

大氣中 CO₂ 濃度 增加에 따른 氣候變化가 農業氣候資源,
植生の 純 1次生産力 및 벼 收量에 미치는 影響

李洪雨* · 申辰澈** · 奉鍾憲***

**Impact of Climate Change Induced by the Increasing
Atmospheric CO₂ Concentration on Agroclimatic Resources,
Net Primary Productivity and Rice Yield Potential in Korea**

Byun Woo Lee*, Jin Chul Shin** and Jong Hon Bong***

ABSTRACT : The atmospheric carbon dioxide concentration is ever-increasing and expected to reach about 600 ppmv some time during next century. Such an increase of CO₂ may cause a warming of the earth's surface of 1.5 to 4.5°C, resulting in great changes in natural and agricultural ecosystems. The climatic scenario under doubled CO₂ projected by general circulation model of Goddard Institute for Space Studies(GISS) was adopted to evaluate the potential impact of climate change on agroclimatic resources, net primary productivity and rice productivity in Korea.

The annual mean temperature was expected to rise by 3.5 to 4.0°C and the annual precipitation to vary by -5 to 20% as compared to current normal climate(1951 to 1980), resulting in the increase of possible duration of crop growth(days above 15°C in daily mean temperature) by 30 to 50 days and of effective accumulated temperature(EAT=ΣTi, Ti≥10°C) by 1200 to 1500°C · day which roughly corresponds to the shift of its isopleth northward by 300 to 400 km and by 600 to 700 m in altitude. The hydrological condition evaluated by radiative dryness index(RDI=Rn/ℓP) is presumed to change slightly. The net primary productivity under the 2×CO₂ climate was estimated to decrease by 3 to 4% when calculated without considering the photosynthesis stimulation due to CO₂ enrichment.

Empirical crop-weather model was constructed for national rice yield prediction. The rice yields predicted by this model under 2×CO₂ climatic scenario at the technological level of 1987 were lower by 34~43% than those under current normal climate.

The parameters of MACROS, a dynamic simulation model from IRRRI, were modified to simulate the growth and development of Korean rice cultivars under current and doubled CO₂ climatic condition. When simulated starting seedling emergence of May 10, the rice yield of Hwaseongbyeon(medium maturity) under 2×CO₂ climate in Suwon showed 37% reduction compared to that under current normal climate.

The yield reduction was ascribable mainly to the shortening of vegetative and ripening period due to accelerated development by higher temperature. Any simulated yields when shifted emergence date from April 10 to July 10 with Hwaseongbyeon(medium maturity) and Palgeum(late maturity) under 2×CO₂ climate did not exceed the yield of Hwaseongbyeon simulated at seedling emergence on May 10 under current climate. The imaginary variety, having the same characteristics as those of Hwaseongbyeon except growth duration of 100 days from seedling emergence to heading, showed 4% increase in yield when simulated at seedling emergence on May 25 producing the highest yield. The simulation revealed that grain yields of rice increase to a greater

* 서울대학교 農科大學 (Coll. of Agric. Seoul Nat'l Univ., Suwon 441-744, Korea)

** 農村振興廳 作物試驗場 (Crop Experiment Station, Suwon 441-100, Korea)

*** 氣象研究所 (Meteorological Research Institute, Seoul 110-101, Korea)

본 연구는 1990년도 과학기술처 특정 연구개발 사업의 지원에 의하여 이루어진 것임 <91. 1. 10 接受>

extent under CO₂-doubled condition than under current atmospheric CO₂ concentration as the plant type becomes more erect.

大氣중의 CO₂ 濃度는 지속적으로 증가하고 있는데, 化石燃料使用量の 증가와 산림이 파괴되어 대기중 CO₂의 고정량이 감소되는 것을 그 주요 원인으로 생각하고 있다. 대기중 CO₂ 濃度는 산업화 이전인 1750~1800년 경에는 280ppmv¹⁹⁾ 정도 였으나 산업화와 더불어 과거 100년간에 약 25% 증가하여 현재 353ppmv에 달하였다²⁾. 대기중 CO₂ 濃度는 앞으로도 계속 증가 될 것으로 전망되고 있으며 현재와 같은 率(2%/1년)로 화석연료의 사용량이 증가하는 경우 2050년경에는 산업화 이전 CO₂ 濃度の 2배인 530~600ppmv에 달할것으로 예측하고 있으며 화석연료의 사용량을 1990년 수준으로 동결한다 할지라도 2050년경에는 415~480ppmv, 2100년경에는 460~560ppmv로 증가할 것으로 예측하고 있다²⁶⁾.

대기중 CO₂ 濃度の 변화는 지구생태계에 氣候 변화와 植物生長에 지대한 영향을 미칠 것이다. CO₂는 地球輻射를 흡수하는 성질을 가지고 있는 소위 온실가스(green house gas)중의 하나로서, 대기중의 CO₂ 濃度가 산업화 이전의 약 2배(600 ppmv)로 증가하는 경우 지구표면 평균기온은 현재보다 3.0±1.5℃ 증가하며 그 증가폭은 위도가 높은 지역일수록 그리고 겨울에 더 클 것으로 예상하고 있다. 강수량 또한 全地球의으로 3~15% 증가하며 이와 더불어 증발량도 같은 정도로 증가될 것으로 예상을 하고 있다¹⁸⁾. 이와 같이 氣候가 변화하는 경우 農業氣候자원의 지리적 분포가 변화되어 작물의 지리적 분포와 생산성이 바뀔 것이다. 일반적으로 中緯度の 곡창지대는 旱澇과 고온으로 인하여 耕作面積과 생산성이 떨어질 것으로 예측하고 있으며 高緯度 지대는 재배 환경이 개선되어 생산성이 증대될 것이며, 농업 지대는 보다 고위도 지대로 확장될 것으로 보고 있다³⁾.

한편 大氣中 CO₂ 濃度の 증가는 물의 이용효율과 광합성의 증대를 통하여 식물의 생산성을 향상시키는 효과를 가져올 것이다. CO₂ 濃度を 증가시켜서 작물의 생산성을 조사 연구한 實驗結果들을 종합한 Kimball¹⁹⁾의 보고에 의하면 CO₂ 증가에 의하여 수량성이 낮아진 경우도 있지만 대개의 경우 收量性은 20~30% 증가하며,

UNEP/GEMS²²⁾의 보고에 의하면 대기중 CO₂濃度가 2배로 증가하는 경우 목화는 104%, 수수는 79%, 벼는 9% 수량이 증가한다고 한다.

大氣中 CO₂가 증가하는 경우 작물의 생산성에 대한 영향은 CO₂ 증가로 인하여 식물의 광합성을 증대시키는 1차적인 효과와 氣候를 변화시킴으로서 오는 2차적인 효과가 복합적으로 작용하여, 自然生態系 또는 農業生態系의 생산성에 正·負의 방향성을 동시에 가지고 영향을 미치기 때문에 예측이 매우 어렵고 또한 지역적으로 그 영향이 매우 다르게 나타날 것이므로 이에 대한 구체적인 연구가 이루어져야 하며 그 대응책 또한 지역적으로 달리 강구되어야 할 것이다.

이와 같은 관점에서 본 연구는 대기중 CO₂ 濃度가 2배로 증가했을 때를 가정하여, 우리나라에서의 ①氣候 및 農業氣候資源量の 변화를 GISS GCM 氣候變化 模擬實驗 결과를 이용하여 파악하고, ②이 氣候變化 scenario를 근거로 하여 자연생태계의 純 1次生産力과 水稻의 생산성 변화에 대한 영향 평가를 시도하였다.

資料 및 方法

1. 氣候變化 Scenario

(1) 基準(baseline) 氣候

대기중 CO₂ 倍增에 따른 氣候變化(2×CO₂ Scenario)가 우리나라의 農業氣候資源, 自然植生の 순 1차 생산성(net primary productivity, NPP) 및 水稻 생산성에 미치는 영향을 비교 검토하기 위한 基準氣候로서 우리나라 각 지역의 例年氣候값⁷⁾을 이용하였다. 기온의 경우 월 평균 기온을 주로 이용하였는데, 일별 예년값이 필요한 경우는 調和分析에 의하여 推定한 값을 이용하였다.

