석회석 광산에서 발생한 대규모 암반사면의 붕괴원인 분석에 관한 연구

이상은, 김학성, 장윤호*

A Study on the Failure Cause of Large Scale Rock Slope
in Limestone Quarries

Sang-eun Lee, Hak-sung Kim, Yoon-ho Jang*

Abstract The target of this study is large scale rock slope collapsed by around 7 pm on August, 2012, which is located at ○○ limestone quarries of Gangneung city, Gangwondo. The slope prior to the collapse is formed as the height of about 200 m and the average inclination of 45°. The estimated amount of the collapse is about 1,500,000 m³ with respect to the slope after the collapse. Geotechnical and field investigations such as boring, geophysical prospecting, surface geological survey, geological lineaments, borehole imaging, metric 3D imaging, experimental and field test, mining work by year, and daily rainfall were performed to find the cause of rock slope failure. Various analyzes using slope mass rating, stereonet projection, limit equilibrium method, continuum and non-continuum model were conducted to check of the stability of the slope. It is expected that the cause of slope failure from the results of various analysis and survey is due to the combined factors such as topography, rainfall, rock type and quality, discontinuities, geo-structural characteristics as the limestone cavity and fault zones, but the failure of slope in case of the analysis without the limestone cavity is not occurred. Safe factor of 0.66 was obtained from continuum analysis of the slope considering the limestone cavity, so the ultimate causes of slope failure is considered to be due to the influence of limestone cavity developed along fault zone.

Key words Large scale rock slope, Slope failure, Safe factor, Limestone cavity, Fault zone

초 록 본 연구는 강원도 강릉시 소재의 ○○ 석회석 광산에서 2012년 8월 23일 오후 7시경 붕괴된 대규모 암반사면을 대상으로 한다. 붕괴 이전에 사면의 높이는 약 200 m이고 평균경사는 45°로 형성되어 있다. 사면 붕괴 후 추정된 붕괴량은 1,500,000 m³ 정도이다. 사면 붕괴의 원인을 분석하기 위하여 시추, 물리탐사, 지표지질 조사, 선구조분석, 공내영상촬영, 입체사진영상촬영, 실내시험 및 현장시험, 년도별 채광현황 및 양수량 분석 등의 현장 및 지반조사를 실시하였다. 사면의 안정성을 파악하기 위하여 SMR, 평사투영법, 한계평형법, 연속체 및 불연속체 해석을 수행하였다. 이 결과들로부터 사면붕괴의 원인은 지형, 강우, 암종 및 암질, 불연속면, 석회암 공동이나 단층의 지질구조적 특성 등 여러 요인들이 복합적으로 작용하여 사면활동이 발생한 것으로 추정되지만, 석회암 공동을 고려하지 않을 경우 사면 붕괴는 발생하지 않는 것으로 분석되었다. 석회암 공동을 고려한 연속체 해석에서 사면 안전율이 0.66으로 나타났다. 따라서 대규모 사면붕괴의 근본적인 원인은 단층대를 따라 발달하고 있는 석회암 공동의 영향에 기인하는 것으로 판단된다.

핵심어 대규모 암반사면, 사면붕괴, 안전율, 석회암 공동, 단층대

Received: Aug. 8, 2014

Revised: Aug. 25, 2014

Accepted: Aug. 27, 2014

*Corresponding Author: Yoon-ho Jang

Tel) +82335706313, Fax) +82335706317

E-Mail) yhj@kangwon.ac.kr

Dept. of Energy & mineral Resources Engineering, Kangwon National University, Joongang-ro Samcheok-si Gangwon-do, 245-711, Korea

1. 서 론

석회석 광산에서 노천채굴시 필연적으로 암반사면이 발생하게 되는데, 채석장에서 사면의 붕괴가 발생하면 작업자의 인명피해 발생뿐만 아니라 채광작업의 곤란으로 생산성이 떨어져 경영악화로 이어지므로 채굴 중이거나 채굴 후에도 암반사면의 안정화는 매우 중요하다

다. 채굴이 완료된 암반사면은 산림청 주관 하에 산지 복구계획에 따라 재정리됨으로써 지진 및 집중강우 등 특별한 자연재해가 없다면 사면은 안정한 것으로 평가된다. 그러나 채굴이 진행되는 암반 사면은 채굴완료까지 상당히 오랜 기간 동안 지표수 유입, 동결융해 등에 의해 절리, 층리 및 단층 등 암반 불연속면에 풍화가 촉진되어 암반강도가 저하하게 된다. 또한 지속적인 공사 차량의 운행 및 채광발파 등에 의한 진동에 의해 불연속면의 쪼개짐 및 벌어짐 현상 등으로 암괴의 탈락이 발생되어 사면의 안정성에 나쁜 영향을 미치게 된다. 따라서 채굴중인 암반 사면은 주기적인 관찰과 사면 계측 등을 통하여 사면의 활동 가능성 상태를 감시할 필요가 있다.

국내의 경우 연장 520 m, 최대 절취고 약 122 m, 최대법면길이 약 212 m인 변성암류로 구성된 대절취 사면에 대하여 활동이력분석과 시공 중 다양한 지반조사를 통하여 사면붕괴원인을 분석한 사례연구(박부성 외, 2006)와 S 석회석 광산을 대상으로 다양한 현장조사와 해석을 통하여 안정성을 평가하고 잔벽사면의 처리방안을 제안한 연구가 있다(선우준 외, 2013).

위 사례연구에서 수행한 현장조사 방법과 해석과정을 참조하여 이 연구가 수행되었다. 본 연구는 강원도 강릉시 소재의 ○○ 석회석 광산에서 2012년 8월 23일

오후 7시경 남측에 위치하고 있는 대규모 사면의 붕괴 지역을 대상으로 하며, 추정된 붕괴량은 $1,500,000 \text{ m}^3$ 정도이다. 붕괴이전 철탑이 위치하고 있는 곳의 사면 높이는 약 200 m이고 평균경사는 45° 로 형성되었으며, 이 사면은 하부에서 간헐적으로 광채를 채광하고 있고 사면 중간부에 정상부를 통과하는 작업로가 개설되어 있었다. 광산 현장에서 연도별 채광도면, 지반조사자료 및 강우자료 등을 확보하여 사면의 현황을 파악하였으며, 붕괴사면의 육안관찰로부터 붕괴원인 분석을 위해 지반조사 계획을 수립하였다. 붕괴사면 내부는 추가적인 붕괴의 위험이 있기 때문에 그 주변에서 지표지질조사, 선구조분석, 다양한 현장조사와 실내 및 현장실험을 통하여 공학적 평가를 실시하고, 그 평가를 토대로 평사투영해석, SMR, 한계평형해석, 연속체/불연속체 전산해석 등 안정성 해석을 통하여 사면 붕괴원인을 분석함으로써 본 석회암 지질조건과 유사한 암반사면을 평가하는데 유익한 자료가 되기를 기대한다.

2. 붕괴사면의 현황

붕괴된 사면의 현황은 Fig. 1과 같다. 붕괴된 면적은 177.533 m^2 , 하단 폭은 310 m, 상단 폭은 269 m, 하부에서 상부까지의 길이는 182 m이다. 붕괴이전 사면에

Fig. 1. Failure view of large scale rock slope

대하여 하부에서 상부까지의 높이는 196 m이며, Section 2에서 보는 바와 같이 붕괴 이후 지반고는 54.6 m의 차이를 보이고 있다. 붕괴된 사면의 육안관찰로부터 주향 이동 단층대 및 지층구분을 그림과 같이 표시하였으며, 붕괴 사면 주변을 3개의 영역, 즉 A, B, C 영역으로 구분하여 사면 노두를 관찰하였다.

