위성영상과 GIS 공간자료를 활용한 북한 검덕광산 인근의 산사태 위험지역 예측

구영현¹⁾ · 김성민²⁾ · 오명찬¹⁾ · 박형동^{1),3)*}

Landslide Risk Assessment at the Gumdeok Mine in North Korea using Satellite Images and GIS Spatial Data

YoungHyun Koo, Sung-min Kim, Myeongchan Oh, and Hyeong-Dong Park*

(Received 20 July 2018; Final version Received 8 August 2018; Accepted 29 August 2018)

Abstract : The purpose of this study is to identify the landslide hazard at the Gumdeok zinc mine, which is an important factor for the construction of infrastructure there if South Korea and North Korea cooperate for the extraction of mineral resources. Because field survey around the mine is impossible, the landslide risk was analyzed using satellite images and GIS data. First, the landslide occurrence area was identified from high resolution satellite images and a landslide inventory map was produced. Next, the slope, aspect, curvature, distance from water, and elevation were used as input data in the frequency ratio method and the logistic regression analysis, conducted to produce landslide hazard maps. Finally, areas around the mining infrastructure where landslides can be expected were identified by applying the multiple flow accumulation analysis. The overall accuracy of predicting landslide risk was 75% with the frequency ratio method and 73% with the logistic regression method. The results of this study can be used as basic data in case of the cooperation of North Korea and South Korea in mineral resource development.

Key words : Gumdeok Mine, landslide, GIS, frequency ratio, logistic regression

요 약 : 본 연구에서는 북한의 대표적 아연광산인 검덕광산을 남북이 협력 개발할 때 인프라 구축을 위해 고려해야 하는 산사태 위험도를 파악하였다. 북한의 지역적인 특성상 현장조사가 어렵기 때문에 위성영상과 GIS 자료를 활용하여 분석을 수행하였다. 우선 고해상도 위성영상을 판독하여 검덕광산 인근에서 산사태가 발생했던 지역을 파악하였고 이를 인벤토리 맵으로 제작하였다. 제작된 인벤토리 맵과 경사도, 경사방향, 곡률, 수계거리, 고도 등의 자료를 바탕으로 산사태 분석에 널리 사용되는 빈도비 분석과 로지스틱 회귀 분석을 각각 사용하여 산사태 위험지도도를 제작하였다. 또한 산사태 위험도가 상위 5% 인 지점에서 실제로 산사태가 일어났을 경우 토사가 어디로 흘러가고 이에 따라 광산 주변 주거시설, 거주시설, 도로, 철도 등의 인프라가 어떤 영향을 받을지도 다중 누적흐름 분석을 통해 수행하였다. 제작된 산사태 위험지도와 인벤토리 맵을 분석한 결과 빈도비 방법은 약 75%, 로지스틱 회귀분석은 약 73%의 정확도를 보였다. 본 연구는 향후 북한과의 자원개발 협력 시에 투자와 인프라 구축에 있어 중요한 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

주요어 : 검덕광산, 산사태, 지리정보시스템, 빈도비, 로지스틱 회귀분석

서 론

한국은 중공업 위주의 산업구조로 인해 광물자원 소비량

이 세계에서 손꼽힐 정도이지만 광물자원 부존량이 많지 않아 대부분을 해외로부터 수입하고 있으며 자급률은 10% 미만에 불과하다. 특히 수요의 대부분을 수입에 의존하는 철광, 동광, 아연광 등 금속광의 경우 국제 자원시장에서의 가격 변동에 민감하기 때문에 자원가격이 상승하면 국내 경제에 큰 부담을 미치게 된다(KEEL, 2014). 이러한 광물 자원의 높은 해외의존도로 인해 발생하는 경제적 불안정성을 감소시킬 수 있는 방법 중 하나가 북한과의 자원개발 협력이다. 남한에 비해 광물자원의 매장량이 풍부한 북한과

- 1) 서울대학교 에너지시스템공학부
- 2) 서울대학교 기반에너지 지속가능화 사업단
- 3) 서울대학교 에너지자원신기술연구소

*Corresponding Author(박형동)

E-mail; hpark@snu.ac.kr

Address; Dept. of Energy Systems Engineering, Seoul
National University, Seoul, Korea

Table 1. Reserves of zinc ore by countries

	Country	Reserve (ton)
1	Australia	63 million
2	China	40 million
3	Peru	25 million
4	North Korea	21 million
5	Mexico	17 million
6	United States	11 million
7	Kazakhstan	11 million

자원 개발 분야를 협력함으로써 얻을 수 있는 가장 큰 장점은 수송거리가 다른 수입국들에 비해 월등히 줄어드는 데에 있다. 또한 광산 개발 협력을 통해 북한의 경제를 활성화시키고 통일 시에 드는 비용을 줄이는 데도 기여할 수 있다.

다양한 광종 중에서도 아연은 남북 광산 개발 협력의 기대효과가 크다. 아연은 국내에서 철, 알루미늄, 동에 이어 네 번째로 중요한 금속이며, 가공이 용이해서 도금, 합석, 방부제, 합금용 등으로 다양하게 사용되고 있다(KOMIS, www.kores.net). 아연은 북한에 세계적인 규모가 매장되어 있는 것으로 알려져 있는데, 미국지질조사국(US Geological Survey, USGS)이 2017년 발표한 국가별 아연 매장량 자료(USGS, 2017)와 국가통계포털(kosis.kr)의 2016년 남북한 주요광종 매장량 자료를 살펴보면 북한은 세계 4위에 달하는 매장량을 가지고 있다(Table 1). 때문에 북한의 아연광산에 대해 남북협력개발이 진행된다면 그 효과가 클 것으로 기대되며, 특히 북한 내 최대 규모를 자랑하는 검덕광산은 협력개발의 잠재력이 크다.

