

갑천 유역의 지하수 유동 평가

Evaluation of Groundwater Flow for the Kap-cheon Basin

홍성훈* / 김정곤**

Hong, Sung-Hun / Kim, Jeongkon

Abstract

Groundwater flow in a basin is greatly affected by many hydrogeological and hydrological characteristics of the basin. A groundwater flow model for the Kap-cheon basin (area= 648.3km²) in the Geum river basin was established using MODFLOW by fully considering major features obtained from observed data of 438 wells and 24 streams. Furthermore, spatial groundwater recharge distribution was estimated employing accurately calibrated watershed model developed using SWAT, a physically semi-distributed hydrological model. Model calibration using observed groundwater head data at 86 observation wells yielded the deterministic coefficient of 0.99 and the water budget discrepancy of 0.57%, indicating that the model well represented the regional groundwater flow in the Kap-cheon basin. Model simulation results showed that groundwater flow in the basin was strongly influenced by such factors as topological features, aquifer characteristics and streams. The streams in mountainous areas were found to alternate gaining and losing streams, while the streams in the vicinity of the mid-stream and down-stream, especially near the junction of Kap-cheon and Yudeong-cheon, areas were mostly appeared as gaining streams. Analysis of water budget showed that streams in mountainous areas except for the mid-stream and up-stream of Yudeong-cheon were mostly fed by groundwater recharge while the streams in the mid and down-stream areas were supplied from groundwater inflows from adjacent sub-basins. Hence, it was concluded that the interactions between surface water-groundwater in the Kap-cheon basin would be strongly inter-connected with not only streams but also groundwater flow system itself.

keywords : Kap-cheon Basin, SWAT, MODFLOW, Groundwater-Surface water Interaction, Groundwater Flow System

요 지

지하수 유동 모델에 반영되는 유역의 수리지질학적, 수문학적 특징들은 지하수 유동 특성에 주요한 영향을 미칠 수 있는 현장 특성들이다. 상기 특징들을 최대한 반영하기 위하여 438개의 관정자료를 토대로 갑천 유역(유역 면적 648.3km²)의 대수층 구조 특성을 분석하고, 24개의 하천 자료를 이용하여 지하수 유동 모델을 구축하였다. 그리고 검·보정된 준분포형 유출모형(SWAT)의 소유역별 지하수 함양량 결과를 3차원 지하수 유동 모델(MODFLOW)과 연계

* 한국수자원공사 수자원연구원 연구원

Researcher, Water Resources and Environment Research Center,
Korea Institute of Water and Environment, Kwater, Daejeon 305-370, South Korea
(e-mail: wghsh72@paran.com)

** 한국수자원공사 수자원연구원 책임연구원

Principal Researcher, Water Resources and Environment Research Center,
Korea Institute of Water and Environment, Kwater, Daejeon 305-370, South Korea
(e-mail: jkkim@kwater.or.kr, Corresponding Author)

하여 갑천 유역의 광역 지하수 유동 특성을 평가하였다. 모의된 지하수위와 86개 지하수 관측정의 지하수위 비교에서 결정계수는 0.99, 유역 전체의 물교환량의 상대오차율이 약 0.57%로 갑천 유역의 지하수 유동 특성을 잘 반영하였다. 갑천 유역의 지하수는 지형 및 대수층 특성과 하천의 영향에 의하여 전반적으로 유역 남쪽에서 북쪽으로 유동하는데 산지 지역에 존재하는 하천들은 손실과 이득 하천의 형태를 반복하는 반면, 갑천 중·하류 부분과 갑천-유등천 합류 부근은 이득하천의 형태를 보이고 있다. 그리고 소유역별 지하수 물교환량 분석한 결과, 상기 지역을 포함하는 소유역의 하천 공급원이 해당 유역의 지하수 함양량보다 지하수 유동 체계에 따라 인근 소유역에서 공급되는 지하수 유입량 비율이 훨씬 높은 것으로 분석되었다. 반면 유등천 중·상류 지역의 소유역을 제외한 산지 지역의 경우는 하천 공급원이 지하수 유동 체계에 의한 유입량보다 해당 유역 내에서 공급되는 지하수 함양량 비율이 높은 것으로 분석되었다. 따라서 지표수와 지하수의 상호작용 및 하천 유출에 지하수 유동 특성이 주요한 영향을 미치는 것으로 평가되었다.

핵심용어 : 갑천 유역, 준분포형 유출모델(SWAT), 3차원 지하수 유동 모델(MODFLOW), 지하수-지표수 상호 작용, 지하수 유동 체계

1. 서 론

도시화에 따른 토지 이용 변화, 기후 변화에 따른 강우 사상의 변화와 이로 인한 지표수-지하수의 물순환 변화 그리고 환경을 고려하는 사회 인식의 변화 등에 따라 국내에서는 수체별 수자원관리에서 지표수-지하수 연계 등을 고려한 유역 통합관리나 하천 복원과 같은 친자연적 하천 관리가 부각되고 있다. 따라서 수자원 관리의 전략도 전술한 변화에 대처하기 위하여 수자원 관리의 핵심기술을 ‘다양한 물공급원(지표수, 지하수, 대체수자원)을 통합하여 관리함으로써 맑은 물을 안정적으로 공급하고, 사용된 물을 경제적으로 깨끗하게 처리하여 쾌적한 물환경을 조성하는 기술’로 정의하고 핵심 기술의 범위로 물순환 해석, 하천관리, 통합유역 계획 및 관리, 지하수 조사, 유동해석 등을 제시하고 있다(한국수자원공사, 2005). 본 연구 대상지역인 갑천 유역에 대한 최근의 연구는 상기 핵심 기술 범위 중에서 하천 관리와 물순환 분석에 관한 연구로 이루어졌다. 장창래 등(2005)은 갑천을 중심으로 하천의 공간이용을 평가하였고, 김정곤 등(2005)은 ‘도심생태하천조성’과 관련하여 갑천의 하천수 및 하수처리수를 이용한 갈수기 대전 3대 하천의 유지유량 및 수질 평가에 관한 연구를 수행하였다. 정영훈 등(2005)은 금강하류지점 목표수질 2등급을 만족하는 금강본류의 필요유량과 이를 만족하기 위한 갑천의 필요 유입량 산정에 관한 연구를 수행하였고 정동국 등(2001)은 대전 노은, 관저지구의 개발 전과 개발 후 유출 변화를 평가하였다. 그리고 갑천 유역의 물순환 분석과 관련하여 김정곤 등(2006a)은 갑천 유역의 수문 특성 및 도시화에 따른 영향 평가를 수행하였다. 하지만 지금까지 갑천 유역의 지하수 유동 평

가에 관한 연구는 수행되지 않았다. 따라서 본 연구에서 갑천 유역의 통합 유역 물 관리 및 하천 복원 사업에 앞서 해당 유역의 정상상태 광역 지하수 유동 특성 평가가 주요 연구 목적이다.

지하수 유동 평가는 평가 목적, 평가 지역의 현장 특성 등에 따라 다양한 방법들이 선택, 적용되어질 수 있지만, 일반적으로 적용성을 고려하여 수치모델이 적용되어진다(최윤영 등, 2000; 김중훈 등, 2000; 안상도 등, 2000; 심병완 등 2002; 허창환, 2003; 윤상훈 등, 2004; 박기중 등, 2004). 지하수 유동 평가에서 영역 내 지표수 특징들은 실제 지하수의 광역적인 유동 특성을 반영하는 자연적인 특징일 뿐 아니라, 이를 설정하는 방법에 따라 모델 결과에 중요한 영향을 미칠 수 있기에(Anderson, 2005), 강수, 지표 유출, 지표하 흐름을 경유하여 지하수체계로 유입되는 지하수 함양량은 지표수-지하수의 연계, 지하수 유동 평가 및 유역의 통합 수자원 관리 측면에서 주요한 매개변수이다. 따라서 함양량의 평가를 위하여 많은 연구들이 수행되었다(이동물과 구호본, 2000; 문상기와 우남철, 2001). 하지만 이런 지하수위, 기저유출 등에 의하여 평가된 함양량은 지하수 모델 적용 시 유역 전체의 평균값 및 함양량의 범위에 대한 정보만을 제공하는 한계를 가지고 있기에 지하수 모델의 주요 입력자료로서의 역할보다는 모델 보정의 매개변수로 활용되었다. 이런 연구들과 병행하여 수치모델을 이용한 지하수 함양량의 공간적 특성 평가 연구도 수행되었다(김성준과 채효석, 2000; 이학수 등, 2001; 김상준과 윤성용, 2005; 권형중 등, 2005; 김남원 등, 2005; 배상근, 2005; 김남원 등, 2006; 안중기 등, 2006). 상기 연구들은 분포형 입력 자료를 요구하는 지하수 유동 모델의 운영 측면에서 볼 때 전자의 방법들보다 좀

더 유용하고 신뢰성 있는 자료를 제공한다. 이런 특성들을 이용하여 김남원 등(2004a,b)은 준분포형 지표수 유출모형인 SWAT(Arnold et al., 1993)과 지하수 유동 모델인 MODFLOW(McDonald and Harbaugh, 1988)를 연동시킨 결합모형을 개발, 적용하였다.

따라서 본 연구에서는 대전지역 지하수 기초조사 자료와 국가 지하수 정보센터 자료 등을 토대로 갑천 유역의 지하수 유동 모델을 구축하였다. 그리고 검·보정된(김정곤 등, 2006b) 준분포형 유출모형인 SWAT을 이용하여 평가된 22개의 소유역별 지하수 함양량 결과를 지하수 유동 모델과 연계하여, 지표수-지하수의 상호작용을 고려한 갑천 유역의 광역 지하수 유동 특성을 평가하였다. 또한 광역지하수 유동체계, 지하수 함양량 그리고 하천과의 지하수 교환량 분석을 통하여 소유역별 및 주요 하천에 미치는 영향인자를 분석하였다.

2. 유역 현황

2.1 기본 현황

연구 대상 유역은 한반도의 중서부와 서해안 일부 지역을 포함하는 금강권역 12개 소유역 중에서 대전 3대 하천(갑천, 유등천, 대전천)을 포함하는 갑천(K6)유역으로 유역 면적 648.3km², 유로연장 73.7km로 형상계수가 약 0.119인 비교적 장방향 형상을 가진 유역이다. 그리고 유역 직선 최장거리는 동서방향으로 약 27km, 남북 방향 약 40km이고 지형 표고 범위는 약 30m ~ 약 870m로 840m 정도의 지형고저차를 보인다(Fig. 1). 유

역 내 주요 행정구역인 대전광역시시는 연 평균 기온 12.3°C, 평년 강수량이 1,354mm이다. 또한 유역 내 2개의 국가하천(갑천, 유등천), 1개의 지방 1급 하천(대전천)과 29개의 지방 2급 하천(갑천, 유등천, 등)이 소재한다(건설교통부, 2005). 토양은 산지 지역은 주로 암쇄토 및 산성암, 변성퇴적암 및 편암 종류(Ma, Mm, Mv)가 분포하며 도심지 및 하천 수계를 따라서는 충적토 종류(Af, An, Ap)의 토양이 분포하고 있다(김정곤 등, 2006b). 지질은 5개의 수문지질단위(미고결 퇴적물, 석회암, 편암 화성암, 비다공질 화산암, 변성암)로 분류되며(한국수자원공사, 2002; 건설교통부, 2004). 유역 중심부 및 하천 주위는 미고결 퇴적물이, 중심부 외곽은 대부분 화성암과 변성암이 존재한다(Fig. 2).

