

노천광산의 관측점 선정 및 운반도로 가시거리 안전성 평가를 위한 GIS 기반 가시구역 분석 기법의 적용

최요순¹⁾ · 서장원¹⁾ · 박형동^{1)*} · 선우춘²⁾

Application of GIS-based Viewshed Analysis for Selecting Optimal Viewpoints and for Evaluating the Sight Distance on a Haul Road in Open-pit mines Yosoon Choi, Jang Won Suh, Hyeong-Dong Park* and Choon Sunwoo

Abstract : This study presents an application of GIS-based viewshed analysis to an open-pit mine to improve the safety of mining operations by considering the visibility effects. The proposed methodology considers the intervisibility between a viewpoint and target points on a Digital Elevation Model (DEM) and determines the set of visible target points as a viewshed area of the viewpoint. The application at the Pasir open-pit coal mine, Indonesia showed that the proposed methodology could be used to select the optimal viewpoints around the pit by evaluating the ratio of pit to viewshed area. The other application showed that the hazardous sections with limited sight distance could be effectively identified by analyzing the viewshed at the points through the center-line of a haulage route.

Key words : GIS, Viewshed analysis, Open-pit mine, Mine design, Sight distance

요약 : 본 연구에서는 노천광산 개발시 시각적 영향 평가를 효과적으로 수행하기 위하여 GIS 기반의 노천광산 가시구역 분석 기법의 활용 방안을 제시하였다. GIS 기반 가시구역 분석 기법은 수치표고모델을 이용하여 관측점과 임의의 대상지점의 시통여부를 신속하게 판단할 수 있으며, 가시구역의 공간적 범위와 면적을 정량적으로 산정할 수 있는 장점이 있다. 인도네시아 파시르 노천광산에 대한 적용 결과, GIS 기반의 가시구역 분석 기법은 채굴적내 최적 관측점 선정 과정에서 효과적으로 활용될 수 있으며, 채굴적의 형태가 복잡해질수록 그 효용성이 높아지는 것을 확인할 수 있었다. 또한, 지형 기복으로 인해 가시거리가 제한될 수 있는 위험구간들을 선별함으로써 운반도로 가시거리 안전성 평가를 수행할 수 있었으며, 가시거리의 확보를 위해 현장에서 적용 가능한 지형정보 방안을 제안할 수 있었다.

주요어 : 지리정보시스템, 가시구역 분석, 노천광산, 광산설계, 가시거리

서론

노천광산 개발시 시각적 영향 평가는 작업장의 안전성 확보와 경관환경의 보호 측면에서 그 중요성이 강조되어 왔다 (Ellsworth, 2000). 시각적 영향 평가는 크게 공간적(어디서 보이는가), 양적(얼마나 보이는가), 질적(주변과 조화를 이루는가) 평가로 구성되는데, 채굴적(pit) 주위에 관측점(viewpoint)의 위치를 결정하는 문제와 운반도로의 가시거리

안전성을 평가하는 문제는 공간적, 양적 측면에서 시각적 영향을 고려해야 하는 대표적인 사례들이라고 할 수 있다.

노천광산에서 관측점을 최적의 위치에 설치하는 것은 작업장의 안전성 확보 측면에서 매우 중요하다. 기본적으로 관측점은 채광작업의 관리를 위한 지휘본부로서의 기능을 담당하기 때문에, 채굴적 전체를 한눈에 조감할 수 있는 충분한 가시구역(viewshed)의 확보가 필수적이다. 관측점의 위치 선정이 잘못되어 채굴적 내부에 비가시구역이 다수 존재할 경우, 동시다발적으로 진행되는 시추, 발파, 적재, 운반 등의 작업공정을 효과적으로 관리할 수 없으며, 특히 발파 위험지역으로 이동하는 채광장비를 신속하게 통제하기 어려워 자칫 큰 사고로 이어질 수 있다. 최근에는 노천광산을 대상으로 관광 상품들이 개발되면서(e.g., Asarco Mineral Discovery Center,

2008년 2월 26일 접수, 2008년 6월 26일 채택

1) 서울대학교 공과대학 에너지시스템공학부

2) 한국지질자원연구원 지반안전연구부

*Corresponding Author(박형동)

E-mail: hpark@snu.ac.kr

Address: Department of Energy Systems Engineering, Seoul National University

2008), 광산개발 현황에 대한 프레젠테이션 장소로서 관측점 위치 선정의 중요성이 보다 부각되고 있다.

공간적, 양적 측면의 시각적 영향 평가는 노천광산의 운반도로 설계시에도 매우 중요하다. 운반도로에서 트럭의 충돌 사고를 예방하기 위해서는 주행중 운전자가 확보할 수 있는 가시거리가 트럭의 정지거리(required stopping distance)보다 더 길게 유지되어야 하지만, 지형적 특성에 따라 그렇지 못한 구간도 다수 존재할 수 있기 때문이다(Kaufman and Ault, 1977). 노천광산에서 발생하는 트럭 충돌 사고중 약 20%는 운전자의 가시거리 확보 문제에 그 원인이 있기 때문에(Miller, 1976), 가시거리가 제한될 수 있는 위험구간들을 사전에 분석하여 운반도로 설계시 반영하고, 적절한 대책을 수립하는 것은 노천광산의 작업 안전성을 향상시키는데 크게 기여할 수 있다(Johnson, 1980).

최근까지도 대부분의 노천광산 현장에서는 시각적 영향 평가를 위한 방법으로서 정량적 분석 기법 보다는 광산 기술자의 현지관찰에 의한 정성적 분석 기법을 활용하고 있다. 현지관찰에 의한 방법은 질적 측면의 시각적 영향을 평가하기는 용이하지만, 가시구역의 전체 면적을 산정하는 등 공간적, 양적 측면의 시각적 영향 평가를 정량적으로 수행하기 어려운 한계가 있다. 또한, 광산의 규모가 커지고 채굴적이 심부화 될수록 정성적 판단 결과의 불확실성이 증가할 수 있으며, 평가할 대상이 실제 존재하는 경우에만 적용이 가능하므로 노천광산의 계획 및 설계 단계에서 활용할 수 없는 단점이 있다.

본 연구의 목적은 노천광산의 설계시 공간적, 양적 측면의 시각적 영향을 정량적이고, 신속하게 평가할 수 있는 새로운 분석 기법을 제시하는 것이다. 이를 위해, 지리정보시스템(Geographic Information Systems, GIS)이 제공하는 대표적인 지형분석 기법중의 하나인 가시구역 분석 기법을 노천채광 분야에 적용하고자 한다. 본 논문에서는 노천광산에 대한 GIS 기반 가시구역 분석 기법의 적용 사례로서, 채굴적 내부의 가시구역 면적을 극대화할 수 있는 관측점의 위치선정 결과와 운반도로의 가시거리에 근거한 트럭의 잠재적 충돌 위험구간 분석 결과를 제시한다.

