

연속체 절리모델을 이용한 불연속성암반 내 지하공동의 변형거동에 관한 수치해석

강상수¹⁾ · 이종길²⁾ · 백환조^{*3)}

¹⁾한국지질자원연구원 지반안전연구부, ²⁾수성엔지니어링 토질부

³⁾강원대학교 지구환경공학부

Numerical Analysis of Deformation Behaviour of Underground Opening in a Discontinuous Rock Mass Using a Continuum Joint Model

Sang Soo Kang¹⁾ · Jong-Kil Lee²⁾ · Hwanjo Baek^{*3)}

¹⁾Geotechnical Engineering Division, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources

²⁾Geotechnical Division, Soosung Engineering

³⁾Division of Geosystem and Environmental Engineering, Kangwon National University

일반적으로 현지암반은 강도의 변화가 심한 다양한 불연속면들을 포함하여 불균질하고 불연속성을 나타낸다. 절리, 단층, 균열, 층리와 같은 불연속면들은 암반의 강도와 변형특성을 좌우하는 중요한 요인이다. 결과적으로, 지하공동의 안정성은 무결암의 역학적 특성뿐만 아니라, 공동의 기하학적 형상과 관련하여 불연속면들의 공간적 분포와 역학적 특성에 크게 영향을 받는다. 따라서 지하심부의 응력조건에서의 공동설계를 위해서는 불연속 암반의 거동에 대한 정확한 이해가 필수적이다. 암반역학 분야의 발전에 의하여 등방성 암반에서의 지하공동 설계를 위한 기준이 제시되고 있으나, 불연속성암반의 변형거동은 불명확성이 여전히 존재한다. 본 연구에서는 연속체절리모델을 적용하여 불연속성암반 내의 지하공동 주변의 소성영역의 크기, 응력분포 및 변형거동에 대하여 매개변수의 변화에 따른 영향을 고찰하였다. Mohr-Coulomb 파괴이론에 의한 탄소성 유한차분법을 적용하였으며, 비조합 유동법칙과 완전소성 물질거동을 가정하였다.

주요어 : 불연속암반, 변형거동, 연속체절리모델, 유한차분법

In situ rock mass is generally heterogeneous and discontinuous, with varying degrees of strength along the planes of weakness. The planes of weakness such as joints, faults, cracks and bedding planes, control the strength and deformation characteristics of the rock mass. Subsequently, the stability of underground opening depends upon the spatial distribution of discontinuities and their mechanical properties in relation with geometrical shape of opening, as well as the mechanical properties of intact rock materials. Understanding the behaviour of a discontinuous rock mass remains a key issue for improving excavation design in highly stressed environments. Although recent advances in rock mechanics have provided guidelines for the design of underground opening in isotropic rock mass, prediction and control of deformation in discontinuous rock masses are still unclear. In this study, parametric study was performed to investigate the plastic zone size, stress distribution and deformation behavior around underground opening in a discontinuous rock mass using a continuum joint model. The solutions were obtained by an elasto-plastic finite difference analysis, employing the Mohr-Coulomb failure criteria. Non-associated flow rule and

* Corresponding author : hwanjo@kangwon.ac.kr

perfectly plastic material behavior are also assumed.

Key words : discontinuous rock mass, deformation behaviour, continuum joint model, finite difference analysis

서 론

지하공간 구조물의 건설대상이 되는 지하암반은 단층이나 절리, 층리, 균열과 같은 다양한 불연속면을 포함하고 있으며, 이들 불연속면의 기하학적 형태와 역학적 특성은 지하구조물의 안정성에 대단히 큰 영향을 미치게 된다. 따라서 지하구조물의 정확한 안정성 해석을 위해서는 불연속면의 특성을 효과적으로 해석에 반영할 수 있는 해석기법의 확립이 필수적이다(김영근 등, 1994; Hoek et al., 1995; Iofis et al., 1995). 단층이나 절리와 같은 불연속면을 포함하고 있는 암반에 대한 수치해석은 크게 연속체 개념의 해석법과 개별체 개념의 해석법으로 구분할 수 있다. 연속체 개념의 해석방법은 암반을 연속체로 가정하고 단층이나 절리와 같은 불연속면은 방향이나 간격, 표면거칠기 등과 같은 물리적 특성들을 암반분류법인 RMR이나 Q-system 등을 이용하여 분류한 후, 불연속면의 특성들에 따라 암반의 강성을 감소시킨 암반물성치를 적용하는 방법이다. 따라서 불연속면의 역학적 성질이 직접적으로 해석에 반영되는 것이 아니라 암반분류에 의해 간접적으로 해석에 반영된다. 이와는 대조적으로, 개별체 개념의 해석법은 개별절리요소(discrete joint element)나 개별요소법(distinct element method)을 이용하여 불연속면의 공간적인 분포형태 및 역학적인 물성을 해석에 직접 반영시켜 개별적인 절리의 거동을 표현할 수 있다. 따라서 절리면 자체의 거동에 의한 지하구조물의 안정성을 비교적 정확히 예측할 수 있으나 복잡한 절리거동 특성을 표현하는 경우, 구성관계식이 복잡해지고 절리의 공간적, 역학적 특성에 관한 상세한 입력자료를 요구하는 등의 문제점을 갖게 된다.

절리의 역학적 성질을 무결암(intact rock)과 결합시켜 절리를 포함하는 암반의 전체적인 거동이 개별절리를 고려할 때와 유사한 결과를 나타내도록 하는 연속체 개념의 절리해석기법이 점차 보편화되고 있으며 이러한 연속체 절리모델(continuum joint model) 또는 편재절리모델(ubiquitous joint model)의 근본적인 원리는 불연속면에 의해 블록으로 나누어진 불연속성 암반을 불연속면의 특성이 반영된 연속체로 가정하여

해석하는 것으로 불연속면의 발달간격이 해석대상이 되는 구조물의 크기에 비해 충분히 작은 경우 적용이 가능하다(이연규, 1994; 박연준 등, 1997).

본 연구에서는 연속체 절리모델을 이용하여 암반 내에 절리나 층리, 균열등의 불연속면이 우세한 방향성을 갖는 단일군의 형태로 발달되어 있는 경우 불연속면의 역학적 특성, 불연속면의 방향성, 공동의 단면형상 및 축압계수의 변화에 따른 탄소성해석을 수행하여 매개변수의 변화가 지하공동의 변형거동에 미치는 영향을 수치해석에 의하여 살펴보았다.