2.2 관정 현황

관정 자료는 지하수 유동 모델 구축의 기본 자료이다. 유역 내 주요 행정구역인 대전광역시에 신고된 관정 개수는 2004년 말 23,790개이나, 좌표 정보, 대수층 구조, 대수층 특성, 현장 관측 자료의 유무를 고려하여 선택 분류 및 사용되었다. 모델 구축에 사용된 갑천 유역의 관정 자료는 총 438개(충적/풍화층 226개, 파쇄/암반층 212개)이다. 이는 대전지역 지하수 기초조사 보고서(이후 기초조사)(건설교통부, 2004)의 기본관측정 229개(충적/풍화층 43개, 파쇄/암반층 186개), 국가 지하수 관측정 3개(충적/풍화층 1개, 파쇄/암반층 2개), 장기자동 지하수 수위 관측정 9개(충적/풍화층 6개, 파쇄/암반층 3개), 대수성 시험정 5개(충적/풍화층 2

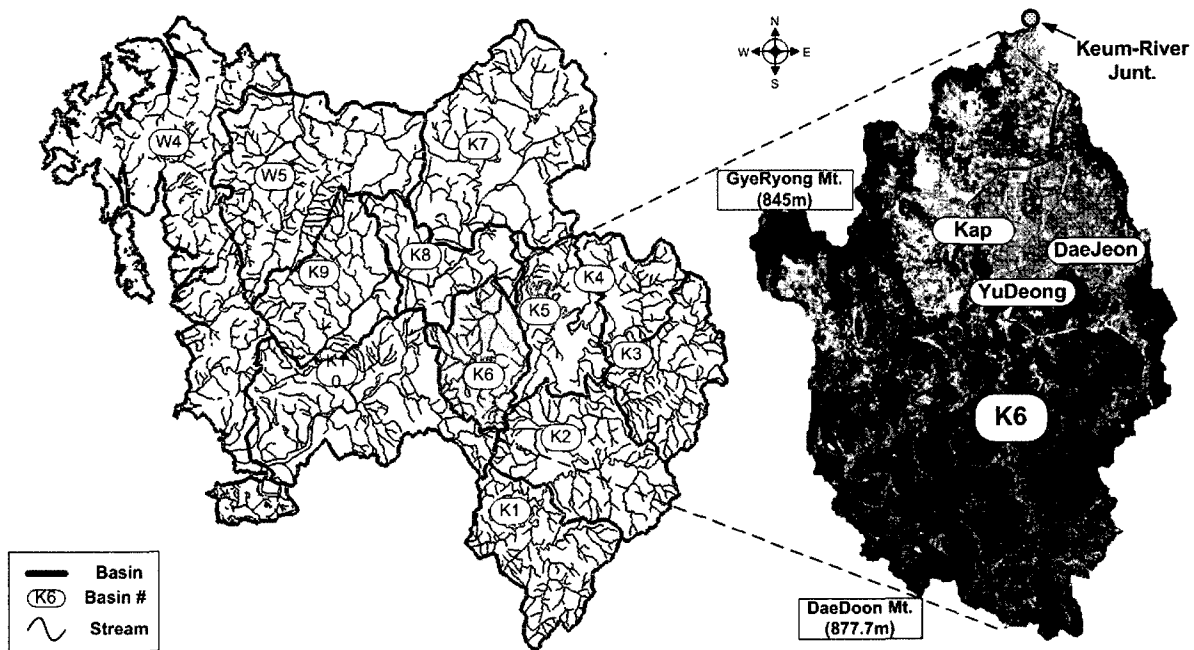


Fig. 1. Location and Topography of Kap-cheon Basin

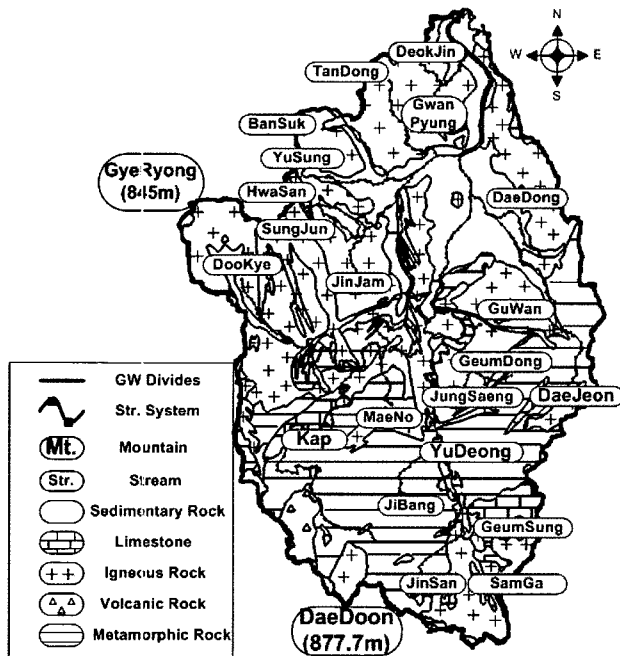


Fig. 2. Hydrogeological Map

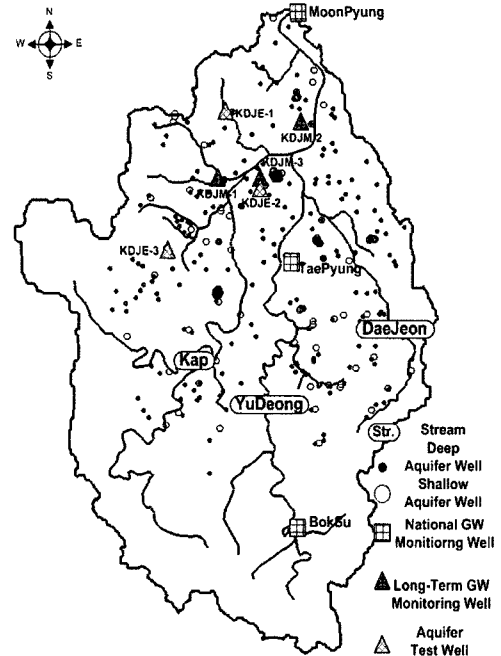


Fig. 3. Location of wells

개, 파쇄/암반층 3개) 자료와 국가지하수 정보센터(이후 GIMS)로부터 입수된 행정구역별 시추 및 착정자료 192개(충적/풍화층 174개, 파쇄/암반층 18개)로 구성되어진다(Fig. 3).

3. 광역지하수 유동 모델 구축

범용성과 현장 적용성을 고려하여 지하수 모델 구축에 MODFLOW-2000을 사용하였다. MODFLOW(A Modular Three-Dimensional Finite-Difference Ground-Water Flow Model)는 유한차분법을 이용하여 다공질 매체에서 밀도가 일정한 3차원 지하수 유동 방정식을 푸는 수치 모형이다. MODFLOW는 최초로 Fortran 66으로 개발되어졌으며, 이후 Fortran 77로 전환되면서 MODFLOW-83으로 버전을 상향시켰고, 기능면에서는 동일하지만 이 버전은 MODFLOW-88로 불려졌다. 이후에 이 모델은 기존의 기능들이 일부 개선 및 보완되고 새로운 기능 추가되면서 MODFLOW-96, 2000, 2005로 개정되었다(McDonald and Harbaugh, 1988; McDonald and Harbaugh, 1996; Harbaugh, et al., 2000; Harbaugh, 2005). MODFLOW의 program 구조는 주 프로그램 및 일련의 독립적인 부 프로그램으로 구성되는 'modular structure' 형태이며, 이 모듈들은 강, 하천, 관정과 같은 지하수 흐름 특징을 모의하기 위하여 'packages'로 조합되어 있다. 따라서 지하수 유동 모델 구축을 위하여 유역 현황에서 기술된 갑천 유역의 지형, 지질, 수계 등의 특성을 반영하고 입력자료로 관정,

대수층 구조 및 특성, 하천 자료와 지표수-지하수의 상호작용을 고려하기 위하여 갑천 유역의 물순환 분석 결과(김정곤 등, 2006a)를 이용하였다.

3.1 대수층 구조 및 특성

입수된 438개의 관정 자료 분석을 토대로 대수층 구조 및 특성 평가를 수행하였다. 조사 자료 대부분의 정보들이 표고 대신 심도 정보의 형태이다. 따라서 해당 지점의 지표 표고를 60m 해상도의 DEM자료를 이용하여 추출하였다. 추출된 관정 지점의 지표표고와 조사된 대수층 두께 자료를 이용하여 각 대수층의 바닥 표고 분석을 수행하였다.

대수층 구조 분석 결과 갑천 유역의 충적/풍화대의 평균 두께는 15.7m, 범위는 약 54m, 표준편차는 약 9m이고, 파쇄/암반층의 평균 두께는 87.6m, 범위는 180m, 표준편차는 약 43m로 분석되었다. 또한 충적/풍화대의 바닥표고와 지표표고와의 상관관계식은 $y=1.0743x-20.636$ ($R^2=0.96$)로 높은 상관성을 보였다. 파쇄/암반층의 바닥표고와 지표표고와의 상관관계식은 $y=1.2702x-113.84$ ($R^2=0.65$)로 충적/풍화대보다는 상관성이 낮지만 신뢰할 수 있는 수준의 결과를 나타내었다(Figs. 4 and 5). 대수층의 수리지질 특성은 입수된 관정 자료 중에서 기초조사의 15개 간이 양수시험과 대수성 시험 자료, GIMS의 16개 시험 결과 그리고 문헌조사 값을 이용하여 모델 보정에 의하여 추정하였다.

