기술기사 2 | 한국지반공학회지 | Vol.32, No.2 | pp.19~26

석회석광산의 토석류 발생예측 및 분석에 관한 연구

김 학 성
라파즈한라시멘트(주)
광산복구팀장
(haksung8697@hanmail.net)

김 성 욱
(주)지아이 대표

최 은 경
(주)지아이
지반연구소 부장

조 준 호
(주)엠에스이엔씨 상무

김 회 성
(주)엠에스이엔씨
토목설계팀 부장

1. 서 론

산사태 및 토석류의 발생 빈도가 높은 산지의 지형적 요건에서 최근에는 지구 온난화와 기후변화에 따른 국지성 집중호우의 빈발로 토석류의 발생 예측과 대비가 더욱 어려워지고 있는 실정이며, 다양한 자연재해 중, 산지가 많은 우리나라는 최근 산사태 및 토석류 발생 빈도가 높아지고 있다(국립재난안전연구원, 2002; 2010; 2013). 광산 내 채광활동 중 토석류에 대한 산사태 예방 계획 수립하고자 강원도 강릉시 소재 석회석 노천광산 일대의 토석류 발생 가능성을 예측하고 토석류 발생 위험지역 발생 시 최적의 대책공법에 대한 분석을 수행하게 되었다.

2. 연구방법

연구방법은 지표수의 흐름 모의를 위한 수계자료 구축과 흐름분배 알고리즘을 적용한 수리수문 검토, 토석류 위험도 및 대책공법으로 구성된다(O'Loughlin, 1986; Grayson et. al., 1992; Costa-Cabral and Burges, 1994). 2000년 이후 자연재해의 빈도가 증가하고 이에 따라 자연재해를 사전에 예측하고 피해를 저감하기 위한 기술들이 개선되었으며, 본 연구에서 이를 적용하였다(표 1).

3. 기초자료 분석

3.1 지형분석

석회석 노천광산 일대의 지형에 대해 1998년과 2014년 지형관련요소(지형, 고도, 습윤지수, 곡률분포

표 1. 토석류 분석 수행절차

구분	내용
지표면 특성분석	• 수계 및 산계 분석 / 수치지형(DEM) 구축 • 토양도 및 토지피복도 구축 : 조도계수, 점성, 항복응력 산정 • 선구조선 및 선밀도 분포
↓	
강우자료 분석	• 기상청 과거 강수자료 분석
↓	
수리수문분석	• 흐름분배알고리즘적용 : TOPMODEL(Debris avalanche, SINMAP) • 지형요소(주제도) 산정 : Tapes-G • 2차원 흐름분배알고리즘을 적용한 토석류 흐름 모형 적용 • 수리수문, 수계, 선밀도에 기초한 재해위험도 작성
↓	
토석류 하도추적모형	• 극한강우조건 및 지표면 특성 반영 • 토석류 조건의 밀도류를 반영한 피해범위 및 침수심 산정
↓	
대책공법	• 피해범위 및 침수심(퇴적심도)을 반영한 저감대책 제시

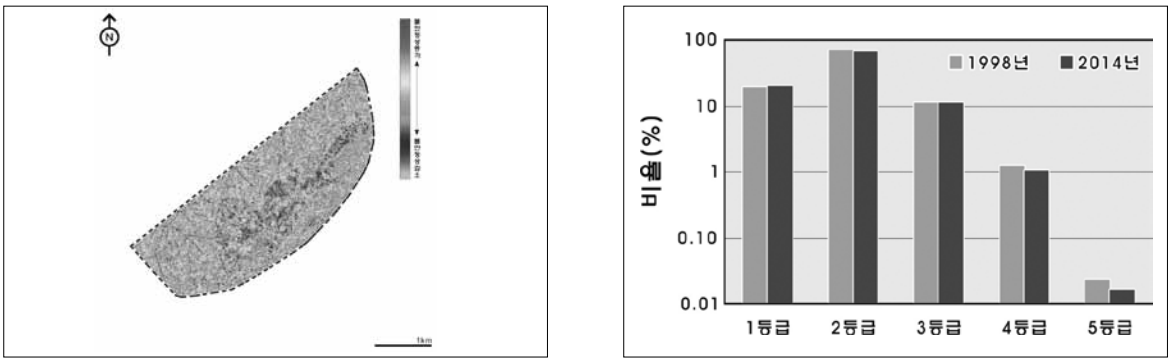


그림 1. 지형기반 재해위험도의 변화

도 외)와 선구조선을 수행하여 채굴과정에 따른 지형의 변화로 인한 재해위험 정도의 변화를 파악하였다. 채굴이 진행되는 부분에서 불안정한 지역의 증가(붉은색)와 감소(푸른색)가 현저하게 나타나고 있으나 1등급에서 5등급까지의 비율 변화는 크지 않은 것으로 분석되었다(그림 1).

