

제1차년도 현장애로
기술개발 사업보고서

시설 내 최적 재배환경구현을 위한 자동제어 기술개발

Development of control Logic for Greenhouse Climate Optimization

연구기관

서울대학교 농업생명과학 대학

농 립 수 산 부



제 출 문

농림수산부장관 귀하

본 보고서를 “시설내 최적 재배환경 구현을 위한 자동제어 기술개발”
과제의 제1년차 보고서를 제출합니다.

1995년 12월 일

주관연구기관명 : 서울대학교 농업생명과학대학

총괄연구책임자 : 이 변 우

연 구 원

농업과 컴퓨터 : 조 홍 석

미 래 전 자 : 김 시 정

연 구 보 조 : 남 택수, 명 을재, 한 상준,
김 시동, 김 수형, 이 정양,
정 이호, 윤 미란, 승 병숙

요 약 문

I. 제 목

시설내 최적 재배환경 구현을 위한 자동제어 기술개발

II. 연구개발의 목적 및 중요성

우리나라의 시설재배 면적은 정부의 적극적인 지원 정책으로 최근 들어 급격한 성장을 보이고 있으나 시설재배작물의 생산성은 선진국에 비하여 매우 낙후되었을 뿐만 아니라 또한 경영비의 과중으로 채산성이 낮다. 생산성과 채산성이 낮은 원인은 온실환경 관리기술의 낙후로 인하여 작물의 생장과 경영비를 고려한 온실의 최적 환경관리가 이루어지지 못하고 있기 때문으로 생산성과 품질을 증진시키고 난방비 등 경영비를 줄여 수익성을 극대화할 수 있는 과학적인 재배환경 제어 기술의 개발은 매우 중요한 당면과제이다. 본 연구는 시설 작물의 생산성과 수익성을 위한 시설내 복합환경의 최적조건 탐색과 이에 근거한 자동제어 논리의 개발과 이를 실용화하는데 목적이 있다.

III. 연구개발내용 및 범위

본 연구는 시설재배 작물의 생산성과 수익성 향상을 위한 시설내 복합환경 제어논리의 개발 및 실용화를 최종목표로 하고 있으며 연구개발 내용과 범위는 다음과 같다.

- 작물생장의 극대화과 에너지 절감을 위한 시설내 온도·습도 환경제어 논리의 개발.
- 작물생장의 극대화과 에너지 절감을 위한 CO₂ 시비 제어 논리의 개발
- 작물체의 수분요구도에 부응한 최적 관개 제어논리의 개발
- 위 사항을 종합한 복합재배환경 자동제어 논리의 개발

연구개발기간 3년중 제 1차년도 연구개발 내용 및 범위는 다음과 같다.

1. 실험용 온실 신축 및 제어 시스템 제작

- o 실험용 온실 제어기 제작
- o 실험용 온실제어 소프트웨어 개발

2. 온실 미기상 예측모델 개발

- o 온실 외부의 온도, 습도, 광, 바람 등의 변화에 따른 온실내의 미기상 변화 예측 모델의 이론적 설계
- o 미기상 모델의 매개변수정량화 검증을 위한 환경계측

3. 시설재배 토마토의 생육 모델 개발

- o 온실내 일사량, 온도, 습도, CO₂농도 등을 입력변수로 하는 토마토 생육 모델의 이론적 설계
- o 생육 모델의 매개변수 정량화 및 검증을 위한 토마토 재배실험

4. 시설작물 관개모델 개발

- o 경직경(stem diameter)측정장치 개발
- o 경직경 변화와 식물체 생리적 상태와의 관계 규명

IV. 연구개발 결과 및 활용에 대한 건의

1. 온실환경 및 토마토 재배 실험을 위한 플라스틱 온실(70m²/동) 4개동을 신축하였으며 온실 환경제어기 및 제어 프로그램을 개발 제작하였고, 이는 2, 3차년도 연구에 계속 이용될 것임.

2. 온실을 지상부 8층 지하부 10층으로 구분하여 각 층에서의 에너지 및 물질 수지를 근간으로 하는 온실미기상예측모델의 이론적 설계를 완료하였으며 일부 모듈(온실의 일사량 투과모델)의 프로그램을 완성하여 검증한 결과 적합도가 매우 높았다.

한편 모델의 파라미터 추정과 검증을 위한 봄에서 여름까지의 온실 내외의 기상관측이 완료되었으며 현재 가을에서 겨울의 관측이 진행되고 있다. 아울러 모델의 프로그램이 현재 진행되고 있음.

3. 온실내부의 온도, 습도, CO₂, 일사량, 풍속 등을 입력변수로 하여 토마토의 잎, 줄기, 과실 등의 생장과 잎의 출현, 화방과 마디의 형성, 개화, 착과 등 발육을 예측할 수 있는 토마토 생육모델의 이론적 설계가 완료되어 모델을 프로그램하고 있는 중이며, 모델의 parameter 추정을 위한 봄에서 여름철 토마토 재배실험이 작기에 완료되었으며, 가을에서 겨울 작기(9월 29일 정식)에는 온실의 온도, CO₂농도 차이에 따른 토마토 성장·발육 실험이 완료단계에 있다. 다양한 조건에서 모델의 예측정확도를 높이기 위하여 2차년도에도 토마토 재배환경에 따른 성장 반응실험이 계속 추진될 것이다.

4. 시설재배 토마토의 최적 관개시기 및 관개량 결정을 위하여 토마토 경직경 미소 변화 측정 장치를 스트레인게이지를 이용하여 제작하였으며, 제작된 경직경 측정장치는 토마토 줄기의 경시적 미소 변화는 정확한 측정에 이용될 수 있는 것으로 판단되었다. 한편 이를 이용하여 충분한 토양 수분조건에서 토마토의 경직경 변화와 증산량 변화의 관계를 검토한 결과 증산량이 최대가 되는 시기에 하루중 경직경이 최소가 되었으며 오전 10시경에 최대가 되어 경직경의 변화는 식물체내의 수분상태를 잘 반영하는 것으로 판단되었다. 경직경 변화를 기준으로 관개시기를 판단하기 위해서는 경직경 변화와 토양수분, 식물체의 기공저항, 수분포텐셜 등과의 관계가 구명되어야 하며 이를 위하여 현재 토양수분변화와 경직경 변화와의 관계 규명실험이 진행되고 있다.

SUMMARY

I . Title

Development of Control Logic for Greenhouse Climate Optimization

II . Objectives and Significance

The horticultural crop production in greenhouses have been increasing very rapidly owing much to the financial subsidy policy of the government. However, the farmer's income is not satisfactory because of the low crop productivity and heavy management cost. The low productivity and high cost of management are mainly due to the failure of optimum control of the greenhouse environment of which technologies have been developed poorly. Thus, the development of control logic to optimize the greenhouse environment is needed urgently for the realization of high productivity and cost cut-down in greenhouse crop production.

The Objectives of the project are a) to develop the searching logic for the optimum greenhouse climate to maximize the crop productivity and to minimize the control cost, and 2) to develop the control algorithm for the realization of optimum greenhouse climate.

III. Research Scopes and Perspectives

This research project aims at developing the methods of greenhouse climate optimization for the enhancement of crop productivity and control cost effectiveness, and the control algorithms. The overall scopes of the project are as follows;

- o Development of control logic for the optimization of air temperature and humidity
- o Development of carbon dioxide enrichment strategy for optimal crop growth and cost down
- o Development of irrigation control logic based on the crop water demand.
- o Development of integrated control algorithm for greenhouse climate optimization.

Major objectives in the first year of the project consist of designing the greenhouse microclimate and crop growth model, acquiring the greenhouse microclimate data and the crop growth and development data for the model parameterization and calibration, and developing the gauge for the measurement of stem diameter microvariation.

1. Construction of plastic greenhouse and control system for the experiments
 - o Construction of greenhouse plastic greenhouse
 - o Development of greenhouse climate controller
 - o Development of climate control software
2. Development of greenhouse microclimate model
 - o Designing the theoretical model to simulate the microclimate by using the outside weather variables as forcing variables
 - o Measurement of microclimate inside and outside the greenhouse to parameterize and calibrate the model
3. Development of greenhouse crop model
 - o Designing the theoretical model to simulate the crop growth and development in the greenhouse

- o Measurement of crop growth and development in response to various environmental condition to parameterize and calibrate the crop model

4. Development of irrigation control model

- o Designing and manufacturing the gauge to measure the microvariation of stem diameter

- o Investigation of the relationship between the microvariation of stem and the crop physiological parameters and plant water status

IV. Results and Suggestions

1. Four units of plastic greenhouse(72m²/unit) equiped with climate controller and algorithms were constructed for the experiments, and a series of experiments for microclimate acquisition and crop response to environmental variations were and is being carried by using the greenhouse.

2. The theoretical microclimate model based on the energy and mass balances in the greenhouses, which were divided into 8 above-ground and 10 soil layers, were designed. The model was composed of several modules simulating the physical processes in the greenhouse. The module for solar radiation penetration through the cover layers were programmed and calibered and performed the realistic simulation of solar radiation inside the greenhouse. The other modules are under programming. The microclimate data inside and outside the greenhouse for the model parameterization and calibration were collected in spring to summer season and is being collected for the fall and winter season.

3. The mechanistic crop growth and development model were designed. to simulate the growth of stem, leaf, root and fruit, and the development of leaves, leaf area, flowers and fruits by using the weather data inside the greenhouse as forcing variables. A series of experiments for the model parameterization and calibration were conducted during spring to summer season, and are being carried out during fall to winter season. The growth and development data were collected under variable temperature and carbon dioxide concentration. For the

completion of the model, much more crop growth and development data should be collected under various environmental conditions, and thus, experiments measuring the crop growth and development under various environmental conditions are going to be carried in the 2nd year of the project.

4. For measuring the microvariation of stem diameter due to crop water status, a measuring device was developed by using strain gauges. The devices were accurate enough to be utilized in measuring the microvariation of the stem diameter. The stem diameter showed the global increase reflecting stem growth and the diurnal changes, being maximum in the morning and minimum in the early afternoon, under ample soil water condition. The time of maximum shrinkage coincided with the time of maximum transpiration, reflecting the plant water status well. To decide the accurate timing of irrigation based on stem diameter variation, The relationship between stem diameter variation, and crop water status and physiological parameters should be elucidated. Thus, experiment to relate the stem diameter change with crop physiological parameter is being carried out by disposing plants to various soil water condition.

목 차

제 1 장 서 론

제 1 절 연구개발의 필요성	13
1. 연구의 배경	13
2. 필요성	14
제 2 절 현기술상태의 취약점	15
1. 온습도 조절	15
2. CO ₂ 시비	15
3. 관개	15
제 3 절 연구 목적과 범위	16

제 2 장 실험용 온실제어 시스템의 제작

제 1 절 시스템의 구성	17
제 2 절 소프트웨어 개요	18
제 3 절 제어 논리	22
제 4 절 하드웨어 개요	30
제 5 절 제어항목 및 센싱항목	31
제 6 절 온실 계전함 사양	32

제 3 장 온실 미기상 예측모델 개발

제 1 절 서 언	34
제 2 절 모델의 설계	35
1. 모델의 가정	35
2. 온실의 에너지 flux와 수지	35
3. 모델의 수치 해법	52

제 3 절 모델 검증을 위한 기상관측과 모델 검증	54
1. 기상 관측	54
2. 기상관측 결과 및 모델 검증	55
제 4 장 토마토 생장 모델의 개발	
제 1 절 서 언	62
제 2 절 토마토 생장모델	63
1. 군락생장율	64
2. 기관의 분화, 발육	67
제 3 절 토마토 생장모델 매개변수 정량화 및 모델 검증을 위한 재배 실험	69
1. 실험재료 및 방법	70
2. 실험결과	71
제 5 장 생체정보를 이용한 토마토 최적 관개모델의 개발	
제 1 절 서 언	111
제 2 절 경직경 측정장치의 개발	111
제 3 절 경직경 변화와 일사량 및 증산과의 관계	115
1. 실험재료 및 방법	115
2. 실험결과	116
제 4 절 결 론	118
참고문헌	119
부 록	127

CONTENTS

Chapter I. Introduction

Section 1. Need for research and development	13
1. Research background	13
2. Need	14
Section 2. Weakness of current technology	15
1. Temperature and humidity control	15
2. CO ₂ enrichment	15
3. Irrigation	15
Section 3. Objectives and scope	16

Chapter II. Greenhouse control system setup for experiment

Section 1. Overall feature of controller system	17
Section 2. Outline of software	18
Section 3 Control Algorithm	22
Section 4. Hardware	30
Section 5. Control and sensing item	31
section 6. Specification of controller box	32

Chapter III. Development of greenhouse microclimate model

Section 1. Introduction	34
Section 2. Model design	35
1. Assumption of model	35
2. Energy flux and balance	35
3. Method of solution	52
Section 3. Microclimate measurement for model calibration	54
1. Measurement of climate	54
2. Results and model calibration	55

Chapter IV. Development of tomato growth model	
Section 1.. Introduction	62
Section 2. Design of growth model	63
1. Daily crop growth rate	64
2. Organogenesis and development	67
Section 3. Experiment for model parametrization and calibration	69
1. Materials and method	70
2. Result and discussion	71
Chapter V. Development of Irrigation model	
Section 1. Introduction	111
Section 2. Development of stem diameter gauge	111
Section 3. Relationship between stem diameter variation and transpiration	115
1. Materials and methods	115
2. Results	116
Section IV. Conclusion	118
REFERENCES	119
APPENDIX	127

제 1 장 서 론

제 1 절. 연구개발의 필요성

1. 연구의 배경

WTO출범에 따른 농산물 교역의 국제적 자유 경쟁 체제에 대응하기 위하여 농업 기반시설 확충, 생산규모의 적정화, 생산시설의 자동화, 생산물의 고품질화, 유통구조의 혁신적 개선 등 당면한 문제들이 산적해 있으며 이를 해결하기 위해서는 보다 체계적이고 과학적인 기술개발이 진행되어야 한다. 시설채소의 경우 생산구조의 개선과 생산성 향상을 통하여 생산원가를 낮추고, 고품질의 상품을 연중 생산할 수 있다면 값싼 해외 상품의 유입을 차단하고 우리의 채소 생산농가를 보호할 가능성이 크다고 할 수 있다. 정부는 채소의 시설재배가 국제경쟁력이 있다고 판단하여 1992년부터 대규모 예산을 편성해 농민의 현대화 시설재배를 지원하고 있으나 이 같은 국가적 시설재배 장려정책 이면에는 무분별한 해외 자재의 수입으로 인한 외화낭비 및 유지보수의 어려움, 최적의 재배조건을 유지하지 못하고 단순한 교과서적 제어만으로 일관함으로 생기는 생산물의 생산성 및 품질의 낙후, 비 효율적 냉난방 관리로 인한 경영비의 압박, 지역기상조건을 고려한 적기적작 기준의 미비, 토경재배 및 수경재배에 대한 과학적 재배기준 미비, 등 체계적으로 개발되어야 할 기반기술이 산적한 상태이다.

또한 시설재배는 노지재배와는 매우 다른 환경 속에서 작물을 생산하기 때문에 우리의 고유한 기상 환경 조건과 재배환경을 과학적으로 평가·분석하여야 하며, 특히 노동력을 적게 들이고 생산원가를 낮추면서도 생산성의 제고와 생산물의 고품질화를 달성할 수 있는 자동화 재배기술의 선진화가 요구되는 시점이라 할 수 있다.

한편 화란 등 선진 농업국들은 우리의 시설재배자동화기술과 관련 자재산업 후진성을 벗어나지 못한 틈을 이용해 그들의 상품을 본격적으로 국내에 판매하려 안간힘을 쏟고 있다. 그들의 상품은 오랫동안 많은 연구와 개발을 거쳐 나온 상품이기에 우리의 기술에 비해 한 단계 앞섰다는 점은 부인할 수 없으나 우리나라 특유의 기상 조건과 품종, 그리고 재배법에 비추어 한계점을 갖고 있어 무분별한 해외상품의 도입보다는 선진기술을 도입·접목하여 우리의 기상조건, 작물, 재배형태에 맞는 우리고유의 기술체계를 확립하는 것이 바람직하다.

2. 연구개발의 필요성

우리나라가 시설 재배 작물의 생산성은 매우 낙후되어 있음. 토마토의 경우 1990년 기준으로 단위면적당 생산량이 시설+노지재배의 경우 연평균 8,606Kg/10a로서 화란의 43,000Kg/10a, 일본의 15,662Kg/10a에 비해 각각 1/5배, 1/1.8배의 생산성에 머무르고 있으며 생산성이 낮은 이유는 작형의 차이, 시설과 관리기술의 낙후 때문이다.

따라서 시설내 최적재배법이 정립되어야 하며, 농가의 시설재배의 경영수지 면에서도 노동력·난방비등 경영비를 최소화하고 수확량과 품질을 증진시켜 최대의 수익을 올릴 수 있는 과학적인 재배환경제어기법의 개발이 필요한 실정이다.

시설토마토의 경우 생산량은 '70년 139.5천톤으로 전체 채소 생산량의 5.3%에 불과하였으나 '92년 1,400천톤으로 16.3%에 달해 날로 그 비중이 높아지고 있다. 그러나, 시설의 환경·재배관리를 시설자재, 환경제어시스템등에 대한 수입의존도가 커서 매년 막대한 량의 외화가 낭비될 뿐 아니라 유지보수나 사용상의 어려움이 있다.

또한 조수입에 대한 경영비가 차지하는 비중이 90년도기준 70.7%에 달해(화란:24.2%) 농가의 경영압박을 가중시키고 있으므로 생산성향상을 위해 생력화된 시설재배면적의 확대와 시설내 과학적 재배환경 자동제어 기술확립이 매우 중요하다.

화란 등 선진유럽국들은 자국의 시설농업기술을 한국·일본을 중심으로 한 동북아 지역을 주요 수출시장으로 삼고 있으며 특히 한국은 범국가적 지원정책에 힘입어 매년 약 500ha이상의 유리온실 재배면적이 증가하는 추세이며 광양의 포항제철 유리온실 시공 등을 계기로 유럽형 온실에 대한 선호도도 높은 편이라 고도의 영업적 전략을 수립해 놓고 추진중인 상태이다. 국내에서는 언론, 학계 등에서 각종 홍보 매체를 통해 국내기술로 이미 시설의 재배환경 제어가 완성된 것처럼 선전하고 있어 일반인의 판단을 흐리게 하고 있으며, 해외의 제어 기술을 단순히 도입·보급하는 선에서 국내 시설재배 농가를 지원하려는 시도를 하고 있어 우리 기술의 개발이 매우 시급한 실정이다.

제 2 절. 현기술 상태의 취약성

1. 온도·습도 조절

우리나라 대부분 온실의 환경제어가 온도에 국한되어 있다. 또한 임의 설정된 최고·최저한계치 위주의 단순제어에 머무르고 있는 실정이다. 변온관리가 필요한 과채류 생산에 있어서 4단변온장치 등을 사용하고 있으나 설정온도와 실제온도간에 차이가 있어서 개선이 필요하며 특히 온도계에 의한 Analog방식 제어의 경우 제어기와 센서간의 임계치 범위가 너무 좁아서 개폐장치가 계속 열림·닫힘을 반복하여 (Hunting 현상) 모터의 고장을 유발하고 있는 상황이다. 한편 선진국에서 활발히 개발 실용화되고 있는 식물생장의 온·습도 반응에 근거한 제어 논리의 개발이 전무한 상태이다.

2. CO₂ 시비

광조건, 식물생육상태, 환기량 등을 고려한 환경제어 논리의 개발이 되어 있지 않으며 대개의 경우 Timer에 의해 아침 9시-11시 사이에 가동하는 단순제어에 불과하며 CO₂ 센서 가격이 고가이고 CO₂ 공급효과에 대한 인식부족 등으로 CO₂ 제어를 하지 않는 농가도 많은 실정으로서, CO₂시비에 의한 생산성 향상과 CO₂제어에 드는 비용을 고려하여 수익성을 최대화할 수 있는 CO₂시비 제어 논리의 개발이 절실히 요청되고 있다.

3. 관개

온실에서 작물을 재배하는 경우 강우가 차단되어 인위적 관개 시기와 관개량은 생산성과 품질에 지대한 영향을 미치나 우리나라의 경우 이에 대한 기준이 마련되어 있지 않다. 따라서 식물의 수분상태, 토양의 수분상태등과는 무관하게 Timer에 의한 관개를 실시하는 것이 주종을 이루며 특히 관수 개시점과 관개량 결정은 논리적 근거없이 보통 일주일에 1-2회 관개하며 일부 농가는 농민의 경험이나 달관적 조사에 의해 관개를 하고 있는 실정이다.

제 3절 연구 목적과 범위

우리나라의 시설재배 면적은 정부의 적극적인 지원 정책으로 최근 들어 급격한 성장을 보이고 있으나 시설재배작물의 생산성은 선진국에 비하여 매우 낙후되었을 뿐만 아니라 또한 경영비의 과중으로 채산성이 낮다. 생산성과 채산성이 낮은 원인은 온실환경 관리기의 낙후로 인하여 작물의 생장과 경영비료 고려한 온실의 최적환경 관리가 이루어지지 못하고 있기 때문으로 생산성과 품질을 증진시키고 난방비 등 경영비를 줄여 수익성을 극대화할 수 있는 과학적인 재배환경 제어 기술의 개발은 매우 중요한 당면과제이다. 본 연구는 시설 작물의 생산성과 수익성을 위한 시설내 복합환경의 최적조건 탐색과 이에 근거한 자동제어 논리의 개발과 실용화하는데 목적이 있다.

본 연구는 시설재배 작물의 생산성과 수익성 향상을 위한 시설내 복합환경 제어논리의 개발 및 실용화를 최종목표로 하고 있으며 제 1차 년도의 연구범위는 다음과 같다.

- 실험용 온실 신축 및 제어 시스템 제작
 - o 실험용 온실 제어기 제작
 - o 실험용 온실제어 소프트웨어 개발
- 온실 미기상 예측모델 개발
 - o 온실 외부의 온도, 습도, 광, 바람 등의 변화에 따른 온실내의 미기상 변화 예측 모델의 이론적 설계
 - o 미기상 모델의 매개변수정량화 검증을 위한 환경예측
- 시설재배 토마토의 생육 모델 개발
 - o 온실내 일사량, 온도, 습도, CO₂농도 등을 입력변수로 하는 토마토 생육 모델의 이론적 설계
 - o 생육 모델의 매개변수 정량화 및 검증을 위한 토마토 재배실험
- 시설작물 관개모델 개발
 - o 경직경(stem diameter)측정장치 개발
 - o 경직경 변화와 식물체 생리적 상태와의 관계 규명

제 2 장 실험용 온실제어 시스템의 제작

제 1절 시스템의 구성

온실제어용 컨트롤시스템은 설계자의 기술력과 주위 여건에 따라 여러형태로 구성될 수 있다. 본 연구개발의 방향은 보편적인 온실제어용 알고리즘을 개발하여 여러형태의 자동제어기에 이식하여 응용할 수 있도록 하고자 한 것이다. 따라서 본 개발에서 가정하는 시스템의 개요는 아래 그림1에서 보는 바와 같다.

온실 내부 동작기(천창개폐기, 측창개폐기, 커튼, 온풍기, 관수기 등)에 대한 제어가 개별온실의 기상센서 값(온도값, 습도값, 이산화탄소값 등)을 근거로 이루어 지며 이 같은 제어에는 외부 기상 값(풍향, 풍속, 일사, 강우, 외부온도, 외부습도 등)이 유기적으로 관여 하여 제어방향을 결정하도록 구성되어 있으며 각각의 제어기에서 출력되는 limit신호와 level 신호를 추출하여 제어제한요소로 이용하고 있다.

본 개발에 사용된 시스템은 크게 계전기, 컨트롤러, 종합관리시스템 등 3요소로 구성되었다. 계전기는 컨트롤러의 지휘를 받아 전기적인 동작기제어를 담당한다. 컨트롤러는 PC상의 종합관리시스템의 일별명령을 받아 온실내외 기상환경을 고려하여 최적의 온실재배환경을 만들기 위한 필요한 모든조치를 취하는 일을 담당하며 또한 센서값 및 제어명령에 대한 모든 상황을 수시로 PC상의 종합관리시스템에게 전달하는 역할을 수행한다. 종합관리시스템의 가장 큰 특징은 모든 관리를 작기단위로 수행한다는 점이다. 즉 일련의 모든 제어를 사용자가 정한 예정작기에 따라 제어환경을 관리·통제하는 것으로 작물의 생육단계에 따른 제어환경설정을 명령할 수 있게 설계하였다. 이같은 제어 설정치는 매일매일 컨트롤러에 전달되며 또한 컨트롤러에서 보내온 제어환경들을 작기별로 별도의 파일로 보관 관리하는 일을 수행한다.

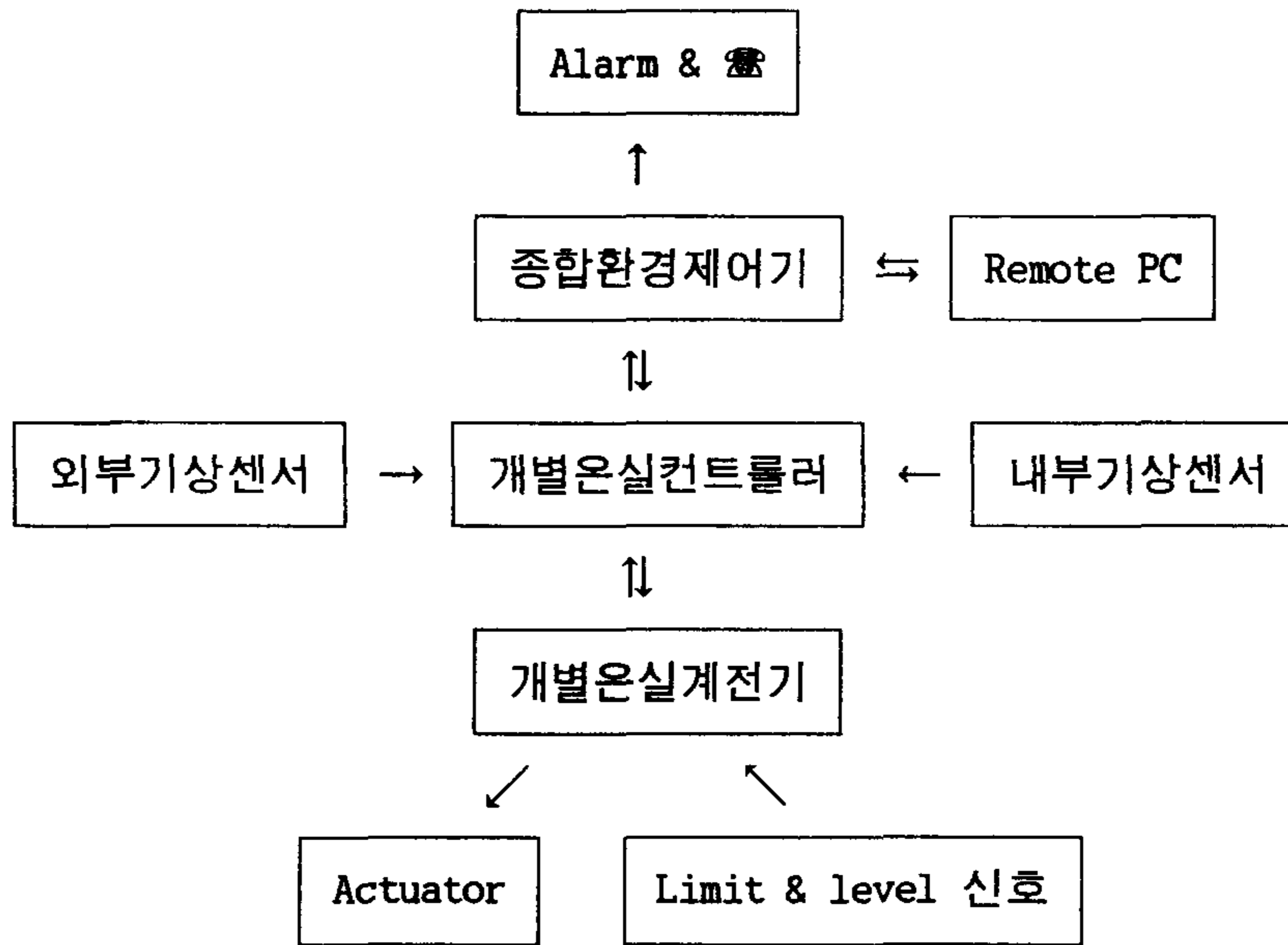


그림 1. 온실용 자동제어 시스템 개요

제 2 절 소프트웨어의 개요

온실제어용 소프트웨어는 크게 2종류로 나누어진다. 하나는 PC용 종합환경관리에 사용하는 프로그램이고 다른 하나는 컨트롤러용 MICROPROCESSOR에 탑재할 제어용 프로그램이다.

먼저 종합관리용 프로그램의 경우에 PC용 TURBO C와 한글처리용 한글라이브리틀을 이용하여 코딩하였으며 사용자의 편이를 도모하기 위해 ICON사용, 마우스 지원 등 사용자 인터페이스를 최대한 강화하여 개발하였다.

프로그램의 기능적 측면에서의 개요는 다음과 같다.

제어항목은 온도, 습도, CO₂ 등 3개 환경을 대상으로 하며 한 제어항목에 대해 최대 30분 단위의 제어환경설정이 가능하여 하루에 48개 단계로 제어논리 편집이 가능하다. 그 경우는 온도이외에 습도 및 CO₂에 대해서도 동일하다. 또한 모든 제어항목은 제어편차범위를 설정할 수 있으며 기본값은 ±2%이다.

제어기의 동작은 가장 먼저 예상되는 작물재배기간에 대해 입력을 받아야 이루어진다. 즉 재배하고자 하는 작물, 재배시작 일시, 재배종료 일시, 그리고 센서자료, 제

어자료, 에러자료 등 자료저장 화일명 등을 입력하여야 기본적인 제어에 들어갈 수 있도록 개발되었다.

표 1. 작물재배기간설정에 필요한 입력요소

구 분	결 정 사 항	내 용
작 기 설 정	재배작물	
	재배시작시점	년:월:일
	재배끝 시점	"
	자료저장화일명	센서자료, 제어자료, 에러자료

제어기를 통해 입력받은 센서값에 각각의 번지(ADDRESS)를 지정하기 위해 센서의 등록, 제어기의 등록 등을 사용자가 입력하게 하나는 기능을 넣었다. 사용자가 입력할 수 있는 센서의 최대 갯수는 온도 및 습도의 경우 컨트롤러 1대당 2개씩, 그리고 CO2는 1개, 그리고 기타 3개의 추가 센서 입력이 가능하도록 설계하였다.

컨트롤러와 종합관리시스템간의 원활한 통신과 작기단위 관리를 위해 시계 및 날짜 맞추기 기능을 삽입하였다.

종합관리시스템을 이용한 수동제어기능을 위해 수동제어용 버튼스วิต를 만들어 컨트롤러의 제어인터럽트를 뺀 기능을 추가하였다.

제어환경설정에 가장 중요한 요소는 일출과 일몰시간인데 이를 위해 시스템이 설치되는 지점의 경도와 위도를 입력받아 자동으로 해당일자의 일출·일몰을 계산하고 디스플레이 시킨다.

불량한 온실외부환경에 대해 효과적으로 대처하기 위해 외부풍속 및 강우에 대한 천·측창개폐제약조건설정 기능을 추가하였다.

저장된 센서값과 제어명령수행상황 및 에러상황 등을 작기단위 화일로 저장하여 화면이나 프린터를 통해 디스플레이 시키는 기능을 넣어 효과적인 관리체계를 구축하였다.

표 2는 PC용 종합환경관리 시스템의 주요화면구성을 나타내었다.

컨트롤러용 제어프로그램은 일차적으로 PC상의 종합관리프로그램의 명령을 받아

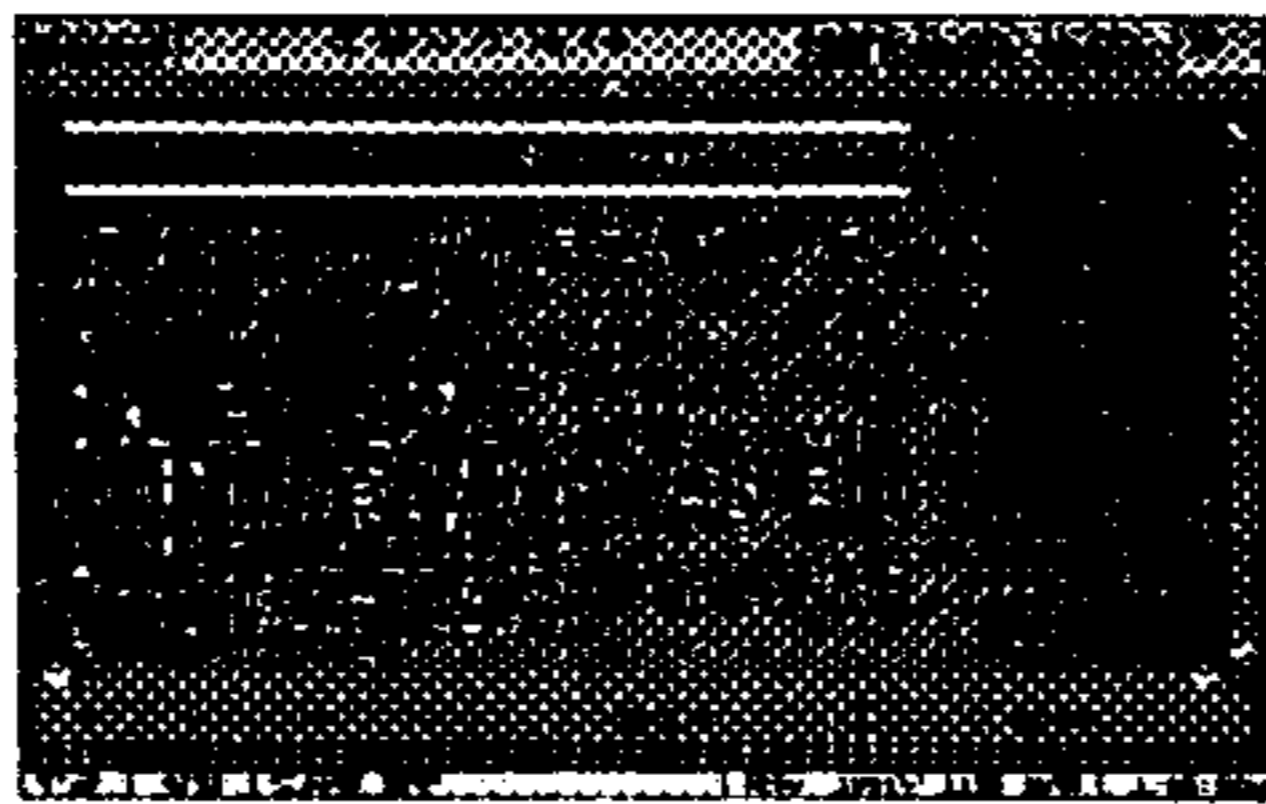
제어를 수행하나 별도로 몇가지 추가적인 기능을 독자적으로 갖고 있다. 즉 천창 및 측창 open delay time 조정을 가능하게 하는 Control Time 수정기능과 환기팬 및 살수 동작을 설정온도에 의한 직접제어방식과 온도제어 Sequence에 의한 작동방식을 선택할 수 있게한 알고리즘 변경 기능, 커튼 동작을 외부광량에 의해 제어하는 Shading Control방식과 Timer에 의한 제어방식을 선택할 수 있게한 알고리즘 변경 기능, 그리고 ID번호에 의한 자체 데이터 구별 신호부가기능, 그리고 내부 감시타이머에 의한 시스템 down 방지기능 등 별도의 기능을 갖고 있는 프로그램을 개발하였다.

초기화면



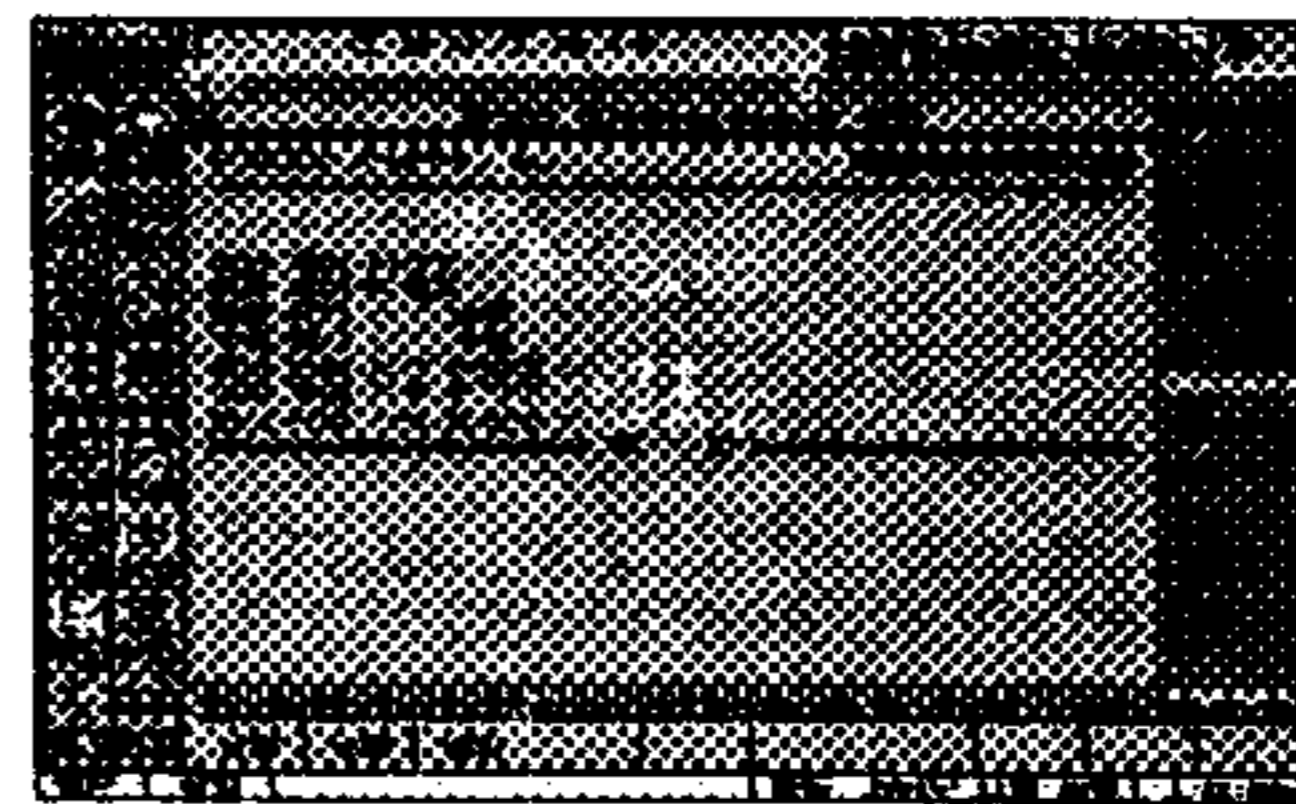
제어환경설정

도움말



설정치 입력(I)

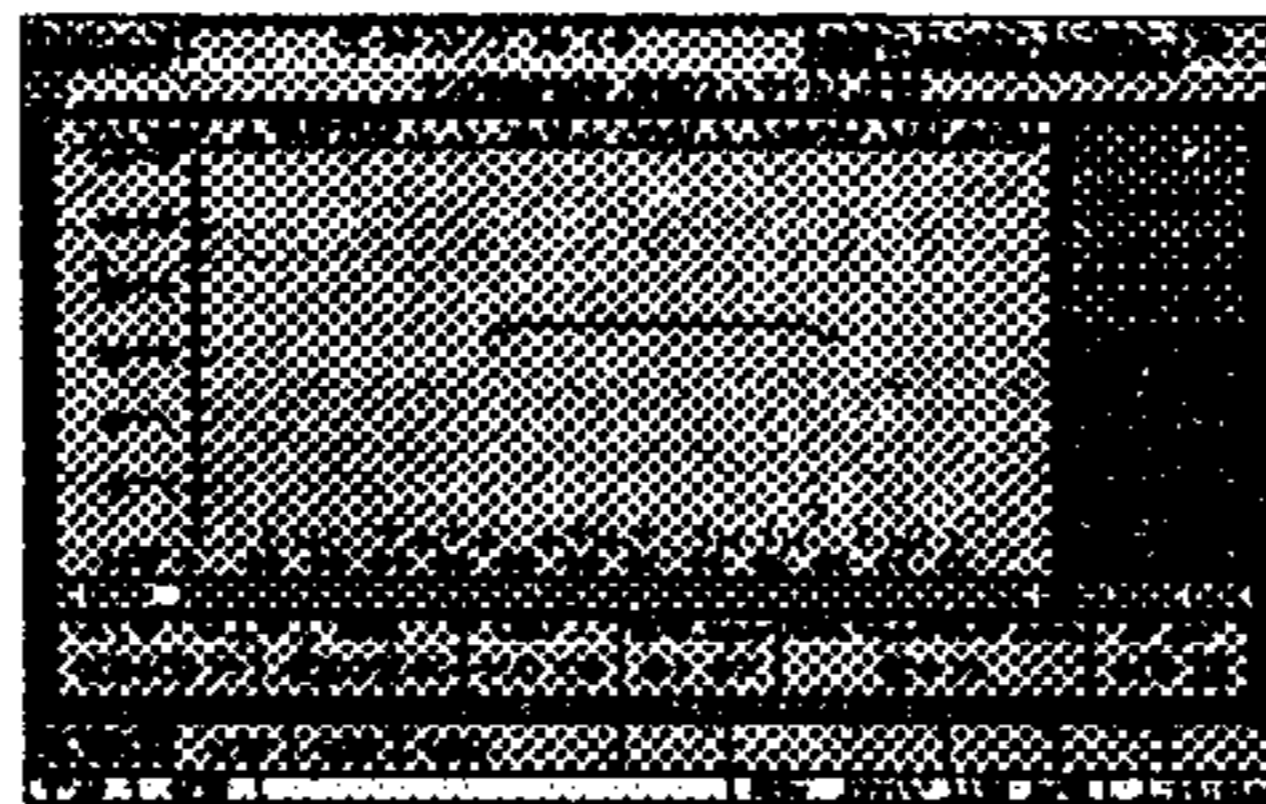
작기설정



설정치 입력(II)



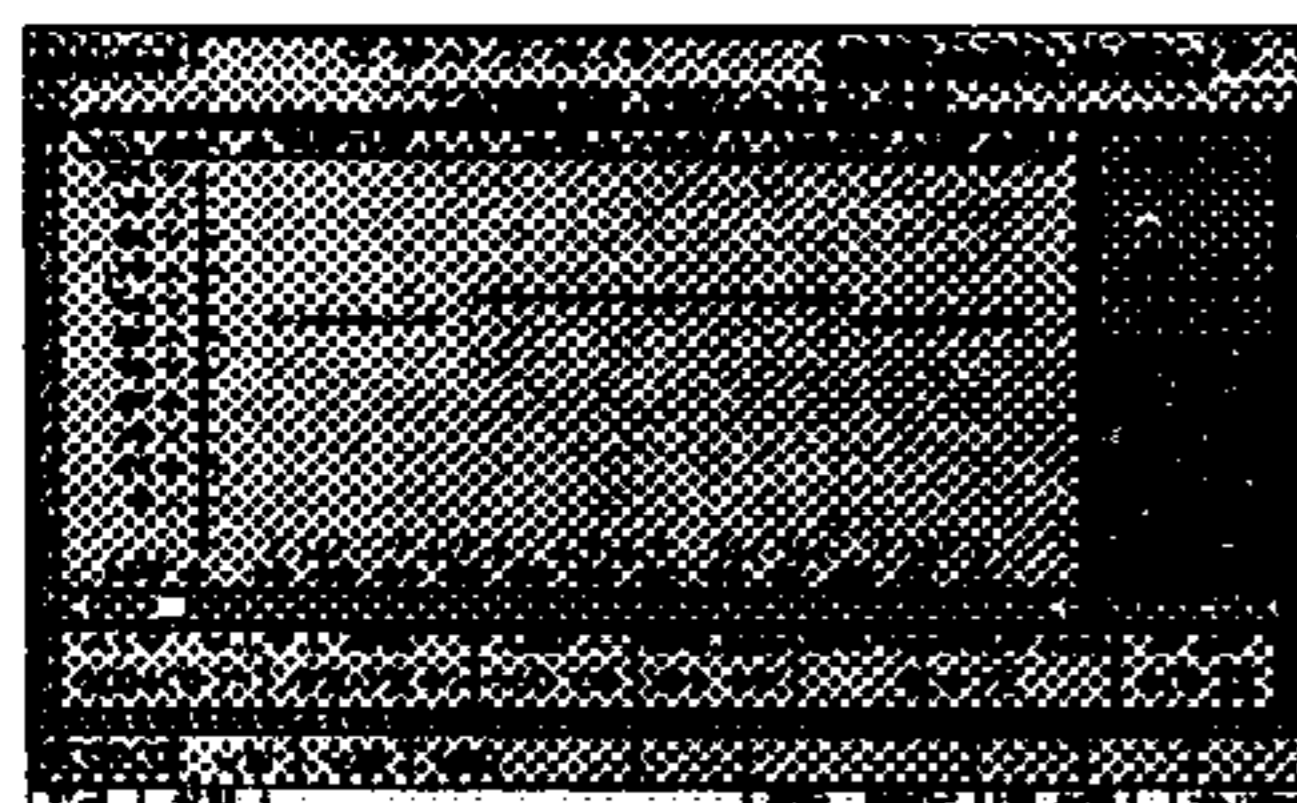
설정치 입력(II)



수동제어용 버튼슈트



자료보기



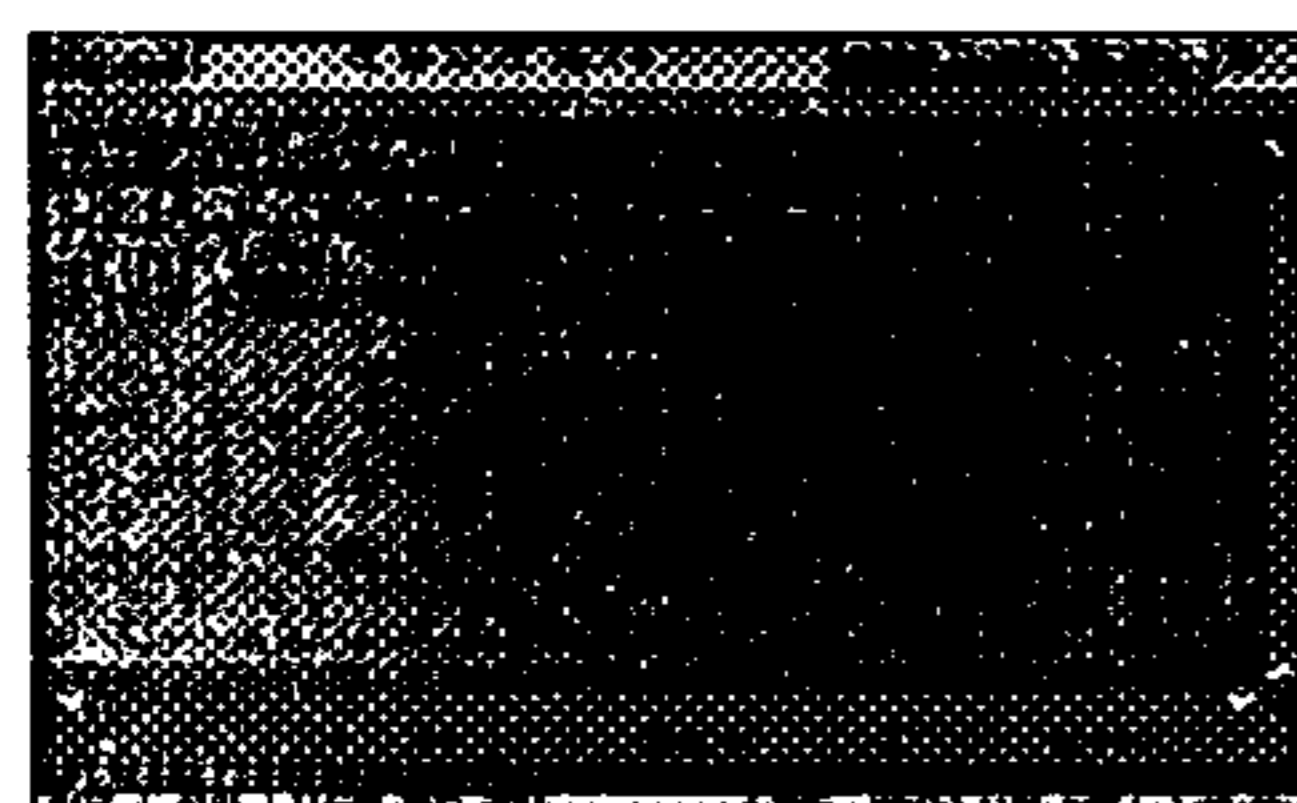
자료보기



화면디스플레이항목선택



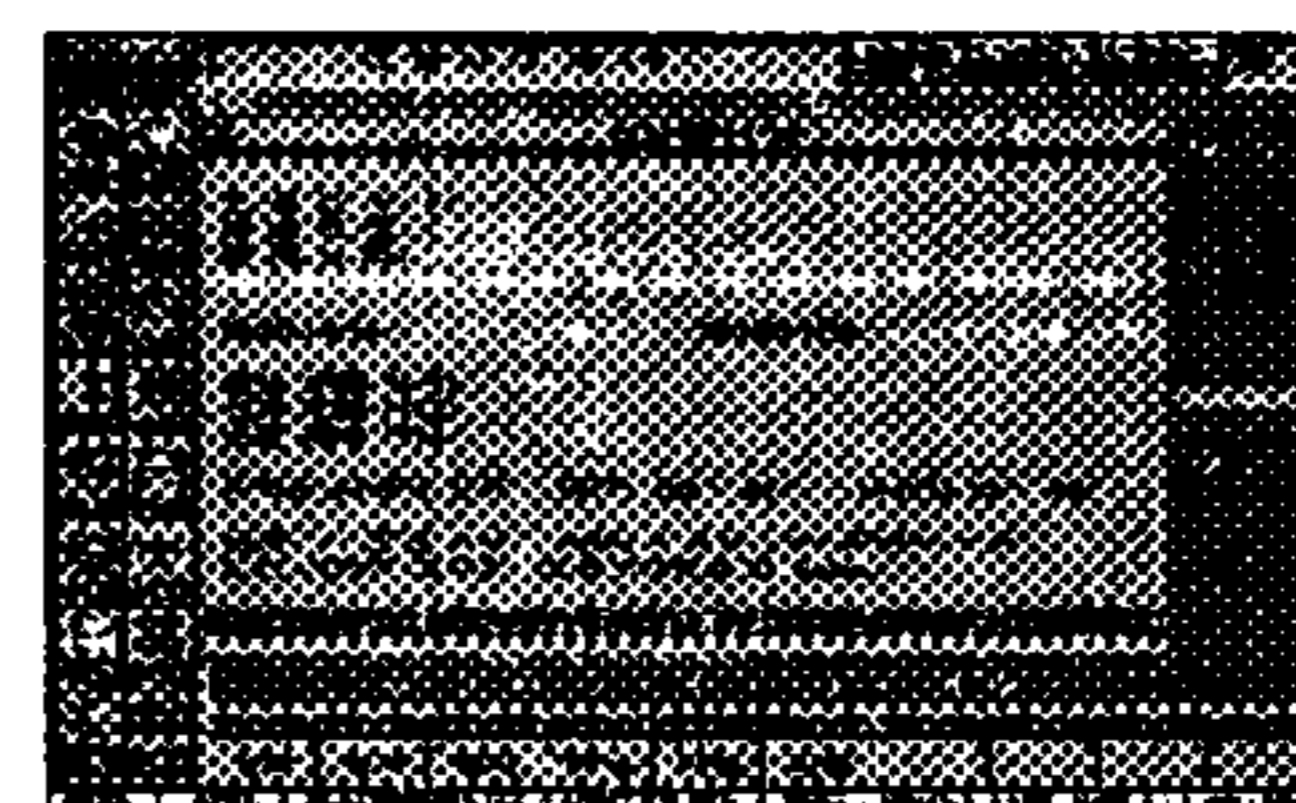
제어환경 보기



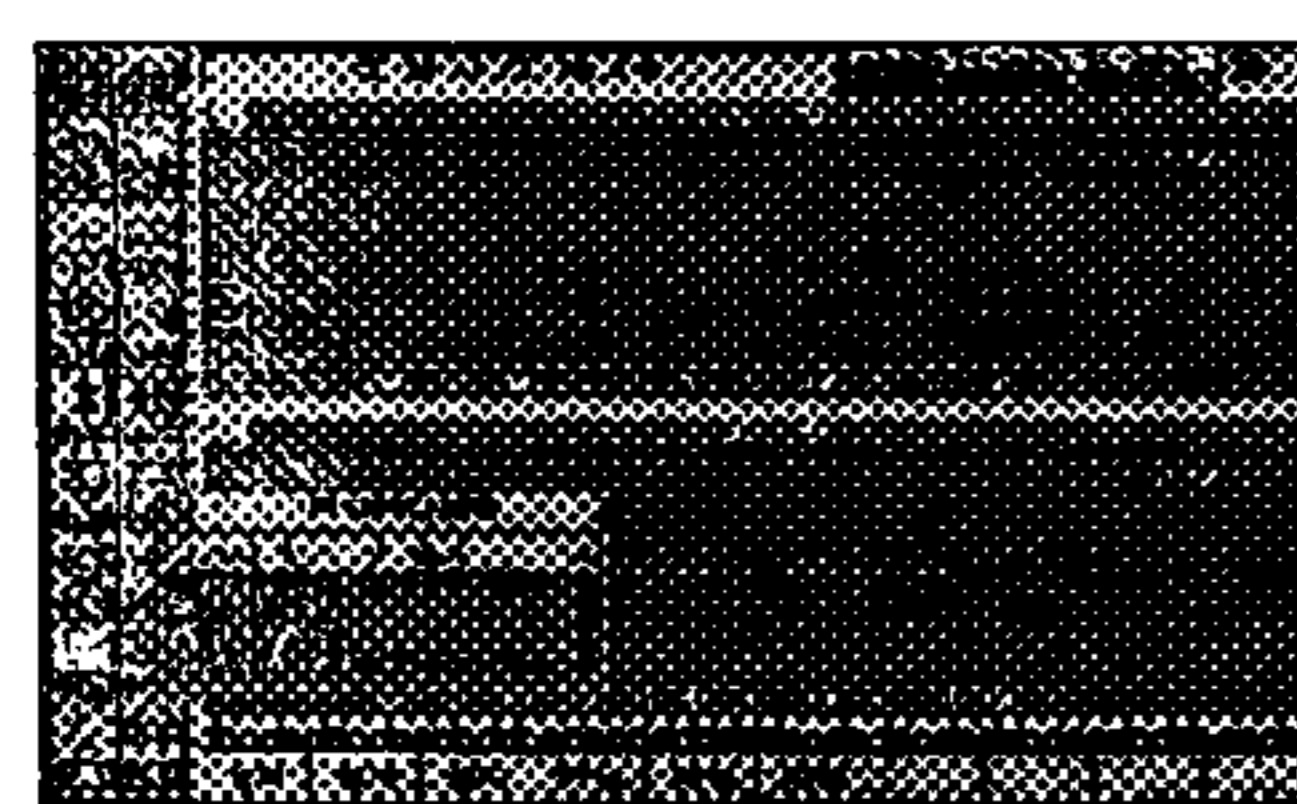
온실환경설정



제어환경제약설정



센서입력



온실위치입력(경도,위도)



기타기능 및 종료

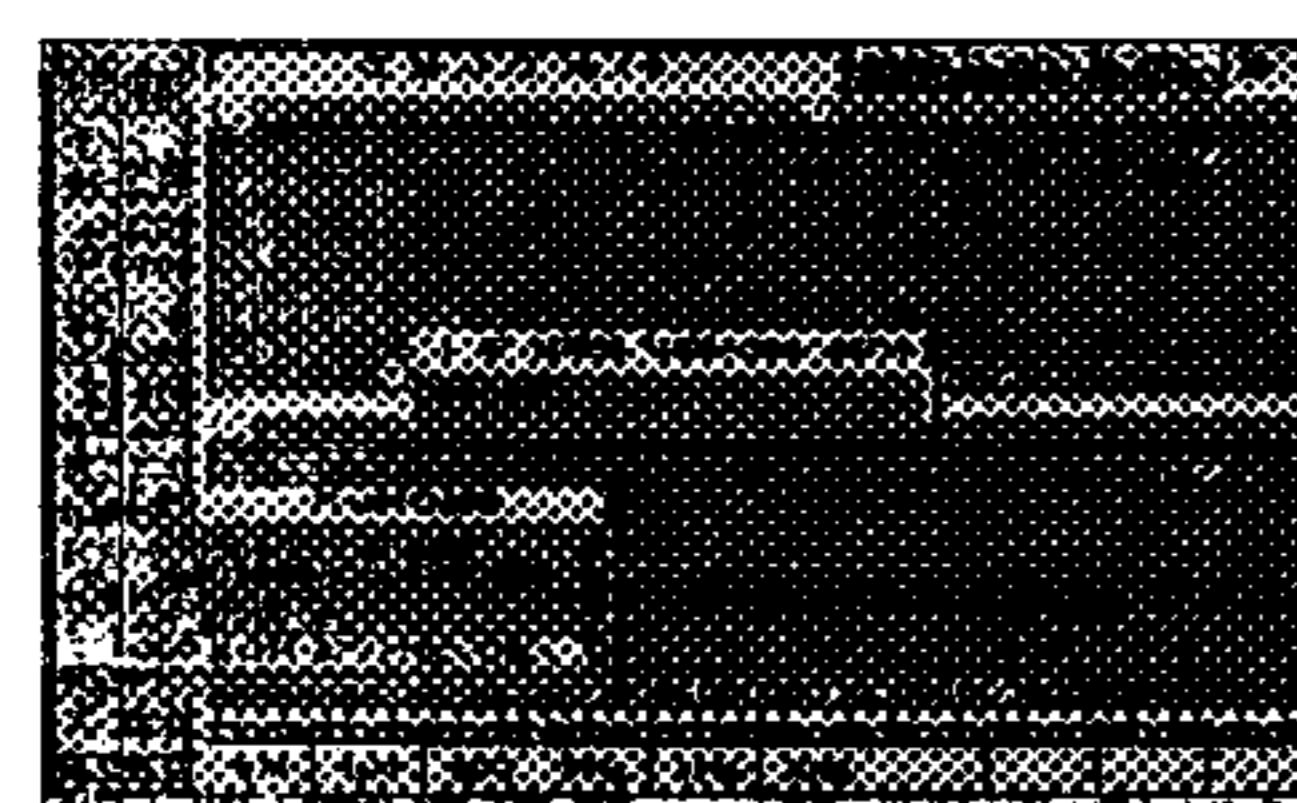
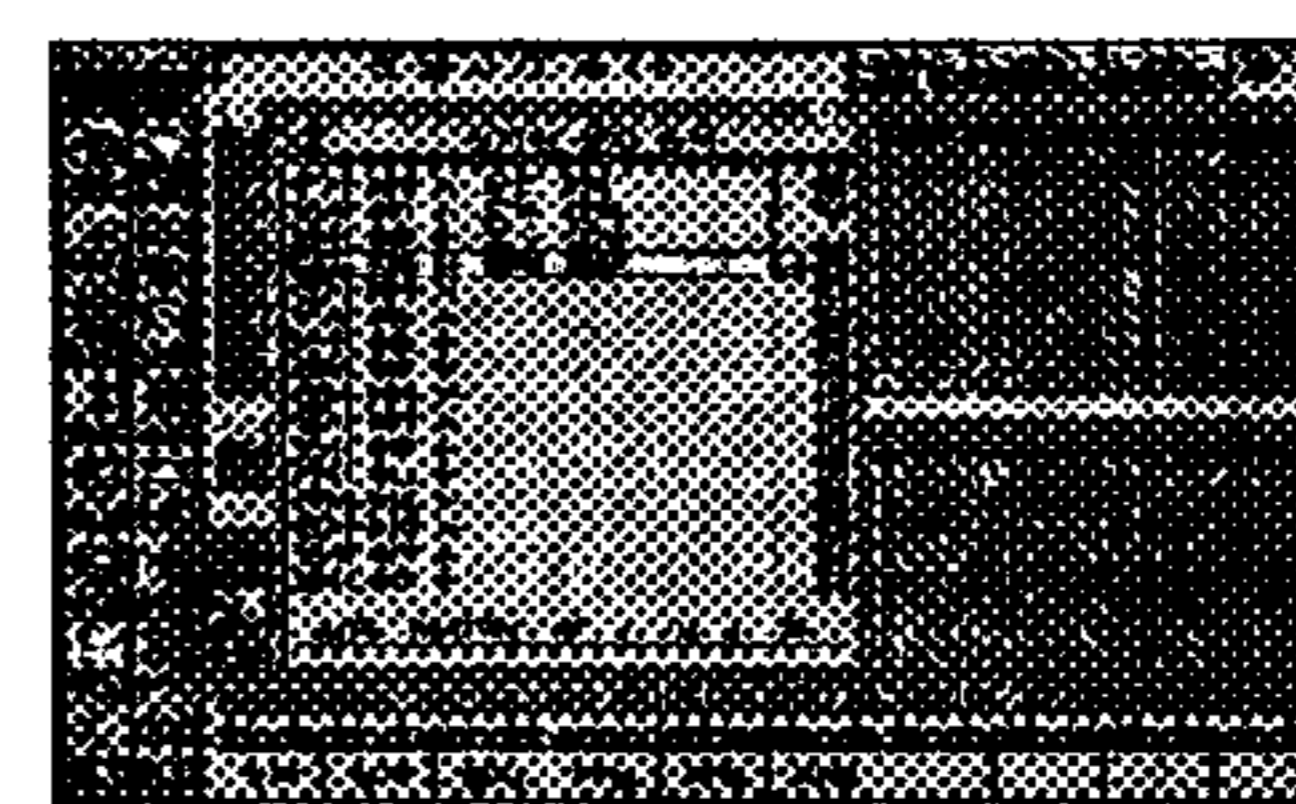


그림 2. PC용 종합관리프로그램의 화면

제 3 절 제어논리

1. 제어명령 흐름도

그림 3.은 제어명령의 흐름에 대한 전체적인 도식화이다. 앞서 설명한 바와 같이 크게 컴퓨터, 제어기, 센서, 동작기로 구성되며 먼저 컴퓨터 프로그램에서 작기, 제어논리를 통해 생성된 “완성된 제어논리자료”가 컨트롤러에 DOWNLOAD되고 컨트롤러는 제어명령을 생성하여 동작부를 통해 제어를 실행하고 그 결과를 비교하여 이상유무를 확인한후 그 결과를 센서신호와 함께 컴퓨터에 UPLOAD시킨다.

