

◇技術資料◇

광미적치장 사면의 안정성 해석 및 대책

송 원 경*¹
한 공 창*²
신 중 호*¹

Abstract

To analyse the stability of a slope composed of waste material produced in a closed lead mine, numerical modeling has been carried out in two dimension using FLAC, finite difference program. The research was focused on the effect of the earthquake as well as a rise of water table upon slope stability. The numerical results have shown that the slope would not be safe against earthquake event and that the increase of pore pressure due to a rise of water table up to the ground level may result in a failure of the slope. On the basis of numerical analyses and site investigation, two sorts of measures have been taken. In short term, removal of a part of materials deposited on the top of the pile is required to increase immediately safety factor of the slope even a little. In long term, it is necessary to repair drainage facilities and dam which covers waste material so that the slope is prevented from failure in a radical manner. It has been confirmed by numerical analyses that an improvement of the stability can be in a great extent expected after such measures have been performed.

요 지

지금은 폐광된 한 광산에서 증석을 회수하는 과정에서 발생된 광미를 쌓아둔 적치장 사면의 안정성을 해석하고 그 대책을 수립하기 위하여 본 연구를 수행하였다. 안정성 해석을 위하여 FLAC 프로그램을 이용한 2차원 모델링을 수행하였다. 특히 지하수면의 상승뿐만 아니라 지진이 사면의 안정성에 미치는 영향을 분석하는데 연구의 초점을 맞추었다. 전산해석 결과 광미 적치장 사면은 지진이 일어날 경우 안전하지 못하며, 지하수면 수준이 지표 근처까지 상승할 경우 파괴될 수도 있는 것으로 나타났다. 전산해석 및 현장조사를 기초로 두 가지의 보강 대책이 수립되었다. 단기적으로는 사면상단의 광미를 제거하여 안전율을 높이는 것이고, 장기적으로는 사면 피복시설과 배수시설을 보수하는 것이다. 이러한 공사가 완료되었을 때 사면의 안정성이 크게 향상될 수 있음이 수치해석 결과 확인되었다.

*1 정희원, 한국자원연구소 자원개발연구부 선임연구원

*2 정희원, 한국자원연구소 자원개발연구부 책임연구원

1. 서 론

지금은 폐광된 한 중석광산에서 원광을 선광하여 농축된 중석을 회수하는 과정에서 다량의 광미가 발생하였다. 광업소는 이 광미를 광산 인근의 하상에 적절한 저장 시설을 마련하여 쌓아두었는데 이를 광미적치장이라고 부른다(사진 1). 적치장 하부에는 콘크리트 옹벽을 설치하였고 광미량이 늘어남에 따라 석축을 3단에서 6단에 걸쳐 쌓았으며 그 이상의 높이에서는 콘크리트로 만든 블록을 쌓아서 사면을 피복하였다. 광미 적치는 1974년 3월에 시작되어 1981년까지 7년간 지속되었는데 최종적으로 형성된 적치장의 규모는 길이가 500m, 높이가 42m, 그리고 최대 폭이 250m에 달한다.

그러나 광업소가 폐쇄된 후 광미 적치장은 적절한 보수와 관리가 이루어지지 않고 방치되어 왔다. 이로 말미암아 적치장 사면을 보호하기 위하여 콘크리트 또는 암석 등의 재료로 피복한 면인 적치장의 법면 일부가 광미의 유실로 함몰되고, 표면이 침식하는가 하면 법면 피복블록의 열화 등이 나타나기 시작했다. 이렇게 적치장 사면에 구조적인 결함이 발생되면서 시설물 안전성에 대한 우려가 부각되기 시작했다. 실제로 1979년 이 지역에 집중강우가 내리

자 수압을 이기지 못한 적치장의 중앙 일부가 유실되는 사건이 발생한 적도 있었다.

본 연구는 이러한 광미적치장 사면의 안정성을 진단하여 안정성을 향상시킬 수 있는 대책을 수립하는데 그 목적을 두고 수행 되었다. 이를 위하여 우선 석축상태, 사면피복 블록의 열화 및 유실 정도, 광미 폐재의 누출 여부, 법면 배면의 공동 발생 여부 그리고 배수시설 상태 등 광미적치장의 전반적인 시설 현황을 조사하였다. 다음에 현 상태에서 광미적치장이 어느 정도의 안정성을 확보하고 있는지를 분석하기 위하여 FLAC을 이용한 2차원 전산해석을 실시하였다. 전산해석은 사면의 전단강도를 크게 떨어뜨리는 지하수압의 변화가 사면의 안정성에 미치는 영향에 대해 초점을 맞추었다. 또한 지진이 적치장의 안정성에 어떠한 영향을 미칠 것인가에 대해서도 분석하였다. 마지막으로 이러한 시설물 실태 조사와 안정성 전산 해석을 기초로 광미적치장의 안정성을 향상시키기 위한 대책을 제시하였다.

