

# 기후변화 연동 지하수 함양량 산정 모델 개발 및 정책방향 고찰

이명진<sup>1)2)\*</sup>·이정호<sup>1)</sup>·전성우<sup>1)</sup>·홍현정<sup>1)</sup>

Review of Policy Direction and Coupled Model Development between  
Groundwater Recharge Quantity and Climate Change

Moung-Jin Lee, Joung-Ho Lee, Seong-Woo Jeon, Hyun-Jung Hong

1) 한국환경정책·평가연구원(Korea Environment Institute)

2) 연세대학교 지구시스템과학과(Dept. of Earth System Sciences, Yonsei University)

제 출 : 2010년 2월 9일

승 인 : 2010년 6월 11일

## 국 문 요 약

본 논문에서는 실질적인 기후변화에 따른 지하수 함양량 산정 모델 개발 및 관리방안을 마련하기 위하여 기후변화에 따른 지하수 함양량 변화를 산정하는 방법론을 제시하였고, 지리정보시스템을 활용하여 연구지역의 미래 시기별 지하수 함양량을 추정하였다. 이를 바탕으로 향후 기후변화에 따른 지하수 수자원 통합관리방안에 대한 정책적 사항을 제안하였다. 연구지역은 낙동강 본류를 포함하는 경상북도 칠곡군, 구미시 일부 및 대구시 북구 일부이며, 최종 연구결과는 미래 기후변화에 따른 시기별 강수량, 함양률, 함양량을 추정하였다. 함양량 및 함양률은 기후변화에 따른 강수량의 변화와 함께 변화하는 추세를 나타내고 있는 것으로 파악되었다. 본 논문에서는 기존의 기후변화와 지하수 함양량의 불명확한 관계를 정량적으로 분석하였으며, 미래 기후변화 예측 결과를 반영한 연구지역 내 지하수 함양률 변화를 시-공간적으로 산정하고, 기존 산정 결과와의 비교를 통해, 향후 기후변화를 고려한 국내 지하수 수자원의 관리방안 수립을 위한 방향을 제시하고자 하였다. 앞으로 연계모델의 고도화 방안 및 현장조사가 추가된다면 보다 정량적으로 기후변화와 지하수 함양량의 상관관계를 파악할 수 있으며, 향후 수자원으로 이용이 증가될 지하수의 전반적인 관리 및 효율적인 운영체제 구축을 위한 한 축을 차지할 수 있다는 점에서 중요성이 있다고 하겠다.

■ 주제어 ■ 기후변화, 지하수 함양량, 지리정보시스템, 함양률, 산정기법

## Abstract

Global climate change is destroying the water circulation balance by changing rates of precipitation, recharge and discharge, and evapotranspiration. The Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC 2007) makes "changes in rainfall pattern due to climate system changes and consequent shortage of available water resource" a high priority as the weakest part among the effects of human environment

\* 교신저자 : sr87sr86@kei.re.kr

\*\* 본 연구는 한국환경정책·평가위원회의 2009년도 녹색성장정책연구 중 「기후변화 연동 4대강 유역 지하수 함양 및 이용가능량 산정 기법 개발」의 지원으로 이루어졌으며 이에 감사를 드린다.

caused by future climate changes. Groundwater, which occupies a considerable portion of the world's water resources, is related to climate change via surface water such as rivers, lakes, and marshes, and "direct" interactions, being indirectly affected through recharge. Therefore, in order to quantify the effects of climate change on groundwater resources, it is necessary to not only predict the main variables of climate change but to also accurately predict the underground rainfall recharge quantity. In this paper, the authors selected a relevant climate change scenario, In this context, the authors selected A1B from the Special Report on Emission Scenario (SRES) which is distributed at Korea Meteorological Administration. By using data on temperature, rainfall, soil, and land use, the groundwater recharge rate for the research area was estimated by period and embodied as geographic information system (GIS). In order to calculate the groundwater recharge quantity, Visual HELP3 was used as main model for groundwater recharge, and the physical properties of weather, temperature, and soil layers were used as main input data. General changes to water circulation due to climate change have already been predicted. In order to systematically solve problems associated with how the groundwater resource circulation system should be reflected in future policies pertaining to groundwater resources, it may be urgent to recalculate the groundwater recharge quantity and consequent quantity for using via prediction of climate change in Korea in the future and then reflection of the results. The space-time calculation of changes to the groundwater recharge quantity in the study area may serve as a foundation to present additional measures for the improved management of domestic groundwater resources.

**Keywords** | Climate Changes, Groundwater Recharge, Geographic Information System(GIS), The Intergovernmental Panel on Climate Change(IPCC)

---

## I. 서 론

2009년 12월 덴마크 코펜하겐에서 개최된 제15차 유엔기후변화협약 당사국 총회에서는 세계 각 국가별로 구체적인 기후변화 대응 및 적응 방안이 논의되었다. 본 회의의 결과는 기후변화의 심각성 및 책임성을 이전보다 가일층 배가시키는 계기가 되었다. 또한 기후변화가 비단 지구환경의 변화에 국한되지 않은, 향후 세계의 정치, 경제, 사회, 산업 등 전 분야에 걸쳐 구조적인 변혁을 조속히 실시해야 한다는 우려를 전 세계가 모두 공감하게 되었다는 데 의의가 있다.

지구온난화로 대표되는 기후변화는 극대홍수 및 극대가뭍의 빈번한 발생으로 인한 인류 사회의 효과적 대응 및 적응을 실시하지 않으면 안되는 상황을 초래하게 되었다. 이에 가장 빠른 대응책을 마련해야 하는 분야로 '수자원 및 이수'를 지적하는 데는 논란의 여지가 있을 수 없다.

우리나라도 이러한 여건 변화에 부응하여 국가 차원의 수자원관리 패러다임을 전반적으

로 개편할 필요가 있다. 즉, 미래 우리나라의 기후사상 변화 예측 결과를 중-장기적 수자원 이용 및 관리에 관한 국가 제반 계획에 명확히 반영해야 하며, 이에는 지하수 수자원도 포함된다. 현재 우리나라의 연간 지하수 사용량은 약 37억 톤으로서, 전체 수자원 사용량의 10% 정도에 불과하나, 국내 전체 지하수 이용 가능량의 35%를 상회하고 있으며, 지역적 이용량의 차이가 큰 특징이 있다. 따라서 기후변화에 따른 강우 사상이 변할 경우, 계절적 또는 지역적으로 지하수 수자원의 적절한 이용이 난이할 수 있으며, 이는 2009년 초 동절기 가뭄에서 그 폐해를 충분히 겪은 예가 있다. 기후변화 예측 결과를 정확히 반영한 지하수 수자원 함양의 계절적-지역적 예측은 수자원의 부가적 확보 차원을 벗어나, 미래 기후변화 적응 측면에서도 시급히 수행하여야 할 과제이다.

지하수 수자원의 이수적 측면에서 기후변화와의 연관성 여부에 대한 발표도 최근 들어 이루어지기 시작했다. 김규범(2009)과 고경석(2009)은 금강 및 낙동강 수계의 갈수기 유지 유량의 약 30~40%가 지하수 기저유출에 의한 것임을 밝혀내었고, 가뭄 등 극한 기후 사상 일수가 증가할수록 기저 유출의 증가 및 그에 따른 지하수 이용에의 영향이 나타날 것으로 예견하였으며, 김규범(2008)은 전국적 국가지하수관측망의 지난 10년간 지하수위 감소 추세로 볼 때, 향후 20년간 약 0.58m의 지하수위 감소가 예측되며 이에 대한 이유로 과다 지하수 채수 및 기후변화로 인한 함양량 감소임을 정성적으로 추측하였다.

본 연구의 목적은 소유역 차원에서 기후변화에 의한 지하수 함양량 추정 및 산정 기법을 개발하고 이를 바탕으로 하는 실질적인 정책방향을 제시하는 것이다. 이를 위하여 첫째, IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change)에서 제공하는 기후변화 시나리오 중 지하수 함양량 산정에 필요한 적정 시나리오를 선정하였다. 둘째, 기후변화를 효과적으로 반영할 수 있는 지하수 유동 모델을 선정하였다. 셋째, 기후변화 자료와 지하수 유동 모델의 연동 방법론을 제시하였다. 넷째, 연구지역을 선정하여 개발된 방법론을 적용하였다. 다섯째, 국가지하수 관측망의 함양량 값과 비교 검증을 수행하였다. 여섯째, 향후 기후변화를 고려한 국내 지하수 수자원의 관리방안 수립을 위한 정책방향을 제시하였다. 이와 같이 본 연구에서는 지역규모에서 기후변화 연동 지하수 함양량의 시계열 분석의 기초연구를 수행하였다.

## II. 연구방법 및 내용

### 1. 적정 기후변화 시나리오 선정

#### 1) 기후변화 시나리오 개요

기후변화의 영향을 평가하기 위해서는 영향 예측의 목적에 적합한 모형을 구축하고, 적절한 방법으로 장래의 기후시나리오를 설계하여 기후변화에 따른 영향평가를 실시하게 된다. 기후시나리오의 작성을 위해서 여러 가지 기후 시나리오의 현황, 기후모형에 의한 기후변화 예측현황 등을 정리하고, 시나리오 작성 시의 문제와 현재 상황에서 고려 가능한 시나리오의 검토가 필요하다.

지구대기 조성변화에 따른 기후변화예측은 IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change)를 중심으로 이루어졌다. IPCC의 시나리오는 7개 분야 30개 영향항목을 고려하여 작성되며, 작성되는 시점에서 가용한 모든 정보를 이용한다(<표 1> 참조). 이 중 대표적인 시나리오는 크게 3가지로 나누어지며 장단점을 정리하면 다음과 같다.

