노천광 연약 사면에서의 계측시스템 선택을 위한 고찰

선우춘 · 류동우* · 정용복 · 박도현

한국지질자원연구원, 지구환경연구본부

Optimal Measurement System for Weak Rock Slopes in an Open-Pit Mine

Choon Sunwoo, Dong-woo Ryu*, Yong-Bok Jung, and DoHyun Park

Geologic Environment Div., Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources

노천광산에서 사면설계는 안정성과 경제성 측면에서 동시에 접근하여 결정해야 한다. 또한 일반 도로 사면과 달리 대부분 보강 없이 굴착해야 하기 때문에 사면경사가 가장 중요한 설계 변수이다. 본 연구에서는 인도네시아 Pasir 광산의 Roto South 채탄장에 대한 사면 변위계측, 계측자료의 해석 및 수치해석을 통해 사면의 거동을 감시하기 위한 계측 시스템을 제안하고자 한다. Pasir 광산의 경우 관리해야할 사면의 영역이 매우 광범위하고, 수치해석에 의한 예상 변위량은 최대 3,000 mm 정도로 나타났다. 현장에서 수행된 경사계에 의한 계측 및 GPS에 의한 변위 계측에 대한 검토와 자동화를 위한 SSR (slope stability radar system)의 적용에 대해 검토하였다.

주요어 : 대규모 노천광산, 연약 암반 사면, 변위, 계측시스템, 경사계, GPS, SSR

The slope design of an open-pit mine must ensure slope stability and economic feasibility. The overall slope angle of the pit is therefore the main factor of concern because of limited support or reinforcement options available in such a setting. This study examines the optimal measurement system for monitoring the behavior of the slope in an open-pit mine using displacement measurement, data analysis, and numerical simulations for a coal mine at Pasir, Indonesia. The area of slope to be managed is extensive and the maximum displacement, as calculated by numerical analysis, is about 3,000 mm. The displacement data, measured by inclinometer and GPS, were analyzed, and the applicability of SSR (slope stability radar) was reviewed in comparison with other monitoring systems.

Key words : large open-pit mine, weak rock slope, displacement, measurement system, inclinometer, GPS, SSR

서 론

노천광산 사면은 영구적으로 유지되는 토목 사면과 달리 개발기간 동안 안전성 확보와 경제적인 설계를 필요로 하지만, 채광 한계지역에 도달한 최종사면은 장기적인 안정성을 유지할 수 있어야 하는 사면설계기술에 있어 양면성이 존재한다. 안전 측면에서는 대규모 노천광 사면에서 운영 중인 장비와 작업원 그리고 매장광량에 대한 경제적인 리스크를 최소화시키는 것이 가장 중요하며, 동시에 광산운영 기간 동안 광물회수를 최대화하고 폐석을 최소화 하여야 한다. 이러한 타협을 위해

작업환경에서 안전하고 실제적으로 수행될 수 있는 설계를 설정하는 것과 가능하면 경사를 세워야 하는 사면각의 설정사이에서의 균형이 필요하다. 따라서 토목사면과 달리 노천 채광장 사면들은 짧은 운영기간 동안 생산의 지장을 최소화할 수 있는 범위내에서 비교적 낮은 수준의 안전성이 요구되지만 정확성과 빈도 측면에서 높은 수준의 모니터링을 필요로 한다.

노천 채탄방식으로 운영되는 시험 대상광산인 Pasir 광산은 채탄규모 및 생산량의 확대에 따라 심부화가 이루어지고 있으며, 높이 150m 이상, 길이가 수 km에 이르는 대규모 사면이 형성되어 있다. 따라서 사면계측

*Corresponding author: dwryu@kigam.re.kr

을 위한 측점을 설정하는 것도 어렵기 때문에, 잠재적으로도 파괴가능성이 있는 사면의 사전인지를 통하여 계측장소를 설정하는 방법이 필요한 상황이다.

사면을 형성하는 지층은 미고결의 이암 및 사암으로 구성되어 있고 주기적인 강우, 주변의 지하수계 및 발파 진동의 영향으로 각 소단을 따라 소규모의 사면붕괴가 발생하고 있다. 이러한 소규모의 붕괴가 운반로를 막을 경우 작업공정에 지장을 주며 추후 대규모 사면붕괴로 이어질 가능성도 높다. 따라서 사면 유지기간 동안 주어진 사면조건에서 주기적인 모니터링과 사면관리를 통해 사면붕괴의 위험을 최소화하는 것도 중요하다. 또한 지속적인 모니터링을 통하여 사면의 파괴예측이 가능하면 파괴전에 사면에 대한 조치를 취함으로써 채광작업의 공정에 지장을 초래하지 않도록 하는 것도 노천 채광장에서 수행해야 할 임무 중에 하나이다. 이 탄광의 사면에 대해 수치해석 프로그램들을 이용하여 노천광산 사면의 안정성을 평가하려는 연구들이 다수 수행되었다(정소걸 외, 2000; 선우춘 외, 2004, 2008; 최성웅 외, 2004). 그러나 수치해석을 통한 안정성 평가방법은 채광장 사면의 일부 수직단면에 제한적으로만 적용될 수 있어, 채광장 전체영역의 사면붕괴의 위험성을 체계적으로 평가하기 어려운 한계가 있다(Jibson and Keefer, 1989). 노천광산과 관련하여 자료의 불확실성은 원천적으로 공간에 따라 변하는 지질 재료의 물리적 특성을 정확히 예측하려는 데에서 기인하며, 이것이 대부분의 지반공학이 당면하고 있는 문제의 불확실성이다. 따라서 시공후에는 이러한 불확실성의 위험 때문에 지속적인 모니터링이 필요하다. 본 연구에서는 인도네시아 Pasir 노천광산의 Roth South 채탄장에 대한 사면변위계측 및 계측자료의 해석을 통해 파괴시기의 예측과 사면의 거동을 감시하기 위한 계측 시스템을 제안하고자 한다.

