

그라우팅 보강영역이 해저터널 안정성에 미치는 영향에 대한 연구

유광호, 김은혜(수원대학교)

1. 서론

최근에는 국제 교류가 활발해지고 산업이 발달함에 따라 해저터널에 대한 관심이 늘어가고 있기 때문에 해저터널을 시공함에 있어 보강에 대한 문제를 해결해야 할 것으로 예상된다. 해저터널의 경우 지하수위가 높고 터널내로 지하수가 유입되기 쉽기 때문에 그라우팅에 의해 지반 보강을 하게 되면 지표면이나 터널 주변의 변위가 감소되고 지하수 차단효과도 얻을 것으로 예상된다.

김진춘과 사공명(2008)은 터널 주변 지반의 손상 및 그라우팅 보강에 대한 연구를 수행한 바 있다. 이 연구에 따르면 터널 주변 손상 발생에 대한 이해와 그로인한 지하수 및 해수의 유입을 차감효과의 그라우팅 기술은 안정적인 터널의 시공을 위해 필수적인 요소라 하였다.

김완영과 박동순(2006)은 터널 주변의 연약한 암반에 대한 터널 그라우팅 보강 효과의 수치해석적 연구를 수행하였다. 축압계수와 하중분담율을 변화시켜가며 해석을 수행하였으며 그 결과 축압계수가 높아질수록 천단이나 인버트 부분보다는 측벽부의 변위가 커지는 것과 하중분담율이 커질수록 암반 상태가 나빠져 변위가 커지는 결과가 나타났다.

앞서 언급된 연구로 볼 때 터널의 안정성을 위한 그라우팅 보강의 효과를 연구한 결과는 많았으나 해저터널 대상의 연구는 아직 미흡한 실정이다. 이에 본 연구에서는 해저터널의 경우 그라우팅 보강영역이 해저터널의 안정성에 미치는 영향을 살펴보기 위해 수치해석을 실시하였다. 이를 위해 연속체 모델에서 슛크리트 두께는 30cm로 동일하게 사용하였고, 암반등급 2가지(1등급, 3등급), 축압계수 3가지(1.0, 2.0, 3.0), 집수정 펌프를 사용한 경우와 사용하지 않은 경우 2가지를 사용하였다. 또한 그라우팅 보강영역 3가지(120°, 180°, 360°)를 보강을 하지 않은 경우와 비교하였다. 따라서 총 $2 \times 3 \times 2 \times 4 = 48$ 가지의 경우에 대해 연계해석을 통한 민감도 분석을 실시하였고 FLAC-2D ver 5.0(Itasca Consulting Group Inc., 2004)을 사용하였다.

2. 모델링 방법

2.1 슛크리트 모델링 방법

지보재는 모델링 방법에 따라 해석결과의 차이를 보일 수 있다. 따라서 본 연구에서는 적정 지보재의 모델링 방법을 선정하기 위하여 슛크리트 수리특성을 이용한 유도배수 방법의 경우 그림 2.1과 같이 슛크리트의 역학적 물성치는 요소소로 모델링하였으며, 슛크리트의 수리특성 물성치는 각각의 슛크리트 두께에 해당하는 영역을 연속체요소로 모델링하였다. 또한 터널 시공 시 굴착면을 통해서 지하수가 유입되므로 굴착면에서의 간극수압을 '0'으로 부여함으로써 터널 내부로 지하

수가 유입되도록 하였다. 한편 역학적 계산을 수행할 때에는 물의 체적 탄성계수를 '0'으로 하여 역학적인 변형에 의해 발생하는 과잉간극수압의 영향을 최소화하여 해석의 정확성을 높였다(조현태, 1994; Shin 등 2002, 2005).

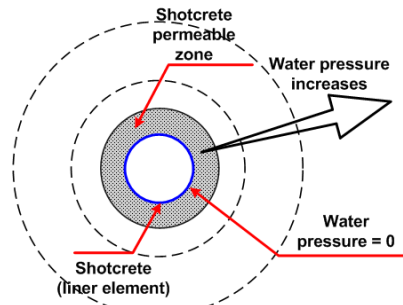


그림 2.1 숯크리트 지보재 모델링(보요소)

2.2 연계해석 모델링 방법

해석단면은 해저터널을 대상으로 수심이 60m, 토피가 100m, 직경 10m인 원형터널을 사용하였으며 터널 중심으로부터 외부경계까지의 거리는 터널 직경의 5배인 50m로 하였다. 터널 축을 중심으로 좌·우 대칭경계 조건을 적용하여 반단면 해석을 수행하였으며 깊이 방향으로는 지표면 이하 영역만을 고려하여 모델링 하였다. 즉, 지하수면과 토피고 50m는 해석영역에 포함하지 않았으며, 단지 지하수면이 일정하게 유지된다는 가정 하에 해석 상부 경계면에 작용하는 수압과 토압을 상재하중으로 처리하였다.