GIS 기반 가시구역 분석 기법의 원리

가시구역 분석 기법은 지형의 기복을 고려하여 임의의 관측점에서 볼 수 있는 영역을 정량화 할 수 있는 기법이며, 국방, 통신, 조경, 시설물 관리, 환경계획 등의 분야에서 광범위하게 활용되고 있다(한갑수, 2005; 이종성, 2006; De Floriani, et al., 1994; Franklin et al., 1994; Camp, et al., 1997; Lake, et al., 1998; Lee and Stucky, 1998;

Kidner, et al., 1999; Wang et al., 2000; O'Sullivan and Turner, 2001). 지표면의 고도 값을 중요한 입력변수로 활용하기 때문에, GIS에서 생성된 수치표고모델(Digital Elevation Model, DEM)로부터 값을 입력받아 신속하고, 정확하게 가시구역을 분석할 수 있는 체계와 알고리즘들이 최근까지 다수 개발되어 왔다(Fisher, 1991, 1993, 1996; De Floriani, et al., 1994; Wang, et al., 1996).

DEM을 이용한 GIS 기반 가시구역 분석 기법의 원리는 Fig. 1과 같다. 관측점에 위치한 관측자(observer)의 눈높이로부터 임의의 표적점(target point)을 향해 목시선(Line-Of-Sight, LOS)을 그린 후, 관측점과 표적점 사이에 위치한 점들의 고도를 해당 위치에 대한 목시선의 고도와 비교한다. 관측점과 표적점 사이에 위치한 점들이 적어도 하나이상 목시선보다 높은 고도 값을 갖는 경우, 관측점과 표적점은 시통(intervisibility)관계가 성립하지 않는다. 반면, 관측점과 표적점 사이의 모든 점들의 고도가 목시선보다 낮은 경우에는 시통관계가 성립하며, 이때의 표적점은 관측점의 가시구역에 포함된다. Fig. 1의 원리를 DEM 상의 2차원 공간으로 확장하는 경우, 목시선은 관측점으로부터 관측점을 제외한 DEM 상의 모든 격자점들에 대해 그려질 수 있다. 각각의 목시선들에 대하여 관측점과 표적점의 시통관계 성립여부를 판단하는 연산이 반복적으로 수행되며, 관측점과 시통관계가 성립하는 전체 표적점들의 집합을 관측점의 가시구역으로 분류한다.

Fig. 2는 16개의 격자점으로 구성된 DEM에 대하여 가시구역 분석을 수행한 결과를 보여준다. Fig. 2(a)에서 각 격자의 중심에 표시된 수치는 고도 값을 의미하며, 음영색 격자점은 가시구역 분석을 위해 설정된 관측점이다. 관측점에서 관찰자의 눈높이에 대한 offset(see Fig. 1)은 0으로 설정하였다. 표적점 (4,2)의 경우 관측점에서 그려진 목시선 α 보다 격자점 (3,2)의 고도가 더 높기 때문에 관측점

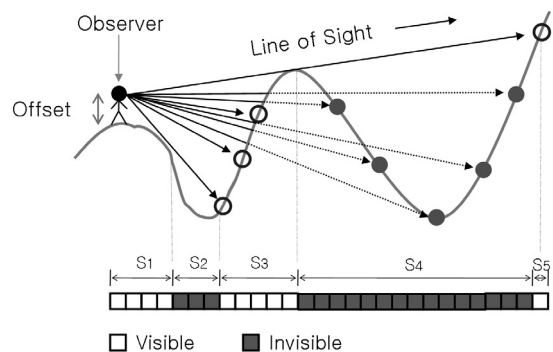


Fig. 1. Principle of the viewshed analysis. The offset represents the height of observer.

과 표적점간의 시통관계가 성립되지 않는다. 따라서 표적점 (4,2)는 관측점의 비가시구역으로 분류된다(Fig. 2(b)). 표적점 (1,4)로 그려진 목시선 β 와 같이 목시선이 관측점과 표적점 사이 격자점들의 중심을 지나지 않는 경우에는 격자간의 경계에 가상으로 설정한 점 P의 고도 값을 주변 격자들로부터 보간한 후, 목시선과 점 P의 고도를 비교하여 표적점 (1,4)에 대한 가시구역 분류를 수행한다.

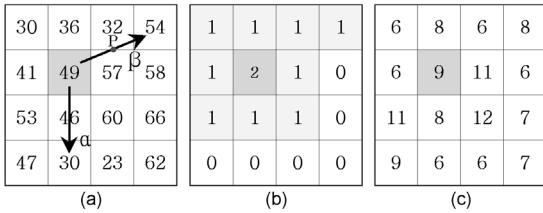


Fig. 2. Example of the viewshed analysis using DEM. (a) DEM, (b) A viewpoint (value=2) and its visible (value=1) and invisible (value=0) areas, (c) Visibility Index

관측점 선정 최적화 문제에서는 가시구역 분석시 특정 관측점이 초기 값으로 주어지지 않을 수도 있다. 이러한 경우, DEM 상의 모든 격자점들을 차례로 관측점으로 설정한 후 가시구역 분석을 수행하며, 각 관측점에서의 가시구역 면적을 의미하는 가시성 지수(visibility index)를 산정한다. Fig. 2(c)에서 각 격자의 중심에 표시된 수치는 해당 격자를 관측점으로 설정할 경우 산정되는 가시구역의 면적(격자수)으로서 가시성 지수를 의미한다. 예를 들어, 격자점 (2,2)의 경우 9개의 격자점들을 가시구역에 포함하게 되므로(Fig. 2(b)), Fig. 2(c)에서 가시성 지수는 9로 표현되었다. 가시성 지수 산정 결과는 통신 중계기의 입지선정 등 시각적 영향 평가와 관련한 공간 최적화 문제에 효과적으로 활용될 수 있다(Kim, et al., 2004).

