

## 철도 터널 굴착이 목포용당 국가 지하수 관측소 지하수위에 미친 영향 분석

이진용<sup>1)\*</sup>, 이명재<sup>2)</sup>, 최미정<sup>3)</sup>, 황현태<sup>4)</sup>, 문상호<sup>5)</sup>, 원종호<sup>6)</sup>

### Analysis of Effects of Railway Tunnel Excavation on Water Levels of a National Groundwater Monitoring Station in Mokpo, Korea

Jin-Yong Lee, Myeong-Jae Yi, Mi-Jung Choi, Hyoun-Tae Hwang,  
Sang-Ho Moon and Jong-Ho Won

**Abstract** Effects of railway tunnel excavation on water level at a national groundwater monitoring station in Mokpo were evaluated by field investigation and numerical groundwater modeling. The water level at the station has experienced a decline of about 5 m within 1 year since July 2002. From the field investigation, it was concluded that decrease of precipitation or increase of groundwater use was not reason for the decline. The Mokpo tunnel of new Honam railway, 70 m apart from the national station, appeared most plausible cause and a period of the tunnel excavation generally well matches up that of the drawdown. To quantify the effects of the tunneling on the water level, a groundwater flow modeling was performed. Especially, a most probable conceptual model was optimized through multiple preliminary simulations of various scenarios because there were few hydrogeological data available for the study area. The optimized model was finally used for the quantification. Based on the field investigation and the numerical simulations, it was concluded that the tunnel excavation was one of the most probable reasons for the substantial water level decline but further hydrogeologic investigation and continuous monitoring are essentially required for the surrounding area.

**KeyWords** National groundwater monitoring stations, Groundwater modeling, Tunnel excavation, Groundwater level, Mokpo-yongdang

**초 록** 본 연구에서는 목포 용당지역 호남선 복선화 터널굴착이 인근 국가 지하수관측소의 지하수위에 끼친 영향을 현장조사 및 수치모델링을 통해 분석하였다. 목포용당 관측소에서는 2002년 7월부터 1년 사이에 약 5 m 이상의 지하수위 강하를 보였다. 현장조사 결과 자연적인 강수량 감소나 지하수 이용량의 증가는 원인이 아닌 것으로 나타났다. 해당 관측소와 이격거리 70 m 정도에 있는 호남선철도 목포터널이 주요 원인으로 파악되었는데 터널굴착의 시기도 지하수위 강하 시기와 대체적으로 일치하였다. 터널굴착의 국가관측소 지하수위에 대한 영향을 정량적으로 분석하기 위해 지하수 유동모델링을 수행하였다. 특히 주변지역에 대한 수리지질 자료가 매우 미흡하여 다양한 다수의 시나리오를 가정하여 개념모델을 최적화하였고 최적화된 개념모델을 이용하여 국가지하수 관측소의 수위영향을 정량화하였다. 현장조사 및 수치모델링 결과 본 국가지하수 관측소의 상당한 수위강하는 목포터널이 직접적인 원인일 가능성이 커나 엄밀한 평가를 위해서는 인근 지역에 대한 추가적인 수리지질학적 조사가 수행되어야 할 것으로 사료된다.

**핵심어** 국가 지하수관측소, 지하수모델링, 터널굴착, 지하수위, 목포용당

## 1. 서 론

2005년 건설교통부와 한국수자원공사는 국가지하수 관측소 설치 이래 단기간에 지하수위 강하가 크게 발생

한 관측소에 대한 원인조사를 실시하였다(한국수자원 공사와 한국지질자원연구원, 2005, Lee et al., 2006a, b). 해당 관측소들의 지하수위는 2~3년 사이에 평균 3 m 이상, 그리고 크게는 45 m 이상의 수위강하를 나타 내었다(이진용 외, 2005). 수위 변동의 원인으로는 강수량의 자연적 감소, 인근지역 지하수 이용량의 증가, 대형빌딩 신축 혹은 지하철-터널 공사에 의한 지하수 유출 등을 고려할 수 있다. 영향 정도에 차이는 있지만 토지이용도 변화(지표면의 아스팔트 피복)에 따른 지하수 함양량의 감소 혹은 상하수도 누수율의 감소 등 도 원인이 될 수 있다(Kim, 2000, Kim and Lee, 2003).

<sup>1)</sup>(주)지오그린21 대표이사

<sup>2)</sup>(주)지오그린21 기획팀 팀장

<sup>3)</sup>(주)지오그린21 환경기술과 과장

<sup>4)</sup>(주)지오그린21 환경기술연구소 연구원

<sup>5)</sup>한국지질자원연구원 지하수지열연구부 책임연구원

<sup>6)</sup>한국수자원공사 조사기획처 지하수조사부 부장

\* 교신저자 : hydrolee@empal.com

접수일 : 2006년 1월 5일

심사 완료일 : 2006년 2월 1일

자연적인 강수량 감소에 의한 지하수위 강하는 강수량이 평년수준으로 회복되면 대부분의 경우 수위는 정상으로 되찾는다. 인근지역의 지하수 양수량 증가에 의한 영향도 대수층 변형(대수층의 두께 감소 혹은 공극의 닫힘)이 발생한 심각한 경우가 아니라면 양수량(이용량) 조절을 통해 적절한 수위회복이 가능하다. 지하철공사 등과 같은 터널 굴착에 의한 인근지역 지하수위의 강하는 일정기간 지속되는데 서울과 대구 지하철의 경우 터널 굴착 후 2~3년간 대부분의 수위강하가 발생하는 것으로 보고 되었다(Kim and Lee, 2003, Lee et al., 2005). 한번 내려간 지하수위는 대체로 회복되지 않고 낮아진 상태에서 다시 정상적인 수위변동을 보이는 것으로 나타났다. 만약 상당한 지하수위 강하가 발생한 상황이 지속된다면 지반의 유효응력 증가로 인한 지반 침하의 우려도 증가한다.

