

터널 건설에 따른 인근 하천 영향 평가를 위한 연구

김태희*¹⁾, 김영식¹⁾, 하규철¹⁾, 김구영¹⁾, 고동찬¹⁾, 양인제²⁾, 홍순택²⁾

¹⁾한국지질자원연구원, ²⁾(주)태조엔지니어링

Study on the Induced Interaction between Groundwater and Surface Water due to the Tunnel Construction

Tae-Hee Kim*¹⁾, Young-Sik Kim¹⁾, Gyoo-Chul Ha¹⁾, Kue-Young Kim¹⁾
Dong-Chan Koh¹⁾, In-Jae Yang²⁾, Soon-Taek Hong²⁾

¹⁾Groundwater & Geothermal Resources Division, Korea Institute of Geoscience & Mineral Resources

²⁾Geotechnical/Tunnel Engineering Dept., Teso Engineering Co., Ltd.

본 연구는 마창대교 진입 터널 건설에 따른 지하수-지표수 연계 시스템에 대한 사례 분석을 그 주요 목적으로 하였다. 터널 노선의 약 300m에 이르는 구간은 본 연구지역을 흐르는 가포천의 직하부를 통과하고 있어 이에 대한 사전 영향 검토가 요구되었다. 하지만, 이와 유사한 사례는 국내외적으로 거의 존재하지 않으며, 다만 국내의 경우 터널 굴착에 따른 지하수계에 대한 영향 검토는 부분적인 조사 자료에 근거한 case modeling 연구가 수행된 사례는 빈번히 존재한다. 하지만 본 연구에서는 불확실성이 높은 자료에 근거한 모델링 연구를 지양하고, 자연적인 상태에서의 고도별 지표수 유량 변화를 관측하여 이를 통해 지하수-지표수 상호 작용을 해석하고자 하였다. 또, 이러한 해석 결과에 근거하여 터널 굴착 시 발생 가능한 문제점을 제시하고, 그에 따른 설계상의 보완점 제시를 그 주요 목적으로 하였다. 본 연구를 위해 터널 예정 노선 직상부를 흐르는 가포천에 대해 총 5개 지점에서 하천 유량 모니터링을 실시하였고, 이를 통해 하천 유량 중 지하수 기저 유출에 의한 기여 정도를 분석하였다. 분석 결과 본 연구 지역에서 하천 유량 중 평균 39%는 지하수의 기저 유출에 의한 것으로 추정되었으며, 터널 굴착 시 최소 지하수 기저유출에 의한 하천 유출량(39%)이 감소할 개연성을 확인하였다. 이상의 연구 결과를 근거로 본 지역에서 터널 굴착에 따른 하천 유량에 대한 영향을 최소화 할 수 있는 방안으로 개수로 공사에 의한 터널 인접 구간에서의 지하수-지표수 상호 작용의 차단, 터널로의 지하수 유입량의 가포천으로의 환원 등 그 영향을 최소화 할 수 있는 방안을 설계 대안으로 제시하였다.

주요어: 지하수-지표수 상호작용, 터널, 고도별 하천 유량, 기저유출

The objective of this study is the evaluation of the tunneling effect on the groundwater-surface water interaction. The designed tunnel line is laid beneath the Gapo-cheon, which runs throughout the study area. And, the pre-evaluation of the tunnel-influence on the Gapo-cheon is urgently needed. However, it is very difficult to find out the similar domestic and/or foreign cases. In this study, the numerical modeling technique was not considered because of the insufficient data. Instead of the numerical modeling, the measurement and

*Corresponding author: katzura@kigam.re.kr

analysis of the stream flow rates 5 different points were adopted to evaluate the influence of the tunnel construction on the Gapo-cheon. Based on the analysis of flow monitoring data, it can be concluded that 39% of flow rate in Gapo-cheon is contributed by the groundwater discharge, as baseflow and the construction of tunnel can seriously decrease the flow rate in Gapo-cheon.

key words : groundwater-surface water interaction, tunnel, surface water monitoring, various elevations, baseflow

개 요

1990년대 중반 이후 국내에서 국도의 직선화, 철도의 복선화, 고속철도 사업 등이 광범위하게 진행되면서 이전 도로 혹은 철도 등이 지형의 영향으로 곡선형을 가지던 것을 대부분 새롭게 건설하는 사업이 진행되고 있다. 국내 실정에서 철도 혹은 도로의 직선화를 위해서 중요한 장애요인이 되는 지형적 기복의 문제를 해결하여야 하는데, 실제 설계 혹은 시공 단계에서 이 문제는 대부분 터널 굴착을 통해 해결하고 있다. 따라서 이전 1km 미만의 터널이 대부분이던 것이 최근 들어서는 10km 이상의 터널도 계획/시공되고 있다. 하지만, 터널이 장대화됨에 따라 이전까지 크게 주목받지 못하던 몇가지 중요한 문제들이 발생하고 있는 것도 현실이며, 이에 대한 뚜렷한 해결책 역시 국내에서는 제시되지 못하고 있다. 실제로 일부 중요한 이러한 문제는 물의 흐름과 관계되는 문제이며, 지하수 시스템과 직간접적인 관계를 가지고 있으나, 아직은 터널 주변에서의 지하수 거동 특성에 대한 연구가 그다지 깊이 있게 진행되고 있지는 못하다. 실제 이러한 문제를 해결하기 위해서는 계획의 입안 단계에서 주변의 정천 현황 및 지하수 유동 시스템과 관련하여 그 영향성에 대한 체계적인 조사 및 평가를 수행하여야 한다. 하지만, 현재 국내의 실정은 균열 암반 내 지하수 시스템과 관련하여 무엇을, 어떻게 조사하여야 하는가에 대해 체계화된 바가 전혀 없다고 보는 것이 오히려 타당할 것이다.