연구대상지역

본 연구에서는 인도네시아 파시르 석탄 노천광산의 3개의 채굴적을 연구대상지역으로 선정하였다. 파시르 석탄

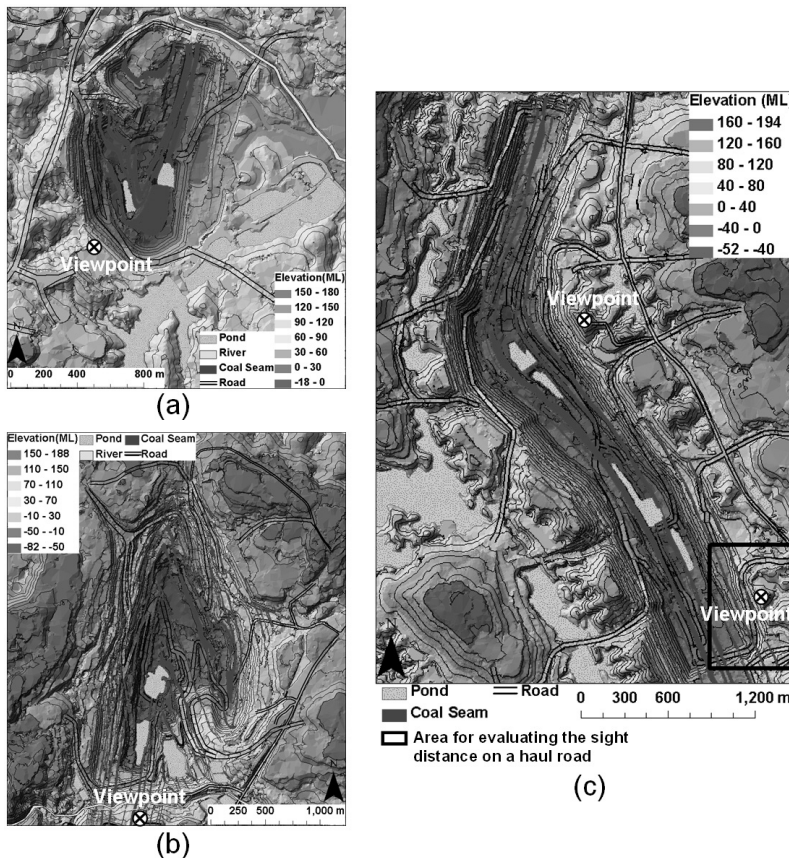


Fig. 3. Thematic maps of the study area. (a) Roto Middle, (b) Roto North, (c) Roto South

노천광산은 인도네시아 동칼리만탄(East Kalimantan)의 위도 1°51'S, 경도 115°53'E 지점에 위치하고 있으며, 광산 전체의 면적은 504 km²이다. 광산은 크게 Roto, Samu, Susubang, Pinang-Jatus의 4개의 광구로 구성되며, 현재 Roto와 Samu 광구에서 발전용 유연탄을 생산하고 있다. 파시르 노천광산의 일반현황 및 지질특성에 대한 보다 자세한 설명은 최요순 등(2006), Choi, et al.(2008)을 참고할 수 있다.

Fig. 3은 연구대상지역으로 선정된 Roto 중부지역(Roto Middle), Roto 북부지역(Roto North), Roto 남부지역(Roto South)의 채굴적 형태와 탄층, 수계, 운반도로 등의 분포현황을 보여준다. 3개의 채굴적들은 모두 스트립(strip) 방식으로 개발되고 있으나, 탄층의 분포에 따라 형태와 크기는 모두 상이하다. 먼저, Roto 중부지역은 원형에 가까운 채굴적 형태로 면적은 0.7 km²이며, Roto 북부지역은 4.8 km²의 면적에 뱃머리 형태의 채굴적이 개발되고 있다. Roto 남부지역의 채굴적은 남북방향으로 길게 뻗은 'S'자 형태를 보이며, 면적은 3.4 km²이다. 현재 Roto 중부지역, Roto 북부지역에는 각각 1곳씩 채굴적 관측점이 설치되어 있으며, Roto 남부지역에서는 2곳에 채굴적 관측점들이 설치되어 있다(Fig. 3). Fig. 4는 각 지역별로 설치되어 있는 관측점에서 바라본 채굴적의 전경을 보여준다. 운반도

로 가시거리 안전성 평가는 Fig. 3(c)와 같이 Roto 남부지역의 동측 운반도로 구간을 대상으로 수행하였다.

채굴적 안전관리를 위한 관측점 선정 최적화

적용 방법

본 연구에서는 연구대상지역의 최적 관측점 위치를 결정하고, 현재 운영되고 있는 관측점 위치의 적합성을 검토하기 위하여 다음과 같은 절차로 GIS 기반 노천광산 가시구역 분석을 수행하였다.

- (1) DEM 생성: 가시구역 분석 기법을 적용하기 위해 필수적으로 요구되는 가장 중요한 자료는 노천광산의 지형 특징을 정확히 반영할 수 있는 DEM이다. 채광활동으로 인해 노천광산에는 다양한 규모의 지형 굴곡들이 존재할 수 있는데, DEM이 이러한 지표의 고도 변화를 정확히 반영할 수 있어야 임의의 관측지점에서의 가시구역을 사실적으로 분류해낼 수 있고, 보다 신뢰성 있는 가시성 지수를 산정할 수 있기 때문이다. 본 연구에서는 지상 정밀지형측량 자료로부터 연구대상지역에 대한 20 m 해상도(resolution)의 DEM을 생성하였다.
- (2) 가시성 지수 산정: 대상지역 DEM의 모든 격자점

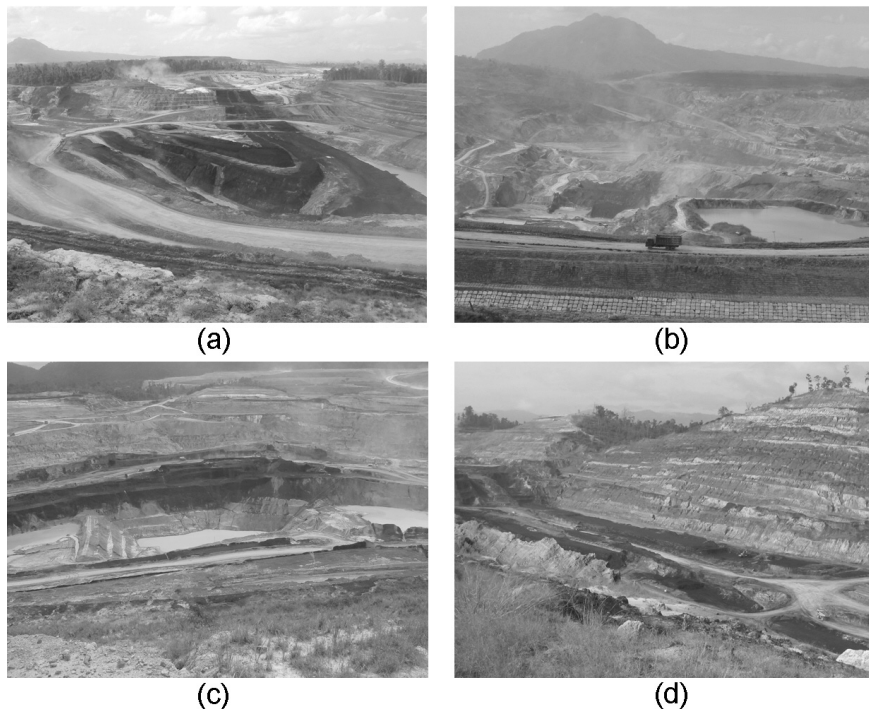


Fig. 4. Views of the study area which are taken (a) from the viewpoint in the Roto Middle, (b) from the viewpoint in the Roto North, (c) from the upper viewpoint in the Roto South and (d) from the lower viewpoints in the Roto South.

