

해저터널의 불연속체 연계해석 시 잠재적 이완영역 평가 방법의 타당성 연구

유광호^{1*}

A feasibility study on the estimation of a potential relaxed zone in the discontinuum coupled analysis of a subsea tunnel

Kwang-Ho You

Abstract When constructing a subsea tunnel in discontinuous rock mass, fluid flow in joints has a great influence on the behavior of the tunnel so that hydro-mechanical coupled analysis should be performed for the stability estimation. In practice, relaxed rock load is generally used for the design of tunnel concrete lining. In a continuum analysis, a method based on the distribution of local safety factor around a tunnel was proposed for the estimation of a potential relaxed zone. However, in the case of discontinuous rock mass in which joints are developed, the whole stability of tunnels depends on the behavior of the joints. In this study, therefore, a method is proposed for the estimation of a potential relaxed zone occurred by the excavation of a tunnel in discontinuous rock mass. The suggested method is validated by sensitivity analysis and the comparison with the results of continuum analysis.

Keywords: Discontinuous rock mass, discontinuum coupled analysis, local factor of safety, potential relaxed zone

요 지 불연속면이 발달한 암반 내에서 해저터널을 시공할 경우 절리 내의 지하수 흐름이 터널 거동에 커다란 영향을 미치므로 안정성 평가 시 수리-역학적 연계해석이 필요하다. 실무에서는 일반적으로 암반이완하중을 고려하여 터널의 콘크리트 라이닝을 설계한다. 연속체 해석 시 잠재적 이완영역을 터널 주변의 국부안전율 분포를 이용하여 수치해석에 의해 산정하는 방법이 제안된 바 있다. 그러나 절리가 발달한 암반의 경우는 절리의 거동이 터널 전체 거동에 큰 영향을 미친다. 따라서 본 연구에서는 불연속 암반 내에 터널 굴착으로 인해 발생하는 잠재적 이완영역을 산정하는 방법을 제안하고 민감도 분석 및 연속체 해석 결과와 비교를 통해 제안된 방법의 타당성을 검증하였다.

주요어: 불연속 암반, 해저터널, 불연속체 연계해석, 국부안전율, 잠재적 이완영역

1. 서 론

급변하는 국제 관계를 고려할 때 가까운 미래에는 지하공간 및 해저터널 등의 개발이 활발히 이루어질 것으로 예상된다. 이에 따라 해저시설물에 대한 연구가 활발히 진행되고 있으며 불연속면이 발달한 암반 내에 해저터널을 건설할 경우 정확한 설계 및 시공을 위해서 수리-역학적 연계해석이 필요하다.

천병식과 신영완(2001)에 의하면 슛크리트와 록볼트 등의 1차 지보재가 터널의 시공 및 운영기간 동안 암반이완하중을 충분히 지지한다면 콘크리트 라이닝은 미적 또는 심리적인 영향만을 고려하여 설계할 수 있다고 하였다. 그러나 불량한 암반상태, 슛크리트의 부식 등으로 1차 지보재가 지보능력을 상실할 경우에 대비하

여 콘크리트 라이닝을 설계하여야 한다고 하였다. 암반이완하중을 산정하는 방법으로는 Terzaghi의 암반하중 분류표, Terzaghi 및 Bierbäumer의 이론식, RMR 값 및 Q 값을 이용한 경험식, 그리고 터널 주변의 국부안전율 분포를 이용한 방법 등이 있다. 유광호 등(2000)에 따르면 국부안전율을 이용한 방법은 해석영역의 각 요소가 얼마나 파괴에 가까운가를 설명하는데 효과적이며, 터널의 안정 해석 시 굴착으로 인해 발생한 터널 주변부의 파괴영역이나 양상, 보강이 필요한 부분을 찾아내는 데에 효과적으로 사용될 수 있다. 따라서 터널 굴착 후의 이완 영역은 국부 안전율이 2.0 또는 3.0이 되는 등고선을 찾아 그 크기를 구할 수 있다고 하였다(유광호 2005).

유광호와 이동훈(2007)은 연계해석 시 해저터널의 이완영역 평가를 위한 수치 모델링 비교 연구를 수행한 바 있다. 3등급 암반을 대상으로 슛크리트 수리특

¹수원대학교 토목공학과 교수

*교신저자: 유광호 (E-mail: khyou@suwon.ac.kr)

성을 이용한 유도배수 방법과 집수정 펌핑을 이용한 유도배수 방법으로 수치해석을 수행하고 국부안전율을 이용하여 이완영역을 산정하였다. 유도배수 방법에 따른 이완영역을 비교한 결과 집수정 펌핑을 이용한 유도배수 방법이 보다 높은 신뢰성을 갖는 결과를 준다고 발표하였다.

