

地球溫暖化가 환경과 農林業에 미치는 영향

Effect of Global Climatic Warming on Environment and Agriculture

權 純 國*
Kwun, Soon-kuk

1. 서론

약 1.5만년 전 최후의 Wurm III 氷期 종료 이후 수많은 기후변동이 반복되었음에도 불구하고 지구의 평균온도는 약 5℃ 정도만 상승하였다고 한다. 이러한 완만한 地球溫暖化를 배경으로 하여, 지구상의 生産圈, 특히 植物相은 풍부하게 되고, 그 분포역도 넓어졌다.

이에따라 인류는 농경법을 개발하고 기술을 발전시킬 수 있었으며 약 5세기전 부터는 그 활동을 전지구로 확대하였다. 또한, 기능이 과학과 결합하여 과학기술로 크게 변신하였으며, 인류는 그것을 이용하여 지구상의 모든것-현상, 물질, 생물 모두를 인류만을 위하여 활용, 소비하는 소위 지구자원화 기술을 확립하였다.

이러한 기술의 발달과 자원의 활용은 여러가지 이점과 함께 많은 문제점도 내포하게 되었는데 예를들면 地質時代에 식물이 100만년에 걸쳐 축적한 태양에너지(化石燃料)를 불과 10년간에 소모해 버리고 그로인해 연간 200억톤이 넘는 이산화탄소를 비롯하여 메탄, 일산화질소, 프레온 등의 온실가스가 대량으로 대기중에 방출되었다.

이와같이 온실가스 농도의 급격한 상승은 대기의 열역학적 특성을 변화시키고, 지구 기후의 형성 과

정을 교란시킬 것으로 우려되고 있다.

기후 시나리오에 의하면 21세기 중반에는 2℃, 21세기 말에는 약 4℃의 기온이 상승된다고 한다. 이와같은 급격한 기후변화는 자연환경 중에서도 기후조건에 순응함으로써 유지되는 自然生態系, 農業生産 그리고 人間生活에 아주 큰 충격을 줄 것이라고 하며, 이 충격을 경감하기 위해서는 상상을 초월하는 비용의 투자와 새로운 기술 개발이 필요할 것으로 생각된다.

따라서, 본 강좌에서는 최근까지의 연구, 특히 기후변동에 관한 정부간 패널(IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change)보고서와 1991년도 일본농업토목학회 중앙연수회에서 발표한 內嶋교수의 강연내용을 주로 참조하여 지구온난화가 환경과 농림업에 미치는 영향에 대해서 간단히 소개하고자 한다.

2. 생물과 환경

지구상에 군림하는 인간을 포함한 모든 생물은 외계 즉 환경과의 사이에서 에너지와 물질을 활발히 교환함으로써 살아간다. 즉, 이러한 교환 활동이 원활하게 이루어지는 조건속에서만 생물의 생존이 가능하다. 지구상의 모든 생물은 30억년이라

* 서울대학교 농업생명과학대학

는 긴 세월동안의 진화를 통하여 기후조건에 적응함으로써 생존할 수 있었다.

그러므로, 환경은 생물의 생존에 있어서 결정적인 중요성을 가지고 있다. 생물의 생존이라는 입장에서 환경의 기능을 생각해보면 그것은 다음과 같이 요약된다.

- (1) 환경은 생물이 생존하고 번식하여 다음 세대를 만들어내는 生命活動의 무대이다.
- (2) 환경은 생명 활동에 필요한 에너지와 물질이 모여 있는 貯藏庫이다.
- (3) 환경은 에너지와 물질을 필요에 따라 生物과 貯藏庫사이로 운반시키는 통로이다.
- (4) 환경은 생물이 배출하는 新陳代謝 물질을 재이용할 수 있도록 분해, 처리하는 再生工場이다.

환경의 이러한 일을 역동적으로 수행시키는 에너지는 1.5억km 우주의 다른 쪽으로 부터 끊임없이 입사되고 있는 태양에너지이다. 1년간 지구의 대기 상단에 도달하는 태양에너지량은 13.29×10^{20} Kcal에 달하나 대기층을 통과하여 지구표면에 도달하는 것은 그 1/2인 6.78×10^{20} Kcal이다. 10^{20} 은 1조의 1억배로서 매우 크다. 그러나 이 양은 태양이 일년간에 우주공간으로 방출하는 에너지총량의 약 2,000만분의 1에 지나지 않는다.

이와같이 생물체의 성장과 생존에 큰 영향을 끼치는 지구환경은 지금까지 크고 작은 여러가지의 변화·변동을 겪었다. 이러한 환경변화 관여하였던, 또 현재 관여하고 있는 요인을 분류하여 보면 <표-1>과 같다.

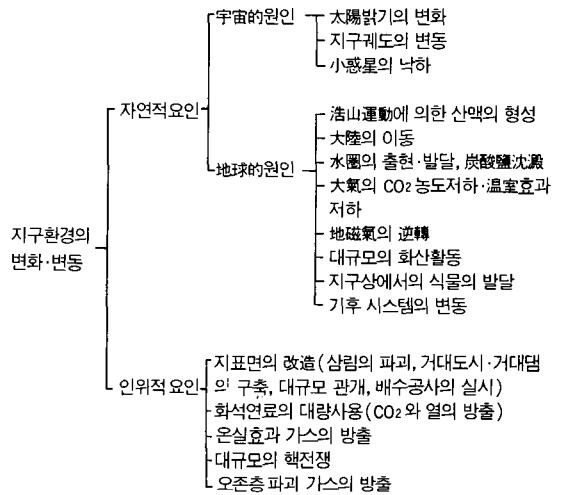
인류의 활동이 화석연료를 사용하여 대규모화한 200-300년 이전까지의 지구환경은 주로 <표-1>에 나타난 자연적요인에 의하여 만들어졌다. 그래서, 古生物學의 연구로 부터 밝혀진 바와 같이 극도로 혹독한 환경변화가 생겼던 때에는 생존하고 있던 같은 시대 생물군의 많은 종이 동시에 切滅하는 集團切滅을 몇번인가 반복하고 있다.

그러나 이와같은 양상은 산업혁명기를 경계로 하여 一變하였다. 인류는 대량의 화석연료와 과학기술을 이용하여 굶주림과 질병을 추방하는데 성공하였으며 많은 다른 생물을 누르고 지구상의 모든 장소로 그 활동영역을 넓히는데 성공하였다. 그러나 이

때문에 지구 생태계는 현재 유사 이래 최대의 위기를 맞이하게 되었다.

