

GIS를 이용한 기후변화 연동 지하수 함양량 산정 모델 개발 및 검증

이명진^{1, 2*} · 이정호¹

Coupled Model Development between Groundwater Recharge Quantity and Climate Change Using GIS

Moung-Jin LEE^{1, 2*} · Joung-Ho LEE¹

요 약

본 연구의 목적은 지리정보를 활용하여 기후변화에 따른 지하수 함양량 산정 모델 개발 및 검증 수행하는 것이다. 이를 위하여 기후변화에 따른 지하수 함양량 변화를 산정하는 방법론을 제시하였고, 지리정보시스템을 활용하여 연구지역의 시기별 미래 지하수 함양량을 추정하였다. 연구지역은 낙동강 본류를 포함하는 낙동강 유역을 선정하였다. 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 연구에서는 지리정보를 활용하여 기존에 기후변화와 지하수 함양량의 불명확한 관계를 정량적으로 분석하였으며, 미래 기후변화 예측 결과를 반영한 연구지역 내 지하수 함양률 변화를 시-공간적으로 산정하였다. 또한 유역내 기저유출량과 비교 분석을 통하여 검증하였다. 앞으로 연계모델의 고도화 방안 및 현장조사가 추가 된다면 보다 정량적으로 기후변화와 지하수 함양량의 상관관계를 파악 할 수 있으며, 향후 본 연구는 수자원으로 이용이 증가되는 지하수의 전반적인 관리 및 효율적인 운영 체제 구축을 위한 한 축을 차지 할 수 있다는 점에서 중요성이 있다고 하겠다.

주요어 : 지리정보시스템(GIS), 기후변화, 지하수 함양량, 함양률

ABSTRACT

Global climate change is disturbing the water circulation balance by changing rates of

2011년 5월 31일 접수 Received on May 31, 2011 / 2011년 7월 8일 수정 Revised on July 8, 2011 / 2011년 7월 22일 심사완료 Accepted on July 22, 2011

1 한국환경정책·평가연구원 국가기후변화적응센터 Korea Adaptation Center for Climate Change, Korea Environment Institute

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

* 연락처 E-mail : leemj@kei.re.kr

precipitation, recharge and discharge, and evapotranspiration. 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. In this study, the authors selected a relevant climate change scenario, 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 periodically and embodied as geographic information system (GIS). In order to calculate the groundwater recharge quantity, Visual HELP3 was used as main model, 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 of ground circulation system, it may be urgent to recalculate the groundwater recharge quantity and consequent change under future climate change. The space-time calculation of changes of the groundwater recharge quantity in the study area may serve as a foundation to present additional measures to improve domestic groundwater resource management.

KEYWORDS : *Geographic Information System (GIS), Climate Changes, Groundwater Recharge, Recharge Ratio*

서 론

기후변화 영향 심화에 따른 극대 홍수 및 극대 가뭄의 빈번한 발생으로 인류사회의 효과적인 대응 및 적응이 시행되어야 하는 상황이 도래되었다. 인간의 삶의 영향에 미치는 가장 중요한 이슈인 '수자원 및 이수' 분야의 빠른 기후변화 대책 마련은 논란의 여지가 있을 수 없다. 이에 기후사상 변화 예측 결과를 중-장기적 수자원 이용 및 관리를 위한 국가 제반 계획에 명확히 반영해 한다. 현재 우리나라의 연간 지하수 사용량은 약 37억^m³ 으로서, 전체 수자원 사용량의 10% 정도에 불과하나, 국내 전체 지하수 이용 가능량의 35%를 상회하고 있다. 지하수는 지역적 이용량에서도 큰 차이를 나타낸다. 기후변화 현상 심화에 따라 가뭄 빈도 및 현상 강화가 예상되며 대체 수자원으로 활용될 수 있는 지하수 수요에 대한 관리가 시급하다. 본 연구를 통하여 미래 기후변화에 따른 미래 지하수 함양

량을 산정하여 기후변화에 따른 '수자원 및 이수'의 효율성을 확보할 필요가 있다. 또한 미래 기후변화 추이 반영을 통한 지하수 함양량의 변화를 정량적으로 계산하여 향후 지역별 지하수 이용량 산정과 같은 직접적인 지하수 활용 방안을 제시 할 수 있다.

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 예견하였다. 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 대유역 차원에서 기후변

화에 의한 지하수 함양량 추정 및 산정 기법을 개발하고 기후변화에 따른 지하수 함양량을 분석하는 것이다. 이를 위하여 첫째, IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change)에서 제공하는 기후변화 시나리오 중 지하수 함양량 산정에 필요한 적정 시나리오의 공간 통계적 스케일 상세화를 수행하였다. 둘째, 기후변화 자료와 지하수 유동 모델의 연동을 통하여 낙동강 유역의 지하수 함양량은 산정하였다. 셋째, 유역 내 기저유출량 분석에 의한 결과 검증이다. 본 연구 결과는 수자원 장기 종합계획 및 지하수 관리 기본계획 등과 같은 국가 단위의 계획 수립에 연계되어 미래 지하수 자원의 이용 방향을 제시하는 기초가 될 것이다.

연구방법 및 내용

1. 연구 지역 선정 및 공간데이터베이스 구축

연구 지역인 낙동강 권역은 부산, 대구 및 일부 광역시를 제외한 지역에서 농촌 지하수 사용률이 높은 지역이다. 지하수 사용률이 높기 때문에 기후변화에 따른 지하수 함양량의 변화가 타 지역에 비해 높을 수 있다. 낙동강 유역과 한강유역을 비교 하였을 때 한강유역은 인구 밀집 지역으로 용수 사용량은 전국 최고 이지만, 대부분 도심권과 연계되어 광역 상수도를 사용하며 기후변화에 의한 지하수 함양량의 변화가 둔감한 지역이다(강형식, 2010). 낙동강 유역의 기초 환경은 국내 제 2의 하천유역으로서, 유역면적은 23,384.21 km²이며, 유로연장 510.36km로 국내 최장 하천이다. 동경 127° 29'~129° 18', 북위

35° 03'~37° 13' 사이에 위치하고 있으며, 본류는 낙동강 유역의 중심부를 관통하며, 곳곳에 입지한 산지로 유향이 급변되면서 남해안으로 유입된다(그림 1).

연구에 필요한 공간데이터베이스는 불투수층 분포, 토양의 수분학적 분류, 경사도 및 기후변화 시나리오 이다. 불투수층 분포는 토지 피복지도의 시가화 건조지역을 추출하여 분석하였다. 토양의 수분학적 분류는 정밀토양도의 토양분류를 바탕으로 분석하였으며, 수치지형도를 활용하여 DEM(Digital Elevation Model)을 생성하여 경사도를 구축하였다. 또한 미래 기후변화 추이에 따른 지하수 함양량 변화 추이를 파악하기 위하여 고도에 따른 기온 및 강우량을 적용하여 상세화된 기후변화 시나리오를 구축하였다(표 1).

