

## 균열 암반 내 터널 설계 시 체계적인 지하수 환경 영향 평가 시스템 제안

김형수 ((주)넥스지오 지하수 환경팀장),  
윤운상 ((주)넥스지오 대표이사)

### 1. 서 론

우리나라는 인구에 비해 비교적 좁은 국토를 가지고 있으며 또한 대부분 산악지형이 발달하고 있어서 국토의 효율적인 개발을 위해 도로 및 철도공사에 따른 산악을 관통하는 터널 공사가 불가피한 실정이다. 이러한 터널 굴착 시 인위적인 충격에 의한 기존의 수리 환경 시스템 변화가 발생할 수 있으며 시공 전 원안 및 대안설계 과정에서 현재의 지하수 환경을 이해하고 굴착에 따른 변화를 예측하는 과정이 필요하다. 그러나, 최근 들어 그동안 일부 토목공사 시공 전 후 과정을 통해 이러한 지하수 관련 영향 분석이 체계적으로 평가되지 않고 진행되어 소류지, 하천 등이 갑자기 마르거나 주변 생활 또는 농업용수로 사용되는 지하수가 고갈되는 현상이 발생하였다. 또한 해안 주변에서는 해수 침투에 의한 염해 발생시켰고, 매립지 및 유류 오염지등 잠재 오염원 지역에서는 주변 지하수 환경을 오염시키는 현상을 발생시켜 민원의 대상이 되기도 하였다. 특히, 최근 고속철도 예정 공사 중 경남 양산 시 천성산 내 산악터널 공사 진행 중 상부에 존재하는 습지 분포에 미치는 영향에 대해 많은 관심이 몰리기도 하였다.

따라서, 터널 공사 시 자연환경 변화에서 우리 생활과 가장 밀접하게 관련된 수리 환경, 즉 지표수/지하수 환경에 대한 평가가 반드시 병행되어야 한다. 특히, 지표수 환경과 달리 지하수 환경은 우리 눈에 보이지 않는 지하에서 일어나는 현상이며 이를 정확히 파악하기 위해서는 지하수를 포함하는 대수층의 수리지질학적 특성을 명확히 규명하고 이를 토대로 인위적인 변화에 따른 양상을 파악하고 설계에 반영하여야 한다. 체계적인 지하수 환경 분석은 이러한 문제점들의 예측/대안 및 민원 발생시 근거 자료로 이용될 수 있으며, 설계공사 중 배수, 차수/그라우팅, 오염방지 시설 등에서 보다 합리적인 설계를 계획하는데 다양한 정보를 제공할 수 있다. 본 논문에서는 균열 암반 내 터널 설계 시 분석 지역의 수리지질학적 특성을 파악하기 위한 지하수 영향 평가 시스템에 대한 절차를 제시하고자 한다.

## 2. 본 론

지하수를 포함하는 환경을 분석할 때 크게 다공질(porous) 매질과 균열암반(fractured rock) 매질로 구분하여 분석하는데 실제로 정확히 구별하지 않고 혼용하여 적용하고 있다. 일반적으로 산악 지역을 크게 토양층(soil zone)-풍화암/연암(transition zone)-경암(bedrock zone)의 3 개층으로 구분할 때 토양층이 다공질 매질을 성질을 가지고 대부분을 이루고 있는 나머지 층들은 균열 암반 매질을 성격을 나타낸다(그림 1 참조). 따라서, 산악지역 터널 설계 시 보다 합리적인 지하수 영향 평가를 위해서는 두 매질의 특성을 명확히 파악하고 분석하기 위해 각각의 특성에 맞는 현장 조사, 시험과 분석 등의 체계적인 평가 수행 계획을 세우고 그 절차에 맞게 수행되어야 한다(그림 2 참조).

