大韓環境工學會誌 · 논문 · pp. 626~633. 2006.

부천지역의 지하수 대수층의 수리적 특성에 관한 연구

김소희† · 이윤진*

건국대학교 지리학과 · *청주대학교 환경공학과

(2006년 5월 2일 접수, 2006년 6월 19일 채택)

A Study on the Hydraulic Properties of Aquifers in Bucheon Area

So-hee Kim† · Yoon-jin Lee*

*Department of Geography, Konkuk University · *Department of Environmental Engineering, Cheongju University*

ABSTRACT : Bucheon city has been rapidly urbanized and steadily enlarged. Also, the city depends on groundwater as an alternative water resource. The objective of this study is to characterize the hydrogeology in this city including the recharge of groundwater and hydraulic property of an aquifer in order to investigate the chemical characteristics and contamination of groundwater in the Bucheon area.
Eleven groundwater wells in the Bucheon area were selected for applying certain hydraulic tests, such as pumping and recovery tests. Theis method and Theis recovery method were used to obtain hydraulic parameters, such as hydraulic conductivity, transmissivity by applying recovery tests. The playground of school and uncovered areas layed a major function of recharging areas. The groundwater well in these areas showed high recharge, transmissivity, and hydraulic conductivity. In a downtown area, groundwater wells showed low pumping capacity and hydraulic parameters.
Groundwater samples were collected from 48 different locations in the Bucheon area and that showed very various chemical composition in groundwater. Their electrical conductivity showed various ranges from 70.4 to 1,287 μS/cm. The composition more significantly affected the groundwater due to the land use and urbanization than that of the aquifer rock type.

Key Words : *Bucheon, Aquifer, Groundwater, Hydraulic Properties*

요약 : 본 연구는 부천시를 대상으로 지하수의 함양량, 대수층의 수리학적인 특성, 심도 및 지하수 심도에 따른 수리, 화학적 특성, 지하수의 오염특성을 파악하기 위해 수행되었다. 수리시험의 대상공은 부천지역의 토지이용형태와 도시발달을 고려하여 충적층 2개 지점과 암반층 9개 지점, 총 11개 지점을 선정하여 양수시험과 함께 회복시험을 동시에 실시하였다. 대수층의 투수량계수, 수리전도도 등의 수리상수를 도출하기 위해 양수시험은 충적층은 Theis의 해법에 의해 해석하였으며 암반층은 Theis의 회복해법에 의해 해석하였다. 학교운동장, 녹지공간이 확보된 공원 지역내 양수정은 지하수량이 다른 지역보다 풍부하고, 투수량계수와 수리전도도가 높은 값을 보였는데 이 지역이 강수의 수직침투와 수평이동이 활발하여 도시지역에서 주요 지하수 함양지역임을 뒷받침한다. 도심권의 도로 및 건축물에 의해 포장된 지역 양수정에서는 수리상수 값이 낮아 지하수의 함양이 어려운 지역으로 관찰되었다. 부천지역 48개 지점에서 채수한 지하수는 심층기반암이 화성암에 기인하여 지하수가 약산성화된 특성을 보였다. 부천시의 지역별 전기전도도는 70.4 ~1,287 μS/cm의 범위를 보였으며 용해성 광물이나 일부 탄산염의 영향을 받아 대부분의 지역에서 다소 높게 검출되었다.

주제어 : 부천시, 대수층, 지하수, 수리학적 특성

1. 서 론

국내 지하수원은 무분별한 지하수의 개발 및 지하수공의 관리미흡으로 인해 수질이 점점 악화되고 있는 실정이다. 더욱이 국내 평균 충적층의 두께는 약 7 m로 상대적으로 얇아 지하수면이 지표면으로부터 가까이 분포하는 수리적 특성을 가지고 있으므로 지하수의 수질오염에 취약한 특성을 가지고 있다. 도시지역에서는 도로포장, 상하수도관망 및 건축물의 축조 등으로 인해 지하수의 함양량, 유출조건, 유동형태가 변형되고 있다. 지하수의 유동체계의 해석 및 오염물질의 거동을 해석하고 이를 예측할 수 있는 기술 개발이 매우 시급한 실정이다.[1)]

본 연구에 이용된 MODFLOW모델은 지하수의 유동체계를 해석하기 위한 3차원모델로 미국지질조사국(U.S.G.S)에 의해 개발되었다.[2,3)] MODFLOW 모델은 피압대수층, 비피압대수층을 동시에 분석할 수 있을 뿐만 아니라 정상흐름 및 비정상흐름 상태를 해석할 수 있는 유한차분 수치모형이다.

Sophocleous(2000) 등은 미국 캔사스 지방의 지하수와 지표수의 영향관계를 분석하기 위해 POTYLDR 및 MODFLOW 모델을 통합하여 운영하여 물부족 문제의 해결방안을 모색하였다.[4)] 정상옥 등(1994)은 MODFLOW 모형을 이용하여 부곡온천에서의 양수로 인한 지하수 수위강하를 예측하였다.[5)] 함세영 등은 양수시험자료를 이용하여 Fratral model을 통

† Corresponding author
E-mail: shkim@sdi.re.kr
Tel: 02-2149-1169 Fax: 02-2149-1199

해 경북 옥명리의 지하수 유동 수리특성을 분석하였다.[6]

이종운 등(1998)은 화강암을 대수층으로 하는 지표수 및 지하수를 대상으로 심도에 따른 용존 물질의 농도 및 그 거동 특성을 고찰하였고 물과 암석과의 반응을 열역학적 해석과 연계하여 분석하였다.[7] 경기도 용인시 일대 천부지하수를 대상으로 수질특성을 고찰한 결과 지하수의 주 양이온은 Ca^{2+}, 음이온은 HCO_3^-이었음을 보고하였다.[8] 비오염 지역 32개, 오염지역 44개 지점을 선정하여 전국의 지하수 수질현황을 조사한 결과 지하수 수질은 외부적 인자보다는 지하수의 심도나 토질특성에 좌우되며 계절에 따른 수질특성변화는 없다고 보고하였다.[9]

연구대상지역인 부천시는 급격한 도시화의 과정을 거쳐 인구 86만의 도시로 발전하였다.[10] 지하수는 레미콘사업장과 농업용수, 등록되지 않은 지하수공을 제외한 약 2,347 개의 지하수공에서 연간 약 5,300,000톤을 생활용수, 공업용수, 농업용수로 사용하고 있다. 특히, 신도시 개발이 진행된 이후 1995년도 지하수 이용량은 전체 상수도 이용량의 약 20%로 지하수에 대한 의존도가 높았다.[11] 현재에도 부천시 외곽의 상수도 미공급 지역에서는 간이 및 소규모 급수용수로 지하수를 개발, 이용하고 있어 부천지역에서는 수원으로서의 지하수에 대한 중요성이 타도시에 비해 상대적으로 높은 편이다.

