

기후변화가 세계농업에 미치는 영향과 대응 *

이 변 우

(서울대학교 농업생명과학대학 교수)

1. 기후와 농업

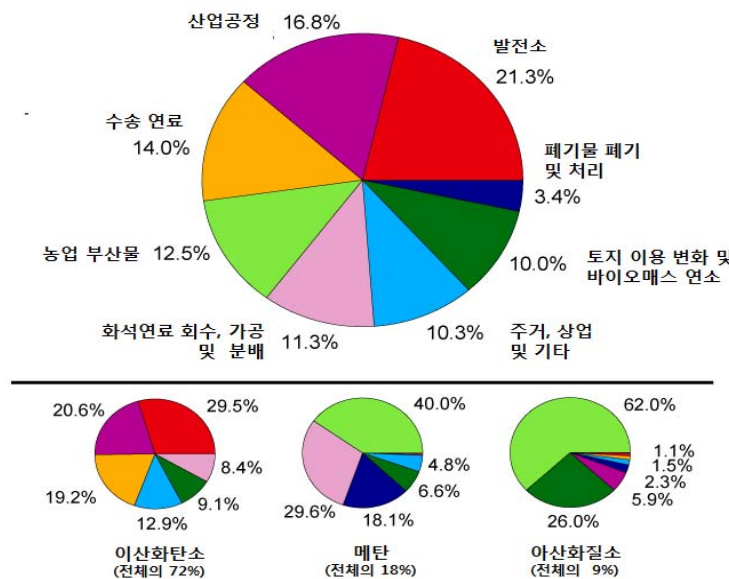
기후란 시시각각으로 변하는 기온, 습도, 기압, 강수, 일사 등 기상요소들의 장기적인 평균상태로 위도, 고도, 지형, 해양 등 수체와의 인접성 등에 의하여 지역에 따라 그 지역 고유의 기후가 형성된다. 농업은 기후, 토양, 생물 등 자연환경에 지배를 받는 산업이다. 특히 기후는 농업에 직접적으로 영향을 미칠 뿐만 아니라 토양 및 생물환경 등에 대한 영향을 통해서 간접적으로 영향을 하기도 한다. 따라서 기후는 지역에 따르는 농업의 형태뿐만 아니라 농작물의 종류, 작부체계, 작기, 생산성, 품질, 안정성 등을 결정짓는 중요한 요소이다. 따라서 현재 진행되고 있는 지구 온난화에 따른 기후 변화는 농업기후 자원의 지리적 및 계절적 변화를 초래하여 농업기후지대의 변화, 이에 따른 작물 적응지역의 변화, 잡초, 병충해 등의 발생 종 및 발생량의 변화, 토양 비옥도의 변화, 가뭄 정도의 변화 등 농업생산에 간접적인 영향을 주게 될 뿐만 아니라 대기 중의 탄산가스 농도 증가와 온도의 상승은 작물의 광합성에 의한 물질 생산, 동화물질의 각 기관으로의 배분, 발육속도, 물의 이용효율 등에 영향하여 작물의 생산성에 직접적인 영향을 미칠 것으로 예상이 되며, 또한 지구 온난화에 따른 기후변화와 그 영

* (leebw@snu.ac.kr, 02-880-4544).

향은 지리적 및 국지적으로 매우 다르게 나타나게 될 것이다.

한편 농업 또한 기후에 영향을 끼친다. 현재 진행형인 지구온난화와 이에 따른 기후 변화의 주요인은 대기 중의 온실기체 증대에 의한 지구온실효과 증대인데, 매년 대기 중으로 인위적으로 방출되는 온실기체 총량의 약 12.5%를 농업분야에서 방출한다<그림 1 참조>. 이는 전 세계 국내총생산(GDP) 중 농업이 차지하는 비중이 4% 정도인 점을 고려하면 농업은 온실기체 집약적 산업이라고 할 수 있다. 온실기체 중 N_2O ¹⁾ 및 NH_4 가스는 전 지구 방출량의 62% 및 40%를 농업분야에서 방출한다. 뿐만 아니라 지구 온난화에 기여도가 가장 큰 CO_2 가스의 경우 농경지와 대기 간에 대규모로 교환되지만 배출과 흡수가 균형을 이루어 농업분야에서 기여도가 미미한 것으로 평가된다. 하지만 농업활동에서 사용하는 전기, 연료 등에서 발생하는 CO_2 , 농경지 확장을 위한 산림 벌채로 생기는 이산화탄소 고정 감소 등을 고려하면 농업분야의 지구 온실기체 배출 기여도는 훨씬 더 크다.

그림 1 전 세계 부문별 온실기체 배출



자료 : Wikimedia Commons.

1) 질산암모늄을 열분해할 때 생기는 화학식 N_2O 의 무색투명한 기체로, 물·알코올에 잘 녹는데, 그 화학적 성질은 산과 비슷하며, 흡입하면 얼굴 근육에 경련이 일어나고, 마취성이 있어 외과수술시 전신마취에 사용하기도 함.

