

## 산악지역의 터널건설에 의한 지하수위 변동분석

### Analysis of Groundwater-Level Variation Caused by Tunnel Construction at a Mountain Area

강 동 환(Kang, Dong Hwan)  
정 상 용(Chung, Sang Yong)  
심 병 완(Shim, Byong Ohan)  
김 병 우(Kim, Byung Woo)  
정 상 원(Cheong, Sang Won)

부경대학교 환경지질학과  
부경대학교 환경지질학과  
부경대학교 환경지질학과  
부경대학교 환경지질학과  
충북대학교 과학교육부

#### 요약

수락산 터널구간 기반암의 평균투수계수는  $2.64 \times 10^{-6} \text{cm/sec}$ , 평균RQD는 78%, 평균공극율은 0.51% 이다. 지하수위와 표고간의 상관성분석을 이용하여 수락산 정상부에서 지하수위를 추정 한 결과, 터널구간의 전체 평균수리경사는 0.267로서 산출되었다. 수리분석에 의한 수락산 터널구간에서의 지하수 유출량은 약 66,378~121,574m<sup>3</sup>/yr, 함양량은 863,500m<sup>3</sup>/yr로 산정되었다. 3차원 지하수유동모델링 소프트웨어 MODFLOW를 이용하여 터널건설에 의한 지하수위 변동을 분석한 결과, 1년 후에는 터널 중심부에서의 지하수위 강하가 각각 40~45m로 나타났으며 터널구간의 지하수위는 3년 후에, 그리고 모델 영역 전체 지하수위는 4.5년 후에 완전하게 정류상태로 회복되었다.

주요어 : 터널, 유출량, 함양량, 지하수위, 지하수유동모델링, MODFLOW.

#### 서론

사회·경제적인 활동의 증가로 늘어나는 교통량을 해소하기 위하여, 도로의 확장이나 신설이 매년 크게 이루어지고 있다. 그런데 산악지역에 도로를 건설할 경우에는 터널이 필수적으로 수반된다. 본 연구에서는 서울외곽순환 고속도로건설의 일환으로 실시될 수락산 터널건설시 일어나는 지하수위 변동상태를 지하수모델링을 통하여 분석하였다.

수락산 터널은 서울특별시 노원구에 위치하며, 연장 2,950m, 폭 18.77m, 높이 10.497m의 편도 4차선 병렬터널로 계획되어 있다. 수락산 터널을 포함하는 조사지역은 지질학적으로 경기 육괴의 서울화강암이라 부르는 대보화강암으로 대부분 이루어져 있다(홍승천 외 2인, 1982). 본 연구의 목적은 현장시험과 실내시험에 의해 산출된 투수계수, 지하수위, RQD, 공극율과 물수지분석 자료를 이용해 지하수 함양량과 터널유출량을 산정하고, 이 결과를 이용해 산악지역 터널건설에 의한 지하수위 변동을 분석하는 것이다. 지하수 모델링에서는 수락

산 터널이 완공된 상태로 가정하여 주변 지하수에 미치는 영향을 평가하고, 지하수위 분포와 수위강하를 예측하였다.

### 수락산 터널구간 기반암의 물성 및 수리경사

Fig.1은 수락산 터널구간 및 연구지역의 지형, 현장시추공(TB-1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8)의 위치를 나타내며, 지하수모델링의 모델영역이 도시되어 있다. 수락산터널 구간에 4개의 깊은 계곡이 교차하며, 수계의 주흐름방향은 남서 방향(앞개울골, 뒷개울골)과 남남동 방향(학림골, 용굴암골)이다(Fig.2).

