지하수토양환경 Vol. 17(2), p. 28~36, 2012 ≪原著≫

부산 수영구 지하철 터널에서의 지하수 유출이 주변 지하수에 미치는 영향

정상용[1]* · 김태형[1] · 박남식[2]
[1]부경대학교 지구환경과학과
[2]동아대학교 토목공학과

The Influence of the Surrounding Groundwater by Groundwater Discharge from the Subway Tunnel at Suyeong District, Busan City

Sang Yong Chung[1]* · Tae Hyung Kim[1] · Namsik Park[2]
[1]Department of Earth Environmental Sciences, Pukyong National University
[2] School of Civil Engineering, Dong-A University

ABSTRACT

This study carried out several kinds of investigations such as geology, hydrogeology, groundwater level and quality, surface-water quality, and the quantity and quality of groundwater discharge from the subway to identify the causes of groundwater contamination around the subway tunnel at Suyeong District in Busan City. Geostatistical analyses were also conducted to understand the characteristics of groundwater level and quality distributions. There are Kwanganri Beach and Suyeong River in the study area, which are basically influenced by seawater. The total quantities of groundwater utilization and groundwater discharge from the subway tunnel in Suyeong District are 2,282,000 m^3/year, which is 2.4 times larger than the sustainable development yield of groundwater. The lowest groundwater level around the subway tunnel is about 32 m below the mean sea-level. The large drawdown of groundwater led to the inflow of seawater and salinized river water toward the subway tunnel, and therefore the quality of groundwater didn't satisfy the criteria of potable, domestic, agricultural and industrial uses. Distribution maps of groundwater level and qualities produced by kriging were very useful for determining the causes of groundwater contamination in the study area. The distribution maps of electrical conductivity, chloride and sulfate showed the extent of seawater intrusion and the forceful infiltration of the salinized Suyeong River. This study revealed that seawater and salinized river water infiltrated into the inland groundwater and contaminated the groundwater around the subway tunnel, because the groundwater level was seriously drawdowned by groundwater discharge from the subway tunnel. The countermeasure for the minimization of groundwater discharge from the subway tunnel is necessary to prevent the groundwater obstacles such as groundwater depletion, groundwater-quality deterioration, and land subsidence.

Key words : Seawater, Groundwater discharge, Sustainable development yield, Groundwater drawdown, Kriging, Groundwater obstacles

1. 서 론

해안지역이나 도서지역에서는 해수의 침입으로 지하수의 수질이 저하된다. 해수로 오염된 지하수는 생활용수를 비롯한 각종 용수로 사용될 수 없어서, 이들 지역에서는 용수의 활용에 어려움을 겪게 된다. 이런 이유로 해안지역 지하수 보전과 관리를 위하여 해수침입에 의한 해안지하수의 염수화에 대한 많은 연구가 수행되어 왔다 (Farber et al., 2003; Shim et al., 2004; Bennetts et al., 2006; Psychoyou et al., 2007; Vandenbohede et al., 2008).

우리나라 제주도는 주요 지질이 투수성이 큰 현무암으로 구성되어 해수침입이 내륙으로 수 km까지 이루어지고 있다(Kim et al., 2003). 내륙의 서해안지역도 조석간만의

*Corresponding author : chungsy@pknu.ac.kr
원고접수일 : 2012. 1. 11 심사일 : 2012. 4. 16 게재승인일 : 2012. 4. 16
질의 및 토의 : 2012. 6. 30 까지

차이가 크고, 충적층과 풍화암이 발달되어 해수침입이 내륙으로 많이 이루어지고 있다. 그러나 남해안과 동해안 지역은 충적층의 발달이 미약하고, 결정질 암석이 우세하게 분포하여 해수침입이 비교적 적게 이루어지고 있다.

이와 같이 해수침입의 정도는 지역의 지질특성에 의하여 결정된다. 그러나 인위적인 요인에 의하여 지하수위가 영향을 받을 경우에는 해수침입의 정도가 변하게 된다. 대도시에는 인구의 증가로 지하철을 이용하는 교통수단이 활발히 이용되고 있다. 서울특별시에는 9개 노선의 지하철이 운영 중이고, 이들 지하철 터널에서 발생되고 있는 유출지하수의 양이 상당하여 지하수위 저하, 불용공 발생, 수질악화 등의 지하수 장해가 발생되고 있다(Lee et al., 2005; Kim et al., 2005; Chae et al., 2008; Hosono et al, 2009). 2008년 기준으로 8개의 지하철 노선에서 유출되는 지하수의 양은 97,308 m^3/일(35,517,420 m^3/년)이다(정상용, 2010). 부산광역시에서도 현재 4개 노선의 지하철이 운영되고 있으며, 이들 지하철 터널에서 발생되는 유출지하수의 양이 15,030 m^3/일(5,486,000 m^3/년)로 상당하여 여러 가지의 장해가 발생되고 있는 실정이다(국토해양부, 2008). 중국 상하이에서는 지하철 터널에서의 지하수 유출을 막기 위하여 지하에 콘크리트 연속벽을 설치하였다(Wang et. al., 2009).

본 연구의 목적은 해안가에 위치하며 지하철이 운영되고 있는 부산시 수영구에서 일어나는 지하수 오염의 원인을 규명하는 것이다. 연구목적을 달성하기 위하여 지질조사, 지하수 수위 및 수질 조사, 지하수 이용량 조사, 하천수 수질 조사, 지하철터널 유출지하수 조사 등을 실시하였다. 연구지역인 부산시 수영구 일원은 충적층의 발달이 크지 않고, 결정질 암석이 우세하여 지질특성상으로는 해수침입이 크게 이루어지지 않는다(부산광역시 수영구, 2011). 그러나 지하철터널과 같은 인위적 요인에 의하여 해수침입의 정도가 달라지고 있다.