들에 대한 가시성 지수를 산정하기 위하여, IDRISI Kilimanjaro 소프트웨어의 가지구역 분석 기능(Eastman, 2003)을 사용하였다. 소프트웨어가 제공하는 매크로(macro) 언어를 사용하여 DEM 상의 모든 격자들에 대한 가지구역 분석이 자동화되도록 하였으며, 가지구역 분석시 관측자의 키에 의한 offset은 1.75 m, 관측 가능 거리는 제한 없이 무한대로 설정하였다. 또한, 각각의 관측점에서 분석된 가지구역들이 래스터(raster) 레이어 상에 Boolean 형식(Visible: 1, Invisible: 0)으로 표현되도록 설정함으로써, 가시성 지수 산정이 보다 용이하게 진행될 수 있도록 하였다.

- (3) 관측점 설치 후보지 선정: 대상지역의 가시성 지수 산정 결과에 근거하여, 지수가 높게 나타난 지점들을 대상으로 관측점 설치 후보지를 선정하였다. 채굴적의 형태가 비교적 단순한 Roto 중부지역, Roto 북부지역의 경우 각각 4개의 후보지를 선정하였고, S자형 채굴적을 갖는 Roto 남부지역에 대해서는 7개의 후보지를 선정하였다. 수계 지역은 관측점 설

치가 불가능하므로 가시성 지수가 높게 산정된 경우라 하더라도 설치 후보지 선정시 제외하였다.

- (4) 후보지에 대한 가지구역 분석 및 적합성 평가: 절차(2)에서 산정된 가시성 지수는 채굴적 내부와 외부에 대한 가지구역의 면적을 함께 고려한 값이다. 따라서 채굴적 안전관리 측면에서 관측점 위치의 적합성을 평가하기 위해서는 채굴적 내부에 대한 가지구역의 면적만을 따로 고려할 필요가 있다. 이를 위해, 본 연구에서는 가지구역 분석 레이어와 채굴적 영역 레이어의 논리적 중첩연산(overlay)을 통해 채굴적 내부에 해당하는 가지구역만을 따로 추출하였고, 채굴적 면적과 채굴적 내부의 가지구역 면적의 비(ratio)를 산정하여 후보지들에 대한 관측점 설치 효율을 정량적으로 비교할 수 있도록 하였다.

결과 및 고찰

Fig. 5는 대상지역에 대한 가시성 지수 산정 결과를 보여준다. 채굴적 하단으로 내려갈수록 가시성 지수가 감

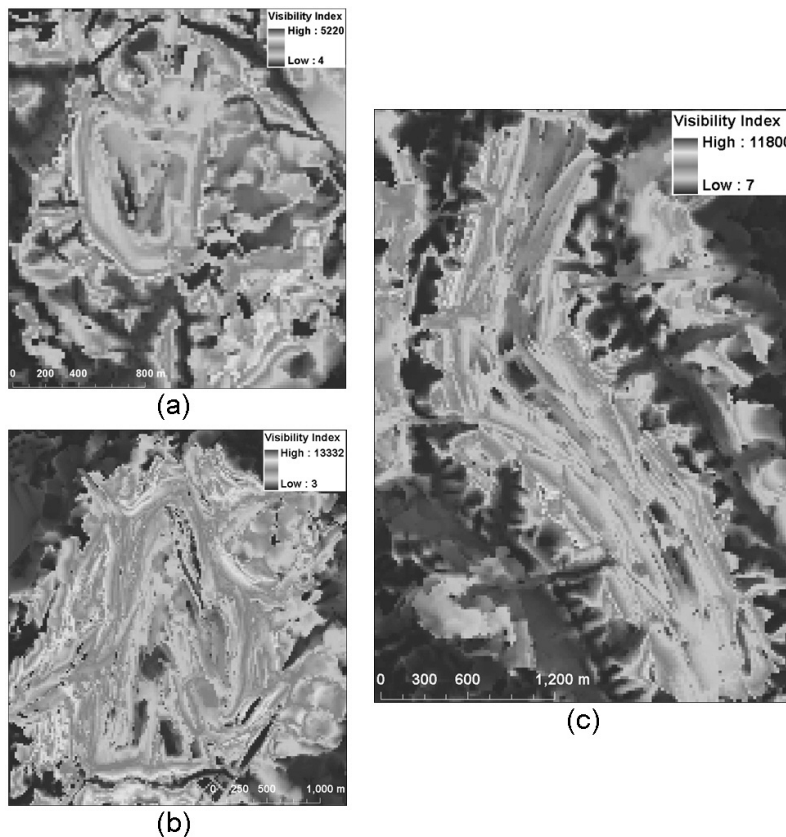


Fig. 5. Visibility index calculated at the (a) Roto Middle, (b) Roto North and (c) Roto South.

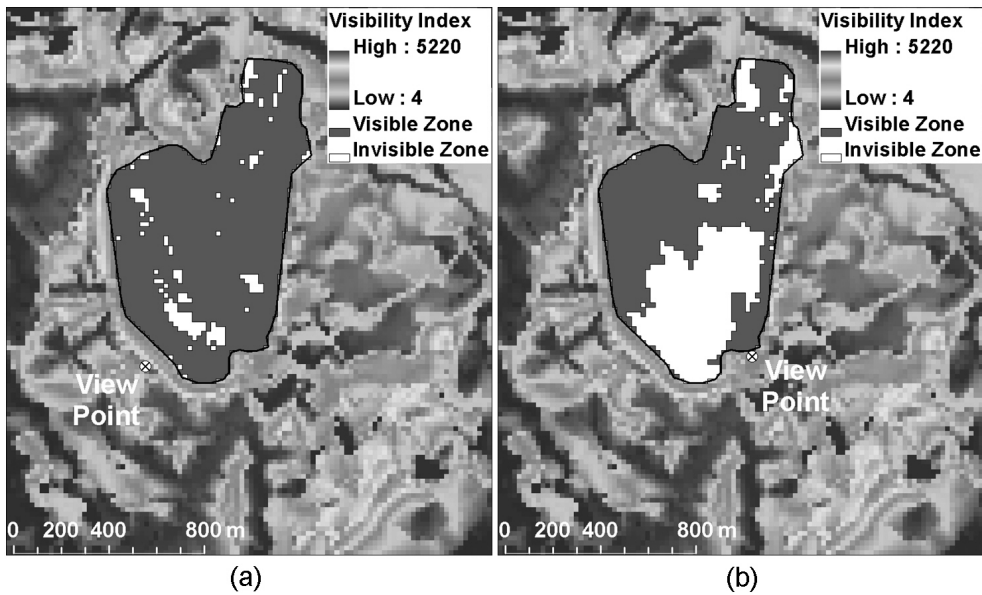
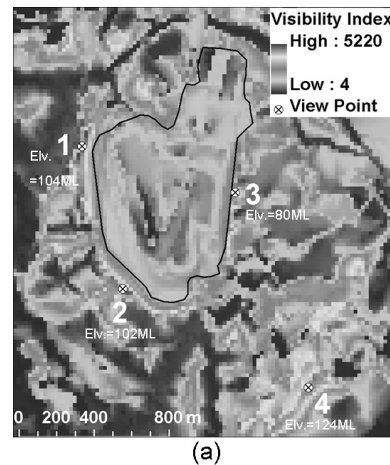


Fig. 6. Comparison of the viewsheds in the pit determined from two candidate sites with different visibility indices.

