

현장수압시험결과의 통계처리를 이용한 암반터널의 용수량예측기법 사례연구 A Case Study of Predicting Groundwater Inflow Into Hardrock Tunnels Based Upon In-Situ Packer Test Data

박준경¹⁾, Jun-Kyung Park, 박영진¹⁾, Young-Jin Park, 최영태¹⁾, Young-Tae Choi, 이대혁²⁾, Dae-Hyuck Lee

¹⁾ 삼보기술단 지반공학부 대리, Junior Engineer, Geotechnical Dept., Sambo Eng. Co., Ltd.

²⁾ SK건설(주) 기술연구소 선임연구원, Senior Researcher, Research Institute., SK Construction Co., Ltd.

SYNOPSIS : The accuracy of inflow into tunnel estimates depends largely on how well permeability is characterized. But, the average of the packer test results will always underestimate the upper end of the permeability range, and therefore underestimate the inflow. Taking an average of the test results always underestimates inflow because the average permeability does not really exist. The distribution of packer-test data may not accurately reflect permeability, however, due to the limits of the test method and the luck of the field investigation. These discrepancies may be overcome by using Raymer(2001)'s log-normal plots and Heuer(1995)'s histograms of the data to develop a permeability model that will be used in lieu of the data to calculate inflow. Furthermore, the influence on the inflow is examined by the geological characteristics based upon the hundred times of packer test ○○ tunnel project.

Key words : inflow, permeability, in-situ packer test, rock excavation, hardrock tunnel

1. 서론

근래 들어 터널굴착으로 인한 용수량의 예측을 위해 수치해석적 기법의 발전결과를 활용한 다양한 종류의 해석적 접근방식이 시도되고 있다. 또한, 근래 들어서는 높아진 환경문제에 대한 관심을 반영하여 터널의 굴착으로 인한 전체 지하수계의 거동을 고찰하고, 공사중 및 완공후의 오염물질 확산에 의한 주변지역의 환경에 미치는 영향을 검토하는 등의 다양한 해석적 방법이 시도되어 지고 있다. 그러나, 이러한 해석기법의 적용 이전에 무엇보다도 중요한 것은 용수량 예측에 절대적인 영향을 미치는 인자인 암반의 투수특성, 즉, 투수계수를 얼마나 합리적으로 추론할 수 있는가에 있으며, 이를 위해 개선된 형태의 다양한 현장시험기법이 도입되어 적용되고 있다.

특히, 최근에 실시되는 T/K 및 대안설계등의 경쟁설계시에는 수백회에 달하는 수압 및 투수시험이 실시되어 터널이 위치하게 될 지반의 수리특성을 파악하고자 하고 있으나, 그 결과의 활용에 있어서는 단순히 그 결과의 산술평균치(mean)만을 이용하여 전체 터널연장을 고려할 때 존재하지 않는 평균치 개념의 용수량을 예측함으로써 실제 굴착시에는 활용도가 매우 낮은 문제점을 내포하고 있다. 실제로 터널굴착시 발생가능한 과대용수량 구간의 유입량 예측에 있어서는 높은 투수계수 값(upper end of the

permeability)이 중요하나 이를 고려한 충분한 검토는 이루어지지 못하고 있는 실정이다.

또한, 굴착중인 터널내로의 유입량 예측은 다음과 같은 몇 가지 이유로 인한 한계점을 내포하고 있다.

- ① 터널건설 굴착예정지역의 지질조건 및 지반상태에 대한 충분한 이해부족
- ② 유입방정식의 가정조건과 실제 현장상황과의 차이
- ③ 현장시험에서 얻어진 자료를 해석프로그램에 그대로 적용할 수 없는 문제점
(가압단계별 투수계수 변화등을 모사하기 어려움등)
- ④ 현장시험을 통해 얻어진 투수계수등의 자료분석기법상의 문제점
- ⑤ 현장조사 자료의 부족으로 인한 다량의 용수유입 예상지역 예측 불능

이러한 문제점의 해결을 위해 본 연구에서는 현장수압시험결과의 통계처리과정을 통한 ③, ④ 문제점의 개선방안에 대한 소개 및 실제 적용사례와, 또한 ⑤ 문제점의 개선에 초점을 맞추고자 Heuer(1995)와 Raymer(2001)등의 연구결과를 바탕으로 국내 산악암반터널 건설예정부지에 대한 수백 회에 달하는 현장수압시험결과를 통계학적기법을 활용하여 분석하고 이를 이용한 터널내부로의 용수량예측을 수행하였다. 이로부터 암반터널의 합리적인 용수량 예측기법을 제시하고자 하였으며, 특히, 암반의 지질학적인 특성이 예상 터널유입량에 미치는 영향을 함께 검토하였다. 또한, 사례분석을 바탕으로 통계특성을 이용한 투수영역 구분에 의한 예상유입량 예측기법의 도입을 통해 과다용수예상구간에 대한 합리적인 예상 유입량 산정기법에 대한 개선방안을 모색해 보고자 하였다.

