

# 지구온난화 기후변화가 농작물 생태계에 미치는 영향과 예측<sup>1)</sup>

오 성 남<sup>2)</sup>



- 미국 Oklahoma University 기상학 박사(Ph. D.)
- 메릴랜드대학교 대기과학과 교수
- KIST/SERI 지구환경정보연구부장
- 기상청 국립기상과학원 연구실장
- 국립환경과학원 지구환경연구소장
- 연세대학교 대기과학과 초빙교수
- (사)한국시니어과학기술인협회 이사

## 1. 서 론

4차 산업혁명시대에 인류의 삶을 위하여 해결하여야 할 2가지 과제가 있다. 집중되는 도시화에 대비하여 삶의 질과 생태계가 보존된 건강한 도시를 개발하는 것과 기후변화에 대비한 식량안보와 자연보존이다.

자연생태계에서 기후와 밀접한 농업분야는 기후변화에 취약하다. 농업 생육과정이 날씨에 크게 의존되기 때문이다. 과학기술은 크게 발달하고 있지만, 예측할 수 없는 자연 재해나 계속되는 온난화 현상을 억제 또는 완화하지 못하고 있다. 농업부분에서 작물의 개화, 출수 시기와 같은 생리학적 변화는 물론이고 작물의 품질 저하와 재배적지가 이동되고 있다. 더구나 병해충의 발생이 높아지고, 개체군의 이동은 자연 생물다양성에도 영향을 줄 수 있어 결과적으로 실질적 생산성을 저하시켜, 국가의 식량안보에 큰 위협이 될 수 있다.

지구적 온난화가 계속되는 금세기 증가하는 세계인구와 고갈되는 자원에 대비하여 식량안보를 달성하는 것은 모든 국가의 중요한 우선순위이다. 다양한 글로벌 변화 동인과 지구온난화 기후변화에서 농업의 잠재적 역할을 고려할 때 농작물 재배에 대한 혁신적인 접근은 분명히 필요하다. 작물의 생육과정과 생산량을 예측하는 역학모델의 활용이 세계적으로 요구되고 있는 시점에 와 있다.

UN의 정부 간 기후변화 협의체(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)는 온실가스 배출량을 줄이고 지속 가능한 식량생산이 이루어지지 않을 경우, 수십 년 내에

1)Predicting the Impact of Climate Change due to Global Warming on Crop Ecosystems

2)OH, SungNam, The Korea Association of Senior Scientists and Engineers, Soongsil University  
(E-mail: mateo0319@hanmail.net)

세계인류는 ‘식량안보’ 문제에 직면할 것이라는 보고서를 발표한 바(2019년 8월 8일) 있다. 해당 연구에는 전 세계 100명 이상의 각 분야 전문가가 참여하였다. 이 보고서는 지구온난화로 전 세계의 식량 공급이 불안정해지면서 2050년에는 주요 곡물 가격이 최대 23% 상승할 것으로 전망하였다. 보고서 작성에 참여한 한 전문가는 특히 열대지방에서 농업 생산량이 감소됨으로써 식량가격이 상승하고 영양소의 질이 떨어지며 공급망이 와해될 것이다.”라는 의견을 밝혔다.

농작물의 수확과 생육에 대한 예측을 위하여 작물의 생육과정과 수확량을 모델링하는 것은 날씨만 바라보는 작물의 관리 관행에서 벗어나 자연과 융합하며 생산을 높이는 과학적 방법이다. 작물의 생산을 이끄는 기후와 토양, 재배지의 물 환경 등 농업생산 시스템의 다양한 구성요소와 식물의 유전자와의 상호작용으로부터 생성된 자료는 작물의 생육 시뮬레이션 모델의 입력자료로 사용된다.

작물의 생육모델에 입력되는 컴퓨터 사물인터넷(IOT)의 개발로 다양한 시뮬레이션 예측 기회가 제공됨으로써 이를 이용한 새로운 작물모델링 접근방식이 요구된다. 따라서 주식인 벼와 밀 그리고 채소와 과일 등에 미치는 기후변화의 영향을 정량화하고 대처하기 위해 앞서가는 날씨를 예측함으로써 구동되는 프로세스 기반 작물생육 컴퓨터 모의모델은 1970년 세계의 녹색혁명 이후 부단히 제기되어 왔다.

작물생육모델에 연동된 지역 기후모델의 예측값을 사용하여 기후변화에 대한 작물의 재배일, 재배밀도, 품종과 작물 종, 비료체계 및 작물의 순환경작(Acarige) 등 작물관리 수준의 적응 옵션을 정량화한다.

기상·기후예측 자료는 대기역학 대기 대순환수치모델(General Circulation Model, GCM)의 결과이다. 제한된 수의 GCM은 확신할 수 있는 미래 기후예측의 대표값을 생성하지 못할 수 있어 가능한 미래 기후예측의 불확실성을 최소화하기 위해 여러개의 다중 GCM의 결과를 활용하는 앙상블 기법을 사용한다. 또한 이러한 시뮬레이션에 사용되는 GCM은 매우 복잡하고 아직은 고유의 불확실성이 존재한다. GCM의 격자는 10~100 km 규모이지만 일반적 농경작지의 규모에서 구동하는 작물의 생육모델은 수십~수백 m의 해상도 내에서 가능하다. 따라서 농작물에 대한 지역적 기후변화 영향을 예측하는 데는 현장 규모의 작물모델이 적합함으로 GCM의 데이터는 다양한 수리 통계적 방법으로 지표 분해능이 규모축소(down scaling)된다. 하지만 기후예측에 많은 불확실성과 잠재적인 편향을 수반하게 됨은 현대과학이 해결하여야 할 과제이다.