2. 연구 재료 및 방법

2.1. 연구지역 개황

연구지역은 부산시 수영구로서 광안리 해수욕장이 위치하며, 동측으로는 부산에서 제일 큰 수영강이 해운대구와 인접하여 있다(Fig. 1). 서측에는 해발 415 m의 금련산이 위치하여 연제구와 경계를 이루며, 동측에는 해발 128.3 m의 백산이 민락동에 위치하고 있다. 금련산은 장년기의 지형으로 비교적 풍화에 강한 높은 산을 이루고 있다.

지질은 중생대 백악기 유천층군에 속하는 안산암질 화

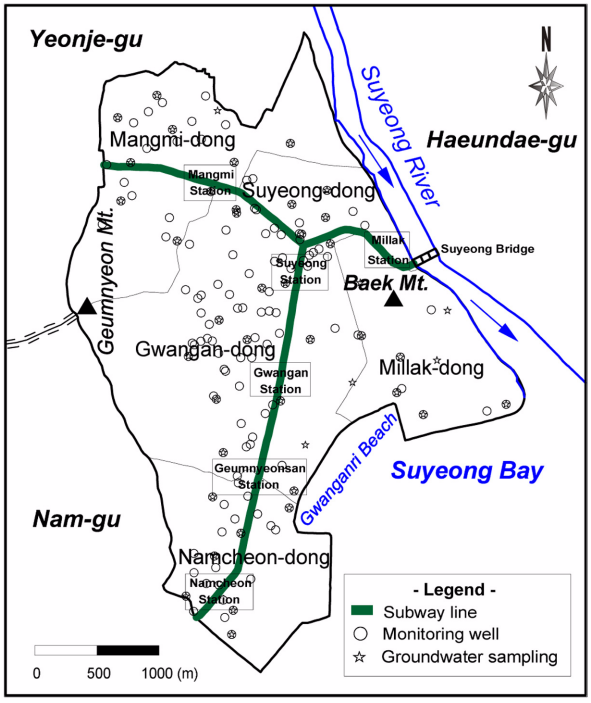

Fig. 1. Location map of the study area.

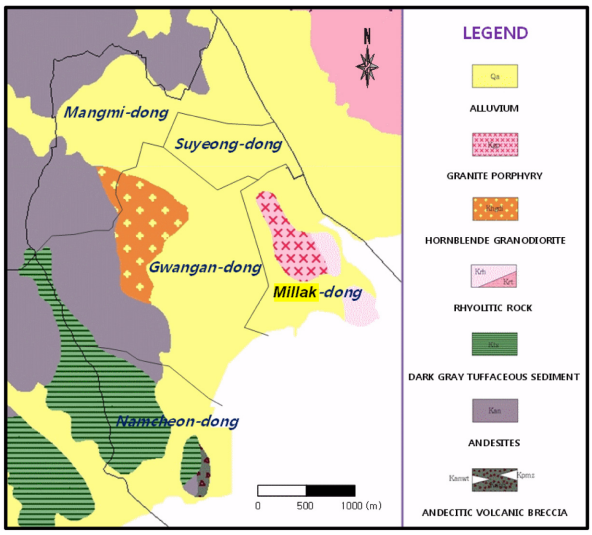

Fig. 2. Geological map of the study area (Son et al., 1978; Chang et al., 1983).

산각력암, 안산암류, 암회색 응회질퇴적암 및 유문암질암, 그리고 이를 관입한 백악기 불국사 관입암류인 각섬석 화강섬록암과 화강반암 및 신생대 제4기 충적층으로 구성되어 있다(손치무 등, 1978; 장태우 등, 1983). 금련산의 정상과 그 일원은 안산암류로 구성되어 있으나, 금련산 입구일원은 암회색 응회질퇴적암으로 구성되어 있다(Fig. 2).

금련산 동측(망미동)에는 각섬석 화강섬록암이, 민락동의 백산에는 화강반암과 유문암질암이 나타난다. 남천동의 해안가에는 안산암질 화산각력암이 일부 나타난다.

금련산체의 중심을 이루고 있는 안산암류는 비교적 신선하고, 단열의 발달이 미약하여 지하수의 유동이 원활하지 못하다. 해안가에 분포하는 안산암질 화산각력암도 괴상이어서 지하수의 유동이 활발하지 못한 편이다. 그러나 광안리 해안가에는 충적층이 심도 2~5 m 정도로 발달되어 있어서, 충적층에는 해수의 침입이 비교적 원활하게 일어나고 있다.

2.2. 지하수 이용량, 수위 및 수질 조사

지하수 이용량은 306개의 지하수공에 부착된 계량기에서 읽은 자료이며, 이 양에 따라서 지하수 이용부담금이 징수되고 있다. 지하수 수위조사는 135개의 대표 지하수 관정을 대상으로 하였으며, 대부분의 지하수공이 가동 중이므로 수위측정 3~5시간 이전에 양수를 중단하고, 수위가 안정된 이후에 측정하였다. 수질 측정을 위한 시료채취는 파이프에 고인 물을 제거하기 위하여 상당 시간 양수하여 수질이 평형상태에 도달한 이후에 현장에서 측정하였다. 실험실 수질분석용 시료는 미국 Millipore사가 제작한 0.45 μm cellulose nitric membrane filter로 여과한 후에, 폴리에틸렌 병에 채취하였다. 채취 후에 실험실로 바로 이송되어 다른 성분들과 함께 분석되었다.