물론 터널 굴착에 따른 지하수 시스템에 대한 영향을 분석하기 위한 일련의 연구는 국내에서도 부분적으로 진행되어 왔으며, 이와 관련된 국내 연구들을 살펴 보면, 이희근 외(1995)는 동해신광산 터널굴착공사와 관련하여 지표수 및 지하수 유동 변화에 대해 조사하였으나 각 요소들간의 연관성에 관해 규명하지는 못하였고, 다만 현황조사의 성격이 강하였다는 한계

를 가지고 있으며, 조병욱 외(1999)는 입하~영천간 도로 터널 공사와 관련하여 터널 굴진에 따른 터널로의 지하수 유입량을 산정하기 위해 유속계를 이용한 조사를 수행, 유량계를 이용한 결과와 비교-검토 연구를 수행하였다. 또, 허창환(2003)은 MODFLOW를 이용한 지하수 유동모델링을 통해 터널 굴착에 따른 지하수위 변동 양상에 대해 연구를 수행하였으나, 터널 굴착 전의 자료만이 활용되어 그 실용성에 관해서는 증명하지 못하였다는 한계를 가지고 있다. 따라서 이러한 연구 결과들을 금번 연구지역의 해석에 적용하기에는 많은 현실적 한계가 존재한다. 본 연구 지역에서는 이미 기술한 터널과 지하수계간의 관계에 관한 검토와 더불어 지표수-지하수-터널 간의 상호 연관성에 대한 검토 필요성이 제기된다. 하지만 본 지역의 시스템(터널-지하수-지표수의 상호 연계)과 유사한 연구 사례는 해외에서도 찾아보기 힘들다. 현재까지 터널 굴착과 관련하여 해외에서도 많은 연구들이 진행되었으나, 대부분 지하수 유입량 산정을 위한 모델링 연구, 굴착에 따른 지하수위 강하 산정을 위한 모델링, 혹은 터널 안정성과 간접적으로 관련된 지질공학적 접근으로 그 내용이 한정되어 있다(Molinero et. al., 2002; Davis and Horswill, 2002; Bossart et. al., 2002). 다만 Liu et. al.(2000)는 환경동위원소에 대한 분석을 통해 강수, 지하수, 터널 유입수간의 상호 관계에 관한 연구를 수행한 바 있다. 이는 터널 굴착 후 강수에서 터널에 이르는 소규모의 물 순환 시스템에 관해 환경동위원소라는 매개를 통해 살펴봄으로써 상호 연계성을 살펴보고자 한 연구로 본 연구 지역의 해석을 위해 가장 근접한 연구라 생각되나, 본 지역은 현재 터널 건설 전이라는 중요한 차이가 있다. 그리고 본 연구는 국내 건설 설계를 위한 조사 관례상 상대적으로 짧은 기간(1~3개월) 내에 연구를 수행해야 한다는 한계를 가지고 있어 지하수-지표수 상호 작용을 위해 흔히 사용되는 수문분리법을 직접 적용하는 것은 한계를 가진다.

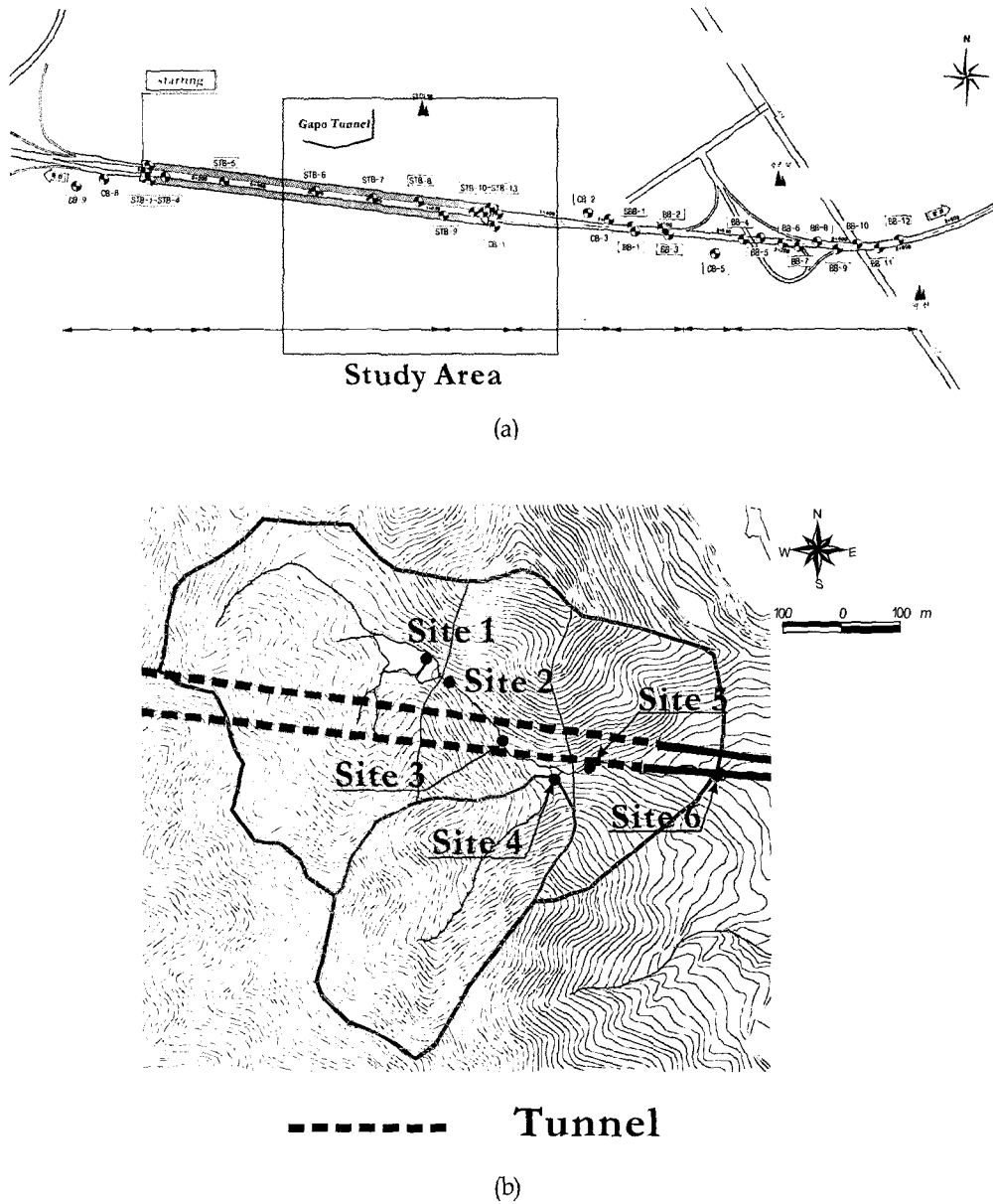


Fig. 1. Topography and designed tunnel line in the investigated area : (a) designed tunnel line and locations of boreholes, (b) monitoring locations.