2. 광미적치장의 구조 및 현황

2.1 구조

본 광미적치장은 중석 광석을 선광하면서

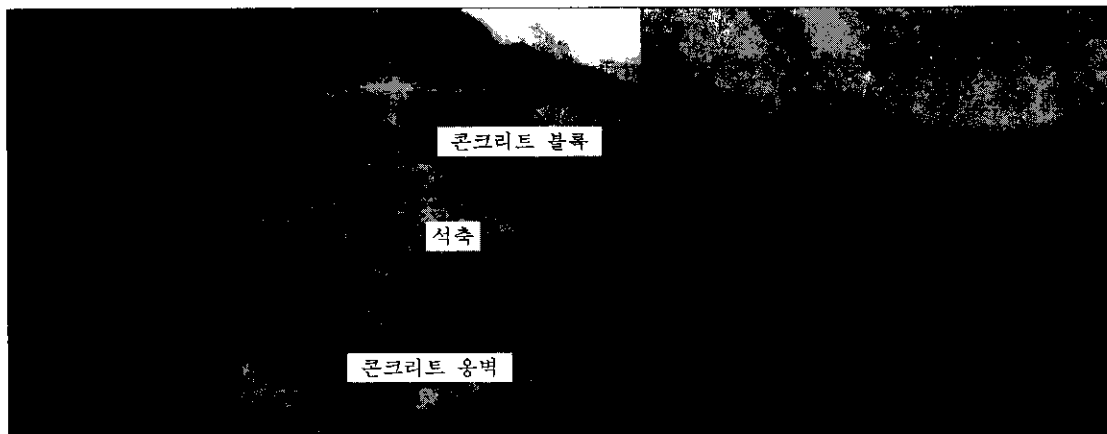


사진 1. 광미적치장 전경. 광미는 옹벽, 석축, 콘크리트 블록으로 피복되어 있다.

발생된 광미를 쌓아둔 사면으로서 광미는 입자 크기로 분류할 때 세립질 모래와 실트로 구성되어 있다. 광미적치장의 구조는 광미가 유실되는 것을 막기 위한 법면시설과 적치장으로 유입되는 물을 배수시키기 위한 배수시설로 이루어져있는데 그 형태는 그림 1과 같으며 그 규모는 표 1에 나타난 바와 같다.

표 1. 광미적치장의 규모

높이	42m
면적	89,300m ²
용적	1,700,000m ³
광미의 총무게	약 4,000,000톤

광미적치장의 구조를 살펴보면, 전방에 흐르고 있는 하천으로부터의 침식을 막기 위하여 호안에 콘크리트 옹벽을 설치하였고, 그 위에 석축 또는 콘크리트 블록으로 법면에 불임공을 시공하여 광미의 풍화나 강우시의 침식 등을 방지하였다. 배수시설로는 적치장 하부에 설치되어 분간선 역할을 하는 배수터널과, 배후산으로부터 적치장 안으로 유입되는 물을 분간선으로 유도 배수시키기 위해 후방의 계곡에 설

치한 다섯 개의 지선으로 구성되어 있다. 또한 산록으로부터 흘러내리는 지표수를 지선으로 유도하기 위해 산등성이를 따라 복수로를 설치하였고, 집중호우시 적치장 내로 범람되는 물을 처리하기 위한 비상 배수경도가 좌측에 설치되어 있다. 그런데 지선 중에서 c 선은 광미의 적치량이 많아지면서 매몰되어 그 기능이 정지되었다.

2.2 현황

2.2.1 법면시설

피복블록의 풍화 및 파쇄 현상은 정도의 차이는 있지만 전구간의 표면에서 발견되고 있다. 블록의 풍화는 전반적으로 각단의 중앙부보다는 상부와 하부에서 더욱 심하게 진행되고 있음이 관측되었다(사진 2). 특히 하부에서 발견되는 풍화파쇄대는 광미유출을 가속화시킬 수 있으므로 장기간 방치 시에는 피복블록 배면에서의 공동형성과 하부 블록의 유실이나 함몰을 가져오고 이는 곧 사면하부의 응력해방을 일으켜서 사면의 파괴로 발전할 우려가 있는 것으로 드러났다.

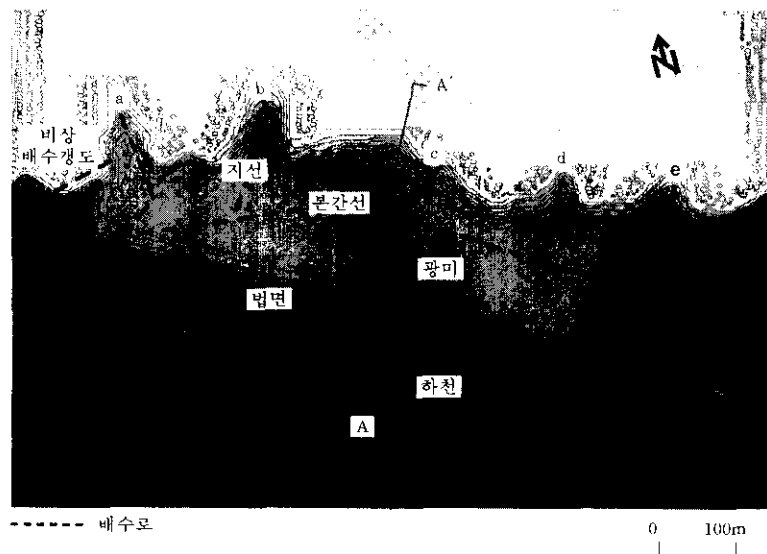


그림 1. 광미적치장 사면의 구조

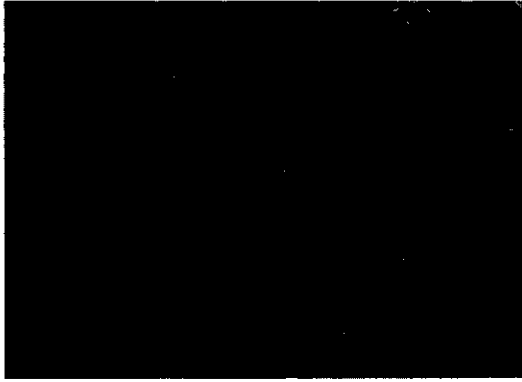


사진 2. 상단의 신선한 블록과 하단의 풍화된 블록을 대비해서 보여주는 모습

피복블록의 풍화도를 알아보기 위하여 Schmidt hammer를 이용한 강도 시험을 실시하였다. 사용되지 않은 새 블록의 Schmidt hammer의 반발치 R은 20~25사이의 값을 갖는 것으로 측정되었는데 이를 압축강도로 환산하면 22~27MPa이다. 광미적치장 사면을 피복하고 있는 블록의 반발치 R은 측정 결과 평균적으로 10~12의 값을 갖는 것으로 나타났는데, 상태가 양호한 것이 15~20, 풍화된 것은 10 이하였다. 이를 압축강도로 환산하면 각각 14~15.5MPa, 17~21MPa, 14MPa에 해당한다. 따라서 피복된 블록의 강도가 초기 설치 상태보다 절반 이하로 약화된 것을 알 수 있다.