실제로 검덕광산은 2007년에 남북 경제개발협력의 대가로 북한이 자원개발권을 제공하여 남한 측에서 조사단을 파견한 사례가 있으나, 그 이후 남북관계가 경색되면서 실제 투자로 이어지는 못했다(KEEL, 2014). 검덕광산은 매

장량이 풍부함에도 불구하고 현재 생산되는 양은 생산능력의 3분의 1에 불과한데, 이는 설비의 노후화와 전력부족 때문으로 보인다(Unikorea21, 2011). 따라서 검덕광산에 대한 남북의 협력 개발이 진행될 경우 노후화된 설비를 개량, 증축하고 전력 공급 시설을 확충하는 것이 우선시되어야 한다. 하지만 검덕광산은 2007년과 2012년에 집중호우와 태풍으로 광산이 침수되고 주변 시설이 산사태로 파괴되는 등 피해가 빈번하게 발생했던 곳이기 때문에 설비 확충에 있어서 수해와 산사태에 대한 대책을 준비해야 할 필요성이 있다.

본 연구의 목적은 향후 검덕 광산의 개발 협력을 위한 자료로 사용하기 위해 광산 주변의 산사태 위험도를 평가하고 산사태가 발생했을 시 피해가 예상되는 곳을 찾아내는 것이다. 북한의 지역적 특성상 현장조사가 불가능하기 때문에 위성영상과 GIS 자료를 활용한 공간분석을 통해 산사태 위험도를 평가하였다. 공간자료를 활용한 GIS 분석은 대상 지역을 직접 방문하지 않더라도 간접적으로 광역적인 분석이 가능하기 때문에 광산 주변의 산사태나 사면안정성을 평가하는 연구에 자주 사용되고 있다(Choi *et al.*, 2009).

우선 고해상도 위성영상을 통해 북한 검덕광산 인근에서 산사태가 발생했던 지역을 찾아내고 이를 통해 과거에 산사태가 발생했던 지역의 인벤토리 맵을 제작하였다. 그리고 이 인벤토리 맵과 산사태 유발 인자들과의 관계성을 파악하고 산사태 위험성을 평가하기 위해 빈도비(Frequency ratio) 분석과 로지스틱 회귀(Logistic Regression) 분석을 수행하였다. 이를 통해 검덕광산 인근의 산사태 위험도를 제작하고, 산사태 위험도가 높은 영역에서 산사태가 발생했을 시 흘러내린 토사로 인한 피해가 예상되는 지역을 다중능적흐름 분석을 통해 찾아내었다.

연구지역 및 데이터

검덕광산 개요

검덕광산은 북한의 함경남도 단천시에 있는 지하광산으로

Fig. 1. Location of Gumdeok Mine.

로(Fig. 1), 해발 630~1700 m의 고지에 위치하고 있으며 총 면적은 100여 km²에 달한다. 1989년 ‘검덕광업연합기업소’라는 명칭으로 바뀌었으며, 연합기업소 산하에는 노은, 남풍, 길동, 탑골 등의 독립광산과 7월 1일, 4월 5일, 봉산, 금골 등의 분광산이 있다. 광산은 마천령계 북대천통과 남대천통의 퇴적변성암들과 그것을 관입한 관입암과 맥암들이 넓게 분포되어 있으며, 여러 차례의 구조운동을 받아 지질 구조가 복잡하다. 북대천통과 남대천통의 지층들은 대체로 남북 방향의 주향을 가지며 주로 동쪽으로 60~80° 경사져있고, 광체들은 대부분이 층상광체들이지만 드물게 맥상광체가 분포한다. 검덕광산에서 발견되는 50여 종의 광물들 중에서 산업적으로 가치 있는 광물들은 섬아연광과 방연광, 황동광인데, 섬아연광과 방연광은 약간의 황철광과 자류철광 등을 포함하는 방연광-섬아연광 광석 형태로 나오며 드물게 방연광 광석, 섬아연 광석 형태로도 발견된다(Kim *et al.*, 1988). 광산의 주개발 대상인 본산 광체, 로은동 광체, 중토장 광체, 봇골 광체, 무학동 광체 등 5개의 광체는 맥폭이 5~100 m, 주향연장 1.5~5 km, 심도연장 1.5 km에 달할 정도로 그 규모가 크다. 매장량은 광석량 기준으로 약 3억 톤, C1급 이상 매장량은 약 2.66억 톤, 품위는 5.09%(아연 4.21%+연 0.88%)로 예상된다. 광석은 2007년 기준으로 연간 약 350만 톤, 정광은 2006년 기준으로 아연정광 19.6만 톤, 연 정광 3만 톤을 생산하고 있지만, 검덕광산의 선광 처리능력이 연간 1천만 톤이라는 것을 고려하면 이는 생산능력의 약 3분의 1 수준에 불과한 수치이다

(Unikorea21, 2011).

검덕광산 인근의 위성영상 및 GIS 데이터

검덕광산 인근에서 과거에 산사태가 발생했던 인벤토리 맵을 구축하기 위해 Esri의 ArcGIS 소프트웨어에서 베이스맵으로 제공하는 World Imagery 자료를 사용하였다. 해당 베이스맵의 자료는 2011년 9월 23일, 2012년 2월 17일, 2013년 3월 5일 촬영된 DigitalGlobe의 영상 자료이며, 해상도는 0.5 m이다. 위성영상 자료를 통해 산사태 발생 지역을 찾아낸 후에는 이 지점들과 산사태 유발 인자들과의 상관관계를 파악해야 한다. 본 연구에서는 산사태를 유발하는 인자로 기존의 국내 산사태 관련 연구들에서 많이 사용했으며(Oh *et al.*, 2012; Choi *et al.*, 2012; Lee, 2007a) 대상 지역에 대한 자료를 획득할 수 있는 고도, 경사도, 경사방향, 곡률, 수계와의 거리 다섯 가지를 선택하고 자료를 획득하였다. 고도 자료는 미국지질조사국의 Earth Explorer (earthexplorer.usgs.gov)에서 제공하는 ASTER Global DEM(Digital Elevation Model) 자료를 사용하였으며, ArcGIS 10.1 소프트웨어를 활용하여 해당 DEM 자료로부터 경사도, 경사방향, 곡률을 추출하였다. 수계와의 거리는 오픈스트리트맵(Open Street Map)을 통해 제공되는 수계 정보로부터 계산하였다. 이렇게 다섯 가지의 래스터 자료는 모두 30 m의 공간해상도를 가지도록 변환하였다. 분석에 사용한 5개 인자들의 자료는 아래의 Fig. 2과 같다.