부천시의 지하수 이용은 산업, 공업화 및 신도시 건설 등으로 증가된 유입인구에 따른 물수요 증가로 인해 그 필요성이 증대하였으나 상수도보급의 미비로 인해 1980년 대 말부터 집중적인 개발이 이루어졌다. 부천지역에서 이용하고 있는 관정수는 현재 전체 2,347개소 중 1,604개소이며 현재 이용량은 연간 5,294,449 m^3에 이르고 있다. 더구나, 현재 지하수가 이용되고 있는 1,604개소의 88%가 먹는 물을 포함한 생활용수로 이용하고 있어 이에 대한 효율적 관리방안이 요구된다. 또한, 도시화에 따른 불투수층의 확대로 지하수 함양량이 점차 줄어들고, 폐공의 방치로 인해 지하수 수위저하 및 지하수질의 오염의 가속화되고 있다.[11]

따라서 본 연구에서는 부천지역의 지하수 수리 특성을 고찰하기 위해 표본지역을 선정하여 자연녹지 및 공원지역, 상업 및 주거지역, 공업지역 등으로 구분하여 토지이용별 지하수의 함양특성 및 수리 특성을 제시하였다. 또한 이 자료를 근거로 부천지역의 대수층의 특성을 명확히 파악하고 지하수의 수위 및 오염인자 관리방안을 도출하고자 하였다.

2. 연구 방법

본 연구는 부천시를 대상으로 Fig. 1과 같이 수질특성평가를 위한 48지점, 대수성 시험을 위한 11지점 및 수위조사 지점 10지점을 선정하여 1997년 3월부터 2004년 12월까지 연구를 실시하였다. 연구 분석에 요구되는 기초 자료로 구로구, 김포, 인천기상대의 기상자료와 부천시 통계연보, 지하수연보를 이용하였다.

양수실험은 대수층의 투수량계수(transmissivity coefficient), 저류계수(storage coefficient), 수리전도도(hydraulic conductivity) 등의 수리상수를 도출하기 위해 수행되었다. 양수시험은 양수공에서 장기간에 걸친 양수를 계속하였을 때 일정한 거리를 둔 관측공에서의 시간에 대한 수위강하를 측정하여 계산하였다.

수리시험의 대상공은 부천지역의 토지이용형태와 도시발달을 고려하여 충적층 2개 지점과 암반층 9개 지점, 총 11개 지점을 선정하여 1997년 3월부터 5월까지 양수시험과 함께 회복시험을 동시에 실시하였다. 지하수공은 비교적 관리가 양호하게 이루어지고 있는 비상용지하수를 대상으로 하였다. 양수시험은 지하수의 사용을 중단한 후 자연수위에 가까운 정도의 수위회복 후 실시하였으며 양수시간은 공별로 하루 이상의 간격을 두고 실시하였다. 이때 양수량은 디지털유속계(Hermit-2000)로 측정하였다. 양수시험도중에 지하수의 수온, pH, 전기전도도를 측정하여 시간에 따른 수질의 변화상태를 파악하여 대수층의 특성 등에 대한 정보를 얻고자 하였다. 충적층을 대상으로 한 양수시험은 Theis의 해법에 의해 해석하였으며 암반층을 대상으로 한 양수시험은 Theis의 회복해법에 의해 해석하였다. 해석을 위한 Curve matching에는 AQTESOLV를 사용하였다.

대수성 시험을 통하여 얻어진 자료로부터 수리상수를 도출하기 위하여 Aquifer Test프로그램을 이용하였다. 본 연구에서는 지하수공의 균열암반대수층을 다공성 매질로 가정하였다. 다공성 매질접근법에 기초하여 적용된 양수시험 해석 모델은 Theis 표준곡선방법을, 양수종료 후 수위회복 자료에 대해서는 Theis 회복시험법을 적용하였다.[12,13]

본 연구에서는 지하수의 유동 분석을 위해서 MODFLOW 모형을 사용하였다. 지하수의 경계조건과 수리적 특성에 의해 굴포천 유역을 대상구역으로 정하고 총 연구영역은 90 m×110 m(90 colum×110 row)의 범위이었고 이중 활성 셀은 5,220개로 설정하였다. 관측정은 덕산중학교 앞 O-3, 작동소공원 O-7, 종합운동장 W-17, 제 7공원 W-9, 상수도 사업소 S-10 이었다. 지질조사 결과에 근거하여 부천지역의 지층구조는 제 1층은 충적층과 풍화대로 하고 제 2층은 암반층으로 구성하는 이중층 구조로 설정하였으며 각 층의 두께는 동일하다고 가정하였다. 유역 경계조건은 지형적인 분수령을 기준으로 경계면의 수직방향으로 지하수의 유동량이 0인 지점으로 하였으며 하부의 경계면도 불투수성 경계면으로 가정하여 두 조건을 No flow조건으로 가정하였다. 본 연구에 이용된 모델 입력자료를 정리하면 Table 1과 같다.

대상지역의 지하수의 수질특성을 살펴보기 위하여 본 연구에서는 2004년 4월 및 11월 두차례에 걸쳐 시료를 채취하여 분석을 실시하였으며 채수 지점은 Fig. 1과 같다. 수온, pH, 용존산소(DO), 전기전도도(EC) 등의 항목은 각각 Check-mate 90, Orion 290A, Orion 142, Orion 185의 분석기기를 이용하여 현장에서 측정하였다.