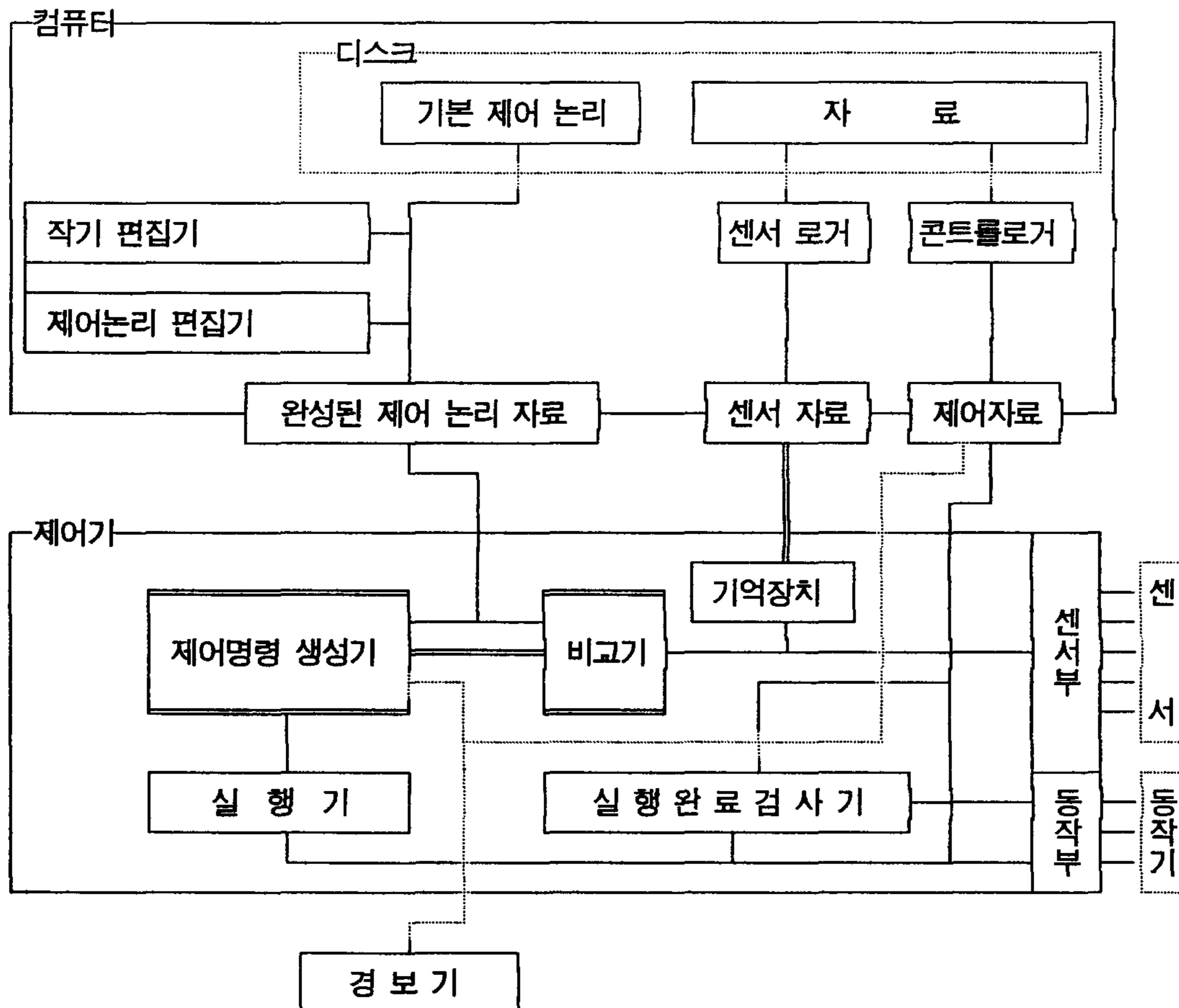


그림 3. 온실환경제어의 흐름

2. 제어명령의 생성원리

제어명령은 기준치에서 + (+)오차를 넘어서게 되면 생성되며 또한 기준치 + (-)오차를 넘어서게 될때 생성된다. 예를 들어 기준치가 20℃이고 오차가 ±2℃라고 가정할 때 온도가 그림 4.와 같이 기준치에서 서서히 올라가 22℃이상이 되면 제어명령이 생성되어 천창/측창 OPEN 또는 환풍기를 켜게 된다. 그렇게 되면 온도가 서서히 내려가 하한치 즉 18℃이하가 되면 다시 제어명령이 생성되어 천창/측창 CLOSE 또는 환풍기를 끄게 된다. 이런방식의 제어는 기존 온실에서 많은 문제점으로 지적되었던 제어기의 hunting(계속적인 ON/OFF 반복)을 막을 수 있으며 순간적인 센서값의 변화는 제어에 영향을 미치지 않게 된다.

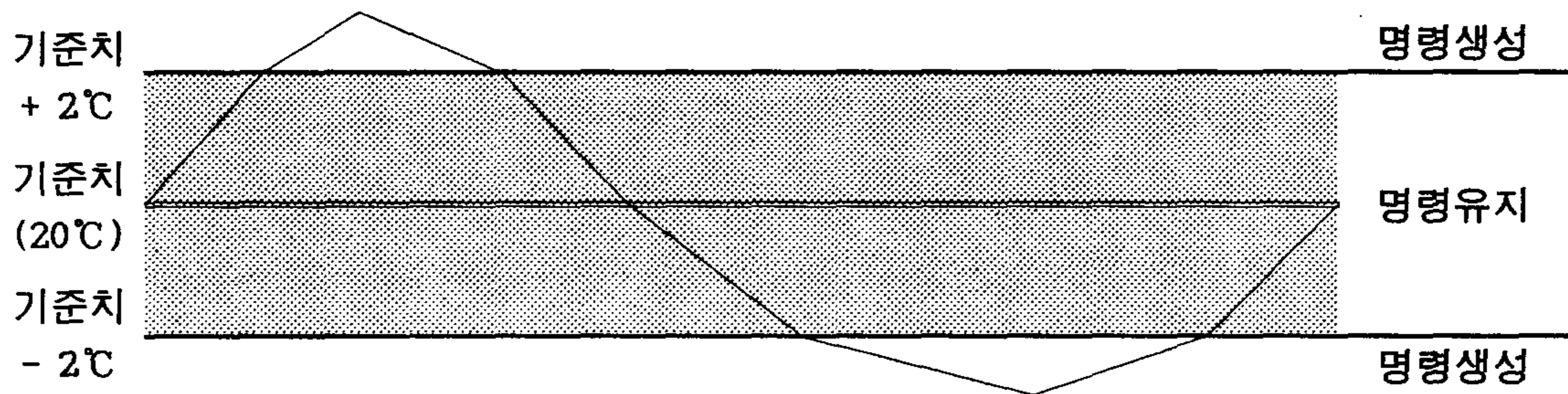


그림 4. 제어명령 생성원리와 DEAD ZONE

먼저 온도의 경우 그림 3.에서 보는 바와 같이 보일러, 커튼, 천창, 측창, 환풍기 등이 온도제어를 위해 필요한 요소로 동원되며, 만일 온도가 SETPOINT보다 높을 경우에는 보일러→ 커튼→천창→측창→환풍기 순서로 제어가 진행되고 반대로 온도가 SETPOINT보다 낮을 경우에는 환풍기→측창→천창→커튼→보일러 순서로 제어가 진행되도록 개발되었다.

이같은 제어순서는 기본적인 제어순서에 불과하며 온실외부에 불량환경이 닥칠 때나 사용자의 요구가 있을때는 즉시 그 제어순서를 변경할 수 있는 구조로 개발되었다.

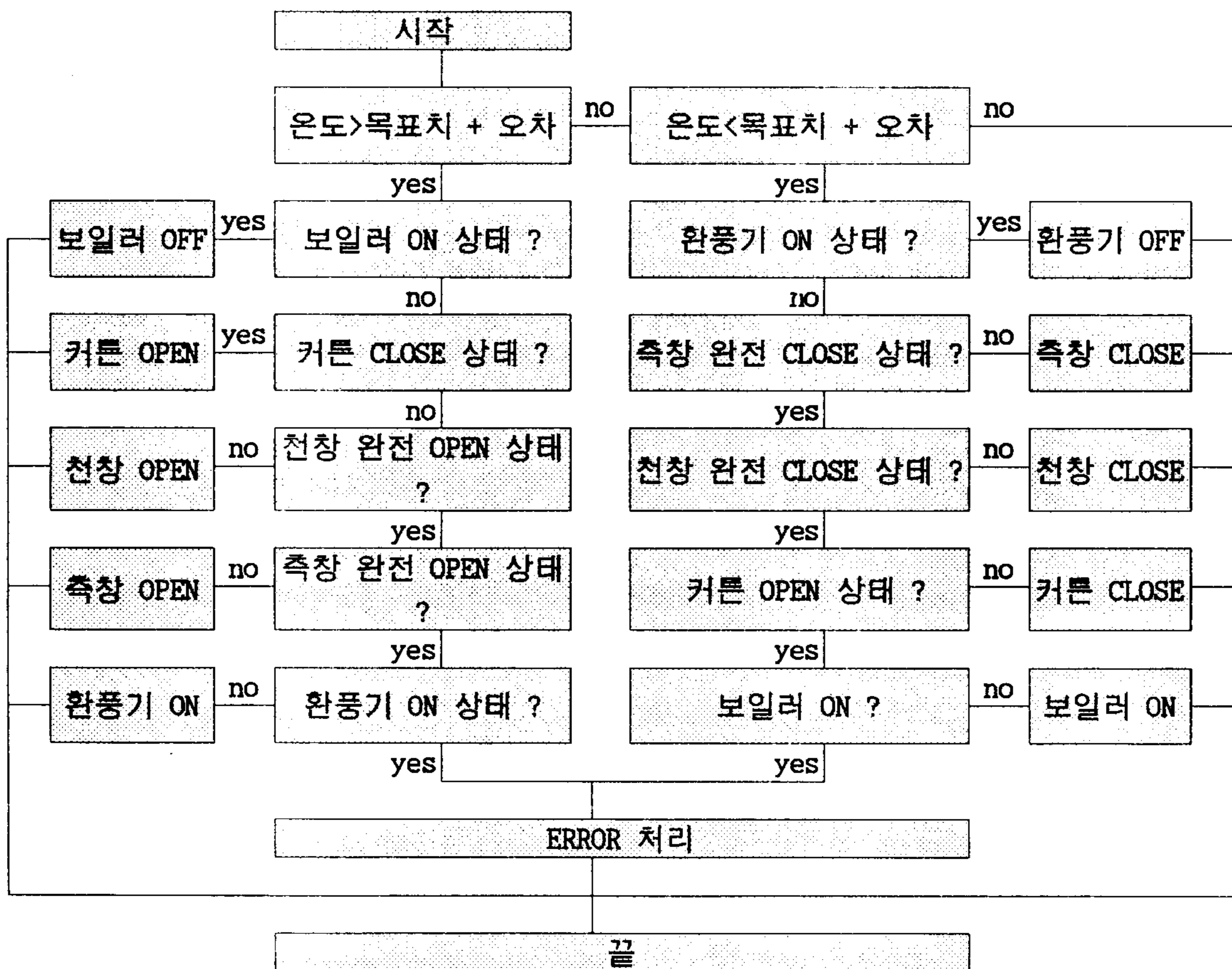


그림 3. 온도 제어 sequence

습도제어 Sequence에는 미스트, 측창, 환풍기 등 3가지 제어요소가 관여한다.

먼저 습도가 목표치보다 높을 경우에 미스트→측창→환풍기 순서로 제어가 진행되며 반대로 습도가 목표치보다 낮을 경우에는 환풍기→측창→미스트 순서로 제어가 진행된다.

대부분의 경우에 습도환경을 맞추는 방향으로 제어를 진행해 가면 반대로 온도환경은 목표치에서 벗어나는 방향으로 진행한다. 이를 위해 그림 9의 전체 제어 Sequence의 제어항목간 순위에서 습도가 가장 낮은 priority를 갖는 항목으로 설정하였다.

습도의 경우도 온실외부의 불량환경과 사용자의 요구에 제어논리나 순서를 바꿀 수 있는 구조로 만들어 졌다.

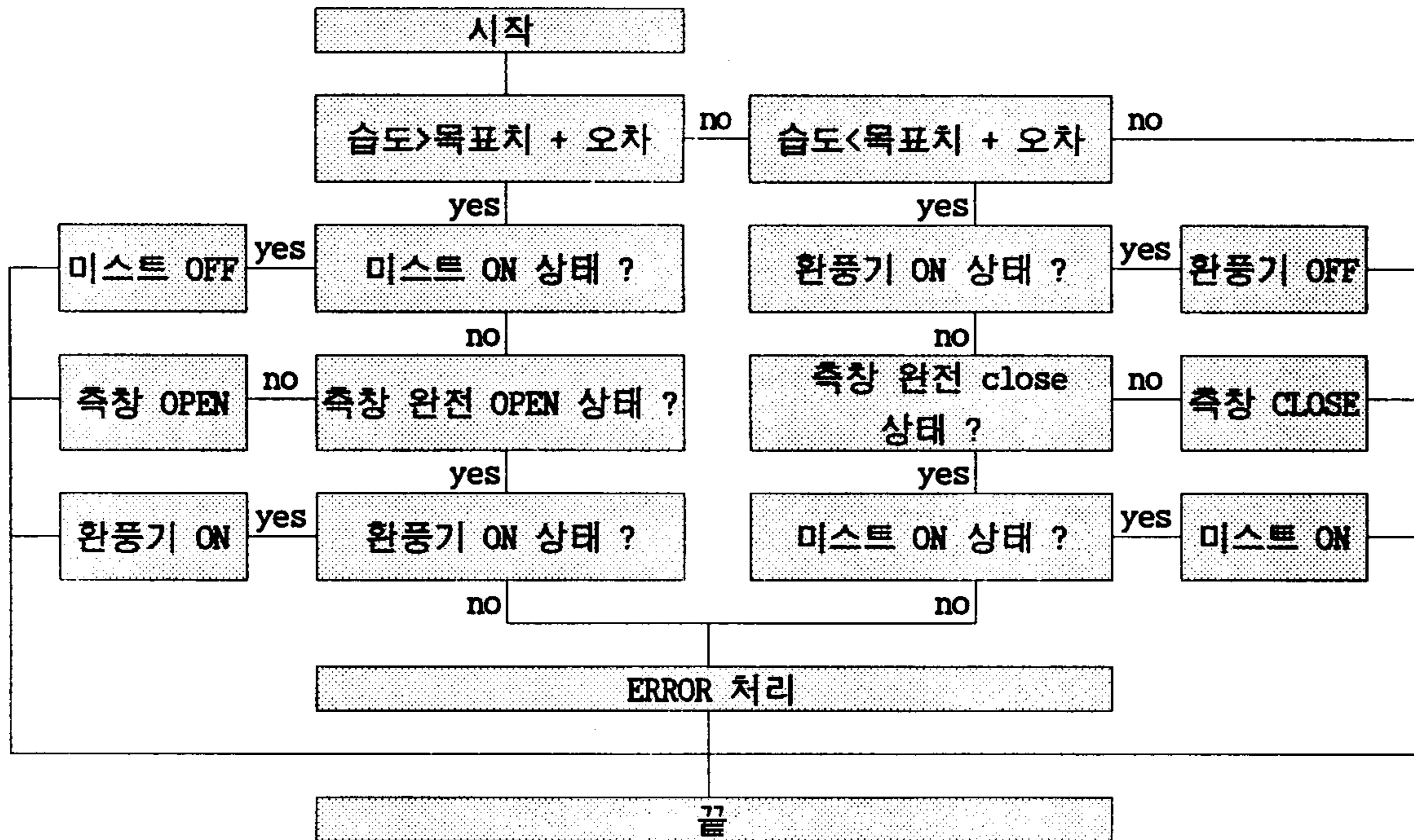


그림 4. 습도 제어 sequence

CO₂제어 Sequence에는 CO₂ 발생기만 제어요소로 관여한다.

CO₂가 목표치보다 높을 경우에 CO₂발생기를 OFF시키고 CO₂가 목표치보다 낮을 경우에 CO₂발생기를 가동시킨다. 단 이경우에 작물의 CO₂환경은 외부의 일사조건과 유기적인 상관관계가 있으나 1년차의 프로그램은 단요인제어에 한하여 프로그램을 개발하였으며 복합요인 제어기술은 본 개발품을 근거로 2년차에 개선하여 개발할 예정이다.

CO₂의 경우도 온실외부의 불량환경과 사용자의 요구에 제어논리나 순서를 바꿀 수 있는 구조로 만들어 졌다.

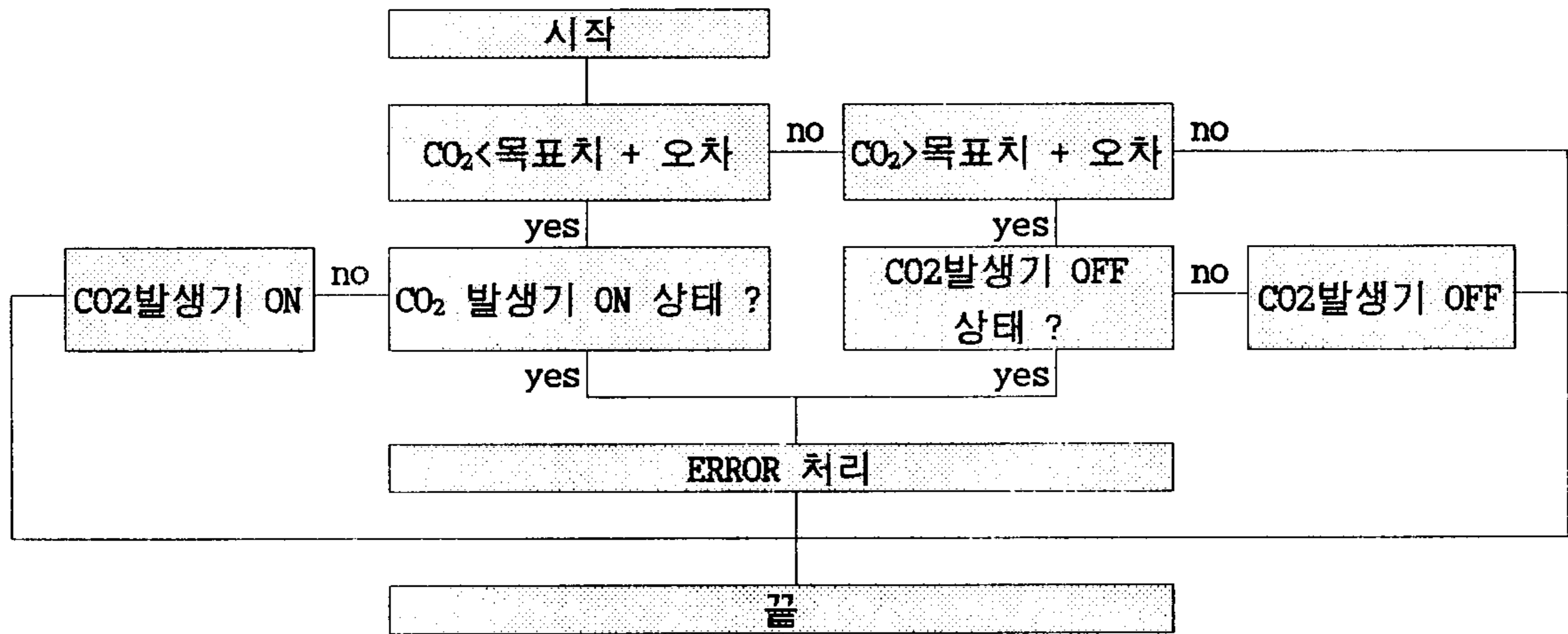


그림 5. 이산화탄소 제어 sequence

광제어 Sequence에는 차광막만 제어요소로 관여한다.

광이 목표치보다 높을 경우에 차광커튼을 CLOSE시키고 광이 목표치보다 낮을 경우에 차광커튼을 OPEN 시킨다. 그러나 본 연구개발에 사용된 시설은 차광커튼시설이 미비된 관계로 1년차 제어에는 동원되지 않았으며 차후 농가용 복합환경제어기 개발에는 추가하여 이용될 예정이다.

광환경제어의 경우도 온실외부의 불량환경과 사용자의 요구에 제어논리나 순서를 바꿀 수 있는 구조로 만들어 졌다.

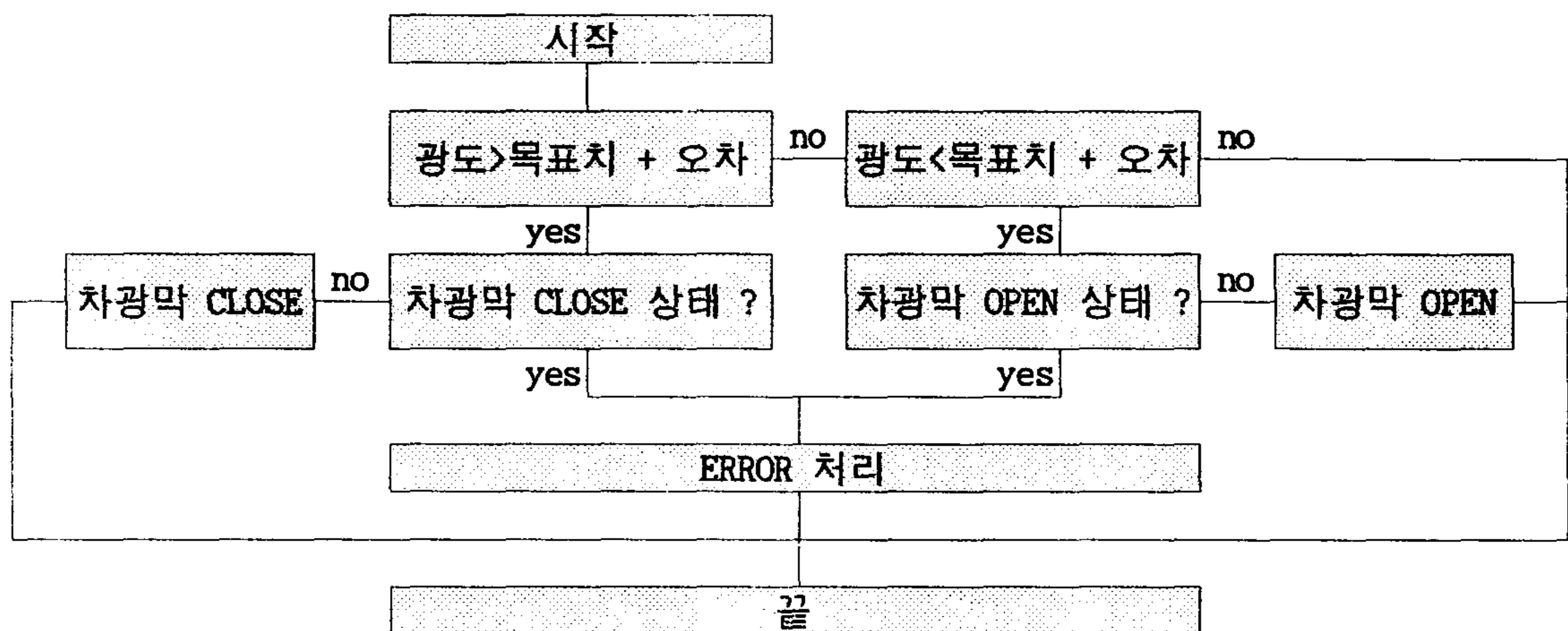


그림 6. 광 제어 sequence

풍향 및 풍속제어 Sequence와 강우제어 Sequence는 특정 제어항목을 갖고 있지는 않으며 온도, 습도, CO2, 광 등 기타의 제어요소외에 외부환경, 특히 풍향과 풍속, 그리고 강우에 관련된 제한을 가하기 위한 Sequence이다.

즉 특정풍향이 설정치보다 세게 불어올때 풍속제한용 BIT를 ON 시키는 비트셋트만을 발생시키며 강우가 설정치(보통은 2mm)보다 많을 때 강우제한용 BIT를 ON 시키는 역할을 수행한다.

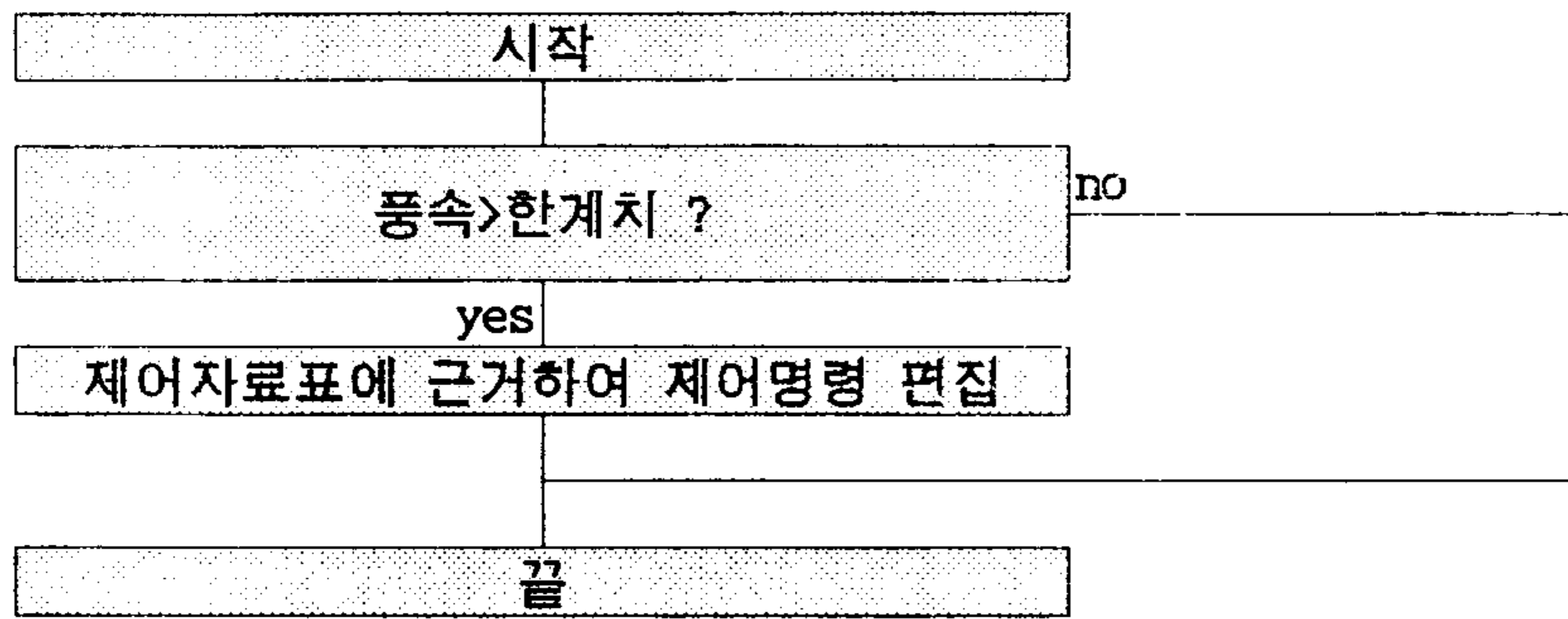


그림 7. 풍향 및 풍속 제어 sequence

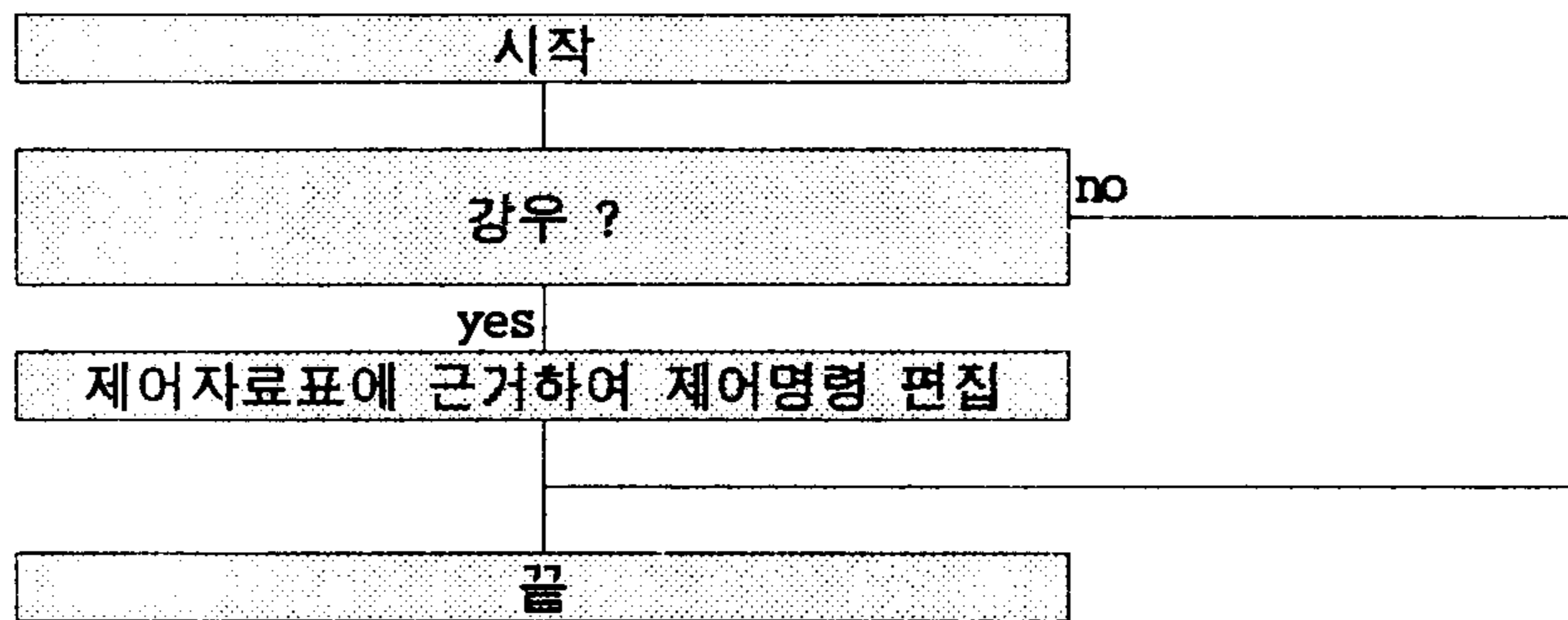


그림 8. 강우 제어 sequence

이상의 제어 Sequence들은 각기 독립적으로 제어에 관여하지 않고 제어요소별로 일련의 순서, 즉 요소간에 해당 priority에 따라 제어에 관여한다. 그림 9.에서 보는 바와 같이 습도→온도→풍향/풍속→광→CO₂→강우→사용자 정의 순으로 제어에 관여한다. 즉 제어용 BIT-SET에 각 제어요소 처리함수에서 보내온 해당 BIT를 SETTING하는데 제어요소별 순서에 따라 앞서 SET된 BIT에 다음 제어요소의 BIT SETTING이 덮어쓰는(OVERWRITING)식으로 일련의 BIT-SETTING이 이루어져서 최종적인 BIT가 확정된 후에 비로소 제어실행함수가 가동하게 된다.

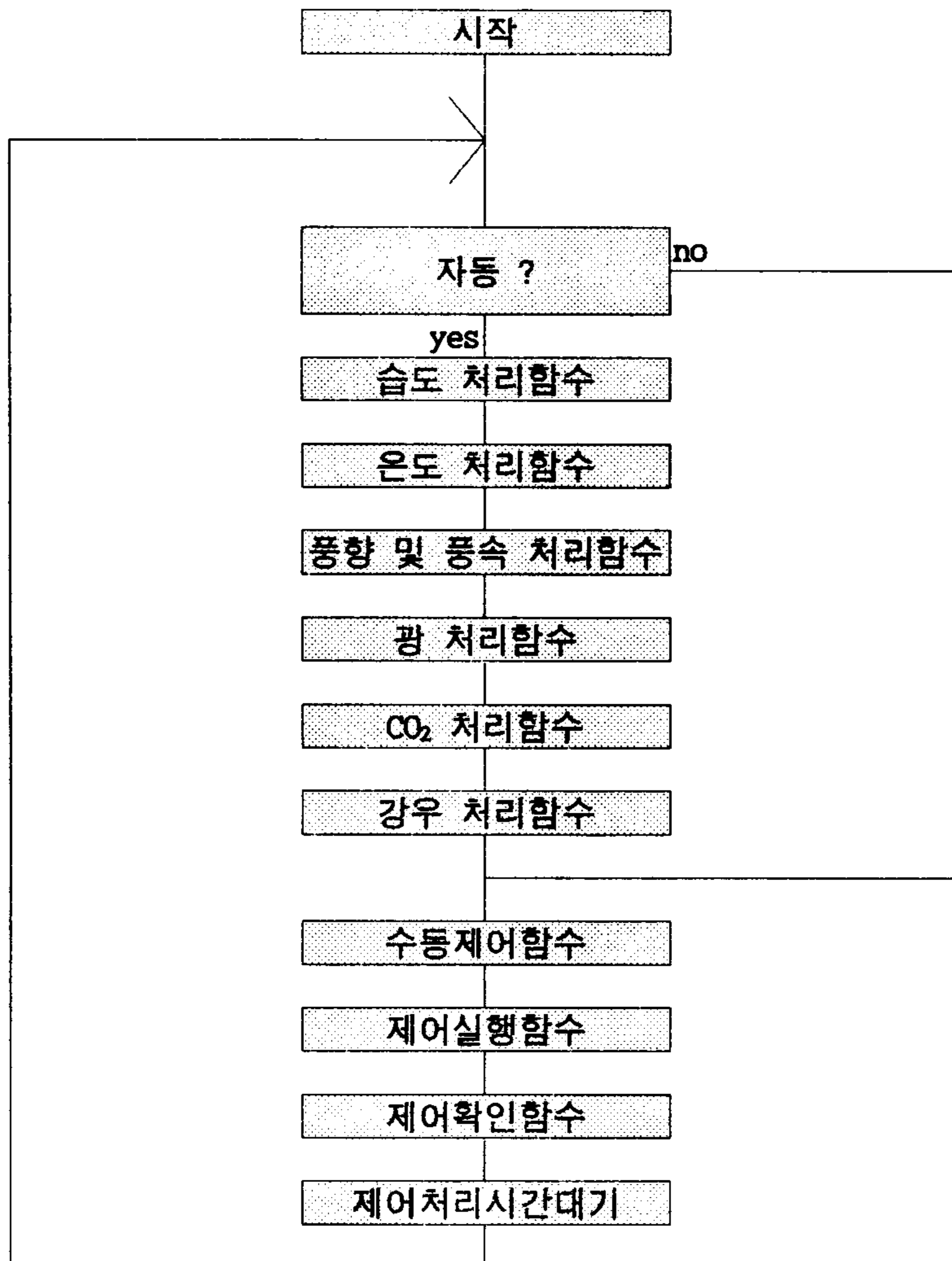


그림 9. 전체 제어 sequence

제 4 절 하드웨어의 개요

본 제어기는 온실제어전용기판(Printed Circuit Board,PCB)를 자체 제작하여 개발하였다. 중앙처리장치는 인텔사의 8bit형의 CPU인 i8051 모델을 사·용하였으며, 기억 장치의 크기는 ROM이 64K Byte, RAM이 1M Byte로 구성하였다. 특히 RAM은 SRAM을 채용하여 전원공급 중단후에도 저장된 자료가 소멸되지 않는 특징을 갖도록 하였다. 제어기의 Display화면은 LCD를 이용하였는데 한개 글자는 5×7 Dot Matrix의 영문전용으로 구성되었으며, 한 화면에 20자를 2줄로 표현할 수 있는 크기로 만들었다. 1년차에는 영문전용으로 개발하였으나 2년차에 전용한글을 채용할 예정이다. 센서신호처리를 위한 Analog to Digital converter는 12Bit방식으로 처리하였으며 센서 입력 Channel은 Main Board상에 최대 8개까지, Limit신호등 Digital 입력 Channel은 최대 24개까지 가능하도록 설계되었다. PC와의 통신을 위해서 RS232 방식의 통신Port를 채용하였으며 키보드는 기능키(Function Key)가 **F1**, **F2**, **F3**, **F4**, **F5**, **F6**, **F7**, **F8** 등 8개, 숫자키(Number Key)가 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 0 등 10개로 구성되었다.

제어기의 외형은 방수·방습을 위해 두께에 고무 팩킹처리가 된 연결 Poly Carbonate 재질의 기성품케이스를 이용해 제작하였다.

표 2. 온실제어기의 사양

구 분	품 명	규 격
내부MICOM	CPU	i8051(8bit)
	ROM	64K BYTES
	RAM	1M BYTES
	REAL TIME CLOCK	년,월,일,시각,72hr 정전보상기능
	DISPLAY	LCD채용, 20자x2행, 5x7도트, 영문전용
	A/D CONVERTER	12BIT
	입력접점	Analog : 8Channel, Digital : 24Channel
	출력접점	24Channel
	통신 PORT	RS232
	키보드	Function키 10개, 숫자키 10개
외 형	FIBOX	재질:PC, 뚜껑:투명PC, L380xW280x180xT2

제 5 절 제어 및 센싱항목

온실내 제어요소 및 센서의 구성은 표 3.에서 보는 바와 같다. 센서는 먼저 온실 동별로 내부에 온도, 습도, CO₂ 센서를 한개씩 설치하였고, 온실외부에 공통센서로 풍향, 풍속, 일사, 강우, 우적, 온도, 습도 센서를 1조 설치하여 온실내외 기상자료 입력에 이용하였다.

제어요소는 일반농가의 제어요소와 유사하게 천·측창, 온풍기, 환풍기, 커튼, CO₂ 발생기, 점적관수 등을 설치하여 이들요소의 제어를 통해 온실내 환경을 최적화하려고 시도하였다.

표 3. 온실제어요소 및 센서 일람

구분	위치	종류	비고
입력센서	외부	풍향, 풍속, 강우, 우적, 일사, 온도, 습도 (각1개)	공통센서
	내부	온도, 습도, CO ₂ (각1개)	온실별 개별설치
제어출력	내부	천창모터(2개), 측창모터(2개), 보온커튼(1개), 온풍기(1대), CO ₂ 발생기(1대), 환기팬(2개), 점적관수(1조)	온실별 개별설치

제 6 절 온실계전함 사양

일반 시설재배농가에서도 계전박스는 반드시 설치되어 있다. 단지 일반적인 계전 박스는 Timer를 이요한 단순제어기에 불과하다. 본 연구개발에서도 일반농가의 제어기와 유사한 형태의 제어를 제작하였으나, 앞서 설명한 환경제어기의 신호를 계전기에 원활히 전달하고 동작기(Actuator)에서 발생하는 Limit신호를 제어기에 전달하기 위하여 Digital Relay Board를 추가로 설치하여 종합적인 제어 시스템이 되도록 하였다. 그외 천·측창 모터구동을 위해 24Volt Transformer와 개별 Magnetic Relay의 안전을 위해 Overload Relay를 설치하는 등의 구성은 일반적인 계전기와 유사하다고 할 수 있다.

다음은 개별온실계전박스의 주요 기능을 열거하였다.

- 과부하차단 및 누전차단부

동작기에 이상발생(합선 등)으로 과부하가 걸릴 경우, 온실의 화재등의 위험성을 배제하기 위하여 각각의 동작기에 과부하 차단기를 설치함. 또한 누수 또는 누전 및 사람의 감전 등의 위험을 방지하기 위해 누전 차단기를 설치함

- 제어명령해석부

컨트롤러의 명령을 해석하여 동작기를 제어 할 수 있도록 하여 주는 장치로 무점점스위치로 구성함

- 수동제어부

자동제어가 실패하거나 부득이하게 수동제어를 하여야 할 경우 스위치를 사용하여 직접 수동제어를 할 수 있도록 함

- 동작기제어부

동작기에 전원을 공급하여 동작하도록 하는 릴레이와 마그네트로 구성되며, 리미트스위치의 입력을 참조하여 동작하도록 함. 또한 리미트스위치의 정보는 컨트롤러에 넘겨 줄 수 있도록 함

- 동작기상태정보 자료입력부

리미트 스위치정보 센서의 자료를 입력받는 단말기로 구성되며 입력받

은 자료는 컨트롤러에 입력되도록 알맞게 가공함

- 계기부

전압계, 전류계, 기타 동작기 상황표시등을 설치하여 온실에서 사용하고 있는 전원의 상태, 사용전류량 및 동작기의 상태를 표시하여, 온실의 이상유무를 확인할 수 있도록 함

- 기타부대장비

캐비닛내에 등을 설치하여 작업성을 좋게 하며, 냉각팬을 설치하여 계장내 온도상승을 방지함. 또한 잠금장치를 하여 안전성을 도모 함

제 3 장 온실 미기상 예측모델의 개발

제 1 절 서 언

온실은 피복재에 의하여 외부와 격리되어 외부기상과는 매우 다른 환경이 조성되며, 이로 인하여 외부기상이 부적절한 시기에도 작물재배가 가능하다. 온실기후나 외부기후와 달리 조성되는 것은 주로 다음의 다음의 두 가지 원인에 기인된다. 즉 온실은 피복재에 의하여 공기가 갇힘으로서 그렇지 않은 외부공기에 비해 주위 공기와 교환이 현저하게 감소되며 또한 풍속이 매우 약화된다. 공기교환의 감소는 직접적으로 온실의 에너지와 물질수지에 영향하며 풍속의 감소는 온실공기와 온실에서 자라는 식물, 토양, 피복재 등 온실 구성체와의 에너지, 수증기, 탄산가스 등의 교환에 영향하기 때문이며, 두번째는 온실피복재의 광학적 등성에 기인하는 것으로서 피복재는 온실 안에서의 모든 에너지 수지에 직접적으로 영향하기 때문이다. 온실의 미기상은 직접적으로 작물의 생장에 영향을 하기 때문에 미기상을 정확히 예측하고 작물의 생장에 가장 알맞은 환경이 되도록 조절하는 것은 매우 중요하며 이를 위해서 온실에서 일어나는 물리적 과정을 수식화하여 외부기상조건의 변화에 따른 온실기상의 변화를 예측하기 위한 모델 개발 연구가 활발히 진행되어 왔으며 (Avisar et al, 1982; Takakura et al, 1971; Kindelan, 1980; Bot, 1989; Kimball, 197) 이 모델들 을 온실의 설계와 온실미기상의 최적화를 위한 도구로 이용하기 위한 연구도 이루어지고 있다. (Houter, 1990; Van Henten and Bontsema, 1991; Gitzen et al, 1990; Gitzen and Cate, 1988). 미기상모델을 이와 같은 목적에 이용하기 위해서는 첫째 정확하게 미기상을 예측할 수 있어야 하며 두번째는 다양한 환경조건에서 특정 시스템에도 적용될 수 있도록 가변성 있게 설계가 되어야 한다(Avisar and Mahrer, 1982). 이와 같은 기준에 부합되기 위해서는 쉽게 관측이 되고 온실에 의하여 영향을 받지 않는 환경인자를 1차적인 경계조건으로 이용하여야 하며 또한 온실시스템을 쉽게 측정이 될 수 있는 물리적·생리적 특성으로 명료하게 정의되어야 한다.

본 연구에서는 온실의 각 층위에서의 에너지 및 물질수지 방정식들을 구성하고 기온, 습도, 풍속, 일사량 등 종관기상자료와 온실요소의 열적·광학적 특성을 제 1차 경계조건으로 하여 방정식들을 풀어서 온실내의 미기상요소들을 예측할 수 있는

모델을 개발하고자 하였으며 궁극적으로는 이 모델을 온실 복합환경최적화 논리 개발에 이용하고자 하는 것이다.

제 2 절 모델의 설계

1. 모델의 가정

온실은 피복재, 보온피복재, 작물군락, 멀칭, 토양층위들로 구성되어 있으며 이들은 수직층위를 이루고 있으며, 토양층을 제외한 모든 층위는 수직·수평적으로 균질한 것으로 가정하였으며 토양 층위는 균질한 10개의 층위로 세분하였다. 시스템의 상부 경계조건은 온실외부의 기온, 습도, 풍속, 단파복사, 대기의 장파복사로 하며 하부 경계조건은 simulation기간 중 변화하지 않는 토양최심층으로 하였다. 에너지와 물질 flux는 수직방향으로만 일어나고 수평방향 flux는 일어나지 않는 것으로 가정하였으며, 온실 대기중의 수증기뿐만 아니라 식물체, 내부공기, 피복재는 온실에서 일어나는 열류속에 비하면 매우 적기 때문에 이들에 의한 저열은 무시하였다.

2. 온실의 에너지 flux와 수지

그림 3.1은 본 모델에서 고려한 모든 에너지 flux를 나타낸 것이며 각 층(layer)에서 에너지 수지식은 다음과 같다. 그림에서 각 화살표는 개개의 에너지 또는 물질 flux를 나타내며 이들 각각에 대하여 flux식을 유도하였다.

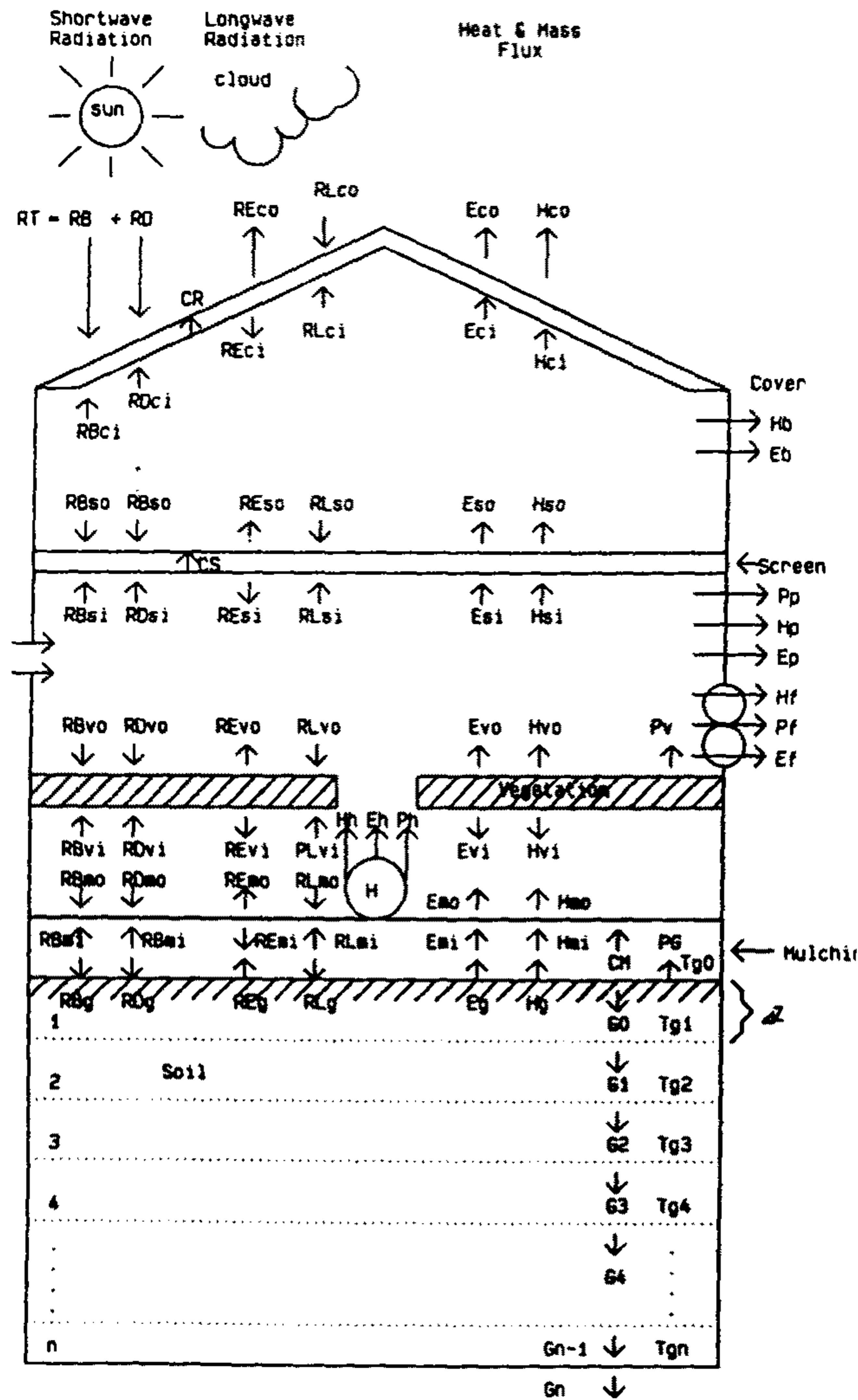


Fig. 3.1 Schematic representation of heat and mass fluxes in the greenhouses

가. 외피복층

온실은 1층의 외부 피복재로 되어 있으며 피복재에는 저열이 되지 않는 것으로 가정하면 피복의 상부와 하부에서의 에너지 수지식은 다음과 같이 쓸 수 있다.

- 상부

$$RB_{co} + RD_{co} + RE_{co} - RL_{co} + CR - Eco - Hco = 0 \dots\dots\dots 1)$$

- 하부

$$RB_{ci} + RD_{ci} + RE_{ci} - RL_{ci} - CR + Eci + Hci = 0 \dots\dots\dots 2)$$

나. 보온 피복층

외피복내부에 1층의 차광막 또는 보온 피복재가 있는 경우를 가정하여 다음과 같이 피복 상하부에서의 에너지 수지식을 구성하였다.

- 상부

$$RB_{so} + RD_{so} + RE_{so} - RL_{so} + CS - Eso - Hso = 0 \dots\dots\dots 3)$$

- 하부

$$RB_{si} + RD_{si} + RE_{si} - RL_{si} - CS + Esi + Hsi = 0 \dots\dots\dots 4)$$

다. 외피복과 보온 피복재 사이의 공기층

이 층의 공기에 의한 열과 물질의 저장에 일어나지 않는 것으로 가정하였다.

- 현열수지

$$Hso - Hb - Hci = 0 \dots\dots\dots 5)$$

- 잠열수지

$$Eso - Eb - Eci = 0 \dots\dots\dots 6)$$

라. 작물군락층

작물체온, 기온, 습도, 일사량 이외의 식물생장에 영향을 주는 요소들은 이상적인 것으로 가정하여 본 모델에서는 고려를 하지 않았으며 식물체에 의한 저열은 없는 것으로 가정하면 작물군락의 에너지 수지식은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$(RB_{vo} + RB_{vi}) + (RD_{vo} + RD_{vi}) + (RE_{vo} + RE_{vi}) - (RL_{vo} + RL_{vi}) - (E_{vo} + E_{vi}) - (H_{vo} + H_{vi}) = 0 \dots\dots\dots 7)$$

마. 멀칭과 보온 피복재 사이의 공기층

공기에 의한 저열이 없는 것으로 가정하였으며 은실의 구성요소들과 열과 물질의 교환을 고려하여 다음과 같이 에너지 수지식을 구성하였다.

