

인도네시아 Pasir 탄전에서의 노천채탄장 사면의 안정성 해석

정소걸¹⁾ · 선우춘¹⁾ · 한공창¹⁾ · 신희순¹⁾ · 박연준²⁾

Stability Analysis of Open Pit Slopes in the Pasir Coal Field, Indonesia

So-Keul Chung , Choon Sunwoo, Kong-Chang Han, Hee-Soon Shin and Yeon-Jun Park

ABSTRACT A series of studies such as geological logging data analysis, detailed geological survey, rock mass evaluation, in-situ and laboratory tests, rock strength and mechanical properties of the rock were concerned. The stability of the slope were carried out in order to design the pit slope and individual benches using the stereographic projection analysis and numerical methods in Roto Pit of Pasir coal field. The bedding plane was one of the major discontinuities in the Roto Pit and the dip of which is about 60° in the northern part and 83° in the southern part. The dip of bedding becomes steeper from north to south. The plane and toppling failures are presented in many slopes. In laboratory test the average uniaxial compressive strength of mudstone was 9 MPa and that of weak sandstone was 10 MPa. In-situ test showed that the rocks of Roto north mining area are mostly weak enough to be classified in grade from R2(weak) to R3(medium strong weak) and the coal is classified in grades from R1(Very weak) to R2(Weak). The detailed stability analysis were carried out on 4 areas of Roto north(east, west, south and north), and 2 areas of Roto south(east and west). In this paper, the minimum factor of safety was set to 1.2 which is a general criterion for open pit mines. Using the stereographic projection analysis and the limit equilibrium method, slope angles were calculated as 30~36° for a factor of safety greater than 1.2. Then these results were re-evaluated by numerical analysis using FLAC. The final slope angles were determined by rational described above. A final slope of 34 degrees can guarantee the stability for the eastern part of the Roto north area, 33 degrees for the western part, 35 degrees for the northern part and 35 degrees for the southern part. For the Roto south area, 36 degrees was suggested for both sides of the pit. Once the pit slope is designed based on the stability analysis and the safety measures, the stability of slope should be checked periodically during the mining operations. Because the slope face will be exposed long time to the rain fall, a study such as preventive measures against weathering and erosion is highly recommended to be implemented.

Key words : Pasir coal field, slope stability, final slope angle, finite difference method, limit equilibrium method, stereographic projection analysis

초 록 본 논문에서는 인도네시아 Kalimantan섬에 위치하는 Pasir탄전의 노천채탄장을 대상으로 기존 지질자료의 분석 및 지질조사, 암반평가, 현지 및 실험실 시험을 통하여 관련 암석들에 대한 물성시험의 수행과 평사투영법과 수치해석에 의한 안정성해석 등을 근거로 채광장내의 전체사면 특히 Roto 북부 및 남부구역의 사면을 적절하게 설계할 수 있는 방안을 제시하고자 하였다. Roto 지역의 주요 불연속면들은 주로 층리로 구성되어 있으며, 층리의 경사는 북쪽의 약 60°에서 남쪽 지역은 80° 전후로 남으로 가면서 경사가 급해지며, 많은 사면에서 평면파괴와 전도파괴가 일어나고 있다. Roto 전 지역의 암석물성 시험결과는 이암은 평균 일축압축강도가 9 MPa 이고, 사암은 12 MPa로 이암보다는 다소 강도가 높다. 원장조사에 의한 암질을 국제암반역학회 분류기준에 따라 분류하면 Roto 북부지역의 암석은 R2~R3 등급에 속할 정도로 대부분 연약하였으며, 석탄층의 강도는 R1~R2 등급에 해당된다. Roto 북부의 4개 지역(동부, 서부, 남부 및 북부)과 Roto 남부의 2개 지역(동부 및 서부)의 사면에 대한 상세한 안정성 해석이 수행되었다. 본 연구에서는 최소 사면안전율을 1.2로 결정하여 평사투영법과 한계평형법의 해석을 통해 계산된 30~36°의 사면경사각에 대하여 다시 유한차분법(FLAC)에 의한 안정성 분석을 실시하였다. 최종 사면각으로 Roto 북부지역의 동부사면은 34°, 서부사면은 33°, 남부사면은 35°, 북부사면은 32°, 그리고 Roto 남부의 최종사면각은 동부 및 남부사면 모두 36°로 제안하였다. 본 노천채탄장의 최종사면과 같이 장기적인 유지를 필요로 하는 사면은 사면의 변형거동을 감시하기 위해 보다 체계적인 계측을 필요로 하며, 또한 사면이 많은 비에 노출되기 쉽기 때문에 사면의 풍화와 침식에 대한 대책연구도 수행되어야 한다.

핵심어 : Pasir 탄전, 사면안정성, 최종 사면각, 유한차분법, 한계평형법, 평사투영법

1)정희원, 한국자원연구소 탐사개발연구부, 책임연구원
2)정희원, 수원대학교 토목공학과 교수

접수일 : 2000년 7월 31일
심사 완료일 : 2000년 8월 14일

1. 서론

Pasir 탄전은 인도네시아의 Kalimantan섬의 동남부에 위치하고, 탄광의 총 조광면적은 50,400 ha에 이르며 (Fig. 1), 신제3기의 퇴적암류들이 유연탄층을 협재하는 지역으로 정확한 시대는 알 수 없지만 중기 내지 후기 마이오세로 알려져 있다. Pasir탄전 부근의 지질현황은 거의 남북방향으로 발달하는 Roto단층을 중심으로 동부와 서부가 퇴적암의 구성비가 상이한 층서를 보인다. 본 탄광에는 총 14매의 탄층이 부존하고 있으며, 석탄층을 중심으로 하는 직상·하반의 암종은 주로 이암층, 사암층, 또 다시 이암층 순으로 분포하며, 각 탄층과 탄층사이에 이암층과 사암층이 호층을 이루고 있다.