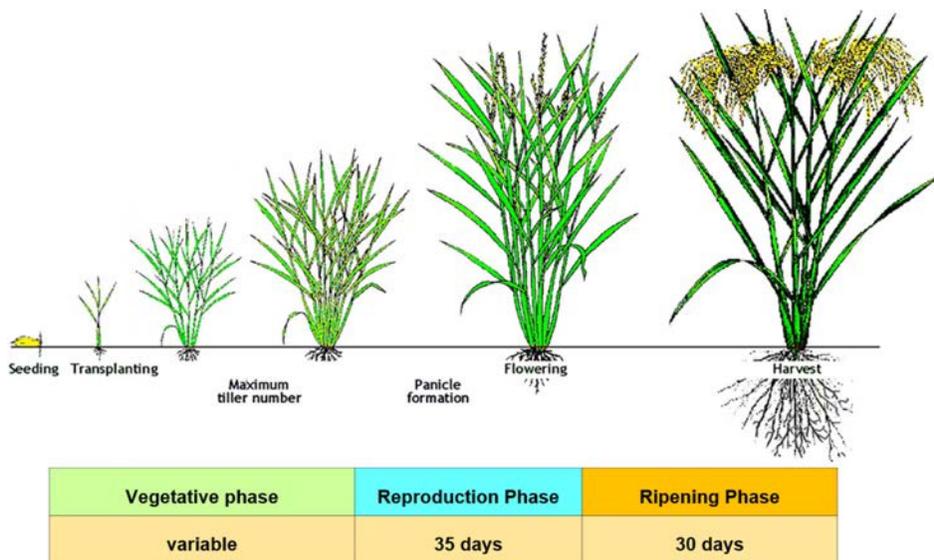
GCM이 향후 작물 수확량을 추정하는 데 사용될 수 있는 범위를 정하고 구체적으로 기후변화에 대한 지역적 작물관리 수준의 적응 옵션을 결정하기 위해 IPCC 5차 평가 보고서에서 17개의 개별 GCM기후모델 결과를 추천하고 있다. 이에 대한 사례로서, 미국농무성(USDA)는 수도(벼) 재배지역의 기후를 예측하여 이를 바탕으로 아시아 지역의 벼(학명, *Olyza Sativa*, 일명 수도) 생산량을 예측하고, 또한 남부 아프리카의 4개 지역에서 옥수수 곡물 수확량을 시뮬레이션 함으로써 미국의 영농계획을 세운다. 지구온난화 기후변화에

대하여 식량안보에 심각한 영향이 예상되는 남부 아프리카 지역은 미국 농작물 수출의 핫스팟(Hot Spot) 중 하나이다.

대표적인 작물로서 수도(벼)의 기후변화에 대한 생육과 수확량을 예측한 사례와 지구온난화 기후변화에 취약한 과일 재배의 이동성을 살펴보고자 한다.

## 2. 기후변화에 대한 수도(벼)작물의 생육과 수확량 예측

1970년대 초 세계 식량 위기는 30억 인구가 1차 또는 2차 주식으로 사용하는 벼에 집중되었다. 주식으로 쌀을 사용하는 대부분 아시아인들은 인구밀도가 세계에서 가장 높은 지역에 살고 있다. 따라서 1972년 이후 세계 각국에서 추진되고 있는 녹색혁명의 과학기술 발전은 식량 증산이 첫 번째 목표이었다. 녹색혁명은 곡물 생산량을 증가시키고 극한적 자연재해의 영향을 줄여 기후변화에 적응하기 위함이다. 상대적으로 미국 등 선진 농업국은 저개발 국가의 쌀 수요로 인해 그들의 역할이 크게 상승되었지만 이른바 “녹색혁명”의 결과로 아시아 쌀 생산량이 급격히 증가함에 따라 실제로 쌀 가격은 세계 시장에서 크게 하락하게 되었고 미국 국내 농민의 대출 금리가 상승하였다.



벼(수도, 水稻) 작물의 성장 단계(Growth Stages of Rice)

2017년에 발표된 PNAS(Proceedings of National Academy of Sciences, 미국과학원 회보)의 연구에 따르면, 지구 평균 기온이 1°C 상승할 때마다 전 세계 밀 생산량은 평균 6.0% 감소하고 쌀은 3.2%, 옥수수는 7.4%, 콩 생산량은 3.1% 줄어든다고 발표하였다. 문

제는 이대로라면 앞으로 지구온난화로 상승하는 기온이 단지 1도에 머물지 않을 것이라는 데 있다. 연구팀은 지금처럼 계속해서 온실가스를 배출할 경우 전 세계 곡물 생산량은 18.2% 줄어든다고 하였다. 우리나라의 곡물 자급률은 23.8%에 불과하다. 70% 이상의 곡물을 수입하는 우리나라는 기후변화로 인한 전 세계 주요 곡물 생산량 감소에 직격탄을 맞을 수 있다. 농촌진흥청 보도자료(2018년 5월 15일)에 따르면, 밀이 자라는 동안 평균 기온이 1°C 오르면 수량은 약 4% 줄어드는 것으로 나타났다.