- 현열수지

$$(H_{vo} + H_{vi}) + H_{mo} + H_h - H_p - H_f - H_{si} = 0 \dots\dots\dots 8)$$

- 잠열수지

$$(E_{vo} + E_{vi}) + E_{mo} + E_h - E_p - E_f - E_{si} = 0 \dots\dots\dots 9)$$

바. 멀칭층

토양피복재에 의한 저열을 무시하면 피복의 상하부의 열수지식은 다음과 같이 쓸 수 있다.

- 상부

$$RB_{mo} + RD_{mo} + RE_{mo} - RL_{mo} + CM - E_{mo} - H_{mo} = 0 \dots\dots\dots 10)$$

- 하부

$$RB_{mi} + RD_{mi} + RE_{mi} - RL_{mi} - CM + E_{mi} + H_{mi} = 0 \dots\dots\dots 11)$$

사. 멀칭과 토양표면사이의 공기층

공기에 의한 열과 수증기의 저장을 무시하면 여기서의 잠열의 수지는 다음과 같이 쓸 수 있다.

- 현열수지

$$H_g - H_{mi} = 0 \dots\dots\dots 12)$$

- 잠열수지

$$E_g - E_{mi} = 0 \dots\dots\dots 13)$$

아. 토양층

토양층은 토양표층토와 그 하부의 10개층으로 구성하였으며 표층에서 에너지 수지식은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$(RB_g + RD_g) + RE_g - RL_g - E_g - H_g - G_o = 0 \dots\dots\dots 14)$$

표층과 각 토양 층위에서는 다른 층위와 달리 불균질(깊이에 따라서 토양수분 및 온도가 다르다.)한 것으로 가정하였으며 일차원 열확산 방정식으로부터 각 층위의 에너지 수지식은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$C_{vgi} \Delta Z_i \frac{\partial T_{gi}}{\partial t} = G_{g-i} - G_i (i = 1, \dots, n) \dots\dots\dots 15)$$

* C_{vgi} : volumetric heat capacity ($\text{j/m}^3/\text{K}$)

2. 모델 flux 방정식

모델의 각 flux를 계산하기 위한 방정식들은 다음과 같다.

가. 온실외부의 태양복사

태양복사(RT)의 산란성분(RD)과 직달성분(RB)는 Erbs et al(1982)에 따라 다음과 같이 계산하였다.

- 산란복사(RD)

$$RD = RT \cdot mt$$

$$\begin{aligned} mt &= 1 - 0.09A_{tr}, & 0 \leq A_{tr} \leq 0.22 \\ &= 0.9511 - 0.1604A_{tr} + 4.388(A_{tr})^2 - \\ &\quad 16.638(A_{tr})^3 + 12.336(A_{tr})^4, & 0.22 \leq A_{tr} \leq 0.80 \\ &= 0.165, & A_{tr} \geq 0.80 \end{aligned}$$

- 직달복사(RB)

$$RB = RT - RD$$

대기권의 태양복사(R_{ex})는 태양상수(S_c)와 태양의 천정각으로부터 다음과 같이 계산하였으며,

$$R_{ex} = S_c \cos \theta_z = S_c \sin \alpha$$

대기의 투과율은 지상에서 측정된 수평면일사량(RT)과 대기권의 태양복사로부터 다음과 같이 계산하였으며 이들의 계산에 필요한 변수들은 다음과 같이 계산하였다.

$$A_{tr} = RT / R_{ex}$$

RT ; global solar radiation ($J/m^2 \cdot sec$)

태양고도(α)와 천정각(θ_z)은 다음과 같이 계산하였다.

$$\cos \theta_z = \sin \alpha = \sin \delta \sin \phi + \cos \delta \cos \phi \cos \omega$$

θ_z ; zenith, α ; solar elevation ϕ ; latitude

δ ; solar declination

$$\delta = 23.45 \sin[360(d_n + 284)/365](\pi/180)$$

d_n ; julian day

온실피복재에 대한 직달태양복사 입사각(θ)은 다음과 같이 계산하였다.

$$\cos \theta = \cos \beta \cos \theta_z + \sin \beta \sin \theta_z \cos(\psi - \gamma)$$

ψ ; solar azimuth[east(+), west(-)]
 γ ; azimuth of the outside wall of greenhouse

$$\cos \psi = (\sin \alpha \sin \phi - \sin \delta) / (\sin \alpha \sin \phi)$$

$$0 \leq \psi \leq \pi/2, \quad \cos \psi \geq 0$$

$$\pi/2 \leq \psi \leq \pi, \quad \cos \psi \leq 0$$

태양상수(S_c)는 다음과 같이 계산 하였다.

$$S_c = S_0[1 + 0.033 \cos(2\pi d_n/365)]$$

$$S_0 = 1370J/(m^2 \cdot sec)$$

나. 온실내의 태양복사

온실외부의 태양복사가 피복재를 투과하여 온실내부로 들어오는 태양복사의 각 피복재 표면에서의 복사 수지를 계산하기 위하여 필요한 사항들을 Takakura et al(1975)에 따라 다음과 같이 계산하였다.

온실내부 보온피복재의 그늘진 부분(Pssl)과 햇빛을 직접 받는 부분(Pcsh)의 외피 전체 면적에 대한 비율

$$P_{csl} = \frac{1}{A_c} \sum_{i=1}^n A_{ci}, \quad \theta > 0$$

$$P_{csh} = \frac{1}{A_c} \sum_{i=1}^n A_{ci}, \quad \theta \leq 0$$

A_c ; total cover surface area

A_{ci} ; cover surface area with tilt angle, β and azimuth, γ

온실내부 보온피복재의 그늘진 부분(Pssl)고 햇빛을 직접 받는 부분(Pssh)의 전체 면적에 대한 비율

$$P_{ssl} = \frac{1}{A_s} \sum_{i=1}^n A_{si}, \quad \theta > 0$$

$$P_{ssh} = \frac{1}{A_s} \sum_{i=1}^n A_{si}, \quad \theta \leq 0$$

A_s ; total screen surface area

A_{si} ; screen surface area with tilt angle, β and azimuth, γ

평균 형태 계수의 계산

- 외피복의 하늘을 보는 형태계수

$$CF_c = \frac{1}{A_c} \sum_{i=1}^n A_{ci} \frac{1 + \cos \beta_i}{2},$$

β ; tilt angle of the surface

- 보온 피복재의 하늘을 향한 형태계수

$$CF_s = \frac{1}{A_s} \sum_{i=1}^n A_{si} \frac{1 + \cos \beta_i}{2},$$

β ; tilt angle of the surface

- 온실의 부지면의 외피에 대한 형태계수

$$CF_{gc} = \frac{1}{A_c} \sum_{i=1}^n A_{ci} \frac{1 - \cos \beta_i}{2},$$

β ; tilt angle of the surface

직달태양복사의 평균 입사각

- 외피복에 대한 입사각

$$\theta_{ca} = \frac{1}{A_c} \sum_{i=1}^n A_{ci} \theta_i$$

- 보온피복에 대한 입사각

$$\theta_{sa} = \frac{1}{A_s} \sum_{i=1}^n A_{si} \theta_i$$

(1) 온실 내의 피복재에 의한 태양복사의 흡수, 반사, 투과

투명매질에 의한 복사의 반사, 흡수, 투과는 매질의 굴절계수에 의하여 결정되며 굴절계수(FI)는 Snell의 법칙에 따라서 다음과 같이 정의된다.

$$FI = \frac{\sin \theta}{\sin \theta_r}$$

θ ; incident angle

θ_r ; refraction angle

$$\theta_r = \sin^{-1}(\sin \theta / FI)$$

Lambert-Beer의 법칙에 의하면 복사가 매질의 일정 두께(fl)을 투과하면서 흡수되고 남은 비율 즉 투과율은 다음과 같이 계산된다.

$$aa = \exp(-k_c \cdot fl / \cos \theta_r)$$

k_c ; extinction coefficient(1/mm)

fl ; film thickness(mm)

Fresnel의 법칙으로부터 반사율은 다음과 같이 계산될 수 있다.

$$fr = \begin{cases} \frac{(1 - FI)^2}{(1 + FI)^2}, & \theta = 0^\circ \\ 0.5 * \left[\frac{\sin^2(\theta - \theta_r)}{\sin^2(\theta + \theta_r)} + \frac{\tan^2(\theta - \theta_r)}{\tan^2(\theta + \theta_r)} \right], & \theta > 0^\circ \end{cases}$$

이상의 관계로부터 투명피복재의 태양복사 투과(tr), 반사(re), 흡수(ab) 계수는 다음과 같이 계산된다.

$$\begin{aligned} tr &= \frac{(1 - fr)^2 \cdot aa}{(1 - fr^2 \cdot aa^2)} \\ re &= fr + \frac{fr \cdot (1 - fr)^2 \cdot aa^2}{(1 - fr^2 \cdot aa^2)} \\ ab &= 1 - tr - re \end{aligned}$$

산란 복사에 대한 흡수·반사, 투과계수의 계산에는 Kimball(1973)에 따라 태양복사의 튜효입사각이 64°C인 것으로 가정하였으며 외피와 내부 피복재에 의한 태양복사의 평균투과·흡수, 반사계수는 다음과 같이 계산하였다.

- 외피복

o 직달복사

$$\begin{aligned} tr_{cb} &= \frac{1}{A_c} \sum_{i=1}^n A_{ci} tr(\theta_i) \\ re_{cb} &= \frac{1}{A_c} \sum_{i=1}^n A_{ci} re(\theta_i) \\ ab_{cb} &= \frac{1}{A_c} \sum_{i=1}^n A_{ci} ab(\theta_i) \end{aligned}$$

○ 산란복사

$$\begin{aligned} \text{tr}_{cd} &= \text{tr}(64^\circ) \\ \text{re}_{cd} &= \text{re}(64^\circ) \\ \text{ab}_{cd} &= \text{ab}(64^\circ) \end{aligned}$$

- 온실내부 피복재

○ 직달복사

$$\begin{aligned} \text{tr}_{sb} &= \frac{1}{A_s} \sum_{i=1}^n A_{si} \text{tr}(\theta_i) \\ \text{re}_{sb} &= \frac{1}{A_s} \sum_{i=1}^n A_{si} \text{re}(\theta_i) \\ \text{ab}_{sb} &= \frac{1}{A_s} \sum_{i=1}^n A_{si} \text{ab}(\theta_i) \end{aligned}$$

○ 산란복사

$$\begin{aligned} \text{tr}_{sd} &= \text{tr}(64^\circ) \\ \text{re}_{sd} &= \text{re}(64^\circ) \\ \text{ab}_{sd} &= \text{ab}(64^\circ) \end{aligned}$$

태양복사의 온실 외피복과 내부피복재를 통한 작물군락 표면으로의 평균투과율은 다음과 같이 계산하였다.

- 외피복

○ 직달복사

$$\text{tr}_{cgb} = \frac{1}{A_g} \sum_{i=1}^n A_{csi} \text{tr}(\theta_i)$$

A_g ; ground area of the greenhouse

A_{csi} ; shaded area of cover on the ground

- 내부피복

o 직달복사

$$tr_{sgb} = \frac{1}{A_g} \sum_{i=1}^n A_{ssi} tr(\theta_i)$$

A_{ssi} ; shaded area of screen on the ground

은실 외피복과 내부피복재의 상·하부에 의한 태양복사의 흡수는 위에서 기술한 관계로부터 다음과 같이 계산할 수 있다.

(가) 외부피복 상부 표면

$$\begin{aligned} RT_{co} &= RB_{co} + RD_{co} \\ &= ab_{cb} RB (\cos \theta_{ca} / \cos \theta_z) P_{csl} + \\ &\quad ab_{cd} RD \cdot CF_c + ab_{cd} re_g RT \cdot CF_{gc} \\ &\quad re_g ; \text{reflectivity of the outside ground} \end{aligned}$$

(나) 외부피복 하부 표면

$$\begin{aligned} RT_{ci} &= RB_{ci} + RD_{ci} \\ &= ab_{cb} tr_{cb} (RB / \cos \theta_z) [re_{sb} \cos \theta_{sa} P_{ssl} A_s / A_c + \\ &\quad (tr_{sb})^2 \cos \theta_{ca} P_{csh}] + ab_{cd} tr_{cd} re_{sd} RD \cdot CF_s A_s / A_c \end{aligned}$$

(다) 내부피복 상부 표면

$$RT_{so} = RB_{so} + RD_{so}$$

$$= ab_{sb}tr_{cb}RB(\cos \theta_{sa}/\cos \theta_z)P_{ssl} + ab_{sd}tr_{cd}RD \cdot CF_s$$

(라) 내부피복 하부 표면

$$RT_{si} = RB_{si} + RD_{si}$$

$$= ab_{sb}tr_{cb}tr_{sb}RB(\cos \theta_{sa}/\cos \theta_z)P_{ssh} +$$

$$ab_{sd}re_v(A_g/A_s) \cdot (tr_{cb}tr_{sgb}RB + tr_{cd}tr_{sd}RD)$$

re_v ; canopy reflectance

식물체 군락의 반사율(albedo, re_v)은 Gourdrian(1975)에 따라서 다음과 같이 계산하였다.

$$re_v = re_c + (re_s - re_c)\exp(-2K \cdot LAI)$$

$$re_c = \frac{2}{1 + K_{bl,dif}/K_{bl}} \cdot \frac{1 - \sqrt{1-\sigma}}{1 + \sqrt{1-\sigma}}$$

$$K_{bl} = 0.5/\sin \alpha, \text{ for spherical leaf distribution}$$

$$K_{bl,dif} = 0.8$$

$$K = K_{bl}\sqrt{1-\sigma}$$

$$\sigma = \text{scattering coefficient of leaf}$$

$$re_s = \text{soil reflection coefficient}$$

(2) 작물군락에 의한 태양복사 흡수

작물군락내부에서 태양복사는 투과엽층(엽면적지수 ; LAI)의 증가에 따라 지수적으로 감소하는 것을 가정한 Monsi와 Saeki(1953)의 식을 이용하여 다음과 같이 계산하였다.

$$\begin{aligned} RT_{va} &= RT_{vo} + RT_{vi} \\ &= tr_c \cdot tr_s(1 - r_{ev})RT\{1 - \exp(-K \cdot LAI)\} \end{aligned}$$

K : canopy light extinction coefficient

r_{ev} : canopy reflection coefficient

(3) 멀칭에 의한 태양복사의 흡수

$$\begin{aligned} RT_{ma} &= RT_{mo} + RT_{mi} \\ &= RT \cdot tr_s \cdot tr_c \cdot \exp(-K \cdot LAI) \cdot ab_m \\ &\quad \cdot (1 + re_g \cdot tr_m + re_m \cdot re_v) \end{aligned}$$

(4) 토양표면에서의 태양복사 흡수

$$\begin{aligned} RT_{ga} &= RT \cdot tr_s \cdot tr_c \cdot tr_m \cdot \exp(-K \cdot LAI)ab_g \\ &\quad (1 + re_g \cdot re_m + tr_m^2 \cdot re_v \cdot re_g) \end{aligned}$$

다. 장파복사

온실의 각 층위에서의 장파복사의 흡수는 각 구성요소에 의한 1차 반사만을 고려하여 다음과 같이 계산하였다.

(1) 외피복의 장파복사 흡수

$$\begin{aligned}
 RL_c &= RL_{co} + RL_{ci} - (RE_{co} + RE_{ci}) \\
 &= \epsilon_c (1 + re_{ls} \cdot tr_{lc} + re_{lv} \cdot tr_{lc} \cdot tr_{ls}^2 \\
 &\quad + re_{em} \cdot tr_{lc} \cdot tr_{ls}^2 \cdot tr_{ev}^2 \\
 &\quad + re_{lg}^2 \cdot tr_{lc} \cdot tr_{ls}^2 \cdot tr_{lv}^2 \cdot tr_{em}^2) R_L \\
 &\quad + \epsilon_c (\epsilon_s \sigma T_s^4 + tr_{ls} \cdot \epsilon_v \sigma T_v^4 \\
 &\quad + tr_{ls} \cdot tr_{lv} \cdot \epsilon_m \sigma T_m^4 \\
 &\quad + tr_{ls} \cdot tr_{lv} \cdot tr_{em} \epsilon_g T_{go}^4) \\
 &\quad - \epsilon_c \sigma T_c^4 (2 - \epsilon_c re_{ls} - \epsilon_c tr_{ls}^2 \cdot tr_{lv}^2 \cdot re_m \\
 &\quad - \epsilon_c tr_{ls}^2 \cdot tr_{lv}^2 \cdot tr_{lm}^2 \cdot re_{lg})
 \end{aligned}$$

(2) 내부 피복의 장파복사 흡수

$$\begin{aligned}
 RL_s &= RL_{so} + RL_{si} - (RE_{so} + RE_{si}) \\
 &= \epsilon_s (1 + tr_{ls} \cdot re_{lv} + tr_{ls} \cdot tr_{lv}^2 \cdot re_{lm} \\
 &\quad + tr_{ls} \cdot tr_{lv}^2 \cdot re_{lg}) tr_{lc} \cdot R_L + \epsilon_s (\epsilon_c \sigma T_c^4 \\
 &\quad + tr_{ls} \epsilon_v \sigma T_c^4 + tr_{ls} \cdot tr_{lv} \epsilon_m \sigma T_c^4 \\
 &\quad + tr_{ls} \cdot tr_{lv} \cdot tr_{lm} \epsilon_g \sigma T_{go}^4) \\
 &\quad - \epsilon_s \sigma T_s^4 (2 - \epsilon_s re_{lc} - \epsilon_s re_{lv} \\
 &\quad - \epsilon_s re_{lm} \cdot tr_{lv}^2 - \epsilon_s re_{lg} \cdot tr_{lv}^2 \cdot tr_{lm}^2)
 \end{aligned}$$

(3) 작물군락에 의한 장파복사 흡수

$$\begin{aligned}
 RL_v &= RL_{vo} + RL_{vi} - (RE_{vo} + RE_{vi}) \\
 &= \epsilon_v (1 + tr_{lv} \cdot re_{lm} + tr_{lv} \cdot tr_{lm}^2 \cdot re_{lg}) \\
 &\quad tr_{lc} \cdot tr_{ls} \cdot R_L + \epsilon_v (tr_{ls} \cdot \epsilon_c \sigma T_c^4 + \\
 &\quad \epsilon_s \sigma T_c^4 + \epsilon_m \sigma T_m^4 + tr_{lm} \epsilon_g \sigma T_{go}^4) \\
 &\quad - \epsilon_v \sigma T_v^4 (2 - \epsilon_v re_{lc} tr_{ls}^4 - \epsilon_v re_{ls} \\
 &\quad - \epsilon_v re_{lm} - \epsilon_v re_{lg} \cdot tr_{lm}^2)
 \end{aligned}$$

(4) 멀칭에 의한 장파복사 흡수

$$\begin{aligned}
 RL_m &= RL_{mo} + RL_{mi} - (RE_{mo} + RE_{mi}) \\
 &= \epsilon_m (1 + re_{lg}) tr_c \cdot tr_s \cdot tr_v \cdot R_L + \\
 &\quad \epsilon_m (tr_{ls} \cdot tr_{lv} \cdot \epsilon_c \sigma T_c^4 + tr_{lv} \epsilon_s \sigma T_s^4 + \\
 &\quad \epsilon_v \sigma T_v^4 + \epsilon_g \sigma T_{go}^4) - \epsilon_m \sigma T_m^4 (2 - \\
 &\quad \epsilon_m re_{lc} \cdot tr_{ls}^2 \cdot tr_{lv}^2 - \epsilon_m re_{ls} \cdot tr_{lv}^2 - \\
 &\quad \epsilon_m re_{lv} - \epsilon_m re_{lg})
 \end{aligned}$$

(5) 토양표면에 의한 장파복사 흡수

$$\begin{aligned}
 RL_g &= RL_{go} - RE_{go} \epsilon_g tr_c \cdot tr_s \cdot tr_v \cdot tr_m R_L + \\
 &\quad \epsilon (tr_{ls} \cdot tr_{lv} \cdot tr_{lm} \epsilon_c \sigma T_c^4 + tr_{lv} \cdot tr_{lm} \cdot \epsilon_s \sigma T_s^4 \\
 &\quad + tr_{lm} \cdot \epsilon_v \sigma T_v^4 + \epsilon_m \sigma T_m^4) - \epsilon_g \sigma T_g^4 (1 - \\
 &\quad \epsilon_g re_{lc} \cdot tr_{ls}^2 \cdot tr_{lv}^2 \cdot tr_{lm}^2 - \epsilon_g re_{ls} \cdot tr_{lv}^2 \cdot tr_{lm}^2 \\
 &\quad - \epsilon_g re_{lv} \cdot tr_{lm}^2 - \epsilon_g re_{lm})
 \end{aligned}$$

* $(\epsilon_c, \epsilon_s, \epsilon_v, \epsilon_m, \epsilon_g), (rl_{lc}, rl_{ls}, rl_{lv}, rl_{lm}, rl_{lg}),$
 $(tr_{lc}, tr_{ls}, tr_{lv}, tr_{lm}, tr_{lg})$ 는 각각 외피복, 내부피복,
 작물군락, 멀칭, 토양의 복사능, 반사능, 투과능이다.

천공으로부터의 장파복사는 다음과 같은 Brunt의 식을 이용하여 계산하였다. 여기서 T_{out} 는 외기온이며 e 는 외기의 수증기압 σ 는 Stefan-Boltzman상수이다.

$$* R_L = \sigma T_{out}^4 (0.45 + 0.06\sqrt{e})$$

라. 전도, 대류, 환기

(1). 토양의 열전도

$$G = -K_s \frac{\delta T_g}{\delta Z}$$

K_s : thermal conductivity

(2) 현열과(H)과 잠열(E) flux

$$H = \rho c_p h \Delta T$$

$$E = \rho \lambda h \nabla Tq$$

ρ : density of air

c_p : specific heat of air

ΔT : temperature difference

λ : latent heat of vaporization

Δq : specific humidity difference

h : heat transfer coefficient

$$h = \begin{cases} 0.213 |\Delta T|^{0.25} \dots \Delta T > 0 \\ \text{(inside the greenhouse)} \\ 0.113 |\Delta T|^{0.25} \dots \Delta T < 0 \\ \text{(outside the greenhouse)} \\ \frac{K_o u^*}{\phi} \end{cases}$$

K_o : von Karman constant(0.4)

u^* : friction velocity

ϕ : non-dimensional profile function

(3) 환기에 의한 현열(H_f)과 잠열(E_f) 손실

$$H_f = \rho c_p h_{ven}(T_{in} - T_{out})$$

$$E_f = \rho \lambda h_{ven}(q_{in} - q_{out})$$

h_{ven} : ventilation transfer coefficient

T_{in} : air temperature inside the greenhouse

q_{in} : specific humidity inside the greenhouse

T_{out} : air temperature outside the greenhouse

q_{out} : specific humidity outside the greenhouse

3. 모델의 수치 해법

그림 3.2는 모델 방정식들의 수치해법을 나타내는 흐름도이다. 온실의 형태, 크기 등 일반적인 특성치, 토양, 식물 및 피복재의 열적 및 광학적 특성, 엽면적 지수, 토양온도 등이 내부 입력상수 또는 초기치 자료로서 필요하며 외부 입력 자료로서는 기온, 습도, 일사량, 풍속 등의 외부기상조건이 필요하다. 수치해법의 순서는 다음과 같다.

- ① 전방유한차분법에 의한 각층의 토양온도를 예측한다.
- ② 환경적변수 값들을 이용하여 온실 내외부 공기의 전달계수를 계산한다.
- ③ 에너지 및 물질수지 방정식들로부터 Newton-Raphson방법에 의하여 토양표면온도, 멀칭표면온도, 작물군락온도, 피복재의 온도와 습도를 계산한다. 모든 방정식들의 온도와 습도에 대하여 적절한 해에 이를때까지 ② 단계를 반복한다.
- ④ 다음의 time step에 대하여 ①~④를 반복한다.

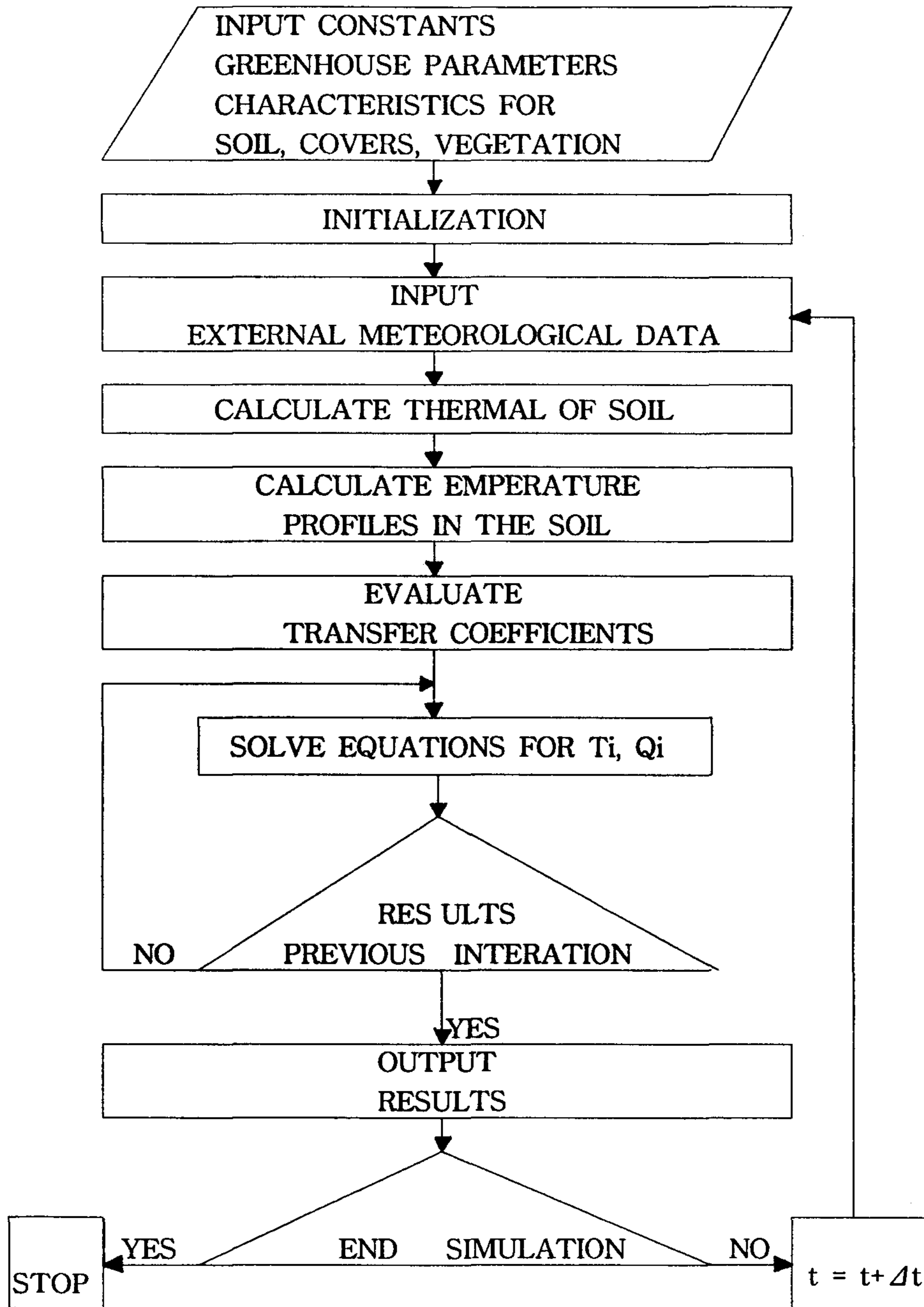


Fig. 3.2 Flow chart for the computer program of the model

제 3 절. 모델 검증을 위한 기상관측과 모델의 검증

1. 기상관측

미기상 모델의 파라미터추정과 검증을 위하여 온실 내외부의 풍속, 온도, 습도, 일사량, 순복사량, 지중열류량, 토양온도, 토양수분 등 관측 실험을 실시하였다. 온실 내외부 기상의 관측은 서울대학교 농업생명과학대학 부속농장에 본 연구를 위하여 설치된 프라스틱 온실에서(70m²/동)에서 토마토가 재배되고 있는 상태에서 5월 27일에서 8월 17일까지 실시되었으며, 또한 가을철과 겨울철의 기상자료를 수집하기 위하여 9월 29일부터 동일한 온실에서 토마토를 재배하면서 현재 관측이 진행되고 있다. 온실내외부의 기상관측 요소의 측정기의 설치는 그림 3.3과 같다. 모든 기상요소는 data logger(Campbell Scientific Inc.)로 10초마다 관측하여 10분간의 평균치를 기록하였다.

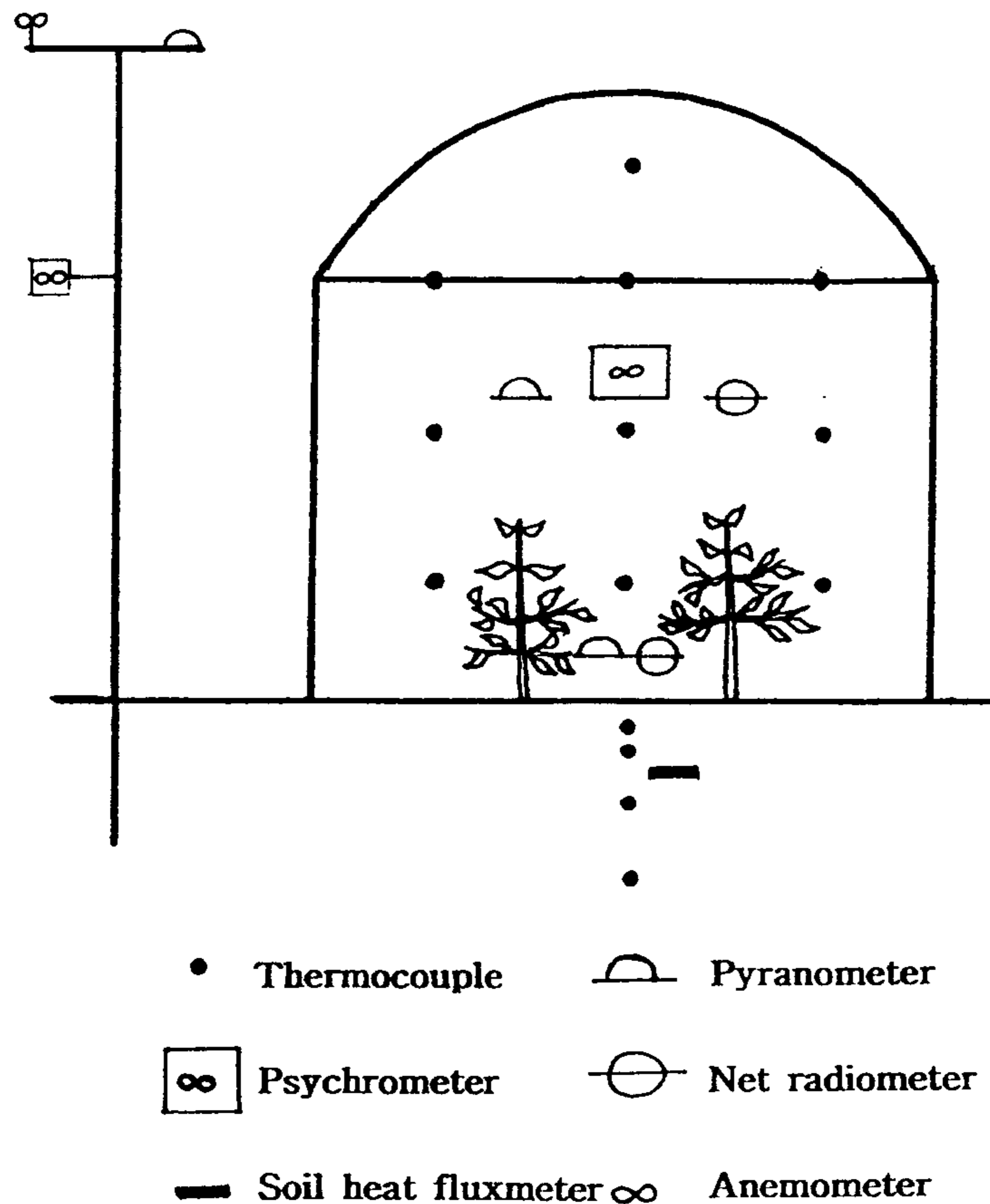


Fig. 3.3 Schematic representation of micrometeorological instrument setup in the greenhouse.

2. 기상관측결과 및 모델 검증

가. 기상관측결과

온실외부기상조건의 변화에 따른 온실미기상의 변화특성을 살펴보기 위하여 청명한 기상상태를 보였던 10월 3일의 온실 내외부의 일사량, 순복사량, 기온, 습도, 지온 등을 다음의 그림으로 나타내었다.

그림3.4는 온실외부, 온실내부의 균락 위와 아래에서의 일사량을 나타낸 것으로서 관측일의 일사량은 각각 $17.0\text{MJ/m}^2/\text{day}$, $14.6\text{MJ/m}^2/\text{day}$, $8.3\text{MJ/m}^2/\text{day}$ 로 피복재를 투과해서 온실내부로 입사된 일사량은 외부일사량의 85%, 균락을 투과하여 지면에 도달된 일사량은 총일사량의 49%, 균락상부 일사량의 54%정도였다. 한편 균락이 흡수한 일사량은 $6.3\text{MJ/m}^2/\text{day}$ 로 온실외부 일사량의 약 37%, 내부일사량의 43%정도였다.

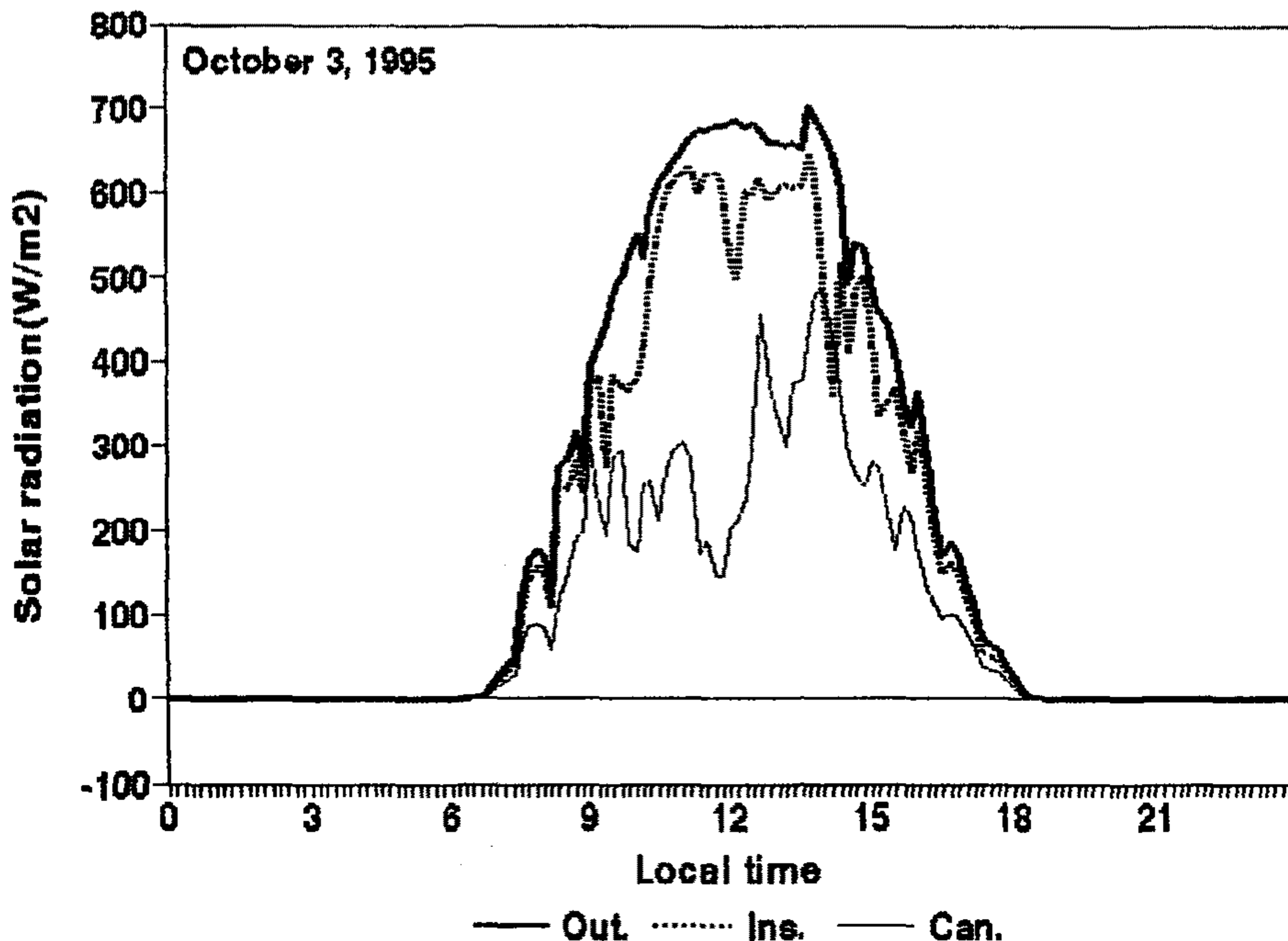


Fig. 3.4 Diurnal marches of solar radiation flux densities outside(Out) the greenhouse, and above(Ins) and below the canopy(Can) in the greenhouse on a clear day.

온실내의 균락 상부에서의 일사량과 순복사량, 균락하부에서의 순복사량 및 지중열류속의 일변화를 나타낸 것이 그림 3.5이다. 균락상부와 하부에서의 순복사는 해가 뜬 후 30분정도까지, 해가 지기전 30분~1시간전부터 음(-)의 값을 나타내어 야간에는 복사냉각이 이루어지고 있으며, 지중열류속은 9시~21시 사이에는 정(+)의 값을 그외의 시간에는 부의 값을 나타내었다. 낮에 토양중에 저장이 되었던 열이 밤에는 지표로 향하여 지표면으로부터의 복사냉각에 의한 열손실을 보충한다. 관측일의 총 순복사량은 7.9MJ/m²/day로 온실내부 일사량의 54%, 균락하부의 순복사는 3.9MJ/m²/day로 일사량의 23%, 지중열류속은 1.1MJ/m²/day/sec로 일사량의 10%미만이였다. 식물균락이 흡수한 순복사량은 4.0MJ/m²/day로서 균락상부 복사량의 약 50%정도였다.

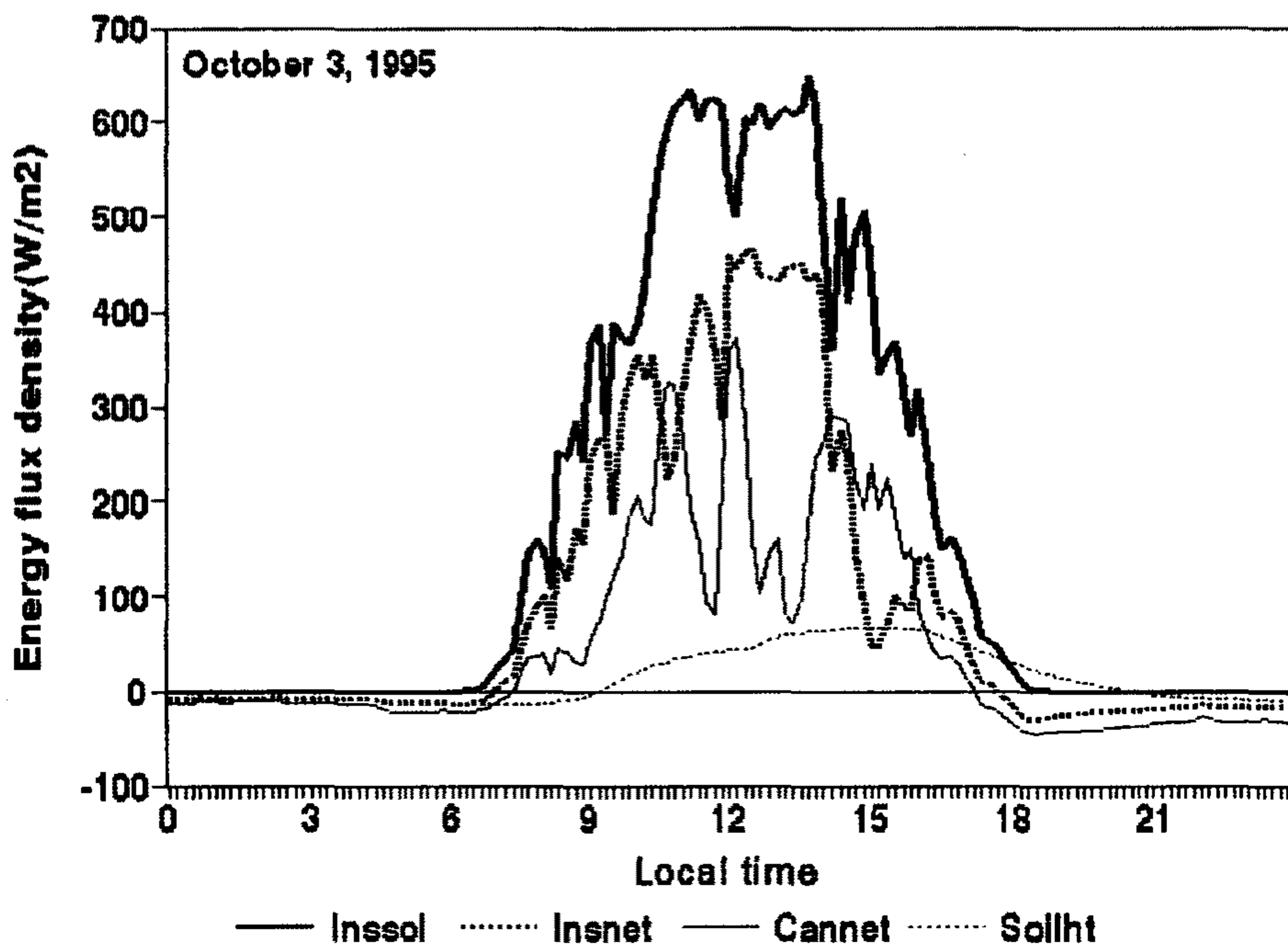


Fig. 3.5 Diurnal marches of solar radiation in the greenhouse(Insol), net radiation above(Insnet) and below(Cannet) the canopy, and soil heat flux(Soilht) on a clear day.

온실내외부의 온도변화를 나타낸 것이 그림 3.6이다. 야간의 기온은 온실 내·외부간에 큰 차이가 없으며 최고 기온은 외기온에 비하여 약 20℃ 정도 높았다.

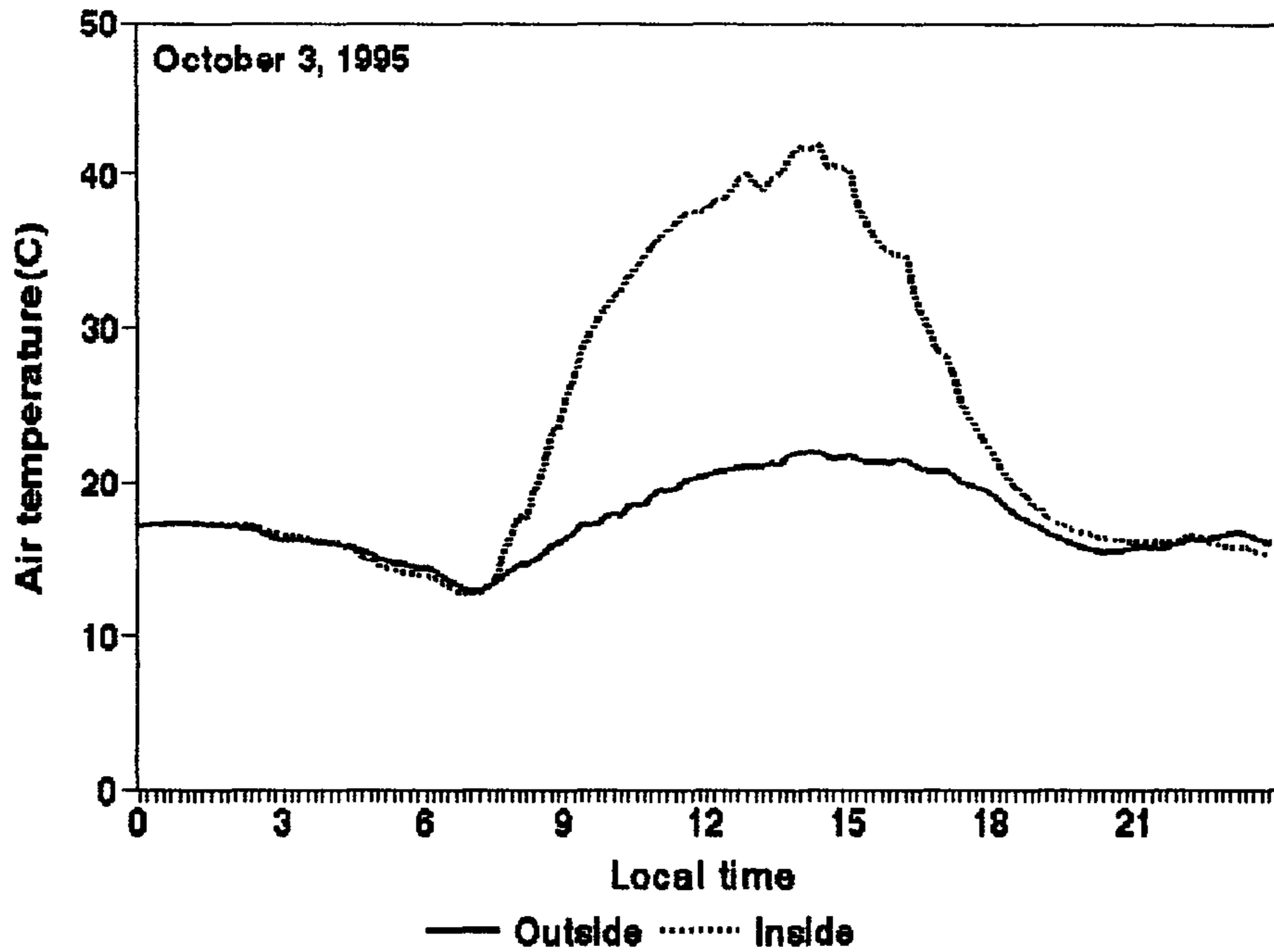


Fig. 3.6 Diurnal marches of air temperature outside and inside the greenhouse on a clear day.

온실내외부의 상대습도와 포차는 그림 3.7에서 보는 바와 같다. 상대습도는 주야간 모두 온실내부가 높았으나 포차는 온실의 경우 거의 0 mb에 가까워 외부에 비하여 낮았으나 낮에는 온도의 상승으로 인하여 포차가 외부보다 현저하게 높았다.

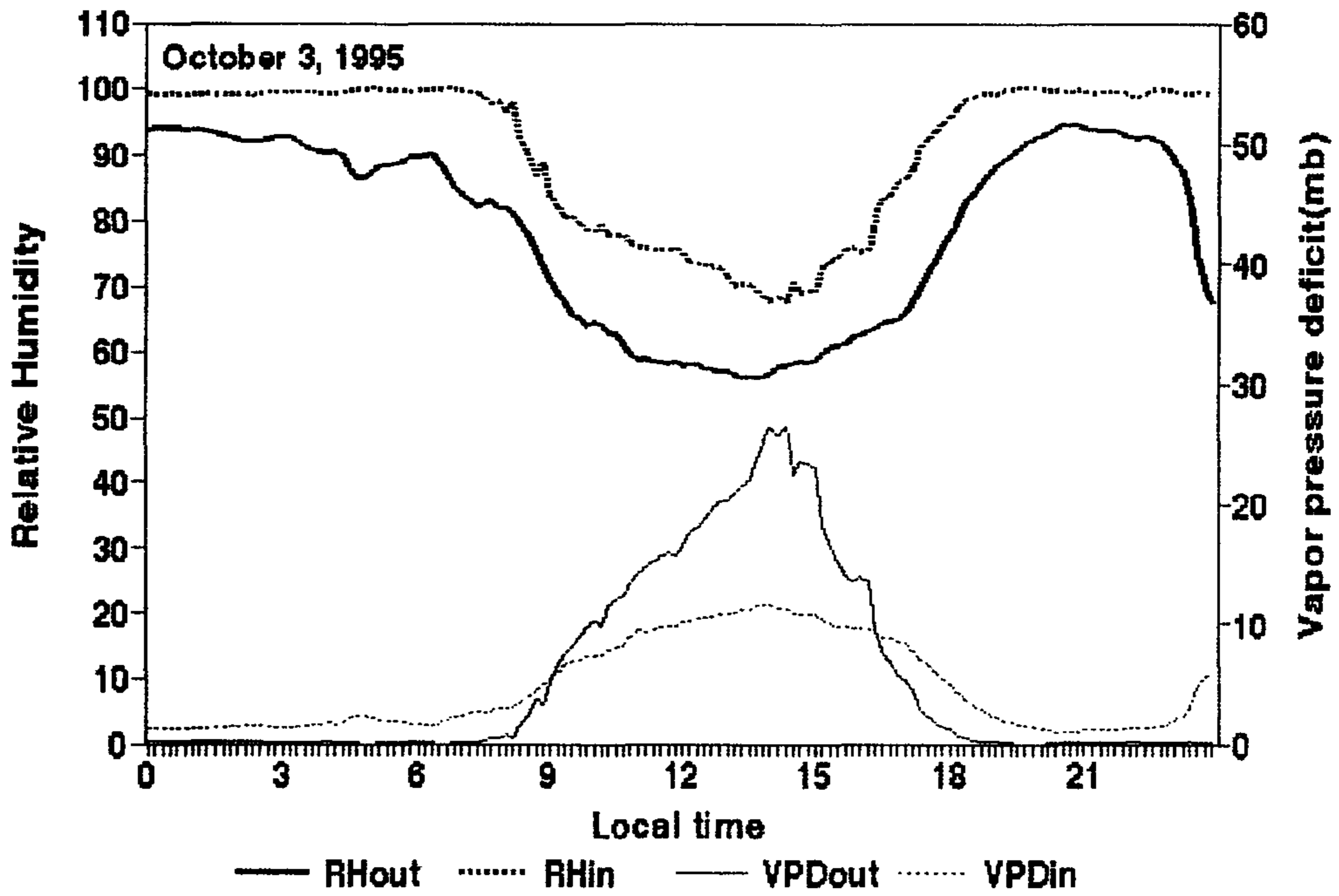


Fig. 3.7 Diurnal marches of relative humidity(RH) and vapor pressure deficit(VPD) inside(in) and outside(out) the greenhouse on a clear day.

온실내부 토중 2cm, 10cm, 20cm 및 40cm에서 토양온도의 일변화(그림 3.8) 특성을 보면 지표에 가까운 층일수록 일변화 진폭이 크고 깊이 들어갈수록 그 진폭이 작아 지 중40cm에서는 거의 일변화를 보이지 않았다.

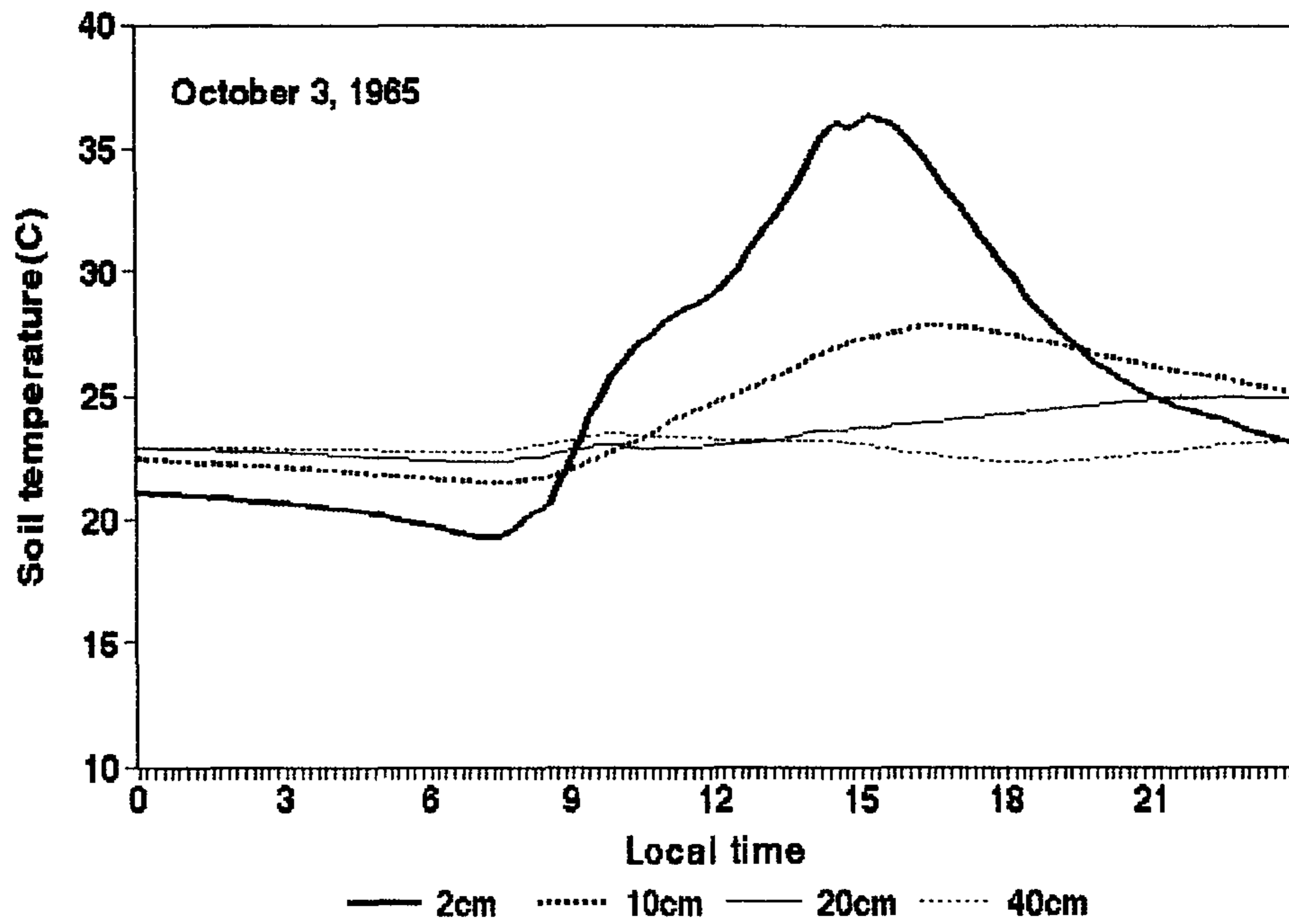


Fig. 3.8 Diurnal marches of soil temperatures of different soil depths in the greenhouse on a clear day.

나. 모델의 검증

컴퓨터 프로그램이 완료된 온실의 일사량 투과 모듈에 온실퍼복재의 광학적 특성과 외부일사량을 입력하여 계산된 온실내부에서의 수평면 일사량과 광합성유효복사를 실측치와 대비시켜 나타낸 것이 각각 그림 3.9와 3.10으로서 측치와 예측치가 매우 잘 일치하였다.