지하수의 용존 성분을 분석하기 위한 절차는 다음과 같다. 시료를 채수 한 후 현장에서 0.45 μm여과지를 이용하여 부유물을 제거하였다. 여과한 시료는 시료 100 mL를 폴리에

Table 1. Input data to analyze ground water flow for using MODFLOW

Item	Hydraulic conductivity(m/sec)	Specific yield	Effective porosity
The first layer (alluvium, regolith)	agricultural field : 2.82×10^{-4} mountain : 1.4×10^{-5}	0.15 0.005	0.15
The second layer (fractured rock)	granite : 2.75×10^{-6} gneiss : 7.53×10^{-6} limestone : 7.53×10^{-6}	0.15	0.15

틸렌 용기에 담은 후 0.5N 질산은용액($AgNO_3$)을 1~2방울 첨가하고 pH 2이하로 산성화시켜 금속이온의 침전 및 흡착을 방지하였다. 전처리한 시료는 냉장 보관하여 실험실로 운반하였다. 음이온 분석을 위한 시료로 1 L 채수하여 24시간이내 분석을 실시하였다.

Na^+, Ca^{2+}, Mg^{2+}, K^+, Fe^{3+}, Cu^{2+}, Zn^{2+}, Mn^{2+}, Cd^{2+}, As^{2+}, Pb^{2+} 등은 유도결합 프라즈마 원자방출분광분석기(ICP-AES, Perkin-Elmer Optima 3000XL)로, F^-, Cl^-, SO_4^{2-}, NO_3^-, PO_4^{3-}는 이온크로마토그래피(Ion Chromatography, Dionex DX500)를 이용하여 분석하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 관측정에 따른 대수층의 수리적 특성

각 관측정별 대수층의 수리적 특성은 Table 2와 같다. 부천지역 대수층의 수리전도도는 10^{-3}~10^{-5} cm/sec로 비교적 투수성이 좋은 것으로 나타났으며, 투수량 계수는 0.81~60.94 m^2/day로 대수층의 두께는 지역에 따라 다양하게 분포하고 있었다.

Table 2. Hydraulic characteristic of each sampling sites

Site	Transmissivity coefficient(m^2/sec)	Hydraulic conductivity(cm/sec)
O-3	2.88×10^{-4}	2.72×10^{-4}
O-7	9.38×10^{-6}	5.6×10^{-5}
O-15	7.05×10^{-4}	3.82×10^{-3}
O-19	1.30×10^{-4}	2.16×10^{-4}
O-20	5.29×10^{-5}	2.16×10^{-3}
W-9	1.10×10^{-4}	6.39×10^{-5}
W-10	2.67×10^{-4}	2.43×10^{-4}
W-17	3.06×10^{-5}	1.63×10^{-5}
W-18	2.70×10^{-4}	3.38×10^{-4}
S-10	2.31×10^{-5}	2.66×10^{-5}
S-13	5.17×10^{-4}	7.39×10^{-4}

충적층의 투수량 계수는 여월동 O-15 지점이 10^{-4} m^2/sec로 인근 O-20 지점의 10^{-5} m^2/sec 보다도 높았다. 회복시험법에 의한 암반층의 투수량 계수는 덕산중학교 앞의 O-3, 제7공원의 W-9, 옥길동의 S-13, 신시청의 W-10, 오정구 여월동 237번지 O-19, 중동 설악마을의 W-18 지점에서 유사하였다. 반면, 투수량 계수는 수도사업소의 S-10, 종합운동장의 W-17은 다소 낮았으며, 작동소공원 내에 위치한 O-7 지점에서 가장 낮았다. 수리전도도는 여월동의 O-20 지점이 가장 큰 2.16×10^{-3} cm/sec를 보였으며, 이는 지하수의 함양이 풍부한 토지이용과 지형적 특성 때문인 것으로 보인다. 수리전도도는 덕산중학교 관측정인 O-3, 옥길동 관측정인 S-13, 신시청인 W-10, 여월동 237번지 O-19, 중동 설악마을 W-18은 7.39×10^{-4}~2.16×10^{-4} cm/sec의 값을 보였고, 수도사업소 관측정 S-10, 제 7공원 관측정 W-9, 종합운동장 관측정 W-17,

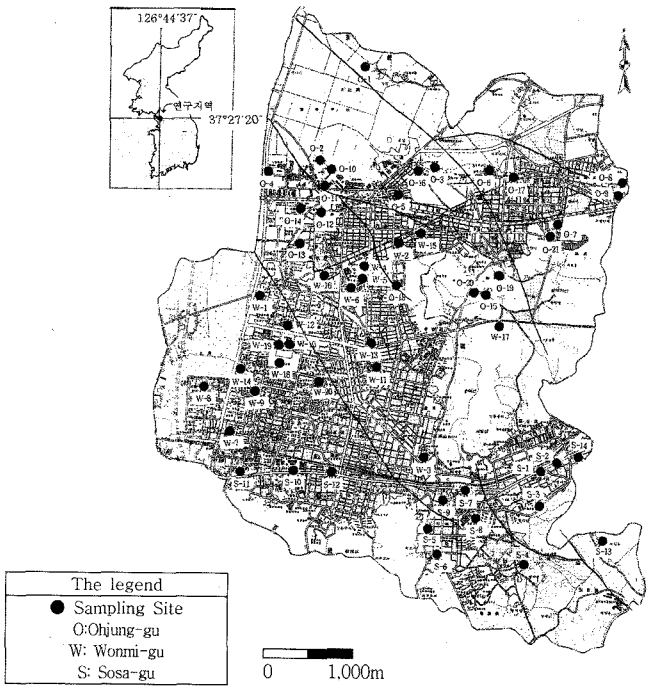


Fig. 1. Schematic diagram of sampling site.

작동 소공원 관측정 O-7지점이 가장 낮은 $6.39\times10^{-5}\sim1.63\times10^{-5}$ cm/sec로 낮은 값을 보였다.

따라서, 부천지역에서 대수층은 배수가 잘되며 인위적인 포장이 적은 지점, 학교운동장, 일부 공원부지에서는 지하수 함양이 잘 되어 투수량 계수와 수리전도도값이 높게 나타났으며, 아파트 등의 건축물이 밀집된 지역에서는 지하수의 함양이 어려워 투수량계수와 수리전도도의 낮았다.

3.2. 계절별 지하수 수위

Fig. 2에서 10개 관측정을 대상으로 월별 암반층과 충적층 지하수 수위의 변화와 그 지역에 내린 강수량을 도시하였다. 지하수 수위 분포는 6개 지점 모두 여름철에 급격한 수위상승을 나타냈는데 이는 국내 강수량의 특징을 반영한 것으로 보여진다. 여름철 장마 이후 가을철 태풍과 동반된 집중호우 이후 강수량은 급격하게 감소하였으며 이때 지하수 수위는 하강곡선이 나타냈으며 이것은 이듬해 봄까지 계속된다.

