

MODFLOW를 이용한 터널의 지하수 유동해석

Groundwater Flow Analysis Using MODFLOW in the Tunnel

허 창 환*

Heo, Chang Hwan

.....

Abstract

In this study, the conduct of underground water flow system with 3 dimensions is interpreted in order to examine closely the actual condition regarding the flow of the underground water which is forecast from the tunnel segment and the interpretation result which selects the design and the construction technique of the tunnel segment was applied. Also, an obstacle to construct that relates with the underground water flow in construction duration in advance will be able to apply with information that is necessary in order to establish the countermeasure. The objective tunnel is the BEOPGI tunnel segment that is 2 parallel tunnels that are a one-way 2 lane and the parameters of the MODFLOW model executing the boring investigation and the permeability examination were presumed. The underground water flow of the excavation tunnel inside was interpreted by the MODFLOW model using the parameters which is presumed and two values which compared with calculated value and observed value are the same almost. Also, when the underground water discharge quantity that followed in tunnel excavation tries to compare, the underground water total discharge quantity from tunnel point of start until destination was presumed as $0.0269\text{m}^3/\text{day}/\text{m}^2$.

Keywords : groundwater flow, finite difference method, velocity vector, MODFLOW

.....

요 지

본 연구에서는 터널구간에서 예상되는 지하수의 유동에 관한 현상을 규명하기 위하여 지하수 유동시스템의 거동을 3차원으로 해석하였으며, 터널구간의 설계와 시공기법을 선정하는데 해석결과를 활용토록 하고, 건설기간 중에 지하수 유동과 관련한 시공상의 장애를 사전에 파악하여 대책을 수립하는데 필요한 정보로 활용할 수 있도록 하였다. 대상터널은 편도 2차선인 2개의 평행터널인 법기터널 구간으로써 시추조사 및 투수시험을 실시하여 MODFLOW 모델의 매개변수를 추정하였다. 추정된 매개변수를 이용하여 MODFLOW 모델에 의해서 굴착터널 내부의 지하수 유동을 해석하고 이로부터의 계산치와 관측치를 비교한 결과 두 값이 거의 일치하였다. 또한 터널굴착에 따라 지하수 유출량을 비교해 보면, 터널시점부터 종점까지 지하수 총유출량은 $0.0269\text{ m}^3/\text{day}/\text{m}^2$ 로 추정되었다.

핵심용어 : 지하수유동, 유한차분법, 속도벡터, MODFLOW

* 충주대학교 토목공학과 강사
Part-Time Lecturer Dept. of Civil Engineering, Chungju National University, Chungju, Chungbuk 380 702, Korea
(E-mail : chheo@hanmail.net)

1. 서론

터널건설 구간에서 지하수를 효율적으로 관리하기 위해서는 대수층내의 지형 및 지질특성인자들의 정확한 상호 관련성의 규명과 이를 통한 지하수 함양과 유동과정의 정확한 해석과 예측이 필요하다. 특히, 터널건설과 같은 인위적인 요인에 의한 지형 및 지질구조의 변화로 야기되는 지하수의 유동을 분석하기 위하여 지질구조, 지하수두, 지하수 유동방향 등의자료로부터 터널건설 전·후에 대한 수리·수문학적 및 지하수 수리학적 관점에서 터널건설이 주변의 수변환경에 미치는 영향을 검토해야만 안전한 터널의 건설이 가능할 것이다.

지하수 유동을 시스템으로 취급하여 해석하고 유동과정을 모델화 하기 위한 연구를 살펴보면, 국외의 연구로는 Hubbert(1940)가 지하수 유동이론을 모형적으로 해석한 이래로 Higgins(1959)의 지하수 오염에 관한 해석, Lau(1959)의 다공질 매체를 통한 지하수 오염확산, Toth(1963)의 소규모 배수구역에 대한 지하수 흐름의 이론적 해석, Freeze와 Witherspoon(1966)은 수학적 모델에 의한 3차원적, 비균질적, 이방성 유역에 있어서의 정상지하수 흐름에 대해 연구하였다. 그 후 Freeze(1971)은 포화·불포화 천이흐름의 취급에 관한 3차원 유한차분법을 이용한 모델을 개발하였고, 이 모델을 소규모의 가상유역에 적용하였다. Kuiper(1975), Gupta와 Tanji(1976), Gupta 등(1984)은 이질층들로 구성된 지하수체제에 관한 3차원 유한요소법을 이용한 모델을 개발하였으며, 정상류에서 3차원 모델의 응용성을 개선시켰다. 이후 Narasimhan과 Witherspoon(1976)은 3차원 지하수 흐름체제에 대한 유한차분방정식의 적용을 발전시켰고 Wang과 Anderson(1982)의 유한차분 및 유한요소법에 의한 지하수 모델링 등을 들 수 있다.

한편, 국내에서는 안중성(1983)은 동위원소를 이용한 한강유역내 지하수와 지표수의 연관성에 관한 연구, 배상근(1989)의 유한차분법을 이용한 지하수 유동계 해석, 특히 지하수 개발에 의하여 변화하는 양수 주변지역의 물환경, 하천수와 지하수의 교류에 대한 변화, 하천유량에 미치는 영향, 지하수의 흐름변화와 지하수위 변화 등을 3차원 유한차분법으로 해석, 김계남(1990)은 암반에서의 지하수 유동특성 분석을 실시하였다. 그리고 Lee, Soontak(1996)은 지하수 수은, 안정동위원체, 방사성 동위원체 및 지하수 수질 등의 환경추적자 분석에 의한 제주 화산섬에서의 지하수 유동에 관한 연구, 최

윤영(2000)의 화산도서에서 유한차분법을 이용한 지하수 유동해석에 관한 연구를 하였으나 터널건설에 따른 지하수 유동에 관한 해석은 미비한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 터널 구간에서 예상되는 지하수의 유동에 관한 현상을 규명하기 위하여 지하수 유동시스템의 거동을 3차원적으로 해석하도록 하였으며, 터널구간의 설계와 시공기법을 선정하는데 해석결과를 활용토록 하고, 건설기간 중에 지하수 유동과 관련한 시공상의 장애를 사전에 파악하여 대책을 수립하는데 필요한 정보로 활용할 수 있도록 하고자 한다.

2. MODFLOW 모델의 이론

실제유역에서 수치해석에 의한 지하수 유동계를 파악하기 위하여 사용된 MODFLOW모델은 유한차분법과 유한요소법에 근거한 모델로서 그 기본이론은 다음과 같다. 일정한 밀도를 가지는 다공성 매질을 통해서 흐르는 3차원 지하수유동은 (1)과 같이 편미분 방정식으로 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial}{\partial x} (K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z} (K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z}) - W = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad (1)$$

여기서, K_{xx} , K_{yy} , K_{zz} 는 x , y , z 좌표축에 따른 투수계수이며, h 는 수두(potential head), W 는 단위체적당의 체적 flux, S_s 는 비저류율 및 t 는 시간이다. 한편 S_s , K_{xx} , K_{yy} , K_{zz} 는 공간의 함수($S_s = S_s(x, y, z)$, $K_{xx} = K_{xx}(x, y, z)$, etc)이고, W 는 시간과 공간의 함수($W = W(x, y, z, t)$)이며, 식 (1)은 불균질, 비등방성 매질에서의 비평형 상태하에서 지하수 흐름을 나타낸다.