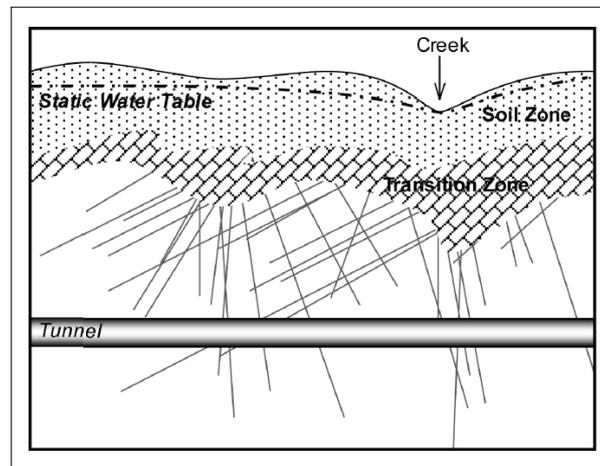


그림 1. 일반적인 산악 지형의 수직적 분포

### 2.1 선행조사(previous investigation)

공사 구간 내 분포하는 수리지질학적 특성을 파악하기 위해 실시되는 현장시험들은 경제적·시간적 한계로 그 범위와 수가 매우 적은 게 현실이다. 실제 현재 진행 중인 일부 터키 사업 등에서는 몇 개의 지하수 현장 시험 결과로 매우 광범위한 지역의 대표적 수리지질학적 특성을 적용하고 있다. 이러한 무리한 적용은 결국 실제 공사 지역의 특성을 무시하고 설계하는 과오를 범할 수 있다.

이러한 문제는 대부분의 지하수 관련 시험들이 착정 또는 시추공 및 고가의 시험 장비들을 필요로 하기 때문에 많은 지역에 설치하여 시험하는데 따르는 막대한 비용 때문이다. 그러므로, 지하수 전문가들은 공사 구간 내 수리지질학적 특성을 대표할 수 있는 위치를 선정하고 적절한 시험의 수와 종류를 적절하게 배치하는 것이 요구되어진다. 예를 들어 전반적으로 지질구조가 안정적이고 단층 및 절리 발달이 약한 퇴적지형 등에는 지하수 현장 시험들을 수평적으로 균등하게 넓게 분포하여 전체적인 특성을 파악하는 것이 대표적인 수리지

