

한강에서의 강변여과수 개발을 위한 적지선정 및 개발가능량 산정(Ⅱ)

Site Suitability and Developable Amount Assessment for Riverbank Filtration in the Han River (Ⅱ)

이 상 일* / 유 상 연** / 이 상 신***

Lee, Sang Il / Yoo, Sang Yeon / Lee, Sang Sin

Abstract

In Korea, riverbank filtration has drawn attention since 1990's as an alternative having potential to stably meet the ever-increasing water demand. Some cities located in the Nak-dong River Basin are currently supplying water through riverbank filtration. This research is on the application of riverbank filtration for stable water quality in Seoul. For this purpose, we have evaluated developable amount of water with riverbank filtration for the Han River. This paper focuses on the Kwangnaruru site, which was selected through a systematic analysis in the companion paper. We have conducted groundwater modeling for a proposed system of wells and an artificial lake. In the Kwangnaruru district, the river length to constitute a well system was identified to be about 1,200m, due to the topography and the field condition such as ecosystem preservation zone. After many design changes, it was found that the maximum developable amount of 23.36 million m³/year could be obtained, when 16 pumping wells were built in every 80 meters along with an artificial lake upstream.

keywords : riverbank filtration, Han River, developable amount, groundwater modeling

요 지

한국에서는 증가하는 용수수요에 대처하기 위해 1990년대부터 낙동강 유역의 지하체들에서 강변여과수를 활용하고 있다. 본 연구에서는 서울의 원수수질 안정을 위한 방안으로 강변여과 도입의 타당성을 검토하였다. 선행 논문에서 계층분석과정(AHP)에 의해 선택된 광나루지구에 대한 개발가능량 평가를 위해 지하수 모델링이 수행되었다. 광나루지구에서는 생태계보존지역 등을 고려하여 하천부지 약 1,200m 구간에 대해 관정시스템을 구축할 수 있을 것으로 파악되었다. 취수량을 늘리기 위한 방안으로 인공호수의 조성이 제안되었다. 80m 간격으로 16개의 관정을 설치할 경우 적정개발량은 연간 약 2,336만m³으로 산정되었다.

핵심용어 : 강변여과, 한강유역, 개발가능량, 지하수 모델링

* 동국대학교 공과대학 사회환경시스템공학과 교수, Corresponding Author
Professor, Dept. of Civil and Environment Engineering, Dongguk Univ., Seoul, 100-715, Korea
(e-mail: islee@dongguk.edu)

** 동국대학교 공과대학 토목환경공학과 석사, 현재 한국건설기술연구원 수자원연구부 연구원
Researcher, Hydrology Research Division, Korea Institute of Construction Technology, 2311, Daehwa-dong, Ilsanseo-gu, Goyang-si, Gyeonggi-do, 411-712, Korea

*** 동국대학교 공과대학 토목환경공학과 박사과정
Ph.D. Candidate, Dept. of Civil and Environment Engineering, Dongguk Univ., Seoul, 100-715, Korea

1. 서론

간접취수 방식은 하상퇴적층, 즉 충적층이 발달한 하천 주변에 우물을 설치하여 취수함으로써 하천 표류수를 지하의 모래, 자갈층으로 유도 함양시키는 방안이다. 하천 표류수가 지하 대수층을 통해 우물에 집수되는 과정에서 자연적인 여과작용에 의하여 수질이 개선되는데, 이는 특히 탁질과 미생물, 자연유기물과 유기질 오염 물질 등의 제거에 탁월한 효과가 있는 것으로 알려져 있다(과학기술부, 2004). 하천 주변과 하상에 발달한 충적층이 간접취수에 적합한 충분한 두께와 투수성을 갖추고 있다면, 간접취수 도입에 의하여 경제적으로 양질의 상수 원수의 안정적인 확보가 가능해 이에 대한 관심이 높아지고 있다.

2004년 서울특별시의 급수인구는 약 10,287,000명으로 서울특별시 상수도 사업본부는 6개 정수장에서 최대 5,400,000m³/day의 수돗물 생산능력을 갖추고 평균 3,581,000m³/day를 공급하고 있다(통계청, 2006).

그러나 건설교통부에서 2001년에 발표한 수자원 장기종합 계획(Water Vision 2020)에 따르면 국내 물 수요는 시간이 지남에 따라 지속적으로 증가하여 2020년에는 26억m³의 물이 부족해진다. 특히 서울시의 경우는 주된 상수원인 한강 상류로 유입되는 지류 하천의 수질에 대한 시민들의 불신감과 수돗물 수질의 고급화 욕구가 증대되고, 음용수에 대한 수질 기준이 날로 강화되고 있어, 수돗물 공급과 관련된 시민들의 잠재적인 불만 요인과 다양한 사회적인 요구 사항을 합리적으로 해소하는 것이 필요하다(건설교통부, 2001). 이에 따라 서울시 상수원의 충분한 공급량 확보와 원수의 수질개선을 위해 강변여과에 의한 간접취수 방안이 검토되고 있다(서울특별시상수도사업본부, 2005).