2차원 연속체의 그라우팅 영역에 대한 효과를 비교하기 위하여 그림 2.2와 같은 그라우팅 영역을 나타내어 수치해석을 실시하였다. 그라우팅 영역은 120°, 180°, 360°의 3가지로 해석하여 그라우팅 보강을 하지 않은 경우와 비교하였으며 반단면 해석이므로 그림 2.2에서와 같이 그라우팅 영역을 60°, 90°, 180°로 나타내었다. 그라우팅의 두께는 5m로 모두 동일하게 적용하였다.

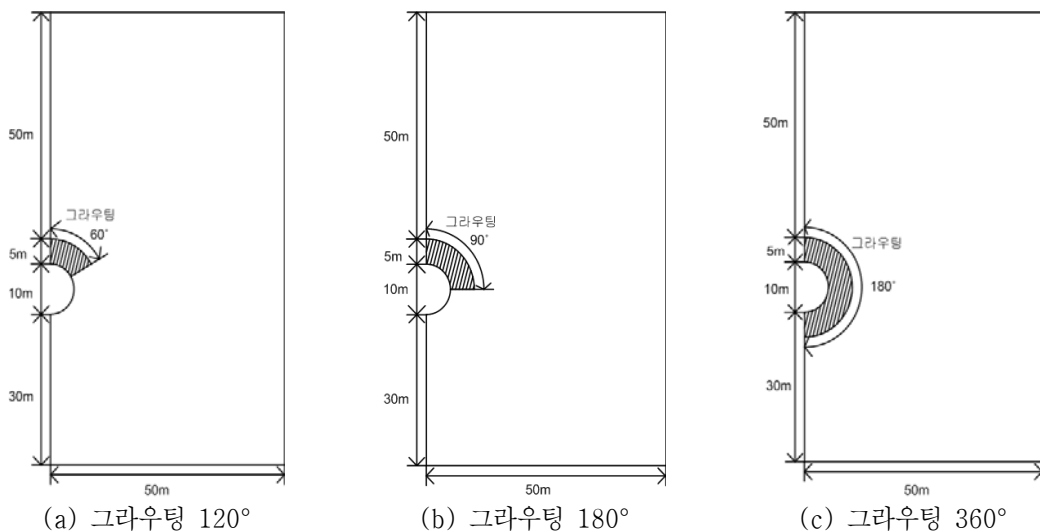


그림 2.2 해석단면 개요도

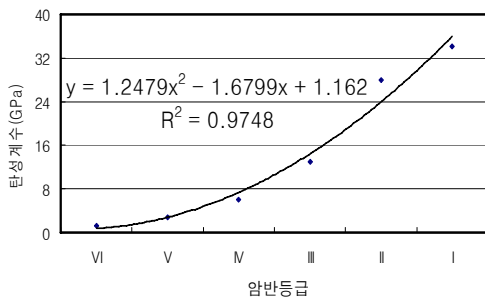
3. 연계해석을 위한 물성치 산정

본 연구에서는 연계해석 입력 물성치 산정을 위해 한국도로공사 도로교통기술원(2002)에서 수치 해석을 위해 사용한 표 3.1에 정리된 암반 물성치를 참고하였다.