3. 지형 및 지질

연구지역은 태백산맥 일부로서 소계곡 및 능선에 해당하며, 북서에서 남동방향으로 칠성산(△981 m)-석병산(△1,055 m)-두타산(△1,353 m)이 서로 연계되어 협준한 산계를 형성하고 있으며, 이 지역 최고봉인 자병산은 석회암 채석장으로 개발 중에 있다. 또한 연구지역 동쪽에 해당하는 지역은 북동쪽으로 이어진 능선과 계곡 들이 급경사를 이루며 협준한 산세를 보이나 연구지역 서쪽은 완경사를 이루며 해발 600 m 내외의 평지 및 저구릉형 산지를 형성한다. 연구지역의 수계의 발달은 한강유역과 동해안 유역의 분수령에 해당하는 지역으로 동쪽으로는 수지상 수계의 형태로써 소하천들이 동류하여 주수천을 형성하고 동류하여 동해로 유입되며, 서쪽에는 소하천들이 남서류하여 동강으로 유입되는 수계의 발달을 보인다.

석병산 일대에 조선계 대석회암통 풍춘석회암이 기반암으로 분포하며, 이 지역 주변은 풍춘석회암층과 시대미상의 편암과 우백질화강암이 분포한다. 우백질 화강암은 편암층과 관입접촉을 하고 있으며, 유색광물을 거의 함유하고 있지 않고 등립상 중립 및 조립질(2~5 mm)이다. 곳에 따라 규장질암으로 점이되는데 이때 직경 1~4 mm의 석류석 반정을 함유하는 경우가 많다. 광물 조성은 미사장석, 사장석과 석영이다. 풍춘석회암층은 주로 암회색 내지 청회색, 유백색 석회암과 돌로마이트질 석회암으로 구성되어 있다. 곳에 따라 담홍색 결정질 석회암 혹은 대리암과 수매의 석회질 세일을 협재한다. 암상에 따라서 상, 중, 하부층원으로 구분된다. 하부층원은 하위로부터 20 m 두께의 암회색 석회암, 약 15 m 두께의 암회색 호상-편상 석회암, 20 m 두께의 유백색 석회암과 그의 최상위에 30 m 두께의 돌로마이트질 석회암으로 구성되어 있다(KIGAM, 2001)

4. 현장 및 지반조사

대규모 사면 붕괴로 인해 현장 접근이 용이하지 않기 때문에 Fig. 1과 같이 붕괴지 주변에서 지반조사를 수행하였다. 지반조사로는 지표지질조사, 시추, 전기비저

항 탐사, 굴절법 탄성과 탐사, 공내영상촬영, 지하수위 측정, 공내전단시험, 입체사진촬영, 암석 물성 및 절리면 전단시험 등을 수행하였다. 그리고 현장에서 연도별 채광도면으로부터 채광현황 및 강우일수를 조사하였으며, 붕괴지 사면의 배후지에서 수목의 휨 현상을 관찰하였다.

4.1 지표지질조사

암반 사면의 안정성은 암반 내에 존재하는 불연속면의 공학적 특성에 의해 좌우되므로 암반 내에 발달하고 있는 불연속면의 공학적인 특성을 파악하는 것이 중요하다. 지표지질조사를 통하여 사면을 구성하고 있는 암반의 공학적 성질을 파악하였으며, 이 자료들을 이용하여 붕괴된 사면의 붕괴유형을 유추하는 분석자료로 사용하였다.

이 조사에서는 붕괴된 사면의 특성상 위험이 내포되고 2차 붕괴의 위험이 존재하므로 붕괴사면 배후의 지질학적 상태 및 2차 붕괴원인이 될 수 있는 사면의 지하수 상태, 식생상태 등에 주안점을 두어 조사를 수행하였다.

조사결과 지질현황은 Fig. 2와 같고, 이를 요약하여 Table 1에 나타내었다. 그림에서 굵은 일점쇄선은 남북방향으로 발달하고 있는 단층대를 나타낸 것이다. 붕괴사면 배후를 따라 N20E~N70E의 주향과 40°~70°의 경사로 7 cm~1 m 이상의 2차 인장균열도 곳곳에서 발견되었으며, 사면 전도에 따른 암 붕괴와 하부 석회암의 공동침하로 추정되는 함몰지가 발견되기도 하였다. 또한 붕괴사면 접촉대에서는 폭 1.2 m~1.5 m에 이르는 석회암 공동이 발견되었으며 과거 사면 이동의 자료인 나무의 수간변이 흔적을 따라 인장균열도 발생하였다. 그리고 붕괴된 사면 내로 지하수 유출은 없는 것으로

Fig. 2. Geological map in study area

Table 1. Summary of surface geological investigations in Fig. 2

No.	Subject	Photography	Features
①	Limestone cavity		<ul style="list-style-type: none"> Limestone cavity found in the left slope of the collapse area with 1.2~1.5 m width and N50E strike. Traces of a lot of limestone cavity around the collapse area
②	Boundary of limestone and schist		<ul style="list-style-type: none"> Contact metamorphic zone of limestone and schist developed in the cut and the collapsed slope highly weathered
③	Tension crack		<ul style="list-style-type: none"> Traces of curved type trees found at the rear of the collapse area Many tension cracks of N70E strike developed with a large extension and 3~20 cm width
④	Caved place		<ul style="list-style-type: none"> Occurrence of the cave caused by the possibility of limestone cavity in the rear of about 7~10 m from the collapse area Cavity of 2.0 m diameter
⑤	Collapse zone of rock		<ul style="list-style-type: none"> Tension crack located at the top of the collapse as schist zone Tension crack of 0.6~1.8 m width, which is departed, with N50E strike
⑥	Additional tension crack		<ul style="list-style-type: none"> Additional tension crack found in the rear of about 2~10 m from the collapse area Opened crack with 7~40 cm width and 100 m extension Covered with vinyl in order to prevent surface water flows
⑦	Pylon collapse		<ul style="list-style-type: none"> Collapse of pylon on the top of mountain located at 830 m sea level Moving down of 345kV #42 pylon belonging to KEPCO connected from Jecheon to Donghae

조사되었는데, 이것은 현장에서 지하수 흐름을 관찰한 결과 사면 배후 너머에 있는 계곡부로 지하수가 거의

유출되기 때문인 것으로 판단되었다.

(a) High-resolution image using Landsat TM

(b) Hillshade image using digital elevation map

Fig. 3. Analysis results of geological lineaments

4.2 지질학적 선구조 분석

지질학적 선구조는 직선 혹은 완곡의 지형요소로써 인접한 표면 및 천부의 지형요소와 구분이 명확한 단층, 파쇄대, 습곡축 등의 지질구조선과 암석경계를 따라 나타난다(Sabins, 1997). 측정하고자 하는 목표물에 직접 접촉하지 않고 멀리 떨어져서 목표물에서 분사되어 나오는 전자파를 감지하여 그 물리적 성질을 측정하고 관찰한다. 수치지도를 이용하여 음영기복도를 제작하여 지형만을 표현하여 분석하며 연구지역의 광역적 지질구조의 구조대 및 방향성을 파악하는데 목적이 있다.

분석자료는 Landsat TM(1999년 10월 29일 촬영 : 30 km×23 km)을 이용하며 1 : 50,000 수치 지형도로 5 m 해상력의 DEM(digital elevation map)을 사용한다. 분석은 1단계 위성색상영상 분석, 2단계 고해상도 위성영상 분석, 3단계 광역음영기복도 분석, 4단계 정밀 음영기복도 분석 순으로 이루어졌다. 이 중 고해상도 위성영상분석과 정밀 음영기복도 결과를 나타내면 Fig. 3과 같다. 고해상도의 인공위성영상을 이용하여 분석한 결과 방향성 및 길이 분포상 주 선구조의 방향성은 N65E이며 N45W의 부방향성을 보이고 있다. 연구지역에는 N45E~N70E의 선구조와 N45W 방향의 선구조가 교차하는 것으로 분석되었다. 여기서 N45E~N70E의 선구조는 사면 배후에 발달하고 있는 계곡부의 추정 단층대와 동일한 방향을 갖는다. 정밀 음영기복도 분석 결과 방향성 및 길이 분포상 주된 선구조의 방향은 N5E이며 N55E와 N35W의 부방향성을 보이고 있다. 연구지역에는 N15~25E와 N50~60E의 연장성이 긴 선구조와 연장이 짧은 NE 방향의 선구조가 다수 교차하고 있는 것으로 분석되었다. 여기서 주된 선구조 N5E와 N15~25E의 선구조 방향은 채광장 사면방향으로 형성되어 있는 주향이동 단층대와 동일한 방향을 나타내고 있다.

