

최 종  
연구보고서

# 센서 네트워크에 의한 과수원관비 최적화시스템 개발

Development of Orchard Drip-fertigation System

Optimized using Sensor Network

과수원관비시스템

토양수분센서

## 수분관리프로그램 개발 및 관비최적화시스템개발

Development of Soil Water Management Model and Optimization of Orchard Drip-fertigation System

## 양분 관리 프로그램 개발

Development of Nutrient Management Program

## 수분감응 정전용량형 센서의 개발 및 최적화

Development and Optimization of Capacitance-type Soil Moisture Sensors

## 토양환경 및 생물환경평가

Risk Assessment of Soil and Biological Environment

서울대학교

수원대학교

농촌진흥청 원예연구소

농 립 부



# 제 출 문

농림부 장관 귀하

본 보고서를 “센서네트워크에 의한 과수원 관비최적화시스템 개발”  
(세부과제 “수분관리프로그램 개발 및 관비최적화시스템개발”  
“양분관리프로그램 개발”  
“수분감응 정전용량형 센서의 개발 및 최적화”  
“도양 및 생물환경 평가” )

의 최종보고서로 제출합니다.

2000. 12.

주관연구기관명 : 서울대학교  
총괄연구책임자 : 김 민 균  
연구 원 : 김 정 한  
연구 원 : 류 순 호  
연구 원 : 임 선 옥  
연구 원 : 김 승 현  
연구 원 : 정 종 배  
연구 원 : 사 동 민  
협동연구기관명 : 수원대학교  
협동연구책임자 : 박 배 식  
연구 원 : 노 회 명  
협동연구기관명 : 농촌진흥청  
원예연구소  
협동연구책임자 : 임 재 현  
연구 원 : 이 준 호  
연구 원 : 박 진 면  
연구 원 : 김 동 순  
연구 원 : 임 명 순

# 요 약 문

## I. 제 목

센서 네트워크에 의한 과수원 관비 최적화 시스템 개발

## II. 연구개발의 목적 및 중요성

현재 우리 나라 농업의 큰 틀(paradigm)이 생산성을 지속하며, 동시에 환경을 보전할 수 있는 “친환경농업”으로 전환하고 있으며, 사과 생산의 방향은 보다 좁은 면적에서 과실을 더 많이 생산할 수 있는 풍산성, 왜성 대목을 이용한 밀식재배로 바뀌고 있다 (Baritt, 1992; Ro and Park, 2000). 한편, 우리가 처한 교역환경은 ISO 9000으로 표현되는 “품질경영”에서 ISO 14000으로 규정되는 “환경경영”이라는 새로운 질서에 의해 조절되고 있다. 이렇게 대내외적으로 변화하는 교역의 질서아래 사과를 비롯한 우리 농산물의 대외 또는 내수 시장의 경쟁력을 높이기 위해서는 생산비절감, 품질향상, 나아가 투입 에너지를 효율적으로 이용할 수 있는 생산기반의 조성이 시급하다.

그러나, 지금까지 우리 농업은 인건비의 상승 등 간접재가 차지하는 비율이 높아 감에도 불구하고 선진국에 비해 농업기반의 자동화를 통한 노동력 및 비료 등 투입재의 절감에 관한 노력이 미진한 실정이다. 다른 한편으로 해마다 과잉의 물과 양분이 과수원에 비효율적으로 투입되어, 이로 인해 토양과 수계가 적지 않게 오염되고 있다. 따라서, 작물이 필요로 하는 시기에 적절한 양의 물과 양분을 적기에 지속적으로 공급할 수 있는 자동화된 생산시설에 관한 연구야 말로 노동력 등 원가를 절감하고, 사과 생산량 및 품질을 개선하여 시장경쟁력을 높이고 나아가 적극적인 환경오염 방지 등 국가 생산자원의 비효율적인 손실을 줄여 농업의 부가가치를 높일 수 있는 기간산업 연구이다.

농업 생산성을 높이기 위한 질소 비료의 효율적인 이용은 사과생산에 있어서 지금도 중요한 관심사이나, 최근 이러한 목표는 환경오염을 줄여야 한다는 시대적인 필요에 의해 수정되고 있다. 이러한 상황은 우리로 하여금 사과 생산자가 이 두가지 목표

를 동시에 최적화할 수 있는 기술정보를 제공하도록 독려하였다. 따라서, 본 연구에서는 우리 나라에서 널리 재배되는 사과나무를 대상으로 이에 적합한 관수점과 질소농도를 구하고, 이를 토대로 토양수분 센서를 사용하여 최적화된 과수원 관비 시스템을 개발하고, 이를 시범 조성한 후 장기간 걸쳐 나타나는 환경 및 생물학적 영향을 평가하여 그 타당성을 분석하고, 여러 형태의 점적 관수법에 따라 형성되는 토양수분 상태를 예측할 수 있는 수리모형(數理模型)을 개발하고, 물이 지닌 유전율(誘電率)을 이용하여 네트워크를 구성하는 정전용량(靜電容量)형 토양수분센서를 개발하고자 하였다.

### Ⅲ. 연구개발 내용 및 범위

본 연구는 크게 토양수분감응 정전용량형 센서의 개발 및 보정과 현장 실험을 통한 타당성 검토와 문제점 도출, 사과나무의 물소모량 정량에 의한 적정관수점 설정 및 이를 토대로 한 적정 질소관비 농도의 설정, 이를 이용해 자동으로 제어되는 관비 시스템을 사과원에 설치한 후 사과나무의 생육과 수량, 토양 및 해충상 등 생물환경 반응의 평가, 관비에 의해 결정되는 토양 수분영역을 예측할 수 있는 수리모형의 개발과 적용이라는 네 가지 줄기로 구성되어 있다.

이를 과제별로 보면 다음과 같다. 첫째, 제 1 세부과제에서는 주로 물소모량 정량과 이를 토대로 한 적정 관수점의 설정, 적정 관수점 검증 실험, 정전용량형 토양수분 센서의 토양 물리화학적 보정, 대표 토양의 수리적 성질 정량과 추정을 통한 database화, 점적 관수에 의한 수분 이동 및 분포를 예측할 수 있는 원통좌표계 또는 직교좌표계를 적용한 수리모형의 개발과 이를 통한 최적 점적기 배열 설정 및 모형의 검증에 관한 연구를 수행했다.

둘째, 제 2 세부과제에서는 사과나무의 물소모량을 토대로 한 적정 질소농도의 설정 및 검증 실험, 관수 및 관비에 따른 토양중 질소의 행태 변화, 물과 산소에 따라 결정되는 질소분포를 예측하는 수리모형의 개발과 검증, 중질소를 사용한 관비와 표면시비간 질소이용률 비교, 동일한 관수점을 적용하여 관비와 표면시비간 토양내 질소의 형태별 분포 및 수분단면 비교에 관한 연구를 수행하였다.

셋째, 제 1 협동과제에서는 주로 센서소재의 선정 및 시작품 제작, 센서별 토양수분감응도 분석 및 측정재현성 검증, 센서별 물리화학적 보정 및 성능 검증, 이에 따른 문제점 도출 및 개선, 센서의 정전용량 readout 회로개발 및 문제점 도출, 정전용량

계측기를 사용한 관비제어 회로의 구성과 제어모듈 개발에 관한 연구를 수행하였다.

마지막으로 제 2 협동과제에서는 사과나무의 환경생리 문제를 다룰 수 있는 배수형 라이시미터를 현장에 설치하고, 이 시설에서 토양의 수분상태와 질소시비 수준을 달리한 실험을 장기간 수행하여 연차적으로 변하는 사과나무의 생육 및 수량 반응과 토양 및 생물 환경 반응을 조사하였다.

#### IV. 연구개발결과 및 활용에 관한 건의

토양이 물로 포화된 경우, 관수점을 -50 및 -80 kPa로 설정하여 자동 관수한 실험을 통해 관수점이 -50 kPa일 때 사과나무의 생육과 결실이 2년간 양호하였으며, 이때의 물소모량을 기준으로 사과나무의 적정 관수점을 -50 kPa로 설정하였다 (Ro, 1999). 이를 토대로 질소농도를 17, 34 및 67 mg L<sup>-1</sup>로 달리하여 3년 동안 사과에 대해 실험한 결과, 사과나무의 생육과 수량 및 품질은 34 mg L<sup>-1</sup>의 경우 좋아 적정 질소농도를 34 mg L<sup>-1</sup>로 설정하였다 (Ro and Park, 2000).

한편, 점적관수에 의한 토양수분 단면을 예측할 수 있는 수리모형을 처음에는 원통형 좌표계(cylindrical coordinate system)를 적용하여 개발하였는데 (노와 김, 1998), 이 모형은 사과나무 한 그루에 대해 행해진 점적 관수의 결과를 예측할 수 밖에 없었다. 그러나, 이 모형(drip2D.for)을 이용하여 가장 효율적인 점적기의 배열은 사과나무를 중심으로 동심원 상에 4개의 점적기를 지중에 설치하는 것이나, 이는 현실적으로 불가능하여 차선인 4개의 점적기를 지표에 설치하는 것이었다. 이를 토대로 나중에 사과원 전체의 점적기 배열과 조합에 따른 토양수분 단면을 예측할 수 있는 수리모형(drip3D.for)을 직교좌표계(Cartesian coordinate system)로 전개하여 개발하였다 (노 등, 2000). 또, 수분과 산소 상태에 따라 질소의 형태변환을 고려할 수 있는 질소분포모형을 연립하여 개발(o2status.c 및 transN.c)하였다. 한편, 이 모형은 환경 및 농업 분야에서 독립적으로 또는 부프로그램으로 사용되는 많은 질소모형과는 달리 산소 상태에 따라 질소의 형태가 변환되는 속도론적 접근을 고려하고 있다. 이 두 모형은 토양에서 수분상태와 이에 따라 변하는 질소의 형태별 분포를 예츄갈 수 있으나, 현장 적용성을 검증하기 위해서는 앞으로 더 연구해야 할 과제이다.

자동 관수에 이용할 수 있는 전기 신호를 송출하는 토양수분을 측정하는 정전용량형 센서를 개발하는 것이 이 연구를 구성하고 있는 다른 하나의 틀이다. 이를 위해

재질과 형태를 달리하여 센서 시제품을 제작하였으며, 이들 모두 정확성, 재현성, 안정성 등 센서 성능을 검토한 바 센서로서의 성능을 확인하였다. 그 중 간단한 구조로 구성되었으나, 비교적 높은 안정성 및 재현성을 가진 two-rod 형태의 센서를 선택하여, 이에 대해 도양학적, 물리화학적 보정을 하였고, 이들 센서로부터 송출되는 전기용량(capacitance)을 일기 위한 회로를 개발하고자 하였다. 그러나, 고주파수(20MHz) 방식인 위상편이 측정법에 의한 측정회로 개발은 회로구성의 불안정성으로 인해 측정 재현성이 신뢰할 만한 수준에 미달하였다. 그러나, 기존 전기용량 측정기를 접속하여 센서를 검증하였으며, 이를 통해 최적화된 점적관비 시스템을 구성할 수 있었다.

이와는 별도로 3년간에 걸쳐 원예연구소의 다른 장소에 설치된 라이시미터를 이용하여 토양수분 영역과 질소시비 수준이 사과나무의 생육과 결실, 토양의 수분 및 양분 영역 및 해충의 생태계에 미치는 영향을 연차적으로 조사하여 본 연구에서 제시하고 있는 적정 관수점이 지닌 환경경영 측면의 이점을 확인할 수 있었다.

지금까지의 결과로 보면, 개발한 센서는 센서의 성능을 충분히 지녔다고 판단되며, 만일 측정회로를 적정 가격대로 개발된다면, 센서의 가격대비 효용성이 많이 향상되어, 수입시장 및 국제시장에서 경쟁력을 갖출 수 있다고 본다. 이를 위해 본 연구팀이 조사한 기술 database의 한계를 극복할 수 있는 정보와 기술을 제공할 수 있는 협조가 필요하다. 한편, 기존 수입 토양수분 센서를 이용해서 본 연구에서 제시한 적정 관수점, 질소 농도 및 점적기 조합을 활용하면, 생산성의 지속은 물론 토양의 질 및 수질 오염을 경감하는 환경경영을 이룰 수 있는 터전을 확보할 수 있다. 토양수분에 관한 수리모형에 관심이 있는 기술력을 지닌 사람이라면, 앞으로 자기 농장 전체의 점적기 배열을 입력하여 토양수분상태를 고려할 수 있는 모형으로 확장할 수 있기 때문에 모형의 활용가치는 높다고 생각한다. 그러나, 질소에 관해서는, 많은 문헌이 말하듯이, 이를 실용화하기 위해 앞으로 많은 실험실적 연구가 뒷받침되어야 한다고 본다. 본 연구에서 제시한 관비 시스템은 비단 과수원뿐만 아니라, 시설재배 또는 정원 등에 적용하여 그 활용성을 매우 높일 수 있다.

## SUMMARY

(영문 요약문)

As evidenced in Europe and North America, the paradigm of apple orcharding in Korea is entering a major change to intensive orcharding, using precocious, dwarfing rootstocks, which may lead to excess N fertilization. Whereas the original goal of apple producers was to maximize productivity, presently this goal is moderated by the need to protect environmental quality. Furthermore, in Korea, with increasing demands for industrial and municipal water, more irrigation water will be needed to meet increasing demands for food for growing populations.

Hence, an understanding of the interaction between N fertilization and irrigation is needed for selecting management practices that optimize crop yield and quality and minimize N losses to the environment. Accordingly, seeking a method to achieve soil moisture and nutrient regimes sufficient to sustain maximum crop growth and crop yield while minimizing leachate from the root zone has been a major concern. The scientific community is thus encouraged to provide quantitative technical information to guide the apple producers in making management decisions that optimize the dual goal of high fruit yield and low environmental degradation.

In recent years, on the other hand, the use of in-situ soil moisture sensors has facilitated real-time monitoring of soil water status and thereby automated irrigation scheduling based on the chosen irrigation level. This situation necessitated a testing of an optimum irrigation-control level that may save more irrigation water resources without sacrificing the productivity of apple orchards. To do so, a drainage-type lysimeter facility, whose design and performance is described here, was constructed to determine water use by apple-growing lysimeters in response to three different soil moisture regimes, and soil water tension of 50 kPa was chosen as the optimum irrigation-control level for dwarf apples. A pot experiment with apple trees was conducted to establish an appropriate concentration of liquid N fertilizers based on the optimum irrigation level chosen, and N concentration of 34 mg L<sup>-1</sup> would be adequate for



drip-irrigated dwarf apples based on the chosen irrigation level.

A numerical model of three-dimensional soil water distribution for drip irrigation management under cropped conditions was developed using Richards' equation in cylindrical coordinates and this model was later modified in Cartesian coordinates to adapt variable flow rates and configurations of drip emitters. The model accounts for both seasonal and diurnal changes in evaporation and transpiration, and the growth of plant root and the shape of root zone. Solutions were numerically approximated using the Crank-Nicolson implicit finite difference technique on the block-centered grid system and the Gauss-Seidel elimination in tandem. Simulation results with mass balance showed that water use efficiency of a drip-irrigated apple orchard was greatest for 4-drip-emitter system buried at 25 cm.

Another numerical models describing for one-dimensional N distribution under steady-state O<sub>2</sub> distribution was developed by solving two sets of simultaneous ordinary and partial differential equations. Solutions were numerically approximated using the fourth order Runge-Kutta method, and the Crank-Nicolson method and the Thomas Algorithm in tandem, but not tested the validity of the model due to lack of measured input parameters.

The second part of this project dedicated to selecting sensor materials, testing and calibrating soil moisture sensors of various forms and materials, and developing a readout circuit for capacitance measurement. Capacitance soil moisture sensors of several forms and materials were designed and calibrated in terms of moisture, temperature, and electrical conductivity of soils. All sensors tested showed good stability, accuracy, and reproducibility for soil moisture. However, a two-rod type probe was incorporated into this optimized fertigation system due to simple but stable architecture producing accurate and reproducible signals. Under 100 kHz to 30 MHz, the measured capacitance responded linearly or curvilinearly to soil moisture content, while linearly to soil temperature. Frequencies higher than 20 MHz produced capacitance readings insensitive to electrical conductivity (EC), but lower frequencies, i.e., 2 to 5 MHz were applicable to capacitance measurement of average moist soils. However, soil texture greatly

affected the readings. In general, the capacitance increased with higher clay content. We have tried to design an electronic circuit to read capacitance induced by high frequencies such as 5 or 20 MHz, but failed due to low reproducibility resulting from the instability of technology presently applicable to such high frequencies. Instead, the readings from sensors were connected to a datalogger or DOS-based computer through a capacitance meter by switching off channels, and the signals were used to interrupt irrigation scheduling.

The third part of the project assessed the combined effects of soil moisture regimes and N rates on the physiology and yield of apples, soil nutrient status, and the ecology of pest insects. Trees drip-irrigated at soil moisture tension of 50 kPa produced higher yield than those at 20 and 100 kPa. Population density of individual pest insect was affected by soil moisture regimes and N rates.

With the aforementioned in prospect, a prototype model of fertigation system using a network of soil moisture sensors was designed and installed on apple-growing lysimeters and fields to test the validity of the chosen optimum irrigation level, N concentration, configuration of drip emitters, and the model. Three-year observation on this fertigation system indicated that set values of N concentration of  $34 \text{ mg L}^{-1}$ , soil moisture tension of 50 kPa, and the configuration of four drip emitters equally spaced in a circle 0.3 m from the tree trunk produced high fruit yield with minimal leachate and accumulation of N in soil under this experimental weather condition.

# CONTENTS

## (영 문 목 차)

Chapter 1. Preface	
Section I. Objectives and scope .....	13
Section II. Interrelationship between working groups .....	15
Section III. Perspective .....	17
Chapter 2. Development of soil water management model and optimization of orchard drip-fertigation system	
Section I. Introduction .....	19
Section II. Scopes .....	20
Section III. Results .....	20
1. Development of soil water movement and distribution model .....	20
2. Establishment of optimum irrigation-control level .....	39
3. Monitoring of soil moisture profile and validation of the model .....	40
4. Sensor calibration .....	56
5. Automatic drip-fertigation control system using capacitance-type soil moisture sensors .....	61
Section IV. Suggestions for the applications .....	63
Chapter 3. Development of a nutrient management program	
Section I. Introduction .....	64
Section II. Scopes .....	65
Section III. Results .....	65
1. Development of nitrogen and oxygen distribution model .....	65
2. Establishment of optimum N-concentration for drip-fertigated apple orchards .....	73
3. Testing of the validity of the optimum N-concentration in drip-fertigated apple orchards or lysimeters .....	74
Section IV. Suggestions for the applications .....	87
Chapter 4. Development and optimization of capacitance-type soil moisture sensors	
Section I. Introduction .....	88
Section II. Scopes .....	94

Section III. Results .....	95
1. Database construction for sensor materials .....	95
2. Calibration of sensors .....	121
3. Electronic circuit for capacitance measurement .....	132
4. Automatic drip-fertigation control system using capacitance-type soil moisture sensors .....	153
Section IV. Suggestions for the applications .....	153
 Chapter 5. Risk assessment of soil and biological environment	
Section I. Introduction .....	155
Section II. Scopes .....	156
Section III. Results .....	156
1. Materials and methods .....	156
2. Assessment on soil environment .....	159
3. Assessment on the physiology and yield of apple trees .....	174
4. Changes in soil moisture regimes with irrigation-control levels .....	180
5. Assessment on pest insects and their natural enemies .....	181
Section IV. Suggestions for the applications .....	219
 Reference .....	221
Appendix 1. ....	227
Appendix 2. ....	250
Appendix 3. ....	265
Appendix 4. ....	286
Appendix 5. ....	304
Appendix 6. ....	316
Appendix 7. ....	321

# 목 차

제 1 장 서 론	
제 1 절 연구개발의 목적과 범위 .....	13
제 2 절 연구추진내용 및 세부과제간 연계 .....	15
제 3 절 기대효과 및 활용 .....	17
제 2 장 수분관리프로그램 및 관비최적화시스템 개발	
제 1 절 서설 .....	19
제 2 절 연구개발내용 및 범위 .....	20
제 3 절 연구개발결과 .....	20
1. 토양수분이동 및 분포모형 개발 .....	20
2. 최적 관수점의 설정 .....	39
3. 점적 자동관비 동안 수분이동분포 모니터링 및 모형예측치와의 비교 ..	40
4. 센서의 토양학적 최적화 .....	56
5. 정전용량형 토양수분센서를 이용한 점적관비 자동제어시스템 구축 .....	61
제 4 절 활용에 대한 건의 .....	63
제 3 장 양분관리프로그램개발	
제 1 절 서설 .....	64
제 2 절 연구개발내용 및 범위 .....	65
제 3 절 연구개발결과 .....	65
1. 정상류 조건하의 산소 분포와 질소 이동 및 분포모형개발 .....	65
2. 적정 관비농도 설정 .....	73
3. 적정 관비농도 입증 및 시비 질소 행동연구 .....	74
제 4 절 활용에 대한 건의 .....	87
제 4 장 수분감응 정전용량형 센서의 개발 및 최적화	
제 1 절 서설 .....	88
제 2 절 연구개발내용 및 범위 .....	94
제 3 절 연구개발결과 .....	95
1. 기초자료조사 및 센서 소재 선정 .....	95
2. 센서의 물리화학적 및 토양학적 최적화 .....	121
3. 정전용량 측정 회로 개발 .....	132

4. 정전용량형 토양수분센서를 이용한 점적관비 자동제어시스템 구축 .....	153
제 4 절 활용에 대한 건의 .....	153
제 5 장 토양 및 생물환경 평가	
제 1 절 서설 .....	155
제 2 절 연구개발내용 및 범위 .....	156
제 3 절 연구개발결과 .....	156
1. 연구수행방법 .....	156
2. 토양환경변화 .....	159
3. 수체에 미치는 영향 .....	174
4. 관수점 조절에 따른 토양수분함량 변화 .....	180
5. 해충 및 천적 발생에 미치는 영향 .....	181
제 4 절 활용에 대한 건의 .....	219
참고문헌 .....	221
부록 1. 토양수분이동 및 분포 모형 Source Code(원통좌표계) .....	227
부록 2. 토양수분이동 및 분포 모형 Source Code(직교좌표계) .....	250
부록 3. 토양산소분포프로그램 Source Code .....	265
부록 4. 질소변환 및 분포 프로그램 Source Code .....	286
부록 5. R-C 증방진 주기측정에 의한 수분측정장치 구동 프로그램 Source Code .....	304
부록 6. 위상편이 측정기법에 의한 수분측정장치 구동 프로그램(어셈블리어) .....	316
부록 7. 정전용량형 센서를 이용한 점적관비 자동제어프로그램 Source Code .....	321

# 제 1 장 서 론

## 제 1 절 연구개발의 목적과 범위

### 1. 기술개발의 필요성

작물이 필요로 하는 적절한 양의 물과 비료를 적기에 지속적으로 공급할 수 있는 최적화된 자동 공급시설이야 말로 노동력 절감과 수확 증대 및 품질개선을 통해 농산물의 가격을 낮추고 나아가 적극적인 환경 오염의 방지 등 국가 생산자원의 비효율적인 손실을 줄여 환경 경영하에 농산물의 부가가치를 높일 수 있는 기간 지원시설이다. 이를 완성하기 위해서는 작물의 최적성장자료를 database로 한 제어장치에 접속하여 안정적으로 토양수분을 계측할 수 있는 센서와 토양의 수분 및 양분 상태를 지속적으로 관리하고 예측할 수 있는 운용 프로그램의 개발이 필수적이다. 본 연구는 지금까지 토양수분의 측정에 사용되었던 기술과는 달리 물이 지닌 유전적(誘電的) 성질을 이용한 정전용량형 토양수분센서를 개발함과 동시에 환경 및 작물생산적으로 최적화된 자동 관비시스템을 운용하는 프로그램을 개발하여 전 시스템을 구성한 후 이를 시범 조성하여 타당성을 분석하는 것을 주요 내용으로 한다. 이러한 자동화시스템의 구현은 우리농업의 국제경쟁력을 크게 개선할 뿐만 아니라, 우리와 유사한 농업 구조를 갖고 있는 후발국의 시장개척을 통해 국익을 크게 도모할 수 있다.

특히, 첨단인 정전용량형 수분센서의 개발이 갖는 의미는 단순히 외국 선진기술의 국산화라는 수동적 차원이 아닌 국내에서 개발한 제품의 세계 시장 개척이라는 수출 지향적인 능동적 대처를 의미한다.

본 연구를 통해 개발하고자 하는 정전용량형 센서와 같은 원리를 적용한 화란의 기존 제품을 수입할 때, 이를 국내 가격으로 환산하면 개당 약 30만원 정도로 고가이나, 이를 개발하면 그 수입대체 효과는 매우 클 뿐만 아니라, 적극적으로 해외 시장을 개척할 수 있는 충분한 시장경쟁력을 확보할 수 있으리라 전망한다.

이번 연구를 통해 제안한 관비 최적화 시스템의 개발은 해외 또는 국내 내수 시장 여건의 변화와 농촌 가동 인력의 고령화와 부족에 능동적으로 대응할 수 있는 대안을 제공한다는 면에서 우선 그 사회적 측면에서 가치를 부여할 수 있다. 한편, 농업 생산

환경을 자동화함으로써 편안하고 알찬 농업으로 가는 길을 제공하기 때문에 귀농현상의 도래와 삶의 질을 높이는데 이바지하리라 전망한다. 다시 한번 말하면, 노동생산력의 향상과 농산물 품질의 향상이 우선적으로 농촌의 경제활성과 정주권 사업에 일익을 담당하리라 전망한다.

한편, 개발되는 소프트웨어인 운용프로그램과 그 과정에서 파생되는 다양한 형태의 연구와 무형의 지적 재산권 또한 우리 농업 학문의 수준을 현 단계에서 비약하는데 기여하리라 전망한다.

또한 이 시설을 통해 물과 비료를 농경지에서 효과적으로 조절할 수 있기 때문에 비점원 오염을 최소화할 수 있으므로 간접적으로 국가 경제 및 사회에 공헌할 수 있으리라 전망한다.

## 2. 연구개발 목표 및 범위

본 연구에서는 최적수분관리 및 양분관리 시스템을 개발을 위해 센서 및 제어시스템개발과 수분 및 양분관리 프로그램 개발, 그리고 토양환경 및 생물환경 평가로 구분하여 다음과 같이 4분야로 나누어 해당 전문가집단에서 수행하였다. 연구의 최종목표에 접근하기 위해서 각 세부과제를 독립적으로 그리고 공동연구가 필수적인 시기에 서로 유기적으로 수행하였다.

- 최종목표 : - 차세대 첨단 센서인 정전용량형 수분센서의 개발  
- 센서 네트워크에 의한 관비 최적화 시스템 구축

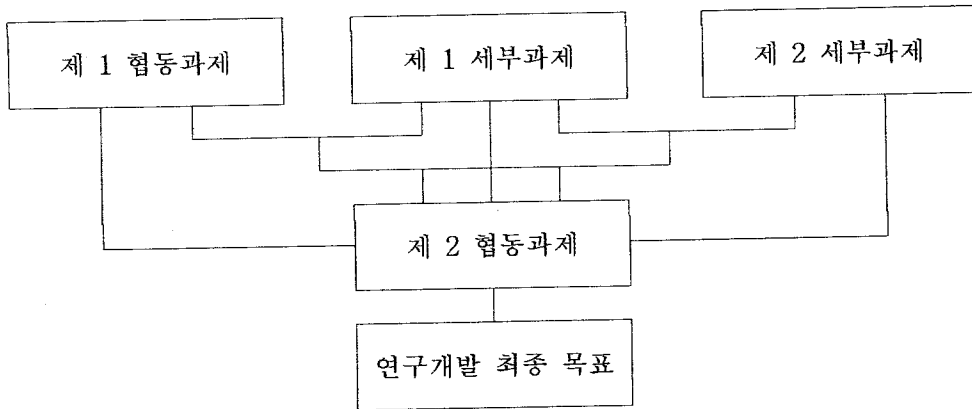
### ○ 세부과제별 목표 :

- 1) 제 1 세부과제 - 수분 관리 프로그램 및 관비 최적화 시스템 개발
- 2) 제 2 세부과제 - 양분 관리 프로그램 개발
- 3) 제 1 협동과제 - 수분감응 정전용량형 센서의 개발 및 최적화
- 4) 제 2 협동과제 - 토양 및 생물환경 평가



## 제 2 절 연구추진내용 및 세부과제간 연계

### 1. 세부과제의 연결 고리



### 2. 세부과제별 연구추진내용 및 협조체제

#### ○ 제 1 세부과제 : 수분 관리 프로그램 및 관비 최적화 시스템 개발

토양에서 수분과 연관된 이동 및 분포 등을 기술하는 모형을 다차원적으로 개발하였다. 이후 모형에 필요한 매개변수 및 알고리즘에 따라 수리특성과 연관된 변수를 실험적으로 정량화하고 이들 실측 자료를 모형에 적용하기 위한 근사추정 및 수식화 작업을 수행하였다. 제안된 시스템의 실용 가능성 및 영향 등을 평가하고 분석하기 위한 제 2 협동과제 연구검증 시설이 설치완료되고 제 1 협동과제에서 시험용 센서의 시작품이 제작되고 이를 토양학적으로 보정하며 시장이 형성된 기존 센서(TDR)과 성능 비교평가를 수행하였다. 다음으로 수분의 이동과 상태를 예측할 수 있는 프로그램이 개발되어 포장에서 적용성을 검증하였다. 또 제 2 세부과제의 연구 결과인 양분 특히 질소모형을 연립하여 시스템의 양분상태를 파악하고자 하였다. 연구검증시설에서 세부 실험이 연차적으로 행해진 후 이를 종합하여 시스템 전반을 평가하는데 활용

하였다.

○ 제 2 세부과제 : 양분 관리 프로그램 개발

여러 종류의 필수 양분 중 본 연구에서는 질소에 초점을 맞추고 진행하였다. 토양의 수분상태에 따른 질소의 형태별 변환 및 분포 단면을 연구하고 제 2 세부과제의 주제인 수분과 산소환경에 따라 변화하는 질소의 형태별 분포 예측 모형을 개발하였다. 이때 제 1 세부과제와 공동으로 전문가를 활용하여 비료 등 양분 이용률 제고 및 토양으로부터 유실의 최소화를 이루고자 하였다. 이를 토대로 최적화된 관비 관리프로그램을 개발하는데 이때에는 제 1 협동과제 및 제 1 세부과제와 연계하여 수행하며 물론 최종적으로 제 2 협동과제와도 연결된 입체적인 연구를 수행하였다.

○ 제 1 협동과제 : 수분감응 정전용량형 센서의 개발 및 최적화

산업적으로 실용가능성이 있고 학문적으로 타당한 수분센서를 개발하기 위하여 우선 센서 시장의 추이에 관한 기초조사와 센서의 기술을 구현할 소재의 선정과 기술적인 측면의 조사가 선행되었다. 이를 토대로 연구를 수행하며 이 때 도출된 문제점을 개선하며 기존 센서의 경우와 비교평가하였다. 다음으로 1세부과제와 함께 센서의 물리화학적 그리고 토양학적인 최적화 작업을 수행하였다. 우선으로 센서를 네트워크로 연결하여 관비시스템을 하드웨어적으로 구성하였다. 정전용량과 수분함량의 보정식을 이용하여 -50kPa의 토양수분포텐셜에서 자동관수가 이루어지는 센서자동제어시스템을 구축하였다.

○ 제 2 협동과제 : 토양환경 및 생물환경 평가

제 1, 제 2 세부과제 및 제 1 협동과제와 공조하기 위해 연구 초기에 각 세부 및 협동과제의 추진 내용을 시험하고 검증할 수 있는 연구시설을 실험규모로 설치하였다. 주로 토양, 수질, 생물생태상 및 생리와 품질의 4 분야에 걸쳐 조사와 분석을 하

었다. 이를 토대로 하여 제안하는 관비 최적화 시스템의 실용가능성을 예측하고자 하였다. 처음에는 검증시설에서 각 세부과제의 세세부 연구가 최종 목표의 연차적 단계로 수행되나 후반기에 시스템이 설치되면 연구의 진행 및 결과를 종합적으로 검토하였다. 토양 및 수질의 분석과 수채 및 과실의 영양 및 품질 분석은 제 2 세부과제와, 토양수분 및 수채의 수분생리는 제 1 세부과제와 협조하여 주기적으로 수행하였다.

### 제 3 절 기대효과 및 활용방안

관비자동화시스템을 구현하여 노동력 절감을 통하여 날로 심각해져가고 있는 농촌의 노동력 부족현상을 완화할 수 있다. 외국에서 개발되어 상용제품화된 여러 가지 타입의 토양수분감응센서가 안고있는 다양한 문제점을 비교검토하여 이를 극복할 수 있는 새로운 타입의 센서를 개발하여 자동화시스템과 결합하여 실용화함으로써 농업기술의 자립화와 농업기술의 국제경쟁력을 확보할 수 있다. 과수원을 대상으로 개발된 관비자동화시스템은 날로 확대일로에 있는 비닐하우스재배 등의 시설재배 분야에 응용될 때 그 파급효과는 상당할 것이다.

관비자동화를 통한 영농과학화는 노동력 절감과 생산성 증대로 농민의 이익을 증진할 수 있다. 자동화를 통한 생산비 절감과 노동환경의 개선을 통하여 보다 저렴한 농산물 공급이 실현될 것이며, 최적환경 재배를 통하여 토양오염 및 비점원 오염에 의한 수질오염을 최소화하며, 농산물의 품질을 크게 향상할 수 있다.

개발하고 있는 센서의 응용분야는 농업분야와 비농업분야로 구분할 수 있다. 농업분야에서는 주로 고소득 작목인 원예 전반에 활용할 수 있다. 앞으로 버섯재배에도 활용하여 품질향상에 기여하리라 예상된다. 비농업분야로는 관상산업 및 환경산업을 들 수 있다. 관상산업으로는 가정의 정원(실내/실외) 관리와 골프장의 그린 관리 등이 있다. 환경분야로서는 매립지의 침출수 관리 및 탐측에 유용하게 이용될 수 있다. 즉 기존 센서로는 고농도의 침출수에 의해 예견되는 부식을 극복하기 어려우나 본 연구에서 개발하고자 하는 센서는 완벽히 절연처리한 내부식성을 가져 이에 상당한 우위를 확보할 수 있다. 또한 이 기술을 제약산업 및 화공관련 산업의 품질관리 및 생산라인에 적용할 수 있는데 이때는 재현성을 갖춘 고도의 정확성을 구비하는 보정회로가 내장되어야 할 것이다.

이와 같이 다양한 산업분야에 활용할 수 있어 수분센서의 시장성은 매우 넓어지리라 생각한다. 또한 이를 산업화 할 때는 활용분야가 요구하는 정확성에 맞추어 보급되어 질 것이다. 농가보급형 또는 현장보급형은 허용하는 오차범위 안에서 단가를 낮추어 경쟁력을 지니도록 하는 방안을 강구 중에 있다.

개발된 정전정량형 센서를 관수/관비에 접목할 경우 연구를 통한 적정수분 및 양분관리에 의해 환경보전은 물론 수자원 절약 및 ISO 14000 하에서 우리 농산물의 시장 경쟁력을 높이는 데 활용이 기대된다. 이 기술은 비단 과수원뿐만 아니라 비닐하우스 등 시설재배에도 적극 활용할 수 있다. 특히, 적극적인 시장 공략의 일환으로 우리 나라와 농업여건이 비슷한 일본, 동남아 및 중국 등지에 선진 농업기술을 수출할 수 있다.

## 제 2 장 수분관리프로그램 개발 및 관비최적화 시스템 개발

- 제 1 세부과제 (주관연구기관)

### 제 1 절 서설

점적관수는 현재 수분을 효율적으로 이용하는 방법으로 알려져 사용하고 있다. 점적관수는 최적 수분조건 유지를 위한 수분을 공급하는 시점, 즉 적정 관수점을 결정하여 토양수분함량이 적정 관수점에 도달하면 그 신호를 전달하는 센서를 매개로 하여 최적수분관리를 이루어 낼 수 있다. 점적으로 공급되는 수분을 관리하기 위해서는 수분이 공급될 적정관수점과 신호를 감지 전달하는 센서 및 계측 제어장치, 그리고 수분의 이동 분포에 따른 토양환경 및 작물체의 행동 파악이 중요하다.

점적관수가 이루어질 때 토양에 따른 수분이동 및 분포의 정보를 아는 것은 수분뿐만 아니라 근권에서 양분행동이 수분분포에 크게 의존하기 때문에 더욱 중요하다. 따라서 관수가 시작되고 관수가 그칠 때의 수분이동 및 분포를 파악할 수 있는 수분관리프로그램의 개발이 요구된다.

수분관리프로그램의 개발을 위해서는 점적기에서 공급되는 물이 어떤 형태로 분포하며 토양특성에 따른 변이양상을 비롯하여 과수의 수분흡수에 이르기까지 다양한 변수를 고려해야 한다. 이러한 변수를 고려한 수분관리프로그램은 최적의 과수원 물관리 및 양분관리의 기초가 될 뿐 아니라 우리 나라 기후에서 물 소모량의 예측을 통한 거시적인 물관리계획에 도움을 줄 것이다.

최적수분의 자동제어를 위해 적정 관수점에서 신호를 발생시키는 센서의 신뢰성을 확보하기 위해서는 센서의 토양수분감응 특성을 알아야 한다. 특히 저가의 실용성 있는 센서로 현재 주목받고 있는 정전용량형 센서의 경우 토성과 염도에 의한 영향을 어떻게 극복할 것인가가 큰 관건이 되고 있다.

## 제 2 절 연구개발내용 및 범위

본 연구에서는 과수원 관비 최적화 시스템을 개발하기 위한 토양의 수분관리 프로그램의 개발과 관비시스템형성에 있어 센서의 토양학적 최적화를 주 연구내용으로 한다.

먼저 토양의 수분관리프로그램의 개발을 위하여 토양에서 수분이동 및 분포를 기술하는 모형을 구입하여 검토한 후 이를 토대로 최적의 수분관리 및 수분 상태 예측 모형을 다차원적으로 개발하는데 활용하는 등의 기술 검토 및 자료를 수집하여 모형 구성이 필요한 매개 변수 및 알고리즘을 구성한다. 과실생산과 건강한 수목 및 토양을 위한 최적의 관비조건이 선택되면 이 상태에서 수분의 이동 및 분포를 예측하는 프로그램을 개발한다. 프로그램 매개변수를 정량한 후 프로그램의 실용성을 검토한다.

제1 협동과제에서 시험용 센서의 시작품이 제작되고 이를 토양학적으로 보정하여 시장이 형성된 기존센서와 성능을 비교 평가한다. 또 관비가 이루어지는 과수원에서 과수를 중심으로 하는 수분의 실시간 모니터링을 통한 관비 시 수분 분포의 흐름을 파악한다.

## 제 3 절 연구개발결과

### 1. 토양수분 이동 및 분포 모형 개발

#### 가. 모형에 대한 일반기술

##### 1) 토양-작물-대기 연속계에서의 수분이동

토양-작물-대기 연속계에서 연속적으로 일어나는 수분 이동을 정량적으로 묘사하기 위해서는 먼저 토양에서의 수분 이동에 관한 물 수지 방정식

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} + \nabla \cdot \vec{q} = 0 \quad (2-1)$$

로부터 출발한다 (노와 김, 1998; 노 등, 2000). 여기서  $\theta$ 는 토양의 용적수분함량( $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ ),  $t$ 는 시간,  $\vec{q}$ 는 Darcy의 속도( $\text{cm}/\text{sec}$ )를 나타낸다. 작물의 뿌리가 수분을 흡수 하면 불포화 토양에서의 수분 이동에 영향을 주게 되며, 이를 모형화하는 방법은 식 (1)에서 이를 소멸항( $S, \text{s}^{-1}$ )으로 처리하는 것이다 (Coelho와 Or, 1996). 점적관개에 의한 물 공급항을  $Q (\text{cm}^3 \text{s}^{-1})$ 로 나타내면 식(1-1)은

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} + \nabla \cdot \vec{q} + S + Q = 0 \quad (2-2)$$

이 된다.

지표면을 기준면으로 지하가 양의 방향인  $z$  좌표계를 취하고, 인장응력을 받는 불포화대에서의 압력수두를  $-\psi$  (matric head, cm)로 나타내면 Darcy의 법칙은좌표계를 취하고, 인장응력을 받는 불포화대에서의 압력수두를  $-\psi$  (matric head, cm)로 나타내면 Darcy 법칙은

$$\vec{q} = K \nabla (\psi + z) \quad (2-3)$$

로 나타낼 수 있다 (노와 김, 1998; 노 등, 2000). 여기서  $K$ 는 불포화 수리전도도( $\text{cm s}^{-1}$ )를 나타내며, 보통의 불균질한 흙에서는 위치에 따라 그 크기와 방향성이 변하는 텐서(tensor)이지만, 본 연구에서와 같은 소규모의 영역에서 그 방향성은 측정이 매우 어려울 뿐 아니라 무시될 수 있는 정도이어서 스칼라이고 위치에 따라 변하지 않는 상수로 본다. 식 (2-3)을 식 (2-2)에 대입하여 불포화대에서의 수분이동을 묘사하는 식

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} + \nabla K \cdot \nabla \psi + K \nabla \cdot \nabla \psi + \nabla K \cdot \nabla z + K \nabla \cdot \nabla z + S + Q = 0 \quad (2-4)$$

을 얻는다. 건조한 토양의 간극에 물이 스며드는 경우(imbibition)와 물이 빠지고 공기가 들어올 때(drainage)의 수분보유도 함수는 수분이력현상을 보이지만 (Guymon, 1994), 본 연구에서는 그 대상이 주로 물이 계속해서 스며드는 경우에 대한 것이므로 이를 무시한다. 그러면, 수분함량  $\theta$  와  $\psi$  는 1:1로 대응하는 단변수 함수가 되고

$\frac{\partial \theta}{\partial t}$  는  $\frac{d\theta}{d\psi} \frac{\partial \psi}{\partial t}$  이 되므로, 식 (2-4)를 직교 좌표계로 다시 쓰면

$$\frac{d\theta}{d\psi} \frac{\partial \psi}{\partial t} + \frac{\partial K}{\partial x} \frac{\partial \psi}{\partial x} + \frac{\partial K}{\partial y} \frac{\partial \psi}{\partial y} + \frac{\partial K}{\partial z} \frac{\partial \psi}{\partial z} + K \left[ \frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial z^2} \right] + \frac{\partial K}{\partial z} + S + Q = 0 \quad (2-5)$$

이 된다. 이 식은 토양수분 이동의 물리적 의미가 보다 선명한 형태인

$$\frac{d\theta}{d\psi} \frac{\partial \psi}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left[ K \frac{\partial \psi}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ K \frac{\partial \psi}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[ K \left( \frac{\partial \psi}{\partial z} + 1 \right) \right] + S + Q = 0 \quad (2-6)$$

로도 쓸 수 있으며 (Bird 등, 1960), 여기에서 첫째 항은 통제용적(control volume)에 수분이 축적되는 속도를, 둘째와 셋째 항은 수평방향의 공간상의 flux 차이를, 그리고 넷째 항은 수직방향에서의 공간상의 흐름량 차이를 나타내며 괄호속의 +1은 중력에 의한 수분 이동을 나타낸다.

식 (2-6)의  $\frac{d\theta}{d\psi}$  (differential moisture capacity)를 알기 위해서는 수분보유도 함수를 알아야 하며, 이는 흙의 물리 화학적 성질과 수분함유 이력에 따라 다르다. 이에 대해서는 많은 연구가 있으며 본 연구에서는 그 중 가장 정확한 것으로 알려진 van Genuchten (1978)의 식

$$Se = \frac{1}{[1 + (\alpha\psi)^n]^{1-1/n}} \quad (2-7)$$

을 이용하여 얻는다. 여기서  $Se$  는 유효 포화도 (-)로  $\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r}$  를 나타내고,  $\theta_s$  는 토양의 포화 수분함량 ( $m^3 m^{-3}$ ),  $\theta_r$  은 잔존 수분함량 ( $m^3 m^{-3}$ )을 나타내며 일반적으로 수



분장력 1,500 kPa에서의 수분함량으로 대신하며(Bear, 1988),  $\alpha$  및  $n$  은 토양의 물리적 성질에 따른 상수로 식(2-7)이 토양의 수분-수압 측정치에 가장 부합하는 경우의 값들로 본다.

주어진 토양의 불포화 수리전도도는 토양의 수분함량에 따라서변하며, 또한 수분함량은 매트릭 수두에 의해서 나타낼 수 있으므로 불포화 수리전도도  $K$  는  $\psi$  의 함수로 나타낼 수 있다. 이에 대한 여러 연구들 중에서 가장 정확한 것으로 알려진 van Genuchten (1978)의 식

$$K(\psi) = \frac{K_s \left\{ 1 - (\alpha \psi)^{m \lambda} \left[ 1 + (\alpha \psi)^n \right]^m \right\}^2}{\left[ 1 + (\alpha \psi)^n \right]^{m \lambda}} \quad (2-8)$$

을 본 연구에 사용한다. 여기서  $K_s$  는 포화 수리전도도 ( $\text{cm s}^{-1}$ ),  $m = 1 - \frac{1}{n}$  이고,  $\lambda = 0.5$  를 사용한다 (Mualern, 1976). 불포화 수리전도도 또한 토양의 함수 이력에 의한 영향을 받으나, 그 정도는 미미하므로 이를 무시할 수 있다 (Vachaud와 Thony, 1971).

토양-작물-대기 연속계에서 토양과 작물 사이에서는 증산작용에 의해서, 그리고 토양과 대기 사이에서는 증발에 의해서 수분이 이동한다. 보통은 이들 두 가지 기구를 구분하지 않고 증발산으로 같이 보며, 직접 측정하거나 간접 추정법을 사용한다. 직접 측정법은 lysimeter, tank, pot, chamber 등을 이용하여 현장에서 직접 실측하는 것이고, 간접 추정법은 에너지 수지 또는 기상학적 인자들을 고려한 공식에 의하여 먼저 잠재 증발산량을 결정하고 여기에 작물계수 등을 적용하여 실제 증발산량을 산정하는 것이 보통이다. 잠재 증발산량의 추정에는 Penman, Blaney-Criddle, Thornthwaite, Jensen-Haise 등의 식이 있으나, 본 연구에서는 다음과 같이 변형된 Gauss 분포식에 기초하여 3월 ~ 10월 사이에 수원 지방에서의 실측자료에 최적화시킨 김과 고 (1977)의 경험식을 이용하여 잠재 증발산량을 산정한다.

$$ET_p = \text{Max}(ET_p) \exp \left[ -1.217 \left( \frac{t_i - t_{\max}}{\Delta t} \right)^2 \right] \quad (2-9)$$

여기서  $ET_p$  는 3월 1일 부터  $t_i$  일 후의 잠재 증발산량(mm/day),  $\Delta t$  는 3월 1일의 잠재

증발산량과 10월 31일의 잠재 증발산량은 같다고 보아  $t_i \leq t_{max}$  에서는  $\Delta t = (3월 1일과 t_{max} 사이의 기간)$ 이고,  $t_{max} \leq t_i$  에서는  $\Delta t = (t_{max}와 10월 31일 사이의 기간)$ 을 나타낸다. 북반구에서  $t_{max}$ 는 7월 20일 경으로 본 연구에서는 7월 25일을 택한다. 김과 고 (1977)의 연구 결과에서 알 수 있듯이, 식 (2-9)는 실측 자료를 잘 대표하고 있으며, Penman과 Jensen-Haise의 추정식들과도 잘 부합한다.

잠재 증발산량으로부터 실제 증발산량을 산정하는데는 작물계수나 토양 수분 계수를 이용하는 방법 (김과 고, 1977)과 작물 및 계절에 따른 지수를 이용하는 방법 (Miller와 Donahue, 1990) 등이 있다. Essery와 Wilcock (1990)은 많은 측정 자료에 기초하여 보통의 경작 조건에서는 실제 증발산량이 잠재 증발산량과 실질적으로 같다고 결론지은 바 있다. 그러나, Feddes 등 (1976)에 의하면 뿌리의 흡수능력 즉, 증산율은 토양의 수분함량에 의해서도 영향을 받으므로 본 연구에서는 노와 김 (1998)에 서와 같이 이를 고려하여 실제 증산량을 구한다.

지표면에서의 수분 증발은 대기중의 습도와 지표면에서의 수리전도도, 그리고 지표면 부근에서 수분 potential 경사도 등에 의해 크게 영향받는다. 건조한 날씨에서는 지표면에서의 수분함량 감소로 인한 수리전도도 감소에 의해서, 그리고 비올 때와 같이 대기중의 상대습도가 매우 높은 경우에는 지표면 부근의 수분 potential 경사도가 감소함에 의해서 지면 증발이 제한된다 (노, 1989). 이러한 현상을 수식으로 묘사하기 위해서는 먼저 지표면에서의 잠재 증발량을 계산하여야 한다. 지표면에서의 잠재 증발량  $E_p$ 는 Ritchie (1972)의 이론에 근거하여 수원 지방에서 실측한 결과를 바탕으로 노 (1989)가 제안한 경험식 ( $r=0.993$ )

$$E_p = 0.517 \cdot ET_p \quad (2-10)$$

을 사용한다. 대기중의 상대습도와 평형을 이루는 지표면에서의 수분 potential은

$$\psi_0 = -\frac{RT}{Mg} \ln(f) \quad (2-11)$$

로 계산되며, 여기서  $R$ 은 기체상수( $8.3143 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$ ),  $T$ 는 지면 부근의 절대 온도 (K),  $M$ 은 물의 분자량( $18 \text{ g mol}^{-1}$ ),  $g$ 는 중력 가속도( $980 \text{ cm s}^{-2}$ ), 그리고  $f$ 는 공기

의 상대 습도를 나타낸다 (Feddes 등, 1976). 이 식으로 계산된 지면에서의 수분 potential이 토양 내부의 수분 potential보다 작을 경우 지면 증발이 발생한다. 이와 같이 계산된 지면 증발율은 식(2-10)으로 계산된 잠재 지면 증발율을 넘지 않아야 한다. 점적관개에 의해 물이 계속 공급될 경우 수분 공급 지점 부근의 지면 증발은 식(2-10)에 의해 제한되므로 잉여의 공급량에 의해 토양내의 습윤 영역은 점차 확대될 수 있다.

## 2) 뿌리의 분포 및 성장과 물 흡수

뿌리의 분포 및 성장, 그리고 물 흡수에 관한 이론도 주로 노와 김 (1998) 의 연구 성과를 이용하며 여기에서 중첩되는 내용은 그 근간만 간단히 설명한다. 뿌리의 성장에 관한 여러 이론 중에서 Borg와 Grimes (1986) 가 많은 작물에 대한 문헌상의 실험 결과들을 토대로 제시한 이론을 본 연구에 이용하며, 이는 뿌리의 성장이 작물의 종류에 상관없이 일정한 경향을 보이며 적당한 환경에서의 뿌리의 성장 깊이는

$$Z_m = Z_T [0.5 + 0.5 \sin \{3.03(t/t_T) - 1.47\}] \quad (2-12)$$

와 같이 sigmoid 형태로 나타낼 수 있다고 한다. 여기서  $t_T$ 는 작물이 완전히 성장하는데 필요한 기간(year),  $Z_m$ 은 시간  $t$ (year)에서의 뿌리 깊이 (cm),  $Z_T$ 는 작물이 최대로 자랐을 때의 즉,  $t=t_T$ (year)에서의 최대 뿌리 깊이(cm)를 나타낸다. 뿌리의 횡적 성장은 깊이 성장에 비례하여 전체 생육 기간 중 근권의 형상은 일정하다고 가정하고, Michael (1978) 의 관찰을 도입하여 이를 회전 타원체로 본다.

작물 뿌리에 의한 물 흡수를 연구하는 여러 가지 방법론 (Corapcioglu, 1992) 중에 서 본 연구에서는 Gardner (1960) 와 Feddes 등 (1976) 의 접근법을 적용한다. 이는 하나 하나의 뿌리에 구애받지 않고, 흙 속에서 뿌리가 균일하게 분포되어 있어서 물을 균일하게 흡수한다고 보는 것으로 Richards 방정식과 연계해서 불포화대에서의 물의 흐름을 묘사하는데 적합하다. 또한 Feddes 등 (1976) 의 여러 가지 식물에 대한 연구에 의하면 보통 식물의 위조점(wilting point)은 매트릭 수두로 -15,000 cm 이고 토양 수분 함량이 매트릭 수두로 -400 cm 이하로 떨어질 경우 작물의 생육에 지장이 있으며 그 정도는 매트릭 수두에 비례하여 선형으로 묘사할 수 있다. 이를 식으로 나

타내면 매트릭 수두가 0 에서 -400cm 까지는  $S = S_{\max}$  로 일정하고, -400 cm에서 -15,000 cm 까지는  $S$  가  $S_{\max}$  로부터 0 까지 선형으로 감소하며

$$S = \frac{S_{\max}}{14,600}(15,000 - \psi) \quad (2-13)$$

이 된다. 이 식에 포함된  $S_{\max}$  는 증산율의 함수이며, 지표면적 기준의 증산율을 근간 토양의 부피를 기준한 물 흡수율에 등치시켜

$$S_{\max} = \frac{3 T_h}{2 Z_m} \quad (2-14)$$

를 얻으며, 여기서  $T_h$  는 잠재 증발산율에서 잠재 지면증발율을 제외한 나머지 즉, 지면을 기준한 잠재 증산율( $\text{mm h}^{-1}$ )을 나타낸다 (노와 김, 1998; 노 등, 2000).

비교적 장시간 동안 관개할 경우에는 평균 잠재 증산율을 적용하여 하루중의 증산율 변화를 무시하지만, 증산율은 하루 동안에도 시간에 따라 변하므로 단시간 동안 관개하는 경우에는 이를 고려한다. 하루중의 증산율 변화에 대한 연구는 Gardner (1968), Cowan (1965), 그리고 Rose 등 (1976) 이 수행한 바 있고, 본 연구에서는 이들이 제안한 삼각함수 모델을 Ritchie(1973)의 실험 결과에 적용하여 하루 중 잠재 증산율 변화를 묘사하는 식

$$T_h = T_{h,\max} \left[ \frac{1 - \cos \frac{2\pi t}{24}}{2} \right]^2 \quad (2-15)$$

를 얻어서 사용한다. 이 식과 Ritchie (1973) 의 실험 결과는 노와 김 (1998) 에 비교되어 있으며 제안된 식(2-15)가 실험 결과를 잘 대표하는 것을 알 수 있다. 식 (2-15)에서  $T_{h,\max}$  는 한 낮의 시간당 최대 잠재 증산율( $\text{mm h}^{-1}$ )이고,  $t$  는 하루 중의 시간(0 ~ 24)을 나타낸다. 하루 동안의 잠재 증산량  $T_d$  (mm)는 식 (2-15)를 0에서 24까지 적분하여  $T_d = 9.0T_{h,\max}$  을 얻으며 (노와 김, 1998), 이를 이용하여 일일 증산량으로부터

하루 중 시간당 최대 증산율을 구할 수 있다. 하루동안의 잠재 증산량(mm)은 식 (2-9)로부터 계산한 잠재 증발산량(mm)으로부터 식 (2-10)으로 계산한 잠재 증발량(mm)을 제외한 나머지로 본다.

### 3) 수리모형의 해

개발된 모형에 이용한 지배 방정식은 강한 비선형 특성을 가지므로 해석적인 방법이 아닌 수치해석적인 방법에 의해 그 해를 구하였다. 적용한 수치해석법은 음함수 유한차분법(implicit finite difference method)인 Crank-Nicolson scheme (Lapidus와 Pinder, 1982)으로 전개하여 Gauss 소거법의 하나인 Gauss-Seidel법에 의해 그 해를 구하였다.

#### 가) 원통좌표계를 사용한 모형

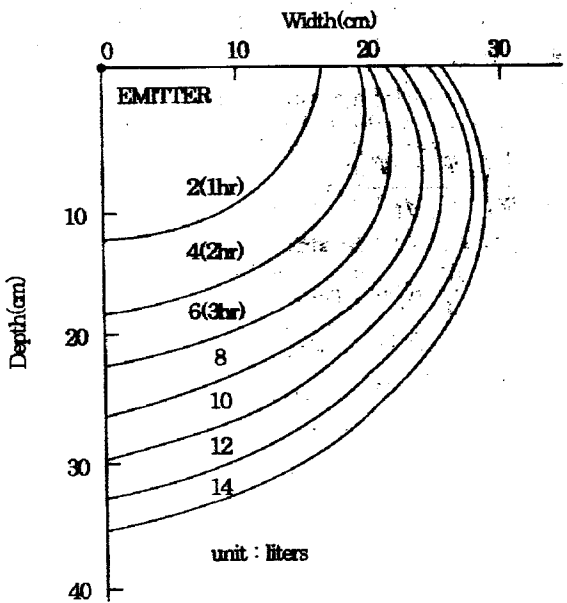


그림 2-1. 유량 = 2 L/hr의 점적관수시 wetting pattern.

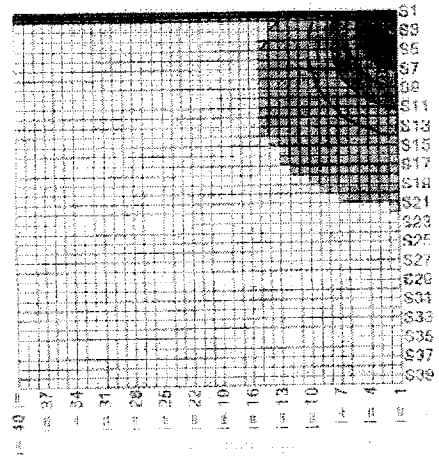
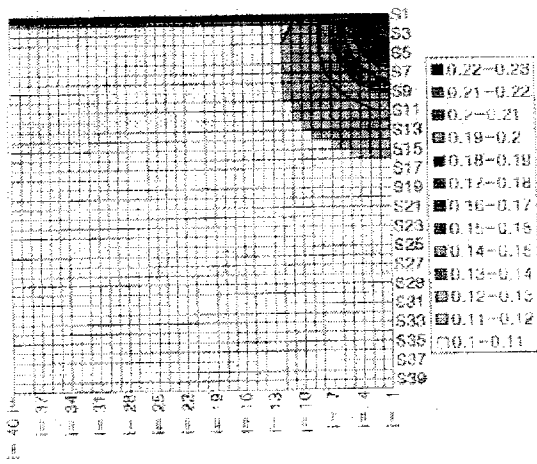


그림 5-2. 유량=2L/hr로 표면으로부터 점적관수 (a) 1시간 (b) 2시간에서 수분함량분포예측.

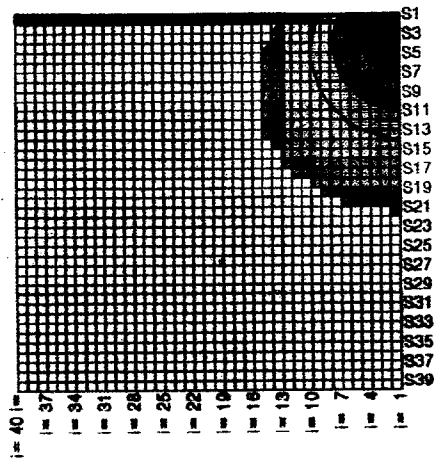
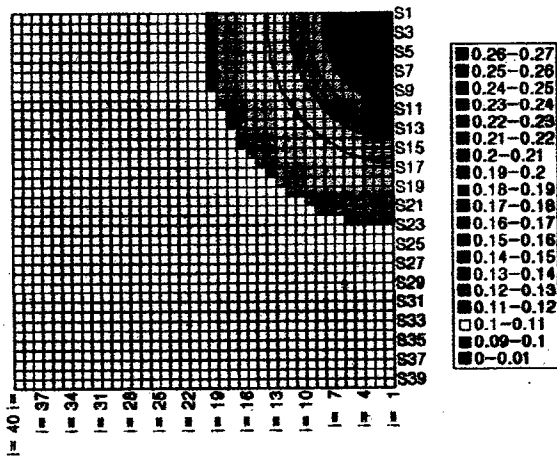


그림 5-3. 증발만이 일어나는 유량=2L/hr로 표면으로부터 점적관수 (a) 1시간 (b) 2시간에서 수분함량분포예측.

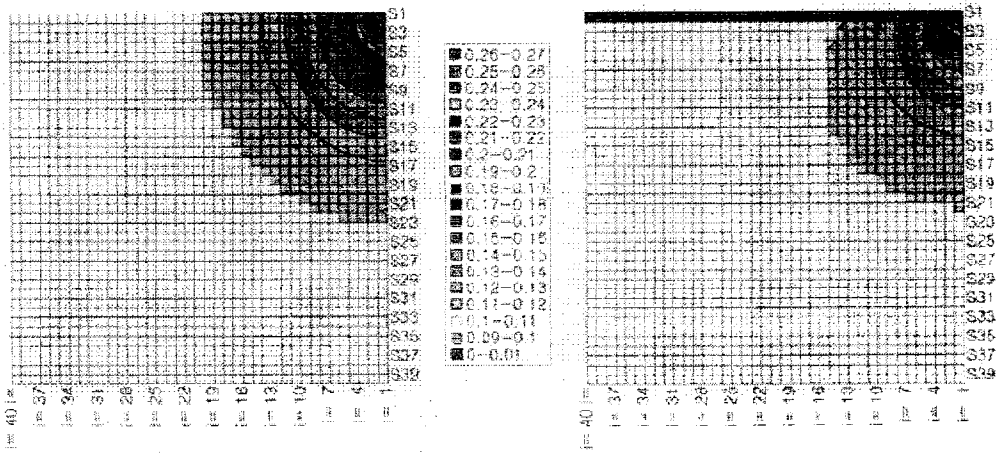


그림 2-4. 근권에서 수분함량분포에 증발의 효과.

(a) 증발산 없음 (b) 증발만 있음. (etpmx=5mm/day, in 2 hours with 2L/hr)

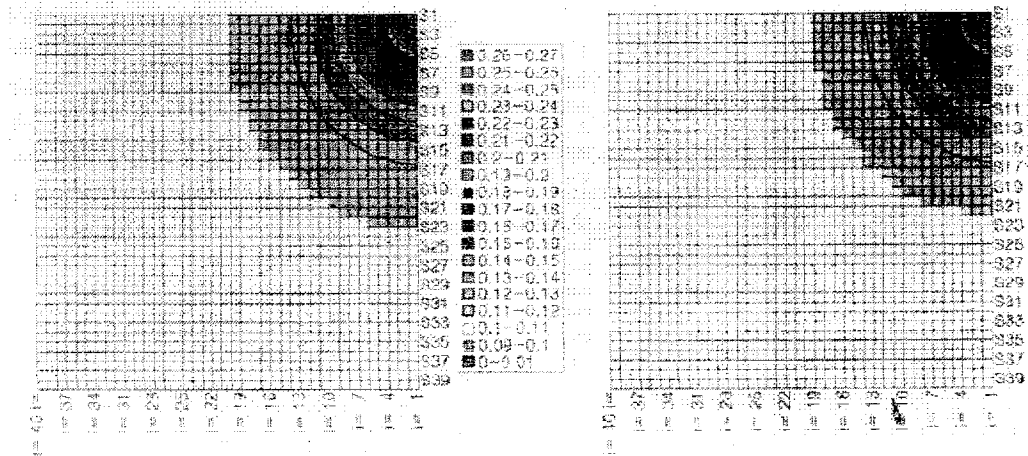


그림 2-5. 근권에서 수분함량분포에 대한 증산의 효과

(a) 증발산 없음, (b) 증산만 있음 (etpmx=5mm/day, in 2 hours with 2L/hr of flow rate)

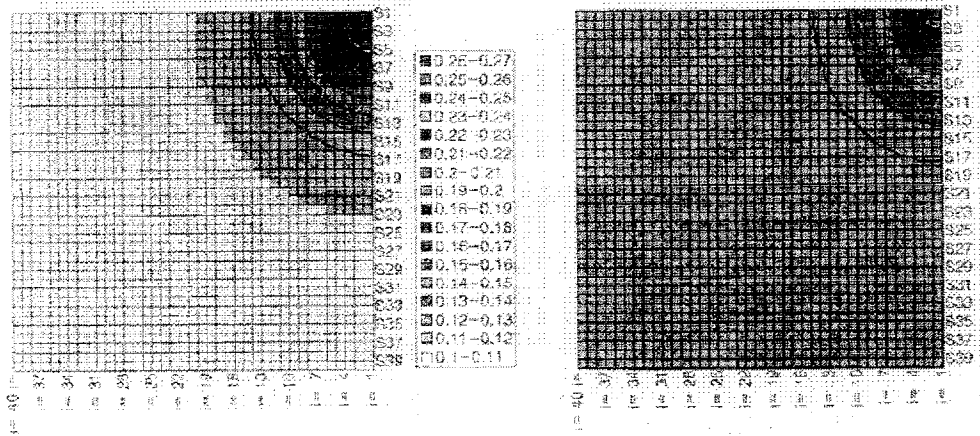


그림 2-6. 2L/hr의 관수율로 토양수분분포에 대한 수리전도도의 효과, (a)  $K_s=0.00126\text{cm/sec}$  and (b)  $K_s=0.00246\text{cm/sec}$

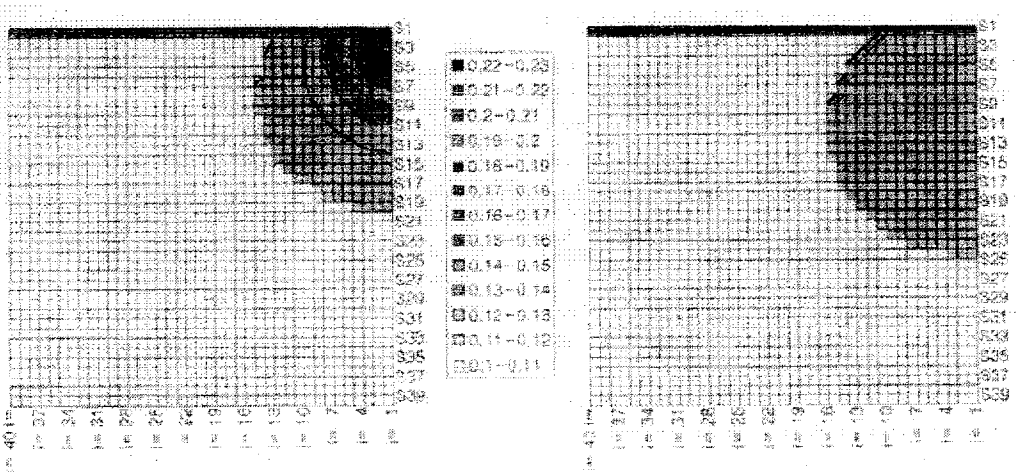


그림 2-7. 증발산이 있는 상태에서 점적관개 2시간 후 2시간동안 토양수분재분포 (a) 점적관개 2시간동안 (b) 점적관개 2시간 후 관수가 없는 2시간동안 (유속 2L/hr,  $e_{\text{pmx}}=5\text{mm/day}$ )



나) 직교좌표계를 사용한 모형

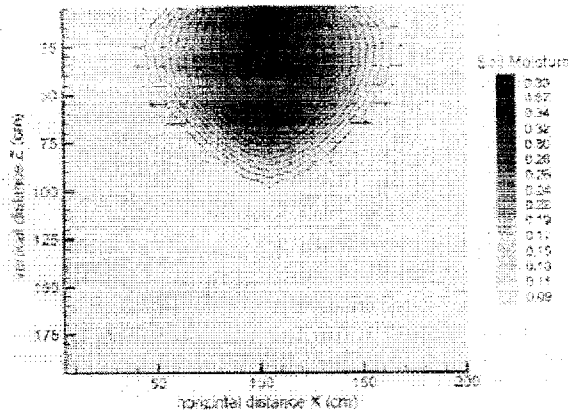


그림 2-8. 유속 1L/hr의 점적기로부터 4일 관수 후 wetting front에서 추정된 토양수분단면과 유속분포

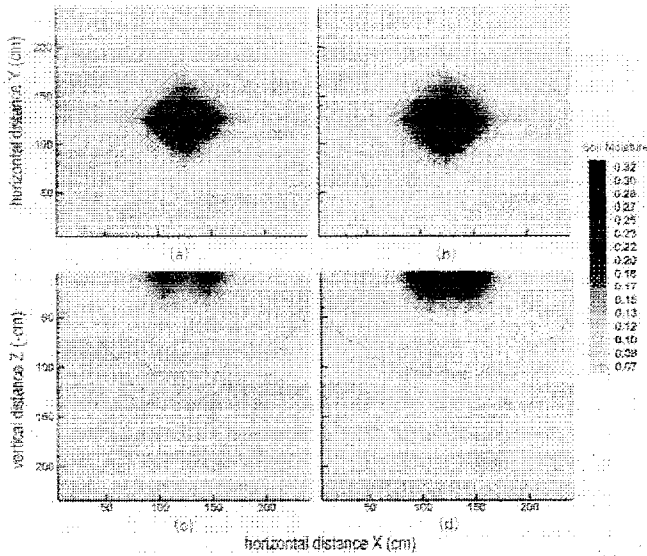


그림 2-9. 나무로부터 20cm 떨어진 지점에 위치한 4개 점적기로 관수된 젖은 토양수분영역 : (a) 1일, (b) 2일, (c) 1일에서 수직단면, (d) 2일에서 수직단면.

## 나. 수리변수 정량화

### 1) 토양수분특성곡선

토양의 대표적 수리특성은 토양수분특성곡선과 토양수리전도도함수이다. 토양수분은 토양생물에 수분을 공급하고 토양 내 물질이동의 매개로서 작용한다. 토양수분보유곡선은 토양수분과 토양수분장력의 관계로 토양수리성질 특성화의 기초적 부분이다. 그 관계는 다양한 명명들로 문헌에서 나타나는데 수분보유함수(water retention function), 수분특성(moisture characteristics), 모세관 압력-포화 곡선(capillary pressure-saturation curve)등이다. 그 함수는 용량요인(capacity factor)인 수분함량과 강도요인(intensity factor)인 토양수분에너지와의 관계이다.

토양수분은 토양용액, 또는 액상이라고도 하며 무게, 부피, 또는 포화정도로 나타낼 수 있다. 토양단면에서 수분흐름분석을 위해서는 부피기준이 가장 유용하다. 토양수분포텐셜은 매트릭 압력수두라고도 하며 불포화 토양에서 음의 값이다. 흡인력과 장력은 매트릭 압력수두와 부호가 반대이므로 불포화 토양에서 양의 값을 보인다. 단위질량 당 에너지, 단위부피 당 에너지(압력), 또는 단위무게 당 에너지(길이)로 나타낼 수 있다. 압력수두는 주어진 밀도의 유체칼럼의 길이로 표현할 수 있다. 그 유체는 주로 토양수분계의 온도에서는 물이다.

토양수분보유함수는 주로 토성 또는 토양의 입자분포, 입자구조 또는 배열에 의존한다. 유기물함량과 용액의 구성 또한 중요한 역할을 한다. 유기물은 친수성이기 때문에 보유곡선에 직접적인 영향을 주고 유기물의 존재로 인한 토양구조 변화로 간접적인 영향을 준다. 팽창성 점토를 포함하는 토양에서 토양의 구성과 농도는 주어진 압력수두에서 보유된 물의 양에 영향을 준다.

토양수분보유함수의 측정은 포장에서 직접 측정하는 방법과 실험실에서 측정하는 방법이 있다. 포장 측정법은 토양수분장력계와 토양수분측정기를 이용하여 측정한다. 토양수분특성곡선은 실험실 측정법과 현장에서 직접 측정하는 포장측정법이 둘 다 존재한다. 그러나 포장 측정법은 시간소비가적이며 토양에 따라서는 포장에서 측정하는 것이 거의 불가능할 때도 있어 실험실 측정법이 주로 쓰인다. 다음 표는 주요 밭토양에 대해 토성별로 토양수분특성곡선을 측정할 것이다.

표 2-1. 토성별 토양수분특성곡선

토성	각 압력(bar)에서 평형수분함량(w/w%)								Sand (%)	Silt (%)	Clay (%)	유기물함량 (%)
	0.01	0.2	0.33	0.5	1	2	5	15				
S1	10.0	7.5	6.4	6.0	4.8	3.8	3.2	2.5	87.3	10.7	2.0	0.1
S2	8.6	8.0	7.4	7.1	6.6	5.8	4.8	3.6	95.2	2.4	2.4	0.2
S3	6.0	4.9	4.1	3.3	3.0	2.6	2.1	1.6	91.6	6.1	2.3	0.2
LS1	16.2	13.5	11.9	11.0	9.9	8.3	6.4	5.0	80.2	12.7	7.1	1.0
LS2	11.9	10.1	9.6	8.6	7.4	6.9	5.4	4.6	84.3	8.6	7.1	0.8
LS3	10.1	8.5	8.0	7.7	6.7	6.3	5.1	4.0	84.4	9.5	6.1	0.6
SL1	16.8	14.6	12.6	11.5	9.4	8.1	6.4	5.0	73.1	19.9	7.0	0.6
SL2	20.2	19.6	16.3	15.2	11.8	9.4	7.8	5.3	59.6	30.2	10.2	0.3
SL3	26.1	22.9	20.1	17.8	14.6	11.9	9.0	6.3	54.4	34.4	11.2	0.6
L1	27.7	24.0	21.2	18.0	14.7	11.6	9.3	6.7	50.4	37.6	12.0	0.5
L2	28.0	23.3	21.4	19.5	17.3	15.6	12.8	10.6	42.0	39.6	18.4	2.3
L3	32.5	28.7	26.5	24.9	21.6	19.2	16.5	14.0	34.1	40.2	25.7	1.5
SCL1	26.9	22.5	20.0	18.2	16.3	15.1	13.0	10.0	48.9	29.2	20.9	0.6
SCL2	26.1	22.6	19.6	17.7	16.2	14.2	12.1	9.8	51.9	25.7	22.4	0.5
SCL3	26.4	23.7	21.0	19.9	17.4	15.5	13.4	11.1	55.7	24.2	20.4	0.3
SiL1	36.8	33.1	30.5	28.4	25.0	21.8	16.7	11.5	7.6	70.2	22.2	2.1
SiL2	30.2	27.4	25.4	23.6	21.8	19.2	15.8	11.5	7.1	69.1	23.8	1.0
SiL3	34.6	29.4	25.5	23.8	20.0	17.0	12.3	9.0	27.2	56.3	16.5	1.7
CL1	29.4	24.5	22.2	20.6	17.5	16.2	13.7	11.6	44.0	27.8	28.2	1.0
CL2	29.1	25.5	22.7	21.4	19.1	16.7	14.5	12.0	30.9	37.1	32.0	0.2
CL3	29.5	26.5	23.7	22.3	19.8	17.5	15.4	13.2	28.3	35.7	36.0	0.4
SiCL1	36.2	32.4	29.7	27.7	25.3	22.3	19.3	15.0	7.2	65.7	27.1	1.8
SiCL2	37.4	32.9	30.5	28.5	26.1	24.1	20.6	17.2	8.8	57.2	34.0	1.9
SiCL3	36.6	32.8	30.0	28.9	26.2	24.2	21.8	19.0	14.5	50.6	34.9	2.7
SiC1	39.2	34.5	32.6	31.0	28.9	26.6	24.5	22.3	12.4	57.5	40.1	1.5
SiC2	44.4	40.1	36.6	34.0	30.4	27.2	23.1	19.7	13.4	42.5	44.1	3.0
SiC3	38.7	35.0	32.7	31.1	29.0	27.3	25.1	22.8	10.1	45.0	44.9	3.6

S:사토, SL:사양토, L:양토, SCL:사질식양토, SiL:실트질양토, CL:식양토, SiCL:실트질 식양토, SiC:실트질식토

2) 토양수리전도도 함수

토양수분의 흐름방정식은 Richards equation으로 표현된다.

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[ K(\theta) \left( \frac{\partial h}{\partial z} + 1 \right) \right] \quad (2-16)$$

이 식은 Darcian 수분이동 방정식과 수분질량보존법칙의 결합으로부터 유도되었다. 좌항은 시간에 따른 매트릭 수두 또는 수분함량의 미분으로 나타낼 수 있는데 그 양자의 관계는 differential water capacity,  $C(h) = \frac{\partial \theta}{\partial h}$ 에 의해 결정된다.

$$C(h) \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[ K(h) \left( \frac{\partial h}{\partial z} + 1 \right) \right] \quad (2-17)$$

이 식은 differential water capacity를 알고 있을 때 적용 가능하다. Unsaturated condition에서 Richard's eq.은 Parabolic differential equation의 형태로 나타나며 Saturated condition에서는 Elliptic differential equation ( $C(h) = 0$ )로 나타난다. 이 식의 분석해는 특정 경계조건에서만 존재하여 일반적 흐름 상황에 대한 해는 수치해로 풀여진다.

Richard's eq.을 풀기 위해서는 토양수리전도도함수  $K(\theta)$ 와 토양수분보유특성  $C(h)$ 이 필요하다. 그런데 포장상태에서 토양수리전도도함수의 측정은 정확성을 가지기 매우 어렵고 시간 소비적이며 비용도 크다. 따라서 토양의 수분보유특성에서 유도되는 토양공극분포모형을 활용 등으로 이론적 모형식을 만들어 간접적으로 토양수리전도도함수를 구하는 방법이 연구되어져 왔다.

불포화 토양의 수리전도도와 토양수분보유특성곡선으로부터 측정된 유효공극의 크기분포의 관계로 수리전도도를 예측하는 방법이 연구되어 왔다. Childs와 Collis-George(1950), Marshall(1958), Millington과 Quirk(1959) 등이 대표적이다. 이 방법은 토양이 공간 내에 불규칙적으로 분포되어 있는 여러 가지 서로 다른 반지름 크기의 공극들을 함유한다는 가정과 토양 입자의 이웃하는 면이나 부분이 서로 접촉했을 때 그 면을 통하는 전반적인 수리전도성은 통계적으로는 서로 연결된 공극쌍의 수와 기하학적으로는 그들의 배열에 따라 좌우된다는 가정에 근거를 두고 있다. 서로 연결된 공극쌍의 전도성은 두 공극 사이의 좁은 통로나 잘록한 목에 의하여 결정된다. 서로 접촉되어 있지 않은 공극들과 축로의 공극들은 무시된다.

일정한 체적에 대하여 토양단면을 통과하는 공극통로의 수  $N$ 은 공극의 단면적에 역비례한다. 즉  $N \propto 1/r^2$ 이 성립되는데 여기서  $r$ 은 공극반지름이다. Poiseuille의 법칙에 의하면 각공극을 통과하여 흐르는 유출량  $Q$ 는 공극반지름의 4제곱에 비례한

다. 즉,  $Q \propto r^4$ 이다. 토양 한 면의 전체전도도는 공극의 종류가 여러 가지이기 때문에 N과 Q 두 가지 곱에 비례하여야 할 것이다.  $K \propto NQ \propto r^2$ .

따라서 공극분포함수가 다공성매체를 통해 같다면 공극군들의 범위는 0으로 접근할 것이고 수리전도도k를 나타내는 식이 된다

### 가) Campbell(1974)의 모형

Campbell(1974)는 공극크기를 이용하여 불포화수리전도도를 구한 Childs(1969)와 Hillel의 실험식을 이용하였다. 다음은 Childs(1969)의 식이다.

$$k = M \int_0^R \int_0^R r^2 F(r) dr F(r) dr \quad (2-18)$$

여기서 r은 공극반지름이고 R은 최대공극지름이며 M은 결정되어야 할 상수이다. F(r)은 공극크기 분포함수로 총공극률 f는 다음과 같이 정의된다.

$$f = \int_0^\infty F(r) dr \quad (2-19)$$

공극 반지름은 수분보유 함수와 모세관 상승 식에 의해 수분함량과 관여한다. Hillel의 수분함량과 수분포텐셜간의 실험식은 다음과 같다.

$$h = h_a(\theta/\theta_s)^{-b} \quad (2-20)$$

여기서 h는 수분함량  $\theta$ 에서 수분포텐셜이고  $h_a$ 는 포화수분함량  $\theta_s$ 에서의 수분 포텐셜로 air entry pressure이다.

따라서 Campbell(1974)는 식(2-18)과 (2-20), 모세관 상승 식을 이용하여 다음과 같은 간단한 식으로 수분함량과 불포화 수리전도도의 관계를 나타내었다.

$$K(\theta) = K_s \left( \frac{\theta}{\theta_s} \right)^{2b+3} \quad (2-21)$$

이 식은 간단한 형태로 표현되는 장점으로 인해 Chen and Wagnet(1992) 등에 의해 대공극과 토양매트릭스로 나누어지는 두 영역의 토양수분이동을 설명하는데 사용되어 졌다.