2. 통계모델의 이론적 고찰

2.1 서론

일반적으로 암반층의 투수계수를 구하기 위해 실시되는 현장수압시험(packer test)의 결과로부터 암반 상태에 따른 정확한 투수계수를 예측할 수는 없지만, 오차요소들을 극복하기 위한 방법으로 실험자료의 대수정규분포도(log-normal plots)를 사용하는 방법이 제안되었다. 이러한 통계학적인 기법은 단순히 현장수압시험 결과의 산술평균치(mean) 만을 취하여 터널내로의 용수량을 예측한다면 예상유입량에 절대적인 영향을 미치는 높은 투수계수 값들을 무시하게 되어 과소평가할 수 밖에 없다는 점에서 착안하여 개발되었다. 지금까지의 여러 연구결과에 의하면 대체적으로 절리(fracture)의 폭은 지수분포특성(exponential distribution)을 보이며, 길이는 대수정규분포(log-normal distribution) 특성을 보이는 것으로 나타났으며, 또한 절리에 의해 지배되는 암반층의 투수계수 역시 대수정규분포를 따르는 것으로 알려져 있다. 이러한 연구결과를 바탕으로 경암지반에 건설되는 터널내로의 유입량 방정식의 적용 및 투수계수를 구하기 위한 현장실험자료의 분석측면에서는 Heuer(1995)의 이론에 근거하여 통계모델을 이용하여 합리적으로 투수계수를 산정하고, 이를 바탕으로 유입량을 예측하는 기법이 개발되었다. 본 절에서는 미국의 Geogia주의 Chattahoochee 터널설계시 적용되었던 용수량 예측기법 사례를 통해 투수계수의 통계모델을 소개하였다((2), (3)).

2.2 투수방정식

유입량예측식은 Goodman(1965)의 이론을 바탕으로 이를 수정한 Heuer(1995)의 식을 사용하였다. Goodman식은 기본적인 가정조건으로 터널내로의 정상류 지하수 흐름과 우물로 흐르는 반경방향 흐름의 정상류에 대한 Theim 방정식을 이용하고 있다. Heuer(1995)는 경암지반에 건설된 터널의 관측자료로부터 터널내로의 유입량은 투수계수에 직접적으로 비례한다는 Theim 방정식이 타당함을 발견하였고, 실제 터널내부로의 유입량은 Goodman식에 의해 구해진 유입량의 1/8 정도가 됨을 제안하였다(식 (1)).

$$Q_L = \frac{2\pi KH}{\ln\left(\frac{2z}{r}\right)} \times \frac{1}{8} \quad (1)$$

여기서, Q_L 은 터널 단위길이당 유입율, K 는 투수계수, H 는 터널중심에서의 수두, z 는 포화된 암반의 두께, r 은 터널의 반경, 그리고 $1/8$ 은 Heuer의 감소계수이다.

2.3 투수방정식의 가정사항 및 인자특성

기본적으로 Goodman모델은 아래와 같은 4가지 가정사항을 내포하고 있다.

- ① 터널은 무한히 길며, 수위는 터널 천단부 가까이까지 저하되지 않는다.
- ② 터널위의 z 높이에서 호수나 강과 같은 무한한 공급원이 있어서 터널내부로의 유입으로 인해 고갈되지 않는다. 즉, 수두(H)는 이러한 공급원의 바닥(z) 높이보다 적어도 같거나 그 이상이어야 한다.
- ③ 터널과 공급원 사이 암반의 투수계수(K)만이 유입율을 제한하는 유일한 인자이다.
- ④ 흐름은 정상류 상태이고 지반은 등방의 균질한 지반조건을 가진다.

경암지역에 건설되는 대부분의 암반터널은 무한공급원의 가정(②)은 만족하고 있다고 볼 수 있으며, 이러한 공급원이 터널이 위치한 기반암보다 다공질의 투수성이 좋은 두꺼운 포화대를 지니고 있다면 반드시 호수나 강과 같은 조건일 필요는 없을 것이다. 또한, ④번 가정은 암반터널에 있어서는 비합리적이며, 이러한 효과를 고려하기 위해 Heuer(1995)는 앞 절에서 언급한 바와 같이 경험적인 감소계수 $1/8$ 을 도입하였다. 비록 Heuer(1995)의 식이 수학적으로 완벽히 증명되지는 못하지만, 다공질매체에서의 흐름을 가정한 Goodman식에 비해 암반터널의 절리특성을 따른 흐름을 어느 정도 합리적으로 고려할 수 있을 것으로 사료된다.

2.4 투수방정식의 인자

앞에서 제시한 유입량 방정식은 4개의 변수를 가지고 있으며, 각각의 변수들은 방정식 내에서 서로 다른 거동을 한다. 즉, r 은 상수이나, H 는 선형적으로 변하며 유입량에도 선형적인 영향을 미친다. 그러나 z 는 선형적으로 변하지만 유입량에 대수적인 영향을 미치며, K 는 지수적으로 변하지만 유입량에 점증적인(cumulative) 영향을 주게 된다. 실용적으로는 r 은 터널단면을 등가의 원으로 환산한 반경을 구하여 산정할 수 있으며, H 와 z 는 터널 축선을 따라 시추데이터와 탐사결과등을 이용한 수리지질학적인 공학적 판단에 근거하여 구할 수 있고, K 는 현장수압시험을 통해 구하게 된다.

통계적인 활용기법 측면에서 살펴 보면, H 는 선형적으로 변하고 선형적인 영향을 주게 되므로 고려하는 터널연장상에서 H 의 산술평균(average)을 구하여 적용할 수 있으며, z 는 선형적으로 변하지만 대수적인 영향을 주므로 z 에 \log 를 취한 값의 평균을 구하여 적용하여야 한다. 또한, K 는 절리의 폭(width)을 고려하면 지수적으로 변하게 되지만, 유입량에는 선형적인 영향을 주게 되므로 통계학적인 분포로써 평가된 후에 유입량 산정에 적용되어야 함을 알 수 있다.