2. 기후변화 시나리오 통계적 스케일 상세화

활용된 과거 기상자료는 1971년부터 2000년까지 낙동강 유역 24개 기상 관측소에서 획득되었다. 공간 통계적 스케일 상세화에 활용된 미래 예측 자료는 기상청 기후변화정보센터를 통하여 2005년부터 제공되는 A1B 지역 기후모형 결과(KMA-RCM : Korea Meteorological Administration - Regional Climate Model)이다. KMA-RCM은 편의보정을 한 중규모 기후예측 모형으로, 독일 막스플랑크 연구소에서 개발된 ECHO-G/S 기후모델을 도입하여 SRES A1B 시나리오를 바탕으로 구성되었다. ECHO-G/S 모델은 대기모델인 ECHAM4와 해양 모델인 GIOE와 OASIS로 구성된 대기해양병합순환모델(AOGCMs : Coupled atmosphere-ocean

TABLE 1. Input GIS Database

자료명	항목	자료형태	Scale
토지피복지도	불투수층	Polygon	1:25,000
토양도	토양분류	Polygon	1:25,000
수치지형도	DEM	Grid	1:25,000
KMA-RCM	미래 기후변화 시나리오	Point	27km

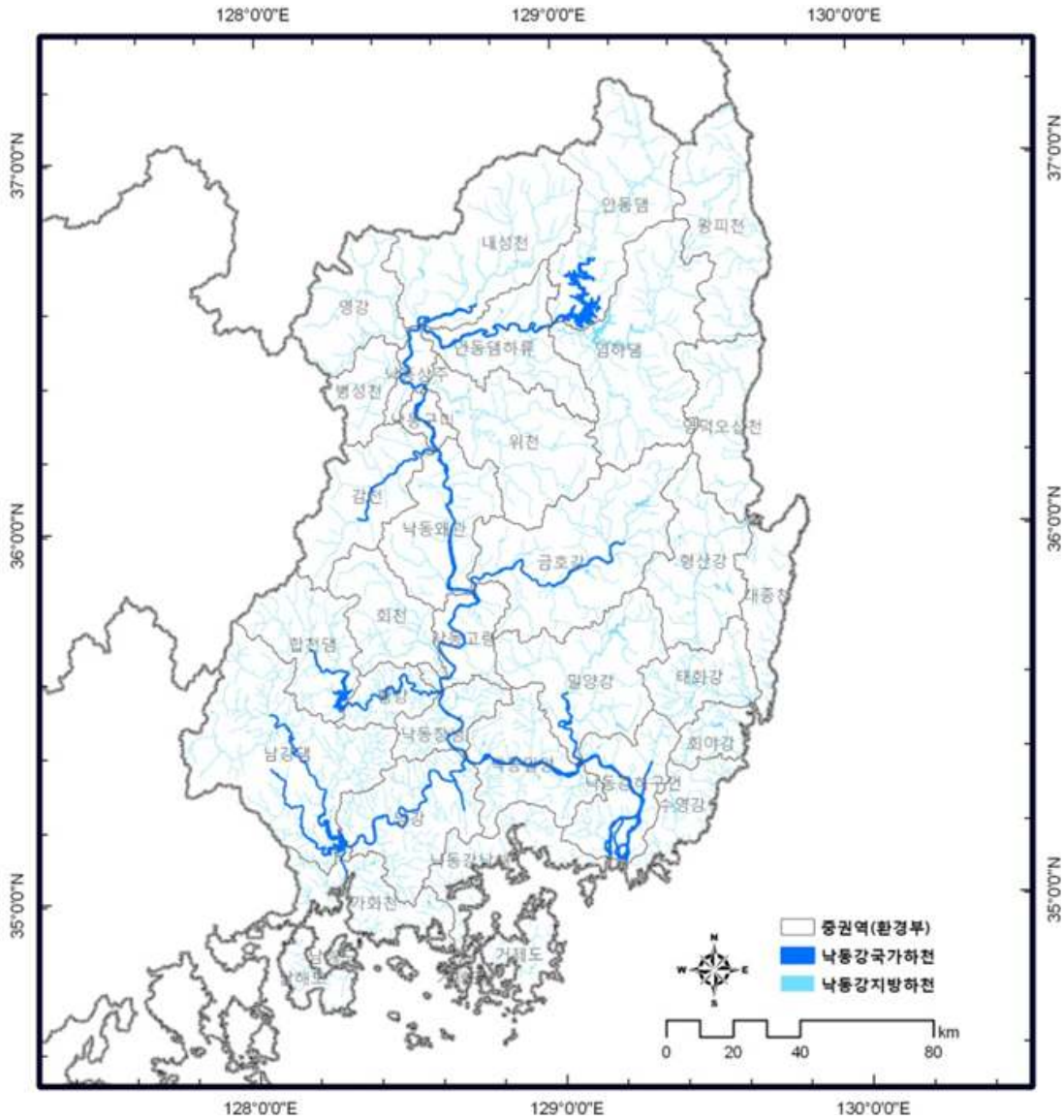


FIGURE 1. Study area

general circulation models)을 사용하였다. KMA-RCM은 기상청에서 사용하는 스케일 상세화 모델을 의미하는 것으로 IPCC Data Distribution Center에서 제공되는 전지구 기후변화 시나리오를 역학적 상세화를 통하여 한반도 주변 기후변화 시나리오를 산출한 것이다. KMA-RCM의 공간해상도는 27km이

다. 이러한 27km의 공간해상도를 공간 통계적 기법 및 고도에 따른 기온 감률을 적용하여 1km까지 상세화 하였다.

전체 자료 구축 기간은 1971년 ~ 2100년이며, 과거 기상 자료는 기상청에서 제공하는 1971년 ~ 2000년까지의 기상 관련 자료 중 기온(°C) 및 강수량(mm)을 대상으로 하였

다. 자료 처리를 위하여 낙동강 유역 24개 관측소 위치도를 작성하였으며 관측소별 거리 분포를 분석하였다. 또한 기상관측 자료 중 일별 자료를 바탕으로 하여 평균 또는 누적 방식을 활용하여 월별 자료로 구축하였다. 월 및 연도 자료는 기온의 경우는 일별 자료를 월별로 누적 후 일수로 나눈 평균값을 활용하였다. 강우량의 경우 일별 강우량 값을 누적하여 월 및 연도별 자료로 구축하였다. 최종 구축된 자료의 구성은 기상 관측소, 기상요인(강우 및 기온), 시계열(일, 월 및 연도)별 기상자료가 구축되었다. 구축된 과거 기상자료는 24개 관측소 위치를 기반으로 하여 지리정보의 공간보간법 중 Kriging 및 IDW 방법이 적용되었다.

지리적 인자 중 기후요소의 시·공간 변동에 가장 큰 영향을 미치는 인자는 해발고도이다. 특히, 기후요소 중 기온은 해발고도의 영향을 많이 받으며, 대류권 내에서는 고도가 상승함에 따라 기온은 하강한다(이승호, 2007). 기온의 보간에 사용된 Kriging 기법은 보간 자료를 공간 추정 과정에서 고려하는 방식이다. 기온의 경우 고도와 선형 상관관계를 가지고 있기 때문에(박노옥, 2008) 미관측 지점에서의 기온 값을 추정하는데 있어서 고도 자료가 부가적인 정보를 제공하여 유추되는 측정값의 오차를 줄일 수 있다. 또한 기온의 경우 고도가 지역 내에서 일정한 영향을 나타내기 때문에 Kriging 방법이 적절하다(Brown, 2002). 강수량은 공간 자료 분포의 국지성과 불변성이 높아 IDW 기법을 적용하였다. IDW는 지역 내에서 나타날 수 있는 강수량의 변이성을 훨씬 잘 설명해 줄 수 있는 기법이다(Davis, 2002). 기상자료의 특성을 최대한 반영할 수 있는 보간법을 다르게 적용하였다.

