

하저터널주위의 지반조건별 지하수 유입량에 관한 분석

An analysis on the inflow to deeply located tunnels by confined groundwater flow

정일문*, 허준석**, 허준행***, 조원철****

1. 서론

터널을 통한 지하수의 과도한 유입량은 굴착작업의 난제가 되고 있으며, 완공후에도 터널의 안전도면에서 신중하게 고려되어야 할 과제가 되고 있다. 터널을 통한 흐름분석은 지하수의 침윤해석으로 가능하며, 이는 다공성 매질 상부에 압층이 존재하는 피압침윤(confined seepage)과, 상부 지하수면에 대기압이 작용하는 비피압침윤(unconfined seepage)의 두 가지로 나눌 수 있다. 수리지질학적인 견지에서 터널의 역할은 단순히 배수시설(drain)로 볼 수 있다(Freeze와 Cherry, 1979; Rushton과 Redshaw, 1979). 다공매질내에서 무한하게 긴 터널압력이 대기압과 같고, 터널상부의 지하수위가 일정하게 유지된다고 가정하면, 정상상태의 흐름망을 구성할 수 있고 매질의 수리전도도를 알 수 있다면, 흐름망 해석을 통해 지하수 유입율을 구할 수 있다. 지하수위가 강하하지 않는다면, 정상상태가 유효하나, 낮은 공극률과 비저유율을 갖는 암반층을 고려하면, 정상상태가 유지되지 않고 수두가 감소하여, 유입율이 시간에 따라 줄어들 것으로 예상된다. 해저나 하저의 깊은 곳에 설치된 터널의 경우는 터널의 굴착으로 인한 수면의 저하가 쉽게 보충되므로 시간에 따른 상부수위의 변화를 무시하고 일정하게 취급할 수 있다.

김승렬 등(1993)은 배수형 터널과 방수형 터널의 특징에 따른 시공방안을 제시하였으며, 이인모 등(1993)은 터널설계시의 지하수압을 고려한 복공설계를 제안하였다. Chisyaki(1984)는 피압흐름이 진행되는 터널에서의 다양한 조건변화에 따른 유입량을 예측하였다.

본 연구에서는 해저 및 하저터널내로의 지하수 유입량을 결정하기 위해 유한요소법을 이용한 2차원 침윤해석을 수행하였다. 지하 개구부를 통한 지하수의 흐름과 포텐셜 분포는 암반의 투수성과 터널상부의 두께, 불투수 기반암의 위치와 그 밖의 변수들에 의존함을 확인하였고, 터널의 제원과 흐름조건 및 지반의 투수조건등을 변화시켜가면서 유입량의 변화와 포텐셜분포 등을 검토하였다. 본 연구의 성과는 지하 심부에 터널공사를 할 경우 지하수문제를 대처하는 한 방안으로 제시될 수 있으며, 터널을 그라우팅한 경우의 유입량도 검토하였다. 본 연구의 결과를 통해 Chisyaki(1984)의 결과를 재확인하였으며, 몇 가지 사항을 추가하여 검토하였다.

2. 본론

본 연구에서는 암반을 다공성매질로 가정하여, 연속방정식과 Darcy의 운동방정식을 결합한 정상 지하수 흐름방정식을 지배식으로 하여 유한요소법을 이용한 유동해석을 수행하였다. 지하수 흐름에 있어 포텐셜은 위치수두와 압력수두의 합으로 구성되며, 포텐셜에 대해 방정식을 풀 때,

* 연세대학교 토목공학과 박사과정

** 연세대학교 토목공학과 석사과정

*** 연세대학교 토목공학과 조교수

**** 연세대학교 토목공학과 교수

경계조건은 그림 1에 나타난 바와 같이 상부경계는 총수두값이 주어지며, 터널내부의 압력이 대기압과 같으므로 터널경계는 위치수두의 값만을 주었다. 터널의 기하학적 형상을 고려하여 유한요소망을 구성하였고, 결과치로 격점에서의 수두값, 각 요소에서의 유속을 구하고 이를 통해 터널 단면을 통과하는 유입량을 산정하였다.