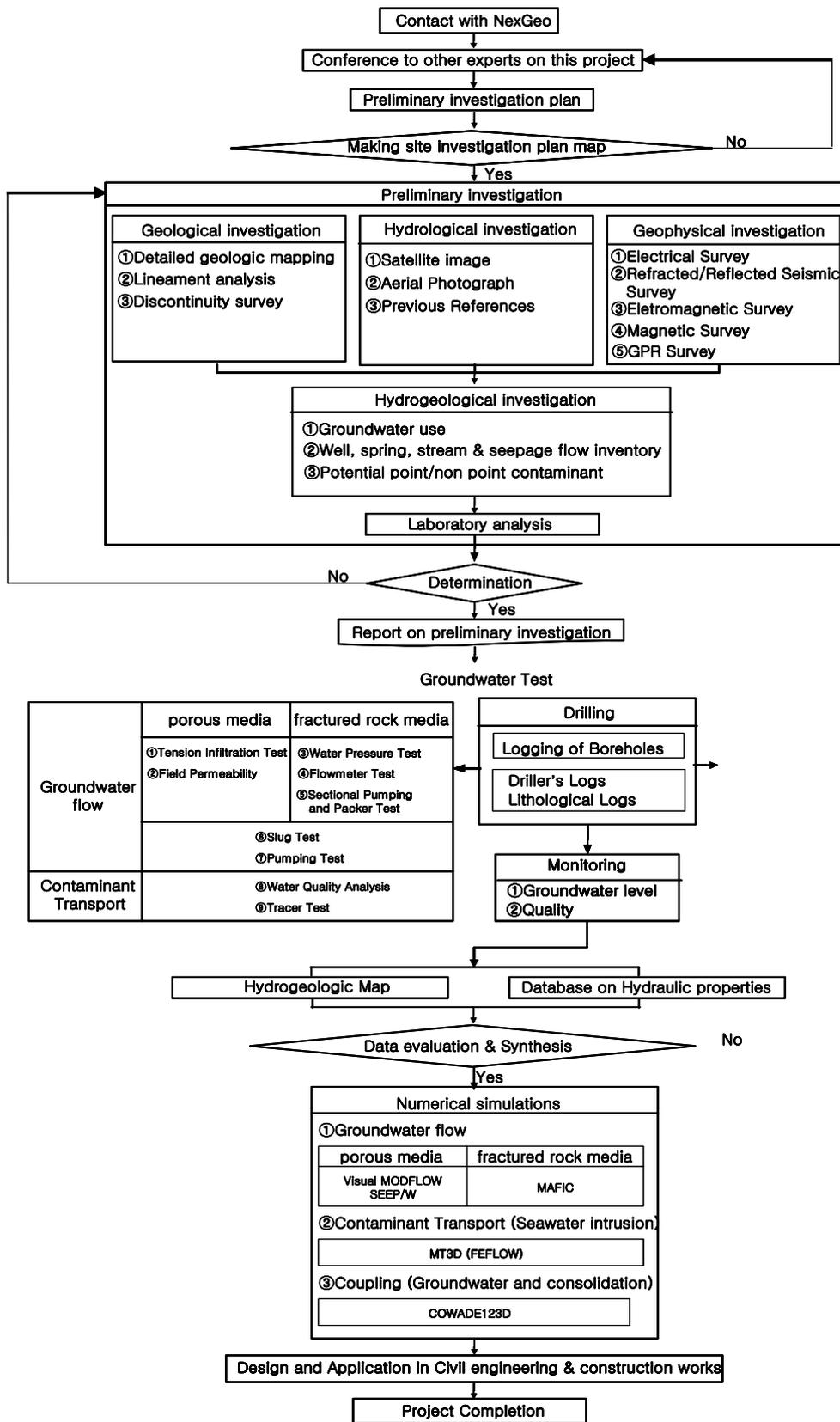


그림 2. 지하수 환경 영향 평가 절차 수행도

질학적 특성을 파악하는데 용이하다. 반면에 일부 구간에 급격한 지질학적 구조가 분포하며 암반 내 대규모 단층 및 파쇄구간이 존재 시에는 그 특정지역 내 지하수 시험들을 모아서 집중시켜서 합리적인 대푯값을 얻는 과정이 필요하다. 따라서, 이러한 기본적인 수리지질학적 정보를 얻기 위해서 대수층을 포함하고 있는 수평 및 수직적으로 전체적인 지질학적 정보를 제시하는 지표지질조사, 공사 구간 내 대략적인 지하수를 포함하는 대수층 위치 또는 지하수가 유동할 수 있는 단층 및 파쇄대 구간을 파악할 수 있는 지구물리탐사가 선행되어야 한다. 또한 이러한 결과를 토대로 지하수 환경을 보다 전문적으로 판단하기 위해 지하수 현장 조사를 실시한다. 지하수 현장 조사는 지하수 이용 실태 및 정권 현황 조사, 잠재 오염원 조사 로 나누어진다. 조사된 결과는 착정 및 시추공사 위치, 장기 모니터링 위치, 지하수 현장시험 위치 및 종류 결정, 조사지역 내 전반적인 수계파악을 통한 지하수 모델영역 선정 및 해석 기초 자료로 활용한다.

## 2.2 지하수 현장 시험(Groundwater tests)

선행조사들에 의해 얻어진 결과 자료를 토대로 분석 지역의 수리지질학적 분포를 결정하기 위한 적절한 지하수 현장 시험 배치가 필요하다. 지하수 현장 시험을 배치하는데 있어서 기준이 되는 지하수학적 선행 요소들은 ① 공사 지역 내 대수층 구간이 다공질 매질 특성을 가지는가? 아니면 절리 및 파쇄대 영향에 의한 균열 암반 특성을 가지는가? ② 다공질 매질 내 토양층에서 포화대(saturated zone) 위에 존재하는 불포화대(unsaturated zone) 특성을 포함할 것인가? ③ 균열 암반 매질 구간 내에서 수리적 특성에 대한 대표적인 성격을 규명하기 위해 수직적 구간을 어떻게 정할 것인가? ④ 대수층 내 지하수 유동 자체만의 수리적 특성만을 고려할 것인가? 아니면 오염물질, 온도, 농도, 역학적 변형 등 다른 요인들이 미치는 수리적 특성을 연동(coupling)해서 고려할 것인가? 등을 결정하여 시험을 배치한다(표 1 참조).

지하수 현장 시험은 각 종류마다 지하수 환경에 미치는 충격(stress)이 다른데 단열 암반 내 터널 예정 지역에서 수리적 특성을 파악하기 위해 일반적으로 많이 수행되는 수압시험, 순간충격시험, 양수시험을 비교해 보면 순간충격시험<수압시험<양수시험의 순서로 미치는 충격이 커서 얻어지는 수리특성 값도 커지는 양상을 보인다. 따라서, 다른 시험보다 비교적 적은 수로 수행되어지는 양수시험은 다른 시험 결과와 비교하여 최종적으로 보정하여 적용되는 것이 합리적이다.

