

이차원 수리-역학적 연계해석 시 유도배수 모델링 방법에 따른 수치해석적 비교연구

유광호^{1*}

A numerical comparative study on induced drainage modelling in 2D hydro-mechanical coupled analysis

Kwang-Ho You

Abstract In tunnels, safety factor concept has been suggested to estimate their stability quantitatively. It is merely limited in the framework of mechanical analysis. However safety factor concept has not been applied in hydro-mechanical coupled analyses due to their modelling complexity. Recently studies on this topic are being actively made. In this study, induced drainage modelling methods for hydro-mechanical coupled analyses are compared and analyzed to estimate safety factor of a subsea tunnel exactly. To this end, methods both controlling hydraulic characteristic of shotcrete and using a drainage well are considered. Sensitivity analysis were carried out on rock class, thickness of shotcrete, and hydraulic properties of rock mass. As the results of this study, it turned out that the induced drainage modelling using a drainage well would give more reliable results than that of controlling hydraulic characteristic of shotcrete in estimating tunnel stability in hydro-mechanical coupled analyses.

Keywords: Hydro-mechanical coupled analysis, safety factor, sensitivity analysis, induced drainage modelling

요 지 터널의 경우 안정성을 정량적으로 평가하기 위해 안전율 개념이 제안된 바 있다. 이는 역학적 해석의 범주에 한정된 것으로 수리·역학적(hydro-mechanical) 연계해석의 범주에서는 해석 모델링의 복잡성으로 인해 안전율 개념이 적용된 연구는 극히 드문 실정이다. 최근 들어 수리·역학적 연계해석에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다. 본 연구에서는 해저 터널의 안전율을 정확히 산정하기 위해 수리·역학적 연계해석 시 유도배수 모델링 방법을 비교·분석하였다. 수치해석 시 터널 내부로 유도배수하는 방법으로는 숏크리트 수리특성을 조절하는 유도배수 방법과 집수정을 이용한 유도배수 방법이 고려되었다. 두 방법의 비교를 위해 암반등급, 숏크리트 두께, 암반 수리특성에 대하여 민감도 분석을 수행하였고, 연구 결과 해저터널의 수리·역학적 연계해석 시 집수정을 이용한 유도배수 방법을 사용하는 것이 터널의 안정성을 검토하는 데에 보다 신뢰성이 높은 것으로 나타났다.

주요어: 수리·역학적 연계해석, 안전율, 민감도 분석, 유도배수 모델링

1. 서 론

근래에 들어 좁은 국토면적 및 비싼 지가 등의 이유로 지하 공간개발이 활발히 이루어지고 있으며 해저터널에 대한 관심도 증가하고 있다. 이에 해저터널을 굴착 시 터널 주변 지반의 응력이 변하고 동시에 간극수압을 변화시켜 지반의 유효응력이 감소하게 된다. 이로 인해 터널 주변 지반의 하중지지력이 감소하고 아울러서 흙의 체적이 변하여 지반변형이 증가한다. 따라서 이러한 경우 터널 및 주변지반의 거동을 규명하기 위해서는 수리적(hydraulic) 측면과 역학적(mechanical) 측면이 고

려된 수리·역학적 연계해석이 요구된다. 그러나 연계해석에 관한 연구는 근래에 들어서야 수행되고 있으며 소수 연구자들에 의해 연구되고 있다.

터널의 안정성을 정량적으로 평가하기 위해 유광호 등(2000, 2001, 2005)과 박종원 등(2004)에 의해 강도 감소기법(shear strength reduction method)에 기초하여 수치해석 시 터널의 안전율을 구하는 방법이 제시된 바 있다. 하지만 이는 역학적 해석의 범주에 한정된 것으로 수리·역학적 연계해석의 범주에서는 안전율 개념이 적용된 연구는 각종 터널 해석 프로그램의 연계해석 기능의 제한성 및 해석 모델링의 어려움 등으로 인해 극히 드문 실정이다.

근래에 들어 유충식(2003)은 수리·역학적 연계해석을 수행하고 응력-간극수압의 관찰을 통하여 라이닝 작용

¹정회원, 수원대학교 토목공학과 교수

*교신저자: 유광호 (khyou@suwon.ac.kr)

하중 및 유발응력, 막장안정성, 지표침하에 관하여 고찰하였다. 연구결과 지하수가 터널 굴착에 미치는 영향은 연계해석을 통해 이해가 가능하며 전응력 해석을 수행할 경우 지하수의 영향이 과소평가될 수 있기 때문에 터널해석의 경우 연계해석이 수행되어야 한다고 주장하였다.

유충식 등(2005)은 터널굴착과 지하수의 상호작용이 터널의 거동에 미치는 영향에 대한 연구에서 가상의 터널조건에 대해 응력-간극수압 연계해석을 이용한 매개변수 연구를 수행하여 연계해석 적용의 필요성을 강조하고 지속적인 연구가 필요하다고 하였다. 한편 유광호와 이광훈(2005)은 터널 주변의 간극수압이 해저터널의 안정성에 미치는 영향을 연계해석을 수행하여 살펴보았다. 이를 위해 비배수 조건과 배수조건으로 가정하여 시공단계별 정상류 상태를 먼저 재현하고 터널의 안전율을 구한 바 있다. 또한, 최근 연구에 의하면 유광호와 이동훈(2007)은 해저터널에서의 연계해석에서 국부안전을 이용하여 수치해석 모델링 방법에 따라 이완하중고를 산정한 바 있다.

본 연구에서는 해저 터널의 안정성을 정확히 검토하기 위해 수리·역학적 연계해석 시 유도배수 모델링 방법을 비교·분석하였다. 모델링 방법에 따른 터널 안정성 비교를 위해 전단강도감소기법에 기초하여 수치적으로 구한 안전율을 사용하였다. 수치해석 시 터널 내부로 유

도배수 하는 방법으로는 숏크리트 수리특성을 이용한 유도배수 방법과 집수정을 이용한 유도배수 방법이 고려되었다.

숏크리트 수리특성을 이용한 유도배수 방법은 가정된 숏크리트의 투수계수를 조정하여 터널 내부로 유도배수되는 유입량을 조절하는 방법으로 숏크리트는 주로 보 (beam) 요소로 모델링된다. 집수정을 이용한 유도배수 방법은 실제 숏크리트 투수계수를 사용하면서 터널 인버트 부분에 집수정을 설치하여 조절하는 방법이다.

유도배수 방법의 비교를 위해 암반등급, 숏크리트 두께, 암반수리특성에 대하여 민감도 분석을 수행하였으며, 안전율, 유입량, 천단변위, 최대휨응력을 비교한 결과 해저 터널의 안정성을 정량적으로 산정하기 위해서는 숏크리트 수리특성을 이용한 유도배수방법보다 집수정을 이용한 유도 배수방법이 정확하고 일관성 있는 결과를 얻을 수 있었다.