나) van Genuchten(1980)의 모형식

van Genuchten(1980)은 불포화수리전도도 유도식으로 Mualem(1976)의 이론모형을 이용하였다.

$$K_r = \Theta^{1/2} \left[ \int_0^\Theta \frac{1}{h(x)} dx / \int_0^1 \frac{1}{h(x)} dx \right]^2 \quad (2-22)$$

$h(x)$ 는 압력수두  $\Theta = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r}$  는 상대수분함량으로 여기서  $\theta_r$ 은 잔여수분함량 (residue water content),  $\theta_s$ 는 포화수분함량(saturated water content)이다. Mualem(1976)은 실제 수분흐름의 분포에 관여하는 공극은 정확히 묘사가 불가능하므로 두 가지 간단한 가정을 사용하였다. 투수공극 사이의 bypass water가 없고 공극배치가 길이가 그들의 공극반지름에 비례하는 모세관 요소의 쌍으로 대체할 수 있다는 것이다. 위 식에서 우항의  $\Theta$ 의 지수인 1/2은 성질이 다른 여러 토양으로 모형을 적용시키고 평균오차의 제곱이 가장 작아지는 값으로 일반적인 양에서 최적값으로 알려져 있다.

van Genuchten(1980)은 토양수분함량과 토양포텐셜의 관계식을 다음식을 이용하였다.

$$\Theta = \left[ \frac{1}{1 + (ah)^n} \right]^m \quad (2-23)$$

이 식을 Mualem(1976) 모형에 대입하여 closed-forms 으로 구한 해가 다음은 다음과 같다.

$$K_r(\theta) = \theta^{1/2} [1 - (1 - \theta^{1/m})^m]^2 \quad (2-24)$$

여기서  $\alpha$ ,  $n$ ,  $m$ 은 변수로  $m=1-1/n$ ,  $0 < m < 1$ 의 관계가 있다.  $K_r$ 는  $K/K_s$ 로 상대수리전도도이다.

van Genuchten(1980) 모형은  $m$ ,  $n$  값에 대해 다른 제한들이 가능하지만, 이 중  $m=1-1/n$  제한조건이 Mualem의 불포화수리전도도 함수와 연결될 수 있다.

#### 다) 수리전도도함수의 추정

① 실측한 토양수분보유곡선을 식(2-20) 또는 식(2-23)을 이용하여 fitting 하여 각각의 변수를 결정한다. fitting은 소프트웨어(EXCEL, ORIGIN41, CoPlot 등)를 이용하여 할 수 있고 van Genuchten(1980) 모형의 경우 U.S. Salinity Lab.에서 개발된 RETC 모델을 적용할 수 있다.

② 변수가 결정되면 식(2-21) 또는 식(2-24)에 대입하여 불포화 수리전도도함수를 구한다. 여기서 포화수리전도도는 보통 실측되거나 van Genuchten(1980) 모형의 RETC 모델을 이용할 경우 추정될 수 있다.

#### 라) 토양수분특성곡선을 이용한 불포화수리전도도 함수의 추정의 예

다음 표와 같은 물리학적 성질을 가진 한 토양단면의 층위별 토양의 수분특성곡선은 그림 2-10와 같았다.

표 2-2. The physical properties of Ap1, B1, and C horizons.

Horizon	Bulk Density (Mg m <sup>-3</sup> )	*Organic Matter (g kg <sup>-1</sup> )	Gravel (kg kg <sup>-1</sup> )	**Particle size distribution (%)			Textural class	Saturated hydraulic conductivity (cm hr <sup>-1</sup> )
				Sand	Silt	Clay		
Ap1	1.35	15.6	0.11	54.40	22.51	23.09	SCL	2.00
B1	1.54	1.3	0.10	58.58	15.21	26.21	SCL	0.27
C	1.32	0.7	0.15	73.26	19.37	7.37	SL	5.24

\*Organic matter : Walkley-Black method

\*\*Particle size distribution : Pipet method

이 토양수분특성곡선을 Campbell 모형 식2-20을 이용하여 fitting 한 후 변수  $b$ ,  $h_a$ 을 구한 후 식(2-21)에 대입하여 그림 2-11와 같은 토양수리전도도 함수를 얻었다.

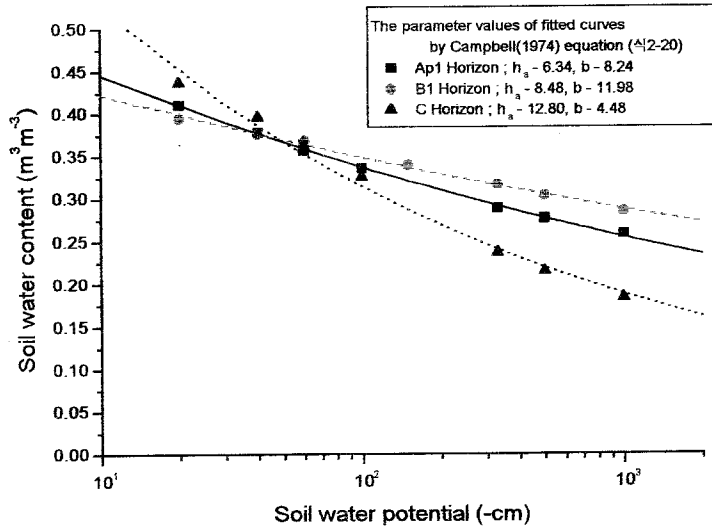


그림 2-10. Ap1과 B1, C층(표2-2)의 토양수분특성곡선

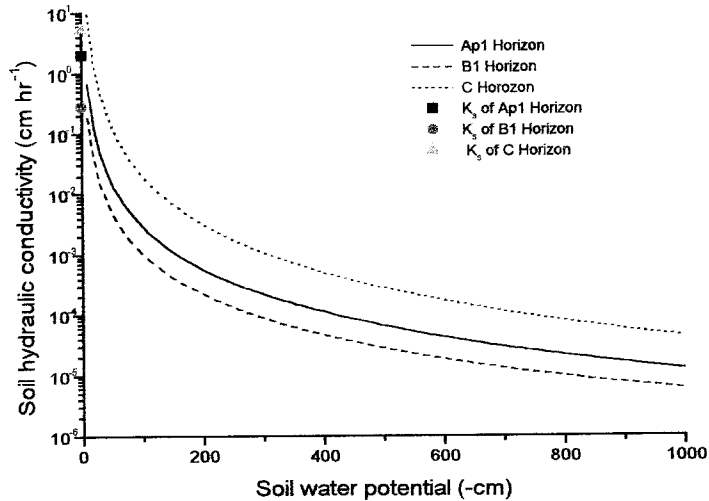


그림 2-11. Ap1과 B1, C층(표2-2 참조)의 토양수리전도도함수



## 2. 최적 관수점의 설정

### 가. 최적 관수점의 설정

사과나무에 관해 최적 관수점을 설정하기 위하여 우선 토양수분 영역을 달리한 실험을 통해 물소모량을 비가림시설 아래 사양토를 이용한 라이시미터 실험을 통해 정량하였다. 내경 1.2 m, 깊이 1.0 m의 라이시미터에 토양을 전용적밀도  $1.3 \text{ Mg m}^{-3}$ 로 채진한 후 2년생 사과나무를 심고 토양수분 관리를 달리하여 수체의 생육 및 물소모량을 조사하였다. 실험기간 동안 사과나무는 관수점을 -50 (IR50) 및 -80 (IR80) kPa로 설정한 점적관수 및 깊이 0.45 m에 자유수면을 설치한 처리 (WT45) 에서 각각 재배되었다. 각각의 라이시미터에 토양수분장력계를 깊이 0.15 m로 부터 0.15 m 간격으로 3개 설치하여 토양수분 영역을 관리하고, 이 신호를 압전소자를 통해 전기신호로 송출하여 점적관개를 제어하였다. 자유수면 처리는 Mariotte bottle 원리를 이용해 실행하였다. 각각의 라이시미터에 공급한 관수량은 유량계를 통해 측정하는 반면, 자유수면 처리에 공급된 물의 양은 병의 물높이의 차이로 측정하였다. 그리고, 사과나무의 물소모량은 Clark 등 (1996) 및 Chalmers 등 (1992)이 했던 바와 같이 물수지방정식을 적용하여 추정하였다. 여기에 설치한 자동 관수 시스템은 본 연구에서 제안한 모형을 적용하여 구성하였다. 처리별 물소모량은 IR50 처리에서 약 43 cm, IR80 처리에서 약 41 cm, WT45 처리에서 약 53 cm로 두 점적관개 처리간 차이가 없었으나, 평균 신초생장량이 IR50 처리에서 유의하게 많았다. 이로부터 관수점 -50 kPa이 적절하다고 판단하였다.

### 나. 최적 관수점 검증실험

앞에서 설정한 적정 관수점으로 대형 포트에 1996년에 사과나무 묘목을 재식하여 2000년까지 비가림 시설하에서 관비실험을 수행하였으며, 그 동안의 사과나무의 생육, 수량, 토양의 수분 및 양분 상태를 조사하여 그 타당성을 검증할 수 있었다. 비가림 시설하에서 질소관비 실험(제3장 참조)을 한 경우 처리 질소 농도 (17, 34 및  $67 \text{ mg L}^{-1}$ ) 에 관계없이 토양수분 영역이 근권에서 변하는 것을 확인하였다. 특히, 일반 표면 시비의 경우 해마다 같은 양의 비료가 사용되기 때문에 염류집적 현상이 계속 관찰되나, 토양수분 상태에 따라 관비가 이루어지는 경우 초기에 관찰된 양분 집적 현상이

시간이 지나면서 경감되는 것을 관찰할 수 있었다. 이는 관비가 기상 인자 등에 의한 증산과 이에 따른 뿌리 흡수 및 토양내 재분포 과정을 통해 결정되는 토양의 수분상태에 따라 제어되기 때문에, 수체의 생육상태에 따라 그 관비량이 차이가 나는 현상과 밀접하다 (제3장 참조).

#### 다. 최적 관수점 적용실험

비가림 시설 옆에 있는 야외 포장에 사과나무 묘목을 1999년에 심은 후 그 해와 2000년까지 질소농도 ( $34$  및  $67 \text{ mg L}^{-1}$ ) 를 달리한 관비 처리와 표면시비 처리에 같은 관수점으로 점적관개한 처리를 두어 현장 적용실험을 수행하였다(제3장 참조).

### 3. 점적 자동관비동안 수분이동분포모니터링 및 모형 예측치와의 비교

#### 가. 시험토양 특성 및 점적기 및 TDR probe 매설

주당 점적기 하나로 관비되는 1년생 사과 과수원에서 토양수분함량 22.8%를 적정 관수점으로 하여 관비가 이루어질 때 수분 분포를 모니터링하였다. 이 과수원은 요소 태질소 34ppm(N1구)와 67ppm(N2구)로 나누어 관비가 시행되었고 각각의 구에서 TDR을 이용하여 수분함량을 실시간 모니터링하였다.

토양시료는 호를 파서 채취하는 방법과 core sampling을 병행했으며 N1, N2구로 나누어 깊이별[0-20cm(깊이1), 20-40cm(깊이2), 40-60cm(깊이3), 60-80cm(깊이4)]로 분석하였다. 토성이 모두 사양토이나 점토함량이 15%내외로 존재하였다. 특히 용적밀도가 1.5이상으로 매우 크게 나타났고 N1구 40 - 60 cm, 60 - 80 cm 깊이에서는 1.8 이상으로 매우 높았다. 토양의 유기물함량과 질소 함량은 낮은 값을 나타내었으나 인산의 경우 N2에서 매우 높게 나타났다.

표 2-3. 시험포장토양의 물리적 성질

	전용적밀도	공극률	sand	silt	clay	토성
N1-1	1.66	0.37	72.38	12.94	14.68	사양토
N1-2	1.57	0.41	68.71	16.17	15.12	사양토
N1-3	1.80	0.32	69.48	14.72	15.81	사양토
N1-4	1.85	0.30	71.26	14.76	13.98	사양토
N2-1	1.55	0.42	71.74	13.88	14.38	사양토
N2-2	1.60	0.39	77.55	8.71	13.74	사양토
N2-3	1.52	0.43	73.41	12.34	14.25	사양토
N2-4	1.63	0.39	61.01	24.00	14.99	사양토

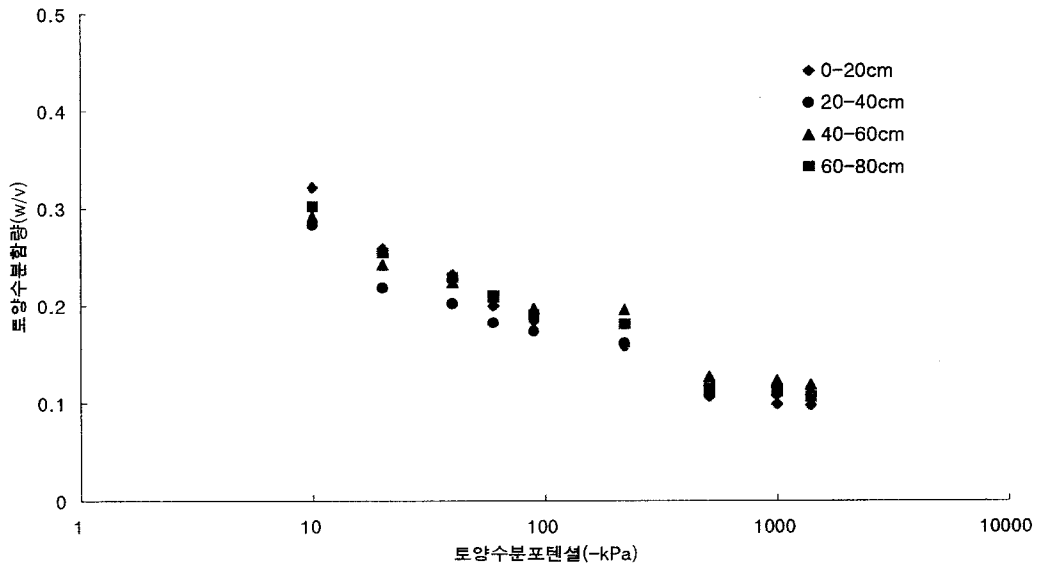


그림 2-12. 시험포장토양의 깊이별 토양수분특성곡선

시험토양의 토양수분특성곡선은 깊이에 따른 차이를 거의 보이지 않았다. 이는 깊이에 따른 점토함량의 차이가 거의 없는 것과 상관성이 있다고 생각된다. 우리는 이 토양수분특성곡선을 이용하여 관수를 요구하는 수분함량 22.8%를 도출하였다.

각 단면의 수분이동이 같다고 가정하고 나무의 한 방향 단면에만 TDR probe를 매설하였다. TDR probe는 사과나무 기준 가로 0, 15, 30, 45cm, 깊이 10, 20, 30, 40, 50, 60cm에 설치하였으며 0, 0cm위치(그림 2- 참조)에 하나를 매설하여 시험구당 각 25개의 probe를 매설하였음.

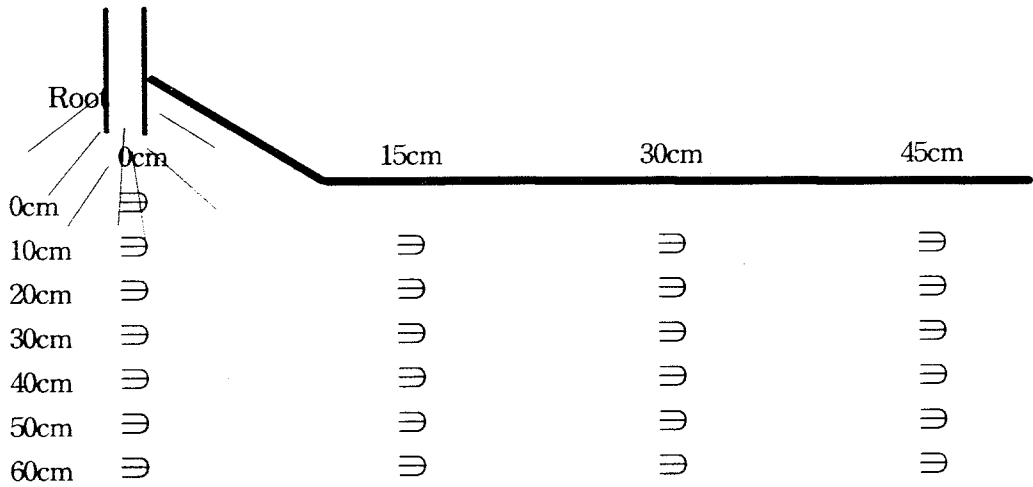


그림 2-13. TDR probe 매설단면도

#### 나. 자동 관수시 수분의 이동

6월 14일 11:45에 N1구에서 처음 자동 관수 관비가 시작되어 4시간 동안 이루어졌으며 관수 관비 시작 후 30분 간격으로 17시간동안 수분의 변화를 측정하였다.

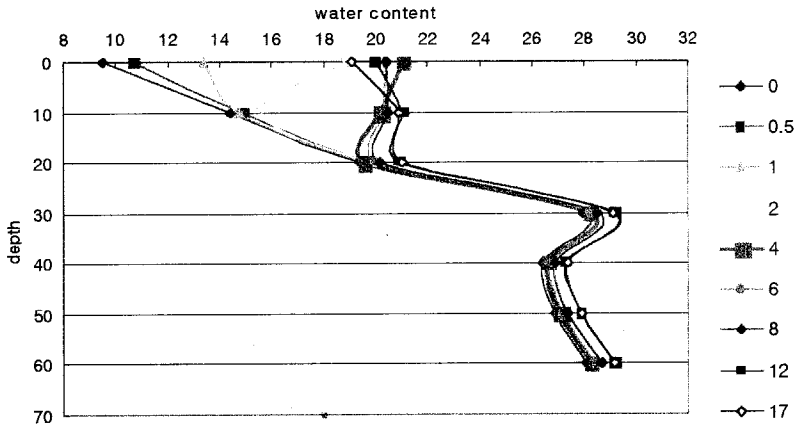
그림 2-의 a~d에서 토양깊이 20cm이하에서는 토양수분단면의 변화가 크지 않았다. 관수된 물의 재분포과정에서 약 1%내외의 작은 수분함량변화를 나타내었다. 이 토양수분단면은 토양깊이 40cm에서 토양수분함량이 60 cm에서 토양수분함량보다 더 커 최대를 나타내는데 이는 이 깊이에서 토양이 수분보유력이 크다라 할 수 있었다. 즉 깊이 40 cm에서 토양수분단면을 통한 수분이동이 제한되고 있다고 생각되었다.

그림 2- a에서 관수관비로 인한 토양수분함량은 토양깊이 0~20cm 에서 크게 변화하였다. 토양표면에서 수분은 증발과 식물뿌리에 의한 흡수 등 토양으로부터 수분을 추출하는 다양한 힘이 작용하여 낮아진 수분함량을 높이는데 물이 이용되었기 때문이라 할 수 있었다. 20cm 이하의 토양 깊이에서는 토양수분함량의 변화가 거의 없었는데 자동관비센서가 0-30cm의 토양수분함량 평균치가 관수점 이상으로 되면 관수가 자동으로 멈추어 더이상의 수분이 공급되지 않아 토양수분포텐셜 차이에 의한 물의 하향이동을 충분히 일으키지 못했기 때문으로 생각되었다. 관수관비가 시작된 지 12시간이 지났을 때 공급된 수분의 재분포가 일어나 깊이 30cm 이하의 토양수분

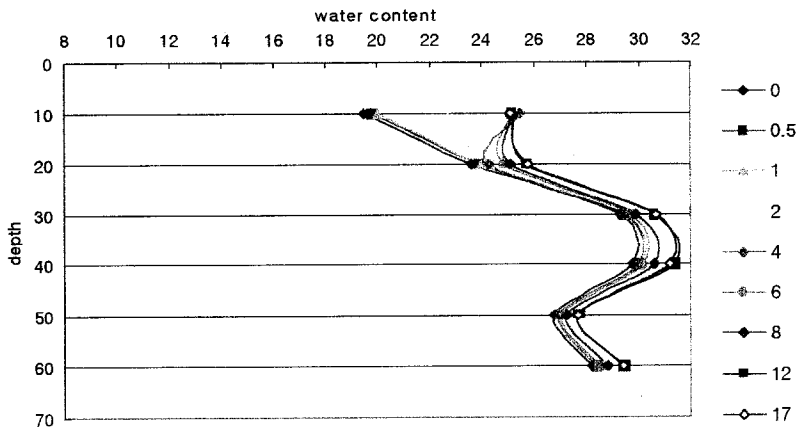
함량이 약 0.5%정도 증가되는 양상을 보였다. 12시간 이후(관수종료 후 8시간) 토양수분단면은 깊이 10cm 이하에서는 토양수분함량의 증가가 일어나지 않고 분포가 안정화되었으며 이때 이미 토양 표면에서는 수분함량이 감소하는 경향을 나타내어 공급된 수분이 토양으로부터 빠져나가기 시작하였다고 할 수 있었다.

토양깊이 10cm 에서 토양수분함량 최대와 최소의 차는 과수로부터 수평거리 0 cm 점적기 바로 아래가 6.6%, 수평거리 15 cm에서 6.0%, 수평거리 30 cm에서 1.8%, 수평거리 45 cm에서 1.5%였다. 따라서 과수로부터, 다시 말해 점적기로부터 수평거리가 클수록 토양수분함량의 변화가 작아졌다. 수평거리 30cm에서 토양수분함량 변화가 급격히 작아지므로 점적기에서 나온 수분의 수평방향 주 이동반경은 30cm이하라 할 수 있었다.

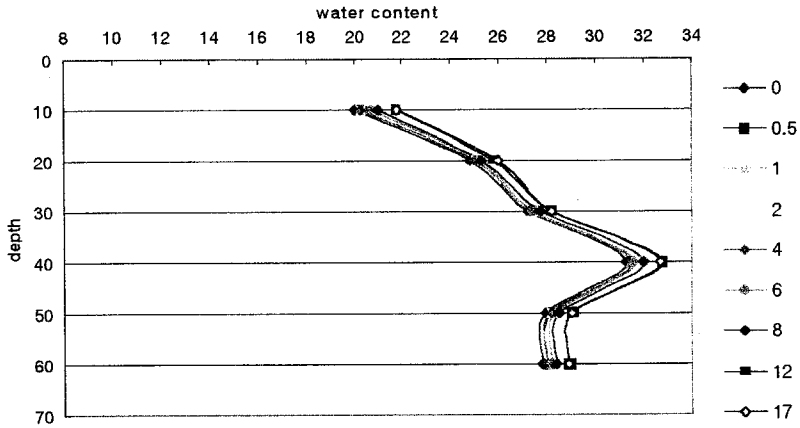
a. 과수로부터 수평거리 0 cm 지점



b. 과수로부터 수평거리 15cm 지점



c. 과수로부터 수평거리 30cm 지점



d. 과수로부터 수평거리 45 cm 지점

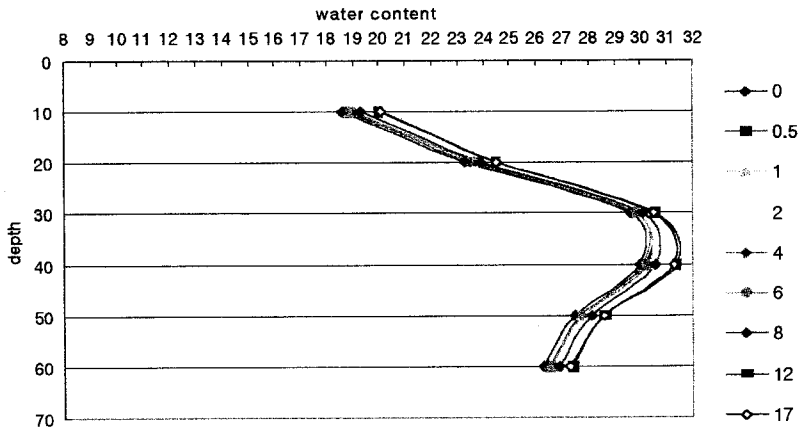
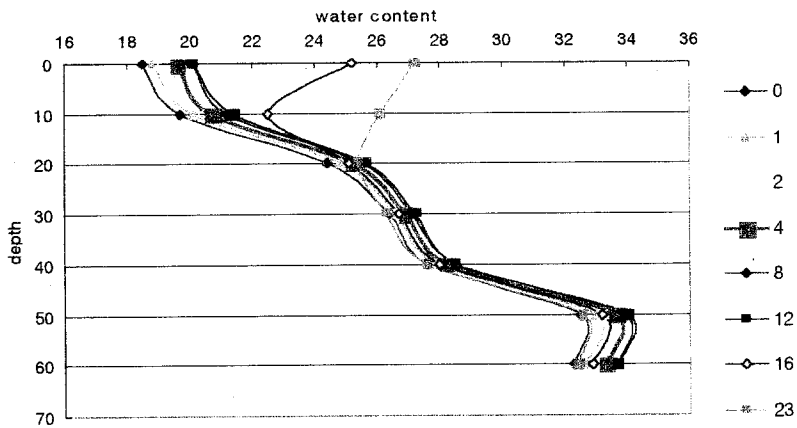


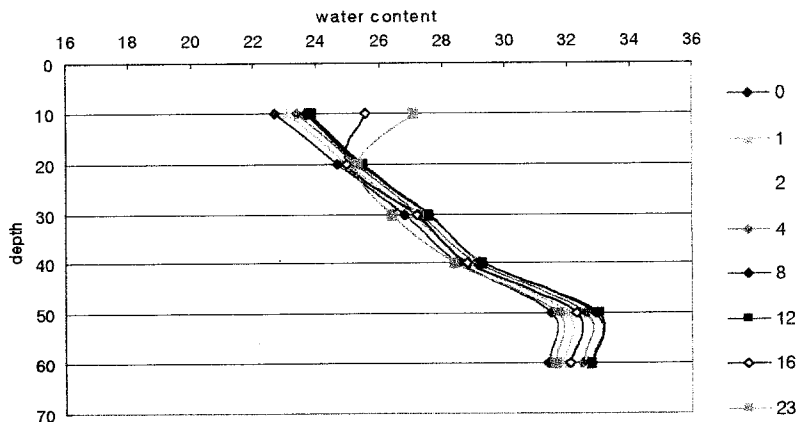
그림 2-14. N1구에서 관수관비 시작 후 17시간동안 TDR을 이용한 토양수분단면 모니터링 (6월 14일 ~ 6월 15일, 단위 - water content : % v/v, depth : cm)

N2구에서는 6월 29일 관수가 시작되었으며 N1구 6월 14일 관수량의 약 2배인 40 L가 공급되었다. N2구의 토양수분단면형태는 N1구와 다르게 깊이 40 cm에서 최대수분함량이 나타나지 않고 깊이 50 cm에서 나타났다. 점적기 바로 아래인 과수로부터 수평거리 0 cm 지점에서 토양수분함량은 N1구에서처럼 깊이 0 ~ 20 cm 범위에서 주로 변화였다. 또한 20 cm 이하 깊이에서 수분함량변화가 분명히 나타나지 않았다. 깊이 10 cm에서 토양수분함량의 최대최소를 비교하여 보면 수평거리 0 cm 지점에서 6.5%, 수평거리 15 cm 지점에서 5%, 수평거리 30cm 지점과 45 cm 지점은 1% 내외였다. N1구와 같이 N2구에서 관수된 수분의 수평방향으로 주 이동반경은 30 cm 이하라고 할 수 있었다.

a. 과수로부터 수평거리 0 cm 지점

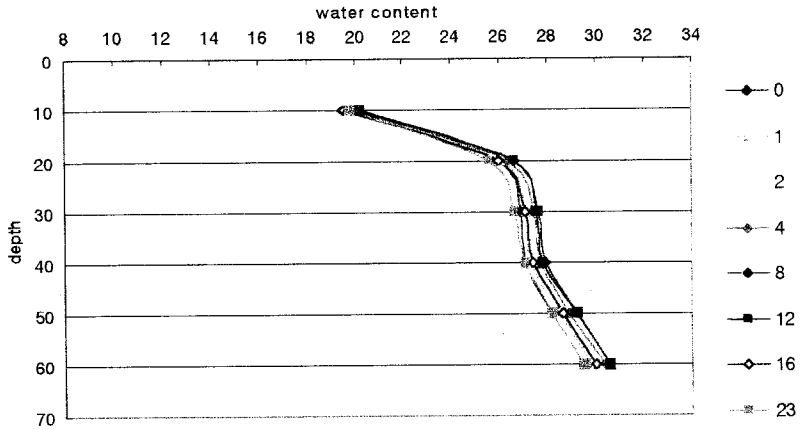


b. 과수로부터 수평거리 15 cm 지점





c. 과수로부터 수평거리 30 cm 지점



d. 과수로부터 수평거리 45 cm 지점

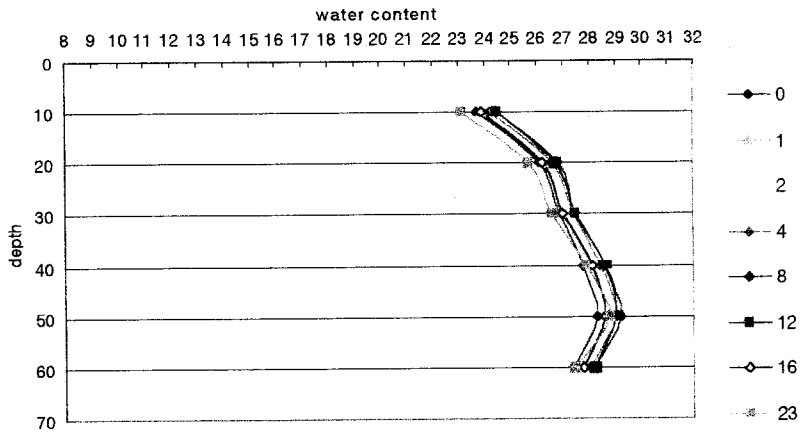


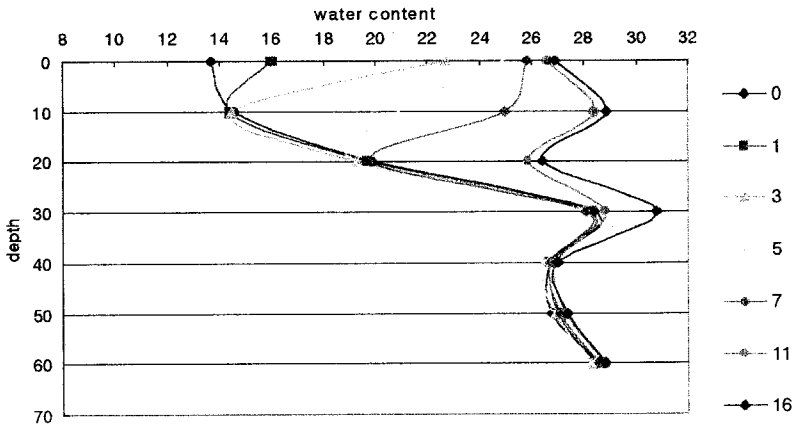
그림 2-15. N2구에서 관비 시작 후 23시간동안 TDR을 이용한 토양수분단면 모니터링 (6월 29일 ~ 6월 30일, 단위 - water content : % v/v, depth : cm)

N1과 N2구의 1차 관수된 물의 주 이동범위는 점적기(과수)를 기준하여 수평방향으로 반경 15~30 cm, 수직으로 약 20 cm 깊이로 나타났다. 따라서 2년생 사과나무의 근권을 수평으로 반경 30cm, 수직으로 50cm깊이로 보았을 때 N1과 N2구의 1차 관수는 주로 근권 내에 분포하여 식물에 유효하게 이용될 수 있다고 생각되었다.

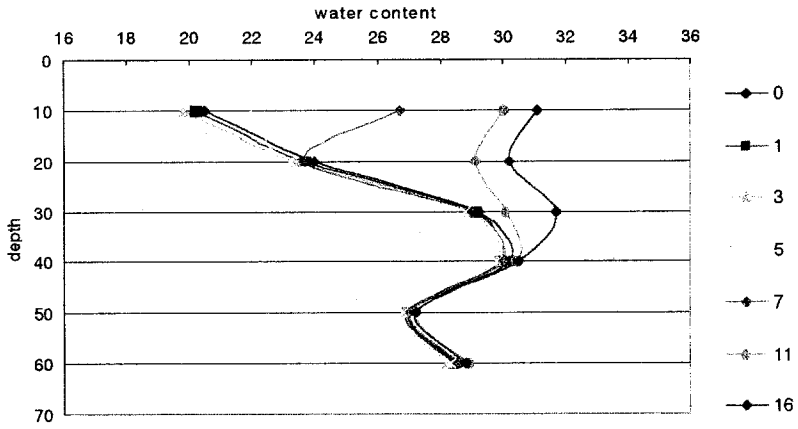
다. 관수점에서 16시간 지속 관수시 수분이동

N1구의 경우, 관수량은 1차관수(6월 14일)의 약 2배인 50L였다. 이 때 과수로부터 수평거리 0 cm 지점에서 깊이 40cm까지 토양수분함량의 변화가 나타났다. 이는 1차 관수시 깊이 20cm의 두 배로 지속관수에 의해 토양수분이 하향이동되었음을 보여 주었다. 수평거리 15cm 지점에서도 토양수분함량이 변화되는 깊이가 40cm 까지로 크게 증가되었다. 또한 수평거리 30cm 지점에서도 토양수분함량이 깊이 30cm 까지 변화하였다. 따라서 관수점에서 관수를 시작하여 자동제어 되지 않고 지속관수 되었을 때, 관수에 의한 토양수분이동범위는 과수를 기준하여 수평으로 30~45 cm, 수직으로 40cm 이라 할 수 있었다. 이는 자동제어되지 않았을 때, 과량 관수된 물의 이동범위가 근권을 벗어날 수 있음을 의미한다.

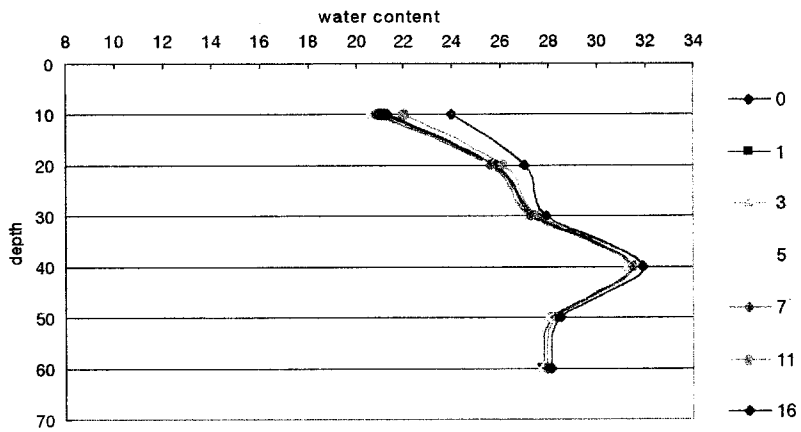
a. 과수로부터 수평거리 0 cm 지점



b. 과수로부터 수평거리 15 cm 지점



c. 과수로부터 수평거리 30cm 지점



d. 과수로부터 수평거리 45 cm 지점

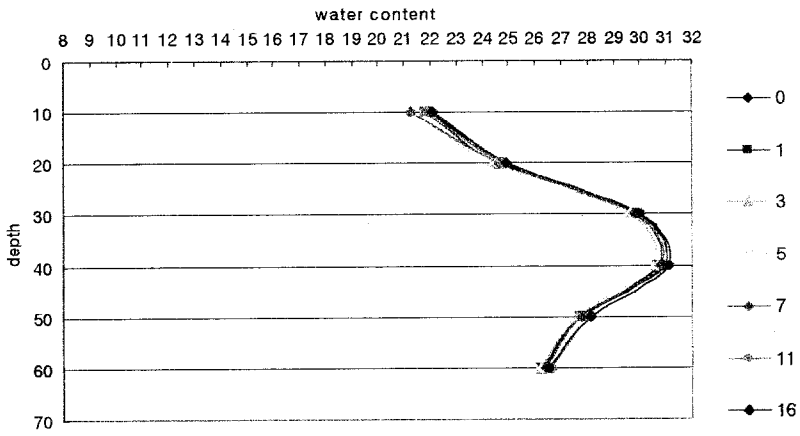
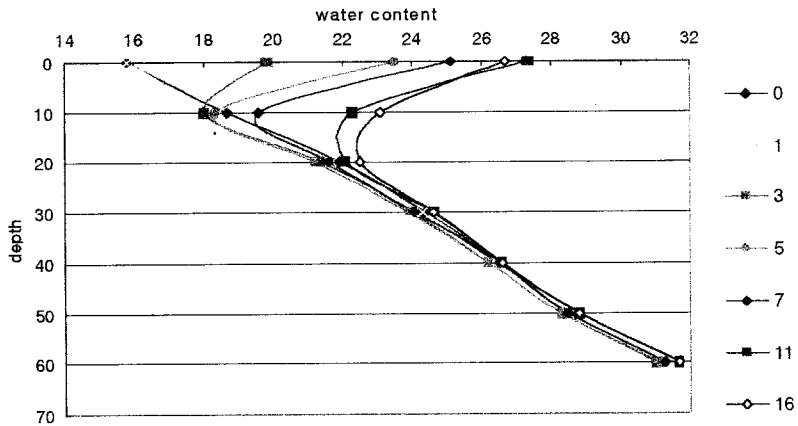
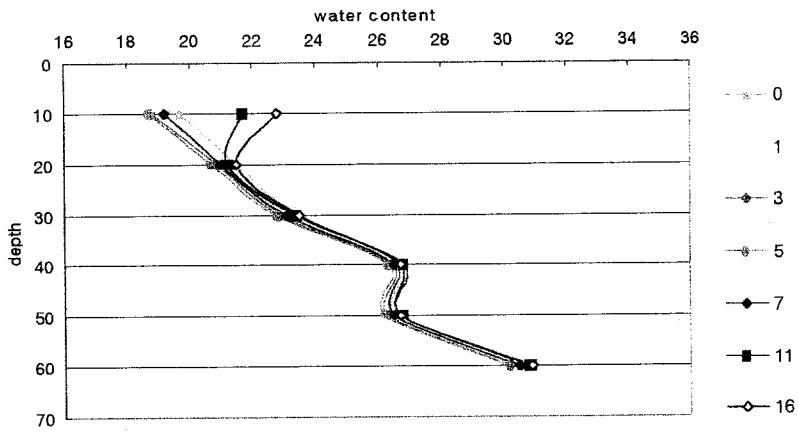


그림 2-16. N1구에서 관수관비 시작 후 16시간동안 TDR을 이용한 토양수분단면 모니터링 (7월 21일~7월 22일, 단위 - water content : % v/v, depth : cm)

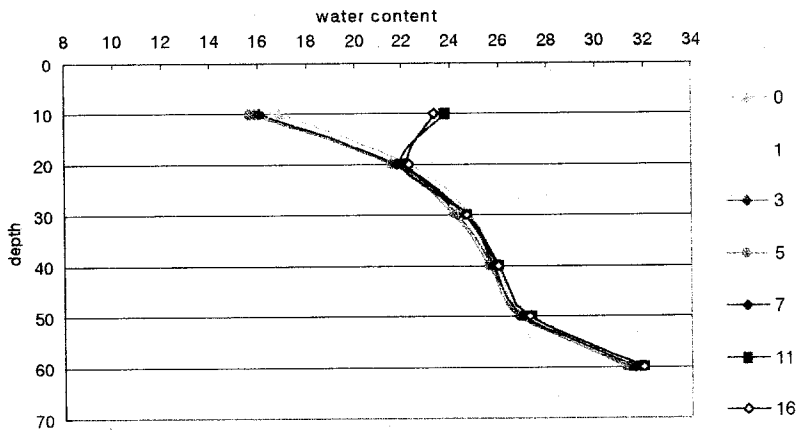
a. 과수로부터 수평거리 0 cm 지점



b. 과수로부터 수평거리 15 cm 지점



c. 과수로부터 수평거리 30 cm 지점



d. 과수로부터 수평거리 45 cm 지점

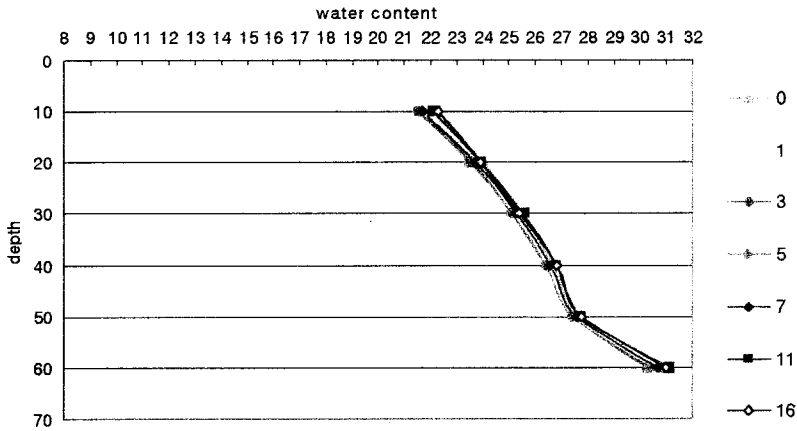


그림 2-17. N2구에서 관수관비 시작 후 16시간동안 TDR을 이용한 토양수분단면 모니터링 (7월 21일~7월 22일, 단위 - water content : % v/v, depth : cm)

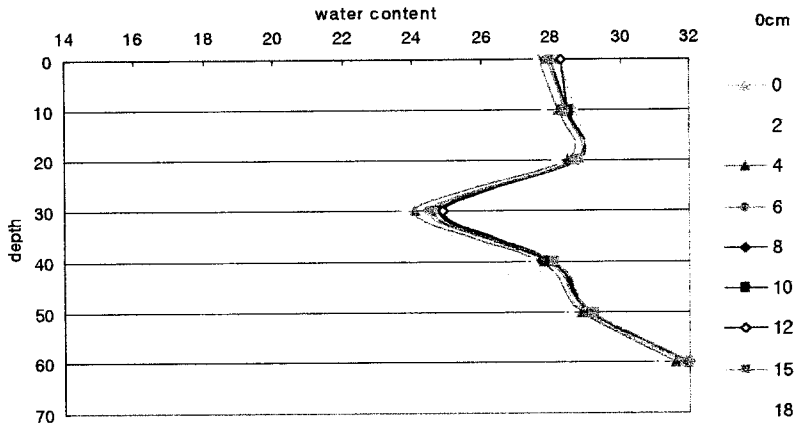
라. 비가 내리는 동안 토양수분단면 모니터링

점적관수시 수분이동의 패턴과 강우시 수분이동의 패턴을 비교하기 위해 9월 1일과 3일 비가 내리는 동안의 수분이동을 모니터링하였다.

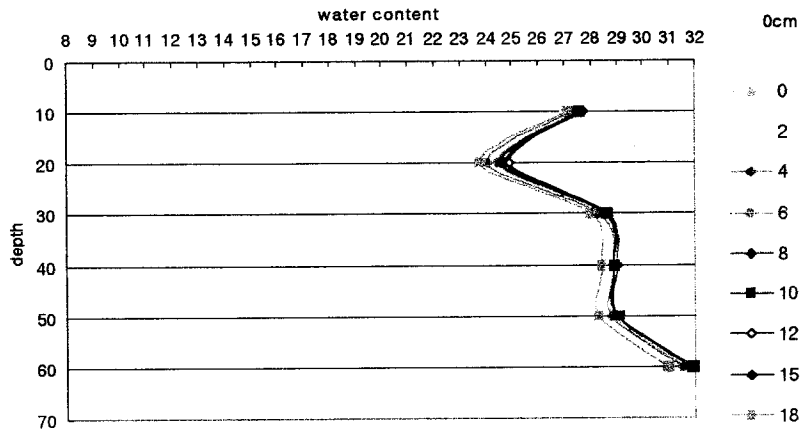
점적관수에 대한 수분 모니터링은 점적관수시 수분이 점에서 시작하여 수직 단면이 타원(수평반경 30cm, 수직반경 50cm)인 반구형 입체로 퍼져나가는 것을 보여 주었던 반면 강우시에는 일정수준의 포화상태를 이루면서 수평방향의 이동이 없이 수직방향의 이동만을 보여주고 있다.

토양단면의 수분상태를 보면 과수와와 거리에 크게 관계없이 30-40 cm 깊이에서 32-34% v/v로 가장 높은 수분함량을 보여주고 있으며 0-20 cm의 지표부에서 상당한 수분함량의 차이를 보였던 점적관수와는 달리 전 거리에서 크게 다르지 않은 수분 분포를 보여주고 있다.

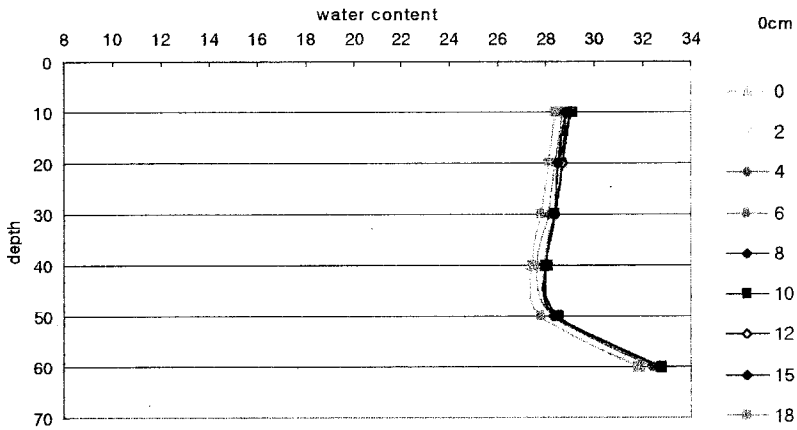
a. 과수로부터 수평거리 0 cm 지점



b. 과수로부터 수평거리 15 cm 지점



c. 관수로부터 수평거리 30 cm 지점



d. 관수로부터 수평거리 45 cm 지점

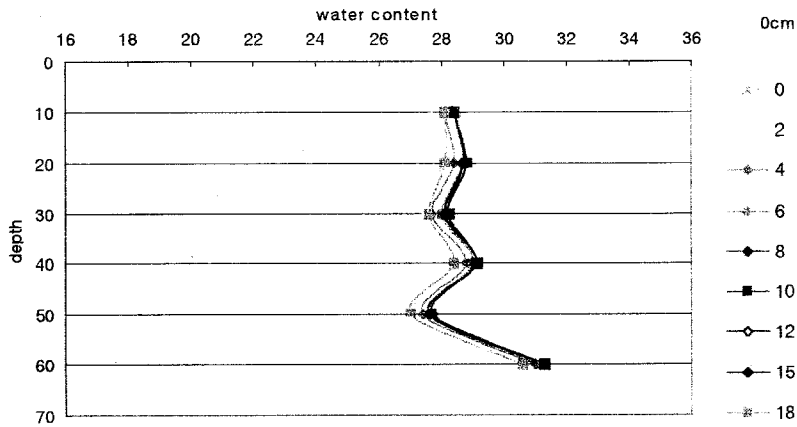


그림 2-18. N2구에서 관비 시작 후 16시간동안 TDR을 이용한 토양수분단면 모니터링 (7월 21일~7월 22일, 단위 - water content : % v/v, depth : cm)



마. 점적관개에서 토양수분이동모형과 실측치와의 비교

주당 점적기 하나로 관수되는 1점 관수 시스템에서 관수시작 후 수분함량 모니터링 결과와 토양수분이동모형의 예측치와 비교한 결과 다음 그림과 같다. 그림에서 보는 바와 같이 전체적인 시간에 따른 수분분포의 경향은 비슷하나 예측모형에서 실측치보다 토양표면에서 수분함량이 급격하게 증가되었다. 이 차이는 실제 포장에서는 과수 주위에 둔덕이 형성되어 토양표면에서 ponding에 의한 토양수분함량 증가가 크게 일어나지 않는 반면 예측모형에서는 이 둔덕의 영향을 포함하지 않기 때문에 파악된다. 깊이 20cm 이하에서 수분분포는 매우 유사하게 나타났다.

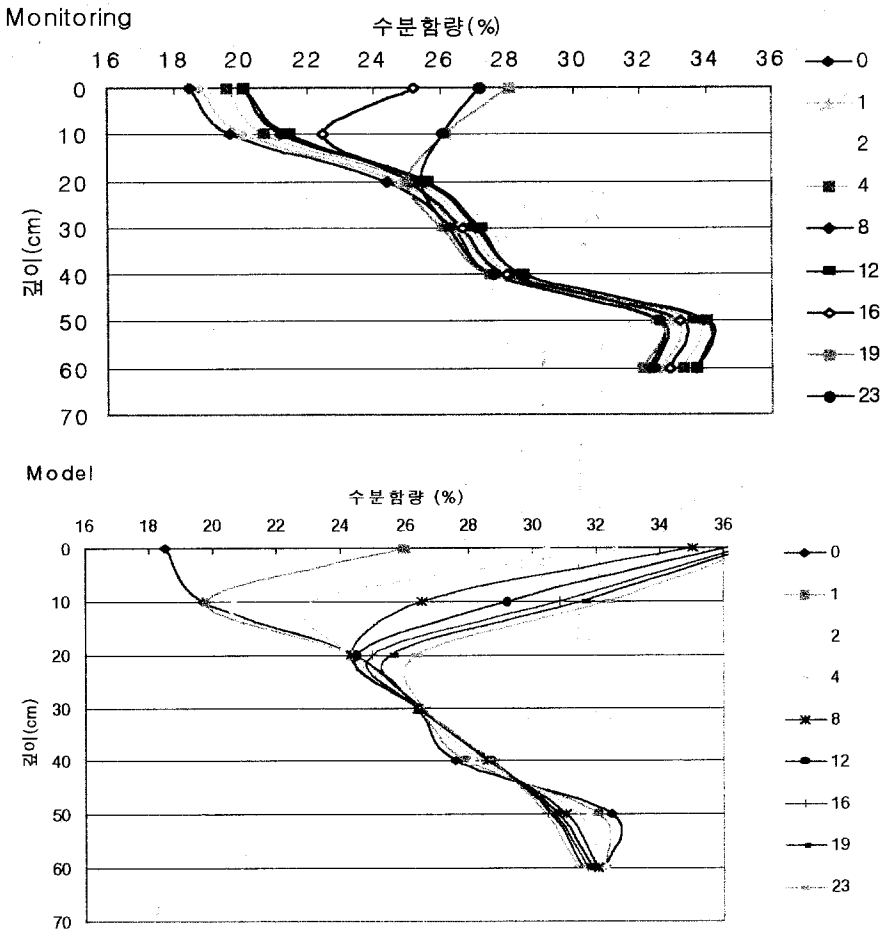


그림 2-19. 주당 1점 관수에서 토양수분분포단면의 실측치와 예측치 비교

#### 4. 센서의 토양학적 최적화(제1협동과제와 공동작업) - 제 4 장 참조

##### 가. 센서 제작 및 시험토양의 특성

가장 간단한 형태의 센서인 Two-rod 센서를 시작품으로 제작하였다. 절연 코팅은 정전기장을 걸어 분체도로 폴리에스테르를 도장하는 방법을 이용하였다. 제작에서 rod 간격을 일정하게 유지하는 것이 매우 중요하였다. 공기 중에서 1.5pF~2.0pF를 나타냈고 수돗물에서는 1MHz 발진 진동수에서는 300pF 으로 높은 값을 나타냈으나 5MHz이상의 진동수에서는 약 100pF을 나타냈다. 공기 중에서 10개의 센서 중 정전용량 값의 최대 최소간 차이는 1MHz에서 0.3pF으로 가장 컸고 진동수가 커질수록 그 차이는 줄어들었다. 수돗물에서 차이는 1MHz에서 26pF으로 가장 컸고 진동수가 커질수록 줄어들어 30MHz에서는 8pF을 나타냈다.

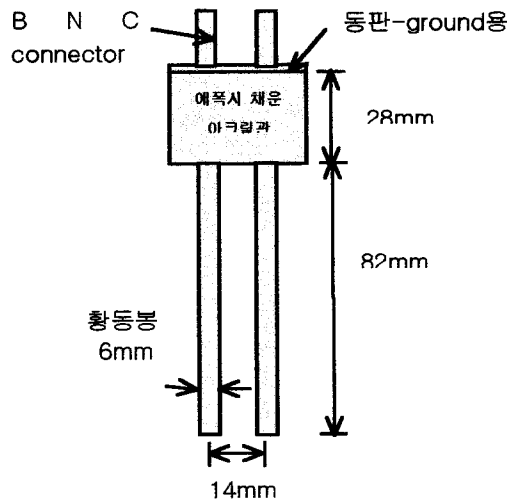


그림 2-20. 시험된 Two-rod 센서의 사양

정전용량 측정 및 수분함량 정량은 일정수분함량으로 맞춰진 토양(지름 30 cm, 높이 30 cm basket에 전용적밀도를 맞춰 높이 25 cm 까지 충전하였습)에 정전용량센서를 장착하여 LCR meter(HP4285A)로 정전용량을 측정한 후 TDR(Trase, Soil Moisture Co. USA) probe를 장착 수분함량을 측정하였다.

시험토양의 특성은 표 2-4에 나타나 있다. 이 토양들은 모두 밭으로 이용되고 있

는 토양으로 Soil A는 점토함량이 높고 전용적 밀도가 낮고 다른 토양에 비해 유기물 함량이 높았고 Soil B는 전용적 밀도가 가장 높으며 Soil C는 점토함량이 가장 낮고 유기물 함량도 가장 낮았다.

각 토양의 토양수분특성곡선은 그림 2- 와 같다. 점토함량이 높은 Soil A가 같은 압력에서 보유되는 수분함량이 가장 높게 나타나 수분보유력이 가장 크다고 할 수 있다. Soil B와 Soil C사이에서도 점토함량과 유기물함량이 높은 Soil B에서의 수분보유력이 높게 나타났다. 또 Soil B의 경우 시용된 지 얼마되지 않은 유기물이 포함되어 있어 이것이 수분보유력에 영향을 주었으리라 생각된다.

표 2-4. 시험토양의 특성

Soil	전용적밀도	Sand(%)	Silt(%)	Clay(%)	Texture	O.M. (%)
Soil A	1.20	16.95	54.47	28.58	실트질식양토	2.01
Soil B	1.61	64.68	26.48	8.84	사양토	0.81
Soil C	1.46	74.82	19.55	5.63	사양토	0.68

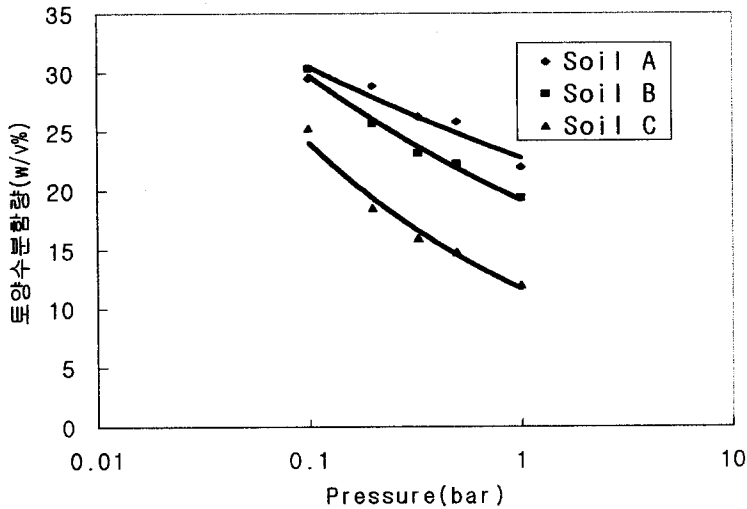


그림 2-21. 시험토양의 토양수분특성곡선

경작지 물관리에 기준이 되는 것은 토양수분포텐셜인데, 각 토양마다 최적의 생육을 나타내는 토양수분포텐셜을 포장용수량이라고 한다. 포장용수량은 대체로 -33kPa로 정하는데, 과수원 관수점에 관한 연구결과 적정 관수점은 -50kPa이라는 것을 얻었

다. 따라서 토양수분포텐셜 -50kPa에 해당하는 토양수분함량을 기준으로 하여 관수 및 관비가 조절되도록 정전용량형 센서를 이용하여 자동제어하게 된다.

정전용량형 센서는 토양수분함량에 정의 상관을 가지고 정전용량이 증가하는 것을 이용하여 토양수분함량을 간접적으로 정량하는 것으로 토양수분함량 대 정전용량의 보정곡선이 요구된다. 위 세 가지 토양의 보정곡선을 구해 각각을 비교하고 또 TDR 센서와 성능을 비교하였다.

#### 나. 토양별 보정곡선 비교

정전용량형 토양수분센서의 보정식은 1차 선형식으로 하였을 때  $R^2$ 값이 약 0.95 이상의 상관을 보였다. 정전용량형센서의 보정곡선의 기울기는 점토함량이 높은 토양일수록 컸다. Soil A(점토함량 33% 실트질식양토)와 Soil C(점토함량 10% 사양토)의 보정식의 기울기가 약 2배 정도의 차이를 나타내었다. 이에 비해 점토함량 차이가 상대적으로 작은 Soil B와 Soil C 사이는 기울기의 차이가 작았다. 따라서 발진진동수 1-10 MHz 범위의 정전용량형 토양수분센서는 토성, 즉 점토함량에 따른 영향을 보정하여 주어야 할 것으로 판단되었다. 1~10 MHz 범위에서 진동수가 증가할수록 같은 수분함량에 대한 정전용량 값은 작아졌다.

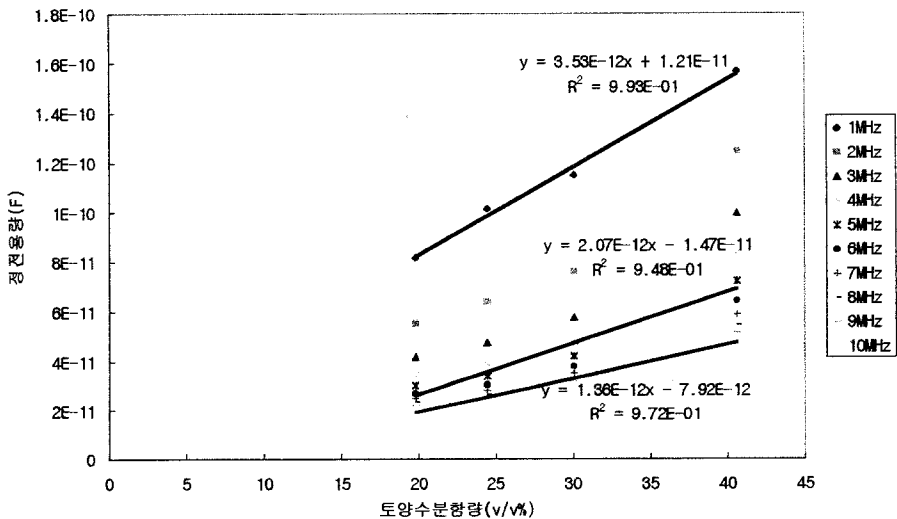


그림 2-22a. 정전용량형 센서 보정곡선 - Soil A

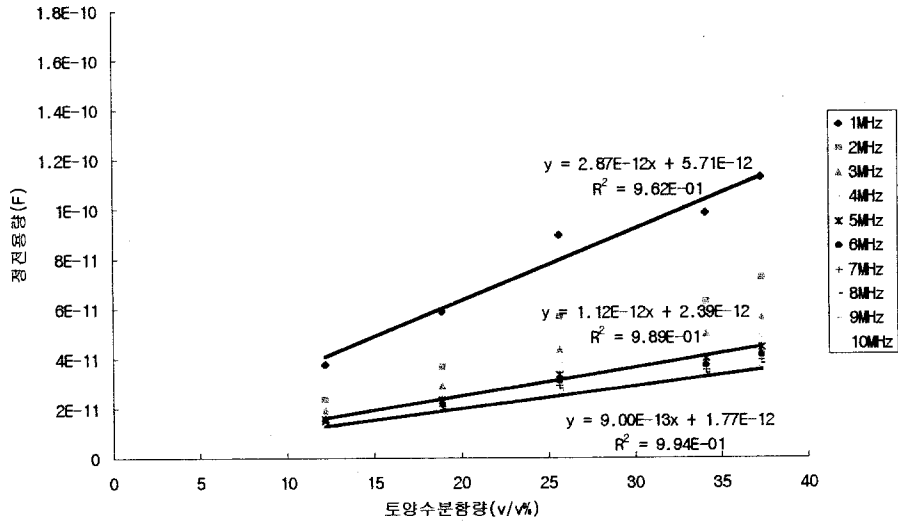


그림 2-22b. 정전용량형 센서 보정곡선 - Soil B

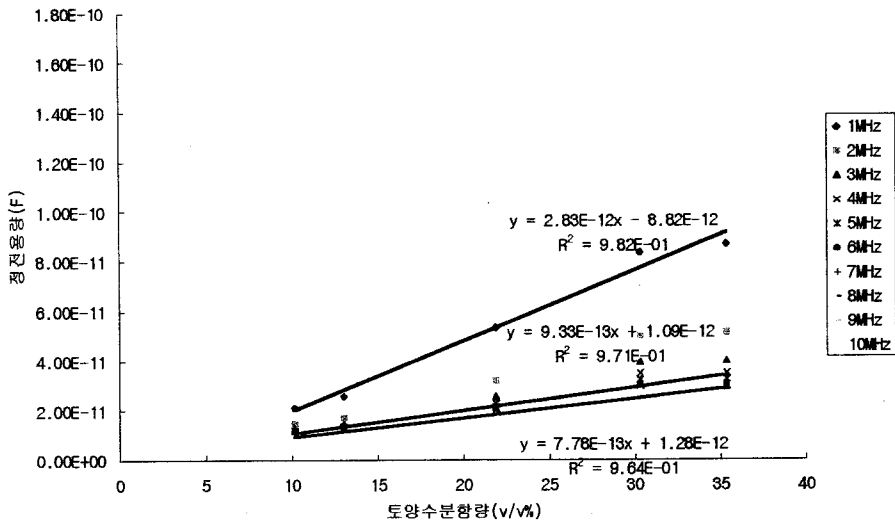


그림 2-22c. 정전용량형 센서 보정곡선 - Soil C

-50 kPa에 해당하는 용적수분함량은 Soil A에서 26%, Soil B에서 22%, Soil C에

서 15%였다. 즉 이 토양수분함량에 해당하는 정전용량 값이 계측기로 측정되었을 때 관비라인의 펌프가 작동되어 관비가 이루어지게 된다. 발진 주파수를 5MHz로 하였을 때 그 값은 Soil A에서 39.12pF, Soil B에서 27.03pF, Soil C에서 15.09pF임을 그림 2-의 보정곡선으로부터 얻을 수 있다. 이와 같이 토양에 따라 관수를 요구하는 시점에서 정전용량이 다르므로 각 토양에 대해서 보정곡선을 그려야 한다. 이 과정은 귀찮고 부담스러우나 충분한 Database가 구축되어 각 토양에 대한 일반적인 정보로 이 보정곡선을 추정할 수 있다면 실용성있는 활용에 큰 제약은 주지 않을 것이다.

#### 다. TDR 센서와의 비교

TDR은 연구실험용으로 현재 널리 쓰이고 있는 토양수분센서이다. 이 센서는 정전용량형 센서와 같이 전자신호를 받아 실시간 모니터링 및 자동제어가 가능하다. TDR과 정전용량형 센서의 비교를 위하여 TDR과 중량법의 1:1 대응 정도를 비교하였다. 정전용량형 센서의 보정곡선의 기울기가 토양에 따라 변화하는데 비해 TDR은 내장된 보정곡선으로 중량법과 1:1 line을 형성한 것으로 보아 TDR은 토양수분함량측정에 미치는 토성에 의한 영향이 상대적으로 작은 것으로 판단되었다.

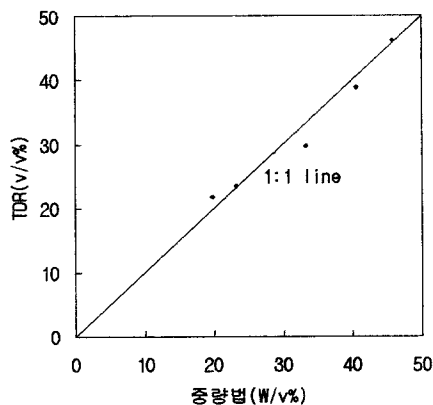


그림 2-23a. TDR과 중량법의 비교  
- Soil A

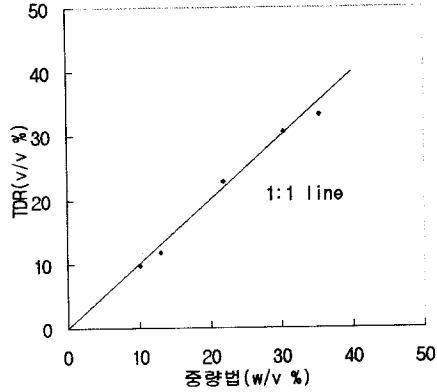
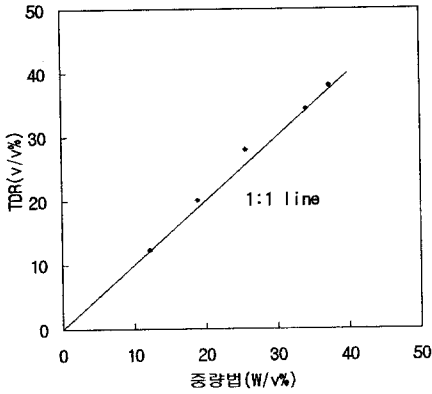


그림 2-23b. TDR과 중량법의 비교    그림 2-23c. TDR과 중량법의 비교  
- Soil B                                    - Soil C

위 그림과 같이 수 MHz의 발진주파수를 가지는 정전용량형 센서에 비해 탁월한 TDR의 성능에도 불구하고 TDR은 높은 가격으로 인해 실용성이 떨어지는 것이 사실이다. 센서의 물리화학적 보상(제4장 참조)이 이루어지고 토성별 보정곡선을 위한 Database가 확립된다면 정전용량형 센서 또한 정확성과 재현성에서 뒤떨어지지 않는다고 판단된다.

5. 정전용량형 토양수분센서를 이용한 점적 관비 자동 제어시스템 구축 (제1협동과제와 공동작업)

토양 수분을 자동으로 조절하기 위하여 먼저 고려하는 토양에 적합한 센서를 선정하고, 토양수분함량에 따른 센서의 정전용량을 측정하여 수분함량에 따른 정전용량과의 관계함수를 도출하여야 한다. 일반적으로 이 함수관계는 토양의 염농도와 온도와 밀접한 관계가 있다. 이러한 관계는 정전용량을 측정하는데 사용한 주파수와도 관계가 있는데 아주 높은 주파수영역에서는 염농도에 따른 영향이 감소하는 것으로 나타났다. 따라서 염농도에 따른 보정이 거의 필요하지 않는 주파수를 선택하여 측정하는 것이 바람직하다.

이러한 조건에서 정전용량의 토양수분함량에 따른 함수관계는 다음과 같은 다항식으로 표현이 가능하다.

$$W(\%) = a_0 + a_1C + a_2C^2 + a_3C^3 \dots$$

위의 식에서 W는 토양의 수분함량이고, C는 센서의 정전용량 값이다. 일련의 실험과정을 거쳐서 위의 상관 관계식을 도출한 후에 정전용량을 측정하면, 위 식으로부터 토양의 수분함량을 구할 수 있게 된다.

이것을 사용하여 토양 수분을 자동으로 조절하는 시스템을 그림 2-24와 같이 구축할 수 있다. 본 시스템에서는 센서의 정전용량을 측정하기 위하여 LCR meter를 사용하였다. 센서로부터 측정된 정전용량 값을 토양의 수분함량으로 전환한 후 설정된 토양수분함량보다 적으면 급수 펌프를 작동시켜 물을 공급하고, 크면 급수펌프의 작동을 중단하는 방법으로 토양의 수분을 자동으로 조절하는 것이 가능하다.

회로의 작동원리는 먼저 위의 관계식을 컴퓨터에 입력하고, 원하는 토양의 수분함량을 설정한다. 센서의 정전용량 값을 LCR meter로부터 GPIB interface를 통하여 컴퓨터로 읽어 드린 후, 위의 관계식을 이용하여 수분함량으로 전환한다. 이미 설정된 토양 수분함량과 비교하여, 급수의 결정을 내린 후 연결된 포트에 신호를 보내면 switching relay가 작동하여 연결된 급수 시설의 운전과 정지를 조절할 수 있다.

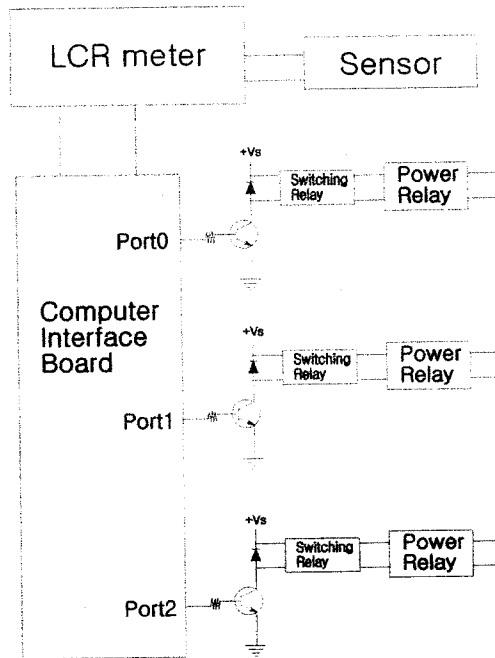


그림 2-24. 정전용량형 토양수분센서를 이용한 점적관비 자동 제어 회로



현재 센서로 일정 주파수의 파를 보내 그 반응 값을 읽는 정전용량 계측 회로 개발에서 어려움으로 자동제어 구동 시험은 HP4285A LCR meter를 이용하였다. 이 시험에서 적정관수점(-50kPa에 해당하는 정전용량)의 신호를 받았을 때 자동관수가 성공적으로 이루어졌다. 위 그림과 같이 구성된 구동회로는 Computer interface board를 추가함에 의해 원하는 만큼의 port 수를 늘릴 수 있다.

센서 자동제어프로그램의 Source code는 부록에 첨부하였다.

실용성 있는 계측회로가 완성된다면 적정관수점에 해당하는 센서의 정전용량을 신호로 자동관수가 이루어지고 관수가 시작된 후 토양으로 수분유입으로 토양수분함량의 변화 및 그에 따른 양분 행동의 추정이 가능하게 될 것이다.

## 제 4 절 활용에 대한 건의

농업에서 환경경영 및 작물을 위한 최적 수분·양분관리를 위해 달성하고자 한 수분관리프로그램 및 관비최적화시스템의 개발에서 개발한 센서의 정전용량값을 읽어들이는 계측기의 회로가 고주파에서의 교란 및 불안정 등의 이유로 실용화되지 못함으로 인해 새로운 관비최적화시스템의 완전한 구성이 이루어지지 못했다.

그러나 이 과제에서 수분관리프로그램, 센서의 토양학적 최적화, 그리고 센서자동제어프로그램은 그 활용성이 높다고 판단된다.

현재 점적관수시 수분이동 및 분포 모형을 점적기의 수에 따라 변형하여 적용할 수 있도록 개발하였고 이는 실측치와 높은 일치성을 나타냈다. 또한 적정관수점의 설정은 기존의 -33kPa을 -50kPa로 낮춤으로써 수분의 효율적 사용뿐 아니라 작물생산비용의 축소를 가져올 수 있다.

농업의 환경경영 및 작물을 위한 최적 수분·양분관리는 우리가 앞으로 달성해야 될 과제이다. 본 연구에서 고민한 성과 및 한계는 좀더 실용성 있는 시스템으로 발전에 기반이 될 것이라 본다. 앞으로 포장의 센서를 읽어들이는 계측기 개발에 성공한다면 개발한 센서자동제어 구동 프로그램을 이용하여 농가를 위한 실용적인 작물의 최적 수분 및 양분 관리 시스템이 완성될 것이며 이는 농업경영의 새로운 전환을 위한 기틀이 되리라 본다.

## 제 3 장 양분관리프로그램 개발

### - 제 2 세부과제 (주관연구기관)

#### 제 1 절 서설

지금까지 우리 농업은 인건비의 상승 등 간접재가 차지하는 비율이 높아감에도 불구하고 선진국에 비해 농업기반의 자동화를 통한 노동력, 비료 등의 투입재를 절감하고자 하는 노력이 미진한 실정이다. 다른 한편으로 해마다 과잉의 물과 양분이 과수원에 비효율적으로 투입되어 이로 인해 토양과 수계가 적지 않게 오염되고 있다. 따라서 작물이 필요로 하는 시기에 적절한 양의 물과 양분을 적기에 지속적으로 공급할 수 있는 자동화된 생산시설에 관한 연구야말로 노동력 등 원가를 절감하고, 사과 생산량 및 품질을 개선하여 시장경쟁력을 높이고 나아가 적극적인 환경오염 방지 등 국가 생산자원의 비효율적인 손실을 줄여 농업의 부가가치를 높일 수 있는 기간산업 연구라 하겠다.

점적관수는 건조한 지역에서 효율적인 물이용을 위해 개발된 관개방법으로 점적관수를 이용하면 물공급뿐 아니라 필요한 양분의 공급도 조절할 수 있다고 알려져 있다. 이 방법은 이스라엘과 같이 물이 부족한 나라 뿐만 아니라 농업기술이 발전한 미국, 뉴질랜드 등에서 1960년대부터 사용되어 왔으며 우리나라의 과수, 온실채소 재배 농가에도 상당수 보급되어 있다. 그러나 우리나라의 경우 앞선 나라들에 비해 점적관수의 효율성을 충분히 활용하고 있지 못한데 이는 우리나라의 기후와 토양, 농업적 특성이 그들과 다르기 때문이다.

점적관수의 효율성을 최대화하기 위해서는 우리나라의 기상조건과 토양환경을 고려하여 과수에 적합한 관수점과 관비농도를 설정하여야 한다. 적정수준의 관비농도를 설정할 때 농업의 생산성을 지속적으로 유지하면서 동시에 환경에 대한 부하를 최소화할 수 있을 것이다. 따라서 본 연구에서는 사과 생산자가 생산성을 지속적으로 유지하면서 환경을 고려한 최적 관수농도 설정을 위한 연구를 수행하였다. 또한 최적 관수관비를 위하여 토양 중 질소의 행동을 모형화하고자 하였다.

나아가 연구된 최적 관수농도에 대한 검증을 위하여 1, 2년생 과수를 대상으로 99, 2000년 포장실험을 수행하였으며 증성자 추적법을 사용하여 시비방법별 질소 이용률

을 비교하고자 하였다

## 제 2 절 연구내용 및 범위

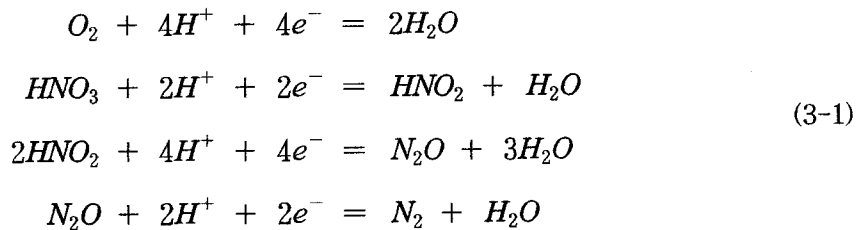
본 연구에서는 사과나무의 물소모량을 토대로 한 적정 질소농도의 설정 및 검증 실험, 관수 및 관비에 따른 토양 중 질소의 행태 변화, 물과 산소에 따라 결정되는 질소분포를 예측하는 수리모형의 개발과 검증, 중질소를 사용한 관비와 표면시비간 질소이용률 비교, 동일한 관수점을 적용하여 관비와 표면시비간 토양내 질소의 형태별 분포 및 수분단면 비교에 관한 연구를 수행하였다.

## 제 3 절 연구개발결과

### 1. 정상류 조건하의 산소분포와 질소 이동 및 분포 모형 개발

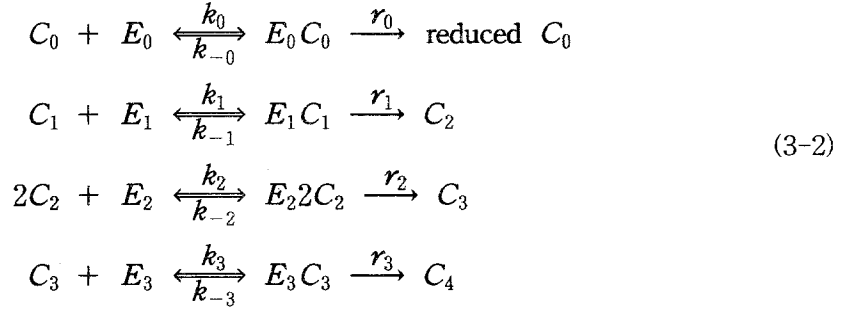
#### 가. 토양내 산소 소모와 탈질 과정 (o2status.c)

통성호기성 미생물에 의한 호기조건에서의 호흡과 혐기 조건에서의 탈질과정에 대한 일반 방정식은 식 (3-1)로 표시할 수 있다.



본 모형은 기존의 다른 모형과 달리 토양 온도와 수분상태에 따라 형성되는 산소의 분포로부터 시작하여 질산과 그 이하 환원 물질들간의 전자 쟁탈을 기본 원리로

해 모형을 전개하였으며, 효소 속도반응론에 입각하면 식 (3-2)로 변환된다.



여기서  $C_0, C_1, C_2, C_3$  및  $C_4$ 는 각각 산소,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{NO}_2^-$ ,  $\text{N}_2\text{O}$  및 질소 분자이고,  $E_i$ 는 각각에 특이적으로 작용하는 효소이고  $E_i C_i$ 는 각각 산소-효소,  $\text{NO}_3^-$ -효소 등의 기질-효소 복합체를 의미한다.

식 (3-2)를 효소-기질 복합체에 대해 정상류(steady-state) 조건으로 전개하면, 식 (3-3)이 되고,

$$\begin{aligned}
 k_0 [C_0][E_0] - k_{-0} [E_0 C_0] &= r_0 [E_0 C_0] \\
 k_1 [C_1][E_1] - k_{-1} [E_1 C_1] &= r_1 [E_1 C_1] \\
 k_2 [C_2][E_2] - k_{-2} [E_2 C_2] &= r_2 [E_2 C_2] \\
 k_3 [C_3][E_3] - k_{-3} [E_3 C_3] &= r_3 [E_3 C_3]
 \end{aligned} \tag{3-3}$$

식 (2)를 다시 시간에 따른 전자수용체 농도의 도함수로 표시하면, 식 (3-4)가 된다.

$$\begin{aligned}
\frac{d[C_0]}{dt} &= -r_0[E_0C_0] \\
\frac{d[C_1]}{dt} &= -r_1[E_1C_1] \\
\frac{d[C_2]}{dt} &= -2r_2[E_2^2C_2] + r_1[E_1C_1] \\
\frac{d[C_3]}{dt} &= -r_3[E_3C_3] + r_2[E_2^2C_2] \\
\frac{d[C_4]}{dt} &= -r_3[E_3C_3]
\end{aligned}
\tag{3-4}$$

식 (3-4)에서 전자의 수송은 반응물이 생성될 때 일어나며, 단위 시간내 생성되는 전자의 최대수는 일정하고 이것이 나중에 반응을 제한한다고 가정하고, 통성 호기성 미생물에 의해 단위 용적당 생성되는 전자의 최대수를 R로 설정하면, 다음과 같은 관계를 유추할 수 있다.

$$\begin{aligned}
R &= 4r_0[E_0C_0] + 2r_1[E_1C_1] \\
&+ 4r_2[E_2^2C_2] + 2r_3[E_3C_3] + k[E]
\end{aligned}
\tag{3-5}$$

여기서 각 항의 계수는 식 (3-1) 반응에 참여하는 전자의 수이고, [E]는 식 (3-1)에 관여하는 전자수용체 이외의 것과 결합하거나 또는 자유상태의 효소의 합으로 해석할 수 있다. 한편, 비례상수 k는 [E]에 의해 소모되는 전자의 속도를 표현한다.

