

노천석탄광산내 대규모 암반사면 안정성 해석

정용복, 선우춘 (한국지질자원연구원)

임동규, 이종범 (KIDECO)

1. 서론

인도네시아 칼리만탄섬에 위치한 파시르탄전(그림 1)은 KIDECO에서 운영하는 유연탄 노천광산으로서 1982년에 KIDECO가 설립되어 현재에 이르고 있다. 전체탄광 면적은 504km²이며 약 11억톤의 유연탄이 매장되어 있는 것으로 추정된다. 1982년 이후 10년 이상의 탐사 및 개발과정을 거쳐 1993년부터 화력발전용 유연탄을 생산해오고 있으며 현재 연간 생산량은 1,800만톤 정도이다. 이곳에서 생산되는 유연탄은 열량은 상대적으로 약간 적지만 유황과 재(ash) 성분이 매우 적다는 큰 장점을 가지고 있다.

파시르 광산은 노천채광방식으로 운영되기 때문에 채광규모의 확대 및 심부화(15m/year)에 따라 대규모의 사면이 형성된다. 앞으로 Roto남부지역부터는 Haul back system의 적용을 계획하고 있어 심도증가율이 더욱 증가할 것으로 예상되기 때문에 이에 따른 사면의 안정성에 대한 해석이 필요하다. 더구나 사면을 형성하는 지층은 미고결의 이암 및 사암으로서 주기적인 강우, 주변 지하수계 및 발파진동의 영향으로 인하여 각 소단을 따라 소규모의 사면 붕괴가 발생하고 있다. 이러한 붕괴가 소규모로 발생하더라도 운반로를 막을 경우 작업 공정에 지장을 받으며 추후 대규모 사면붕괴로 이어질 가능성도 있어서 경제성과 안전을 고려한 최적 사면구배를 결정하는 것이 무엇보다도 중요한 실정이다.

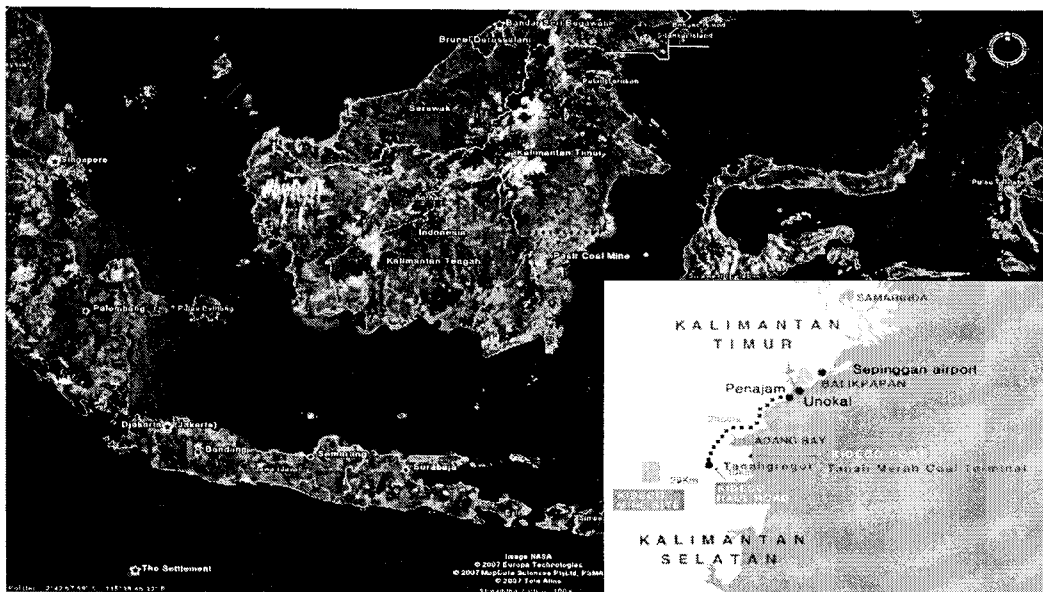


그림 1 파시르 광산 위치

본 연구에서는 이러한 대규모 사면 안정에 영향을 주는 각 요인들을 고려하여 실내실험 및 기 파괴된 사면 역해석을 통하여 적정 강도정수를 파악하고자 하였으며 이를 근거로 하여 신규로 굴착하고자하는 대규모 사면의 안정성을 한계평형법을 사용하여 평가하였다.

2. 현장 개요

2.1 현장소개

파시르 탄광은 크게 북부, 중부 및 남부 구역으로 구분되며 남부는 그림 3처럼 A, B, C(1~4), D(1~2), E(1~2) 그리고 F구역으로 구분된다. 암종의 구성은 대략적으로 이암이 80%, 사암이 15% 그리고 석탄이 5%정도로 구성되어 있다. 각 암종들의 강도는 50MPa 이하로 매우 낮다. 탄층은 향사구조의 한 날개부에 속하며, 탄층의 경사는 75°에서 수직까지 지역으로 변하고 있으며, 15개의 다른 탄층이 서로 평행하게 부존하며 탄폭은 1m에서 25m까지 다양하다.

