

## 절리 암반터널의 불연속체해석과 연속체해석에 관한 고찰

# A Study on Continous and Discontinous Analysis of Tunnels in Jointed Rock Mass

이종선<sup>1</sup> · 김시격<sup>2</sup> · 김도훈<sup>3</sup> · 정재동<sup>4</sup>

Joung-Sun Lee · Si-Kyeok Kim · Do-Hoon Kim · Jae-Dong Jung

### Abstract

Numerical methods to estimate behaviors of jointed rock mass can be roughly divided into two methods : continuous and discontinuous model. Generally, distinct element method(DEM) is applied in discontinuous model, and finite element method(FEM) or finite difference method(FDM) is utilized in continuum model. To predict a behavior of discontinuous model by DEM, it is essential to understand characteristics of joints developed in rock mass through field tests. However, results of field tests can not provide full information about rock mass because field tests are conducted in limited area. In this paper, discontinuous analysis by UDEC and continuous analysis by FLAC are utilized to estimate a behavior of a tunnel in jointed rock mass. For including discontinuous analysis in continuous analysis, joints in rock mass is considered by reducing rock mass properties obtained by RMR and decreasing shear strength of rock mass. By comparing and revising two analysis results, analysis results similar with practical behavior of a tunnel can be induced and appropriate support system is decided.

**Keywords** : Jointed rock mass, Continuum model, Discontinuous model

## 1. 서론

본 논문의 목적은 불확실한 지반조사 결과에 근거한 절리암반 터널의 설계시, 불연속체 해석과 불연속면을 고려한 연속체해석을 수행하여 비교 분석함으로써, 합리적인 연속체 해석을 위한 절리 암반터널의 보정계수를 파악하기 위함이다.

개별요소법인 UDEC으로 암블릭과 절리의 물성을 이용한 절리 모델 해석을 수행하여 절리 암반 터널의 거동과 안정성을 파악할 수 있는 해석 결과치를 산출하는 한편, 지반조사 결과인 RMR(Rock Mass Rating)에 의한 경험식으로부터 얻은 물성에 의해 불연속면이 고려된 연속체 해석을 수행하여 두 결과치를 비교함으로써 연속체 해석의 적정성을 파악한다.

“안전율은 파괴를 막을 수 있는 최소의 전단강도와 실제 지반의 전단강도의 비로 정의된다(Bishop, 1955).”, “안전율은 실제 전단강도를 파괴가 일어나기 시작하는 강도로 줄이기 위하여 나눈 값이 된다(Duncan, 1996).”에서 나타난 바와 같이, 연속체해석의 절리면 모델 해석시 Increment Search<sup>1)</sup>방법에 의한 역해석을 실시하여, 개별요소법의 불연속체해석과 RMR값에 의한 연속체 해석의 결과치와 유사한 해석 결과치를 나타내는 암반 보정 계수를 최종적으로 산출하여 불확실한 지반의 절리발달사항을 연속체 모델에 적용하고 이 보정계수를 절리 암반 터널의 안전율로 활용한다.

절리 암반의 해석시에는 개별요소법의 암블릭과 연속체 암블릭을 Mohr-Coulomb Model을 이용한 Deformable Block으로 적용함으로써 각 해석의 비교 분석이 가능하게 하며, 개별요소법의 절리면 모델도 Mohr-Coulomb 기준 절리면 모델을 이용하여 해석의 일관성을 유지하도록 하였다.

1) 수치해석 과정에서 변수를 단계적으로 증가시켜 해를 찾기위한 방법

1 남광토건(주), 토목기술팀장  
2 (주)용마엔지니어링, 터널부 상무  
3 (주)용마엔지니어링, 터널부 대리  
4 다린이엔씨, 대표이사

## 2. 이론적 고찰

### 2.1 Mohr-Coulomb Model의 정의

탄소성 구성 모델에서는 재료의 응력 수준이 항복점에 도달하기 전까지의 거동은 탄성 모델로서 묘사되나, 항복점에 도달한 이후의 거동은 소성 거동을 따른다고 가정한다. 즉, Mohr-Coulomb 항복규준(Failure Criteria)에 따르면 흙의 전단강도는 항복면에서의 연직응력이 증가함에 따라 증가한다고 가정, 팽창각을 상수로 취급하며, 전단강도식은  $\tau = \sigma \tan \phi + C$  로 표현된다.