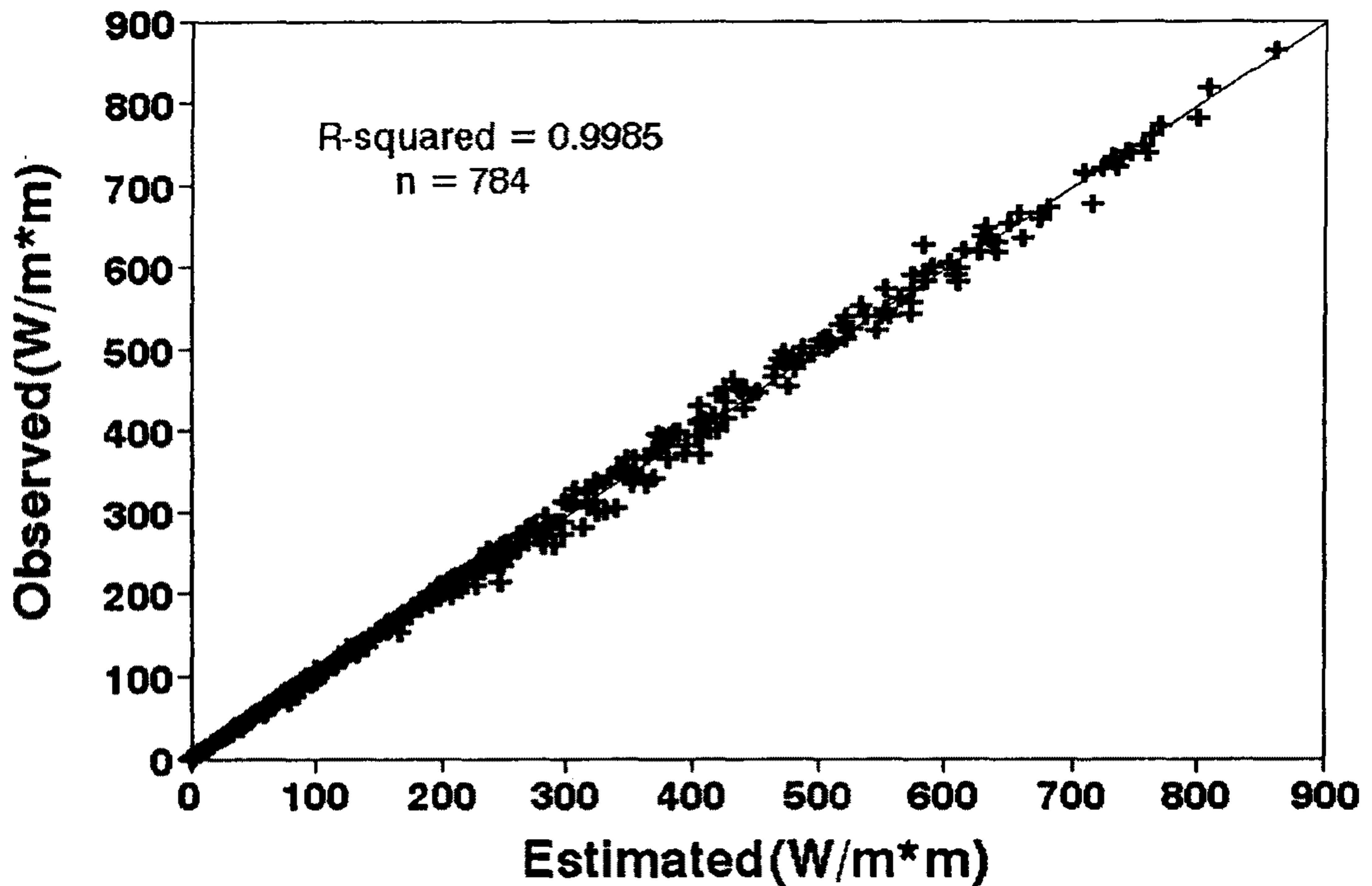


Fig. 3.9 Solar radiation inside the greenhouse observed and calculated by the model developed. Each point in the figure represents 10 minutes average radiation.

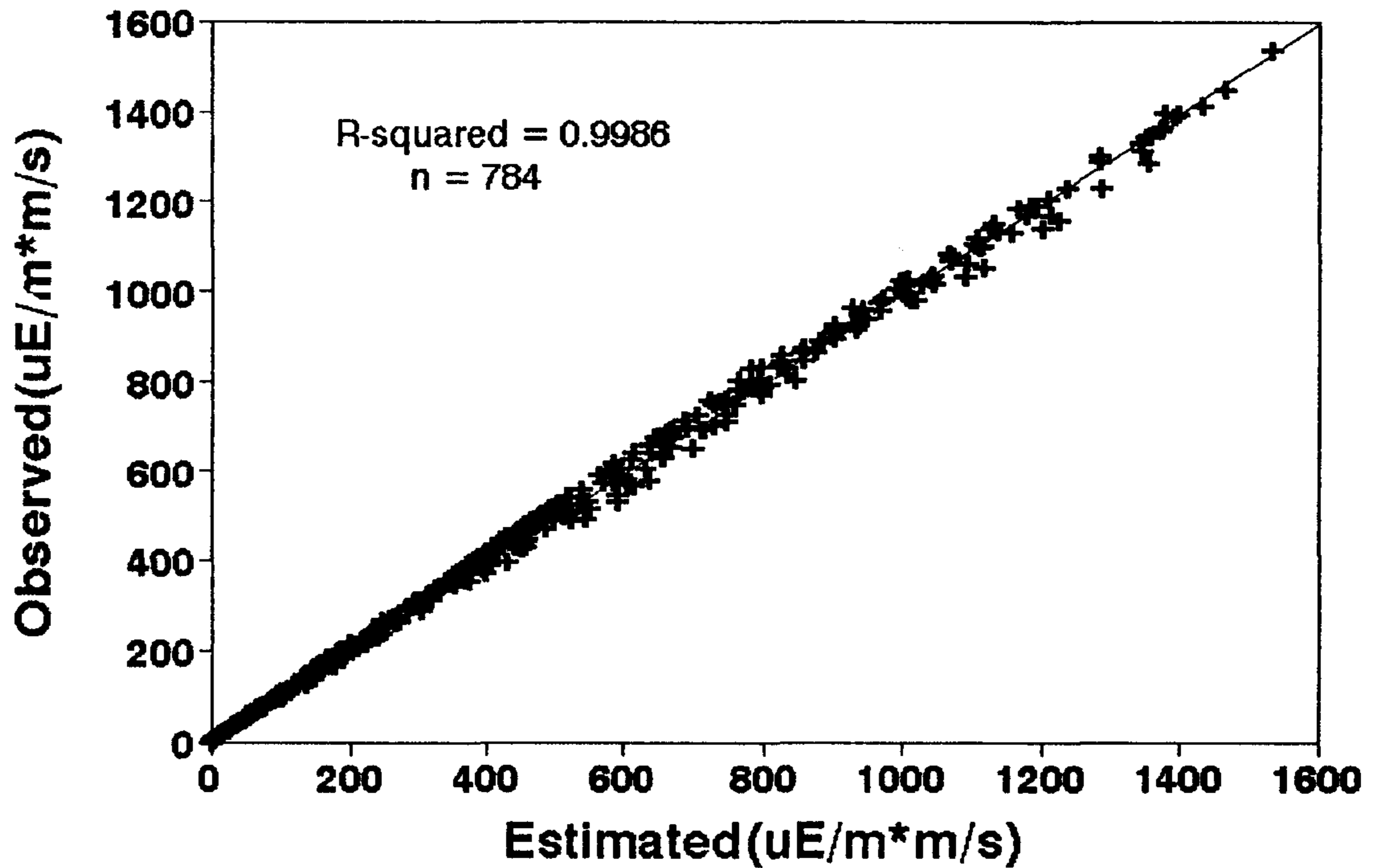


Fig. 3.10 Photosynthetically active radiation inside the greenhouse observed and calculated by the model developed. Each point in the figure represents 10 minutes average PAR.

일사량외의 온실내 온도, 습도 등에 대한 모델검증은 기 관측된 기상자료와 현재 진행중인 기상관측자료를 이용하여 전체 모델의 program이 완료되는 대로 실시할 예정이다. 이와 같이하여 개발된 미기상모델은 온실복합환경 제어논리 개발에 중요한 도구로 이용될 수 있을 것이다.

제 4장. 토마토 성장모델의 개발

제 1절 서언

영양, 수분 및 병충해 관리가 적절하게 이루어지는 조건에서 온실작물의 성장과 수량은 주로 작물체 주위 즉 온실내의 온도, 일사량, 습도 등 미기상조건에 의하여 지배를 받는다. 그런데 이들 환경요소가 작물의 성장과 발육에 미치는 영향은 독립적이 아니라 상호복합적으로 영향을 미치기 때문에, 온실의 환경을 작물의 성장과 발육에 최적의 상태로 조절하기 위해서는 이들 상호복합적인 영향을 반영한 작물의 성장모델의 개발은 필수적이다.

작물성장모델은 지난 20여년간 많은 사람들에 의하여 각 작물을 대상으로 개발되어 왔으나(Wit et al, 1970, 1978 ; Spitter's et al, 1989 ; Yang et al, 1990 ; Hand et al, 1972), 토마토 성장모델은 Jones등(1991)이 개발한 TOMGRO와 SUCROS87(Spitter et al, 1989)을 근간으로 하여 Bertin등(1993)이 개발한 TOMSIM이 있을 뿐이다. TOMGRO는 토마토의 발육은 매우 상세하게 설계되어 있으나 TOMSIM은 물질생산은 비교적 다양한 조건에서 토마토의 성장을 simulation할 수 있도록 설계되어 있는 반면에 토마토의 발육모델이 없는 것이 단점이다.

본 연구의 최종 목적은 TOMSIM과 TOMGRO의 장점을 취하여 새로운 토마토 성장모델로 구성하고 이를 궁극적으로는 토마토 온실재배에서 온실환경관리의 최적화 논리개발에 응용하고자 하는 것이다. 그런데 이러한 성장모델들이 온실환경의 최적화 논리개발에 현실적으로 이용될 수 있기 위하여 다양한 환경조건에서 모델의 parameter들이 추정되어야 하며 또한 calibration과 validation과정을 거쳐야 한다. 1차년도인 본연구에서는 이론적인 토마토 성장모델을 설계하고 이를 검증하기 위하여 다양한 환경조건에서 토마토 성장과 발육자료를 얻는 것을 목표로 하였다.

제 2절 토마토 성장 모델

토마토 성장모델의 종합적 구조를 나타낸 것이 그림 4.1이다. 이 모델은 토양수분, 식물영양, 병충해관리가 최적수준으로 관리되는 조건에서 토마토의 성장 및 발육속도를 지배하는 주요인을 온실의 온도, 일사량, CO₂농도인 것으로 가정하였다. 이 모델은 일중 시각에 따라 광합성을 계산하고 이를 적산하여 일당 건물축적속도를 계산하여 여기에 각 기관으로의 배분계수를 곱하여 각 기관의 성장율을 계산하고 또한 발육속도는 환경요소로부터 매일 계산한다. 일당 성장 및 발육속도를 생육기간에 따라 적산하여 작물의 성장과 발육을 simulation한다.

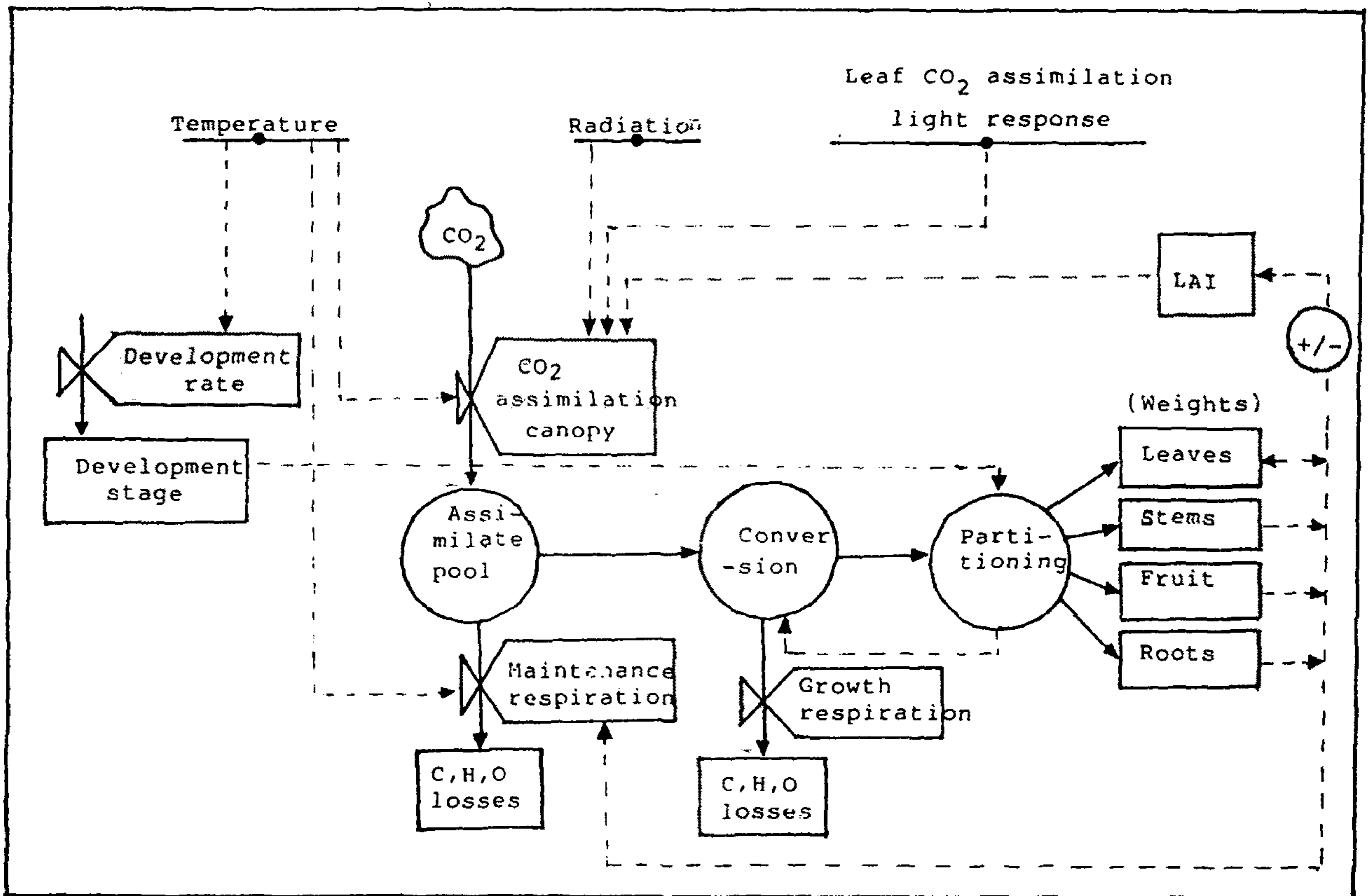


Figure 4.1 Schematic diagram of tomato growth model. Boxes are state variables, valves are rate variables, circles are intermediate variables. Solid lines are flows of material, dotted lines are flows of information.

1. 균락생장율

토마토 균락의 일당 성장율은 Gijzen(1992)에 따라서 다음과 같이 계산하였으며 각 기관의 일당 성장율은 균락 성장율에 광합성 산물의 각 기관으로 분배계수를 곱하여 계산하였다.

$$\frac{dw}{dt} = C_f(A - R_m)$$

$\frac{dw}{dt}$: Crop growth rate (g/m²/day)

C_f : Conversion efficiency from assimilate to dry matter

A : Gross Assimilation rate (gCH₂O/m²/day)

R_m : Maintenance respiration rate (gCH₂O/m²/day)

여기서 전환효율(C_f)은 광합성산물의 건물로의 전환비율을 나타내는 것으로서 건물의 화학적 조성에 의하여 결정이 되며 전 식물체의 전환효율은 각 기관의 전환효율과 광합성 산물의 각 기관으로의 배분계수로부터 다음과 같이 계산한다.

$$C_f = 1/(ASR_{lv}F_{lv} + ASR_{st}F_{st} + ASR_{rt}F_{rt} + ASR_{fr}F_{fr})$$

ASR : Assimilate requirement (gCH₂O/g dry matter)

F : Fraction of assimilates diverted to the organ

lv, st, rt, fr : represent leave, stem, root, and fruit, respectively

전 식물체의 유지 호흡속도는 각 기관의 건물중, 각기관의 유지호흡속도와 유지호흡의 온도의존성으로부터 다음과 같이 계산된다.

$$R_m(T) = (MR_{lv}W_{ev} + MR_{st}W_{st} + MR_{rt}W_{rt} + MR_{fr}W_{fr})Q_{10,C}^{(0.1(T-Tr))}$$

MR : Maintenance respiration rate(gCH₂O/g/day)

W : Organ dry weight(g/m²)

Tr : Reference temperature

Q₁₀ : Temperature coefficient for MR

여기서 Q_{10,c}는 유지호흡의 온도계수로서 각 기관에 따른 차이는 없는 것으로 가정하였다.

가. 군락의 순간광합성속도

군락내의 엽층 L에서 순간 순광합성속도는 Gourdrian 등(1985)에 따라서 다음과 같이 계산하였다.

$$A_L = A_m(1 - \exp(-\varepsilon I_{a,L}/A_m))$$

A_m : the gross assimilation rate at light Saturation ($\text{gCH}_2\text{O}/\text{m}^2\text{leaf}/\text{h}$)

ε : the initial light use efficiency ($\text{gCH}_2\text{O}/\text{m}^2\text{leaf}/\text{h}$)/($\text{J}/\text{m}^2\text{leaf}/\text{sec}$)

$I_{a,L}$: the amount of absorbed radiation ($\text{J}/\text{m}^2\text{leaf}/\text{s}$)

여기서 광화학적 이용효율(ε)는 Bertin et al(1993)에 따라서 다음과 같이 계산하였다.

$$\varepsilon = \varepsilon_0(C_a - \Gamma)/(C_a + 2\Gamma)$$

ε_0 : $0.084 \text{ molCO}_2/\text{mol photon absorbed}$

Γ : Carbon dioxide compensation point ($\mu\text{l} / \text{l}$)

광보상점은 Brook 등(1985)의 측정에 의하면 엽온의 증가에 따라 증대하며 다음과 같이 온도의존성을 계산하였다.

$$\Gamma = 42.7 + 1.68(T_1 - 25) + 0.012(T_1 - 25)^2$$

T_1 : leaf temperature

군락의 순간 총광합성속도는 광포화상태에서 CO_2 농도에 따라서 달라지는 최대순광합성속도와 엽온에서의 암호흡속도로부터 다음과 같이 계산하였다.

$$A_m = P_{n,c} + R_{d,T_1}$$

$P_{n,c}$: Maximum net photosynthetic rate limited by CO_2

($\mu\text{mol CO}_2/\text{m}^2\text{leaf}/\text{sec}$)

R_{d, T_1} : Dark respiration rate at leaf temperature
 $(T_1)(\mu \text{ molCO}_2/\text{m}^2\text{leaf}/\text{sec})$

광포화상태에서 CO_2 농도에 따라서 달라지는 최대순광합성속도는 Goudrian 등(1985)에 따라 다음과 같이 계산하였다.

$$P_{n, c} = 41.6(C_a - \Gamma)/r_m + 1.36r_b + 1.6r_s$$

r_m : mesophyll resistance(s/m)

r_b : Boundary layer resistance(s/m) for water vapor

여기서 각 저항에 곱해진 상수들은 CO_2 와 수증기 확산속도의 각 저항에 대한 비를 말하며, 41.6은 20°C 에서 CO_2 의 밀도(mmol/ℓ)이다. 한편 암호흡속도의 온도의존성은 다음과 같이 계산하였다.

$$R_{d, T_1} = R_{d, 20}Q^{(0.1(T_1-20))}$$

$R_{d, 20}$: Dark respiration at 20°C leaf temperature(T_1)

Q_{10} : Temperature coefficient for dark respiration

군락의 각 엽층(L, 상층부로부터의 누적엽면적지수)에서의 광흡수는 Monsi 등(1953)에 의하여 다음과 같이 계산하였다.

$$I_{a, L} = K(1 - \rho)I_0 \exp(-KL)$$

K : Light extinction coefficient of canopy

L : Cumulative leaf area index from canopy top

ρ : Canopy reflection coefficient

군락의 흡광계수(K)와 반사율(ρ)는 Goudrian(1977)에 따라 다음과 같이 계산하였다.

*. $K = 0.8\sqrt{(1-\sigma)}$, for spherical angle distribution
 σ : leaf scattering coefficient (0.2)

*. $\rho = (1 - \sqrt{(1-\sigma)}) / (1 + \sqrt{(1-\sigma)}) \cdot [2 / (1 + 2\sin\beta)]$
 β : solar elevation

작물 군락에 의한 순간 총광합성속도(A_c)는 각 엽층에서의 순간 총광합성속도(A_L)을 군락의 전체 엽면적지수에 대하여 다음과 같이 계산하였다.

$$A_c = \int_0^{LAI} A_L dL, \quad LAI : \text{Leaf Area Index}$$

윗 식의 적분을 Gaussian Integration Method에 의하여 수치적분하였다.

나. 군락의 일당 총광합성

군락의 일당 총광합성은 순간 총광합성 속도를 일출시각에서 일몰시각까지 적산하여 계산하였다.

$$A = \int_{sr}^{ss} A_c dt$$

ss : sunset hour

sr : sunrise hour

2. 기관의 분화발육

토마토기관의 분화와 발육은 Jones 등(1991)이 개발한 TOMGRO모델을 그대로 적용하는 것으로 하였다. 주간의 마디수, 엽수, 과실수의 가장 어린 age class에서 순변화율은 각 기관의 분화율에서 다음 age class로의 전이율을 빼서 계산하였다.

$$\frac{dN_s(1)}{dt} = \text{GENR} * \text{PLM2} - r_L(T) * F(C) * n_L * N_s(1)$$

$$\frac{dN_L(1)}{dt} = \text{GENR} * \text{PLM2} / (1 + \text{TPL}) - r_L(T) * F(C) * n_L * N_L(1) - P_L(1)$$

$$\frac{dN_F(1)}{dt} = \text{GENR} * \text{PLM2} * (\text{FPN}(\text{PLSTN}) * R_c) - r_F(T) * F(C) * n_F * N_F(1) - P_F(1)$$

- $N_s(i)$, $N_L(i)$,
 $N_F(i)$ = the numbers of stems, leaves, and fruit/m², respectively, for age class i ,
 GENR = rate of new node appearance, no./plant-d,
 PLM2 = plant density (no./m²),
 FPN = fruit initiated per new node depending on PLSTN,
 PLSTN = total number of nodes on the plant on a given day,
 TPL = ratio of new fruiting trusses to new leaves,
 Rc = ratio of carbon supply to demand for the crop,
 $r_L(T)$ = overall rate of development of leaves at temperature(T) and 350ppm carbon dioxide concentration, (1/d),
 F(C) = scalar function of CO₂ concentration(C) that modifies the rate of development for CO₂ levels above or below 350ppm,
 n_L = number of leaf age classes, 20 in the present model,
 $r_F(T)$ = rate of development of fruit at temperature T and 350ppm CO₂ concentration(1/d), and
 n_F = number of fruit age classes, 20 in the present model.

$PL(i)$ 는 차광, 병충해 등에 엽의 손실을 나타내며 $PF(i)$ 는 낙과 손실을 나타낸다. $r_L(T) * F(C) * n_L$ 은 각 age class i 에서의 엽수에 대한 다음의 age class $i+1$ 로 전이하는 엽수의 비율을 나타낸다.

GENR은 실제온도와 CO₂농도에서 개체당 마디 분화속도를 나타내는 것으로서 다음과 같이 계산된다.

$$GENR = GENERAT * F_n(T) * F(C)$$

GENERAT는 마디 최대분화속도이며, $F_n(T)$ 와 $F(C)$ 는 분화속도의 온도와 CO₂농도 의존성을 나타내는 계수이다.

특정 엽령의 엽수, $N_L(i)$ 의 순변화율은 다음식에 의하여 계산된다.

$$\frac{dN_L(i)}{dt} = r_L(T) * F(C) * n_L * N_L(i-1) - r_L(T) * F(C) * n_L * N_L(i) - P_L(i)$$

마디수와 과실의 발육도도 잎의 발육을 나타내는 윗 식과 기본적으로 동일하게 표현하였다.

각 age class에서 최대 엽면적 신장율, $\frac{dA_{LP}(i)}{dt}$ 는 다음과 같이 계산된다.

$$\frac{dA_{LP}(i)}{dt} = N_L(i) * POL(i) * F_n(T) * F(C)$$

여기서 POL(i)는 적온과 350ppm CO₂농도에서 age class i에 있는 잎의 신장율을 나타낸다.

제 3 절. 토마토 성장모델 매개변수 정량화 및 검증을 위한 토마토 재배실험

위에서 설계된 모델을 현실적으로 이용하기 위해서는 다양한 환경조건에서 실험된 토마토 성장 및 발육자료가 수집되어 이를 이용하여 모델의 매개변수들이 정량화되고 calibration과 validation이 되어야 한다. 이와 같은 목적으로 다양한 환경조건에서 토마토의 성장·발육자료를 얻기 위하여 일련의 작기 이동 및 CO₂와 온도 조절실험을 실시하였다.

1. 실험 재료 및 방법

가. 춘하계 토마토 온실재배 실험

본 실험은 신축 plastic house(75m²/동) 2동을 이용하여 실시하였다. 공시품종은 모따로와 Arlette 두 품종이었으며 3월 28일 파종하여 5월 28일에 휴폭 80cm, 휴간 30cm, 25cm(2줄)×45cm로 정식하였다. 시비는 퇴비를 3000kg/10a, N-P-K = 30-24-28kg/10a로 하였으며 P는 전량기비, N과 K 50%는 기비로 나머지 50%는 2회에 걸쳐 관개 시스템을 통하여 액비로 시비하였다. 물관리는 토중 10cm의 water potential이 -0.2bar이상으로 유지되도록 drip irrigation을 하였으며, 1주일에 2~3회 측지를 제거하였다. 온실 환경관리는 온실의 측창만 개방하고 특별한 환경제어를 하지 않았다.

6월 10일부터 8월12일까지 1주일 간격으로 품종별로 동당 4개체씩 sample하여 엽면적, 과중, 초장, 화방수, 경중, 엽중, 엽병중을 조사하였으며, 품종별로 4개체를 지정하여 매일 엽수, 화방수, 개화수를 조사하였다. 온실 및 외부기상은 그림 2.2에서 보는 바와 같이 기상관측 센서를 설치하여 Dater logger로 10초 간격으로 측정하여 10분 평균 자료를 수집하였다.

나. CO₂ 및 온도조절에 따른 토마토 생장 반응 실험

신축 plastic house 3개동(75m²/동)을 이용하여 실험을 하였다. 서광을 공시하였으며 7월 26일 파종·육묘하여 9월 29일에 25cm(2줄)×45cm 휴폭 90cm, 휴간 60cm로 정식하였다. 환경조절 처리는 다음과 같은 세 처리를 하였다.

Treatment 1 : 야간 최저 11℃, 주간 최고 25℃,
CO₂ 830ppm(주간의 평균)

Treatment 2 : 야간 최저 11℃, 주간 최고 25℃,
CO₂ 자연조건

Treatment 3 : 야간 최저 8℃, 주간 최고 25℃,
CO₂ 자연조건

온실환경관리는 전항의 실험과 동일하게 하였다. 토마토 생장과 발육, 기상 조사는

전항의 실험과 동일하게 하였으며 CO₂시비처리는 액화가스로 하였으며 온실의 CO₂ 농도를 10분 간격으로 monitoring하였다.

2. 실험결과

가. 춘하계 토마토 재배 실험

(1) 생육기간중 온실의 미기상 환경

토마토 재배기간중의 평균기온, 상대습도 및 포차를 나타낸 것이 각각 그림 4.2 그림 4.3, 그림 4.4이다. 온실내부의 기온은 외부에 비하여 낮에는 높았으나 야간에는 오히려 낮았는데 이는 기온의 온실역전현상 때문인 것으로 판단된다. 재배기간중 온실내부의 평균기온은 주간은 26℃, 야간은 21℃였다.

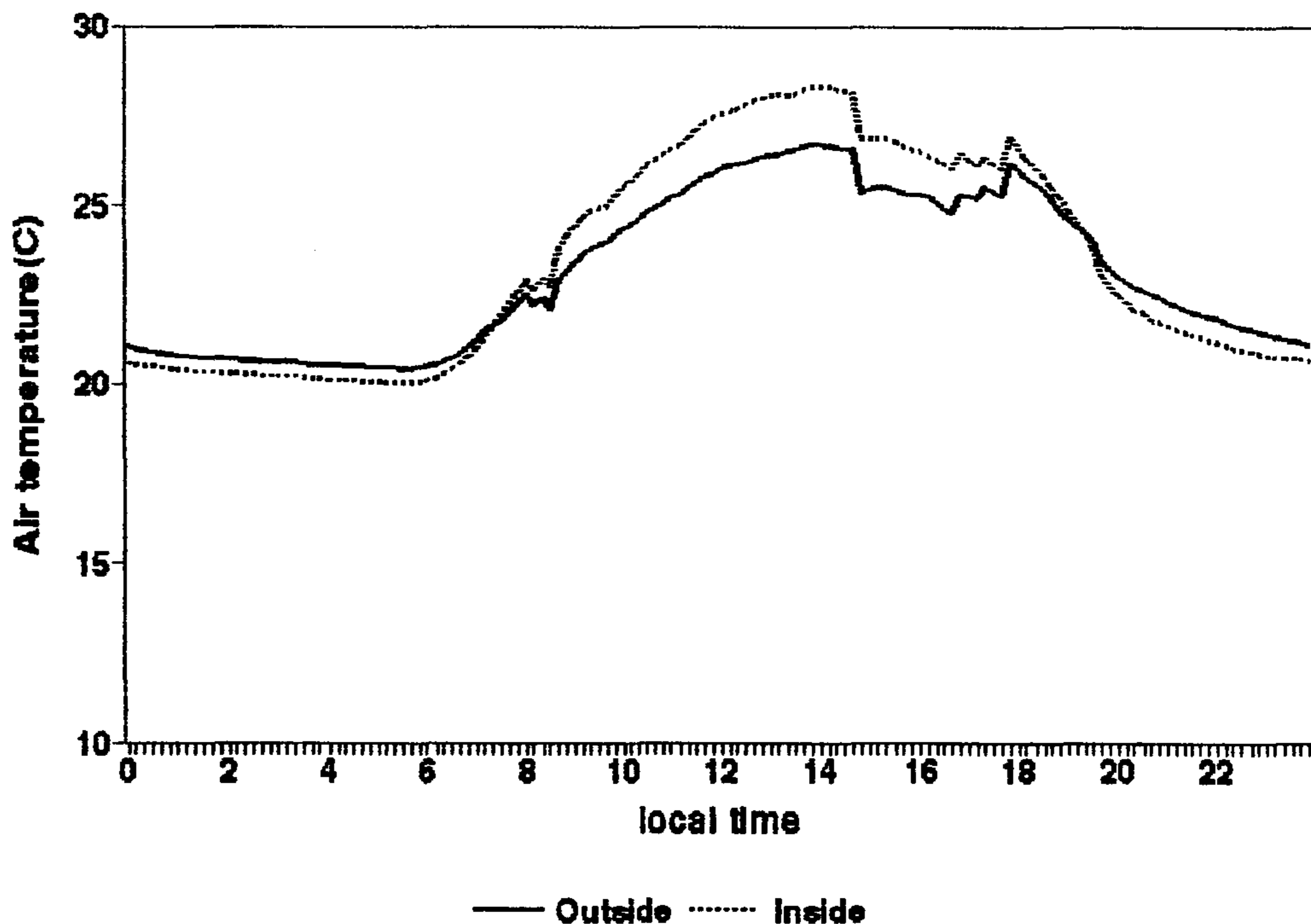


Fig. 4.2 Diurnal courses of average air temperature over the whole experimental period inside and outside the greenhouse.

재배기간중 평균 상대습도의 일변화(그림 4.3)를 보면 주간에는 온실내부가 온실외부보다 상대습도가 오히려 낮았는데 이는 온실기온이 외기에 비하여 높기 때문이다. 야간에는 외기보다 온실내부가 상대습도가 높았다. 전 생육기간중 온실내부의 평균 상대습도는 주간이 70.0%, 야간이 70%였다.

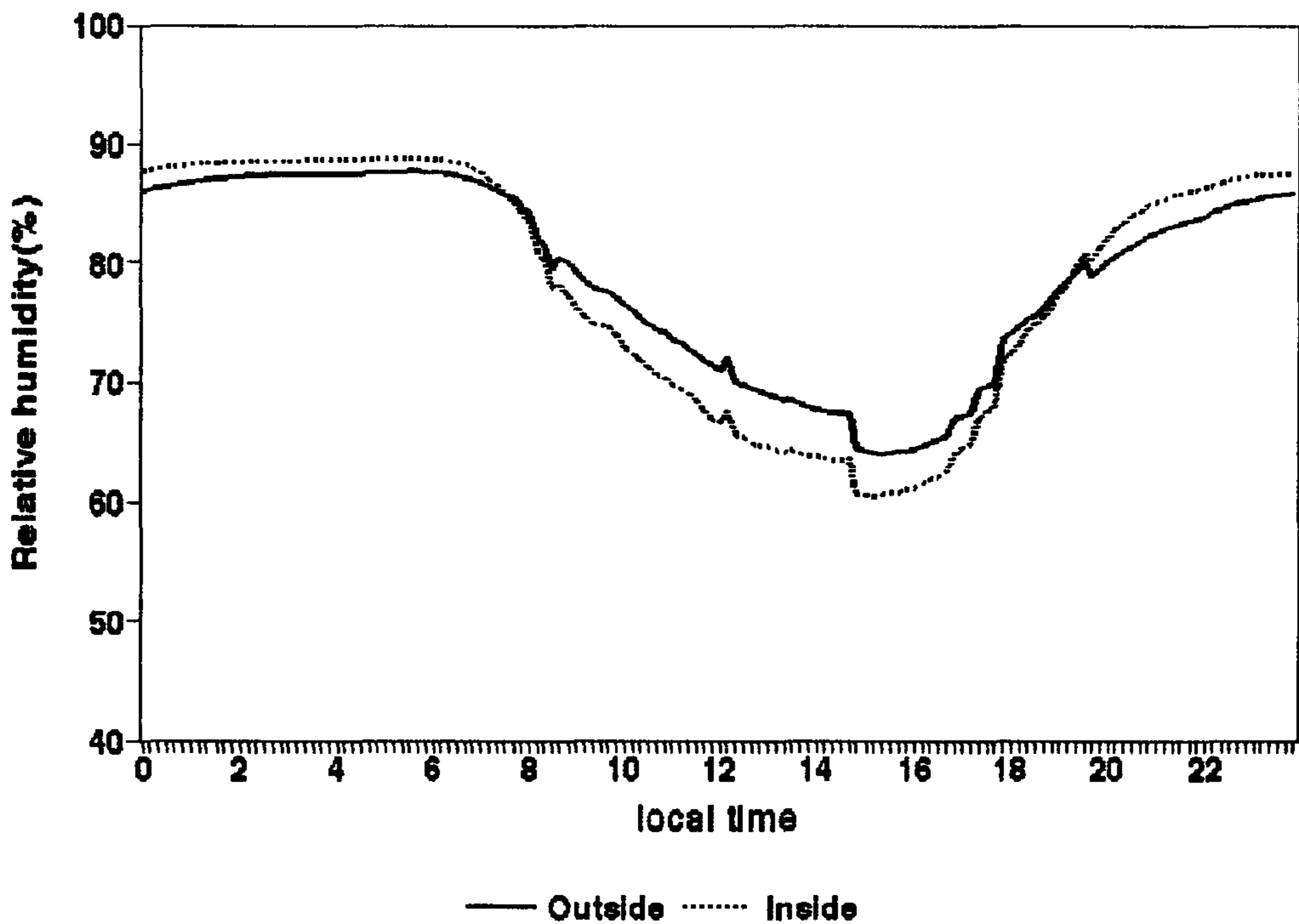


Fig. 4.3 Diurnal courses of average relative humidity over the whole experimental period inside and outside the greenhouse.

대기의 증발요구도를 나타내는 온실 내부 공기의 포차(그림 4.4)의 경우 주간에는 외기온보다 온실기온이 높아 온실외부보다 포차가 컸으며 야간에는 반대로 온실내부의 포차가 낮았다. 실험기간중 온실내부의 평균포차는 주간이 10.3mb, 야간이 3.3mb였다.

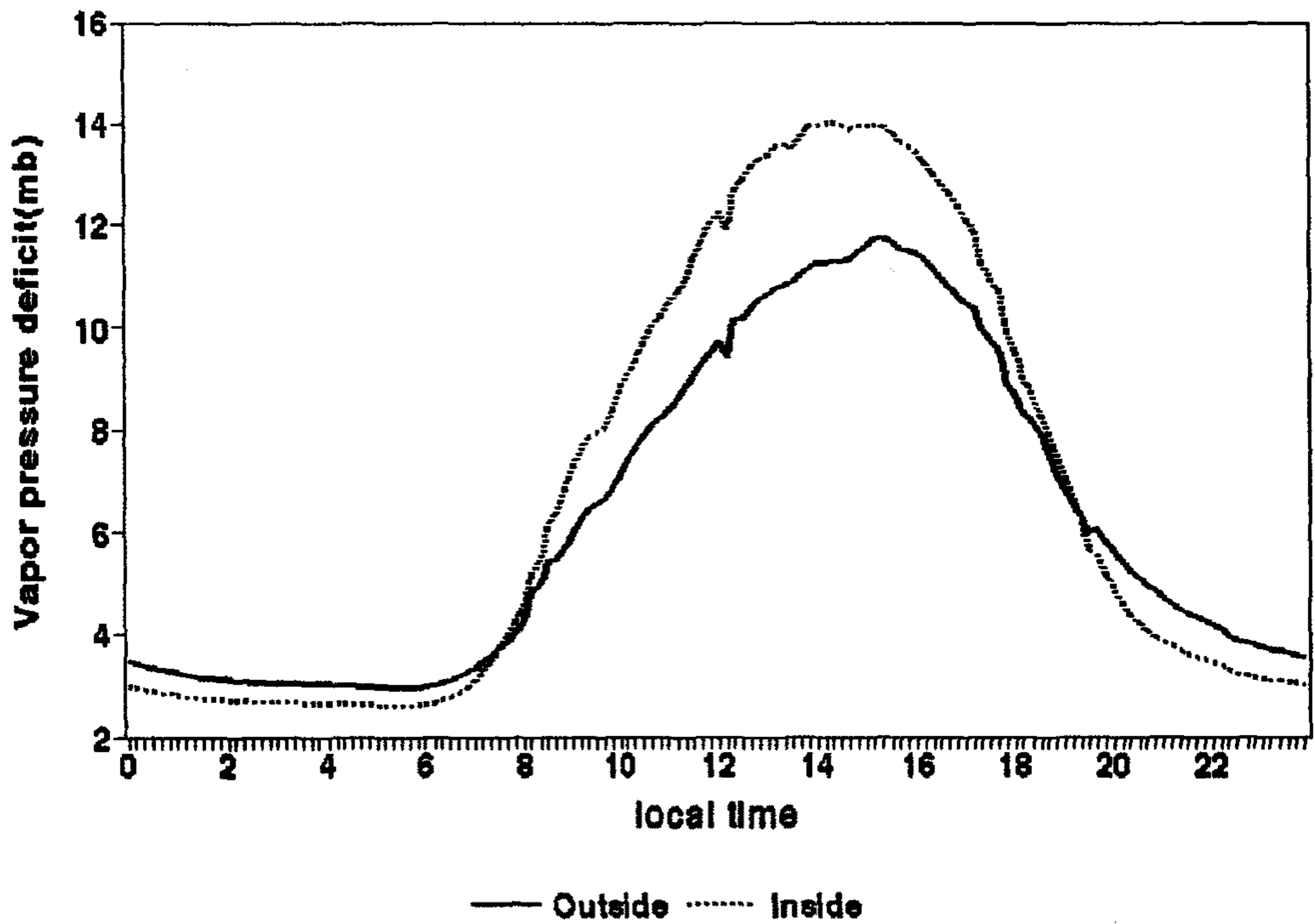


Fig. 4.4 Diurnal courses of vapor pressure deficit over the whole experimental period inside and outside the greenhouse.

실험기간중 온실외부의 평균 일사량과 순복사량의 일변화는 각각 그림 4.5와 그림 4.6과 같다. 실험기간중 일평균 총일사량은 온실외부가 13.99MJ/m²/day, 온실내부가 10.57MJ/m²/day, 균락 하부가 1.8MJ/m²/day로서 피복재의 투과율은 75.6%였으며 토마토 균락의 투과율은 17.6%였으며 식물균락에 흡수된 일사량은 외부 일사량의 62.3%였다.

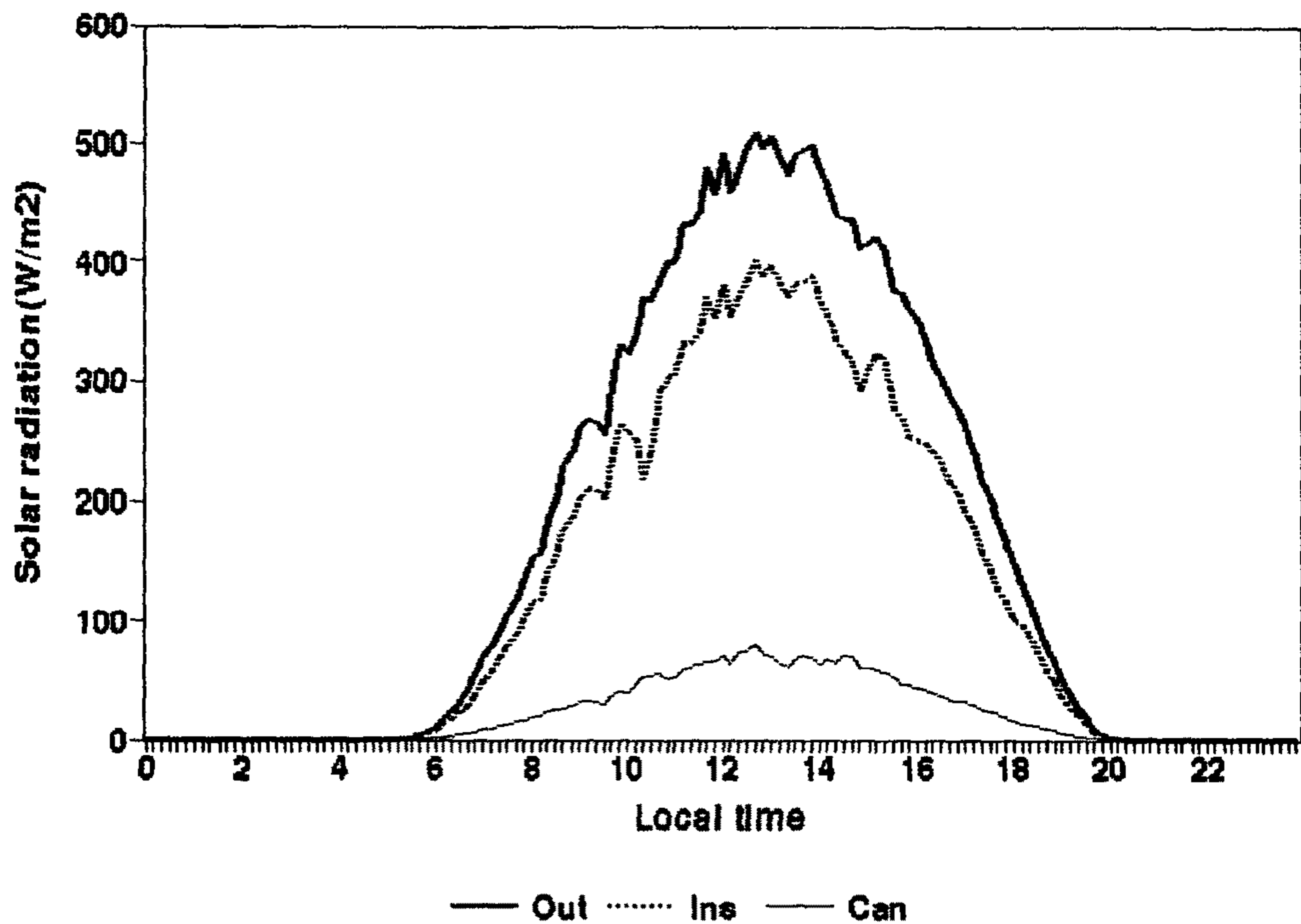


Fig. 4.5 Diurnal courses of average solar radiation over the whole experimental period outside(Out) and inside(Ins) the greenhouse, and below the canopy.

온실외부의 군락상부와 군락하부에서의 실험기간 중 평균 순복사량의 일변화를 나타낸 것이 그림 4.6이다. 군락상부의 순복사량은 6.23MJ/m²/day로서 온실내부 일사량의 58.9%였으며 군락하부에서의 순복사량은 1.22MJ/m²/day로서 군락상부 순복사량의 19.6%였다.

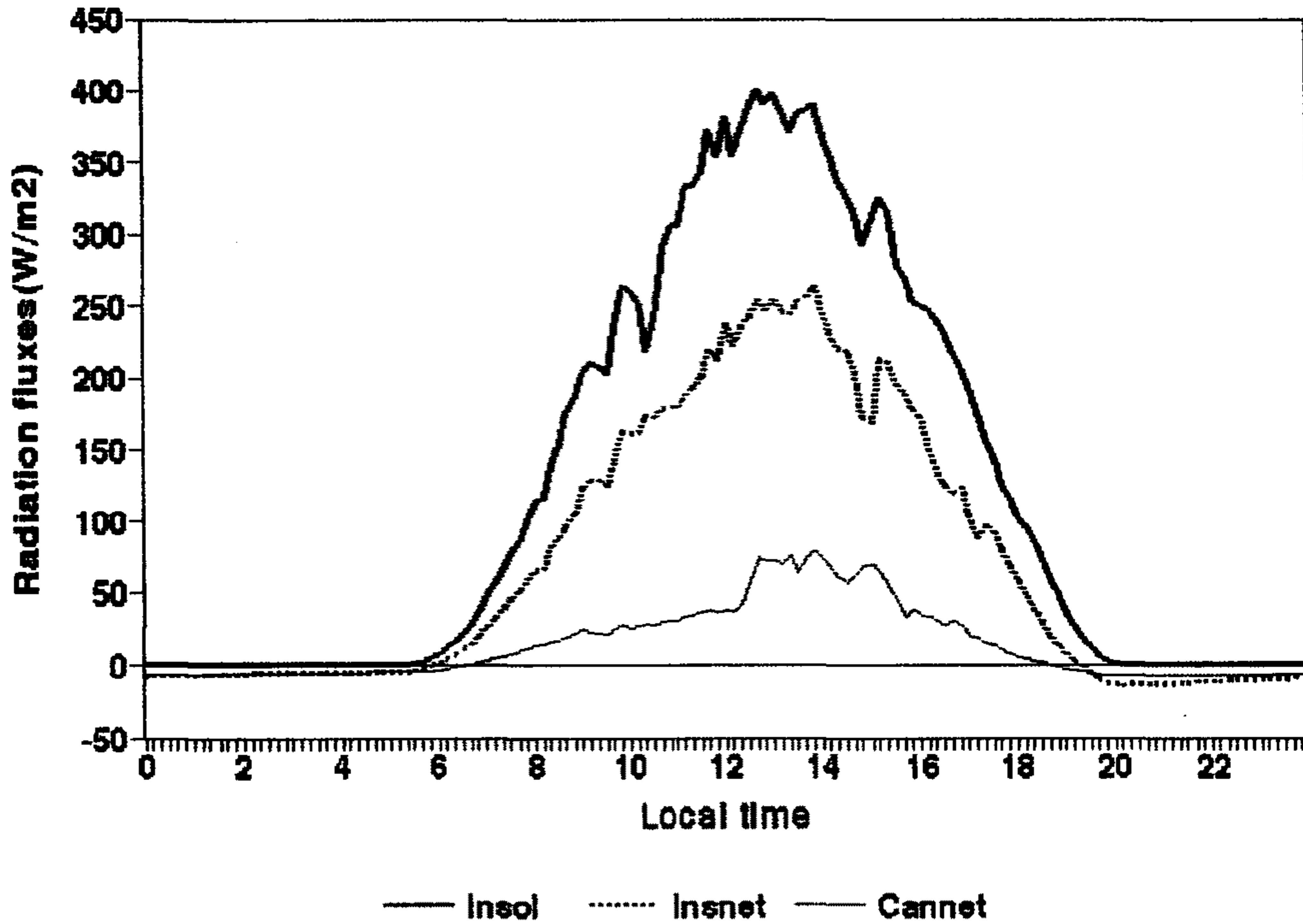


Fig. 4.6 Diurnal courses of average solar radiation inside the greenhouse(Insol), net radiation above (Innet) and below canopy(Cannet) inside the greenhouse.

(2) 토마토의 성장과 발육

(가) 기관별 건물중

온실에서 재배한 토마토 품종 Arlette와 Momotaro의 정식 후 각 기관별 건물중 증가 추이는 그림 4.7에서 그림 4.11까지와 같다. 엽 건물중(그림 4.7), 엽병중(그림 4.8), 경중(그림 4.9) 및 지상부 전체 건물중(그림 4.11)의 증가 속도와 최종 건물중은 Arlette보다는 Momotaro에서 컸으나 과실 건물중(그림 4.10)의 증가 속도와 최종 건물중은 양 품종간에 차이가 없어 양 품종은 광합성산물의 각 기관으로의 배분 비율이 틀린 것으로 보인다.

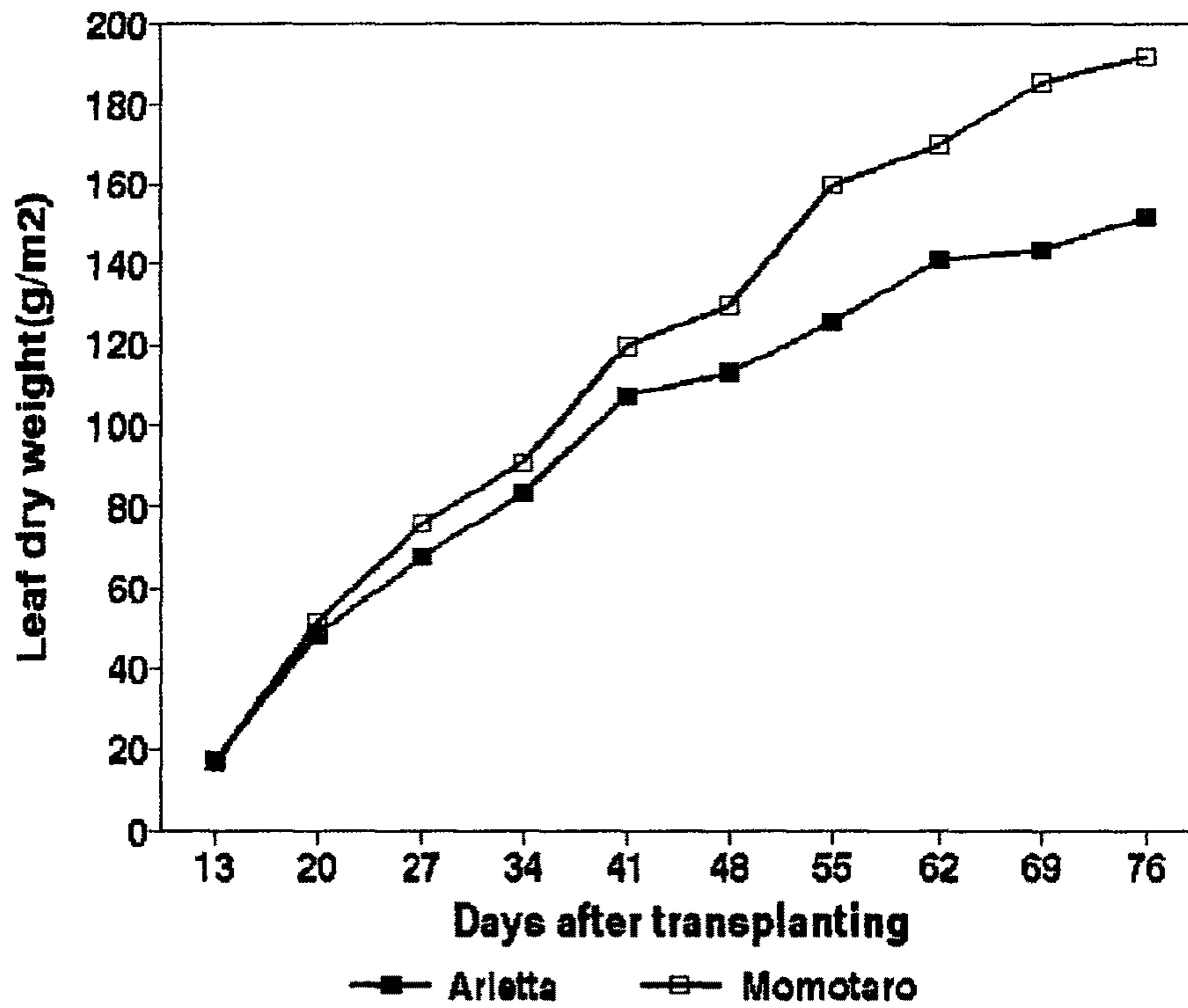


Fig. 4.7 Leaf dry weight increase after planting in two tomato varieties grown in the greenhouses

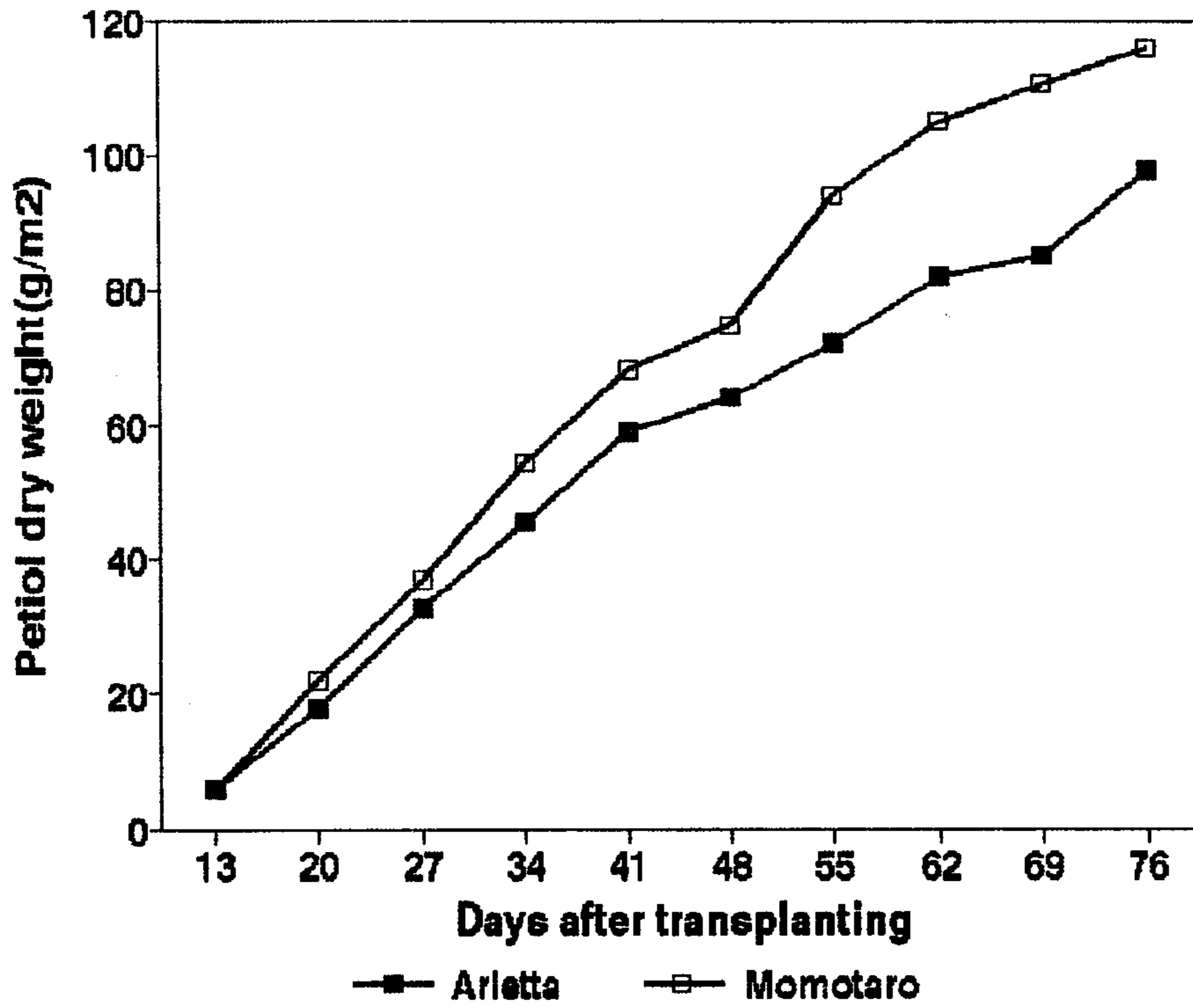


Fig. 4.8 Petiole dry weight increase after planting in two tomato varieties grown in the greenhouse

