

## 석탄광산에서 발생한 대규모 폐광석 더미에 대한 안정성 검토

강기천<sup>1)</sup> · 안남규<sup>2)</sup> · 오재일<sup>2)</sup> · 김태형<sup>\*1)</sup>

<sup>1)</sup> 한국해양대학교 건설환경공학부

<sup>2)</sup> 중앙대학교 건설환경공학과

### Stability Investigation of the Large Size Heap of Coal Associated Wastes

Gi-Chun Kang<sup>1)</sup> · Nam-Kyu Ahn<sup>2)</sup> · Je-ill Oh<sup>2)</sup> · Tae-Hyung Kim<sup>\*1)</sup>

<sup>1)</sup> Division of Civil and Environmental Engineering, Korea Maritime University

<sup>2)</sup> Department of Civil and Environmental Engineering, Chung-Ang University

강원도에 위치한 D석탄광산에서 발생한 폐광석을 쌓아둔 적치장 사면의 지반공학적·환경공학적 측면에서 안정성을 해석하고, 적합한 대책을 수립하기 위하여 본 연구를 수행하였다. 적치장에서 하천으로 유입되는 침출수에 대한 수질검사를 통해 폐광석적치장이 산성광산배수(AMD)를 발생시키고 있음을 확인 할 수 있었다. 폐광석적치장의 사면안정 해석을 위하여 SLOPILE 프로그램을 이용하여 건기시, 평상시, 우기시에 대하여 원호활동 해석을 실시하였다. 또한, 사면의 규모가 대규모인 점을 고려하여 사면 선단부분을 무한사면으로 가정된 평면파괴 해석도 실시하였다. 원호활동 해석에서 우기시 사면의 안전율이 0.78로 사면의 선단부에서 파괴가 발생하고, 평면파괴해석의 결과 우기시 활동깊이 4m 이하부터 사면의 안전율이 1이하로 파괴의 가능성을 잠재하고 있는 것으로 나타났다. 따라서 비점오염 형태의 AMD 발생 저감과 사면 안정성 확보라는 측면에서 복합 대응이 가능한 뒷채움재로 폐콘크리트를 활용한 붕괴방지벽체(옹벽) 설치가 제안되었다.

**주요어:** 사면안정, 원호파괴, 평면파괴, 산성광산배수, 옹벽, 폐콘크리트 재생골재

Stability investigations were conducted for the heap of coal associated wastes occurred from D mine located in Gang-Won Province from the geotechnical and environmental engineering aspect, and a countermeasure was also examined to increase the stability in this area. Quality of water flowed from the heap of coal associated wastes was identified as AMD. Slope stability investigations were conducted with both circular failure analyses using SLOPILE program and planar failure analyses in cases of dry, rainy, and ordinary slopes. The results of circular failure analyses indicated that the factor of safety is 0.78 for rainy case. For planar failure analyses, the factor of safety decreases with increase the depth and reaches below 1 about 4m depth for rainy case. A retaining wall system with backfill using the recycled-concrete aggregates as a practical scheme was suggested to satisfy both demands: reducing AMD generation, and enhancing slope stability in the deposits of coal associated wastes.

**Key words:** slope stability, circular failure, planar failure, AMD, retaining wall, recycled-concrete aggregates

\* Corresponding author : kth67399@hhu.ac.kr

## 서 론

우리나라의 광산산업은 1980년대 중반까지 국민연료로서 중추적인 역할을 담당해 왔으나, 생산원가의 상승에 따른 경쟁력 약화와 대체 에너지(석유, 천연가스 등)의 수입 그리고 채광으로 인한 환경오염 문제가 이슈화되면서 가행광산이 점차 감소하게 되었다. 1989년 석탄산업 합리화정책으로 1989년부터 1997년까지 총 351개의 탄광이 폐광되었으며 현재는 11개 탄광만이 운영 중이다. 탄광 운영과정에서 발생하는 광산폐기물은 크게 채탄을 위한 채굴시 발생하는 폐광석과 선탄 후 발생하는 석탄부산물인 폐광미가 있는데 이것들은 대부분 탄광 인근의 하상에 투척하여 쌓아 두었는데 이를 폐광석적치장이라고 부른다(배위섭 외, 2003).

석탄채취가 일어난 또는 진행되고 있는 광산지대는 제거된 탄층으로 인해 황철석(pyrite;  $FeS_2$ ) 등의 황성 광물이 공기와 물에 노출, 산화되면서 주로 2가 철과 다량의 수소이온( $H^+$ )이 만들어지는 생성반응으로 산성광산배수(Acid Mine Drainage; 이하 AMD)가 유출되게 된다. 일반적인 AMD는 낮은 pH 특성을 보여 철, 망간, 마그네슘, 동, 아연, 칼슘, 알루미늄 등이 쉽게 용해되어 중금속농도와 경도가 높아 하천수와 지하수, 토양 등을 오염시킨다. 또한 하천수에 희석되면서 금속수산화물(metal hydroxide)을 형성하여 수생물의 광합성, 산란 등을 방해하는 적화/백화현상 등을 발생시키며, 미관을 해치는 등의 다양한 환경오염을 일으킨다(최정찬, 1996; 전효택 외, 1998).

폐광 및 가행 갱구로부터 발생하는 AMD는 점오염원 형태로 처리시스템을 설치하여 정화하고 있으나, 탄광 주변에 적치되어 있는 폐광석 더미의 경우 강우 혹은 지하수와 반응하여 AMD를 발생시키며 비점오염원(Non-point source) 형태로 환경 문제를 초래하게 된다. 이러한 폐광석적치장에 대해서 산업자원부를 비롯한 정부부처에서 광해방지사업을 매년 순차적으로 실시하고 있으나, 적치장에 대한 단순한 차수 정도의 시공만이 이뤄지고 있어 근본적인 해결책이 되지 못하며, 그나마도 사후관리가 제대로 되지 않아 침출수의 유출 등의 현상이 나타나고 있다. 이에 대해서 폐광석(미)의 근본적 해결을 위한 다양한 연구가 이뤄지

고 있다(김명진 외, 2001; 양재의 외, 1998; 이진국 외, 1991).