2. 연계해석 모델링 방법

대상 터널은 그림 1과 같이 수심이 60 m, 토피가 100 m인 직경 10 m의 원형터널이며, 균질한 암반에 굴착되는 것으로 가정하였다. 또한, 터널 굴착 시 미칠 수 있는 영향을 고려하여 해석영역을 높이 140 m, 터널 중심으로부터 외부경계까지의 거리는 터널 직경의 5배인 50

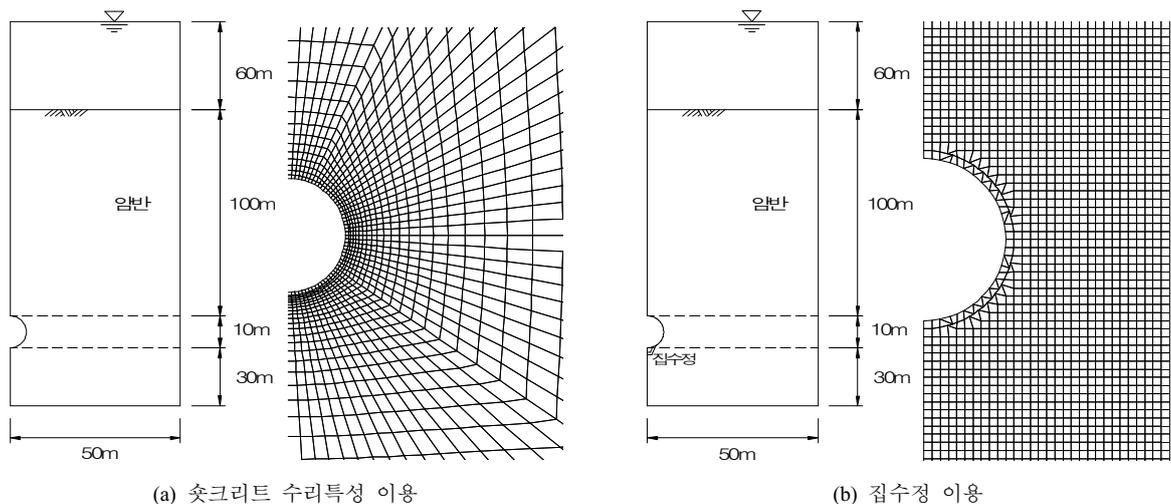


그림 1. 해석 단면 형상 및 요소망

m로 하였다.

해석속도를 높이기 위하여 터널 축을 중심으로 좌·우 대칭경계 조건을 적용하여 반단면 해석을 수행하였으며, 깊이 방향으로는 지표면 이하 영역만을 고려하여 모델링하였다. 즉, 지하수면은 해석영역에 포함하지 않았으며, 단지 지하수면이 일정하게 유지된다는 가정 하에 지표면에 작용하는 수압만을 상재하중으로 처리하였다.

경계조건은 좌·우 측면경계는 수평방향 변위를 구속하고 하부경계는 수직방향을 구속하였으며, 우측면경계와 상부경계에서의 수압은 일정하게 유지되도록 하였으며, 굴착은 전단면굴착으로 가정하였다. 또한, 그림 1의 (a)와 같이 숏크리트 수리특성을 이용한 유도배수 모델링 방법에서는 숏크리트를 모델링하는 층수에 대한 민감도 분석을 원활하게 하기 위해 방사형 요소망을 사용하였으며, 그림 1의 (b)와 같이 터널의 인버트부에 집수정을 설치한 모델링 방법에서는 격자형 요소망을 사용하여 터널내로 유입되는 유입수를 처리하였다. 이는 터널 주변의 거동을 분석하는 데에 방사형 요소망과 별 차이가 없으나, 소성영역 및 수압 분포 등을 분석 하는 경우에는 요소망의 크기가 같은 격자형이 유리하기 때문이다.

일반적으로 2차원 해석에서는 3차원적 터널 시공과정

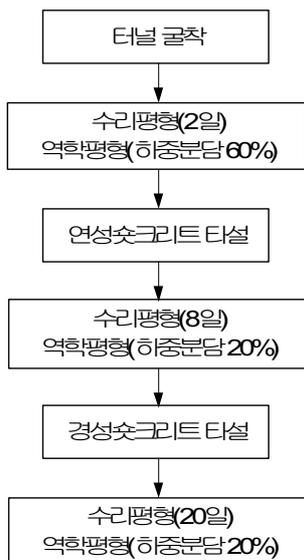


그림 2. 굴착 및 연계 해석 순서도

을 현실적으로 모델링하기 위해 하중분배 개념을 도입하여 해석을 수행한다. 본 연구에서는 그림 2와 같이 3가지 굴착단계(굴착-연성 숏크리트 타설 -경성 숏크리트 타설)별 하중 분담율을 각각 60%-20%-20%로 가정하여 해석하였다. 유충식과 김선민(2006)에 의해 수행된 연구에서와 같이, 시공과정을 모델링할 때 각 굴착하중을 유사한 시공환경에서의 자료를 고려하여 굴착단계 2일, 연성 숏크리트 단계 8일, 경성 숏크리트 단계 20일 가량이 소요되는 것으로 가정하였다. 연계해석은 완전 수리-역학적 연계해석 보다는 수치학적 해석과 역학적 해석을 그림 2에서와 같이 각각 굴착단계에서 교대로 실시하였다.

3. 숏크리트 모델링 방법

3.1 보(Beam) 요소

지보재는 모델링 방법에 따라 해석결과의 차이를 보일 수 있다. 따라서 본 연구에서는 적정 지보재의 모델링 방법을 선정하기 위하여 숏크리트 수리특성을 이용한 유도배수 방법의 경우 그림 3과 같이 숏크리트의 역학적 물성치는 보요소로 모델링하였으며, 숏크리트의 수리특성 물성치는 각각의 숏크리트 두께에 해당하는 영역을 연속체요소로 모델링하였다. 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(조현태, 1994; Shin 등 2002, 2005).

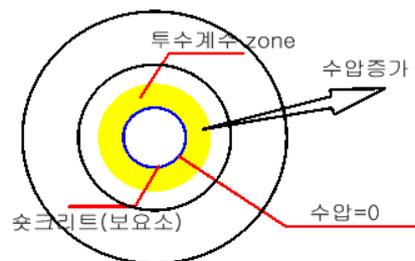


그림 3. 숏크리트 지보재 모델링(보요소)

민감도 분석을 위한 연계해석 시 숏크리트의 수리특성(투수계수)을 사용하여 지하수 흐름을 모사하였다. 숏크리트의 수리특성에 따른 거동특성을 파악하기 위해 그림 5와 같이 숏크리트 모델링 층수를 1, 3, 5층으로 나누고 각각의 층에 따른 굴착면 주변의 요소크기는 숏크리트 두께를 숏크리트 모델링 층수로 나누어 요소크기를 산정하였다. 예를 들어 숏크리트 두께 30 cm의 경우 숏크리트 모델링 층수 1, 3, 5층에 따라 각층의 요소크기는 30×30 cm, 10×10 cm, 6×6 cm가 된다.