(2) CO₂ 倍增時 氣候 Scenario

대기중 CO₂가 2배로 증가했을 때 우리나라의 氣候 Scenario는 미국 NASA의 고다드 우주연구소(Goddard Institute for Space Studies, GISS)의 大氣大循環 모델(General Circulation Model, GCM)로 예측한 1×CO₂ 및 2×CO₂하에서의 월평균기온, 월강수량 자료에 근거하여 작

성하였다. GISS GCM의 1×CO₂ RUN은 대기중의 CO₂ 濃度를 315ppmv로 2×CO₂ RUN은 630 ppmv로 가정하여 이에 따른 氣候를 7.8°(위도)×10°(경도) 간격의 全球 格子點마다 생성한다¹⁵⁾. GISS GCM이 생성하는 격자점 중에서 우리나라에 가장 인접해 있는 35.22°N, 130°E 격자점과 이 격자점에 가장 인접해 있는 蔚山測候所의 월평균기온과 월강수량을 비교하여 본 결과 평균기온의 경우 7,8월은 1×CO₂ RUN은 울산의 氣候 예년값을 3월, 7월, 8월에는 매우 유사하게, 6월은 낮게, 그 외의 달에는 높게 예측하고 있다. 한편 강수량의 경우는 4월~8월은 적게 그 외의 달에는 지나치게 많게 예측하고 있다. 따라서 이 격자점의 GISS GCM 2×CO₂ RUN 예상치를 CO₂ 배증시의 우리나라 氣候 그대로 이용하는 것은 곤란하므로 2×CO₂ RUN과 1×CO₂ RUN의 차이로 현재 우리나라 例年氣候값을 다음과 같이 補正하여 CO₂ 배증시의 우리나라 氣候 Scenario를 작성하였다.

$$T_{2 \times CO_2} = T_{base} + (T_{GISS \ 2 \times CO_2} - T_{GISS \ 1 \times CO_2})$$

$$P_{2 \times CO_2} = P_{base} \times (P_{GISS \ 2 \times CO_2} / P_{GISS \ 1 \times CO_2})$$

여기서,

T_{2×CO₂}는 CO₂ 배증시의 우리나라 월평균기온

P_{2×CO₂}는 CO₂ 배증시의 우리나라 월강수량
T_{GISS 1×CO₂}, P_{GISS 1×CO₂}는 각각 GISS GCM의 기온과 강수량의 1×CO₂ RUN

T_{GISS 2×CO₂}, P_{GISS 2×CO₂}는 각각 GISS GCM의 기온과 강수량의 2×CO₂ RUN

GISS의 1×CO₂ RUN과 2×CO₂ RUN의 차이를 지도에 等值線으로 그려 우리나라에서의 氣候變化를 파악하였다. CO₂ 배증시의 기온과 강수량 변화는 지역적으로 다소 차이는 있으나 그 차이가 크기 않으므로 대체로 우리나라에서의 기온

및 강수량의 평균적인 변화(Table. 1)를 모든 지점에 적용하였다. GISS GCM이 예측한 자료는 월평균기온이므로 일별자료가 필요한 경우에는 기온의 연중변화 경향이 현재와 같다고 가정하여 조화분석⁸⁾에 의하여 추정하였다.

2. 農業氣候資源變化 評價

農業氣候資源은 작물의 生長可能期間, 온도 및 수자원 등으로 평가된다. 본 연구에서는 일평균기온이 15°C 이상인 날을 의미하는 작물기간, 일평균기온이 10°C 이상되는 날의 일평균기온을 적산한 有效積算溫度(Effective Accumulated Temperature, EAT=ΣTi, Ti≥10°C), 연간 純輻射量을 년 총강수량의 蒸發에너지로 나누어 氣候의 건조정도를 나타내는 輻射乾燥指數(Radiative Dryness Index, RDI=Rn/ℓP; Rn: 純輻射量, ℓ: 蒸發潛熱, P: 降水量)를 基準氣候와 2×CO₂ 氣候하에서 계산하여 農業氣候資源을 평가하였다.

3. 純一次生産力 變化 評價

2×CO₂ 氣候 Scenario하에서의 자연식생의 순 1차 생산력(NPP_{CO₂})은 氣候變化和 CO₂ 증가에 의한 상호작용 효과를 무시하면 氣候變化에 의한 순 1차 생산력의 변화(ΔNPP_{CO₂}) 및 CO₂ 증가에 따른 순 1차 생산력의 변화(ΔNPP_{CO₂})와 基準氣候에서의 純一次生産力(NPP)과의 합으로 다음과 같이 표현된다¹⁴⁾.

$$NPP_{CO_2} = NPP + \Delta NPP_{CO_2} + \Delta NPP_{CII}$$

순 일차생산력의 계산에는 Chikugo Model^{23,24)}을 이용하였는데 이 모델에서는 CO₂ 증가에 따른 순 1차생산력의 변화(ΔNPP_{CO₂})는 고려하지 않은 것으로서 다음과 같다.

$$NPP = 0.29[\exp(-0.216 RDI^2)] Rn$$

여기서 RDI(=Rn/ℓP)는 氣候의 건조도를 나타내는 복사건조지수이며 Rn은 연간 총순복사량

Table 1. Changes in monthly mean temperature(ΔT, °C) and monthly precipitation(ΔP, %) due to a doubling of atmospheric CO₂ predicted by the GISS GCM in Korea.

Month	January	February	March	April	May	June
ΔT	4.0	4.3	4.3	3.8	4.3	3.8
ΔP	0	0	0	+15	+15	+15
Month	July	August	September	October	November	December
ΔT	3.3	3.5	4.2	3.0	3.5	3.5
ΔP	-5	-5	-5	+5	+5	+5

(Kcal/cm²/year), ℓ 은 물의 증발잠열(580cal/g), P는 연 총강수량(cm/year)이다.

각 지역의 순복사량은 Chang¹⁰⁾의 모델을 이용하여 다음과 같이 추정하였다.

$$R_n = (1-\rho)S_t - \sigma Ta^4 \{ (286.18 + 202.8 B_1) - (45.24 + 10.92 B_1) \sqrt{e_a} \}$$

여기서 ρ 는 자연식생의 albedo로서 積雪이 없는 달에는 0.15로, 적설이 있는 달에는 적설의 Albedo를 0.65로 가정하여 예년 적설일수를 적용 가중평균 하였다. S_t 는 일사량, B_1 는 S_t/S_0 로서 S_0 는 대기권의 일사량이며, Ta 는 월평균기온, e_a 는 대기의 수증기압, σ 는 Stefan-Boltzmann 常數이다. 일사량은 일조시간으로부터 다음과 같이 구하였다¹¹⁾.

$$S_t = 0.188 + 0.473S/S_0 + 0.049(1-Cd) + 0.00027 e_a$$

여기서 S는 日照時間, S_0 는 可照時間, Cd는 雲量, e_a 는 大氣의 蒸氣壓이다.

4. 水稻 收量性的 變化 評價

(1) 水稻 收量性 豫測 統計模型 作成

대기중의 CO₂ 증가에 의한 지구온난화가 우리나라의 水稻 收量성에 미치는 影響을 현재의 기술수준에서 평가하기 위하여 水稻 收量은 농립수산 통계연보에 있는 各道別·年次別段步當 백미수량으로서 水稻의 재배기술, 품종, 농업기반조성 여건 등의 변화와 기상자료의 가용성 등을 감안하여 1969년부터 1989년까지 21년간의 자료를 이용하였다. 우리나라 水稻 수량의 년차 변이에 가장 크게 영향하는 기상요인은 7, 8, 9월의 평균기온이라고 한 李⁴⁾의 보고에 근거하여 이를 기상변수로 채택하였다. 기상자료는 경기도는 수원, 강원도는 춘천, 충북은 청주, 충남은 대전, 전북은 전주, 전남은 광주, 경북은 대구, 경남은 울산을 대표지역으로 하여 이들 지역의 측후소 기상자료를 이용하였다. 독립변수로 이용된 기상자료는 水稻 收量性的 연차변동 중에서 기상의 연차변동에 의한 효과를 설명하기 위하여 7, 8, 9월의 각 지역 년도별 평균기온에서 각 지역 예년값(1951~1980년)을 뺀 편차와 이들의 자승항, 각 지역별 收量性的 변이를 설명하기 위하여 각 지역의 7, 8, 9월 각 달의 평균기온에서 8개지역 평균을 뺀 편차와 이들의 자승항으로 모두 12개였다. 한편 우리나라 水稻의 收量性的 기상변동

에 대한 sensitivity는 1971년부터 보급되기 시작한 통일계 품종의 재배 면적비율에 따라서 달라질 것으로 가정하여 각 도별 통일계 품종의 재배 면적 비율과 이의 자승항을 독립변수로 채택하였으며 또한 농업기반조성 여건, 재배기술수준의 年次的 변화 효과를 설명하기 위하여 각 년도에서 1968년을 제외한 수와, 이의 5승항까지 dummy 변수로 채택하였다. 이와 같은 19개의 독립변량과 水稻 수량을 대상으로 重回歸式을 계산해 10%수준에서 편회귀계수의 유의성이 인정되는 변량만을 최종 회귀모델에 채택하였다.

중회귀식의 작성에는 SAS의 stepwise를 이용하였으며 변량의 선택은 backward elimination을 하였다. 회귀모델의 작성에 있어서 년차에 따른 기술수준의 변화는 도에 관계없이 같은 것으로 가정하였으며 1969~1987년까지의 자료는 회귀식의 작성에 이용하였으며, 1988년과 1989년은 이 統計模型의 예측정도를 검증하기 위하여 남겨놓았다.

이와 같이하여 작성된 통계경험식에 기술수준을 1987년으로 고정하여 각 지역의 基準氣候값과 2×CO₂ 氣候 scenario값을 대입하여 水稻 收量성을 계산·상호 비교하였다.