2. 기후변화가 농업에 미치는 영향

2.1. 농업 생산 관련요인의 변화

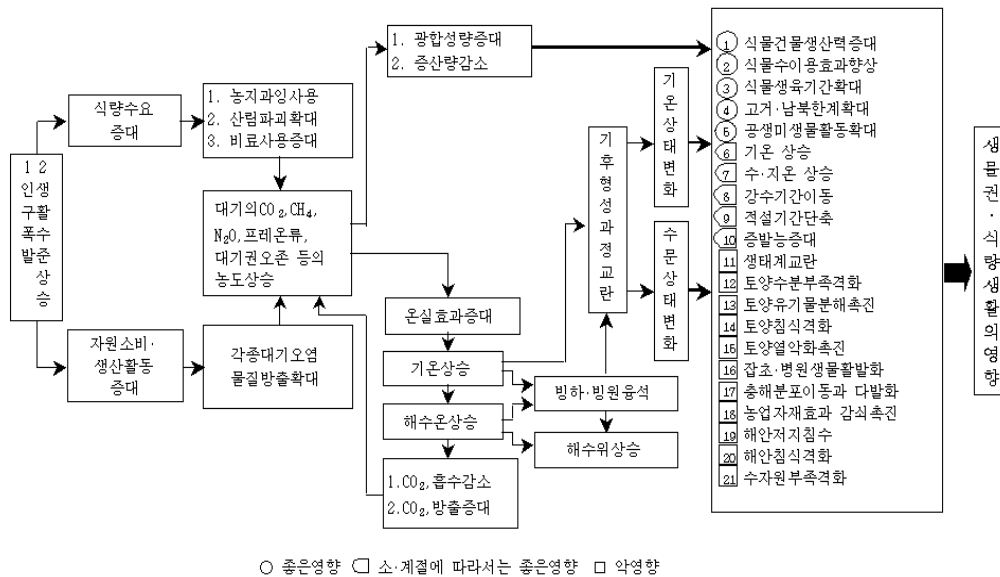
온실가스농도 상승에 따른 지구 온난화와 이에 따른 기후 변화가 농업생태계에 미치는 영향에 대해서 우치지마(内嶋, 1988)는 <그림 2>와 같이 요약하였다. 지구온난화에 따른 농업생태계에 대한 영향은 대기 중 CO₂ 농도 증가에 따른 광합성 촉진, 증산 억제 등의 직접적인 영향과 농업기후자원, 수문상태의 변화에 따른 간접적인 영향으로 구분할 수 있다. 간접적인 영향에는 기온 상승과 수문상태 변화에 따른 식물생육 가능기간 연장, 작물 재배 남북한계 확대, 지온·수온 상승, 적설기간 단축, 증발량 증대, 강수기간 이동, 토양수분부족 심화, 잡초·병원생물 다발, 해충 다발, 지력악화 촉진, 농업자재효과 저하촉진 등이다. 이와 같은 농업관련 요인의 변화는 지역에 따라서 매우 다양하게 나타나고 또한 농업 생산에 대한 각 요인 들 간의 상호작용 효과가 지역에 따라서 매우 복잡 다양하게 나타날 것이므로 기후변화가 세계 농업에 미치는 영향을 일괄해서 파악하는 것은 매우 어렵다. 예를 들어 기온 상승이 어떤 특정 작물 생산성에 미치는 영향만 놓고 보더라도 현재 이 작물 재배에 적합한 온도 조건을 가진 지역에서는 조금만 온도가 상승하면 생산성이 저하될 것이지만 이 작물의 남북 한계 지역에서는 기온이 상승하면 오히려 생산성이 증대할 것이다.

이산화탄소(CO₂)는 작물 생장에 필수적이지만 대기 중 이산화탄소 농도 증가는 식물에 긍정 및 부정적 영향을 동시에 미칠 수 있다. 현재 대기 중의 이산화탄소 농도는 광합성 포화점이상이기 때문에 이산화탄소 농도 증가는 광호흡을 줄이고 광합성을 증대시켜 온도와 습도가 적정 범위에 있을 때는 이산화탄소 농도 증가가 작물 생장과 수량을 증대시킬 것이다. 이산화탄소 증대에 따른 생장과 수량 증가는 벼와 같은 C3식물²⁾이 옥수수³⁾와 같은 C4식물³⁾보다 클 것이다. 다른 환경 스트레스가 없는 조건에서 이산화탄소 농도가 550ppm으로 높아지면 현재의 이산화탄소 농도에서 보다 C3 작물은 10~20%, C4 작물은 0~10% 수량이 증대한다(Ainsworth 등 2004; Gifford 2004; Long 등 2004; Tubiello 등 2007). 그러나 이산화탄소 농도가 증가하면 식물체의 기공 수가 줄어들어 증산량이 줄어들어(Bert 등, 1997; Woodward 등, 1995), 식물 체온이 높아져서 고온 피해를 더 크게 받을 수 있다.

2) C3 식물은 C3 대사과정으로만 탄소를 고정하는 식물임.

3) C4 식물은 4탄당(C4) 화합물이 관여하는 추가적인 경로를 이용해 이산화탄소가 부족한 환경에서 광합성의 암반응을 계속하는 식물을 지칭함.

그림 2 대기 중 이산화탄소농도 상승에 의한 기후화가 농업생태계에 미치는 영향



자료 : 内嶋, 1988(이정택(2007)에서 재인용).

작물의 광합성 등 생리적 반응과 생장은 온도의 지배를 받아 적은 범위를 벗어나면 생리적 기능과 생장이 감소하여 수량의 감소로 이어진다. 따라서 현재 작물의 생육 적은 범위에 있거나 더 높은 지역은 온난화에 따라서 수량이 감소할 것이며 적은 범위 보다 낮은 지역은 온난화가 수량에 긍정적인 영향을 미칠 것이다. 또한 작물에 따라서 생육 적은이 다르기 때문에 기후 온난화의 영향은 작물에 따라서 다르게 나타날 것이다. 한편 작물의 생육기간은 온도와 밀접한 관련이 있다. 온도 상승은 발육을 촉진하여 생육기간을 단축시켜서 생산성에 부정적인 영향을 할 것이다. 특히 성숙기간 중의 온도 상승은 노화를 촉진하여 수량 감소에 크게 영향을 미칠 것이다. 온도가 상승하면 이산화탄소 농도 증가에 따른 수량증대 효과가 감소하고 또한 광합성 기간이 단축되어 적정 조건에서보다 수량 증대 효과는 크게 감소한다(Baker, 2004; Caldwell 등, 2005).

한편 온도와 이산화탄소 농도 증가는 작물의 품질에도 영향을 미칠 것이다. 예를 들어 높은 이산화탄소 농도에서는 식미를 좌우하는 중요한 요인인 쌀의 아밀로오스(amylose) 함량이 증대 되어 밥맛이 떨어지고, 단백질 함량이 낮아져 사료의 영양학적 품질이 저하되며, 사람의 영양에 중요한 철과 아연의 함량이 낮아지는 등의 품질 저하가 예상된다고 한다(IPCC, 2007b).

위에서 언급한 온도 상승과 이산화탄소 농도 증가가 작물의 성장과 수량에 미치는 직접적인 영향 이외에도 온난화에 따라서 변화되는 물리적 환경 변화는 농업의 생산성과 생산 안정성에 지대한 영향을 미칠 것이다. 전국 규모의 온난화에 따라 예상되는 물리적 환경 요인의 변화 방향과 이에 따라 농업생산에 미칠 잠재적 영향과 그 영향의 신뢰 수준에 대하여 Iglesias 등(2009)은 <표 1>과 같이 요약하였다.