4.3 시추 및 물리탐사

붕괴된 암괴로 덮여져 있는 붕괴지 내는 2차 붕괴의 우려가 있어 접근이 불가능한 상태이므로 붕괴 사면 배후에서 Fig. 4와 같이 시추조사 및 물리탐사를 계획하였다. 시추 심도는 20~70 m로 총 3공의 시추와 굴절법 탄성파탐사 및 전기 비저항탐사가 수행되었다. 시추 및 물리탐사 조사결과는 지층분포상태의 파악, 토질 및 암반분류, 시추공 현장실험, 주상도 및 지층단면도 작성에 활용된다.

시추조사 결과는 Table 2와 같다. 붕적층(colluvial soil)의 두께는 5.0~13.9 m로 주로 실트질모래(silty sand)로 구성되어 있으며, 다량의 점토가 혼재되어 있다. 풍화토층(weathered soft soil)은 기반암의 최상부 풍화대로서 그 두께는 4.0~6.0 m 정도이며, 주로 실트질모래로 구성되어 있다. 풍화암층(weathered hard soil)은 기반암의 상부 풍화대로서 두께는 4.7~6.0 m이며, 기반암

Fig. 4. Locations of borehole survey and geophysical prospecting

Table 2. Results of borehole survey

Borehole No.	Strata	Depth (m)	Features	TCR (%) (Aver.)	RQD (%) (Aver.)
BH-1	Weathered soft soil	0.0~6.0	<ul style="list-style-type: none">Silty sand mixed with rock fragmentsBrown color, dense-highly denseN=7/30~50/30		
	Weathered hard soil	6.0~15.3	<ul style="list-style-type: none">Silty sandDark brown color, dense-highly denseN=50/10~50/5		
	Rock	15.3~34.0	<ul style="list-style-type: none">SchistLight grey color, completely or moderately weatheredFracturing in generalJoints of 15~20° dipSlickside along valley direction with 50~75° dip	13~50 (32)	0~7 (4)
		34.0~38.0	<ul style="list-style-type: none">granite of light and dark grey colorsSlightly weathered or sound rock	87~100 (99)	48~100 (73)
		38.0~40.5	<ul style="list-style-type: none">Slate		
		40.5~50.6	<ul style="list-style-type: none">Mica schist of light grey colorGranitic gneiss of white color		
		50.6~64.8	<ul style="list-style-type: none">Slate		
		64.8~66.0	<ul style="list-style-type: none">Granite of light color		
		66.8~70.0	<ul style="list-style-type: none">Mica schist of dark brown color		
BH-2	Colluvial soil	0.0~5.0	<ul style="list-style-type: none">Silty sand mixed with rock fragmentsYellowish brown, very looseClay containingSize of rock fragments : 3~15 cmN=21/30~6/30		
	Weathered soft soil	5.0~9.0	<ul style="list-style-type: none">Silty sandBrown color, dense-highly denseN=50/30~50/10		
	Weathered hard soil	9.0~13.7	<ul style="list-style-type: none">Silty sandDark brown color, highly denseN=50/10~50/4		
	Rock	13.7~23.5	<ul style="list-style-type: none">LimestoneFracturing in generalSlickside along valley direction with 75° dip	91~100 (96)	7~20 (15)
		23.5~28.6	<ul style="list-style-type: none">Alternation of schist and limestone	88~100 (98)	28~100 (67)
		28.6~35.0	<ul style="list-style-type: none">Limestone		
		36.5~38.1			
		38.5~39.0			
		39.7~44.2			
		35.0~36.5	<ul style="list-style-type: none">Schist		
		38.1~38.5			
	39.0~39.7				
44.2~47.8					
47.8~50.0	<ul style="list-style-type: none">Granite of light grey color				
BH-3	Colluvial soil	0.0~13.9	<ul style="list-style-type: none">Silty sand mixed with rock fragmentsContaining large amounts of clayN=12/30~50/18		
	Rock	13.9~20.0	<ul style="list-style-type: none">LimestoneFracturing zone : 13.9~14.4 m depth	80~100 (98)	0~95 (87)

이 오랜 풍화작용을 받아 암으로서의 역학적 성질은 거의 상실하였으나 암의 구조 및 조직을 보유하고 있는

지층이다. 암반층은 시대미상의 화강암이 기반암으로 분포하며, 암층의 경계부로서 석회암, 편암 및 슬레이트

Fig. 5. Distribution of elastic wave velocity by seismic refraction survey

Fig. 6. Result of Electrical resistivity with dipole-dipole arrays

가 교호하여 나타나는 것이 특징이다. BH-1 공에서는 심도 34.0 m까지 파쇄대가 발달하고 있으며, 심도 23.0~24.0 m, 27.4~27.5 m, 35.0 m에서 계곡방향으로 경사 50~75° 정도의 Slickenside가 발달하고 있고 심도 26.0 m와 28.2 m는 2~3 mm 두께의 점토가 함유되어 있다. BH-2에서는 심도 13.7~23.5 m 구간이 전반적으로 파쇄대로서 계곡방향을 따라 점토가 다량 함유되어 있으며, 절리사이에 Slickenside가 75° 정도로 발달하고 있다.

굴절법 탄성과 탐사 및 전기 비저항 탐사결과를 나타내면 각각 Fig. 5 및 Fig. 6와 같다. 탐사위치는 Fig. 3과 같이 시추공 위치와 나란하게 배열하였다. 탄성과 탐사와 시추결과를 비교하였을 때 토사층은 탄성파속도가 0.7 km/sec 이하, 리핑암층은 0.7~1.5 km/sec, 그리고 암층은 1.5 km/sec로 나타났다. 각 지층경계의 출현심도는 토사층 2.2~11.4 m, 리핑암층 5.1~22.3 m이며, 150~320 m 구간은 계곡부의 추정 단층대의 영향으로 깊은 풍화대를 보인다. 여기서 탄성과 탐사 결과로 봉적층과 풍화토층을 구분하는 것은 거의 불가능하여 이들 층을 함께 토사층으로 구분하였다.

전기 비저항 탐사에서는 단위전극간격을 10 m로 하여 쌍극자 배열(dipole-dipole array)을 적용하였다. 탐

사결과 전체적으로 50~100,000 Ω-m의 전기 비저항 분포를 보이며, R1(200~280 m)의 이상대는 사면붕괴 및 추정 단층대인 계곡부로 지하수가 침투하기 때문으로 여겨진다. R2(170~190 m)는 소계곡부로서 파쇄대의 영향으로 보이며, R3(100~150 m)는 기존 도로개설을 위한 굴착과 성토의 영향으로 판단된다.

4.4 입체사진측량기법에 의한 불연속면 조사

붕괴지 사면의 2차 붕괴 위험으로 현장에 접근할 수 없기 때문에 원거리에서 적용이 가능한 입체사진측량기법을 통하여 불연속면 조사를 수행하였다. 입체사진측량기법이란 대상면에 대하여 2장의 사진영상을 취득한 후 이 영상을 이용하여 대상면의 공간정보를 추출하는 방법이다. 동일 피사체에 대해 서로 다른 측정위치 및 방향에서 얻은 2개 이상의 화상정보를 분석함으로써 피사체 표면에 대한 화상정보가 포함되므로 불연속면의 방향분석이 가능하다. 이 연구에서는 오스트리아 3GSM 사(2004)에서 개발한 불연속면 전용 상용코드인 Shape MatriX 3D system을 이용하였는데, 이것은 절리 분석을 위해 개발된 것으로 카메라를 통해 취득된 좌우 스테레오 영상을 이용하여 정합과정을 거쳐 점군

Fig. 7. Distribution of discontinuities using shape matrix 3D system

(point cloud)에 기초한 3차원 영상을 생성한 후 실내에서 분석을 실시하는 프로그램이다. 사용된 카메라는 Nikon D200, 렌즈는 Nikon AF-S DX 18-70 mm f/3.5-4.5G IF-ED를 사용하였으며, 이 프로그램에서는 카메라 및 렌즈의 왜곡에 대한 보정과 모든 줌 및 초점거리에 대한 정보가 포함되어 있다.

