

터널굴착이 환경에 미치는 영향에 관한 연구

A Study on the Environmental Effect due to Tunnel Excavation

이용수* · 권용완** · 배규진***

Lee, Yong-Soo · Kwon, Yong-Wan · Bae, Gyu-Jin

Abstract

In present study, the effect of tunnel excavation on groundwater was investigated by a case study and numerical analysis. The case study revealed that groundwater can be one of environmental impacts resulting from tunnel excavation. To examine variations in groundwater level due to tunnel excavation, numerical analysis was performed. The analysis result indicated that tunnel excavation could affect the groundwater behavior as the groundwater adjacent to tunnel flows in it. Also, it was found that, for the case where groundwater flowing through fractured zone passes tunnel excavation area, a special care with the excavation would be needed to avoid any tunnel instability due to a large quantity of groundwater flowing in it.

Keywords : Tunnel, Environmental effect, Noise, Vibration, Groundwater

요 지

본 논문에서는 사례분석과 수치해석 등을 통하여 지하수가 터널굴착에 미치는 영향을 고찰하였다. 사례분석을 통하여 터널 굴착으로 인하여 발생하는 여러 가지 환경적 요인중 하나인 지하수를 도출하였고, 이에 대하여 터널굴착단계에 따른 지하수위의 변화를 수치해석을 통하여 예측하였다. 해석결과, 터널주위의 지하수가 터널로 유입됨에 따라 터널 굴착이 지하수거동에 영향을 미칠 수 있으며, 파쇄대와 같은 지하수의 이동경로가 터널굴착구간을 지나간다면 많은 양의 지하수가 터널내부로 유입 될 가능성이 있으므로 터널굴착시 이에 대한 세심한 예측기법이 필요한 것으로 나타났다.

주요어 : 터널, 환경영향, 소음, 진동, 지하수

* 정회원 · 한국건설기술연구원 지반연구부 선임연구원
** 정회원 · 한국건설기술연구원 지반연구부 연구원
*** 비회원 · 한국건설기술연구원 지반연구부 연구부장

1. 서론

일반적으로 터널굴착으로 인하여 지하수의 수위변화 그리고 발파 등에 의한 소음·진동이 발생하게 되며, 이로 인하여 생태계보호지역의 동·식물의 피해와 주변지역의 지하수 고갈 등 각종 민원이 발생하고 있다. 터널굴착에 의한 환경적 영향은 지하수위 저하, 지반침하, 소음·진동 등 직접적인 요인과 이로 인해 발생하는 자연 생태계 훼손 및 우물고갈과 같은 환경적 피해와 민원발생 등 경제·사회적으로 간접적인 요인이 있다.

현재 국내에서는 터널건설로 인한 환경피해 및 민원발생으로 그 피해액만 수천억원에 이르고 있다. 특히, 서울외곽순환고속도로의 사패산 터널은 터널 굴착으로 인한 지하수 수위 및 소음문제 그리고 생태계 훼손 등으로 인하여 공사가 중단되어 그 피해금액이 약 2천5백억원/년에 달했다. 경부고속철도 구간중 여러 현장에서 터널공사로 인한 지하수 고갈로 민원이 제기되는 등 문제점이 발생하였는데, 천성산 터널 공사의 경우, 생태계보전지역 무제치늪과 습지보호지역 화엄늪 등 22개 산지늪의 파괴, 계곡수와 지하수의 고갈, 천연기념물과 법적 보호동식물의 생명위협 등 환경파괴가 우려되고 활성 단층으로 인해 터널의 안전성에 의문이 제기되고 있다.

터널 굴착에 따른 지하수 시스템에 대한 영향을 분석하기 위한 일련의 연구는 국내에서도 부분적으로 진행되어 왔다. 이와 관련된 국내 연구들을 살펴보면, 천병식 등(1995)은 배수형터널 내부의 과다유입수가 터널의 안정성에 미치는 영향을 검토하기 위하여 침투류 해석을 하였으며, 문현구(2001)는 3차원 절리망에서의 지하수 유동에 대하여 절리의 형상, 중심의 위치, 방향성, 크기 등을 통계학적으로 발생시켜 3차원 절리모델을 개발하여 암반의 불연속면이 수리학적인 특성에 미치는 영향을 분석하였으며, 허준석(1997)은 암반의 투수성, 터널상부의 두께, 매질의 비균질 특성과 불투수층의 경사도 등 여러 인자가 터널내로의 유입량에 영향을 미치는 것으로 제시하였다. 성익환 등(1998)은 터널굴착공사로 인하여 지하수위의 하강원인은 기후적인 조건, 과잉양수, 터널내로의 누출량 등 여러 가지 가능성이 존재하나, 직접적인 원인은 터널로 누출되는 지하수 손실로 평가하였으며, 지하수위 하강폭과 하강양상은 지하수공이 터널로부터 떨어진 거리 및 단열구조 발달상태와 밀접한 관련성이 있음을 기술하였다. 주광수

등(2003)은 터널굴착에 따른 고원습지 영향에 대하여, 해외의 시공사례를 제시하였으며, 터널굴착에 의한 고원습지의 생태계 영향을 최소화하기 위하여 프리그라우팅과 같은 대책공법을 제시하였다. 이병대 등(2002)은 터널굴착에 따른 지하수체의 거동 특성을 파악하기 위하여 터널굴착시 그라우팅 이전의 초기유출량과 초기 그라우팅 이후의 유출량을 측정하였고, 이를 단열구조와 비교, 분석하였다.

송원경(2004)은 굴착중인 터널 주변 지역의 지하수 고갈원인을 규명하기 위하여 지질학적, 수리학적, 지구물리학적 조사를 수행하여 지하수 유동체계는 시간 경과에 따라 변화됨을 파악하였다. 또한, 김태희 등(2004)은 터널 굴착 이전인 현재의 시점에 대한 데이터 확보와 자연적 실태를 조사함으로써 터널 굴착에 따른 하천의 영향을 검토하였다. 검토결과, 터널 굴착을 통해 지하수의 기저유출량에 해당하는 39%의 유량을 감소시킬 개연성이 존재함을 확인하였다.

