

민감도 분석을 통한 불연속 암반 내의 해저터널의 안정성 평가를 위한 연계해석

유광호^{1*}, 이동훈²

Coupled analysis for the stability estimation of a subsea tunnel in discontinuous rock masses using sensitivity analysis

Kwang-Ho You, Dong-Hoon Lee

Abstract In discontinuous rock masses, hydraulic-mechanical coupled analyses are required since groundwater flow in joints have a great influence on the stability of a subsea tunnel. In this study, a sensitivity analysis was performed based on coupled analysis to verify the routine which can estimate the safety factor of a tunnel in discontinuous rock mass. To this end, 324 cases of numerical calculations were performed with a commercial program, UDEC-2D. As a result, it was confirmed that the proposed routine for coupled analysis in discontinuous rock mass could give a reasonable result for the estimation of safety factor of a tunnel. Therefore, it is expected that the safety factor estimation method used in this study can be effectively applied for the stability estimation of a subsea tunnel in discontinuous rock masses.

Keywords: Discontinuous rock masses, subsea tunnel, coupled analysis, factor of safety

요 지 불연속면이 발달한 암반 내에서 해저터널을 건설할 경우 절리내의 지하수 흐름이 터널거동에 커다란 영향을 미치므로 안정성 평가 시 수리-역학적 연계해석이 필요하다. 이에 본 연구에서는 불연속체의 연계해석 시 터널의 안전율을 산정하는 루틴의 검증에 위해 민감도 분석을 수행하였다. 이를 위해 암반블록과 절리의 상호작용을 해석할 수 있는 UDEC-2D 프로그램을 이용하였으며 총 324가지의 경우에 대하여 수치해석을 수행하였다. 결과적으로 불연속체 연계해석을 위해 제안된 안전율 산정 루틴이 타당한 결과를 줌을 확인하였다. 따라서, 본 연구에서 사용된 안전율 산정 방법이 불연속 암반 내에 시공되는 해저터널의 안정성 평가 시 효과적으로 사용될 수 있을 것으로 기대된다.

주요어: 불연속 암반, 해저터널, 연계해석, 안전율

1. 서 론

불연속면이 발달한 암반 내에서 터널을 굴착하는 경우 암반블록 보다 암반 내 불연속면이 낮은 강도 특성 및 높은 투수성을 가짐으로써 암반의 역학적, 수리적 거동을 좌우하기 때문에 안정성 검토 시 불연속면의 특성을 고려하는 것이 중요하다. 기존의 연구에 따르면 장석부와 허도학(2001)은 절리 암반 내에서 터널의 안정성 평가를 위해 개별요소 모델링 방법에 대한 연구를 수행한 바 있다. 연구에 따르면 개별요소해석이 있어서 기본적으로 고려하여야 할 주요 문제들에 대해 고찰하고 기본적인 해석기준을 제안하였다. 터널 설계단계에서 지나치게 복잡한 개별요소모델을 이용한 터널 안정해석은

불확실하기 때문에 모델방법을 단순화하여 결과간의 상관성을 분석하는 것이 바람직하다고 하였다.

김치환(2000)은 개별요소법에 의한 터널의 안정성 해석에 있어서 설계계수를 결정하는 방법에 대해 기술한 바 있으며, 이성규와 김치환(2001)에 의하면 개별요소법을 이용한 터널의 안정성 해석에 있어 Barton-Bandis 절리 모델과 Mohr-Coulomb 절리 모델의 해석 결과를 비교·분석하였다. 또한 주어진 응력 조건과 터널 형상에 따른 암반의 변형 거동을 규명하기 위해 불연속체 해석과 연속체 해석을 수행하고 각각 결과를 비교하였다. Barton-Bandis 모델을 이용한 방법에서는 연속체 해석과 불연속체 해석결과의 차이가 없었으며 Mohr-Coulomb 모델을 이용한 방법에서는 해석의 결과가 차이를 보인다는 것을 연구한 바 있다. 그러나 이들의 연구는 수리적인 특성을 고려하지 않고 역학적인 측면에서 수행된 연구들이었다.

¹수원대학교 토목공학과 교수

²수원대학교 토목공학과 석사과정

*교신저자: 유광호 (khyou@suwon.ac.kr)

그러나 암반 내에 건설되는 해저터널의 경우에는 지하수 흐름은 암반 자체를 통과하기 보다는 대부분 불연속면을 통해 이루어진다. 불연속면 내를 흐르는 지하수는 간극수압으로 인해 암반의 응력 분포에 영향을 주며, 역으로 암반에서의 응력 조건으로 인해 절리를 역학적으로 변형시킴으로써 절리 내 지하수 거동에도 영향을 미치므로 수리적(hydraulic)-역학적(mechanical) 연계해석이 필요하다.

유광호(2008)는 해저 터널의 안전율을 정량적으로 산정하기 위해 2차원 연속체에 대해 수리-역학적 연계해석 시 유도배수 모델링 방법을 비교·분석하였다. 수치해석 시 터널 내부로 유입되는 지하수를 유도 배수하는 방법으로 쏘크리트 수리특성을 조절하는 유도배수 방법은 FLAC-2D Ver. 4.0을 사용하였고 집수정의 펌핑을 통한 유도배수 방법은 탄소성 거동모사가 가능한 FLAC-2D Ver. 5.0을 사용하여 민감도 분석을 수행하였다. 그 결과 해저터널의 수리-역학적 연계해석 시 집수정 펌핑을 이용한 유도배수 방법을 사용하는 것이 터널의 안정성을 검토하는 데에 보다 신뢰성이 높다는 결과를 도출한 바 있다. 그러나 이 연구는 연속체 모델을 가정한 것으로 불연속체 모델에서도 적용 될 수 있는지에 대한 연구가 요구되었다.

