

해저터널에서의 그라우팅 보강을 위한 안정성 연구

유광호^{1*}, 김은혜²

A study on the stability analysis for grouting reinforcement in a subsea tunnel

Kwang-Ho You, Eun-Hye Kim

Abstract Recently interest in subsea tunnels is increasing nationwide and the construction of a subsea tunnel is taking place. For the stability of such a subsea tunnel, grouting is necessary for the water barrier and reinforcement of the tunnel. In this study, therefore, it was investigated how the grouting reinforcement had an effect on the stability of a subsea tunnel located in a great depth. To this end, Hydro-mechanical coupled analyses were performed for a sensitivity analysis in terms of different grouting range, rock class, shotcrete thickness, coefficient of lateral earth pressure, grouting thickness, and pumping existence for the rock classes I, III, and V. FLAC-2D ver. 5.0 was used for the numerical analyses. It was came to the conclusion that the effect of the increased water pressure due to the water barrier of the grouting should be considered as well as the strength improved effect in designing grouting reinforcement of subsea tunnels.

Keywords: Subsea tunnel, grouting reinforcement, stability analysis, coupled analysis

요 지 최근 국내에서는 해저터널에 대한 관심이 늘고 있고, 실제 해저터널의 건설이 진행되고 있다. 이러한 해저터널의 안정성을 위해서는 차수 및 보강을 위해 그라우팅이 필수적이다. 따라서 본 연구에서는 해저 심부에 위치한 터널을 대상으로 그라우팅 보강이 터널의 안정성에 미치는 영향을 살펴보았다. 이를 위해 1, 3, 5 등급 암반을 대상으로 그라우팅 보강영역, 암반등급, 숏크리트 두께, 측압계수, 그라우팅 두께, 팽창의 유무를 달리하여 민감도 분석을 위한 수라-역학적 연계해석을 수행하였다. 수치해석을 위해 FLAC-2D ver 5.0을 사용하였다. 해저터널의 그라우팅 보강 설계를 수행할 경우에는 그라우팅의 강도증가 효과뿐만 아니라 그라우팅 차수로 인해 증가되는 수압의 효과도 같이 고려해야 할 것으로 판단된다.

주요어: 해저터널, 그라우팅 보강, 안정성 평가, 연계해석

1. 서 론

최근 국내에서는 해저터널에 대한 관심이 늘고 있다. 그 예로 국내에서 최초로 시공되는 3.7 km의 부산과 거제도를 연결하는 침매터널이 시공 중에 있다. 또한 보령-태안 간 연륙교가 2010년 8월에 착공을 앞두고 있으며, 이 연륙교는 해저터널과 사장교로 계획되어 있다. 국내 뿐만 아니라 한국과 일본, 한국과 중국을 연결하는 해저터널에 대한 관련 연구가 활발히 이루어지고 있다(유광호, 2008; 유광호와 이동훈, 2008a, 2008b).

이와 같은 해저터널은 지하수위가 높고 터널내로 지하수가 유입되기 쉽기 때문에 시공 시 보강에 대한 문제를 해결해야 한다. 따라서 해저터널의 안정성을 확보하

기 위해서는 차수 및 보강을 위한 그라우팅이 필수적이다. 하지만 그라우팅 보강을 하게 되면 터널 주변 암반의 전단강도가 증가할 것으로 예상되나 반면 지하수 차수효과로 인해 터널에 작용하는 수압도 증가할 수 있다. 따라서 해저터널의 안전하고 경제적 그라우팅 보강설계를 위해서는 보다 심도 있는 수라-역학적 연계해석에 관한 연구가 요구된다.

김진춘과 사공명(2008)은 터널 주변 지반의 손상 및 그라우팅 보강에 대한 효과에 대해 연구한 바 있다. 이 연구에서는 그라우팅 선진 시공 관리시스템인 AGS (All-in-on Automatic Grouting System)을 적용하여 터널 내부로 유입되는 지하수 및 해수를 효과적으로 차감할 수 있다고 주장하였다.

김완영과 박동순(2006)은 터널 주변의 연약한 암반에 대한 터널 그라우팅 보강 효과의 수치해석적 연구를 수행하였다. 측압계수와 하중분담율을 변화시켜가며 해석

¹수원대학교 토목공학과 교수

²(주)에스코컨설턴트 사원

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

을 수행한 결과 축압계수가 높아질수록 천단이나 인버트 부분보다는 측벽부의 변위가 커지며 하중분담율이 커질수록 암반상태가 나빠져 변위가 증가하는 것으로 나타났다.

또한 유광호와 김은혜(2009)는 해저터널을 대상으로 그라우팅 보강영역이 달라짐에 따른 터널 안정성에 대한 연구를 수행한 바 있다. 이 연구에서 보강영역이 넓어질수록 안정성이 증가할 것이라는 예상대로 터널의 안전율은 증가하고, 천단변위는 감소하는 것으로 나타났다. 하지만 그라우팅 보강효과는 그리 크게 나타나지 않았는데, 이는 터널에 높은 상재압력이 작용하고 그라우팅으로 인한 지반강도 증가와 차수효과에 의한 수압 증가가 서로 상쇄되었기 때문으로 판단되었다. 이 연구에서 쏫크리트 두께는 30 cm로 동일하게 사용하였고, 암반등급 2 가지(1 등급, 3 등급), 축압계수 3 가지(1.0, 2.0, 3.0), 집수정 펌프를 고려한 경우와 고려하지 않은 경우 2 가지, 그라우팅 보강영역 3 가지(120°, 180°, 360°) 및 보강을 하지 않은 경우로 나누어 총 48 경우에 대해 간단한 민감도 분석을 실시하였다. 하지만 정확한 결론을 도출하기 위해서는 보다 자세한 민감도 분석이 요구되었다.

본 논문에서는 연속체를 대상으로 그라우팅을 보강하지 않은 경우와 120°, 180°, 360°로 보강한 경우의 영향을 비교하기 위하여 암반등급(1 등급, 3 등급, 5 등급), 쏫크리트 두께 (30 cm, 45 cm, 60 cm), 축압계수 (1.0, 2.0, 3.0), 그라우팅 두께 (5 m, 7 m)와 펌핑을 한 경우와 하지 않은 경우로 수리-역학적 연계해석을 실시하여 총 $4 \times 3 \times 3 \times 3 \times 2 = 432$ 가지의 민감도 분석을 실시하였다. 이 해석을 위해 FLAC-2D ver 5.0(Itasca Consulting Group Inc., 2004)을 사용하였다.

