한국지구시스템공학회지
Vol. 43, No. 5 (2006) pp. 429-438

연구논문

광해방지를 위한 대규모 석탄 노천광의 배수설계 최적화

최요순[1] · 선우춘[2] · 박형동[1]*

Control of open-pit mine drainage for mine reclamation using Geographic Information Systems

Yosoon Choi, Choon Sunwoo and Hyeong-Dong Park*

Abstract : This paper presents an application of GIS-based hydrological modeling and spatial analysis to a region of Roto Middle in the Pasir open-pit coal mine, Indonesia to effectively control the contaminated runoff for mine reclamation. A detailed topographical survey was performed at the study area to generate a reliable DEM(Digital Elevation Model). Hydrology tools implemented in ArcGIS 9.1 were used to extract the characteristics of drainage system such as flow direction, flow accumulation and catchment area from DEM. The results of spatial analysis showed that size of in-pit pond and arrangement of pumping facility are not suitable and some runoff drained through waste dump can flow in the river without any purification. Finally, four practical actions were suggested to optimize the design of drainage system in the study area for mine reclamation.

Key words : Drainage control, Open-pit mine, GIS, Digital Elevation Model, Mine reclamation

요 약 : 본 연구에서는 인도네시아 파시르(Pasir) 석탄 노천광의 중부지역(Roto Middle)을 대상으로 노천광내 배수시스템을 분석하고, 채굴적 및 폐석 적재지에서 유출되는 오염수를 효과적으로 제어하기 위한 배수설계 최적화를 수행하였다. 정밀 지형측량을 통해 대상지역의 DEM(Digital Elevation Model)을 제작하였으며, GIS 기반의 배수 모델링을 기법을 적용하여 DEM으로부터 빗물의 흐름방향, 누적 흐름양, 집수구역의 분포 등 강우시 노천광 배수시스템의 특성을 추출하였다. 배수시스템에 대한 분석결과, 현재의 채굴적 내부 폰드(in-pit pond)의 면적과 배수설비의 배치, 운반로(haul road)의 경사구배 등에서 문제점이 발견되었으며, 발견된 문제점을 효과적으로 해결하기 위한 4가지 배수설계 최적화 방안을 제시하였다.

주요어 : 배수처리, 노천광, 지리정보시스템, 수치등고모델, 광해방지

서 론

현대의 광물자원 개발에 있어 광해방지(mine reclamation) 기술은 지속 가능한 광산개발(sustainable mine development)을 위한 필수적인 요소로서 그 중요성이 증대되어 왔다. 광해방지 기술을 적용 시점에 따라 폐광후 광해방지 기술과 가행중 광해방지 기술로 분류한다면, 최근 국내에서 진행되고 있는 폐광산 인근지역 오염토양의 개량 및 복원, 폐광산 갱내 유출수의 정화, 폐광산 지반침하 지역의 대책 마련, 방치된 채광 시설물과 자재의 처리 등의 광해방지 사업은 폐광후 광해방지 기술에 해당한다고 볼 수 있다. 2006년 현재 국내 광산 현황은 가행광산 730 개소, 휴·폐광산 1276 개소(특히, 석탄광의 경우 가행광산 9 개소, 휴·폐광산 340 개소)로서 (광해방지사업단, 2006), 국내에서는 폐광후 광해방지 기술에 대한 수요와 관심이 보다 높을 수 밖에 없는 상황이다. 그러나 범세계적으로 추진하고 있는 해외에너지·광물자원의 개발 측면에서는, 개발 대상국과의 외교적·환경적 마찰을 줄이고, 개발 종료후 부담하는 환경복원 비용을 절감하기 위한 친환경적인 채광 기법이 요구되고 있으며, 이를 위해 국내에서도 가행중 광해방지 기술에 대한 관심과 적극적인 개발 노력이 필요한 시점이다.

국내에서 해외에너지·광물자원 개발의 성공사례로 평가받는 인도네시아 파시르(Pasir) 유연탄광의 경우

2006년 9월 19일 접수, 2006년 10월 25일 채택
1) 서울대학교 공과대학 지구환경시스템공학부
2) 한국지질자원연구원 지반안전연구부
*Corresponding Author(박형동)
E-mail; hpark@snu.ac.kr
Address; School of Civil, Urban and Geosystem Engineering, Seoul National University

대규모 노천채굴 방식으로 개발되어, 현재에도 가행 중에 있다. 대규모 노천광의 경우 광체가 지표에 그대로 노출되어 있기 때문에, 강우시 노천광 지표면을 따라 흐르는 빗물과 광체가 반응하여 오염수가 생성될 수 있다(Meek, 1990). 또한 채굴적(pit) 주위의 폐석 적재지 (waste dump)로부터 침출수가 배출되어 인근 하천을 오염 시킬 수 있기 때문에(Hustrulid and Kuchta, 1995), 강우시 이들 오염수의 배출을 효과적으로 제어할 수 있는 노천광 배수설계 기술이 필요하며, 이는 대규모 석탄 노천광에서 요구되는 가행중 광해방지 기술의 하나로 볼 수 있다.

대규모 석탄 노천광에서 오염수의 배수처리를 위해 일반적으로 사용하는 방법은 강우시 채굴적으로 유입되는 빗물을 하단의 내부 폰드(in-pit pond)에 1차 저장한 후, 침전 폰드로 이송시켜 일정시간 오염수를 정화 처리하는 방법이다(Meek, 1990). 침전 폰드에서 정화 처리된 물은 다시 인근 하천으로 배출된다. 이러한 배수처리 방법을 사용하는 경우에는 폰드의 크기와 위치, 침전 폰드로의 이송을 위한 펌핑 설비(pumping facility)의 배치 및 용량, 폐석 적재지의 위치 등을 채굴적 설계 단계에서 결정해야 하며, 합리적인 의사결정을 위해서는 강우시 빗물의 흐름방향과 누적 패턴을 고려한 배수시스템 분석 및 배수설계 최적화 과정이 필요하다. 적절하지 않은 배수설계가 원인이 되어, 노천광내 폰드가 범람하거나, 또는 오염수가 하천으로 직접 유입되는 경우 심각한 환경문제를 유발할 수 있기 때문이다.