따라서 본 연구의 주요 목적은 자연적인 조건의 지표수-지하수 상호관계의 규명을 통해 터널 건설시 발생할 수 있는 문제점에 대해 사전 검토하여, 터널 시공에 따른 문제점을 보완하고, 또 이를 위해 짧은 기간 내 지하수-지표수 간의 상호작용 정도를 규명하기 위한 유량 관측 방법에 관한 검토에 그 목적이 있다.

연구 지역의 수계 분포 특성

본 연구 지역은 경상남도 마산시 가포동 가포초등학교 서쪽에 위치한 지역으로 마창대교 건설에 따른 진입도로 건설 예정 지역으로 마산-창원 연안 만에 직

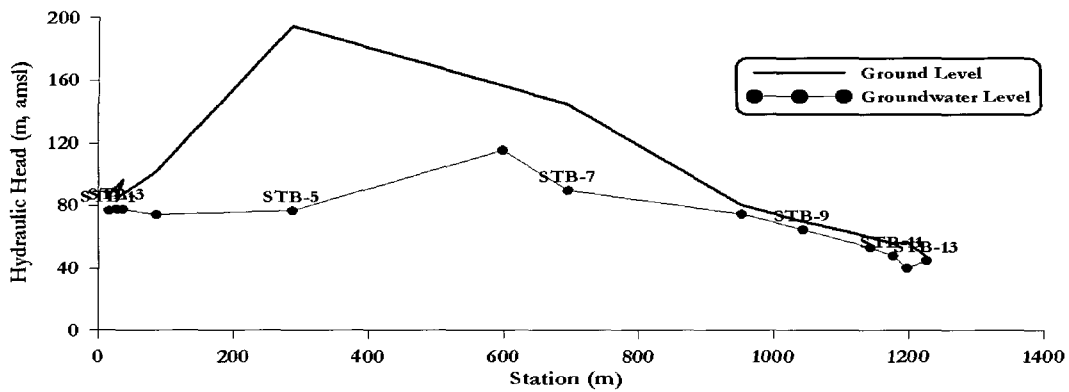


Fig. 2. Static groundwater level along with designed tunnel line (July, 2003).

Table 1. Locations of boreholes and groundwater levels at each of holes around the designed tunnel.

zone	No. of hole	borehole location(STA)	coordinate		elevation (EL.m)	ground-water level (m)
			X	Y		
starting area	STB-1	0+015.32(7.3m north)	184,886.390	159,665.580	86.57	76.97
	STB-2	0+036.36(14.52m south)	184,839.880	159,683.370	96.94	77.92
	STB-3	0+027.59(11.3m north)	184,888.670	159,680.000	84.77	78.275
	STB-4	0+085.00(2.28 north)	184,849.870	159,733.930	102.23	74.23
central area	STB-5	0+287.00(10.94m south)	184,831.390	159,935.090	194.78	76.78
	STB-6	0+598.05(4.4m south)	184,794.420	160,244,210	156.83	115.55
	STB-7	0+696.00(7.52m south)	184,763.520	160,440,380	144.85	89.95
	STB-8	0+952.20(1.7m north)	184,751.180	160,595,770	80.65	74.85
	STB-9	1+043.46(10.1m south)	184,702.850	160,681,040	70.31	64.81
terminal area	STB-10	1+143.24(7.4m south)	184,715.270	160,784,620	60.19	53.29
	STB-11	1+176.29(5.62m south)	184,712.480	160,816,540	56.24	48.14
	STB-12	1+196.19(12.1m north)	184,702.850	160,681,040	57.20	40.30
	STB-13	1+226.25(5.8m south)	184,705.390	160,866,000	47.82	44.96

접 인접해 있고, 가포 유원지(매립 예정지)와 인접해 있는 지역이다. (주)태조엔지니어링에서는 본 지역의 터널 설계를 위한 기본 자료를 획득하기 위해 터널 예정 노선을 따라 총 13개의 시추정(STB-1 ~ 13, Fig. 1(a))을 착정하여 본 지역의 지질공학적 특성을 조사하였으며, 해당 지역 지하수계의 기초적인 특성을 조사하기 위하여 지하수위 조사, 양수시험, 유향-유속 시험 등 기본적인 수리지질 조사를 수행하였다.

(1) 터널 노선에 따른 지하수위 분포

조사 지역의 지하수위 분포는 전반적으로는 지표 지형의 고도를 따라 분포하고 있다(Fig 2, Table 1). 다

만, 터널 노선을 따라 서쪽부(STB-1 ~ 5)에서는 전반적으로 지하수위가 낮아 74.23~78.28m(해발 기준) 사이의 지하수위 값을 보여 주고 있으며, 동쪽부(STB-6 ~ 13)에서는 해발 115.55m에서 갠구부쪽으로 가면서 점차 낮아져 해발 40.30m 정도로 지형 고도에 따른 지하수위 변화 양상을 뚜렷하게 보여주고 있다.

(2) 유향-유속 시험

(주)태조엔지니어링에서는 본 지역의 공내 자연적 지하수 흐름 방향을 조사하기 위하여 STB-2, 6, 9번에서 2차원 지하수 유향-유속 시험을 수행하였다(Table 2). 시험 결과를 살펴보면 전반적인 지하수의 흐름은

Table 2. Results of in-situ groundwater flowmeter test.