부천의 대부분 지역에서 충적층의 지하수 수위 변동은 강수량의 변화와 일치하는 일반적 특성을 나타내고 있었다. 원미구 근린공원 W-20 지점에서는 월 강수량이 최고인 달과 지하수 수위가 최고점인 달이 다르게 나타났는데 이는 비가 가장 많이 내린 달에 누적된 강수량으로 인해 지하수 수위가 계속 상승하고 그 달 이후에 내린 비로 인해 지하수 수위의 최고점이 형성된 후 그 최고점 이후에는 함양이 중지되었기 때문으로 판단된다.

소사구 두진종합건설 지점 S-1, 삼양중기 S-8, 유한전문대 S-14 및 원미구 부곡중학교 W-13, 오정구 여월동 O-21 지점은 강수량의 변화에 따라 지하수 수위의 변화가 거의 없었다. 원미구 신시청 W-10, 시민공원 W-18, 신시청 W-19, 근린공원 W-20, 소사구 옥길동 S-13의 지점에서는 강수량의 변화에 따라 지하수 수위의 민감하게 반응하는 충적층 지하수의 일반적 특성을 나타냈다.[14,15]

연구지역의 지하수는 자유수면을 갖는 포화대 대수층으로 유입량과 유출량의 변화에 따라 수위의 변화가 민감하게 발생했으며 지하수의 수위 변동진폭이 0.8 m로 나타났는데 이것은 자연수위의 변동이라기보다는 인근 우물의 양수에 따른 우물간 간섭 효과라고 판단된다.

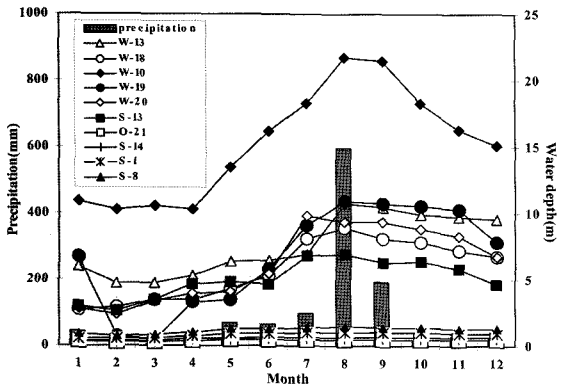


Fig. 2. The variation of water level for each site depending on precipitation.

3.3. 지하수 유동 분석

양수를 하지 않은 정류상태에서의 지하수 수위는 Fig. 3과 같다. 본 연구지역으로 유입된 수량은 강우 및 기타 함양으로부터 66,082 m^3/day이었고 모델 연구지역내의 유입량은 전량이 하천을 통해 유출되어 유입-유출이 -0.48로 모사되었다. 등포텐셜면에 수직으로 나타난 유선은 북서쪽을 향하고 있으며, 이는 특히 하천을 통한 물의 유출경로를 나타낸다.

Fig. 4는 장기간 양수정 가동시 정류상태에 도달한 등수두선을 제시하였다. 제 1층에서의 등수두선은 등고선의 모양과 유사한 경향을 나타냈으며 1층 등수두선에서 하천의 존재여부를 확인할 수 있었는데 이를 통해 전반적으로 지형 및 하천효과가 반영됨을 알 수 있다. Fig 4(b)는 양수정 가동시의 제 2층에서의 지하수 수위 예측을 나타낸 것이다. 부천지역내의 지하수 수위는 지표수보다 높은 15~45 m로 나타났다. 부천시 북쪽, 동쪽에 위치한 관측정의 지하수 수위는 15~40 m이었으며 서쪽방향은 10~20 m로 모사되었다. 이상의 모델해석 결과는 현장에서 관측공을 통해 실측한 수두값과 그 오차는 1 m이내였다. 제 2층은 1층과 수두 분포는 거의 유사하고 수리전도도만 2층이 크므로 각층의 지하수 유동방향은 유사하였으며 2층에서의 지하수 수위는 전체적으로 1층보다는 약간 하강한 것으로 나타났다. 또한 제 2층에서는 Fig. 5에서와 같이 양수량 및 함양 등의 차이에 의해 지역에 따라 지하수위가 주변주역에 비해 급격히 하강하는 현상을 보였다.

본 연구에서는 주어진 양수량에 의해 채수를 한 이 후 3, 5, 10, 20년이 경과하였을 때의 지하수의 수위를 예측하였으며 (관련그림생략), 그 결과시간경과에 따라 수위는 비교적 안정적이었으며 약간의 수위 변화를 보이고 있으나 큰 문제점은 없는 것으로 판단되었다. 그러나 향후, 지하수개발이 계속될 경우 정기적으로 추가 개발된 관정들의 위치 및 양수량 등을 모델에 입력하여 수위변동을 재예측해야 할 것으로 사료된다.