그러나 식 (1)의 해석적 해는 거의 불가능하므로 근사해를 얻기 위해서는 매우 다양한 수치적 기법들이 적용되어야만 한다. 그러한 접근 중의 하나가 유한차분법으로서 유한차분 형태에서 지하수 흐름 방정식의 전개는 연속방정식의 적용이며 셀에서 유입되고 유출되는 모든 흐름의 합은 셀 내부에서 저류변화율에 대해 반드시 같아야 한다. 따라서 지하수 밀도가 일정하다는 가정하에 셀에 대한 흐름의 평형을 나타내는 연속방정식은 식 (2)으로 나타낼 수 있다.

$$\sum Q_i = SS \frac{\Delta h}{\Delta V} \quad (2)$$

여기서, Q 는 셀로 유입되는 흐름을 (L3T-1), SS 는 유한차분 형태에서 비저류율이며, 식 (1)에 대한 S_s 로서, 대수층에 있어 단위 수두변화에 따른 단위 체적당 유입되는 물의 체적(L-1)을 나타내고, V 는 셀의 체적(L3) 및 h 는 수두변화이다.

격자 시스템에서 i, j, k 셀과 인접한 $i, j-1, k$ 로부터 수평적인 셀 i, j, k 로의 흐름은 Darcy의 법칙에 의해 다음의 식 (3)과 같다.

$$q_{i,j-1/2,k} = KR_{i,j-1/2,k} \Delta C_i \Delta V_k \frac{(h_{i,j-1,k} - h_{i,j,k})}{\Delta r_{j-1/2}} \quad (3)$$

여기서, $h_{i,j,k}$ 는 절점 i, j, k 에서의 수두, $h_{i,j-1,k}$ 는 절점 $i, j-1, k$ 에서의 수두, $q_{i,j-1/2,k}$ 는 절점 i, j, k 와 $i, j-1, k$ 사이의 면을 통과

하는 유출량, $KR_{i,j-1/2,k}$ 는 절점 i, j, k 와 $i, j-1, k$ 사이의 수평투수계수, $\Delta C_i \Delta V_k$ 는 수평면에 대한 셀의 면적, $\Delta r_{j-1/2}$ 은 절점 i, j, k 와 $i, j-1, k$ 사이의 거리이다.

3. 모델의 적용분석

3.1 대상터널의 지형 및 지질

본 연구의 대상터널은 국가지원지방도 60호선(기장~목포)의 일부인 경남 양산시 명곡동에서 동면 법기리까지 $L = 2.020$ km 인 법기터널 구간으로 주변지형을 조사해보면, 서편으로 낙동강 지류인 양산천이 흐르고 동편으로는 수영강이 흐르고 있다. 즉, 법기터널 시점부(No. 3+680)는 양산천 지류인 북부천 상류의 명곡동(음지마을) 계곡이며, 법기터널 종점부(No. 4+700)는 수영강 지류인 법기천 상류의 법기리(음개골) 계곡이다.

법기터널 주변의 지표면은 산지로서 상록수인 소나무와 낙엽수인 떡갈, 잣목 등이 혼성되어 자생하고 있는 전형적인 산지혼성수림을 형성하고 있으며, 지표면은 EL. 356.4m~EL. 429.8m 의 산령으로부터 서편인

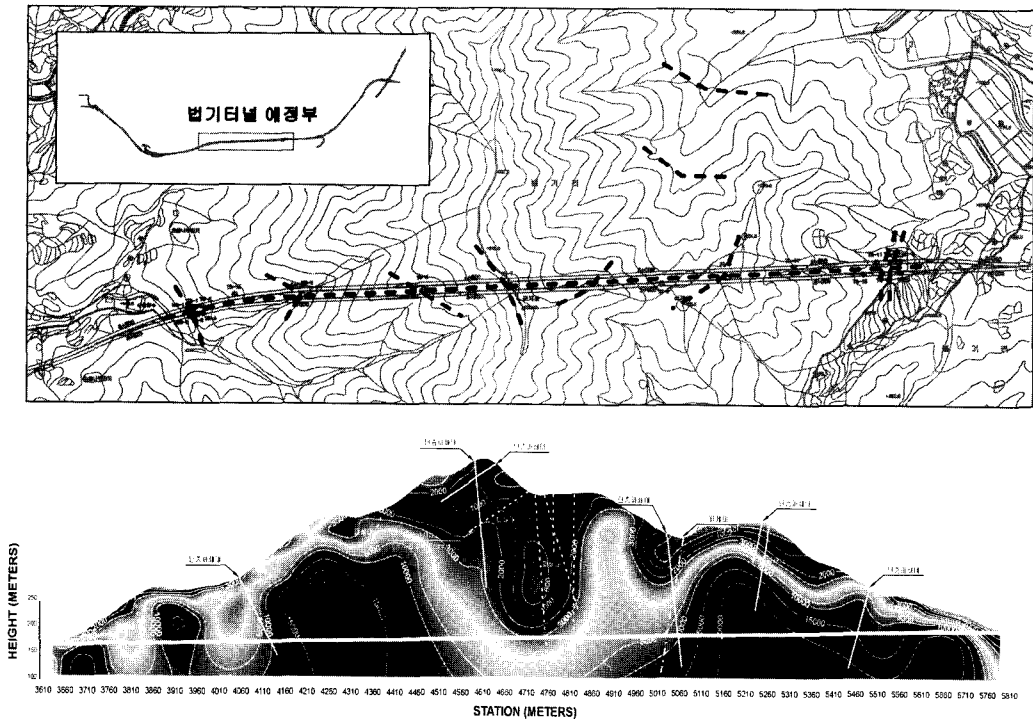


그림 1. 법기터널 부근의 단층구조

터널시점부는 지표면 경사가 매우 급하고 동편인 터널 종점부는 지표면이 다소 완만한 편이다. 특히, 법기터널의 시점과 종점부에는 과거에 소규모로 경작(논과 밭)을 해왔으나 최근에는 대부분 휴경상태로서 잡종지를 이루고 있다.

법기터널 구간의 지반지질은 터널내에 분포된 지층의 구성상태와 지반의 공학적 특성을 파악하기 위하여 터널부의 지표지질조사, 시추조사 등을 실시하였다. 터널구간에 15개 지점(TB-1~TB-15)에서 시추를 실시하고 코아 채취와 지하수위를 측정하였다.

법기터널 주변의 단층구조는 그림 1에서 볼 수 있는 바와 같이 터널구간 동·서편으로 각각의 동래단층과 양산단층이 명확히 구분되고 있음을 볼 수 있다. 뿐만 아니라 양 단층 사이에서도 많은 절리가 있고 이 절리를 따라 부분적으로 파쇄대가 발달하고 있으며, 결과적으로 이 파쇄대는 지하수의 유동에 영향을 미치게 될 것이다.

