

SWAT 모형을 이용한 농업유역의 기후변화 민감도 평가

Climate Change Sensitivity Assessment of a Highly Agricultural Watershed Using SWAT

박민지* 김성준**

Park, Min-Ji · Kim, Seong-Joon

I. 서론

화석연료 소비는 온실가스와 이산화탄소 배출 발생을 증가시킨다. IPCC 보고서에 따르면 CO₂ 증가는 현재에 330ppm에서 550~990ppm까지 증가할 것이라고 예측하고 있다(IPCC, 2007). 또한 온실가스 증가에 따른 지구 온도 증가와 강수량의 변화도 예측하고 있다. 이러한 변화들은 수문 순환과 식물의 생장에 직접적인 영향을 끼치게 된다. 기존 연구에서는 CO₂의 증가에 따라 기공전도도가 감소되고 증산이 작아질 것이라고 발표하였다(Morison and Gifford, 1983; Morison, 1987; Hendry et al., 1993; Tyree and Alexander, 1993; Field et al., 1995; Saxe et al., 1998; Wand et al., 1999; Medlyn et al., 2001; Wullschlegler et al., 2002). 또한 CO₂ 증가에 따른 엽면적의 증가와 기공전도도에 따른 증산 감소가 상쇄 보충될 것이라는 연구도 수행된 바 있다(Wand et al., 1999; Prichard et al., 1999; Saxe et al., 1998).

본 연구에서는 캘리포니아 San Joaquin 농업 유역에 16개 시나리오를 사용하여 50년에 대한 연, 월평균 CO₂와 강수, 온도가 유역의 수문 순환에 끼치는 영향과 이러한 요소들의 민감도를 분석하여 정량화하였다.

II. 재료 및 방법

1. 대상 유역 설명

미국 캘리포니아 San Joaquin 강 유역은 대부분이 농업지역으로 지중해 기후인 건조하고 뜨거운 여름과 춥고 습한 겨울을 가지며, 연평균 강수량은 200~300mm이며 대부분이 11~4월에 오며 5~10월에 오는 양은 매우 작다. 일평균 온도는 15°C이며 건조한 기후 때문에 농업의 관개 의존도가 높은 유역이다(그림 1).

2. SWAT 수문학적 모형

SWAT은 USDA에서 개발된 수문/수질 모형

* 건국대학교 사회환경시스템공학과 박사과정 (iamg@konkuk.ac.kr)

** 건국대학교 사회환경시스템공학과 교수 (kimsj@konkuk.ac.kr)

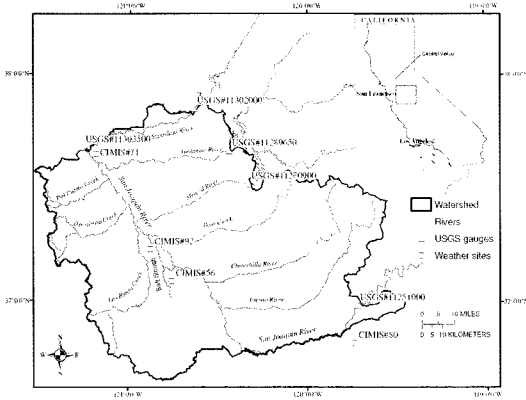


그림 1. 대상 유역

이다. 미계측 유역의 농업과 토지 관리에 따른 수자원, 퇴사량, 농업적 화합물의 영향을 예측한다. 일단위 분포형 모형으로 토양, 토지의 속성에 의해 HRU라는 수문단위로 나누어 모의된다. 유출량은 SCS 유출 곡선에 의해 계산되며, 식생 순환은 열원단위 이론에 의해 모의된다. 관개는 토양에 수분이 부족하면 자동 혹은 수동으로 적용되도록 되어있다. CO₂ 농도에 따른 증발산량 계산으로 미래 기후변화에 따른 모의가 가능하다. CO₂ 2배 증가시 기공전도도가 40% 감소하는 것으로 연구된바 있다. 이러한 감소 추이는 CO₂ 농도에 선형으로 계산되며 그 식은 다음과 같다.

$$g_{CO_2} = g \times [1.4 - 0.4 \times (CO_2/330)]$$

단 CO₂ 농도에 따른 LAI 영향은 고려하지 않는다.