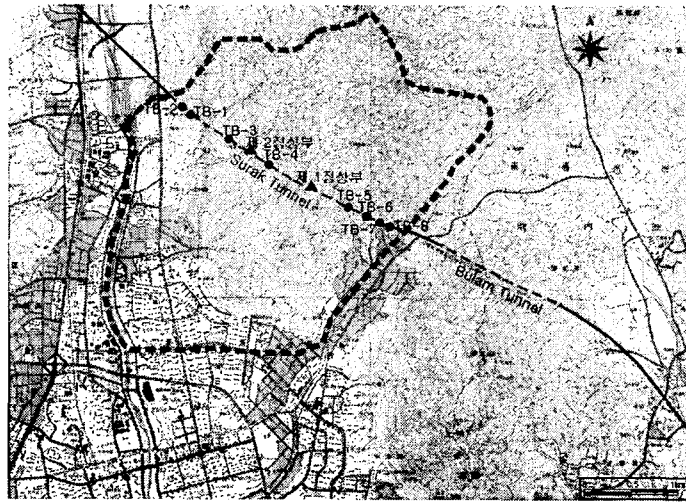


Fig. 1. 연구지역의 지형 및 터널구간.

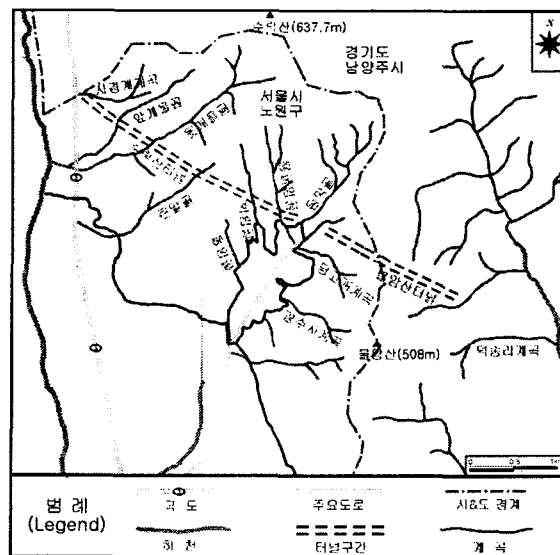


Fig. 2. 수락산 터널구간의 수계.

수락산 터널의 입구부와 출구부에서 수행한 8개의 시험시추공에서 실시된 수압시험결과에 의하면 각 시추공별 기반암의 평균투수계수는  $5.56 \times 10^{-7} \sim 6.12 \times 10^{-6} \text{ cm/sec}$  의 범위에 있으며, 이들 자료에서 계산된 터널구간 전체의 평균투수계수는  $2.64 \times 10^{-6} \text{ cm/sec}$  이다. 열극이 발달된 화성암이나 변성암에서의 투수계수는  $8 \times 10^{-7} \sim 3 \times 10^{-2} \text{ cm/sec}$ 의 범위에 있는 것으로 보고되어 있다(Domenico and Schwartz, 1998). 현장코아의 RQD는 52~89%의 범위로 나타나며, 평균은 78%로서 암질상태가 매우 양호하다(이정인 외 2인, 1997). 시험시추에서 채취된 암석코아의 실내시험 결과 공극율의 범위는 0.25~1.08%이며, 평균치는 0.51%이다. 실내시험에 이용된 코아에는 절리의 발달이 미약하므로, 현장암석의 공극율은 이보다 큰 값을 가질 것으로 판단된다. 수락산 터널 입구부와 출구부의 시험시추에서 얻은 지하수위 범위는 지표면하 0.5~4.5m이며, 해수면기준으로 환산할 경우 77.06~125.97m의 범위에 있다(Table 1).

Table 1. 수락산 터널 구간 기반암의 물성 및 지하수위 현황.

시추공	투수계수(cm/sec)	RQD(%)	공극율(%)	지하수위(m)
TB-1	$3.78 \times 10^{-6}$	80	0.35	87.53
TB-2	$1.62 \times 10^{-6}$	52	0.60	77.06
TB-3	$5.56 \times 10^{-7}$	80	0.25	87.35
TB-4	$2.50 \times 10^{-6}$	89	0.30	93.15
TB-5	$6.12 \times 10^{-6}$	65	0.86	105.04
TB-6	$3.12 \times 10^{-6}$	89	1.08	120.18
TB-7	$2.24 \times 10^{-6}$	89	0.35	125.97
TB-8	$1.18 \times 10^{-6}$	79	0.29	108.05
평균	$2.64 \times 10^{-6}$	78	0.51	100.54

