

지표수-지하수 통합해석모형 SWAT-MODFLOW의 적용



김남원 >>>
한국건설기술연구원 선임연구위원
nwkim@kict.re.kr



정일문 >>>
한국건설기술연구원 연구위원
imchung@kict.re.kr

하지 못했던 것이다. 이와 같은 문제를 해결하기 위한 여러 방안 중 가장 우선적인 것은 지표수와 지하수를 연계 해석할 수 있는 장기 유출 모형의 구축이다. 이를 위한 모형 선택기준의 우선순위는 지표수와 지하수의 수리화학적 상호작용을 다루는 방식과 토지이용, 지표유출, 기후인자 등을 고려한 수문학적 영향을 검토할 수 있어야 한다는 점이다. 또한 지하수 거동의 경우 회귀수의 영향이나 기타 특성치의 공간분포를 설명할 수 있어야 한다. SWAT-K의 지표수-지하수 연계모듈인 SWAT-MODFLOW모형(김남원 등, 2004a; 김남원 등, 2004b; Kim et al., 2008)은 이러한 해석을 위해 개발되고 적용되었다.

1. 서론

과거의 수문순환 해석은 강우, 증발, 유출, 침투 등 각 수문성분에 대해 총괄적인 물수지 분석을 주로 수행함으로써, 물리적 기반의 정확한 수문성분해석이 어려웠다. 그러나 최근에는 물 순환과정의 불확실성을 최소화하려는 노력과 물리적 의미를 파악하려는 시도에 초점을 맞추어 물 순환 과정의 각 성분을 보다 면밀히 분석하고 있다. 특히 유출해석은 대부분 지표수 중심으로 행해지기에 지표하 유출 거동 특성이 상대적으로 간과되어 온 것이 사실이며, 이와 마찬가지로 지하수 유동해석에 있어서도 지표수 수문성분거동의 면밀한 분석결과를 반영하지 못했다. 따라서, 하천 주변의 지하수 이용에 따른 수리권 문제, 지하수 함양량 및 적정 개발량 산정 문제, 과도한 하도유출 문제 등 여러 가지 현안에 대한 명확한 해결점을 제시

2. SWAT-MODFLOW모형의 적용사례

1) 지하수 함양량의 시공간적 분포 산정

수문순환에서 대수층으로의 지하수 함양은 매우 복잡한 수문학적 과정으로, 강우의 빈도, 강도, 지속 시간 뿐 아니라 온도, 습도, 풍속과 지하수위 상부에 존재하는 토양 및 암반층의 특성과 깊이, 지표의 지형과 식생분포 및 토지이용과도 관련된다(Memon, 1995; 김남원 등, 2005). 따라서 지하수 함양량의 시공간적인 변동성을 정량적으로 추정하는 것은 효율적인 지하수 관리에 매우 필요한 사항이다.

국내외에서 적용되는 지하수 함양량 추정방법은 기저유출-감수곡선 분석법(Fetter, 1993)에 의한 추

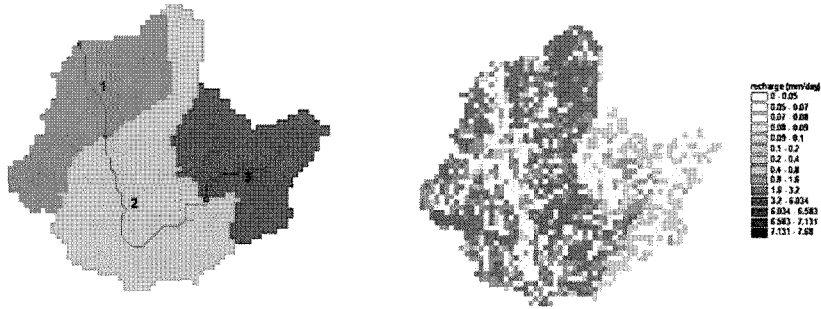


그림 1. 집중형 함양량과 분포형 함양량 산정의 개요

정방법이나 함양-배출의 기본가정이 연 기반이므로 1년 단위로 문제를 해결함으로써 계절성, 월별 변화등은 반영되지 못하는 단점이 있다. 또한 지하수 함양량은 기후조건, 토지이용, 관개와 수리지질학적 비균질성에 의해 현저한 시공간적 변동성을 나타내고 있어, 그림 1의 좌측에 나타낸 바와 같이 집중형 개념의 방법은 시공간적 분포상황에 관한 해석에 적합하지 않은 것으로 판단된다.

