

전력구 터널의 배수 안정성에 관한 연구 A Study on Drainage Stability of Cable Tunnel

지현석¹⁾, Hyun-Seok Jee, 박준모²⁾, Joon-Mo Park, 장연수³⁾, Yeon-Soo Jang,
박정순⁴⁾, Chung-Soon Park

- 1) 동국대학교 토목환경공학과 석사과정, Graduate Student, Dept. of Civil & Environmental Eng.,
Dong-Guk University
- 2) 동국대학교 토목환경공학과 석사과정, Graduate Student, Dept. of Civil & Environmental Eng.,
Dong-Guk University
- 3) 동국대학교 토목환경공학과 부교수, Associate Professor, Dept. of Civil & Environmental Eng.,
Dong-Guk University
- 4) 동국대학교 토목환경공학과 연구교수, Research Professor, Dept. of Civil & Environmental Eng.,
Dong-Guk University

SYNOPSIS : This paper presents the results of 3-D analysis on steady state flow in the region where the leakage in a cable tunnel is occurred due to high excess ground water pressure. In numerical modeling, a relief well is selected as a method of reduction in water pressure at the surrounding region of the cable tunnel. The distribution of ground water level after dewatering by relief wells is analyzed. Results show that the amount of dewatering level in the layer of hard rock is about 4.2~8.6m, and that in the layer of fracture zone is about 5.8~8.2m. The predicted settlement at the cable tunnel due to the increase of effective stress by dewatering is 0.3mm.

Key words : steady state flow, leakage, cable tunnel, relief well, settlement

1. 서 론

오늘날 국내의 급속한 산업화 및 도시집중이 심화됨에 따라 좁은 국토를 효율적으로 개발하기 위한 지하공간의 활용이 많아지고 있으며, 특히 터널이 가장 큰 비중을 차지하고 있는 실정이다. 대부분의 터널공사는 전 공정이 지하수위 하부의 폐쇄된 공간에서 이루어지기 때문에 지하수의 영향을 반드시 고려해야 한다.

본 연구에서는 ○○지역의 총 연장 2.5km의 전력구 터널구간 중 과도한 수압으로 인한 터널의 누수현상이 발생하는 지역에 대하여 3차원 지하수 흐름해석 프로그램인 MODFLOW를 사용하여 대상지역을 모델링하였다. 모델 구축시 실시설계에 고려되지 않았던 파쇄대의 수리특성과 대상지역의 3차원적 지형특성을 반영하였으며, 지하수 분기선과 누수발생지점 및 누수위험 단면을 고려하여 대상지역을 3개 지역으로 분할하였다.

대상지역의 현재의 지반조건 및 지하수 흐름을 재현하기 위한 정상류 흐름해석을 실시하여 파쇄대의 투수계수를 산정하였고, 해석 모델내의 물수지 분석을 통하여 지하수 유·출입량의 오차를 검증하였다.

수치해석을 위한 모델링시 누수 발생지역의 대처방안으로 터널 바닥면을 천공한 감압우물(relief well)을 통해 유입시켜 유공관을 통해 배출하는 수압저감 공법을 채택할 경우 터널주변의 수압저감도를 분석하고, 이때 수두저하에 따른 지반 유효응력 증가에 의한 지표면의 탄성침하량 및 그 범위를 산정하였다.

2. 전력구 터널구간의 지질 구성 및 주변현황

본 터널은 비배수터널로 Shield TBM 공법을 채택하여 시공된 터널이다. 전력구 터널 구간의 상부에는 지하철 터널이 위치하며 노선 중앙부에는 정거장이 위치해 있고, 지상부는 중심상업지역 및 군사보호구역으로 다수의 건물이 밀집되어 있다.