Fig. 2. GIS factors used for analyzing (a) digital elevation model, (b) slope, (c) curvature, (d) aspect, (e) distance from drainage.

연구방법

연구방법의 흐름도는 Fig. 3에 정리되어 있다. 우선 검덕광산 주변의 고해상도 위성영상으로부터 산사태 발생지역을 찾아내어 인벤토리 맵을 제작하였으며, 이 자료를 바탕으로 빈도비(Frequency ratio) 방법과 로지스틱 회귀분석(Logistic regression) 방법을 통해 산사태 위험도를 평가하였다. 이 두 방법은 Lee *et al.*(2006), Lee *et al.*(2007b), Yilmaz.(2009), Pradhan *et al.*(2010) 등 많은 산사태 연구들에서 사용한 방법으로, 본 연구에서는 각각의 방법으로 산사태 위험지도를 작성하고 그 결과를 비교하였다. 또한 이 방법을 통해 평가한 산사태 위험도가 높은 영역에서 실제로 산사태가 발생했을 때 이로 인해 예상되는 피해영역을 다중 누적 흐름 분석을 통해 파악하여 산사태로 인한 광산 주변 시설의 피해 범위를 예측하였다.

검덕광산 인근의 산사태 인벤토리 맵 구축

산사태 위험도를 평가하는 과정에서 우선 과거에 산사태가 발생했던 지역을 찾아내어 산사태 인벤토리 맵을 구축하는 것이 필요하다. 기존의 연구들은 산사태가 발생했던 지역을 찾아낼 때 항공영상과 위성영상을 활용하거나 직접 방문하여 조사하는 방법을 사용했는데, 북한 지역은 접근성이 제한된다는 지역적 특성으로 항공영상과 직접 방문 조사가 어려우므로 위성영상을 이용하는 것이 유일한 방법이다. 위성영상을 활용한 산사태 인벤토리 맵 구축 연구들은 다양한 종류의 위성영상을 사용하고 있는데, 해상도가 10~30 m 정도인 중해상도 다중분광 위성영상부터 해상도 1 m 이하의 고해상도 위성영상까지 다양한 위성영상이 활용되고 있다. 중해상도 위성영상 중에서는 Landsat TM과

ETM+ 다중분광 영상(Mwaniki *et al.*, 2015), ASTER의 스테레오 이미지와 다중분광 영상(Alkevi. *et al.*, 2011), SPOT-5 영상(Moine *et al.*, 2009; Sato *et al.*, 2009) 등이 활용되었다. 최근에는 1m 이하의 고해상도 영상을 사용한 연구들도 찾아볼 수 있는데, 해상도 1 m의 IKONOS-2 (Fiorucci *et al.*, 2011), 0.5 m의 GeoEye(Lu *et al.*, 2011) 등이 많이 사용되었다. 또한 최근에는 하나의 영상만을 사용하는 것이 아니라 해상도가 다른 중해상도 영상과 고해상도 영상을 같이 사용하여 인벤토리 맵을 제작하면서 정확도를 높인 사례들도 찾아볼 수 있다(Marcelino *et al.*, 2009).

북한 지역은 현장 방문을 통한 직접적인 조사가 불가능하므로 DigitalGlobe에서 제공하는 해상도 0.5 m의 위성영상을 판독하여 과거에 산사태가 발생한 것으로 보이는 지역을 추출하였다. 위성영상 판독을 통해 산사태 발생 지역을 추출하기 위해 세 가지 기준을 적용하였다. 우선 산림지역에서 주변에 비해 나무가 없고 흙이 드러나간 흔적이 보이는 지역을 선택하였다. 산사태는 산악 지형에서 흙이 쓸려나가는 현상이므로 해당 기준을 설정하였다. 또한 이런 기준을 만족시키는 곳 중에서는 산악 지형에 있는 밭과 비슷한 모습을 보이는 곳이 있어 밭으로 보이는 곳은 제외하였다. 밭은 구획을 나눈 듯한 모습이 특징적으로 나타나는데, 이렇게 직선적으로 나뉜 구획이 나타나는 지역은 밭으로 여겨 산사태 지역에서 제외하였다. 이러한 두 가지 조건을 만족시키는 지역일지라도 해당 지역이 토목 공사나 건축 등으로 인해 산을 깎아냈을 수도 있다. 위의 두 가지 조건을 만족시키는 지역 중에서 도로와 인접해 있거나 주변에 인공적인 시설물이 있는 지역은 토목 공사가 진행 중인 지역으로 여겨 산사태 발생 지역에서 제외하였다. 이러한 세 가지 기준을 바탕으로 검덕광산 주변에서 Fig. 4와 같은 지점들을 과거에 산사태가 발생했을 가능성이 높은 지점으로

Fig. 3. Flow chart of methodology.

선택하였고, 이를 바탕으로 Fig. 5와 같은 산사태 인벤토리 맵을 제작하였다.

빈도비 분석

빈도비 분석은 산사태와 같은 특정 사건의 발생 위치와 인자들 간의 관계성을 밝히기 위해 사용하는 방법으로(Lee *et al.*, 2007b), 산사태 분석 외에도 광산 주변의 지반침하

평가(Suh *et al.*, 2015; Son *et al.*, 2015; Suh *et al.*, 2010), 광산의 침수지역 예측(Park *et al.*, 2016) 등 광산의 재해 평가에 널리 사용되고 있다. 빈도비는 영향 인자들을 종류나 그 범위에 따라서 분류하고, 각각의 범주에 대해서 산사태 발생 지역 중에서 해당 인자의 범주가 차지하는 비율과 전체 지역에서 해당 범주가 차지하는 비율의 비로 나타낼 수 있다. 만약 빈도비가 1이라면 전체 영역과 산사태가 발생한

Fig. 4. Satellite images of landslide occurrence sites.