지하수 함양량을 추정하는 또 다른 대표적인 방법은 지하수위 변동곡선 해석법(Water-table fluctuation method: WTF)으로 이 방법은 Theis (1937)에 의해 처음 제시됐고 Sophocleous (1991)에 의해 그 장점이 부각됐으며, Winter 등(2000)에 의해 구체적인

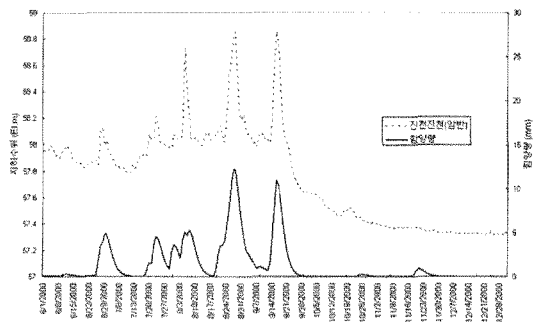


그림 2. 실제 관측 지하수위와의 상관성을 고려한 계산 함양량의 시계열의 예(진천)

적용이 수행됐다. 이 방법은 관측공의 수위 변화에 비산출율을 곱하여 실질적인 지하수 함양량을 계산하는데, 관측공의 변화에만 의존하므로 유역기반의 물수

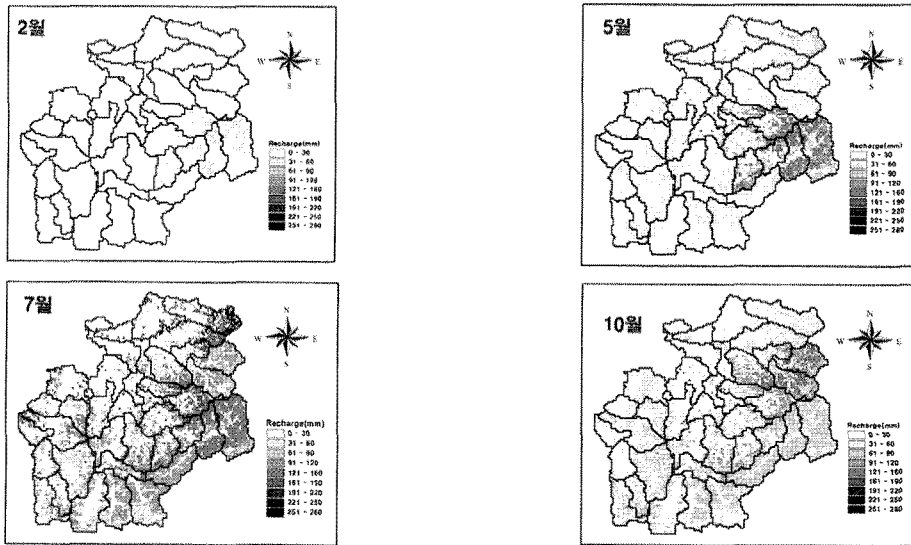


그림 3. 정읍지역의 월평균 지하수 함양량의 공간분포도(2001-2007)

지 관점에서는 제한적으로 적용될 수 밖에 없다.

이와 같은 단점을 극복하기 위해 SWAT-MODFLOW를 활용할 수 있으며, 유역물수지와 지하수위 변동을 동시에 고려함으로써 매우 정확한 함양량 산정을 할 수 있다(국토해양부, 2007). 다시 말하면 유역 출구점에서의 관측유량과 모의유출량의 적합을 수행하는 동시에 양질의 관측 지하수위 자료를 이용하여 그림 2에 나타낸 바와 같이 지하수 함양의 시계열과의 상관성이 최대가 되는 함양매개변수를 모델링을 통해 산정함으로써 지하수위 변동법의 특성까지 반영할 수 있다는 장점을 지닌다(정일문 등, 2007; Chung et al., 2010). 또한 함양량의 공간분포를 통해 지역적으로 매우 비균질한 분포를 보이고 연단위 함양량에서 찾아볼 수 없는 월별 함양특성이 확연히 나타내는 것을 볼 수 있다. 이러한 분포는 지형학적 요인, 토지이용 및 토지피복 조건에 따라 달라지는 것을 알 수 있다(그림 3).

이 방법을 이용하여 지금까지 청원, 청주지역(한국건설기술연구원, 2006), 여수, 양평, 안양지역(한국건설기술연구원, 2008), 정읍지역(한국건설기술연구원, 2009)에 대해 적용을 수행한 바 있으며 점차 전국적으로 적용을 확대해 나갈 예정이다.