대규모 석탄 노천광의 광해방지를 위해 합리적인 배수설계가 중요함에도 불구하고, 대부분의 설계 작업은 노천광 배수시스템에 대한 종합적인 분석과정 없이 현장 광산 기술자의 경험에 의존하여 진행되고 있다. 이는 노천광내 배수시스템을 효과적으로 분석하고, 배수설계를 최적화 할 수 있는 적절한 분석 방법 및 도구가 아직까지 제공되지 못하고 있기 때문인 것으로 판단된다. 광산개발 분야에서도 Minescape(Mincom, 2006), Mining Visualization System(Ctech, 2006), VULCAN MineModeller (Maptek, 2006) 등 채굴적의 전산화 설계를 위한 상용 소프트웨어들이 다수 활용되고 있으나, 이들 소프트웨어들은 노천광내 빗물 흐름의 특징을 분석할 수 있는 기능들을 제공하지 못하는 한계가 있다. 반면, GIS(Geographic Information Systems) 소프트웨어의 경우 배수시스템의 분석을 위한 다양한 기능들을 제공하고 있으나, 광산개발 분야에서는 그 활용도가 아직까지 높지 못한 실정이며, 특히, 대규모 노천광의 배수시스템 설계를 위한 활용은 최근까지도 거의 시도된 적이 없는 새로운 연구 과제라고 할 수 있다.

본 연구의 목적은 가행중인 대규모 석탄 노천광의 배수설계를 최적화할 수 있는 GIS 기반의 분석 기법을 제시하는 것이다. 노천광내 배수시스템의 특성을 분석하고, 분석 결과를 바탕으로 폰드, 폐석 적재지, 펌핑 설비 등 배수관련 시설의 최적 위치와 용량을 결정함으로써, 집중 강우시 오염수 확산에 의해 발생할 수 있는 광해를 사전에 예방할 수 있도록 하고자 한다. 본 논문에서는 인도네시아 파시르 노천광의 중부지역(Roto Middle)을 대상으로 배수시스템 분석 및 배수설계 최적화를 수행한 적용 사례를 소개한다.

연구대상지역

파시르 노천광은 인도네시아 동칼리만탄(East Kalimantan) 발릭파판(Balikpapan) 서측 130km 지점에 위치하고 있다. 전체 탄광의 면적은 504km^{2}로 서울시와 비슷한 크기이며, 약 11억톤의 발전용 유연탄이 매장되어 있는 것으로 추정된다. 1982년 인도네시아 정부와 채광협약을 체결한 이후, 10년 이상의 탐사 및 개발 과정을 거쳐 1993년부터 화력 발전용 유연탄을 생산해오고 있으며, 현재 연간 생산량은 1800만톤 정도이다(Samtan, 2006).

Fig. 1은 파시르 노천광의 광체 분포와 채굴적의 개발 현황을 보여준다. 지표에 노출된 80-90도 경사의 수직탄층을 따라, 남북방향 16km, 동서방향 7km 범위로 채굴적이 분포하고 있다. 채굴적은 지표수준을 170ML로 보았을 때, 2006년 현재 -100ML까지 개발이 진행되었으며, 지하심부에서의 광체발달 상황에 따라 최대 -150 ML까지 개발이 진행될 예정이다. 파시르 노천광의 지질은 하상퇴적으로 생성된 제 3기의 사암(sandstone), 이암(mudstone), 석탄(coal) 층으로 구성되어 있으며, 이중 이암층의 영향으로 강우시 습윤 상태가 되면 지표면은 거의 불투수층에 가까운 특성을 나타낸다(정소걸 등,

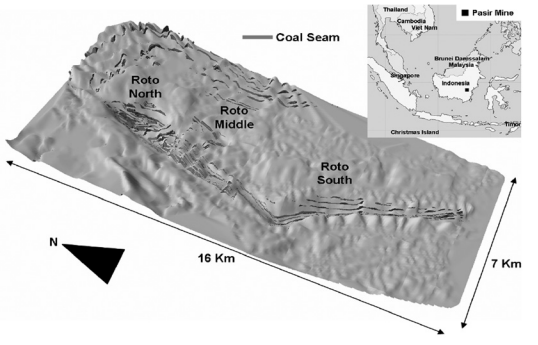


Fig. 1. Location and 3D view of the Pasir open-pit coal mine, Indonesia.

2003). 파시르 지역의 강우량은 연평균 2500mm 정도이며(1992년부터 2005년까지의 통계), 1월부터 4월 사이에 강우량이 비교적 더 높게 나타난다(Fig. 2).

파시르 노천광은 남북방향으로 로또 강북지역(Roto North), 로또 중부지역(Roto Middle), 로또 강남지역(Roto South)으로 구분된다(Fig. 1). 본 논문에서는 로또 중부지역의 채굴적 M(pit M)을 중심으로 4.65km^2 (2.03 km × 2.29km) 영역을 대상지역으로 선정하였다. 로또 중부지역 채굴적 M의 탄층은 대습곡에 의한 배사구조에 나타나고 있으며, 배사축을 중심으로 V자 형태의 탄층이 지표에 노출되어 있다(Figs. 3 a&b). 석탄의 개발을 위해 스트립(strip) 방식의 원형 채굴적이 개발되어 왔으며(Fig. 3c), 개발과정에서 발생하는 폐석들은 채굴적을 둘러싸고 있는 폐석 적재지(waste dump)로 운반된다(Fig. 3b).