채탄은 Fig. 2와 같이 암석층사이에 협재되어 있는 경사 탄층을 포크레인으로 리핑하여 바로 트럭에 적재하여 저탄장으로 보내는 시스템으로 이루어진다. 따라서 석탄층이 완전히 채굴되면 채탄잔벽이 바로 최종사면으로 남는 경우가 많이 있다.

노천채광에서는 각 벤치 및 전체 사면의 높이와 사면의 각도를 결정하는 것이 무엇보다 중요하다. 본 연구는 기존 지질자료의 분석과 정밀지질조사, 암반평가, 현지 및 실험실 시험을 통한 암석의 물성규명과 안정성해석 등을 근거로 채광장내의 벤치 및 전체사면 특히 Roto 북부 및 남부지역 사면의 경사를 결정해줌으로써 현장 기술진이 채광작업에 적절한 사면과 벤치를 설계할 수 있는 방안을 제시하고자 하였다.

2. 탄전내 불연속면 및 암석물성 현황

2.1 불연속면의 분포현황

Roto 북부채탄장내 전체지역은 향사축을 기준으로 하여 편이상 동부지역과 서부지역으로 분할하였다(Fig. 3). Roto 북부채탄장에 분포하는 가장 중요한 불연속면들은 대부분 층리면들이며, 이 불연속면 그룹은 서부와 동부지역 모두에서 set 1에 속하는 그룹으로 향사의 양쪽 날개부에 해당한다. 그러나 서부의 일부지역은 지층의 역전으로(set 2) 동부의 set 1 그룹과 비슷한 경사방향을 나타내며 경사각은 낮게 나타나고 있다. 주요 불연속면 그룹의 방향성은 동부지역이 경사방향 및 경사각이 N279/71°이며, 서부지역은 N258°/64°를 나타내고 있다(Table 1).

탐탄을 위해 굴착한 트랜치내에 나타나는 층리와 절리 등의 불연속면 분포를 살펴보면 TR-93이 위치하는 Roto 북부의 경우와 TR-94가 위치하는 Roto 남부의 북부지역은 경사방향이 N261°와 N281°로 서로 비슷한 경향을 나타내지만 TR-95가 위치하는 Roto 남부의 남부지역은 지층의 경사방향이 N63°로 경사방향이 반대 방향으로 바뀌며, 이것은 앞에서 설명된 지질구조형태와 일치되는 것을 알 수 있다. 또한 불연속면의 경사는 북

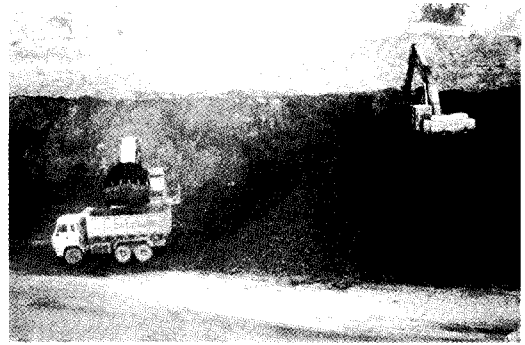


Fig. 2. Coal winning and loading.



Fig. 1. The Pasir Coal Mine located in East Kalimantan, Indonesia.



Fig. 3. Panoramic view of coal mine.

Table 1. Distribution of the major discontinuity sets in the Roto South and Roto North mining area.

mining area	group	dip direction (°)	dip (°)	
Roto North	East section	set 1	258	64
	West section	set 1	279	71
		set 2	93	35
	TR-93	set 1	261	61
Roto South	TR-94	set 1	281	81
	TR-95	set 1	63	83

부지역이 60° 이고 남부지역이 80° 전후로 남부지역으로 내려갈수록 불연속면들의 경사가 급해지고 있다.

2.2 암석의 물성

Roto 전 지역의 암석물성 시험결과는 이암은 일축압축강도가 4.2~18.6 MPa로서 평균 9.0 MPa이고, 인장강도가 0.7~1.6 MPa이다. 사암은 일축압축강도가 6.3~18.5 MPa 정도이고 평균치는 12 MPa로 이암보다는 다소 강도가 높다. 서부지역 사암의 인장강도는 0.9~2.7 MPa이고, 동부지역 사암의 인장강도는 0.6~10.4 MPa의 범위를 나타내지만 2.0 MPa 이내인 경우가 대부분이다.

사면안정성을 분석하는 데 중요한 지표가 되는 암반의 전단강도 및 내부마찰각은 이암이 Roto 북부지역에서는 1.6 MPa 및 53.9°이며, 서부지역에서는 2.9 MPa와 56.1°로 나타났다. 한편 사암에 대한 전단강도 및 내부마찰각은 북부지역은 2.1 MPa과 34.6°, 그리고 서부지역은 4.7 MPa과 36.2°의 값을 보이고 있다. Roto 남부에서 채취된 이암의 전단강도는 1.1~1.9 MPa이며, 내부마찰각은 41.2~47.8°이었다.

사암은 전체적으로 높은 투수성과 석회성분이 많이 포함되어 있고, 이암은 낮은 강도와 낮은 투수성을 가지며 slaking이 잘 일어나고, 석탄은 취성이 강하며 균열이 많

다(Davy, 1995).

Schmidt hammer test에 의한 강도측정결과를 국제암반역학회 분류기준에 따라 분류하면 Roto 북부지역의 암질은 R2(Weak rock)~R3(Medium strong weak) 등급에 속할 정도로 대부분 연약하였으며 석탄층의 강도는 R1(Very weak)~R2(Weak) 등급에 해당된다.

3. 채탄장 사면의 안정성 분석

이 지역의 사면붕괴의 주요 원인은 주로 사면의 기하학적인 형태, 지질적인 요소, 지하수 및 지표수 등에 의한 암석풍화의 영향으로 분류할 수 있다. 지질적인 요소는 암반에 존재하는 절리, 층리, 단층 등과 같은 불연속면들의 영향이 가장 크고, 또한 불연속면의 경우는 불연속면의 출현 빈도, 방향 및 경사 등이 중요한 요소가 되며, 불연속면 자체의 물리적 특성 또한 중요한 요소가 된다. 지하수에 의한 영향은 강우시 지표수가 암반내의 균열이나 공극으로 침투되어 암반의 약화나 지하수위의 상승에 의한 전단강도의 감소 및 지반하중의 증가 등으로 사면붕괴에 영향을 줄 수 있다. 또한 인위적인 요소로는 발파작업에 의한 발파진동이 사면에 영향을 줄 수 있지만, 본 채탄장에서는 발파작업이 없기 때문에 발파에 의한 영향은 없다.