2.5 투수계수의 통계학적 모델링

기존의 연구결과에 의하면 통계분포로부터 판단할 때 암반터널 내부로의 대부분 유입량은 터널 전연장을 고려할 때 투수계수가 높은 일부구간의 아주 적은 연장에 의해서 좌우된다. K 를 산술평균값을 이용하여 유입량을 계산할 수도 있으나, 이러한 방법은 터널 전연장에 걸친 투수계수의 잠재적인 변화가능성을 무시하게 되는 것이다. Heuer(1995)는 실험결과의 통계학적인 분포는 터널에서의 투수계수분포를 대변한다는 가정을 바탕으로 터널 전 연장에 걸친 투수계수의 통계학적인 분포를 평가하기 위해 수

압시험결과의 히스토그램(histogram)을 사용하였다(그림 1). 즉, 유입량에 영향을 미치는 가장 큰 인자는 히스토그램 상에서 소수의 상한값영역(high-end tail)임을 명확히 증명하였으며, 히스토그램상의 나머지 부분은 유입량에 상대적으로 미소한 영향을 미침을 밝혔다. 그러나, 히스토그램이 투수계수분포를 매우 명확히 나타내기는 하지만 유입량 예측에 있어서는 소수의 상한영역(high-end tail)의 값에 모든 가중치를 두고, 나머지 실험결과들을 무시하게 되므로 과도한 용수량이 예측될 가능성이 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 Raymer(2001)는 실험결과를 직접 유입량 예측에 적용할 것이 아니라 투수계수의 예측모델을 개발하여 유입량 예측을 실시할 것을 제안하였다.

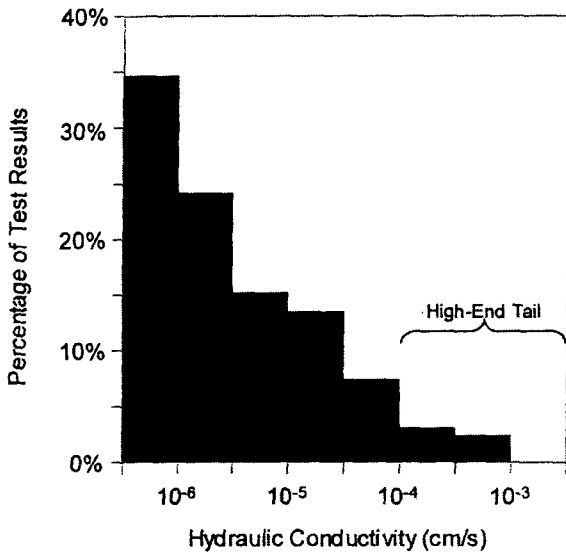


그림 1. 298회의 수압시험결과의 Histogram

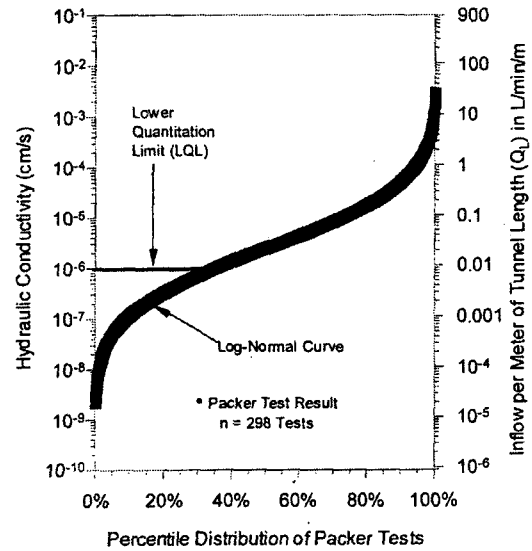


그림 2. 수압시험결과의 누적분포곡선

이를 위해 누적분포곡선(cumulative curves, 그림 2)을 이용하였으며, 각 시험의 Percentile은 아래의 식 (2)를 이용하여 계산하였다.

$$P_i = \frac{i}{(n + 1)} \quad (2)$$

여기서, i 는 각 시험의 번호 즉, 1(최소 투수계수)에서 n (최대 투수계수) 값을 가지며, n 은 전체 시험회수이다. 각 Point의 Percentile을 계산하여 작은 값에서 큰 값으로 순서대로 정렬한 후 투수계수와 Percentile을 도시화 한다. 투수계수 값을 y 축의 원편에 도시하고 터널의 단위길이당 유입량(실험치)을 y 축의 오른편에 도시하여 나타낸다. 유입량 하한치는 기존의 연구결과에 따라 터널연장과 수두조건을 고려하여 무시할 만한 적은 유입량을 나타내는 투수계수 값을 선정하도록 하였다.

그림 2.에서 볼 수 있는 바와 같이 LQL을 제외한 나머지 점들은 대수정규분포특성을 가지는 것으로 나타난다. 투수계수는 지수적으로 변화하는 특성을 가지고 있으므로 실험결과가 대수정규분포 특성을 가지는 것은 적합하다고 간주할 수 있다. 게다가 지금까지의 연구결과에 의하면 절리암반영역에서 절리의 길이와 폭, 밀도는 대수정규적으로 분포하므로 절리의 투수계수는 이러한 특성에 의해 지배됨을 고려할 때 대수정규적으로 분포하게 된다.

