

갑천 유역의 지표수-지하수 상호작용 평가

Evaluation of Surface water-Groundwater Interaction for the
Kap-Stream Basin

홍성훈*, 김정곤**

Sung-Hun Hong, Jeongkon Kim

요지

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 22개 소유역의 지하수 함양량 결과를 3차원 지하수 유동 모델(MODFLOW)과 연계하여 갑천 유역의 광역 지하수 유동 특성을 평가하였다. 모의된 지하수위와 86개 지하수 관측정의 지하수위 비교에서 결정계수는 0.9918, 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 함양량, 지하수-지표수 상호 작용

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. 본 연구 대상 지역인 갑천 유역에 대한 최근 연구는 하천 관리, 지표 유출 모델을 이용한 물순환 분석 그리고 국부적인 지하수 유동 특성 평가는 이루어졌으나, 유역 전반의 지하수 유동 특성에 대한 평가는 이루어지지 않았다. 따라서 본 연구의 주요 목적은 갑천 유역의 통합 유역 물 관리 및 하천 복원 사업에 앞서 해당 유역의 광역 지하수 유동 특성 평가가 주요 연구 목적이이다.

지하수 유동 평가는 평가 목적, 평가 지역의 현장 특성 등에 따라 다양한 방법들이 선택, 적용되어질 수 있지만, 일반적으로 적용성을 고려하여 수치모델이 적용되어진다. 지하수 유동 평가에서 영역 내 지표수 특

* 정회원 · 한국수자원공사 수자원연구원, 연구원 · E-mail : wghsh72@paran.com

** 정회원 · 한국수자원공사 수자원연구원, 책임연구원 · E-mail : jkim@kwater.or.kr

정들은 실제 지하수의 광역적인 유동 특성을 반영하는 자연적인 특징일 뿐 아니라, 이를 설정하는 방법에 따라 모델 결과에 중요한 영향을 미칠 수 있기 때문에(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 지하수위 변동 특성, 기저유출 등에 의하여 함양량이 평가되지만, 이런 함양량은 지하수 모델 적용 시 유역 전체의 평균값 및 함양량의 범위에 대한 정보만을 제공하는 한계를 가지고 있다. 이런 연구들과 병행하여 수치모델을 이용한 지하수 함양량의 공간적 특성 평가 연구도 수행되었다. 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.

본 연구에서는 김정곤 등(2006) 준분포형 유출모형인 SWAT을 이용하여 평가된 22개의 소유역별 지하수 함양량 결과를 지하수 유동 모델과 연계하고 대전지역 지하수 기초조사 자료와 국가 지하수 정보센터 자료 등을 토대로 갑천 유역의 지하수 유동 모델을 구축하였다. 모형된 구축을 통하여 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

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 장방형 형상을 가진 유역이다(Fig. 1).

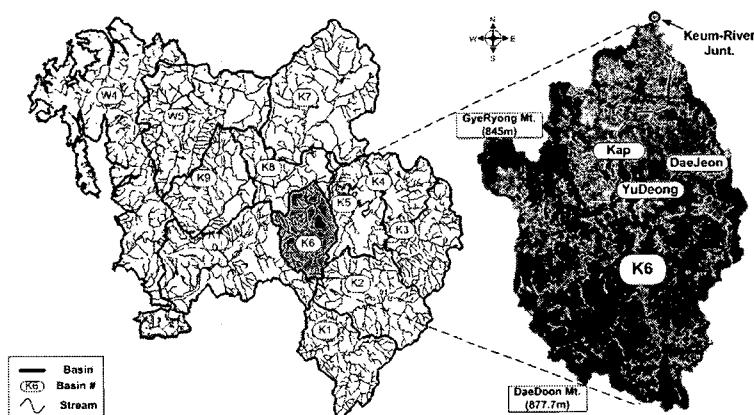


Fig. 1. Topography of Kap-stream Basin

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 암새토 및 산성암, 변성퇴적암 및 편암 종류(Ma, Mm, Mv)가 분포하며 도심지 및 하천 수계를 따라서는 층적토 종류(Af, An, Ap)의 토양이 분포하고 있다(김정곤 등, 2006). 지질은 5개의 수문지질단위(미고결 퇴적물, 석회암, 판입 화성암, 비단공질 화산암, 변성암)로 분류되며(한국수자원공사, 2002; 건설교통부, 2004). 유역 중심부 및 하천 주위는 미고결 퇴적물이, 중심부 외곽은 화성암과 변성암이 대부분 존재한다. 유역 내 주요 행정구역인 대전광역시에 신고된 관정 개수는 2004년 말 23,790개이나, 좌표정보, 대수총 구조, 대수총 특성, 현장 관측 자료의 유무를 고려하여 선택 분류되어 사용하였다. 모델 구축에 사용된 갑천 유역의 관정 자료 총 438개(총적/풍화층 226개, 파쇄/암반층