(2) 作物生長 模型에 의한 水稻 收量性 變化 評價

基準氣候와 2×CO₂ 氣候하에서의 水稻 生長 및 收量성을 模擬實驗하기 위하여 Penning de Vries 등이 개발한 作物生長 模擬模型(MA-CROS, Modules of an Annual Crop Simulator)을 이용하였다. 模擬實驗에서는 MACROS의 Production Level 1을 이용하였는데 이는 물과 양분이 충분히 공급되는 조건으로서 작물의 生長率이 simulation時點의 작물의 상태와 기상, 특히 일사량과 기온에 지배되는 상태로서²⁰⁾ 현재 우리나라의 水稻는 대부분이 灌溉水와 비료가 충분히 공급되는 조건에서 재배되므로 Production Level 1에 가깝다고 할 수 있다. 1차년도 연구³⁾에서 1966년부터 1985년까지 수원측후소의 기상자료를 입력, 진흥의 生長을 模擬하여 작물시험장의 진흥품종 작황시험 성적과 비교 검토한 결과 수량의 年次變動을 잘 추정 하였다. 수원(해발 37m)과 대관령(해발 820m)에 대하여 水稻 生長 模擬實驗을 하였는데 현재의 氣候 狀態에서 벼의 재배가 불가능한 대관령을 포함시킨

것은 $2\times\text{CO}_2$ 하에서 고도에 따른 벼재배가능 지역의 천이를 파악하고자 한 것이다. 水稻 生長 模擬實驗에는 早生種인 오대벼, 中生種인 화성벼, 晚生種인 팔금벼를 이용하였다. 이들의 온도와 일장에 따른 發育速度는 李의 연구결과를 이용하였다. 현재의 재배기술 상태에서 基準氣候와 $2\times\text{CO}_2$ 氣候下에서의 水稻 生長과 수량을 비교 검토하기 위하여 模擬實驗의 초기조건으로 直播栽培를 가정하여 출아일은 현재 수원의 氣候下에서 露地 水稻 生長의 早限期인 5월 10일로 하였고, 出아시의 엽중과 근중은 각각 1.3kg/ha 엽초중은 1.7kg/ha로 발육지수는 0.001로 하였다. 생육의 模擬 계산은 출아일부터 생리적 성숙기까지 하였다.

入力外部變數(driving variable)는 수원 측후소와 대관령의 최고기온, 최저기온, 일사량의 基準氣候 및 $2\times\text{CO}_2$ 氣候 scenario 값들이었으며, $2\times\text{CO}_2$ 氣候 scenario의 일사량은 基準氣候에서와 같다고 가정하였다. 한편 $2\times\text{CO}_2$ 氣候 scenario하에서 生長 模擬實驗을 하는 경우, CO_2 증가에 의한 광합성 촉진효과를 감안하기 위하여 그림 1¹¹⁾에 나타나 있는 modification factor를 고려하여 최대광합성속도를 변형하여 生長을 模擬하였다.

대기중 CO_2 濃도가 증가하여 氣候가 변하는 경우 벼의 재배기간이 달라지며 또한 재배시기에 따른 수량의 변화가 基準氣候에서와는 다른 양상으로 나타날 것이다. 또한 변화된 氣候조건하에서 다수확을 위하여 재배품종이 가져야 할 특성

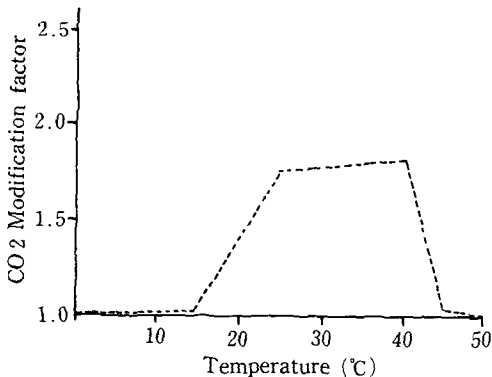


Fig. 1. The CO_2 modification factor for net photosynthesis due to the CO_2 doubling from 330 ppmv to 660 ppmv. (Adopted from DOE, 1990)

도 다를 것으로 예상된다. 따라서 $2\times\text{CO}_2$ 氣候 scenario하에서의 적응 재배시기와 적응 품종적 특성을 검토하기 위하여 공시된 품종들을 4월 10일부터 15일 간격으로 7회에 걸쳐 출아기를 이동시켜 가면서 模擬實驗을 하였으며, 또한 氣候가 고온화하는 경우 생육기간이 단축되어 生長 수량이 감소될 것이므로 基準氣候하에서 화성벼 적기재배(5월 10일 출아)하의 출아에서 출수기까지의 기간(약 100일)으로 생육기간을 고정시킨 假想 品種을 생각하여 출아기에 따른 模擬實驗을 하였다. 한편 CO_2 濃도가 높고 생육초기의 온도가 높은 경우 초기생육이 왕성하여 조기에 限界 葉面積에 달하여 이후의 生長에 光이 제한 인자가 될 것으로 가정하여 群落의 葉 傾斜角 분포를 변화시킨 假想的 品種을 대상으로 하여 模擬實驗을 하였다.

結果 및 考察

1. 氣候變化

대기중 CO_2 가 2배로 증가하였을 때 GISS GCM으로 예측한 우리나라의 기온변화($2\times\text{CO}_2$ RUN - $1\times\text{CO}_2$ RUN)를 계절별로 나타낸 것이 그림 2이다. 우리나라의 년 평균기온의 상승은 $3.5\sim 4.0^\circ\text{C}$ 정도로 추정되며 북쪽으로 갈수록 상승정도가 커진다. 계절별로는 겨울이 $3\sim 4.5^\circ\text{C}$, 봄이 $3.8\sim 4.5^\circ\text{C}$, 가을이 $3.3\sim 3.8^\circ\text{C}$ 정도 상승되는 것으로 예측되었다.

그림 3는 CO_2 倍增에 따른 강수량 변화 [$(2\times\text{CO}_2$ RUN/ $1\times\text{CO}_2$ RUN - 1) * 100]의 계절별·지리적 분포를 나타낸 것이다. 연 총강수량은 동남부지방을 제외하고는 지역적으로 0~20% 정도 증가 할 것으로 예측하였으며 계절별로는 겨울이 -5~5%, 봄이 10~20%, 여름이 0~10%, 가을이 0~20% 정도로 변화하여 여름철을 제외하고는 대부분의 지역에서 강수량이 증가 할 것으로 예상하였다. 지역적으로 보면 여름과 가을은 북서쪽으로 가면서 강수량의 증가율이 크며 봄과 겨울은 북쪽으로 갈수록 강수량 증가율이 커졌다.

2. 農業氣候資源과 自然植生の 純 1次生産力 變化

1) 作物期間

작물의 생장은 대체로 일평균기온이 15°C 이상

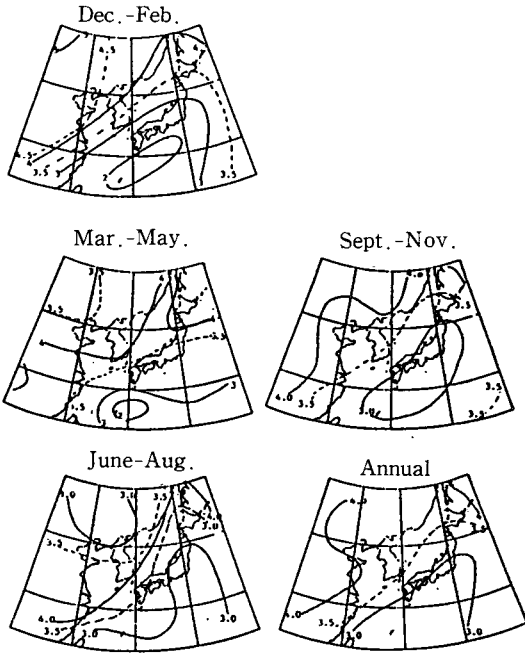


Fig. 2. Geographical distribution of GISS GCM-generated change in temperature (°C) over Korean peninsula. Numbers on isotherms indicate the difference between $1 \times \text{CO}_2$ and $2 \times \text{CO}_2$ equilibrium climate ($2 \times \text{CO}_2 - 1 \times \text{CO}_2$).

