

분포형 유역 모델을 이용한 하천-지하수 상호작용의 시공간적

변동 해석: 영국 Tarland Burn 유역에 대한 사례 연구

Analysis of Temporal and Spatial Variations of Channel-Aquifer Interaction Using a Distributed Catchment Model: A Case Study for the Tarland Burn Catchment in the UK

구본경*

Bhon Kyoung Koo

Abstract

Channel-aquifer interaction is one of the key hydrological processes that determine water flows in the stream/river channel. Field measurements of channel-aquifer interaction, however, is very difficult and costly, particularly when one intends to understand its variations across a catchment for a long period. Hydrological simulations using a catchment model are a relatively easier and cheaper alternative provided the model structure is appropriate for describing channel-aquifer interaction. In this study, a catchment model called CAMEL (Chemicals from Agricultural Management and Erosion Losses) is used for estimating channel-aquifer interaction over time and space. CAMEL is a distributed catchment model to simulate transformation and transport processes of sediment and pollutants as well as water flows at the catchment scale. In the model, a catchment is represented using a network of square columns each of which is comprised of various storages of water. CAMEL explicitly simulates both surface and subsurface processes including channel-aquifer interaction. This paper presents an application study results of CAMEL for the Tarland Burn Catchment, a small (catchment area 52 km²) rural catchment in Scotland, UK, demonstrating some of the channel-aquifer interaction dynamics across the catchment during a 2-year period.

Key words: Channel-Aquifer Interaction, Distributed Catchment Model, CAMEL.

1. 서 론

일반적으로 강우시의 하천수는 대부분 지표에서 유출되는 강우유출수로 구성되며, 평시의 하천수는 인접 지역에서 유입하는 지하수가 그 대부분을 차지한다. 즉, 지하수는 평시 유량을 결정하는 가장 큰 요인 중의 하나로 작용하는 것이다. 유역의 수문학적 관점에서 볼 때, 하천수와 지하수는 하나의 연속된 물 순환 체계의 일부로서 상호 작용하기 때문에 그 중 어느 하나 만을 독립적으로 분석하는 것은 바람직하지 않다. 최근 물 관리가 유역 단위에서 이루어져야 한다는 주장이 구체적인 설득력을 얻고 있는 시점에서, 종합적 유역 관리를 위한 물수지 분석의 일환으로서 하천수와 지하수 사이의 상호작용 해석에 대한 요구가 늘어나고 있다.

그러나, 하천수와 지하수의 상호작용을 실측을 통하여 분석하는 것은 공간적 제약이 따를 뿐 아니라 많은 시간과 경비가 소요되는 바, 이것은 유역내에서 하천-지하수 상호작용의 공간적 분포

* 정회원 · (주)하이드로코어 유역환경연구부 · Email : bkkoo@hydrocore.co.kr

를 장기간에 걸쳐 파악하고자 할 때에 특히 그러하다. 이러한 문제점을 극복할 수 있는 하나의 대안으로서 분포형 유역모델링 기술은 지표수 및 지하수의 유동을 포함하는 유역내 수문현상을 입체적으로 해석할 수 있기 때문에 적은 비용과 노력으로 하천-지하수 상호작용의 시공간적 변동을 효과적으로 파악할 수 있다.

본 연구는 분포형 유역모델 CAMEL(Chemicals from Agricultural Management and Erosion Losses)을 이용하여 영국 Aberdeen 근교에 위치하는 Tarland Burn 유역에서 하천-지하수 상호작용의 시공간적 특성을 해석하고자 한다.

2. 연구방법

2.1 유역모델 CAMEL

CAMEL 모델은 대상 유역의 지표면을 정방형 격자로 분할하며 각 격자는 지하의 토양총과 대수총을 표현하기 위하여 정사각기둥의 형태로 정의된다. 모든 격자의 중앙에는 직사각형의 수로가 있어 작은 개울이나 하천을 표현하며, 하천 둑과 저수지, 댐이 정의될 수 있다. 각 격자는 주변의 격자 중 최대 7개의 상류 격자 및 1개의 하류 격자와 서로 연결된다.

CAMEL 모델은 식생, 토양, 대수총 및 수로 등 4개의 storage 내부 및 storage 사이에서 일어나는 주요 수문 현상을 분석적 기법 또는 수치해석 기법을 이용하여 1 - 24 시간의 계산간격으로 모의한다.