3.2 지표수 환경

터널 설계와 시공에서는 기상조건이 타 건설공정에 비해서 직접적인 영향을 미치지 않는으나 터널설계의 경우에 대수층의 지하수 함양은 지표수에 영향을 받으므로 기상·수문조건과 그 특성을 조사하여 지하수 환경에 미치는 영향을 규명해 두어야 한다.

본 연구의 법기터널 구간은 양산~동면 일대로서 양산 시가지에 인접해 있으나 기상관측 자료가 빈약하여 인접한 부산측후소 자료를 이용하였으며, 최근 월별 기상자료는 평균기온, 평균풍속, 강수량, 상대습도 및 일

조시간으로 나누었다. 특히 년평균강수량이 1,356.4mm이고 6~8월에 약 650mm가 발생하여 3개월 동안에 년강우량의 1/2이 집중되어 내리고 있으므로 여름철에 집중호우에 의한 과다한 지표수는 대수층으로 유동할 가능성이 높으며, 지표하의 질리와 파쇄대층을 따라 지하수로 함양될 수 있다.

따라서 법기터널 시점과 종점의 지표면에서 발생하는 유출량 즉, 터널 입·출구 부근에서의 지표수량과 지하수 함양을 분석해보면 다음과 같다.

3.2.1 수문량 산정방법 검토

수문량 산정을 위한 설계빈도는 홍수의 규모와 구조물의 중요도 등에 따라 그 재현기간이 채택될 수 있으나, 법기터널의 입·출부는 공사기간이 짧고 입구부의 배수공 처리기간이 1~2개월에 불과하므로 재현(확률)기간은 T=10년 정도가 타당할 것으로 판단된다.

또한 배수면의 도달시간은 법기터널 입구부의 사면이 급경사 산지로서 도달시간은 매우 빠르므로, 일반산지에 널리 이용되고 있는 Kirpich의 경험식을 이용토록 하였다. 즉, 홍수도달시간은 강우지속시간(T_c , min)을 결정하는 중요한 인자로서 지표면 도달거리(L, Km), 포고차(ΔH , m) 및 유역 평균경사($S = \Delta H/L$)에 관계되며, 그 관계식은 식(4)와 같다.

$$T_c = 3.976 \frac{L^{0.77}}{S^{0.385}} \quad (4)$$

따라서 터널 입·출부의 지표수문량 즉, 계획홍수량은 유역면적이 4 km² 이내일 때 적용되는 합리식

표 1. 법기터널 시·종점부의 지형인자

| 유역 | 유역면적 (A, km ²) | 유로연장 (L, Km) | 포고차 (ΔH , m) | 유역평균경사 ($\Delta H/L$, m/m) | 비고 |
|------|----------------------------|--------------|-----------------------|------------------------------|----|
| 시점부 | 0.943 | 0.940 | 365 | 0.388 | |
| 종점부 | 0.865 | 0.920 | 334 | 0.363 | |
| 저수지부 | 0.807 | 1.005 | 285 | 0.284 | |

표 2. 법기터널 시·종점부의 홍수유출량

| 유역 | 유역면적 (A, km ²) | 강우지속시간 (T_c , hr) | 유출계수 (C) | 강우강도 (I, mm/hr) | 홍수유출량 (Q_p , CMS) | 비고 |
|------|----------------------------|----------------------|----------|-----------------|----------------------|----|
| 시점부 | 0.943 | 0.927 | 0.80 | 60 | 12.57 | |
| 종점부 | 0.865 | 0.935 | 0.70 | 60 | 10.09 | |
| 저수지부 | 0.807 | 1.100 | 0.75 | 50 | 8.41 | |

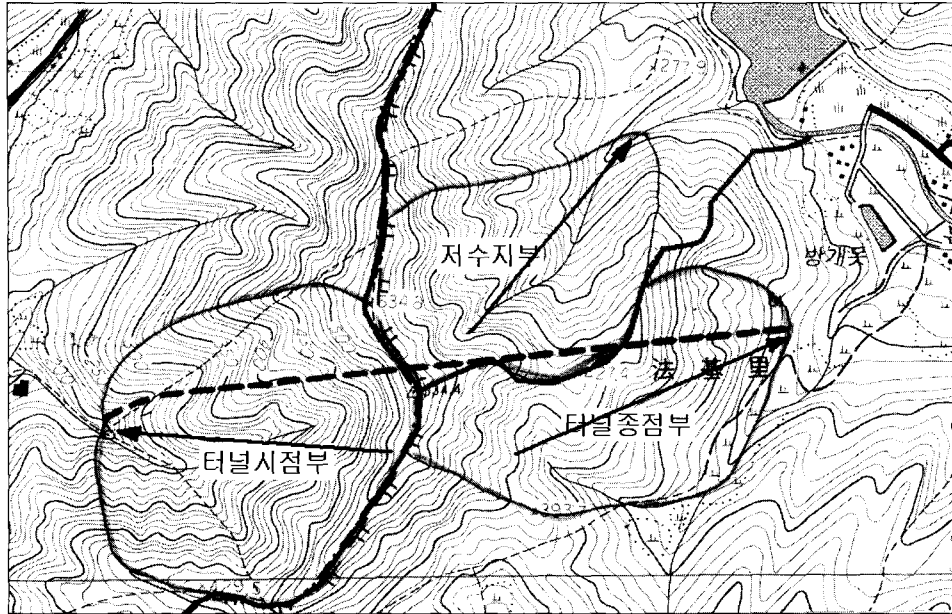


그림 2. 법기터널 시점부의 지표면 유역

(National Formula)을 사용하였으며, 계획홍수량 (Q_p , m^3/s)은 식 (5)와 같이 유역면적(A , km^2), 강우강도(I , mm/hr) 및 유출계수(C)에 의해서 계산할 수 있다.

$$Q_p = 0.2778 \cdot C \cdot I \cdot A \quad (5)$$

3.2.2 수문량 산정

법기터널 시점과 종점부의 홍수유출이 예상되는 지표면적은 그림 2와 같다. 따라서 표 1의 법기터널의 시·종점부의 지형인자로부터 홍수도달시간을 Kirpich 식으로 산정하고 이를 설계강우의 지속시간으로 채택하여 각 유역의 홍수량을 표 2와 같이 산정하였다.

3.3 지하수 환경

본 연구에서는 법기터널 공사와 관련하여 지하수 유동환경이 공사에 미치는 영향과 터널공사 또는 구조물이 주변 지하수나 지표수에 미치는 영향을 사전에 파악하고 그 대책을 설계에 반영하여 공사에 대비할 필요가 있다. 특히, 법기터널 주변에는 터널 서편에 양산단층이 발달해 있고 동편에는 동래단층이 발달하고 있으며, 양 단층대에 위치한 법기터널 구간에는 많은 절리가 발달하고 있으므로 지하수 이용실태와 하천 및 농경지 등을 정밀 조사하여 검토토록 하였다.

법기저수지 시점부에서 약 200m 하단부에 위치하고 있는 산성정수(주)는 「먹는샘물 관리법」에 따라 경상남도로부터 1995년 6월 23일자로 먹는샘물제조업 허가를 받아 취수정 2개 공에 대하여 용량 $60 m^3/일$ 의 취수 한도량을 운영 중이었으며, 실제 취수량은 PW-1호 공이 $11.4 m^3/일$, PW-2호공이 $14 m^3/일$ 등으로 총 $25.4 m^3/일$ 을 생산했던 것으로 조사되었다.

