기후변화와 물발자국의 미래 *

최순군†, 허승오, 홍성창, 최동호
(†국립농업과학원 기후변화생태과 농업연구사)

1. 들어가면서

"물 쓰듯 한다"라는 말이 있듯이 물이 풍부한 우리나라에서는 물의 가치가 높지 않다. 가뭄이 들면 그제야 내리는 비의 가치가 얼마인지 따져보거나 긴급대책 방안을 내놓지만 장마가 시작되면 가뭄 이야기는 언제 그랬냐는 듯 사라진다. 이러한 현상은 동서고금을 막론하고 공통적인 것 같다. 벤자민 프랭클린은 "우물이 말라야 비로소 물의 가치를 깨닫는다"라는 말을 남겼다.

물은 어디에나 존재하지만 언제 어디서나 사용가능하지는 않다. 많은 전문가들은 기후변화가 물 위기를 심화시킬 것이라는데 동의한다. 그리고 물 위기는 국지적으로 나타날 것이다. 어떤 지역은 홍수가 잦아지는 반면 다른 지역은 가뭄이 심화될 것이다. 시간적으로도 봄 가뭄이 심해지고 여름 홍수가 빈번해질 수 있다. 이러한 물 불균형을 해소할 수 있는 방안으로 물발자국 개념이 관심을 끌고 있다.

이 글은 기후변화에 따른 농업생산 환경의 변화가 물발자국에 미치는 영향을 살펴봄으로써 물발자국이 미래의 가상수 교역의 방향을 예측할 수 있는 지표가 될 수 있을 것인지 검토하고 물발자국이 지니는 한계와 향후 과제를 제시하고자 한다.

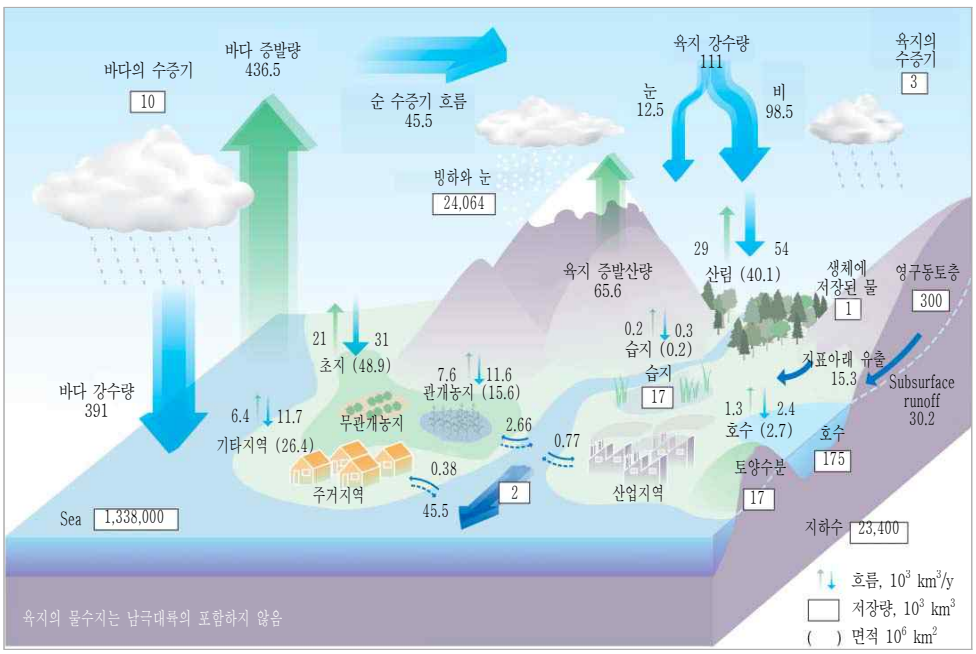
* (soonkun@korea.kr). 이 글은 기후변화, 물발자국과 관련된 논문 및 책에 기재된 내용 및 자료를 번역하여 참조함.

1.1. 물의 순환

물은 사라지지 않는다. 한 번 사용된 물이 성질이 변하여 당장 이용할 수 없는 상태로 변하더라도 태양에너지에 의해 다시 사용할 수 있는 형태로 돌아온다. 육지에서는 연간 6만 5,500km^{3}의 물이 대기로 이동하며 바다에는 연간 43만 6,500km^{3}의 물이 대기로 이동한다. 이는 시간 당 약 50km^{3}로 바다가 2분 동안 만들어내는 구름의 양이 미국인이 하루 동안 사용하는 물의 양을 능가한다. 물 분자는 9일 동안 대기 중에 머물고 비나 눈이 되어 육지에 내려온다. 육지에는 연간 11만 1,000km^{3}의 물이 내리는데, 이 중 4만 5,500km^{3}의 물이 바다로 흘러나간다.

하천으로부터 끌어 쓰는 물의 양은 연간 3,800km^{3}이다. 농업은 이 중 70%에 해당하는 2,660km^3/year를 사용한다. 이는 하천이 보유한 2,000km^3 보다 많은데 물이 끊임없이 흐르기 때문이다. 실제로는 바다로 흘러나가는 4만 5,500km^3/year 중의 일부를 사용한 것으로 볼 수 있다. 이처럼 흐름을 고려하여 사용 가능한 수자원의 총량을 '가용수자원'이라 한다.

그림 1. 지구의 물 흐름(천km^3/year)과 보유량(천km^3)



자료: Taikan Oki와 Shinjiro Kanae(2006).

하천에서 끌어 쓰는 물은 가용수자원의 10%가 채 되지 않는다. 그럼에도 불구하고 세계적으로 물 부족의 문제가 발생하는 이유는 무엇일까? 그 이유는 물이 시·공간적으로 다르게 분포되어 있기 때문이다. 시간적 불균형의 예로 하천의 유량은 우기와 건기에 차이가 매우 크며 월 단위, 일 단위에서도 크게 차이가 난다.

물은 결국 돌아오겠지만, 돌아오는 시기를 통제하기는 어렵다. 그래서 물의 시간적 불균형 문제를 해결하기 위해 인공저수지를 만들었으며 그 저장량은 연간 취수량의 약 2배인 7,200km^3으로 추정된다.