한편 김택곤(1994)에 의하여 불연속 암반내의 지하수 흐름이 공동에 미치는 영향에 관한 수치해석적 연구가 수행된 바 있다. 이 연구에 따르면 동일한 지하수위 조건에서 연계해석과 비연계해석을 수행하여 응력조건과 절리의 방향성에 따른 절리 거동을 비교하였으며 지하수위가 높은 심부 암반의 경우 절리거동에 의한 지하수 상태가 달라지므로 연계해석이 필요하다고 하였다.

유광호 등(2008)은 연속체 모델에서 사용된 안전율 산정 루틴이 불연속체 모델에서도 적용될 수 있는지에 대한 연구를 수행하기 위해 불연속체 모델에 적용할 수 있는 안전율 산정 루틴을 개발한 바 있다. 개발된 안전율 산정 루틴을 사용하여 같은 조건에서의 비교를 위해 1등급 암반을 가정하고 쏘크리트 두께, 축압계수, 집수정 펌핑의 유·무에 따른 18가지 경우에 대해 수치해석을 실시하였다. 동일한 해저터널을 대상으로 암반을 절리의 변형을 고려한 등가연속체로 가정하여 수행한 FLAC 해석과 암반블록과 절리의 특성을 별도로 고려하여 수행한 UDEC 해석 결과를 비교한 바 있다. 연구 결과에

따르면 터널주변에 작용하는 수압분포로 인해 FLAC 해석 보다 UDEC 해석에서 안전율이 작게 산정되었다. 그러나 UDEC 해석이 천단변위, 응력, 총 유입량에서 FLAC 해석과 같은 경향을 나타내 해저터널의 연계해석 시 FLAC 해석에 사용된 해저터널의 안정성 평가 방법을 UDEC 해석에서도 적용할 수 있다고 하였다. 그러나 FLAC 해석과 UDEC해석의 비교를 위해 사용된 해석 조건의 경우의 수가 충분치 않았다는 단점이 있다.

따라서, 본 연구에서는 유광호 등(2008)이 불연속체의 수리-역학적 연계해석 시 사용한 안전율 산정 루틴의 검증에 대해 다음과 같은 조건에 대해 민감도 분석을 수행하였다. 이를 위해 암반블록과 절리의 상호작용을 해석할 수 있는 UDEC(Universal Distinct Element Code)-2D Ver. 4.0(Itasca Consulting Group Inc., 2004) 프로그램을 이용하였으며 1등급 암반, 쏘크리트 두께 3가지, 축압계수 3가지, 배수구 펌핑의 유·무, 절리간격 3가지, 직교하는 두 조의 절리경사 2가지, 절리강도 3가지를 가정하여 총 324 경우에 대하여 수치해석을 수행하였다. 또한, 불연속체 안전율 산정 루틴을 사용한 민감도 분석 결과를 분석하여 수리-역학적 연계해석 시 해저터널의 안정성을 검토하였다.

2. 불연속 암반의 연계해석

2.1 개요

해저터널의 경우 굴착으로 인해 터널 주변 암반의 응력과 간극수압이 동시에 변하여 암반의 유효응력이 변하게 된다. 이로 인해 터널주변 암반블록의 하중지지력이 감소하고 아울러서 암반블록이 변형된다. 또한, 불연속면 내에 흐르는 지하수의 경우에도 간극수압의 변화가 암반의 유효응력 분포에 영향을 주며, 동시에 암반의 유효응력이 절리를 역학적으로 변형시켜 결과적으로 절리 내 지하수 흐름에 영향을 미친다. 이러한 경우 터널 및 주변암반의 거동을 규명하기 위해서는 수리(hydraulic)-역학적(mechanical) 연계해석이 요구된다.

불연속 암반의 연계해석 시 암반블록과 절리의 상호작용을 해석할 수 있는 개별요소해석 프로그램인 UDEC-2D Ver. 4.0을 사용하여 다음과 같은 조건에 대해 민감도 분석을 실시하였다. 이를 위해 1등급 암반, 쏘크리트 두께는 30 cm, 45 cm, 60 cm(3 가지), 배수구 펌핑을 실시

하여 지하수를 유도·배수하는 경우와 펌핑을 하지 않는 경우로 나누었으며, 축압계수는 1.0, 2.0, 3.0(3 가지), 절리간격은 1 m, 2 m, 3 m(3 가지), 직교하는 두 조의 절리경사는 0°와 90°, 45°와 135°(2 가지), 절리강도는 암반 블록강도의 1, 0.5, 0.1배(3가지)로 가정하여 총 324 경우에 대하여 수치해석을 실시하였다.

2차원 해석에서 3차원적 터널 시공과정을 모사하기 위해 하중분배개념을 적용하여 해석을 수행하였으며 굴착 하중은 유사한 시공환경에서의 자료를 고려하여 굴착단계 2일, 연성(soft) 슛크리트 단계 8일, 경성(hard) 슛크리트 단계 20일 가량이 소요되는 것으로 가정하였다. 이 때, 굴착단계(터널굴착-연성 슛크리트타설-경성 슛크리트타설)별 하중분담율은 60% - 20% - 20%로 가정하였다.