첫째, SA90(Scientific Assessment 1990) 배출 시나리오는 인구, 경제성장을 위한 기술 변화, 토지이용 경향 또는 배출량 조절정책과 같은 중요 결정요소에 대한 특정한 가정을 기반으로 미래 배출량을 예측하는 시나리오다. 기준 배출 시나리오는 온실가스를 줄이기 위한 미래의 기후정책에 대하여 어떠한 가정도 하지 않은 상태를 말한다. SA90 시나리오에서는 에너지 공급은 석탄 집약적이고 에너지 수요는 효율성이 증대되는 것으로 가정하였다. 이산화탄소의 억제가 낮게 이루어진다면, 열대림이 소멸될 때까지 산림의 황폐화가 지속될 것으로 예상하였으며, 농업에서의 메탄가스와 아산화질소는 제어하지 않았다(Convery et al., 2003). SA90 시나리오는 전지구 평균기온이  $0.3^{\circ}\text{C}/10\text{yr}$ 의 비율로 증가하여, 2025년에는 현재보다 약  $1^{\circ}\text{C}$  증가하고, 21세기 말에는  $3^{\circ}\text{C}$  증가할 것으로 예상하였다. Scenario B에서는  $0.2^{\circ}\text{C}/10\text{yr}$ , Scenario C에서는  $0.1^{\circ}\text{C}/\text{yr}$  이상, Scenario D에서는 약  $0.1^{\circ}\text{C}/10\text{yr}$ 의 비율로 가정하였다(IPCC, 1990).

둘째, IS92에서는 6개의 표준 배출 시나리오(IS92a-f)를 제시하였고, 기준 시나리오인 IS92a에 따르면, 기준연도인 1990년도의 이산화탄소 농도는 약 350ppmv이고 100년 후인 2090년에는 약 670ppmv가 될 것으로 추정하였다. IS92a 시나리오에 따른 기후변화 예측 결과, 향후 100년 동안에 전 지구의 평균온도는  $2.5^{\circ}\text{C}$  상승할 가능성이 가장 높으며,  $1.5\sim 4.5^{\circ}\text{C}$  범위에서 상승할 것으로 예상하였다(IPCC, 1992). 에어로졸 효과를 고려하면,

2.0°C 상승 가능성이 가장 높게 나타났다. 그러나 IS92 시나리오에 반영되어 있는 에너지에 대한 이산화탄소 강도(단위 에너지당 이산화탄소 배출량)가 제한되어 있다는 것과 1992년 작성된 IS92 시나리오가 1985년도까지의 데이터를 기초로 하여 작성되었기 때문에 급변하는 현실을 제대로 반영하지 못하였다는 단점이 있다.

셋째, SRES(Special Report on Emissions Scenarios) 시나리오는 IS92 시나리오 이후 데이터를 바탕으로 일관성을 갖는 인구통계적, 사회적, 경제적, 기술적, 환경적, 정치적 미래를 예측한 것으로 4개의 Marker 시나리오로 구분된다. 4개의 시나리오 모두 온난화 저감을 위한 대책을 포함하지 않는 시나리오이지만 미래 세계 경제 발달, 인구 증가 및 개발도상국의 산업화등을 고려하여 다양화하였다(<표 2> 참조).

표 1 IPCC 기후시나리오 작성에 필요한 주요 영향분야

분야	영향 항목	예상 영향
수자원	물공급	댐의 저류량 변화
		토양 등의 저류량 변화
	물수요	농업용수 수요량의 변화
		도시용수 수요량의 변화
	기타	호소·하천 등의 수질변화
		수온 변화
삼림	식림수종	재목의 성장 변화
		재질의 변화
산업·에너지	상수도	물의 수요 변화, 물의 공급량 변화
	하수도배수	바다나 하구의 배수효율 저하
	전력선·통신선	강풍에 의한 절단
	에너지 수급	에너지 수요변화, 발전소의 효율저하, 발전소·석유정제시설의 침수
건강·시민생활	사망률	기후변화에 의한 사망자 급감 현황
	심혈관계질환	발병률의 변화
	호흡기계질환	발병률의 변화
	호흡기계질환	발병률의 변화
	열중병	발병률의 변화
	수매개성감염병	콜레라 발병률의 변화
	식물매개성감염병	말라리아 발병률의 변화
생태계	고산생태계	고산식물의 분포중에 대한 변화
	삼림생태계	식물·동물·곤충종의 변화
	자연초원, 습지	식물·동물·곤충종의 변화
	생물다양성	기후변화에 의한 생물다양성 변화 현황
	생태계	산림 식생대이동 및 구조와 기능 변화
	산호초	산호초의 멸종

분야	영향 항목	예상 영향
방재·국토보전	수해	홍수
		웅설홍수
	교통시설(항만)	파랑·고조(高潮)·침수의 증대
	교통시설(도로·철도·공항)	연안입지시설의 침수
	해안보전	파랑·고조(高潮)·침수의 증대
식료	토양환경	하천범람, 토사재해의 증대
		토양유기물의 분해 부족
		토양침식량의 증가
	수경재배	농지의 수물, 지하수 상승, 염수화
	수경이외의 농작물	생산량의 변화
		생산량의 변화
	기타	해충의 분포, 발생종류의 변화
잡초의 변화		

표 2 SRES에 있어서 정량화에 대한 개요

	A1				A2	B1	B2
	A1B	A1C (석탄)	A1C (석유)	A1T			
인구증가	낮음	낮음	낮음	낮음	높음	낮음	중간
경제성장	매우 높음	매우 높음	매우 높음	높음	중간	높음	중간
에너지 수요	낮음~중간	낮음~중간	낮음	낮음	높음	낮음	중간
토지이용 변화	높음	높음	중간	중간	중/소	높음	중간
기술변화 속도	빠름	빠름	빠름	빠름	늦음	중간	중간
기술 변화의 방향성	석탄	석유 및 가스	균형	비화석연료	지역적	효율성 및 탈물질	보통의 Dynamic

## 2) 기후변화 시나리오 선정 및 고려사항

기후변화 영향평가 연구와 정책입안자들이 기후시나리오를 선택하는 데 있어 다음과 같은 5가지 기준을 고려해야 한다. 첫째, 전 지구적인 예측이 일관적인 시나리오인지 살펴보아야 한다. 기후 시나리오는 온실가스의 증가에 의하여 2100년도에 기온이 1.4~5.8℃ 증가하거나 대기 중 이산화탄소의 농도가 2배가 되었을 때 1.5~4.5℃ 증가할 것으로 예상되는데, 전 지구적으로 일반적인 예상치를 벗어나는 모순된 값이 없는 시나리오를 선정해야 한

다. 둘째, 과학적으로 타당한 시나리오인가 검토해야 한다. 자연법칙을 무시하지 않고 지역 또는 전 지구적으로 객관적 타당성을 유지해야 하며, 다른 변수들의 변화와 조화가 이루어져야 한다. 셋째, 기후변화 영향평가 연구에 적용하기 위하여 시공간적으로 다양한 자료의 제공이 가능한 시나리오인지 검토해야 한다. 예를 들어, 강수량, 태양복사, 온도, 습도, 풍속 등의 입력변수들의 공간적인 범위가 전 지구에서 관심 지역까지 제공되는지 검토하고, 시간적인 범위에서는 연평균에서 일별 또는 시간별 자료를 제공할 수 있는지 고려해야 한다. 넷째, 미래에 발생하는 지역기후의 잠재적 변화를 대표할 수 있는 시나리오인가 확인해야 한다. 마지막으로, 기후변화 영향평가를 위하여 시나리오를 획득하고, 해석하고 적용하기 손쉬운 시나리오인지 검토해야 한다.

그러므로 본 연구에서는 SRES(Special Report on Emission Scenario)의 A1B 시나리오에 따른 한반도 기후변화 시나리오를 선택하였다. A1B 시나리오는 고도 경제성장이 계속되며, 세계 인구가 21세기 중반에 정점에 달한 후 감소하고, 신규 에너지의 개발 및 에너지 관련 신기술 또는 고효율화 기술이 급속히 도입되는 미래 사회를 가장한 시나리오이며, 이에 따른 기후변화를 예측하였다.

현재 IPCC의 Data Distribution Center에서는 기후변화에 의한 일관된 영향연구를 위해 SRES(Special Report on Emissions Scenarios)에 의한 수개의 GCM(Global Climate Model) 결과들을 제공하고 있다. 기후모형에 의한 GCM의 결과들은 장기간에 걸친 월단위의 다양한 기후요소들을 제공하나 공간해상도가 커 한국과 같은 지역연구에 충분한 공간정보를 제공하지 못하고 있다. 따라서 한국의 기후변화 영향 예측연구에서는 공간해상도가 향상된 RCM(Regional Climate Model)의 연구결과와 통계적인 방법에 의해 해상도가 향상된 GCM의 결과를 이용하거나 감도분석적인 방법을 이용한 연구방법이 사용되어야 한다.

## 2. 지하수 유동 모델과 지리정보시스템 연계 방법론

### 1) 적정 지하수 유동 모델 선정

지하수 함양에 영향을 주는 요소는 강수, 식생, 토지이용, 도시화 및 토양특성으로 구분되며 각 요소를 적절히 반영하는 지하수 유동 모델을 선정하여야 한다. 본 연구에서는 SWAT(Soil and Water Assessment Tool)(정일문, 2006), MODFLOW(Modular Three Dimensional Finite Difference Ground Water Flow)(이정호, 2005), MOHISE(Serge

Brouyre, 2004), 및 HELP(Hydrological Evaluation of Landfill Performance)<sup>3</sup>(임은진, 2004)를 비교 분석하였다(<표 3> 참조).