본 연구에서는 서울시를 관류하는 한강 본류 및 고

수부지에서 강변여과를 이용한 간접취수 방식의 타당성을 살펴보기 위해, 이상일과 이상신(2008)에서 강변여과수 개발을 위한 최적 가능지로 선정된 광나루지역에 지하수유동 모델링을 실시하였다. 이 지역에서 강변여과수 취수에 따른 지하수위 강하량과 취수정도로의 유입량 등을 평가하여 서울시 지역의 개발가능량을 산정하는 것이 연구의 목적이다.

2. 지하수 흐름해석

2.1 지형 및 지질

한강유역은 한반도 중앙부에 위치하고 있으며 유역면적 26,356km², 유로연장 481.7km의 제 1하천으로 전국토 면적의 약 23%를 차지하고 있다(Fig. 1).

한강유역의 지질은 서울을 포함한 경기도 일부가 선캠브리아기 시생대의 경기 편마암 복합체가 광범위하게 분포하고 있으며, 서울지역에서는 이를 후기에 관입한 화강암체가 서울시 면적의 약 36%를 차지하고 있다. 화강암 분포지역의 경우 구성물질의 입도가 커서 투수성이 양호하며, 편마암 및 편암 분포지역은 입도가 작아 충적층 지하수 부존이 불리하다.

2.2 지하수 모델링

서울시 상수도사업본부에서 조사된 기초조사 자료를 바탕으로 한 선행연구(이상일과 이상신, 2008)의 적지분석 과정을 통해, 최상류지점에 위치해서 상대적으로 수질이 양호하고, 기존시설(암사정수장)과의 연계성 등에서 가장 높은 적합도를 보인 광나루 지구에 대한 지하수 모델링을 실시하였다.

3차원 유한차분법 모델인 MODFLOW(Waterloo Hydrogeologic, Inc., 2003)가 지하수 모델링에 이용되었다. 1:5,000의 수치지도를 기초로 하였고 지층의 형태에

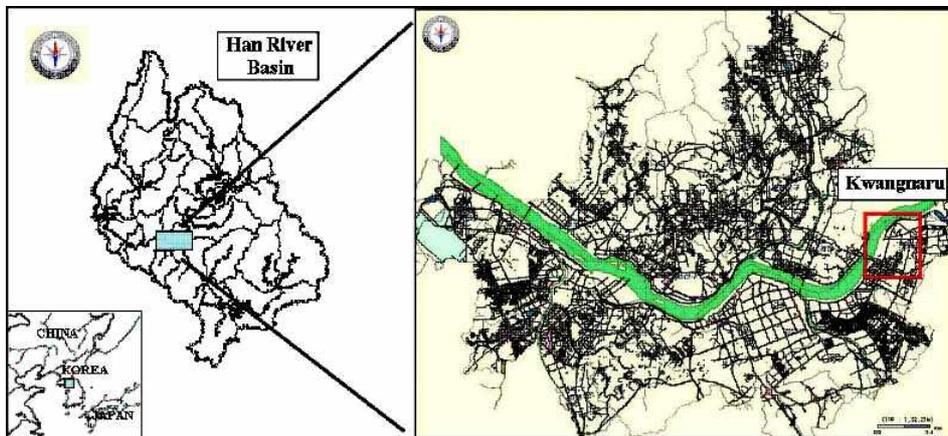
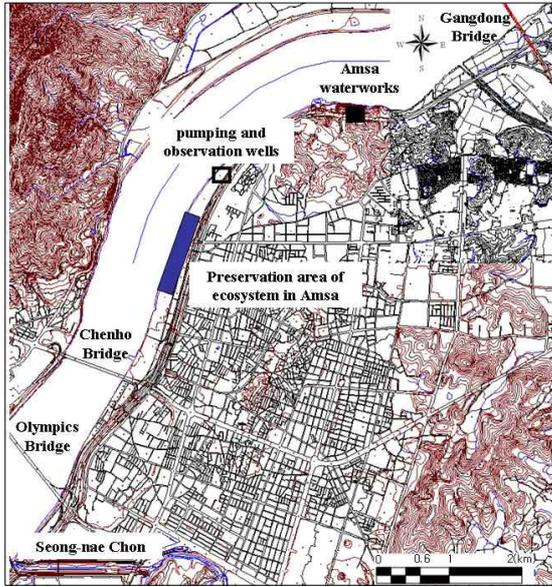
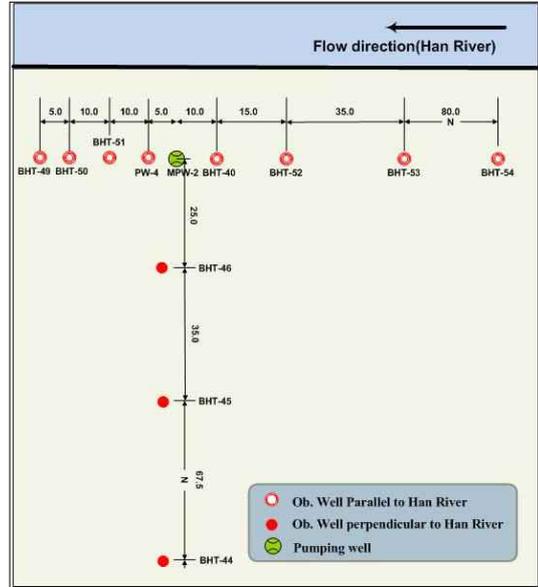