또한, 광업소의 폐광석적치장은 적절한 보수와 유지관리가 이루어지지 않고 자연 상태로 방치되어 있는데, 이로 말미암아 적치장의 법면 일부의 폐광석이 유실되고 표면의 침식 등의 문제가 발생되고 있다. 이렇게 적치장 사면의 구조적인 결함이 발생되면서 사면의 안정성에 대한 우려가 부각되고 있다. 실제로 집중강우로 인한 적치장의 일부 법면이 유실되는 경우가 발생되고 있다. 다만 폐광석적치장이 위치가 인구 밀집지역이 아니고 개발이 되지 않은 지역으로 사회적 관심을 끌지 못하고 있는 실정이다. 하지만 최근에 관광 또는 주거 단지로 폐광산지역 개발됨에 따라 환경공학측면에서의 안정성과 더불어 지반공학측면에서의 이들 적치장의 안정화에 대한 연구의 필요성이 요구되고 있다.

본 연구에서는 이러한 폐광석적치장에 대해 지반 및 환경공학 측면에서 안정성을 진단하여 안정성을 향상시킬 수 있는 대책을 수립하고자 한다. 이를 위하여 적치된 폐광석 사면의 상태 및 유실정도, 법면 배면의 파괴 발생여부 그리고 배수시설 상태, 수질조사 등 폐광석적치장의 전반적인 시설 현황을 조사하고, 사면붕괴현상을 조사하였다. 이를 토대로 수치해석 단면을 설정하고 건기시, 평상시, 우기시의 상태에 따른 폐광석 적치 사면에 대한 한계평형해석을 실시하였다. 본 연구 결과는 현재 전국에 걸쳐 무분별하게 적치되어 있는 많은 폐광석 및 폐광미 더미의 안정해석에 기초적인 자료로 활용될 수 있을 것으로 기대되며, 또한 폐광석지대로 인해 기인하는 비점오염 형태의 오염원에 대한 수질정화와 연계한 종합적인 대책을 수립하는데 중요한 자료로도 활용될 수 있을 것이다.

## 대상지역

연구대상지역으로는 1930년대부터 지금까지 가행되고 있는 강원도 D광업소를 선택하였다. D광업소는 발생하는 폐광석을 갱구 옆에 위치한 적치장 상부로 운반하여 사면을 따라 단순적치하고 있으며, 하천을 따라 만들어진 석축을 경계로 500m정도 둘러싸져 있으며, 적치장의 상부는 아래에서 약 200m로 조사되었다. 주변 하천은 황화현상과 백화현상을 보이고 있어

AMD의 발생을 간접적으로 파악할 수 있으며, 현재 갱에서 발생하는 AMD는 별도의 이송관을 통해서 하류부 광산폐수처리장으로 보내 정화하고 있다. 한편 폐광석적치장의 석축시설(높이 2m)은 노후와 되어 일부 균열이 발생된 상태이며, 특히 2002~2004년의 여름철 집중호우로 인하여 적치장 사면하부에서 20~30m 규모의 사면이 무너져 내려 부분적으로 석축이 유실 또는 파손되기도 하였다(Fig. 1 참조).

## 연구방법

### 시료

현재의 기술로 폐광석과 같이 큰 입자의 지반재료를 불교란 상태로 채취하는 것은 매우 어려워서 실험에 사용된 폐광석 시료는 현장을 대표할 수 있도록 폐광석적치장에서 접근이 가능한 사면상부의 10곳을 선