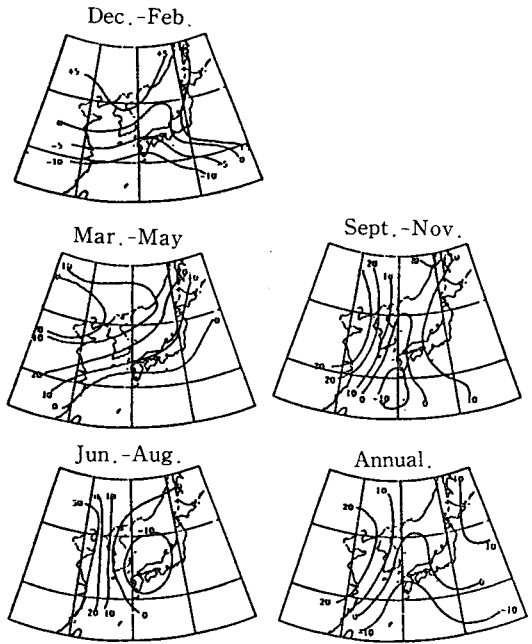


Fig. 3. Geographical distribution of GISS GCM-generated changes in precipitation (%) over Korean peninsula. Numbers on isohyets indicate departure (%) of $2 \times \text{CO}_2$ from $1 \times \text{CO}_2$ equilibrium climate ($(2 \times \text{CO}_2 / 1 \times \text{CO}_2 - 1) \times 100$).

되어야 하는데, 일평균기온이 年中 15°C 이상되는 일수를 作物期間이라고 하며 이는 대체로 露地에서의 여름작물 재배가능 기간을 나타내는 指標로 삼고 있다²⁾.

그림 4에서 보면 例年 氣候하에서의 우리나라 평지의 作物기간은 제주도의 190일에서 북쪽의 150일 사이에 분포하고 있으나 GISS $2 \times \text{CO}_2$ Scenario와 같이 氣候가 변화되는 경우 作物기간은 제주도 남쪽의 240일에서 북쪽의 180일까지 作物기간이 30~50일정도 더 연장 될 것으로 보인다. 한편 해발 820m정도되는 대관령의 경우 作物기간이 150일정도까지 연장되어 例年 氣候의 중북부지방 평지의 作物기간과 비슷하여질 것으로 예상되어 作物의 栽培限界가 보다 높은 高度로 높아질 것으로 보인다.

例年 氣候下에서의 作物기간(X)과 $2 \times \text{CO}_2$ 氣候하에서의 作物기간(Y) 사이에는 $Y = 43.8 + 0.956X$ ($R^2 = 0.935$, $n = 26$)의 관계가 성립되어 이로부터 특정지점의 $2 \times \text{CO}_2$ 氣候下에서의 作物기간의 예측이 가능 할 것으로 보인다.

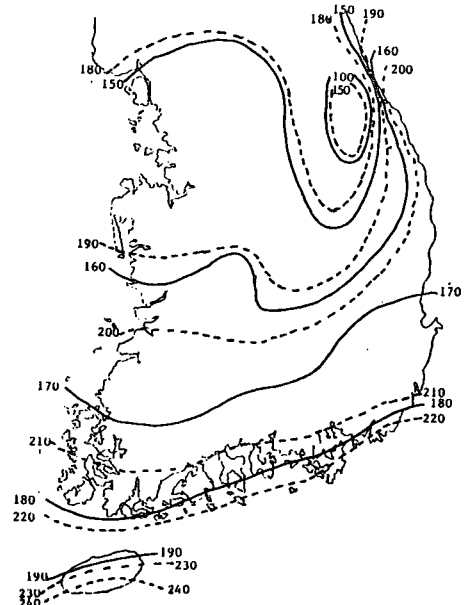


Fig. 4. Regional distribution of crop growth duration (Number of days above 15°C in daily mean air temperature) for baseline climate (-) and $2 \times \text{CO}_2$ equilibrium climate(---).

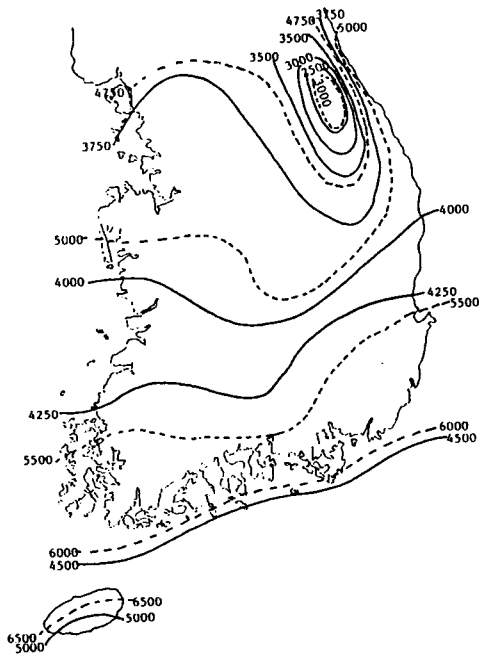


Fig. 5. Regional distribution of effective accumulated temperature ($^{\circ}\text{C} \cdot \text{day}$) for baseline climate (-) and $2\times\text{CO}_2$ equilibrium climate (---).

2) 有效積算溫度

어느지역의 溫量資源(thermal resources)은 그 지역의 植物生長期間, 특정작물의 재배가능여부 등을 판정하는데 중요한 지표가 된다. 본 연구에서는 온량자원을 평가하기 위하여 일평균기온 10°C 이상인 날의 일평균기온을 년중 합산한 유효적산온도를 例年氣候와 $2\times\text{CO}_2$ 氣候하에서 지역별로 계산하여 그 등치선을 그림 5에 나타내었다. 평지에서 例年氣候하의 유효적산온도는 제주도의 $5000^{\circ}\text{C} \cdot \text{day}$ 에서 중북부지방의 $3500^{\circ}\text{C} \cdot \text{day}$ 사이에 분포하나 $2\times\text{CO}_2$ 氣候하에서는 제주도의 $6500^{\circ}\text{C} \cdot \text{day}$ 에서 중북부지방의 $4750^{\circ}\text{C} \cdot \text{day}$ 사이에 분포하여 동일지역에서는 $1200\sim 1500^{\circ}\text{C} \cdot \text{day}$ 정도 증가하며 유효적산 온도의 等值線은 $300\sim 400\text{km}$ 북상 할 것으로 예상된다. 한편 대관령의 유효적산온도는 약 $2000^{\circ}\text{C} \cdot \text{day}$ 에서 $3500^{\circ}\text{C} \cdot \text{day}$ 로 상승하여 例年氣候하의 중북부지방의 평지와 유사하여질 것으로 예측된다.

일본의 경우도 유효적산온도가 $1000^{\circ}\text{C} \cdot \text{day}$ 정도 증가하여 등치선은 약 100km 북상할 것으로 예상하였다²⁴⁾. 한편 例年氣候하에서의 유효적산

온도(X)와 $2\times\text{CO}_2$ 氣候하에서의 유효적산온도(Y) 사이에는 $Y = -107.47 + 1.32X$ ($R^2 = 0.963$, $n = 26$)의 관계가 있다.

벼의 재배지역을 구분하는데는 대체로 유효적산온도를 기준하여 $2500^{\circ}\text{C} \cdot \text{day}$ 등치선을 벼재배 北限界, $5000^{\circ}\text{C} \cdot \text{day}$ 등치선을 벼 2期作栽培 北限界로 보고 있으며^{21,24)}, 이로부터 판단하여 볼 때 $2\times\text{CO}_2$ 氣候 조건하에서는 우리나라 중남부 지방 이하의 지역에서는 벼의 2期作栽培가 가능하며, 대관령(해발 820m) 정도의 산간지대까지 벼의 재배가 가능 하여질 것으로 보인다. 한편 제주도는 유효적산온도가 $6500^{\circ}\text{C} \cdot \text{day}$ 정도로 상승하여 아열대 또는 열대작물을 노지에서 재배하는 것이 가능하여질 것이다.

3) 水文條件의 變化

강수량, 증발, 토양수분 등의 水文條件은 자연 생태계나 농업생태계의 생산성에 큰영향을 미친다. 본 연구에서는 水文條件의 변화를 파악하기 위하여 복사건조지수(Radiative Dryness Index ; $RDI = Rn/LP$)를 계산하여 표 2에 나타내었다. 복사건조지수는 순복사량에 대한 강수량을 모두 증발시키는데 소요되는 에너지(LP)의 년간 총 순복사량(Rn)에 대한 비율을 나타내는 것으로서 氣候의 乾燥度를 나타내는 지표이며 이는 自然地理的 植生の 분포와 밀접한 관계를 가지고 있다⁹⁾. 복사건조지수가 커질수록 물 수지면에서 증발량이 증가하여 건조하여 지는 것을 뜻하는 것으로, 년중 복사건조지수는 지역에 따라서 변이가 크지 않으므로 전국을 평균하여 보면 例年氣候의 0.7에서 $2\times\text{CO}_2$ 氣候의 0.64로 약간 감소되는 것으로 추정되나 큰 차이는 아니며 계절별로 보면 겨울과 봄은 $2\times\text{CO}_2$ 氣候하에서 RDI가 비교적 큰 비율로 감소하여 例年氣候보다 습윤하여지는 것으로 추정되나 여름과 겨울은 水文條件에 큰 차이가 없을 것으로 보인다.

