

기후변화 평가용 분포형 수문모형 개발현황 소개



박 근 애 |

University of Washington, Department of
Civil & Environmental Engineering 박사후
연구원
dolpin2000@konkuk.ac.kr



김 성 준 |

건국대학교 사회환경시스템공학과 교수
kimsj@konkuk.ac.kr

1. 서론

2011년 2월에 동해안 지역에 내린 100년만의 폭설로 인한 주택붕괴 및 교통마비 피해와 7월 중부 집중호우로 인한 범람과 침수 및 산사태 등 최근 국내에서는 다양한 이상기후로 인하여 기후변화에 대한 관심과 경각심이 고조되고 있으며, 이에 대한 연구와 대응책 마련에 대한 목소리가 높아지고 있는 실정이다. 2007년 2월 2일 유엔(United Nations, UN) 정부간 기후변화위원회(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)는 기후변화에 관한 종합 보고서를 통해 우리나라가 기후변화 상태에서 기온상승이 높은 지역으로 예측되며 2100년에는 아열대 기후로 변화할 것으로 예측되고 있다. 이러한 지구온난화에 의한 미래 기온의 상승과

강수량의 규모 및 빈도 변화는 인간 생활 및 생태계에 변화를 야기할 수 있으며, 특히 수자원 측면에서는 심각한 위협요소가 아닐 수 없다. 이는 수자원부존량의 변화를 야기해 안정적인 수자원 공급과 계획 수립을 저해할 수 있으며, 가뭄과 홍수 등과 같은 자연재해의 빈도나 강도를 증가시켜 사회·경제적으로 많은 피해를 일으킬 수도 있다(배덕효와 정일원, 2007).

우리나라는 협소한 국토면적과 과다한 인구로 토지나 수자원 등 국토자원 이용의 강도가 다른 나라에 비하여 현저하게 높기 때문에 지구온난화에 따른 기후변화와 같은 약간의 기후변동으로도 심각한 수자원 문제가 발생할 가능성이 내포되어 있다. 그러므로 기후변화에 따른 수자원 예측과 대응 방안을 마련하기 위해서는 기후변화와 수문순환과의 관계가 지역(유역 규모)차원에서 예측되고 평가되기 위한 시스템이 구축되어야 하며, 장기적인 국가 수자원계획을 위해서는 기후변화에 의한 한반도 및 유역 규모의 수자원에 미치는 영향 예측 및 평가가 필요하다고 할 수 있다(서병하 등, 2005). 이를 위해, 기후변화에 대한 수자원 변화의 예측능력을 향상시키기 위해 대륙규모의 시공간적 수자원 변동성을 파악하고 다양한 해상도의 기후모형과 결합하여 영향평가를 수행할 수 있는 수문모형의 개발이 필요하다(배덕효와 정일원, 2007). 따라서 본 고에서는 선진국에서 기후변화평가를 위해 많이 이용되고

있는 분포형 수문모형인 VIC 모형과 현재 국내에서 적합한 기후변화평가용 분포형 수문모형인 PGA-K 모형의 개발 현황을 소개하고자 한다.

2. VIC 소개

선진국에서 기후변화영향을 평가하기 위하여 적용하고 있는 대표적인 모형에는 미국 워싱턴대학의 Liang et al. (1994, 1996)에 의해 개발 및 처음 소개된 Large-scale의 VIC(Variable Infiltration Capacity) 모형이 있다.

이 VIC 모형은 물수지 모의가 가능한 격자기반의 분포형 수문모형이다. 처음에 이 모형은 GCM에서 정확히 모의가 되지 않는 지표흐름을 좀 더 역학적으로 향상시키기 위해 지표모형으로써 개발되었다. 그러한 과정에서 이 모형은 ‘지표온도와 기온이 같다’는 가정하에서 “물수지”모드를 구동할 수 있었다. 이 방법은 계산과정을 줄일 수 있었고 따라서 많은 수자원 연구에서 자주 사용하게 되었다. 현재 이 모형은 1/16° 해상도까지 개발되어 약 500km² 이상의 지역에서 가장 정확하게 적용되고 있다.