본 연구는 단기간에 상당량의 수위강하를 나타낸 목포용당 국가 지하수 관측소에 대한 지하수 현장조사 및 실내분석 결과로 인근 호남선 복선화 터널굴착에 의한 영향을 집중적으로 평가하였다. 연구지역에 대한 수리지질 자료가 미흡하므로 다수의 가능한 시나리오를 설정하고 반복하여 수치모의를 수행함으로써 현장 개념모형을 최적화하는 과정을 제시하였다.

## 2. 연구지역 및 방법

### 2.1 목포용당 국가 지하수 관측소

목포용당 관측소는 전라남도 목포시 용당동에 위치하고 있다. 목포시는 삼면이 바다로 둘러싸여 있는데 관측소를 기점으로 북서쪽으로 1.8 km, 남서쪽으로 3.5 km 그리고 남동쪽으로 2.7 km 정도 거리에 바다와 접해있다. 관측소 주변에 목포시청을 중심으로 상가와 주거지역이 분포하고 있다(Fig. 1). 주거지역을 벗어난 외곽지역에는 상업지역이 있으며, 특히 70 m 이격지점에 호남선(임성리-목포) 신노선 터널구간이 지나간다. 관측소 뒤편에는 해발고도 97.7 m의 무명산이 있으며 무명산 등산에는 일부 발자국을 재배하고 있다. 본 관측소에는 70 m 심도의 암반관측정이 1995년 12월 27일에 준공되어 1996년 1월 16일부터 지하수위, 지하수온, 전기전도도에 대한 관측을 계속하고 있다. 암반관측정은 12 m 심도까지 250 mm 철재 파이프를 외부케이싱이 되어 있고, 내부 케이싱은 200 mm PVC 파이프가 되어 있다. 스트레나는 17~27 m, 33~39 m 심도에 설치되었으며, 관측장비(센서)는 케이싱 상단으로부터 31.78 m에 설치되어 있다. 설치당시 초기 지하수위는 지표로부터 9.45 m 심도였다.

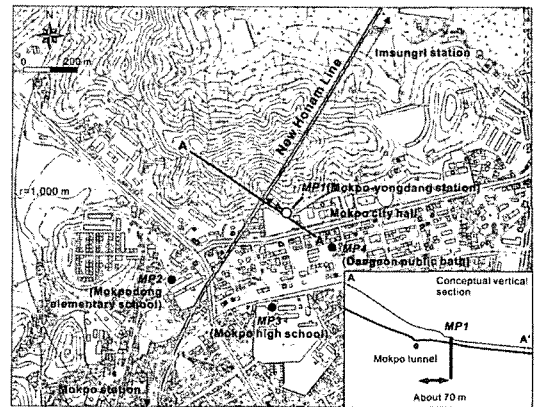


Fig. 1. Location of the studied station showing also groundwater wells in the study area and conceptual vertical section (A-A') crossing the Mokpo tunnel

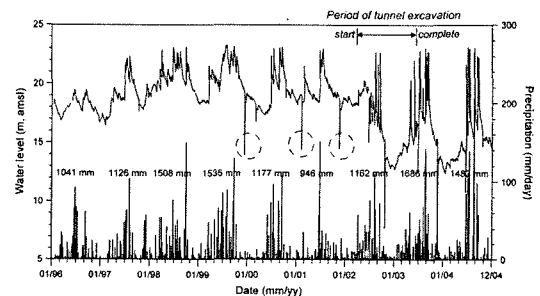


Fig. 2. Water level variation measured at the studied groundwater monitoring station. Values of annual precipitation are also shown in the middle of the figure

관측소 지역의 지층구성을 보면, 0.6 m 심도까지는 실트질 모래층으로 되어 있으며, 0.6~1.2 m에서는 응회암의 풍화대가 나타난다. 1.2~31.2 m 심도에서는 응회암의 연암층으로 매우 조밀하나 단열 및 절리가 발달하여 있으며, 파쇄가 심한 구간이 있다. 31.2~70 m 심도에서는 응회암의 경암으로 국부적으로 파쇄대가 나타나는 특징을 보이고 있다(건설교통부와 한국수자원공사, 1995). 기상청 목포관측소 기상자료에 의하면 1971년부터 2000년까지 30년간 연평균 강수량은 1,125 mm 이고 1995년 관측소 설치 이후 1997년까지 연평균 강수량보다 적게 내리다가 다시 강수량이 증가하여 이 기간 이후부터는 2001년 한해를 제외하고 연평균 강수량보다 많은 것으로 나타났다. 특히 2003년에는 1,686 mm의 최대 강수량을 기록하였다(Fig 2).

## 2.2 수위 변동

목포용당 암반관측정의 지하수위는 관측 개시일인 1996년 1월 16일부터 현재까지 측정되고 있다(Fig. 2). 지하수위 변동을 보면 2002년 6월까지의 강우의 영향을 직접적으로 받는 형태로 일정한 패턴을 유지하지만, 2002년 7월부터 변동형태가 바뀌면서 지하수위가 짧은 시간 내(약 1년) 약 5 m 가까이 하강하는 것으로 나타났다. 이후 강우 등 계절적인 영향으로 지하수위가 일부 회복되는 양상을 보이지만 연중 평균 지하수위는 약 3 m 이상 내려간 상태에서 수위변동이 유지되고 있다. 또한 한국수자원공사가 연 2회 지하수질 분석을 위한 양수작업의 영향으로 지하수위가 일시적으로 내려간 형태도 나타나고 있다(Lee et al., 2006b, Fig. 2에서 점선 원으로 나타낸 부분).