212개)이다. 대전지역 지하수 기초조사 보고서(이후 기초조사)(건설교통부, 2004)의 기본관측정 229개(총적/풍화층 43개, 파쇄/암반층 186개), 국가 지하수 관측정 3개(총적/풍화층 1개, 파쇄/암반층 2개), 장기자동 지하수 수위 관측정 9개(총적/풍화층 6개, 파쇄/암반층 3개), 대수성 시험정 5개(총적/풍화층 2개, 파쇄/암반층 3개) 자료와 국가지하수 정보센터(이후 GIMS)로부터 행정구역별 시추 및 쟁정자료 192개(총적/풍화층 174개, 파쇄/암반층 18개)를 입수하였다

3. 모형 구축

입수된 438개의 관정 자료 분석을 토대로 대수층 구조 및 특성을 분석하여 유역 대수층 구조를 평가하였다. 그리고 검·보정된 준분포형 지표 유출 모형에 의하여 평가된 소유역별 지하수 침투량(김정곤 등, 2006) 중 천부대수층을 통하여 유역 내 하천수로 유출되는 지하수(지하수 유출)는 하천 경계에 의하여 그 특성이 반영된다는 가정 하에 지하수 유출량을 제외한 침투량을 지하수 순 함양량으로 가정하고 공간적으로 분포시킨 소유역별 지하수 순 함양량을 경계조건으로 적용하였다. 갑천 유역의 32개 하천 중 24개 하천(3대 하천 및 21개의 지방 2급 하천)에 대한 하천수위, 하상 저층고, 하폭, 하상저층의 물성치 등을 기 조사, 보고된 자료를 최대한 수집, 분석한 결과를 하천유수주적 패키지(Stream flow routing package)에 적용하고 49개의 하천 분할부분(Segment)과 1369개의 하천 구간(Reach)으로 경계조건으로 지정하였다. 전술하였던 지형, 수계, 지질, 대수층 구조 및 특성, 물순환 주요 결과 등의 유역 특성을 최대한 반영하여 구축된 광역 지하수 유동 모형은 x, y 방향으로 각각 200m 균일 격자로 공간 이산화 되었고, z 방향은 대수층과 하천과의 연계 및 광역 지하수 유동 평가를 위하여 층적/풍화층 및 파쇄/암반층으로 구성되는 상부 지하수 유동층과 기반암층으로 구분되는 하부 지하수 유동층의 2개 층으로 이산화 되었다. 격자망에 의하여 차분화된 셀의 개수는 66,300개이고, 절점의 수는 100,566개이다. 또한 유역 경계는 No-flux 경계로, 초기조건은 모든 활성셀이 지하수에 의하여 포화된 상태로 주었고, 지배방정식은 Layer-Property Flow(LPF)를 사용하여 차분화하고, Solver는 Geometric Multigrid (GMG)를 사용하였다.

3.1 모형 보정

모형은 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)이 0.9918로 구축된 지하수 유동 모형이 갑천 유역의 지하수 흐름을 잘 모의하는 것으로 분석되었다(Fig. 2).