현재 파시르 광산은 노천채광법의 하나인 Strip 채탄법으로 개발되고 있다. 이 채탄법은 간단한 채탄 시스템으로 탄층사이에 부존하는 이암이나 사암에 천공을 실시하고 발파에 의해 암반을 이완시킨 후에 폐석은 적재장비인 shovel/backhoe를 이용하여 100-150톤 트럭에 의해 운반하여 폐석처리장으로 운반처리된다(그림 3(a)). 이와 같이 폐석의 암반을 제거한 후에는 backhoe를 이용하여 채탄을 실시하여 트럭에 적재시킴으로써 채탄이 이루어진다(그림 3(b)). 앞으로 채탄심도가 깊어짐에 따라 사면의 안정성 문제 때문에 제안되고 있는 채탄계획은 Strip 채탄법과 같은 채탄법형태를 갖는 Haul Back 채탄방법의 도입을 예정하고 있다. 이 채탄법은 현재의 채탄작업사면 뒷부분에 놓이는 채굴적 공간에 바로 폐석을 쌓는 것으로 심부의 탄을 포기하는 것을 의미한다. 이러한 작업과정은 폐석처리비용이 감소하게 되고 사면의 유지기간을 단축시킴으로써 사면의 안전성을 꾀하기 위한 것이다.

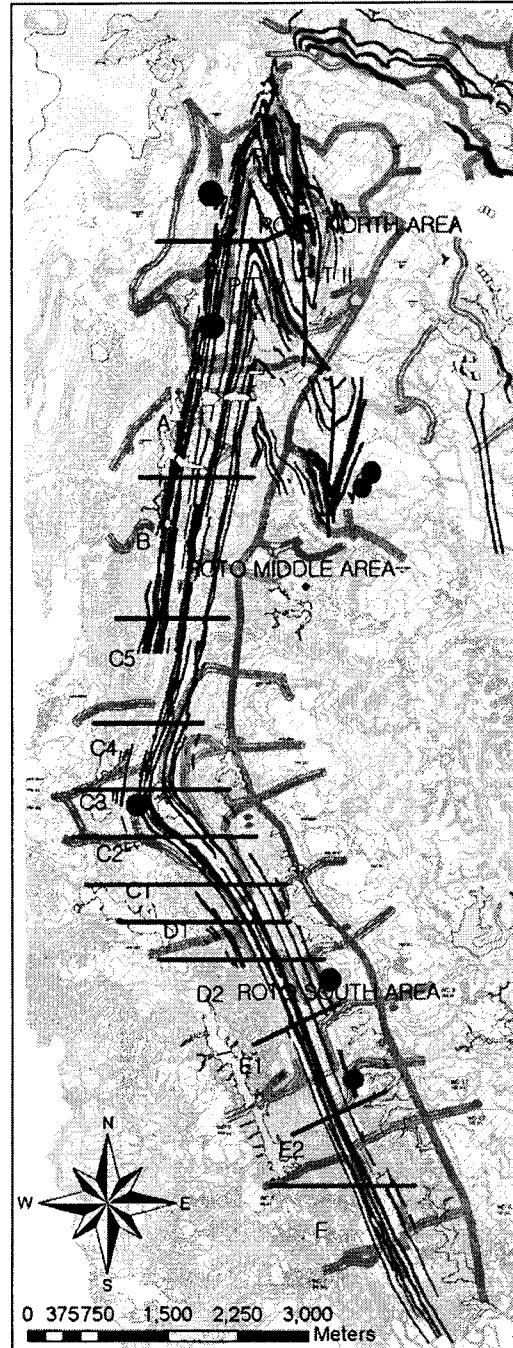
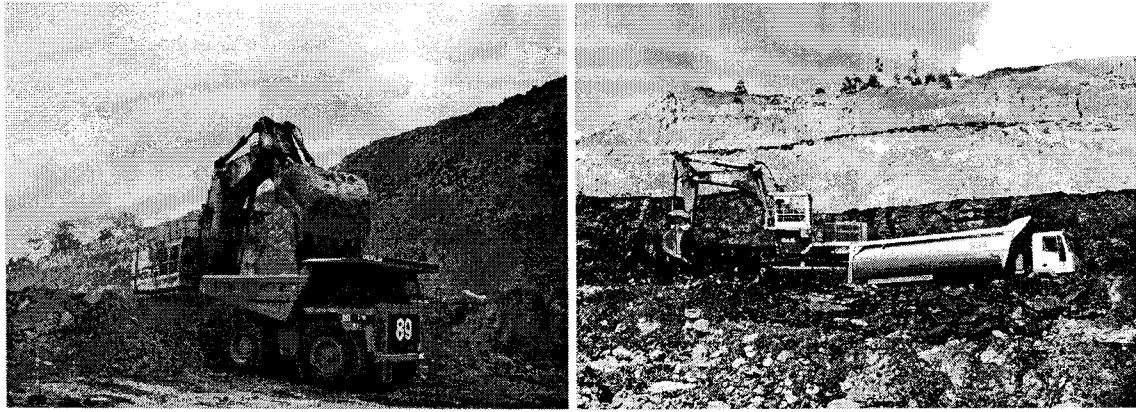


그림 2. 파시르 탄전 전도



(a) 발파 후 폐석 적재, (b) 폐석 제거 후 석탄 적재

2.2 사면 현황

현재 사면의 구배는 8m 높이의 소단과 6m의 berm 및 운반로의 경우 35m폭으로, 전체 사면구배는 27°로 운영되고 있으나 채굴심도가 깊어짐에 따라 그림 4와 같은 형태의 48m 높이의 대규모 소단으로 굴착하는 것을 계획하고 있으나 아직 이에 대한 안정성 평가는 진행되지 않은 상태이다.