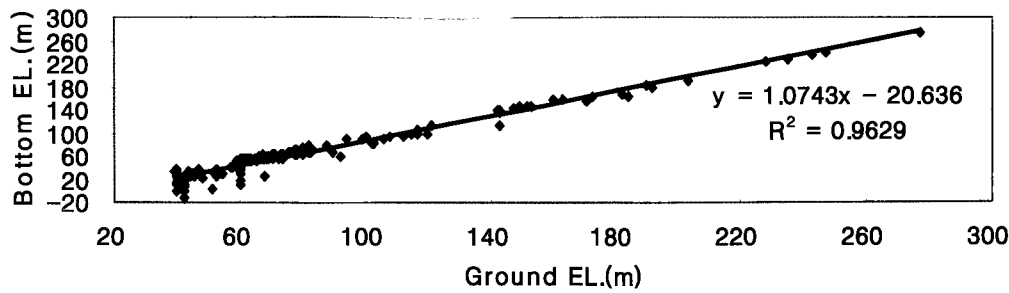


Fig. 4. Relationship of Ground Elevation and Bottom Elevation of Alluvial/Weathered Stratum

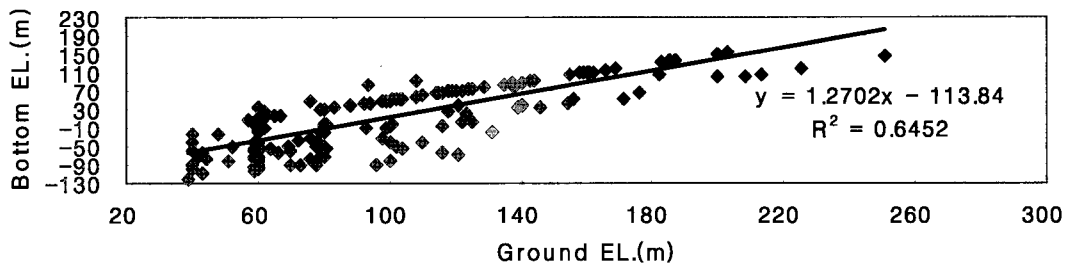


Fig. 5. Relationship of Ground Elevation and Bottom Elevation of Fractured/Rock Stratum

3.2 지하수 함양량

일반적으로 지하수 유동 모델의 입력 자료인 함양량은 지하수 개발가능량이라는 개념과 비교되면서 기저유출 방법, 물수지 방법 등과 같은 다양한 방법에 의하여 7.8%~18%로 산정되었다(박창근, 1996). 하지만 본 연구에서 사용된 지하수 함양량은 상기 방법과 접근 방법에서 차이가 있다. 실제 함양된 지하수는 유동 특성에 따라 하천과 상호작용을 보이며 지표수로 유출되거나 혹은 지하수체계로 유입될 수도 있다. 그리고 하천으로 유출된 물은 지하수가 아닌 지표수의 기작에 따라 유동 특성을 달리한다. 이런 물순환 특성을 고려하여 기저유출에 상대적으로 영향을 크게 미치는 일반적 의미의 지하수 함양량과는 다른 의미로 순 지하수 함양량을 입력 자료로 사용하였다. 이런 개념과 유사하게 해안지역의 지하수 개발가능량 평가에 있어, 하천으로의 기저유출을 제외하고 순수하게 대수층을 통하여 유동하는 지하수에 국한시킨 유효 지하수 함양량에 대하여 해안유출량 개념을 이용하여 울진 지역 및 3대강(낙동강, 영산강·섬진강, 금강) 권역에 적용 평가한 연구도 있다. 이 연구 결과에 따르면 기저유출을 제외한 대수층을 통한 지하수 유동량은 3대강 권역에서 약 2.3%, 울진지역에서 약 4.5%로 평가된 바 있다(홍성훈 등, 2003; 한수영 등, 2006). 따라서 하천 경계가 사용되는 본 연구에서는 검·

보정된 준분포형 강우-유출 모델(김정곤 등, 2006b)에 의하여 평가된 유출 성분 중 지하수 침투량에서 하천수로 유출되는 지하수 유출량을 제외한 침투량을 지하수 순 함양량으로 가정하고 공간적으로 분포시킨 소유역별 지하수 순 함양량을 경계조건으로 적용하였다. 요컨대 상기 조건은 지하수 이용량의 시·공간적 변동성이 고려되지 않은 상황에서, 지하수 유출량이 총적/풍화층과 파쇄/암반층으로 구성된 상부 지하수 유동층의 지하수 이용과 하천으로 유출된다는 가정에서 성립된 것이다.

3.3 하천

갑천 유역의 32개 하천 중 24개 하천(3대 하천 및 21개의 지방 2급 하천)에 대한 하천수위, 하상저층고, 하폭, 하상저층의 물성치 등은 ①금강수계 하천정비 기본계획(대전지방 국토 관리청, 2002), ②3대 하천 시설물 안정성 검토 및 방재대책 수립 보고서(대전광역시, 2000), ③한국하천일람(건설교통부, 2005), ④국가 수자원관리 종합정보 시스템(WAMIS), ⑤갑천, 유등천 하천정비 및 시설물 개보수공사 - 실시설계보고서(대전광역시 하천관리사업소, 2004) 자료를 통하여 수집, 분석하였다. 24개의 하천은 MODFLOW의 하천유수추적 패키지(Stream flow routing package)를 이용하여 경계조건으로 지정되고 이를 위하여 49개의 하천 분할부분(Segment)과 1369개의 하천 구간(Reach)으로 나누어

지하수 유동 모델 구축에 적용되었다(Fig. 6). 수위관측소를 포함하는 하천 분할부분의 수위는 수자원관리 종합정보 시스템 자료의 관측기관 평균수위를 사용하였고, 기타 하천 분할부분의 수위와 하천 정보는 보고서에 수록된 조사 자료를 이용하였다.

3.4 지하수 유동 모델 구축

3.4.1 지하수 유동 개념 모델

갑천 유역의 지하수 유동 모델은 전술하였던 지형, 수계, 지질, 대수층 구조 및 특성, 물순환 주요 결과 등의 유역 특성을 최대한 반영하여 구축하였다. 구축된 유동 모델은 x, y 방향으로 각각 200m 균일 격자로 공간 이산화 되었고, z방향은 대수층과 하천과의 연계 및 광역 지하수 유동 평가를 위하여 충적/풍화층 및 파쇄/암반층으로 구성되는 상부 지하수 유동층과 기반암층으로 구분되는 하부 지하수 유동층의 2개 층으로 이산화되었다. 격자망에 의하여 차분화된 셀의 개수는 66,300개이고, 절점의 수는 100,566개이다(Fig. 7). 유역 경계는 수자원 단위 유역을 기준으로 No-flux 경계로 설정하였다. 비록 이 설정이 경계 내·외로의 지하수 유동 가능성을 배제하고, 지하수 함양이 하천으로 집중되게 할 가능성을 내포하고 있지만, 본 연구에서는 유역 경계가 지하수 분수령이라는 가정 아래 상기 조건을 사용하였다. 하천은 하천 유수추적이 가능한 Stream 경계

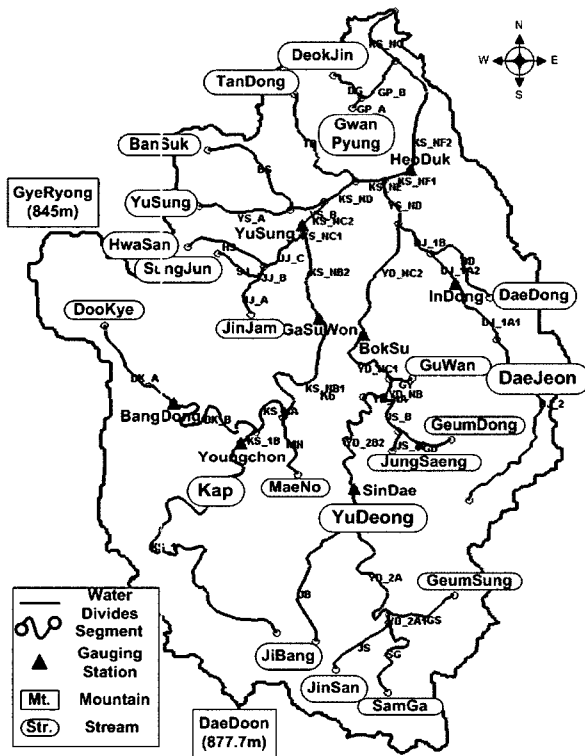


Fig. 6. Stream Segment

그리고 검·보정된 준분포 모델(SWAT)의 결과를 이용한 Recharge 경계를 사용하였다. 초기조건은 모든 활성 셀이 지하수에 의하여 포화된 상태로 주었고, 지배방정식은 Layer-Property Flow(LPF)를 사용하여 차분화하고, Solver는 Geometric Multigrid (GMG)를 사용하였다.

3.4.2 지하수 모델 보정

정상상태 지하수 유동 모델은 86개의 현장 관측 지하수위의 평균값을 이용하여 보정되었다. 보정 대상 매개변수는 수리전도도와 지하수 순 함양량을 이용하였다. 모델 보정은 지하수 순 함양량의 경우 검,보정된 유출 모델의 결과로 수리전도도에 비하여 신뢰성이 높은 것으로 판단하여 우선 조사된 대수층의 수리전도도 범위 내에서 1차 보정 작업을 수행하고, 산정된 지하수 순함양량을 토대로 2차 보정 작업을 수행하였다. 갑천 유역 내 86개 관측정에서의 지하수 수위와 모의 결과를 비교한 결과 결정계수(R^2)가 0.99로 분석되었다. 또한 조사된 관측정의 평균 수위차의 범위가 0.902m~3.595m, 최대 수위차의 범위가 0.003m~5.457m로서, 계산 수위 및 관측 수위의 평균 오차 1.159m, 절대 평균 오차 3.144m, RMSE 4.05m 그리고 약 4.5%의 상대오차는 구축된 모형이 갑천 유역의 지하수 흐름을 신뢰성 높게 모의하는 것으로 평가되었다.(Figs. 8 and 9).

