

불연속 암반의 역학적 성질과 암반구조물의 안정성 평가

Mechanical characteristics of discontinuous rock mass and stability evaluation of rock structures

이정인, Chung-In Lee

서울대학교 공과대학 지구환경시스템공학부 교수, Professor, Division of Civil, Urban and Geosystem engineering, Seoul National University, Seoul

Synopsis: The characteristics of discontinuities have a great influence on the behavior of rock masses. The understanding and the application to the subsequent analysis of these characteristics have been the main concern of the engineers engaged in rock mechanics. This paper includes study on the following topics; the shear strength and deformation behavior of discontinuities, the numerical analysis of mechanical behavior of discontinuous rock, hydraulic characteristics of rock mass and stability analysis of rock blocks around a tunnel, which has been conducted in Rock Engineering Laboratory, Seoul National University.

Keywords: discontinuities, shear, deformation, numerical analysis, hydraulic, stability analysis of rock blocks

1. 서론

암반은 다른 공학재료와는 달리 지질학적 생성과정에서 단층, 절리, 층리, 균열 등의 역학적인 불연속면을 포함하고 있다. 특히 우리나라 암반은 대부분이 지질학적으로 고생대, 중생대의 오래된 지층에 속하여 암석재료 자체는 견고하고 치밀하나 거듭된 조산운동(造山運動)과 습곡작용으로 단층, 절리 등의 불연속면이 심하게 발달되어 있다. 그러므로 현지암반의 역학적 변형거동과 안정성은 이러한 불연속면의 분포특성과 역학적 특성에 크게 좌우된다. 따라서 암반 불연속면의 역학적 성질을 정량적으로 규명하고 이를 암반구조물의 안정성 평가에 합리적으로 반영할 수 있는 해석방법에 관한 연구가 암반공학의 가장 중요한 문제로 대두되고 있다.

불연속면의 역학적 특성 중 가장 비중있게 다루어 지는 요소중의 하나가 전단강도이다. 전단거동 및 전단거동에 관한 연구는 Patton(1966)을 비롯한 여러 연구자에 의해 수행되어 왔는데 그 중 Barton(1973)의 경험식은 불연속면의 전단강도에 영향을 미치는 인자를 고루 포함하여 지금까지 널리 이용되고 있다. 그러나 이 경험식에 사용되는 절리거칠계수 JRC는 정확한 물리적 의미를 갖지 못하고 정량적으로 판별할 수 없다는데 문제점이 있다. 따라서 여기에서는 불연속면의 전단강도와 변형특성에 관한 연구내용과 함께 거칠기 매개변수에 관한 연구내용을 소개한다.

한편 불연속 암반의 안정성 해석에는 블록이론을 이용한 강체블록의 해석, 개별블록의 안정성 해석, 수치해석에 의한 역학적 안정성 해석, 불연속면을 통한 지하수유동의 수리적 해석 등이 있다. 블록이론은 터널의 굴착시 발생하는 낙반사고방지를 위해 사용할 수 있는 해석방법인데 굴착면과 불연속면의 방향관계에 따라 좌우되는 암반블록의 안정성 변화를 알 수 있게 해준다. 개별블록의 안정성 해석은 블록이론의 단점을 보완한 것으로서 대상부지에 나타나는 낙반가능블록들에 대한 보다 상세한 정보를 보여

준다. 이 논문에서는 블록이론을 간단히 소개하고 개별블록의 안정성 해석의 연구적용사례를 소개한다.

지하 구조물의 거동해석에 이용되고 있는 수치해석 방법에는 유한요소법, 유한차분법, 개별요소법, 경계요소법등이 있다. 이러한 수치해석법들을 적용할 때 암반은 연속체와 불연속체, 2가지로 모델화 될 수 있다. 전자는 불연속면을 연속체로 등가화한 암반물성을 입력자료로 하며 후자의 경우는 불연속면과 암석을 개별적인 요소로 다루게 된다. 최근에는 연속체 모델과 함께 불연속체 모델을 사용하여 절리의 여러 특성을 직접 고려하는 방법들이 개발되고 있으며(Goodman, 1969, Plesha, 1987) 이러한 수치해석에 있어 입력자료로 활용하기 위해 절리면의 상태 및 변형·파괴거동에 대한 연구가 진행되고 있다. 이 보고에서는 유한요소법에 의한 절리암반의 점소성해석과 개별체 절리해석에 대한 연구를 소개한다. 또한 원유액화석유가스의 비축시설에서는 불연속면에 의한 지하수 유동해석이 가스누출을 방지하는 수봉(水封가)시스템 설계에 대단히 중요하므로 불연속면의 연결망 모델에 의한 해석의 연구결과도 소개한다.

이 보고에서 소개하는 연구는 필자가 소속하고 있는 서울대학교 공과대학 암반공학연구실에서 최근 몇 년간 수행된 연구중 관련사항을 발췌한 것이며 공동 연구자의 이름을 본문중에 인용함으로써 연구기에 대한 보답의 뜻을 나타내고자 하였다.

2. 암석 불연속면의 전단강도 및 변형특성

현지암반의 불연속면 강도 및 변형에 영향을 미치는 절리면 상태 및 하중조건 등에는 여러 가지가 있으나 특히 전단강도 및 변형에 영향을 미치는 요소로는 절리면의 거칠기(roughness), 절리면의 풍화정도, 방향, 수직응력, 기본마찰각 등을 들 수 있다. 필자 등은 불연속면을 갖는 암석의 전단강도 및 변형 거동에 관한 연구에서 일개군(一箇群)의 규칙적이고 평탄한 인공절리면을 갖는 비교적 큰 암석시험편을 만들어 일면전단시험을 수행하고 전단방향에 대한 불연속면의 방향과 불연속면 매수가 전단강도 및 변형에 미치는 영향을 조사하였으며 여기에서의 연구 결과가 자연층리면을 갖는 이암시료의 일면전단시험에서도 일치함을 확인한 바 있다(1, 2). 그 이후에도 서로 90° 를 이루는 두 개의 인공절리면을 가지는 암석시험편에 대한 일면전단시험에서 불연속면의 방향에 따른 최대전단응력과 수직변위의 이방성을 조사하였으며(5) 인공절리면을 갖는 암석시험편 삼축압축시험에서도 연약면의 하중방향과 이루는 각도가 강도 및 변형에 미치는 유사한 결과를 조사한 바 있다(3, 4). 그러나 이러한 연구는 톱으로 자른 평탄한 절리면을 대상으로 하였으며 하중방향에 대한 불연속면의 방향각을 중심으로 강도의 이방성을 주로 조사하였다.

절리면의 거칠기와 절리면의 풍화정도에 따른 압축강도를 고려한 Barton의 전단강도를 나타내는 경험식이 최근 널리 사용되기 시작하면서 이 경험식에서 제안한 절리거칠계수(JRC)가 많은 연구의 대상이 되고 있다. 그러나 Barton이 제안한 절리거칠계수는 물리적 개념에서 정량적으로 도출한 매개변수가 아니고 10단계의 곡선의 형태를 제시하여 정성적으로 나타내고 있어서 객관적이고 정확한 값을 얻기 어렵다. 이러한 문제점을 인식하여 절리면 거칠기를 다른 매개변수로 표현하고자 하는 연구가 Tse & Cruden(1979), Swan(1983) 등의 많은 사람들에 의해 수행되어 왔으나 이러한 연구 중의 대부분은 절리 거칠계수와 다른 거칠기 매개변수간의 상관관계를 파악하고자 한 연구이며, 직접전단시험 등을 통하여 절리의 변형·파괴거동을 새로운 거칠기 매개변수로 직접 표현하고자 시도한 경우는 별로 없다.

필자 등은 절리면의 형상을 수치적으로 측정하고 각종 거칠기 매개변수를 결정하여 이들 매개변수간의 상관관계를 파악하며, 직접전단시험을 통하여 이들 매개변수의 변화에 따른 전단거동을 조사하였다(이상돈; 이정인, 1996). 여기에서는 이 연구의 내용을 소개한다.