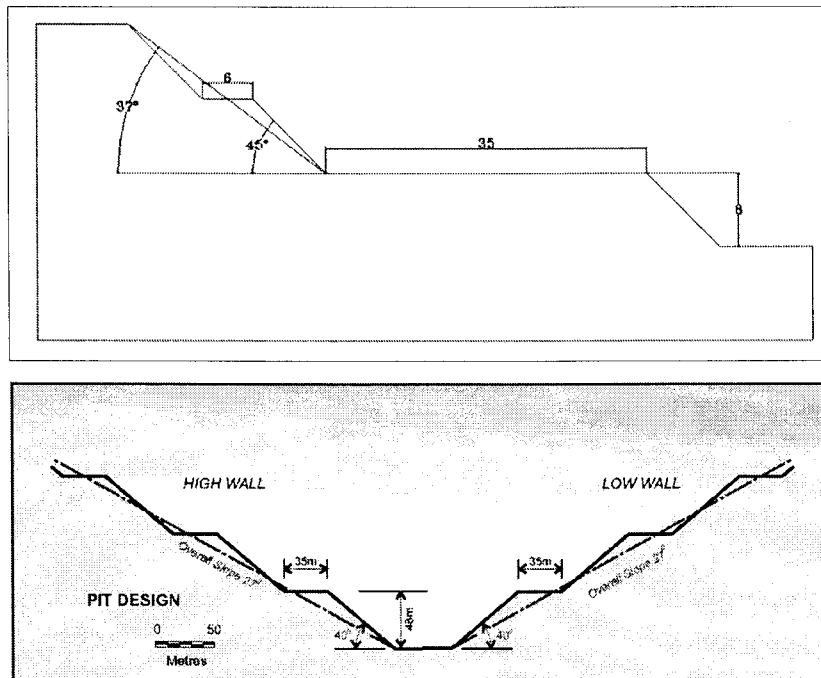


그림 4. 현재 및 계획 사면 구배

먼저 기존의 사면 현황을 소개하면 다음과 같다. 파시르광산에 형성된 사면의 경우 구성 암석이 약하며 지역 특성상 주기적인 강우와 사면 선단 주변에 형성된 많은 못(pond), 주기

적인 발파 등 사면 안정성에 불리한 여건들이 다수 존재하고 있다. 이 광산에서 발생하는 사면 파괴형태는 사면파괴에서 볼 수 있는 모든 형태의 사면파괴가 관찰되고 있다. 사면 파괴 양상은 많은 토사사면에서 나타나는 원호파괴와 평면파괴, 전도파괴, 지표수 세굴에 의한 침식 등이 흔하게 나타난다. 또한 사면의 전체적인 변형에 의해 사면 상부에 인장균열들이 발생하고 있으며 상단 배수로에서도 인장균열들이 관찰되기도 한다. 이러한 인장균열들은 지층의 주향방향으로 발달되어 있으며 지표수가 이러한 인장균열을 통해 쉽게 침투하여 사면의 불안정성을 가속화시키고 있다. 또한 채탄장 저수조나 사면 상부의 저수조나 침전조 등이 지하수 공급원으로 작용하여 사면의 안정성에 영향을 끼치는 것으로 판단된다.

사면 저부에서 수시로 발생하는 발파진동도 사면에 영향을 미치고 있는 것으로 나타났으나 이는 별도의 연구를 통해 접근하고 있으므로 본 연구에서는 자세한 내용을 제외하였다 (최병희 외, 2006).

2.3 파괴 사면

소단 규모의 소규모 파괴 이외에 중규모 이상의 사면 파괴가 2006년 10월 및 2007년 5월과 6월에 각각 C4서측, C1C2 서측 및 E2 동측에서 발생하였으며 본 연구에서는 이에 대하여 역해석을 수행하였다.

먼저 2006년 10월에 파괴된 C4 서측사면의 경우 주 운반로 하부 사면이며 강우량이 적은 건기시 파괴가 발생하였다 (그림 5). 다만 사면 하부에서 누수가 발생하는 것을 관찰하였고 상부 운반로에 천공된 발파공에서도 지하수가 확인되어 지하수면이 지표 근처에 형성된 것을 알 수 있다. 또한 이 부분은 굴곡부 하단에 속하여 인장균열이 다수 발생했을 가능성이 높은 지역이다. 파괴 규모는 2~3개 소단 규모로 일어났다. 이 지역은 이 전에도 유사한 파괴가 발생한 것으로 알려져 있다.

