

연계해석 시 해저터널의 이완하중고 산정을 위한 수치 모델링 비교 연구

유광호, 이동훈 (수원대학교)

해저 지하 구조물을 시공할 경우는 높은 수압 및 침투압 등의 영향이 무시될 수 없으므로 지하저장 공동의 정확한 거동평가를 위해서는 수리-역학적 해석이 수행되어야만 한다. 또한, 실무에서는 암반이완하중을 고려하여 터널의 콘크리트 라이닝을 설계하며, 이를 위해 이완하중고를 터널 주변의 국부안전율 분포를 이용하여 수치해석에 의해 산정하는 방법이 제안된바 있다. 따라서 본 연구에서는 해저터널을 대상으로 수리-역학적 연계해석 시 국부 안전율을 이용한 이완하중고 산정 기법의 타당성을 살펴보았다. 이를 위해 3등급 암반을 대상으로 쏘크리트 수리특성을 이용한 유도배수방법과 집수정의 펌핑을 이용한 유도배수방법을 이용하여 이완하중고를 산정하고 적용성을 비교하였다. 연구 결과 연계해석 시 해저시설물의 안전율 및 이완하중고를 정확하게 산정하기 위해서는 집수정의 펌핑을 이용하여 유도배수하는 모델링 방법이 보다 정확하고 일관성 있는 결과를 얻을 수 있었다.

1. 서론

해저 지하 구조물을 시공할 경우는 높은 수압 및 침투압 등의 영향이 무시될 수 없다. 지하수위 아래에서 터널을 굴착하면 터널 주변 지반의 하중 지지력이 감소하여 암반의 체적이 변하여 지반변형이 증가한다. 따라서 이러한 경우 지하저장 공동의 정확한 거동평가를 위해서는 수리(hydraulic) - 역학적(mechanical) 연계해석이 수행되어야 한다. 유충식 등(2006)에 의하면 현재 실무에서 적용하고 있는 각종 터널해석 프로그램의 연계해석 기능의 제한성 및 해석 모델링 시 지반공학적인 문제를 반영하는데 있어서의 각종 해석 모델링에 대한 경험부족으로 응력-간극수압 연계해석을 설계에 적절하게 반영한 예는 많지 않은 실정이다.

또한, 천병식 등(2001)에 의하면 실무에서는 터널의 콘크리트 라이닝 설계 시 쏘크리트와 록볼트 등의 1차 지보재가 터널의 유지기간 동안 암반이완하중을 충분히 지지 한다면 콘크리트 라이닝은 미적 또는 심리적인 영향만을 고려하여 설계할 수 있다. 그러나 불량한 암반상태, 쏘크리트의 부식 등으로 1차 지보재가 지보능력을 상실할 경우에 대비하여 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 방법이 있다. 유광호 외 2명(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 찾을 수 있다고 하였다(유광호 2005).

이에 본 연구에서는 국부안전율을 이용한 이완하중고 산정 기법의 타당성을 살펴보기 위

해 가상의 해저터널을 대상으로 수리-역학적 연계해석을 수행하였다. 이를 위해 암반상태가 중간 정도인 3등급 암반에 대해 숏크리트 수리특성을 이용한 유도배수방법과 집수정의 펌핑을 이용한 유도배수방법으로 이완하중고를 산정하였다. 숏크리트 투수계수를 이용한 유도배수방법은 숏크리트 두께 60cm, 숏크리트 투수계수를 5가지로 달리하였고, 집수정 펌핑을 이용한 유도 배수 방법은 숏크리트 두께 3가지 (30, 45, 60cm)와 집수정 펌핑량을 3가지로 달리하여 민감도 분석을 실시하였다.

2. 국부안전율에 의한 이완하중고 산정 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, 공극수압(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 파괴가 발생하려면 σ_3 는 그대로 유지하면서 원 (b)와 같이 파괴면에 접할 때까지 σ_1 이 증가하여야 한다(Itasca Consulting Group, 1999). 또한, 원 (a)에 의해 표현된 응력상태에서 원의 중심은 그대로 유지하면서 원 (c)와 같이 파괴면에 접할 때까지 응력원의 반지름을 증가시킴으로서 파괴에 도달할 수도 있다. 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.