2. 전단강도 감소기법

터널의 안정성은 유광호 등(2000, 2001, 2005)에 의해 전단강도 감소기법에 기초하여 수치적으로 구할 수 있는 안전율(factor of safety)을 구함으로써 정량적으로 평가된 바 있다.

터널 안정해석에서는 전단강도 감소기법을 적용하기 위해 실제 지반의 점착강도(c)과 내부 마찰각(ϕ)를 시험 안전율(F^{trial})로 나누어 일련의 해석을 반복 수행한다.

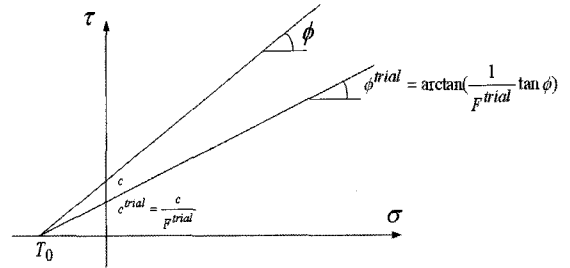


그림 1. 전단강도와 시험 전단강도(박연준과 유광호, 1998)

이때 시험 안전율(trial factor of safety)과 이에 의해 감소된 지반의 물성은 그림 1에 나타난 바와 같이 원래의 물성을 선형적으로 감소시켰으며 식 (1)과 식 (2)의 관계를 갖는다.

$$c^{trial} = \frac{c}{F^{trial}} \quad (1)$$

$$\phi^{trial} = \tan^{-1}\left(\frac{1}{F^{trial}} \tan \phi\right) \quad (2)$$

이 시험 안전율에 의해 감소된 지반의 물성을 가진 암반에 터널굴착 시 파괴가 발생한다면, 터널의 안전율은 방금 적용되었던 시험 안전율보다는 작으며, 파괴가 발생하지 않았다면 시험안전율보다는 크다는 것을 의미한다. 따라서 터널의 파괴가 발생되기 시작하는 시점의 시험안전율을 구하면, 이것이 곧 터널의 안전율이 된다고 할 수 있다. 이 때 원래 파괴포락선과 시험안전율에 의해 감소된 파괴포락선은 그림 1에 도시된 바와 같이 동일한 인장강도 점에서 단지 기울기만 감소시킨 직선으로 나타내게 된다. 한계평형해석에서는 인장파괴를 고려하지 않으므로 인장강도는 변화시키지 않는다. 그러나 터널 해석 시에는 필요에 따라 동일한 방법으로 인장강도도 감소시킬 수 있다.

3. 연계해석

3.1 연계해석 모델링 방법

해석단면은 수심이 60 m, 토피가 100 m, 직경이 10 m 인 원형터널을 대상으로 하였으며 터널 중심으로부터 수평방향 해석경계까지의 거리는 터널 직경의 5배인 50

m로 하였다. 즉, 해수면(지하수위)은 터널 천단으로부터 160 m 상부에 위치하는 것으로 가정하였다. 그림 2와

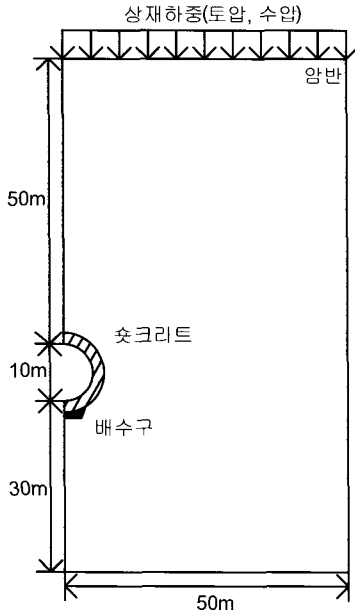


그림 2. 해석단면 개요도

같이 해석속도를 높이기 위해 터널 축을 중심으로 좌우 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.

그라우팅 보강영역은 그림 3에 나타내었으며 보강영역이 120°, 180°, 360°이지만 반단면 해석이므로 60°, 90°, 180°로 나타내었고 그라우팅 두께는 수압이 많이 작용하는 해저터널과 그라우팅 장비의 성능 및 작업여건 등을 종합적으로 고려하여 5 m와 7 m로 가정하고 수치해석을 실시하여 그라우팅 두께의 영향을 살펴보았다.

또한 배수구 펌핑에 대한 효과를 알아보기 위해 터널의 인버트 하단에 배수구를 설치하였다. 수치해석 상에서는 배수구가 위치하는 암반에 수압 경계조건을 설정하고 투구계수를 주변 암반 보다 100배 정도 크게 주어 자연 배수되는 조건으로 모델링하였다. 또한 2차원 해석에서 3차원적 터널 시공과정을 모사하기 위해 하중분배 개념을 적용하여 해석을 수행하였는데, 굴착단계(터널 굴착-연성 숏크리트 타설-경성 숏크리트 타설)별 하중분담율은 각각 60% - 20% - 20%로 가정하였다. 한편,