연구대상 지역

광산 현황

연구 대상 광산은 인도네시아의 Kalimantan 섬의 남동부지역에 위치하는 KIDECO사 Pasir 석탄 광산으로 (Fig. 1) 노천채탄을 실시하고 있다. 전체 탄광의 면적은 504 km²이며, 2011년 연간 생산량은 약 3,000만톤 정도이다. Fig. 2는 Pasir 노천 채광장의 개발 중인 채광장들의 현황을 나타낸다. Pasir 광산은 광산을 동서방향으로 가로질러 흐르는 강을 기준으로 Roto North, Roto Middle 및 Roto South 지역으로 구분된다. 현재 가동중

Fig. 1. Study area (KIDECO Pasir Coal Mine).

인 작업장은 Roto 전 지역, SM 및 Susubang 지역이다. 본 연구는 Roto South 지역을 대상으로 수행되었고, 사면과 관련된 모든 설명도 Roto South 지역에 국한한다. Pasir 탄광은 신생대 3기층의 퇴적암류들이 유연탄층을 협재하며 분포하고, 이 지층들은 지질시대를 확정할 정도의 화석이 발견되지 않아 정확한 시대는 알 수 없지만 중기 내지 후기 마이오세로 알려져 있다(이병주 외, 2001). 이 지역은 거의 남북방향으로 발달하는 Roto 단층을 중심으로 동부와 서부가 퇴적암의 구성비가 상이한 층서를 보인다. ROTO 지역은 70~90° 경사의 탄층을 따라, 남북방향 약 16 km, 동서방향 약 7 km 정도의 채굴적이 분포하고 있다. ROTO 지역의 광상구조는 전체적으로 거의 남북방향의 축을 가지며 양 날개부는 모두 70° 정도에서 수직까지의 경사로 서향하는 형태의 향사 습곡구조를 나타낸다. 광산 개발은 이 향사구조의 정점부를 기점으로 하여 남쪽으로 채탄작업이 이루어지고 있다. 15개의 다른 탄층이 서로 평행하게 부존하며

Fig. 2. Current mining area at the KIDECO Pasir Coal Mine.

탄폭은 1 m에서 25 m까지 다양하다. 암종의 구성은 대략적으로 이암이 80%, 사암이 15% 그리고 석탄이 5% 정도로 구성되어 있다. 각 암종들의 강도는 50 MPa 이하로 강도가 낮으며 물에 포화시에는 사암의 경우는 모래와 같이 분해되는 경우도 많다(선우춘 외, 2008). 채탄은 노천채광법의 하나인 스트립(Strip) 채탄법으로 개발되고 있으며, 이 채탄법은 간단한 채탄시스템으로 탄층사이에 부존하는 이암이나 사암을 발파로 암반을 이완시킨 후에 파쇄된 폐석은 적재장비인 쇼벨이나 백호를 이용하여 100~150톤 트럭에 의해 폐석처리장으로 운반처리 된다. 폐석을 제거한 후 석탄은 백호를 이용하여 채탄을 실시하여 30톤 트럭에 의해 선단장으로 운반되어진다.

사면 현황

사면은 8 m 높이의 소단과 6 m의 berm, 그리고 35 m폭의 운반로로 구성되어 있으며, 전체 사면구배는 24~27°로 운영되고 있으나 채굴심도가 깊어짐에 따라 48 m 높이의 대규모 소단으로 굴착하는 것을 계획하고 있다(Fig. 3). 대상지역에는 연약한 지질조건, 채광을 위한 주기적인 발파진동, 많은 강우와 지표수의 영향에 의한 미고결 암석의 강도저하 등 사면안정성에 불리한 조건

Fig. 3. Design of open-pit slopes in the study area.

들이 존재하며, 특히 법면으로 흐르는 지표수는 우곡(gully)이나 협곡을 생성하여 사면의 불안정성을 가속시키고 있다(선우춘 외, 2008). 사면상부의 저수지, 침전조 등도 지하수공급원으로 작용하여 사면의 안정성에 상당한 영향을 미치고 있다. 일부 지역에서는 사면의 변형에 의해 사면 정상부에 많은 인장균열들이 지층의 주향방향(사면의 평행)으로 발달하고 있으며, 상단 배수로에서도 인장균열들이 관찰되기도 한다. 지표수가 이러한 인장균열을 따라 쉽게 침투되어 사면 안정성에 많은 영향을 미치며 또한 사면파괴의 시발점이 되기도 한다.

Pasir 광산의 연약사면에서 발생하는 파괴는 일반 암반사면에서 발생할 수 있는 평면파괴, 전도파괴, 쉼기파괴 외에도 토사사면에서 일어나는 원호파괴가 많이 발생되고, 대규모 연약사면에서는 상부의 인장균열 등을 포함하는 모든 파괴양상을 포함하여 사면파괴에서 볼 수 있는 모든 형태의 사면파괴가 관찰되고 있다. 노천 채광장은 도로사면과 달리 작업장이 광역화되기 때문에 배수처리를 위한 사면의 배수에 대한 지속적인 관리가 곤란하여 배수로가 제 역할을 하지 못하는 경우가 대부분이다. 따라서 범(berm)에 모이는 지표수들이 사면의 안정성에 좋지 못한 영향을 미치는 요인이 된다.

사면을 구성하는 주요 암석인 이암과 사암의 경우 신생대 3기의 미고결층에 해당하여 물에 의해 포화되었을 경우 거의 분해되는 현상들을 관찰할 수 있다. 코어 형태의 사암과 이암 시편을 물에 침수시킨 경우 2시간 이내에 완전히 토사 형태로 분해되는 현상이 관찰된다. 이암 사이에 협재되어 있는 사암의 경우도 지역적으로 강도에 있어 많은 차이를 나타내며 물과의 관계에서 발생하는 암석의 강도는 Fig. 4와 같이 많은 차이를 보이고 있다. 햄머로 타격시 햄머가 박힐 정도 약하거나 손으로 만져도 부서질 정도로 연약한 경우가 대부분으로 햄머의 타격으로 쉽게 부서지는 R0(극연암)에서 부분적으

Fig. 4. Different types of sandstone in strength.