2.2 연계해석 모델링 방법

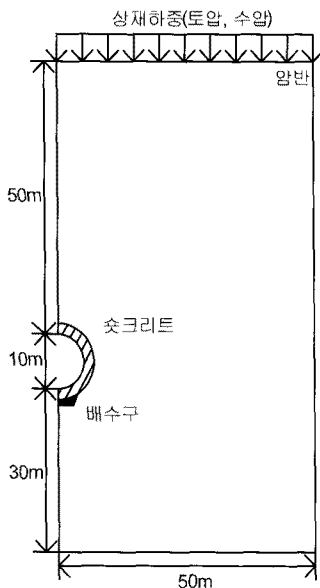
불연속 암반 내에 위치한 해저터널을 가정하여 그림 1의 (a)와 같은 해석단면 조건으로 수심이 60 m, 토피가 100 m, 직경이 10 m 인 원형터널을 사용하였으며 터널 중심으로부터 수평방향 해석경계까지의 거리는 터널 직경의 5배인 50 m로 하였다. 즉, 해수면(지하수위)은 터

널 천단으로부터 160 m 상부에 위치하는 것으로 가정하였다. 해석속도를 높이기 위해 터널 축을 중심으로 좌·우 대칭경계 조건을 적용하여 반단면 해석을 수행하였고 깊이 방향으로는 터널 천단으로부터 50 m까지의 구간을 해석영역으로 설정하였다. 단, 지하수면이 일정하게 유지된다는 가정 하에 해석 상부경계면에 작용하는 수압과 토압을 상재하중으로 처리하였다. 또한 연계해석 시 해석속도를 더욱 빠르게 하기 위해 그림 1의 (b)와 같이 굴착면 주변(굴착면으로부터 터널직경의 1D까지)에서는 절리간격을 해석조건에 따라 1 m, 2 m, 3 m로 하였고, 이 외의 영역에서는 절리간격을 3 m로 넓게 하였다.

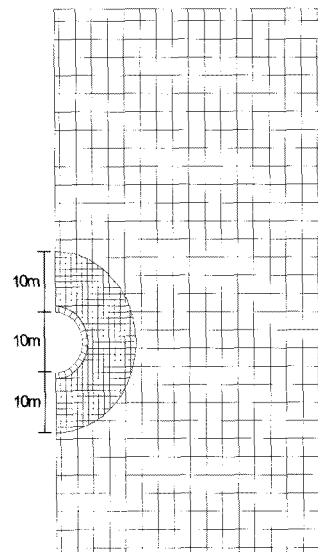
배수구 펌핑에 대한 효과를 알아보기 위해 터널의 인버트 하단에 배수구를 설치하여 주변 절리의 투수계수보다 큰 값을 주어 배수효과를 주는 동시에 지하수를 유도·배수하였다. 단, 암반블록은 불투수성으로 가정하였다.

2.3 연계해석 시 안전을 산정 루틴

절리를 포함하고 있는 불연속 암반의 연계해석 시 암



(a) 해석단면



(b) 해석 요소망

그림 1. 불연속 암반의 해석단면 개요도

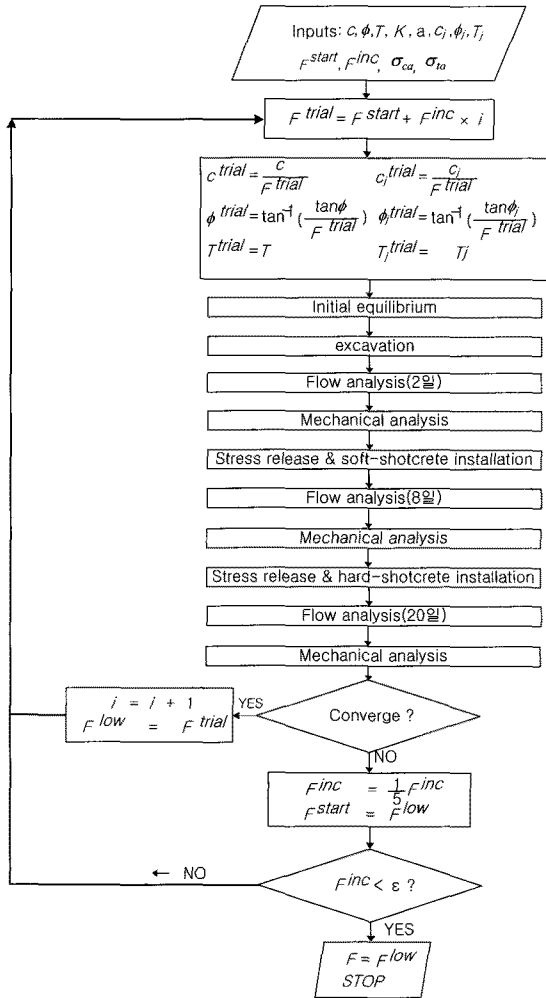


그림 2. 2차원 불연속체의 연계해석 시 안전을 산정 순서도

표 1. 절리간격에 따라 산정된 암반블록 및 절리의 강도정수

절리간격 (m)	암반블록의 탄성계수(GPa) 및 절리의 수직강성(GPa/m)	암반블록의 전단계수(GPa) 및 절리의 전단강성(GPa/m)
1	68.24	28.42
2	51.18	21.31
3	45.49	18.82

표 2. 수치해석에 사용된 1등급 암반의 암반블록의 기타 물성치(한국도로공사 도로교통기술원, 2002)

암반	단위중량 (kN/m ³)	마찰각 (deg)	점착강도 (MPa)	인장강도 (MPa)	간극률	포아송비	투수계수 (k)
1등급	26	45	1.0	0.5	0.20	0.2	0

반 자체의 물리적 특성보다는 암반 내에 존재하는 절리의 거동특성이 구조물의 안정성에 더 큰 영향을 미친다. 절리에 관한 강도정수는 절리면 점착강도(c_j), 절리면 마찰각(ϕ_j), 절리면 인장강도(t_j), 절리의 수직강성(K_n), 절리의 전단강성(K_s) 등이 사용된다. 이러한 절리의 강도정수를 사용하여 불연속체 연계해석 시 해저터널의 안전율 산정 순서도를 그림 2와 같이 도시하였다. 이 때 안전율은 암반블록과 절리에 전단강도감소기법을 동시에 적용하였고, 순서도에 따라 UDEC-2D ver. 4.0의 내장언어인 FISH로 작성된 안전율 산정 루틴을 사용하여 안전율을 자동으로 구했다.