3.2 지질 및 암종 특성 분석

대상지역은 옥천대의 동북부에 위치하며, 퇴적층은 조선계 대석회암통 풍촌석회암층이 주를 이루고, 그 상부에 조선계 대석회암통 완평층이 위치하고 있다. 이를 시대미상의 편상화강암과 우백질화강암이 관입한 형태를 보인다(그림 2).

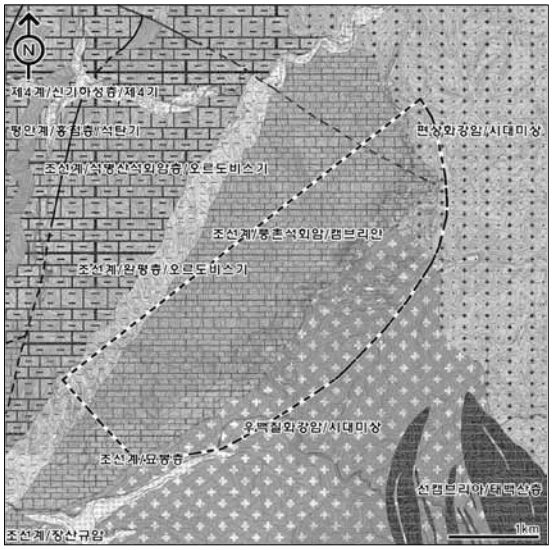


그림 2. 조사지역의 지질도(1:5만 지질도)

풍화특성 및 강도특성은 암종에 따라 다르게 나타나며(그림 3, 4), 과업구간의 기반암인 석회암 시료에 대한 풍화도, 풍화광물분석, 일축압축강도 등을 종합 분석하여 풍화지수 및 강도특성을 산정하였다(표 2).

3.3 확률강우량 산정

확률강우량의 산정에 다양한 시도가 이루어져 왔으나 본 연구에서는 국토해양부의 "확률강우량도 개선 및 보완 연구(국토해양부, 2011)"의 확률강우량 정보 체계에 따라 산정하였다. 지속시간 24시간을 기준으로 재현기간 100년 빈도에서 469.7mm, 재현기간 200년 빈도에서 520.1mm, 재현기간 500년 빈도에서 585.9mm으로 계산되었다. 지역빈도해석에 따라 지역형상추정법을 근거로 재현기간 200년 빈도, 지속시간 24시간 강우량을 580mm로 산정하였다(허준행 외, 2007).

3.4 홍수위험지도

흐름모형을 위한 지표면 특성인자(토지피복도 및 정

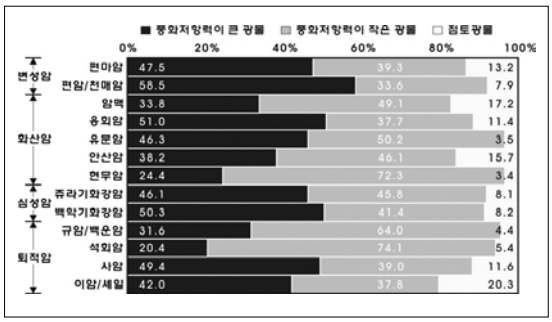


그림 3. 암종에 따른 광물특성

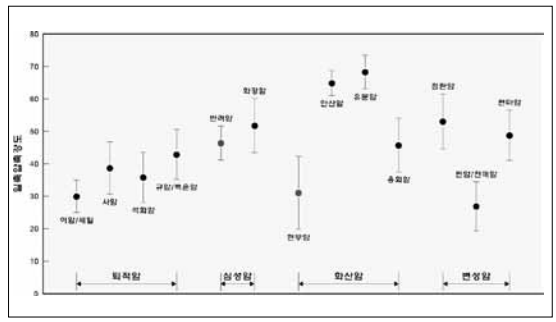


그림 4. 암종에 따른 일축압축강도의 분포범위

표 2. 석회암의 풍화도 및 내구성

구 분	개수	평균	편차	최소	최대	왜도	첨도
풍화저항력이 큰 광물	15	20.43	22.63	0.00	66.40	1.08	0.04
풍화저항력이 작은 광물		79.57					
점토광물		5.43	7.56	0.00	19.10	0.92	−0.98
풍화도	11	24.24	30.60	1.41	78.38	1.10	−0.70
일축압축강도	130	35.76	15.29	10.45	78.96	0.86	0.19

