

경상북도 영천지역의 지하수위 회복 예측 수치 모델링

이병대^{1*} · 추창오² · 이봉주¹ · 조병욱¹ · 함세영³ · 임현철¹

¹한국지질자원연구원 지하수지열연구부, ²안동대학교 지구환경과학과, ³부산대학교 지질학과

Numerical Modeling on the Prediction of Groundwater Recovery in the Youngchun Area, Kyungbook Province

Byeong Dae Lee^{1*}, Chang Oh Choo², Bong Joo Lee¹, Byung Wook Cho¹, Se-Yeong Hamm³ and Hyun Chul Im¹

¹Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, Daejeon 305-350, Korea

²Dept. of Earth & Env. Sci., Andong University, Andong 760-749, Korea

³Dept. of Geology, Pusan University, Pusan 609-735, Korea

A modeling was performed to predict the groundwater recovery in the vicinity of the waterway tunnel area using a groundwater flow model MODFLOW. The model was calibrated to reproduce measured groundwater levels and observed flow rates into the tunnel prior to lining, and then used for flow simulation under transient condition. Model predictions under steady-state condition revealed that if tunnel conductance had been reduced by 25% to 90%, groundwater levels would recover between 8% and 72.4% of their initial levels and flow into the tunnel will decrease between 5.5% and 82.7%. In case of 75% tunnel conductance reduction in transient simulation, most of wells were predicted to recover within 20 years or so. The complete recovery for the wells with the groundwater level over 70 m was found to be impossible. For the 90% tunnel conductance reduction, all wells were found to be recovered within 15 years.

Key words : waterway tunnel, groundwater level, modeling, flow rate, conductance

도수로터널 굴착으로 인하여 하강되었던 주변 지역의 지하수위 회복을 모델링하였다. 터널 굴착 후, 라이닝 전·후를 기준으로, 먼저 정상류 상태에서 라이닝 전의 배출량과 지하수위를 보정하고, 그 다음 부정류 상태에서 라이닝과 그라우팅 후 터널내의 배출량을 점차적으로 줄여 가면서 모델링 하였다. 정상류 상태의 모델링에서 터널 컨덕턴스가 25~90% 감소될 경우, 배출량은 5.5~82.7% 감소되는 것으로 예측되었고, 지하수위는 8~72.4% 회복되는 것으로 예측되었다. 부정류 상태의 지하수위 회복시기 예측 모델링에서 컨덕턴스가 75% 감소될 경우, 대부분 관측공들은 20년 내외에서 회복되는 것으로 예측되었고, 지하수위가 70 m 이상인 일부 관측공들은 회복되는 것이 불가능하였다. 컨덕턴스 90% 감소 시에는 모든 관측공들이 15년 이내에 회복되는 것으로 예측되었다.

주제어 : 도수로터널, 지하수위, 모델링, 배출량, 컨덕턴스

1. 서 론

대규모 지하 터널 굴착시에 발생하는 지하수 유동 변화는 터널의 안정성뿐만 아니라 주변 지역의 환경 변화에 매우 중요한 요인으로 작용하고 있다. 또한, 터널 굴착시에 단층 및 단층파쇄대, 절리 등의 단열구조

대를 통과하게 되면, 이 구조대를 따라서 주변 대수층의 지하수 흐름이 터널 쪽으로 향하고, 터널 내로 지하수가 유입된다. 이로 인하여 주변 지역의 지하수위가 하강하고, 농업용수, 공업용수, 그리고 생활용수 등에 영향을 미치게 된다. 따라서, 터널 굴착으로 인한 지하수 유출량 변화와 수리지질 매개변수와의 관련성

*Corresponding author: blee@kigam.re.kr

을 정확히 이해하여, 터널 완공 후 주변 지역의 지하수위 회복여부 및 회복시기를 예측, 모델링 하는 것이 매우 중요하다.

단열암반에서 지하수 흐름을 묘사하는 수치모델로서, Long *et al.*(1982, 1985), Smith and Schwartz (1984), Schwartz *et al.*(1983)은 분리단열모델을 이용하였다. Kitterod *et al.*(2000)은 단열암반 대수층에서 터널내로의 지하수 유출을 모델링하기 위하여 지구통계학적인 방법을 이용하였다. 이 연구결과에 의하면 터널 굴착시 단열대가 터널과 수리적으로 연결되어 있어, 많은 양의 지하수가 터널내로 유입되었다. 국내에서도 함세영과 성익환(1999), 함세영과 임정웅(1994)은 프랙탈모델을, Park and Lee(1995)는 분리단열모델을 이용하여 단열암반 대수층에서의 지하수 흐름 모델을 연구하였다. 안상도 등(2000)은 MODFLOW를 이용하여 초정지역의 지하수 유동을 해석하였고, 지하수 개발에 따른 환경변화의 예측 모델링을 수행하였다.

연구지역은 영천댐 도수로터널 구간으로(Fig. 1), 이

도수로터널은 금호강의 수질을 향상시키고 이 지역에 충분한 용수를 공급하기 위해 임하댐에서 영천댐까지 건설되었다. 터널의 길이는 32.97 km에 달하는 장대터널로 본 터널과 3개의 사갱(access tunnel)으로 형성되어 있으며, 경사는 약 0.06%이다. 이 도수로터널 굴착 중 터널 주변지역의 지하수가 터널내로 유입되면서 연구지역 내에 농업 및 생활용수의 고갈 현상이 발생하였고, 주민들의 민원이 제기되었다. 터널굴진 작업은 주민들의 집단 민원으로 인하여 약 5개월 동안 일시 중단되기도 하였다. 본 연구는 도수로터널 굴착이 완료되고 라이닝과 그라우팅이 완전히 끝난 후, 하강되었던 지하수위의 회복정도 및 회복시기를 모델링하는데 그 목적이 있다. 모델링은 터널 굴착 후, 라이닝전·후를 기준으로 먼저 정상류상태에서 라이닝전의 배출량과 지하수위를 보정하고, 그 다음 부정류상태에서 라이닝과 그라우팅후 터널내 배출량을 점차적으로 줄여 가면서 모델링 하였다. 모델링에서 배출량의 감소는 터널 컨덕턴스(Waterloo hydrogeologic, 2000)를