공간적 불균형은 지표면에서의 물의 저장과 흐름이 제한된 지역에서 이루어지고 있기 때문에 생긴다. 사막에서 물 흐름은 0에 가까울 것이며 연간 강수량이 2,000㎜가 넘는 아마존 유역은 초당 20만 톤의 물이 바다로 빠져나간다. 따라서 모든 물 문제는 국지적으로 발생한다. 우리가 물 절약 변기를 설치해서 물을 절약한다 해도 물 부족을 겪고 있는 사막지역 마을에는 전혀 도움이 되지 않는다.

1.2. 물발자국

2008년 봄, 바르셀로나는 60년 만에 최악의 가뭄을 경험하였다. 바르셀로나 전체 저수지의 수위가 20% 수준으로 내려가자 당국은 해변에 위치한 샤워시설과 분수에 더 이상 물을 공급하지 않기로 했다. 바르셀로나 수자원 관리업체는 3,000만 달러를 들여 화물선을 이용해 프랑스 마르세유에서 물을 실어 날랐다. 화물선이 가져온 물 1,900만 리터는 바르셀로나에서 32분 만에 동이 났다.[1)]

먼 거리까지 많은 양의 물을 운송할 방법은 중력에 의한 방법뿐이다. 음용수를 운송하는 정도라면 물탱크를 나르거나 해수담수화를 통해 충족할 수 있다. 그러나 가정과 산업, 농업에 요구되는 양을 충족하기 위해 물탱크를 운송하거나 에너지가 많이 드는 해수담수화 기술을 적용하는 것은 어리석은 일이다.

한편, 물 부족 지역에서는 물을 많이 소모하는 작물을 기르거나 공산품을 생산하는 대신에 식량과 공산품을 수입함으로써 물 문제를 해결할 수 있다. 식량이나 공산품을 교역하는 것은 이들을 생산하기 위해 필요한 물의 양을 교역하는 셈이다. 이러한 개념을 보이지 않는 물, '가상수(virtual water)' 교역이라 한다. 가상수 교역은 직접 물을 교역하는 무게의 1/100에서 1/1,000에 지나지 않는다.

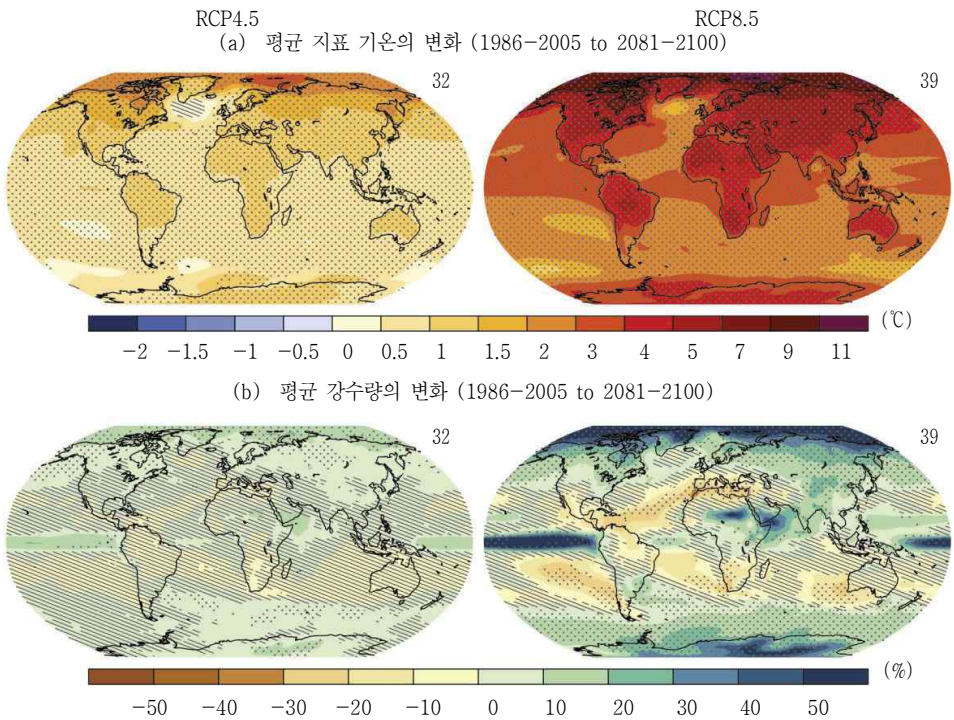
1) 『거대한 갈증』으로부터 발췌 Fishman(2012).

물발자국은 가상수를 산정하는 주요 개념으로 '단위 재화를 생산하기 위해 전 과정에서 소비된 물'을 의미한다. 물발자국과 가상수 교역은 기후변화와 식량안보에 대응하여 세계 무역 전략의 성과를 평가하기 위한 도구로 유용하다.

1.3. 기후변화[2)]

1986~2005년을 기준으로 21세기 후반(2081~2100년) 지구 평균 표면 온도는 RCP4.5 시나리오에서 1.1℃~2.6℃, RCP8.5에서 2.6℃~4.8℃ 상승할 가능성이 높다. RCP시나리오란 IPCC[3)] 5차 보고서에서 채택된 대표농도경로(Representative Concentration Pathway, RCP)시나리오로서 CO_2농도변화에 따라 세기말(2100년) 복사 강제력