3.4 적용 및 분석

3.4.1 지하수 경계조건 및 격자구조 설정

본 연구의 대상지역인 법기터널 부근은 양산천과 수영강이 약 3 km 거리에 위치하므로 지하수 유동과는 직접적인 영향이 없다. 즉, 법기터널이 통과하는 부근의 지형은 대체로 터널의 종방향에 직각방향으로 산령이 발달하고 있으며, 터널 계획고는 시점부가 EL. 169.38 m 이고 종점부는 EL. 200.83m에 걸쳐서 통과하므로 양산천과 수영강의 지표가 EL. 10.00m 이하임을 감안한다면 표고차가 약 150 m 이상 높은 위치이므로 하천의 영향은 전혀 없다고 볼 수 있다. 그러나 터널 시점부에 소재한 산성정수 시설과 종점부에 소재한 법기저수지가 본 터널구간의 지하수 유동에 어떤 영향을 미칠 것인가는 매우 중요한 문제이다. 그러므로 이러한 주변여건을 고려하여 지하수 유동해석에 사용한 MODFLOW 프로그램의 적용을 위한 경계 조건을 설

정도로 하였으며, 시추된 지질자료를 근거로 모의발생에 적용될 MODFLOW 모델의 최종 매개변수를 추정토록 하였다.

범기터널의 지하수 유동해석을 위해서 MODFLOW에 적용할 기반암의 투수계수와 Lugeon치는 범기터널 시점부, 중앙부 및 종점부로 나누어 실시하였으며, 투수계수는 시점부(TB-1, TB-3)가 $1.522 \times 10^{-6} \sim 9.568 \times 10^{-7} \text{cm/sec}$, 중앙부(TB-5~TB-10)가 $8.808 \times 10^{-7} \sim 1.014 \times 10^{-5} \text{cm/sec}$ 및 종점부(TB-11, TB-13)가 $2.532 \times 10^{-6} \sim 8.267 \times 10^{-6} \text{cm/sec}$ 인 것으로 각각 분석되었다. 다음으로, Lugeon 치는 시점부가 0.022~0.050 l/min/m, 중앙부가 0.012~0.995 l/min/m 및 종점부가 0.173~0.754 l/min/m 인 것으로 각각 분석되었다.

3.4.2 MODFLOW에 의한 지하수 유동해석

본 연구에서는 범기터널 주변의 지하수 거동시스템을 규명하여 터널 공사 중에 터널내부에서 발생하는 지

하수 유출량의 추정과 터널설치 후에 범기터널 주변지역의 지하수환경변화를 사전에 평가 및 예측함으로써 그 현상을 범기터널 공사와 설계에 반영코자 함이다.

따라서 본 범기터널 주변의 지하수 유동해석은 터널 굴착 전에 유동하고 있는 지하수의 거동을 분석하고 또한 터널굴착 후에 발생하는 주변의 지하수 환경의 거동변화를 해석토록 하였다. 특히, 터널굴착 후에는 터널로 인해서 발생하는 지하수유동현상을 굴착시 및 굴착 후 6개월 및 24개월로 각각 나누었으며, 이 때 범기터널 주변의 지하수 거동을 해석토록 하였다.

1) 범기터널 주변의 지하수 유동해석

본 연구에서 범기터널 주변의 지하수 유동을 해석하기 위하여 가장 널리 사용되고 있는 MODFLOW 모델을 적용하였으며, 분석결과는 모델에서 계산된 지하수두와 관측수두를 비교할 수 있도록 정호에 따른 수두 분포표를 작성하여 비교하였다.

먼저, 표 3에 나타난 바와 같이 관측치와 계산된 지

표 3. 범기터널 주변의 지하수위 관측치와 계산치 비교(원래)

| 지점 No. | 관측 지하수두 (EL.m) | 계산 지하수두 (EL.m) | 상대오차(%) | 비 고 |
|--------|----------------|----------------|---------|---------------|
| MG1 | 191.25 | 191.64 | 0.20 | |
| MG2 | 123.74 | 123.12 | 0.50 | |
| MG3 | 126.19 | 126.74 | 0.44 | |
| TB1 | 166.40 | 166.38 | 0.01 | 터널시점부(-0.02m) |
| MG4 | 302.47 | 302.98 | 0.17 | |
| MG5 | 215.63 | 215.92 | 0.13 | |
| MG6 | 191.46 | 191.04 | 0.22 | |
| TB2 | 190.18 | 190.07 | 0.06 | 터널종점부(-0.11m) |

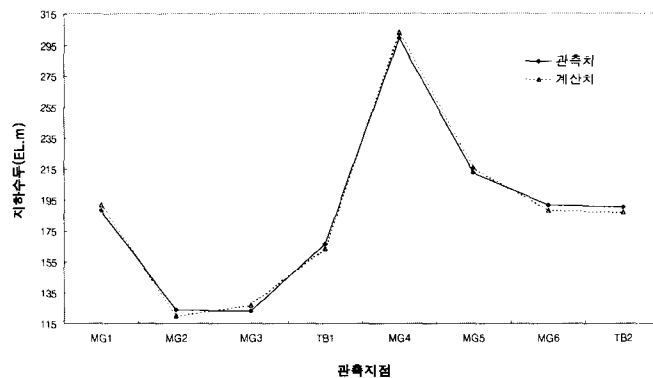


그림 3. 범기터널 주변의 지하수위 관측치와 계산치 비교(원래)

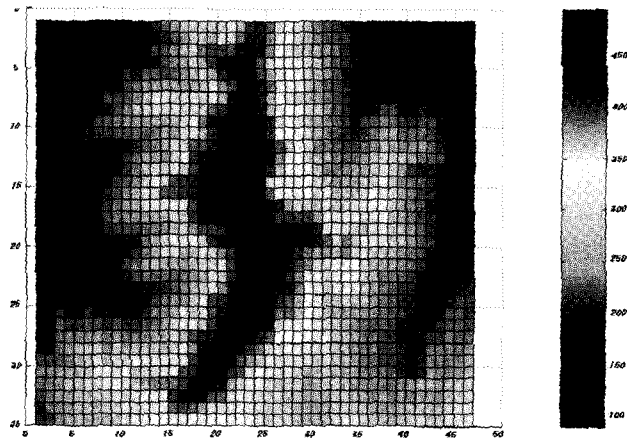


그림 4. 범기터널 주변의 지하등수두 분포도(원래)

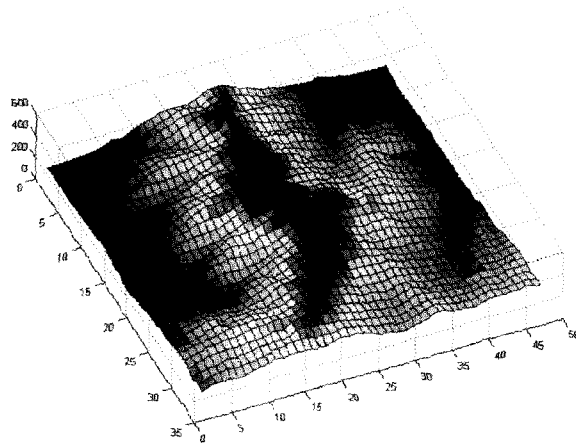


그림 5. 범기터널 주변의 지하등수두 유속벡터 분포도(원래)

하수두와의 상대오차 백분율(E.P.)을 비교 검토한 바, 0.01~0.50%의 범위를 나타내었고 그림 3에서 보는 바와 같이 관측치와 거의 일치하였다.