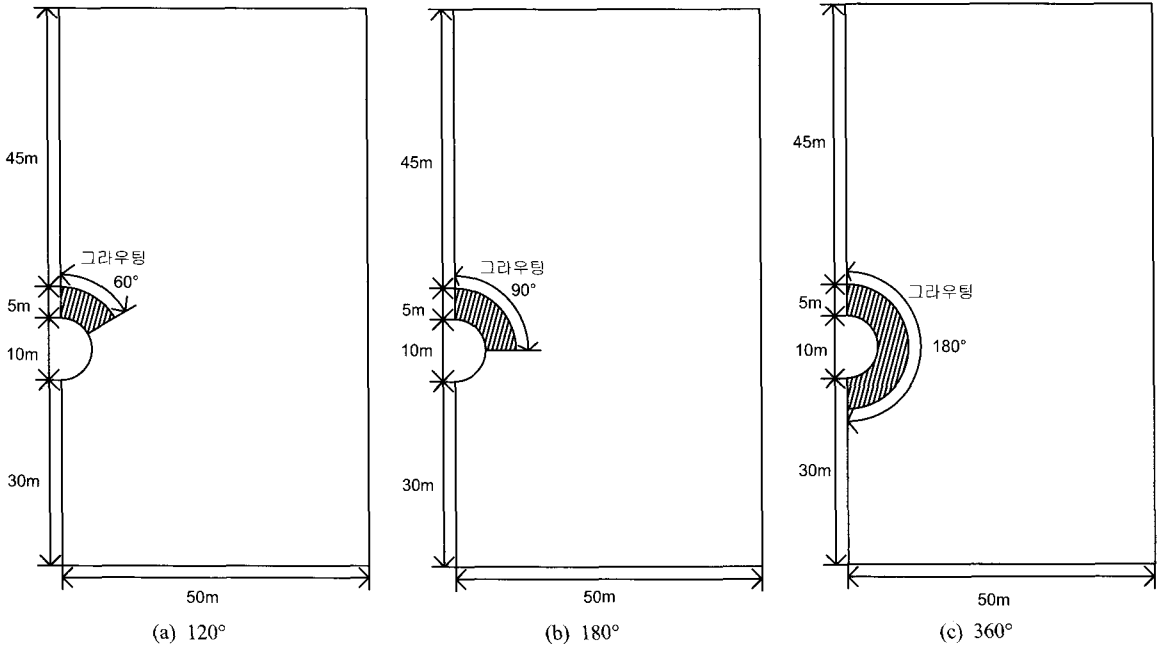


그림 3. 그라우팅 보강영역

흐름해석(flow analysis)을 위해 굴착단계별 소요 일수를 기준 연구자료(유충식과 김선빈, 2006)를 참고하여 굴착단계 2일, 연성(soft) 숏크리트 단계 8일, 경성(hard) 숏크리트 단계가 20일 가량이 소요되는 것으로 가정하였다.

3.2 안전율 산정을 위한 해석 절차

수리-역학적 연계해석을 통해 터널의 파괴가 발생하는 시점의 시험 안전율을 구하기 위해서는 먼저 시작값(F^{start})과 증분값(F^{inc})을 정한다. 이때 시작값은 해석 결과가 평형 상태, 즉 터널의 파괴가 발생하지 않는 시험 안전율이 되어야 하며, 증분값은 원하는 안전율의 정확도에 따라 정해지는데 해석과정에서 단계별로 감소시킬 수 있다.

해석결과가 수렴되면, 터널의 파괴가 발생하지 않은 것이므로 시험안전율(F^{trial})은 증분값 만큼 증가되고, 이 때 시험안전율은(F^{low})로 저장된다. 이러한 상태로 시험안전율을 증가시켜가며 해석을 반복 수행한다. 어느 시점에서 해석 결과가 수렴하지 않으면, 이 시험 안전율은 실제 안전율보다 높은 값이므로 바로 전 단계의 안전율인(F^{low})을 새로운 시작점으로 하여 다음 단계로 넘어가 감소된 증분 값을 사용하여 동일한 계산을 수행한다. 즉 초기의 안전율을 1.0으로 정하고 이 결과가 수렴하면, 시험안전율을 다시 1.0간격으로 증가시켜가며 (즉 1.0, 2.0, 3.0, ...) 해석을 수행한다. 이 때 해석에 사용되는 지반의 강도는 점차 감소하게 된다.

만일 2.0에서 해석 결과가 수렴하지 않을 경우, 실제 안전율은 2.0에서 1.0 사이의 값을 가지게 되므로 1.0에서부터 0.2간격으로 시험안전율을 증가시켜가며 해석을 수행한다. 다시 1.2에서 해석 결과가 수렴하지 않으면, 실제 안전율은 1.0에서 1.2사이에 존재하므로 1.0에서부터 0.02간격으로 시험안전율을 증가시켜가면서 해석을 수행한다. 만일 해석 결과가 1.16에서 수렴하지 않으면 실제 안전율은 1.14에서 1.16 사이의 값이므로 1.15를 터널의 안전율로 취한다(유광호 등, 2000). 한편, 연계해석은 완전 수리-역학적 연계해석 보다는 수리적 해석과 역학적 해석을 그림 4에서와 같이 각각 굴착단계에서 교대로 실시하였다.

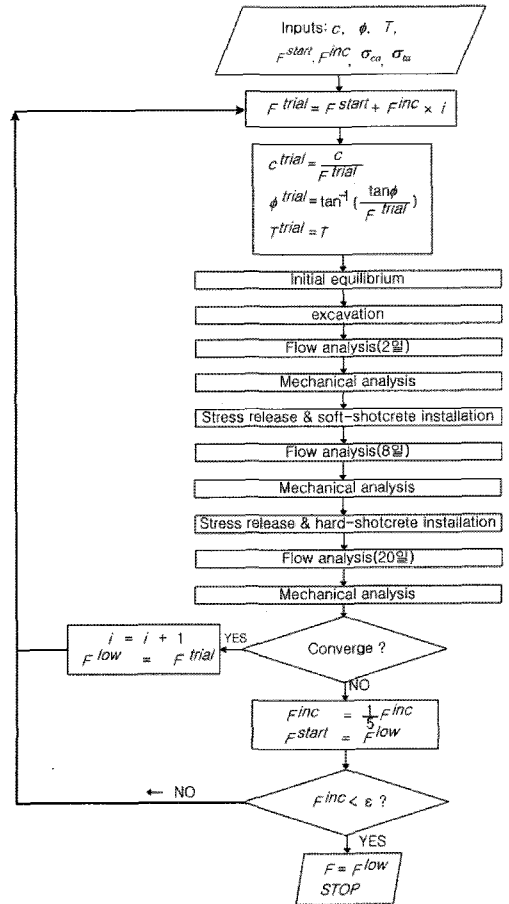


그림 4. 2차원 연속체의 연계해석 시 안전율 산정을 위한 흐름도

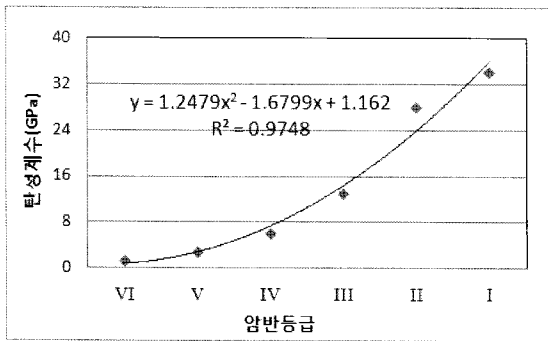
3.3 연계해석을 위한 입력정수

본 논문에서는 연계해석 입력 물성치 산정을 위해 표 1에 정리된 한국도로공사 도로교통기술원(2002)에서 “암반등급에 따른 도로터널 지보체계 개선연구”를 위한 수치해석을 위해 사용한 암반 물성치를 참고하였다.