소하는 패턴을 볼 수 있으며, 상단의 경우 경사 방향이 채굴적 중심을 향하는 사면에서 가시성 지수가 상대적으로 높게 산정됨을 알 수 있다. 관측점 설치 후보지 결정을 위한 기초 자료로서 가시성 지수 산정 결과를 활용할 수 있는지 판단하기 위하여 Roto 중부지역에서 가시성 지수가 4941로 산정된 지점과(Fig. 6(a)) 2561로 산정된 지점(Fig. 6(b))을 관측점 설치 후보지로 가정하고, 채굴적 내부에 대한 가시구역의 분석을 수행하였다. 그 결과, 가시성 지수가 높은 후보지가 채굴적 내부에 대해서도 보다 넓은 가시구역을 확보하는 것을 확인할 수 있었다(Fig. 6).

Fig. 7(a)는 Roto 중부지역에서 가시성 지수가 상대적으로 높은 지점에 선정한 4곳의 관측점 후보지들을 보여 준다. 각 후보지에 대하여 가시구역 분석을 수행한 후, 채굴적 내부의 가시구역만을 추출하여 채굴적 면적에 대한 가시구역의 면적 비를 산정한 결과, 2번 후보지에서 채굴적 면적의 92%에 해당하는 가시구역 면적을 확보할 수 있는 것으로 나타났다. 반면, 채굴적으로부터 상대적으로 멀리 위치한 4번 후보지는 가시성 지수가 높게 산정 되었음에도 불구하고, 가시구역이 채굴적 면적의 22% 정도로 좁게 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 이를 통해, 노천광산 관측점의 위치 선정시 가시성 지수뿐만 아니라 채굴적과의 거리도 함께 고려되어야 함을 알 수 있다. 만약, 채굴적 면적의 90% 이상을 가시구역으로 확보하는 것을 관측점 설치의 효용성 지표로 설정할 경우, Roto



ID	Cover area (m ²)	Cover ratio of the pit (%)									
		10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
1	599,600	[Bar chart showing 84% coverage]									84%
2	650,400	[Bar chart showing 92% coverage]									92%
3	558,800	[Bar chart showing 79% coverage]									79%
4	155,200	[Bar chart showing 22% coverage]									22%

Fig. 7. Selection of the optimal viewpoint at the Roto Middle. (a) Four candidate sites which are selected based on the visibility index, (b) Ratio of the pit to viewsshed area determined from each candidate site

중부지역에서는 2번 후보지에 관측점을 설치하는 것이 가장 효과적일 것으로 판단된다.

Roto 북부지역에 대한 관측점 후보지 선정 결과와 각 후보지에서의 가시구역 분석 결과는 Fig. 8과 같다. 단일 관측점을 설치할 경우에는 채굴적 면적의 70%를 가시구역으로 확보할 수 있는 1번 후보지(Fig. 8(a))가 최적의 관측점 위치가 될 수 있다. 그러나 채굴적 내부의 90% 이상을 가시구역으로 확보하고자할 경우에는, 단일 관측점만으로는 그 목표를 달성하는 것이 불가능하며 2개 이상의 다중 관측점 설치가 필요할 것으로 판단된다. 전체 4개의 관측점 후보지를 2개씩 조합하여, 2개의 관

측점이 동시에 설치되었을 경우의 가시구역을 분석한 결과 1번, 3번 후보지에 관측점을 설치할 경우 90% 이상의 가시영역 확보가 가능할 것으로 판단된다.

Roto 남부지역에 선정한 관측점 후보지들(Fig. 9(a))의 경우, 단일 관측점 설치시 어떤 지점을 선택하더라도 채굴적 내부의 70% 이상을 가시구역으로 확보하는 것이 불가능한 것으로 나타났다. Fig. 9(b)는 관측점 후보지들의 일부 조합에 대하여 채굴적 대비 가시구역의 면적 비를 산정한 결과를 보여준다. 3개 이상의 관측점을 설치할 경우, 대부분 90% 이상의 가시구역을 확보할 수 있는 것으로 나타났으며, 관측점을 4개 설치할 경우에는 3개

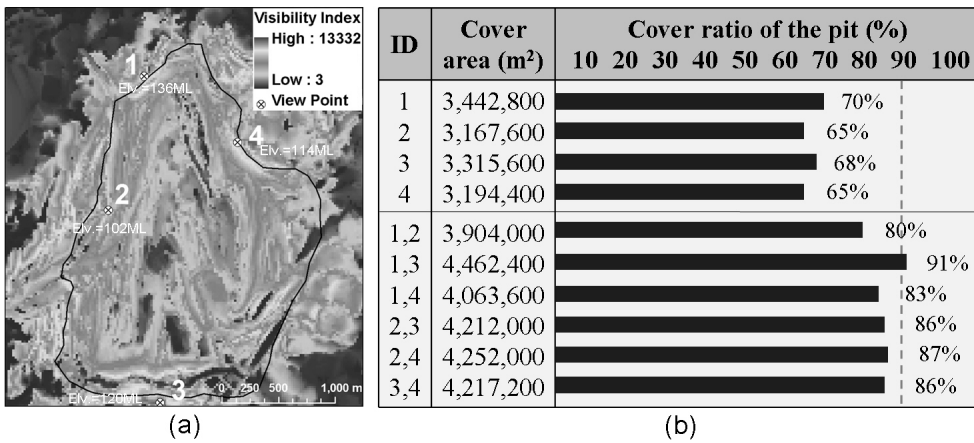


Fig. 8. Selection of the optimal viewpoint at the Roto North. (a) Four candidate sites which are selected based on the visibility index, (b) Ratio of the pit to viewshed area determined from each candidate site and from several combinations of candidate sites