한편 공동의 발생부위와 함몰부위는 피복블록에서보다는 석축부분에서 많이 발생되고 있는 것으로 드러났다. 또 보수흔적이 있는 부위 혹은 그 주변에서 주로 발생되고 있는데 이는 보수 시 펄터재의 사용과 같은 완벽한 보수가 이루어지지 않았기 때문이다.

광미적치장 하부에 구축된 석축에 설치되어 있던 대부분의 배수공들은 파쇄되었거나 유실되었고, 석축의 배면에는 공동이 형성되었거나 함몰되어 있는 것으로 관측되어 배수기능이 크게 떨어져 있는 것으로 드러났다. 석축은 하부의 한 개 층에 대해서만 돌과 돌 사이의 틈새를 시멘트로 채우고 그 위층들의 돌 사이에는

시멘트의 메꿈작업이 되어 있지 않았다. 따라서 석축에서는 전반적으로 돌 사이의 틈새를 통해 광미의 유출이 진행되어 배면에는 공동이나 적치장의 광미와 공간이 형성되어 있었다(사진 3). 이러한 곳에서는 석축의 함몰 등도 관찰되었다. 또한 단의 상부에 타설된 콘크리트의 유실 등은 강수시 표면수가 그대로 사면으로 침투될 수 있으며 상부의 광미유출로 상부의 돌들이 유실되는 경우도 관찰되었다. 이와 같은 상황으로 석축을 방치한다면 석축의 틈새들을 통해 침출수와 함께 광미의 유출이 가속화 될 수 있으므로 석축의 범변상황은 더욱 악화될 수 있을 것이다.



사진 3. 석축의 틈, 배면에는 광미의 유실로 공동이 형성되어 있다.

2.2.2 배수시설

지선의 유입구 상부에는 계곡 상류로부터 굴러 내려오는 암석이나 나뭇가지 등을 저지할 수 있는 차단막이 설치되어 있으나 계곡에서 굴러온 암괴 등에 의하여 파손되었거나 잡석들로 메워져 있어서 계곡수가 배수관을 통하여 배수되지 못하고 적치장 안으로 흘러 들어가고 있었다. 적치장 하부에 매설된 본관선은 직접 관측이 불가능하여 그 상태를 정확히 파악할 수는 없으나 출구에서 물이 배수되고 있는 상황으로 보아 그 기능에 특별한 장애를 받고 있는 것은 아니므로 판단되었다.

산복수로의 경우 외형상 형태는 거의 온전하게 유지되고 있으나 일부 구간은 산에서 굴러 내려온 돌들로 메워져 있는 것이 목격되었다. 배수로 구조물과 지표면 사이가 벌어져 틈이 나 있는 부분이 많이 발견되었다. 그러나 이러한 산복수로의 부실함에도 불구하고, 적치장 배후 산록의 물 유입면적이 작기 때문에 적치장 수압상승에는 그다지 큰 영향을 주지는 못할 것으로 판단되었다.

비상배수로는 입구와 출구 모두 잘 유지되고 있으며 내부도 견고한 암반을 통과하고 있으므로 문제 발생의 여지는 전혀 없을 것으로 관측되었다.

일정한 간격을 두고 적치장 하부 옹벽 전 구간에 걸쳐 배수공이 설치되어 있으나 유독 우측 옹벽에는 배수공이 전혀 설치되어 있지 않았다. 조사 기간이 건기임에도 불구하고 적치장 중앙에 있는 배수공으로 폐수가 광미와 함께 배출되고 있는 것이 목격되었다. 특히 이 부근에서 옹벽의 갈라진 틈을 통해서 폐수가 스며 나오고 있는 것을 볼 수 있었다(사진 4).



사진 4. 옹벽에 난 틈을 통해 폐수가 스며 나오고 있는 모습

3. 안정성 해석

3.1 모델의 구조

광미적치장 안정성을 평가하기 위하여 유한

차분법 프로그램인 FLAC을 이용하여 2차원 전산해석을 실시하였다. 이는 문제의 사면이 비교적 일정한 형태의 단면이 횡으로 길게 연장된 구조를 갖고 있으므로 사면의 역학적 거동은 지형의 기하학적인 형태에 크게 영향을 받지 않기 때문이다. 따라서 이 부근의 한 대표 단면을 선정하여 전산 해석을 실시한다면 사면의 안정성에 대한 보수적 결과를 얻게 될 것이다. 해석 단면은 가장 보수적인 결과를 얻기 위해서 그림 1의 AA' 단면을 선정하였다. 그것은 이곳이 법면과 산까지의 거리가 가장 멀어서 폐재 폭이 가장 크며, 하중 지지력이 월등한 적치장 양단의 곡선 구조와는 달리 상당구간 직선 구조를 갖고 있어서 전단력이 집중될 수 있는 구간이기 때문이다.