기후변화로 인해 위협받는 분야는 농작물 생산량뿐만이 아니다. 지난 2019년 4월 미국 워싱턴 대학의 세계 보건·환경·노동·위생 과학 교수인 크리스티 에비(Kristie Ebi) 박사는 대기 중 탄소량 변화로 인해 작물의 영양분이 감소하여, 이를 섭취하는 모든 동물이 이미 건강에 상당히 심각한 영향을 받고 있다고 하였다. 농업의 지속성은 무엇보다 건강한 토양에서 건강한 농산물을 안정적으로 생산하는 데서 보장된다. 인간이 초래한 기후변화로 인한 수많은 부작용은 인간의 먹거리, 주거와 같은 기본적인 생활에 치명적인 결과를 가져오게 되었다.

이와 관련하여 우리의 주식인 벼 작물에 대한 생육모델로서 활용된 사례는 1980년대 후반 미국 Texas Blackland연구소와 Oklahoma대학교가 공동으로 개발한 RICEMOD-300의 시험평가가 최초이다. 본 필자는 오클라호마 대학교 응용기후연구소에서 필리핀 국제미작연구소(IRRI)가 개종한 IR8 벼 작물을 RICEMOD-300 컴퓨터 모델에 이식하여 도작기간의 관측된 일 기상 조건에 대한 벼의 생육과정과 수확량을 모의하였다. 기후변화 요소에 대한 벼의 민감도를 정의하고 경제적 영향을 평가하기 위해 3개의 관측 및 2개의 모델링된 생육기간의 날씨 입력데이터 세트가 채택되었다. 토양 및 식물의 생리학적 입력자료는 국제미작연구소(IRRI)의 벼 포장실험 기록을 사용하였다.



필리핀 국제미작연구소(International Rice Research Institute, IRRI) 전경

RICEMOD-300 구동에는 기후-물 균형방법(climatic-water-balance method)을 적용하기 위하여 5종류의 물 공급 관개수준을 채택하였다. 따라서 재배기간 동안 총 적용된 물은 990 mm에서 1500 mm 범위였으며 벼 생산량은 450~850 g/m<sup>2</sup> 범위였다. 모델의 벼 생산량(yield)에 대한 반응은 일 최고기온과 최저기온과의 일교차 변화와 높은 상관관계가 있었다. 이 모델은 벼논의 증발산 속도, 토양수분 방출 및 수리 전도도 곡선을 유지하는 데 필요한 물의 잠재 손실의 중요성과 뿌리의 수분흡수에 대한 토양저항을 결정하는 데 뿌리 길이와 밀도의 역할을 강조하였다.

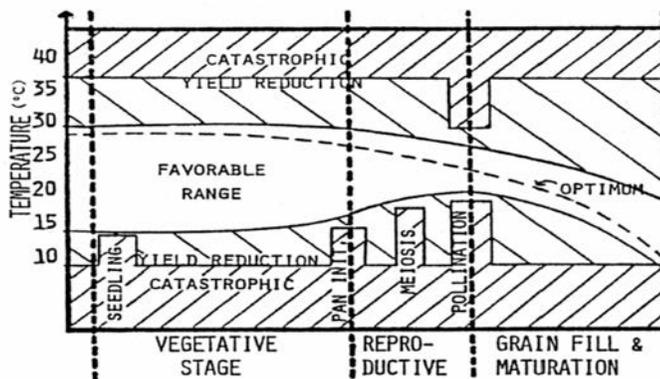
모의된 수확량은 IR8의 포장실험과 95%의 동일한 결과를 나타내었다. 이에 따라 지구 온난화 기후변화에 대한 벼 작물의 적응과 수확량을 예측하여 보았다. 도작지대의 이산화탄소 온실가스의 농도가 현재보다 2배가 되었을 경우 벼 작물의 성장과 수확량은 대기의 이산화탄소(CO<sub>2</sub>)의 농도를 2배 증가시키고 IR8 품종의 생리학적 생육기간을 120일로 고정, 토양 및 재배지역 환경조건에 변화가 없다고 가정하였다.



(a) IRRI에서 개발한 벼 품종 IR8



(b) IRRI의 각종 벼 재배 포장실험 단지



(c) 벼(수도, 水稻)의 생육단계 별 기온범위

작물의 성장은 원천적으로 수분의 흡수 시스템에서 탄소균형 접근방식을 사용하여 시뮬레이션된다. 광합성은 식물이 받는 빛을 탄수화물로 전환하는 과정이다. 처음에는 태양 복사와 온도에 의해서만 제어되는 것으로 가정하고 나중에 기온, 물 및 비료로 인한 응력의 영향으로 수정된다. 이러한 스트레스 요인의 정량화로 이어지는 토양수분 균형과 질소변환 및 광 흡수의 분석 관계는 Jones & Kiniry (1986)에 의해 제시되었다.

총 광합성의 일일 비율은 일일 누적 일사량, 일조시간, 캐노피 내 광의 소광계수, 단일의 광 투과율의 함수로 벼 작물의 캐노피에 대해 계산된다.

모델적용 범위에서 ‘포인트 기반’ 모델은 유전자형, 환경 및 관리전략 간의 근본적인 상호작용을 기반으로 공간에서 하나 또는 여러 지점에서의 작물의 성장을 모의 한다. 그러나 넓은 지역(예: > 50,000 km<sup>2</sup>)에 대해 이러한 모델을 매개 변수화하는 것은 실용적이지 않다. 포인트 기반 모델의 한계는 넓은 면적의 작물 수확량을 추정하는 위성관측을 기반으로 작물생육컴퓨터모델을 사용하여 해결할 수 있다.