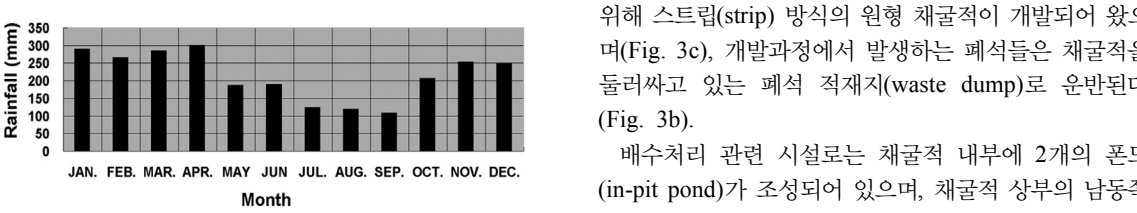
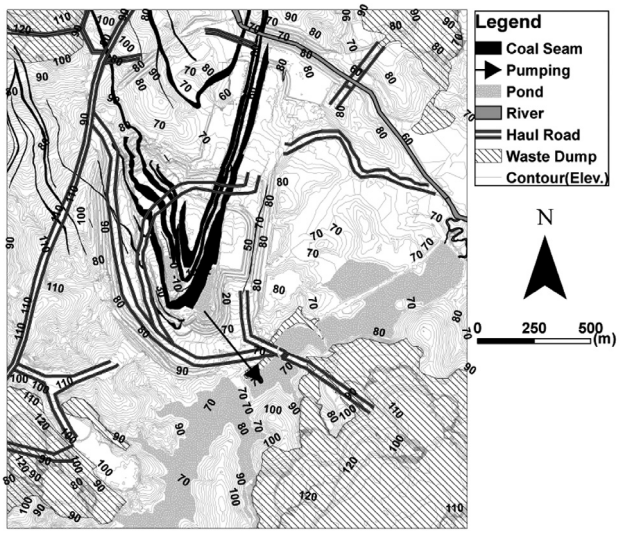


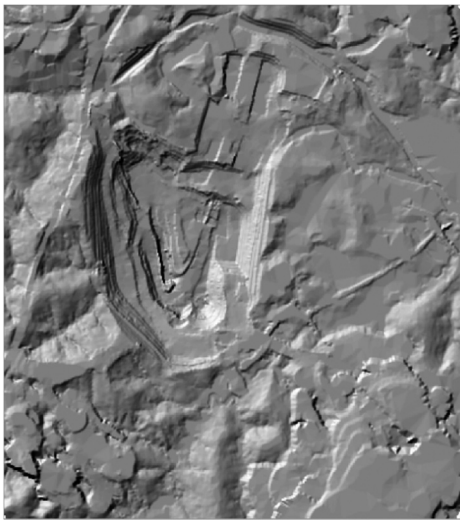
Fig. 2. Monthly mean rainfall data averaged from 1992 to 2005 at the Pasir open-pit coal mine, Indonesia.

배수처리 관련 시설로는 채굴적 내부에 2개의 폰드(in-pit pond)가 조성되어 있으며, 채굴적 상부의 남동쪽 방향으로 4개의 침전 폰드가 조성되어 있다(Fig. 3b). 강우시 채굴적으로 유입되는 빗물들은 벤치(bench), 벤치

(a)



(b)



(c)

Fig. 3. Study area. (a) Panoramic view of the pit M at Roto Middle. (b) Thematic map of the Roto Middle. (c) Hillshaded map of the Roto Middle.

사면(bench face), 램프(ramp), 운반 도로(haul road) 등을 따라 흘러내려, 최종적으로는 2개의 내부 폰드에 저장되며, 이를 다시 상부의 침전 폰드로 이송하기 위해 시간당 740m^{3}의 배수 용량을 가진 펌핑 설비가 서측 내부 폰드에서 가동되고 있다.

연구방법

DEM의 생성

GIS 기반의 배수 모델링 기법을 대규모 노천광에 적용하기 위해 필수적으로 요구되는 가장 중요한 자료는 노천광 지역의 지형 특징을 정확히 반영할 수 있는 고정밀·고해상도 DEM(Digital Elevation Model)이다. 노천 채굴 방식의 특성상 노천광에는 채굴적을 포함하여 다양한 규모의 지형 굴곡들이 존재할 수 있는데, DEM이 이러한 지형 굴곡들을 정확히 반영할 수 있어야 강우시 나타나는 빗물의 흐름을 사실적으로 모델링 할 수 있으며, 보다 신뢰성 있는 배수시스템 분석 결과를 도출할 수 있기 때문이다. 본 연구에서는 신뢰성 있는 DEM을 생성하기 위해, 토털 스테이션(Total Station)과 DGPS (Differential Global Positioning System)을 이용하여 연구 대상지역 지형에 대한 정밀 측량을 수행하였고, 2m 고도 간격의 등고선을 갖는 지형도를 제작하였다. 이어서 미국 ESRI의 ArcGIS 9.1 소프트웨어를 사용하여 등고선 자료를 TIN(Triangulated Irregular Network) 모델로 변환하였고, 마지막으로 TIN to Raster 기능을 사용하여, 지형 자료의 TIN 모델로부터 5m 격자 간격으로 이루어진 DEM을 생성하였다(Fig. 4).

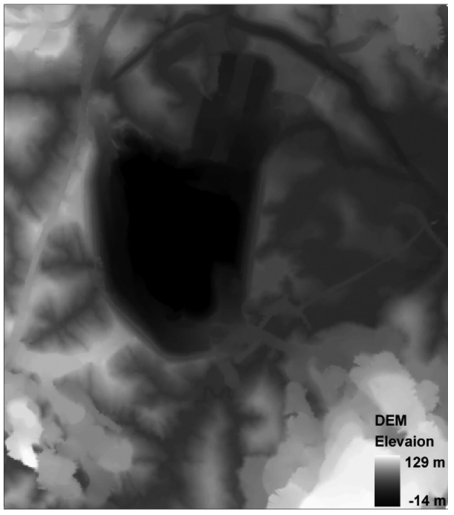


Fig. 4. DEM(Digital Elevation Model) of the Roto Middle.

GIS 기반 배수 모델링 기법의 원리

배수시스템의 종합적인 분석을 위해 빗물의 흐름방향(flow direction), 누적 흐름양(flow accumulation), 집수구역(catchment) 등을 DEM으로부터 계산할 수 있는 알고리즘들이 최근까지 다수 개발되어 왔다(Mark, 1984; Jenson and Domingue, 1988; Martz and deJong, 1988; Tribe, 1992; Martz and Garbrecht, 1999; Wang and Liu, 2006). 특히, Jenson and Domingue(1988)에 의해 개발된 알고리즘은 거의 모든 GIS 소프트웨어들의 분석 기능으로 구현되어왔으며(Wang and Liu, 2006), 그 결과 GIS는 배수 모델링을 위한 효과적이고 편리한 도구로서 다양한 분야에서 활용되고 있다(Garbrecht and Martz, 2000; Burrough *et al.*, 2005; Maidment *et al.*, 2005).