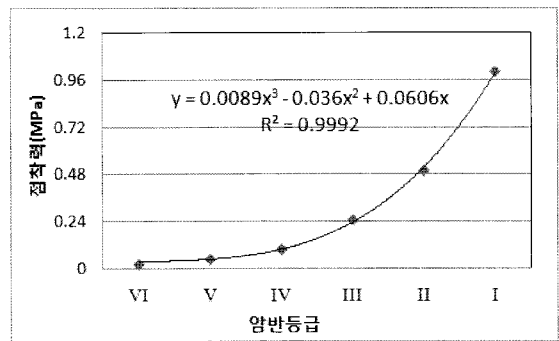
그라우팅 영역의 증가된 지반 강도정수는 적용된 암반 강도정수보다 한 등급 상향시킨 값을 적용하였다. 1 등급 암반의 경우 그라우팅 후의 강도정수는 1~6 등급 암반의 값을 사용한 회귀분석을 통해 그림 5와 같이 추정하였다. 여기서 결정계수 R^2 이 1.0에 가까워질수록 ‘상관성이 높다’라고 할 수 있다. 탄성계수 값은 그림 5의 (a)에서 결정계수가 0.9748인 2차 다항식으로 탄성계수를 나타내었고 1 등급의 그라우팅 탄성계수는 50

표 1. 암반등급별 변형성 및 강도정수(한국도로공사 도로교통기술원, 2002)

구분	탄성계수(GPa)	단위중량(kg/m ³)	마찰각(°)	점착력(MPa)	인장강도(MPa)
1 등급	34.12	2,600	45	1.0	0.5
2 등급	28.02	2,600	42	0.5	0.25
3 등급	13.01	2,600	38.5	0.25	0.125
4 등급	6.04	2,600	35	0.1	0.05
5 등급	2.80	2,600	31	0.05	0.025
6 등급	1.26	2,600	26.5	0.025	0.0125



(a) 탄성계수



(b) 점착력

그림 5. 암반등급별 강도정수 회귀분석

표 2. 해석에 사용된 입력 물성치

구분	탄성계수 (GPa)	단위중량 (kg/m ³)	마찰각 (°)	점착력 (MPa)	인장강도 (MPa)	간극률	포아송비	투수계수 k (cm/sec)
1 등급	암반	34.12	2,600	45	1.0	0.5	0.20	1.22×10 ⁻⁵
	그라우팅 영역	50.00	2,600	45	1.7	0.88	0.17	1.22×10 ⁻⁶
3 등급	암반	13.01	2,300	38.5	0.25	0.125	0.25	7.22×10 ⁻⁵
	그라우팅 영역	28.02	2,450	38.5	0.5	0.25	0.22	7.22×10 ⁻⁶
5 등급	암반	1.26	2,000	31	0.05	0.05	0.30	4.22×10 ⁻⁴
	그라우팅 영역	6.04	2,150	31	0.1	0.1	0.27	4.22×10 ⁻⁵

GPa로 산정하였다.

그림 5의 (b)는 1 등급의 그라우팅 영역의 점착력 값을 구하기 위한 그래프이다. 점착력은 결정계수가 0.9992인 3차 다항식을 사용하여 1.7 MPa로 값을 산정하였다. 또한 인장강도값은 점착력값의 반으로 가정하여 사용하였다.

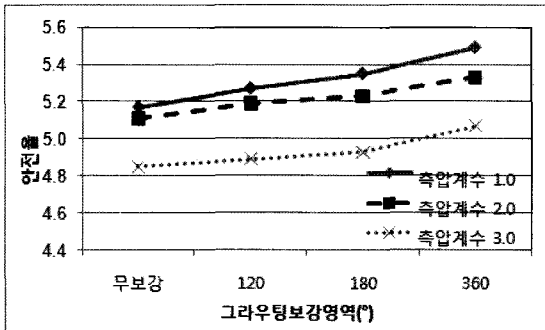
해석에 사용된 입력 물성치는 표 1의 값을 참고하여 산정하였고 암반 및 그라우팅 영역으로 구분하여 표 2에 정리하였다. 단위중량 값은 표 2와 같이 암반상태가 좋을수록 단위중량이 커지도록 수정하여 사용하였으며 1

등급 암반의 경우에 그라우팅 보강을 하여도 단위중량이 더 증가하지 않을 것으로 판단하여 암반과 그라우팅 영역의 단위중량을 동일하게 적용하였다. 또한 그라우팅 보강영역의 투수계수는 원암반 투수계수의 0.1배를 적용하였다. 포아송비는 모든 암반에서 동일하다고 가정하였다.

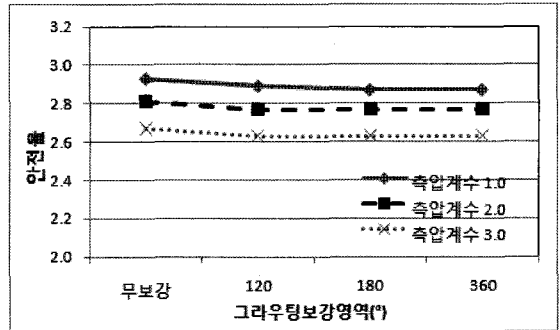
또한 표 2에서 1 등급 암반의 그라우팅 영역 마찰각은 기존 연구에서 마찰각 회귀분석을 통해 탄성계수와 마찬가지로 결정계수가 0.9999로 가장 높은 2차 다항식을 사용하여 47°로 산정한 바 있었다(유광호와 김은혜,

표 3. 해석에 사용된 슛크리트 물성치

구 분	두께(cm)	탄성계수 (GPa)	포아송비	인장강도(MPa)		항복압축 강도(MPa)	간극률	투수계수 k (cm/sec)
				항복	잔류			
연 성	30	3.0	0.25	0.89	0.45	12.36	0.08	1.0×10^{-5}
	45							
경 성	60	30.0						



(a) 1 등급



(b) 3 등급

그림 6. 축압계수에 따른 그라우팅 보강영역과 안전율 관계 (스�크리트 두께 60 cm, 그라우팅 두께 5 m, pump)

2009). 그러나 마찰각의 경우에 그라우팅 보강을 하는 경우에도 증가하지 않는 것으로 판단되어 그라우팅 영역과 암반 영역을 같은 값으로 가정하였다.

연계해석 시 슛크리트의 역학적 거동은 소성거동을 고려할 수 있는 라이너(liner)요소로, 수리적 거동은 굴착면 주변 1m 두께의 연속체요소로 표 3에 정리된 수리 물성값을 부여하여 모델링하였다(유광호와 김은혜, 2009). 연계해석에 사용된 슛크리트의 물성치는 표 3에 정리하였다. 또한 터널 시공 시 굴착면을 통해서 지하수가 유입되므로 굴착면에서의 간극수압을 '0'으로 부여함으로써 터널 내부로 지하수가 유입되도록 하였다. 한편 역학적 계산을 수행할 때에는 물의 체적 탄성계수를 '0'으로 하여 역학적인 변형에 의해 발생하는 과잉간극수압의 영향을 최소화하여 해석의 정확성을 높였다.