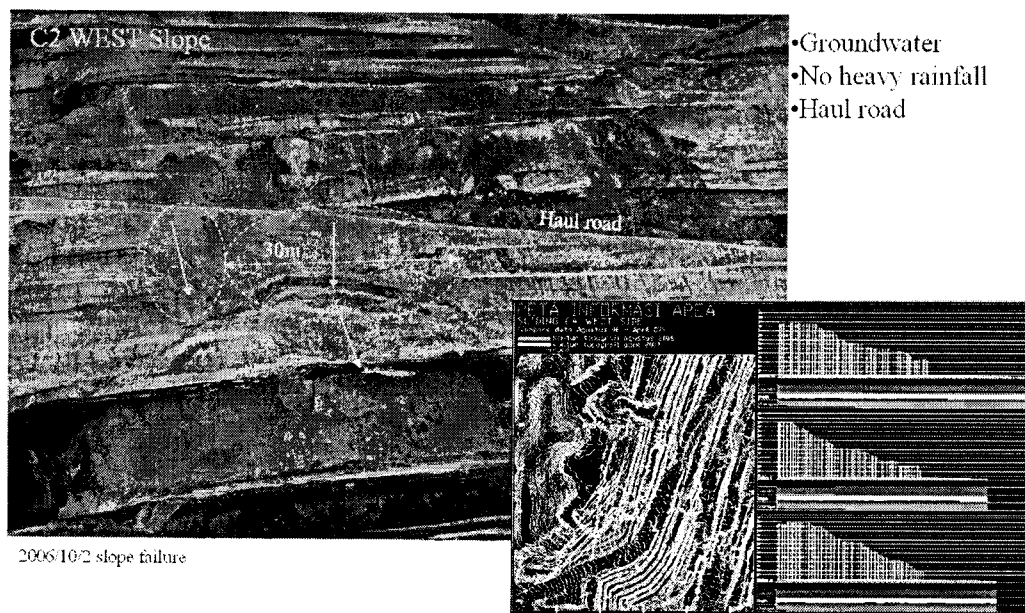


그림 5. C1C2 서측 파괴사면 현황 (2006년 10월 2일 파괴 발생)

2007년 5월에 파괴된 C1C2 서측 사면의 경우 그림 6과 같이 높이 70m, 폭 300m 규모로 붕괴되었으며 월 누적강우량 580mm가 되는 우기시에 파괴가 발생하였다. 또한 2006년 11월부터 2007년 4월까지 사면 하부에서 약 60m 이상 굴착이 급격히 진행되어 파괴가 발생한 것으로 추정된다.

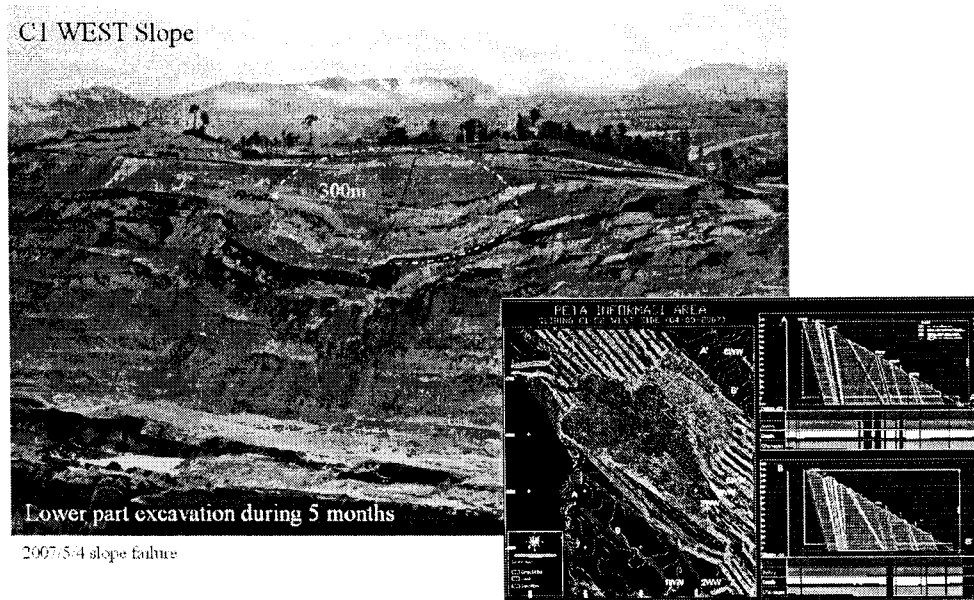


그림 6. C1C2 서측 파괴사면 현황 (2007년 5월 4일 파괴 발생)

E2 동측사면은 지하수위계 및 변위 측정을 위해 2007년 6월에 계측기를 설치한 단면으로서 계측기 설치 후 하부 굴착을 진행하자 2007년 6월에 파괴가 발생하였다. 역시 2~3개 소단 규모로 발생하였으며 느슨한 사암층에서 미끄러짐이 발생하였다. E2 사면의 경우 매우 저수조가 존재하여 사면의 지하수 공급원으로 작용하였다.