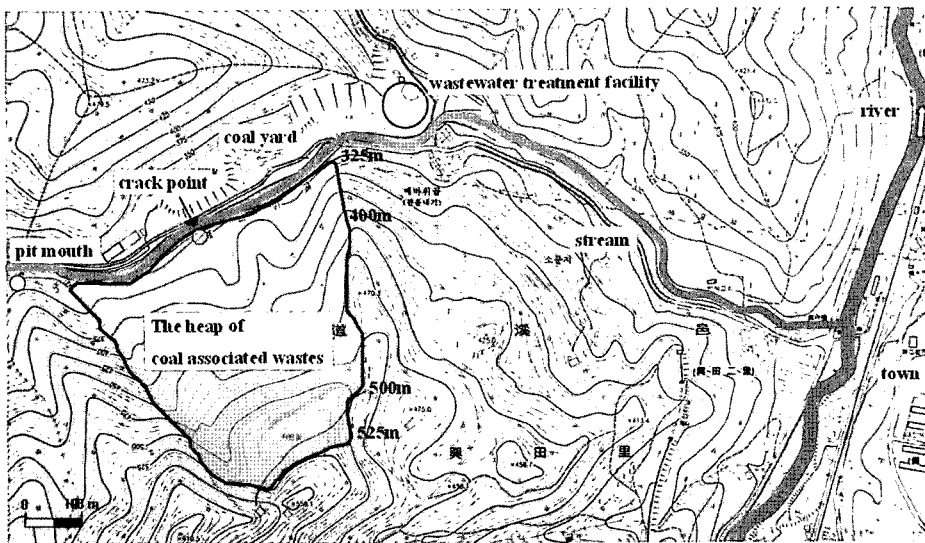


Fig. 1. Geological map of the heap of coal associated wastes near D mine

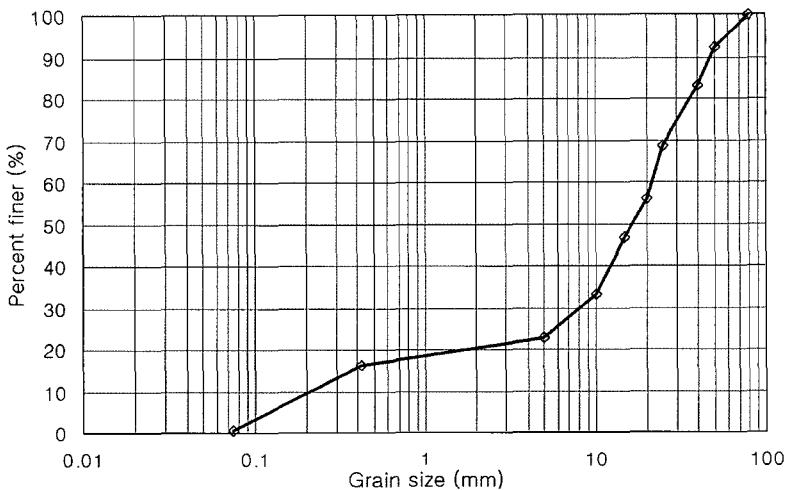


Fig. 2. Particle size distribution of the coal associated wastes

정하여 각각의 지점에서 표토층으로부터 10cm 아래의 시료를 50kg정도를 채취하여 사용하였다. 이때 시료의 크기는 수행할 대형삼축압축시험기 (직경 300mm)의 최대 가능 사이즈를 고려하여 50mm 미만으로 체가름 하여 준비하였다. 준비된 시료의 입도분포는 Fig. 2와 같이 균등계수가 134, 곡률계수 25.1인 것으로 나타났다.

### 실내시험

전술한 바와 같이 준비된 시료를 이용하여 대형삼축시험을 실시하였다. 대형 원주형 공시체(직경 300mm × 높이 620mm)에 1.0, 2.0 및 3.0 kgf/cm<sup>2</sup> 등 세 종류의 구속압 하에서 3mm/min(약 0.48%/min)의 속도로 압밀배수삼축시험(CD)을 실시하였다. 대형삼축시험의 경우 전단속도는 일반적으로 0.1~1.0% 정도로 하고 있으며 전단시 과잉간극수압이 발생하지 않도록 하였다. 시험결과는 Mohr원으로 작도하여 수치해석에 필요한 전단강도정수를 산정하였다.

압밀배수삼축압축시험에 사용된 공시체의 초기 단위중량을 결정하기 위해 다짐시험이 실시되었다. Table 1에 나타난 바와 같이 다짐물드에 공기 건조상태의 시료를 투입한 후 소정의 다짐층수와 다짐횟수(0~72회)를 변화시키면서 단위중량을 측정하였다. 다짐에너지를 0~5.562kgf·cm/cm<sup>3</sup>로 변화시켜가며 다짐시험을 실시하여 얻어진 다짐에너지와 단위중량의 관계를 쌍곡선(Hyperbola)에 근사시켜 이론적으로 가능한 단위중량 값도 산정하였다(식 (1), 식 (2)). 실험계수 a와 b는 식(1)을 식(2)로 선형화하여 산정한다.

Table 1. Conditions of compaction test

Specimen size	Diameter 30cm, Height 62cm
No. of layers	5 layers(12~13cm/layer)
No. of drops	0~72 times

$$\gamma_d = \frac{E_c}{a + b \cdot E_c} \quad (1)$$

$$\frac{E_c}{\gamma_d} = a + b \cdot E_c \quad (2)$$

여기서,  $\gamma_d$ : 건조밀도 (tf/m<sup>3</sup>),  $E_c$ : 다짐에너지, a 및 b: 실험계수이다.

### 수치해석

현재 상태의 광미 적치장이 어느 정도 안정성을 확보하고 있는지를 분석하기 위하여 사면안정해석을 실시하고자 한다. 본 연구에서는 SLOPILE 프로그램을 이용하여 한계평형해석법 가운데 Bishop 간편법에 의한 원호파괴 해석과 폐광붕적토층(Fig. 3 참조)만을 무한사면으로 가정된 평면파괴 해석을 실시하였다(송영석, 2003; Lade, 1996).

### 사면지반의 기하학적 형상

수치해석을 위해 중요한 요소 중 하나는 대상사면의 기하학적 형상을 정확하게 설정하는 것이다. Fig. 1의 지형도를 근거로 Fig. 3과 같이 사면안정해석을 위한 사면지반의 기하학적 형상을 모델화 하였다. 원 사면으로부터 소규모 파괴에 의해 쓸려 내려와 사면저부에 퇴적된 폐광석은 원래 성분이 퇴색된 폐광석(폐광붕적토)으로 판단되어 원 폐광석 다른 지층으로 분류하여 도시하였다. 원 사면에서의 소규모 파괴는 폐석덤핑에 따른 폐석간의 굴림, 강우 또는 다른 외적요인에 의해 장기간 진행 되었을 것이다.

선택된 모델 단면상에서 폐광석의 최대 폭은 500m, 최대 높이는 192m이다. 모델의 크기는 경계면의 영향을 최소화시키기 위하여 경계면이 관심 지역으로부터 충분히 떨어지도록 폭 570m, 높이 240m로 비교적 넓게 설정하였고 관심지역(폐광석)의 해석을 위해서 원지반을 기반암으로 선택하였다.