지하수위의 변동 경향성을 파악하기 위하여 최소자승법을 이용한 단순회귀분석 결과 연 46.8 cm의 속도( $r^2=0.25$ )로 하강하는 것으로 나타났다. 또한 비모수 경향분석 결과(Mann-Kendall test 및 Sen's test) 99% 신뢰수준에서 지하수위가 하강하는 것으로 평가되었다(한국수자원공사와 한국지질자원연구원, 2005). 한편 2001년은 평년과 달리 매우 작은 강수량에도 정상적인 안정 수위를 유지하였으나 오히려 강수량이 증가한 2002년과 2003년에 지하수위 강하를 보임으로써 강수량 감소에 의한 목포용당 관측소의 수위하강 가능성은 배제되었다.

## 2.3 연구 방법

위에서 살펴본 바와 같이 2002년도에 단기간에 발생한 지하수위 강하의 원인을 파악하기 위하여 현장조사 및 실내분석을 실시하였다. 현장조사에서는 인근지역(용당동 및 산정동)의 용수공급 상황 및 지하수 이용시설의 신설 및 폐공에 대한 탐문조사 및 관련기관 자료 조사를 실시하였으며 아울러 국가지하수관측소를 기준으로 반경 1 km 이내의 대형토목공사 혹은 간이상수도 시설의 신설 등의 여부를 파악하였다. 측정가능한 지하수관정에 대해서는 지하수위를 수동으로 측정하였고 한개 지하수관정은 자동으로 지하수위를 관측하였다. 현장조사 시 목포용당 관측소에서 직선거리로 약 70 m 이격된 위치에 호남선 복선화노선 목포터널이 비교적 최근에 굴착된 것을 확인하고 이 터널이 국가지하수관측소의 수위에 영향을 줄 수 있을 것으로 판단하였다.

터널의 영향을 정량화하기 위해 한국철도시설공단으로부터 공사기간, 터널의 제원, 터널굴착시 지하수 유출량 등의 자료를 입수하여 지하수모델링을 실시하였다. 수치모의에 사용한 상용 프로그램은 3차원 유한차분법

을 이용한 Visual MODFLOW 3.0(Waterloo Hydro-geologic, Inc., Canada)이다.

## 3. 결과 및 토론

### 3.1 주변지역 지하수 이용현황

목포용당 국가지하수관측소 인근은 상수도가 보급되어 있는 지역으로 지하수를 학교, 세차장, 목욕탕, 다세대주택 등 청소나 화장실 용도로 사용하고 있다. 용당동의 신고시설(과거에는 30톤/일 이상, 2002년부터는 이하 시설도 신고대상임)은 15개소이며, 허가시설과 경미한 이용시설은 없는 것으로 조사되었다(Table 1). 용당동과 인접한 산정동의 경우 200~300번지가 관측소와 비교적 가까이 있으며, 허가시설(생활용수 100톤/일 초과, 농업용수 150톤/일 초과 사용) 1개소와 신고시설 4개소가 있는 것으로 조사되었다. 목포용당 관측소 주변의 지하수 이용시설의 위치를 보면 거리상 최소 100 m 이상 떨어져 있다. 관측소가 이들 이용시설보다 비교적 높은 지대에 위치하고 있으며, 일일 지하수이용량이 크지 않아 관측소의 지하수위가 이들 양수의 직접적인 영향을 크게 받을 것으로 보이지는 않는다. 한편 1993년 이후 폐공된 관정은 13개 신고시설로 원인을 살펴보면 수량부족 3건, 염분증가 4건, 수질악화 3건, 상수도대체 1건, 용도변경 1건, 기타 1건 등으로 나타나, 지하수량 및 수질의 문제가 비교적 자주 발생한 것을 알 수 있다(Table 2). 2002년 이후 4건의 지하수관정 폐공 원인은 거의 수질악화에 있으며 대부분이 염분증가에 따른 것이다.

### 3.2 지하수위

관측소 인근의 지하수위의 분포를 확인하기 위하여 현장조사 시 파악한 지하수 관정에 대하여 수동 수위측정기(Model 101, Solinst)로 지하수위를 측정하였다. 목포동초등학교의 지하수 이용시설(MP2, 위치는 Fig. 1 참조)에 대하여는 자동수위 관측장비(Diver, Solinst)를 설치하여 10분 간격으로 지하수위 변동을 관측하였다. 이용관정 중 대부분은 양수시설과 관정이 지하에 매설되어 있어 지하수위를 측정할 수 없었으며, 다만 4개 지점에서 지하수위를 측정할 수 있었다(Table 3). 우기인 2005년 7월 27일에 측정된 국가지하수 관측소의 지하수위(MP1)는 지하 7.14 m이었고 관측소와 146 m 이격된 대건탕(목욕탕, MP4)의 경우, 지하 11.95 m로 시설공사 관계로 지하수를 이용하지 않고 있어 비교적 자연수위에 가깝다고 볼 수 있다. 그러나 목포고등학교(MP3)의 경우 조사기간이 방학이었음에도 불구하고 지

**Table 1.** Summary of groundwater use wells around the national groundwater monitoring station (YD: yongdang-dong, SJ: sanjung-dong).