터널이 통과하는 지역의 지반특성은 그림 1에 보인 바와 같이 단층대 및 파쇄대가 다수 분포하고, 터널상부에 지하수위가 39m~63m의 범위에 분포하고 있으므로 지점에 따라 전력구 터널은 4.0kg/cm^2 이상의 높은 수압을 받게 된다. 본 쉴드터널의 방수기능은 25cm 두께의 세그먼트 라이닝이 담당하고 있는데, 해석구간 내에 파쇄대층이 존재하여 부분적으로 과도한 수압이 작용하는 지역에서 소규모의 누수현상이 발견되었다. 전력구 터널은 2.8m의 작은 내경으로 인하여 그라우트를 위한 천공작업기의 도입이 어려운 형편으로 누수가 발생하는 지역에서 소량의 조절 배수를 허용하여 수압을 저감시키는 방안이 대안으로 제시되었다.

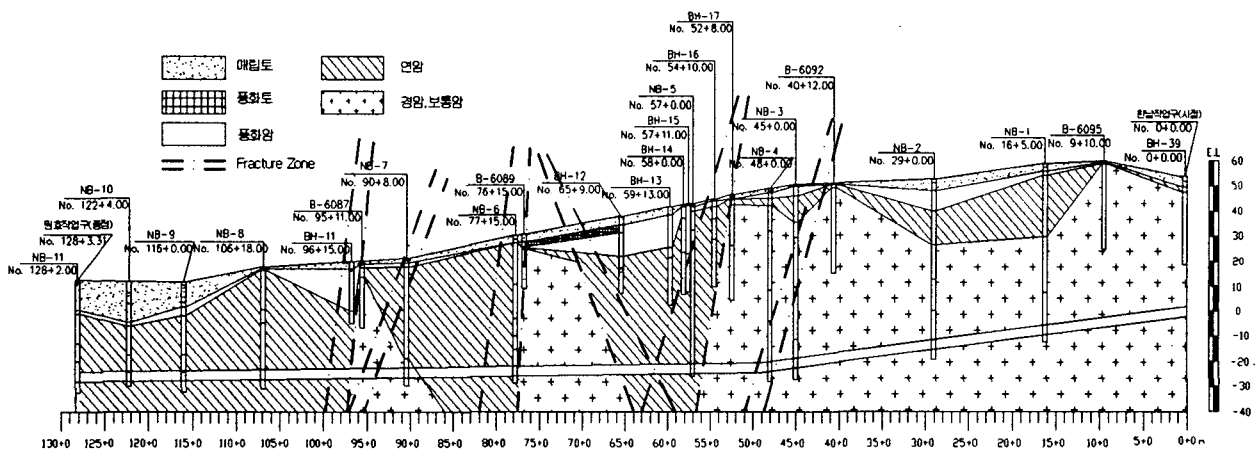


그림 1. 전력구 터널구간의 지질 종단면도

3. 해석단면과 입력정수의 결정

3.1 해석단면의 결정

본 해석모델 영역에서 가장 관심이 되는 지역은 단층파쇄대 구간 중에서도 터널내부로 누수가 발생하고 있는 지점(그림 2의 A)으로서 이 지역을 주 해석영역으로 결정하였으며, 터널의 횡방향 및 종방향의 분석한계는 누수지점과 지형도를 통한 지하수 분기선을 고려하여 결정하였다.

그림 2는 전력구 터널노선과 지하수 분기선을 나타낸 것으로 지하수 분기선을 넘어 지하수가 흐를 수 없기 때문에 터널구간에서 지하수 분기선을 고려하여 횡방향 분석한계를 150~300m로 선정하였다. 종방향 수평단면은 현장조사 결과 터널내부로 지하수가 유입되고 있는 구간 중 누수가 많이 일어나는 부분과 지질종단면상 단층파쇄대가 심한 지역이 중복되어 나타나는 구간으로 설정하여 200~260m로 결정하였다.

표 1에 보인 바와 같이 본 해석 구간의 지층은 지표로부터 매립토, 풍화토, 풍화암, 연암, 보통암, 경암의 순서로 분포되어 있으므로 각각의 시추공에서 조사된 지층 두께를 기준으로 지표면의 높이를 고려한 유한차분 요소망을 적절하게 분할하였다.