Fig. 1. Han River Basin and Study Site - Kwangnaru



(a) Study Area



(b) Plan view of Wells

Fig. 2. Kwangnaru Site

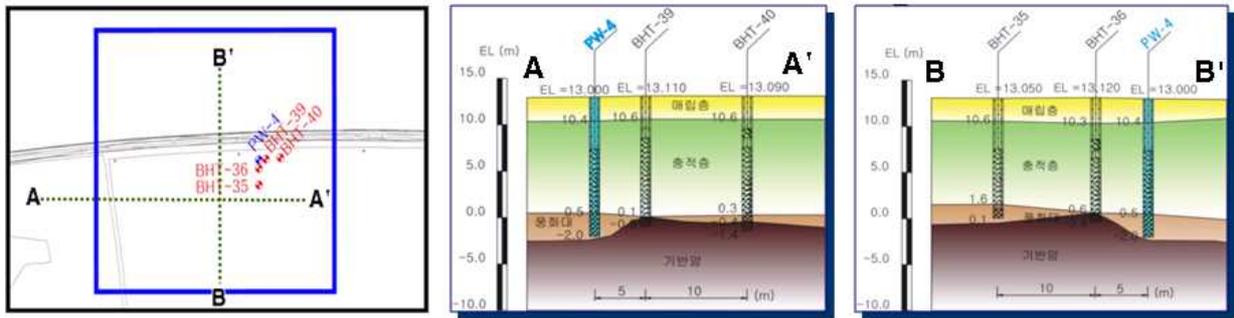


Fig. 3. Cross Section of Well Field Near PW-4

관한 입력자료는 시추자료, 입도분석 자료, 양수시험 분석 자료를 활용하였다(서울시, 2005). 대상구역은 Fig. 2(a)와 같이 강동대교부터 성내천 사이이며 상류에 암사정수장이 위치하고, 하류쪽에는 생태보존 지역이 존재하고 있다. Fig. 2(b)는 취수정과 관측정의 위치를 나타낸 것으로 한강과 평행한 방향으로 8개의 관측정과 수직인 방향으로 3개의 관측정에서 지하수위 및 지질특성을 조사하였다. PW-4 취수정의 시추단면도는 Fig. 3과 같다.

취수시 지하수위의 변동을 정확히 파악하고자 조사 지역의 영향범위에 포함될 것으로 예측되는 유역을 모델영역으로 설정하였다. 모델영역은 광나루 지구 전 구간 중에서 천호대교 남단부터 암사정수장까지 하천연장 약 4.6km, 유역면적 5.62km²으로 설정하였다. 유역의 대부분 지역은 시가지이며, 해발고도 80m의 산지가 북동쪽에 존재하고 이 산지는 남서쪽을 따라 능선을 형성하고 있다. 대부분 해발고도 10~20m에 시가지가 위치하고

있다(Fig. 4).

모델영역에 기본격자는 40m×40m의 간격으로 100개의 행과 80개의 열로 구성하였다(Fig. 5). 취수정 주변의 격자망은 한 개의 cell안에 정호가 설치될 수 있게 5m×5m 간격으로 구성하고, 그 외 지역은 10~40m의 격자망으로 구성하였다. 경계조건은 위치에 따라 RIV (River boundary), NFB(No-flow boundary), GHB (General Head Boundary)으로 설정되었으며 Fig. 6에 나타내었다.

이 지역은 매립토층, 충적층, 풍화암 및 연암층의 3개의 층으로 구성되었다(Fig. 7). 연구대상지역의 충적층은 모래, 자갈이 섞인 층으로 구성되어 있어 수평층의 층서 발달정도를 중간정도로 판단하여 수평투수계수와 수직투수계수의 비(K_z/K_h)를 0.1로 적용하였다. 또한 풍화암 및 암반층은 편마암이 풍화작용을 받아 발생한 풍화암으로 구성되어 있어 수평투수계수와 수직투수계수의 비를 0.01로 적용하였다(Walton, 1988).