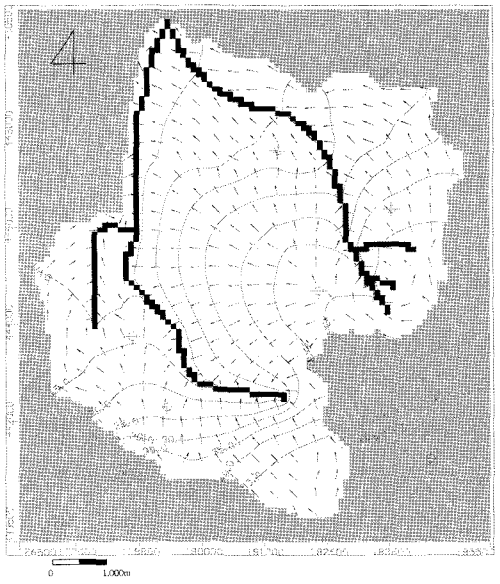
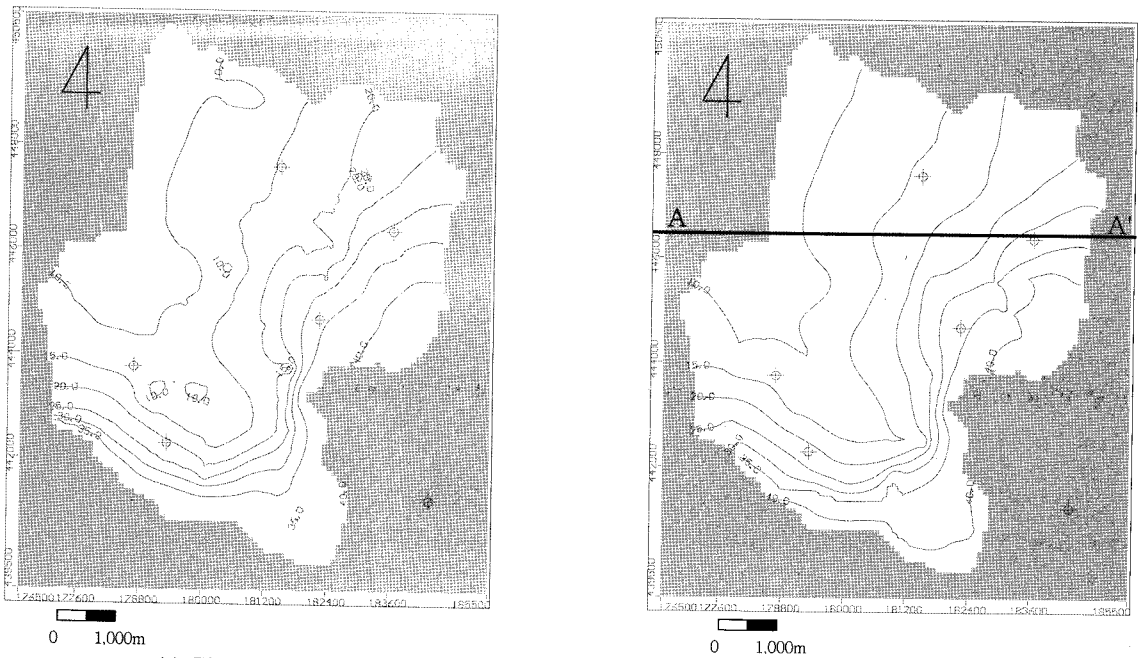


Fig. 3. The expectation of ground water level and direction of flow with rectification by MUDFLOW modeling.



(a) The first layer (b) The second layer

Fig. 4. The expectation of ground water level while pump was operated with rectification.

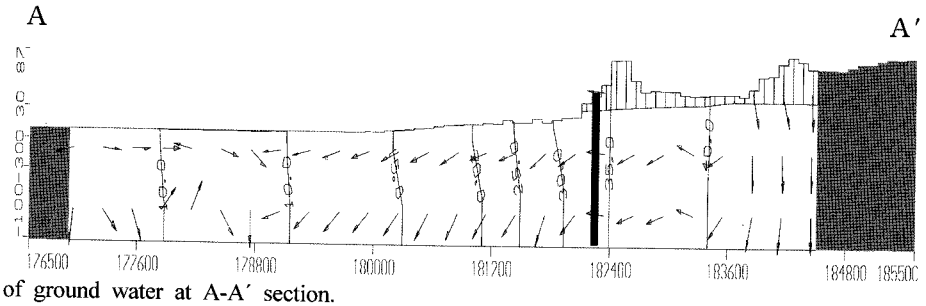


Fig. 5. The flow of ground water at A-A′ section.

Table 3. The mass balance comparison between the modeling by MUDFLOW and analytical process (Unit : 10^6 m^3/year)

		Analytical method	Modeling by MUDFLOW
Inflow	Net recharge	24.12	24.12
	The others	0.87	2.06
	Total	24.99	26.18
Outflow	Net recharge	11.85	13.32
	Rivers	13.14	12.86
	Total	24.99	26.18

Table 3에서 굴포천 유역에 대하여 시행한 모델링 결과가 검증하기 위하여 해석적 방법[16] 및 모델모사결과에 의한 물수지를 비교해 보았다. 예측결과 유입량에 있어 4.7%의 차이를 보였으나 전체적으로 5% 이내의 오차를 보이므로 본 모델에 의한 모사결과는 신뢰할 수 있을 것으로 본다.

3.4. 물질이동 특성

부천지역 베르네천 지역은 하수도 설비가 이루어지지 않아 생활하수가 그대로 하천으로 유출되고 있다. 따라서, NO_3-N가 비교적 높은 농도로 존재할 것으로 예측되므로 본 연구에서는 이를 대상으로 주변의 생활하수에 의한 지하수 오염을 모의하였다. 이때 NO_3-N의 초기농도는 2 mg/L, 연속적으로 30 mg/L로 유입되게 설정하였으며 유입 깊이를 고정수두 10 m로 한정하였다. 즉, 해당지역에 현상태하에서의 지하수 흐름을 MODFLOW모델을 이용하여 Historical Matching을 실시하여 현재의 지하수 수위 분포상태에 부합하게 보정하여 현 상태하에서의 오염물질 이동 특성을 해석하였다. Fig. 6에서 생활하수가 유입되어 지하수가 NO_3-N에 의해 오염되는 과정을 모사하였다.

오염물질이 유입되기 시작한 후 시간이 경과함에 따라 NO_3-N로 오염되는 면적은 점차 증가하였으며 이는 지하수의 유동방향으로 확대되었다. 1년 후에는 오염원 부근에 NO_3-N의 농도가 2.5~5 mg/L인 등치선이 형성되었고 모의 지역내 질산성질소의 최고 농도는 6 mg/L이었다. 약 2년 후에는 오염지역이 1년 경과이후 보다 확대되었고 점오염원 부근에 5 mg/L 이상인 농도 등치선이 형성되었으며 모의지역 내 NO_3-N의 최고 농도가 9 mg/L이었다. 3년 후에 점오염원 부근의 NO_3-N의 농도는 먹는 물 기준치인 10 mg/L 이상으로 나타났으며 오염지역의 면적이 확대되어 Y좌표가 444,800~