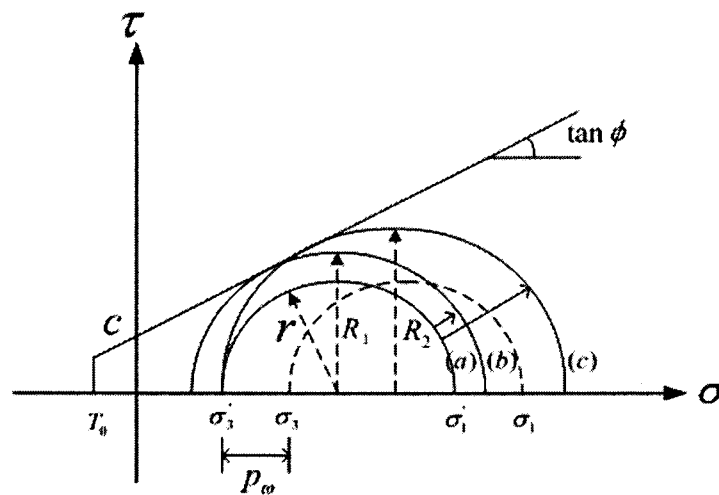


그림 1. 간극수압을 고려한 국부안전율

$$\sigma'_{1f} = \left(\frac{1 + \sin\phi}{1 - \sin\phi} \right) \sigma'_3 - 2c \sqrt{\frac{1 + \sin\phi}{1 - \sin\phi}} \quad (1)$$

여기서, c 는 점착력이고, ϕ 는 내부마찰각이다.

이 때, 국부 안전율(F.S.)은 식(2)와 같이 계산될 수 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 외 2명, 2000).

따라서, 터널 굴착 후의 이완 영역은 그림 2와 같이 국부 안전율이 2.0 또는 3.0이 되는 등고선을 찾아 그 크기를 찾을 수 있다(유광호, 2005).

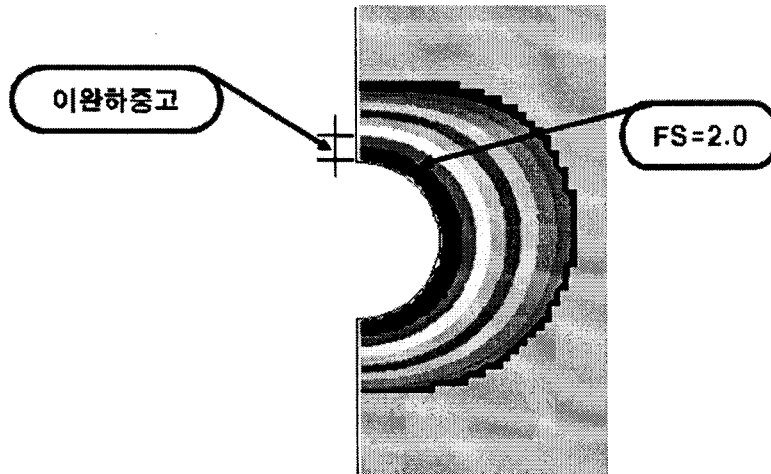


그림 2. 국부안전율(F.S=2.0)에 의한 이완하중고

3. 연계해석 모델링 방법

3.1 슛크리트 수리특성을 이용한 유도배수 방법 모델링

대상 터널은 그림 3의 (a)에서와 같이 수심이 60m, 토피가 100m인 직경 10m의 원형터널로 가정하였으며, 균질한 암반에 굴착되는 것으로 가정하였다. 또한, 터널 굴착 시 미칠 수 있는 영향을 고려하여 해석영역을 높이 140m, 터널 중심으로부터 외부경계까지의 거리는 터널 직경의 5배인 50m로 하였다. 해석속도를 높이기 위하여 터널 축을 중심으로 좌·우 대칭경계 조건을 적용하여 반 단면 해석을 수행하였으며, 깊이 방향으로는 지표면 이하 영역만을 고려하여 모델링하였다. 즉, 지하수면은 해석영역에 포함하지 않았으며, 단지 지하수

면이 일정하게 유지된다는 가정 하에 지표면에 작용하는 수압만을 상재하중으로 처리하였다.

