

수치해석에 의한 석회암 채굴 사면의 안정성 해석

임한욱¹⁾ · 김치환²⁾ · 백환조³⁾

Stability Analysis of Rock Slope in Limestone Mine by Numerical Analysis

Han-Uk Lim, Chi-Hwan Kim and Hwan-Jo Baek

Abstract. Two numerical methods such as DEM and FDM were adopted to analysis of rock slope stability, of which dimensions are about 150 m(length), 58 m(height), 70° dip, in Halla limestone mine. For this rock slope stability analysis, strength reduction method was used to calculate the safety factor of slope through numerical method. To keep the rock slope safely, it is proposed to reduce the height of the rock slope from 58 m to 45 m and to reduce the angle of the slope from 70° to 55°, too.

Keywords: Finite Difference Method, Distinct Element Method, Strength reduction method, Rock slope stability

초 록. 한라 석회암 광산에서 높이가 대체로 58 m이고 사면의 경사각이 70°인 암반 사면의 안정성 해석을 위하여 암반을 연속체로 가정한 FDM과 절리의 강도 특성 등을 주로 고려한 DEM 등 두 가지 수치해석법을 사용하였다. 수치해석법으로 사면의 안정성을 안전율로 표시하기 위하여 강도감소법을 이용하였다. 연속체 해석 결과에서는 사면의 안정이 유지되는 것으로 판단할 수 있으나 절리의 특성을 고려한 해석 결과 사면의 안전율이 1.3보다 크도록 사면을 안전하게 유지하기 위해서는 사면 높이를 45 m로, 경사를 55°로 변경하는 것이 바람직한 것으로 판단되었다.

핵심어: 유한차분법, 개별요소법, 강도감소법, 암반사면의 안정

1. 서 론

국토의 대부분이 산악지형인 우리나라의 경우 국토의 효율적인 개발을 위하여 도로, 댐, 항만, 터널 및 택지 조성 등 각종 시설물의 건설이 점차 증가하는 추세에 있다. 이러한 시설물을 건설하기 위해서는 암반의 절취가 불가피하며 굴착 후 남게 되는 암반 사면을 유지, 관리하는 것은 대단히 중요하다.

일반적으로 암반 사면을 안정하게 굴착, 유지하기 위해서는 암반 내 각종 지질적인 요소, 사면의 기하학적 형태, 지하수 및 발파 등에 의한 후천적인 영향 등이 검토되어야 한다. 이중 지질적인 요소란 암반중의 절리, 층리 및 단층 등을 포함하며 이들을 불연속면(discontinuity)이라 할 때 이들의 출현 빈도, 방향 및 경사 등의 요인과 물리적, 역학적 특성이 주요 요인이 된다.

그리고 사면의 기하학적 형태란 전체 사면의 구배(기울기)와 방향, 높이, 길이 및 필요시 소단(小段)의 설치

및 그 형태를 의미한다.

반면에 발파란 대부분의 암반 사면을 굴착하는 중요한 수단으로 이완 영역이 확산되지 않도록 즉, 원암반의 지내력을 최대한 보전할 수 있도록 정밀하게 굴착되어야 한다. 때때로 지표수가 암반 내 균열이나 공극으로 침투하게 되면 암반 강도의 저하와 암반 내 지하수의 흐름에 영향을 미쳐 사면 붕괴의 요인이 될 수도 있다.

이와 같이 복잡한 요인에 의해 좌우되는 암반 사면의 안정성을 해석하는 방법은 크게 경험적 방법과 수치해석적 방법으로 구별할 수 있다.

이 가운데 수치해석적 방법이란 암반 내 불연속면과 주요 역학적 특성을 구하고, 이를 해석 프로그램에 입력시켜 계산하는 방법으로 여기에는 연속체 해석과 불연속체 해석으로 나눌 수 있다. 연속체 해석은 대상 암반을 거시적으로 포착하여 그 영역 내에서 불연속성에 의한 역학적 특성을 등가(等價)가 되는 연속체로 바꾸고 파괴와 변형 상태를 해석하는 방법이다. 반면에 불연속체 해석은 대상 암반 중의 개개의 불연속면을 평가하여 암반을 암반 블록으로 된 불연속체로 간주하여 파괴 후의 암반 블록의 거동, 영향범위, 파괴메커니즘을 해석하는 방법이라 할 수 있다. 수치해석적인 방법은 컴

¹⁾정회원, 강원대 지구환경시스템공학과 교수

²⁾정회원, 우석대 토목공학과 교수

원고 접수일 : 2001년 5월 18일

원고심사완료일 : 2001년 9월 10일

퓨터의 발전과 더불어 지반공학 및 여러 분야에서 비교적 활발히 채택되고 있다. 특히 이 방법은 경험적인 판단, 실험실 자료와 계측에 의한 해석 등에 비하여 상대적으로 비용이 적게 소요되고 또한 정량적 평가가 가능하다는 점에서 널리 이용되고 있다.

