X-선회절분석(XRD) 결과에 따르면 활동면 위의 세립질 퇴적암은 일라이트, 카올리나이트, 녹니석 등의 점토광물을 함유하고 있으며, 층리면과 절리틈을 충전하고 있는 점토는 일라이트(Illite), 카올리나이트, 녹니석과 소량의 팽윤성 점토광물, 몬모릴로나이트로 구성되어 있다. 수분을 함유한 절리충전 점토의 수분함량을 조사한 결과 60%가 넘는 높은 함수비를 나타내었다.

### 4-4. 사면안정해석

강우와 관계없이 사면의 선단부를 절개한 1일 후에 층리의 경사방향과 같은 방향으로 활동이 일어났다는 사실은 사면 선단부를 절개함으로써 사면하부의 지지력이 제거됨에 따라서 층리면을 따라 하부부터 활동이 일어났을 가능성이 높음을 나타낸다. 실제 사면붕괴 전에 사면 선단부에 형성된 절개면과 층리 및 절리의 기하학적 관계로부터 층리면을 따른 평면파괴가 가능한지 평사투영법을 이용해 확인해 보

았다. 이때 암반의 내부마찰각은 RMR분류로부터 도출한 값 (19°)을 이용하였다. 평사투영해석 결과 평면파괴가 발생할 수 있는 것으로 나타났다(그림 5).

평사투영해석 결과 불연속면의 기하학적 조건으로부터 평면파괴 가능성이 있는 것으로 나타나므로 붕괴전의 사면조건과 한계평형법을 이용하여 평면파괴에 대한 안전율을 계산해 보았다. 이때 필요한 암반의 물성치는 RMR로부터 얻은 자료를 근거로 하였다. 계산한 결과 얻어진 안전율은 0.4로 절개면이 매우 불안정한 것으로 나타났다. 따라서 본 사면의 붕괴는 사면 선단부의 절개에 의하여 층리면을 따른 활동에 의해 발생하였을 가능성이 매우 높다.

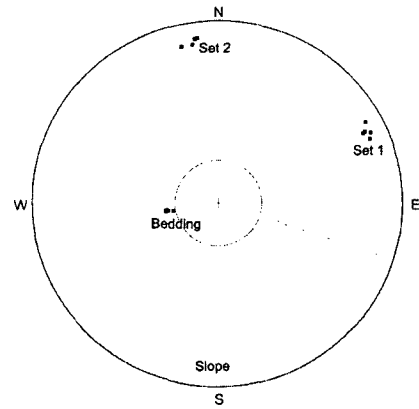


그림 5. 조사사면의 절리군과 평사투영 해석도

## 5. 토론 (산사태의 발생원인)

앞의 조사와 연구결과를 종합하면 본 산사태의 붕괴원인을 다음과 같이 추정할 수 있다.

1980년에 발생한 1차 붕괴로 인해 퇴적암으로 구성된 사면의 암반이 심하게 파쇄되고 절리와 층리 틈이 크게 이완되면서, 암반의 투수성이 높아져 암반내부로 지표수의 침투가 용이하게 되었다. 또한 1984년의 수치지형자료를 바탕으로 제작한 조사지역 일대의 음영기복도를 보면 붕괴사면 배후에 지표수가 모이기 쉬운 집수 지형이 발달해 있음이 관찰된다. 이와 같이 본 사면은 지표수가 모이기 쉬운 지형과 지표수가 침입하기 쉬운 지반으로 이루어져 있어서 풍화로 형성된 점토와 함께 물이 유입되기 좋은 조건을 갖추게 되었다.

실제 본 역에 나타나는 암반의 층리와 절리 틈은 점토로 충전되어 있거나 물에 젖어 있다. 특히 층리의 주향방향과 나란하게 발달한 고각도 절리는 충전 점토의 두께가 최고 1cm에 이르며 함수비가 60%에 이를 정도로 물에 포화되어 있다. 이러한 충전 점토는 암반내의 투수성을 크게 떨어뜨려 스며든 지표수가 배수되는 것을 차단하여 수압을 형성하게 하며, 또한 활동면 내의 점토는 물과 함께 불연속면의 전단강도를 크게 떨어뜨린다. 이와 같이 붕괴사면은 암반내의 불연속면들이 물과 점토로 포화되기 시작하면서 수압이 작용하고 층리면의 전단강도가 급격히 떨어짐으로써 서서히 포행성 이동을 하였을 것으로 추정된다.