붕괴사면에 대하여 Fig. 1과 같이 A, B, C 3구간으로 구분하여 입체사진측량기법으로 분석한 결과는 Fig. 7과 같다. 그림에서 빨간색, 파란색, 연두색 및 보라색은 유사한 주향과 경사를 갖는 불연속면군을 나타낸 것이다.

붕괴지 사면의 입체사진측량기법에 의한 결과를 평사

투영(stereo net)으로 나타내면 Fig. 8과 같다. A 영역의 주 불연속면군의 방향성을 경사/경사방향으로 나타내면 72/283(J1), 44/335(J2), 79/070(J3)의 방향이 우세하며, B 영역의 주 불연속면군의 방향성은 75/265(J1), 67/314(J2), 80/043(J3)의 방향이 우세하게 발달하고 있다. 그리고 C 영역은 64/318(J1), 81/131(J2), 31/224(J3)의 방향이 우세한 것으로 나타났다. 붕괴 사면의 경사/경사방향이 55/320임을 고려할 때, A 영역의 석회암 층리 J2는 평면파괴 가능성이 있으며, J2와 석회암 절리 J1 사이에 켜기파괴 가능성이 있다. B 영역과 C 영역의 불연속면 결과에서는 사면 붕괴의 위험성은 없는 것으로 보인다.

4.5 공내영상촬영

시추공 영상촬영은 시추공벽이 Probe에 장착된 Hyperboloidal 반사경을 통하여 반사된 영상을 CCD 카메라로 기록하는 장비로 CCD 카메라가 시추 공저로부터 일정한 속도로 상행하면서 5 mm 간격으로 시추공벽을 촬영하여 720 pixel의 Image로 기록한다. 지자기 북극을 기준으로 정렬된 영상단면으로부터 불연속면을 분석하고, 분석된 불연속면의 Sine 곡선에서 최소 점에서의 방향이 불연속면의 경사방향이 되며, 분석된 불연속면의 Sine 곡선 폭과 공경으로부터 불연속면의 경사각을 결정한다. 공내영상촬영으로부터 얻어진 자료들은 불연속면 발생빈도를 분석하여 암반분류에 반영되며 주향과 경사를 통계처리하여 주절리군의 방향성과 사면과의 관계를 분석하는데 활용된다.

BH-1 공은 붕괴지 사면의 석회암층과 다른 편암층으로 이루어져 있어 공내영상촬영은 BH-2와 BH-3 공에서 수행되었다. 얻어진 결과를 평사투영으로 나타내면 Fig. 9와 같다. BH-2 공의 불연속면 방향성은 14-36/042~112(J1), 29-46/337~007(J2), 30-51/245~277(J3)이며, 불연속면의 빈도수는 심도 5~15 m 구간에서 약

Fig. 8. Stereo net projection for the discontinuities obtained by shape matrix 3D system

Fig. 9. Stereo net projection for the results of BIPS

60% 정도를 차지하며 하부로 갈수록 대체로 줄어드는 경향을 보이고 있다. BH-3 공의 불연속면 방향성은 17~34/084~118(J1), 62~78/089~106(J2)이며 불연속면의 분포는 약 15 m 구간에서 33% 이상을 차지하며 심도와 상관성 없이 고르게 분포하고 있다.

4.6 공내 지하수위 측정

지하수위 측정은 지하수체(ground water body) 상면의 위치 또는 시추공에 나타나는 정수면(piezometric surface)의 위치를 지표면 또는 일정한 기준면부터의 심도를 측정한다. 지하수위 조사는 시추조사 완료 후 24 시간 경과한 다음 정수위 상태에서 공내 지하수위를 측정하였다. 측정 결과 BH-1에서는 심도 26 m, BH-2는 14.8 m이고 BH-3은 13.4 m로써 풍화대 및 암반층에 분포하는 것으로 확인되었다. 사면의 최정상 높이가 196 m인 점을 고려할 때 붕괴지 사면내로 유출 가능성이 있으나, 육안에 의한 관찰결과 붕괴지 사면 내로의 유출은 없는 것으로 나타났다. 이것은 현장조사결과 붕

괴지 사면 배후지 계곡부 아래에 큰 물 웅덩이와 다량의 계곡수가 아래로 흐르는 것을 감안할 때, 붕괴지 사면 배후에 있는 규모가 큰 계곡부로 유출되기 때문인 것으로 판단된다.

4.7 실내시험 및 현장시험

흙과 암석의 물리·역학적 특성을 파악하기 위하여 실내시험을 실시하였다. 흙의 비중, 함수비, Atterberg 한계, 입도분포 시험(Lambe & Whitman, 1978)의 결과는 Table 3과 같으며, Sampler를 이용하여 지표에서 채취한 점토질 흙과 점토섞인 자갈에 대한 전단시험 결과는 Table 4와 같다.

암석의 물성 시험결과 Table 5와 같으며, 연구지역에 분포하는 화강암, 편암 및 슬레이트, 석회암에 대하여 각각 5회의 실험결과를 나타낸 것이다. Table 6은 불연속면 시험결과를 나타낸 것으로, 5회의 수직응력에 대한 전단응력의 결과이다.

연구지역 내의 현지 지반의 강도정수 산정을 위해 풍

Table 3. Physical properties of soil

Borehole No.	Specific gravity	Water contents (%)	Atterberg limits (%)		Grain size distribution %, finer than						Soil description	Depth (m)
			Liquid limit	Plastic index	4.75 mm	2.0 mm	0.425 mm	0.075 mm	0.005 mm	0.002 mm		
BH-1	2.656	19.3	-	-	100.00	93.10	43.67	22.79	7.22	5.32	Silty sand	2.0
BH-1	2.651	18.7	-	-	99.64	94.21	40.96	20.82	5.50	3.92	Silty sand	4.0
BH-1	2.644	12.1	-	-	97.60	91.48	40.08	20.27	5.29	4.08	Silty sand	6.0
BH-2	2.661	21.4	41.3	17.0	90.84	84.05	51.99	33.82	10.77	7.46	Clayed sand	4.5
BH-3	2.678	26.0	38.5	14.1	92.75	88.64	73.95	60.85	18.81	12.64	Sandy lean clay	3.0
BH-3	2.667	42.7	53.1	28.7	81.08	75.64	53.90	30.98	12.54	10.14	Clayed sand with gravel	9.0

Table 4. Results of direct shear test

Sample No.	Specific gravity	Water contents (%)	Atterberg limits (%)		Direct shear test		Soil description
			Liquid limit	Plastic index	cohesion (kN/m ²)	friction angle (degree)	
UD-1	2.681	30.0	39.4	15.5	1.45	29.7	Sandy lean clay
UD-2	2.637	19.5	32.1	11.0	1.60	34.9	Clayed gravel

Table 5. Physical properties of rock

Rock type	Specific gravity	Absorption (%)	P wave velocity (m/sec)	Tensile strength (MPa)	Uni. comp. strength (MPa)	Young's modulus (GPa)	Poisson's ratio
Granite	2.635~2.659 (2.647)	0.091~0.192 (0.159)	3520~3950 (3680)	4.8~9.6 (7.0)	42~93 (66)	30.22~53.09 (39.90)	0.103~0.309 (0.203)
Schist & slate	2.737~2.757 (2.746)	0.199~0.254 (0.226)	3230~3980 (3610)	1.0~6.0 (3.7)	61~116 (80)	44.68~57.98 (52.50)	0.175~0.279 (0.207)
Limestone	2.718~2.754 (2.727)	0.090~0.275 (0.209)	3890~4320 (4100)	5.2~6.0 (5.6)	74~94 (87)	42.29~59.34 (50.54)	0.145~0.298 (0.200)