그 결과 벼논의 수량(水量)을 현재의 수준으로 둘 경우와 관개수를 2배 및 3배로 증가시켰을 때의 벼 수확량은 대기의 2 × CO<sub>2</sub> 기후에서 38% 증가로 시작하여 14%, 12% 증가율을 보이다가 후에 관개수의 증가에 무관하게 더 이상의 증가율이 상승되지 않았다.

### 3. 과수 작물에 대한 기후변화 영향

과일과 채소(F&V)는 영양가 있는 식단에 필수적인 역할을 한다. 지난 20년 동안 1인당 세계 야채 생산량은 10년 전(1991~2000)에 비해 약 60% 증가하였다. 수요 증가로 인해 과일 생산량도 지속적으로 증가하여 왔다. 신선한 과일과 채소(F&V)에 대한 수요 증가는 건강 문제로 인한 소비자의 선호에 기인한다. 예를 들어, 미국 농무성(UAD)과 보건복지부가 개발한 영양 권장 다이어그램인 “The Food Guide Pyramid”는 하루에 5~9인분의 과일과 채소를 섭취하도록 하고 있다. “과일 섭취량”은 필요한 칼로리와 관련하여 정의된다. 이는 제공되는 식품군, 모양 및 영양분과 같은 다양한 요인에 따라 다르다. 이러한 권장 사항은 소비자에게 식음료의 건강상 이점을 교육하는데 기여함으로써 인류가 직면하고 있는 주요 환경문제로서 기후변화와 미래의 화석연료 부족 때문임을 알려주고 있다. 기후변화(Climate Change, CC) 시나리오를 배경으로 과일과 채소(Fruit & Vegetables, F&V) 생산에 대한 환경 지속가능성을 평가한 결과를 보면 다음과 같다.

기후변화가 과일 및 채소 부문에 미치는 잠재적인 영향은 지구 기온상승과 대기의 이산화탄소 수준, 지표층 오존량 고갈과 재배지의 강수패턴 변화와 매우 밀접하다. 기후변화로 인한 F&V에 대한 잠재적 위험은 질감, 색상, 성숙도 및 영양소 등 생산품질에 밀접하다.

농산물 생산시스템에서 직면하고 있는 가장 중요한 환경적 요인 중 하나는 물 수요의 증가와 수자원의 고갈이다. 물 부족으로 인한 스트레스는 생물 다양성의 손실을 포함하여 많은 잠재적인 환경적 영향을 미친다. 따라서 기존 F&V 생산 공급과정에서 물 공급원의

잠재적인 환경평가가 적절히 이루어져야 한다. 농업 시스템에 대한 기후변화의 이차적 영향에는 해충 및 질병의 갑작스런 출현 시기, 곤충 및 잡초, 새로운 장소로의 이동 및 겨울철 변화 등이 포함된다.

과일은 고온에 자주 노출되면 햇볕에 타거나 질감 및 영양가의 손실 등이 저하될 수 있다. 따라서 기후변화의 영향은 적절한 적응 및 완화 조치가 구현될 때까지 F&V 생산 시스템의 지속 가능성을 악화시킬 것으로 예상된다.



각종 신선한 과일 및 채소(F&V)

LCA(Life Cycle Assessment, 생육순환평가) 방법은 상품 및 서비스의 지속 가능한 공급을 위해 대체 생산 시스템의 환경영향을 평가하고 비교하기 위한 잘 확립된 방법이다. LCA는 현재 농업생산 시스템 및 관행을 평가하는 것으로 제한되어 있다. 따라서 미래의 생산 시나리오를 평가하는 것은 새로운 추진력/방향/적용 등이다. 현재 연구의 범위는 환경을 제시하는 것이다.

F&V 공급에 대한 기후변화의 영향은 F&V 공급의 두 단계인 농장 내와 농장 외로 구분할 수 있다. 전자는 수확까지 재배하는 동안 관련된 모든 과정을 포함하고 후자는 제품이 농장을 떠나 소비자의 식탁에 도달한 후까지의 과정이다.

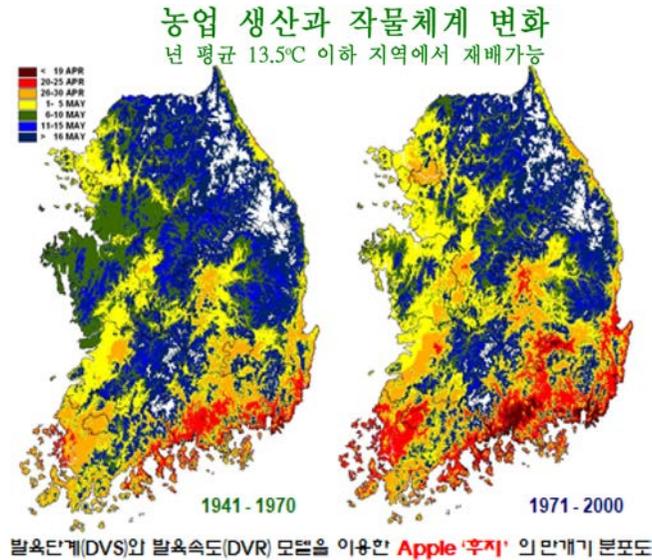
인간 활동으로 인해 배출되는 대기의 이산화탄소( $CO_2$ ) 및 메탄( $CH_4$ )과 같은 온실가스는 지구온난화의 원인이 될 뿐만 아니라 식물 생리학적 성장과 발달에 큰 영향을 준다. 예를 들어,  $CO_2$  수