다음 식 (3-6)의 가정과,

$$[E] = [E_0] + [E_1] + [E_2] + [E_3]
\tag{3-6}$$

다음 식 (7)의 임시변수 [E<sub>ic</sub>]를 매개로 하여,

$$[E_{ic}] = \sum [E_n]
\tag{3-7}$$

여기서 n = 0 ... 3으로 n = i 인 경우는 생략하면,

$$[E_i] = [E] - [E_{ic}], \quad i = 0 \dots 3 \quad (3-8)$$

식 (3), (4) 및 (5)를 결합하고  $[E_0]$ ,  $[E_1]$ ,  $[E_2]$ ,  $[E_3]$  및  $[E]$ 를 생략하여, 이를 재정리하면 일련의 식 (9)와 식 (10)이 된다.

$$r_0[E_0 C_0] = \frac{Q_0[C_0]R}{1+4Q_0[C_0]+2Q_1[C_1]+4Q_2[C_2]^2+2Q_3[C_3]} \quad (3-9)$$

$$r_1[E_1 C_1] = \frac{Q_1[C_1]R}{1+4Q_0[C_0]+2Q_1[C_1]+4Q_2[C_2]^2+2Q_3[C_3]}$$

$$r_2[E_2^2 C_0] = \frac{Q_2[C_2]^2 R}{1+4Q_0[C_0]+2Q_1[C_1]+4Q_2[C_2]^2+2Q_3[C_3]} \quad (3-10)$$

$$r_3[E_3 C_3] = \frac{Q_3[C_3]R}{1+4Q_0[C_0]+2Q_1[C_1]+4Q_2[C_2]^2+2Q_3[C_3]}$$

여기서  $Q_i/r_i = k_i/(r_i+k_i)$ ,  $i = 1, 2$  및  $3$ 이고, 이것은 각 반응의 Michaelis-Menten 상수의 역수이다. 한편  $Q_i$ 가 지닌 물리적 의미는 전자에 대한 경쟁 과정 중 일어나는 각각의 전자 수용체에 대한 친화도의 비례 계수(전자 경쟁의 가중요인)이기 때문에, 이들을 친화도 계수라 한다.

식 (3-9) 및 (3-10)으로 표현할 수 있는 전자소모율(ECR)은 산소,  $\text{NO}_3^-$ ,  $2\text{NO}_2^-$ ,  $\text{N}_2\text{O}$ 가 환원하는데 각각 4, 2, 4 및 2이기 때문에, 이들 전자 수용체에 의해 소모되는 전자의 표현은 식(3-11)이 된다.

$$\begin{aligned} ECR &= 4r_0[E_0 C_0] + 2r_1[E_1 C_1] + 4r_2[E_2^2 C_2] + 2r_3[E_3 C_3] \\ &= \frac{\{4Q_0[C_0] + 2Q_1[C_1] + 4Q_2[C_2]^2 + 2Q_3[C_3]\}R}{1+4Q_0[C_0]+2Q_1[C_1]+4Q_2[C_2]^2+2Q_3[C_3]} \end{aligned} \quad (3-11)$$

식 (3-11)은 이들 통성 호기성 미생물에 의한 ECR이 최대 EPR보다 항상 낮음을 나타내고 있다. 분모의 "1"은 매우 중요한 의미를 갖는데, 이는 모든 효소가 완전히 탈질과정의 산소를 포함한 모든 전자 수용체와 결합하지 않음을 알려주고 있다. 즉 불포화 상태임을 나타낸다. 만일 모든 효소가 이들과 완전히 결합하면, 분모의 "1"은 사라지게 되는데, 이 상태에서는 ECR = R (EPR)이 성립되며 이때, 생성된 전자는 이 탈질 과정에서 전부 소모됨을 의미한다. 이때는 포화 상태이다.

식 (3-9) 및 (3-10)을 소모율와 생성율을 모두 표현하는 식 (3-4)에 대입하면, 다음 식 (3-13)과 (3-14)를 유도할 수 있다.

$$\begin{aligned} \frac{d[C_0]}{dt} &= \frac{Q_0[C_0]R}{1+4Q_0[C_0]+2Q_1[C_1]+4Q_2[C_2]^2+2Q_3[C_3]} \\ \frac{d[C_1]}{dt} &= \frac{Q_1[C_1]R}{1+4Q_0[C_0]+2Q_1[C_1]+4Q_2[C_2]^2+2Q_3[C_3]} \\ \frac{d[C_2]}{dt} &= \frac{\{Q_1[C_1]-2Q_2[C_2]^2\}R}{1+4Q_0[C_0]+2Q_1[C_1]+4Q_2[C_2]^2+2Q_3[C_3]} \end{aligned} \quad (3-12)$$

$$\begin{aligned} \frac{d[C_3]}{dt} &= \frac{\{Q_2[C_2]^2-Q_3[C_3]\}R}{1+4Q_0[C_0]+2Q_1[C_1]+4Q_2[C_2]^2+2Q_3[C_3]} \\ \frac{d[C_4]}{dt} &= \frac{Q_3[C_3]R}{1+4Q_0[C_0]+2Q_1[C_1]+4Q_2[C_2]^2+2Q_3[C_3]} \end{aligned} \quad (3-13)$$

식 (3-12) 및 (3-13)은 상미분방정식의 해법중 하나인 4차-Runge-Kutta법을 적용

하여 해를 구할 수 있다.

지금까지 보고한 내용은 통성 호기성 미생물에 관해 유도된 내용이나, 토양에서 탈질에 관여하지 않는 미생물이라 할지라도 산소를 소모하는 obligate aerobes도 있다. 따라서, 이들에 의한 전자 생성률을  $R_a$ 로 설정하고 이 역시 상수로 취급하면 이들에 의한 산소 소모율은 식 (3-14)와 같이 표현할 수 있다.

$$-4 \frac{d[C_0]_a}{dt} = R_a \quad (3-14)$$

여기서  $[C_0]_a$ 는 호기성미생물에 의해 소모되는 산소농도를 의미하며, 식(3-14)를 적분하면 호기성미생물에 의한 산소농도의 변화를 볼 수 있다.

이 모형에 의하면,  $Q_0$ 가 적어도 다른  $Q_i$ 보다 1000배 이상은 되어야 산소로 하여금 탈질 과정의 효과적인 저해자 임무를 부여할 수 있었음을 알 수 있다. 이러한 상황에서, 식 (3-12) 및 (3-13)을 풀어 구한 산소 농도는 시간의 1차 함수이고 식 (3-14)에서 구한 양상과 거의 비슷하다.

위와 같은 수학적 입증을 통해 두 가지의 호기성 미생물에 의해 소모되는 최대 산소소모율은 두개를 합한 것으로 식 (3-15)와 같이 설정하였다 ( $R_t$ ).

$$R_t = R_a + R \quad (3-15)$$

여기서  $R$ 에 대한  $R_a$ 의 비율은 곧 통성 호기성 미생물과 호기성 미생물 군집에 의해 생성되는 전자의 비율과 일치한다. 따라서,  $R_t$ 를 식 (3-12)의 첫번째 식의 분자로 대입하였으며, 나머지는 그대로  $R$ 을 대입하였다.

#### 나. 정상류 산소 산소상태에 따른 질소 변환과 이동 (transN.c)

앞에서 유도한 산소소모에 관한 반응론적인 관계를 시간뿐만 아니라, 위치에 따라 지역적으로 이러한 반응들이 어떻게 일어나는가를 예측하기 위해 수송현상과 접목하였다. 특히, 탈질에 관여하는 전자 수용체들은 기상, 액상 또는 고상에서 여러 화학 반응을 일으키므로 이 모형은 각각에 상별로 나누어 개발하였다. 산소가 소모되는 경



생적인 반응은 식 (3-12)의 첫번째 식으로 표현하였으며, 이것으로부터 모형은 구성되었다. 이때, 이 식에서  $4Q_0C_0$ 가 1보다 매우 크거나, 또는 다른  $Q_iC_i$ 보다 훨씬 큰 경우에 식 (3-12)의 첫번째 식은 식 (3-16)과 같이 간단히 표시할 수 있다.

$$\frac{d[C_0]}{dt} = - \frac{EPR}{4} = - O_2CR \quad (3-16)$$

여기서 EPR을  $\Phi_0^*$ ,  $O_2CR$ 을  $\Phi$ 라 하면,  $\Phi$ 는  $\Phi_0^*$ 의 0.25이다. 그러나, 이는 임계온도 이상 20°C까지 온도에 따라 직선 형태로 증가하고, 등은 조건하에 지수함수 형태로 감소하기 때문에 이는 식 (3-17)로 표시할 수 있다.

$$\Phi = A\Phi_0(T - B)\exp(-kx) \quad (3-17)$$

여기서  $\Phi$ 는 깊이별 산소소모율,  $\Phi_0$ 는 지표의 산소소모율 그리고 k는 미생물활성의 깊이의존도이다. 한편, A는 호흡활성의 온도의존성, B는 호흡활성의 임계온도로 각각 0.0526°C<sup>-1</sup> 및 1°C이다.

산소의 이동에 관한 1차원 수송방정식은 식 (3-18)과 같으며,

$$\frac{\partial C_0}{\partial t} = \frac{1}{\theta_a} \frac{\partial}{\partial x} \left[ D^* \frac{\partial C_0}{\partial x} \right] - \frac{A\Phi_0}{\theta_a} (T - B)\exp(-kx) \quad (3-18)$$

여기서  $\theta_a$ 는 air-filled porosity이며,  $D^*$ 는 산소의 확산계수이다.

토양단면을 통해 전자에 대해  $NO_3^-$ ,  $NO_2^-$  및  $N_2O$  산소와 경쟁하는 현상은 산소가 분포되어 있는 토양의 깊이에 의존하기 때문에, 단면내 구해진 산소분포는  $NO_3^-$ ,  $NO_2^-$ ,  $N_2O$  및 질소 기체의 이동방정식에 공급함 또는 소모항으로 처리하였다. 이 모형에서  $NO_3^-$  및  $NO_2^-$  이동은 액상에서 일어난다고 가정하여 각각 식 (3-19)와 (3-20)으로 기술하였다.

$NO_3^-$  :

$$\theta_w \frac{\partial C_1}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[ \theta_w D \frac{\partial C_1}{\partial x} \right] - \frac{Q_1 C_1 RA (T-B) \exp(-kx)}{1 + 4Q_0 C_0 + 2Q_1 C_1 + 4Q_2 C_2^2 + 2Q_3 C_3} \quad (3-19)$$

NO<sub>2</sub><sup>-</sup> :

$$\theta_w \frac{\partial C_2}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[ \theta_w D \frac{\partial C_2}{\partial x} \right] - \frac{(Q_1 C_1 - 2Q_2 C_2^2) RA (T-B) \exp(-kx)}{1 + 4Q_0 C_0 + 2Q_1 C_1 + 4Q_2 C_2^2 + 2Q_3 C_3} \quad (3-20)$$

여기서  $\theta_w$ 는 용적수분함량이고 D는 액상 내 확산계수이다.

N<sub>2</sub>O 기체는 액상과 기상에 걸쳐 분배되어있기 때문에, 각각에 대해 전개해야하나, 이 모형에서는 우선 액상에 대해 전개하였다.

$$\frac{\partial C_3^T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[ \theta_a D^* \frac{\partial C_3^g}{\partial x} + \theta_w D \frac{\partial C_3}{\partial x} \right] + \frac{(Q_2 C_2^2 - Q_3 C_3) RA (T-B) \exp(-kx)}{1 + 4Q_0 C_0 + 2Q_1 C_1 + 4Q_2 C_2^2 + 2Q_3 C_3} \quad (3-21)$$

여기서 C<sub>3</sub><sup>T</sup>는 토양내 있는 액상 및 기상에 존재하는 N<sub>2</sub>O를 의미한다.

식 (3-21)에서 기상 및 액상에 있는 N<sub>2</sub>O의 지역평형을 가정하기 위해 C<sub>3</sub><sup>g</sup>, C<sub>3</sub> 및 C<sub>3</sub><sup>T</sup>의 관계[식(3-22)]이 도입되었으며, 이에 N<sub>2</sub>O의 분배계수(k<sub>d</sub>)를 매개하였으며, 이는 다음 식 (3-23)으로 정의하였다.

$$C_3^T = \theta_a C_3^g + \theta_w C_3 = \left( \frac{\theta_a}{k_d} + \theta_w \right) C_3 \quad (3-22)$$

$$k_d = \frac{C_3}{C_3^g} \quad (3-23)$$

마지막으로, 질소기체의 확산이동에 관한 방정식은 다음 식 (3-24)와 같다. 이들 이동 방정식에 대한 자세한 설명은 생략한다.

$$\frac{\partial C_4}{\partial t} = \frac{1}{\theta_a} \frac{\partial}{\partial x} \left[ \theta_a D^* \frac{\partial C_4}{\partial x} \right] - \frac{Q_3 C_3 R A (T - B) \exp(-kx)}{\theta_a \{1 + 4Q_0 C_0 + 2Q_1 C_1 + 4Q_2 C_2^2 + 2Q_3 C_3\}} \quad (3-24)$$

#### 다. 수리모형의 해

전자가 전달되는 일련의 반응은 일련의 상미분 방정식은 4차 Runge-Kutta 법을 적용하여 그 해를 구하였으며, 산소 및 질소의 형태별 이동 및 분포에 관한 지배 방정식은 강한 비선형적 특성에 의해 수치해석적인 방법에 의해 그 해를 구하였다. 음함수 유한차분 법의 일종인 Crank-Nicolson scheme을 적용하여 전개하였으며, 이들 연립 방정식의 해는 “Thomas Algorithm”으로 일컬어지는 Gauss 소거법의 변형을 적용하여 구하였다 (Lapidus와 Pinder, 1982).

#### 2. 적정 관비농도 설정

제 2 장에서 관수점을 -50kPa로 하여 얻은 물소모량에 현행 질소시비 수준인 200 kg ha<sup>-1</sup>의 질소를 녹인 경우 얻을 수 있는 농도는 67 mg L<sup>-1</sup>이 되고, 시비수준 설정 실험과 같이 이의 반, 또 그 반의 수준을 각각 34 및 17 mg L<sup>-1</sup>로 하여 질소농도 설정 실험 및 이에 따른 질소공급량을 산정 실험을 수행하였다 (Ro and Park, 2000). 이를 우리가 흔히 쓰는 질소비료인 요소의 농도로 환산하면 각각 37, 74 및 148 g L<sup>-1</sup>가 된다. 1996년부터 2000년까지 연차적으로 수령에 따라 실험한 결과 항상 질소농도 34 mg L<sup>-1</sup>가 수체의 부위별 건물중, 질소이용률, 수량 및 과실의 품질이 좋았으며, 토양 질소의 집적 현상이 없었다. 한편, 질소농도 67 mg L<sup>-1</sup> 처리 경우 초기에 토양에 상

당한 질소집적이 관찰되었으나, 시간이 지나면서 줄어드는 경향이였다. 이 처리에서 질소이용률, 건물중, 수량 및 과실의 품질은 세 처리중 가장 낮았으며, 초기의 뿌리 염류장해 현상이 관찰되었다. 반면, 질소농도 17 mg L<sup>-1</sup>의 경우 질소이용률은 가장 높았으나, 인 및 칼리의 이용률은 중간이였다. 이 처리에서 자란 사과나무는 실험기간 내내 수세가 강하게 유지되었다. 질소농도 34 mg L<sup>-1</sup> 처리에서 사과나무가 흡수한 질소는 묘목이 2.3, 1년생이 6.9, 2년생이 15.2, 3년생이 16.9 g 이였다.

### 3. 적정 관비농도 입증 및 시비질소의 행동 연구

#### 가. 4차년도(99년) 토양 중 질소분포 고찰

시비기준은 1년차, 2년차 분석을 기준으로 관수와 동시에 관비를 했을때의 양을 기준으로 기준으로 N1구(34ppm), N2구(67ppm)로 구분하였고, 인산과 칼리는동일한 양(KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>=7.5 g)을 시비하였다.

실험포장은 비가림하지 않은 상태에서 토양유실 방지를 위해 잔디로 피복하였다. 대상과수는 후지 M9으로 처리구당 각 11주를 심었다. 관수 관비는 6월부터 시작하였다.

표 3-1. 포장토양의 성질

	용적밀도(g/cm <sup>3</sup> )	유기물함량(%)	토성
N1 0-20	1.6	0.81	사양토
N1 20-40	1.6	0.79	
N1 40-60	1.6	0.83	
N1 60-80	1.6	0.73	
N2 0-20	1.6	0.85	사양토
N2 20-40	1.6	0.93	
N2 40-60	1.8	0.93	
N2 60-80	1.8	0.97	

#### 1) 관수일 및 관수량

N1구 관비총량 400L 투입 N / dripper = 400 \* 34 / 10 = 1.36g

N2구 관비총량 342L 투입 N / dripper = 332 \* 67 / 10 = 2.22g

이 토양에서 포장용수량(0.033 MPa)수준인 수분함량 22.8%에서 관수점을 잡아 과

수로부터 10cm 거리에서 0-30cm 토양의 평균 수분함량이 22.8%미만일 때 자동으로 관수가 되도록 하였다. 9월에는 7-8월의 관수와 강우로 토양수분이 충분한 상황에서 집중호우가 내렸기 때문에 거의 관수가 이루어지지 않았다.

표 3-2. 자동관수시스템에 의한 관수현황

N1	관수일	6/14	7/1	7/4	7/5	7/6	7/7	7/21	8/16	8/20	8/24	8/25	8/27
	관수량(L)	28	22	22	10	18	3	50	47	52	48	14	86
N2	관수일	6/29	7/6	7/7	7/21	8/18	8/20	8/25	8/27	9/1			
	관수량(L)	40	10	12	38	100	100	24	16	2			

### 2) 1차 시료채취 분석 결과

1차 시료채취는 8월 12일 수행하였다. 8월 초순은 강우가 많은 시기이기 때문에 관수가 없었으며 주간부(거리0cm)에서 비교적 적은 양이 측정되었다. 많은 강우에도 불구하고 깊이 0-20cm구간이나 40-60cm구간의 질산태 질소의 양이 비슷하게 나타나고 있으며 심각한 강우에도 불구하고 우려할 만한 용탈은 나타나지 않았다.

표 3-3. 1차시료 분석결과

거리 깊이	N1						N2					
	NH <sub>4</sub> -N(ppm)			NO <sub>3</sub> -N(ppm)			NH <sub>4</sub> -N(ppm)			NO <sub>3</sub> -N(ppm)		
	0cm	30cm	60cm	0cm	30cm	60cm	0cm	30cm	60cm	0cm	30cm	60cm
0-20cm	29.06	36.80	37.68	33.16	40.97	49.02	26.51	30.08	24.97	31.97	33.62	33.69
20-40cm	32.99	37.89	37.40	33.86	48.11	41.04	27.00	28.34	33.62	38.83	30.71	35.68
40-60cm	31.48	41.67	33.76	34.32	43.07	37.15	48.15	31.03	33.97	37.81	42.56	27.59

### 3) 2차 시료채취 분석 결과

2차 시료는 9월 1일에 채취하였다. N1구는 그루당 8/24 4.36L, 8/25 1.27L, 8/27

7.82L 관수되었으며 N2구는 그루당 8/25 2.18L, 8/27 1.45L 관수되었다.

N1구의 경우 관수, 관비가 집중되어 나타났기 때문에 암모니아태 질소가 상대적으로 많이 측정되었다. N2구의 경우 1차 시료와 마찬가지로 별다른 경향성을 보이지 않는다. 1,2차 시료의 분석 결과로 볼 때 점적관수 관비시 근권 주변에 거의 일정한 농도(30-40 ppm)로 무기태 질소가 존재함을 알 수 있다.

표 3-4. 2차 시료 분석 결과

거리 깊이	N1						N2					
	NH <sub>4</sub> -N(ppm)			NO <sub>3</sub> -N(ppm)			NH <sub>4</sub> -N(ppm)			NO <sub>3</sub> -N(ppm)		
	0cm	30cm	60cm	0cm	30cm	60cm	0cm	30cm	60cm	0cm	30cm	60cm
0-20cm	50.42	26.65	27.80	33.76	27.35	28.54	37.40	35.89	30.40	36.42	39.57	38.20
20-40cm	40.20	50.21	34.14	25.04	50.25	29.94	48.31	26.05	32.08	38.41	28.75	39.11
40-60cm	35.55	42.20	32.74	25.91	33.83	31.80	39.60	28.71	29.87	35.51	29.90	29.03

가. 5차년도(2000년) 토양 중 질소분포 고찰

4차년도에 수분이동모형으로 시뮬레이션한 결과 주간부에서의 1점관수보다 주간부 주위로 4점관수가 효율적이어서 5차년도 관수 관비 실험은 4점관수로 수행되었다. 관행의 표면시비와 효율을 비교하기 위해 기존의 N1, N2 관비구뿐만 아니라 표면시비구를 설치하였다. 수체의 질소 이용률 비교를 위하여 15N으로 표지된 요소비료를 사용하였다.

1) 1차 시료 채취 분석결과

기비 후 40여일이 지난 후이기 때문에 표면시비로 투입된 요소는 질산태 질소로 이미 전환된 상태였기 때문에 토양 중 암모늄태 질소의 함량은 N1구(37.82 ppm), N2구( 34.40 ppm)에 비해 표면시비구(19.75 ppm)가 매우 낮게 나타났다. 하지만 질산태 질소의 함량은 27.76 %로 N1구(35.05 ppm)이나 N2(34.38 ppm)에 비해 낮기는 하였지만 어느 정도 비슷한 수준을 나타냈다.

암모늄태 질소에 질산태 질소의 표준편차가 대체로 작게 나타났다. N1구(10.4:9.8),

N2구(16.3:7.4), 표면시비구(8.4:5.7)로 표준편차의 차이가 최소 106%에서 최대 220%까지 나타났다. 이는 암모늄태 질소는 관비시간에 따라 함량의 변이가 크지만 질산태 질소는 용탈을 촉진할 만큼 많은 비가 내리지 않는한 일정한 수준의 농도를 유지하기 때문이다.

2) 2차 시료 채취 분석결과

2차 시료 채취는 2000년 11월 11일 수행하였다. 2차 시료 채취는 수체분석과 함께 수행하였다. 분석결과는 아래 표와 같다.

표 3-5. 5차년도 1차 시료 분석 결과

단위 ppm

거리	N1(34ppm)구						N2(67ppm)구					
	10cm		20cm		40cm		10cm		20cm		40cm	
깊이	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>
10cm	36.52	35.28	30.92	27.49	31.23	39.43	12.97	22.31	78.85	54.99	21.48	32.68
20cm	20.02	28.53	36.11	42.02	36.31	31.59	27.49	33.82	25.94	30.09	22.62	30.71
30cm	52.91	42.64	54.47	54.94	20.44	32.16	23.86	31.13	61.63	50.22	101.68	59.97
40cm	36.83	30.61	40.78	20.75	49.39	38.39	17.64	23.86	53.95	42.95	15.56	27.49
50cm	46.17	27.49	12.45	17.12	62.77	57.27	23.34	28.01	15.87	22.83	13.18	24.69
60cm	70.76	48.25	60.70	53.85	49.28	67.34	31.13	56.03	16.91	18.68	17.64	22.83
	표면시비구											
거리	10cm		20cm		40cm							
깊이	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>						
10cm	15.15	27.81	13.38	32.37	19.30	32.16						
20cm	40.98	41.29	42.02	39.22	26.46	29.05						
30cm	15.36	20.13	22.20	26.04	7.26	24.38						
40cm	15.25	22.00	14.53	22.41	15.25	32.06						
50cm	20.23	22.00	17.53	24.28	11.31	21.27						
60cm	14.53	23.34	20.34	25.42	17.90	17.43						

표 3-6. 5차년도 2차 토양시료 분석결과

단위 ppm

	거리	0 cm		20 cm		40 cm	
	깊이	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>
표면 시비구	20 cm	32.06	34.99	33.39	38.73	32.06	29.38
	40 cm	26.71	34.99	33.66	33.93	33.12	32.06
	60 cm	37.40	32.32	33.66	36.06	34.46	32.06
N1 (34ppm) 구	20 cm	3.19	32.06	34.72	31.79	34.46	28.85
	40 cm	32.32	32.06	31.79	38.73	27.25	32.06
	60 cm	27.25	32.59	29.38	33.12	30.72	29.38
N2 (72ppm) 구	20 cm	26.71	32.32	34.73	4.99	33.93	34.73
	40 cm	32.06	26.71	34.73	34.99	33.93	34.73
	60 cm	32.06	36.86	30.72	34.73	36.06	32.06

### 3) 수체의 질소 이용률 비교

수체의 질소 이용률을 측정하기 위하여 중질소(1.5%)로 표지된 요소로 표면시비 및 관비하였다. 수체는 잎, 가지, 줄기, 잔뿌리, 원뿌리로 나누어 분석하였다. 부위별 실험결과는 아래 표와 같다.

경작기 동안 공급된 질소는 표면시비구 16 g, N1구 7.1 g, N2구 7.3 g이었으며 이용률은 N2구에서 가장 높게 나타났다. N1구의 이용률은 8.29 %, N2구의 이용률은 10.49%였으며 이것은 표면시비구의 이용률 4.12%에 비해 2배, 2.5배에 해당하는 수치이다. 부위별로 보면 지상부가 지하부보다 이용률이 높았으며 특히 줄기의 이용률이 높았다. 그러나 중질소의 atom(%)는 가지와 원뿌리에서 높게 나타났다.



표 3-7. 수체의 질소 이용률 분석 결과

		건물중(g)	질소함량(g)	15N atom (%)	작물흡수량 (mg)	이용률(%)
표면시비 구	잎	50.20	0.77	0.521	103.28	0.65
	가지	137.60	1.00	0.574	180.51	1.13
	줄기	337.5	1.89	0.515	244.34	1.53
	잔뿌리	98.60	0.56	0.502	65.79	0.41
	원뿌리	52.50	0.33	0.591	65.45	0.41
	총이용률					4.12
N1 (34ppm)구	잎	77.70	1.38	0.541	210.68	2.97
	가지	198.40	1.14	0.497	129.63	1.83
	줄기	345.80	1.54	0.482	154.82	2.18
	잔뿌리	129.20	0.60	0.486	63.14	0.89
	원뿌리	44.70	0.24	0.511	30.48	0.43
	총이용률					8.29
N2 (67ppm)구	잎	68.40	1.14	0.485	117.87	1.61
	가지	150.20	1.02	0.561	173.48	2.38
	줄기	512.40	2.44	0.522	331.01	4.53
	잔뿌리	111.40	0.60	0.522	80.68	1.11
	원뿌리	57.10	0.40	0.547	62.72	0.86
	총이용률					10.40

다. 점적관수시 관비 및 표면시비된 요소의 행동비교

과수를 비롯한 발작물은  $\text{NH}_4\text{-N}$ 보다  $\text{NO}_3\text{-N}$ 을 선호하며 점적관수가 주로 용탈위험성이 적은 건조한 지역에서 이루어지는 까닭에 선진국가에서는 관비용 질소비료로  $\text{KNO}_3$ ,  $\text{NH}_4\text{NO}_3$ 같은 질산태 비료를 사용하고 있다. 반면 우리 나라의 경우 용탈위험성이 적고 가격경쟁력에서 우위에 있는 요소비료가 관비에 사용되고 있다. 따라서 우리나라 실정에 맞는 관수 관비 최적화 시스템을 구축하기 위해서는 관비용 비료로서 요소를 평가하여야 할 것이다. 이를 위해 요소의 행동을 다른 비료와 간단히 비교하기 위한 항온배양실험을 수행하였으며 점적관수시 관비된 요소와 표면에 시용된 요소의 행동을 연구하여 그로부터 유래한 무기태 질소의 양 및 분포를 평가하였다. 그에 덧붙여 질소의 행동과 관비에 의한 토양의 화학성 변화를 고찰하였다.

## 1) 항온배양실험

요소비료의 질소변환을 고찰하고 다른 비료의 질소변환과 비교하기 위해 항온배양 실험을 수행하였다. 공시토양으로 수원시 이목동 원예연구소 과수원 토양을 사용하였다. 먼저 토양을 코아에 넣고 토양 수분 추출장치를 이용해 -30 kPa과 -50 kPa의 수분함량을 측정하였다. 그리고 100 mL 플라스틱 병에 토양 20 g을 용적밀도 1.3 g/cm<sup>3</sup>수준으로 충전한 후 -30 kPa 수분조건에서 1주일간 사전배양하였다. 사전배양이 끝난 후 요소, 유안, 질산칼륨을 토양 20g에 N 0.975 g의 수준으로 물에 녹여 투입한 후 20℃, -50 kPa 수분조건에서 4주간 항온배양하였다. 항온배양실험 결과 요소와 유안 모두 22일-29일 사이에 질산화작용이 완료되었으며 질산태 질소의 양은 요소, 유안, 질산칼륨 처리구에서 각각 52, 55, 65.6 mg kg<sup>-1</sup>로 질산칼륨이 약간 높게 나타났다.

## 2) 포트실험

점적관수시 관비와 표면시비된 요소의 행동을 비교하기 위해 비닐하우스 내에서 6주간의 포트실험으로 수행하였다.

### 가) 재료 및 방법

#### (1) 처리

상부 반경 27 cm, 하부 반경 25 cm, 깊이 58 cm 포트에 토양 121 kg을 충전하였다.(용적밀도 1.27 g/cm<sup>3</sup>) 표면시비구는 토양 5 kg 요소 4g(N 1.87g)을 골고루 섞은 후 포트에 충전하였고 관비구는 질소농도를 120 ppm으로 하여 1개월간 관비하였다.

#### (2) 관개방법

토양수분의 조절은 점적기로부터 15 cm 거리에 길이 20 cm의 TDR 탐침봉을 매설하여 관수점 -50 kPa에서 조절하였다. Marriot 병을 이용하여 0.5 L hr<sup>-1</sup>의 일정유속을 유지하였다.

표. 3-8 관수의 화학적 성질

pH	EC (dS m <sup>-1</sup> )	Cation(ppm)				Anion(ppm)			
		Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Mg <sup>++</sup>	Ca <sup>++</sup>	F <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>--</sup>
6.8	0.15	19.7	3.9	3.1	17.7	0.19	35.54	7.74	9.94

### (3) 시료채취

시료는 점적기에서 5, 15 cm 거리에서 0-5, 15-20, 35-40 cm 깊이에서 관수 시작일을 0일로 하여 1, 7, 14, 28, 44일 채취하였다. 44일 채취의 경우 무기태 질소 총량 결정을 위해 별도로 반경 0-5, 5-15(3반복), 15-27 cm(3반복), 깊이 10 cm 간격으로 시료를 채취하였다.

### (4) 분석방법

요소태 질소는 UV-VIS spectrometer(SHIMADZU, UV-1601)을 사용하여 발색법으로 측정하였으며 무기태 질소는 켈달법으로 측정하였다. pH와 EC는 1:5법으로 측정하였으며 주요 치환성 양이온 Na, K, Ca, Mg는 원자 흡광 광도계(SHIMADZU AA6501F)를 사용하여 측정하였다. 투입된 요소비료로부터 생성된 무기태 질소의 총량의 안정성 동위원소비 질량 분석기(Isoprime-EA, micromass)를 사용한 중질소 추적법으로 결정하였다.

## 나) 결과

### (1) 시간에 따른 질소변환과 이동에서 나타난 특징

관비구에서는 점적기 부근(5-5)을 제외하고는 NH<sub>4</sub><sup>+</sup> 농도의 별 변화가 나타나지 않는 것으로 보아 대부분의 요소가 점적기 부근에서 가수분해되었으며 이동성이 좋은 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>로 변환된 후 이동하였다는 것을 알 수 있다. 이는 pH의 변화로도 확인할 수 있었다. NO<sub>3</sub><sup>-</sup>의 농도는 꾸준히 증가하였는데, 5-20와 15-5에서는 7일 후부터 초기값 5.26 mg kg<sup>-1</sup>의 두배 이상인 13.91, 13.63 mg kg<sup>-1</sup>을 나타내었고 14일 이후에는 전지점에서 10 mg kg<sup>-1</sup>의 농도를 보였다. 반면 표면시비구에서는 1일에는 5-5와 15-5에서만

$\text{NH}_4^+$ 의 농도가 높게 나타났으나 질산화작용으로 이 지점들의  $\text{NH}_4^+$ 가 감소하는 동안 다른 지점에서는 증가를 나타냈다. 증가양상은 14일까지 나타났는데 그 크기는 최소  $5.7 \text{ mg kg}^{-1}$ (5-20)에서 최대  $8.1 \text{ mg kg}^{-1}$ (15-40)이었다. 이 현상은 요소나  $\text{NH}_4^+$ 가  $\text{NO}_3^-$ 에 비해 이동성이 적다고 하여도 표면에 고농도로 집적되어 있기 때문에 관비에 비해 훨씬 빠르게 용탈될 수 있음을 의미한다.

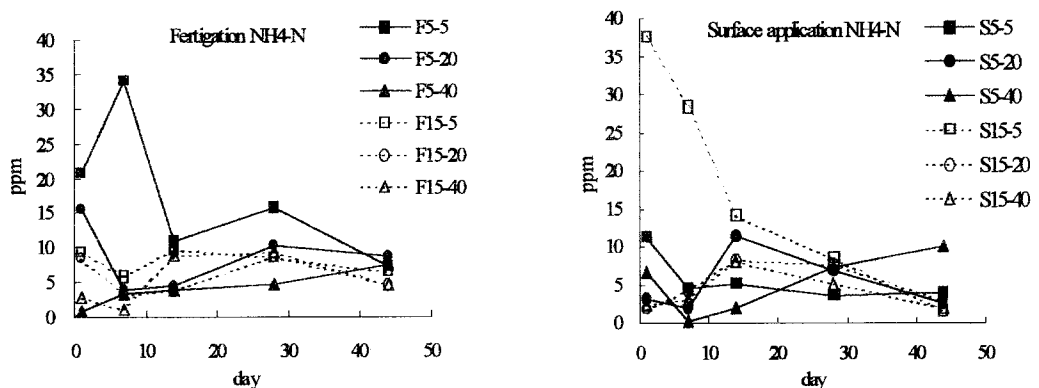


그림 3-1. 관비구와 표면시비구에서 지점별  $\text{NH}_4\text{-N}$ 의 함량 변화.

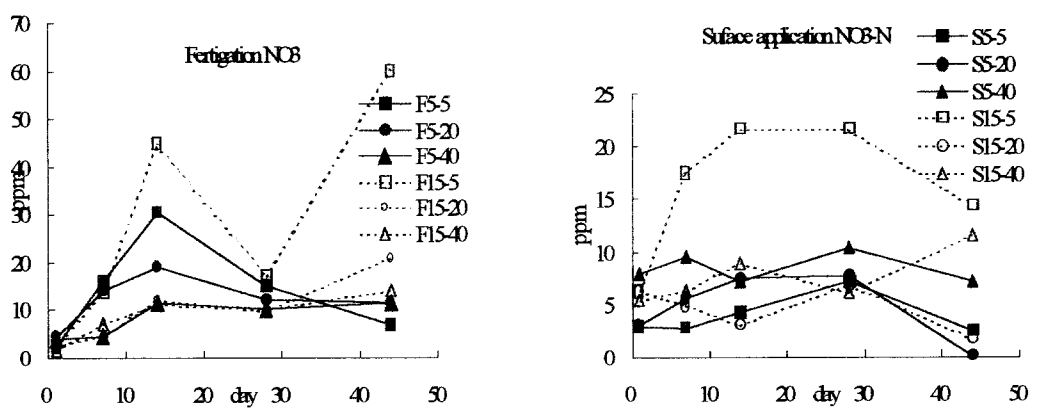


그림 3-2. 관비구와 표면시비구에서 지점별  $\text{NO}_3\text{-N}$ 의 함량 변화.

(2) 무기태 이온의 분포와 요소 유래 질소 총량 평가

44일 후 무기태 질소의 총량은 관비구 2.53 g, 표면시비구 2.57 g이었다. 관비구의 경우  $\text{NO}_3^-$ 이 전체 무기태 질소의 84%로 표면시비구의 69%보다 높았다. 깊이별로 보면 관비구는 0-10 cm 에 38%로 높았지만 10-20, 20-30, 30-40 cm에서 각각 18, 19, 16%로 고루 분포되어 있었으며 40 cm 이하는 9%로 용탈이 적었음을 알 수 있다. 그러나 표면시비구의 경우 0-10 cm에서 43%였으며 10-20, 20-30 cm는 8, 10%에 불과하고 30-40, 40 cm 이하에 각각 23, 16% 존재하였다. 두 처리구에서 모두 0-10 cm 깊이의 반경 15-27 cm 구획에서  $\text{NO}_3^-$ 의 집적이 나타났다. 이 구획은 관수를 조절하는 센서의 외부접경으로 관수가 이 구획에 유입될 때 관수는 중단되게 된다. 따라서 집단류를 통해 빠르게 이동하던  $\text{NO}_3^-$ 가 속도가 느린 확산에 의해 이동하게 되면서 집적되는 것으로 볼 수 있다. 투입된 요소 중 무기태 질소로 전환된 것은 관비구의 경우 950 mg(투입요소의 67.4%)이며 이 양은 전체 무기태 질소 중 37.5%였다. 이 중 99%는  $\text{NO}_3^-$ 로 존재하였으며, 620 mg이 센서의 외부접경에 집적되어 있었다. 표면시비구의 경우 770 mg(투입요소의 42.%)이 무기태로 전환되었으며 이 중  $\text{NO}_3^-$ 는 82%이었다. 그리고 전환된 무기태 질소의 91%가 센서의 외부접경에 집적되어 있었다.

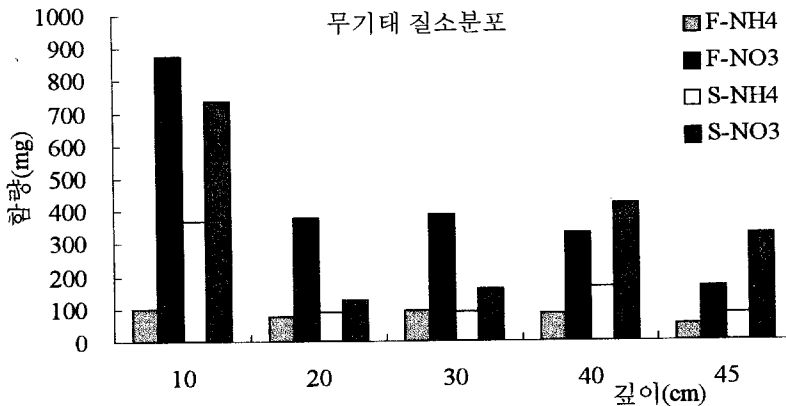


그림 3-3. 관비와 표면시비간 깊이별 무기태 질소 총량 분포

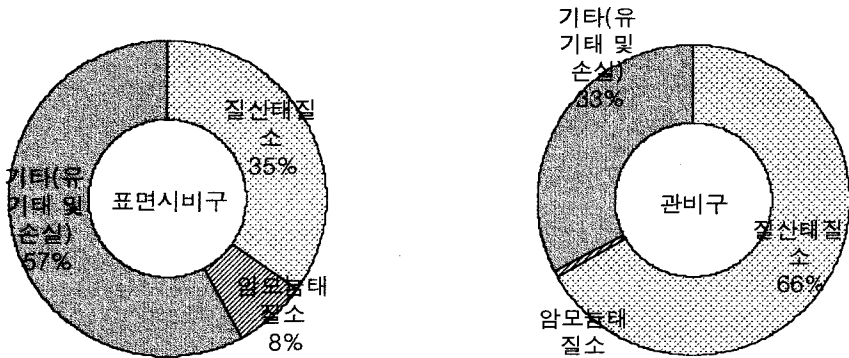


그림 3-4. 투입된 요소의 형태변환.

### (3) 질소변환에 따른 토양의 화학성 변화

질소변환에 의해 가장 크게 영향을 받은 토양의 성질은 pH이다. 관비구의 경우 요소 가수분해에 의한 pH 상승은 5-5에서만 1-7일 사이에 나타났으며 그 이후에는 질산화 작용에 의한 pH 감소가 나타났다. 특히 5-5의 경우 계속된 질산화작용에 의해 7-44일 사이에 1.23 단위 감소하였다. 5-5에서의 급격한 감소에는 질산화 작용뿐 아니라 양이온 용탈의 영향도 있을 것이라고 생각되며 44일의 경우 5-5의 양이온 함량은 15-5에 비해 Na 70%, K 84%, Mg 78%, Ca 83% 수준이었다. 표면시비구의 pH 변화는 전지점에서 유사하였는데 1-7일 사이에 요소 가수분해에 의해  $0.52 \pm 0.13$  단위 상승하였으며 7-28일 사이에 질산화 작용에 의해  $0.57 \pm 0.14$  단위 감소하였다.

EC의 변화는  $\text{NO}_3^-$  함량 변화와 유사한 경향을 나타내었다. 표면시비구의 5-5에서는 계속적으로 감소하였으나 관비구의 5-5에서는 14일까지 증가하다 감소하였다. 1일에서 44일 사이의 하락폭은 표면시비구( $0.055 \rightarrow 0.039 \text{ dS m}^{-1}$ )에서 보다 관비구( $0.046 \rightarrow 0.020 \text{ dS m}^{-1}$ )가 더 컸으며 최대치인 14일( $0.062 \text{ dS m}^{-1}$ )에 비교하면 39% 수준까지 하락하였다.

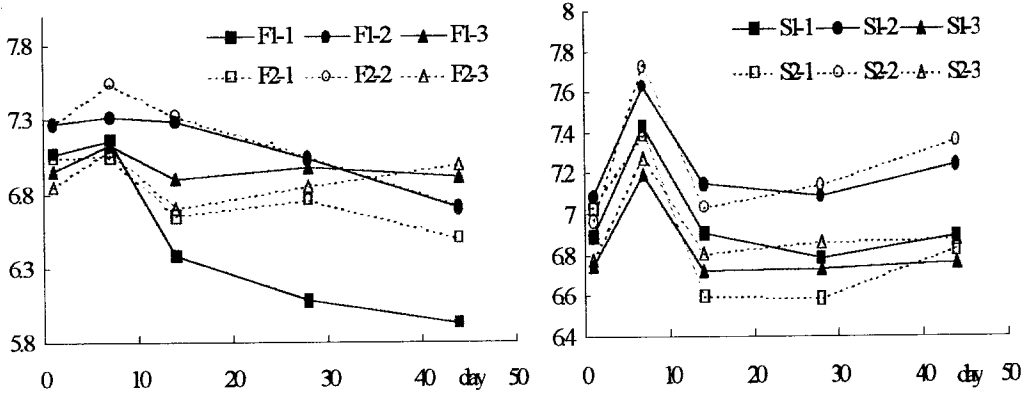


그림 3-5. 관비구와 표면시비구의 pH 변화 비교

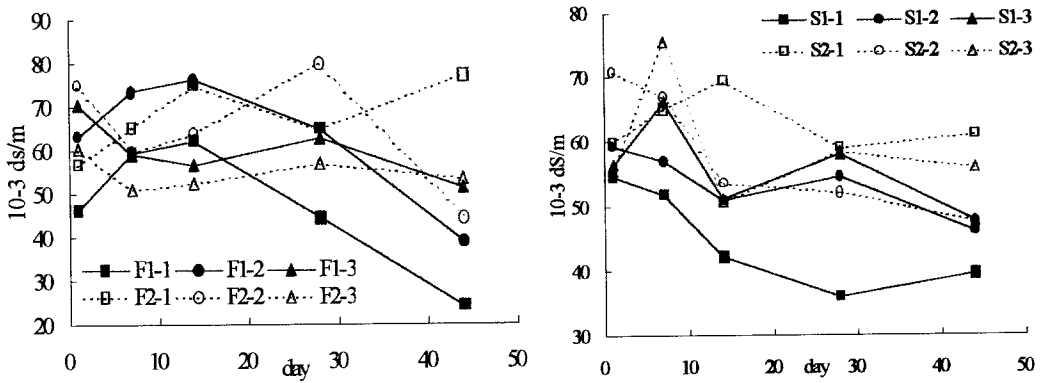


그림 3-6. 관비구와 표면시비구의 EC 변화

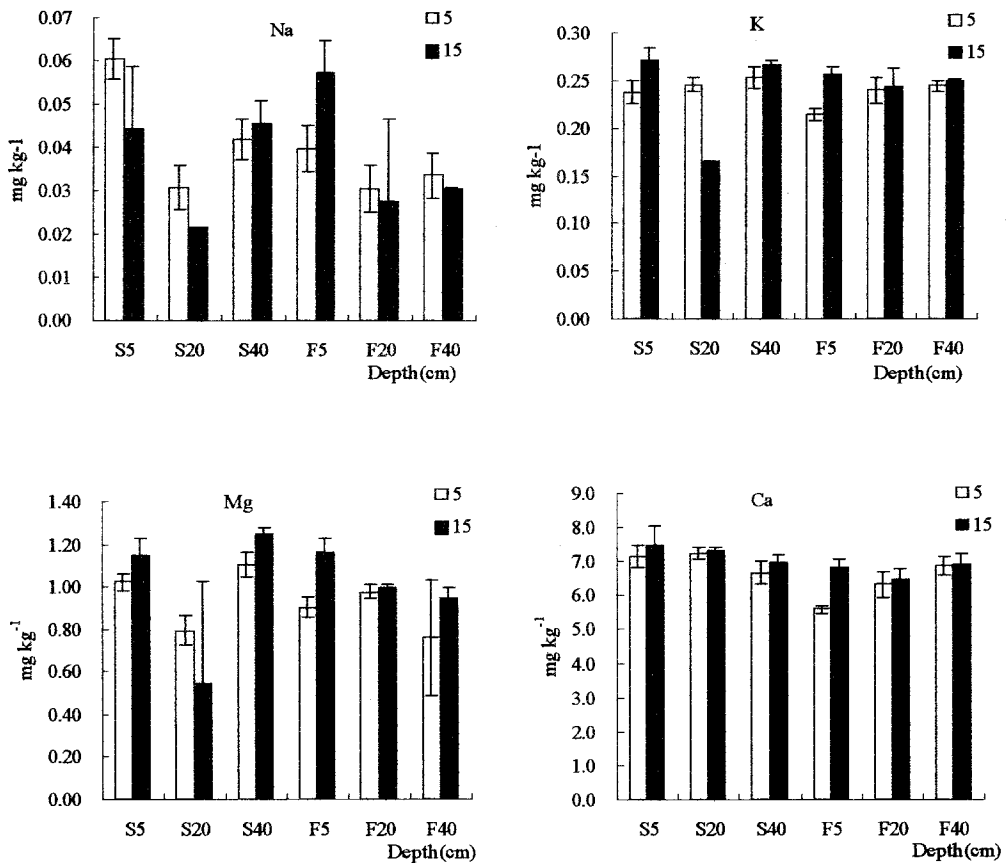


그림 3-7. 점적기로부터 거리 5, 15 cm 표토의 주요 치환성 양이온 Na, K, Mg, Ca 함량

#### 다) 결론

본 실험의 결과로 볼 때 관비는 표면시비에 비해 요소의 변환 과정에 수반되는 암모니아 휘산 및 질소의 용탈 등에 의한 손실이 적어 시비효율의 측면에서 표면시비에 비해 긍정적인 효과를 기대할 수 있을 것으로 판단되었다. 하지만 점적기가 식물 뿌리 근 처에 설치되어있을 때 토양의 pH가 급격히 낮아져 부정적인 영향을 줄 수도 있다. 또한 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>의 생성까지 2주-4주의 시간이 소모되므로 실제 적용시 이를 고려하여 관비 시점을 잡아야 할 것이다.



## 제 4 절 활용에 대한 건의

적정 관수점에서 최적 관비농도로 관비시 관비의 손실과 용탈, 초과집적에 의한 오염을 최소화할 수 있으므로 기존의 추천시비량 개념을 대폭 개선할 수 있다. 예를 들어 요소를 관비하였을 경우 표면시비에 비해 무기태 질소 생성률이 높았을 뿐만 아니라(표면시비 43%, 관비 67%) 과수가 선호하는 질산태 질소로의 거의 전량 전환하였다. 또한 중질소 추적법으로 수행한 수체 분석에서도 그루당 N 16 g을 표면시비한 수체보다 관비로 그루당 N 7.1, 7.3 g 처리한 곳의 수체가 더 높은 이용률을 나타내었다.

이러한 적정 관수점과 적정 관비농도에 대한 개념을 농민들에게 대중적으로 전파하여 점적관수에 대한 물이해로 인한 불필요한 물 소모와 과도한 양분의 공급이 없도록 해야 할 것이다.

# 제 4 장 수분감응 정전용량형 센서의 개발 및 최적화

- 제 1 협동과제 (수원대학교)

## 제 1 절 서설

### 1. 기술개발의 필요성

국제적으로 또는 국지적으로 교역환경은 GATT체제하의 품질경영(ISO 9000)에서 WTO체제하의 환경경영(ISO 14000)이라는 새로운 질서에 의해 조절되리라 전망된다. 이렇게 변화되는 국제교역의 질서아래 우리 농산물의 해외 또는 내수 시장의 경쟁력을 높이기 위하여는 생산비 절감, 품질개선 나아가 자연환경에 친근한 생산기반의 조성이 시급하다. 그러나, 지금까지 우리나라 농업은 인근비의 상승 등 간접비용이 차지하는 비율이 높아감에도 불구하고 선진국에 비해 농업의 자동화를 통한 노동력 절감과 최적재배 구현을 달성하려는 노력이 미진한 실정이다. 다른 한편으로 우리농업이 지니고 있는 문제점은 해마다 농경지에 과도한 비료와 물이 비효율적으로 투입되기 때문에 토양 및 수계의 오염에 적지 않게 기여하고 있다는 점이다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 관수자동화시스템의 구현은 장차 우리농업의 경쟁력을 크게 향상시킬 것이다. 핵심기술이 토양수분측정센서의 개발을 달성하여 안정적으로 토양수분상태를 지속적으로 관리하고 예측할 수 있는 운용 프로그램을 개발하여 작물의 최적생장자료를 data base로 한 제어장치에 접속하면 관수자동화를 구현할 수 있다.

본 연구는 지금까지 토양수분의 측정에 사용되었던 기술과는 달리 물이 지닌 유전적 성질을 이용한 정전용량형 토양수분센서를 개발함을 주요내용으로 한다. 이러한 자동화시스템의 핵심기술 개발은 우리농업의 국제 경쟁력을 크게 개선할 뿐아니라, 우리와 유사한 농업구조를 갖고 있는 후발국의 시장개척을 통해 국익을 크게 도모할 수 있다. 또한 국민의 삶의 질이 날로 높아져 고급 농산물에 대한 수요는 생산단계에서부터 철저한 체계적 관리를 요구하고 있다.

특히, 첨단기술의 정전용량형 수분측정센서의 개발이 갖는 의미는 단순히 외국 선진기술의 국산화라는 수동적 차원이 아닌 국내에서 개발한 제품의 해외시장개척이라는 수출지향적인 능동적 대처를 의미한다.

## 가. 산업적 측면

외국에서 개발되어 상용제품화된 여러 가지 방식의 토양수분센서가 안고 있는 다양한 문제점을 비교 검토하여 이를 극복할 수 있는 새로운 타입의 센서를 개발하여 자동화 시스템과 결합하여 실용화함으로써 농업기술의 자립화와 국제경쟁력을 확보할 수 있다. 과수원과 같은 시설농업에서 요구되는 관수자동화시스템을 구현하며 날로 확대일로에 있는 시설재배분야에 응용될 때 그 파급효과는 상당할 것이다. 또한 공원과 컨츄리 클럽 등의 그린을 관수자동화함으로써 쾌적한 생활환경조성사업에 이바지할 수 있을 뿐아니라, 방대한 선진국시장을 겨냥할 수 있다. 나아가 소규모로 개발하여 실내정원 등에 적용하면 방대한 해외시장을 개척할 수 있으리라 전망한다.

## 나. 환경적 측면

최적환경 재배를 통하여 농경지에 과다한 비료와 물이 비효율적으로 투입되어 유발되는 토양 및 수계의 오염을 최소화할 수 있다.

## 다. 정책적 측면

노동생산성 향상과 품질개선은 농산물수입을 억제하며 품질고급화로 해외시장을 개척하여 수출을 확대할 수 있다. 또한 농민의 소득증대와 노동환경개선을 통해 도시와 농촌간의 대등한 생활여건을 조성하여 균형있는 국토발전을 기할 수 있다.

## 2. 국내의 관련기술의 현황

### 가. 국내기술수준

국내에서 토양수분센서를 상품화한 실적은 없으며 간헐적으로 실험실용으로 석고괴(gypsum block)을 이용한 전기저항 센서를 제작사용한 경우가 있는 실정이다. 다만, 실험실 연구용으로 소량의 외국제품이 수입되어 사용되고 있는 형편이다. 따라서

본 연구를 통해 개발하고자하는 토양수분측정센서의 상용화는 우리나라 농업의 생산 기반과 기술수준을 제고하는데 크게 기여하리라 전망한다. 본 연구에서 우리는 수분의 기본적인 물성에 대한 기초과학자 연구집단의 노력과 토양의 물리화학적 조성에 대한 토양학 연구집단의 축적된 연구결과에 전기회로 공학자들의 응용기술을 접목하여 자동토양수분측정장치를 개발하고자 한다. 본 연구를 통하여 외국기술의 국산화를 구현하는 것이 아니라 국제 경쟁력있는 독자적인 첨단기술의 확보를 기할 수 있을 것이다.

#### 나. 해외 선진 기술 수준

토양 및 다공성 매질에서 수분함량을 측정하는 기술은 미국 및 유럽을 중심으로 농업 및 환경분야 뿐 아니라 석유탐사 등에서 오랫동안 개발되어 측정원리면에서 진화를 거듭하고 있다. 토양의 수분함량을 측정하는 기존의 방법으로 수분장력계, 전기저항센서, 중성자 산란법 및  $\gamma$ -선 조사법 등이 사용되고 있으나 이러한 기존의 방법은 측정범위의 제한성 및 안전성 경제성 등에서 많은 문제점을 내포하고 있다. 그러나 1980년대부터 미국에서 개발되어 연구용으로 많이 사용되고 있는 TDR(Time Domain Reflectometry) 센서는 마이크로파가 Transmission line을 따라 전파할 때 전파속도의 유전율에 대한 의존적인 성질을 이용하여 간접적으로 수분량을 측정하고 있으나 분석상의 난해함을 안고 있어 이를 극복하기 위한 여러 가지 형태의 센서 개발이 시도되고 있다. 이들 문제점으로 인하여 TDR은 전문가용으로 연구실에서 제한적으로 사용되고 있다. 또한 1994년에 네덜란드에서는 FD(Frequency Domain)방식의 센서가 개발 시험 중에 있다.

#### 다. 기존의 토양수분측정센서의 문제점

- 수분장력계 : 수분측정범위  $\Rightarrow$  0~0.8 bar  
전기신호 접속시 고가의 압전소자 (pressure transducer)가 필요
- 전기저항센서 : 수분측정범위  $\Rightarrow$  1bar 이상  
수분이 많은 경우 전해질의 간섭이 문제, 정확도에 대한 신뢰성이 결여.

· 중성자 산란법 : 방사선에 노출될 위험 내포, 고가로 인한  
농작물

시설에 부적합, 실험실 연구용으로 사용.

·  $\gamma$ -선 조사법 : 방사선에 노출될 위험 내포, 고가장비로  
주로 실험실 연구용.

참고로 FD방식과 TDR방식을 비교검토하고 전기저항 방식과 정전용량방식의 수분 측정 특성을 비교 검토하였다.

○ FD 센서와 TDR 센서의 비교

	FD	TDR
length of electrode	<15cm	>10cm
accuracy, resolution	decreasing with $\theta$	increasing with $\theta$
measurement freq.	20MHz	0.5-1GHz
bound water sensitivity	as for free water	less than for free water
Maxwell-Wagner sensitivity	low	lowest
calibration	required	required
interpretation of data	direct	indirect(graphically)
sensor multiplexing	simple(RS232)	complex(coaxial VHF system)
conductivity meas.	part of technique	possible, but not accurate
instrument operation	simple	skilled operator needed (when not automated)
stratification detection	averaged out	boundary detection possible
reliability	high	medium
cost --apparatus	low	high
sensor	low	high
multiplexer		
sensors	high ro medium	low to medium
power consumption	low	high

○ 전기저항식과 정전용량식 토양수분센서의 비교

	전기저항식	정전용량식
1	값이 싸고 사용이 간편하다.	값이 싸고 사용이 간편하다.
2	측정영역 $10^3 - 10^6$	측정영역 $10^0 - 10^2$
3	물질에 따른 calibration 요구	보정스위치로 단일 calibration 가능
4	유기액체에 사용할 수 없음	유기액체에 사용가능
5	수분측정영역에 제한, 4-20%범위	수분측정영역에 제한이 없음
6	전극의 안정도 불필요, 시료와 양호한 접촉이 요구됨	전극의 높은 안정도 요구, 시료와 양호한 접촉은 불필요
7	온도의존성이 큼, 측정값에 무관	온도의존성이 작고 측정값에 의존성이 있음
8	교정곡선이 측정전압에 의존함	교정곡선이 측정전압에 무관함
9	시료의 밀도 의존성이 작음	시료의 밀도의존성이 큼
10	결합수에 염이 포함되어 있으면 큰 오차 유발	결합수에 염이 포함되어 있어도 영향이 작음
11	전극이 넓은 경우 수분이 많은 부분의 값을 읽음	평균수분을 측정함
12	시료의 내부와 외부에 수분기울기가 있을 경우 오류가 발생	시료전체의 수분을 측정값으로 읽음
13	정전기의 영향에 민감함	정전기의 영향에 무관함

라. 국·내외 기술수준 비교표

	선진국	한국
○ 전기저항 센서 기술	○	×
○ 토양수분장력계 기술	○	×
○ 중성자 산란 기술	○	×
○ $\gamma$ -선 점감 기술	○	×
○ TDR측정 기술	○	×
○ 정전용량형 센서 기술	○	×

마. 시장규모

주시장(국가 또는 지역) : 미국, 일본, (프랑스외 유럽)

시장규모

구분	현재의 시장규모	예상되는 시장규모
세계시장 규모	1,600억원	(2000년) 8,000억원
한국시장규모	33억원	(2000년)165억원

산출근거:(한국시장)20만원/대×3,300사이트×5대/사이트=33억

5년 후 (영농의 기업화 및 자동화 진전) 33억×5 = 165억

(세계시장) 영농선진화 국내시장의 약 100배 추산

바. 기술개발 후 향후 전망

본 연구를 통해 첨단 정전용량형 토양수분센서가 개발되면, 이는 수분계측분야에서 세계적으로 우위에 있는 기술을 확보하게 되고 이와 함께 많은 고부가가치를 지닌 기술이 축적되게 된다. 한편 정전용량센서는 자체적으로 전기신호를 출력하므로 손쉽게 이를 표준화하여 자연스럽게 자동화 및 컴퓨터에 접속시켜 제어할 수 있는 많은 적용가능성을 내포하고 있다. 이러한 기술을 발전시키면 온도 및 염류농도를 계측할

수 있는 기술도 도출할 수 있으므로 그 적용분야의 영역은 농업생산의 초생력화를 넘어 곡류의 수분 및 화공분야 심지어 환경관련 산업분야까지 확대되리라 전망하며 아울러 이 기술이 지닌 부가가치 또한 매우 높으리라 전망한다.

본 연구를 통해 개발하고자하는 정전용량형 센서와 같은 원리를 응용한 화란의 개발제품을 수입할 때, 이를 국내가격으로 환산하면 개당 약 40만원 정도의 가격이 예상되며, 이를 개발하면 그 수입대체 효과는 매우 클 뿐만 아니라 적극적으로 해외시장을 개척할 수 있는 충분한 시장경쟁력을 확보할 수 있으리라 전망한다. 또한 토양수분측정센서의 개발과정에서 수분하는 다양한 형태의 연구와 무형의 지적 재산권 또한 우리 농업학문의 수준을 현단계에서 비약하는데 기여하리라 전망한다.

센서개발을 통한 계측산업은 비단 농업뿐 아니라 타 산업에서도 수입대체 효과가 예상되며 아울러 시장경쟁력이 제고되리라 전망한다. 또한 기초과학과 공학기술 및 농업연구의 공동연구노력을 통하여 센서기술의 국제 경쟁력을 확보할 수 있다. 이러한 직접적인 효과이외에도 생산환경을 자동화함으로써 노동력의 생산성제고와 농작물의 재배환경의 초생력화가 가능해지리라 전망하며 동시에 자원을 에너지 효율적으로 관리함으로써 환경보전은 물론 나아가 국토의 균형발전에 이바지하리라 전망한다.

## 제 2 절 연구개발내용 및 범위

### 1. 기술개발의 최종목표

정전용량형 수분감응 토양수분센서를 개발·최적화하여 시장경쟁력있는 토양수분 측정기의 상용화를 이루어낸다. 이와 함께 토양수분측정기 기술의 국제경쟁력을 확보한다.

### 2. 기술개발의 내용 및 범위



기술적 타당성과 영농현장에서의 실용성에 기초한 토양수분센서를 개발하기 위하여 토양수분측정센서기술의 개발추이와 농업현장의 시장개척추이를 조사하여 기술적 측면의 문제점 및 이를 극복할 수 있는 새로운 기술의 개발가능성을 면밀히 검토하여 적정한 prototype의 고안과 적정한 소재의 선정을 기한다. 또한 다양한 환경에서 새로운 센서와 기존센서의 기술적 비교평가를 기하여 최적화를 추구한다.

새로운 방식에서 예상되는 문제점을 도출하여 합리적이고 경제적인 토양수분측정센서를 개발한다. 또한 이에 상응하는 기본전자회로를 설계한다. 측정범위와 측정환경을 고려한 세심한 설계를 기하여 폭넓은 환경에서 예상되는 noise effect를 최소화시킨다.

농업환경에서 예상되는 다양한 측정환경을 고려하여 비교적 크게 나타나는 물리적 보정인 온도의존성에 관한 실험을 다양하게 실시하여 측정오차의 최소화를 구현하며 토양조성에 따른 화학적 보정을 구현하기 위하여 다양한 표본토양에 대한 실험을 통하여 전해질에 대한 센서의 안정성을 확보하고 토양종류에 따른 data log를 구축한다.

시작품을 제작하여 다양한 보정실험을 통한 최적화를 구현하며 측정환경을 고려한 센서의 디자인을 개발하여 생산공정을 연구한다. 농업환경에서 요구되는 토양수분측정센서의 이용자의 용도에 따라 자동제어화를 구현하여 편의성을 구현한다.

## 제 3 절 연구개발결과

### 1. 기초자료 조사 및 센서소재선정

#### 가. 기초자료 조사

##### 1) 토양의 유전적 성질

물질이 가지는 유전성에 의한 성질은 복소수로 표현되는 유전상수(dielectric constant)로 나타나며, 복소수로 표현되는 유전율  $\epsilon$  은 다음과 같다.

$$\epsilon = \epsilon' - i\epsilon'' \quad (4-1)$$

여기서  $\epsilon'$  은 유전율의 실수부분으로 물질의 분극화율을 나타낸다.  $\epsilon''$  은 유전율의 허수부로 에너지의 흡수율을 나타낸다. 물질의 이온화정도에 따라 전도성과 유전성에 의하여 전기적 에너지가 흡수된다. 따라서,

$$\epsilon'' = \epsilon_d'' + \frac{\sigma}{\epsilon_0\omega} \quad (4-2)$$

로 나타낼수 있으며,  $\epsilon_d''$ 는 유전성에 의한 에너지 흡수를 나타내고,  $\sigma$ 는 이온화된 정도에 따른 전도성이며,  $\epsilon_0$ 는 진공의 유전율이고,  $\omega$ 는 전기장의 각진동수이다. 각진동수  $\omega$ 가 relaxation frequency (자유수의 relaxation frequency는 17GHz) 보다 충분히 작으면 유전성에 의한 에너지 손실은 전도성에 의한 에너지 손실에 비해 무시할 정도가 되어  $\epsilon'' \approx \frac{\sigma}{\epsilon_0\omega}$ 이다.

그림 4-1에서 나타난 바와 같이 순수한 물의 경우 굴절율  $n$ 은  $\omega$ 가 물의 relaxation frequency보다 작을 때 거의 일정한 값을 보인다.

유전상수는  $\epsilon'/\epsilon_0$ 로 나타내어지는 데 물의 경우 약 81, 건조토양의 경우 약 7을 나타낸다. 물은 건조토양의 10배 이상의 높은 유전상수를 가지므로 유전상수의 측정을 통한 토양수분함량결정이 가능하다.

토양은 토양 골격을 이루는 토양 무기 입자와 동·식물에서 유래된 유기물 및 이들 고체 입자들 사이 공극에 채워진 공기와 수분으로 이루어져 있다. 따라서 토양의 유전상수는 토양무기물, 토양 유기물, 토양수분, 토양공기의 4성분의 유전상수와 그 함량비에 의해 결정된다. 4 성분 중 토양의 전체 유전상수에 가장 큰 영향을 미치는 것은 토양수분이다. 그러나 토양 무기물과 토양 유기물도 종류와 특성에 따라 영향을 미칠 수 있다. 토양 무기물은 입자크기로 분류하는데 미농무성법에 의하면 입자지름이 2~0.05mm를 모래, 0.05~0.002mm를 실트, 0.05~0.002mm를 점토라 하여 세 성분으로 나눈다. 특히 토양의 유전적 성질에 영향을 미치는 것은 점토이다. 점토입자는 표면에 전하를 가지고 있는데 대부분 음전하를 띠고 있다. 따라서 점토를 많이 함유한 토양의 경우 점토표면의 전하량에 의해 유전상수가 영향을 받게 된다. 이 영향은 전자기파의 발진 진동수를 높일 때 줄어든다고 알려져 있다. 문헌에서는 100MHz이상의 발진진동수를 가질 때 점토의 표면전하에 의한 영향을 무시할 수 있다고 밝히고 있다. 토양 유기물은 대부분 콜로이드를 형성하여 표면전하를 띠고 있는 부식(humus)으로 이루어져 있다. 따라서 유기물의 함량 또한 토양의 유전성질에 중요한 요소가 된다. 토양 공기의 경우는 진공 중에서 유전율과 큰 차이를 보이고 있지 않아

전체적인 토양의 유전율에 거의 영향을 주지 않는다.

따라서 토양의 유전상수는 토양수분함량에 의해 가장 큰 영향을 받으나 전자기파의 발진진동수와 토양 중 점도함량과 유기물함량 등에 의해 달라질 수 있다.

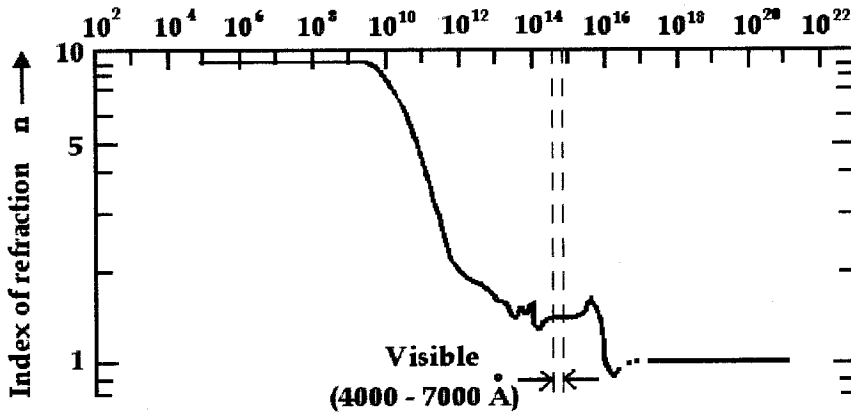


그림 4-1. 전자기파의 Frequency에 따른 순수한 물의 굴절율  
(  $n = \sqrt{\epsilon}$ ,  $n$  : 굴절율,  $\epsilon$  : 유전상수 )

## 2) 측정원리

토양과 같은 물질의 유전율은 2개 또는 그 이상의 전극을 갖는 축전기의 복소 임피던스를 측정함에 의해 결정된다. 전기회로 이론으로부터 복소 임피던스  $Z$ 와 유전율 사이에는 다음과 같은 관계가 성립한다.

$$Z = \frac{1}{G + j\omega C} = \frac{1}{j\omega\epsilon\epsilon_0\kappa} \quad (4-3)$$

여기서  $\kappa$ 는 전극의 길이, 간격, 지름, 형태로 결정되는 geometry factor이며  $G$ 와  $C$ 는 유전체에서 전극의 전도도와 정전용량이다. 간단한 회로모형은 그림1-2에서 나타나 있다.

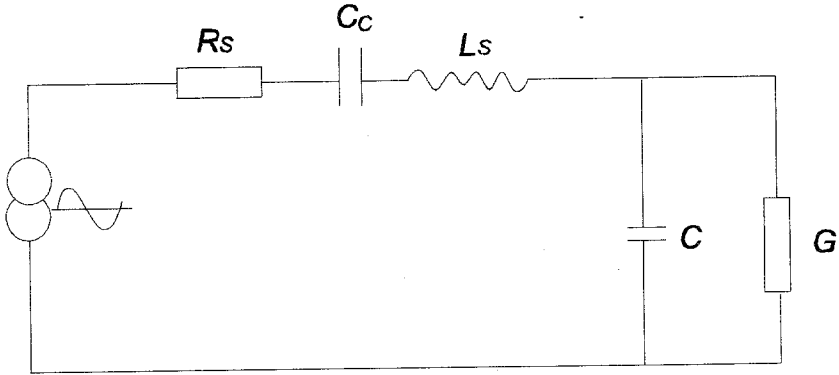


그림 4-2. 유전율 측정을 위한 간단한 회로 모형

연결선과 전극의 자체 임피던스는 인덕터  $L_s$ 와 저항  $R_s$ 과 정전용량  $C_c$ 로 추정할 수 있다. 알려진 전류  $I$ 의 사인파가 전압  $u=i \cdot Z$ 를 가지고 유전물질을 통해 진행하면 전압의 크기  $|u|$ 와 위상  $\phi$ 는 가한 신호의 상대적 비로 측정되어진다. 이로부터  $Z=|u| \cdot e^{j\phi}/i$ 의 실수부와 허수부인 정전용량  $C$ 와 전도도  $G$ 는 계산될 수 있다. 이를 이용하여 최종적으로 실수부와 허수부는 다음과 같이 계산되어진다.

$$\epsilon' = \frac{C}{\epsilon_0 \cdot \chi} \quad (4-4)$$

$$\epsilon'' = \frac{G}{\omega \epsilon_0 \cdot \chi} \quad (4-5)$$

정전용량에서 유전상수의 실수부를 이끌어내는 것은 단순한 수치적 계산이므로 정전용량은 측정된 유전물질의 유전상수의 실수부를 나타낸다고 할 수 있다

### 3) 실시간 토양수분함량 측정센서의 구비조건

토양수분함량의 실시간 측정은 농업에서 뿐 아니라 환경친화적 토양이용을 위해 그 중요성이 높아지고 있다. 전자기파의 발진을 통한 토양 유전상수의 측정으로 토양 수분함량을 결정하는 것은 이 실시간 연속 측정을 가능하게 한다.

토양의 전자기적 성질을 이용한 방법이 최근 다양하게 개발되고 있다. 측정방식은 Non-contact와 Contact 두 가지로 나눌 수 있다. Non-contact 방법으로 근적외선법, Microwave reflectance, Ground penetration radar 이 대표적이다. 이 방법은 전자기파를 토양에 쏘아 흡수밴드를 분석하거나 펄스파의 통과 및 반사시간을 측정하여 토양

의 유전상수를 알아내고 이를 수분함량을 환산한다. Contact 방법으로는 전기저항식 센서, 정전용량식 센서, 마이크로파 방법 등이 있다. Contact 방법은 토양에 센서를 삽입하여 일정 파장을 갖는 전자기파를 주어 전기저항, 정전용량 등을 측정하여 수분함량을 알아낸다. Non-contact 방법은 그 가격이 비싸 널리 사용되고 있지 못한 실정이다. Contact 방법 중에 근래 주목되고 있는 것이 정전용량식 센서이다. 이 센서는 측정영역이 넓고 다른 센서들에 비해 비교적 싼 가격으로 만들 수 있다는 것이 큰 장점이다.

토양수분함량측정에 있어 토양수분센서가 갖추어야 할 요건은 먼저 포장에서 토양수분함량을 연속으로 측정가능하여야 한다는 것이다. 이것은 특히 환경제어 목적으로 센서가 이용될 때 필수적인 부분이다. 토양수분함량에 관련된 다른 변수를 쉽게 예측가능해야 한다. 예를 들자면 종자 발아시 바람과 햇빛의 작용으로 생긴 dry crust의 깊이, 지하수면의 깊이 등이 있다.

또한 센서가 제어시스템에 이용되기 위해서는 센서가 감응하는 부피와 위치를 알아야 한다. 다음으로 농기계 등에 의한 진동, 오염, 충격에 견딜 수 있는 견고한 센서라야 한다. 센서가 정확한 토양수분함량을 나타내기 위해서는 Calibration이 필수적으로 요구된다. 토양은 기후, 식생, 모재 등에 따라 매우 다양하게 존재한다. 따라서 모든 토양에 적용할 수 있는 Calibration 식을 만드는 것은 불가능한 일이다. 특히 점토함량이 높은 팽창성 토양이나 유기물함량이 많은 토양등은 Calibration에 많은 어려움이 있다.

센서가 폭넓게 사용되기 위해서는 가격이 저렴해야 한다. 센서의 개발과 사용에 있어서 가격은 최종적인 제한요건이 된다. 일반인이 사용하기 간편하면서 측정에 있어 정확성과 재현성을 가진 센서를 저렴한 가격으로 개발하는 것이 센서개발의 관건이라 하겠다.

#### 4) 토양 유전성질에서 염도의 영향

분자 분극율은 서로 다른 원자 또는 분자사이에서 다른 분포를 보인다. 원자의 전자구름이 양의 핵에 몰리는 electronic과 중성위치로부터 양이온과 음이온의 이동을 유발하는 ionic 이 있다. ionic molecular polarizability는 각 분자가 영구 쌍극자 모멘트를 가질 때 나타난다. 전기장을 가하면 무질서한 분자충돌의 힘에 대해 영구 쌍극자들이 정렬하려는 경향을 띤다. 무질서 운동은 온도의 함수이므로 이 효과는 온도

의존적이다.

토양은 토양 교질물, 공기, 수분, 용질의 복합체이고 분자 결합력은 물리적 또는 화학적이다. 순수한 물 분자는 큰 유전상수 값을 나타내는 큰 영구 전자 쌍극자 모멘트를 갖고 있다. 또 다른 중요한 부분이 이온 쌍극자 모멘트이다. 토양의 염도는 변화하기 때문에 분극율의 특성도 바뀔 수 있다. 또한 이것은 축전기의 정전용량에도 영향을 미친다.

Kramers-Kronig relation에 따르면 유전율의 실수부와 허수부는 다음과 같은 관계를 가진다.

$$\epsilon'(\omega) = \epsilon_0 + \frac{2}{\pi} P \int_0^{\infty} \frac{\omega' \epsilon''(\omega') d\omega'}{(\omega'^2 - \omega^2)} \quad (4-6)$$

토양 염도는 포화토양반죽 또는 건조토양과 증류수를 일정비로 혼합하여 진탕한 후 그로부터 추출된 용액의 전도도로 표현된다. 토양 염도에 의해 반응하는 유전특성은 전자기파의 진동수에 따라 다르다. 기 개발된 정전용량형 센서의 경우, 이온에 의한 영향을 없애기 위해 150MHz의 고주파를 사용한 것이 존재한다. 그러나 이런 고주파를 사용할 경우 가격이 비싸지므로 다른 방법을 모색함이 필요하다.

#### 나. 센서 소재 선정 및 기초실험

우리는 이번 실험을 시행하는데 있어 1번째 센서 모델로 간단한 센서의 형태를 제작하였다(그림 4-3).

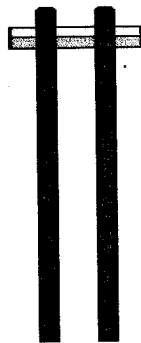


그림 4-3. Parallel two rod probe sensor (센서 1)의 형태

이 측정센서는 표면을 절연물로 코팅시킨 길이 152mm, 도체간 간격 0.8mm의 한쌍의 금속막대 축전기이다. 우리는 이 측정센서를 토양이 담긴 시료용기에 장착하였다. 이 한 쌍의 도체전극 사이의 수분함량에 따른 Capacitance의 변화를 보기 위해 RLC meter(SR 720)을 이용하여 토양의 수분함량을 변화시켜 가며 100kHz에서 Capacitance를 측정하였다. 토양의 온도에 따른 Capacitance의 변화를 측정하기 위하여 그림 3에 제시한 바와 같이 일정한 규격의 박스를 만들고 그 안에 220V용 200W전구를 설치하여 외부에 최대 출력전압 130V인 교류전압전원과 연결하여 주고 박스 내부에 스티로폴을 이용하여 외부와의 열적 교류를 차단하여 토양 내부의 온도변화 조절이 가능하게 하였다. 토양의 온도를 측정하기 위해 시료용기에 온도센서를 부착하여 Multi-meter (PM 2525)로 온도를 측정하였다. Capacitance의 연속측정을 위하여 온도를 측정하는 multi-meter와 LCR-meter를 RS-232 interface를 이용하여 컴퓨터에 연결하고 연속적으로 데이터를 측정할 수 있도록 하였다. 또한 최적의 측정 Frequency를 알아보기 위하여 100kHz ~ 30 MHz의 측정범위를 가지는 Capacitance meter (HP 4285A)를 이용하여 다양한 측정 Frequency에 따른 센서의 특성을 파악하였다. 우리는 실험을 통해 Parallel two rod probe의 특성상 수분을 측정하고자 하는 토양과의 접촉에 따라 측정편차가 상당히 크게 예상되어 probe에 토양과 수분평형을 손쉽게 이루는 물질(석고)을 coating한 2번째의 센서모델을 제작하였고, 외부 전자기장의 변화를 센서내부에서 차단해 주기 위하여 coating한 석고 외곽에 도체 등전위면을 형성하여준 3번째 센서모델(그림 2-8)을 제작하여 센서특성을 연구하였다. 우리는 이 연구에서도 또한 2,3번째 센서의 특성을 실험하는데 있어서 연속측정이 가능하도록 HP 4285A와 컴퓨터를 IEEE-488 인터페이스를 이용하여 측정데이터를 연속적으로 컴퓨터에 전송할 수 있도록 연결하였다. 이와 같은 측정장치를 이용하여 우리는 다음과 같은 실험을 수행하였다.

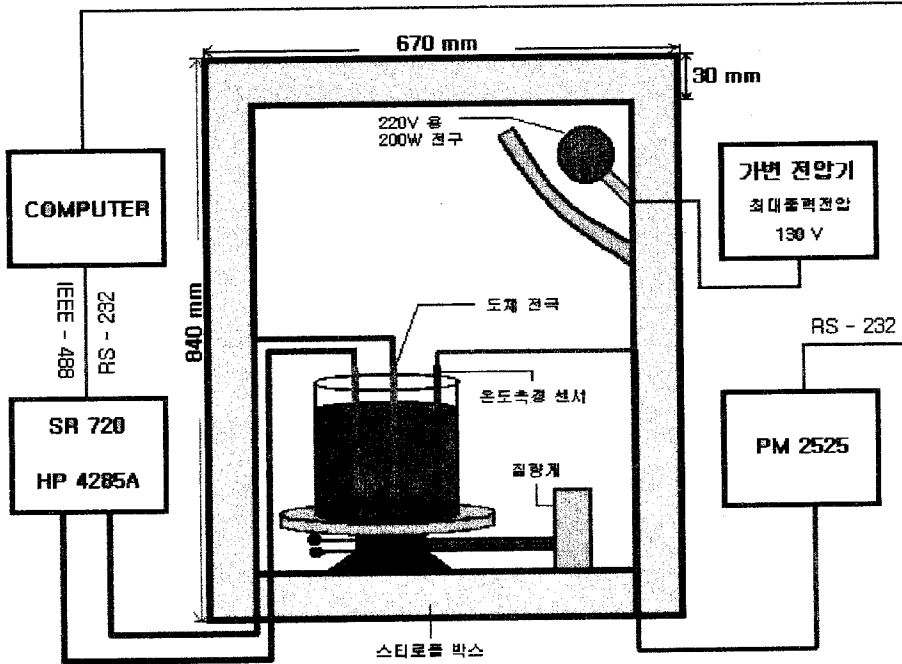


그림 4-4. 실험장치 구성도

1) 실험1 - 토양수분함량에 따른 parallel two rod probe(센서 1)의 Capacitance 변화 측정

건조오븐을 사용하여 포화수분함량이 14% 정도인 양질사토를 105℃ 상태에서 18 시간 건조시킨 후 시료용기에 잘 다져 넣고, 측정센서를 장착하여 측정 frequency 100kHz 에서 센서 1의 Capacitance를 측정하였다. 시료토양에 물을 조금씩 첨가하여 토양의 수분함량을 증가시켜가며 측정하였다. 수분함량이 증가할수록 Capacitance가 변화하게 된다. 가해진 수분이 토양에 충분히 확산되어 평형상태에 이르렀을 때 Capacitance의 값이 안정되어짐을 볼 수 있었다. 이때 Capacitance와 질량을 측정한다. 시료의 건량기준 수분함량은 다음의 식으로 계산된다.

$$\text{수분함량} = \frac{\text{측정된질량} - \text{건조된질량}}{\text{건조된질량}} \times 100$$

주어진 수분함량에서 Capacitance를 측정하여 그림 4의 결과를 얻었다.