그림 2. 1986~2005년 대비 2081~2100년의 지표 온도(a) 및 평균 강수량(b)의 변화

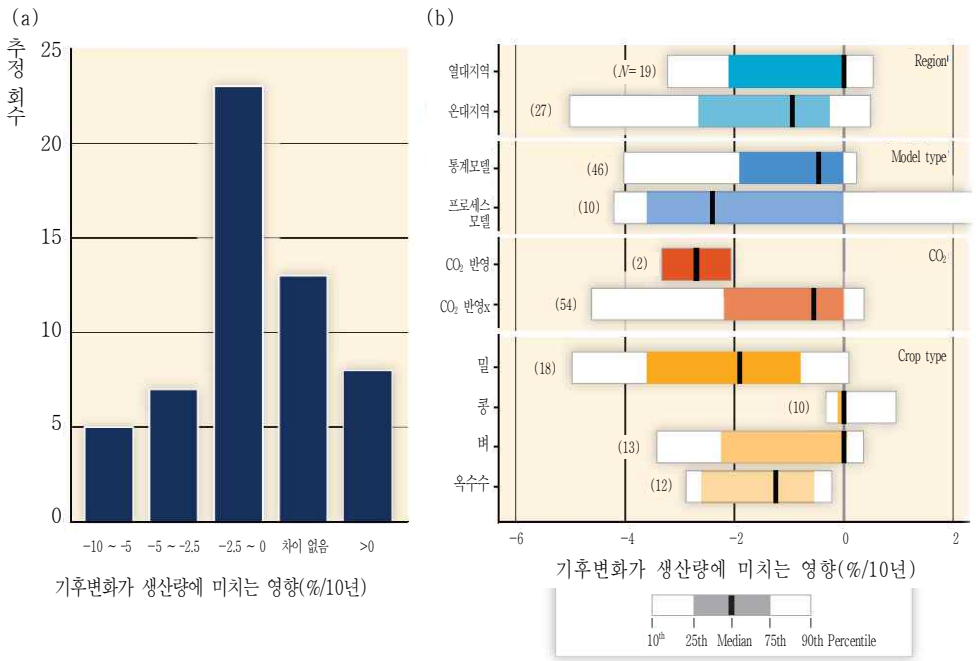


자료: IPCC(2014).

2) 기후변동에 관한 정부간 패널(Intergovernmental Panel on Climate Change)의 5차보고서의 Working Group Ⅱ, Impact adaptation and vulnerability, IPCC)로부터 발췌함.

3) 기후 변화와 관련된 전 지구적 위험을 평가하고 국제적 대책을 마련하기 위해 세계기상기구(WMO)와 유엔환경계획(UNEP)이 공동으로 설립한 유엔 산하 국제협의체(Intergovernmental Panel on Climate Change).

그림 3. 기후변화에 따른 4가지 주요 식량작물의 생산량 변화 예측



자료: IPCC(2014).

(지구가 흡수하는 일사량과 그 중 다시 우주로 방출되는 에너지의 차이)이 4.5W/㎡이면 RCP4.5 시나리오, 8.5 W/㎡이면 RCP8.5 시나리오이다. 값이 높을수록 지구가 흡수하는 에너지가 더 커져 지구의 온도가 올라간다. RCP8.5 시나리오는 현재와 같이 온실가스를 배출할 경우의 시나리오이며, RCP4.5 시나리오는 온실가스 배출을 줄이려는 노력이 상당히 실현된 미래의 시나리오이다.

북극 지역의 온난화는 지속될 것이며, 그 속도는 지구 평균 온난화 속도보다 더 빠를 것이다. 강수량의 변화는 지역별로 일관된 경향을 보이지 않을 것이다. RCP8.5 시나리오에서 고위도 및 적도 부근 태평양의 연 평균 강수량은 증가할 가능성이 높다. RCP8.5 시나리오에서 중위도 및 아열대 건조 지역의 평균 강수량은 감소하는 반면 중위도 습윤 지역의 평균 강수량은 증가할 가능성이 높다<그림 2>. 즉, 건조지역은 더욱 더 건조해지고, 습한 지역은 더욱 비가 많이 내릴 것으로 예상하고 있다. 이러한 강수량의 변화는 작물이 이용하는 빗물의 양(녹색물발자국과 관련됨)과 가용수자원(청색물발자국과 관련됨)에 영향을 줄 것으로 예상된다.

작물 생산량의 변화는 작물의 종류, 지리적 위치 및 적용 시나리오에 따라 다양하다 <그림 3>. 온대 작물은 열대작물에 비해 생산량 감소가 클 것으로 예상된다. 월동 작물인 밀은 매우 큰 감소세를 보일 것으로 예상되는 반면 콩의 생산량에는 큰 변동이 없을 것으로 보인다. 쌀 역시 생산량의 중위값은 변동이 없지만 옥수수는 생산량 감소가 예상된다. IPCC 5차 보고서에는 보다 다양한 기후시나리오, 다양한 지역 및 작물에 대하여 생산량 변동을 예측한 논문들이 정리되어 있다.[4)]

2. 기후변화 연구 현황

대기 중 CO_2 상승으로 인한 기후변화와 기후변화가 식물에 미치는 영향을 평가한 연구는 90년대 이전부터 수행되어왔다. 1990년 IPCC 1차 보고서가 발표된 이후로 기후변화 시나리오와 농업 및 다양한 분야에 대한 영향평가 연구가 본격적으로 수행되고 있다. 현재까지 5차보고서가 발표되었으며 2021년에 6차 보고서가 발표될 예정이다. 이와 관련하여 다양한 실험연구와 모델을 이용한 연구가 계속해서 수행되고 있으며 최근에는 기후변화가 물발자국에 미치는 영향 평가도 이루어지고 있다.

2.1. 기후변화 조건에서의 작물반응 실험

식물의 생장이 CO_2 농도에 영향을 받는다는 사실은 1804년, 소쉬르(Saussure, 1767~1845)에 의해 최초로 밝혀졌다. 소쉬르는 광합성을 하는 데 필요한 탄소의 공급원이 공기 중의 CO_2라는 사실을 확인하였으며 주변 공기보다 높은 CO_2 농도에서 완두콩이 더

그림 4. USDA-ARS의 OTC

그림 5. 노지에서의 CO_2 농도 반응실험

자료: 저자 작성.

4) Working Group II, Impact adaptation and vulnerability, Chapter 7 Food Security and Food Production Systems의 Box 7-1 참조 (pp. 510-512).