다음으로, 모의발생 결과에 있어 관측치와 계산치가 가장 큰 차이를 나타내고 있는 지점은 MG2 와 MG3 지점으로서 상대오차 백분율이 0.44 및 0.50%의 값을 나타내었고 가장 작은 차이를 보이고 있는 지점은 TB 1 과 TB 2 지점으로서 0.01 및 0.06%의 값을 나타내었다.

따라서 모의발생한 지하수두 계산치는 현장에서 실측한 지하수두와 매우 일치하였다. 또한 현재 지하수계에서의 지하수두와 모델에서 계산된 지하수두를 유사하

게 일치시켜 검정과정을 거친 후 각종 Stress에 따른 정류 및 천어상태 하에서 시뮬레이션을 실시하는 Historical Matching에서도 Influx = Outflux이러야 하는데 정류상태 아래에서의 물수지 분석결과에 대한 불일치 척도가 0%로서 유출량과 유입량이 동일하게 분석되었다.

그림 4는 범기터널 공사전의 지하등수두분포를 나타낸 것으로서 그림 5의 유속벡터를 보면 지하수 유동분포는 각 방향으로 고르게 유출되고 있는 것으로 분석되었다. 특히, 셀(Column 13~18×Row5~30) 지점의 유출이 셀(Column 28~38×Row5~30) 지점보다 유출이 느리게 일어나고 있는 것으로 나타났다.

표 4. 법기터널 주변의 모의발생 분석결과와 지하수 유출량

| 지 점 | 유효공극율 | 동수구배 | 유출량 (m ³ /day/m ²) | 비 고 |
|-----------------|-------|-------|----------------------------------------------|---------------|
| 터널시점 부근 | 0.05 | 0.065 | 0.0052 | 측벽으로 부터 유입 |
| 시점으로부터 500m지점 | 0.05 | 0.039 | 0.0044 | 측벽으로 부터 유입 |
| 시점으로부터 1,000m지점 | 0.05 | 0.039 | 0.0067 | 측벽과 상부로 부터 유입 |
| 시점으로부터 1,500m지점 | 0.05 | 0.042 | 0.0058 | 측벽과 상부로 부터 유입 |
| 터널종점 부근 | 0.05 | 0.060 | 0.0048 | 측벽으로 부터 유입 |
| 합 계 | - | - | 0.0269 | |

2) 터널 굴착시 지하수 유동해석

본 연구에서는 지하수 유동시스템 해석을 위해 MODFLOW를 이용하였으며, 분석결과를 토대로 터널 굴착에 따라 터널로 부터 지하수 유출량 해석을 실시하였다. MODFLOW모델의 모의발생을 위해 적용한 투수계수와 동수구배에 따른 터널부의 지하수 유출량은 표 4와 같다.

그 결과 터널시점 부근과 시점으로부터 500m지점, 1,000m지점, 1,500m지점, 1,400m지점인 터널종점 부근에 대해서 공사기간 중 터널측벽으로부터 유입될 수 있는 각각의 지하수 유출량을 나타내었다. 여기서, 터널시점 부근과 시점으로부터 1,050m지점, 터널종점 부근의 동수구배는 각각 0.065, 0.039~0.042 및 0.060 으로 분석되었으며, 이러한 결과를 이용한 터널시점으로부터 터널종점까지의 지하수 총 유출량은 0.0269 m³/day/m²로 산정되었다.

3) 터널 굴착 후 지하수 유동해석

본 연구에서는 법기터널(<폭 11.79m, 높이 7.838m >×2개, 각 터널사이의 거리는 24m)의 굴착에 따른 완공 후 6개월 및 24개월 경과 후에 있어 지하수 유동 해석을 실시하였으며, 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 터널 굴착 6개월 경과 후

법기터널 완공 6개월 경과 후에 지하수 유동시스템의 해석결과는 MODFLOW모델에서 계산된 지하수두와 관측수두를 비교할 수 있도록 정호별로 수두분포표를 작성하였다.

먼저, 표 5에 나타난 바와 같이 관측 지하수위와 계산된 지하수두의 상대오차는 0.06~0.49% 의 범위로 수두가 변화하였으며, 그림 6에 관측 지하수위와 계산 지하수두를 도시하였다. 유한차분모델을 이용한 지하수 두분포 분석치에서 가장 큰 수두차를 나타내고 있는 지점은 TB 1 과 TB 2 지점으로서 수두차가 각각 1.15m 및 0.86m 로 나타나고 가장 작은 수두차를 보이고 있는 지점은 MG 4 지점으로서 0.17m 인 것으로 나타났다.

분석결과에서 볼 때, 법기터널이 완공될 시에는 터널 주변에서 다소 지하수두 저하가 일어나고 터널시점 부 지역과 명곡저수지 주변은 큰 영향이 없는 것으로 분석되었다. 이러한 결과는 터널 중심부 지역이 전체적인 법기터널 유역에서 볼 때 가장 고지대에 속하며, 지하수 함유량이 법기터널 전체수역의 약 50% 정도에 해당하고 있어 터널 종점부지점의 지하수두 변화에는 큰 영향을 주지 못하는 것으로 판단된다. 이것은 전철의 정류상태에 대한 모델의 모의발생 결과치에서 볼 때, 법기터널 종점부에서 터널이 완공되기 전의 지하수 유동분포가 저수지와 산정정수 측은 비교적 지하수 유출이 활발히 이루어지고 있어 터널 완공 후에 명곡저수지 측과 산정정수 측으로의 수두저하에는 큰 영향이 주지 않을 것으로 판단된다.

다음으로, 그림 7~8는 법기터널 완공 6개월 후의 지하수두수두분포를 나타낸 것으로서 그림 8의 유속벡터를 보면 법기터널 중심부수역은 지하수 유동분포가 터널을 기점으로 양측으로 활발히 유출되고 있는 것으로 분석되었으며, 법기터널 하류지점은 터널 부근에서 하류측으로 유동이 활발해지면서 각 방향으로 고르게 유

표 5. 법기터널 주변의 지하수위 관측치와 계산치 비교(6개월 경과 후)

| 지점 No. | 관측 지하수두 (EL.m) | 계산 지하수두 (EL.m) | 상대오차(%) | 비 고 |
|--------|----------------|----------------|---------|---------------|
| MG1 | 191.25 | 191.70 | 0.25 | |
| MG2 | 123.74 | 123.40 | 0.27 | |
| MG3 | 126.19 | 136.73 | 0.43 | |
| TB1 | 166.40 | 165.25 | 0.49 | 터널시점부(-1.15m) |
| MG4 | 302.47 | 302.64 | 0.06 | |
| MG5 | 215.63 | 216.43 | 0.37 | |
| MG6 | 191.46 | 191.18 | 0.15 | |
| TB2 | 190.18 | 189.32 | 0.45 | 터널종점부(-0.86m) |