VIC 모형은 강수, 최고, 최소온도와 풍속의 일자료들을 입력자료로써 이용하며 모형 안에서 추가적으로 태양복사량, 수증기압, 수증기압차와 같은 자료들이 계산된다. 이 모형의 가장 큰 특징은 모형의 각 셀별 토양수분의 수직 분포에 영향을 미치는 대표적인 토양층들과 침투과정의 매개변수화가 이루어져 있다는 것이다. 이에 침투량과 증발산량의 변화를 모의하기 위해 다양한 식생조건을 반영하는 차단층과 3개의 토양층으로 구성되어 있다(그림 1). 차단층에서는 동일 피복종류별 면적비를 고려하여 각 피복특성이 반영된 차단 및 증발을 모의하며, 보통 식생시대 및 나대지로 구분된다. 토양층의 경우 깊이에 따라 최상부토층(Layer 0), 상부토층(Layer 1), 하부토층(Layer 2)으로 구분된다. 이 중 최상부토층은 침투에 직접적인 영향을 받는 지

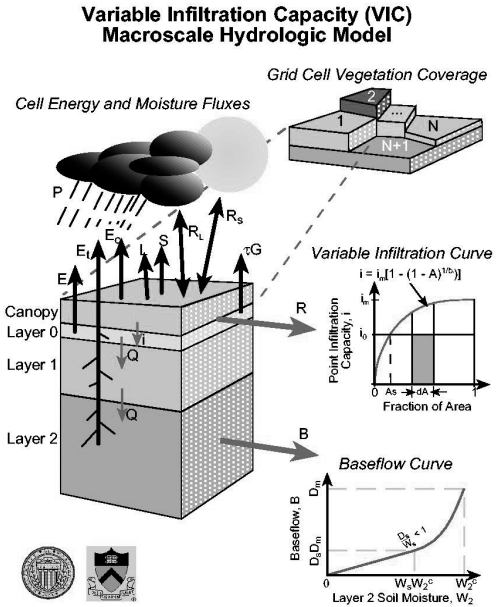


그림 1. VIC 모형의 개요

역이며, 토양수분의 변화에 가장 민감하다. 또한 중력식 배수를 통해 상부토층으로 침투량을 모의하며, 식생 및 나대지 지역의 여부에 따라 증산 및 증발 모의가 결정된다. 상부토층에서는 최상부토층과 더불어 강우시작 후 토양층의 포화여부에 따라 지표유출이 모의되며, 증산 및 하부토층에 대한 침투량이 계산된다. 하부토층에서는 상부토층에서 유입된 침투량으로부터 증산과 기저유출이 모의된다(손경환 등, 2011).

잠재 증발산량은 Penman-Monteith법에 의해 계산되며(Maidment et al. 1993), 이와 더불어 Cherkauer and Lettenmaier (2003), Wigmosta et al. (1994), Andreadis et al. (2009)이 제시한 알고리즘을 반영하는 1시간 간격의 (일단위 이하(sub-daily)) 눈 모형(snow model)을 포함하고 있다. 각 격자에서 눈의 거동을 모의할 수 있는 능력을 향상시키는 것은 고도층(elevation bands)이 상세격자(subgrid)로 구성되어 있기 때문이다. 현재 고도층은 약 500m의 해상도까지 적용되고 있다.

현재 국외에서는 VIC 모형을 원활하게 이용하여 대유역에 대한 수자원 부족량 및 기후변화 평가를 수행하고 있는데, 미국 북서부주의 기후변화영향평가 대표 단체 중 하나인 워싱턴 대학의 지역통합과학 평가 (Regional Integrated Science Assessment; RISA)의 기후영향그룹(Climate Impact Group; CIG)에서는 SRES의 2개의 온실가스배출시나리오(A1B, B1)를 기반으로 AR4에 사용된 AOGCMs 중 A1B 시나리오는 20개, B1 시나리오는 19개를 이용하여 총 39개 미래 기후시나리오를 생산하였다. 생산된 기후시나리오를 Delta Method 기법을 통해 1/16° 해상도로 상세화하여 VIC 모형에 적용, 수문 시나리오를 생산하였다. 생산된 시나리오를 기반으로 “Urban storm water Infrastructure”, “Hydrology & Water management”, “Energy”, “Agriculture & Economics”, “Salmon & Ecosystems”, “Forest”, “Human Health”, “Coast” 등의 분야로 나누어 평가하였다(그림 2). 특히 “Hydrology

& assessment” 분야에서는 워싱턴 주 전역에 대한 미래 수문 전망(토양수분, 적설, 하천유량)을 하였을 뿐만 아니라 워싱턴 주 내에서의 Puget sound 지역(도시지역) 및 Yakima river 지역(과수지역)의 물 관리에 대한 연구를 수행하였다.