() : average value

Table 6. Results of direct shear test for discontinuities

Borehole No.	Discontinuity type	Cohesion (MPa)		Friction angle (degree)		JRC	JCS (MPa)	Depth (m)
		Peak	Residual	Peak	Residual			
BH-2	Bedding plane at limestone	0.111	0.043	29.6	25.7	4~6	66	30.0
	Joint at limestone	0.124	0.053	31.2	26.9	6~8	78	35.0
	Schistosity at schist	0.119	0.086	32.1	27.4	6~8	52	44.3

Table 7. Results of borehole shear test

Bohehole No.	Soil type	Cohesion (kPa)	Friction angle (degree)	Depth (m)
BH-1	Soft soil	24.92	29.88	4.0
	Hard soil	31.59	33.70	9.0
BH-2	Soft soil	26.30	32.19	6.0
	Hard soil	33.55	33.23	10.5

화토 및 풍화암에 대하여 시추공 전단시험을 수행하였다. 시추공내 시험구간에 전단기(shear head)를 삽입하고 지상에서 Hand Pump를 이용하여 전단기를 공벽에 부착시킨 후 수평압력(normal stress)을 가한다. 다음 시추공내 전단기와 연결된 로드(rod)를 지상에서 유압 잭(hydraulic jack)으로 끌어당겨 전단응력(shear stress)을 산정한다. 풍화대 구간에서 5회의 시험을 통하여 구한 공내전단시험 결과는 Table 7과 같다. 풍화토보다는 풍화암에서 구한 점착력과 마찰각이 크게 나타난 것을

알 수 있다.

4.8 암반분류 및 강도정수 산정

1973년 Bieniawski가 제안(1989년 수정안 제시)한 RMR (rock mass rating)은 암반분류체계로서, 이것은 야외조사 또는 시추조사에서 측정가능한 5가지 평가항목, 즉 신선한 암석의 일축압축강도, 암질지수(rock quality designation, RQD), 불연속면의 간격, 불연속면의 상태, 지하수 유입량에 따라 평점을 부여하고 불연속면의 주향

Table 8. Rock classification results by RMR

Bohehole No.	Depth (m)	RMR rating	Rock quality
BH-1	15.2~35.6	25~27	Poor
	35.6~61.0	43~59	Fair
	61.0~67.0	62	Good
	67.0~70.0	44	Fair
BH-2	13.7~23.0	25	Poor
	23.0~31.5	43~54	Fair
	31.5~34.0	65	Good
	34.0~50.0	50~59	Fair
BH-3	13.9~14.4	31	Poor
	14.4~20.0	59	Fair

Table 9. Strength parameters of soil for continuum analysis

Type	Unit weight (kN/m ³)	Cohesion (kPa)	Friction angle (degree)	Deformation modulus (MPa)	Poisson's ratio
Colluvial soil	17.0	15.69	29.7	30.0	0.35
Weathered soft soil	19.0	14.22	34.9	50.0	0.33
Hard soil	21.0	32.57	33.5	250.0	0.30

Fig. 10. Layer division for continuum analysis

과 경사에 의해 보정한 평점 합계에 의해 암반을 5등급으로 구분하는 방법이다(Singh & Goel, 1999). 각각의 시추공에 암반분류 결과는 Table 8과 같으며, 주로 심부로 갈수록 좋은 암반에 해당된다.

한편, 연속체 해석을 위해 적용되는 토사층에 대한 지반정수는 문헌조사, 현장실험 및 실내실험을 토대로 결정하였으며, 그 결과는 Table 9와 같다. 붕적토는 느슨한 상태이고 풍화토 및 풍화암은 조밀한 상태이므로 문

헌자료를 참고하여 단위중량, 변형계수 및 포아송 비를 산정하였으며, 점착력 및 내부마찰각은 실내시험 및 공내전단시험 결과를 적용하였다.

한계평형법 및 연속체 해석을 위해 적용되는 암반층에 대한 지반정수는 Hoek-Brown 식을 이용하였다(Hoek & Diederichs, 2006). 현장조사를 통하여 연속체 해석을 위한 암반의 영역을 단면도로 구분하면 Fig. 10과 같다. 사면의 단면에서 소단과 소단사이의 경사는 55° 정

Table 10. Strength parameters of rock mass and RMR for rock layer

Zone No.	Unit weight (kN/m ³)	Cohesion (kPa)	Friction angle (degree)	Deformation modulus (MPa)	Poisson's ratio	RMR
1	23.0	330.00	30.0	2020	0.200	45
2	25.0	920.00	38.0	6160	0.200	65
3	26.0	1740.00	41.0	10800	0.200	75
4	19.0	1.45	29.7	30	0.350	-
5	23.0	440.00	25.0	2100	0.207	45

Fig. 11. Cross section of mining construction by year

도이며, 전체적인 사면의 경사는 45°이다. 토사 영역은 시추조사와 탄성파탐사로부터 풍화토와 풍화암으로 구분하였으며, 석회암 지역은 3개의 영역(#1, #2, #3)과 편암지역(#5), 그리고 시추조사 결과로부터 단층구조선(#4)을 추정하여 삽입하였다. 각 영역에 대한 RMR 결과와 지반정수는 Table 10과 같다. 여기서 #4의 단층구조선의 물성은 Table 4의 점토질 흙으로 간주하여 적용하였다.

4.9 채광작업 및 강우현황

붕괴된 #42번 철탑 하부 사면에 대하여 최근 2000년부터 2012년까지 채광한 현황을 단면도로 나타내면 Fig. 11과 같다. 단면도 상에서 채굴면적을 나타내면 2000~2005년은 약 28,224 m², 2006~2009년은 14,969 m², 그리고 2010년~붕괴전까지는 6,005 m²의 채광이 이루어졌다. 이 단면도로부터 대부분의 채광작업이 2009년까지 큰 규모로 이루어졌으며, 붕괴지 사면(단면도의 우측 부분)의 채광작업은 2010년 이후 거의 이루어지지 않았다.

한편, 2012년 8월까지의 강우일수는 63일로 강우량은 875 mm이고 강설일수는 14일로 115 cm이다. 이중 7월과 8월에 집중적으로 강우량이 증가하였는데 전체 강우량의 73%를 차지한다. 2012년 8월의 강우를 나타내면 Fig. 12와 같으며, 사면이 붕괴된 8월 23일의 강우량은 48mm를 보이고 있고 붕괴전까지 10일 정도 지속적으로 강우가 있었음을 알 수 있다. 이와 같이 지속적으로 진행된 강우는 붕괴사면 배후에 있는 인장균열로 지표수가 침투함으로써 간극수압의 증가를 가져온 것으로 추측할 수 있다.

4.10 수목의 수간변이 조사

토질이나 연약암반이 경사를 따라 하부로 천천히 이동하는 현상을 포행이라고 하는데, 포행이 발생하는 지역의 수목은 손상 및 변형을 겪게 된다. 즉 수목의 파손, 충격, 뿌리 뽑힘 및 포행(기울어짐) 등의 다양한 형태로 나타난다(Carrara & O'Neill, 2003). 따라서 이 연구에서는 사면 붕괴발생 지역에 인접한 산림지역에서 수목의 수간변이 흔적을 조사함으로써 사면의 붕괴징후 여

Fig. 12. Daily rainfall in August

Fig. 13. Survey of curved type trees

부를 파악하는데 목적이 있다.