2.1.1 강우 차단 및 증발산

식생 성장곡선에 따라 변동하는 식생의 강우 차단용량에 근거하여 강우 차단량을 계산하며, Shettleworth(1993)에 의해 제안된 Penman 변형 방정식을 이용하여 잠재증발량 및 표준식생의 증발산량을 산정한다. 일반 식생의 증발산량은 표준식생의 증발산량(E_{rc})에 작물계수 및 토양수분제한요소를 적용하여 산정한다.

2.1.2 침투, 포화 및 강우 유출

CAMEL은 Green-Ampt 모델(Green and Ampt, 1911)의 Mein and Larson(1973) 수정식(식 1)을 이용하여 강우 침투량을 계산한다.

$$f = 1000k_{eff} \left[1 + \frac{S_f(\theta_{sat} - \theta)}{F} \right] \quad (1)$$

여기에서, f = 최대침투율(mm hr^{-1}), k_{eff} = 유효 수리전도도(m hr^{-1}), S_f = 습윤 선단부에서의 matric potential(mm), F = 누적 침투량(mm)이다. 강우강도가 최대침투율 보다 작을 때는 모든 강우량이 토양에 침투되는 것으로 가정하며, 강우강도가 최대침투율을 초과할 경우에는 연속치환 수치해석 기법을 이용하여 누적 침투량을 계산한다.

시간 강우량이 침투량을 초과하거나 토양층 전체가 포화되었을 때에는 강우 유출수가 발생한다. 강우 유출수를 비롯한 지표 유출수는 릴(rill) 시스템을 통해 하천으로 유출되는데, Gilley et al.(1990)의 연구 결과에 기초하여 지표면 폭 1 m마다 하나의 릴이 하천을 향하여 발달되어 있는 것으로 가정한다. 또한, 지표 유출수는 논, 밭의 둑 또는 하천 둑에 의해 흐름이 막히지 않는 이상 단위 시간 이내에 모두 하천으로 유출되는 것으로 가정한다.

2.1.3 대수층 충전

토양 함수량이 포장용수량을 초과하면 대수층 충전이 발생하는데, 토양층과 대수층의 수리전도를 동시에 고려한 storage routing 기법을 이용하여 충전량을 산정한다(식 2 및 식 3). 토양층 및 대수층의 수리전도도는 Van Genuchten(1980) 방정식을 이용하여 계산된다.

$$q_{sa} = 0.001 \cdot V_{ss} [1 - \exp(-\Delta t/t_T)] \quad (2)$$

$$Q_{sa} = \min \left(\frac{\sum q_{sa}}{\Delta t}, K_{sat} \Delta x^2 \right) \quad (3)$$

여기에서, q_{sa} = 토양층 체적 0.1 %에 해당하는 토양수분의 대수층 충전량(m^3), V_{ss} = 토양층 체적(m^3), Δt = 시간간격(hour), t_T = 토양수분이 대수층 상부까지 이동하는데 걸리는 시간(hour), Q_{sa} = 대수층 충전 총량 ($m^3 \text{ hour}^{-1}$), K_{sat} = 대수층 상층의 수리전도도($m \text{ hour}^{-1}$).

한편, 대수층 내부에서의 지하수 충전 역시 이와 유사한 방법으로 계산된다.

2.1.4 하천 루팅

Maidment(1993)에 의해 제안된 분산형 단위 수문곡선(spatially distributed unit hydrograph) 기법에 임의의 저수지 및 호수가 포함되도록 수정하여 적용함으로써 하천 루팅을 계산한다. 하천 수의 유동은 단위 시간 내에서 정상상태로 가정하여 Manning 방정식을 이용하여 유속을 비롯한 수리학적 매개변수들을 계산한다. 이러한 하천 루팅 기법을 개별 격자에 독립적으로 적용함으로써 유역내 모든 격자에서 하천수 유동을 해석한다.

2.1.5 지하수 유동 및 하천-지하수 상호작용

CAMEL은, 지하수 유동이 Darcian 흐름이라는 가정을 기초로 하여, 지하수 유동의 수평 성분만을 고려한 2차원 Boussinesq 방정식을 유한차분법으로 해석한다. 또한, CAMEL은 주어진 단위 시간에 하천수와 지하수의 수두 차이를 근거로 하는 Darcian 흐름을 산정함으로써 하천-지하수 사이의 상호작용을 모의한다. 주어진 격자에서 지하수위가 하천수위보다 높으면 하상을 통해 지하수가 하천에 유입되며, 그 반대인 경우에는 하천수가 대수층 충전에 기여하게 된다.