로 해머의 타격에도 자국만 조금 남는 R2(연암)까지 분포하여 같은 사암이라도 많은 차이를 보이고 있다 (Manual Index Test 참조). 이러한 사암의 강도특성으로 인해 특히 사암에서 침식에 의한 세굴이 많이 일어나고 있는 것을 현장에서 관찰할 수 있다.

사면 변위계측 및 해석

사면 변위 패턴과 파괴

붕괴전 사면의 움직임은 암반의 탄소성 변형, 연화현상 그리고 파괴를 포함한 복합적인 현상들로부터 발생할 수 있다(Sullivan, 2007). 지진에 의한 파괴를 제외하고 거의 대부분의 대규모 파괴는 점진적으로 발생하고, 심각한 사면 불안정은 일반적으로 사면 정상부 배면의 인장균열의 점진적 발전과 상당한 변위를 동반하게 된다. Fig. 5는 크리프에 의한 사면의 변위 추이를 나타내는 것으로(Fell et al., 2000) 사면의 크리프 반응은 변형 속도가 감소하는 1차 크리프와 일정한 변형 속도를 보이는 2차 크리프 그리고, 변형 속도가 증가하는 3차 크리프로 구분할 수 있으며 일반적으로 3차 크리프 이후에 사면 파괴나 붕락이 발생한다. 2차 크리프의 발생 중에는 거의 일정한 변형 속도를 보이며, 이는 작용 응력에 영향을 받는다(Amitrano and Helmstetter, 2006). 2차 크리프는 일반적으로 매우 짧은 시간 동안만 발생하며, 1차 및 3차 크리프 메카니즘이 함께 발생할 수도 있다(Varnes, 1982). 현장 계측치에 의하면 사면 파괴의 마지막 단계는 속도-시간 공간에서 쌍곡선 함수의 모양을 나타내며, 이는 취성파괴에서 볼 수 있는 크리프의 비선형 마지막 단계와 유사하다(Petley, 2004). 불안정 초기 단계에서는 대개 사면 상단부를 따라 발생한 인장균열이 열리고, 이어서 사면 상단부가 가라앉거나 사면

Fig. 5. Creep behavior of moving slopes (after Fell et al., 2000).

하단부가 수평 이동하다가 최종단계에서 이르러 급격하게 파괴된다. 파괴면의 크기는 수 미터 높이에서 수 킬로에 걸쳐 발생할 수 있다.

사면계측시스템

사면 계측의 가장 중요한 목적은 안정적인 광산운영을 유지하고, 불안정성을 사전에 감지하여 사면 변위의 영향을 최소화하고, 사면 거동과 관련한 지반공학적 정보를 제공하는데 있다(Call and Savely, 1990). 사면의 붕괴는 겉보기에 뚜렷한 징후 없이 발생하여 인명 피해, 장비 손상 및 채광과정에서의 생산성 저하를 초래할 수 있기 때문에 사면 안정성은 광산 개발에 있어 매우 중요한 안전 및 생산성 문제와 직결된다. 변형률계(extensometer)와 같은 간단한 계측 장치부터 매우 정교한 레이더나 글로벌 항법 위성 시스템(Global Navigation Satellite System)에 이르기까지 다양한 계측 시스템을 적용하여 임박한 사면 불안정성이나 파괴를 예

Fig. 6. Common slope-monitoring systems.

측할 수 있다. 사면 파괴 발생전 수 주 혹은 수 개월에 걸쳐 작은 진조 현상들이 나타날 수 있으며(Hoek and Bray, 1981), 사면 계측 시스템은 임박한 사면의 불안정성을 예측하거나 사면 파괴의 영향을 최소화하기 위한 목적으로 사면의 변형이나 지반 상태를 감시하는데 폭 넓게 이용되어 왔다. 사면 계측 시스템은 계측 대상에 따라 지반 거동, 지반 진동, 지하수 및 사면 지보제에 걸리는 하중 계측으로 분류할 수 있지만(Fig. 6), 여기서는 지반 거동 계측에 대해서만 언급한다. 지반 거동 계측 기술은 지표와 지하 암반의 거동을 계측하는 방식으로 구분된다. 지표면의 거동계측은 사면의 특정 지점별 변위(균열폭 측정 혹은 측량 네트워크)와 전체 영역의 변위를 계측하는 방식(스캐닝 혹은 영상기반 기술)으로 구분된다. 측량 네트워크는 사면이나 노천광에서 가장 일반적인 지하 암반 계측 방식으로 조사 과정동안 변화가 없는 지역 의 기준점 체계가 필요하다(Lang et al., 1994; Corominas et al., 2000). 이 기술은 장비의 설치와 유지를 위해 감시 지점에 접근해야만 하는 단점 때문에 감시 영역이 제한된다(Lichti et al., 2000). 가장 일반적인 지하 변위 측정 기기와 방법은 경사계, 변형률계, AE 센서(Acoustic Emission Sensor)와 시간영역

반사측정법 등이 있다. 시간영역 반사측정법과 같은 특정 기술들은 지표 및 지하 모두에서 이용될 수 있다.

사면계측 및 분석

경사계에 의한 사면변위측정

Pasir 광산의 조사 사면에서 지반 변위를 측정하기 위하여 경사계 케이싱을 안정된 지반까지 굴착하여 수직으로 설치하여 사면의 변위계측을 시도하였으나 연약암반으로 구성된 채광장 사면은 수십 cm에서 수 m까지 변위가 발생하여도 파괴가 일어나지 않고 변위가 계속적으로 증가하기 때문에 경사계의 케이싱을 심하게 변형시켜 측정 프루브(probe)를 삽입할 수 없는 상황을 초래하였다. 변위가 수 m까지 이를 정도로 절대 변위량이 크기 때문에 계측한계를 초과하여 경사계를 이용한 변위측정은 사실상 어려워 측정을 중단하였다.

경사계를 이용한 변위측정은 경사계 케이싱주변 지반에 이완 영역 발생과 함께 지반 변위가 발생하는 경우 케이싱 또한 변위가 발생하여 이 변위를 측정한다. 사용된 경사계는 Model 5480 Inclinometer probe (ACE사)와 Control cable, Inclinometer data logger로 구성되며,

Fig. 7. Measurement of displacement by inclinometer.