No. of hole	depth (m)	flow direction (clockwise from north)	flow rate	
			(m/day)	(cm/sec)
STB-2	19.8	258.5	2.7	9.525×10^{-4}
	26.1	214.3	1.6	5.644×10^{-4}
	28.3	221.8	1.4	4.939×10^{-4}
STB-6	38.9	252.6	1.0	3.528×10^{-4}
	43.6	125.1	0.5	1.764×10^{-4}
	52.3	243.2	0.3	1.058×10^{-4}
STB-9	14.0	208.1	2.6	9.172×10^{-4}
	27.1	54.8	2.3	8.114×10^{-4}
	31.4	60.8	2.5	8.819×10^{-4}
	32.1	63.5	2.6	9.172×10^{-4}

지형기복에 따라 높은 곳에서 낮은 곳으로 흐르는 양상을 보여 주고 있으며, 유속은 $10^{-4} \sim 10^{-3}$ (cm/sec)로 비교적 빠른 흐름은 보여 주고 있다. 다만 STB-9의 경우 최상부 시험구간(지표로부터 14m 지점)의 경우 그 방향이 전반적인 지형 기복(동쪽)과는 다른 남쪽 방향의 지하수 흐름을 보여 주고 있는데, 이는 해당 지역의 소규모 계곡 지형의 영향으로 보이며, 이는 이 부근에서 지하수와 지표수 상호간의 연계성에 대한 개연성을 제시해 준다.

(3) 순간 수위변화 시험 및 양수 시험

(주)태조 엔지니어링에서는 본 조사 지역의 수리적 특성을 파악하기 위해 가포천 상류 지점 농업용 저류지 인접 지역에서 순간 수위변화 시험 및 양수 시험을 수행하였다. 시험 결과 나타난 수리전도도의 값은 $1.88 \times 10^{-6} \sim 9.32 \times 10^{-4}$ cm/sec (순간수위 변화 시험), $6.77 \times 10^{-4} \sim 8.89 \times 10^{-4}$ cm/sec (양수시험)로 나타났으며, 각각의 기하 평균은 1.3×10^{-5} cm/sec(순간수위변화 시험), 4.47×10^{-4} cm/sec(양수시험)이다. 이는 일반적인 암반 대수층에서 나타나는 값과 큰 차이는 보이지 않는다.

이상의 조사 결과를 근거로 본 연구지역 내 터널 굴착에 따른 터널-지하수-지표수(가포천)간의 상호 관계를 규명하기 위한 현장 조사를 수행하였다.

조사 방법

기존의 연구에서 터널-지하수-지표수 간의 상호 관계를 검토하기 위하여 이용된 방법은 대개의 경우 지하수 모델링에 의존하는 경향이 강하였으며, 현장 조사 자료를 이용하는 경우에 있어서 실제 상호간의 영향에 대해 규명할 수 있는 방법이 제안된 예는 찾아보기 힘들다. 물론 이는 터널이 하천을 가로지르는 경우는 존재하더라도 (한강 하저터널) 하천 직하부를 따라 가는 사례가 거의 없기 때문이다.

본 연구에서는 이러한 상호관계를 규명하기 위하여 지하수로부터 하천으로의 기저 유출량을 산정하는 방법을 이용하였다. 일반적으로 상시 하천의 경우 부분적인 지하수로의 손실 지역이 존재한다 하더라도 대부분의 지역에서 지하수로부터 유량을 획득하는 이득하천으로 보는 것이 타당하며(Fig. 3(a)), 지속적인 지하수의 기저 유출은 하류부로 갈수록 하천 유량을 증가시키게 된다. 하지만 하천 하부로 터널이 통과하게 되는 경우 하천으로 기저 유출되어야 할 지하수의 흐름이 터널 주변의 지하수위 하강에 따라 터널 쪽으로 유출될 수 있으며(Fig. 3(b)), 따라서 하천의 기저 유출량을 합리적으로 산정할 수 있다면, 본 지역에서 터널 건설 후, 터널-지하수-지표수 간의 상호 관계를 규명하는데 가장 중요한 자료를 제공할 수 있다. 지하수-지표수 간의 상호작용에 관하여 국내의 기존 연구에서는 hydrograph를 이용한 기저유출량 산정법이 많이 이용되었다(원이정 외, 2000; 김경수와 조기태, 2000; 김형수와 원이정, 2001). 또, 최근 들어서는 동위원소를 이용한 기저유출량 산정에 관한 연구 역시 진행되고 있다(이광식과 이창수, 1999). Hydrograph를 이용하여 정확한 기저유출량을 산정하기 위해서는 일반적으로 장기간의 유량관측 자료를 필요로 한다. 하지만 일반적인 설계시에는 장기간의 관측 자료를 통하여 설계 자료를 확보한다는 것은 용이한 일이 아니며, 따라서 단기간의 관측 자료를 이용하여 이러한 기저 유출량을 산출할 수 있는 연구방법의 도입이 요구된다.

본 연구에서는 이러한 시기적 문제를 극복하고 기저 유출량을 정확히 평가하기 위해 상류에서 하류로 내려가며 다섯 개의 지점에서 하천 유량을 관측하여, 각 지점 별 유량의 변화를 직접 산출하는 방법을 이용하였다. 이는 직접 강수에 의한 지표 유출이 지표수 유량에 영향을 주지 않는 조건에서는 지표수의 위치별 유량 변화에 영향을 줄 수 있는 직접적인 요인으로는 지표로의 지하수 기저 유출에 의한 것 이외에는 존재하지 않는다는 전제를 가지고 있다.