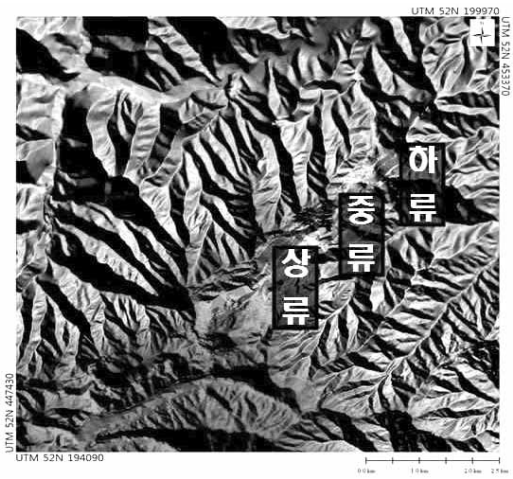
〈1998년〉		〈2014년〉	
			
상류 GRID 고도	628.58 m	상류 GRID 고도	610.16 m
중류 GRID 고도	543.47 m	중류 GRID 고도	441.55 m
하류 GRID 고도	358.87 m	하류 GRID 고도	378.07 m

그림 5. 조사지역의 3개 지점 위치(상류, 중류, 하류)

밀토양도)를 반영하여 대상지역에 대한 구간별 유량특성을 분석하였다(그림 5).

하류지역은 1998년의 유량이 많고 2014년은 유량이 적어진 것을 알 수 있다. 일반적으로 상류와 중류는 2014년의 유량이 확실히 늘어난 것이 보이지만, 하류는 반대로 나타난다. 중류는 20시간이 지난 후, 유량이 급격하게 늘어나는 것을 알 수 있다. 이는 주위 격자가 더 낮아서 20시간동안 주위의 격자 내에 물이 차고 20시간이 지난 후에는 유량이 같이 증가한다(그림 6~8).

유량곡선 그래프에서 특이점은 연구지역의 산계 사이 계곡부에서 채굴작업을 하여 강우의 도달시간이 굉장히 빠르다는 것이다. 즉, 집중호우로 인한 인명사고나 재해를 예방하는데 특히 유의해야 할 것으로 판단된다.