Fig. 8. Results of displacement measurement by inclinometer in Roto South D area.

케이싱 내부로 프루브를 집어넣어 변위자료를 획득하게 된다(Fig. 7). 지중경사계 출력은 전압(mV) 단위의 값으로 데이터로거에 표시되며 이 값은 프로브 내부의 가속도계가 각도의 변화에 따른 전압 변화를 나타내는 값이다. 지중경사계는 측정 간격에 대한 각도의 변화를 프로브가 측정하여 길이 단위의 변위량(Δmm)으로 환산하여 사용하며 기준길이(L: 측정간 거리)에 대한 각도 변화량의 $\sin$ 값이다.

Fig. 8은 변위측정치에 대한 그래프 출력화면으로 Fig. 8(a) 좌측은 A축의 누적 변위량을, 우측에는 B축의 누적 변위량을 깊이에 따라 출력한 것이다. A0방향은 사면법면의 방향으로 A축의 (+)변위를 나타내고 A180방향은 사면 법면의 반대방향으로 A축의 (-)변위를 나타낸다. 그리고 B0방향은 A축에 수직인 B축의 (+)변위를 나타내며 B180방향은 B0방향의 반대방향으로 B축의 (-)변위를 나타낸다. Fig. 8(b)는 변위가 일어나고 있는 방향을 나타낸다. Roto South D 구역 동측 사면에서

약 25 cm의 변위가 발생한 예가 된다.

GPS에 의한 변위계측 및 분석

경사계 사용의 어려움으로 현장에서는 채굴현황을 측량하기 위한 주기적인 측량작업이 이루어지기 때문에 GPS 측량팀의 협조를 통해 불안정이 예상되는 주요 사면에 대하여 법면을 따라 각 소단 별로 측정점을 설정하여 GPS를 이용한 사면변위계측을 수행하였다. 각 계측 사면에 대해 GPS에 의해 계측된 변위분석을 실시하였고, 변위크기에 따른 파괴시기를 예측하기 위하여 Fukuzono (1985)가 제시한 역변위속도 개념을 적용하였다. 이 개념은 예측목적으로 적용되었으며 대부분은 역해석에도 사용되었다(Eberhardt, 2007). 역변위속도가 0이 되면 무한대의 변위가 발생하는 것으로 파괴라고 볼 수 있다. 현장에서 쉽게 사용할 수 있도록 측정값을 입력하면 자동으로 분석을 수행할 수 있는 EXCEL 시트를 개발하였다(Fig. 9). 이 시트를 사용하여 누적 변위량

(a) Slope profile and total displacement occurred in the plane

(b) Trend analysis on the displacement for each post

Fig. 9. Excel sheet for measurement data analysis.

에 의한 경고, 역변위 속도에 의한 파괴시점 예측 및 사면 전체 거동을 바로 파악할 수 있다. 분석결과와 Fig. 9(a)와 같이 사면 단면에서의 각 측정(시트상에는 post)별로 계측단면상에서의 수직 변위(시트상에는 Sectional View)와 평면상에서의 수평변위 및 변위방향(시트 상에는 Plan View)에 대해 분석함으로써 전체적인 변위발생의 경향을 파악할 수 있다. 그리고 하나의 계측 단면에서 여러 측점은 사면의 단면을 제대로 파악할 수 있도록 일반적으로 각 벤치의 정점과 선단에 측정점들을 설정하였다. 막대그래프는 마지막 계측시점에서의 변위량과 변위속도를 나타내며, 변위량 경우는 누적된 변위량이 되므로 실제로는 각 계측지점에서의 총변위량으로 판단할 수 있다.

Fig. 9(b)의 표들은 Fig. 9(a)의 막대그래프의 값을 나타낸다. 그리고 각 그래프는 수평변위에 대한 분석들이다. 시트 상 'Displacement history'는 측정에서의 수평변위의 이력을, 'Slope failure prediction'은 측정시간별

역변위속도로서 사면의 파괴시점을 파악하기 위한 그래프이며, 'Plan view'는 최초의 측정시점에서부터 최종측정 시점까지의 수평방향의 위치로 변위가 일어난 방향의 경향을 파악할 수 있다. 전체적으로 사면 하단부로부터 변위가 발생하고 있으며, 변위속도는 1.5~2.3 cm/day 정도이고 총 수평변위가 150 cm에 이르는 것을 볼 수 있다.

Fig. 10은 계측 관리가 잘 이루어진 변위 계측 자료를 분석한 것으로 Roto South E1 동측사면에서 변위가 계속 증가하며 단면에서의 변위거동이 활동면(Fig. 10의 사면내 원호 점선은 현장에서 관찰한 파괴예상면))을 예측할 수 있게 해준다(사면상부는 하강, 서부는 수평이동). 이 구역은 하부에서 생산을 위한 굴착이 계속 진행되어 변위가 계속 발생하였던 곳이다. Fig. 10의 분석결과와 같이 GPS에 의한 변위 계측이 관리가 잘 이루어진다면 Pasir 광산과 같이 변위가 수 m까지도 발생하고 광역적인 사면현장을 갖는 경우 지중의 경사계 측정정보

Fig. 10. Deformation behavior analysis and slope failures (Roto South E1).

다 상당히 신뢰성이 있을 수 있음을 보여주는 예이다. 그러나 계측의 관리가 잘 이루어지지 않는다면 계측자에 따라 많은 오차를 나타낼 수 있기 때문에 지속적인 계측관리가 필요하며 넓은 지역을 대상으로 작업이 곤란한 어려운 점이 있다. 그러나 위험도 평가(선우춘 외, 2010)를 통해 위험도가 높은 사면의 계측지역을 선정한다면 지역에 대한 문제점도 해결할 수 있을 것이다.

유한 요소 해석에 의한 변형 검토

Pasir 광산의 경우 관리 대상 사면의 영역이 매우 광범위하고 사면 파괴 예상 변위가 상당히 큰 편으로 계측의 자동화와 장비 운영 효율성 제고 측면에서 앞에서 설명한 계측방법외의 계측 시스템을 선택하기 위하여 사면에서의 예상변위를 파악하기 위한 수치해석을 실시하였다.