또한, 수리-역학적 연계해석 시 해저 시설물의 안전을 산정 기법의 타당성을 살펴보기 위해 주요 입력파라미터의 민감도 분석을 실시하였다. 이를 위해 암반등급 3가지(1등급, 3등급, 5등급), 숏크리트 수리특성 3가지, 숏크리트 모델링 층수 3가지(1층, 3층, 5층), 숏크리트 두께 3가지(30 cm, 40 cm, 50 cm)를 사용하여 총 3×3×3×3=81가지의 경우에 대해 연계해석을 실시하고 결과를 분석하였다. 이에 따라 본 연구에서는 각각의 경우에서 안전율을 산정하고 비교하였으며 연속체요소로 모델링하여 수리특성 물성치를 적용한 경우 숏크리트 두께에 해당하는 요소를 세분화하여 요소크기에 따른 안전율의 변

화를 확인하고자 하였다.

2차원 연계해석을 위해 사용된 프로그램은 FLAC-2D ver. 4.0(Itasca Consulting Group Inc., 2000)이며 안전율 산정을 위해 내장언어인 FISH로 별도의 routine을 작성하여 사용하였다.

4.1.1 지반의 물성치 및 지보재의 물성치

해석에 사용된 지반 물성치는 표 1과 같이 한국도로공사에서 제시한 암반등급별 변형성 및 강도정수를 기본으로 사용하였으며 암반등급별로 정리하였다(한국도로공사 도로교통기술원, 2002). 또한, 주지보재인 숏크리트의 수리특성(투수계수, 간극률) 및 탄성계수를 표 2와 같이 가정하였으며, 허용인장응력은 0.89 MPa, 허용압축응력은 12.36 MPa을 기준으로 숏크리트의 파괴를 판정하였다. 단, S-H-1이 유도배수가 가장 적게 발생하는 경우이고, S-H-3이 유도배수가 가장 크게 발생하는 경우로 약 1,000배 정도 차이를 두었다. 이 때 사용된 투수계수는 실제 숏크리트의 투수계수의 값은 아니며 측압계수는 1.0으로서 과지압에 대해서는 고려하지 않았다.

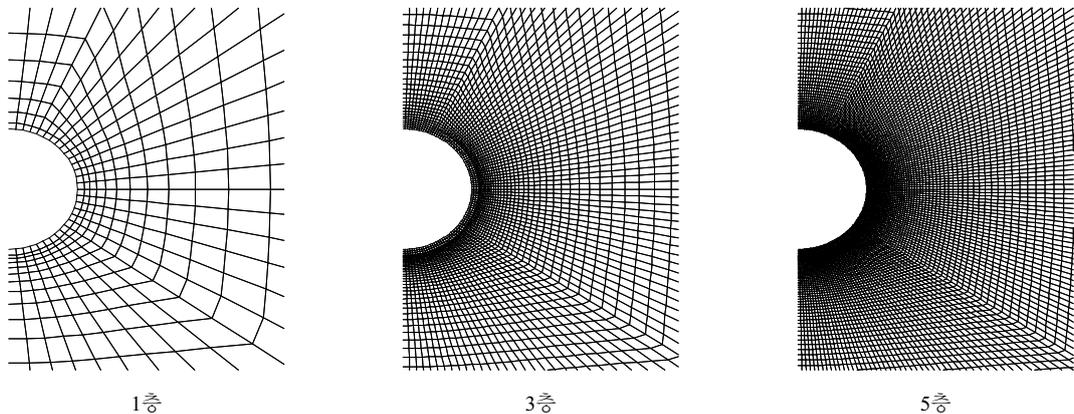


그림 5. 수치해석 시 지보재 모델링 층수

표 1. 암반등급별 변형성 및 강도 정수

구 분	체적 탄성계수 (GPa)	전단 탄성계수 (GPa)	마찰각 (deg)	점착력 (Pa)	단위중량 (kN/m ³)	투수계수 (cm/sec)	간극률
1 등 급	22.75	13.65	45	1.0×10 ⁶	26	1.22×10 ⁻⁵	0.20
3 등 급	8.67	5.20	38.5	2.5×10 ⁵	26	7.22×10 ⁻⁵	0.25
5 등 급	1.87	1.12	31	5.0×10 ⁴	26	4.22×10 ⁻⁴	0.30

표 2. 민감도 분석에 사용된 쏫크리트(beam 요소) 역학 및 수리 물성치

구 분		투수계수 (cm/sec)	간극률	탄성계수 (GPa)	비고
S-H-1	연성 쏫크리트	4.9×10^{-7}	0.08	3	허용인장응력= 0.89 MPa 허용압축응력= 12.36 MPa
	경성 쏫크리트	4.9×10^{-9}	0.06	30	
S-H-2	연성 쏫크리트	4.9×10^{-5}	0.10	3	
	경성 쏫크리트	4.9×10^{-7}	0.09	30	
S-H-3	연성 쏫크리트	4.9×10^{-3}	0.12	3	
	경성 쏫크리트	4.9×10^{-5}	0.11	30	

4.2 집수정을 이용한 방법

집수정 펌핑을 이용한 유도배수 모델링 방법은 쏫크리트의 투수계수만을 이용하여 유도배수량을 조절하는 모델링 방법과 달리 쏫크리트의 투수계수는 실제의 값을 사용하고 추가로 집수정 펌핑의 유·무를 이용하여 유도 배수하는 모델링 방법이다. 이 모델링 방법에서 터널 내부로 유입되는 총 유입량은 쏫크리트 자체를 통해 유입되는 양과 터널 인버트 밑에 위치한 집수정 펌핑을 통해 유입되는 양을 합산하여 산정하였다.

수리·역학적 연계해석 시 집수정 펌핑을 이용한 유도배수 모델링 방법의 검증에 위해 주요 입력 파라미터의 민감도 분석을 실시하였다. 이를 위해 암반등급은 1, 3, 5등급(3가지), 쏫크리트 두께는 30 cm, 45 cm, 60 cm(3가지), 집수정 펌핑의 유·무(2가지)에 따라 총 $3 \times 3 \times 2 = 18$ 가지 경우에 대해 연계해석을 실시하고 파라미터간의 상관관계를 분석하였다.

2차원 연계해석을 위해 탄소성 거동 모사가 가능한 라이너(liner)요소를 사용할 수 있는 FLAC-2D ver 5.0(Itasca Consulting Group Inc., 2005)을 사용하였다.

4.2.1 수정 지반의 물성 및 지보재의 물성치

본 연구의 해석에 사용된 암반 물성값은 표 3에 정리한 바와 같다. 표 3의 값들은 한국도로공사 도로교통 기술원(2002), “암반등급에 따른 도로터널 지보체계 개선연구”에서 사용된 암반등급별 변형성 및 강도 정수 중에 암반상태가 좋을수록 단위중량이 커지도록 수정된 것이다.

쏘크리트를 모델링하기 위해 liner 요소의 입력 물성치 및 쏫크리트의 수리 물성치를 표 4와 같이 사용하였다. 연계해석 시 쏫크리트의 투수계수는 1.0×10^{-5} cm/sec, 간극률은 0.08로 일정하게 유지하고 쏫크리트의 두께를 30 cm, 45 cm, 60 cm로 변화시켰다.