4. 토석류 시뮬레이션

4.1 유출구 및 사방시설 현황

대상지역에 지형적으로 강우의 유출 통로가 되는 계

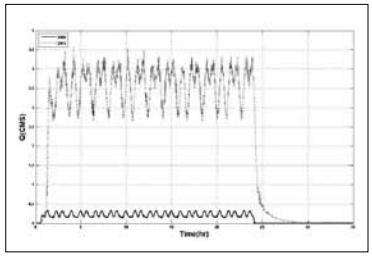


그림 6. 상류지점의 유량곡선

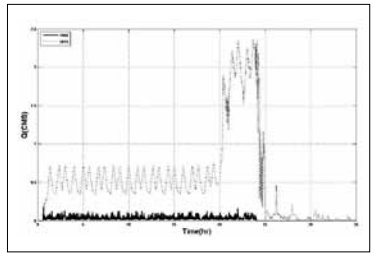


그림 7. 중류지점의 유량곡선

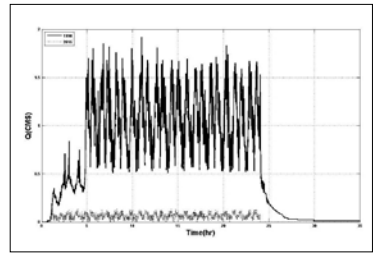


그림 8. 하류지점의 유량곡선

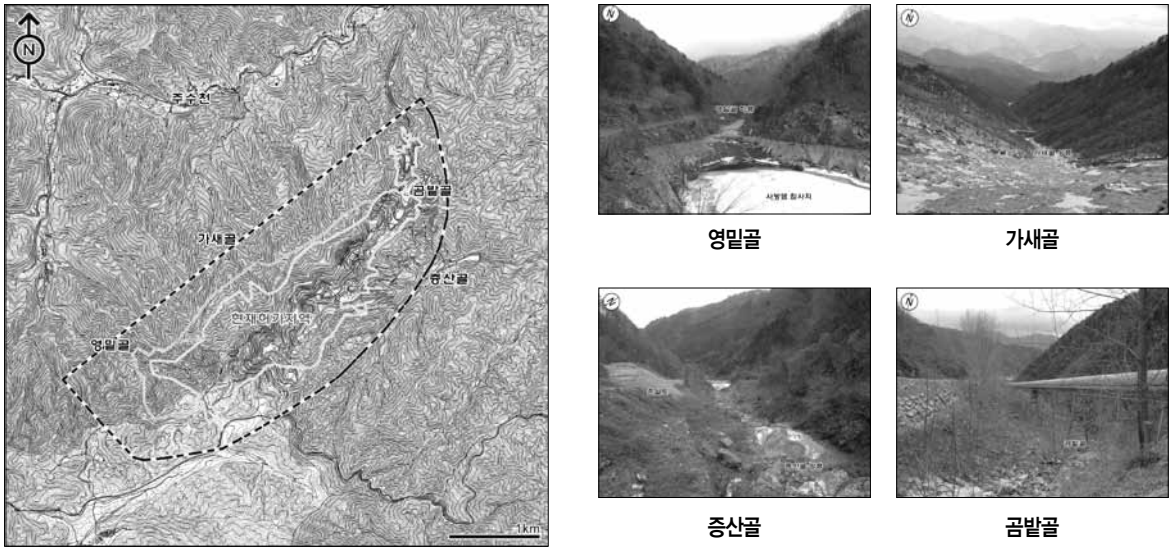


그림 9. 주요 유출구의 위치 및 현황

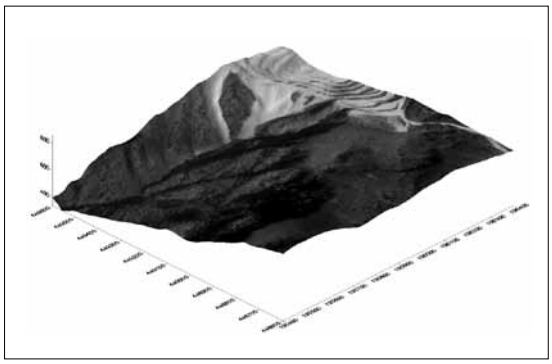


그림 10. 지형(Area 1)

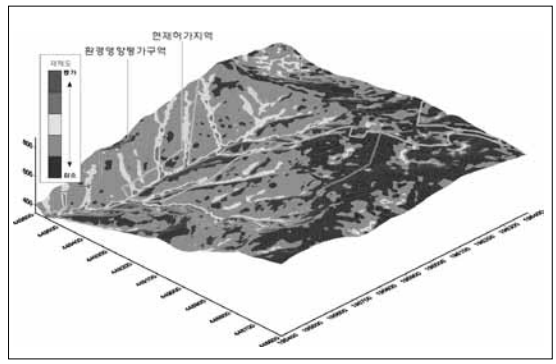


그림 11. 재해위험도 등급(Area 1)

곡은 4개 지점(영밑골, 가새골, 증산골, 곰밭골)이 발달하며, 이 지점에 대하여 흙입자를 수반한 밀도류(토석류)의 침수심을 모의하였다.

채굴지의 북쪽으로 주수천이 동에서 서의 흐름으로 발달하며, 채굴지의 영밑골, 가새골, 곰밭골에서 유출된 강우는 주수천으로 직접 유입되므로 강우조건에 따라 하천의 범람이 발생할 수 있어 이에 대한 검토가 필요하다(그림 9).

채굴지 주변의 사방시설은 주요 유출구 4곳에 오탁수 유출방지 시설(사방댐) 8개소 및 옹벽구조물 2개소가 설치되어 있다(그림 15).