Address	Usage	Installation (yy/mm)	Well depth (m)	Well radius (mm)	Planned pumping rate (m <sup>3</sup> /day)	Distance <sup>a</sup> (m)
YD 1189-1	Living	91/12	100	200	30	107
YD 1193-8	Living	91/11	30	200	50	146
YD 1194-1	Living	92/03	50	200	50	217
YD 845	Living	94/05	250	200	100	289
YD 841-5	Living	91/02	100	200	50	340
YD 970-6	Living	87/05	75	40	30	369
SJ 270-1	Living	85/01	60	200	30	372
YD 1197-3	Living	96/01	70	50	30	406
SJ 274-25	Living	94/05	250	200	100	457
SJ 264-1	Living	02/12	100	150	100	481
SJ 264-1	Living	03/07	135	200	250	498
SJ 327-4	Living	91/11	149	200	280	651
YD 937-1	Living	92/03	120	200	30	751
YD 982-65	Living	99/01	100	150	80	776
YD 113-12	Living	95/09	100	200	70	939
YD 1087-3	Living	-	63	200	30	1,041
YD 1128-6	Living	93/08	80	200	80	1,087
YD 1103-13	Living	05/02	100	150	90	1,109
YD 1143-1	Living	94/07	40	32	20	1,278
YD 1061	Living	03/11	30	50	29	1,627

<sup>a</sup>Radial distance from the monitoring station.**Table 2.** Summary of abandoned groundwater wells around the national groundwater monitoring station (YD: yongdang-dong, SJ: sanjung-dong).

Address	Installation (yy/mm)	Well depth (m)	Well radius (mm)	Abandoned (yy/mm)	Reason (problem)	Distance <sup>a</sup> (m)
YD 982-65	87/01	180	200	93/08	Quality <sup>b</sup>	749
YD 1125-12	90/01	50	200	93/08	Quality	691
YD 1028-7	87/01	70	200	94/02	Quality	1,589
SJ 339-5	96/06	150	200	98/03	Quality	898
YD 1203-1	97/07	80	150	98/05	-	162
YD 1188-11	93/07	100	200	98/07	Quality	298
YD 1186-10	93/06	90	200	98/10	Quantity	145
YD 186	97/05	40	150	99/07	Quantity	1,675
SJ 225	98/11	80	175	99/12	Quantity	819
SJ 292	00/12	90	150	02/09	-	649
YD 964-4	97/09	70	150	03/03	Quality	565
YD 964-4	97/09	70	150	03/03	Quality	559
SJ 274-25	86/10	150	32	03/03	Quality	474

<sup>a</sup>Radial distance from the monitoring station.<sup>b</sup>Water quality problems were mostly derived from increase in salinity

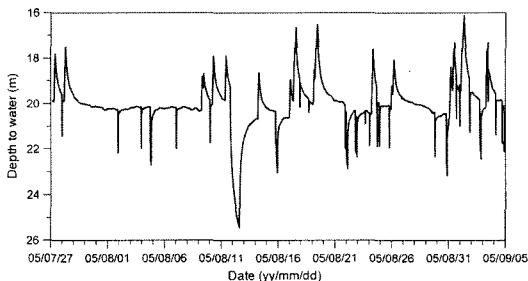
**Table 3.** Groundwater levels (depths to water below ground surface) measured at groundwater use wells around the national groundwater monitoring station.

Well ID	Location	Date	Water level	Distance <sup>a</sup>
MP1	NGMS	2005-07-27	7.14 m	-
MP2	Mokpodong elementary school	2005-07-27	19.62 m	372 m
		2005-09-05	20.85 m	
MP3	Mokpo high school	2005-07-27	42.00 m	369 m
		2005-09-05	27.77 m	
MP4	Daegeon public bath	2005-07-27	11.95 m	146 m
		2005-09-05	11.96 m	

<sup>a</sup>Radial distance from the monitoring station.

하수를 지속적으로 양수하고 있어 지하수위가 지하 42 m로 매우 낮아진 상태였다. 목포동초등학교 이용관정 (MP2)의 지하수위도 19.62 m로 상당히 낮아져 있었는데 지동관측 결과 지하수위 변동은 강우에 상당히 민감하게 반응하며, 다시간·다량 양수시에도 양수를 중단할 경우 수위회복은 상대적으로 빨랐다(Fig. 3). 모니터링 기간 중 빈번한 상하 수위변동 외에 특별히 하강 추세를 보이지는 않았다. 2005년 9월 5일에 측정된 지하수위는 대체로 7월보다 약간 하강한 값을 보였으나 목포고등학교의 경우 측정기간 중 지하수이용 중지로 7월보다 14 m 이상 크게 상승하였다.

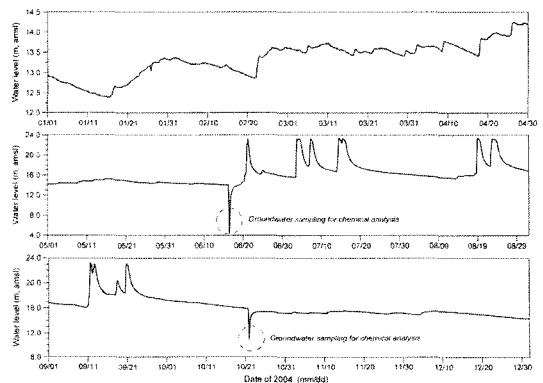
이러한 지하수위 분포는 목포용당 관측소가 이들 관정들 보다 상대적으로 고지대에 있는 점과 관측소의 동일 시점 지하수위가 7 m 내외인 점을 감안하면 주변 지하수위가 대체적으로 상당히 낮은 상태임을 알 수 있다. 특히 목포동초등학교의 이용관정은 신흥남선 복선노선(목포터널)과 직선으로 약 60 m 거리에 이격되어 있지 않아 호남선 복선화 공사와 관련하여 지하수위 강하를 겪었을 것으로 예상되나, 과거 수위기록이 전무하며 학교관련자 면담결과 지하수량 부족으로 인한 문제가



**Fig. 3.** Water level fluctuation measured at the Mokpodong elementary school (MP2), which is 372 m apart from the national groundwater monitoring station (10-min interval data)

없는 것으로 조사되었다. 지하수량 혹은 지하수위 강하에 대한 문제를 인식하지 못한 큰 이유 중 하나는 지하수를 직접 끌어올려 사용하는 것이 아니라 양수하여 저장탱크에 저장하였다가 사용하기 때문으로 사료된다.