구체적인 실례로서, <표-1>의 아랫쪽에 나타난 바와같은 인위적인 환경변화가 생기게 되었다. 이 변화는 과거 1.5만년동안 생긴 地球環境 變化의 약 100배에 달할 정도이다. 그래서, 현재 진행되고 있는 환경변화는 지질학적 시간 척도의 환경변화에 순응하면서 완만하게 진화하여, 형성될 수 있었던 많은 생물이나 생태계에 대해서는 심각한 위협임이 분명하며 앞으로 많은 生物種의 인위적인 集團切滅 발생도 예상된다.

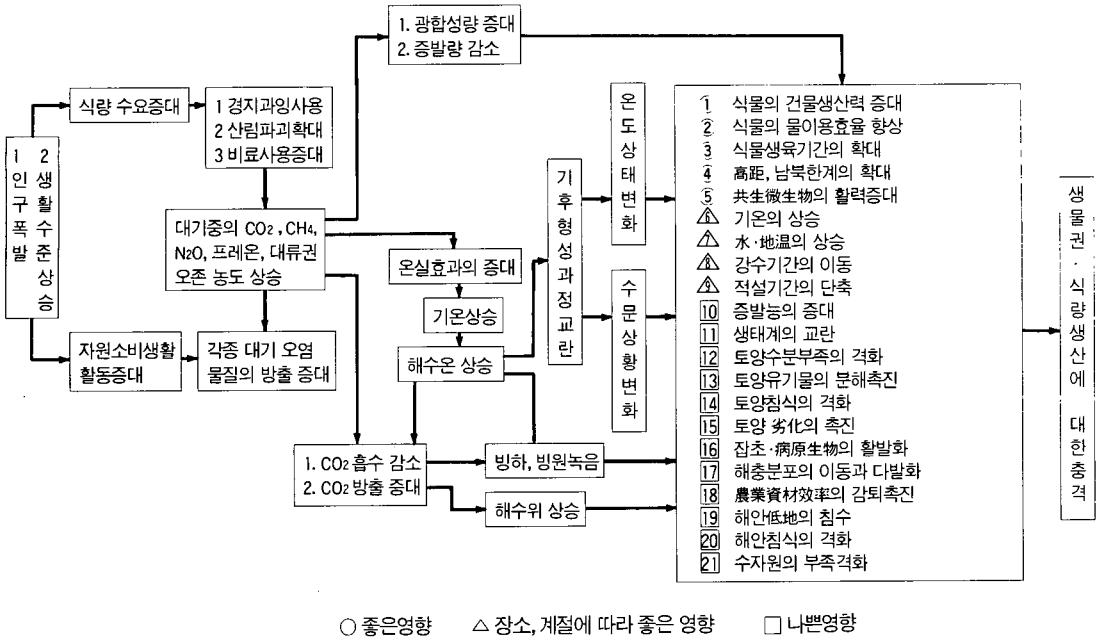
<표-1> 地球環境의 變動·變化에 관여하는 요인



3. 温暖化가 환경에 미치는 영향

가까운 미래의 예상되는 인구의 폭발(20세기말 60억, 2030년대에 80억, 21세기말에 100억)과 경제활동의 확대를 생각할 때, 화석연료 사용 기세는 금후에도 계속 증가 될 것이다. 따라서 각종 溫室 gas의 綜合濃度는 1990년을 기준으로 할때 2030년도에는 2배의 CO₂ 濃度 상당으로, 2080년대에는 4배의 CO₂ 濃度 相當으로 상승될 것으로 예상된다.

초대형 컴퓨터로서 작성된 2×CO₂ (2배의 CO₂ 농도상당) 平衡 氣候 시나리오에 의하면 다음과 같은 氣候變化가 예상된다.



〈그림-1〉 대기조성과 지구기후의 인위적인 변화의 환경과 생물권에 대한 영향

氣溫上昇	南·北洋半球 30-60도대 低緯度帶	2-5℃ 1.5℃
陸水量	南·北洋半球 45-60도대 北半球 中緯度帶 南部(30-40°) 低緯度帶(兩半球 0-30°)	여름 5%증가 겨울 15%증가 지나친 변화없음 5-10%증가
蒸發散能	전 지역에서	2-3%/℃ 증대

향은 크게 大氣 組成, 특히 CO₂濃度 上昇의 식물에 대한 직접영향(光合成활동의 촉진과 蒸散活動의 억제)과 誘導氣候 變化를 통한 세가지 간접영향(온도상태의 변화, 수문상태의 변화, 해수위 상승)으로 나누어 생각해 볼 수 있는데 식물에 대한 직접 영향은 다음 장으로 미루고 여기서는 환경에 대한 간접 영향에 대해서 설명하고자 한다.

그러나 水分供給이 적은 乾燥, 半乾燥地帶에서는, 蒸發 放熱이 적기때문에 기온 상승은 위의 예상보다 크게 될 것이다.

최근의 大氣·海洋 결합의 기후모델에 의한 過度의 온도상승 연구에 따르면, 이러한 온도상승은 평형기후 시나리오 값의 0.6-0.7배가 된다. 이 때문에, 온실가스 濃度가 2배의 CO₂ 농도상당이 되는 2030년대에서의 기온상승은 1.2-3.5℃로 될 가능성이 높다.

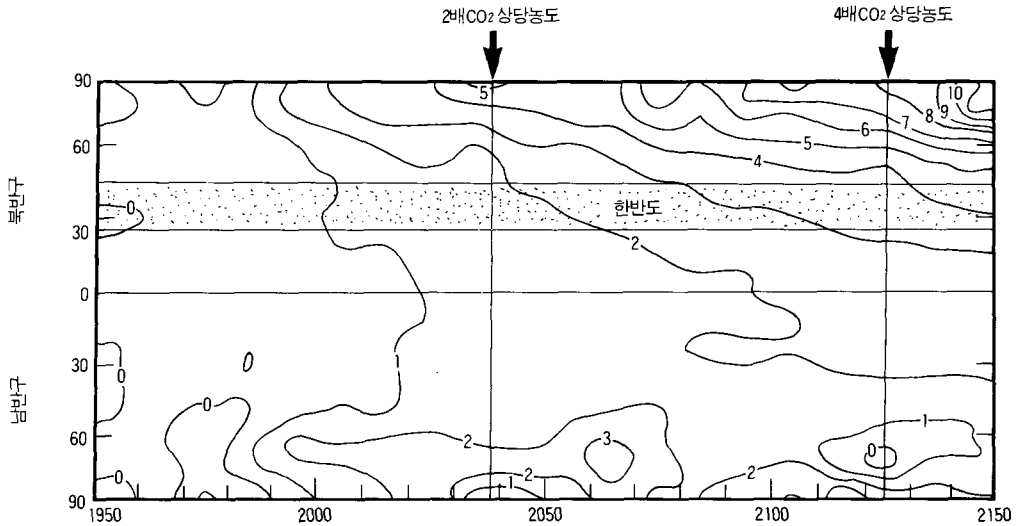
위에서 기술한 바와 같은 기후변화가 인위적으로 진행될 때에 어떠한 경로를 통하여 환경과 생물권에 그러한 영향이 과급되는가를 나타내면 〈그림-1〉과 같다.