유광호와 이동훈(2008a)은 해저터널의 이완하중고 산정을 위하여 이론적으로 제시된 식들과 수치해석을 통해 산정된 이완하중고를 비교한 바 있다. 기존에 3등급 암반으로 국한되어 있던 연구에서 1, 3, 5등급으로 암반 등급을 확대하고 국부안전율을 이용하여 이완하중고를 산정하였다. 그 결과 이론식을 사용하여 구하는 것 보다는 수치해석에 의해 산정된 이완하중고가 일관적이고 타당함을 도출하였다. 또한, 유광호와 이동훈(2008b)은 과지압 조건에서 해저터널의 연계해석 시 이완하중고 평가에 대한 연구를 발표하였다. 이 연구에 따르면 지보재의 두께가 증가할수록 이완하중고가 감소하나 그 차이는 미미한 것으로 나타났으며 축압계수가 증가할수록 이완하중고가 증가하는 것으로 나타났다.

그러나 앞선 연구들은 암반을 절리가 없는 등가연속체로 가정하여 수행된 연구들일 뿐이며 불연속면이 발달한 암반에서의 잠재적 이완영역 평가 방법에 관한 연구는 수행된 바가 없다. 따라서 본 연구에서는 불연속면이 발달한 암반 내에 해저터널을 굴착할 경우 수리·역학적 연계해석 시 암반블록의 국부안전율 등고선도와 파괴된 절리의 영역을 이용한 방법에 기초하여 잠재적 이완영역을 산정하는 방법을 제안하였다.

이를 위해 암반블록과 절리의 상호작용을 해석할 수 있는 UDEC(Universal Distinct Element Code)-2D Ver. 4.0(Itasca Consulting Group, Inc., 2004) 프로그램을 이용하였다. 또한 대상 암반은 해저터널이 건설되는 지역의 특성상 암반조건이 양호해야 하기 때문에 한국도로공사 도로교통기술원(2002)에서 제시한 1등급 암반을 대상암반으로 가정하였다. 그리고 축압계수, 배수구 펌핑의 유·무, 절리간격, 절리경사, 절리면 강도 등에 대한 민감도 분석 및 연속체 해석 결과와의 비교를 통해 잠재적 이완영역을 산정하고 제안된 방법의 타당성을 검증하였다.

2. 이완영역 평가 방법

수치해석에 있어, 각 요소에서의 응력상태는 전응력 표현 시 그림 1과 같이 점선으로 표시된 Mohr 원(주응력 σ_1 과 σ_3)에 의해 표현될 수 있고, 간극수압(P_w)이 작용하면 유효응력에 의한 응력상태는 $\sigma - \tau$ 평면상에서 반지름 r 을 갖는 원 (a)로 그려진다. 이 원이 파괴면 (failure envelope)에 접하게 될 때 파괴가 발생한다. 원 (a)에 의해 표현된 응력상태에서 원의 중심은 그대로 유지하면서 원 (b)와 같이 파괴면에 접할 때까지 응력원의 반지름을 증가시키므로써 파괴에 도달할 수도 있다. 또한, 원 (a)에 의해 표현된 응력상태에서 파괴가 발생하려면 σ_3 는 그대로 유지하면서 원 (c)와 같이 파괴면에 접할 때까지 σ_1 이 증가하여야 한다(Itasca Consulting Group, 1999). 두 원의 반지름 비($F = \frac{R_2}{r}$ or $\frac{R_1}{r}$)는 주어진 응력 상태에서 일종의 강도/응력비 (strength/stress ratio)에 해당하며, 종종 국부 안전율(factor of safety)이라고도 한다. 특히, 본 연구에서는 σ_3 는 그대로 유지하면서 σ_1 이 증가하여 파괴되는 경우로 가정하여 안전율을 구하였다. 파괴될 때의 최대주응력을 σ_{1f} 라 하면, 식 (1)과 같이 표현된다.

$$\sigma_{1f} = \left(\frac{1 + \sin \phi}{1 - \sin \phi} \right) \sigma_3 - 2c \sqrt{\frac{1 + \sin \phi}{1 - \sin \phi}} \quad (1)$$

여기서, c 는 점착력이고, ϕ 는 내부마찰각이다.

이 때, 국부 안전율(F.S.)은 식 (2)와 같이 계산될 수

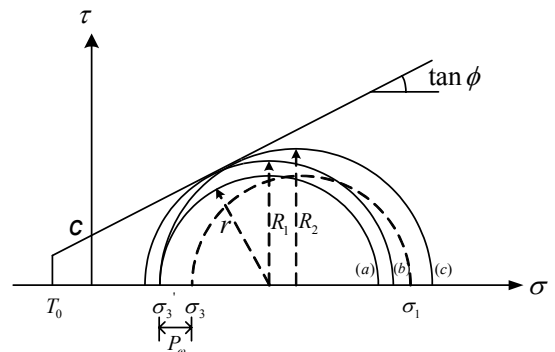


그림 1. 간극수압을 고려한 국부안전율

있다.

$$F.S. = \frac{R_2}{r} = \frac{\sigma'_3 - \sigma'_{1f}}{\sigma'_3 - \sigma'_1} \quad (2)$$

이와 같은 방법은 해석영역의 각 요소가 얼마나 파괴에 가까운가를 설명하는 데에는 효과적이며, 터널의 안정 해석 시 굴착으로 인해 발생한 터널 주변부의 파괴영역이나 양상, 보강이 필요한 부분을 찾아내는 데에 효과적으로 사용될 수 있다(유광호 등, 2000).