해외에서는 현재까지 터널 굴착과 관련하여 많은 연구들이 진행되었으나, 대부분 지하수 유입량 산정을 위한 모델링 연구, 굴착에 따른 지하수위 강하 산정을 위한 모델링, 대상지반의 지질공학적 접근 등 환경과 연관된 연구는 미비한 실정이며, Goodman(1965)은 터널내로의 지하수 유출의 예측에 대한 이론적인 분석을 하였다.

본 논문에서는 국내에서 터널공사중 발생한 환경피해에 대한 사례를 조사·분석하여 터널에 미치는 환경영향인자를 도출해내고, 이러한 인자에 대하여 수치해석 등을 통하여 그 영향을 분석하여 향후 터널건설에 따른 환경피해를 최소화하기 위한 기초자료로써 활용하고자 한다.

2. 터널공사에 따른 환경 피해 사례분석

2.1 피해현황

표 1은 국내의 터널공사로 인하여 민원이 제기된 공사현장과 피해원인 및 보상내용 등을 나타내고 있다. 표 1에 의하면 터널건설공사로 인한 발생하는 환경영향은 터널발파로 인한 인근주민의 정신적 피해와 가축피해, 터널발파로 인한 소음진동, 터널굴착으로 인한 지하수 고갈, 자연생태계 훼손, 지하수 오염 등의 피해가 발생하는 것으로 나타났다.

표 1. 국내 터널설공사로 인한 피해현황

| | 지역 | 원인 | 피해 | 비고 |
|----|--------------------------------------|----------------------|--|--|
| 1 | 고철 제 0-00공구 | 터널발파 | 목장 가축피해 | 목장이전 79,000,000원 보상 |
| 2 | 고철 제 0-00공구 | pile 항타 및 토공 | 목장, 양돈장, 양계장, 육견 장 피해 | 목 장 : 5,727,100원 보상 양돈장 : 29,698,300원 양계장 : 7,274,300원 육견장 : 7,092,700원 |
| 3 | 고철 제 0-0공구 | 터널발파 | 축사 폐업 및 휴업 | 약 1억원 규모의 피해보상 진행중 |
| 4 | 경부고속철도 0-0공구 북안~대창구간 | 진동 발파소음 | 건물균열 소음/분진 피해 | 현재 협상 진행중 |
| 5 | 충북 보은~산외면간 국도 4차선 확장공사 봉계터널구간 | 터널발파 소음 | 보은군 산외면 봉계리 인 근 30여 농가가 가축유산 과 주택 균열 | 현재 협상 진행중 |
| 6 | 경춘선 복선전철 묵현리 터널공사 | 터널발파 소음 | 건물 벽에 균열 소음과 분진피해 | 가구당 2천만원씩 모두 11억2천만원의 피해보상을 요구 |
| 7 | 익산-장수간 고속도로 제 10공구터널공사 | 터널발파 진동 | 가축피해, 소음, 진동, 지하수 고갈 | 1억6천만원 요구 |
| 8 | 인천시 서구 석남3동~ 부평구 산곡1동 철마터널공사 | 터널발파 | 공사소음 진동피해 건물균열 | 주민 피해보상 요구중 |
| 9 | 국도 14호선 우회 도로건설공사구간 중 양정 터널 공사 | 터널발파 | 건물피해 소음피해 | 피해액 12억원 주장 |
| 10 | 고철 광명역공사 | 터널굴착 | 지하수고갈 | - |
| 11 | 고철 비룡터널 | 터널굴착 | 지하수고갈 | - |
| 12 | 고철 천안역사 | 터널굴착 | 지하수고갈 | - |
| 13 | 고철 대전 읍내동 | 발파 진동 소음 | 건물균열 | 585만원 배상 |
| 14 | 고철 옥천군 상촌면 화신5터널 | 터널발파 | 배수로정비 미비로 가옥 침수 | - |
| 15 | 대전지하철공사 | 발파 진동 소음 | 건물피해 정신적 피해 | 684만원 배상 |
| 16 | 고철 충남 옥천군 | 발파진동 소음 | 영업방해 축사피해 | 약 1억원 요구 |
| 17 | 인천 문학터널 | 공사장비에 의한 소음 진동 분진 | 건물피해 정신적피해 | 4억1천만원 요구 |
| 18 | 경부고속도로 가양터널 구간 | 소음 진동 | 건물피해 정신적 피해 | 건물피해보상 22,700,000원 정신적 피해보상 30,000,000원 |
| 19 | 군산시 농수로터널 발파 | 소음 진동 | 건물피해 | 300만원 배상 |
| 20 | 고철 옥천군 옥천읍 가화리 화신터널 | 발파 | 건물균열 | - |
| 21 | 고철 금정산 천성산 터널 | 터널굴착 | 고층습지고갈 지하수누수 | - |
| 22 | 서울외곽순환고속도로 사패산터널 | 지하수저하 소음 진동 | 사찰피해 생태계 피해 | 환경단체 반발 |

2.2 터널현장 종사자에 대한 설문조사

터널건설에 따른 환경에 대한 영향을 알아보기 위하여 국내의 지하철 및 도로터널 현장에 근무하는 사람들에 대하여 설문조사를 실시하였다. 주요 항목은 실제 터널건설에 있어서 가장 환경에 민감하게 영향을 미치는 항목에 대한 조사와 지하수 그리고 소음, 진동의 영향 여부를 조사하였다.

그림 1은 터널굴착 중 가장 환경에 영향을 미치는 항목에 대하여, 터널발파로 인한 소음의 피해가 42%로 가장 큰 것으로 나타났다. 소음에 이어서 지하수에 영향을 준다고 응답한 사람이 29%, 발파로 인한 진동에 의한 영향은 25%, 기타 분진에 의한 피해는 4%로 나타났다. 조사결과 터널굴착시 환경에 영향을 주는 항목은 크게 소음, 진동, 지하수의 3가지 요소가 있음을 알 수 있었으며, 향후 터널건설시 이에 대한 항목에 중점을 두어 터널건설을 해야 할 것으로 판단된다.