표 1 전국 규모의 기후변화와 농업생산 관련 요인의 변화

기후 및 관련 물리적 요소	예상되는 변화 방향	농업 생산에 대한 잠재적 영향	잠재적 영향의 신뢰성
대기 CO ₂	증가	- 작물과 잡초의 biomass 생산과 생리적 물 이용효율 증가 - C/N비 변화에 따른 토양수분 수지의 변화 - 잡초의 작물에 대한 경쟁력 증가에 따른 잡초 생태 변화	중정도
		- 농업생태계의 변화	높음
		- N 순환 변화	높음
		- 기대 수준보다 낮은 수량증대	낮음
대기 O ₃	증가	- 작물 수량 감소	낮음
해수면	상승	- 해안 농업지대의 바닷물 침수 - 관개수의 염화	높음
극한 현상	명확하지는 않으나 지역적 시간적 변동성 증대 예상, 홍수와 가뭄 증가	- 경작 실패 - 수량 감소 - 물에 대한 경쟁	높음
강우 강도	수문 순환 강화되나 지역적 변동 증대	- 침식 양상의 변화와 침식 증대 - 폭풍우 영향 변화 - 홍수 빈도 및 피해 증대 - 침수 피해 증대 - 병해충 피해 증대	높음
온도	상승	- 작물 적응성과 생산성 변화 - 잡초, 병해충 변화 - 작물 품질 변화	높음
	일교차	- 작물 생산성과 품질 변화	중정도
열해	열파 증대	- 곡실 형성에 피해 - 일부 해충의 증가	높음

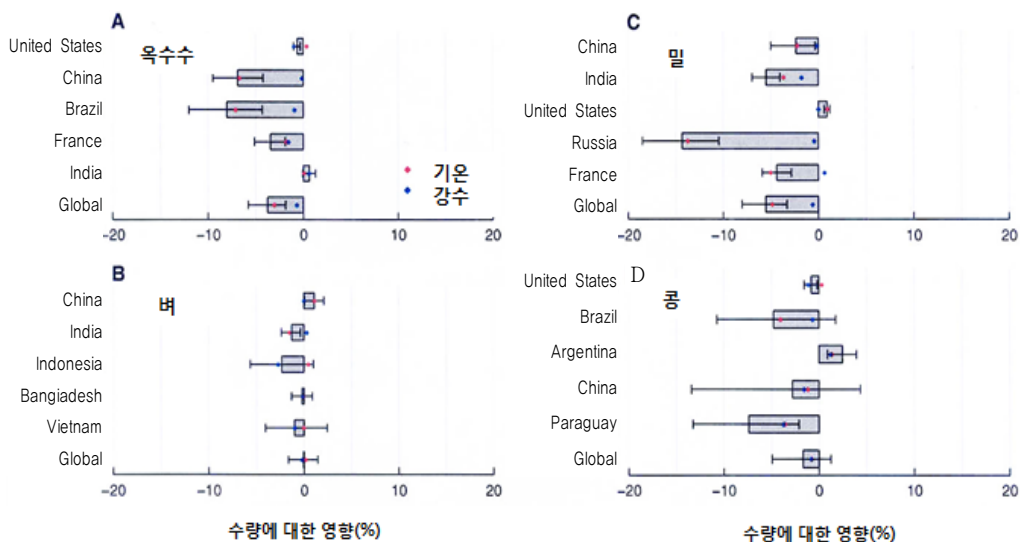
자료 : Iglesias 등, 2009.

2.2. 기후 변화와 농업 생산: 연왕

기후변화에 대한 정부 간 패널(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)이 발표한 제4차보고서(2007a)에 의하면 지난 100년간 (1906-2005년) 전 지구 연평균기온이 0.74°C 상승하였다. 최근 들어 지구 기온의 상승 속도가 빨라지는 경향으로 최근 25년간의 지구 평균기온의 상승은 0.45°C로 과거 100년 동안 기온상승 속도의 2.4배에 이르

고, 1850년 이래 가장 더운 12년 중 11년이 최근 12년에 집중되었다고 하였다. 이와 같은 기후 온난화 속도는 위도가 높은 지역일수록 기온 상승속도가 빠르고 계절별로는 여름에 비하여 겨울의 기온 상승이 빠르며, 낮의 최고 기온 보다는 야간의 최저기온 상승이 커서 일교차가 작아지는 것으로 관측되고 있다. 이와 같은 기후 변화가 세계 농작물 생산에 어떠한 영향을 미쳤는지에 대한 평가 보고는 많지 않다. Lobell 등(2011)이 1980년 이후 기후 변화가 벼, 옥수수, 밀 및 콩의 세계 생산에 미친 영향을 분석하여 보고한 바에 의하면 이 기간 중 작물 재배기간의 기온 및 강수량 변화로 인하여 옥수수와 밀의 전 세계 생산성이 각각 3.8%와 5.5% 감소시키는 결과를 초래하였으나 콩과 벼의 경우는 큰 영향을 받지 않았다고 하였다<그림 3, 표 2 참조>. 밀과 옥수수의 경우 미국을 제외한 대부분의 국가에서 이 기간 중 기후 변화가 생산성에 부정적 영향을 미쳤고 위도에 따른 영향도의 의존성이 없었으나, 쌀의 경우 위도가 높은 지역에서는 온난화가 수량을 높이는 결과를 초래하였고 저위도에서는 반대로 온난화가 부정적 영향을 미쳤다고 하였다. 이와 같은 작물 수량성 변화에 대한 영향은 강수 변화 보다는 기온 변화 경향이 더 크다고 하였다. 이 기간 중 증가한 47ppm 이산화탄소 시비 효과에 의한 수량 증대 효과를 고려하더라도 기후 변화는 옥수수와 밀의 수량성에 부정적 영향을 미쳤으며 벼와 콩의 경우는 수량에 다소 긍정적인 영향을 미친 것으로 분석하였다.

그림 3 1980~2008년 기후변화 경향이 주요작물의 세계 평균 수량에 미친 영향



주 : 가로 회색 선은 5%에서 95%까지 신뢰구간을 의미함.

자료 : Science vol. 333, 2011.