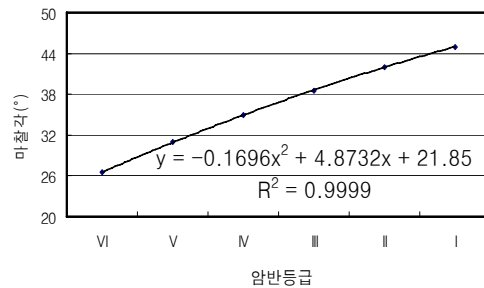
표 3.1 암반등급별 변형성 및 강도정수

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

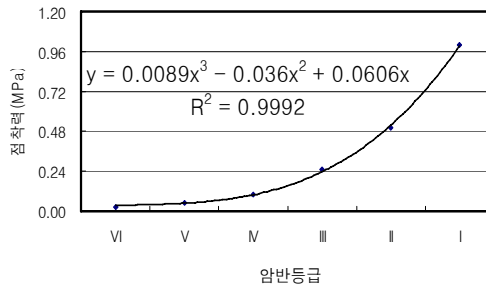
그라우팅 영역의 증가된 지반 강도정수는 적용된 암반 강도정수보다 한 등급 상향시킨 값을 적용하였다. 1등급 암반의 경우 그라우팅 후의 강도정수는 1~6등급 암반의 값을 사용한 회귀분석을 통해 그림 3.1과 같이 추정하였다. 여기서 결정계수 R²이 1.0에 가까워질수록 ‘상관성이 높다’라고 할 수 있다. 탄성계수 값은 그림 3.1의 (a)에서 결정계수가 0.9748인 2차 다항식으로 탄성계수를 나타내었고 1등급의 그라우팅 탄성계수는 50GPa로 산정하였다.



(a) 탄성계수



(b) 마찰각



(c) 점착력

그림 3.1 암반등급별 강도정수 회귀분석

마찰각은 그림 3.1의 (b)에서 마찰각 회귀분석을 사용하여 탄성계수와 마찬가지로 결정계수가 0.9999로 가장 높은 2차 다항식을 사용하여 마찰각을 47°로 산정하였다. 그림 3.1의 (c)는 1등급의 그라우팅 영역의 점착력 값을 구하였다. 점착력은 결정계수가 0.9992인 3차 다항식을 사용하여 1.7MPa로 값을 산정하였다.

해석에 사용된 입력 물성치는 표 3.1의 값을 참고하여 산정하였고 암반 및 그라우팅 영역으로 구분하여 표 3.2에 정리하였다. 단, 단위중량 값은 표 3.2와 같이 등급에 따라 다른 값을 사용하였다.

표 3.2 해석에 사용된 입력 물성치

구분		탄성계수 (GPa)	단위중량 (kg/m ³)	마찰각 (°)	점착력 (MPa)	인장강도 (MPa)	간극률	포아송비	투수계수 k (cm/sec)
1등급	암반	34.12	2,600	45	1.0	0.5	0.20	0.2	1.22×10^{-5}
	그라우팅 영역	49.59	2,600	47.9	1.8	0.88	0.17	0.2	1.22×10^{-6}
3등급	암반	13.01	2,300	38.5	0.25	0.125	0.25	0.2	7.22×10^{-5}
	그라우팅 영역	28.02	2,450	42	0.5	0.25	0.22	0.2	7.22×10^{-6}

4. 수치해석 결과

1등급, 집수정 펌핑을 하지 않은 경우, 암반의 측압계수를 변화시켰을 때의 안전율을 그림 4.1과 같이 그라우팅 보강영역으로 구분하여 나타내었다. 측압계수가 증가할수록, 그라우팅 보강영역이 작아질수록 안전율이 감소하는 것으로 나타났으나 그 차이는 최대 0.25 정도로 크지 않았다. 그림 4.1에 나타난 경우뿐 아니라 1등급이고 집수정 펌핑을 한 경우 및 3등급 암반의 경우에도 그라우팅 보강영역에 작아질수록 측압계수가 커질수록 안전율이 미세하게 증가하는 것으로 나타났다.

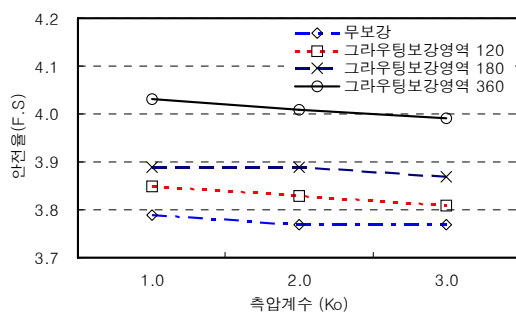


그림 4.1 측압계수와 안전율과의 관계 (1등급, no-pump)

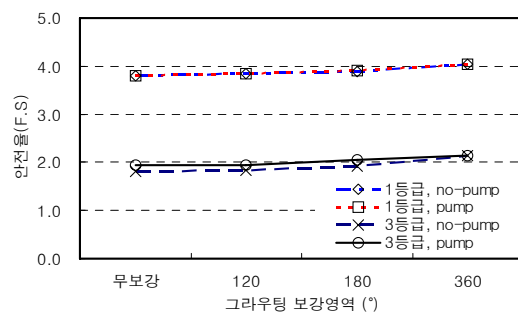


그림 4.2 그라우팅 보강영역과 안전율과의 관계 (K0=1.0)

그림 4.2는 측압계수가 1.0인 암반의 경우, 그라우팅 보강영역의 효과를 암반 등급별, 펌핑 유무에 따라 안전율로 나타내었다. 그림 4.1에서도 나타났듯이 그라우팅 보강영역이 넓어질수록 안전율이 미세하지만 증가하였다. 또한 등급별로 펌핑 유무에 대하여 살펴보면 1등급 암반이 3등급 암반보다 안전율이 약 2.0정도 높은 것으로 나타났고 1등급 암반에서는 펌핑의 유무가 안전율에 영

향을 거의 미치지 않는 것으로 나타났다. 반면 3등급 암반의 경우에는 펌핑을 한 경우가 펌핑을 하지 않은 경우보다 약 0.2 정도 안전율이 더 높게 나타났다.