이렇게 선정된 단면으로부터 제작된 수치해석 모델은 그림 2와 같다. 모델 단면상에서 광미의 최대 폭은 200m, 최대 높이는 42m 이다. 모델의 크기는 경계면의 영향을 최소화시키기 위하여 경계면이 관심 지역으로부터 충분히 멀어지도록 폭 250m, 높이 75m로 비교적 넓게 설정하였다.

해석 모델은 광미를 대표하는 모래층과 실트층, 콘크리트 옹벽 그리고 하부의 기반암층으로 구성된다. 광미층을 모래층과 실트층으로 구분한 것은 광미를 적치할 때 사면 쪽에는 상대적으로 입도가 큰 광미가 쌓이고 사면에서 먼 쪽은 입도가 작은 광미가 쌓인다는 사실을 반영하기 위한 것이다. 그러므로 해석 시 이 두 재료에는 서로 다른 물성이 적용된다. 모델의 좌우 경계에서는 횡방향의 변위를 구속하

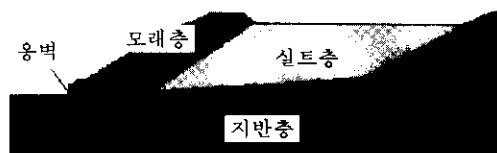


그림 2. 수치해석 모델의 구조

고, 하부 경계에서는 중방향의 변위를 구속하는 경계 조건을 택하였다.

3.2 토질정수의 결정

모델의 각 재료에 적용된 역학적 물성값은 표 2와 같다. 표에서 모래층과 실트층 재료의 물성치는 최근의 조사보고서(고광선 외, 1996)에 나와 있는 자료를 이용하였다. 이 조사에서는 광미의 건조 단위중량은 평균 1.7ton/m^3 인 것으로 보고되고 있으나 광미는 하부로 내려갈수록 상부 자중에 의하여 압밀되었을 것이므로 이를 고려하여 본 연구에서는 광미의 단위중량이 심도에 따라 m^3 당 3kg/m^3 씩 증가하는 것으로 가정하였다. 내부마찰각과 영률은 표준관입 시험을 통해 얻은 N값으로부터 추정된 값이다.

N값은 깊이 5m 이내의 상층부는 10 이하, 깊이 15m 내외까지는 20~25, 그리고 그 하부로 갈수록 40이상까지 증가하는 것으로 나타났다. 위 보고서에서는 그 평균값인 $N=25$ 를 사용하였다. 이 값을 이용하여 영률과 내부마찰각을 환산하였는데, 영률은 Schmertmann(1970)의 경험식

$$E = 0.4N \text{ (MPa)} \quad (1)$$

에 의하여 결정되었으며, 내부마찰각은 Dunham(1954)의 경험식

$$\phi = \sqrt{12N} + 15 \quad (2)$$

에 의하여 결정되었다. 단 내부마찰각의 경우 입자가 가는 실트질 모래의 마찰력은 입자가 굵은 모래보다 작으므로(Derski et al,

1989) 실트층에 대해서는 모래층보다 5도 작은 값을 적용하였다.

콘크리트 응력과 하부 지반의 경우에는 역학적 물성시험을 실시하지 않고 일반적인 콘크리트 물성값과 통상적으로 연암 내지 보통암에 대하여 사용하는 물성값들을 추정하여 적용하였다. 그것은 이들 재료의 전단강도는 광미의 전단강도에 비해 상대적으로 매우 크므로 추정된 값이 실제와 다르더라도 모델 사면의 전단 거동에는 그다지 큰 영향을 주지 않기 때문이다.

4. 해석결과

사면은 배후에 산을 끼고 있고 그 계곡을 통해서 지표수의 유입이 활발하다. 이렇게 적치장 안으로 물이 유입되고 강수가 원활하게 배수되지 않을 경우 지하수면의 상승을 초래하여 수압이 증가한다. 수압의 증가는 전단강도를 떨어뜨리는 요인으로 작용하므로 사면은 역학적 평형을 잃고 파괴가 일어날 수 있다. 특히 대상사면과 같이 배수시설의 상태가 양호하지 못하여 배수가 충분히 이루어지는지 의심스러우므로, 만일 우기에 많은 양의 비가 일시에 내릴 경우 물이 적치장 안에 고일 수가 있다. 이것은 곧 지하수면이 적치장 표면에 형성되어 사면의 안정성을 크게 위협할 수 있다. 이러한 상황은 매우 이례적일 수 있으나 일단 그러한 경우에도 사면은 파괴되지 않고 안정성이 유지되어야만 할 것이다.

따라서 본 연구에서는 이와 같은 지하수 조

표 2. 수치모델에 사용된 물성값

층구분 \ 물성	단위중량 (ton/m^3)	영률 (MPa)	포아송비	점착력 (kPa)	내부마찰각 (도)
모래층	1.7 *	10	0.35	20	30
실트층	1.7 *	10	0.35	20	25
콘크리트응벽	2.5	20	0.25	5000	45
지반층	2.5	5	0.2	1000	40

* 모래와 실트의 단위 중량은 심도에 따라 m^3 당 3kg/m^3 씩 증가하는 것으로 가정하였다.

건의 변화에 따른 사면의 안정성을 검토하기 위하여, 사면이 건조한 경우에서부터 완전히 침수된 경우까지 단계적으로 지하수면의 위치를 변화시키면서 사면의 안정성을 해석하였다. 지하수면의 높이를 세 경우로 가정하여 해석이 진행되었는데, 첫째는 완전히 건조한 경우이고, 두 번째는 평시의 지하수면인 경우, 세 번째는 완전히 침수된 경우이다. 평시의 지하수면은 적치장 지표면을 따라 약 20m 하부에 위치하는 것으로 간주하였는데 이 지하수면은 시추공에서 확인된 지하수면의 위치로부터 추정된 선이다. 완전 침수는 지하수면이 지표면에 다다른 경우로서 이는 사면의 안정성이 최악의 상태에 놓이게 되는 상황을 해석하기 위한 것이다.