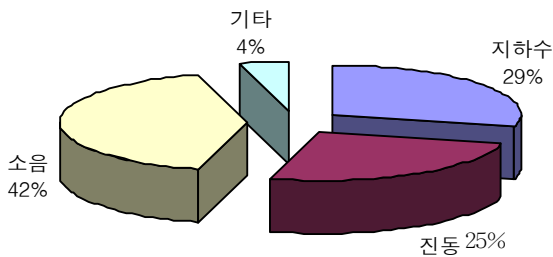


그림 1. 터널굴착중 환경에 가장 영향을 미치는 항목

그림 2는 지하수와 소음진동이 실제로 터널현장에서 환경에 영향을 미치는가에 대한 조사이다. 조사에 응한 응답자들이 자신들이 근무하는 터널현장에서 지하수와 소음진동이 환경에 영향을 미친다고 응답한 사람이 약 20%이며, 지하수에 영향을 전혀 미치지 않는다고 응답한 사람은 40%, 소음진동의 경우 약 17%를 차지하는 것으로 나타났다. 조사결과, 지하수의 경우 영향을 주지 않는다는 응답이 약 40%로서, 소음진동에 비해서는 실제로 환경에 영향을 미치지 않는다는 의견을 보였다. 이러한 이유는, 소음진동의 경우 인근마을의 민원 발생, 건물의 균열, 가축의 피해 등으로 가시적으로 보일 수 있지만, 지하수의 경우 그 특성상 소음진동에 비하여 실제 그 피해를 쉽게 알지 못한다는 특성인 것으로 판단된다.

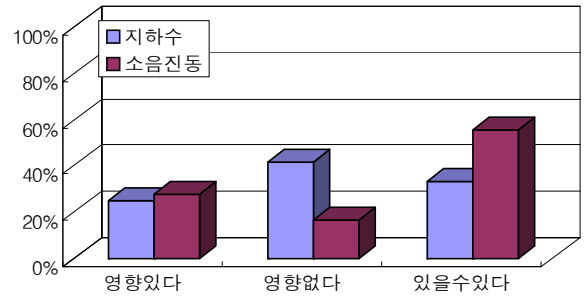


그림 2. 지하수, 소음 진동이 환경에 미치는 영향

2.3 피해유형에 대한 분석

터널건설로 인하여 발생한 피해사례에 대하여 피해유형별 조사 및 분석을 하였다. 터널건설에 따른 환경피해 사례 분석은 1999년 1월부터 2004년 6월말까지 중앙환경분쟁 조정위원회에 제기된 385건의 환경분쟁 조정 사례중 터널공사와 관련된 분쟁사례와 국민고충처리위원회에 제기된 사례 및 각종 터널공사현장에서 조사한 사례 등에 대하여 분석을 실시하였다.

그림 3은 터널공사로 인해 발생한 피해를 유형별로 분석한 것이다. 터널공사로 인하여 발생한 피해로는 크게 터널공사현장 인근에서 사육중인 가축에 대한 피해와 발파로 인한 진동에 의하여 인근 주택이나 건물에 균열이 발생하는 피해가 가장 큰 것으로 나타났다. 건물피해의 경우 33%를 차지하여 가장 많은 피해형태로 나타났으며, 가축피해와 정신적 피해가 각각 20%, 18%로 이들 3가지 유형이 전체의 약 70% 이상을 차지하는 것으로 나타났다. 이밖에, 분진 및 소음피해, 지하수 고갈 등의 피해도 발생가능한 유형이다.

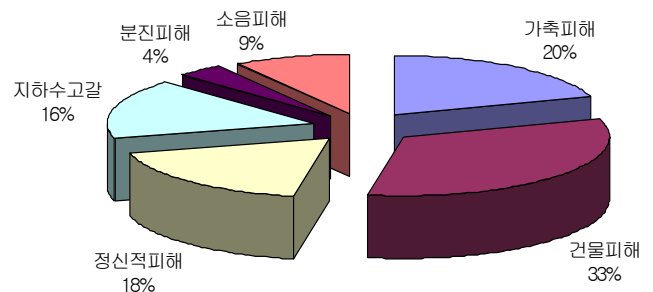


그림 3. 터널건설로 인한 피해유형

2.4 발파로 인한 소음·진동 분석

그림 4는 중앙환경분쟁조정위원회와 국민고충처리위원회 및 기타 자료로부터 터널발파 및 공사장비에 대한 소음측정 자료를 분석한 것이다. 각 사례마다 이격거리가 다르지만, 터널발파시와 공사장비가 운용 중일 때 피해가 클 것으로 예상되는 지점에서 측정하였다. 측정결과, 조사대상의 약 65%가 국내 소음·진동규제법중 생활소음 규제기준인 70dB(A)(주간 08:00~18:00, 공사장 기준)을 초과하는 것으로 나타났다. 이러한 분쟁사례에서 중앙환경분쟁조정위원회에서는 소음으로 인해 인체에 영향을 미칠 수 있는 수인한계를 70dB(A)로 정하여 소음에 의한 피해를 인정하고 있다.

현재 각 터널공사현장에서는 이러한 소음으로 인한 피해를 예방하기 위하여 발파시 분할발파의 실시, 무진동 무소음 공법에 의한 발파, 터널 갱문입구에 방음문 설치 등 여러 가지의 방음대책을 강구하고 있으나, 소음이라는 환경적 특성 때문에 그 효과는 크게 나타나고 있지 않는 실정이다.