최근에는 여러 가지 종류의 전산 프로그램이 개발되어 선택의 폭이 넓어졌지만 그에 못지 않게 연구 대상물의 조건에 가장 적합한 프로그램을 선정하고 사용하는 것도 중요하다고 하겠다. 이와 같은 이유로 본 연구에서는 Mohr-Coulomb 모델을 이용한 연속체 해석과 절리 모델을 이용한 불연속체 해석을 동시에 실시하고 그 결과 얻어진 자료를 고찰하였다. 특히 절리를 포함한 암반의 경우 암반 자체의 물리적 특성은 물론이고 암반 내에 존재하는 절리의 거동 특성에 의해 구조물의 안정성이 더욱 영향을 받게 되므로 UDEC(Universal Distinct Element Code)과 같은 개별요소법을 바탕으로 하는 프로그램을 선정하는 것이 더욱 타당한 것으로 알려져 국내에서도 최근에 지하공간 및 터널은 물론 암반 사면의 안정성 해석에 비교적 널리 이용되고 있다.¹⁴⁾

먼저 FLAC으로 불연속면을 포함한 등가의 암반물성을 고려한 연속체해석으로 사면의 안정성을 검토하도록 한다. 사면의 안정성은 사면에서 파괴영역이 발생하는 지를 강도감소계수의 변화에 따라 확인하도록 한다. 개별요소법에서는 각 암석블록의 파괴보다는 불연속면의 움직임에 따라 사면의 안정성이 좌우될 것으로 예상되므로 사면을 구성하는 암석블록의 변위속도를 기준으로 사면의 안정 여부를 판단하도록 한다. 즉 사면 내 암석블록의 변위속도가 거의 없는 상태를 사면이 안정된 상태로 판정하도록 한다.

수치해석방법으로 사면에서의 안전율을 구하기 위하여 다음과 같은 강도감소법(strength reduction method)을 적용하였다.⁶⁾ 사면의 안전율(Fs)은 실제 암반의 전단강도와 파괴가 발생하지 않는 최소 전단강도와의 비로써 정의한다. 따라서 암반의 실제 강도를 안전율로 나누면 사면에서 파괴가 일어나기 시작하는 강도로 감소시키게 된다. 강도감소법은 먼저 실제 암반의 점착력 c 와 내부마찰각 ϕ 을 임의의 사면 안전율(Fs)로 나누어 다음과 같이 감소시키고 이를 입력하여 계산을 수행한다.

$$c^{input} = c/Fs$$

$$\phi^{input} = \tan^{-1}((\tan \phi)/Fs)$$

이와 같이 임의의 안전율(Fs)을 변화시키면 사면에서 파괴가 발생할 때까지 안전율(Fs)을 조정하여 계산을

반복 수행하는 접근 방법이다. 따라서 안전율(Fs)은 강도감소계수(strength reduction factor)와 같아지게 된다.

사면의 안정 여부를 평가하기 위한 기준은 안전율로 하되 여러 기관에서 설정한 것을 참고로 이번 연구에서 적용할 안전율을 결정하도록 한다. 건설교통부 구조물 설계기준에 의하면 절토 사면의 최소 안전율을 1.3으로 정하고 있다. 또 일본 건설성의 표준 안전율은 1.1~1.3으로 정하고 있고, 영국 국립석탄공사(national coal board)에서는 최소안전율을 1.1~1.25로 정하고 있다. 도로 등 중요구조물이 아닌 경우 Hoek & Bray는 암반 사면의 안전율을 1.0~1.3으로 정하고 있다. 이와 같은 여러 기관의 예를 참고로 이번 연구에서는 사면의 최소 안전율을 1.3으로 정하고 이 값보다 작은 안전율의 경우 불안정한 사면으로 판정하기로 한다.

한편 연구 대상 구역은 험준한 태백산맥에서 석회암을 채굴하고 있는 라파즈-한라시멘트(주) 옥계광산의 한 사면으로 설정하였다.

2. 연구대상구역의 지질특성 및 채굴개요

옥계 광산의 지질은 캄브리아기 양덕층군의 묘봉층과 조선 누층군의 대 석회암층 군에 속하는 묘봉층, 원평층 및 이들 지층을 후기에 관입한 화강암과 기타 암맥류로 구성된다.

위 지층들은 북동쪽에서 남서쪽으로 서로 평행하게 대상(帶狀)으로 분포하고, 남동쪽으로 묘봉층, 풍촌층, 원평층 순서로 북쪽으로 경사져 있으며, 전체 지층의 주향은 N40°~50°E, 경사는 대체로 30°~40°NW이다. 채굴 대상은 상부 고품위대와 중·하부 석회암대 전체이다. 고품위대는 조립질의 석회암으로 유백색 내지 백색을 띤다. 석병산 17호 광구 내 채광장에서 석병산 49호에 이르기까지 그 연장이 약 7.5 km로서 CaO가 52.4~54.5%인 고품위대이다. 그러나 현재 가행중인 구간의 총 연장은 약 3.5 km이며, 단면으로 보면 상부의 원평층, 원평층 직하부 그리고 상부 백운암층 까지도이다. 그 결과 훼손면적 대비 채굴광량이 적어 그동안 지속적인 개발 작업이 진행된 결과 산림의 이용면적이 증가되었다.

최근에는 상부의 백운암층, 고품위 석회암층, 원평층을 제거하고 그 하부에 부존되어 있는 석회암을 회수하여 가채율을 향상시키고 아울러 급경사 사면에서 채광을 종료시 전체 사면의 경사가 대체로 70°정도로 잔치된다. 이들 광산에 대한 구체적인 지질 단면 및 광황 등은 기 보고한 내용⁵⁾에 제시되어 있어 생략하기로 한다.

이 광산에서 계단(bench)의 조성은 지층과 계단의 방



Fig. 1. View of Rock Slope in Limestone Mine.

향이 서로 역방향일 때와 평행한 경우로 대별된다. 즉 지층의 상반 방향으로 개설된 계단은 지층 경사와 역방향으로 조성되어 단층 등 2차적으로 생성된 불연속면에 의하지 아니하고는 사면 붕괴는 일어나지 않고 다만 발파에 의한 균열대에서 소규모로 부석이나 낙석 현상이 일어난다. 그러나 일부 구간에서 지층의 경사와 평행하게 조성된 계단에서는 대규모 미끌림(sliding) 붕괴가 우려된다. 계단 조성 과정에서 지층을 절단하여 노출된 불연속면이나 층리 사이로 우수의 침투와 대형 증장비의 지속적인 통행으로 침투수에 의한 점착력 약화와 장비 통행, 발파진동 등 외력에 의하여 층리 사이가 피로한계에 도달하면 사면 붕괴가 일어날 수 있을 것으로 우려된다. 특히 하반 경계에 묘봉층 직상부와 인접한 지역에서는 석회암과 점토 광물질이 교호상으로 퇴적되어 있어 안정성에 저해 요인이 되고 있다.