4.2 피해범위 및 침수심

연구지역의 재해도, 토석류, 침수심에 대해 지형을 기반으로 총 8개의 구역(Area 1 ~ Area 8)으로 세분화하여 분석하였다. 재해위험도는 붉은색으로 갈수록 재해도가 증가하는 형태로 나타났으며(그림 11), 토석류 발생 예상 분포도는 붉은색으로 갈수록 경사도가 높고 화살표의 길이가 길수록 흐름도가 큰 것으로 표

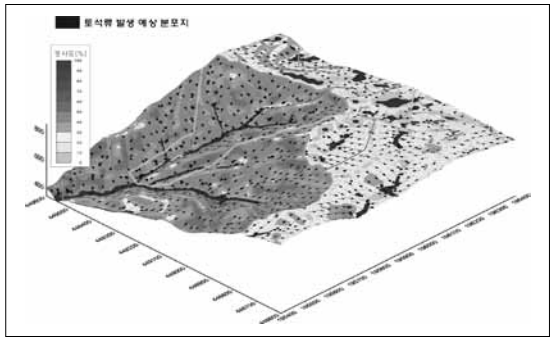


그림 12. 강우 흐름과 토석류 발생 예상지점(Area 1)

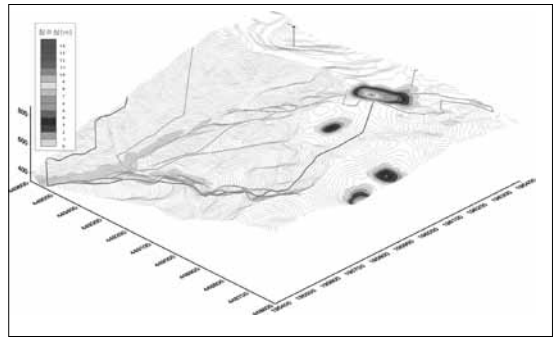
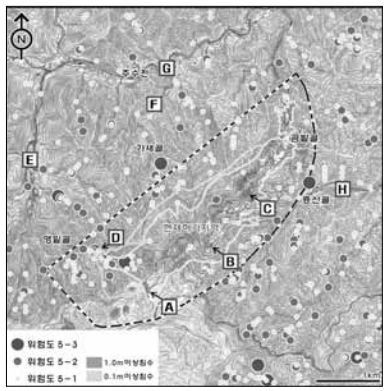


그림 13. 홍수피해범위 및 침수심(Area 1)



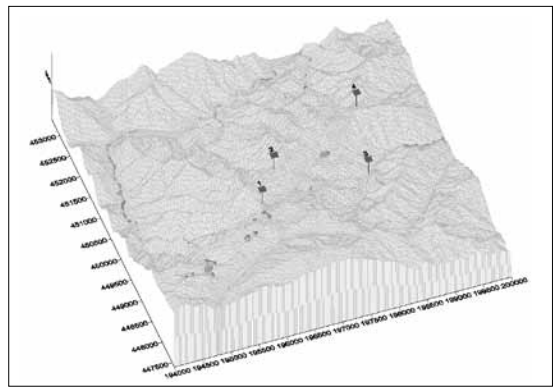


그림 14. 토석류 위험도와 200년 빈도 강우 조건에 따른 토석류 침적지

현하였다(그림 12). 홍수피해범위 및 침수심(FLO-2D 결과)은 침수심에 대해서 붉은색으로 갈수록 침수심이 깊어지는 형태를 보인다(그림 13).

4.3 토석류 위험도

재해위험도에서 위험도가 가장 높은 5등급을 위험 정도에 따라 3개로 구분(5-1등급, 5-2등급, 5-3등급)하였으며, 허가지역 중 재해위험도가 높은 지점은 영밑골 계곡의 입구부이며, 유출구인 가새골도 비교적 위험도가 높은 지역에 해당된다.(그림 15.)

재현빈도 200년 강우를 이용한 홍수위험지도에서 최대 침수지역은 허가지역 내부는A, B, C 지점에서 1.0m 이상의 침수심을 보이고 있으며, 특히 A와 C가 깊은 심도를 보인다.

A 지역은 외부의 직접유출은 없으나 0.1m 이상의 침수심을 보이는 D, E(영밑골)와 F(가새골) 지점은 지형에 의한 재해위험이 높고, 유출구 뿐만 아니라 인접한 지역에서 2-3개의 계곡이 합류하여 흐름이 발달하는 지역으로 허가지역 내부에서 외부로 직접 유출되는 지점에 해당한다. 또한 유출구를 통해 유출되는 토석류는 계곡을 따라 흐름이 계속되어 주수천(G)으로 합류된다.

증산골 지역은 외부로의 유출이 발생하게 되나 남양리 방향으로 발생되는 흐름은 H지점의 상부에 2개, 하부에 2개의 사방댐이 설치되어 있고 사방댐의 높이가 침수심 이상으로 토석류는 사방시설에서 멈출 것으로 예상된다.