일반적으로 지형의 고도와 지하수위 관계는 선형적인 비례관계에 있다(정상용 등, 1999). Fig.3은 수락산터널의 입구부와 출구부 주변에서 실시된 7개의 시험시추공에서 측정된 지하수위와 표고간의 상관성을 분석한 것이다. 두 자료의 상관성은 거의 비례관계에 있으며, 매우 크게 나타났다. 지하수위와 표고간의 관계식은 식 (1)과 같다.

$$\text{지하수위}(m) = 0.9811 \times \text{표고}(m) - 0.0012(m) \quad (1)$$

수락산지역의 지하수위자료에서 구한 선형회귀식을 이용하여 터널이 통과되는 지역의 제 1정상에서 추정된 지하수위는 해발 260.0m 이며, 제 2정상에서 추정된 지하수위는 178.6m 이다. 이 추정된 지하수위자료를 이용하여 수락산 제 1정상부에서 구한 수리경사는 약 0.238 이고, 제2정상부에서 구한 수리경사는 약 0.295 이다. 따라서, 수락산 전체의 터널관통지역에서 지하수 유동의 평균 수리경사는 약 0.267로서 매우 큰 편이다.

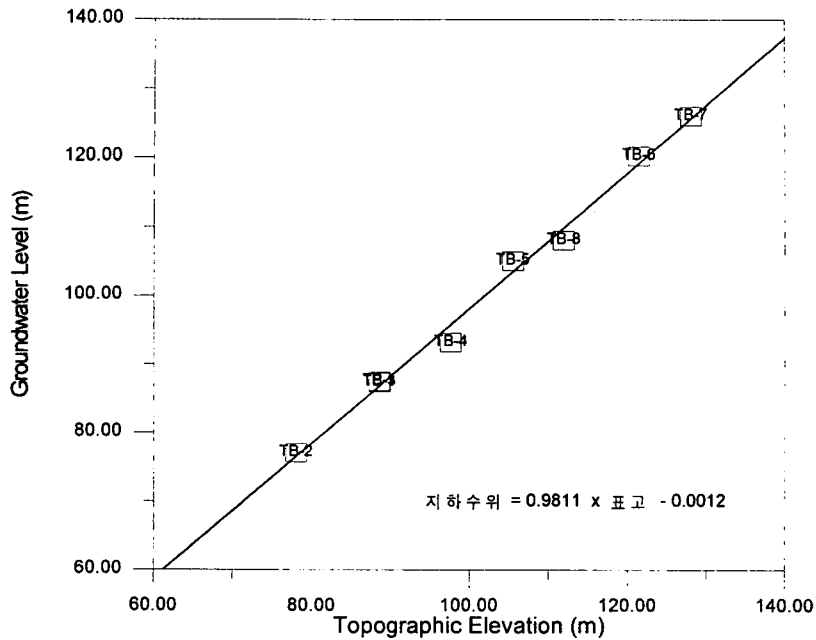


Fig. 3. 수락산 터널지역의 표고와 지하수위의 상관성.

### 지하수 유출량과 함양량 산정

터널반경을 터널의 최대 높이인 10.5m로 가정할 경우 지하수유출이 일어날 수 있는 측면의 총길이는 약 33m가 된다. 따라서 터널측면의 총유출면적은  $33m \times 2,950m = 7,350m^2$  이다. 투수계수는 시험시추공에서 수압시험으로 산출한 평균값인  $2.64 \times 10^{-8} m/sec$ 을 사용하고, 수락산터널 굴착에 의한 지하수 유출로 일어나는 지하수위 강하량을 50~91.5m 로 가정할 경우에, Darcy's Law를 적용한 식 (2)와 (3)에 의해 터널측면의 연간 지하수 유출량은 44,252~81,049  $m^3/yr$ 로 산정된다.

$$\begin{aligned}
 Q &= AKJ_y \\
 &= (33m \times 2,950m) \times (2.64 \times 10^{-8} m/sec) \times (60 \times 60 \times 24 \times 365 sec/yr) \times 0.546 \quad (2) \\
 &= 44,252 m^3/yr
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 Q &= AKJ_y \\
 &= (33m \times 2,950m) \times (2.64 \times 10^{-8} m/sec) \times (60 \times 60 \times 24 \times 365 sec/yr) \times 1.000 \quad (3) \\
 &= 81,049 m^3/yr
 \end{aligned}$$