준이 높은 감자 식물은 광합성 속도가 더 높을 수 있지만 수준이 높아지면 결국 그 비율은 감소한다. 같은 결과로, 기온이 올라감에 따라 과일의 숙성이 가속화되어  $CO_2$  농도 수준이 상승되며 그 영향으로 과일의 더 많은 부패로 이어질 수 있어 결과적으로 온난화의 환경에 대한 영향의 강도가 높아질 수 있다. 한반도의 경우 1970년까지 유명한 대구사과는 이제 경북 추풍령을 넘어 야간의 일교차가 높고 서늘한 강원도 산간 지역으로 과수 재배지역이 이동되어 있다.

예상된 기후변수로서 대기 이산화탄소( $CO_2$ )양의 농작물 생육 수확량과 농업 시스템에 미치는 영향에 대한 결과는 다음 복잡한 지역 패턴에서 나타나고 있다.

대기의  $CO_2$  농도의 증가는, 작물의 덩이줄기(괴경) 등 작물의 바이오매스 성장을 증가시킬 수 있다. 한편  $CO_2$  영양분 효과는 미네랄 N의 가용성과 식물이 얻을 수 있는 능력에 달려 있다고 알려져 있다. 따라서 농작물 바이오매스의 잠재적인 미래 성장에 따른 결과로 온실가스(GHG) 배출량 중 하나인  $N_2O$ 로서 손실될 수 있는 질소(N)를 흡수한다. 그

러나 CO<sub>2</sub>에 의한 작물 수확량의 변동성은 기후의 변동성과 유사하게 높으므로 대기 CO<sub>2</sub>와 수확량 상호작용을 이해하는 것은 매우 중요하다.

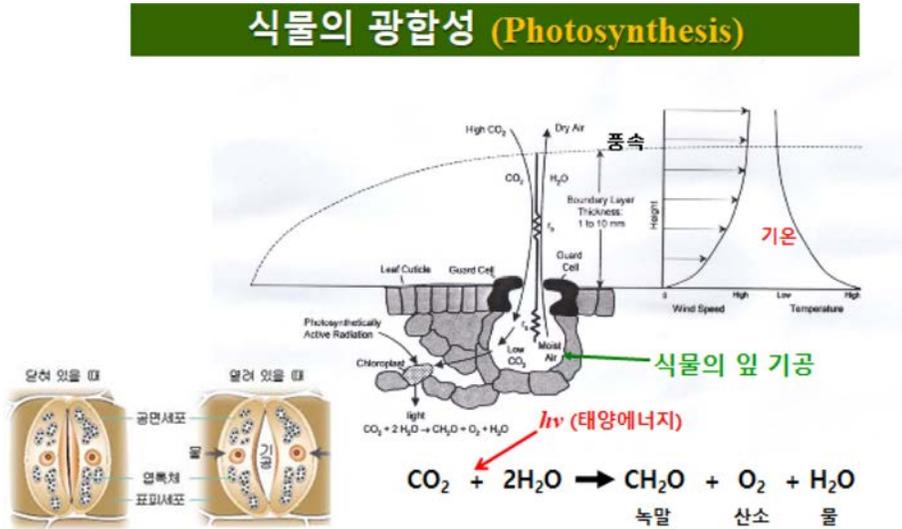


농작물 재배지역에 SO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub> 및 산성비와 같은 대기오염 물질과 UV 자외선 복사에너지가 높으면 작물의 식물조직과 병원균에 대한 작물의 반응에 영향을 미칠 수 있다. 질소와 황 이산화물과 같은 대기오염 물질의 농도가 높아지면 부영양화와 산성화가 발생함으로써 이로 인한 성층권 대기의 오존층을 감소시켜 자외선에 취약한 토마토, 양배추, 감자 및 사탕무와 같은 야채의 품질과 생산에 영향을 준다. 이들로부터 나타나는 효과로서 광합성 억제, 바이러스에 대한 감수성 증가, 토마토와 콩의 건조성이 증가하여 생산을 저해하는 작물의 건조중량(Dry Matter)이 증가한다.

작물 수확량은 고온 또는 한파의 지속시간과 강한 상관관계를 나타내어 극한 기상현상에 대한 연구는 비정상적으로 높은 기온의 짧은 기간 조차도 작물의 성장과 수확량에 해로운 영향을 미칠 수 있다. 고온 스트레스는 식물의 많은 생리적, 생화학적 및 대사활동이 온도에 의존하기 때문에 식물의 생산에 악영향을 준다. 예를 들어, 오이와 멜론 씨앗은 42~45°C, 수박, 호박 및 호박 씨앗은 42°C의 기온상태에서 제대로 발아되지 않는다. 25°C 이상의 온도는 토마토의 수분과 과일 세트 저하에 영향을 미친다.