DEM을 이용한 GIS 기반의 배수 모델링 기법의 원리는 Fig. 5와 같다. 먼저, 지표면의 고도값이 매트릭스 형태로 배열되어 있는 DEM으로부터(Fig. 5a), 각 격자에서의 빗물 흐름방향을 계산한다(Fig. 5b). 빗물 흐름방향의 계산에는 Mark(1984)가 제안한 D8 방식이 가장 일반적으로 사용되는데, 중심 격자와 중심 격자를 상하, 좌우, 대각선 방향으로 둘러싼 8개의 주변 격자간의 기울기를 계산하여, 중심 격자로부터 가장 큰 기울기를 보이며 하강하는 주변 격자 방향으로 빗물의 흐름방향을 결정하는 방식이다. 모든 격자에 대한 빗물의 흐름방향이 계산된 뒤에는 흐름방향을 따라 이동하면서, 빗물의 누적 흐름양과 집수구역을 산정한다. Fig. 5에 제시된 예제의 경우 음영 표시된 2개의 집수지점이 DEM에 존재하고 있으며(Fig. 5a), 누적 흐름양의 계산 결과 위쪽 집수지점에는 12개의 상부 격자로부터의 빗물이 누적되어 유입되고, 아래쪽 집수지점에서는 2개의 상부 격자로부터 빗물이 누적되는 것을 확인할 수 있다(Fig. 5c). 집수구역은 집수지점으로의 빗물 유입에 영향을 주는 상부 격자의 분포를 의미하며, 집수지점의 개수와 동일하게 두개의 구역으로 구분되었다(Fig. 5d). 본 연구에서 사용한 배수 모델링 알고리즘에 대한 보다 자세한 설명은 Jenson and Domingue(1988)를 참고할 수 있다.

GIS 기반 배수 모델링 기법의 적용

GIS 기반 배수 모델링 기법의 적용을 위해 ArcGIS 9.1 소프트웨어가 제공하는 Hydrology 분석 도구를 사용하였다. ArcGIS 소프트웨어를 이용한 배수 모델링 절차는 많은 문헌을 통해 소개되어 왔기 때문에(예: Doan, 2000; ESRI, 2006), 본 연구에서는 기존 문헌에서 소개된 배수 모델링 절차 중 일부를 도입하여, 다음과 같은 과정으로 분석 작업을 수행하였다.

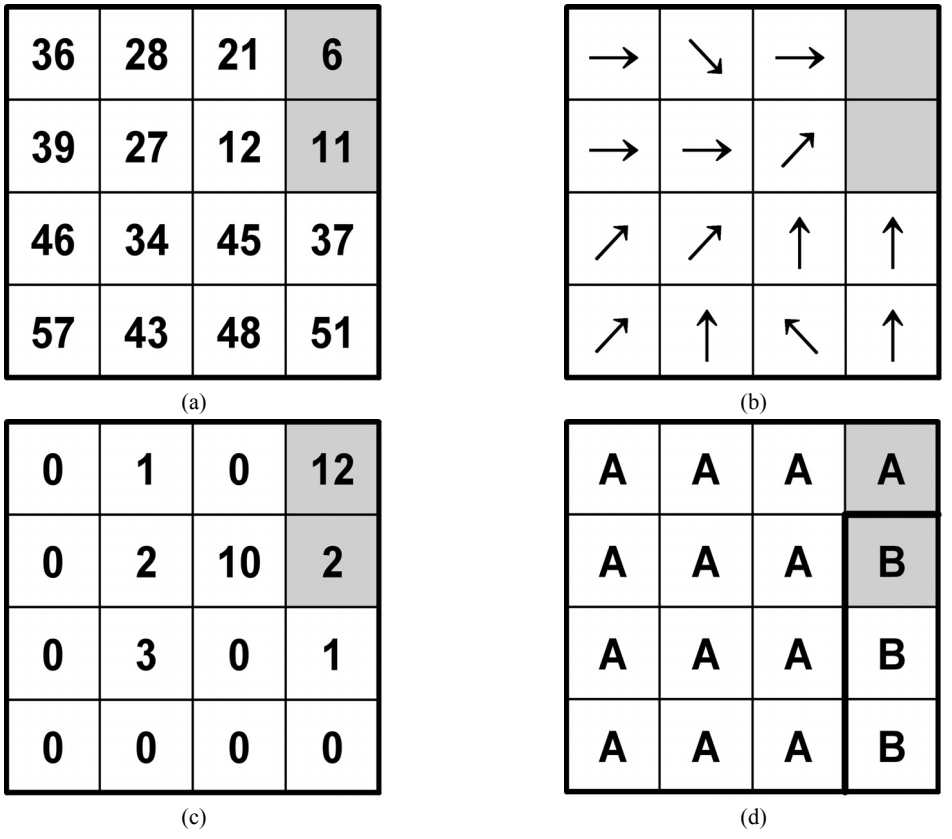


Fig. 5. Example of drainage analysis. (a) DEM. (b) Flow direction. (c) Flow accumulation. (d) Catchment area(marked with A&B).