### 2.2 RMR에 의한 수정된 암반강도 적용

암석의 일축 압축강도, 암질지수(R.Q.D.), 불연속면의 평균 간격, 불연속면의 상태, 지하수의 상태로부터 암반의 특성을 중요도에 따라 가중치를 두어 구한 RMR 값으로부터, 각 지반 물성치의 감쇠지수<sup>2)</sup>를 구할 수 있다.

암반의 변형계수(Deformation Modulus)는 모든 수치해석에서 매우 중요한 변수로 적용된다. 본 해석에서는 암반 분류 방법중 가장 보편적으로 활용되고 있는 RMR 분류법에 따른 Bieniawski(1978)와 Serafim & Pereira(1983)에 의해 제안된 Bieniawski(1978)의  $E = 2 RMR - 100$ (GPa)과 Serafim & Pereira(1983)의  $E = 10^{\frac{RMR-10}{40}}$  (GPa) 경험식에 의해 절리를 고려한 변형계수를 산출하였다.

본 해석의 점착력과 내부마찰각의 산정을 위해, Trueman (1988)이 RMR을 바탕으로 제안한 경험식을 사용하였으며, 점착력은  $C_m = 0.25 \text{Exp}(0.05 RMR)$ (MPa) 이며, 마찰각은  $\phi_m = 0.5 RMR + 5$  (Degree)이다.

### 2.3 전단강도 감소기법에 의한 역해석

전단강도 감소기법에 의해 사면해석에서의 안전율은 지반의 강도를 사면의 파괴가 발생할 때까지 점진적으로 감소시켜가며 해석을 반복 수행하여 구할 수 있다. 탄성-완전소성 모델인 Mohr-Coulomb 모델인 경우 탄성-완전탄소성 구성 방정식과 연산유동법칙이 적용될 경우 전단강도 감소 기법으로 구해진 안전율은 분할법에 의해 구해진 안전율과 일치하며 유일한 값을 가진다.

본 논문에서도 Flac 해석 모델의 암반에 절리로 인한 암반 강도 저하를 적용시키기 위해 전단강도 감소 기법을 이용하여 암반의 물성치인 점착력(c)와 내부 마찰각( $\phi$ )를 보정계수인  $F_{trial}$ 를 이용한  $C^{trial} = \frac{1}{F_{trial}} C$ ,  $\phi^{trial} = \arctan$ ,

2) 절리가 없는 암반 물성을 절리를 고려한 암반물성으로 나눈값

( $\frac{1}{F_{trial}} \tan \phi$ )의 식으로 나누어 전단강도를 감소시킴으로써 암반의 강도 저하를 고려 할 수 있다.

## 3. 물성치 산정

### 3.1 적용 암반

UDEC 해석 시의 물성은 보통암인 경우를 적용하였다. 보통암을 적용한 이유는 절리 발달구간의 암반 터널의 거동을 파악함에 있어 보통암이 그 외의 암반에 비하여 굴착에 따른 절리의 영향을 잘 표현할 수 있기 때문이다. 풍화암의 경우 절리의 발달보다는 굴착시 암반의 이완에 의한 영향이 크고, RMR이 60 이상인 경암과 극경암의 경우에는 절리의 발달이 적어 절리 조건 즉 방향과 상태에 민감한 거동을 보이며 또한 현지 지반의 응력조건이 고려되어야 하기 때문이다. 암반 블록과 절리면은 Mohr-Coulomb의 물성치를 적용하였다.

FLAC 해석에서는 UDEC의 암반 블록과 형상이 동일한 수치 Mesh에 보통암 RMR 40~60 사이의 값을 이용하여 관련 물성을 해석에 적용하였다. Bieniawski와 Serafim & Pereira에 의해서 제안된 RMR에 의한 변형계수 경험식과 Trueman의 경험식에 근거한 강도정수를 이용하여 해석을 수행하였고, 전단강도감소기법은 Increment Search 방법에 의한 역해석을 실시하였다.