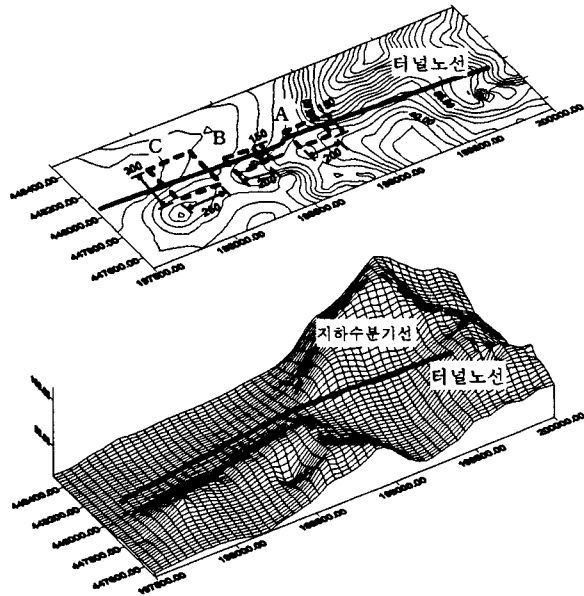


그림 2. 대상 터널의 분석한계 및 지하수 분기선

표 1. 수치해석 입력정수

층	특성	투수계수 (cm/sec)	투수계수비 (k_y/k_x)	총공극률 (n)	유효공극률 (n_e)	비산출율 (S_y)	비저류계수 (S_s)
매립토		1.00×10^{-3}	0.1	0.35	0.24	0.24	4.77×10^{-4}
풍화잔류토		7.70×10^{-4}	0.1	0.30	0.30	0.30	3.64×10^{-4}
풍화암		1.50×10^{-4}	0.1	0.10	0.10	0.10	2.50×10^{-4}
파쇄대 ²⁾		$10^{-2} \sim 10^{-4}$	0.01	0.10	0.10	0.10	2.53×10^{-3}
연암		1.13×10^{-3}	0.01	0.05	0.05	0.05	1.81×10^{-3}
경암		2.47×10^{-3}	0.01	0.05	0.05	0.05	1.34×10^{-3}

4. 지하수 흐름해석 및 결과분석

4.1 경계조건

전력구 터널로 인하여 지하수흐름의 영향이 미치지 않는 횡방향 분석한계 지점에서 측정된 지하수위를 좌·우측 격자에 정수두 경계조건(GL.-1.2~1.6m)으로 입력하였으며, 터널 하부에 설치되어 있는 유공관($\psi=200\text{mm}$)은 직사각형 격자형태로 모사하였다. 뒷채움 그라우트를 통하여 침투된 지하수가 유공관을 통하여 중력배수되는 유량($33\text{m}^3/\text{day}$)을 전력구 터널주변에 분포하는 암반의 종류에 대해 암반의 구성비와 투수계수비에 따라 표 2와 같이 유량을 분배하여 해석하였다.

표 2. 전력구 터널로 침투되는 각 층별 지하수량

암 반	분포비율 (%)	투수계수비 (%)	유량환산비 (%)	분배유량	
				(m^3/day)	($\text{m}^3/\text{day/m}$)
파쇄대	17.6	97.75	95.70	31.58	0.0718
연암	30.4	1.84	3.11	1.03	0.0014
경암	52.0	0.41	1.19	0.39	0.0003
계	100.0	100.00	100.00	33.00	0.0735

3.2 입력정수의 결정

수치해석을 이용한 흐름해석에서 필요한 입력정수는 지하수의 흐름특성과 저류특성 정수로 구분할 수 있다.