2.2 대상유역

본 연구의 대상유역인 Tarland Burn 유역(유역면적 52 km²)은 영국 스코틀랜드 북동부에 위치하는 전형적인 농업유역으로서, 표고 133 m - 660 m인 구릉지에 삼림(21 %), 초지(45 %), 농경지(25 %) 및 황무지(8 %) 등의 토지이용이 분포하고 있으며, 화강편마암 계열의 풍화된 암석층 위에 식양토, 사양토 및 충적층 토양이 발달해 있다.

Tarland Burn 유역에 CAMEL 모델을 적용하기 위해 100 m × 100 m 격자를 이용하여 수치고도 모델을 구성하고, Landcover of Scotland 1988(MLURI, 1993) 토지피복 DB 및 HOST(Boorman et al., 1995) 토양 DB를 이용하여 모델을 구축하였다. 한편, 유역 내부 및 인근의 4개 기상관측소로부터의 일별 기상 자료와 유역 출구에서 관측된 2년(1999.1.1 - 2001.1.1)간의 연속유량 자료를 이용하여 모델을 보정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 모델 보정

CAMEL 모델의 보정은 Tarland Burn 유역의 출구에서 관측된 2년(1999.1.1 ~ 2001.1.1)간의 연속유량 자료를 이용하여 수행되었다. 모델 보정 과정에서 수정된 주요 매개변수는 토양 및 대수 층의 수리전도도, 작물계수, 하천의 Manning 조도계수 등이며, 모델은 지하수위 초기조건에 매우 민감한 것으로 확인되었다. 모델 보정 결과는 그림 1에 나타낸 바와 같이 기저유량 및 첨두유량 모두를 비교적 잘 재현하는 것으로 판단된다(Nash-Sutcliffe 효율계수 $E_{NS} = 0.73$).

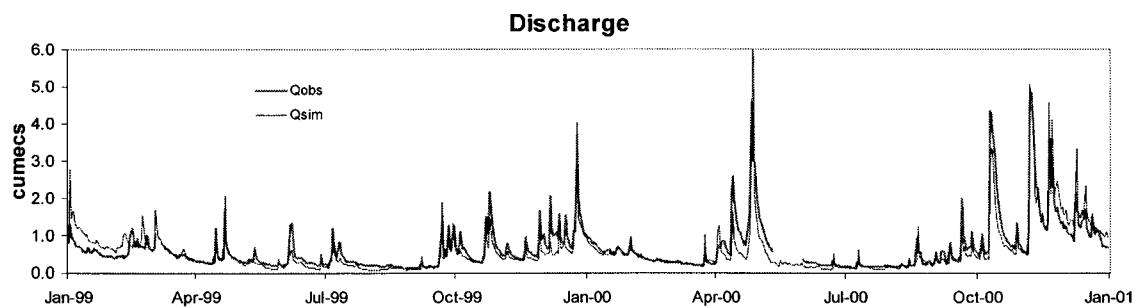


그림 1. 유역 출구에서의 수문곡선(청색 실선은 관측치이며 적색 실선은 모델 모의결과임)

3.2 하천-지하수 상호작용의 시공간적 변동

Tarland Burn 유역에서 하천-지하수 상호작용은 시간에 따라서, 또 유역내 위치에 따라서 변동하는데, 그림 2에 나타낸 바와 같이 지하수위가 낮은 상류지역에서는 항상 하천으로부터 대수층으로의 충전이 일어나며(격자 270과 403), 중류지역에서는 계절에 따른 지하수위 변동에 따라 하천-지하수 사이의 흐름이 번갈아 발생하고(격자 1306), 하류지역에서는 하천으로의 지하수 유입이 연중 지속적으로 일어나는 것으로 해석된다(격자 3139).