그림 5는 진동측정 자료를 분석한 것이다. 현재 소음·진동규제법에서는 진동기준을 생활소음 규제기준과 동일한 70dB(V)~75dB(V)로 규정하였다. 그러나, 중앙환경분쟁조정위원회에서는 이러한 기준보다는 인체가 영향을 미칠 수 있는 수인한계 기준으로 73dB(V)로 하여 분쟁조정시 이 값을 적용하고 있다. 조사결과, 진동도는 34dB(V)~90dB(V)로 분포하며 수인한계인 73dB(V)을 초과하는 사례는 전체의 50%로 나타났다

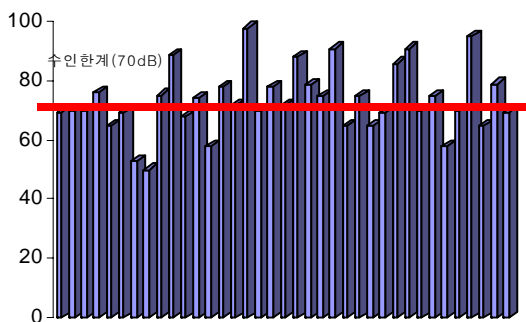


그림 4. 소음도 측정자료결과

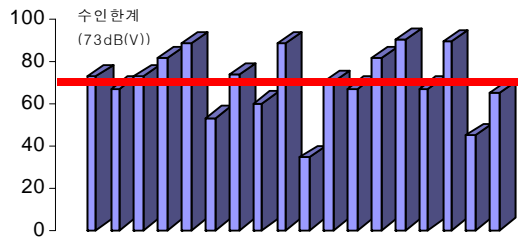


그림 5. 진동도 측정자료결과

그림 6은 발파진동에 대한 측정결과이다. 측정결과 구조물 손상기준 발파진동 허용치(1999년 건설교통부 제정)인 일반가옥에 대한 기준인 1.0cm/sec 이내로 관리되고 있으며, 대부분의 경우 문화재 관리기준인 0.3cm/sec 이내로 측정되어 진동도, 소음에 비해서는 그 영향이 크지 않는 것으로 나타났다.

여러 분쟁조정사례들을 보면, 진동 및 소음이 법적인 규제치내로 발생하였더라도 진동 및 소음이 인간 및 동물에 미치는 영향은 어느 정도 개연성이 있다고 보며, 피해일부를 배상해야 한다는 것으로 조사되었다.

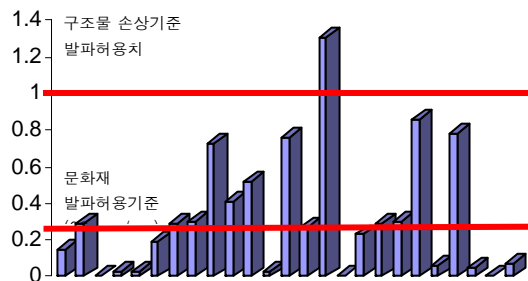


그림 6. 발파진동 측정자료결과

2.5 민원제기로 인한 피해액 분석

그림 7은 중앙환경분쟁위원회 및 국민고충처리위원회에 조정을 의뢰한 사례중에서 보상요구액 및 실제 배상액을 도시화한 것이다. 사례들을 살펴보면 대략 터널공사로 인한 건물균열 및 소음, 진동에 의한 정신적 피해, 측사피해 등에 대한 보상액을 약 3천만원에서 12억원 가량을 요구한 것으로 나타났으며, 이에 대한 법원의 배상판결은 피해보상요구액의 약 10% 정도를 인정하는 것으로 나타났다.

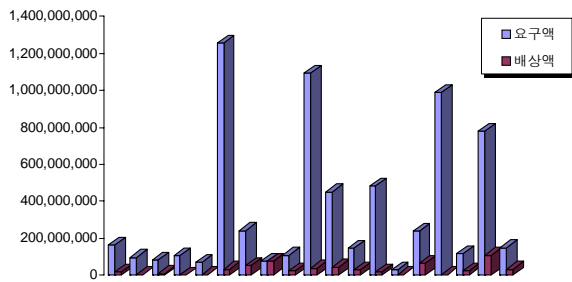


그림 7. 터널관련 피해요구액 및 보상액

법원의 주요 피해인정내용은 진동 및 소음이 법적인 규제치내로 발생하였더라도, 진동 및 소음이 인간 및 동물에 미치는 영향은 어느 정도 개연성이 있다고 보며, 피해일부를 배상해야 한다고 한다.

3. 터널굴착에 따른 지하수위 변위 해석

앞절에서 사례분석을 통하여 터널건설로 인한 환경에 미치는 인자로서 지하수, 소음, 진동 등을 도출하였다. 본 절에서는 환경에 영향을 미치는 인자중 하나인 지하수에 대하여 침투류 해석을 실시하여 터널굴착후 시간에 따른 지하수위 저하 경향과 간극수압 분포 등을 알아보려고 한다.

3.1 침투류해석

포화수가 연결된 공극을 갖는 다공질 매체내를 침투할 때 유출속도 v 는 동수경사 i 에 비례하고 따라서, 침투유량 Q 는 동수경사 및 투수단면적 A 에 비례한다.

$$Q = kiA$$

여기서, k 는 투수계수로서 속도의 차원을 가지며 액체내의 투수성의 크기를 평균적 흐름의 통계적 개념으로 나타내는 척도가 된다. 한편, 암반내의 침투이론은 매우 불규칙적이어서 복잡하게 분포된 불연속면에 의하여 지배되므로 Darcy의 법칙과 같은 단순한 해석은 불가능하다. 그러나, 경계조건이 명확하고, 불연속면의 규모에 비하여 대상물의 규모가 충분히 크며 탁월한 불연속면을 따라 파쇄대가 형성되어 있거나, 거시적으로 볼 때 등방성 또는 이방성으로 간주될 경우에는 투수이론을 적용한 해석 및 실험이 가능하다. 지하수위면보다 낮은 지중에

배수형 터널을 건설하게 되면 터널은 지중에 설치된 배수관과 같은 역할을 하게 되며, 이에 따라 지하수의 흐름상태는 정상류 흐름과 부정류 흐름상태의 두 가지로 분류된다. 정상류 상태는 지하수의 유입원이 무한하여 시간에 따라 지하수위와 터널을 통한 배출 수량이 크게 변화하지 않는 상태를 말하며, 부정류 상태는 터널로 배수되는 배출 수량이 터널 주변 지반으로 충전되는 지하수량보다 많아서 시간이 경과함에 따라 지하수위가 저하되면서 터널내로의 배출수량이 감소하는 상태라 할 수 있다.