일반적으로 사면안정성 문제에서 발생할 수 있는 사면암반의 파괴형태는 낙석, 토사형의 원호 전단파괴, 블록의 붕괴, 평면파괴, 썰기형 파괴와 전도파괴 등으로 분류할 수 있지만, 이 지역에서는 대부분 평면파괴와 썰기형 파괴가 대부분이다.

3.1 불연속면의 분포에 따른 사면 안정성

조사현장에서 관찰할 수 있는 불연속면 분포와 사면의 방향과 경사에 따른 사면안정성 즉 기하학적인 안정성은

평사투영법을 사용하여 분석하였다. 사면의 경사는 현재의 사면각도인 60° 또는 70°와 예상 경사인 40°에 대해 조사하였다.

채탄장내의 사면은 채탄작업을 위주로 탄층을 그대로 사면에 남긴 채로 사면을 유지하기 때문에 낮은 강도의 암석과 지하수 및 지표수의 영향으로 현재와 같은 경사각의 사면은 유지하기 매우 어려운 상황이다. Fig. 4는 Roto 북부의 동부와 서부지역에 위치하는 채탄사면의 예로서 같은 경향을 나타내는 불연속면일지라도 채탄장 사면에서 일어나는 사면의 붕괴형태는 E65S1사면이 속하는 동쪽사면에서는 평면파괴가 일어나고, WS74S1이 속하는 서쪽 사면에서는 전도파괴가 일어날 수 있는 것을 볼 수 있다.

Roto 북부에 위치하는 대부분의 채탄사면에서는 이와 같은 현상들이 일어나고 있다. 현재와 같은 경사를 갖는 사면의 경우 기하학적으로 파괴가 일어나는 것을 알 수 있지만, 경사를 40°로 낮추면 두 사면 모두에서 평면파괴나 전도파괴를 피할 수 있는 것을 볼 수 있다. 그렇지만 이 지역의 사면파괴는 이와 같은 기하학적인 파괴의 가능성보다는 다른 요인들에 의한 파괴가 일어나고 있는 것을 많이 관찰할 수 있다. 중요한 요인 중에 하나가 배수로의 결함 즉 사면위로 흐르는 배수처리의 부족과 우기와 건기의 반복으로 풍화가 빠르게 진행되는 것도 심각한 사면붕괴의 원인이 되고 있음을 볼 수 있다. 배수가 잘되지 않음으로써 나타나는 현상들 중에서는 사면 전체적으로 깊게 파인 자국들을 많이 관찰할 수 있다 (Fig. 5).

또한 이런 파진 홈을 따라 유출된 토사들이 허부의 소단 등에 쌓임으로써 또 다른 문제점을 발생시키고 있다. 특히 사암의 경우는 풍화가 심해 물에 의해 쉽게 모래성

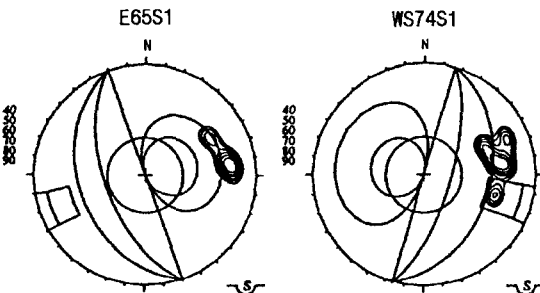


Fig. 4. Analysis of the stability for the slopes of Roto North mining area using stereo-graphic projection method. (left: for the east slope, right: for the west slope).



Fig. 5. Rill and gully erosion in the slope.

분들을 흘러보냄으로써 공동이 형성되고 그 다음에는 균열이 발생하여 붕괴로 이행되는 시발점이 되기도 한다. 실제적으로 현재 진행되고 있는 사면의 파괴들은 흙사면에서 발생하는 원형파괴가 허부에서 먼저 일어나고 나중에는 층리면을 따라 평면파괴 및 전도파괴가 일어나는 것으로 판단된다. 많은 지역에서 지하수나 지표수의 영향으로 산사태와 같은 형태의 사면붕괴인 debris flow를 관찰할 수 있다(Fig. 6). 또한 부분적으로 벤치높이를 높은 상태로 방치함으로써 사면붕괴가 사면전체에서 일어나고 있으며, 이러한 사면의 경우는 사면상부에서 사면붕괴의 전조를 나타내는 인장균열들을 관찰할 수 있다. 이러한 균열을 따라 빗물 등이 유입되면 붕괴가 촉진될 수 있기 때문에 이러한 인장균열이 발견되면 적절한 대책을 세워 사면의 붕괴를 막아야 한다.

Fig. 7은 Roto 북부의 동부와 서부지역의 불연속면들에 대해 채탄 완료후 유지사면의 방향을 남북으로 하고, 사면의 경사를 30°, 40° 그리고 50°로 유지했을 때 동쪽 사면과 서쪽 사면에서의 사면안정성의 해석결과를 나타낸



Fig. 6. Debris flow in the slope.

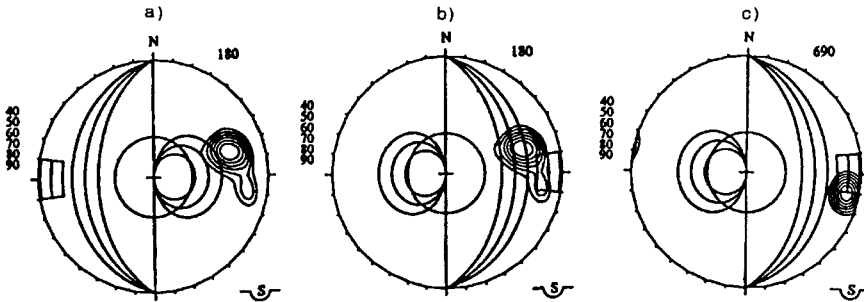


Fig. 7. Analysis of the stability for the slopes of Roto mining area using stereo-graphic projection method (a) for the east slope in Roto north, b) for the west slope in Roto north, c) for the west slope in Roto south).