2.1 절리면 거칠기 매개변수

이 연구에서는 절리거칠계수가 아닌 다른 매개변수로 거칠기를 표현하기 위하여 직접전단시험을 위한 절리시료를 인장균열 발생장치를 이용하여 인공적으로 제작하고, 그림 1과 같은 3차원측정기를 사용하

여 절리형상을 0.27mm의 간격으로 수치화하여 측정하였다. 수치량으로 측정한 절리형상으로부터 절리의 거동을 보다 잘 나타내는 것으로 조사된 6가지 거칠기 매개변수를 계산하고, 각 매개변수간의 상관관계를 나타내는 회귀식을 결정하였으며, 절리형상의 측정간격에 따른 영향을 분석하였다. 이 연구에서 사용한 6가지 매개변수는 다음과 같다.

첫번째 매개변수는 절리면의 평균기울기(average slope of joint asperity)인 SL_{ave} 와 절리면의 평균거칠각(micro average inclination angle)인 i_{ave} 인데 절리면의 평균기울기와 평균거칠각은 인접한 각 측정지점간의 기울기와 측정간격의 곱을 전부 합하여 평균한 값, 즉 측정지점간 기울기의 가중 산술평균값이다.

두번째 매개변수는 절리면 기울기의 평방평균값인 Z_2 와 거칠각의 평방평균값(root mean square of i -angle)인 i_{rms} 인데, 이는 Myers(1962)가 제안한 것이다. 이 매개변수는 각 측정지점간의 기울기를 제곱하여 더한 다음 평균을 취하는데, 이러한 평방평균은 편차나 분산 등을 반영하는 추상적 대표값이다. 어떤 절리형상이 일정한 기울기로만 되어 있다면 평균거칠각과 평방평균 거칠각은 같게 되지만, 각 측정지점간의 기울기가 차이가 있다면 측정지점간의 기울기 편차가 심할수록 평방평균 거칠각이 점점 더 커지게 된다. 실제 절리형상은 다양한 기울기를 가지므로 평방평균 거칠각은 평균거칠각보다 항상 큰 값을 가지게 된다.

세번째 매개변수인 SDH 는 평균 절리면 높이에 대한 표준편차(standard deviation of height)로서 절리형상의 각 측정지점들이 평균 절리면에서 얼마나 벗어나 있는지의 척도로서 길이의 차원을 가진다.

네번째 매개변수인 거칠기형상지수(roughness profile index, R_p)는 절리 표면을 따라 측정한 절리면의 총길이를 절리면에 투영한 직선거리(L)로 나눈 무차원량이다. 표면의 굴곡이 전혀 없는 평면절리의 경우에는 거칠기형상지수가 1이 되며, 표면이 거칠수록 1보다 점점 큰 값을 가지게 된다.

다섯번째 매개변수인 SD_{SL} (standard deviation of slope)과 SDi (standard deviation of i -angle)는 각각 절리면 기울기의 표준편차와 절리 거칠각의 표준편차인데 이 매개변수는 절리형상의 거칠각이 통계적으로 평균값에서 얼마나 많이 벗어나 있는지를 나타내는 값이다.

절리면 거칠기를 표현하기 위해 사용한 여섯번째 매개변수인 프랙탈차원(D)은 원래 수학이나 물리학의 특별한 분야에서 개발되었으나 현재에는 여러 분야에서 활발한 연구가 진행되고 있다. 절리형상으로부터 프랙탈차원을 결정하는 데에는 몇 가지 방법이 있는데, 여기서는 분할법을 사용하여 결정하였다. 분할법에서는 절리형상을 일정한 분할자 길이(divider length, r)로 연속적으로 분할하였을 때 분할된 구획개수(N)를 분할자 길이에 대하여 로그-로그 그래프로 표시하여 아래의 식에서와 같이 그 기울기로부터 D 값을 결정한다.

$$-D = \frac{\log N}{\log r} \quad (1)$$

식(1)을 변환하면 다음과 같은 식이 얻어진다.

$$1-D = \frac{\log Nr}{\log r} \quad (2)$$

이 연구에서는 식(2)를 이용하여 절리형상의 프랙탈차원을 결정하였다.

거칠기 매개변수간의 상관관계를 분석하는 데에는 황등화강암, 여산대리석, 단양석회암의 3가지 암종의 총 91개 시료에서 측정한 결과를 모두 사용하였다. 한 시료당 3개의 기준선에 대하여 측정을 하였으므로 분석에 사용한 절리단면은 273개이다.

각각의 거칠기 매개변수간의 관계를 멱함수로 표시한 결과(표1 참조), 평균거칠각(i_{ave})과 평방평균 거칠각(i_{rms}), 거칠각의 표준편차(SDi)는 선형관계로 확인되었으며, 거칠기형상지수(R_p)와 프랙탈차원(D)도 선형관계식이 타당하다고 판단되었다. 반면 위 두 그룹간의 관계는 2차 함수나 제곱근 함수로 표시할

수 있다.

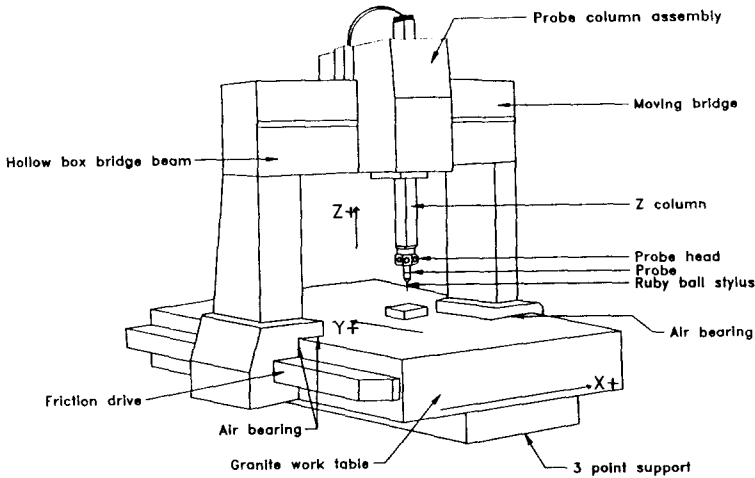


그림 1 3차원 좌표측정기기의 모형도

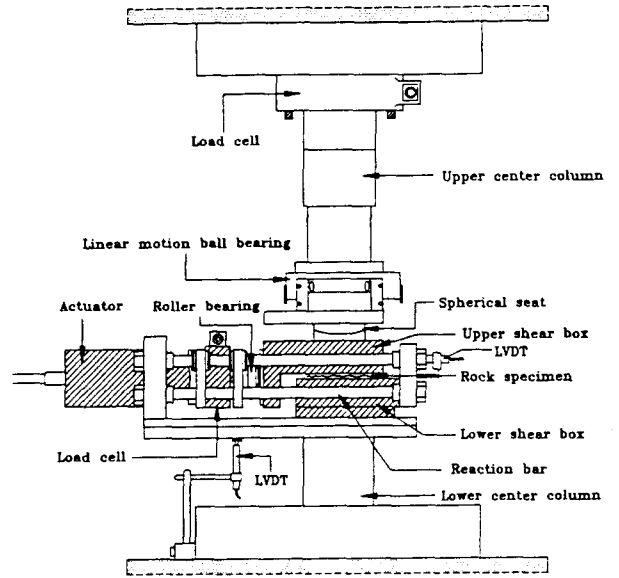


그림 2 직접전단시험기의 모형도

표 1 거칠기 매개변수간의 멱함수 회귀분석

멱함수(power function)	결정계수 (R^2)
$i_{ave} = 68.73(R_p - 1)^{0.526}$	0.989
$SL_{ave} = 2.34(D - 1)^{0.495}$	0.918
$i_{rms} = 82.2(R_p - 1)^{0.501}$	0.996
$R_p = 3.09(D - 1)^{0.917} + 1$	0.927
$SD_{SL} = 0.961(R_p - 1)^{0.503}$	0.937
$D = 0.198 SD_{SL}^{1.89} + 1$	0.871
$D = 0.092 Z_2^{1.93} + 1$	0.925
$i_{ave} = 0.684 i_{rms}^{1.04}$	0.977
$i_{ave} = 1.24 SD_i^{0.974}$	0.881
$i_{rms} = 1.65 SD_i^{0.964}$	0.960

2.2 수직응력과 거칠기 매개변수의 변화에 따른 절리의 전단거동

절리면 형상을 측정된 시험편에 대하여 여러 거칠기 매개변수와 수직하중 수준 등에 따른 전단거동을 파악하기 위하여 직접전단시험을 실시하였다. 이 연구에 사용한 직접전단시험기는 미국 Interlaken사에서 제작한 만능재료시험기에 설치하여 실험을 할 수 있도록 새로 제작한 것이다. Interlaken 시험기의 프레임 안에 설치되는 직접전단 시험장치의 형태는 그림 2에 제시된 바와 같다.