지면유출은 측면유출보다 유출면적( $20m \times 2,950m$ )이 적고, 또한 수리경사가 적기 때문에 측

면유출의 50%정도로 산정하였다. 즉, 지면유출량은 22,126~40,525 m<sup>3</sup>/yr 정도로 산정된다. 따라서 측면유출과 지면유출을 합산한 총 유출량은 66,378~121,574 m<sup>3</sup>/yr로 산정된다(Table 2).

Table 2. 수락산 터널에 의한 지하수 유출량.

수위강하(m)	수직수리경사 (J <sub>y</sub> )	측면유출량 (m <sup>3</sup> /yr)	지면유출량 (m <sup>3</sup> /yr)	총유출량 (m <sup>3</sup> /yr)
50.0	0.546	44,252	22,126	66,378
91.5	1.000	81,049	40,525	121,574

지하수 함양량은 수락산 지역의 강수량, 증발산량, 지표유출량 및 기저유출량 등을 이용하여 물수지분석에 의한 함양율(1992년부터 2001년까지 10년간 평균강수량 1457.1mm의 20.09%에 해당하는 292.7mm)과 유역면적을 고려하여 다음과 같이 산출되었다.

$$\begin{aligned}
 \text{지하수함양량} &= \text{함양율} \times \text{유역면적(터널주변의지하수함양유역)} \\
 &= 292.7 \text{ mm/yr} \times 2,950,000 \text{ m}^2 \\
 &\doteq 863,500 \text{ m}^3/\text{yr}
 \end{aligned}
 \tag{4}$$

식 (4)에서 산출된 양의 지하수가 매년 수락산 일원에 함양되므로 터널에서의 지하수 유출로 일어나는 지하수위 강하는 크지 않을 것이다. 터널공사시 지수그라우팅의 적절한 조치를 취하지 않고, 지하수의 유출이 계속 일어나는 것으로 가정할 경우에도 터널이 완공된 후 지하수 유출량은 이 지역의 지하수 함양량과 비교할 때, 약 8~14%로 상대적으로 적은 양이다.

## 지하수 모델링

세계적으로 널리 통용되고 있는 지하수유동 소프트웨어 MODFLOW를 이용하여 터널건설에 의한 지하수위 변동을 분석하였다. 모델링에서는 터널을 drain 경계조건으로 설정하여 터널이 완공되었을 때 지하수위가 강하하는 변화량을 1년 단위로 예측하고, 정류 상태(steady state)로 지하수위가 안정화될 때까지의 기간을 평가하였다. 각 예측 결과들은 정류상태와 부정류상태(transient state)로 구분하여 최대와 최소의 지하수 유출량에 따라 이루어졌다. 모델링에서 터널내로의 지하수 유출량을 최소 0.06336m<sup>3</sup>/day와 최대 0.11233m<sup>3</sup>/day로 설정하고, 1년 단위로 최대 5년까지의 기간동안 지하수위 분포의 변화를 분석하였다(Table 3).

Fig.4는 MODFLOW를 이용한 격자 구성 및 경계조건, 그리고 Target Head로 이용되는

관측공들을 나타내고 있으며, Fig.5는 터널이 없는 현재 상태에서 수락산 일원의 지하수위 분포를 나타낸다.

Table 3. MODFLOW 입력자료.