현장 지하수 수질은 온도, pH, 전기전도도(EC), 용존산소(DO) 등이 측정되었으며, 이용된 장비는 온도와 EC에는 TOA CM-14P (Japan), pH는 ThermOrion 250A+ (U.S.A.), 용존산소는 Istek 25D (Korea) 이다. 염소와 황산 이온은 Ion Chromatography Dionex 120을 이용하여 분석하였다.

2.3. 지구통계기법 적용

지하수 수질자료의 분포특성을 파악하기 위하여 지구통계기법인 정규크리깅을 이용하였으며, 지하수위 분포도 작성에는 지하수위와 표고의 상관성을 이용하는 코크리깅 기법을 이용하였다. 수영구에는 고도가 높은 금련산이 위치하고, 이곳에는 지하수공이 없어서 정확한 지하수위를 파악할 수 없기 때문에, 지형의 표고자료를 지하수위 추정에 이용하였다. 지하수 분석 대상 지역의 지형적인 변화가 큰 경우에는 지하수위 자료뿐만 아니라, 지형적인 기복도 고려함으로써 더 정밀한 지하수위 등고선도를 만들어 낼 수 있다(Hoeksema, 1989; 정상용 등, 1999).

2.3.1. 정규크리깅

크리깅은 최적의 선형 불편 추정량(BLUE : best linear unbiased estimator)로서, 그 공식은 다음과 같다(Journel & Huijbregts, 1978).

$$Z_K^* = \sum_{i=1}^{n} \lambda_i Z_i \tag{1}$$

여기서 Z_i 는 공간상에 분포하는 표본자료의 값

λ_i 는 Z_i 에 배당되는 가중치

Z_K^* 는 크리깅에 의한 추정치 이다.

크리깅의 가중치는 추정치가 불편(unbiased)이고, 추정분산(estimation variance)이 최소가 되도록 결정되어야 한다.

크리깅의 불편조건은

$$E[Z_V - Z_K^*] = 0 \tag{2}$$

여기서 Z_V 는 미지의 참값이고, Z_K^* 는 추정치이다.

방정식 (2)로부터 가중치의 합은 1.0이 된다.

$$\sum_{i=1}^{n} \lambda_i = 1.0 \tag{3}$$

크리깅의 추정분산은 다음과 같으며, 최소가 되어야 한다.

$$E[Z_V - Z_K^*]^2 = C(V,V) + \mu - \sum_{i=1}^{n} \lambda_i C(v_i, V) \tag{4}$$

여기서 $C(V,V)$ 는 표본자료간의 공분산, μ는 Lagrange multiplier, $C(v_i,V)$ 는 표본자료와 추정치간의 공분산으로서 표본자료의 베리오그램에서 결정될 수 있다.

2.3.2. 코크리깅

Matheron(1971)이 코크리깅의 일반적 이론을 개발하였으며, Myers(1982)가 코크리깅의 행렬 공식을 정리하였다.

코크리깅에서 선형추정량군은

$$\overline{Z}_k^*(x) = \sum_{k=1}^{n} \overline{Z}(x_k)\Gamma_k \tag{5}$$

여기서 $\overline{Z}(x_k)$ 는 표본자료군이며, Γ_k 는 가중치군으로 $n \times n$ 행렬을 이룬다.

가중치군의 총합은 $n \times n$ 단위행렬을 이룬다.

$$\sum_{k=1}^{n} \Gamma_k = I \tag{6}$$

가중치군 Γ_k 의 충분조건은 정규크리깅과 같이 불편조건과 최소 추정분산 조건이다.

$$E[\overline{Z}(x)-\overline{Z}^{*}(x)] = [0,0,\ldots,0] \quad (7)$$

$$E\left[\overline{Z}(x)-\overline{Z^{*}}(x)\right]^{2} = minimal \quad (8)$$

2.3.3. 베리오그램

공간상에 분포하는 표본자료의 특성은 베리오그램에 의해서 나타나며, 베리오그램은 공간상에 분포하는 임의의 두 자료값의 차이의 분산으로 구해진다(Matheron, 1963).

$$2\gamma(h) = E\{[Z(x)-Z(x+h)]^{2}\} \quad (9)$$

$$= \frac{1}{N(h)}\sum_{i=1}^{N(h)}[z(x_i)-z(x_i+h)]^{2}$$

여기서 $2\gamma(h)$는 베리오그램이고, $\gamma(h)$는 반베리오그램(semi-variogram)이다. Z(x)는 임의의 지점 x에 있는 자료의 값이며 $Z(x+h)$는 $Z(x)$에서 h 만큼 떨어진 지점의 자료 값이다. $N(h)$는 거리 h 만큼 떨어진 한쌍의 실험자료 $z(x_i)$와 $z(x_i+h)$의 개수다.

크리깅에 의한 자료 추정에는 표본자료의 공분산이 필요한데, 이것은 표본자료의 반베리오그램으로부터 얻어진다. 즉,

$$C(h) = sill-\gamma(h) \quad (10)$$

여기서 $C(h)$, $\gamma(h)$는 거리 h 만큼 떨어진 자료들 간의 공분산과 반베리오그램이다. sill은 일정한 범위(range)를 넘어서 반베리오그램의 상관성이 없어질 때의 반베리오그램 값이다.