사용된 요소망은 그림 3의 (b)와 같이 방사형으로써 터널 굴착면으로부터 외부로 멀어질수록 요소가 커지도록 구성하였다. 경계조건은 좌·우 측면경계는 수평방향 변위를 구속하고 하부경계는 수직방향을 구속하였으며, 우측면경계와 상부경계에서의 수압은 일정하게 유지되도록 하였다. 또한, 굴착은 전단면굴착으로 가정하였다.

일반적으로 2차원 해석에서는 3차원적 터널 시공과정을 현실적으로 모델링하기 위해 하중 분배 개념을 도입하여 해석을 수행하는데 유충식(2006)에 의해 수행된 연구에 의하면, 시공과정을 모델링 할 때 각 굴착하중을 유사한 시공환경에서의 자료를 고려하여 굴착단계 2일, 연성 슛크리트 단계 8일, 경성 슛크리트 단계 20일 가량이 소요되는 것으로 가정하여 본 연구에서는 3가지 굴착단계(터널굴착 - 연성 슛크리트 타설 - 경성 슛크리트 타설)별 하중 분담율을 60% - 20% - 20%로 가정하여 해석하였다.

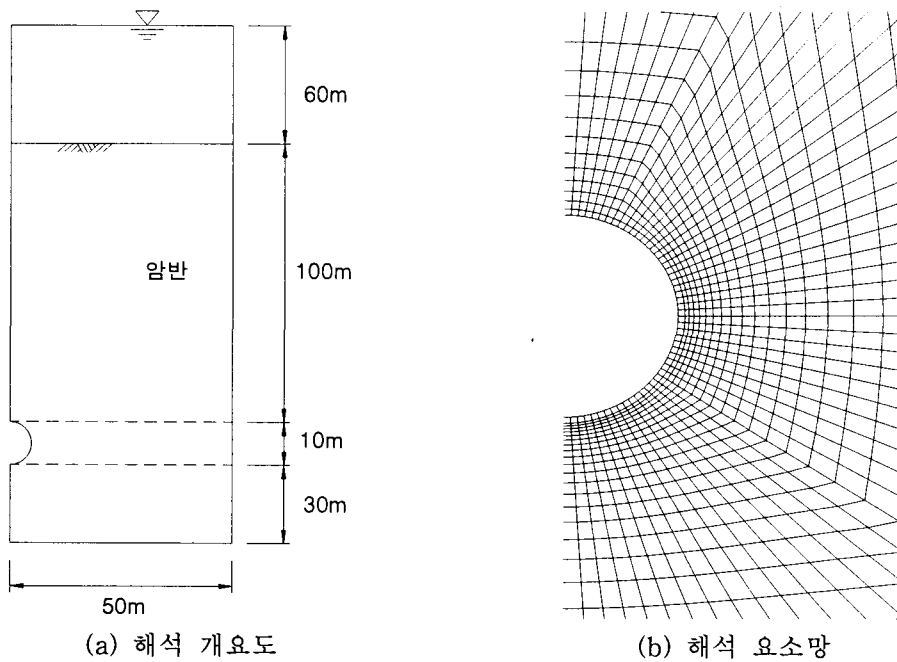


그림 3. 슛크리트 수리특성을 이용한 유도배수 모델링

해석에 사용된 지반 물성치는 표 1과 같이 한국도로공사에서 제시한 암반등급별 변형성 및 강도정수를 기본으로 사용하였다(한국도로공사 도로교통기술원, 2002). 슛크리트의 수리특성은 표 2에서와 같이 S-H-a에서부터 S-H-e까지 5가지 경우로 구분하여 적용하였는데 각각의 경우 투수계수가 100배씩 증가되도록 하였다. 즉, 표 2에서 S-H-a는 투수계수가 가장 적은 경우로 유입량이 가장 적고, S-H-e는 투수계수가 가장 큰 경우로서 유입량이 가장 많은 경우에 해당한다. 슛크리트 모델링 층수는 1층으로 고정하여 모델링 층수에 대한 영향은 본 연구에서 고려하지 않았다.