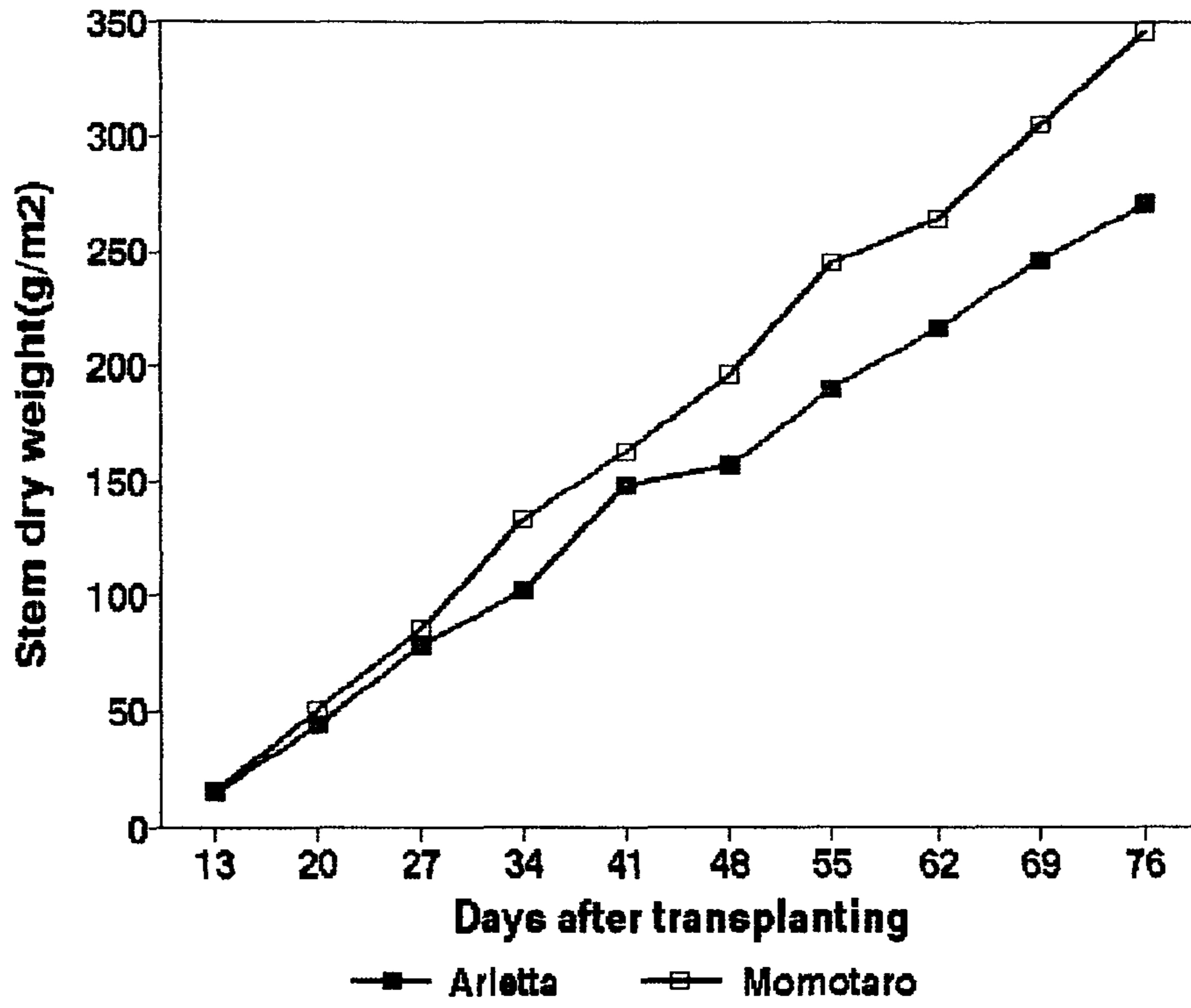


Fig. 4.9 Stem dry weight increase after planting in two tomato varieties grown in the greenhouse

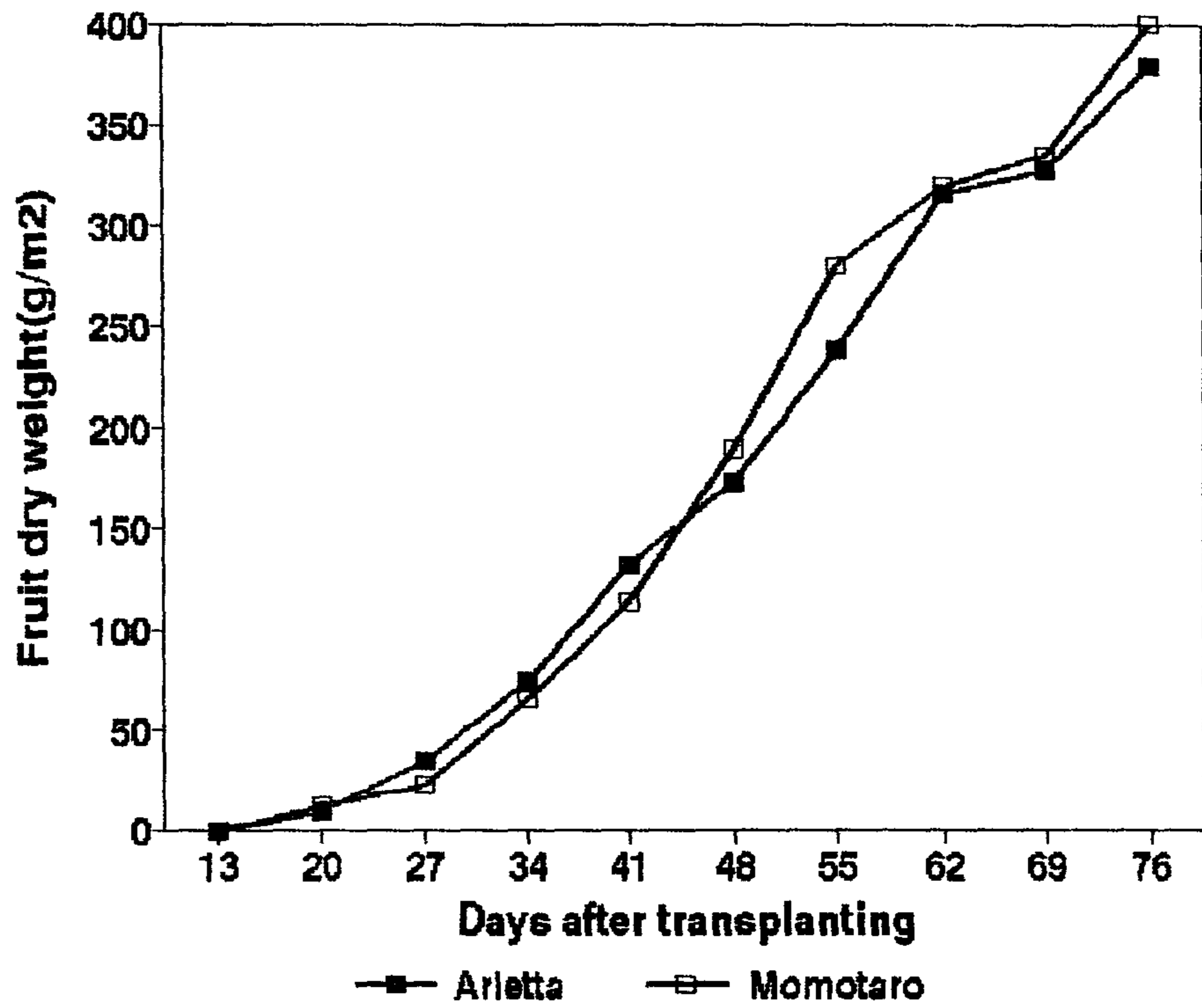


Fig. 4.10 Fruit dry weight increase after planting in two tomato varieties grown in the greenhouse

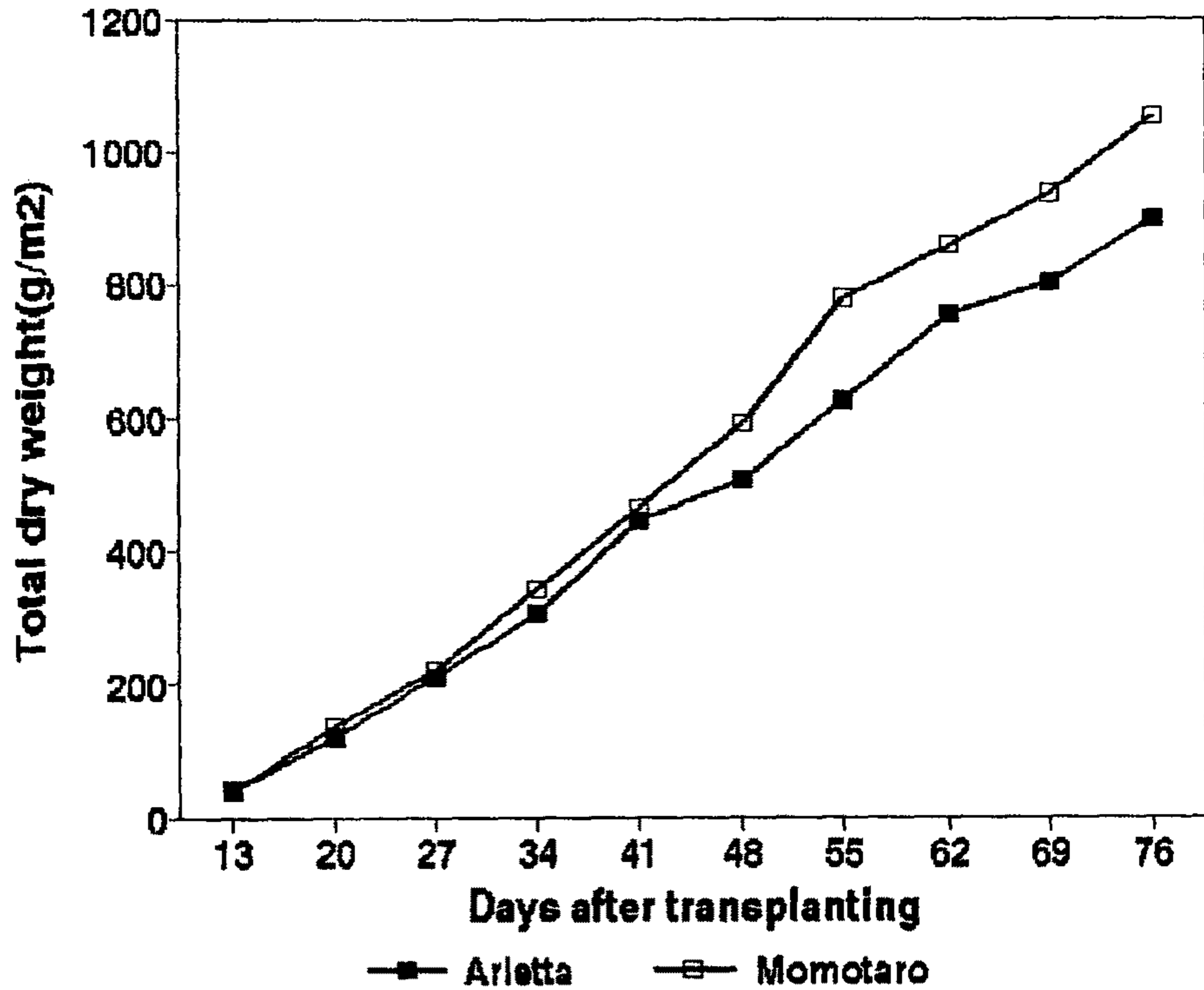


Fig. 4.11 Total dry weight increase after planting in two tomato varieties grown in the greenhouse

(나) 지상부 총건물중과 각 기관 건물중과의 관계

광합성 산물의 각 기관으로의 배분 정도를 파악하기 위하여 지상부 전체 건물중과 엽(그림 4.12), 엽병(그림 4.13), 경(그림 4.14) 및 과실(그림 4.15) 건물중과의 관계를 그림으로 나타내었다.

엽 및 엽병중과 전체 건물중과의 관계는 직선이 아니었으며 건물중이 증가함에 따라서 이들 기관의 건물중 비율이 낮아지는 경향이었는데, 이는 생육 후반기로 가면서 엽의 노화탈락이 커지기 때문인 것으로 판단된다. Arletta보다는 Momotaro가 엽 및 엽병중 비율이 컸다. 경중 및 과실중과 전체 건물중과의 관계는 직선적인 관계가 있어서 전체 건물중 1g이 증가하면 줄기는 Arletta는 0.29g, Momotaro는 0.31g이 증가하는 관계를 보이고 있으며, 과실중은 Arletta가 0.50g, Momotaro가 0.44g 증가하며, Arletta가 Momotaro보다 광합성 산물이 과실로 배분되는 비율이 다소 큰 것으로

판단되었다. Challa등(1991)은 토마토 지상부 총 건물중 증가분에 대한 과실중 증가분은 0.65g/g이라고 보고 하였으며, 한편 de Konning(1991)은 0.72g/g이라고 보고 하였다. 본 실험의 결과는 이들의 결과보다 낮은 수치를 보이고 있는데 이것이 품종에 차이인지 재배환경의 차이에 의한 것인지는 불분명하다.

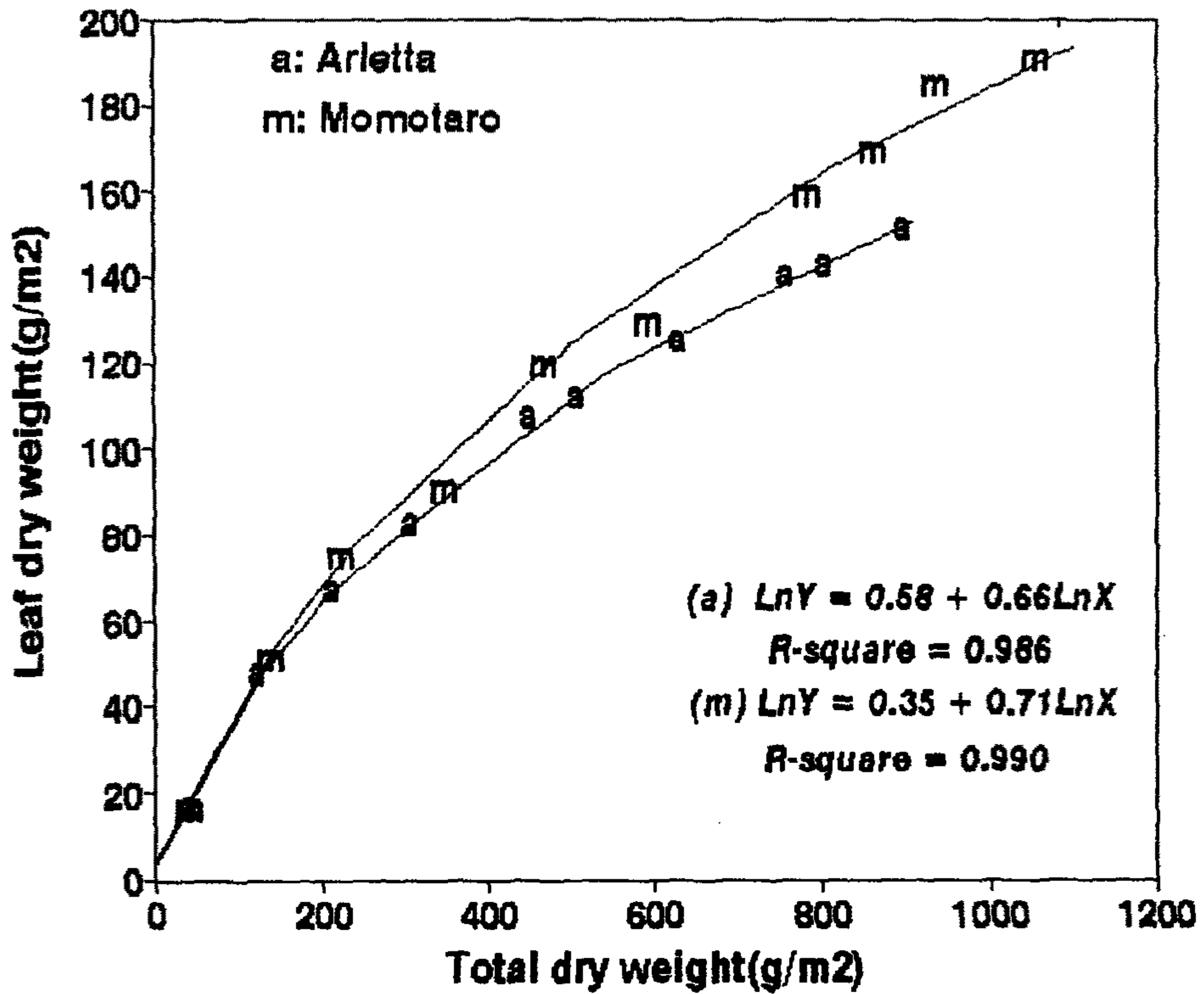


Fig. 4.12 Relationship between leaf dry weight and total dry weight in two tomato varieties

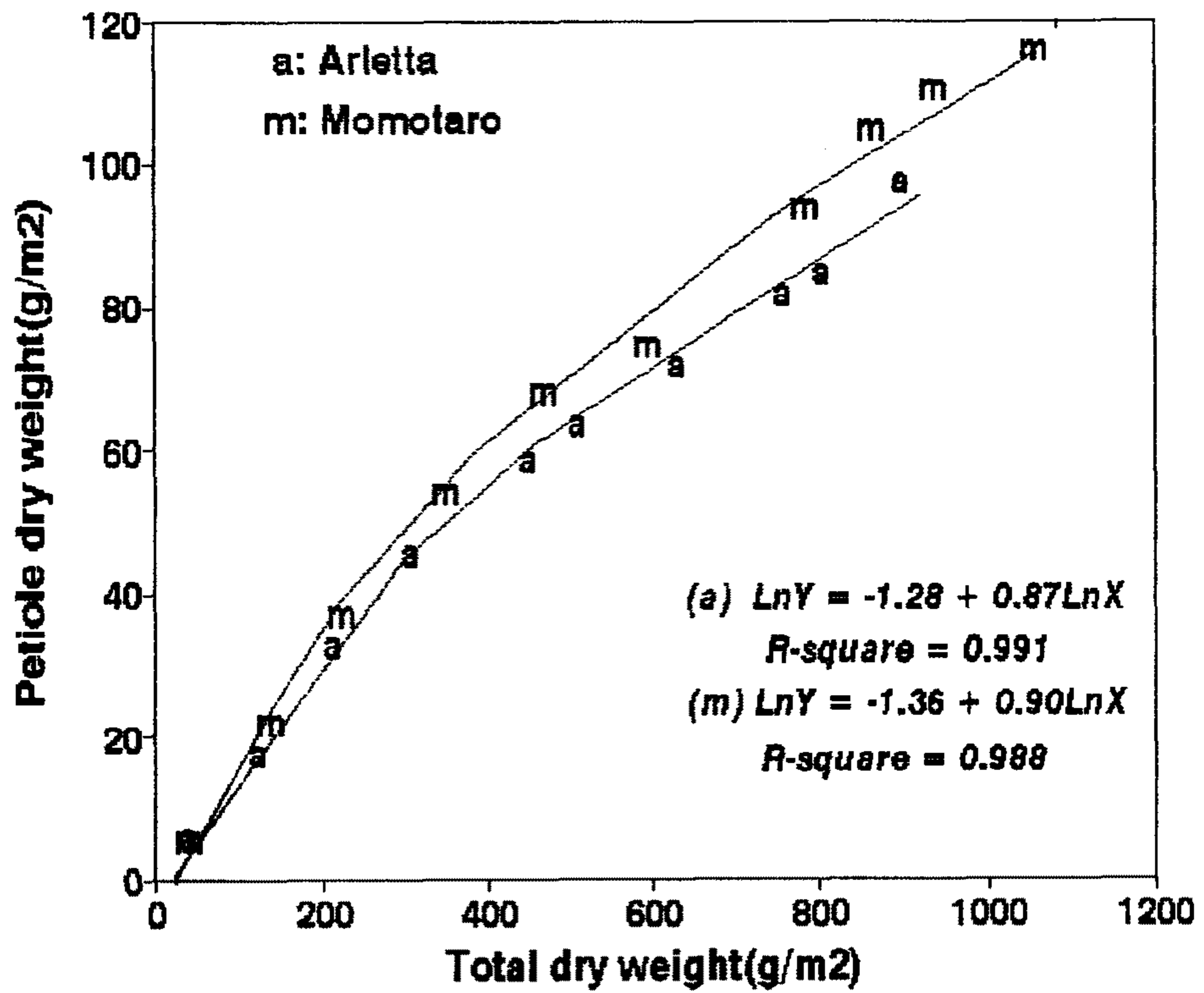


Fig. 4.13 Relationship between petiole dry weight and total dry weight in two tomato varieties

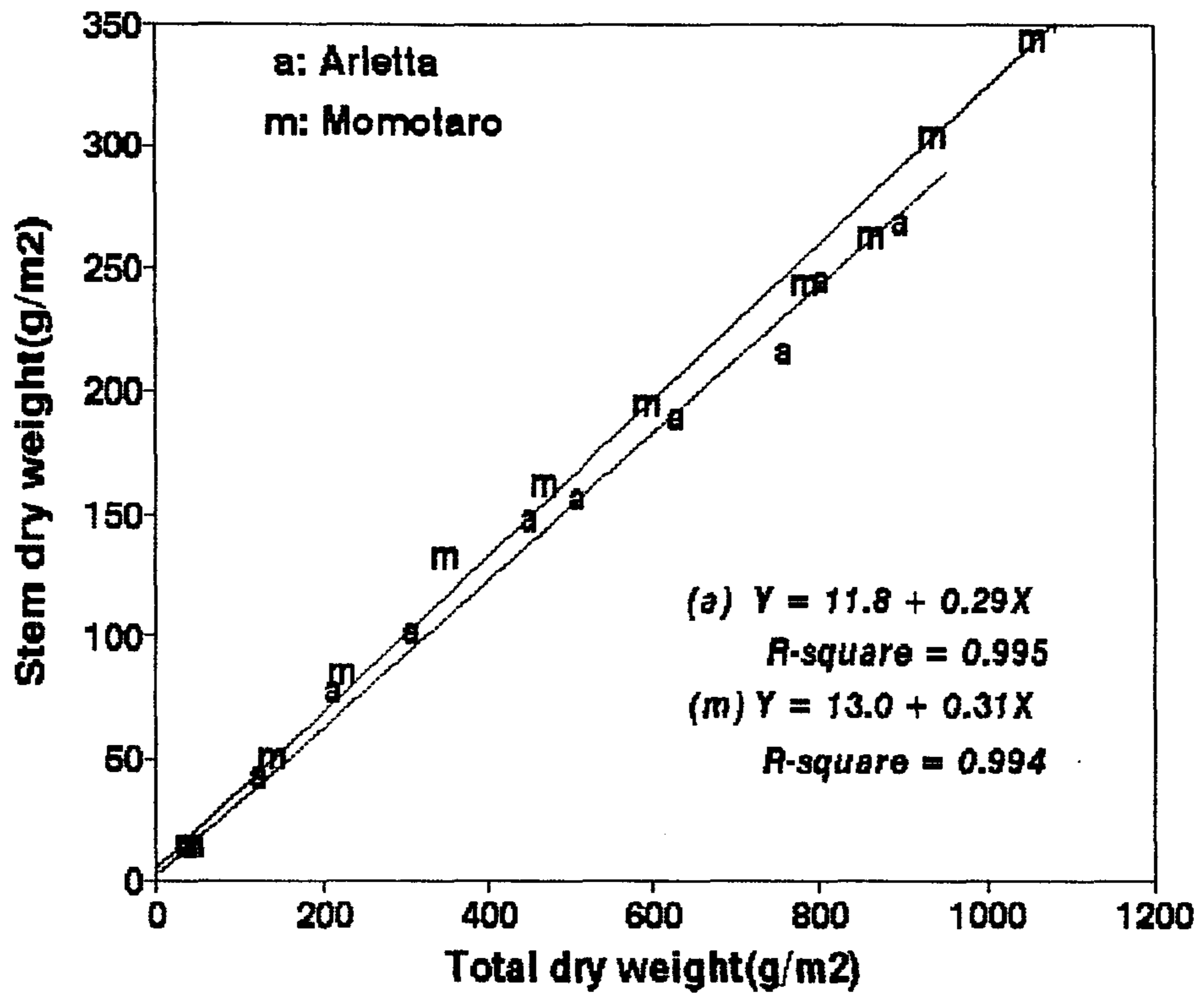


Fig. 4.14 Relationship between stem dry weight and total dry weight in two tomato varieties

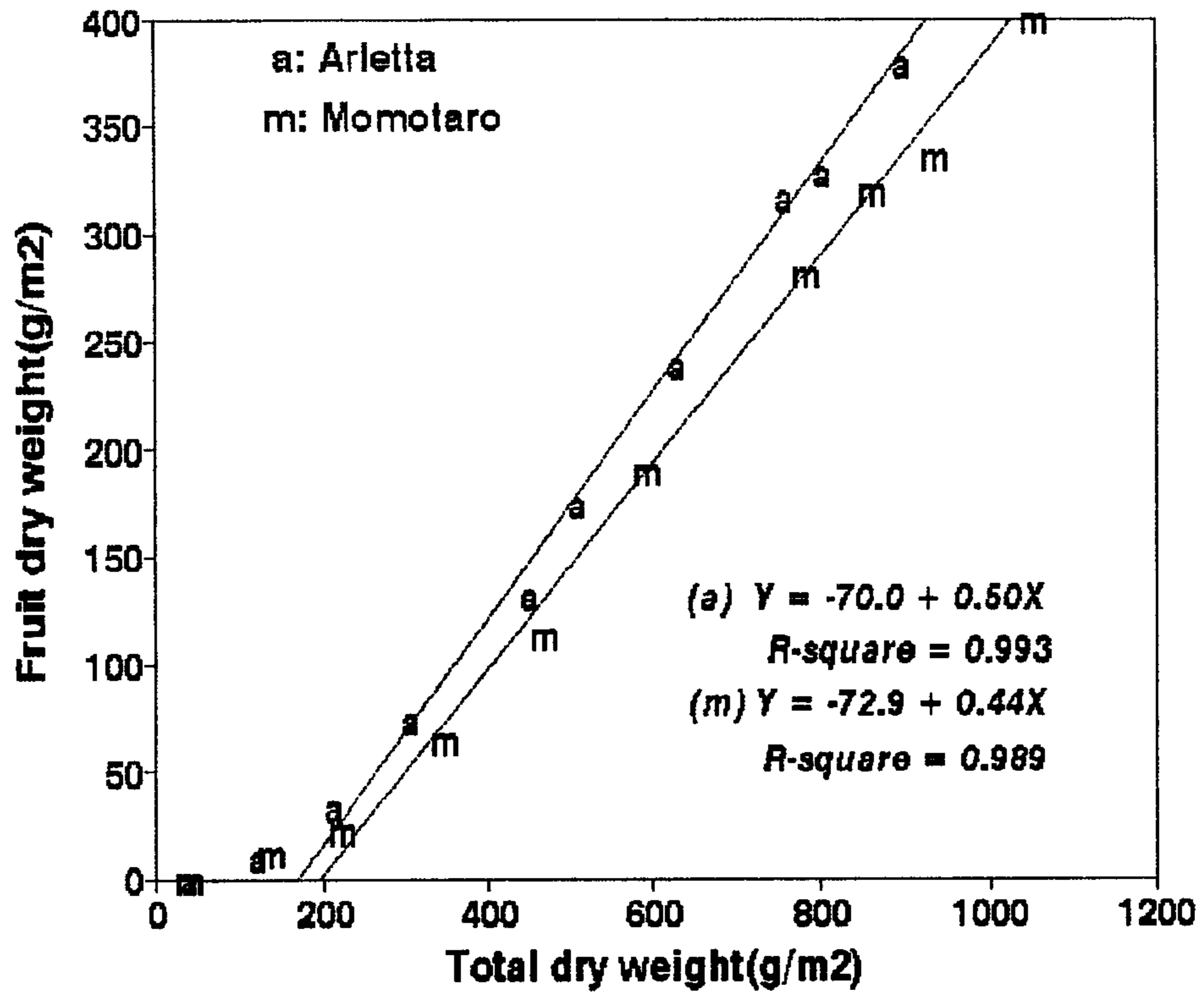


Fig. 4.15 Relationship between fruit dry weight and total dry weight in two tomato varieties

엽면적지수, 비엽면적 및 엽수, 최종 엽면적 지수는 그림 4.16에서와 같이 차이가 없었으며 Aletta는 생육 전 기간을 통하여 지속적으로 엽면적이 증가하였으나 Momotaro는 정식 후 48일 경에 최대에 이르고 그 이후는 증가하지 않았다.

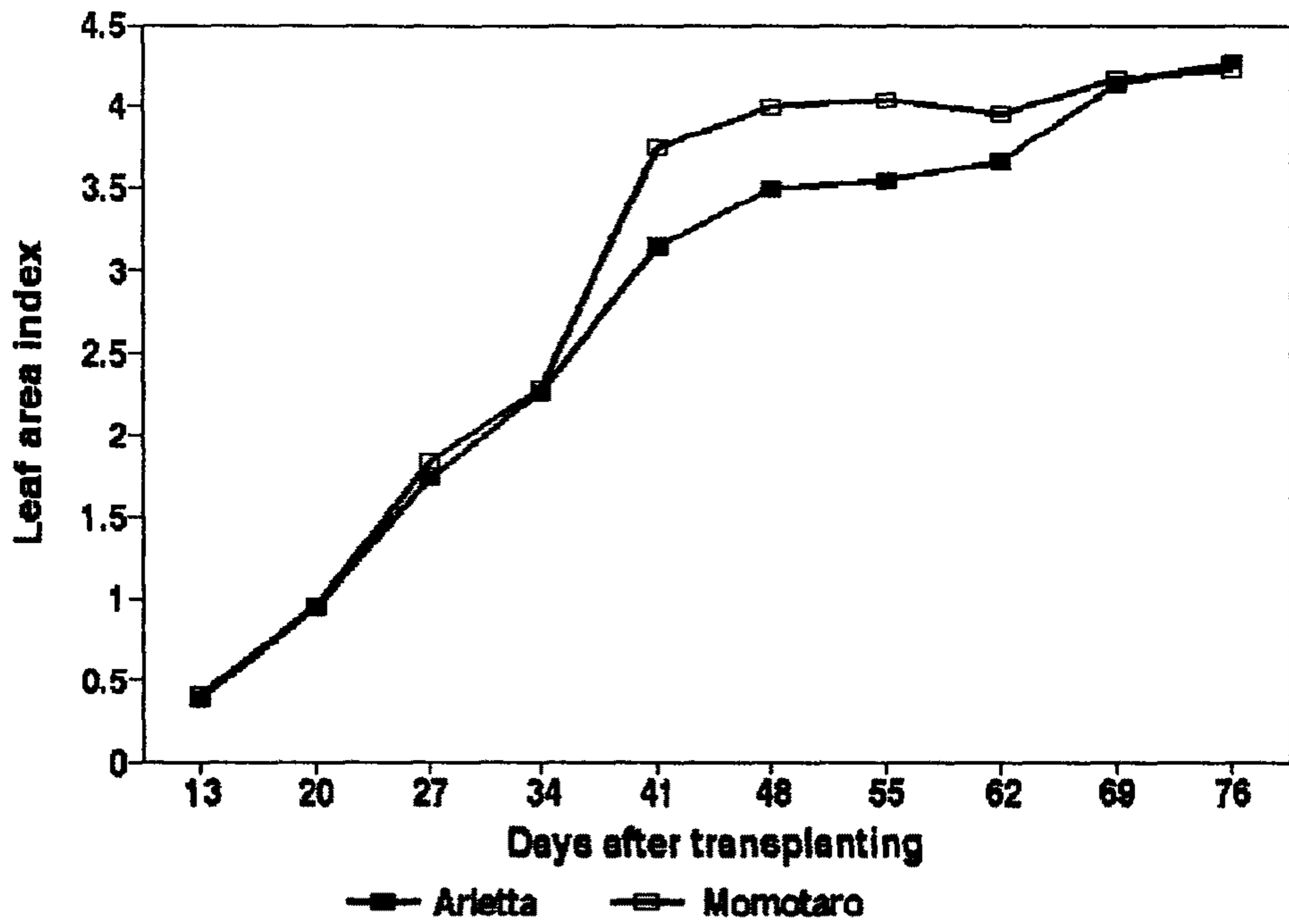


Fig. 4.16 Leaf area development after planting in two tomato varieties grown in greenhouse

앞의 두께를 나타내는 지표인 비엽면적(그림 4.17)은 두 품종 모두 전 생육 기간중 180 cm^2/g 에서 300 cm^2/g 사이에서 변이를 보였다. 비엽면적은 이식 후 41-48일경까지는 증가하는 경향이였으나 그 이후 점차 감소하는 경향을 보였다.

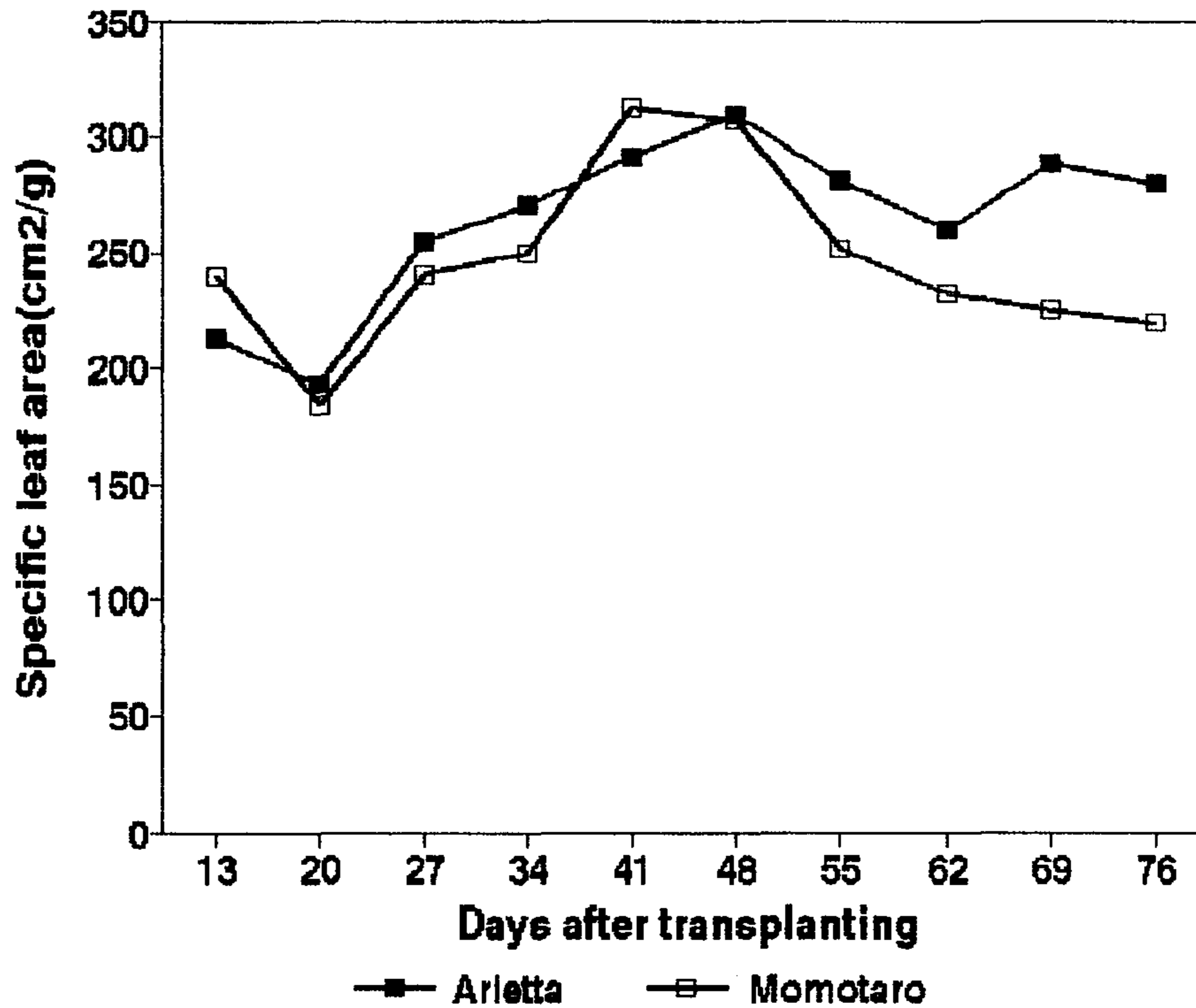


Fig. 4.17 Temporal variation of specific leaf area after planting in two tomato varieties grown in the greenhouse

엽수의 증가 경향은 공시한 두 품종 모두 차이가 없었으며(그림 4.18) 정식 후 45일 경을 경계로 하여 전반기 보다는 후반기에 증가 속도가 둔화되는 경향이였다. 이는 생육 후반기의 고온에 기인하는 것으로 판단된다. 생육 전 기간 중 엽수 1매 증가에는 약 3일이 소요되었다.

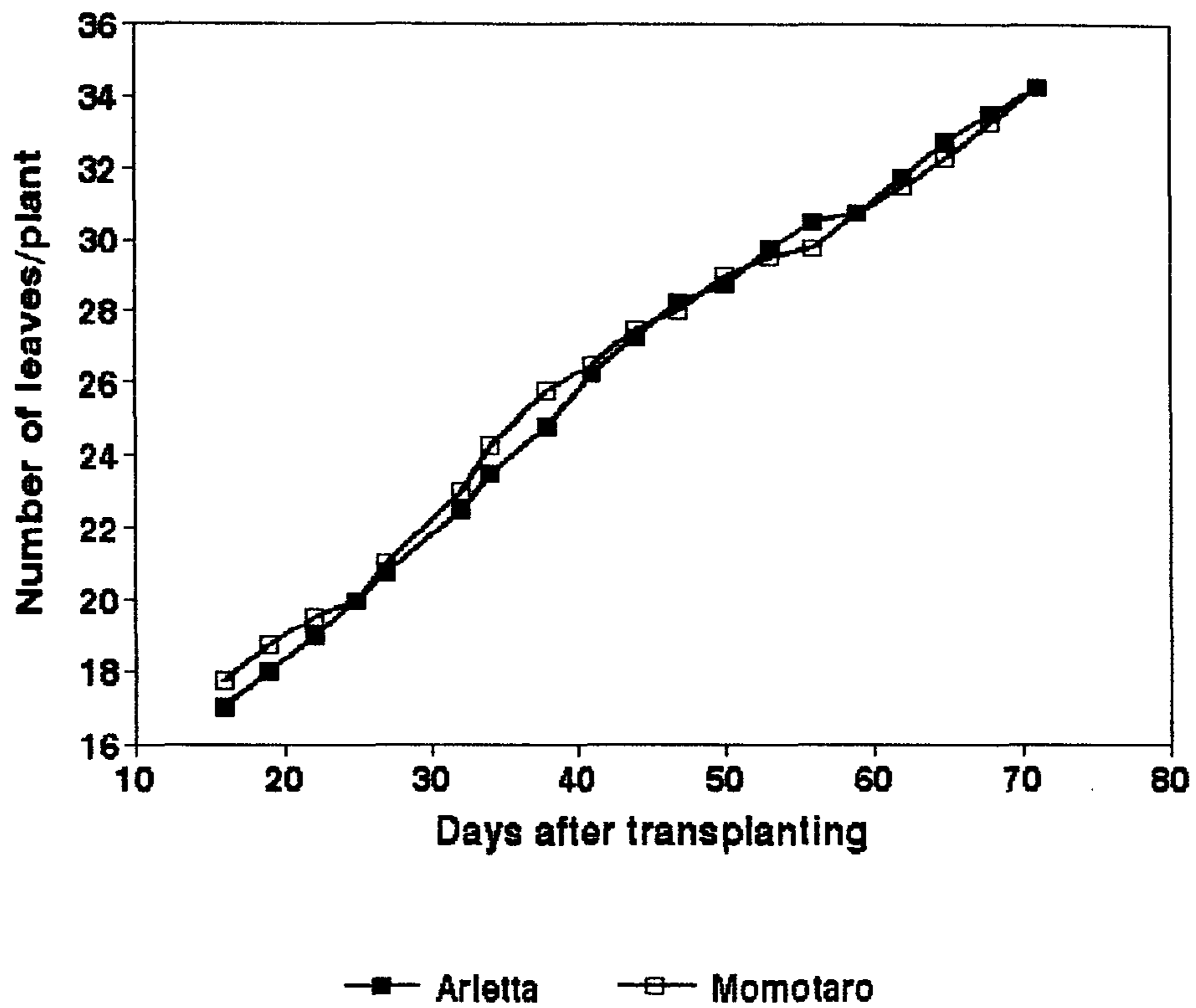


Fig. 4.18 Increase in the number of leaves after planting in two varieties grown in the greenhouse

(다) 과실 수량

토마토의 수량은 표1과 같다. 수량은 공시 품종간에 차이가 없었으며 대체로 7,100 - 7,200 kg/10a 수준이었다.

Table 4.3 Fruit yield tomato grown in polyethylene-covered greenhouse during May 28 to August 16, 1995

Cultivar	Fresh weight of fruit(kg/10a)	Number of fruits(ea./10a)
Arletta	7,218	78,746
Momotaro	7,112	65,450

나. CO₂농도와 온도에 따른 토마토 성장반응 실험

(1) 생육기간중 온실의 미기상환경

CO₂시비를 하지 않은 실험온실내의 CO₂농도의 일변화는 그림 4.19와 같다. CO₂농도는 광합성이 활발하게 이루어지는 15시경에 최저 180ppm까지 떨어졌으며 낮 동안(08시~18시)의 평균 CO₂농도는 342ppm이었다.

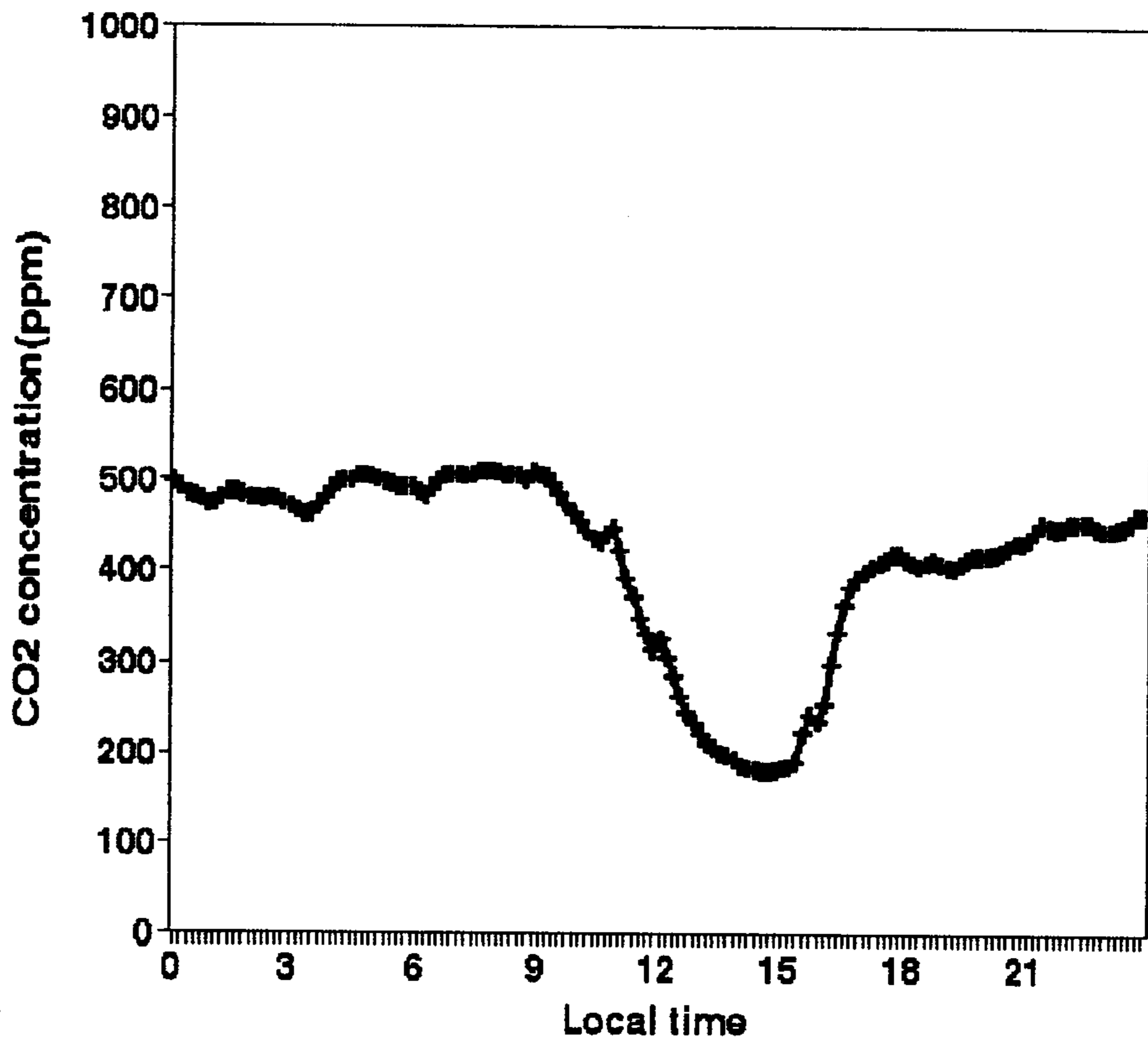


Fig. 4.19 Diurnal course of CO₂ concentration in the greenhouse without CO₂ enrichment on November 29, 1995.

한편 CO₂시비를 한 온실의 전 재배기간중 평균 CO₂농도의 일변화는 Fig. 4.20과 같다. 10시경에 약 1000ppm정도로 가장 높았으며 8시에서 18시까지 낮동안의 평균 CO₂ 농도는 830ppm이었다.

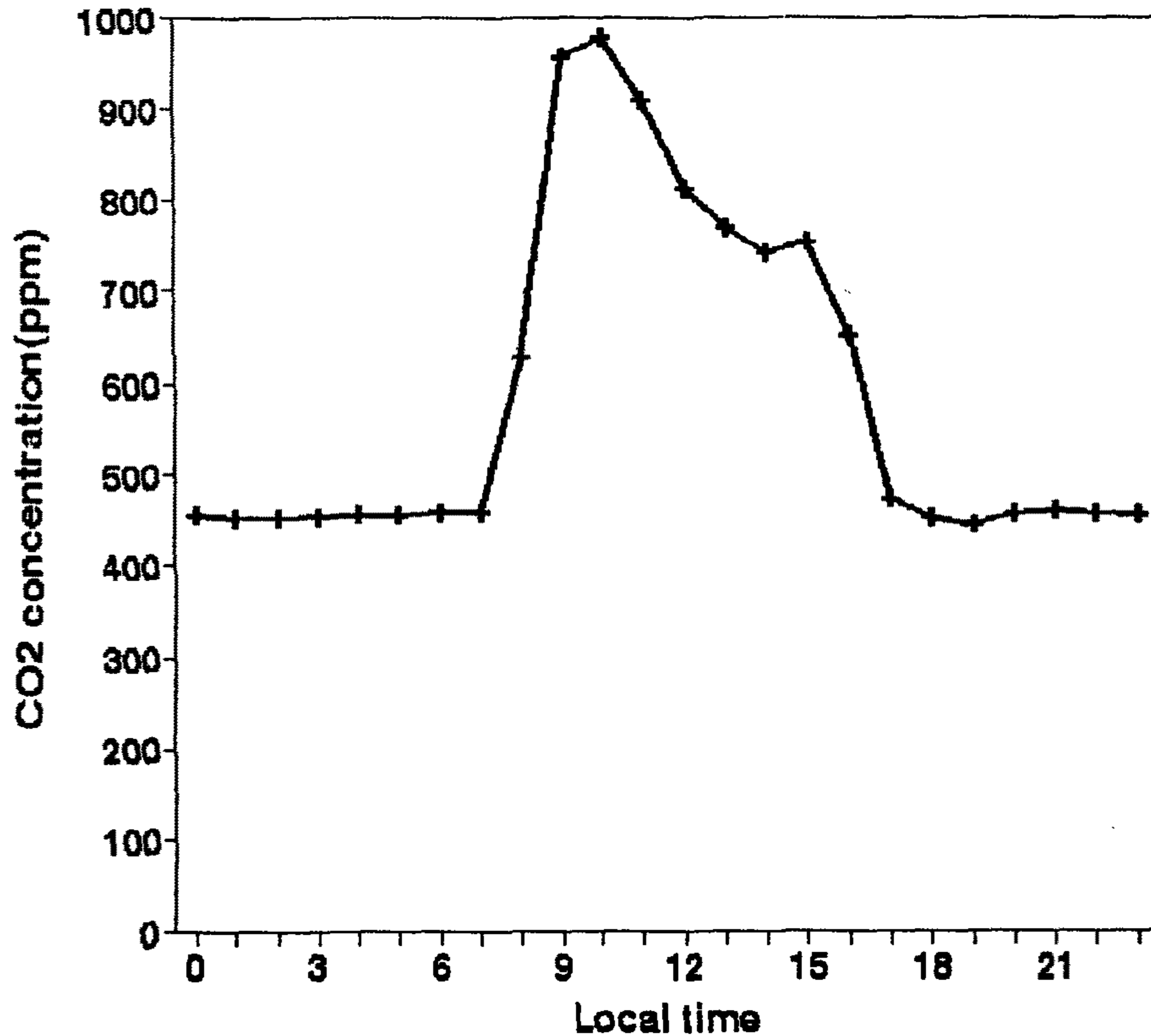


Fig. 4.20 Diurnal course of CO₂ concentration in the CO₂ enriched greenhouse, averaged over the whole experimental period.

실험기간 전 기간중 평균기온의 일변화를 나타낸 것이 그림 4.21이다. 실험기간중 최고기온 평균은 약 25°C로서 처리에 따라 큰 차이가 없었으며 최저 기온은 처리 III이 8°C로 가장 낮았으며 처리II는 약 12°C정도였다. 각 처리별 주야간 평균기온은 표 3.1과 같다.

Table 3.1 Average air temperature(°C) over the whole experimental period during daytime(08 : 00~18 : 00) and nighttime.

Time	Treatment			outdoor
	I	II	III	
Daytime	20.3	20.1	19.6	10.2
Nighttime	12.6	11.9	10.0	5.4

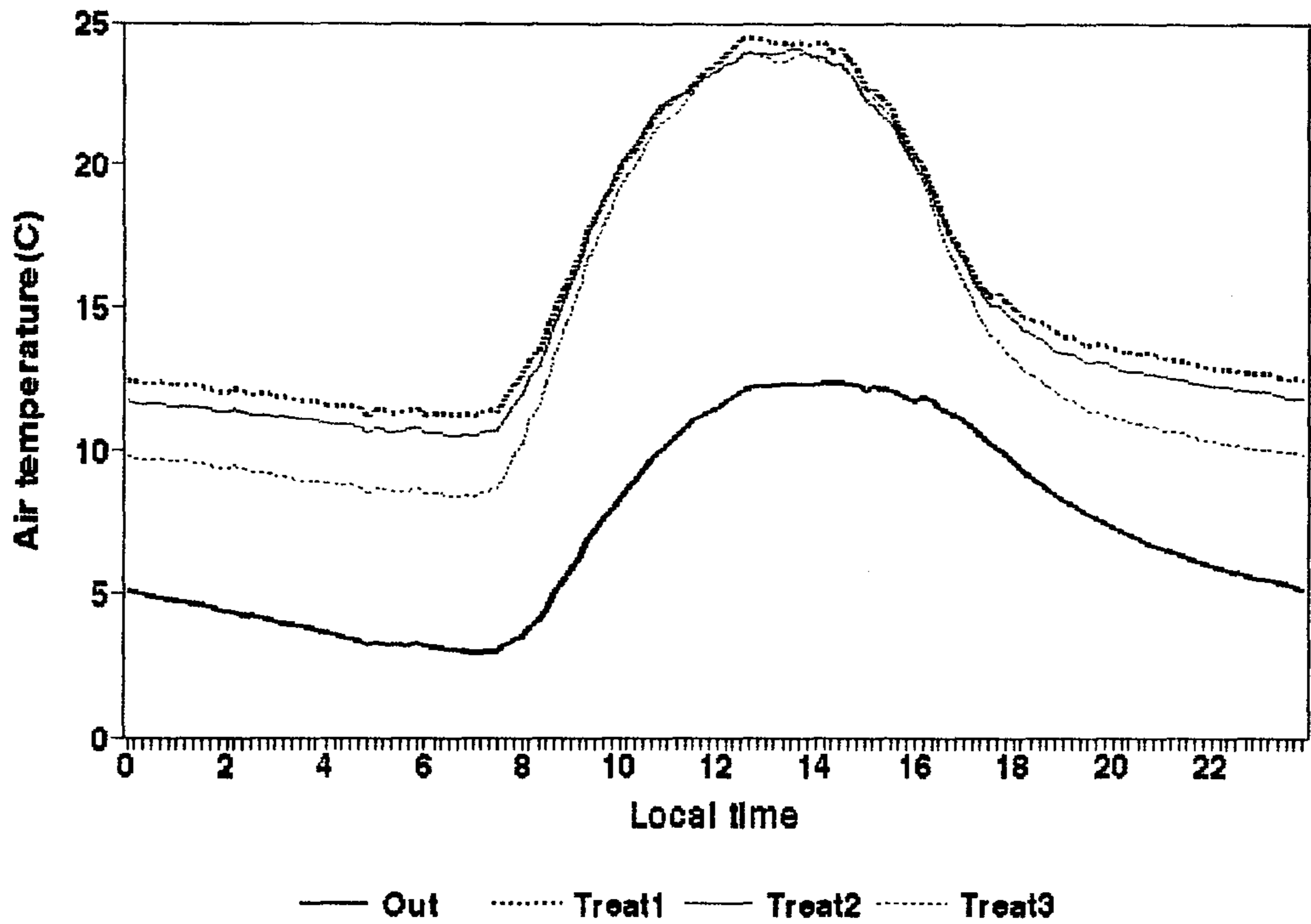


Fig. 4.21 Diurnal courses of air temperatures averaged over the whole experimental period. (Out : outside, Treat 1, Treat 2 and Treat 3 depict greenhouses exposed to different temperature and CO₂ control)

실험기간중 각 처리 온실의 평균 상대습도와 포차의 일변화는 각각 그림 4.22와 그림 4.23과 같다. 주간과 야간의 상대습도는 야간에 비하여 온실내부가 높았으며 처리온실별로는 처리 I의 경우는 주간 야간 모두 처리 II에 비하여 상대습도가 낮게 유지되었으며 처리 III의 경우는 주간에는 타 처리에 비하여 낮게 유지되었으나 야간에는 타 처리에 비하여 높게 유지되었다. 한편 대기의 증발요구도의 지표인 포차는 처리 I이 가장 컸으며 다음이 처리 III, 처리 II의 순이었다. 각 처리 온실의 주야간 평균 상대습도와 포차는 표 4.2와 같다.