따라서 금번 연구 대상 구역은 옥계 광산의 채굴 사면 중 안정성이 가장 우려되는 42번 철탑하부 2~3개 계단과 SL440 통행로 끝자락 부분으로 대체로 그 길이는 150 m, 높이가 약 58 m 되는 구간인데 전반적인 모습은 Fig. 1과 같다. 사진 중앙부에서 보이는 바와 같이 부분적으로 소규모 붕괴가 일어나고 있다.

3. 유한차분법에 의한 안정성 해석

해석에 사용한 프로그램은 FLAC(Fast Lagrangian Analysis of Continua) 3.3 Version으로 유한차분법을 이용한 상용 프로그램이며, Newton의 운동방정식을 기초로 하여 개발된 프로그램으로 초기조건과 경계조건을 만족하는 해를 구하도록 구성되어 있으며, 토질, 암반 등 지반공학 분야의 문제를 풀기 위한 프로그램이다.

이 방법은 여러 가지 장점을 갖고 있지만 연속체 해

석을 한다는 점에서 암반과 같은 불연속면을 갖는 재료의 해석에는 사용에 제한이 따른다.

그러나 이 프로그램은 비교적 널리 활용되고 있기 때문에 기본적인 해석이론, 해석모델의 적용 및 해석과정 등에 대해서는 생략하기로 한다.

3.1 입력 물성치의 결정

전산해석을 위한 입력 물성치를 결정하는데는 많은 어려움이 따른다. 일반적으로 시추코어로부터 구해진 암석의 물성은 대부분 신선한 부분(intact rock)을 이용하여 구하기 때문에 현지 암반의 물성치로 결정하는데는 무리가 따른다.

따라서 실험실 결과치로부터 여러 가지 경험식을 이용하여 조정하였다. 이를 다시 RMR에 의한 암반 분류값과 비교하여 결정하였다.

실험실에서 시추코어를 사용하여 일축압축강도 및 기본물성, 압열인장강도, 삼축압축시험, 자연절리면 직접전단시험 및 절리압축시험 등을 국제암반역학회(ISRM)의 제안방법으로 실시하였다.

검토 대상이 되는 사면은 실제 채굴면보다 높을 뿐 아니라 지하수 흐름을 찾을 수 없어 지하수에 의한 영향은 고려하지 않았다.

먼저 변형계수의 보정에 관해서는 Bieniawski, Serafim과 Pereira, Mitri, Nicholson 등이 제안한 식 가운데 가장 작은 값으로 구해지는 Nicholson의 제안식(1)을 이용하였다.

$$E_m = \left[0.0028R^2 + 0.9 \exp\left(\frac{R}{22.82}\right) \right] E_i \quad (1)$$

여기서 E_m 및 E_i 는 각각 현지 변형계수 및 실험실에서 구한 탄성계수로 그 단위는 GPa이고 R은 RMR 값이다.

현지 암반의 인장강도는 Hoek & Brown이 제시한 경험식(2)을 사용하였으며(2)식에 포함된 m과 s는 상수로서 각각(3) 및(4)로부터 구한다.

$$\sigma_t = 0.5 \cdot \sigma_c (m - \sqrt{m^2 + 4s}) \quad (2)$$

$$m = m_i \exp\left(\frac{R-100}{14I_m}\right) \quad (3)$$

$$s = \exp\left(\frac{R-100}{6I_s}\right) \quad (4)$$

여기서 m_i 는 신선암에 대한 m의 값이고, I_m 은 기계 굴착 및 조절발파를 시행하여 암반이 불교란되었을 때

는 1, 교란되었을 때는 2를 적용하며, I_3 는 불교란 암반 일 경우 1, 교란암반일 경우는 1.5를 적용한다. 암중에 따른 구체적인 값은 본 연구에서는 생략하기로 한다. 다음으로 내부마찰각과 점착력을 추정하는 식으로 Trueman은 식 (5)와 (6)을, 국내에서는 식 (7)과 (8)을 사용하기도 한다.

$$c_m = 0.25 \exp(0.05R) \quad (5)$$

$$\phi_m = 0.5R + 5 \quad (6)$$

$$c_m = -0.051 + 0.008R - 3.346 \times 10^{-5} R^2 \quad (7)$$

$$\phi_m = -0.0086 + 0.789R - 0.003R^2 \quad (8)$$

그리고 Trunk는 Trueman이 발표한 식 (6)을 (9)와 같이 수정, 발표하였다.

$$\phi_m = (0.5R + 8.3) \pm 7.2 \quad (9)$$

위들 식에서 R은 RMR값이다.

FLAC 해석을 위한 실험실 물성치와 조정한 값들을 요약하면 Table 1과 같다.

3.2 해석 결과

FLAC 해석을 위한 절점망은 Fig. 2, Fig. 5와 같고, 해석 결과 X 및 Y 방향의 변위, 변위벡터, 주응력, 파괴영역 등을 구하였는데 이들 중 사면의 파괴를 알 수 있는 파괴영역을 예시하면 각각, Fig. 3, 4 및 Fig. 6과 같다.