표 2 1980-2008 기온 및 강수 변화 경향이 주요 작물의 세계 평균 생산성에 미친 영향

단위: %

작 물	세계 총생산 (백만톤)	세계 총생산에 대한 영향(%)			이산화탄소 변화 영향(%)	총 계
		기온 변화	강수변화	소계		
옥수수	607	-3.1 (-4.9, -1.4)	-0.7 (-1.2, 0.2)	-3.8 (-5.8, -1.9)	0.0	-3.8
벼	591	0.1 (-0.9, 1.2)	-0.2 (-1.0, 0.5)	-0.1 (-1.6, 1.4)	3.0	2.9
밀	586	-4.9 (-7.2, -2.8)	-0.6 (-1.3, 0.1)	-5.5 (-8.0, -3.3)	3.0	-2.5
콩	168	-0.0 (-3.8, 1.9)	-0.9 (-1.5, -0.2)	-1.7 (-4.5, 1.2)	3.0	1.3

주 : 괄호 안의 숫자는 각각 5% 및 95% 신뢰구간을 의미함. 이산화탄소 변화 영향은 1980-2008 기간 중 47ppm 증가에 의한 수량
향상 추정치임.

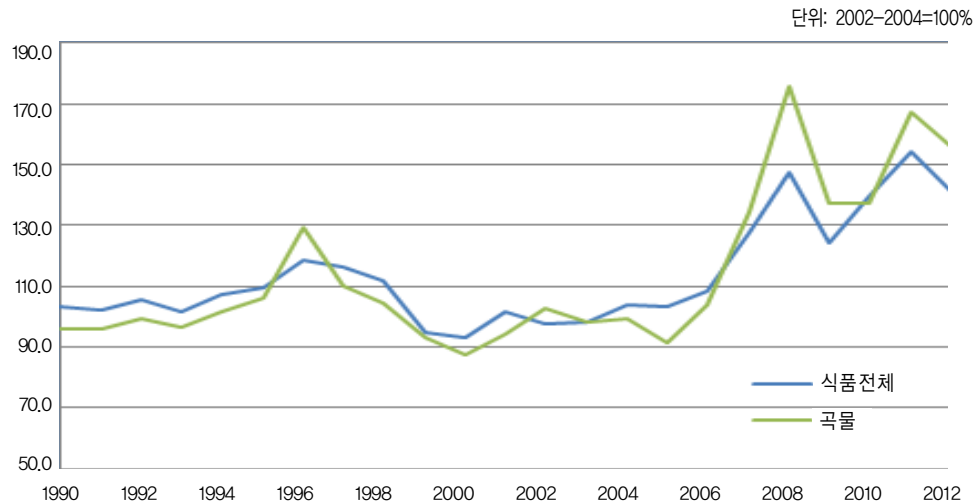
자료 : Science vol. 333, 2011.

현재 진행형인 기후변화의 또 다른 특징 중의 하나는 기상의 변동성이 커지고 있는 것이다. 1970년대 이후 가뭄 강도와 기간이 많은 지역 특히 열대와 아열대 지역에서 증가되고 있으며, 세계 대부분의 지역에서 호우 발생 빈도가 증가하였으며, 이상 고온 및 열파 발생 빈도가 증가하였고, 적도 해수면 온도 상승에 따른 열대성저기압 활성이 증가하는 등 이상 극한 기상 현상의 발생이 증가한 것으로 관측되었다(IPCC, 2007a). 이에 따라서 전 세계적으로 자연재해 발생과 피해 규모가 증가하는 추세에 있다. 앞에서 살펴본 바와 같이 기후의 평균적 변화 경향은 세계 작물 생산성의 평균적 변화 경향에 영향을 미치지만, 이와 같은 기상의 시공간적 변동성 변화는 세계 작물 생산의 안정성과 곡물 가격에 지대한 영향을 미친 것으로 평가되고 있다. 최근 6년 동안 2007/2008, 2010/2011 두 차례에 걸쳐 국제 곡물가격이 폭등하였고<그림 4>, 이에 이어 2012년에 3번째 식량위기가 확산될 것이라는 우려가 커지고 있다. 이와 같은 곡물 가격 급등은 주요 생산 및 수출국들의 가뭄, 홍수 등 기상 이변에 의한 공급 불안이 신흥국의 소득 증대에 따른 곡물수요 증가, 유가 상승에 따른 바이오에너지용 곡물 수요 증가 등과 맞물려 나타나는 현상이다.

2012년 현재 진행되고 있는 곡물가격 급등은 미국, 러시아, 중국, 우크라이나 등지에서 일어나고 있는 가뭄, 홍수 등 기상 이변에 의한 작황 부진 때문이다<그림 5 참조>. 2012년 전 세계 곡물 생산량은 이와 같은 기상 이변으로 인해 전년대비 2.7% 감소하

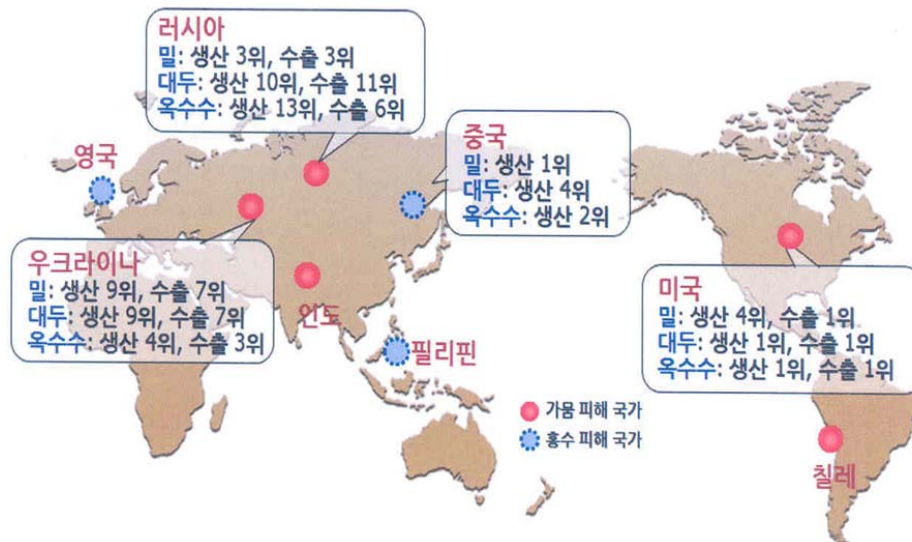
여 생산이 소비보다 4,000만 톤(소비의 1.7%) 부족할 전망이다. 밀은 전년 대비 4.7%, 옥수수는 3.2%, 쌀은 0.4% 생산이 감소할 것으로 전망이다(USDA, 2012).