표 1에 나타낸 바와 같이 파쇄대를 제외한 각 층의 투수계수는 실시설계에 이용된 기존의 지반조사보고서를 참고하였으며, 파쇄대의 투수계수 및 저류특성의 인자들에 대하여는 Domenico (1972), Freeze and Cherry(1979), Walton(1989), 한정상(1998)등의 문헌을 참고하였다.

4.2 해석모델의 검증과 보정

파쇄대의 투수계수를 결정하기 위하여 3.2절에서 제시한 투수계수를 $10^{-2} \sim 10^{-6} \text{cm/sec}$ 범위내의 적절한 값을 택하여 반복적으로 연산을 실시하고 수압계의 실측치와 모사치가 일치되도록 시행착오과정을 통하여 결정하였다. 그림 3과 같이 투수계수를 변화시키면서 터널 라이닝에 작용하는 수압을 그래프로 나타내어, 현장계측치(44t/m^2)와 일치하는 투수계수($5.50 \times 10^{-4} \text{cm/sec}$)를 파쇄대의 투수계수로 결정하였다.

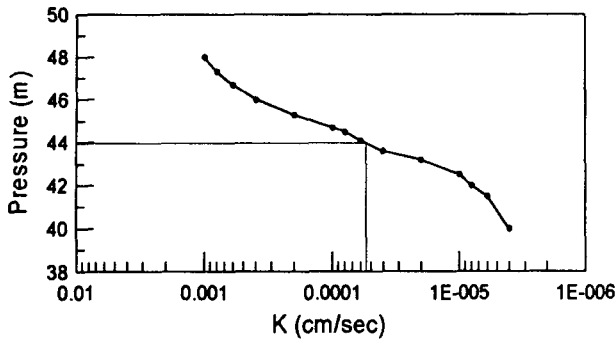


그림 3. 투수계수에 따른 라이닝에 작용하는 수압

사용된 프로그램 MODFLOW는 전 영역에서 물의 유·출입현상을 질량보존의 법칙에 기초하여 개발된 것이기 때문에 정상류 상태에서 모사영역내로 유입되는 전체수량과 전체 모사영역에서 외부로 배출되는 수량은 항상 동일해야 한다. 최종물수지(budget)는 정상류 상태에서 유입량과 유출량 사이에 약간의 차이가 발생하는데, 이를 오차(%) = $\left[\frac{\text{유입량} - \text{유출량}}{(\text{유입량} + \text{유출량})/2} \right]$ 로 나타내며, 일반적으로 오차는 1% 이내이어야 한다. 이러한 해석을 통하여 표 3과 같이 유·출입되는 지하수의 유동량이 동일한지 비교하여 모델을 검증한 결과 오차가 0.678%로써 허용범위 이내에 있는 것으로 평가되었다.

표 3. 해석영역에서의 지하수 유출입량

유입량 (m^3/day)	유출량 (m^3/day)	Balance (m^3/day)	오차 (%)
411.52	414.33	-2.81	-0.678

4.3 지하수위 저감공법의 모델링

본 전력구 터널은 지하 40m~70m에 위치하고 있어 파쇄대에서는 최대 4.8kg/cm^2 의 수압이 터널에 작용하고 있음을 계측 결과와 정수두 해석으로부터 파악할 수 있었다. 따라서 전력구 터널의 누수현상은 과도한 수압이 그 중요한 원인이 되므로 터널에 작용하는 수압을 저감시킬 필요가 있다. 본 연구에서 채택한 감압우물(relief well)은 유공관에서 세그먼트 라이닝과 뒷채움 그라우트를 천공하여 수압을 저감시키는 공법이다.