하도추적모형에서 채굴지 외부로 이동되는 토석류

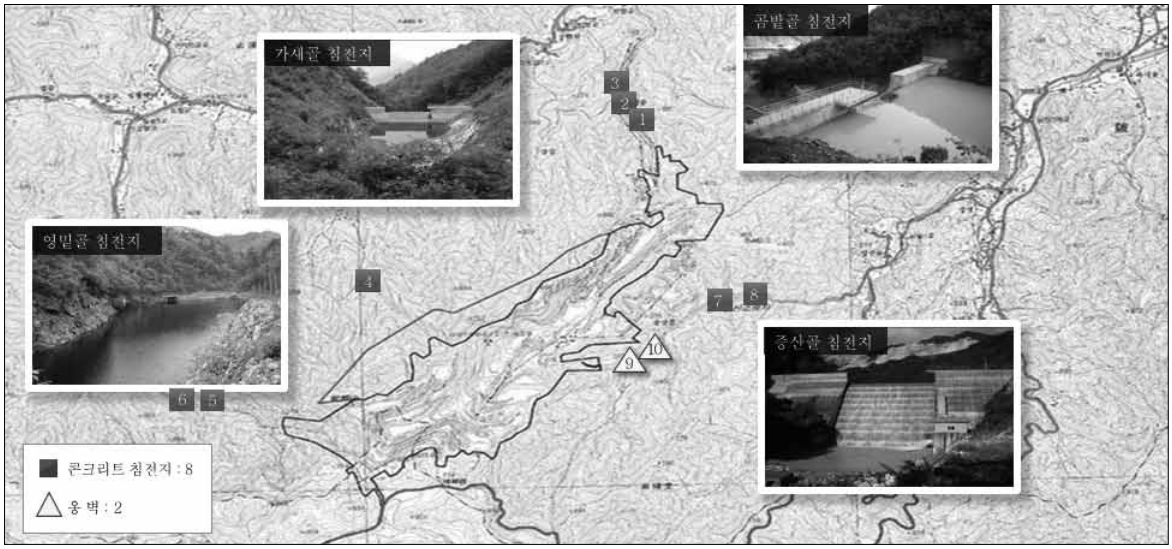


그림 15. 오탁수 유출방지 시설 현황도

는 최대 침수심(지표수+토석)이 1m미만이며, 1회의 극한강우 사상에 의해 침적량, 퇴적토의 양은 이보다 낮은 것으로 예상된다.

채굴지 내부에서 토석류 발생지역은 경사도가 낮은 평탄지에 집중되며, 유출구가 형성된 지점의 경우(지형적으로 지표수 배출구가 형성된 지점) 토석류의 침수심은 최대 2m를 넘지 않았고, 유출구가 발달하지 않는 요철형 지형의 침수심은 지형에 따라 10m 이상의 침수심을 보인다.

5. 토석류 대책 및 방재 운영현황

조사 대상지역과 같이 수원지대에 황폐한 산지가 있는 하천은 유입토사에 의해 하상이 상승하고, 홍수가 범람하여 유역전체에 피해를 가져올 수 있다. 이러한 하천은 상류유역에서 유출토사를 조절하여 하류하천의 하상변동이 극단적으로 변화하지 않도록 하고, 이러한 유역은 일반적으로 계통적 사방을 실시하며 강우 시 유송잡물에 의한 사방시설의 기능저하를 방지하기 위하여 지속적으로 통수단면을 확보하는 것이 중요하다.

대상지역은 과거 수차례 홍수 발생 이력이 있고, 사방시설 등이 설치되어 토석류 방재 시설을 운영하고 있다. 광산주변 주요 유출구 4곳에 오탁수 유출방지 시설(사방댐) 8개소 및 옹벽구조물 2개소가 설치되어 있다(그림 15). 사방시설의 기능저하 방지를 위한 정기 준설과 시설물 유지관리, 사업장내 다단계 사력 침사지 운영, 기타 오탁수 저감시설 및 정화활동 등이 수행중이다.