2.1 균질·등방 투수성 매질을 통한 유입량

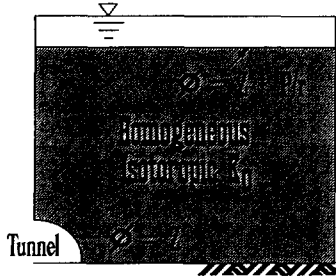


그림 1 균질·등방성 매질을 통한 단면

터널을 통과하는 이상적인 피압지하수 흐름의 개념적 단면은 그림 1과 같다. 터널바닥에 불투수 암반이 존재하는 경우 그림 1에서와 같이 1/4원형터널의 중심으로부터의 상부두께와 투수계수(K_0)가 고정되었다는 가정하에 자유수면의 수심을 각각 10, 20, 30, 40m로 증가시킴에 따른 포텐셜과 터널내부로의 유입량의 변화를 살펴보았다. 상부 압력인 수심이 증가함에 따라 유량비(Q_0/K_0)는 Chisyaki (1984)의 결과와 마찬가지로 선형증가의 양상을 보였다.

2.2 균질·이방성 매질을 통한 유입량

퇴적암반의 경우는 수평·수직 투수계수가 서로 같지 않은 경우가 존재한다. 수평투수계수 K_x 가 연직투수계수 K_y 보다 큰 경우가 존재하며, 특히 절리(jointed)암반에서는 절리방향으로의 투수계수가 그에 연직방향인 투수계수보다 크다. 이처럼 수평투수계수와 연직투수계수가 다른 경우에 대해서 K_y/K_x 의 변화에 따른 유입량비 Q_y/Q_0 를 구하였다. 다음의 그림은 상호연직(orthotropic)투수성 매질내에서의 투수계수의 비를 변화시켜 얻은 실험 결과치들을 나타낸 것이다. 등수두선의 분포에서 K_y/K_x 가 작을 때는 장축이 긴 타원형의 양상을 나타내며, K_y/K_x 가 클 때는 원형에 가까워짐을 보였다.

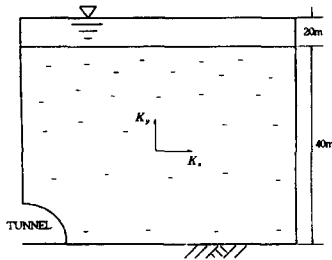


그림 2 터널 주변의 수평 수직 투수계수의 비가 다른 경우의 단면

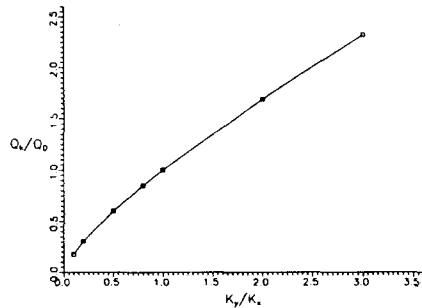


그림 3 투수계수비에 따른 유량비

그림에서 Q_k 는 주어진 투수계수비 (K_y/K_x)에서의 유량이고, Q_0 는 $K_y/K_x=1$ 인 경우의 유량이다. 그림 3의 결과는 Chisyaki(1984)의 결과와 유사한 경향을 보였으며, 곡선의 회귀식은 $Q_k/Q_0=0.977(K_k/K_0)^{0.8}$ 로 산정되었다.