다. 동쪽 사면에서는 불연속들에 의해 기하학적으로 파괴가 일어나지 않는 반면, 서쪽 사면에서는 불연속면에 의해 기하학적으로 평면 및 전도파괴가 모두 일어날 수 있지만 사면의 경사를 30°로 낮추면 평면파괴를 피할 수 있다.

Roto 북부지역의 남쪽에 위치하는 인 TR-93과 남부 지역에 위치하는 트랜치인 TR-94와 TR-95에서 관찰된 불연속면들에 대해 채탄완료후의(사면은 남북방향) 안정성은 동쪽사면의 경우는 Roto 북부지역의 남쪽부에서 약간의 평면파괴가 일어날 수 있지만, 경사를 40°이하로 낮추면 평면파괴를 피할 수 있다(Fig. 7a 및 b). Roto 남부지역의 동쪽 사면의 경우는 기하학적으로 층리에 의한 사면파괴는 일어나지 않는다. 서쪽사면의 경우는 Roto 북부지역의 남쪽부와 Roto 남부지역의 북쪽부에서 전도파괴가 예상되며, Roto 북부는 사면의 경사를 40°이하로 낮추면 전도파괴를 피할 수 있지만, Roto 남부의 북쪽부에서는 어떠한 경사의 사면에서도 층리에 의한 전도파괴를 피할 수 없다(Fig. 7c). 이 전도파괴를 피하는 방법은 사면의 방향을 북서쪽으로 20~30° 정도로 전환시키는 것이다. Roto 남부지역의 남쪽부는 동쪽 뿐만 아니라 서쪽사면에서도 기하학적으로 층리에 의한 사면파괴는 일어나지 않는 안정된 사면들이다.

3.2 사면의 안정성 평가

가. 개요

사면안정성평가를 위한 Roto 북부 및 남부에 대한 현지암반조사를 실시한 결과 Roto 북부는 Pit의 동부, 서부, 남부, 북부의 4개 지역, Roto 남부는 동부, 서부에 대한 세부적인 안정성 검토가 이루어져야 할 것으로 판단되었다. 본 지역의 대표 암석인 이암, 사암, 석탄층에 대한 실험실 시험결과를 바탕으로 암반평가를 실시하여

현지암반물성을 산정하여 안정성평가의 입력자료로 하였고, 수리시험결과 본 지역이 불투수층으로 판명되어 해석 시 지하수면은 고려하지 않았다. 해석은 한계평형법에 의하여 각 사면의 최종사면각 30~36°에 대해 안전율을 계산하여 안전율이 1.2 이상인 최종사면각을 결정하고, 그리고 결정된 사면각에 대해서는 유한차분법에 의한 전산해석을 실시하여 안정성 여부를 관찰하였다.

사면의 안정성분석에서 중요한 것은 최소 안전율을 갖는 활동면을 결정하는 것인데 한계평형법은 활동면을 따라 활동하려는 힘과 활동에 대한 저항력의 평형상태를 비교하여 안전율을 구하는 방법이다. 한계평형법에 의한 안정성 검토에서는 계산이 비교적 간단하고 충분한 정밀도가 있다고 많이 이용되고 있는 Bishop법으로 사면안정성을 분석하였다. 전산해석에 사용한 프로그램은 Galena를 사용하였다.

나. Roto 북부의 사면안정성

Roto 북부의 사면안전을 계산은 동부, 서부, 남부, 북부사면에 대하여 대표적인 지층구조를 그 대상으로 삼았으며, 구성암석은 대부분 이암, 사암, 석탄층으로 이루어져 있고 안정성 계산에 사용된 입력치는 Table 2와 같다.

각 사면에 대하여 Pit의 경계지역을 기준점으로 하여 최종사면각을 30에서 36°까지 변화시키면서 안전율을 계산하였고, 동부, 서부 및 북부사면의 최종사면 높이는 150 m, 남부사면의 높이는 105 m를 기준으로 하였으며, 각 벤치의 높이는 15 m, berm의 폭은 10 m로 하였다. 최종사면각을 결정하기 위한 최소안전율의 한계치는 노천채광에서 일반적으로 사용하고 있는 최소안전율인 1.2를 기준으로 삼았다.

Roto 북부지역에 대한 안전율의 계산결과를 Table 3과 같다. Fig. 8 및 9는 Roto북부의 사면들에 대한 계

Table 2. The input data of rock properties in analysis of limit equilibrium method.

rock type	unit weight (kN/m ³)	cohesion (kPa)	friction angle (°)
mudstone	22.0	38.2	30
sandstone	20.6	22.2	40
coal	14.5	19.4	26

산단면, 파괴면, 안전율을 표시한 예이다. 동부사면의 경우 사면각이 30°, 32°, 34°, 35°, 36°일 때 각각의 사면에 대한 안전율은 1.307, 1.237, 1.215, 1.199, 1.171이었으며, 서부사면에서의 안전율은 1.306~1.146, 북부사면의 안전율은 1.339~1.182, 남부사면은 1.357~1.189의 값을 나타내고 있다. 안전율이 1.2이상인 경우는 동부와 서부가 34° 이하일 때이고, 반면에 남부와 북부는 35° 이하일 때이다.

다. Roto 남부의 사면안정성

Roto 남부도 북부처럼 구성암석은 이암, 사암, 석탄층으로 이루어져 있으며 안정성 계산시의 입력치는 Table 2와 같다. 이 지역은 동부사면과 서부사면으로 구분하여 Pit 경계를 기준점으로 하여 최종사면각을 30°에서 36°까지 변화시키면서 안전율을 계산하였으며, 최종사면의 높이는 105 m를 기준으로 하였으며 각 벤치의 높이와 berm의 폭은 Roto 북부와 동일하게 각각 15 m와 10 m로 하였다.