그림에서 보는 바와 같이 기후변화가 미치는 영

1) 온도 환경에 대한 영향

온실가스의 농도상승에 의하여 지구 기후가 변할 가능성이 있다는 것은 약 130년전에 Tyndall (1861)에 의하여 이미 지적된 바 있다. 그러나 그 당시는 순전히 과학상의 한 가정으로서 현재의 SF적인 문제에 지나지 않았다. 그러나 인류활동의 비대는 이 SF적인 문제를 현실적인 세계적 大課題로 바꾸어 놓았다.

최근의 대기-해양 결합 모델에 의한 過度의 氣候 溫暖化의 한 예상 결과가 〈그림-2〉에 나타나 있다. 북반구의 고위도대에서는 그 변화가 의외로 적은 것으로 나타나 있는데 이것은 남극대륙 주변의 해역에서 다량의 열이 深層으로 운반되기 때문일 것이다.



〈그림-2〉 온실가스 농도 상승에 따른 지구 온난화 시나리오

한반도가 위치하는 위도대의 온난화는 2040-2050년대에 2℃, 2140-2150년대에는 4℃로 예상된다. 2℃의 온도차가 여수(13.8℃)와 서울(11.8℃) 간의 년평균기온 차이와 같다. 이 온도차를 후빙기의 온도변화와 비교해 보면 다음과 같다.

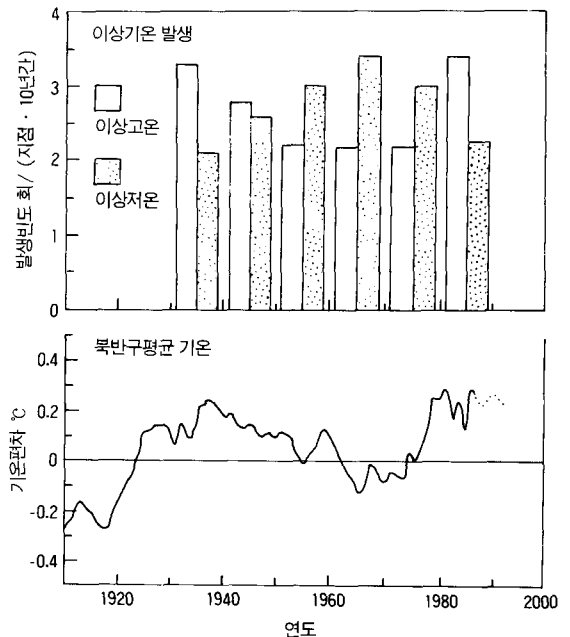
$$\begin{aligned} \text{가까운 未來의 氣候溫暖化 速度} &= 2^\circ\text{C}/50 \\ &= 0.04^\circ\text{C}/\text{년} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{後水期の 氣候溫暖化 速度} &= 5^\circ\text{C}/1.5 \times 10^4 \\ &= 0.0003^\circ\text{C}/\text{년} \end{aligned}$$

즉 가까운 未來의 人爲의 氣候溫暖化는 後水期 그것의 120배나 된다.

평균기온의 변화와 함께 겨울철 기온의 변화는 보다 중요하다. 그런데 현재의 대기대순환 모델(GCM, General Circulation Model) 시나리오에 따르면 지구온난화 현상이 끼치는 온도상승의 효과는 여름철 보다 겨울철에 더 큰 것으로 알려져 있다. 현재, 겨울철의 저온에 의하여 亞熱帶, 熱帶의 有害生物(雜草, 害蟲, 病原生物 등)의 中緯度帶域으로의 확산이 억제되고 있다. 또, 겨울철의 低溫은 보리류나 과수류의 生殖 生長의 개시와 관련하여 중요한 역할을 하고 있다. 그러므로 겨울철기후의 溫暖化는 平均 氣溫의 변화보다 더 큰 의미를 가진다.

또 하나의 문제는 GCM기후 시나리오로부터 최고기온이나 최저기온 등의 氣象極值의 변화를 밝히는 것은 어렵다는 것이다. 따라서 현재까지의 기후 기록의 해석이 이 문제를 밝히기 위해서 쓰여지고 있으며, 그 하나의 결과가 〈그림-3〉에 나타나 있다.



〈그림-3〉 기후 변화와 이상 기온 출현의 관계

〈그림-3〉으로부터 異常高溫·低溫의 出現頻度와 北半球 平均氣溫의 累年 平均値로부터의 偏差와의 사이에는 밀접한 상관이 있음을 알 수 있다. 즉, 양의 편차의 기간에는 이상고온의 頻도가, 음의 편차의 기간에는 異常低溫의 頻도가 높아졌음을 나타내고 있다. 특히, 과거 140년간 연평균기온의 高溫 기록의 일곱 중 여섯은 1980년대에 출현하였다. 그리고, 최고온은 1990년에 있었다고 보고되어 있다. 이와 같은 기록은 인위적인 기후온난화의 진행에 따라서 이상고온이 많이 나타난다는 것을 실례적으로 보여 주고 있다.

과거 기후 data의 해석으로부터, 溫暖化가 뚜렷하였던 1930년대에는 미국, 캐나다, 소련의 中緯度 穀倉地帶에서 대규모 旱魃天候가 계속되었으며, 특히 북미의 大平原 地帶는 1930년대에 6회나 旱魃에 휩쓸렸다.

이 과거의 사례로부터 추정한다면 가까운 未來의 溫暖化 기후하에서는 異常高溫과 旱魃 天候의 發生 頻도가 커지고, 이러한 변화는 自然生態系, 농업시스템 그리고 인간사회에 큰 충격을 줄 것으로 예상된다.