Landslide Inventory Map around Gumdeok Mine

Fig. 5. Landslide inventory map around Gumdeok Mine.

Table 2. Spatial relationships between each factor and landslide

Factor	Class	No. of pixels in domain	Percentage of domain	No. of landslide	Percentage of landslide	Frequency ratio	Coefficient of logistic regression
Slope (degree)	0-5	4,965	1.97	0	0.00	0.00	0.0650
	5-10	14,264	5.66	1	0.54	0.10	
	10-15	22,859	9.08	5	2.72	0.30	
	15-20	31,362	12.45	11	5.98	0.48	
	20-25	36,981	14.69	23	12.5	0.85	
	25-30	39,865	15.83	23	12.5	0.79	
	30-35	37,529	14.90	32	17.39	1.17	
	35-40	32,418	12.87	28	15.22	1.18	
	40-70	31,565	12.54	61	33.15	2.64	
Aspect	flat	769	0.31	0	0.00	0.00	0.0000
	N	38,254	15.19	9	4.89	0.32	-1.091
	NE	35,894	14.25	41	22.28	1.56	0.6185
	E	29,657	11.78	28	15.22	1.29	0.9100
	SE	38,260	15.19	39	21.20	1.39	0.6858
	S	35,242	14.00	47	25.54	1.83	0.4233
	SW	24,638	9.78	10	5.43	0.56	-0.9293
	W	21,888	8.69	10	5.43	0.63	0.0000
	NW	27,206	10.80	0	0.00	0.00	-2.3200
Curvature	convex (-)	100,349	39.85	82	44.57	1.12	-2.5458
	linear	60,242	23.92	37	20.11	0.84	-3.0676
	concave (+)	91,216	36.22	65	35.33	0.98	-2.8047
Distance from drainage (m)	0-300	41,419	16.38	56	30.43	1.86	-0.0001
	300-600	27,048	10.70	31	16.85	1.57	
	600-900	20,620	8.16	10	5.43	0.67	
	900-1,200	17,899	7.08	10	5.43	0.77	
	1,200-1,500	16,926	6.70	1	0.54	0.08	
	1,500-2,000	25,827	10.22	12	6.52	0.64	
	2,000-3,000	41,614	16.46	44	23.91	1.45	
	3,000-7,000	61,459	24.31	20	10.87	0.45	
Elevation (m)	400-700	22,768	9.04	30	16.30	1.80	-0.0003
	700-1,000	79,273	31.48	65	35.33	1.12	
	1,000-1,300	78,530	31.19	51	27.72	0.89	
	1,300-1,600	52,014	20.66	33	17.93	0.87	
	1,600-2,100	19,223	7.63	5	2.72	0.36	

영역에서 해당 범주가 차지하는 비율이 같다는 것을 의미하며, 그 값이 1보다 클수록 해당 범주와 산사태 발생과의 관계성이 크고, 1보다 작으면 그 관계성이 작다고 볼 수 있

다. 경사도, 경사방향, 곡률, 수계와의 거리, 고도 5개의 공간인자들에 대해서 각각의 산사태 발생에 대한 빈도비는 아래 Table 2와 같이 계산되었다. 각각의 인자들의 빈도비

가 계산되면 이를 통해 산사태 발생지수(LSI, Landslide Index)를 아래 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$LSI = \sum_i^N FR_i \quad (1)$$

이때 FR_i 은 각 인자의 빈도비이며, N은 사용된 인자의 수로, 본 연구에서는 총 5개의 인자를 고려했으므로 N은 5이다. 산사태 발생지수가 높을수록 산사태의 위험이 높다는 것을 의미한다.

로지스틱 회귀분석

로지스틱 회귀분석은 독립변수들과 종속변수들 간의 관계를 파악하기 위한 다변수회귀방법인데, 특히 어떤 특징의 유무를 파악하기 위해 사용되는 방법이다. 로지스틱 회귀 방법의 장점은 변수들이 연속적인 변수이든 불연속적인 변수이든 상관없이 사용할 수 있으며, 항상 정규분포를 따르지 않더라도 사용할 수 있다는 점이다(Lee, 2007a). 본 연구에서 독립변수로 선정한 인자들 중에 경사도나 수계로부터 거리, 고도 등은 연속적인 값을 가지지만 경사방향이나 곡률 같은 경우는 연속적인 값이 아닌 범주화된 자료이며, 또한 이에 따른 종속 변수가 산사태의 발생 유무라는 이진 변수이기 때문에 로지스틱 회귀분석은 산사태 발생 가능성 파악에 유용한 방법이다. 실제로 로지스틱 회귀분석은 산사태 위험도를 분석할 때 많이 사용되고 있다(Chae *et al.*, 2004; Lee *et al.*, 2004).