한편, 연속체 해석 시 터널 굴착으로 인해 발생한 이완영역의 크기가 그림 2와 같이 국부 안전율이 2.0 또는 3.0이 되는 등고선을 찾아 구하는 방법이 제안된 바 있다(유광호와 이동훈, 2007). 따라서 본 연구에서도 암반 블록 내의 응력들로부터 국부안전율을 구하고 동일한 방법으로 이완영역의 크기를 산정하였다.

하지만, 불연속체 해석에서는 절리면의 거동이 중요하므로 절리의 파괴도 이완영역의 크기를 구하기 위해 고려되어야 한다. 즉 절리가 파괴되면 암반블록이 안정되더라도 암반은 이완된 것으로 간주되어야 한다. 파괴된 절리는 절리면에 작용하는 인장력과 전단력이 "0"이 되는 UDEC의 특성을 이용하여 찾을 수 있다. 따라서 암반블록의 국부안전율이 2.0 이하가 되는 영역과 절리면에 작용하는 인장력과 전단력이 "0"인 파괴된 절리를 포함한 영역을 찾아 그 중 더 큰 영역을 이완영역으로

산정하는 것이 타당할 것이다.

3. 불연속체 연계해석 모델링

3.1 해석조건 및 민감도 분석

불연속 암반 내에 위치한 해저터널을 가정하여 그림 3의 (a)와 같은 해석단면 조건으로 수심이 60 m, 토피가 100 m, 직경이 10 m인 원형터널을 사용하였으며 터널 중심으로부터 수평방향 해석경계까지의 거리는 터널 직경의 5배인 50 m로 하였다. 즉, 해수면(지하수위)은 터널 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.

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

불연속체 연계해석 시 이완영역 평가를 위해 제안된 방법의 타당성을 검증하기 위해 축압계수 3가지(1.0, 2.0, 3.0), 배수구 펌핑의 유·무, 절리간격 3가지(1 m, 2 m, 3 m), 직교하는 두 조의 절리경사 2가지(A(0°와