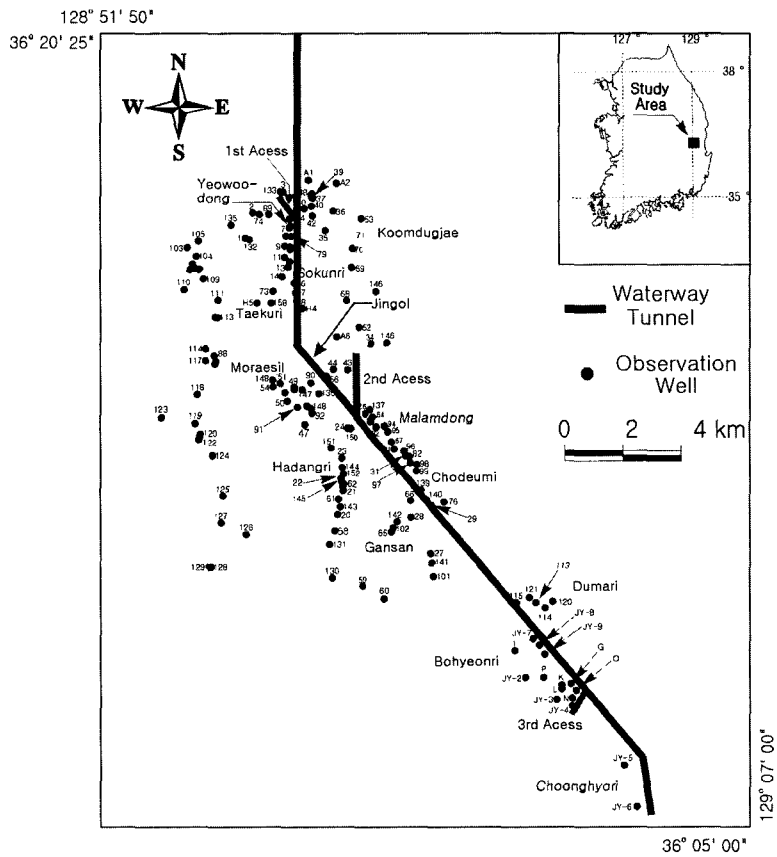


Fig. 1. Location of study area and the waterway tunnel.

라이닝전의 25%, 50%, 75%, 그리고 90% 감소하는 경우를 고려하였다.

2. 수리지질학적 개념 모델

2.1. 수리지질 및 단열

연구지역은 경상퇴적분지 하양층군의 퇴적암류와 유천층군의 화산암류 및 이를 관입한 불국사 관입암류들이 분포한다(Fig. 2). 퇴적암류는 사암과 셰일의 호층이

며 접촉변성작용을 받아 대부분이 호온펠스화 되어 있다. 층리발달이 아주 양호하며, 부분적으로 파쇄된 사암층은 이 지역의 주 대수층을 형성하고 있으며, 층리면은 지하수의 주요 통로 역할을 하고 있다. 유천층군의 화산암류는 주로 유문암질 응회암이 대부분이고, 불국사 관입암류들의 주된 암석은 화강암류이다.

단층 및 구조대의 방향과 규모 등은 지하수 유동에 큰 영향을 미친다. 연구지역의 단층구조는 서북서 방향의 좌수향의 주향이동 단층이 지배적이며, 화목리를