4) 自然植生の 純 1次生産力の 變化

대기중의 CO_2 증가에 따른 氣候변화로 인한 우리나라 식생의 생산성 변화를 검토하기 위하여 Uchijima et al²³⁾이 개발하여 國際生物計劃(International Biological Program, 1964~1972년)에서 全 世界的으로 조사된 자연식생의 순 1차생산력 자료를 이용하여 검증한 Chikugo 모델에 우리나라 26개 기상관측소의 자료와 이 관측소들의 $2\times\text{CO}_2$ 氣候 시나리오를 대입하여 순

Table 2. Seasonal distribution of radiative dryness index (RDI) under normal and $2 \times \text{CO}_2$ equilibrium climate in Korea.

Climate	Statistic	Spring	Summer	Autumn	Winter	Annual
Normal (A)	mean	1.50	0.60	0.62	0.22	0.70
	range	1.46~1.55	0.59~0.61	0.57~0.69	0.13~0.34	0.67~0.74
$2 \times \text{CO}_2$ (B)	mean	1.30	0.60	0.59	0.14	0.66
	range	1.26~1.35	0.59~0.60	0.54~0.66	0.06~0.27	0.63~0.70
B/A	mean	0.87	1.00	0.95	0.64	0.94

Table 3. Regional distribution of net primary productivity (NPP) of natural ecosystem under normal and $2 \times \text{CO}_2$ equilibrium climate.

Climate	NPP (ton/ha)	
	mean	range
Normal (A)	13.7	13.2~14.3
$2 \times \text{CO}_2$ (B)	13.2	12.7~13.9
A/B	0.97	0.96~0.97

1차생산성을 계산하여 표 3에 나타내었다. 예년 氣候하에서의 우리나라 자연식생의 순 1차생산성은 12.7~13.9ton/ha 범위에서 변하며, 대기중 CO_2 가 배증함에 따른 氣候變化에 의하여 3~4% 정도 감소하는 것으로 추정 되었다. 그런데 이 Chikugo model은 순 1차생산력을 수문조건 (RDI)과 순복사(Rn)의 변화만으로 순 1차생산력을 평가하므로 $2 \times \text{CO}_2$ 氣候 scenario에서 CO_2 증가에 따른 광합성 촉진효과는 고려하지 못하고 있다. 그런데 대기중의 CO_2 濃도가 2배로 증가 할 경우 순광합성속도는 25~45℃ 범위에서 1.7~1.8배 증가¹¹⁾하므로 이를 고려하면 우리나라 자연식생의 순생산성은 例年氣候에서보다 다소 증가될 것으로 판단된다.

그런데 일본의 경우는 본 연구에서와 동일한 방법으로 평가하였을때 전국적으로 평균 9%정도 증가 할 것으로 예측하였다²⁴⁾.

3. 水稻의 收量變化

1) 重回歸 模型에 의한 水稻 收量性 變化 評價 最適 重回歸 模型

최근의 水稻 품종 및 재배기술 수준을 그대로 적용하였을 때 例年氣候와 $2 \times \text{CO}_2$ 氣候하에서의 水稻 收量性을 비교·검토하기 위하여 重回歸 模型을 작성하였다. (표4)

우리나라 水稻의 년차에 따른 收量性의 변화는 7월, 8월, 9월의 평균기온의 년차에 따른 변화와

Table 4. Crop-climate regression model to predict rice yield (kg/10a) for each province of Korea.

Variable	Coefficient	Prob>F
INTERCEP	425.035000	0.0001
YEAR	-106.783690	0.0009
YEAR** 2	39.268669	0.0001
YEAR** 3	-5.118532	0.0001
YEAR** 4	0.283087	0.0001
YEAR** 5	-0.005619	0.0001
RCT** 2	0.01700	0.0029
DELC 8	8.30900	0.0937
DELC 9** 2	-18.94300	0.0001
DFN 7	8.72900	0.0025
DFN 9	8.25100	0.0750
DFN 8** 2	-10.90300	0.0001
DFN 9** 2	-6.01100	0.0914

NOTE :

YEAR denotes number subtracted 1968 from year
RCT denotes percentage covered by Tongil type varieties

DFL denotes departure from monthly mean temperature averaged over 8 weather stations located in each province (Suwon, Chunchon, Cheongju, Daejon, Jeonju, Kwangju, Taegu, Ulsan)

DFN denotes departure from normal monthly mean temperature

** 7, 8 and 9 suffixed at each variables mean July, August and September, respectively.

유의적인 관계가 있는 것으로 판단되었다. 각 지역 7월의 평균기온이 그 지역의 예년기온보다 1℃ 높아지면 수량은 8.7kg씩 증가하며, 8월과 9월의 평균기온 편차와는 2차곡선적인 관계가 있어 8월 기온은 例年氣候에서, 9월 기온은 예년보다 약 0.5℃ 높을때 최대의 수량을 나타내며, 이보다 낮아지거나 높아지면 收量性은 오히려 떨어지는 것으로 나타났다. 한편尹⁵⁾은 경기, 경북, 전북, 3個道를 대상으로한 연구에서 3개도 모두

8월의 평균기온이 水稻의 收量性에 가장 큰 영향을 주는 변수라고 하였으며 8월기온이 예년값보다 높거나 낮으면 수량에 負의 영향을 미친다고 하였다. 일본의 경우도 작황지수변이에 가장 크게 영향을 주는 요소는 7,8월 평균기온이며 7,8월 평균기온과 작황변이와는 2차곡선적 관계를 나타낸다고 하였다²⁵⁾.

收量變化

중회귀 모델에 각 道의 대표 관측소의 기상자료를 대입하여 추정 수량을 계산하였으며 경기도의 경우만을 실제 수량과 대비하여 그림 6에 나타내었다. 충남과 전북은 예측수량이 실제수량보다 낮게 추정되었으며 경남은 반대로 높게 추정되었는데 이는 모든 道가 기술수준이 같다는 가정하에서 회귀모델을 작성한 데서 오는 오차일 것으로 추정된다. 그러나 이들 道 역시 水稻 수량의 연차변화 경향은 이 회귀모델로 잘 추정이 되는 것으로 판단되었다. 또한 회귀모델에 이용하지 않았던 1988년과 1989년의 경우 1987년의 기술수준에서 각 년의 기상자료를 대입하여 예측하였을 때에도 앞서와 같은 경향이였다. 이 통계모델의 작성 목적이 氣候變化에 따른 收量性의 변화를 예측하는 것으로서 일부 도에서 절대수량의 예측에는 다소 과대 또는 과소 평가되는 경향은 있으나 연차에 따른 氣候變動에서 오는 收量性의 변화는 비교적 정확하게 예측하는 것으로 판단되어 연구 목적에 충분히 적용될 수 있을 것으로 판단된다.

2×CO₂ 氣候 scenario하에서 우리나라 水稻 수량의 변화를 현재의 기술수준에서 파악하고자 기술수준은 1987년도로 고정하고 이 回歸模型에 例年 氣候와 2×CO₂ 氣候 scenario를 대입하여 水稻 收量性을 예측한 것이 표 5이다. 例年 氣候하에서의

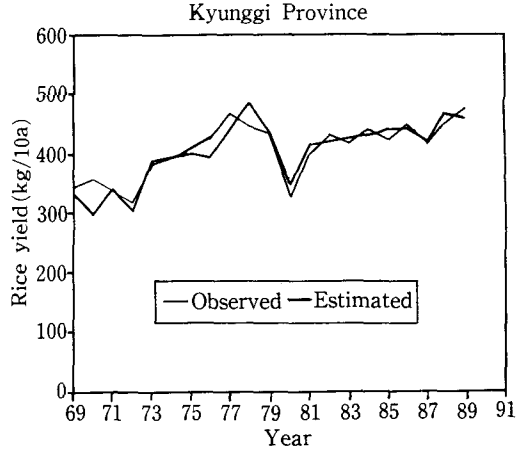


Fig. 6. Observed and estimated yield trend of rice in Korea.

도별 수량은 413~518kg/10a 범위에서 변하는 것으로 추정되었으며, 2×CO₂ 氣候에서는 236~341kg/10a로 추정되어 대기중 CO₂ 배증시에 예상되는 氣候변화는 우리나라의 水稻수량을 43%(강원)~34%(전남)정도 감수를 시킬 것으로 예측된다. 그러나 이 예측은 벼의 재배기술과 품종을 1987으로 고정하였으며 또한 CO₂ 증가에 따른 광합성촉진효과를 고려하지 않아 실제의 상황보다 과대 평가된 것으로 판단된다. Kimball¹⁶⁾이 약 400여편의 연구논문들을 종합한 바에 의하면 대기중 CO₂ 濃度 증가에 따른 個葉의 광합성촉진효과는 작물 수량증대에 직결되어 CO₂ 濃度가 2배로 되는 경우, C₃식물에서는 건물중이 평균 40%증가하고 C₄식물에서는 15%가 증가하였다고 한다. 이와 같은 CO₂ 증가에 따른 작물의 물질생산 촉진효과와 변화된 氣候에 적응하는 재배기술과 품종의 개발이 이루어지는 경우를 감안하면 水稻의 收量性 감소는 이보다 훨씬 적거나 오히려 현재보다 증대될 가능성도 있다.