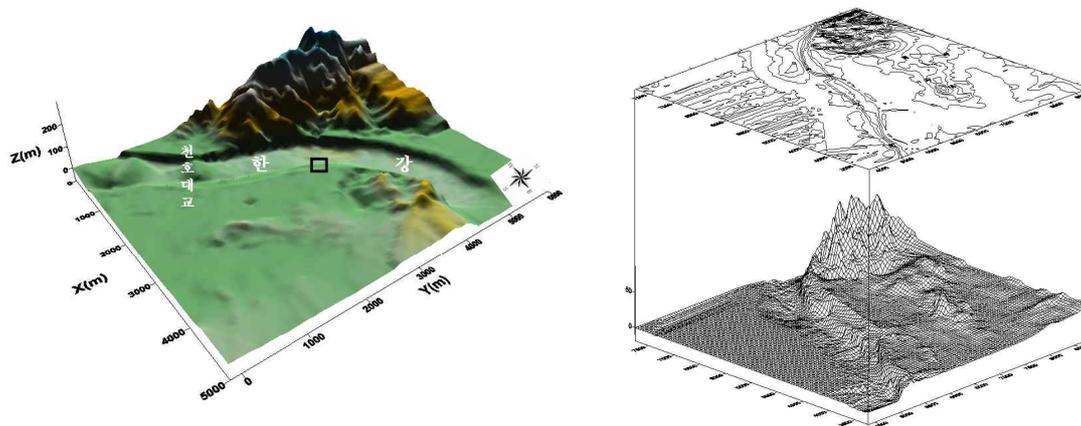


Fig. 4. 3-D Numerical Elevation Map of Modeling Area

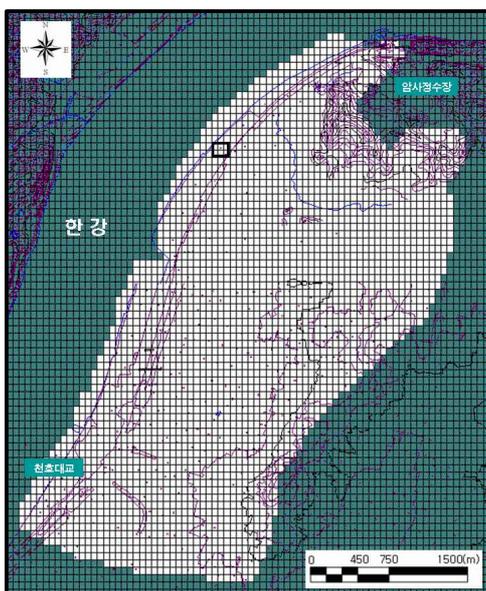


Fig. 5. Grid System. Finer Grids are used for Well Fields (Boxed Area)

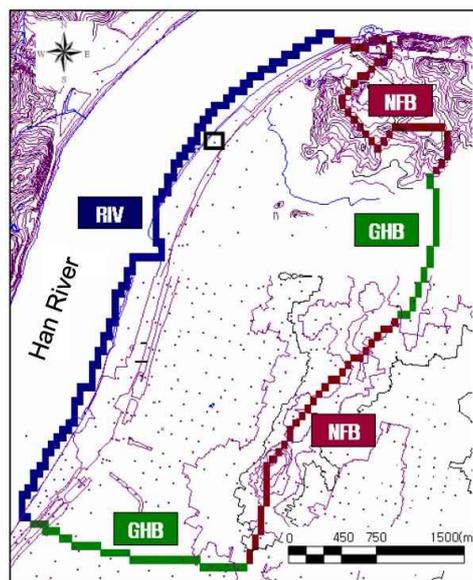


Fig. 6. Boundary Conditions

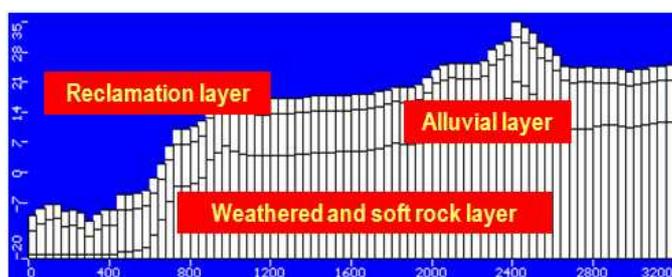


Fig. 7. Stratification of Kwangnaruru Site (unit: m)