광합성 활동은대기의 이산화탄소(CO<sub>2</sub>)와 수분(H<sub>2</sub>O)을 광합성 파장역(0.32~0.78 μm) 내의 태양복사에너지(PhotosisAR)의 작용으로 식물의 녹말(CH<sub>2</sub>O)과 산소를 생산하는 과정으로서 기온변화에 비례한다. 온도 상승으로 인해 다른 효소에 의해 촉매되는 생화학 반응 속도가 증가하기 때문이다. 또한 특정 기온 임계 값 이상에서는 식물 조직이 열 스트

레스에 대한 내성이 감소 될 수 있다. 성장기 동안 온도가 상승하면 조기 성숙하여, 대표적으로 감자의 경우 주로 괴경(Tuber) 형성과 개화를 위해 기온과 일조시간에 매우 민감하다.



식물의 질병과 관련하여 기온상승은 질병 발생률, 숙주 병원체 상호작용, 곤충 및 잡초 출현 시간, 새로운 장소로의 이동 및 겨울철 능력을 포함하여 여러 가지 복잡한 방식으로 해충 감염 증가 등 악영향을 미친다.

기후변화의 영향은 숙주와 병원체의 생리학 및 저항성을 수정할 가능성도 있다. 또한 잠재적으로 병원균의 발병 단계와 속도를 변경할 수 있다. 또한 기온, 강우, 습도, 방사선 또는 이슬은 곰팡이 및 박테리아의 성장과 확산에 영향을 미칠 수 있어 식물 질병에 영향을 미칠 수 있는 중요한 대기환경 요소이다. 오염, 특히 오존과 UV-B 방사선 및 식물에 대한 영양소 이용 가능성. 제안된 적응조치는 최적의 온도로 식물성장을 촉진하기 위해 재배기간을 변경하는 것이다. 완화조치로서 감염되기 쉬운 영역에서 곰팡이 및 박테리아의 성장을 억제 할 수 있는 특정 유형의 농약을 요구할 수 있다. 이는 환경적으로 영향을 미치므로 정량화해야 한다.

기본적인 영양가 외에도 F&V는 생물학적 활성성분이 풍부하다. 건강에 도움이 되는 아스코르브 산, 설탕 및 페놀 등 많은 생물학적 활성성분의 농도는 대기의 CO<sub>2</sub> 수준이 증가함에 따라 증가 할 수 있지만 단백질 및 미네랄 함량도 감소한다. 과일과 채소의 숙성은 작물이 수확 전에 더 높은 온도에 노출 될 때 발생할 수 있다. 예를 들어, 토마토 과일을 30°C 이상의 온도에 노출되면 정상적인 과일 숙성에 필요한 많은 매개 변수가 억제된다. 발색, 연화, 호흡률 및 에틸렌 생산. 직사광선에 노출 된 사과는 더 그늘진 조건에서 재배 한 사과에 비해 설탕 함량이 더 높았다.

과일을 고온(35~40°C)에 자주 노출하면 햇볕에 타거나 질감이 손실될 수 있다. 사과와 아보카도에 관한 많은 연구에서 신선한 F&V 작물의 품질이 고온과 높은 CO<sub>2</sub> 및 오존 수준에 노출되면 직·간접적으로 영향을 받는다고 보고되어 있다. 온도는 또한 광합성에 영향을 미치기 때문에 F&V 제품의 다양한 물리·화학적 변화(예: 설탕, 유기농산, 탄력 및 항산화 활성). 또한, 0°C(권장 온도 이하)에서 저장하면 일부 과일은 나무의 그늘진 부분에서 수확한 동일한 과일보다 냉기손상(예: 과일의 색상 및 질감) 발생률이 낮았다. F&V 작물수확 후 온도 관리는 비타민 C를 유지하는 가장 중요한 요소이다. 더 높은 기온의 기후환경에서 과일 및 채소 작물은 더 높은 펄프온도로 수확 될 것이므로 적절한 냉각을 위해 더 많은 에너지와 냉매가 필요하게 되고 이에 따라 제품 가격이 상승할 수 있다.

#### 4. 기후변화에 대응한 식량안보와 자연보호

농업 부문에서 배출되는 온실가스는 모든 인위적 온실가스(GHG) 배출량의 30~40% 정도를 차지한다. 따라서 기후변화에 높은 기여도가 있는 반면 동시에 영향도 많이 받고 있다. 농업에 영향을 미치는 자연재해 요소는 가뭄, 홍수 및 산불과 같은 극한적 기상현상으로서 기후변화로 인한 발생빈도의 증가와 함께 지구적 기온상승과 수문순환의 변화로 인해 생육패턴의 변화폭이 높아지고 있다. 특히 화석연료와 석유산업에서 파생된 농업원자재에 대한 의존도가 증가하고 다른 생산부문 간의 자원에 대한 경쟁도 농업 시스템의 취약성을 악화시키고 있다.

경작지에 대한 다양성이 있는 농산물을 재배함으로써 기후의 압력을 완화시켜 자연환경을 보호하게 한다. 더욱이 지속 가능성이 높은 실천은 정적인 상황을 유지하기 위한 요구사항이 아니라 사회 및 경제발전의 기초를 형성하는 자연 시스템의 탄력성과 적응성을 높이기 위한 도전으로 보아야 한다.

작물 생산시스템에 대한 환경평가와 미래 기후변화가 F&V 작물의 생산성과 품질에 미치는 해로운 영향을 방지하는 방법으로서 피해를 정량화하고 작물 생산시스템이 의존하는 생태계를 시뮬레이션 함으로서 적절한 예방 및 적응조치를 취하는 것이 중요하다. 기온상승이 작물 특히 과일과 채소의 광합성에 영향을 줌으로써 수확 후 다양한 식품의 품질에 부정적인 영향을 미칠 것으로 예상된다.