이론적 고찰

암반에는 암석자체의 불균질성 및 이차적 광물조성 작용, 지각운동과 같은 다양한 지질학적 작용에 의해 단층이나 절리, 층리, 균열 등의 수많은 불연속면이 존재하며, 이러한 불연속면의 존재로 인해 전단강도나 투수율 등의 역학적 특성은 전체적으로 이방성을 보이게 된다(Goodman, 1989). 절리와 같은 불연속면에 대한 전단강도는 절리면의 거칠기, 절리면 표면의 압축강도, 층진상태 및 절리면에 작용하는 수직응력에 따라 변화하는 특징을 보이며 절리의 전단강도에 대한 추정식은 가장 일반적으로 사용되는 Mohr-Coulomb식을 비롯하여 여러 학자들에 의해 제안되고 있다.

Barton(1973)은 인공절리에 대한 직접전단시험에 기초하여 비선형적인 경험식을 제안하였다.

$$\tau = \sigma \tan \left[JRC \log_{10} \left(\frac{JCS}{\sigma} \right) + \phi_b \right] \quad (1)$$

여기서, JRC 는 절리거칠계수(Joint Roughness Coefficient), JCS 는 절리표면의 단축압축강도(Joint wall Compressive Strength), ϕ_b 는 기본마찰각이다.

JRC , JCS , ϕ_b 는 여러 연구자들에 의한 실험결과에 기초하여 간단한 시험이나 경험식에 의해 구할 수 있다.

불연속성 암반에서 파괴는 불연속면의 경사와 불연속면이 갖는 역학적 특성, 그리고 암반에 작용하는 주응력의 크기 및 방향 등에 따라 불연속면 혹은 무결암

내에서 파괴면이 형성되며, Jaeger(1960)는 단일 불연속면이 존재하는 경우 미끄러짐에 의한 암석의 파괴 기준을 불연속면의 점착력 및 내부마찰각을 이용하여 식(2)와 같이 유도하였다.

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \frac{2(c_w + \sigma_3 \tan \phi_w)}{(1 - \tan \phi_w \cot \alpha) \sin 2\alpha} \quad (2)$$

위의 식에서 σ_1 , σ_3 는 각각 최대, 최소 주응력을 나타내며 c_w , ϕ_w 는 불연속면의 점착력 및 내부마찰각, 그리고 α 는 최소주응력의 방향과 불연속면사이의 각을 말한다. 무결암을 통하여 파괴면이 형성되는 경우에는 무결암의 강도정수를 이용한 Mohr-Coulomb의 파괴 기준을 적용할 수 있으며, 불연속면과 무결암에 대한 파괴 기준으로부터 최소주응력 σ_3 와 불연속면이 이루는 각 α 의 변화에 따른 암석의 파괴상태에서의 최대주응력 σ_1 의 변화는 Fig. 1의 형태로 나타난다. Vutukuri 등 (1995)은 Jaeger의 파괴기준이 절리뿐만 아니라 층리구조의 암석에 대한 실험결과와 일치함을 보여준 바 있다.

일반적으로 해석대상의 규모가 커짐에 따라 불연속면의 분포빈도는 점점 많아지는 경향을 보이며 대상암반의 관심영역이 확대됨에 따라 무결암으로부터 점차적으로 불연속면의 수가 증가하여 관심영역이 매우 확대된 경우에는 수많은 불연속면을 포함하게 된다. 불연속면의 분포양상과 암반구조물의 규모에 따라 해석모델의 선택이 달라진다. Fig. 2(a)는 미세균열이 포함되어 있으나 전체적으로 균질한 등방체로 볼 수 있는 경우로서 대상암반은 연속체로 고려할 수 있다. Fig. 2(b)는 소수의 뚜렷한 절리를 포함하는 경우로서 절리면을 따라 미끄러짐과

벌어짐이 발생하며 그 외의 영역은 균질, 등방체로 간주될 수 있다. 따라서 이와 같은 상태에서 지하암반 구조물의 거동을 정확하게 예측하기 위해서는 개별적인 절리의 거동을 묘사하기 위한 개별절리요소를 이용함이 바람직하다. Fig. 2(c)의 경우는 암반을 불연속체 모델로 간주하는 것이 타당한 경우로 암반은 절리군의 교차에 의해 블록을 형성하며 개개 블록의 미끄러짐이나 벌어짐, 회전을 고려하기 위해서는 개별요소법을 이용한 해석이 적합하다. Fig. 2(d)는 불연속면이 치밀하고 몇 개의 균으로 발달된 경우로서, 암반은 준연속체로 고려할 수 있으며 특히 불연속면이 일정한 방향성을 갖는 절리군의 형태로 발달되어 있고 그 간격이 대상구조물에 비해 충분

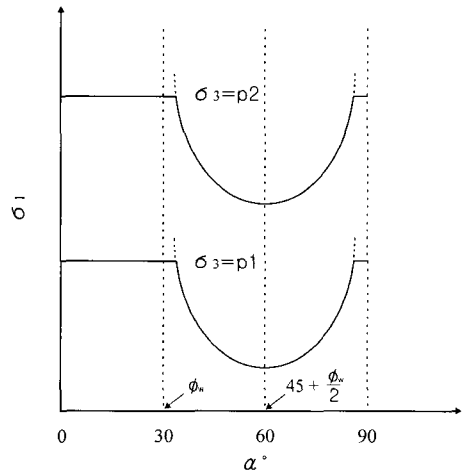


Fig. 1. Major principal stress at failure for a given confining stress versus the angle of inclination of weakness plane (after Jaeger, 1960).

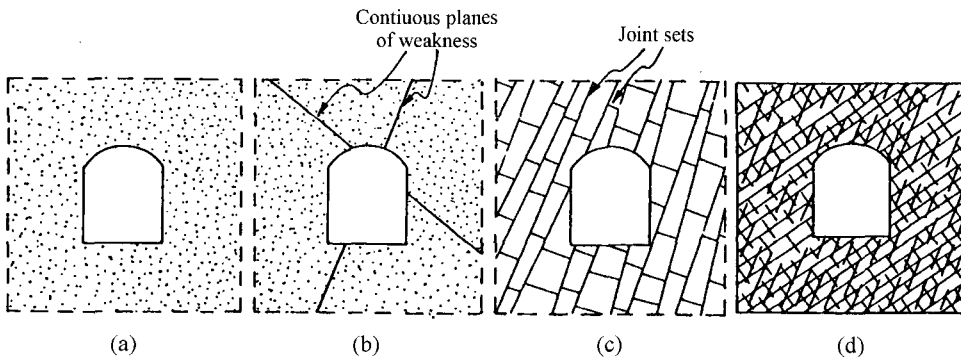


Fig. 2. Conceptual models relating the rock structure and rock response to excavation (after Brady, 1987).