3. 자료 수집 및 분석

30m 해상도 DEM, 1:250000 토지피복도, 1:100000 하천도와 1:24000 토양도를 구축하였으며, 유역내 4개 기상관측소에 기상자료를 수집하였다(그림 1).

4. 모형의 검보정

사진 민감도 분석과 문헌 조사를 기초하여 보정하였으며, Nash-Sutcliffe 모형 효율은 0.95(보정), 0.94(검증)로 나타났다.

5. CO₂ 농도, 강우, 온도변화 시나리오

IPCC SRES에 고 배출 시나리오인 A1FI와 저 배출 시나리오인 B1을 기초하여 표 1과 같이 입력하였다. LARS-WG 기후생성기 사용하여 50년의 기후 자료를 생성하게 된다.

표 1. 모형 입력 기후변화 시나리오

Scenario	CO ₂ Conc. (ppm)	Temperature (°C)	Precipitation (%)
Reference	330	0	0
1	330	1.1	0
2	330	6.4	0
3	330	0	10
4	330	0	20
5	330	0	-10
6	330	0	-20
7	550	1.1	0
8	550	1.1	10
9	550	1.1	20
10	550	1.1	-10
11	550	1.1	-20
12	970	6.4	0
13	970	6.4	10
14	970	6.4	20
15	970	6.4	-10
16	970	6.4	-20

Ⅲ. 결과 및 고찰

1. 물생성량(Water yield)

16개 시나리오에 대한 모형의 구동 결과 연 평균 물생성량은 강우 증가에 따라 증가하였으며 온도 증가에 따라 감소하는 것으로 나타났다(표 2). 그러나 CO₂ 농도가 970ppm일 때는 강수량이 10% 감소하여도 물생성량이 8.8% 증가하는 것으로 나타났다. 월 단위를 비교 결과 CO₂가

330ppm에는 강수량 증가시를 제외하고 다른 4개의 시나리오에서 모두 달에 감소하였으며, 550ppm에서는 강수량 감소시를 제외하고 모두 증가하였다. 그리고 970ppm 입력시에는 20% 강우 감소를 제외하고 모두 증가하였다<표 3>.

2. 증발산량

연 평균 증발산량은 온도, 강우와 비례하였으나, 월 증발산량에서는 CO₂가 330ppm일 때는 온도가 증가할 때 6월부터 9월까지의 감소, 나머지 달은 증가하였다. 550ppm 입력시에는 전체적으로 감소하였으며 특히 20% 강수량 감소시 13.1%로 가장 높은 감소폭을 보였다. 계절적으로는 늦은 여름과 초가을(6월~9월)에 감소폭이 컸으며, 20% 강우 감소시에 감소폭이 가장 컸다. 970ppm에서는 4월에 감소폭이 가장 작았으며 온도와 강수량에 증감에 따른 차이는 미미하였다.

3. 관개수

연평균 관개수는 온도와 강수량에 반비례하였으며 특히 온도 변화에 따른 변화량이 컸고, CO₂ 농도 증가에 따라 감소하는 것으로 나타났다<표 2>.

월관개수 분석 결과 330ppm에서는 최고 관개수 사용이 온도가 1.1℃ 증가했을 때는 6월에서 5월로 6.4℃씩 증가했을 때는 6월에서 4월로 각각 변화하였다. 550ppm의 CO₂에서 봄(3~5)에는 소폭 상승하였으며, 여름(6~11)에는 크게 감소하였다. CO₂ 농도가 970ppm일 때는 온도와 강수량의 따른 차이는 미미하였으며, 20% 강수량 증가시 7월에 76.2%까지 감소하였으며, 12월을 제외한 모든 계절에 감소하였다.

4. 하천흐름량

하천흐름량은 온도와는 반비례, 강수량과 CO₂농도와는 비례하여 모의되었다<표2>. 증발산량과는 반대적으로 나타났다. 현재 CO₂ 농도인 330ppm에서는 온도 증가에 따라 봄(3~6)에 감소하고 여름(7~11)에 증가하였다. B1 배출 농도인 550ppm에서는 11월에서 6월에는 330ppm일 때와 비슷한 경향을 보였고 나머지 달에는 모든 강우 조건에서 증가하였다. A1FI 배출 농도인 970ppm 일 때는 모든 달에 증가하였으며 11월에서 3월까지의 강수량 감소에 따라 감소하였다. 특히 7월에는 170.8~191.9%까지 증가하였다.