Table 5. Polished rice yield (kg/10a) predicted under normal and 2×CO₂ equilibrium climate generated by GISS GCM

Province	Normal climate(A)	2×CO ₂ Climate(B)	(B/A) * 100
Kyunggi	467	291	62.3
Kangwon	413	236	57.1
Choongbuk	491	314	64.0
Choongnam	475	299	62.9
Chonbuk	475	299	62.9
Chonnam	518	341	65.8
Kyungbuk	484	308	63.6
Kyungnam	474	298	62.9

(2) 生長模型에 의한 水稻 收量變化 評價와 適應性 模擬實驗

氣候變化에 따른 收量變化

수원의 直播栽培에서 벼가 出芽하여 정상적으로 생장이 가능한 早限期(일평균기온 약 15°C)인 5월 10일 출아한 것으로 가정하여 화성벼와 팔금벼의 성장과 수량을 MACROS로 모의한 결과가 표 6이다. 수원의 例年氣候하에서 화성벼와 팔금벼의 출아에서 출수까지의 기간은 각각 42일, 55일, 수량은 각각 807kg/10a, 657kg/10a 이었다. 그러나 2×CO₂ 氣候(scenario)에서는 화성벼와 팔금벼의 영양생장기간은 각각 25일과 28일, 성숙기간은 10일, 19일 단축되어 지상부 건물중은 각각 39%와 12% 감소되었으며 수량은 화성벼는 37% 감소되었으나 팔금은 차이가 없었다. 팔금은 지상부건물 생산량은 많으나 수원의 例年氣候에서는 출수가 안전출수기 이내에 되지 못하여 성숙후기에 저온장애를 받아 收量성이 낮아진 반면 2×CO₂ 氣候 시나리오에서는 고온으로 생육기간이 단축되어 건물생산성은 다소 떨어지나 등숙장애는 받지 않기 때문인 것으로 사료된다. 이와 같이 현재의 재배시기와 현재의 수원지방 적응품종으로 2×CO₂ 氣候하에서 벼를 재배하는 경우 고온으로 인하여 영양생장기간과 등숙기간 모두가 크게 단축되어 수량은 40%에 가깝게 감소되어 앞에서 회귀모델로 추정된 결과와 매우 유사한 결과를 보였다. 대기중 CO₂ 濃도가 증가하는 경우 氣候가 온난화한다는 의견이 지배적이나¹³⁾, 이에 반대하는 의견도 많다^{12,14)}. 따라서 대기중 CO₂ 濃도는 2배로 증가하고, 氣候가 변화하지 않았을 때 (scenario 1)를 가정하여 화성벼에 대하여 성장을 모의실험한 결과 지상부건물

Table 7. Growth duration, biomass and economic yield of rice simulated under 2×CO₂ equilibrium climate (scenario) in Daegwanryong. The seedling emergence was fixed on May10.

Character	Odaebyeo	Hwaseong-byeo
Seedling emergence to heading (days)	86	74
Heading to maturity (days)	44	34
Seedling emergence to maturity (days)	130	108
Biomass yield (kg/ha)	794	850
Grain yield (kg/ha)	527	508

중은 1623kg/10a, 수량은 911kg/10a로서 例年氣候에서보다 16%, 13% 증가하는 것으로 예측되었다.

한편 대관령의 豫年氣候조건하에서는 유효·산온도가 약 2000°C·day 정도로 벼의 재배가 불가능하나 2×CO₂ 氣候하에서는 有效積算溫度가 약 3500°C 정도로 조생·중생종 벼의 재배가 가능하여질 것으로 보고, 조생종인 오대벼와 중생종인 화성벼를 5월 10일(평균기온 15°C) 출아한 것으로 간주하여 성장을 모의실험한 결과(Table7) 오대벼와 화성벼의 수량은 각각 527kg/10a와 508k/10a으로 추정되었으며 이는 수원의 例年氣候에서보다 낮은 수량인데 대관령의 2×CO₂ 氣候에서 출아기의 온도는 예년의 수원과 비슷하나 여름철은 기온이 높고 위도가 높아, 생육일수가 단축되었기 때문인 것으로 판단된다.

適應性 模擬實驗

氣候가 변화되면 이에 적응하기 위하여 재배방

Table 6. Growth duration, biomass and grain yield of rice simulated under normal and 2×CO₂ equilibrium climate in Suwon. The seedling emergence was fixed on May 10.

Character	Hwaseongbyeo			Palgeumbyeo	
	Normal	Scenario 1	Scenario 2	Normal	Scenario 2
Seedling emergence to heading(day)	100	100	75	120	92
Heading to maturity(day)	42	42	32	55	36
Seedling emergence to maturity(day)	142	142	107	175	128
Biomass yield(kg/10a)	1,396	1,623	850	1,527	1,346
Grain yield(kg/10a)	807	911	508	657	657

* Scenario 1 and scenario 2 denote normal climate with CO₂ doubled condition and GISS GCM generated 2×CO₂ equilibrium climate, respectively.

벼과 품종의 특성이 달라져야 할 것으로 판단된다. 따라서 현재의 품종으로 출아기를 달리하여 재배하였을 때 $2\times\text{CO}_2$ 氣候하에서의 적응성 여부와 출아에서 출수까지의 기간을 100일로 고정한 가상 품종을 생각하였을 때 수량의 변화를 검토하였다(그림 7~10).

수원의 例年氣候에서 일평균기온이 15°C 이상이 되어 출아한 벼가 안전하게 생육할 수 있는 시기는 5월 10일경이며 $2\times\text{CO}_2$ 氣候에서는 이보다 30일 빠른 4월 10일경이다. 이들 시기부터 15일 간격으로 출아기를 늦추어 가면서 생장을 모의실험한 결과 화성벼는 $2\times\text{CO}_2$ 氣候조건하에서 어느 시기에 출아를 하여도 생육일수가 현재의 적기 출아시의 생육일수(142일)보다 크게 짧았으며 이에 따라 지상부건물중과 수량 모두 크게 낮았다. 한편 感光性이 예민하고 感溫性이 둔한 팔금벼⁶⁾의 경우는 $2\times\text{CO}_2$ 氣候에서 4월 10일 및 4월 25일 출아한 경우는, 수원에서 화성벼를 5월 10일 출아한 경우와 생육기간과 지상부건물중은 비슷하였으나 수량은 약 30%정도 감소하였으며 수량

이 가장 높았던 5월 10일 출아에서도 19%정도 수량이 낮았다. 이와 같이 전 생육기간과 지상부 건물생산은 비슷하였으나 收量性이 낮은 원인은 고온으로 인하여 등숙기간이 짧아지는 것이 그 원인이었다. 이와 같이 현재의 품종들을 그대로 $2\times\text{CO}_2$ 氣候에서 재배하게 되면 생육기간이 단축되어 수량이 감소되므로 어느시기에 출아하더라도 출아에서 출수까지의 기간이 100일로 일정한 가상의 품종을 생각하여 출아기를 이동시켜 가면서 생장을 모의실험 하였다. 이 경우 4월 25일에서 5월 25일 사이에 출아하면 例年氣候에서 5월 10일 출아한 화성벼보다 地上部乾物生産量은 월등히 많았으나 수량은 출아기를 현재보다 15일 늦춘 5월 25일 출아에서만 840kg/10a로 4%정도 증수하였다.

한편 대관령의 경우 오대벼와 화성벼의 출아기를 5월 10일부터 15일간격으로 옮겨가면서 생장을 模擬實驗 한 결과(그림 10) 수원지방의 예년 적정 出芽期인 5월 10일 출아에서 생장량과 수량

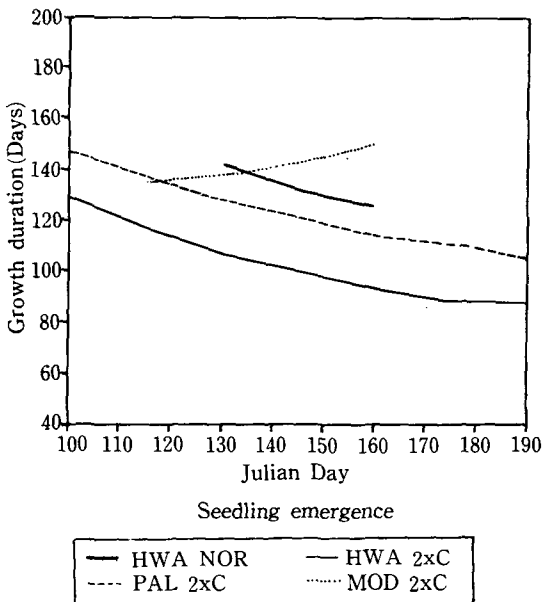


Fig. 7. Growth duration in response to date of seedling emergence simulated under normal climate(NOR) $2\times\text{CO}_2$ equilibrium climate ($2\times\text{C}$) in three rice varieties; Hwaseongbyeo(HWA), Palgeum(PAL), and imaginary one (MOD) having the same characteristics with Hwaseongbyeo except growth duration which were fixed as 100 days from seedling emergence to heading.