히 작은 경우에는 연속체 절리모형을 이용한 해석이 적용될 수 있다(Brady, 1987; 이연규, 1994).

수치해석 모델

해석과정

불연속 암반에 공동이 굴착되면 공동주위는 이차적 응력 재분배로 인한 응력집중과 불연속면 및 암반자체의 항복으로 인한 소성영역이 발생하게 되며 이와 같은 거동을 묘사하기 위해 FLAC-2D에 의한 탄소성 해석을 수행하였으며 모델은 평면변형률(plane-strain)상태의 Mohr-Coulomb 항복조건식을 적용하였다. 또한, 해석에 사용된 모델은 단일 절리군의 불연속면을 포함하므로 대칭성을 보이지 않기 때문에 공동 전단면에 대하여 모델화 하였으며 공동은 전단면 굴착에 의해 굴진되는 것으로 단순화 하였고 수직응력은 암반의 자중만을 고려하였다.

공동이 굴진되면서 공동의 횡방향은 물론, 축방향으로 하중전이효과(arching effect)가 발생하며 이러한 축방향의 하중전이를 2차원 평면상에서 적절히 고려해 주기 위해서는 하중분담률의 도입이 필요하다. 본 해석에서는 지금까지 많은 검증작업이 이루어진 내부 압력으로 하중분담률을 조절하는 방법에 의해 40-30-30의 하중분담율을 적용하였다. 또한, 해석을 위한 무결암, 지보재 및 불연속면의 물성치는 기존의 문헌(윤지선, 1995; Farmer, 1969, 1983) 및 자료(이상필 등, 1990; 이연규, 1994)를 참조하여 Table 1과 같이 설정하였다.

매개변수 설정

암반은 균열, 절리, 단층, 층리면 등을 포함하는 불연속체이며 이러한 불연속 암반의 거동은 암석자체의 역학적 특성보다는 불연속면의 공간적 분포 및 역학적 특성에 의해 크게 영향을 받는다. 따라서 지하 구조물의 건설에는 불연속면의 영향을 고려하는 것이 중요하며 또한 지하 구조물의 설계와 안정성을 해석하는데 있어 축압계수, 즉 수직응력에 대한 수평응력의 비(K)는 중요한 고려사항이다. 본 연구는 이러한 매개변수의 변화가 지하공동의 변형거동에 미치는 영향을 살펴보기 위해 먼저 공동단면의 경우 동일한 단면적($78.5m^2$)을 갖는 원형과 마제형단면을 선정하였으며 공동단면 장단축의 변화 및 곡률반경의 변화에 따른 변형거동을 살펴보기 위해 장단축의 비가 2:1인 수평타원과 수직타원에 대해서도 고려하였다. 공동은 50m의 심도에 위치하는 것으로 가정하였다.

불연속면을 고려한 해석에서 불연속면이 갖는 방향성 및 역학적 특성은 중요한 고려사항이며 불연속 암반에 대해 연속체 절리모형을 적용하기 위해서는 다음과 같은 불연속면의 일반적인 속성이 고려된다. 첫째, 암반 내에 분포하는 다양한 상태의 불연속면들은 주향과 경사 및 간격이 비교적 일정한 주절리군으로 표현되며 둘째, 절리군내에서 절리면의 역학적 특성은 비교적 일정하다. 이와 같은 속성을 기초로 하여 불연속면이 갖는 방향성에 대한 고려는 2차원 해석의 제한으로 인해 불연속면의 주향은 공동의 굴진방향과 일치하는 것으로 보았으며 불연속면의 경사는 수평면과 각각 0° , 30° , 45° , 60° , 90° 로 변화하는 경우를 모델화하였다. 또한, 불연속면의 역학적 특성은 Table 1을 기준으로 4단계로 나누어 점차적으로 낮아지도록 하였으며(Table 2), 축압계수 K 는 각각에 대하여 0.5, 1.0, 1.5, 2.0으로 변화시키면서 해석을 수행하였다.

Table 1. Mechanical properties of rock and shotcrete adapted in this study.

Item	Unit	Rock	Discontinuity	Shotcrete	
				soft	hard
Young's Modulus	t/m ²	1.0E6	-	5.0E4	1.5E5
Cohesion	t/m ²	30.0	15.0	-	-
Friction Angle	degree	35	35	-	-
Poisson's Ratio	-	0.25	-	-	-
Tensile Strength	t/m ²	15.0	8.0	-	-
Unit Weight	t/m ³	2.5	-	-	-
Area	m ²	-	-	0.12	0.12

Table 2. Variation of mechanical properties of discontinuity adapted in this study.

	Cohesion [t/m ²]	Friction Angle [degree]	Tensile Strength [t/m ²]
Case 1	15.0	35	8.0
Case 2	10.0	32	6.0
Case 3	6.0	30	4.0
Case 4	2.0	28	1.0

해석결과 및 고찰

불연속면의 영향

암반 내에 불연속면이 우세한 방향성을 가지고 발달되어 있는 경우 암반의 역학적 특성은 불연속면의 존재로 인하여 전체적으로 이방성을 보이게 된다. 이와 같이 불연속면이 일정한 방향으로 발달한 불연속암반 내에 공동이 굴착되는 경우 굴착면 주위에는 다른 부분에 비해 상대적으로 변형이 큰 부분이 발생하게 된다. Fig. 3은 이러한 영향을 살펴보기 위해 각각 연속체 모델과 연속체 절리모델을 이용하여 해석한 결과로 연속체 모델을 이용한 경우에는 공동의 변형 거동은 단면형상에 따라 항상 대칭적으로 나타나는 특징을 보인다. 그러나 연속체 절리모델과 같이 불연속면을 고려하는 경우(dip angle 30°) 불연속면의 존재로 인하여 공동의 변형은 수직축에 대해 비대칭성을 나타내며 굴착면 주위에서 발생하는 변위를 살펴보면 불연속면에 수직인 방향에서 상대적으로 큰 변위가 발생한다. 또한, 소성영역의 분포양상도 연속체 모델을 적용한 경우, Pan 등(1990)의 연구결과에서와 같이 원형공동 주위에서 동일한 깊이로 전개되는 양상을 보이나 불연속면을 포함하는 연속체 절리모델의 경우 공동단면 수직축에 대해 비대칭적으로 분포하며 불연속면에 수직인 방향으로 전개되는 특징을 보인다.