4. 연계해석 민감도 분석 결과

그라우팅 보강영역이 확대됨에 따라 터널의 거동이 어떻게 달라지는가를 알아보기 위하여 그라우팅 보강을 하지 않은 경우(무보강), 터널 천단부를 중심으로 120°,

180°, 및 360°로 보강한 경우로 나누어 수치해석 결과를 정리하였다.

그림 6(a) 및 (b)는 그라우팅 보강영역에 따른 안전율을 각각 1 등급 및 3 등급 암반을 대상으로 축압계수를 달리하여 나타낸 것이다. 그림 6(a)와 (b)에서 나타난 바와 같이 1 등급 암반의 경우는 안전율이 4.8에서 5.5 사이로 2.6에서 3.0사이인 3 등급 암반의 경우 보다 크게 산정되었다. 또한 1 등급과 3 등급 암반 모두에서 축압계수가 증가할수록 안전율이 감소하고, 축압이 안전율에 미치는 영향이 1 등급 암반에서 보다 3 등급 암반에서 감소하는 것으로 나타났다. 한편 그라우팅 보강영역이 증가할수록 1 등급 암반의 경우는 안전율이 증가하는 경향이 확연히 나타났으나 3 등급 암반의 경우는 그라우팅 보강영역이 확대되더라도 안전율이 증가하지 않는 것으로 나타났다. 이는 암반 상태가 좋은 1 등급 암반의 경우는 그라우팅에 의한 전단강도 증가 효과가 그라우팅에 의한 차수효과로 발생하는 굴착면 주변의 간극수압 증가 효과보다 크고, 3 등급 암반의 경우는 두 효과가 거의 같기 때문인 것으로 판단된다. 이러한 현상은 이후에 서술되는 같은 조건인 슛크리트 두께 60 cm,

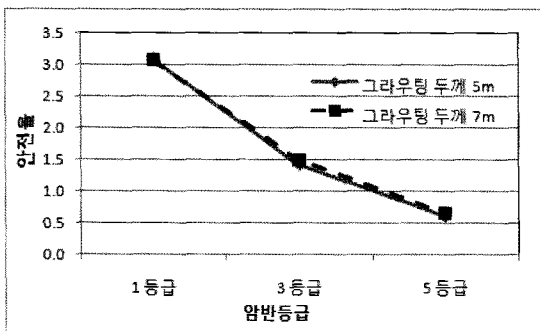
그라우팅 두께 5 m, 펌핑을 고려한 5 등급 암반의 경우에 더욱 확실히 확인될 수 있다.

그림 7(a) 및 (b)는 그라우팅 두께에 따른 안전율을 각각 그라우팅 보강영역 120° 및 360°를 대상으로 암반 등급별로 나타낸 것이다. 그림 7에서 보는 바와 같이, 암반등급이 나빠질수록 안전율이 감소하고 그라우팅 두께의 영향은 거의 없는 것으로 나타났다. 한편 그라우팅 보강영역이 360°의 경우가 120°의 경우보다 같은 조건에서 안전율이 미소하게 0.2 정도 증가하는 것을 알 수 있다.

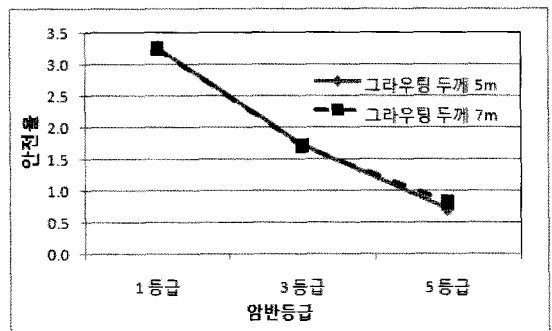
그림 8(a) 및 (b)는 펌핑 유무에 따른 안전율을 각각 그라우팅 보강영역 120° 및 360°를 대상으로 암반등급 별로 나타낸 것이다. 그림 8에서 나타난 바와 같이 그라우팅 보강영역이 360°인 경우는 암반등급에 관계없이 펌핑의 영향은 거의 없으나, 그라우팅 보강영역이 120°

인 경우는 암반등급이 나빠질수록 펌핑을 하는 경우가 미소하나마 안전율이 크게 나타났다. 이는 배수구를 통해 펌핑을 함으로서 굴착면 주변의 수압이 줄었기 때문으로 판단된다.

숏크리트 두께가 안전율에 미치는 영향을 살펴보기 위해 그림 9와 같이 축압계수 2.0, 그라우팅 두께 5 m, 펌핑을 하지 않은 경우에 대해 암반등급 별로 그라우팅 보강영역과 안전율의 상관관계를 나타내었다. 그림 9(a) 및 (b)에서와 같이 암반 1 및 3 등급의 경우 숏크리트의 두께가 증가할수록 안전율이 증가하는 것을 알 수 있다. 한편 암반 1 등급의 경우는 그라우팅 보강효과가 거의 없는 반면 암반 3 등급의 경우는 숏크리트 30 cm 및 45 cm의 경우 그라우팅을 360°로 실시하는 경우 보강효과가 다소 발생하는 것으로 나타났다. 참고로 5 등급 암반의 경우도 3 등급 암반과 유사한 경향을 보였으나 숏크리트를 30

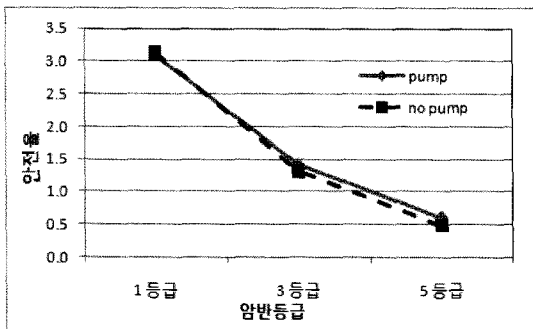


(a) 그라우팅 보강영역 120°

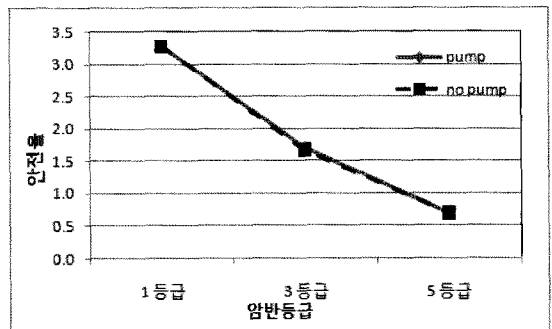


(b) 그라우팅 보강영역 360°

그림 7. 그라우팅 두께에 따른 암반등급과 안전율 관계 (축압계수 1.0, 숏크리트 두께 30 cm, pump)