### 2.2.1. 균열 암반 내 대수층 특성 시험

전체적으로 다공질 매질로 규정하는 시험과 달리 암반 내 발달된 절리 및 파쇄구간을 이동 경로하는 지하수 유동 특성을 파악하는 시험에는 가장 일반적인 적용하고 있는 수압 시험, 정압 시험, 추적자 시험, 양수유발 유속시험 등이 있다. 압력을 일정하게 하는 정압 시험과 유입/유출량을 일정하게 하는 정량 시험으로 구분하는데 특히 암반 내에서 시험 시에는 정압 시험이 성공 확률이 높다. 일반표 1. 지하수 현장 시험들의 종류 및 특성적으로 시추 주상도, BHTV, BIPS 등의 결과를 토대로 구간을 설정하여 팩커를 설치하고 수행한다. 공 주변에 발달한 균열들 각각의 수리적 특성과 연결정도를 좀더 정확히 파악하기 위해서 불연속면 양수유발 유속시험과

분 류	구 간	시험항목	목 적	획득 수리상수
다공질 매질 특성	토양층	지표투수시험	· 지표부근의 불포화대 수리특성 및 함양률을 파악하기 위함	· 침투율, 흡착도, 불포화/포화수리전도도
	풍화암	투수시험	· 토사층 및 풍화대의 투수성을 파악하기 위함	· 수리전도도(투수계수)
절리 암반 특성	연암	암반수리 이방성시험	· 투수성 단열의 위치를 파악하고 주요 단열에서의 구간별 수리전도도 파악하기 위함	· 구간별 수리전도도
	경암	수압시험	· 기반암의 투수성 및 암질상태를 파악하기 위함	· 구간별 수리전도도
	(단층 및 파쇄대)	지하수유향 유속시험	· 수직, 수평적인 지하수의 유동속도와 방향을 파악하기 위함	· 유향 및 수리전도도
통합	전체 or 특정구간	순간충격시험	· 적은 범위의 충격으로 인근 대수층의 수리상수를 파악하기 위함	· 투수량 계수, 저류계수
		장기양수시험	· 일정 또는 단계별 양수량을 통해 시추공 주변에 보다 넓은 범위에서 대수층의 수리특성을 파악하기 위함	· 투수량 계수, 저류계수, 우물효율
오염 (염해)	전체 or 특정구간	추적자 시험	· 관심 구간에서 대수층내 주 오염원의 이송/분산/확산등의 수리특성을 파악하기 위함	· 종분산지수, 유효공극률, 선속도
		수질 검증	· 수직구간에서 오염이 발생하는 주 이동 통로 및 상태를 파악하기 위함	· 구간별 EC, TDS, 염도, 온도, pH
지반 침하	연약 구간	양수유발 지반침하 시험	· 양수에 의해 발생하는 암밀 정도를 측정하여 지반침하 규모를 파악하기 위함	· 수직 변위량

추적자 시험이 많이 적용되고 있다. 불연속면 양수유발 유속 시험은 구간별 수리전도도를 구해 낸다는 점에서 기존 수압시험과 동일한 성격을 가진다. 그러나, 구간별로 존재하는 단열들을 통해 지하수는 유입 또는 유출되는 양상을 보이는데 수압시험은 일괄적으로 시추공에서 주변 밖으로 지하수를 유출시키는 반면 본 시험은 자연적으로 일어나는 유입과 유출량을 파악할 수 있다. 본 시험의 분석 방법 순서는 첫째, 자연 유속을 측정하고 다음으로 양수를 유발하면서 유속을 다시 측정하여 두 값에서부터 구간별 수리전도도를 얻어낸다(그림 3 참조)

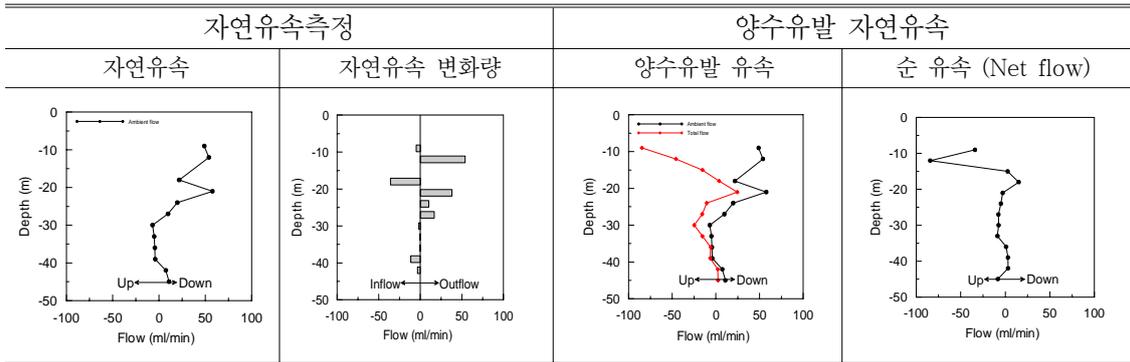


그림 3. 불연속면 양수유발 유속시험 결과 예

$$K_i = \frac{\overline{K} (\Delta Q_i - \Delta q_i) / \Delta z_i}{Q/b} \quad (1)$$