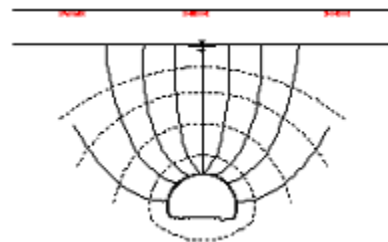


그림 8. 정상류 흐름상태

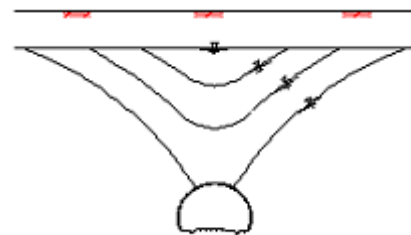


그림 9. 부정류 흐름상태

3.2 현장현황

본 해석에 적용된 터널은 부산 지하철 ○○ ~ ○○ 구간으로서 터널굴착구간으로 지방하천이 흐르며, 지층현황은 터널천단부 위로는 매립층, 충적층, 풍화도와 풍화암층 등으로 구성되어 있으며, 지하수위는 G.L -3.0m에 위치하고 있으며, 천단부 보강을 위하여 강관다단 그라우팅을 적용하였다. 그림 10은 본 구간의 지하수위 및 지반현황을 나타낸다.

3.3 해석조건

해석영역은 지층조건을 고려한 해석심도를 모델링하였으며 지하수 용출범위는 지하수유동 해석결과로부터 터널 단면좌우측으로 150m를 적용하였으며 하부는 3H(터널고)이상 적용하였으며 모델링에 적용된 지하수위는 적용구

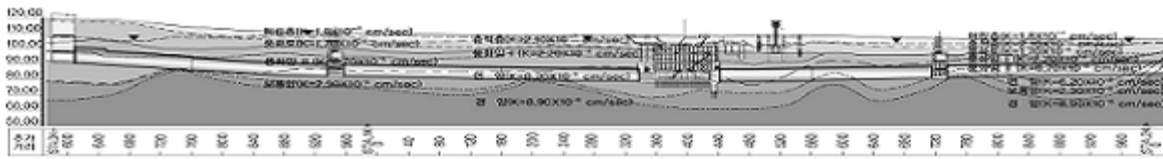


그림 10. 지하수위 및 지층현황

간의 상시평균 지하수위를 적용하였다. 또한, Transient 해석에 적용한 유입기간은 시공기간을 고려하여 굴착초기부터 2년간 유입조건을 적용하였다.

해석은 굴착시점을 기준으로 굴착완료시 갱구부의 1일 배출량을 분석하였으며, 다음과 같은 방법으로 해석을 실시하였다.

- 지층별 투수계수를 차별적용하고 시공기간을 고려하여 기간별 Transient 해석을 수행
- 지반을 연속체로 가정하여 유입조건은 상시 지하수위 면에서 항시 유입되는 조건을 적용하고 지표면에 강우 조건을 고려
- 터널주변은 수압(P=0)경계를 이용하여 유출되도록 하며, 지층별 투수계수를 차별적용하고 시공기간을 고려하여 기간별 Transient 해석을 수행

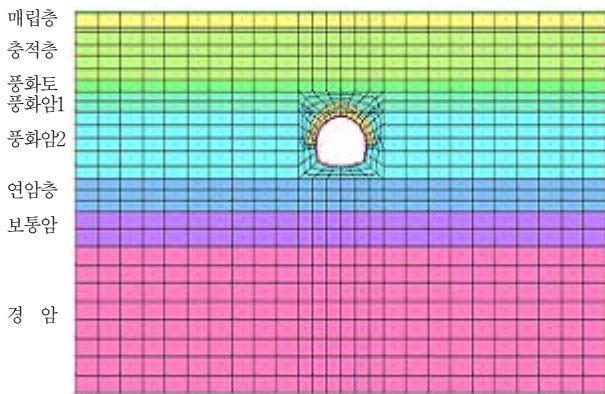


그림 11. 해석단면

표 2. 지층별 적용 투수계수

| 지층 | 투수계수 |
|------|-------------------------------|
| 충적층 | $k=1.8 \times 10^{-5}$ cm/sec |
| 풍화암 | $k=2.2 \times 10^{-4}$ cm/sec |
| 연암 | $k=6.7 \times 10^{-5}$ cm/sec |
| 경암 | $k=8.9 \times 10^{-6}$ cm/sec |
| 숏크리트 | $k=0.10368$ m/day |
| 강관다단 | $k=9.5 \times 10^{-4}$ m/day |

3.4 해석결과

3.4.1 시간에 따른 유출량 변화

시간의 경과에 따른 지하수의 저하로 인한 영향을 검토하기 위하여 부정류해석(transient analysis)을 실시하였으며, 부정류 해석결과 시간경과에 따른 유출량 변화는 그림 12와 같이 나타났다.

굴착직후 약 $2.11 \text{ m}^3/\text{min}/\text{km}$ 가 유출되는 것으로 해석되었으며, 시간의 경과에 따라 유출량이 감소하며 약 6개월 이후로는 유출량이 굴착직후의 약 68% 수준인 $1.45 \text{ m}^3/\text{min}/\text{km}$ 에 점차로 수렴하는 것으로 나타났다. 이는 터널굴착에 의해서 터널내로 지하수가 유입됨에 따라 주위의 지하수위가 낮아지면서 평형상태로 수렴하는 과정에서 유입량이 점차 감소하여 약 6개월후 $1.45 \text{ m}^3/\text{min}/\text{km}$ 의 값에 수렴하는 것으로 판단된다.