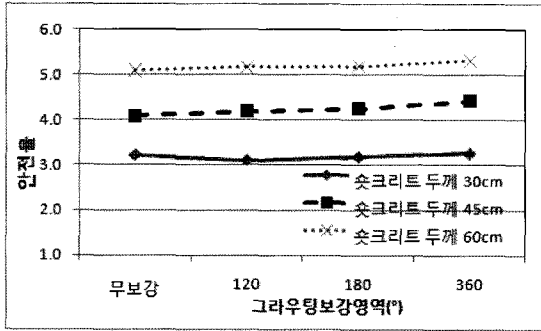


(a) 그라우팅 보강영역 120°

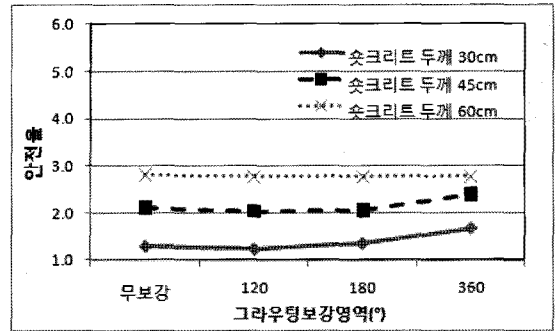


(b) 그라우팅 보강영역 360°

그림 8. 펌핑 유무에 따른 암반등급과 안전율 관계 (축압계수 1.0, 그라우팅 두께 5m, 숏크리트 두께 30 cm)

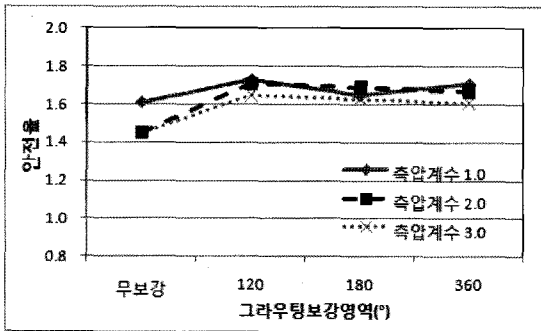


(a) 1 등급

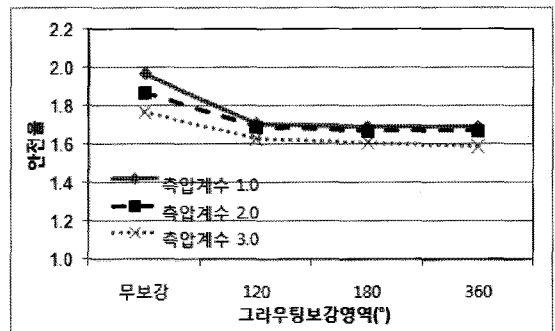


(b) 3 등급

그림 9. 슛크리트 두께에 따른 그라우팅 보강영역과 안전율 관계 (축압계수 2.0 그라우팅 두께 5 m, no pump)



(a) 그라우팅 두께 7 m, no pump



(b) 그라우팅 두께 5 m, pump

그림 10. 5 등급 암반에서의 그라우팅 보강영역과 안전율의 관계 (스�크리트 두께 60 cm)

cm로 보강한 경우는 모두 파괴가 되어 안전율이 1.0이하로 나타났다. 따라서 암반상태가 나쁠수록 슛크리트의 보강효과는 다소 감소하나 굴착면 전주면을(360°로) 그라우팅하는 경우 보강효과가 커짐을 알 수 있다.

그림 10은 5 등급 암반을 대상으로 축압계수에 따른 그라우팅 보강영역과 안전율의 관계를 나타낸 것이다. 그림 10에서 보면, 5 등급 암반의 경우에도 그림 6의 1 등급과 3 등급 암반에서와 마찬가지로 축압이 증가할수록 안전율이 감소하는 것으로 나타났다. 한편 축압이 안전율에 미치는 영향은 1, 3 등급에 비해 감소하는 것을 알 수 있었다. 그라우팅 두께가 7 m이고 펌핑을 하지 않은 경우인 그림 10(a)를 살펴보면 그라우팅을 실시하지 않은 무보강 보다는 그라우팅 보강을 실시한 경우가 안전율이 증가하지만, 그라우팅 영역을 확대하더라도 안전율은 증가하지 않고 오히려 미세하게 감소하여 그

라우팅 보강영역을 120° 이상으로 보강하는 것은 보강 효과가 없는 것으로 나타났다. 반면에 그림 10(b)와 같이 그라우팅 두께가 5 m이고 펌핑을 실시한 경우는 그림 10(a)와 마찬가지로 그라우팅 영역을 확대하더라도 보강효과가 없는 것으로 나타났고, 그라우팅을 보강하지 않은 경우가 오히려 그라우팅을 보강한 경우 보다 안전율이 축압에 관계없이 크게 나타났다.

그림 10(b)의 일반적인 예상과 다른 현상을 보다 자세히 분석하기 위해 그라우팅 보강영역별 수압분포를 그림 11과 같이 살펴보았다. 수압분포를 위해 그림 11(a)와 같이 그라우팅 영역의 외곽경계면에서 7군데를 수압 측정위치로 선정하였다. 참고로 '1'은 천단, '4'는 측벽, '7'은 바닥부를 의미한다. 그림 11(b)는 그림 11(a)에 도시된 7군데의 수압 측정위치에서 측정된 수압을 그라우팅 보강영역 별로 도시한 수압분포를 보여준다. 그림

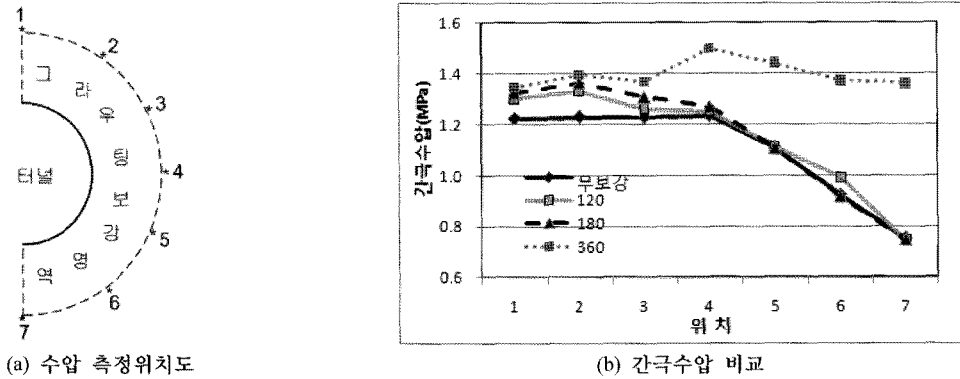


그림 11. 5 등급 암반에서의 그라우팅 보강영역에 따른 수압분포(MPa)
(측압계수 1.0, 숏크리트 두께 60 cm, 그라우팅 두께 5 m, pump)