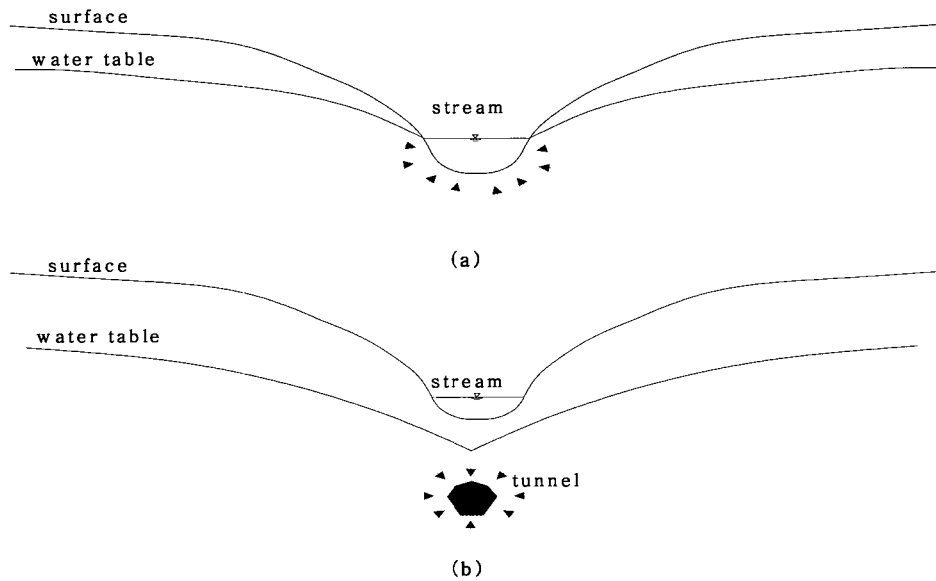


Fig. 3. Schematic profile of the interaction between tunnel-stream-groundwater : (a) general gaining stream, (b) schematic diagram of the losing stream due to the construction of tunnel.

(1) 하천 유출량 관측

본 연구에서는 연구지역 가포 농업용 저류지로부터 동쪽으로 흘러 나가는 가포천의 유량을 관측하기 위하여 하천수위-유량 관계식을 이용하는 수위-유량곡선식(rating curve) 방법을 적용하였다.

수위-유량 곡선식은 수문자료분석의 기본이 되는 식으로 하천단면, 하상 높이, 하상재료의 조도분포, 식생, 수질 등의 하천환경이 변화하면 수위-유량 곡선식도 변하게 된다. 특히 하상이 평형상태를 이루지 못한 곳에서는 변화의 폭도 커지게 된다. 수위-유량 곡선식을 유도하기 위해서는 수위자료와 이에 대응되는 유량 자료를 통계적으로 처리해야 한다. 하천에서의 수위-유량 곡선식은 일반적으로 다음과 같은 2가지 유형으로 크게 나눌 수 있다(Black, 1991; 양지영, 2000).

$$Q = a (H + b)^n \quad (1)$$

$$Q = aH^2 + bH + c \quad (2)$$

여기서 Q 는 유량, H 는 수위를 나타내며 a, b, c, n 은 지역에 따라 변하는 값으로 회귀분석을 통하여

구해야 하는 상수들이다. 우선 합리적인 곡선식을 얻기 위하여 수위와 유량관계가 어떤 형태를 이룰 것인가를 파악해야 하는데 이를 위하여 자료들을 반대수지(semi-log paper) 또는 전대수지(log-log paper)에 나타낸 후 직선형인지, 곡선형인지를 1차적으로 검토하였다. 그 후 정확한 회귀분석을 통하여 식(1)과 식(2) 형태의 곡선식을 각각 하나씩 구한 다음, 두 식 중 상관관계수(correlation coefficient)가 더 좋은 것을 그 지점의 수위-유량 곡선식으로 결정하는 것을 원칙으로 하였다. 회귀분석 과정 중 다른 점들과 동떨어져 있는 자료는 잘못된 자료라 판단하여 제외하였다.

단기간에 걸쳐 개발된 곡선식으로 유출해석을 하는 경우 유량측정자료의 관측범위, 수위 및 유량측정성과의 정확도의 한계성, 경년적 하상변동에 따른 저수위부의 변화 등 제반 현지 여건에 의해 많은 제약을 받게 된다. 따라서 사용시 신중을 기해야 한다. 따라서 본 연구에서는 하천 유량 관측시 하상과 하천 수위를 직접 관측함으로써 유량 산정 상에서의 오차 발생 요인을 제거하고자 하였다.

(2) 지하수위 및 하천 수위 모니터링

앞서 언급한 바와 같이 하천 수위의 경우 수위-유량 곡선식을 산출하기 위하여 2003년 7월 하순부터 2003년 9월 중순까지 총 2개월간 압력 관측 방식의 센서를 이용하여 관측을 수행하였으며, 이와 함께, 인근 하천의 시추공(STB-8, STB-9)에서 지하수위 모니터링도 함께 수행하였다. 이 때 지하수위 자료를 고도별 유량 산출 결과 및 이를 통한 지하수 기저유출량 산정의 타당성을 뒷받침하기 위해 활용되었다. 이와 함께, 대기압 변화 자료도 함께 모니터링 하여 지하수위 및 하천 수위를 보정하였다.

하천 유량 산출을 위한 하천수위 모니터링은 Fig. 1(b)에 제시된 site 2~6까지 총 5지점에서 관측하였으며, 전반적인 지형구배는 site 2가 상류부에 해당하며,

site 5는 가포천 본류와 site 4를 거쳐 유출되는 지류 유출이 함께 빠져 나가는 지점이며, site 6은 갱구부 예정지 직하부에 해당한다.

조사 결과

(1) 하천 유량

총 6개의 지점에서 하천수위 관측값과 하천유량 관측값을 이용하여 rating curve를 만들고, 이를 이용하여 수위를 유량으로 환산한 결과는 Table 3, 4, 5와 Fig. 4에 제시된 바와 같다. 각 Table 및 Fig. 4에 제시되어진 하천 유출량 및 평균은 관측 오차 및 하천 표면의 국부

Table 3. Schematic statistics of volumetric flow rates (L/sec)

	site 2	site 3	site 4	site 5	site 6
maximum	47.37	58.75	15.48	81.61	84.50
minimum	8.19	6.07	2.72	14.19	19.86
average	16.95	16.34	6.34	27.02	38.15
standard deviation	6.61	7.62	2.34	9.67	12.18

Table 4. Differences of volumetric flow rates between each of monitoring points (baseflow rate, L/sec)

	site3-site2	site5-(site3+site4)	site6-site5	site6-(site2+site4)
maximum	11.99	14.02	22.95	26.77
minimum	-6.37	-1.95	1.36	5.02
average	-0.60	4.44	11.12	14.96
standard deviation	3.02	2.83	4.25	4.76