잘 자란다는 사실을 발견하였다. 이후 많은 연구자들이 소쉬르의 연구를 참고하여 CO_2 농도의 변화와 식물반응 실험들을 수행하였다. CO_2가 지구온난화의 주요 원인 물질로 밝혀짐에 따라 CO_2 농도의 변화와 기온상승을 동시에 고려한 식물반응 실험이 이루어졌다. 주로 실험실이나 온실에서 많은 연구들이 수행되었는데, 실험실과 온실은 일교차, 태양광, 강우, 습도 등 실제 현장의 기후를 반영하지 못한다는 단점이 있었다.

이를 보완하기 위하여 상부개방형챔버(Open Top Chamber, OTC)가 개발되어 실험에 이용되고 있다<그림 4>. 상부개방형챔버는 투명한 재질의 벽면으로 둘러쌈으로써 챔버 내부의 기온을 외부 기온보다 약간 높은 상태로 유지하는 장치이다. 벽면의 높이를 조정함으로써 내부 기온과 외부 기온의 차이를 조절 할 수 있다. 미국농업연구청(USDA-ARS)[5]은 현재 상부개방형챔버를 이용하여 콩, 밀, 옥수수의 생육반응을 연구 중에 있다. <그림 4>의 사진에서 CO_2를 주입한 오른쪽 챔버가 주입하지 않은 왼쪽 챔버보다 콩의 생육이 월등한 것을 확인할 수 있다.

한편, 상부개방형챔버는 바람의 영향이 제외된다는 점에서 한계가 있다. 따라서 <그림 5>의 사진과 같이 개방된 노지에서 CO_2를 주입하여 주변부 CO_2 농도를 높이거나 열선을 이용하여 주변부 기온을 높여 식물의 반응을 비교하는 연구도 수행되고 있다. 그러나 CO_2 농도와 기온을 일정 수준으로 제어하기 힘들고(바람이 불면 CO_2 농도가 바뀜) 유지를 위해 많은 비용이 소요된다는(1주 동안 무려 3ton의 CO_2가 필요함) 단점이 있다.

그림 6. USDA-ARS의 SPAR system

그림 7. 내부 대기 제어 시스템

주: SPAR system 내부에 설치된 센서를 통해 대기 상태를 측정하고 물, CO_2의 과부족을 판단하여 공급함.
자료: 저자 작성.

5) United States Department of Agriculture - Agricultural Research Service.

최근에는 SPAR(Soil Plant Atmosphere Research) system이 기후변화 연구를 위한 가장 정밀한 실험 방법으로 사용되고 있다<그림 6, 7>. 온도, 습도, CO_2 농도를 인위적으로 조절하여 작물의 생육을 평가할 수 있으며 시스템 내부의 기상환경을 유지하기 위하여 외부로 배출되는 물의 양과 외부에서 유입되는 CO_2 양을 측정할 수 있다. 이를 통해 작물의 CO_2 소비, 광합성 양, 증발산에 의한 물 소비량 등을 측정할 수 있다.

그림 8. 국립농업과학원의 OTC

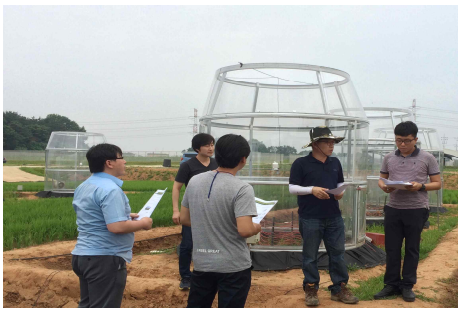


그림 9. 온난화대응농업연구소의 SPAR system

자료 : 저자 작성.

우리나라에서도 농촌진흥청 국립농업과학원에서 OTC를 이용하여 CO_2 농도 및 기온변화에 따른 작물의 생육과 물 소비량을 분석하고 있다<그림 8>. 국립식량과학원과 온난화대응농업연구소에서는 SPAR system을 도입하여 다양한 식량작물과 원예작물에 대하여 기후반응을 연구하고 있다<그림 9>.

2.2. 기후변화 연구를 위한 모델

기후변화 연구를 위해 기후변화 조건을 조성하기에는 많은 시간과 노력, 특히 비용이 소요된다. 그리고 다양한 기후변화 조건에서 다양한 작물에 대해 기후변화의 영향을 분석하기는 불가능에 가깝다. 따라서 이러한 한계점을 극복하기 위해 여러 가지 모델들이 개발되었다. DSSAT, ORYZA, EPIC/APEX, FAO Aqua-Crop 등이 대표적이다. 앞선 모델들은 생육조건(토양수분 및 양분, 일사량, 기온, CO_2 등)에 대하여 작물의 생체량과 엽면적 증가, 물 소비량(증발산량)을 일 단위로 계산한다. 대부분의 기후변화 연구 결과는 모델을 이용한 분석 결과이다.

한편, 같은 기후자료를 적용하더라도 각 모델의 분석결과는 일치하지 않는다. 모델마다 요구하는 입력자료, 고려하는 인자, 반응식이 다르기 때문이다. 기후변화 연구를

위해 가장 좋은 모델이란 존재하지 않는다. 다만 다양한 연구자들이 다양한 모델을 이용하여 도출하는 결과를 정리하면 미래 기후변화 영향의 추세를 가늠할 수 있다.

3. 기후변화와 물발자국

기후변화에 따른 물발자국 변화에 관한 연구는 많지 않다. 그러나 CO_2 농도 상승과 이로 인한 기후변화가 농업 생산성과 작물의 물 소비량에 미치는 영향에 대해서는 많은 연구가 수행되었다. 기후변화는 단순히 농업에 나쁜 영향만 주는 것은 아니다. CO_2 농도 상승과 기온 상승, 강우패턴의 변화는 각각 농업 생산성과 작물의 물 소비량에 양면적인 영향을 준다. 여기서는 CO_2 농도, 기온, 강수량의 변화가 농업생산성과 물 소비량에 미치는 영향을 검토함으로써 기후변화가 물발자국에 미치는 영향을 추정해보았다.