그러므로, 앞의 그림에서 x 축을 정규분포(normal distribution (probability))로 바꾸고, y 축을 대수축으로 바꾸는 축변환을 통해 대수정규곡선(log-normal curve)이 직선으로 나타내어지게 된다(그림 3). 이때 x 축 및 y 축 변환은 아래의 식으로 이루어진다.

$$x = \sigma(P_i)$$

$$y = \log K$$
(3)

여기서, $\sigma(P_i)$ 는 각 실험에 대한 Percentile 값, P_i 의 표준 정규 누적 분포의 역함수(inverse normal distribution function)이다.

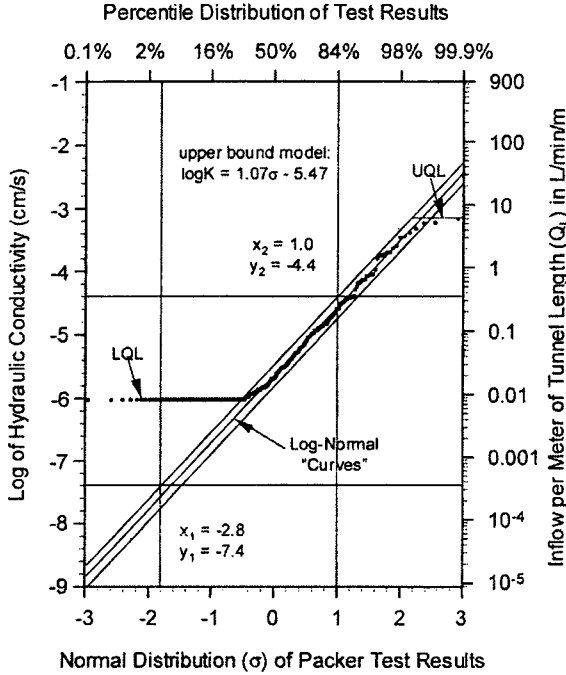


그림 3. 수압시험결과의 대수정규분포곡선

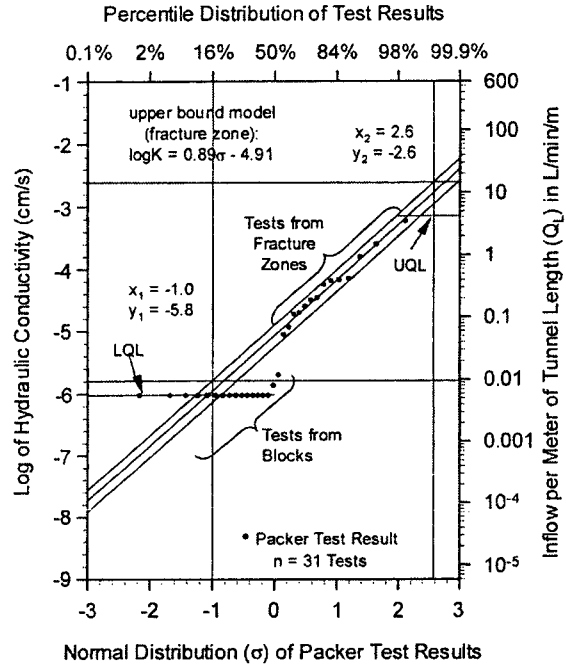


그림 4. 수압시험결과의 대수정규분포곡선

유입량 상한치(UQL, upper quantitation limit)는 Packer 시험과정 절차나 지질학적인 요인들에 의해 야기될 수 있다. 이러한 원인은 대부분 높은 유입을 하에서 시험장비의 한계성에 근거하게 되는 것으로 알려져 있으며, 만일 이러한 한계가 지질학적인 원인에 의해 야기된다면 투수계수 모델은 자연적인 경계조건을 반영할 수 있도록 수정이 필요하게 된다.

2.5 유입량 산정기법

앞 절의 결과를 이용하여 최종적으로 얻어진 대수정규분포곡선을 이용하여 세 개의 상관선(correlation line)을 얻을 수 있으며, 이 세 개의 직선은 유입량 예측에 사용되는 투수계수 모델에 해당한다. 중간선은 유입량을 과대하게 예측할 확률과 과소하게 예측할 확률이 모두 50%인 모델이며, 상한선은 과소하게 예측할 확률이 매우 작아지는 모델, 하한선은 과대하게 예측할 확률이 매우 작아지는 모델에 해당한다. 이 세 개의 직선은 다음의 3가지 규칙에 의해 작성하여야 한다.

- ① 모든 세 개의 직선은 서로 평행하다.
- ② 중간선은 상한선과 하한선사이에서 등간격을 가지는 선이다.
- ③ 상한선과 하한선은 LQL과 UQL 사이에서 모든 점들을 포함해야만 한다.

데이터가 많은 경우 상한선과 하한선이 정확히 유입량의 범위를 예측하게 하여 높은 신뢰도를 가지게 되나, 데이터가 적은 경우에는 경계선에 의해 대별되는 신뢰도는 낮아지게 된다.

투수계수모델(hydraulic conductivity model)은 단순히 직선의 방정식으로 모델링할 수 있다.

$$y = mx + b, \quad m = \frac{(y_1 - y_2)}{(x_1 - x_2)} \quad (4)$$

여기서, m은 직선의 경사이며, b는 y 절편, (x1, y1)과 (x2, y2)는 직선상의 점들이다.