(1) 채움 연산(filling operation) : 일반적으로 DEM에는 8방향 모두 상대적으로 고도가 높은 주변 격자에 둘러싸인 함몰 격자 (depressed grid)가 존재할 수 있다. D8 방식 (Mark, 1984)에 의해 빗물의 흐름방향을 결정하는 경우, 함몰 격자에서는 8방향 모두를 고려하더라도 하강하는 기울기를 찾아낼 수 없으며, 그 결과 빗물이 이동하지 못하고 함몰 격자에 정체·누적되는 모델링 결과가 나타난다. 만약, DEM에 존재하는 함몰 격자가 하천이나 폰드, 혹은 지표상에 실제 존재하는 함몰 지형(예, 카르스트 지형)을 의미한다면, 빗물이 이러한 함몰 격자에 누적되는 현상은 보다 사실적인 모델링 결과라고 볼 수 있을 것이다. 그러나 DEM에 존재하는 함몰 격자들의 일부는 실제 지형의 반영이 아닌 자료 생성시 발생한 오류일 수 도 있으며, 실제 지형을 반영했다고 할지라도 얕은(shallow) 함몰 지형일 경우에는 강우시 빗물이 가득 고인후, 누수(overflow) 패턴이 나타날 수 있기 때문에, 빗물의 연속된 흐름 패턴을 분석하기 위해서는 얕은 함몰 격자들에 대한 적절한 고도 보정 작업이 필요하다.

본 연구에서는 대상지역 채굴적 하부의 내부 폰드와 채굴적 상부의 침전 폰드, 그리고 동북방향의 하천에 해당하는 영역들을 빗물이 최종적으로 모이게 되는 집수지점으로 가정하여, 이들 영역에 대한 함몰 격자들은 DEM 상에 그대로 유지하였고, 그 외의 대상지역에 분포하는 얕은 함몰 격자들은 채움 연산을 적용하여 고도 보정을 해줌으로써, 폰드 및 하천을 중심으로 연속된 빗물의 흐름 패턴이 모델링될 수 있도록 하였다.

(2) 흐름방향 계산(calculating flow direction) : 채움 연산을 통해 보정된 DEM으로부터 빗물의 흐름방향을 계산하였다. D8 방식에 의해 주변 8방향 격자의 기울기를 상호 비교하는 과정에서, 2방향 이상의 동일한 기울기가 나타나는 경우에는, Jenson and Domingue(1988)의 알고리즘에 따라 중심 격자로 빗물이 흘러 들어오는 방향을 반영하여 빗물이 흘러 나가는 방향을 결정하였다.

(3) 누적 흐름양 계산(calculating flow accumulation) : 강우시 지표면을 따라 흐르는 빗물의 집중도를 분석하고, 빗물의 흐름을 제어할 수 있는 적절한 지점을 선정하

기 위해 누적 흐름양을 계산하였다. 누적 흐름양은 DEM 자료와 동일하게 매트릭스 형태로 산출된 누적 값들이 기록되기 때문에, 본 연구에서는 공간분석의 효율성을 높이기 위해, 누적 흐름양에 따라 100 격자 이상 누적 경로, 1,000 격자 이상 누적 경로, 10,000 격자 이상 누적 경로의 3가지 등급으로 분류하여 선형의 벡터라인 자료로 변환을 수행하였다.

(4) 집수구역 구분(delineating catchment boundary) : 채굴적 내부 폰드와 침전 폰드, 하천으로 유입되는 빗물의 양을 산정하고, 강우량에 따른 폰드의 수위 상승을 예측하기 위해 집수구역의 구분과 면적 계산을 수행하였다. 집수구역의 면적이 계산되면 다음과 같은 근사식을 이용하여 강우시 각 폰드에서의 수위 상승 정도를 산정하였다.

$$RW = \frac{C \times R}{P \times 1000} \quad (1)$$

여기서 RW는 폰드 수위 상승(m), C는 집수구역의 면적(m^2), R은 강우량(mm), P는 각 폰드의 면적(m^2)을 나타낸다. 파시르 노천광의 지질 특성으로 인해 강우시 지표면은 불투수층의 성질을 보이기 때문에, 빗물이 토양으로 흡수되거나 지하수로 유입되는 현상은 계산식에 고려하지 않았다.

또한, 다음의 근사식을 사용하여 집중 강우시에도 폰드의 수위를 안정적으로 유지시킬 수 있는 펌핑 설비의 적정 용량을 산정하였다.

$$PC = \frac{DR \times C}{H \times 1000} \quad (2)$$

여기서 PC는 펌핑 설비의 용량(m^3/hour), DR은 1일 강우량(mm/day), C는 집수구역의 면적(m^2), H는 펌핑 설비의 1일 가동 시간(hour/day)을 의미한다.

결과 및 토의

배수 모델링 결과

대상지역의 DEM에 대하여 채움 연산을 수행한 결과 채굴적 내·외부의 일부 얕은 함몰 지형에서 고도값이 보정되는 효과를 확인할 수 있었다(Fig. 6a). 그러나 대상지역 고도의 최소값에는 변화가 없었는데, 이는 가장 낮은 고도에 위치한 내부 폰드 영역을 최종 집수지점으로 가정하여, 채움 연산을 수행하더라도 함몰 지형이 그대로 유지될 수 있도록 조정해 주었기 때문이다. Fig. 6b의 빗물의 흐름방향 산정 결과는 복잡한 패턴을 보이고 있으나, 채굴적 내부의 경우 주로 벤치 사면의 주향 방향에 따라 빗물의 흐름 방향이 결정되고 있음을 확인할 수 있다.

Fig. 7은 대상지역 빗물의 누적 흐름양을 분석한 결과이다. 강우시 발생하는 빗물의 누적 흐름은 채굴적 벤치 사면 상부로부터 하부로 내려오면서 점차 누적양이 증가하는 패턴을 보이고 있으며, 특히 채굴적 북측과 서측 사면의 운반로(haul road)를 따라 빗물의 누적양이 급격하게 증가하는 것을 확인할 수 있다. 대상지역 빗물의 누적