종합적으로 제안된 이완하중고 산정 기법을 검증하기 위해 3등급(스�크리트 두께 60cm)암반에서 5가지의 슛크리트 수리특성 (S-H-a, S-H-b, S-H-c, S-H-d, S-H-e)을 조합하여 총

1×5=5가지의 경우를 해석에 사용하였다. 측압계수는 1.0으로서 과지압에 대해서는 고려하지 않았으며, 보요소를 모델링 할 수 있는 FLAC-2D ver. 4.0(Itasca Consulting Group Inc., 1995)을 사용하였다.

표 1. 암반등급별 변형성 및 강도 정수

구 분	체적 탄성계수 (GPa)	전단 탄성계수 (GPa)	마찰각 (deg)	점착력 (MPa)	밀도 (kg/m ³)	투수계수 (cm/sec)	간극률
3 등급	8.67	5.20	38.5	0.25	2600	7.22×10^{-5}	0.25

표 2. 이완한중고 산정에 사용된 슛크리트 수리 물성치

구 분	투수계수 (cm/sec)	간극률	
S-H-a	soft shotcrete	2.5×10^{-11}	0.03
	hard shotcrete	2.5×10^{-13}	0.02
S-H-b	soft shotcrete	2.5×10^{-9}	0.05
	hard shotcrete	2.5×10^{-11}	0.04
S-H-c	soft shotcrete	2.5×10^{-7}	0.08
	hard shotcrete	2.5×10^{-9}	0.06
S-H-d	soft shotcrete	2.5×10^{-5}	0.10
	hard shotcrete	2.5×10^{-7}	0.09
S-H-e	soft shotcrete	2.5×10^{-3}	0.12
	hard shotcrete	2.5×10^{-5}	0.11

3.2 집수정 펌핑량을 이용한 유도배수 방법 모델링

집수정의 펌핑량을 이용한 유도배수 모델링 방법은 슛크리트의 투수계수만을 이용하여 유도배수량을 조절하는 모델링 방법과 달리 슛크리트의 투수계수는 실제의 값을 사용하고 추가로 실제 터널시공 과정과 보다 유사하게 집수정의 펌핑을 이용하여 유도 배수하는 모델링 방법이다.

수리-역학적 연계해석 시 집수정의 펌핑을 이용한 유도배수 모델링 방법에 의해 이완한중고 산정 기법의 타당성을 살펴보기 위해 주요 입력 파라미터의 민감도 분석을 실시하였다. 대상 터널은 그림 4의 (a)와 같이 직경 10m의 원형터널이며, 해석 요소망은 그림 4의 (b)와 같이 격자형을 사용하였다. 경계조건 및 굴착단계별 하중 분담을 등을 비롯한 해석조건은 슛크리트 수리특성을 이용한 방법과 마찬가지로 동일하게 적용하였다. 이를 위해 3등급 암반을 대상으로 슛크리트 두께는 30cm 45cm, 60cm(3가지), 슛크리트 수리특성은 1.0×10^{-5} cm/sec, 간극률은 0.08로 고정하였고, 집수정의 펌핑량은 3.6, 1.8, 0.036 m³/hr-m(3가지)을 적용하였다. 측압

계수(K_0)는 1.0을 사용하여, 총 $1 \times 3 \times 3 = 9$ 가지 경우에 대해 연계해석을 실시하여 이완하중고를 산정하였다. 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.