2) 통합유출해석

▶ 경안천 유역

경안천 유역은 SWAT-MODFLOW의 첫 번째 시범유역으로 결합모형의 성능을 테스트하기 위해 1991년 유출량 자료에 대해서 검증을 시도했다. 모형 적용 결과 특히 갈수량의 적합결과가 향상되었다. 특히 갈수기에도 유출량이 급감하지 않고 실측유량에 접근하는 양상을 보이고 있음을 알 수 있었는데 이러한 차이는 근본적인 모형의 형태에 기인한다. 잘 알려진 바와 같이 SWAT 모형(Arnold et al, 1993)은 준 분포형 모형이며, 그 중에서 지하수 유출은 개념적(conceptual) 모형을 따르고 있다. 다시 말해서 갈수 시 지하수 유출성분은 지수함수적으로 감소하는

특성을 가진 식에 의존한다. 이럴 경우 갈수 시에는 급감하는 형태를 나타내므로 경안천과 같이 지하수 유출이 전체 유출에 큰 부분을 형성하는 경우에는 실제 관측치와 차이를 보일 수밖에 없다. 하지만 SWAT-MODFLOW의 경우는 SWAT 모형의 지하수 성분을 분포형 모형인 MODFLOW(McDonald and Harbaugh, 1988)로 대체하여 하천과 대수층간의 수위차이에 따른 물 교환량으로 지하수 유출량을 결정하므로 보다 현실적인 모델링 결과를 제시하고 있다(김남원 등, 2006).

▶ 무심천 유역

통합유출해석의 일환으로 SWAT-MODFLOW모형을 무심천 유역에 적용하여 유역단위의 수문과정을 재생하였다. 서로 다른 기간의 강수량이 하천유출, 침투, 함양, 지하수유출의 동적과정에 미치는 영향을 평가하였고, 강수량과 각 수문성분량간의 관계, 유역 특성의 비균질성에 따른 지하수 함양량의 시공간적 변동 등을 분석하였다. 특히 함양의 증감, 하천수위의 증감에 따른 지하수 유출의 변화를 나타내었고 우기에 하천에서 대수층으로의 물 유입의 발생으로 침예한 형태의 지하수 유출곡선이 나타남을 보였다. 기존의 지표수나 지하수 해석모형만으로는 모사할 수 없는 하천-대수층간의 시간적으로 변하는 경계유량을 고려한 유출해석이 가능해짐으로써 지하수 유출량을 포함한 총 유출량의 신뢰도를 높일 수 있음을 강조하였다(김남원 등, 2007).

▶ 안양천 유역

완전연동형 지표수-지하수 결합모형인 SWAT-MODFLOW를 안양천 유역에 적용하여 하천과 대수층의 상호작용의 범위와 강도를 분석하였다. 강우가 집중되는 우기에 하천수가 지하수로 유입되는 등 하천과 대수층간의 교환량의 방향이 일별로 변하는 현상을 모사하였고(그림 4) 공간적으로도 하천수위의 변화에 따른 상호 교환량의 영향 범위를 상류, 중류, 하류 대표 지역에 대해 산정하였다. 하류로 갈수록 하

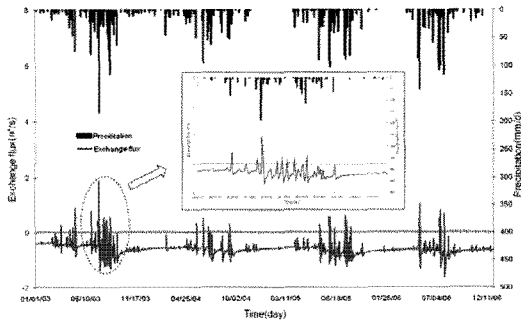


그림 4. 하천셀에서의 지표수-지하수 상호 교환량(일별) 산정 결과(2003-2006)

천-대수층간의 교환량의 영향 범위가 넓어지고 변동 폭은 작아지는 경향을 보여주었다(김남원 등, 2009).

▶ 제주 표선 유역

지표수-지하수 통합모형인 SWAT-MODFLOW의 본격적인 실증을 위해 함양, 지하수 이용, 해안 유출이 크게 발생하는 특이한 지역적 특성으로 수문해석이 난해한 제주 표선 유역에 대해 모형을 적용하여

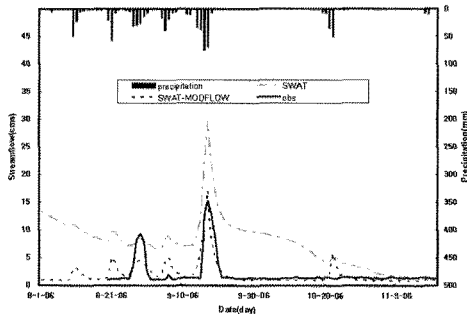


그림 5. 표선유역 유출량의 관측 및 모의치 비교

지표수 유출현상과 지하수 유동을 동시에 성공적으로 모의하였다(김남원 등, 2009).

3. 결론

국내에서 수행된 지표수-지하수 상호작용 및 연계 이용 분석에 관한 연구는 아직 그다지 활발한 편은 아니다. 본 연구에서 제시한 여러 가지 적용사례 역시 아직은 초기단계이고 모델링을 통한 가능성을 확인한 것이 큰 수확이라고 할 수 있다. 이러한 해석을 기반으로 보다 실용적이고 필수적인 연구들이 제시되어야 할 것이다. 예를 들면, 하천변 지하수의 이용 문제, 지하수의 개발가능량 산정방안과 같은 주제가 해당될 것이다. 본 고의 후속편으로 보다 창의적이고 실용적인 연구성과를 가까운 미래에 제시할 수 있을 것으로 기대한다.