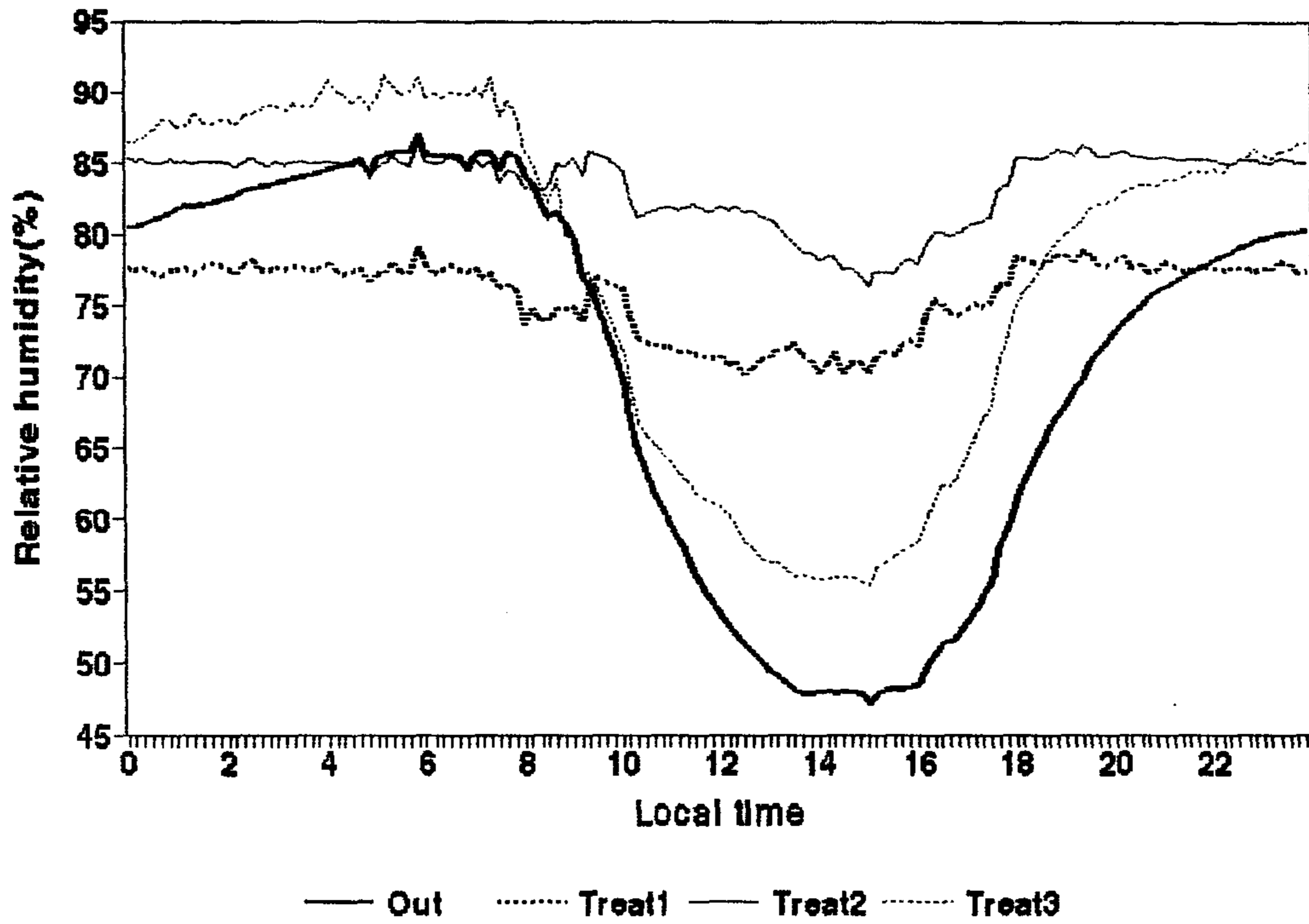


Fig. 4.22 Diurnal courses of average relative humidity over the whole experimental period in the greenhouses

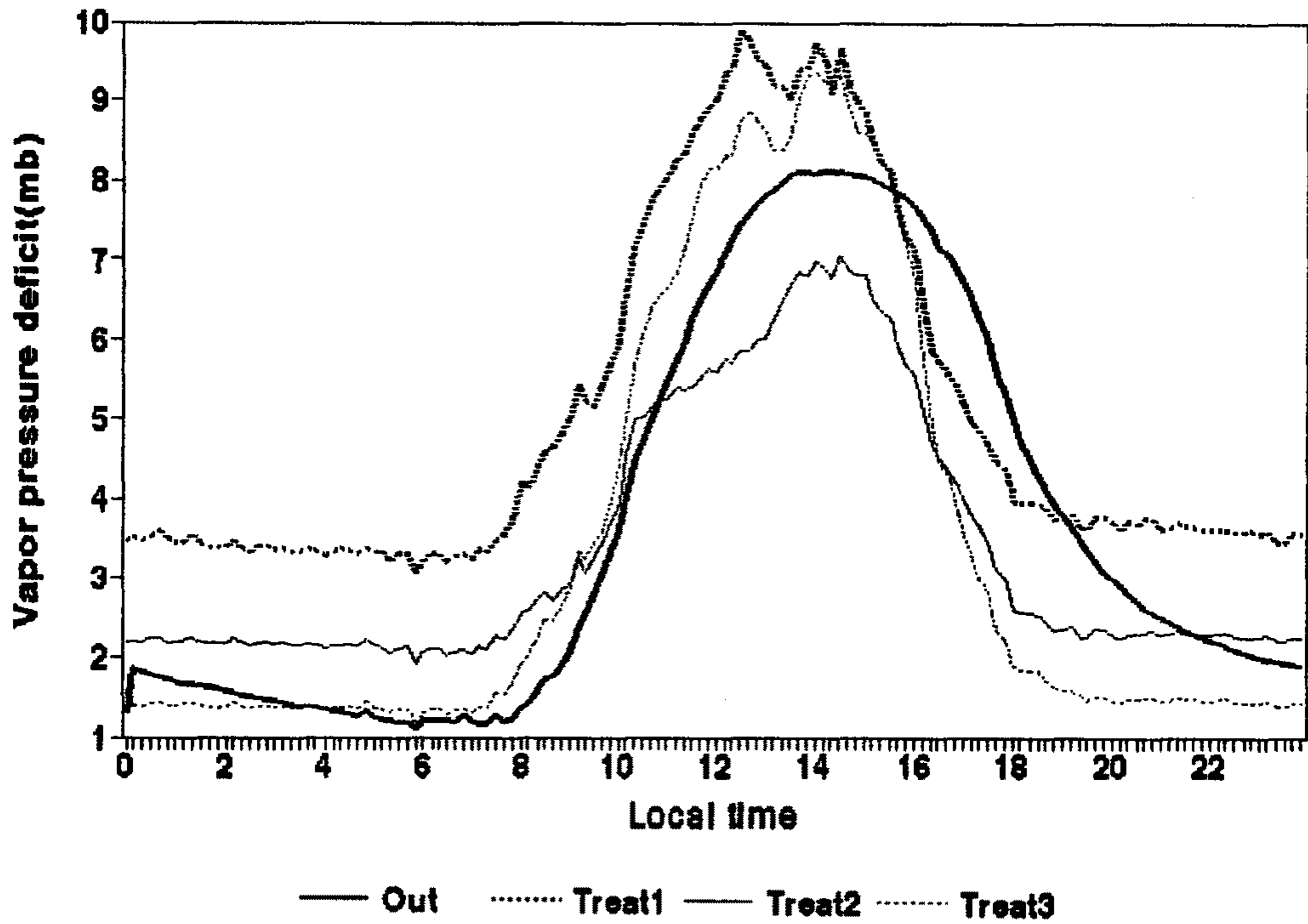


Fig. 4.23 Diurnal course of average vapor pressure deficit over the whole experimental period in the greenhouses.

Table 4.2 Average relative humidity and vapor pressure deficit over the whole experimental period in the greenhouses during day-and night-time.

Time	Relative humidity(%)				Vapor pressure deficit(mb)			
	Treat I	Treat II	Treat III	Outdoor	Treat I	Treat II	Treat III	Outdoor
Daytime	73.1	84.2	77.0	58.0	7.2	5.0	6.0	5.9
Nighttime	79.0	77.0	85.0	89.1	3.2	2.2	1.5	2.1

온실내외부의 일사량을 나타낸 것이 그림 4.24이다. 일평균 일사량은 온실외부가 8.99MJ/m²/day, 온실내부가 7.15MJ/m²/day로서 온실피복재의 투과율은 약 80%였으

며, 균락하부에서의 일사량은 $1.93\text{MJ}/\text{m}^2/\text{day}$ 균락의 실험기간중 평균 투광율은 27% 였다.

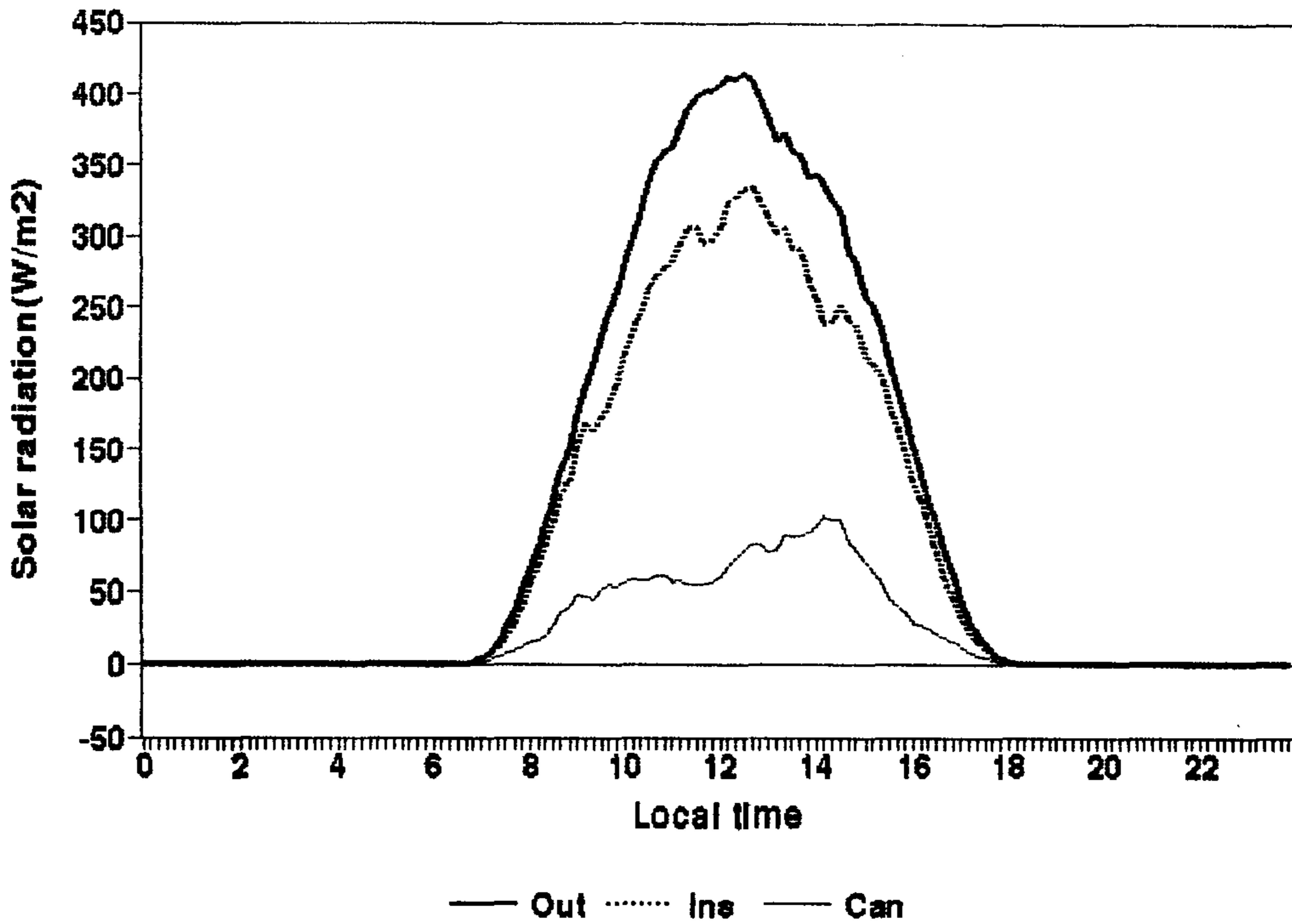


Fig. 4.24 Diurnal courses of average solar radiation over the whole experimental period outside(Out), and inside(Ins) the greenhouse, and below the canopy(Can).

온실내부에서의 순복사량과 지중열류를 나타낸 것이 그림 25 이다. 온실내부 균락상 태에서의 순복사량은 $2.86\text{MJ}/\text{m}^2/\text{day}$ 로서 온실내 일사량($7.15\text{MJ}/\text{m}^2/\text{day}$)의 40%, 균락 하부의 순복사량은 $0.28\text{MJ}/\text{m}^2/\text{day}$ 로서 상부 순복사량의 10%정도였다. 지중 열효율은 $-0.146\text{MJ}/\text{m}^2/\text{day}$ 로서 온실 내부에서 에너지 수지에 큰 비중을 차지하지 않는 것으로 판단된다.

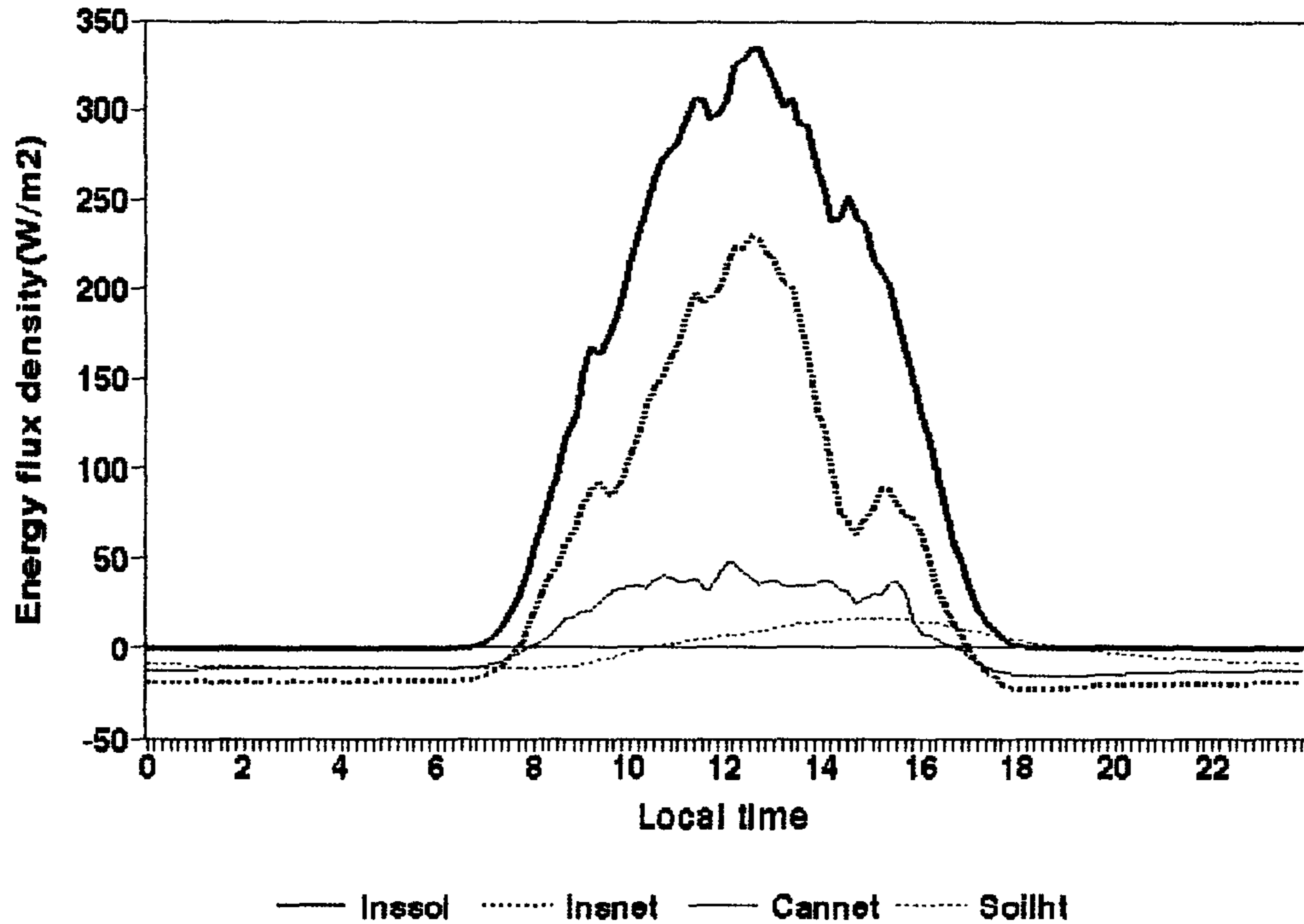


Fig. 4.25 Diurnal Courses of average net radiation above(Innet) and below(Cannet) Canopy, and Soil heat flux inside the greenhouse.

(2) 토마토의 성장과 발육

(가) 각 기관의 건물중

정식후 각 기관의 건물중 증가를 나타낸 것이 그림 4.26에서 그림 4.30까지이다. 엽(그림 4.26), 엽병(그림 4.27), 경(그림 4.28), 과실(그림 4.29) 및 지상부 전체(그림 4.30) 건물중은 CO₂시비를 하고 생육기간 평균 최고/최저온도를 25°C/12°C로 한 처리 I이 가장 컸으며 다음이 CO₂처리를 하지 않고 최고/최저온도를 25°C/12°C로 관리한 처리 II가 다음으로 컸으며 CO₂처리를 하지 않고 최고/최저온도를 25°C/8°C로 한 처리 III이 가장 작았다. 한편 이 실험의 각 부위별 건물중은 하계에 실험한 건물중보다 현저히 낮았는데 이는 실험을 실시한 기간중의 일사량이 현저히 낮고 또한 지중가온을 하지 않아 토양온도 또한 낮았기 때문인 것으로 판단된다.

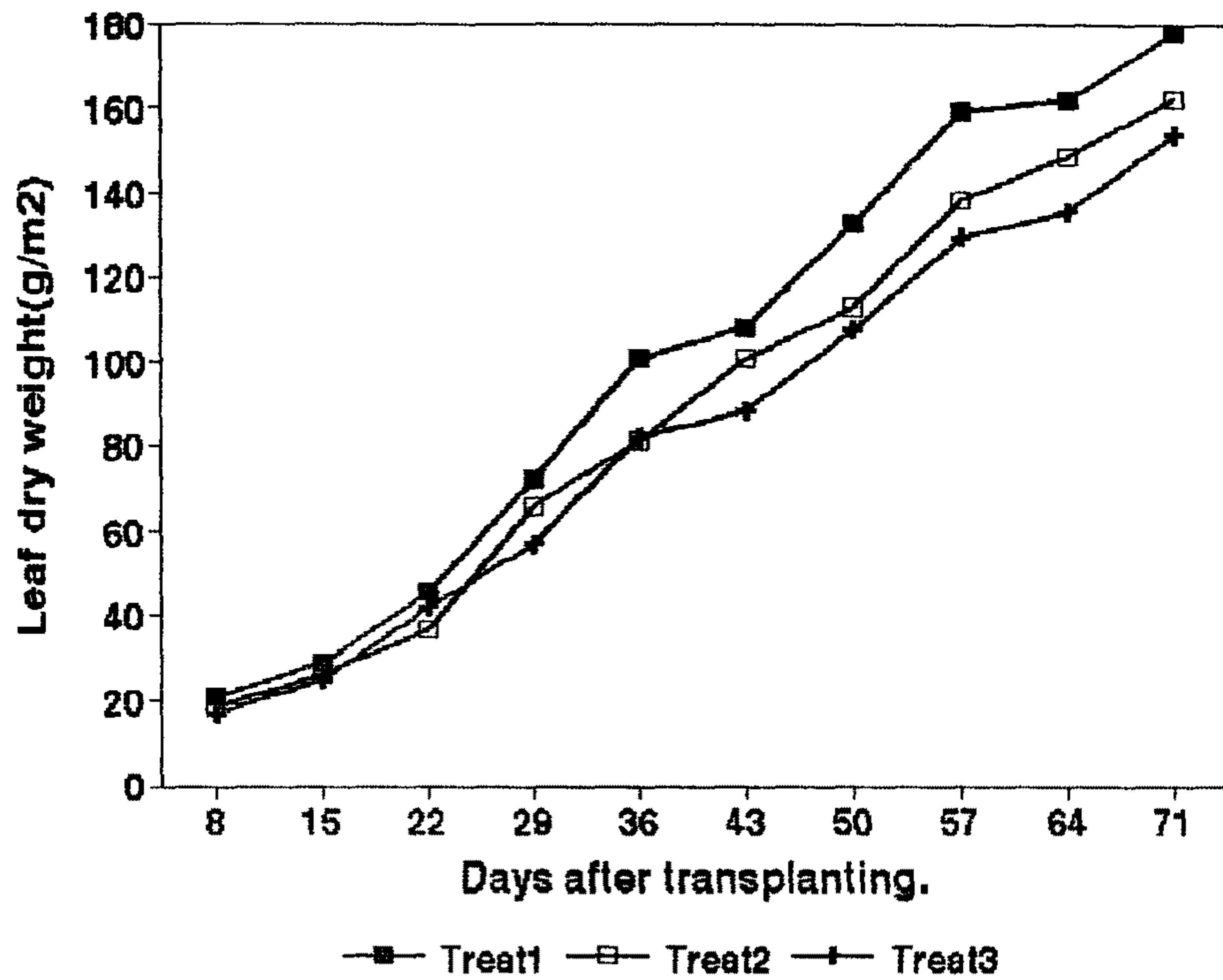


Fig. 4. 26 Leaf dry weight increase after planting in tomato, cv Seokwang exposed to different CO₂ concentration air temperature, in the greenhouse (Treatments were explained in materials and methods)

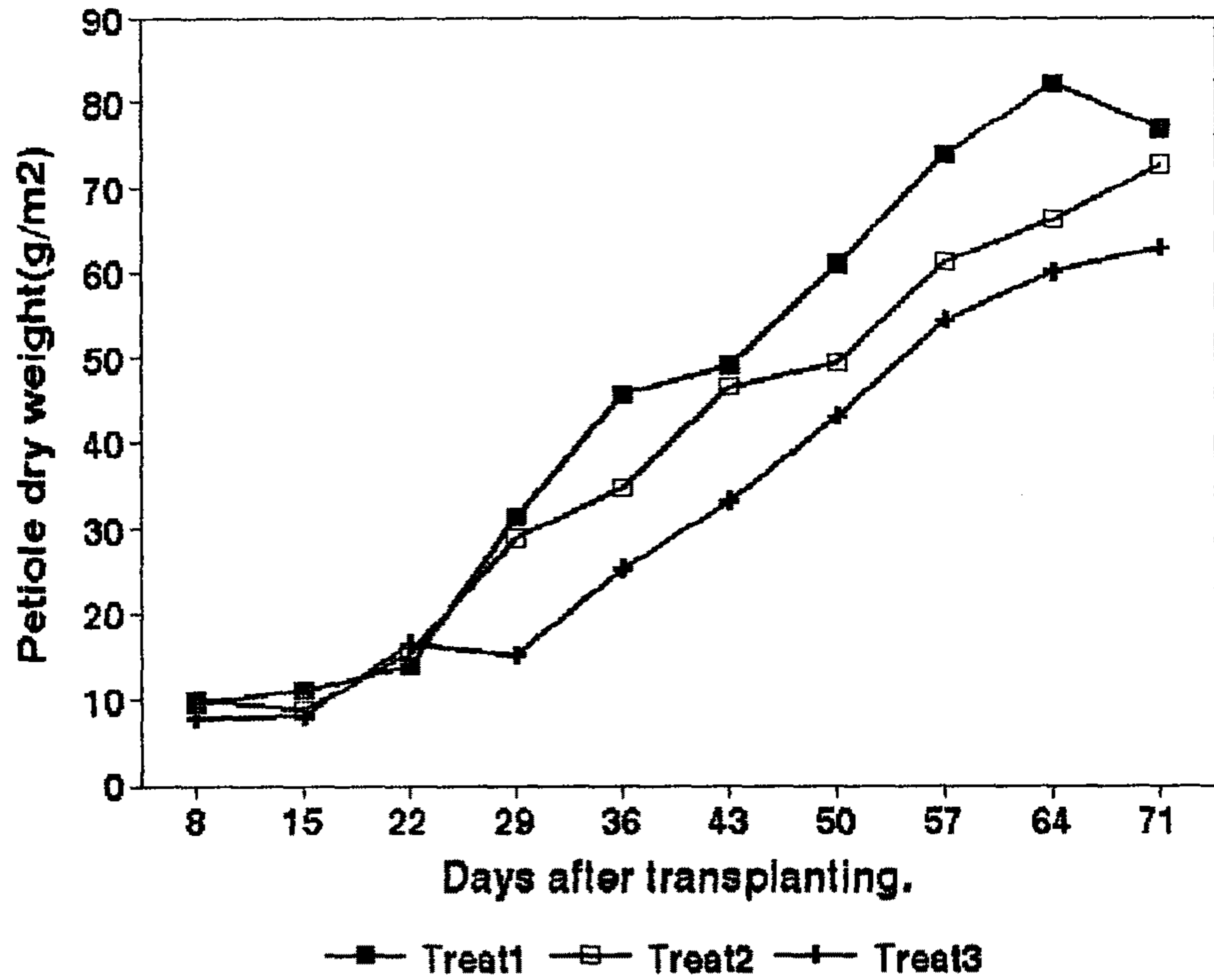


Fig. 4. 27 Petiole dryweight increase after planting in tomato, cv Sekwang, exposed to defferent CO₂ concentration and air temperature in the greenhouse.

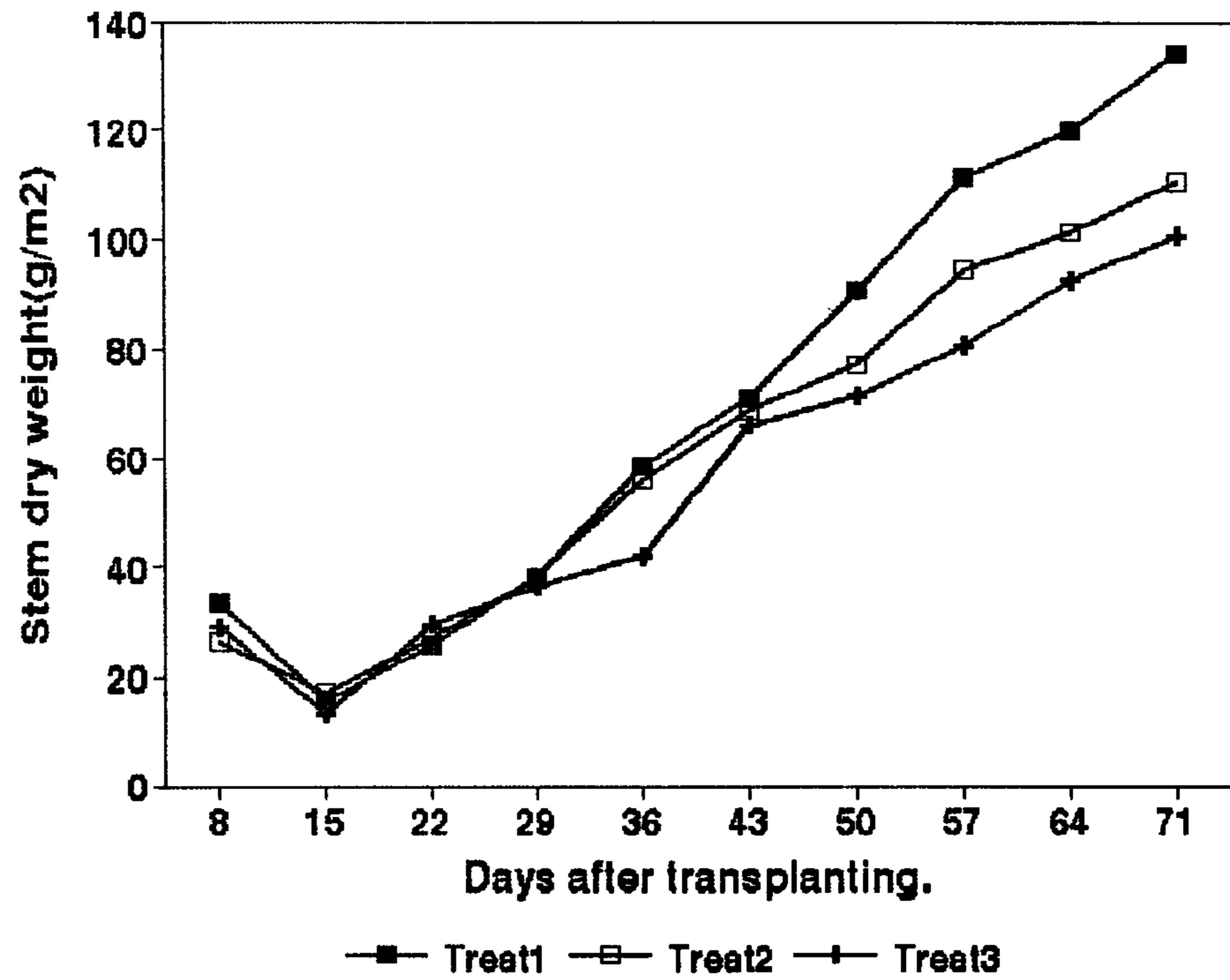


Fig. 4. 28 Stem dryweight increase after planting in tomato, cv Seokwang exposed to different CO₂ concentration and air temperature in the greenhouse.

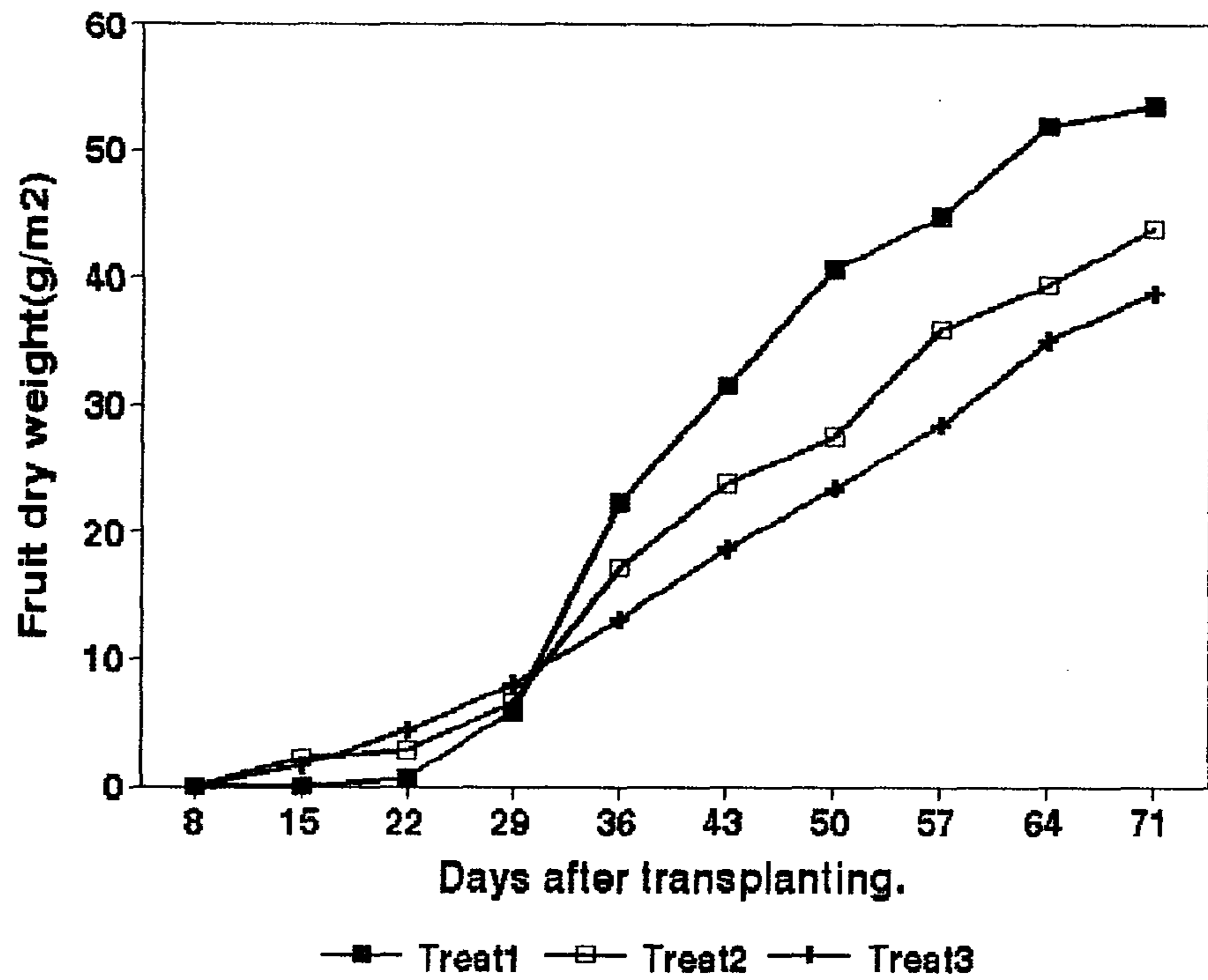


Fig. 4. 29 Fruit dry weight increase after planting in tomato, cv Seokwang exposed to different CO₂ concentration and air temperature in the greenhouse.

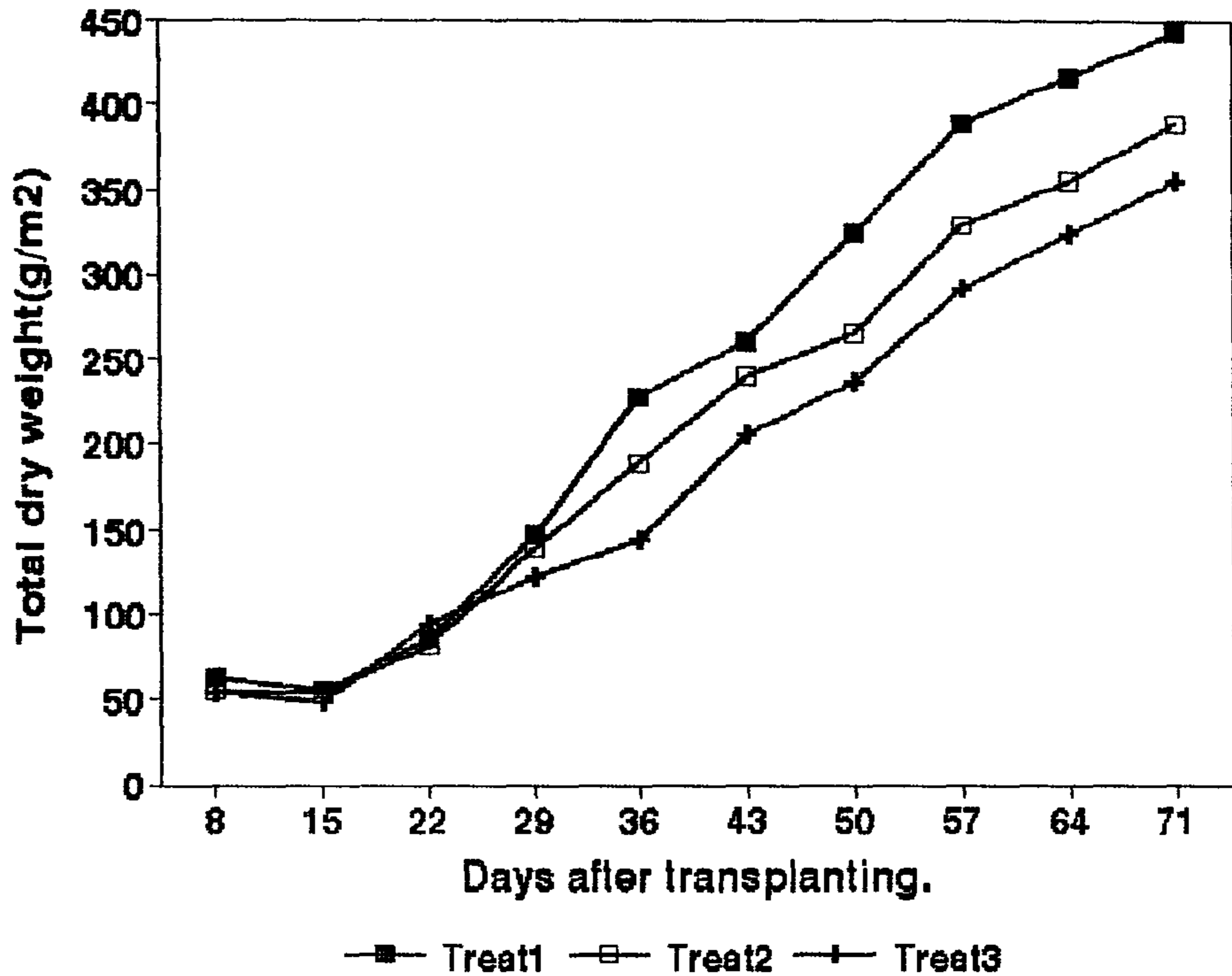


Fig. 4.30 Total dry weight increase after planting in tomato, cv Seokwang exposed to different CO₂ concentration air temperature in the greenhouse.

(나) 지상부 전체건물중과 각 기관건물중과의 관계

지상부 전체건물중과 엽중(그림 4.31), 엽병중(그림 4.32), 경중(그림 4.33), 및 과실중(그림 4.34)과는 고도로 유의한 직선관계가 있었으며 이 관계는 처리에 따라 차이가 없어 CO₂처리 및 기온 처리에 따라서 동화산물의 각 기관으로의 배분비율은 달라지지 않은 것으로 판단된다. 건물중 1g이 증가하면, 엽중은 0.4g, 엽병중은 0.19g, 경중은 0.27g, 과실중은 0.17g 증가하였다. 앞서 기술한 하계실험결과, Challa(1991) 및 de Kouing(1991)의 보고에 비하여 과실로의 건물배분 비율이 현저히 낮았으며 상대적으로 잎으로의 배분비율이 컸다. 이와 같은 결과가 겨울철에 실험이 되어 일사량의 부족이나 지중가온을 하지 않은 상태에서 재배되어 저지온에서 기인된 것으로 판단되나 이에 대해서는 보다 철저한 원인규명을 할 필요가 있다.

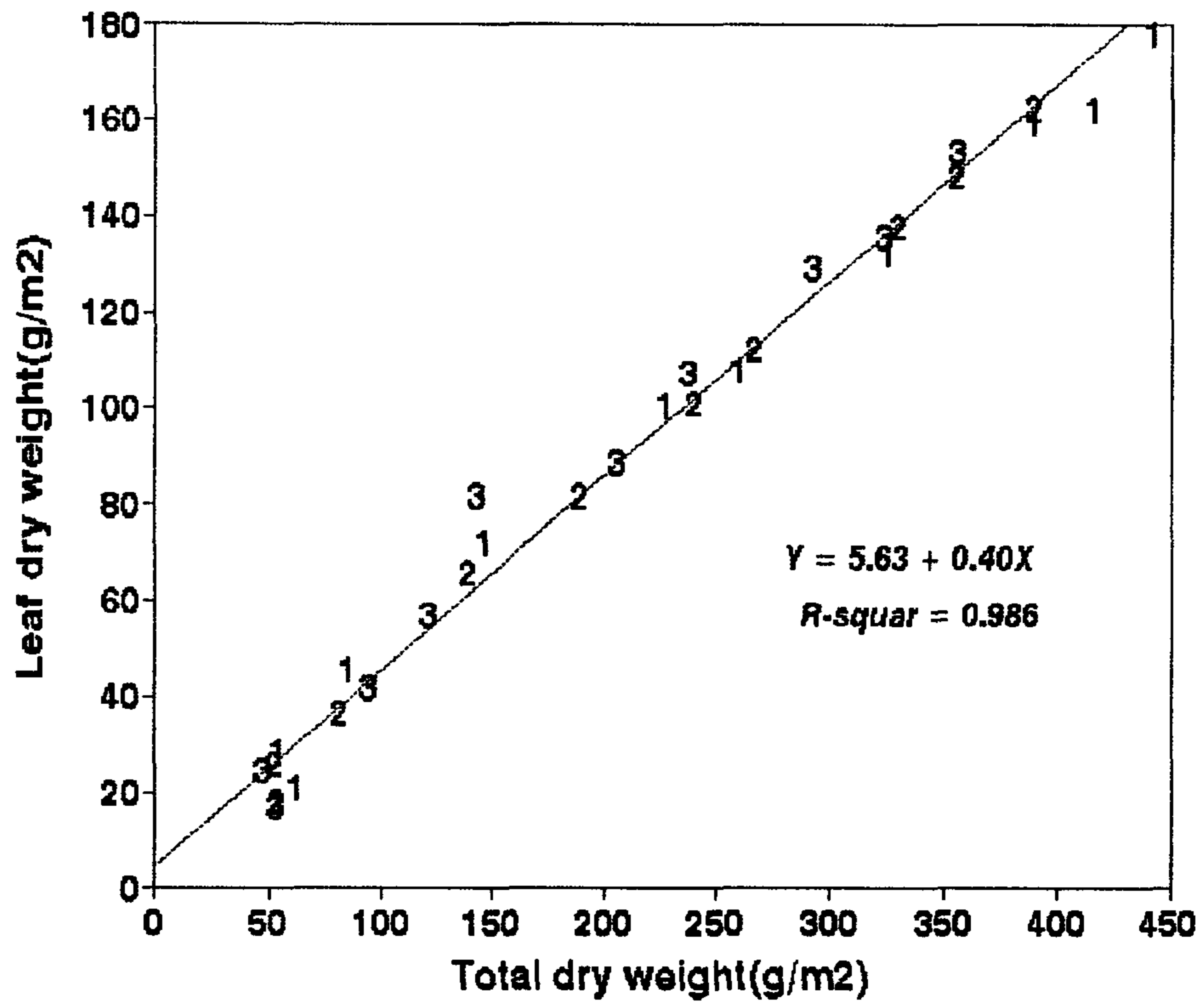


Fig. 4. 31 Relationship between leaf dry weight and total dry weight. Figures, 1, 2 and 3 in the graph depict treatment 1, treatment 2 and treatment 3, respectively.

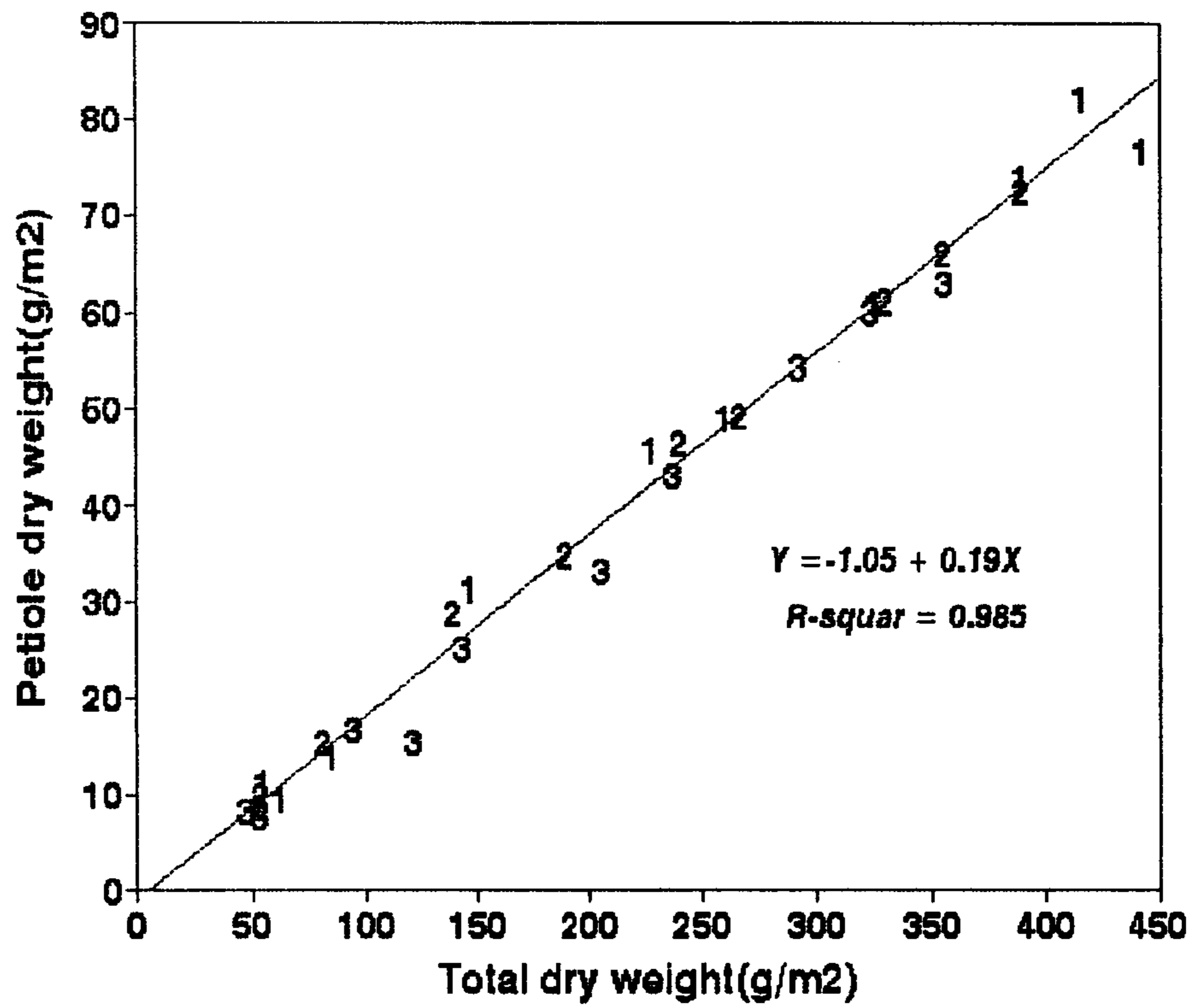


Fig. 4. 32 Relationship between petiole dry weight and total dry weight.

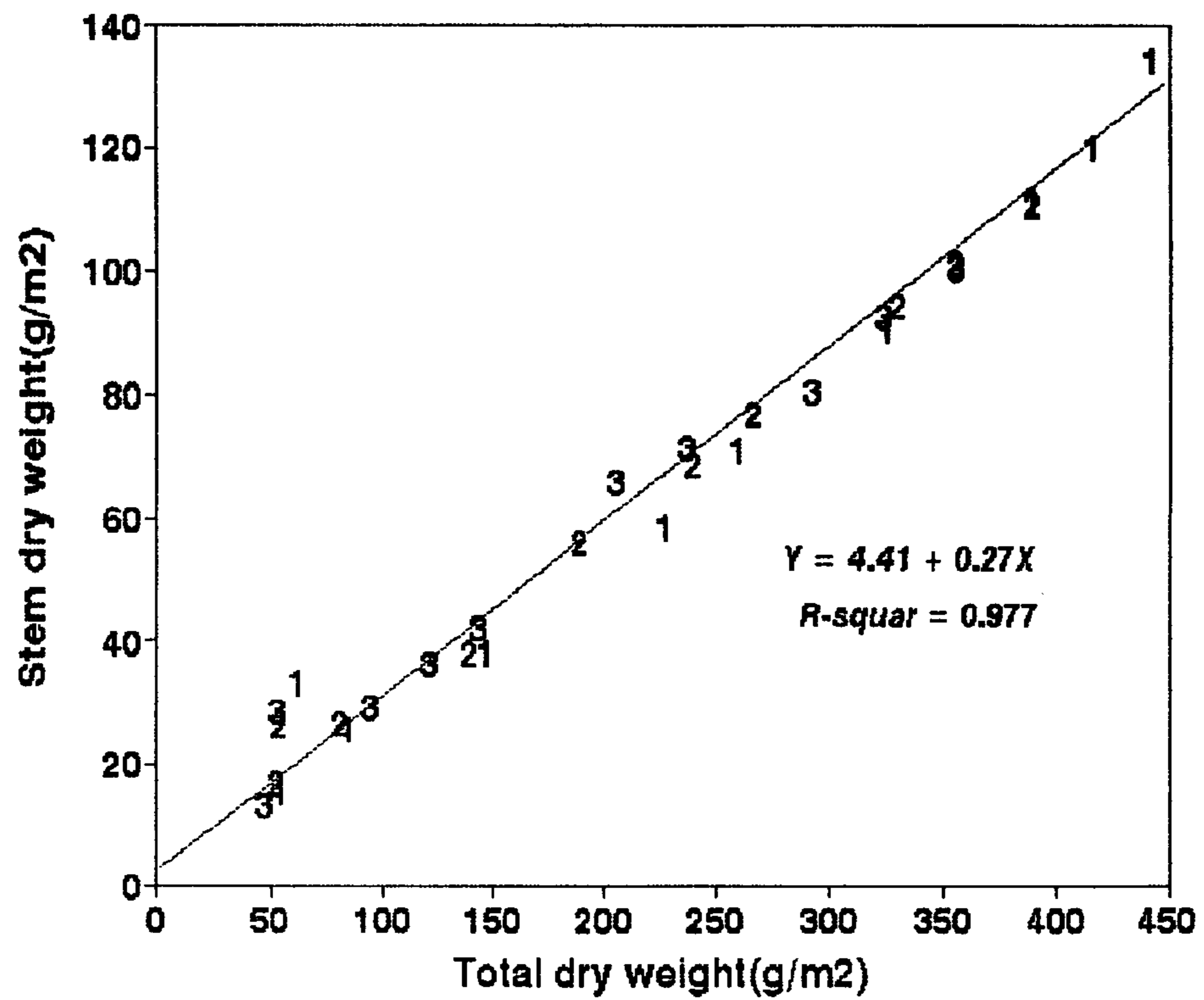


Fig. 4. 33 Relationship between stem dry weight and total dry weight.

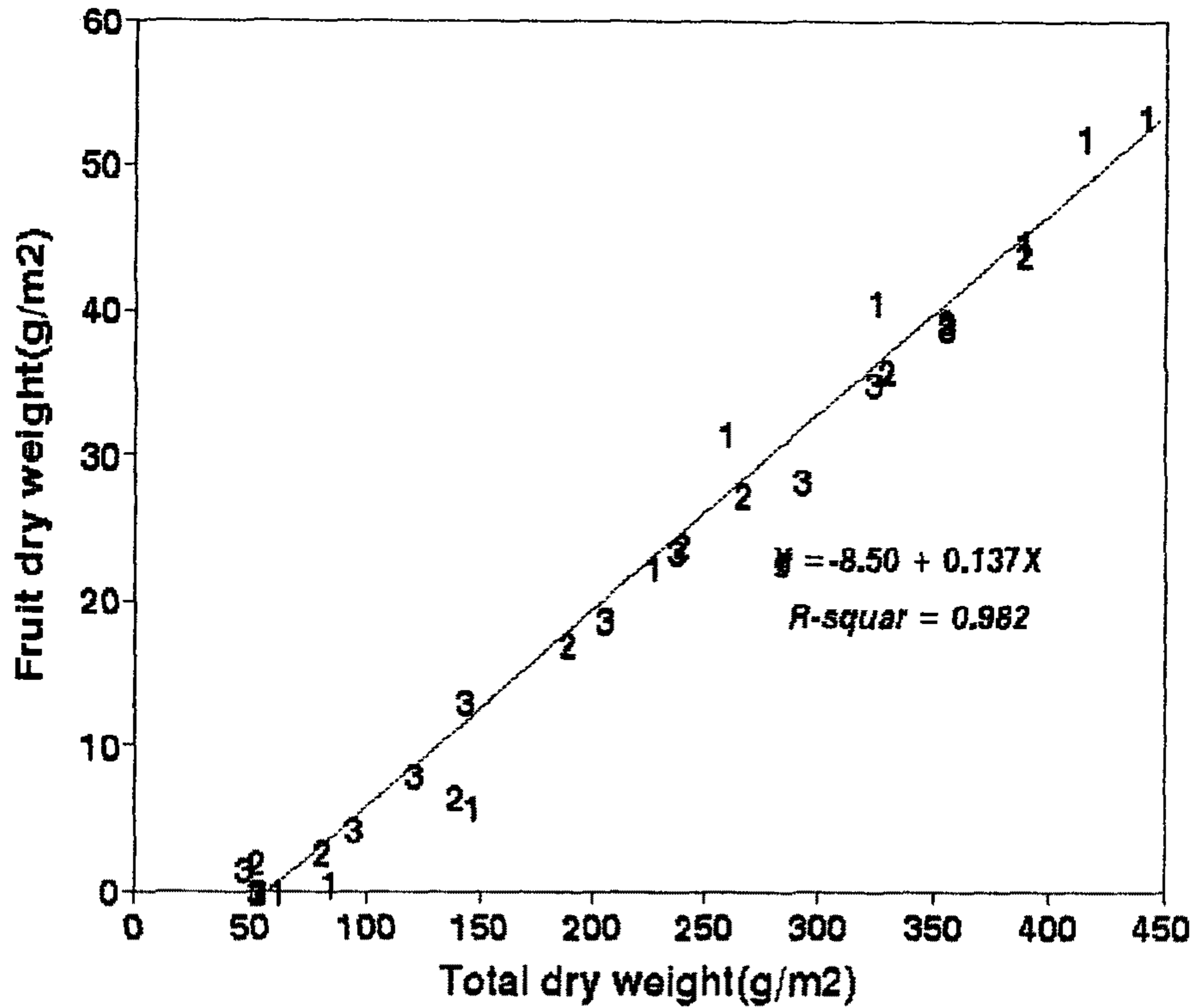


Fig. 4. 34 Relationship between fruit dry weight and total dry weight.

다. 엽면적과 비엽면적

정식 후 엽면적지수와 비엽면적의 변화를 나타낸 것이 각각 그림 4.35과 그림 4.36이다. 엽면적지수는 동일한 온도관리로 한 조건에서 CO₂ 시비처리에 의하여 증가되지 않았는데 이는 그림 4.36에서 보는 바와 같이 CO₂처리에 의하여 비엽면적이 감소하였기 때문이다. CO₂시비처리를 하지않은 조건에서는 보다 저온으로 관리된 처리 II에 비하여 엽면적이 낮았는데 이는 그림 4.27과 그림 4.36에서 보는 바와 같이 엽건물중이 낮을뿐만 아니라 비엽면적이 작았기 때문이었다. 일반적으로 CO₂ 시비를 하면 비엽면적이 감소하고 고온에서는 비엽면적이 증가한다는 보고(Jones 등, 1991)와 일치하였다.

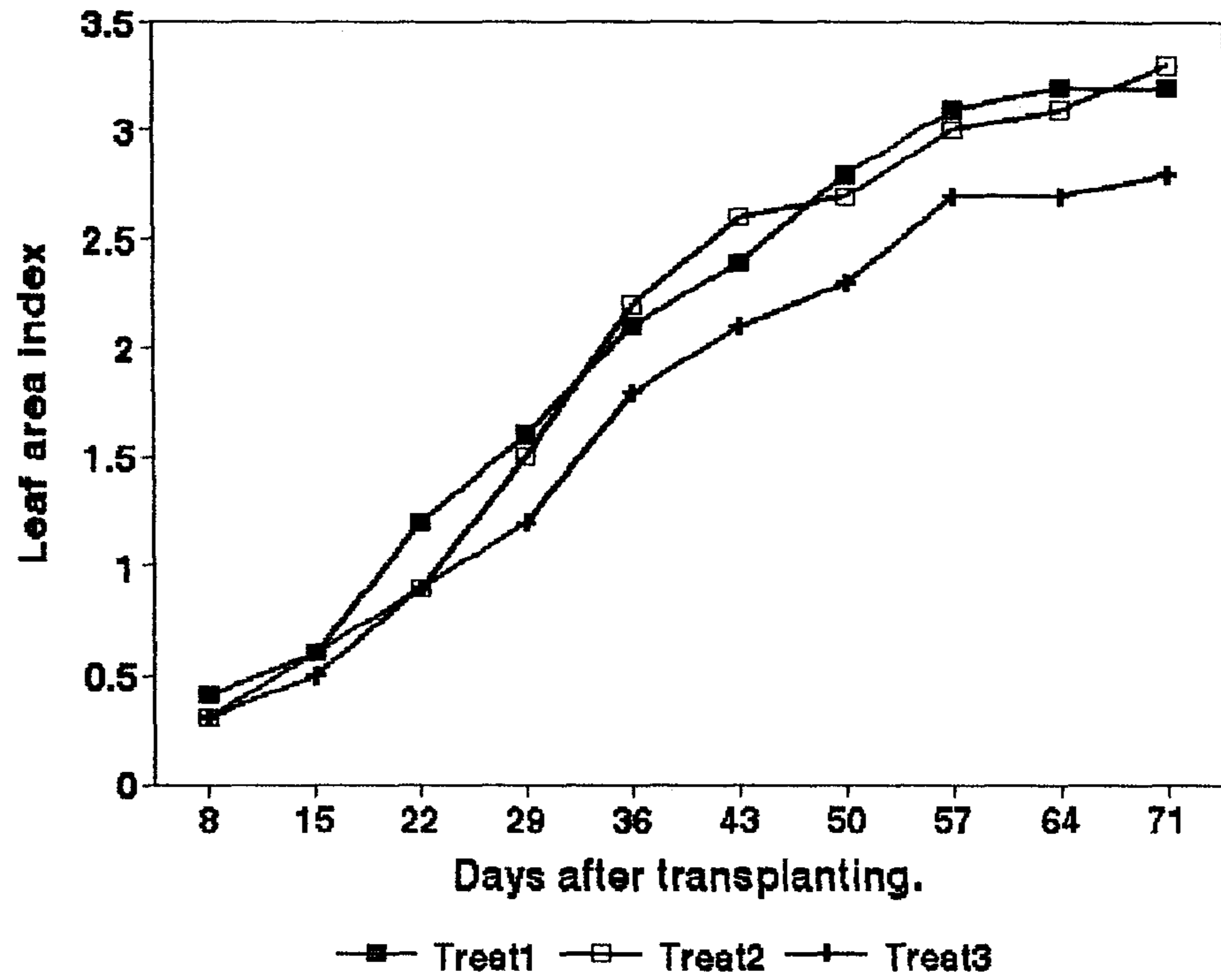


Fig. 4. 35 Leaf area development after planting in tomato, cv Seokwang exposed to different CO₂ concentration and air temperature in the greenhouse.