그림 4 세계 곡물 및 식품 실질가격지수 변화 추세



자료 : World Food Situation (FAO 08/09/2012 발표로부터 작성).

그림 5 2012년 세계 기상이변 현황



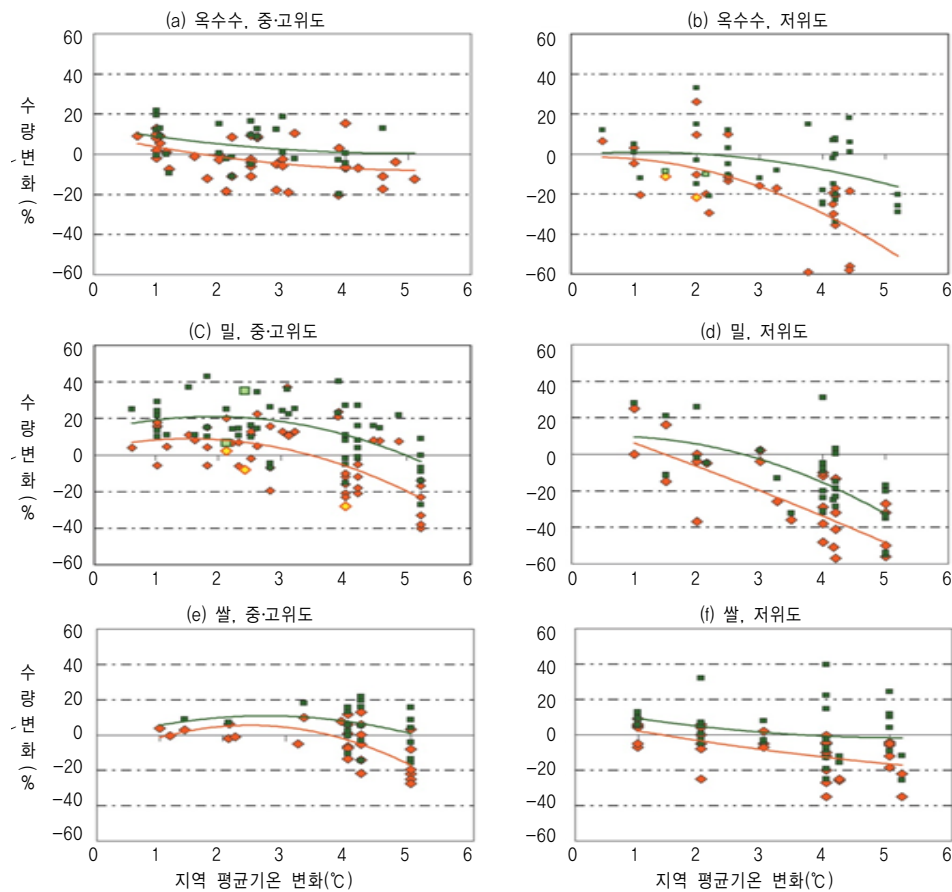
주 : 곡물 생산 및 수출 순위는 2011년 기준임.

자료 : USDA PSD Online, 삼성경제 연구원 (2012)에서 재인용.

2.3. 기후 변화와 농업생산: 전망

지구 온실효과 증대에 따른 기후 변화는 20세기보다도 21세기에 더 큰 폭으로 일어날 것으로 예측되고 있다(IPCC 4차보고서, 2007a). 대기 중 CO₂ 농도는 2100년까지 550(SRES B1)-970ppm(SRES AiF1)으로 증가하고, 이에 따라 지구 평균기온은 1.8-4.0℃ 증가하여 20세기 변화폭보다 3배 이상 가속화될 전망이다. 또한 21세기에도 20세기에 진행되어온 폭염, 집중호우, 가뭄 등 극한 현상의 빈도 증가가 지속되고 태풍의 세기가 강화될 가능성이 높다. 강수는 고위도 지방에서는 증가하고 열대 및 아열대 지역에서는 감소할 전망이다. 농업은 기후변화에 매우 취약하여 이와 같은 기후변화는 식량

그림 6 옥수수, 밀과 쌀 수량의 기후변화에 대한 민감도



주 : 녹색점들과 선은 적응을 하지 않은 경우이고 주황색 점들과 선은 적응을 한 경우임.

자료 : IPCC, 2007b.

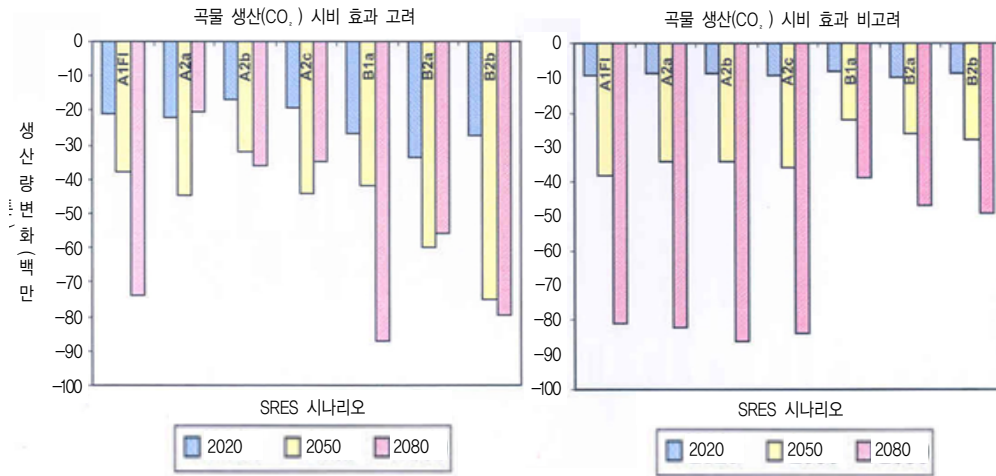
생산과 가용성, 식량공급의 안정성, 식량에 대한 접근성, 식량 이용 등 세계 식량안보의 모든 요소에 지대한 영향을 미치게 될 것이다.