안전율을 해석한 결과 그라우팅 보강 시와 무보강시 안전율의 차이가 크지 않아 그라우팅 보강 효과가 크지 않은 것으로 나타났다. 이는 앞의 2.2절의 연계해석 모델링 방법에서 나타냈듯이 터널 굴착면 주변에 수심이 60m, 토피가 100m로 총 160m 높이의 상재하중이 작용하므로 굴착면 주변의 응력이 매우 커서 그라우팅 보강으로 인한 강도 증가효과가 미미한 것으로 판단된다.

천단변위의 변화를 알아보기 위하여 그림 4.3과 같이 그라우팅 보강영역별로 천단변위를 집수정 펌핑을 하지 않은 경우의 1등급 암반을 축압계수에 따라 나타내었다. 그라우팅 보강 영역이 넓어질수록 천단변위는 0.2~0.4mm 정도로 줄었으며 축압계수가 커질수록 그라우팅 보강영역과 마찬가지로 0.2~0.4mm 정도 천단변위가 감소하였다.

또한 암반등급과 펌핑의 유무에 따른 천단변위의 변화를 알아보기 위하여 그라우팅 보강 영역이 180°인 경우를 중심으로 축압계수가 천단변위에 미치는 영향을 그림 4.4와 같이 살펴 보았다. 그림 4.3과 마찬가지로 축압계수가 증가할수록 천단변위는 미세하게 감소하였고 1등급 암반보다 3등급 암반이 변위가 크게 발생하는 것으로 나타났다. 펌핑의 유무는 안전율과 마찬가지로 1등급 및 3등급 암반에서 모두 거의 차이가 없는 것으로 나타났다.

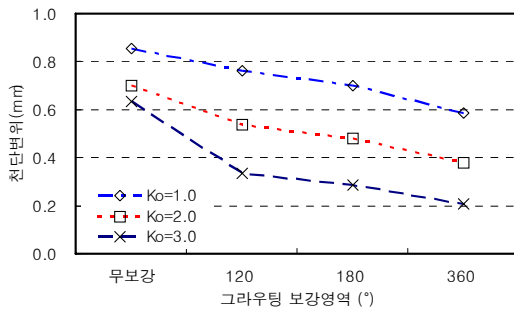


그림 4.3 그라우팅 보강영역과 천단변위와의 관계 (1등급, no-pump)

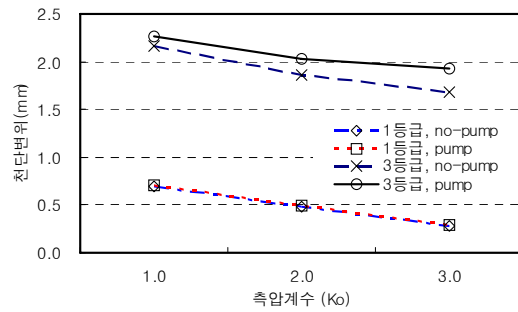


그림 4.4 축압계수와 천단변위와의 관계 (그라우팅 보강영역 180°)

그라우팅 보강영역에 대한 축압별 총유입량을 집수정 펌핑 유무에 따라 1등급 암반을 대상으로 그림 4.5와 같이 나타냈다. 그라우팅 보강영역이 넓어질수록 총유입량이 감소하였고 축압에 따른 변화는 없는 것으로 나타났다. 또한 집수정 펌핑을 한 경우가 집수정 펌핑을 하지 않은 경우보다 유입량이 크게 나타났다. 이때 그라우팅 보강영역이 360°인 경우 다른 그라우팅 보강영역 때보다 총유입량이 크게 작아지는 것으로 나타났다.

그림 4.6은 암반의 등급별, 집수정 펌핑 유무에 따라 총유입량을 나타낸 것이다. 그림 4.5의 축압과의 비교에서와 마찬가지로 그라우팅 보강영역이 넓어질수록 총유입량이 감소하였고 3등급 암반이 1등급 암반보다 투수계수가 크므로 총유입량이 크게 나타났고, 집수정 펌핑을 한 경우가 펌핑을 하지 않은 경우보다 총유입량이 크게 나타났다.