그림 4-5에서 볼 수 있듯이 수분함량에 따른 Capacitance의 변화가 특성곡선의 형태를 이루고 있음을 알 수 있다. 우리는 이 실험을 통해 우리의 방식을 이용한 토양 내부의 수분함량 결정이 가능하더라는 확신을 갖게 되었다.

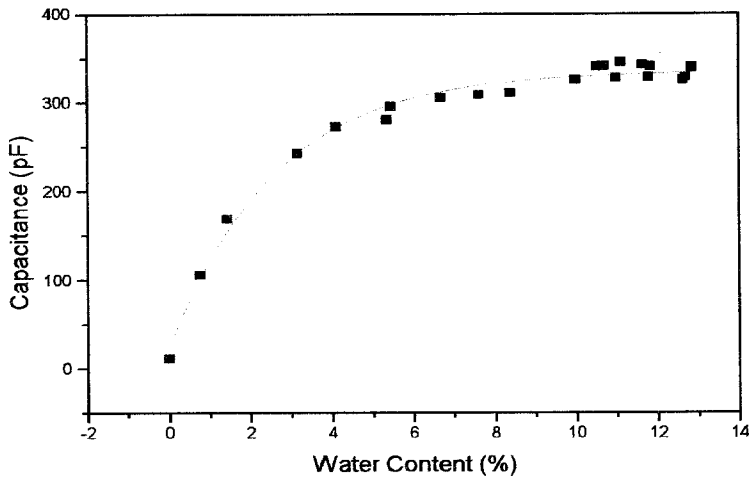


그림 4-5. 100kHz 에서 수분함량에 따른 Capacitance의 변화

## 2) 실험2 - 온도변화에 따른 Capacitance의 변화 측정

우리는 토양 수분함량과 Capacitance와의 연관성을 확인한 다음 온도변화에 따른 Capacitance의 측정을 시도하였다. 또한 최적의 측정 frequency를 찾기 위하여 Capacitance meter (HP 4285A)를 이용하여, 100kHz ~ 30 MHz 의 frequency 변화에 따른 시료 토양의 온도와 parallel two rod probe의 측정 Capacitance와의 관계를 파악하였다. 우리는 이 실험을 위해 위의 측정장치에 제시한 바와 같이 온도변화조절이 가능한 박스를 이용하였고 온도변화에 따른 Capacitance의 연속측정을 위하여 Multimeter(PM2525)와 Capacitance meter(HP 2485A)를 컴퓨터와 RS-232 interface, IEEE-488 interface를 이용하여 연결하여 연속 측정하였다. 우리는 포화 수분함량이 약 40%가량 되는 토양을 수분함량 22.42%로 만들고 측정용기를 밀폐하여 수분함량을 일정하게 유지시킨 상태에서 약 37°C의 온도에서부터 22°C까지 변화시켜가며 온도에 따른 Capacitance의 변화를 측정하여 그림 4-6와 같은 결과를 얻었다.

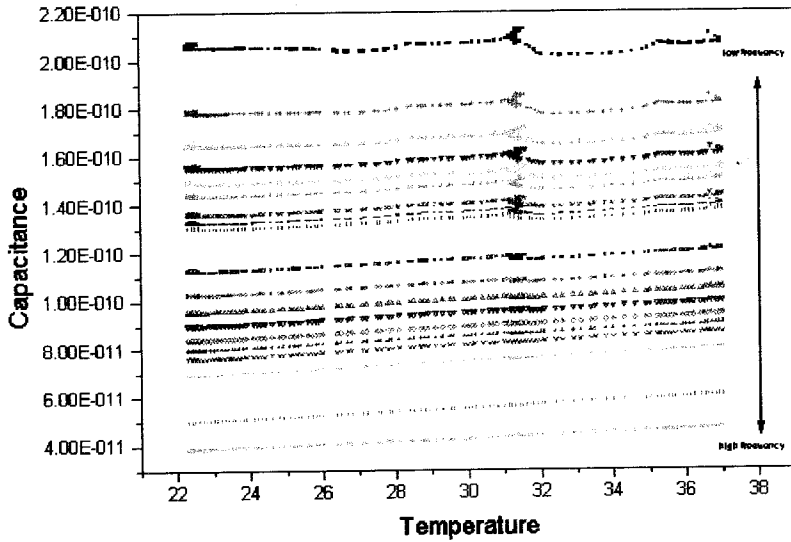


그림 4-6. 100kHz - 30MHz 의 측정 주파수에서 온도변화에 따른 Capacitance의 변화

이 데이터로 우리는 온도변화에 따라 Capacitance가 선형적 관계가 있으며 센서 제작에 있어 온도 보정작업이 필요함을 확인할 수 있었고, MHz 단위 이상의 측정 frequency에서 온도 변화에 따른 안정된 Capacitance의 변화가 나타남을 확인함으로써 토양 수분측정의 적절한 측정 frequency가 MHz 이상이 되어야 함을 파악할 수 있었다.

또한 우리는 토양 함수량을 변화시켜가며 온도와 Capacitance와의 관계가 일정하게 나타나는 지를 확인하기 위한 실험을 시행하였다. 우리는 3.5%, 14.5%, 22.42%의 토양샘플을 준비하고 시료 용기에 담은 후 밀폐시키고 37°C에서 22°C까지 온도를 천천히 떨어뜨리며 인터페이스를 통한 Capacitance 측정을 시도하였고, 그 결과 5MHz의 측정 frequency에서 그림 4-7과 같은 결과를 얻었다.

이 결과로 각각의 토양 수분함량에 따른 온도와 Capacitance와의 관계가 선형적임을 확인할 수 있었다.

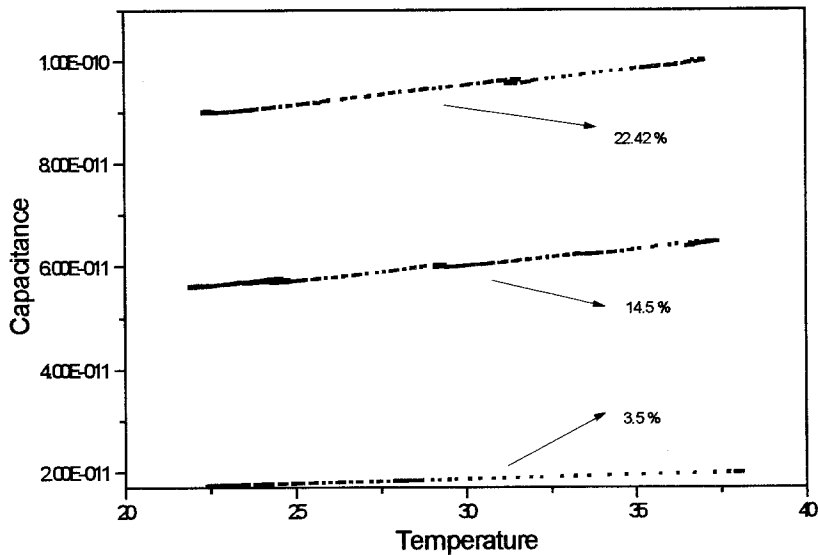


그림 4-7. 센서 1의 5mm에서 수분함량 3.5%, 14.5%, 22.42%에서 토양의 온도변화에 따른 Capacitance 변화

### 3) 실험3 - parallel two rod probe sensor을 보완한 새로운 센서 제작 (센서 2)

우리는 앞의 두 실험을 통해 토양의 수분함량에 따른 Capacitance의 변화 특성과 토양 온도에 따른 Capacitance의 선형적 변화를 확인하고 우리의 방식을 이용한 토양 수분측정기 개발의 가능성을 확인할 수 있었다. 하지만 parallel two rod probe sensor는 토양이 수분함유에 따라 상태가 변화하게 되고 그에 따라 센서에 접촉하는 토양의 상태가 달라질 수 있으므로 불안정할 수 있다. 우리는 이러한 문제의 발생을 없애기 위해 항상 일정한 접촉상태를 유지할 수 있게 해주기 위하여 토양과 수분의 평형이 용이한 석고로 rod 주위를 coating한 센서(센서2)를 제작하였다. 우리는 coating한 석고가 토양의 수분함량에 따라 얼마나 빠르게 수분을 흡수할 수 있는지 알아야 했다. 왜냐하면 토양의 수분함량만큼 석고가 충분히 빠르게 수분을 흡수하지 못한다면 토양의 수분을 적절히 측정해 내지 못할 것이기 때문이다.

이에 따라 우리는 건조한 센서2를 20%의 수분함량을 갖고 있는 토양 안에 삽입하

고 Capacitance를 측정함으로써 석고가 얼마나 빠르게 주위토양 수분과 평형상태가 이루어지는지를 확인하였다. 1분 간격으로 약 2500분간 Capacitance를 측정한 결과 그림 4-8과 같은 결과를 얻었다.

이는 완전히 건조된 석고에 토양의 수분이 충분히 diffusion되는 데 약 1시간정도 소요됨을 알 수 있었고, 이 정도의 석고와 토양의 수분적 평형 민감도는 충분히 만족할만하다라는 결과를 얻었다. 이에 따라 우리는 센서2가 토양수분측정에 좀더 안정적일 수 있다라고 판단하고 센서2의 특성을 파악하기 위한 실험을 실시하였다. 우리는 석고에 수분을 충분히 포화시킨 상태에서 자연건조 시켜가며 1분 간격으로 100kHz에서 30MHz의 측정 frequency에서 Capacitance를 측정하였다. 그중 5MHz부터 30MHz까지 5MHz단위로의 결과가 그림 4-9와 같이 나타났다. 시간이 0인 점이 석고의 포화 함수 상태이고 약700분 정도인 점이 석고의 건조상태이다.

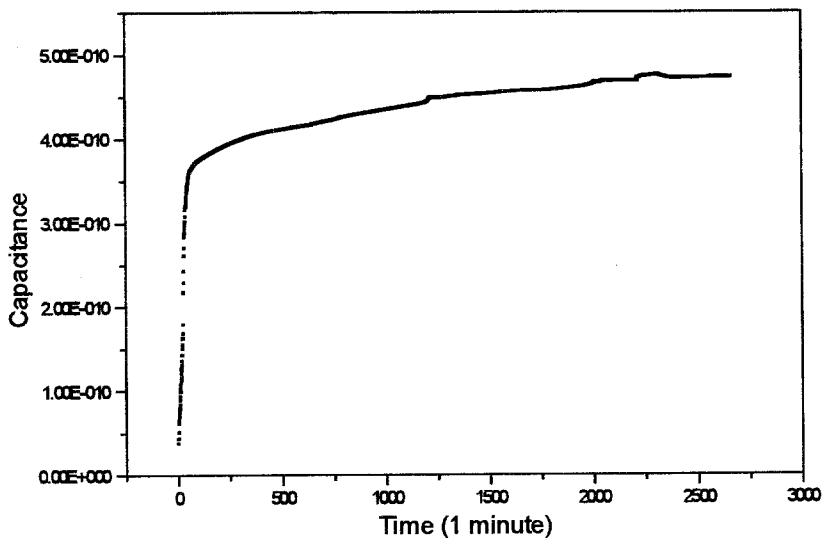


그림 4-8. 수분함량 20% 토양에 석고센서를 삽입한 후 Capacitance 변화

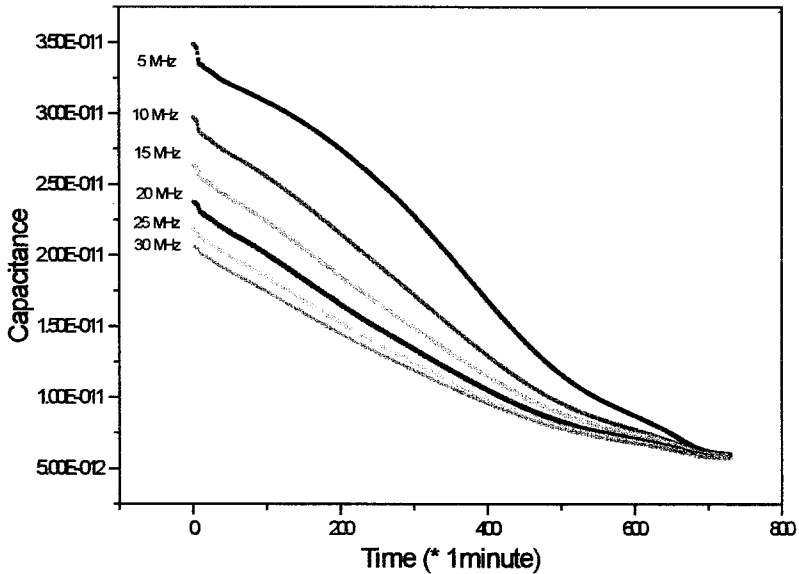


그림 4-9. 센서 2 자체의 수분포화상태에서 건조과정동안 Capacitance의 변화

#### 4) 실험4 - 석고의 포화수분함량의 변화

우리는 석고의 포화 수분함량이 센서로서의 역할을 크게 좌우한다는 것을 파악하고 석고의 포화 수분함량을 높이기 위해 실험을 시도하였다. 우리는 몇 가지 실험 결과 최초 석고의 제작에 있어 석고 가루와 물과의 배합 비율에 따라 석고의 포화 수분함량이 변한다는 것을 확인할 수 있었다. 우리는 석고와 물의 비율을 석고를 1로 했을 때 물을 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 1.0, 1.1, 1.2, 1.3, 1.4의 비율로 섞어 가며 각 비율에 따른 석고의 포화 함수량을 실험하였다. 그 결과 석고:물이 1:1.1이상의 비율로 섞였을 때 우리가 원하는 50% 이상의 포화 수분함량을 나타냄을 확인할 수 있었다. 우리는 그에 따라 다시 물의 비율을 석고를 1로 했을 때 1.0, 1.1, 1.2, 1.3, 1.4의 비율로 섞은 5개의 석고를 제작하여 물을 포화시켰다가 건조시키는 실험을 3차례 반복함을 통해 석고의 포화 수분함량을 측정하였다. 3차례의 반복실험결과 우리가 석고와 물의 초기 배합 비율에 따라 석고의 포화 수분함량이 크게 좌우됨을 알 수 있었고, 우리가 원하는 50% 이상의 석고를 제작하기 위해서는 석고와 물의 비율을 1:1 이상으로 해야 함을

알게 되었다. 하지만 여기서 우리는 우리가 제작하는 센서가 오랜 기간 동안 수분의 변화를 측정해야 하므로 쉽게 마모되어서는 안되므로 각 석고와 물의 비율에 따른 강도를 비교해야 했다.

우리는 석고와 물의 비율이 1:1인 경우의 강도가 가장 안정적이라는 사실과 이 비율이 우리가 원하는 포화 수분함량 이상을 가진다는 것을 통해 우리가 제작하는 센서에 적합한 석고의 비율이 1:1임을 결정할 수 있었다.

5) 실험5 - 외부 전자기장의 영향을 배제하기 위하여 센서 2 주위에 등전위면을 형성시켜준 sensor(센서 3)의 제작 및 실험

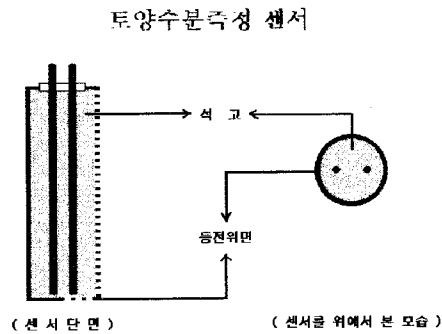


그림 4-10. 센서 3의 형태

그림 4-10에 제시한 형태에 석고와 물의 배합비율을 1:1로 섞어 제작하였다. 이 센서는 포화 수분함량이 약 65%이고 최대 포화상태에서 Capacitance가 약 180 pF이며 건조상태에서의 Capacitance가 약 0.9pF인 센서이다. 우리는 이 센서의 측정의 안정성과 재현성을 확인하기 위하여 실온(약 19℃ ~ 22℃)에서 석고 수분함량의 변화에 따른 Capacitance를 반복하여 측정하였다. 석고의 수분함량은 건량기준 수분함량에 의해 계산하였다. 우리는 3차례에 걸친 반복실험을 시행하여 그림 4-11과 같은 결론을 얻었다. 그림 4-11은 이 센서의 측정의 재현성이 뛰어나다는 것을 보여주고 있다.

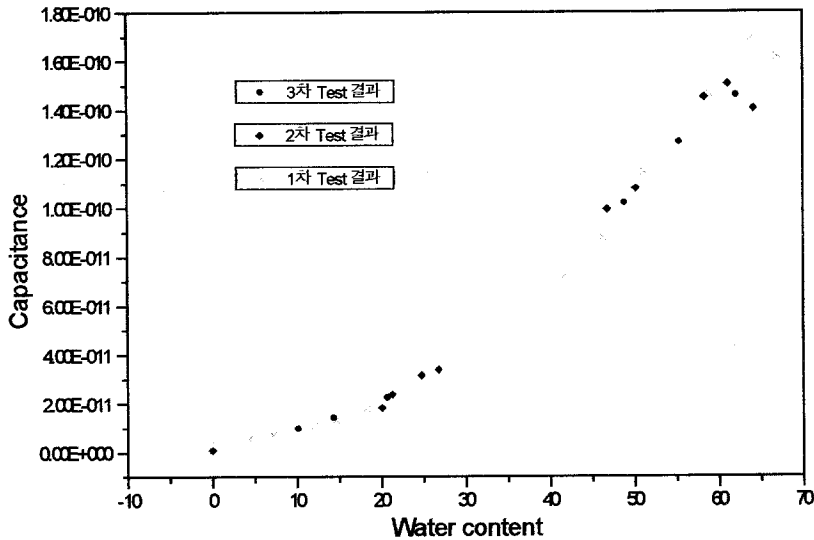


그림 4-11. 센서 3 자체의 5MHz에서 측정재현성을 비교

우리는 1GHz 이하의 측정 frequency에서 다른 물질에 비해 월등히 큰 유전율을 갖는 수분의 특성을 이용하여 토양의 수분함량을 결정할 수 있는 센서를 제작하였다. 수분함량의 변화에 따른 Capacitance의 변화가 특성곡선의 형태로 나타나고 온도의 변화에 따른 Capacitance의 변화가 선형적인 관계를 가짐을 확인할 수 있었다. 우리는 이를 통해 본 유전성을 이용한 토양수분측정 센서를 이용하여 토양수분을 측정할 수 있다라는 가능성을 확인하고, 토양과의 접촉문제를 해결하기 위하여 토양과 수분의 평형이 잘 이루어지는 석고를 coating하고 외부 전기장의 영향을 배제하기 위해 등전 위면을 형성시킨 센서를 고안, 제작하였다. 토양수분측정에 적절한 측정 frequency를 파악하기 위하여 100kHz 에서 30MHz에 이르는 넓은 영역에 대해 실험을 시행하였으며, 수분함량에 따른 Capacitance의 측정 폭과 오차를 분석하여 5MHz 에서 10MHz사이의 영역이 가장 적절하다는 것을 확인할 수 있었다. 고안되어진 센서의 측정재현성을 실험한 결과 상당히 안정된 재현성을 보여주고 있다.

## 다. 센서별 토양수분감응 특성 평가

정전용량형 센서 형태는 매우 다양하다. 평행판 축전기, Two-rod transmission type, coaxial type 등이 그것이다. 발진진동수 또한 수십 MHz에서 수백 MHz까지 다양하다. 고안한 센서는 Two-rod sensor를 기본형으로 하여 센서의 안정성, 토양과의 접촉성 개선을 위해 다공성물질을 전극주변에 감싼 센서, 9-tine coaxial sensor 등이다. 이 센서들을 토양에 장착하고 토양수분함량에 따른 정전용량의 변화를 관찰하였다. 정전용량의 변화특성은 센서별로 차이가 존재하였으며 그 결과는 다음과 같다.

### 1) 실험장치

75kHz에서 30MHz까지 발진진동수의 변화가 가능한 LCR meter HP4285A와 온도 센서 PM2525 multimeter를 이용하여 토양수분함량에 대한 정전용량의 변화를 관찰하였다. 그림4-4와 같다.

### 2) 실험토양의 특성 및 실험방법

실험 토양은 과수재배용 시설토양으로 사양토이다. 이 토양은 사과나무 시험재배를 위하여 사양토와 유기물을 섞은 교란된 토양이다. 토양의 수분특성곡선이 그림 4-12에 나타나 있다. 포장용수량으로 정의되는 -33kPa에서의 토양수분함량은 약 32.5%로 나타난다. 즉 이 토양은 사양토로 점토함량이 낮음에도 유기물함량이 높은 편이므로 수분보유력이 낮게 나타나지 않았다. 총공극률 또한 57%로 높게 나타났는데 이 또한 유기물함량에 의한 영향으로 생각된다. 이 총공극률은 실험 시 토양충진 정도에 따라 변화가 있을 수 있지만 대체로  $\pm 2\%$ 이하이다.

표 4-1. 실험토양의 물리화학적 특성

토양채취지점	유기물 함량 (%)	토성(%)			양이온치환용량 (cmol/kg)	염농도 (dS/m) soil:water=1:5
		Sand	Silt	Clay		
과수재배용 시설토양	4.31	63.25	22.25	14.51	23.7	1.367



포장에서 채취된 토양을 실험실에서 건조시킨 후 약 2mm 체로 걸렀다. 이것은 유기물 덩어리나 자갈 등을 제거하고 토양의 성질을 고르게 하기 위하여서다. 토양수분함량에 대한 센서감응을 시험하기 위해 토양과 센서를 장착할 pot를 만들었다. pot는 아크릴로 직육면체로 제작하였다. 각 면에 작은 구멍을 내어 건조가 빠르게 되게 하였다. pot의 부피는 약 1200cm<sup>3</sup> 이었다.

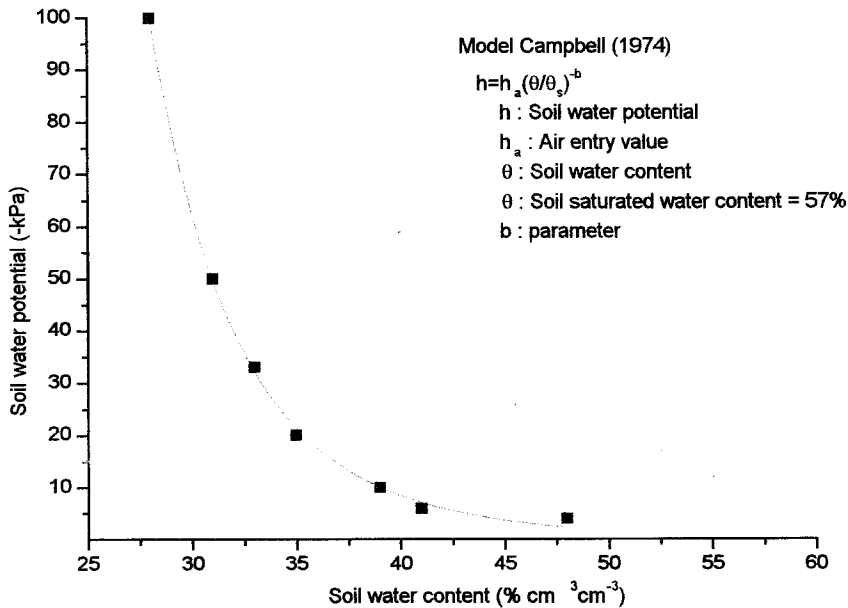


그림 4-12. 실험토양의 토양수분특성곡선

토양을 시험 pot에 충전시킬 때는 분무기로 물을 뿌려 수분함량을 약 15% 정도 높은 다음 충전시켰다. 센서와 토양이 시험 pot에 장착되면 큰 용량의 그릇에 pot를 놓고 그 주위에 물을 넣어 수분이 아래에서부터 포화되도록 하였다. 포화는 약 24시간동안 이루어졌다. 포화가 끝나면 물을 먼저 제거하고 pot를 그림 4-4와 같이 장착하고 센서를 HP4285A와 연결시켰다. 이후 건조과정동안 pot의 무게와 정전용량을 측정하였다. 측정동안 젖은 가아제를 토양 표면에 덮어 pot의 가장자리 토양과 중심토양에 있을 수 있는 수분함량 기울기를 최대한 줄이고자 하였다. 마지막 측정 후 pot의 토양을 제거하여 수분함량을 측정하였다. 토양수분함량은 3반복으로 측정하여 측정오차를 줄였다.

토양수분함량은 토양을 105°C oven에서 24시간 건조하여 단위 건조 토양 당 수분량을 구하고 이에 토양의 전용적밀도를 곱하여 얻어졌다.

### 3) Two-rod 센서

다양한 크기의 Two-rod 센서들이 1MHz에서 30MHz까지 발진진동수를 달리하며 토양수분함량에 대한 정전용량변화를 측정하는 데 사용되었다. rod지름 6mm, 길이 105mm, 간격 20mm의 Two-rod센서를 전용적밀도 1.14g/cm<sup>3</sup>을 가지는 토양에서 수분함량에 따른 정전용량의 변화가 그림 4-13에 나타나 있다.

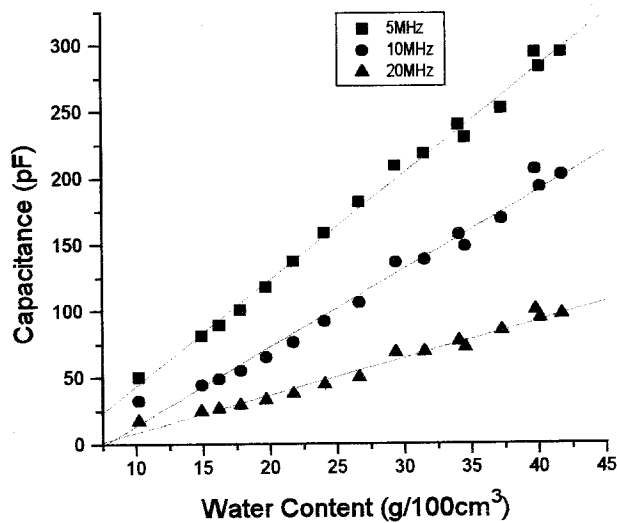


그림 4-13. Two-rod sensor의 Calibration curve

그림 4-13과 같이 이 센서는 수분함량에 대한 감응성이 매우 좋으며 이 토양에 대해 선형성을 가지는 것으로 보여졌다.

### 4) Two-rod 센서를 포함한 다공성 블록 센서간 비교

Two-rod 센서는 토양수분함량에 대한 감응성이 높게 나타나나 토양과의 접촉, 절

연코팅의 안정성, 외부전자기장의 간섭 등으로 센서의 감응안정성과 견고성에서 쉽게 풀리지 않는 문제들을 갖고 있다. 따라서 Two-rod를 보호하며 센서의 안정성과 견고성을 높이기 위해 센서 주위를 다공성물질로 감싼 형태를 고안하였다.

사용된 다공성물질로는 석고, Fiberglass, Nylon이다.

석고 센서는 물과 석고를 1:1로 혼합하여 Two-rod 주위에 부어 굳으면 석고봉 형태로 제작하였다. 그림 4-10과 같다. Fiberglass 센서는 그림 4-10에서 석고 대신 fiberglass를 충전한 것이다. Fiberglass 는 보온재로 쓰이는 것을 잘게 뜯어 물에 적셔 부피를 줄인 후 봉 주위로 충전하였다. Nylon 센서는 그림 4-10에 Nylon을 충전한 것과 같은 형태이다. Nylon은 시장에서 판매되는 실을 센서봉 주위로 감은 후 실을 길이 1cm 정도로 잘라 충전하였다.

각 센서는 pot에 토양과 함께 장착하고 포화 후 건조과정동안 정전용량의 변화를 측정하였다. 측정 시 온도변화는 15°C~32°C였다. 그러나 수분함량 약 40%이하에서는 25°C~32°C로 변화 폭이 크지 않았다.

발진주파수 5MHz에서의 정전용량 대 토양수분함량의 보정곡선은 그림 4-14에 나타나 있다. 이것은 다공성물질의 공극 크기에 의해 크게 좌우됨을 보여준다. 다공성물질로 석고를 사용한 센서는 고수분 영역에서 정전용량의 변화가 거의 보이지 않다가 약 30%의 수분함량에서부터 급격한 정전용량의 감소를 보이고 있다. 이에 반해 fiberglass, nylon의 경우 고수분영역에서 큰 기울기로 정전용량이 감소함을 보여주고 있다. 이 실험에서 각 센서의 감응 영역은 Fiberglass 60%-45%, Nylon 42%-35%, 석고 30%-15%라고 할 수 있다. Nylon의 경우 전 수분영역에서 수분함량이 감소함에 따라 정전용량도 감소하는 경향을 보인다. 그러나 30%에서 15%사이는 기울기가 매우 낮게 나타난다. Fiberglass와 Nylon의 경우는 어떤 재질의 재료를 사용하느냐와 충진을 어떻게 시키느냐에 따라 센서반응 특성이 크게 달라질 것이다. 실제로 전기저항센서 중 Fiberglass와 Nylon을 matrix로 한 센서가 존재한다. 따라서 뒤에 이 센서들에 대한 실험을 더 진행하였다.

포화에 가까운 수분함량에서 석고 센서의 정전용량이 다른 센서보다 높게 나타나는데 그것은 석고자체가  $\text{CaSO}_4$ 의 염이므로 이 염에 의한 영향으로 생각된다. 석고는 수분이 많을 때 용해되는 성질이 있어 강우가 많은 습윤한 지역에서 사용이 어려우므로 건조한 기후를 가진 지역에서 많이 사용되어진다. 우리 나라는 작물생육기인 여름에 강우가 집중되는 다습한 기후를 가진 지역이다. 따라서 이 센서는 포장에서 사용하기 어려우며 온실과 같은 시설에 사용되어야 할 것이다.

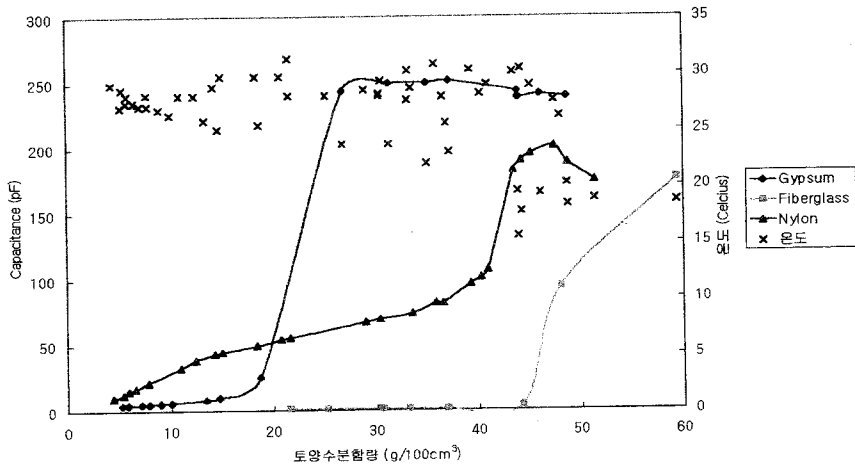


그림 4-14. 5MHz에서의 다공성 블록 센서간 토양수분감응성 비교

#### 5) 다공성물질로 유리섬유와 석고를 수직 결합한 센서

이전의 측정들에 의하면 석고 블록은 수분함량 약  $25\text{g}/100\text{cm}^3$  이하에서 감응성이 있는 반면 유리섬유 블록은  $35\text{g}/100\text{cm}^3$  이상에서 감응성이 있었다. 두 다공성 블록 모두 현장에서 요구하는 수분감응범위를 만족시키지 못했다. 따라서 센서를 길이로 중간지점을 중심으로 두 개의 부분으로 나누어 한 부분은 유리섬유를 채우고 다른 부분은 석고를 채워 토양수분에 대한 감응정도를 살펴보았다. 실험결과는 그림3-5에 나타나 있다. 센서는 rod 지름 6mm, 길이 140mm, 사용한 토양의 전용적밀도는  $1.07\text{g}/\text{cm}^3$ 였다.

석고와 유리섬유가 감응하지 못하는  $25\sim 35\text{g}/100\text{cm}^3$ 의 수분범위가 나타났다. 특히 발진진동수가 높아질수록 그래프 중간의 평탄한 영역이 더 커졌다. 즉 우리가 석고와 유리섬유를 이용하여 만든 다공성물질의 공극분포가 토양수분에 감응하는데 유효하지 않다고 할 수 있다.

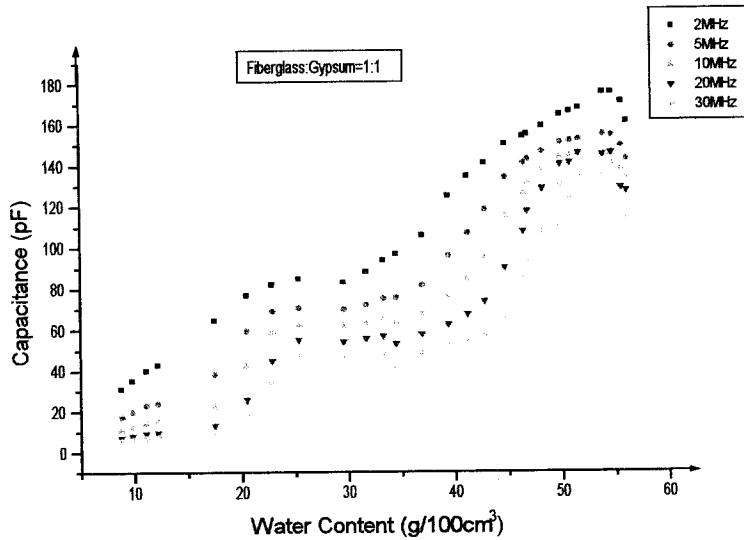


그림 4-15. 유리섬유와 석고를 수직 결합한 센서의 Calibration curve

#### 6) 다공성물질로 나일론을 이용한 센서

그림 4-14에서 나일론은 토양수분에 감응하는 특성이 다른 다공성물질보다 좋았다. 같은 나일론 실을 잘게 잘라 Two rod와 작은 구멍이 촘촘히 뚫린 원통관 사이에 넣어 제작하였다. 이 나일론 센서는 전용적밀도를 달리하며 두 번 측정하였다.

##### 가) 1차 측정

rod 지름 6mm, 길이 120mm, 간격 20mm이고 전용적밀도는  $1.02\text{g/cm}^3$ 이었다.

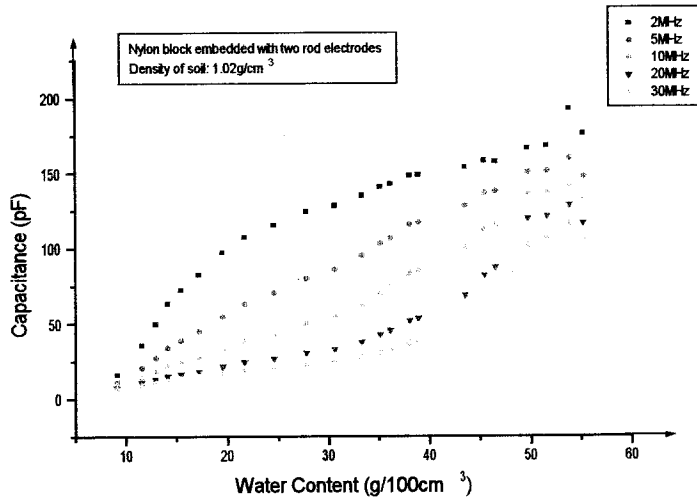


그림 4-16. 나일론 블록센서의 Calibration curve 1

나) 2차 측정

센서규격은 1차 측정과 동일하며 토양의 전용적 밀도는 1.14g/cm<sup>3</sup>였다.

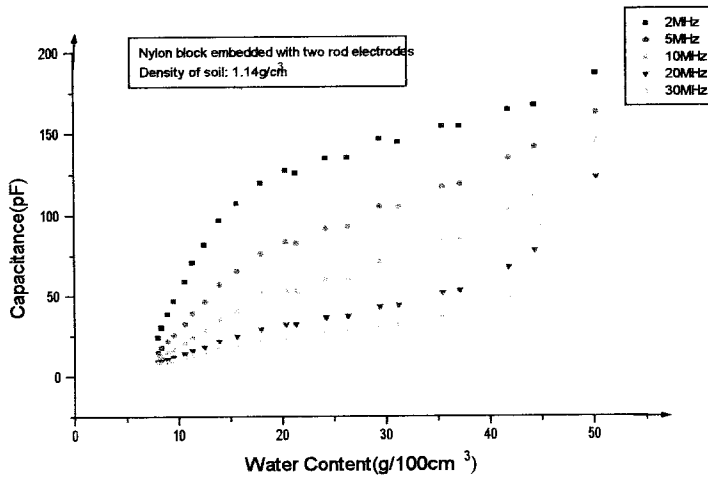


그림 4-17. 나일론 블록센서의 Calibration curve 2

## 7) 평행판 축전기를 포함한 나일론 블록 센서

원리적으로 평행판 센서는 같은 구조 즉 같은 길이, 같은 간격을 가진다고 했을 때 two-rod sensor보다 더 높은 정전용량을 가질 수 있다. 또한 평행판 센서는 더 많은 에너지를 집중 할 수 있고 외부 전자기파에 의한 간섭이 적은 편이다. 센서의 Radius는 28.55mm, 길이 132mm, width 13mm, 간격 20mm로 제작하였다. 토양의 전 용적밀도는  $1.04\text{g}/\text{cm}^3$ 이었다. 이 센서의 토양수분함량에 대한 감응은 그림 3-8에 나타나 있다.

그림 4-18은 그림 4-17에서보다 센서의 토양수분에 대한 높은 감응성을 나타내고 있다. 즉 그림 4-17은 토양수분함량  $20\sim 35\text{g}/\text{cm}^3$ 범위에서 토양수분함량에 대한 정전 용량의 기울기가 매우 완만해짐에 반해 그림 4-18은 10MHz 이하의 진동수에서 특히 토양수분함량에 따른 정전용량이 민감하게 변화하고 있음을 보여주고 있다. 그림 4-19 또한 그림 4-17에 비해 토양수분함량 감응성이 높게 나타난다. 따라서 평행판 축전기 나일론 블록 센서가 Two-rod 나일론 블록 센서보다 토양수분함량에 대한 센서의 감응성이 높다고 할 수 있다

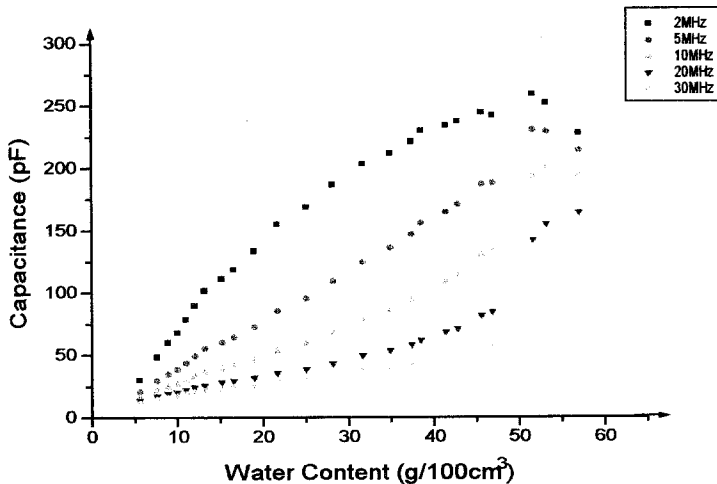


그림 4-18. 평행판 축전기를 포함한 나일론 블록센서의 Calibration curve 1

같은 센서를 이용하여 점토함량이 높은 토양에서 실험하고 그 결과를 발진진동수 8MHz에서 비교하였다.

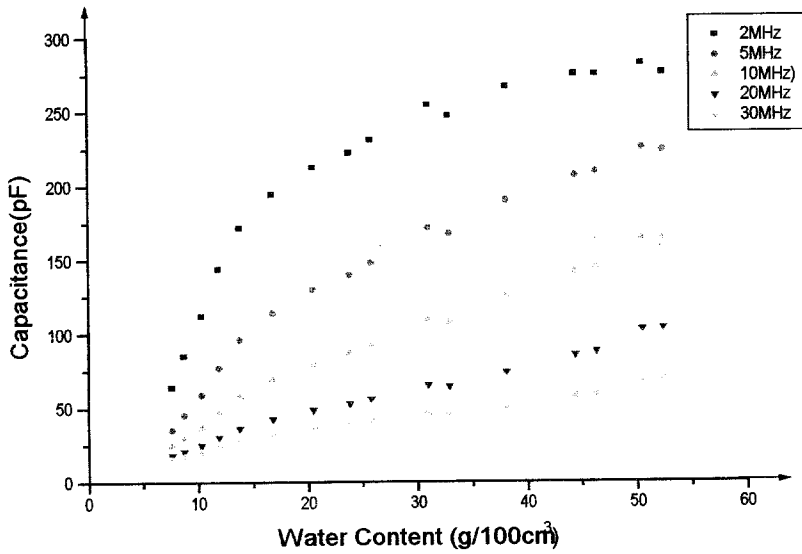


그림 4-19. 평행판 축전기를 포함한 나일론 블록센서의 Calibration curve 2

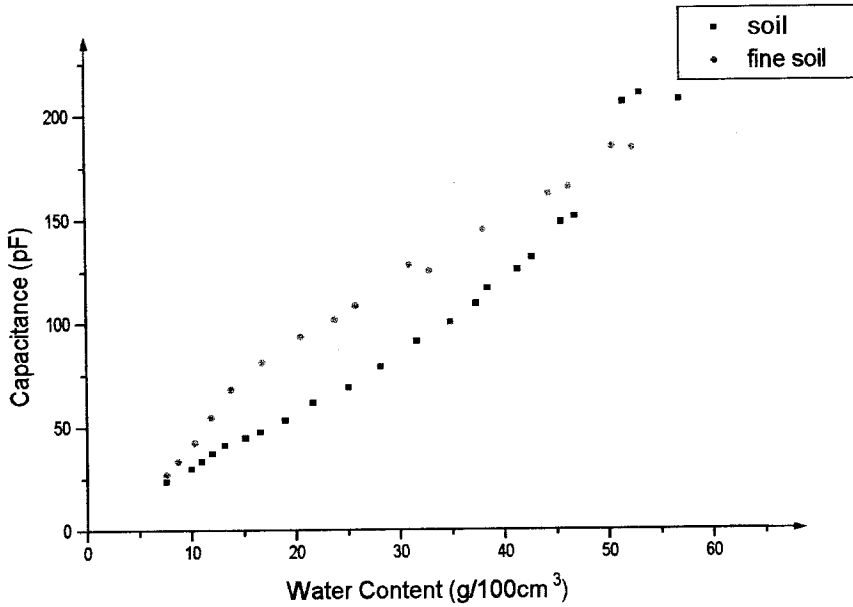


그림 4-20. 평행판 축전기를 포함한 나일론 블록센서의 토양별 Calibration curve 비교



## 8) Coaxial 센서

Two-rod 센서의 외부전기장간섭효과를 제거하기 위하여 coaxial 센서가 시험되었다. 이 센서의 사양은 그림 4-21과 같다.

이 센서를 이용하여 수분함량에 대한 정전용량변화를 그림 4-22에 나타냈다. 그림 3-3의 Two rod sensor와 비교하여 보면, 발진진동수별 반응 특성이 다르게 나타난다. Two rod sensor의 경우 5MHz, 10MHz, 20MHz 모두에서 일차직선과 잘 일치하는 반면 Coaxial 센서의 경우 10MHz 이하에서는 차수가 1이하의 다항함수의 형태를 10MHz이상에서는 차수가 1이상인 다항함수의 형태를 취하고 있다. 10MHz에서는 일차직선과 일치하는 특성을 보여 주고 있다.

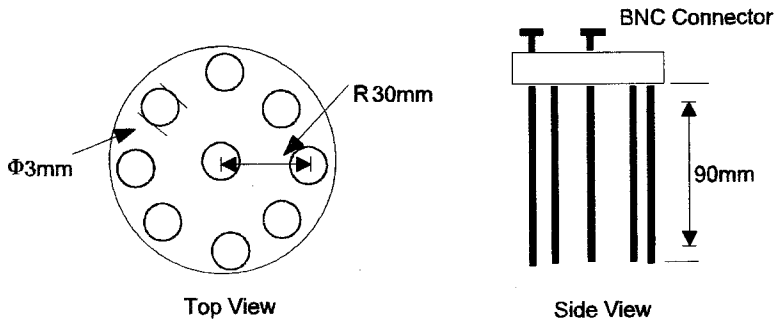


그림 4-21. Coaxial 센서의 사양

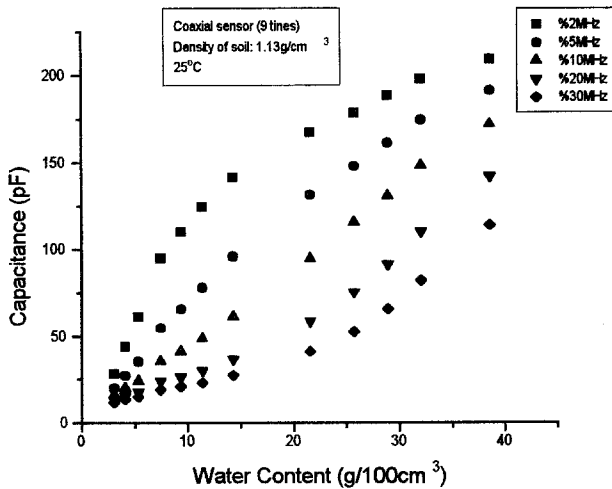


그림 4-22. Coaxial 센서의 Calibration curve

### 9) 센서절연코팅이 정전용량 측정에 미치는 영향

정전용량 측정에 미치는 절연코팅의 영향은 Two-rod sensor를 이용하여 시험하였다. 코팅두께를 달리하여 코팅한 후 발진진동수 5MHz에서 수분함량이 높은 토양 (50g/100cm<sup>3</sup> 이상)에서 센서를 장착한 후 그 특성을 살펴보았다.

Two-rods사이의 저항은 코팅의 정도를 나타내는 데 사용되었다.

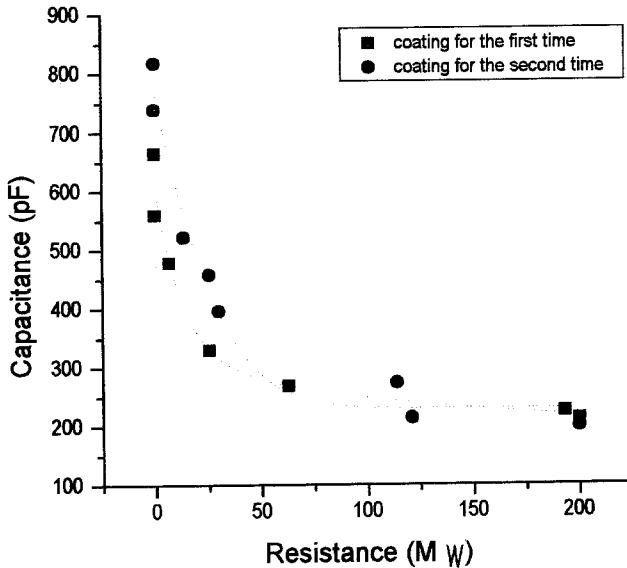


그림 4-23. 코팅정도에 따른 저항 대 정전용량의 특성

정전용량 측정에서 절연코팅의 안정성은 필수적이다. 절연코팅제로 우레탄을 사용하였다. 이 절연코팅제는 실험실에서 측정할 때는 사용이 가능하나 견고하지 못해 실제 포장에서는 사용하기 어렵다. 다공성물질을 사용한 센서를 만든 것의 가장 큰 이유 중의 하나가 절연코팅의 안정성 문제였다. 만약 토양에서 벗겨지지 않는 견고한 절연코팅이 가능하다면 Two-rod 기본형 센서도 포장토양에 사용하기 충분히 안정할 것이다. 따라서 우리는 좀더 견고한 절연코팅방법을 찾기 위해 많은 조사를 하였다. 그 결과 정전기장을 걸어 분체도로 폴리에스테르를 도장하는 방법을 찾았다. 이 방법은 토양에서 부식되지 않고 물에 안정한 것으로 알려진 것이다. 센서의 물리화학적 및 토양학적 최적화에 사용된 센서는 모두 이 방법을 이용하여 코팅을 한 것이다.

## 2. 센서의 물리화학적 및 토양학적 최적화(제1세부과제와 공동 연구)

### 가. 온도 보정

#### 1) Two-rod 센서와 Coaxial 센서의 온도 감응 특성

Two-rod 센서와 Coaxial 센서 모두 온도가 증가함에 따라 정전용량이 일차함수로 증가하였다(그림4-24, 25). Two-rod 센서는 2MHz를 제외하고 토양수분함량이 낮아 질수록 일차직선의 기울기가 작아졌다. 그러나 Coaxial 센서의 경우 5MHz에서도 토양수분함량이 낮을 때 오히려 기울기가 조금 커지는 경향을 보였다. 10MHz와 20MHz에서 각 수분함량에서 기울기는 수분함량이 감소함에 따라 작아지나 그 정도는 Two-rod 센서에 비해 매우 작았다.

Coaxial 센서는 Two-rod 센서에 비해 rod 수가 많으므로 rod간 상호작용이 존재 하리라 추측된다. 또한 Coaxial 센서는 형태상 외부 전자기장의 간섭을 적게 받는 특성을 지니고 있어 수분함량에 의한 기울기 차이가 적었다고 생각된다.

그림 4-24과 그림 4-25는 일차회귀식의  $R^2$ 값이 대부분 0.99임을 보여 준다. 따라서 Two-rod 센서와 Coaxial 센서는 온도에 의한 정전용량 값의 보상이 충분히 가능하다고 할 수 있다. 그러나 토양에 따라 수분함량에 감응하는 정전용량 값이 다르고 토양 전기전도도 또한 다양하므로 온도 의존성 정도 및 그 형태 또한 달라질 수 있다고 생각 된다.

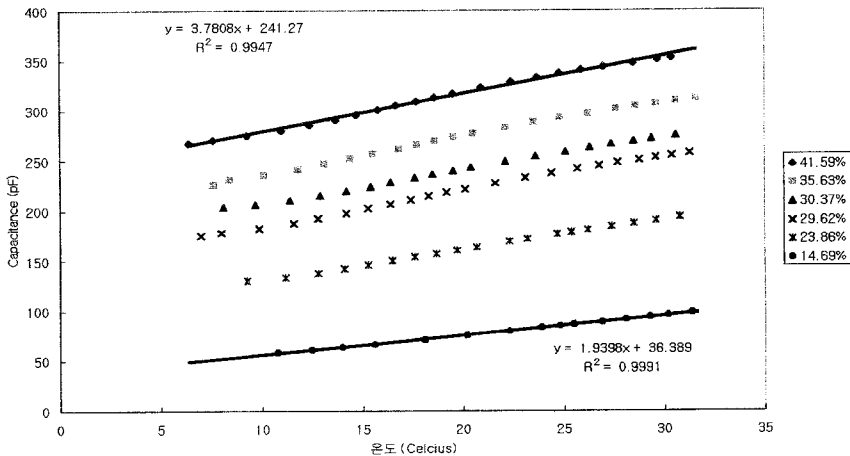


그림 4-24a. Two-rod sensor의 온도특성 - 5MHz

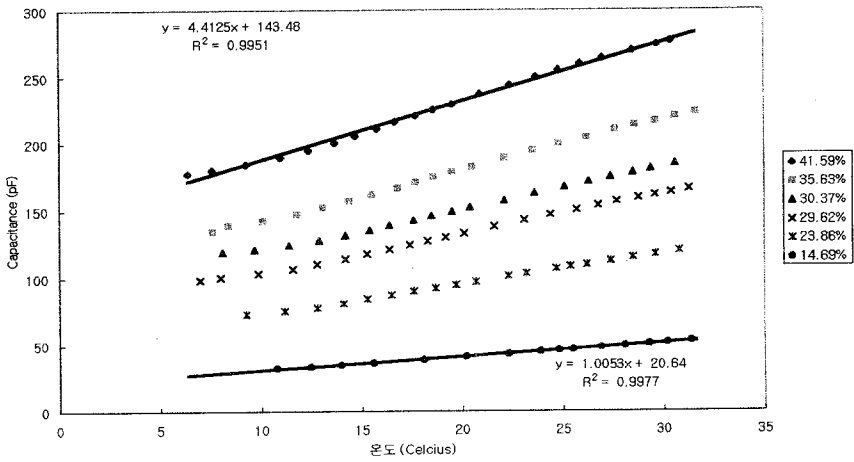


그림 4-24b. Two-rod sensor의 온도특성 - 10MHz

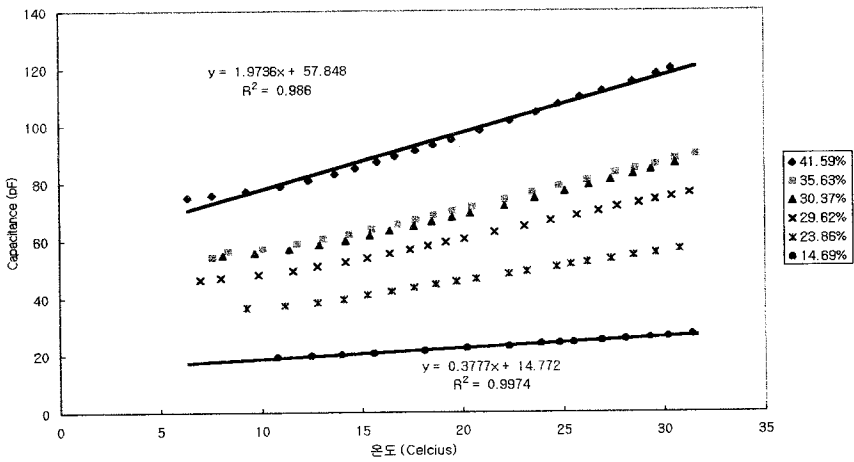


그림 4-24c. Two-rod sensor의 온도특성 - 20MHz

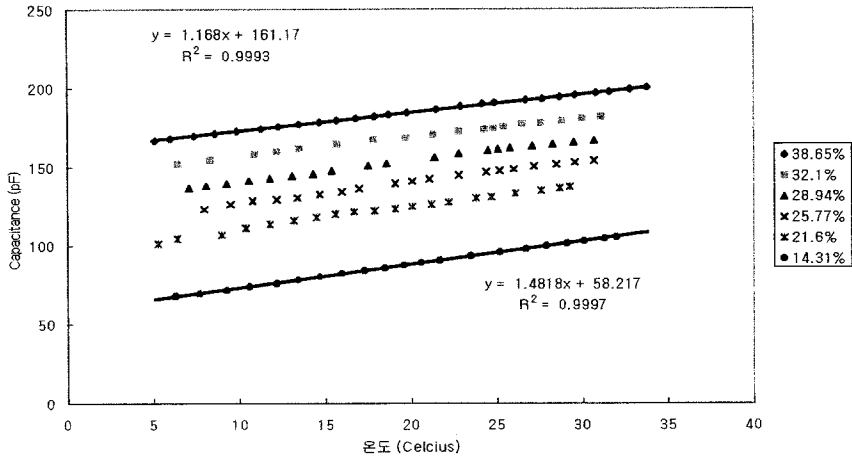


그림 4-25a. Coaxial sensor의 온도특성 - 5MHz

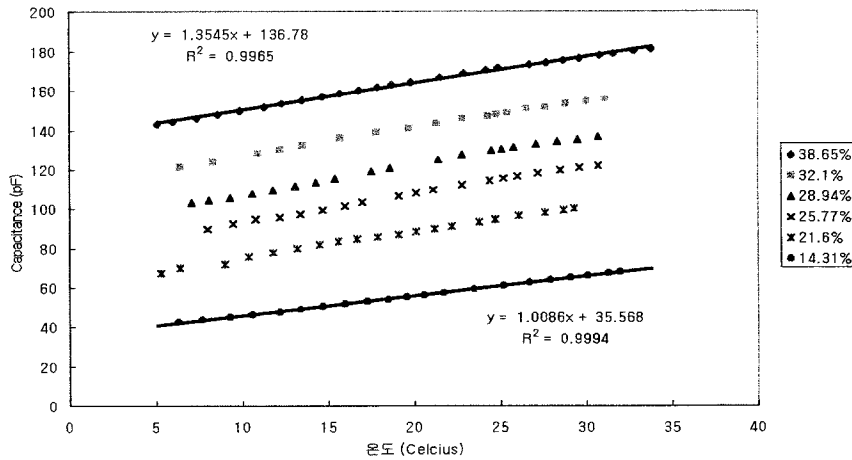


그림 4-25b. Coaxial sensor의 온도특성 - 10MHz

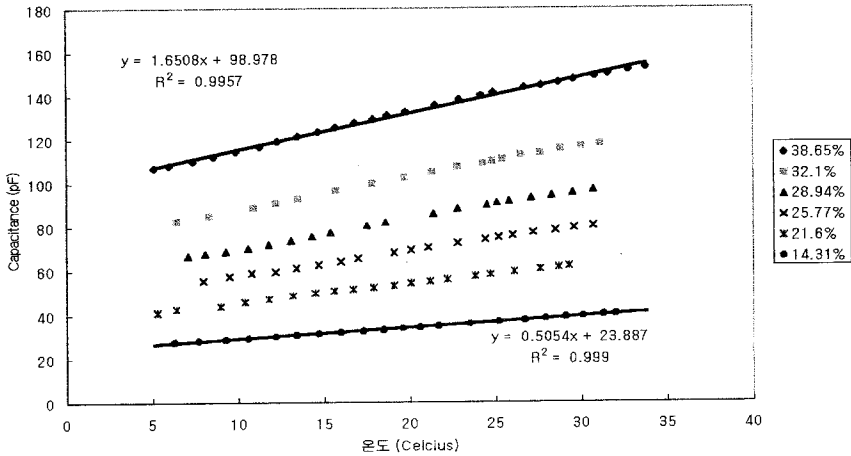


그림 4-25c. Coaxial sensor의 온도특성 - 20MHz

## 2) 온도 보정식의 도출

토양의 유전상수는 온도의 함수로 측정온도에 따른 보정은 필수적이다. 수분함량이 27.94% 인 표본토양에서 온도를 변화시켜가며 capacitance를 측정하였다. LCR미터의 다양한 측정진동수에 대한 capacitance 값의 온도 의존성이 그림 4-26에 나타나 있다. 온도의 변화를 수평축으로 나타내고 각 온도에서 측정된 capacitance 값을 수직축에 나타내었다. LCR미터의 측정 진동수에 따라 기울기가 다르게 나타남을 볼 수 있으나, 어느 측정 진동수에서나 선형 관계의 보정이 가능함을 잘 보여 주고 있다.

측정 진동수 20MHz에서  $C(pF) = 32.371 + 1.316T(^{\circ}C)$ 으로 표현되었다.

표본 토양의 수분함량에 따라 온도 보정 기울기가 다르게 나타나는 것을 보정하기 위해 20MHz의 측정진동 수에서 주어진 토양의 수분함량을 변화시켜가며, 온도에 대한 기울기를 조사하였다. 그 결과 그림4-27과 같았다. 수평축은 표본의 수분함량을, 수직축은 각 수분함량에 따른 온도 의존성 기울기를 나타내고 있다. 온도 의존성 기울기  $\rho(\theta) = -0.4062 + 0.0585\theta$ 로 용적 토양수분함량의 함수로 나타남을 보였다.

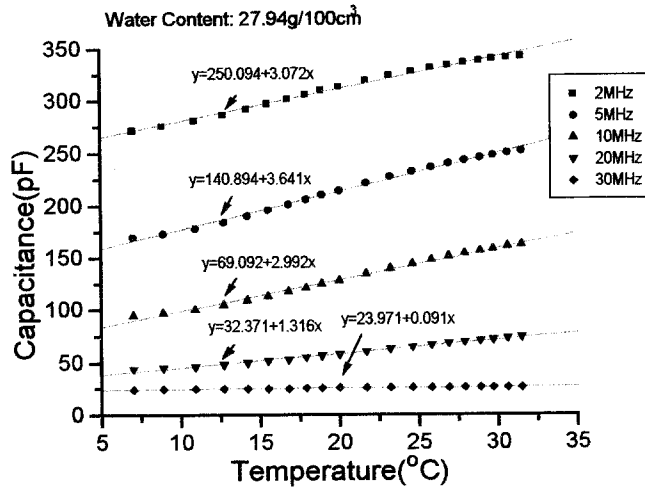


그림 4-26. 토양수분함량 27.94g/100cm<sup>3</sup>에서 온도에 따른 정전용량의 변화

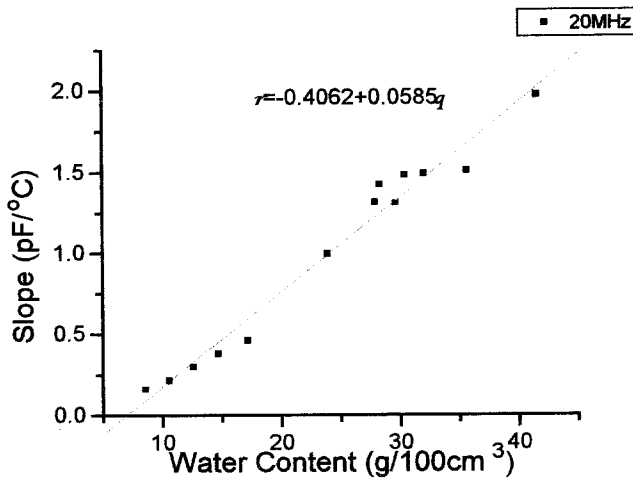


그림 4-27. 수분함량과 온도보정곡선 기울기와의 상관관계

이상의 결과로 온도 보정식을 얻을 수 있다. LCR미터의 측정 진동수 20MHz에 대해 다음의 보정식을 얻었다.

$$C_M = C_C + \rho(\theta)(T - 25)$$

25°C에서  $C_C$ 의 capacitance 값을 가질 때 온도 T에서  $C_M$ 의 capacitance 값을

가진다. 기율기  $\rho(\theta)$ 는  $25^{\circ}\text{C}$ 에서 수분함량  $\theta$ 의 함수이다. 위의 식을 이용한  $25^{\circ}\text{C}$ 에서의 표준 수분함량에 따른  $C_c$ 의 값이 그림 4-28에 나타나 있다. 표준 수분함량을 수평축에 나타내고 그에 따른 온도 보정한  $C_c$ 의 값을 수직축에 나타내었다.  $C_c = -15.2920 + 2.8520\theta$ 의 식을 얻었다.

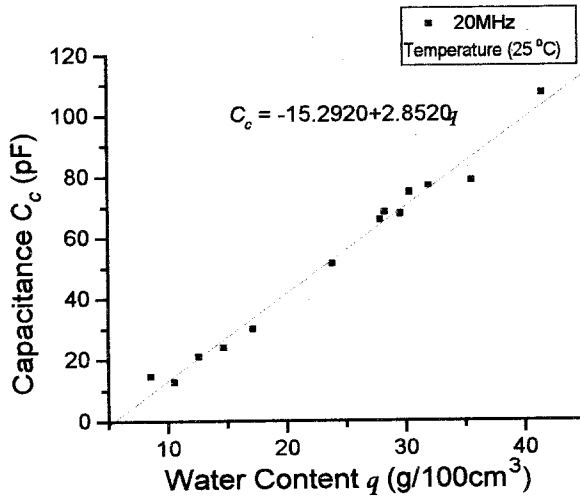


그림 4-28.  $25^{\circ}\text{C}$ 를 기준한 수분함량과 온도보정곡선 기율기와의 상관관계

#### 나. 염농도 보정 (ionic salinity calibration)

##### 1) 센서의 염농도 반응 특성

Two-rod 센서와 유사한 Three-rod 센서(길이 80mm, 지름 6mm 황동봉, rod간격 13mm)를 이용하여 실험하였다. 공기 중에서 약 4pF의 정전용량을 나타내었고 용액의 염농도에 따른 정전용량의 변화는 그림 4-29에 나타나 있다. 표준 염농도 용액은 KCl을 초순수에 녹여 각 염농도에 해당하는 몰농도를 가지는 용액으로 만들어졌다. 0~6.67dS/m사이 염농도에서 센서의 정전용량 값의 변화는 150pF에서 340pF까지 변화한다. 이 변화량은 매우 크며 수분감응력을 희석시킬 수도 있다. 현재 작물재배에서 토양 염도 제한값은 4dS/m이다. 대부분 포장 토양의 염도는 안정적이며 변화가 심하지 않다. 그러나 작물재배를 위해 인위적으로 만든 토양의 경우 염의 용탈정도에 따라 염도의 변화가 매우 심하다.



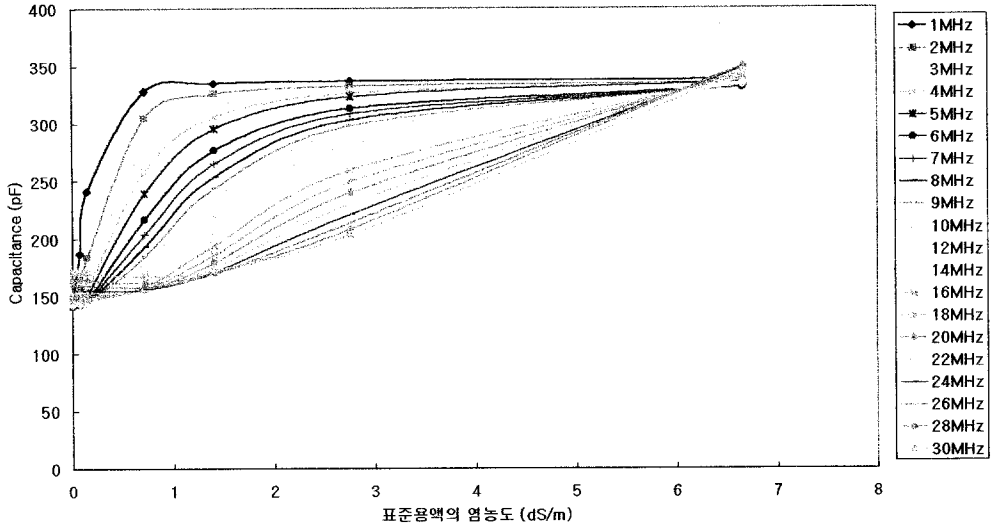


그림 4-29. KCl 표준용액 염농도에 따른 정전용량의 변화

센서의 정전용량 용량은 발진진동수가 수MHz에서 염농도가 0~1 dS/m에서 급격하게 증가하였다. 반면 20MHz 이상의 발진진동수에서는 1dS/m 이상에서 급격히 정전용량이 증가하였다. 또한 염농도에 따른 정전용량 값의 증가가 일차 직선 형태를 가지고 있다. 즉 토양의 염도 범위에 따라 센서의 반응이 민감하지 않은 발진진동수를 선택하면 염도에 의한 오차를 극복할 수 있으리라 생각된다. Two-rod 센서의 20MHz염도 의존성이 줄어드는 것은 센서의 이러한 특성 때문이라 생각된다.

일반적으로 포장토양은 1dS/m이하의 염도를 가지고 있다. 따라서 20MHz이상의 발진진동수를 사용하는 것이 좋을 것이다.

토양[사양토, EC(1:5) 0.0848 dS/m]을 약 2mm체로 쳐 지름 280mm, 높이 300mm 원통형 pot에 센서와 함께 장착하고 염농도 0.0171dS/m 용액으로 포화시켜 건조과정 동안 정전용량을 측정 한 후 다음 0.143dS/m 용액으로 포화한 후 같은 과정을 수행하였다.

그림 4-30a~e에 염농도 0.017dS/m 용액으로 포화시킨 후 건조과정 동안 정전용량의 변화를 측정 한 그래프 (염도A)와 0.143 dS/m의 염농도를 가지는 용액으로 포화시킨 후 정전용량의 변화를 측정 한 그래프(염도B)를 비교하였다. 2MHz에서 5MHz로 가면서 염농도 의존성이 더 증가하는 반면 10MHz, 20MHz 에서는 5MHz와 염농도 의존성 차이가 뚜렷하게 나타나지 않았다. 반면 30MHz에서는 염농도 의존성이 줄어들

었다고 볼 수 있었다.

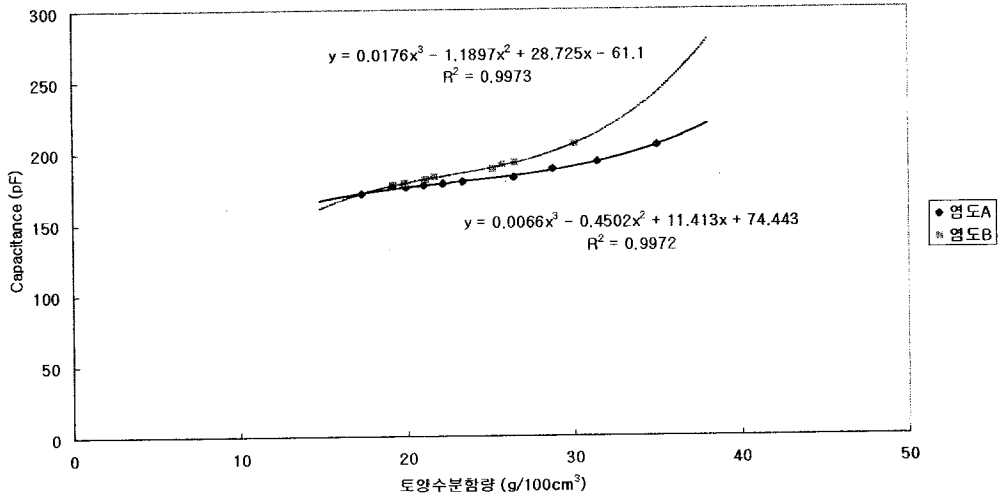


그림 4-30a. 센서의 염농도 의존성 - 2MHz

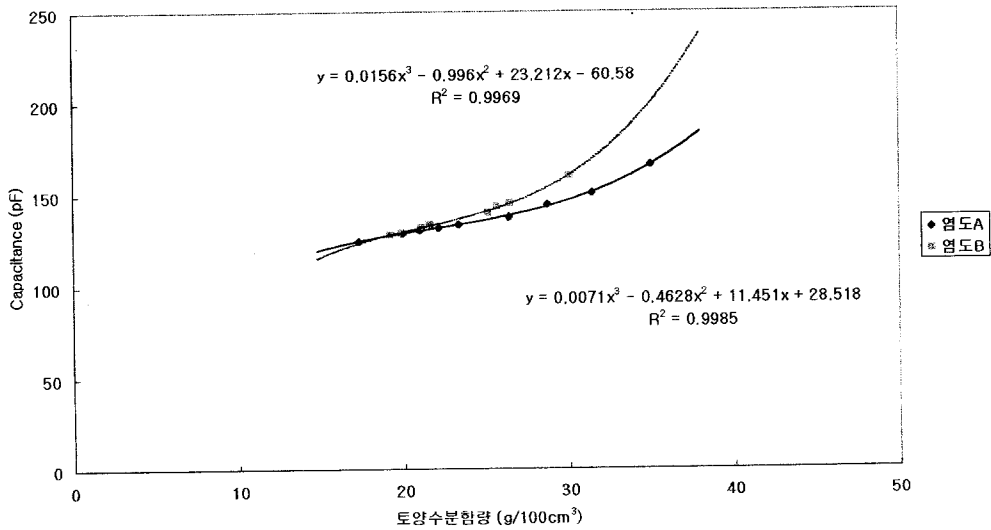


그림 4-30b. 센서의 염농도 의존성 - 5MHz

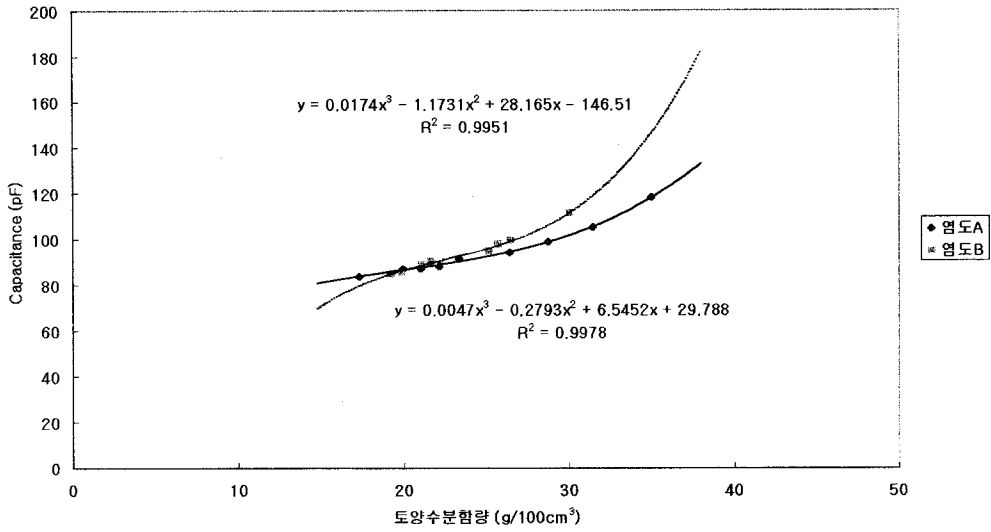


그림 4-30c 센서의 염농도 의존성 - 10MHz

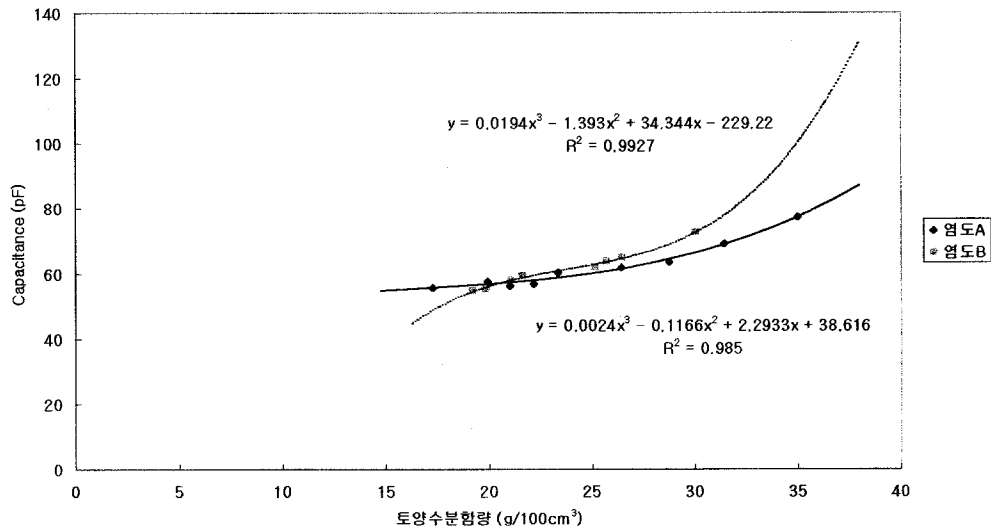


그림 4-30d. 센서의 염농도 의존성 - 20MHz

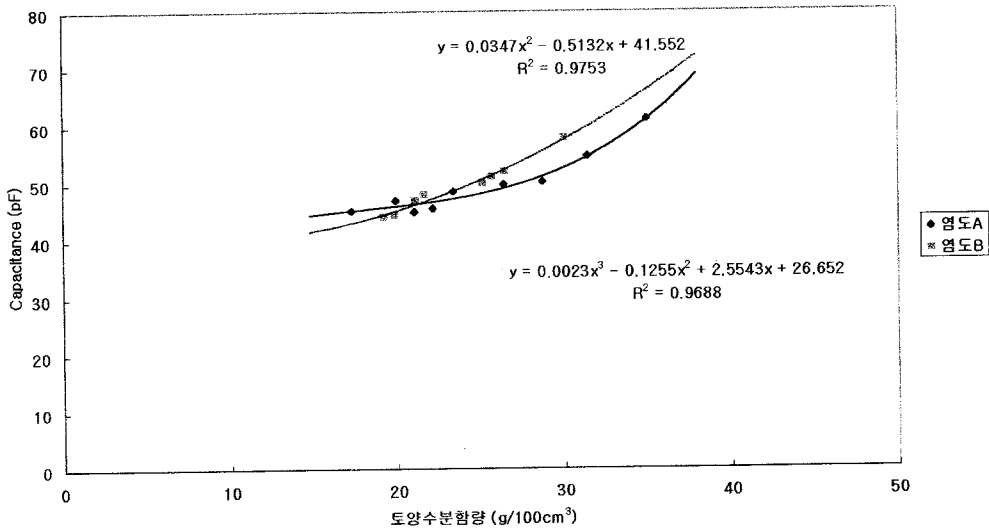


그림 4-30e. 센서의 염농도 의존성 - 30MHz

## 2) 염농도 보정식의 도출

토양의 수분함량 측정에 있어서 염농도 의존성은 민감하게 나타난다. 유전율방식의 수분함량 측정에서 염농도 의존성이 상대적으로 약하게 나타난다고 알려져 있으나 측정회로의 측정 진동수가 자유수 물분자의 relaxation frequency보다 훨씬 낮은 경우 의존성이 상대적으로 크게 나타나므로 보정을 하여야 한다. 염농도의 증가는 측정 capacitance의 증가로 나타난다. 염농도가 매우 낮은 증류수를 함유한 토양에서 측정 한 capacitance 값을 기본값으로 하여 KCl용액으로 염농도를 조절하면서  $\Delta C_{\sigma}$ 를 측정 하였다. 그 결과 염농도 보정과 온도 보정을 위해 다음의 식을 얻었다.

$$C_C(\theta) = C_M - \Delta C_{\sigma} - \rho(\theta)(T - 25)$$

온도 T에서 capacitance의 값  $C_M$ 을 읽었을 때, 25°C에서 온도 보정 및 염농도 보정을 한 capacitance의 값이  $C_C(\theta)$ 이다. 그림4-31은 보정 결과가 실측치와 이차곡선으로 잘 적합됨을 보이고 있다.

높은 수분함량을 보이는 표본 토양을 서서히 건조시켜가며 capacitance 값을 측정 하였다. 이 측정자료에 온도보정만을 한 결과가 그림4-32에 나타나 있다. 또한 온도보정 및 염농도 보정을 기한 결과가 그림4-33에 나타나 있다. 오븐 건조한 수분함량의

표준을 삼았으며, 센서를 통한 수분함량의 측정이 약간의 fluctuation을 보이고 있으나, field에서의 측정센서로서 가능성이 있음을 확인할 수 있다.

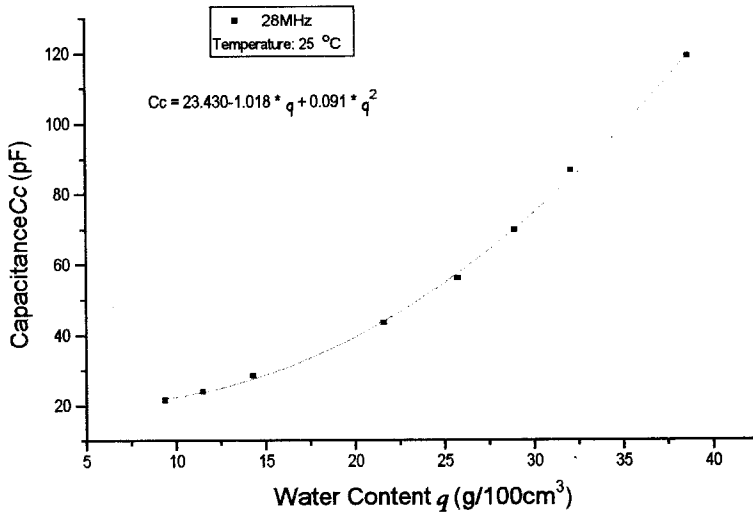


그림 4-31. Coaxial sensor에서 염농도 보상을 위한 보정곡선

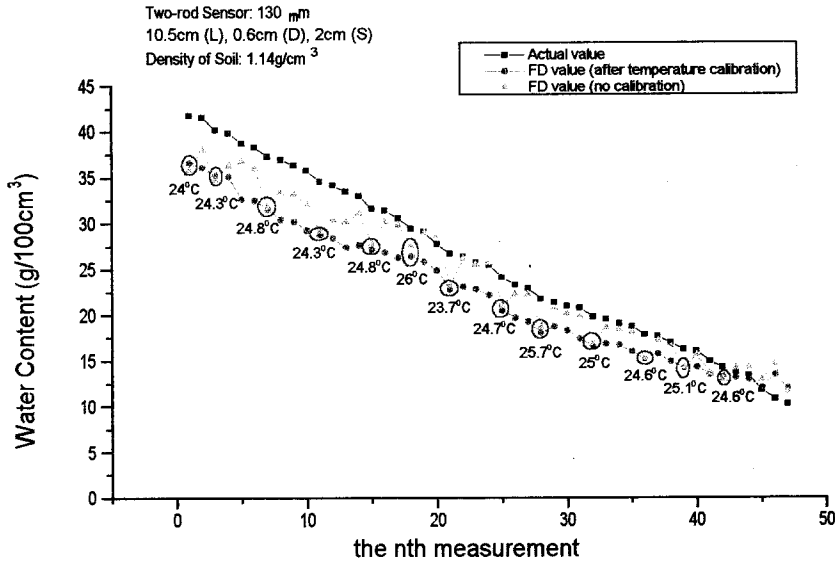


그림 4-32. 온도 보정을 하기전과 한 후의 보정곡선 비교

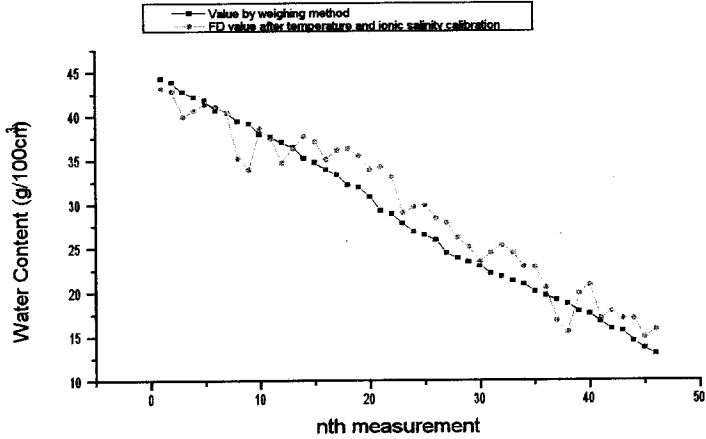


그림 4-33. 염농도와 온도 보정 후 보정곡선

### 3. 정전용량 측정 회로 개발

#### 가. 회로개발 배경 및 목적

물질의 수분함량을 측정하는 방법으로서 실제 함유된 수분을 직접 측정하는 것은 대부분의 경우에 매우 어렵기 때문에 보통은 수분 함유량에 비례해서 나타나는 물질의 물리적인 특성변화를 측정함으로써 함유된 수분량을 유추해내는 간접적인 측정방법을 주로 사용한다.