기후변화가 농작물 생산성과 생산량을 변화시키는 주요인은 생물리학적 및 사회 경제적 요인들의 변화이다. 기온 상승 등 장기적인 기후변화 경향이 작물 생산에 미치는 생물리학적 영향은 지역에 따라 달라서 일부 지역에서는 정의 방향으로 영향을 하나 다른 지역에서는 부의 방향으로 영향을 할 것이며 또한 이와 같은 영향은 시간의 흐름에 따라서 변화한다. <그림 6>은 세계의 여러 지역에서 수행한 모의실험 결과를 종합한 것이다. 지역 평균기온이 1-3℃증가할 경우 중고위도 지방의 작물 수량은 다소 증가하지만 그 이상으로 온도가 상승하면 중고위도에서도 작물 수량이 감소할 것으로 예측이 된다. 그러나 저위도 지방 특히 계절적 건조지대와 열대지방에서는 1-2℃의 작은 온도 상승에서도 수량이 감소할 것으로 예측된다(IPCC, 2007b). 2050년까지는 세계 주요작물 재배 면적의 최소 22%가 부정적 기후변화 영향을 받을 것이며, 사하라 이남의 아프리카와 아시아는 각각 56%와 21%의 주요작물 경작지에서 부정적 영향이 나타날 것으로 예상된다(Ramirez 등, 2011).

사회경제적 요인들은 가격 및 비교 우위의 변화를 통하여 작물생산성 및 생산량에 영향을 한다. 생물리학적 영향과 사회경제적 요인을 고려하여 기후변화가 미래의 곡물 생산성 및 생산량에 미치는 영향을 평가한 결과(Parry 등, 2004; IFPRI, 2009)에 의하면 기후 변화 영향이 지역별로 다르게 나타나지만 세계 전체로 보면 대체로 부정적인 영향을 미칠 것으로 예측하고 있다. 온실기체의 SRES 시나리오에 의한 미래 예측 기후 조건에서 주요 식량 작물의 수량은 선진국에서는 증가하나 개발도상국에서는 감소할 것으로 예측된다. 특히 아프리카와 남아시아에서의 수량 감소가 가장 커서 기온 상승이 가장 큰 A1FI 시나리오로 전망한 2080년대 기후조건에서는 30%의 수량 감소가 예상된다(Parry 등, 2004). 전 세계 식량 생산량은 CO₂ 농도 증대에 따른 시비효과를 고려하지 않는 경우 2080년대까지 5(A1, A2)~10(B1, B2)%가 감소할 것으로 예측되며 CO₂ 농도 증대에 따른 시비효과가 충분히 발휘되는 조건에서는 그 감소폭이 1/3로 줄어들 것으로 예측된다고 한다(Parry, 2004; <그림 7 참조>).

한편 기온 상승 등 장기적인 평균적 기후변화 경향과 더불어 전 지구 및 지역 기후는 현재보다 더 변동성이 커질 것으로 예상된다. 즉, 홍수, 가뭄, 우박, 열대성 저기압 등 극한 현상의 강도와 빈도가 증가하여, 작물 수량의 변동성을 증대시키고, 나아가서는 식량 공급의 안정성에 부정적인 영향을 미쳐서 세계 식량안보에 악영향을 미치게 될 것으로 예상된다.

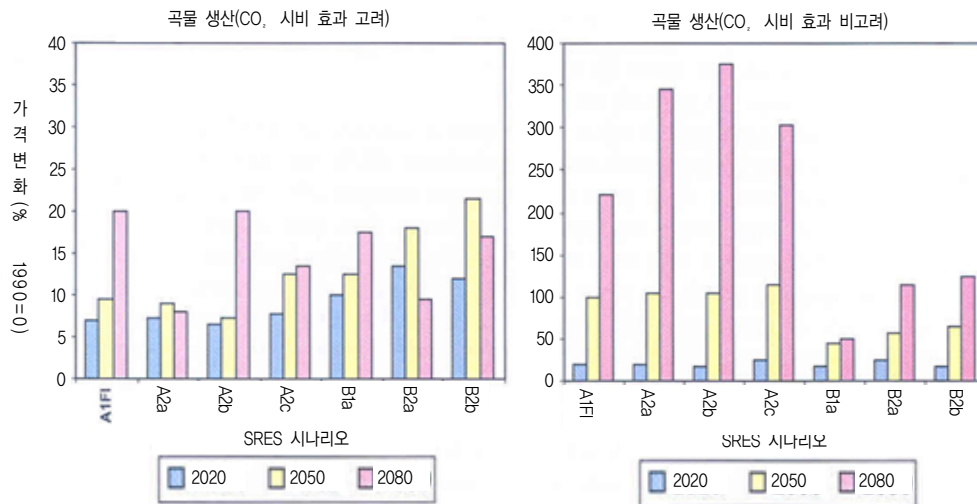
그림 7 SRES 기후변화 시나리오에 따른 세계 곡물 생산량 변화 전망



자료 : Parry, 2004.

기후변화는 식품의 생산뿐만 아니라 식품 가격에도 지대한 영향을 미치게 될 전망이다. 기후변화가 세계 식품 가격에 미칠 영향에 대한 많은 연구들의 기본적인 결론은 첫째, 평균적으로 보면 기온이 완만하게 상승하는 2050년 까지는 식품가격이 완만하게 상승할 것이며, 둘째, 2050년 이후는 식품가격이 현저하게 상승할 것이라는 것이다 (Parry 등, 2004; IFPRI, 2009; Schmithuber & Tubiello, 2007).

그림 8 SRES 기후변화 시나리오에 따른 세계 곡물 가격 전망



자료 : Parry, 2004.

3. 기후변화 대응: 기후 스마트 농업

2050년 까지 세계 인구는 90억으로 증가되고(UN, 2011), 전 세계 열량 섭취량(calorie intake)은 2000년 대비 60% 증가할 뿐만 아니라(Deutsche Bank, 2009) 바이오 연료 생산을 위한 토지 수요가 증대하여 더욱 제한된 가용 자원을 가지고 식량생산을 현저하게 증가시키지 않으면 안 된다. 그러나 기후 변화는 전 세계의 식량생산에 부정적인 영향을 미칠 것으로 전망되고 있다. 특히 농업이 국내총생산(GDP)의 29%를 차지하고, 총 인구의 69%가 농업에 종사하는 개발도상 국가들은 농업에 대한 기후변화 영향이 식량 생산과 국가 전체 경제에 지대한 충격을 미치게 될 것이다. 따라서 기후변화 충격을 완화하고 식량안보를 확보하기 위해서는 기후변화 적응을 위한 다각적인 노력이 필요하다. 또한 동시에 온실기체 집약 산업인 농업분야는 온실기체 배출 감축뿐만 아니라 탄소격리(carbon sequestration)를 통하여 기후변화 완화에 기여하여야 하며 기여할 수 있는 충분한 잠재력도 가지고 있다.