### 지하수위 위치 설정

본 대상 지역은 사면은 배후에 산을 끼고 있어 계곡을 통해서 지표수의 유입이 될 수 있고 강수가 원활하게 배수 되지 않을 경우 지하수면의 상승을 초래하여 수압이 증가할 수 있다. 수압의 증가는 전단강도를 떨어뜨리는 요인으로 작용하므로 사면은 역학적 평형을 잃고 파괴가 일어날 수 있다. 특히, 대상사면의 경우 배수시설이 잘 되어 있지 않아 배수가 충분히 이루어

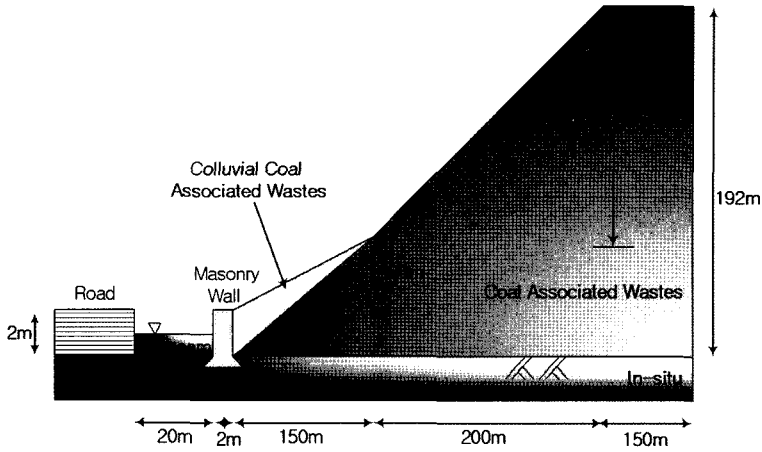


Fig. 3. Schematic cross section diagram of the heap of coal associated wastes with the dimension of slope

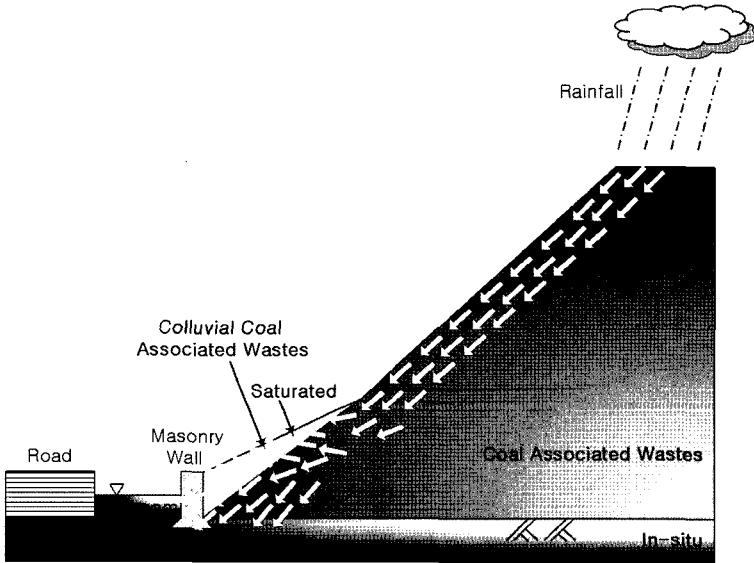


Fig. 4. Schematic diagram of the expected precipitation flowing path during rainfall

지는지 의심스럽다. 사면안정에 미치는 강우와 지하수위의 영향은 지배적인데 대부분의 사면이 건기시 보다는 우기시에 파괴가 많이 발생하는 것을 봐도 알 수 있을 것이다(홍원표 외, 1996). 그래서 본 연구에서는 3가지 경우(건기시, 평상시, 우기시)에 대해 수위를 고려하여 해석을 실시하였다. 건기시는 지하수위 위치가 폐광석층 아래에 위치하는 경우이고, 평상시는

폐광붕적토내 일부가 포화되고 폐광석 하단 부분에 지하수위가 위치하는 경우이다. 우기시는 폐광붕적토 전체가 포화되고 폐광붕적토층 경사를 따라 폐광석 표면에 수위가 형성되는 경우이다. 우기시는 강수에 의한 침투로 빗물이 폐광석 지반 내 깊숙이 침투하기 전에 표면으로 흘러내려 폐광붕적토 전체 층까지 수위가 차는 것을 고려한 것이다(Fig. 4).

## 수질분석

폐광석적치장으로 인한 환경영향을 파악하기 위해서 적치장에서 하천으로 AMD의 유입이 예상되는 지점을 선정하여 수질조사를 실시하였다. 콘크리트 석축의 아래 부분의 크랙이 발생한 곳에서 하천수와 회석되기 전에 채수하여 현장에서 수온, pH, 전기전도도, ORP, TDS, DO를 DO meter(810A, Orion), pH meter(290A, Orion), Conductive meter(125A, Orion)로 즉시 분석하였다. 그 후 보관에 유의하여 실험실에서 0.45 $\mu$ m filter로 필터링 후 ICP(ICPS-1000 IV, Shimidzu)와 IC(DX-80, Dionex)를 이용하여 양이온(Fe, Al, Mn, Pb, Cu, Zn, Cd, As, Ca, Mg)과 음이온(SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, F, Cl, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>)의 분석을 실시하였다.

## 결과 및 고찰

### 실내시험 결과

#### 시험시료의 물리적 성질

폐광석을 통해 얻어진 기본물성은 Table 2와 같다. 흡수율 시험은 골재의 간극을 알고, 콘크리트 배합 설계시 사용수량을 조절하기 위하여 행하며, 굵은 골재의 마모 시험은 철구를 사용하는 로스앤젤레스 시험기를 사용하여 부순 돌, 부순 광재, 자갈 등의 마모에 대한 저항을 시험한 것이다. 잔골재와 부순돌(최대치수 20mm)의 흡수율이 각각 0.80, 0.78인 것을 고려하면 폐광석의 흡수율(1.82) 2배정도 되는 것을 알 수 있다. 폐광석의 마모율(36.9)도 보통의 부순돌의 마모율(28.9) 보다 높은 것으로 측정되었다(문한영과 유정훈, 2001). 위와 같은 특성은 폐광석이 마모와 풍화가 쉽게 진행될 수 될 수 있음을 의미한다.