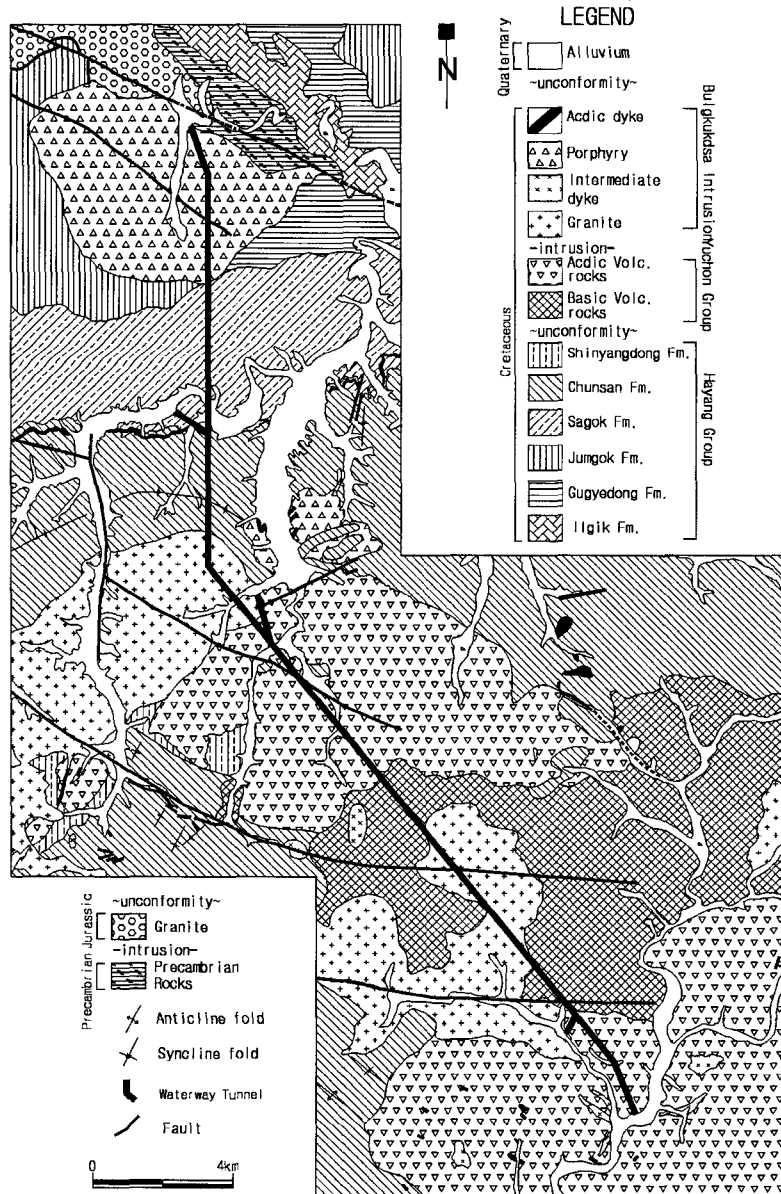


Fig. 2. Geologic map of the study area.

중심으로 거의 남북 내지 북북동-남남서 방향의 단층들이 발달하기도 한다. 서북서 방향의 좌수향 주향이동 단층으로는 금천단층과 가음단층이 있다. 연구지역의 단열구조들은 이들 두 단층과 관련되어 동서 혹은 서북서 방향의 단열들이 많이 발달되어 있다. 연구지역의 이러한 지질구조는 지하수유동의 주요 통로 역할을 하고 있다. 실제 터널내로의 많은 양의 지하수 유출 및 주변 지역 지하수공들의 지하수위 하강 양상은 이들 단열구조의 영향이 지배적이다.

2.2. 지하수위 분포

지하수위 회복을 모델링하기 위하여 터널 좌, 우측에 굴착된 180여 개의 지하수공들을 대상으로 정기적인 지하수위 관측을 하였다. 연구기간동안 측정된 관측공들의 지하수위는 지표하 수m에서 234.8 m까지의 다양한 분포를 보여주고 있다. 이러한 지하수위 분포는 터널 굴착으로 인하여 연구기간 초기에 이미 지하수위가 지표하 50 m 이상의 큰 폭으로 하강되어 있는 지역과 터널 굴진이 다시 시작된 7~8월 이후에 하강된 지역, 그리고 영향을 받지 않은 지역으로 구분할 수 있다.

2.3. 수리상수 분포

본 연구에서 수리상수 값은 야외에서 수행한 수리시험을 기초로 결정하였다. 수리시험을 통해 얻어진 연구지역의 각 암석에 따른 수리전도도, 공극율, 저류계수의 분포는 각각 퇴적암지역이 $2E-6 \sim 2E-9$ m/s, 0.03, $1E-3$, 화산암지역 $1E-7 \sim 1E-9$ m/s, 0.01, $1E-3$ 이고, 화강암지역은 $1E-7 \sim 1E-9$ m/s, 0.01, $1E-3$ 이다. 연구지역에서 지하수위 하강 양상이 다양한 것은 불균질한 단열체계 때문이다. 이 연구의 모델링에서 터널 내 지하수 유출량에 대한 보정시 단열의 규모에 따라서 수리전도도 영역을 달리 적용하였다. 그리고 주요 단층들은 $1E-3$, $1E-4$ m/s 등의 증가된 수리전도도 값으로 모델에 반영하였다.

2.4. 함양율 산정

함양율은 지하수 수치 모델링에서 중요한 입력자료로서, 이 연구에서는 미국의 토양보전국에서 개발하여 단위유역의 직접유출량 산정에 사용하고 있는 SCS-CN 방법을 적용하여 지하수 함양율을 산정하였다. SCS-CN 방법은 직접유출량의 크기에 직접적으로 영향을 미치는 인자로서, 유역을 형성하고 있는 토양의 종류, 토지이용상태, 식생의 피복상태, 온도, 강우강도 및 토양

의 수문학적 조건 등을 고려하여 이들 인자들이 직접 유출에 미치는 복합적인 영향을 양적으로 표시하는 것이다. 연구지역의 함양율을 구하기 위하여 안동기상대의 1989년에서 1999년까지 11년 간의 일별 강수량자료를 이용하여 CN값 변화에 대응하는 연도별 침투량을 계산하여 함양율을 산정하였다. 이 방법을 이용하여 산정된 연구지역의 함양량은 11년간 평균 강수량의 7.5%에 해당하는 약 80 mm/yr 이다.

2.5. 터널내 지하수 유출량

지표하에 터널이 굴착되면 지하에서 수두차가 거의 없는 느린 유동상태에서 터널 굴착으로 야기되는 터널 주변과의 급격한 수두차로 인하여 주로 단열대를 따라서 지하수가 빠른 속도로 터널내로 유입된다. 터널내

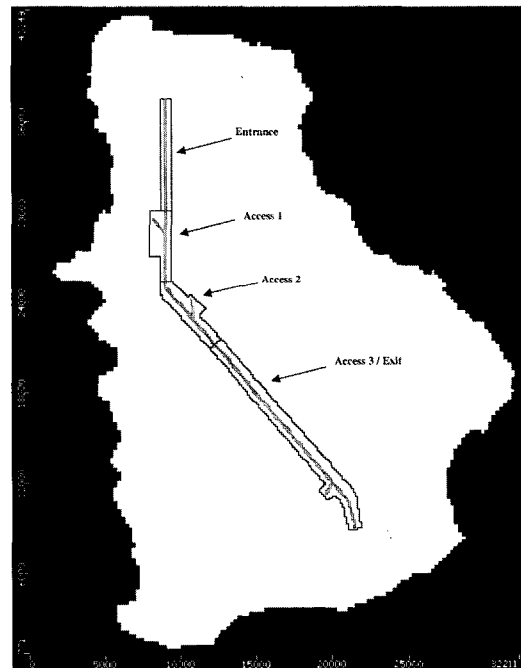


Fig. 3. Waterway tunnel showing Entrance, Access 1, Access 2, and Access 3, Exit of the tunnel in the study area.