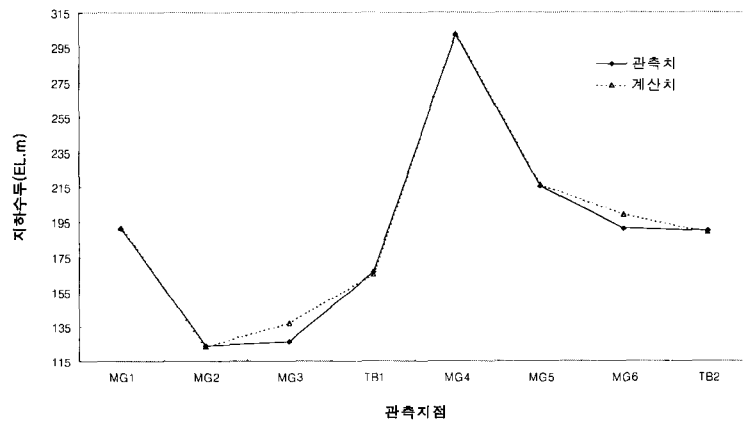


그림 6. 법기터널 주변의 지하수위 관측치와 계산치 비교(6개월 경과 후)

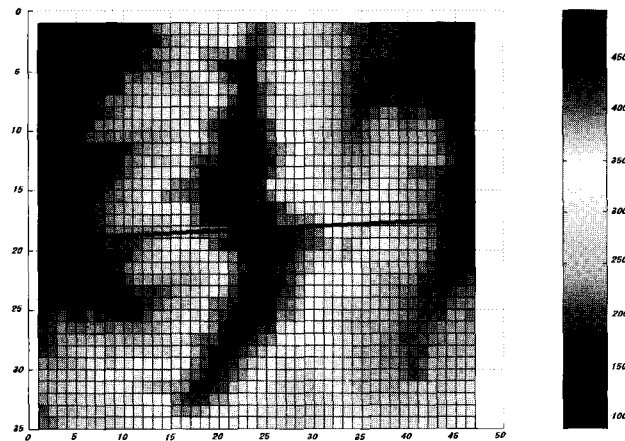


그림 7. 법기터널 주변의 지하등수도 분포도(6개월 경과 후)

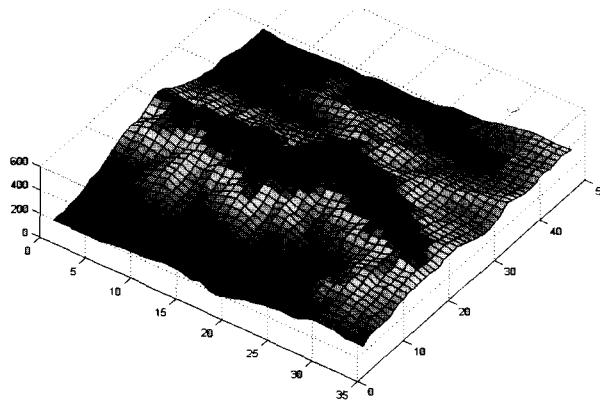


그림 8. 법기터널 주변의 지하등수두 유속벡터 분포도(6개월 경과 후)

출이 발생하고 있는 것으로 나타났다. 그리고 그림 8의 3차원 등수두분포를 보면 법기터널이 완공될 때에 상류 유역의 지하수 등수구배는 법기터널 종점부 유역보다 비교적 급한 경사를 이루고 있는 것으로 분석되었다.

(2) 터널 굴착 24개월 경과 후

법기터널 완공 24개월 경과 후에 지하수 유동 해석 결과는 MODFLOW 모델에서 계산된 지하수두와 관측 수두를 비교할 수 있도록 정호별로 수두분포표를 작성하였다.

먼저, 표 6에 나타난 바와 같이 관측지하수두와 계산된 지하수두의 상대오차는 0.09~1.07%의 범위로 수두가 변화하였으며, 그림 9에 관측치와 계산치에 대한 지하수두를 도시하였다. 유한차분모델을 이용한 지하수 두분포에서 가장 큰 수두차를 나타내고 있는 지점은

TB 1 과 TB 2 지점으로서 수두차가 각각 1.65m 및 10.7m 의 지하수위 저하를 나타내었고 가장 작은 수두차를 보이고 있는 지점은 MG 5 지점으로서 0.55m 높이는 것으로 나타났다.

결과에서 법기터널이 완공된 6개월 경과 후보다 터널주변에서 지하수두 저하가 작게 일어나고 있으나 다른 지점들을 고려해 볼 때는 터널 주변에서 가장 큰 수두 변화량을 보이고 있어 기존의 지하수 유동시스템에서 터널로 인한 터널 주변의 지하수가 가장 큰 영향을 받고 있는 것으로 나타났다. 그러나 터널 시점부 지역과 명곡저수지 주변은 앞에서와 같이 영향이 거의 없는 것으로 분석되었으며, 전체적인 지하수두 저하가 법기터널이 완공된 24개월 경과 후에는 변화량이 거의 없는 것으로 나타나 이후 안정적인 지하수두 분포를 이루는 것으로 판단된다. 그러나 법기터널이 완공된 24개월 경

표 6. 법기터널 주변의 지하수위 관측치와 계산치 비교(24개월 경과 후)

| 지점 No. | 관측 지하수두 (EL.m) | 계산 지하수두 (EL.m) | 상대오차(%) | 비 고 |
|--------|----------------|----------------|---------|---------------|
| MG1 | 191.25 | 191.01 | 0.13 | |
| MG2 | 123.74 | 123.60 | 0.11 | |
| MG3 | 126.19 | 126.74 | 0.44 | |
| TB1 | 166.40 | 164.75 | 0.99 | 터널시점부(-1.65m) |
| MG4 | 302.47 | 302.86 | 0.13 | |
| MG5 | 215.63 | 215.43 | 0.09 | |
| MG6 | 191.46 | 191.21 | 0.13 | |
| TB2 | 190.18 | 188.14 | 1.07 | 터널종점부(-2.04m) |

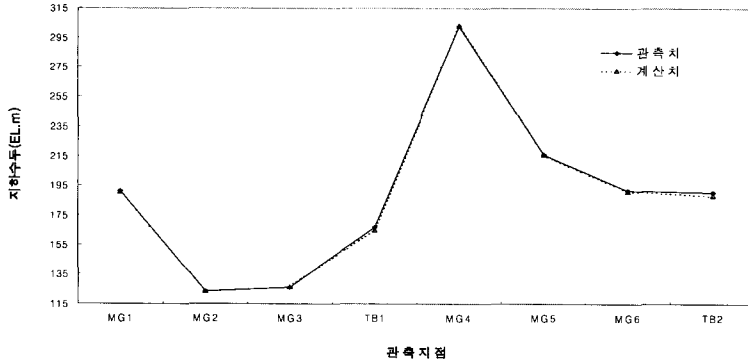


그림 9. 법기터널 주변의 지하수위 관측치와 계산치 비교(24개월 경과 후)

과 후에 분석된 모델의 모의발생 결과치는 법기터널 시점부에서 크게는 약 1.65m의 지하수두 저하가 발생되었고 법기터널 종점부의 주변에서는 약 1.07m의 지하수두 저하가 발생되고 있다. 하지만 법기터널 시점부는 터널의 영향을 거의 받지 않는 것으로 분석되었으며, 이러한 영향은 터널을 기점으로 볼 때, 하류지역의 지하수 함양량이 높은 비중을 차지하고 있기 때문인 것으로 판단된다.