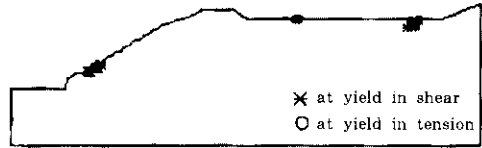
모델 해석시 지하수면 하부의 매질은 포화 상태이므로 입자 사이에 간극수압이 작용하게 되는데, 이때 매질에 걸리는 수압은 지하수면으로부터의 침도에 비례하는 것으로 간주한다. 또한 포화 상태인 매질의 단위무게는 건조한 매질의 단위중량에 물의 무게가 추가되어야 하므로 총 단위무게를 사용하였다.

해석 과정은 먼저 탄성조건 하에서 해석모델에 지하수 조건 및 중력만을 작용시킨 상태에서 계산을 진행한다. 수치모델의 불평형력이 일정한 수준 이하로 떨어지면 모델은 평형 상태에 도달하였다고 가정하고 이 때의 응력 상태를 대상 모델의 초기 응력 상태라고 간주하였다. 모델이 평형상태에 도달하면 강도 및 점착력을 표 2에 나와 있는 실제 값으로 환원시켜 대 변형률 모드로 계산을 수행한다. 대 변형률 모드란 사면 파괴시 변위가 비현실적으로 크게 발생할 때 계산 수행을 자동으로 중지시키고자 할 때 사용하는 수단이다.

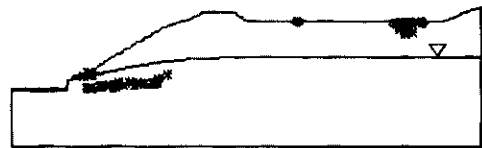
이와 같은 해석 과정을 거쳐서 우선 지하수 조건에 따른 소성영역의 변화를 구하였으며 그 결과를 그림 3에서 보여주고 있다. 소성영역이란 재료가 과도한 응력을 받아 전단응력이 그 재료의 전단강도를 넘어서 파괴에 이른 구간을 말하는데 본 계산에서 사용된 파괴 조건식은 Mohr-Coulomb 식(Goodman, 1989)이다.

해석 결과 건조한 경우에는 소성영역이 거의 나타나지 않고(그림 3.a), 평수위인 경우에 사면하부에 일부분 소성파괴가 일어나기 시작함을 알 수 있다(그림 3.b). 그러나 소성파괴는 국부적으로 발생하고 있으므로 파괴에 이르는 것은 없을 것으로 예측된다. 반면에 그림 3.c는 지하수면이 지표에까지 이를 경우 사면 하단에서 시작한 소성영역은 모래층과 실트층의 경계를 따라서 상부 지표까지 연장되어 사면이 파괴될 수 있음을 보여준다. 이 때 사면의 파괴 형태는 상단에서 발생하는 인장파괴와 함께 전형적인 원호파괴의 모습을 띠고 있다.

다음에 위의 세 가지 지하수면 조건에서 사



(a) 건조한 경우



(b) 평상시



(c) 완전 침수시

그림 3. 지하수면 상승에 따른 소성파괴 영역의 발전

면의 안정성을 정량적으로 평가하기 위하여 안전율 계산을 수행하였다. 사면의 안전율을 구할 때 주로 사용하는 한계 평형법에서는 Bishop(1959)이나 Sarma(1973) 등이 사용한 안전율 정의로부터 계산된다. 이들은 안전율을 재료가 동원할 수 있는 최대 전단강도와 예상 파괴면에 작용하는 전단력의 비로써 정의한 반면 FLAC에 의한 전산해석에서는 사면의 안전율을 다음과 같이 정의하였다.

$$\text{안전율} = \frac{(\text{현 재료의 최대전단강도})}{(\text{파괴시 재료의 전단강도})} \quad (3)$$

현 재료의 최대 전단 강도란 현재 사면을 구성하고 있는 재료의 실제 물성치로 결정되는 최대 전단 강도를 의미하며, 파괴시 재료의 전단강도란 재료의 전단강도에 영향을 주는 변수인 점착력과 내부마찰각 그리고 인장강도 등을 임의로 낮추었을 때 사면이 파괴에 이르게 되는 값들로 결정되는 전단강도를 의미한다. 이러한 계산 과정은 별도의 Fish 프로그램에 의하여 수행되며 이 routine을 거치면서 수렴되는 변수값들로부터 안전율이 계산된다.

지하수 조건에 따른 해석에 덧붙여 지진이 발생하는 경우의 안전율도 함께 계산하였다. 지진의 영향을 고려하기 위해서는 동하중을 가하는 것이 이상적이나 편의상 중력가속도로 대표되는 지진의 최대하중을 전 계산 과정에 일정하게 적용하는 준 정적 계산을 실시하였다. 지진하중조건은 가동기준지진(OBE) 수준에 준하여 결정되었는데 수평방향의 지진하중조건을 0.1g, 수직방향의 지진하중조건을 수평방향의 약 70%에 해당되는 0.07g로 가정하였다. 여기서 g는 중력 가속도로써 9.81 m/sec²이다.