또한 본 사면의 경우, 사면의 경사방향과 층리의 경사방향이 같고, 층리의 주향방향과 나란한 고각도의 절리가 발달하여 있어서 층리면을 따라 사면파괴가 발생하기 쉬운 잠재적 조건을 갖추고 있다. 이러한 조건하에서 사면의 선단부를 절개하자 사면 선단부의 지지력이 제거됨에 따라서 층리면을 따라 하부부터 활동이 일어났다. 이러한 가능성은 평사투영해석 결과에서도 확인되며, 실제 현장에서 층리면을 따라 상부 암괴가 미끌어지면서 생긴 굽은 선구조(groove)가 사면경사방향으로 형성되어 있는 것이 층리면상에서 관찰된다. 또 붕괴사면의 중, 상부에 발달한 인장균열의 방향(trend)이 층리면의 주향방향과 층리를 고각도로 자르는 절리의 주향과 유사하다는 사실은 활동이 층리면을 따른 평면파괴의 양상을 띠었음을 나타낸다.

결론적으로 본 사면은 집수가 쉬운 지형과 과거에 발생한 산사태로 인해 형성된 투수성 높은 지반, 그리고 평면파괴가 용이한 지질구조 등 사면파괴가 발생하기 쉬운 내적 취약요건을 갖추고 있었으며, 산사태 발생의 직접적인 원인은 사면 선단부의 굴착에 의한 지지력 제거인 것으로 판단된다.

## 6. 결론

- 1) 경남 사천 산사태는 강우와 관계없이, 기존의 산사태 지역이 재활성되어 발생하였다.
- 2) 산사태 발생의 직접적 동기는 부지확보를 위해 실시한 사면 선단부의 절개이다. 굴착으로 인해 사면

선단부의 지지력이 제거됨에 따라서 층리면을 따라 활동이 일어났다.

3) 물리탐사와 시추조사 결과 본 사면에는 크게 두 개의 활동면이 있으며, 이번에 발생한 산사태는 상부에 있는 활동면을 따라 일어났다.

4) 산사태가 일어난 사면은 기존의 산사태로 인해 크게 이완된 암반중의 절리와 층리, 파쇄대를 통해 물이 침투하고 점토가 유입되어 현저하게 수압이 증가하고 전단강도가 크게 떨어지면서 활동이 일어나기 좋은 조건을 갖추게 되었다.

5) 산사태 발생이력이 있는 사면은 과거의 산사태로 인해 암반이 심하게 파쇄되어 있어 산사태가 재발성될 가능성이 크므로 이런 지역에서 공사를 할 때에는 많은 주의를 기울여야 한다.

#### 참고문헌

1. 김남장, 강필중, 1965, 한국지질도, 1:50,000 진교도폭, 국립지질조사소.
2. 김상규, 1994, 한국에서 발생하는 지반활동, Proceedings of East Asia Symposium and Field Workshop on Landslides and Debris Flows, Seoul, Korea, p. 75-99.
3. 한국건설기술연구원, 1989, 사면의 안전진단 및 보호공법, 연구보고서, 건기연89-GE-111.
4. 홍원표 외 4인, 1990, 강우로 기인되는 우리나라 사면활동의 예측, 대한토질공학회지, 제6권, 제2호, p.55-62.
5. Kim, S.K., et al., 1992, Prediction of rainfall-triggered landslides in Korea, Proceedings of the 6th International Symposium, Christchurch, New Zealand, p.989-994.
6. Kim, W.Y. and Chae, B.G., 1998, Landslide Characteristics in Korea, Proceedings of Korea-France Joint Seminar, Seoul, Korea.
7. Hoek, E and Bray, J., 1981, Rock Slope Engineering, Institute of Mining and Metallurgy, 358p.
8. Hong, S.W., et al., 1994, The Characteristics of Landslides in Korea, East Asia Symposium and Field Workshop on Landslides and Debris Flows, Seoul, Korea, p. 267-276.