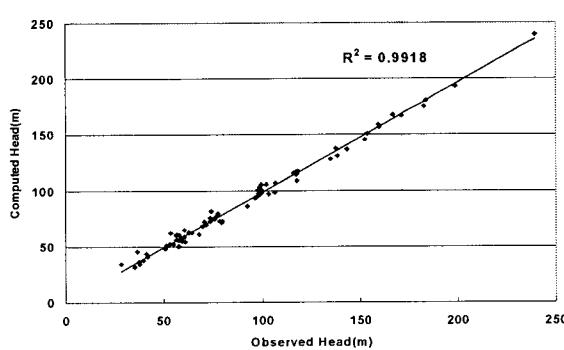


Fig. 2. Scatter Plot of Computed Vs. Observed Groundwater Head

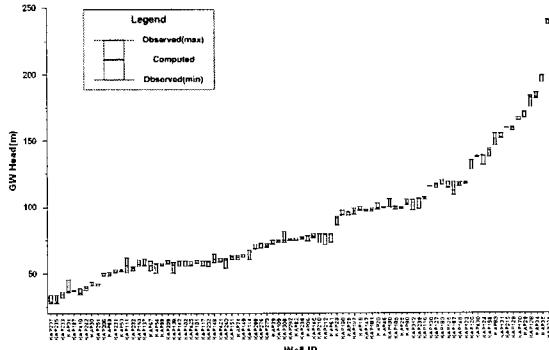


Fig. 3. Computed GW Head Vs. Range of Observed GW Head

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 오차는 3.144m, RMSE는 4.05m, 상대오차율은 약 4.5%는 신뢰성 있는 결과임을 알 수 있다(Fig. 3).

4. 지하수 유동 평가

4.1 지하수위 및 유속 분포

갑천 유역의 지하수위는 약 26m ~ 346m의 분포로 나타났다. 전반적인 지하수 흐름 방향은 유역 남쪽에서 북쪽으로 향하거나 지형적인 영향과 유역 내 하천들의 영향을 받아 산지지역에서 평지지역인 대전광역시 지역으로 집중되는 형태를 보인다. 또한 산지지역 중 표고가 상대적으로 높은 곳의 지하수위는 상부지하수 유동 층보다 아래에 지하수위가 분포하는 것으로 평가되었다. 산지지역 중 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. 그리고 지하수 유속 분포는 지형 및 지질 특성에 따른 수두경사와 대수층 특성에 따라 그 특성이 반영되는 것으로 평가되었다(Fig. 4).

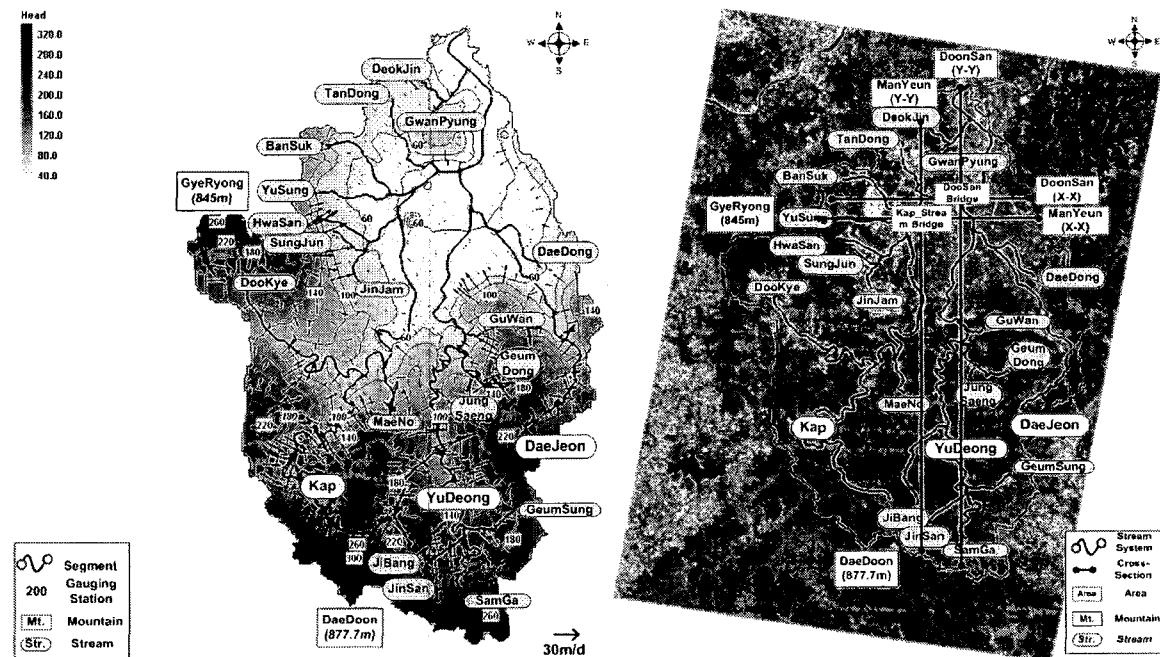


Fig. 4. Distribution of GW Head and Velocity on Fractured/Rock Layer (Scaling Ratio : 50)