3. 연구 결과 및 고찰

3.1. 지하수 이용현황

수영구청의 자료(부산광역시 수영구, 2011)에 의하면, 2008년도에 총 306개소의 지하수공에서 지하수 이용량은 1,530,960 m^3/년(4,194 m^3/일)이다. 용도별로는 생활용이 289개소에서 1,356,684 m^3/년(3,717 m^3/일)로 가장 많고, 공업용이 16,080 m^3/년(44 m^3/일), 농수산용이 21,816 m^3/년(60 m^3/일), 그리고 기타 용도가 136,380 m^3/년(374 m^3/일)이다(Table 1). 대부분의 지하수공은 암반층을 착정하여 만들어졌고, 심도는 30~350 m의 범위이다. 지하수공의 직경은 15~20 cm가 대부분이다. 금련산 일원에는 지하수공의 개발이 적고, 대부분의 지하수공은 주택이 밀집된 저지대에 개발되어 있다.

3.2. 지하철 유출지하수

부산시에는 2008년 기준으로 3개 노선의 지하철이 운영되고 있으며, 부산시 전역에서 발생되는 지하철 유출지하수 수량은 15,030 m^3/일이다(국토해양부, 2008). 그 중에서 3,828 m^3/일이 사용되며 나머지 11,172 m^3/일은 전량 우수배출관을 통하여 인근 하천으로 배출되고 있다(Table 2). 사용량은 총 유출지하수의 약 25%이며, 우수관을 통

Table 1. Groundwater use and quantity in the study area (unit: m^3/year)

District	Total		Living Use		Industrial Use		Agricultural and fishery use		Other use	
	Wells	Quantity	Wells	Quantity	Wells	Quantity	Wells	Quantity	Wells	Quantity
Gwangan-dong	157	838,692	150	761,220	4	3,612	2	1,860	1	72,000
Namcheon-dong	56	241,992	53	218,844	2	3,552	1	19,596	0	0
Mangmi-dong	51	229,428	47	196,404	3	8,868	0	0	1	24,156
Millak-dong	23	99,060	21	98,652	1	48	1	360	0	0
Suyeong-dong	19	121,788	18	81,564	0	0	0	0	1	40,224
Total	306	1,530,960	289	1,356,684	10	16,080	4	21,816	3	136,380

Table 2. Groundwater discharge from the subway in Busan city (unit: m^3/day)

Subway Number	Discharge Quantity	Utilization		Unused Quantity
		Quantity	Use	
1	2,356	262	Cleaning & Domestic Use, River Control	2,094
2	6,197	1,325	Cleaning & Domestic Use, River Control	4,872
3	6,477	2,241	Cleaning & Domestic Use, River Control	4,206
Total	15,030	3,828		11,172

Table 3. Groundwater discharge from the subway in Suyeong District (unit: m^3/day)

Subway Station	Discharge Quantity	Utilization		Unused Quantity
		Quantity	Use	
Namcheon	–	–	–	–
Geumnyeonsan	281	20	Cleaning Station	261
Gwangan A	148	20	Cleaning Station	128
Gwangan B	27	–	–	27
Suyeong	50	–	–	50
Millak	551	20	Cleaning Station	531
Mangmi A	170	–	–	170
Mangmi B	830	7	Cleaning Station	823
Total	2,057	67		1,990

한 단순 배출량은 약 75%에 해당된다.

수영구에서는 2008년 기준으로 2호선과 3호선 2개 노선이 운영되고 있으며, 수영구내 지하철에서 발생되고 있는 유출지하수의 총량은 6개 역사에서 2,057 m^3/일이다. 그 중 망미역사 2개소에서 1,000 m^3/일로 가장 많고, 다음은 민락역사로서 551 m^3/일의 지하수 유출량이 발생하고 있다(Table 3).

3.3. 지하수 개발가능량 대비 지하수 배출량

건설교통부의 지하수관리기본계획 보고서(2007)에 의하면 수영구의 지하수 개발가능량은 950,000 m^3/년(2,605 m^3/일)이다. 지하수 개발가능량 산출에는 여러 가지 기법이 있으나, 아직까지 완벽한 기법은 없다. 이 보고서에서 지하수 개발가능량은 지하수 수위강하곡선 분석에 의한 지하수 함양율을 산출하여, 10년 빈도 가뭄시 강수량을 적용하여 추정되었다. 2008년 기준의 지하수 이용량 1,530,000 m^3/년(4,194 m^3/일)과 지하철에서 배출되는 유출지하수량 750,000 m^3/년(2,057 m^3/일)의 합 2,280,000 m^3/년(6,251 m^3/일)은 지하에서 방출되는 지하수 총배출량이 되며, 이것은 지하수 개발가능량의 약 2.4배에 해당된다. 일반적으로 지하수 개발가능량보다 배출량이 많을 경우에는 지하수 장해(지하수고갈, 수질악화, 지반침하)가 발생될 수 있다.

3.4. 수영강 수질 특성

수영강은 부산에서 제일 큰 강이며, 수영구와 해운대구의 경계에 위치한다. 수영강은 바다와 연결되어 있어서 해수의 영향을 받고 있다. 표층수에 대한 전기전도도를 측정한 결과 수영강의 수질은 갈수기에는 최대 32,000 μS/cm 정도이며, 풍수기에는 최대 16,000 μS/cm 정도이다. 해수의 영향은 수영교에서 상류 쪽으로 약 5.5 km 정도까지 영향을 받는 것으로 나타났다(Fig. 3). 또한 수영강의 수질에서 Na^+는 4,624 ± 760.8 mg/L, K^+는 394.6 ± 74.8 mg/L, Cl^-은 9,839.3 ± 1,513.0 mg/L, SO_4^{-2}는 1,246.9 ± 191.8 mg/L로서 수영강이 해수의 영향을 많이 받고 있는 것을 알 수 있다.