Hamlet and Lettenmaier (1999)는 제2차 IPCC GCM 결과자료를 이용하여 Columbia River 유역을 대상으로 VIC 모형을 이용하여 수자원에 대한 기후변화 영향을 평가하였고, Payne et al. (2004)은 같은 유역에 대해 제3차 IPCC 보고서의 NCAR PCM 자료를 이용하여 기후변화에 따른 수자원 영향평가를 실시하였다. 같은 NCAR PCM 자료를 이용하여 Christensen et al. (2004)과 Van Rheenen et al. (2004)는 각각 Colorado River 유역과 California 유역을 대상으로 수자원 영향평가가 이루어졌으며 이 연구는 모두 VIC 모형을 이용하였다. 이와 비슷하게 최근 많은 연구자들이 VIC 모형으로 제4차 IPCC 결과를 이용하여 수자원 체계에 대한 기후변화 영향을 평가하였다.

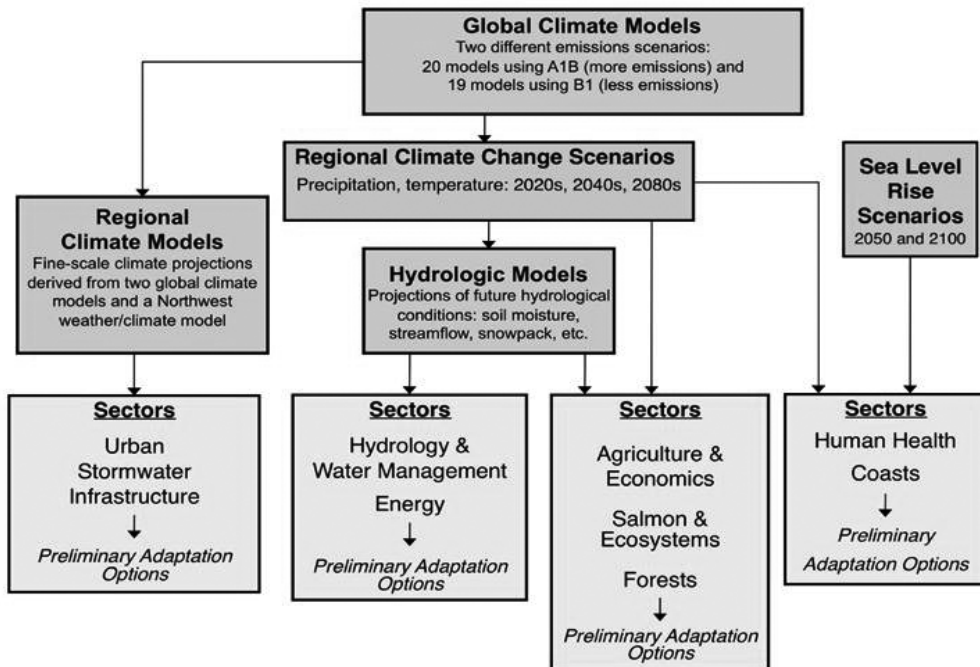


그림 2. 미국 워싱턴 주의 기후변화에 의한 각 분야 평가 기법

가를 위해 개발되고 있는 국내형 분포형 수문모형인 PGA-K(Projection of hydrology via Grid-based Assessment in Korea) 모형의 개발현황에 대해 소개하고자 한다. 이 모형은 건국대학교의 김성준 교수를 대표로 하여, 2012년까지 소프트웨어로 개발될 예정이며, 1km의 해상도로써 한반도 5대강유역 전반에 대한 기후변화 영향평가를 하는 것이 주목적이다.

본 모형은 그림 3과 같은 모델링 구조로 개발이 이루어지고 있으며, 현재까지 공간기상자료 생성모듈, 증발산량 산정 모듈, 침투량 & 침투량 산정모듈, CO₂ 고려모듈, 토양수분 산정모듈, 직접유출량 산정모듈, 기저유출량 산정모듈, 수문요소별 시공간분포도 생성모듈, 민감도 분석 모듈, 모형의 검·보정 모듈 등이 완료되어 한강유역에 대상으로 그 적용성을 평가하였다. 2012년 상반기 중으로 공간매개변수를 자동생성하는 모듈, 용설량 산정 모듈, 분석지점별 모의결과 평가모듈, 식생변화 예측 모듈을 개발하여 한반도 전 지역을 대상으로 적용성 평가를 실시할 예정이다.

이 모형은 토양층을 3개로 나누어 계산하는 3단 구성의 형태를 가지며 각 토양층에서 지표면유출, 중간유출, 기저유출, 침투, 침투 등이 모의된다(그림 4). 일단위로 수문순환을 산정하며, 유출모듈,

증발산모듈, 토양수분 모듈로 구성되었다.