기후변화 적응 정책은 식량생산을 유지 내지 향상시키면서도 농업 및 식품 시스템이 기후변화 충격에 대한 회복 능력을 증대시켜야 한다. 적응 조치들은 지역 특이적이고 식품체인(food chain) 전 과정에 걸쳐서 고려되어야 한다. 농업에 있어서 기후변화 적응을 위한 조치를 나열하면 다음과 같다(IPCC, 2007b).

- 가뭄, 고온 등의 스트레스에 강하거나 변화된 기후 생태에 적응하는 생물계절을 가진 다양한 품종과 작물의 이용
- 파종 및 이식시기 조절, 생산성이나 품질을 유지할 수 있는 새로운 재배기술도입
- 물을 포착하고 토양수분을 보전하는 기술 또는 홍수가 나기 쉬운 지역에서는 침수, 침식 및 양분 용탈을 방지할 수 있는 기술 등의 수분 보전 및 관리기술들의 활용 증대
- 가축과 작부체계의 연계 강화를 통한 농업생물 다양성 증대 및 영농 활동의 다각화
- 초지 생산시기와 맞도록 가축 방목강도와 방목시기의 재조정, 새로운 종이나 품종의 가축 및 초지 도입, 시비관리 개 등 기후변화 적응 가축 및 초지 관리 기술 적용
- 종합관리기술, 새로운 작물이나 가축 품종, 검역 개선, 거점 신고 프로그램(sentinel monitoring program) 등을 통한 병, 해충 및 잡초 관리 개선
- 농업 생산에 단기 및 계절 기상예보의 적극적인 활용으로 위험도 저감

위와 같은 농업적 적응 조치 이외에도 식품체인 전 과정을 통해서 기후변화 적응에 고려되어야 할 사항 들은 많다. 예를 들어 풍년과 흉년간의 격차를 완화하기 위해서 수

확 후 식량의 분배와 저장을 개선하는 것 등이다.

농업분야에 있어서 기후변화 완화 조치는 식량안보를 해치지 않으면서 달성되어야 한다. 식량생산을 늘리는 조치는 많은 경우 농업분야 온실기체 총 방출량을 늘리게 된다. 하지만, 농업 토양 및 바이오매스를 통한 탄소격리 및 농업 생산의 효율성 증대를 통한 온실기체 방출 절대감축 등을 통하여 기후 변화 완화에 기여할 수 있을 것이다. 농업생태계로부터 온실기체 배출 감축을 위한 선택 사항들을 IPCC 4차보고서(2007b)는 다음과 같이 7가지로 분류하여 제시하였다.

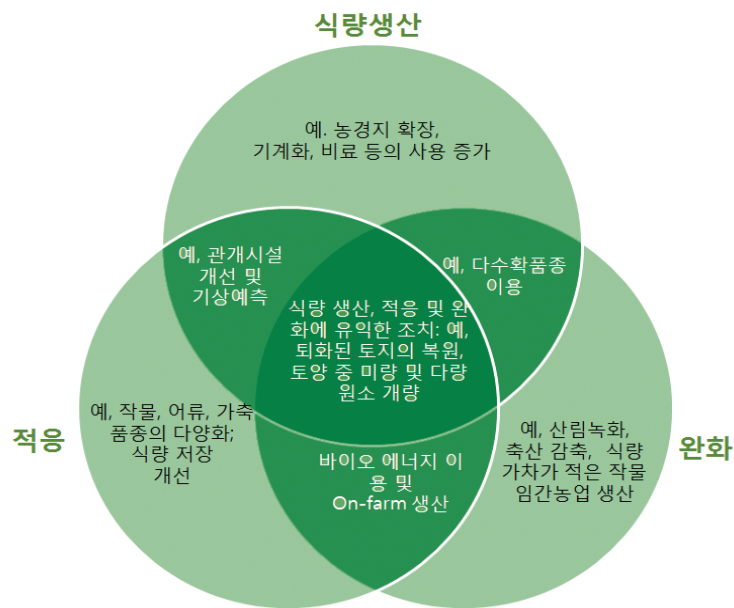
- 양분관리, 경운 및 잔사 관리, 물 관리 (관개, 배수), 논토양관리, 임간농업 (agroforestry), 휴경지, 토지이용 변경 등을 포함하는 농경지 관리
- 방목강도, 생산성 증대, 양분관리, 초종도입 등을 포함하는 방목지 및 초지 관리
- 습지 배수 지양을 포함하는 유기 토양 관리
- 침식 방지, 유기물 개선, 양분 개선 등을 포함하는 퇴화된 토양 복원
- 사양관리 개선, 사료첨가제, 장기적인 구조 및 관리 개선, 가축 개량 등을 포함하는 가축 관리
- 취급 및 저장 방법개선, 호기적 분해, 영양원으로서의 효율적 이용 등을 포함하는 퇴구비 관리
- 에너지 작물(고체, 액체, 바이오가스 및 잔사)을 포함한 바이오에너지

위와 같은 농업분야의 기후변화 완화조치들 중에서도 다음과 같은 특정 조치들은 식량의 생산성을 올리면서도 산출 단위당 온실기체 방출을 줄여서 기후변화 완화와 식량안보를 동시에 증진할 수 있는 시너지 잠재력이 높은 것들이다. 즉, 품종 개량(예, 물이용 효율 제고), 고기와 우유의 지속 가능한 생산성을 증진하기 위한 가축개량, 경지 휴한을 지양하고 식량 생산용 피복작물 및 두과작물의 윤작체계에 도입, 정밀 시비 관리 도입, 초지의 사료품질 및 생산성 개량, 에너지 효율적이고 정밀한 관개 및 수분 보전 기술 확대, 임간농업(Agroforestry) 도입 등이 이에 속한다. 그러나 이와 같은 특정 기술들은 보다 전체론적 농업 관리에 포함이 될 때 의미를 가진다. 한편 지구 전체적으로 가장 효율적이고 적절한 완화 조치를 찾는 것은 불가능하다. 농업분야의 모든 완화 조치는 지역에 따라서 적절히 선택되어야 한다.