수목의 수간변이 현황을 나타내면 Fig. 13과 같다. 5개소의 조사지점 중 3개소에서 수목의 수간변이가 관찰되었는데, 1지점은 13그루 중 7그루, 2지점은 12그루 중 12그루, 3지점은 6그루 중 3그루에서 수간변이를 보여 그 변이율은 50~100%이다. 수목의 수령은 대부분 30~60년이고 수고는 평균 12 m이다. 주요 수종은 소나무와 신갈나무로 이루어져 있으며 수간변이의 위치는 지체 부로부터 높이가 0.7~1.2 m이고, 수간변이 방향은 1지점은 S30W~W, 2지점은 N35E~N80E, 3지점은 S50E~S70E이다.

수목이 변형된 방향은 표층부에 관찰된 균열대 및 경사방향과 어느 정도 일치하는 것으로 볼 수 있다. 수목

이 휘어져서 성장하고 있는 지점의 높이는 지표면에서 약 0.7~1.2 m에 위치한 곳에 있으므로, 이 수고까지 성장하는 시점을 3~5년 정도로 볼 때 땅밀림 현상은 오래 전부터 지속적으로 발생한 것으로 추정이 가능하다. 이와 같이 휘어지는 현상은 현존 수목이 0.7 m 정도 성장하였을 때 넓은 면적의 지반이 땅밀림 작용으로 수목이 생육하는 지반 전체가 이동하면서 수목이 기울어진 상태에서 수직생장을 위해 임목의 끝부분이 휘어서 성장하게 된 결과로 추정된다. 과거 송전탑이 설치되어 있는 정상부를 중심으로 동, 서, 남쪽 방향으로 외력이 서서히 작용하여 수목이 변형되어 성장하고 있는 것으로 볼 수 있으며, 수목이 변형된 방향은 표층부에 관찰된 균열대 및 경사방향과 어느 정도 일치한다고 볼 수 있다.

5. 안정성 해석 및 결과

일반적으로 암반 사면의 파괴형태는 원형파괴(circular failure), 평면파괴(plane failure), 쐈기파괴(wedge failure) 및 전도파괴(toppling failure)가 있는데, 원형파괴는 암반에 뚜렷한 구조적인 특징이 없고 파쇄된 정도가 매우 심한 암반이나 토층에서 발생가능하며, 평면파괴는 연장성이 긴 불연속면에서 사면의 방향과 같은 방향으로 한 곳에 극점이 집중적으로 분포할 때 발생한다. 쐈기파괴는 불연속면이 2개 이상 교차하는 곳에서 발생되며, 전도파괴는 사면 경사면과 반대의 경사를 갖는 불연속 암반에서 흔히 관찰된다(Wyllie & Mah, 2004). 이 연구에서는 사면의 안정성 해석으로 SMR(slope mass rating)에 의한 평가, 평사투영법, 한계평형법, 연속체 및 불연속체 해석을 적용하였다.

5.1 SMR에 의한 평가

SMR은 Romana(1985)가 제시한 분류법으로서 RMR을 암반사면의 안정성 평가에 적합하도록 수정한 것이다. 평가항목 및 평점은 RMR 분류법과 동일하며, 평점의 보정기준을 불연속면과 절취사면의 주향 차이각, 평면파괴

시 불연속면의 경사각, 불연속면과 절취사면 경사각의 상관관계, 절취공법에 따라 세분화하였으며, 그 값은 식 (1)과 같다. 여기서, F1, F2 및 F3는 불연속면에 대한 보정이고 F4는 절취방법에 대한 보정을 나타낸 것이다.

$$SMR = RMR + (F1 \cdot F2 \cdot F3) + F4 \quad (1)$$

Fig. 10과 같이 영역구분을 통해 사면의 노두에서 관찰한 불연속면의 특징과 RMR을 기초로 분석한 SMR 결과는 Table 11과 같다. 평가결과 #1 영역에서는 불안정, 나머지 영역에서는 대체로 안정한 것으로 나타났다.

5.2 평사투영법에 의한 해석

사면의 방향, 불연속면의 방향 및 마찰각을 고려하여 암반사면의 안정성을 분석하는 방법으로 이 연구에서는 극점투영법을 사용하였다. Fig. 1과 같이 사면의 붕괴구간이 넓기 때문에 A, B, C 영역으로 구분하여 파괴의 형태를 분석하였다. 입체영상사진촬영 및 사면 노두에서 조사한 불연속면 자료를 이용하여 A, B, C 영역에 대한 평사투영을 수행하였으며, 그 결과는 각각 Fig. 14, Fig. 15 및 Fig. 16과 같다. 평사투영해석시 사면의

Table 11. Results of SMR

Zone No.	RMR	Correction factors of SMR				SMR	Evaluation of rock slope
		F1	F2	F3	F4		
1	45	0.15	1	-60	0	36	Unstable
2	65	0.15	1	-60	0	56	Partial stable
3	75	0.15	1	-60	0	66	Stable
5	45	0.15	0.4	-60	0	41	Partial stable

Fig. 14. Results of stereonet analysis at zone A

Fig. 15. Results of stereonet analysis at zone B

Fig. 16. Results of stereonet analysis at zone B

경사는 현재 붕괴된 상태인 74° 로 하였다. A영역의 경우 평면 및 전도파괴 해석에서 국부적으로 불안정하나 주불연속면군이 형성되어 있지 않아 사면붕괴에는 영향을 미치지 않는 것으로 판단되며, 썩기파괴 해석에서는 불안정하여 한계평형법에 의한 안전율 계산이 필요하다. B영역의 경우 A영역과 동일한 결과를 나타내지만, 붕괴이전 사면의 경사 55° 를 적용하면 썩기파괴의 가능성은 없는 것으로 나타난다. C영역의 경우 평면파괴 해석에서 불안정하게 나타났으나, 붕괴되기 이전의 사면 경사를 적용하면 평면파괴의 가능성은 없는 것으로 나타나며, 썩기파괴 해석에서는 안정한 것으로 평가되었다.

5.3 한계평형법에 의한 해석

평사투영법을 이용하여 암반사면에서의 개략적인 평가를 한 후에 파괴형태를 알아보고 위험하다고 판단된 잠재적인 파괴 가능성을 가지고 있는 불연속면에 대하여 사면의 안전율을 계산한다. 5.2절에서 보는 바와 같이 A, B, C 영역 모두 붕괴이전 사면에서는 평면파괴의 가능성은 없으며, A 영역에서 썩기파괴의 가능성이 있으므로 A 영역을 대상으로 한계평형법을 적용하였다.

A 영역에서 불연속면군 J1 70/285는 석회암 절리면, J2 45/335는 석회암 층리면이다. 붕괴이전의 안정성 해석결과는 Fig. 17과 같으며, 수압을 고려한 우기시 안전율 1.616으로써 안정한 것으로 평가되었다. 이 결과로

Fig. 17. Analysis result by limit equilibrium method for wedge failure at zone A

Fig. 18. Modelling for continuum analysis

부터 불연속면의 발달에 따른 사면의 대규모 붕괴는 없는 것으로 생각할 수 있다.

5.4 연속체 해석

연속체 해석을 위하여 범용적으로 사용하고 있는 FLAC-2D 유한차분법을 이용하였으며(Itasca, 2011), Fig. 10의 사면 단면을 Fig. 18과 같이 모델링하였다. 모델링시 사각형 요소를 사용하였으며 사면의 좌, 우측 경계는 수평변위, 사면 하부는 수평변위 및 수직변위를 구속하였다. 응력-변위 관계는 탄소성 모델로서 Mohr-Coulomb 파괴기준을 적용하였다. 또한 전단강도를 감소시켜 최소 안전율을 구하는 강도감소법을 적용하였으며(Lee & Jang, 2010), 사면의 안정성 해석시 안전율을 Mohr-Coulomb 식의 형태로 나타내면 식 (2)와 같다. 여기서, c 와 ϕ 는 입력변수이고, σ_n 은 실제 수직응력이다. c_r 와 ϕ_r 은 평형 상태를 유지할 수 있는 한계내에서 감소된 변수들이다. c 와 $\tan\phi$ 를 동일한 비율로 감소시키며, 이 변수는 파괴

Fig. 19. Modelling for discontinuity analysis

Fig. 20. Distribution of plastic zone

가 발생할 때까지 단계별 과정을 거치게 된다.

$$\text{안전율(safe factor)} = \frac{c - \sigma_n \tan \phi}{c_r - \sigma_n \tan \phi_r} \quad (2)$$

강도감소법을 적용하여 해석한 결과 사면의 안전율은 1.91로 나타나 사면의 붕괴는 발생하지 않는 것으로 분석되었다.