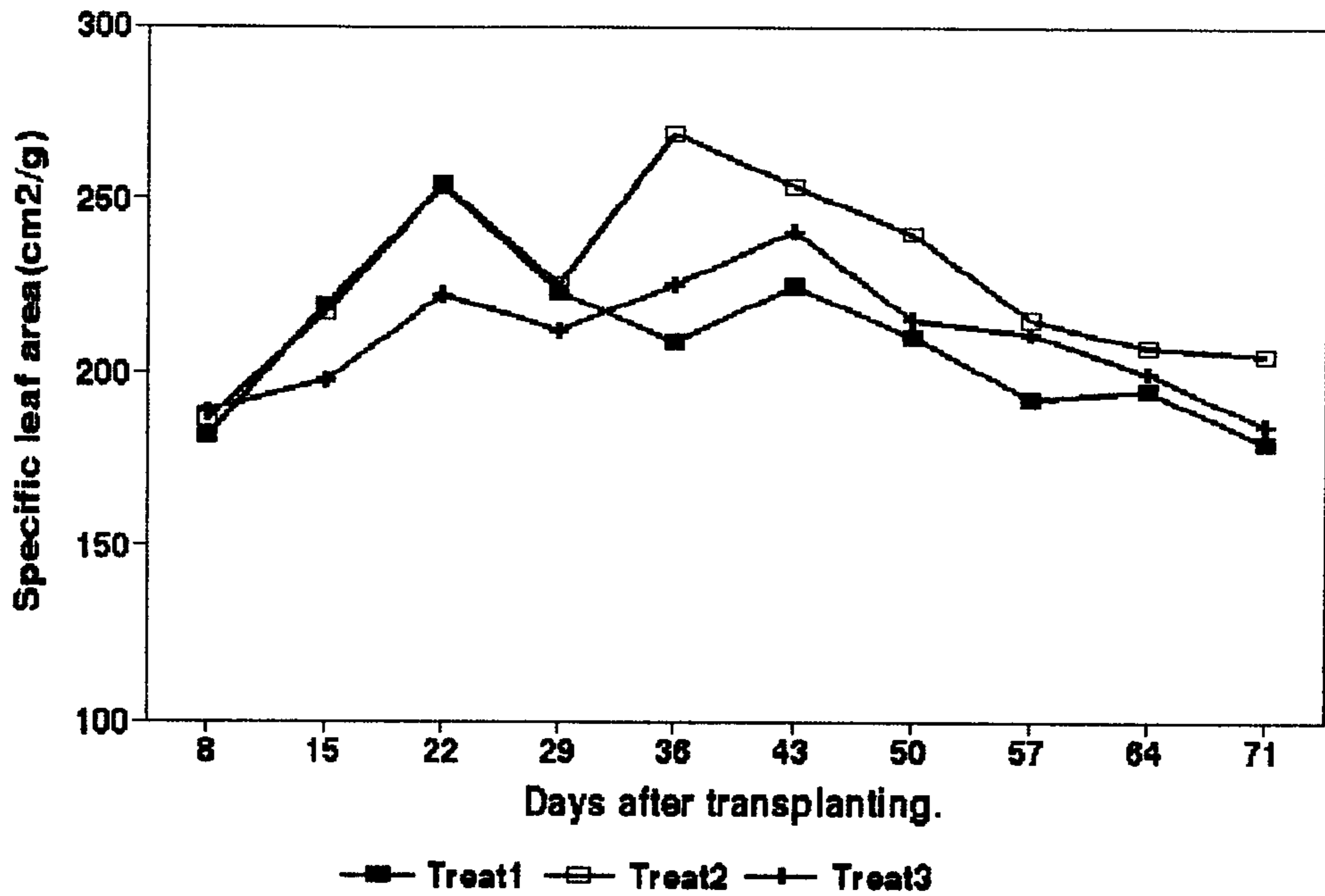


Fig. 4. 36 Variation in specific leaf area after planting in tomato, cv Seokwang exposed to different CO₂ concentration and air temperature in the greenhouse.

(라) 기관의 분화

정식 후 엽수, 마디, 화방수, 개화수, 착과수 등의 증가를 나타낸 것이 그림 4. 37에서 그림 4. 42까지 이다. 엽수(그림 4. 37), 마디수(그림 4. 38), 화방수(그림 4. 39) 및 개화수(그림 4. 41)는 저온으로 관리 처리 3의 경우에만 다소 감소하였다. 한편 착과수(그림 4. 42)은 CO₂시비에 의하여 다소 감소하는 경향이였다. 엽수, 마디수 및 화방수는 정식후 45일경을 경계로하여 증가속도가 다소 둔화되는 반면 개화수와 착과수는 이 시기를 기점으로 하여 급속하게 증가하는 경향으로 생식기관의 발육과 영양기관의 발육을 다소 지체시키는 것으로 판단되었다.

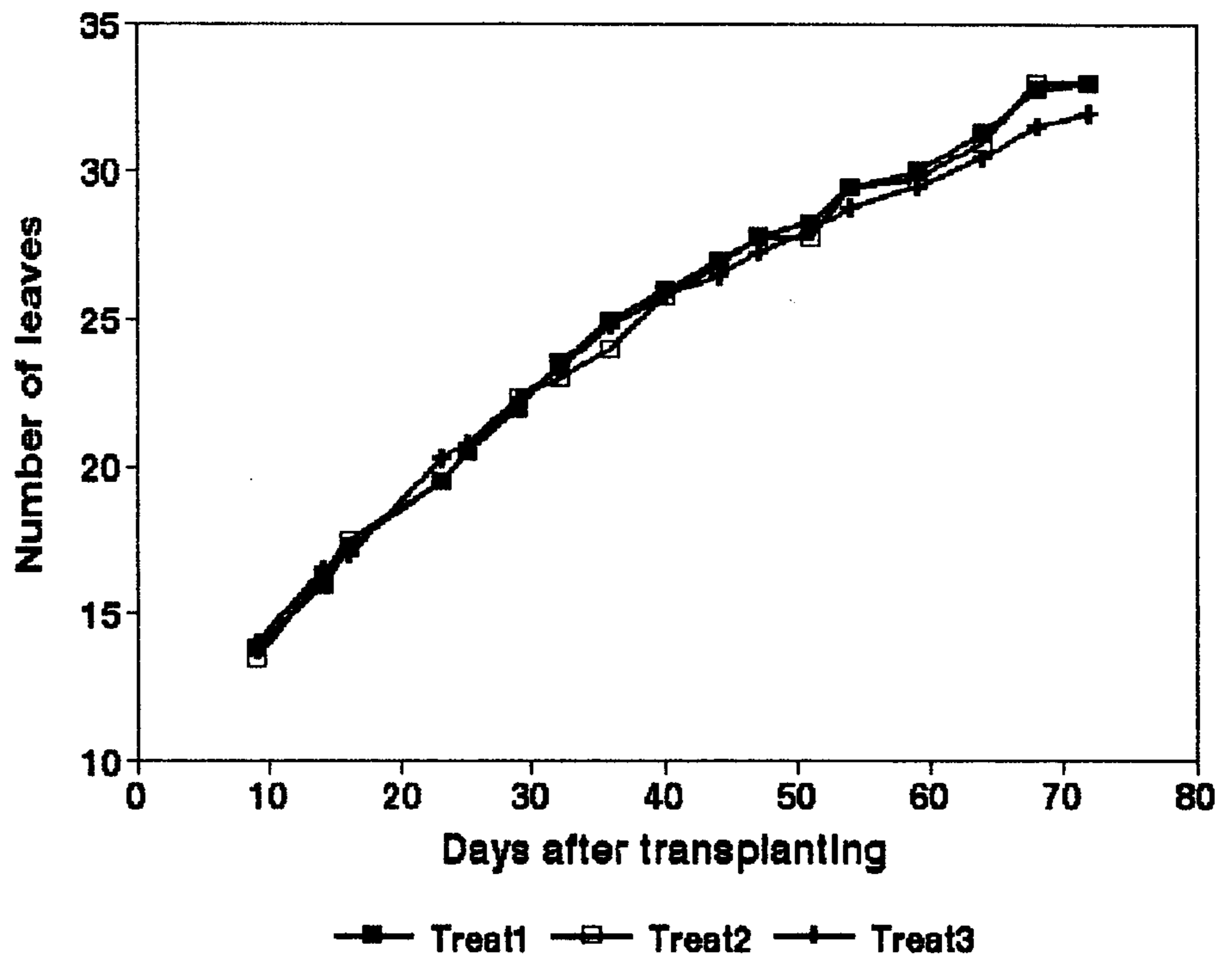


Fig. 4. 37 Increase in the number of leaves after planting in tomato, cv Seokwang exposed to different CO₂ concentration and air temperature in the greenhouse.

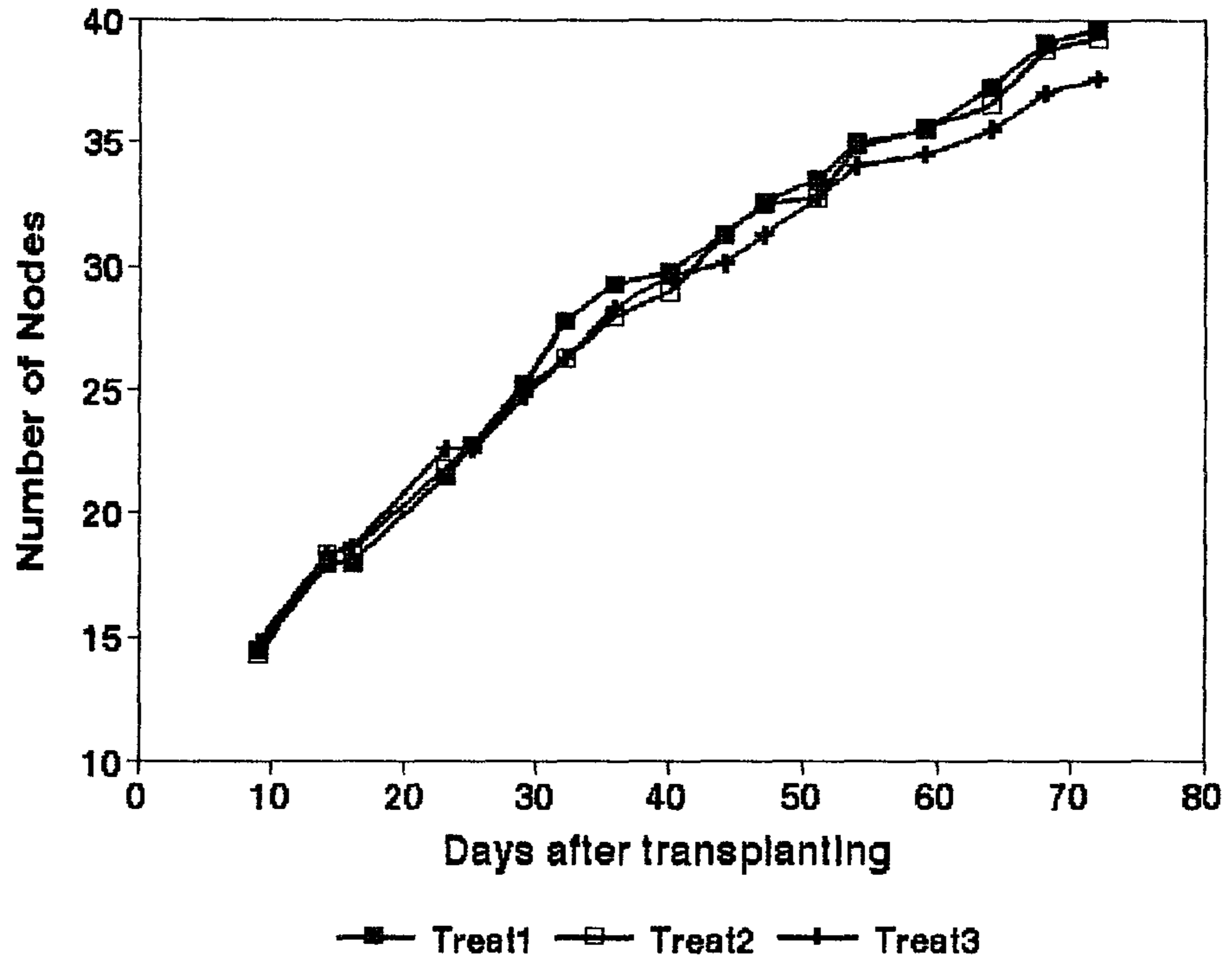


Fig. 4. 38 Increase in the number of nodes after planting in tomato, cv Seokwang exposed to different CO₂ concentration and air temperature in the greenhouse.

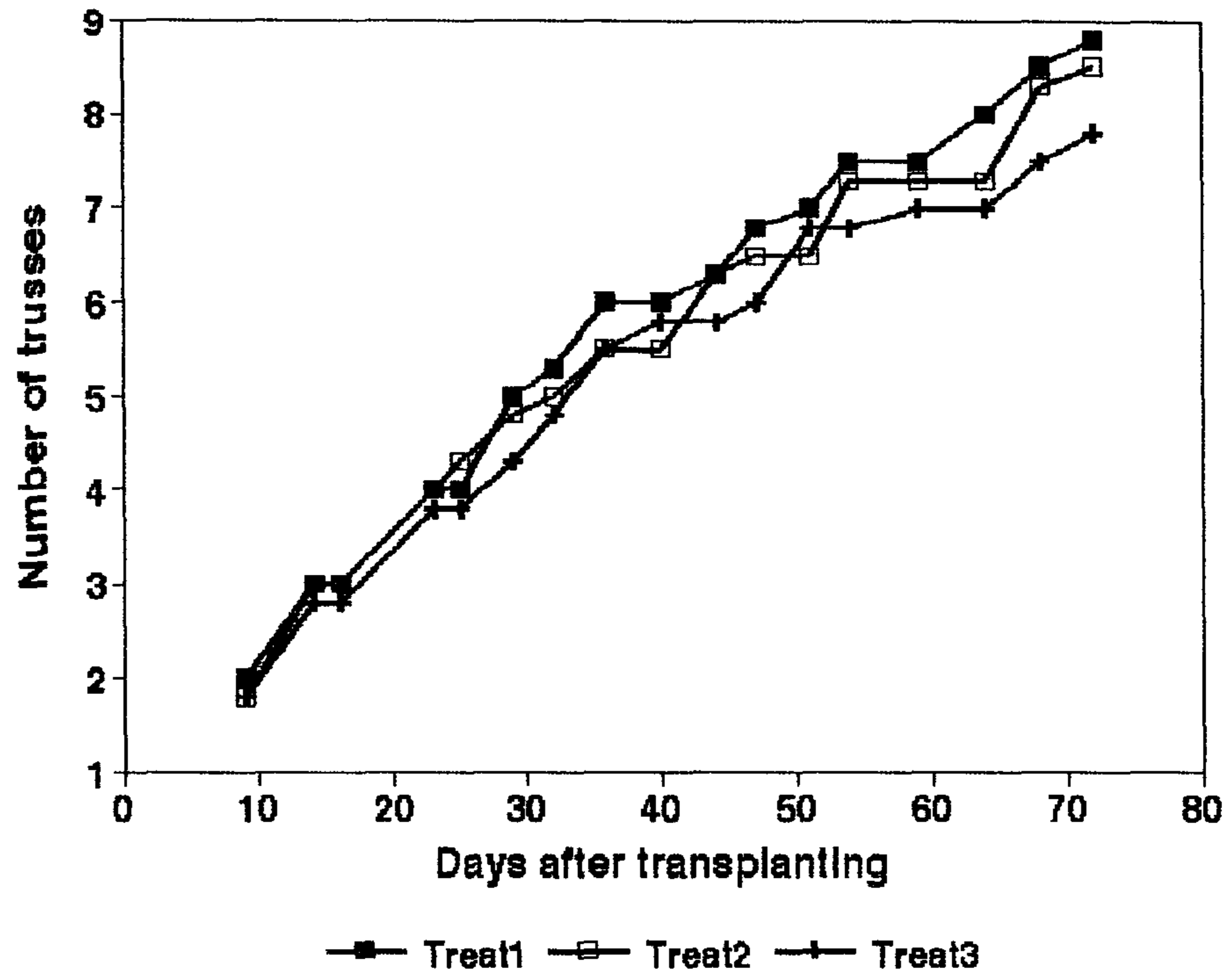


Fig. 4. 39 Increase in the number of trusses after planting in tomato, cv Seokwang exposed to different CO₂ concentration and air temperature in the greenhouse.

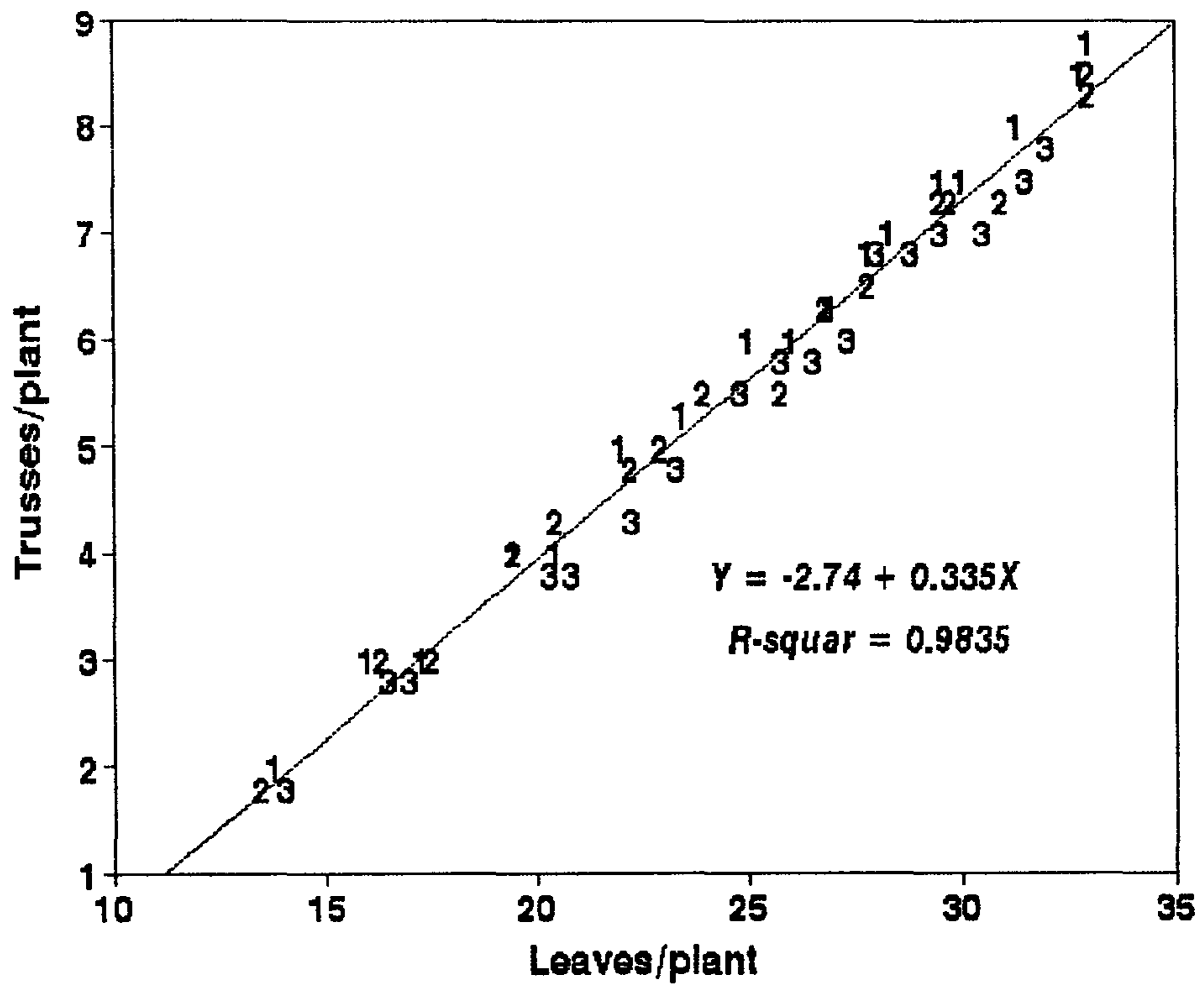


Fig. 4. 40 Relationship between the numbers of trusses and leaves per plant, Figures in graph represented the treatment number.

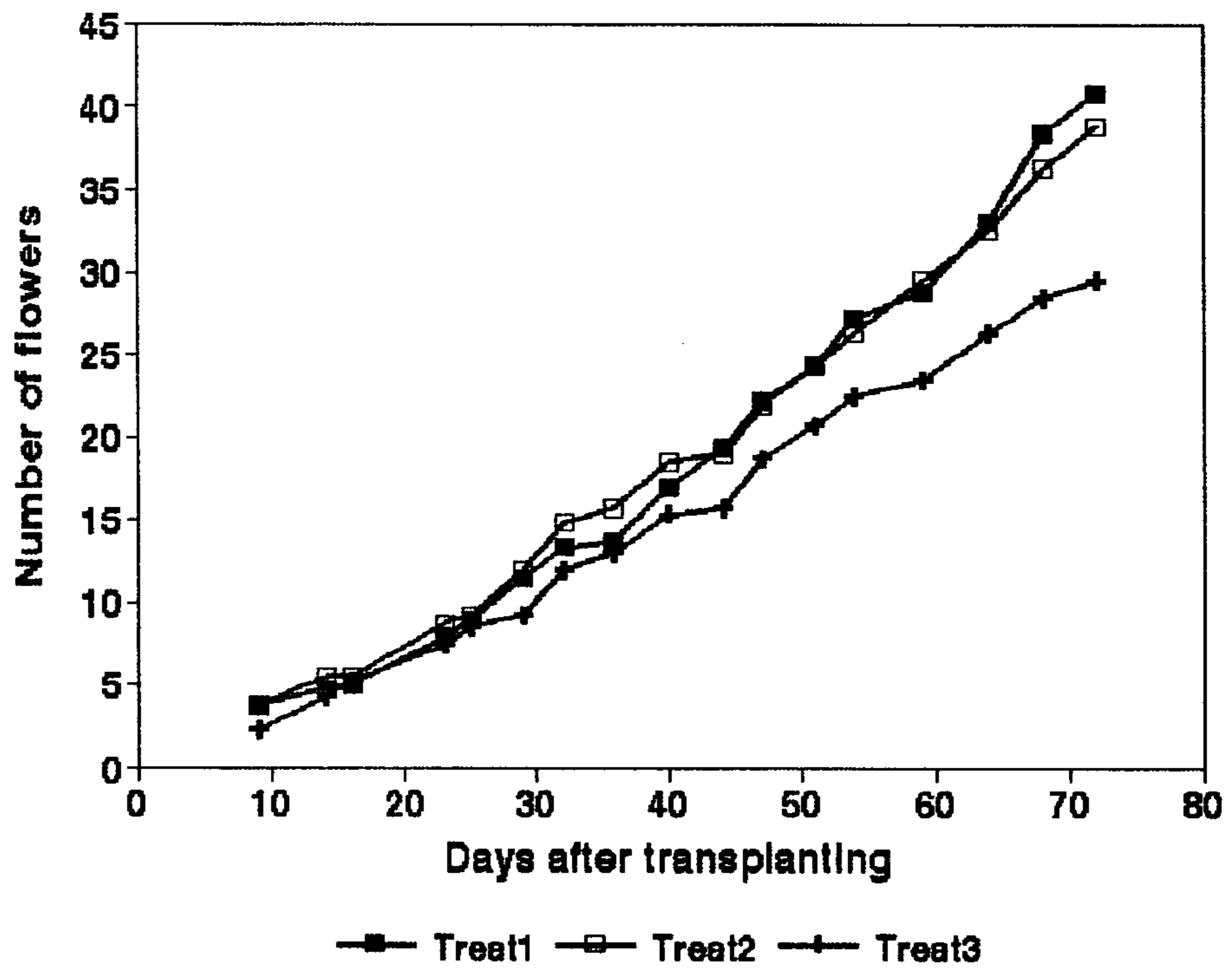


Fig. 4. 41 Increase in the number of flowers after planting exposed to different CO₂ concentration and air temperature in the greenhouse.

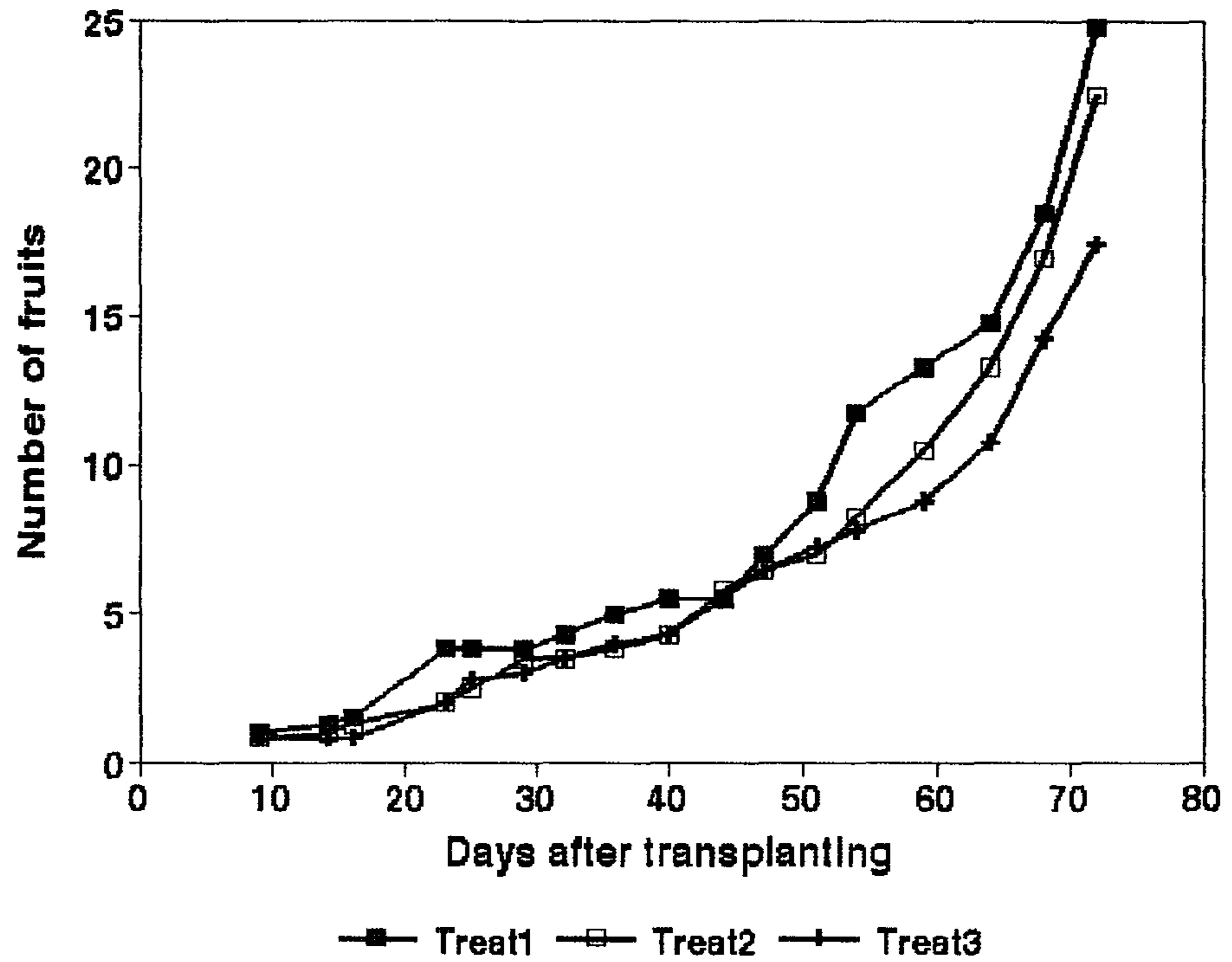


Fig. 4. 42 Increase in the number of fruits after planting in tomato , cv Seokwang exposed to different CO₂ concentration and air temperature in the greenhouse.

제 5 장 생체정보를 이용한 토마토 최적 관개 모델의 개발

제 1절 서 언

온실은 피복재에 의하여 강우가 차단되기 때문에 노지에서와는 달리 관개는 필수 불가결하며, 관개 방법의 양부는 온실재배작물의 수량 뿐만 아니라 품질에도 지대한 영향을 미친다. 그러나 우리나라의 경우 온실에서 재배되는 작물의 관개 시기 및 관개량 결정에 대한 기준이 제대로 마련되어 있지 않다. 작물의 관개 개시 시기를 결정하는 데에는 작물 체내 수분 상태를 기준으로 하고 관개량은 증발산량에 근거하여 결정하는 것이 가장 타당하다고 한다.(Moriya et al.)

식물체의 수분 상태에 근거하여 관개시기를 결정하기 위해서 식물체 수분 상태를 비파괴적으로 monitoring할 수 있어야 하는데, 줄기 직경의 변화(Moriya et al,1992; Namken et al,1969; Schoch et al,1987,1989; Simonean et al,1993; Huck et al,1977), 줄기 정전용량의 변화(Moriya et al,1992) 등을 측정하여 이를 식물체 수분 상태 변화의 간접적 지표로 삼아 관개시기의 결정에 이용하고자하는 많은 연구가 이루어지고 있다. 특히 경직경의 변화는 식물체 수분상태를 잘 반영하여(Simoneau et al,1993) 관개시기 결정에 이를 지표로 이용하기 위한 연구가 많으며 Moriya et al(1992)은 경직경 측정 장치를 이용하여 포도원의 관개 자동화 시스템을 실용화 하였다.

본 연구의 최종 목적은 경직경의 모니터링과 모델에 의한 실내의 증발산량의 예측에 근거하여 온실에서 재배되는 토마토의 관개시기 및 관개량 결정 논리를 개발하여 실용화 하고자 하는 것으로서 제 1년차에는 경직경 측정 장치의 개발, 경직경 변화와 식물체 증산 및 토양 수분과의 관계를 구명하는 것을 목표로 하였다.

제 2절 경직경 측정장치 개발

식물체내 수분상태 변화에 따른 줄기 직경 변화를 측정하기 위하여 strain gauge를 이용한 변위(displacement) 변환기를 제작하였다. 변위변환기에 이용한 회로는 미소저항변화에 정확도가 높은 Wheatstone bridge회로를 구성하여 사용하였다. 브리지의 출력측에 부하가 없는 open circuit에 대한 원리는 다음과 같다.

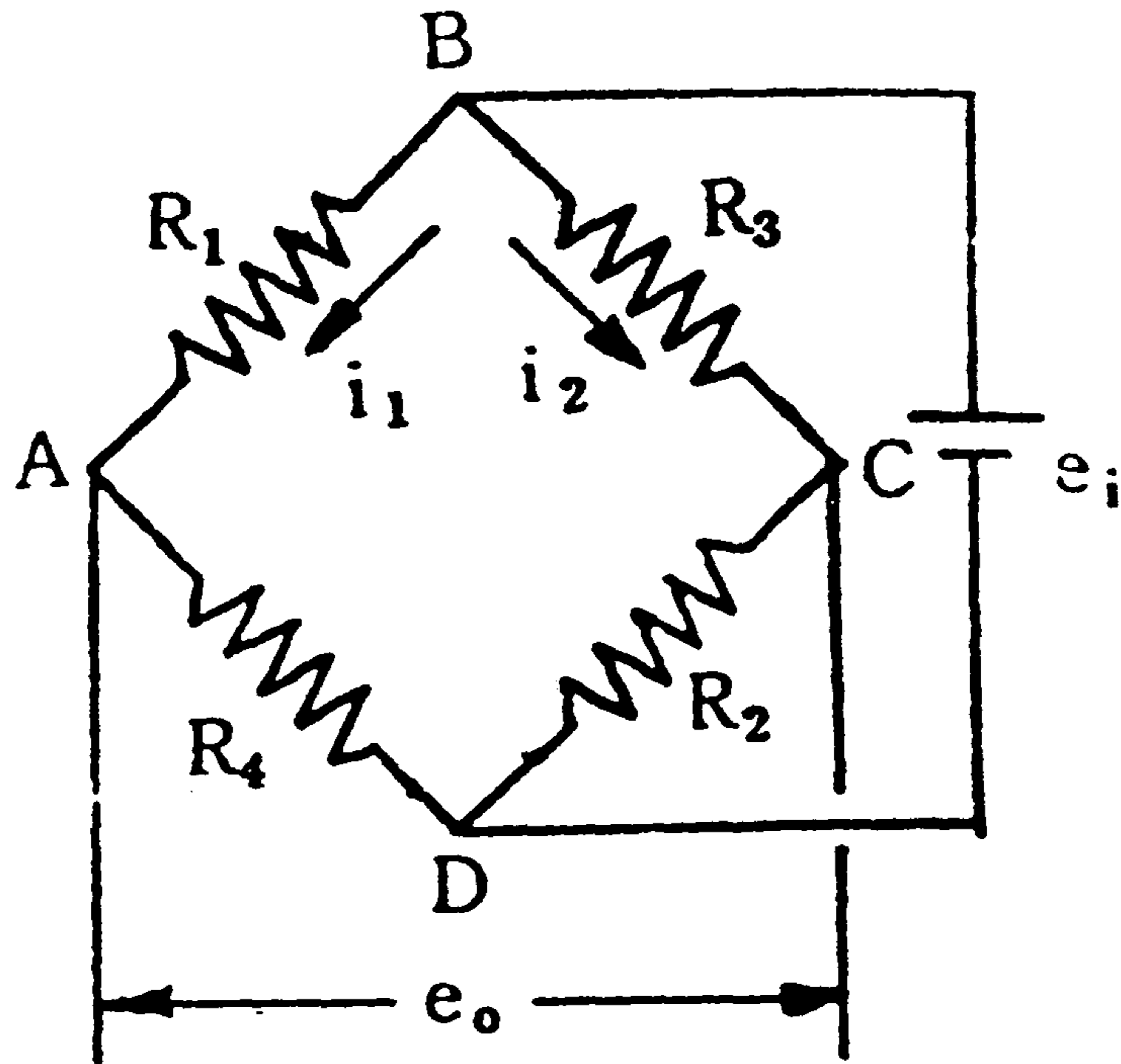


Fig. 5. 1 Basic Wheatstone bridge circuit

그림 5. 1에서 각 지선에 흐르는 전류는 다음과 같으며,

$$i_1 = \frac{e_i}{R_1 + R_4}$$

$$i_2 = \frac{e_i}{R_2 + R_3}$$

저항에 의한 전압 강하는 다음과 같이 되어

$$e_{AB} = i_1 R_1 = \frac{R_1}{R_1 + R_4} e_i$$

$$e_{CB} = i_2 R_3 = \frac{R_3}{R_2 + R_3} e_i$$

스트레인 게이지의 변형으로 각각의 저항에 변화가 생기게 되면 그에 따라서 e_o 의 변화가 생기게 된다.

출력 전압은 다음과 같이 된다.

$$e_o = e_{AB} - e_{CB} = \left(\frac{R_1}{R_1 + R_4} - \frac{R_3}{R_2 + R_3} \right) e_i$$

스트레인 게이지 시스템은 active gauge 수에 따라서 1-gauge, 2-gauge, 3-gauge 방법이 있는데 여기서는 2-gauge 방법을 사용하였다. 이 방법은 1-gauge 방법에 비하여 2배의 출력을 얻을 수 있으며 온도보상 효과를 얻을 수 있다. 그림 2 에서 G_1 과 G_3 (본 연구에서는 각각 120Ω 스트레인 게이지 사용)가 각각 크기가 같은 인장 변형과 압축 변형을 받는다면 G_1 과 G_3 의 저항은 각각 $R_1 + \Delta R$, $R_3 - \Delta R$ 이 된다. 여기서 $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R$ (본 연구에서는 active gauge와 dummy gauge 모두 120Ω 인 것을 사용)이 라면 출력 전압은 다음과 같다.

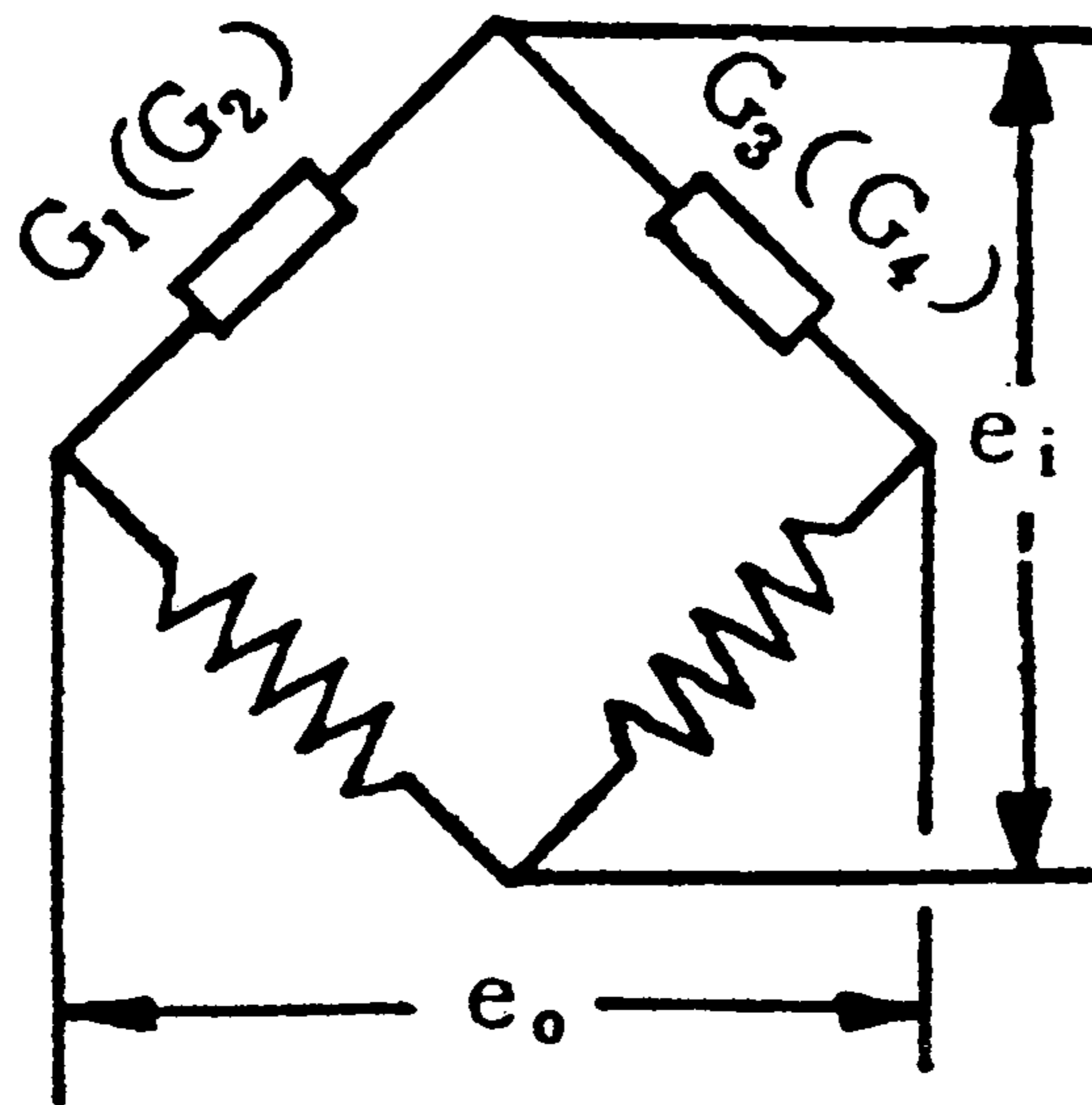


Fig. 5. 2 Circuit of half bridge method

$$e_o = \left(\frac{R_1 + \Delta R}{R_1 + \Delta R + R_4} - \frac{R_3 - \Delta R}{R_2 - \Delta R + R_3} \right) e_i = \frac{\Delta R}{2R} e_i$$

이와 같은 원리를 적용하여 토마토의 줄기 직경 변화를 계측하기 위한 경직경 측정 장치를 다음(그림 5. 3)과 같이 제작하였다.

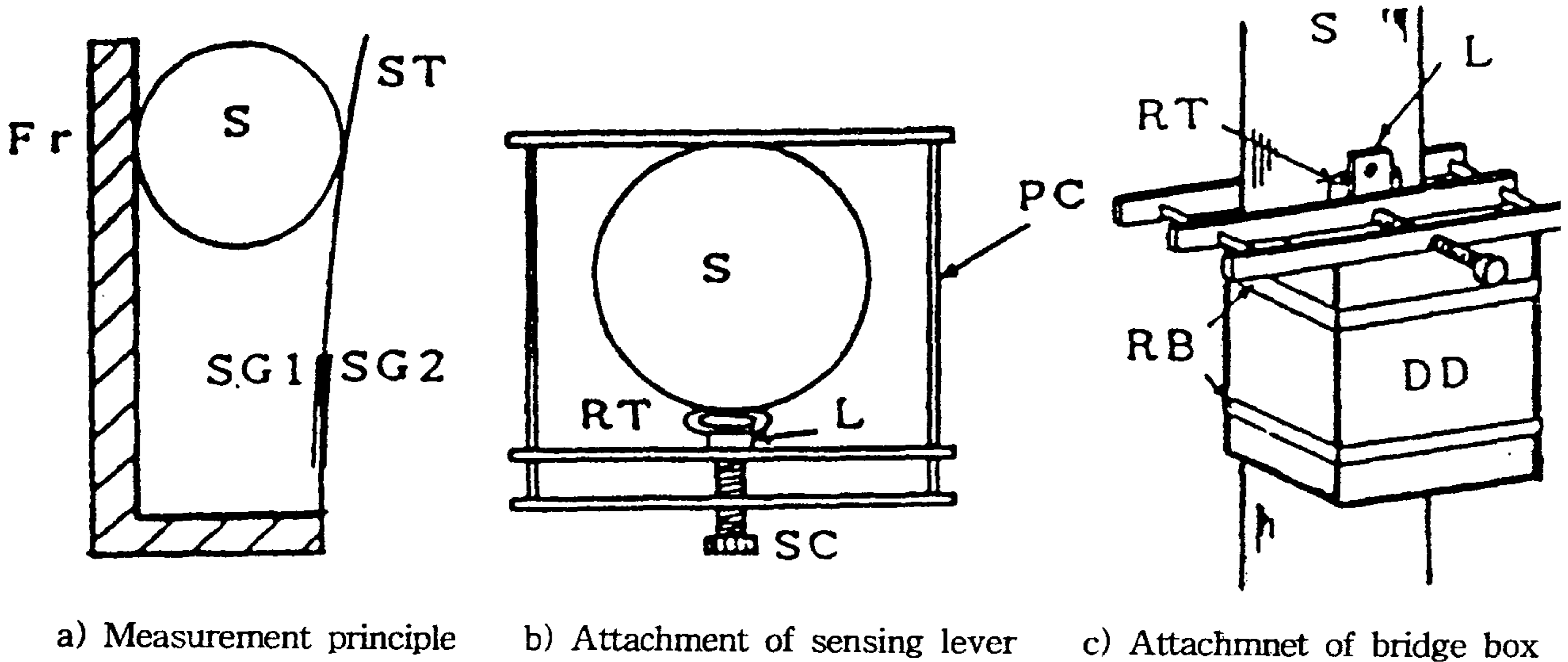


Fig. 5.3 Device for measuring stem diameter microvariation.

S: stem of plant; Fr: rigid frame; ST: displacement sensing lever
 SG: strain gauge; PC: pinch cork; RT: rubber tube; DD: bridge box
 RB: rubber band; L: sensing lever

이와같이 제작된 토마토 경직경 변화 측정기를 datalogger(Campbell Scientific, 21XL)에 연결하여 10초 간격으로 500mV를 입력하고 strain gauge의 압축, 인장 변형에 따르는 출력 변화를 검출하여 저장하였다. 계측 시스템의 측도 설정 (Calibration)을 위하여 그림 5. 3의 변위측정 lever 말단의 변위와 출력과의 관계를 나타낸 것이 그림 5.4이다.

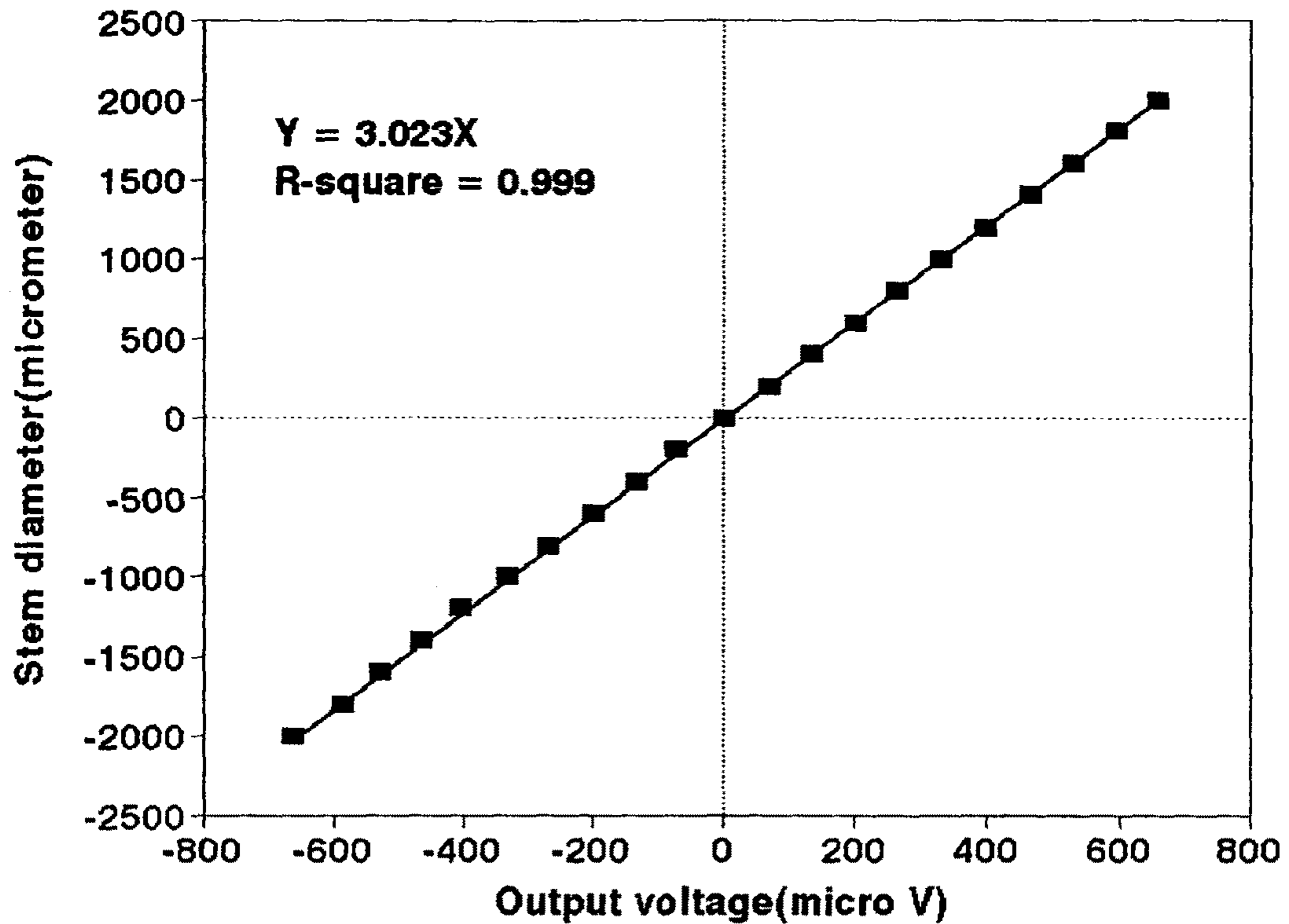


Fig. 5. 4 Relationship between output voltage and displacement of stem diameter gauge lever

그림에서 보는 바와 같이 경직경변화 계측기 lever의 변위와 출력간에는 직선성이 매우 높으므로 식물체 수분상태에 따른 토마토 줄기의 직경변화를 정밀하게 계측할 수 있을 것으로 판단되었다.

제 3절 토마토 경직경 변화와 일사량 및 증산량과의 관계

1. 실험 재료 및 방법

본 연구에서 개발한 경직경 측정장치를 이용하여 토마토 줄기 직경의 경시적 변화를 측정하였으며, 동시에 경직경 측정 동일개체의 증산량(Sap Flow System; Dynamax Inc, USA)과 일사량을 측정하였다. 측정은 온실내에서 7월 28일부터 약 4주일 측정하였다.

모든 측정은 datalogger(Campbell Scientific)로 10초 마다 측정하여 10분간의 평균으로 표시하였다.

측정에 이용한 토마토(Arletta)는 3월 28일 파종하여 5월 27일 정식하였으며 생육 기간중 토양수분은 토중 10cm에서 2bar 이상이 되도록 관리하였다.

2. 실험결과

그림 5. 5에서 보는 바와같이 토마토 경직경은 하루에 약 200 μ m 정도 씩 증가하는 경향을 보였으며 한 낮에는 100 - 150 μ m 정도 경직경이 감소하였다.

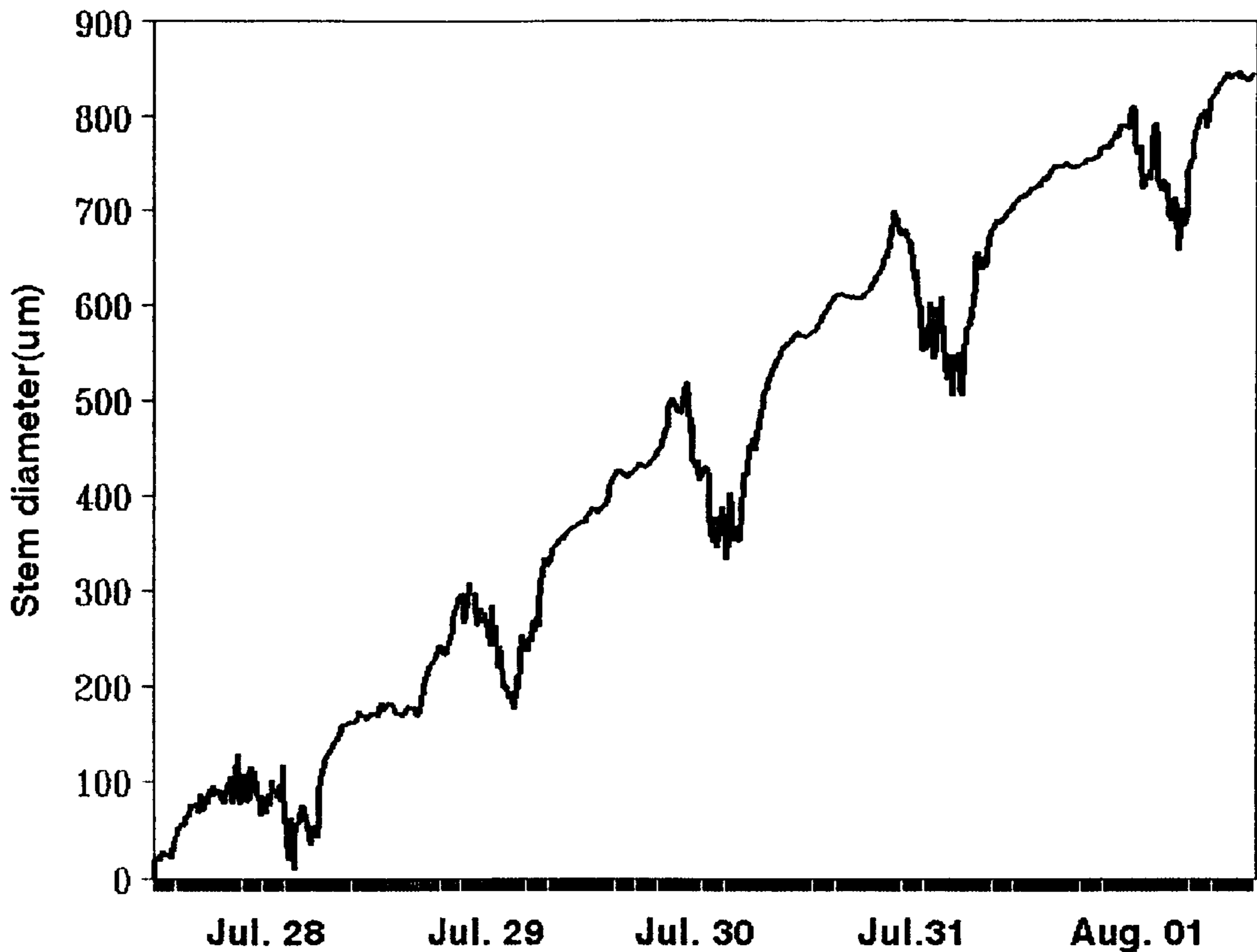


Fig. 5. 5 Global increase and diurnal variation of stem diameter of tomato during July 28 to August 1 in the greenhouse

그림 5. 6은 비교적 맑은 날인 7월 29일과 흐린날인 8월 5일날의 경직경, 증산량,

일사량을 대비하여 나타낸 것이다. 맑은 날인 7월 29일의 경우 7월 29일의 경우 경직경은 오전 10시경에 최대에 이르렀다가 이후 급격히 감소하여 증산량이 최대에 이른 시각인 15시 - 16시경에 최저에 달하였으며 이후 증산량의 감소와 함께 다시 회복하여 이후 계속 증가하는 경향을 보였다. 한편 흐린 날인 8월 5일에는 7월 29일과 마찬가지로 10시경에 경직경은 최대에 달하였으나 그 후로는 7월 29일에서와 같은 뚜렷한 경직경의 감소는 보이지 않았다.

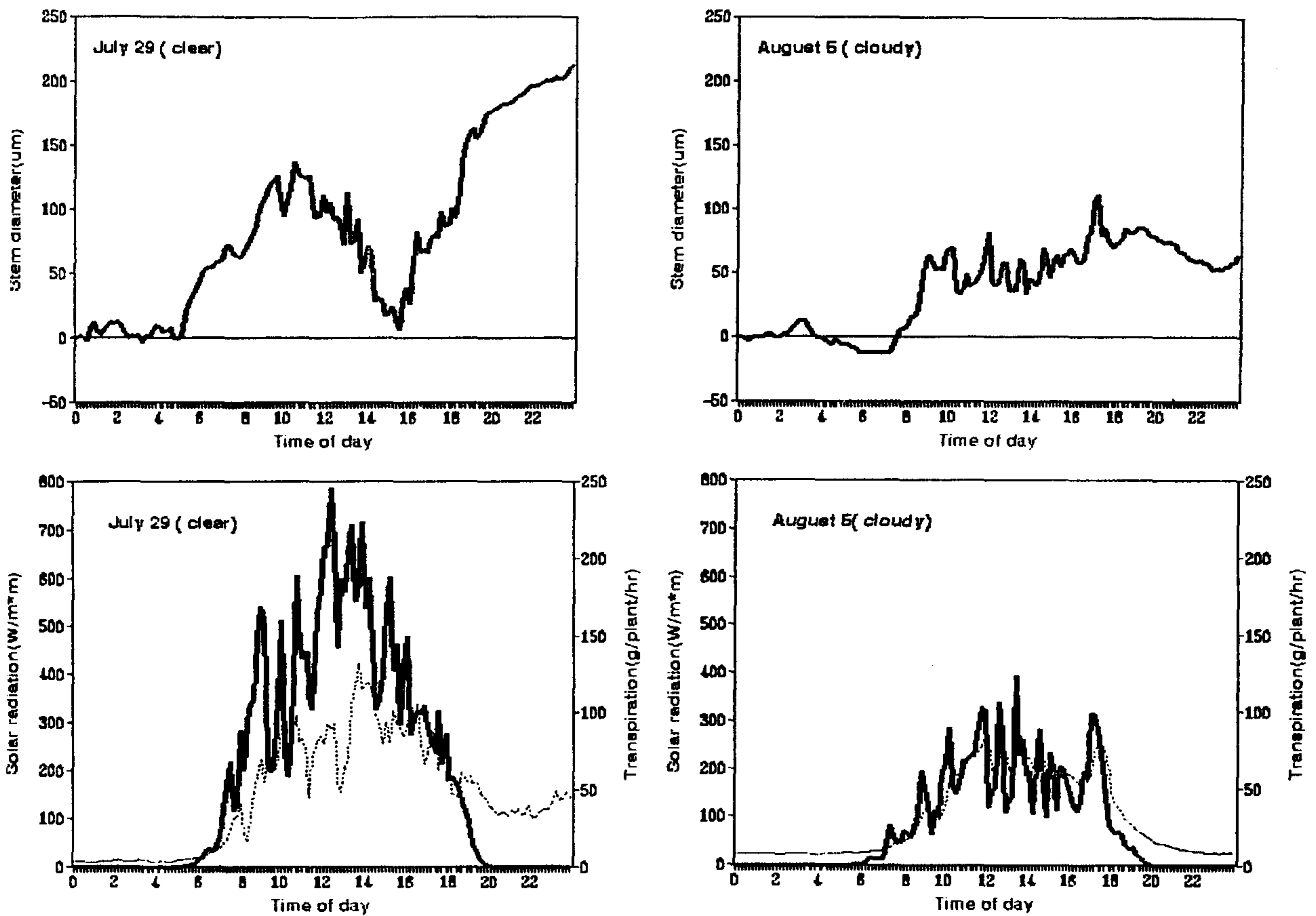


Fig. 5. 6 Diurnal variation of stem diameter, solar radiation(—) and transpiration(···) on clear(July 29) and cloudy(August 1) day in the greenhouse

제 4 절 결 론

이상의 결과들로 살펴 볼 때 본 연구에서 개발한 경직경 측정장치는 식물체내의 수분변화와 생장에 따르는 경직경의 변화를 정확하게 측정할 수 있는 것으로 판단되었다. 한편 하루중 경직경의 변화는 식물체의 증산 속도와 밀접한 관계가 있어서 증산 속도가 뿌리의 흡수력을 상회할 경우 줄기의 도관에 부압이 걸려 경직경의 변화에 근거하여 관개시기를 정확하게 결정할 수 있기 위하여 경직경 변화와 식물체의 기공저항, 엽수분 포텐셜 등 생리적 특성의 변화와 관계가 다양한 토양 수분조건에서 파악되어야 한다. 이를 위해서 현재 토양수분의 변화에 따른 경직경 변화경향을 파악하기 위한 실험이 진행중이다.