일 강우량과 최대 잠재보유수량을 이용해서 지표 유출량과 침투유출량을 모의한다. 중간유출은 토양층(0~20m)에서 재배분에 의해 동시에 계산된다. 증발산량 추정을 위하여 FAO Penman-Monteith 공식(Verhoef and Feddes, 1991)을 사용하였으며, 공기동력학 저항 산정 시 위성영상으로부터 추출한 LAI(Leaf Area Index) 자료를 이용함으로써 실제증발산량으로 변환하였다. 또한 이 모형의 가장 큰 특징은 기후변화에 큰 영향을 미치는 요인인 CO₂를 고려하여 증발산량을 최종적으로 계산하는 것이다. CO₂가 증가하게 되면 기공이 닫혀 잎의 수분 손실량이 줄어 증발산량이 감소하며, 또한 광합성효과와 탄소 보정 효소의 증가에 따른 일면적 증가가 뿌리의 활동 범위를 작게 하여 토양수분이 증가하게 된다. 이와 같은 원리를 이용하여 물이용효율계수를 계산하고 이를 증발산량 값에 적용하여 최종 증발산량을 산정하게 된다. 토양 속으로 들어간 물은 여러 가지의 경로를 따라 이동하며, 식물에 의한 이용 또는 증발에 의해서 소모된다. 토양수는 토양체의 바닥까지 침투되어 결국에는 대수층에 충전된다. 토양수의 이러한 흐름은 토양 구조와 밀접한 관련이 있다. 토양수분함량은 0(노건조 상태의 토양)에서 최대치, 포화상태의 토양에서 최소치의 범위를 가지게 된다. 식물과 토양의 상호작용에 있어 두 가지 중간적인 단계가 포장용수량(Field Capacity)과 영구위조점(Wilting Point)이다. 포장용수량은 완전히 습윤시킨 토양이 약 2일 정도 배수되었을 때의 토양수분 함량이며, 영구위조점은 토양에서 자라는 식물이 시들고, 밤새도록 잎을 습한 환경에 두었는데도 회복이 되지 않을 때의 토양수분함량을 말한다. 이 두 가지 단계를 보다 쉽게 양적으로 정의하기 위하여 토양이 물을 유지하는 장력의 개념이 사용되어 왔다. 포장용수량은 토양에서 0.033MPa의 장력으로 유지되는 수분함량이며, 영구위조점은 1.5MPa의 힘으로 유지되는 수분함량이다. 포장용수량과 영구위조점 사이의 장

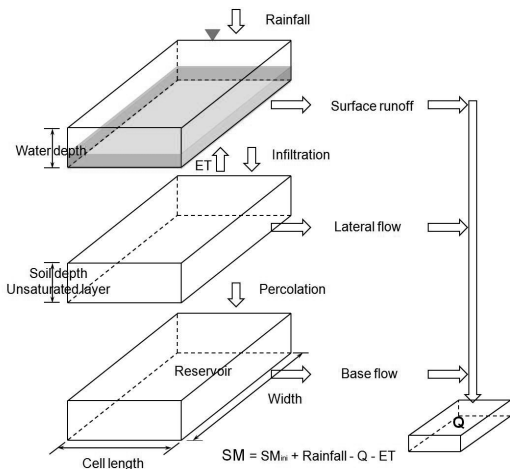


그림 4. PGA-K 모형의 개요

학술/기술기사

력으로 유지되는 수분함량은 식물이 이용할 수 있는 가용수량으로 간주된다(Neitsch, 2002). 따라서 이 모형에서의 토양수분은 토성종류에 따라 유효공극률, 포장용수량, 영구위조점의 조건을 설정하여 산정하며, 이에 따라 배수가능 토양수분을 계산하고 지표하 흐름과 침투가 모의된다.

PGA-K모형을 한강유역(그림 5)에 시범 적용하기 위해 27개 기상관측소의 1976년-2010년 동안의 일 강수, 최소, 평균, 최고온도, 상대습도, 일조시간, 풍속자료를 수집하였으며, 검보정을 위한 3개의 댐지점(충주댐, 소양강댐, 청평댐)의 유입량 자료를 수집하였다. 또한 지형입력자료로서 환경부에서 제공하는 1:25,000의 중분류 토지이용도(그림 6)와 농촌진흥청에서 제공하는 1:25,000 정밀 토양도(그림 7)를 수집하였다. 수집된 입력자료들은 분포형 모형의 입력자료로 재가공되어야 하는데 기상관측소의 점자료들은 IDW(Inverse Distance Weighting) 법으로 공간분포화하는 모듈을 개발하여 1km해상도 모형의 입력자료로 사용하였다(그림 8). 이를 이용하여 모형의 검보정을 위하여 유출과 관련된 매개변수를 선정하고 3개의 댐지점에 대한 적용성을 검토하였다. 충주댐지점에서는 NSE 평균 0.59, R^2 0.67, RMSE 3.40mm/day로 나타났으며, 소양강댐지점은 NSE 평균 0.71, R^2 0.73, RMSE 2.42mm/day로, 청평댐지점은 NSE 평균 0.63, R^2 0.67, RMSE 2.92mm/day로 나타났다.