또한 고도에 따른 관측소 별 기온 및 강우 감률을 적용하였다. 최종적으로 토지피복지도를 활용하여 생성된 육지 영역 경계를 바탕으로 공간자료를 정리하여 기상요인별, 월 및 연도별 기상 분포도를 작성하였다. 또한 기상

인자는 비관측점과 공간내삽에 활용되는 주변 관측점간 표고편차를 기온 및 강우 감률에 의해 보정해주는 비교적 간단한 방법을 적용하였지만 우수한 결과를 나타내므로 각 기상 관측점의 고도에 따른 표고 편차를 기온 하강 및 강우 감소의 지표로 적용 식 1, 식 2 및 식 3에 적용하였다.

미래 예측 자료는 기온 및 강우량으로 구성되며 전술하였듯이 기상청 기후변화정보센터에서 제공 받은 KMA-RCM을 활용하였다. KMA-RCM의 특징은 2001년의 시점을 기준으로 등간격 점 형태의 기온 및 강우의 변화량만으로 표현되어 있다. 본 연구에서는 과거 기상 자료를 기준으로 미래 기후변화 시나리오의 상대적 변화량을 반영하여 미래 기후변화 변화를 절대량으로 표현하였다. 자료 처리를 위하여 기온 및 강우량의 KMA-RCM 자료(ASCII)를 위치좌표 값을 가질 수 있도록 처리하였다. KMA-RCM은 포인트 형태로 제공되며 내삽법을 이용하여 공간해상도 1km로 작성하였다. 이때 내삽을 위하여 활용되는 방법은 전술한 Kriging 기법을 활용하였다. 유사한 새로운 격자 값을 출력하기 위하여 가장 인접한 값을 이용하는 방식을 활용하였으며 기초 자료는 30m DEM을 활용하였다. 자료 구축은 평균 기온, 강우량의 총 2개 항목으로 구축하였다. 2000년부터 2100년까지 총 100년의 미래 기상자료를 구축하였으며 KMA-RCM은 순별(10일 단위)로 구성되어 있지만, 순별 자료 처리에 대한 시간과 자료 처리 양에 대한 문제로 월단위로 구축하였다. 자료 구축 방식은 과거기상자료 구축과 동일한 방식을 활용하였다(그림 2).

$$\begin{aligned} \tau &= 0.00688 + 0.0015 \cos 0.0172(i - 60) \\ &\text{평균기온감율} \end{aligned} \quad (1)$$

$|\tau|$: 연중 일자에 따른 기온감율 절대값
 i : 연중 일자(1/1일=1, 12/31일=365)

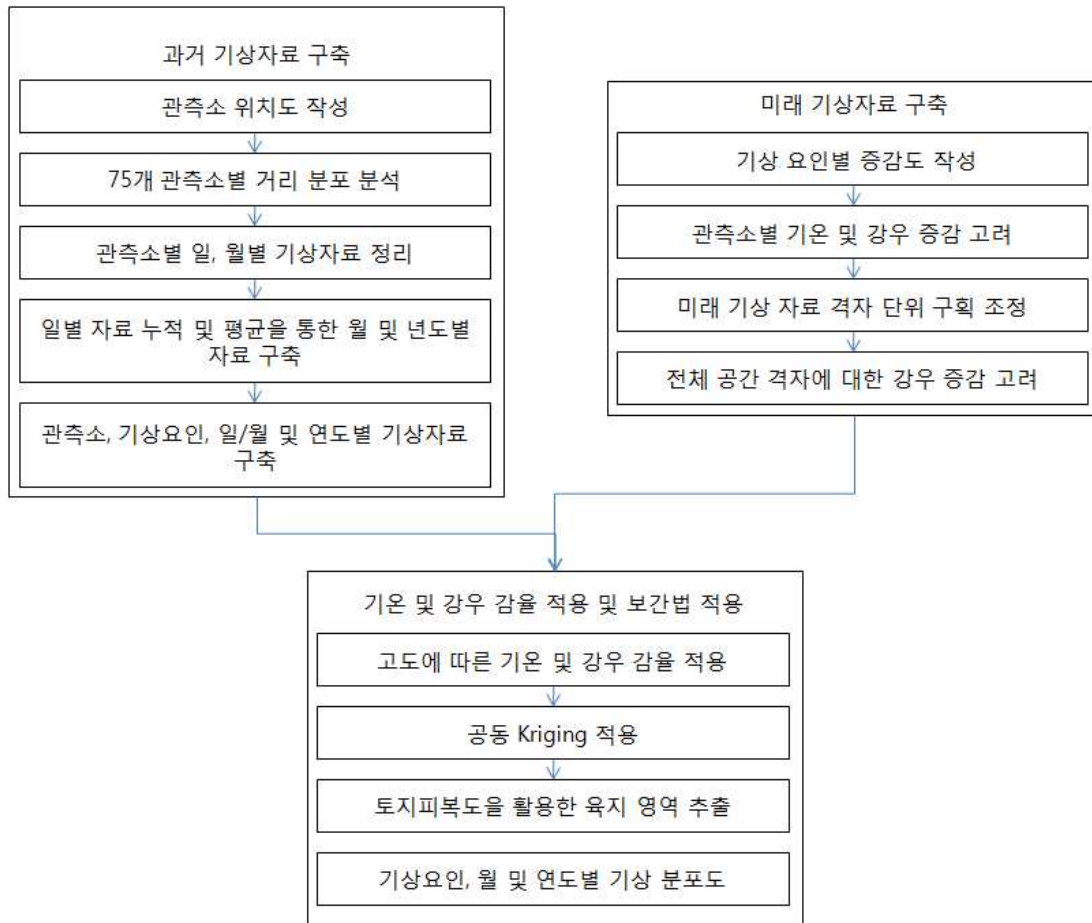


FIGURE 2. Past and Future Weather Data Processing Flow

$$T = T_i + Elevation(m) \times \text{기온감율} \quad (2)$$

$$P = P_i \times (1.74)^{\frac{Elevation}{1000}} \quad (3)$$

$$P = P_i \times (0.54)^{\frac{Elevation}{1000}}$$

3. 기후변화 연동 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(Brouyere, 2004), 및 HELP(Hydrological Evaluation of Landfill Performance)(임은진, 2004)를 비교 분석하였다. 전술한 모형선정기준 중 모형을 실제 유역에 적용해봐야 알 수 있는 사항을 제외한다면, 모형의 선정기준은 첫째, 사용가능성 또는 개발가능성이다. 대부분의 장기 지하수 유동모델들은 이 조건에 충족하는 것으로 판단된다. 둘째, 목적에 부합하느냐는 것이다. 본 연구의 주요 목적은 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 주 대상으로 하며 입력 자료에서도 기상 및 기온 자료가 포함된다. 이를 고려한 모형 선택이 필수적이다. 넷째, 입력 자료의 구축에 관련된 사항이다. 국내의 경우 분포형 모형을 이용하여 유출모의를 수행하는 것은 입력 자료의 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 HELP3이며, 본 연구에서는 이를 활용하였다.