그림 7. Roto 남부 E2 동측사면 파괴 현황

3. 역해석 및 모델링

본 연구와 관련하여 인도네시아 반둥대학교의 암석역학 실험실에 의뢰하여 역학실험을 수행하였으나 비교적 양호한 시료를 사용하여 실험을 수행하였기 때문에 대부분 실험실 실험결과를 사용할시 안전율을 과대평가하는 것으로 나타났다. 이 중 전단실험만이 편차가 적고 결과가 다른 실험자료에 비하여 현장과 비교적 잘 부합하는 것으로 나타나 역해석의 초기값으로 사용하였다(표 1)

또한 역해석은 시간과 사용의 편의성 측면에서 한계평형법으로 선택하였으며 해석 소프트웨어는 Rocscience사의 Slide 5.0을 사용하였다 (Rocscience, 2003). 한계평형해석법은 활동면을 따라 파괴가 일어나려는 순간에 있는 토체의 안정성을 해석하는 방법으로 문제를 단순화하기 위한 가정을 설정하여 간단한 정력학 이론으로 산정한 안전율이 허용안정율 이상이 되면 사면은 파괴에 대해 안전하고, 변형은 허용치 이내인 것으로 판단할 수 있다 (Abramson et al. 2002).

일반적으로 토사 및 풍화암의 절개 사면, 쌓기 사면의 안정해석시 한계평형해석 방법이 유효하다. 한계평형 이론에 의한 사면 안정해석방법은 여러 가지가 있으나 그 정확성은 설계정수와 사면의 기하학적 조건의 정확도 및 해석방법 고유의 정밀도에 의해 좌우된다.

표 1 암석역학 실험 결과

Rock type	Condition	2007 삼축실험		2006 삼축실험		2006 전단실험	
		c (MPa)	ϕ (°)	c (MPa)	ϕ (°)	c (MPa)	ϕ (°)
Sandstone	Dry	6.32	43.85	2.44	36.10	0.13	32.77
	Wet	4.99	42.62	4.19	41.92	0.07*	15.22*
Mudstone	Dry	0.10	37.30	1.78	26.56	0.11	23.34
	Wet	0.01	22.40	2.83	22.52	0.06*	14.18*
Coal	Dry	14.39	22.93	0.77	49.50	0.23	37.68
	Wet	5.15	30.83	0.66	43.11	0.102*	20.9*

* Residual value

3.1 C4 서측사면

C4 서측사면의 경우 하부 굴착이 일부 진행되었으며 지하수가 존재하는 것으로 나타나 이를 고려하여 해석을 수행하였다. 먼저 정상상태 지하수 분포를 유한요소해석을 통해 구하였고 발파진동의 영향을 고려하기 위해 수평방향으로 자중x0.1의 하중이 가해지는 것으로 가정하였다. 또한, 이암과 사암의 경우, Duncan & Wright (2005)를 참조하여 잔류강도를 사용하였으며 석탄층은 최대전단강도를 사용하였다.

해석방법은 GLE, Bishop, Janbu 및 미국 공병대 제안법을 적용하였으며 이 중 기존의 파괴 형태와 가장 유사한 한계파괴면을 추정된 것은 미국 공병대의 사면안전계산법으로서 기타의 방법들은 사면의 파괴심도를 매우 깊게 추정하였다. 이러한 점을 고려하여 구한 C4 사면의 안전율은 1.033으로 현재 사용한 강도정수가 지하수 및 발파진동을 고려한 C4 파괴현상을 잘 반영하는 것임을 알 수 있다(그림 8).

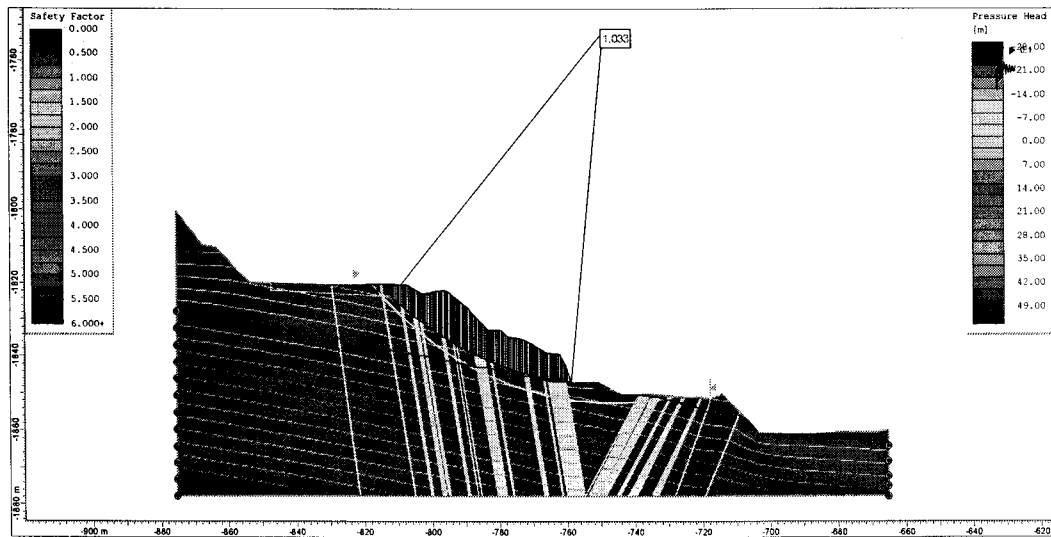


그림 8. C4 서측 사면 역해석 결과 (Corp. of Eng. #2)