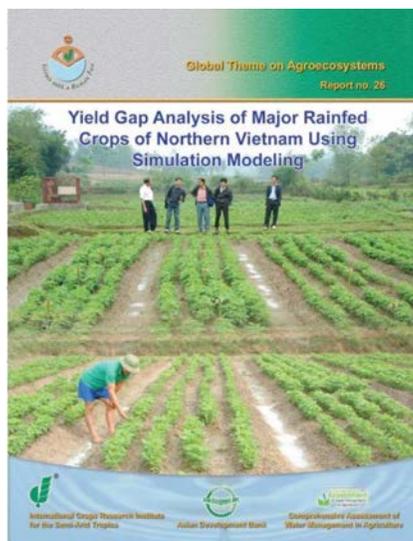
현재 농작물의 생육과정을 모사하여 수확량을 예측할 수 있는 컴퓨터 수치모델은 하와이 IBSNAT/CERES (자원 및 환경 합성을 통한 작물 추정) 작물모델이 가장 많이 사용된다. 1980년대부터 미국에서 다양한 작물에 대한 사용자 중심의 일반 시뮬레이션 모델을 생성하려는 시도의 결과로서 세계에서 가장 많이 사용되고 표준화된 모델이다. 이 모델은 어떤 기후에서든 언제든지 특정 작물의 생육과정과 수확량을 예측하여 기후변화에 대한 농업경작지의 환경관리와 과학적 생산 영농기술 정보 그리고 농경제 전략 자료로 활용한다.

대표적으로 보리, 옥수수, 기장, 수수, 밀, 벼에 CERES 모델의 상용화는 매우 성공적이

다. 또한 마른 콩, 땅콩 및 대두의 CROPGRO 모델; 카사바의 CROPSIM 및 아 로이드와 감자의 SUSTOR 모델 등 IBSNAT(International Benchmark Sites Network for Agrotechnology Transfer) 모델은 농업기술 이전을 위한 국제 프로그램에 통합되어 있다. IBSNAT은 DSSAT(Decision Support System for Agrotechnology Transfer) 버전 v2와 v3 패키지를 개발함으로써 DSSAT v3에서 사용은 고지대와 저지대 조건에서 벼 작물의 성장과 발달을 시뮬레이션하는 일일단계 모델인 CERES-Rice 모델(Singh et al., 1993)을 통용시켰다.

DSSAT는 주어진 기후조건에서 다양한 품종의 수확량과 성장을 지배하는 요소, 즉 씨앗, 물 및 비료가 곡물로 변환되는 모든 과정을 시뮬레이션 한다. 또한 재배지역의 지리적 조건, 에너지(태양 광) 및 작물의 관리관행을 통해 일사량, 일최고최저 기온, 강수량, 일조 변화, 토양특성 및 토양수질 조건과 토양의 질소 등 비료와 관개수와 관련된 물 균형을 고려한다.

미국 농무성은 CERES-Rice 모델을 사용하여 태국의 저지대 지역의 벼 작물 대안에 대한 신속한 평가를 위한 의사결정 지원 시스템을 개발하였다. 발전된 시스템은 농장 및 정책 수준에서 의사 결정을 지원하며 지정된 지역에 대해 검증된 모델과 몇 가지 ‘가상’ 질문에 답하기 위한 분석 도구로 구성된다. 이들은 CERES-Rice 모델이 태국 북동부의 농부들이 얻은 낮은 수확량과 상대적으로 높은 수확량을 시뮬레이션 할 수 있음을 보여주었다.



## 5. 결 론

지구온난화 기후변화가 진행되고 있는 오늘날 자연환경의 다양한 분야에서 적응하는 것도 중요하지만, 미래에 더 이상 부정적인 결과가 발생하지 않도록 기후변화 추세를 완화시키고자 하는 행동이 필요한 시점이다.

작물의 생육 컴퓨터모델은 영농과 품종 개발 그리고 자연환경보존을 위하여 농업정보화 기술시대를 가져올 수 있는 잠재력을 가지고 있다. 개발된 작물의 생육컴퓨터모델의 적용이 충분히 상세하게 생태단계(날씨와 관련된 작물의 성장단계)를 정확하게 시뮬레이션 한다면 작물관리의 효율성을 크게 높일 것이다. 모델 시뮬레이션 결과는 다음 작물관리 일정과 식물의 생태학적 및 형태학적(예, 잎 면적) 성장 단계와 긴밀히 연결하는 것을 전제 조건으로 한다.

(a) 물 사용효율을 극대화하기 위한 효율적 관개(irrigation) 전략.

(b) 식물조직 분석을 통한 작물의 생육기간 초기, 중간, 최대 tillering(결삭 성장), 원추 시작 등 단계별 비료 결정.

(c) 잎 단계 생육기간 잡초 종류에 따른 제초제 적용과 해충방제와 수확시기 결정.

기후 취약지역에 적용 가능한 또 다른 잠재적 선택은 생산시스템의 재배치이다. 물 스트레스를 최소화하는 선택은 물사용 효율성을 높이는 개선된 관개시설을 사용하는 것이다. 기후변화 영향에 대한 적응 및 완화를 위하여 관행적 영농방법을 지양하고 작물에 따른 토지사용 변화 등 환경적 평가에 대한 관심을 두어야 한다.