HELP3 모형은 지표유출(surface runoff), 침투(infiltration), 증발산(evapotranspiration), 침투(percolation) 등의 토양층에 대한 수문성분을 결정하기 위한 준 2차원의 모형으로 Schroeder *et al.*(1994)에 의해 개발되었다. HELP3의 지배 방정식은 토양층에서의 흐름을 비포화 투수계수로 고려한 Darcy(식 3 및 식 4) 법칙에 의해 모의된다. HELP3는 일단위의 시간규모를 사용하며, 최저토양층에서의 침투량(PR)은 지표수문성분들의 물수지 균형에 기초하여 다음 식 2와 같이 간접적으로 산정될 수 있다. P는 강우량, E는 증발산량, Q는 지표유출량, ΔS 는 토양수분저류량의 변화를 나타낸다.

$$q = -K \frac{dh}{dl} \quad (4)$$

$$PR = P - (E + Q + \Delta S) \quad (5)$$

HELP3 모형에 입력되는 자료는 기상자료(climatologic data), 토양자료(soil data) 그

리고 설계자료(design data)로 구성되어 있다. 기본적인 기상요소 자료는 미국농무성(U.S. Department of Agriculture; USDA)이 개발한 WGEN 모형을 차용하고 있다. 직접유출량 모델링도 미국농무성 토양보존국(Soil Conservation Service; SCS)의 유출지수(curve number; CN)방법을 활용한다(USDA, 1985).

4. 낙동강 유역의 유출곡선지수(Curve Number) 보정

기존의 CN 산정 방법론은 토양의 수분과 유출률이 보통인 상태 하에, 평균 경사도 5% 미만인 소규모 지역의 유출량을 산정하기 위해 개발된 방법론으로, 농경지나 평지지역에서는 비교적 좋은 결과를 도출하지만 산간지역에서는 적용성이 낮은 편이다. 수자원의 지속적 확보기술개발사업단의 CN 산정 방법론 역시 강우 손실 및 유출에 큰 영향을 미치는 지형적 경사도를 고려하지 않고 있어, 유역의 67% 이상이 산지로 구성된 낙동강 유역의 경우 본 방법론을 적용하여 CN을 산정하는데 무리가 있다.

이에 본 연구에서는 경사를 고려한 CN(Walker *et al.*, 2002)의 CN 산출식 식 5를 반영하였다. 여기서 slope는 % 단위의 경사도로 수치지형도를 통하여 구축한 30m DEM을 활용하여 격자별 경사도를 적용하였다. CN_{2s} 는 토양의 수분과 유출률이 보통인 상태에서 경사도에 따라 보정된 CN이다. CN_2 는 토양의 수분과 유출률이 보통인 상태에서 경사도가 보정되지 않은 선행토양 함수 조건(AMC : Antecedent Soil Moisture Condition) II 조건 하의 CN, CN_3 는 선행강우로 인하여 토양이 포화 상태로 유출률이 높은 AMC III 조건하(습윤 상태)의 경사도가 보정되지 않은 CN 값이다. 습윤 상태의 CN_3 는 아래의 식 6을 통해 산정할 수 있다. 본 연구에서는 앞서 산정된 낙동강 유역의 격자별 경사도를 산출하

TABLE 2. Antecedent Soil Moisture Condition

AMC	선행토양 수분상태	5일 선행강우량 P_5 (mm)	
		비성수기	성수기
I	토양이 건조상태로 유출률이 낮은 상태	$P_5 < 12.70$	$P_5 < 35.56$
II	토양의 수분과 유출률이 보통인 상태	$12.70 < P_5 < 27.94$	$35.56 < P_5 < 53.34$
III	선행강우로 인하여 토양이 포화 상태로 유출률이 높은 상태	$P_5 > 27.94$	$P_5 > 53.34$

여 습윤상태의 CN_3 을 도출하고, Walker *et al.*(2002)의 방법론을 적용하여 경사도가 보정된 CN_{2s} 를 산출하였다(표 2).

$$CN_{2s} = \frac{(CN_3 - CN_2)}{3} \cdot [1 - 2 \cdot \exp(-13.89 \cdot \text{slope}(\%))] + CN_2 \quad (6)$$

$$CN_3 = \frac{23 \cdot CN_2}{10 + 0.13 \cdot CN_2} \quad (7)$$

5. 기후변화 연동 지하수 함양량 산정 모델 개발

산정 기법 개발을 위한 연구 흐름은 그림 3과 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 위한 현지 기상실측 자료의 확보 가능성과 검증을 위한 유역내 기저유출량이 존재하는 지역을 우선으로 선정하였다. 기상자료는 전술하였듯이 과거부터 현재까지의 기상실측자료 수집과 A1B SRES를 기반으로 한 지역기후 모델 다운스케일링을 통한 미래 기상자료 예측 값으로부터 획득하였다. 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 격자별로 제작하였다. 공간자료 중 속성자료는 토지이용 현황에 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, 격자별 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. 산정된 지하수 함양량을 바탕으로 지리정보시스템을 활용해 도면화하여 직관력을 높이는 작업을 수행하였다. 또한, 강수량 및 지하수 함양량을 바탕으로 지하수 이용가능량을 산정하였다.