Table 1. Flow rates recorded by datalogger at entrance, 1st, 2nd, 3rd access tunnel.

Tunnel Section	Measured Tunnel In Flow Rate (m ³ /day)
Entrance	2687
Access 1	15652
Access 2	9157
Access 3/Exit	13774
Sum	41270

지하수 유입은 터널 굴착 과정에서 유입형태가 다양하고, 터널을 굴착할수록 유입량이 증가하였다. 터널 유입량은 입구, 1사갱, 2사갱, 그리고 3사갱의 침전지에서 측정되었다. 이 구간은 Fig. 3에 도시되어 있으며, 각 구간의 평균 유입량은 입구가 2687 m³/day, 1사갱은 15652 m³/day, 2사갱은 9157 m³/day, 그리고 3사갱은 13774 m³/day 이다(Table 1). 굴착하는 동안 지하수 유입과 터널 벽의 컨덕턴스를 감소시키기 위해 그라우팅을 하였다.

3. 수치모델 구성

연구지역에서 하강되었던 지하수위 회복을 모델링하기 위하여 유한차분 모델인 Visual MODFLOW를 이용하였다(Waterloo hydrogeologic, 2000). MODFLOW는 다공질 포화매체내에서 2차원 또는 3차원의 지하수 흐름을 모사하기 위해 미국지질조사소에서 개발된 프로그램이며, 유한 차분법으로 지하수 유동 평행방정식의 해를 구한다. 단열암반내 지하수 흐름에 대한 연구방법에는 단열암반을 연속체로 보는 경우와 불연속체로 보는 경우가 있다. 단열암반을 연속체로 보면 그 암반은 수리지질학적으로 균등하면서 다공질로 해석할 수 있다. 이와 반대로 불연속체로 볼 경우에는 지하수 흐름은 여러 조의 단열을 따라서 일어나며, 개개 단열의 연장, 방향성, 경사, 빈도, 단열면의 성질뿐만 아니라 단열과 단열간의 연결성과 교차성이 지하수 흐름을 좌우할 것이다. 연구지역과 같이 넓은 지역에 대해서 개개 단열들에 대한 충분한 자료없이 추계론적 분리단열모델과 같은 불연속체 모델을 적용할 때는 해석이 어려울 뿐만 아니라 오히려 오차가 더 커질 수도 있다. 그런 관점에서 원칙적으로 다공성매질 환경에서 사용되어지는 Visual MODFLOW를 연구지역에 적용하였다.

3.1. 모델격자

전체 모델 범위는 1500 km²의 지역에 해당되며 모델에 이용된 격자 지역은 775 km²이다. 모델 격자는 318열, 187행으로 구성되고, 각 모델 층에 대해 59,466 개의 격자 블록으로 나뉘어졌다. 격자 블록은 모델 경계 부근에서 250 m×250 m의 큰 격자 블록을, 그리고 터널 인접 지역에서는 125 m×125 m로 격자 블록이 이루어졌다. 지하수 모델을 통해 수직 흐름을 모사하기 위해 격자는 3개의 층으로 구분하였다. 격자의 최고 고도는 연구지역의 전자지형도(DEM)를 이용하여 결정하였고, 최저 고도는 흐름이 수평으로 예상

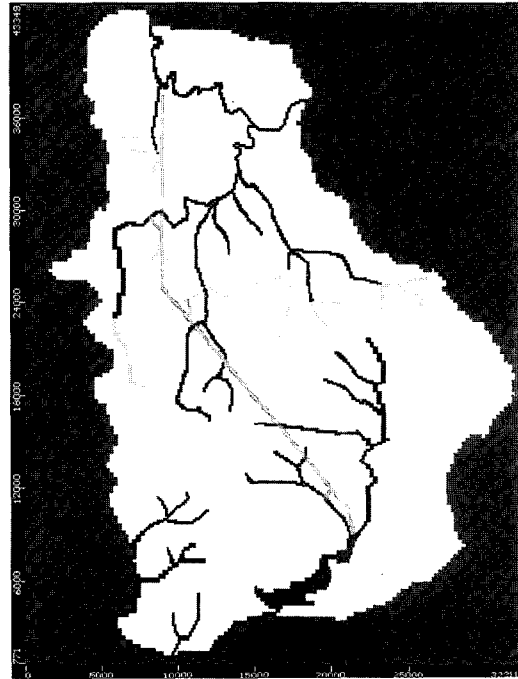


Fig. 4. Numerical modeling region including tunnel and boundary location of the river and stream.

되는 곳, 즉 해발고도 0 m로 설계하였다. 그리고 터널은 3개의 층에서, 층 2(layer 2)에 설정하였다.

3.2. 경계조건

연구지역의 모델경계는 Fig. 4에 도시되어 있으며, 모델 영역은 터널 주변의 영향권을 포함하여 영향권보다 훨씬 더 멀리 확장시켰다. 이는 연구지역의 모델 경계를 영향권보다 더 멀리 확장시킴으로써 모델 예측의 편차를 없애기 위함이다. 모델 경계는 물리적인 경계로 결정하였다. 동쪽, 서쪽, 북쪽의 높은 지형에서의 경계는 광역적인 흐름의 분수령에 따라 비유동 경계(no flow boundary)로 설정하였다. 남쪽 경계는 영천댐으로 고정수두 경계(constant head boundary), 소하천 및 터널은 배출경계(drain boundary)로 설정되었다. 수계의 컨덕턴스 값은 연구지역의 강과 하천의 폭을 이용하여 5 m, 10 m, 15 m, 20 m의 폭을 가진 강과 하천을 대상으로 구하였다.