Fig. 4는 축압계수 $K=1.0$ 에서 불연속면의 경사가 0°, 30°, 45°, 60°, 90°인 경우 마제형단면의 변형모습을 도시한 것으로 Fig. 3의 원형공동에 나타난 변위양상과 유사하게 불연속면에 수직인 방향에서 상대적으로 큰 변위가 발생하며 이러한 변형거동 현상은 이회근 등(1990)의 모형실험 및 이상필 등(1990)의 절리요소를 이용한 수치해석 결과와 유사함을 보인다.

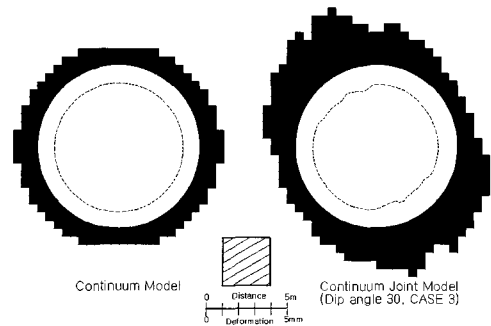


Fig. 3. Deformation and yield zone of the circular opening ($K=1.0$).

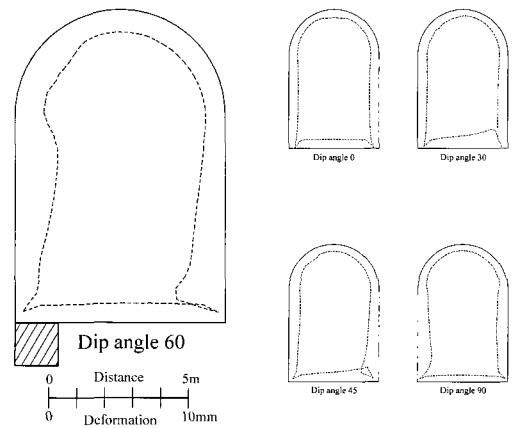


Fig. 4. Deformation of the horse-shoe shaped opening ($K=1.0$).

한편, 암반 내에 존재하는 불연속면은 지하수 및 지표수의 유입, 온도변화 등에 의해 지속적으로 풍화가 진행되고 이러한 영향에 의해 점차적으로 강도가 낮아지게 된다.

Figs. 5와 6은 축압계수가 1.0인 경우에 원형단면에서 불연속면의 경사 및 강도변화에 의한 천반 및 측벽에서의 변위를 나타낸 것으로 불연속면의 강도가 case 1인 경우 불연속면의 경사변화는 공동의 변형거동에 크게 영향을 미치지 않으나 불연속면의 강도가 case 2, case 3로 점차 낮아짐에 따라 공동의 변형은 불연속면의 경사에 크게 영향을 받고 있음을 알 수 있다.

Fig. 7은 마제형단면에서 불연속면의 강도변화에 따른 공동의 변형상태를 도시한 것으로 불연속면의 물성치가 case 1인 경우에 발생하는 변위는 공동단면 수직축에 대하여 거의 대칭적으로 나타나지만 불연속면의 강도가 저하됨에 따라 30°경사의 불연속면과 접하는 공동경계부 즉, 천단 좌측부분과 바닥 우측 모서리 부분에서 변위량의 급격한 증가를 살펴볼 수 있다. 따라서 암반내에 분포하는 불연속면이 우세한 방향성을 가지고 발달한 경우에는 단순히 RMR이나 Q-system과 같은 암반분류법에 의해 해석대상 암반의 강성을 낮추어 연속체 모델을 적용하는 것은 바람직하지 않은 것으로 판단되며 대상 암반 내 불연속면의 발달이 현저하다면 지반조사 단계에서부터 불연속면의 공간적 분포 및 역학적 특성을 정확히 파악해야 한다. 또한, 설계단계에서도 이러한 불연속면의 거동이 묘사될 수 있는 해석을 수행하여 지하공동의 취약부에 대한 검토가 이루어지도록 해야 하며 이로부터 보다 안전하고 경제적인 지하공동의 시공이 이루어질 수 있다.

불연속면 경사의 영향

불연속면의 경사가 변하게 되면 불연속면에 작용하는 응력의 변화에 의해 공동의 변형거동이 차이를 보이게 된다. Figs. 8과 9는 축압계수가 1.0인 원형단면에서 하중이완에 따른 천반의 처짐과 반경방향의 변위를 불연속면의 경사에 따라 나타낸 것이다. 천반의 처짐은 불연속면의 경사가 수직에 가까울수록 감소하는 경향을 보이나 O-A선 방향으로의 반경방향 변위는 수직 및 수평경사에 비해 불연속면이 경사진 경우에 상대적으로 큰 변위량을 보이며 60°의 경사에서 가장 큰 변위를 나타낸다. 수평경사인 경우 천반의 처짐 및 하반의 융기는 상대적으로 큰 값을 나타낸다.

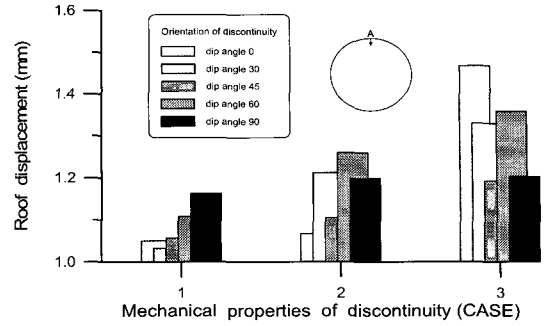


Fig. 5. Roof lowering of the circular opening (K = 1.0).

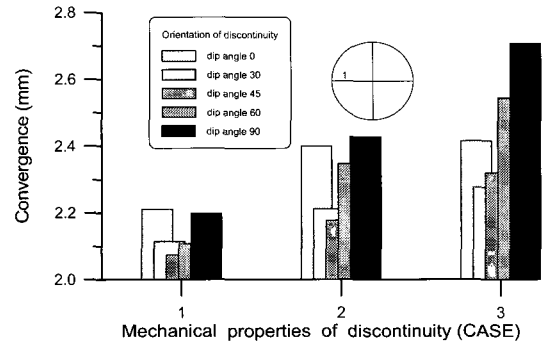


Fig. 6. Convergence of the circular opening measured along line 1 (K = 1.0).

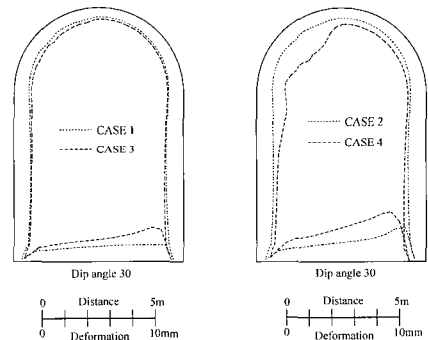


Fig. 7. Deformation of the horse-shoe shaped opening for different mechanical properties of discontinuity (K = 1.0).