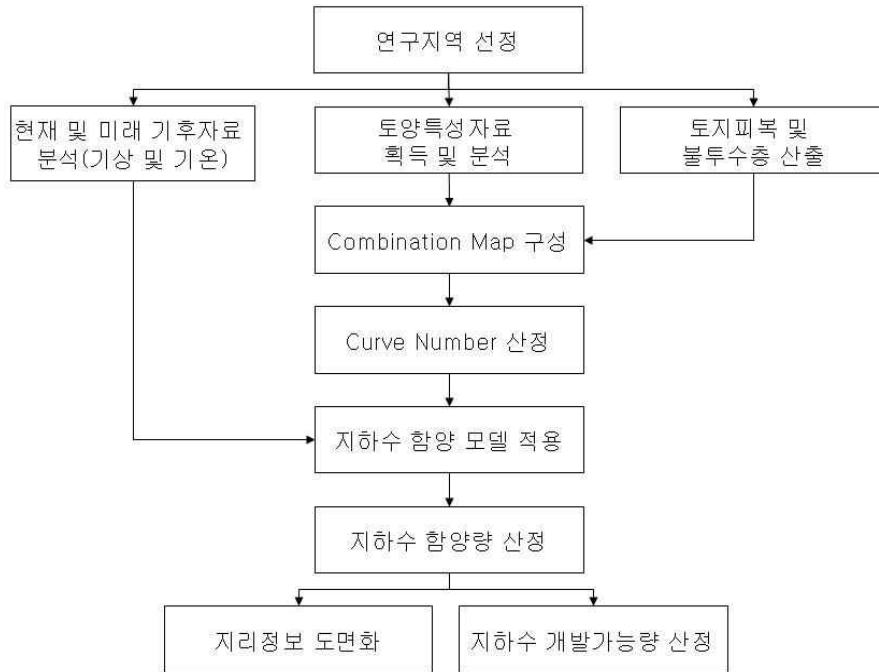


FIGURE 3. Flow Chart of Coupled Model Development

6. 연구지역 기저유출량 산정을 통한 검증

본 연구결과의 검증은 연구지역의 기저유출량 산정을 통하여 수행하였으며, 3가지를 가정을 고려하였다. 첫째, 물의 순환과정을 수문수환이라고 하며, 이중 유출은 지표면에 도달한 강우가 하천에 이르는 경로에 따라 다시 지표면 유출, 지표하 유출, 중간 유출 및 지하수 유출로 구분된다. 기저유출량은 이러한 유출의 전체 과정을 모두 포함한다. 그렇기 때문에 지하수 함양량은 전체 기저유출량보다 작아야 한다. 둘째, 낙동강유역의 과거 강우사상의 경향을 고려하면, 집중호우 기간을 제외하고는 일관된 유량의 흐름을 나타내고 있다. 일관된 유량을 나타내는 시기의 낙동강 유량은 주변지역의 지하수 유입으로 판단하였다. 셋째, 대전 유성지역 소유역의 지하수 함양량 산정을 검증하는 과정에서도 본 연구의 결과 검증과 유사한 기저유출량 산정을 통하여 수행되었다(조성원 등, 2005).

기저유출은 지면 지표하 유출과 지하수 유출량이 합쳐 나타나는 유출이다. 따라서 그 동적인 양상이 단기간에 걸쳐 큰 폭으로 변하는 하천의 직접유출 보다는 매우 큰 시간 폭으로 더디게 변화한다. 때문에 기저유출의 변화양상을 시(hr)단위로 분석하는 것은 큰 의미가 없다고 판단된다. 따라서 본 연구에서는 일(day)단위 유량자료를 사용하였으며, 한강홍수통제소(<http://www.hrfco.go.kr>)에서 제공하고 있는 국토해양부 관할 낙동강 유역 유량 측정 지점의 2009년도 일별 유량 측정 자료를 이용하였다. 한편, 신뢰성 있는 기저유출의 분리를 통한 합리적인 대표단위도를 유도하기 위하여 본 연구에서는 수평직선분리법과 USGS(U.S geological survey)에서 개발한 프로그램인 PART를 이용하여 기저유출을 분리하고, 해당 유역의 연간 기저유출량을 계산하였다.

연구 결과 및 검증

1. 미래 기후변화 시나리오 분석에 따른 낙동강 유역 기후 사상 결과

미래 기후변화 시나리오 분석을 통한 낙동강 유역의 기후 사상 변화는 전술한 목표연도를 중심으로 정리하였다. 목표시점은 지하수 함양량 산정과 동일한 시점으로 정하였으며, 1차년도 시점과 동일하게 1971년부터 2000년을 2000년대, 2001년부터 2030년을 2030년대, 2031년부터 2050년을 2050년대, 2051부터 2100년을 2100년대로 정의하였다. 목표연도 및 월별 분석을 수행하였으며, 최소, 최대 및 평균값으로 세부 분류 하였다.

전반적인 기온 및 강우량 분석은 표 3과 표 4와 같다. 기온에 대한 세부 분석은 전반적으로 증가하는 추세이며, 기온의 평균, 최소

및 최대값을 비교하였을 때, 다른 동일시기에 비해 2030년 1월이 가장 낮은 기온을 보였다. 또한 기온의 최소, 최대 및 평균값을 모두 비교하여도 2100년 8월(30.98℃) 및 7월(29.62℃)이 가장 높은 것으로 파악되었다. 2000년대, 2030년대, 2050년 및 2100년대를 비교하였을 때 기간 경과에 따라 낙동강 유역의 기온이 전체적으로 증가하는 것으로 나타났다. 강우량에 대한 세부 분석에서 강우는 기간 경과에 따라서 지속적으로 증가하고 있으나, 2050년 및 2100년에서 급속히 증가하는 것을 나타낸다. 또한 최소, 최대 및 평균값을 비교 하였을 때 2030년 1월이 10.96mm로 가장 적은 값을 나타냈으며, 2050년 7월 및 2100년 8월이 최소, 최대 및 평균 강우량에서 가장 많은 부분을 차지 하였다.

TABLE 3. Max, Min and Mean Temperature of Year/ Monthly(℃)

년/월	최소값	최대값	평균값	년/월	최소값	최대값	평균값
2000년 01월	-13.71	3.21	-2.58	2050년 01월	-12.39	4.59	-1.21
2000년 02월	-12.15	4.60	-0.64	2050년 02월	-11.05	5.92	0.51
2000년 03월	-7.51	8.70	4.40	2050년 03월	-5.39	10.78	6.65
2000년 04월	-1.44	13.98	10.95	2050년 04월	0.66	16.08	13.03
2000년 05월	3.21	18.91	15.79	2050년 05월	5.02	20.97	17.86
2000년 06월	7.20	22.76	19.80	2050년 06월	9.38	24.92	21.98
2000년 07월	10.49	26.01	23.09	2050년 07월	12.91	28.61	25.72
2000년 08월	10.82	26.38	23.48	2050년 08월	13.30	28.92	25.94
2000년 09월	6.00	220.83	18.50	2050년 09월	8.36	24.93	20.93
2000년 10월	-0.11	17.62	12.27	2050년 10월	2.49	20.10	14.91
2000년 11월	-6.29	11.56	5.57	2050년 11월	-4.69	13.13	7.18
2000년 12월	-11.73	5.81	-0.34	2050년 12월	-9.53	8.01	2.02
2030년 01월	-14.11	2.95	-3.11	2100년 01월	-9.79	6.74	1.48
2030년 02월	-11.70	5.10	-0.16	2100년 02월	-8.65	7.93	3.02
2030년 03월	-7.51	8.90	4.53	2100년 03월	-4.59	11.53	7.47
2030년 04월	-0.44	14.98	11.94	2100년 04월	1.66	17.08	14.10
2030년 05월	4.20	19.97	16.88	2100년 05월	6.11	21.91	18.79
2030년 06월	8.52	24.06	21.09	2100년 06월	11.30	27.12	24.22
2030년 07월	11.49	26.92	24.06	2100년 07월	14.11	29.62	26.77
2030년 08월	12.32	27.87	25.01	2100년 08월	15.35	30.98	28.13
2030년 09월	7.30	23.83	19.85	2100년 09월	10.11	26.73	22.77
2030년 10월	0.91	18.72	13.36	2100년 10월	3.29	21.02	15.79
2030년 11월	-5.19	12.56	6.68	2100년 11월	-2.35	15.12	9.76
2030년 12월	-10.23	7.13	1.14	2100년 12월	-8.01	9.17	3.64

TABLE 4 Max, Min and Mean Precipitation of Year/ Monthly(mm)