#### 시료의 다짐특성

다짐시험 결과는 Table 3 및 Fig. 5와 같다. Table 4의 건조단위중량은 다짐시험결과(Table 3 및 Fig. 5)를 토대로 식(1)을 사용하여 쌍곡선 근사에 의하여 산정한 이론적 건조단위중량 값이다. 다짐에너지가 증가할수록 건조단위중량 증가율이 감소하는 결과를 보

**Table 2.** Physical characteristics of the coal associated wastes

Items	Values
Specific gravity	2.52
Water content (%)	4.08
Abrasion ratio (%)	36.9
Water absorption (%)	1.82

**Table 3.** Results of compaction tests

No. of tamping	Dry unit weight(t/m <sup>3</sup> )	Compactive effort (cm·kg/cm <sup>3</sup> )
0	1.243	0
4	1.563	0.250
9	1.631	0.587
18	1.724	1.241
36	1.855	2.672
72	1.931	5.562

Table 4. Predicted dry unit weights using hyperbola method

Material	Density	Min. dry unit weight (tf/m <sup>3</sup> )	Max. dry unit weight (tf/m <sup>3</sup> )	Relative density (%)		
				50	70	90
coal associated wastes		1.49	1.92	1.68	1.78	1.87

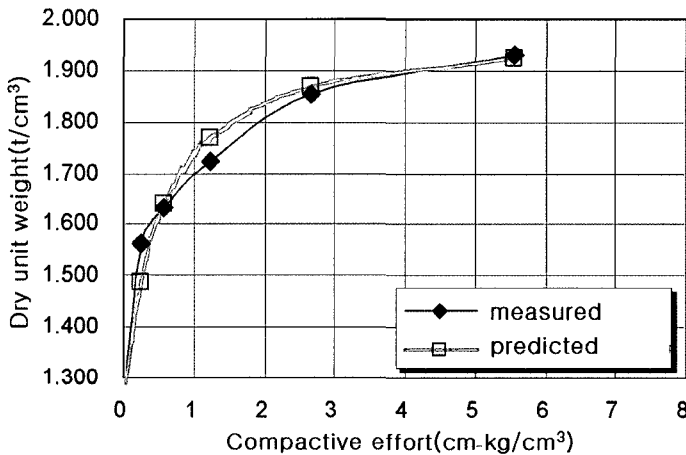


Fig. 5. Results of compaction tests : dry unit weight vs. compactive effort

고 최대건조단위중량이 약 1.9 t/m<sup>3</sup> 정도에 이르는 것을 알 수 있다. 위의 값을 참고로 현장 단위중량을 추정할 수 있는데, 본 현장에 적치되어 있는 광산폐기물이 인위적으로 다져지지 않았고, 장기간 방치되어 있으면서 자연적으로 압밀이 되었음을 고려하면 현장의 평균적인 단위중량은 1.9t/m<sup>3</sup> 보다 작은 1.8t/m<sup>3</sup>로 합이 적절하다고 판단된다. 이 값은 중간정도의 밀도를 가지는 자갈의 단위중량으로, 잘 다져진 자갈 및 자갈 섞인 모래의 단위중량 2.0t/m<sup>3</sup>, 느슨한 경우의 단위중량 1.63t/m<sup>3</sup> 과 비교해도 적절하다고 판단된다.

**압밀배수(CD) 삼축시험**

공시체의 초기 건조단위중량은 앞에서 제시한 1.8t/m<sup>3</sup>로 제작하여 축변형율이 15%까지 실험을 실시하였다. 대부분의 응력값이 축변형율 15%에서 수렴하는 것으로 나타났다. 삼축압축시험 결과는 Table 5와 같다. 강도정수는 Fig. 6에서 보는 바와 같이 Mohr-원

을 작도하여 내부 마찰각(φ) 32.5°와 점착력(c) 0.15 kg/cm<sup>2</sup>를 얻었다.

**수치해석 결과**

수치해석에 사용된 재료들의 물성값은 Table 6과 같다. 폐광석의 물성값은 다짐시험과 삼축압축시험 결과를 이용하였다. 폐광붕적토의 물성값은 국내·외의 연구자료가 부족한 관계로 폐광석에 대한 실내시험의 결과와 구호본 외(2000)의 논문을 참고하여 결정하였다. 구호본의 연구에 의하면 붕적토의 점착력(c)은 1.0 ~ 2.5 t/m<sup>2</sup>로, 내부마찰각(φ)은 23 ~ 28°로 제시하였다. 본 연구에서는 폐광붕적토는 폐광석에서 발생된 것임을 고려하여 폐광석보다 작은 강도정수 값인 c = 1.0 t/m<sup>2</sup>, φ = 28°을 사용하였다. 왜냐하면 폐광붕적토가 모가 많이 나있고, 강우 등에 의해 사면표층부에서 세립분 함량이 적을 것으로 판단되었

Table 5. Results of consolidated-drained triaxial tests

Confining pressure (kgf/cm <sup>2</sup> )	$(\sigma_1 - \sigma_3)_{max}$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	$(\sigma_1 - \sigma_3)/2$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	$(\sigma_1' + \sigma_3')/2$ (kgf/cm <sup>2</sup> )
1.0	2.848	1.424	2.424
2.0	5.250	2.625	4.625
3.0	7.500	3.750	6.750