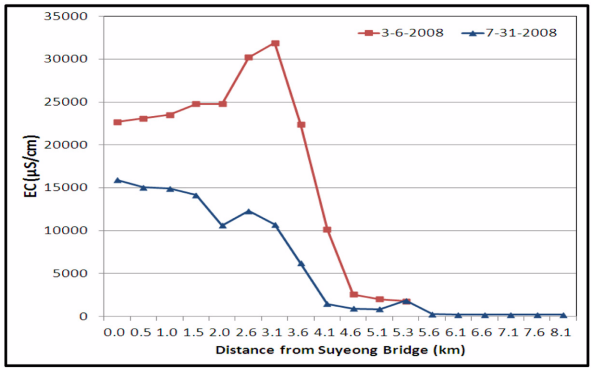

Fig. 3. Variations of EC at the Suyeong River.

3.5. 지하수위 분포

수영구에서는 306개의 지하수공이 이용되고 있는 데, 그 중에서 대표관정 135개의 지하수공의 수위가 조사되었다. 대표관정은 산악지대에는 없으나, 사면과 평지에서 그 분포는 대체로 일정한 간격을 유지하고 있다. 대표관정의 지표면하 평균 지하수위는 16.97 m이고, 해수면기준 평균 지하수위는 10.50 m이다. 그러나 광안동 및 수영동에서는 지하수위가 해수면 보다 낮게 형성되는 관정이 여러 곳에서 나타났다. 수영동에서는 최대 –32.32 m의 지하수위가 형성된 관정이 있다. 지형의 표고와 지하수위와의 상관성을 이용한 코크리깅 기법을 적용하여 지하수위 분포도가 작성되었다. 베리오그램 모델은 구상형모델이 적합하였으며, nugget은 1.0, sill은 1,858, 상관성범위는

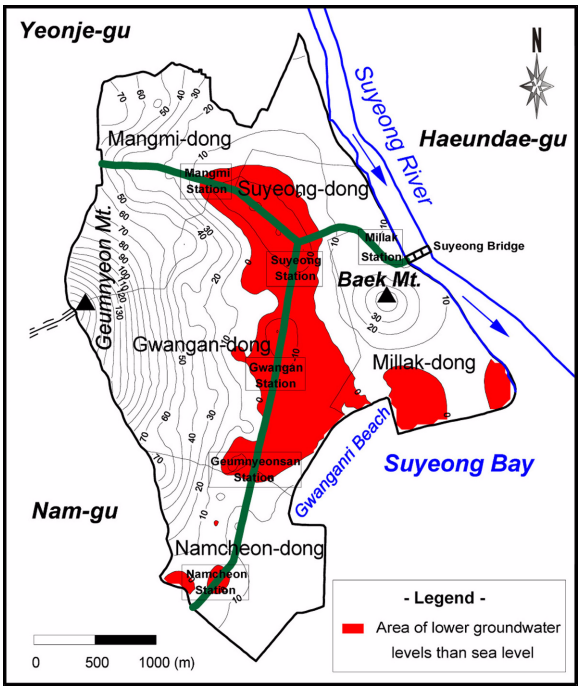

Fig. 4. Distribution map of groundwater level.

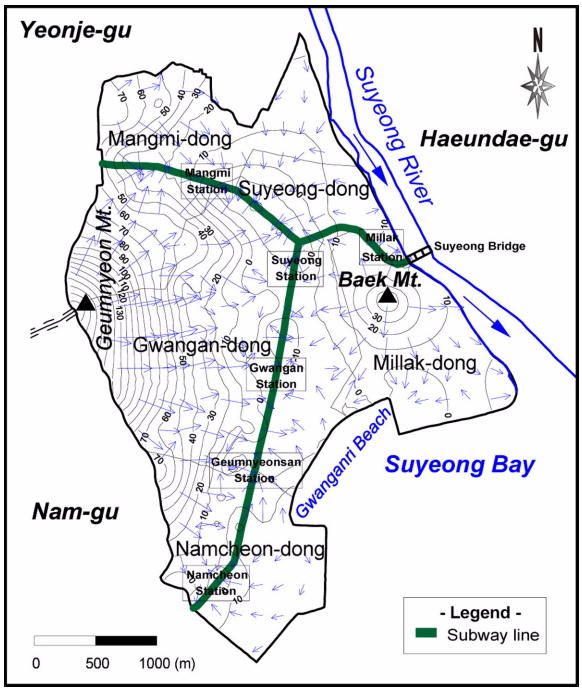

Fig. 5. Distribution map of flow line.

2360 m이다. 코크리깅에서 추정된 지하수위의 교차검정 결과에 의하면, 오차의 표준편차는 0.032, 추정치와 원자료간의 상관계수는 0.941로서 추정치의 정밀성은 상당히 큰 편이다.

지하수위 분포도(Fig. 4)에 의하면, 적색으로 표시된 지역의 지하수위가 해수면 이하이다. 지하수위가 해수면 이하인 지역은 남천동, 광안동, 수영동, 망미동에서 지하철 노선을 따라 나타나고 있다. 민락동 해안가에서 해수면 이하의 지하수위를 형성하는 원인은 이곳이 매립지인 관계로 지하수위가 해수면 가까이 위치하고, 또한 여름철 회센타의 성수기로 인한 지하수 관정들에서의 과잉양수 때문으로 판단된다. 지하철 노선 주변에서 지하수위가 해수면 이하로 형성되는 원인은 유출지하수가 터널내로 유입되는 데, 유입된 지하수는 다시 지하로 함양되지 못하고 인근 수영강으로 방류되기 때문이다.