3.2 C1C2 서측사면

C1C2 서측사면의 경우 C4와 동일한 해석을 수행할 경우 실제 파괴면과 달리 사면 전체를 한계파괴면으로 추정했을 경우의 안전율이 가장 낮은 것으로 나타났다. C1C2사면의 경우 배후 저수조는 없으나 월 누적강우량 580mm가 되는 우기에 파괴되었으므로 상부 지층이 포화되었을 것으로 가정하여 각 지층의 단위중량을 포화단위중량으로 적용하였다. 이 경우에도 미국 공병대의 안전율 계산법이 실제 파괴면과 가장 유사하게 추정하였으나 실제보다는 더 큰 규모의 한계파괴면을 추정하였다. 안전율은 0.954로 나타났으며 현재까지의 지반 정보내에서는 합리적으로 추정된 결과라고 판단된다. 좀 더 정확한 안정성 평가를 위해서는 심도에 따른 각 암석의 강도 증가를 고려해야만 정확한 파괴면 및 안전율을 추정할 수 있을 것으로 사료된다.

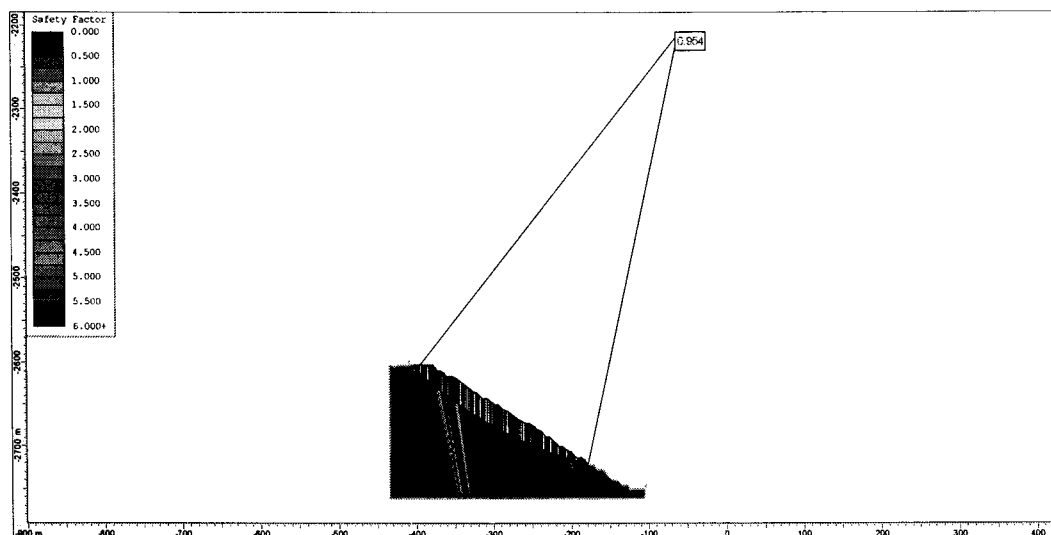


그림 9. C1C2 서측사면 역해석 결과 (Corp. of Eng. #2)

3.3 E2 동측사면

E2 동측사면은 C4사면과 유사한 조건에서 파괴되었으며 상부 운반로만 없는 상태이다. E2 사면 역시 지하수와 발파진동을 고려하여 역해석을 수행하였으며 미국 공병단의 안전율 계산법에 의해 1.04의 안전율을 얻었다.

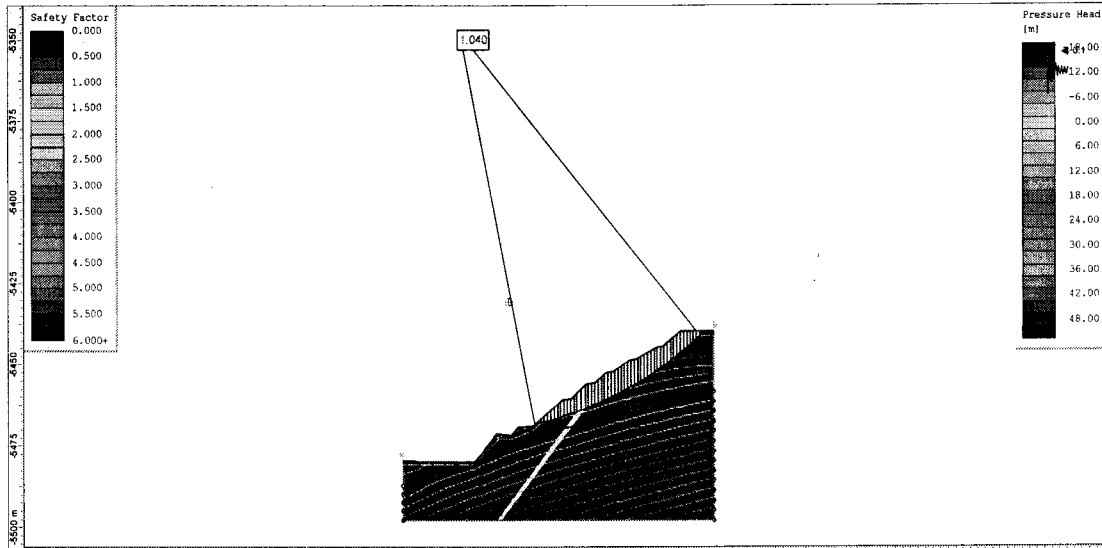


그림 10. E2 동측사면 역해석 결과 (Corp. of Eng. #2)