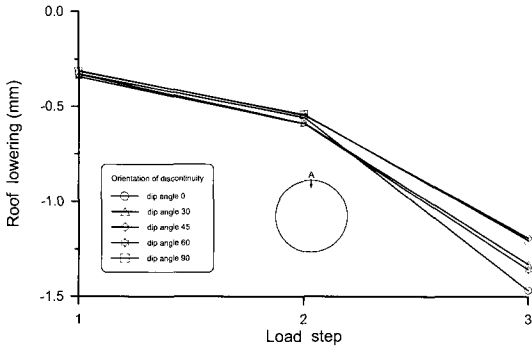


Fig. 8. Roof lowering of the circular opening.

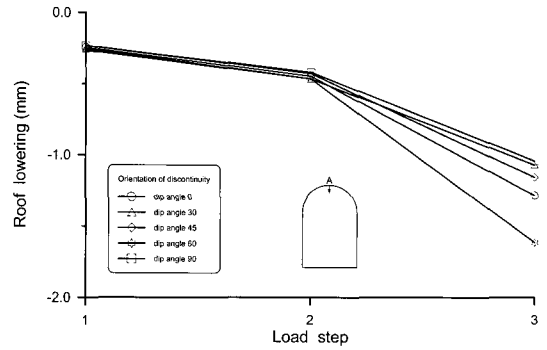


Fig. 10. Roof lowering of the horse-shoe shaped opening.

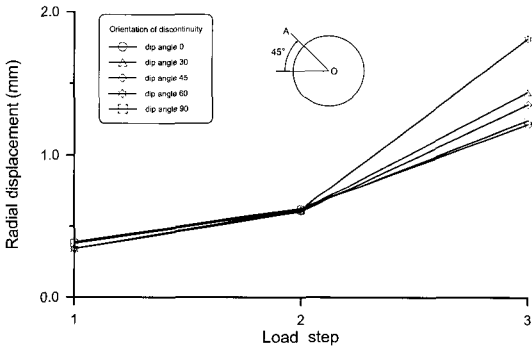


Fig. 9. Radial displacement of the circular opening measured along line O-A.

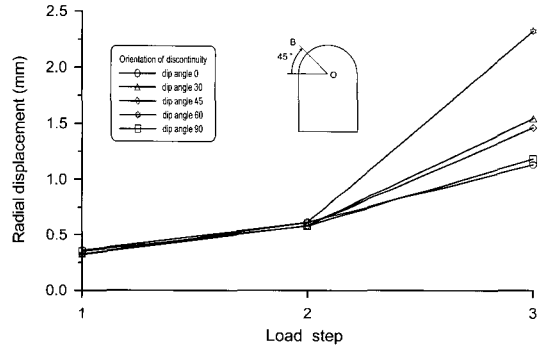


Fig. 11. Radial displacement of the horse-shoe shaped opening along line O-B.

마제형단면의 경우는 원형단면의 결과와 약간의 차이를 보여준다. Fig. 10은 마제형단면에서 천반의 처짐을 도시한 것으로 원형단면과는 달리 60°의 경사에서 가장 큰 변위가 발생하며, 반경방향의 변위는 원형단면의 결과와 유사함을 보이지만(Fig. 11) 불연속면의 경사가 60°인 경우 원형단면과 비교하여 상대적으로 큰 변위가 발생하며 이러한 현상은 처반의 처짐에서도 살펴볼 수 있다. 이러한 원인은 마제형단면의 좌우 측벽부 및 바닥부에서 불연속면을 따라 발생하는 전단항복에 의한 영향으로 마제형단면은 원형단면에 비해 불연속면의 영향을 더 크게 받고 있음을 알 수 있다.

Fig. 12는 불연속면의 각 경사에서 불연속면의 전단강도 및 인장강도가 저하됨에 따라 공동주위에서 발생하는 전단항복 및 인장항복의 발생양상을 살펴보기 위해 공동주위를 12개의 영역으로 분할한 것으로 먼저 초기 불연속면의 강도가 case 2인 경우 각각의 경사에서 나타나는 주응력을 좌표변환에 의해 불연속면에

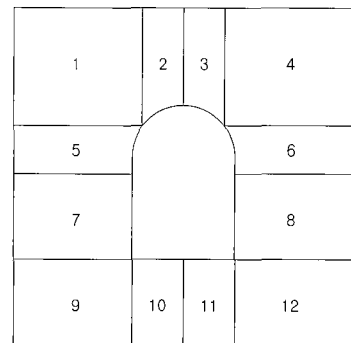


Fig. 12. Partition zones around the horse-shoe shaped opening.

서의 응력성분으로 변환하였다. 변환된 응력을 불연속면의 전단강도 및 인장강도가 저하된 경우 즉, case 3의 항복조건에 적용하였으며 이때 각각의 분할된 영