사사

본 기사는 21세기 프론티어 연구개발사업인 수자원의 지속적 확보기술개발사업의 연구성과(과제번호 2-2-3)로서 연구비 지원에 감사드리며, 지하수 함양량 산정연구를 위한 국토해양부/한국건설교통기술평가원, 한국광물자원공사, 한국농어촌공사의 지원에도 감사를 드립니다. ☺

참고문헌

1. 국토해양부, 한국건설교통기술평가원 (2007) 우리나라 지역특성에 맞는 최적 지하수 함양량 산정기법 개발.
2. 김남원, 정일문, 원유승 (2004a). 완전 연동형 SWAT-MODFLOW 결합모형, (I) 모형의 개발. 한국수자원학회 논문집, 한국수자원학회, 제37권, 제6호, pp.499-507.
3. 김남원, 정일문, 원유승 (2004b). 완전 연동형 SWAT-MODFLOW 결합모형, (II) 모형의 적용. 한국수자원학회 논문집, 한국수자원학회, 제37권, 제6호, pp.509-515.
4. 김남원, 정일문, 원유승 (2005). 시공간적 변동성을 고려한 지하수 함양량의 추정방안, 한국수자원학회 논문집, 제38권, 제7호, pp. 517-526.

5. 김남원, 정일문, 원유승 (2006). 완전연동형 SWAT- MODFLOW 모형을 이용한 지표수-지하수 통합 유출모의. 대한토목학회 논문집, 대한토목학회, 제26권, 제5B호, pp. 481-488.
6. 김남원, 정일문, 이정우, 원유승 (2007). 지표수-지하수 통합모형을 이용한 무심천 유역의 수문과정 해석. 한국수자원학회논문집, 제40권, 제5호, pp.419-430.
7. 김남원, 정일문, 유상연, 이정우, 양성기 (2009). 제주 지역 지표수-지하수 연계 해석. 한국환경과학회지, 18(9), pp. 1017-1026.
8. 김남원, 유상연, 정일문, 이정우 (2009). 유역단위 지표수-지하수 상호작용의 시공간적 변동분석. 한국수자원학회 논문집, 42(1), pp. 21-31.
9. 정일문, 김남원, 이정우 (2007). 유역 유출과정과 지하수위 변동을 고려한 분포형 지하수 함양량 산정방안. 한국지하수토양학회 논문집, 12(5), pp. 19-32.
10. 한국건설기술연구원 (2006) 청원,청주 지역 지하수 함양량 산정 연구.
11. 한국건설기술연구원 (2008) 여수,양평,안양 지역 지하수 함양량 산정 연구.
12. 한국건설기술연구원 (2009) 정읍지역 지하수 함양량 산정 연구.
13. Arnold, J.G., Allen, P.M., and Bernhardt, G. (1993). A comprehensive surface groundwater flow model. *Journal of Hydrology*, Vol.142, pp. 47-69.
14. Chung, I. M., Kim, N. W., Lee, J. and Sophocleous, M. (2010). A new scheme for assessing distributed groundwater recharge rate by using integrated surface-ground water modeling. *Hydrogeology Journal*, Volume 18, Issue 5 (2010), Page 1253.
15. Fetter, C. W. (1994). *Applied Hydrogeology*, Prentice Hall.
16. Kim, N.W., Chung, I.M., Won, Y.S., and Arnold, J.G. (2008). Development and application of the integrated SWAT-MODFLOW model. *Journal of Hydrology*, Vol. 356, pp. 1-16.
17. McDonald, M. G. and A. W. Harbaugh. (1988). "A Modular Three-Dimensional Finite-Difference Ground-water Flow Model", U.S. Geological Survey Techniques in Water Resources Investigations Report Book 6, Chapter A1, p. 528.
18. Memon, B. A. (1995). Quantitative analysis of springs. *Environmental Geology*, Vol. 26, pp. 111-120.
19. Sophocleous, M. A. (1991). "Combining the soil water balance and water level fluctuation methods to estimate natural groundwater recharge : practical aspects." *Journal of Hydrology*, Vol. 124, pp. 229-241.
20. Theis, C. W. (1937). "Amount of groundwater recharge in the southern high plains.", *Transactions of the American Geophysical Union* 18, p. 564.
21. Winter, T. C., S. E. Mallory, T. R. Allen, and D. O. Rosenberry (2000). "The use of principal component analysis for interpreting groundwater hydrographs." *Ground Water*, Vol. 38, No. 2, pp. 234-246.