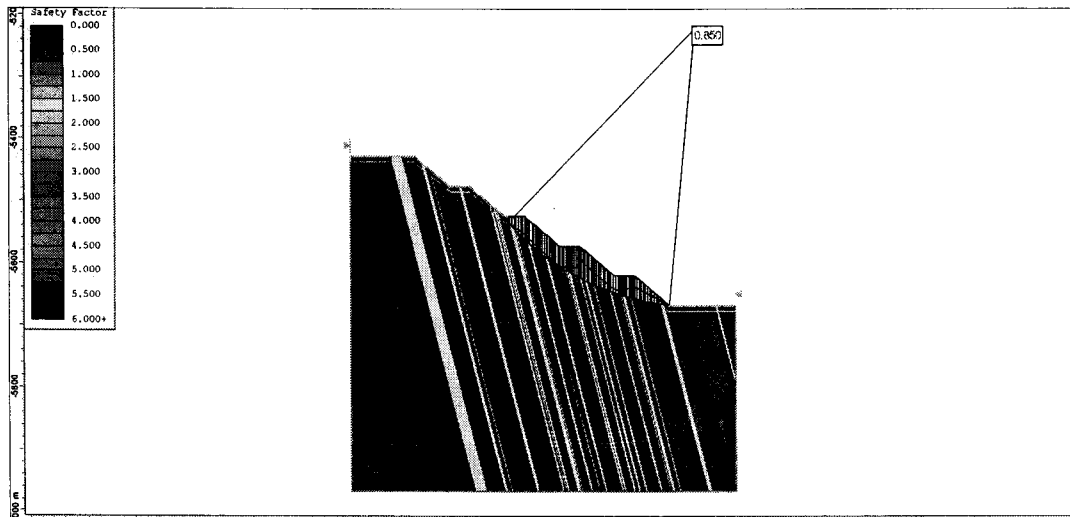
4. 신규굴착사면안정성 평가

이상의 역해석 결과를 근거로 하여 Haul back 굴착 예정인 E 지역의 안정성을 평가하였다. 약 240m의 사면고가 형성되기 때문에 C1C2의 경우가 유사하게 적용될 수 있을 것으로 판단하여 C1C2에서 구한 값을 사용하였다.

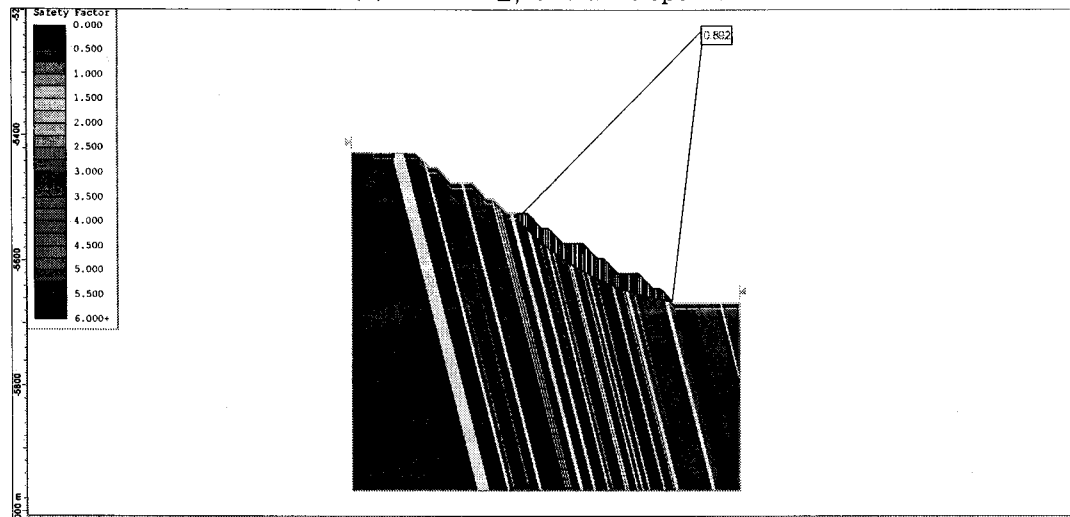
신규굴착사면은 평균구배 27°로 계획하고 있으며 소단 높이를 48m, 24m, 16m인 경우에 대하여 고려하고 있으며 각각의 경우에 대하여 안전율을 평가하였다.

각각 해석을 수행한 결과 48m, 24m, 16m 모두 사면 하단부 3개 소단에 걸친 한계파괴면을 추정하였으며 안전율을 각각 0.850, 0.892 및 0.897로 평가하여 대규모 소단보다는 소규모 소단으로 굴착하는 것이 상대적으로 유리한 것으로 나타났다 (그림 11). 또한 안전율이 C1C4에서 구한 0.954에 비하여 0.1에서 0.06 정도 낮게 나타나 C1C4와 유사한 거동을 보일 것으로 판단된다.