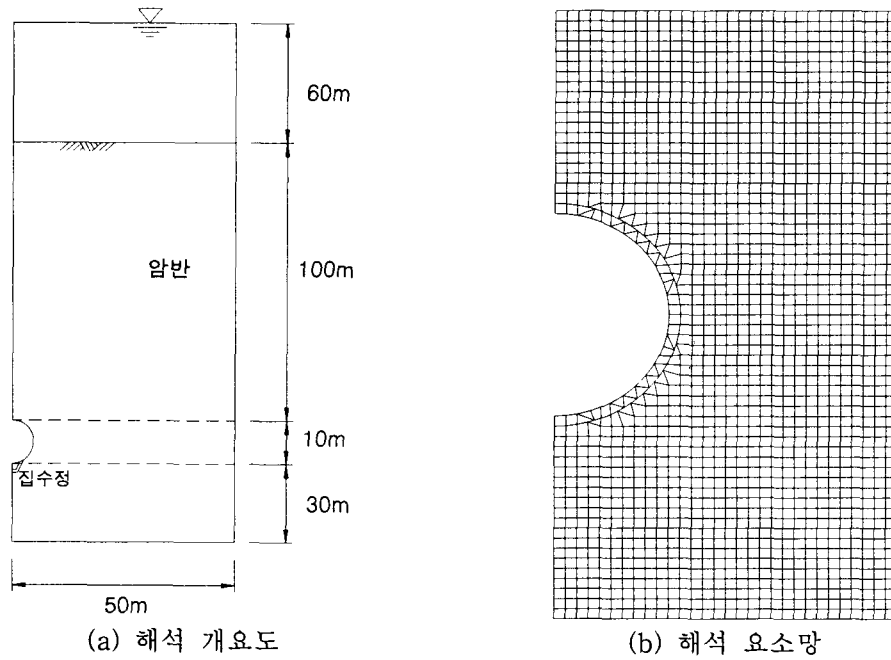


그림 4. 집수정 펌핑을 이용한유도배수 모델링

표 3은 한국도로공사 도로교통 기술원(2002), “암반등급에 따른 도로터널 지보체계 개선연구”에서 사용된 암반등급별 변형성 및 강도 정수를 바탕으로 암반상태에 맞는 밀도를 제시하여 사용하였다. 표 4는 숯크리트를 모델링하기 위해 사용된 Liner 요소의 입력 물성치 및 숯크리트의 수리 물성치를 나타낸 것이다.

표 3. 수정된 암반등급별 변형성 및 강도 정수

구 분	체적 탄성계수 (GPa)	전단 탄성계수 (GPa)	마찰각 (deg)	점착력 (MPa)	밀도 (kg/m^3)	투수계수 (cm/sec)	간극률
3 등 급	8.67	5.20	38.5	0.25	2,300	7.22×10^{-5}	0.25

표 4. 숏크리트 (Liner 요소) 역학 및 수리 물성치

두께 (m)	포아송비	탄성계수 (GPa)	허용 인장응력 (MPa)	잔류 인장응력 (MPa)	허용 압축응력 (MPa)	투수계수 (cm/sec)	간극률
0.30	0.25	3.0	0.89	0.45	12.36	1.0×10^{-5}	0.08
0.45							
0.60							

4. 수치해석 결과

4.1 숏크리트 수리특성을 이용한 유도배수 방법 결과

숏크리트 수리특성을 이용한 유도 배수 방법을 이용하여 3등급 암반상태에서 국부안전율이 2.0과 3.0인 영역의 높이(또는 두께)를 이완하중고로 산정하였으며 천단부와 측벽부로 구분하여 표 5와 같이 정리 하였다. 국부안전율이 2.0일 때 숏크리트 투수계수가 증가할수록 이완하중고는 감소하여야 하나 숏크리트 투수계수가 S-H-d인 경우와 숏크리트 투수계수가 가장 큰(S-H-e)경우에서 급격히 감소하거나 증가하여 경향과는 다소 차이가 있었다. 이는 측벽부와 국부안전율이 3.0에 대해서도 같은 결과를 나타내 전반적으로 결과의 신뢰성이 떨어졌다.

표 5. 3등급 암반의 숏크리트 수리특성에 의한 이완하중고 산정 결과

투수계수 (cm/sec)			이완하중고(m) F.S=2.0		이완하중고(m) F.S=3.0	
			천단부	측벽부	천단부	측벽부
S-H-a	soft	1.6×10^{-11}	1.71	2.10	3.03	4.46
	hard	1.6×10^{-13}				
S-H-b	soft	1.6×10^{-9}	1.79	2.00	3.03	4.89
	hard	1.6×10^{-11}				
S-H-c	soft	1.6×10^{-7}	1.52	2.06	3.03	4.90
	hard	1.6×10^{-9}				
S-H-d	soft	1.6×10^{-5}	0.61	0.94	2.58	6.75
	hard	1.6×10^{-7}				
S-H-e	soft	1.6×10^{-3}	2.97	3.88	4.07	5.87
	hard	1.6×10^{-5}				