2) 水文條件에 대한 영향

물은 생물의 생존 및 생산활동과 사회의 발전에 있어 온도에 필적하는 중요한 요소이다. 일반적으로, 어떤 지역의 水資源 賦存量은 다음 식으로 산정된다.

$$\text{부존량} = \text{강수량} - \text{증발산}$$

앞에서 설명한 1930년대의 기후온난화 시대에 유럽, 러시아 지역에서는 겨울철의 降水量이 감소하고 카스피아해의 水位가 낮아진 것을 알 수 있었다. 따라서, 가까운 未來의 인위적인 氣候 溫暖化도 水文 조건 및 水資源에 현저한 영향을 줄 것으로 생각된다.

GCM에 의한 水文 조건의 예측은 溫度 조건의 예측에 비하여 精密度가 낮다고 한다. 지구 평균으로 본다면 기온 상승에 따라 공기의 包藏 水蒸氣量이 증가하므로 降水量도 증가하는 것으로 예상된다. 그러나, 대기층 내의 攪亂 發生場이나 時期가 변화하여, 현재 降雨量이나 雨期와는 다른 양상이 나타날 것으로 예상되고 있다. 예를 들면, 北半球

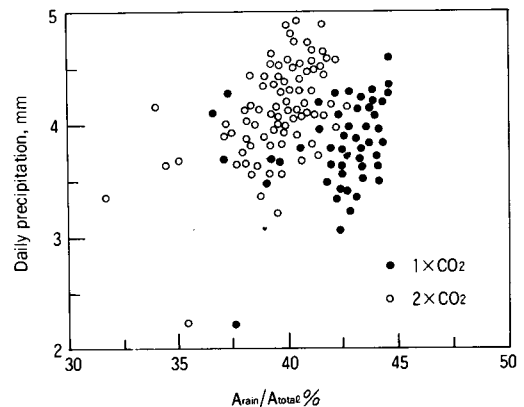
中緯度帶에서는 우기의 到來가 빨라지고 여름의 乾期가 길어질 가능성이 높다. 또 根雪期間이 단축되어 토양면 증발이 많아질 것으로 예상되기도 한다.

한반도 부근은 대체로 강수량 증가지역이지만 그 값은 그리 크지 않은데, 계절별로 차이를 나타내고 있다. 즉, 봄에는 약 15% 증가하고 여름에는 약 10% 이상 감소하는 것으로 되어 있으며, 가을과 겨울에는 한반도 북부지방은 증가, 남부지방은 감소하는 것으로 나타나 있다. 따라서 대체로 강수량이 많던 지역은 감소하고 반대로 적던 지역은 증가하는 경향을 볼 수 있다.

氣候 溫暖化에 따른 경우 형태의 변화에 대한 모의 발생 결과의 하나가 〈그림-4〉에 나타나 있다. 그림에 의하면 溫暖化시에는 雨슬비형 降雨로부터 shower형으로 강우형태가 변화한다. shower형 강우에서는 집수역의 저류능력이 낮아지고, 홍수흐름으로 유출하는 비율이 높아지므로 물 이용효율이 낮아진다.

또 하나의 중요한 문제는 降雨에 의한 土壤 浸蝕力이 강우강도의 증가에 비례하여 커지는 것이다. 특히 온난화에 따라 土壤有機物(腐植 포함)의 分解가 촉진되면 토양의 水蝕性(Erodibility)이 높아진다. 그래서, 세계적으로 약 10억 ha를 차지하는 발지대에서의 土壤 浸蝕 문제는 溫暖化에 따라 한층 더 심화 될 것이다.

많은 연구결과에 의하면 蒸發面에 水分 補給이 불충분한 조건에서는 태양에너지의 配分을 특징짓는 Bowen比가 작아지는 것으로 알려져 있다. 이것



〈그림-4〉 기후 온난화에 따른 경우 형태의 변화

은 温暖化와 함께 蒸發 放熱이나 蒸散이 증가하는 것을 의미한다. 설정 조건에 따라서 다르겠지만 3℃의 温暖化에서 蒸發散量은 상당히 증가한다. 이러한 현상은 당연히 作土層의 水收支에 영향을 줄 것이다.

作土層의 水分含量은 공급 성분의 강수량과 방출 성분인 蒸發散의 收支에 의하여 결정된다. Manabe, Wetherald(1987)는 GCM의 결과를 사용하여, 2×CO₂ 기상조건하에서의 토양수분의 변화(현재 값과의 차)를 연구하여 北半球의 대부분의 지역에서는 토양수분이 줄어들고, 아프리카의 사하라지역과 남반구 대륙의 대부분에서는 늘어난다는 사실을 발견하였다. 한반도 부근은 역시 약간의 감소가 예상되지만 겨울철에는 다소 증가할 수 있는 지역으로 나타나 있다.

이러한 모의발생 결과는 古氣候 데이터 해석으로부터의 復元 결과(예를들면, Kellogg·Schwarw, 1981; Budyko·Izrael, 1988)와 잘 일치하고 있다. 이것은 나중에 설명하는 바와 같이 北半球 中緯度帶에 위치하는 대규모 穀倉地帶의 현재 생산력이 가까운 未來에는 현재에 비하여 대폭적으로 낮아질 것을 암시하고 있다.

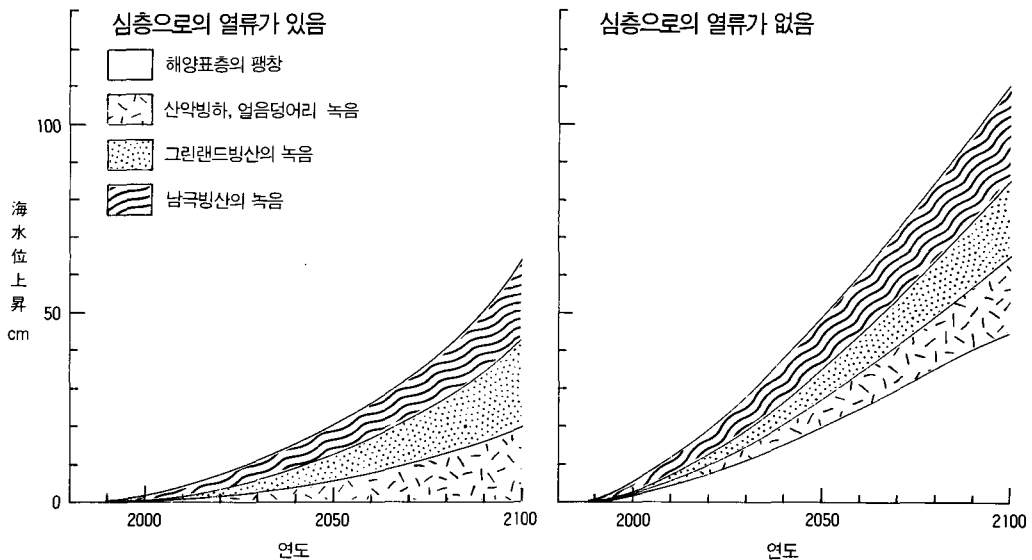
降雨의 集中化와 함께, 증발율이 감소되는 기간이 급증하고, 光合成 및 蒸散活動은 아주 억제될 것이다.