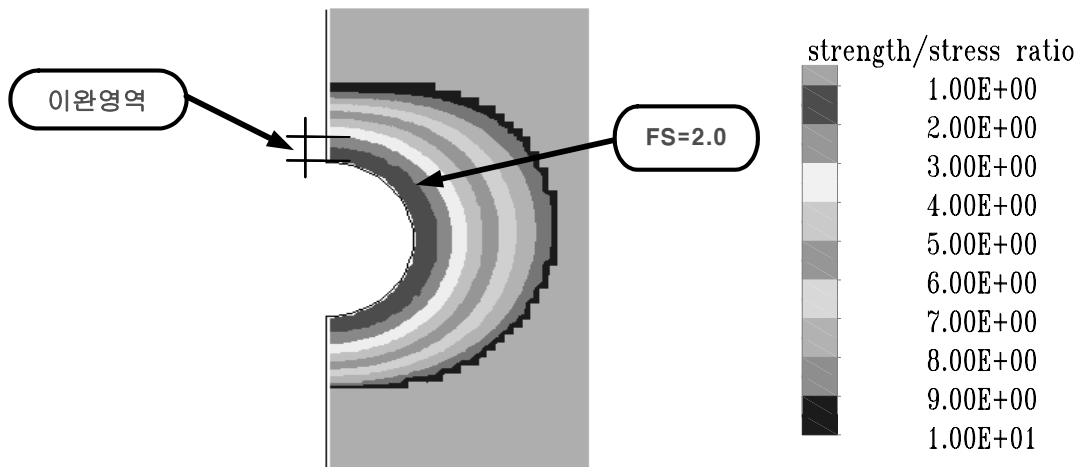


그림 2. 국부안전율 2.0 등고선도를 이용한 이완영역 산정

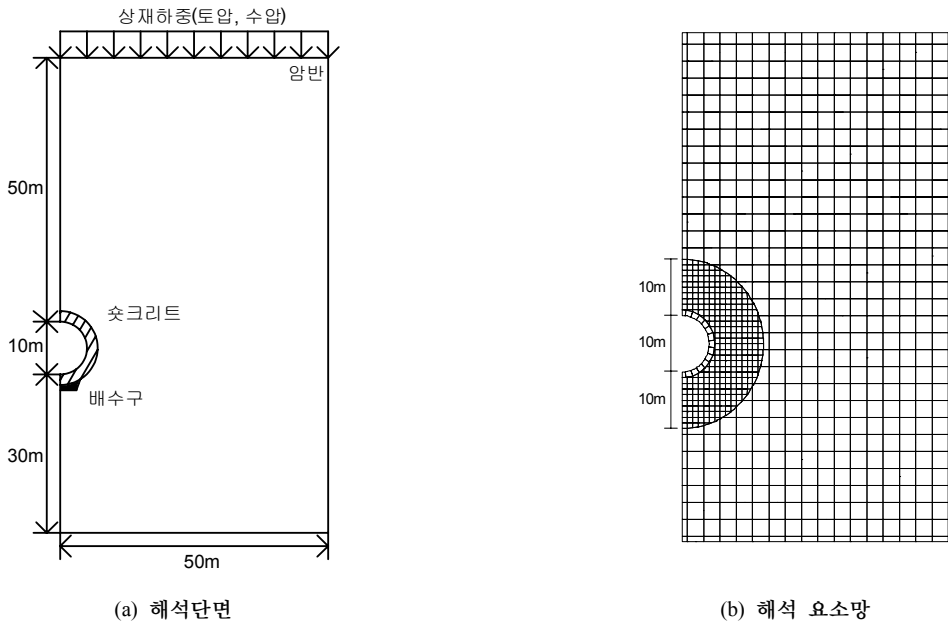


그림 3. 불연속 암반의 해석단면 개요도

90°) 및 B(45°와 135°)), 절리면 강도 3가지(암반블록의 1배, 0.5배, 0.1배)를 가정하여 총 108 가지에 대하여 민감도 분석을 실시하고 결과를 분석하였다. 단, 보강을 위해 숏크리트가 두께 30 cm로 타설되는 것으로 가정하였다. 한편 연계해석 시 해석속도를 더욱 빠르게 하기 위해 그림 3의 (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.

한편 암반블록은 변형이 가능한 모델(deformable block)로 Mohr-Coulomb 구성모델이 사용되었고, 절리는 면적 접촉(area contact)에 근거한 Coulomb 모델이 사용되었다. 변형 가능한 블록은 그 내부가 다시 유한차분 삼각형 요소(zone)로 분할되는데 블록을 나누는 요소의 수에 따라 복잡할 수도 있고 단순할 수도 있다(한국지반공학회, 2000).

3.2 연계해석을 위한 입력정수

수치해석 시 1등급 암반의 암반블록(암석) 및 절리의 강도정수는 유광호와 이동훈(2008c)이 사용한 방법을 이용하였다. 즉, 암반블록의 탄성계수 및 전단계수는 각각

절리의 수직강성 및 전단강성과 같다고 가정하였다. 1등급 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 투수계수(k)는 “0”으로 가정하여 불투수성으로 처리하였다.

불연속체 해석 시 사용된 절리의 강도정수를 표 3과 같이 정리하였는데 절리의 마찰각, 점착력, 인장강도는 암반블록의 강도정수와 동일한 값을 적용하였다. 또한, 절리강도정수가 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

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 암반블록의 강도정수(한국도로공사 도로교통기술원, 2002)

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

표 3. 불연속체 해석 시의 절리의 강도 및 수리 물성치(유광호 등, 2008)

절리강도	마찰각(ϕ_j) (deg)	점착력(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. 숏크리트의 두께 및 강도정수

숏크리트 두께 (cm)	탄성계수(GPa)		포아송비	인장응력(MPa)		항복압축응력 (MPa)
	연성	경성		항복	잔류	
30	3	30	0.25	0.89	0.45	12.36

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 (3)과 같이 산정하여 $83.3 Pa^{-1}sec^{-1}$ 을 적용하여 절리를 통해 지하수의 흐름을 유도하였다.

$$k_j = \frac{1}{12\mu} = 83.3 Pa^{-1}sec^{-1} \quad (3)$$

한편 숏크리트는 항복 후에도 잔류강도로 저항할 수 있는 liner 요소로 모델링하였는데 사용된 강도 정수는 표 4와 같다. 또한, 숏크리트의 수리특성은 그림 3(b)에서 보는 바와 같이 방사형으로 분포된 16 개의 절리에 의해 모델링되었는데 이때 수리 물성치는 표 3의 값이

사용되었다.

4. 이완영역 평가 결과

불연속면이 발달한 암반 내에 해저터널의 수리-역학적 연계해석 시 암반블록의 국부안전율이 2.0인 등고선과 파괴된 절리의 영역을 비교하여 둘 중 큰 영역을 사용하여 이완영역을 산정하였다. 또한, 부가적으로 불연속체 해석에서 암반 블록 내에 생성되는 요소(zone)의 크기가 이완영역의 크기에 미치는 영향을 검토하였으며 마지막으로 국부안전율 등고선도를 이용한 이완영역 평가 방법으로 연속체 해석방법과 불연속체 해석방법의 결과를 비교하였다.