년/월	최소값	최대값	평균값	년/월	최소값	최대값	평균값
2000년 01월	17.93	38.01	24.35	2050년 01월	8.36	19.53	11.15
2000년 02월	23.38	44.17	31.32	2050년 02월	16.44	34.78	23.15
2000년 03월	43.47	86.13	55.38	2050년 03월	47.04	67.72	56.07
2000년 04월	69.69	142.88	88.62	2050년 04월	84.69	196.63	119.77
2000년 05월	69.51	155.94	91.89	2050년 05월	52.99	123.66	75.19
2000년 06월	122.29	235.23	163.66	2050년 06월	111.12	199.12	139.53
2000년 07월	177.24	302.11	241.40	2050년 07월	260.55	472.60	352.11
2000년 08월	189.25	334.88	235.64	2050년 08월	221.45	370.32	271.23
2000년 09월	112.62	220.83	140.63	2050년 09월	120.10	288.77	168.93
2000년 10월	39.02	73.76	48.12	2050년 10월	68.54	157.57	96.90
2000년 11월	35.35	60.35	42.20	2050년 11월	37.46	77.35	49.68
2000년 12월	15.05	28.22	18.95	2050년 12월	16.76	31.79	20.96
2030년 01월	7.41	18.64	10.96	2100년 01월	19.50	40.80	25.01
2030년 02월	27.20	63.79	41.87	2100년 02월	18.49	41.75	27.16
2030년 03월	45.64	83.37	58.51	2100년 03월	58.27	98.73	69.63
2030년 04월	70.70	148.99	90.37	2100년 04월	87.27	166.64	106.63
2030년 05월	56.15	135.14	74.72	2100년 05월	54.28	116.78	74.91
2030년 06월	140.17	281.27	186.75	2100년 06월	126.52	266.47	176.87
2030년 07월	169.87	276.65	215.32	2100년 07월	143.75	339.91	203.51
2030년 08월	103.93	218.05	149.44	2100년 08월	256.62	407.88	301.94
2030년 09월	128.80	325.43	189.37	2100년 09월	161.56	412.57	243.10
2030년 10월	40.20	87.08	53.13	2100년 10월	43.16	104.00	58.49
2030년 11월	27.54	55.50	33.10	2100년 11월	31.14	65.71	39.17
2030년 12월	14.56	29.90	19.10	2100년 12월	19.01	43.04	25.54

2. 미래 기후변화 시나리오 분석에 따른 낙동강 유역 기후 사상 결과

낙동강 본류 유역의 지하수 함양률 산정을 위해, IPCC 전 세계 기후모형(GCM)을 바탕으로 지역 기후모형(RCM) 수준의 공간 해상도로 상세화하여 온도 및 강수량을 산정하였으며, 국내에 적합한 수문학적 토양유형에 따라 피복분류 통계적 접근법을 사용하여 중분류 토지피복 항목별 CN을 산정하였다. 본 과정을 통해 구축된 입력자료 등을 HELP3 모델에 입력하여, 공간해상도 30m 기반의 격자별 지하수 함양률 및 함양률을 산출하였다. 기후변화에 따른 지하수 함양률의 시간적 변화는 1970~2000년 27.37%, 2001~2030년 27.43%, 2031~2050년 26.06%, 2051~2100년 27.88%로 산정되었다. 전반적으로 함양률은 강수량 변화에 민감하게 반응하는

것으로 분석되었다. 또한, 유출곡선지수에 따른 함양률 변화는 크게 영향을 받지 않으나, 지수 값이 불투수층에 가까운 지역일수록 함양률이 급격히 감소됨을 알 수 있었다. 시기별 강수량 대비 강수량, 지하수 함양률 및 함양률은 표 3과 같다. 함양률 1970년 이후부터 2030년까지 증가하다가 2031년~2050년까지 감소하고, 2051년 이후 다시 증가하는 것으로 나타났다. 이는 전체적인 미래예측 기후변화와 동일한 흐름을 나타내는 것으로 사료된다(표 5).

본 연구대상 지역은 낙동강 권역 중 22개 유역으로, 이들 유역별 지하수 평균 함양률, 함양률은 표 6과 같다. 시기별 평균 함양률을 분석하면 감천 유역이 2000년대 30.87%, 2030년대 30.87%, 2050년대 29.29% 및 2100년대 31.56%로 가장 높았다. 가장 낮은 지하수 함양률을 나타내는 유역은 낙동고령

지역으로 2000년대 23.80%, 2030년대 23.84%, 2050년대 22.73%, 2100년대 24.06%로 가장 낮았다. 유역별 평균 함양량 분석의 특징은 2000년대에서 높은 함양률을 나타내는 감천 유역이 타 년대에서도 높은 함양률을 나타내고 있다. 또한 2000년대 낮은 함양률을 나타내는 지역은 타 년대에서도 낮은 함양률을 보이는 현상을 보였다.

시기별 함양량을 분석하면 남강댐이 2000년대 619,960,000m³/년, 2030년대 620,580,000m³/년, 2050년대 581,220,000

m³/년 및 2100년대 643,500,000m³/년으로 가장 높았다. 가장 낮은 지하수 함양량은 낙동구미 유역으로 2000년대 49,675,000m³/년, 2030년대 49,751,000m³/년, 2050년대 46,636,000m³/년 및 2100년대 51,802,000m³/년으로 가장 낮았다. 유역별 함양량 특징은 평균 함양량 특징과 동일하게 남강댐의 지하수 함양량이 시기별 영향을 받지 않고 지속적으로 높은 경향을 나타냈으며, 낙동구미 유역은 지속적으로 낮은 함양량을 나타냈다. 시기별 이용가능량을 분석하면 남강댐이 2000년대

TABLE 5. Ground water Recharge of Target years(mm)

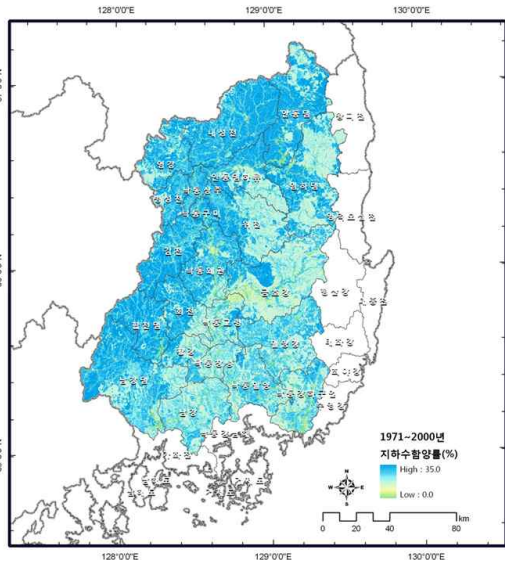
	1970-2000년	2001-2030년	2031-2050년	2051-2100년
강우량(mm)	954.61	954.61	941.15	972.77
함양률(%)	27.37	27.43	26.06	27.88
함양량(m ³ /년)	6.1925E+09	6.2065E+09	5.8133E+09	6.4276E+09

TABLE 6. Each watershed ground water of Target years(mm)