여기서,  $\overline{K}$ 는 시추공의 평균 수리전도도,  $\Delta Q_i$ 는 양수 유발 유속의 변화량,  $\Delta q_i$ 는 자연 유속의 변화량,  $\Delta z_i$ 는 측정구간,  $Q$ 는 양수율,  $b$ 는 대수층의 두께를 나타낸다.

### 2.3. 예측 분석

각종 지하수 현장 시험 결과들을 분석하여 얻어진 수리상수 값들을 토대로 하여 공사 지역 내 관심 구간 내에 현재 지하수 환경을 모사하고 이를 토대로 터널 굴착에 따른 지하수 환경이 어떻게 변하는지를 예측하기 위해 수치 해석 프로그램들이 실시된다. 대부분 토목 공사 지역은 규모가 광범위하고 현장에 따라 관심 분야도 매우 다르기 때문에 많은 전문가들에 의해 검증된 상용 프로그램을 많이 이용한다. 일반적으로 많이 알려진 프로그램은 Visual ModFlow, MT3D, MAFIC, FEFLOW, SEEP/W 등이 있다. 이러한 상용 프로그램들의 특징을 요약하면 표 2 과 같다. (표 2 참조)

표 2. 지하수 관련 프로그램들의 적용 범위

특성 \ 프로그램	Visual ModFlow	FEFLOW	MT3D	MAFIC	COWADE 123D	SEEP/W
다공질 매질	○	○	○		○	○
균열 암반 매질				○		
불포화대 고려		○			○	○
지하수 유동	○	○		○	○	○
오염 이동		○	○			
염해(밀도류)		○				
연동(지하수+ 지반 침하)					○	
FEM(유한요소방법)		○		○	○	○
FDM(유한차분방법)	○		○			

### 2.2.1. 균열 암반 내 터널 굴착을 위한 지하수 수치 모델 분석

현재 터널 굴착에 따른 지하수 유동 변화를 예측/분석하는데는 Visual Modflow, GMS, SEEP/W와 같은 상용 프로그램들이 많이 사용되고 있다. 이러한 프로그램은 터널 주변 굴착에 따른 지하수위 저하, 지하수 유입량 및 영향 범위 등을 예측하고 분석할 수 있다. 그러나, 이러한 모델링 분석은 대상영역을 다공질 매질 특성으로 가정하기 때문에 터널 주변에서 유입이 전 구간에서 걸쳐 발생하게 된다. 이는 실제 암반 내 터널 굴착 시 일부 특정 지역에서 지하수 유입이 발생하는 것과 차이가 있다. 도심지역등에서 일부 전철 굴착 시 토양층/풍화층을 관통하지만 대부분 연암 내지 경암이 주로 분포하는 심도에 설계를 계획하기 때문에 터널 내에서 지하수 영향 분석을 예측할 때 균열 암반 매질을 함께 고려하는 것이 합리적이다. 균열 암반 매질 특성을 분석하기 위해 일반적으로 MAFIC을 많이 적용하고 있다. 이는 암반 내 발달하고 있는 균열을 통해서만 지하수가 유동한다고 가정한다. 따라서, 터널 심도 근처에 발달하고 있는 균열 분포 사항을 모델링 분석 시 적절하게 적용하는 것이 필요하다. 이를 위해 정밀 지표지질조사, 대심도 시추공 내 각종 탐사 및 물리탐사 등을 통해 모델링 분석에 필요한 입력 상수들을 얻는다. 또한 위에서 살펴본 균열 암반 매질 특성 관련 지하수 현장 시험 결과를 통해 전체 단열들 중 수리적 특성을 갖는 단열들을 결정하고 적용해야 한다(표 3 참조). 이러한 입력 상수들을 통해 발생된 균열망은 실제 영역에 분포되어 있는 균열 분포가 아닌 통계학적으로 많은경우 수 중 하나라고 볼 수 있다. 따라서, 한번의 과정으로 생성된 단열망을 가지고 예측 판단할 수 없으면 이러한 오류를 극복하기 위해 MCS (Monte Carlo simulation)방법이 적용되어야한다. MCS를 고려해서 분석할 때 지하수 유입량인 경우 최대/최소 값의 차이가 매우 크며 많은 수의 분석을 통해 기하 평균값을 선택하는 것이 합리적이다(그림 4 참조).