FLAC에 의하여 여러 가지 지하수 조건과 지진 조건에 따라 해석한 결과 그림 4와 같은 안전율 변화 곡선을 얻었다. 그림은 지진이 일어나지 않는 경우와 지진이 일어나는 경우에 지하수면의 상승에 따라 각각 안전율이 어느 정도 떨어지는지를 비교해서 보여 주고 있다. 지진하중이 작용하지 않는 조건에서 건조한 경

우, 평수위 경우 그리고 사면이 완전 침수된 경우에 대한 최소안전율은 각각 1.54, 1.27 및 1.01인 것으로 나타났다. 이 결과로부터 지하수면이 지표에서 20m정도의 하부에 존재한다면 사면은 충분한 안정성을 확보할 수 있으나 집중 호우시 적치장이 완전 침수할 경우에는 안전율이 거의 한계치인 1로 떨어지므로 사면이 파괴될 수도 있음을 알 수 있다.

한편 지진이 발생했을 때 적치장이 완전히 침수되어 있다면 안전율이 한계치에 훨씬 못미치므로 사면은 파괴될 위험성이 높다. 비록 지하수면이 그와 같이 높게 형성되지 않고 평소의 수면을 유지하더라도 안전율은 1.07이므로 사면은 파괴의 위험으로부터 그리 멀리 있다고 할 수 없다. 지진이 일어나더라도 사면이 안전한 것은 적치장이 건조한 경우뿐인 것으로 드러났다.

지하수압의 증가나 지진 하중의 발생으로 인해 사면이 파괴될 때 예상되는 파단면은 그림 5와 같다. 그림 3의 소성영역 분포도에서도 알 수 있듯이 예상 파단면은 용벽의 바로 위에서 서부터 시작하여 모래층과 실트층의 경계면을 따라 발전하여 사면 상단에 이르는 원호파괴의 양상을 띠고 있음을 알 수 있다.

5. 대책

광미적치장의 시설물들에 대한 현장조사와 FLAC을 이용한 사면의 안정성에 관한 전산해석 결과를 바탕으로 단기간 내에 사면의 안정성을 향상시킬 수 있는 대책과 근본적으로 사면을 파괴의 위험으로부터 보호할 수 있는 장기 대책을 마련하였다.

5.1 단기대책

근본적인 대책을 수립하기 전까지 임시로 단기간 내에 사면의 안정성을 향상시키기 위해 유효한 방법은 사면 최상단의 제거이다. 최상단이란 그림 6에 나와 있는 부분을 가리키는데

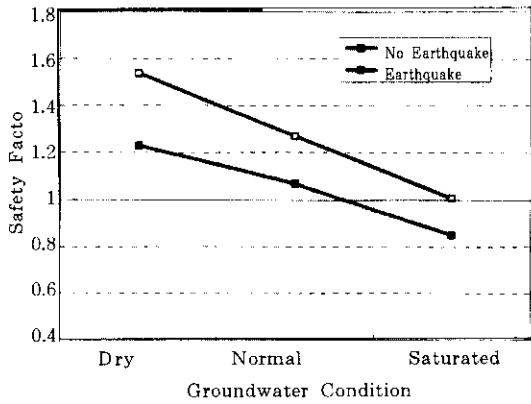


그림 4. 지하수면의 위치와 지진의 유무에 따른 사면의 안전율 변화

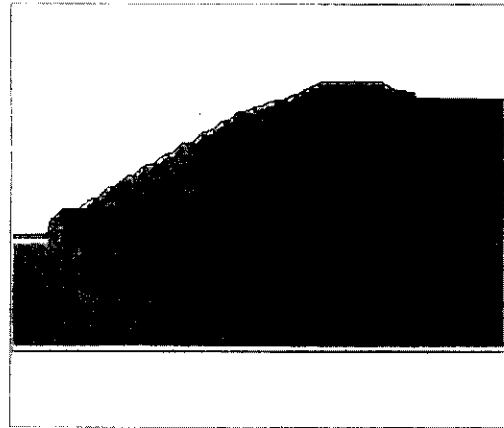


그림 5. 전단력이 사면의 전단강도를 넘어설 때 예상되는 파괴면

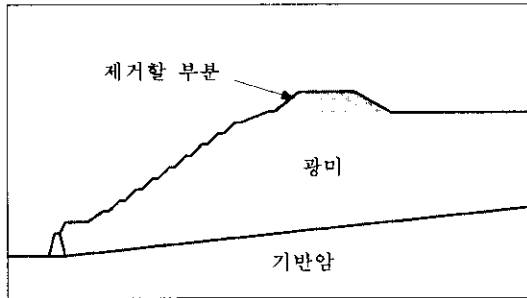


그림 6. 사면의 안정성을 향상시키기 위해 제거해야 할 최상단 부분

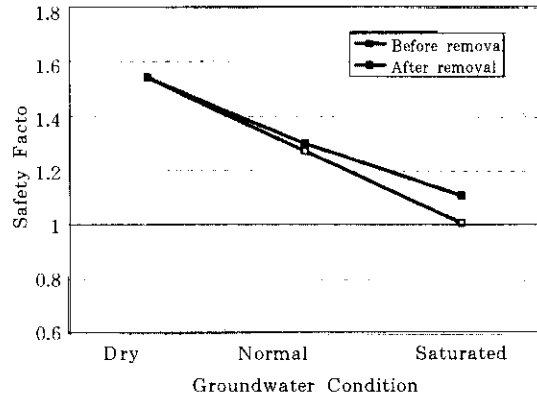


그림 7. 상단제거 전후의 안전율 비교

이것은 광미의 일부로서 분진의 비산을 막고, 지표수가 적치장 밖으로 넘치지 않고 배수로로 집수될 수 있도록 만들어 놓은 둔덕이다. 그러나 이곳에 쌓여있는 광미는 사면 상단에 전단력을 추가로 제공하고 있으므로 사면의 안정성을 감소시키는 요소로 작용하고 있다. 따라서 이 부분을 제거한다면 전단력이 줄어들므로 그만큼 사면의 안전율이 증가되는 효과를 얻을 수 있을 것이다.