표 3. 해석에 사용된 암반등급별 변형성 및 강도 정수

구 분	체적 탄성계수 (GPa)	전단 탄성계수 (GPa)	마찰각 (deg)	접착력 (MPa)	단위중량 (kN/m ³)	투수계수 (cm/sec)	간극률
1 등 급	22.75	13.65	45	1.0	26	1.22×10^{-5}	0.20
3 등 급	8.67	5.20	38.5	0.25	23	7.22×10^{-5}	0.25
5 등 급	1.87	1.12	31	0.05	21	4.22×10^{-4}	0.30

표 4. 쏫크리트(Liner 요소) 역학 및 수리 물성치

두께 (cm)	포아송비 (연성/경성)	탄성계수(GPa) (연성/경성)	허용 인장응력 (MPa)	잔류 인장응력 (MPa)	허용 압축응력 (MPa)	투수계수 (cm/sec)	간극률
30	0.25/0.25	3.0/30	0.89	0.45	12.36	1.0×10^{-5}	0.08
45							
60							

5. 결과 분석

5.1 숏크리트 수리특성을 이용한 결과

숏크리트 수리특성을 이용한 유도배수 방법의 결과로써 안전율, 천단변위, 유입량, 최대휨응력으로 나누고 압반등급으로 구분하여 표 5와 같이 정리하였다. 표 5에서 알 수 있듯이 압반상태가 불량해질수록 안전율이 감소하고 천단변위, 유입량, 최대휨응력이 증가하는 것으로 나타났다. 압반상태가 가장 불량한 5등급 압반에서 숏크리트 수리특성이 S-H-3(4.9×10^{-5} cm/sec)이고, 숏크리트 두께가 50 cm인 경우를 제외한 모든 경우에서 대부분이 지보재가 파괴되어 안전율이 0.1이하로 나타났다. 숏크리트 두께가 50 cm인 경우 압반등급과 안전율의 관계를 숏크리트 수리특성에 따라 구분하고 그림 6과 같이 숏크리트 모델링 층수로 나누어 정리하였다. 숏크리트 수리특성은 S-H-1(4.9×10^{-9} cm/sec)에서 S-H-3(4.9×10^{-5} cm/sec)으로 갈수록 투수계수가 증가한다. 숏크리트 모델링 층수가 증가하고 압반상태가 불량해 질수록 안전

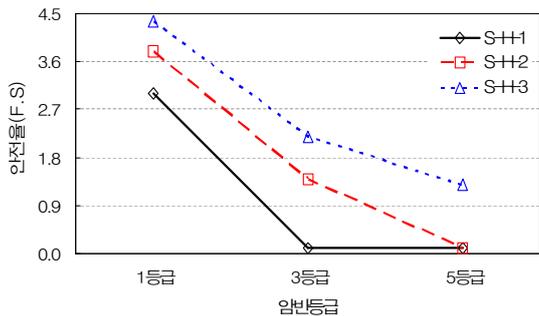
리트 수리특성이 S-H-3(4.9×10^{-5} cm/sec)이고, 숏크리트 두께가 50 cm인 경우를 제외한 모든 경우에서 대부분이 지보재가 파괴되어 안전율이 0.1이하로 나타났다. 숏크리트 두께가 50 cm인 경우 압반등급과 안전율의 관계를 숏크리트 수리특성에 따라 구분하고 그림 6과 같이 숏크리트 모델링 층수로 나누어 정리하였다. 숏크리트 수리특성은 S-H-1(4.9×10^{-9} cm/sec)에서 S-H-3(4.9×10^{-5} cm/sec)으로 갈수록 투수계수가 증가한다. 숏크리트 모델링 층수가 증가하고 압반상태가 불량해 질수록 안전

표 5. 숏크리트 수리특성을 이용한 민감도 분석 결과

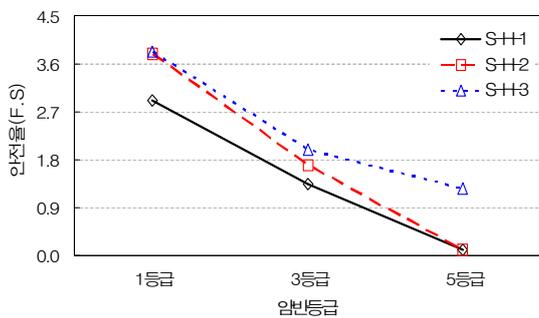
압반등급 (숏크리트 모델링 층수)	숏크리트 수리특성	숏크리트 두께 (cm)	안전율 (F.S)	천단변위 (cm)	유입량 (m ³ /day-m)	최대휨응력 (MPa)
1 등급 (1층)	S-H-1	30	0.1 이하	0.354	3.12×10^{-2}	17.7
		40	1.45	0.269	2.69×10^{-2}	12.0
		50	2.99	0.208	2.95×10^{-2}	7.8
	S-H-2	30	2.45	0.194	1.61	6.87
		40	2.95	0.173	1.39	5.15
		50	3.79	0.15	1.15	3.13
	S-H-3	30	3.11	0.093	4.80	1.09
		40	3.83	0.114	2.81	1.26
		50	4.35	0.109	2.83	1.44
3 등급 (3층)	S-H-1	30	0.1 이하	0.712	9.18×10^{-3}	17.1
		40	0.1 이하	0.658	9.55×10^{-3}	18.5
		50	1.35	0.749	1.79×10^{-2}	12.0
	S-H-2	30	0.1 이하	0.707	2.98	24.3
		40	0.1 이하	0.605	2.30	18.1
		50	1.69	0.483	9.84×10^{-1}	9.21
	S-H-3	30	1.45	0.324	24.50	7.39
		40	1.83	0.439	27.68	5.38
		50	1.98	0.392	31.59	5.23
5 등급 (5층)	S-H-1	30	0.1 이하	3.471	1.81×10^{-2}	22.0
		40	0.1 이하	2.918	5.83×10^{-3}	17.6
		50	0.1 이하	2.121	2.12×10^{-2}	17.2
	S-H-2	30	0.1 이하	2.562	1.58	22.3
		40	0.1 이하	2.824	1.03	14.9
		50	0.1 이하	1.575	1.30	14.4
	S-H-3	30	0.1 이하	2.256	130.96	21.0
		40	0.1 이하	1.754	124.50	17.1
		50	1.23	1.816	80.45	12.0

율은 전반적으로 감소하고 숯크리트 수리특성이 클수록 안전율이 증가하는 경향이 나타났다. 그러나 그림 6의 (c)에서 3등급, 숯크리트 모델링 층수가 5층인 경우에는 수리특성 S-H-1이 수리특성 S-H-2인 경우보다 안전율이 높게 나타나 결과가 합리적이지 못하였다.

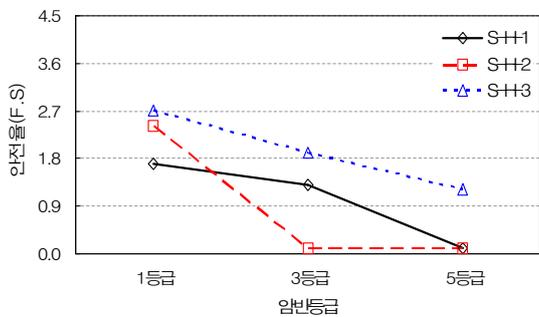
숯크리트 모델링 층수가 1층이고 숯크리트 두께가 40 cm인 경우 암반등급과 유입량의 관계를 숯크리트 수리



(a) 숯크리트 모델링 층수가 1층인 경우



(b) 숯크리트 모델링 층수가 3층인 경우



(c) 숯크리트 모델링 층수가 5층인 경우

그림 6. 숯크리트 두께 50 cm의 경우 암반등급과 안전율의 관계

특성으로 구분하여 그림 7과 같이 도시하였다. 수리특성이 큰 S-H-3 경우에서 암반상태가 불량한 5등급은 유입량이 급격하게 증가하는 것으로 나타났는데 이는 수리특성이 크고 암반상태가 불량하여 유입량이 급격히 증가한 것으로 판단된다. 그러나 수리특성이 작은 S-H-1, S-H-2의 경우는 유입량이 거의 없었으며 이 같은 현상은 숯크리트 모델링 층수가 3층, 5층에서도 같은 결과를 보였다.