그림 13은 굴착후 시간경과에 따른 유속벡터 및 간극수압분포를 나타낸 것이다. 그림 13으로부터 시간이 경과함에 따라 간극수압은 점차로 작아지는 경향을 보이며, 라이닝에도 일부 수압이 작용하므로, 이에 대한 영향을 검토하여야 할 것으로 판단된다.

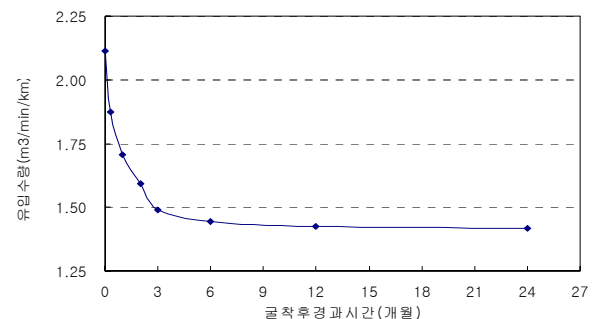
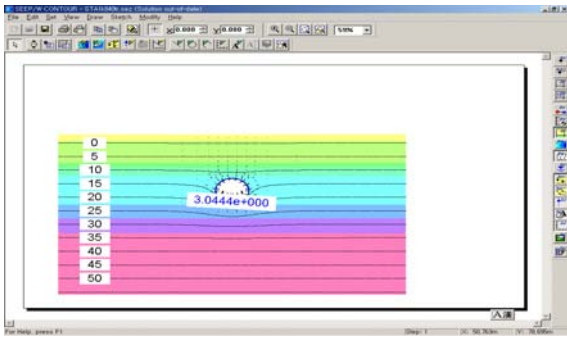
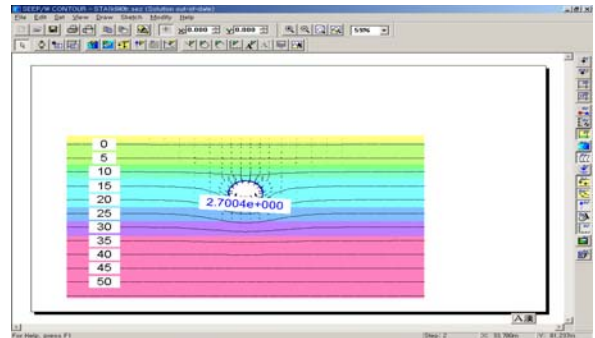