높이 58 m, 사면경사 70°인 사면에서 강도감소 계수를 여러 가지로 변화시켜 계산을 수행하였다. 그 중 강도감소계수를 2.5와 3으로 가정하여 조정한 경우를 살펴보면 Fig. 3 및 Fig. 4와 같이 사면의 최하단과 최상단 부근에서 파괴영역이 약간 발생하고 있고 강도감소 계수를 3에서 2.5로 감소시킨 결과 파괴영역의 크기가

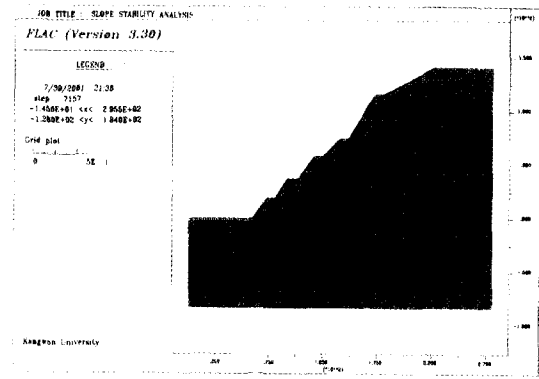


Fig. 2. Plot of grid for FLAC (Height = 58 m, Angle = 70°).

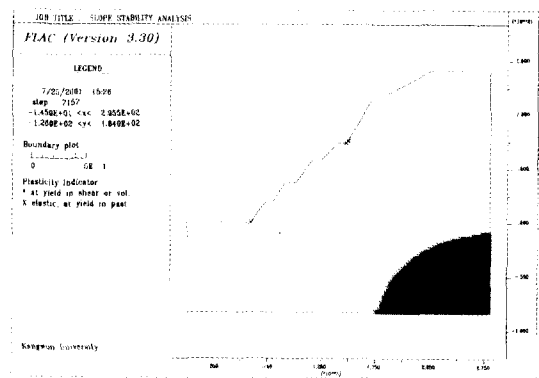


Fig. 3. Plot of plastic zone (Height = 58 m, Angle = 70°, Strength reduction coefficient = 2.5).

줄어드는 것을 알 수 있다. 사면에서 파괴영역이 발생되지 않도록 하기 위하여 사면의 높이를 45 m로, 사면의 경사각을 55°로 낮추어 안정성을 검토하였다. 사면의 높이를 45 m로 낮추고 강도감소계수가 3일 때는 Fig. 6과 같이 사면에 약간의 파괴영역이 여전히 나타나고 있다. 그러나 강도감소계수를 2.5로 변경한 경우에는 파괴영역이 전혀 나타나지 않았다. 따라서 사면의 높이

Table 1. Input data of FLAC.

Properties	Lab. Value		Input data	Remarks
	Ave. Value	Range		
· Uniaxial comp. strength (MPa)	112.7	101.4-164.1	113	
· Brazilian tensile strength (MPa)	10.3	9.5-14.8	1.33	equation (2)
· Young's modulus (GPa)	51.89	46.70-57.12	7.17	equation (1)
· Poisson's ratio	0.254	0.232-0.269	0.254	
· Density (gr/cm ³)	2.641	2.594-2.685	2.641	
· Cohesion force (MPa)	14.2	10-21.9	2.5	equation (7)
· Int. friction angle (°)	54.4	51.1-57.4	30	equation (9)

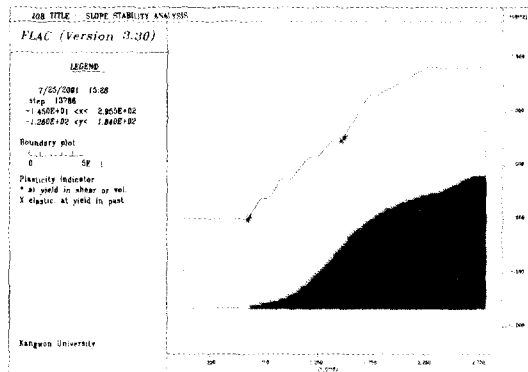


Fig. 4. Plot of plastic zone (Height = 58 m, Angle = 70°, Strength reduction coefficient = 3.0).

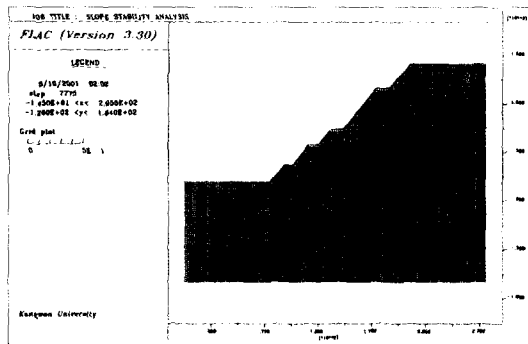


Fig. 5. Plot of grid for Flac (Height = 45 m, Angle = 55°).

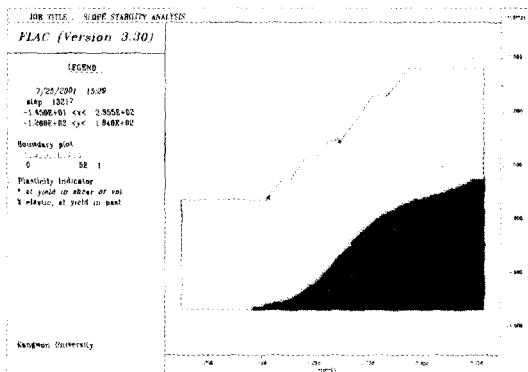


Fig. 6. Plot of plastic zone (Height = 45 m, Angle = 55°, Strength reduction coefficient = 3.0).