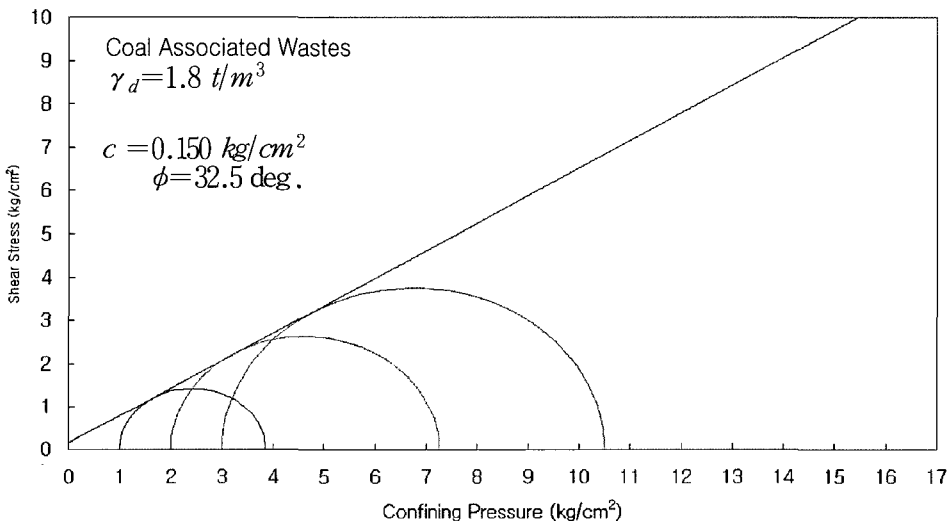


Fig. 6. Mohr circles and failure envelope from consolidated-drained triaxial tests

기 때문이다. 또한 이 값은 구호본이 제시한 값의 범위 안에 있기 때문에 적절하다고 판단된다. 기반암은 기존 연구 자료의 대표적인 값을 선택하여 사용하였다 (한국도로공사, 1998; Bowles, 1982). 한편, 광미는 하부로 내려갈수록 상부 자중에 의하여 압밀되어 지반 물성치가 다를 수도 있으나 이를 무시하였다.

원호파괴 해석

건조한 경우(a)에는 안전율이  $F_s = 1.152$ , 평상시의 상태를 나타내는 (b) 경우에는  $F_s = 1.079$ , 소단부분(폐광붕적토층) 완전 침수된 (c) 경우에  $F_s = 0.784$ 의 안전율을 보인다(Table 7). 예상한 바와 같이 우기시(즉, 폐

광붕적토층이 완전 포화시)의 사면안전율이 가장 낮게 나타남을 알 수 있다(Fig. 7). 그리고 사면파괴가 발생하는 위치가 폐광붕적토 부분인데 이것은 Fig. 1에 도시된 실제 사면파괴위치와 잘 일치함을 알 수 있다. 우기시 사면 파괴활동면의 깊이는 약 11m 정도로 나타났다.

평면파괴 해석

원호파괴 해석 결과 폐광붕적토 부분이 가장 위험한 사면으로 판명되어 이 부분만을 무한사면으로 가정하고 강우시 침투압을 고려한 해석을 실시하였다(Fig. 8). 폐광붕적토가 차지하는 범위가 상당히 넓기

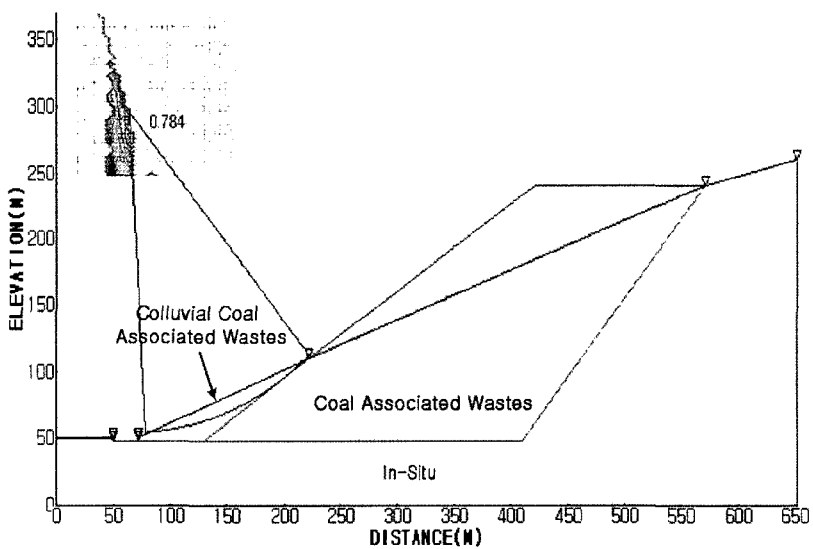


**Table 6.** Properties of materials used for the numerical analysis

Materials	Wet unit weight( $t/m^3$ )	Saturated unit weight ( $t/m^3$ )	Cohesion $c$ ( $t/m^2$ )	Friction angle $\phi$ ( $^\circ$ )
Colluvial coal associated wastes	1.80	2.04	1.00	28.00
Coal associated wastes	1.80	2.04	1.5	32.5
In situ ground	2.10	2.20	5.00	35.00

**Table 7.** Results of slope stability analysis using Bishop method

Cases	Ground water level	Factor of safety	Failure place & scale
(a) Dry	Top of the in situ ground	1.152	Top of slope in the coal associated wastes layer
(b) Ordinary	Below the colluvial coal associated wastes layer	1.079	Entire of slope
(c) Rainy	Top of the colluvial coal associated wastes layer	0.784	Toe of slope in the colluvial coal associated wastes layer



**Fig. 7.** Result of slope stability using Bishop method for the case of wet period (Colluvial coal associated wastes layer is fully saturated)