한편 국가 지하수 관측소에 가장 인접한 지하수 이용관정도 140 m 이상 이격되어 있는데 신고한 이용량으로는 관측소에 미치는 수위영향이 미미할 것으로 사료된다. 그러나 현재 인근지역의 지하수위 강하정도로 판단하였을 때 실제 지하수 이용량은 신고량 이상일 것으로 판단된다. 대구대봉 국가지하수 관측소의 경우 인근지역의 지하철 공사(터널굴착) 외에 100 m 이내의 민방위 관정의 지하수 이용이 일정 정도 국가 관측소 지하수위에 영향을 주는 것으로 조사되었다(Lee et al., 2006b). 대구대봉 관측소 지하수위의 일반적 하강경향(지하철 공사 영향) 외에 빈번한 수위변동(불규칙/규칙적인 반복 변동)이 인지되었는데(6시간 간격 원시자료), 본 목포용당 관측소에서는 이와 같은 빈번한 변동이 나타나지 않는 것으로 보아 인근지역 지하수이용에 따른



**Fig. 4.** Water level fluctuation measured at the national groundwater monitoring station (6-hour interval data)

직접적이며 빠른 영향은 작은 것으로 사료된다(Fig. 4). 그러나 앞서 지하수위 분포에서 보았듯이 이들 주변의 지속적이며 장기적인 지하수 이용은 전체적인 지하수위 하강에 영향을 줄 것으로 보인다.

### 3.3 터널굴착 영향에 대한 지하수모델링

#### 모델링 개요

한국철도시설공단(2005) 자료에 의하면 목포와 임성리간을 연결하는 호남선 제7공구 노반공사는 1999년 5월 20일에 착공하여 2004년 12월 10일에 준공하였다. 호남선 제7공구에는 6개의 터널이 만들어졌는데 본 연구지역내의 목포터널은 목포시청 북쪽에서부터 시작하여 목포역에 이르는 연장길이 700 m로 2002년 4월부터 2003년 6월까지 공사를 완료하였다. 이러한 공사시점은 목포용당 관측소의 이상적인 지하수위 강하가 시작된 것으로 보이는 2002년 6월과 시기적으로 근접해 있다(Fig. 2 참조). 산 측면을 굴착하기 시작하는 터널 공사 일정을 고려할 때 목포터널 굴착을 목포용당 관측소의 지하수위 강하의 직접적인 원인의 하나로 고려하

였다. 터널 공사로 인한 관측소의 수위영향을 정량적으로 분석하기 위하여 지하수 유동 모델링 기법을 이용하였다. 연구지역에 대한 수리지질학적 자료의 한계로 본 수치모델링에서는 적절한 개념모델을 구성하고 현실적으로 가능한 여러 경우를 가정하여 최적화(training and optimization)한 후 목포터널 공사로 인해 목포용당 관측소에서 지하수위 강하가 일어날 수 있는지 여부와 강하량에 대해 분석하였다. MODFLOW2000(지하수 유동분석 엔진, USGS)을 이용하여 총 78개 경우(시나리오)를 분석하였다(Table 4).

관측소 부근은 도심지인 관계로 자연적인 지하수 경계조건 설정이 어렵고 국가지하수관측소외에는 수리지질 자료가 크게 부족하여 비교적 단순화하여 개념모형을 구성하였다. 모의 영역의 경계는 목포용당관측소 북쪽의 산능선을 지하수 분수령으로 설정하였고, 나머지 부분은 모의경계에 의한 영향이 최소화되도록 가로 및 세로 1,000 m로 넓게 설정하였다(Fig. 5a). 도심지는 지하수계에 영향을 미치는 보다 복잡한 조건(예를 들어 상하수도 누수, 파악하지 못한 지하수이용, 국지적인 토목공사 등)이 존재할 수 있으나(Kim, 2000), 본 모의에

Table 4. Number of conceptual models for numerical groundwater modeling.

Parameters in conceptual model		Cases	Simulations	
Basic conceptual models	Hydraulic conductivity (cm/sec)	$1.0 \times 10^{-3}$	3	
		$1.0 \times 10^{-4}$		
		$1.0 \times 10^{-5}$		
	In progress	1	3	
		10		
		100		
	Tunnel conductance ( $m^2/day$ )	0.001	4	$3 \times 3 \times 4 \times 2 \times 1 = 72$
		0.01		
		0.1		
	After completion	1	4	
1				
1				
Constant head boundary (m)	1	2		
	4			
Recharge (mm/yr)	30	1		
Sensitivity analysis of groundwater recharge	Hydraulic conductivity (cm/sec)	$1.0 \times 10^{-3}$	3	
		$1.0 \times 10^{-4}$		
		$1.0 \times 10^{-5}$		
	Tunnel conductance ( $m^2/day$ )	In progress	10	1
		After completion	0.01	
	Constant head boundary (m)	4	1	
	Recharge (mm/yr)	15	2	
		60		
	Total number of simulations			$72 + 6 = 78$