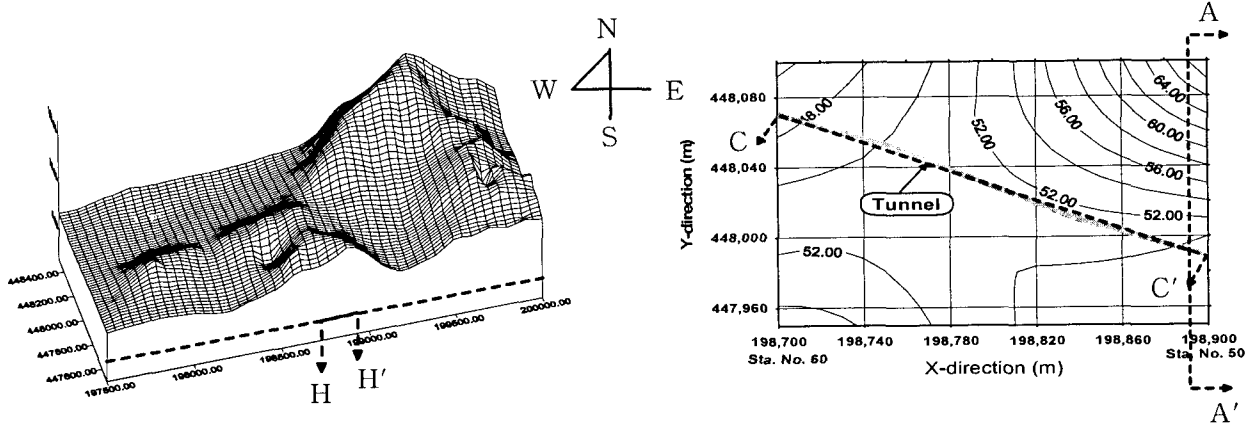
수치해석 모델상의 감압우물의 설치 간격은 수두저하 효과가 1.0m 이상 되는 곳을 감압우물의 효과가 있는 영향반경으로 고려하여 해석구간 길이 260m에 우물의 배치간격을 25m로 하여 총 9개의 복정 감압우물(multi relief well)을 설치하였다.

4.4 정상류 흐름 해석에 의한 수두 강하량

감압우물의 설치위치 및 대상지역의 수두강하량을 그림 4에 나타내었다. 그림 4(d)는 수평단면의 수두저하 분포를 보여주고 있는데, 전력구 터널인접지역의 수두저하량을 검토한 결과 경암부 4.2~8.6m, 파쇄대 5.8~8.2m로 나타났다. 파쇄대 지역에서 수두저하의 영향반경이 크게 나타나는 것은 파쇄대의 투수계수가 경암에 비하여 100배 이상 큰 관계로 감압우물의 수두저하 효과가 먼 거리에까지 미치고 배수량도 크기 때문으로 분석된다. 그림 4(e)는 횡단면에서의 수두저하량이며, 횡방향으로 약 80m 정도까지 수두가 1.0m 감소하는 경향을 보이고 있다. 수두저하 영향범위가 수직방향보다는 수평방향으로 넓게 나타나는 것은 절리가 횡방향으로 발달되어 있으며, 지층의 수직투수계수보다 수평투수계수가 크기 때문으

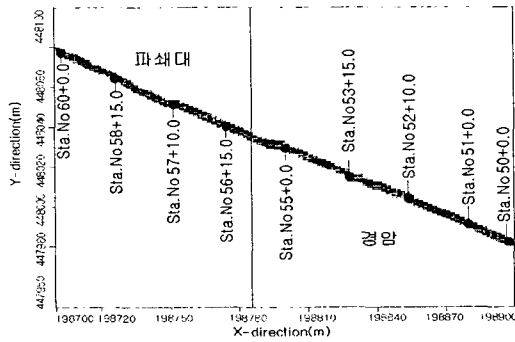
로 평가된다.

그림 4(f)는 해석대상지역의 종단면 확대 부분으로서, 전력구 터널에서 감압우물로 지하수를 배수함으로써 약 1.0m의 수두저하가 발생하는 영향범위는 GL. -14m지점에서 GL. -7m 까지이며, 전력구 터널 상부에 위치한 지하철 터널 주변의 수두저하는 0.4m로 매우 미미한 것으로 나타나고 있다.