를 45 m로 낮추며 사면경사를 55°로 줄이고 연속체 해석으로 사면의 안정성을 평가한 결과 파괴영역이 발생하지 않는 안전율은 약 2.5이었다. 이를 다시 후술하는 개별요소법으로 절리의 방향과 강도를 고려한 해석으로

구한 사면의 안전을 약 1.3과 비교할 때 연속체 해석으로 구한 안전율이 약 2배 정도 높게 나타났다.

4. 개별 요소법에 의한 안정성 분석

개별 요소법은 Cundall(1971)이 처음 제안한 방법으로 암반공학 문제들을 풀 수 있는 효과적인 수치해석 기법으로 인식되고 있다. 절리면 사이 접촉면의 특성을 나타내기 위하여 절리의 강성을 고려하였고, 운동방정식을 수치 적분하기 위하여 명시적 유한차분법을 사용하는 것이 그 특징이다. 암반은 절리압반이 서로 연결되어 구성된 블록들의 집합체로 다루어지며, 개별 블록은 블록 내부의 유한차분 요소망에 의해 분할된다. 본 해석에 사용한 UDEC은 Cundall 등이 개발한 개별 요소법의 수치해석 기법을 사용한 프로그램이다.

4.1 프로그램의 개요 및 이론

해석에 사용된 프로그램은 개별요소법을 바탕으로 한 UDEC(Universal Distinct Element Code) 3.10 version으로 불연속면 사이의 접촉면의 특성을 나타내기 위하여 불연속면의 강성을 고려하였고, 운동방정식을 수치적분하기 위하여 FLAC과 마찬가지로 Explicit scheme을 사용하는 것이 특징으로 블록의 이동에 의해 경계면에 발생하는 접촉력 및 변위를 계산한다.

블록의 이동은 블록 시스템을 가로질러 경계면에 전달되는데 이는 동적으로 블록 시스템의 물리학적 특성으로 속도가 전파됨을 의미한다. 수치 해석적인 관점에서는 이러한 동적인 거동은 시간이라는 매개변수를 도입하여 표시한다. 이때 시간의 크기는 매 계산단계에서 각 블록의 이웃 블록들에 대한 침투가 즉각 전달되지 않을 정도로 충분히 작아야 한다. 이러한 과정은 연속체에서 유한차분법의 Explicit법에서 사용하는 방법과 유사하다. 이 개별요소법에 의한 블록 시스템의 변위 계산은 동적인 계산식에 기초를 두고 있기 때문에 정적인 문제에 이 방법의 적용은 시스템이 안정된 상태로 수렴하기 위하여 Damping 상수를 도입하여 동적이완(Dynamic relaxation)을 시킨다. 이 방법에 사용되는 알고리즘은 강성블록 사이의 상호작용을 나타내는 힘-변위 관계식과 각 블록에 작용하는 힘과 모멘트에 의한 운동방정식에 기초를 두고 있다.

4.2 모델의 적용 및 해석과정

UDEC에서는 FLAC과 마찬가지로 Null model group, Elastic model group 및 Plastic model group이

있으며 일반적으로 토사나 암반으로 구성되어 있는 지반의 거동 특성은 흔히 Plastic model group 중에 Mohr-Coulomb model로써 표현되고 있다.

그리고 불연속면의 미끄러짐이나 분리현상, 그리고 불연속면의 움직임에 따른 암반 블록의 회전 및 이동 현상 등을 정확히 모사하기 위해 Barton과 Bandis에 의해 비선형 Barton-Bandis joint model이 새롭게 제안되기도 하였다.

이 모델은 불연속면의 변형과 강도에 미치는 불연속면 거칠기의 영향을 일련의 경험적 관계식에 의하여 표현하였으며 다음과 같은 특성을 가진다. 절리의 수직거동은 쌍곡선적인 응력-변위 경로, 반복적인 하중의 재하에 의한 시간 이력, 반복적인 하중의 재하에 의한 수직강성의 증가, 전단변위에 의해 발생된 불연속면 표면의 엇갈림에 의한 수직강성의 변화, 절리의 압착량과 절리면의 거칠기에 근거한 수리적 틈(hydraulic aperture of joint) 등을 고려하였다.^{6,9)}

그리고 절리의 전단거동은 수직응력과 전단변위 함수로서의 확장, 최대 전단 이후의 절리면 손상, 최대 전단 이후 반복 재하시 2차 최대전단강도의 감소 등을 고려하였다.

4.3 입력 물성치

4.3.1 암반블록의 물성

연속체 해석과는 달리 UDEC과 같은 불연속체 해석에서는 불연속면의 영향이 명시적(explicit)으로 고려되기 때문에 암반 블록의 물성은 시추코어에 대한 암석 실내시험 결과에 따라 결정하였다.

(1) 변형계수와 포아송비

본 연구에서 사용되는 UDEC 소프트웨어에서는 불연속면과 불연속면 사이에 존재하는 암반 블록을 변형하지 않는 강체나, 변형이 가능한 블록으로 설정할 수 있다. 심도가 낮거나 작용하는 봉압의 크기가 작은 경우 불연속 암반의 변형거동은 주로 불연속면의 변형거동에 의하여 좌우된다. 하지만 본 연구의 해석 대상처럼 비교적 대규모인 경우 불연속면의 거동은 변형거동 못지 않게 암반 블록의 변형거동 또한 불연속 암반의 변형거동에 중요한 영향을 끼친다. 따라서 본 연구에서는 암반 블록을 변형 가능한 블록으로 설정하였다. 이 경우 암반 블록의 변형계수가 필요하다.

변형계수는 암석 실내시험 결과의 평균값인 51.89 GPa, 포아송비는 0.254로 하였다.

(2) 내부 마찰각, 점착력, 인장강도 결정

내부 마찰각, 점착력, 인장강도는 암석 실내시험 결

Table 2. Input data of UDEC.