Table 1. Open-pit slope heights at the final excavation stage.

Area	Section	Slope angle (°)	Slope height (m)
Roto South AB	West slope	27	345
	East slope	27	209

Fig. 11. Schematic of finite element analysis (Roto South AB area).

해석 단면 및 지반 물성

Pasir 광산의 Roto South AB지역 채광 사면에 대해 굴착으로 인한 지반 거동을 파악하기 위하여 유한요소 해석을 수행하였다. Table 1과 같이 사면각은 27°로 계획되었고, 사면 높이는 약 210~460m인 대절토 사면이다. 특히, 사면 정상부 배후지는 대규모 폐석장(최대 성토 높이 약 85m)이 위치한다. Fig. 11은 해석 단면을 나타내며, 전체적으로 사면 굴착은 세 단계로 구분하여 굴착 단계별 지반 변위 및 응력 분포를 분석하였다. 따라서 전체 해석은 4단계에 걸쳐 수치해석이 이루어졌고, 첫 단계는 초기 현지응력 단계에 대한 해석과 3단계에 걸친 채굴후의 각 단계별 안전성 해석을 실시하였다.

Mohr-Coulomb 탄소성 파괴모델에 의한 유한요소 해석을 위해서는 암종별 변형계수, 점착력, 내부마찰각, 단위중량, 포아송비와 지층간 접촉면의 물성이 필요하다. 암종별 변형계수와 포아송비 산정을 위해 실내 암석시험을 수행하였으며, 변형계수와 포아송비 결정시 한국지질자원연구원에서 수행한 KIDECO 석탄광업소의 분석 자료(선우준 외, 2008)와 Golder 사에서 2010년 수행한 Roto 강남지역의 안정성 분석 자료(Golder Associates, 2010)를 고려하였다. Table 2는 실내 암석시험의 암종별

Table 2. Mean values of deformation moduli and Poisson's ratios.

Rock type	Deformation modulus (MPa)	Poisson's ratio
Coal	969.89	0.26
Mudstone	274.20	0.30
Sandstone	674.48	0.25

변형계수와 포아송 비의 평균값을 나타내고, Table 3은 한국지질자원연구원과 Golder사의 분석 자료를 나타낸다.

폐석장 지역의 변형계수 값은 Waste Dump West 지역의 SPT 값을 토대로 산정하였다. Schmertmann (1978)에 따르면 세립에서 중간 정도의 모래에 대한 SPT 값과 변형계수의 관계는 식 (1)과 같다.

$$E = 7N \quad (1)$$

여기서, E는 현장의 변형계수(kg/cm²), N은 표준관입시험에서 얻은 타격수.

Waste Dump West 지역의 평균 SPT 값인 15를 적용하여 변형계수를 산정하였고, 폐석이 교란된 상태로 적치되는 작업 환경을 고려하여 포아송비는 0.35로 가정하였다. 지층간 인터페이스 물성(점착력과 마찰각)은

Table 3. Deformation moduli and Poisson's ratios (after Sunwoo et al., 2008; Golder Associates, 2010).

Rock type	Deformation modulus (MPa)		Poisson's ratio
Coal	548.3	541.8*	0.25
Mudstone	550.3	962.9*	0.26
Sandstone	1384.1	1401.6*	0.25

*Deformation modulus estimated by Golder Associates (2010)

Table 4. Shear strength of bedding plane (after Golder Associates, 2006).

Type	Cohesion (kPa)	Friction angle (°)
Interface	10	15.4

Table 5. Deformation moduli and Poisson's ratios used in the present study.

Rock type	Deformation modulus (kPa)	Poisson's ratio
Coal	687,000	0.26
Mudstone	596,000	0.28
Sandstone	1,153,000	0.25
Waste dump	10,500	0.35

Table 6. Geotechnical properties used in the present study.

Rock type	Unit weight (kN/m ³)	c (kPa)	ϕ (°)
Coal	13.3	545.6	21.0
Mudstone	22.0	312.9	18.6
Sandstone	22.0	368.1	25.0
Waste dump	22.0	22.6	17.4

사면 안정성 평가시 분석된 층리면의 전단강도시험 결과값(Golder Associates, 2006)을 적용하였으며(Table 4), Table 5는 본 연구에서 적용한 지층의 물성을 나타낸다. 한편 채광 지역 주변에서 초기 응력을 측정하기 위한 시험을 수행하지 못하여 측압계수를 1.0으로 가정하여 사면의 안정성 평가를 수행하였다. Table 6은 해석에 사용한 각 층의 물성치를 나타낸다.

Roto South AB지역 채광 사면의 안정성 해석

굴착으로 인한 지반 변위를 분석하기 위해 사면의 소단부(G1~G3, G8~G9), 최종 사면의 끝단 부분(G4, G10), 채광 사면에 근접한 폐석장 부분(G5), 한계평형해석에서 최소 안전율의 활동면을 보인 폐석장 부분(G6, G7)을 측점으로 설정하였다(Fig. 12).

굴착으로 인한 지반 변위의 결과는 Table 7 그리고 Fig. 13 및 14와 같다. Roto South AB 지역의 사면에 대한 연속체 안정성 해석을 수행한 결과, 굴착이 진행됨에 따라 채광 사면과 폐석장 사면의 지반 변위가 증가하였다. 좌측사면의 소단부(측점 G1~G3)에서는 87.2~

Fig. 12. Monitoring points for displacement.**Table 7.** Calculated displacements at monitoring points.

Slope	Monitoring point	Displacement (cm)					
		Stage 1		Stage 2		Stage 3	
		Hor.	Vert.	Hor.	Vert.	Hor.	Vert.
Left Slope	in Pit	G1	87.2	1.13	-	-	-
		G2	87.6	0.9	178.0	22.1	-
		G3	87.4	2.3	187.0	20.7	304.0
		G4	58.5	-5.1	128.0	-8.8	219.0
	Waste dump	G5	43.2	-6.6	100.0	-15.6	183.0
		G6	30.3	-8.2	71.6	-20.9	130.0
		G7	12.1	-17.9	28.3	-44.4	51.6
Right slope		G8	-43.5	17.2	-73.6	49.8	-
		G9	-50.9	18.3	-88.1	50.1	-120.0
		G10	-10.1	-0.9	-16.8	-2.0	-20.4

Fig. 13. Horizontal displacement during each excavation stage at monitoring points.