2.2.1 수직응력의 변화에 따른 절리의 전단거동

거칠기 매개변수별로 비슷한 값을 가지는 시료의 최대전단강도를 단축압축강도로 정규화시켜 수직응력에 대하여 표시한 결과가 그림 3에 있다. 멱함수로 나타냈을 때의 계수값과 지수항은 대리석이 화강암에서보다 더 큰데, 다른 거칠기 매개변수에서도 비슷한 결과를 보여주고 있다. 계수값이 큰 것은 대리

석 시료의 거칠기가 더 커서 동일한 수직응력하에서 더 높은 최대전단강도값을 가지기 때문이다. 일반적으로 거칠기가 더 크면 수직응력의 증가에 따른 전단강도의 감소율도 더 많아질 것으로 예상되는데, 시험결과는 수직응력에 따른 감소율이 대리석에서 더 작은 것으로 나타났다. 특히 화강암의 단축압축강도가 대리석의 2.4배나 되는 점을 감안한다면 이 연구에서 수행한 수직응력 수준이 완전한 비선형 거동을 파악하기에는 너무 낮은 범위에 있는 것으로 생각된다. 잔류전단강도의 경우도 수직응력이 증가함에 따라 일정한 기울기로 증가하지 않고 수직응력이 큰 범위에서 미세한 비선형 거동을 보였다.

2.2.2 거칠기 매개변수의 변화에 따른 절리의 전단거동

동일한 수직응력하에서 이 연구에 사용한 6가지 거칠기 매개변수의 변화에 따른 최대전단강도를 그래프로 표시해본 결과, 거칠기 매개변수값이 증가함에 따라 최대전단강도도 증가하는 경향을 나타내었다. 절리면 높이의 표준편차(SDH)로도 어느 정도는 전단강도 변화를 표시할 수 있는 것으로 나타났다. 그림 4는 암종에 관계없이 0.192MPa의 수직응력하에서의 최대전단강도를 평방평균 거칠각에 대하여 표시한 것이다. 수직응력이 낮은 경우에는 전단강도가 재료자체의 강도에 별로 영향을 받지 않는다고 할 수 있는데, 그림에서 보듯이 암종에 관계없이 거칠기 매개변수의 변화에 따라서 강도값이 증가하는 것을 확인할 수 있다. 초기팽창량, 초기팽창각 및 평균팽창각 등은 거칠기 매개변수의 변화에 따라 어떤 경향성을 확인할 수 없었다.

정점전단변위와 전단강성도 팽창거동과 마찬가지로 값의 분포가 아주 산만하게 나타났다. 전단변형 거동을 나타내는 이들 요소는 수직응력에는 큰 영향을 받지만 거칠기에 대해서는 전단강도만큼의 영향을 받지 않는 것으로 판단된다. 즉, 수직응력이 동일하다면 정점전단변위나 전단강성, 팽창거동 등은 거칠기를 포함한 절리면의 상태, 절리면간의 밀착 정도, 이방성의 존재 유무 등과 같은 여러 요인들의 복합작용에 의해 결정된다고 할 수 있다.

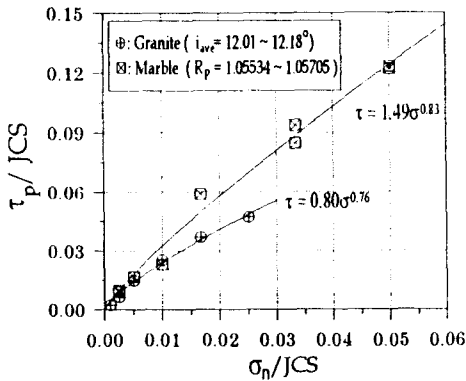


그림 3 화강암과 대리석의 절리면에 대한 정규화된 최대전단강도의 비교

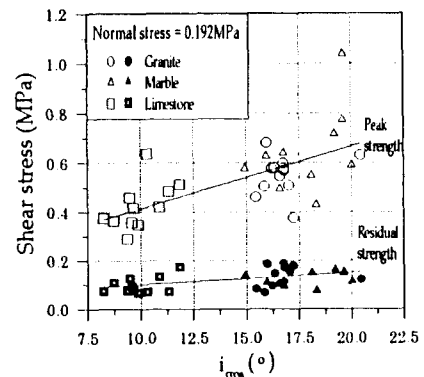


그림 4 거칠각의 평방평균값 i_{rms} 의 변화에 따른 최대전단강도의 증가

한편, 절리면 높이의 표준편차를 제외한 5가지 매개변수와 수직응력, 암석의 단축압축강도, 기본마찰각을 사용하여 절리면 전단강도를 나타내는 다음의 경험관계를 산출하였다.

$$\tau = \sigma_n \tan \left(\phi_b + A * P * \left(\frac{JCS}{\sigma_n} \right)^B \right) \quad (3)$$

여기서 JCS는 절리면의 압축강도이고, A는 거칠기 파라미터값을 보정하는 비례상수, B는 수직응력의 증가에 따른 전단강도의 감소를 결정하는 멱함수의 지수이다. P는 거칠기 매개변수인데, 평균거칠각, 평방평균 거칠각, 거칠각의 표준편차는 그 값을 그대로 사용하고, 거칠기형상지수와 프랙탈차원은 제곱근 값을 사용한다. 이렇게 결정된 5가지 전단강도 경험관계는 다음과 같다.

$$\tau = \sigma_n \tan \left(\phi_b + 1.44 i_{ave} \left(\frac{JCS}{\sigma_n} \right)^{0.116} \right) \quad (4)$$

$$\tau = \sigma_n \tan \left(\phi_b + 1.15 i_{rms} \left(\frac{JCS}{\sigma_n} \right)^{0.108} \right) \quad (5)$$

$$\tau = \sigma_n \tan \left(\phi_b + 1.81 SDi \left(\frac{JCS}{\sigma_n} \right)^{0.101} \right) \quad (6)$$

$$\tau = \sigma_n \tan \left(\phi_b + 94.20 \sqrt{R_p - 1} \left(\frac{JCS}{\sigma_n} \right)^{0.108} \right) \quad (7)$$

$$\tau = \sigma_n \tan \left(\phi_b + 198.72 \sqrt{D - 1} \left(\frac{JCS}{\sigma_n} \right)^{0.112} \right) \quad (8)$$

3. 불연속 암반의 안정성 해석

3.1 블록이론과 개별블록의 안정성 해석

절리가 발달된 경암질 암반내에서 터널을 굴착할 때에 발생하는 심각한 문제중의 하나는 암반내에 존재하는 불연속면과 굴착에 의하여 형성되는 자유면에 의하여 생성된 블록의 낙반 사고이다. R.E. Goodman, Gen-hua shi(1985)등에 의하여 제안된 블록이론은 암반사면이나 지하공동에 존재하는 절리들의 방향성을 조사하여 우세한 방향의 절리들에 의하여 발생하는 블록들의 안정, 불안정 및 낙반의 가능성 여부를 판정할 수 있도록 하였다.

블록이론에서 블록은 먼저 유한성과 무한성에 따라 분류하는데 암반내에서 불연속면과 자유면에 의해 경계가 설정되어 일정한 부피를 갖는 다면체를 유한블록(Finite block)이라 하며 특정방향으로 무한한 연장성을 가지는 블록을 무한블록(Infinite block)이라고 한다. 유한블록은 다시 테이퍼드블록(Tapered block)과 거동가능블록(Removable block)으로 분류할 수 있다. 테이퍼드블록은 블록에 작용하는 힘의 방향이나 크기에 상관없이 기하학적인 구조로 인하여 암반내에 갇혀서 자유공간으로의 이동이 불가능한 블록이다. 거동가능블록은 다시 안정블록(Stable block)과 잠재적(Potential) 키블록, 그리고 키블록으로 구분된다. 그림 5는 2차원 공동주변에 존재하는 블록들의 종류를 보여주고 있다.