	Joint set #1	Joint set #2	Joint set #3	Remark
Dip (°)	72.46	53.5	15.5	①
Length (m)	25	18	20	②
Aperture (m)	0	0.01	0.01	③
Spacing (m)	0.5	1.0	0.7	④
JKn (MPa/m)	6321	5432	5872	⑤
JKs (MPa/m)	593	534	561	⑤
JRC	7	5	6	⑥
JCS (MPa)	131	93	109	⑦
Lo	0.1	0.1	0.1	⑧
ϕ_r (°)	33	34	31	⑤
σ_c (MPa)	113	113	113	⑨

과의 평균값에 가까운 값을 선택하였으며 그 값은 각각 54°, 14 MPa, 10.3 MPa이다.

4.3.2 불연속면의 물성

불연속면의 물성은 국제암반역학회(ISRM)에서 제안한 실험법으로 실측하는 방법과 Bandis 등(1982)의 연구 결과를 근거로 하여 경험식으로 구하는 방법이 있다. 본 연구에서는 현장에서 지질조사에 의한 값과 실험실에서 구한 값을 사용하였는데 그 내용은 Table 2와 같다.

- ① 실제의 경사방향과 경사각을 전산 모델링 단면방향으로 축변환 시킨 값
- ② 평균값은 요소 크기를 고려하여 가정한 값이며, 표준편차는 측정치 중 최대편차
- ③ 모든 불연속면은 연결된 것으로 가정함으로써 해석모델을 간략화
- ④ 측정치의 10배를 적용(이를 다시 변형가능 블록으로 재분할함으로써 현장과 유사한 효과 도모)
- ⑤ 절리면 전단시험 결과 적용
- ⑥ 현지암반 불연속면 조사 결과 적용
- ⑦ 현장 Schmidt hammer test 조사 결과 적용
- ⑧ 절리면 전단시험 시료의 전단 방향 길이
- ⑨ 실내 암석물성시험 결과 적용

실제 절리의 간격이 0.5~1.0 m로 좁기 때문에 수치모델의 절리 간격으로 입력하면 소프트웨어의 기능상 계산 수행이 어려우므로 수치모델에 입력한 절리 간격은 넓게 하였다.

절리의 전단강도 시험값 중 최대마찰각과 점착력을 입력하였다. 이는 같은 방향의 절리라 하더라도 연속되지 않고 단속적으로 분포된 상태를 감안하여 실험값 중

최대치를 입력하였다.

4.4 해석모델과 조건

해석모델은 FLAC의 경우와 마찬가지로 너비 125 m, 높이 125 m로, 이 가운데 계단만의 높이는 58 m, 길이 150 m를 해석대상으로 하였다. 요소망의 하부와 수평방향의 변위 속도를 고정하였으며 절리 간격 및 경사 그리고 길이 등은 현지에서 실측하여 구한 값 즉 Table 2에 주어진 값을 그대로 적용하였다. 절리 사이의 암괴 내부는 다시 유한 차분 요소망을 구성하여 암괴 자체의 변형도 가능하도록 하였다.

4.5 해석 결과 및 고찰

UDEC 해석을 위한 개별 요소망은 Fig. 7, Fig. 11과 같다. UDEC 해석의 경우도 FLAC 해석과 마찬가지로 X 및 Y 방향의 변위, 변위벡터, 주응력, 파괴영역 등을 구하였는데 이들 중 변위속도 상태를 도시하면 각각

Fig. 8, Fig. 12와 같다. 변위속도가 나타나는 것은 절리로 분리된 암반 블록이 안정되지 않고 변위가 발생하는 상태 즉 암반사면 중 불안정한 영역을 표시한다.

사면의 높이가 58 m, 사면 경사가 70°일 때, 강도감소 계수를 여러 가지로 조절하면서 안정성을 검토하였다. 그 중 절리의 강도를 강도감소계수 1.3으로 나누어 강도를 감소시킨 후 해석한 결과 사면전체에서 변위속도 벡터가 큰 것을 Fig. 8에서 볼 수 있다. 사면의 높이가 높고 사면 경사가 급하기 때문에 전체 사면이 불안정한 모습을 보이고 있는 것이다. Fig. 9는 절리면 전단변위를 보여주는데 절리면에서 발생하는 최대전단변위를 보면 약 8.496 mm로 사면 내부 절리에서 발생하고 있다. 절리면 전단변위가 크게 발생하는 절리면을 연결하면 사면이 파괴되는 양상을 알 수 있다. Fig. 10은 절리가 열리는 변위를 보인다.

원래 높이 58 m, 경사 70°인 사면의 안전율이 1.3보다 작으므로 사면의 안정성을 확보하기 위하여 사면을

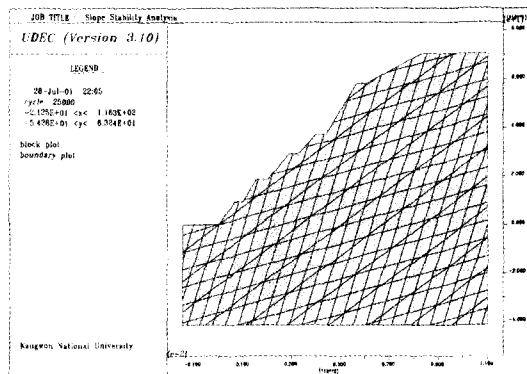


Fig. 7. Plot of discrete element grid (Height = 58 m, 70°).