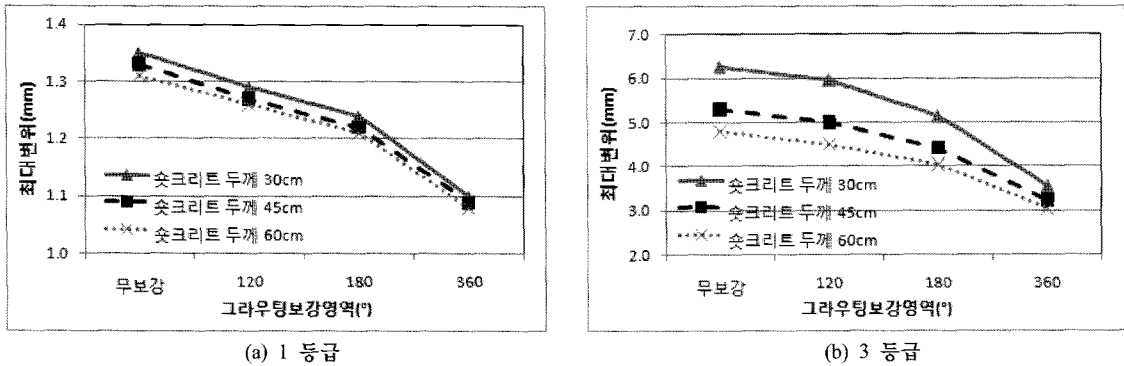


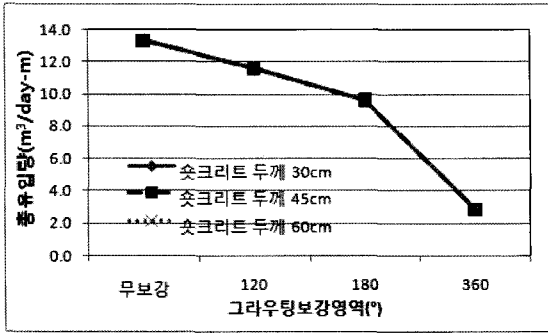
그림 12. 그라우팅 보강영역과 최대변위의 관계
(측압계수 1.0 그라우팅 두께 5 m, pump)

11(b)에 나타난 바와 같이 그라우팅 보강영역이 확대됨에 따라 그라우팅 경계면에 작용하는 수압이 증가함을 알 수 있다. 특히 천단부에서는 무보강의 경우가 보강한 나머지의 경우에 비해 수압이 0.1 MPa 정도 작게 발생하는 것으로 나타났다. 한편 360°로 보강한 경우만 천단부에 작용하는 수압과 비슷한 값이 바닥부에도 작용하고, 무보강을 포함한 나머지의 경우는 천단부에 작용하는 수압 보다 훨씬 작은 유사한 수압이 바닥부에 작용하는 것으로 나타났다.

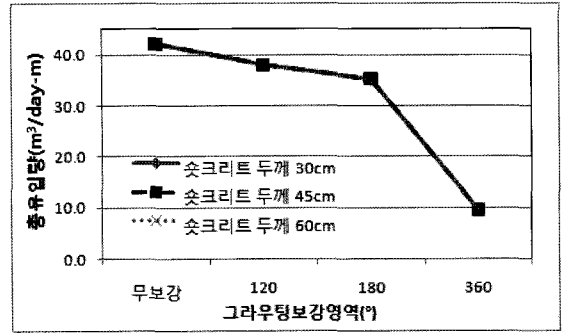
이와 같이 그라우팅 보강영역이 확대되고 전단강도가 커져서 안전율이 증가하여야 함에도 불구하고 안전율이 감소하는 이유는 그림 11(b)에서 보는 바와 같이 그라우팅 보강영역이 넓어짐에 따라 터널 내부로 들어오는 유입량이 줄어들어 그라우팅 보강영역 경계면에 작용하는 수압이 증가했기 때문임을 알 수 있다. 다시 말해 그라

우팅 보강으로 인한 강도증가 효과보다 그라우팅 차수로 말미암아 증가된 수압으로 인해 안정성이 감소되는 효과가 더 크게 나타났기 때문에 안전율이 감소하는 결과가 초래된 것으로 판단된다.

그라우팅 보강영역이 터널 굴착면 변위에 미치는 영향을 살펴보기 위하여 굴착면에서 발생하는 변위 중에 가장 큰 최대변위를 그림 12와 같이 분석하였다. 단, 측압의 효과를 배제하기 위해 측압계수는 1.0으로 하였다. 그림 12(a)에서 나타난 바와 같이 숏크리트 두께가 작아질수록 최대변위가 커지는 것으로 나타났으나 그 차이는 미세한 것으로 나타났다. 이와 마찬가지로 3 등급 암반에서의 숏크리트 두께가 작아질수록 최대변위가 크게 발생하였고 그 차이가 1 등급 암반에서 보다는 크게 나타났으며, 그라우팅 보강영역이 증가함에 따라 최대변위가 감소하는 결과가 나타났다. 특히 그라우팅 보강영



(a) 1 등급



(b) 3 등급

그림 13. 그라우팅 보강영역과 총유입량의 관계
(측압계수 1.0, 그라우팅 두께 5 m, pump)

역이 확대됨에 따라 췁크리트 두께가 최대변위에 미치는 영향은 점점 감소하고, 특히 그라우팅 보강영역이 360°인 경우에 췁크리트 두께의 영향이 많이 감소하는 것으로 나타났다.

그림 13(a)와 (b)는 측압계수 1.0, 그라우팅 두께 5 m, 펌핑을 고려한 경우의 그라우팅 보강영역과 총유입량의 관계를 각각 암반등급 1과 3인 경우 췁크리트 두께 별로 나타낸 것이다. 여기서 총유입량은 터널 굴착면을 통해 유입되는 양과 배수구를 통해 펌핑되는 양을 합한 값이다. 췁크리트 두께의 총유입량에 대한 영향은 거의 없고, 암반등급이 나빠질수록 총유입량이 증가하는 것으로 나타났다. 또한 그라우팅 보강영역이 넓어짐에 따라 총유입량이 감소하는 것으로 나타났고, 그라우팅 보강영역이 360°일 때 총 유입량이 가장 크게 감소하는 것으로 나타났다. 이는 상대적으로 투수계수가 작은 그라우팅 영역이 확대됨에 따라 유입량이 줄어든 것으로 판단된다. 참고로 측압계수 2.0과 3.0에 대한 경우도 유사한 결과를 얻어 유입량에 대한 측압계수의 영향도 거의 없는 것으로 나타났다.