4. 모델보정

터널 굴착으로 인하여 하강되었던 지하수위 회복을 예측하기 위하여 이 연구에서는 라이닝 전·후를 기준

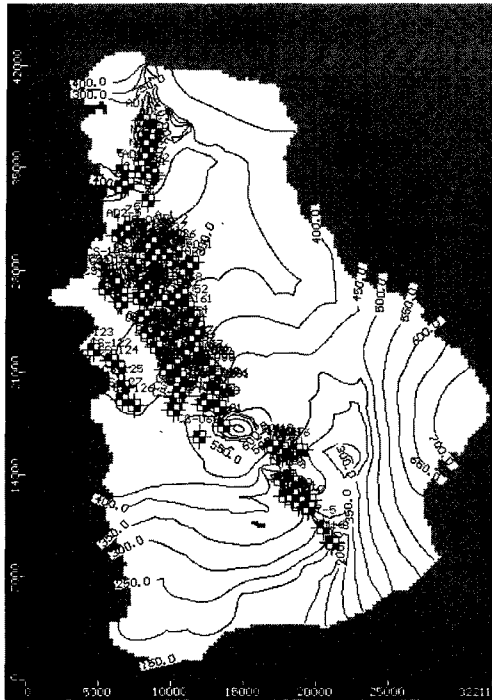


Fig. 5. Groundwater levels of steady state before tunnel excavation.

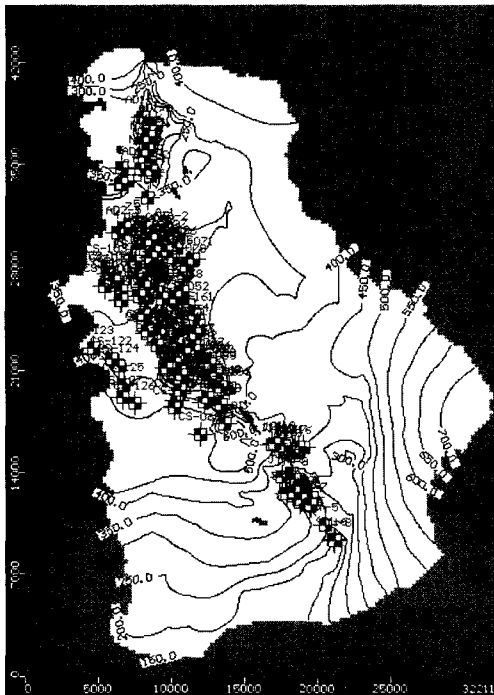


Fig. 6. Groundwater levels of steady state after tunnel excavation.

으로 하여 먼저 라이닝전의 터널내 배출량과 측정된 지하수위를 이용하여 모델보정을 수행하였다.

4.1. 지하수위 보정

지하수위 자료는 연구지역의 178개의 관측공으로부터(Fig. 1) 측정된 매월 지하수위 자료를 평균하여 이용하였다. Fig. 5는 연구지역의 터널 굴착전의 지하수위 등고선도로, 터널 굴착 전 자연상태에서의 지하수위 값과 지하수 흐름은 거의 지형고도에 지배되고 있음을 알 수 있다. Fig. 6은 터널 굴착 후 정상류상태의 보정된 지하수위 등고선도를 나타낸 것이다. 터널 굴착 후에는 터널내 지하수 유출로 인하여 연구지역의 지하수 흐름이 터널쪽으로 향하는 흐름임을 알 수 있다. 관측된 지하수위 값과 보정된 지하수위 값에 대한 신뢰도를 평가하기 위하여 정량적 민감도 분석을 하였다(Fig. 7). 민감도 분석은 관측치와 모델링 결과치와의 오차를 보여주는 RMS 오차(Root Mean Square Error)를 사용하였으며 연구지역의 전체적인 RMS 오차는 8%이다. 이 값은 연구지역의 지하수위 하강폭의 다양성과 지질의 불균질성과 연구지역에 많이 발달되어 있는 단층 및 절리 등의 단열 특성을 고려하면 오차가 미미함을 의미한다. 일반적으로 RMS 오차가

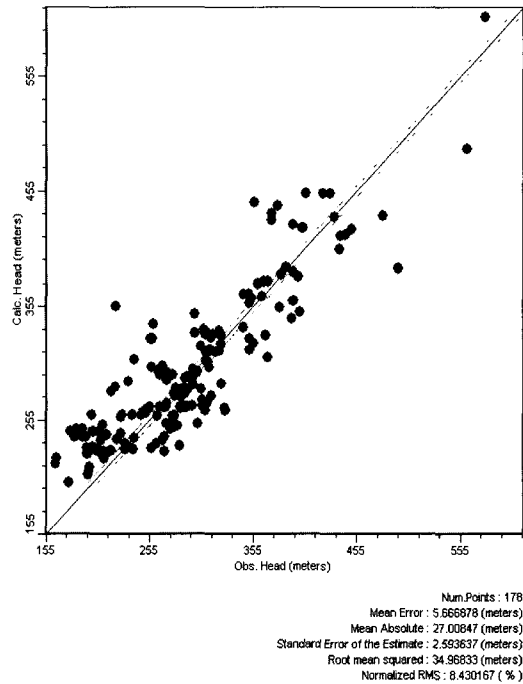


Fig. 7. Observed/Calibrated groundwater level and calibration statistics.