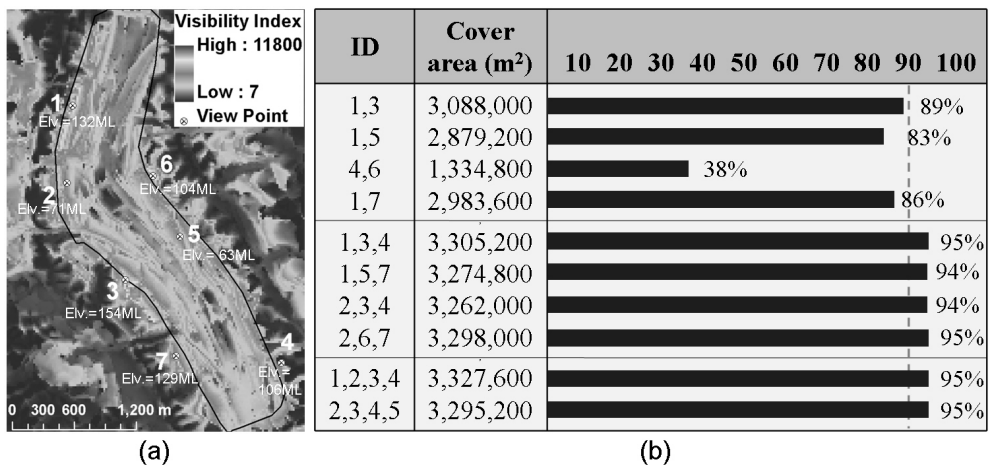


Fig. 9. Selection of the optimal viewpoints at the Roto South. (a) Seven candidate sites which are selected based on the visibility index, (b) Ratio of the pit to viewshed area determined from several combinations of candidate sites

설치할 경우와 비교하여 큰 개선 효과를 발견할 수 없었다. 이상의 결과를 종합할 때, Roto 남부지역의 경우 90% 이상의 가시구역 확보를 위해서는 3개 지점에 대한 관측점 설치が必要하며, 현장 여건상 최대 2개 지점으로 관측점 설치를 제한할 경우에는 1번, 3번 후보지의 조합을 선택하는 것이 가장 효과적일 것으로 판단된다.

본 연구에서 제시한 최적 관측점 선정 결과와 기존에 설치되어 있는 관측점의 위치(Fig. 3)를 비교한 결과, Roto 중부지역과 북부지역에서는 거의 일치하는 것으로 나타났으나, Roto 남부지역에서는 다소 차이를 보였다. Roto 중부지역과 북부지역의 채굴적은 원형에 가까운 비교적 단순한 형태로 개발되고 있어 현장 기술자의 정성적 판단만으로도 적절한 관측점 위치 선정이 가능했을 것으로 판단된다. 그러나 채굴적 형태가 복잡한 Roto 남부지역의 경우 정성적 판단만으로는 다중 관측점에 의해 나타나는 복합적인 시각적 영향을 평가하기 어려웠던 것으로 추정된다. 본 연구에서 적용한 GIS 기반의 가시구역 분석 기법은 채굴적의 형태가 복잡해질수록 최적 관측점 선정시 그 효용성이 더욱 높아질 것으로 판단된다.

본 연구에서는 관측자의 평균 신장을 1.75 m로 가정하여 offset을 설정하고, 가시구역 분석을 수행하였다. 관측자의 신장 차에 따른 최적 관측점 선정 결과의 민감도를 분석하기 위하여, 관측자의 평균 신장을 각각 1.60 m와 1.90 m로 가정하고 가시구역 분석을 반복 수행한 결과, Roto 중부지역, Roto 북부지역, Roto 남부지역 모두 관측점 후보지들의 가시구역 변화가 채굴적 면적의 1% 이내의 범위에서 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 따라서 현장 광산 기술자들의 신장의 크기를 1.60 m-1.90 m 범위로 가정할 경우, 본 연구에서 적용한 가시구역 분석 및 최적 관측점 선정 기법은 합리적인 결과 도출이 가능한 것으로 판단된다.

운반도로 가시거리 안전성 평가

적용 방법

가시거리에 의한 노천광산 운반도로의 안전성 평가를 위해 Fig. 10과 같은 2가지 상황을 고려하였다. Fig. 10(a)는 연직방향의 지형 굴곡으로 인해 트럭 운전자가 정지거리 이상의 충분한 가시거리를 확보하지 못하는 경우를 나타내며, Fig. 10(b)는 수평면상에서 트럭 이동방향의 오른쪽에 위치한 절취사면으로 인해 운전자의 가시거리가 제한되는 경우를 보여준다. 본 연구에서는 Fig. 3(c)에 제시된 적용구간에 대하여 운반도로의 중심선을 기준으로 20 m 간격의 62개 측점을 설정하였고(Fig. 11(a)), 각 측점에 대한 가시구역 분석을 수행하였다. 가시구역

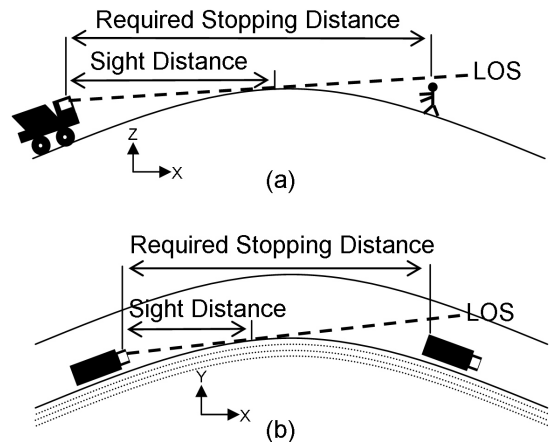


Fig. 10. Examples of unsafe conditions of a truck moving through a haul road due to the limited sight distance. (a) Vertical curve, (b) Horizontal curve (modified from Kaufman and Ault (1977))

분석에 필요한 지형의 고도 정보를 얻기 위해, 지상 정밀 지형측량 자료로부터 5 m 해상도의 DEM을 생성하였으며, offset은 폐식 처리용 100톤 덤프트럭의 차량 높이를 고려하여 4.27 m로 가정하였다.

결과 및 고찰

Fig. 11(b)는 21번 측점과 51번 측점에 대하여 가시구역 분석을 수행한 결과를 보여준다. 트럭의 정지거리는 오르막 이동보다는 내리막 이동시에 급격히 증가하기 때문에, 본 연구에서는 내리막 이동에 대한 가시거리 평가를 중점적으로 수행하였다. 내리막 이동에 대한 가시거리는 각각의 측점에서 내리막 방향으로 비가시영역이 처음 나타나는 지점까지의 거리를 기준으로 산정하였다(Fig. 11(b)). 21번 측점의 경우 연직 방향의 지형 굴곡으로 인해 내리막 방향의 가시거리가 41 m 정도로 제한되는 것을 확인할 수 있었다. 51번 측점의 경우에는 수평 방향에서 남쪽의 절취사면으로 인해 가시거리가 다소 제한되었으나, 21번 측점과 비교하여 상대적으로 긴 가시거리를 확보할 수 있는 것으로 분석되었다.