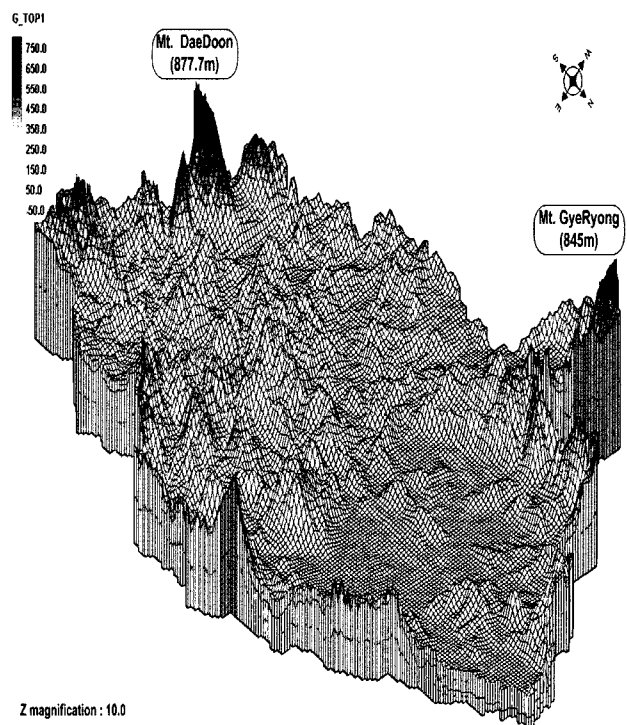


Fig. 7. Regional Groundwater Flow Model

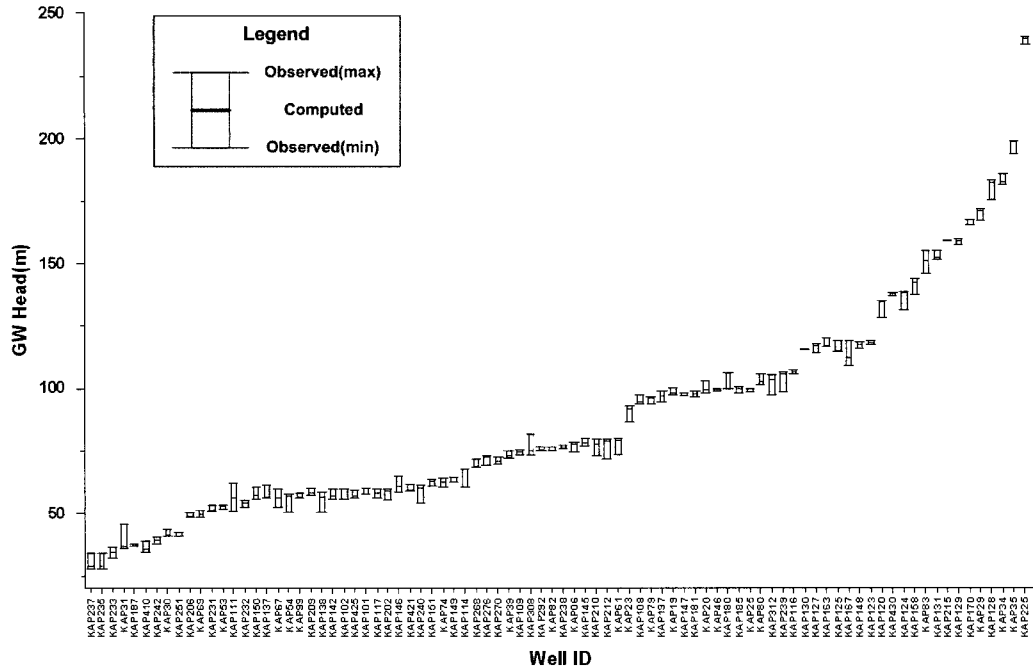


Fig. 8. Computed GW Head Vs. Range of Observed GW Head

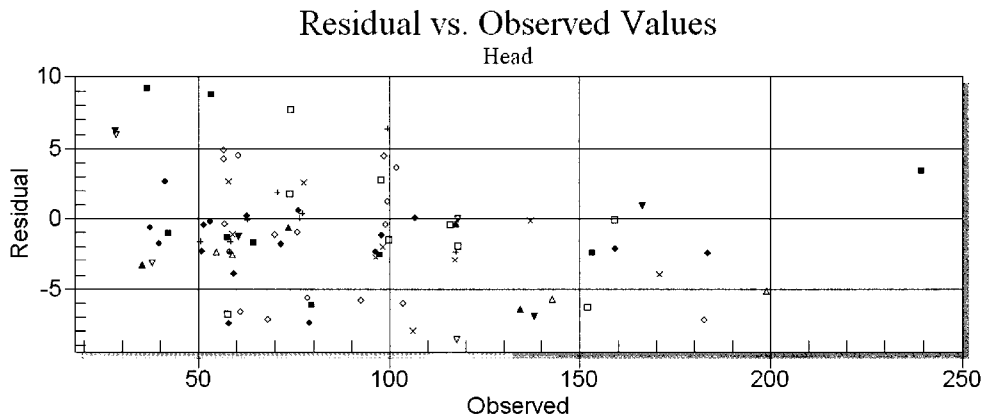


Fig. 9. Residual Distribution of Computed and Observed Values

3.4.3 추정된 매개변수

조사된 미고결 퇴적층의 수리전도도의 범위는 $5.0 \times 10^{-3} \sim 204.8 \text{ m/day}$, 평균은 약 12.1 m/day 였고, 변성암·화성암 지역은 $4.0 \times 10^{-3} \sim 5 \times 10^{-1} \text{ m/day}$, 평균은 약 $1.83 \times 10^{-1} \text{ m/day}$ 였다. 저유계수는 미고결 퇴적층이 0.032~0.052, 변성암·화성암 지역은 0.01~0.442였다. 모델 보정에 의하여 추정된 대수층 수리전도도는, 미고결층 퇴적층 지역이 2~6m/day, 변성암·화성암 지역이 $4.5 \times 10^{-5} \sim 8 \times 10^{-2} \text{ m/day}$ 이고 전체 평균값은 $5.7 \times 10^{-1} \text{ m/day}$, 표준편차는 $8.8 \times 10^{-1} \text{ m/day}$ 이다. 하부 지하수 유동층의 수리전도도 분포는 $1.0 \times 10^{-5} \sim 9.0 \times 10^{-3} \text{ m/day}$ 이고, 평균값은 약 $8 \times 10^{-3} \text{ m/day}$, 표준편차는 $1.4 \times 10^{-3} \text{ m/day}$ 이다. 또한 수리전도도 이외의 대수층 수리지질 매개변수들은 저유계수와 대수층 특성을 고려하여, 상부 및 하부 지

하수 유동층의 비산출률은 각각 0.08~0.13과 0.05 그리고 두 층의 공급률은 각각 0.18~0.23과 0.15로 설정하였다(Fig. 10).

모델 보정에 의한 소유역별 강수량 대비 지하수 순 함양량의 분포는 평균 1.47%, 최소 0.02%, 최대 2.34%로 분석되었다(Fig. 11). 보정에 의하여 추정된 소유역별 지하수 순 함양량은 2000년에서 2004년까지 5년간의 갑천 유역 물순환 분석 주요 결과(김정근 등, 2006a)를 토대로 평가된 소유역별 지하수 평균 순 함양량에서 2번~9번, 16번~17번 소유역은 10%~30%, 15번 유역은 80%의 감소된 양이다. 이는 순 함양량이 수정된 소유역 대부분 지형경사 및 토양 특성에 의한 토양층 포화 투수계수가 상대적으로 큰 산지지역으로 물순환 성분 중에서 측면 및 지하수 유출을 통한 하천 유출이 모델

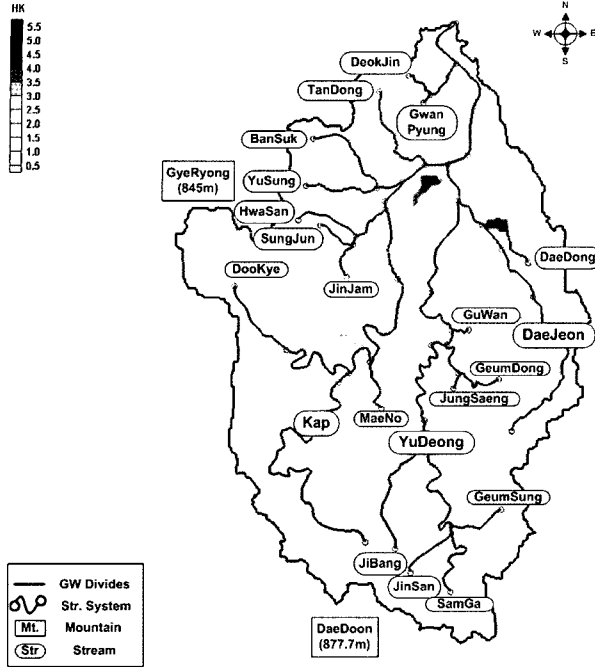


Fig. 10. Distribution of K(m/day)

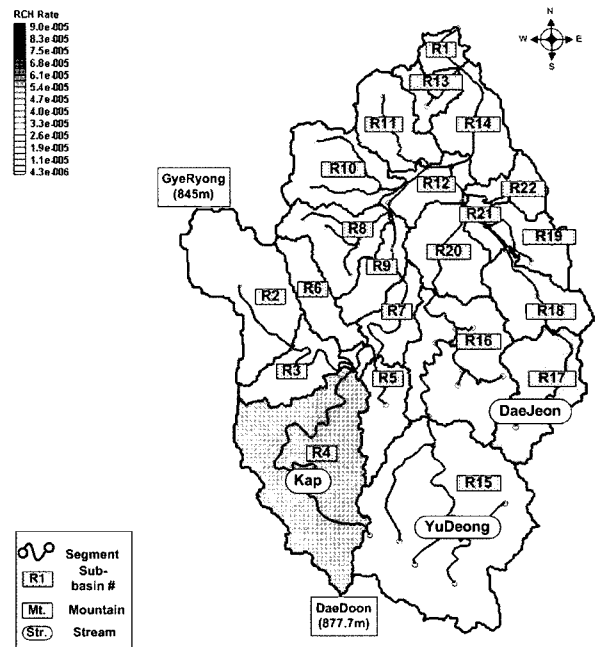


Fig. 11. Distribution of R(m³/day/m²)

에서 평가되는 양보다 더 클 수 있음을, 역으로 산정된 지하수체계로의 함양량이 더 작을 수 있음을 의미한다고 판단된다. 그리고 동일한 산지지역임에도 불구하고 4번 유역에 비하여 15번 유역의 감소 비율이 컸던 이유는 앞에서 기술한 산지지역의 특성 뿐 아니라 15번 유역의 지하수 우동 체계와 관련이 큰 것으로 판단된다. 유출 모델의 경우 물순환 성분들이 타유역으로 전달되지 않고 최종적으로 분할된 소유역의 1개 출구 지점으로 유출되는 집중형 모델이다. 그런데 물순환 성분들 중에서 지하수 유출량 및 지하수 함양량 등의 성분들은 지하수 유동체계를 따라 타 소유역으로 전이될 수 있는 가능성이 있다. 즉, 유출모델 결과를 이용하여 산정된 지하수 순 함양량 이외에 광역지하수 유동체계에 의하여 타 유역에서 15번 소유역으로 유입되는 지하수(Figs. 12 and 13)로 인하여 이 유역의 대수층이 유동시킬 수 있는 양보다 많은 유입량이 설정된 것으로 추정된다.

4. 광역 지하수 유동 평가

4.1 지하수위 및 유속 분포

갑천 유역의 지하수위는 약 26m~346m의 분포로 나타났다. 전반적인 지하수 흐름 방향은 유역 남쪽에서 북쪽으로 향하나 지형적인 영향과 유역 내 하천들의 영향을 받아 산지지역에서 평지지역인 대전광역시로 집중된다.

그리고 산지지역 중 표고가 상대적으로 높은 곳은 지하수위가 상부 지하수 유동층보다 아래에 분포하는 것으로 분석되며, 수위가 형성된 부분은 모델에서 하천으로 지정된 곳 또는 저지대인 계곡에 해당된다. 즉, 지하수 유동 모델이 산지지역에서 저지대를 따라 지하수위가 형성되는 것을 적절히 모의하는 것으로 판단된다. 지하수 유속 분포는 지역적으로 그리고 상부 및 하부 유동층의 유속 차이가 커서 벡터 크기를 조정하였다. 상부 유동층은 도심 부근에서, 하부 유동층은 산지지역에서 지하수 유동이 빠르다. 이는 상부 유동층의 경우 비록 평지 지역의 수두경사가 산지지역에 비해 작지만, 대수층 수리전도도가 크기 때문에 형성되는 것으로 판단된다. 그리고 하부 유동층의 경우 차이가 크지 않은 수리전도도보다는 수두 경사에 영향을 받아 산지지역 유동이 빠른 것으로 평가된다(Figs. 12 and 13).