Roto 남부지역에 대한 안전율의 계산결과는 Table 4와 같다. Fig. 10은 Roto 남부의 동부사면에 대한 계산 단면, 파괴면, 안전율을 표시한 예이며, 30°, 32°, 34°, 36° 일 때 각각의 사면에 대한 안전율은 1.358, 1.288, 1.229, 1.222이었으며, 서부사면의 안전율이 각각 1.479, 1.406, 1.345, 1.296이었다.

라. 최종사면각 제안

Table 3. The safety factor in Roto North mining area.

final slope angle (°)	safety factor			
	eastern slope	western slope	northern slope	southern slope
30	1.307	1.306	1.339	1.357
32	1.237	1.244	1.274	1.293
34	1.215	1.215	1.228	1.233
35	1.199	1.183	1.219	1.212
36	1.171	1.146	1.182	1.189

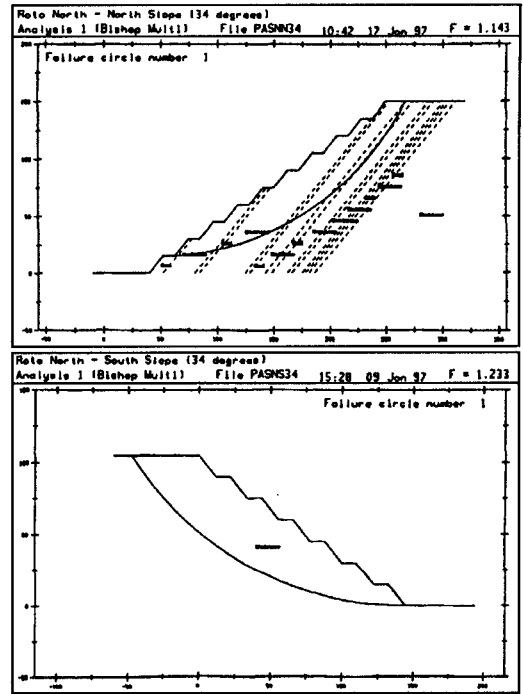


Fig. 8. The analysis results of northern and southern slopes in Roto North mining area (dip 34°).

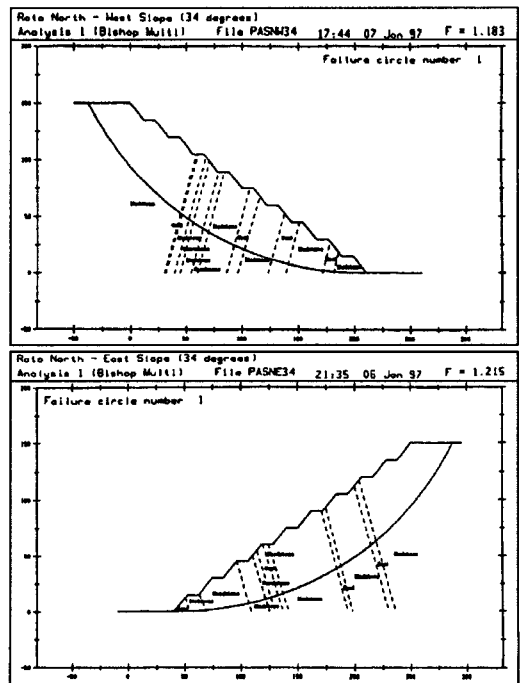


Fig. 9. The analysis results of eastern and western slope in Roto North mining area (dip 34°).

Table 4. The safety factor in Roto South mining area.

final slope angle (°)	safety factor	
	eastern slope	western slope
30	1.358	1.479
32	1.288	1.406
34	1.229	1.345
36	1.222	1.296

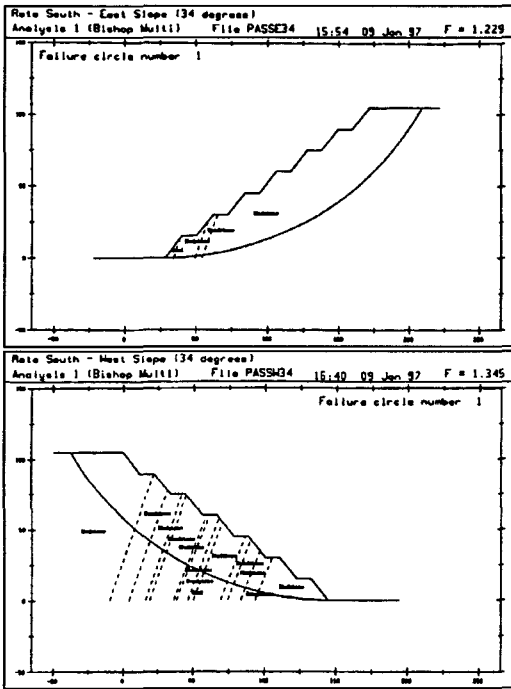


Fig. 10. The analysis results of eastern and western slope in Roto South mining area (dip 34°).

안전율은 활동면을 따라 활동하려는 힘과 활동에 대한 저항력의 평형상태를 비교하여 최소안전율을 구하며, 안전율이 1.0이면 활동력과 저항력이 평형을 이룬다고 본다. 일반적으로 노천채광장에서 적용하고 있는 안전율 1.2를 취하여 이 이상일 경우의 사면각을 최종사면각으로 제안하였다. 따라서 Roto 북부지역의 동부사면은 36°, 서부사면은 34°, 북부와 남부사면은 35°로 제안하고, Roto 남부의 최종사면각은 동부 및 서부사면 모두 36°로 제안한다.