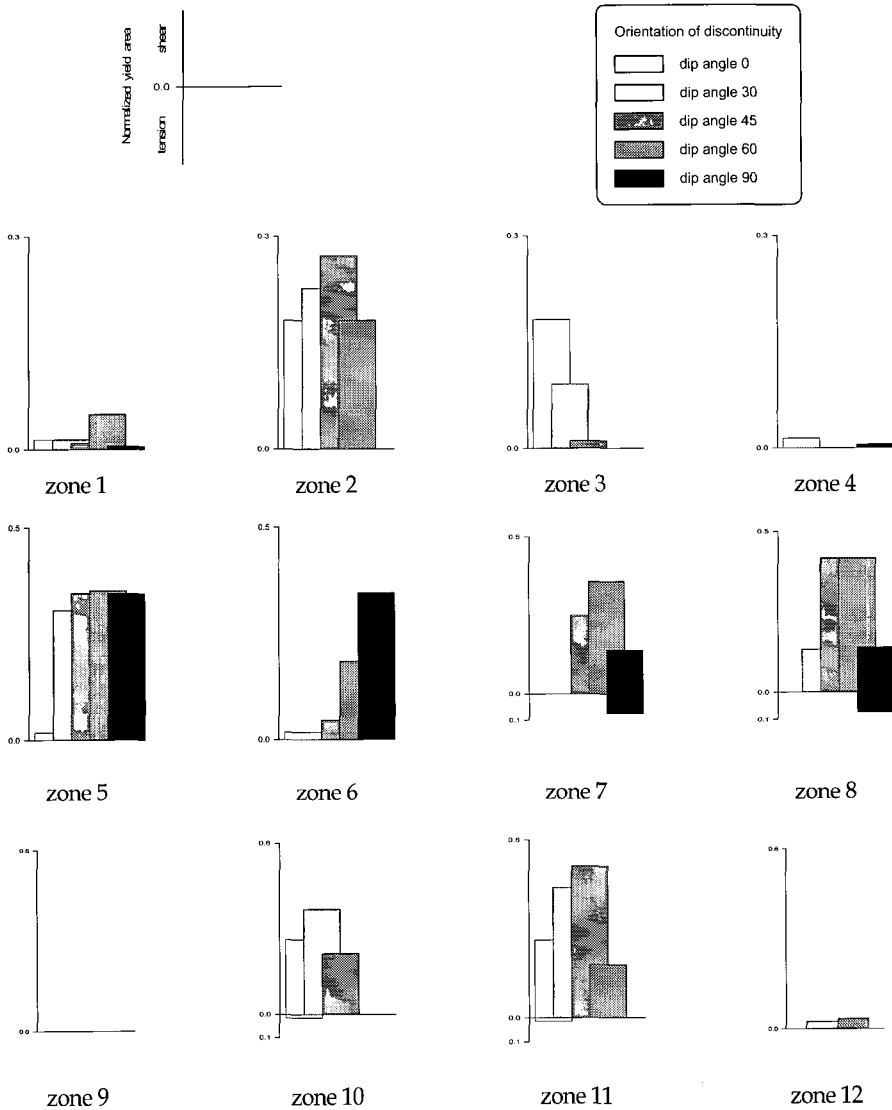


Fig. 13. Normalized yield area in partition zones.

역에서 발생가능한 전단항복 및 인장항복의 분포양상을 분석하였다. 각 영역에서 발생가능한 항복영역은 불연속면의 응력상태가 탄성한계 이상을 나타내는 요소의 총 면적으로 계산하였으며 각 영역의 단면적으로 정규화한 결과는 Fig. 13과 같다.

수평 및 수직경사의 경우 단면 수직축에 대하여 대칭성을 보이며 모서리부분에서는 항복영역의 추가적인 진전이 거의 없음을 알 수 있다. 또한, 수평경사의 경우 공동측벽부에 비해 천단부와 바닥부에서 항복영역의 확대를 살펴볼 수 있으며 반대로 수직경사에서는 측벽부에서 상대적으로 우세함을 보인다. 한편, 인

장응력에 의한 항복은 수평경사의 경우 공동바닥부의 측면에서 발생하며 수직경사에서는 공동 양측벽부에서 발생한다. 이는 공동단면의 경계면이 불연속면과 나란한 경우 인장응력에 의한 항복의 가능성을 보여주는 것으로 전단항복은 잔류전단강도를 갖는데 비해 인장항복은 강도가 완전히 손실되어 공동의 안정성에 큰 영향을 미치므로 수직경사에서 측벽부의 인장항복에 대한 보강을 고려하여야 한다. 불연속면이 경사진 경우, 공동주위에 분포하는 불연속면에서 인장응력에 의한 항복은 발생하지 않으며 전단항복이 지배적으로 발생함을 알 수 있다. 또한, 공동수직축을 중심으로 좌

측상부와 우측하부에서 상대적으로 항복영역이 확대되는 특징을 보인다.

공동단면 형상변화의 영향

공동단면의 형상변화에 의한 공동주위 응력분포 및 변위에 대한 연구는 지금까지 많은 연구가 이루어져 수학적으로 계산이 가능하나 분석가능한 공동형상이 제한되어 있으며 대부분이 탄성조건에 기초하고 있다. 또한, 불연속면을 고려한 공동단면의 형상변화에 관한 연구는 아직 미흡한 실정이다. 본 해석에서는 공동단면의 장단축의 변화 및 불연속면이 접하는 지점에서의 곡률반경의 변화에 의한 영향을 살펴보기 위해 장축 대 단축의 비가 2:1인 수평장축을 갖는 타원형 (Model III)과 수직장축을 갖는 타원형 (Model IV)을 각각 모델화 하였으며 기존의 원형 및 마제형단면과 상호비교 하였다.

Table 3는 불연속면이 각각 수평 및 수직경사인 경우 공동의 천반과 측벽에서 불연속면과 접하는 지점에서의 곡률반경으로 수평경사의 불연속면과 접하는 천반의 곡률반경은 수직타원인 경우 1.77m로 가장 작으며 수평타원의 경우 14.14m로 가장 큰 곡률반경을 갖는다. 반면 수직경사의 불연속면과 접하는 공동측벽에서의 곡률반경은 수평타원인 경우 1.77m로 가장 작으며 마제형의 경우 수직경사와 접하는 지점에서의 곡률반경은 무한대가 된다.

Figs. 14와 15는 4가지 공동단면 형상에 대한 천반의 처짐 및 측벽에서의 수평변위를 Table 3에 나타낸 불연속면과 접하는 공동의 곡률반경 변화에 따라 도시한 것으로 천반의 처짐은 곡률반경이 가장 작은 수직타원의 경우 가장 작은 변위를 나타내며 곡률반경이 커짐에 따라 천반의 수직변위는 증가하는 경향을 보인다. 또한, 측벽에서의 수평변위는 수직경사와 접하

는 지점에서의 곡률반경이 가장 작은 수평타원의 경우 가장 작은 값을 나타내며 곡률반경이 커짐에 따라 곡률반경에 비례하여 증가한다.

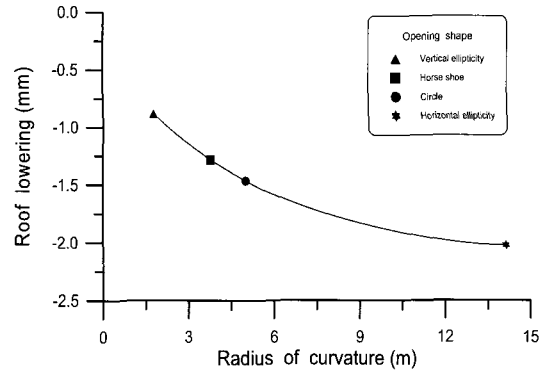


Fig. 14. Roof lowering versus the radius of curvature for different opening shapes (case 3, $K = 1.0$).