2.3 비균질·등방성 매질을 통과하는 유입량

터널 주변의 일부분이 고투수성 매질인 경우인 비균질·등방성 매질을 통한 유입량을 검토하였다. 유량 Q_0 는 균질이고, 등방성인 투수계수 K_0 를 가진 영역을 통과하는 유입량이고, Q' 은 투수성이 큰 비균질 영역이 존재하는 경우 터널을 통과하는 유입량이다. R 은 반원 터널의 반경이다. 그림에서 보는 바와 같이 고투수성 지역이 y 방향과 평행한 경우는 투수계수의 비($K'/K_0=5.0, 2.0$)에 관계없이 특정값에 접근함을 볼 수 있으며, 고투수성 지역이 x 방향과 나란한 경우가 y 방향과 나란한 경우보다 유입량의 변화가 완만하며, 투수계수비에 따른 값의 차이도 큰 것으로 나타났다.

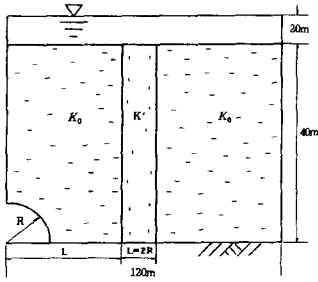


그림 4 고투수지역(수직방향)을 통과하는 터널의 단면

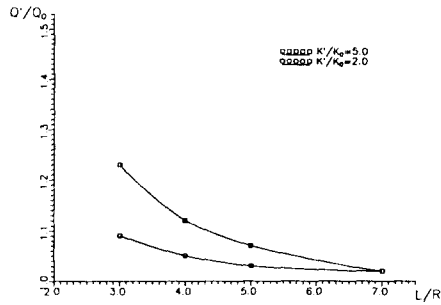


그림 5 Q'/Q_0 과 L/R 사이의 관계(고투수지역이 y 방향일 경우)

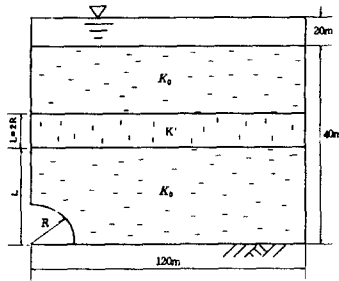


그림 6 고투수지역(수평방향)을 통과하는 터널의 단면

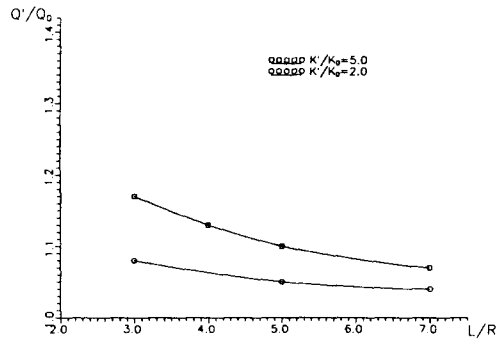


그림 7 Q'/Q_0 대 L/R (고투수지역의 주방향일 경우)

2.4 비균질·이방성 매질을 통과하는 유입량

터널 주변의 매질은 다양한 형태로 존재할 수 있으며, 투수성의 공간적 변동에 따라 유입량에도 변화가 예상되어 비균질·이방성을 고려한 유입량을 검토하였다. 그림 8에서 터널 주변은 가상적으로 4개 부분으로 나뉘며, A지역에서의 투수계수를 기준으로 B, C지역에 각각 A지역 투수계수

의 80%와 50%를 적용했고, 이방성을 나타내기 위해 각 지역의 x, y방향 투수계수비(K_y/K_x)를 0.3, 0.5, 0.8, 1.0, 1.2, 1.5, 2.0으로 증가시켜가면서 터널내의 유입량을 비교하였다.