탄층구조는 앞에서 언급된 것처럼 향사구조상의 날개부에 부존하는 여러 개의 탄층을 대상으로 채탄하는 것으로 종방향으로 채탄심도가 깊어지는 것이 아니라 습곡의 축방향으로 길게 채탄이 이루어지는 형태다. 따라서

채탄은 일반 지층을 먼저 그리고 탄층을 리핑함으로써 이루어지기 때문에 채탄중의 사면경사는 지층의 경사와 동일하게 유지된다. 여기서 제안되는 최종경사각은 습곡의 축에서 가장 먼 마지막 탄층을 채탄한 후의 최종사면에 대한 경사각으로 중심으로 심도가 깊어지는 채탄과 달리 경사각에 따른 경계성 문제는 심각하지 않다.

3.3 유한차분법에 의한 안정성분석

가. 해석방법

연구목적이 사면의 최대안정각도를 구하는 것이므로 한계평형법에 의해 결정된 사면각에 대하여 다시 유한차분법에 의한 안정성 분석을 실시하였다. 해석은 채광예정 지역 지반에 발생한 변화의 순서대로 ①초기평형단계, ②사면의 형성을 위한 개착단계의 2단계 해석을 수행하였다. 해석결과는 설계사면의 안정여부가 관심의 대상이므로 사면의 수직적 움직임을 나타내는 수직변위 분포도와 지반내 활동성 소성영역의 분포를 나타내는 파쇄영역 분포도를 결과로 표시하였다. 해석요소망의 좌우경계에서는 수평방향의 변위를 구속하였고, 요소망의 하부경계는 수평 및 수직방향 변위를 구속하였다. 현지 초기응력이 측정되지 않았기 때문에 수직방향의 응력은 암반지중에 의한 것으로 가정하였고 수평방향의 응력은 암암시 Poisson효과에 의해서만 고려하였다.

나. 해석에 사용된 입력자료

이 지역의 지층은 이암이 주종을 이루며 사암과 탄층이 협재한다. 사암의 강도와 변형성은 이암과 매우 유사하나 층상구조에 따른 전반적인 암반거동에 미칠 영향을 고려하여, 이암, 사암, 탄층으로 구분하여 모델링하였고, 해석에 사용된 현지암반의 물성자료는 Table 5와 같다. 사암과 이암 등에 대한 강도 실험은 수행하였으나, 이암 및 사암 내에 존재하는 층리 및 절리에 대한 별도의 시험은 수행하지 않았다. 이는 불연속면을 포함한 시료의 채취가 매우 어렵기도 하였거니와, 이들 불연속면에 의한 이방성보다는 주변 암석보다 강도 및 변형성이 현저히 낮은 탄층의 존재가 전반적인 사면의 변형 및 파괴거동에 더욱 지배적인 역할을 할 것이라고 판단되었기 때문이다.

다. 해석결과

한계평형법에 의해 최종사면각이 결정된 6개의 사면에 대해 안정성 분석을 실시하였다.

1) Roto 북부

(1) 동부사면(34°)

Table 5. The input data of rock mass characteristics in analysis.

rock type	unit weight (KN/m ³)	Bulk modulus (Pa)	Shear modulus (Pa)	friction angle (degree)	cohesion (Pa)	tensile strength (Pa)
mudstone	2,200	.28E9	.21E9	30	38.2E3	5.0E3
sandstone	2,060	.24E9	.16E9	40	22.2E3	2.5E3
coal	1,450	.28E9	.06E9	26	19.4E3	0

지층구조가 사면에 대해 반대로 경사져 있고, 4매의 탄층이 사면과 교차하고 있으며, 탄층의 강도는 주변지층의 강도보다 낮아서 사면의 절취로 인하여 탄층은 전단파쇄에 의한 소성상태에 있다. 이렇게 파쇄된 탄층면을 따라 미끄러짐 현상이 발생하여 탄층면을 따른 변위불연속면이 관찰된다. 최하단부에 부존하는 탄층의 영향으로 사면의 하단부에 비교적 넓은 범위의 전단파쇄영역이 발생하여 사면의 장기적인 안정성에는 문제가 될 것으로 판단되나 대규모 사면붕락의 발생가능성은 없을 것이다 (Fig. 11).

(2) 서부사면(33°)

지층구조가 사면에 대해 반대로 경사져 있고, 5매의 탄층이 사면과 하단부에서 교차하고 있으며, 동부사면과 마찬가지로 대부분의 탄층은 사면의 형성과 함께 소성상태에 있기 때문에 탄층면을 따라 미끄러짐이 발생하여 변위불연속면이 생기고 있다. 본 사면 역시 전반적으로 안정한 편이나 사면 하단부에 존재하는 2매의 탄층의 영향으로 사면의 하단부에 전단파쇄가 발생하여 사면의 장기적인 안정성에는 문제가 될 소지가 있다(Fig. 11).

(3) 북부사면(35° 및 32°)

지층의 경사가 사면과 같은 방향으로 경사져 있고, 35°로 사면을 형성한 경우 사면상단부의 탄층을 따라 대규모 파단면을 따라 원호파괴에 가까운 사면붕괴가 발생할 수 있기 때문에 35°의 사면형성은 안정상 문제가 있다(Fig 12). 따라서 사면경사를 32°로 낮출 경우 주 파단면은 탄층으로 후퇴하고 사면상에서는 파쇄도도 소멸되고 있음을 볼 수 있다(Fig 13). 그러나 탄층의 미끄러짐이 매우 우세하여 장기적인 안정이 보장될 지는 의문시된다. 사면형성후 사면의 관찰에 주의를 기울이고 움직임이 관찰될 경우, 특히 사면상부의 수평면이 탄층과 만나는 곳에서 인장균열 등의 발생이 증가하는 경우는 사면의 안정대책이 필요하다.