조사지역의 입도분석결과와 시추자료를 바탕으로 현장 투수시험, 양수시험 등을 통하여 각 지층의 개략적인 수리정수(투수계수, 공극률, 저류계수)를 산정하였다. 또한, 정상류 모델링을 통하여 해석된 수위와 강변여과수 사용전의 자연적인 평형상태의 수위를 서로 비교해 일치시키는 모형보정(model calibration)을 실시하였다. Table 1은 관측수위와 보정된 모델수위간의 오차정도를

를 보여준다. 보정에 이용된 실제 관측지하수위는 2개월 장기양수시험 결과(2005년 9월 11일~10월 31일)의 수위강하자료를 이용하였다(서울특별시, 2005). 관측된 지하수위는 평균 6.52m였고, 정상류 모델링을 통하여 보정을 실시한 후의 수위는 평균 6.42m로 RMSE는 0.16m의 값을 보였다. 정상류 모델링을 통해 산정된 각 층에서의 수리정수들은 Table 2에 정리하였다.

Table 1. Comparison of Observed and Calculated Water Level

Well No.	Observed water level (m)	Calculated water level (m)	Error (m)	RMSE (m)
BHT-40	6.51	6.39	0.12	0.16
BHT-44	6.78	6.53	0.25	
BHT-45	6.84	6.46	0.38	
BHT-46	6.52	6.43	0.09	
BHT-49	6.43	6.38	0.05	
BHT-50	6.78	6.38	0.40	
BHT-51	6.29	6.38	-0.09	
BHT-52	6.24	6.40	-0.16	
BHT-53	6.38	6.41	-0.03	
BHT-54	6.56	6.42	0.14	
PW-4	6.40	6.39	0.01	

Table 2. Hydraulic Property of Layers

		Layer 1 (Reclaimed layer)	Layer 2 (Alluvial layer)	Layer 3 (Rock layer)
Hydraulic conductivity (m/sec)	K_x	1.2×10^{-4}	7.51×10^{-4}	7.4×10^{-5}
	K_y	1.2×10^{-4}	7.51×10^{-4}	7.4×10^{-5}
	K_z	1.2×10^{-5}	7.51×10^{-5}	7.4×10^{-7}
Porosity	Effective porosity	0.2	0.2	0.02
	Total porosity	0.53	0.46	0.05
Storage coefficient	Specific storage (S_s)	0	0.15(1/m)	3.3×10^{-6} (1/m)
	Specific yield (S_y)	0.2	0.2	0.2

3. 개발가능량 산정

3.1 단일관정

보정된 수리정수들을 입력자료로 사용하여 정상류에 해당하는 모델링을 하고, 그 결과를 이용하여 단일관정 취수시 개발가능량을 산정하였다. 민감한 지역인 관정 주변의 격자망은 5m×5m로 설정하고 그 외 지역은 10~40m 간격으로 조정하였다.

일반적으로, 비피압 대수층에서 지하수위가 대수층 두께의 70% 정도 하강하면 최대 취수량의 약 90%에 이르며, 수위 강하에 따른 산출량 증가 측면에서 수위 강하를 65% 이상 무리하게 증가시키는 것은 비효율적인 것으로 알려져 있다(한정상, 1998). 따라서, 65% 이하의 범위에서 우물의 효율을 고려한 설계가 적절한 것으로 판단된다. 본 연구에서 취수정의 수위강하는 채수량 증가를 위해 동일 지역의 선행연구인 서울특별시상수도사업본부(2005)를 포함한 문헌고찰과 대수층의 두께가 비교적 얇은 한강유역의 특성 등을 고려하여 포화 대수층 두께(9.9m)의 50%가 넘지 않을 때 즉, 4.95m를

기준으로 하였다. 초기 수두를 포화대수층 두께인 9.9m로 두고, 최초 취수량은 5,000m³/day로 설정한 후, 단계적으로 500m³/day씩 감소시키며 취수정에서의 수위강하량을 살펴보았다(Fig. 8).