3. 연계해석을 위한 입력정수

수치해석 시 1 등급 암반의 암반블록(암석) 및 절리의 강도정수는 유광호 등(2008)이 사용한 방법을 이용하였다. 즉, 암반블록의 탄성계수 및 전단계수는 각각 절리의 수직강성 및 전단강성과 같다고 가정하였다. 1 등급 암반(등가암반)의 강도정수는 한국도로공사 도로교통기술원(2002)에서 제시한 값을 사용하였는데 이때, 탄성계수와 전단계수는 각각 34.12 GPa과 14.21 GPa이다. 한편, 절리간격이 변하더라도 등가암반의 강도정수가 같아지도록 암반블록의 강도와 절리의 강성을 구했다. 절리간격이 1 m, 2 m, 3 m일 때, 각각 산정된 암반블록(암석)의 탄성 및 전단계수와 절리의 수직 및 전단강성을 구하여 표 1과 같이 정리하였다. 또한, 1등급 암반의 기타 물성치는 표 2와 같이 한국도로공사 도로교통기술원(2002)이 제시한 값을 사용하였다. 단, 암반블록 투수계

수(k)는 “0”으로 가정하여 불투수성으로 처리하였다.

불연속체 해석 시 사용된 절리의 강도정수를 표 3과 같이 정리하였는데 절리의 마찰각, 점착강도, 인장강도는 암반블록의 강도정수와 동일한 값을 적용하였다. 또한, 절리 강도정수가 해저터널의 거동에 미치는 영향을 분석하기 위해 암반블록의 강도를 1, 0.5, 0.1배 감소시킨 값을 각각 사용하여 수치해석을 실시하였다. 이 때 수직응력이 0인 상태에서의 절리틈새인 초기절리틈새(a_{zero})와 수직응력이 가장 클 경우 더 이상 줄어들지 않는 절리 틈새인 잔류절리틈새(a_{res}) 값이 필요하다. UDEC 해석 시 유입량은 절리의 투수율 및 틈새에 의해 달라진다. 따라서, 연속체(FLAC) 해석의 유입량과 불연속체(UDEC) 해석의 유입량이 비슷하게 되도록 역해석을 통하여 초기절리틈새와 잔류절리틈새 값을 추정하였고, 그 결과를 표 3에 나타내었다. 절리의 투수율(k_j)은 물의 동점성계수(μ)를 $10^{-3} Pa \cdot sec$ 로 가정하고 식 (1)과 같이 산정하여 $83.3 Pa^{-1}sec^{-1}$ 을 적용하여 절리를 통해 지하수의 흐름을 유도하였다.

$$k_j = \frac{1}{12\mu} = 83.3 Pa^{-1}sec^{-1} \quad (1)$$

해저터널의 지보재로 사용된 슛크리트의 강도정수를 표 4와 같이 정리하였다. 슛크리트의 탄성계수는 굴착단계에 따라 연성 슛크리트는 3 GPa, 경성 슛크리트는 30 GPa로 나누었으며 슛크리트가 허용인장응력과 허용압축응력을 초과하면 지보재가 파괴되는 것으로 간주하였다.

4. 연계해석 시 민감도 분석 결과

해저터널의 수리-역학적 연계해석 시 안전율 산정 루틴의 검증을 위해 암반상태, 슛크리트 두께, 측압계수, 배수구 펌핑의 유·무, 절리간격, 절리경사, 절리강도에 따라 민감도 분석을 수행하였다. 수치해석 결과를 절리간격, 절리강도, 절리경사에 따라 정리하고 터널에 미치는 영향을 분석하였다.

스�크리트 두께 30 cm, 절리강도 1배, 측압계수 1.0인 경우에서의 절리간격과 안전율의 관계를 그림 3과 같이 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 절리간격이 증가할수록 안전율이 증가하고 절리경사가 0°와 90°일 때 보다 절리경사가 45°와 135°일 때 안전율이 증가하였다. 또한, 배수구의 펌핑을 고려한 경우에서 안전율이 증가한 것을 확인할 수 있었다. 이는 같은 해석조건에서 터널 굴착면 1 m 주변의 수압분포를 위치별(요소번호)로 나타낸 그림 4에서 알 수 있듯이 절리경사가 45°와 135°일 때 터널 주변에 작용하는 간극수압이 절리경사가 0°와 90°일 때 보다 작게 발생하여 안전율이 증가하는 것으로 판단된다. 또한, 배수구 펌핑의 유·무에 따라 인버트부의 수압차이가 약 0.286 MPa(절리경사 0°와 90°), 약 0.442 MPa(절리경사 45°와 135°)로 나타나 배수구 펌핑을 고려한 경우가 터널 주변에 작용하는 간극수압이 작게 나타났다. 슛크리트 두께 30 cm, 펌핑 고려, 절리경사 45°와 135°, 절리강도 1배인 해석조건에서 절리간격에 따른 안전율의 변화를 측압으로 구분하여 그림 5와 같이 나타