(4) 남부사면(35°)

본 사면은 이암층만이 존재한다. 수직변위가 상부 암체의 두께에 비례하여 단조롭게 증가하며, 불안정한 요인

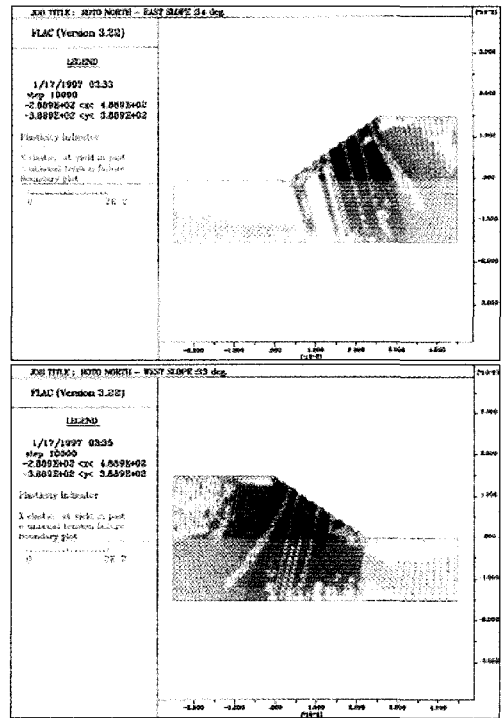


Fig. 11. The failure zone in the eastern(dip 34°, left) and western(dip 33°, right) slopes of Roto North mining area.

이 발견되지 않는다. 소성영역의 분포에서도 눈에 띄는 활동성 소성영역이 발견되지 않아 사면이 안정되게 유지될 것으로 판단된다.

2) Roto 남부

(1) 동부사면(36°)

본 사면에서 이암층 이외의 지층으로는 사면하단부에 사면과 같은 방향으로 경사진 1개의 사암층이 존재한다. 해석의 결과도 Roto 북부 남부사면의 경우와 같이 안정하다(Fig. 14).

(2) 서부사면(34°)

1개의 탄층과 5개의 사암층이 사면에 대해 반대로 경사져 있고 사면과 교차하고 있다. 사면하단부에 부존하

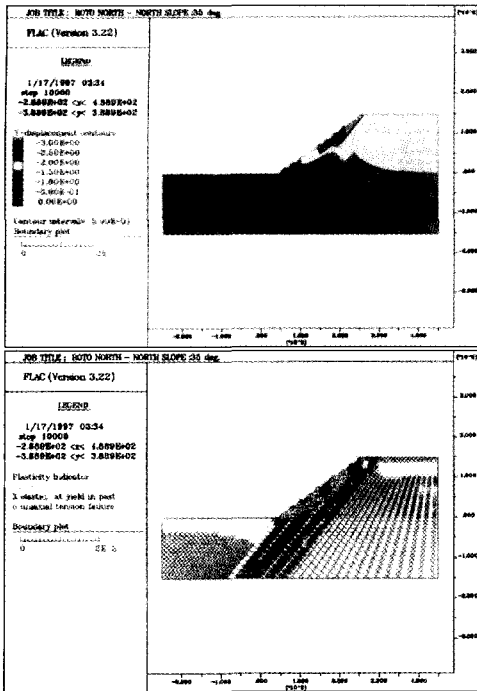


Fig. 12. The vertical displacement and failure zone in the northern slope of Roto North mining area (dip 35°).

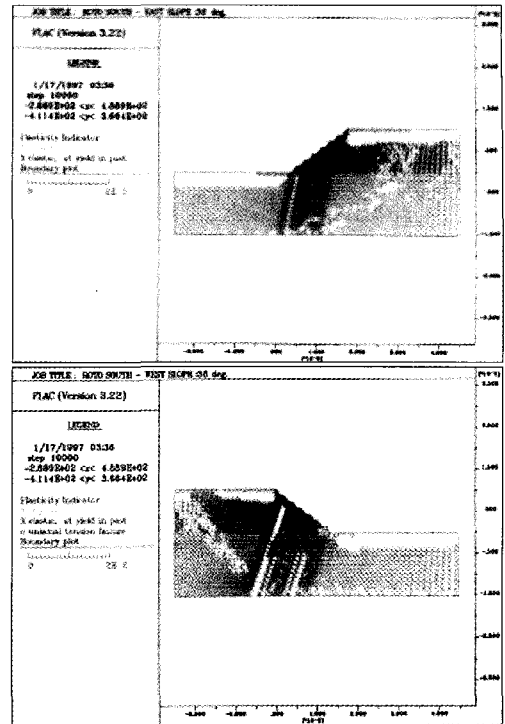


Fig. 14. The failure zone in the eastern(dip 36°, left) and western(dip 34°, right) slopes of Roto South mining area

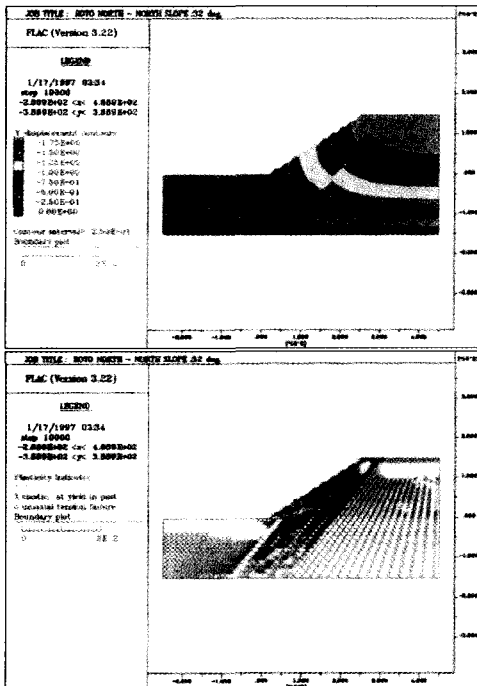


Fig. 13. The vertical displacement and failure zone in the northern slope of Roto North mining area (dip 32°).

는 탄층의 영향으로 1개의 변위 불연속면이 관찰되며, 사면의 최하단부 탄층부근에서 소규모의 소성영역이 관찰된다. 그러나 소성영역이 사면상부로 진전되지 않으므로 사면의 안정성에 영향을 주지 않을 것으로 판단된다 (Fig. 14).

4. 결 론

Pasir 탄전내의 Roto 북부 및 남부지역에서 불연속면의 조사 및 석탄층의 위치를 고려한 사면의 안정성 분석의 결과는 아래와 같다.