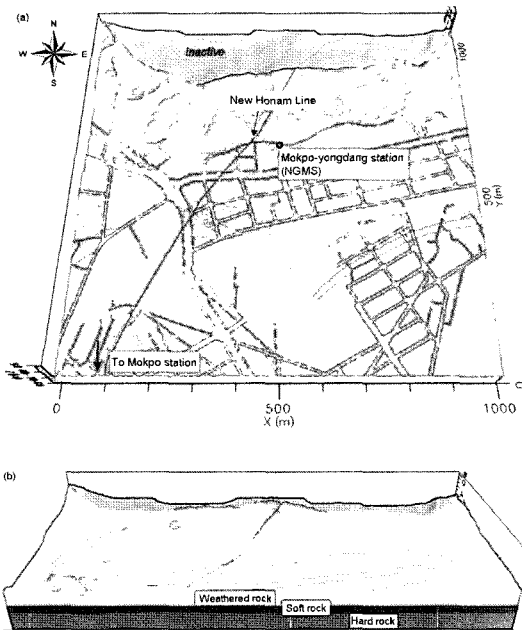


Fig. 5. Illustrations showing (a) domain and (b) vertical hydrogeological stratification for the numerical modeling

서는 고려하지 않았다. 모의영역의 격자망 구성은 가로 및 세로 모두 5 m로 설정하였다. 모의 영역 북쪽의 산 능선은 지하수 분수령으로 무흐름경계(no flow boundary)로 설정하였고, 남쪽은 일정수두경계(constant head boundary)로 설정하였다. 일정수두는 모의영역 남쪽 가장자리(목포역 부분)에서 약 800 m 지점이 바다인 것을 고려하여 지표고도(해수면 위 5 m)에서 지하수위가 지하 1 m인 경우에 대해 해수면 위 4 m와 해수면 보다 약 1 m 높은 경우에 대해 1 m(해수면 위), 두 가지로 구성하였다. 기본적으로 지하수 흐름이 북쪽에서 남쪽으로 형성되도록 하였고 모의 지역의 함양률은 30 mm/yr로 설정하여 입력하였다.

모의영역의 수리지질학적 수직층서는 국가지하수 관측소 자료(건설교통부와 한국수자원공사, 1995) 및 일부 제한적인 수리지질자료(한국철도시설공단, 2005)를

참조하여 상부로부터 풍화대, 연암, 경암으로 구분하였고(Fig. 5b), 터널 입력 및 주 반응 구간을 풍화대로 설정하여 풍화대의 수리전도도( $K_x=K_y$ )는  $10^{-3} \sim 10^{-5}$  cm/sec 범위로 하고, 수직방향의 수리전도도( $K_z$ )는 수평 수리전도도보다 10배 작게 입력하여 각각의 개념모형별로 지하수 유동을 계산하였다(Table 5). 목포터널 공사구간은 배수경계(drain boundary)로 설정하였다. 한국철도시설공단 자료에 의하면 목포터널의 시점부 터널 고도는 6.87 m 이나 모의영역내의 터널고도는 북쪽에서 남쪽으로 2.12 m에서 -5.64 m이다. 이때 배수경계의 전도도(conductance)는 터널 굴착시 1, 10, 100  $m^2/day$ 로, 터널 굴착 완료 후 유지관리시에는 0.001, 0.01, 0.1, 1  $m^2/day$ 로 설정하고 각각의 경우에 대해 모의하여 터널 구간으로 유입되는 유입수량 및 터널 노선에서 약 70 m 떨어진 지점(국가지하수관측소)에서의 수위변화를 계산하였다.

**최적화 및 민감도 분석(optimization and sensitivity analysis)**

앞서 언급한 바와 같이 본 모델링에서는 기존의 연구 지역에 대한 수리지질학적 조사자료가 부족하기 때문에 최적의 개념모형을 도출하여 터널굴착 영향을 정량화하기 위해 다양한 경우에 대한 예비 모델링 작업을 수행하였다. 일반적으로 터널 공사에 따른 터널로의 권장 지하수 유입량은 터널 굴착시 0.72  $m^3/day/m$  이하로, 터널 굴착 완료 후 유지관리 시에는 0.087  $m^3/day/m$  이하로 제시되고 있다(대한터널협회, 1999). 본 수치모의에서는 터널 지하수 유입량이 제시된 기준치 이내이면서 터널에서 70 m 떨어진 지점에서의 수위강하가 목포용당 관측소에서 실측된 수위변화량과 유사한 개념모형을 도출하도록 하였다. 수리전도도에 따른 개념모형별 모의 결과 수리전도도가 클수록 대체로 터널로 유입되는 유입수량이 크게 분석되었다(Table 6). 수리전도도가 큰 Type 1의 경우 터널 공사중 배수경계 전도도를 크게 할수록 터널유입량이 계속 증가하지 않고 일부 감소하는 것으로 나타났는데 이는 배수경계 전도도가 크면 모의시간 초기에 지하수가 상대적으로 다

Table 5. Hydrogeological stratification and its hydraulic conductivity for the numerical modeling.