Fig. 14. Vertical displacement during each excavation stage at monitoring points.

Fig. 15. Total displacement after final excavation (Stage 3).

304.0 cm의 수평변위와 0.9~40.1 cm의 수직변위가 발생하였고, 우측사면의 소단부(측점 G8~G9)에서는 43.5~120.0 cm의 수평변위와 17.2~86.4 cm의 수직변위가 발생하였다. 최종 좌측사면의 끝단부(측점 G4)에서는 수평변위 58.5~219.0 cm, 수직변위 5.1~10.6 cm가 발생하였고, 최종 우측사면의 끝단부(측점 G10)에서는 수평변위 10.1~20.4 cm, 수직변위 0.2~2.0 cm가 발생하였다. 한편 폐석장의 측점 G5의 경우 수평변위 43.2~183.0 cm, 수직변위 6.6~27.9 cm, G6의 경우 수평변위 30.3~130.0 cm, 수직변위 8.2~43.3 cm, G7의 경우 수평변위 12.1~51.6 cm, 수직변위 17.9~85.7 cm가 발생하였다.

원지반이 포화된 조건에 대한 해석시, 변위가 수렴되지 않아 굴착으로 인한 안정성 확보가 어려운 것으로 분석되었다. 그러나 본 연구에서 산정한 변형계수 값은 채광 지역 전체에 대한 대표 물성으로 해석 단면 위치에서의 변형계수와 상이할 수 있으므로 수치해석에서 분석된 변위의 절대값보다는 굴착 단계별로 발생하는 변

위의 경향(기울기, 수렴여부 등)을 안정성 평가의 기준 자료로 활용하는 것이 합리적일 것이다. Fig. 15는 최종 단계 채굴후의 총 변위 분포는 사면 굴착면에서 지반 변위가 집중되는 것을 알 수 있으며, 좌측사면의 경우 상부 폐석장으로 인해 우측사면보다 변위가 크게 발생하는 경향을 보였다.

사면 변위 계측 시스템의 선정

임박한 사면 파괴 경고에 대한 계측 시스템의 신뢰도를 평가하는데 고려해야 하는 세 가지 주요 인자는 계측 범위, 계측 빈도 및 계측 시스템의 정밀도이다. 계측 범위(monitored area)와 관련하여, 대규모 영역의 변형을 계측하는 시스템은 개별 지점의 계측 시스템에 비해 사면의 변형 패턴에 대한 중요한 자료를 제공할 수 있다. 또한, 사면 전체 영역에 대한 계측은 미리 설정된 파괴 유형과 변형 패턴에 기초한 변형 계측이 가능하기

Fig. 16. Typical precision of various surface-measurement techniques (after Vaziri et al., 2010).

때문에, 그 계측 결과가 개별 지점에서의 계측보다 계측 설계의 불확실성의 영향을 덜 받는다. Fig. 16과 같이 지표면 계측 기술은 개별 지점들 혹은 사면 전체 영역에 걸쳐 변위 계측에 적용할 수 있다. 지중 계측 기술은 일반적으로 사면의 제한된 개별 지점의 계측만이 일반적으로 가능하다. 계측 빈도는 수 분 단위나 훨씬 짧은 간격으로 변형을 계측하는 시스템이 사면 거동을 평가하는데 훨씬 유용하게 사용될 수 있으며, 특히 사면 변형 계측에 적합하다. 계측이 연속적으로 이루어지지 않는다 하더라도, 일반적으로 예기치 못한 변형 패턴 혹은 큰 변형 속도가 감지되면 보다 짧은 계측 간격으로 계측이 이루어져야 한다. 정밀도와 관련하여 계측기들은 사면에서 완전한 파괴로 인해 발생하는 최대 변위에 비해 훨씬 작은 크기의 변위를 감지할 수 있을 정도의 충분한 민감도를 가져야 한다. 사면은 지질조건, 기하학적 형태, 유지 수명, 지반공학적 문제 그리고 광산 운영 조건 등에 따라 매우 다양한 상황에 놓이게 되어 사면 파괴 유형과 사면 변형 기구(deformation mechanism)에 대한 명확한 규명없이 계측 정밀도의 요구 수준에 대한 규정화는 매우 어렵다.

변형 계측 장비의 선택과 관련하여, 계측 장비의 정밀도는 파괴에 이르는 예상 변형(Δ)의 최소 1/50 수준이 요구되며(Lang et al., 1993), 만약 장비의 정밀도가 $\Delta/200$ 이하이면 사면의 변형 반응에 대해 훨씬 정밀한 추정치를 얻을 수 있다. 그러나 이런 기준치들은 보편적으로 사용되는 허용기준을 의미하는 것은 아니다. 사면 변위 계측 시스템에 적용되는 일반적인 정밀도는 Fig. 16과 같다(Krauter, 1988; Gili et al., 2000). 이상적인 계측 시스템은 신뢰도와 관련된 세 가지 인자 외에도 기후 조건에 영향을 받지 않아야 하며, 야간 측정이 가능해야 하고, 장비 운영과 관련한 편향이 없어야 한다. 자동화 장비는 운영 미숙이나 조작 실수로부터 발생하는

오차 인자들을 배제할 수 있고, 계측 빈도에 있어 탄력적으로 운영이 가능한 장점이 있다. 수동 장비의 경우는 지반공학 전문가가 파괴과정을 예측하고 안전 관리나 안정화 방안을 수립하기 위한 변위 이력과 패턴을 해석해야 한다. 따라서 넓은 영역을 수많은 프리즘으로 조사할 경우 많은 시간과 인력 투입을 필요하고 자료 처리에도 많은 시간이 요구된다.