표 3. 지하수 불연속체 모델링 분석 시 입력 상수에 필요한 사항

내 용	균열 발생	발생된 균열의 수리적 특성
필요한 시험 항목	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 최종 지질도 및 스캔라인 조사 자료 (절리방향, 간격, 틈새, 연장등)</li> <li>- BIPS/Televue</li> <li>- 전기 비저항 탐사</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 수압 시험</li> <li>- 불연속면 양수유발 유속 시험</li> <li>- 정압 주입 시험</li> <li>- 추적자 시험</li> </ul>

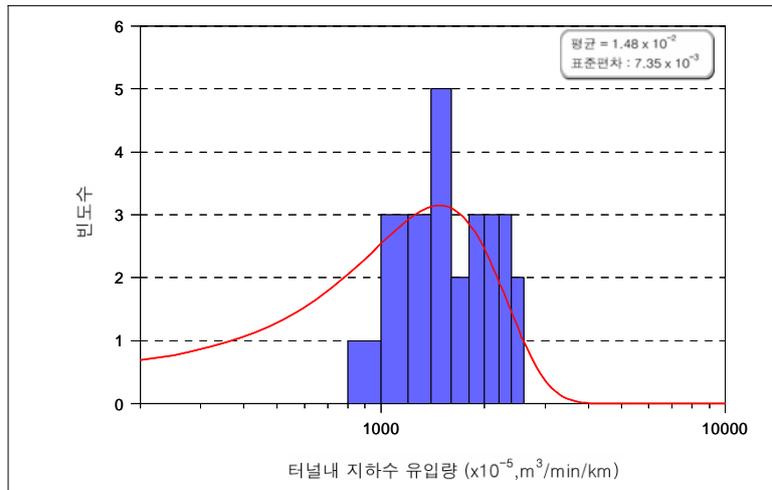


그림 4. MAFIC을 이용한 터널 내 지하수 유입량

그러나, 이러한 암반 내 불연속면 특성을 고려하는 분석은 분석 영역이 커질수록 단열의 수가 기하급수적으로 증가하여 실제 터널 주변에 분포하는 단열들의 수리적 특성을 제대로 반영하지 못하기 때문에 앞으로 더 많은 연구가 필요한 실정이다.

전체적인 지하수 환경 변화를 예측하는데 좀 더 용이한 다공질 매질 특성을 가정하는 Visual Modflow나 SEEP/W의 해석 결과와 병행하여 적용하는 것이 현재로는 가장 합리적이다. 적용 방법 순서는 첫째, 균열 암반 매질의 특성을 고려하는 불연속체 모델링으로 터널 내 유입되는 지하수 량을 예측한다. 둘째, 다공질 매질 특성을 기초로 하는 연속체 모델링(예 -Visual Modflow) 분석 과정에서 터널 조건을 고려할 수 있는 drain boundary condition에서 conductance 입력 시 이 값을 가지고 민감도 분석 과정을 수행하여 위에서 얻어진 유입량 결과와 비교 분석하여 가장 적절한 값을 선택한다(그림 5 참조). 셋째, 여기서 결정된 conductance 값을 기준으로 하여 전 구간에 동일하게 적용하여 굴착 시기에 따른 지하수 유입량을 검토하여 배수, 차수 그라우팅 설계 공사에 적용한다.