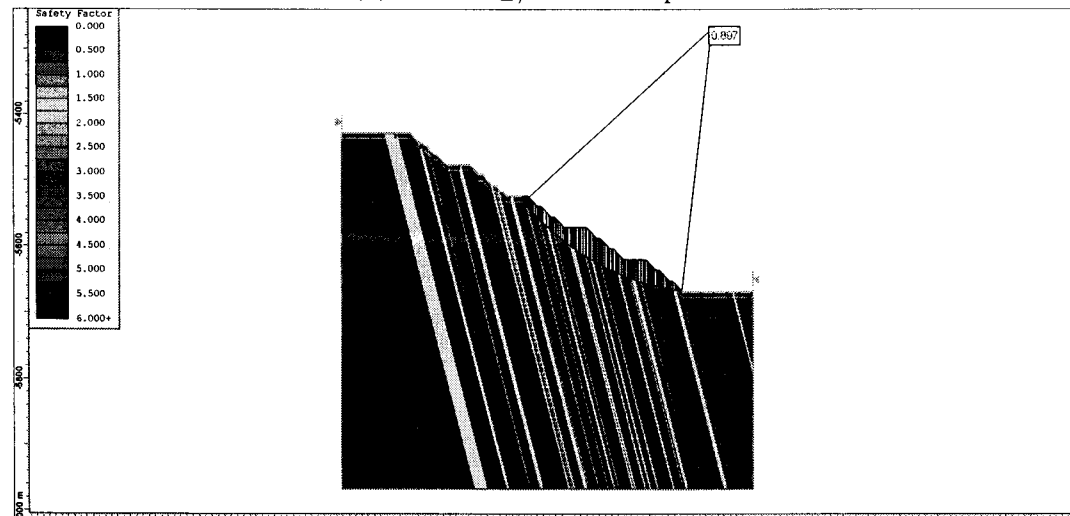
또한 현재 발파진동을 저감하기 위한 시험발파가 수행 중에 있으며 상부 저수조 제거 및 하부 배수공 설치와 같은 사면 안정화를 제한한 상태이므로 이러한 방법들이 적용된다면 안전율은 증가할 것으로 판단된다. 또한 Haul back 시스템에서는 폐석으로 다시 성토를 하게 되므로 실제안전율은 약간 증가할 것으로 판단된다. 다만, 좀 더 정확한 안전율 평가를 위해서는 이암의 심도 증가에 따른 강도 변화, 사암층별 강도특성 차이 및 정확한 지층 층서 단면 확보가 선행되어야 할 것으로 판단된다.



(a) 48m 소단, overall slope 27°



(b) 24m 소단, overall slope 27°



(c) 16m 소단, overall slope 27°

그림 11. 신규굴착 사면 안전을 평가 결과

5. 결론

연암으로 구성된 대규모 노천사면의 구배는 안정성 및 경제성 제한조건을 만족하는 최적 구배를 확보해야 하며 이는 여러 가지 방법으로 수행될 수 있다. 본 연구에서는 한계평형법을 사용하여 기존에 파괴된 3개 지역 사면의 역해석을 통해 강도정수를 확보하고 이를 통해 신규 굴착사면의 안전율을 평가하였다. 신규 굴착사면은 심도가 300m까지도 증가하여 현재의 사면에 비하여 대규모로 형성되기 때문에 보다 더 신뢰성을 확보한 안전율 평가가 요구된다. 역해석 결과를 사용하여 신규굴착사면에 대하여 안전율을 평가한 결과 기존 파괴사면에서 구한 안전율보다 0.1에서 0.06정도 낮은 것으로 나타나 현재 사면의 거동과 유사한 결과를 보일 것으로 판단된다. 다만 사면 안정을 저해하는 사면상부의 저수조 제거, 하부 배수공을 사용한 지하수위 하강, 발파진동 저감 및 법면 다짐, haul back에 의한 재 성토 등이 적용된다면 안전율은 증가할 것으로 판단된다.

다만 현재보다 더 신뢰성을 확보한 안전율 평가를 위해서는 심도 및 포화도에 따른 강도 특성과 정확한 지층 단면, 그리고 기 파괴된 사면에 대한 정밀 분석 및 역해석을 계속적으로 수행하는 것이 요구된다.

사사

본 논문은 한국지질자원연구원이 수행하고 있는 산업자원부 출연사업인 '대규모 석탄노천광의 연약사면 안정성 및 생산성향상 연구' 과제 사업의 일환으로 수행되었습니다. 또한 자료조사에서 지원을 아끼지 않으신 KIDECO 임직원 여러분에게도 감사드립니다.

참고문헌

최병희, 류동우, 선우춘, 2006, 인도네시아 파시르 탄광에서의 노천발파공법에 대한 고찰, 한국지구시스템공학회 86회 학술발표회, pp.248-252.

한국지질자원연구원, 2006, 광물자원 수급분석 및 자원평가, GAA2004001-2006(3), 산업자원부

Abramson L.W. , Lee T.S., Sharma S. & Boyce G., 2002, Slope Stability and Stabilization Methods, John Wiley & Sons, p.712

Duncan, J.M. & Wright, S.G., 2005, Soil Strength and Slope Stability, John Wiley & Sons, p.297

RocScience, 2003, Slide User's Guide, p.199, RocScience Inc.