### 3.2 암반블럭 및 절리면 적용 물성치

UDEC에서의 절리면 물성은 Mohr-Coulomb의 물성과 Barton-Bandis의 물성을 적용하는 두가지의 방법이 있으나, 논문에서는 모델 파괴 기준의 통일성을 기하기 위하여 Mohr-Coulomb의 물성치를 적용하였다. 적용 물성은 자료의 정확성을 확보하기 위하여 실제 설계 단계에서 조사된 지반 조사 결과 및 분석(경상남도 양산지역)에서 산출된 암반과 절리면의 물성을 적용하였다.

절리면 물성치 적용을 위해서, Barton의 경험식을 이용하여 Mohr-Coulomb Model 절리면 해석에 필요한 강도정수인 C와  $\phi$  값을 산출하였다.

표 2에서 JRC는 불연속면의 거칠기, JCS는 불연속면의 압축강도, Kn는 불연속면의 수직강성, Ks불연속면의 전단

Table 1. 암반 터널 해석 물성치

구 분	단위중량 (ton/m <sup>3</sup> )	변형계수 (GPa)	점착력 (MPa)	내부 마찰각 (°)	포아송 비	RMR
보통암	2.5	8.00	2.00	43	0.24	40~60

Table 2. 절리 입력 특성치

구 분	JRCo	JCSo (MPa)	Kn (GPa)	Ks (GPa)	Lo	$\phi_r$ (°)	$\frac{\sigma_c}{JCS_0}$	$\sigma_c$ (MPa)	$\sigma_n$ (MPa)
J1	8.5	73	37.1	3.24	0.1	30	1.8	132	0.3
J2	7.3	73	29.7	2.35	0.1	30	1.8	132	0.3
J3	5.7	73	20.6	1.31	0.1	30	1.8	132	0.3

Table 3. Barton의 경험식에서 구한 Mohr-Coulomb의 절리 입력 특성치

구 분	JRCo	JCSo (MPa)	Kn (GPa)	Ks (GPa)	점착력 C(MPa)	내부마찰각 $\phi$ (°)
J1	8.5	73	37.1	3.24	0.0730	44
J2	7.3	73	29.7	2.35	0.0583	42
J3	5.7	73	20.6	1.31	0.0467	39

강성, Lo는 실험실 공시체의 절리면 길이,  $\sigma_c$ 는 무결암 암석의 일축압축강도이다.

Mohr-Coulomb의 절리면 모델은 점착력과 내부마찰각의 값이 필요하므로 이는 Barton이 제안한 아래에 나열된 경험식으로 부터 구한다.

전단응력( $\tau$ )산출  $\tau = \sigma_n \tan [JRC \log (\frac{JCS}{\sigma_n}) + \phi_r]$

$\frac{\partial \tau}{\partial \sigma_n}$  계산  $\blacktriangleright$

$$\frac{\partial \tau}{\partial \sigma_n} = \tan [JRC \log (\frac{JCS}{\sigma_n}) + \phi_r] - \frac{\pi}{180} \frac{JRC}{\ln 10} [\tan^2 [JRC \log (\frac{JCS}{\sigma_n}) + \phi_r] + 1]$$

내부마찰각( $\phi$ ) 산출  $\blacktriangleright \phi = \arctan (\frac{\partial \tau}{\partial \sigma_n})$

점착력(c)  $\blacktriangleright C = \tau - \sigma_n \tan \phi$

### 3.3 RMR에 의한 암반 강도 정수 산정

UDEC의 암반 블록으로서 고려한 보통암의 RMR 범위인 40~60 에서 RMR 값을 변화 시켜 강도 정수를 산출함으로써, RMR의 차이에 따른 암반 물성치의 변화에 따른 해석을 수행하여 그 적정성을 검토하였다.

적용된 경험식은 국내외에서 가장 널리 적용되는 Bieniawski(1978)와 Serafim & Pereira(1983)의 식과 Trueman(1988)의 식을 적용하였으며, 변형계수(Deformation Modulus)의 산출에서 RMR > 50인 경우에는 Bieniawski의 경험식을 RMR ≤ 50인 경우에는 Serafim & Pereira의 경험식을 적용, 암반의 물성을 산출하여 다음 제시한 표 4와 같이 정리하였다.