Table 5. The ratios of differences between each of flow rates to stream flow rate (%)

	site3-site2	site5-(site3+site4)	site6-site5	site6-(site2+site4)
maximum	0.33	0.51	0.43	0.60
minimum	-0.95	-0.08	0.02	0.20
average	-0.11	0.18	0.29	0.39
standard deviation	0.27	0.13	0.06	0.06

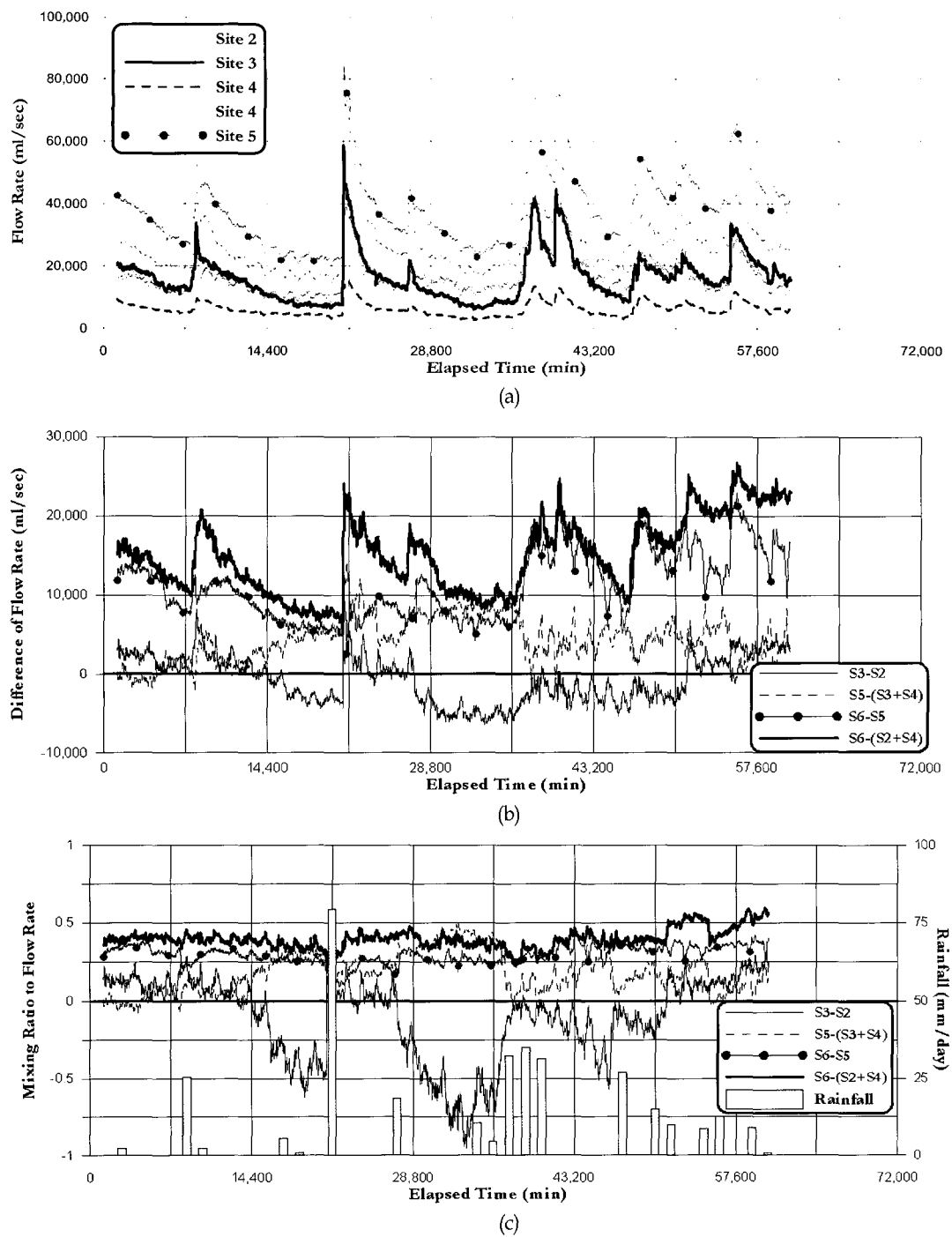


Fig. 4. The results of stream flow monitoring : (a) volumetric stream flow rate, (b) differences between each of monitoring point(baseflow), (c) ratios of differences between each of flow rates to stream flow rate (ratio of baseflow to stream flow rate)

적, 일시적 변동에 의한 영향을 제거하기 위해 window 7의 이동평균값을 취하였다. 관측되어진 하천 유출량을 살펴보면, site 2(농업용 저류지 직하부)에서는 최대 47.37 L/sec에서 최소 8.19 L/sec, site 3(STB-8번 옆)에서는 최대 58.75 L/sec에서 최소 6.07 L/sec, site 4(지류)에서는 최대 15.48 L/sec에서 최소 2.72 L/sec, site 5(합류점)에서는 최대 81.60 L/sec에서 최소 14.19 L/sec, site 6(터널 갱구부 예정지)에서는 최대 84.50 L/sec에서 최소 19.86 L/sec로 관측되었다(Table 3). 이들 각각의 평균/표준편차는 site 2에서는 16.95/6.61, site 3에서는 16.34/7.62, site 4는 6.24/2.34, site 5는 27.02/9.67, site 6은 38.15/12.18로 나타났다. 이를 상류구배로부터 하류구배로 살펴보면 site 2 - site 3의 구간을 제외한 나머지 구간에서는 하류 구배로 갈수록 유량이 증가하는 양상을 보인다. 물론 최대값에서는 site 3 역시 site 2에 비해 높은 유량을 기록하고 있으나, 이는 강수에 의한 직접적인 지표유출에 의한 영향으로 실제 지하수와의 관계를 통해 하천 유량이 증가한다고 볼 수는 없다. 본 구간에서 하천 유량이 하류구배로 내려감에 따라 감소하는 것은 농업용 저류지에 의한 영향으로 해석할 수 있다. 즉, 본 연구지역 최상류부에 위치한 농업용 저수지에서 지속적으로 공급되는 유량은 site 2지점에서 자연적으로 흐르는 하천유량 훨씬 초과하여, 도리어 2-3사이의 구간에서는 손실하천이 형성되고 있음을 지시해 주고 있는 것이다. 하지만, 나머지 구간에서는 하류로 내려감에 따라 강수시 외 하천 유량이 가장 적은 시기에도 증가하는 경향을 볼 수 있다(Fig. 4(a)). 다만, site 5와 4사이의 구간에서 site 3과 4 유량의 합이 site 5 지점의 유량에 비해 일시적으로 높게 기록된 구간이 있으나(Fig. 4(a), (b), Table 4), 이는 예외적인 일시적 현상일 뿐이며, 전체적으로 site 5의 유량은 site 3과 site 4 유량의 합보다 많은 유량을 보여 주고 있다.