그림 8은 3등급, 숯크리트 두께 40 cm인 경우 유입량과 숯크리트 모델링 층수의 관계를 나타내었다. 수리특성이 S-H-1과 S-H-2인 경우 숯크리트 모델링 층수가 증가하여도 유입량의 차이는 없었으며 그 양도 극히 적은 것으로 나타났다. 그러나 수리특성이 가장 큰 S-H-3의 경우 숯크리트 모델링 층수가 증가할수록 유입량이 증가하는 것으로 나타났다.

1등급, 숯크리트 모델링 층수가 3층일 때 유입량과 숯크리트 두께의 관계를 그림 9와 같이 나타내었다. 수리

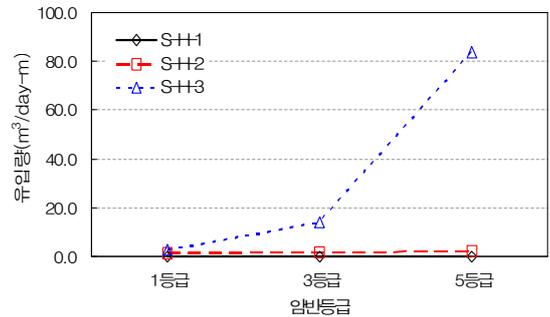


그림 7. 유입량과 암반등급의 관계(숯크리트 모델링 1층, 숯크리트 두께 40 cm)

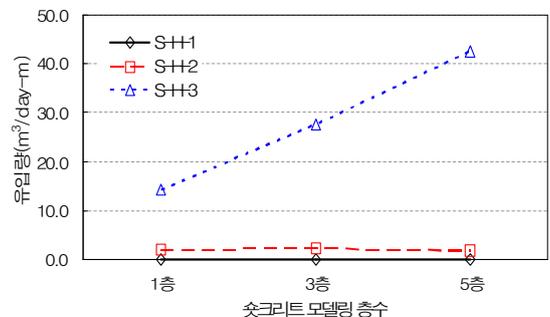


그림 8. 유입량과 숯크리트 모델링 층수와의 관계(3등급, 숯크리트 두께 40 cm)

특성이 가장 작은 S-H-1은 숯크리트 두께에 따른 유입량이 거의 없었으며 수리특성이 S-H-2인 경우는 유입량이 급격히 감소하다가 다시 증가하는 경향이 나타났다. 그러나 수리특성이 가장 큰 S-H-3의 경우 숯크리트 두께가 증가할수록 유입량이 감소하였다. 이와 같이 3가지의 수리특성별로 서로 다른 결과가 나타나 결과의 타당성이 떨어졌다.

숯크리트 모델링 층수가 5층이고 수리특성이 중간인 S-H-2의 경우, 유입량과 숯크리트 두께의 관계를 그림 10과 같이 암반등급별로 구분하여 나타내었다. 1등급의 경우 숯크리트 두께가 증가하면서 전체적인 유입량은 감소하는 경향을 보인다. 그러나 암반상태가 불량할수록 유입량이 증가해야 하지만 5등급 암반의 경우 오히려 1등급 보다 유입량이 감소한 것으로 나타나 결과가 합리적이지 못하였다.

숯크리트 수리특성이 가장 큰 S-H-3의 경우, 숯크리트 두께와 천단변위의 관계를 숯크리트 모델링 층수별

로 구분하여 그림 11과 같이 나타내었다. 1, 5등급 암반에서도 같은 결과가 나타나 대표적인 3등급 암반을 그래프로 나타냈었다. 전체적으로 숯크리트 두께가 증가할수록 천단변위는 감소하여야 하나 숯크리트 모델링 층수가 3층, 5층의 경우 천단변위가 감소하는 것으로 나타나 타당하지 못한 결과가 나타났다.

숯크리트 두께 40 cm, 모델링 층수 1층인 경우의 최대 허용력과 암반등급의 관계를 숯크리트 수리특성별로 그림 12와 같이 나타내었다. 암반상태가 불량해지면서 숯크리트에 작용하는 응력이 증가하였으며, 숯크리트 수리특성이 S-H-1의 1, 3, 5등급, S-H-2의 3, 5등급과 S-H-3의 5등급에서 숯크리트 허용응력인 12.36 MPa를 초과하여 안전율이 0.1이하로 나타났다.

최대허용력과 숯크리트 두께와의 관계를 그림 13과 같이 3등급 암반의 모델링 층수 1층인 경우를 그래프로 나타내었다. 숯크리트 두께가 증가할수록 최대허용력은 감소하였으며 수리특성이 가장 큰 S-H-3의 경우는 지보재에 걸리는 간극수압이 감소하여 최대허용력이 숯크리트 허용응력을 초과하지 않았다.

숯크리트의 수리특성을 이용한 유도배수 방법의 결과 암반상태에 따라 안전율이 감소하기는 하지만 숯크리트 모델링 층수가 5층일 때 숯크리트 수리특성 S-H-1인 경우 안전율이 경향과 맞지 않았다. 암반상태가 불량하고 숯크리트 두께가 증가할수록 유입량의 증가나 감소가 예상했던 경과와 다르게 나타났다. 5등급 암반에서 1등급보다 유입량이 감소하는 것으로 나타났다. 또한 숯크리트 두께가 증가함에 따라 천단변위의 감소가 예상되었으나 암반등급에 따른 각각의 경우에서 천단변위가

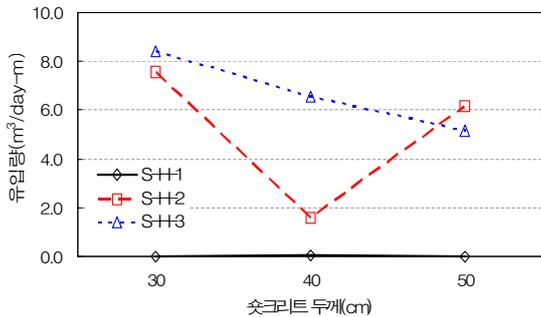


그림 9. 유입량과 숯크리트 두께의 관계(1등급, 숯크리트 모델링 3층)

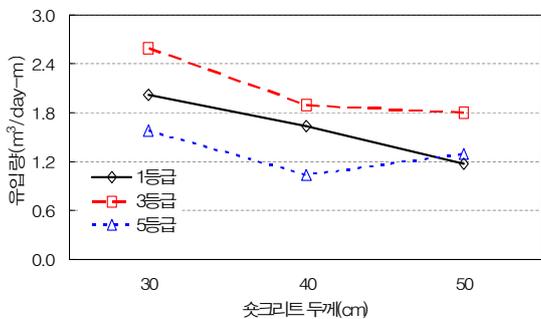


그림 10. 유입량과 숯크리트 두께의 관계(숯크리트 모델링 5층, S-H-2)