지하수 유선도(Fig. 5)에 의하면 금련산과 백산에서 지하수가 함양되며, 함양된 지하수는 전반적으로 해안쪽으로 흐른다. 그런데, 지하철노선 주위에서의 지하수위 강하가 크기 때문에, 해안으로 유동하는 지하수가 지하철노선 주변으로 유입되고 있다. 또한 해안가에서는 해수침입현상에 의해 해수가 내륙으로 유입되는데, 수영구에서는 지하철노선 주변에서의 큰 수위강하 때문에, 해수의 유입이 더 크게 일어나고 있다.

일반적으로 하천과 지하수가 인접하여 있을 경우 상호작용을 하는데, 수영강 주변에서도 지하철노선 주변에서의 큰 수위강하 때문에, 수영강물이 내륙으로 많이 유입되고 있음을 지하수 유선도를 통하여 파악할 수 있다. 그런데 수영강은 해수의 영향으로 염수화되어 있어서, 이 염수화된 하천수가 수영강과 민락동 일원의 지하수 수질을 오염시키고 있다.

3.6. 지하수 수질

2008년 7월에 측정된 수영구의 대표관정 135개에서 측정된 현장 간이수질 결과(Table 4)에 의하면, 평균수온은 20.1°C, 평균 pH는 7.08, 평균 전기전도도(EC)는 1,040.5 μS/cm, 평균 용존산소(DO)는 5.9 mg/L이다. 전기전도도의 평균값이 중앙값보다 큰 이유는 해수의 영향을 받은 지하수가 많기 때문이다.

현장간이수질 이외에도 45개 관정에서 채취한 지하수의 수질을 실험실에서 종합적으로 분석하였으며, 그 중에서 염소이온과 황산이온의 농도를 이용하였다. 그 이유는 염소이온과 황산 이온은 해수의 주요성분이기 때문이다. 각 성분들에 대한 베리오그램을 분석(Table 5)한 후에, 정규크리깅 기법을 이용하여 전기전도도(Fig. 6), 염소이온(Fig. 7) 및 황산이온(Fig. 8) 분포도를 작성하였다.

전기전도도 분포도에서 EC가 800 μS/cm(TDS 500

Table 4. General statistics of groundwater quality data

Component	Max.	Min.	Mean	Median	Standard Deviation	Skewness	Kurtosis
Temp. (°C)	30.0	14.0	20.1	19.6	2.0	0.6	3.9
pH	8.58	5.97	7.08	6.97	0.58	0.42	–0.37
EC (μS/cm)	25,600.0	206.5	1,040.5	577.5	2,679.6	7.7	64.1
DO (mg/L)	12.6	2.4	5.9	5.5	2.2	0.9	0.5
Cl^- (mg/L)	16,886.12	15.88	916.85	61.54	3,002.1	4.5	21.0
SO_4^{2-} (mg/L)	2,068.00	13.43	179.53	53.84	404.7	3.5	12.3

Table 5. Selected variogram models and parameters of EC, Cl^- and SO_4^{2-}

Data	Model	Nugget	Sill	Range (m)	R^2	RSS
EC	Spherical	10,000	16,270,000	5,110	0.841	5.68×10^{13}
Cl^-	Exponential	2,400,000	17,010,000	8,031	0.349	1.60×10^{14}
SO_4^{2-}	Exponential	47,800	228,800	4,353	0.445	3.01×10^{10}

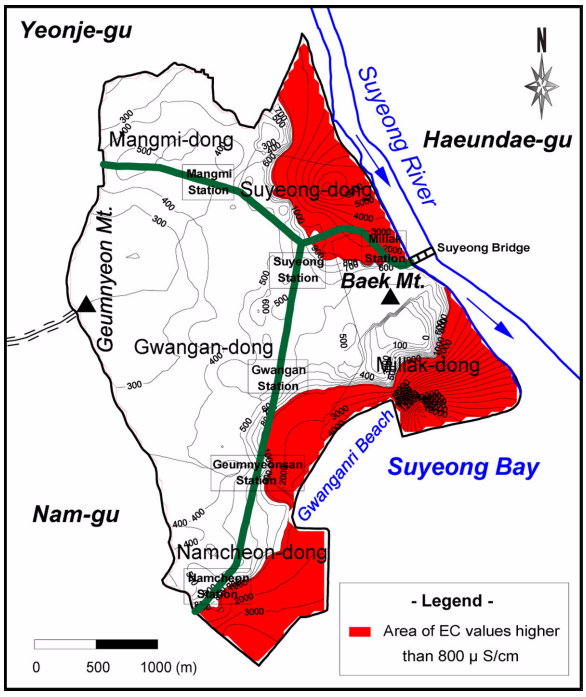

Fig. 6. Distribution map of EC.

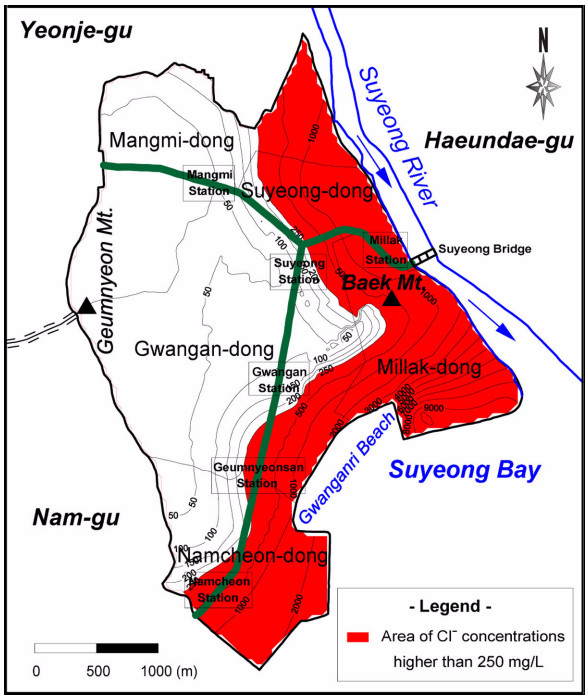

Fig. 7. Concentration map of Cl^-.