입력자료	내용
유한차분 격자망의 수	Column : 56 Row : 48 Layer : 1
모델링 대상구간(m <sup>2</sup> )	4,250m×4,000m
터널 및 주변 구간 셀의 크기(m <sup>2</sup> )	62.5m×62.5m
대수층의 형태	자유면 대수층
층두께(m)	표고 ~ -20m
경계조건	하 천 : Constant Head boundary 터 널 : Drain (0.06336 ~ 0.11233m <sup>3</sup> /day) 수락산의 동서능선: no-flow boundary
수리전도도(m/sec)	수평 수리전도도 : $2.64 \times 10^{-8}$ m/sec 수직 수리전도도 : $2.64 \times 10^{-9}$ m/sec
평균 저류계수	0.007
Recharge Rate(mm/year)	292.7 mm/yr

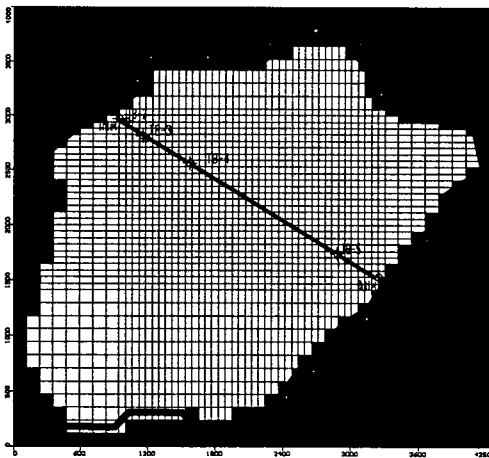


Fig. 4. 모델 격자 및 경계조건.

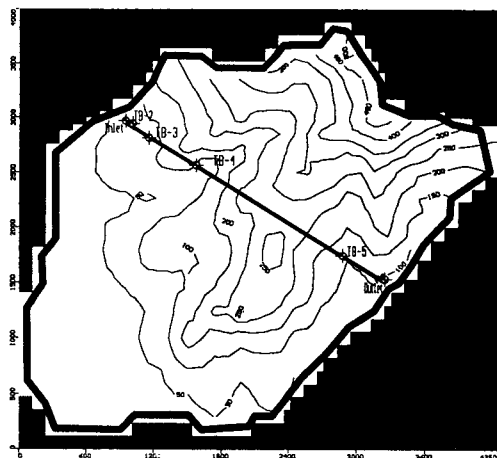


Fig. 5. 현재상태의 지하수위 분포.

Fig.6은 터널이 완공된 후 터널 내 지하수 유출량이 0.06336m<sup>3</sup>/day인 경우에 정류상태에서의 지하수위 분포를 나타낸다. 터널이 없는 현재상태의 지하수위와 비교하면 터널구간에

서의 수위강하가 거의 없는 것으로 나타났다. Fig.7은 터널완공 1년후의 지하수위 분포를 나타내는데, 정류상태와 비교하여 터널중심부에서 지하수위가 약 40m 정도 강하되었다. 그리고, 1년 후부터는 강수로부터 지하수가 함양되어 지하수위가 계속 상승하고(Fig.8, 9, 10), 4.5년 후(Fig.11)에는 정류상태의 지하수위로 회복되었다. 터널구간의 지하수위는 3년 후에 정류상태로 회복되었으나, 터널중심부의 가장 높은 곳의 지하수위는 4.5년 후에 정류상태로 회복되었다.

유출량이 0.11233m<sup>3</sup>/day로 증가되는 경우에도 정류상태의 지하수위는 터널이 없는 현재상태의 지하수위와 비교하면 터널구간에서의 수위강하가 거의 없는 것으로 나타났다(Fig.12). Fig.13은 터널완공 1년 후의 지하수위 분포를 나타내는데, 정류상태와 비교하여 지하수위가 약 45m 정도 강하되었다. 1년 후부터는 강수로부터 지하수가 함양되어 지하수위가 계속 상승하고(Fig.14, 15, 16), 터널구간의 지하수위는 3년 후에 정류상태로 회복되었으며, 4.5년 후부터는 전체 영역이 완전히 정류상태로 회복되었다.

따라서 지하수 유출량이 0.06336m<sup>3</sup>/day와 0.11233m<sup>3</sup>/day 일때, 두 경우 모두 정류상태의 지하수위가 현재 상태의 지하수위와 거의 동일한 분포를 보이고 있는데, 이것은 터널구간에서 함양량 대비 유출량의 비율이 8~14%로 적기 때문이다. 1년 후에는 터널 중심부에서의 지하수위 강하가 각각 40m와 45m로 나타났지만, 터널구간의 지하수위는 3년 후에, 그리고 터널중심부의 가장 높은 곳의 지하수위는 4.5년 후에는 정류상태로 회복되는 것으로 나타났다. 이 지하수위 강하량은 터널내 지하수유출 방지대책이 실시되지 않은 경우이기 때문에, 실제로는 이보다 훨씬 적을 것이다.