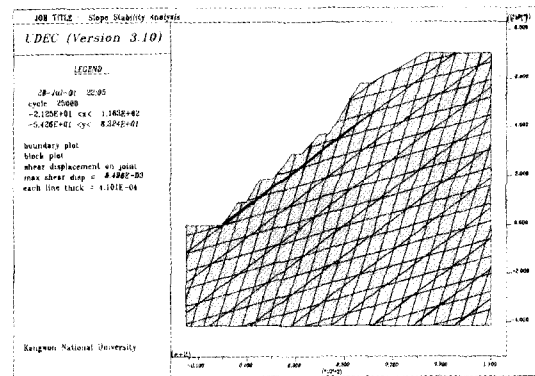


Fig. 9. Plot of joint shear displacement (Height = 58 m, Angle = 70°, Strength reduction coefficient = 1.3).

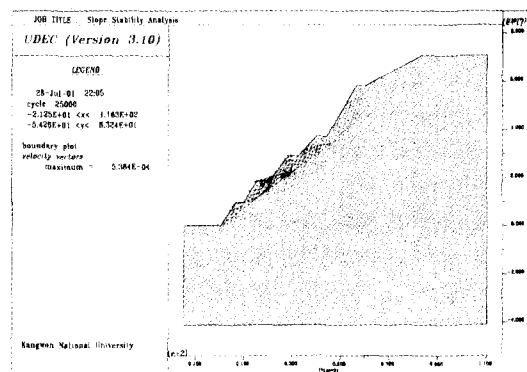


Fig. 8. Plot of displacement velocity vector (Height = 58 m, Angle = 70°, Strength reduction coefficient = 1.3).

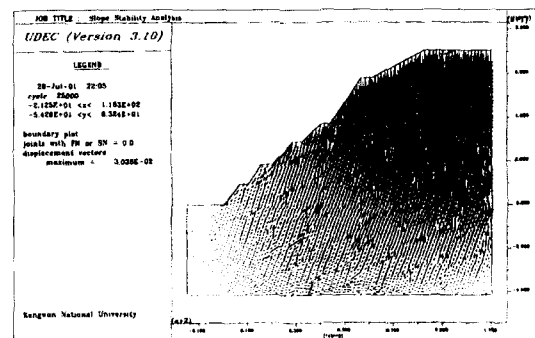


Fig. 10. Plot of joint opening displacement (Height = 58 m, Angle = 70°, Strength reduction coefficient = 1.3).

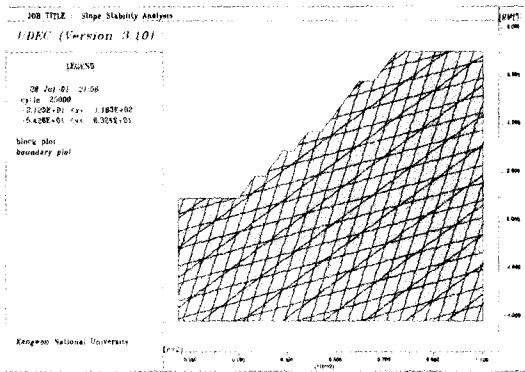


Fig. 11. Plot of discrete element grid (Height = 45 m, Angle = 55°).

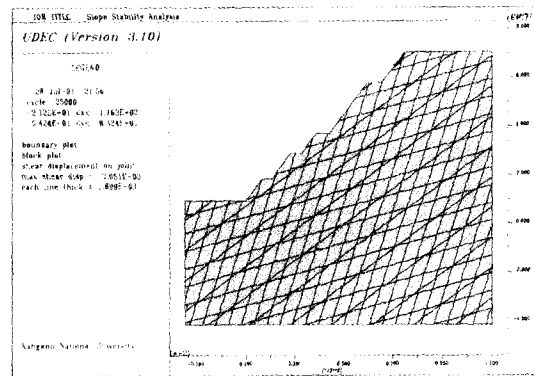


Fig. 13. Plot of joint shear displacement (Height = 45 m, Angle = 55°, Strength reduction coefficient = 1.3).

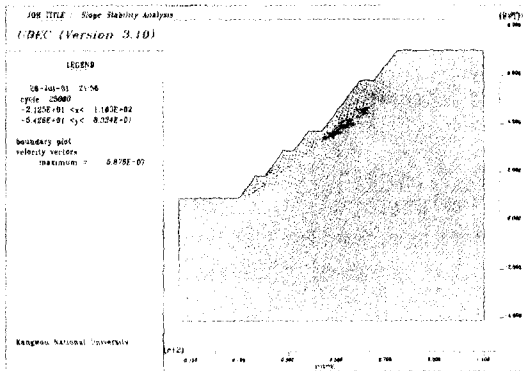


Fig. 12. Plot of displacement velocity vector (Height = 45 m, Angle = 55°, Strength reduction coefficient = 1.3).

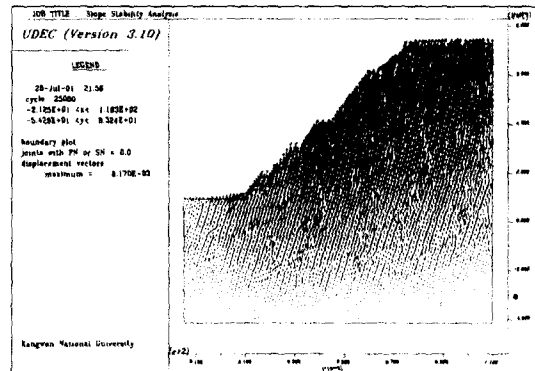


Fig. 14. Plot of joint opening displacement (Height = 45 m, Angle = 55°, Strength reduction coefficient = 1.3).