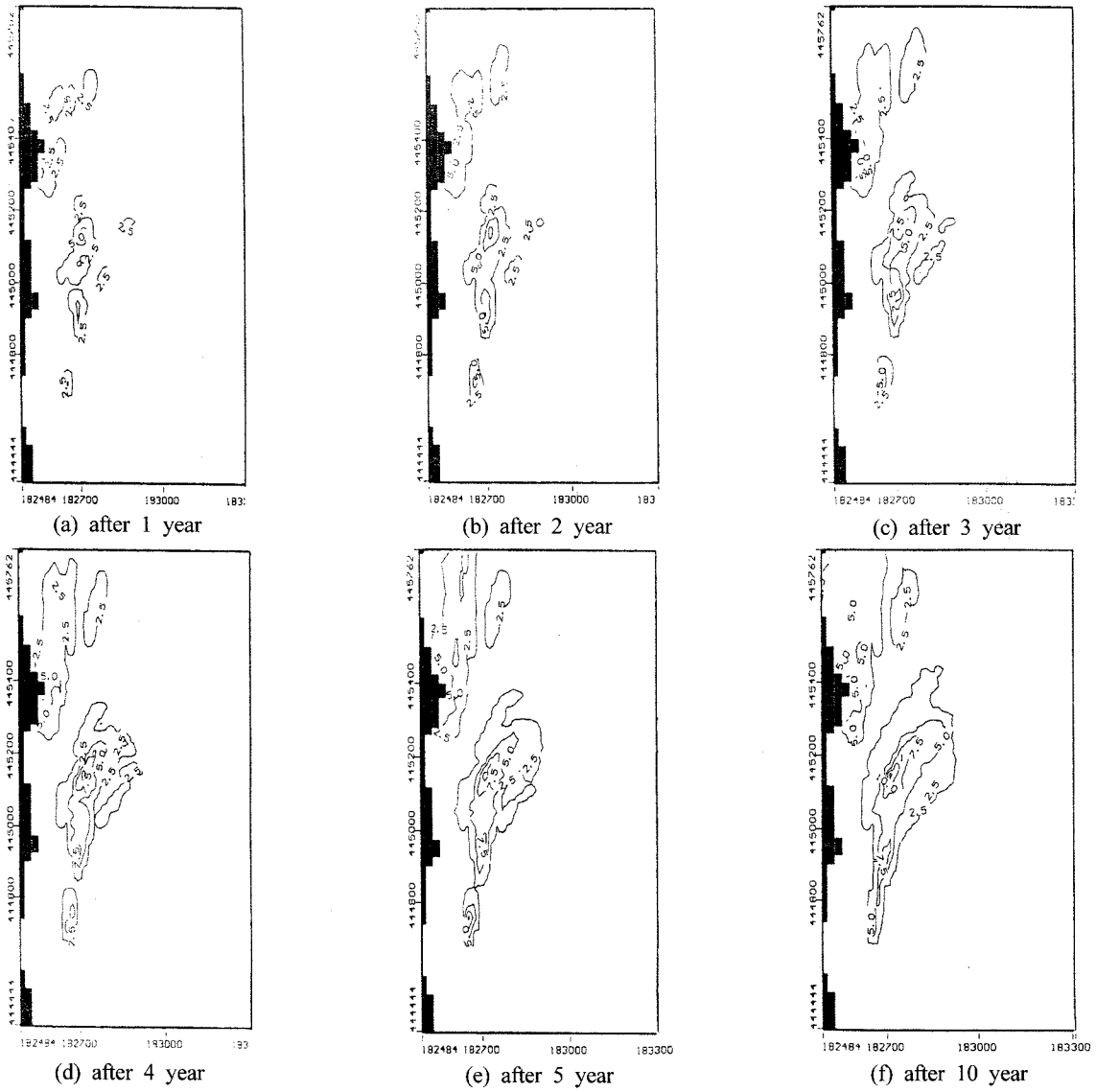


Fig. 6. The simulation result for NO_3-N around Berunea river.

445,300 사이에 위치한 모의 지역 중앙의 오염지역은 폭이 약 300 m, 길이가 약 450 m이었다. 4년 후에는 오염지역의 면적이 확대됨과 동시에 최대농도가 증가하여 최대 농도가 12 mg/L로 증가하였고 5년 후에는 모의 지역 중앙에 위치한 오염지역의 면적은 폭이 약 300 m, 길이가 약 750 m로 증가하였으며 이 범위는 하천까지 도달하였다. 10년 후에는 질산성질소의 최대농도가 14 mg/L로 증가하였으며 모의지역 내 점오염원 부근에 먹는물 기준치를 초과하는 등치선이 형성되었다.

총 48개의 관정 중 13개 관정에서 음용수 기준치를 초과하였으며, 10~20 mg/L사이의 관정이 총 11개 지점으로서 전체의 22.9% 정도를 차지하며 20 mg/L의 이상의 관정은 전체의 약 4%를 차지하였다. 질산성질소가 음용수 기준을 초과하는 관정의 분포를 보면 초과 관정은 소사구 심곡 본1동, 소사본 1동, 소사본 2동, 원미구 중동, 심곡 3동, 역곡 3동에 집중되어 있고 그 외 지역에는 비교적 균등하게 분포되어 있다.

본 모의 실험은 생활하수에 의한 지하수의 오염만을 고려하였지만 실제로 해당지역에 비료살포나 축산폐수에 의해 좀 더 높은 농도의 NO_3-N가 지하수로 유입되어 지하수를 오염시킬 것으로 예상된다. 따라서 모의 지역에 하수처리시설의 도입이 요구되며 특히 질산성 질소에 의한 오염뿐 아니라 생활하수의 유입을 고려한 주변지역 지하수 및 하천에서 대한 전반적인 수질항목에 대한 고찰이 요구되어 질것으로 판단된다.

3.5. 토지이용별 지하수 수질

자연녹지 및 공원지역 11개 지점, 상업 및 주거지역 19개 지점, 공업지역에 17개 지점을 선정하여 수질특성을 고찰하였다. Table 4에서 지하수의 수질 특성을 연구지역의 토지이용에 따라서 이를 제시하였다.