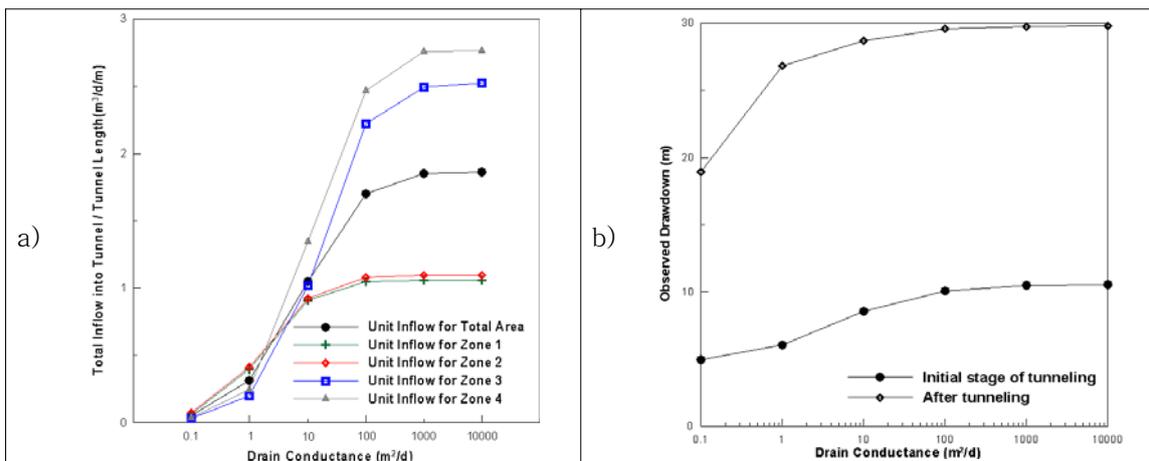


그림 5. Visual Modflow에서 터널 내 a)지하수 유입량 및 b)지하수위 강하에 대한 drain conductance의 민감도 분석

터널 주변의 수리 특성 값을 역으로 추산하여 전체 영역에 대입하여 결과를 얻는 과정을 갖는다면 설계 시 배수 및 차수/그라우팅 설계에 보다 정확한 결과를 제시할 수 있다.

## 2.4. 모니터링

터널 공사 등 여러 현장들에서 비교적 쉽게 지하수 환경 변화를 관측하는 방법 중 하나가 지하수위 관측이다. 현장에서 측정된 지하수위는 모델링 분석 과정에서 실제 현장과 계산 결과를 비교할 때도 이용된다. 그러나, 설치된 관측공에서 측정되는 지하수위는 위치에 따라서 대표적인 성격을 나타내지 않는 경우가 있다. 특히 암반구간에서는 단열이 발달된 일부 파쇄구간에서만 지하수 유동이 발생한다. 따라서, 터널 굴착에 따른 영향을 판단하기 위한 지하수위 관측을 관심 대상 관측공에 설치할 때는 그 위치, 심도 등을 위에서 얻어진 지하수 현장시험, 모델링 결과를 검토하여 신중히 선택해야 한다. 지속적인 지하수위 자료 축적은 현재 대부분의 토목 공사 현장에서 시공 전 한번의 모델링 분석으로 낮은 신뢰 결과를 도출하는 문제점을 개선할 수 있다. 시공 전 뿐만 아니라 시공 중 또는 시공 후에도 축적된 자료를 가지고 지속적인 보정과 분석이 수행된다면 매우 합리적이고 현실적인 결과를 도출할 수 있다.

### 2.4.1. 지하수위 관측(지하수 유동)

지하수위는 고정된 것이 아니라 여러 자연적 및 인위적인 요인에 의해 끊임없이 변동한다. 지하수위 변동은 대수층의 저유량 변화를 나타내며 관측점에서 지하수위를 장기적으로 관측함으로써 알 수 있다(그림 6 참조). 지하수위는 강우량과 대기압의 자료를 시계열 통계분석에 의해 상관관계를 파악할 수 있으며, 지하수 부존 특성과 변동 상황을 파악할 수 있는 기초 자료로 활용 가능하다. 또한 지하수 유동 모델링을 구사할 때 함양량(recharge)의 기본 자료로 활용할 수 있으며, 시공/유지 관리 시 지속적인 모니터링을 통해 수위강하에 대한 민원에 대비하기 위한 기초 자료로 활용이 가능하다.