mg/L) 이상되는 지역이 적색으로 표시되었는데, 전기전도도가 크게 나타나는 지역은 해안가와 수영강 주변이다. 남천동과 민락동은 매립지이므로, 투수성이 커서 해수침입이 다른 지역에 비하여 크게 나타난다. 광안리 해변 주위에서의 해수침입이 크게 일어나는 이유는 지하철 노선주변의 큰 수위강하에 기인한다. 수영동주변에서 전기전도도가 큰 이유도 염수화된 수영강이 지하철 노선주변의 큰 수위강하 때문에, 내륙으로 많이 침투한 결과이다.

염소이온 농도분포도에서 염소이온농도가 250 mg/L(음용수 및 생활용수 기준) 이상인 지역이 적색으로 표시되었으며, 이것은 전기전도도 분포도보다 더 넓게 나타났다. 특히 백산 일원의 지하수가 염수화된 수영강의 영향으로 염소이온이 높게 나타났다.

황산이온 농도분포도에서 황산이온농도가 200 mg/L(음용수 기준) 이상인 지역이 적색으로 표시되었으며, 광안리 해수욕장 일원에서 전기전도도나 염소이온 분포도보다 적은 영역을 차지하였다.

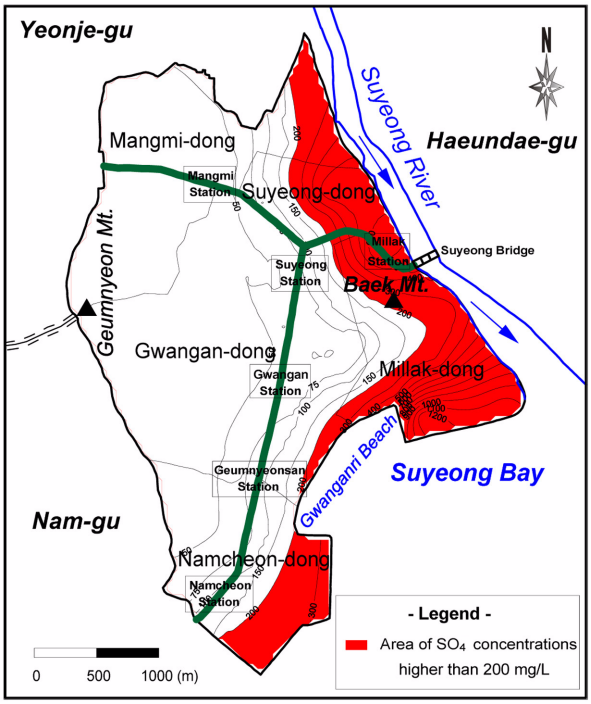

Fig. 8. Concentration map of SO_4^{2-}.

4. 토의 및 결론

부산시 수영구 일원에는 결정질암석이 분포하여 해수침입이 비교적 적게 일어나는 지역이다. 그런데 이 지역에는 지하철이 2개 노선 운영되고 있고, 이 지하철 터널에서 유출되는 지하수의 양이 2,057 m^3/일(750,000 m^3/년)이다. 수영구에서 306개소의 지하수공에서 이용되고 있는 지하수의 양은 4,194 m^3/일(1,530,000 m^3/년)로서, 유출지하수와 함께 지하에서 배출되고 있는 지하수의 총양은 6,251 m^3/일(2,280,000 m^3/년) 이다. 따라서 지하에서 배출되는 지하수의 총량은 수영구 지하수 개발가능량 2,605 m^3/일(950,000 m^3/년)의 약 2.4배에 해당한다.

수영구 대표관정 105개소에서 측정된 지하수위는 해수면기준으로 평균 10.50 m이다. 그런데, 지하철노선 주변의 지하수위는 유출지하수의 영향으로 수위가 해수면 이하로 크게 하강되어 있다. 특히 수영동에서는 지하수위가 –30 m 이상되는 곳이 있다. 지하철 노선 주변에서 지하수위가 해수면 이하로 형성되는 주원인은 터널내로 유입된 유출지하수가 다시 지하로 함양되지 못하고 인근 수영강으로 방류되기 때문이다. 지하수 흐름은 전반적으로 지하수 함양지역인 금련산과 백산에서 지형의 고도를 따라 해안지역으로 흐르는 데, 지하철노선 주변에서 과도한 지하수위의 저하로 지하수가 지하철터널 주변으로 유입되고 있다. 또한 수영강과 인접한 지역에서도 지하수위 저하로 염수화된 수영강이 많이 침투되어 있다.

대표관정에서 측정된 전기전도도, 염소이온 및 황산이온 분포도에 의하면, 수영구 지하수는 기본적으로 해수침입의 영향으로 해안가 지하수는 오염되어 있다. 그런데 수영구에서는 지하철 노선주변의 지하수가 염소이온과 황산이온에 의하여 오염이 많이 되어 있다. 이것은 지하철에서 발생되는 유출지하수에 의해 지하수위가 많이 하강되어 해수침입이 더 크게 발생되고, 또한 하천과 지하수의 상호작용에 의하여 염수화된 수영강물의 유입이 더 원활하게 일어나고 있기 때문이다.