상부와 하부 유동층 전체의 유속 벡터 평균 크기는 약 19m/day이고, 표준편차는 약 71m/day이다. 유속 벡터 분포를 살펴보면 계룡산 부근의 지하수는 두계천 방향 유속이 우세하나 지형·지세를 따라 동북쪽으로는 지하수 흐름이 많아 보이며 이는 진잠천과 유성천 방향의 영향을 가진다. 그리고 대둔산 부근 유역경계 지하수는 남에서 북으로 향하나 지표표고가 낮은 지역으로 유하하면서 서쪽의 갑천과 동쪽의 유등천으로 분기되며, 금산 부근의 지하수는 대부분 유등천으로 유향을 가지고 있다. 동쪽 경계 부근의 산지지역은 지형적 영

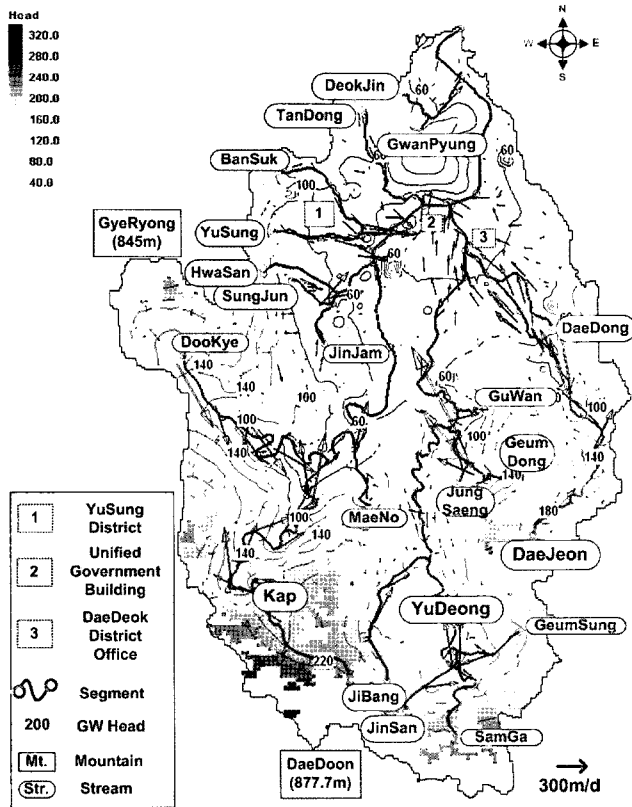


Fig. 12. Distribution of GW Head and Velocity on Upper Layer (Scaling Ratio : 5)

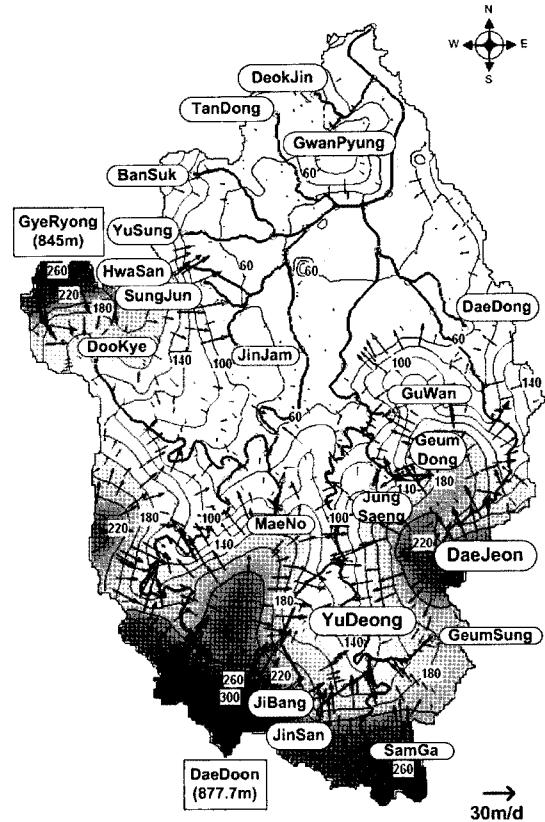


Fig. 13. Distribution of GW Head and Velocity on Lower Layer (Scaling Ratio : 50)

향에 의하여 방사 형태의 유향을 보이며 유등천 및 유등천 지류와 대전천으로 유하하는 것으로 판단된다.

Fig. 14는 지하수 유동 단면선을 나타낸 것이고, Figs. 15 and 18은 갑천대교, 둔산대교를 기점으로 한 x, y축 방향의 지하수 유동 단면도이다. 갑천대교 중심의 y방향 단면을 살펴보면, 남쪽의 지방천 부근의 지하수는 광역지하수 유동계를 따라 갑천 중류부를 지나 갑천대교 부근의 갑천으로 유하하는 것으로 판단된다. 또한 x방향 단면을 살펴보면 서쪽의 유성천 부근 지하수가 갑천으로 유하하며 갑천대교 하부를 지나서 갑천 동쪽의 유등천과 상호 연계되고 있는 것으로 판단된다 (Figs. 15 and 16). 둔산대교 중심의 y단면을 살펴보면, 남쪽의 삼가천, 진산천 부근의 지하수가 유등천 상, 중류부를 지나 둔산대교가 있는 갑천으로 유동한다. 또한 x방향 단면을 보면 서쪽의 반석천 주위의 지하수 유동도 갑천과 상호 연계되고 있음을 알 수 있다(Figs. 17 and 18).

요컨대 대전 3대 하천은 갑천 지역의 광역지하수 유동과 상호 연계되고 있을 뿐 아니라, 지방 2급 하천들 역시 지하수체계와 국가 및 지방 1급 하천과 지하수 유

동체계를 통하여 상호 연계되고 있음을 알 수 있다.

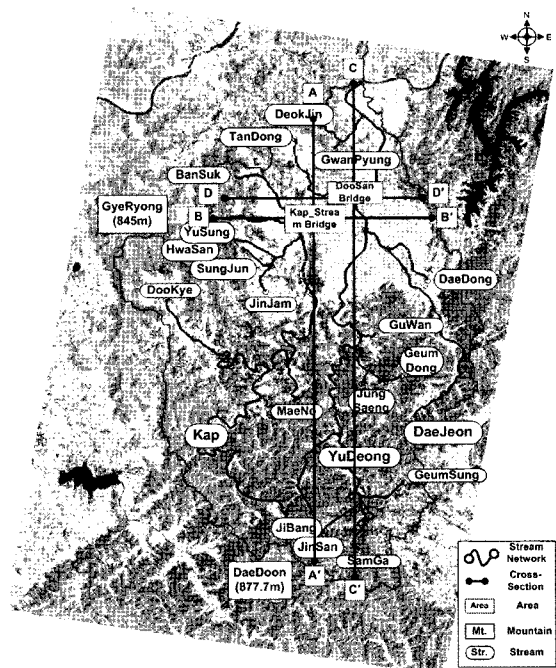


Fig. 14. Cross-Section Lines for GW Flow Analysis

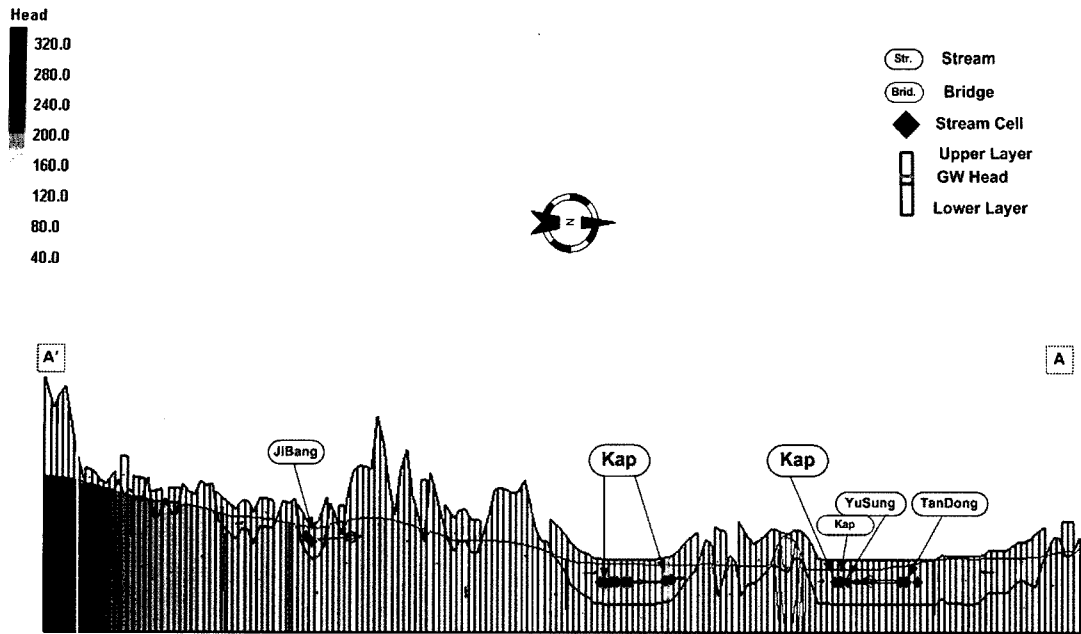


Fig. 15. Cross-Section(A-A') Centering Around Kap-stream Bridge(S.R : 10)

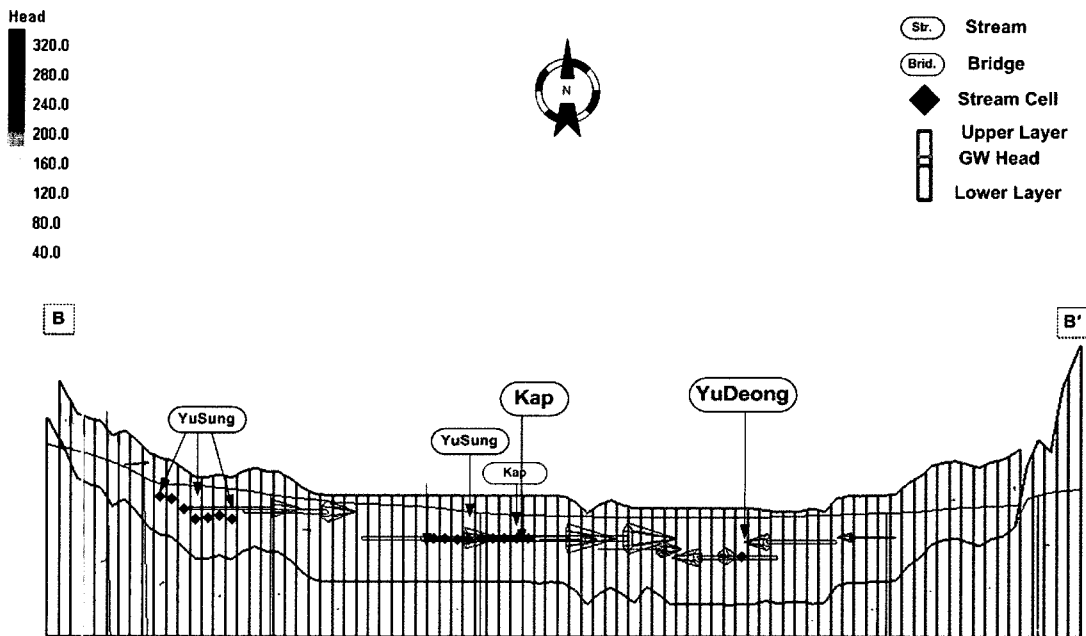


Fig. 16. Cross-Section(B-B') Centering Around Kap-stream Bridge(S.R : 10)

4.2 지표수-지하수 상호 작용

유역 전체의 지하수 물교환량 중 지하수 함양을 통한 지하수체계로의 유입율은 61.7%, 하천을 통한 유입율은 38.3%이고, 물 교환량의 상대오차율은 0.57%이다. 소유역 내 하천과 지하수의 상호작용의 정량적 평가를 위하여 소유역별 지하수 물교환량을 분석하였다(Fig. 19).