국내에서 블록이론을 이용한 안정성 해석에 관한 연구는 암반사면(이정인; 서영호; 장근무, 1992)에 대한 것과 지하공동의 낙반블록(양형식; 이희근, 1991)에 대한 것 등이 있다. 그러나 이 블록이론에 의한 해석은 단지 몇 개의 우세한 방향의 절리들에 의하여 형성되는 블록들만을 대상으로 하며 그 외에 존재하는 불규칙 절리를 포함한 수 많은 절리들에 대한 해석이 제외되고 절리의 연장성에 제한을 둘 수 없으며 절리의 위치를 고려하지 않는다는 단점을 가지고 있다.

따라서 필자등은 블록이론의 단점을 보완하여 현장에서 나타나는 개별적인 암반블록의 역학적 안정성을 평가할 수 있는 개별블록의 안정성해석법(송재준; 이정인, 1995)을 연구, 발표한 바 있다. 이 연구에서는 Gen-hua shi(1990)와 S.F. Hoerger(1988) 등의 연구내용을 이용하여 그림 6의 흐름도에 보이는 바와 같이 현장 절리 지질도에 나타난 절리 트레이스들을 입체적으로 재구성하고 각 절리의 교차로 인하여 생성되는 블록들을 찾아내어 각 블록에 대한 거동성을 분석한 후 안정성을 계산하는 프로그램을 구성하였다. 이 프로그램을 에너지 비축공동의 안정성 해석에 적용한 결과, 낙반의 예측과 보강에 필요한 개별 블록의 부피와 높이, 그리고 안전율등의 자료를 얻을 수 있었다.

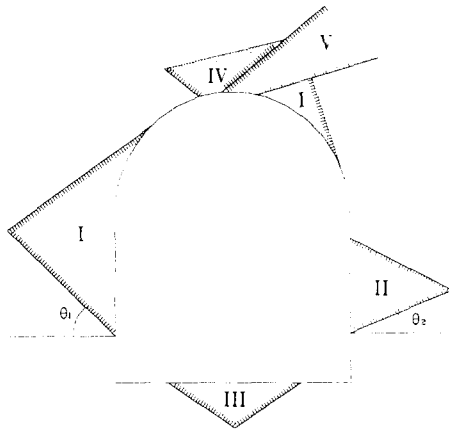


그림 5 공동주변 블록의 종류 :

I-키블록, II-잠재적키블록, III-안정블록

IV-테이퍼드블록, V-무한블록

($\theta_2 < \psi < \theta_1$, ψ :마찰각)

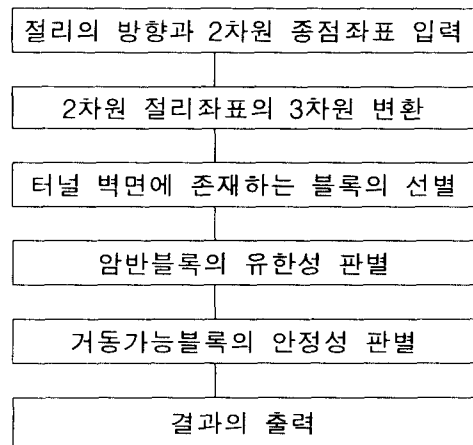


그림 6 개별블록 안정성해석의 흐름도

안정성 해석의 대상이 되는 곳은 지하 에너지 비축 공동이다. 대상 지역의 공동의 축방향 길이는 총 222m 인 데 개별블록에 의한 안정성 해석을 위하여 20m 길이의 10개 구간과 22m 길이의 1개 구간으로 나누어 구간별로 해석을 실시 하였다. 공동의 축방향은 선주향(Trend)이 N20W 이고 선경사(Plunge)는 0° 이다. 현장의 지질 상태는 화강암질 편마암이 주층을 이루고 수직에 가까운 급경사 절리와 저경사 절리들이 많이 분포하는 것으로 보고 되었다. 현장 절리 지질도에서 116개의 절리를 선택하여 입력자료로 사용하였다. 절리면들의 마찰각은 30° 로, 암반의 밀도는 2.7 ton/m³ 로 가정하고 절리들이 교차하여 이루어지는 블록들을 조사한 후 각 블록의 안정성과 크기, 자중 등을 계산하였다. 11개 구간 중 5번 구간의 해석결과를 살펴보면 다음과 같다.

▶ 다섯번째 구간

경사각이 60° 이상인 절리가 8개 존재하며 50° 가 1개, 30° 미만인 7개 존재한다. 그림 7의 펼친그림에서 서로 나란하게 보이는 6, 7, 8번의 방향이 서로 같고 13, 14, 15번 절리도 같은 방향을 갖는다. 구간의 경계 밖으로 나와있는 1번과 4번은 경사각이 각각 20° , 30° 로서 저경사 절리이다.

이 구간에서는 11개의 블록이 발생되었는데 이 중 9개는 무한블록이고 나머지는 각각 키블록과 잠재적 키블록이다. 표 2를 참조하면 여기에서 발생하는 잠재적 키블록은 안전율이 1.0이고 5번의 저경사 절리면을 따라 미끄러짐의 가능성을 보이는 소규모 블록임을 알 수 있다. 갠러리의 천정 부근에 있는 키블록은 수직 방향으로 낙하하며 높이가 1m 미만인 비교적 작은 블록이다. 두 블록의 입체 형상을 그림 8에서 볼 수 있다. 이 구간에서 나타난 키블록은 현장에서 낙반된 블록과 위치가 일치하는 것으로 판명되었다.

표 2 5번 구간에 나타난 거동가능블록의 해석내용

No.	Joint	Type (S.F.)	Volume (m ³)	Height (m)	Sliding Plane	Force (ton)
1	1 10 5	P (1.00)	0.09	0.44	5	0
2	2 6 9 8	K (F)	1.66	0.79	0	4.48