Layers	Weathered layer $K_x=K_y$ (cm/sec)	Soft rock $K_x=K_y$ (cm/sec)	Hard rock $K_x=K_y$ (cm/sec)
Type 1	$1.0 \times 10^{-3}$		
Type 2	$1.0 \times 10^{-4}$	$5.0 \times 10^{-5}$	$5.0 \times 10^{-6}$
Type 3	$1.0 \times 10^{-5}$		

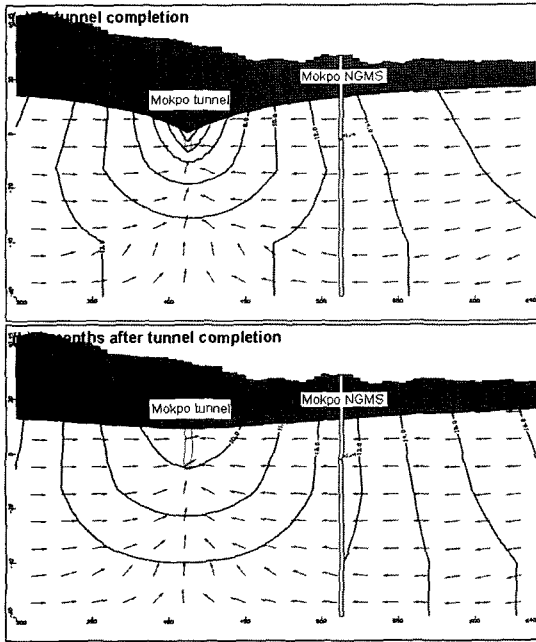


Fig. 8. Vertical sections of water levels around the tunnel and the national groundwater monitoring station (vertical exaggeration  $\times 2$ )

계를 향해 흐르는 것으로 분석되었다. 다음으로 정류상태의 지하수위를 초기수두로 그리고 다른 입력조건은 유지한 채 터널(배수경계)의 전도도를 공사중은  $10 \text{ m}^2/\text{day}$ , 터널공사 후 유지 관리시에는  $0.01 \text{ m}^2/\text{day}$ 로 하여 터널 공사에 따른 지하수 유동 변화를 모의하였다.

터널 공사에 의한 지하수위 강하 구역은 시간이 경과할수록 목포터널 노선 주변으로 평행하게(line sink) 확대되었고, 터널 구간 주변의 수두구배는 완만해 지는 것으로 나타났다(Figs. 7 and 8). 모의 결과 터널내로 유입되는 지하수의 유입수량은 한국철도시설공단(대한터널협회)이 제시한 권장량 이내인 터널 공사 중에는  $0.504 \text{ m}^3/\text{day}/\text{m}$ , 터널 공사 후에는  $0.065 \text{ m}^3/\text{day}/\text{m}$ 로 분석되었다(Table 8). 또한 터널 노선에서 거리에 따른 지하수위 변화를 분석한 결과 지하철 구간에서 약 70

Table 8. Calculated groundwater inflow into the tunnel.

Tunneling	In progress	After completion
Input conductance of model ( $\text{m}^2/\text{day}$ )	10	0.01
Recommended inflow of tunnel ( $\text{m}^3/\text{day}/\text{m}$ ) <sup>a</sup>	0.720	0.087
Calculated inflow ( $\text{m}^3/\text{day}/\text{m}$ )	0.504	0.065

<sup>a</sup>Values recommended by KRNA (Korea Railway Network Authority)

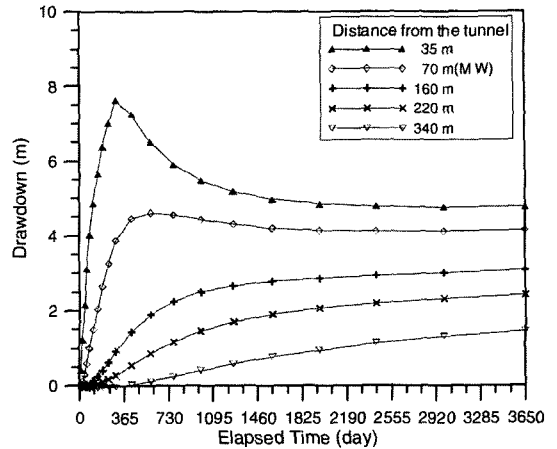


Fig. 9. Drawdowns calculated from the main simulation

m 떨어진 지점에서 지하수위 강하는 1년 내에 급격하게 일어났으며 2년 이후에는 약 4.6 m로 어느 정도 일정해지는 것으로 나타났다(Fig. 9). 이러한 수위하강패턴은 지하수 유동 모형에서 대수층의 수리전도도 및 터널에 입력한 배수경계의 전도도에 의한 영향을 크게 받고 있지만, 일반적인 상황에서 목포터널 굴착으로 인해 터널 이격거리 70 m에 위치한 목포용당 관측소에서 충분히 나타날 수 있는 현상으로 판단된다.

목포터널은 굴착심도가 지하 10~30 m로 비교적 지표에 가까이 있어서 심정을 사용하는 주변지역의 지하수 이용에 큰 영향을 주지 않는 것으로 나타났다. 또한 수치모델링을 수행한 결과에서도 터널과 인접한 지역에 한정하여 부분적인 영향을 주고 있는 것으로 나타났다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 목포용당 국가지하수관측소에서 2002년도 하반기에 발생한 5 m 이상의 급격한 지하수위 강하의 원인을 밝히고자 하였다. 현장조사 및 실내분석 결과 당해 기간 동안 자연적인 강수량 감소 혹은 인근 지역의 지하수 이용량 증가 등은 발생하지 않았다. 지하수위 저하의 직접적인 주요원인은 관측소로부터 직