각 작물들은 생장에 적절한 온도 범위를 가지고

표 2. 기준 년도에 강수량, 온도 변화에 따른 차이 비교(물생성량, 증발산량, 관개수량, 하천흐름)

Baseline scenarios (absolute values)						
CO ₂ Conc. (ppm)	Temperature (°C)	Precipitation (%)	Water Yield (mm)	ET (mm)	Irrigation Water Use (mm)	Streamflow (m ³ s ⁻¹)
modern conditions			85.4	437.7	224.4	108.9
Climate change scenarios (changes relative to baseline scenarios)						
CO ₂ Conc. (ppm)	Temperature (°C)	Precipitation (%)	Water Yield (%)	ET (%)	Irrigation Water Use (%)	Streamflow (%)
330	+1.1	0	-3.4	0.4	-0.5	-2.4
330	+6.4	0	-15.6	2.8	-0.8	-11.9
330	0	+10	22.0	2.2	-0.7	8.0
330	0	+20	46.1	4.0	-1.0	16.6
330	0	-10	-20.3	-2.5	0.4	-7.4
330	0	-20	-38.4	-5.4	1.2	-14.3

표 3. 배출 시나리오에 따른 기준 년도와 차이 비교(물생성량, 증발산량, 관개수량, 하천흐름)

CO ₂ Conc. (ppm)	CO ₂ Conc. (ppm)	CO ₂ Conc. (ppm)	CO ₂ Conc. (ppm)	CO ₂ Conc. (ppm)
<i>Baseline scenario (atm. CO₂ temperature and precipitation at modern levels)</i>				
+0%	85.4mm	437.7mm	524.2mm	108.9m ³ s ⁻¹
<i>IPCC emission scenario B1 (atm. CO₂=550 ppm; Mean temperature +1.1 °C)</i>				
Change relative to baseline scenario (%)				
+8%	+1.6	-8.1	-15.3	+2.2
+10%	+24.9	-6.2	-15.9	+10.7
+20%	+50.4	-4.7	-16.3	+19.7
-10%	-19.3	-1.4	-14.6	-5.4
-20%	-37.9	-13.1	-13.7	-12.6
<i>IPCC emission scenario A1F1 (atm. CO₂=970 ppm; Mean temperature +6.4 °C)</i>				
Change relative to baseline scenario (%)				
+0%	+36.5	-37.5	-58.3	+23.5
+10%	+65.0	-36.5	-58.8	+32.7
+20%	+94.5	-35.7	-59.1	+42.3
-10%	+8.8	-38.6	-57.9	+14.8
-20%	-17.2	-39.7	-56.9	+5.7

있다. 온도의 증가에 따라 식물의 성장 시기와 순환은 빠르게 바뀌게 된다. 6.4°C 증가시 최대 엽면적은 2달이나 미리 나타나기도 한다. 이에 따라 증발산량의 연 변화는 적지만 생육 시기에 따라 겨울에 증발산량과 관개수량은 늘어나고 여름에는 감소한다. 강수량 증가에 따라 근영역의 수분 증가에 따라 증발산 가능량의 증가로 증발산량은 증가하였으나 최대 강수량과 강도는 식물 성장 순환과 관개수의 관계는 변화시키지 않았는데 강수량의 대부분이 휴면 기간동안 내리기 때문이다. 또한, 온도 증가시 관개수와 하천 흐름량은 반대적인 상관관계를 갖는다.

CO₂와 온도 증가시에 전체적인 식물-수분 스트레스 감소로 관개수량 사용을 감소시킨다. 하지만 SWAT은 기공전도도와 CO₂의 관계를 선형으로 계산하고 CO₂에 따른 LAI를 고려하지 못함으로 기공전도도를 과대평가하게 된다. 식생에 대한 CO₂ 영향의 단순화로 인해 분석 결과를 수자원 관리에 사용하기에 불확실성을 가지고 있다. 그러나 본 연구에서는 CO₂가 수문순환에

어떻게 영향을 끼치는지에 대한 정보를 제공하였다. 향후 연구에서는 CO₂에 따른 LAI와 기공전도도의 변화 정보의 구축이 필요하다.