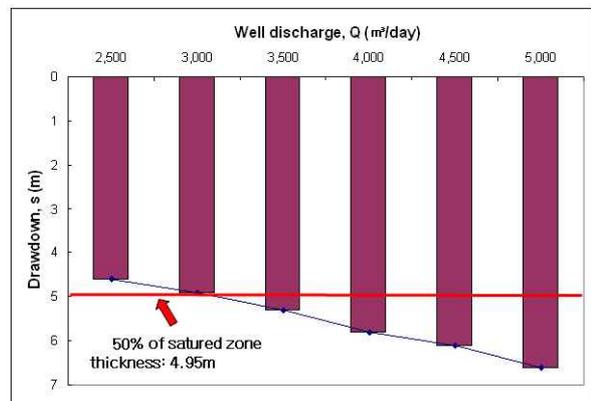
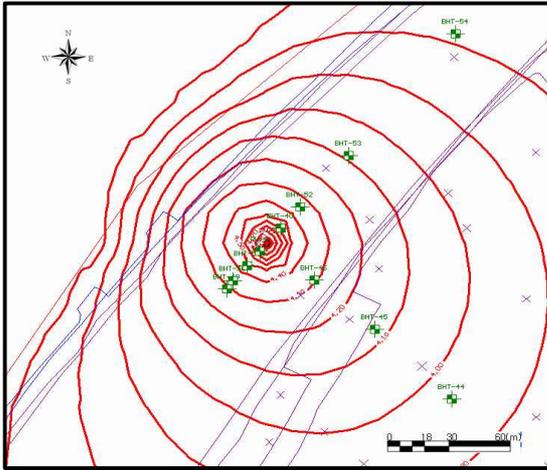
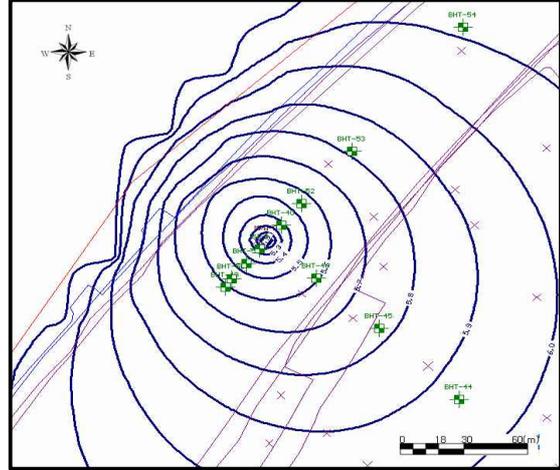


Fig. 8. Drawdown for Various Pumping Rates - Single Well

Fig. 8에서 보는 바와 같이 5,000m³/day 취수시 수위강하는 6.6m이고, 취수량이 줄어들수록 그 값은 점



(a) Drawdown



(b) Equipotential Line

Fig. 9. Drawdown and Equipotential Line for 3,000m³/day of Pumping – Single Well

차 작아진다. 3,000m³/day를 취수한 경우 수위강하량이 4.9m로 나타나 기준에 부합되는 최대 개발가능량으로 산정되었다. Fig. 9는 3,000m³/day 취수시 이 지역의 수위강하량과 수두분포를 나타낸 것이다.

3.2 관정시스템 구성

복수의 관정이 균을 이룰 때에는 상호 간섭효과가 있기 때문에 유효반경을 고려해야 한다. 단일관정일 경우 취수정과 관측정 사이의 거리와 수위강하량의 관계를 반대수그래프에 도시하여 선이 가로축과 만나는 점이 최대영향반경이 된다(Fig. 10). 따라서, 인접한 두 관정의 유효영향반경은 단일관정시 최대영향반경의 1/2이 되며, 산정한 결과 한강과 평행한 방향으로 100m, 수직인 방향으로 145m가 얻어졌고, 관정시스템을 구성하기 위한 유효영향반경을 최대 100m로 설정하였다.

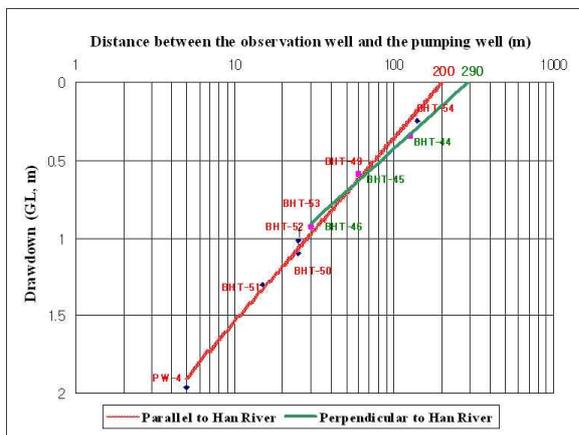


Fig. 10. Determination of Effective Radius

광나루 지구에서 관정시스템을 구성하기 적합한 하천연장은 지형과 생태계보전지역을 고려하면 약

1,200m 정도이다. 이 지역에 유효영향반경 100m를 기준으로 관정간 이격거리를 줄여가면서 시뮬레이션을 수행하였다.