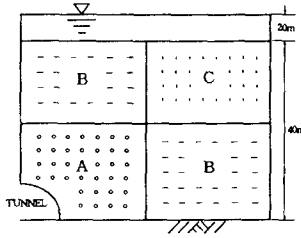


그림 8 비균질 투수성 매질의 개념도

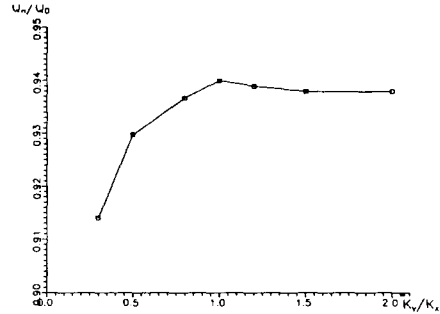


그림 9 비균질 이방성 매질을 통한 유입량의 변화

그림 9의 결과는 투수계수비의 변화에 따른 비균질 매질에서의 터널내의 유입량과 균질일 때의 유입량의 관계이다. 유량비는 투수계수비가 $0 < K_y/K_x < 1$ 인 경우 균질인 경우의 90%이상을 유지하며, $K_y/K_x > 1$ 일 때는 특정값에 수렴하는 양상을 나타냈다.

2.5 터널주변 균열범위에 따른 굴착중 유입량 검토

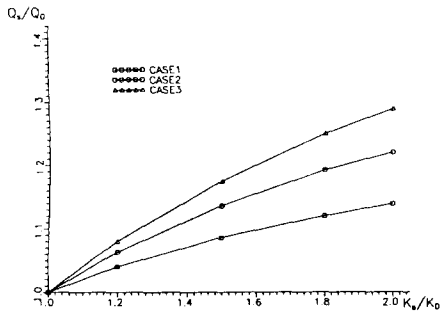


그림 10 균열을 가진 터널주변 투수계수비 대 유량비
량비는 균열의 범위가 넓어질수록 비례해서 커지는 것으로 확인되었다.

터널주변의 그라우팅효과로 인한 터널내 유입량 감소와는 반대로 터널의 굴착으로 생긴 균열로 인한 터널주변 투수계수의 증가에 따른 터널유입량을 검토해 보았다. 균열의 분포범위에 따라서 3가지 경우로 검토하였는데, 터널 반경을 기준으로 반경의 1배인 경우를 CASE1, 반경의 2배인 경우를 CASE2, 반경의 3배인 경우를 CASE3로 나타내었다. 각 CASE에 대한 결과를 종합해 볼 때 투수계수비가 1.0~2.0인 범위에서 유

2.6 불투수 기저암반이 경사진 경우의 유입량 검토

그림 11과 그림 12에서와 같이 불투수 기저암반이 상향 혹은 하향으로 경사진 경우 터널로의 유입량을 검토하였다. 여기서, Q_s 는 터널바닥하부가 경사졌을때의 유량이고, Q_0 는 터널바닥의 기준면이 수평인 경우의 유입량이다. α 는 상향경사각을 $-\alpha$ 는 하향경사각을 나타낸다. 주어진 경사각들은 단면의 수평거리에 대한 수직거리의 비로 산정된 값들이다. 그 결과 위의 값들은 상향 경사를 가졌을 경우, 경사가 급할수록 터널내 유입량은 감소하며, 하향의 경사를 이룰 때에는 경사가 급해질수록 터널내 유입량은 증가한다. 따라서 터널하부바닥의 경사형태가 상·하향여부에

따라 터널내 유량비(Q_s/Q_0)는 감소·증가한다.