전술한 모형선정기준 중 모형을 실제 유역에 적용해봐야 알 수 있는 사항을 제외한다면, 모형의 선정기준은 첫째, 사용가능성 또는 개발가능성이다. 대부분의 장기 지하수 유동모형들은 이 조건을 충족하는 것으로 판단된다. 둘째, 목적에 부합하느냐는 것이다. 본 연구의 주요 목적이 기후변화 예측을 통한 지하수 함양량의 변화를 유추하는 것이다. 이 목적에 부합하는 모형은 개념적인 모형이 아닌 분포형 또는 준분포형 모형이다. 셋째, 유역특성, 시·공간 규모 문제 등 모형의 제한점에 대한 것이다. 즉, 모형은 다양한 유역조건과 규모에 대해서 적용 가능해야 하고, 계산 시간간격도 사용자가 적절히 조정할 수 있어야 한다. 본 연구에서는 기후변화를 주대상으로 하며 고려할 입력 자료에서도 기상 및 기온 자료가 포함된다. 이를 고려한 모형 선택이 필수적이다. 넷째, 입력자료의 구축에 관련된 사항이다. 국내의 경우 분포형 모형을 이용하여 유출모의를 수행하는 것은 입력자료의 구축 측면에서 많은 제약이 있다. 즉, 지표수계에 관련된 자료는 어느 정도 구축이 가능하지만, 지하수계의 자료는 국내 대부분의 지역에서 수집이 불가능한 실정이므로 분포형 모형임에도 불구하고 개념적 모형과 유사하게 이용되는 경우가 많다. 상기 4가지 조건을 충족하는 모형은 분포형 모형인 SWAT이나 HELP<sup>3</sup>가 적당하다.

SWAT이나 HELP<sup>3</sup>를 비교하면 두 모형이 물수지법을 기초로 하고 있지만, 물이 토양층에 침투하는 것을 모의하는 데에는 HELP 모형은 Darcy법칙에 근거하고 있고, SWAT모형에서는 물수지법을 이용하고 있다는 점에서 차이가 있다고 하겠다. 따라서, 토양층 내를 침투하는 기작에 대해서 HELP 모형이 SWAT 모형보다 더 물리적 현상을 반영한다고 볼 수 있다. HELP 모형은 국내에서 주로 매립장 평가부분의 침출수량을 계산하기 위하여 사용되었는데 몇몇 연구자들은 이 모형을 지하수 함양량 산정에 활용하며, 국외의 경우 HELP 모형은 오랫동안 검증이 이루어졌고 사용하기가 간편한 이유 때문에 기후변화와 관련한 연구에 활용하고 있다. 특히 날씨(기상) 모듈을 차용하고 있는 장점이 기후변화와 관련한 지하수 함양량 변화를 평가하는 데 유용한 도구가 되고 있는 것을 알 수 있다. 그러므로 특히 HELP<sup>3</sup>는 본 연구의 목적인 기후자료와 연동이 가능하며, 지하수 함양량 산정도 가능하다. 위 두 가지 기능을 연계하여 기후변화에 따른 지하수 함양량 산정이 가능할 것이다.



표 3 지하수 유동 모델 비교

지하수 유동 모델	개요	구성	장점	단점
SWAT	- 토양, 토지이용, 토지관리 상태에 따른 물, 유사, 농업화학물질의 거동 예측 모델	- 수문 - 토양유실 - 영양물질 - 하도주적 모듈	- 모형 구동에 필요한 자료들이 대부분 기구축되어 있으며 변형없이 사용 가능	- 장기간에 대한 모의모형으로, 단일 호우에 의한 홍수 사상의 자세한 모의 결과가 불가 - 모형의 구조가 복잡하고, 많은 수의 매개변수가 포함되어 있어서 매개변수 추정이 어려움 - 지하수위 변동에 따른 함양량 영향을 고려하기 어려움 - 토양수리특성치를 고려할 수 없으므로, 불포화대 토양층내부흐름이 상세화되지 않음
MODFLOW	- 다공질 포화매체내의 지하수 흐름을 모의하는 3차원 모형	- 유동성분 패키지 - 해법패키지	- 수리체계에 있어 원하는 부분만 모의 - 여러성분을 독립적으로 모의	- 다공질 매체내에서 유동하는 유체는 온도와 밀도가 항상 일정한 것으로 가정 - 오염된 지하수와 같은 다상 유동체, 불연속성이 큰 파쇄매체 - 이방성 조건에서는 적용 불가
MOHISE	- 기존의 모델, 수치해석 방법론 등을 통합한 수계관리 수문 통합 모델	- 토양, - 지하수 - 지표수 모듈 - 연계 및 통합 모듈	- 시나리오 설정이 가능하여 수자원 장기계획 - 기후변화로 인한 물순환 영향 분석 용이	- 수위가 낮은 갈수기 동안의 시뮬레이션 결과는 우수하나, 홍수기의 정확도는 떨어짐 - 입력자료의 의존도가 타모델에 비해 높음
HELP	- 매립지 내외의 수자원 이동현상 파악을 위한 모델 - 기상조건과 매립층의 초기 함수조건에 의한 매립지 내의 유출 및 침투, 토질특성을 - 기초로 매립지 내에서 이루어지는 수리학적 과정을 분석, 평가하는 물수지 예측 모델	- 기상모듈 - 매립지 설계자료 모듈 - 수행모듈	- 강우, 표면저류량, 침투, 증발산량, 토양수분 저장능력 - 극면배수를 통해 유출되는 각각의 수량을 예측 가능 - 입력자료가 타 모델에 비하여 간단 - 미계측 유역에 적용가능함(중간유출 손실계수 지역화를 위한 연구필요). - 함양량의 다양한 시공간적 분포특성 파악과 토지이용 변동특성의 반영이 가능함. - 토양수리특성치를 고려할 수 있고, 토양층을 침투하는 물리적 현상을 반영함.	- 준2차원모형으로 가시화 기능이 타모델에 비해 떨어짐

자료: 정일문. 2007. “우리나라 지역특성에 맞는 최적 지하수 함양량 산정기법 개발”의 연구결과 수정.

## 2) HELP3 모델 개요

본 연구에서 지하수 유동 모델로 선정된 HELP3 모형은 지표유출(surface runoff), 침투(infiltration), 증발산(evapotranspiration), 침투(percolation) 등의 토양층에 대한 수문성분을 결정하기 위한 준 2차원의 모형으로 Schroeder 등 (1994)에 의해 개발되었다. HELP3의 지배 방정식은 토양층에서의 흐름은 비포화 투수계수를 고려한 Darcy(식1 참조) 법칙에 의해 모의된다. 일단위의 시간규모를 사용하며, 최저토양층에서의 침투량(PR)은 지표수문 성분들의 물수지 균형에 기초하여 다음 식2와 같이 간접적으로 산정될 수 있다. P는 강우량, E는 증발산량, Q는 지표유출량, ΔS는 토양수분저류량의 변화를 나타낸다.

$$q = -K \frac{dh}{dl} \text{----- 식1}$$

$$PR = P - ( E + Q + \Delta S ) \text{---- 식2}$$

HELP3 모형에 입력되는 자료는 기상자료(climatologic data), 토양자료(soil data) 그리고 설계자료(design data)로 구성되어 있다. 기본적인 기상요소 자료는 미국농무성(U.S. Department of Agriculture; USDA)이 개발한 WGEN 모듈을 차용하고 있다(Richardson and Wright, 1984). 직접유출량 모델링도 미국농무성 토양보존국(Soil Conservation Service; SCS)의 유출지수(curve number; CN)방법을 활용한다(USDA, SCS, 1985).

## 3) 지리정보시스템 연계 방법론 검토

지하수 유동 모델링과 지리정보시스템 연계에는 세가지 단계가 있다. 이 연계형태의 세가지 단계는 첫째가 임시연계, 둘째는 부분적 연계, 셋째는 완전한 연계이다(<그림 1> 참조). 첫 번째 단계인 임시 통합 단계에서는 지리정보시스템 데이터베이스와 지하수 유동 모델링이 따로 활용되는 상황이다. 자료는 지리정보시스템으로부터 추출되고, 모형은 따로 실행되고 결과는 사용자 재량에 따라 분석된다. 두 번째 단계에서는 모델링에서 지리정보시스템이 좀 더 통합된 역할을 한다. 지리정보시스템은 지하수 유동 모델링에 분석 자료를 제공하고, 분석된 모델링 결과를 선처리 및 결과 표현을 위해 받아들인다. 대부분의 경우가 여기에 속한다. 세 번째 단계는 지리정보시스템 소프트웨어 안에서 완전한 모형개발로 이루어진다. 사용자는 하나의 운영체제 환경에서 지리정보시스템에 저장된 자료를 모형의 요구에 맞게 만들고 처리하며 모형도 지리정보시스템에 맞게 이루어져 있다.

지리정보 및 지하수 유동 모델을 처음 활용하는 초급 사용자의 입장에서 가장 이상적인

방법론은 세 번째 방법론일 것이다. 그러나 이 방법론은 특정 지하수 유동 모델링의 전 과정(수식 및 해법 포함)을 지리정보로 구현해야 한다. 이 과정에서 특정 지하수 유동 모델링의 특성을 정확히 구현하지 못할 수 있다는 것과 시간, 예산 등의 문제를 함께 고려하여 본 연구에서는 현실적인 방안을 고려하여 두 번째인 부분적 연계를 적용하였다.

지하수 유동 모델링은 자료의 형식과 처리 방법론의 차이가 있지만, 기본적으로 공간자료를 처리하여 분석한다(<그림 2> 참조). 지하수 유동 모델링을 활용하여 효율적으로 분석하기 위해서는 자연현상을 가능하면 정밀하고 정확하게 수치화하는 과정이 반드시 필요하며, 이 과정에서 지리정보시스템 자료는 우수한 도구가 된다.

이러한 지리정보시스템과 지하수 모델링의 연계는 <표 4>와 같으며, 이 과정들은 서로 연결되어 있고 어떤 부분은 반복적으로 행해진다. 우선적으로 연구대상지의 문헌조사가 실시된다. 연구대상 지역의 보고서, 지도 및 인터넷 자료를 활용하여 지리정보시스템 데이터베이스가 구축된다. 이러한 데이터베이스 구축은 전체 연구에서 시간이 많이 소비된다.

데이터베이스를 구축하는 동안에 입력자료의 해석이 필요하다. 즉, 토양, 토지이용, 지질 및 기후와 같은 입력자료는 수치모델링의 입력 파라미터로 사용하기 위해서 해석이 필요하고 일반화를 해야 한다.