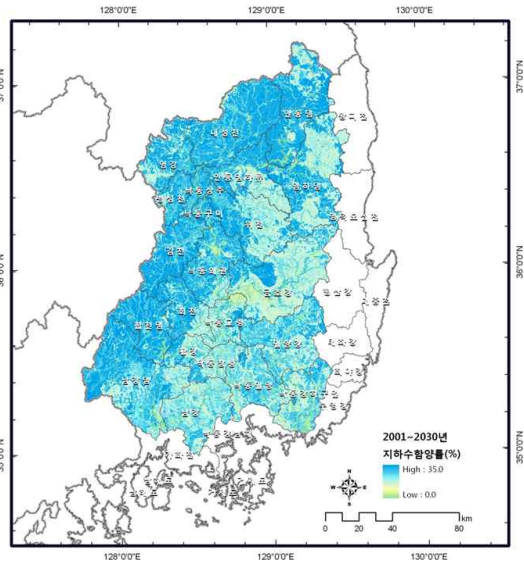
유역	1971~2000년		2001~2030년		2031~2050년		2051~2100년	
	평균함양률	함양량	평균함양률	함양량	평균함양률	함양량	평균함양률	함양량
안동댐	29.24	4.5452E+08	29.29	4.5535E+08	27.76	4.2534E+08	29.90	4.7360E+08
임하댐	26.69	5.0328E+08	26.81	5.0555E+08	25.41	4.7249E+08	27.20	5.2268E+08
안동댐하류	27.18	2.5435E+08	27.18	2.5439E+08	25.82	2.3823E+08	27.59	2.6310E+08
내성천	30.61	5.3052E+08	30.60	5.3032E+08	29.05	4.9642E+08	31.26	5.5222E+08
영강	28.84	2.5162E+08	28.87	2.5195E+08	27.39	2.3566E+08	29.41	2.6154E+08
병성천	29.45	1.2175E+08	29.46	1.2178E+08	28.03	1.1423E+08	30.03	1.2651E+08
낙동상주	29.19	6.2460E+07	29.33	6.2760E+07	27.96	5.8972E+07	29.97	6.5351E+07
위천	26.85	3.6031E+08	26.91	3.6111E+08	25.56	3.3818E+08	27.28	3.7312E+08
낙동구미	29.04	4.9675E+07	29.08	4.9751E+07	27.65	4.6636E+07	29.72	5.1802E+07
감천	30.87	2.9624E+08	30.87	2.9619E+08	29.29	2.7710E+08	31.56	3.0864E+08
낙동왜관	28.01	2.9574E+08	28.01	2.9572E+08	26.63	2.7722E+08	28.52	3.0690E+08
금호강	24.39	4.8709E+08	24.43	4.8796E+08	23.22	4.5725E+08	24.65	5.0171E+08
회천	28.66	2.1384E+08	28.69	2.1405E+08	27.21	2.0021E+08	29.21	2.2215E+08
낙동고령	23.80	1.2451E+08	23.84	1.2471E+08	22.73	1.1724E+08	24.06	1.2825E+08
합천댐	30.35	2.6910E+08	30.34	2.6900E+08	28.77	2.5153E+08	31.01	2.8021E+08
황강	25.88	9.5629E+07	25.92	9.5786E+07	24.65	8.9806E+07	26.24	9.8827E+07
낙동창녕	24.85	1.1226E+08	25.04	1.1313E+08	23.83	1.0616E+08	25.33	1.1659E+08
남강댐	28.32	6.1996E+08	28.35	6.2058E+08	26.93	5.8122E+08	28.85	6.4350E+08
남강	24.68	2.7915E+08	24.78	2.8029E+08	23.61	2.6326E+08	25.00	2.8819E+08
낙동밀양	25.19	2.4159E+08	25.34	2.4297E+08	24.15	2.2833E+08	25.65	2.5064E+08
밀양강	26.48	3.5953E+08	26.74	3.6303E+08	25.43	3.4044E+08	27.15	3.7561E+08
낙동강하구연	23.94	2.0919E+08	24.02	2.0994E+08	22.89	1.9722E+08	24.29	2.1632E+08
합계		6.1923E+09		6.2063E+09		5.8131E+09		6.4275E+09

433,970,000m³/년, 2030년대 434,410,000 m³/년, 2050년대 406,850,000m³/년 및 2100년대 450,450,000m³/년으로 가장 높았다. 가장 낮은 지하수 함양량은 낙동구미 유역으로 2000년대 34,772,000m³/년, 2030년대

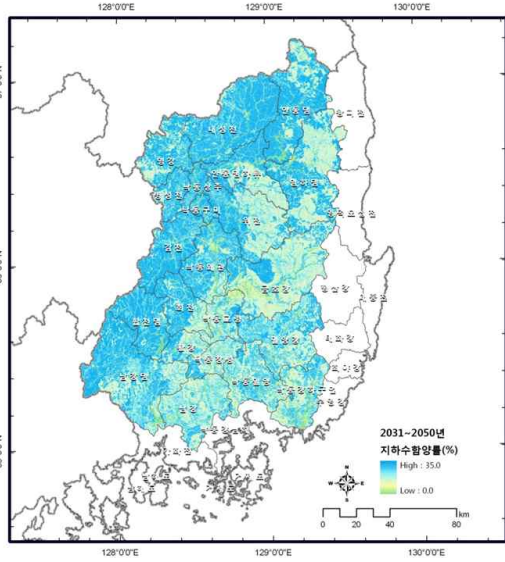
34,826,000m³/년, 2050년대 32,645,000m³/년 및 2100년대 36,261,000m³/년으로 가장 낮았다. 유역별 이용가능량 특징은 시기별 함양량과 마찬가지로이며, 이용가능량이 높은 순위와 함양량이 높은 순위가 동일하였다(표 6).



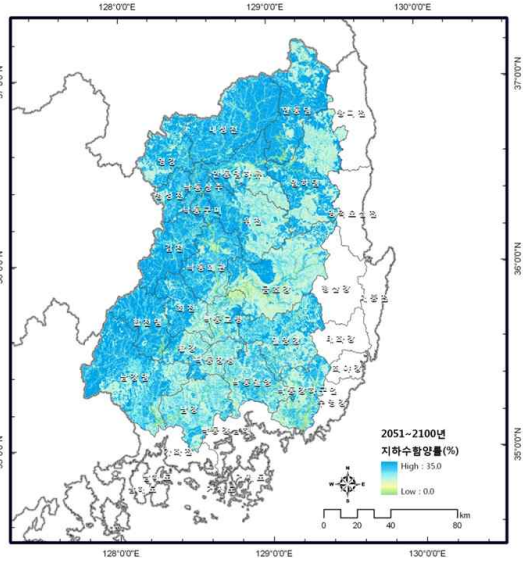
(A) 1971~2000 year



(B) 2001~2030 year



(C) 2031~2050 year



(D) 2051~2100 year

FIGURE 4. Time Series of Ground water(1971 ~ 2100)

TABLE 7. Each Observation of Baseflow

지점	유역면적 (km ²)	기간(일)	평균 하천유량		평균 기저유출량		기저유출율 (%)
			m ³ /s	mm/yr	m ³ /s	mm/yr	
길안	411.65	365	2.45	80	0.61	20	25.0
산양	215		2.47	160	1.19	80	48.3
점촌	608		20.2	450	9.7	220	48.0
달지	6,375.3		70.9	150	33.3	70	47.0