그림 4.5와 4.6의 결과를 종합해볼 때 그라우팅 보강영역이 360°일 경우 총유입량이 급격하게 감소하는 것으로 나타났다. 이는 배수를 하는 집수정이 터널의 인버트 하부에 설치되어 360°로 그라우팅 하는 경우는 집수정의 역할이 무의미해지기 때문이다. 즉, 터널로 유입되는 지하수는 모두 그라우팅영역을 통해서만 이루어지기 때문이다.

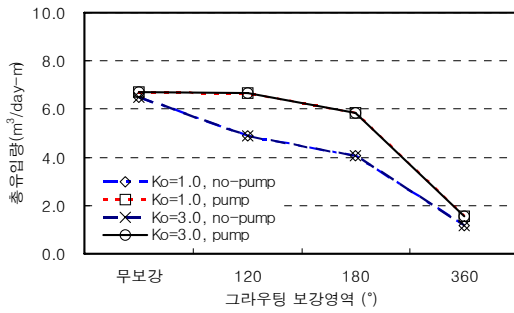


그림 4.5 그라우팅 보강영역에 대한 축압별 총유입량 (1등급)

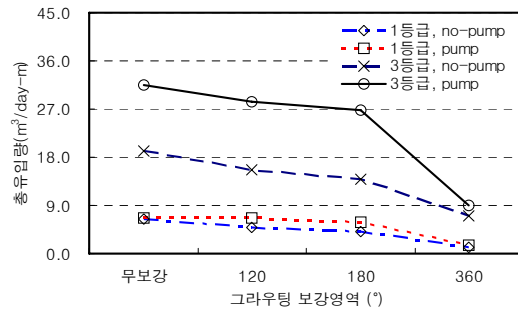


그림 4.6 그라우팅 보강영역에 대한 암반등급별 총유입량 (K0=1.0)

한편, 그림 4.1과 4.2에서 보았듯이 그라우팅 보강 효과가 안전율에 크게 영향을 주지 못하였는데, 이는 그라우팅으로 인해 그라우팅 영역의 강도는 증가했지만, 반면에 차수효과 때문에 터널로 유입되는 양이 줄어서 굴착면 주변에 작용하는 수압이 증가되었기 때문인 것으로 판단된다. 다시 말해 그라우팅으로 인한 지반 강도 증가와 수압의 증가가 서로 상쇄되어 결과적으로 안전율이 크게 증가하지 않은 것으로 판단된다.

5. 결론

그라우팅 보강영역이 해저터널의 안정성에 미치는 영향을 알아보기 위하여 보강을 하지 않은 경우와 그라우팅을 120°, 180°, 360°로 보강한 경우에 대해 수치해석을 실시한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

보강영역이 넓어질수록 안정성이 증가할 것이라는 예상대로 안전율은 증가하고, 천단변위는 감소하는 것으로 나타났다. 하지만 그라우팅 보강효과는 그리 크게 나타나지 않았는데, 이는 터널에 높은 상재압력이 작용하고 그라우팅으로 인한 지반강도 증가와 치수효과에 의한 수압 증가가 서로 상쇄되었기 때문으로 판단된다.

그라우팅 보강영역이 넓어질수록 총유입량이 감소하였고 축압에 따른 변화는 없는 것으로 나타났다. 특히 그라우팅 보강영역이 360°인 경우 120°, 180°보다 총유입량이 크게 작아지는 것으로 나타났는데 이는 360°로 그라우팅한 경우에는 집수정을 통한 유입량이 거의 발생하지 않았기 때문이다.

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

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, 터널기술학회지 Vol.10, No. 3, pp. 50-61.
3. 조현태 1994, 지하수를 고려한 도심지 터널의 설계와 해석에 대한 고찰, 공학석사 학위논문, 서울대학교 대학원, p. 57.
4. 한국도로공사 도로교통기술원, 2002, 암반등급에 따른 도로터널 지보체계 개선 연구, p. 268.
5. Shin, J.H., D.M. Potts, and L. Zdravkovic, 2002, "A numerical study of the effect of groundwater movement on long-term tunnel behaviour", Geotechnique, Vol. 52, No.6, pp. 391~403.
6. Shin, J.H., D.M. Potts, and L. Zdravkovic, 2005, "The effect of pore-water pressure on NATM tunnel linings in decomposed granite soil", Geotechnique, Vol. 42, pp. 1585~1597.