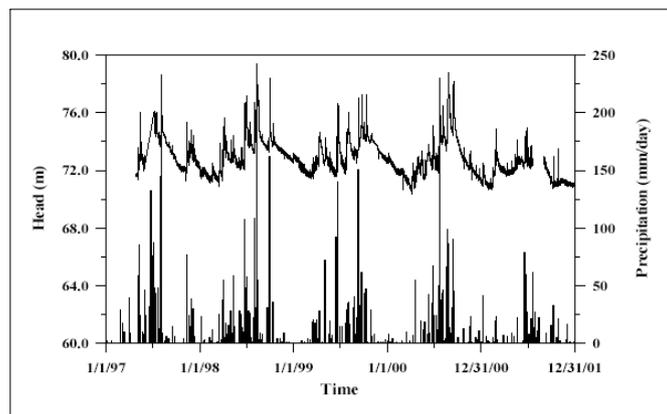


그림 6. 개별 강우에 의해 지하수위 상승이 발생하는 경우

### 2.4.2. 정기 수질 검층(지하수 오염)

정기 수질 검층은 관측공에서 시공 시 정기적인 기간 동안 변화하는 pH, 염도, 온도, DO, TDS, EC 등 구간에 따른 수직적 분포를 파악하기 위해 실시한다(그림 7 참조). 특히 암반 내 발달한 단열을 따라 그 변화가 크게 발생함을 보여준다. 따라서, 측정 기간 동안 심도별 수질특성의 변화를 파악함으로써 시공에 따른 영향성을 파악할 수 있으며, 지하수의 유출/입이 일어나는 구간의 수질특성은 거의 일정한 특성을 보이므로 대략적인 파쇄대 및 단층대를 판단할 수 있다. 분석된 수질특성은 오염물질 이류-확산 모델링 입력 자료로 활용이 가능하다.

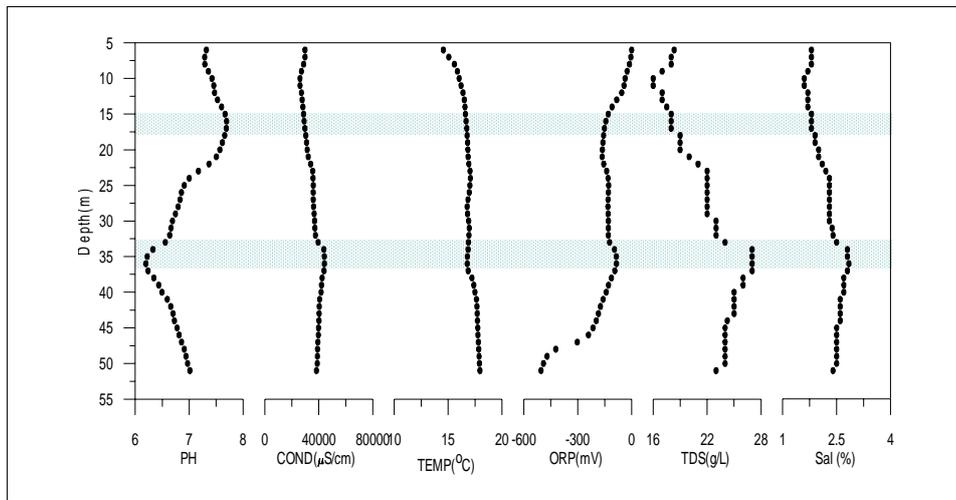


그림 7. 심도에 따른 분석 결과

### 3. 결 론

그 동안 균열 암반 내 터널 설계에 수행되었던 지하수 환경 영향 평가는 많은 새로운 방법과 기술들을 제시하고 적용하였다. 그러나, 얻어진 많은 결과 자료들이 중복되거나 대푯값을 선정하여 적용하는데 어려움이 많았다. 일반적으로 터널 굴착은 암반 내에서 이루어지므로, 기존의 다공질 매질로 가정하여 수행된 현장 시험과 이를 기초로 한 모델링 분석에는 한계가 있으므로 단열 암반 매질 특성을 고려한 분석 방법도 병행하는 것이 보다 합리적이다. 단열 암반 매질 특성을 고려하기 위해서는 1. 현장 내 발달한 단열들의 수리적 특성을 파악할 수 있는 지하수 현장 시험을 실시하고 이를 토대로 2. 불연속면을 고려할 수 있는 예측분석을 실시하고, 3. 얻어진 정량적인 결과를 가지고 다공질 매질을 고려하는 연속체 모델링에 적용하여 보다 합리적인 결과를 산출할 수 있다. 암반 내 발달한 단열의 수리적 특성을 파악하고 예측하는데는 확률적 기법이 많이 적용되므로 현장 시험, 모델 영역 설정, 수리적 단열 규명 등 보다 더 많은 연구가 필요하다.

■ 참고문헌 ■

1. R. Allan Freeze and John A. Cherry, 1979. Groundwater, Prentice Hall.
2. C. W. Fetter. 1994. Applied Hydrogeology, 3rd edition. Macmillan College Publishin Company.
3. C. W. Fetter. 1999. Contaminant Hydrogeology, 2nd edition, Prentice Hall, p18 ~31.
4. Mary P. Anderson and William W. Woessner, 1992. Applied Groundwater Modeling : Simulation of Flow and Advective Transport, Academic Press.
5. Young, S.C., H.E. Julian, H.S. Pearson, F.J. Molz, and G.K. Boman, Application of the electromagnetic borehole flowmeter, EPA/600/R-98/058, U.S. Environmental Protection Agency, 1998