다음으로 지표와 지하조건을 특성화(characterize)해야 하는데 연구보고서나 야외조사 자료가 수집되고 분석되어야 한다. 이런 자료들에는 지형(표고, 경사, 경사방위), 기후, 지질(암상과 구조), 토지이용, 식생지수, 토양 및 배사 등이 있다. 이런 기본자료와 해석된 자료는 수리지질학적 지하수 유동 모델링 구조의 개념적 모형에 적정한지 고려하여야 한다. 지리정보시스템으로 구축된 다양한 공간자료는 이 자료의 분포를 통하여 공간조절능력 추정에 대한 정확도를 높일 수 있다.

그림 1 지리정보시스템과 지하수 모델과의 통합

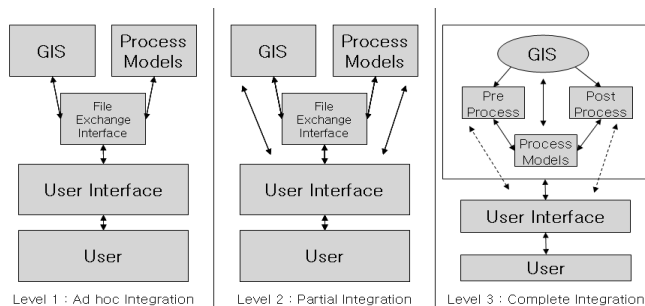


그림 2 지하수 모델링 과정

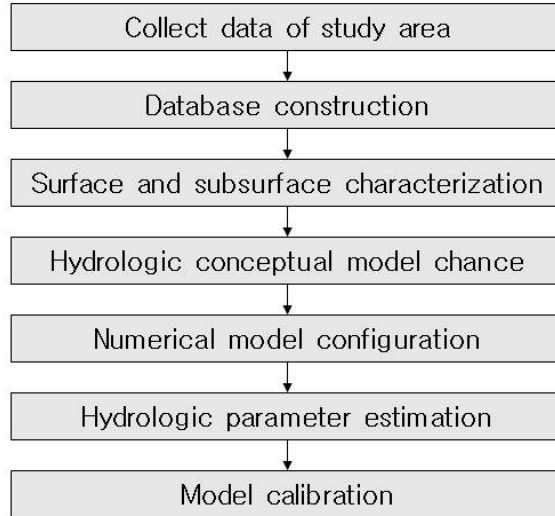


표 4 지하수 모델링을 위한 자료 및 단계

Database Construction	Surface and subsurface characterization	Hydrologic conceptual model change	Numerical model configuration
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Geology</li> <li>- Major structure</li> <li>- Landuse</li> <li>- LAI</li> <li>- Soil</li> <li>- Topography</li> <li>- Surface hydrology</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Geological Structure Setting</li> <li>- Hydrogeology</li> <li>- Vegetation &amp; Soil</li> <li>- Surface hydrology</li> <li>- Topography</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Hydrogeologic Framework</li> <li>- Conceptuation</li> <li>- Pattern and Distribution of Discharge</li> <li>- Pattern and Distribution of Recharge</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Boundary Condition Setting</li> <li>- Hydrologic Parameter Estimation</li> </ul>

### 3. 기후변화 연동 지하수 함양량 산정 모델 개발

#### 1) 산정 기법 개발

산정 기법 개발을 위한 연구 흐름은 <그림 3>과 같으며, 연구지역 선정, 기후자료 분석, 토양특성 자료 분석, 토지피복의 불투수층 산출, Combination Map 구성, Curve Number 산정, 지하수 함양 모델 적용 및 함양량 산정의 단계적 과정을 거쳐 개발되었다.

연구지역의 선정은 지역적 특성 및 가용 지리정보 자료의 정밀성 현황, 기후자료 획득을

위하여 현지 기상실측 자료의 확보 가능성과 검증을 위한 국가지하수 관측망이 존재하는 지역을 우선으로 선정하였다.

기상자료는 전술하였듯이 과거부터 현재까지의 기상실측자료 수집과 A1B SRES를 기반으로 한 지역기후모델 다운스케일링을 통한 미래 기상자료 예측값으로부터 획득하였다. 또한 기상자료는 면적 자료가 아니며 기상관측 위치에 해당되는 자료만을 가지고 있는 특성이 있다. 따라서 이를 연구지역 면적 전체에 해당되는 자료로 변화하여, 미리 선정된 공간해상도와 동일하게 만드는 전처리작업을 필수적으로 수행하였다.

토양특성 자료는 현재 전 세계적으로 사용되고 있는 모든 지하수 유동 모델에 적용되는 기초 자료이다. 토양특성자료의 정밀도는 지하수 함양량 산정 정확도에 직접적인 영향이 있으며 대축척 및 공신력 있는 기관의 자료를 사용하는 것이 중요하다. 본 연구에서는 국립농업과학원에서 제공하고 있는 정밀 토양도(1:25,000 축척)를 활용하였다.

토지피복의 불투수층은 지하수 함양에 직간접적인 영향을 미치며, 이를 파악하기 위하여 토지피복에 따른 불투수층 분포 및 특성을 분석하여야 한다. 토지이용 현황에 따라서 불투수층의 면적은 지역별로 차이가 있으며 이는 정밀 토양도의 지목별 현황과 연계하여 고려하였다.

Combination Map 구성은 토양 특성자료 및 불투수층의 자료를 바탕으로 공간적인 교집합을 산정하며, 연구 지역 내 임상 및 엽면적지수 분포 등의 지리정보를 부가적으로 활용하여 제작하였다. 공간자료 중 속성자료는 토지이용현황에 분류, 불투수층 분류 및 각 토지이용, 불투수층 공간분포에 따른 토양의 특성 등으로 구성되어 있다.

유출곡선지수(Curve Number)는 Combination Map을 바탕으로 토양의 수문학적 그룹을 재분류하는 방식을 적용하였으며, 공간적 분포를 나타내도록 수행하였다. 토양의 수문학적 그룹 분류는 농촌진흥청 농업과학기술원 및 한국건설기술연구원에서 제공하고 있는 수문학적 토양 분류법에 근거하여 실시하였으며, 정밀토양도의 Soil Code를 활용하여 분류하였다(농촌진흥청 농업과학기술원, 2007). 분류별 토양특성은 침투율, 토양배서 투수율 및 토성으로 세분류된다.

본 연구에서 선정된 지하수 함양량 산정 모델은 기후자료 및 유출곡선지수를 기본 입력자료로 수용하였으며, 최소 공간해상도별 유출곡선지수 및 기후변화자료를 연동하여 입력하는 방식으로 수행하였다. 선택된 지하수 함양량 모델은 HELP3이며, 이 모델의 구동 결과는 지하수 함양량을 최종적으로 나타낸다. 최종 결과물은 시기별, 각 유출곡선지수, 최소 공간해상도별 및 기후변화별 결과를 산출해낸다(<그림 4> 참조).

산정된 지하수 함양량을 바탕으로 지리정보시스템을 활용해 도면화하여 직관력을 높이는 작업을 수행한다. 또한 강수량 및 지하수 함양량을 바탕으로 지하수 이용가능량을 산정하였다.

그림 3 산정 기법 개발 흐름도

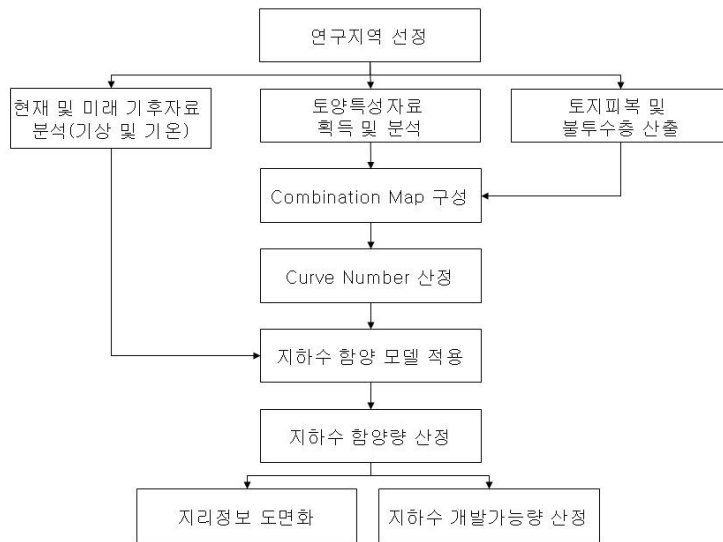
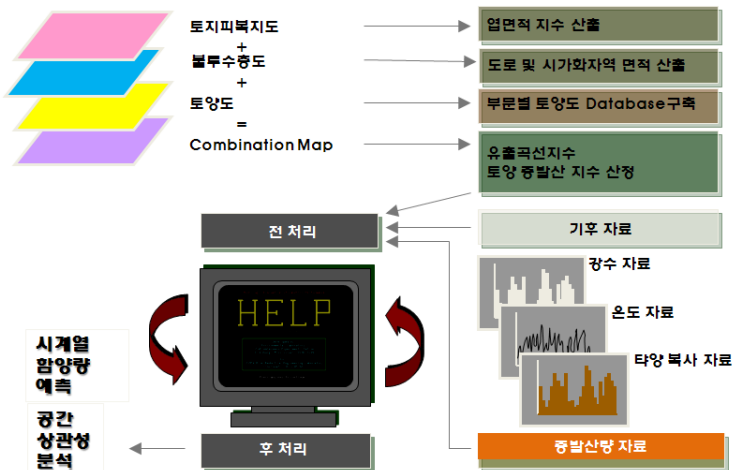


그림 4 모델 흐름도



#### 4. 기후변화 연동 지하수 함양량 산정

##### 1) 연구지역 선정 및 공간지리정보 확보

연구대상지역은 경상북도 칠곡군, 구미시 일부 및 대구시 북구 일부를 포함하며, 달성군, 성주군, 김천시 및 군위군과 인접한 지역이다. 낙동강 본류가 연구지역의 일부를 관통하고 있으며 전체 면적은 500.75km<sup>2</sup>이다.