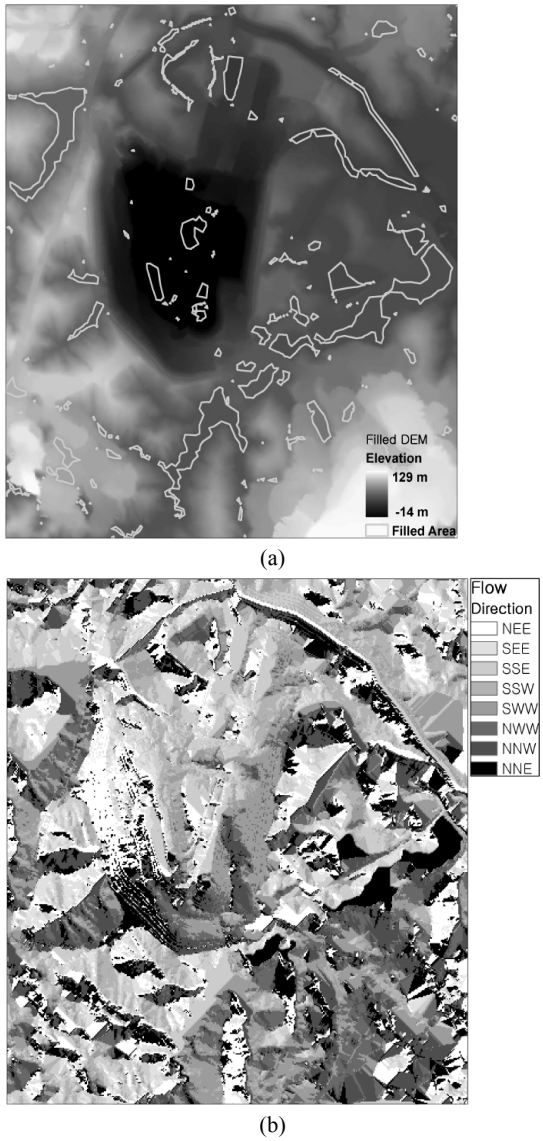


Fig. 6. Drainage analysis at the Roto Middle. (a) Filled DEM. (b) Flow direction.

흐름 패턴을 보고 판단할 때, 노천광의 운반로 및 램프의 설계에 있어 작업 안정성 및 효율성뿐만 아니라 배수시스템에 대한 고려가 매우 중요하다는 것을 알 수 있다.

채굴적 남동쪽과 남서쪽에 위치한 폐석 적재지에서 배출되는 침출수는 대부분 침전 폰드로 유입되고 있는 것으로 분석되었다. 그러나 북동쪽과 북서쪽 폐석 적재지에서 배출되는 침출수의 경우 침전 폰드 등의 정화 시설을 거치지 않고, 하천으로 직접 유입되고 있는 것으로 나타나고 있어, 이에 대한 적절한 배수처리 대책이 필요할 것으로 판단된다. 채굴적 동측 사면을 넘어 위치하는 언덕 지형에서는 강우시 빗물이 북동쪽 방향으로 흘러 내려온 후, 운반로를 따라 다시 서쪽으로 흐름방향을 전환하는 것을 볼 수 있으며, 방향을 전환한 빗물은 채굴적 내부로 흘러들어 서측 내부 폰드에 누적되는 것으로 나타났다. 이 지역의 경우 오염수 배출 지역이 아니므로 흐르는 빗물에 대한 별도의 정화처리 없이, 배수 방향의 제어를 통해 빗물이 하천으로 흘러가도록 조정한다면, 채굴적 내부에서의 배수 설비의 운영비용을 다소 절감할 수 있을 것으로 판단된다.

집수구역의 범위(Fig. 8)와 면적(Table 1)을 산정한 결과, 서측 내부 폰드의 집수구역(Catchment ID = 4)이 가장 넓게 분포하고 있는 것을 확인할 수 있었다. 분석 결과로부터 펌핑 설비가 배치되어 있는 동측 내부 폰드에 비해 서측 내부 폰드로의 유입되는 빗물의 양이 더 많다는 것을 알 수 있으며, 이는 현재 동측 내부 폰드에서 운영되고 있는 펌핑 설비의 배치가 적절하지 못하다는 것을 의미한다. 집중 강우시 서측 내부 폰드의 범람으로 인한 오염수의 확산 및 채광작업 능률의 저하를 사전에 예방하기 위해서는 서측 내부 폰드로의 펌핑 설비 배치를 검토할 필요가 있으며, 설비의 추가 배치가 어려운 경우에는 동측 폰드의 설비를 서측 폰드로 이동시키는 방안도 고려할 수 있을 것이다.

Table 1은 식 (1)에 의해 근사적으로 추정된 강우량에 따른 폰드 수위의 상승 정도를 보여준다. 앞서 집수구역

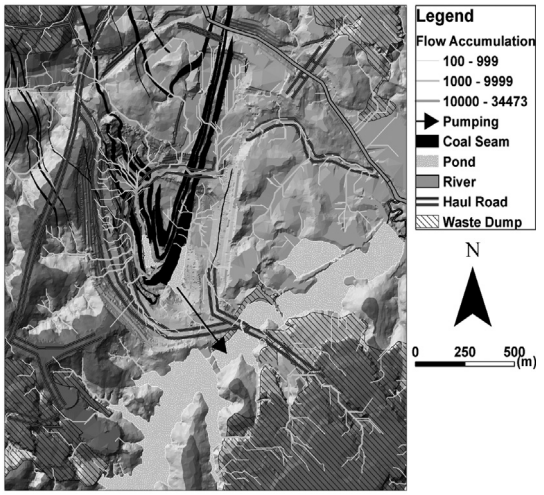


Fig. 7. Analysis of flow accumulation at the Roto Middle.

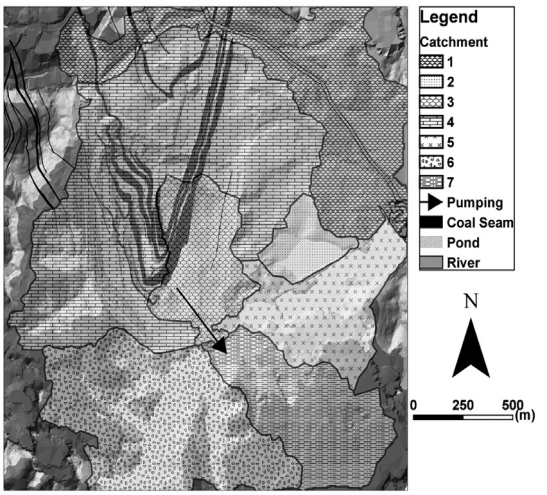


Fig. 8. Analysis of catchment area at the Roto Middle.