본 측정회로 개발에서는 유전을 측정방법에 근거하여 위에서 언급한 단점들을 극복할 수 있는 R-C 충전방전에 의한 용량 측정기법과 R-C 회로에 의한 위상편이 측정기법에 의해 토양에 함유된 수분을 측정할 수 있는 측정장치를 개발하는 것을 목표로 하였다.

#### 나. 수분측정장치 개발

앞서 간략히 언급한 대로, 물질에 함유된 수분을 측정하는데는 여러 가지 접근 방법이 있다. 오븐에 시료를 넣은 다음 가열하여 시료에 함유된 수분을 증발시켜 습도

를 측정하는 방법, 시료를 분쇄하여 전기저항을 측정하는 방법, 시료의 유전율을 측정하는 방법, 마이크로웨이를 시료에 통과시키면서 감쇄량을 측정하는 방법, 적외선을 사용하는 방법 등 물질 내에 함유된 수분에 의해 영향을 받는 각종 물리적인 특성을 측정할 수 있는 방법이면 어느 것이든 수분함량의 측정에 응용될 수 있다.

이론적인 해석에서의 문제는 이런 측정 방법에 의한 측정치가 수분함량에 선형적으로 비례하는가 하는 것과 그 비례범위가 어떠한가 하는 것이며 실제 구현에서의 문제는 구현의 용이성과 경제성, 그리고 구현된 측정 시스템에 의한 측정치의 정확도와 재현성이 될 것이다. 또한 측정 기법에 따라서는 수동적인 조작이 많아서 측정절차가 복잡하고 자동화하기가 곤란한 경우도 있을 수 있는데 응용 목적에 따라서는 이런 것도 큰 문제가 된다.

측정장치 설계에 있어서 가장 중요한 관점은 측정의 정밀도와 정확도 및 재현성이며 그 외 부수적인 요인으로는 측정과정의 편이성, 자동화, 휴대성 등이 될 것이다. 측정의 정밀도는 측정장치를 구성하는 부품들의 정밀성과 측정장치의 분해능에 의해 좌우되는 것으로서 현재의 하드웨어 기술에 의해 충분한 수준의 정밀도를 얻을 수 있다.

측정의 정확도는 직·간접적으로 측정되는 시료의 물리적인 양과 실제 수분함유량과의 사이에 존재하는 상관관계를 어느 정도로 정확하게 알고 있느냐 하는 것에 의해 결정되는 것으로서 이것을 규명하기 위해서는 다양한 실험을 수행하여 결과를 분석하여야 한다.

측정의 재현성문제는 측정장치의 설계시에 고려되지 않은 부수효과(side effect)들에 의해 발생되거나 피측정 시료의 불균일성에 의해 발생하는 것으로서 측정환경을 정규화하고 측정기 제작시 적절한 구조를 정하여 주고 측정시 적절한 교정(calibration)을 수행하여야 한다. 측정의 재현성을 떨어뜨리는 큰 요인으로는 전술한 바와 같이 측정기의 제작 당시에 발생할 수 있는 형태적인 요소, 즉 측정장치와 센서 간에서 측정환경에 따라 변할 수 있는 전자계의 영향이나 가변분포용량 등과 피측정 시료의 불균일한 분포 또는 시료량의 불균일성 등을 들 수 있다. 이런 상황에서 일관성이 있는 측정치를 얻기 위해서는 동일한 양의 시료에 대해 여러 번 측정을 반복하여 평균을 취하는 통계적인 방법을 사용할 수 있으나 매번 측정할 때마다 동일한 양의 시료를 채집하기도 용이하지 않으며 또한 측정시간이 오래 소요됨으로써 실시간 응용에 부적합하다는 단점이 있다.

본 과제에서는 이런 문제점을 보완하기 위하여 측정기내에 수분 측정을 위한 센서

(또는 극판)를 여러 곳에 분포시키고 릴레이나 반도체 스위치 소자를 사용하여 빠른 시간에 이들 각각의 센서에 대한 측정을 수백번 이상 반복수행하고 그 평균치를 계산하여 출력하는 방법을 사용함으로써 전술한 재현성 개선의 문제는 물론 측정과정의 자동화와 실시간화를 동시에 달성할 수 있는 측정장치를 설계·제작하였다.

#### 1) R-C 충전전 주기측정에 의한 수분측정 장치 개발

토양수분함량에 비례하여 유전율이 변한다는 사실과 두 전극 사이에 유전체를 둘 경우 유전율에 비례한 정전용량이 얻어 진다는 사실에 근거하여, 양쪽 벽에 평판전극을 갖는 사각기둥형으로 된 측정용기에 곡물을 투입한 후 정전용량을 측정하고 적절한 배율로 보정을 행함으로써 곡물의 수분함량을 간접적으로 측정할 수 있도록 하였다.

평판전극 사이의 정전용량 측정방법으로는 가장 보편적인 RC 시정수회로의 충전전주기 측정기법을 사용하였는데, 이것은 시정수회로를 트리거하여 C 값에 비례하는 원쇼트 펄스폭을 발생시킨 다음 그 펄스 폭 동안 주기를 알고 있는 아주 안정된 수정발진기의 클럭 개수를 계수함으로써 간접적으로 C의 용량을 측정한다. 다음 그림에 본 측정장치의 설계개념을 보인다.



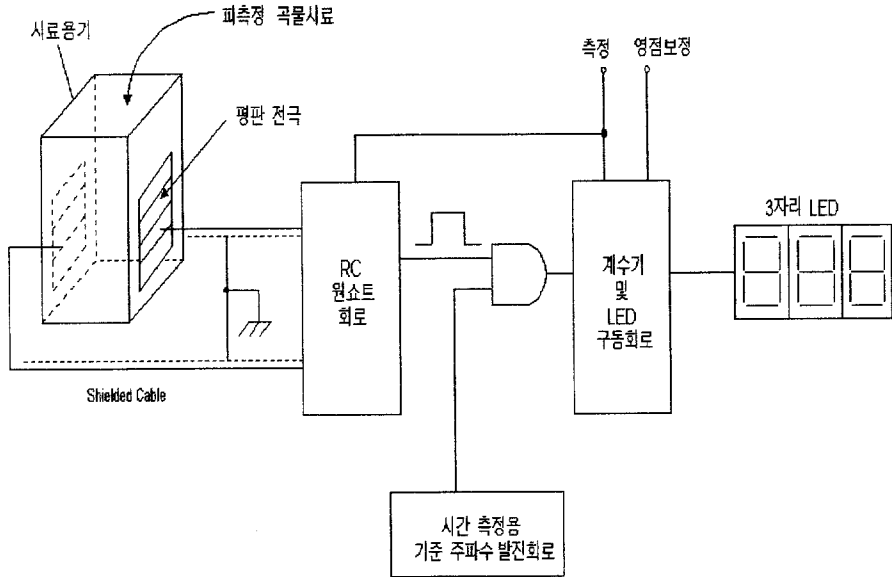


그림 4-34. 수분측정장치의 설계 개념도

555 형의 타이머 IC에 의한 RC 원쇼트 회로에서 발생하는 펄스 폭은  $1.1RC$  초 (sec)로서 이 펄스 폭내에 주기가  $T(=1/f)$  초인 기준 주파수의 클럭을 통과시켜서 계수했을 때 만약  $N$ 개의 펄스 수가 계수되었다면 정전용량  $C$ 는 다음과 같이 계산된다.

$$C = \frac{TN}{1.1R} [F] = \frac{N}{1.1Rf} [\mu F] \quad (4-7)$$

여기서 저항  $R$ 의 단위는  $M\Omega$ 이며 주파수  $f$ 의 단위는  $MHz$ 이다.

제작하고자 하는 수분측정장치의 설계에 있어서 우선 고려된 사항으로는 첫째로는 측정의 재현성이 확보되어야 한다는 것이고, 둘째로는 온도변화 등 주변환경의 변화에 둔감해야 한다는 것이며, 마지막으로 가능한 한 휴대가 용이한 형태여야 한다는 것이었다.

첫째 요소인 측정의 재현성 확보 문제를 해결하기 위해서는 회로자체가 안정해야 함은 물론 매 측정 시 밀도가 균일해야 하며 측정장치와 시료용기를 연결하는 선로 등에서 피할 수 없이 발생하는 분포용량 등에 변화가 없어야 한다. 이 중 가장 문제가 되는 것은 측정선로에서의 분포용량과 시료밀도의 균일성으로서 분포용량을 일정

하게 유지하는 것은 시료용기와 측정선로를 엄격하게 정전차폐를 시킴으로써 어느 정도 해결할 수 있었으나, 매번 시료밀도의 균일성을 확보하기가 용이하지 않기 때문에 여기서는 측정용기내의 상하 2 개 장소에서 정전용량을 별도로 측정하여 평균을 취하는 방법을 사용하였다.

이 부분이 본 연구에서 접근한 독특한 방법으로 실제로는 상하 2개 장소 각각에서 각각 128회씩의 측정을 행하여 평균을 취한 다음 그 2개의 평균치를 다시 평균하는 방식으로 정전용량을 측정하고 있다. 이는 실제 실험적인 데이터 수집시 자주 사용되는 기법으로서 이렇게 함으로써 매 측정시 마다 발생될 수 있는 랜덤한 오차를 최대한 제거하고 안정된 측정치를 얻을 수 있다. 실제 회로에서는 각각의 측정장소에서 구동되는 RC 원쇼트 회로의 시정수가 아주 작아서 상하 각각 128회씩 총 256회의 측정이 수행되어도 전체적인 측정시간은 아주 짧다.

둘째 요소인 온도에 대한 안정성 문제를 해결하기 위해서는 RC 시정수회로의 출력을 받아 고도로 안정된 원쇼트 펄스폭을 만들어 내는 회로가 필요한데 본 연구에서는 555 형의 타이머 IC를 사용함으로써 이 문제를 해결하고 있다. 555 형의 타이머는 기본형태로부터 고도로 안정된 CMOS형까지 다양하게 제공되고 있는데, CMOS형의 경우는 입력 임피던스가  $10^{12} \Omega$  이상이며, 펄스폭의 온도 유동성이  $50\text{ppm}/^\circ\text{C}$  이하이고 전원전압의 변동에 대해서도 상당히 우수한 특성을 보여주고 있다.

셋째 요소인 휴대성 문제를 해결하기 위해서는 측정 데이터를 수집하고 영점 조정과 적절한 보정을 수행하여 LED에 디스플레이 하는 전부분을 Intel 8051원칩 마이크로컨트롤러와 하드웨어 수준에서 호환성을 가지면서도 속도가 빠르고 프로그램이 용이한 ATMEL사의 AT89C51을 사용하였다. 마이크로컨트롤러를 사용함으로써 주변 하드웨어의 개수를 최소화시킬 수 있으며, 측정동작을 프로그램으로 제어함으로써 측정시 발생될 수 있는 각종 예외 상황에 유연하게 대처할 수 있게 된다.

그림 4-35에 이상의 기본 설계개념과 디스플레이 등의 주변회로를 포함시킨 전체 회로의 블록선도를 보인다.

그림에서 볼 수 있는 것처럼 측정에 수반되는 많은 기능들을 마이크로컨트롤러가 담당함으로써 회로가 비교적 단순하게 구성되었으며 LED 디스플레이도 측정시에만 구동되도록 하여 소비전력을 최대한 억제하고 있다. 이 회로의 동작은 다음과 같다.

우선 전원이 투입되면 마이크로컨트롤러는 시료용기가 비어 있는 상태에서 상하 각각의 측정장소에서 정전용량을 측정하여 저장한다. 이 측정치들은 상하 각각에서 128회씩 측정되어 평균을 취한 값이다. 이 값들은 회로의 입력 임피던스와 측정선로

등에 존재하는 분포용량으로서 나중에 시료의 정전용량 측정시 실제 시료만에 의한 정전용량을 계산하기 위한 영점 보정용으로 사용된다. 그 뒤 측정기는 대기상태로 들어가서 사용자가 측정보턴이나 영점조정보턴을 누를 때까지 기다린다.

본 회로의 동작은 측정 보턴과 영점조정 보턴의 2개 입력에 의해 제어되며 마이크로컨트롤러의 인터럽트 기능을 사용하여 보턴 입력을 조사한다. 먼저 측정 보턴이 눌러지면 우선 상하 각단의 정전용량을 측정한 후 이 값들과 미리 저장되어 있는 영점보정용 측정치를 비교하여 그 차이가 미소하면 측정기는 시료가 없는 상태에서 측정 보턴이 눌러진 걸로 간주하고 방금 측정된 값들을 새로운 영점보정용 값으로 저장한다. 만약 측정치들과 영점보정용 값들과의 차이가 현격하면 측정기는 유효한 시료가 투입된 상태로 간주하고 방금 측정된 값들에서 미리 저장되어 있는 영점조정용 값들을 감함으로써 분포용량이 제거된 측정치를 얻는다.

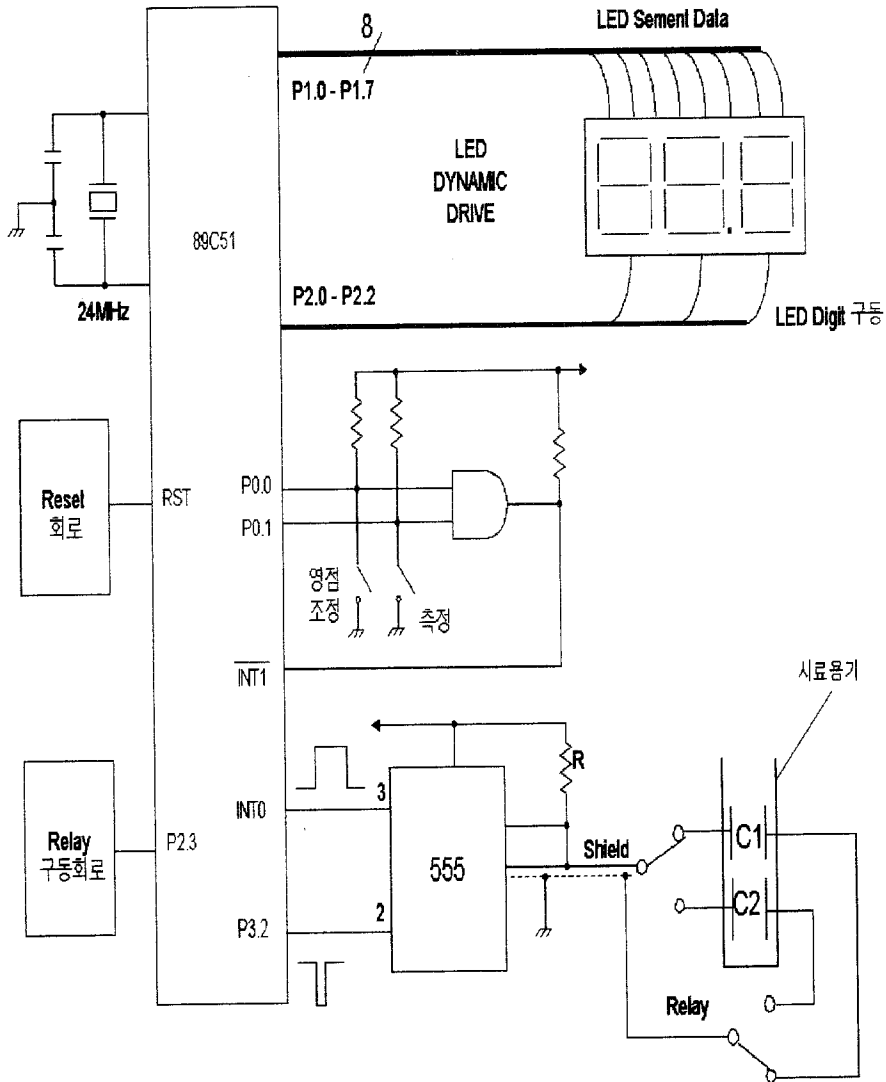


그림 4-35. 수분측정장치의 전체 회로 개략도

그 뒤 측정기는 다시 상하단 측정치간을 비교하여 상단에서의 측정치가 하단에서의 측정치에 비해 현격히 작을 때는 시료용기에 시료가 충분히 담겨 있지 않은 걸로 간주하고 하단 측정치만을 유효한 측정치로 디스플레이 한다. 만약 상하단 측정치간의 차이가 미소하면 2개 측정치의 평균을 취함으로써 시료밀도의 편차에서 발생하는 오차를 최소화하여 디스플레이 한다.

영점조정 보턴이 눌러지면 역시 상하단에서의 정전용량을 측정한 후 이 값들과 미

리 저장되어 있는 영점보정용 값들과의 차이를 조사한다. 만약 이 차이들의 아주 크면 측정기는 현재 시료가 투입되어 있는 상황에서 영점조정 보턴이 눌러진 걸로 간주하고 LED에 에러 메시지를 디스플레이 한다. 차이가 근소하면 측정기는 방금 측정된 값을 새로운 영점보정용 값으로 저장한다. 다음 그림 4-36, 37에 이상 간략하게 설명한 측정 알고리즘을 구현하기 위한 프로그램 순서도를 보인다.

본 회로의 설계개요에서도 언급하였듯이 본 측정기에서는 동일한 시료에 대해 128번이라는 많은 회수의 측정을 수행하여 그 평균치를 사용하고 있기 때문에 측정치의 안정성이 상당히 우수함을 확인 할 수 있었다.

본 측정회로의 전체적인 정확성과 재현성에 가장 핵심적인 역할을 하는 부분은 RC 시정수회로와 원쇼트 펄스 폭을 만들어 내는 부분으로서 RC 회로의 온도 안정성 확보를 위해서는 고정밀 금속 피막저항을 사용하면 되지만 곡물 수분측정과 같이 10 pF 대의 아주 작은 정전용량을 측정하고자 하는 경우, 원쇼트 회로의 직선성을 유지시키는 것은 그렇게 간단한 일은 아니다. 따라서 향후의 연구과제는 아주 작은 크기의 정전용량 측정시 555 구조보다 뛰어난 직선성과 안정성을 갖는 원쇼트 회로를 개발하는 것이 될 것이다.

또한 수분을 함유한 토양에 의해 생성되는 커패시턴스는 수분에 의한 전도성 때문에 상당한 크기의 병렬저항을 가질 것이며 이 병렬저항의 크기 역시 수분함량에 의존적일 것으로 생각되기 때문에 정전용량과 병렬저항 값을 동시에 측정하는 회로 설계 및 보정 알고리즘의 개발이 필요하다고 할 수 있을 것이다.

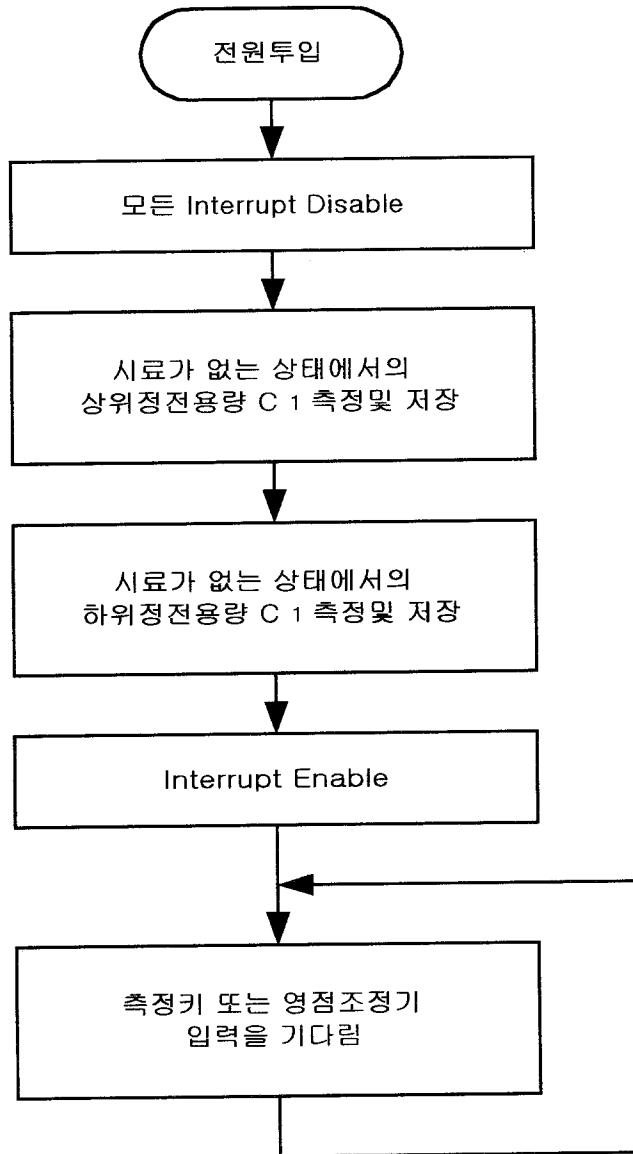


그림 4-36. 수분측정장치의 프로그램 순서도(a)

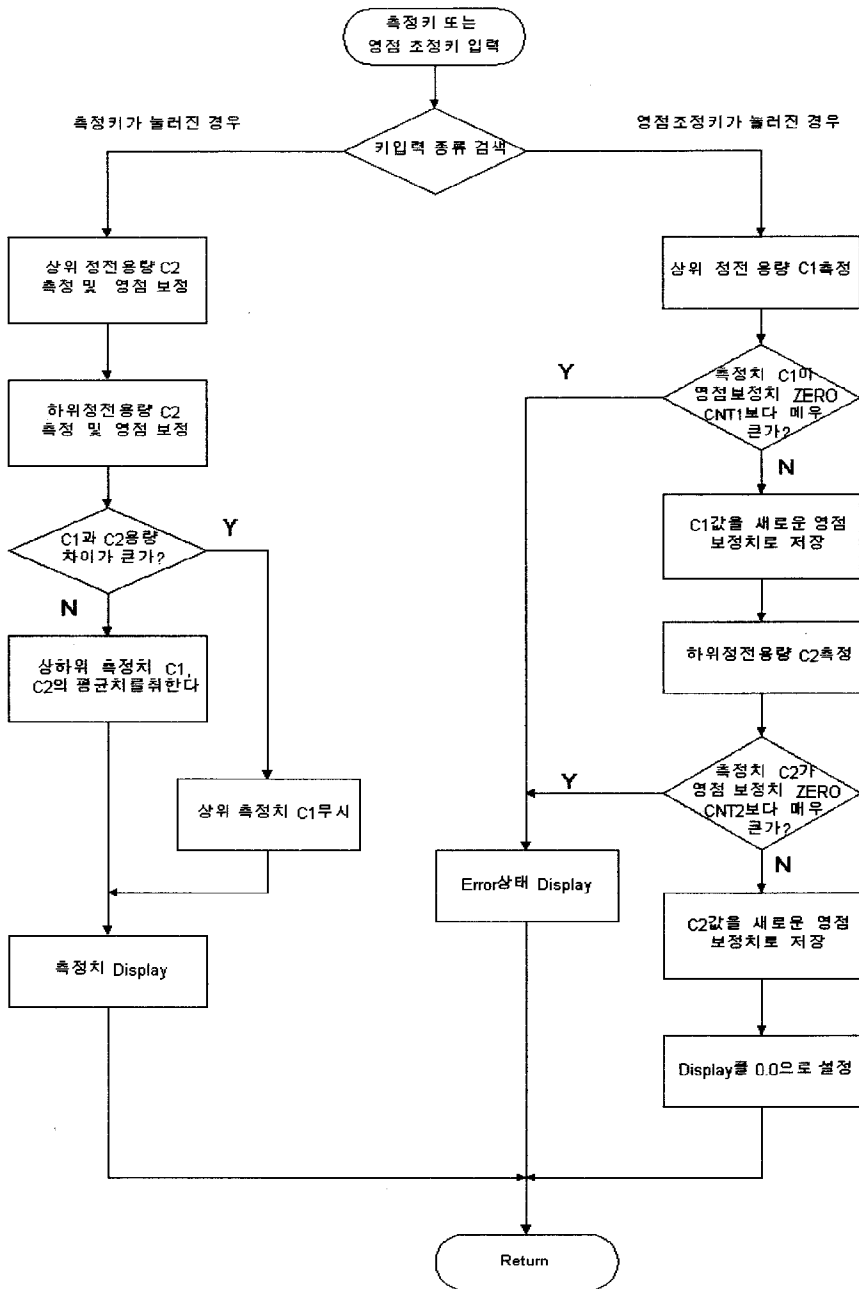


그림 4-37. 수분측정장치의 프로그램 순서도(b)

2) 위상편이 측정기법에 의한 수분측정장치 개발

그림 4-38과 같이 직렬로 연결된 R, C 회로에 어떤 교류신호  $v_s(t)$ 를 인가하면 커패시턴스 C 양단에는  $v_s(t)$ 와 주파수는 같으나 진폭이 감소되고 위상이  $\theta^\circ$  만큼 편이된  $v_L(t)$ 가 나타난다는 사실을 이용하여 피측정 용량 C의 값을 측정하는 장치를 개발하고자 한다.

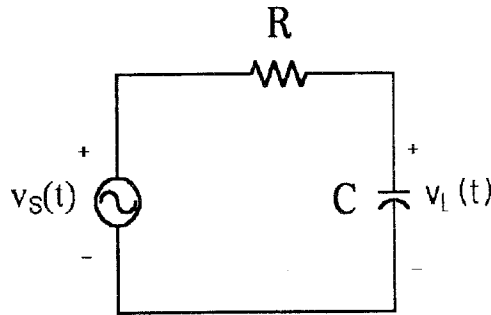


그림 4-38. R-C 위상편이 회로

$v_s(t)$  및  $v_L(t)$ 는 다음과 같다.

$$v_s(t) = V_S \cos \omega t \quad (4-8)$$

$$v_L(t) = V_L \cos (\omega t - \theta) \quad (4-9)$$

여기서  $V_S$  및  $V_L$ 는 각각  $v_s(t)$ 와  $v_L(t)$ 의 진폭이며,  $\theta$ 는 위상편이각이고  $\omega$ 는 교류신호의 각주파수로서  $\omega = 2 * \pi * f$  (radian/sec)이다.  $f$ 는 교류신호의 주파수 (Hz)이며 아랫첨자  $s, L$ 은 각각 신호원(Source), 부하(Load)임을 나타낸다.

교류회로이론에 의해 이 문제를 해석해 보면  $V_S, V_L, \theta$  값들은 모두 회로소자 R, C의 값들과 어떤 관계식을 만족시키며 이때 적절한 측정기법을 통해  $V_S, V_L, \theta$  값들을 측정하게 되면 관계식으로부터 R과 C의 값들을 역으로 계산해 낼 수 있다. 이것이 본 절에서 설계하고자 하는 측정장치의 설계기본 개념이며 위의 회로에서의 회로소자 C가 바로 측정대상인 곡물이나 토양의 수분함량에 비례한다고 가정되는 양이 된다.

일반적으로 이상적이지 못한 커패시턴스는 전극사이에 존재하는 매질의 유전율에



비례하는 정전용량과 함께 손실요소(Dissipation factor)로서의 저항성분이 병렬로 연결된 형태로 모델링되며 실제 측정하고자 하는 곡물이나 토양 역시 이런 형태의 정전용량으로 모델링될 수 있을 것이다.

또한 실제 측정기를 제작하여 토양의 정전용량을 측정하고자 할 경우 측정기 내부에서 발생된  $v_s(t)$ 가 역시 측정기 내부에 존재하는 저항 R을 통해 측정기 외부에 있는 C에 공급되어  $v_L(t)$ 를 발생시키게 되는데 이 과정에서 측정기로부터 C까지의 신호 공급선이 되는 동축케이블 자체의 정전용량 및 병렬저항 성분이 피측정체인 C의 용량 및 저항에 병렬로 부과되게 된다. 따라서 실제 측정은 이런 분포용량성분까지 함께 포함된 형태로 이루어지게 되며 이런 분포용량성분은 나중 마이크로컨트롤러가 담당하게 되는 신호처리 알고리즘에서 적절히 보상되어 제거시키면 된다.

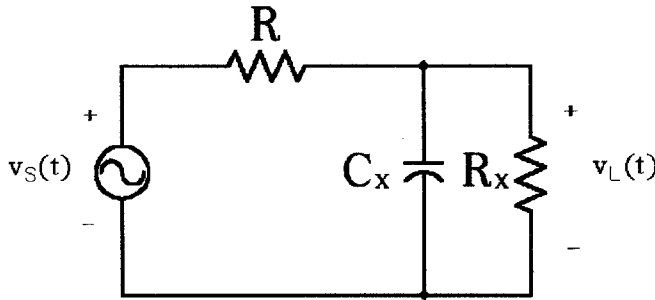


그림 4-39. 피측정용량과 회로의 분포용량 및 손실성분이 함께 고려된 등가회로

그림 4-39는 이상에서 설명한 피측정 정전용량 C와 분포용량성분들이 함께 고려된 형태로서의 미지 용량성분 및 손실성분을 각각  $R_X$ ,  $C_X$ 로 표현한 등가회로이다.

이제 기본적인 회로이론에 의해 신호원 전압  $v_s(t)$ , 피측정물 양단의 전압  $v_L(t)$ , 위상편이  $\theta$ 와 측정하고자 하는 용량  $C_X$  및 저항  $R_X$ 와의 관계식을 유도해 보자.

우선 편이상  $R_X$ 와  $C_X$ 의 병렬에 의한 피측정 임피던스를 복소 임피던스  $R + jX$ 의 형태로 두고 신호원 전압과 피측정물 양단에 나타나는 부하전압과의 관계를 유도하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 V_L &= V_L \cos \theta + j V_L \sin \theta \\
 &= \frac{R + jX}{R_S + R + jX} V_S = \frac{R(R + R_S) + X^2 + jR_S X}{(R + R_S)^2 + X^2} V_S
 \end{aligned} \tag{4-10}$$

가 된다. 여기서,  $V_S$  및  $V_L$ 은 각각

$$V_S = V_S \angle 0 = V_S, \quad V_L = V_L \angle \theta$$

인 페이저(Phasor) 형태의 전압값 들이다.

$$A = V_L \cos \theta, \quad B = V_L \sin \theta \tag{4-11}$$

로 두면 (4-10)식으로부터 다음의 관계가 성립된다.

$$\frac{R(R + R_S) + X^2}{(R + R_S)^2 + X^2} V_S = A \tag{4-12}$$

$$\frac{R_S X}{(R + R_S)^2 + X^2} V_S = B \tag{4-13}$$

이때, (4-12)식은 다음과 같이 변형될 수 있고,

$$\frac{(R + R_S)^2 + X^2 + R(R + R_S) - (R + R_S)^2}{(R + R_S)^2 + X^2} V_S = A \tag{4-14}$$

(4-14)식을 정리하면 다음과 같이 된다.

$$\frac{R(R + R_S) - (R + R_S)^2}{(R + R_S)^2 + X^2} V_S = A - V_S \tag{4-15}$$

여기서 (4-13)식 ÷ (4-15)식을 구하면

$$\frac{R_S X}{R(R + R_S) - (R + R_S)^2} = \frac{B}{A - V_S} \tag{4-16}$$

이 되며 (4-16)식을 정리하여  $X$ 에 대해 풀면 다음과 같다.

$$X = \frac{B[R(R+R_S) - (R+R_S)^2]}{R_S(A-V_S)} \quad (4-17)$$

여기서 (4-13)식을  $X$ 에 관한 2차 방정식의 형태로 정리하면

$$BX^2 - R_S V_S X + B(R+R_S)^2 = 0 \quad (4-18)$$

이 되며 (4-17)식의 관계식을 (4-18)식의  $X$ 에 치환을 시키면

$$B \frac{B^2 [R(R+R_S) - (R+R_S)^2]^2}{R_S^2 (A-V_S)^2} - R_S V_S \frac{B [R(R+R_S) - (R+R_S)^2]}{R_S (A-V_S)} + B(R+R_S)^2 = 0 \quad (4-19)$$

이 된다.

(4-19)식의 양변에  $R_S^2 (A-V_S)^2$ 을 곱하고  $R(R+R_S) - (R+R_S)^2 = -R_S(R+R_S)$ 인 관계식을 이용하여 정리하면 다음과 같이 피측정 임피던스의 저항성분  $R$ 을 구할 수 있다.

$$R = - \frac{B^2 + R_S V_S (A-V_S) + (A-V_S)^2 R_S}{B^2 + (A-V_S)^2} \quad (4-20)$$

이제 (4-17)식과 (4-20)식으로부터 피측정물의 임피던스  $R + jX$ 가 구해졌으므로 실제 피측정물의 모델이 그림 4-39와 같이 저항  $R_X$ 와 용량  $C_X$ 가 병렬 연결된 구조라고 가정하고  $R_X$ 와  $C_X$ 의 값을 계산하면 된다. 즉  $R, X$ 와  $R_X, C_X$ 의 관계는 다음과 같다.

$$R + jX = \frac{\frac{R_X}{j\omega C_X}}{R_X + \frac{1}{j\omega C_X}} = \frac{R_X}{1 + j\omega R_X C_X}$$

$$= \frac{R_X}{1 + \omega^2 R_X^2 C_X^2} + j \frac{-\omega R_X^2 C_X}{1 + \omega^2 R_X^2 C_X^2} \quad (4-21)$$

(4-21)식으로부터  $R_X$ 와  $C_X$ 는 다음과 같이 결정된다.

$$R_X = \frac{R^2 + X^2}{R} \quad (4-22)$$

$$C_X = -\frac{X}{\omega(R^2 + X^2)} \quad (4-23)$$

위의 전개과정을 살펴보면 피측정물의 정전용량  $C_X$ 와 손실성분  $R_X$ 를 측정하기 위해서는 측정에 사용되는 신호원  $v_s(t)$ 의 진폭  $V_S$ 와 피측정물 양단에 나타나는 부하전압  $v_L(t)$ 의 진폭  $V_L$  및 위상편이각  $\theta$ 를 측정할 다음 (4-11), (4-17), (4-20), (4-21), (4-22)식을 사용하면 됨을 알 수 있다.

일반적으로 교류신호의 진폭은 이상적인 정류기로 정류시킨 후 첨두치 유지회로 (Peak Holder)를 사용하여 구할 수 있으며, 두 교류신호 사이의 위상편이는 OP Amp 에 의한 영점통과 비교기(Zero-Crossing Comparator)와 저역통과 필터의 조합에 의해 구할 수 있다. 그러나 본 과제에서 설계하고자 하는 측정기에 사용되는 신호원의 주파수가 20MHz로 아주 높기 때문에 이 주파수대에서 이상적인 정류기와 비교기를 구현할 수 있는 OP Amp 등의 소자를 구하기가 용이하지 않았다.

따라서  $V_S$ ,  $V_L$ ,  $\theta$ 의 크기를 측정할 수 있는 다른 방법을 찾아야 했으며, 결국 Analog Device사에서 제공하는 광대역 아날로그 승산기(Analog Multiplier)를 사용하기로 하였다. 아날로그 승산기는 두 개의 아날로그 신호  $X$ ,  $Y$ 를 입력받아 그 곱  $X*Y$ 를 출력시키는 회로이다.

본 연구에서는 위와 같은 두 개의 승산기를 사용하여  $v_s(t)*v_L(t)$ 와  $v_L(t)*v_L(t)$ 를 구함으로써  $C_X$  및  $R_X$ 를 구하는데 필요한  $V_L$ 과  $\theta$ 의 값을 구하도록 하였으며 또 하나 필요한 변수인  $V_S$ 는 신호원 발진회로 설계 시 1.0V로 안정시킴으로써 측정과 계산의 과정을 좀 더 간략화 시킬 수 있도록 하였다.

(4-8)식과 (4-9)식의  $v_s(t)$ ,  $v_L(t)$ 에 의한 두 개의 승산기 출력  $v_s(t)*v_L(t)$ 와  $v_L(t)*v_L(t)$ 를 구하면 다음 식과 같이 된다.

$$v_s(t)*v_L(t) = \cos \omega t * \cos (\omega t - \theta)$$

$$= \frac{1}{2} V_S V_L [\cos \theta + \cos(2\omega t - \theta)] \quad (4-24)$$

$$\begin{aligned} v_L(t) * v_L(t) &= V_L^2 \cos^2(\omega t - \theta) \\ &= \frac{1}{2} V_L^2 [1 + \cos(2\omega t + 2\theta)] \end{aligned} \quad (4-25)$$

(18), (19)식으로 주어지는 승산기의 출력에는  $V_L$ ,  $\theta$ 에 관한 유용한 정보를 갖는 직류성분과 원래 신호원 주파수의 2배 주파수를 갖는 교류성분이 함께 존재하는데 저역통과 필터(Low Pass Filter)를 사용하여 고주파 성분을 제거시키고 나면 각각의 승산기 출력으로부터 다음과 같은 정보를 얻을 수 있다.

$$v_s(t) * v_L(t) \rightarrow \frac{1}{2} V_S V_L \cos \theta, \text{ (여기서 } V_S = 1) \quad (4-26)$$

$$v_L(t) * v_L(t) \rightarrow \frac{1}{2} V_L^2 \quad (4-27)$$

(20), (21)에서 얻어지는 정보는 직류성분으로서 범용 저잡음형 OP AMP로 쉽게 증폭이 가능하며 A/D 변환기를 사용하여 디지털 값으로 변환 후 마이크로컨트롤러로 처리할 수 있게 된다. 본 연구에서는 2개의 A/D 변환기를 사용하여  $v_s(t) * v_L(t)$ 와  $v_L(t) * v_L(t)$ 의 디지털 값을 얻은 후 (4-27)식으로부터  $V_L$ 을 계산하고 (4-26)식으로부터  $\theta$  값을 계산하여 (4-11), (4-17), (4-20), (4-21), (4-22)식으로 주어지는 일련의 계산과정에 의해  $R_X$ 와  $C_X$ 의 값을 구하였다. 그림 4-40은 이상의 측정기법을 구현하기 위한 전체적인 측정 시스템의 개략도를 보여 준다.

이제 전체 수분 측정 시스템을 구성하는 각각의 부분에 대해 설명하고자 한다. 그림 4-40의 회로는 위에서 언급한 대로 기능적으로 다음과 같이 5개의 부분으로 이루어진다

- 가) 사인파형 발생회로
- 나) 위상, 진폭 검출회로
- 다) A/D 변환회로
- 라) CPU 및 주변 digital 회로
- 마) 전원 공급회로

이중에서 A/D 변환회로, CPU 및 주변회로, 전원 공급회로 등은 일반적으로 많이 사용되는 회로이므로 별도의 설명없이, 회로 동작의 핵심이 되는 사인파형 발생회로 및 위상, 진폭 검출회로를 중심으로 설명한다.

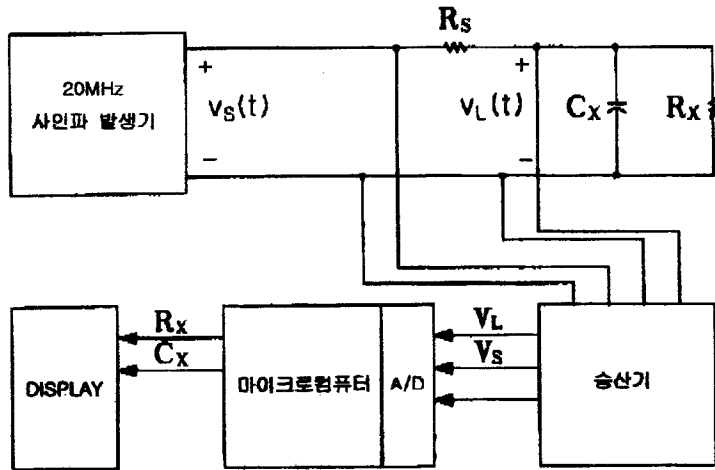


그림 4-40. 위상편이 측정기법에 의한 수분측정장치의 구성 개략도

#### 가) 사인파형 발생회로

이 회로는 20MHz의 정현파를 발생시키는 회로이다. 고주파 JFET와 수정 발진자(Quartz)로 Piece 발진회로를 구성한다. JFET의 Gate의 입력 Impedance가 높으므로 수정 발진자의 발진 조건에 영향을 거의 주지 않으며, 수정 발진자는 수만에 이르는 높은 Q값과 수 ppm단위의 온도 변화 특성을 가지고 있으므로 이 회로의 주파수 안정도는 매우 높다.

이 발진 회로의 출력에 대해서 진폭을 원하는 크기로 조절하고 직류성분 및 고조파를 제거하여 완전한 사인파형을 만들기 위해서 filter 및 buffer 회로를 설계한다. Piece 발진회로의 출력 Impedance는 높은 편은 아니지만 출력 회로가 발진 조건에 영향을 주어 발진 조건 및 파형을 변화시키므로 출력에 연결되는 회로의 설계에 주의해야 한다. filter회로는 20MHz에서 동작하는 active filter가 없으므로 passive filter로 설계한다. filter는 순서대로 HPF (High-Pass Filter)와 Buffer Amplifier, 그리고 LPF

(Low-Pass Filter)의 3 부분으로 구성된다. 여기서 Buffer Amplifier는 HPF와 LPF를 분리하여 BPF(Band-Pass Filter)의 동작을 하게 하는 역할을 한다. 회로의 최종 출력단에 있는 Buffer는 출력 Impedance를 원하는 수준으로 낮추기 위한 것이다.

회로 제일 왼쪽의  $500\ \Omega$ 은 발진 조건 및 발진 진폭을 결정하며,  $1\ K\Omega$ 은 회로 가운데의 BUF634로 들어가는 파형의 크기, 그리고 회로 오른쪽의  $500\ \Omega$ 의 저항은 출력단 Buffer로 들어가는 파형의 크기를 제한하는 역할을 한다. 회로에 사용된 Buffer는 Slew Rate가  $2000\ V/\mu S$  인 초고속 type이지만 진폭이 3V를 넘게 되면 심각한 파형의 왜곡을 유발하여 고조파들의 크기를 증가시키므로 회로 전체의 정현파의 진폭이 2.0V를 넘지 않도록 해야한다. 따라서 회로에 사용된 가변 저항들은 신호의 진폭뿐 아니라 기본 주파수(fundamental frequency)의 파형의 진폭대 고조파 파형의 진폭을 결정하는데 중요한 역할을 한다. 가변저항들은 회로 각 부분의 파형을 Spectrum analyzer로 세심하게 관찰하면서 조절한다. 적절하게 조절하면 기본 주파수대 고조파 주파수 성분의 파형의 크기의 비를 40dB이상으로 벌어지게 할 수 있다.

이 발진회로는 특성상 많은 잡음을 생산하므로 회로의 각 부분에 적절하게 condenser를 삽입하여 잡음을 줄인다. 일반적으로 사용되는 condenser들은 모두 값에 따른 일정한 동작 영역을 가지고 있어서 그 동작 영역에서만 capacitance 역할을 한다. 측정치에 의하면 약 40MHz정도까지의 주파수에서 capacitance 역할을 하기 위해서는 ceramic type으로 1000pF이하의 condenser만을 사용해야 한다.

#### 나) 위상, 진폭 검출회로

이 회로의 역할은 source 전압 파형과 부하 양단간의 전압 파형을 비교하여 위상의 변화와 크기의 변화를 검출함으로써 부하의 impedance를 계산하기 위한 정보를 얻기 위한 회로이다(다음의 그림 참조). 즉,

- (a) 출력 신호 X의 진폭
- (b) 입력 신호 Y대 출력 신호 X의 위상차이

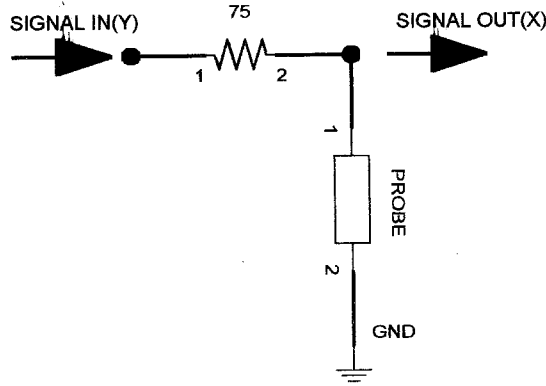


그림 4-41. 위상진폭 검출회로

의 정보를 검출하는 회로가 필요하게 된다. 표현의 편의상, 이하에서 언급하는 신호 X는 그림 4-40에서의  $v_L(t)$ 를, 그리고 신호 Y는 그림 4-40에서의  $v_S(t)$ 를 각기 나타낸다.

일반적으로 진폭 검출에는 envelop detection 기능의 회로를, 위상 검출에는 PLL을 응용한 회로를 사용하지만 언급한 대로 20MHz의 주파수 대역에서는 일반적인 OPAMP를 사용할 수 없으므로 이와 같은 회로를 사용할 수 없다. 위상 검출의 경우에는 고속의 PLL을 사용하여 회로를 구성할 수는 있지만 그 앞단에 ALC(Automatic Level Control)회로를 부가하여 비교되는 두 신호의 진폭을 정밀하게 일치시켜야 하는 문제점이 남게 된다. 따라서 본 회로에서는 Video 회로에 사용되는 고속의 4 quad analog multiplier (AD834)를 사용하여 다음과 같은 위상 및 진폭 검출 회로를 구성한다.



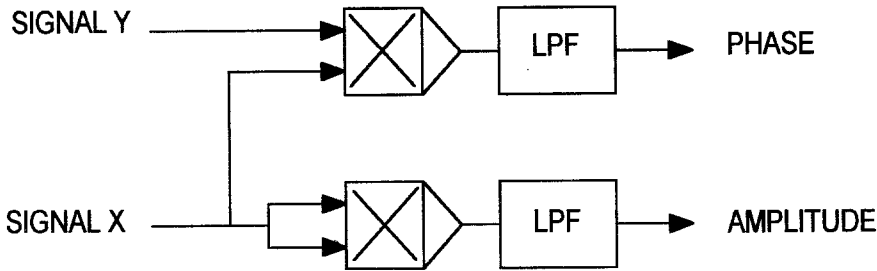


그림 4-42. 4 quad analog multiplier (AD834)를 이용한 위상 진폭 검출 회로

여기서 SIGNAL X를  $X\cos(\omega t + \theta)$ , SIGNAL Y를  $Y\cos(\omega t)$ 로 하면 위의 그림에서 PHASE 단자와 AMPLITUDE 단자로 출력되는 신호는 각기 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\text{PHASE} : \frac{1}{2} XY\cos(\theta)$$

$$\text{AMPLITUDE} : \frac{1}{2} XX$$

여기서 Y의 크기는 Sine-Wave Generator로부터의 출력으로서 미리 정해진 값이므로 적절한 계산에 의해서 X와  $\theta$ 를 구해낼 수 있다.

위 그림에서 전압 파형입력 SIGNAL X, SIGNAL Y를 각각 VX, VY로 표시한다. VX에 대해서 BUF634를 거치고 있는 것은 analog multiplier AD834의 입력 impedance가 측정 회로에 영향을 주지 않기 위해서 impedance를 높일 목적으로 들어가 있다. AD834의 출력 회로는 current source 형태를 하고 있으므로 출력단(W1, W2) 간에 각기  $100\ \Omega$ 를 연결하여 전류를 전압으로 변환한다. 따라서 출력 전압 파형의 크기 (multiplier의 gain)는 이 저항값에 따라 결정되지만 S/N비를 높일 목적으로 이 저항값을 크게 하면 AD 834의 slew rate를 넘어서 왜곡된 파형을 내게 된다. 실험적으로 파악한 바에 의하면  $100\ \Omega$ 이 40MHz에서 왜곡을 일으키지 않는 최대 저항값이 된다. 이때 AD 834의 출력 level은 약 200mV가 된다.

AD834의 출력측에 있는 condenser가 LPF 역할을 한다. 전술한 바와 같이 이 condenser는 높은 동작주파수(40MHz 및 그 고조파)를 고려해서 정한 값으로서 이 condenser를 이 이상의 값을 사용하여도 LPF 동작은 개선되지 않는다.

AD834의 출력 파형은 저항 양단에 걸쳐 나타나므로 differential amplifier(INA105)를 이용하여 GND에 대해서 측정 가능한 전압값으로 변환한다. 이 amplifier는 증폭 기능은 없으므로(gain이 1) 출력 신호의 크기는 AD834의 출력 level (200mA) 다시 이 신호를 증폭하여 A/D converter로 보내야 한다. 최종 출력단의 증폭기는 differential amplifier 구조를 사용하였고 소자로는 LM307을 사용하였다. LM307은 범용 OPAMP이지만 frequency compensated type으로 전원에 noise가 깔려있는 상태에서 안정적인 동작을 하고 accuracy도 회로 전체의 측정 정밀도에 비해서 손색이 없으므로 채용하였다. 다음에서 기술되는 바, 이 증폭기는 매우 높은 gain(수십에서 수백정도)을 가져야 하므로 대부분의 OPAMP는 쉽게 발진을 일으키게 된다.

LM307의 두개의 가변 저항은 측정에 매우 중요한 역할을 한다. AD834는 특성상 full-range의 입력에 대해서 출력으로 불과 200mV의 작은 전압만을 제공한다. 이 full-range는 측정 전압파형(SIGNAL X)으로 보아서 0에서 SIGNAL X 까지의 크기 변화, 그리고 0에서 90도까지의 위상변화에 해당한다. 이는 다시 측정 대상의 impedance로는 pure resistance로부터 무한대의 capacitance에 대응하는 값이다. 따라서 측정 대상의 impedance가 매우 제한된 영역에서 변화하는 것을 고려하면 AD834의 출력단에서 검출되는 유효한 전압 변화는 수 mV까지 내려간다. LM307은 이러한 작은 변화를 A/D converter의 full-range (0 - 3V)로 증폭해야 하므로 정밀한 offsetting, 높은 gain의 기능을 가져야 한다.

#### 다. 회로개발고찰 및 실용회로 개발의 어려움

양극판 사이에 있는 토양의 유전율 크기에 따라 정전용량이 비례한다는 사실에 근거하여 실제 측정기는 (1) 원쇼트 회로를 사용하여 R-C 회로의 충전 주기를 측정하는 방식과 (2) R-C 회로에 교류신호를 인가하고 C 양단에 나타나는 전압의 진폭과 위상편이를 측정하는 방식을 사용하여 구현하였다. R-C 충전 주기 측정방법을 사용한 측정기는 회로가 간단하여 휴대형을 염두에 두고 제작하였으며, 간단한 회로에도 불구하고 아주 짧은 시간에 128회의 측정을 실시하여 그 평균치를 표시함으로써 측정조건에 따른 노이즈 성분이 상당히 걸려져서 측정 재현성이 우수하였다. R-C 회로의 위상편이 측정방법을 사용한 측정기는 신호원 전압의 주파수가 20MHz로 높아져 범용 OP 앰프를 사용하여 위상편이각을 판별하는 평이한 회로는 사용할 수 없었

고, 따라서 광대역의 승산회로를 사용하여 피측정신호의 진폭과 위상편이각을 추출하는 복잡한 회로로 구성할 수밖에 없었다. 결과적으로, 회로가 복잡해지고 높은 주파수에서 나타나는 부유용량, 부유 인덕턴스의 영향과 승산회로의 출력전압 레벨이 낮아서 상대적으로 커진 노이즈의 영향으로 인해 정밀한 측정값을 얻는데 아주 곤란함이 많았다. 이 문제를 해결하기 위해 이 방법에서도 R-C 충방전 주기 측정방법에서와 마찬가지로 매 측정 당 1000번씩의 샘플링을 수행하여 그 평균치로 미지의  $R_X$  값과  $C_X$  값을 계산하여 어느 정도의 측정 재현성을 얻을 수 있었다. 그러나 역시 접지 노이즈와 A/D 변환 오차, 증폭기의 스케일링 설정 등이 쉽지 않아서 가끔 저항치가 음으로 계산되는 등의 결함이 있었다.

측정회로가 저진동수 방식인 R-C 충방전 방식은 토양과 같이 염농도 의존성이 큰 물질의 수분함량 측정에서는 큰 전도율로 인해 측정값의 불안정성이 지속적으로 나타나, 측정재현성이 현저히 결여되어 실용성이 없다고 평가되었다. 건조 곡물과 같이 전도성이 낮은 물질의 capacitance 및 저항 측정을 통한 수분함량 측정회로로는 가능성이 있다고 평가되나, 역시 회로구성의 불안정성으로 인해 측정재현성이 신뢰할 만한 수준에 미달하여 향후 개선 노력을 지속적으로 기울여 나갈 예정이다.

20MHz의 고진동수 방식인 위상편이 측정법에 의한 측정회로 개발은 회로 자체가 안고 있는 불안정성 때문에 실용화하기에는 보다 근본적인 새로운 접근이 요구된다. 따라서 센서에서 감지되는 전기적 신호를 읽어들이는 회로개발의 어려움으로 인해 본 과제를 수행함에 있어서 실제 데이터는 HP 4285A LCR 미터를 사용하여 측정하였다.

향후 실용적이며 소비자가 수용할 수 있는 보급가의 수분측정 시스템을 구현하기 위해서 안정적이며 측정재현성이 신뢰할만한 전자회로 개발을 기하기 위해 실무에서 LCR미터를 개발한 연구팀과 공동노력을 통해 추진해 나아갈 예정이다.

#### 4. 정전용량형 토양수분센서를 이용한 점적 관비 자동 제어시스템 구축 (제 1 세부과제와 공동) - 제 2 장 참조

### 제 4 절 활용에 대한 건의

정전용량형 수분감응 토양수분센서를 개발·최적화하여 시장경쟁력있는 토양수분 측정기의 상용화를 이루어내고자 하였으나 개발하려고 한 위상편이측정기법을 이용한

회로 자체의 불안정성으로 인해 토양수분감응 센서의 정전용량 값을 읽어들이려 컴퓨터로 전달하지 못했다. 따라서 센서 자동제어에 있어서는 LCR meter(HP4285A)를 이용하였다.

다양한 형태의 정전용량형 센서의 토양수분감응성을 파악하였다. 즉, Two-rod 형, Coaxial 형, 평행판 축전기형 그리고 토양과의 접촉성을 높이고 센서자체의 안정성을 높이기 위해 사용한 다공성물질결합센서를 시험하여 다양한 토양수분감응성을 파악하였다. 나일론, 유리섬유, 석고 등의 물질에 따라 충전정도에 따라서 다른 감응을 보였으므로 토양특성에 맞는 다공성물질을 선택할 수 있을 것이다. 또 센서의 물리화학적 및 토양학적 보정은 센서의 안정성을 확보에 중요한 정보를 제공하였다고 생각된다.

센서 자동제어 프로그램은 전기신호를 받아들이는 다른 형태의 센서에도 적용 가능하므로 귀중한 자료가 되리라 본다.

회로의 불안정성으로 실제에 적용이 불가능했지만 여기서 시도한 두가지 형태의 회로에 대한 고민이 앞으로 안정적이며 측정재현성이 신뢰할만한 계측기 회로를 개발하는데 기초가 되리라 생각된다.

## 제 5 장 토양 및 생물환경 평가

- 제 2 협동과제 (원에연구소)

### 제 1절 서 설

국내 과수 재배면적은 1995년 174,130ha이며 이 가운데 사과 재배면적이 50,103ha 이었으나 1999년에는 급격히 감소하여 31,079ha로 38%가 줄어들었으나 배 재배 면적은 15,752ha에서 25,677ha로 63%나 증가하였고 포도는 1995년에 26,030ha에서 1999년에 30,537ha로 17%가 증가하여 1999년 전체 과수 면적은 1995년과 대동소이한 174,409ha를 유지하고 있다(농림부, 2000). 이들 전체 과수 농가 278,664호에서 관수시설을 보유하고 있는 농가는 78,185호(농림부, 1997)로 28%를 차지하고 있어 이들 관수시설의 합리적인 관리가 과수나무를 적절히 관리할 수 있는 방법이 되며 나아가 이들 시설이 토양 및 주변환경에 미치는 영향을 평가하여 앞으로 나아갈 방향을 제시하는 것이 필요하다.

과수원 토양관리에서 물을 적절하게 유지하는 것은 나무가 잘 자랄 수 있는 토양환경을 조성하는데 있어서 가장 중요한 일이다. 우리나라는 연간 강수량이 사과재배에는 충분하나 계절적으로 불규칙하여 한발과 습해가 교차되는 경우가 많아 물 관리에 어려움을 겪고 있으며 이로 인하여 적절한 수세관리가 이루어지지 않는 실정이다. 또한 질소비료는 식물생육에 필요한 다량원소로서 나무 생육에 밀접하게 영향을 미치나(Peterson과 Stevens, 1994) 최근에는 과비에 의한 손실이 많아 과수원에 사용된 질소 중 나무에 흡수되지 않는 질소는 물과 함께 유실 또는 용탈되어 하천 또는 지하수를 오염시켜 환경문제를 유발하게 된다. 따라서 예전에는 질소의 사용효과를 고려한 연구가 주종을 이루었으나 최근에는 토양수분과 관련된 연구가 이루어지고 있다(Ryu 등, 1994a, b).

현재 우리나라의 과수원은 부적절한 양분 및 수분관리로 나무가 도장하여 불균형적으로 자라는 과수원이 많으며 질소 과비와 한발과 과습의 빈번한 교차로 적진병이 발생되기도 한다(Oh와 Shin, 1989). 특히 우리나라의 사과나무 주 품종인 후지는 유목기에 세력이 안정되지 않으면 결실이 잘 되지 않는 등 수세 조절이 어렵다. 따라서 조기 수확을 위한 건실한 나무를 만들기 위해서는 유목기의 적절한 토양수분함량과 질소 시비량과의 연관된 해석이 필요하다.

## 제 2절 연구개발내용 및 범위

본 연구는 과수원에서 유목기의 적절한 토양관리, 시비관리 및 병해충관리를 위한 합리적이고 효율적인 시스템 운용 기준을 설정하기 위하여 토양 및 생물에 대한 환경평가를 실시하는 것이다.

비가림 하우스에서 'Fuji'/M.26 자근묘 1년생을 재식하여 관수점과 질소시비량에 따른 수체생육 및 해충발생 모니터링을 처리구 재식 1년차에서 4년차까지 수행하였다. 또한 엽중 무기성분함량, 수체생육, 과실특성, 토양의 양분함량 변화, 해충 및 천적의 발생 등의 상호 연관성을 연구하였다.

## 제 3 절 연구개발결과

### 1. 연구수행방법

공시품종은 'Fuji'/M.26 1년생 자근묘를 직경 110cm 높이 110cm인 원통형 FRP(fiber reinforce plastic) 라이시메타에 접목부위 5cm가 노출되게 1997년 3월 27일에 재식하였으며 지상부는 비가림 비닐하우스로 관리하였다. 시험 처리전 토양의 물리·화학적 성은 표 5-1과 같다. 시험구 배치는 난괴법 요인실험으로 질소와 관수점 2요인으로 처리는 3수준 3반복이며 반복 당 1주로 하였다. 시험처리 내용은 추천되고 있는 질소 시비량(Yiem 등, 1999)을 0, 50%, 100%의 수준으로 시비하였다. 년차별 시비량은 표 5-2와 같으며 요소(尿素)로 계산하여 시비하였으며 기비는 11월 하순에 60%, 추비는 5월 하순과 10월 중순에 각각 20%씩 시비하였고 시험기간동안 인산과 칼리는 주지 않았다. 토양수분 처리는 관수점을 -20, -50 및 -100kPa으로 4월 1일부터 10월 31일까지 토양수분장력계를 이용하여 자동 조절되도록 하였고 11월부터 3월까지는 비가림을 제거하여 노지와 동일한 조건으로 관리하였다. 잎 시료는 신초 중간 잎을 7월 하순에 채취하여 건조 후 40메쉬로 분쇄하였다. 토양시료는 매년 가을에 토심 10cm에

서 채취하였고 2000년에는 토심별로 10, 30, 50, 70cm 깊이로 채취하여 음건 후 2mm 체로 선별하여 분석시료로 이용하였다. 식물체의 분석방법(AOAC, 1995)은 질소는 켈달(Kjeldahl B-316, Buchi)로 증류하여 정량하였고, 인산은 vanadomolybdo-phosphoric acid법으로, 붕소는 0.5M-HCl로 침출하여 curcumin 수산액을 넣고 증발 건조 후 95% ethanol에 녹여 발색한 후 비색정량(UV/VIS spectrophotometer Lambda 18, Perkin Elmer)하였다. 칼리, 칼슘, 마그네슘 및 망간은 시료 0.5g에 c.H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>와 c.HNO<sub>3</sub>를 1:1로 한 혼합액 20ml를 넣고 습식분해하여 ICPE(MX2, GBC, Australia)로 정량하였다. 토양분석방법은 Spark(1996)의 Method of Soil Analysis(III)를 참고하였다.

인산은 Lancaster法으로 比色計(UV/VIS spectrophotometer Lambda 18, Perkin Elmer)를 이용하여 720nm에서 측정하였고, K, Ca 및 Mg은 1N-CH<sub>3</sub>COONH<sub>4</sub>(pH 7)로 추출하여 ICP (Induced Coupled Plasma MX2, GBC)를 이용하여 K는 766nm, Ca는 317nm, Mg은 279nm에서 分析하였다. 有機物含量은 200mesh를 통과하는 시료를 Tyurin法으로 적정하였고, pH는 토양 5g을 시험관에 취한 後 蒸溜水 25ml를 加하여 30분간 振盪 後 pH 측정기(Model Orion 250A)를 이용하여 유리전극법으로 측정하였다.

신초생장량은 1998년에서 2000년까지 3년간에 걸쳐 10월 상순에 주당 전체를 조사하여 평균하였고, 간주비대량은 10월 하순에 접목부위 5cm 상부에서 측정하였다. 전정량은 하계전정을 실시하지 않은 상태에서 동계 전정량을 1997년과 1998년을 누적하여 계산하였다. 주당 수량은 1999년과 2000년 2년에 걸쳐 조사하였으며 과실 특성은 2000년 조사자료를 활용하였다.

재식 1년차(1997년)부터 4년차(2000년)까지의 사과나무 관리상태는 그림 5-1에서 5-6과 같다.

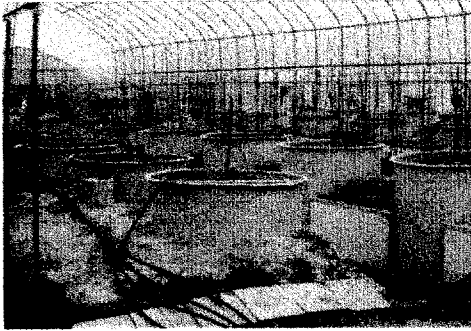


그림 5-1. 1-year old apple trees



그림 5-2. 2-year old apple trees



그림 5-3. 3-year old apple trees

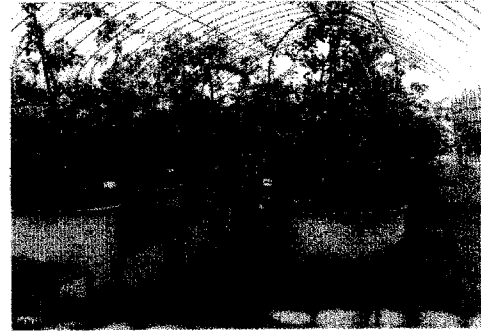


그림 5-4. 4-year old apple trees



그림 5-5. Apple trees during growing season at the 4th year



그림 5-6. Apple trees during harvest season at the 4th year



해충 및 천적 조사는 사과해충 중 조팝나무진딧물(*Aphis citrocola* van der Goot), 은무늬굴나방(*Lyonetia prunifoliella* (Matsumura)), 사과굴나방(*Phyllonorycter ringoniella* (Matsumura)), 점박이용애(*Tetranuchus urticae* Koch), 사과응애(*Panonychus ulmi* Koch) 잎말이나방류(leaf rollers), 사과혹진딧물(apple leaf-curling aphid), 자나방류(Geometridae), 복숭아순나방(oriental fruit moth), 기타 밤나방류(Noctuidae) 해충을 조사하였다. 천적류는 긴털이리응애(*Amblyseius womersley* (Schicha)), 무당벌레류(Coccinellidae), 풀잠자리류(*Chrisopa* sp.), 기타 흑파리류, 거미류 등을 조사하였다.

조팝나무진딧물 주당 5신초에서 발생마리수, 은무늬굴나방은 피해엽수를 조사하였다. 사과굴나방 및 사과혹진딧물은 주당 200엽에서 피해엽수를 조사하였고 점박이용애와 사과응애는 주당 10엽에서 발생마리수를 조사하였다. 기타 잎말이나방류, 자나방류, 밤나방류는 주당 발생마리수를 조사하였으며 복숭아순나방은 주당 피해신초수를 조사하였다. 천적류는 해충조사시 동시에 조사하였으며 발생량이 적었기 때문에 연간 발생수를 종합하여 분석하였다.

표 5-1. Physicochemical properties of the soil used.

Soil texture	pH	OM	Av.	Ex. cat. (cmol kg <sup>-1</sup> )		
	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (1:5)	(g kg <sup>-1</sup> )	(mg kg <sup>-1</sup> )	Ca	Mg	K
Sandy loam	6.4	25	995	7.2	3.0	1.9

표 5-2. Amount of applied nitrogen in each year

Year	1997	1998	1999	2000
Nitrogen				
0%	0g/tree	0g/tree	0g/tree	0g/tree
50%	10	25	50	75
100%	20	50	100	150

## 2. 토양 환경 변화

### 가. 년차별 토양 화학성 변화

### 1) pH

관수점과 질소 시비량에 따른 년차별 토양 pH 변화는 그림 5-7과 같다.

처리 1년차(1997년) pH는 6.7로 처리간에 차이가 없었으나 2년차부터는 질소 시비량이 100%인 -20과 -50kPa의 관수점에서 낮은 경향을 보였고 4년차인 2000년에는 질소 100% 시비구가 낮았다. 특히 -20kPa 관수점에서 월등히 낮았는데 이는 물과 석회 및 마그네슘의 이동과 관계가 깊은 것으로 질소 시비량이 많고 관수량이 많을 때 그림 5-16과 17에서 보는 바와 같이 칼슘과 마그네슘이 심토로 이동이 일어나 pH가 낮아진 것으로 판단되었다. 따라서 질소 무비구는 처리기간에 관계없이 높게 유지되었으며 -100kPa에서 가장 높게 유지되었다.

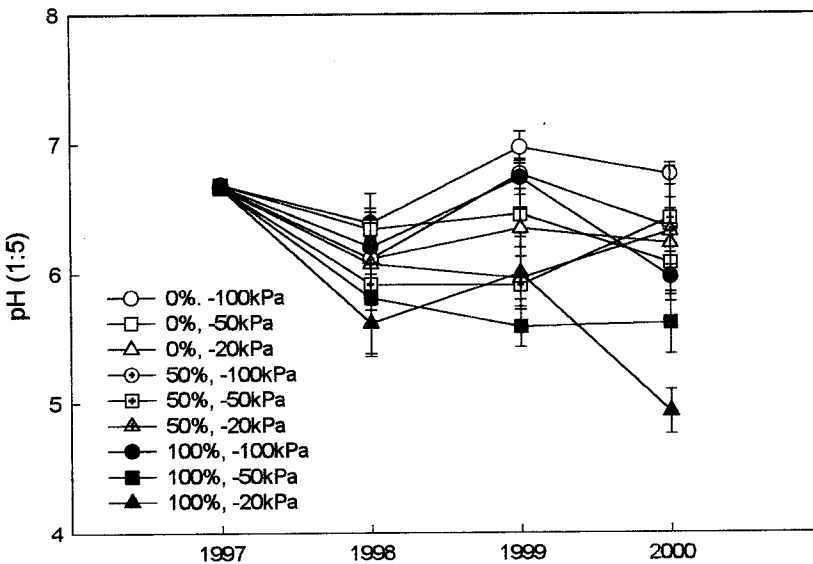


그림 5-7. Effect of nitrogen application rates and drip irrigation levels on seasonal changes of pH at 10cm soil depth.

## 2) 유기물

관수점과 질소시비량에 따른 년차별 토양 유기물 함량 변화를 보면 그림 5-8와 같다.

관수점과 질소 시비량에 따른 토양 유기물함량의 변화는 처리 년차에 관계없이 일정한 수준을 유지하였고 1년차(1997년)부터 4년차(2000년)까지 22-28g/kg의 변화폭을 유지하였는데 이는 시험 처리전 토양이 25g/kg인 것을 보면 토양 시료를 채취할 때의 오차 범위로 볼 수 있다. 따라서 유기물을 사용하지 않은 토양에서 관수점과 질소 시비량은 토양중의 유기물함량 변화에 미치는 영향이 적은 것으로 판단되었다.

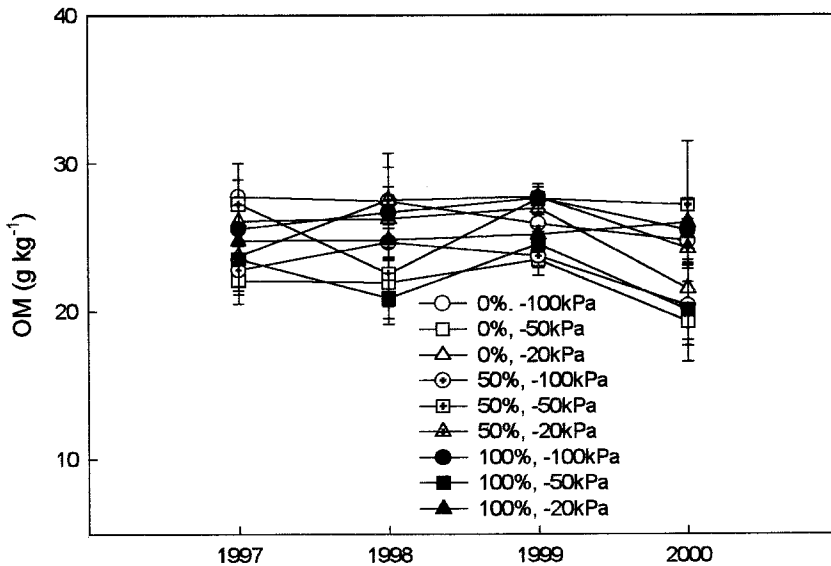


그림 5-8. Effect of nitrogen application rates and drip irrigation levels on seasonal changes of organic matter content at 10cm soil depth.

## 3) 유효인산

관수점 및 질소 시비량에 따른 토양중 유효인산함량을 보면 그림 5-9와 같다.

처리 1년차(1997년)에는 처리간에 차이가 없이 880-950mg/kg을 유지하였으며 처리 2년차는 730-920mg/kg, 3-4년차는 660-810mg/kg이다. 처리 2년차는 1년차보다 많이 낮아졌으나 3년차부터는 감소량이 적었고 3-4년차는 거의 같은 경향을 보였다. 관수점에 따른 차이를 보면 -100kPa 처리구가 3-4년차에 낮은 경향을 보이고 있으며 1999년에서 2000년에 걸쳐 함량변화가 적은 것은 볼 때 관수점이나 질소시비량에 따른 토양중의 유효인산함량 변화는 700-800mg/kg 범위에서는 미미할 것으로 판단되었다.

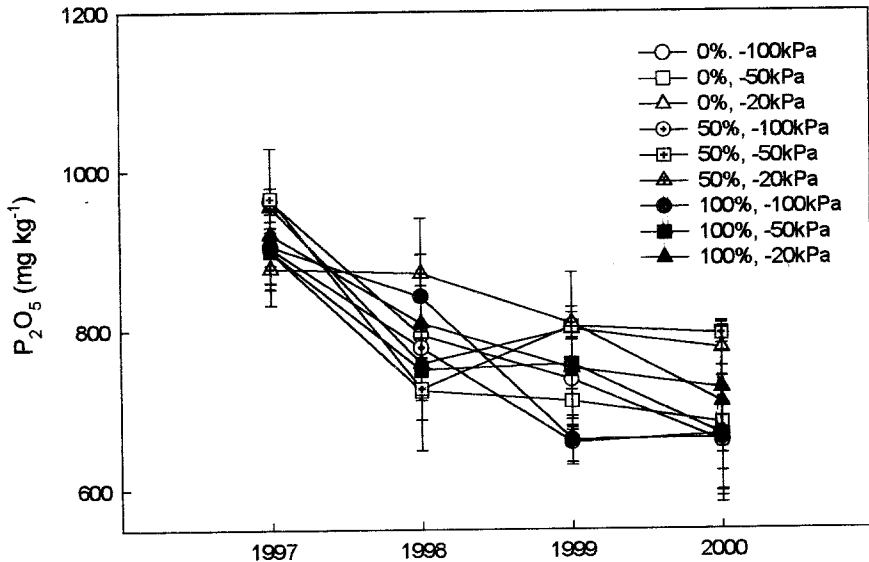


그림 5-9. Effect of nitrogen application rates and drip irrigation levels on seasonal changes of available phosphorus content at 10cm soil depth.

#### 4) 치환성 칼슘

관수점 및 질소시비량에 따른 년차별 토양 치환성 칼슘함량을 보면 그림 5-10과

같다.

처리 1년차(1997년)는 7.6-8.4cmol/kg으로 시험 처리전 토양보다 높았으나 이는 비가림 시설로 표토에 집적된 것으로 판단되며 처리 2년차와 3년차는 질소 50% 시용과 -50kPa의 관수점에서 낮은 경향을 보였고 처리 4년차에는 질소 100% 시용과 관수점 -20과 -50kPa처리에서 낮았다. 이는 질소 시비량이 많고 관수 물량이 많을 때 칼슘의 용탈이 많다는 보고(岩本數人, 1993)와 일치하였다. 따라서 질소 과비와 필요 이상의 관수는 과수원의 질소와 칼슘이 용탈되어 과수원의 토양화학성 악화와 동시에 수질에도 바람직하지 못한 방향이므로 합리적으로 관리할 필요가 있다.

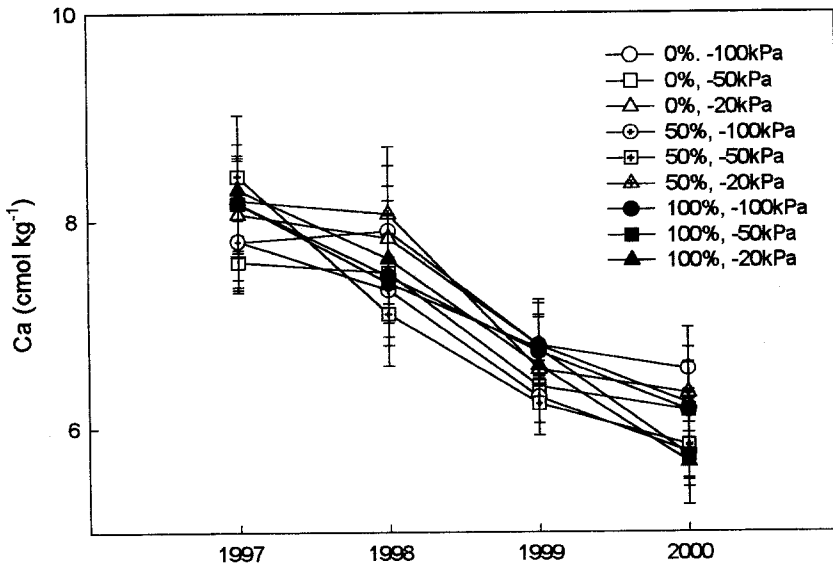


그림 5-10. Effect of nitrogen application rates and drip irrigation levels on seasonal changes of exchangeable Ca content at 10cm soil depth.

#### 5) 치환성 마그네슘

관수점 및 질소 시비량에 따른 년차별 치환성 마그네슘 함량 변화는 그림 5-11과 같다.

처리 1년차(1997년)는 3.5-3.7cmol/kg으로 시험 처리전 토양보다 높은 것은 칼슘과 마찬가지로 비가림 하우스 관리가 원인으로 판단되며 2년차부터는 질소 시비량이 100%에서 낮은 경향을 보였으며 50% 시용이 높게 나타났다.처리 4년차는 질소 100% 시용이 토양수분함량에 관계없이 낮게 나타나 마그네슘의 토양내 이동은 관수점보다는 질소시비량에 따른 영향이 많은 것으로 판단되었다.

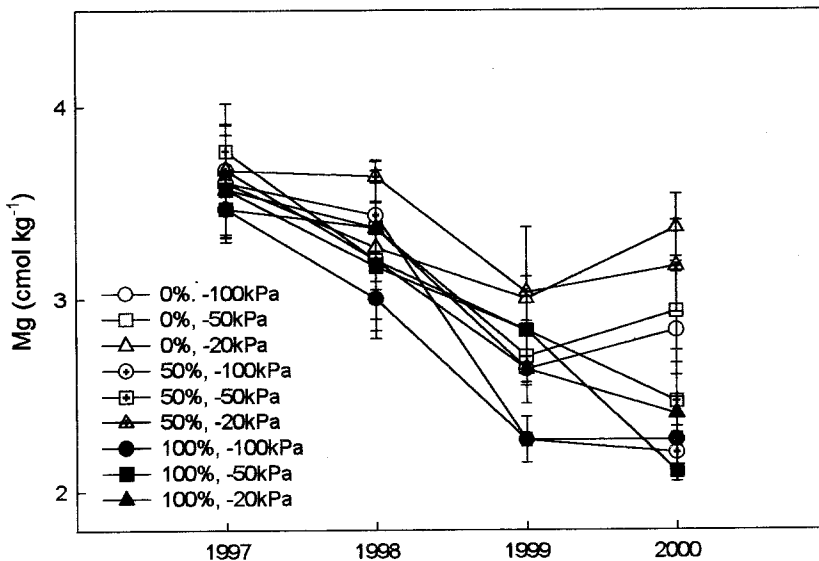


그림 5-11. Effect of nitrogen application rates and drip irrigation levels on seasonal changes of exchangeable Mg content at 10cm soil depth.

#### 6) 치환성 칼륨

관수점 및 질소 시비량에 따른 년차별 토양내 치환성칼륨 함량의 변화는 그림

5-12와 같다.

관수점 및 질소 시비량에 따른 처리 1년차(1997년)의 치환성 칼륨함량은 1.8-2.2cmol/kg으로 처리간에 차이가 없이 시험 처리전 토양보다 약간 많게 나타났다. 처리 2년차는 -50kPa 관수점에서 낮았고 3-4년차는 -100kPa 관수점에서 낮게 나타났다. 2000년의 칼륨함량은 1999년보다 높게 나타났는데 이는 갈습과 마그네슘과는 달리 토양수분 이동에 영향을 많이 받은 것으로 판단되나 정확한 판단을 내리기 위해서는 앞으로 더 많은 조사가 필요하다.

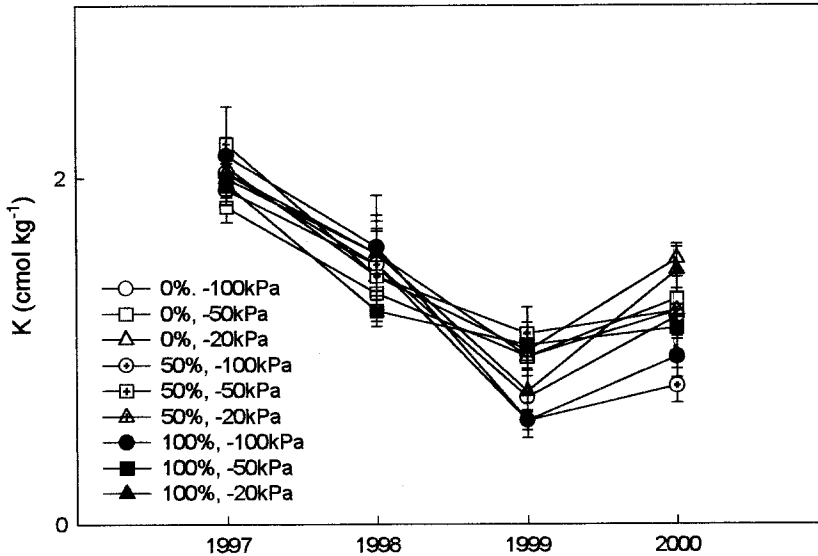


그림 5-12. Effect of nitrogen application rates and drip irrigation levels on seasonal changes of exchangeable K content at 10cm soil depth.