유입 성분 중에서 지하수 함양이나 하천보다 지하수 유동 체계에 의해 인근 소유역으로부터 해당 소유역에 유입되는 지하수 이동량이 더 높은 비율을 차지하는 소유역들은 1, 7, 8, 9, 12, 15, 16, 18, 19, 20, 21, 22번의 12개 소유역이다(Table 1). 이들 소유역의 유출량 비율을 살펴보면, 지하수 유동체계를 통한 타 소유역으로의 유출보다 하천으로 유출되는 비율이 높은 소유역은 1, 7, 8, 9, 12, 15, 16, 18이고, 지하수 유동체계를 따라 타

소유역으로 유출되는 비율이 높은 소유역은 19, 20, 21, 22번이다. 전자에 언급된 소유역들 중 15, 16, 18번 소유역을 제외한 나머지 소유역은 갑천 중, 하류 지역에 분포한다. 즉, 지하수 유동 체계에 따라 북쪽에서 남쪽으로 유하하던 지하수가 대전광역시 서쪽지역인 갑천 중, 하류 부분에서 하천수로 유출되는 특성을 보인다. 그리고 후자에 언급된 19, 20, 21, 22번 소유역은 대전광역시 동쪽 지역을 유하하는 대전천 및 유등천의 중, 하류 지역으로 비록 하천으로의 유출이 발생하지만, 지

하수 유동 체계에 따라 갑천과 유등천의 합류지점으로 유출하는 특성을 나타낸다. 이런 광역지하수 유동 특성은 갑천과 유등천의 합류지점인 12번 소유역의 하천구간이 약 94%의 유출율을 보이는 이득하천을 형성시키며 하천수가 지하수와 긴밀히 상호작용하고 있음을 보여준다. 그리고 지하수 유동 특성에 따라 15, 16번 소유역은 유등천, 18번 소유역은 대전천 중, 상류 부분의 하천을 유지하는 것으로 판단된다.

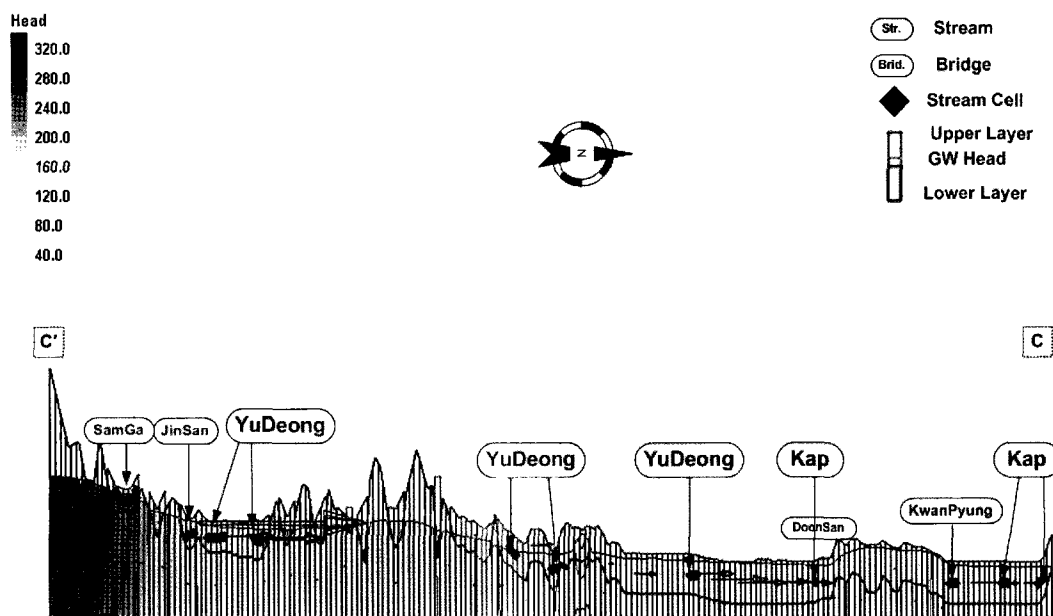


Fig. 17. Cross-Section(C-C') Centering Around DoonSan Bridge(S.R : 10)

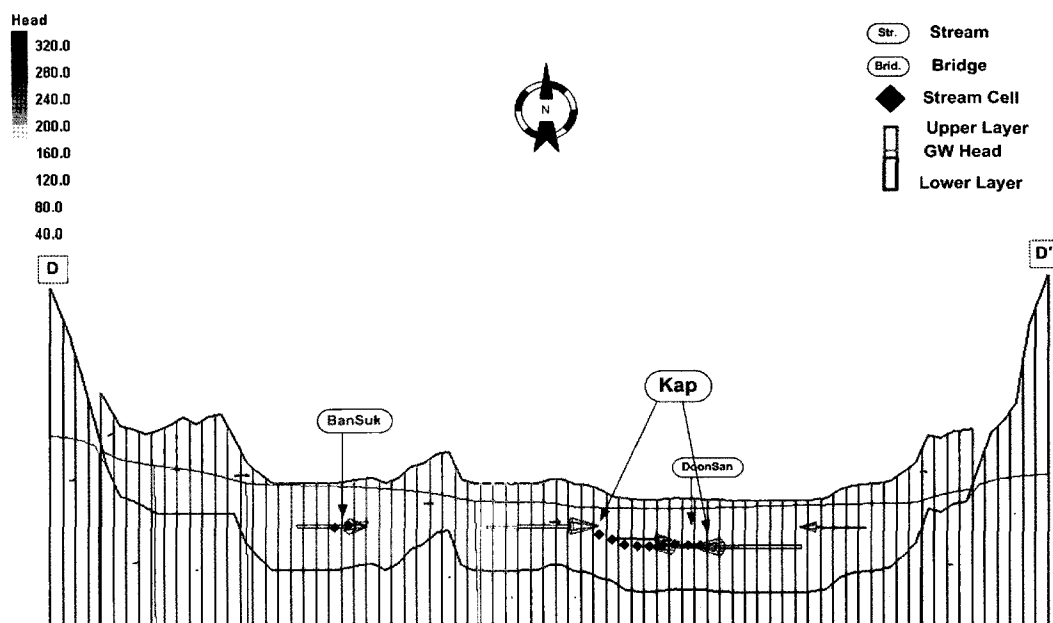


Fig. 18. Cross-Section(D-D') Centering Around DoonSan Bridge(S.R : 10)

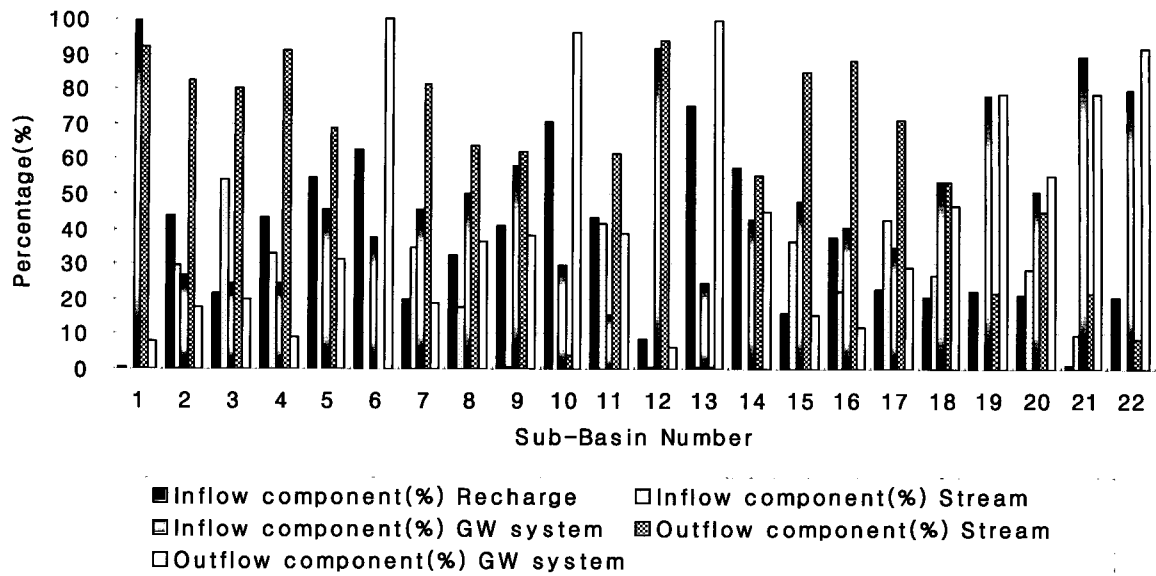


Fig. 19. Groudwater Budget in Sub-Basin

Table 1. Groudwater Budget in Sub-Basin Where Inflow is Highly Supported from Adjacent Groundwater System

Sub-Basin	Inflow Component(%)			Outflow Component(%)		Discrepancy(%)
	Recharge	Stream	GW system	Stream	GW system	
1	0.7	0.0	99.3	92.0	8.0	2.3E-02
7	19.8	34.8	45.4	81.0	19.0	2.9E-02
8	32.3	17.5	50.2	63.8	36.2	3.1E-01
9	41.2	0.6	58.2	61.7	38.3	4.3E-05
12	8.5	0.3	91.2	93.8	6.2	6.6E-02
15	15.8	36.3	47.9	84.8	15.2	1.8E+00
16	37.5	22.2	40.3	88.2	11.8	2.4E+00
18	20.3	26.4	53.3	53.2	46.8	2.2E-02
19	21.9	0.0	78.1	21.5	78.5	4.7E-04
20	20.9	28.4	50.7	44.8	55.2	9.3E-01
21	1.3	9.8	88.9	21.7	78.3	4.8E-03
22	20.5	0.0	79.5	8.3	91.7	1.6E-02

Table 2. Groudwater Budget in Sub-Basin Where Inflow is Highly Supported from Groundwater Recharge