3. 유역 내 기저유출량 분석에 의한 결과 검증

유출량 산정 지점으로는 낙동강 상류 유역 중 길안천, 금천, 영강, 달지 등 인위적 유량 조절 상황이 발생하지 않는다고 판단되는 지류 합류부 및 본류 총 4개 지점을 기저유출량 산정 지점으로 선정하였다. 4개 유량측정 지점의 2009년도 유량 및 기저유출량 시계열 자료를 근거로한 각 지점별 유량 및 기저유출 평균값, 지점별 기저유출율은 표 4에 표시하였다. 낙동강 상류 일대 일부 유역에서 총 하천 유량에 대한 기저유출 비율은 최저 25%에서 최대 48%에 이르는 것으로 분석되었다. 기저유출이 지연된 지표하 유출 및 순수 지하수 유출의 합이고, 강우 사상에 대한 고려가 프로그램 내에 반영되어 있으므로, 유량 측정 지점의 지하수 유출은 최대 30%~35%에 이를 것으로 판단되며, 이는 지하수 함양률과 동일하다고 할 수 있다. 본 연구에서 산정된 낙동강 상류 유역의 지하수 함양률은 병성천 유역이 30%를 상회하며, 다른 상류 유역은 26~29%의 함양률 범위를 보인다. 이러한 지하수 함양률은 하천유량 자료를 통해서 취득된 낙동강 상류 지역의 기저유출률 범위 내에 모두 속하는 바, 본 연구에서 구한 지하수 함양률 분포가 충분히 합리적임을 나타낸다고 할 수 있다(표 7).

결론 및 토의

본 연구에서는 지리정보를 활용하여 실질적인 기후변화에 따른 지하수 함양량 산정 모델 개발 및 연구지역 지하수 함양량 산정을 위하여 우선적으로 적정 기후변화 시나리오의 공

간 해상도 상세화를 수행하였으며, 적정 지하수 유동 모델을 선정하였다. 또한 지리정보시스템과의 연계방법을 제시하여 기후변화 연동 지하수 함양량 산정 모델을 개발하였다. 개발된 기법을 연구지역에 적용하여 실제 기후변화 영향에 대한 지하수 함양량을 미래 시기별로 추정 및 검증하였다.

기후변화에 따른 기후사상의 변화는 기온 및 강우량의 변화로 나타난다. 기온의 증감은 증발산에 영향을 미치며, 토양의 수분변화를 유도하여 지하수 충전에 영향을 준다. 강우량의 증감은 지하수 증감에 직접적인 영향을 미친다. 본 연구 결과에서도 전술된 2가지 사항이 분석되었다. 미래 지하수 함양량의 변화는 본 연구 결과 강우량의 변화에 보다 민감한 것으로 파악되었다. 기후변화에 따른 지하수 함양률의 변화는 강우량과 함양률의 관계는 강우량이 가장 많은 기간(2051-2100년)에 가장 많은 함양률을 나타내고 있다. 이를 고려하였을 때 전반적으로 함양률 변화는 강수량의 변화에 민감하게 반응하는 것으로 분석되었으며, 유출곡선지수에 따른 함양률 변화는 크게 영향을 받지 않는으나, 지수 값이 불투수층에 가까운 지역일수록 함양률이 급격히 감소됨을 알 수 있었다. 시계열 지하수 함양량 분석 결과 점진적으로 지하수 함양률이 증가하는 추세를 나타내고 있다. 이를 바탕으로 향후 지하수 함양량의 활용계획이 수립되어야 한다. 본 연구의 결과 검증은 낙동강 유역 내 기저유출량 분석을 통하여 검증하였다. 단일 시기의 검증이었지만, 본 연구 결과가 기저유출량 보다 작았으며, 본 연구에서 구한 지하수 함양률 분포가 충분히 합리적임을 나타

낸다고 할 수 있다.

본 연구에서는 기존에 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 관리 방안 수립을 위한 방향을 제시하였다. 앞으로 연계모델의 고도화 방안, 검증 방안의 다양화 및 현장조사가 추가된다면 보다 정량적으로 기후변화와 지하수 함양량의 상관관계를 파악 할 수 있을 것이다.

감사의 글

본 연구는 한국환경정책·평가연구원의 2010년도 녹색성장정책연구 물관리 취약성과 물안보 전략 III 중 “기후변화 연동 4대강 유역 지하수 함양 및 이용가능량 산정 기법 개발2”의 지원으로 이루어 졌으며 이에 감사드립니다. **KAGIS**

참고 문헌

- 강형식, 김호정, 이진희, 홍현정, 조성윤, 주기재, 정인철, 정광석. 2010. 기후변화 대응을 위한 적정 하천공간 확보 방안. II 한국환경정책·평가연구원 연구보고서.
- 고경석. 2009. 기후변화에 따른 국내 지하수자원 취약성. 제14차 지하수 정보협력 포럼 발표자료.
- 김규범. 2008. 미국의 기후변화에 대비한 지하수 조사·이용 및 관리. 건설교통부 연구보고서.
- 김규범. 2009. 기후변화와 지하수 양수에 따른 지표수 영향. 제14차 지하수 정보협력 포럼 발표자료.
- 김성준, 채효석. 2000. 격자기반의 토양수분추적에 의한 지하수함양량 추정기법 개발. 한국수자원학회논문집. 33(1):61-72.
- 농촌진흥청 농업과학기술원. 2007. (수문해석을 위한)토양수리특성과 토양전자지도의 활용 농촌진흥청 연구보고서.
- 이승호, 허인혜, 이경미, 김선영, 이윤선, 권원태. 2007. 한국의 열파분포와 그 원인에 관한 연구. 대한지리학회지 42(3):332-343
- 이정호, 이영준, 이수재. 2005. 터널로 인한 지하수 영향 저감방안 연구. 한국환경정책·평가연구원 연구보고서.
- 임은진, 이재영, 최상일. 2004. 폐기물 매립지의 최종 복토 구조에 따른 침출계수 변화에 관한 연구. 한국지하수토양환경학회지 9(2):48-53.
- 조성현, 문상호, 고동찬, 조민조, 송무영. 2005. 추적자(CI)를 이용한 유성지역 소유역에서의 유출수문곡선분리와 기저유출량의 산정. 지질학회지 41(3):427-436.
- 정일문, 김남원, 김철겸, 이정우, 김태희, 김용제, 김구영, 하규철, 전철민, 이도훈. 2007. 우리나라 지역특성에 맞는 최적 지하수 함양량 산정기법 개발. 건설교통부. 연구보고서. 363쪽.
- 정일문, 김남원, 이정우, 이병주. 2006. SWAT 모형을 이용한 무심천 유역의 지하수 함양량 추정. 2006년 한국수자원학회 학술발표회. 76-79쪽.
- 박노옥, 장동호. 2008. 수치표고모델과 다변량 크리깅을 이용한 기온 및 강수 분포도 작성. 대한지리학회지 43(6):1001-1015.
- Brown D.P., A.C. Comrie. 2002. Spatial modeling of winter temperature and precipitation in Arizona and New Mexico, USA. Clim Res. 22:115-128.
- 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. Gbur 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.
- Brouyere, S., G. Carabin and A. Dassargues. 2004. Climate change impacts on groundwater resources: modelled deficits in a chalky aquifer, Geer basin, Belgium. *Hydrogeology Journal* 12:123-134.
- USDA, Soil Conservation Service. 1985. National engineering handbook, section 4, hydrology. US Government Printing Office, Washington, D.C.
- 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.
- 한강홍수통제소 <http://www.hrfco.go.kr>. **KAGIS**