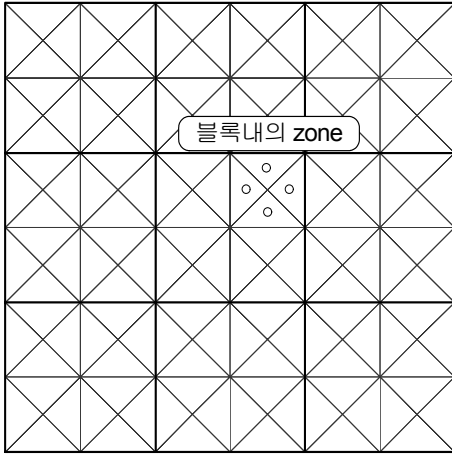
4.1 암반블록 내부의 요소 크기 영향

암반블록 내부의 요소(zone)를 묘사한 그림 4와 같이

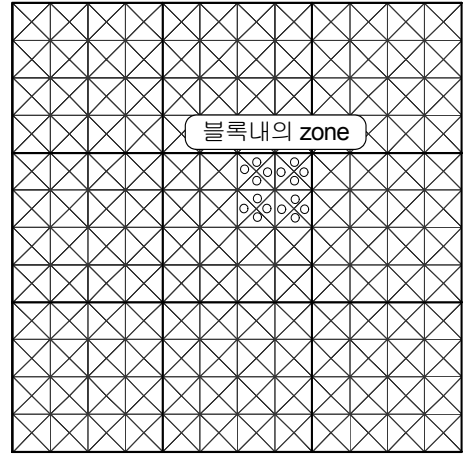
암반블록 내부에 생성되는 요소의 한 변(edge)의 최대길이를 각각 1.0과 2.0을 넘지 않도록 설정하여 해석을 수행하였다. 그림 4의 (a)는 한 변의 길이를 2.0이하로 설정한 것으로서 한 개의 암반 블록내부에 요소가 16개가 생성되며 그림 4의 (b)는 한 변의 길이를 1.0이하로 생성되게 하여 한 개의 암반 블록내부에 요소의 수가 64개

가 생성됨을 알 수 있다. 단 요소의 수가 증가하게 되면 해석소요시간이 증가하는 문제점이 있다.

표 5는 요소의 크기를 달리하여 수행한 결과를 비교하여 나타내었다. 또한, 그림 5에 이완영역 평가 결과를 암반 블록내부에 생성되는 요소의 크기에 따라 구분하여 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이 전반적으로 요소의



(a) 요소의 최대 변의 길이가 2.0 이하

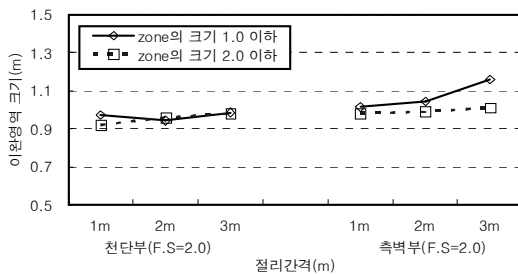


(b) 요소의 최대 변의 길이가 1.0 이하

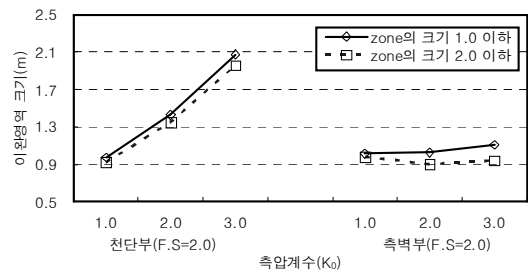
그림 4. 블록 내부의 요소 크기

표 5. 암반블록 내 요소 크기에 따른 이완영역 평가 결과 비교

측압계수	요소 크기 절리간격	최대변의 길이 1.0 이하			최대변의 길이 2.0 이하		
		1 m 천단/측벽	2 m 천단/측벽	3 m 천단/측벽	1 m 천단/측벽	2 m 천단/측벽	3 m 천단/측벽
1.0		0.97/1.01	0.94/1.04	0.99/1.16	0.92/0.98	0.96/0.99	0.98/1.01
2.0		1.43/1.02	1.39/0.95	1.47/0.90	1.35/0.90	1.39/1.00	1.40/0.96
3.0		2.08/1.11	2.24/1.15	2.20/0.96	1.96/0.94	2.18/1.02	2.21/0.99



(a) 절리간격과 이완영역 관계($K_0=1.0$)



(b) 측압계수와 이완영역 관계(절리간격 1 m)

그림 5. 암반블록 내 요소 크기에 따른 이완영역 평가 결과

한 변의 길이가 1.0이하 일 때가 2.0이하 일 때보다 다소 큰 이완영역을 나타냈다. 절리간격에 따라 요소의 크기를 달리하여 그림 5의 (a)에 나타낸 결과 암반 블록내부의 요소의 크기에 따른 차이는 천단부에서는 거의 없고 측벽부에서는 절리간격이 증가할수록 커지나 그 차이는 0.15 m로 그다지 크지 않은 것으로 나타났다. 그림 5의 (b)는 측압계수가 이완영역에 미치는 영향을 살펴본 것인데, 절리간격과 마찬가지로 요소의 크기에 상관없이 비슷한 값을 나타내 측압계수의 영향이 거의 없는 것으로 나타났다. 따라서, 본 연구에서는 요소의 한 변의 길이가 2.0을 넘지 않도록 하여 결과에는 큰 영향을 미치지 않으면서도 해석 속도를 줄일 수 있도록 하였다.

4.2 결과 정리 및 분석

암반블록의 국부안전율 등고선을 이용한 이완영역 평가 방법은 그림 6에서 흰색 점선과 같이 국부안전율이 2.0인 등고선을 찾아 이완영역의 크기를 찾을 수 있다. 한편 파괴된 절리의 영역은 그림 6에서 검은색 실선과 같이 절리면에 작용하는 인장력과 전단력이 “0”이 되는 절리의 영역을 찾아 찾을 수 있다. 이 두 가지 영역 중에 큰 영역을 이완영역으로 간주하고 그림 6과 같이 천단부와 측벽부에서 잠재적 이완하중 크기($H_{relaxed}$)를 각각 산정하였다.