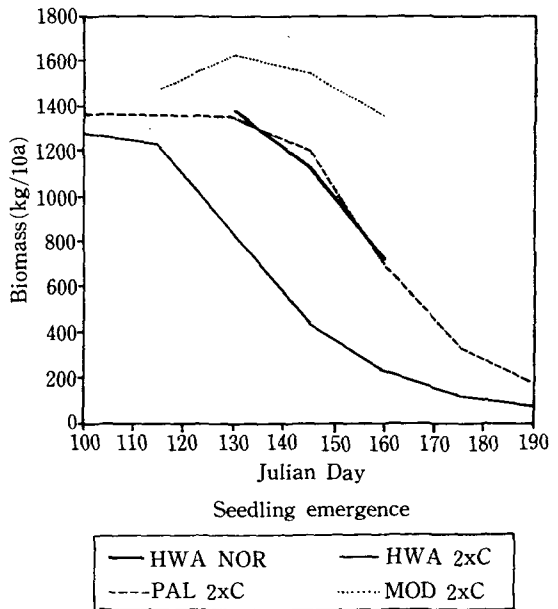


Fig. 8. Biomass yield in response to date of seedling emergence simulated under normal climate(NOR) and $2\times\text{CO}_2$ equilibrium climate($2\times\text{C}$) in three rice varieties; Hwaseongbyeo(HWA), Palgeum(PAL) and imaginary one (MOD) having the same characteristics with Hwaseongbyeo except growth duration which were fixed as 100 days from seedling emergence to heading.

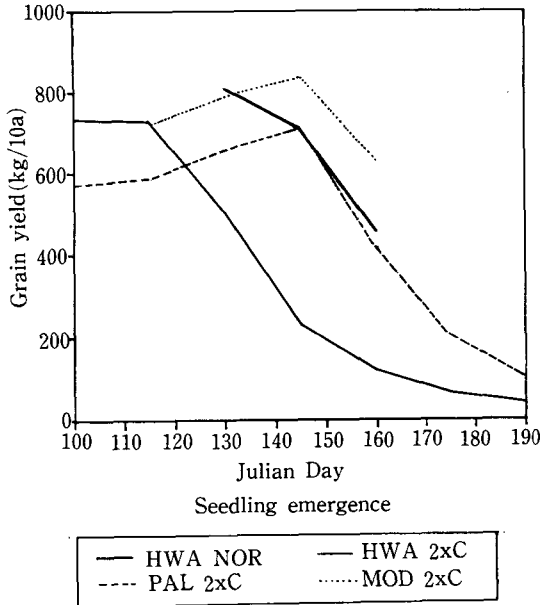


Fig. 9. Grain yield in response to date of seedling emergence simulated under normal climate (NOR) and $2\times\text{CO}_2$ equilibrium climate ($2\times\text{C}$) in three rice varieties; Hwaseongbyeo (HWA), Palgeum (PAL) and imaginary one (MOD) having the same characteristics with Hwaseongbyeo except growth duration which were fixed as 100 days from seedling emergence to heading.

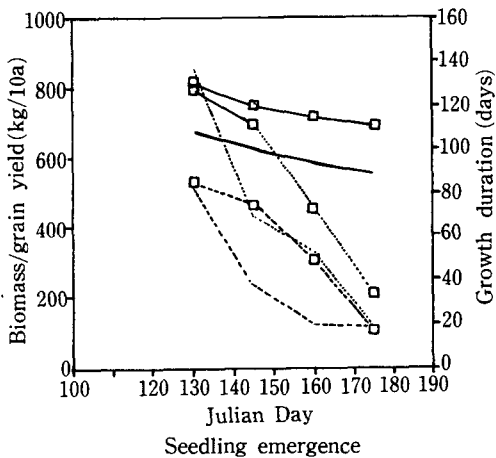


Fig. 10. Growth duration (—) and biomass (...) and grain yield (---) in response to date of seedling emergence simulated under $2\times\text{CO}_2$ equilibrium climate in Daegwanryong for Odaebyeo (□) and Hwaseongbyeo.

Table 8. Plant types with different leaf angle distribution postulated for the dynamic simulation of rice growth and yield.

Plant type	Leaf angel distribution			Remark
	$0^\circ\sim 30^\circ$	$30^\circ\sim 60^\circ$	$60^\circ\sim 90^\circ$	
Type 1	0.134	0.366	0.50	Spherical
Type 2	0.107	0.268	0.625	
Type 3	0.08	0.170	0.750	IR 8
Type 4	0.04	0.085	0.875	
Type 5	0.01	0.040	0.950	
Type 6	0	0	1	

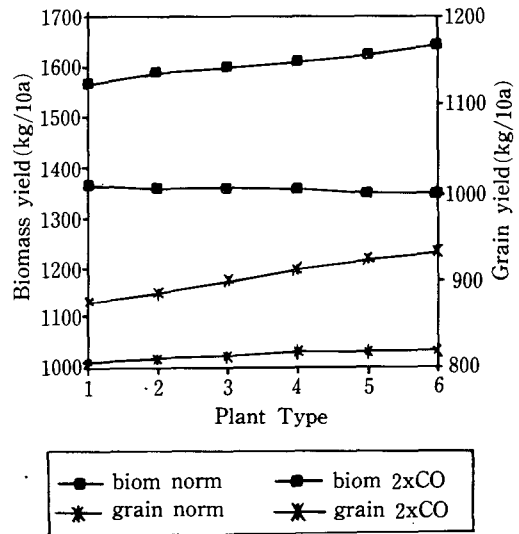


Fig. 11. Response of biomass and grain yield to the modification of plant type as in table 8, simulated under current atmospheric CO_2 concentration (norm), and doubled CO_2 condition ($2\times\text{CO}_2$) at normal climate in Suwon.

이 가장 많았으며 이보다 늦어질 경우 수량은 급격히 감소하였는데 이는 등숙기에 기온이 낮아 등숙이 제대로 되지 못하기 때문이다. 일사량은 변하지 않고 氣候가 온난하여지고 대기중 CO_2 濃度가 높아지면 ($2\times\text{CO}_2$ scenario) 초기생육이 왕성하여 조기에 限界葉面積指數에 달하여 이 시기 이후부터는 태양광이 群落의 성장 제한요인이 될 것으로 판단되므로 畝락의 수광조건을 달리하기 위하여 畝락의 葉경사각 배치가 표 9에서와 같고 다른 특성은 화성벼와 같은 假想의 品種을 생각하여 수원 的 例年氣候하에서 5월 10일 출아한 것으로 가정하여 현재의 대기중 CO_2 濃度와 倍增된 상태에서의 성장을 모의 하였다. 그림 11

에서 보면 현재의 CO₂ 濃度하에서는 草型이 직립화됨에 따른 지상부건물중과 수량의 증가정도는 크지 않았으나 CO₂ 濃度가 2배인 조건에서는 건물중과 수량이 直立草型化됨에 따라 뚜렷이 증가하는 경향이였다.

이와 같은 결과들로부터 類推하여 볼 때 현재의 품종중에서 2×CO₂ 氣候하에서 적응하는 품종을 선택하여 재배시기만을 이동하여 적기에 재배한다 하더라도 收量性은 현재보다 감소될 것으로 보인다. 그러나 感溫性은 매우 둔하고 출수한 제일장이 짧고 감광성이 매우 예민하여 고온하에서도 생육단축정도가 적은 품종이나 기본영양생장성이 큰 품종을 육성하여 재배시기를 지금보다 늦추어 등숙적온기에 출수할 수 있는 품종을 육성 재배하는 경우는 지금보다 收量性이 높아질 것이며 또한 IR8보다 잎이 더 직립한 草型의 특성을 부여하는 경우 수량의 증대는 더 클 것으로 판단된다.

한편 CO₂ 濃度가 높아지면 광합성속도는 증가하고 호흡속도는 감소하여 순광합성이 증가한다는 것은 이미 定量的으로 잘 밝혀져 있어¹¹⁾ 이를 모의실험에 고려하였으나 온도상승에 따른 광합성물질의 각 기관으로의 배분의 변화에 대해서는 지금까지 충분히 연구가 되어 있지 못하여¹²⁾ 모의실험에 감안하지 못하였다. CO₂와 온도증가에 따라 동화물질의 각 기관으로의 배분이 달라질 경우 모의실험에 의한 영향평가 결과 또한 달라질 것이므로 보다 정확한 평가와 대책마련을 위해서는 이에 대한 연구가 이루어져야 할 것으로 판단된다.