따라서 해안 도시지역에서 지하철과 같은 지하터널이 발달되어 있는 경우에는 Ghyben-Herzberg 관계에 의한 해수침입보다도 훨씬 많은 해수의 영향을 받게 된다. 또한 하천과 인접한 도시지역에 지하터널이 발달되어 있는 경우에도 지하수에 하천수의 유입이 훨씬 크게 발생되게 된다. 도심지역에는 지하철 터널이외에도, 통신구와 전력구 터널이 굴착되어 있어서, 지하수 유출이 많이 발생된다. 유출지하수에 의하여 지하수위가 많이 하강될 경우에는 지하수고갈, 수질오염, 지반침하 등의 지하수 장해가 발생될 수 있기 때문에, 유출지하수의 발생을 최소화할 수 있는 방안을 적극적으로 강구해야 할 것이다.

사 사

본 논문은 2009학년도 부경대학교의 지원을 받아 수행된 연구이다(과제번호: PK-2009-74). 논문심사 과정에서 유익한 조언을 해준 익명의 심사위원들께 감사한다.

참 고 문 헌

건설교통부, 2007, 지하수관리기본계획(2007~2011) 보고서.

국토해양부, 2008, 유출지하수 저감 및 활용방안 연구보고서.

부산광역시 수영구, 2011, 2011년 지하수 이용실태 조사보고서.

손치무, 이상만, 김영기, 김상욱, 김형식, 1978, 동래・월내 도폭(1:50,000), 자원개발연구소.

장태우, 강필종, 박석환, 황상구, 이동우, 1983, 부산・가덕 도폭(1:50,000), 한국동력자원연구소.

정상용, 2010, 서울시 지하철 유출지하수에 의한 지하수 장해와 대책, 지질학회지, **46**(1), 61-72.

정상용, 유인걸, 윤명재, 권해우, 허선희, 1999, 불균질・이방성 대수층의 지하수 유동분석에 지구통계기법의 응용, 지질공학,

9(2), 147-159.

Bennetts, D.A., Webb, J.A., Stone, D.J.M., Hill, D.M., 2006, Understanding the salinization process for groundwater in an area of south-eastern Australia, using hydrochemical and isotopic evidence, *J. of Hydrol*., **232**, 178-192.

Chae, G.T., Yun, S.T., Choi, B.Y., Yu, S.Y., Jo, H.Y., Mayer, B., Kim, Y.J., and Lee, J.Y., 2008, Hydrochemistry of urban groundwater, Seoul, Korea: The impact of subway tunnels on groundwater quality, *J. of Contam. Hydrol.*, **101**, 42-52.

Farber, E., Vengosh, A., Gavrieli, I., Marie, A., Bullen, T.D., Mayer, B., Holtzman, R., Segal, M., and Shavit, U., 2003, The origin and mechanisms of salinization of the Lower Jordan River, *Geochim. et Cosmochim. Act*., **68**(9), 1989-2004.

Hoeksema, R.F., 1989, Cokriging model for estimation of water table elevation, *Water Resour. Res*., **25**(3), 429-438.

Hosono, T, Ikawa, R, Shimada, J, Nakano, T, Saito, M, Onodera, S.I., Lee, K.K., and Taniguchi, M, 2009, Human impacts on groundwater flow and contamination deduced by multiple isotopes in Seoul City, South Korea, *Sci. of the Tot. Environ*., **407**, 3189-3197.

Journel, A.G. and Huijbregts, C.J., 1978, Mining Geostatistics. Academic Press, London.

Kim, S.J., Hyun, Y., and Lee, K.K., 2005, Time series modeling for evaluation of groundwater discharge rates into an urban subway system, *Geosc. Jour*., **9**(1), 15-22.

Kim, Y., Lee, K.S., Koh, D.C., Lee, D.H., Lee, S.G., Park, W.B., Koh, G.W., and Woo, N.C., 2003, Hydrogeochemical and isotopic evidence of groundwater salinization in a coastal aquifer, a case study in Jeju volcanic island, Korea, *J. of Hydrol*., **270**, 282-294.

Lee, J.Y., Choi, M.J., Kim, Y.Y., and Lee, K.K., 2005, Evaluation of hydrologic data obtained from a local groundwater monitoring network in a metropolitan city, Korea, *Hydrol. Proc*., **19**, 2525-2537.

Matheron, G., 1963, Principles of geostatistics, *Economic Geology*, **58**, 1246-1266.

Matheron, G., 1971, The theory of regionalized variable and its applications, *Cah. Ceatre Morphol. Math*., **5**.

Myers, D.E., 1982, Matrix formulation of co-kriging, *Math. Geol*., **14**(3), 249-257.

Psychoyou, M., Mimides, T., Rizos, S., and Sgoubopoulou, A., 2007, Groundwater hydrochemistry at Balkan coastal plains-the case of Marathon of Attica, *Greece, Desalination*, **213**, 230-237.

Shim, B.O., Chung, S.Y., Kim, H.J., and Sung, I.H., 2004, Intrinsic random function of order k kriging of electrical resistivity data for estimating the extent of saltwater intrusion in a coastal aquifer system, *Environ. Geol*., **46**, 533-541.

Vandenbohede, A., Lebbe, L., Gysens, S., Delecluyse, K., Dewolf, P., 2008, Salt water infiltration in two artificial sea inlets in the Belgian dune area, *J. of Hydrol*., **360**, 77-86.

Wang, J., Hu, L., Wu, L., Tang, Y., Zhu, Y., and Yang, P., 2009, Hydraulic barrier function of the underground continuous concrete wall in the pit of subway station and its optimization, *Environ. Geol*., **57**, 447-453.