선거리 70 m 이내의 호남선 복선화에 따른 터널굴착이 고려되었다. 터널굴착에 의한 영향의 정량화하기 위해 지하수 모델링을 실시하였다. 인근지역에 대한 수리지질자료가 적어 다수의 가능한 시나리오를 설정하고 반복하여 수치모의를 실시하고 이를 통해 개념모형을 최적화하였다. 최적화된 개념모형을 통해 계산한 결과 본 목포터널 굴착이 국가지하수관측소 지하수위 저하의 직접적 원인이 될 수 있음을 알았다. 그러나 이용 가능한 주변지역 수리지질 자료(지하수위 등)가 미흡하여 보다 신뢰성 있는 정량화를 위해서는 이에 대한 추가적인 조사가 필요하다. 한편 목포터널 원인 외에도 관측소 인근에 지하수 이용시설이 다수 있어 상당량의 지하수를 채수하고 있다. 터널로 인한 영향은 일시적인 것으로 사료되나 주변 지하수 채수에 따른 지속적인 지하수위 하강이 우려되므로 이들에 대한 지하수정밀조사와 대책이 요구된다.

## 사 사

이 연구는 한국지질자원연구원과 한국수자원공사의 “국가지하수관측망 인근의 지하수 장해 원인 분석 및 대책마련 연구”의 일환으로 수행되었습니다. 자료수집에 협조해 주신 한국철도시설공단에 감사드립니다. 또한 좋은 수정의견을 주신 두 분의 심사위원님께서도 감사의 말씀을 드립니다.

## 참고문헌

1. 건설교통부, 한국수자원공사, 1995, 1995 지하수 관측망 설치공사 준공보고서, 한국수자원공사, 대전, 566p.
2. 대한터널협회, 1999, 터널설계기준: 건설교통부 제정, 구 미서관, 133p.
3. 이진용, 이명재, 이재명, 안경환, 원종호, 문상호, 조민조, 2005, 국가 지하수관측소 지하수위, 전기전도도 및 수온 자료에 대한 모수적 및 비모수적 변동 경향성 분석, 지하수토양환경(심사중).
4. 최미정, 이진용, 구민호, 이강근, 2004, 터널모델링시 개념모델에 따른 지하수 유동 예측결과 비교연구, 지질공학 14, 223-233.
5. 한국수자원공사, 한국지질자원연구원, 2005, 지하수 장해우려지역 대책방안 연구 보고서, 초안, 한국지질자원연구원, 대전, 801p.
6. 한국철도시설공단, 2005, 호남복선(송정리-목포) 제7공구 노반신설공사, 한국철도시설공단, 대전, 30p.
7. Kim, Y.Y., 2000, Analysis of Hydraulic Properties of an Urban Groundwater System: Groundwater System in Seoul Area, Korea, Ph.D. thesis, Seoul National University, Seoul, Korea, 320p.
8. Kim, Y.Y. and K.K. Lee, 2003, Disturbance of groundwater table by subway construction in the Seoul area, Korea, Geosciences Journal 7, 37-46.
9. Lee, J.Y., M.J. Choi, Y.Y. Kim and K.K. Lee, 2005, Evaluation of hydrologic data obtained from local groundwater monitoring network in a metropolitan city, Korea, Hydrological Processes 19, 2525-2537.
10. Lee, J.Y., M.J. Yi, Y.K. Yoo, K.H. Ahn, G.B. Kim and J.H. Won, 2006a, A review of national groundwater monitoring network (NGMN) in Korea, Hydrological Processes (in press).
11. Lee, J.Y., M.J. Yi, J.M. Lee, K.H. Ahn, J.H. Won, S.H. Moon and M. Cho, 2006b, Causes of substantial water-level decline at a national groundwater monitoring station in Daegu, Korea, Geosciences Journal (submitted).
12. Molinero, J., J. Samper and R. Juanes, 2002, Numerical modeling of the transient hydrogeological response produced by tunnel construction in fractured bedrocks, Engineering Geology 64, 369-386.

**이진용**

1996년 서울대학교 지질학과 이학사  
 1998년 서울대학교 지구환경과학부 이학석사  
 2001년 서울대학교 지구환경과학부 이학박사

Tel: 02-875-9491  
 E-mail: hydrolee@empal.com  
 현재 (주)지오그린21 대표이사

**이명재**

1999년 서울대학교 지구시스템전공 이학사  
 2001년 서울대학교 지구환경과학부 이학석사

Tel: 02-875-9492  
 E-mail: tankguy@empal.com  
 현재 (주)지오그린21 기술기획팀 팀장

**최미정**

1998년 전북대학교 지구환경과학과 이학사  
 2000년 연세대학교 지구시스템과학과 이학석사

Tel: 02-875-9421  
 E-mail: geogw99@empal.com  
 현재 (주)지오그린21 지하수토양환경과 과장

**황현태**

2002년 부경대학교 환경지질학과 이학사  
 2004년 서울대학교 지구환경과학부 이학석사

Tel: 02-875-9428  
 E-mail: naps@korea.com  
 현재 (주)지오그린21 기술연구소 연구원

**문상호**

1981년 서울대학교 지질학과 이학사  
 1983년 서울대학교 지질학과 이학석사  
 1990년 서울대학교 지질학과 이학박사  
 1993년 미국 Indiana Univ, Post-Doc

Tel: 042-868-3372  
 E-mail: msh@rock25t.kigam.re.kr  
 현재 한국지질자원연구원 지하수지열연구부 책임연구원

**원종호**

1984년 서울대학교 지질학과 이학사  
 1986년 서울대학교 지질학과 이학석사  
 2004년 서울대학교 지구환경과학부 이학박사

Tel: 042-629-2725  
 E-mail: jhwon@kowaco.or.kr  
 현재 한국수자원공사 지하수조사부장