3.1. CO_2 농도 상승과 물발자국

CO_2 농도 상승은 기후변화의 원인이 되어 농업에 간접적으로 나쁜 영향을 준다고 알려져 있지만 직접적으로는 작물의 생육에 긍정적인 영향을 준다. CO_2 농도 상승은 농산물의 물발자국을 줄이는 역할을 할 것이다. CO_2 농도 상승은 식물의 물이용 효율(Water Use Efficiency, WUE)을 높이기 때문이다. 물이용 효율은 식물이 소비하는 물의 양(증산량)에 대한 탄소 고정량의 비율을 의미한다. 탄소 고정량은 생산량과 밀접한 관련이 있다. 이미 많은 연구가 CO_2 농도 상승 조건에서 생산량이 증가하고 관개량[6]이 감소한다는 결과를 도출하였다.

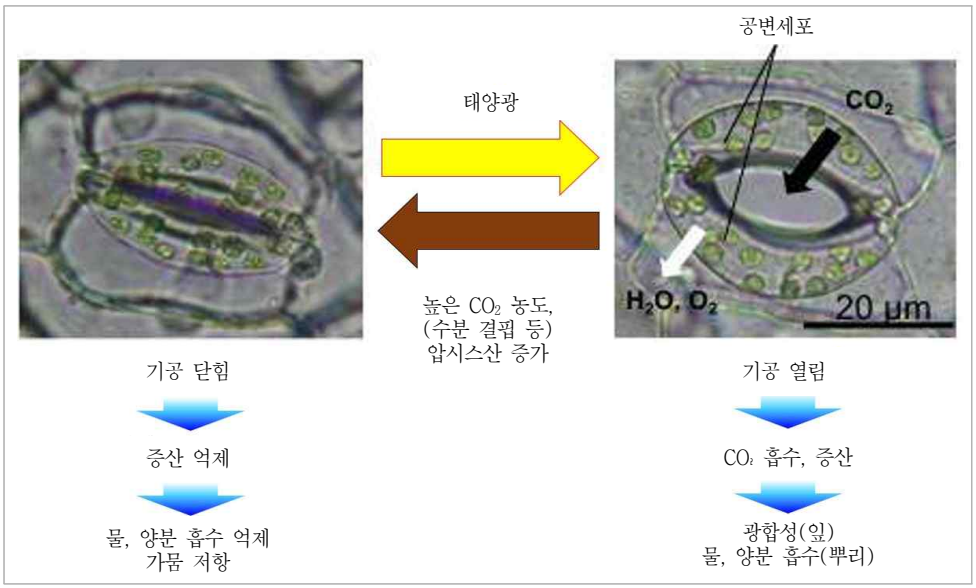
높아진 CO_2 농도는 식물의 광합성 효율을 높인다. 식물은 공기 중의 탄소를 더 빨리 흡수할 수 있어 식물의 생체량(biomass)을 더 빨리, 더 많이 증가시킨다. 실재로 네덜란드에서는 시설원예 온실 난방으로 발생하는 이산화탄소를 온실에 공급하는 기술이 보편화되어있고 우리나라 파프리카 농장에도 액화탄산가스를 이용하여 온실에 이산화탄소를 공급하고 있다.[7]

식물은 크게 벼, 밀, 콩 등의 C3 식물[8]과 수수, 옥수수, 사탕수수와 같은 C4 식물[9]로

6) 작물의 생육에 필요한 양의 물을 공급하는 것임.
7) 이산화탄소 비료(CO_2 fertilizer)
8) 암반응에서 최초의 CO_2 고정산물이 탄소가 3개(Phospho Glyceric Acid, PGA)인 식물임.
9) 암반응에서 최초의 CO_2 고정산물이 탄소가 4개(옥살아세트산)인 식물임.

분류된다. C4 식물은 C3 식물에 비해 광합성효율이 좋고 물 요구량이 적다는 특징이 있다. 그러나 C4 식물은 이미 체내에서 CO_2 농도를 높여 이용하고 있다. CO_2 농도 상승은 공기 중의 CO_2 농도를 그대로 이용하는 C3 식물의 생장에 더 긍정적인 영향을 준다. 많은 연구자들의 연구내용을 정리하면 300ppm을 기준으로 CO_2 농도를 두 배 증가시키면 C4 식물은 10~15%의 생산량 증가를 보인 반면 C3 식물의 생산량은 33~40%가 증가하는 것으로 나타났다(Kimball 1983; Prior 등 2003).

그림 10. CO_2 농도에 의한 기공 닫힘



자료: (https://phys.org/news/2014-03-growth-pore.html).

CO_2 농도 상승은 식물의 물 소비량을 줄인다. CO_2 농도가 올라가면 식물은 기공[10]을 자주 열지 않아도 광합성에 필요한 탄소를 충분히 얻을 수 있다. 식물은 복잡한 기제를 거쳐[11] 결국 높은 CO_2에 반응하여 기공을 닫는다. 기공이 닫히면 물이 기공을 통해 기체 상태로 내보내지는 증산작용이 줄어들고, 뿌리가 토양수분을 빨아들이는 양이 줄어든다. 300ppm을 기준으로 CO_2 농도가 두 배 상승할 경우 증산량이 34% 감소하는 것으로 보고되었다(Kimball와 Idso 1983).

10) 광합성에 필요한 이산화탄소가 들어오고 광합성의 결과로 만들어진 산소가 나가는 공기의 이동 통로임. 이곳에서 잎에 있는 물이 기체상태로 내보내지는 증산작용이 일어남.
11) 자세한 내용은 Xu 등 (2016)에 정리되어 있음.

3.2. 기온 상승과 물발자국

『귤화위지(橘化爲枳)』 "귤이 회수를 건너면 탱자가 된다"라는 말이 있듯 작물은 기후와 토양이 변하면 생육이 달라진다. 현재 재배중인 작물은 지역의 기후에 특화된 작물이다. 지금도 기후가 변화함에 따라 재배적지는 계속해서 변화하고 있다. 사과, 배추 등의 재배지는 점차 북상하거나 고도가 높아지고 있다. 모내기에서 수확까지 시간이 짧은 조생종 벼는 설 자리를 잃고 있다. 반면, 제주도에서나 재배가 가능했던 감귤은 재배지가 북상하여 이제는 남부 해안지역에서도 재배가 가능하다.