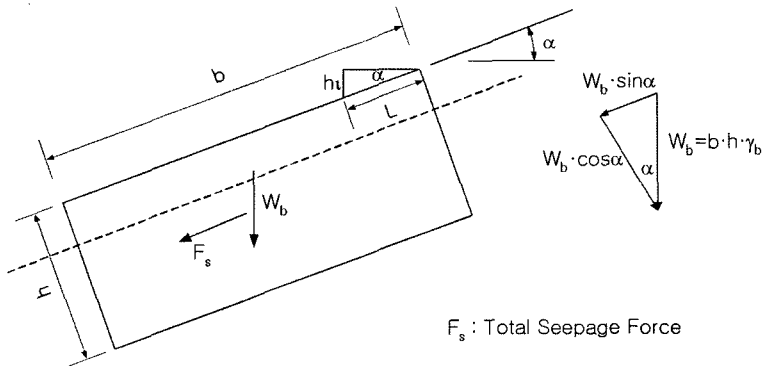


Fig. 8. Planar failure mechanism of infinite slope

Table 8. Results of planar failure analysis

Depth $h(m)$	Factor of safety ( $F_s$ )	
	Coal wastes ( $c=1.5 t/m^2, \phi=32.5^\circ$ )	Colluvial coal wastes ( $c=1 t/m^2, \phi=28^\circ$ )
2	1.80	1.34
4	1.31	1.01
6	1.14	0.90
8	1.06	0.84
10	1.01	0.81
12	0.98	0.79

(Fig. 1 참조) 때문에 무한사면으로 가정에는 문제는 없을 것이다(Lade, 1996).

Table 8은 침투압을 고려한 무한사면에 대한 평면 파괴 해석 결과를 정리한 것이다. 평면파괴해석에 적용된 물성 값은 원호파괴해석에서 적용된 물성 값과 동일하다. 두 경우 모두 표층으로부터 깊이(h)가 증가함에 따라 사면의 안전율이 감소함을 알 수 있다. 폐광석 물성 값을 사용한 경우 안전율이 1보다 작아지는 경우는 표층 깊이가 10m 이상에서 발생하고, 폐광봉적토의 물성 값을 사용한 경우 표층으로부터 약 4m 깊이 이상부터 안전율이 1이하로 내려감을 알 수 있다.

수질조사 결과

폐광석적치장에서 하천으로 유입되는 수질의 측정 결과를 아래 Table 9와 같이 나타내었다. 석축 아래 균열 부분에서 측정된 수질데이터의 평균과 하류에서 회석된 하천수의 수질을 비교하면, 전체적으로 폐광석적치장에서 유출수가 하천수에 비해서 산성이며 오염물 농도 역시 더 높았다. 특히 pH 3.8, Al 229mg/L,  $SO_4^{2-}$  4983mg/L 등의 AMD 특성항목을 통해서 폐광석적치장이 AMD를 발생시키고 있음을 확인할 수 있었다.

지반환경공학적 보강대책

폐광석적치장에 대하여 SLOPILE을 이용한 사면안정해석 결과와 수질검사 결과를 바탕으로 사면의 안정성을 향상시키고 수질오염을 줄일 수 있는 대책을 마련하였다. 본 대상 사면의 경우 강우에 의한 지하수

**Table 9.** Results of water pollution around the heap of coal associated wastes

	Basic item					Cation (mg / l)										Anion (mg / l)	
	pH	Cond. ( $\mu$ s)	ORP (mV)	DO (mg / l)	TDS (mg / l)	Fe	Al	Mn	Pb	Cu	Zn	Cd	As	Ca	Mg	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	F-
Measure 1	3.79	5165	185	5.77	2696	0.4	226	51.0	0.17	0.25	7.05	N.D	0.80	324	744	4920	10.3
Measure 2	3.76	5510	186	5.96	2880	0.5	238	54.8	0.17	0.29	7.63	N.D	0.86	327	786	5152	10.2
Measure 3	3.81	5170	184	5.60	2700	0.4	223	51.4	0.13	0.27	1.13	N.D	0.82	325	735	4878	9.6
Average *	3.79	5282	185	5.78	2759	0.4	229	52.4	0.16	0.27	5.27	N.D	0.83	325	755	4983	10.0
Stream **	6.68	347	15	4.80	165	N.D	N.D	0.71	N.D	N.D	0.03	N.D	N.D	32.6	23.1	104	0.16

\* Average of outflow water quality from the heap of coal associated wastes

\*\* Water quality of stream N.D.= not detected.

위상승에 의해 사면 파괴가 발생하는 점을 감안하여 사면 내로 강우의 유입을 줄이는 방법과 침투된 강우의 배수를 향상시킬 수 있는 방법이 제안되었다. 또한, 김종범 외(2002)의 연구결과에 근거하여 광산주변의 수질개선을 위해 폐콘크리트를 활용하는 방안을 적극 고려하였다.

폐광석이라는 재료의 특성과 사면의 규모 그리고 사면활동깊이가 깊은 점을 고려해 볼 때 기존의 사면 안정공법인 네일, 앵커등의 보강재를 사용하기에는 경제적, 시공상의 애로점이 많기 때문에 현재의 안전율을 유지하는 공법을 선택하는 것이 적합하다고 판단되어 규모가 4~5m 정도의 높이를 갖는 옹벽과 같은 붕괴방지벽체 설치에 의한 안정화 공법이 가장 적절하다고 판단된다. 대상지역의 폐광석 적치장은 자연낙하로 인해 형성된 사면을 가지고 있어 건기시에 충분한 안전율을 확보하고 있는 것으로 판단되나 집중호우 등에 의한 지하수위 상승과 침투압에 의한 사면표층부의 파괴가 발생하여 폐광석이 하천의 석축위로 이동하고 석축의 일부가 붕괴되는 상황이다. 그러므로 폐광석의 이동을 방지할 수는 옹벽의 설치가 지반공학측면에서 가장 적합한 안정확보 방안이라 할 수 있다. 또한 환경적인 측면에서 적치장에서 발생하는 AMD를 중화시키는 방안으로 옹벽 배면 뒷채움재로 투수성이 좋은 폐콘크리트를 활용하면 수질개선에도 도움이 될 것으로도 판단된다.