3.2 불연속 암반의 수치해석

유한요소법을 이용한 절리암반의 안정성 해석방법은 연속체 개념의 해석방법과 개별체 절리요소를 이

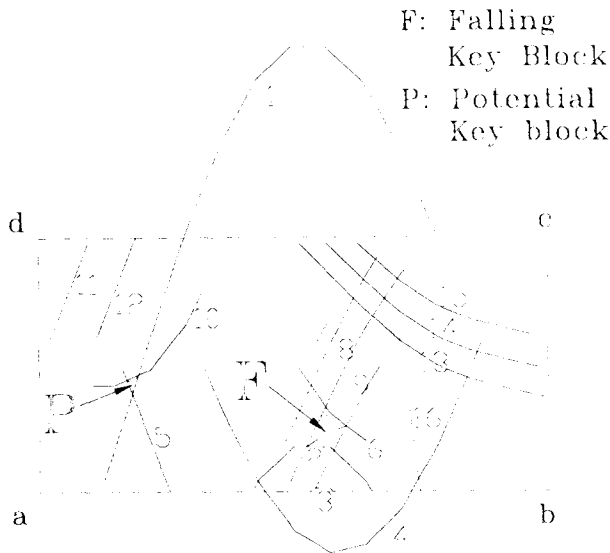


그림 7 5번 구간 절리지질도의 펼친그림

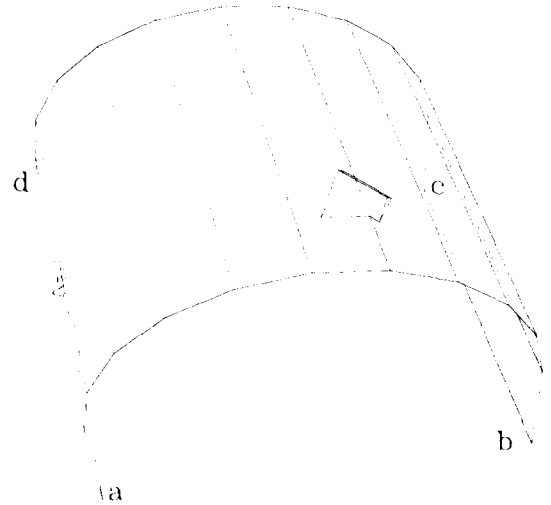


그림 8 5번 구간 거동가능블록의 형상

용하는 방법으로 구분할 수 있다. 연속체 개념의 해석방법은 절리면의 역학적 성질을 무결암과 결합시켜 절리면을 포함한 암반의 전체적인 거동이 절리를 개별적으로 고려할 때와 유사한 거동을 보이도록 하는 방법으로써 절리의 발달상태가 규칙적이고 절리의 간격이 해석대상 구조물에 비하여 충분히 작을 때 적용성이 있으며, Zienkiewicz & Pande(1977), 이연규 등(1995)의 연구를 그 예로 들 수 있다. 연속체 개념의 해석방법이 갖는 장점은 절리 또는 보강재의 패턴 변화에 따라 요소망을 재구성할 필요가 없어, 입력변수 영향 분석에 매우 유용하다는 것이다. 암반구조물의 안정성이 특정 불연속면에 의해 지배되는 경우에는 그 불연속면 자체가 해석 대상이 되어야 하며 이 경우 절리면 양쪽면의 상대변위를 허용하는 개별체 절리 유한요소가 필요하다. 지금까지 제시되어 있는 개별체 절리 유한요소들은 몇개의 불연속면이 존재하는 암반, 기초와 지반의 접촉부 그리고 수갱 등에서 라이닝과 암반의 접촉면 등의 거동을 해석하기 위하여 개발되어 왔다. 절리의 개별적 거동을 개별절리요소를 개발하여 해석하려는 연구는 Goodman 등(1968)에 의하여 처음으로 시도되었으며, 요소의 강성행렬을 유도하는 과정에서 절리의 수직강성과 전단강성을 처음으로 도입하였다. 이후 Goodman 개별절리요소를 기본으로 한 여러가지 변형된 형태의 개별절리요소들이 제안되었다. 국내에서도 필자 등이 개별절리 유한요소를 이용하여 절리면의 직접전단시험을 수치적으로 모사한 연구를 수행하였다(이연규; 이정인, 1997).

지금까지 제시되어 있는 유한요소법 이외의 절리암반에 대한 수치해석 기법에는 킨블럭 해석법, 개별요소법, 불연속면에 대한 경계요소법 등이 있으며 이들은 개별절리를 고려하는 수치 해석기법의 범주에 속한다.

3.2.1 절리암반에 대한 점소성 해석

절리암반에 대한 점소성해석(이연규; 이정인; 조태진, 1995)에 있어 록볼트에 의해 보강된 절리암반의 점소성 거동은 보강된 암반이 무결암, 절리균 및 볼트균을 나타내는 단위로 구성되는 유변학적 모델에 의하여 설명될 수 있으며 각 단위는 그림 9에 나타난 것과 같이 스프링, 슬라이더, 그리고 dashpot 으로 구성된다고 가정한다. 슬라이더는 재료의 항복조건에 대응되는 요소로서 재료의 항복 이후부터 미끄러지기 시작하여 dashpot에 의한 점성변형을 발생시킨다. 따라서 슬라이더는 실제 해석에서 항복조건식에 대응된다. 무결암을 나타내는 단위와 절리균을 나타내는 유변학적 단위가 서로 직렬로 연결되며 이것은 다시 록볼트균을 나타내는 단위들과 병렬로 연결되는 형태를 취한다. 따라서 첫번째 열은 절리암반에 대한 유변학적 모델이 되며, 이것은 록볼트균 수 만큼의 유변학적 단위와 서로 병렬로 연결되어 전체적으로는 보강된 절리암반에 대한 등가암반의 유변학적 모델을 구성하게 된다. 직렬로 연결된 무결암과

절리군을 나타내는 유연학적 단위들에서 나타나는 응력은 동일하며, 이 단위들에서 발생하는 변형률의 합은 병렬로 연결된 록볼트 단위들에서 발생한 변형률과 동일하게 된다. 전체 모델에 작용하는 하중은 평행한 각 열의 부피비로 분담되어 각 열에 작용하게 된다.

그림 10은 국내에서 건설 중인 지하 원유비축기지를 대상으로 한 절리암반의 점소성 해석에서 사용된 모델로서 저장공동은 해수면을 기준으로 -30 ~ -60m 에 위치하고 있으며 단면의 크기는 폭 18m, 높이 30m이다. 그림과 같이 공동 주위에는 2개의 주 절리군을 갖는 것으로 조사되었으며 축압비(K)는 약 1.3으로 추정되었다. 현장의 굴착순서에 준하여 갤러리, 벤치1, 벤치2, 벤치3의 4단계 순차적 굴착 및 록볼트보강 해석을 실시하였다. 무결암은 탄성거동을 하는 것으로 가정하였으며 점소성 변형은 절리군과 록볼트만을 통하여 발생하는 것으로 가정하였다. 그림 11은 벤치3의 굴착 및 보강이 완료된 후 터널단면의 변형형태를 300배 확대하여 나타낸 것으로 2개의 절리군의 존재로 인하여 비대칭적 변형양상을 보여준다. 이와 같이 터널의 변형거동은 절리의 분포특성에 큰 영향을 받는다는 점을 고려할 때 이러한 해석결과는 개발된 모델이 절리 및 보강 패턴변화에 따른 터널의 비선형 거동 특성을 예측하는데 효과적으로 이용될 수 있다는 것을 보여준다.