#### 나. 토심별 토양화학성 변화

##### 1) pH

토양 pH는 토양의 산성과 알칼리성을 나타내는 것으로 토양중의 양분 유효도에 영향을 주기 때문에 대단히 중요하다.

그림 5-13은 1997년부터 2000년까지 관수점과 질소 시비량을 다르게 관리했을 때 4년차의 토양 깊이별 pH의 변화를 나타낸 것이다. 질소를 시용하지 않은 곳과 질소를 50% 처리한 토양은 관수점에 관계없이 토심에 따라 pH의 변화가 없었으나 질소를 100% 시용하고 관수점을 -20kPa로 관리한 토양으로 지표하 10cm에서 pH가 4.9로 낮았고 토심이 깊어질수록 상승하였다. 질소 100% 시용과 관수점이 -50kPa과 -100kPa로 조절된 지표하 10cm에서 pH가 5.6과 6.0으로 -20kPa보다는 높았으며 토심이 깊어질수록 증가하여 같은 경향을 보였다. 이와 같이 질소 100% 시용구에서 관수량이 많을수록 지표에서 pH가 낮은 것은 많은 관수량과 질소시비량의 영향으로 추정되었다.

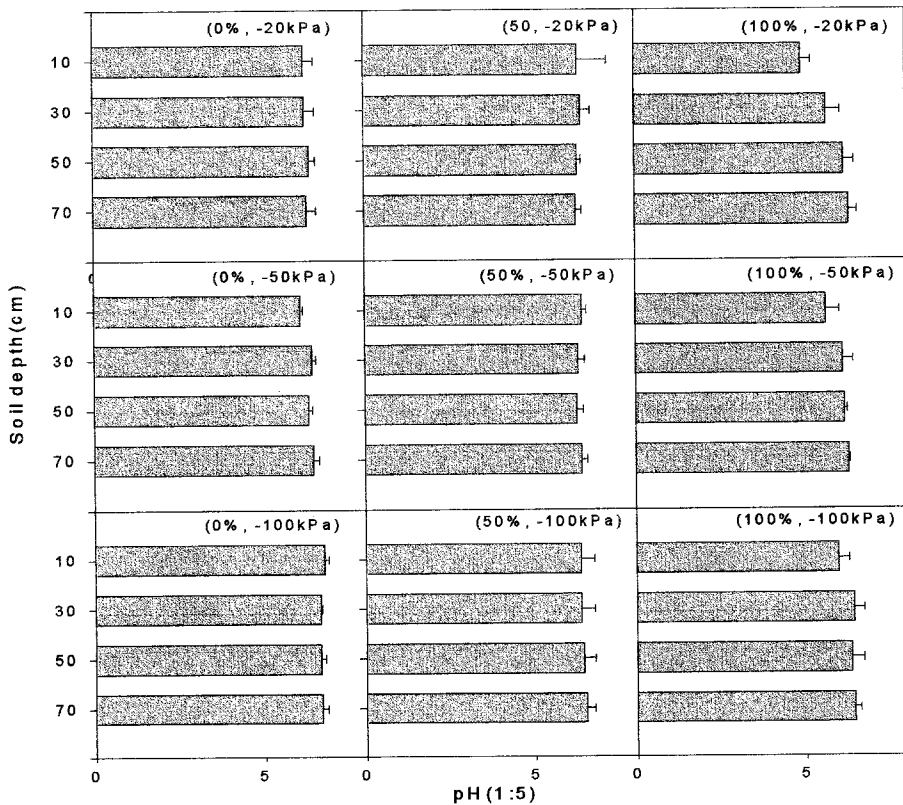


그림 5-13. Effect of nitrogen application rates and drip irrigation levels on



pH at various soil depths.

2) 유기물

질소 시비량 및 관수 수준이 토심별 토양 유기물함량 변화에 미치는 영향은 그림 5-14와 같다.

관수 수준에 따른 토양내 유기물 함량은 처리간에 유의성이 없으며 관수 수준이 낮은 -20kPa에서 높은 경향을 보였고 질소 시비량에 따른 차이는 50%와 100%를 사용했을 때가 질소 무시용구보다 많은 경향을 보였다.

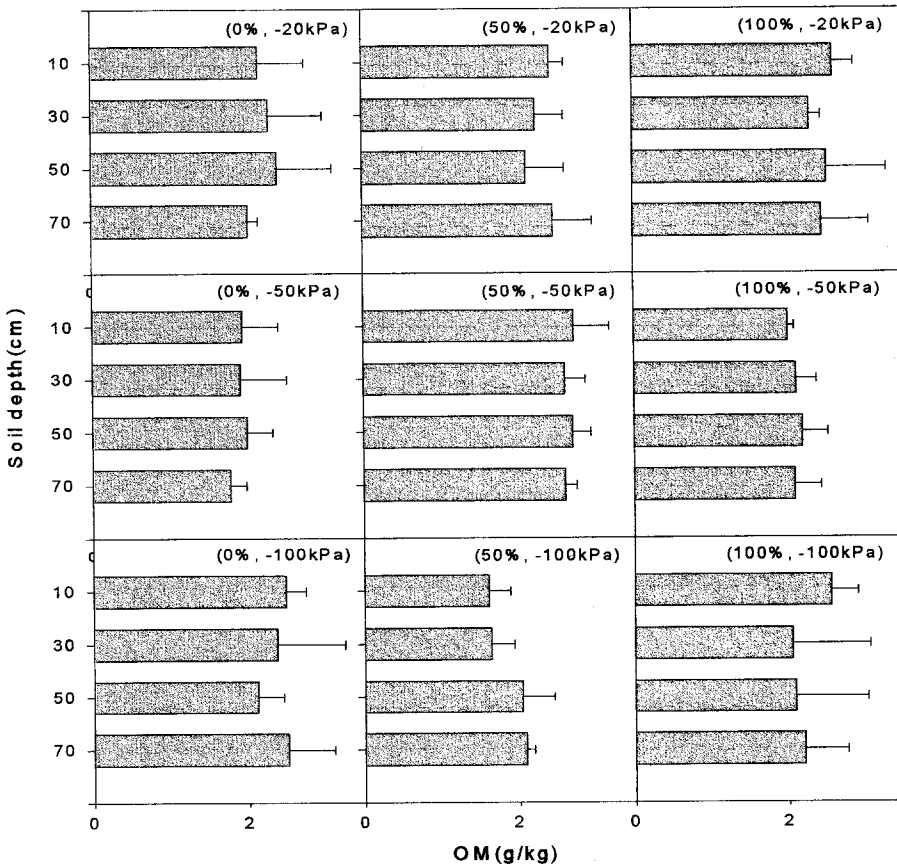


그림 5-14. Effect of nitrogen application rates and drip irrigation levels on organic matter at various soil depths in 2000.

### 3) 유효인산

질소 시비량 및 관수 수준이 토심별 유효인산함량 변화에 미치는 영향은 그림 5-15와 같다.

관수점 -20kPa에서는 지표 하 10cm보다 30-50cm부위에서 유효인산함량이 많았고 질소 시비량이 100%인 -50, -100kPa에서는 지표 하 70cm에서 가장 많은 경향을 보였다. 질소 시비량 50%와 -50kPa의 관수점에서는 지표 하 30cm까지 증가하다가 토심이 깊어질수록 감소하였다. 이와 같은 결과는 무질소 처리는 토심에 따른 차이가 적은 것을 볼 수 있었고 질소 50%보다는 100% 시비구가 표층보다 심층에 높은 것으로 나타나 질소 시비량이 인산의 이동에 영향을 미치는 것으로 추정되었다.

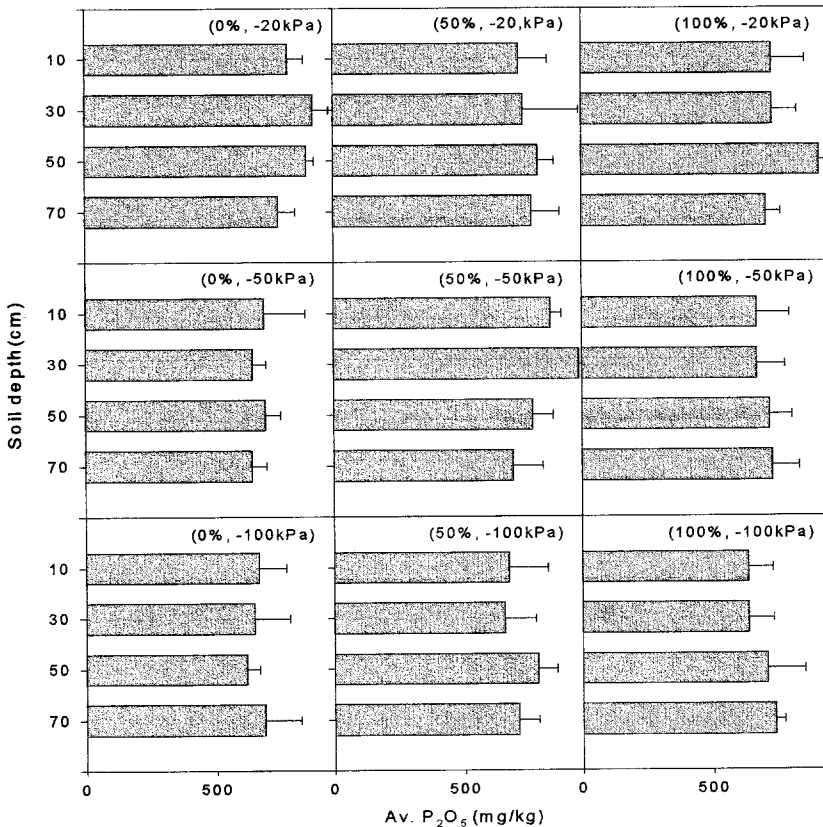


그림 5-15. Effect of nitrogen application rates and drip irrigation levels on the content of available phosphorus at various soil depths in 2000.

#### 4) 치환성 칼슘

질소 시비량 및 관수점에 따른 토심별 치환성 칼슘함량 변화는 그림 5-16과 같다.

관수점 -20kPa에서 질소 시비량에 관계없이 토심이 표토 10cm보다 깊어질수록 칼슘함량이 증가하였고 -50kPa에서는 토심 50cm에서 시비량에 관계없이 높았다. -100kPa에서는 질소 시비량에 관계없이 토심에 따른 토양중 칼슘함량 차이가 적었다. 질소 시비량에 따른 토심별 칼슘 함량 차이는 시비량이 많을수록 -20kPa과 -50kPa에서 표층에서 칼슘함량이 낮았다. 이와 같은 결과는 질소시비량이 과다하면 칼슘과 함께 용탈된다는 보고(岩本數人, 1993)와 일치하였고 -20kPa과 -50kPa에서 토심별 차이가 심한 것은 관수되는 물량이 많으면 용탈의 작용을 촉진하는 것으로 판단되었다.

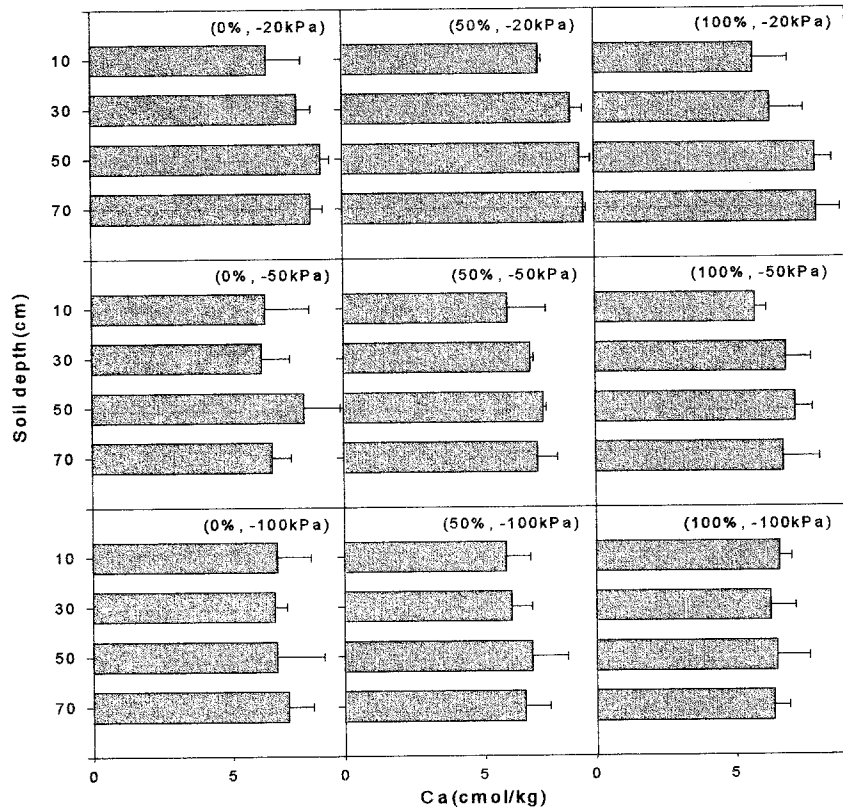


그림 5-16. Effect of nitrogen application rates and drip irrigation levels on the exchange Ca content at various soil depths in 2000.

### 5) 치환성 마그네슘

질소 시비량 및 관수점에 따른 토심별 마그네슘함량 변화는 그림 5-17과 같다.

질소 시비량에 따른 토양중 마그네슘 함량은 -20kPa에서 질소 시비량이 많을수록 토심간에 차이가 많아 질소 시비량 100%의 관수점 -20kPa에서는 토심 10cm보다 70cm에서 0.36cmol/kg이 많았다. -50kPa에서는 질소 무비구는 토심별 차이가 없었으나 50%와 100%에서는 10cm보다 30cm이하가 많은 경향을 보였으며 -100kPa에서도

질소 시비량 50%와 100%에서 토심이 깊어질수록 많은 경향을 보였다. 이와 같은 결과는 마그네슘도 칼슘과 같이 질소의 시비량과 관수되는 물량의 영향을 받아 토층내에서 이동이 많다는 보고와 일치하였으며 우리나라와 같이 장마기에 강수량이 많은 조건에서는 질소과비는 양이온의 용탈을 촉진하는 것으로 판단되었다.

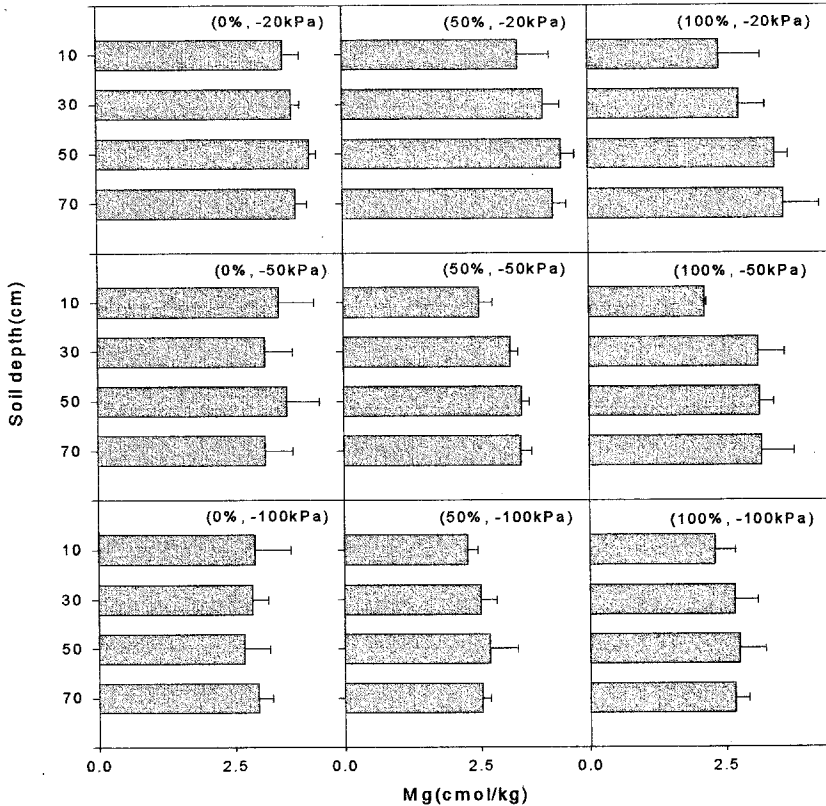


그림 5-17. Effect of nitrogen application rates and drip irrigation levels on the exchange Mg content at various soil depths in 2000.

#### 6) 치환성 칼륨

질소 시비량 및 관수점에 따른 토심별 치환성 칼륨함량 변화는 그림 5-18과 같다.

-20kPa에서 질소 50% 시비량은 토심이 깊어질수록 함량이 증가하였으며 -50kPa 과 -100kPa에서도 같은 경향을 보였다. 이와 같은 결과를 볼 때 관수점과 질소 시비 량에 따른 토양내 칼륨함량은 시비량과 관수점에 관계없이 지표 10cm보다 토심이 깊어질수록 증가하였으며 토양에서 가장 쉽게 이동되는 양이온으로 추정할 수 있었다.

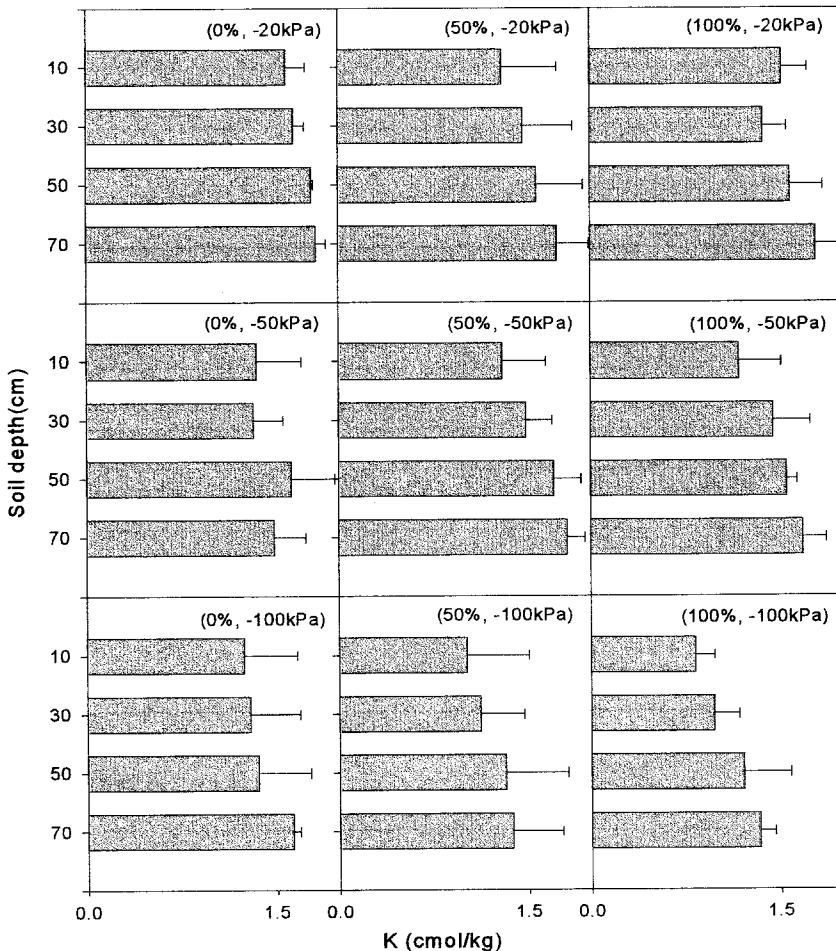


그림 5-18. Effect of nitrogen application rates and drip irrigation levels on the exchange K content at various soil depths in 2000.

#### 다. 토양 중의 질산태 및 암모니아태 질소 함량

질소 시비량 및 관수점에 따른 토양중의 질산태 질소 함량과 암모니아태 질소 함량은 그림 5-19와 같다.

토양중의 질산태 질소함량은 무비구와 50% 시비구에서는 관수점이 높을수록 낮았으나 100% 시비구에서는 -100kPa의 관수점에서 가장 높고 -20kPa의 관수점에서 가장 낮았다.

암모니아태 질소는 질소 시비량에 관계없이 -100kPa에서 가장 낮았고 질소 무비구와 50% 시비구는 -20kPa과 50kPa의 관수점에서 같은 경향을 보였으나 100% 시비구에서는 관수점이 높은 -20kPa에서 76mg/kg으로 가장 높았고 -100kPa에서 27mg/kg으로 낮았다. 이와 같은 결과를 볼 때 무비구와 50% 시비구는 시비량에 영향이 적은 것으로 판단되었고 100% 시비구는 관수점이 높을 때는 환원 상태인 암모니아태 질소가 월등히 높았고 질산태가 급격히 낮아져 과수원의 질소 과비는 배수가 불량할 때 토양중에 암모니아태 질소가 많아 생육에도 지장이 있을 것으로 판단되었다 (Faust, 1989).

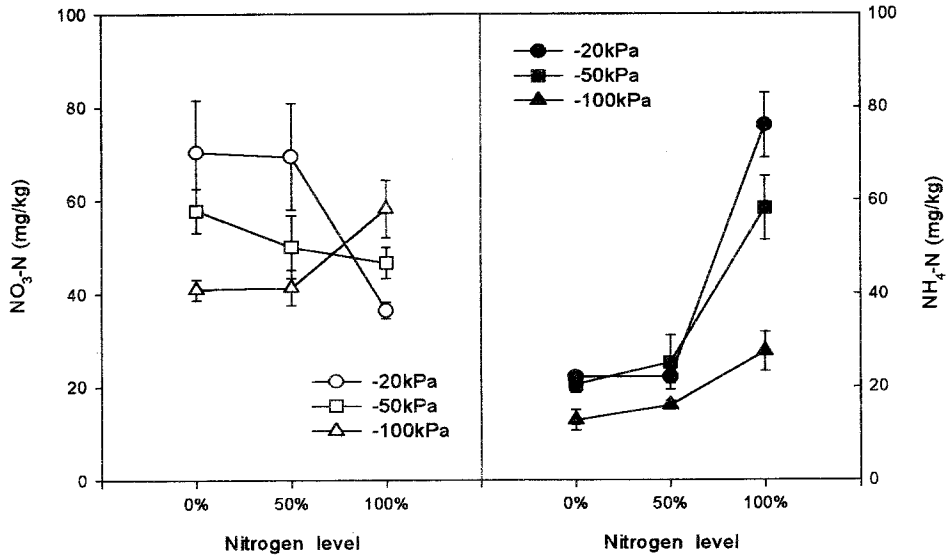


그림 5-19. Effect of nitrogen application rates and drip irrigation levels on the NO<sub>3</sub>-N and NH<sub>4</sub>-N content at 10-20cm soil depth on May 22, 2000.

### 3. 수체에 미치는 영향

#### 가. 엽중 무기성분함량

표 5-3은 질소 시비량 및 관수점 조절에 의한 엽중 무기성분함량변화를 나타낸 것이다.

엽중 질소함량은 관수점 -50kPa에서 질소 50%와 100% 시비구가 무시비구보다 높았으나 -100kPa에서는 27.1~27.4g · kg<sup>-1</sup>으로 질소 시비량에 따른 차이는 없었다. 이는 토양수분이 충분할 때는 질소를 시비함으로서 엽중 질소함량이 높았으나(Judkins, 1949), 토양 수분이 부족한 조건에서는 질소 시비에 따른 영향이 적은 것을 알 수 있었는데 이는 사양토에서 토양수분 장력이 -100kPa일 때 수리전도도가 2mm · h<sup>-1</sup>이하



로 떨어지며 이로 인하여 흡수가 억제된 것으로 판단되었다(Wraith와 Wright, 1998).

엽중 인산함량은 -20kPa에서 질소 100% 시비구가 무비구와 50% 시비구보다 8.4%가 낮았으며 -50kPa에서는 질소 시비량에 따른 차이는 없었으나 질소 시비량이 높을수록 엽중 인산함량이 낮은 경향을 보였다.

엽중 칼륨함량은 관수점에 따른 차이는 없으나 관수점 -100kPa에서 질소 무비구보다 50%와 100% 시비구에서 높았는데 이는 엽중 질소함량이 높아지면 칼리함량도 증가한다는 보고와 같은 경향이였다(Kenworthy와 Gilligan, 1948; Weeks 등, 1952).

질소 시비량 및 관수점에 따른 엽중 칼슘과 마그네슘함량은 유의성이 없으나 관수점 -50kPa에서 질소 시비량이 증가할수록 낮은 경향을 보였다. 따라서 사과재배에서 엽중 칼슘과 마그네슘함량을 높게 유지하는 방법은 관수점을 -50kPa으로 관리하며 질소 시비량은 Yiem 등(1999)이 추천하는 재식 1년차의 주당 20g(100%)과 재식 2년차의 50g(100%)을 절반 이하로 시비하는 것이 가장 좋을 것으로 판단되었다.

엽중 망간함량은 관수점에 관계없이 질소 시비량이 증가할수록 증가하여 (Labanauskas 등, 1958, 1959) 1년차와 2년차 100% 시비구에서  $178\sim 200\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 으로 질소 무비보다 90~122%가 증가하였으며 Shear와 Faust(1980)가 보고한 적정범위  $25\sim 150\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 을 초과하였다. 이는 질소 시비량이 많아짐에 따라 토양 중에  $\text{NO}_3\text{-N}$ 가 증가하여 pH가 낮아져(Ryu, 1994) 망간 흡수가 많은 것으로 추측되었다.

엽중 붕소함량은 질소 시비량과 토양수분함량에 따라 일정한 경향은 없으나 관수점 -20kPa에서 질소 100% 시비구가 높았고 질소 50% 시비구에서는 -20kPa에서 낮았으나 관수점 -50kPa과 -100kPa에서 질소 시비량이 많아질수록 낮은 경향을 보였다 (Smith 등, 1954).

㉔ 5-3. Effect of irrigation point and nitrogen rate on mineral content of 'Fuji'/M.26 apple leaves in 1998.

N level <sup>z</sup> (g/tree)		Irrigation point (-kPa)			<i>L.S.D</i> <sup>y</sup>
'97	'98	20	50	100	
<i>Nitrogen</i> (g · kg <sup>-1</sup> )					
0		26.3	25.4	27.4	1.8
50%		27.0	27.1	27.1	n.s.
100%		27.2	27.7	27.4	n.s.
<i>L.S.D</i>		n.s.	n.s.	n.s.	
<i>Phosphorus</i> (g · kg <sup>-1</sup> )					
0		2.4	2.2	2.3	n.s.
50%		2.4	2.2	2.4	n.s.
100%		2.2	2.2	2.2	n.s.
<i>L.S.D</i>		n.s.	n.s.	n.s.	
<i>Potassium</i> (g · kg <sup>-1</sup> )					
0		15.3	14.1	15.4	n.s.
50%		16.3	15.7	16.3	n.s.
100%		16.3	15.8	16.8	n.s.
<i>L.S.D</i>		n.s.	n.s.	n.s.	
<i>Calcium</i> (g · kg <sup>-1</sup> )					
0		12.8	12.9	11.1	n.s.
50%		13.3	12.8	12.4	n.s.
100%		13.0	11.8	12.5	n.s.
<i>L.S.D</i>		n.s.	n.s.	n.s.	
<i>Magnesium</i> (g · kg <sup>-1</sup> )					
0		3.3	3.5	3.4	n.s.
50%		3.3	3.4	3.0	n.s.
100%		3.4	3.1	3.1	n.s.
<i>L.S.D</i>		n.s.	n.s.	n.s.	
<i>Manganese</i> (mg · kg <sup>-1</sup> )					
0		93.7	90.0	89.8	n.s.
50%		122.1	128.6	125.2	n.s.
100%		177.8	199.8	185.6	n.s.
<i>L.S.D</i>		46.8	41.5	30.9	
<i>Boron</i> (mg · kg <sup>-1</sup> )					
0		18.6	20.6	21.8	n.s.
50%		12.5	19.1	20.8	n.s.
100%		21.5	19.0	19.9	n.s.
<i>L.S.D</i>		n.s.	n.s.	n.s.	

<sup>z</sup> See ㉔ 5-2.

<sup>y</sup> Nonsignificant or significant at 5% level.

관수점 및 질소 시비량에 따른 신초 성장량은 표 5-4와 같다.

1998년에 질소 시비량에 따른 신초 성장량은 처리간에 유의성이 없었고 관수점에 따른 신초성장량은 -20kPa에서 76.5cm로 가장 컸으며 -50kPa과 -100kPa은 유의성이 없었다. 1999년에는 질소 시비량과 관수점 조절에 따른 차이가 없었으나 2000년에는 관수점 조절에 따른 차이로 -20kPa이 24cm로 가장 컸고 -50kPa과 -100kPa은 유의성이 없었다. 3년간의 평균값에서도 질소 시비량에 따른 유의성은 없으나 관수점 조절에 따른 -20kPa에서 유의성은 1%로 가장 성장량이 많았다. Cripps(1971)는 토양수분이 많을 때 MM115대목에서는 신초 성장량이 많았으나 실생대목은 성장량 차이가 없다고 하여 실생보다 영양계 대목이 토양수분함량에 민감함을 알 수 있었다. 또한 1998년이 1999년과 2000년보다 신초 성장량이 많은 것은 1998년이 재식 2년차로 주지 형성용으로 자랐기 때문이다.

표 5-4. Effect of irrigation point and nitrogen application rate on shoot length of 'Fuji' /M.26 apple trees.

N level <sup>z</sup> (g/tree)	Irrigation point	Shoot length (cm)			
		1998	1999	2000	average
0	-20kPa	71.8	24.0	26.6	40.8
	-50kPa	69.0	26.1	20.2	38.4
	-100kPa	68.0	22.2	19.0	36.4
50%	-20kPa	80.8	22.0	20.6	41.1
	-50kPa	63.8	30.8	20.6	38.4
	-100kPa	65.8	20.4	19.6	35.3
100%	-20kPa	77.0	23.7	24.8	41.8
	-50kPa	63.5	26.1	20.0	36.5
	-100kPa	63.9	19.4	16.0	33.1
<i>ANOVA</i> <sup>y</sup>					
N level		n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
Irri. level		***	n.s.	*	**
N * Irri. level		n.s.	n.s.	n.s.	n.s.

<sup>z</sup> see 표 5-2.

<sup>y</sup> n.s., \*, \*\*\*, = Non-significant or significant at P= 0.05 or 0.001, respectively.

질소 시비량 및 관수점에 따른 사과나무의 간주비대량은 표 5-5와 같다.

질소 시비량에 따른 간주비대량은 1998, 1999, 2000 모두 처리간에 유의성이 없으나 관수점에 따른 차이는 1998과 1999년에는 -20kPa에서 3.7cm<sup>2</sup>, 9.5cm<sup>2</sup>로 가장 컸고 2000년에는 -20kPa에서 25.7cm<sup>2</sup>로 0.1%의 고도의 유의성이 있어 관수점 조절에 따른 관리 기간이 길어짐에 따라 누적되는 효과로 인하여 처리간에 차이가 확연함을 알 수 있었다. 그러나 질소 시비량과 관수점 조절에의 상호작용은 유의성이 없었다.

표 5-5. Effect of nitrogen rates and drip irrigation levels on the trunk cross-sectional area in apple trees.

N level <sup>z</sup> (g/tree)	Irrigation point	TCSA <sup>y</sup> (cm <sup>2</sup> )		
		1998. 3	1999. 3	2000. 10
0	-20kPa	3.86	8.45	26.96
	-50kPa	4.24	7.47	25.60
	-100kPa	3.36	6.72	24.75
50%	-20kPa	4.24	10.16	25.51
	-50kPa	4.28	8.61	18.56
	-100kPa	3.57	7.17	16.94
100%	-20kPa	3.03	9.97	24.64
	-50kPa	3.39	8.45	18.12
	-100kPa	3.79	7.77	18.64
ANOVA <sup>x</sup>				
N level		n.s.	n.s.	n.s.
Irri. level		*	*	***
N * Irri.		n.s.	n.s.	n.s.

<sup>z</sup> See 표 5-2.

<sup>y</sup> TCSA = Trunk cross-sectional area.

<sup>x</sup> n.s., \*, \*\*\*, = Non-significant or significant at P= 0.05 or 0.001, respectively.

관수점에 따른 전정량(표 5-6)은 질소 시비량에 관계없이 관수점이 높을수록 많아 -20kPa이 -50kPa과 -100kPa보다 1.5~2.8배에 달하였다. 시비량에 따른 전정량은 -20kPa에서 질소 무비구와 50% 시비구가 많았으며 -50kPa에서는 50% 시비구가 많았고 -100kPa에서는 100% 시비구가 많았다. 또한 관수점과 질소수준의 상호작용을

보았을 때  $F = 9.78^{***}$ 로 고도의 유의성이 있었으며 토양수분이 많으며 질소 수준이 낮을 때 전정량이 가장 많았고, 토양수분이 적을 때는 질소에 관계없이 현저히 떨어져 사과나무 생육에는 질소 수준보다는 토양수분함량의 영향이 큰 것으로 판단되었다. 따라서 토양에 따라 어느 정도 차이는 있겠으나 재식 1~2년차에서는 적당한 토양수분함량을 유지한다면 현재 추천되고 있는 질소 시비량을 절반으로 줄여 시비하는 것이 착과 및 생육에 바람직할 것으로 사료되었다.

표 5-6. Effect of irrigation point and nitrogen application rate on the accumulative amount of pruning from 1997 to 1998.

N level <sup>2</sup> (g/tree)	Irrigation point (-kPa)			L. S. D
	20	50	100	
	..... (g D. W. · tree <sup>-1</sup> ) .....			
0	450.7	228.3	184.0	68.4
50%	482.0	354.0	171.0	81.4
100%	339.3	254.0	226.7	52.9
L. S. D	91.7	73.0	19.0	

$F_{N \text{ level} \times \text{Irrigation point}} = 9.78^{***}$

<sup>2</sup> See 표 5-2.

질소 시비량 및 관수점에 따른 수량 차이는 표 5-7과 같다.

질소 시비량에 따른 수량 차이는 1999년에 무비구에서 가장 적은 주당 5.2kg이 수확되었으며 2000년에는 50% 시비구에서 가장 적은 주당 8.9kg이 수확되었고 누적 수량을 보면 질소 100% 시비구가 주당 20.4kg으로 가장 많았다. 관수점에 따른 차이는 -20kPa에서 1999년에 주당 9.6kg으로 가장 많았으나 2000년에는 -50kPa이 13.4kg으로 많았으나 전체 수량은 -20kPa이 20.2kg으로 가장 많았다. 이와 같은 결과는 생육 초기에 토양수분이 많아 생육이 촉진되어 나타난 결과로 판단되나 밀식재배 형태에서는 밀식장해가 우려됨으로 시간을 두고 조사할 필요가 있다고 판단된다.

과실의 특성인 과중은 질소 시비량에 따른 차이는 없으나 관수점에 따른 차이로 관수량이 많은 -20kPa에서 273g으로 가장 컸고 -100kPa에서 208g으로 가장 적어 물이 과실 비대와 밀접한 관계가 있음을 보여 주었다. 당도는 관수점과 질소 시비량에 따

른 차이가 없었다.

표 5-7. Effect of nitrogen application rates and drip irrigation levels on the fruit yield and quality in apple trees.

N level <sup>z</sup> (g/tree)	Irrigation point	Yield (kg/tree)			fruit weight (g)	soluble solid (%)
		1999	2000	Total		
0	-20kPa	7.73	8.57	16.3	231.7	14.6
	-50kPa	4.61	11.55	15.8	237.0	14.2
	-100kPa	3.37	16.10	19.5	204.0	14.7
50%	-20kPa	9.53	11.34	20.9	303.3	15.1
	-50kPa	5.02	12.30	17.3	262.3	15.0
	-100kPa	9.02	3.00	12.0	210.0	15.7
100%	-20kPa	11.56	11.77	23.3	285.7	14.5
	-50kPa	2.98	16.40	19.4	218.0	14.9
	-100kPa	9.22	9.22	18.4	210.3	14.2
ANOVA <sup>y</sup>						
N level		*	*	*	n. s.	n. s.
Irri. level		**	*	*	**	n. s.
N * Irri.		n. s.	***	*	n. s.	n. s.

<sup>z</sup> See 표 5-2.

<sup>y</sup> n.s., \*, \*\*\*, = Non-significant or significant at P= 0.05 or 0.001, respectively.

#### 4. 관수점 조절에 따른 토양수분함량 변화

그림 5-20은 1997년에 조사된 재식 1년차 유목의 관수점에 따른 토양의 수분함량 변화를 나타낸 것으로 -20kPa은 13회, -50kPa은 9회, -100kPa은 6회 관수되어 관수 점이 낮을수록 토양중에 수분함량이 낮게 지속적으로 유지되었으며 관수 횟수도 -20kPa보다 절반이 못되는 46%로 관수되는 물의 소요량이 월등히 적은 것을 알 수 있었다. -50kPa의 관수점은 6-8월에 15일에 1회 정도로 관수가 실시되었으나 지하수위와 모세관 현상이 있는 일반 노지 포장에서는 성목의 경우 증산량이 유목보다 많기

때문에 비가 오지 않을 때 7-10일에 1회 정도 관수를 실시하는 것이 좋을 것으로 판단되었다.

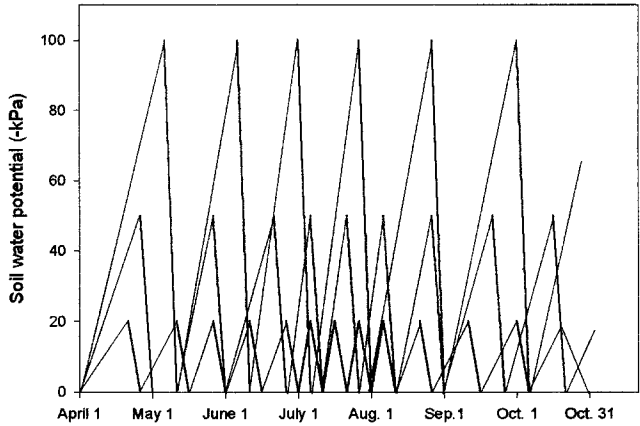


그림 5-20. Changes in soil water potential during experiment in 1997.

## 5. 해충 및 천적 발생에 미치는 영향

### 가. 조팝나무진딧물

토양내 수분처리만 실시된 1996년의 경우 수분처리 후 경과 기간에 따른 조팝나무진딧물 발생은 그림 5-21과 같다. 토양이 건조한 경우(-200kPa) 거의 발생하지 않았으며 과습한 경우(-20kPa) 수분처리 후 40일부터 발생밀도가 증가하여 발생기간 동안 다른 처리에 비하여 높은 발생을 보였다. 적습조건(-50kPa)에서는 건조한 조건보다 밀도가 높았으나 소발생 상태를 유지하였다. 이와같이 토양수분에 따라 발생이 차이가 나는 것은 조팝나무진딧물이 신초에 주로 발생하는 해충이기 때문으로 판단된다(농진청, 1988) 즉 과습한 경우는 정상적으로 신초 생장이 정지되지 않고 계속 자라기 때문에 진딧물 발생이 많아진다. 반면 건조한 경우 신초생장이 억제되기 때문에 발생이 감소되는 것으로 생각된다.

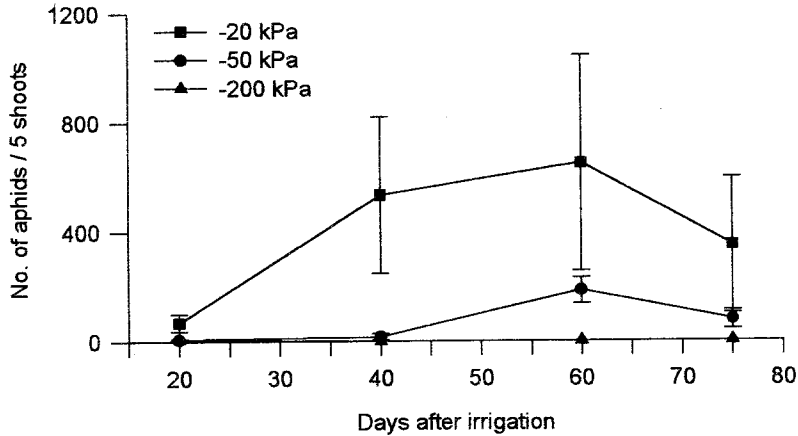


그림 5-21. Change of *Aphis citricola* densities according to irrigation points in 1996.

1997년부터는 토양수분과 질소수준을 동시에 처리하였다. 1997년의 경우 요인분석 결과 조팝나무진딧물 발생초기인 5월 21에는 수분, 질소, 수분×질소 상호작용 효과가 없었다. 하지만 진딧물 밀도가 증가함에 따라 수분×질소 상호작용 효과가 크게 나타났다(표 5-8, 9). 따라서 수분 및 질소의 주효과를 비교할 수 없었기 때문에 요인별 수준에 따른 단순효과를 비교하였다.

1997년 6월 12일 질소수준이 같은 경우 수분수준간 차이는, 질소가 적은 수준(N=0)에서는 적습조건에서 발생밀도가 높았고( $F=11.30$ ,  $df=2$ ,  $p=0.0092$ ), 적정 질소 수준에서는 토양 수분이 증가할수록 다발생하였으며( $F=164.21$ ,  $df=2$ ,  $p=0.0001$ ) 질소배량 수준에서는 건조와 과습한 경우 높은 발생밀도( $F=27.87$ ,  $df=2$ ,  $p=0.0090$ )를 보였다(그림 5-22 : A1). 적정 질소조건에서는 1996년과 동일한 경향이었으며 질소시비가 적거나 많은 경우는 1996년과 차이가 있었다. 이것은 재식 1년차인 관계로 뚜렷한 경향이 나타나지 않았고 또한 질소와의 상호작용 효과의 영향으로 수분효과가 상쇄되기 때문으로 판단된다. 6월 27일에는 같은 질소조건에서 수분 수준간 차이가 없었으며 이것은 조팝나무진딧물 발생이 자연감소하는 시기이기 때문으로 판단된다(그림 5-22: B1).



표 5-8. Densities (aphids per 5 shoots) of *Aphis citricola* according to irrigation points and nitrogen level in 1997

Irrigation point	treatment				1997		
	N level				5. 21	6. 12	6. 27
-100kPa	97	98	99	2000			
	0	0	0	0	2.3	455.0	570.0
	10	25	50	75	1.0	90.3	1001.7
	20	50	100	150	6.7	735.0	578.3
	Sub-mean				3.3	426.8	716.7
-50kPa	0	0	0	0	4.7	893.3	506.7
	10	25	50	75	0.0	315.0	1400.0
	20	50	100	150	0.3	130.0	406.7
	Sub-mean				1.7	446.1	771.1
-20kPa	0	0	0	0	15.7	317.3	453.3
	10	25	50	75	2.3	846.7	1066.7
	20	50	100	150	2.7	573.3	883.3
	Sub-mean				6.9	579.1	801.1

1997년 토양수분이 동일한 경우 질소간 차이는, 6월 12일 토양이 건조한 조건에서는 질소 배량에서 발생이 많았고(F=29.06, df=2, p=0.008), 적습조건에서는 질소가 적을수록 다발생하였으며(F=38.17, df=2, p=0.0004), 과습조건에서는 적정 질소 시비 수준에서 다발생(F=14.92, df=2, p=0.0047) 하였다(그림 5-22 : A2). 6월 27일에는 토양이 건조한 경우 질소수준간 차이가 없었으며 적습인 경우 적정 질소수준(F=14.62, df=2, p=0.0049), 과습인 경우도 적정질소 수준(F=8.52, df=2, p=0.0177)에서 발생밀도가 높았다(그림 5-22 : B2). 즉 건조한 조건에서는 수분의 효과가 뚜렷이 나타나지 않았으며 이것은 토양수분이 적당히 있어야 질소가 흡수되기 때문으로 판단되었다.

표 5-9. ANOVA table for the density of *Aphis citricola* in 1997

Variable	df	1997					
		5. 21		6. 12		6. 27	
		MS	P value	MS	P value	MS	P value
Irrigation (I)	2	64.04	0.4091	6192.33	0.0191	16492.59	0.7005
Nitrogen (N)	2	97.15	0.2663	42920.11	0.0540	1071934.26	0.0001
I×N	4	61.48	0.4833	478237.44	0.0001	152798.15	0.0319

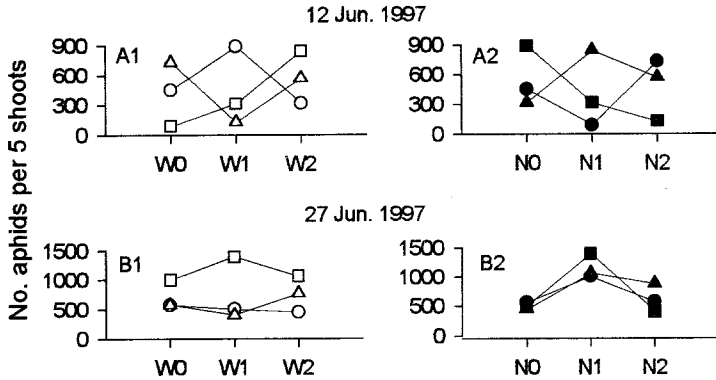


그림 5-22. Graphic demonstration of Irrigation (W)×Nitrogen (N) interaction for *Aphis citricola* densities in 1997.

Nitrogen level : ○ 0%, □ 50%, △ 100%.

Irrigation point : ● -100 kPa, ■ -50 kPa, ▲ -20 kPa.

1998년 생육초기인 5월 4일에는 수분효과는 없었고 질소의 효과가 있었으며 수분×질소 상호작용 효과는 없었다. 5월 13일에는 수분, 질소, 수분×질소 상호작용 효과가 있었다. 6월 27일에는 수분의 효과는 없었고 질소효과 및 수분×질소 상호작용 효과가 있었다(표 5-10, 11). 일반적으로 통계적인 상호작용 효과가 없더라도 F 값이 1 이상이면 상호작용효과를 검토해야 하는 것을 알려져 있다(채 등, 1987). 따라서 각 요인별 같은 수준에서 다른 요인의 단순효과를 비교하였다. 또한 5월 4일과 6월 27일은 발생밀도가 낮았기 때문에 5월 13일의 자료를 분석하였다.

질소수준이 같은 경우 수분 수준간 차이는, 질소 시비가 없는 경우 차이가 없었고 적정 질소가 시비된 경우는 과습조건으로 갈수록 다발생하였다( $F=84.81$ ,  $df=2$ ,  $p=0.0001$ ). 질소 시비가 많은 경우는 건조한 조건에서 많이( $F=10.10$ ,  $df=2$ ,  $p=0.0120$ ) 발생하였다(그림 5-23 : A1).

수분수준이 같은 경우 질소 수준간 차이는, 토양이 건조한 경우 적정 질소 수준에서 많이 발생하였고( $F=7.25$ ,  $df=2$ ,  $p=0.0251$ ), 적습( $F=19.25$ ,  $df=2$ ,  $p=0.0025$ ) 및 과습( $F=162.89$ ,  $df=2$ ,  $p=0.0001$ )한 경우도 적정질소수준에서 다발생하였다(그림 5-23: A2).

1998년에는 1997년과 달리 처리간 일정한 경향이 없었으며 이것은 1998년 봄철 강

우가 많은 관계로 대기중의 습도가 높아 이 영향을 받은 것으로 생각된다.

표 5-10. Densities (aphids per 5 shoots) of *Aphis citricola* according to irrigation points and nitrogen level in 1998

Irrigation point	Treatment				1998		
	N level				5. 4	5. 13	6. 27
97	98	99	2000				
-100kPa	0	0	0	0	7	247	4.3
	10	25	50	75	25	528	3.2
	20	50	100	150	10	387	3.3
	Sub-mean				14.0	387.3	3.6
-50kPa	0	0	0	0	15	318	5.0
	10	25	50	75	20	576	5.0
	20	50	100	150	5	233	4.7
	Sub-mean				8.3	375.7	4.9
-20kPa	0	0	0	0	20	415	3.3
	10	25	50	75	55	1701	4.3
	20	50	100	150	5	192	4.3
	Sub-mean				26.7	769.3	3.5

표 5-11. ANOVA table for the density of *Aphis citricola* in 1998

Variable	df	1998					
		5. 4		5. 13		6. 27	
		MS	P value	MS	P value	MS	P value
Irrigation (I)	2	500.15	0.0633	425671.26	0.0001	3.86	0.0246
Nitrogen (N)	2	1712.04	0.0007	1242591.81	0.0001	0.03	0.9676
I×N	4	362.04	0.0944	470924.87	0.0001	1.14	0.2896

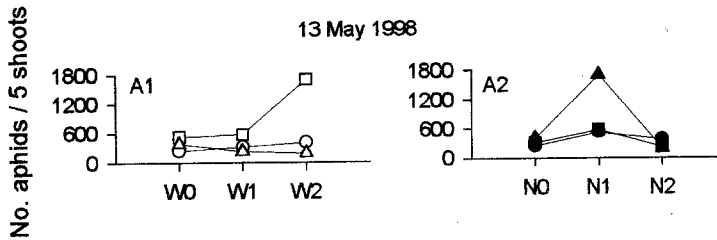


그림 5-23. Graphic demonstration of Irrigation (W)×Nitrogen (N) interaction for *Aphis citricola* densities in 1998.

Nitrogen level : ○ 0%, □ 50%, △ 100%.

Irrigation point : ● -100 kPa, ■ -50 kPa, ▲ -20 kPa.

1999년 수분 및 질소 수준에 따른 조팝나무 발생은 5월 21일 수분 및 수분×질소 상호작용효과는 있었으나 질소효과는 없었다. 전체적으로 과습조건에서 다발생하는 경향이였다. 6월 2일과 16일에는 수분, 질소, 수분×질소 상호작용효과는 있었다. 생육 후기 2차 발생기인 9월 6일에는 수분, 수분×질소 상호작용 효과는 있었으나 질소처리 효과는 없었다. 건조조건에서는 질소 수준에 관계없이 모두 무발생하였으며 적습 조건에서는 질소 시비량이 증가할수록 다발생하는 경향이 뚜렷하였다. 9월 28일에도 9월 6일과 비슷한 경향을 보였다(표 5-12, 13). 5월 21일에는 발생밀도가 낮고 9월에는 처리별 발생경향이 뚜렷하였으므로 6월의 발생정도를 요인별 단순효과를 비교하였다.

질소수준이 같은 경우 수분 수준간 차이는, 6월 2일 질소 시비가 없는 경우 ( $F=11.5$ ,  $df=2$ ,  $p=0.0097$ )와 질소가 많은 경우는( $F=16.57$ ,  $df=2$ ,  $p=0.0036$ ) 과습한 조건에서 발생이 많았고, 적정질소 수준( $F=23.60$ ,  $df=2$ ,  $p=0.0014$ )에서는 건조할수록 밀도가 높았다. 6월 16일에는 모든 질소수준(N0;  $F=9.02$ ,  $df=2$ ,  $p=0.0156$ , N1;  $F=4.80$ ,  $df=2$ ,  $p=0.0568$ , N2;  $F=13.01$ ,  $df=2$ ,  $p=0.0066$ )에서 과습할수록 발생밀도가 높았다(그림 5-24: A1, B1).

수분수준이 같은 경우, 6월 2일 토양이 건조한 경우 적정 질소수준( $F=15.41$ ,  $df=2$ ,  $p=0.0043$ )에서 발생밀도가 높았고, 토양이 적습( $F=27.61$ ,  $df=2$ ,  $p=0.0009$ )하거나 과습( $F=18.39$ ,  $df=2$ ,  $p=0.0028$ )한 경우는 질소가 많을수록 발생밀도가 높았다. 6월 16일에도 동일한 경향(W0;  $F=9.81$ ,  $df=2$ ,  $p=0.0129$ , W1;  $F=25.01$ ,  $df=2$ ,  $p=0.0012$ , W2;  $F=10.95$ ,

df=2, p=0.0100)을 보였다(그림 5-24: A2, B2).

표 5-12. Densities (aphids per 5 shoots) of *Aphis citricola* according to irrigation points and nitrogen level in 1999

Irrigation point	Treatment				1999				
	N level				5. 21	6. 2	6. 16	9. 6	9. 28
	97	98	99	2000					
-100kPa	0	0	0	0	6.0	63.3	18.3	0.0	0.0
	10	25	50	75	1.0	206.7	63.3	0.0	0.0
	20	50	100	150	1.7	136.7	46.7	0.0	0.0
	Sub-mean				2.9	135.6	42.8	0.0	0.0
-50kPa	0	0	0	0	0.0	38.3	11.7	6.7	26.7
	10	25	50	75	10.0	68.3	45.0	10.0	56.7
	20	50	100	150	1.7	180.0	113.3	76.7	130.0
	Sub-mean				3.9	95.6	56.7	31.1	71.1
-20kPa	0	0	0	0	9.0	143.3	53.3	0.0	20.0
	10	25	50	75	0.0	151.7	101.7	8.3	0.0
	20	50	100	150	22.0	418.3	210.0	3.3	1.7
	Sub-mean				10.3	237.8	121.7	3.9	7.2

표 5-13. ANOVA table for the density of *Aphis citricola* in 1999

Variable	df	1999									
		5. 21		6. 2		6. 16		9. 6		9. 28	
		MS	P value	MS	P value	MS	P value	MS	P value	MS	P value
Irrigation(I)	2	146.93	0.0180	48414.81	0.0001	15962.04	0.0001	2586.11	0.0108	13786.11	0.0001
Nitrogen(N)	2	54.70	0.1407	6138.04	0.0001	20637.04	0.0001	1552.78	0.0509	2158.33	0.0013
I×N	4	210.26	0.0005	22085.15	0.0001	4141.20	0.0044	1588.89	0.0249	3344.44	0.0001

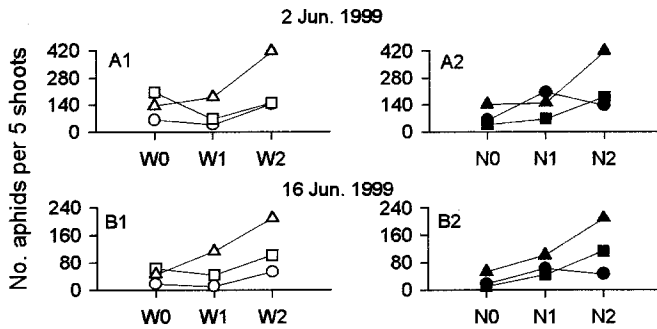


그림 5-24. Graphic demonstration of Irrigation (W)×Nitrogen (N) interaction for *Aphis citricola* densities in 1999.

Nitrogen level : ○ 0%, □ 50%, △ 100%.

Irrigation point : ● -100 kPa, ■ -50 kPa, ▲ -20 kPa.

2000년 토양수분과 질소수준에 따른 조팝나무진딧물 발생은 5월 21에는 모든 처리 효과가 없었으며 6월 3일과 7월 3일에는 수분, 질소, 수분×질소 상호작용 효과가 있었다(표 5-14, 15).

표 5-14. Densities (aphids per 5 shoots) of *Aphis citricola* according to irrigation points and nitrogen level in 2000

Irrigation point	Treatment				2000		
	N level			2000	5. 21	6. 3	7. 3
97	98	99	2000				
-100kPa	0	0	0	0	0.0	50.0	6.7
	10	25	50	75	0.0	20.0	3.3
	20	50	100	150	0.0	21.7	13.3
	Sub-mean				0.0	30.6	7.8
-50kPa	0	0	0	0	0.0	6.7	283.3
	10	25	50	75	0.7	1.0	240.0
	20	50	100	150	1.7	83.3	38.3
	Sub-mean				0.8	30.3	187.2
-20kPa	0	0	0	0	3.3	145.0	321.7
	10	25	50	75	0.0	3.3	196.7
	20	50	100	150	0.7	25.0	243.3
	Sub-mean				1.3	57.8	253.9

각 요인의 수준에 따른 단순효과는 질소수준이 동일한 경우, 6월 3일 질소수준이 적은 경우 과습한 조건(F=17.61, df=2, p=0.0031), 질소수준이 적정한 경우 건조조건(F=8.68, df=2, p=0.0169), 질소가 많은 경우 적습조건(F=11.81, df=2, p=0.0083) 등 처리효과가 다양하게 나타났다. 그러나 7월 3일에는 모든 질소수준에서 토양수분이 증가할수록 발생밀도가 높은 경향(N0; F=40.74, df=2, p=0.0003, N1; F=106.51, df=2, p=0.0001, N2; F=37.47, df=2, p=0.0004)을 보였다(그림 5-25 : A1, B1).

수분수준이 동일한 경우 질소수준별 단순효과는, 6월 3일 건조(F=9.90, df=2, p=0.0126) 또는 과습(F=21.32, df=2, p=0.0019)한 경우는 질소가 적을 때 발생밀도가 높았고, 적습(F=21.89, df=2, p=0.0018)에서는 질소시비가 증가할수록 발생밀도가 높았다. 7월 3일에는 건조한 경우 발생이 거의 되지 않았으며 적습(F=21.39, df=2, p=0.0019) 및 과습(F=8.30, df=2, p=0.0187)에서는 질소시비가 적을 때 많이 발생하였다(그림 5-25 : A2, B2).

표 5-15. ANOVA table for the density of *Aphis citricola* in 2000

Variable	df	2000					
		5. 21		6. 3		7. 3	
		MS	P value	MS	P value	MS	P value
Irrigation(I)	2	4.04	0.4564	2241.44	0.0127	145823.15	0.0001
Nitrogen(N)	2	1.81	0.6969	7958.11	0.0001	25128.70	0.0001
I×N	4	4.81	0.4443	8354.22	0.0001	19102.31	0.0001

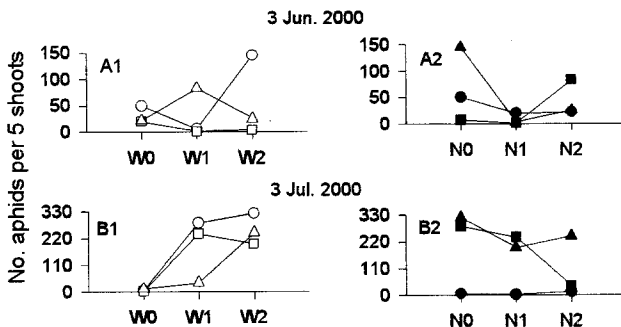


그림 5-25. Graphic demonstration of Irrigation (W)×Nitrogen (N) interation for *Aphis citricola* densities in 2000.

Nitrogen level : ○ 0%, □ 50%, △ 100%.

Irrigation point : ● -100 kPa, ■ -50 kPa, ▲ -20 kPa.

나. 은무늬굴나방

토양 내 수분처리만 실시된 1996년의 경우 수분처리 후 경과 기간에 따른 은무늬굴나방 발생은 그림 5-26과 같다. 초기의 발생밀도는 동일하였으나 토양이 건조한 경우(-200kPa) 시간이 지날수록 발생이 감소하였으며 과습한 경우(-20kPa) 수분처리 후 60일부터 발생밀도가 증가하여 발생기간 동안 다른 처리에 비하여 높은 발생을 보였다. 적습조건(-50kPa)에서는 건조한 조건보다 밀도가 높았으나 과습한 경우보다는 소 발생 상태를 유지하였다. 이와 같이 토양수분에 따라 발생이 차이가 나는 것은 은무늬굴나방이 주로 발생하는 해충이기 때문으로 판단된다. 즉 과습한 경우는 정상적으로 신초 생장이 정지되지 않고 계속 자라기 때문에 발생이 많아진다. 반면 건조한 경우 신초생장이 억제되기 때문에 발생이 감소되는 것으로 생각된다. 이같은 경우는 조팝나무진딧물 발생과 유사한 경향을 보였다.

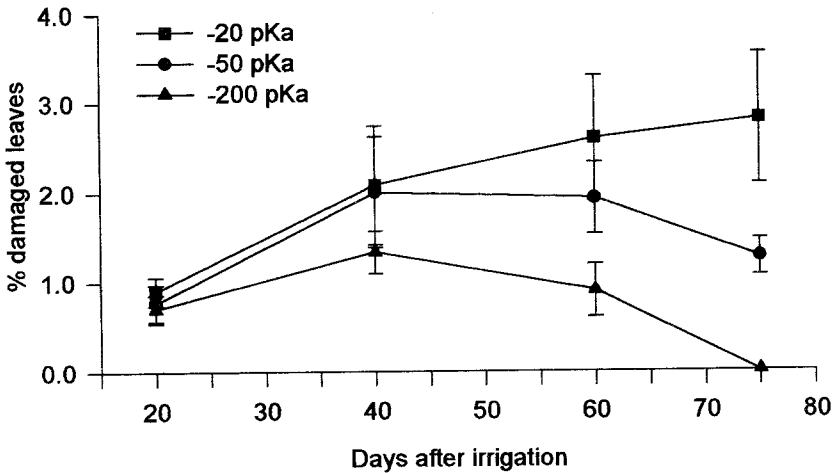


그림 5-26. Change of *Lyonetia prunifoliella* densities according to irrigation points in 1996.

1997년부터는 토양수분과 질소수준을 동시에 처리하였다. 1997년의 경우 요인분석 결과 은무늬굴나방 발생초기인 5월 21일 부터 수분, 질소, 수분×질소 상호작용 효과



가 나타났다. 6월 12일에는 질소효과만 나타났으며, 생육후기 2차 신초생장기인 8월 8일에는 수분효과만 나타났다(표5-16, 17). 상호작용효과를 무시할 수 없었으므로 요인별 같은 수준에서 다른 요인의 단순효과를 분석하였다.

6월 12일 질소수준이 같은 경우 수분수준간 차이는, 질소가 적은 수준(N=0)에서는 건조조건에서 발생밀도가 높았고(F=9.75, df=2, p=0.0130), 적정 질소 수준에서는 토양 수분이 많은 경우 소발생하였으며(F=15.50, df=2, p=0.0043) 질소배량 수준에서는 토양 습도에 따라 차이가 없었다. 2차 발생기인 8월 8일에는 질소 수준이 적거나 적당한 조건에서는 수분조건에 따라 발생이 차이가 없었으며, 질소가 과다한 경우 과습 > 건조 > 적습 순으로 발생밀도에 차이(F=24.00, df=2, p=0.0014)가 있었다(그림 5-27 : A1, B1).

수분 조건이 동일한 경우 질소 수준간 차이는, 6월 12일 적습 및 과습 조건에서는 질소 수준간 차이가 없었고, 건조한 조건에서는 질소가 적을 때 발생밀도가 높았다(F=19.50, df=2, p=0.0024). 8월 8일에는 건조, 적습, 과습 수준에서 질소수준별 차이가 없었다(그림 5-27 : A2, B2). 이렇게 시험 1년차에서는 질소의 효과 보다는 수분의 효과가 나타났으며, 전체적으로 과습에서 다발생되는 경향을 보였다.

표 5-16. Densities (no.leaves damaged per 5 shoots) of *Lyonetia prunifoliella* according to irrigation points and nitrogen level in 1997

Irrigation point	Treatment				1997		
	N level				6. 12	6. 27	8. 8
97	98	99	2000				
-100kPa	0	0	0	0	6.3	3.3	1.7
	10	25	50	75	3.0	3.0	2.3
	20	50	100	150	1.7	1.3	1.3
	Sub-mean				3.7	2.6	1.8
-50kPa	0	0	0	0	3.3	4.3	0.7
	10	25	50	75	3.3	1.7	0.7
	20	50	100	150	2.0	2.3	0.0
	Sub-mean				2.9	2.8	0.4
-20kPa	0	0	0	0	2.3	4.0	1.3
	10	25	50	75	1.3	2.0	2.3
	20	50	100	150	1.3	2.7	2.7
	Sub-mean				1.7	2.9	2.1

표 5-17. ANOVA table for the density of *Lyonetia prunifoliella* in 1997

Variable	df	1997					
		6. 12		6. 27		8. 8	
		MS	P value	MS	P value	MS	P value
Irrigation(I)	2	9.15	0.0003	0.26	0.7209	7.00	0.0003
Nitrogen(N)	2	12.48	0.0001	8.93	0.0006	0.78	0.2497
I×N	4	3.81	0.0048	1.70	0.1112	0.94	0.1687

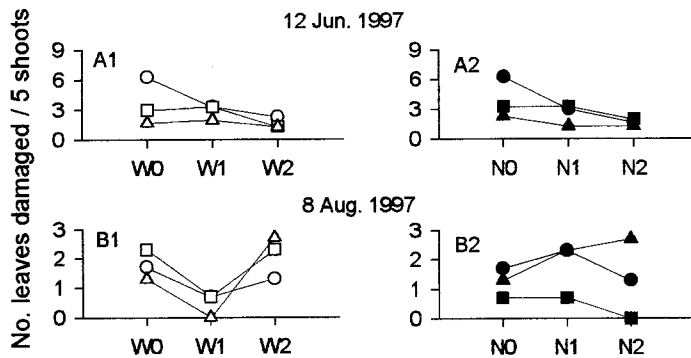


그림 5-27. Graphic demonstration of Irrigation (W)×Nitrogen (N) interaction for *Lyonetia prunifoliella* densities in 1997.

Nitrogen level : ○ 0%, □ 50%, △ 100%.

Irrigation point : ● -100 kPa, ■ -50 kPa, ▲ -20 kPa.

처리 2년차인 1998년에는 1차발생기인 6월 9일에는 수분, 질소, 수분×질소 상호작용 효과가 있었으나 6월 27일에는 어느 효과도 나타나지 않았다. 2차 발생기인 8월 17일에는 질소 및 수분×질소 상호작용효과가 나타났고 9월 17일에도 같은 결과를 보였다(표 5-18, 19). 상호작용 효과가 인정되었으므로 각 요인별 수준에 따른 다른 요인의 수준을 비교하였다.

질소수준이 같은 경우 수분수준간 차이는, 6월 9일 질소가 적은 수준(N=0)에서는 수분 수준별 차이가 없었고 적량 질소 및 과량 질소에서는 수분 수준이 높을수록 다 발생하였다(N1; F=9.06, df=2, p=0.0154, N2; F=10.50, df=2, p=0.0110). 8월 17일에는

적정 질소 수준에서는 수분 수준간 차이가 없었고, 질소가 적은 경우 적습에서 발생 밀도가 높았으며(F=13.08, df=2, p=0.0065), 질소가 과다한 경우는 과습에서 발생밀도(F=13.71, df=2, p=0.0058)가 가장 높았다(그림 5-28 : A1, B1).

수분 조건이 동일한 경우 질소 수준간 차이는, 6월 9일 과습한 경우에만 질소 수준이 증가할수록 발생밀도가 높았다(F=20.11, df=2, p=0.0022). 8월 17일에는 건조한 경우는 질소 수준간 차이가 없었으며 적습에서는 질소가 적을수록 다발생(F=18.05, df=2, p=0.0029)하였고, 과습에서는 질소가 많은 경우 다발생(F=9.80, df=2, p=0.0129)하는 경향을 보였다(그림 5-28 : A2, B2).

표 5-18. Densities (no.leaves damaged per 5 shoots) of *Lyonetia prunifoliella* according to irrigation points and nitrogen level in 1998

Irrigation point	Treatment				1998			
	N level				6. 9	6. 27	8. 17	9. 17
	97	98	99	2000				
-100kPa	0	0	0	0	4.0	14.0	13.7	14.0
	10	25	50	75	2.7	11.3	14.7	15.0
	20	50	100	150	3.0	13.3	12.7	13.7
	Sub-mean				3.2	12.9	13.7	14.2
-50kPa	0	0	0	0	4.0	15.0	17.7	18.0
	10	25	50	75	3.7	14.0	14.0	15.0
	20	50	100	150	4.0	14.3	10.0	10.7
	Sub-mean				3.9	14.4	13.9	14.6
-20kPa	0	0	0	0	2.3	11.3	13.3	15.7
	10	25	50	75	7.3	12.7	10.0	11.7
	20	50	100	150	3.7	16.3	15.3	16.3
	Sub-mean				3.9	13.4	11.8	13.1

표 5-19. ANOVA table for the density of *Lyonetia prunifoliella* in 1998

Variable	df	1998							
		6. 9		6. 27		8. 17		9. 17	
		MS	P value	MS	P value	MS	P value	MS	P value
Irrigation(I)	2	4.78	0.0490	5.59	0.3080	2.48	0.4261	0.59	0.8336
Nitrogen(N)	2	1.50	0.0706	9.15	0.1567	13.48	0.0206	9.93	0.0707
I×N	4	1.82	0.0015	8.76	0.1423	27.70	0.0002	24.81	0.0008

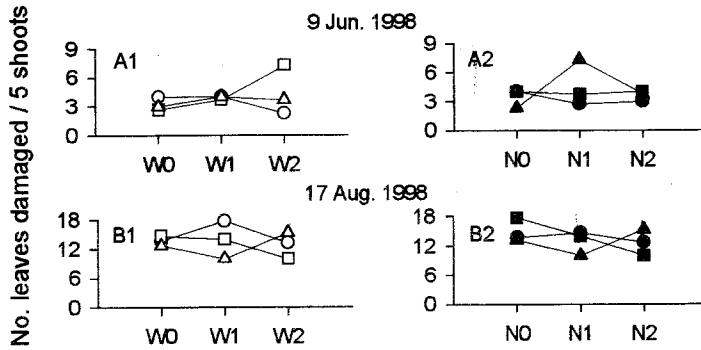


그림 5-28. Graphic demonstration of Irrigation (W)×Nitrogen (N) interaction for *Lyonetia prunifoliella* densities in 1998.

Nitrogen level : ○ 0%, □ 50%, △ 100%.

Irrigation point : ● -100 kPa, ■ -50 kPa, ▲ -20 kPa.

표 5-20. Densities (no.leaves damaged per 5 shoots) of *Lyonetia prunifoliella* according to irrigation points and nitrogen level in 1999

Treatment		1999						
Irrigation point	N level				6. 2	8. 11	9. 6	9. 28
	97	98	99	2000				
-100kPa	0	0	0	0	5.3	1.0	1.0	1.7
	10	25	50	75	4.0	1.7	2.0	3.0
	20	50	100	150	5.0	2.7	2.3	3.7
	Sub-mean				4.8	1.8	1.8	2.8
-50kPa	0	0	0	0	3.0	5.0	5.3	7.7
	10	25	50	75	5.3	5.0	6.3	8.3
	20	50	100	150	5.7	11.3	10.0	9.7
	Sub-mean				4.7	7.1	7.2	8.6
-20kPa	0	0	0	0	4.7	6.3	9.7	3.7
	10	25	50	75	3.7	1.3	1.3	4.0
	20	50	100	150	4.0	2.0	4.0	2.7
	Sub-mean				4.1	3.2	5.0	3.4

1999년 수분 및 질소 처리에 따라 6월 2일에는 상호작용 효과만 있었으며 8월 11

일과 9월 6일에는 수분, 질소, 수분×질소 상호작용 효과가 있었다. 9월 28일에는 상호작용 효과가 없고 수분의 효과만이 나타났다(표 5-20, 21).

표 5-21. ANOVA table for the density of *Lyonetia prunifoliella* in 1999

Variable	df	1999							
		6. 2		8. 11		9. 6		9. 28	
		MS	P value	MS	P value	MS	P value	MS	P value
Irrigation(I)	2	1.15	0.3985	68.48	0.0001	67.44	0.0001	89.93	0.0001
Nitrogen(N)	2	0.93	0.4728	16.04	0.0018	14.11	0.0023	2.48	0.2376
I×N	4	3.81	0.0370	24.15	0.0001	29.89	0.0001	2.59	0.2106

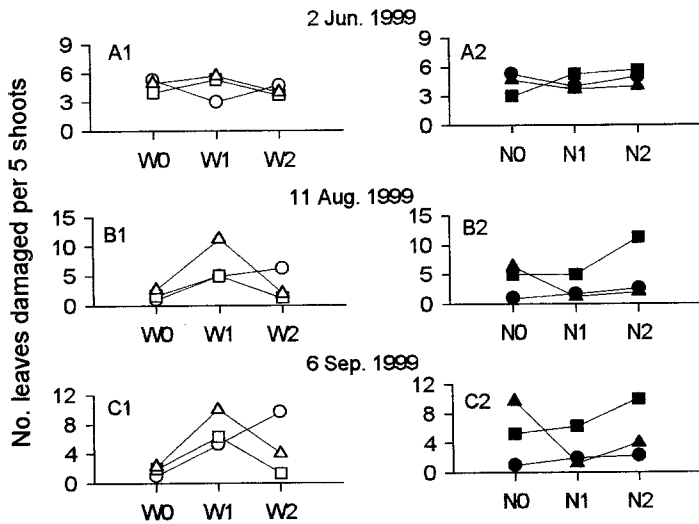


그림 5-30. Graphic demonstration of Irrigation (W)×Nitrogen (N) interaction for *Lyonetia prunifoliella* densities in 1999.

Nitrogen level : ○ 0%, □ 50%, △ 100%.

Irrigation point : ● -100 kPa, ■ -50 kPa, ▲ -20 kPa.

질소수준이 동일한 경우 수분 수준별 단순효과는, 생육초기인 6월 2일에는 어느 질소 수준에서도 수분 수준간 차이가 없었다. 2차발생기인 8월 11일에는 질소가 적은

경우 과습할수록 발생밀도가 높았고(F=16.00, df=2, p=0.0039), 적정 질소 및 과다 수준에서는 적습에서 높았다(N1; F=10.09, df=2, p=0.0120, N2; F=31.83, df=2, p=0.0006). 9월 6일에도 8월 11일과 같은 결과를 보였다(그림 5-30 : A1, B1, C1).

수분조건이 동일한 경우 질소 수준별 단순효과는, 생육초기인 6월 2일 건조 및 과습 수준에서는 질소 수준간 차이가 없었으며, 적습한 경우는 질소가 많을수록(F=5.18, df=2, p=0.0493) 다발생하였다. 2차 발생기인 8월 11일에는 건조한 경우 질소수준에 따라 차이가 없었고, 적습에서는 질소가 많을 때(F=12.89, df=2, p=0.0067) 과습에서는 질소가 적을 때(F=18.09, df=2, p=0.0029) 다발생하였다. 9월 6일에는 8월 11일과 동일한 결과를 보였다(그림 5-30 : A2, BN2, C2).

2000년 은무늬굴나방 발생은 1차 발생기인 6월 3일에는 수분, 질소, 수분×질소 상호작용 효과가 나타났으며, 7월 3일에는 수분 및 수분×질소 상호작용, 2차 발생기인 9월 3일에는 질소 및 수분×질소 상호작용 효과가 나타났다(표-22, 23).

표 5-22. Densities (no.leaves damaged per 5 shoots) of *Lyonetia prunifoliella* according to irrigation points and nitrogen level in 2000

Irrigation point	Treatment				2000		
	N level				6. 3	7. 3	9. 3
	97	98	99	2000			
-100kPa	0	0	0	0	2.7	5.0	0.3
	10	25	50	75	0.7	1.7	2.3
	20	50	100	150	0.7	3.0	2.3
	Sub-mean				1.3	3.2	1.7
-50kPa	0	0	0	0	1.0	3.0	3.7
	10	25	50	75	0.0	2.3	0.0
	20	50	100	150	0.0	1.3	1.3
	Sub-mean				0.3	2.2	1.7
-20kPa	0	0	0	0	0.0	0.0	0.3
	10	25	50	75	0.0	2.0	5.0
	20	50	100	150	0.0	2.3	0.7
	Sub-mean				0.0	1.4	2.0

표 5-23. ANOVA table for the density of *Lyonetia prunifoliella* in 2000

Variable	df	2000					
		6. 3		7. 3		9. 3	
		MS	P value	MS	P value	MS	P value
Irrigation(I)	2	4.33	0.0003	7.15	0.0005	0.33	0.5795
Nitrogen(N)	2	3.00	0.0020	1.04	0.2021	3.00	0.0180
I×N	4	1.00	0.0464	7.75	0.0001	15.83	0.0001

질소수준이 동일한 조건에서 수분의 단순효과는, 7월 3일에는 질소수준이 적은 경우 토양 수분이 적을수록 다발생( $F=28.50$ ,  $df=2$ ,  $p=0.0009$ ) 하였고, 적정 및 과다 질소 수준에서는 차이가 없었다. 9월 3일에는 질소가 적은 경우 적습에서 발생밀도가 가장 높았고( $F=11.11$ ,  $df=2$ ,  $p=0.0096$ ), 적정 질소 수준에서는 과습( $F=42.25$ ,  $df=2$ ,  $p=0.0003$ ), 과다 질소수준( $F=6.33$ ,  $df=2$ ,  $p=0.0332$ )에서는 토양 수분이 적을수록 발생이 많았다(그림 5-31 : A1, B1).

수분수준이 동일한 경우 질소의 단순효과는, 7월 3일에는 건조한 경우 질소수준이 낮을 때 발생이 많았고( $F=19.00$ ,  $df=2$ ,  $p=0.0025$ ), 적습에서는 차이가 없었으며 과습한 경우( $F=10.75$ ,  $df=2$ ,  $p=0.0140$ )는 질소량이 많을수록 발생이 많았다. 9월 3일에는 건조한 경우 질소가 많을수록( $F=12.00$ ,  $df=2$ ,  $p=0.0080$ ), 적습에서는 질소가 적을 때( $F=11.62$ ,  $df=2$ ,  $p=0.0086$ ), 과습에서는 적정 질소 수준( $F=36.60$ ,  $df=2$ ,  $p=0.0004$ )에서 발생밀도가 높았다(그림 5-31 : A2, B2).

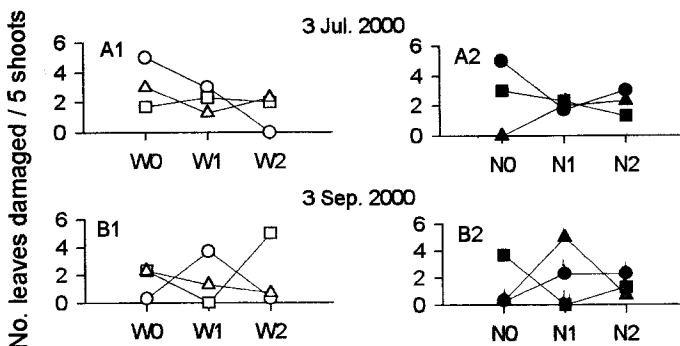


그림 5-31. Graphic demonstration of Irrigation (W)×Nitrogen (N) interaction for *Lyonetia prunifoliella* densities in 2000.

Nitrogen level : ○ 0%, □ 50%, △ 100%.

Irrigation point : ● -100 kPa, ■ -50 kPa, ▲ -20 kPa.

다. 사과굴나방

토양내 수분처리만 실시된 1996년의 경우 수분처리 후 경과 기간에 따른 사과굴나방 발생은 그림 5-31과 같다. 초기의 발생밀도는 동일하였으나 토양이 건조한 경우(-200kPa) 시간이 지날수록 발생이 증가하였으며 적습조건(-50kPa)에서 가장 소발생하는 경향을 보였다. 과습한 경우(-20kPa)는 건조한 경우보다는 낮았으나 적습조건보다는 높았다. 비록 통계적인 차이는 없었으나 건조한 토양조건에서 다발생하는 경향을 보였다.

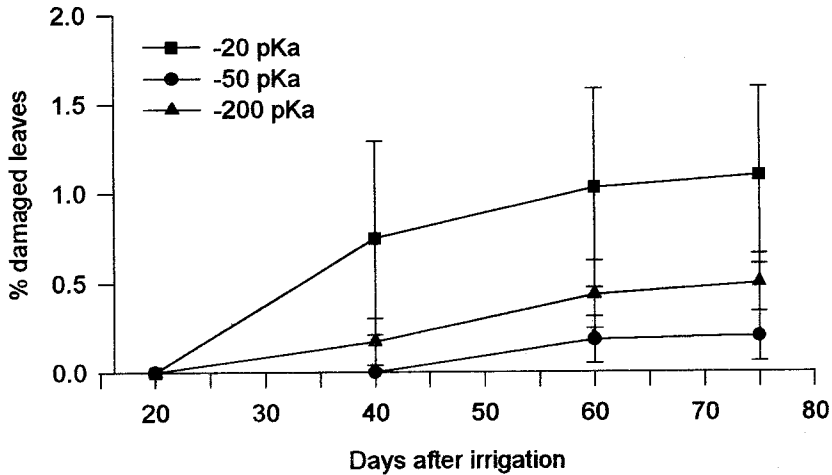


그림 5-31. Change of *Phyllonorycter ringoniella* densities according to irrigation points in 1996.