Fig. 12는 57개의 측점들에 대하여 내리막 방향의 가시거리를 산정한 결과를 보여준다. 내리막 방향의 가시구역이 관심 영역의 좌측 경계와 인접한 1~5번 측점의 경우 가시거리가 과소평가될 가능성이 존재하므로 Fig. 12의 결과에 포함시키지 않았다. 분석결과 35번 측점 부분에서 가장 긴 가시거리 확보가 가능한 것을 알 수 있다. 트럭의 정지거리는 지형의 경사, 이동 속도, 트럭의 하중에 따라 달라질 수 있으나, 광산 안전규정에 따라 내

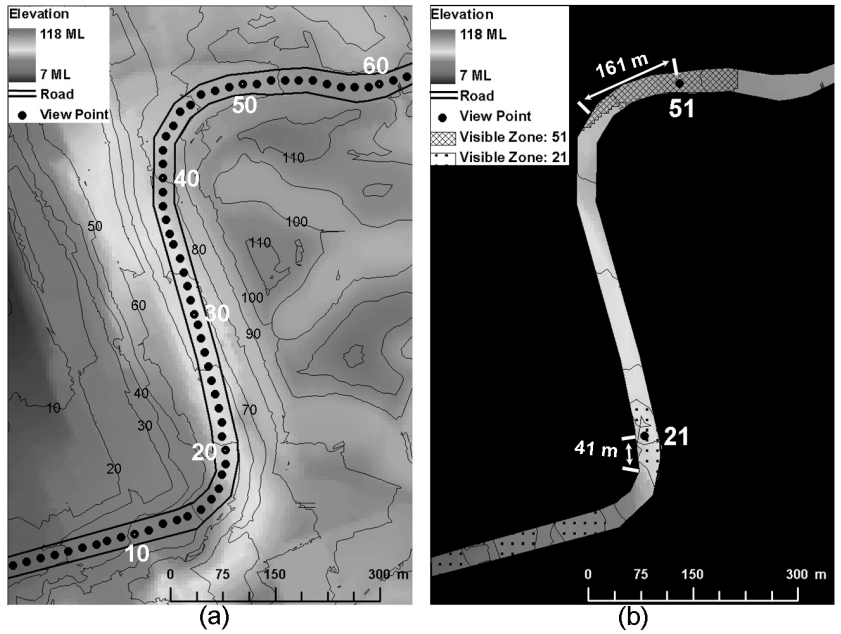


Fig. 11. (a) Stations through center line of the haul road, (b) Sight distances which are determined from Station 21 and Station 51.

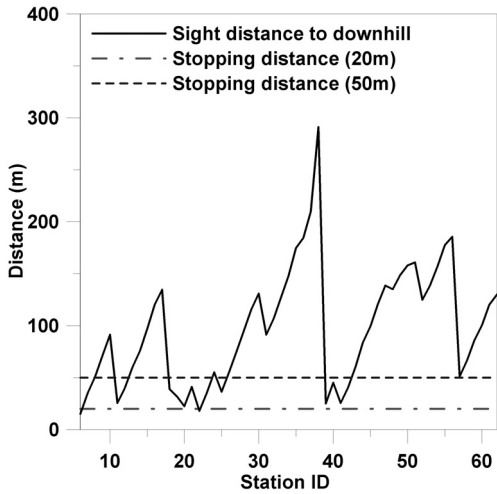


Fig. 12. Sight distance of the stations in Fig. 11 (a) with assumed stopping distances of a truck moving to downhill.

리막 이동시 20 m 또는 50 m 정지거리 확보를 권고하는 상황을 가정할 수 있다. 20 m 정지거리 규정을 적용하는 경우, 22번 측점에서 제한된 가시거리에 의한 주행 안전성 문제가 발생할 수 있는 것으로 나타났다. 또한, 운반도로 전체 구간에 대하여 50 m 정지거리를 확보하기 위해서는 10번, 20번, 40번 측점 부근의 구간에 대하여 운

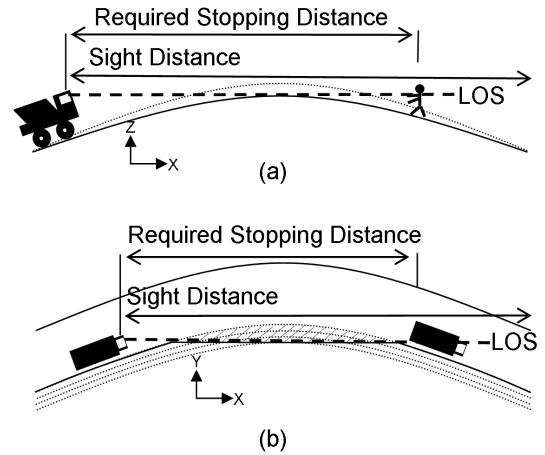


Fig. 13. Examples of the remedy to the unsafe conditions. (a) The vertical curve has been lengthened comparing with Fig. 11 (a), thus creating a sight distance longer than the required stopping distance, (b) The horizontal sight distance can be lengthened longer than the required stopping distance by removing some trees or laying back the slope (modified from Kaufman and Ault (1977))

반도로 정비 작업이 필요할 것으로 판단된다. Fig. 13은 가시거리의 확보를 위해 현장에서 적용 가능한 지형정비 방안을 제시한다.

향후 연구로서 운반도로 가시거리 분석을 보다 확장할 경우, 노천광산 운반도로 설계시 주어진 정지거리에 따른 운반도로의 수평방향 곡률과 절취사면고 등에 대한 가이드라인을 제시할 수 있을 것이라 기대한다.

결 론

본 연구에서는 노천채광 현장에서 활용할 수 있는 시각적 영향 평가 기술의 하나로서, GIS 기반 가시구역 분석 기법의 적용방안을 제시하였다. 인도네시아 파시르 석탄 노천광산의 3개의 채굴적을 대상으로 관측점 선정 을 위한 분석을 수행한 결과, 대상지역의 가시성 지수를 기준으로 관측점 설치 후보지들을 선정할 수 있었고, 각각의 후보지들로부터 예상되는 채굴적내 가시구역의 면적을 정량적으로 평가하여 관측점의 최적 위치를 결정할 수 있었다. 분석된 최적 관측점의 위치와 현재 설치되어 있는 관측점의 위치를 비교해본 결과, 채굴적 형태가 복잡한 Roto 남부지역에서 관측점 위치의 차이를 발견할 수 있었다. 이를 통해, 채굴적의 형태가 복잡해질수록 노천광산의 시각적 영향 평가시 GIS 기반 가시구역 분석 기법의 효용성이 높아짐을 기대할 수 있다. 두 번째 사례 연구에서는 파시르 노천광산의 운반도로를 대상으로 노선 중심의 축점들을 따라 가시구역 분석을 수행하였고, 그 결과 제한된 가시거리로 인해 트럭 충돌 등의 사고의 발생 위험이 높은 구간들을 선별할 수 있었다. 본 연구에서 제시한 GIS 기반 노천광산 가시구역 분석 기법은 정량적인 시각적 영향 평가 기법으로서 광산 개발단계는 물론 계획 및 설계 단계에서도 유용하게 활용될 수 있을 것으로 기대한다.