결론적으로, 기후변화가 농작물 생육과정에 미치는 영향에 대한 사전에 예측하기 위해서는 다양한 옵션을 선택하는 것이 중요하다. 다양한 지역의 생산 시스템의 복잡성과 농작물의 생리 및 생물학적 특성을 모두 나타낼 수 있는 데이터의 가용성과 가변성은 작물의 생육과정 예측 모델링에 무엇보다도 중요한 요소이다. 이에 따른 과일과 채소의 생육과정에 기후변화 영향을 최소화하기 위해서는 다음을 권장한다.

- 생산성 변화의 영향 : 다양한 작물의 수확량 변화가 국가/지역/글로벌 공급망에 미치는 영향을 추적하여 공급망에 따라 지속 가능성 지표를 작성한다.
- 통합 해충 관리 : 발생하는 질병의 영향을 완화하기 위해 현재 적용하는 것과 다른 유형의 살충제 사용을 포함할 수 있는 미래의 해충관리전략을 수립한다.
- 물 관리 : F&V 생육에 예상되는 물 스트레스에 대한 다양한 물 관리전략 수립.
- 토양 품질 : 토지사용 변화의 영향과 토양 비옥도의 척도 그리고 GHG 배출량을 줄이기 위한 토양 유기탄소 변화와 농업 생산지역의 재배치/이동 상황을 평가.
- 환경 및 경제 핫스팟 분석 : 저장, 냉장 및 운송시설을 포함한 물류의 미래 변동을 적절히 고려하여 다양한 F&V 제품을 생산/소비하는 환경 및 경제성 평가.
- 다양한 작물 시스템 구성 : 수직 농장을 포함한 보호 및 비보호 농업 시스템의 잠재적 완화 옵션을 고려, 인프라 및 도구와 관련된 영향을 줄이는 조치를 구성.

작물의 생육모델의 개발과 활용은 융합과학(Interdisciplinary science)으로서 기상, 기후, 식물, 생태계, 원격탐사, 지리정보, 컴퓨터, Data base, 관측 등 다양한 과학기술 개발과 협력이 요구된다. 따라서 모델의 결과는 포장실험결과와 비교 검증되어야 하고 경제성이 평가되어야 한다. 또한 모델의 정확성과 효율적 활용을 위하여 국지규모(local scale) 기상관측이 이루어져야 한다. 가뭄 등 기후 및 기상변화에 대한 극한현상에 대처하고, 국제적 경제전략과 동조하며 농업경제 및 국토환경을 위한 개발이 병행되어야 한다. 국외의 상업용 모델(wheat model, corn model, potato model인 하와이 IBSNAT 모델과 비교되는 국내 기후조건과 토양에 맞는 모델 개발이 반드시 연구되어야 한다. 국내 수도(벼)의 생육영향을 미치는 기온의 일교차 값은 벼논의 물수지 조건을 고려하지 않아도 -10°C~10°C 범위이다. 또한 기후변화에 대한 영향을 예측하기 위하여 대기대순환 모델로서 GISS climate

model을 그리고 WGEN solar radiation model과 SWRB evaporation model 등 - 부속 모델의 적극적인 활용과 이와함께 정확성을 위한 지속적인 연구가 필요하다.

또한 아시아 15개 지역에서 주식으로 재배하고 있는 18가지 쌀 품종에 대해 모사한 결과를 보정과 검증을 한 결과 2009년부터 ORYZA2000은 벼 작물 모델에서 주로 비생물학적 스트레스를 목표로 하는 작물 모델로 수정 개발되었다. 국제미작연구소(IRRI)의 수도(水稻) 모델링 그룹은 ORYZA2000의 테스트 및 적용을 장려하고 그 결과가 피드백되기를 환영하며 모델사용자에게 최신정보를 제공한다.

ORYZA2000



물수지(water budget)가 좋은 벼논(Rice Paddy)과 물수지가 부족한 감자작물의 케노피

## 참고문헌

- Fiore, A., Lardo, E., Montanaro, G., Laterza, D., Loiudice, C., Berloco, T., Dichio, B. and Xiloyannis, C., 2018. Mitigation of global warming impact of fresh fruit production through climate smart management. *Journal of Cleaner Production*, 172: 3634-3643.
- Corbeels, M., Berre, D., Rusinamhodzi, L. and Lopez-Ridaura, S., 2018. Can we use crop modelling for identifying climate change adaptation options? *Agricultural and Forest Meteorology*, 256-257: 46-52.
- Parajuli, R., Thoma, G. and Matlock, M. D., 2019: Environmental sustainability of fruit and vegetable production supply chains in the face of climate change: A review. *Science of the Total Environment*, 650: 2863-2979.
- Oh, S. N., 1988. Simulation of meteorological and physiological rice yield prediction model. The University of Oklahoma Graduate College, Ph. D. Dissertation, 245pp.
- Singh, U. and Ritchie, J. T., 1993. Simulating the impact of climate change on crop growth and nutrient dynamics using the CERES-Rice model. *Journal of Agricultural Meteorology*, 48(5): 819-822.
- Chen, Y., Donohue, R. J., McVicar, T. R., Waldner, F., Mata, G., Ota, N., Houshmandfar, A., Dayal, K. and Lawes, R. A., 2020. Nationwide crop yield estimation based on photosynthesis and meteorological stress indices. *Agricultural and Forest Meteorology*, 284: 107872.