### 3.4 전단강도 감소기법의 물성치 산정

전단강도 감소 기법에 따른 보정계수에 의하여 표 1에서 제시한 암반의 기본 물성치를 수정하여 해석을 수행하여, 보통암의 점착력과 내부 마찰각은 표. 5와 같이 보정계수에 의해 수정되었다.

표. 5와 같이 초기 F 값을 1로 정하고 이를 0.5 간격으로 증가시켜가며(즉, 1.5, 2.0, 2.5 등) 해석을 수행하였다. 예를 들어 1.5에서 UDEC의 결과치보다 큰 값이 나왔을 경우 1.0에서 0.1간격으로 F를 증가시켜며 해석을 수행하고 UDEC의 해석치가 1.4와 1.5사이라 하면 0.01씩 F값을 증가시켜 해석을 수행하여 적절한 F값을 도출한다.

## 4. 해석개요

### 4.1 UDEC Mohr-coulomb 절리 Model 해석개요

UDEC해석은 UDEC Ver 3.10을 사용하였으며, 프로그램에 사용된 암반블럭은 Mohr-Coulomb Model을 이용한 Deformable Block으로 형성하고 절리면 모델은 연속체 해석과 동일한 파괴규준 적용을 위하여 Mohr-Coulomb Model 절리면 모델을 적용하였다.

적용지보 패턴으로서 숏크리트 두께는 8cm, 록볼트 길이는 4m, 간격은 2m이며 굴착방법은 전단면 굴착으로서 Type - III을 적용하였다.

Table 4. RMR에 의한 물성치 정리

구 분	RMR	단위중량 (ton/m <sup>3</sup> )	변형계수 (GPa)	점착력 (MPa)	내부마찰각 (°)	포아슨비
보통암	41	2.5	5.96	1.94	25.5	0.24
보통암	45	2.5	7.50	2.37	27.5	0.24
보통암	50	2.5	10.00	3.05	30.0	0.24
보통암	55	2.5	10.00	3.91	32.5	0.24
보통암	60	2.5	20.00	5.02	35.0	0.24

Table 5. F<sup>trial</sup>에 따른 수정된 보통암의 점착력과 내부 마찰각의 계산예

구 분	$C^{trial} = \frac{1}{F^{trial}} 2.0$	$\phi^{trial} = \arctan \left( \frac{1}{F^{trial}} \tan 43 \right)$
F <sup>trial</sup> = 1.0	2.00MPa	43.000
F <sup>trial</sup> = 1.5	1.33MPa	31.868
F <sup>trial</sup> = 2.0	1.00MPa	24.998
F <sup>trial</sup> = 2.5	0.80MPa	20.456
F <sup>trial</sup> = 3.0	0.67MPa	17.267

절리의 영향을 고려하기 위하여 세 개의 주절리군을 고려하여, 절리경사를 수평면과 60°, 70°, 120°로 하여, 굴착방향에 따라 영향을 미칠 수 있는 절리면의 방향성에 대해서는 고려하지 못하였다.

#### 4.2 FLAC Mohr-coulomb 연속체 Model 해석개요

FLAC 해석은 FLAC Ver 3.30인 프로그램을 사용하였고, 해석에 쓰인 물성은 RMR 값을 이용한 경험식에 의해 산정된 물성과 전단강도 감소 기법을 이용한 Incremental Search 방법에 의하여 산정된 암반의 물성으로 해석을 수행하였다.

적용지보패턴은 해석의 통일성을 기하기 위하여 UDEC 절리 Model의 해석과 같이 슛크리트 두께는 8cm, 록볼트 길이는 4m, 간격은 2m이며 굴착방법은 전단면 굴착으로서 Type - III을 동일하게 적용하였다.

### 5. 해석결과

#### 5.1 UDEC Mohr-coulomb 절리 Model 해석결과

천단변위는 2.212mm이고, 측벽변위의 경우 모두 터널 내 공으로 발생하여, 좌우측변위는 각각 1.318mm, 1.187mm로 산정되었다.