그 이외에 북쪽지방의 水資源에 크게 영향을 주는 積雪期間과 積雪量의 변화도 중요한 문제이다. 그러나 현시점에서는, 지역적인 降雪 상황에 따라 氣候 温暖化의 영향을 평가할 수 있는 지역기후 모델은 개발되어 있지 않다. 따라서, 전형적인 寒冬·多雪年과 暖冬·小雪年의 降雪量, 降雪期間, 水資源 등의 비교연구가 중요한 역할을 할 것이다.

3) 海水位에 대한 영향

海水位는 일정불변의 것이 아니고, 대륙 기반의 승강 및 대륙위에서의 물의 저류량(氷河·氷山 등)에 따라서 변한다. 예를 들면 약 2만년전의 Wurm III 氷期에는 대량의 물이 해양으로 부터 육지로 이동하여 저장되었기 때문에 해수위는 현재보다 수십 m 낮았다. 또, 수천년 전의 後氷期 시대에는 겨꾸로 해수위가 높아져서, 湖南平野의 내수로 바다가 침입하였다.

가까운 未來에 있어서 入爲的인 氣候 温暖化의 영향은 후빙기의 溫度上昇에 필적 또는 上廻할 것



<그림-5> 기후온난화에 의한 해수위 상승 시나리오

으로 예상되어, 산악지대나 고위도대의 氷河. 氷山の 融解·流出이 생길 것이다. 이것은 대륙 내부의 건조 지대에 있는 넓은 오아시스 농업지대의 존속에 치명적인 영향을 줄 것으로 생각된다. 그 외, 融解된 물은 최종적으로 海洋으로 유출하여 그 수위를 상승시킬 것이다.

미국의 環境保全局(EPA)은 많은 연구를 참조하여, <그림-5>와 같은 海水位 상승 시나리오를 발표하였다. 이것에 의하면 海洋 混合層(약 70-80m 까지)내로 대기로 부터의 熱流가 제한되어, 수온 상승에 의하여 體膨脹이 크게 되는 조건하에서는 다음 세기말에 약 1m의 해수위 상승이 예상되고 있다. 한편, 깊은 海層으로의 熱流移動이 커서, 海洋溫의 상승이 거의 없는 조건하에서는 약 60cm의 해수위가 상승된다. 그리고 산악 빙하, 그린랜드 빙산, 남극 빙산의 기여는 거의 같다고 한다.

약 1m의 海水位 상승에도 그 영향은 커서, 해안 침식의 격화, 연안 저습지의 浸水로 부터 시작하여 淡水資源의 劣化, 港灣施設 등의 수리에 이르기 까지 아주 넓은 범위에 영향을 미칠 것이다. 특히, 低濕地의 水沒은 해안평야의 농업이나 생태계의 붕괴를 의미하므로 아주 중요하다. 그러나 약간의 선진국을 제외하고는 水沒地域의 평가에 필요한 상세한 지형도는 정비되어 있지 않은 실정이다.

특히 동남 아시아일대의 인구가 조밀한 논 지대는 海水位 상승에 대하여 극히 취약하여, 1m의 해수상승이 생긴다면 다수의 環境難民이 발생할 것으로 예상된다. 예를들면 갠지스강 델타地域의 방글라데시에서는 1m의 해수위 상승으로 10%의 주민이 거주지를 잃으며, 국내 총생산의 10%를 잃어버린다고 한다. 이러한 결과도 불확실한 지평 평가에 근거하였으므로 해안 저위역의 詳細 地形圖의 정비는 현재 긴급한 과제이다.

4. 지구온난화가 農林業에 미치는 영향

본래, 農林業은 지역의 풍토 조건에 적합한 植物種을 골라서 재배하는 것을 원칙으로 한다. 즉, 適地適作의 관점에서 예로부터 농사를 지을 수 있었다. 따라서 어떤 지역의 풍토조건 특히, 기후조건은

累年平均이 上下로 변동하더라도 한 방향으로 기울지 않는 것으로 되어 있었다.

그러나, 최근 및 가까운 未來의 인위적인 기후 온난화는 이러한 상황이 바뀔 것을 우리에게 강요하고 있다. 경향적으로 변화하는 기후조건에 대한 충격 양상은 16세기중엽부터 19세기중엽에 걸쳐서 北半球를 휩쓸어 크나큰 영향을 주었던 小氷期에 필적할지도 모른다. 당시의 인구(약 10억 내외)와 현재의 인구(53억)의 차이를 생각하면 충격의 범위는 아주 클 것으로 예상된다.

이 때문에, 대개 10년전 부터 人爲的인 기후 온난화의 시나리오가 제시되었으므로, 농림업에 대한 충격의 평가가 가장 시급한 문제였다. 그러나 기후 변화 시나리오의 대부분은 약 500km 格子에 의거하고 있어 지역기후의 차이에 따라 큰 영향을 받는 農林業에 대한 충격을 평가하기에는 아주 불충분하다. 특히 한반도 전체라 할지라도 격자점을 지니고 있지 못하므로 상세한 변화를 알 수 없는 결점을 지니고 있다.

그럼에도 불구하고 얻은 연구성과는 가까운 미래의 기후온난화가 무시할 수 없는 영향을, 인류의 생존을 지탱하는 農林業에 주고 있다는 것을 나타내고 있다.