연구지역의 현황파악을 위하여 임상도<sup>1)</sup>, 지질도<sup>1)</sup>, 토양도<sup>1)</sup>, LAI(Leaf Area Index)<sup>1)</sup>, 토지피복도<sup>1)</sup>, 불투수층도<sup>1)</sup>를 분석하였다. 활용자료는 6개이며, 분석자료는 총 9개 항목이다. 자료 중 LAI는 Landsat ETM을 이용하여 자체 제작하였으며, 불투수층은 토지피복지도를 활용하여 자체 제작하였다.

본 연구에서는 1970년에서 2100년까지의 기상자료(강우 및 기온)를 활용하였다. 1970년부터 2000년까지는 기상청의 실제 관측자료를 활용하였으며, 2001년부터 2100까지는 SRES A1B 시나리오를 통하여 얻어진 기상자료를 활용하였다. 측정 및 예측된 기상자료는 30년간 자료의 방대한 양의 처리과정 및 처리시간 효율성을 위하여 30년 평균을 산정하여 활용하였다. 연구지역의 1970년부터 2000년까지의 평균온도 11.69℃, 누적강수 1,018.04mm, 2001년부터 2030년까지 평균온도 12.59℃, 누적강수 981.04mm, 2031년부터 2050까지 평균온도 13.79℃, 누적강수 1,222.49mm, 2051년에서 2100년까지 평균온도 15.51℃, 누적강수 1,192.03mm로 추정되었다(<표 5> 참조).

Combination Map 구성을 통한 유출곡선지수(Curve Number) 분류 작업에서는 우선적으로 토양의 수문학적 그룹을 분류하였다. 일반적으로 토양은 수문학적 특성에 따라 아래와 같이 4가지 그룹(A, B, C, D)으로 분류할 수 있다(<표 6> 참조). 토양의 침투속도나 유출량에 따라 개념적으로 토양그룹을 분류할 수 있으나, 정작 실제적으로 토양통에 따른 수문학적 토양유형에 대한 명확한 기준은 전무하였다. 이에 농업과학기술원에서는 미국 자연자원보전국의 수문학적 토양유형 분류기준에 근거하여 국내 토양통을 대상으로 현장측정 및 입자특성을 활용한 추정식을 개발·적용함으로써 토양통별 침투 및 투수속도를 평가하여 유출곡선지수(유출곡선지수)법의 적용을 위한 합리적인 수문학적 토양유형을 분류하였다(<표 7> 참조). 본 연구에서는 1:25,000 축척의 토양도의 Soil Code를 바탕으로 농업과학기술원에서 발표한 수문학적 토양유형에 따라 해당 그룹을 할당하였다. 연구지역의 수문

1) 임상도 출처: 산림청, 지질도 출처: 한국지질자원연구원, 토양도 출처: 농촌진흥청, LAI 출처: 자체제작, 토지이용도 출처: 환경부, 불투수층도 출처: 자체제작.

학적 토양유형 분류결과, 그룹 A와 D가 전체 면적의 55.13%(276.04km<sup>2</sup>), 38.27%(191.66km<sup>2</sup>)을 차지하였다(<그림 6> 참조).

유출곡선지수는 산정시 토양통 및 지표의 토지이용현황에 따라 정하는 계수로, 유역의 수문학적 토양형, 토지이용과 처리상태 및 선행토양함수조건의 함수이며, 한 유역의 유출능력을 나타내는 무차원수로서 총우량에 대한 직접유출량의 잠재력을 나타낸다. 유출곡선지수값은 1에서 100의 범위의 값을 가지며, 유출량과 비례한다. Combination Map 제작 결과, 본 연구지역은 산림지역 중 토양의 수문학적 그룹이 A에 해당하는 지역이 넓게 분포하고 있는 것으로 분석되었다(<그림 7> 참조).

본 주제도들은 HELP3의 구동을 위한 물리적 입력자료 및 공간적 기본단위도로 활용되었다.

그림 5 연구지역





표 5 기후변화에 따른 기온 및 강수량 변화

연도/월	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	
기온 변화 (°C)													평균
1970-2000	-2.09	-0.02	5.20	11.96	16.94	21.03	24.12	24.38	19.25	13.09	6.21	0.19	11.69
2001-2030	-2.68	0.47	5.30	12.96	18.04	22.33	25.09	25.90	20.61	14.14	7.32	1.67	12.59
2031-2050	-0.77	1.09	7.49	14.06	19.04	23.22	26.73	26.85	21.74	15.73	7.81	2.54	13.79
2051-2100	2.02	3.68	8.29	15.08	19.95	25.44	27.81	29.06	23.55	16.60	10.43	4.17	15.51
강수량 변화 (mm)													전체
1970-2000	19.78	26.71	48.25	75.14	71.91	135.88	212.87	205.07	128.83	41.72	36.38	15.49	1018.04
2001-2030	8.42	34.57	51.31	73.41	58.26	151.40	213.83	140.63	160.99	44.59	28.20	15.57	981.20
2031-2050	8.94	18.79	52.96	104.90	55.74	116.98	324.72	266.77	132.58	81.11	41.30	17.70	1222.49
2051-2100	20.46	23.91	65.65	88.41	56.30	143.48	178.34	279.08	237.45	45.14	31.53	22.29	1192.03

표 6 수문학적 토양분류

수문학적 그룹	특 성
A	침투속도가 매우 높아 유출량이 적은 토양
B	침투속도가 다소 높아 유출량이 다소 적은 토양
C	침투속도가 다소 낮아 유출량이 다소 많은 토양
D	침투속도가 매우 낮아 유출량이 많은 토양

표 7 수문학적 토양분류별 특성

수문학적 토양군	침투율	토양배수	투수율	토 성	비 고
A	높음	매우 양호	높음	사질이거나 역질	· 유출량이 적음
B	보통	양호	보통	약간 세립질이거나 약간 조립질	
C	느림	-	느림	약간 세립질이거나 세립질	· 수직침투방해층 있음
D	매우 느림	-	매우 느림	경반측이거나 점토층을 갖는 토양	· 유출량이 많음 · 지하수위가 높음 · 불투수층이 있음

그림 6 수문학적 토양 분류

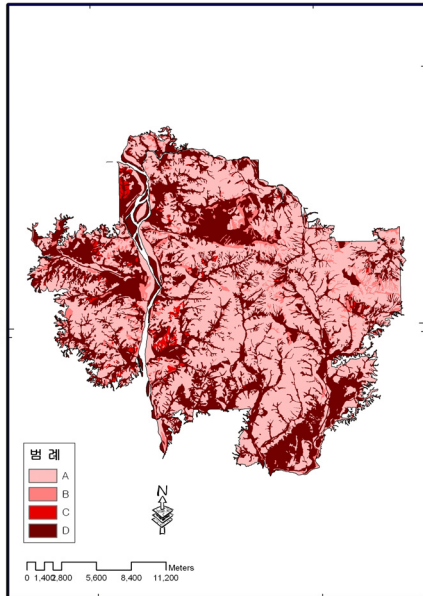
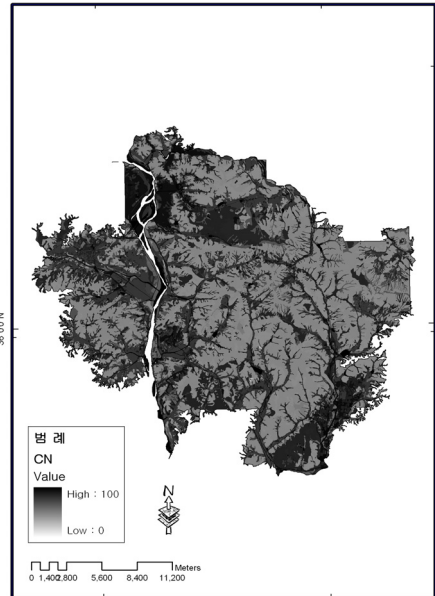


그림 7 유출곡선지수 분석



## 2) 지하수 함양률 변화분석

HELP3 모델을 이용한 연구지역의 지하수 함양률 산정은 유출곡선지수값에 의한 공간적 분류를 바탕으로 유출곡선지수 값에 해당하는 토양의 종류의 종류를 추출하고, 해당 토양통의 물리적 특성을 입력하는 방식으로 진행되었다. 각 토양에 해당하는 물리적 및 수리지질학적 특성은 USGS(U.S Geological Survey) 및 EPA(U.S Environmental Protection Agency)에서 제공되는 자료를 활용하였다. 유출곡선지수별 함양률 산정의 최소 공간적 범위는 10m×10m로 설정하였다.

기후변화에 따른 지하수 함양률의 시간적 변화는(<표 8>, <그림 8, 9, 10, 11> 참조) 1970~2000년 26.19%, 2001~2030년 25.87%, 2031~2050년 27.33% 및 2051~2100년 25.45%로 산정되었다. 전체 4개의 기간으로 나눈 연구 결과에서 강우량의 많은 순서는 2031~2050년, 2051~2100년, 1970~2000년 및 2001~2030년이다. 함양률 및 함양량의 많은 순서는 2031~2050년, 1970~2000년, 2001~2030년 및 2051~2100년이다. 강우량이 가장 높은 기간(2031~2050년)에 가장 높은 함양률 및 함양량을 나타내고 있다. 강우량이 세 번째(1970~2000년)로 많은 기간이 함양률 및 함양량이 두 번째로 많은 기간이다. 강우량이 두

번째로 많은 기간(2051~2100년)이 함양률 및 함양량이 네 번째인 경우가 있지만 4개 기간의 함양률 표준편차는 0.81로 크지 않다. 이러한 결과를 전반적으로 고려하였을 때 함양률은 강수량 변화에 민감하게 반응하는 것으로 분석되었으며, 지역적 특성으로는 시가화 지역에 가까운 불투수 지역에서는 함양률이 급격히 감소하는 양상을 나타내었다.