10%보다 작고 평균 오차범위가 0에 가까울수록 보정이 잘된 것으로 해석할 수 있다(WHI, 1997).

4.2. 터널내 배출량 보정

터널 굴착 후, 라이닝 전·후를 기준으로 먼저 정류상 태에서 라이닝전의 배출량에 대해 보정하였다. 라이닝전의 실제 관측된 배출량과 보정을 통해 예측된 터널 배출량은 각각 터널 입구에서는 2687 m³/day과 2564 m³/day, 1사갱은 15652 m³/day과 15907 m³/day, 2사갱은 9157 m³/day과 11603 m³/day, 그리고 3사갱은 13774 m³/day과 12003 m³/day이다(Table 2). 이 표에서 각 사 갱별로 측정치와 예측치의 차이는 입구는 -123 m³/day로 측정치와 비교하여 4.6% 감소하는 것으로 보정되었다. 1사갱은 +255 m³/day로 1.6%의 증가, 2사갱은 +2,446 m³/day로 26.7% 증가, 3사갱은 -1,768 m³/day로 12.9% 감소하는 것으로 보정되었다. 터널 전구간을 통해 배출 되는 측정치와 예측치의 차이는 810 m³/day로 전구간의 측정치에 비해 2% 증가하는 것으로 보정되었다.

5. 예측 모델링

터널 라이닝과 그라우팅이 완료된 후 터널 굴착으로 인하여 하강되었던 지하수위의 회복을 평가하기 위하여 예측 모델링을 하였다. 먼저 라이닝과 그라우팅 이전의 모든 관측공들에 대한 평균 지하수위를 구하고, 각 사갱의 평균 터널 배출량을 계산한 후, 정상류 상태에서 평균 지하수위와 평균 배출량을 일치시키는 보정을 반복 실시하였다. 그다음 터널 컨덕턴스를 25%, 50%, 75%, 90% 감소시키면서 각각의 경우에 대해서 배출량과 지하수위 예측 모델링을 하였다.

5.1. 컨덕턴스 감소에 따른 배출량 예측

터널 컨덕턴스는 터널 수리전도계수로서 터널 주변 지역의 대수층에서 터널내로 지하수가 유입되는 용이성 정도를 지시한다. 터널내로의 지하수 유입량은 터널 내부와 외부의 압력차이로 인해 증가 혹은 감소되는 컨덕턴스와 비례하다. 터널내 지하수 유입량과 함

Table 2. Flow rates recorded by datalogger and flow rates calibrated.

Tunnel Section	Observed Tunnel Inflow (m ³ /day)	Calibration Tunnel Inflow (m ³ /day)	Difference (m ³ /day)
Entrance	2687	2564	-123(-4.6%)
Access 1	15652	15907	+255(+1.6%)
Access 2	9157	11603	+2446(26.7%)
Access 3. Exit	13774	12003	-1768(-12.9%)
Total	41270	42080	810(<2%)

Table 3. Calibrated flow rates of steady state condition.

Steady State Scenario	Entrance Zone Inflow Rate	Access 1 Inflow Rate (m ³ /day)	Access 2 Inflow Rate (m ³ /day)	Access 3 Exit Inflow Rate (m ³ /day)	Total Inflow Rate (m ³ /day)
Tunnel Conductance Reduced 0 (Calibration)	2564	15907	11603	12006	42080
Tunnel Conductance Reduced 25%	2269	15245	11080	11153	39747
Tunnel Conductance Reduced 50%	1928	13407	9868	10175	35378
Tunnel Conductance Reduced 75%	1441	9384	7670	7588	26083
Tunnel Conductance Reduced 90%	466	884	2697	3217	7264
Tunnel Conductance Reduced 100%	0	0	0	0	0

께 터널을 따라서 발달하고 있는 단열정도는 모델 영역내 컨덕턴스를 정의하는데 유용한 정보이다. 이 연구에서는 라이닝과 그라우팅에 의한 차수효과를 이용하여 컨덕턴스 감소에 따른 배출량을 예측하였다.

라이닝과 그라우팅이 시작되는 시점을 기준으로 터널 컨덕턴스가 25%, 50%, 75%, 그리고 90% 감소될 경우, 각각의 경우에서 터널 전체구간에서의 배출량은 첫째의 경우 42,080 m³/day에서 39,747 m³/day로, 둘째 42,080 m³/day에서 35,378 m³/day로, 셋째 42,080 m³/day에서 26,083 m³/day로, 넷째 42,080 m³/day에서 7,264 m³/day로 감소되었다(Table 3).

5.2. 컨덕턴스 감소에 따른 지하수위 회복 예측

Table 4는 컨덕턴스의 감소에 따른 지하수위의 회복율을 나타낸 것이다. 터널 컨덕턴스 25% 감소에 따른 평균 지하수위 회복은 6.0m이고 회복율은 평균 8.3%이다. 그리고 터널 컨덕턴스 50% 감소에 따른 평균 지하수위 회복은 17.5 m, 회복율은 24.1%이다. 75% 감소에 따른 평균 지하수위 회복은 37.40 m이고 회복율은 51.6%이며, 터널 컨덕턴스 90% 감소에 따른 평균 지하수위 회복은 52.5 m, 회복율은 72.4%이다.