(2) 기저유출량

직접 강수 시를 제외한 시기에서 하류 방향에서의 하천 유량의 변화는 지표상의 변화로는 설명할 수 없다. 즉, 이러한 하천 유량 변화를 설명하기 위해서는 본 지역에서 지하수에 의한 기저 유출로 해석하는 것이 타당할 것이다. 이러한 전제 하에 각 관측 지점간의 기저유출량을 계산해 보았다(Fig. 4(b), Table 4). 물론 site 2와 site 3 사이에서는 평균 -0.60 L/sec(최대 12.0 L/sec, 최소 -6.37 L/sec)로 도리어 하천에서 지하수계

로 유량이 유실되고 있음을 확인할 수 있다. 하지만 본 연구 지역의 최상류부(site 2)에서 최하류부(site 6)에 이르는 전체 구간을 살펴보면, 평균 기저유출량은 평균 14.96 L/sec(최대 26.77 L/sec, 최소 5.02 L/sec)로 나타났다. 이는 site 6에서 전체 하천유량에 대비하여 최대 60%, 최소 20%, 평균 39%에 해당하는 양으로 본 연구지역에서 최종적으로 유출되는 하천 유량은 약 40%가 지하수의 기저유출에 의한 것임을 알 수 있다.

터널 굴착에 따른 수계에 미치는 영향 검토

본 조사결과를 터널 건설에 따른 수계와의 연관성을 중심으로 살펴 보았다. 이상의 조사 결과를 근거로 터널 굴착 시 본 지역의 수계(지하수-지표수 포함)에 미치는 영향을 검토하여 보았다. 단, 통상적으로 활용되는 지하수 모델링에 의한 영향 분석은 실제 불확실성이 높아 본 연구의 검토 대상에서는 제외하였다. 본 연구에서는 하천-지하수계의 상관관계에 대한 현장 관측 자료만을 반영하였다.

Fig. 3(b)에 제시된 바와 같이 터널 굴착 시 반배수 터널 혹은 배수 터널의 경우, 부분적인 지하수위의 하강은 피할 수 없으며, 이러한 지하수위의 하강은 하천으로 유출되어야 할 지하수의 흐름을 인위적으로 터널로 바꾸어 놓게 된다. 즉, 본 연구 지역에서의 기저유출에 의한 지하수의 기여를 완전히 차단할 뿐만 아니라, site 2와 site 3 구간 사이에서처럼 본 연구지역 내 하천 구간 전반을 손실하천(losing stream)으로 바꾸어 놓을 개연성이 매우 높다. 따라서 터널 굴착 시 연구지역을 관통하는 가포천의 유량은 최소 40%는 감소할 것으로 판단된다. 이 때 40%는 site 2에서의 하천 유량이 손실되지 않고 site 6 지점까지 흐른다는 전제하에서의 평균값이다. 하지만, site 2에서 site 3에 이르는 구간에서 전체 하천 유량이 평균 11%감소하는 점을 감안한다면, 터널 굴착 시 본 연구지역 내 가포천을 터널 종점 부까지 건천(dry stream)으로 바꾸어 놓을 가능성 역시 배제할 수 없다. 다만, 터널 시공 이전 개수로 공사를 통해 본 지역의 지하수계와 하천의 상호작용을 차단할 경우 개수로의 시작지점에서의 유량을 종점부까지 유지할 수 있는 대안이 될 수 있다. 하지만, 이 역시 지하수로부터의 기저유출에 의한 하천 유량 손실을 보완할 수는 없다. 따라서 본 지역에서의 터널 시공 시 터널로 유입되는 지하수를 하천으로 되돌릴 수 있는 방안이 강구되어야 할 것이다.

토의 및 결론

본 연구는 터널 굴착 이전의 시점에서 터널 굴착 후 예상되는 문제점에 대한 사전 연구의 성격을 가진다. 따라서 터널 굴착 이전인 현재의 시점에 대한 Back Data의 확보와 자연적 실태를 조사함으로써 터널 굴착에 따른 영향을 검토하고자 하였다. 물론 강수 시 지표 직접 유출에 의한 하천 유량의 변화(지하수 기저유출과 무관한 하천 유량 변화)에 대한 별도의 검토가 요구되는 것은 사실이나, 강수 시 하천 유량의 급격한 변화는 일시적인 현상(1일 이내)임을 감안한다면, 전체 조사 기간에 대한 영향을 배제하는 것이 터널 굴착에 따른 본 연구 지역에 대한 영향을 검토하는데 재해도 평가라는 관점에서는 오히려 합리적일 수 있을 것이다. 이 뿐만 아니라 본 연구에서는 기저 유출량의 정확한 정량적 산출을 위하여 상류로부터 하류에 이르는 총 5지점에서 단계별 모니터링을 실시하고, 1) 하천 유출량 중 지하수에 의한 기저 유출량이 차지하는 비율에 대한 평가, 2) 터널 시공 후 재해도 평가를 위한 본 연구에서 적용한 방법에 대한 적용성을 평가하여 보았다. 이상의 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

① 본 하천에서 최하류부(site 6)에서의 유출량 중 평균 39%의 유출량이 지하수의 기저 유출에 의한 것으로 평가된다.

② 본 연구 지역에서의 터널 굴착을 통해 가포천의 총 유량 중 지하수의 기저유출량에 해당하는 39%의 유량을 감소시킬 개연성이 존재함을 확인하였다. 하지만, 실제 터널의 굴착 시 지하수에 의한 기저 유출량의 손실뿐만 아니라 하천으로부터 터널로의 직접적인 손실 역시 발생할 가능성 역시 존재한다.