5. 결론

본 논문에서는 해저 심부에 위치한 터널을 대상으로 그라우팅 보강에 따른 안정성 검토를 하기 위해 1, 3, 5 등급 연속체 암반을 대상으로 그라우팅 보강영역, 암반등급, 췁크리트 두께, 측압계수, 그라우팅 두께, 펌핑의 유무를 달리하여 수치해석을 실시하여 다음과 같은

결론을 얻었다.

1, 3, 5 등급 암반 모두에서 암반등급이 나빠질수록 안전율이 감소하고, 췁크리트의 두께가 증가할수록 안전율이 증가하여 암반상태가 나쁠수록 췁크리트의 보강 효과가 커지며, 그라우팅 두께의 영향은 거의 없는 것으로 나타났다. 한편 측압계수가 증가할수록 안전율은 감소하고, 암반등급이 나빠질수록 측압이 안전율에 미치는 영향이 감소하는 것으로 나타났다.

그라우팅 보강영역이 360°인 경우는 암반등급에 관계없이 펌핑의 영향은 거의 없으나, 그라우팅 보강영역이 120°인 경우는 암반등급이 나빠질수록 펌핑을 하는 경우가 미소하나마 안전율이 크게 나타났다. 이는 배수구를 통해 펌핑을 함으로서 굴착면 주변의 수압이 줄었기 때문으로 판단된다. 또한 췁크리트 두께 및 측압의 총유입량에 대한 영향은 거의 없고, 암반등급이 나빠질수록 총유입량이 증가하는 것으로 나타났다. 또한 그라우팅 보강영역이 넓어짐에 따라 총유입량은 감소하는 것으로 나타났다.

그라우팅 보강영역이 증가할수록 1 등급 암반의 경우는 안전율이 증가하는 경향이 확연히 나타났으나 3 등급 암반의 경우는 그라우팅 보강영역이 확대되더라도 안전율이 증가하지 않는 것으로 나타났다. 특히, 5 등급 암반, 그라우팅 두께가 5 m인 경우는 그라우팅 영역을 확대하더라도 보강효과가 없는 것으로 나타났고, 그라우팅을 보강하지 않은 경우가 오히려 그라우팅을 보강한 경우 보다 안전율이 측압에 관계없이 크게 나타났다. 이는 그라우팅 보강으로 인한 강도증가 효과보다 그라우

팅 차수로 말미암아 증가된 수압으로 인해 안정성이 감소되는 효과가 더 크게 나타났기 때문인 것으로 판단되었다.

종합적으로 판단할 때 그라우팅 보강 설계를 수행할 경우에는 단순히 강도증가 효과만 고려하기 보다는 그라우팅 차수로 인해 증가되는 수압의 효과를 같이 고려해야 할 것으로 판단된다. 다만, 수치해석 시 사용된 입력 물성값들은 관련 문헌 등을 통해 가정되거나 추정되었으므로 본 연구의 결론을 적용함에 있어 주의가 요구된다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁시행 한 2009년도 첨단도시개발사업(과제번호 : 05-건설핵심 D10-01, 과제명 : 해저시설물차폐기술연구)에 의하여 연구비가 지원되었기에 관계자분들에게 감사드립니다.

참고문헌

1. 김완영, 박동순 (2006), "터널 그라우팅 보강 효과의 수치해석적 연구", 대한토목학회 2006년도 정기 학술대회 논문집, pp. 1565-1568.
2. 김진춘, 사공명 (2008), "터널 주변 지반의 손상 및 그라우팅 보강", 기술강좌, 한국터널공학회지, 제1 권, 제3호, pp. 50-61.
3. 박연준, 유광호 (1998), "편재절리 모델을 이용한 절리 암반 사면의 안정성 해석", 한국암반공학회 논문집, 제 8권, 제4호, pp. 287-295.
4. 유광호 (2008), "이차원 수리-역학적 연계해석 시 유도 배수 모델링 방법에 따른 수치해석적 비교 연구", 터널 기술, 한국터널공학회 논문집, 제10권, 제1호, pp. 91-104.
5. 유광호, 김은혜 (2009), "그라우팅 보강영역이 해저터널 안정성에 미치는 영향에 대한 연구", 한국암반공학회 학술발표회 논문집, 서울대학교 호암컨벤션센터, pp. 113-119.
6. 유광호, 박연준, 강용 (2001), "절리암반 터널의 안전을 평가를 위한 수치해석적 연구", 한국암반공학회 논문집, 제11권, 제3호, pp. 279-288.
7. 유광호, 박연준, 배규진 (2000), "연약 암반층에 굴착된 터널의 안전을 평가", 대한터널협회 논문집, 제2권, 제3호, pp. 47-57.
8. 유광호, 박연준, 홍근영, 이현구, 김재권 (2005), "지보재 파괴를 고려한 터널 안전율의 수치해석적 산정 연구", 터널 기술, 한국터널공학회 논문집, 제7권, 제1호, pp. 37-49.
9. 유광호 이동훈 (2008a), "해저터널의 이완하중고 산정을 위한 제안식들과의 수치해석적 비교 연구", 터널 기술, 한국터널공학회 논문집, 제10권, 제1호, pp. 25-36.
10. 유광호, 이동훈 (2008b), "민감도 분석을 통한 불연속 암반 내의 해저터널의 안정성 평가를 위한 연계해석", 터널 기술, 한국터널공학회 논문집, 제10권, 제4호, pp. 421-430.
11. 유충식, 김선빈 (2006), "NATM 터널의 응력-간극수압 연계 유한요소모델링" 2006년 한국지반공학회 봄학술 발표회 논문집, pp. 189-198.
12. 한국도로공사 도로교통기술원 (2002), 암반등급에 따른 도로터널 지보체계 개선 연구, pp. 268
13. Itasca Consulting Group, Inc. (2005), Fast Lagrangian Analysis of Continua, Ver. 5.0, Itasca Consulting Group, Minneapolis, Minnesota, USA.

접수일(2010.2.11), 수정일(2010.3.8), 게재확정일(2010.3.22)