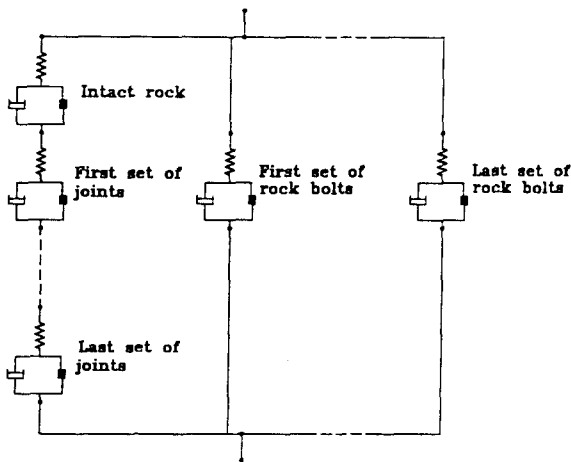


그림 9 보강된 절리암반의 유연학적 모델

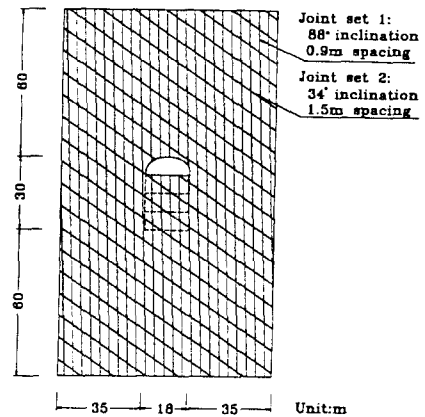


그림 10 2개의 절리군을 갖는 해석모델

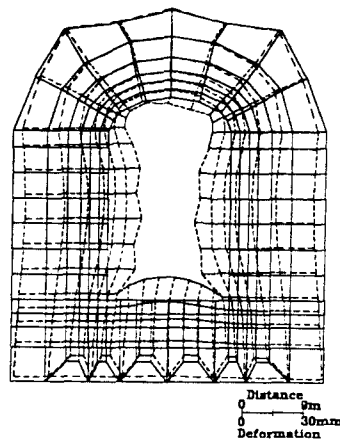


그림 11 벤치3 굴착보강후 변형도

3.2.2 개별체 절리 유한요소 해석

개별체절리 유한요소해석에 관한 연구(이연규; 이정인, 1997)에서 그림 12는 개별절리 유한요소를 보

여주며 4절점 혹은 6절점요소로 되어있다. 이 연구는 절리요소의 거동을 지배하는 거동 방정식으로 Plesha(1987)가 제안한 탄소성 절리 거칠각 손상 모델을 사용하였으며 절리의 탄성거동, 경화거동, 연화거동, 및 수직팽창 까지도 수치적으로 모사할 수 있는 유한요소 프로그램을 개발하였다. 그림 13은 수치적으로 직접전단시험을 모사하기 위하여 사용된 간단한 유한요소망으로써 2개의 8절점 평면변형률 요소와 1개의 6절점 절리요소로 이루어져 있다. 그림 13의 (a),(b)는 각각 일정 수직응력 조건과 일정 수직변위 조건에 대응되는 요소망이다. 그림 14는 수직응력을 50, 100, 200 kPa로 변화시키면서 일정 수직응력 하에서 수치 직접전단시험을 실시한 예이며, 실제 직접전단시험에서 나타나는 전형적인 곡선의 형태를 보여준다. 최대전단강도에 대한 잔류전단강도의 비가 수직응력이 커짐에 따라 커지고 있음을 알 수 있으며, 이는 수직응력의 증가에 따라 절리면의 전단저항이 커지는 반면 미끄러짐 발생 이후 수직응력이 클수록 절리면의 손상이 급격히 일어나기 때문이다. 그림 15은 초기수직응력을 1, 5, 10 MPa로 변화시키면서 일정 수직변위하에서 수치 직접전단시험을 실시한 예이며 초기 수직응력이 낮을수록 미끄러짐 이후 전단강도 증가 비율이 크게 나타나고 있음을 보여주고 있다. 일정 수직변위하에서는 암반 절리면에 작용하는 수직응력이 낮은 경우 미끄러짐을 어느정도 허용하고, 수직응력이 높은 경우 전단변위를 정점전단변위 부근에서 구속시키는 것이 암반블럭의 안정화에 유리하다는 사실을 그림 15는 보여준다.

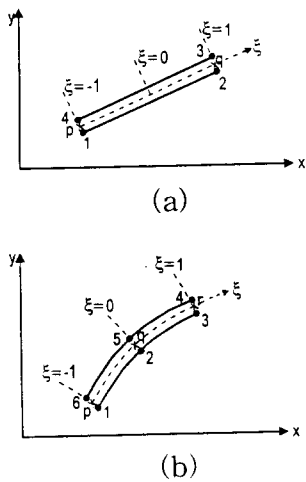


그림 12 등매개변수 절리요소
(a) 4절점요소 (b) 6절점요소

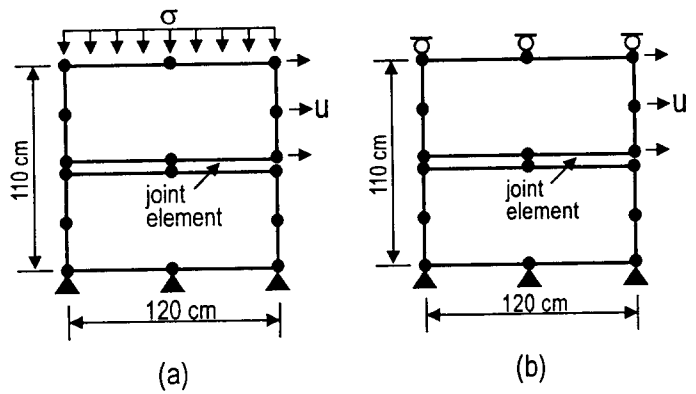


그림 13 수치직접전단시험에 이용된 유한요소망
(a) 일정 수직응력조건 (b) 일정 수직변위조건

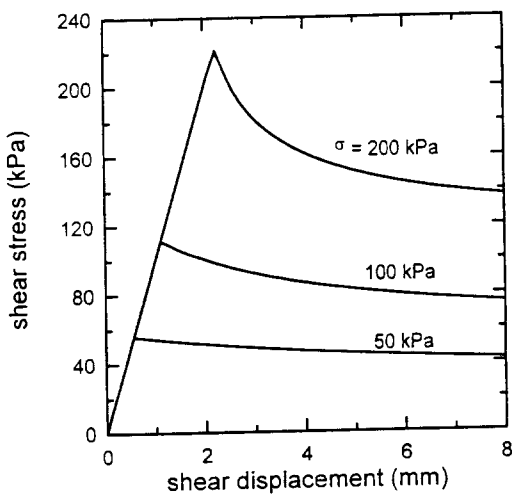


그림 14 일정 수직응력조건에서 전단변위에 따른 전단응력

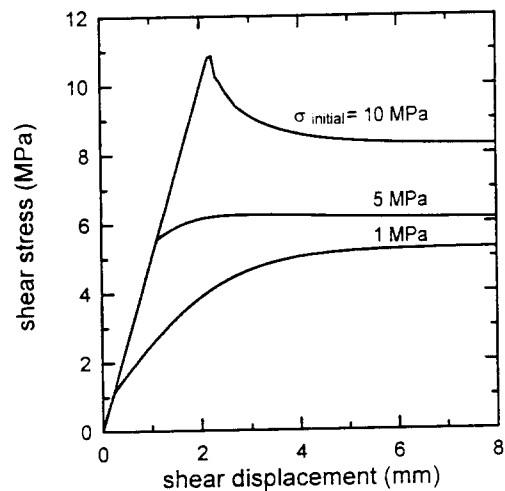


그림 15 일정 수직변위조건에서 전단변위에 따른 전단응력

3.3 지하수 유동해석

불연속면의 발달에 의한 지하수 유동해석은 암반을 등가 다공성매체, 이중공극매체, 그리고 불연속면 연결망을 모델화하는 세가지 모형으로 분류할 수 있다.

등가 다공성매체 개념에 의한 해석(장근무; 이정인, 1994)은 대상지역 암석과 불연속면의 수리적 특성을 포괄적으로 나타내는 수리물성을 입력치로 하는 해석으로서 넓은 지역을 대상으로 하는 해석에 적합하며 대표수리물성을 구하는데 어려움이 있다는 단점이 있다. 이중공극모델은 암반을 암석과 불연속면의 두 매체로 모델화하고 각 매체를 통한 지하수 유동 방정식을 세운후 유한요소법 등의 수치해석방법을 통하여 해석을 하게된다. 이 모델은 불연속면이 복잡하게 발달하여 개개 불연속면의 기하학적, 수리적 특성을 고려하기 힘든 경우에는 적용성이 크나 몇 개의 한정된 불연속면군이 존재하는 경우에는 적용상 한계를 가지고 있다. 불연속면 연결망을 통한 지하수 유동해석 방법은 불연속면의 방향, 간격, 길이, 간극등의 확률분포함수를 설정하고 이에 따라 불연속면을 발생시켜 연결망을 구성한다. 이 연결망을 통한 지하수의 유동은 해석적인 방법이나 유한요소법, 경계요소법등을 이용한다. 그림 16은 이와같은 절차에 따라 구한 공동주변 절리면의 각 점의 수두값들을 보여준다.

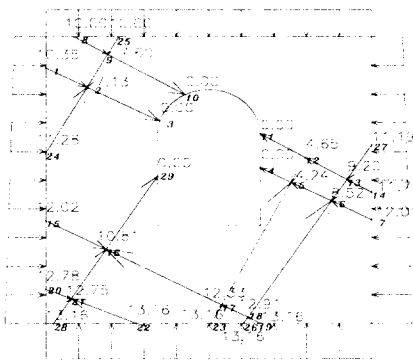


그림 16 지하수의 유동방향과 수두의 해석예

S.D. Priest(1993), J.C. Long(1983)등의 연구자들의 연구에 의하여 불연속면이 가지는 특성을 분석해 본 결과 일정한 분포를 가진다는 것이 알려져 있다. 암반벽면의 조사나 보어홀의 조사를 통하여 불연속면을 조사해본 결과, 불연속면의 중심은 포아송 분포를 이루면서 발생하고 불연속면의 추적길이(trace length)는 음지수적인 분포 또는 로그-정규분포를 보이며 불연속면의 방향은 정규분포나 fisher분포를 나타내고 불연속면의 틈새의 크기는 일반적으로 정규분포를 따르는 것으로 조사되었다. 여기에서는 이러한 불연속면 분포 특성을 이용하여 필자 등이 수행한 불연속면 연결망 지하수 유동해석을 예시한다(장현익; 이정인, 1996).

3.3.1 해석모델의 입력변수 및 경계조건

해석한 지역은 원유를 저장하는 대규모 지하공동으로서 공동간의 간격은 35m이고 해발 -30m ~ -60m의 심도에 위치하고 있다. 대상지역에 존재하는 절리군의 경사방향은 2개의 군으로 분류되었는데 경사방향의 평균과 표준편차는 1번군의 경우 207.99°, 13.43° 이고 2번군은 113.33° 와 8.71° 였다. 그림 17은 1번군의 경사방향을 돛수분포표로 나타낸 것이다.