표 3. 불연속체 해석 시의 절리강도정수(유광호 등, 2008)

절리강도	마찰각(ϕ_j) (deg)	점착강도(c_j) (MPa)	인장강도(t_j) (MPa)	투수율(k_j) ($Pa^{-1}sec^{-1}$)	a_{zero} (mm)	a_{res} (mm)
1배	45	1.0	0.5	83.3	0.07	0.025
0.5배	35	0.5	0.25			
0.1배	30	0.1	0.05			

표 4. 지보재(스�크리트)의 강도정수

스�크리트 두께 (cm)	탄성계수(GPa)		투수율(k_j) ($Pa^{-1}sec^{-1}$)	포아송비	허용인장응력 (MPa)	허용압축응력 (MPa)
	연성	경성				
30	3	30	83.3	0.25	0.89	12.36
45						
60						

내었다. 그림에서 알 수 있듯이 절리간격이 1 m, 2 m의 경우에는 축압에 따른 안전율의 차이가 크게 나타나지 않았으나 절리간격이 3 m인 경우 축압이 증가할수록 안전율이 증가하는 것으로 나타났다.

절리간격 1 m, 축압계수 1.0, 숯크리트 두께 30 cm의 조건에서 절리강도와 안전율의 관계를 그림 6과 같이 절리경사에 따른 배수구 펌핑 유·무로 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이 절리강도가 작아질수록 안전율이 감소하였으며 절리경사가 0°와 90°일 때보다 45°와 135°일 때 안전율이 높게 나타났다. 절리 경사가 0°와 90°일 때에는 배수구 펌핑의 유·무에 따른 안전율의 차이가 거의 없었으나 절리경사가 45°와 135°인 조건에서는 배수구 펌핑을 할 때 안전율이 증가하는 것으로 나타났다. 이는 앞서 설명한 그림 4에서와 같이 간극수압이 작게 발생하기 때문이다.

그림 7은 절리경사 45°와 135°, 숯크리트 두께 30 cm, 배수구 펌핑을 하는 조건에서의 절리간격과 천단변위와의 관계를 축압계수로 구분하여 나타내었다. 그림에서

알 수 있듯이 축압이 증가할수록 천단변위가 감소하는 것으로 나타났다. 절리경사 0°와 90°, 축압계수 2.0, 배수구 펌핑을 하지 않는 조건에서의 절리간격과 천단변위와의 관계를 그림 8과 같이 숯크리트 두께별로 구분하여 나타내었다. 절리간격이 증가할수록 천단변위가 감소하지만 절리간격 2 m와 3 m에서는 차이가 없는 것으로 나타났다. 이는 같은 해석 조건의 절리간격에 따른 변위벡터도를 나타낸 그림 9에서 알 수 있듯이 절리간격이 커질수록 동일한 면적 내에 생성된 절리의 수가 적기 때문에 변위가 작게 발생한 것으로 판단된다.

절리강도 1배, 축압계수 1.0, 숯크리트 두께 30 cm의 조건에서 절리간격과 총유입량의 관계를 그림 10과 같이 나타내었다. 여기서, 총유입량은 숯크리트를 통해 유입되는 양과 배수구를 통해 유입되는 양을 합산하였다. 그림에서 알 수 있듯이 절리간격이 커질수록 총유입량이 감소하는데 이는 지하수가 절리를 통해 흐르고 절리간격이 클수록 동일한 면적 내에서의 절리의 수가 적기

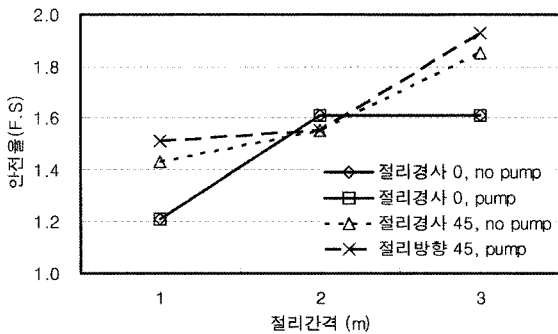


그림 3. 절리간격과 안전율의 관계(숯크리트두께 30 cm, 절리강도 1배, $K_0=1.0$)

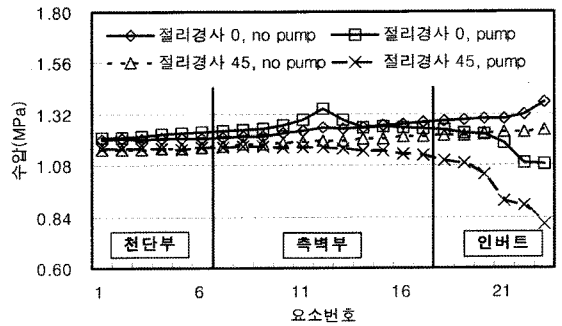


그림 4. 터널 굴착면 1 m 주변의 수압분포(숯크리트두께 30 cm, 절리강도 1배, $K_0=1.0$, 절리간격 1 m)

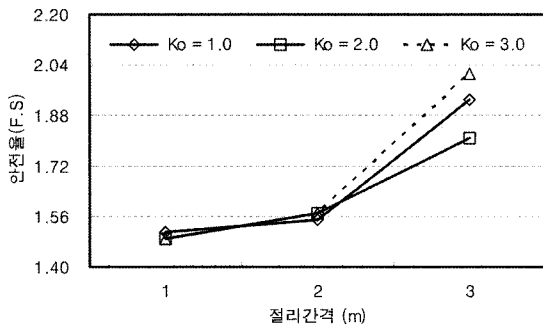


그림 5. 절리간격과 안전율의 관계(숯크리트두께 30 cm, 펌핑고려, 절리경사 45°, 절리강도 1배)