산사태 영향 인자들의 독립변수들과 산사태 발생이라는 종속변수 사이에는 식 (2)가 성립한다.

$$p = 1 / (1 + e^{-z}) \quad (2)$$

이때 p는 해당 사건, 즉 이 경우에는 산사태가 발생할 확률이며, z는 식 (3)과 같은 여러 개의 독립변수의 선형 조합으로 나타낼 수 있다.

$$z = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + b_nx_n \quad (3)$$

b_0 는 상수항이고, b_i ($i = 1, 2, \dots, n$)은 로지스틱 선형회귀 모델의 계수, n은 독립변수들의 개수로서, 본 연구에서는 5개의 인자들을 고려했으므로 n은 5이다. 각각의 독립변수의 회귀식의 계수는 Table 2에 정리되어 있으며, 이에 따른 z 값은 아래의 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$z = 0.0650 * slope + 1.0 * aspect + 1.0 * curvature - 0.0003 * elevation - 0.0001 * drainage \quad (4)$$

여기서 slope는 도(°)로 나타내지는 경사도 값이며, aspect는 각각의 경사방향에 따른 회귀계수(Table 2), curvature는 지형의 곡률에 따른 회귀계수(Table 2), elevation은 미터로 나타내지는 고도 값, drainage는 미터로 나타내지는 수계로부터의 거리이다. Aspect와 curvature 변수는 가중치를 1로 두고 Table 2의 회귀계수를 대입하여 계산된다. 이렇게 구한 z 값을 식 (2)에 대입하면 산사태 발생 확률을 얻을 수 있다.

다중 누적흐름 분석을 통한 산사태 토사피해 예측

산사태가 발생하면 산사태가 발생한 지점에서 토사가 흘러내려와 주변의 각종 시설에 피해를 입히게 된다. 따라서 제작한 산사태 지도의 산사태 위험이 높은 지역에서 실제로 산사태가 일어나 토사가 흘러내린다면 토사가 어느 방향으로 흘러내려서 어느 곳에 피해를 입히는지 파악하는 것이 향후 재해 방지를 위해 중요하다. 따라서 본 연구에서는 앞서 제작한 산사태 지도를 바탕으로 누적 흐름 분석을 수행하여 광산 주변의 거주단지, 산업단지, 도로, 철도 등의 주요 인프라 시설 중 어느 곳이 산사태로 인한 피해를 많이 입게 될지 파악하였다.

유체의 흐름을 분석하기 위한 GIS 공간분석 기법으로 8방향 단일 흐름 알고리즘(O'Callaghan *et al.*, 1984; Jenson *et al.*, 1988)이 가장 일반적으로 사용되고 있다. 그러나 이러한 알고리즘은 DEM에서 중심격자를 둘러싼 8개의 주변 격자 중 경사도가 가장 급한 방향으로 유체가 흐른다고 가정하기 때문에 유체가 여러 방향으로 확산되는 현상을 고려할 수 없다는 단점이 있다. 본 연구에서는 토사가 여러 방향으로 확산되는 현상을 모델링하기 위해 다중 흐름 알고리즘(Freeman, 1991)을 적용하였다. 단일흐름 알고리즘은 경사도가 가장 큰 하나의 방향으로 유체가 흐르는 것으로 계산하는 반면 다중 흐름 알고리즘은 중심격자보다 낮은 모든 격자로 물이 흐른다고 계산한다. 이때 각 방향의 경사도를 고려하여 방향별 가중치를 계산하고, 이로부터 중심격자의 물이 주변 격자로 분산되는 양을 계산한다. 주변 격자로 분산되는 물의 비율은 식 (5)와 같이 계산한다.

$$f_i = \frac{Max(0, Slope_i^p)}{\sum_{j=1}^8 (Max(0, Slope_j^p))} \quad (5)$$

이때 중심격자 i에 대해서 경사도가 0보다 큰 방향의 경사도에 p제곱을 하여 합산을 하고, 그 비율에 따라 가중치를 준다. 일반적으로 p값은 1.1을 주면 좋은 결과를 얻을 수 있다(Freeman, 1991).

연구결과 및 토의

산사태 위험지도 제작

빈도비 방법과 로지스틱 회귀분석을 통해 얻은 산사태 위험지도는 Fig. 6과 같다. Fig. 6의 지도는 산사태 위험도를 백분위로 나타냈을 때 상위 20% 내에 해당하는 영역이다. 두 방법을 통해 평가한 산사태 위험도는 비슷한 경향을 보이는 것을 확인할 수 있다. 차이점이 있다면 경사방향이 서쪽이고 빈도비 방법으로는 산사태 위험도가 낮았던 지역들 중 일부가 로지스틱 회귀분석 결과로는 산사태 위험도가 높게 나타난다는 것이다. 이렇게 빈도비 방법과 로지스틱 회귀 분석의 결과가 약간 다르게 나타나는 이유는 자료를 분석하는 방법의 차이때문이다. 예를 들자면, 경사도 인자의 경우 로지스틱 회귀분석의 결과는 경사도가 높을수록 무조건 산사태 위험도가 커지게 되지만, 빈도비 방법의 경우에는 경사도가 더 급한 경사도 25~30°의 범위에서의 빈도비가 20~25°의 빈도비보다 산사태 위험도가 낮게 나타난다. 이와 비슷하게 수계거리의 경우에도 빈도비 분석을 사용하면 수계로부터의 거리가 멀수록 산사태 위험도가 감소하다가 수계거리 2,000~3,000 m 구간에서는 산사태 위험도가 높게 나타난다. 이처럼 두 분석 결과는 대체적인 경향은 일치하지만, 자료를 분석할 때 빈도비 방법은 연속적인

값을 범주화하여 분석하는 반면 로지스틱 회귀분석은 연속적인 값을 그대로 사용하기 때문에 두 방법이 산사태 위험도를 평가하는 데 있어서 세밀한 차이가 있을 수 있다.

Fig. 6에 있는 검덕광산의 위치는 광산 관련 지상 시설이 있는 곳으로, 빈도비 방법과 로지스틱 회귀분석을 사용했을 때 모두 광산의 서쪽 사면이 산사태 발생 위험이 큰 것으로 보인다. 검덕광산의 남쪽에 있는 북한군의 대표적인 마그네사이트 광산인 룡양광산의 주변도 추가적으로 살펴보면 룡양 광산의 주변은 전반적으로 산사태 위험도가 높게 나타나 것을 볼 수 있다. 또한 수계 지역과 가까울수록 산사태의 위험도가 증가하는 것을 볼 수 있다.