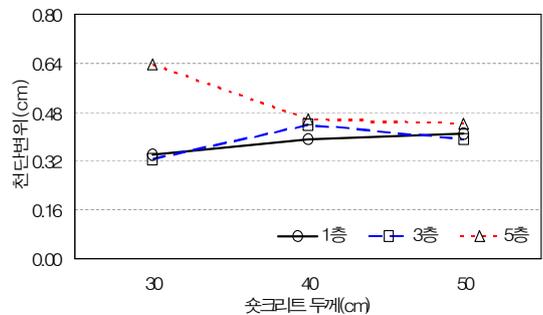


그림 11. 숯크리트 수리특성(S-H-3)의 숯크리트 두께와 천단변위(3등급)의 관계

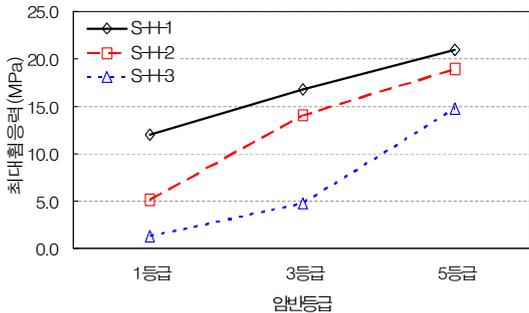


그림 12. 최대흡응력과 압반등급의 관계(숫크리트 두께 40 cm, 1층)

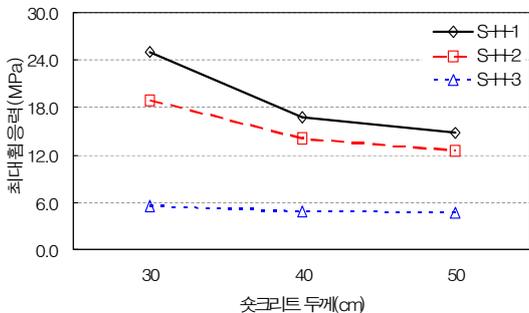


그림 13. 최대흡응력과 숫크리트 두께의 관계(3등급, 1층)

증가하는 결과가 나타났다. 따라서 숫크리트의 수리특성을 이용한 유도배수 방법은 결과가 일관적이지 못하여 신뢰성이 떨어지는 것을 알 수 있다.

5.2 집수정 펌핑을 이용한 결과

집수정의 펌핑량을 이용한 유도배수 방법의 민감도 분석결과를 표 6과 같이 안전율, 천단변위, 최대흡응력, 총 유입량, 펌프량, 숫크리트 유입량으로 구분하여 압반등급에 따라 숫크리트 두께별로 나타내었다. 여기서, 총 유입량은 펌프량과 숫크리트 유입량의 합산으로 나타내었다. 압반상태가 불량할수록 안전율이 감소하고 천단변위는 증가하였으며, 총유입량도 증가하는 것으로 나타났다. 또한 각 압반등급에서는 숫크리트 두께에 따른 총 유입량의 변화는 없는 것으로 나타났다. 표 6의 안전율 결과는 숫크리트 수리특성을 이용한 결과인 표 5와 비교하면 전반적으로 같은 조건에서 크게 나타남을 알 수 있다. 이는 집수정을 이용하여 유도배수시키는 경우

숫크리트 배면에 걸리는 수압이 숫크리트 수리특성을 이용한 방법 보다 작아지기 때문이다.

압반등급과 안전율의 관계를 숫크리트 두께에 따라 구분하여 그림 14와 같이 나타내었다. 압반상태가 불량할수록 안전율은 감소하였으며 숫크리트 두께가 증가할수록 안전율이 증가하여 예상과 같은 결과가 나타났다. 그림 15는 안전율과 숫크리트 두께의 관계를 3등급 압반에서 집수정 펌핑의 유·무에 따라 구분하였다. 숫크리트 두께가 증가하면 안전율도 증가하지만 집수정 펌핑의 유·무가 안전율에 미치는 영향은 거의 없는 것을 알 수 있다.

총 유입량인 숫크리트 투수계수에 의한 숫크리트 유입량과 집수정의 유·무에 따른 펌프 유입량의 관계를 알아보기 위하여 숫크리트 두께가 45 cm 일 때 압반등급과 숫크리트 유입량, 펌프 유입량의 관계를 그림 16 및 그림 17과 같이 나타내었다. 숫크리트 두께 30 cm, 60 cm의 경우도 숫크리트 두께 45 cm와 같은 결과를 나타내어 대표적인 결과를 그림으로 나타내었다. 그림 16에서 압반상태가 불량할수록 숫크리트 내로 들어오는 유입량은 증가하며 집수정 펌핑의 유·무에 따라 3등급 압반까지는 비슷한 양이 유입되지만 5등급 압반에서 집수정을 고려할 경우 급격히 증가하는 것으로 나타났다.

그림 17은 집수정을 고려한 경우에서 압반상태가 불량할수록 펌프 유입량이 증가하며, 특히 5등급 압반에서 펌프 유입량이 급격히 증가하는 것을 알 수 있다. 이는 숫크리트 유입량과 펌프 유입량에서 동일한 현상이 나타나는데 1, 3등급 압반의 투수계수에 비해 5등급 압반의 투수계수가 상대적으로 크므로서 지하수의 유입량이 증가하여 나타나는 현상으로 판단된다.

총 유입량과 압반등급의 관계를 집수정 펌핑의 유·무에 따라 구분하여 그림 18과 같이 나타내었다. 숫크리트 유입량과 펌프 유입량과 마찬가지로 압반상태가 불량할수록 총 유입량이 증가하며 5등급 압반에서 급격히 증가하는 것을 알 수 있다. 이는 그림 16과 그림 17을 숫크리트 유입량과 펌프 유입량을 합산하여 총 유입량을 산정했기 때문에 그림 16과 같은 비슷한 양상이 나타난다.