Sub-Basin	Inflow Component(%)			Outflow Component(%)		Discrepancy(%)
	Recharge	Stream	GW system	Stream	GW system	
2	43.9	29.6	26.5	82.4	17.6	8.6E-02
3	21.8	53.8	24.4	80.2	19.8	3.1E-02
4	42.9	32.9	24.2	91.0	9.0	1.5E-02
5	54.3	0.0	45.7	69.0	31.0	9.2E-03
6	62.6	0.0	37.4	0.0	100.0	1.7E-06
10	70.2	0.0	29.8	4.1	95.9	6.3E-05
11	43.3	41.6	15.1	61.1	38.9	4.4E-03
13	74.9	0.7	24.4	0.7	99.3	1.1E-03
14	57.4	0.0	42.6	54.9	45.1	1.4E-02
17	22.8	42.4	34.8	70.8	29.2	4.8E-02

유입성분 중에서 타 성분에 비하여 지하수 함양 유입 비율이 높은 유역은 2, 4, 5, 6, 10, 11, 13, 14번의 8개 소유역이고, 하천수에 의한 유입 비율이 높은 유역은 3, 17번의 2개 소유역이다(Table 2). 이들 중에서 2, 4, 5, 11번 소유역은 하천으로의 유출 비율이 높으며, 6, 10, 13번 소유역은 하천 유출보다 인근 지하수 유동체계의 유출이 높은 유역이다. 2, 4, 5, 11번 소유역은 인근 유역의 지하수 이동량이 하천 상류 지역 유출에 기인하는 비율이 높은 15, 16, 18번 소유역과는 달리 이 소유역들은 해당 유역의 지하수 함양량이 타 유입 성분보다 영향이 큰 것으로 판단된다. 반면에 6, 10, 13번 소유역은 지하수 함양량이 하천 유출에 크게 기여하지 않고 타 소유역의 지하수 유동체계로 유출되는 특성을 보인다. 이 외에도 3번과 17번 소유역은 하천에 의한 유입수가 지하수로 유입되었다 다시 하천으로 유출되는 특성을 보이는 것으로 판단된다.

Fig. 20은 갑천 유역 및 대전 3대 하천의 합류 지점 부근에서 지하수와 하천의 상호 작용을 도시한 것이다. 전반적으로 산지지역에 소재한 하천들은 지하수와 하천수가 서로 교환되면서 이득 및 손실하천의 형태를 보이고 있지만, 주요 하천의 합류 지점인 12번 소유역의 경우 인근 지하수 유동 체계로부터 유입되는 유입량 비율이 91.2%이며, 이 유입량은 하천으로 유출되는 유출량 비율이 93.8%인 전형적인 이득하천을 이루고 있다. 12번 소유역의 유입, 유출 성분 구성은 Table 3에 제시되었다. 지하수 유동 체계로부터의 유입량 중 10번 소유역 비율이 가장 크며, 20번과 11번 소유역 순이다. 이는 4.1절에서 논의된 지하수위 및 광역지하수 유동 특성과 연관성이 큰 것을 알 수 있다. 즉, 지하수위 및 지하수 유속 등 지하수 유동 특성이 하천과 지하수 상호작용 평가 및 연계운영 시 고려해야할 중요한 인자 중에 하나임을 추정할 수 있다.

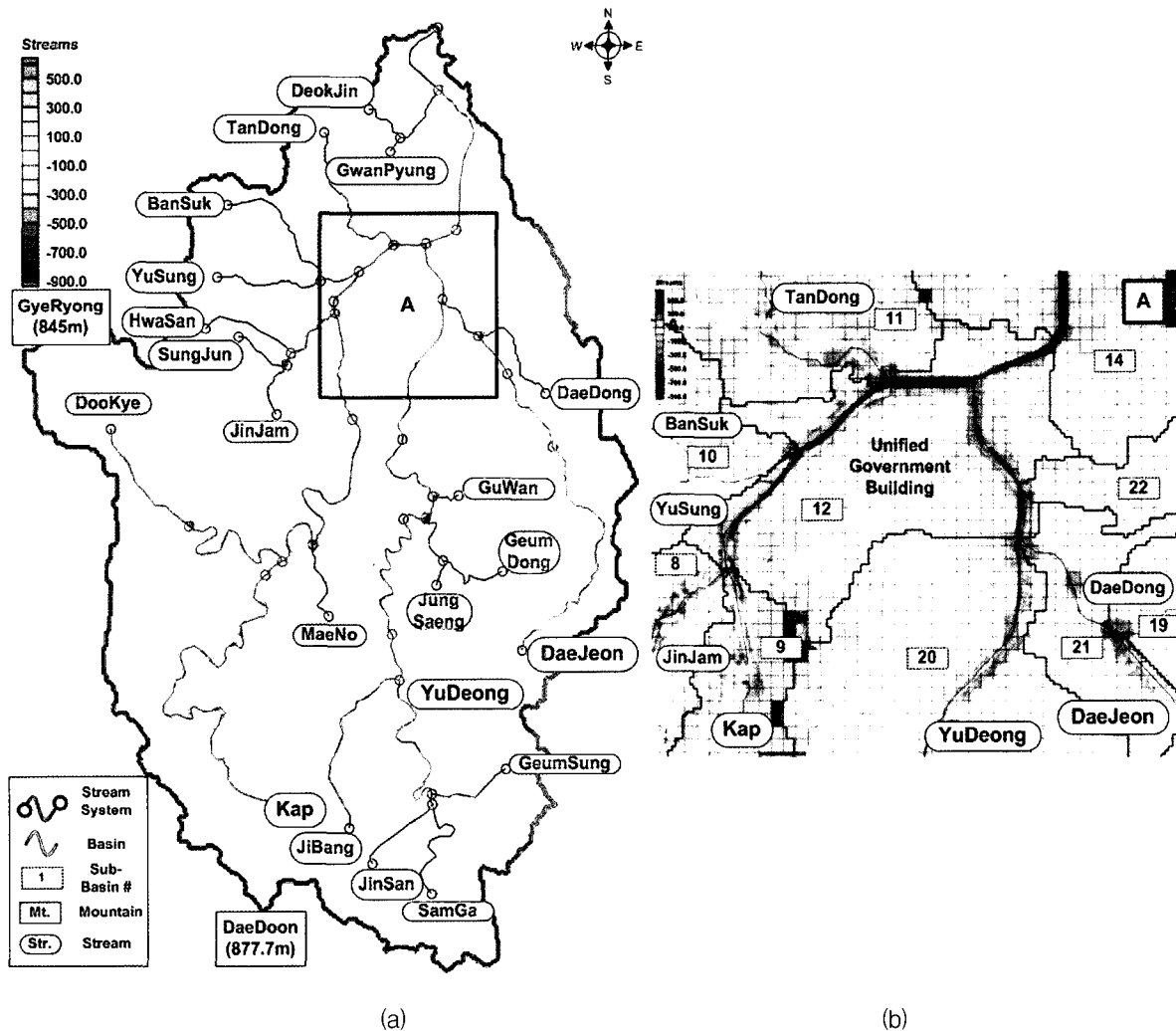


Fig. 20. Distribution of Gaining/Losing Streams(Green : Gaining Stream, Red : Losing Stream) (a) in the Whole Basin and (b) near the Junction of Major Streams

Table 3. Groudwater Budget in Sub-Basin No. 12

Source & Sink	Inflow Component(%)	Outflow Component(%)
Stream	0.3	93.8
Recharge	8.5	0.0
Sub-Basin	91.2	6.2
8	6.8	0.4
9	1.3	0.1
10	25.1	0.8
11	14.9	0.3
14	10.8	2.3
20	17.6	0.1
21	5.4	0.0
22	8.1	2.0
Lower Aquifer	1.2	0.2

5. 주요 결과 및 결론

갑천 유역의 광역 지하수 유동 특성 파악을 위하여, 438개의 관정 자료, 32개의 하천 중 24개의 하천 정보와 검·보정된 SWAT 모형의 주요 결과인 지하수 함양량 등 가용한 모든 자료를 분석하여 유역의 대수층 특성, 수리지질 특성, 수문학적 특징들을 최대한 지하수 유동 모델 구축에 적용하였다. 이를 토대로 갑천 유역의 광역지하수 유동 특성과 더불어 지하수와 하천과의 상호작용에 대한 정량적 평가를 수행하였다. 주요 결과는 다음과 같다.

- 1) 갑천 유역의 충적/풍화대 층의 평균 두께는 15.7m 이고, 파쇄/암반층의 평균 두께는 87.6m로 분석되었다. 또한 충적/풍화대의 바닥표고와 지표표고와의 상관관계식은 $y=1.0743x-20.636$ ($R^2=0.96$)로 높은 상관성을 보였다. 파쇄/암반층의 바닥표고와 지표표고와의 상관관계식은 $y=1.2702x-113.84$ ($R^2 = 0.65$)로 충적/풍화대보다는 상관성이 낮지만 신뢰할 수 있는 수준의 결과를 나타내었다.
- 2) 계산 수위와 관측 수위의 비교 결과 결정계수(R^2)는 0.99로 잘 일치하였다. 또한 관측된 지하수위의 변화 폭과 비교하면 발생한 오차는 신뢰할 수 있는 수준으로 판단된다.
- 3) 지형경사가 큰 산지지역 및 지하수 유동 체계에 따라 타 유역에서 지하수 유입량이 많은 소유역의 경우 이들의 상호관계를 고려하여 지하수 함양량을 추정해야할 것으로 판단된다. 이를 위해서는 궁극적으로 지표수, 지하수의 기작이 상호연동된 물리적으로 완전분포형 모형이 필요하다. 그러나 대

부분의 지표수 모형들이 집중형 및 준분포형 모형임을 감안할 때 지표수-지하수 상호작용 및 통합수자원관리 측면의 유역 물순환 분석을 위해서는 소유역 분할 시 지하수 유동 특성에 대한 고려가 필요하다. 즉, 본 연구에서 사용된 준분포형 유역 유출모형의 경우 기본적으로 지형 특성이 고려되고 사용자의 입장에서 하천 수계도, 검·보정을 위한 하천 수위 및 유량 측정 지점 등이 고려되거나 지하수 유동 특성은 고려되지 않는다. 따라서, 지표수-지하수 연계 및 유역 물순환 분석의 정확도를 제고하기 위해서는 소유역 분할 시 유역 경계에서의 지하수 유동량에 대한 불확실성을 최소화하기 위한 지하수 분수령에 대한 고려가 필요할 것으로 판단된다.