산사태 피해지역 예측

산사태 위험도 상위 5%에 해당하는 영역에서 산사태가 발생했다고 가정했을 때 이 영역으로부터 흘러내리는 토사의 누적흐름량을 분석한 결과가 Fig. 7이다. 이 누적흐름량 분석 결과를 바탕으로 광산 주변의 주거지역, 산업지역, 도로, 철도에 대해 산사태 토사의 영향을 받을 수 있는 위험지역을 찾아내고 토사의 흐름 방향을 예측하였다. 우선 Fig. 8은 주거지역 중에서 토사의 누적흐름량이 높게 나타나는 (a), (b), (c) 세 구역을 확대하여 나타낸 것이다. Fig. 8(a) 지역은 광산시설과 기차역 주변에 주거시설이 밀집해 있는

Fig. 6. Landslide hazard map applying (a) Frequency ratio method, (b) Logistic regression method.

곳인데, 산사태가 발생한다면 북서쪽 사면에서 발생할 가능성이 높고, 북서쪽 사면에서 흘러내린 토사로 인해 주거 지역의 중앙부와 서쪽 지역이 영향을 받을 위험이 크다. 이러한 경향은 빈도비와 로지스틱 회귀분석 두 방법을 이용한 결과에서 모두 나타나므로 토사의 흐름이 예상되는 지역에 적절한 보강공사를 할 필요가 있다. Fig. 8(b)의 주거 지역은 전체적인 산사태 위험도가 높게 나타나고 있는데, 북쪽 사면과 서쪽 사면으로부터 토사가 흘러내릴 가능성이 높다. 산사태로 인해 흘러내리는 토사의 양이 많을 것으로 예상되기 때문에 이를 고려한 보강공사가 필요하다. Fig. 8(c) 지역의 경우에는 남서쪽 사면에서 발생하는 산사태와 이때 흘러내리는 토사로 인해 피해를 입을 가능성이 높으

므로 이에 대한 보강이 필요하다. 주거지역의 경우에는(a), (b), (c) 세 지역을 제외하고는 토사의 흐름으로 인한 산사태 위험도가 크지 않을 것으로 보인다.

Fig. 9는 산업지역에 대한 토사 누적흐름량을 나타낸 것이다. 산업지역의 경우에는 Fig. 9(a)와 (b) 두 지역에 대해 산사태로 인한 피해가 있을 것으로 예상되는데, 특히 (a) 지역의 피해가 많을 것으로 예상된다. (a) 지역은 광산과 관련된 산업시설들이 밀집되어 있는 곳으로, 주변이 급한 경사로 둘러싸여 있기 때문에 주변의 산사태 위험도가 크며, 이에 따라 산사태로 인한 토사의 피해가 있을 것으로 예상된다. 토사의 대부분은 북쪽과 서쪽 사면으로부터 흘러내릴 가능성이 높기 때문에 이에 대한 대비가 필요할 것으로 보

Fig. 7. Multiple flow accumulation of soil flowed from landslide risky area (a) Frequency ratio method, (b) Logistic regression method.

Fig. 8. Residential area expected to be damaged by landslides (Hatched: top 5% risky area).

인다. Fig. 9(b) 지역의 경우에는 (a)와 비교했을 때 큰 피해를 아니지만 어느정도 피해가 예상되며, 북동쪽과 서쪽에 위치하고 있는 급경사면으로부터 토사가 흘러내릴 가능성이 높으므로 이에 대한 대비가 필요하다.

Fig. 9. Industrial areas expected to be damaged by landslides (Hatched: top 5% risky area).

Fig. 10. Road areas expected to be damaged by landslides (Hatched: top 5% risky area).

Fig. 11. Railroads areas expected to be damaged by landslides (Hatched: top 5% risky area).

업시설과 주거시설의 피해 예상영역과 겹친다. 도로의 Fig. 10(b) 영역의 경우에는 앞에서 살펴본 산업시설의 Fig. 9(a) 지역과 비슷한 위치이며, 도로의 Fig. 10(c) 영역의 경우에는 주거시설의 Fig. 8(b) 지역에 해당하는 위치이다. 따라서, 산업시설과 주거시설의 산사태에 대비한다면 도로의 산사태 피해도 함께 줄일 수 있을 것으로 보인다. 철도 영역에 대해서도 마찬가지로 산사태 피해 가능성이 높은 지역을 뽑았는데, Fig. 11의 (a), (b), (c), (d) 지역의 산사태 피해 가능성이 높을 것으로 예상된다. 북한은 남한에 비해 도로와 철도망이 체계적으로 갖추어져 있지 않기 때문에 산사태로 인한 피해가 발생할 경우 광산 생산물의 운송에 막대한 차질이 빚어질 수 있다. 특히 이 지역의 철도의 경우 검덕광산에서 생산된 아연을 단천시에 위치한 단천 제련소로 운반하는 거의 유일한 운송수단이기 때문에 철도에 피해가 발생한다면 광산 운영에 있어 막대한 손실이 예상된다. 따라서 철도 인근의 산사태 피해 가능성이 높은 지역에 대해 보강공사를 통해 산사태로 인한 철도 운송에 차질이 생기지 않도록 하는 것이 필수적이다.

산사태 위험도의 검증

빈도비 방법과 로지스틱 회귀분석을 통해 나타낸 산사태 위험도가 산사태 발생을 얼마나 정확하게 평가했는지를 검증하기 위해 산사태 인벤토리 맵의 산사태 발생지역 자료를 활용하였다. 두 방법을 사용해 계산한 산사태 위험도와 산사태 인벤토리 맵을 통해 얻은 산사태 발생위치의 분포를 비교한 그래프가 Fig. 12이다. Fig. 12에서 X축은 산사태 위험도가 상위 몇 퍼센트인지를 나타내는 것이고 Y축은 이때 산사태 발생 위치의 누적확률분포이다. 관찰된 산사태의 약 50%정도가 산사태 위험도 상위 25%에 포함되며, 관찰된 모든 산사태는 산사태 위험도 상위 85%의 범위 안

에 포함되는 것을 확인할 수 있다. 산사태 위험 평가의 정확도는 Fig. 12의 그래프에서 그래프 아래의 면적이라고 볼 수 있는데, 빈도비 방법이 75.31%, 로지스틱 회귀분석이 73.36%의 정확도를 보인다. 빈도비 방법이 로지스틱 회귀분석에 비해 2% 정도 높은 정확도를 보이나, 경향에 있어서 큰 차이를 보이지는 않는다.