1) 自然植生の 분포와 생산력에 대한 영향

현재 지구상에서의 自然植生 분포는 처음에 서술한 Wurm III 빙기 후의 기후 온난화를 배경으로 만들어진 것이다(예를들면, Davis, 1981). Wurm III 빙기의 추위때문에 남쪽으로 쫓겨나던 植物群은 따뜻함의 회복에 따라 느린 걸음으로 北上하여 현재의 植生 分布를 만들었다. 유럽에서의 花粉 分析 데이터로 부터 復元한 植物種의 北上 速度가 <표-2>에 요약되어 있다.

<표-2> 木本植物의 移動速度(Huntley-Birks, 1983)

분 류	군	이동속도, km/년
오 리 나 무		0.5~2.0
너 도 밤 나 무		0.2~0.3
전 나 무		0.08~0.5
소 나 무		1.5
상 수 리 나 무		0.08~0.5
보 리 수		0.05~0.5

〈표-2〉로부터 기후변화에 따른 木本植物의 이동 속도는 의외로 늦은 것이 확인되었다. 한국에서도 後冰期 너도밤나무의 이동속도는 50m/년으로 추정되고 있다. 단, 이 이동속도는 각종 식물의 가능 최대치가 기후 온난화 때문인지 다른 요인에 의한 것인지를 판단하는 자료는 현재 없다. Emanuel 등(1985)은 미국 지구물리유체역학연구소(GFDL, Geophysical Fluids Dynamics Laboratory)의 초기온난화 시나리오(Manobe, Stouffer, 1980)와 Holdridge(1947)의 생물대 분류방식을 사용하여 2×CO₂ 기후 온난화에 의한 自然植生帶의 이동을 연구하였다. 최대의 변화는 중위도대 북부로부터 고위도대에 걸쳐서 생기고, 현재의 寒帶林(Boreal)의 남반부가 후속림으로 대체되고, 한대림은 보다 고위도대로 이동될 것이라고 발표하였다. 그후 Kauppi, Rosch(1988)는 NASA의 고다드 우주연구소(GISS, Goddard Institute for Space Studies) 모델에 의한 温暖化 시나리오를 이용하여, 寒帶林帶의 南限과 北限에 대응하는 有效積算氣溫(1300, 600度日)의 이동을 평가하여, 〈그림-6〉의 결과를 얻었다. 이것으로부터도 현재의 한대림의 南半分이 붕괴할 위험성이 있는 것을 알 수 있다.

寒帶林을 구성하는 針葉樹는 유용한 건축재 및 펄프재로서 널리 이용되고 있으므로 이 林帶의 붕괴, 縮小는 지역의 사회·경제, 그리고 流域 물收支나 自然生態系에 큰 영향을 끼칠 것이다.

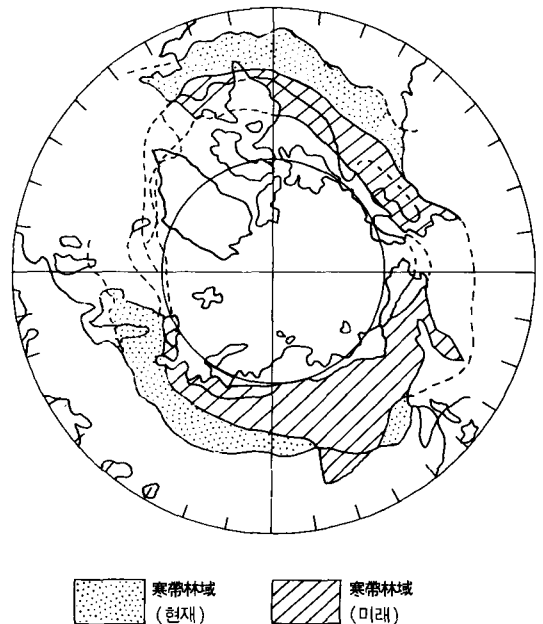
더욱 중요한 문제는 이 林帶中 전 세계의 土壤有機物量(炭素로서 2조3천억톤)의 약 1/3이 포함되어 있다는 것이다. 이것은 大氣中の 炭酸가스량(炭素로서 7,300억톤)과 맞먹는 양이다. 그래서 寒帶林이 붕괴하여 토양면이 노출되므로서 土壤有機物의 分解가 가속화되면, 대기의 탄소 밸런스가 교란되어 대기의 온실가스 농도는 급상승할 것으로 생각된다.

기후변화가 완만하여 기후변화에 따라서 식물대가 완만하게 이동하는 것을 전제로, 기후온난화에 의한 자연식생의 변화도 연구되어 있다. Pittock, Nix(1986)는 Australia의 자연 식생의 純1次生産力이 강우조건에 개선에 따라 약 20% 늘어날

것으로 예상하고 있다. 또 우리나라의 경우에는 식생의 순 1차 생산력이 지역에 따라서 다소의 차이는 있으나 대개 10%정도 증가할 것으로 추정된다.

이와 같은 결과는 기후의 온난화에 따라서 식생대가 완만하게 이동한다고 하는 가정을 뒷받침하고 있는 것으로서 실제로는 기후대 이동에 따른 식생분포역과의 대응이 무너져, 생산력의 발현이 방해될 것이다. 그래서, 현실적인 생산력 증가의 위의 예상보다 더욱 적어질 것으로 생각된다. 이 문제를 해결하는데는 식생분포의 이동과 생산력에 의한 기후변화의 영향을 동시에 평가하는 모델의 개발이 필요하다.

2) 높은 이산화탄소의 농작물에 대한 직접 영향
환경대기중의 이산화탄소는 식물의 기본적인 생리활동인 광합성의 소재이고, 또한 氣孔 開度の 조절제이다. 높은 이산화탄소 농도의 작물광합성 속도, 증산속도, 성장, 건물생산량 그리고 收量에 대한 영향이 많은 연구로 밝혀져 있다.