- 4) 갑천 유역의 지하수는 상부지하수 유동층을 따라 하천과의 상호작용에 의하여 유출되기도 하지만 대체로 유역 남쪽에서 상부 및 하부 지하수 유동층을 따라 유역 북쪽으로 유동한다. 또한 유역 서쪽(계룡산 부근) 부근의 지하수는 유동 체계를 따라 유성구 지역을 거쳐 갑천-유등천 합류 지대(12번 소유역)인 갑천대교-둔산대교 구간 및 정부청사 부근의 갑천으로 유출되는 것으로 평가되었다. 또한 유등천 및 대전천 상류 부의 지하수는 대덕구청 일대의 유등천-대동천 합류부를 경유하여 역시 갑천-유등천 합류지점의 갑천으로 유동하는 것으로 분석되었다. 따라서 12번 소유역 내 하천구간은 이런 광역지하수 유동 특성과 하천과의 상호작용에 의하여 갑천 유역에 함양된 지하수가 유출되어 형성되는 이득하천인 것으로 평가되었다.
- 5) 소유역별 지하수 물교환량을 분석한 결과, 대체

로 대전광역시 서쪽의 갑천 중,하류 지역은 광역 지하수 유동체계에 의하여 유입된 지하수가 하천으로의 유출되는 특성을 보이고 대전광역시 동쪽의 유등천, 대전천 유역은 이들 하천으로의 유출보다 지하수 유동 체계를 따라 이 지역들을 경유하여 갑천-유등천 합류지점으로 유하하는 것으로 분석되었다. 즉, 갑천 유역 내 국가 및 지방 하천들은 하천과 하천 혹은 하천-지하수는 광역지하수 유동체계를 통하여 상호 연계되고 있는 것으로 분석되었다.

본 연구에서는 현장 특성을 최대한 반영할 수 있는 자료 분석과 신뢰성이 높은 수문성분 결과를 토대로 갑천 유역의 광역 지하수 유동 특성 평가와 대전 3대 하천과의 상호작용에 대한 정량적 평가를 수행하였다. 연구 결과, 하천 유출 및 지표수-지하수의 상호작용에 있어 지하수 유동 특성이 이들 관계에 주요한 영향인 자임을 추정할 수 있었다. 본 연구의 결과는 향후 양수 등에 대한 지하수 분포 및 유동 특성의 변화와 이로 인한 하천과 지하수의 수리수문학적 상호작용에 미치는 영향 등 갑천 유역의 통합 수자원 관리와 하천 관리에 기초 결과로 활용될 수 있을 것이다. 또한 수문성분 및 지표수 유출모형과 연계되어 지표수-지하수의 시·공간적 특성 변화에 중요한 기초 결과로 활용될 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 수자원공사 수자원연구원 연구과제(과제번호 : KIWE-HEC-06-21, 과제명 : 지표수-지하수 상호작용 및 연계운영을 고려한 도시하천 유역의 물순환 분석) 및 21세기 프론티어연구개발사업인 수자원의 지속적 확보기술개발사업단의 연구비지원(과제번호: 1-6-3)에 의해 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- 건설교통부 (2004). **대전지역 지하수 기초조사 보고서**
- 건설교통부 (2005). **한국하천일람**
- 김남원, 정일문, 원유승 (2004a). “완전 연동형 SWAT-MODFLOW 결합모형 (I) 모형의 개발.” **한국수자원학회 논문집**, 한국수자원학회, 제37권, 제6호, pp. 499-507.
- 김남원, 정일문, 원유승 (2004b). “완전 연동형 SWAT-MODFLOW 결합모형 (II) 모형의 평가.” **한국수자원학회 논문집**, 한국수자원학회, 제37권, 제6호, pp.509-515.
- 김남원, 정일문, 원유승 (2005). “시공간적 변동성을 고려한 지하수 함양량의 추정 방안.” **한국수자원학회 논문집**, 한국수자원학회, 제38권, 제7호, pp.517-526.
- 김남원, 정일문, 원유승, 이정우, 이병주 (2006). “시공간적 변동성을 고려한 무심천 유역의 지하수 함양량 추정.” **지하수토양환경학회 논문집**, 한국지하수토양환경학회, 제11권, 제5호, pp.9-19.
- 김상준, 윤성용 (2005). “유역 물순환을 고려한 지하수 개발가능량 산출 연구 (I) -장기유출모형의 적용 및 분석-” **대한토목학회 논문집**, 대한토목학회, 제25권, 제1B호, pp.35-42.
- 김성준, 채효석 (2000). “격자기반의 토양수분추적에 의한 지하수함양량 추정기법 개발.” **한국수자원학회 논문집**, 한국수자원학회, 제33권, 제1호, pp. 61-72.
- 김정근, 여중현, 김우구 (2005). “하수처리수를 이용한 하천유지유량 확보에 따른 대전 3대 하천에서의 수질모의.” **2005년 한국수자원학회 학술발표회 논문집**, 한국수자원학회, pp. 1373-1377.
- 김정근, 손경호, 노준우, 장창래, 고익환 (2006a). “SWAT 모델을 이용한 갑천 유역에 대한 수문 특성 분석 및 도시화 영향 평가.” **한국수자원학회 논문집**, 한국수자원학회, 제39권, 제10호, pp. 881-890.
- 김정근, 손경호, 노준우, 장창래, 고익환 (2006b). “갑천 유역을 대상으로 SWAT 모형의 다 변수 및 다 지점 검·보정.” **한국수자원학회 논문집**, 한국수자원학회, 제39권, 제10호, pp. 867-880.
- 김중훈, 박진욱, 김형수(2000). “Application of MOD-FLOW to Jun stream basin in Donghae city” **한국수자원학회 논문집**, 한국수자원학회, 제33권, 제 S1호, pp. 394-399
- 대전광역시 (2000). **3대 하천 시설물 안정성 검토 및 방재대책 수립 보고서**
- 대전광역시 하천관리사업소 (2004). **갑천, 유등천 하천 정비 및 시설물 개보수공사 - 실시실계보고서**
- 대전지방 국토 관리청 (2002). **금강수계 하천정비 기본계획**
- 권형중, 임혁진, 박남식, 김성준 (2005). “유역의 지형 및 토양특성을 고려한 지하수 개발량 평가.” **대한토목학회 논문집**, 대한토목학회, 제25권, 제1B호, pp. 19-25.
- 문상기, 우남철 (2001). “누적 강수량과 지하수위 곡선을 이용한 지하수 함양률 추정 기법.” **지하수토양환경학회 논문집**, 한국지하수토양환경학회, 제6권, 제1호, pp.33-43.

- 박기중, 정상욱 (2004). “농촌 소유역에서 지하수 유동 모형의 매개변수 민감도 분석.” **한국수자원학회 논문집**, 한국수자원학회, 제37권, 제8호, pp.687-693.
- 박창근 (1996). “우리나라 지하수 개발가능량 추정: 1. 개념 정립과 기법의 개발.” **지하수환경학회 논문집**, 한국지하수토양환경학회, 제3권, 제1호, pp.15-20.
- 배상근 (2005). “지하수함양량 산정을 위한 NRCS-CN 방법의 적용성.” **대한토목학회 논문집**, 대한토목학회, 제3권, 제1호, pp.93-109.
- 심병완, 정상용, 김희준, 성익환 (2002). “수리동역학적 모델링에서 분산지수에 따른 해수침투 범위의 변화.” **한국지하수토양환경학회지**, 한국지하수토양환경학회, 제7권, 제4호, pp.59-67.
- 안상도, 김경호, 정영훈 (2000). “초정지역의 지하수 유동해석.” **지하수환경학회 논문집**, 한국지하수토양환경학회, 제7권, 제3호, pp.133-140.
- 안중기, 이용두, 황종환 (2006). “격자기반의 토양물수 지방법에 의한 지하수함양의 공간분포 추정.” **지하수토양환경학회 논문집**, 한국지하수토양환경학회, 제11권, 제1호, pp. 65-76.
- 이동률, 구호본 (2000). “강우량과 지하수위를 이용한 지하수 함양특성 분석.” **한국수자원학회 논문집**, 한국수자원학회, 제33권, 제1호, pp. 51-59.
- 이학수, 한지영, 김경현, 김상현 (2001). “지표하 흐름을 고려한 개선된 TOPMODEL의 유출분석연구.” **한국수자원학회 논문집**, 한국수자원학회, 제34권, 제4호, pp. 403-411.
- 윤상훈, 박재현, 박창근 (2004). “지하담 운영시 발생하는 염수침입 저감기법에 관한 연구.” **한국수자원학회 논문집**, 한국수자원학회, 제37권, 제2호, pp. 97-108.
- 장창래, 김정근, 이광만 (2006). “도시하천의 공간이용 평가(갑천과 유등천을 중심으로).” **한국환경복원 녹화기술학회 논문집**, 제40권, 제10호, pp. 867-880.
- 정동국, 한영만, 이범희 (2001). “대전 노은·관저지구 개발에 의한 유출 변화 분석.” **한국수자원학회 학술발표회 논문집**, 한국수자원학회, pp. 395-400.
- 정영훈, 이충성, 김형수, 심명필 (2005). “갑천 유역의 빈도별 갈수유량에 따른 필요유량 산정.” **대한토목학회 논문집**, 대한토목학회, 제25권, 제2B호, pp. 97-105.
- 최윤영, 이순탁 (2000). “화산도서에서 유한차분법을 이용한 지하수 유동해석.” **한국수자원학회 학술발표회 논문집**, 한국수자원학회, 제33권, 제5호, pp. 611-622.
- 한국수자원공사 (2002). **금강권역 광역 지하수 조사 연구**, pp. 353-358.
- 한국수자원공사 (2005). **기술로드맵(Technology Roadmap) : Kick-off 워크샵**, 한국수자원공사, pp. 115-163.
- 한수영, 홍성훈, 박남식 (2006). “권역별 층적층 지하수의 해안 유출량 분포” **대한토목학회 논문집**, 대한토목학회, 제26권, 제1B호, pp. 1-6.
- 허창환 (2003). “MODFLOW를 이용한 터널의 지하수 유동해석.” **한국수자원학회 논문집**, 한국수자원학회, 제36권, 제1호, pp. 129-142.
- 홍성훈, 한수영, 박남식 (2003). “해안지역의 지하수 개발가능량 평가.” **대한토목학회 논문집**, 대한토목학회, 제23권, 제3B호, pp. 201-207.
- Arnold, J.G., Allen, P.M., and Bernhardt, G. (1993). “A comprehensive surface-groundwater flow model.” *Journal of Hydrology*, Elsevier, Vol. 142, pp. 47-69.
- Anderson. E.I. (2005). “Modeling groundwater-surface water interactions using the Dupuit approximation.” *Advances in Water Resources*, Elsevier, Vol. 28, pp. 315-327.
- Harbaugh, A.W., Banta, E.R., Hill, M.C., and McDonald, M.G. (2000). *MODFLOW-2000, The U.S. Geological Survey Modular Ground-Water Model - User Guide to Modularization Concepts and the Ground-Water Flow Process*, USGS.
- Harbaugh, A.G.(2005). *MODFLOW-2005, The U.S. Geological Survey Modular Ground-Water Model - the Ground-Water Flow Process*, USGS.
- McDonald, M.G. and Harbaugh, A.W. (1988). *Techniques of Water-Resources Investigations of the United States Geological Survey - A Modular Three-Dimensional Finite-Difference Ground-Water Flow Model*, USGS.
- McDonald, M.G. and Harbaugh, A.W. (1996). *User's Documentation for MODFLOW-96, an update to the U.S. Geological Survey Modular Finite-Difference Ground-Water Flow Model*, USGS.

(논문번호:07-28/접수:2007.03.26/심사완료:2007.06.07)