이제 투수계수 모델은 $y = \log K$ 와 $x = \sigma(P)$ 의 항으로 나타내어 지고, 유입량은 실제 실험 데이터 보다 투수계수 모델에 의해 근거하여 계산할 수 있다. Heuer(1995)의 유입량 예측식에서 다른 변수들은 모두 기지의 값에 해당하므로, y축은 터널의 단위길이당 유입량의 대수치(log QL)를 나타내도록 표현할 수 있다. 유입량은 정규분포곡선상($x = \sigma$)에서 투수계수모델을 적분함으로써 상한한계값(Qupper)과 중간값(Qmedian)을 $x = \sigma$ 의 정규분포곡선 상의 작은 증분에 대해 $y = \log K$ 의 직선을 적분함으로써 구할 수 있으며, log K 값을 QL로 변환함으로써, 또한 σ 의 증분을 터널길이의 증분으로 변환함으로써 구할 수 있다. 비록 투수계수 모델 직선이 (+)나 (-)로 무한대로 연장될 수는 있으나, 한정된 σ 의 범위에서는 유입량의 증가량의 적분값에서만 유효하다. 반면에 σ 의 하한값은 중요하지 않고, σ 의 상한값은 계산되는 유입량의 거의 대부분이 이 상한값 근처의 값에서 발생되므로 큰 영향을 미친다. 이러한 σ 의 상한값은 상관선의 기울기가 급해질수록 증가하게 된다. 적분값의 실제 한계는 자연경계조건(natural boundary condition)에 의해 결정된다. 이러한 경계조건의 결정에 있어서 지질학적인 지식과 판단이 많이 요구된다. 그러나, 중간값(Qmedian)은 과대예측(overestimated)되거나 과소예측(underestimated)될 확률이 같은 유입량을 말하는 것으로 그 값이 실제의 유입량이나 계산된 최선(best-estimated)의 유입량을 의미하지는 않는다.

2.6 파쇄대 구간의 유입량 예측

앞 절의 그림 4.에는 Chattahoochee터널의 수압시험 결과를 파쇄대구간과 일반구간으로 구분하여 투수계수의 통계모델을 이용하여 유입량을 산정한 결과로서, 이와 같이 파쇄대 구간과 같이 집중용출수가 예상되는 구간에 대해서도 통계처리가 가능한 충분한 양의 수압시험 결과만을 이용하여 앞절에서 언급한 같은 통계학적 처리과정을 통해 터널내로의 유입량을 예측할 수 있다.

3. 용수량예측기법 적용사례

3.1 현황 및 지질특성

○○터널 구간은 서로 다른 기원의 마그마가 혼입된 백악기 후기의 화강암(화강암, 화강섬록암)이 주류를 이루며, 터널 중앙부 및 종점부 일부구간에 소폭의 관입암(염기성 암맥)이 화강암을 관입한 상태로 관찰되고 있었다. 기반암의 투수계수는 $4.48 \times 10^{-5} \sim 2.0 \times 10^{-6}$ cm/sec를 보이며, 법기단층대(1.98×10^{-5} cm/sec)보다 암질이 양호한 수평절리(sheeting joint) 분포구간(Sta. 5+550~5+740)에서 상대적으로 더 크게 분포하는 양상을 나타내고 있었다. 법기단층대 구간(Sta. 5+000~5+025)에서는 상대적으로 높은 투수계수와 0.7bar의 피압대가 분포하므로 터널굴착시 별도의 차수대책이 필요할 것으로 예상되었다.

Cell Mapping 기법을 이용한 토목지질도(그림 5)와 터널구간 유입량에 큰 영향을 줄 것으로 예상되는 다양한 인자들을 고려하기 위한 수문지질도(그림 6)를 작성하여 터널설계의 기초자료로 활용하였으며, ○○터널 구간의 지반특성을 조사하기 위해 약 200m 간격으로 대안설계시 20공, 실시 설계시 7공의 시추조사를 실시하였다(그림 7). 보링공간의 간격은 예상되는 지질조건의 변화구간과 장비의 접근가능여부 등을 종합적으로 고려하여 결정하였다. 터널이 위치하게 되는 암반층의 투수계수 산정을 목적으로 15공의 시추공에 대하여 (실시설계시 : 7공, 대안설계시 : 8공) 총 336회의 Packer 시험이 실시되었으며(실시

설계시 : 98회, 대안설계시 : 238회 - 가압단계 1단계를 1회로 산정하는 경우), 주로 터널위치심도 ±1D에 해당하는 깊이에서 시험을 수행하였다.