위에서 언급된 강우량을 기준으로 함양률을 적용하여 함양량을 산정하였다. 시기별 강수량 대비 지하수 함양률 및 함양량을 <표 8>에 정리하였다. 함양률 및 함양량은 2001~2030년도에 강우량과 함께 감소하지만 2031년부터 2050년까지 증가하는 것을 나타내고 있다. 이는 전체적인 미래예측 기후변화와 동일한 흐름을 나타내는 것으로 사료된다. 또한 지하수 함양량에 대한 시계열 분석의 결과는 과거와 비교하여 점진적으로 증가하는 것으로 사료된다.

표 8 시기별 강우량, 함양률, 함양량 및 이용가능량

	1970~2000년	2001~2030년	2031~2050년	2051~2100년
강우량(mm)	1018.04	981.20	1222.49	1192.03
함양률(%)	26.19	25.87	27.33	25.45
함양량(㎥/년)	$1.423 \times 10^8$	$1.409 \times 10^8$	$1.504 \times 10^8$	$1.422 \times 10^8$

그림 8 1970~2000년 지하수 함양률

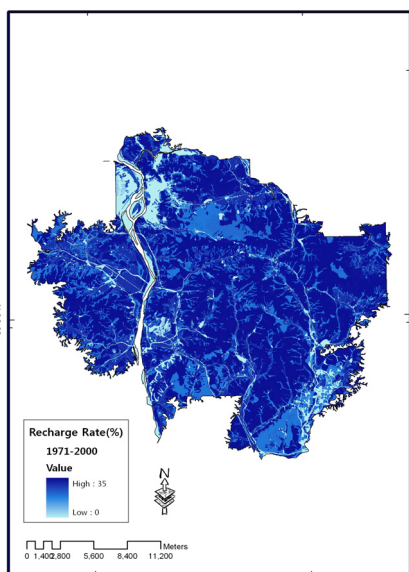


그림 9 2001~2030년 지하수 함양률

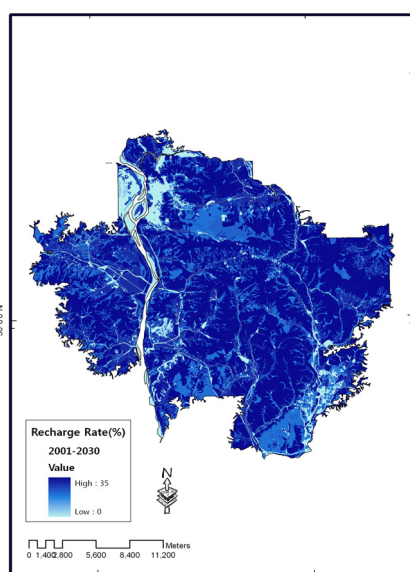


그림 10 2031~2050년 지하수 함양률

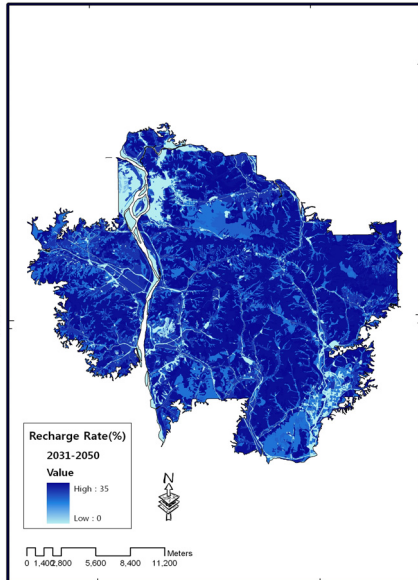
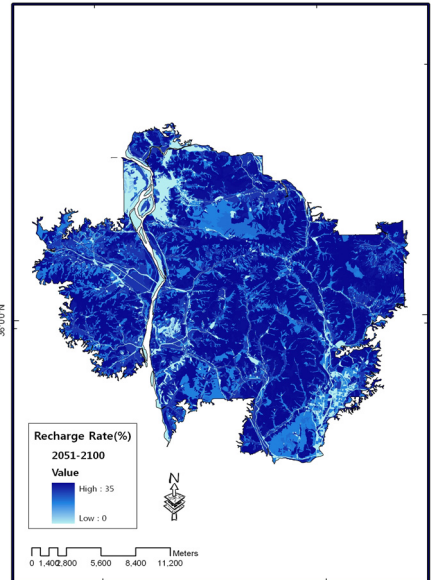


그림 11 2051~2100년 지하수 함양률



## 5. 기후변화 연동 지하수 함양량 검증

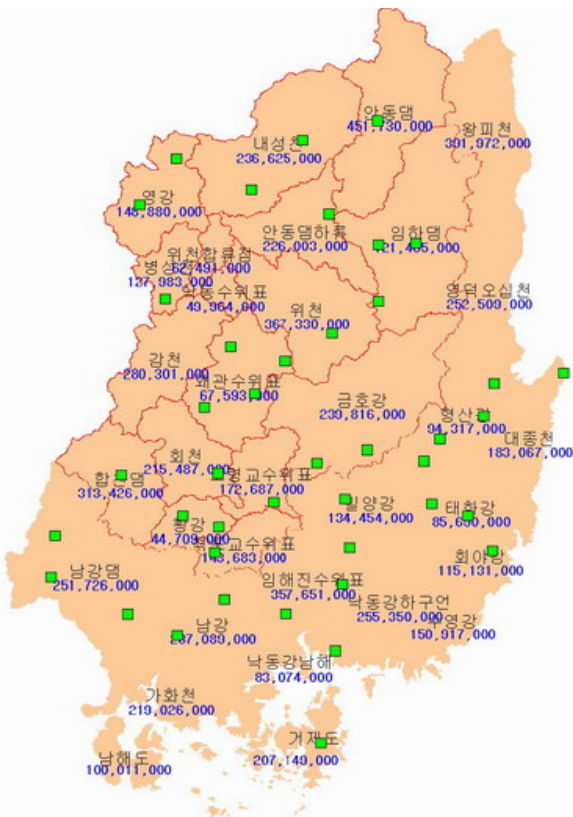
본 연구의 결과 검증은 국가지하수정보센터(<http://www.gims.go.kr>)에서 제공하고 있는 국가지하수관측망의 지하수위 및 함양률 변화를 활용하였다. 국가지하수관측망은 전국을 대상으로 지역 또는 유역별 대표지점에 지하수의 수위 및 수질의 변동 상황을 지속적으로 관측하기 위한 지하수 관측소를 설치 운영함으로써 국내 지하수자원의 보전 관리를 위한 기반을 구축한 것이다. 2005년 기준 전국에 320개의 지하수 관측지점이 설치되어 있으며, 연구지역에 해당되는 경상북도 지역에는 43개의 관측망이 있다(<그림 12> 참조). 관측자료 분석에는 등치선도, 함양률 분석 및 수질경향성 분석이 있다. 본 연구지역인 경상북도 칠곡군 일원에는 총 2개소의 국가지하수 관측망이 운영 중에 있으며, 지하수위 및 함양률 자료 중 활용가능한 2002~2004년까지의 자료를 확보하였다(<표 9> 참조).

2004년 칠곡 왜관 관측망의 자료에 의하면, 표준편차 0.005~0.010의 범위에서 지하수 함양률의 변화폭이 10.5%~12.1%에 해당된다. 또한 2004년 칠곡 가산 관측망의 경우 표준편차 0.005~0.010까지의 경우에 함양률이 약 18.6%에서 21.6%에 해당된다. 즉, 동일한 관측점에서도 오차 범위 및 초기 조건을 어떻게 할당하느냐에 따라 2~3% 가량의 함양률 차이

를 보인다.

본 연구의 결과는 기상자료가 1970년부터 2000년까지는 실측자료이며, 2001~2030년, 2031~2050년, 2051~2100년까지는 기후변화예측자료를 활용하였다. 따라서 연구결과의 실제 계측치와의 비교는 1970~2000년까지의 지하수 함양량 및 국가지하수 관측망의 측정기간이 포함되는 2001~2030년까지의 두 자료를 이용하여 실시하였다. 두 시기의 함양률은 각각 26.19% 및 25.87%로 국가지하수 관측망에서 추정된 연구지역의 최대 지하수 함양률인 21.6%보다 높게 산정되었음을 알 수 있다. 이는 연구지역 대부분이 비교적 투수성이 우수한 수문학적 토양군(A 및 B)에 속하며, 강우 함양이 발생하는 불포화대의 두께 역시 2m 미만으로 얇기 때문에, 강우의 지하침투가 예상보다 빨리 진행되고 있음을 시사하고 있다. 토양 투수성이 극단적으로 높은 제주도의 경우 토성은 다르나 수리학적 토양 특성의 분포는 연구지역과 유사하며, 지하수 함양률이 46%에 달한다(건설교통부, 2007). 또한 육상과

그림 12 2004년 낙동강 유역 국가지하수 관측망 위치도



불포화대 분포가 크게 다르지 않은 서남해안 일대 도서지역의 경우, 강우의 지하 함양률이 20~30%의 범위를 보인다(문유리, 2009). 본 연구에서 함양량을 추정한 방법은 C/N 값을 기초로 하여 투수되는 모든 강우량을 함양량으로 산정하는 간접적인 방법이다. 검증에 활용된 국가지하수 관측망의 자료는 실제 지하수위를 측정하여 함양량을 유추하는 직접적인 방식이다. 즉 방법론 및 추정 방식의 차이 및 기존의 다른 연구 결과를 고찰하여 고려한다면 본 연구에서 산정된 지하수 함양률 분포가 과다하게 수득된 것은 아닌 것으로 판단된다.