pH는 상업 및 주거지역에서 6.9로 다소 높았고 자연녹지 및 공원과 공업지역의 pH는 6.8이었다. 전기전도도는 상

Table 4. The constitution of components in ground water according to land usage

The purpose of use		pH	EC (μS/cm)	Na^+ (mg/L)	K^+ (mg/L)	Ca^{2+} (mg/L)	Mg^{2+} (mg/L)	HCO_3^- (mg/L)	Cl^- (mg/L)	NO_3^- (mg/L)	SO_4^{2-} (mg/L)	Si^{2+} (mg/L)
The green belt and park zone	Min.	5.9	102.3	15.3	0.6	43.0	1.4	16.8	1.7	0.7	0.7	0.4
	Max.	7.6	786.0	40.3	2.8	104.9	15.6	200.2	170.0	44.1	69.0	32.9
	Mean	6.8	414.4	24.2	1.3	60.6	8.6	118.2	51.6	8.3	20.5	17.5
The industrial zone	Min.	6.2	271.0	11.2	0.8	35.3	1.1	10.8	17.0	0.1	9.0	12.1
	Max.	7.1	1183.0	31.4	3.3	83.4	16.8	129.2	121.0	19.7	71.0	24.3
	Mean	6.8	539.6	21.4	1.4	58.4	5.7	82.2	65.1	6.7	25.9	19.3
The business and residental zone	Min.	6.3	70.4	13.0	0.6	36.3	1.8	12.0	5.0	0.2	1.0	0.1
	Max.	7.4	704.0	31.2	3.2	89.1	22.0	148.2	96.0	17.4	87.0	25.6
	Mean	6.9	377.3	24.2	1.3	62.1	8.3	104.7	44.4	5.9	25.5	17.1

업 · 주거지역에서 704 μS/cm로 가장 낮고, 자연녹지 및 공원지역, 공업지역 순으로 나타났다.

K^+는 평균농도가 1.3～1.4 mg/L의 범위로 녹지나 공업에서 농도가 동일하였고 상업지역 및 주거지역에서 다소 높았다. Ca^{2+}, Mg^{2+}농도는 자연녹지 및 공원지역이 다른 지역보다 높았다. HCO_3^-은 자연녹지에서 118.2 mg/L로 가장 높았으며 공업지구가 82.2 mg/L로 가장 낮았다. Cl^-의 함량은 자연녹지 및 공원지역이 51.6 mg/L, 공업지구가 65.1 mg/L, 상업지역 및 주거지역이 44.4 mg/L이었다. 자연녹지 및 공원지역에서 Cl^- 농도가 높았으며 인위적인 유입이 있었던 것으로 판단된다. NO^{3-} 농도는 자연녹지 및 공원지역에서 8.3 mg/L로 가장 높은 높았으며 공업지구가 6.7 mg/L, 주거지역이 5.9 mg/L이었다. SO_4^{2-}의 농도는 공업지구에서 25.9 mg/L로 가장 높았고 그 다음 상업지역, 녹지 및 공원지역 순이었다.

토지이용에 따른 지하수의 수질특성을 보면 공업지역은 HCO_3^-, Cl^-의 함량이 높고, NO_3^- 함량이 낮은 것이 특징이다. 상업 및 주거지역은 Ca^{2+}, Mg^{2+}, HCO_3^-, SO_4^{2+}가 높은 반면 Cl^-과 NO_3^-는 낮았다. 공원지역의 Na^+, Ca^{2+}, Mg^{2+}, HCO_3^-, Cl^-, NO_3^-는 공업지역과 주거지역에 비해 상대적으로 높았다.

3.6. 심도별 지하수 수질

지하수 수질 특성을 지하수공의 우물개발 심도에 따라 지표에서 50, 50～100, 100～150, 150～250, 250～450 m의 범위로 분류하여 수질을 분석하였으며 구간별 지하수 성분에 대한 최소값, 최대값, 평균값은 Table 5와 같다. pH는 심도별로 크게 차이가 없으며 전기전도도는 심도 50 m까지 324 μS/cm, 50～100 m에서는 435 μS/cm, 심도 150 m 이상은 631 μS/cm로 심도가 깊어질수록 점차 증가하는 반면, 심도 100～150 m에서는 347 μS/cm로 다시 낮아졌다. 심도 150～250 m에서 전기전도도의 수치가 1,287 μS/cm의 최대값을 보이는데 이는 인위적인 오염물이 이 지점에 집중적으로 유입된 결과로 보여진다. Na^+의 함량은 지표에 가까운 0～50 m 구간을 제외하곤 심도에 관계없이 거의 비슷한 양상을 보였으며, Ca^{2+}의 경우도 천층인 심도 0～50 m 구간을 제외하곤 약 59 mg/L로 거의 비슷한 경향을 보였다. Mg^{2+}은 심도가 깊어질수록 농도가 점차 증가하는 경향을 증가하였다. HCO_3^-은 심도 50～150 m까지는 다소 감소하는 경향을 보이다가 심도 150 m 이상에서 다시 증가하였다. Cl^-은 심도 100～150 m구간에서 가장 높은 170 mg/L의 농도를 보였다.

Table 5. The components constitution according to groundwater well depth

Depth		pH	EC (μS/cm)	Na^+ (mg/L)	K^+ (mg/L)	Ca^{2+} (mg/L)	Mg^{2+} (mg/L)	HCO_3^- (mg/L)	Cl^- (mg/L)	NO_3^- (mg/L)	SO_4^{2-} (mg/L)	Si^{2+} (mg/L)
0~50 m	Min.	6.6	102	21.4	0.6	49.8	4.7	111.2	9.0	1.3	0.7	0.4
	Max.	7.6	704	40.3	3.4	123.3	19.6	149.2	107.0	14.5	88.7	25.6
	Mean	6.9	324.2	27.0	1.3	71.7	4.7	124.7	34.8	4.7	24.3	15.9
50~100 m	Min.	6.2	70.4	11.2	0.5	35.3	1.6	10.8	9.0	0.1	1.4	0.1
	Max.	7.5	704.0	30.3	2.8	84.1	15.6	150.2	103.0	12.5	46.1	24.3
	Mean	6.7	435.1	21.4	1.2	57.7	6.6	102.6	56.9	4.3	17.7	17.4
100~150 m	Min.	6.1	101.0	12.7	0.6	23.6	1.1	12.8	1.7	0.2	2.2	11.5
	Max.	7.4	786.0	31.4	3.3	111.0	22.0	130.3	170.0	22.3	72.5	24.1
	Mean	6.8	374.7	22.3	1.5	59.6	6.8	101.2	55.1	6.7	25.8	19.0
150~250 m	Min.	5.9	190.0	13.8	0.9	19.1	1.8	19.6	12.0	0.2	3.6	12.8
	Max	7.6	1287.0	31.2	2.0	78.6	17.5	213.6	87.0	48.9	77.2	32.9
	Mean	6.7	631.6	21.7	1.3	56.2	8.9	123.6	59.9	12.8	25.6	19.0

NO_3^-는 심도 0~50 m 구간에서 1.3~14.5 mg/L 농도범위를 가졌고 100 m 이상의 심도에서는 0.1~12.5 mg/L로 지표부근의 NO_3^-의 농도가 더 높았는데 이는 지표부근에 오염원이 분포하기 때문인 것으로 사료된다. 심도 150 m 이상에서 다시 0.2~48.9 mg/L의 농도범위를 보여 농도가 증가하였다. SO_4^{2-}는 0~50 m 구간에서 가장 높은 88.7 mg/L를 보였으며 50~100 m 구간에서 농도가 낮아졌는데 SO_4^{2-}의 농도 역시 지표부근의 오염물질에 영향을 받는 것으로 생각된다. 또한 SO_4^{2-}의 농도는 150 m 이상의 구간에서는 약간 증가하는 경향을 보였는데 이는 NO_3^-와 동일한 경향으로 150 m 지점에 오염원이 유입되고 있는 것으로 보여진다.