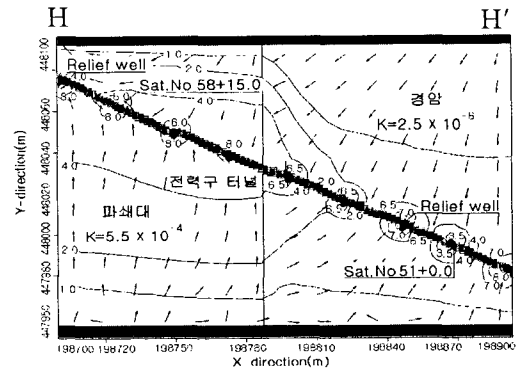


(a) 흐름해석 구간 위치도

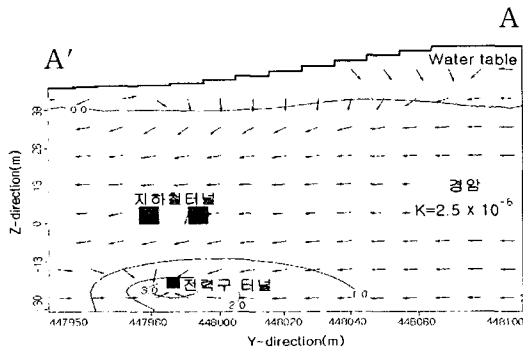
(b) 종·횡단면의 흐름해석 구간



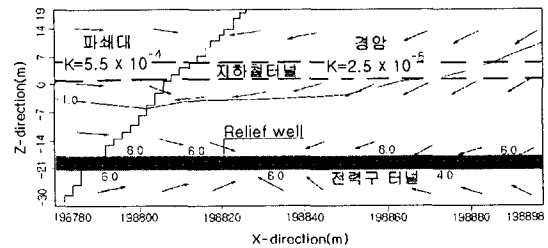
(c) Relief well 설치위치도



(d) 수평단면(전체)



(e) 횡단면(전체)



(f) 종단면(전력구 부분 확대)

그림 4. 감압우물을 고려한 정상류 흐름해석 결과

수치해석 결과의 타당성을 알아보기 위하여 터널내부에 계측기가 설치된 부분에 직경 1.5cm의 넓이로 세그먼트 라이닝과 뒷채움 그라우트를 천공하여 시험우물을 설치하고 지하수의 유입량을 24시간 동안 계측한 결과, 유입량은 0.168 m³/day이었다. 수치해석 결과 1.5cm 직경의 감압우물 설치시 유공관을 통하여 유입 예상되는 유량은 표 4와 같이 경암 및 연암부에서 0.189m³/day로 추정되었으며, 파쇄대 지역에 설치된 감압우물을 통한 유입량은 0.424m³/day로 경암 및 연암부보다 2.2배 정도 유입량이 많은 것으로 평가되었다.

표 4. 감압우물을 통한 유입수량

(단위 : m³/day/개소)

수치모델 예측치		계측치
경암 및 연암부	파쇄대	경 암
0.189	0.424	0.168

수치모델로부터 구한 유량이 시험시공시 계측된 유량보다 1.125배 크게 산정되었으나, 수치모델의 불확실성을 고려할 때 유입수량은 거의 일치하는 것으로 평가할 수 있으며, 수치모델의 유입수량 산정의 오차로 인한 수두저하량 변화가 터널의 안정성이나 유공관의 통수능력, 집수정의 용량에 영향을 거의 미치지 않을 것으로 사료된다.

5. 터널 주변에 대한 침하량 검토

전력구 터널주변의 침하가 발생하는 요인으로는 터널주변 암반의 간극수압 저하와 지하수 유동으로 인한 공동발생을 들 수 있다. 본 장에서는 현장 지반조건 및 수치모델 해석에 의한 수압저하량을 토대로 탄성론에 근거한 터널주변의 침하량 및 침하영향 범위를 산정하였다.