그림 18은 1번군에 속한 불연속면들의 추적길이(trace length) 분포를 보여준다. 추적길이의 경우 두 군 모두 음지수분포인 $\lambda \exp(-\lambda x)$ 로 추정되었는데 λ 값은 1번과 2번군 각각 0.06648과 0.08227로 구해졌다.

대상지역에서 샘플링한 불연속면의 개수는 모두 900개이며 1번과 2번군의 개수는 각각 388개와 512개이다. 대상지역의 전체면적은 12928m²이므로 1번 군의 밀도는 0.03이고 2번군의 밀도는 0.0396이다.

불연속면 군의 틈새크기는 남북방향과 동서방향으로서 이방성이 존재하는 경우와 등방성의 경우로 나누어 해석을 실시하였는데 각각의 경우에 대한 평균과 표준편차는 표 3에 나와 있다.

지하수위 값들은 해석대상지역에서 연속체모델을 이용하여 해석한 연구(장근무, 1995)를 이용하여 해석 경계위치에서의 값을 대입하였다. 해석조건은 공동상부 30m위에 수벽공으로 2bar의 압력을 주고 공동내부의 압력을 0.5bar, 1.0bar, 2.0bar일 때 3가지 경우에 대하여 계산하였다.

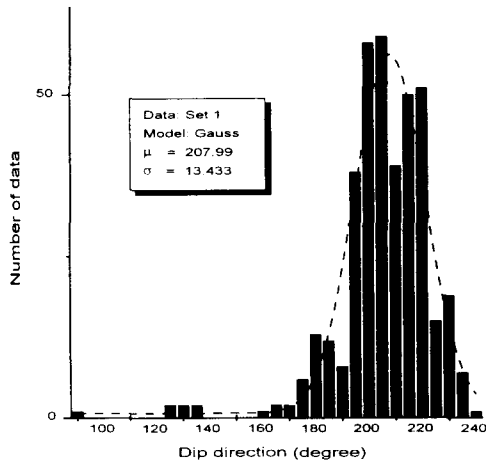


그림 17 1번군의 경사방향분포

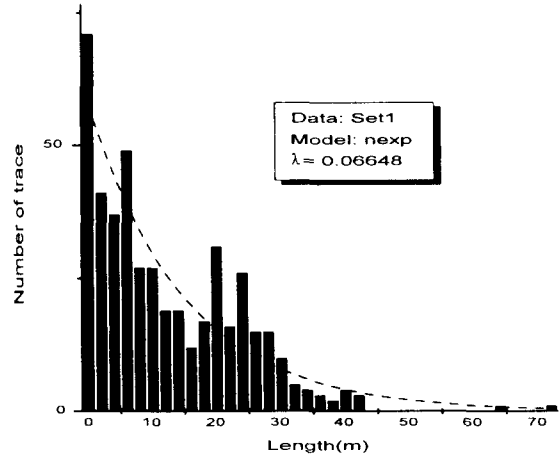


그림 18 1번군의 추적길이 분포

3.3.2 해석 결과 및 분석

그림 19은 공동의 내부압력이 0.5bar일 때 파쇄대가 지나가는 단면에서의 수두분포이다. 파쇄대는 공동 3개를 모두 통과하고 수평면과 15°의 각도를 이루고 있다. (a)의 경우 틸새가 큰 불연속면을 따라서 수두 변화가 심하지만 파쇄대의 영향으로 파쇄대 주위로 매우 많은 양의 지하수가 흐르므로 파쇄대가 없을 때 보다 수두가 낮아졌으며 등수두선도 파쇄대를 주위로 형성된다. (b)의 경우 역시 파쇄대 주위로 수두가 낮아지며 등수두선을 형성하지만 (a)와 다르게 공동주위를 제외하고는 수평면과 평행한 상태이다.

그림 20은 그라우팅을 했을 때 공동의 내압이 변함에 따라 공동으로 유입되는 유량이 어떻게 변하는 가를 보여준다. 수리전도도가 이방일 경우이며, 공동의 내압이 증가함에 따라 공동으로 유입되는 유량은 줄어들었으며 내압이 2.0bar일 때가 0.5bar일 때 보다 약 40%정도 유량이 감소했다. 공동의 내압이 서로 다른 3가지 경우 모두에서 지하비축기지의 설계단계에서 계산된, 수리지질상태가 안정을 잃지 않는 허용누수량인 115ton/day에 못 미치므로 이 경우는 공동이 안정하다고 할 수 있다.

표 3 지하수 유동해석을 위한 입력변수

		1번 절리군	2번 절리군
경사방향 (°)	평균	207.99	113.33
	표준편차	13.433	8.7098
경사 (°)	평균	90	10
	표준편차	90	10
밀도(density)		0.03	0.0396
추적길이 (m)	λ	0.13294	0.16454
틈새 (mm)	평균	0.08 ^a & 0.06 ⁱ	0.01 ^a & 0.065 ⁱ
	표준편차	0.008 ^a & 0.006 ⁱ	0.001 ^a & 0.0065 ⁱ

a : 이방성 수리전도도의 경우

i : 등방성 수리전도도의 경우

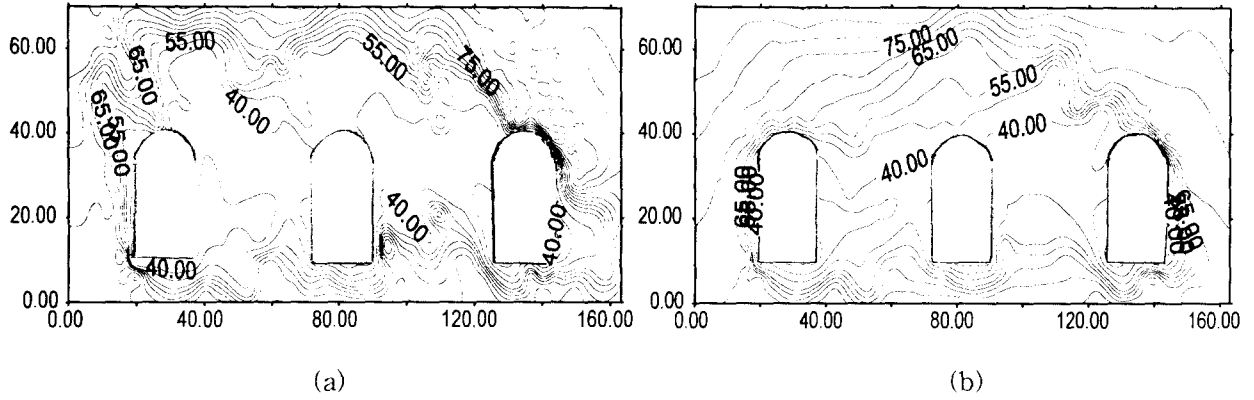


그림 19 파쇄대가 존재할 때의 공동주변의 수두분포 (내압 $P_i=0.5\text{bar}$)
(a) 이방성 (b) 등방성

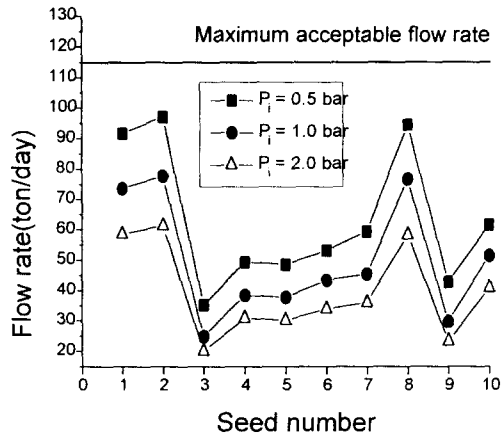


그림 20 그라우팅후 내압에 따른 주하수 유입량변화 (수리전도도가 이방성일때)

4. 결론

불연속암반의 안정성을 평가하기 위하여 불연속면의 전단강도와 변형특성, 블록이론 및 개별블록의 안정성해석, 불연속면을 포함하는 암반의 역학적 거동에 관한 수치해석, 암반의 수리공학적 연구에 관하여 최근 서울대학교 공과대학 암반공학연구실에서 수행된 연구내용의 일부를 소개하였다. 주요 결론은 다음과 같다.