집수정 펌핑을 고려한 경우 천단변위와 압반등급의 관계를 숫크리트 두께로 구분하여 그림 19와 같이 정리하였다. 압반상태가 불량할수록 천단변위는 증가하고 숫크리트 두께가 증가할수록 천단변위가 감소하여 예상

표 6. 집수정 펌핑 유·무를 이용한 민감도 분석 결과

암반 등급	숏크리트 두께 (cm)	집수정	안전율	천단변위 (cm)	최대 휨응력 (MPa)	총 유입량 (m ³ /day-m)	펌프량 (m ³ /day-m)	숏크리트 유입량 (m ³ /day-m)
1등급	30	고려	3.99	0.081	0.96	6.55	0	6.55
		미고려	4.01	0.082	0.96	7.96	1.27	6.69
	45	고려	4.99	0.081	0.84	6.55	0	6.55
		미고려	5.01	0.081	0.84	7.96	1.27	6.69
	60	고려	6.29	0.080	0.77	6.55	0	6.55
		미고려	6.33	0.081	0.79	7.96	1.27	6.69
3등급	30	고려	2.05	0.419	7.91	23.55	0	23.55
		미고려	2.11	0.422	7.33	33.99	8.07	25.92
	45	고려	2.87	0.343	5.34	23.55	0	23.55
		미고려	2.95	0.346	5.11	33.99	8.07	25.92
	60	고려	3.89	0.313	4.13	23.55	0	23.55
		미고려	4.01	0.317	4.00	33.99	8.07	25.92
5등급	30	고려	0.31	-	12.37	56.72	0	56.72
		미고려	0.43	3.084	12.36	164.49	66.16	98.33
	45	고려	0.99	5.164	12.37	56.72	0	56.72
		미고려	1.17	2.371	10.50	164.49	66.16	98.33
	60	고려	1.85	2.068	11.40	56.72	0	56.72
		미고려	2.03	2.061	79.22	164.49	66.16	98.33

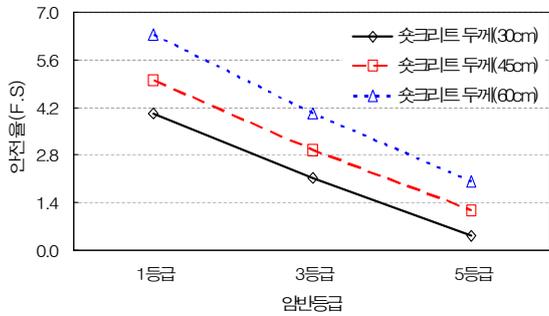


그림 14. 안전율과 암반등급의 관계(펌프 고려)

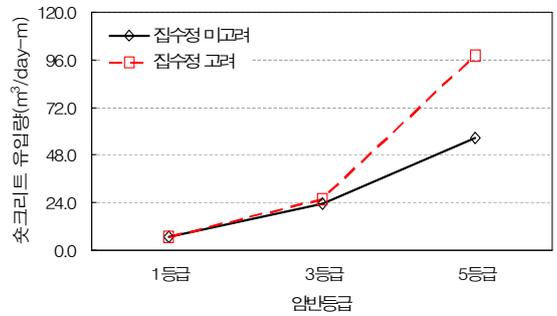


그림 16. 숏크리트 유입량과 암반등급의 관계(숏크리트 두께 45 cm)

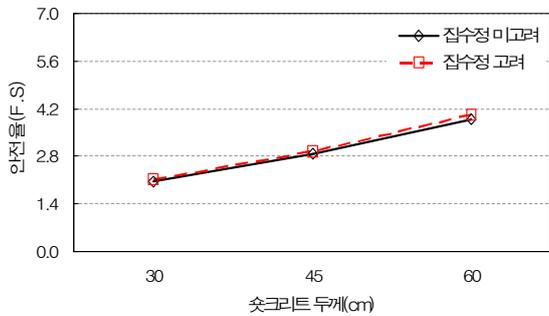


그림 15. 안전율과 숏크리트 두께의 관계(3등급)

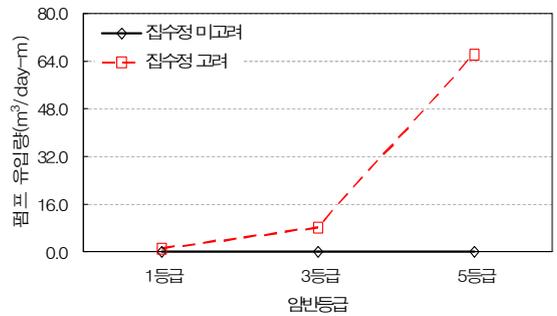


그림 17. 펌프 유입량과 암반등급의 관계(숏크리트 두께 45 cm)

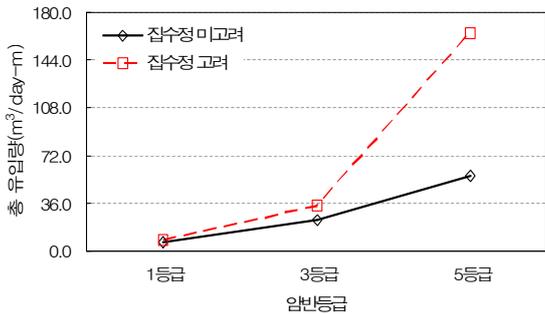


그림 18. 총 유입량과 암반등급의 관계(shotcrete 두께 45 cm)

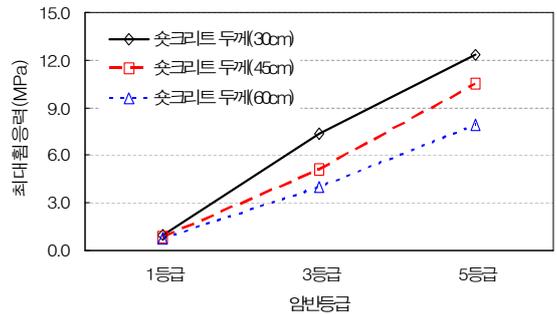


그림 20. 최대휨응력과 암반등급의 관계(집수정 고려)

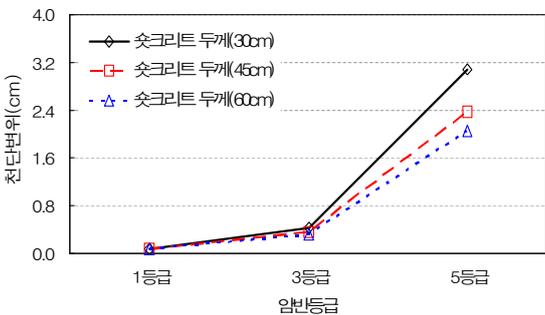


그림 19. 천단변위와 암반등급의 관계(집수정 고려)

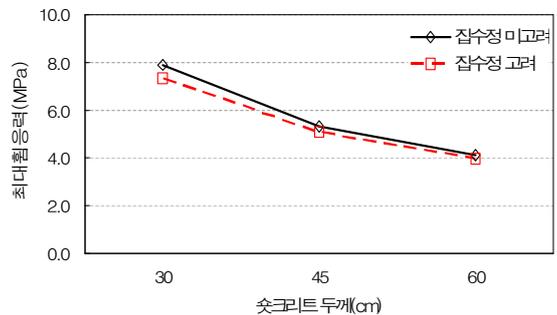


그림 21. 최대휨응력과 shotcrete 두께의 관계(3등급)

과 같은 결과가 나타났다. 5등급 암반에서 천단변위가 급격히 증가하고 shotcrete 두께에 따라 천단변위의 차이가 커짐을 알 수 있는데 암반상태가 5등급으로서 가장 불량하기 때문인 것으로 판단된다.

최대휨응력과 암반등급과의 관계를 그림 20과 같이 집수정을 사용할 경우 shotcrete 두께별로 구분하여 나타냈다. 그림에서 알 수 있듯이 암반상태가 불량할수록 지보재가 받는 응력이 증가하였으며 shotcrete 두께 30 cm, 5등급 암반에서는 shotcrete 허용응력(12.36 MPa)을 초과하는 것으로 나타났다. 또한, shotcrete의 두께가 증가할수록 지보재에 작용하는 응력이 작아짐을 알 수 있다.