그림 6은 절리방향 A(0°와 90°), 절리간격이 1 m, 절

리강도 1배, 집수정 펌핑을 하지 않는 경우에서의 측압 계수별로 산정된 이완영역의 크기를 보여준다. 그림에서 알 수 있듯이 측압이 증가할수록 파괴된 절리가 포함된 영역은 거의 변화가 없는 반면 암반블록의 국부안전율 2.0 등고선(흰색 점선)의 영역은 천단부에서는 증가하고 측벽부에서는 변화가 없는 것을 알 수 있다. 결과적으로 측압계수가 증가할수록 천단부의 이완영역 크기가 0.97 m, 1.32 m, 2.19 m로 증가하였으며 측벽부의 경우는 1.01 m, 0.96 m, 1.00 m로 거의 비슷한 결과를 나타냄을 알 수 있다.

측압계수와 이완영역 크기의 관계를 절리간격이 1 m, 절리강도가 1배인 경우에 대해 그림 7에 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이 측압계수가 증가할수록 이완영역의 크기는 증가하였으나 절리방향 및 집수정 펌핑의 유·무는 크기에 거의 영향을 주지 못하는 것으로 나타났다.

절리강도가 이완영역 크기에 미치는 영향을 분석하기 위해 절리간격 1 m, 측압계수 1.0의 경우에 대해 그림 8과 같이 살펴보았다. 그림에서 알 수 있듯이 절리강도가 감소함에 따라 이완영역의 크기는 1 m로써 동일한 값을 나타내 절리간격이 1 m, 측압계수가 1.0일 때 절리강도가 이완영역 크기에 미치는 영향은 없는 것으로 나타났다. 또한 절리간격이 2 m, 3 m일 경우에도 같은 결과를 나타내었다.

절리간격과 이완영역 크기와의 관계를 그림 9와 같이

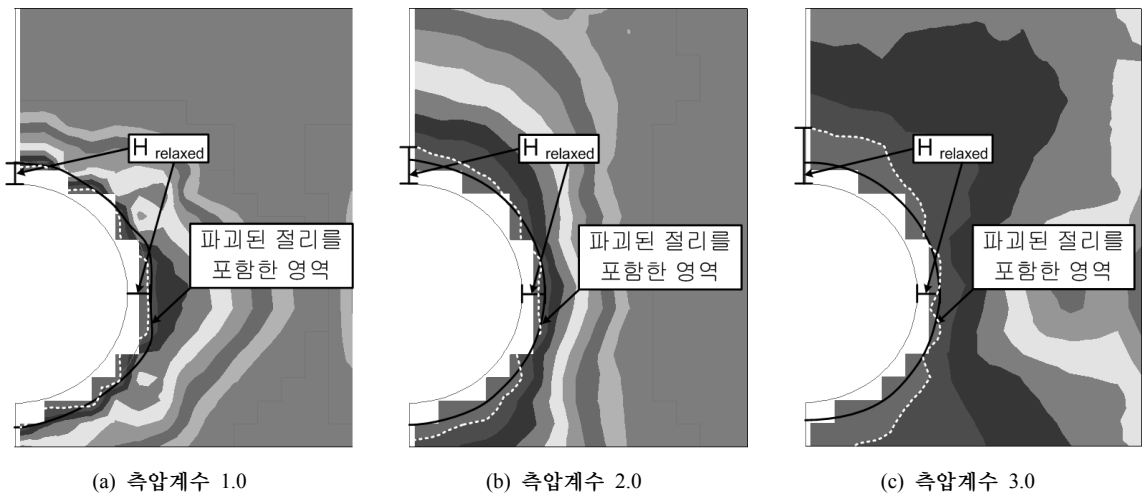


그림 6. 측압계수에 따른 이완영역 크기 산정(절리방향 A(0°와 90°), 집수정 펌핑을 하지 않는 경우, 절리간격 1 m, 절리강도 1배)

나타내었으며 절리방향 A, B와 집수정 펌핑을 한 경우에 대해서 구분하여 나타냈다. 여기서 절리방향 A는 직교하는 두 절리의 경사가 0°와 90°일 경우를 나타내며 절리방향 B는 45°와 135°일 경우를 의미한다. 그림 9의 (a)는 절리방향이 A(0°와 90°)일 때 집수정 펌핑을 한 경우로서 측압계수가 1.0일 경우 절리간격에 상관없이 이완영역 크기가 동일한 것을 알 수 있다. 그러나 측압계수가 2.0, 3.0인 경우에는 절리간격이 증가할수록 이완영역 크기도 미미하게나마 증가되는데 이는 결과적으로 암반블록의 국부안전율 2.0 등고선 영역이 파괴된 절리 영역 보다 더 넓어 이완영역으로 사용되었기 때문이다. 한편 절리간격이 클수록 암반블록의 크기가 커짐으로써 절리의 위치가 멀어지게 되어 파괴된 절리 영역을 정확하게 산정하는 데에 어려움이 많았고, 반면에 암반블록의 국부안전율 등고선을 이용하는 경우에는 영역이 비교적 정확하게 산정되었다.

참고로 집수정 펌핑을 하지 않는 경우도 펌핑을 하는 경우와 거의 같은 결과를 얻었다. 따라서 집수정 펌핑이

이완영역 크기에 미치는 영향이 거의 없는 것을 알 수 있었다.