식생과 증발산량 감소에 따른 관개시기 변화는 농부들의 수자원 할당과 계획에 사용될 것이다. 또한 작물의 성장 순환이 바뀔 경우 이모작을 하기도 충분할 것으로 판단된다. 유출 증가는 오염물 증가로 나타날 수 있으니 해당 관리국은 이에 대비해야 한다.

IV. 결 론

본 연구에서는 농업 유역인 San Joaquin 강유역을 대상으로 기후변화에 따른 수자원 영향을 SWAT을 이용하여 모의하였다. 대상 유역은 기후변화에 대해 매우 민감하였다. CO₂는 970ppm, 온도 6.4°C 증가시 증발산량은 37.5% 감소하였으며, 물생성량은 36.5%, 하천흐름은 23.5% 증가하였다. 강수량이 관개수량과 증발산량에 끼치는 영향은 미미하였다. 연구 결과

온도는 모든 수문 요소에 영향을 끼치며 온도 상승은 식물의 성장 추이에 영향을 끼쳐 월별 증발산량과 관개수량 변화를 가져온다.

V. 활용방안 및 기대효과

이러한 정량화된 정보는 본 유역의 수자원 보존과 농업관리에 사용될 수 있다. 실질적으로 CO₂ 농도와 온도의 영향을 많이 받는 농업 유역의 기후변화에 따른 수문, 농업 생산성의 영향에 대한 더욱 광범위한 평가가 필요하다.

참고문헌

- Field, C.B., Jackson, R.B., Mooney, H.A., 1995. Stomatal Responses to Increased CO₂: Implications From the Plant to the Global Scale. *Plant Cell Environment* 18, pp.1214~1225.
- Hendry, G.R., Lewin, K.F., Nagy, K.F., 1993. Free Air Carbon Dioxide Enrichment: Development, Progress, Results. *Vegatatio*, 104/105, pp.17~31.
- IPCC, 2007. *Climate Change 2007: The Physical Science Basis*, Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Medlyn, B.E., Barton, C.V.M., Broadmeadow, M.S.J., Ceulemans, R., De Angelis, P., Forstreuter, M., Freeman, M., Jackson, S.B., Kellomaki, S., Laitat, E., Rey, A., Roberntz, P., Sigurdsson, B.D., Strassmeyer, J., Wang, K., Curtis, P.S., Jarvis, P.G., 2001. Stomatal Conductance of Forest Species After Long-Term Exposure to Elevated CO₂ Concentrations: A Synthesis. *New Phytologist* 149, pp.247~264.
- Morison, J.I.L., Gifford, R.M., 1983. Stomatal Sensitivity to Carbon Dioxide and Humidity. *Plant Physiology* 71, pp.789~796.
- Morison, J.I.L., 1987. Intercellular CO₂ Concentration and Stomatal Response to CO₂. *Stomatal Function*. Stanford University Press, Stanford California, pp.229~251.
- Tyree, M.T. and Alexander, J.D., 1993. Plant water relations and the effects of elevated CO₂: a review and suggestions for future research. *Plant Ecology* 104~105(1), pp.47~62.
- Pritchard, S.G., Rogers, H.H., Prior, S.A., Peterson, C.M., 1999. Elevated CO₂ and Plant Structure: A Review. *Global Change Biology* 5, pp.807~837.
- Saxe, H., Ellsworth, D.S., Heath, J., 1998. Trees and Forest Functioning in an Enriched CO₂ Atmosphere. *New Phytologist* 139, pp.395~436.
- Wand, S.J.E., Midgley, G.F., Jones, M.H., Curtis, P.S., 1999. Responses of Wild C4 and C3 Grass (Poaceae) Species to Elevated Atmospheric CO₂ Concentrations: A Meta-Analytic Test of Current Theories and Perceptions. *Global Change Biology* 5, pp.723~741.
- Wullschlegel, S.D., Gunderson, C.A., Hanson, P.J., Wilson, K.B., Norby, R.J., 2002. Sensitivity of Stomatal and Canopy Conductance to Elevated CO₂ Concentration - Interacting Variables and Perspectives of Scale. *New Phytologist* 153, pp.319~331.

출 처

Journal of Hydrology 2009. 5. 20

Darren L. Ficklin, Yuzhou Luo, Eike Luedeling, Minghua Zhang

Department of Land, Air and Water Resources, University of California, Davis, CA 95616, USA.