6. 결 론

본 연구는 강원도 강릉시 소재 석회석 노천 광산 일대의 토석류 발생 가능성을 예측하고, 토석류 발생 위험지역 발생 시 최적의 대책공법을 수립하기 위하여 수행되었다. 그 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 대상지역의 지속된 채굴행위로 인해 지형의 변화가 수반되어 채굴지 내부의 평탄지는 강우 시 지

표수의 흐름에 의해 습윤지수가 증가하며, 채굴지에서 외부로 유출되는 흐름과 유량에 변화가 수반되어 북부에 위치하는 주수천의 지표수의 수렴 정도는 다소 증가하였으나 주수천의 하천범위를 넘어서지 않는 것으로 분석되었다

2. GIS를 기반으로 한 재해위험도 분석결과, 채굴로 인한 급경사지의 증가는 재해의 발생 위험정도를 상승시키는 요인으로 작용하는 것이 일반적이나 채굴과정에서 지표수 수렴에 관계되는 상부사면기여면적(지형지수)과 곡률의 변화가 감소하여 두 시기의 재해위험도 등급은 사업장 외부지역에서 유사한 경향을 보이며, 채굴지 내부는 사면 보강공법 등과 같은 붕괴 저감시설이 지속적으로 반영되어 위험지역이 감소하는 결과를 보이고 있다.
3. 하도추적모형 시뮬레이션 결과, 대상지역에서 200년 재현빈도의 강우가 지속되면 4시간에 후에 최대피해범위와 침수심에 도달하며, 강우가 중단된 후 30분이 지나면 피해지역 중 80% 이상에서 유출이 완료되어 피해범위에서 벗어나며, 12시간 후에는 주요 계곡부를 제외한 지점에서 강우의 배출이 완료되었다. 사업장 외부지역은 대상지역의 남서부에 위치한 영밑골의 피해범위와 침수심이 증가하는 것으로 분석되었으며, 영밑골을 유출구로 가정한 홍수모의 시 토석류는 현재 설치된 사방시설에서 수렴되는 결과를 보여주고 있다.
4. 토석류 발생예정지와 하도추적모형에 의한 토석류 피해범위 분석결과, 재해위험도에서 위험도가 가장 높은 5등급을 위험정도에 따라 3개로 구분(5-1등급, 5-2등급, 5-3등급)하면 지점을 표시하면 허가지역 중 재해위험도가 높은 지점은 영밑골 계곡의 입구부이며, 유출구인 가새골도 비교적 위험도가 높은 지역에 해당되나 기설치 운영 중인 사방댐의 높이가 침수심 이상이므로 토석의 흐름은 사방시설 하부로 더 이상 진행되지 않을 것으로 예상된다.
5. 토석류 대책공법 및 방재시설은 광산인근 주요 유출구 4곳에 광해방지 및 토사유실 방지시설이 설치 운영되고 있으므로 토석류가 발생하더라도 이 시설물에 의해 수렴되는 것으로 분석되었으며, 사방시설의 기능저하 방지를 위해 정기적인 준설작업 등 유지관리 작업의 수행으로 토석류 방재시설을 지속적으로 운영하고 있다.

참 고 문 헌

1. 국립재난안전연구원(2002), 사면붕괴의 유형별 원인과 저감대책 연구, 연구보고서, pp. 153.
2. 국립재난안전연구원(2013), GIS기반 급경사지 붕괴위험도 판단시스템 개발(Ⅲ), 급경사지 붕괴위험도 판단시스템 검증, 11-1312184-000041-01, pp. 154.
3. 국립재난안전연구원(2010), 급경사지 재해예경보 정보 분석 시스템 개선, NIDP-PR-2010-01-02, pp. 304.
4. 국토해양부(2011), 확률강우량도 개선 및 보완 연구, 11-1611000-001995-01, pp. 237.
5. 산림청(2013), 제1차 산지관리기본계획(2013-2017), pp. 96.
6. 허준행, 이영석, 신홍준, 김경덕(2007), 우리나라 강우자료의 지역빈도해석 적용성 연구(I): 확률강우량 산정, 대한토목학회논문집, 27(2), pp. 101-111.
7. Costa-Cabral, M. and Burges S.T., 1994, Digital elevation model networks(DEMON) : A model of flow over hillslopes for computation of contributing and dispersal areas. Water Resources Research, 30(6), 1681-1692.
8. FLO-2D SOFTWARE (2005) FLO-2D PRO Reference manual.
9. Grayson, R.B., Moore, I.D., and McMahon, T.A., 1992, Physically based hydrologic modeling : 1. A terrain-based model for investigative purposes, Water Resources Research, 28(10), 2639-2658.
10. O'Loughlin, E.M., 1986, Prediction of surface saturation zones in natural catchments by topographic analysis, Water Resources Res. 22(5), 794 - 804.