또한, 절리간격이 1 m인 경우의 그림 6에서와 마찬가지로 절리간격이 2 m, 3 m인 경우에서도 측압계수가 2.0, 3.0으로 증가할수록 이완영역 크기가 천단부에서는 확연히 증가하는 반면 측벽부에서는 거의 동일한 것으로 나타났다. 이는 수평응력이 수직응력보다 상대적으로 큰 측압효과 때문에 천단부에 응력이 집중되어 이완영역이 증가하는 것으로 판단된다.

그림 9의 (b)는 절리방향이 B(45°와 135°)일 때 집수정 펌핑을 한 경우로서 절리방향이 A(0°와 90°)의 경우와 마찬가지로 천단부에서는 측압계수가 증가할수록 이완영역 크기가 증가하는 것으로 나타났다. 반면 측벽부에서는 이완영역 크기가 1.0 m 내외로 측압에 의한 영향은 거의 없는 것으로 나타났다. 절리방향이 0°와 90°일 때 보다 45°와 135°일 경우 천단부의 이완영역 크기는 비슷하거나 다소 크게 나타나 불연속 암반 내에서 절리의 방향이 경사져 있을 때 이완영역이 좀 더 크게

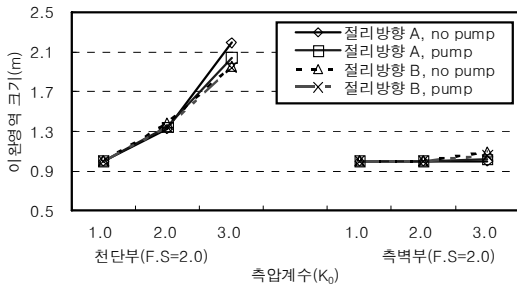


그림 7. 측압계수와 이완영역 크기의 관계(절리간격 1 m, 절리강도 1배)

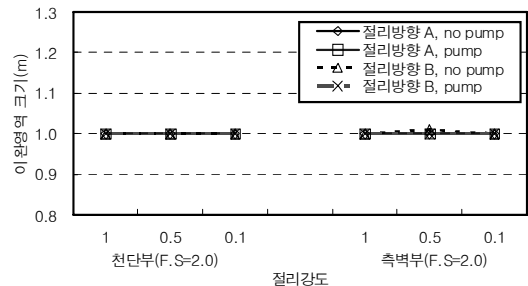
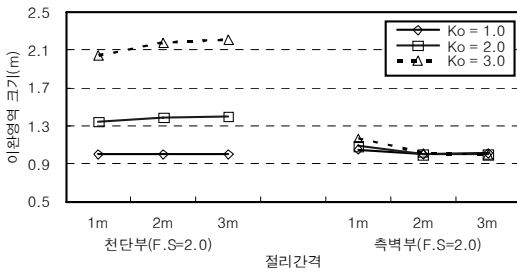
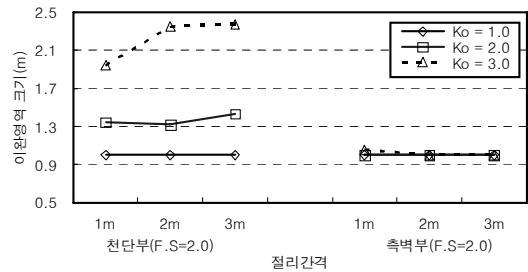


그림 8. 절리강도와 이완영역 크기의 관계(절리간격 1 m, 측압계수 1.0)



(a) 절리방향 A(0°와 90°)



(b) 절리방향 B(45°와 135°)

그림 9. 절리간격과 이완영역 크기의 관계(절리물성 1배, 집수정 펌핑을 한 경우)

발달함을 알 수 있으나 그 차이는 크지 않은 것으로 나타났다.

이상에서 살펴본 결과를 종합하면, 축압계수가 절리강도, 절리간격, 집수정 펌핑 유·무, 및 절리방향보다도 이완영역 크기에 가장 큰 영향을 미치며 특히 천단부에서 축압계수가 증가할수록 크기가 확연히 증가하는 것으로 분석되었다.

4.3 연속체 해석 결과와의 비교

불연속체 해석 시 이완영역 크기 산정을 위하여 본 연구에서 제안한 방법의 타당성을 검증하기 위해 동일 조건에서 수행된 연속체 해석의 결과와 비교하였다. 연속체 및 불연속체 해석의 비교를 위해 1등급 암반, 슛크리트 두께 30 cm, 집수정 펌핑을 한 경우에 대해서 축압계수 별로 결과를 표 6과 같이 정리하였다. 불연속체 해석은 연속체 해석과 동일한 조건으로 절리간격 1 m, 절리방향은 0°와 90°, 절리강도는 암반블록과 같도록 하여 수행되었다. 단, 이완영역 크기는 천단부를 대상으로 비교하였으며 연속체 해석의 결과는 유광호와 이동훈(2008b)의 연구결과이다.