5.1 탄성론에 의한 즉시 침하량 산정식

흙이 탄성거동을 보인다면 지표면에서의 즉시침하량(S_i)은 식 1과 같이 지표면 아래 모든 깊이의 변형률(ϵ_v)을 적분함으로써 계산할 수 있다.

$$S_i = \int_0^z \epsilon_v dz = \int_0^z \frac{1}{E_s} (\Delta\sigma_v - 2\mu\Delta\sigma_h) dz \quad (1)$$

여기서, E_s : 흙의 탄성계수, $\Delta\sigma_v$: 수직응력 증가량, $\Delta\sigma_h$: 수평응력 증가량, μ : 포아슨 비
만일 탄성체의 깊이가 무한하다면, 지표침하량은 다음과 같이 산정된다.

$$S_i = q_0 \frac{B}{E_s} (1 - \mu^2) \alpha \quad (2)$$

여기서, q_0 : 순하중, B : 기초의 폭, α : 형상계수

본 대상지역과 같이 지하수위 저하에 의한 유효응력의 증가에 의하여 침하가 발생하는 경우는 기초폭 B 를 고려하지 않으므로 단위폭에 대한 해석을 실시하였으며, 형상계수는 1, 순하중 q_0 는 수위저하로 인한 유효응력의 증가분을 사용하였다.

5.2 침하량 산정 결과 분석

앞 장에서 언급한 수압저감도 분석 결과를 토대로 수압저감의 영향범위가 넓고, 수두저하량이 큰 Sta. No. 57 지점에서 지중 침하량을 산정하였다. 이 지점은 매립층, 풍화암, 연암, 파쇄대로 지층이 구성되어 있으며, 그림 5에서 나타낸 바와 같이 파쇄대 내에서 특히 큰 간극수압의 변화가 발생하고 있다. 따라서

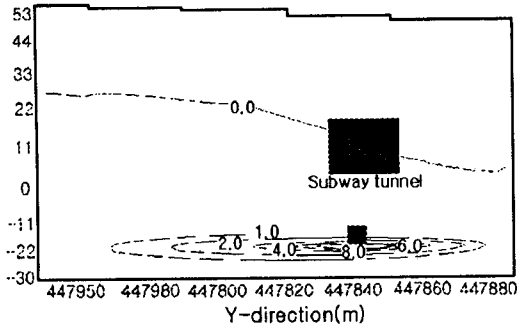


그림 5. Sta. No.57 지점의 수두저하 분포

본 연구에서는 간극수압 지하량을 기준으로 층을 나누고 각 층에서의 침하량을 산정하였으며, 터널이 위치한 지점의 최종 침하량은 각 층의 침하량을 누적하여 계산하였다(표 5 참조).

감압우물 주변의 침하량 산정결과를 그림 6에 2·3차원으로 나타내었다. 분석결과 경암부에서는 0.06mm의 침하량을 보이고 있으며, 파쇄대에서는 0.16~0.30mm의 침하량을 나타내고 있다. 수두강하량은 터널주변에서 가장 크기 때문에 최대 침하는 터널부분 Sta. No. 57에서 발생하였으며, 그 값은 0.3mm로 나타났다.

표 5. 각 층별 침하량과 전체누적침하량 (Sta. No. 57지점)

심도 (m)	지층	수두저하량 (m)	유효응력 증가분 (t/m^2)	침하량 (mm)
-11.0	파쇄대	0.5	2.75	0.052
-19.5	파쇄대	1.0	6.38	0.121
-20.2	파쇄대	2.0	1.05	0.019
-21.5	파쇄대	4.0	3.90	0.074
-21.8	파쇄대	6.0	1.50	0.028
-22.0	파쇄대	8.4	0.24	0.005
전체 누적 침하량				0.299