기온 변화에 대한 작물의 반응은 작물마다 생육하기 좋은 온도가 다르기 때문에 일률적으로 설명할 수 없다. 다만, 기온 변화에 적응하려는 노력 없이 현재와 같은 작물을 같은 방법으로 재배할 경우 생산량은 감소할 것으로 예상된다.

기온상승은 하루 동안의 증발량과 증산량(이하 증발산량)을 증가시킬 것으로 예상되나 전 재배기간으로 놓고 보면 증발산량이 감소할 것으로 예상된다. 기온 상승이 작물의 생육기간을 단축시키기 때문이다. 필자는 논의 수 생태계를 조사하기 위해 연 3회(6월 초, 8월 중순, 9월 말) 강원도 철원부터 제주도 서귀포까지 출장을 다녔다. 김제의 경우 5월 하순에 모내기를 시작하여 10월 초 수확을 하여 조사가 가능하였는데, 제주도 서귀포의 하논을 방문하였을 때 6월 초에는 아직 모내기가 이루어지지 않아 조사를 하지 못했다. 놀라운 사실은 9월 말 제주도 하논을 찾아 갔을 때 이미 수확을 마쳤다는 것이다.

결국, 기온 상승은 생산량도 줄이고 증발산량도 줄인다. 때문에 물발자국이 기온 상승으로 인해 커질 것인가 작아질 것인가는 작물의 특성에 따라 다르다. 작물은 각기 자라기 위한 최소한의 온도인 기저온도와 생육 최적 온도가 있다. 기저온도는 품종마다 다르지만 일반적으로 밀은 0℃, 감자는 7℃ 벼와 콩, 옥수수는 10℃로 알려져 있다. 생육 최적온도는 C4 식물이 C3 식물에 비해 높은 편이다. C3 식물인 밀은 20-25℃가 최적 온도로 추정되며 C4 식물인 옥수수는 30-35℃가 생육 최적 온도로 추정된다<그림 11>.

작물은 싹이 트고, 꽃이 피고, 열매가 맺는 시기, 성숙기 등의 생육 단계가 재배 시작부터 '일정 온도 이상의 누적된 온도'에 영향을 받는다. 이를 유효적산온도(Growing Degree Day, GDD)라고 하는데 이러한 개념은 무려 1735년 Reaumur에 의해 처음 소개되었다.[12] 기온상승은 유효적산온도를 빠르게 채워 작물이 성숙기에 이르는 시기를 앞당긴다. 따라서 작물은 충분한 생체량을 쌓기도 전에 수확기에 도달하여 결국 생산량이 감소하게 된다.

12) 어떤 작물은 매우 다른 기후에서 재배됨. 스페인, 아프리카와 같은 더운 지역, 프랑스와 같이 온화한 지역, 북유럽 같이 추운지역에 자라는 밀에 대해 성숙기까지의 기온을 더해보면 흥미로운 사실을 발견할 수 있음.

따라서 같은 지역 같은 시기에 같은 작물을 심을 경우 기온상승에 따른 생산량 감소는 불 보듯 뻔하다. Phillips 등(1996)은 기온이 2℃ 상승할 경우 옥수수와 콩의 생산량이 3%가 감소할 것으로 예측하였다. Tao와 Zhang (2011)은 평균기온이 1℃, 2℃, 3℃ 상승하고 CO_2 농도 상승을 고려하지 않을(고려할) 경우 중국의 옥수수 생산량이 각각 1.4%~10.9%(1.6%~7.8%), 9.8%~21.7%(10.2%~16.4%), 4.3%~32.1%(3.9%~26.6%)가 감소할 것으로 예측하였다.

많은 실험연구들은 기온이 올라가면 하루 동안의 증발산량은 올라간다고 보고하였다. 높은 기온은 작물의 광합성과 호흡, 증산활동을 활발하게 한다. Jones 등(1985)은 콩을 대상으로 기온을 28℃에서 35℃로 증가시켜가며 실험하였다. 그 결과 1℃ 올라갈 때마다 콩의 일 증산량이 4~5% 증가한다고 보고하였다. Rosenberg 등(1990)도 기온이 1℃ 올라갈 때 일 증발산량이 6.7%가 증가한다고 하였다. 그러나 이러한 연구 결과는 단기간의 실험결과로서 작물생육 전체 기간에 대한 연구는 아니었다.

한편, Mera 등(2006)은 C3작물과 C4작물 모두 기온이 올라가면서 총 증발산량이 감소한다고 보고하였다. 기온 상승으로 작물이 유효적산온도를 빠르게 채워 생육기간이 줄어들기 때문이다. Tao와 Zhang(2011)역시 기온이 올라감에 따라 생육기간이 단축되어 옥수수의 총 증발산량이 감소한다고 보고하였다.

기온이 올라가면 생산량도 줄어들고 증발산량도 감소할 것으로 예상되기 때문에 기온변화와 물발자국의 변화의 관계를 단순히 설명할 수가 없다. 또한 생육기간 단축이 생산량을 감소시킨다면 농부는 생육기간이 더 긴 품종을 선택하거나 아예 다른 작물을 재배할 것이다. 예를 들어 우리나라 철원 지역의 기후가 전주의 기후로 바뀐다면 철원의 대표 조생종[13]인 '오대벼'의 재배를 중단하고 중만생종인 '신동진벼'를 재배하면 그만이다. 그러나 기후변화를 고려한 품종선택과 생산량, 물 소비량의 변화에 관한 연구는 아직 풀어야할 숙제로 남아있다.

3.3. 강수량과 물발자국

농업에는 물이 필요하며 이는 곧 비를 의미한다. "농사는 하늘이 짓는다"라는 말이 있다. 수리시설이 부족했던 옛날에는 극심한 가뭄이 찾아올 때 왕이 직접 하늘을 향해 기우제를 지내기도 했다. 그만큼 농사를 좌우하는 것은 물이다.

미국의 콜로라도주와 네브래스카주에서부터 텍사스주에 걸쳐 있는 고평원지역에

13) 같은 종의 작물 중에서, 표준적인 개화기의 것보다 일찍 꽃이 피고 성숙하는 종. 조생품종이라고도 함. 이와 반대로 늦게 개화, 성숙하는 품종은 만생종 또는 만생품종(晩生品種)이라고 함.