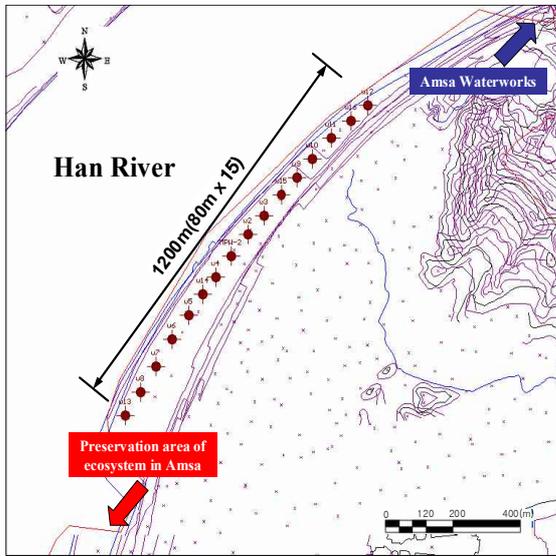
거리-수위강하량 그래프에 따라 설정된 관정간 영향반경은 100m이나, 수직정 사이에 수위강하량이 다소 떨어지더라도 수위강하가 수직정의 스크린 아래로 떨어지지 않으므로 유량 증대를 위하여 다소 좁은 간격으로 관정을 배치하는 것이 좀 더 효과적이다. 관정시스템 구성시 최적개발가능량 산정을 위하여 관정간 이격거리를 100m, 80m, 60m로 변화시키며 수위강하량을 살펴보았다. 이 때 수위강하가 대수층 포화두께인 9.9m의 1/2인 4.95m를 넘지 않도록 하는 총취수량을 산출하였다.

관정간 간격이 100m인 경우 1,200m 구간에 13개의 관정이 설치될 수 있으며 최대 수위강하량을 예측할 수 있다. 이후 80m 간격의 16개 관정, 60m 간격의 21개 관정에서도 같은 방식으로 수위강하량을 산출하였다. 관정간 이격거리 80m의 16개 관정 설치시 최대 수위강하량이 5m로 나타나 이때의 총 취수량 48,000m³/day를 개발가능량으로 산정하였다(Fig. 11).

Fig. 12는 80m 간격으로 16개 관정을 배치했을 때 수위강하량과 수두분포를 나타낸 것이다. 가장 많은 5m의 수위강하량이 발생한 곳은 가운데 관정과 상류로부터 4-5번째와 12-13번째 관정부근에서 나타났다.

3.3 개발가능량 증대방안

일반적으로는 취수량 산정시, 취수시 손실을 20% 시설 예비율 10%를 고려하여 관정을 설계한다(서울시특별시상수도사업본부, 2006). 그러나 앞 절에서 살펴본 개발가능량은 취수시 손실율이나 시설 예비율과 같은 감소를 고려하지 않은 경우이다. 또한 한강에 근접한 곳의 시추자료만을 가지고 모델링을 수행하였으므로 취



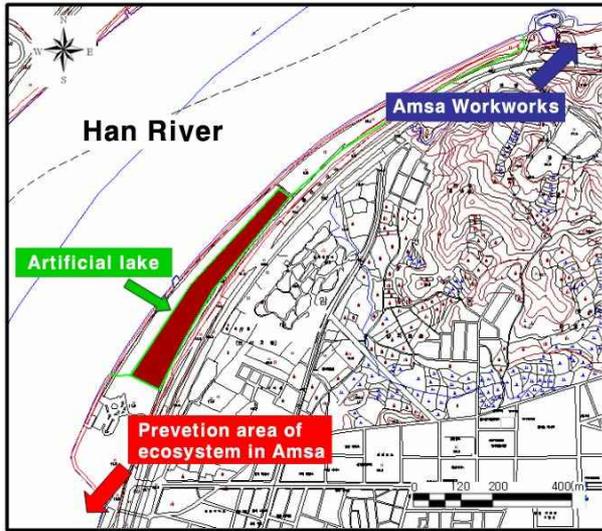


Fig. 14. Location of proposed artificial lake

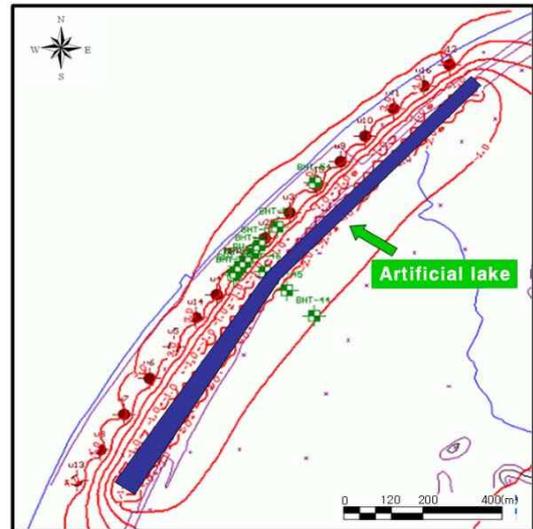


Fig. 15. Drawdown for 4,000m³/day of pumping per well

Table 3. Pumping Rate and Drawdown before and after Introducing Artificial Lake

Pumping rate (m ³ /day)		3,000	3,500	4,000	4,500	5,000
Drawdown (m)	Before	4.9	5.3	5.8	6.1	6.6
	After	4.0	4.4	4.9	5.5	6.2