3등급 암반의 경우 최대휨응력과 shotcrete 두께와의 관계를 집수정 펌핑의 유·무로 구분하여 그림 21과 같이 나타냈다. shotcrete 두께가 증가할수록 최대휨응력은 감소하였으며 집수정 펌핑을 고려한 경우가 집수정 펌핑을 고려하지 않은 경우 보다 최대휨응력이 작은 것으로 나타났다.

집수정을 이용한 유도배수 모델링 방법으로 수치해석을 수행한 결과 암반상태가 좋고 shotcrete 두께가 증가

할수록 안전율이 증가하는 것으로 나타났다. 암반상태가 불량할수록 천단변위가 증가하고 shotcrete 두께가 증가할수록 천단변위가 감소하였다. 집수정 펌핑을 고려하지 않은 경우보다 펌핑을 고려한 경우가 최대휨응력이 작은 것으로 나타났다. 이는 집수정 펌핑으로 인해 shotcrete에 걸리는 간극수압이 줄어들었기 때문인 것으로 사료된다.

이와 같은 결과들로 미루어 볼 때 shotcrete 수리특성을 이용한 유도배수방법 보다 집수정 펌핑을 이용한 유도배수방법이 타당한 것으로 확인되었다. 이는 전반적으로 집수정을 이용한 유도배수 모델링이 shotcrete의 수리특성을 이용한 유도배수 모델링 보다 실제 터널의 배수시스템을 더 잘 모사하기 때문으로 판단되며 추후 터널의 안정성을 검토하는데 보다 합리적일 것으로 생각된다.

6. 결 론

해저 터널의 안정성 검토를 위해 수리·역학적 연계해석 시 유도배수 모델링 방법에 따라 안전율 개념을 사용

하여 정량화하는 기법을 개발하기 위해 본 연구를 수행하였다. 숏크리트 수리특성을 이용한 유도배수 방법과 집수정을 이용한 유도배수 방법을 이용하여 민감도 분석을 수행하여 비교한 결과 다음과 같은 결론을 도출할 수 있었다.

숏크리트의 수리특성을 이용한 유도배수 방법으로 모델링하여 연계해석을 수행한 결과 일반적으로 암반상태가 불량할수록 유입량이 증가하지만 5등급 암반에서 1등급보다 유입량이 감소하는 것으로 나타났다. 또한, 숏크리트 두께가 증가함에 따라 천단변위의 감소가 예상되었으나 이와 반대되는 결과가 나타났다. 따라서 숏크리트의 수리특성을 이용한 유도배수 방법은 결과가 일관적이지 못하여 신뢰성이 떨어진다.

반면에 집수정을 이용한 유도배수 방법의 경우 암반상태가 불량할수록 안전율이 감소하고 천단변위가 증가하였으며, 숏크리트 두께가 증가할수록 안전율이 증가하고 천단변위가 감소하여 합리적이고 타당한 결과가 나타났다. 따라서 숏크리트 수리특성을 이용한 방법보다 집수정 펌핑을 이용할 경우 터널의 안정성을 보다 합리적으로 판단할 수 있었다. 한편, 집수정의 펌핑을 고려한 경우에서 지보체에 작용하는 힘응력이 숏크리트 수리특성을 이용한 방법 보다 작아져 안전율이 증가하는 것으로 나타났다. 이는 해저터널 등의 연계해석 시 집수정의 펌핑을 이용하여 유도배수시키 방법을 사용하면 숏크리트 수리특성을 이용한 방법보다 경제적인 설계가 가능할 것으로 판단된다.

종합적으로 판단해 볼 때, 해저터널의 수리-역학적 연계해석 시 집수정을 이용한 유도배수 방법을 사용하여 터널의 안정성을 검토하는 것이 결과의 일관성 및 신뢰성을 높일 수 있을 것으로 예상된다.

감사의 글

본 연구는 건설교통부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁시행 한 2007년도 첨단도시개발사업(과제번호: 05-건설핵심 D10-01, 과제명: 해저시설물 차폐기술연구)에 의하여 연구비가 지원되었기에 관계자분들에게 감사드립니다.

참고문헌

1. 박종원, 박연준, 유광호, 이상돈 (2004), “터널의 안전율 평가 기법에 관한 연구”, 터널과 지하공간, 제14권, 제5호, pp. 327-338.
2. 유광호, 박연준, 배규진 (2000), “연약암반층에 굴착된 터널의 안전율 평가”, 터널기술, 제2권, 제3호, pp. 47-57.
3. 유광호, 박연준, 강용 (2001), “절리암반 터널의 안전율 평가를 위한 수치해석적 연구”, 터널과 지하공간, 제11권, 제3호, pp. 279-288.
4. 유광호, 박연준, 홍근영, 이현구, 김재권 (2005), “지보재 파괴를 고려한 터널 안전율의 수치해석적 산정 연구”, 터널기술, 제7권, 제1호, pp. 37-49.
5. 유광호, 이광훈 (2005), “터널 배면의 간극수압이 해저터널의 안정성에 미치는 영향”, 터널기술, 제8호, 제4호, pp. 355-363.
6. 유광호, 이동훈 (2007), “연계해석 시 해저터널의 이완 하중고 산정을 위한 수치 모델링 비교 연구”, 2007년 한국암반공학회 특별심포지엄 논문집, 제주 그랜드 호텔, pp. 137-146.
7. 유충식 (2003), “지하수가 터널굴착에 미치는 영향에 관한 3차원 연계해석”, 터널기술, 제5권, 제2호, pp. 175-187.
8. 유충식, 김선빈, 배규진, 신휴성 (2005), “터널시공과 지하수의 상호작용이 터널의 거동에 미치는 영향”, 터널기술, 제7권, 제2호, pp. 97-107.
9. 유충식, 김선빈 (2006), “NATM 터널의 응력-간극수압 연계 유한요소모델링”, 2006년 한국지반공학회 봄학술 발표회 논문집, pp. 189-198.
10. 조현태 (1994), 지하수를 고려한 도심지 터널의 설계와 해석에 대한 고찰, 공학석사 학위 논문, 서울대학교 대학원, 57p.
11. 한국도로공사 도로교통기술원 (2002), 암반등급에 따른 도로터널 지보체계 개선연구, 268p.
12. Itasca Consulting Group, Inc. (2000), Fast Lagrangian Analysis of Continua, Ver. 4.0, Itasca Consulting Group, Minneapolis, Minnesota, USA.
13. Itasca Consulting Group, Inc. (2005), Fast Lagrangian Analysis of Continua, Ver. 5.0, Itasca Consulting Group, Minneapolis, Minnesota, USA.
14. Shin, J.H., Potts, D.M., Zdravkovic, L. (2002), “A numerical study of the effect of groundwater movement on long-term tunnel behaviour”, Geotechnique, Vol. 52, No. 6, pp. 391-403.
15. Shin, J.H., Potts, D.M., Zdravkovic, L. (2005), “The effect of pore-water pressure on NATM tunnel linings in decomposed granite soil”, Geotechnique, Vol. 42, pp. 1585-1597.



유 광 호

수원대학교
토목공학과
교수

E-mail: khyou@suwon.ac.kr