보강하거나 사면의 높이와 경사를 조정하는 방법이 있으나 시멘트 원료로 쓰이는 석회암인 것을 고려하면 사면의 높이와 경사를 변경하는 것이 유리할 것이다. 이에 따라 사면의 높이를 약 45 m로 낮추고 사면의 경사도 약 55°로 줄인 후에 같은 방법으로 안정성을 검토하였다. 강도계수가 1.3인 경우 사면 전체에서 변위 속도가 크게 감소되어 안정된 상태를 보인다. 사면의 암반 블록에서 변위가 거의 없는 상태를 Fig. 12에서 확인할 수 있다. Fig. 13과 같이 절리면 사이에서 발생하는 최대 전단변위도 약 2.051 mm로 줄었다. Fig. 14는 절리면이 열리는 변위를 보이는데 약 6.170 mm로 줄어든 것을 알 수 있다. 연속체 해석으로 검토한 사면의 안전율과 비교하면 높이 45 m, 경사 55°인 사면에서 FLAC으로 해석한 안전율이 약 2.5일 때도 사면은 안정상태로 보였으나 절리를 주로 고려한 개별요소법에서는 안전율이 약 1.3으로 작아졌다. 이는 절리의 방향과 강도

에 따라 사면의 안전율이 크게 낮아지는 것을 의미한다. Fig. 1에서 보듯이 실제로 높이 58 m, 경사 70°인 사면의 일부가 파괴된 양상을 볼 때 개별요소법에 의한 해석이 좀더 실제적인 것으로 판단된다. 따라서 사면의 높이를 58 m에서 45 m로 낮추고 사면의 경사를 70°에서 55°로 줄였을 때 사면의 안전율은 약 1.3인 안정된 상태가 될 것으로 예상되었다.

4.6 안정성 확보를 위한 제안

암반을 연속체로 가정하고 실시한 FLAC 해석과 암반을 불연속체로 고려하여 해석한 UDEC의 결과에 따르면 사면의 표면에서 미끄러짐이 발생한 곳에서 사면의 안정성을 확보하기 위해서는 사면의 구배와 높이의 조정이 요구된다. 즉 사면의 높이를 현재의 58 m에서 대체로 45 m로 축소하고 사면의 구배를 70°에서 55° 내외로 조정할 것을 추천한다.

5. 결 론

본 연구에서는 절리 암반의 안정성을 위하여 암반을 연속체로 가정한 FLAC 해석과 암반내 각종 불연속면의 존재와 이들의 영향을 고려할 수 있는 UDEC 해석을 실시하였다.

앞으로 안정적인 사면 유지를 위해서는 사면의 높이를 58 m 에서 대체로 45 m 로 축소하고 구배 역시 70° 에서 55° 내외로 조정하면 절리의 방향과 강도를 고려할 때 사면의 안전율은 약 1.3으로 예상되어, 안정된 상태를 유지할 것으로 판단된다.

사 사

본 연구는 1997년부터 2000년까지 한국학술진흥재단의 대학부설연구소 과제 연구비(강원대학교 부설 자원개발연구소)에 의한 세부과제 “환경오염 저감을 위한 석회석 광산 개발방안에 관한 연구”의 일부로 연구되었으며 지원에 감사 드립니다.

참고문헌

1. 강추원, 1999, Barton-Bandis 절리 모델에 의한 지하
2. 김치환, 2000, 개별요소법에 의한 터널의 안정성 해석에 있어 설계 정수의 결정, 한국암반공학회지, 터널과 지하공간, 9(3), 278-290.
3. 장명환, 양형식, 1999, 암반 구조물의 수치 해석을 위한 입력 자료의 비교분석, 한국암반공학회지, 터널과 지하공간, 9(3), 221-229.
4. 최성용, 정소결, 1999, Barton-Bandis joint model을 이용한 절리 암반 사면의 안정성 해석, 한국암반공학회지, 터널과 지하공간, 9(2), 141-148.
5. 임한옥, 김재동, 백환조, 2000, 환경오염 저감을 위한 석회석 광산 개발 방안에 대한 연구, 한국암반공학회지, 터널과 지하공간, 10(1), 80-91.
6. E.M.Dawson, W.H. Roth and A. Drescher, 1999, Slope stability analysis by strength reduction, Geotechnique 49(6), 835-840
7. Barton, N. and S. Bandis, 1982, Effects of block size on the shear behavior of jointed rock, Keynote Lecture, Proc. 23rd U.S. Symp. on Rock Mech., 739-760.
8. Barton, N., 1990, Scale effects or sampling bias, Proc. Int. Workshop on Scale Effects in Rock Masses, 31-55.
9. Barton, N. and S. Bandis, 1990, Review of predictive capabilities of JRC-JCS model in engineering practice, Proc. Int. Symp. on Rock Joints, Norway, 603-610.
10. Itasca Consulting Group, Inc., 1995, FLAC User's Manual, Version 3.3.
11. Itasca Consulting Group, Inc., 2000, UDEC User's Manual, Version 3.10.



임 한 옥

1966년 서울대학교 자원공학과 공학사
1980년 서울대학교 대학원 자원공학과 공학석사
1985년 서울대학교 대학원 자원공학과 공학박사
1996-1998년 강원대 공과대학원장 겸 산업대학원장
Tel : 033-250-6253
E-mail : hulim@cc.kangwon.ac.kr
현재 강원대학교 지구환경시스템공학과 교수



김 치 환

1983년 서울대학교 자원공학과 공학사
1985년 서울대학교 대학원 자원공학과 공학석사
1990년 서울대학교 대학원 자원공학과 공학박사
Tel : 063-290-1468
E-mail : kimchee@hanimail.com
현재 우석대학교 토목공학과 교수



백 환 조

1984년 서울대학교 자원공학과 공학사
1986년 서울대학교 대학원 자원공학과 공학석사
1994년 University of Texas at Austin, 토목공학과, 공학박사
Tel : 033-250-6257
E-mail : hwanjo@cc.kangwon.ac.kr
현재 강원대학교 지구환경시스템공학과 교수