앞의 세 가지 인자들에 기초하여 사면 변위 계측 시스템의 신뢰도를 평가하기 위해 신뢰도 맵을 사용할 수 있다. 사면 파괴에 이르기까지 넓은 변형 범위를 가지는 사면들에 대한 신뢰도 맵에 기초하여 다양한 계측 시스템들의 신뢰도를 평가한 결과는 Fig. 17과 같다. 연구 대상 지역인 Pasir 광산의 경우 관리해야 할 사면의 영역이 매우 광범위하고, 해석에서 최대 3,000 mm 정도의 변위가 발생하기 때문에 앞에서 언급한 계측 장비의 정밀도는 예상 변위의 1/50 수준은 60 mm 정도가 되어 해상도와 장비운영 효율과 사면 안정화의 중요성이 높은 점을 고려할 때 SSR 시스템(slope stability radar system)의 적용을 제안할 수 있다(Fig. 17 및 18).

이 시스템은 암반 사면을 원격 스캔하며 사면 표면의 움직임을 연속적으로 측정할 수 있는 전천후 장비이다. 차분간섭기법을 이용하여 스캔에서 수신된 레이더 신호의 위상들을 비교하여 사면의 움직임을 측정하는 개념으로 기록된 임의의 위상차는 mm 단위의 측정치로 변환된다. 시스템에서 영역별로 별도의 경보 임계치를 설정할 수 있으며, 사면 파괴에 앞서 발생하는 급격한 사면의 거동을 감시하고 실시간 경보 기능이 가능하다. SSR 시스템은 1시간 내 채설치가 가능한 이동식 시스템이고, 1분 내에 10,000 m²의 면적을 스캔할 수 있기 때문에 임의의 파괴에 대해 소개(evacuation) 목적으로 초기 경보 기능을 제공할 수 있다. 또한 SSR 시스템을 이용하여 사면 안정성과 관련한 위험 관리도 가능하다.

Fig. 17. Reliability of various monitoring systems (after Vaziri et al., 2010).

Fig. 18. Ground Probe Slope Stability Radar (SSR) system and application (after Little, 2006).

결과 및 검토

사면의 안정성 해석과 변위계측의 분석에 대한 결과를 요약하면 다음과 같다.

유한요소해석에 의해 Roto South AB지역 채광 사면의 굴착으로 인한 지반 거동을 분석한 결과, 사면의 굴착이 진행됨에 따라 채광 사면과 폐석장 사면의 지반 변위가 증가하는 경향을 보였으며, 사면 굴착면에서 지반 변위가 집중되었다. 또한 원지반이 포화되는 지하수위 조건을 고려한 해석시에는 변위가 수렴되지 않아 굴착으로 인한 사면 안정성 확보가 어려운 것으로 분석되었다. 굴착으로 인한 지반 변위의 결과는 좌측사면의 소단부(측점 G1~G3)에서 최대 약 300 cm의 수평변위와 40 cm의 수직변위가 발생하였고, 우측사면의 소단부(측점 G8~G9)에서는 약 120 cm의 수평변위와 86 cm의 수직변위가 발생하였다. 해석에서 분석된 변위는 계측시

스템의 선정과 계측관리 기준으로 활용이 가능할 것으로 판단된다. 다만, 본 연구에서 적용한 변형계측 값은 채광 지역 전체에 대한 대표 물성으로 현장계측을 수행하는 위치의 변형계측수와 상이할 수 있으므로 수치해석에서 분석된 변위의 절대값보다는 굴착 단계별로 발생하는 변위의 경향(기울기, 수렴여부 등)을 안정성 평가의 기준 자료로 활용하는 것이 합리적일 것이다.

사면 설계대로 굴착을 진행하더라도 강도자료의 불확실성과 공간적 분산, 작업 및 지질 조건 등에 의해 사면은 설계와 다르게 거동할 수 있기 때문에 이에 대한 대책으로서 사면거동에 대한 계측이 수행되어야 한다. 사면 계측의 중요한 목적은 안정적인 광산운영을 유지하고, 불안정성을 사전에 감지하여 사면 변위의 영향을 최소화하고, 사면 거동과 관련한 지반공학적 정보를 제공하는데 있다. 계측과 관련된 제안 사항들은 다음과 같다.

- 지중 계측법인 경사계를 사용하는 계측은 Pasir 광산에서는 채광장 사면을 구성하는 연약암반의 변위가 수 십cm를 초과하여 수 m까지 일어나 절대 변위량이 경사계의 계측한계를 초과하기 때문에 이 계측방법은 사실상 적용이 어려운 실정이다.
- 현장에서는 채굴현황을 위한 주기적인 측량작업이 이루어지기 때문에 광산 여건을 고려하여 GPS 측량팀의 협조를 통해 주요 불안정 예상사면에 대하여 GPS를 이용한 사면변위계측을 수행을 추천한다. 분석결과 GPS에 의한 변위 계측이 관리가 잘 이루어진다면 Pasir 광산과 같이 변위가 수 m까지도 발생하고 광역적인 사면현장을 갖는 경우 지중의 경사계 측정보다 상당히 신뢰성이 있는 계측자료를 제공할 수 있을 것으로 판단된다. 그러나 계측의 관리가 잘 이루어지지 않는다면 계측자에 따라 많은 오차를 나타낼 수 있기 때문에 지속적인 계측관리가 필요하며 넓은 지역을 대상으로 작업이 곤란한 어려운 점이 있지만 사면의 위험도 평가를 통하여 계측지역을 선정할 수 있다.
- 연구 대상 지역인 Pasir 광산의 경우 관리해야할 사면의 영역이 매우 광범위하고, 해석에서 최대 3,000 mm 정도의 변위가 발생하기 때문에 앞에서 언급한 계측 장비의 정밀도는 예상 변위의 1/50 수준은 60 mm 정도가 되어 해상도와 장비운영 효율과 사면 안정화의 중요성이 높은 점을 고려할 때 SSR(slope stability radar system)의 적용을 제안할 수 있다.

사 사

본 연구는 한국지질자원연구원의 KIDECO 수탁사업인 'KIDECO 석탄광업소(인도네시아 Pasir)내 사면의 안정성 평가연구' 과제의 일환으로 수행되었습니다. 또한 현장 조사와 실험을 지원해주신 KIDECO 임직원 여러분에게도 감사드립니다.