숏크리트 수리특성별로 천단부에서 국부안전율 2.0에 해당하는 이완하중고를 나타낸 그래프로서 그림 5와 같이 나타냈다. 수리특성은 S-H-a가 가장 작은 경우이고, S-H-e가 가장 큰 경우로서 수리특성이 커짐으로써 이완하중고가 감소할 것으로 예상된다. 그러나 그림에서 알

수 있듯이 숯크리트 수리특성이 증가할수록 이완하중고가 감소하다가 수리특성이 가장 큰 경우(S-H-e)에서 갑자기 증가하여 결과의 신뢰성이 떨어졌다.

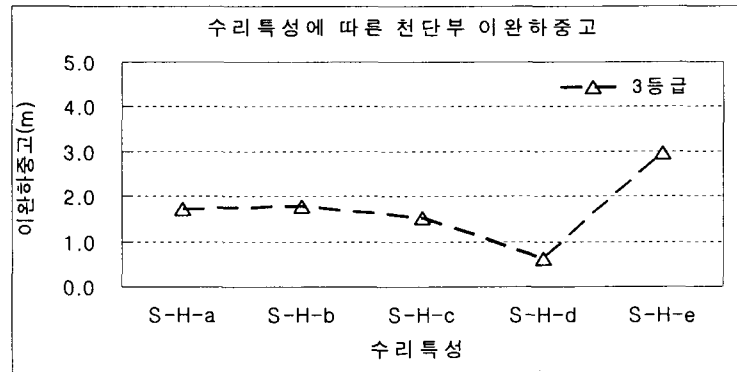


그림 5. 숯크리트 수리특성 vs 천단부의 이완하중고(F.S=2.0)

4.2 집수정 펌핑량을 이용한 유도배수 방법 결과

집수정 펌핑량을 이용한 유도 배수 방법을 이용하여 3등급 암반상태에서 국부안전율이 2.0과 3.0인 영역의 높이(또는 두께)를 이완하중고로 산정하였으며 천단부와 측벽부로 구분하여 표 6과 같이 정리하였다.

3등급 암반의 경우 초기 집수정 펌핑량이 감소할수록 이완하중고는 감소하였으며, 숯크리트 두께가 증가할수록 국부안전율이 2.0인 영역에서의 이완하중고는 감소하는 것으로 나타났고 국부안전율이 3.0인 영역에서는 펌핑량이 가장 적은(c)의 경우에 미소하게 증가하는 것으로 나타났으나 집수정 펌핑량이 이완하중고에 미치는 영향은 거의 없는 것으로 나타났다.

표 6. 3등급 암반의 집수정 펌핑에 의한 이완하중고 산정 결과

숯크리트 두께 (cm)	초기 집수정 펌핑량 (m ³ /hr-m)		이완하중고(m)			
			천단부		측벽부	
			F.S=2.0	F.S=3.0	F.S=2.0	F.S=3.0
30	a	3.6	3.94	5.16	5.05	7.13
	b	1.8	3.75	5.00	4.94	7.00
	c	0.036	3.82	5.04	5.25	7.40
45	a	3.6	3.32	4.50	4.52	6.52
	b	1.8	3.31	4.50	4.52	6.52
	c	0.036	3.29	4.48	4.68	6.72
60	a	3.6	3.03	4.17	4.13	6.07
	b	1.8	3.03	4.17	4.13	6.07
	c	0.036	3.08	4.23	4.34	6.35

초기 집수정 펌핑량에 따라 국부안전율 영역이 2.0일 때 이완하중고의 관계를 숏크리트 두께별로 정리하여 그림 7과 같이 그래프로 나타냈다. 초기 집수정 펌핑량이 a($3.6\text{m}^3/\text{hr-m}$)에서 c($0.036\text{m}^3/\text{hr-m}$)로 감소하는 경우 이완하중고의 차이가 약 10cm정도로서 크게 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다. 숏크리트 두께가 30cm일 때 이완하중고가 가장 높게 나타났으며, 숏크리트 두께가 증가할수록 이완하중고는 전반적으로 감소하는 것으로 나타났다. 또한, 천단부보다 측벽부의 이완하중고가 더 큰 것으로 나타났는데 이는 측압계수를 1.0으로 하였으나 깊은 심도와 높은 수압작용으로 인한 결과인 것으로 판단된다.