서는 오갈라라 대수층(Ogallara aquifer)의 지하수를 관개수로 사용하고 있다. 이곳의 지역에서는 관개시설이 되어 있지 않은 인접 지역에 비해 밀 생산량이 45%, 수수 생산량이 70%, 면화 생산량이 135% 이상 더 많다. 지하수 사용량은 1950년도 이래로 2004년에는 세 배 이상 증가하여 연간 약 247억 톤 이상을 기록하고 있다.

세계 관개농지의 생산량은 총 생산량의 40%를 차지한다. 그러나 대부분의 농경지는 안정적인 관개시설을 갖추지 못한다. FAO보고서에 따르면, 2009년 세계 관개면적은 301Mha로 1961년에 비해 117%가 증가하였으나 전체 경작지 1,527Mha의 19.7%에 불과하다고 보고하였다<표 1>. 우리나라의 경우도 논은 관개시설을 잘 갖추고 있지만 밭은 관개시설을 갖춘 지역이 드물다. 관개시설이 없는 농지의 작물은 비가 오지 않는 날이 계속되면 가뭄을 겪게 된다. 즉, 토양수분이 부족하여 작물의 뿌리가 토양수분을 빨아들이기 힘든 상태가 되면 생육이 저하되거나 심할 경우 시들어 죽게 된다<그림 12>.

기후변화에 따른 강수량, 강우패턴의 변화는 작물에 의한 증발산량과 생산량에 큰 영향을 줄 것으로 예상된다. 특히 심각한 가뭄은 생산량을 '0'으로 만들어 물발자국을 무한(∞)으로 만들 수도 있다. Mera 등(2006)은 미국 Clayton의 콩과 옥수수에 대하여 강수량이 현재의 25%, 50%, 75%, 150%로 바뀔 경우에 대하여 작물 생체량의 변화를 추정하였다. 강수량이 증가함에 따라 생산량도 크게 증가하였으며 증발산량도 함께 증가하는 추세를 보였다. Phillips 등(1996)은 강수량 변화에 따른 콩과 옥수수의 물이용 효율(생산량/증발산량)을 계산하였다. CO_2 농도 350 ppm에서 강수량이 -20% ~ +20%로 변하는 동안 작물의 물이용 효율이 증가하였다. 즉, 물발자국이 감소하였다. 그러나 CO_2 농도 625ppm에서는 강수량이 증가함에 따라 반대로 물발자국이 증가하는 경향을 보였다.

표 1. 총 경지 면적 및 관개 면적의 변화 (Mha)

구분	1961	2009	순 증가량 1961-2009
총 경지 면적	1,368	1,527	12%
비관개	1,229	1,226	-0.2%
관개	139	301	117%

자료: FAOSTAT database.

그러나 이러한 연구 결과는 연구 대상지역마다 극히 상이하게 나타날 것이다. 이미 강수량이 풍부한 지역과 현재 강수량이 매우 부족한 지역의 기후변화 영향은 각각 다를 것이다. 또한 지역마다 토성(모래, 미사, 점토의 비율)이 다른데 이에 따라 물을 보유할 수 있는 양이 다르다. 비가 더 많이 더 자주 오더라도 사용하지 못하고 흘려보낼 수도 있으며 비가 더 적게 더 드물게 내리더라도 충분히 작물을 길러낼 수도 있다. 게다가 작물마다 가뭄에 견딜 수 있는 능력에도 차이가 있다. 따라서 강수량의 변화가 물발자국에 미치는 영향을 일반적으로 말할 수 없다.

3.4. 한계점 및 향후 과제

지금까지 '기후변화와 물발자국'에 대하여 살펴보았지만 물발자국의 미래는 현재로선 알 수 없다. 첫 번째 이유는 물발자국의 개념이 단위 생산에 대한 물 소비량인데 생산량과 물 소비량이 매우 밀접한 관계가 있기 때문이다. 생육환경이 좋으면 물 소비량이 크고, 가뭄과 이상기상 등 나쁜 생육환경에서는 물 소비량도 줄어든다. 따라서 물발자국의 변화가 보이지 않을 수 있다. CO_2의 증가만이 온전히 물발자국을 줄이는 역할을 할 것이다. 그러나 물발자국이 줄어들더라도 나머지 요인들에 의해 생산량이 감소한다면 과연 그 작물을 수입하지 않고 재배하는 것이 유리한 것인지 의문이다.

두 번째로 재배방법이 기후변화에 따라 변할 것이기 때문이다. 기온이 높아지면 서늘한 기후를 좋아하는 배추를 재배하기 어려워질 것으로 쉽게 예상할 수 있다. 그러나 재배시기를 바꾼다면 어떻게 될 것인가? 현재 전북지역은 가을배추를 많이 재배하는데 전북지역의 기후가 해남과 같아진다면, 지금의 해남과 같이 월동배추를 심으면 문제가 해결된다. 오히려 재배가능 기간이 늘어나 농사에 유리할 수도 있다.

세 번째로 품종이 변하기 때문이다. 기후가 바뀌어 생산성이 떨어진다면 농부는 몇 해는 지켜보겠지만 결국에는 품종을 바꿀 것이다. 혹은 아예 작목을 바꿀 수도 있다. 더욱 놀라운 사실은 작물 자체가 오랜 기간이 지나면 지역 기후에 적응한다는 것이다. 같은 품종이라도 해남에서 재배된 작물과 철원에서 재배된 작물의 2세를 전주에 심으면 생육과 생물계절(phenology)이 크게 차이가 난다.

네 번째, 기후변화시나리오와 모델의 불확실성이 크다. Bocchiola 등(2013)은 이탈리아 Po valley지역 옥수수를 대상으로 3가지 물 관리 시나리오, 5가지 기후변화시나리오를 적용하여 청색, 녹색 물발자국을 산정한 결과 모든 시나리오에서 일정한 경향 없이 모두 다르게 산정되었다. 특히 강수량은 많은 불확실성을 가지고 있기 때문에 기후

변화에 따라 물발자국이 어떻게 변할지는 한두 가지 시나리오만으론 단정적으로 말할 수 없다.