1997년부터는 토양수분과 질소수준을 동시에 처리하였다. 1997년의 경우 수분×질소 상호작용 효과가 강하게 나타났고 수분 및 질소 효과는 없었다(표 5-24, 25). 상호작용 효과가 있었기 때문에 요인 수준별 단순효과를 분석하였다.

질소수준이 같은 경우 수분 수준별 단순효과는 8월 8일 질소가 적은 경우 건조할 수록(F=7.80, df=2, p=0.0214) 발생밀도가 높았으며 적정 및 과다 질소 수준에서는 수분 수준간 차이가 없었다(그림 5-32 : A1).



수분 수준이 같은 경우 질소 수준별 차이는 어느 수분 조건에도 차이가 없었다(그림 5-33 : A2).

표 5-24. Densities (no. leaves damaged per 200 leaves) of *Phyllonorycter ringoniella* according to irrigation points and nitrogen level in 1997 and 1998

Irrigation point	Treatment				1997		1998	
	N level				8. 8	8. 17	9. 17	
	97	98	99	2000				
-100kPa	0	0	0	0	2.3	2.0	3.3	
	10	25	50	75	0.3	1.7	3.7	
	20	50	100	150	0.3	1.7	4.0	
	Sub-mean				1.0	1.8	3.7	
-50kPa	0	0	0	0	0.0	0.7	2.0	
	10	25	50	75	1.3	2.3	4.0	
	20	50	100	150	1.7	2.3	3.7	
	Sub-mean				1.0	1.8	3.2	
-20kPa	0	0	0	0	1.7	2.0	2.7	
	10	25	50	75	1.0	2.0	3.3	
	20	50	100	150	0.3	3.0	4.7	
	Sub-mean				1.0	2.3	3.5	

표 5-25. ANOVA table for the density of *Phyllonorycter ringoniella* in 1997 and 1998

Variable	df	1997		1998			
		8. 8		8. 17		9. 17	
		MS	P value	MS	P value	MS	P value
Irrigation(I)	2	0.00	1.0000	1.81	0.5682	0.48	0.7209
Nitrogen(N)	2	0.78	0.2937	2.26	0.4974	4.93	0.0555
I×N	4	3.44	0.0035	1.70	0.7031	0.98	0.6151

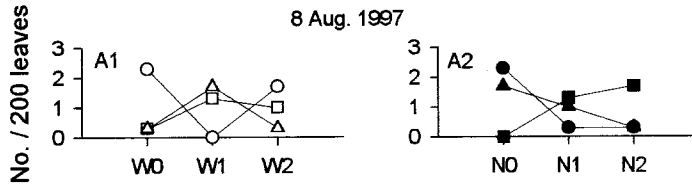


그림 5-32. Graphic demonstration of Irrigation (W)×Nitrogen (N) interaction for *Phyllonorycter ringoniella* densities in 1997.

Nitrogen level : ○ 0%, □ 50%, △ 100%.

Irrigation point : ● -100 kPa, ■ -50 kPa, ▲ -20 kPa.

처리 2년차인 1998년에는 8월 17일과 9월 17일 모두 수분, 질소, 수분×질소 상호작용 효과가 없었다(표 5-24, 25). 하지만 상호작용 효과를 무시할 수 없었으므로 요인별 단순효과를 비교하였다.

질소 수준이 동일한 조건에서 수분수준별 차이는 단순효과 비교에서도 8월 17일 및 9월 17일 유의성이 없었다(그림 5-33 : A1, B1).

수분 수준이 동일한 조건에서 질소 수준별 차이는 8월 17일에는 모든 수준에서 유의성이 없었고, 9월 17일에는 과습한 경우 질소 수준이 많을수록( $F=9.33$ ,  $df=2$ ,  $p=0.0144$ ) 발생밀도가 높았다(그림 5-33 : A2, B2). 1998년은 7월 하순부터 집중호우가 계속되었기 때문에 비록 비가림하우스로 강우를 차단하고 토양수분을 조절하였다 하더라도 공기중의 습도가 높았기 때문에 처리효과가 상쇄된 것으로 판단되었다.

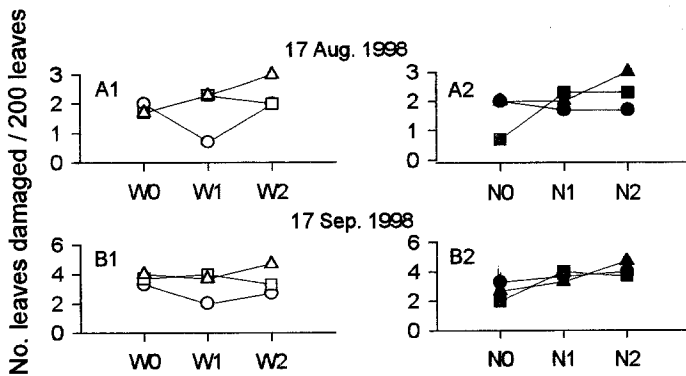


그림 5-33. Graphic demonstration of Irrigation (W)×Nitrogen (N) interaction for *Phyllonorycter ringoniella* densities in 1998.

Nitrogen level : ○ 0%, □ 50%, △ 100%.

Irrigation point : ● -100 kPa, ■ -50 kPa, ▲ -20 kPa.

1999년 처리별 사과굴나방 발생은 8월 11일과 9월 28일에는 처리간 통계적 차이가 없었으며 9월 6일 수분×질소 상호작용 효과가 있었다(표 5-26, 27). 상호작용 효과를 무시할 수 없었으므로 요인별 단순효과를 비교하였다.

질소수준이 동일한 경우 수분 수준의 차이는 9월 6일 질소가 적은 경우 수분조건이 적을수록 다발생하였다( $F=24.00$ ,  $df=2$ ,  $p=0.0014$ ). 적정 및 과다질소 수준에서는 수분 수준별 통계적 차이가 없었다. 9월 28일에는 모든 질소 수준에서 수분 수준별 통계적 차이가 없었다(그림 5-34 : A1, B1).

수분 수준이 동일한 경우 질소 수준별 단순효과는 9월 6일 건조 및 적습에서는 질소 수준간 차이가 없었으며, 과습한 경우 질소가 적을 때 높은( $F=14.33$ ,  $df=2$ ,  $p=0.0052$ ) 발생밀도를 보였다. 9월 28일에는 모든 수분 수준에서 질소 수준별 통계적 차이가 없었다(그림 5-34 : A2, B2).

表 5-26. Densities (no. leaves damaged per 200 leaves) of *Phyllonorycter ringoniella* according to irrigation points and nitrogen level in 1999

Irrigation point	Treatment				1999		
	N level				8. 11	9. 6	9. 28
	97	98	99	2000			
-100kPa	0	0	0	0	0.3	1.0	2.7
	10	25	50	75	0.3	2.0	3.3
	20	50	100	150	0.0	2.7	4.3
	Sub-mean				0.2	1.9	3.4
-50kPa	0	0	0	0	0.0	2.3	2.7
	10	25	50	75	0.0	1.7	2.3
	20	50	100	150	0.0	2.7	3.3
	Sub-mean				0.0	2.2	2.8
-20kPa	0	0	0	0	0.0	3.7	4.0
	10	25	50	75	0.3	1.3	2.7
	20	50	100	150	0.0	1.7	2.3
	Sub-mean				0.1	2.2	3.0

表 5-27. ANOVA table for the density of *Phyllonorycter ringoniella* in 1999

Variable	df	1999					
		8. 11		9. 6		9. 28	
		MS	P value	MS	P value	MS	P value
Irrigation(I)	2	0.11	0.3874	0.33	0.7292	1.04	0.2722
Nitrogen(N)	2	0.11	0.3874	1.33	0.3007	0.70	0.4053
I×N	4	0.06	0.7361	3.17	0.0438	2.26	0.440

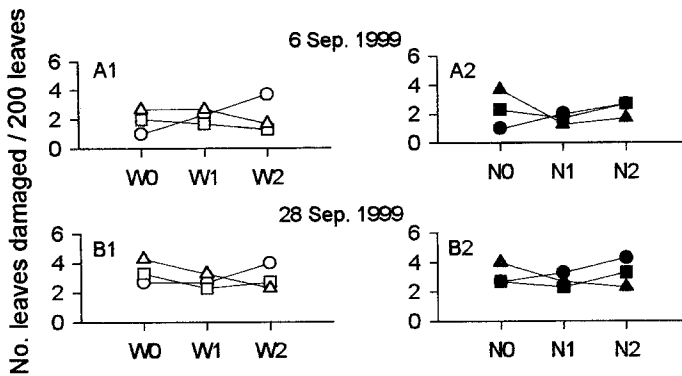


그림 5-34. Graphic demonstration of Irrigation (W)×Nitrogen (N) interation for *Phyllonorycter ringoniella* densities in 1999.

Nitrogen level : ○ 0%, □ 50%, △ 100%.

Irrigation point : ● -100 kPa, ■ -50 kPa, ▲ -20 kPa.

2000년 처리결과 생육초기인 6월 3일에는 통계적 처리효과가 없었고 7월 3일과 9월 3일 수분 및 수분×질소 상호작용 효과가 있었다(표 5-28, 29).

표 5-28. Densities (no.leaves damaged per 200 leaves) of *Phyllonorycter ringoniella* according to irrigation points and nitrogen level in 2000

Treatment		2000					
Irrigation point	N level				6. 3	7. 3	9. 3
	97	98	99	2000			
-100kPa	0	0	0	0	1.7	6.3	3.0
	10	25	50	75	2.7	7.3	3.7
	20	50	100	150	1.7	8.3	5.0
	Sub-mean				2.0	7.3	3.9
-50kPa	0	0	0	0	2.7	6.7	5.0
	10	25	50	75	1.0	3.3	3.7
	20	50	100	150	1.3	4.0	3.3
	Sub-mean				1.7	4.7	4.0
-20kPa	0	0	0	0	1.7	3.0	4.3
	10	25	50	75	0.3	2.7	1.7
	20	50	100	150	1.7	1.0	1.7
	Sub-mean				1.2	2.2	2.6

표 5-29. ANOVA table for the density of *Phyllonorycter ringoniella* in 2000

Variable	df	2000					
		6. 3		7. 3		9. 3	
		MS	P value	MS	P value	MS	P value
Irrigation(I)	2	1.37	0.2276	58.81	0.0001	5.81	0.0113
Nitrogen(N)	2	1.04	0.3192	2.37	0.1220	2.93	0.0794
I×S	4	2.04	0.0890	6.90	0.0017	4.81	0.0081

단순효과를 비교한 결과 질소수준이 동일한 조건에서 수분의 단순효과는, 7월 3일에는 질소수준이 적은 경우 토양 수분이 적을수록 다발생( $F=10.09$ ,  $df=2$ ,  $p=0.0120$ )하였고, 적정 질소 수준에서는 건조한 경우 밀도가 가장 높았으며( $F=57.33$ ,  $df=2$ ,  $p=0.0001$ ), 질소 과다 수준에서도 건조한 경우 다발생하였다( $F=28.23$ ,  $df=2$ ,  $p=0.0009$ ). 9월 3일에는 질소가 적은 경우와 적정 질소 수준에서는 차이가 없었고, 질소가 많은 경우 건조한 수분조건에서 다발생( $F=9.37$ ,  $df=2$ ,  $p=0.0142$ )하는 경향을 보였다(그림 5-35 : A1, B1).

수분조건이 동일한 경우 질소의 단순효과는 7월 3일 건조 수준에서는 차이가 없었고 적습한 경우 질소 수준이 적을수록 다발생하였다( $F=7.64$ ,  $df=2$ ,  $p=0.0224$ ). 9월 3일에는 과습한 경우 질소가 적을수록 다발생( $F=21.33$ ,  $df=2$ ,  $p=0.0019$ )하였다(그림 5-35 : A2, B2).

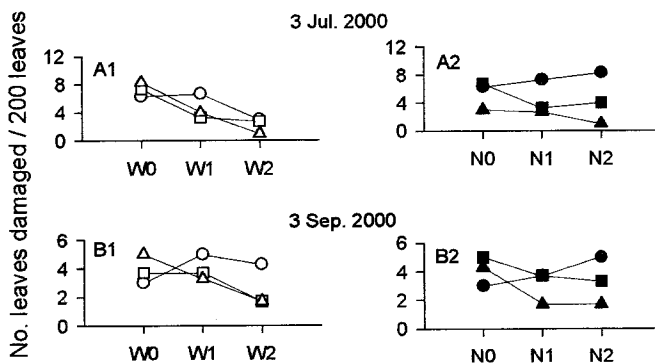


그림 5-35. Graphic demonstration of Irrigation (W) × Nitrogen (N) interaction for *Phyllonorycter ringoniella* densities in 2000.

Nitrogen level : ○ 0%, □ 50%, △ 100%.

Irrigation point : ● -100 kPa, ■ -50 kPa, ▲ -20 kPa.

라. 응애류 및 천적류

토양내 수분처리만 실시된 1996년의 경우 수분처리 후 경과 기간에 따른 응애류 발생은 그림 5-36과 같다. 점박이용애의 경우(그림 5-36A) 수분처리 60일부터 건조한 조건에서는 발생밀도가 급격히 증가하였고 적습 및 과습조건에서는 밀도가 낮게 유지되었다. 사과응애의 경우(그림 5-36B) 수분처리후 50일까지는 처리간 뚜렷한 경향이 없었으나 50일 이후부터는 토양이 건조한 경우 적습 및 과습보다 발생밀도가 높게 유지되었다. 적습 및 과습 수준에서는 차이가 없었다.

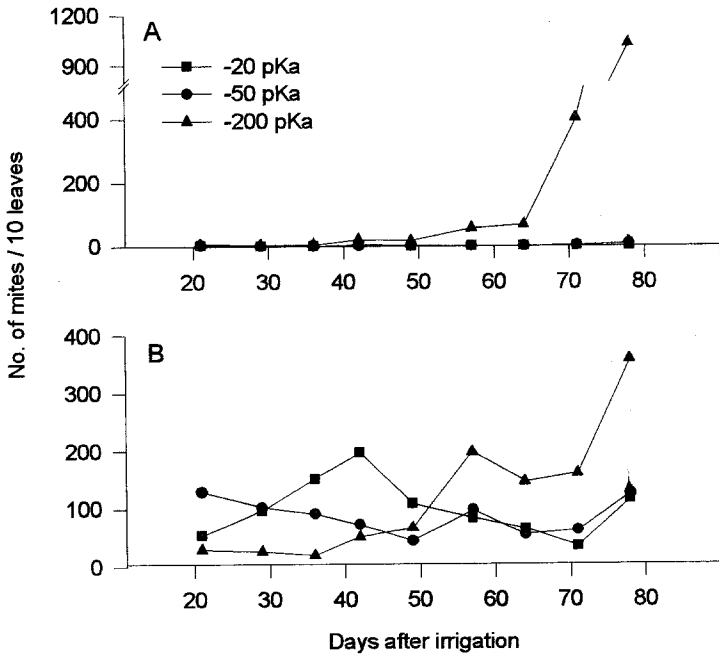


그림 5-36. Change of densities of *Tetranychus urticae* (A) and *Panonychus ulmi* (B) according to irrigation point in 1996.

1997년 수분 및 질소가 동시에 처리된 결과 점박이용애 발생은 8월 7일과 12일에 건조 조건에서 질소 시비량이 증가 함에 따라 각각 1.03~7.47마리, 4.00~10.50마리를

보여 질소증가에 따라 다발생는 경향을 나타냈다. 수분함량에 따른 발생밀도 차이는 건조한 구에서 발생밀도가 높은 경향은 보였으나 통계적 유의성은 없었다(표 5-30).

표 5-30. Densities (no.mites per leaf) of *Tetranychus urticae* according to irrigation point and nitrogen level in 1997

Treatment		Date (month/day)				
Irrigation point	N level	8/7	8/12	8/18	8/23	8월30일
-100kPa	0g	1.03b	4.00c	4.20ab	1.07a	0.07ab
	10g	4.23ab	6.50abc	2.97ab	0.17a	0.00b
	20g	7.47a	10.50a	4.57ab	0.37a	0.03b
-50kPa	0g	1.60b	4.93bc	5.37ab	0.07a	0.07ab
	10g	3.13b	5.53bc	3.00ab	0.33a	0.07ab
	20g	3.40b	4.53c	4.17ab	1.20a	0.07ab
-20kPa	0g	3.60b	9.43ab	5.57ab	0.37a	0.03b
	10g	1.63b	3.57c	1.27b	0.17a	0.23a
	20g	3.13b	5.33bc	7.20a	0.43a	0.00b

The same letters in a column are not significantly different at 5% by Duncan's Multiple Range Test.

1997년 사과응애 발생의 경우는 엽당 평균밀도는 조사기간 중 계속 감소하였는데 건조조건에서는 질소 시비량이 많아질수록 감소하는 경향이었으나 과습조건에서는 오히려 질소시비량이 많아질수록 증가하는 경향이였다(표 5-31).



표 5-31. Densities (no.mites per leaf) of *Panonychus ulmi* according to irrigation point and nitrogen level in 1997

Treatment		Date (month/day)				
Irrigation point	N level	8/7	8/12	8/18	8/23	8/30
-100kPa	0g	3.50b <sup>1</sup>	2.23b	2.73ab	0.43a	0.00a
	10g	3.83b	1.40b	1.43bc	0.23ab	0.03a
	20g	1.33bc	0.37b	0.40c	0.07ab	0.00a
-50kPa	0g	0.63c	0.57b	0.63c	0.20ab	0.10a
	10g	0.73c	1.30b	0.70c	0.23ab	0.03a
	20g	10.17a	10.70a	4.27a	0.17ab	0.00a
-20kPa	0g	1.27bc	1.37b	1.63bc	0.13ab	0.00a
	10g	1.53bc	3.40b	0.40c	0.00b	0.03a
	20g	2.77bc	1.63b	2.63ab	0.10ab	0.00a

The same letters in a column are not significantly different at 5% by Duncan's Multiple Range Test.

1998년 응애류 발생은 점박이응애의 경우 자연적으로 발생한 긴털이리응애의 영향으로 9월 22일부터 관찰되기 시작하였는데 10월에도 예년보다 높은 기온으로 계속 증가하는 경향을 보였다. 그러나 토양수분함량과 질소수준에 따른 엽당 평균발생밀도의 차이는 유의성이 없었다. 단 10월 9일에는 질소수준이 증가함에 따라 밀도가 유의하게 감소하는 경향을 보였다(표 5-32).

표 5-32. Densities (no.mites per leaf) of *Tetranychus urticae* according to irrigation point and nitrogen level in 1998

Irrigation point	N level	Date (month/day)			
		9/22	9/28	10/3	10/9일
-100kPa	0g	0.37	1.77	0.67	2.03
	25g	0.00	0.70	0.07	0.00
	50g	0.43	0.47	0.50	0.13
-50kPa	0g	0.23	0.53	0.87	2.93
	25g	0.07	0.43	1.67	1.13
	50g	0.00	0.23	0.53	1.13
-20kPa	0g	0.10	1.73	2.77	1.57
	25g	0.03	0.70	0.70	2.20
	50g	0.03	0.03	0.13	0.17

표 5-33. Densities (no.mites per 5 leaves) of *Panonychus ulmi* according to irrigation point and nitrogen level in 1998

Treatment		Date (month/day)				
Irrigation point	N level	5/25	6/9	9/28	10/3	10/9
-100kPa	0	14.0	28.3	0.00	0.03	0.00
	25	26.7	41.7	0.00	0.00	0.00
	50	10.7	22.3	0.00	0.00	0.27
-50kPa	0	26.7	44.0	0.00	0.00	0.87
	25	18.3	33.0	1.10	0.53	1.27
	50	16.7	28.7	0.00	0.00	0.00
-20kPa	0	6.0	19.0	0.00	0.00	0.07
	25	5.7	8.3	0.00	0.00	0.00
	50	9.0	23.3	0.00	0.17	0.07

사과응애의 계절초기(5/25~6/9) 수분함량에 따른 발생량은 과습조건 보다는 적습 및 건조조건에서 많았다(표 5-33). 질소수준에 따라서는 적습조건에서 질소량이 감소할수록 다발생하는 경향을 보였고, 건조 및 과습조건에서는 질소수준별 뚜렷한 발생 차이가 없었다. 계절후기에는 9월 28일에 관찰되기 시작하여 증가하는 경향을 보였는데 적습조건 10g/주에 해당하는 질소수준에서 지속적으로 증가하였다. 10월 3일의 경우에 건조조건에서는 질소수준이 낮을수록, 과습조건에서는 질소수준이 높을수록

엽당평균밀도가 높아 토양수분함량과 질소수준간의 교호작용효과가 유의하게 나타났다. 10월 9일에는 토양수분함량의 효과가 유의하게 나타나 건조와 과습조건보다 적습조건에서 높은 밀도를 보였다(표 5-33).

1998년에는 천적류인 긴털이리응애(*Amblyseius womersley* (Schicha))가 자연적으로 발생하였다(표 5-34). 긴털이리응애는 7월부터 10월까지 꾸준히 발생하였으나 특별히 토양수분함량이나 질소수준에 따른 차이를 보이지는 않았다. 그러나 10월 3일의 경우에만 건조와 과습조건 보다 적습조건에서 엽당 평균밀도가 유의하게 많은 것으로 나타났다. 9월 28일 이후에는 토양수분함량과 질소수준간에 유의한 교호작용효과가 나타나 건조조건에서는 질소수준이 낮을수록, 과습조건에서는 질소수준이 높을수록 엽당 평균밀도가 높았다. 이것은 토양수분 및 질소수준에 따른 발생이기 보다는 응애류의 밀도에 기능반응을 보이기 때문으로 판단되었다(Kim과 Lee, 1993).

표 5-34. Densities (no.mites per leaf) of *Amblyseius womersley* according to irrigation point and nitrogen level in 1998

Irrigation point	N level	Date (month/day)					
		7/6	8/6	9/22	9/28	10/3	10/9
-100kPa	0g	0.03	0.10	0.00	0.03	0.10	0.00
	25g	0.10	0.07	0.03	0.00	0.00	0.00
	50g	0.20	0.07	0.03	0.00	0.03	0.10
-50kPa	0g	0.17	0.13	0.10	0.00	0.03	0.03
	25g	0.20	0.03	0.17	0.23	0.47	0.33
	50g	0.10	0.07	0.07	0.00	0.03	0.00
-20kPa	0g	0.13	0.10	0.03	0.00	0.00	0.03
	25g	0.07	0.10	0.07	0.03	0.03	0.03
	50g	0.33	0.17	0.07	0.27	0.17	0.30

1999년 점박이응애 발생에 영향을 미치는 토양수분함량은 5월과 6월에는 적습조건이 점박이응애의 증식에 유리하나, 8월과 9월에는 오히려 건조 조건에서 발생밀도가 높았다(표 5-35). 이것은 실제 포장조건에서 고온기가 아닌 5, 6월에는 적당한 토양수분조건에서 다발생하고 고온기인 8월에는 토양이 건조한 경우 다발생된다는 것을 의미한다. 우리나라의 경우 포장상태에서 점박이응애는 고온기인 7월부터 발생밀도가 증가하기 시작하여 보통 8월 상순 발생최성기를 보인다(Lee, 1990). 이것은 장마후 시

기와 일치하며 장마기간 중 과원의 배수가 불량하여 침수 또는 부분 침수상태가 지속되므로 지나친 과습은 나무의 수분 생리로 볼 때 건조한 조건과 유사한 것으로 보인다. 질소수준의 경우에는 전반적으로 주당 50g 질소시비 수준에서 접박이용애의 발생 밀도가 높았다.

표 5-35. Densities (no.mites per 10 leavea) of *Tetranychus urticae* according to irrigation point and nitrogen level in 1999

Treatment				Date (month/day)									
Irrigation point	N level (g/tree)			5/24	5/31	6/7	6/14	6/21	8/30	9/6	9/13	9/20	9/27
	97	98	99										
-100kPa	0	0	0	7.8	8.7	42.2	143.2	149.2	0.5	0.7	0.2	6.5	9.2
	10	25	50	0.8	5.5	31.2	81.8	151.5	1.8	1.8	6.7	30.0	36.0
	20	50	100	1.0	2.3	31.7	79.3	111.5	1.0	0.5	0.3	2.2	4.3
	Sub-mean			3.2	5.5	35.5	101.4	103.4	1.1	1.0	2.4	12.9	16.5
-50kPa	0	0	0	2.2	7.2	39.7	55.2	58.3	0.3	0	0.3	2.8	4.3
	10	25	50	47.8	35.2	70.3	97.8	78.8	0.7	0.7	0.7	0.3	6.8
	20	50	100	8.3	9.2	88.0	108.7	86.2	0.3	0.7	6.3	23.8	11.3
	Sub-mean			19.4	17.2	66.0	87.2	74.4	4.3	0.5	2.4	9.0	7.5
-20kPa	0	0	0	3.0	5.2	54.7	99.7	74.5	0.3	0.8	1.7	6.8	11.0
	10	25	50	7.8	11.7	86.3	114.2	117.2	0.3	0.3	2.2	10.8	10.2
	20	50	100	0.3	0.3	7.0	26.8	76.0	0.0	0.5	0.2	0.5	3.0
	Sub-mean			3.7	5.7	49.3	80.2	89.2	0.2	0.5	1.4	6.0	8.1

표 5-36. Densities (no. mites per 10 leaves) of *Panonychus ulmi* according to irrigation point and nitrogen level in 1999

Treatment				Date (month/day)				
Irrigation point	N level (g/tree)			5/24	5/31	6/7	6/14	6/21
	97	98	99					
-100kPa	0	0	0	0.0	0.0	0.2	0.0	0.5
	10	25	50	0.0	0.0	0.0	0.2	0.5
	20	50	100	0.0	0.3	0.0	0.2	0.3
	Sub-mean			0.00	0.10	0.07	0.13	0.43
-50kPa	0	0	0	0.0	0.0	0.0	0.5	0.8
	10	25	50	0.0	0.7	0.0	0.7	1.5
	20	50	100	0.2	1.2	0.2	1.2	0.8
	Sub-mean			0.07	0.63	0.07	0.80	1.03
-20kPa	0	0	0	0.0	0.7	0.5	0.8	1.2
	10	25	50	0.0	0.0	0.2	0.0	0.7
	20	50	100	0.0	0.0	0.0	0.0	0.5
	Sub-mean			0.00	0.23	0.23	0.27	0.80

1999년 사과응애 발생은 5월 31일에 토양수분함량의 효과가 유의하게 나타나 건조조건보다 적습조건에서 엽당평균밀도가 높았으며 건조조건과 적습조건에서는 질소수준이 높을수록 밀도가 높아 토양수분함량과 질소수준간의 교호작용 효과가 유의하게 나타났다. 6월 14일에도 마찬가지로 토양수분함량의 효과가 유의하게 나타나 건조조건보다 적습조건에서 높은 밀도를 보였으나 교호작용 효과는 뚜렷하지 않았다. 5월 31일과 6월 14일을 제외하고는 사과응애의 발생밀도에 미치는 토양수분함량과 질소수준 각각의 효과에 유의한 차이가 없었다. 6월 21일의 살비제 살포이후 사과응애의 발생은 미미하였다. 이상의 결과로부터 사과응애는 질소수준보다는 토양수분함량의 영향을 더 많이 받는 것으로 추측된다(표 5-36).

표 5-37. Densities (no.mites per leaf) of *Tetranychus urticae* according to irrigation point and nitrogen level in 2000

N level	Irrigation point									Mean
	-100kPa			-20kPa			-50kPa			
	0%	50%	100%	0%	50%	100%	0%	50%	100%	
25-May	0.62	0.35	0.50	0.30	0.67	0.20	0.45	0.62	1.50	0.58
01-Jun	1.45	1.33	0.98	1.52	2.78	0.80	1.13	0.85	1.53	1.37
09-Jun	6.97	12.20	8.13	7.82	14.72	4.32	7.07	7.92	13.65	9.20
16-Jun	13.03	11.73	8.63	6.53	13.22	11.75	5.40	12.30	16.62	11.02
23-Jun	0.13	0.00	0.03	0.12	0.00	0.00	0.12	0.03	0.03	0.05
30-Jun	0.35	0.00	0.00	0.05	0.20	0.02	0.05	0.10	0.07	0.09
07-Jul	0.80	0.00	0.33	0.08	0.10	0.15	0.03	0.23	0.12	0.20
14-Jul	3.15	0.08	1.60	0.77	1.80	0.47	1.12	1.62	0.28	1.21
21-Jul	2.67	0.90	2.95	1.02	2.43	0.57	1.77	3.12	1.37	1.87
28-Jul	9.67	3.02	9.25	7.77	12.53	5.95	4.07	12.82	6.78	7.98
11-Aug	0.08	0.02	0.03	0.00	0.08	0.03	0.00	0.02	0.02	0.03
18-Aug	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
25-Aug	0.05	0.00	0.00	0.02	0.03	0.02	0.00	0.07	0.02	0.02
01-Sep	0.08	0.00	0.02	0.03	0.02	0.08	0.03	0.02	0.05	0.04
08-Sep	0.30	0.02	0.00	0.13	0.07	0.10	0.22	0.00	0.20	0.12
18-Sep	0.42	0.22	0.08	0.35	0.40	0.28	0.15	0.47	0.63	0.33
25-Sep	0.42	0.60	0.27	0.57	0.45	1.48	0.47	1.00	0.90	0.68
02-Oct	0.72	0.73	0.52	1.27	0.95	3.57	1.98	1.23	1.45	1.38
09-Oct	1.42	2.60	1.70	4.22	2.65	7.22	3.23	3.10	3.60	3.30
16-Oct	2.60	3.32	3.22	6.18	3.30	8.00	4.07	4.25	6.92	4.65
23-Oct	2.90	5.35	3.15	6.45	3.08	9.47	4.58	6.20	6.32	5.28
30-Oct	3.87	5.70	4.42	6.43	3.85	8.70	5.33	5.78	7.43	5.72
Mean	2.35	2.19	2.08	2.35	2.88	2.87	1.88	2.81	3.16	

2000년 점박이응애 발생은 6월 16일과 7월 28일, 2회에 걸쳐 정점을 이루었으며 9월말부터 다시 증가추세를 보이다가 10월말에 완화되는 경향을 보였다. 6월 16일의 조사에서 6월 2일에 살포한 살비제 약효가 없어 6월 17일에 다시 한 번 살비제를 살포하여 점박이응애 밀도를 낮추었다. 7월 28일에 또 한 번의 정점이 있었으며 이에 대하여 7월 31일에 살비제를 살포하였다. 일부 시험구에서 앞에 많은 피해가 나타나 8월 7일에 재차 살비제를 처리하였다.

토양수분함량과 질소시비 수준별 처리 결과를 살펴보면 6월 16일의 경우, 적습조건 및 주당 과다 질소시비 수준에서 엽당 16.62개체로 가장 밀도가 높았으며 7월 28

일에는 적습조건 및 주당 적정 질소시비 수준과 과습조건 및 주당 적정 질소시비 수준에서 각각 엽당 12.83개체와 12.53개체로 다른 시험구보다 밀도가 높게 나타났다. 9월말부터의 증가추세는 과습조건 및 주당 과다 질소시비 수준에서 뚜렷하였다.

6월 16일에는 질소를 시비한 처리와 시비하지 않은 처리별로 점박이응애 암컷성충 밀도간에 유의한 차이가 있었다. 7월 28일에는 질소무비 처리와 주당 적량 처리에서 점박이응애 밀도에 유의한 차이를 나타냈다. 6월 9일부터 6월 23일까지, 7월 28일, 9월 8일의 조사 결과, 질소시비 수준이 점박이응애 밀도에 유의한 영향을 미치는 것으로 나타났다. 그러나 7월 21일과 9월 25일 이후에는 토양수분함량과 질소시비 수준별로 점박이응애 암컷성충밀도에 유의한 차이가 있었다. 이 결과들은 대부분 상호작용 효과를 보이므로 토양수분함량과 질소시비 수준의 효과가 독립적이지 않다는 것을 알 수 있다. 이상의 결과에서 6월에는 질소시비 수준이, 9월말 이후에는 토양수분함량과 질소시비 수준이 점박이응애 암컷성충밀도에 유의한 영향을 미친다고 판단되었다.

사과응애와 긴털이리응애의 발생은 일부 시험구에 국한되거나 발생의 빈도 및 밀도가 극히 적었다.

## 바. 기타해충 및 천적류

### 1) 기타 해충

수분처리만 실시된 1996년에 처리별 잎말이나방류 발생은 과습한 경우 다발생하는 경향을 보였고 적습조건에서 소발생하는 경향을 보였다. 그러나 발생밀도가 매우 낮고 오차가 컸기 때문에 처리간 유의성을 분석하기에는 한계가 있었다.

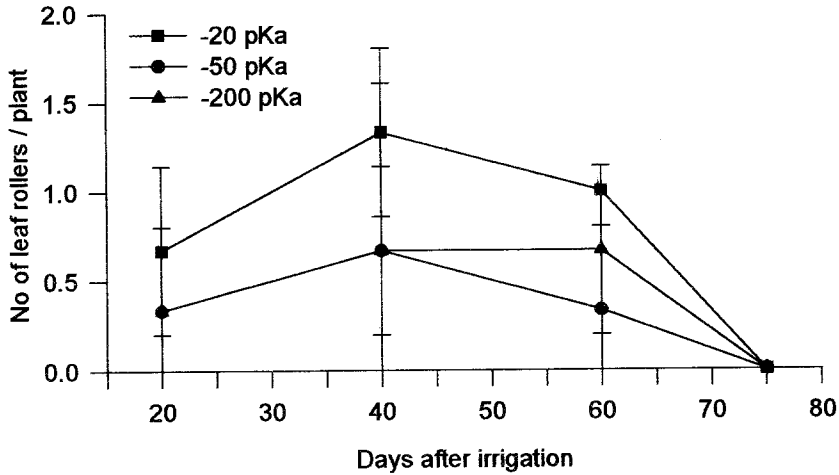


그림 5-37. Change of densities of leaf rollers according to irrigation point in 1996.

1997년부터 2000년까지 기타해충의 발생은 1998년과 2000년에는 기타 해충의 발생이 거의 없었으며 1997년과 1999년에 일부 발생하였다(표 5-38). 1997년 사과칼무늬나방(Notuidae), 자나방류(Geometridae), 잎말이나방류 등은 적습구에서 다발생되었으며, 질소시비량이 많을수록 발생이 높은 경향을 보였으나 통계적으로는 차이가 없었다.

1999년 사과혹진딧물, 잎말이나방류 등은 처리간 일정한 경향이 없었고 복숭아순나방은 적습 > 과습 > 건조 순으로 다발생하는 경향이였다. 하지만 발생량이 적었기 때문에 통계적 유의성은 분석할 수 없었다. 이들 해충들은 일반 과수원에서 관행적으로 약제를 살포하는 경우는 거의 발생되지 않는 해충들로서 수분 및 질소 수준에 대한 발생 경향이 보고된 바 없다.



표 5-38. Densities of insect pests according to irrigation points and nitrogen level

Irrigation point	Treatment				Years			
	N level				1997	1999	1999	1999
	97	98	99	2000	(Lepidoptera) <sup>1</sup>	(ALA) <sup>2</sup>	(LR) <sup>2</sup>	(OFM) <sup>4</sup>
-100kPa	0	0	0	0	0.3	0.0	1.0	0.7
	10	25	50	75	0.7	0.0	1.3	0.7
	20	50	100	150	0.0	0.0	1.3	1.3
	Sub-mean				0.3	0.0	1.2	0.9
-50kPa	0	0	0	0	1.7	0.3	1.0	1.0
	10	25	50	75	4.3	0.0	1.3	1.7
	20	50	100	150	4.6	0.0	1.0	2.3
	Sub-mean				3.5	0.1	1.1	1.7
-20kPa	0	0	0	0	0.3	0.0	1.0	1.7
	10	25	50	75	1.3	0.0	1.3	0.7
	20	50	100	150	0.0	0.0	1.3	1.0
	Sub-mean				0.5	0.0	1.2	1.1

<sup>1</sup> No. of Leaf rollers, Geometridae, and Noctuidae per tree on 8 August.

<sup>2</sup> % damaged leaves by apple leaf-curling aphid on 2 June.

<sup>3</sup> No. of leaf rollers per tree on 11 August.

<sup>4</sup> No. of shoots infested by oriental fruit moth on 6 September.

## 2) 천적류

무당벌레류(Coccinellidae) 발생은 표 5-39와 같다. 수분 및 처리조건에 따라 발생이 차이가 나기보다는 주요 먹이 곤충이 진딧물이므로 진딧물 발생과 관계가 있었다. 또는 진딧물 발생이 많더라도 먹이의 밀도에 반응을 보이기 위해서는 먹이를 탐색하는데 필요한 시간적 지연이 필수적이기 때문에 반드시 진딧물 밀도가 높을 때 무당벌레류의 밀도가 높지는 않았다. 다만 앞의 결과에서 진딧물의 발생은 과습한 경우 다 발생하는 경향이었고 적습조건에서는 질소 시비가 증가할 때 다발생하는 경향을 보였고 수분 및 질소 최적 조건에서는 이 보다 소발생하는 경향을 보였으므로 이런 경우 천적이 발생되어 진딧물 밀도를 줄여줌으로써 피해로까지는 진전되지 않는다는 점을 생각할 수 있겠다.

풀잠자리류도 무당벌레와 비슷하게 토양 수분 및 질소 수준에 따른 반응이기 보다는 기주 해충인 진딧물 또는 응애류의 밀도에 반응하는 것으로 해석된다(표 5-40). 일

부 거미류 천적 및 후파리류 등 다른 천적류도 발생되었으나 사과해충군집과 연관된 것이며 처리에 따른 반응으로 해석하기에는 무리가 있다. 다만 최적 관비를 통하여 가장 합리적인 토양 수분과 질소수준을 공급했을 때 이런 천적류가 발생되어 해충 밀도를 조절할 수 있다는 점이다.

표 5-39. Densities of natural enemy, Coccinellidae, during full season according to irrigation points and nitrogen level

Irrigation point	Treatment				Years			
	N level				1997	1998	1999	2000
	97	98	99	2000				
-100kPa	0	0	0	0	0	0	3	3
	10	25	50	75	0	0	5	5
	20	50	100	150	34	3	2	2
	Sub-mean				11.3	1.0	3.3	3.3
-50kPa	0	0	0	0	17	5	6	2
	10	25	50	75	0	0	6	1
	20	50	100	150	0	3	14	4
	Sub-mean				5.7	2.7	8.7	2.3
-20kPa	0	0	0	0	0	4	5	4
	10	25	50	75	12	12	5	1
	20	50	100	150	13	0	7	7
	Sub-mean				8.3	5.3	5.7	4.0

표 5-40. Densities of natural enemy, *Chrysopa* sp., during full season according to irrigation points and nitrogen level

Irrigation point	Treatment				Years			
	N level				1997	1998	1999	2000
97	98	99	2000					
-100kPa	0	0	0	0	2	0	0	1
	10	25	50	75	10	1	0	0
	20	50	100	150	40	0	0	0
	Sub-mean				17.3	0.3	0.0	0.3
-50kPa	0	0	0	0	9	0	1	1
	10	25	50	75	48	1	1	0
	20	50	100	150	1	0	3	0
	Sub-mean				19.3	0.3	1.7	0.3
-20kPa	0	0	0	0	1	3	0	0
	10	25	50	75	78	2	1	0
	20	50	100	150	13	0	0	4
	Sub-mean				30.7	1.7	0.3	1.3

In 1997, eggs were included in counts.

수분 및 질소수준에 따른 사과 해충 및 천적발생은 지금까지 정리한 바와 같이 해충류들 중 조팝나무진딧물, 은무늬굴나방, 사과굴나방, 응애류 등은 처리간 차이가 있었으며 기타 해충류인 잎말이나방류, 복숭아순나방 등은 차이가 없었다. 천적류는 해충발생밀도에 따라 발생이 연관되므로 수분 및 질소 처리에 따른 효과를 분석하기에는 한계가 있었다.

조팝나무진딧물은 수분×질소 상호작용 효과에 따라 요인별 단순효과를 분석한 결과 질소 수분이 동일한 경우 1997년부터 2000년까지 총 21 건의 분석 중 과습한 경우 다발생하는 경우가 11건(52.4%)이었으며 적습에서 다발생한 경우는 2건, 건조에서 다발생한 경우는 4건, 통계적 유의성이 없는 경우는 4건이었다. 따라서 조팝나무진딧물은 토양 수분이 과습한 경우 다발생되는 것으로 판단된다. 수분 조건이 동일한 경우 질소 수준별 단순효과는 질소가 많을 때 다발생하는 경우가 6건, 질소시비가 없을 때 다발생하는 경우가 5건, 질소 50%에서 다발생하는 경우가 7건으로 질소수준별 뚜렷한 차이가 없었다. 하지만 적습조건에서는 질소시비가 증가할수록 다발생하는 경향을 보였다.

은무늬굴나방은 질소 수준이 동일한 경우 총 24건의 단순효과를 분석한 결과 과습한 경우 6건, 적습한 경우 4건, 건조한 경우 4건에서 다발생하였다. 총 10건에서는 통계적 유의성이 없었다. 비록 빈도수는 적지만 토양이 과습한 경우 다발생하는 경향을 보였다. 수분수준이 동일한 경우 질소 수준의 단순효과는 질소시비가 많을 때 다발생하는 경우가 6건, 질소시비가 없을 때 다발생하는 경우가 3건이었고 통계적 유의성이 없는 경우가 12건 이었다. 전체적으로 질소시비가 많을 때 다발생하는 경향을 보였다.

사과굴나방은 질소 수준이 동일한 경우 수분 수준별 단순효과는 총 21 건의 분석에서 6건의 경우 토양이 건조할 때 다발생하였고, 적습 또는 과습에서는 다발생되는 경우가 없었다. 비록 통계적 유의성이 없는 빈도수가 많았으나 토양 수분의 영향을 많이 받아 건조한 경우 다발생하였다. 토양 수분이 동일한 경우 질소 수준의 단순효과는 총 21건 중 17건이 통계적 유의성이 없었고 질소시비가 없는 경우 다발생하는 경우가 4건, 질소가 많은 경우는 1건 이었다. 즉 질소에 따른 효과는 적었으나 질소가 적을 때 다발생하는 경향을 보였다.

응애류 중 점박이응애는 상호작용 효과가 강하게 나타나서 분석에 한계가 있었으나 토양 수분이 건조한 경우 다발생하였으며 질소 시비에 따라서는 질소량이 증가할 수록 다발생하였다. 특히 적습조건에서는 질소시비가 증가할 때 다발생하였다. 사과응애는 뚜렷한 경향을 보이지 않았다.

## 제 4 절 활용에 대한 건의

관수점 조절과 질소 시비량에 따른 토양 및 생물환경을 평가한 결과는 다음과 같으며 이 결과는 과수원 관리에 자료를 제공하리라 본다.

1. 관수점 조절 및 질소시비량에 따른 토양중 pH 변화는 관수점이 높을수록 질소 시비량이 많을수록 낮은 경향을 보였고 유기물과 유효인산함량은 처리간에 유의성이 없었다.
2. 치환성 칼슘과 마그네슘은 질소 시비량이 많을수록 관수점이 높을수록 낮아지는 경향을 보였고 칼륨은 질소 시비량의 영향보다 -100kPa에서 가장 낮았다.
3. 관수점 조절 및 질소시비량에 따른 토심별 pH 변화는 질소 시비량이 많고 관수점이 -20kPa의 지표하 10cm에서 낮은 경향을 보였고 유기물과 유효인산 함량은 처리간에 일정한 경향이 없었다.
4. 토심별 치환성 칼슘, 마그네슘 및 칼륨함량은 질소 시비량이 많고 관수점이 높을수록 표토에서 함량이 낮았고 심토로 갈수록 높아지는 경향을 보이고 있다.
5. 토양중 질산태 질소 함량은 질소 100% 시비구에서 관수점이 높은 -20kPa에서 가장 낮았으나 암모니아태 질소는 높았고 -100kPa에서 질소 시비량에 관계없이 암모니아태질소가 가장 낮았다.
6. 관수점 조절에 의한 엽중 무기성분함량은 유의성이 없으나 관수점이 낮을 때 칼슘과 마그네슘이 낮은 경향을 보였고 질소 시비량을 줄였을 때 질소, 칼리 및 망감함량은 낮아졌으나 인산과 마그네슘은 증가하였고 칼슘과 붕소함량은 감소하였다.
7. 신초생장량과 간주비대량은 질소 시비량에 따른 차이는 없으나 관수점 -20kPa이 -50kPa과 -100kPa보다 많았으며 전정량은 -20kPa과 -50kPa의 관수점 조절에서 질소 시비량 50% 시비구가 많았으며 -100kPa에서는 100% 시비구가 많았다.

8. 관수점 조절에 의한 수량은 작과 1년차(1999년)는 -20kPa에서 많았으나 2년차(2000년)는 -50kPa에서 많았다. 질소 시비량에 의한 수량 차이는 1년차에서는 무비구에서 가장 적었으며 2년차는 질소 50% 시비구에서 적었다.
9. 조팝나무진딧물 발생은 질소 시비효과 보다는 토양 수분효과에 따라 영향을 더 크게 받았으며 토양이 과습한 경우 다발생하였다. 질소 수분에 따른 효과는 약했으나 질수준 50% > 100% > 0% 순으로 다발생하였다.
10. 은무늬굴나방 발생은 수분 및 질소에 영향을 받았으며 토양이 과습한 경우 다발생하는 경향이었고 질소 시비가 증가할수록 다발생하였다.
11. 사과굴나방 발생은 토양 수분 및 질소의 효과가 약하게 나타났으나 토양이 건조한 경우 다발생하였고 질소 수준에서는 질소 시비가 작을수록 다발생하였다.
12. 점박이응애는 질소×수분 상호작용 효과가 강하게 나타났으며 토양 수분이 건조한 경우 다발생하였으며 질소 시비에 따라서는 질소량이 증가할수록 다발생하였다. 사과응애는 뚜렷한 경향을 보이지 않았다.
13. 수분 및 질소수준에 따른 기타 사과 해충 및 천적발생은 해충류인 잎말이나방류, 복숭아순나방 등은 차이가 없었다. 천적류는 해충발생밀도에 따라 발생이 연관되므로 수분 및 질소 처리에 따른 효과를 분석하기에는 한계가 있었다.

## 참고문헌

- 김재현. 1998. 100% 실용 아날로그 회로설계모음집, 도서출판 세운.
- 남현수의 3인. 1993. "수분", 공업진흥청(한국표준과학연구원).
- 노희명, 권재필, 김승현, 류순호. 2000. 작물흡수를 고려한 3차원 토양수분분포모델개발을 통한 최적 관개연구. 한국농화학회지 제43권 제2호 pp. 116-123.
- 노희명, 김승현. 1997. 점적관개에서 토양수분이동현상에 대한 2차원 모델개발연구. 한국토양비료학회지 Vol. 30(4) : 314-327.
- 농림부. 1997. '97과수실태조사. 동양문화인쇄, 서울
- 농림부. 2000. 2000농림통계연보.pp. 320.
- 농진청. 1988. 원색도감 과수해충생태 및 방제. pp. 220. 농업기술연구소. 삼미인쇄사, 서울
- 류순호, 임선욱. 1989. "토양비료", 한국방송통신대학교 출판부.
- 박선호편저. 1992. 최신 전자회로 아이디어 백과 1, 2, 영진출판사.
- 배정덕, 김응목. 1997. 기본 전자회로 모음집, 도서출판 세화.
- 岩本數人, 1993. 농업기술대계(5). 樹園地 p.3. 農山漁村文化協會, 東京.
- 차영배. 1998. 8051 기초부터 응용까지, 동일출판사.
- 채영암, 구자옥, 서학수, 이영만. 1987. 기초생물통계학. pp. 418. 향문사, 서울
- AD834, INA105A Data Book, Analog Device Home Page. (www.analog.com)
- ADC0804, LM358N, LM336 Data Book, National Semiconductor Home Page.
- AOAC. 1995. Official Methods of Analysis (II). 16th edition. Arlington.
- Barker J. M. and R. R. Allmaras. 1990. System for automating and multiplexing soil moisture measurement by time domain reflectometry. Soil Sci. Soc. Am. J., 54:1-6.
- Bell J. P., J. J. Dean, and M. G. Hodnett. 1987. Soil moisture measurement by an improved capacitance technique : Part II. Field techniques, evaluation and calibration", J. Hydrol., 93:79-90.
- Bell, D. A. 1994. Electronic Instrumentation and Measurements, Prentice Hall.
- BUF634 Data Book, Burr Brown Home Page. (www.burrbrown.com)
- Campbell J. E. 1990. Dielectric properties and influence of conductivity in soils at One to fifty Megahertz", Soil Sci. Soc. Am. J., 54:332-341.

- Campbell, G.S. 1974. A simple method for determining unsaturated conductivity from moisture retention data. *Soil Sci.* 117:311-314.
- Carr, J. J. 1996. *Elements of Instrumentation and Measurement*, Prentice Hall.
- Chalmers, D.J., P.K. Andrews, K.M. Harris, E.A. Cameron and H.W. Caspari. 1992. Performance of drainage lysimeters for evaluation of water use by Asian pears. *HortSci.* 27: 263-265.
- Clark, G.A., E.E. Albrechts, C.D. Stanley, A.G. Smajstrla and F.S. Zazueta. 1996. Water requirements and crop coefficients of drip-irrigated strawberry plants. *Transactions of the ASAE.* 39: 905-913.
- Cripps, J.E.L. 1971. The influence of soil moisture on apple root growth and root: shoot ratios. *J. Hort. Sci.* 46:121-130.
- Dalton F. W., W. W. Herkelrath, D. S. Rawlins, and J. D. Rhoades. 1984. Time Domain Reflectometry : Simultaneous measurement of soil water content and electrical conductivity with a single probe", *Science* 224:989-990.
- Dean T. J., J. P. Bell and A. J. B. Baty. 1987. Soil moisture measurement by an improved capacitance technique, part I. Sensor design and performance. *Journal of hydrology*, 93:67-78.
- Debye P. 1928. *Polar molecules*. Dover Publications.
- Diniel Hillel 著, 김재정 譯. 1989. 토양물리학. 대한교과서 주식회사.
- Evelt S. R., and J. L. Steiner. 1995. Precision of Neutron scattering and capacitance type soil water content gauges from field calibration. *Soil. Sic Soc. Am. J.*, 59:961-968.
- Faust, M. 1989. *Physiology of temperature zone fruit trees*. p. 80. Wiley. New York.
- Heimovaara T. J., A. G. Focke, W. Prouten and J. M. Verstraten. 1995. Assessing Temporal Variations in Soil water Composition with Time Domain Reflectometry", *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 59:689-698.
- Herkelrath N. N., S. P. Hamburg, and F. Murphy. 1991. Automatic real-time monitoring of soil moisture in a remote field area with time domain reflectometry", *Water Resour. Res.*, 27:857-864.
- John Markus. 1993. *Modern Electronic Circuits Reference Manual*, 도서출판 기다리.
- Judkins, W.P. 1949. The relationship of color, nitrogen and rainfall to the growth



- of young peach trees. Proc. Amer. Soc. Hort. Sci. 53:29-36.
- Kenworthy, A.L. and G.M. Gilligan. 1948. Interrelationship between the nutrient content of soil, leaves, and trunk circumference of peach trees. Proc. Amer. Soc.Hort. Sci. 51:209-215.
- Kim H. Tan. 1993. Principles of Soil Chemistry, 2nd Edition. Marcel Dekker, INC.
- Kim, D. S. and J.H. Lee. 1993. Functional response of *Amblyseius longispinosus* (Acari: Phytoseiidae) to *Tetranychus urticae* (Acari: Tetranychidae): Effects of prey density, distribution, and arena size. Korean J. Appl. Entomol. 32: 61-67.
- Klute A. 1986. Method of Soil Analysis Part 1. Physical and Mineralogical Methods, Second Edition. ASA, Inc.&SSSA, Inc.
- Klute, A.. 1986. Water Retention:Laboratory Methods In methods of soil analysis, part 1. A. Klute(ed.). Monograph No. 9, ASA, Madison, WI.
- Koorevaar P., G. Menelik and C. Dirkelsen. 1983. Elements of soil physics. Elsevier.
- Labanauskas, C.K., T.W. Embleton, and W.W. Jones. 1958. Influence of soil applications of nitrogen, phosphate, potash, dolomite, and manure on the micronutrient content of avocado leaves. Proc. Amer. Soc. Hort. Sci. 71:285-291
- Labanauskas, C.K., T.W. Embleton, W.W. Jones, and M.J. Garber. 1959. Effect of soil applications of nitrogen, phosphate, potash, dolomite, and manure on the micronutrient concentration in Valencia orange leaves. Proc. Amer. Soc. Hort. Sci.73:257-266.
- Ledien J., P. De Ridder, P. De Clercq and S. Dantrebanade. 1986. A method of measuring soil moisture by time-domain reflectometry. J. Hydrology 88:319-328.
- Lee, S. W. 1993. Studies on the pest status and integrated mite management in apple orchards. Ph.D. Dissertation. Seoul National University, Suwon, Korea. pp.87.
- Marion, J.M., D. Or, D.E. Rolston, M.L. Kavvas, and J.W. Biggar. 1994. Evaluation of methods for determining soil water retentivity and unsaturated hydraulic conductivity. Soil Sci. 158:1-13.
- Marshall T. J. and J. W. Holmes. 1988. Soil physics. second edition, Cambridge University Press.

- Muallem, Y. 1976. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. *Water Resour. res.* vol. 12:513-522.
- Oh, W.K. and K.C. Shin. 1989. Soil management of orchard and fertilizer. p. 322. second ed. Samjinkihog, Seoul.
- Pande A., 1975. Handbook of Moisture Determination and Control. Vol. 2:345-392 Marcel Dekker, INC.
- Passioura, J.B. 1971. Hydrodynamic dispersion in aggregated media. I. Theory. *Soil Sci.* 111:339-344
- Paul Horowitz, Winfield Hill. 1989. The Art of Electronics, Cambridge.
- Perterson, A.B. and R.G. Stevens. 1994. Tree fruit nutrition. p. 41-42. Yakima, Washington.
- RETC program. 1999. U.S. Salinity Lab..
- Ro, H. M. 1999. Influence of grass cover on water use and shoot growth of young 'Fuji'/M.26 apple trees at three soil water regimes in double pot lysimeter. *J. Kor. Soc. Soil Sci. Fert.* Vol. 32(4) : 357-364.
- Ryu, K.S. 1994. Effect of soil water on the change in soil pH and nutrients movement under rain-fed condition in bare soil. *J. Kor. Soc. Soil Sci. Fert.* 27:263-268.
- Ryu, K.S., S.H. Yoo, and K.C. Song. 1994a. Movement of applied nutrients through soils by irrigation. III. Effect of soil water on the movement of nitrogen J. *Kor.Soc. Soil Sci. Fert.* 27:232-237.
- Ryu, K.S., S.H. Yoo, and K.C. Song. 1994b. Effect of soil water on the movement of Ca, Mg and K in the soil. *J. Kor. Soc. Soil Sci. Fert.* 27:255-262.
- Shear, C.B. and M. Faust. 1980. Nutritional ranges in deciduous tree fruits and nuts. *Hort. Rev.* 2:142-163.
- Simon Ramo, John R. Whinnery, and Theodore Van Duzer. 1994. Fields and Waves in Communication electronics. 3rd Edition. JOHN WILEY & SONS, INC.
- Slight H. A., 1989. The Measurement of Moisture Content Measurement and Control. Vol. 22:45.
- Smith, P.F., W. Reuther, A.W. Specht, and G. Hrniciar. 1954. Effect of differential nitrogen, potassium, and magnesium supply to young Valencia orange trees in

- sand culture on mineral composition especially of leaves and fibrous roots. *Plant Physiol.* 29:349-355.
- Tietze, U., and Ch. Schenk. 1991. *Electronic Circuits : Design and Applications*, Toppan.
- TL026C Data Book, Texas Instruments Home Page. ([www.ti.com](http://www.ti.com))
- Tomer, M. D. and J. L. Anderson. 1995. Field evaluation of a soil water capacitance probe in a fine sand", *Soil Science*. 159:90-98.
- Topp G. C., J. L. Davis and A. P. Annan. 1980. Electronmagnetic determination of soil water content : Measurements in coaxial transmissiln lines. *Water Resour. Res.*, 16:574-582.
- Topp G. C., M. Yanaka W. D. Zechuk, and S. Zegelin. 1988. Determination of electurcal conductivity using time-domain reflectometry : soil and water experiments in coaxial lines. *Water Resour. Res.*, 24:945-952.
- van Genuchten, M.Th.. 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 44:892-898.
- Vanclooster M., D. Mallants, J. Vanderborght, J. Diels, J. Van Orshoven, and J. Teyen. 1995. Monitoring solute transport in a multi-layered Sanady Lysimeterusing time domain reflectometry. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 59:337-344.
- Walley W. R. and J. V. Stafford. 1992. Real-time sensing of soil water content from mobile machinery : Options for sensor design. *Computers and Electronics in Agriculture*. 7:269-284.
- Ward A. L., R. G. Kachanoski, and D. E. Elrcik. 1994. Laboratory mearturement of solute transport using time domain reflectometry. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 58:1031-1039.
- Weeks W.D., F.W. Southwick, M. Drake, and J.E. Steckel. 1952. The effect of rates and sources of nitrogen, phosphorus, and potassium on the mineral composition of McIntosh foliage and fruit color. *Proc. Amer. Soc. Hort. Sci.* 60:11-21.
- Whalley W. R., T. J. Dean and P. Izzard. 1992. Evaluation of the capacitance technique as a method for dynamically measuring soil water content. *J. Agric. Engng Res.*, 52:147-155

- Wobschall D. 1978. A frequency shift dielectric soil moisture sensor. *IEEE Trans. Geosci. Electron*, Ge-16(2):112-118.
- Wraith, J.M. and C.K. Wright. 1998. Soil water and root growth. *HortScience* 36:951-959.
- Yiem, M.S., K.C. Shin, and J.M. Park. 1999. Soil management of orchard and fertilizer. p. 218. third ed. Semyongmoonhwasa, Suwon.

## 부록 1. 토양수분이동 및 분포 모형 Source Code(원통좌표계)

[Source program of a numerical model for describing three-dimensional soil water distribution for drip irrigation management under cropped conditions(drip2D.for)]

===== Cylindrical Coordinate =====

c This is the main program to solve Richards' equation modeling moisture  
 c migration in the root zone exposed to the root water uptake and  
 c evapotranspiration. Crank-Nicolson scheme and predictor-corrector method and  
 c rectangular coordinate system employed. all units are used as c.g.s.

c

```
dimension theta(60,60,60),thetai(60,60,60),
1      theini(10),psii(60,60,60),
1      x(60),y(60),z(60),pk(60,60,60),qs(60,60),dlz(60),
2      flwrt(8),nxfl(8),nyfl(8),nzfl(8),frrt(60,60,60),
3      vx(60,60,60),vy(60,60,60),vz(60,60,60),
4      ddo(60,60,60),ffo(60,60,60),eeo(60,60,60),
5      bbo(60,60,60),hho(60,60,60),vuo(60,60,60),
6      vlo(60,60,60),rhso(60,60,60),opsi(60,60,60)
```

c

```
common ddd(60,60,60),fff(60,60,60),eee(60,60,60),
1      bbb(60,60,60),hhh(60,60,60),vuu(60,60,60),
2      vll(60,60,60),rhs(60,60,60),psi(60,60,60)
```

c

```
open(1,file='aggie21.dat',status='old')
open(2,file='aggie22.dat',status='old')
open(3,file='aggie23.dat',status='old')
open(4,file='aggie21.out',recl=256,status='new')
open(5,file='msblnc.out',status='new')
open(6,file='prfl21.out',recl=256,status='new')
```

c

```
read(1,*)alpha,pn,pks,thetas,thetar,zt,bzratio,tt,tm,
1  flgetp,temp,f,etpmx,ftime,delx,dely,delz,nxmx,nymx,nzmx,delt
```

c

```
ncx=(nxmx+1)/2
ncy=(nymx+1)/2
```

c

```
write(*,*)'number of dripping points?'
read(*,*)nodp
```

c

```
do 100 n=1,nodp
  read(2,*)nxfl(n),nyfl(n),nzfl(n),flwrt(n)
```

```

100  continue
c
do 150 k=1,nzmx
  read(3,*)theini(k)
150  continue
c
do 160 k=1,nzmx
do 160 j=1,nymx
do 160 i=1,nxmx
  thetai(i,j,k)=theini(k)
c
  psii(i,j,k)=(((thetai(i,j,k)-thetar)/(thetas-thetar))
1      *(pn/(1.-pn))-1.)*(1./pn)/alpha
160  continue
c
do 200 i=1,nxmx
  x(i)=delx*(i)-delx*0.5
200  continue
c
do 250 j=1,nymx
  y(j)=dely*(j)-dely*0.5
250  continue
c
dlz(1)=0.02*delz
delz1=dlz(1)
z(1)=0.5*dlz(1)
do 300 k=2,nzmx
  z(k)=dlz(1)+delz*(k-1)-delz*0.5
300  dlz(k)=delz
c
write(*,*)'date and time? give it as 4,19,15(mon/date/oclock)'  

read(*,*)mon,date,oclock
c
c calculate the number of days between March 1st and the date considered
c
if(mon.eq.3)dd=date
if(mon.eq.4)dd=31.+date
if(mon.eq.5)dd=61.+date
if(mon.eq.6)dd=92.+date
if(mon.eq.7)dd=122.+date
if(mon.eq.8)dd=153.+date
if(mon.eq.9)dd=184.+date

```

```

if(mon.eq.10)dd=214.+date
c
c calculate tdiff which is the difference between July 25th and considered date.
c
if(dd.le.147.)then
  tdiff=147.
else
  tdiff=98.
endif
c
c calculate daily evapotranspiration rate(etp, mm/day) from
c maximum evapotranspiration(etpmx, mm) and equation (14).
c
  etp=etpmx*exp(-1.217*(dd-147.)*(dd-147.)/tdiff/tdiff)
c
c estimate maximum hourly transpiration rate(mm/hr), thmx, during a day,
c maybe occurs at noon. employing equation (24).
c "caution units, etp(mm per day), thmx and th(mm/hr) automatically adjusted".
c
  thmx=(1.-0.517)*etp/9.
c
c calculate the transpiration distribution along 24 hours,
c using equation (23).
c
  th=thmx*(0.5-0.5*cos(3.1416*oclock/12.))*2.
c
c calculate the root depth and width using equation (20) and bzratio.
c
  zm=zt*(0.5+0.5*sin(3.03*(tm/tt)-1.47))
  bm=zm*bzratio
c
c calculate the maximum water uptake rate, smx, in case of no water deficit
c in the soil using equation (22). this equation was obtained by setting
c (etp*area)=(smx*volume of hemi-ellipsoid).
c unlimited water content assumed in the root zone.
c unit of smx is "1/sec", which is identical with the Richards equation.
c
  smx=1.5*th/zm/3600./10.
  if(flgetp.eq.0.)smx=0.
c
c so far, preliminary calculations of all the parameters have been done, and
c we are at the beginning of solving partial differential equation(9).

```

```

c C-N scheme and iteration method for the solution of matrix are used.
c
c give initial theta values and calculate initial hydraulic conductivities.
c
    time=0.
c
    do 400 k=1,nzmx
    do 400 j=1,nymx
    do 400 i=1,nxmx
        theta(i,j,k)=thetai(i,j,k)
        psi(i,j,k)=psii(i,j,k)
c
        pk(i,j,k)=pks*(
1           1.-((alpha*psii(i,j,k))**(pn-1.))*
2           (1.+(alpha*psii(i,j,k)**pn)**(-1.+1./pn)
3           )**2./
4           1.+(alpha*psii(i,j,k)**pn)**(0.5-0.5/pn)
c
        if(pk(i,j,k).lt.6.37e-20)pk(i,j,k)=6.37e-20
c
400    continue
c
    do 450 j=1,nymx
    do 450 i=1,nxmx
        pk(i,j,1)=2.0e-6
450    continue
c
c give and calculate parameters for mass balance on water.
c
    flowin=0.
c
    wtihitl=0.
    do 500 k=2,nzmx
    do 500 j=1,nymx
    do 500 i=1,nxmx
        wtinitl=wtinitl
1         +theta(i,j,k)*delx*dely*dlz(k)
500    continue
c
    trnslss=0.
    evaplss=0.
    outzone=0.

```



```

c
c give legend at output files(will be used in Tecplot)
c
write(4,*)'Title="Aggie21.out"'
write(4,*)'Variables="x","y","z","psi","theta","vx","vy","vz"'
write(4,*)'Zone I=',nxmx,',J=',nymx,',K=',nzmX,',F=point'
c
c advance time steps.
c
700 time=time+delt
wtaccum=0.
c
c give upper boundary conditions (1st type), as cm unit, using equation (16).
c in this study, psi values themselves are positive.
c
do 800 j=1,nymx
do 800 i=1,nxmx
800 psi(i,j,1)=-100.*8.3143*(273.+temp)*alog(f)/0.018/9.8
c
c modify upper boundary conditions to consider the three cases described in
c equations (17) thru (19). qs is upward flowrate. (-)*(flow rate from 1st
c to 2nd layer).
c
do 900 j=1,nymx
do 900 i=1,nxmx
qs(i,j)=-((pk(i,j,1)*dlz(1)+pk(i,j,2)*delz)/(dlz(1)+delz)
1 *(psi(i,j,2)-psi(i,j,1))/(0.5*delz+0.5*delz1)+1.)
900 continue
c
do 1000 j=1,nymx
do 1000 i=1,nxmx
if(qs(i,j).lt.0.)then
psi(i,j,1)=psi(i,j,2)+0.5*(delz+delz1)
qs(i,j)=0.
elseif(qs(i,j).ge.(0.517*etp/864000.))then
psi(i,j,1)=psi(i,j,2)
1 +(0.5*dlz(1)+0.5*dlz(2))
1 +(0.5*dlz(1)+0.5*dlz(2))*0.517*etp/864000.
2 *(dlz(1)+dlz(2))/(dlz(1)*pk(i,j,1)+dlz(2)*pk(i,j,2))
qs(i,j)=0.517*etp/864000.
elseif((qs(i,j).ge.0.)and.(qs(i,j).le.0.517*etp/864000))then
psi(i,j,1)=psi(i,j,1)

```

```

        qs(i,j)=qs(i,j)
    endif
c
    if(flgetp.eq.1)then
        psi(i,j,1)=psi(i,j,2)+0.5*(delz+delz1)
        qs(i,j)=0.
    endif
c
1000  continue
c
c  consider flow in at the dripping points.
c
    do 1100 k=2,nzmx
    do 1100 j=1,nymx
    do 1100 i=1,nxmx
c
        if(i.eq.nxfl(1).and.j.eq.nyfl(1).and.k.eq.nzfl(1))frt(i,j,k)=
1          flwrt(1)/delx/dely/delz
c
        if(i.eq.nxfl(2).and.j.eq.nyfl(2).and.k.eq.nzfl(2))frt(i,j,k)=
1          flwrt(2)/delx/dely/delz
c
        if(i.eq.nxfl(3).and.j.eq.nyfl(3).and.k.eq.nzfl(3))frt(i,j,k)=
1          flwrt(3)/delx/dely/delz
c
        if(i.eq.nxfl(4).and.j.eq.nyfl(4).and.k.eq.nzfl(4))frt(i,j,k)=
1          flwrt(4)/delx/dely/delz
c
        if(i.eq.nxfl(5).and.j.eq.nyfl(5).and.k.eq.nzfl(5))frt(i,j,k)=
1          flwrt(5)/delx/dely/delz
c
        if(i.eq.nxfl(6).and.j.eq.nyfl(6).and.k.eq.nzfl(6))frt(i,j,k)=
1          flwrt(6)/delx/dely/delz
c
        if(i.eq.nxfl(7).and.j.eq.nyfl(7).and.k.eq.nzfl(7))frt(i,j,k)=
1          flwrt(7)/delx/dely/delz
c
        if(i.eq.nxfl(8).and.j.eq.nyfl(8).and.k.eq.nzfl(8))frt(i,j,k)=
1          flwrt(8)/delx/dely/delz
c
1100  continue
c

```

```

ccc      do 1110 j=1,nymx
ccc      do 1110 i=1,nxmx
ccc      psi(i,j,1)=0.
ccc 1110  continue
c
c start prediction procedure.
c
c firstly, calculate hydraulic conductivity values for every cell.
c
      do 1300 k=1,nzmx
      do 1300 j=1,nymx
      do 1300 i=1,nxmx
        pk(i,j,k)=pks*(
1          1.-((alpha*psi(i,j,k))**(pn-1.))*
2          (1.+(alpha*psi(i,j,k))**pn)**(-1.+1./pn)
3          )**2./
4          1.+(alpha*psi(i,j,k))**pn)**(0.5-0.5/pn)
c
          if(pk(i,j,k).lt.6.37e-20)pk(i,j,k)=6.37e-20
c
1300  continue
c
      do 1350 j=1,nymx
      do 1350 i=1,nxmx
        pk(i,j,1)=2.0e-6
1350  continue
c
c calculate parameters(different way from aggie13.for)
c
      do 1390 j=2,nymx-1
      do 1390 i=2,nxmx-1
c
          ddo(i,j,2)=(pk(i-1,j,2)+pk(i,j,2))/delx/dely/4.
c
          ffo(i,j,2)=(pk(i+1,j,2)+pk(i,j,2))/delx/dely/4.
c
          bbo(i,j,2)=(pk(i,j-1,2)+pk(i,j,2))/delx/dely/4.
c
          hho(i,j,2)=(pk(i,j+1,2)+pk(i,j,2))/delx/dely/4.
c
          if(qs(i,j).ge.(0.517*etp/864000.))then
            vuo(i,j,2)=0.

```

```

else
  vuo(i,j,2)=(0.5*dzl(2)*pk(i,j,2)+0.5*dzl(1)*pk(i,j,1))
1      /(0.5*dzl(2)+0.5*dzl(1))
2      /(0.5*dzl(2)+0.5*dzl(1))**2/2.
endif

c
  vlo(i,j,2)=(pk(i,j,3)+pk(i,j,2))/delz/delz/4.

c
  eeo(i,j,2)=ddo(i,j,2)+ffo(i,j,2)+bbo(i,j,2)+hho(i,j,2)
1      +vuo(i,j,2)+vlo(i,j,2)
2      -((thetas-thetar)*(1.-pn)*
3      alpha**pn*(psi(i,j,2)**(pn-1.))
4      *(1.+(alpha*psi(i,j,2))**pn)**(-2.+1./pn))
5      /delt

c
  if(qs(i,j).ge.(0.517*etp/864000.))then
    rhso(i,j,2)=((thetas-thetar)*(1.-pn)*alpha**pn
1      *(psi(i,j,2)**(pn-1.))
2      *(1.+(alpha*psi(i,j,2))**pn)**(-2.+1./pn))
3      /delt*psi(i,j,2)
4      +ddo(i,j,2)*(psi(i,j,2)-psi(i-1,j,2))
5      -ffo(i,j,2)*(psi(i+1,j,2)-psi(i,j,2))
6      +bbo(i,j,2)*(psi(i,j,2)-psi(i,j-1,2))
7      -hho(i,j,2)*(psi(i,j+1,2)-psi(i,j,2))
8      -vlo(i,j,2)*(psi(i,j,3)-psi(i,j,2))

c
1      -0.517*etp/864000./dlz(2)

c
2      -(pk(i,j,2)+pk(i,j,3))/delz/2.

c
3      +ftr(i,j,2)

c
  else
    rhso(i,j,2)=((thetas-thetar)*(1.-pn)*alpha**pn
1      *(psi(i,j,2)**(pn-1.))
2      *(1.+(alpha*psi(i,j,2))**pn)**(-2.+1./pn))
3      /delt*psi(i,j,2)
4      +ddo(i,j,2)*(psi(i,j,2)-psi(i-1,j,2))
5      -ffo(i,j,2)*(psi(i+1,j,2)-psi(i,j,2))
6      +bbo(i,j,2)*(psi(i,j,2)-psi(i,j-1,2))
7      -hho(i,j,2)*(psi(i,j+1,2)-psi(i,j,2))
8      +vuo(i,j,2)*(psi(i,j,2)-psi(i,j,1))

```

```

9          -vlo(i,j,2)*(psi(i,j,3)-psi(i,j,2))
c
1          +(0.5*dlz(1)*pk(i,j,1)+0.5*dlz(2)*pk(i,j,2))
1          /(0.5*dlz(1)+0.5*dlz(2))/(0.5*dlz(1)+0.5*dlz(2))
c
2          -(pk(i,j,2)+pk(i,j,3))/delz/2.
c
3          +frt(i,j,2)
endif
1390 continue
c
do 1400 k=3,nzmx-1
do 1400 j=2,nymx-1
do 1400 i=2,nxmx-1
c
ddo(i,j,k)=(pk(i-1,j,k)+pk(i,j,k))/delx/dely/4.
c
ffo(i,j,k)=(pk(i+1,j,k)+pk(i,j,k))/delx/dely/4.
c
bbo(i,j,k)=(pk(i,j-1,k)+pk(i,j,k))/delx/dely/4.
c
hho(i,j,k)=(pk(i,j+1,k)+pk(i,j,k))/delx/dely/4.
c
vuo(i,j,k)=(0.5*dlz(k)*pk(i,j,k)+0.5*dlz(k-1)*pk(i,j,k-1))
1          /(0.5*dlz(k)+0.5*dlz(k-1))
2          /(0.5*dlz(k)+0.5*dlz(k-1))**2/2.
c
vlo(i,j,k)=(pk(i,j,k+1)+pk(i,j,k))/delz/delz/4.
c
eeo(i,j,k)=ddo(i,j,k)+ffo(i,j,k)+bbo(i,j,k)+hho(i,j,k)
1          +vuo(i,j,k)+vlo(i,j,k)
2          -((thetas-thetar)*(1.-pn)*
3          alpha**pn*(psi(i,j,k)**(pn-1.))
4          *(1.+(alpha*psi(i,j,k))**pn)**(-2.+1./pn))
5          /delt
c
rhs0(i,j,k)=((thetas-thetar)*(1.-pn)*alpha**pn
1          *(psi(i,j,k)**(pn-1.))
2          *(1.+(alpha*psi(i,j,k))**pn)**(-2.+1./pn))
3          /delt*psi(i,j,k)
4          +ddo(i,j,k)*(psi(i,j,k)-psi(i-1,j,k))
5          -ffo(i,j,k)*(psi(i+1,j,k)-psi(i,j,k))

```

```

6      +bbo(i,j,k)*(psi(i,j,k)-psi(i,j-1,k))
7      -hho(i,j,k)*(psi(i,j+1,k)-psi(i,j,k))
8      +vuo(i,j,k)*(psi(i,j,k)-psi(i,j,k-1))
9      -vlo(i,j,k)*(psi(i,j,k+1)-psi(i,j,k))
c
1      +(0.5*dz(k-1)*pk(i,j,k-1)+0.5*dz(k)*pk(i,j,k))
1      /(0.5*dz(k-1)+0.5*dz(k))/(0.5*dz(k-1)+0.5*dz(k))
c
2      -(pk(i,j,k)+pk(i,j,k+1))/delz/2.
c
3      +frt(i,j,k)
c
c check whether there are plant roots or not.(rz=root zone)
c
      rz=0.
      rz=(x(i)-(ncx-0.5)*delx)**2./(bm)**2.
1      +(y(j)-(ncy-0.5)*dely)**2./(bm)**2.
2      +z(k)**2./(zm)**2.
c
      if(rz.gt.1.)go to 1400
c
c consider water uptake rate depending upon water content(equation 21).
c
      if(psi(i,j,k).gt.15000.)then
          rhso(i,j,k)=rhso(i,j,k)
      endif
c
      if(psi(i,j,k).lt.15000..and,psi(i,j,k).gt.400.)then
          rhso(i,j,k)=rhso(i,j,k)-smx*(15000.-psi(i,j,k))/14600.
      endif
c
      if(psi(i,j,k).lt.400.)then
          rhso(i,j,k)=rhso(i,j,k)-smx
      endif
c
1400 continue
c
c store psi values as opsi which is the value at previous time step.
c
      do 1500 k=1,nzmx
      do 1500 j=1,nymx
      do 1500 i=1,nxmx

```

```

opsi(i,j,k)=psi(i,j,k)
1500 continue
c
c rename all parameters to fit in the subroutine.
c
do 1600 k=2,nzmx-1
do 1600 j=2,nymx-1
do 1600 i=2,nxmx-1
ddd(i,j,k)=ddo(i,j,k)
fff(i,j,k)=ffo(i,j,k)
bbb(i,j,k)=bbo(i,j,k)
hhh(i,j,k)=hho(i,j,k)
vll(i,j,k)=vlo(i,j,k)
vuu(i,j,k)=vuo(i,j,k)
eee(i,j,k)=eeo(i,j,k)
rhs(i,j,k)=rhso(i,j,k)
1600 continue
c
c calculate new psi values in the subroutine gs.
c
c *****
call gs(nxmx,nymx,nzmx)
c *****
c
c impose lower b.c.
c
do 1700 k=1,nzmx
do 1700 j=1,nymx
psi(1,j,k)=psi(2,j,k)
1700 psi(nxmx,j,k)=psi(nxmx-1,j,k)
c
do 1800 k=1,nzmx
do 1800 i=1,nxmx
psi(i,1,k)=psi(i,2,k)
1800 psi(i,nymx,k)=psi(i,nymx-1,k)
c
do 1900 j=1,nymx
do 1900 i=1,nxmx
1900 psi(i,j,nzmx)=psi(i,j,nzmx-1)
c 1900 psi(i,j,nzmx)=psii(i,j,nzmx)
c
c so far, prediction process finished, and correction starts.

```

```

c
c firstly, calculate hydraulic conductivity values for every cell.
c
      do 2000 k=1,nzmx
      do 2000 j=1,nymx
      do 2000 i=1,nxmx
        pk(i,j,k)=0.5*pks*(
1          1.-((alpha*psi(i,j,k))**(pn-1.))*
2          (1.+(alpha*psi(i,j,k)**pn)**(-1.+1./pn)
3          )**2./
4          1.+(alpha*psi(i,j,k)**pn)**(0.5-0.5/pn)
c
1          +0.5*pks*(
1          1.-((alpha*opsi(i,j,k))**(pn-1.))*
2          (1.+(alpha*opsi(i,j,k)**pn)**(-1.+1./pn)
3          )**2./
4          1.+(alpha*opsi(i,j,k)**pn)**(0.5-0.5/pn)
c
          if(pk(i,j,k).lt.6.37e-20)pk(i,j,k)=6.37e-20
c
2000  continue
c
      do 2050 j=1,nymx
      do 2050 i=1,nxmx
        pk(i,j,1)=2.0e-6
2050  continue
c
c give upper boundary conditions (1st type), as cm unit, using equation (16).
c in this study, psi values themselves are positive.
c
      do 2100 j=1,nymx
      do 2100 i=1,nxmx
2100  psi(i,j,1)=-100.*8.3143*(273.+temp)*alog(f)/0.018/9.8
c
c modify upper boundary conditions to consider the three cases described in
c equations (17) thru (19). qs is upward flowrate. (-)*(flow rate from 1st
c to 2nd layer).
c
      do 2200 j=1,nymx
      do 2200 i=1,nxmx
c
          qs(i,j)=-pk(i,j,1)*dlz(1)+pk(i,j,2)*delz/(dlz(1)+delz)

```



```

1          *((opsi(i,j,2)-opsi(i,j,1))/(0.5*delz+0.5*delz1)+1.)
2200  continue
c
do 2300 j=1,nymx
do 2300 i=1,nxxmx
  if(qs(i,j).lt.0.)then
    psi(i,j,1)=opsi(i,j,2)+0.5*(delz+delz1)
    qs(i,j)=0.
  elseif(qs(i,j).ge.0.517*etp/864000.)then
    psi(i,j,1)=opsi(i,j,2)
1      +(0.5*dlz(1)+0.5*dlz(2))
1      +(0.5*dlz(1)+0.5*dlz(2))*0.517*etp/864000.
2      *(dlz(1)+dlz(2))/(dlz(1)*pk(i,j,1)+dlz(2)*pk(i,j,2))
    qs(i,j)=0.517*etp/864000.
  elseif((qs(i,j).ge.0.)and.(qs(i,j).le.0.517*etp/864000))then
    psi(i,j,1)=opsi(i,j,1)
    qs(i,j)=qs(i,j)
  endif
c
  if(flgetp.eq.1)then
    psi(i,j,1)=opsi(i,j,2)+0.5*(delz+delz1)
    qs(i,j)=0.
  endif
c
2300  continue
c
c consider flow in at the dripping points.
c
do 2400 k=2,nzmx
do 2400 j=1,nymx
do 2400 i=1,nxxmx
c
  if(i.eq.nxfl(1).and.j.eq.nyfl(1).and.k.eq.nzfl(1))frt(i,j,k)=
1      flwrt(1)/delx/dely/delz
c
  if(i.eq.nxfl(2).and.j.eq.nyfl(2).and.k.eq.nzfl(2))frt(i,j,k)=
1      flwrt(2)/delx/dely/delz
c
  if(i.eq.nxfl(3).and.j.eq.nyfl(3).and.k.eq.nzfl(3))frt(i,j,k)=
1      flwrt(3)/delx/dely/delz
c
  if(i.eq.nxfl(4).and.j.eq.nyfl(4).and.k.eq.nzfl(4))frt(i,j,k)=

```

```

1          flwrt(4)/delx/dely/delz
c
      if(i.eq.nxfl(5).and.j.eq.nyfl(5).and.k.eq.nzfl(5))frr(i,j,k)=
1          flwrt(5)/delx/dely/delz
c
      if(i.eq.nxfl(6).and.j.eq.nyfl(6).and.k.eq.nzfl(6))frr(i,j,k)=
1          flwrt(6)/delx/dely/delz
c
      if(i.eq.nxfl(7).and.j.eq.nyfl(7).and.k.eq.nzfl(7))frr(i,j,k)=
1          flwrt(7)/delx/dely/delz
c
      if(i.eq.nxfl(8).and.j.eq.nyfl(8).and.k.eq.nzfl(8))frr(i,j,k)=
1          flwrt(8)/delx/dely/delz
c
2400  continue
c
ccc   do 2410 j=1,nymx
ccc   do 2410 i=1,nxmx
ccc   psi(i,j,1)=0.
ccc 2410  continue
c
c  start correction procedure.
c
c  calculate parameters(different way from aggie13.for)
c
      do 2490 j=2,nymx-1
      do 2490 i=2,nxmx-1
c
          ddd(i,j,2)=(pk(i-1,j,2)+pk(i,j,2))/delx/dely/4.
c
          fff(i,j,2)=(pk(i+1,j,2)+pk(i,j,2))/delx/dely/4.
c
          bbb(i,j,2)=(pk(i,j-1,2)+pk(i,j,2))/delx/dely/4.
c
          hhh(i,j,2)=(pk(i,j+1,2)+pk(i,j,2))/delx/dely/4.
c
      if(qs(i,j).ge.(0.517*etp/864000.))then
          vuu(i,j,2)=0.
      else
          vuu(i,j,2)=(0.5*dz(2)*pk(i,j,2)+0.5*dz(1)*pk(i,j,1))
1          /(0.5*dz(2)+0.5*dz(1))
2          /(0.5*dz(2)+0.5*dz(1))*2/2.