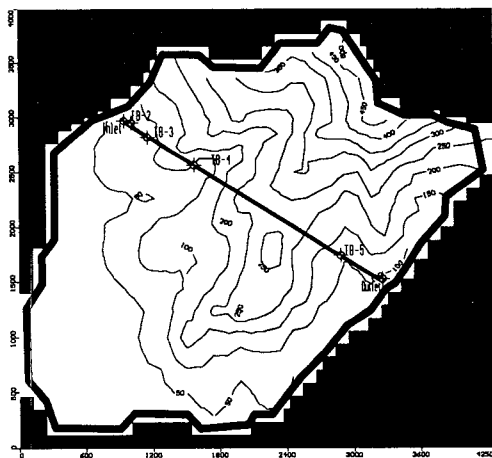


Fig. 6. 정상상태의 지하수위 분포.

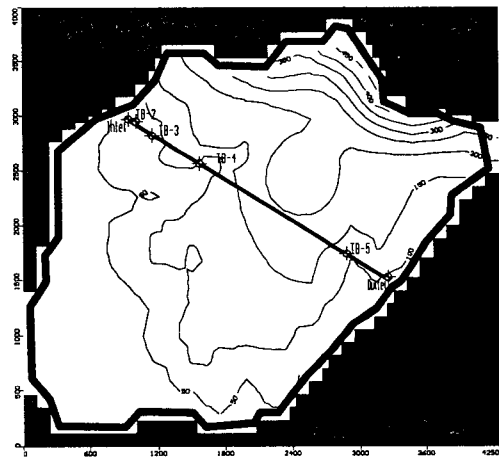


Fig. 7. 1년 후의 지하수위 분포.

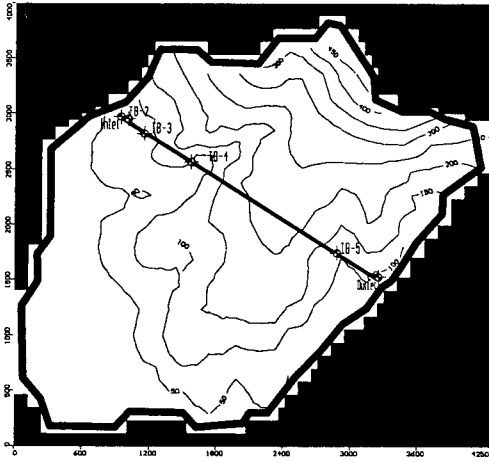


Fig. 8. 2년 후의 지하수위 분포.

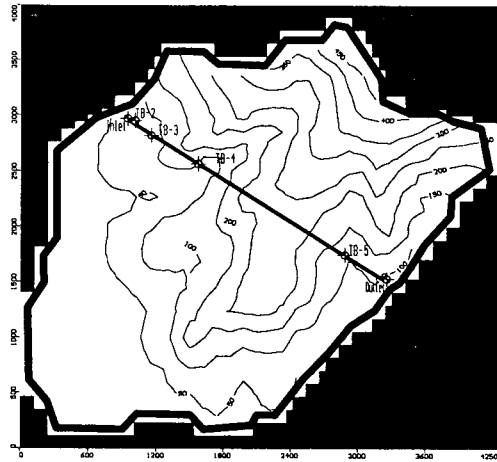


Fig. 9. 3년 후의 지하수위 분포.

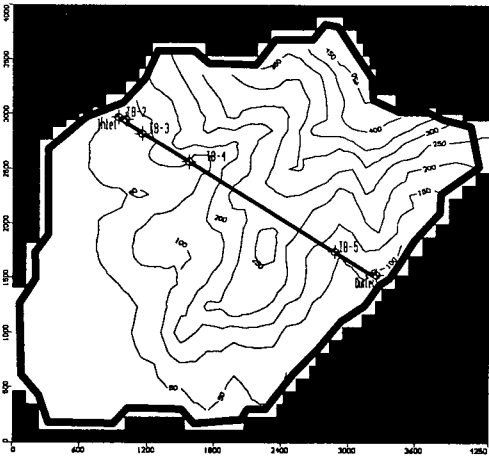


Fig. 10. 4년 후의 지하수위 분포.