③ 이러한 문제점에 대한 대안으로 본 설계에서 고려하고 있는 개수로 공사 이외에 시공 중 혹은 후 터널로 유입되는 지하수를 하천으로 되돌릴 수 있는 방안에 대한 고려가 반드시 필요하다.

④ 다단계 하천 유출량에 대한 모니터링 방법은 기존의 하천 유출량 곡선을 통한 기저 유출 분리법(baseflow separation)의 한계(총 하천유출량 추정상의 오차, 기저 유출 곡선 분리의 주관성 등)를 극복하고 위치에 따른 유출량 차이를 이용하여 보다 객관적인 기저유출량을 도출할 수 있음을 확인하였다.

앞서 조사 결과에 대한 서술 및 터널과의 상관성 검토를 통해 살펴 본 바와 같이 지표수 유량의 구배에 따른 변화에 대한 모니터링은 본 지역에서의 지하수-지

표수 상호 연계 영향 검토에 매우 유용한 방법임을 확인할 수 있다. 하지만, 현재까지 국내에서 터널-지하수-지표수 상호 연계성에 대한 case study가 부족한 만큼 본 연구 지역에서의 영향성 검토 및 추후 유사 사례 발생시 이에 대한 대책 마련을 위해서는 터널 굴착 시, 굴착 후의 변화에 대한 지속적인 조사 및 이에 대한 해석, 지하수 시스템에 대한 체계적인 조사와 이에 근거한 비교 모델링 연구가 추가적으로 요구된다 할 것이다.

참고문헌

- 김경수, 조기태, 2000, 대청댐 유역의 기저유출분리를 통한 기저유량 산정에 관한 연구, 2000, 한국지하수 환경학회지 vol 7. No 1 pp 15-19
- 김형수, 원이정, 2001, 금강 용담, 공주, 규암 수문 자료를 이용한 기저유출 분리방식 지하수 개발 가능량 예비 산정, 한국지하수토양환경학회 2001년도 추계학술발표회, 143~147
- 양지영, 2000, 복류수와 포화지표수 흐름을 고려한 경사면 유출, 박사학위논문, 서울대학교
- 원이정, 김형수, 한찬, 2000, 낙동강 진동 및 왜관 수문 자료를 이용한 기저유출 분리방식 지하수 개발가능량 산정, 한국지하수토양환경학회 창립총회 및 춘계학술발표회 자료집, 157
- 이광식, 이창수, 남한 강수와 하천수의 산소와 수소 동위원소 조성, 1999, 지질학회지, 제35권 1호, 73-84
- 이희근, 전효택, 이종운, 이대혁, 류동우, 오석영, 1995, 동해신광 터널굴착공사와 관련된 지표수 및 지하수의 유동변화에 대한 조사연구(I) - 수문학 및 암반수리학적 접근을 중심으로, 터널과 지하공간, 제 5권, 347-362
- 조병욱, 성익환, 이병대, 추창오, 김통권, 이인호, 최경국, 김정숙, 1999, 터널내 구간별 지하수 유입량 산정방법 : 유속계의 이동, 자원환경지질학회, 제32권, 6권, 661-667
- 허창환, 2003, MODFLOW를 이용한 터널의 지하수 유동해석, 한국수자원학회논문집, 제36권 1호, 129-142
- Black, P.E., 1991, Watershed Hydrology, second edition, Book News, Inc., Portland, Or.
- Bossart, P., Meier, P.M., Moeri, A., Trick, T. and Mayor, J.C., 2002, Geological and hydraulic characterisation of the excavation disturbed zone in the

- Opalinus Clay of the Mont Terri Rock Laboratory, *Engineering Geology* vol 66, 19-38
- Davis, G.M. and Horswill, P., 2002, Groundwater control and stability in an excavation in Magnesian Limestone near Sunderland, NE England, *Engineering Geology* vol 66, 1-18
- Liu, D., Yang, L.Z. and Mao, J., 2000, Application of Environmental Isotope to Groundwater Study of the Quinling Railway Tunnel, *Tunneling and Underground Space Technology*, vol 15(2), 147-151
- Molinero, J., Samper, J. and Juanes, R., 2002, Numerical Modeling of the Hydrogeological Response produced by Tunnel Construction in Fractured Bedrocks, *Engineering Geology* vol 64, 369-386

투 고 일 2004년 2월 5일
 심 사 일 2004년 2월 6일
 심사완료일 2004년 3월 1일

하규철
 한국지질자원연구원 지하수지열연구부
 305-350, 대전시 유성구 가정동 30
 Tel: 042-868-3081
 Fax: 042-863-9404
 E-mail: hasife@kigam.re.kr

김구영
 한국지질자원연구원 지하수지열연구부
 305-350, 대전시 유성구 가정동 30
 Tel: 042-868-3053
 Fax: 042-863-9404
 E-mail: kykim@kigam.re.kr

고동찬
 한국지질자원연구원 지하수지열연구부
 305-350, 대전시 유성구 가정동 30
 Tel: 042-868-3079
 Fax: 042-863-9404
 E-mail: dckoh@kigam.re.kr

김태희
 한국지질자원연구원 지하수지열연구부
 305-350, 대전시 유성구 가정동 30
 Tel: 042-868-3070
 Fax: 042-863-9404
 E-mail: katzura@kigam.re.kr

김영식
 한국지질자원연구원 지하수지열연구부
 305-350, 대전시 유성구 가정동 30
 Tel: 042-868-3079
 Fax: 042-863-9404
 E-mail: saul123@empal.com

양인제
 태조엔지니어링 지반/터널부
 138-050, 서울시 송파구 방이동 51-1 유정빌딩
 Tel: 02-2140-9241
 Fax: 02-418-7638
 E-mail: ygloria@empal.com

홍순택
 태조엔지니어링 지반/터널부
 138-050, 서울시 송파구 방이동 51-1 유정빌딩
 Tel: 02-2140-9240
 Fax: 02-418-381-2770
 E-mail: hst2770@hanmail.net