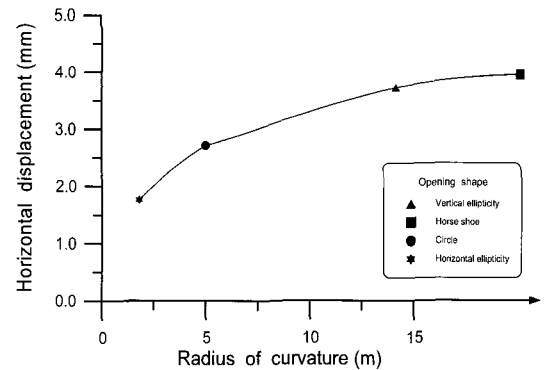


Fig. 15. Horizontal displacement versus the radius of curvature for different opening shapes (case 3, $K = 1.0$).

Table 3. Radius of curvature of roof and wall with opening shape.

	Opening Shape	Radius of Curvature, ρ [m]	
		Roof	Wall
Model I	Circle	5.0	5.0
Model II	Horse-shoe	3.76	∞
Model III	Horizontal Ellipticity	14.14	1.77
Model IV	Vertical Ellipticity	1.77	14.14

측압계수의 영향

지하공동 굴착전에 형성된 초기응력의 크기와 응력의 이방성은 공동의 단면형상과 공동의 배치방향 그리고 보강패턴을 결정하는데 중요한 변수가 된다. 초기 수직응력 대 수평응력의 비로 표현되는 측압계수 (K)는 오버코어링이나 수압파쇄법과 같은 다양한 현저한 응력측정 방법에 의해 측정할 수 있으며 현재까지 보고된 자료에 의하면 지표근처의 심도에서는 측압비의 분산도가 매우 큰 반면 지표로부터 깊이가 큰 경우에는 거의 정수압상태의 응력분포를 보이는 것으로 알려지고 있다. 따라서 측압비의 차이에 의한 변화를 살펴보기 위해 연직응력을 일정하게 고정하고 수평방향의 응력을 측압계수에 의해 0.5, 1.0, 1.5, 2.0의 비율로 변화시키면서 공동의 변형거동을 살펴보았다.

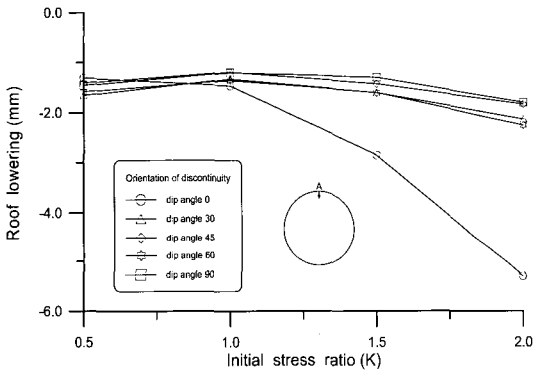


Fig. 16. Roof lowering of the circular opening versus initial stress ratio (case 3).

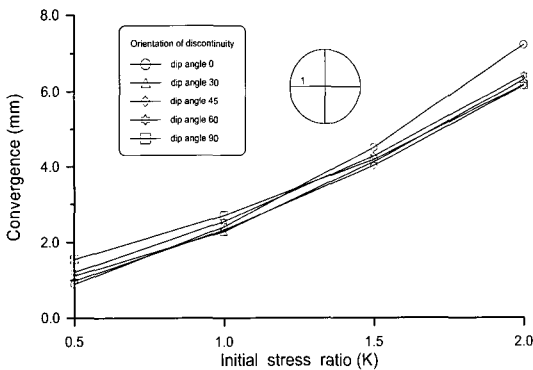


Fig. 17. Convergence of the circular opening measured along line 1 versus initial stress ratio (case 3).

Figs. 16와 17은 원형단면에서 측압계수의 변화에 의한 천반의 처짐 및 측벽에서의 내공변위를 불연속면의 경사변화에 따라 도시한 것으로 천반에서 발생하는 처짐은 수평경사의 경우 측압계수가 증가함에 따라 즉, 초기 수평응력이 수직응력에 비해 상대적으로 커짐에 따라 급격하게 증가하는 반면, 그 이외의 경사에서는 측압계수의 변화는 공동의 수직변형거동에 상대적으로 큰 영향을 미치지 못하고 있음을 알 수 있다. 또한, 측벽에서의 내공변위는 경사변화에 따라 큰 차이는 보이지 않으며 전체적으로 측압계수가 점점 커짐에 따라 수평응력에 비례하여 증가하는 경향을 보여준다.

Figs. 18과 19는 마제형단면에서 측압계수의 변화에 따른 천반의 처짐 및 측벽에서의 내공변위를 나타낸 것으로 천반의 처짐은 천반부 단면형상의 유사함으로 인

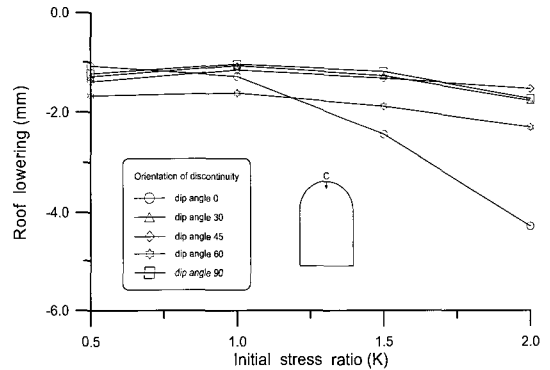


Fig. 18. Roof lowering of the horse-shoe shaped opening versus initial stress ratio (case 3).

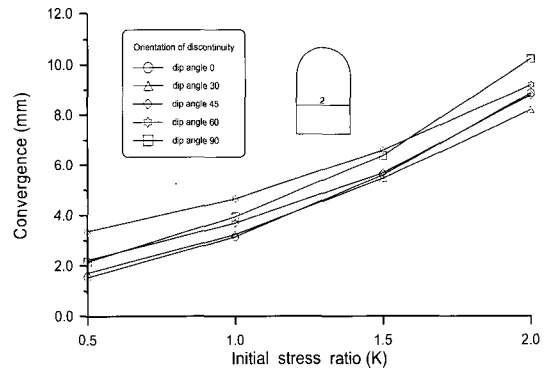


Fig. 19. Convergence of the horse-shoe shaped opening measured along line 2 versus initial stress ratio (case 3).

해 원형단면에서의 결과(Fig. 16)와 비슷한 양상을 보이며 수평경사의 경우 원형단면에서와 같이 초기 수직응력에 비해 수평응력이 커짐에 따라 천반의 처짐은 급격하게 증가되는 특징을 보인다. 이러한 현상은 수평응력이 상대적으로 커짐에 따라 공동의 경계부와 접하는 불연속면이 인접한 불연속면으로부터 분리되어 공동 안쪽으로 밀려들어 오는 사실에 기인한다. 또한, 측벽에서의 내공변위는 초기수직응력에 비해 수평응력이 커짐에 따라 증가하는 경향을 보이며 단면형상의 차이로 인해 원형단면과는 달리 축압계수가 커짐에 따라 수직경사에서 가장 큰 변위를 나타낸다.