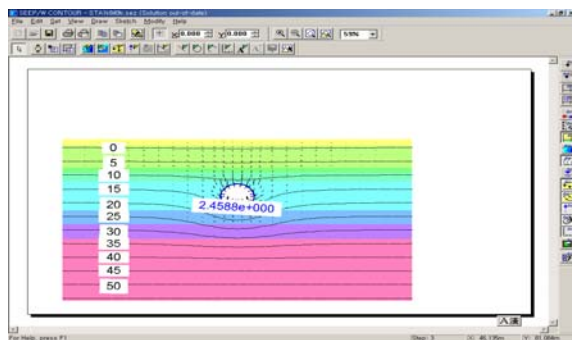
그림 12. 시간경과별 유출량 변화량



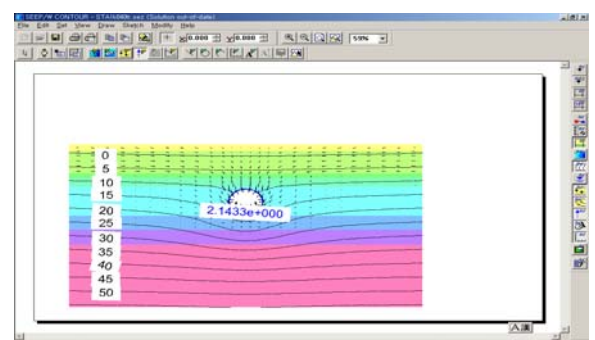
(a) 굴착후 1일



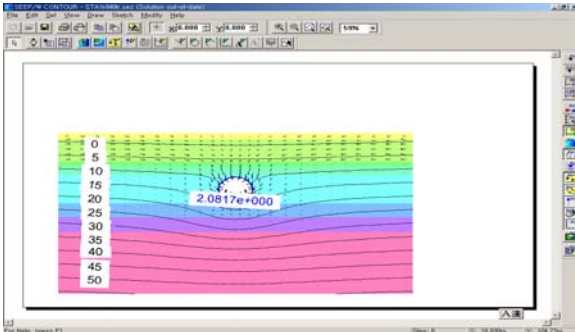
(b) 굴착후 7일



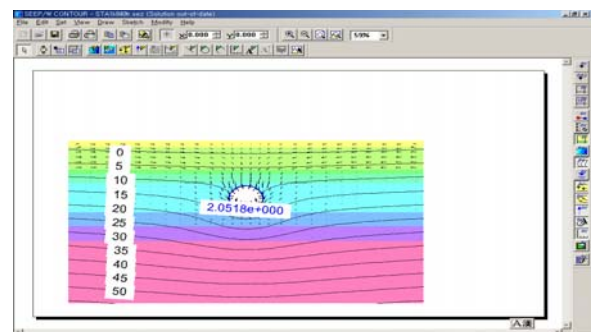
(c) 굴착후 30일



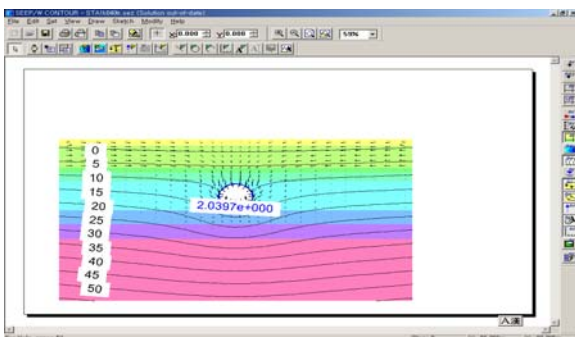
(d) 굴착후 90일



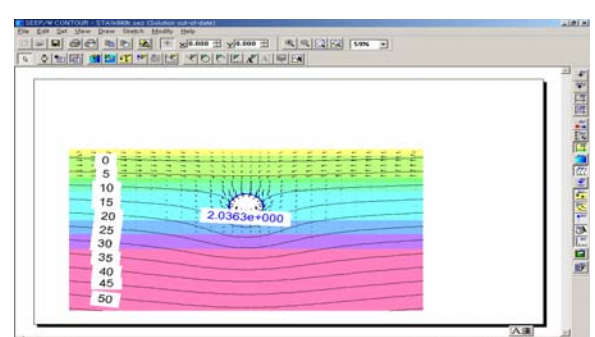
(e) 굴착후 6개월



(f) 굴착후 1년



(g) 굴착후 2년



(h) 굴착후 4년

그림 13. 시간경과별 유속벡터 및 간극수압분포

3.4.2 경험식에 의한 유출량 산정

경험식(Goodman)에 의하여 터널내로 유입되는 유입량을 산출하였다. Goodman의 식은 다음과 같으며, 산정결과 표 3과 같이 2.44(m³/min/km)가 유출되는 것으로 산정되어, 수치해석에서 산정된 값(2.11m³/min/km) 보다 다소 큰 값을 나타내었다.

$$Q = \frac{2 \pi K_s H_o}{\ln \left(\frac{4L}{d} \right)}$$

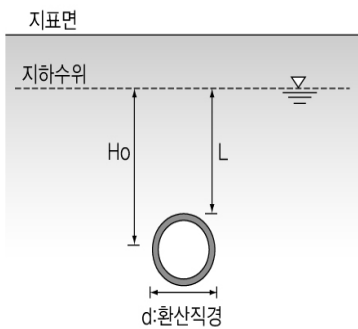


그림 14. 유출량 산정 개념도

- 여기서, Q : 지하수 침투유량
 H_o : 터널중심에서 지하수위간 거리
 L : 천단부에서 지하수위간 거리
 K_s : 암반투수 계수
 d : 터널의 환산직경

표 3. 경험식에 의한 유출량 산정

| d(m) | K _s (cm/sec) | H _o (m) | L(m) | Q (m ³ /sec/m) | Q (m ³ /min/km) |
|------|----------------------------|--------------------|------|------------------------------|-------------------------------|
| 8.99 | 6.7×10 ⁻⁵ | 16.80 | 12.8 | 0.0000407 | 2.44 |

경험식에 의해 계산된 유입량은 굴착후 지하수위 저하가 고려되지 않은 관계로 2차원 부정류 (Transient) 해석결과에 비해 상당한 차이를 보이는 것으로 나타났다. 굴착단계별 최대 유출량의 수치해석 결과는 터널의 연장, 시공기간, 지반성상 등을 종합적으로 고려한 결과이며 실제 용출수는 암반에 발달한 절리와 같은 불연속면을 따라 침투가 이루어지는 것이 대부분이다.

3.4.3 시간에 따른 지하수위 변화

터널굴착이 완료된 후의 시간경과에 따른 지하수위 변화를 검토하기 위하여 부정류해석을 실시하였다. 해석결과 터널주위의 지하수가 터널로 유입됨에 따라 그림 15와 같은 지하수위 변화를 보인다. 즉 터널굴착은 터널 주변의 지하수거동에 영향을 미치나, 그 영향은 크지 않은 것으로 판단되며, 터널 천단부 지점의 지하수위가 가장 큰 것으로 나타났으며, 초기와 비교하여 지하수위는 약 4.5m 정도 하강하는 것으로 보여 굴착에 의한 영향은 크지 않은 것으로 판단된다. 그림 15에 표기된 1~9는 각각 굴착후 1일, 7일, 30일, 60일, 90일, 6개월, 1년, 2년, 4년을 나타낸다.

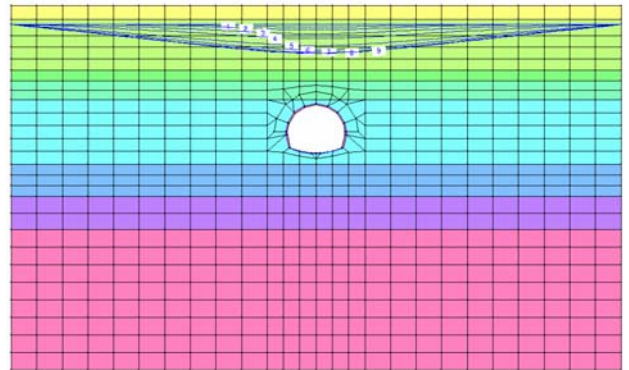


그림 15. 시간경과에 따른 지하수위 변화

시간에 따른 지하수위 변화를 보면, 그림 16과 같이 굴착완료후 약 6개월 동안 지하수위의 강하는 약 4.0m의 변화를 보이나 이후의 지하수위의 저하는 점차적으로 줄어드는 경향을 보이며, 4년후의 지하수위는 약 4.4m로서 점차 이 값에 수렴할 것으로 판단된다. 굴착완료후 지하수위의 변화는 초기상태와 비교하여 약 4.5m 내외로서 지하수위 강하가 크지 않으며, 자연적으로 회복가능한 정도로 보이며, 지표수의 고갈 등에 대한 환경적인 영향은 없을 것으로 판단된다. 그러나, 파쇄대와 같은 지하수의 이동경로가 터널굴착구간을 지나간다면, 많은 양의 지하수가 터널내부로 유입될 가능성이 있으므로 터널공사시 파쇄대와 같은 단층대에 대한 세심한 주의 및 보강이 필요할 것이다.