Table 1. Rise of water-level at the in-pit ponds and setting ponds at the time of rainfall.

Catchment ID	Catchment Area (m^2)	Pond Type	Pond Area(m^2)	Rise of Water-Level(m)		
				Rainfall = 15mm	Rainfall = 30mm	Rainfall = 45mm
2	106088	Setting Pond	32090	0.0	0.1	0.1
3	279786	In-pit Pond	9573	0.4	0.9	1.3
4	1293550	In-pit Pond	5043	3.8	7.7	11.5
5	337536	Setting Pond	115285	0.0	0.1	0.1
6	660060	Setting Pond	156022	0.1	0.1	0.2
7	379554	Setting Pond	24663	0.2	0.5	0.7

면적이 가장 넓게 분석되었던 서측 내부 폰드에서 강우에 따른 수위상승 역시 가장 크게 나타나고 있다. 집수구역의 면적에 비해 폰드 면적이 매우 좁게 설계되어 있는 것에 그 원인을 추정할 수 있으며, 서측 내부 폰드 면적의 확장이 필요할 것으로 판단된다. 침전 폰드의 경우 대부분 강우에 따른 수위 상승 정도가 높지 않게 나타났다. 다만, 7번 집수구역내에 포함되어 있는 침전 폰드는 펌핑 설비에 의해 동측 내부 폰드로부터 이송되는 물의 양까지 함께 고려할 경우(즉, 7번 집수구역과 3번 집수구역의 면적을 합산하여 수위 상승을 추정할 경우), 15mm 강우에 대해 0.4m 정도의 수위 상승이 발생할 것으로 예측되었다.

최적화 방안

GIS 기반의 배수 모델링을 수행한 결과, 현재 대상지역 배수시스템의 특징과 문제점을 분석할 수 있었고, 배수설계 최적화를 위한 4가지 방안을 도출할 수 있었다. Fig. 9는 다음의 4가지 최적화 방안을 DEM에 반영하여 빗물의 누적 흐름양을 다시 분석한 결과를 보여준다.

1. 채굴적 서측 내부 폰드의 경우 폰드의 크기 확장과 함께 펌핑 설비의 추가 배치가 필요하다(Fig. 9a). 서측 내부 폰드의 면적을 현재의 5,000m^2 수준에서 15,000 m^2로 3배 확장하는 경우, 15mm 강우시 수위 상승은 1.3 m 정도로 보다 안정된 범위내에서 나타날 것으로 예상된다. 추가 배치되는 펌핑 설비를 24시간 가동하고, 1일 최대 강우량을 60mm 라고 가정한다면, 식 (2)에 의해 추가 배치할 펌핑 설비의 적정 용량은 시간당 3,240m^3 정도이면 충분할 것으로 판단된다. 또한, 채굴적 상부 침전 폰드로의 이송 방향은 침전 폰드의 면적과 수위상승을 고려할 때, 6번 집수구역(Fig. 8)의 침전 폰드가 가장 적합할 것으로 판단된다.

2. 채굴적 동측 사면으로 떨어지는 빗물의 흐름을 배수로 개설 등을 통해 제어한 후, 빗물의 누적 흐름양이 100 미만으로 나타나는 부분에 내부 적재 (in-pit dump) 방식으로 폐석을 처리한다(Fig. 9b). 내부 적재 방식으로 폐석을 처리하는 경우 폐석으로부터 배출되는 침출수를 채굴적 내부 폰드로 유도하여 단계별 정화 처리를 할 수 있기 때문에, 외부 적재(ex-pit dump) 방식과 비교하여 하천으로 직접 유입되는 오염수의 양을 줄일 수 있을 것이다. 또한 폐석 운반비용의 절감 효과도 얻을 수 있는 장점이 있다.

3. 채굴적 상부의 동쪽 운반로의 경사 구배를 조정하여 언덕 지형에서 흘러 내려오는 빗물이 서쪽으로의 방향 전환 없이 하천으로 바로 유입될 수 있도록 한다(Fig. 9c). 빗물 흐름 방향의 제어를 통해 채굴적으로 유입되는 빗물의 양을 줄일 수 있으며, 그에 따라 배수처리 비용도 절감할 수 있다.

4. 하천으로 직접 유입될 수 있는 폐석 침출수를 정화하기 위해 Fig. 9의 d, e, f 지점에 대해 소규모의 침전 폰드를 조성한다. 채굴적 북동쪽과 북서쪽 폐석 적재지에서 흘러나오는 침출수는 하천으로 직접 유입될 경우 광해의 원인이 될 수 있으며, 채굴적 내부로 흐르게 하여 폰드에서 정화하는 경우 펌핑 비용을 포함한 전체적인 배수처리 비용을 증가시킬 수 있다. 따라서 빗물이 흘러내려가는 최적 지점에 소규모 침전 폰드를 조성하여 정화 처리하는 것이 보다 효율적인 방안이라고 판단된다.

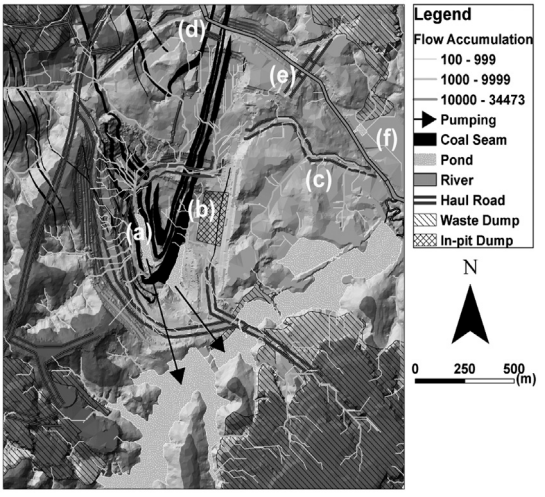


Fig. 9. New design of the drainage management for mine reclamation at the Roto Middle.