그러나 이러한 한계점들을 고려한 연구는 부족한 실정이다. 현재 농업부문 물발자국 연구의 주요 내용은 재배과정에서의 세부적인 내용보다는 생산-유통-소비 단계에서의 전과정 평가나 물발자국 교역에 집중되어있기 때문이다. 기후변화로 인해 국가 및 지역의 물발자국이 어떻게 변화할지, 가상수 교역이 어떻게 변화하고 수자원의 효율적 분배가 어떤 방식으로 이루어져야 할지는 작물의 물발자국 변화만으로 판단할 수 없을 것이다.

기후변화를 고려한 물발자국 연구 결과가 의미를 가지려면, 일단 생산성 측면에서 지역별로 어떤 작목, 품종, 재배시기를 선택할 것인지에 대한 판단이 선행되어야 한다. 물발자국 산정 및 가상수 교역에 대한 분석은 차후에 수행되어야 할 것이다. 이를 위해 해당 농산물의 주요 수입·수출국에 대해 품종별, 기후지대별, 기후변화 시나리오별로 재배시기의 변화까지 고려하여 분석해야 한다. 그러나 이러한 빅 데이터를 생산할 길은 멀기만 하다.

4. 요약 및 결론

기후변화는 물의 시·공간적 불균형을 심화시킬 것으로 예상된다. 또한 농작물의 생산성과 물 소비량을 변화시킬 것이다. 이러한 변화는 국지적으로 매우 다르게 나타나며 농작물마다, 품종마다 영향이 다를 것으로 예상된다. 기후변화의 영향을 분석하기 위해 기후변화 조건을 조성하거나 다양한 모델을 이용한 연구들이 수행되어왔으나 이러한 연구들은 재배시기, 품종의 선택 등 농업활동의 변화를 고려하지 않은 채 분석이 이루어져 왔다.

물발자국은 현재의 농업생산 및 소비구조에서 소비되는 물의 양과 흐름을 파악할 수 있으며 가상수 교역을 통한 수자원의 효율적 분배 방안을 탐구하는 데 유용한 도구이다. 그러나 작물은 생육환경이 좋아지면 물 소비량이 늘어나고, 생육환경이 나빠지면 물 소비량이 줄어드는 특성을 가진다. 따라서 기후변화로 인해 물발자국이 변하지 않더라도 생산량이 현저히 감소한다면 미래에 그 작물을 재배하는 것이 자원의 효율적 이용 측면에서 유리한지 다시 생각해 보아야 한다. 농업에 필요한 자원은 물뿐만 아니라 토양, 에너지 등 다양하기 때문이다.

최근 자원의 효율적인 관리를 위한 새로운 의사결정지원 방법으로 넥서스(NEXUS)

개념이 제시되고 있다. NEXUS는 단 하나의 자원이 아닌 다양한 자원들의 가용 범위와 상호작용을 네트워크로 구성하고 기후변화 등 외부 충격에 대한 시스템의 유기적 변화를 관찰함으로써 결론을 도출하는 개념이다. 현재 NEXUS의 개념은 이론적으로 기초 단계이지만 식량-물 뿐만 아니라 식량-물-에너지-토양 등이 연계된 NEXUS연구는 기후변화에 대응하기 위한 새로운 도구로 활용될 수 있을 것으로 기대한다.

참고문헌

Bocchiola, D., Nana, E., & Soncini, A. (2013). "Impact of climate change scenarios on crop yield and water footprint of maize in the Po valley of Italy". *Agricultural Water Management, 116*, 50-61.

Fishman C. (2012). *The big thirst: The secret life and turbulent future of water*. Simon and Schuster.

Jones, P., Allen, L. H., & Jones, J. W. (1985). "Responses of soybean canopy photosynthesis and transpiration to whole-day temperature changes in different CO_2 environments". *Agronomy Journal, 77(2)*, 242-249.

Kimball, B. A. (1983). "Carbon dioxide and agricultural yield: an assemblage and analysis of 430 prior observations". *Agronomy journal, 75(5)*, 779-788.

Kimball, B. A., & Idso, S. B. (1983). "Increasing atmospheric CO_2: effects on crop yield, water use and climate". *Agricultural water management, 7(1)*, 55-72.

Mera, R. J., Niyogi, D., Buol, G. S., Wilkerson, G. G., & Semazzi, F. H. (2006). "Potential individual versus simultaneous climate change effects on soybean (C 3) and maize (C 4) crops: an agrotechnology model based study". *Global and Planetary Change, 54(1)*, 163-182.

Oki, T., & Kanae, S. (2006). "Global hydrological cycles and world water resources". *science, 313(5790)*, 1068-1072.

Phillips, D. L., Lee, J. J., & Dodson, R. F. (1996). "Sensitivity of the US corn belt to climate change and elevated CO_2: I. Corn and soybean yields". *Agricultural systems*, 52(4), 481-502.

Prior, S. A., Torbert, H. A., Runion, G. B., & Rogers, H. H. (2003). Implications of elevated CO_2-induced changes in agroecosystem productivity. *Journal of crop production, 8(1-2)*, 217-244.

Rosenberg, N. J., Kimball, B. A., Martin, P., & Cooper, C. F. (1990). "From climate and CO_2 enrichment to evapotranspiration". *Climate change and US water resources.*, 151-175.

Tao, F., & Zhang, Z. (2011). "Impacts of climate change as a function of global mean temperature: maize productivity and water use in China". *Climatic Change, 105(3),* 409-432.

Xu, Z., Jiang, Y., Jia, B., & Zhou, G. (2016). "Elevated-CO_2 response of stomata and its dependence on environmental factors". *Frontiers in plant science*, 7.

참고사이트

IPCC (http://www.ipcc.ch/report/ar5)
FAOSTAT database. (http://faostat.fao.org/)
네이버 지식백과 (http://terms.naver.com/)
미국 과학뉴스 포털 (https://phys.org/)
세계식량기구 (http://www.fao.org/)