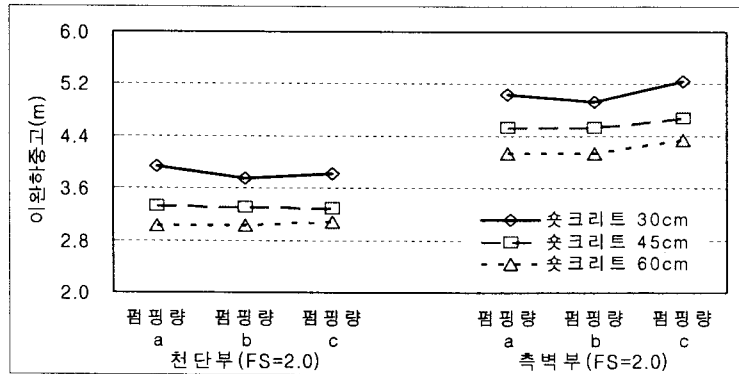


그림 7. 집수정 펌핑량 vs 천단부 및 측벽부의 이완하중고(3등급)

5. 결론

해저터널을 대상으로 수리-역학적 연계해석 시 국부안전율을 이용한 이완하중고 산정 기법의 타당성을 살펴보기 위해 3등급 암반을 대상으로 숏크리트 수리특성을 이용한 유도배수 방법과 집수정의 펌핑을 이용한 유도배수방법을 이용하여 이완하중고를 산정하고 적용성을 비교한 결과 다음과 같은 결론을 도출할 수 있었다.

- 연계해석 시 해저시설물의 이완하중고를 산정하기 위해서는 숏크리트의 수리특성을 이용하여 유도 배수하는 모델링 방법보다는 집수정의 펌핑을 이용하여 유도 배수하는 모델링 방법을 적용하는 것이 보다 일관성 있는 결과를 얻을 수 있어 타당할 것으로 판단된다.
- 해저 시설물 굴착에 따라 발생하는 이완영역은 터널 주변의 국부안전율이 2.0이나 3.0인 영역을 이용하여 구할 수 있을 것으로 기대된다.

하지만 본 연구는 암반등급을 3등급에 한정하여 수행된 연구로서 향후 다양한 암반상태를 대상으로 보다 정밀한 연구를 통해 검증될 필요가 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

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

참고문헌

1. 유광호, 박연준, 배규진, 2000, 연약암반층에 굴착된 터널의 안전율 평가, 터널기술논문집, Vol. 2, No. 3, pp. 47~57.
2. 유광호, 2005, 2-ARCH 터널의 라이닝 설계를 위한 터널굴착주변 응력이완 영역산정에 관한 연구, 터널기술논문집, Vol. 7, No. 4, pp. 343~352.
3. 유충식, 김선빈, 2006, NATM 터널의 응력-간극수압 연계 유한요소모델링, 한국지반공학회봄학술발표회 논문집, pp. 189-198.
4. 천병식, 신영완, 2001, NATM 터널의 콘크리트 라이닝 설계하중에 관한 연구, 터널과 지하공간, 한국암반공학회, Vol. 11, No. 2, pp. 96~108.
5. 한국도로공사 도로교통기술원, 2002, 암반등급에 따른 도로터널 지보체계 개선연구, 268p.
6. Itasca Consulting Group, Inc., 1995, Fast Lagrangian Analysis of Continua, Ver. 4.0, Itasca Consulting Group, Minneapolis, Minnesota, USA.
7. Itasca Consulting Group, Inc., 2005, Fast Lagrangian Analysis of Continua, Ver. 5.0, Itasca Consulting Group, Minneapolis, Minnesota, USA.