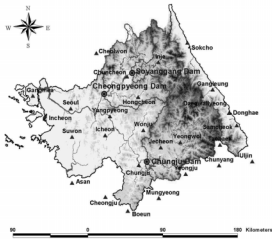


그림 5. 대상유역 (한강유역)

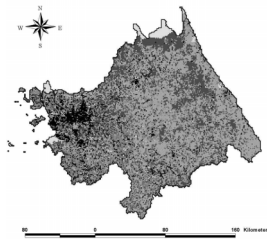


그림 6. 토지이용도

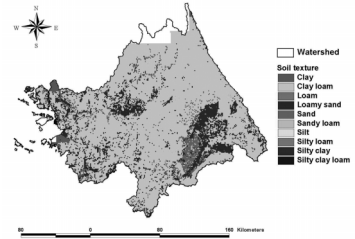


그림 7. 토양도

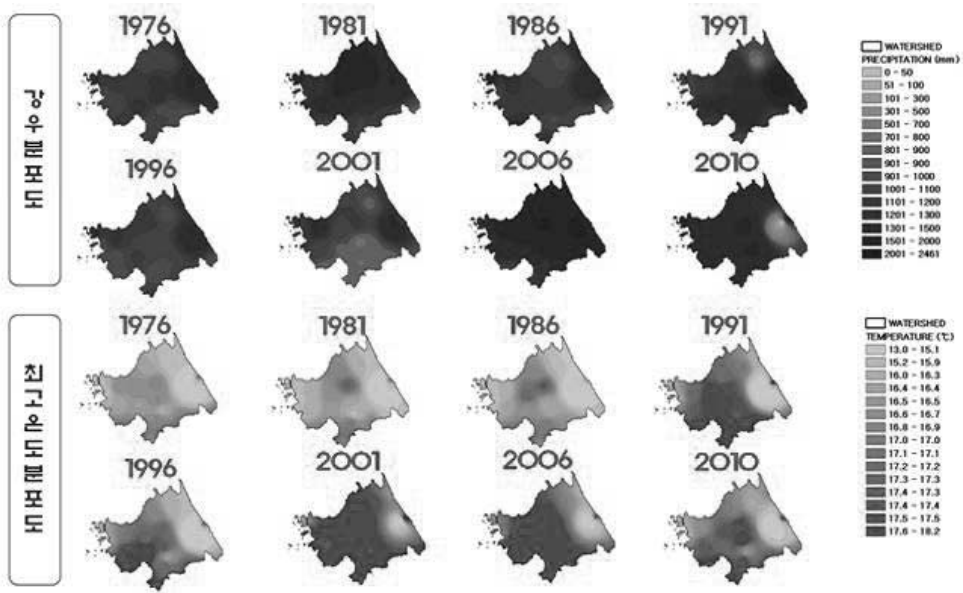


그림 8. 강우분포도와 온도분포도

본 모형으로 한강유역을 대해 미래기후변화영향을 평가하기 위하여 세종대에서 제공한 4개의 GCM의 A2시나리오 자료를 이용하였다. 4개의 GCM은 다음과 같다.

- 1) *CNRM CM3*(Centre National de Recherches Meteorologiques, Coupled global climate Model, France)

- 2) *CSIRO Mk3.0*(Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization, Mk General Climate Model, Australia)
- 3) *CONS ECHO-G*(Meteorological Institute of the University of Bonn (Germany), Institute of KMA (Korea), and Model and Data Group, ECHAM4-HOPE-G (Hamburg Ocean Primitive Equation

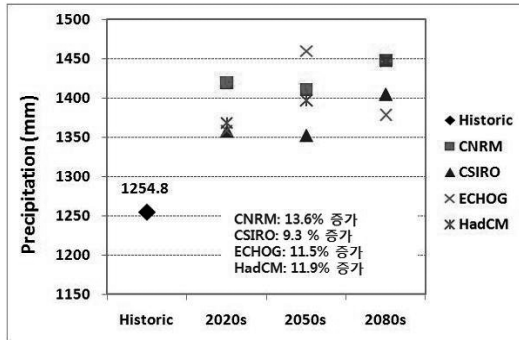
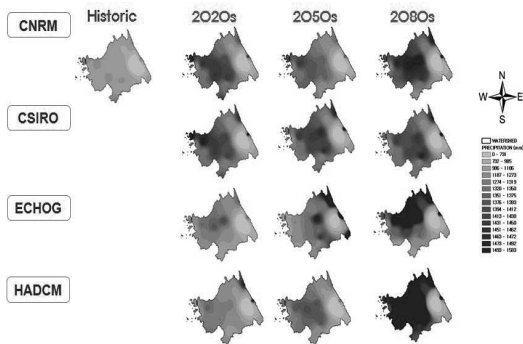