5.5 불연속체 해석

불연속체 해석을 위하여 범용적으로 사용하고 있는 UDEC 개별요소법을 이용하였으며(Itasca, 2000), Fig. 19와 같이 모델링하였다. UDEC은 개별요소법을 이용한 2차원 해석프로그램으로서 암반에 존재하는 불연속면들의 특성을 효과적으로 모사할 수 있다. 해석에는 현장 지표지질조사 및 입체영상촬영으로부터 구해진 3개의 불연속면군, 즉 경사 및 경사방향이 각각 50/109, 30/350, 35/250을 적용하였다. 강도감소법을 적용하여 해석한 결과 사면의 안전율은 1.1로써 사면의 붕괴는

발생하지 않으나, 연속체 해석보다는 상대적으로 작은 값을 나타낸다. 금변 사면붕괴와 같이 사면 배후 100 m 정도까지 파괴되는 양상과는 다른 소성역, 즉 경사면에 집중적으로 분포하는 소성역을 보이고 있어 사면의 붕괴는 발생하지 않을 것으로 보인다(Fig. 20).

6. 붕괴원인의 분석

2012년 8월 23일 ○○ 석회석 광산에서 발생한 대규모 사면에 대한 붕괴원인을 파악하기 위하여 다양한 현장 및 지반조사를 수행하였다. 분석결과 이 붕괴사면은 지형, 암종, 암질, 불연속면, 석회암 공동이나 단층 등 지질구조 및 강우 등 여러 요인들이 복합적으로 작용하여 사면활동이 발생한 것으로 추정된다.

6.1 지형 및 기하학적 특성

대상구간 주변은 붕괴 사면 배후에 계곡부가 존재함으로써, 강우시 유입되는 침투수에 의해 지중의 석회암, 편암, 슬레이트 및 화강암 교호대에 수압이 크게 작용함으로 인한 사면의 활동력 증가 뿐만 아니라 계곡부의 깊은 풍화대 지층의 강도열화 등에 따른 전단강도의 감소 현상이 정량적인 평가는 어렵지만 붕괴를 가속화시킨 원인으로 분석된다.

6.2 풍화대의 풍화 특성

이 지역의 구성암석은 고생대 조선계의 풍춘석회암, 시대 미상의 편암, 슬레이트 및 화강암이 교호하는 지역으로, BH-1의 시추결과 파쇄 및 풍화작용에 의해 풍화대 발달이 50 m 심도까지 깊게 발달하고 있다. 단층을 따라 발달한 파쇄대로 지표수가 침투되어 주변에 비

해 풍화대가 깊게 발달한 것으로 보이며, 층리면, 편리면 및 엽리면을 따른 쪼개짐 특성 또한 암질의 연약화를 가중시키는 요소로 작용된 것으로 생각된다. 따라서 이와 같은 깊은 풍화대의 교호와 급속한 풍화촉진작용도 사면활동의 한 원인으로 추측된다.

6.3 지질구조적 특성

대상 사면은 고생대 조선계에 해당하는 지층으로서 오랜 지질시대를 거치는 동안 화강암의 관입과 지질구조적 변동에 의해 엽기성 암맥(dyke)과 단층의 발달이 현저하다. 시추, 지표지질조사 및 전기비저항 탐사 결과의 비교, 분석에 의하면 사면 배후에 있는 계곡부는 불량 암질대가 깊게 분포하는 대규모 단층구조로 파악된다. 이 단층들이 채광장 방향으로 형성된 단층과 금변 붕괴된 철탑 주변에서 서로 교차하고 있는 관계로 강우로 인한 다량의 지표수 침투 및 지하수위 상승에 의한 간극수압의 증가를 유발하여 사면활동의 한 원인을 제공하였을 것으로 판단된다.

지표지질조사결과 사면의 배후 및 채광장 주변에 석회암 공동의 흔적이 발견될 뿐만 아니라 한전의 철탑 시추조사 자료에서 일부 석회암 공동이 발견되는 점을 고려할 때 이 사면 부지는 다수의 크고 작은 석회암 공동이 불규칙하게 발달된 것으로 파악된다. 또한 채광장 사면 내에 존재하는 단층을 따라 물이 침투함으로써 석회암 공동의 발달이 단층대 영역 내에서 현저하였을 것으로 추정된다. 이와 같이 불규칙하게 발달된 석회암 공동 역시 사면활동의 원인으로 판단되며, 사면의 우측에 다량 분포하고 있는 엽기성 암맥은 풍화에 취약하여 강도가 현저히 저하됨으로써 사면 활동의 원인으로 어느 정도 작용한 것으로 추정된다(Fig. 21).

Fig. 21. View of the rock slope before the collapse

6.4 수목의 휨 현상

사면 배후의 인장균열면 주위의 수목들을 관찰한 결과 지반이 채광장 사면 방향으로 이동 및 침하되면서 채광장 사면의 반대 방향으로 휘는 현상이 관찰되었다. 수목들의 수령은 30~60년 정도로 조사되었으며, 수목들의 휨 상태 및 인장균열대의 낙엽이나 흙의 덮임 상태로 볼 때 지반의 이동 및 침하는 5년 이상 되는 것으로 판단되므로, 6.3절에서 언급한 지질구조적인 특성 등에 의해 장기간에 걸쳐 사면의 변화가 진행된 것으로 보인다.

6.5 불연속면의 특성

이 사면에는 다양한 불연속면들, 즉 층리, 엽리, 편리, 절리 및 단층이 복잡하게 발달하고 있다. 평사투영 해석결과에 의하면 불연속면들의 교차에 의한 켜기활동 및 국부적인 평면과 전도활동이 예상되는 사면임을 알 수 있다. 불안정한 사면활동에 대한 한계평형법 계산결과 안정율이 확보되며, 연속체 및 불연속체 해석을 수

행한 결과 사면의 붕괴가 발생하지 않는 것으로 분석되었다. 즉, 다시 언급하면 대상 사면 내에 대규모 사면붕괴를 유발할 수 있는 석회암 공동과 같은 연약대가 단층대와 연결되어 암반 내에 있을 것으로 추정되는데, 사면에서 관찰된 불연속면과 예상되는 석회암 공동의 분포를 추정하여 나타내면 Fig. 22과 같다. Fig. 22와 같이 추정되는 석회암 공동을 단면도로 모사하면 Fig. 23과 같다. 붕괴된 사면의 형상과 비교하였을 때 17° 정도의 경사로 석회암 공동이 발달한 것으로 추정된다. 석회암 공동을 고려하여 FLAC 2D를 이용한 연속체 해석을 실시한 결과 안전율은 0.66으로 붕괴가 발생하는 것으로 분석되었다.

이상의 결과로부터 요약하면, 사면붕괴를 일으키는 요인은 지형, 강우, 지질적 특성, 불연속면 특성 등 다양하게 존재하지만, 금변과 같이 석회암 지층에서 대규모 사면의 붕괴를 일으키기 위해서는 단층대를 따라 발달하고 있는 암반 내 석회암 공동의 영향에 기인한 것으로 여겨지므로, 즉 암반 내에 발달한 석회암 공동의 연

Fig. 22. Predicted limestone cavity and discontinuities observed at collapsed slope

Fig. 23. Cross section predicted by Fig. 21

약대가 단층구조대에 연계되어 발생된 것으로 판단된다.