결 론

본 연구에서는 대규모 석탄 노천광에서 가행중 활용할 수 있는 광해방지 기술의 하나로서, GIS 기반의 노천광 배수설계 최적화 기법을 제안하였다. 인도네시아 파시르 노천광의 로또 중부지역을 대상으로 적용 시험을 수행한 결과 강우시 나타나는 빗물의 흐름방향, 누적 흐름양, 집수 구역의 범위 및 면적 등을 효과적으로 모델링 할 수 있었으며, 합리적인 배수설계를 위한 공간분석도 함께 수행할 수 있었다. 로또 중부지역의 경우 채굴적 내부 폰드의 크기와 펌핑을 위한 배수 설비의 배치 부분에서 문제점이 발견되었으며, 폐석 적재지로부터 배출된 침출수가 인근 하천으로 직접 유입될 수 있는 강우의 흐름 패턴이 일부 발견되었다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 본 연구에서는 4가지 배수처리 최적화 방안을 제시하였

으며, 제시된 방안에 따라 DEM을 보정한 후 배수 모델링을 다시 수행한 결과 보다 합리적인 배수처리가 가능해짐을 확인할 수 있었다. 본 연구에서 제안한 GIS 기반의 노천광 배수설계 최적화 기법은 광해방지와 더불어 채광 생산성 및 안정성 향상을 위한 노천광 배수설계에도 유용하게 활용될 수 있을 것으로 기대한다.

사 사

본 연구는 한국지질자원연구원이 수행하고 있는 산업자원부 출연연구사업(석탄 노천광의 사면안전유지 및 발파기술 연구)과 2006년도 2단계 두뇌한국21 사업의 지원으로 수행되었으며, 또한 논문 작성은 서울대학교 공학연구소의 지원으로 이루어졌다.

참고문헌

광해방지사업단, 2006, "우리나라 광산 현황", <http://www.kmrc.or.kr/pr/k_sub2.asp>, Cited 11 Sep 2006.

정소걸, 선우춘, 한공창, 신희순, 박연준, 2000, "인도네시아 Pasir 탄전에서의 노천채탄장 사면의 안정성 해석", 터널과 지하공간, Vol. 10, pp. 430-440.

Burrough, P.A., Karssenberg, D. and van Deursen, W., 2005, "Environmental modeling with PCRaster", In: Maguire, D.J., Batty, M. and Goodchild, M.F. (eds), *GIS, spatial analysis, and modeling*, ESRI Press, Redland, USA, pp. 333-356.

Ctech, 2006, "Mining Visualization System", <http://www.ctech.com/products/mvs.htm>, Cited 11 July 2006.

Doan, J.H., 2000, "Hydrologic model of the Buffalo Bayou using GIS", In: Maidment, D.R., Djokic, D. (eds), *Hydrologic and hydraulic modeling support with geographic information systems*, ESRI Press, Redland, USA, pp. 113-144.

ESRI, 2006, "An overview of the hydrology tools in ArcGIS", <http://webhelp.esri.com/arcgisdesktop/9.1/index.cfm?id=3191&pid=3190&topicname=An%20overview%20of%20the%20Hydrology%20tools>, Cited 13 July 2006.

Garbrecht, J. and Martz, L.W., 2000, "Digital elevation model issues in water resource modeling", In: Maidment, D.R. and Djokic, D. (eds), *Hydrologic and hydraulic modeling support with geographic information systems*, ESRI Press, Redland, USA, pp. 1-27.

Hustrulid, W. and Kuchta, M., 1995, *Open pit mine planning and design: fundamentals*, Balkema, Rotterdam, Netherlands, pp. 252-367.

Jenson, S.K. and Domingue, J.O., 1988, "Extracting topographic structure from digital elevation data for geographic information system analysis", P*hotogrammetric Engineering & Remote Sensing*, Vol. 54, pp. 1593-1600.

Maidment, D.R., Robayo, O. and Merwade, V., 2005, "Hydrologic modeling", In: Maguire, D.J., Batty, M., Goodchild, M.F. (eds), *GIS, spatial analysis, and modeling*, ESRI Press, Redland, USA, pp. 319-332.

Maptek, 2006, "VULCAN MineModeller", <http://www.vulcan3d.com/ openpit.html>, Cited 11 July 2006.

Mark, D.M., 1984, "Automated detection of drainage networks from digital elevation models", *Cartographica*, Vol 21, pp. 168-177.

Martz, L.W. and deJong, E., 1988, "CATCH: A FORTRAN program for measuring catchment area from digital elevation models", *Computers & Geosciences*, Vol. 14, pp. 627-640.

Martz, L.W. and Garbrecht, J., 1999, "An outlet breaching algorithm for the treatment of closed depressions in a raster DEM", *Computers & Geosciences*, Vol. 25, pp. 835-844.

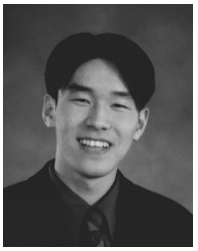
Meek, F.A., 1990, "Water and air management", In: Kennedy, B.A. (eds), *Surface mining*, Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Littleton, USA, pp. 819- 840.

Mincom, 2006, "Minescape", <http://www.mincom.com/company/images/min0057_mincom_minescape.pdf>, Cited 11 July 2006.

Samtan, 2006, "Annual Report", <http://www.samtan.co.kr/SAMTANAN.PDF>, Cited 12 July 2006.

Tribe, A., 1992, "Automated recognition of valley lines and drainage networks from grid digital elevation models: a review and a new method", *Journal of Hydrology*, Vol. 139, pp. 263-293.

Wang, L. and Liu, H., 2006, "An efficient method for identifying and filling surface depressions in digital elevation models for hydrologic analysis and modeling", *International Journal of Geographical Information Science,* Vol. 20, pp. 193-213.



최 요 순

2004년 서울대학교 공과대학 지구환경시스템공학부 공학사
2006년 서울대학교 대학원 지구환경시스템공학부 공학석사

현재 서울대학교 대학원 지구환경시스템공학부 박사과정
(E-mail; yspower7@snu.ac.kr)

박 형 동

현재 서울대학교 공과대학 지구환경시스템공학부 부교수
(本 學會誌 第42卷 第5号 參照)

선 우 춘

현재 한국지질자원연구원 지반안전연구부 책임연구원
(本 學會誌 第42卷 第6号 參照)