Roto 북부 채탄장 전체에 분포하는 가장 중요한 불연속면은 층리면이 주를 이루며, 동부지역의 경사방향 및 경사각이 N279°/71° 이고, 서부지역에서는 258°/64°를 보이고 있다. 탐탄을 위해 굴착한 트랜치내에 나타나는 불연속면들의 분포는 Roto 북부의 경우와 Roto 남부의 북부지역은 경사방향이 261°와 281°로 서로 비슷한 경향을 나타내지만, Roto 남부의 남부지역은 지층의 경사방향이 63°로 경사가 반대로 바뀌며, 경사는 북부지역이

60°이고 남부지역이 80° 전후로 남부지역으로 내려 갈수록 불연속면의 경사가 급해지는 것을 볼 수 있다.

채탄장내의 사면은 채탄작업을 위주로 탄층을 남긴 채로 사면을 유지하기 때문에 낮은 강도의 암석과 지하수 및 지표수의 영향으로 현재와 같은 경사각의 사면은 유지하기 매우 어려운 상황이다. Roto 북부의 서쪽사면에서는 불연속면에 의해 기하학적으로 평면 및 전도파괴가 모두 일어나지만 경사를 30°로 낮추면 평면파괴를 피할 수 있을 것이다. Roto 북부지역의 남쪽부 동쪽사면의 경우는 약간의 평면파괴가 관찰되지만 사면의 경사를 40° 이하로 낮추면 평면파괴를 피할 수 있을 것이다. 서쪽사면의 경우는 Roto 북부와 Roto남부의 북쪽지역에서 전도파괴가 예상된다. Roto 북부는 사면의 경사를 40°이하로 낮추면 전도파괴를 피할 수 있지만, Roto 남부의 북쪽지역에서는 어떠한 경사의 사면에서도 기하학적으로 층리에 의한 전도파괴를 피할 수 없다. 따라서 전도파괴를 피하기 위해서는 사면의 방향을 북서쪽으로 20~30° 정도 전환시켜야 한다. Roto 남부지역의 남쪽부는 동쪽뿐만 아니라 서쪽사면에서도 기하학적으로 층리에 의한 사면파괴가 일어나지 않는 안정된 사면이다.

수치해석에 의한 사면안정성평가는 Roto 북부는 Pit의 동부, 서부, 남부, 북부의 4개 지역, Roto 남부는 동부, 서부에 대해 이루어졌다. 본 연구에서는 최소안전율을 1.2로 정하여 이 이상의 안전율일 경우의 사면각을 최종사면각으로 제안하였다. 즉, Roto 북부지역의 동부사면은

34°, 서부사면은 33°, 북부 및 남부사면은 35°로 제안하였고, 그리고 Roto 남부의 최종사면각은 동부 및 남부사면 모두 36°를 제안한다. 이 결과에 대한 유한차분법에 의한 안정성 해석결과를 살펴보면 Roto 북부의 북부사면의 사면경사각 35°는 안정성에 큰 문제가 있기 때문에 32°로 결정하였다.

사면에 대한 안정성평가와 안전대책 수립을 통해 암반 사면의 설계와 시공을 실시한 후 사면 유지기간 동안 주기적으로 안전진단이 요구된다. Pasir 탄전 노천채광장의 최종사면과 같이 장기적으로 유지를 필요로 하는 구조물에 대해 사면의 변형거동을 감시하기 위해서는 보다 체계적인 계측을 필요로 하며, 사면의 시공시에 계측계획이 반드시 수립되어야 할 것이다. 또한 사면이 열대지방의 많은 비에 노출되기 쉽기 때문에 사면의 풍화와 침식에 대한 대책연구도 수행되어야 한다.

참 고 문 헌

1. Davy John Brown PTY LTD, 1995, Pasir project- Technical operations review and expansion studies, Geotechnical Report No.1.
2. Letouzey, J., P. Werner and A. Marty, 1990, Fault reactivation and structural inversion. Backarc and intraplate compressive deformations. Example of the eastern Sunda shelf (Indonesia). Tectonophysics, 183, 341-362.

정 소 곽



1975년 서울대학교 공과대학 자원
공학과 공학사
1982년 Ecole des Mines de Nancy
(프랑스), DEA
1984년 Orleans 대학교(프랑스), 공
학박사

Tel : 042-868-3231

E-mail : skchung@kigam.re.kr

현재 한국자원연구소 탐사개발연구부 부장

선 우 촌



1978년 서울대학교 공과대학 자원공
학과, 공학사
1984년 서울대학교 대학원 자원공학
과, 공학석사
1988년 프랑스 파리 VI대학교, 이학
박사

Tel : 042-868-3235

E-mail : sunwoo@kigam.re.kr

현재 한국자원연구소 탐사개발연구부 책임연구원

한 공 창



1976년 서울대학교 공과대학 자원공
학과, 공학사
1989년 Ecole des Mines de Paris,
지질공학과, 공학석사
1993년 Ecole des Mines de Paris,
지질공학과, 공학박사

Tel : 042-868-3241

E-mail : hankc@kigam.re.kr

현재 한국자원연구소 탐사개발연구부, 책임연구원

신 희 순



1976년 서울대학교 공과대학 자원공
학과, 공학사
1978년 서울대학교 대학원 자원공학
과, 공학석사
1986년 서울대학교 대학원 자원공학
과, 공학박사
1988년 영국 Newcastle대학, 지반
공학과 객원연구원

Tel : 042-868-3240

E-mail : shinhs@kigam.re.kr

현재 한국자원연구소 탐사개발연구부 책임연구원

박 연 준



1981년 서울대학교 공과대학 자원공
학과, 공학사
1983년 서울대학교 대학원 자원공학
과, 공학석사
1992년 미국 Minnesota 대학교 대
학원 토목공학과, 공학박사

Tel : 031-250-6256

E-mail : yjpark@mail.suwon.ac.kr

현재 수원대학교 공과대학 토목공학과 교수