사 사

본 연구는 2008년 한국학술진흥재단의 2단계 두뇌한국21 사업, 문제해결형인력양성지원사업(KRF-2007-511-D00299) 과 한국지질자원연구원이 수행하고 있는 산업자원부 출연연구사업(대규모 석탄 노천광의 연약사면 안정성 및 생산성 향상 연구)의 지원으로 수행되었으며, 또한 논문 작성은 서울대학교 공학연구소의 지원으로 이루어졌다.

참고문헌

이종성, 2006, "GIS를 이용한 경관민감도분석에 관한 연구," *한국환경과학회지*, 제15권, 11호, pp. 1069-1075.
 최요순, 선우춘, 박형동, 2006, "광해방지를 위한 대규모 석탄 노천광의 배수설계 최적화," *한국지구시스템공학*

- 회지*, 제43권, 5호, pp. 429-438.
 한갑수, 2005, "GIS와 RS를 이용한 오대산국립공원의 경관특성 분석에 관한 연구," *한국지리정보학회지*, 제8권, 4호, pp. 114-122.
 Asarco Mineral Discovery Center, 2008, "Mine Tours," <http://www.asarco.com/AMDC/mine_tours.html>, Cited 22 June 2008.
 Camp, R. J., Sinton, D. T. and Knight, R. L., 1997, "Viewsheds: a complementary management approach to buffer zones," *Wildlife Society Bulletin*, Vol. 25, No. 3, pp. 612-615.
 Choi, Y., Park, H.D. and Sunwoo, C., 2008, "Flood and gully erosion problems at the Pasir open pit coal mine, Indonesia: a case study of the hydrology using GIS," *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, Vol. 67, No. 2, pp. 251-258.
 De Floriani, L., Marzano, L. and Puppo, P. E., 1994, "Line-of-sight communication on terrain models," *International Journal of Geographical Information Systems*, Vol. 8, No. 4, pp. 329-342.
 Eastman, L. J., 2003, *IDRISI Kilimanjaro: Guide to GIS and Image Processing*, Clark University, Worcester, USA, pp. 95-96.
 Ellsworth, J. C., 2000, "Design principles for recreating visual quality on surface mined landscapes," In: Burley, J. B. (eds.), *Environmental Design for Reclaiming Surface Mines*, The Edwin Mellen Press, New York, USA, pp. 329-361.
 Fisher, P. F., 1991, "First experiments in viewshed uncertainty: the accuracy of the viewshed area," *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, Vol 57, No. 10, pp. 1321-1327.
 Fisher, P. F., 1993, "Algorithm and implementation uncertainty in viewshed analysis," *International Journal of Geographical Information Systems*, Vol. 7, No. 4, pp. 331-374.
 Fisher, P. F., 1996, "Extending the applicability of viewsheds in landscape planning," *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, Vol. 62, No. 11, pp. 1297-1302.
 Franklin, W. M., Ray, C. K. and Mehta, S., 1994, *Geometric algorithms for siting of air defense missile batteries*, Technical Report on Contract No. DAAL03-86-D-0001, Battelle, Columbus Division, Columbus, Ohio, USA, pp. 1-116.
 Johnson, G. A., 1980, "Improved visibility systems," In: Andrus, C. D. and Norman, L. D. (eds.), *Surface Mine Truck Safety (Bureau of Mines Information Circular 8828)*, Department of the Interior, Washington, USA, pp. 22-39.
 Kaufman, W. W. and Ault, J. C., 1977, *Design of Surface Mine Haulage Roads-A Manual (Bureau of Mines Infor-*

- mation Circular 8758), Department of the Interior, Washington, USA, pp. 8-9.
- Kidner, D., Sparkes, A. and Dorey, M., 1999, "GIS and wind farm planning," In: Stillwell, J., Geerman, S. and Openshaw, S. (eds.), *Geographical Information and Planning*, Springer, London, UK, pp. 203-223.
- Kim, Y. H., Rana, S. and Wise, S., 2004, "Exploring multiple viewshed analysis using terrain features and optimisation techniques," *Computers & Geosciences*, Vol. 30, No. 9-10, pp. 1019-1032.
- Lake, M. W., Woodman, P. E. and Mithen, S. J., 1998, "Tailoring GIS software for archaeological applications: an example concerning viewshed analysis," *Journal of Archaeological Science*, Vol. 25, No. 1, pp. 27-38.
- Lee, J. and Stucky, D., 1998, "On applying viewshed analysis for determining least cost paths on Digital Elevation Models," *International Journal of Geographical Information Science*, Vol. 12, No. 8, pp. 891-905.
- Miller, W. K., 1976, *Analysis of haulage truck visibility hazards at metal and nonmetal surface mines-1975*, (Mining Enforcement and Safety Administration Information Report/ 1976), Department of the Interior, Washington, USA, pp. 1-2.
- O'Sullivan, D. and Turner, A., 2001, "Visibility graphs and landscape visibility analysis," *International Journal of Geographical Information Science*, Vol. 15, No. 3, pp. 221-237.
- Wang, J., Robinson, G. J. and White, K., 1996, "A fast solution to local viewshed computation using grid-based digital elevation models," *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, Vol. 62, No. 10, pp. 1157-1164.
- Wang, J., Robinson, G. J. and White, K., 2000, "Estimating surface net solar radiation by use of Landsat-5 TM and digital elevation models," *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 21, No. 1, pp. 31-43.



최요순

2004년 서울대학교 공과대학 지구환경
시스템공학부, 공학사
2006년 서울대학교 대학원 지구환경시
스템공학부, 공학석사

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



서장원

2007년 서울대학교 공과대학 지구환경
시스템공학부, 공학사

현재 서울대학교 대학원 에너지시스템공학부 석사과정
(E-mail; jangwonsuh@hanmail.net)



박형동

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

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



선우준

1978년 서울대학교 공과대학 자원공학
과, 공학사
1984년 서울대학교 대학원 자원공학과,
공학석사
1988년 프랑스 파리 VI 대학교, 이학박사

현재 한국지질자원연구원 지반안전연구부 책임연구원
(E-mail; sunwoo@kigam.re.kr)