다음으로, 그림 10은 법기터널 완공 24개월 후의 지하등수두분포를 나타낸 것으로써 그림 11의 유속벡터를 보면 터널 완공 전보다 지하수두는 전체적으로 저하되었으나 벡터 경향은 거의 유사한 경향을 보여주고 있는 것으로 나타났다. 그리고 그림 11의 3차원 지하등수두 분포를 보면 법기터널이 건설되기 전과 유사한 동수구배를 이루고 있는 것으로 분석되었다.

4. 지하수유동 해석결과의 비교검토

지금까지 법기터널 주변의 터널 건설과 관련하여 MODFLOW에 의하여 지하수유동 3차원 해석을 실시한 결과를 토대로 터널 내부와 주변으로 나누어 각각의 분석내용을 검토해보고, 지하수 유동과 관련한 터널구조물의 설계와 시공상의 평가와 보안 그리고 터널 외부의 지표수 및 지하수 환경변화에 대한 비교·검토하였다.

먼저, 터널구조물 내부의 지하수유동은 법기터널 구간인 시점(No.3+680)~종점(No. 5+700)부근을 대상으로 지질조사 결과와 MODFLOW 등에 의한 지하수 유동해석 결과를 비교해 보면 다음과 같다. 지질조사에서 나타나는 바와 같이 법기터널의 중심부에 직각방향으로 형성된 지질도처럼 터널노선에 직각방향으로 절리

와 파쇄대가 크게 발달해 있으며, 지하수의 유동방향은 대체로 시점부에서 서쪽의 양산사기 방향을 흐르는 성분, 종점부에서 남쪽방향으로 흐르는 성분 및 법기저수지 방향으로 흐르는 성분 등으로 각각 구분되었다. 그러나 터널노선의 직각방향으로 발생한 절리와 파쇄대는 터널구간의 지하수유동에 직·간접적인 영향을 미칠 수 있는 중요한 요인이며, 특히 터널 중심부(BT 7~BT 8)를 횡단하는 파쇄대가 남북방향으로 발달하여 지하수의 유동을 촉진시키는 요인으로 작용하게 된다.

다음으로, 지하수 3차원 유동해석에서도 터널 중심부에서 지하대수층이 형성되어 유동하고 있음을 알 수 있었다. 즉, 지층의 위치에 따라서 다소 지하대수층의 발달 규모는 상이하나 일부 지점에서 터널 상부인 EL. 260m 위치에 지하수의 유동이 형성되고 또한 EL. 190m 위치에서는 법기터널에서 법기저수지 방향으로 지하수의 유동이 형성되는 등 이러한 현상은 지질탐사 및 3차원 유동해석 등에서 공통적으로 나타나고 있다.

한편, 터널주변 지표수 및 지하수 환경은 법기터널 주변을 대상으로 지형·지질조사 및 MODFLOW 해석에 의한 지하수 유동해석 결과에 따라 지표수와 지하수환경의 변화를 비교해보면 다음과 같다.

지형 및 지질조사에서 나타나는 바와 같이 법기터널 주변의 지형을 보면 독립적인 형태의 산령을 형성하고 있고 터널이 횡단하는 산령의 동서로 양산천과 수영강이 형성되어 터널주변의 지하수 유동은 비교적 단순한 형태를 취하고 있다. 한편 터널주변의 지질도 대체로 단봉을 이루는 형태의 지질대가 조성되어 지하수대의 형성이 터널 중심부에서 표고가 낮은 지역으로 유동하고 있다. 즉, 터널 주변의 지하수는 MODFLOW 해석 결과에서와 같이 터널 시점부와 종점부 그리고 법기저

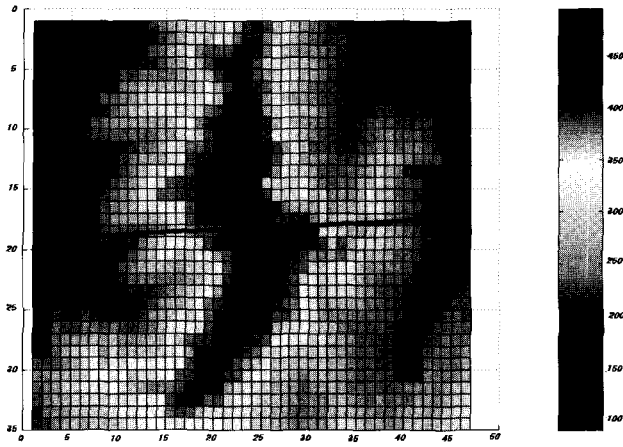


그림 10. 법기터널 주변의 지하등수두 분포도(24개월 경과후)

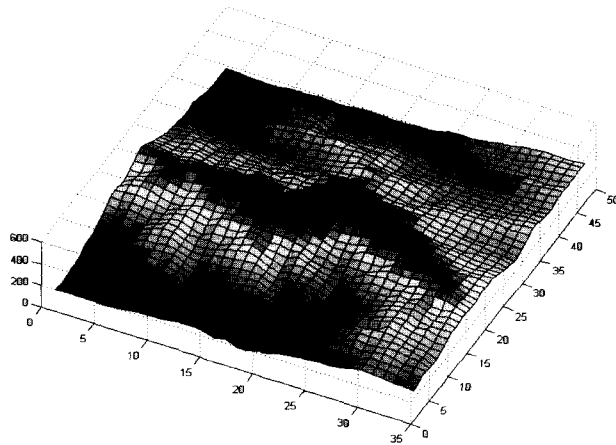


그림 11. 법기터널 주변의 지하등수두 유속벡터 분포도(24개월 경과 후)

수지부 방향 등으로 분할되어 유동하고 있다.

먼저, 터널 시점부의 지표수와 지하수에 미칠 수 있는 영향과 관련하여 살펴보면 터널 시점부는 작은 급계 곡부이고, 터널의 종방향의 계곡선형과 대체로 비슷한 방향의 선형을 이루고 있어 터널로 인한 지하수 대수층을 차단시킨다거나 장애물이 될 것으로 예상되지 않고 있다. 그러나 터널 시점부 하단에 위치한 (주)산성정수에는 수리지질 특성상 지하수위와 지하수질에 영향을 미치지 않을 것으로 판단되며, 그 하류부에 산재한 양산시 명곡리 읍지마을의 하천수, 지하수, 명곡소류지 및 경작지(논) 등에는 지표수 및 지하수의 환경변화가 없을 것으로 판단된다.

다음으로, 터널 종점부는 양산시 동면 법기리 대평골에 위치하고 있으며, 터널 종점으로부터 300m 하류에 방개못과 법기리(중마을)가 위치하고 있다. 역시 터널 종점부는 작은 완만한 계곡을 형성하고 있고 터널의 종방향의 계곡선형과 대체로 비슷한 방향의 선형을 이루고 있어 터널로 인한 지하수 대수층을 차단시키는 현상은 없을 것으로 예상된다.