현재 광나루 지구의 경우 올림픽대로가 지나가는 도심안쪽으로는 주거공간과 도로가 존재하지만 제외지 쪽으로는 약 100m 정도의 여유폭이 존재하고 있다. 따라서, 제외지 쪽에 인공호수를 조성하여 수량·수질적인 측면에서 이득을 볼 수 있다고 판단된다. 인공호수를 조성할 때 가능한 위치가 Fig. 14에 나타나 있다. 인공호수의 크기는 제외지 쪽의 부지 여건과 확보된 공간을 고려하여 면적은 약 50,754m², 수심 1m, 총용량은 50,754m³으로 가정하였다.

인공호수 설치시의 모델링 조건은 관정 시스템의 경우와 동일하게 하였다. 단, 인공호수를 모사하기 위해 인공호수 부분은 G.L. -1m의 고정수두 경계조건 (General Head Boundary, GHB)으로 설정하였다. 앞서와 마찬가지로 16개 취수정 중 한 곳이라도 수위강하량이 포화대수층 두께(9.9m)의 50%(4.95m)가 될 때의 취수량을 총개발가능량으로 산정하였다. 관정시스템에서 개발가능량을 산정할 때와 달리 관정 당 취수량을 3,000m³/day에서 500m³/day씩 증가시키면서 취수정의 수위강하량을 살펴보았다(Table 3.). 그 결과 4,000m³/day를 취수한 경우 수위강하량이 4.9m로 나타나 최대 개발가능량으로 산정하였다. 인공호수 조성 후 모델링 결과는 Fig. 15와 같다.

인공호수가 없는 관정시스템의 경우 한 개 관정에서

3,000m³/day씩 16개 관정을 운영할 때 수위강하량은 5m였다. 반면 인공호수를 조성시 5m의 수위강하량은 4,000m³/day로 취수한 경우에 나타났다. 따라서 인공호수 조성을 통하여 한 개 관정 당 약 1,000m³/day의 수량적 이익을 얻을 수 있다.

이를 종합해 보면 본 연구에서 고려된 방식에 의할 경우 광나루지구에서 서울시 상수도 원수로 확보가능한 양은 64,000m³/day로 이를 기준으로 추정할 때 연 23,360,000m³의 추가수자원 확보가 가능하다고 볼 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 선행논문에서 AHP를 이용해 후보지로 선정된 광나루지구의 강변여과 개발가능량을 산정하였다. 지하수 흐름해석을 통해 16개의 관정시스템을 구성하고, 보다 많은 취수량을 얻기 위해 배후지에 인공호수를 조성하는 방안을 제시하였다. 지하수 모델링을 실시한 결과 연간 약 2,336만m³의 개발가능량을 얻을 수 있을 것으로 판단되었다.

본 연구는 관정배치와 개발가능량 산정을 위해 지하수 모델링이 긴요한 수단이 될 수 있음을 보여준다. 본 연구는 도심 지역의 제한된 공간에서 강변여과를 통해 상수도 공급을 모색하는 타 지역에 유용한 정보를 제공

할 것으로 믿는다.

감사의 글

본 연구는 21세기 프론티어연구개발사업인 수자원의 지속적 확보기술개발사업단의 연구비지원(과제번호: 3-4-3)에 의해 수행되었습니다.

참고 문헌

- 건설교통부 (2001). 수자원 장기종합 계획 보고서 (Water Vision 2020)
- 과학기술부 (2004). 지속가능한 지하수 개발 및 함양기술 개발 보고서
- 동국대학교 (2007). 인공함양을 활용한 한강 및 낙동강 유역 수도공급 방안 연구 보고서
- 서울특별시상수도사업본부 (2005). 간접취수 도입을 위한 기초조사 보고서
- 서울특별시상수도사업본부 (2006). 간접취수 도입을 위한 타당성조사 중간보고서
- 이상일, 이상신 (this issue). "한강에서의 강변여과수 개발을 위한 적지선정 및 개발가능량 산정(I)." **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제41권, 8호, pp. 825-834
- 통계청 (2006.5.8). <http://www.nso.go.kr>
- 한정상 (1998). 지하수환경과 오염, 박영사
- Waterloo Hydrogeologic, Inc. (2003). *Visual MODFLOW Pro User's Manual*
- Walton, W. C. (1988). *Groundwater pumping tests*, Lewis Publishers Inc., pp. 9-34
- (논문번호:08-42/접수:2008.03.14/심사완료:2008.06.20)