그림 9. 미래 강우분포도와 변화량

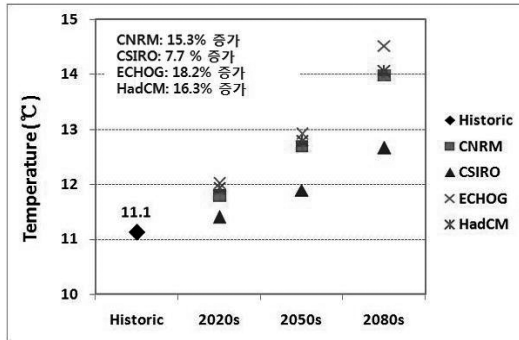
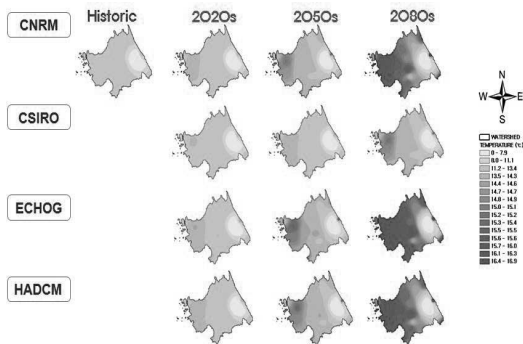


그림 10. 미래 온도분포도와 변화량

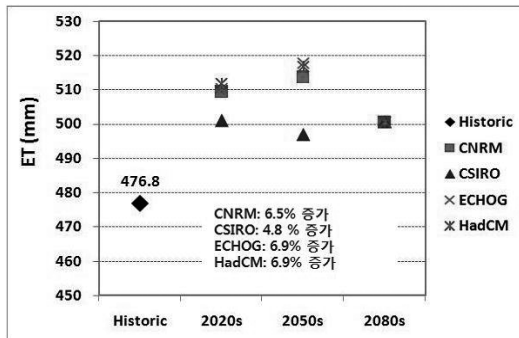
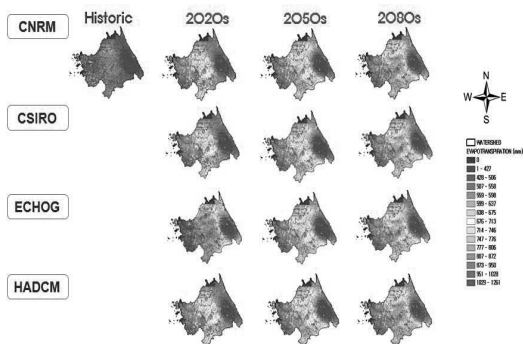


그림 11. 미래 증발산량분포도와 변화량

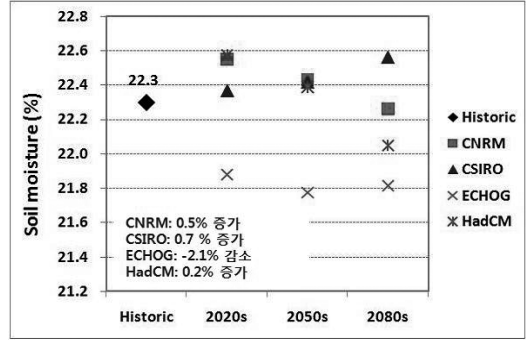
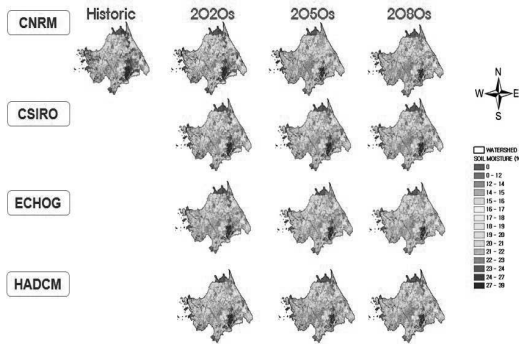