연구의 의의 및 한계

본 연구는 접근이 어려운 북한의 검덕광산 인근 지역에 대해 산사태 위험도를 평가하고, 이를 통해 광산 주변의 시설들에 대한 산사태 위험도를 평가했다는 면에서 의의가 있다. 북한 지역, 그중에서도 특히 광산이라는 특수한 지역 인근의 산사태 위험도를 평가한 연구는 전례가 없기 때문에 향후 광산 개발 협력 등에 있어 유용하게 활용될 수 있을 것으로 기대된다. 하지만 접근 불가능한 북한이라는 지역의 특수함으로 인해 정확도에는 한계가 있을 수 있다. 더 높은 정확도와 신뢰성을 얻기 위해서는 검덕광산 인근의 산사태 발생 지역에 대한 정확한 정보가 필요하다. 고해상도 위성영상에 대해 몇 가지 기준을 가지고 영상판독을 실시했지만, 현장조사를 통한 산사태 파악보다는 정확도가 떨어질 수 있기 때문이다. 때문에 자원분야에서 남북협력이 이루어져 해당 지역에 직접 방문할 수 있다면 현장조사를 통해 산사태 위험평가의 정확도를 높일 필요성이 있다. 또한 본 연구에서는 자료 획득의 한계로 인해 경사도, 경사방향, 곡률, 수계와의 거리, 고도 5개의 인자만을 영향인자로 사용했지만, 현장조사를 통해 토양도, 지질도, 식생분류도 등의 정밀한 자료를 획득할 수 있다면 정확도를 높이는 데 기여할 수 있을 것이다.

결론

본 연구에서는 향후 광물자원 분야에서의 남북 협력 시 검덕광산의 안정적인 인프라 구축을 위해 광산 인근의 산사태 발생 위험성을 분석하였다. 고해상도 위성영상을 활용하여 과거에 산사태가 발생했던 지역을 찾아내었으며, 이를 활용하여 빈도비 방법과 로지스틱 회귀분석을 각각 사용하여 북한의 검덕광산 인근의 산사태 위험도를 평가하였다. 또한 산사태 위험도가 높은 영역에서 산사태가 발생했을 시 토사의 흐름으로 인해 피해를 볼 수 있는 지역을 주거지역, 산업지역, 도로 및 철도 등의 기초 인프라 시설을 중심으로 예측했다. 검덕광산 인근 산업지대와 거주지대는 비교적 안전하지만 일부 지역에는 토사 흐름으로 인해 피해를 입을 가능성이 크게 나타나기 때문에 해당 영역과 사면에 대해 산사태에 대비한 보강공사를 수행해야 할 것으로 보인다. 또한 검덕광산과 단천제련소를 연결하는 도

Fig. 12. Cumulative frequency diagram showing landslide hazard occurring in cumulative percent of landslide occurrence.

로, 철도 등의 교통망에서도 일부 급경사면에서 발생한 산사태로 인한 토사 흐름 피해가 예상된다. 북한은 도로와 철도 인프라가 열악하기 때문에 산사태 피해가 예상되는 지역에 대해 각별한 주의와 적절한 대책이 필요할 것이다. 본 연구는 GIS와 원격탐사 기술을 활용해서 접근이 어려운 북한이라는 특수적인 지역에 대해 산사태 위험도를 평가했다는 점에서 의의를 가지며, 향후 남북한의 자원 분야 협력 시에 검덕광산의 인프라를 개선하고 투자할 때 참고할 수 있는 유용한 기초자료로서의 가치가 크다. 하지만 현장분석이 어려워 분석 정확도에 한계가 있으므로 향후 활발한 남북협력을 통해 해당 지역의 구체적이고 정밀한 자료를 획득한다면 연구결과와 정확도를 높일 수 있을 것이다.

사 사

이 논문은 2018년도 서울대학교 통일기반 구축사업의 지원을 받아 수행된 결과물임.