스�크리트의 압축응력과 록볼트의 축력 모두 안정하게 해석되었으며, 암반 및 절리에 의해 발생하는 응력을 터널의 지보재가 충분히 지지할 수 있는 것으로 해석되었다.

#### 5.2 RMR에 의한 암반강도 FLAC 해석결과

41, 45, 50, 55, 60의 RMR값을 경험식에 의해 해석 물성치를 산출하여 해석을 수행한 결과는 다음과 같다.

해석 결과 RMR 값이 45일 때 UDEC의 천단 변위 2.212mm와 슛크리트 압축응력 0.341MPa과 유사한 결과가 도출되었다. 보통암의 RMR 평균치인 50의 연속체 해석결과가 UDEC의 해석 결과와 차이를 보이는 것은, 실제 절리 암반의 RMR 값이 보통암 RMR 평균치인 50보다 작은 값을 가

짐을 보여준다고 사료된다.

본 논문에서 적용한 암반의 실제 지반조사 결과에서도 보통암의 RMR값이 45로 도출된 것은 이를 뒷받침하는 자료라 볼 수 있다.

#### 5.3 전단 강도 감소법에 따른 FLAC 해석결과

FLAC 해석결과에서  $F_{\text{trial}}$  값이 1.48에서, UDEC의 슛크리트 압축응력 0.341MPa과 천단변위 2.212mm과 유사함을 알 수 있다.

Table 6. UDEC의 슛크리트 응력 및 록볼트 축력

구 분	해석 결과	허 용 치	비 고
최대 압축응력	0.341MPa	0.84MPa	안 정
최대 인장응력	-	0.006MPa	안 정
최대 록볼트 축력	0.002MPa	0.009MPa	안 정

Table 7. RMR을 이용한 FLAC의 천단변위 및 슛크리트 압축응력

RMR 값	천단변위	스�크리트 압축응력	비 고
41	2.672mm	0.411MPa	
45	1.800mm	0.339MPa	UDEC과 유사한 결과
50	1.179mm	0.215MPa	

Table 8. 보정계수에 따른 슛크리트 응력과 천단 변위의 변화

구 분	스�크리트 압축응력	천단부 변위
$F_{\text{trial}} = 1.42$	0.319MPa	1.886mm
$F_{\text{trial}} = 1.43$	0.324MPa	1.910mm
$F_{\text{trial}} = 1.44$	0.325MPa	1.925mm
$F_{\text{trial}} = 1.45$	0.332MPa	1.946mm
$F_{\text{trial}} = 1.46$	0.333MPa	1.965mm
$F_{\text{trial}} = 1.47$	0.334MPa	1.986mm
$F_{\text{trial}} = 1.48$	0.341MPa	2.003mm
$F_{\text{trial}} = 1.49$	0.348MPa	2.025mm