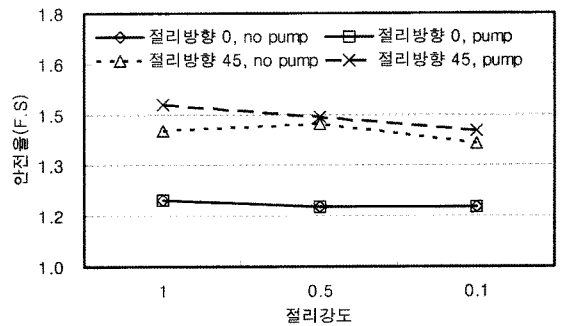


그림 6. 절리강도와 안전율의 관계(절리간격 1 m, $K_0=1.0$, 숯크리트두께 30 cm)

때문인 것으로 판단된다. 또한, 절리경사가 0°와 90°이고 배수구 펌핑을 할 경우 총유입량이 가장 크게 나타났는데 이는 지하수의 흐름이 절리경사가 45°와 135°일 때 유리하긴 하지만 총유입량 산정 시 절리경사 보다는 배수구의 펌핑에 의한 영향이 더 큰 것으로 판단된다. 절리간격 1 m, 절리경사 0°와 90°, 펌핑 고려, 숯크리트 두께 30 cm의 조건에서 절리강도와 총유입량의 관계를 그림 11과 표 5로 절리강도에 따라 나타내었다. 그림

11과 표 5에서 알 수 있듯이 절리강도가 감소할수록 총유입량이 증가하는 것으로 나타났다. 또한, 측압이 커질수록 총유입량은 적어지는 것으로 나타났다. 그러나 절리강도가 0.5배와 0.1배의 경우 측압계수 2.0과 3.0일 때 거의 같은 총유입량이 산정되었다. 총유입량은 펌프 유입량과 숯크리트 유입량을 합산하여 산정하게 되는데 표 5에서 알 수 있듯이 펌프유입량과 숯크리트 유입량이 거의 같기 때문이다.

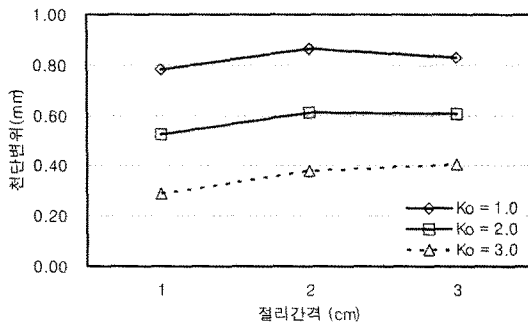


그림 7. 절리간격과 천단변위의 관계(절리경사 45°, 숯크리트 두께 30 cm, 펌핑 고려)

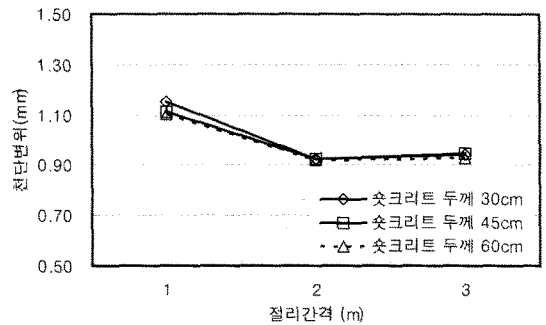


그림 8. 절리간격과 천단변위의 관계(절리경사 0°, Ko=1.0, 펌핑 미고려)

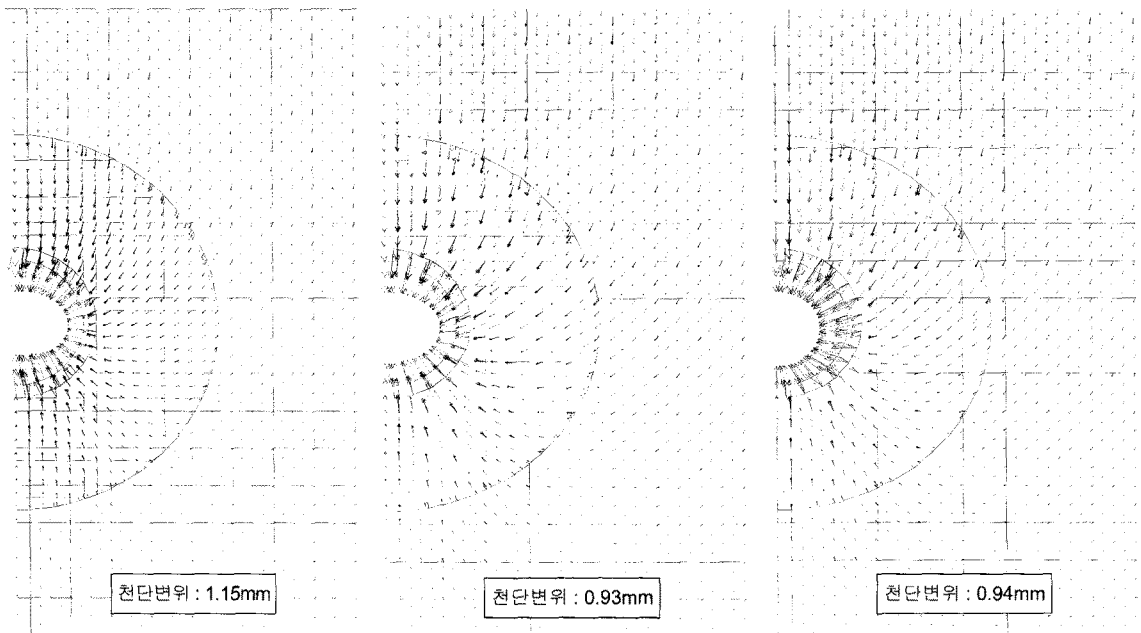


그림 9. 절리간격 따른 변위벡터(Ko=1.0, 절리경사 0°, 숯크리트두께 30 cm, 펌핑 미고려)