References

- Alkevli, T. and Ercanoglu, M., 2011. Assessment of ASTER satellite images in landslide inventory mapping: Yenice-Gökebey (Western Black Sea Region, Turkey). *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 70, 607-617.
- Chae, B., Kim, W., Cho, Y., Kim, K., Lee, C., and Choi, Y., 2004. Development of a logistic regression model for probabilistic prediction of debris flow. *The Journal of Engineering Geology*, 14(2), 211-222.
- Choi, J., Oh, H., Lee, H., Lee, C., and Lee, S., 2012. Combining landslide susceptibility maps obtained from frequency ratio, logistic regression, and artificial neural network models using ASTER images and GIS. *Engineering Geology*, 124, 12-23.
- Choi, Y., Park, H., Sunwoo, C., and Jung, Y., 2009. Application of fuzzy theory and ahp to evaluate the slope instability at pasir open pit coal mine, Indonesia. *Journal of the Korean society for geosystem engineering*, 46(1), 45-60.
- Fiorucci, F., Cardinali, M., Carlà, R., Rossi, M., Mondini, A.C., Santurri, L., Ardizzone, F., and Guzzetti, F., 2011. Seasonal landslides mapping and estimation of landslide mobilization rates using aerial and satellite images. *Geomorphology*, 129(1-2), 59-70.
- Freeman, T.G., 1991. Calculating catchment area with divergent flow based on a regular grid. *Computers & Geosciences*, 17(3), 413-422.
- Jenson, S.K. and Domingue, J.O., 1988. Extracting topographic structure from digital elevation data for geographic information system analysis. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 54, 1593-1600.
- Kim, C., 1988. *North Korea Geography: Geology and underground resources*, Educational books publisher, Pyongyang, North Korea, 667p.
- Korea Energy Economics Institute(KEEI), 2014. *Investment on Potential in Development and Processing of North Korea's Mineral Resources*, KEEI research report 14-20, Uiwang, Korea, 127p.
- Lee, J. and Park, H., 2004. Dependency of landslide occurrences on rainfall. *Journal of the Korean Society for Geosystem Engineering*, 41(1), 77-82.
- Lee, S., 2007. Application and verification of fuzzy algebraic operators to landslide susceptibility mapping. *Environmental Geology*, 52, 615-623.
- Lee, S. and Pradhan, B., 2007. Landslide hazard mapping at Salangor, Malaysia using frequency ratio and logistic regression models. *Landslides*, 4, 33-41.
- Lee, S. and Sambath, T., 2006. Landslide susceptibility mapping in the Damrei Romel area, Cambodia using frequency ratio and logistic regression models. *Environmental Geology*, 50, 847-855.
- Lu, P., Stumpf, A., Kerle, N., and Casagli, N., 2011. Object-oriented change detection for landslide rapid mapping. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 8(4), 701-705.
- Marcelino, E.V., Formaggio, A.R., and Maeda, E.E., 2009. Landslide inventory using image fusion techniques in Brazil. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 11, 181-191.
- Moine, M., Puissant, A., and Malet, J.P., 2009. Detection of landslides from aerial and satellite images with a semi-automatic method: Application to the Barcelonnette basin (Alpes-de-Hautes-Provence, France). *Landslide processes -from geomorphologic mapping to dynamic modelling*, Landslide Processes, Strasbourg, France, p.63-68.
- Mwaniki, M.W., Agutu, N.O., Mbaka, J.G., Ngigi, T.G., and Waithaka, E.H., 2015. Landslide scar/soil erodibility mapping using Landsat TM/ETM+ bands 7 and 3 Normalised Difference Index: A case study of central region of Kenya. *Applied Geology*, 64, 108-120.
- O'Callaghan, J.F. and Mark, D.M., 1984. The extraction of drainage networks from digital elevation data. *Computer Vision Graphics Image Processes*, 28, 328-344.
- Oh, H., Park, N., Lee, S., and Lee, S., 2012. Extraction of landslide-related factors from ASTER imagery and its application to landslide susceptibility mapping. *International Journal of Remote Sensing*, 33(10), 3211-3231.
- Park, S., Suh, J., Kim, G., Kim, D., Kim, D., Kim, E., and Baek, H., 2016. GIS-based spatial analysis for the prediction of

- flooded area in an underground limestone mine. *Journal of the Korean Society of Mineral and Energy Resources Engineering*, 53(6), 572-582.
- Pradhan, B. and Lee, S., 2010. Landslide susceptibility assessment and factor effect analysis backpropagation artificial neural networks and their comparison with frequency ratio and bivariate logistic regression modelling. *Environmental Modelling & Software*, 25, 747-759.
- Sato, H.P., Harp, E.L., 2009. Interpretation of earthquake-induced landslides triggered by the 12 May 2008, M7.9 Wenchuan earthquake in the Beichuan area, Sichuan Province, China, using satellite imagery and Google Earth. *Landslide*, 6, 153-159.
- Son, J., Suh, J., Yi, H., Park, H., and Lee, S., 2015. GIS-based subsidence hazard analysis on abandoned coal mine sites combining the frequency ratio and radius of influence. *Journal of the Korean Society of Mineral and Energy Resources Engineering*, 52(6), 567-576.
- Suh, J., Choi, Y., Park, H., Kwon, H., Yoon, S., and Go, W., 2010. Application of frequency ratio and analytic hierarchy process to subsidence hazard assessment around abandoned coal mine. *Journal of the Korean Society of Mineral and Energy Resources Engineering*, 47(5), 690-704.
- Suh, J., Choi, Y., Park, H., and Lee, S., 2015. Development of a software for assessing mining subsidence susceptibility using GIS combined with frequency ratio, fuzzy membership functions and analytic hierarchy process. *Journal of the Korean Society of Mineral and Energy Resources Engineering*, 52(4), 364-379.
- Unikorea21 - North Korea resource story 12, 2018.07.11., <http://unikorea21.com/?p=10341>
- U.S. Geological Survey(USGS), 2017. *Mineral Commodity Summaries 2017*, U.S. Geological Survey, Virginia, U.S., 202p.
- Yilmaz, I., 2009. Landslide susceptibility mapping using frequency ratio, logistic regression, artificial neural networks and their comparison: A case study from Kat landslides (Tokat-Turkey). *Computers & Geosciences*, 35, 1125-1138.

구영현

2017년 서울대학교 공과대학 에너지자
원공학과 공학사

현재 서울대학교 에너지시스템공학부 석사과정
(E-mail; kooala317@snu.ac.kr)

오명찬

2017년 서울대학교 공과대학 에너지자
원공학과 공학사

현재 서울대학교 에너지시스템공학부 박사과정
(E-mail; amir117@daum.net)

김성민

2009년 서울대학교 공과대학 에너지자
원공학과 공학사
2016년 서울대학교 공과대학 에너지시
스템공학부 공학박사
2016년 서울대학교 에너지자원신기술연
구소 연수연구원
2017년 부경대학교 에너지자원연구소
전임연구원

현재 서울대학교 BK21 플러스 기반에너지 지속가능화 인력양성
사업단 연수연구원
(E-mail; snuhyrule@daum.net)

박형동

1988년 서울대학교 공과대학 자원공학
과 공학사
1990년 서울대학교 공과대학 자원공학
과 공학석사
1994년 영국 런던대학교 임페리얼 칼리
지 지질학과 이학박사

현재 서울대학교 공과대학 에너지시스템공학부 교수
(E-mail; hpark@snu.ac.kr)