## 결론

본 연구는 폐광석적치장에 대해 지반 및 환경공학 측면에서 안정성을 검토하고 그 결과를 분석하여 대책 방안을 검토하였다. 본 연구 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 원호활동 해석결과 건기시, 평상시, 우기시의 사면안전율은 각각 1.15, 1.08, 0.78로 나타났으며 우기시 폐광붕적도층에서 약 11m 정도의 활동깊이로 파괴가 발생되었다.

(2) 무한사면 평면파괴 해석시 파괴깊이가 깊어짐에 따라 안전율이 감소되는데, 폐광석 물성 값을 사용한 경우 표층으로부터 10m 아래에서, 폐광붕적도 물성 값을 사용한 경우는 4m 아래서 안전율 1이하로 예측되었다.

(3) 폐광석적치장에서 하천으로 유입되는 유입수의 수질조사결과, 전체적으로 폐광석적치장의 유출수가 하천수에 비해서 낮은 pH를 보이며, 오염도가 훨씬 높았다. 특히 pH(3.8)와 Al(229mg/L), SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>(4983mg/L) 등의 AMD 특성항목을 통해서 폐광석적치장이 AMD를 발생시키고 있음을 확인할 수 있었다.

(4) 폐광석적치장에 대한 지반환경적 안정성을 확보하기 위한 방안으로 뒷채움재로 폐콘크리트를 이용한 붕괴방지벽체(옹벽) 설치가 제안되었다.

## 사사

본 연구는 환경부의 "차세대 핵심 환경기술 개발사업(Eco-technopia 21 project)"으로 지원받은 과제이며, 이에 감사드립니다.

## 참고문헌

- 김명진, 안규홍, 정예진, 2001, 폐광산 광미에서의 비소 분리 및 중금속 특성에 관한 연구, 대한환경공학회지, 제23권, 10호, pp. 1711-1719.
- 김용필, 송영선, 이광열, 장용채, 정경환, 이대명, 2002, 지반공학 시험법 및 응용, 세진사, pp. 1-894.
- 김중범, 오재일, 박찬식, 2002, 페콘크리트 재생골재를 이용한 산성광산배수 중화처리, 대한환경공학회지, 제24권, 1호, pp. 21-31.
- 구호본, 이종현, 배영식, 2000, 붕적토 사면의 안정성 해석과 보강 대책에 관한 연구, 한국지반공학회지, 제16권, 6호, pp. 43-50.
- 마상준, 2003, 폐광산에 의한 지반피해와 보강대책, 토목기술기사, 대한토목학회, pp. 17-26.
- 문한영, 유정훈, 2001, 콘크리트용 전로슬래그 굵은골재의 품질에 대한 고찰, 대한토목학회 논문집, 대한토목학회, 제21권, 5-A호, pp. 593-602
- 배위섭, 정영욱, 심연식, 2003, 폐탄광 자연정화시설의 효율적인 사후관리방안연구, 한국지구시스템공학회지, 제40권, 4호, pp. 284-291.
- 송영석, 2003, 활동역지시스템으로 보강된 사면의 설계법, 박사학위논문, 중앙대학교, pp. 1-348
- 송원경, 한공창, 신중호, 1998, 광미적치장 사면의 안정성 해석 및 대책, 한국지반공학회지, 제14권, 3호, pp. 123-134.
- 이진국, 이재영, 1991, 대구시 신천상류의 중금속오염에 관한 지화학적 연구, 달성폐광산의 영향에 대하여, 환경과학연구소 논문집, 경북대학교 환경과학연구소, 5권, pp. 1-22.
- 양재의, 전상호, 김휘중, 1998, 휴 폐광산에서 유출되는 중금속에 의한 하천수의 오염, 한국토양비료학회 춘계학술발표대회 논문초록집, pp. 182.
- 전효택, 황지호, 1998, 폐 석탄광 주변 지구화학적 환경의 중금속 오염 평가: 도계탄광 부근 수계에서의 산성광산배수의 지구화학, 한국지구시스템공학회지, 한국지구시스템공학회, 제35권, 5호, pp. 491-501.
- 최정찬, 1996, 광산 산성수 평가 및 처리기술 분석, 대한지하수환경학회 공동학술강연회 발표 논문집, 대한지하수환경학회, pp. 47-68
- 한국도로공사, 1998, 사면안정 해석기준
- 한국수자원공사, 2005 광산폐기물에 대한 대형삼축시험 연구보고서, pp. 10-23.
- 홍원표, 최승호, 한중근, 황인철, 1996, 강우시 사면안정해석법에 관한 연구, 대한토목학회 학술발표회 논문집, pp. 195-198
- Bowles, J. E., 1982, Foundation Analysis and Design, pp. 1-763
- Lade, P. V., 1996, Slope Stability, Lecture note, Johns Hopkins University, pp. 1-344

투 고 일 2005년 3월 21일  
 심 사 일 2005년 3월 22일  
 심사완료일 2005년 5월 25일

---

강기천(Gi-Chun Kang)  
 한국해양대학교 건설환경공학부  
 606-791, 부산광역시 영도구 동삼동 1  
 Tel: 051-410-4945  
 Fax: 051-404-3222  
 e-mail: sabem1002@hotmail.com

안남규(Nam-Kyu Ahn)  
 중앙대학교 건설환경공학과  
 156-756, 서울시 동작구 흑석동 221번지  
 Tel: 02-826-4528  
 Fax: 02-812-1834  
 e-mail: sapa-9135@hanmail.net

오재일 (Je-ill Oh)  
 중앙대학교 건설환경공학과  
 156-756, 서울시 동작구 흑석동 221번지  
 Tel: 02-820-5339  
 Fax: 02-812-1834  
 e-mail: ohjeill@cau.ac.kr

김태형(Tae-Hyung Kim)  
 한국해양대학교 건설환경공학부  
 606-791, 부산광역시 영도구 동삼동 1  
 Tel: 051-410-4465  
 Fax: 051-404-3222  
 e-mail: kth67399@hhu.ac.kr