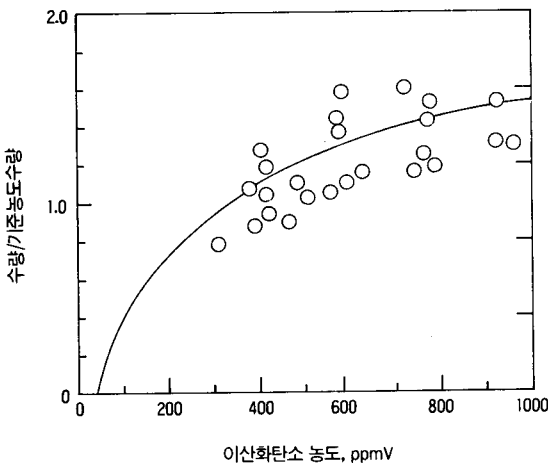
〈그림-6〉 2×CO₂기후 온난화의 寒帶林帶 분포에 대한 영향

잎 내외의 가스교환을 제어하는 기공 conductance(D_s m/s)는 주변공기중의 CO_2 농도(C, ppmv, parts per million by volume)에 의하여 다음과 같이 변화한다 (Rogers등, 1984):

$$\begin{aligned} \text{대 두, } D_s &= 0.0485 - 7 \times 10^{-5}C + 3.4 \times 10^{-8}C^2 \\ \text{sweet corn, } D_s &= 0.0328 - 5.49 \times 10^{-5}C \\ &\quad + 2.96 \times 10^{-8}C^2 \\ \text{sweet gum, } D_s &= 0.0253 - 3.26 \times 10^{-5}C \\ &\quad + 1.36 \times 10^{-8}C^2 \end{aligned}$$

이것으로부터 CO_2 농도가 330ppmv로부터 660ppmv로 되면 D_s 는 약 40% 저하한다는 것을 알 수 있다. 이 관계는 다른 식물(C_3 , C_4 식물군)에도 잘 맞는다. 이와 같이, 기공 conductance가 감소하고, 증산방열이 저하하기 때문에 잎의 온도는 상승한다. 대두 잎에서의 관측에 의하면 2배의 CO_2 에서는 잎의 온도는 1-2°C 높아진다.

氣孔 開度の 감소는 CO_2 농도상승에 의하여 보상되므로, 식물잎의 광합성 활동은 CO_2 농도 상승에 따라 증가한다. 많은 실험결과에 의하면 C_3 작물의 수량은 CO_2 농도 배증(330/660ppmv)에서 $26 \pm 9\%$ 상승한다. 이것은 높은 CO_2 농도의 비료효과 때문이다. 그러나 옥수수, 사탕수수 등의 C_4 작물에서는 상기와 같은 비료효과가 현저하지는 않다. 대두에 대한 실험결과가 <그림-7>에 나타나 있다.



<그림-7> 대두 수량과 CO_2 농도와의 관계

측점은 흩어져 있으나, 기준 농도(340ppmv)로부터 상승됨에 따라서 직각쌍곡선적으로 대두 수량은 상승하고 있다. 여기서, $2 \times CO_2$ 농도에서의 수량은 약 40% 증가하였다. 그러나 이와 같은 비료효과를 발휘하기 위해서는 무기양분 특히 인산과 질소의 충분한 시용이 불가결하다고 보고하고 있다. 그래서 농가의 포장 특히 자본과 기술이 충분하지 않는 개발도상국의 농가포장에서는 위와같은 높은 CO_2 의 비료효과는 기대할 수 없다고 한다.

수확물의 품질에 대한 영향도 중요하다. 현재까지는 자료가 불충분하여, 높은 CO_2 에서는 광합성 활동이 왕성하게 되고, 당과 전분의 함량이 증가한다는 정도만 보고되어 있다. 이 때문에 수확물의 영양가와 저장성도 낮아, 잔사물의 미생물에 의한 분해도 영향을 받을 것으로 예상된다.

3) 높은 CO_2 의 농작물에 대한 간접 영향

농도의 간접 영향은 다음의 경로를 통하여 나타난다. 농업기후자원의 변화, 병해·충해·잡초해의 변화, 토양수분과 비옥도의 변화, 작물의 수량과 기축 생산력에 대한 영향.

a) 농업기상자원의 변화

$2 \times CO_2$ 기후 온난화가 진행되면 農業 北限界線(예를들면 1,300度日)은 캐나다 동부역에서 500km, 시베리아 중앙역에서 1,000km나 북으로 이동될 것으로 예상된다. 일반적으로 1°C의 기온 상승에서 곡작물의 재배 北限界線은 150km-200km 북상하고, 高距限界線은 150-200m 상승한다. 이 때문에 현재의 농업지대 대부분에서 작물의 재배가능 기간은 아주 길어질 것이다. 그러나 고온에 의하여 熟期가 짧아져서 減收할 것으로 예상된다. 중위도대와 아열대와의 경계역, 예를 들면 인도 북부나 멕시코는 열 stress가 커짐에 따라 고무 재배가 곤란해진다. 또 저위도에서는 벼의 개화, 수정의 고온장애가 다발할 것이다.

b) 병해, 충해, 잡초해의 변화

기후 온난화에 따라 활동기간이 길어지고 겨울의 심한 추위는 완화되기 때문에 병·충해의 대발생과 아열대 및 열대성 종의 중위도 지역으로의 침입, 정착이 예상된다. 예를 들면, 우리나라에서 벼멸구류나 과일파리류의 북상과 정착이 이루어지고, 따라

서 벼농사 및 원예 작물에 큰 피해를 주게 될 것이다. 또한 잡초류의 생육이 왕성하게 되면 잡초 방제가 현재보다 더 중요한 과제가 될 것이다.

기타 중요한 열대기축 병해의 중위도대로의 퍼짐도 걱정되는 문제이다. Life-Valley熱이나 돼지 코레라는 기후온난화에 따라서 미국으로 침입한 것으로 보인다. 또, 쇠파리나 각종 진드기의 분포구역도 넓어지고 따라서 축산업에 큰 피해를 줄 것이다. 고온에 의한 환경 stress의 증가는 가축, 가금류의 저항성을 약화시켜 생산성을 아주 낮출 가능성이 있다.

c) 토양수분과 비옥도의 변화

GCM 시나리오 및 현재까지의 자료를 기초로 하여 평가된 토양수분 감소지역이 표-3에 요약되어 있다.

<표-3>에서와 같이 현재의 주 농업지대 대부분에서 경도층의 토양수분 부족이 발생할 것이며 이것은 농업생산 potential의 저하를 가져오게 할 것이다.

<표-3>기후온난화에 따라 토양수분 감소가 예상되는 지역 (IPCC, 1990)

대륙	겨울(12, 1, 2월)	여름(6, 7, 8월)
아프리카	아프리카 삼각지대, 남아프리카, 서아프리카	서아프리카, 아프리카 삼각지대
유럽		서 유럽의 일부
아시아	아라비아반도 서부, 동남아시아	중국의 북부, 중앙부(몽골포함) 소련중앙아시아, 시베리아의 일부
북아메리카	미국남부	미국 남서부, 중앙아메리카
남아메리카	아르헨 북부	브라질 동부
호주	호주동부	호주 서부

강수 형태와 증발산의 변화는 지하수의 보급수량을 감소시키고, 농업생산에 큰 역할을 하고 있는 지하대수층 수자원의 고갈을 앞당길 것으로 걱정된다.