그림 12. 미래 토양수분분포도와 변화량

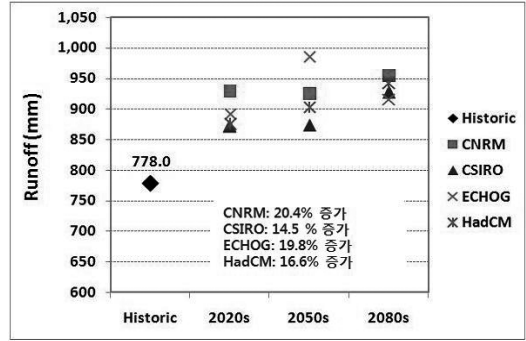
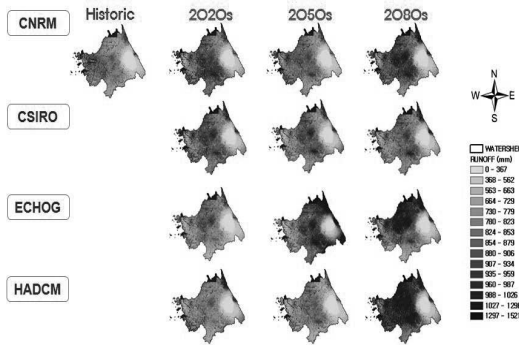


그림 13. 미래 유출량분포도와 변화량

Model-Global), Germany/Korea)
 4) UKMO HadCM3(U.K. Met Office, Hadley Centre Coupled Model, UK)

이 자료는 1971년-2099년 동안의 전국 기상관측소별 일별 강우와 온도자료가 제공되었으며 모형에서 사용할 수 있도록 공간분포화하였다. 미래기후변화에 따른 영향을 평가하기 위하여 Historic(1971년 -2000년)을 기준으로 2020s(2010년-2039년), 2050s(2040년-2069년), 2080s(2070년-2099년)를 설정하고 강우, 온도의 경향을 살펴보았으며, 이 자료들을 PGA-K 모형에 적용하여 증발산량, 토양수분, 유출량의 변화를 검토하였다.

그림 9와 10은 4개 GCM의 강우와 온도분포도이며 과거 30년 자료를 기준으로 했을 때 미래 강우와 온도의 변화를 그래프로 나타낸 것이다. 강우

와 온도 모두 미래로 갈수록 증가하는 경향을 보이고 있으며, 강우는 평균 11.6%, 온도는 평균 14.4% 증가하는 것으로 나타났다. 이를 PGA-K 모형에 적용한 증발산량, 토양수분, 유출량의 결과를 그림 11, 12, 13에 각각 나타내었다. 증발산량은 온도의 증가로 인해 평균 6.3%증가하는 경향을 보였으며, 토양수분은 CONS/ECHO-G가 약 2.1%감소하는 경향을, 다른 GCM의 경우는 약 0.5%증가하는 경향을 나타내며 불규칙적인 변화를 보였다. 유출량은 증발산량의 증가에도 불구하고 강우량의 증가와 큰 토양수분함량으로 침투 및 침투량의 증가로 인해 평균 17.9%증가하는 것으로 전망되었다.

다음과 같은 PGA-K 모형의 결과는 현재까지 이루어진 것이며, 아직 완료되지 않은 모듈을 추가하고 현재의 모듈을 다소 수정하여 한강유역 뿐만 아니라 5대강 모든 유역에 적용성 평가를 실시하여 모형을 검증할 예정이다.

4. 결론

본 고에서는 국내에 적합한 기후변화영향 평가를 위한 시공간적 수자원 변동성을 파악할 수 있는 수문모형의 개발의 필요성에 따라 현재 국외에서 가장 활동적으로 이용되고 있는 VIC 모형과 국내에서 개발진행되고 있는 PGA-K 모형의 개발 현황을 소개하였다. VIC 모형은 미국전역에서 기후변화에 따른 영향 평가를 하는데 있어 그 적용성이 뛰어나며 현재 1/16° 해상도까지 개발되어 있어 그 활용성이 더 높아지고 있다. 또한 유출량뿐만 아니라 용설과 토양수분에 대해서도 합리적인 모의 결과를 도출하는 것으로 밝혀져 앞으로 더 많은 연구자들이 이용할 것으로 판단된다. 하지만, 우리나라와 같이 국토자원 이용강도가 높은 나라에 있어서는 VIC 모형의 해상도로는 기후변화 전망 결과에 한계가 있다. 따라서 이러한 취지에 의해 PGA-K 분포형