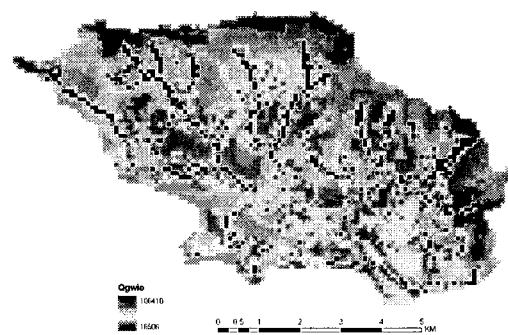


그림 3. 격자별 지하수 순유입량

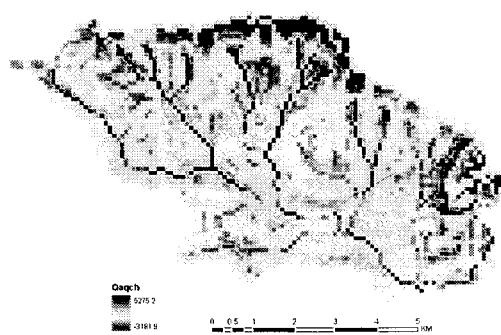


그림 4. 격자별 지하수의 하천 유입량

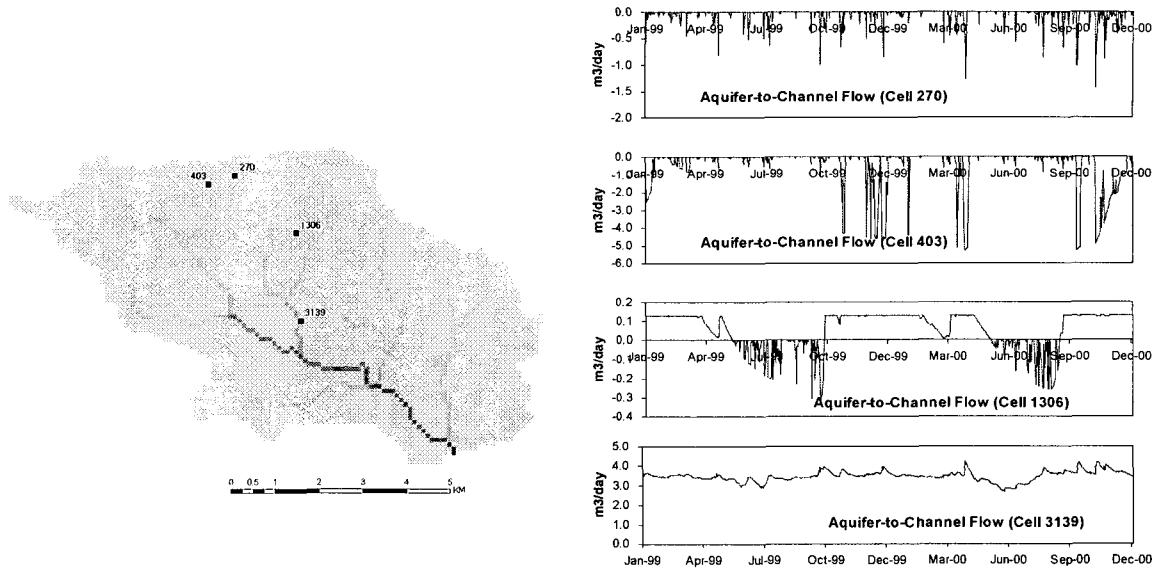


그림 2. Tarland Burn 유역내 4개 지점에서 하천-지하수 상호작용의 시간적 변동

그림 3은 모의기간 중 격자별 지하수 순유입량을 나타낸 것이며, 그림 4는 격자별로 지하수의 하천으로의 유입량을 나타낸 것이다. 이러한 모의 결과는 실측을 통해 검증된 것은 아니지만 유역 규모에서 지하수 유동 및 하천-지하수 상호작용의 공간적 분포를 해석하는 데에 유용한 기초 자료로 이용될 수 있을 것으로 사료된다.

4. 결 론

분포형 유역모델 CAMEL은 지표수 및 지하수 유동을 포함하는 유역의 수문현상을 입체적으로 모의할 수 있는 구조를 갖추고 있는 바, 영국 Tarland Burn 유역에 적용된 본 연구를 통하여 유역 규모에서 하천-지하수 상호작용의 공간적 분포를 해석하는 데에 유력한 도구로 이용될 수 있음이 확인되었다.

참 고 문 헌

- Boorman, D.B., Hollis, J.M and Lilly, A.(1995). Hydrology of soil types: a hydrologically-based classification of the soils of the United Kingdom, Institute of Hydrology Report No.126, Institute of Hydrology, Wallingford.
- Gilley, J. E., Kottwitz, E. R., and Simanton, J. R.(1990). Hydraulic characteristics of rills, Trans. ASAE 33(6): 1900-1906.
- Green, W. H. and Ampt, G. A.(1911). Studies on soil physics, 1. The flow of air and water through soils, J. Agric. Sci. 4, 11-24.
- Mein, R. G. and Larson, C. L.(1973) Modeling infiltration during a steady rain, Water Resources Research 9(2): 384-394.
- MLURI(1993). The Land Cover of Scotland 1988, Aberdeen, MLURI.
- Shuttleworth, W. J.(1993). Evaporation, In: Handbook of Hydrology, edited by: Maidment, D., McGraw-Hill, pp. 4.1 to 4.53.
- van Genuchten, M. Th.(1980). A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils, Soil Sci. Soc. Am. J., 44(5): 892-898.