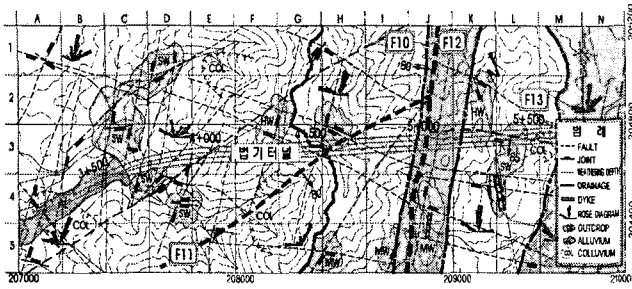


그림 5. Cell Mapping에 의한 토목지질도



그림 6. 수문지질도

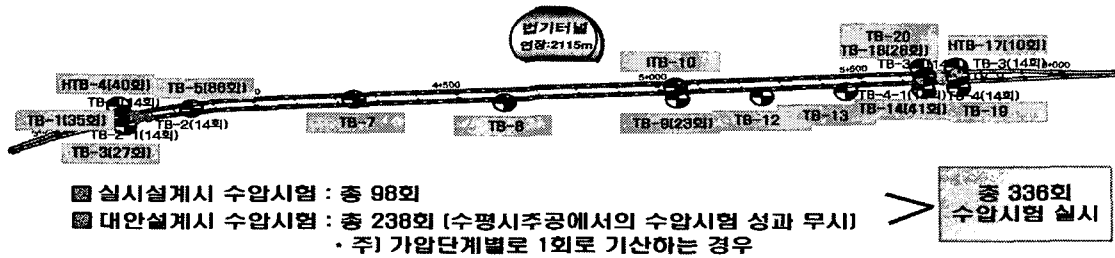


그림 7. ○○터널 현황 및 수압시험 위치

수두압 분포 및 시추조사에서 관찰된 절리분포특성을 고려하여 다음의 표 1.과 같이 7개 구간으로 구분하였으며, 구간별 수리특성(투수계수, 수두압 분포)을 구분하여 그림 8.에 표시하였다.

표 1. ○○터널 수리영역 구분현황

구 간	위 치(Sta.)	투수계수(cm/sec)	특 성
1	3+680~3+800	4.90×10^{-6}	터널 입구부
2	3+800~4+100	4.48×10^{-6}	Sheeting Joint 분포구간
3	4+100~5+000	2.00×10^{-6}	암질 양호한 구간
4	5+000~5+025	1.98×10^{-6}	법기단층대 구간
5	5+025~5+350	4.29×10^{-6}	단층점토 분포구간
6	5+350~5+550	3.00×10^{-6}	암질 양호한 구간
7	5+550~5+740	4.27×10^{-6}	Sheeting Joint 분포구간

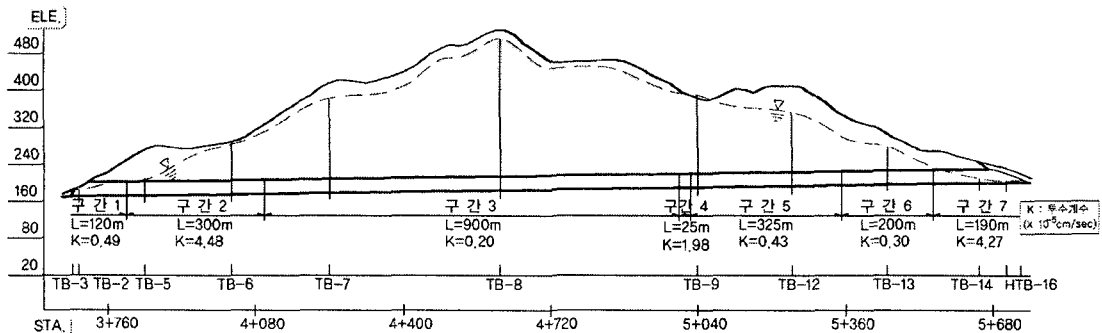


그림 8. ○○터널 투수영역별 투수계수 및 수두압 분포현황

수압시험은 유입유량과 압력이 평형상태가 될 때까지 수행하는 방법으로 실시하였으며, 1×10^{-6} (cm/sec) 보다 작은 투수계수 대해서는 정확한 투수계수값 산정이 불가할 것으로 판단되어 이 값을 LQL로 설정하였다. 설정된 LQL값 이하의 투수계수에 대해서는 수두조건을 고려할 때 거의 무시할 만

크의 터널내 유입량이 발생할 것이므로 이와 같은 가정이 어느 정도 타당할 것으로 판단되었다.

3.2 통계모델 적용결과

아래의 그림 9.에는 ○○터널 구간에서 실시된 총 336회의 실험결과를 정리하여 히스토그램으로 정리하여 나타내었으며, 그림에서 보여지는 바와 같이 $1 \times 10^{-5} \sim 5 \times 10^{-5}(\text{cm}/\text{sec})$ 의 구간이 전체의 약 30%정도를 차지하는 것으로 나타났다.

기존의 설계적용시와 같이 전체 터널연장(2,115m)에 대해 Heuer 식을 이용하여 정상류 상태의 유입량 (steady-state(long-term) inflow)을 계산해 보면, 투수계수의 단순 평균치($5.92 \times 10^{-5}(\text{cm}/\text{sec})$) 적용시 식 (5)와 같은 결과를 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned}
 Q_L &= \frac{2\pi KH}{\ln\left(\frac{2z}{r}\right)} \times \frac{1}{8} = \frac{2\pi \times 5.92 \times 10^{-7} \times 180}{\ln\left(\frac{2 \times 180}{10.911}\right)} \times \frac{1}{8} \\
 &= 2.394 \times 10^{-5} (\text{m}^3/\text{sec}/\text{m}) \\
 &= 1.436 \times 10^{-3} (\text{m}^3/\text{min}/\text{m})
 \end{aligned}
 \tag{5}$$