1) 불연속면의 방향에 따른 암석의 강도 및 변형특성에 관한 연구가 수행되어 전단강도와 전단변형의 이방성에 관련된 주요 결과를 얻었으며 절리면 거칠기를 정량적으로 표현하기 위한 매개변수들을 연구하고 각 매개변수간의 관계를 조사하였다. 그 결과 평균거칠각(i_{ave})과 평방평균 거칠각(i_{rms}), 거칠각의 표준편차(SDi)는 선형관계로 확인되었으며, 거칠기형상지수(R_p)와 프랙탈차원(D)도 선형관계식이 타당하다고 판단되었다. 반면 위 두 그룹간의 관계는 2차 함수나 제곱근 함수로 표시할 수 있었다. 직접전단 시험결과 최대전단강도는 수직응력의 증가에 따라 각 거칠기 매개변수별로 비선형 거동을 보이는데 화강암에서보다 대리석 시료에서 그 기울기가 더 크게 나타났다. 6가지 거칠기 매개변수값이 증가함에 따

라 최대전단강도도 증가하는 경향을 보였다. 한편, 시험에서 얻은 전단강도를 토대로 다음의 경험관계를 산출하였다.

$$\tau = \sigma_n \tan \left(\phi_b + A * P * \left(\frac{JCS}{\sigma_n} \right)^B \right)$$

여기서 τ 는 최대전단강도, σ_n 은 수직응력, ϕ_b 는 기본마찰각, JCS 는 절리면의 압축강도이고, A 는 거칠기 파라미터값을 보정하는 비례상수, B 는 수직응력의 증가에 따른 전단강도의 감쇠를 결정하는 멱함수의 지수이다. P 는 거칠기 매개변수인데, 평균거칠각, 평방평균 거칠각, 거칠각의 표준편차는 그 값을 그대로 사용하고, 거칠기형상지수와 프랙탈차원은 제공근값을 사용한다.

2) 블록이론의 단점을 보완하는 개별블록의 안정성 해석 프로그램을 개발하고 지하유류비축기지 현장에 적용하였다. 대상지역을 11개의 구역으로 나누어 해석을 실시하였는데 그 중 5번 구간에서는 1개의 키블록과 1개의 잠재적키블록이 나타났다. 이 중 키블록은 현장의 굴착작업도중 낙반된 블록과 같은 것으로 판명되었다.

3) 불연속암반에 대한 수치해석법들을 소개하고 절리암반에 대한 점소성 해석과 개별체 절리 유한요소 해석의 원리 및 적용사례를 살펴보았다. 절리암반에 대한 점소성 해석법은 절리 및 보강 패턴변화에 따른 터널의 비선형 거동 특성을 예측하는데 효과적으로 이용될 수 있다는 것을 보여주었고 개별체 절리 유한요소 해석법은 직접전단시험의 시뮬레이션에 효과적으로 사용될 수 있음을 보여주었다.

4) 불연속면의 방향, 간격, 길이, 간극 등의 확률분포함수를 설정하여 통계적으로 불연속면을 발생시키고 이 불연속면 연결망 모델에 의한 지하수 유동해석 연구내용을 소개하였다. 이 연구에서는 대규모 지하 원유저장공동에서 공동의 주변에 파쇄대가 존재하는 경우의 수두분포와 그라우팅 후 공동 내압의 변화에 따른 지하수 유입량의 변화 등 설계자료를 얻었다.

참고문헌

1. 김기주, 이희근, 이정인, 김재극(1982), “불연속면을 갖는 암석의 전단강도 및 변형거동에 관한 연구 (제1보)”, **대한광산학회지**, 제19권, 제4호, pp.252-259.
2. 김기주, 이정인, 김재극(1983), “연약면을 갖는 암석의 전단강도 및 변형거동에 관한 연구(제2보)”, **대한광산학회지**, 제20권, 제2호, pp.119-125.
3. 이형원, 이정인(1984), “삼축압축하에서 인공절리면을 지닌 암석의 강도와 변형거동에 관하여”, **대한광산학회지**, 21권 2호, p.97-105
4. 김기주, 이정인, 김재극(1985), “삼축압축하에서 암석의 연약면이 파괴강도에 미치는 영향에 관한 연구”, **대한광산학회지**, 22권 2호, p.91-97
5. 강준호, 이정인(1991), “불연속면의 방향에 따른 암석의 전단강도 및 변형특성에 관한 연구”, **한국자원공학회 제55회 학술발표회 논문집**, pp.204-208.
6. 이상돈, 이정인(1996), “절리면 형상의 정량적 측정을 통한 각종 거칠기 파라미터의 비교분석”, **한국자원공학회 제66회 학술발표회 논문집**, pp.139-146.
7. 이상돈, 강준호, 이정인(1994), “절리면의 거칠기에 따른 암석 절리의 전단강도 및 변형거동에 관한 연구”, **한국암반공학회지(터널과 지하공간)**, vol.4, pp.261-273.
8. 김태혁, 이상돈, 이정인(1994), “직접전단시험을 통한 암석 절리의 변형거동 및 미소파괴음 발생에 관한 연구”, **한국암반공학회지(터널과 지하공간)**, vol.4, pp.274-286.

9. 이상돈, 이정인, 박연준(1996), “각종 거칠기 파라미터에 따른 암석 절리의 전단거동에 관한 연구”, **한국자원공학회 제67회 학술발표회 논문집**, pp.74-77.
10. 이연규, 이정인(1997), “절리면 거침각의 손상을 고려한 개별체 절리 유한요소”, **한국암반공학회지 (터널과 지하공간)**, 게재심사중.
11. 이연규, 이정인, 조태진(1995), “굴착과정에서 록볼트로 보강된 절리암반의 점소성 거동 분석”, **한국암반공학회지(터널과 지하공간)**, vol.5, pp.123-133.
12. 조태진, 이정인(1993), “절리암반에 설치된 지하공동의 거동분석”, **한국자원공학회 제 60회 학술발표회논문집**, pp.192-197
13. 장근무, 이정인(1995), “지하원유저장 공동주위 암반의 변형거동에 따른 투수계수 변화”, **한국자원공학회지**, Vol. 32, No. 2, pp.103-115.
14. 이상필, 이정인(1990), “불연속 암반내 공동주위의 응력 및 변형거동에 관한 수치해석”, **한국자원공학회지**, 27권 4호, p.268-282
15. 장현익, 장근무, 이장인(1996), “통계적 접근법에 의한 불연속암반의 지하수 유동해석”, **한국암반공학회지(터널과 지하공간)**, vol.6, pp.30-38.
16. 송재준, 이정인(1996), “터널굴착에서 불연속면에 의한 공동주변 암반블록의 안정성 해석”, **한국자원공학회지**, Vol. 33, No. 3, pp.186-193.
17. 장근무(1989), “Block theory 를 이용한 암반사면의 안정성 해석”, 서울대학교 대학원 공학석사 학위논문 .
18. 양형식, 이희근(1991), “블록이론을 이용한 낙반해석 연구”, **한국자원공학회지** Vol.28, pp.292-300.
19. Barton N.(1973), “Review of a new shear-strength criterion for rock joints”, *Engng. Geol.*, Vol. 7, pp.287-332.
20. Goodman, R.E., Taylor R.L. and Brekke T.L.(1968), “A model for the mechanics of jointed rock”, *J. Soil Mech and Found. Div. ASCE*, Vol.94, pp.637-659
21. Plesha, M.E.(1987), “Constitutive models for rock discontinuities with dilatancy and surface degradation”, *Int. J. for Num. and Anal. Meth. in Geomech* Vol.11, pp.345-362
22. Zienkiewicz, O.C. and Pande, G.N.(1977), “Time-dependent multilaminar model of rocks - A numerical study of deformation and failure of rock masses”, *Int. J. for Num. and Anal. Meth. in Geomech* Vol.1, pp.219-247
23. D.S. Young, S.F. Hoerger(1989), “Probabilistic and deterministic key block analyses”, *Proc. of the 30th US Symp. on Rock Mechanics*, pp.227-234.
24. G. Shi, R.E. Goodman(1990), “Finding 3-d maximum key blocks on unrolled joint trace maps of tunnel surfaces”, *Proc. of the 31st US Symp. on Rock Mechanics*, pp.219-228.