참 고 문 헌

제1장

1. 김인수, 강진구. 1993. 시설원예의 경영규모와 경제성. 국내시설산업 발전을 위한 심포지엄. p35-61, 서울대학교 농업개발연구소

제 3장

1. Avissar R. and Y. Mahrer, 1982. Verification study of a Numerical Greenhouse Microclimate Model. Transactions of the ASAE; 1711-1982
2. Chandra Pitam, L. D. Albright, N. R. Scott. 1981. A time dependent analysis of greenhouse thermal environment. American Society of Agricultural Engineers, 81 ; 442-448.
3. Froehlich. D. P, L. D. Albright, N. R. Scott, p. Chandra. 1979. Steady-Periodic analysis of glasshouse thermal environment. American Society of Agricultural Engineers, 79 ; 387-399.
4. Jaxob. C. 1982. Modelisation de la vitesse du vent et de la temperature de l'air a l'interieur d'une parcelle bocagere. Agricultural Meteorology, 27: 89-104
5. Kimball, B. A. 1973. Simulation of the energy balance of a greenhouse. Agric. Meteor., 11(1973) ; 243-260
6. Kindelan, M. 1980. Dynamic simulation of Greenhouse Environment. Transactions of the ASAE; 1232-1239
7. Kittas. C, J. P. Chiapale, O. De villele et F. Aries. 1987. Modele d'estimation de la temperature de paroi d'une serre. Agricultural and Forest Meteorology, 39 ; 131-142.
8. Kittas, C.. 1987. Un modele d'estimation des deperditions energetiques diurnes des serres. Agronomie, 7(3) ; 175-181.
9. Levit. H. J and R. Gaspar. 1988. Energy budget for greenhouses in

- humid-temperate climate. *Agricultural and Forest Meteorology*, 42 ; 241-254.
10. Levit H. J and R. Gaspar. 1988. Energy budget for greenhouses in humid-temperate climate. *Agricultural and Forest Meteorology*, 42 ; 241-254.
 11. Lqbal. M, A. K. Khatri 1977. Wind-Induced Heat Transfer Coefficients from Glasshouses *Transactions of the ASAE*, 157-160.
 12. Mahrer, Y., R. Avissar, O. Naot and J. Katan. 1987. Intensified soil solarization with closed greenhouses: Numerical and experimental study. *Agric. and For. Meteor.*, 41(1997); 325-334
 13. Philip. J. K. 1957. Evaporation, and moisture and heat fields in the soil. *Journal of meteorology*, 354-366.
 14. Seginer Ido, Louis D. Albright. 1980. Rational Operation of Greenhouse Thermal-Curtains. *American Society of Agricultural Engineers*, 80 ; 1240-1245.
 15. Suzuki Haruo and Hideo Tanada. 1988. Deviations in the Horizontal Distribution of Soil Temperatures beneath Film Mulch and Evaluation of the Mulch Effect. *Journal of agriculture and meteorology*, 44(2) ; 119-126.
 16. Takakura.T, A. Jordan and L. L. Boyd. 1971. Dynamic Simulation of plant Growth and Environment in the Greenhouse. *Transactions of the ASAE*; 964-971
 17. Walker J. N. 1965. Predicting temperatures in ventilated greenhouses. *Transactions of the ASAE*; 445-448.

제4장

1. Aubinet M, J. Deltour and Dehalleux. 1989. Stomatal regulation in greenhouse crops : Analysis and simulation. *Agricultural and Forest Meteorology*, 48 ; 21-44
2. Ben-Asher J, C. W. Meek. R. B. Hutmacher, and C. J. Phene. Computational approach to assess actual transpiration from aerodynamic and canopy

- resistance. *Agronomy Journal*, 81 ; 776-782
3. Bertin N and C. Gary. 1993. Tomato fruit-set : A case study for validation of the model tomgro. *Acta Horticulturae*, 328 ; 185-193
 4. Bertin N and E. Heuvelink. 1993. Dry-matter production in a tomato crop : Comparison of Two simulation models. *Journal of Horticultural Science*, 68(6) ; 995-1011
 5. Challa, H. and E. Heuvenlink, 1993. Economic evaluation of crop photosynthesis. *Acta Horticulturae* 328 ; 219-228
 6. Ehler N and P. Karlsen. 1993. Optico-a model based real-time expert system for dynamic optimization of CO₂ enrichment of greenhouse vegetable crops. *Journal of Horticultural Science*, 68 ; 485-494
 7. Ehler Niels. 1991. An autocalibrating model for simulating and measuring net canopy photosynthesis using a standard greenhouse climate computer. *Computers and Electronics in Agriculture*, 6 ; 1-20
 8. Giaglaras Panagiotis, Maria Baille, Alain Baille. 1995. Net photosynthesis response to light and air CO₂ concentration of *Begonia × hiemalis* : Whole plant measurements and modelling. *Scientia Horticulturae*, 63 ; 83-100
 9. Gijzen, H. 1992. Simulation of photosynthesis and drymatter production of greenhouse crops. CABO-DLO/TPE Simulation Report CABO-TT, 28, CABO-DLO Wageningen, The Netherland
 10. Gijzen H and J. Goudriaan. 1989. A flexible and explanatory model of light distribution and photosynthesis in row crops. *Agricultural and Forest Meteorology*, 48;1-20
 11. Goudrian, J.. 1977. *Crop micrometeorology: a simulation study*: 249pp, Centre for Agricultural Publishing and Documentation, Wageningen, The Netherland.
 12. Goudrian, J., H. H. Van Laar, H. Van Keulen and W. Louwerse, 1985. Photosynthesis, CO₂ and plant production. In: *Wheat growth and modelling*(Day, D. and R.K, Atkin Eds). NATO ASI Series, Series A: Life Science, 86 ; 107-122

13. Grange R. I and J. Andrews. 1994. Expansion rate of young tomato fruit growing on plants at positive water potential. *Plant, Cell and Environment*, 17 ; 181-187
14. Hand D. W, G. Clark, M. A. Hannah, J. H. Thornley and J. Warren Wilson. 1992. Measuring the canopy net photosynthesis of Glasshouse crops. *Journal of Experimental Botany*, 43 ; 375-381
15. Heuvelink E. 1995. Dry matter production in an tomato crop : Measurements and simulation. *Annals of Botany* 75 ; 369-379
16. Heuvelink E. 1995. Growth, development and yield of a tomato crop periodic destructive measurements in a greenhouse. *Scientia Horticulturae*, 61 ; 77-99
17. Jay M. H., J. L. Heilman and R. J. Lascano. Determination of soil water evaporation and transpiration from energy balance and stem flow measurements. *Agricultural and Forest Meteorology*, 52 ; 287-301
18. Joliet O. 1994. Hortitrans, a model for predicting and optimizing humidity and transpiration in greenhouses. *J. agric. Engng Res.*, 57 ; 23-37
19. Joliet O and B. J. Bailey. 1992. The effect of climate on tomato transpiration in greenhouses : Measurements and models comparison. *Agricultural and Forest Meteorology*, 58 ; 43-62
20. Jones J. W, E. Dayan, L. H. Allen, H. Y. Van Keulen, H. Challa. 1991. A dynamic tomato growth and yield model(TOMGRO). *American Society of Agricultural Engineers*, 34(2) ; 663-672
21. Kano A. and Cornelius H.M. van Bavel. 1988. Design and test of a simulation model of tomato growth and yield in a greenhouse. *J. Japan. Soc. Hort. Sci.* 56(4) ; 408-416
22. Katerji N and A. Perrier. 1985. Determination de la resistance globale d'un couvert vegetal a la diffusion de vapeur d'eau et de ses differentes composantes Approche the'orique et verification experinentale sur une culture de luzerne. *Agricultural and Forest Meteorology*, 34 ; 105-120
23. Kitano M and H. Eguchi. 1991. Dynamics of plant water relations as affected

- by evaporative demand. IFAC Mathematical and Control Applications in Agriculture and Horticulture, 367-372
24. Logendra S. and H. W. Janes. 1992. Light duration effects on carbon partitioning and translocation in tomato. *Scientia Horticulturae*, 52 ; 19-25
 25. Myster Jardar, Roar Moe. 1995 Effect of diurnal temperature alternations on plant morphology in some greenhouse crops - a mini review. *Scientia Horticulturae*, 62 ; 205-215
 26. Papadakis G, A. Frangoudakis, and S. Kyritsis. 1994. Experimental investigation and modelling of heat and mass transfer between a tomato crop and the greenhouse environment. *J. Agric. Engng Res.*, 57;217-227
 27. Rijdsdijk A. A and G. Houter. 1993. Validation of a model for energy consumption, CO₂ consumption and crop production(ECP-model). *Acta Horticulturae*, 328 ; 125-131
 28. Romero-Aranda, R and J. J. Longuenesse. 1995. Modelling the effect of air vapour pressure deficit on leaf photosynthesis of greenhouse tomatoes : The importance of leaf conductance to CO₂. *Journal of Horticultural Science*. 70(3) ; 423-432
 29. Seginer Ido. 1994. Transpirational cooling of a greenhouse crop with partial ground cover. *Agricultural and Forest Meteorology*, 71 : 265-281
 30. Sinoquet H et R. Bonhomme. 1989. Modélisation de l'interception des rayonnements solaires dans une culture en rangs. II. Structure géométrique du couvert et validation du modèle. *Agronomie*, 9 ; 619-628
 31. Spitters C. J. T, H. A. J. M. Toussaint and J. Goudriaan, 1986. Separating the diffuse and direct component of global radiation and its implications for modeling canopy photosynthesis. *Agricultural and Forest Meteorology*, 38 ; 217-229
 32. Stanghellini C, W. Th. M. van Meurs. 1992. Environmental control of greenhouse crop transpiration. *J. agric. Engng Res.*, 51 ; 297-311
 33. Tchamitchian M and J. J. Longuenesse. 1992. A photosynthesis model for

greenhouse row crops. *Acta Horticulturae*, 328 ; 137-149

34. Thornley J. H. M, D. W. Hand and J. Warren wilson, 1992. Modelling light absorption and canopy net photosynthesis of goasshouse row crops and application to cucumber. *Jounnal of Experimental Botany*, 43 ; 383-391
35. Yang X., Ted H. Short, robert D. Fox and William L. Barerle. 1990. Dynamic modeling of the microclamate of a greenhouse cucumber row-crop. Part I. Theoretical model. *American Society of Agriculturla Engineers*, 33(5) ; 1701-1716

제5장

1. Ansley R. J, W. A. Dugas, M. L. Heuet and B. A. Trevino. 1994. Stem flow and porometer measurements of transpiration from honey mesquite (*Prosopis glandulosa*). *Journal of Experimental Botany*, 45 ; 847-856
2. Baille M, J. C. Lauty and A. Baille. 1992. Some comparative results on evapotranspiration of greenhouse ornamental crops, using lysimeter, greenhouse H₂O balance and LVDT sensors. *Acta Horticulturae*, 304 ; 199-208
3. De Koneng A. N. M and J. C. Bakker. 1992. In situ plant weight measurement of tomato with an electronic force gauge. *Acta Horticulturae*, 304 ; 183-186
4. Garnier E and Berger. 1986. Effect of water stress on stem diameter changes of peach trees growing in the field. *Joutnal of Applied Ecology*. 23 ; 193-209
5. Genslet W and F. Diaz-Munoz. 1983. Simultaneous stem diameter expansions and apoplastic electropotential variations following irrigation or rainfall in cotton. *Crop Science*, 23 ; 921-923
6. Genslet W and F. Diaz-Munoz. 1983. Stem diameter variations in cotton under field conditions. *Crop Science*, 23 ; 907-912
7. Grun R, J. P. Toutnier. 1992. Micrometric measutenent of stem diameter changes as a means to detect nutritional stress of tomato plants. *Acta*

Horticulturae, 304 ; 265-272

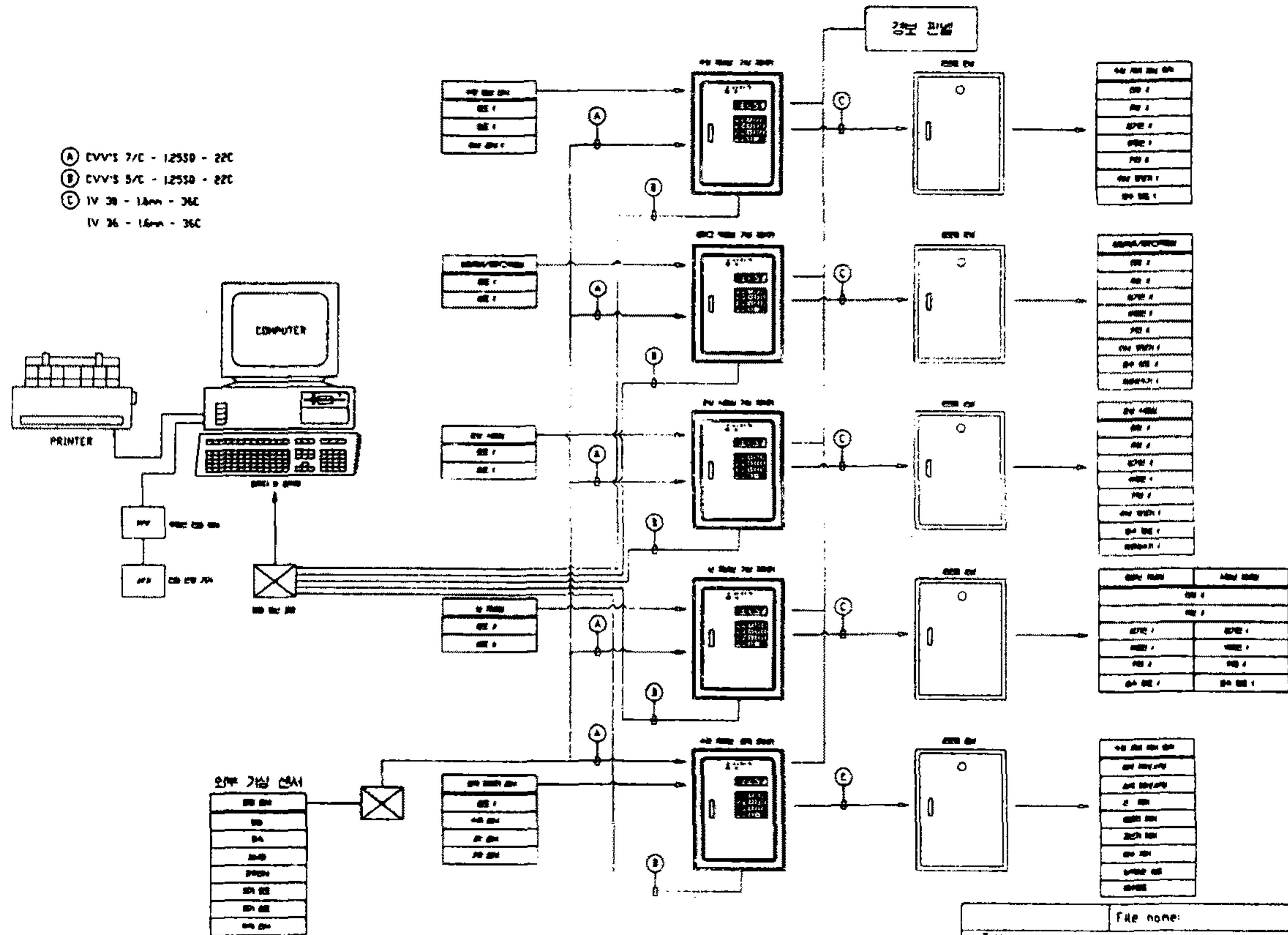
8. Huck M. G. and Betty Klepper. 1977. Water relations of cotton. II. Continuous estimates of plant water potential from stem diameter measurements. *Agronomy Journal*, 69 ; 593-597
9. Kateji N, P. G. Schoch, P. Rimgoto, J. C L'Hotel. 1990. Diagnostic des périodes de xontrainte hydrique chez des plantes d'aubergine cultivées en serre, au moyen des microvariations des tiges. *Agronomie*, 10 ; 541-549
10. Katerji Nader, Francois Tardieu, Olivier Bethenod, and Philippe Quetin. 1994. Behaviot of maize stem diameter during drying cycles : Comparison of two methods for detectong water stress. *Crop Science*; 34 ; 165-169
11. Klepper Betty, V. Douglas Browning, and Howard M. Taylor. 1971. Stem diameter in relation to plant water ststus. *Plant Physiol*, 48 ; 683-685
12. Lassoie J. P. 1973. Diurnal dimensional fluctuations in a douglas-fir stem in response to tree water status. *Forest. Science*, 19(4) ; 251-255
13. Moriya H, K. Iwao, H. Kageyama. 1992. Studies on non-destructive and continuous measuremint of water contents and applications to irrigation in crop culture. *Acta Horticulturae*, 304 ; 345-351
14. Namken L. N, J. F. Bartholic, and J. R. Runkles. 1969. Monitoring cotton plant stem radius as an indication of water stress. *Agronomy Journal*, 61 ; 891-893
15. Jehoshua, R., E. Rendon-Poblete, M. Allen Stevens, and Abdel-Ilah Ambri. 1981. Use of leaf water potential to determine water stress in field-grown tomato plants. *J. Amer. Soc. Hort. Sci*, 106(6) ; 732-736
16. Schoch P. G, J. C. L'Hôtel, P. Dauplé, G. Conus et M.J. Fabre. 1989. Microvariations de diamètre de tige pour le pilotage de l'irrigation. *Agronomie*, 9 ; 137-142
17. Schoch P. G, J. C. L'Hôtel et B. Brunel. 1990. Croissnnce du diametre de la tige de tomate : Errets du rayonnement et de la temperature nocturne. *Agricultural and Forest Meteorology*, 50 ; 229-238

18. Schoch P. G, N. Katerje, P. Rimgoto, M. Tcharnitchian, P. Malet. J. c. Yhotel and M. C. Daunay. 1987. Influence du niveau d'alimentation hydrique sur les variations du diamètre des tiges, du potentiel hydrique, de la résistance stomatique, de la transpiration et de la photosynthèse de l'aubergine (*Solanum melongena* L.). *Agricultural and Forest Meteorology*, 40 ; 89-104
19. Simonneau T, R. Habib, J.-P. Goutouly and J.-G. Huguet. 1993. Diurnal changes in stem diameter depend upon variations in water content : Direct evidence in peach trees. *Journal of Experimental Botany*, 44(260) ; 615-621
20. Urban L, A. Jaffrin and A. Chraïbi. 1993. Analysis of pressure-volume curves of leaves of *Rosa hybrida* cv. sonia. *Journal of Experimental Botany*, 44 ; 605-613
21. Van leperen W and H. Madery. 1994. A new method to measure plant water uptake and transpiration simultaneously. *Journal of Experimental Botany*, 45 ; 51-60
22. Werkhoven C. 1992. Sensors for irrigation scheduling of cultures in the field. *Acta Horticulturae*, 304 ; 259-264

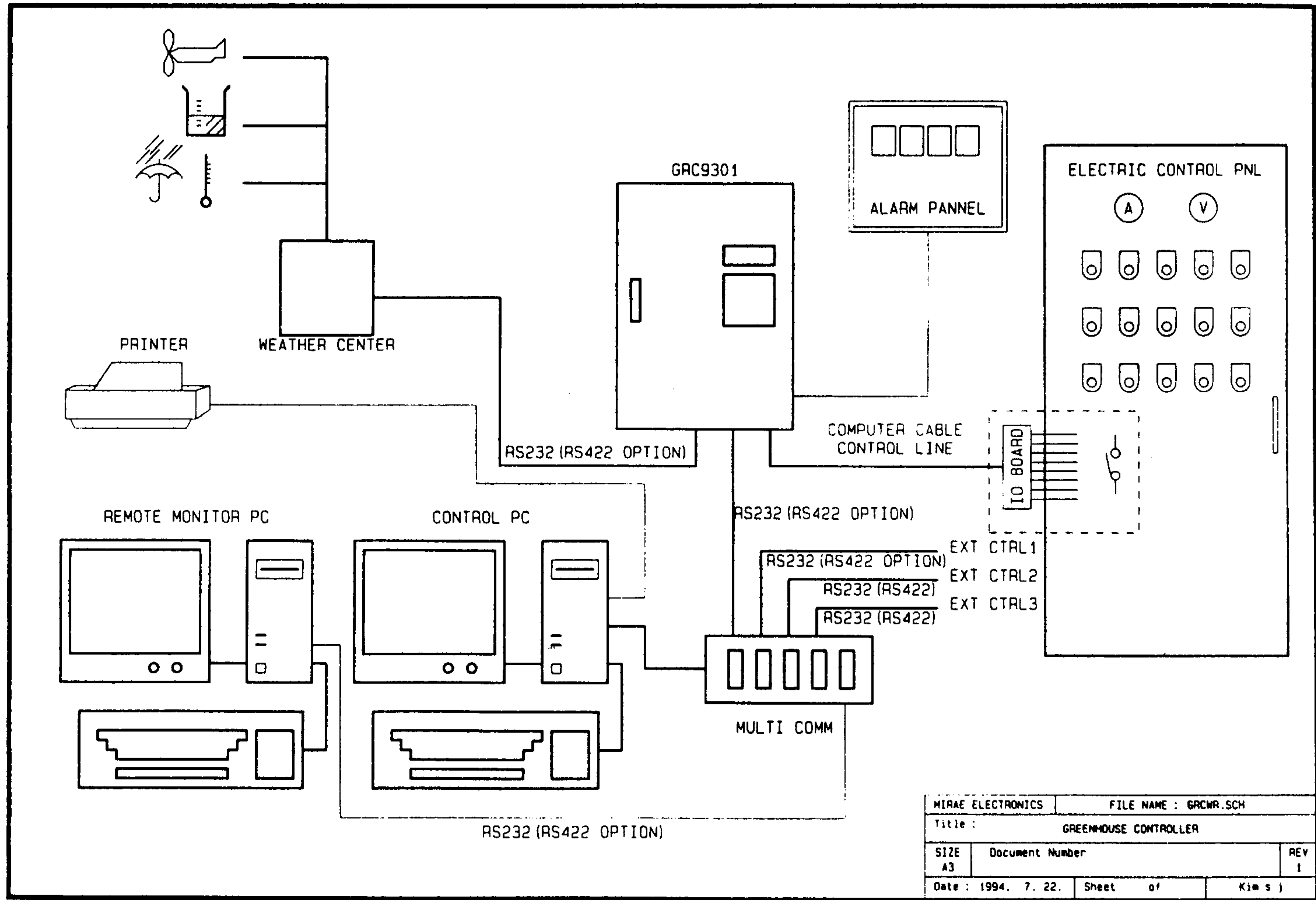
부 록

컴퓨터 환경/양액 제어 계통도

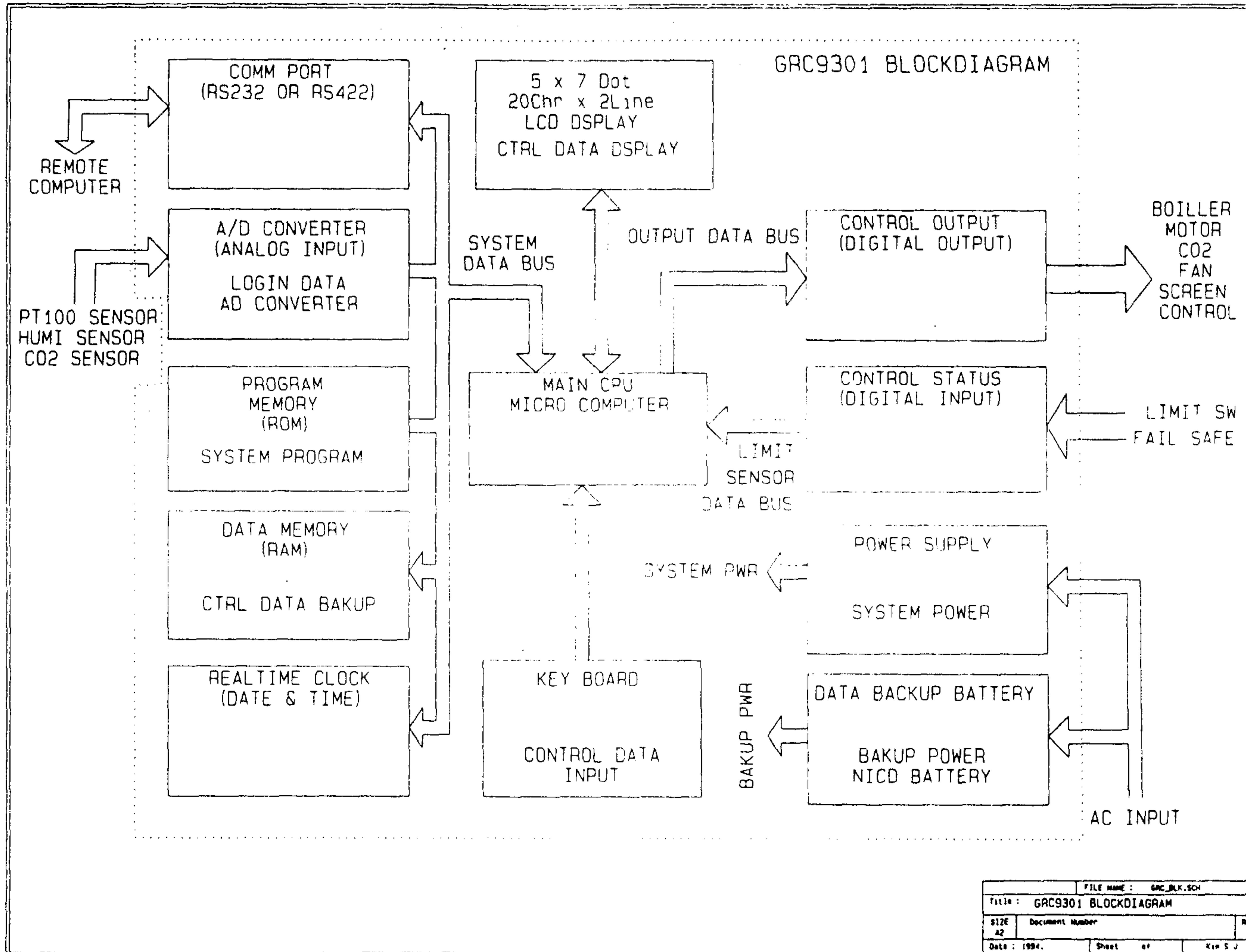
- Ⓐ CVV'S 7/C - 12550 - 22C
- Ⓑ CVV'S 5/C - 12550 - 22C
- Ⓒ IV 30 - 14mm - 36C
- IV 26 - 16mm - 36C

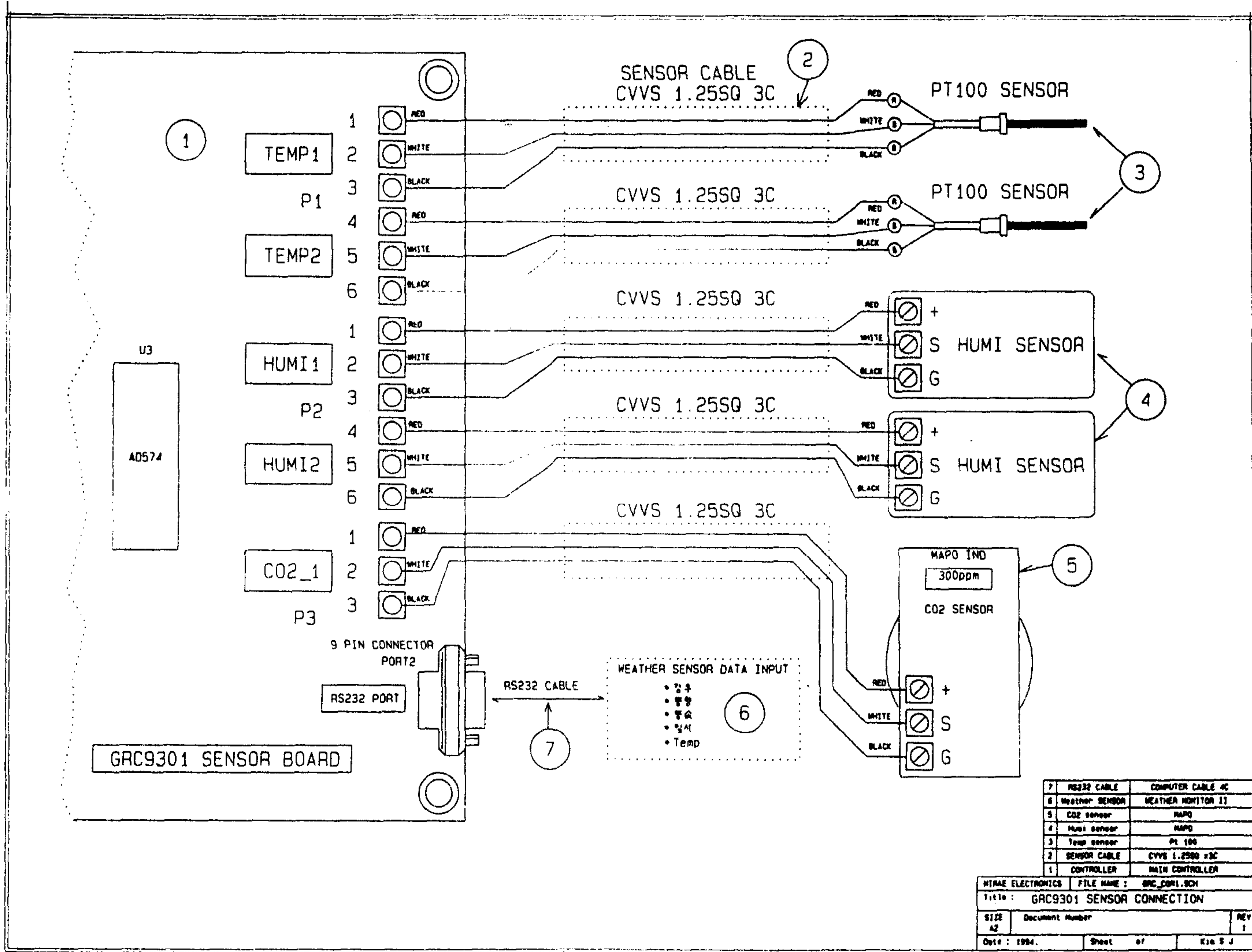


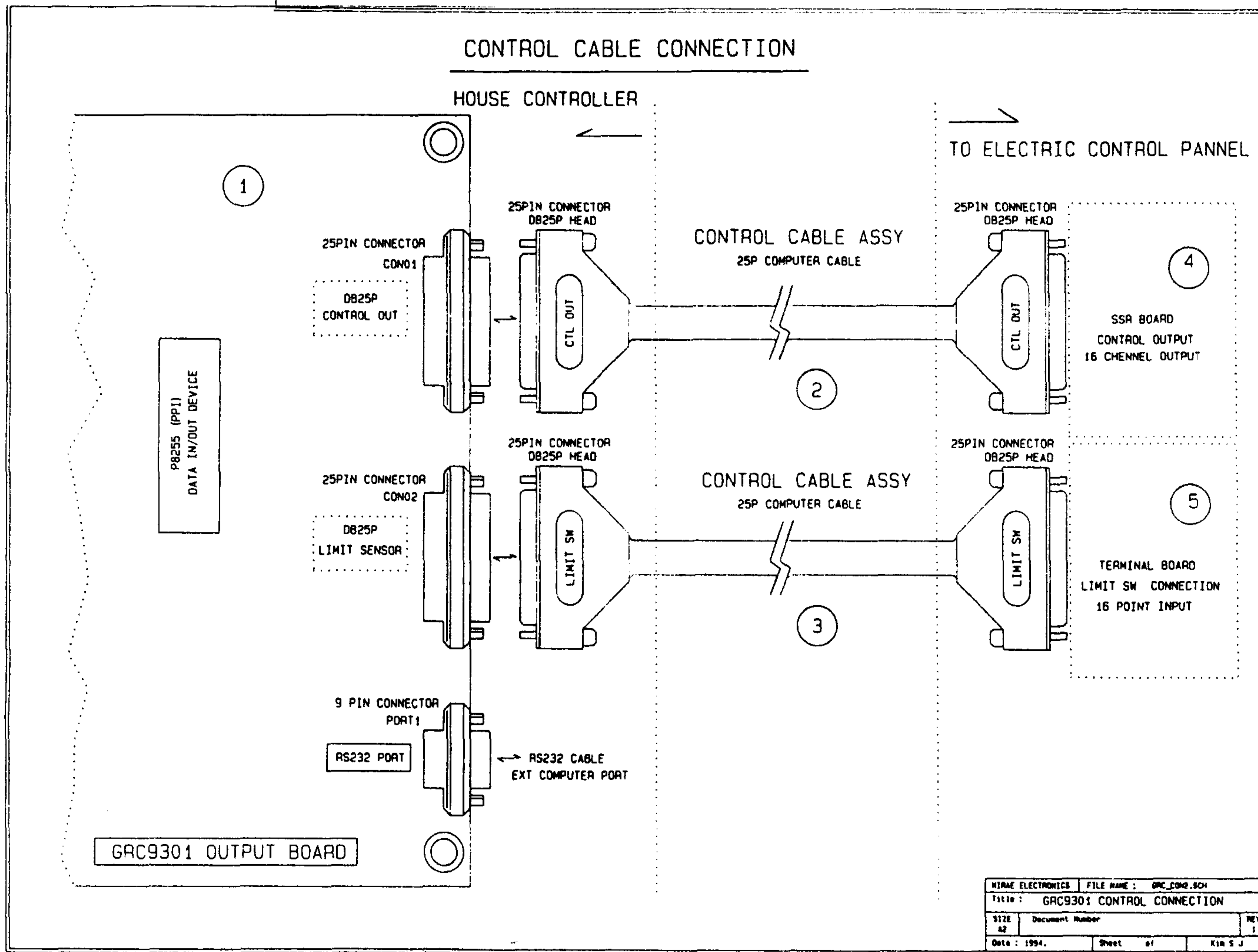
File name:			
Title:		컴퓨터 제어 계통도	
Size	Document Number:	REV	
A1		1	
Date: 1994.	Sheet	of	DWG Kim S.J

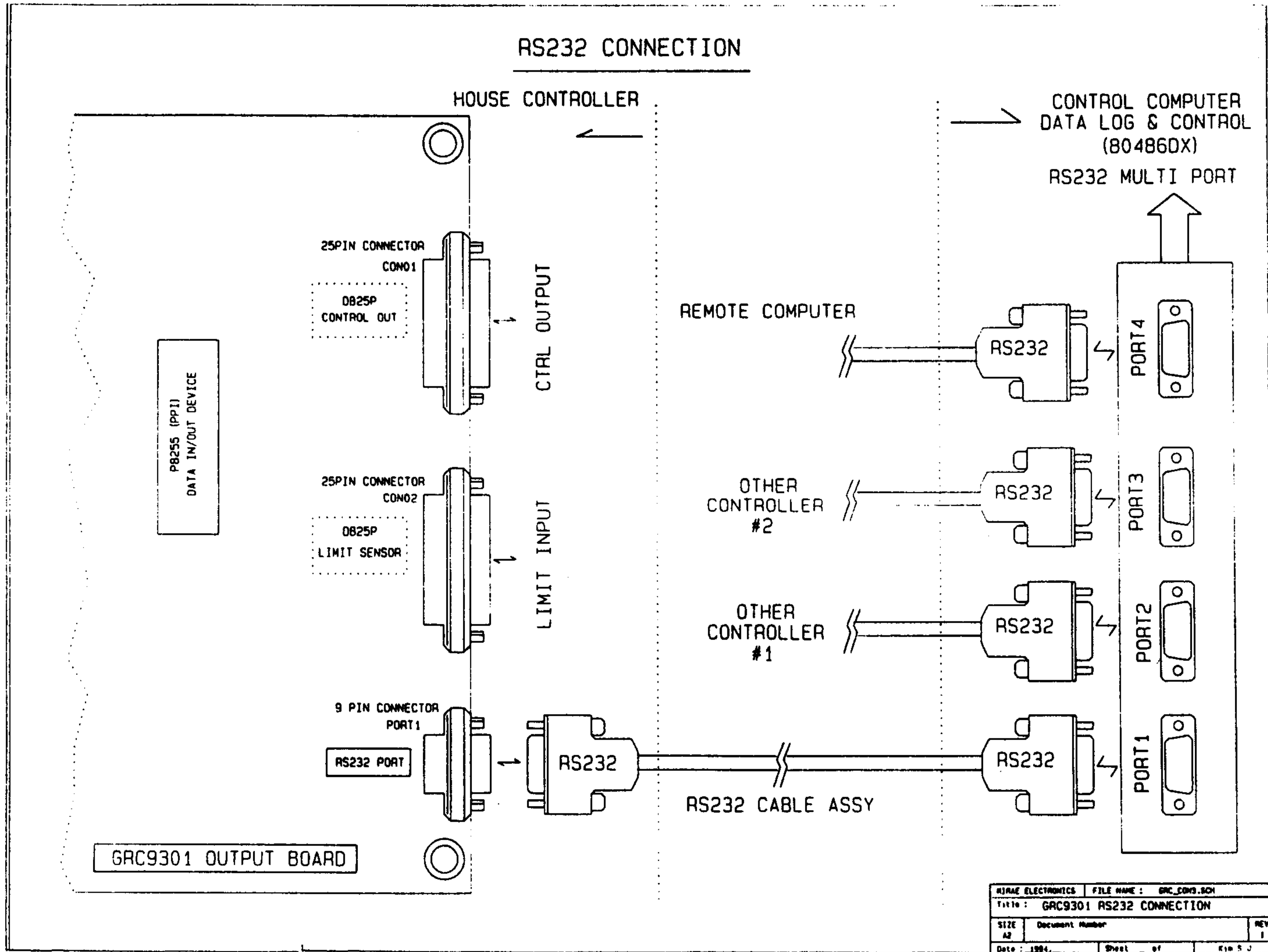


MIRAE ELECTRONICS		FILE NAME : GRCWR.SCH	
Title :		GREENHOUSE CONTROLLER	
SIZE A3	Document Number	REV 1	
Date : 1994. 7. 22.	Sheet	of	Kim s j





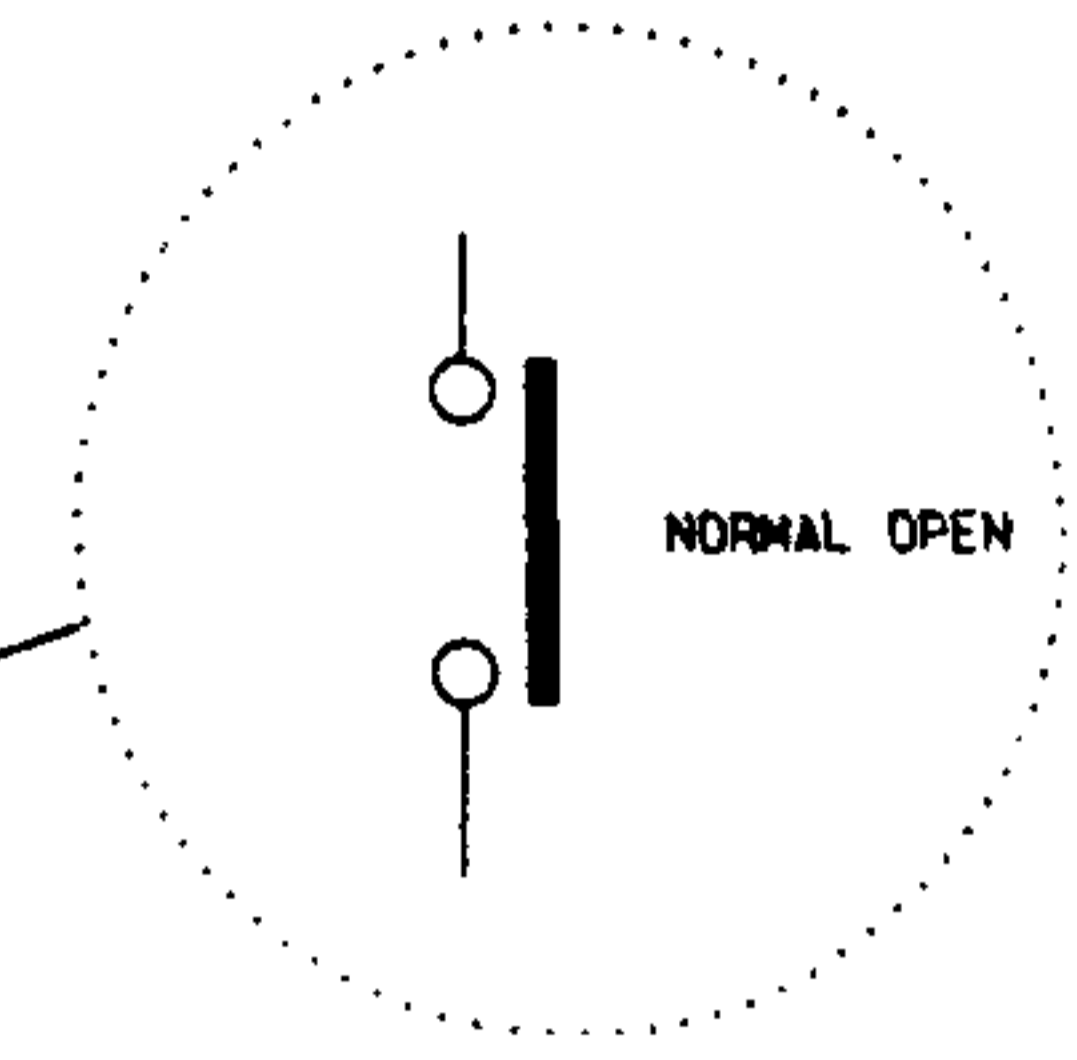
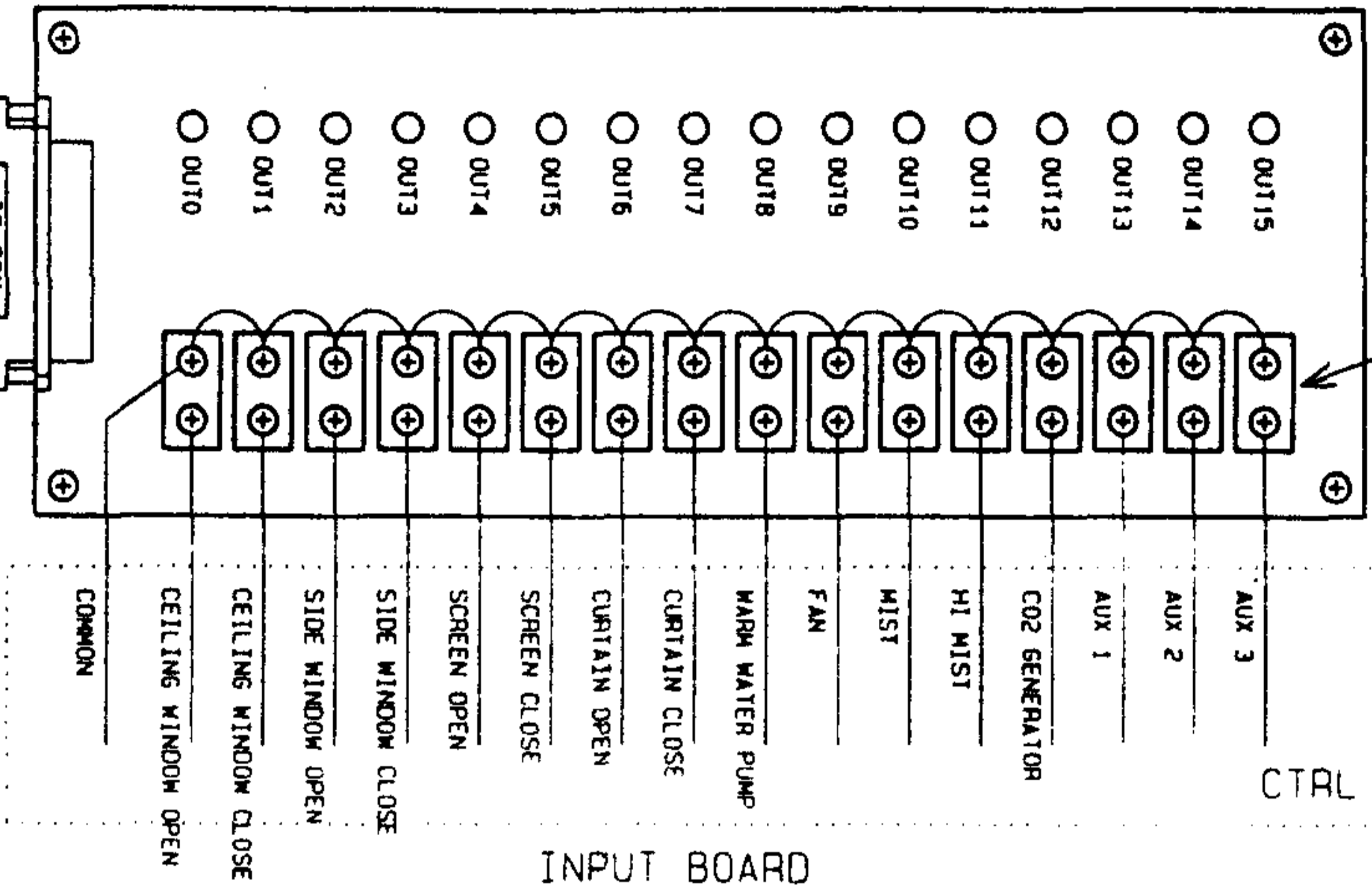




WJRAE ELECTRONICS	FILE NAME :	GRC_CONN.SCH
Title : GRC9301 RS232 CONNECTION		
SIZE	Document Number	REV
A2		1
Date : 1984	Sheet	of
		Kim S J

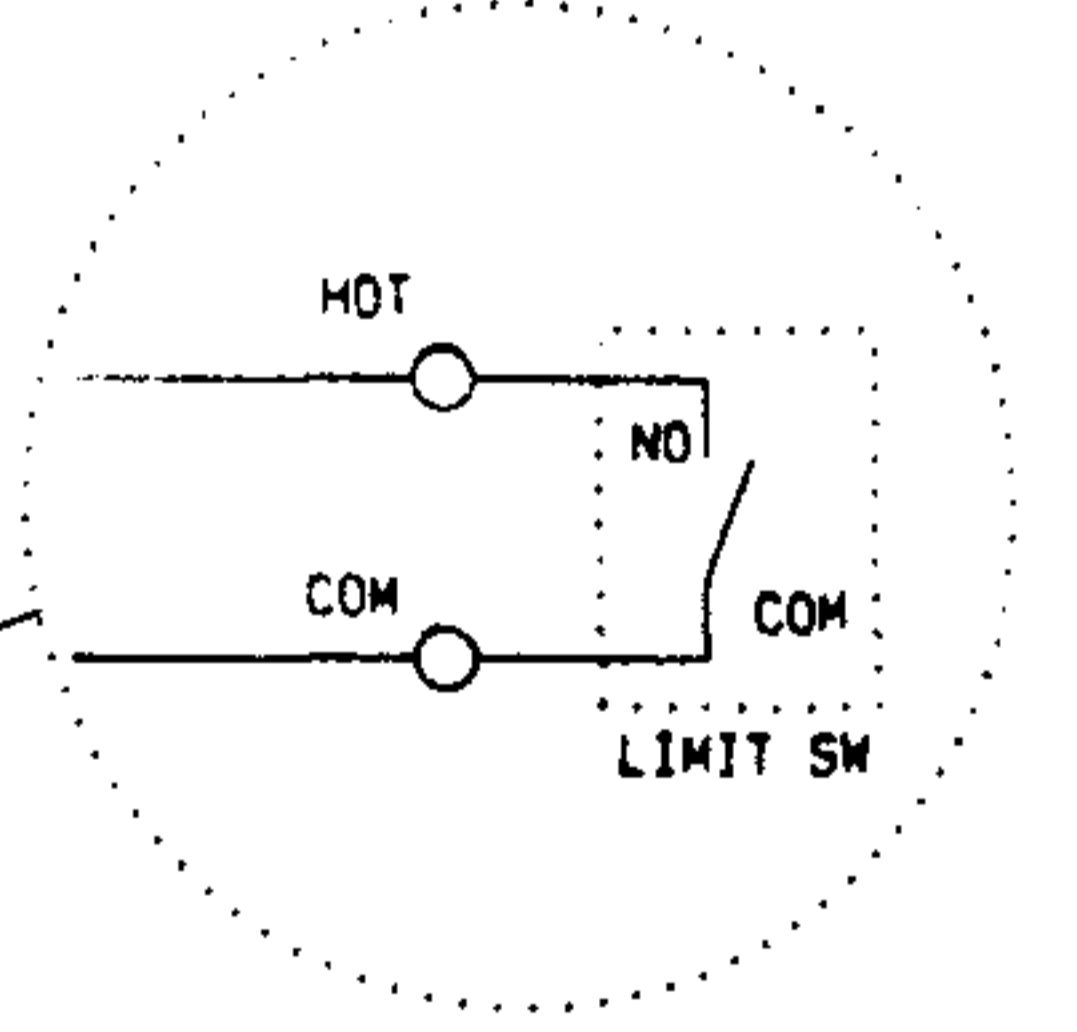
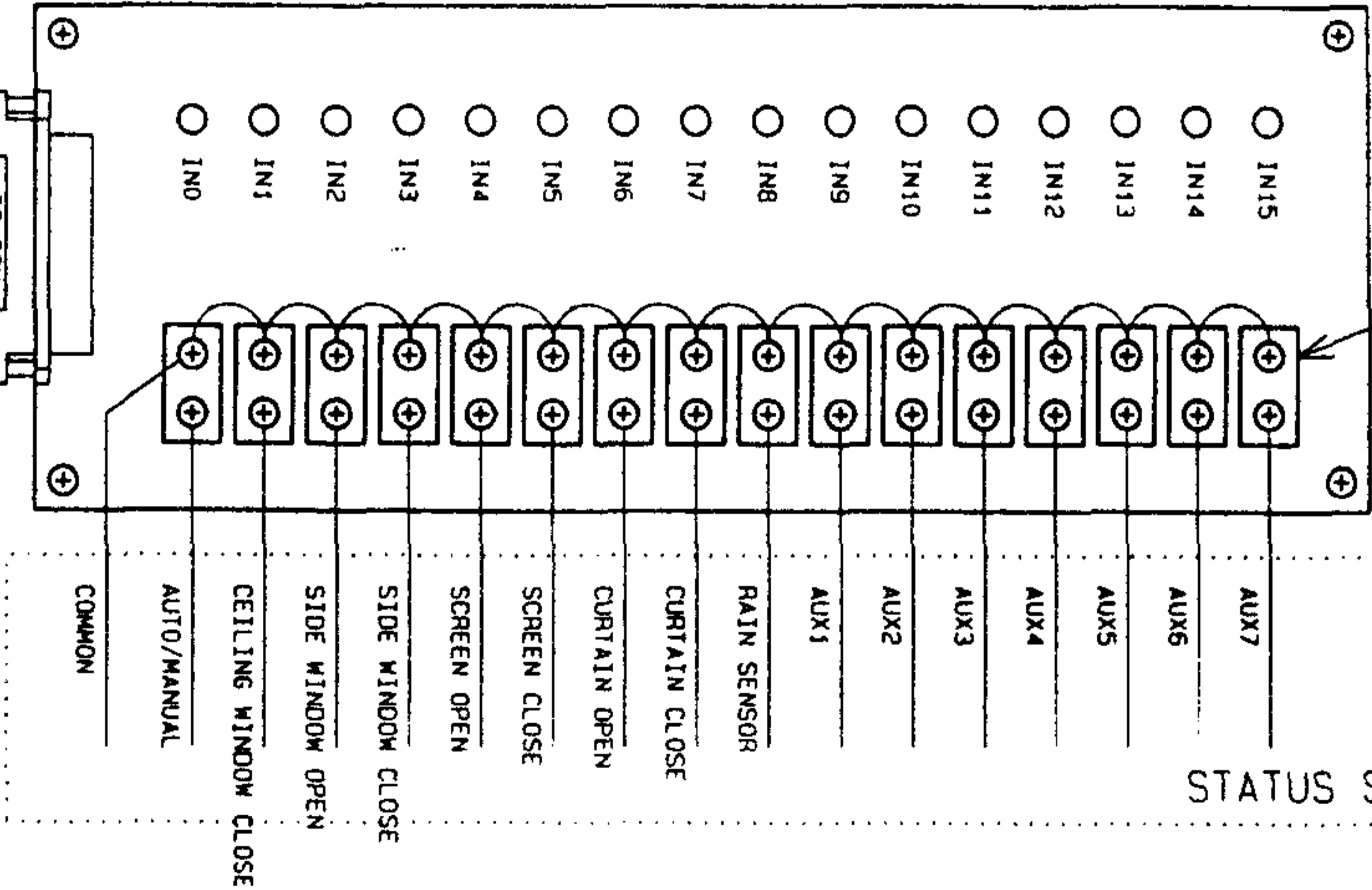
OUTPUT BOARD (SSR BOARD)

CONTROL CABLE ASSY
FROM GRC9301A
CONTROL OUTPUT



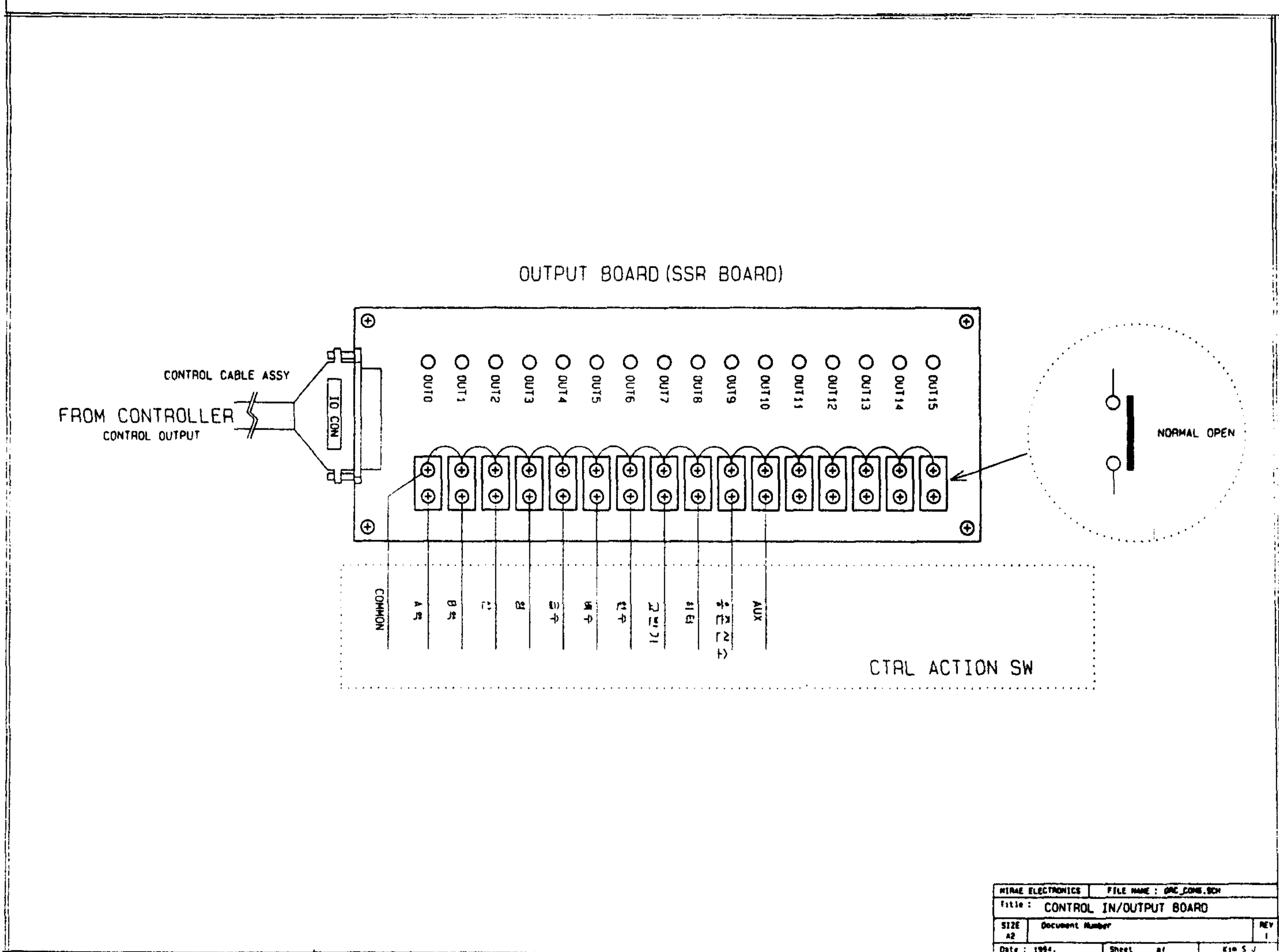
INPUT BOARD

SENSOR CABLE ASSY
FROM GRC9301A
LIMIT SENSOR INPUT



STATUS SENSE SW

MTRAE ELECTRONFUSE NAME : GRC_COM4.SCH			
Title : CONTROL IN/OUTPUT BOARD			
SIZE	Document Number	REV	
A2		1	
Date : 1994.	Sheet	of	Rev S J



MIRAE ELECTRONICS		FILE NAME : OPC_COMB.SCH	
Title : CONTROL IN/OUTPUT BOARD			
SIZE	Document Number		REV
A2			1
Date : 1994.	Sheet	of	Kim S J