범기터널의 총 336회의 Packer 시험 결과 Histogram

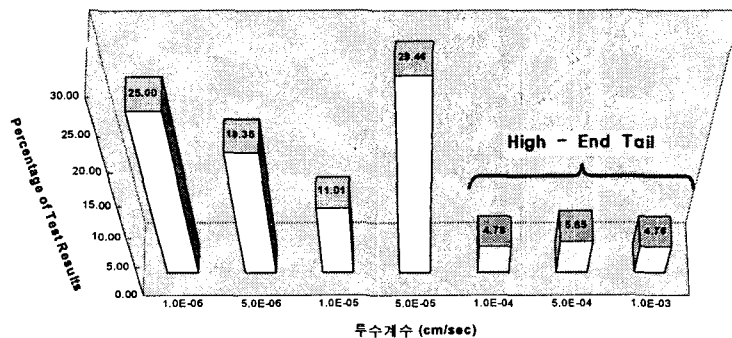


그림 9. ○○터널 투수계수 히스토그램

앞 절에서 언급한 투수계수의 통계모델을 이용하여 예상유입량을 산정하고자 수압시험 결과의 누적분포곡선을 나타내면 그림 10.과 같고, 이를 대수정규분포 모형으로 환산하면 그림 11.과 같다. 그림 11.에서의 실험값들은 대략 $1 \times 10^{-6} \text{cm}/\text{s}$ 와 $1.1 \times 10^{-4} \text{cm}/\text{s}$ 사이에서 직선형의 분포를 이룸을 알 수 있다. 이러한 직선은 직접적인 실험치를 대신하여 터널내로의 유입량을 계산하는데 사용될 수 있는 투수계수 모델에 해당한다. ○○터널 수압시험 결과의 대수정규분포곡선은 약 $1.1 \times 10^{-4} \text{cm}/\text{s}$ 의 상한치를 보이며, 이러한 한계치는 Packer 시험과정 절차나 지질학적인 요인들에 의해 야기된 것으로 판단된다.

○○터널 구간에서는 적분한계를 투수계수분포와 터널길이등을 종합적으로 고려하여 $\pm 3\sigma$ 로 설정하였고, 그림 12.의 대수정규분포 모델을 이용하여 구한 전체 터널연장에 대한 유입량은 상한한계값 $Q_{\text{upper}} = 2702.055(\text{L}/\text{min}/\text{km})$ 이고, 중간값 $Q_{\text{median}} = 1705.916(\text{L}/\text{min}/\text{km})$ 로 나타났다. 그러므로 수압시험 자료의 분산성을 고려할 때 유입량의 추정치는 $Q_{\text{inflow}} = 2,200 \pm 500 (\text{L}/\text{min}/\text{km}) = 2.20 \pm 0.50(\text{m}^3/\text{min}/\text{km})$ 가 이 판단하는 것이 합리적일 것으로 사료된다. 이것은 앞의 식 (5)에서 구한 $1.4(\text{m}^3/\text{min}/\text{km})$ 과 비교하면 용수량 예측범위가 약 20% ~ 60%정도까지 용수량 예측범위에 차이를 가져오게 되는 것을 알 수 있다.

그러나, 일부 파쇄대 구간에 대해서는 한정된 수압시험만을 실시할 수 밖에 없었던 점등을 고려하면 실제 터널굴착시의 유입량은 이보다 더 커질 수 있을 것이다.