Fig. 8과 Fig. 9는 각각 컨덕턴스 75% 감소시와 90% 감소시의 지하수위 등고선도를 도시한 그림이다. 컨덕턴스 감소에 따른 지하수위 회복 정도를 파악하기 위하여 이 그림들과 터널 굴착전의 지하수위 등고선도인 Fig. 5를 비교하였다. 그 결과, Fig. 8의 경우, 전체적으로 지하수위가 많이 회복되어 Fig. 5의 지하수위 등고선도와 거의 일치한다. 그러나 터널 가까운 지역은 회복되지 않은 지하수 유동 시스템의 변화양상을 보여 주고 있다. Fig. 9의 경우는 거의 터널 굴착 이전의 지하수위 값을 형성하고 있으며, 지하수 흐름 상태 역시 터널 굴착에 의한 영향을 거의 받지 않고 있다.

5.3. 지하수위 회복시기 예측

터널 굴착으로 인하여 하강되었던 지하수위 회복시기를 예측하기 위하여 부정류 상태의 모델링이 수행되었다. 모델 수행은 기존에 시공한 그라우팅 효과로 이미 컨덕턴스가 50% 이상 감소된 관계로 인하여 터널 컨덕턴스를 75%, 90% 감소시키면서 각각의 경우에 대해서 모델링하였다. 그 결과, 컨덕턴스가 75% 감소시, 연구지역의 평균 지하수위 회복시기는 터널로부터 1 km 내의 혹은 그 이상 떨어져 있고, 라이닝전 평균

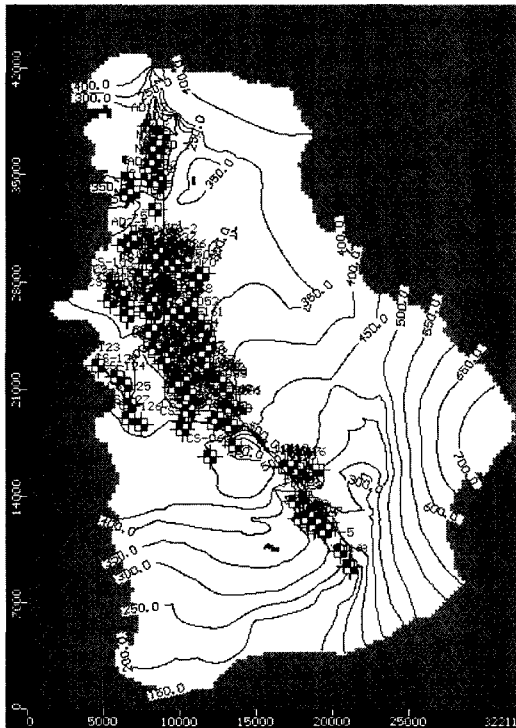


Fig. 8. Predicted groundwater levels for tunnel conductance reduced by 75%.

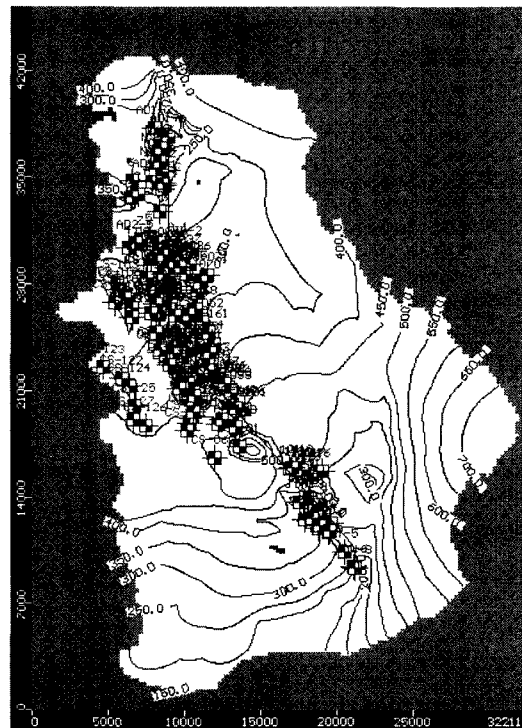


Fig. 9. Predicted groundwater levels for tunnel conductance reduced by 90%.

지하수위가 지표하 20~40m인 관측공들은 10년 이내에 회복되는 것으로 예측되었다. 그리고 터널로부터 1km 이내의 거리에 위치하면서 평균 지하수위가 지표하 50m에서 60m 정도의 분포를 보이는 관측공들은 20년 이상이 걸리는 것으로 예측되었다. 터널로부터 300m 이내의 아주 가까운 거리에 위치하고 평균 지하수위가 지표하 70m 이상인 관측공들은 지하수위가 회복되지 않는 것으로 예측되었다. 컨덕턴스 90% 감소 시 예측된 회복시기는 터널로부터 1km 내의 혹은 그 이상 떨어져 있고, 라이닝전 평균 지하수위가 지표하 20~40m인 관측공들의 경우는 3년 이내에 수위가 회복되는 것으로 예측되었다. 그리고 터널로부터 1km 이내의 거리에 위치하면서 평균 지하수위가 지표하 50m에서 60m 정도의 분포를 보이는 관측공들은 10년 이내로 예측되었고, 터널로부터 300m 이내의 아주 가까운 거리에 위치하고 평균 지하수위가 지표하 70m 이상인 관측공들의 경우는 하강되었던 지하수위가 회복되는데 최소 15년 정도의 시간이 걸리는 것으로 예측되었다.

6. 토의 및 결론

연구지역내의 터널 굴착 공사로 인하여 주변 지하수 공들의 수위가 하강하였으며, 시간이 경과함에 따라 연구지역 일대의 지하수 흐름 체계의 변화를 일으켰다. 도수로터널 굴착으로 인하여 하강되었던 터널 주변 지역의 지하수위가 터널 굴착이 완료되고 라이닝과 그라우팅이 완료된 이후, 하강되었던 지하수위의 회복정도 및 회복시기를 모델링하였다.