표 9 국가지하수 관측망 지하수 함양률 결과

관측 연도	관측 소명	최고수위 (m)	최저수위 (m)	최고-최저 (m)	최적화직선 (Y)	결정계수 (r <sup>2</sup> )	30일후 수위강하	함양률(a) (δ=0.005)	함양률(a) (δ=0.006)	함양률(a) (δ=0.007)	함양률(a) (δ=0.008)	함양률(a) (δ=0.009)	함양률(a) (δ=0.010)
2004년	질곡 왜관	28.69	26.77	1.92	1.920e-.0270t	0.998366	1.066	0.105	0.109	0.112	0.115	0.118	0.121
	질곡 가산	110.16	107.24	2.92	2.920e-.1470t	0.985892	2.885	0.186	0.193	0.199	0.205	0.21	0.215
2003년	질곡 가산	110.321	107.424	2.897	2.897e-.1560t	0.989993	2.87	0.187	0.194	0.2	0.205	0.21	0.215
	질곡 왜관	28.893	27.65	1.243	1.243e-.0320t	0.999029	0.767	0.116	0.121	0.124	0.128	0.131	0.134
2002년	질곡 가산	108.769	107.369	1.4	1.400e-.1920t	0.990125	1.396	0.188	0.195	0.201	0.206	0.212	0.216

### 6. 기후변화 연동 지하수 수자원 관리를 위한 정책방향

기후변화에 따른 지하수 함양률의 시계열적 변화는 강수량 증감과 밀접한 연계가 있다. 또한 기후변화로 인한 부정기적 기상 이상으로 인하여 지표수 수자원의 오염은 점진적으로 빠르게 진행될 것이며, 그 활용성은 떨어지게 될 것이다. 이에 대한 대응방안으로 안정적 수자원을 제공할 수 있는 지하수의 활용이 극대화될 것으로 예상된다.

본 연구는 주로 기후변화 예측치를 연동한 지하수 함양률 산정 방법론 및 모델 개발에 중점을 두었으며, 모델을 적용한 시범지역 역시 유역 전체를 대표할 수 없기 때문에 국내 지하수 수자원 관리에 관한 구체적인 방안을 수립하기는 어려우나, 연구결과를 토대로 향후 국내 지하수 수자원의 양적 관리에 관한 다음과 같은 정책 방향을 제시할 수 있을 것으로 본다.

지하수 함양률 및 이용가능량은 국가적 차원에서 수립 또는 갱신되는 수자원이용관련계획(예: 수자원장기종합계획, 지하수관리기본계획 등)에서 장래 국내 가용 수자원량 예측시 필수적으로 산정되어야 하는 항목이다. 본 연구에서도 산정된 지하수 함양률 및 이용 가능량 결과를 충분히 활용할 경우 국내 전 유역의 지하수 이용 및 개발 가능량에 대한 근미래 및 장기적 목표설정이 용이할 것으로 판단된다.

기존의 지하수 함양률은 중권역 유역당 1개의 상수로 주어진다. 일례로, 연구 지역이 속해 있는 낙동강 구미 및 왜관 유역의 지하수 함양률은 각각 11.64% 및 13.94%로 산정되어 있으며(국토해양부, 2007), 이는 유역 전체 지역에 동일하게 적용된다. 또한 연구지역 내 운영되고 있는 국가지하수 관측망 2개소의 지하수위 변동폭에 따른 지하수 함양률은 10.5~21.5%의 범위에 속하며, 별도의 계측치가 없는 한 연구지역 전체 지하수 함양률을 대표한다고 할 수 있다. 그러나 본 연구에서는 지하수 함양률 및 함양량을 지역의 토지이용

및 형태, 토양 수리 특성 등의 공간지리정보를 이용하여 공간적 세분화를 시도하였고, 중권역 유역보다 작은 면적에서의 지하수 함양량을 산정 및 예측할 수 있다는 점에서 큰 의의가 있다. 이는 향후, 군 단위 기초자치단체 이하에 해당되는 소규모 행정구역 단위에 있어서도 지하수 개발·사용량 목표 설정 및 제한, 가뭄 등 용수부족 발생시 적정 지하수 개발 위치 선정 등 지하수 수자원 이용과 관리에 대한 행정목표를 자체적으로 수립할 수 있는 기본적인 도구를 제공할 수 있다. 또한 보다 다양한 시계열 기후자료를 바탕으로 대권역 크기의 유역을 분석한다면 시계열별 및 행정구역별 지하수 활용 계획을 수립하는 데 도움이 될 것이다.

광역 또는 지방단위 상수도에 의한 관망 네트워크가 설치되지 않은 산간 및 도서 지역에서는 여전히 지하수가 주 용수원으로 사용되고 있다. 이러한 지역에서 마을상수도 개발사업, 관광 등 위락-레저시설 건설 및 체육시설 건설사업 등 대규모 용수 사용이 요구되는 사업이 계획될 경우, 해당지역의 기후변화에 따른 강수패턴 변화, 토지이용 및 토양의 수리적 특성 등에 따라 함양되는 지하수의 양 및 그에 따른 적정 개발량을 재산정하여야 하나, 지역에 따라 지하수 수문 관련 계측 자료가 존재하지 않는 경우가 많아 정확한 함양량 예측이 난이할 수 있다. 본 연구를 통해 산정된 지하수 함양률 및 함양량의 공간분포 자료는 자료 도엽 상의 세부 격자별 지하수 함양에 관한 속성정보를 모두 포함하고 있으며, 1971년부터 2100년까지의 지하수 함양량 정보를 지역에 상관없이 시·공간적으로 제공할 수 있기 때문에, 지하수 수문 미계측 유역에서 대규모 개발사업에 따른 지하수 이용 가능량 예측에 필수적인 정보를 제공할 수 있을 것으로 본다.

## VI. 결 론

본 연구에서는 실질적인 기후변화에 따른 지하수 함양량 산정 모델 개발 및 관리방안을 마련하기 위하여 우선적으로 적정 기후변화 시나리오를 선정하였으며, 적정 지하수 유동 모델링을 선정하였다. 또한 지리정보시스템과의 연계방법을 제시하여 기후변화 연동 지하수 함양량 산정 모델 개발하였다. 개발된 기법을 연구지역에 적용하여 실제 기후변화 영향에 대한 지하수 함양량을 미래 시기별로 추정하였다. 이를 바탕으로 향후 기후변화에 따른 지하수 수자원 통합관리방안에 대한 정책적 사항을 제안하였다.

기후변화에 따른 지하수 함양률의 변화는 강우량과 함양량의 관계는 강우량이 가장 많은 기간(2031~2050년)에 가장 많은 함양량을 나타내고 있다. 이를 고려하였을 때 전반적으로

함양률 변화는 강수량의 변화에 민감하게 반응하는 것으로 분석되었으며, 유출곡선지수에 따른 함양률 변화는 크게 영향을 받지 않으나, 지수값이 불투수층에 가까운 지역일수록 함양률이 급격히 감소됨을 알 수 있었다. 시계열 지하수 함양률 분석 결과 점진적으로 지하수 함양률이 증가하는 추세를 나타내고 있다. 이를 통하여 향후 지하수 함양률의 활용계획을 수립하여야 한다. 본 연구의 결과 검증은 국가지하수정보센터(<http://www.gims.go.kr>)에서 제공하고 있는 국가지하수관측망의 지하수위 및 함양률 변화를 활용하였다. 국가지하수 관측망의 최대 함양률과 본 연구 결과 함양률은 4~5% 정도 본 연구 결과가 높았다. 그러나 실제 지하수위 관측을 통한 방식과 C/N 값을 통한 간접적인 방식의 차이를 고려하고, 기존 타 연구의 결과를 고찰하면 본 연구에서 산정된 지하수 함양률 분포가 과다하게 수득된 것은 아닌 것으로 판단된다.

본 연구에서는 기존의 기후변화와 지하수 함양률의 불명확한 관계를 정량적으로 분석하였으며, 미래 기후변화 예측 결과를 반영한 연구지역 내 지하수 함양률 변화를 시·공간적으로 산정하고, 기존 산정 결과와의 비교를 통해 향후 기후변화를 고려한 국내 지하수 수자원의 관리방안 수립 방향을 제시하기 위한 연구라고 할 수 있다. 앞으로 연계모델의 고도화 방안 및 현장조사가 추가된다면 보다 정량적으로 기후변화와 지하수 함양률의 상관관계를 파악할 수 있으며, 향후 전반적인 물관리 및 물안보 체제 구축을 위한 한 축을 차지할 수 있다는 점에서 중요성이 있다고 하겠다. 이와 같은 의의에도 불구하고 본 연구는 몇 가지 한계를 갖는다. 첫째, 기후변화 시나리오 자체의 정확성 한계이다. 본 연구는 IPCC에서 제공하는 기후변화 시나리오를 선택하여 수행한 것으로 기후변화 시나리오 자체에 대한 검증을 실시하지 못하였다. 둘째, 다양한 지하수 유동 모델링의 적용이 필요하다. 본 연구에서는 각 모델 간의 장단점을 분석하였지만, 실제 각 모델링의 함양률 결과를 분석하고 이에 대한 현장조사를 실시하지 못하였다. 향후 기후변화 연동 지하수 함양률 산정 연구가 추가적으로 진행된다면 현 모델의 고도화 및 지하수 유동 모델링에 대한 정밀한 현장조사가 필요하다고 하겠다.