마지막으로, 법기터널은 산령을 횡단하는 선형구조를 가지고 있으며, 인접한 약 600m 거리에 법기저수지가 위치하고 있고 특히, 이 구역은 상수보호구역으로 지정되어 관리되고 있다. 앞에서 MODFLOW의 분석결과를 볼 때, 터널 중심부에서 종점부에 이르는 북측 방향

으로 절리와 파쇄대가 크게 발달하고 있어 지하수의 대수층 형성과 유동이 예상되었다. 따라서 터널부와 범기저수지의 거리가 약 600m 로써 멀기는 하지만, 이 부분이 절리가 심하게 형성되어 있고 파쇄대가 발달해 있어 지하수의 유동에 각별한 대책이 요망되고 있으며, 그 대책으로 파쇄대 부근의 대수층을 정밀탐사하여 터널주변에 차수벽처리를 하거나 범기저수지 주변의 누수와 관련한 계층장비를 설치하여 저수지 거동을 공사기간 동안에는 감시(모니터링)를 수행할 수 있도록 사전 대비책이 필요하다고 판단된다.

5. 결 론

지금까지 국가지원지방도 60호선의 일부인 양산~동면간 도로구간인 범기터널 주변의 지하수유동에 관한 현상을 규명하기 위하여 지하수 유동시스템의 거동을 MODFLOW에 의해서 3차원적으로 해석한 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 지하수 유동시스템 해석을 실시한 결과, 정류상태에서 관측 지하수두와 계산된 지하수두의 상대오차백분율(E.P.)이 10% 이내의 범위로서 관측치와 거의 일치하였다. 그리고 범기터널 공사전의 모의발생 분석결과를 이용하여 지하수두분포와 유속벡터를 산정한 결과 지하수 유동분포는 각 방향으로 고르게 유출되고 있는 것으로 분석되었으며, 3차원 등수두분포는 터널중심부에서 시점방향과 종점방향으로 등수구배를 이루고 있는 것으로 분석되었다.
- 2) 터널 완공 6개월이 경과한 후의 지하수 유동분석에서 관측 지하수두와 계산된 지하수두의 수두차는 0.15~0.86m의 범위로 수두가 저하되었으며, 분석결과로 볼 때 범기터널이 완공될 시에는 터널 주변에서 두드러진 지하수두 저하가 일어나고 터널 시점지역과 산성정수 주변은 큰 영향이 없는 것으로 분석되었다. 이러한 결과는 터널 중심부(군자산 축) 지역이 전체적인 범기터널 수역에서 볼 때, 가장 고지대에 속하며, 지하수 함유량이 범기터널 전체유역의 약 50% 정도에 해당하고 있어 터널 하류지점의 지하수두 변화에는 큰 영향을 주지 못하기 때문인 것으로 판단된다.
- 3) 터널 완공 24개월 경과 후에 지하수 유동시스템 분석에서 관측 지하수두와 계산된 지하수두의 수두차는 1.65~2.04m의 범위로 수두가 저하되었으며, 지하수두분포에서 가장 큰 수두차를 나타내

고 있는 지점은 TB1과 TB2 지점으로서 수두차가 각각 7.23m 및 8.39m인 것으로 나타났다. 분석결과로 볼 때 범기터널의 완공 12개월 경과 후보다 지하수두 저하가 작게 일어나고 있으나, 다른 지점들을 고려해 볼 때, 터널 주변에서 가장 큰 수두변화량을 보이고 있어 기존의 지하수 유동시스템에서 터널의 영향은 터널 주변의 지하수가 가장 큰 영향을 받고 있는 것으로 나타났다.

이상과 같은 지하수 유동해석 결과는 앞으로 범기터널 공사가 진행되어 실제 현장에서 발생하는 지하수 유출량을 관측하여 본 논문에서 해석하여 추정한 결과와 비교함으로써 MODFLOW에 의한 터널주변의 지하수 유동해석을 적용함에 있어서 그 유용성을 판단할 수 있을 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

- 김계남(1990). "암반에서의 지하수 유동특성 분석." **한국수문학회지**, 제23권, 제2호, pp. 227-237.
- 배상근(1989). "삼차원 정상지하수 모형에 의한 홍적대의 지하수 유동해석." **한국수문학회지**, 한국수문학회, 제22권, 제1호, pp. 81-90.
- 안종성(1983). "동위원소를 이용한 한강유역내 지하수와 지표수의 연관성에 관한 연구." **한국수문학회지**, 한국수문학회, 제23권, 제2호, pp. 245-252.
- 최윤영, 이순탁(2000). "화산도에서 유한차분법을 이용한 지하수 유동해석." **한국수자원학회 논문집**, 한국수자원학회, 제33권, 제5호, pp.611-622.
- Freeze, R. A.(1971). "Three-dimensional, transient, saturated-unsaturated flow in a groundwater basin." *Water Resour. Res.*, 7, pp. 347-366.
- Freeze, R. A., Witherspoon, P. A.(1966). "Theoretical analysis of regional groundwater flow ; 1. Analytical and numerical solutions to the mathematical model." *Water Resour. Res.*, 2, pp. 641-656.
- Gupta, S. K., Cole, C. R., Pinder, G. F.(1984). "A finite element three-dimensional groundwater model for a multiaquifer system." *Water Resour. Res.*, 20, pp. 553-563.
- Gupta, S. K., Tanji, K. K.(1976). "A three-dimensional Galerkin Finite Element solution of flow through multiaquifers in Sutter Basin."

- California, *Water Resour. Res.*, 12, pp. 152-162.
- Higgins, G. H.(1959). "Evaluation of the groundwater contamination hazard from underground nuclear explosives." *J. Geophys. Res.*, 64, pp. 1509-1519.
- Hubbert, M. K.(1940). "The theory of groundwater motion." *J. Geol.*, 48, pp. 785-944.
- Kuiper, L. K.(1975). "A state-wide hydrological model." *Trans. Am. Geophys. U.*, 56, pp. 982.
- Lau, L. K., Kaufman, W. J.(1959). "Dispersion of a water tracer in radial laminar flow through homogeneous porous media." *Hydraulic Lab. and Sanitary Eng. Res. Lab.*, Univ. of California, Berkeley, Progr. Report. 5.
- Lee Soontak(1996). *Groundwater Movement in the Volcanic Island of Cheju, Korea*, Ph.D.(Sc) Thesis, Inst. of Geosci., Univ. of Tsukuba.
- Narasimhan, T. N., Witherspoon, P. A.(1976) "An intergrated finite difference method for analyzing fluid flow in porous media." *Water Resour. Res.*, 12, pp. 57-64.
- Toth, J.(1963). "A theoretical analysis of groundwater flow in small drainage basins." *J. Geophys. Res.*
- Wang, H. F., Anderson, M. P.(1982). "*Introduction to Groundwater Modeling-Finite Difference and Finite Element Method.*", W. H. Freeman and Company.
- (논문번호:03-14/접수:2003.01.10/심사완료:2003.02.08)