이러한 상단제거 작업이 안전율 증가에 미

치는 효과를 알아보기 위하여 그 단면에 대하여 전산해석을 실시하였다. 그림 7은 해석 결과 얻어진 안전율을 상단이 제거되기 전의 안전율과 비교해 놓은 곡선이다. 그림에서 상단을 제거했을 때의 안전율은 그렇지 않을 때에 비해 높아지는 것이 확인된다. 특히 지하수면이 상승하여 간극수압이 증가할수록 상단을 제거할 때 안전율 상승효과가 두드러짐을 알 수 있다. 적치장이 완전히 침수했을 때 상단을 제거한 상태의 안전율은 1.11로서 상단을 제거하

기전의 안전율 1.01에 비해 10%의 안전율 증가효과가 있는 것으로 계산되었다.

5.2 장기대책

장기적으로 사면의 안정성을 확보하기 위해서는 그림 4에서 볼 수 있듯이 지하수면이 과도하게 상승하지 않도록 방지하는 일이 가장 중요하다. 이는 곧 매질 내에 작용하는 간극수압의 증가를 막음으로써 사면의 전단강도를 높이는 것을 의미한다. 사면의 지하수위가 상승하거나 하강하는 것은 적치장으로 유입되는 물의 양에 좌우되나 이를 원활하게 배수시켜서 유입량을 감소시킬 수 있다면 지하수면의 과도한 상승은 발생하지 않을 것이다. 따라서 배수 시설이 제 기능을 충분히 발휘할 수 있도록 보수, 보강공사를 실시하는 것이 광미적치장 사면의 안전을 근본적으로 확보할 수 있는 대책일 것이다. 배수 기능의 회복을 위하여 실시해야 할 공사 내용을 열거하면 다음과 같다.

(1) 적치장 상류측 호안 옹벽 시공

호안의 상류측에 석축으로 건조되어 있는 구간을 옹벽으로 대체한다. 이때 옹벽 후방에 필터층을 충전하고 옹벽에 배수공을 설치한다.

(2) 콘크리트 블록 보강

법면의 콘크리트 블록을 전면 교체한다. 이때 광미가 유실되어 공동을 형성한 곳은 후면 뒤채움을 실시하고 강우 시 표면수가 침투하지 않도록 콘크리트 블록의 연결부를 몰타르 등으로 충전한다.

(3) 석축 보강

석축을 헐고 다시 쌓는다. 이 때 기존의 공동은 후면 뒤채움을 하며 광미의 유실방지 및 원활한 배수를 위하여 후면에 필터층을 충전하며 배수공을 적당한 간격으로 배치한다.

(4) 소단 보강

소단의 표면을 콘크리트로 포장하여 침입수를 억제하고 각 소단의 지표수를 배재할 수 있는 배수로를 매 2단마다 설치한다.

(5) 기존 옹벽 보강

옹벽 하단부의 하천수에 의해 침식된 곳은 콘크리트로 보강하며 하류측의 기존 배수공에 부직포와 같은 필터재를 삽입하여 토사의 유출을 방지한다. 배수공이 설치되지 않은 구간은 옹벽의 후면을 터파기한 후 필터층을 충전하고 배수공을 설치한다.

(6) 산 복수로 정비

산복수로의 측구를 정비(되메움 등)하여 산록수가 광미적치장으로 흘러드는 것을 방지하며 산복수로 내에 유입된 암석 및 낙엽 등을 제거한다.

(7) 기존 지선 배수로 정비

a, b, d, e 지선 유입구를 낙석으로부터 보호할 수 있는 차단막을 설치하며 계곡물을 모두가두어 지선으로 유도할 수 있는 차수벽을 설치한다. 파손된 배수관을 보수한다.

이와 같이 배수시설을 보수, 보강했을 때 광미적치장의 안정성이 얼마나 향상될 수 있는지를 확인하기 위하여 전산해석을 수행하였다. 우선 배수 기능이 원활하게 작동할 경우 사면 내부의 지하수 흐름을 역시 FLAC을 이용하여 simulation하였고 또 그 때의 사면 안전율을 구하였다.

배수기능이 완벽하게 가동될 경우 적치장 표면의 물은 배수로를 통하여 밖으로 완전히 배수될 것이므로, 수리 모델링 조건중 지하수는 사면 배후 산록으로부터만 시스템 안으로 유입된다고 가정하였다. 이는 해석모델의 계곡쪽 경계면에 일정한 수압을 가해줌으로써 실현된다.

모델의 각 영역에 적용할 수리적 특성으로서 우선 지반층은 불투수층으로 가정하였다. 광미의 투수계수는 일반적인 토질의 평균치와 큰 차가 없이 10^{-3} m/sec일 것으로 추정되나 수치 모델링에서는 계산 속도를 빠르게 하기 위하여 이보다 훨씬 높은 값인 10^{-2} m/sec를 적용하였다. 이렇게 투수계수를 높이더라도 지하수의 정상 유동상태를 얻고자하는 본 모델해석의 목적상 그 결과에는 아무런 영향을 미치지 않는다. 그것은 수리모델에서 투수계수는 지하

수 유동이 수리적 경계조건으로부터 전 영역에 걸쳐 정상류 상태에 이를 때까지의 시간에 영향을 미치는 변수일 뿐 최종 지하수위나 최종 수압에 영향을 미치는 변수는 아니기 때문이다.