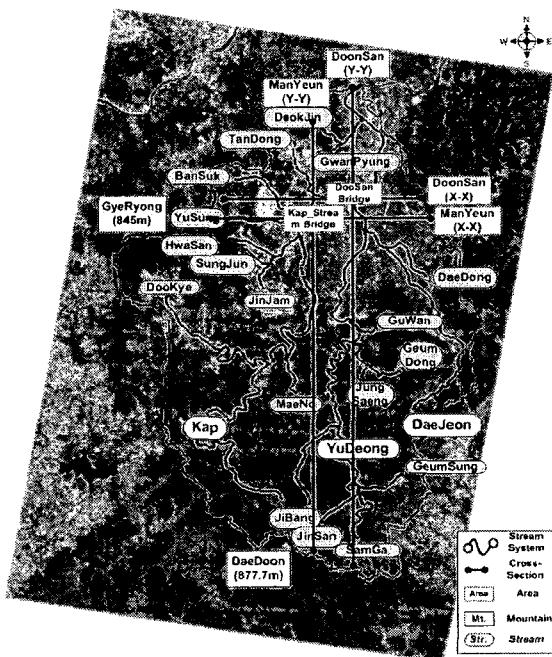


Fig. 5. Cross-Section Lines for GW Flow

Fig. 5는 지하수 유동 단면선을 나타낸 것이고, Fig. 6은 단면선 중에서 둔산대교 중심의 y 방향 단면(C-C') 상에서의 지하수 유동을 도시화 한 것이다. 유역 남쪽인 삼가천, 진산천 부근의 지하수는 하천과 지하수와의 상호 연계되면서 유동천 상, 중류부를 지나 둔산대교가 있는 갑천으로 유동한다.

4.2 지표수-지하수 상호작용

유역 전체의 지하수 물교환량 중 지하수 함양을 통한 지하수체계로의 유입율은 61.72%, 하천을 통한 유입율은 38.28%이고, 물 교환량의 상대오차율은 0.57%이다. 소유역 내 하천과 지하수의 상호작용에 대한 정량적 평가를 위하여 소유역별 지하수 물교환량을 분석한 결과, 광역지하수 유동 특성에 따라 하천 유출의 주요 공

급원이 다른 특성을 보였다(Fig. 7). 즉, 전반적으로 대전광역시 서쪽의 갑천 중, 하류 지역은 광역지하수 유동 체계에 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.

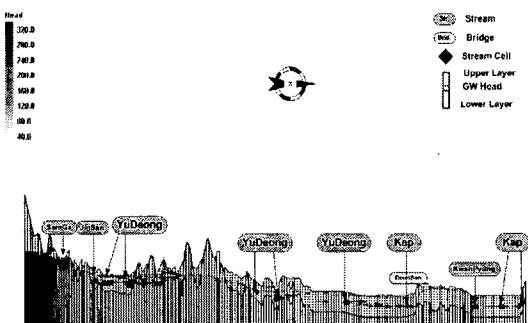


Fig. 6 Cross-Section(Y-Y) Centering Around DoonSan Bridge(S.R : 10)

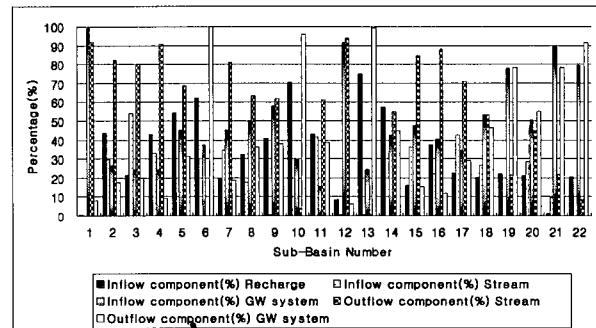


Fig. 7 Groudwater Budget in Sub-Basin

5. 결 론

본 연구는 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 평가가 이들 관계에 주요한 영향인자임을 추정할 수 있었다. 연구의 결과는 향후 양수 등에 대한 지하수 분포 및 유동 특성의 변화 그리고 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.

참 고 문 헌

- 건설교통부 (2004), 대전지역 지하수 기초조사 보고서
- 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.
- 김정곤, 손경호, 노준우, 장창래 (2006), “갑천유역을 대상으로 SWAT 모형의 다 변수 및 다 지점 검·보정.”, 한국수자원학회 논문집, 한국수자원학회, 제39권, 제10호, pp. 867-880.
- 한국수자원공사 (2002), 금강권역 광역 지하수 조사 연구, pp. 353-358.
- Anderson, E.I. (2005). "Modeling groundwater-surface water interactions using the Dupuit approximation." *Advances in Water Resources*, Elsevier, Vol. 28, pp. 315-327.
- 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.
- 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.