기타, 강우량의 증대가 예상되는 지역에서는 비료분의 용탈이 진행되어 비옥도가 저하될 염려가 있다. 예를 들면, 러시아의 레닌그라드 지구에서는 서기 2025년경에는 용탈때문에 비옥도가 현재보다 20% 이상 저하되고, 농업생산potential의 향상을 위하여 다량의 비료가 필요하게 될 것으로 예상된다.

다.

d) 작물수량과 기축생산력에 대한 영향

작물품종을 포함하여 농업기술을 현재상태로 가정하여 2×CO₂기후 온난화의 경우에 작물수량 변화의 모의발생 결과를 요약하면 다음과 같다.

북미 대륙

- 미국 : 온난화(3.8~6.3℃)와 수분저하(10%)가 동시에 생기면 옥수수, 콩의 수량 potential은 각각 4~25%, 24~72% 저하될 것이다.

- 캐나다 : 온난화(3~4℃)가 토양수분 저하와 함께 생기면 밀의 전국 평균수량은 약 20%저하한다.

유럽 대륙

- 북, 북서유럽 : 온난화에 따라 가장 혜택을 받는 지역으로서 밀의 수량은 10-20% 상승하고, 감자도 증수된다. 농업지대는 수백 km 북상한다.

- 남유럽 : 온난화와 10%의 강수량 감소가 동시에 생기면 지중해 연안 식생의 생산력은 5-36% 감소할 것이다.

아프리카 대륙

온난화(1.5℃) 때문에 증발산량이 늘어나고 수자원량은 감소할 것이다. 이 때문에 농경으로 부터 방목으로의 이행은 필연적일 것이다. 한발 발생빈도의 변화가 농업에 있어서 중요하다.

아시아 대륙

- 중국 : 온난화로 인하여 여름 몬순 계절풍이 강화되므로 남부지역에서는 홍수 위험도가 증가할 것이다. 100mm의 강수량 증가와 1℃ 기후온난화가 동시에 생긴다면 쌀, 밀, 옥수수의 수량은 10% 증가할 것이다. 그러나 강우의 증가가 없으면 1℃상승시 마다 약 3%의 수량 감소가 생긴다.

- 인도 : 기온이 0.5℃만 상승한다면 밀의 수량은 10% 저하할 것이다. 즉, 남부지역의 사탕수수 수량은 고온장에 때문에 감소할 것이다.

이상의 결과를 정리하면 온난화가 생긴다 하더라도 늘어나는 세계인구에 대한 식량공급은 세계 평균값으로도 가능하다.

그러나 지역적으로 보면 인구 potential과 생산 potential사이의 차이로 인하여 수급을 압박하는

점이 생길 것으로 예상된다. 또한 수출력의 증감은 다음과 같다.

수출력 증가지역 : 캐나다(밀, 옥수수), 서 유럽
제국(곡류)

수출력 감소지역 : 미국, 지중해 제국

5. 결 론

이상의 간단한 설명으로 부터 알 수 있는 바와 같이 가까운 장래의 인위적인 기후 온난화때문에 인류를 포함한 전 생물의 생존을 지탱하는 지구환경의 각 부분에 현저한 변화를 가져올 가능성이 아주 높다. 이것은 자연생태계, 자연식생, 그리고 식량생산 시스템에 상당히 큰 충격을 줄 것이다. 그러나 이미 지적인 바와같이 이러한 영향평가의 기초가 되는 기후온난화 시나리오는 500km 격자를 사용하여 만든것이다(현재 한반도내에 격자점이 없음). 그러므로 지역적인 기후조건에 밀착되어 농사를 짓고 있는 농림업에 대한 영향을 평가하기에는 너무 조잡하다는 지적이 많다. 보다 더 정확도가 높은 평가를 하기 위해서는 적어도 격자크기가 200km인 高分解能 기후모델의 시나리오를 사용해야 할 것이다.

또한, 농업기후자원이나 생산력 변화의 평가에 사용되고 있는 여러가지 모델도 아직 불충분한 것이 많다. 이 때문에 위에서 설명한 영향평가의 대부분은 제1차 근사값이라고 하지 않을 수 없다. 그러므로 보다 자세한 기후변화에 대한 영향을 파악하기 위해서는 각 나라의 국지적인 조건을 가미한 고분해능 기후 모델의 개발을 포함하여 기후변화에 대한 환경조건과 생물의 반응에 관한 연구를 체계적으로 발전시키는 일이 무엇보다도 필요하다.

끝으로 우리도 이제 지구환경보전에 적극적으로 참여해야 할 것이다. 기후변화에 대한 정부간 패널(IPCC)보고서에 의하면 지구적 차원에 있어서의 농업 활동은 지구 온난화에 약 14%정도 기여한다고 한다. 기후변화에 따른 엄청난 변화에 적응할 수 있는 기술의 연구, 개발, 정착화에 농업과학자, 정책담당자, 농민의 공동적인 노력이 필요할 것으로 생각되며, 무엇보다도 우리나라에서의 기후변화 정도와 영

향을 가능한한 정확하게 예측하는 기술의 개발이 시급하다. 다시말해서 앞으로 GR에 대비한 우리나라대로의 지속가능한 농업의 기술개발과 정착화에 힘써야 할 것이다.

참고문헌

1. 内嶋善兵衛, 1992. 地球環境と農林業への地球温暖化の影響, 農業土木學會中央研修會 テキスト, 農業土木學會pp.1-19.
2. 조하만, 1992. 지구온난화와 한반도 부근의 기후변화, 생태계 위기와 한국의 환경문제, 따님환경농총1, pp. 80-101.
3. 임정남, 1992. 지구온난화가 우리나라 농업생태계에 미치는 영향, 생태계 위기와 한국의 환경문제, 따님환경농총1, pp. 104-123.
4. IPCC (Working group II), 1990. Draft report on agriculture and forestry. pp. 53.

권 순 국



약 력

- 1964. 서울대학교 농과대학 농공학과 졸업
- 1974. 미국 Colorado 주립대학교 대학원, M.S
- 1980. 미국 Iowa 주립대학교 대학원, Ph.D.
- 현재 서울대학교 농업생명과학대학 농공학과 교수