참고문헌

- 선우춘, 류창하, 정용복, 최병희, 류동우, 김형목, 2008, 대규모 석탄 노천광의 연약사면 안정성 및 생산성 향상 연구, 한국지질자원연구원 연구보고서 NP2007-006-2008(2), 184p.
- 선우춘, 정소걸, 최성웅, 송원경, 박의섭, 2004, 탄전에서 암반 이완발파와 사면안정에 관한 연구, KIGAM Bulletin, 8, 15-27.
- 선우춘, 정용복, 최요순, 박형동, 2010, 대규모 노천광 연약암반 사면에서의 GPS 계측과 위험도평가에 의한 파괴예측, 대한지질공학회지, 20, 243-255.
- 이병주, 선우춘, 정소걸, 2001, 인도네시아 파시르탄전지역의 변형과정 및 사면내 불연속면 분석, KIGAM Bulletin, 5, 45-55.
- 정소걸, 선우춘, 한공창, 신희순, 박연준, 2000, 인도네시아 Pasir 탄전에서 노천채탄장 사면의 안정성 해석, 터널과 지하공간, 10, 430-440.
- 최성웅, 박의섭, 선우춘, 정소걸, 2004, 실측진동파형을 이용한 발파 동해석 기법에 관한 연구, 터널과 지하공간, 한국암반공학학회지, 14, 108-120.
- Amitrano, D. and Helmstetter, A., 2006, Brittle creep, damage, and time to failure in rocks, J. Geophys. Res., 111, B11201.
- Call, R.D. and Savely, J.P., 1990, Open pit rock mechanics, Surface Mining, Society for Mining, Metallurgy and Exploration, Inc, 860-882.
- Corominas, J., Moya, J., Lloret, A., Gili, J.A., Angeli, M.G., Pasuto, A., and Silvano, S., 2000, Measurement of landslide displacements using a wire extensometer, Eng. Geol., 55, 149-166.
- Eberhardt, E., 2007, The role of advanced numerical methods and geotechnical field measurements in understanding complex deep-seated rock slope failure mechanisms, Canadian Geotechnical Journal, 45, 484-510.
- Fell, R., Hung, O., Leroueil, S., and Reimer, W., 2000, Geotechnical engineering of the stability of natural slopes and cuts and fills in Soil, GeoEng2000, International Conference on Geotechnical and Geological Engineering, Melbourne, Australia, 2000, 104p.
- Fukuzono, T., 1985, A new method for predicting the failure time of a slope, Proceedings of 4th International Conference & Field Workshop on Landslides, 145-150.
- Gili, J.A., Corominas, J., and Rius, J., 2000, Using global positioning system techniques in landslide monitoring. Eng. Geol., 55, 167-192.
- Golder Associates, 2006, Technical Memorandum, 92p.
- Golder Associates, 2010, Report on pit wall stability Roto pit south Kideco coal mine south Kalimantan. 20p.
- Hoek, E. and Bray, J.W., 1981, Rock Slope Engineering, 3rd ed., Institute of Mining and Metallurgy, London, 358p.
- Jibson, R.W. and Keefer, D.K., 1989, Statistical analysis of factors affecting landslide distribution in the New Madrid seismic zone, Tennessee and Kentucky, Eng. Geol., 27, 509-542.
- Krauter, E., 1988, Applicability and usefulness of field measurements on unstable slopes, Proceedings of the 5th International Symposium on Landslides, Lausanne, 367-373.
- Lang, A.M., Swindells, C.F., and Higham, G.J., 1993, Survey based open pit wall monitoring- Experience based realitie, Geotechnical instrumentation and monitoring in open pit and underground mining, 303-309.
- Lang, A.M., Swindells, C.F., and Higham, G.J., 1994,

- The realities of survey based open pit wall monitoring, Aust. Mining, 86, 24-25.
- Lichti, D.D., Stewart, M., and Tsakiri, M., 2000, High density spatial data collection for monitoring of steep wall movements, Proceedings of the Ninth International Symposium on Mine Planning and Equipment Selection, 327-331.
- Little, M.J., 2006, Slope monitoring strategy at PPRust open pit operation, The South African Institute of Mining and Metallurgy, International Symposium on Stability of Rock Slopes in Open Pit Mining and Civil Engineering, 211-230.
- Petley, D.N., 2004, The evolution of slope failures: mechanisms of rupture propagation, Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 4, 147-152.
- Schmertmann, J.H., 1978, Use of the SPT to measure dynamic soil properties?-yes, but..!, Dynamic Geotechnical Testing, ASTM STP, 654, 341-355.
- Sullivan, T.D., 2007, Hydromechanical coupling and pit slope movements, Slope Stability 2007, Proceedings of 2007 International Symposium on Rock Slope Stability in Open Pit Mining and Civil Engineering, September, Perth, Australia, 3-43.
- Varnes, D.J., 1982, Time-deformation relations in creep to failure of earth materials, Proceedings of the Seventh Southeast Asian Geotechnical Conference, Hong Kong, 107-130.
- Vaziri, A., Moore, L., and Ali, H., 2010, Monitoring systems for warning impending failures in slopes and open pit mines, Natural Hazards, 55, 501-512.

선우춘

한국지질자원연구원 지구환경연구본부
305-305 대전시 유성구 과학로 92
Tel: 042-868-3235
Fax: 045-868-3416
E-mail : sunwoo@kigam.re.kr

류동우

한국지질자원연구원 지구환경연구본부
305-305 대전시 유성구 과학로 92
Tel: 042-868-3099
Fax: 045-868-3416
E-mail : dwryu@kigam.re.kr

정용복

한국지질자원연구원 지구환경연구본부
305-305 대전시 유성구 과학로 92
Tel: 042-868-3097
Fax: 045-868-3416
E-mail : ybjung@kigam.re.kr

박도현

한국지질자원연구원 지구환경연구본부
305-305 대전시 유성구 과학로 92
Tel: 042-868-3913
Fax: 045-868-3416
E-mail : parkdo@kigam.re.kr

원고접수일 : 2012년 3월 13일
수정본채택 : 2012년 4월 17일
게재확정일 : 2012년 4월 20일