結果 要約 및 結論

대기중의 CO₂ 濃度는 化石燃料의 使用增加와 山林破壞로 인하여 급속히 증가하여 현재 산업화 이전보다 25%정도 증가한 353ppmv에 달하였다. 현재와 같이 화석연료의 사용량이 매년 2%씩 증가한다고 가정할 때 21세기 중반이 되면 600ppmv에 접근할 것으로 예상하고 있다. 이와 같이 대기중의 CO₂ 濃度가 2배 증가하는 경우 지구의 온실효과 증대로 인하여 지구표면의 평균 기온은 3.0±1.5℃ 상승할 것으로 예상된다. 이와같은 氣候변화는 자연식생의 분포와 생산력을 변화시킬 뿐만아니라 農業氣候資源을 변화시켜

농업생산성에도 크게 영향할 것이다.

본 연구에서는 미국 항공 우주국의 Goddard 우주 연구소의 大氣大循環 모델로 예측한 2×CO₂(630ppmv)하에서의 氣候 시나리오에 근거하여 대기중 CO₂ 濃度가 2배로 되었을 경우 우리나라 氣候, 農業氣候資源, 水稻의 生産性에 미치는 영향을 검토하였다.

본 연구에서 얻어진 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 2×CO₂ 氣候는 우리나라 例年氣候에 비하여 기온은 연평균 3.5~4.0℃ 상승하며, 상승정도는 가을이 가장 낮고(3.3~3.8℃), 봄(3.8~4.0℃)이 가장 높은 것으로 예상되었다. 연 총강수량은 동남부지방을 제외하고는 0~20%정도 증가할 것으로 예상되는데 증가정도는 북서쪽으로 갈수록 커진다. 계절별로는 겨울(-5~5%)에 강수량 변화가 가장 적고 봄철(0~20%)이 가장 클 것으로 예상되었다.
2. 作物期間(일평균기온 15℃이상 일수)은 지역에 따라 예년(1951~1980)보다 30~50일정도 연장되며, 有效積算溫度(평균기온 10℃이상 일평균기온 적산치)는 1200~1500℃·day 증가하여 유효적산온도의 等值線은 300~400km 북상하고 高度로 보아도 600~700m 정도 높아질 것으로 예상된다. 중남부이하 평야지대는 유효적산 온도가 5000℃·day이상으로 되어 벼의 2기작재배도 가능하여질 것으로 예상된다.
3. 輻射乾燥指數(RDI=Rn/ℓP: Rn은 순복사량, ℓ은 증발잠열, P는 강수량)로 볼때 1년 전체로 보면 水文條件에서는 큰 변화가 예상되지 않으나 봄철에는 지금보다 덜 건조해질 것으로 보인다.
4. 자연식생의 순 1차생산력을 Chikugo model로 계산하였을 때 지역에 따라 예년기후에서 보다 3~4%정도 감소될 것으로 보이나 이 모델에서 고려하지 않은 CO₂ 증가에 따른 광합성 촉진 효과를 감안하면 순 1차생산력은 지금 보다는 증가될 것으로 보인다.
5. 統計 經驗 모델에 의하여 수도의 收量性 변화를 1987년도의 기술수준에서 평가한 결과 2×CO₂ 氣候下에서는 例年氣候에서 보다 34~43%의 減收가 예측되었다.
6. 水稻生長 simulation 모델에 의하여 例年氣候下에서 직파재배시 수원의 적정 출아일인 5월 10일(평균기온 15℃)에 출아한 것으로 가정하여 兩

氣候條件에서 화성비의 수량을 예측한 결과 $2 \times \text{CO}_2$ 氣候下에서 37% 감소되어 통계 모델에 의한 예측과 비슷하였다. 이와 같이 수량이 감소되는 주요인은 고온으로 발육속도가 빨라져 영양생장기간과 등숙기간이 크게 단축되기 때문이었다. 그러나 대관령에서는 例年氣候에서는 오대벼와 화성비의 재배가 불가능하나 $2 \times \text{CO}_2$ 氣候下에서는 5월 10일 출아하면 오대벼 527kg/10a, 화성벼 508kg/10a 정도의 수량이 예측되었다.

7. 화성벼는 팔금을 $2 \times \text{CO}_2$ 氣候하에서 어느시기에 재배하더라도 例年氣候의 5월 10일 출아 이상의 수량을 기대할 수 없으나, 다른 특성은 화성벼와 같고 출아에서 출수까지의 기간이 100일정도(5월 10일 출아시 수원의 例年氣候에서의 출수기간) 유지되는 품종을 가상하였을 때 例年氣候보다 15일정도 늦게 출아하면 840kg/10a로 4%정도 증수가 가능하였다.
8. CO_2 速度가 2배로 증가한 조건에서는 草型이 直立化 될수록 수량이 높아졌으며 그 증가정도는 현재의 CO_2 濃度하에서 보다 월등이 컸다.
9. 위와 같은 결과들을 볼 때 大氣中 CO_2 濃度가 2배로 되고 이에 따라 氣候가 변하는 경우 感溫性이 둔하고 반면에 팔금보다 限界日長이 더 짧고 感光性이 아주 예민한 품종이나 基本營養生長性이 길어 생육기간을 충분히 확보하고 草型이 IR8 정도보다도 훨씬 직립인 품종을 육성하여 등숙적온기에 재배하는 경우 收量性은 지금보다 크게 증대될 가능성이 있는 것으로 보인다.

引 用 文 獻

1. 기상연구소, 1986. 우리나라의 태양복사에너지 분포에 관한 연구(I). 134pp
2. 金光植, 1975. 農業氣象學. 鄉文社. 331pp
3. 과학기술처, 1990. 한반도 氣候변화 감시 및 이상기상에 관한 연구(I). 421pp.
4. 李殷雄, 1985. 우리나라 水稻作의 豐凶과 氣象環境과의 關聯性에 關한 研究. 서울大 農學研究 9(1) 別冊 : 79-89
5. 윤진일, 1990. 국내농업생산에 대한 세계적 氣候변동의 일차효과 분석. 한국학술진흥재단연구보고서. 39pp
6. 이변우, 1991. 수도의 생육과 수량의 Dynamic Simulation Model의 개발. I. 수

- 도발육예측모델의 개발. 한국학술진흥재단 연구보고서. 27pp
7. 중앙기상대, 1982. 한국氣候表 제1권 氣候예년값(1951-1980). 368pp
8. 중앙기상대, 1988. 표고별 농업氣候圖. 103pp
9. 坪井八十二, 1977. 農業氣象 ハントブック. 養賢堂, 東京. 854pp
10. Chang, Jen-Hu, 1970. Global distribution of net radiation. Ann. Assn. Amer. Geogr. 60 : 340-351.
11. DOE, 1990. Effects of air temperature on atmospheric CO_2 -plant growth relationship. DOE. ER-4050T. 61pp
12. Essex, C., 1986. Trace gases and the problem of false invariants in climate model-a comment. Climatol. Bull. 20(1) : 19-25.
13. Hansen, J.E., 1988. The greenhouse effect on current global temperature and regional heat waves. Hearings in United States, House of Representatives, Committee on Energy and Commerce. Subcommittee on Energy and Power.
14. Idso, S.B., 1985. The search for global CO_2 green house effects. Environ. Conserv. 12 : 29-35.
15. Jenne, R., 1990. Information about several climate model runs. NCAR/EPA Doc7
16. Kimball, B.A., 1983. Carbon dioxide and agriculture yield; An assemblage and analysis of 430 prior observations. Agron. Jour. 75 : 779-788.
17. Melillo, J.M., T.V. Callaghan, F.I. Woodward, E. Salati and S.K. Sinha, 1990. Effects on ecosystem. page 283-310 in climate change. The IPCC Scientific Assessment.
18. Mitchell, J.F.B., S. Manabe, V. Meleshko, and T. Takioka, 1990. Equilibrium climate change and its implications for the future. page 131~173 in climate change, The IPCC Scientific Assessment.
19. Neftel, A.E., Moor, H. Oeschger and B. Stauffer, 1985. Evidence from polar ice cores for the increase in atmospheric CO_2 in the past two centuries. Nature 315 : 45-47.
20. Penning de Vries, F.W.T., D.H. Jansen, F.H. M. ten Berge and A. Bakema, 1989. Simulation

- of ecophysiological processes of growth in several annual crops.
21. Seino, H., 1989. Global warming and its effect on food production. page 19~25 in Agriculture and environment. Natl. Inst. of Agroenviron. Sci.
 22. UNEP/GEMS, 1987. The greenhouse gasses. UNEP/GEMS Environmental Library No. 1 : 70 pp.
 23. Uchijima, Z. and H. Seino, 1985. Agroclimatic evaluation of net primary productivity of natural vegetations (1) Chikugo model for evaluating net primary productivity. J. Agr. Met. 40(4) : 343-352.
 24. Uchijima, Z. and S. Seino, 1988. Probable effects of CO₂-induced climatic change on agroclimatic resources and net primary productivity in Japan. Bull. Natl Inst. Agro-Environ. Sci. 4 : 67-88.
 25. Uchijima, Z., 1981. Yield variability of crops in Japan. Geojournal 15(2) : 151-164.
 26. Watson, R.T, H. Rhode, H. Oeschger and U. Siegenthaler, 1990. Green house gases and aerosols. page 1~40 in climate change. The IPCC Scientific Assessment.