## 참고문헌

- 강동희. 2001. 「부정류 상태에서 난지도 매립지 침출수 거동 예측». 중앙대학교 석사학위논문.
- 강인식. 1994. “지구온난화와 동반된 한반도 기온변화의 시나리오 연구(I)”. 「한국기상학회지」 30(2): 247-260.
- 건설교통부. 1995. “지하수자원기본조사(3차)”. 「지하수관리조사보고서」.
- 건설교통부, 한국건설교통기술평가원. 2007. 「우리나라 지역특성에 맞는 최적 지하수 함양량 산정기법 개발」.
- 고경석. 2009. “기후변화에 따른 국내 지하수자원 취약성”. 제14차 지하수 정보협력 포럼 발표자료.
- 구민호, 김형수, 안경환. 2000. “지하수 수위 및 수온의 장기 측정자료 분석”. 「대한지질공학회 2000년 정기총회 및 학술발표회」.
- 구태훈, 조원철. 2001. “집중호우시 발생하는 난지도 매립지내의 지하수 거동”. 「지하수 토양환경」 6(3): 107-117.
- 국립기상연구소. 2002. 「한반도 및 동아시아지역 기후변화 시나리오기법 개발」. 기상연구소 연구보고서.
- 국토해양부. 2007. 「지하수관리기본계획」.
- 김규범. 2008. 「미국의 기후변화에 대비한 지하수 조사·이용 및 관리」.
- \_\_\_\_\_. 2009. “기후변화와 지하수 양수에 따른 지표수 영향”. 제14차 지하수 정보협력 포럼 발표자료.
- 김규범, 김기영. 2008. “미계측지역 지하수 함양량 추정을 위한 통계적 접근”. 「한국지반환경 공학회 논문집」 9(7): 73-85.
- 김규범, 이명재, 김정우, 이진용, 이강근. 2004. 「수위강하곡선을 이용한 함양량 추정기법의 국가지하수관측소 지하수위 자료에의 적용성 평가: 지질공학」 14(3): 313-323.
- 김재욱. 2005. 「지역기후모형을 이용한 산림식생의 취약성 평가에 관한 연구」. 서울대학교 석사학위논문.
- 김정곤, 손경호, 노준우, 장창래, 고익환. 2006. “SWAT모형을 이용한 갑천유역에 대한 수문 특성 분석 및 도시화 영향 평가”. 「한국수자원학회논문집」 39(10): 881-890.
- 김춘지, 강현석, 서명석, 이동규. 2002. 「SNU/RCM 과 RegCM2 의 동아시아 기후 모의 성능 비교: 대기」 12(1): 442-444.
- 김태국, 민영미, 오재호, 김동식. 2002. 「역학적 다운스케일링 기법을 이용한 동아시아 지역기

후의 수치모의: 대기」 12(1): 475-480.

농촌진흥청 농업과학기술원. 2007. 「(수문해석을 위한)토양수리특성과 토양전자지도의 활용」.

문유리. 2009. 「도시지역 용수공급체계에 관한 고찰」. 한국환경정책·평가연구원.

박수희, 김정우. 2001. 「지역 기후 모형을 이용한 동아시아 기후의 모사: 대기」 11(3): 136-139.

이길성, 정은성, 신문주, 김영오. 2006. “SWAT모형을 이용한 도시하천 상류유역의 하천유지  
유량 산정방안”. 「한국수자원학회논문집」 39(8): 703-716.

이동규. 2002. 「지역기후모형의 개발」. 환경부 최종보고서.

이동근, 김재욱, 정휘철. 2006. “기후변화의 영향평가를 위한 대순환모형과 지역기후모형의  
비교 연구”. 「환경영향평가」 15(4): 249-257.

이동률. 1995. “지하수 감수곡선을 이용한 지하수함양량 추정과 장기 갈수량 예측”. 고려대학  
교 토목환경공학과 박사학위논문.

이정호, 이영준, 이수재. 2005. 「터널로 인한 지하수 영향 저감방안 연구」. 한국환경정책·  
평가연구원.

임은진, 이재영, 최상일. 2004. “폐기물 매립지의 최종 복토 구조에 따른 침출계수 변화에  
관한 연구”. 「한국지하수토양환경학회지」 9(2): 48-53.

전성우, 정휘철, 이동근. 2002. 「기후변화에 따른 생태계 영향평가 및 대응방안 연구 III -  
삼림부분을 중심으로」. 한국환경정책·평가연구원.

정일문, 김남원, 김철겸, 이정우, 김태희, 김용제, 김구영, 하규철, 전철민, 이도훈. 2007. “우리  
나라 지역특성에 맞는 최적 지하수 함양량 산정기법 개발”. 건설교통부, pp.363.

정일문, 김남원, 이정우, 이병주. 2006. “SWAT모형을 이용한 무심천 유역의 지하수 함양량  
추정”. 「2006년 한국수자원학회 학술발표회」, pp.76-79.

조민수, 정일웅, 김정우. 1997. “이산화탄소 배증에 의한 기후대 변화의 GCM 모사”. 「1997년  
도 가을 학술발표회 초록집」, pp.76-79.

조재경. 2007. “지하수 함양량 산정법의 구분과 적용성 검토”. 「농어촌과 환경」 94: 153-161.

최병수, 안중기. 1998. “지역단위 지하수 자연함양률 산정방법 연구”. 「지하수환경」 5(2):  
57-65.

Alcamo, J. ed. 1994. *Image 2.0: Integrated Modelling of Global Climate Change*. Kluwer,  
Dordrecht, The Netherlands.

Allen, D. M., D. C. Mackie, and M. Wei. 2004. “Groundwater and climate change:  
a sensitivity analysis for the Grand aquifer, southern British Columbia,  
Canada”. *Hydrogeology Journal*, 12: 270-290.

- Bell, J. L., L. C. Sloan, and M. A. Snyder. 2004. "Regional Change in Extreme Climate Events: A Future Climate Scenario". *Journal of Climate*, 17(1): 81-87.
- Brouyre, Serge, Guy Carabin, and Alain Dassargues. 2004. "Climate change impacts on groundwater resources: modelled deficits in a chalky aquifer, Geer basin, Belgium". *Hydrogeology Journal*, 12: 123-134.
- Convery, F. J., L. Dunne, L. Redmond, L. B. Ryan. 2003. *Achieving Behavioural Change-Policy Instruments and the Management of Climate Change*.
- Federer, C. A., C. Vörösmarty, and B. Fekete. 2003. "Sensitivity to Annual Evaporation to Soil and Root Properties in Two Models of Contrasting Complexity". *Journal of Hydrometeorology*, 4(6): 1276-1290.
- IPCC. 1990. *Climate Change-The IPCC Scientific Assessment*. Houghton, J. T., G. J. Jenkins, J. J. Ephraums eds. Cambridge University Press.
- \_\_\_\_\_. 1992. *Climate Change 1992 : The supplementary report to the IPCC Scientific Assessment*. Houghton, J. T., B. A. Callander, and S. K. Varneyl eds. Cambridge University Press.
- IPCC-TGICA. 2007. *General Guidelines on the use of Scenario Data for Climate Impact and Adaptation Assessment*. Version 2. Prepared by T. R. Carter on behalf of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Task Group on Data and Scenario Support for Impact and Climate Assessment, p.66.
- Jyrkama, M. I., J. F. Sykes, and S. D. Normani. 2002. "Recharge estimation for transient ground water modeling". *Ground Water*, 40: 638-648.
- Jyrkama, M. I. and J. F. Sykes. 2007. "the impact of climate change on spatially varying groundwater recharge in the Grand River watershed(ontario)". *Journal of Hydrology*, 338: 237-250.
- Kirshen, P. H. 2002. "Potential impacts of global warming on groundwater in eastern Massachusetts". *Journal of Water Resources Planning and Management*, 128: 216-226.
- Lerner, D., A. S. Issar, and I. Simmers eds. 1990. *Groundwater recharge: a guide to understanding and estimating natural recharge*. Heise, Hannover.
- Mearns, L. O., F. Giorgi, P. Whetton, D. Pabon, M. Hulme, and M. Lal. 2003. *Guidelines for use of climate scenarios developed from Regional Climate Model experiments*. Data Distribution Centre of the International Panel of Climate Change, p.38.
- Richardson, C. W. and D. A. Wright. 1984. *WGEN: A model for generating daily weather*

- variables*. ARS-8. Agricultural Research Service, US Department of Agriculture.
- Risser, D. W. 2008. *Spatial distribution of ground-water recharge estimated with a water-budget method for the Jordan Creek watershed, Kehigh County, Pennsylvania*. Scientific Investigations Report 2008-5041, U.S. Geological Survey.
- Risser, D. W., W. J. Gburek, and G. J. Folmar. 2009. "Comparison of recharge estimates at a small watershed in east-central Pennsylvania, USA". *Hydrogeology Journal*, 17: 287-298.
- Rosenberg, N. J., D. J. Epstein, D. Wang, L. Vail, R. Srinivasan, and J. G. Arnold. 1999. "Possible impacts of global warming on the hydrology of the Ogallala Aquifer Region". *Climatic Change*, 42: 677-692.
- Schroeder, P. R., T. S. Dozier, P. A. Zappi, B. M. McEnroe, J. W. Sjostrom, and R. L. Peyton. 1994. "The Hydrologic Evaluation of Landfill Performance (HELP) Model: Engineering Documentation for Version 3". U.S. Environmental Protection Agency Office of Research and Development, Washington, DC.
- Scibek, J. D. M. Allen, A. J. Cannon, and P. H. Whitfield. 2007. "Groundwater-surface water interaction under scenarios of climate change using a high-resolution transient groundwater model". *Journal of Hydrology*, 333: 165-181.
- Takata, K., S. Emori, and T. Watanabe. 2003. "Development of the minimal advanced treatments of surface interaction and runoff". *Global and Planetary Change*, 38(1-2): 209-222.
- USDA, Soil Conservation Service. 1985. *National engineering handbook, section 4, hydrology*. Washington, D.C.: US Government Printing Office.
- Vaccaro, J. J. 1992. "Sensitivity of groundwater recharge estimates to climate variability and change, Columbia Plateau, Washington". *Journal of Geophysical Research*, 97: 2821-2833.
- Walker, G. R., L. Zhang, T. W. Ellis, T. J. Hatton, and C. Petheram. 2002. "Estimating impacts of changed land use on recharge: review of modelling and other approaches appropriate for management of dryland salinity". *Hydrogeology Journal*, 10: 68-90.
- Xuejie, G., L. Yong, L. Wantao, Z. Zongci, and F. Giorgi. 2003. "Simulation of Effects of Land Use Change on Climate in China by a Regional Climate Model". *Advances in atmospheric sciences*, 20(4): 583-592.