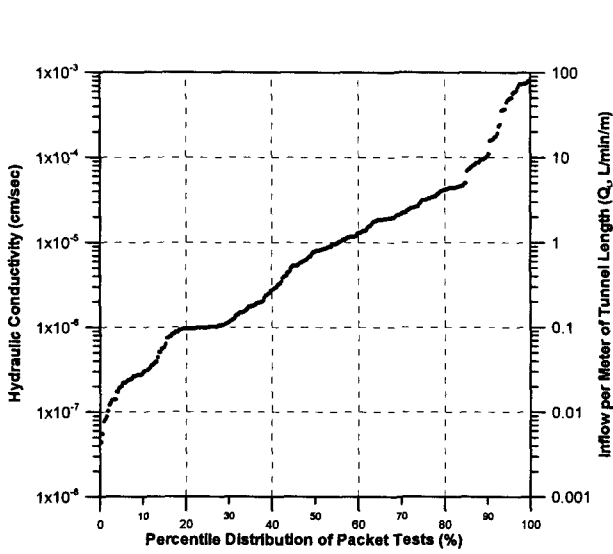


그림 10. ○○터널 수압시험 누적분포곡선

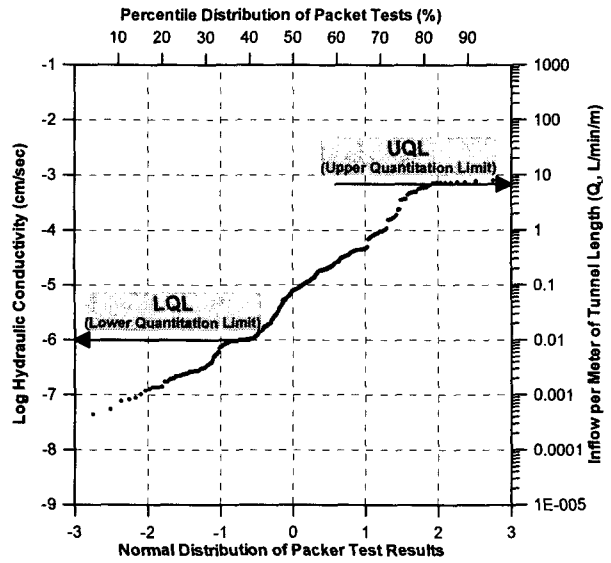


그림 11. ○○터널의 UQL, LQL 설정

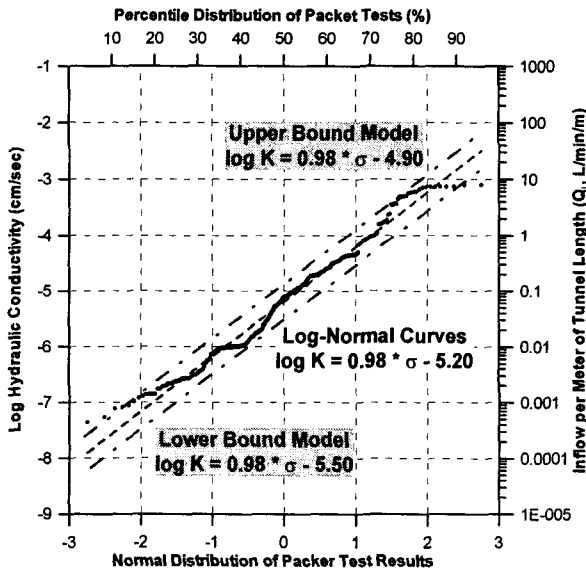


그림 12. ○○터널 투수시험결과의 대수정규분포모델

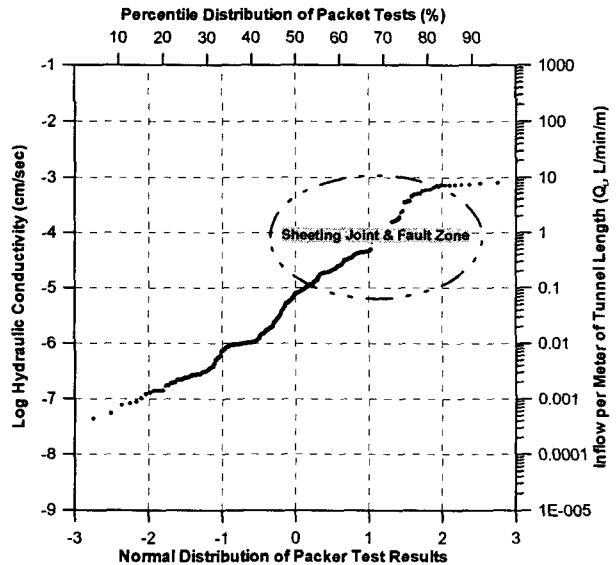


그림 13. ○○터널 시공중 용출수 과다예상구간

또한, 앞 절에서 언급한 Sheeting Joint 분포구간 및 단층대 예상구간에서의 수압시험결과를 분석해보면 그림 13.에서 표시한 부분과 같이 주로 투수계수가 큰 부분에 존재하게 되며, 공사중 예상유입량은 이 부분의 자료만을 이용하여 앞에서 수행한 동일한 통계처리과정을 통해 유입량을 예측할 수 있다.

5. 결론 및 토의

본 연구에서는 현장수압시험자료의 대수정규분포 모델링을 이용한 용수량 예측기법을 소개하고, 이를 이용하여 설계에 적용한 사례를 제시하였다. 본 연구에서 얻어진 결론을 요약하면 아래와 같다.

- 1) 실제 터널건설시 배수관경의 결정, 집수정용량의 결정, 폐수처리 시설용량 결정등에 가장 큰 영향을 미치는 유입량예측을 위해 투수계수 분포의 통계모델을 이용하였으며,
- 2) 경암 암반지역의 경우 기존의 투수계수 평균치 개념에 의한 유입량의 산정식과 투수계수의 통계분포모델을 고려하여 산정하는 경우 예상용수량의 범위가 약 20% ~ 60%정도까지 차이가 발생할 수 있으며, 그 만큼의 과다설계가능성을 내포하고 있음을 알 수 있었다.
- 3) 파쇄대 구간과 같이 서로 완전히 상이한 투수특성을 가진 과다용수예상구간에 대해 충분한 수압시험 성과가 있는 경우 fracture zone에서의 데이터를 포함하는 경계모델을 설정하여 유입량을 예측하는데 적용할 수 있을 것이다.
- 4) 또한, 설계시 통계학적인 유입량 예측결과와 현장의 유입량 실측결과등을 비교·활용한다면 시공시 역해석 기법을 통한 굴착 미진행구간에 대한 유입량의 예측에도 충분히 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

본 연구에서는 주로 모델설명을 위주로 제한된 현장사례에 대한 결과만을 언급하였지만, 향후 투수특성이 상이한 국내 대표암종별(화강암, 편마암, 퇴적암등) 자료들에 대한 데이터들을 축적하여 적합한 유입량 범위를 암반상태를 고려하여 종합적으로 제시하고자 하는 노력이 수반되어야 할 것으로 판단되며, 또한, 본 연구에서는 유입량 산정식에 있어서 경험식에 의한 보정계수를 이용한 Heuer(1995)의 식을 적용하였지만, 향후 암반터널의 절리특세를 따른 흐름에 대한 더 많은 연구가 이루어져야 할 것으로 생각된다.

참고문헌

1. Goodman, R. E., Moye, A. Schalkwyk, and I. Javandel. (1965), "Ground-water inflow during tunnel driving", Engineering Geology, Vol. 2, No.39.
2. Heuer, R. E. (1995), "Estimating Rock-Tunnel Water Inflow", Proceedings of the Rapid Excavation and Tunneling Conference.
3. Raymer, J. H. (2001), "Predicting Groundwater Inflow Into Hard-Rock Tunnels : Estimating the High-End of the Permeability Distribution", Proceedings of the Rapid Excavation and Tunneling Conference.
4. SK건설 주식회사(2002), "○○~○○간 도로 4차로 확장공사 설계보고서".