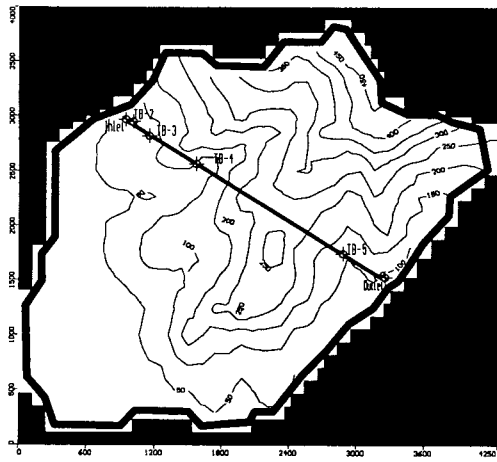


Fig. 11. 4.5년 후의 지하수위 분포.

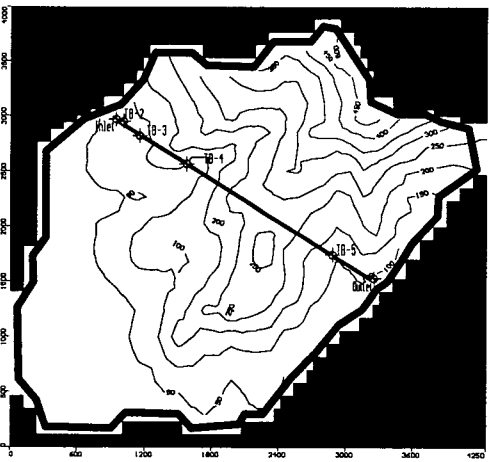


Fig. 12. 정상상태의 지하수위 분포.

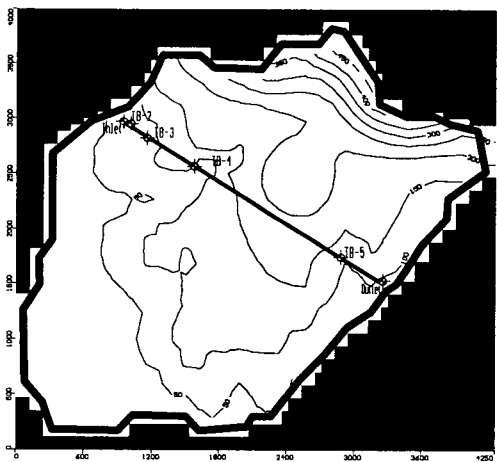


Fig. 13. 1년 후의 지하수위 분포.



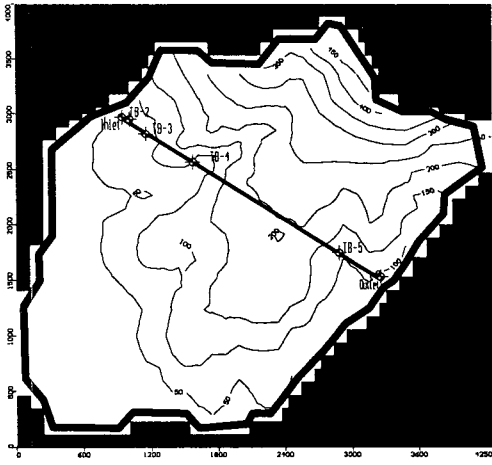


Fig. 14. 2년 후의 지하수위 분포.



Fig. 15. 3년 후의 지하수위 분포.