정상류 상태의 모델링에서 터널 컨덕턴스가 25~90% 감소될 경우, 배출량은 5.5~82.7% 감소되는 것으로 예측되었고, 지하수위는 8~72.4% 회복되는 것으로 예측되어 터널 굴착 이전의 자연상태로 회복되는 것은 불가능하였다. 그러나 Table 4에서 컨덕턴스가 완

전히 100% 감소될 경우에는 지하수위 회복 역시, 100%로 회복되어 굴착 이전의 자연상태를 유지하는 것으로 나타났다. 그러나 도수로터널의 특성상 컨덕턴스가 100% 감소한다는 것은 불가능하므로 컨덕턴스 감소율을 최고 90% 수준으로 모델링하였다.

도수로터널은 일반적으로 물을 도수할 목적으로 설치하는 터널로서 내수압의 작용 유무에 따라 자유수면 터널(무압터널)과 압력터널로 구분한다. 연구지역의 터널은 내수압이 작용하지 않는 자유수면 터널이다. 압력터널은 물을 송수할 때 터널 내부가 수압을 받게 되지만 자유수면 터널은 건설 후 물을 송수할 때에도 터널 내부는 대기압 상태를 유지하게 된다. 자유수면 터널의 경우 라이닝 콘크리트에 작용하는 외수압을 경감시키기 위해 배출공(weep hole)을 설치하여 지하수를 항상 배출시키기 때문에 100%의 컨덕턴스 감소는 불가능하다. 그러나 터널내 그라우팅의 효과로 상기한 바와 같이 터널 컨덕턴스가 90% 이상 줄어든 경우, 터널내 배출량과 지하수위 회복은 라이닝과 그라우팅전에 비하여 각각 82.7%의 배출 감소율과 72.4%의 회복율을 보여주고 있어, 터널 주변의 지하수환경 시스템이 거의 터널 굴착전의 상태에 가까워지는 것으로 해석되었다. 부정류 상태의 모델링에서 예측된 지하수위 회복시기는 관측공이 위치한 지역에 따라 많은 차이가 있었다. 이는 관측공들이 위치한 지점과 터널로부터 떨어진 거리와의 관계, 관측공이 놓인 지점의 단열발달 상태 등에 따라 차이가 나는 것으로 해석된다 (Morin *et al.*, 1997).

이와 같이 연구지역은 도수로터널 굴착으로 인하여 많은 양의 지하수가 터널내로 유입됨에 따라 주변 지역의 지하수위가 하강되었고, 이로 인하여 지하수 시스템이 변화되었다. 따라서 연구지역의 지하수자원의 보존을 위해서는 지속적인 지하수위 관측 및 신뢰성이 높은 모델의 구축을 통해 지하수환경을 정확하게 평가하는 것이 필요하다.

Table 4. Average absolute recovery and average recovery rate of groundwater level according to reduction of conductance.

Steady State Scenario		Average Water level (m)	Average Absolute Recovery (m)	Average Percentage Recovery (%)
Tunnel Conductance Reduced	0% (Calibration)	300.1	0.0	0.0%
Tunnel Conductance Reduced	25%	306.2	6.0	8.3%
Tunnel Conductance Reduced	50%	317.6	17.5	24.1%
Tunnel Conductance Reduced	75%	337.6	37.4	51.6%
Tunnel Conductance Reduced	90%	352.6	52.5	72.4%
Tunnel Conductance Reduced	100%	372.7	72.5	100.0%

참고문헌

- 안상도, 김경호, 정영훈 (2000) 초정지역의 지하수 유동 해석. *대한지하수환경학회지*, 7권, p. 133-140.
- 함세영, 성익환 (1999) 선형유동에 관한 이중공극 모델. *대한지하수환경학회지*, 6권, p. 1-7.
- 함세영, 임정웅 (1994) 누수를 포함하는 지하수 유동의 프락탈 모델 적용에 의한 균열 암반 대수층의 수리상수 산출. *대한지질공학회지*, 4권, p. 219-229.
- Kitterod, N.O., Colleuille, H., Wong, W.K. and Pedersen, T.S. (2000) Simulation of groundwater drainage into a tunnel in fractured rock and numerical analysis of leakage remediation, Romeriksporten tunnel, Norway. *Hydrogeology Journal*, v. 8, p. 480-493.
- Long, J.C.S., Remer, J.S., Wilson, C.R. and Witherspoon, P.A. (1982) Porous media equivalents for networks of discontinuous fractures. *Water Resources Research*, v. 18, p. 645-658.
- Long, J.C.S., Gilmour, P. and Witherspoon, P.A. (1985) A model for steady fluid flow in random three-dimensional networks of discshaped fractures. *Water Resources Research*, v. 21, p. 1105-1115.
- Morin, R.H., Carleton, G.B. and Poirier, S. (1997) Fractured aquifer hydrogeology from geophysical logs; The Passaic formation, New Jersey. *Groundwater*, v. 35, p. 328-338.
- Park, Y.C. and Lee, K. K. (1995) Simulation of groundwater flow of fractured porous media using a discrete fracture model. *Econ. Environ. Geol.*, v. 28, p. 503-512.
- Smith, L. and Schwartz, F. W. (1984) An analysis of the influence of fracture geometry on mass transport in fractured media. *Water Resources Research*, v. 20, p. 1241-1252.
- Schwartz, F. W., Smith, L. and Crowe, A.S. (1983) A stochastic analysis of macroscopic dispersion in fractured media. *Water Resources Research*, v. 19, p. 1253-1265.
- Waterloo hydrogeologic. (2000) *Visula MODFLOW v. 2.8.2 User's Manual*. Waterloo hydrogeologic Inc. 311p.
- WHI (1997) JEB pit dewatering model. Waterloo hydrogeologic Inc. 7-2p.

2003년 월일 원고 접수, 2003년 월 일 게재승인.