이러한 조건을 사면에 적용하여 해석한 결과 그림 8과 같은 지하수 흐름을 얻었다. 그림에서 사면쪽 지하수면은 콘크리트 옹벽의 하단에 형성되고 있는 것을 볼 수 있다. 그러므로 옹벽이나 피복사면에는 전혀 수압이 작용하지 않으며 따라서 침출수도 발생하지 않을 것임을 알 수 있다. 사면의 파괴는 대체로 응력집중이 일어나는 사면하부에서부터 시작된다는 사실을 감안할 때, 그 부분의 수위가 낮아져서 수압이 강화된다는 것은 사면의 안정성이 크게 향상될 수 있다는 것을 의미한다.

이를 확인하기 위하여 침투류 해석결과로부터 얻어진 지하수면을 적치장 사면에 적용하여 안전율을 계산하였는데 그 결과는 아래와 같다.

-지진이 일어나지 않을 경우 : $F=1.48$

-지진이 일어날 경우 : $F=1.13$

이를 배수시설이 개선되기 전의 평상시 수위에서 지진이 일어나지 않을 경우와 일어날 경우에 계산된 각각의 안전율 1.27 및 1.07과 비교할 때 안전율의 증가효과가 두드러짐을 알 수 있다. 즉 지진이 일어나지 않을 경우에는

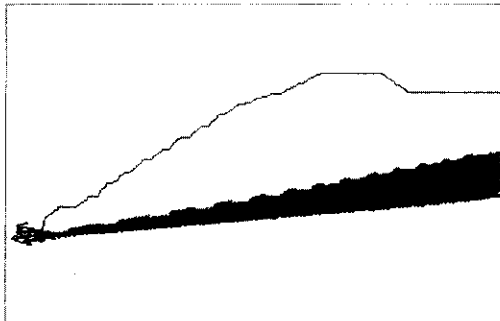


그림 8. 원활한 배수가 이루어지는 경우의 지하수 흐름

0.21, 그리고 지진이 발생할 경우에는 0.06의 안전율 상승을 기대할 수 있다. 이와 같은 해석결과를 놓고 볼 때 배수시설을 개선하여 배수가 잘 이루어도록 한다면 본 사면은 지진이 일어나지 않을 경우에 충분한 안정성이 확보될 수 있음은 물론, 지진이 일어나더라도 파괴될 가능성을 어느 정도 낮출 수 있음이 확인되었다.

6. 결 론

본 연구는 지금은 폐광된 한 중석광산에서 원광을 선광하는 과정에서 발생된 광미를 쌓아 둔 적치장 사면의 안정성을 진단하고 그 안정성을 향상시킬 수 있는 대책을 수립하기 위하여 수행되었다.

유한 차분법 프로그램인 FLAC을 이용한 2차원 모델을 이용하여 광미적치장의 안정성 해석을 실시한 결과 지하수면이 상승함에 따라 소성영역이 확대되어 안정성의 저하가 발생하는데 만일 지하수면이 지표에까지 이를 경우 사면은 파괴될 수 있음이 확인되었다. 특히 지진이 발생할 경우 지하수면이 평소의 위치에만 있더라도 안전율이 1.07 밖에 이르지 않으므로 사면의 안정성을 충분히 확보할 수 없는 것으로 판명되었다.

광미적치장 시설물들에 대한 현장조사와 FLAC을 이용한 사면의 안정성에 관한 전산해석 결과를 바탕으로 안정성을 향상시킬 수 있는 단기 대책과 사면을 파괴의 위험으로부터 근본적으로 보호할 수 있는 장기 대책을 제시하였다.

단기 대책은 사면의 최상단에 쌓여 있는 광미를 제거하는 것이다. 이렇게 할 경우 적치장이 완전히 침수하더라도 사면의 안전율은 상단을 제거하기전의 1.01에서 1.11로 증가하므로 사면의 최상단을 제거함으로써 단기적으로 안정성을 증대시키는 효과를 얻을 수 있음이 입증되었다.

장기적인 대책은 광미적치장 사면이 근본적

인 안정성을 확보할 수 있도록 하기 위한 것으로서 배수시설을 보수, 보강하고 법면시설을 개선하는 것이다. 이 경우 사면의 안전율은 지진이 없을 경우 1.48, 지진이 있을 경우 1.13으로 예측되었다. 이를 시설개선이 이루어지기 전의 안전율과 비교해볼 때, 광미적치장 사면은 지진이 일어나지 않을 경우에 충분한 안정성을 확보할 수 있음은 물론, 지진이 일어나더라도 파괴될 가능성을 어느 정도 낮출 수 있음이 확인되었다.

참 고 문 헌

1. 고헌선, 김교원, 백경원, 임석산, 정해상, 강현웅, 박장우(1996), *정밀안전진단 보고서*, 시설안전기술공단, pp. 11-69.
2. Bishop, A. W.(1955), "The use of the slip circle in the stability analysis of slopes", *Geotechnique*, Vol. 5, pp. 357-362.
3. Derski, W., Izbicki, R. Kisiel, I. and Mroz, Z.(1989), *Rock and soil mechanics*, Developments in geomechanical engineering Vol. 48, Elsevier, pp. 153-154.
4. Dunham, J. W.(1954), "Pile foundations for building", *Proc. of the ASCE, J. SMF Div.*, Vol. 80, SM. 1, pp. 1-21.
5. Goodman, R. E.(1989), *Introduction to rock mechanics*, John Wiley and Sons, pp. 80-82.
6. Sarma, S. K.(1973), "Stability analysis of embankments and slopes", *Geotechnique*, Vol. 23, pp. 423-433.
7. Schmertmann, J. H.(1970), "Static cone to compute static settlement over sand", *Proc. of the ASCE, J. SMFE*, Vol. 96, SM 3.