결 론

본 연구에서는 연속체 절리모형을 이용하여 절리나 층리, 균열 등의 불연속면이 암반 내에서 우세한 방향성을 갖는 단일균의 형태로 발달되어 있는 경우 불연속면의 역학적 특성, 불연속면의 방향성, 공동의 단면형상, 축압계수의 변화에 따른 탄소성해석을 수행하여 매개변수의 변화가 지하공동의 변형거동에 미치는 영향을 수치해석에 의해 살펴보았으며 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 절리나 층리, 균열등의 불연속면이 특정방향으로 우세하게 발달되어 있는 경우 개별절리모형을 이용한 해석은 구성관계식이 복잡해지고 개개의 불연속면에 대한 모델링의 어려움이 발생하는데 비해 연속체 절리모형은 이러한 문제에 대한 유용한 해석수단이다.

2) 불연속 암반에서 공동의 변형거동은 불연속면에 수직인 방향에서 상대적으로 큰 변위가 발생하며 불연속면의 강도가 저하됨에 따라 이러한 경향은 더욱 두드러지며 소성영역의 전개양상도 유사함을 보인다. 따라서 대상암반을 암반분류법에 의해 단순히 연속체로 모델화하는 것은 불합리하다.

3) 정수압 응력장하에서 불연속면의 경사변화에 의한 공동의 변형거동은 공동단면 변화로 인한 2차응력의 크기 및 방향변화로 인해 차이를 보이며 마제형공동의 경우 불연속면의 경사가 $45 + \phi_w/2$ 부근에서 가장 불리한 변형거동현상이 관찰된다. 또한, 불연속면의 강도저하로 인한 추가적인 항복영역의 진전은 불연속면이 경사진 경우 전단항복이 지배적으로 발생하며 수평 및 수직경사의 경우 공동경계면이 불연속면과 나란한 부분에서 인장응력에 의한 항복이 발생한다.

4) 공동단면의 형상변화에 의한 공동천반의 처짐은 수평경사를 갖는 불연속면과 공동천반이 접하는 지점의 곡률반경이 커짐에 따라 증가하며 측벽에서의 수평변위도 수직경사와 접하는 공동벽면의 곡률반경에 비례하여 증가한다.

5) 축압계수의 변화에 의한 공동의 수직변형거동은 초기 수직응력에 비해 수평응력이 증가함에 따라 수평경사에서 가장 큰 영향을 받는 반면 수평변형거동은 축압계수가 증가하여도 불연속면의 경사에 의해 크게 변화되지는 않는다.

사 사

이 연구는 강원대학교 부설 자원개발연구소의 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드린다.

참고문헌

김영근, 이회근, 1994, 절리특성이 인공절리를 포함한 불연속암반의 변형거동에 미치는 영향에 관한 연구, 한국자원공학회지, 31, 131-141.

박연준, Dawson, E.M., 1997, 편재절리모형의 유용성과 한계성, 터널과 지하공간, 7, 202-207.

윤지선, 1995, 암의 역학, 구미서관, 47-63.

이상필, 이정인, 1990, 불연속 암반내 공동주위의 응력 및 변형거동에 관한 수치해석, 한국자원공학회지, 27, 268-282.

이연규, 1994, 록볼트로 보강한 절리암반의 점소성거동에 관한 수치해석 모델 개발, 서울대학교 공학박사 학위논문. 150p.

이회근, 양형식, 1990, 이방성 암반내 공동 굴착 과정에서의 주위 암반 거동에 관한 축적모형실험 및 수치해석, 한국자원공학회지, 27, 390-411.

정형식, 유병옥, 1997, 암석의 풍화에 따른 강도변화 특성 및 강도 추정에 관한 연구, 한국지반공학회지, 13, 71-93.

Barton, N., 1973, Review of a new shear-strength criterion for rock joints, Engineering Geology, 7, 287-332.

Bell, F.G., 1993, Engineering Geology, Blackwell, 133-179.

Brady, B.H.G., 1987, Boundary element and linked methods for underground excavation design, Analytical and Computational Methods in

- Engineering Rock Mechanics, Brown, E.T.(ed.), London, Allen and Unwin, 164-204.
- Farmer, I.W., 1969, Engineering Properties of Rocks, Barnes & Nobel Inc., 55-69.
- Goodman, R.E., 1989, Introduction to Rock Mechanics, Second Edition, John Wiley & Sons, 141-177.
- Hoek, E., Kaiser, P.K. and Bawden, W.F., 1995, Support of Underground Excavation in Hard Rock, Netherlands, 215p.
- Iofis, I.M., Maksimov, A.V. and Levkin, Yu.M., 1995, The influence of joints on the stability of large underground openings, Mechanics of Jointed and Faulted Rock, 795-800.
- Jaeger, J.C., 1960, Shear fracture of anisotropic rocks, Geological Magazine, 97, 65-72.
- Ladanyi, B. and Archambault, G., 1970, Simulation of behavior of a jointed rock mass, Proc. 11th Symp. on Rock Mechanics, 105-125.
- Pan, Y. W. and Chen, Y. M., 1990, Plastic zones and characteristics-line families for openings in elasto-plastic rock mass, Rock Mechanics and Rock Engineering, 23, 275-292.
- Vutukuri, V.S., Hossaini, S.M.F. and Foroughi, M.H., 1995, A study of the effect, of roughness and inclination of weakness planes on the strength properties of rock and coal, Mechanics of Jointed and Faulted Rock, 151-155.

투 고 일 2005년 7월 29일
 심 사 일 2005년 7월 30일
 심사완료일 2005년 9월 5일

강상수
 한국지질자원연구원 지반안전연구부
 305-350 대전시 유성구 가정동 30
 Tel: 042-868-3255
 Fax: 042-861-9721
 E-mail: kss@kigam.re.kr

이종길
 수성엔지니어링 토질부
 138-170 서울 송파구 송파동 167-1 수성빌딩
 Tel: 02-552-0111
 Fax: 02-424-1784
 E-mail: kicss@soosungeng.com

백환조
 강원대학교 공과대학 지구·환경공학부
 200-701 강원도 춘천시 효자2동 192-1
 Tel: 033-250-6257
 Fax: 033-255-6257
 E-mail: hwanjo@kangwon.ac.kr