4. 결 론

본 연구에서는 부천시를 대상으로 대수층의 수리학적 특성과 지하수 유동에 따른 물질이동, 토지이용, 심도에 의한 수리, 화학적 특성 및 수질오염인자를 파악하기 위하여 수행되었으며 현장 대수성시험, 수질조사분석을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 학교운동장, 녹지공간이 확보된 공원 지역내 양수정은 지하수량이 다른 지역보다 풍부하고, 투수량 계수와 수리전도도가 높은 값을 보였는데 이 지역이 강수의 수직침투와 수평이동이 활발하여 도시지역에서 주요 지하수 함양지역임을 뒷받침한다. 도심권의 도로 및 건축물에 의해 포장된 지역 양수정에서는 지하수의 함량이 상대적으로 적고 수리상수 값이 낮아 지하수의 함양이 어려운 지역으로 관찰되었으며 지하수공이 밀집되어 있고 사용량이 증가한데 원인이 있는 것으로 생각된다. 이러한 지역에서는 광역적인 지하수의 유동이 대수층을 형성하는 것으로 보인다. 장기적 수위변화에 대한 예측결과 지하수 수위 등고선의 큰 변화는 나타나지 않고 않았으나 향후 지속적인 지하수 개발시 일정기간 단위로 추가 개발된 관정들의 위치 및 양수량 등을 모델에 입력하여 수위를 예측해야 할 것으로 판단된다.

2) 오염물질 이동을 분석한 결과 3년 후에는 질산성질소가 먹는 물 기준치인 10 mg/L이상인 지점에 있으며 5년 후에는 오염체의 앞부분이 하천까지 도달하였다. 10년 후에는 최대농도가 14 mg/L로 증가하였으며 모의 지역 중간에 위치한 점오염원 부근에 먹는 물 기준치 10 mg/L를 초과하는 등치선이 형성되었다. 오염물질이 유입되기 시작한 후 시간이 경과함에 따라 오염지역의 면적은 지하수의 유동 방향으로 확대되었다.

3) 부천지역 48개 지점에서 채수한 지하수는 대부분의 지하수가 약산성화 되어 있는 특성을 보이고 있는데 pH는 평균 6.8로 이러한 경향은 심층기반암이 화성암에 기인으로 인한 것이다. 부천시의 대부분의 지역에서 전기전도도가 250~750 μS/cm의 범위로 나타나 다소 높은 경향을 보였으며 이는 용해성 광물이나 일부 탄산염의 영향을 받은 것으로 사료된다. 지하수 조성 분석 결과 구별 지역의 차이보다는 토지이용상태와 심도에 따라 다양한 양상을 보여줌을 알 수 있었다. 심도 150 m 지점에서 전기전도도, NO_3^-, SO_4^{2-}가 증가하였으며 해당지점에 오염원이 유입되고 있는 것으로 보여진다.

참고문헌

1. Scanlon, B. R., Healy, R. W., and Cook, P. G., "Choosing appropriate techniques for quantifying groundwater recharge," *Hydrology Journal*, **10**, 18~39(2002).
2. 전보현, 최용석, "MODFLOW의 입력변수를 확장한 3차원 지하수유동 시뮬레이션에 관한 연구," 한국자원공학회지, **34**, 420~431(1997).
3. Andersen, F. Peter., A manual of instructional problems for the U.S.G.S MODFLOW model. EPA/600/R-93/010 (1993).
4. Sophocleous, M. A. and Samuel, P. P., "Methodology and application of combined watershed and groundwater models in Kansas," *Journal of Hydrology*, 236, 185~201(2000).
5. 정상옥, "Modflow 모형을 이용한 부곡온천지역 지하수 유동해석," 수문학회지, **27**(1), 79~87(1994).
6. 함세영, 김형찬, 임정웅, "수직 지질구조에 의해서 지배되는 암반지하수유동의 수리적 성질과 그 예," 대한지하수환경학회지, **5**(2), 101~119(1998).
7. 이종운, 전효택, 전용원, "국내 화강암질암 내 심부 지하수의 지구화학적 특성," 대한지하수환경학회지, **4**(4), 199~211(1997).
8. 우남칠, 최미정, "경기도 용인시 일대 천부지하수의 수질특성 연구," 대한지하수환경학회지, **6**(2), 53~58(1999).
9. 이길철, 김종택, "지하수 수질현황에 관한 조사 연구," 국립환경연구소보, **7**, 253~265(1985).
10. 부천시, 부천시 통계연보(2004).
11. 부천시, 지하수관리계획 기본조사보고서-지하수오염실태와 현황(1997).
12. Theis, C. V., The relationship between the lowering of the piezometric surface and duration of discharge of a well using ground-water storage, Transactions of the American Geophysical Union, 519~524(1935).
13. Young, S. C., "Impacts of positive, skin effects on borehole flowmeter tests in a heterogeneous granular aquifer," *Groundwater*, **36**(1), 67~75(1998).
14. 문상기, 우남칠, "누적강수량과 지하수위 곡선을 이용한 지하수 함양율 산정기법," 지하수 토양환경학회 추계학술대회논문집, 23~30(2000).
15. 이진용, 이강근, "강우에 대한 지하수위 반응양상 비교분석: 강원도 원주지역과 경기도 의왕지역," 지하수토양환경학회지, **7**(1), 3~13(2002).
16. 최병수, 안중기, "지역단위 자연함양율 산정방법 연구," 지하수환경, **5**(2), 57~65(1998).