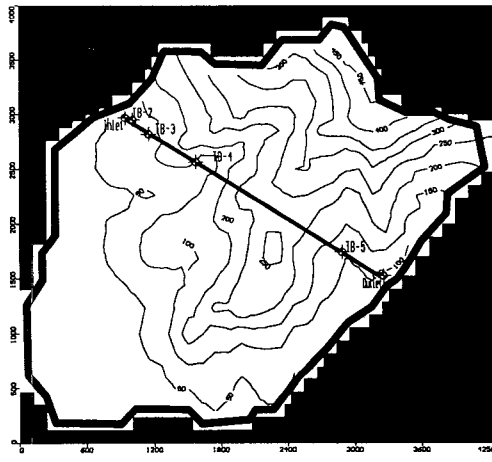


Fig. 16. 4년 후의 지하수위 분포.

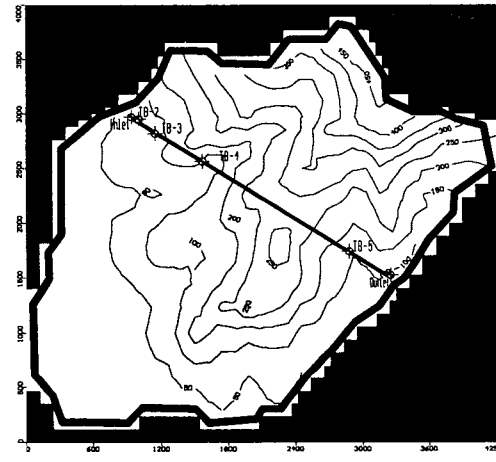


Fig. 17. 4.5년 후의 지하수위 분포.

## 결 론

1. 수락산 지역 기반암의 평균투수계수는  $2.64 \times 10^{-6} \text{cm/sec}$  이고, 평균RQD는 78%이며, 평균공극율은 0.51%로 나왔다. 지하수위와 표고간의 상관성분석을 이용하여 수락산 정상부에서 지하수위를 추정하고 수리경사를 산출하였다. 그 결과 제1정상부에서의 평균적인 수평수리경사는 0.238이고, 제2정상부에서는 0.295로 계산되었다. 따라서 수락산 터널구간의 전체 평균수리경사는 0.267로서 매우 큰 편이다.

2. 수리분석 결과에 의하면, 수락산 터널에서의 지하수 유출량은 측면유출량과 바닥유출량을 합하여 약 66,378~121,574  $\text{m}^3/\text{yr}$ 로 산정되었다. 이 유출량은 터널공사 중에 지하수 유출방지를 위한 조치를 전혀 취하지 않는 것을 가정하므로, 실제로는 이보다 적은 양의 지하수 유출이 일어날 것이다. 그리고, 터널구간의 지하수 함양량은 863,500  $\text{m}^3/\text{yr}$ 로 산정되었다. 지

하수 유출량은 이 지역의 지하수 함양량과 비교할 때, 약 8~14%에 해당된다.

3. 세계적으로 널리 통용되고 있는 3차원 지하수유동모델링 소프트웨어 MODFLOW를 이용하여 터널건설에 의한 지하수위 변동을 분석하였다. 지하수 유출량을 최소 0.06336m<sup>3</sup>/day와 최대 0.11233m<sup>3</sup>/day로 산정 하였을때, 1년 후에는 터널 중심부에서의 지하수위 강하가 각각 40m와 45m로 나타났지만, 터널구간의 지하수위는 3년 후에, 그리고 모델 영역 전체 지하수위는 4.5년 후에 완전하게 정류상태로 회복되었다.

## 참고문헌

- 이정인, 조태진, 이연규, 1997, 암석역학을 이용한 터널설계, 359p.
- 정상용, 유인걸, 윤명재, 권해우, 허선희, 1999, 불균질·이방성 대수층의 지하수 유동분석에 지구통계기법의 응용, 지질공학, 제9권, 2호, p.147-159.
- 한정상, 한찬, 1999, 3차원 지하수모델과 응용, 박영사, 1390p.
- 홍승천, 이병주, 황상기, 1982, 한국지질도 1:50,000, 한국동력자원연구소, 44p.
- Domenico, P.A., and Schwartz, F.W., 1998, Physical and Chemical Hydrogeology, 2nd edition, John Wiley & Sons, Inc.
- Waterloo Hydrogeologic, Inc., 1998, Visual MODFLOW, version 2.72.