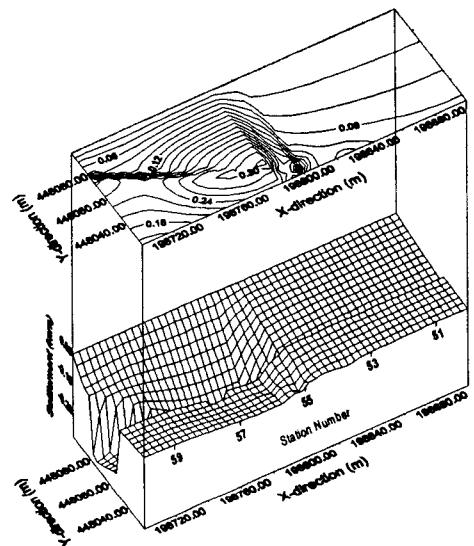


그림 6. 감압우물 주변의 침하량 산정결과

6. 결 론

전력구 터널구간 중 과도한 지하수압으로 인한 터널의 누수현상이 발생하는 지역에 대하여 지하수 분포와 흐름특성을 해석하고, 그 대처방안으로 감압우물을 채택하였을 때, 터널주변의 수압저감 효과를 지하수 흐름해석을 통하여 규명하였다. 또한 암반의 간극수압 저하로 인한 대상지반의 침하에 따른 영향을 검토한 결론은 다음과 같다.

(1) 실제지반조건과 지하수흐름을 수치해석으로 재현하기 위해 지하수 분기선과 누수발생지점 및 누수 위험 단면을 고려하여 횡방향으로 150~300m, 종방향으로 200~260m의 분석한계를 결정하였다. 정상류 해석을 통한 파쇄대의 투수계수를 현장의 지하수위 분포 및 수압 계측데이터를 적용하여 보정한 결과 $5.50 \times 10^{-4} \text{cm/sec}$ 로 평가되었다. 해석모델내의 물수지를 분석한 결과 모델의 전 영역에서 지하수의 유·출입량의 오차가 1% 이하로 나타났다.

(2) 전력구 터널과 지층상태를 고려한 정상류 흐름해석 결과, 파쇄대의 수두분포가 경암부의 수두분포보다 크게 나타났으며, 터널로 유입되는 소량의 지하수 유출로 인해 경암 및 연암부에서는 미량의 수두저하를 보이거나 파쇄대에서는 상대적으로 큰 투수성을 갖기 때문에 큰 영향이 없는 것으로 나타났다.

(3) 전력구 터널에서의 누수현상에 대한 대책의 하나로서 감압우물을 수치모델에 도입하여 경암지역과 파쇄대 지역의 터널 유공관 하부에 각각 1개소씩 단정으로 설치했을 때, 터널배면의 수두저하량은 각각 3.2m, 2.7m이었다. 감압우물의 간격을 25m로 복정 감압우물을 설치했을 경우에는 경암부에서는 약 4.2~8.6m, 파쇄대에서는 약 5.8~8.2m의 수압저감 효과가 있었다.

(4) 전력구 터널에 설치된 감압우물로 인한 수두저하에 따른 지중 침하량과 침하영향범위를 산정한 결과, 침하량 분포는 주로 수두저하량이 많은 파쇄대의 전력구 터널주변에서 크게 나타나는 경향을 보이고 있으나, 최대 침하량은 0.3mm로 극히 미소한 것으로 평가되었다.

참고문헌

1. 김상규(1997), 토질역학, 청문각, pp.296~299.
2. 한정상(1998), 지하수환경과 오염, 박영사, pp.84~86.
3. Domenico, P. A.(1972), "Concepts and Models in Groundwater Hydrology", McGraw-Hill, N.Y., pp.405.
4. Freeze, R. A., and Cherry, J. A.(1979), "Groundwater", Prentice-Hall, pp.29.
5. Hoek, E. & Bray, J. W. (1981), "Rock Slope Engineering", IMM, pp.127~149.
6. Walton W. C.(1988), "Groundwater Pumping Tests", Lewis Publishers Inc., pp.9~34.