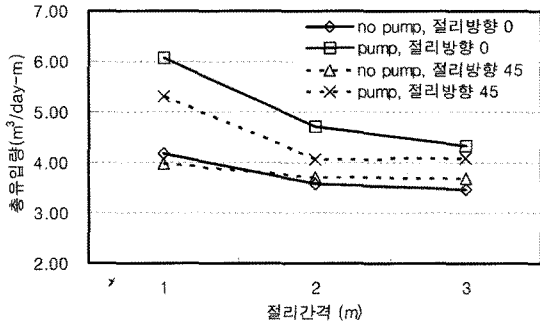


그림 10. 절리간격과 총유입량 관계(절리강도 1배, $K_0=1.0$, 슛크리트두께 30 cm)

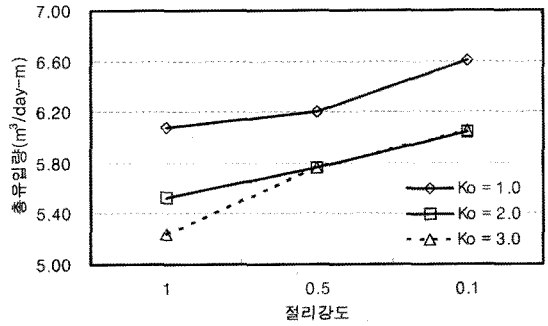
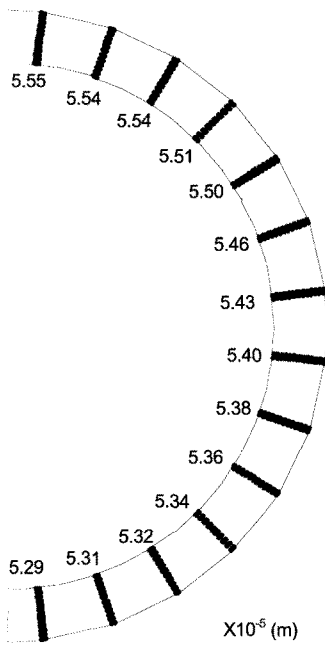


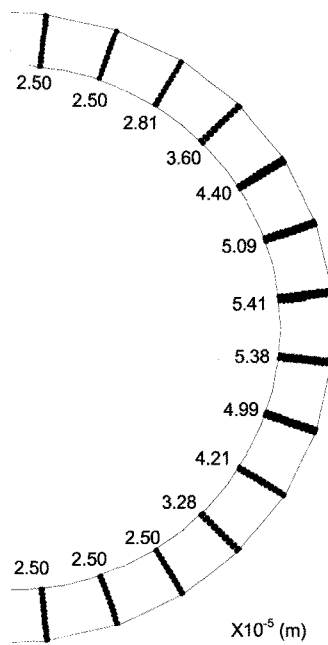
그림 11. 절리강도와 총유입량 관계(절리간격 1 m, 절리경사 0°와 90°, 배수효과 고려, 슛크리트두께 30 cm)

표 5. 절리물성 변화에 따른 총유입량(절리간격 1 m, 배수구 펌핑 고려, 슛크리트두께 30 cm)

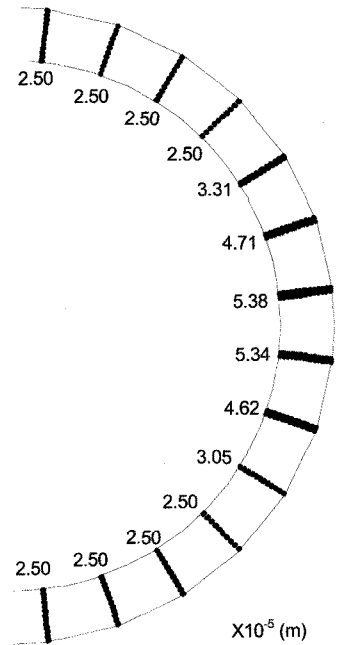
절리경사	절리강도	1배			0.5배			0.1배		
	측압계수	1.0	2.0	3.0	1.0	2.0	3.0	1.0	2.0	3.0
0°와 90°	총유입량 (m³/day-m)	6.08	5.53	5.24	6.20	5.77	5.76	6.61	6.04	6.05
	펌프 (m³/day-m)	2.10	0.35	0.35	2.30	0.35	0.35	2.84	0.35	0.35
	스�크리트 (m³/day-m)	3.98	5.18	4.89	3.90	5.42	5.41	3.77	5.69	5.70



(a) $K_0=1.0$



(b) $K_0=2.0$



(a) $K_0=3.0$

그림 12. 측압에 따른 터널 굴착전 절리 틈새(절리간격 1 m, 절리경사 0°, 절리강도 0.1배, 펌핑 고려, 슛크리트두께 30 cm)

특히, 슛크리트 유입량이 축압계수 2.0과 3.0에서 같아지는 이유를 분석하기 위해 절리간격 1 m, 절리경사 0°와 90°, 절리강도 0.1배, 배수구 펌핑 고려, 슛크리트 두께 30 cm의 경우에서 터널 굴착전 터널 주변의 절리틈새상태를 비교하였고 그 결과를 그림 12와 같이 나타냈다. 축압이 1.0인 경우 터널의 천단부, 측벽부, 인버트의 절리틈새가 평균 5.42×10^{-5} m으로 잔류절리틈새(a_{res} , 2.5×10^{-5} m) 보다 높게 나타나 아직 잔류상태에 도달하지 않았다.