표 6으로부터 연속체 및 불연속체의 경우 모두 축압계수가 증가할수록 이완영역 크기가 증가하는 것을 알 수 있다. 또한 불연속체 해석결과가 연속체 해석보다 이완영역이 다소 작게 산정되었다. 이는 불연속체 해석의 경우 지하수 흐름이 절리를 통해서만 가능하기 때문에 암반블록 내부의 국부안전율이 상대적으로 연속체의 경우보다 크게 산정되었기 때문으로 판단된다. 하지만 산정된 이완영역 크기의 차이는 크지 않은 것으로 나타났다. 따라서 본 연구에서 제안된 암반블록의 국부안전율 등고선 및 파괴된 절리영역을 이용한 방법이 불연속체 해석 시 이완영역을 산정하는 방법으로 효과적으로 사용될 수 있을 것으로 판단된다.

5. 결 론

불연속면이 발달한 해저터널을 대상으로 수리-역학적 연계해석 시 암반블록의 국부안전율을 이용한 방법과 파괴된 절리의 영역을 이용한 잠재적 이완영역 평가 방법을 통하여 1등급 암반을 대상으로 민감도 분석 및 연속체 해석 결과와의 비교를 통해 다음과 같은 결론을 도출할 수 있었다.

절리간격 및 축압계수에 따라 암반 블록내부의 요소의 크기가 이완영역 크기에 미치는 영향을 분석해 본 결과 커다란 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다. 축압계수가 절리강도, 절리간격, 집수정 펌핑 유·무, 및 절리방향보다도 이완영역 크기에 가장 큰 영향을 미치며 특히 천단부에서 축압계수가 증가할수록 크기가 확연히 증가하는 것으로 나타났다. 연속체 해석과 불연속체 해석의 이완영역 평가 결과 불연속체 해석결과가 연속체 해석보다 다소 작게 산정되었지만 비슷한 결과를 나타냈다. 따라서 본 연구에서 제안된 잠재적 이완영역 평가 방법이 불연속면이 발달한 암반 내에서 효과적으로 사용될 수 있을 것으로 판단된다.

하지만, 본 연구의 결과는 특정 지반 및 지보조건에 대하여 단순히 수치해석적인 방법에 의해 터널 굴착으로 인해 발생하는 이완영역을 산정한 것으로 향후 실험이나 현장 자료를 통해 보다 정밀한 검증이 이루어져야 할 것으로 판단된다.

감사의 글

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

표 6. 연속체 해석과 불연속체 해석의 이완영역 평가 결과 비교

암반등급		해석방법	연속체(FLAC)			불연속체(UDEC)		
		축압계수(K_0)	1.0	2.0	3.0	1.0	2.0	3.0
1 등급	이완영역 크기(m)	1.23	1.86	2.39	0.92	1.35	2.04	

참고문헌

1. 유광호, 박연준, 배규진 (2000), “연약암반층에 굴착된 터널의 안전을 평가”, 터널기술, 한국터널공학회 논문집, Vol. 2, No. 3, pp. 47-57.
2. 유광호 (2005), “2-ARCH 터널의 라이닝 설계를 위한 터널굴착주변 응력이완 영역산정에 관한 연구”, 터널기술, 한국터널공학회 논문집, Vol. 7, No. 4, pp. 343-352.
3. 유광호, 이동훈 (2007), “연계해석 시 해저터널의 이완 하중과 산정을 위한 수치 모델링 비교 연구”, 한국암반공학회 특별심포지엄 논문집, 제주그랜드 호텔, pp. 137-146.
4. 유광호, 이동훈, 김은혜 (2008), “해저터널의 2차원 수리-역학적 연계해석을 통한 연속체와 불연속체의 수치해석적 비교 연구”, 2008년 한국암반공학회 국제학술회의, 전남대학교, pp. 377-389.
5. 유광호, 이동훈 (2008a), “해저터널의 이완하중과 산정을 위한 제안식들과의 수치해석적 비교 연구”, 터널기술, 한국터널공학회 논문집, Vol. 10, No. 1, pp. 25-36.
6. 유광호, 이동훈 (2008b), “과지압 조건에서 해저터널의 연계해석 시 이완하중과 평가 연구”, 한국지반공학회 봄 학술발표회, 서울시립대학교, pp. 716-724.
7. 유광호, 이동훈 (2008c), “민감도 분석을 통한 불연속암반 내의 해저터널의 안정성 평가를 위한 연계 해석”, 터널기술, 한국터널공학회 논문집, Vol. 10, No. 4, pp. 421-430.
8. 천병식, 신영완 (2001), “NATM 터널의 콘크리트 라이닝 설계하중에 관한 연구”, 터널과 지하공간, 한국암반공학회 논문집, Vol. 11, No. 2, pp. 96-108.
9. 한국도로공사 도로교통기술원 (2002), “암반등급에 따른 도로터널 지보체계 개선 연구”, 268p.
10. 한국지반공학회 (2000), “토목기술자를 위한 암반공학”, 한국지반공학회 시리즈 11, 구미서관, 678p.
11. Itasca Consulting Group, Inc. (2004), Universal Distinct Element Code 2D, Ver. 4.0, Itasca Consulting Group, Minnesota, USA.

접수일(2009.2.5), 수정일(1차: 2009.2.19, 2차: 2009.4.23), 게재확정일(2009.5.18)