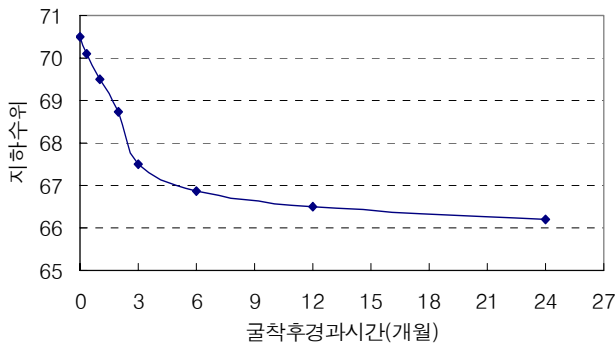


그림 16. 시간에 따른 지하수위 변화

4. 결론

본 연구에서는 터널건설에 따른 환경영향을 조사·분석하여 환경적 영향을 최소화하기 위한 기초자료로 활용하기 위하여 연구하였으며, 분석결과 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

- (1) 터널굴착중 가장 환경에 영향을 미치는 항목에 대하여 설문조사를 한 결과, 터널발파로 인한 소음의 피해가 42%로 가장 큰 것으로 나타났다. 소음에 이어서 지하수에 영향을 미친다는 응답이 29%, 발파로 인한 진동에 의한 영향은 25%, 기타 분진에 의한 피해는 4%로 나타났다.
- (2) 터널공사로 인하여 발생된 피해유형으로는 크게 터널공사현장 인근에서 사육중인 가축에 대한 피해와 발파로 인한 진동에 의하여 인근 주택이나 건물에 균열이 발생하는 피해가 가장 큰 것으로 나타났다. 건물피해의 경우 33%를 차지하여 가장 많은 피해형태로 나타났으며, 가축피해와 발파로 인한 정신적 피해가 각각 20%, 18%로 이들 3가지 유형이 전체의 약 70% 이상을 차지하는 것으로 나타났다.

- (3) 분쟁사례가 발생한 지역에 대해 소음 및 진동에 대한 계측결과, 일부 현장에서는 기준치를 초과하는 것으로 조사되었으며, 진동 및 소음이 법적인 규제치 이내로 발생하였더라도 진동 및 소음이 인간 및 동물에 미치는 영향은 어느 정도 개연성이 있다는 것으로 조사되었다.
- (4) 본 사례조사 분석을 통하여 터널건설에 따른 환경영향 최소화 기술은 민원발생이나 분쟁사례가 가장 많은 소음·진동 및 지하수에 대하여 중점적으로 그 연구가 이루어져야 하며, 법적인 규제치 이내로 억제할 수 있는 기술 이외에도 인간공학적 측면에서의 접근도 필요한 것으로 판단된다.
- (5) 부산지하철 ○○구간을 대상으로, 시간의 경과에 따른 지하수의 저하로 인한 영향을 검토하기 위하여 부정류해석(transient analysis)을 실시하였으며, 부정류 해석결과 굴착직후 약 2.11m³/min/km가 유출되는 것으로 해석되었으며, 시간의 경과에 따라 유출량이 감소하며 약 6개월 이후로는 유출량이 최대 1.45m³/min/km보다 작은 값으로 점차 수렴하는 것으로 나타났다.
- (6) 부정류해석결과 터널주위의 지하수가 터널로 유입됨에 따라 터널 굴착이 지하수거동에 영향을 미칠 수 있으나, 초기와 비교하여 지하수위는 약 4.5m 정도 하강하는 것으로 보여 굴착에 의한 영향은 크지 않은 것으로 판단된다.
- (7) 파쇄대와 같은 지하수의 이동경로가 터널굴착구간을 지나간다면 많은 양의 지하수가 터널내부로 유입될 가능성이 있으므로 터널공사시 파쇄대와 같은 단층대에 대한 세심한 주의 및 보강이 필요할 것이다.

(접수일자 : 2004년 10월 28일)

참 고 문 헌

1. 환경부 중앙환경분쟁조정위원회, <http://edc.me.go.kr/>.
2. 국민고충처리위원회, <http://www.ombudsman.go.kr/>.
3. 건설교통부(1998), 환경친화적 도로건설요령.
4. 고태영, 문현구(2001), 3차원 절리망에서의 지하수 유동에 관한 연구, 한국자원공학회지 vol. 38.
5. 허준석, 정일문, 허준행, 조원철(1997), 해저 및 하저터널로의 지하수 유비에 관한 정량적 분석, 대한토목학회논문집 제 17권 제 II-1호, pp. 13~22.
6. 김태희, 김영식, 하규철, 김구영, 고동찬, 양인제, 홍순택(2004), 터널 건설에 따른 인근하천 영향평가를 위한 연구, 한국지질공학회지 vol. 14.
7. 이병대, 성익환, 조병욱, 신희순(2002), 터널 굴착 주변지역의 지하수유동모델링을 위한 지하수함양량 산정, 한국터널공학회지 터널기술 vol. 4, pp. 22~31.
8. 이희근, 전효택, 이종운, 이대혁, 류동우, 오석영(1995), 동해신광 터널굴착공사와 관련된 지표수 및 지하수의 유동변화에 대한 조사연구, 터널과 지하공간 제 5권, pp. 347~362.
9. 주광수, 박경호, 서영호, 고성일(2003), 터널굴착에 따른 고원습지 영향 최소화 방안 연구, 2003 추계학술발표회, 한국철도기술연구원.
10. 성익환, 이병대, 조병욱, 이봉주(1998), 도수로터널 굴진에 의한 지하수 누출과 주변 지역의 지하수위 변화 양상, 대한자원환경지질학회 학술발표회지.
11. 송원경(2004), 터널굴착과 지하수 고갈 상관조사, 2004 한국암반공학회 기술세미나, pp. 51~60.
12. 천병식, 최송암, 남순성(1995), 배수형터널내 과다유입수가 터널의 안정에 미치는 영향, 한국지반공학회지 제 11권 제 4호.
13. Molinero et al(2002), Numerical modeling of the Hydrogeological response produced by tunnel construction in fractured bedrocks, Engineering Geology vol. 64.
14. Liu et al(2000), Application of environmental Isotope to groundwater study of the Quinling railway tunnel, Tunneling and Underground Space Technology, vol. 15.
15. Goodman, R.F.(1965), Groundwater inflows during tunnel driving, Bull.Int.Assoc.Eng.Geol.