그러나 축압계수 2.0과 3.0에서는 절리틈새가 각각 평균 3.69×10^{-5} m, 3.31×10^{-5} m 으로 나타났고 천단부와 인버트의 절리틈새는 잔류상태인 2.5×10^{-5} m에 도달하여 더 이상 줄어들지 않는 것으로 나타났다. 또한, 측벽부의 절리틈새가 축압계수 2.0과 3.0에서 거의 같게 나타났다. 따라서 축압계수가 2.0 이상이 되면 절리틈새의 상태가 일정하게 되기 때문에 슛크리트 유입량이 일정하게 되고 결국 총유입량이 일정하게 나타나는 것으로 판단된다.

5. 결 론

해저터널의 연계해석 시 안전율 산정 루틴의 검증을 위해 암반상태, 슛크리트 두께, 축압계수, 배수구 펌핑의 유무, 절리간격, 절리경사, 절리강도 조건을 조합하여 민감도 분석을 실시한 결과 다음과 같은 결론을 도출할 수 있었다. 절리간격과 축압이 증가할수록 안전율이 증가하였으며 배수구 펌핑을 한 경우 안전율이 증가하였다. 이는 배수구 펌핑(인버트)으로 인해 터널 배면으로 유입되는 지하수를 배수구로 유도하여 간극수압을 감소시키기 때문인 것으로 판단된다.

절리간격이 커질수록 일정한 면적 내에 있는 절리의 수가 적기 때문에 누적변위가 작게 발생하여 천단변위가 감소하는 것으로 나타났다. 또한, 절리경사가 0°와 90°, 배수구 펌핑을 할 경우 총유입량이 크게 나타남으로써 절리경사보다는 배수구 펌핑에 의한 영향이 더 큰 것으로 분석된다.

절리강도가 작아질수록 안전율이 감소하고 총유입량은 증가하는 것으로 나타났다. 그러나 축압계수 2.0과 3.0인 경우 절리강도가 1배일 때를 제외하고는 총유입량이 거의 같았다. 이는 축압계수가 2.0 이상이 되면 절리틈새의 상태가 일정하게 되기 때문에 슛크리트 유입

량이 일정하게 되고 결국 총유입량이 일정하게 나타나는 것으로 판단된다.

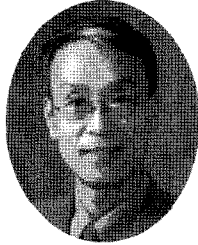
위 결과들을 종합적으로 분석해 볼 때 불연속 암반 내의 해저터널에 대한 연계해석 시 사용한 안전율 산정 루틴방법이 타당한 결과를 나타냄을 확인하였다. 따라서, 불연속 암반 내에 해저터널을 굴착할 경우 연계해석을 통한 안정성 검토 시 본 연구에서 사용한 안전율 산정 루틴이 적절한 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁시행 한 2008년도 첨단도시개발사업(과제번호: 05-건설핵심 D10-01, 과제명: 해저시설물 차폐기술연구)에 의하여 연구비가 지원되었기에 관계자분들에게 감사드립니다.

참고문헌

- 김치환 (2000), “개별요소법에 의한 터널 안정성 해석에 있어 설계정수의 결정”, 터널과 지하공간, Vol. 10, pp. 278-290.
- 김택곤 (1994), 불연속면 암반내 지하수유동과 공동거동의 상호작용에 관한 수치해석적 연구, 공학석사학위논문, 서울대학교 대학원, 97p.
- 유광호 (2008), “이차원 수리-역학적 연계해석 시 유도 배수 모델링 방법에 따른 수치해석적 비교연구”, 한국터널공학회 논문집, Vol. 10, No. 1, pp. 91-104.
- 유광호, 이동훈, 김은혜 (2008), “해저터널의 2차원 수리-역학적 연계해석을 통한 연속체와 불연속체의 수치해석적 비교연구”, 한국암반공학회 국제학술회의, 전남대학교, pp. 377-389.
- 이성규, 김치환 (2001), “개별요소법을 이용한 터널 안정성 해석에 있어 Barton-Bandis 절리모델과 Mohr-Coulomb 절리 모델의 비교”, 한국터널공학회 논문집, Vol. 11, No. 2, pp. 167-173.
- 장석부, 허도학 (2001), “절리암반내 터널의 안정성 평가를 위한 개별요소 모델링에 대한 고찰”, 한국터널공학회 논문집, Vol. 3, No. 2, pp. 3-12.
- 한국도로공사 도로교통기술원 (2002), “암반등급에 따른 도로터널 지보체계 개선 연구”, 268p.
- Itasca Consulting Group, Inc. (2004), Universal Distinct Element Code 2D, Ver. 4.0, Itasca Consulting Group, Minnesota, USA.



유 광 호

수원대학교
토목공학과
교수

E-mail: khyou@suwon.ac.kr



이 등 훈

수원대학교
토목공학과
석사과정

E-mail: dongury2@hanmail.net