7. 결 론

2012년 8월 23일 강원도 강릉시 소재의 ○○ 석회석 광산에서 발생한 대규모 사면 붕괴의 원인을 분석하기 위하여 시추, 물리탐사, 지표지질조사, 공내영상촬영, 입체사진영상촬영, 실내시험 및 현장시험 등을 실시하였다. 이 결과들을 토대로 다양한 안정성 해석을 수행하였으며 연구된 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 대상 사면은 고생대 조선계의 풍춘 석회암, 시대 미상의 화강암, 편암 및 슬레이트가 교호하는 지역으로서 사면 배후에 있는 계곡부는 큰 규모의 추정 단층대로서 깊은 풍화대가 발달하고 있으며, 채광장 방향으로 형성된 주향이동 단층과 #42 철탑 부근에서 서로 교차하고 있다.
2. 지표지질조사 결과 붕괴 사면 배후를 따라 N20E~N70E의 주향과 40°~70°의 경사로 7 cm~1 m 이상의 2차 인장균열도 곳곳에서 발견되었으며, 사면 전도에 따른 암 붕괴와 하부 석회암의 공동침하로 추정되는 함몰지가 발견되기도 하였다. 또한 붕괴사면 접촉대에서는 폭 1.2 m~1.5 m에 이르는 석회암 공동이 발견되었으며 과거 사면 이동의 자료인 나무의 수간변이 흔적을 따라 인장균열도 발생하였다.
3. 고해상도 인공위성에 의한 선구조 분석결과 방향성 및 길이 분포 상 주된 선구조 방향은 N65E이고 주로 N45~70E의 범위를 갖는데, 이것은 사면 배후에 발달하고 있는 계곡부의 추정 단층대와 동일한 방향성을 갖는다. 정밀 음영기복도 선구조 분석결과 주된 선구조 방향 N5E와 N15~25E의 연장이 긴 선구조 방향은 채광장 사면 방향으로 형성되어 있는 단층대와 동일한 방향을 나타낸다.
4. 시추조사결과 BH-1 및 BH-2 공에서는 석회암, 편암, 슬레이트 및 화강암이 혼재되어 나타나고 있으며, 일부 심도의 파쇄대에서 점토 함유 및 계곡방향으로 Slickenside 흔적으로 보이고 있어 단층의 특성을 보인다. BH-3 공은 13.9 m까지 암편쇄인 실트질 모래의 붕층층이고 그 이하에서는 석회암이 분포한다.
5. 시추 및 공내영상촬영에 의한 불연속면 조사 결과 주요 불연속면군의 경사 및 경사방향이 23~25/342~001, 28~55/237~290으로 나타나며, 절취면의 붕괴 방향 320°와 비교할 때 20° 이상의 차이를 보인다.
6. 붕괴된 사면에서 굴절법 탄성과 탐사와 전기 비저항 탐사를 수행하였다. 탄성과 탐사결과 150~320 m 구

간은 계곡부의 추정 단층대의 영향으로 풍하대가 깊게 나타난다. 전기비저항 탐사결과 전체적으로 50~100,000 Ω -m의 분포를 보이며, 200~280 m 이상대는 사면붕괴 및 계곡부 추정 단층대로 지하수가 침투함에 따른 영향으로 생각된다. 170~190 m의 이상대는 소계곡부로서 하부 파쇄대나 절리 등 구조대의 영향에 기인하는 것으로 판단된다.

7. 사진입체측량기법에 의해 노두 사면의 불연속면을 조사한 결과 붕괴면 좌측부에서 경사/경사방향이 44/335인 석회암 층리는 평면파괴, 석회암 층리와 석회암 절리 72/283 사이에는 썩기파괴의 가능성이 있다. 붕괴면의 정상부와 우측부에서의 불연속면 조사결과 사면붕괴 가능성은 없는 것으로 나타났다.
8. 붕괴사면 좌측부 썩기활동에 대한 한계평형법 해석 결과 안전율이 1.616이고 강도감소법을 적용한 연속체 및 불연속체 전산해석결과는 각각 1.91 및 1.10으로 나타나 고 소성역을 관찰한 결과 사면 붕괴는 발생하지 않는 것으로 여겨진다.

이상의 결과로부터 사면붕괴의 원인은 지형, 강우, 암종 및 암질, 불연속면, 석회암 공동이나 단층의 지질구조적 특성 등 여러 요인들이 복합적으로 작용하여 사면활동이 발생한 것으로 추정되지만, 석회암 공동을 고려하지 않을 경우 사면 붕괴는 발생하지 않는 것으로 분석되었다. 석회암 공동을 고려하여 연속체 해석을 수행한 경우 사면 안전율이 0.66으로 나타났다. 따라서 대규모 사면붕괴의 근본적인 원인은 단층대를 따라 발달하고 있는 석회암 공동의 영향에 기인하는 것으로 판단하였다.

References

1. 3GSM GmbH, 2004, ShapeMetrix3D Manual Version 3.5, Austria.
2. Carrara, P. E. and J. M. O'Neill, 2003, Tree-ring dated landslide movements and their relationship to seismic events in southwestern Montana, USA, Quaternary Research, 59, pp. 25-35.
3. Hoek, E. and M. S. Diederichs, 2006, Empirical estimation of rock mass modulus, International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 43, pp. 203-215.
4. Itasca Consulting Group, Inc., 2000, UDEC User's Guide, Minnesota, USA.
5. Itasca Consulting Group, Inc., 2011, FLAC User's Guide, Minnesota, USA.
6. KIGAM, 2001, 강릉도폭 (1 : 25,000)
7. Lambe, T. W. and R. V. Whitman, 1978, Soil Mechanics - SI Version, John Wiley & Sons, 553p.

8. Lee, S. E. and Y. H. Jang, 2010, Stability assesment of the slope at the disposal site of waste rock in limestone mine, Journal of KSRM, 20, No. 6, pp. 475-490.
9. Park, B. S., H. Jo, S. H. Cha and K. H. Lee, 2006, Case study on the causes for the failure of large scale rock mass slope composed of metasedimentary rocks, Journal of KSRM, 16, No. 6, pp. 506-525.
10. Romana, M., 1985, New adjustment ratings for application of Bieniawski classification to slopes, Proceedings of the International Symposium on Role of Rock Mechanics, Zacatecas, Mexico, pp. 49-53.
11. Sabins, F. F., 1997, Remote Sensing : Principles and Interpretation, W. H. Freeman and Company, USA.
12. Singh, B. and R. K. Goel, 1999, Rock Mass Classification - A Practical Approach in Civil Engineering, Elsevier, 293p.
13. Sun, W. C., Y. S. Lee, H. W. Kim and B. J. Lee, 2013, Stability assesment on the final fit slope in S limestone mine, Journal of KSRM, 23, No. 2, pp. 99-109.
14. Wyllie, D. C. and C. W. Mah, 2004, Rock Slope Engineering, Spoon Press, USA & Canada, 431p.

이 상 은

1991년 강원대학교 공과대학 자원공학과
공학사
1993년 강원대학교 대학원 자원공학과
공학석사
1999년 강원대학교 대학원 자원공학과
공학박사

Tel: 033-570-6306
E-mail: lee9367@kangwon.ac.kr
현재 강원대학교 삼척캠퍼스 에너지자
원공학과 조교수

장 윤 호

1979년 인하대학교 공과대학 자원공학과
공학사
1981년 인하대학교 대학원 자원공학과
공학석사
1990년 인하대학교 대학원 자원공학과
공학박사

Tel: 033-570-6313
E-mail: yhjjang@kangwon.ac.kr
현재 강원대학교 삼척캠퍼스 에너지자
원공학과 교수

김 학 성

1993년 강원대학교 공과대학 자원공학과
공학사
2011년 강원대학교 삼척캠퍼스 방재대
학원 광해·지질방재전공 공학석사

Tel: 033-530-1421
E-mail: haksung8697@hanmail.net
현재 강원대학교 삼척캠퍼스 방재대학
원 광해·지질방재전공 박사과정