모형이 현재 개발되고 있으며, 2012년에 완료될 예정이다. 한강유역에 대해 시범적용해본 결과 그 적용성이 상당함을 알 수 있었으며, 앞으로 공간매개 변수 모듈 및 미래 식생과 용설예측 모듈을 추가함으로써 기후변화 영향 평가에 대한 불확실성을 줄일 수 있을 것으로 판단된다. 이 PGA-K 모형을 이용하여 한반도 전 지역에 대한 기후변화영향 평가를 실시함으로써 국내의 특성을 잘 반영한 결과를 도출할 것으로 기대해본다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부 한국건설교통기술평가원의 2009 건설기술혁신사업인 '기후변화에 의한 수문 영향분석과 전망' 과제에 의해 지원되었습니다. ☺

참고문헌

1. 배덕효, 정일원 (2007). 기후변화에 따른 바람직한 유역관리, 제13회 '세계 물의 날'기념 심포지움: 19-35.
2. 손경환, 배덕효, 정준석 (2011). 지표수문해석모형을 활용한 국내 가뭄해석 적용성 평가, 한국수자원학회 논문집, 44(8): 667-681.
3. Andreadis, K., Storck, P., Lettenmaier, D. P. (2009). Modeling snow accumulation and ablation processes in forested environments, *Water Resour Res*, 45: W05429, doi:10.1029/2008WR007042.
4. Cherkauer, K. A., Lettenmaier, D. P. (2003). Simulation of spatial variability in snow and frozen soil field. *J Geophys Res*, 108(D22): 8858, doi:10.1029/2003JD003575.
5. Christensen, N. S., Lettenmaier, D. P. (2007). A multimodel ensemble approach to assessment of climate change impacts on the hydrology and water resources of the Colorado River basin, *Hydrol Earth Syst Sci*, 11: 1417-1434.

6. Christensen, N. S., Wood, A. W., Voisin, N., Lettenmaier, D. P., Palmer, R. N. (2004). The effects of climate change on the hydrology and water resources of the Colorado River basin. *Clim Change*, 62: 337-363.
7. Hamlet, A. F., Lettenmaier, D. P. (1999). Effects of climate change on hydrology and water resources of the Columbia River basin. *J AmWater Resour Assoc*, 35: 1597-1624.
8. Hayhoe, K, Wake C., Huntington, T. G., Luo, L., Schwartz, M. D., Sheffield, J., Wood, E. F., Anderson, B., Bradbury, J., DeGaetano, T. T., Wolfe, D. (2007). Past and future changes in climate and hydrological indicators in the US Northeast. *Clim Dyn*, 28: 381-407.
9. Liang X., Lettenmaier D. P., Wood E. F., Burges S. J. (1994). A simple hydrologically based model of land surface water and energy fluxes for GSMS. *J Geophys Res*, 99(D7): 14,415-14,428.
10. Liang X, Wood E. F., Lettenmaier D. P. (1996). Surface soil moisture parameterization of the VIC-2L model: evaluation and modifications. *Glob Planet Change*, 13: 195-206.
11. Maidment, D. R., ed., (1993). Handbook of Hydrology. McGraw-Hill.
12. Maurer, E. P. (2007). Uncertainty in hydrologic impacts of climate change in the Sierra Nevada, California under two emissions scenarios. *Clim Change*, 82(3-4): 309-325.
13. Maurer, E. P., Wood, A. W., Adam, J. C., Lettenmaier, D. P., Nijssen, B. (2002). A long-term hydrologically based dataset of land surface fluxes and states for the conterminous United States. *J Clim*, 15: 3237-3251.
14. Mote, P. W., Hamlet, A. F., Clark, M., Lettenmaier, D. P. (2005). Declining mountain snowpack in western North America. *Bull Am Meteorol Soc*, 86(1): 39-49.
15. Payne, J. T., Wood, A. W., Hamlet, A. F., Palmer, R. N., Lettenmaier, D. P. (2004). Mitigating the effects of climate change on the water resources of the Columbia River basin. *Clim Change*, 62: 233-256.
16. Van Rheezen, N. T., Wood, A. W., Palmer, R. N., Lettenmaier, D. P. (2004). Potential implications of PCM climate change scenarios for California hydrology and water resources. *Clim Change*, 62: 257-281.
17. Vicuna, S., Maurer, E. P., Joyce, B., Dracup, J. A., Purkey, D. (2007). The sensitivity of California water resources to climate change scenarios. *J Am Water Res Assoc*, 43(2): 482-498.
18. Wigmosta, M. S., Vail, L. W., Lettenmaier, D. P. (1994). A distributed hydrology-vegetation model for complex terrain. *Water Resour. Res.*, 30: 1665-1679.