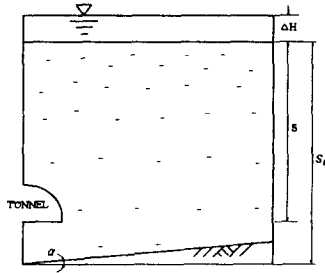


그림 11 터널바닥하부가 상향경사를 이룰 때의 단면

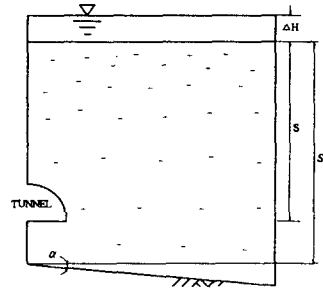


그림 12 터널바닥하부가 하향경사를 이룰 때의 단면

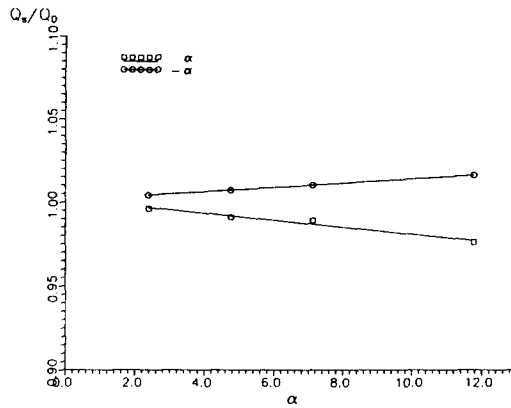


그림 13 상·하향경사와 유량비(Q_s/Q_0)와의 관계

3. 결론

본 연구에서는 다양한 매질조건의 변화에 따른 터널내로의 유입량의 변화양상을 검토한 것으로 결론은 다음과 같이 요약될 수 있다.

(1) 압층으로 작용하는 상부수위가 증가할수록 터널내로의 유입량은 거의 선형으로 증가함을 알 수 있었으며, 터널상부의 두께가 커짐에 따라 유입량도 증가함을 재확인하였다.

(2) 이방성 투수계수비(K_y/K_x)의 증가에 따라 유입량의 비도 증가하며, 곡선의 형태는 멱지수 형으로 그 회귀식은 $Q_k/Q_0 = 0.977(K_k/K_0)^{0.8}$ 로 산정되었다

(3) 대상지역내에 고투수성영역이 존재하면 유량은 증가되며, x축, y축 방향과 나란하게 일정한 두께로 고투수성 영역이 존재할 때, x축에 나란한 경우는 y축에 나란한 경우보다 완만한 변화를 보였으며, 두 경우 모두 L/R값이 증가함에 따라 일정한 값에 수렴하였다.

(4) 투수성이 터널주변에서 가장 크고 터널로부터의 거리가 증가할 수록 감소하는 공간적 변

화를 보일 때 비균질 매질에서의 터널내의 유입량과 균질일 때의 유입량의 비를 투수계수비에 대해 검토한 결과 $0 < K_y/K_x < 1$ 인 경우 증가추세를 보이며, $K_y/K_x > 1$ 일 때는 특정값에 수렴하는 양상을 나타냈다.

(5) 터널의 굴착으로 생긴 균열로 인해 투수계수의 증가에 따른 터널유입량의 변화를 고려한 결과 균열의 범위에 비례하여 유입량도 증대됨을 확인하였다.

(6) 터널하부 불투수층이 수평면에 대해 상향경사를 이루었을 경우, 경사각이 커질 수록 터널내로의 유입량은 감소하며, 하향의 경사를 이룰 때에는 경사가 급할수록 터널내 유입량이 증가하는 것으로 나타났다.

4. 참고문헌

- 김승렬 외, “배수형 터널과 방수형 터널의 설계와 시공”, 지반공학과 터널기술, 93년도 봄 학술발표회 논문집, 한국지반공학회, pp.49~57, 1993.
- 이인모 외, “터널설계시 지하수의 고려방안 연구”, 지반공학과 터널기술, 93년도 봄 학술발표회 논문집, 한국지반공학회, pp.1~8, 1993.
- 한정상, 지하수학 개론, 박영사, 347p, 1983.
- Chisyaki, T., “A study on confined flow of ground water through a tunnel”, *Groundwater*, Vol.22, No.2, pp.162~167, 1984.
- Freeze, R.A. and Cherry, J.A., Groundwater, Prentice Hall, 1979.
- Istok, J., Groundwater Modeling by the Finite Element Method, American Geophysical Union, 493p, 1989.
- Rushton, K. R. and Redshaw, S.C., Seepage and Groundwater Flow, John Wiley & Sons, 1979.
- Strack, O.D.L., Groundwater Mechanics, Prentice Hall, 1989.