식량생산, 기후변화 적응, 기후변화 완화라는 세 가지 목표를 충족시키기 위해서는 농업 기술체계들 간의 상승(synergy) 및 상쇄(trade-off) 효과 사이에 균형을 이루도록 하

여야 한다. <그림 9>는 이 세 가지 목표 사이의 상승 및 상쇄효과에 대한 잠재적인 가능성을 보여주는 예이다. 이 세 목표를 동시에 충족할 수 있는 특정 기술이나 정책적 선택이 있을 수 있으나 많은 경우 이 세 목표 중 하나 또는 2가지만 충족시키고 다른 목표와는 타협을 해야 한다. 따라서 이 세 목표 중 어디에 우선권을 두어야 하는가는 국가 및 지역 수준에서 중요한 과제이다.

그림 9 식량생산, 기후변화 적응과 완화 사이의 상승 및 상쇄적 관계



자료 : Meridian Institute, 2011.

최근 세계 농업에 있어 새로운 조류로 등장하고 있는 것이 식량안보, 기후변화 적응 및 완화라고 하는 농업이 당면하고 있는 목표들 간의 부정적 상쇄 효과는 최소화하고 이익을 최대화 하고자하는 농업 즉, 기후 스마트 농업 (climate smart agriculture, CSA)이다. FAO (2010)는 CSA을 “생산성과 탄성력을 현저하게 증가시키고 (기후변화 적응), 온실기체를 감축 또는 제거하며 (기후변화 완화), 국가 식량안보 및 발전목표 성취를 향상시키는 농업”으로 정의하고 있다. CSA의 핵심 요소는 농업 생산성 및 기후변화 충격에 대한 탄성력 증대, 탄소 격리 향상 또는 이산화탄소 방출 저감, 농업과 농업 이외의 토지이용 사이의 인터페이스 관리 등이다. CSA에서 선택하는 조치들은 많은 경우 기후변화 적응과 완화 필요성을 고려한 친환경 농업기술들이 될 것이다. 늘어나는 세

계 인구의 식량 수요를 충족시키기 위해서는 온실기체의 농업분야 총배출량이 증가할 것으로 예상되지만, CSA를 위한 조치들은 기후변화 완화라고 하는 유일한 창만을 통해서 평가되지 말아야 하며 전체적인 경제를 비롯하여 식량안보를 위한 기후변화 적응의 중요성에 비추어 선택되어야 한다는 것이다.

참고문헌

- 삼성경제연구원. 2010. 「글로벌 식량공급불안, 한국경제를 위협하는가?」.
- 삼성경제연구원. 2012. 「반복되는 국제 곡물가격파동 - 애그플레이션, 피그플레이션, 유가상승 -」. CEO Information 864호.
- 한국과학기술한림원. 2010. 「기후변화에 대응한 농수산학 분야의 현황과 대책」. 한림원보고서 66.
- Ainsworth, E.A., A. Rogers, and S.P. Long. 2004. Testing the source-sink hypothesis of down-regulation of photosynthesis in elevated CO₂ in the field with single gene substitution in Glycine max. *Agricultural and Forest Meteorology* 122:85-94.
- Baker, J.T.. 2004. Yield responses of southern U.S. rice cultivars to CO₂ and temperature. *Agricultural and Forest Meteorology* 122:129-137.
- Bert G. D. Gonzalez-Meler, A. Miquel, P. Steve. 1997. More efficient plants: A Consequence of Rising Atmospheric CO₂ ? *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology* 48: 609.
- Caldwell, C.R., J.J. Britz, and R.M. Mirecki. 2005. Effect of temperature, elevated carbon dioxide, and drought during seed development on the isoflavone content of dwarf soybean (Glycine max) grown in controlled environments. *Journal of Agricultural Food Chemistry* 53: 1125-1129.
- Deutsche Bank. 2009. Investing in agriculture: Far-reaching challenge, significant opportunity. An asset management perspective. June, 2009.
- Gifford, R.M.. 2004. The CO₂ fertilizing effect. Does it occur in the real world? *New Phytologist* 163: 221-225.
- IFPRI. 2009. Climate change impact on agriculture and cost of adaptation.
- Iglesias, A. L. Garrote, S. Quiroga, and M. Moneo. 2009. Impacts of climate change in agriculture in Europe. PESETA-Agriculture study. European Commission, Joint Research Centre, Institute for Prospective Technological Studies.
- IPCC. 2007a. Climate change 2007: The physical science basis.

- IPCC. 2007b. Climate change 2007: Impacts, Assessment, and Vulnerability.
- Lobell, D.B., W. Schnienker, and J. Costa-Roberts. 2011. Climate trends and global crop production since 1980. *Science* 333: 616-620
- Schmidhuber, J. and F. N. Tubiello. 2007. Global food security under climate change. www.pnas.org/cgi/doi/pnas..0701976104.
- Long, S.P., E.A. Ainsworth, A. Rogers, and D.R. Ort. 2004. Rising atmospheric carbon dioxide: Plants FACE the future. *Annual Review of Plant Biology* 55: 591-628.
- Meridian Institute. 2011. Agriculture and climate change. Policy Brief.
- Meridian Institute. 2011. Agriculture and climate change. Scoping Report.
- Parry M.L., C. Rosenzweig, A. Iglesias, M. Livermore, and G. Fischer. 2004. Effects of climate change on global food production under SRES emissions and socio-economic scenarios. *Global Environmental Change* 14: 53-67.
- Ramirez, J., A. Jarvis, and P. Laderach. 2011. Empirical approach assessing the impacts of climate change on agricultural production. The EcoCrop model and a case study with grain sorghum. *Agriculture and Forest Meteorology*.
- Tubiello, F.N., J.A. Amthor, K. Boote, M. Donatelli, W.E. Easterling, G. Fisher, R. Gifford, M. Horden, J. Relly, and C. Rozenzweig. 2007. Crop Responses to elevated CO₂ and world food supply. *European Journal of Agronomy* 26:215-223.
- Woodward F. and C. Kelly. 1995). The influence of CO₂ concentration on stomatal density. *New Phytologist* 131: 311 - 327.