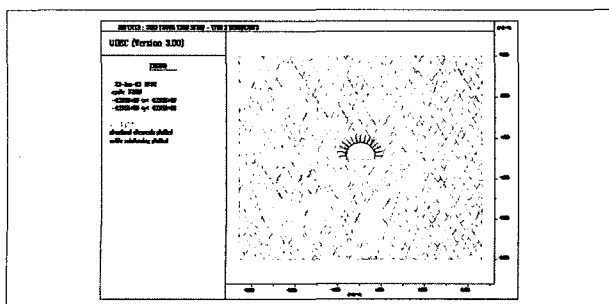


Fig. 1. UDEC 해석단면

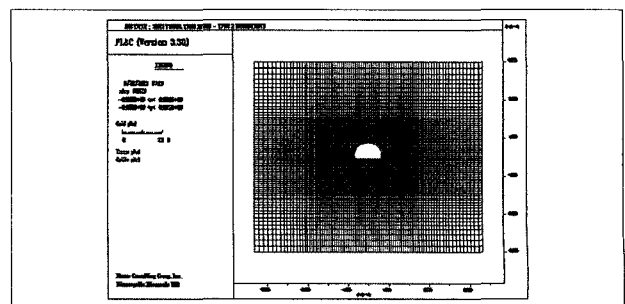


Fig. 2. FLAC 해석단면

## 6. 해석결과 분석 및 결론

터널 안전성 검토에서 널리 활용되고 있는 연속체 모델기법인 FLAC해석이 절리 암반에서는 신뢰성이 부족한 것으로 평가되어 개별요소법에 의한 불연속체 모델 기법을 활용하고 있으나, 개별요소법인 UDEC에 의한 해석을 위해 실제 거동에 유사한 Parameter를 구하기 위해서는 정밀한 지반조사 및 분석이 요구된다. 경제성, 환경문제 및 민원 등으로 인하여 설계단계에서 정밀 조사 및 분석이 곤란할 경우 비교적 단순하게 물성치를 구할 수 있는 연속체 해석 기법으로 불연속체 거동을 모사할 수 있는 지반조건의 범위를 검토한 결과 다음과 같다.

- (1) 최종 천단변위는 불연속체 UDEC 해석에서 2.212mm, RMR을 이용한 FLAC 해석에서 1.800mm, 전단강도감소법의 FLAC 해석에서 2.003mm 값이 도출되었다. 모든 값이 안정측에 포함되었으며, 각각의 변위의 차이는 크지 않은 것으로 나타났다.
- (2) 슛크리트의 압축응력이 허용응력에 비해 작은 범위에서 나타났다. 개별요소법인 UDEC해석 결과와 비교할 때, RMR값이 45일때의 FLAC 해석에서는 0.39%차이를 보였으나, 전단강도 감소기법 FLAC 해석에서는 차이를 보이지 않았다. 두 모델의 비교에서는 압축 응력이 0.59%의 차이가 남을 알 수 있었다.
- (3) 본 논문의 결과에서 알 수 있는 바와 같이, 보통암 절리 암반의 RMR값 40~60의 평균치인 50이하인 RMR값을 갖는 연속체 해석에서 UDEC 결과와 유사한 거동을 보이므로 지반조사가 충분하지 못한 절리암반터널의 해석시 보통암 암반의 RMR 평균치보다 낮은 값의 범위인

40~50 사이의 값을 사용하여 연속체 해석에 적용하면 유사한 결과를 얻을 수 있을 것으로 판단된다.

- (4) 전단강도감소기법에 의한 보정계수 기법은 통상 사용하는 절리 사면의 해석에 국한되지 않고, 터널 거동의 안전성을 평가하는데 사용되는 제한적인 사용에서 터널의 안전성을 판단하는 해석방법으로 사용될 수 있음을 보인다. 그러나 다양한 물성치를 갖는 여러 암반터널에서 추가적인 해석을 수행하여 보정계수의 차이를 파악할 필요가 있다.

## 참고 문헌

1. 박연준, Dawsao E.M., 1997 터널과 지하공간 7. 3. 202-207.
2. 박연준, 유광호, 1998, 터널과지하공간, 8. 4, 287-295.
3. 유광호, 박연준, 배규진, 2000, 대한터널협회 논문집, 2. 3, 47-57.
4. Bishop A. W, 1955 The Use of the Slip Circle in the Stability Analysis of Slope, Geotechnique, Vol.5, 7-17.
5. Duncan J. M., 1996 State of the Art Limit Equilibrium and Finite-element Analysis of Slopes, J.Geotech. Engng. Div Am. Soc. Civ. Engrs. 122. 3, 577-596.
6. Barton, N. And Choubey, V.(1977) "The shear Strenth of rock joints in theory and practice." Rock Mechanics, vol.10 1-54.
7. Bandis, S. C., Lumsden, A. C. and Barton, N. R(1981), "Experimental studies of scale effects on shear behaviour rock joints." International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts, Vol.20, Vol.2, 249-268.
8. Goodman, R. E.(1976), Methods of Geological Engineering in Discontinuous Rocks, West, St Pal.
9. Goodman, R. E.(1980), Introduction to Rock Mechanics, Wiley, New York.
10. Hoek, E.(1983), "Strength of jointed rock masses", Geotechnique, Vol.33, No.3 187-223.