```

endif

c

vll(i,j,2)=(pk(i,j,3)+pk(i,j,2))/delz/delz/4.

c

eee(i,j,2)=ddd(i,j,2)+fff(i,j,2)+bbb(i,j,2)+hhh(i,j,2)

1 +vuu(i,j,2)+vll(i,j,2)

2 -0.5\*((thetas-thetar)\*(1.-pn)\*

3 alpha\*\*pn\*(opsi(i,j,2)\*\*(pn-1.))

4 \*(1.+(alpha\*opsi(i,j,2)\*\*pn)\*\*(-2.+1./pn))

5 /delt

c

2 -0.5\*((thetas-thetar)\*(1.-pn)\*

3 alpha\*\*pn\*(psi(i,j,2)\*\*(pn-1.))

4 \*(1.+(alpha\*psi(i,j,2)\*\*pn)\*\*(-2.+1./pn))

5 /delt

c

if(qs(i,j).ge.(0.517\*etp/864000.))then

rhs(i,j,2)=0.5\*((thetas-thetar)\*(1.-pn)\*alpha\*\*pn

1 \*(opsi(i,j,2)\*\*(pn-1.))

2 \*(1.+(alpha\*opsi(i,j,2)\*\*pn)\*\*(-2.+1./pn))

3 /delt\*opsi(i,j,2)

c

1 +0.5\*((thetas-thetar)\*(1.-pn)\*alpha\*\*pn

1 \*(psi(i,j,2)\*\*(pn-1.))

2 \*(1.+(alpha\*psi(i,j,2)\*\*pn)\*\*(-2.+1./pn))

3 /delt\*opsi(i,j,2)

c

4 +ddd(i,j,2)\*(opsi(i,j,2)-opsi(i-1,j,2))

5 -fff(i,j,2)\*(opsi(i+1,j,2)-opsi(i,j,2))

6 +bbb(i,j,2)\*(opsi(i,j,2)-opsi(i,j-1,2))

7 -hhh(i,j,2)\*(opsi(i,j+1,2)-opsi(i,j,2))

9 -vll(i,j,2)\*(opsi(i,j,3)-opsi(i,j,2))

c

1 -0.517\*etp/864000./dlz(2)

c

2 -(pk(i,j,3)+pk(i,j,2))/delz/2.

c

3 +frt(i,j,2)

c

else

c

rhs(i,j,2)=0.5\*((thetas-thetar)\*(1.-pn)\*alpha\*\*pn

```

1      *(opsi(i,j,2)**(pn-1.))
2      *(1.+(alpha*opsi(i,j,2)**pn)**(-2.+1./pn))
3      /delt*opsi(i,j,2)
c
1      +0.5*((thetas-thetar)*(1.-pn)*alpha**pn
1      *(psi(i,j,2)**(pn-1.))
2      *(1.+(alpha*psi(i,j,2)**pn)**(-2.+1./pn))
3      /delt*opsi(i,j,2)
c
4      +ddd(i,j,2)*(opsi(i,j,2)-opsi(i-1,j,2))
5      -fff(i,j,2)*(opsi(i+1,j,2)-opsi(i,j,2))
6      +bbb(i,j,2)*(opsi(i,j,2)-opsi(i,j-1,2))
7      -hhh(i,j,2)*(opsi(i,j+1,2)-opsi(i,j,2))
8      +vuu(i,j,2)*(opsi(i,j,2)-opsi(i,j,1))
9      -vll(i,j,2)*(opsi(i,j,3)-opsi(i,j,2))
c
1      +(0.5*dlz(1)*pk(i,j,1)+0.5*dlz(2)*pk(i,j,2))
1      /(0.5*dlz(1)+0.5*dlz(2))/(0.5*dlz(1)+0.5*dlz(2))
c
2      -(pk(i,j,3)+pk(i,j,2))/delz/2.
c
3      +frt(i,j,2)
endif
c
2490  continue
c
do 2500 k=3,nzmx-1
do 2500 j=2,nymx-1
do 2500 i=2,nxmx-1
c
ddd(i,j,k)=(pk(i-1,j,k)+pk(i,j,k))/delx/dely/4.
c
fff(i,j,k)=(pk(i+1,j,k)+pk(i,j,k))/delx/dely/4.
c
bbb(i,j,k)=(pk(i,j-1,k)+pk(i,j,k))/delx/dely/4.
c
hhh(i,j,k)=(pk(i,j+1,k)+pk(i,j,k))/delx/dely/4.
c
vuu(i,j,k)=(0.5*dlz(k)*pk(i,j,k)+0.5*dlz(k-1)*pk(i,j,k-1))
1      /(0.5*dlz(k)+0.5*dlz(k-1))
2      /(0.5*dlz(k)+0.5*dlz(k-1))**2/2.
c

```

$$vll(i,j,k)=(pk(i,j,k+1)+pk(i,j,k))/delz/delz/4.$$

c

$$eee(i,j,k)=ddd(i,j,k)+fff(i,j,k)+bbb(i,j,k)+hhh(i,j,k)$$

$$\begin{aligned} &+vuu(i,j,k)+vll(i,j,k) \\ &-0.5*((thetas-thetar)*(1.-pn)* \\ &alpha**pn*(opsi(i,j,k)**(pn-1.)) \\ &*(1.+(alpha*opsi(i,j,k)**pn)**(-2.+1./pn)) \\ &/delt \end{aligned}$$

c

$$\begin{aligned} &-0.5*((thetas-thetar)*(1.-pn)* \\ &alpha**pn*(psi(i,j,k)**(pn-1.)) \\ &*(1.+(alpha*psi(i,j,k)**pn)**(-2.+1./pn)) \\ &/delt \end{aligned}$$

c

$$rhs(i,j,k)=0.5*((thetas-thetar)*(1.-pn)*alpha**pn$$

$$\begin{aligned} &*(opsi(i,j,k)**(pn-1.)) \\ &*(1.+(alpha*opsi(i,j,k)**pn)**(-2.+1./pn)) \\ &/delt*opsi(i,j,k) \end{aligned}$$

c

$$\begin{aligned} &+0.5*((thetas-thetar)*(1.-pn)*alpha**pn \\ &*(psi(i,j,k)**(pn-1.)) \\ &*(1.+(alpha*psi(i,j,k)**pn)**(-2.+1./pn)) \\ &/delt*opsi(i,j,k) \end{aligned}$$

c

$$\begin{aligned} &+ddd(i,j,k)*(opsi(i,j,k)-opsi(i-1,j,k)) \\ &-fff(i,j,k)*(opsi(i+1,j,k)-opsi(i,j,k)) \\ &+bbb(i,j,k)*(opsi(i,j,k)-opsi(i,j-1,k)) \\ &-hhh(i,j,k)*(opsi(i,j+1,k)-opsi(i,j,k)) \\ &+vuu(i,j,k)*(opsi(i,j,k)-opsi(i,j,k-1)) \\ &-vll(i,j,k)*(opsi(i,j,k+1)-opsi(i,j,k)) \end{aligned}$$

c

$$\begin{aligned} &+(0.5*dlz(k-1)*pk(i,j,k-1)+0.5*dlz(k)*pk(i,j,k)) \\ &/((0.5*dlz(k-1)+0.5*dlz(k))/(0.5*dlz(k-1)+0.5*dlz(k))) \end{aligned}$$

c

$$-(pk(i,j,k+1)+pk(i,j,k))/delz/2.$$

c

$$+frt(i,j,k)$$

c

c

c check whether there are plant roots or not.(rz=root zone)

c

$$rz=0.$$

```

      rz=(x(i)-(ncx-0.5)*delx)**2./(bm)**2.
1      +(y(j)-(ncy-0.5)*dely)**2./(bm)**2.
2      +z(k)**2./(zm)**2.
c
      if(rz.gt.1.)go to 2500
c
c consider water uptake rate depending upon water content.
c
      if(opsi(i,j,k).gt.15000.)then
          rhs(i,j,k)=rhs(i,j,k)
      endif
c
      if(opsi(i,j,k).lt.15000..and.opsi(i,j,k).gt.400.)then
          rhs(i,j,k)=rhs(i,j,k)-smx*(15000.-opsi(i,j,k))/14600.
      endif
c
      if(opsi(i,j,k).lt.400.)then
          rhs(i,j,k)=rhs(i,j,k)-smx
      endif
c
2500 continue
c
c calculate new psi values in the subroutine g-s.
c
c *****
c call gs(nxxmx,nymx,nzmx)
c *****
c impose lower b.c.
c
      do 2600 k=1,nzmx
      do 2600 j=1,nymx
          psi(1,j,k)=psi(2,j,k)
2600      psi(nxxmx,j,k)=psi(nxxmx-1,j,k)
c
      do 2700 k=1,nzmx
      do 2700 i=1,nxxmx
          psi(i,1,k)=psi(i,2,k)
2700      psi(i,nymx,k)=psi(i,nymx-1,k)
c
      do 2800 j=1,nymx
      do 2800 i=1,nxxmx

```

```

2800     psi(i,j,nzmx)=psi(i,j,nzmx-1)
c 2800     psi(i,j,nzmx)=psii(i,j,nzmx)
c
c   convert psi into theta values.
c
      do 2900 k=1,nzmx
      do 2900 j=1,nymx
      do 2900 i=1,nxmx
          theta(i,j,k)=thetar+(thetas-thetar)*
1          (1.+(alpha*psi(i,j,k)**pn)**(1./pn-1.))
2900     continue
c
c   check mass balance on water.(there can be only vertical flow out in
c   subsurface since 2nd type boundary condition is employed along the
c   horizontal edge of the root zone)
c
c   i) flow in(cm**3)
c
      do 3000 n=1,nodp
          flowin=flowin+delt*flwrt(n)
3000     continue
c
c   ii) amount of accumulation in subsurface(cm**3)
c
      do 3100 k=1,nzmx
      do 3100 j=1,nymx
      do 3100 i=1,nxmx
          wtaccum=wtaccum+(theta(i,j,k)-thetai(i,j,k))*dlz(k)*delx*dely
3100     continue
c
c   iii) evaporation loss
c
      do 3200 j=1,nymx
      do 3200 i=1,nxmx
          rzh=(x(i)-(ncx-0.5)*delx)**2.
1          +(y(j)-(ncy-0.5)*dely)**2.
c
c          if(rzh.gt.1600.)go to 3200
          evaplss=evaplss+qs(i,j)*delx*dely*delt
c
3200     continue
c

```

```

c iv) transpiration loss
c
do 3300 k=1,nzmx
do 3300 j=1,nymx
do 3300 i=1,nxmx
  rz=0.
  rz=(x(i)-(ncx-0.5)*delx)**2./(bm)**2.
1    +(y(j)-(ncy-0.5)*dely)**2./(bm)**2.
2    +z(k)**2./(zm)**2.
c
  if(rz.gt.1.)then
    trnslss=trnslss
  elseif(psi(i,j,k).gt.15000.)then
    trnslss=trnslss
  elseif(psi(i,j,k).lt.15000..and.psi(i,j,k).gt.400.)then
    trnslss=trnslss+delx*dely*dlz(k)*smx*delt
1    *(15000.-psi(i,j,k))/14600.
    elseif(psi(i,j,k).lt.400.)then
      trnslss=trnslss+delx*dely*dlz(k)*smx*delt
    endif
3300  continue
c
c v) amount of water drained out of the domain.
c
do 3400 j=1,nymx
do 3400 i=1,nxmx
  outzone=outzone+
1    (0.5*pk(i,j,nzmx-1)+0.5*pk(i,j,nzmx-2))
2    *((psi(i,j,nzmx-1)-psi(i,j,nzmx-2))/delz+1.)*delx*dely*delt
3400  continue
c
c check total mass error.
c
errmss=-100.*(flowin-wtaccum-evaplss-trnslss-outzone)
1    /flowin
c
if(abs(time-ifix(time/600)*600).lt.delt)then
  write(*,*)'elapsed time= ',time,' sec'
  write(5,*)'mass balance error= ',errmss,' % @ time=',time
endif
c
c*****

```



```

        if(time.lt.ftime)go to 700
c*****
c
c write details of mass balances.
c
        write(5,*)'amt of flowin =' ,flowin
        write(5,*)'amt of wtinitl =' ,wtinitl
        write(5,*)'amt of wtaccum =' ,wtaccum
        write(5,*)'amt of evaplss =' ,evaplss
        write(5,*)'amt of trnslss =' ,trnslss
        write(5,*)'amt of outzone =' ,outzone
c
c calculate Darcy's velocity in the root zone.
c
        do 3500 j=2,nymx-1
        do 3500 i=2,nxmx-1
c
            vx(i,j,1)=(pk(i+1,j,1)+2.*pk(i,j,1)+pk(i-1,j,1))/4.*
1             (psi(i+1,j,1)-psi(i-1,j,1))/2./delx/theta(i,j,1)
c
            vy(i,j,1)=(psi(i,j+1,1)+2.*pk(i,j,1)+pk(i,j-1,1))/4.*
1             (psi(i,j+1,1)-psi(i,j-1,1))/2./dely/theta(i,j,1)
c
            vz(i,j,1)=(0.5*dzl(1)*pk(i,j,1)+0.5*dzl(2)*pk(i,j,2))
1             /(0.5*dzl(1)+0.5*dzl(2))
2             *((psi(i,j,2)-psi(i,j,1))/(0.5*delz+0.5*delz1)+1.)
3             /theta(i,j,1)
3500 continue
c
        do 3600 k=2,nzmx-1
        do 3600 j=2,nymx-1
        do 3600 i=2,nxmx-1
            vx(i,j,k)=0.25*(pk(i+1,j,k)+2.*pk(i,j,k)+pk(i-1,j,k))*
1             (psi(i+1,j,k)-psi(i-1,j,k))/2./delx/theta(i,j,k)
            vy(i,j,k)=0.25*(pk(i,j+1,k)+2.*pk(i,j,k)+pk(i,j-1,k))*
1             (psi(i,j+1,k)-psi(i,j-1,k))/2./dely/theta(i,j,k)
            vz(i,j,k)=0.5*(pk(i,j,k)+pk(i,j,k+1))*
1             ((psi(i,j,k+1)-psi(i,j,k))/delz+1.)/theta(i,j,k)
3600 continue
c
c print output(fitting for Tecplot)
c

```

```

do 3800 k=1,nzmx
do 3800 j=1,nymx
do 3800 i=1,nxmx
    write(4,*)x(i),y(j),z(k),psi(i,j,k),
1          theta(i,j,k),vx(i,j,k),vy(i,j,k),vz(i,j,k)
c 3700    format(1x,3(1x,f6.2),f9.4,1x,f5.3,3(f11.9,1x))
3800      continue
c
c
3900  do 4100 k=2,nzmx
        write(6,4000)(theta(i,ncy,k),i=1,ncx+1)
4000    format(42(1x,f5.3))
4100    continue
c
c  end of program
c
4200  stop
      end

c
c  this subroutine is to calculate the new psi values by using Gauss-Seidel
c  iteration method.
c
c  *****
c  subroutine gs(nxmx,nymx,nzmx)
c  *****
c  pipsi is the value at the previous iterations. required to check whether it
c  has converged or not.
c
c  dimension pipsi(60,60,60)
c
c  common ddd(60,60,60),fff(60,60,60),eee(60,60,60),
1      bbb(60,60,60),hhh(60,60,60),vuu(60,60,60),
2      vll(60,60,60),rhs(60,60,60),psi(60,60,60)
c
c  100  difmx=0.
c
c  do 200 k=2,nzmx-1
do 200 j=2,nymx-1
do 200 i=2,nxmx-1
    pipsi(i,j,k)=psi(i,j,k)

```

```

        psi(i,j,k)=(-rhs(i,j,k)
1          +psi(i-1,j,k)*ddd(i,j,k)+psi(i+1,j,k)*fff(i,j,k)
2          +psi(i,j-1,k)*bbb(i,j,k)+psi(i,j+1,k)*hhh(i,j,k)
3          +psi(i,j,k-1)*vuu(i,j,k)+psi(i,j,k+1)*vll(i,j,k)
4          )/eee(i,j,k)
c
        dif=abs(psi(i,j,k)-pipsi(i,j,k))
        difmx=amax1(dif,difmx)
c
200    continue
c
        if(difmx.ge.0.0001)go to 100
c
        do 300 k=2,nzmx-1
        do 300 j=2,nymx-1
        do 300 i=2,nxmx-1
        if(psi(i,j,k).lt.0.)then
            psi(i,j,k)=0.000001
            write(*,*)i,j,k,' overflow occurred!'
        endif
300    continue
c
400    return
        end

```

## 부록 2. 토양수분이동 및 분포 모형 Source Code(직교좌표계)

[Source program of a numerical model for describing three-dimensional soil water distribution for drip irrigation management under cropped conditions(drip3D.for)]

===== Cartesian Coordinate =====

```
c This is the main program to solve the Richards' equation modeling moisture
c migration in the root zone exposed to the root water uptake and
c evapotranspiration employing the Crank-Nicolson scheme and Hill's predictor-
c corrector method. c.g.s. units are used.
```

```
c
```

```
    dimension theta(100,100),thetaold(100,100),ddo(100,100)
1      ,ffo(100,100),eeo(100,100),bbo(100,100),hho(100,100)
2      ,rhso(100,100),r(100),z(100),pk(100,100),pko(100,100)
3      ,qs(100)
```

```
c
```

```
    common ddd(100,100),fff(100,100),eee(100,100),bbb(100,100)
1      ,hhh(100,100),rhs(100,100),psi(100,100),opsi(100,100)
```

```
c
```

```
    common nosb,nosbold
```

```
c
```

```
    open(1,file='aggie13.dat',status='old')
    open(2,file='prfl2d.out',recl=256,status='new')
c    open(3,file='prfl1d.out',status='new')
    open(4,file='msblnc.out',status='new')
    open(5,file='surfer.out',status='new')
```

```
c
```

```
    read(1,*)alpha,pn,pks,thetas,thetar,thetai,zt,bzratio,tt,tm,
1      flgetp,flwrt,temp,f,etpmx,ftime,delr,delz,nrmx,nzmx,delt
```

```
c
```

```
c parameter estimations
```

```
c
```

```
    pi=3.141592
    if(flwrt.eq.0.)flwrt=0.000000001
```

```
c
```

```
    psii((((thetai-thetar)/(thetas-thetar))**(pn/(1.-pn))-1.)
1      *(1./pn)/alpha
    write(*,*)'psii= ',psii,' cm'
```

```
c
```

```
    do 100 i=1,nrmx
100    r(i)=delr*(i)-delr*0.5
```

```

c
do 200 j=1,nzmx
200   z(j)=delz/2.+delz*(j-1)
c
   write(*,*)'date and oclock? give answer like 4,19,15(mon/date/oclock)'
   read(*,*)mon,date,oclock
c
c calculate the number of days between March 1st and the date considered
c
   if(mon.eq.3)dd=date
   if(mon.eq.4)dd=31.+date
   if(mon.eq.5)dd=61.+date
   if(mon.eq.6)dd=92.+date
   if(mon.eq.7)dd=122.+date
   if(mon.eq.8)dd=153.+date
   if(mon.eq.9)dd=184.+date
   if(mon.eq.10)dd=214.+date
c
c calculate tdiff which is the difference between July 25th and considered date
c
   if(dd.le.147.)then
       tdiff=147.
   else
       tdiff=98.
   endif
c
c calculate daily evapotranspiration rate(etp, mm/day) from
c maximum evapotranspiration(etpmx, mm/day) and equation (14).
c
   etp=etpmx*exp(-1.217*(dd-147.)*(dd-147.)/tdiff/tdiff)
c
c estimate maximum hourly evapotranspiration rate(mm/hr), thmx, during a day,
c maybe occurs at noon. employing equation (24).
c "caution units, etp(mm/day), thmx and th(mm/hr) automatically adjusted".
c
   thmx=(1.-0.517)*etp/9.
c
c calculate the evapotranspiration distribution along 24 hours,
c using equation (23).
c
   th=thmx*(0.5-0.5*cos(pi*oclock/12.))**2.
c

```

c calculate the root depth and width using equation (20) and bzratio.

c

```
zm=zt*(0.5+0.5*sin(3.03*(tm/tt)-1.47))
bm=zm*bzratio
```

c

c calculate the maximum water uptake rate, smx, in case of no water deficit

c in the soil using equation (22). this equation was obtained by setting

c (etp\*area)=(smx\*volume of hemi-ellipsoid).

c unlimited water content assumed in the root zone.

c unit of smx is "1/sec", which is identical with the Richards equation.

c

```
smx=1.5*th/zm/3600./10.
if(flgetp.eq.0.)smx=0.
```

c

c so far, preliminary calculations of all the parameters have been done, and

c we are at the beginning point of the partial differential equation(9).

c C-N scheme and predictor-corrector method is used.

c

c give initial theta values and calculate initial hydraulic conductivities.

c

```
time=0.
```

c

```
do 300 j=1,nzmx
do 300 i=1,nrmx
theta(i,j)=thetai
thetaold(i,j)=thetai
psi(i,j)=psii
```

c

```
pk(i,j)=pks*(
1      1.-((alpha*psii)**(pn-1.))*
2      (1.+(alpha*psii)**pn)**(-1.+1./pn)
3      )**2./
4      1.+(alpha*psii)**pn)**(0.5-0.5/pn)
```

c

```
300 continue
```

c

c give and calculate parameters for mass balance on water.

c

```
flowin=0.
```

c

```
wtinitl=0.
do 400 j=2,nzmx
```

```

do 400 i=1,nrmx
  wtinitl=wtinitl
1      +theta(i,j)*pi*((delr*i)**2.-(delr*i-delr)**2.)*delz
400    continue
c
  trnslss=0.
  evaplss=0.
  outzone=0.
c
c give legend at output files
c
  write(2,500)(i,i=1,nrmx)
500    format(42(1x,'i= ',i2))
c
  write(5,*)'      i      ','      j      ','      theta(i,j)'
c
c advance time steps.
c
600    time=time+delt
      wtaccum=0.
c
c give upper boundary conditions (1st type), as cm unit, using equation (16).
c in this study, psi values themselves are positive.
c
do 700 i=1,nrmx
700    psi(i,1)=-100.*8.3143*(273.+temp)*alog(f)/0.018/9.8
c
c modify upper boundary conditions to consider the three cases described in
c equations (17) thru (19). qs is upward flowrate between 1st and 2nd layer.
c
do 800 i=1,nrmx
  qs(i)=-2.*(pk(i,1)*pk(i,2)/(pk(i,1)+pk(i,2)))*
1      (psi(i,2)-psi(i,1))/delz+1.)
800    continue
c
do 900 i=1,nrmx
  if(qs(i).lt.0..or.flgetp.eq.1.)then
    psi(i,1)=psi(i,2)+delz
    qs(i)=0.
  elseif(qs(i).ge.0.517*etp)then
    psi(i,1)=psi(i,2)+0.517*etp*(pk(i,1)+pk(i,2))*delz/2./
1      (pk(i,1)*pk(i,2))+delz

```

```

        qs(i)=0.517*etp
        elseif((qs(i).ge.0.).and.(qs(i).le.0.517*etp))then
            psi(i,1)=psi(i,1)
            qs(i)=qs(i)
        endif
900    continue
c
c    give boundary condition to the center line(2nd type b.c.)
c
        do 1000 j=1,nzmx
1000    psi(0,j)=psi(1,j)
c
        if(flwrt.gt.0.)then
            nosb=1
            nosbold=1
        else
            nosb=1
            nosbold=0
        endif
c
c    start prediction procedure.
c
c    firstly, calculate hydraulic conductivity values for every cell.
c
        do 1100 j=1,nzmx
        do 1100 i=1,nrmx
            pk(i,j)=pks*(
1            1.-((alpha*psi(i,j))**(pn-1.))*
2            (1.+(alpha*psi(i,j))**pn)**(-1.+1./pn)
3            )**2./
4            1.+(alpha*psi(i,j))**pn)**(0.5-0.5/pn)
1100    continue
c
c    secondly, calculate the total volume of source blocks.
c
1200    tsvolume=0.
        do 1300 i=1,nosb
            if(theta(i,2).lt.0.99*thetas)then
                tsvolume=tsvolume+pi*delr*delr*(2.*i-1.)*delz
            endif
1300    continue
c

```



c calculate parameters

c

```
do 1400 j=2,nzmx-1
do 1400 i=1,nrmx-1
  if(i.gt.1)then
    ddo(i,j)=0.5*(r(i)-0.5*delr)*
```

c hydraulic conductivity between two blocks(harmonic mean, Dr. Reddell's note)

```
1      (2.*r(i)-delr)*pk(i,j)*pk(i-1,j)/(pk(i,j)*(r(i)-0.75*delr)+
2      pk(i-1,j)*(r(i)-0.25*delr))
3      /r(i)/delr/delr
```

```
else
  ddo(i,j)=0.
endif
```

c

```
ffo(i,j)=0.5*(r(i)+0.5*delr)*
```

c hydraulic conductivity between two blocks

```
1      (2.*r(i)+delr)*pk(i,j)*pk(i+1,j)/(pk(i,j)*(r(i)+0.75*delr)+
2      pk(i+1,j)*(r(i)+0.25*delr))
3      /r(i)/delr/delr
```

c

```
bbo(i,j)=1./delz/delz*pk(i,j)*pk(i,j-1)/(pk(i,j)+pk(i,j-1))
```

c

```
hho(i,j)=1./delz/delz*pk(i,j)*pk(i,j+1)/(pk(i,j)+pk(i,j+1))
```

c

```
eeo(i,j)=((thetas-thetar)*(1.-pn)*alpha**pn
1      *(psi(i,j)**(pn-1.))*
1      (1.+(alpha*psi(i,j)**pn)**(-2.+1./pn))/delt
2      -ddo(i,j)-ffo(i,j)-bbo(i,j)-hho(i,j)
```

c

c incorporate the possibility of the positive pressure at the source block.

c

```
if((i.le.nosb).and.j.eq.2.and.theta(i,2).lt.0.99*thetas)then
  frt=flwrt/tsvolume
else
  frt=0.
endif
```

c

```
rhs0(i,j)=((thetas-thetar)*(1.-pn)*alpha**pn
1      *(psi(i,j)**(pn-1.))*
1      (1.+(alpha*psi(i,j)**pn)**(-2.+1./pn))/delt*psi(i,j)
2      +ddo(i,j)*(psi(i,j)-psi(i-1,j))
3      -ffo(i,j)*(psi(i+1,j)-psi(i,j))
```

```

4          +bbo(i,j)*(psi(i,j)-psi(i,j-1))
5          -hho(i,j)*(psi(i,j+1)-psi(i,j))
6          +(2.*pk(i,j)*pk(i,j-1)/(pk(i,j)+pk(i,j-1))
7          -2.*pk(i,j)*pk(i,j+1)/(pk(i,j)+pk(i,j+1)))/delz
8          +frt
c
c check whether there are plant roots or not.
c
      if((r(i)**2/bm/bm+z(j)**2/zm/zm).gt.1.)go to 1400
c
c consider water uptake rate depending upon water content.
c
      if(psi(i,j).gt.15000.)then
        write(*,*)'wilting occurs at',' i=' ,i,' j=' ,j
        rhso(i,j)=rhso(i,j)
      endif
c
      if(psi(i,j).lt.15000..and,psi(i,j).gt.400.)then
        rhso(i,j)=rhso(i,j)-smx*(15000.-psi(i,j))/14600.
      endif
c
      if(psi(i,j).lt.400.)then
        rhso(i,j)=rhso(i,j)-smx
      endif
c
1400  continue
c
c store pk(i,j) values at pko(i,j)
c
      do 1500 j=1,nzmx
      do 1500 i=1,nrmx
        pko(i,j)=pk(i,j)
1500  continue
c
c rename ddo, eeo, ffo, bbo, hho, and rhso as ddd, eee, fff, bbb, hhh, and rhs
c to fit notations in subroutine.
c
      do 1600 j=2,nzmx-1
      do 1600 i=1,nrmx-1
        ddd(i,j)=ddo(i,j)
        eee(i,j)=eeo(i,j)
        fff(i,j)=ffo(i,j)

```

```

        bbb(i,j)=bbo(i,j)
        hhh(i,j)=hho(i,j)
        rhs(i,j)=rhso(i,j)
1600    continue
c
c store psi values as opsi which is the value at time step (n).
c
        do 1700 j=1,nzmx
        do 1700 i=1,nrmx
            opsi(i,j)=psi(i,j)
1700    continue
c
c calculate new psi values to obtain parameter values(pk and psi)
c in the subroutine sor.
c
c *****
c call sor(nrmx,nzmx)
c *****
c
c consider the expansion of source blocks.
c
        if(nosb.ge.nrmx)then
            write(*,*)'all top blocks got ponded!'
            write(*,*)'reduce flow rate or increase grid block size!'
        endif
c
        if(nosb.gt.nosbold)then
            nosbold=nosb
            go to 1200
        endif
c
c impose lower b.c.
c
        do 1800 j=1,nzmx
            psi(0,j)=psi(1,j)
1800    psi(nrmx,j)=psi(nrmx-1,j)
c
        do 1900 i=1,nrmx
1900    psi(i,nzmx)=psi(i,nzmx-1)
c
c calculate the parameters again using updated psi values(correction)
c

```

c firstly, calculate pk values with the updated psi values.

c

```
do 2000 j=1,nzmx
do 2000 i=1,nrmx
  pk(i,j)=pks*(
1      1.-((alpha*psi(i,j))**(pn-1.))*
2      (1.+(alpha*psi(i,j))**pn)**(-1.+1./pn)
3      )**2./
4      1.+(alpha*psi(i,j))**pn)**(0.5-0.5/pn)
2000 continue
```

c

c secondly, calculate the total volume of source blocks.

c

```
tsvolume=0.
do 2100 do i=1,nosb
  if(theta(i,2).lt.0.99*thetas)then
    tsvolume=tsvolume+pi*delr*delr*(2.*i-1.)*delz
  endif
2100 continue
```

c

c calculate parameter values.

c

```
do 2200 j=2,nzmx-1
do 2200 i=1,nrmx-1
  if(i.gt.1)then
    ddd(i,j)=0.5*(r(i)-0.5*delr)*
```

c hydraulic conductivity between two blocks(mean value between pk and pko)

```
1      (2.*r(i)-delr)*(
2          pk(i,j)*pk(i-1,j)/(pk(i,j)*(r(i)-0.75*delr)+
3          pk(i-1,j)*(r(i)-0.25*delr))
4          +pko(i,j)*pko(i-1,j)/(pko(i,j)*(r(i)-0.75*delr)+
5          pko(i-1,j)*(r(i)-0.25*delr))
6      )/2./r(i)/delr/delr
  else
    ddd(i,j)=0.
  endif
```

c

```
fff(i,j)=0.5*(r(i)+0.5*delr)*
```

c hydraulic conductivity between two blocks(mean value between pk and pko)

```
1      (2.*r(i)+delr)*(
2          pk(i,j)*pk(i+1,j)/(pk(i,j)*(r(i)+0.75*delr)+
3          pk(i+1,j)*(r(i)+0.25*delr))
```

```

4      +pko(i,j)*pko(i+1,j)/(pko(i,j)*(r(i)+0.75*delr)+
5      pko(i+1,j)*(r(i)+0.25*delr))
6      )/2./r(i)/delr/delr

```

c

```
bbb(i,j)=1./delz/delz*(
```

c hydraulic conductivity between two blocks(mean value between pk and pko)

```

1      pk(i,j)*pk(i,j-1)/(pk(i,j)+pk(i,j-1))
2      +pko(i,j)*pko(i,j-1)/(pko(i,j)+pko(i,j-1))
3      )/2.

```

c

```
hhh(i,j)=1./delz/delz*(
```

c hydraulic conductivity between two blocks(mean value between pk and pko)

```

1      pk(i,j)*pk(i,j+1)/(pk(i,j)+pk(i,j+1))
2      +pko(i,j)*pko(i,j+1)/(pko(i,j)+pko(i,j+1))
3      )/2.

```

c

```
eee(i,j)=((thetas-thetar)*(1.-pn)*alpha**pn*
```

```

1      ((0.5*psi(i,j)+0.5*opsi(i,j))**(pn-1.))*
2      (1.+(alpha*(0.5*psi(i,j)+0.5*opsi(i,j)))**pn)
3      **(-2.+1./pn))/delt
2      -ddd(i,j)-fff(i,j)-bbb(i,j)-hhh(i,j)

```

c

c incorporate the possibility of the positive pressure at the source block.

c

```

if(i.le.nosb.and.j.eq.2.and.theta(i,2).lt.0.99*thetas)then
    frt=flwrt/tsvolume
else
    frt=0.
endif

```

c

```
rhs(i,j)=((thetas-thetar)*(1.-pn)*alpha**pn*(
```

```

1      (0.5*opsi(i,j)+0.5*psi(i,j))**(pn-1.)
2      )*
3      (1.+(alpha*
4      (0.5*opsi(i,j)+0.5*psi(i,j)))**pn
5      )**(-2.+1./pn))/delt*opsi(i,j)
6      +ddd(i,j)*(opsi(i,j)-opsi(i-1,j))
7      -fff(i,j)*(opsi(i+1,j)-opsi(i,j))
8      +bbb(i,j)*(opsi(i,j)-opsi(i,j-1))
9      -hhh(i,j)*(opsi(i,j+1)-opsi(i,j))
1     +0.5*(2.*pk(i,j)*pk(i,j-1)/(pk(i,j)+pk(i,j-1))

```

```

2      -2.*pk(i,j)*pk(i,j+1)/(pk(i,j)+pk(i,j+1))/delz
3      +0.5*(2.*pko(i,j)*pko(i,j-1)/(pko(i,j)+pko(i,j-1))
4      -2.*pko(i,j)*pko(i,j+1)/(pko(i,j)+pko(i,j+1))/delz
5      +frt
c
c check whether there are plant roots or not.
c
      if((r(i)**2/bm/bm+z(j)**2/zm/zm).gt.1.)go to 2200
c
c consider water uptake rate depending upon water content.
c
      if(psi(i,j).gt.15000.)then
          rhs(i,j)=rhs(i,j)
      endif
c
      if(psi(i,j).lt.15000..and.psi(i,j).gt.400.)then
          rhs(i,j)=rhs(i,j)
1      -smx*(15000.-0.5*psi(i,j)-0.5*opsi(i,j))/14600.
      endif
c
      if(psi(i,j).lt.400.)then
          rhs(i,j)=rhs(i,j)-smx
      endif
c
2200  continue
c
c calculate new psi values in the subroutine sor
c
c
c      *****
c      call sor(nrmx,nzmx)
c      *****
c
c incorporate the possibility of the expansion of source blocks.
c
      if(nosb.gt.nosbold)then
          nosbold=nosb
          go to 1200
      endif
c
c impose boundary conditions
c

```

```

do 2300 j=1,nzmx
  psi(0,j)=psi(1,j)
  opsi(0,j)=opsi(1,j)
  pk(0,j)=pk(1,j)
  pko(0,j)=pko(1,j)
2300 continue
c
do 2400 j=1,nzmx
  psi(nrmx,nzmx)=psi(nrmx-1,nzmx)
  opsi(nrmx,nzmx)=opsi(nrmx-1,nzmx)
  pk(nrmx,nzmx)=pk(nrmx-1,nzmx)
  pko(nrmx,nzmx)=pko(nrmx-1,nzmx)
2400 continue
c
do 2500 i=1,nrmx
  psi(i,nzmx)=psi(i,nzmx-1)
  opsi(i,nzmx)=opsi(i,nzmx-1)
  pk(i,nzmx)=pk(i,nzmx-1)
  pko(i,nzmx)=pko(i,nzmx-1)
2500 continue
c
c convert psi into theta values
c
do 2600 j=1,nzmx
do 2600 i=1,nrmx
  theta(i,j)=thetar+(thetas-thetar)*
1      (1.+(alpha*psi(i,j)**pn)**(1./pn-1.))
2600 continue
c
c check mass balance on water.(there is no flow out in subsurface since 2nd
c type boundary conditions are employed along the edge of the root zone.
c if there occurs a moisture content change at the edge, the input data should
c be changed to cover larger domain)
c
c i) flow in
c
  flowin=flowin+flwrt*delt
c
c ii) amount of accumulation
c
do 2700 j=2,nzmx
do 2700 i=1,nrmx

```

```

        wtaccum=wtaccum+theta(i,j)
1          *pi*((delr*i)**2.-(delr*(i-1.))**2.)*delz
2700      continue
c
c iii) evaporation loss
        do 2800 i=1,nrmx
            evaplss=evaplss+qs(i)*pi*((delr*i)**2.-(delr*(i-1))**2.)*delt
2800      continue
c
c iv) transpiration loss
        do 2900 j=2,nzmx
        do 2900 i=1,nrmx
            if((r(i)**2/bm/bm+z(j)**2/zm/zm).gt.1.)then
                trnslss=trnslss
            elseif(psi(i,j).gt.15000.)then
                trnslss=trnslss
            elseif(psi(i,j).lt.15000..and.psi(i,j).gt.400.)then
                trnslss=trnslss
1                +pi*((delr*i)**2.-(delr*(i-1.))**2.)*delz*smx*delt
2                *(15000.-0.5*psi(i,j)-0.5*opsi(i,j))/14600.
            elseif(psi(i,j).lt.400.)then
                trnslss=trnslss
1                +pi*((delr*i)**2.-(delr*(i-1.))**2.)*delz*smx*delt
            endif
2900      continue
c
c check total mass error.
c
        errmss=100.*(flowin+wtinitl-wtaccum-evaplss-trnslss)/
1          (flowin+wtinitl)
c
        write(4,*)'mass balance error= ',errmss,' % @ time=',time
c
c check time against required time
c
        if(abs(time-ifix(time/60)*60).lt.delt)then
            write(*,*)'elapsed time= ',time,' sec',' nosb= ',nosb
        endif
c
c*****
        if(time.lt.ftime)go to 600
c*****

```



```

c
c calculate amount of water outside of the root zone.
c
      do 3000 j=1,nzmx
      do 3000 i=1,nrmx
      if((r(i)**2/bm/bm+z(j)**2/zm/zm).gt.1.)then
        outzone=outzone
1         +theta(i,j)*pi*((delr*i)**2.-(delr*(i-1.))**2.)*delz
      endif
3000    continue
c
      write(4,*)'water amt outside of root zone = ',outzone,' gram'
c
c print output
c
3100    do 3300 j=1,nzmx
          write(2,3200)(theta(i,j),i=1,nrmx)
3200      format(42(1x,f5.3))
3300    continue
c
      do 3400 j=1,nzmx
      do 3400 i=1,nrmx
        write(5,*)i,j,' ',theta(i,j)
3400    continue
c
c end of program
c
3500    stop
      end

c
c this subroutine is to calculate the new psi values by using Gauss-Seidel
c iteration method.
c
c *****
c      subroutine sor(nrmx,nzmx)
c *****
c pipsi is the value at the previous iterations. required to check whether it
c has converged or not.
c
      dimension pipsi(100,100)

```

```

        common ddd(100,100),fff(100,100),eee(100,100),bbb(100,100)
1         ,hhh(100,100),rhs(100,100),psi(100,100),opsi(100,100)
c
        common nosb,nosbold
c
100      difmx=0.
c
        do 200 j=2,nzmx-1
        do 200 i=1,nrmx-1
            pipsi(i,j)=psi(i,j)
            psi(i,j)=(rhs(i,j)-psi(i-1,j)*ddd(i,j)-psi(i+1,j)*fff(i,j)
1             -psi(i,j-1)*bbb(i,j)-psi(i,j+1)*hhh(i,j))/eee(i,j)
c
            dif=abs(psi(i,j)-pipsi(i,j))
            difmx=amax1(dif,difmx)
c
200      continue
c
        if(difmx.ge.0.00001)go to 100
c
        do 400 j=2,nzmx-1
        do 400 i=1,nrmx-1
            if(psi(i,j).lt.0.)then
                nosb=nosb+1
                nosb=min0(nosb,nrmx)
                do 300 jj=1,nzmx
                do 300 ii=1,nrmx
                    psi(ii,jj)=opsi(ii,jj)
300          continue
                go to 500
            endif
400      continue
c
500      return
        end

```

### 부록 3. 토양산소분포프로그램 Source Code

[Source program describing for soil O<sub>2</sub> distribution (o2status.c)]

```
/* This is a finite difference method to solve a diffusion problem using */
/* Crank-Nicolson's method. This program is an illustration of the */
/* constant O2 conc. at left no-flux at right with depth dependent OCR */
/* PROGRAM3: o2status.c (This program should be used with transN.c */

#include <stdio.h>
#include <math.h>
#include <string.h>
#define M 101
#define MM 100
typedef double LIST1[M];
LIST1 x,lower,diag,upper,c1o,c1n,amount,keq,bulkd,pore;
LIST1 fc1,phil,d4,d5,moist,air,pi,mratio,aratio,rt,temp;
double quantity,conc_sum,s_moist,d_moist,depth,dx,dt;
int choice1,choice2,choice3;
void blue();

main()
{
    double ao,max,ko,p1,d1,dg,t,time,count,t1,total,delt;
    double simpson(),dnc,trapezoid(),o2flux,to,tf,rho1,rho2,month;
    int i,j,m,n,ro2,print,xd,xdr;
    void tridia(),initial(),constfc1(),outfile(),outfile1();
    void porosity(),moisture(),const_d45(),temperature(),partition();
    void constphil(),const_coeff1(),locate();
    FILE *file1,*file2,*file3,*file4,*file5,*fopen();
    char *pp2,*pp3,*pp4,*pp5,name1[20],name2[20],name3[20],name4[20],name5[20];
    char answer[10];

    pp2 = ".000";
    pp3 = ".001";
    pp4 = ".004";
    pp5 = ".005";
    n = M;
    blue();
    printf ("\nName of File to Store Data : ");
    scanf ("%s",name1);
    if ((file1 = fopen(name1,"w")) == NULL) {
        printf ("Too bad. The File cannot be opened. \n");
    }
}
```

```

        exit (1);
    }
    strcpy(name2,name1);
    strcat(name2,pp2);
    if ((file2 = fopen(name2,"w")) == NULL) {
        printf ("\n\nThe File cannot be opened. \n");
        printf ("\nUse file name without extention.\n");
        exit (1);
    }
    strcpy(name3,name1);
    strcat(name3,pp3);
    if ((file3 = fopen(name3,"w")) == NULL) {
        printf ("\n\nThe File cannot be opened. \n");
        printf ("\nUse file name without extention.\n");
        exit (1);
    }
    strcpy(name4,name1);
    strcat(name4,pp4);
    if ((file4 = fopen(name4,"w")) == NULL) {
        printf ("\n\nThe File cannot be opened. \n");
        printf ("\nUse file name without extention.\n");
        exit (1);
    }
    strcpy(name5,name1);
    strcat(name5,pp5);
    if ((file5 = fopen(name5,"w")) == NULL) {
        printf ("\n\nThe File cannot be opened. \n");
        printf ("\nUse file name without extention.\n");
        exit (1);
    }
    }
    dt = 1.0;
    dx = 2.0;
    /* printf ("\ndt and dx : ");          */
    /* scanf ("%lf%lf",&dt,&dx);          */
    /* printf ("\nLiquid and Gas Diff. Coeff. (cm2/min) of pure system : "); */
    /* scanf ("%lf%lf",&dl,&dg);          */
    dl = 0.001;   dg = 10.0;   /* dl changed to 0.001 on Dec.8,95  14:20hr */
    print = 500;
    time = 100000.0;
    /* printf ("\nInput print-out time and total time of calculation : "); */
    /* scanf ("%d%lf",&print,&time);      */
    printf ("\nO2 consumption rate (20 C) at surface, and exponential k value : ");

```

```

scanf ("%lf%lf",&max,&ko);
n = M;
ao = 8.43;
ro2 = 0;
p1 = 2.0*dx*dx/dt;
initial(n);
month = 0.0;    to = 0.0;    tf = 0.0;    xd = 0;
temperature(n,&month,&to,&tf,&xd);
partition(n);
porosity(n,&xdr,&rho1,&rho2);
moisture(n);
const_d45(n,dl,dg,p1);
constphil(n,max,ko);
const_coefl(n,p1);
t = 0.0;
count = 0.0;
t1 = 0.0;
j = 0;
delt = 100.0;
fprintf (file3,"      Time   Conc-sum   quantity\n");
locate (10,5);
printf ("Presently calculating : No = ");
while (t < time) {
    constfc1(n,p1,ao,dt);
    tridia(n,fc1);
    for (i=0; i<n; i++)
        c1o[i] = c1n[i];
    count += dt;
    t += dt;
    if ((int)count == print) {
        for (i=0; i<n; i++)
            amount[i] = air[i]*c1n[i];
        conc_sum = simpson(n,c1n);
        quantity = simpson(n,amount);
        fprintf (file3,"%10.0f%10.2f%10.2f\n",t,conc_sum,quantity);
        count = 0.0;
        delt = fabs(conc_sum - t1);
        if (delt < 0.1) {
            break;
        }
        t1 = conc_sum;
        j++;
    }
}

```

```

    }
    locate (10,35);
    printf ("%6.0f",t);
}
printf ("\n\n\n");
c1o[0] = ao;
for (i=0; i<n-1; i++)
    c1o[i+1] = c1n[i];
i = 0;
while (i < n) {
    if ((c1o[i] < 0.001) && (delt <= 1.0)) {
        ro2 = i*(int)dx + 1;
        printf ("\nSteady state was reached in the system at t = %7.1f",t);
        printf ("\nThe depth of aerobic-anaerobic depth is %d cm",ro2);
        o2flux = max*(1.0 - exp(-ko*(double)ro2))/ko;
        dnc = trapezoid(n,ro2,phi1);
        break;
    }
    else if (c1o[i] < 0.001) {
        ro2 = i*(int)dx + 1;
        printf ("\nSteady state was not yet reached at t = %7.1f",t);
        printf ("\nDelta of conc_sum[%d] - conc_sum[%d] = %6.2f",j,j-1,delt);
        printf ("\nThe value of ro2 = %3d",ro2);
        o2flux = max*(1.0 - exp(-ko*(double)ro2))/ko;
        break;
    }
    i++;
}
if ((c1o[n-1] > 0.001) && (delt < 1.0)) {
    printf ("\nThe steady state was finally reached at %7.1f",t);
    printf ("\nThe conc. of O2 at distance at %4d = %6.3f",n,c1o[i-1]);
    o2flux = 0.00;
}
if ((c1o[i-1] > 0.001) && (delt > 1.0)) {
    printf ("\nThere was no aerobic-anaerobic boundary in the system.");
    printf ("\nup to %d cm depth.",i*(int)dx);
    o2flux = 0.00;
}
}
fprintf (file1,"%10.2f%10.2f%10.3f%10.3f%10.4f%10.4f\n",dt,dx,dg,dl,max,ko);
fprintf (file1," x    temp    keq    moist    BD    d4    ");
fprintf (file1," d5    rt    pi    conc.\n");
for (i=0; i<n; i++) {

```

```

    fprintf (file1,"%5.1f%8.3f%8.2f%8.2f%8.2f",x[i],temp[i],keq[i],moist[i],bulkd[i]);
    fprintf (file1,"%8.3f%8.3f%8.3f%8.3f%8.3f\n",d4[i],d5[i],rt[i],pi[i],c1o[i]);
}
fprintf (file1,"\n");
outfile1(file2,name2,ro2,o2flux,dx,dt,max,dl,dg,ko,print,time,to,tf,xd,rho1,rho2,xdr,month,dnc);
/*****
/*****      New beginning      *****/
printf ("\n\nThe formal part of steady state O2 distribution was all finished.\n");
printf ("The next step is to calculate the O2 consumption from this state\n");
printf ("to new moisture state. The time it takes and the changes in the\n");
printf ("O2 distribution will be printed in files.");
printf ("\n\nIf you want to continue input 'y' else 'n' : ");
scanf ("%s",answer);
if (strcmp(answer,"y") != 0) {
    exit(0);
}
printf ("\n\nPress any key to proceed. ");
getch();
blue();
printf ("\n\nInput print-out time and total time of calculation : ");
scanf ("%d%lf",&print,&time);
printf ("\n\nThe values of moisture content distribution were :\n");
printf ("Surface moisture = %5.2f%%\n",s_moist);
printf ("Bottom moisture = %5.2f%%\n",d_moist);
printf ("Depth of bottom = %6.0fcm\n",depth);
printf ("You choose new moisture distribution based on these information.\n");
printf ("When press a key, what you see will disappear.\n");
printf ("\n\nPress any key to proceed : ");
getch();
moisture(n);
const_d45(n,dl,dg,p1);
constphil(n,max,ko);
const_coeff1(n,p1);
t = 0.0;
for (i=0; i<n; i++)
    amount[i] = air[i]*c1n[i];
conc_sum = simpson(n,c1n);
quantity = simpson(n,amount);
fprintf (file5,"t = %10.0f\n",t);
fprintf (file5," x      conc.\n");
for (i=0; i<n; i++)
    fprintf (file5,"%5.1f%8.3f\n",x[i],c1o[i]);

```

```

fprintf (file5, "\n");
count = 0.0;
t1 = 0.0;
delt = 100.0;
while (t <= time) {
    constfc1(n,p1,ao,dt);
    tridia(n,fc1);
    c1n[0] = ao;
    for (i=0; i<n; i++)
        c1o[i] = c1n[i];
    count += dt;
    t += dt;
    if ((int)count == print) {
        for (i=0; i<n; i++)
            amount[i] = air[i]*c1n[i];
        conc_sum = simpson(n,c1n);
        quantity = simpson(n,amount);
        fprintf (file5, "t = %10.0f\n",t);
        fprintf (file5, " x      conc.\n");
        for (i=0; i<n; i++) {
            fprintf (file5, "%5.1f%8.3f\n",x[i],c1o[i]);
        }
        fprintf (file5, "\n");
        count = 0.0;
        delt = fabs(conc_sum - t1);
        if (delt < 0.1) {
            j++;
            break;
        }
        t1 = conc_sum;
    }
}
ro2 = 0; o2flux = 0.0; month = 00.0; dnc = 0.0;
outfile1(file4,name4,ro2,o2flux,dx,dt,max,dl,dg,ko,print,time,to,tf,xd,rho1,rho2,xdr,month,dnc);
}

```

```

void initial(n)
int n;
{
    int i;

    for (i=0; i<n; i++) {

```



```

x[i] = (double)i*dx;
c1o[i] = 0.0;
c1n[i] = 0.0;
phi1[i] = 0.0;
fc1[i] = 0.0;
bulkd[i] = 0.0;
pore[i] = 0.0;
moist[i] = 0.0;
air[i] = 0.0;
d4[i] = 0.0;
d5[i] = 0.0;
mratio[i] = 0.0;
aratio[i] = 0.0;
lower[i] = 0.0;
diag[i] = 0.0;
upper[i] = 0.0;
pi[i] = 0.0;
rt[i] = 0.0;
temp[i] = 0.0;
keq[i] = 0.0;
}
return;
}

```

```

void temperature(n,month,to,tf,xd)
int n,*xd;
double *month,*to,*tf;
{
int i,j;
double delta,slope,ave_t,amp_t,xdump,omega,phase,tt1,tt2;
char t1[5];
void from_file();
blue();
printf ("\nTemperature distribution of the soil affects the biological \n");
printf ("activity within the soil profile.\n");
printf ("Three choices can be made depending upon your model choice.\n\n");
printf ("      Linear model      :          (1)\n");
printf ("      Seasonal temperature model :      (2)\n");
printf ("      Data from a file      :          (3)\n\n");
printf ("Choose 1 or 2 or 3 only.   Your Choice   : ");
scanf ("%d",&choice2);
if ((choice2 < 1) || (choice2 > 3)) {

```

```

printf ("\nToo bad you have to repeat again.");
exit(1);
}
switch (choice2) {
case 1 :
printf ("\nInput surface temp. (To), lower depth temp (Tf) and depth (Xd) : ");
scanf ("%lf%lf%s",to,tf,t1);
*xd = atoi(t1);
if (*xd > (n-1)*(int)dx) {
printf ("\nMake the depth < %d cm.",(n-1)*(int)dx);
printf ("\nToo bad. Repeat again.");
exit(1);
}
j = *xd/(int)dx + 1;
delta = *tf - *to;
slope = delta/(double)(*xd);
for (i=0; i<j; i++)
temp[i] = *to + (double)i*dx*slope;
if (j < n) {
for (i=j; i<n; i++)
temp[i] = *tf;
}
break;
case 2 :
printf ("\nInput average temperature and amplitude of temp. wave : ");
scanf ("%lf%lf",&ave_t,&amp_t);
/* ave_t = 5.5; *****/
/* amp_t = 13.0; *****/
xdump = 140.0;
omega = 0.5236;
phase = -1.964;
printf ("\nInput the month and day as 7.3 as August, 9 : ");
scanf ("%lf",month);
for (i=0; i<n; i++) {
tt1 = x[i]/xdump;
tt2 = omega**month - tt1 + phase;
temp[i] = ave_t + amp_t*exp(-tt1)*sin(tt2);
}
*to = temp[0];
*tf = temp[n-1];
*xd = (n-1)*(int)dx;
break;

```

```

    case 3 :
        from_file(n,temp);
        *to = temp[0];
        *tf = temp[n-1];
        *xd = (n-1)*(int)dx;
        break;
    }
return;
}

void partition(n) /* No solubility at freezing was taken care of */
int n;
{
    int i;

    for (i=0; i<n; i++) {
        keq[i] = 1.363 - 0.04948*temp[i] + 0.00069*temp[i]*temp[i];
        if (temp[i] <= -1.0)
            keq[i] = 0.0;
    }
    return;
}

void porosity(n,xdr,rho1,rho2)
int n,*xdr;
double *rho1,*rho2;
{
    int ij;
    double slope,delta;
    void from_file();

    blue();
    printf ("\nSoil bulk density changes with depth. There are several");
    printf ("\nmeans to approximate the bulk density distributions.");
    printf ("\nTwo options are available for bulk density distribution.");
    printf ("\n\n\tLinear distribution                (1)");
    printf ("\n\tBulk density data from a file            (2)");
    printf ("\n\nChoose 1 or 2 only                Your Choice : ");
    scanf ("%d",&choice1);
    if ((choice1 < 1) || (choice1 > 2)) {
        printf ("\nToo bad you have to repeat again.");
        exit(1);
    }
}

```

```

}
switch (choice1) {
case 1 :
    printf ("\nIt is assumed that bulk density changes linearly from surface");
    printf ("\nto a depth (m) and then it becomes constant from that depth down.");
    printf ("\nBulk density at surface and the depth are needed");
    printf ("\nin order to construct a total porosity profile.");
    printf ("\nInput surface bulk density, depth bulk density, and depth (cm) : ");
    scanf ("%lf%lf%d",rho1,rho2,xdr);

    if (*xdr > (n-1)*(int)dx) {
        printf ("\nMake the depth < %d cm.",(n-1)*(int)dx);
        printf ("\nRepeat again.");
        exit(1);
    }
    j = *xdr/(int)dx + 1;
    delta = *rho2 - *rho1;
    slope = delta/(double)(*xdr);
    for (i=0; i<j; i++) {
        bulkd[i] = (*rho1 + (double)i*dx*slope);
        pore[i] = 1.0 - bulkd[i]/2.65;
    }
    if (j < n) {
        for (i=j; i<n; i++) {
            bulkd[i] = *rho2;
            pore[i] = 1.0 - bulkd[i]/2.65;
        }
    }
    break;
case 2 :
    from_file(n,bulkd);
    for (i=0; i<n; i++)
        pore[i] = 1.0 - bulkd[i]/2.65;
    *rho1 = bulkd[0];
    *rho2 = bulkd[n-1];
    *xdr = (n-1)*(int)dx;
    break;
}
return;
}

void moisture (n)

```

```

int n;
{
    int i;
    void linear(),get_moist();
    blue();
    printf ("\nSoil moisture content changes with depth. There are two");
    printf ("\nmethods to approximate the moisture distributions.");
    printf ("\nTwo options are available for moisture distribution.");
    printf ("\n\n\tLinear distribution                (1)");
    printf ("\n\tMoisture data from a file                (2)");
    printf ("\n\nChoose 1 or 2 only. Your Choice : ");
    scanf ("%d",&choice3);
    if ((choice3 < 1) || (choice3 > 2)) {
        printf ("\nToo bad you have to repeat again.");
        exit(1);
    }

    switch (choice3) {
        case 1 : linear(n);
                break;
        case 2 : get_moist(n,moist);
                break;
    }
    return;
}

void linear(n)
int n;
{
    int i,j;
    double delta,slope;
    blue();
    printf ("\nIt is assumed that moisture content changes linearly from surface");
    printf ("\nto a depth (m) and then it becomes constant from that depth down.");
    printf ("\nSurface moisture content and moisture at the depth are needed");
    printf ("\nin order to construct a moisture profile.");
    printf ("\nInput surface moisture (%%), depth moisture (%%), depth (cm) : ");
    scanf ("%lf%lf%lf",&s_moist,&d_moist,&depth);
    if ((s_moist < 1) || (d_moist < 1) || (depth <= 1)) {
        printf ("\nMoisture content should be in %% and larger than 1.");
        printf ("\nDepth should be at least deeper that 1 cm.");
        printf ("\nToo bad. Repeat again.");
    }
}

```

```

        exit(1);
    }
    if (depth > (n-1)*(int)dx) {
        printf ("\nFor the purpose of calculation, make the depth < %d cm.",(n-1)*(int)dx);
        printf ("\nToo bad. Repeat again.");
        exit(1);
    }
    if ((s_moist > 100*pore[0]) || (d_moist > 100*pore[n-1])) {
        printf ("\nMoisture content should be less than total porosity.");
        printf ("\nRepeat again.");
        exit(1);
    }
    j = (int)depth/(int)dx + 1;
    delta = d_moist - s_moist;
    slope = delta/depth;
    for (i=0; i<j; i++) {
        moist[i] = 0.01*(s_moist + (double)i*dx*slope);
        air[i] = pore[i] - moist[i];
    }
    if (j < n) {
        for (i=j; i<n; i++) {
            moist[i] = 0.01*d_moist;
            air[i] = pore[i] - moist[i];
        }
    }
    for (i=0; i<n-1; i++) {
        mratio[i] = moist[i]/moist[i+1];
        aratio[i] = air[i]/air[i+1];
    }
    mratio[i] = 1.0;
    aratio[i] = 1.0;
    return;
}

```

```

void get_moist(n,moist)
int n;
double moist[M];
{
    void from_file();
    int i,j;

    from_file(n,moist);
}

```

```

for (i=0; i<n; i++) {
    moist[i] = moist[i]; /* data of moist[] in the file is in fraction */
    air[i] = pore[i] - moist[i];
}
for (i=0; i<n-1; i++) {
    mratio[i] = moist[i]/moist[i+1];
    aratio[i] = air[i]/air[i+1];
}
mratio[i] = 1.0;
aratio[i] = 1.0;
s_moist = moist[0];
d_moist = moist[n-1];
depth = (n-1)*(int)dx;
return;
}
void from_file (n,y)
int n;
double y[M];
{
    FILE *file3,*fopen();
    char name3[20],head1[20],head2[20];
    int i,j,total;
/* double xob[50],yob[50],z[4][5],zo[4][5],q[4]; */
/* void calculate(), gauss(); */

    printf ("\n\nThe data file should have xob[i] and yob[i] in 2 columns.");
    printf ("\n\nThe xob[i] is the depth and yob[i] is other measurements.");
/* printf ("\n\nFrom these observations, equation (cubic) will be obtained"); */
/* printf ("\n\nand values with dx = %3.1f for entire depth will be calculated.",dx);*/
/* printf ("\n\nThe first row should be 2 headings of string for x[i] and y[i]."); */
    printf ("\n\nInput the name of file with data : ");
    scanf ("%s",name3);
    if ((file3 = fopen(name3,"r")) == NULL) {
        printf ("The file : %s can not be opened. Repeat. ",name3);
        exit(1);
    }
    fscanf (file3,"%s%s\n",head1,head2);
    i=0;
    while ((fscanf (file3,"%lf%lf\n",&x[i],&y[i])) != EOF)
        i++;
/* total = i; */
/* j = 3; */

```

```

/* calculate (total,xob,yob,j,z0,z); */
/* j++; */
/* gauss (j,z,q); */
/* for (i=0; i<n; i++) */
/* y[i] = q[0] + q[1]*x[i] + q[2]*x[i]*x[i] + q[3]*x[i]*x[i]*x[i]; */
return;
}

void swap_row (z1,j1,k1,m1) /* Swapping the two rows for pivot*/
double z1[4][5]; /* which has higher value */
int j1,k1,m1;
{
    int j;
    double temp;

    for (j=k1; j<m1; j++) {
        temp = z1[j1][j];
        z1[j1][j] = z1[k1][j];
        z1[k1][j] = temp;
    }
    return;
}

double power (x1,ii) /* Power of double by integer */
double x1;
int ii;
{
    double z = 1.0;
    int i;
    for (i=0; i<ii; i++)
        z *= x1;
    return (z);
}

void calculate (j,xob,yob,jj,z0,z1) /* Calculate sum and sum of sq. etc */
int jj; /* j = total no. of pair, jj is order */
double xob[50],yob[50],z0[4][5],z1[4][5]; /* of the equation */
{
    int i,k,m,n;
    double power();
    k=jj+1;

```



```

for (n=0; n<=jj; n++) {
    for (m=0; m<=k; m++)
        z1[n][m] = 0.0;
}
i = 0;
while (i<j) {
    for (n=0; n<=jj; n++) {
        for (m=0; m<=jj; m++)
            z1[n][m] += power(*(xob+i),n+m);
        z1[n][m] += *(yob+i)*power(*(xob+i),n);
    }
    i++;
}
for (n=0; n<=jj; n++) {
    for (m=0; m<=jj; m++)
        z0[n][m] = z1[n][m];
    z0[n][m] = z1[n][m];
}
return;
}

```

```

void gauss (n1,z1,q1)          /*Solution of simultaneous equations by */
double z1[4][5],q1[4];      /*Gauss Elimination method          */
int n1;                      /* n1 = No. of rows which is 1 more than*/
{                             /* order. Since j was order, it was    */
    double ab,big,quot,sum;   /* incremented j++ before passing to  */
    int ij,k,l,m,jj,kpi,ipi,nn; /* Gauss from main(). The value of z[] */
    void swap_row();          /* are are modified by Gauss so z[]   */
                              /* value should be taken before Gauss  */

    m = n1 + 1;
    l = n1 - 1;
    for (k=0; k<l; k++) {
        jj = k;
        big = fabs(z1[k][k]);
        kpi = k + 1;
        for (i=kpi; i<n1; i++) {
            ab = fabs(z1[i][k]);
            if (big < ab) {
                big = ab;
                jj = i;
            }
        }
    }
}

```

```

    if ((j>k)||(j<k))
        swap_row(z1,jj,k,m);
    for (i=kpi; i<n1; i++) {
        quot = z1[i][k]/z1[k][k];
        for (j=kpi; j<m; j++)
            z1[i][j] += - quot*z1[k][j];
    }
    for (i=kpi; i<n1; i++)
        z1[i][k] = 0.0;
}
q1[n1-1] = z1[n1-1][m-1]/z1[n1-1][n1-1];
for (nn=0; nn<l; nn++) {
    sum = 0.0;
    i = n1 - nn - 2;
    ipi = i+1;
    for (j=ipi; j<n1; j++)
        sum += z1[i][j]*q1[j];
    q1[i] = (z1[i][m-1] - sum)/z1[i][i];
}
return;
}

void const_d45(n,dl,dg,p1)    /* pi[] was constructed here */
int n;
double dl,dg,p1;
{
    int i;
    for (i=0; i<n; i++) {
        rt[i] = air[i] + keq[i]*moist[i];    /* This one here, moist[] was taken out */
        d5[i] = 0.75*dg*(air[i] - 0.1);    /* make 0.1 changeable */
        pi[i] = p1*rt[i];
        if ((air[i] <= 0.1) || (d5[i] <= dl)) {
            d5[i] = dl;
            d4[i] = dl;
        }
        else
            d4[i] = d5[i] + moist[i]*dl*keq[i]; /* here air[i] should not come */
        if (d4[i] <= dl) /* modif. 10.09.96 */
            d4[i] = dl;
    }
    return;
}

```

```

void constphil(n,max,ko)
int n;
double max,ko;
{
    int i;
    double rtemp,slope;

    slope = max/19.0; /* max is value at 20 C while 1.0 C is threshold */
    for (i=0; i<n; i++) {
        rtemp = temp[i] - 1.0;
        if (rtemp < 1.0)
            rtemp = 0.0;
        phil[i] = slope*rtemp*exp(-ko*x[i]);
    }
    return;
}

```

```

void const_coeff1(n,p1) /* for O2, only */
int n; /* const. at x = 0, no flux x = n */
double p1;
{
    int i;
    /* d5[-1] = d5[0], ratio[-1] = ratio[0] */
    lower[0] = 1.0; /* It is fictitious value */
    diag[0] = d5[0]*aratio[0] + d5[0] + p1;
    upper[0] = d5[0];
    for (i=1; i<n-1; i++) {
        lower[i] = aratio[i-1]*d5[i-1];
        diag[i] = lower[i] + d5[i] + p1;
        upper[i] = d5[i];
    }
    lower[i] = aratio[i-1]*d5[i-1] + d5[i];
    diag[i] = lower[i] + p1;
    upper[i] = 1.0; /* It is fictitious value */
    return;
}

```

```

void constfc1(n,p1,ao,dt) /* this is for O2 */
int n; /* p1 = 2*dx*dx/dt */

```

```

double p1,ao,dt;
{
    int i;
    double t1,t2,t3;

    t1 = aratio[0]*d5[0] + d5[0] - p1;
    t3 = p1*dt/air[0]; /* moist[0] was taken out FVDEPTH4.C, 8/9/95 */
    fc1[0] = t1*c1o[0] - d5[0]*c1o[1] - 2*aratio[0]*d5[0]*ao + t3*phil[0];
    for (i=1; i<n-1; i++) {
        t1 = aratio[i-1]*d5[i-1];
        t2 = t1 + d5[i] - p1;
        t3 = p1*dt/air[i]; /* moist[i] was taken out 8/9/95 */
        fc1[i] = -t1*c1o[i-1] + t2*c1o[i] - d5[i]*c1o[i+1] + t3*phil[i];
    }
    t1 = aratio[i-1]*d5[i-1] + d5[i];
    t2 = t1 - p1;
    t3 = p1*dt/air[i]; /* moist[i] was taken out 8/9/95 */
    fc1[i] = -t1*c1o[i-1] + t2*c1o[i] + t3*phil[i];
    return;
}

```

```

void tridia (n,fa)

```

```

int n;

```

```

double *fa;

```

```

{

```

```

    LIST1 alpha,beta,yy;

```

```

    int k;

```

```

    alpha[0] = - diag[0];

```

```

    beta[0] = upper[0]/alpha[0];

```

```

    yy[0] = fa[0]/alpha[0];

```

```

    for (k=1; k<n; k++) {

```

```

        alpha[k] = - diag[k] - lower[k]*beta[k-1];

```

```

        beta[k] = upper[k]/alpha[k];

```

```

        yy[k] = (fa[k] - lower[k]*yy[k-1])/alpha[k];

```

```

        if (yy[k] < 0.0) /* This was added to check - value */

```

```

            yy[k] = 0.0;

```

```

    }

```

```

    k--;

```

```

    c1n[k] = yy[k];

```

```

    while ( --k >= 0)

```

```

        c1n[k] = yy[k] - beta[k]*c1n[k+1];

```

```

    return;

```

```
}
```

```
double trapezoid (n,ro2,phil) /* This is the total biological activity */  
int n,ro2; /* which was not satisfied by OCR and */  
double *phil; /* ready to denitrify, below O2 zone. */
```

```
{  
    int i,j;  
    double sum;  
  
    j = n - ro2 + 1;  
    sum = 0.0;  
    for (i=ro2; i<n; i++)  
        sum += phil[i];  
    sum = sum - 0.5*(phil[ro2] +phil[n-1]);  
    return (sum);  
}
```

```
double simpson(n,yy)  
int n;  
double *yy;  
{  
    double z,oddsun,evensun;  
    int j;  
  
    oddsun = 0.0;  
    evensun = 0.0;  
    for (j=2; j<n; j++) {  
        if ((j%2) == 1)  
            oddsun += yy[j-1];  
        else  
            evensun += yy[j-1];  
    }  
    z = (yy[0] + yy[j-1] + 4*evensun + 2*oddsun)*dx/3;  
    return (z);  
}
```

```
void  
outfile1(file2,name2,ro2,o2flux,dx,dt,max,dl,dg,ko,print,time,to,tf,xd,rho1,rho2,xdr,month,dnc)  
FILE *file2;  
char *name2;  
int ro2,print,xd,xdr;
```

```

double o2flux,dx,dt,max,dl,dg,ko,time,to,tf,rho1,rho2,month,dnc;
{
    fprintf (file2,"File = %s          ",name2);
    switch (choice3) {
        case 1 : fprintf (file2,"Linear model :\n");
            fprintf (file2,"S_moist = %-10.2f  D_moist = %-10.2f",s_moist,d_moist);
            fprintf (file2,"  Depth = %-6.2f\n",depth);
            break;
        case 2 : fprintf (file2,"Read_file model moisture : \n");
            break;
    }
    fprintf (file2,"Print = %-5d          Time = %-7.1f\n",print,time);
    fprintf (file2,"dx = %-10.1f          dt = %-10.1f \n",dx,dt);
    switch (choice2) {
        case 1 : fprintf (file2,"Temp distribution is linear model : \n");
            fprintf (file2,"To = %-10.1f          Tf = %-10.1f          Xd = %5d\n",to,tf,xd);
            break;
        case 2 : fprintf (file2,"Seasonal temperature distribution at %-5.2f\n",month);
            break;
        case 3 : fprintf (file2,"Temp. Data from file and cubic approximation.\n");
            break;
    }
}

switch (choice1) {
    case 1 : fprintf (file2,"Density distribution is linear model : \n");
        break;
    case 2 : fprintf (file2,"Density Data from file and cubic approximation.\n");
        break;
}

fprintf (file2,"rho1 = %-10.2f          rho2 = %-10.2f          Xdr = %5d\n",rho1,rho2,xdr);
fprintf (file2,"Dl = %-8.4f          Dg = %-8.4f\n",dl,dg);
fprintf (file2,"OCR = %-8.5f          ko = %-8.4f\n",max,ko);
fprintf (file2,"Depth of O2 = %d          O2 flux = %-8.4f\n",ro2,o2flux);
fprintf (file2,"Total Denitrification Capacity = %-8.4f\n",dnc);
}

#define BLUE 16
#define FWHITE 15
void blue()
{
    int color;
    void cls_c(int);
    color = FWHITE | BLUE;
}

```

```

    cls_c(color);
}

void cls_c (int color)
{
    void c_scroll(int,int,int,int,int,int,int);
    void locate(int,int);
    int row,col,wide,deep,num,f;
    row = 0;
    col = 0;
    wide = 80;
    deep = 24;
    num = 0;
    f = 0x07;
    c_scroll(row,col,wide,deep,num,f,color);
    locate(row,col);
}

#include <dos.h>
#define VIDEO 0x10
void c_scroll(int row, int col, int wide, int deep, int num, int f, int color)
{
    union REGS ireg;
    ireg.h.ah = f;
    ireg.h.al = num;
    ireg.h.ch = row;
    ireg.h.cl = col;
    ireg.h.dh = deep;
    ireg.h.dl = wide;
    ireg.h.bh = color;
    int86(VIDEO,&ireg,&ireg);
}

void locate (int row,int col)
{
    union REGS r;
    r.h.ah = 2;
    r.h.bh = 0;
    r.h.dh = row;
    r.h.dl = col;
    int86 (VIDEO,&r,&r);
}

```

#### 부록 4 : 질소변환 및 분포 프로그램 Source Code

[Source program describing for N transformation and distribution (transN.c)]

```

/* This is a finite difference method to solve a diffusion problem using */
/* Crank-Nicolson's method. This program is an illustration of the */
/* no-flux and radiative flux boundary condition at left and at right with */
/* reversible chem. c1,c2,c3,c4 and c5 for O2, NO3, NO2, N2O and N2 */
/* It is assumed that O2 profile is steady, exponential and related to D,K */
/* Effective D due to variable moisture content, and depth dependent */
/* bioactivity was added for the numerator in which surface activity == 1. */
/* O2 and N2 gas were expressed based on theta1. However, in order to make*/
/* material balance, Flux of N2, Sum of N2 were multiplied with 1/ratio so */
/* that it is based on liquid values */
/* This program requires data file with .001 for O2, moist, rt, pi, clo etc */
/* This program was modified on July 14, 1995 with bulk density change. */
/* Threshold T = 1.0 C that's why it is DENIT1.C */
/* PROGRAM4: transN.c */
/*****
/* Be careful flux and _q[i] were multiplied 1000 times 2.14.97 */
/* so that it is expressed in micro mol basis */
*****/

#include <stdio.h>
#include <math.h>
#include <string.h>
#define M 101
#define N 50
#define NN 10
#define MM 100
typedef double LIST1[M];
LIST1 x,c1o,c2o,c2n,c3o,c3n,c4o,c4n,c5o,c5n,rt,amount,moist,air,temp,keq;
LIST1 fc2,fc3,fc4,fc5,phi1,phi2,phi3,phi4,phi5,pi,d4,d5,bulkd,mratio,aratio;
LIST1 low23,diag23,upper23,low4,dia4,up4,low5,dia5,up5,temp1,air_q,liq_q;
void blue();
double quantity[NN],conc_sum[NN],dx,dt,xd2,xd3,xd4;

main()
{
double ao,c2i,c3i,c4i,max,ko,dl,dg,k1,k2,k3,k4,k5,k6,p1,sumc4g,sumc4l;
double t,time,count,t1,total,tt,oldval;
double c4flux,c5flux,c4fsum,c5fsum,gfsum,fratio,simpson();
double sumc2,sumc3,sumc4,sumc5,sum;

```



```

int i,j,m,n,lno3,rno3,lno2,rno2,ln2o,rn2o,print,choice,number;
void initial(),n_initial(),n_linear(),n_box(),constphi1(),constphi();
void constfc23(),constfc4(),constfc5(),air_ratio();
void const_coeff23(),const_coeff4(),const_coeff5();
void tridiagon(),output(),outfile(),outfile1(),outfile2(),outfile3();
FILE *file1,*file2,*file3,*file4,*file5,*fopen();
char *pp2,*pp3,*pp4,name1[20],name2[20],name3[20],name4[20],name5[20];
char h1[10],h2[10],h3[10],h4[10],h5[10],h6[10],h7[10],h8[10],h9[10],h10[10];
pp2 = ".000";
pp3 = ".001";
pp4 = ".002";
blue();
printf ("\nName of File to Store Data : ");
scanf ("%s",name1);
if ((file1 = fopen(name1,"w")) == NULL) {
    printf ("Too bad. The File cannot be opened. \n");
    exit (1);
}
printf ("\nName of File created by ODEPTH program, that contains ");
printf ("\nDate on O2 distribution : ");
scanf ("%s",name5);
if ((file5 = fopen(name5,"r")) == NULL) {
    printf ("Too bad. The File name was wrong and it cannot be opened. \n");
    exit (1);
}
strcpy(name2,name1);
strcat(name2,pp2);
if ((file2 = fopen(name2,"w")) == NULL) {
    printf ("\n\nThe File cannot be opened. \n");
    printf ("\nUse file name without extention.\n");
    exit (1);
}
strcpy(name3,name1);
strcat(name3,pp3);
if ((file3 = fopen(name3,"w")) == NULL) {
    printf ("\n\nThe File cannot be opened. \n");
    printf ("\nUse file name without extention.\n");
    exit (1);
}
strcpy(name4,name1);
strcat(name4,pp4);
if ((file4 = fopen(name4,"w")) == NULL) {

```

```

    printf ("\n\nThe File cannot be opened. \n");
    printf ("\nUse file name without extention.\n");
    exit (1);
}
printf ("\nPrint-out time and total time : ");
scanf ("%d%lf",&print,&time);
n = M;
ao = 8.43;
initial(n);
fscanf (file5,"%lf%lf%lf%lf%lf%lf\n",&dt,&dx,&dg,&dl,&max,&ko);
fscanf (file5,"%s%s%s%s%s%s%s%s%s\n",h1,h2,h3,h4,h5,h6,h7,h8,h9,h10);
for (i=0; i<n; i++) {
    fscanf (file5,"%lf%lf%lf%lf%lf",&x[i],&temp[i],&keq[i],&moist[i],&bulk[i]);
    fscanf (file5,"%lf%lf%lf%lf%lf\n",&d4[i],&d5[i],&rt[i],&pi[i],&c1o[i]);
}
number = 1;
n_initial(n,number,&choice,&lno3,&rno3,&c2i,&c2o,&c2n);
number = 2;
n_initial(n,number,&choice,&lno2,&rno2,&c3i,&c3o,&c3n);
number = 3;
n_initial(n,number,&choice,&lno2,&rno2o,&c4i,&c4o,&c4n);

/* printf ("\nEnter rate constants: (k1), (k2), (k3), (k4) : "); */
/* scanf ("%lf%lf%lf%lf",&k1,&k2,&k3,&k4); */
/* printf ("\nEnter escape rate constants for N2O (k5), and N2 (k6) : "); */
/* scanf ("%lf%lf",&k5,&k6); */
k1 = 10000.0; k2 = 0.1; k3 = 100.0; k4 = 0.1; k5 = 0.05; k6 = 0.05;

p1 = 2.0*dx*dx/dt;
constphil(n,max,ko);
air_ratio(n);
t = 0.0;
count = 0;
j = 0;
c4fsum = 0.0;
c5fsum = 0.0;
gfsum = 0.0;
const_coeff23(n,p1,dl);
const_coeff4(n,pi);
const_coeff5(n,p1);
fprintf(file3,"Time Sum_NO3 Sum_NO2 S_N2O(L) S_N2O(G) Sum_N2 ");
fprintf(file3,"Sum(N) Total(N) DeltaNO3\n");

```

```

fprintf(file4,"Time      C4flux  C4fsum  C5flux  C5fsum  Fratio  GFsum\n");
oldval = 0.0;
while (t < time) {
    constphi(n,k1,k2,k3,k4);
    constfc23(n,p1,d1);
    tridiagon(n,c2n,low23,diag23,upper23,fc2);
    tridiagon(n,c3n,low23,diag23,upper23,fc3);
    constfc4(n,k5);
    tridiagon(n,c4n,low4,dia4,up4,fc4);
    constfc5(n,p1,k6);
    tridiagon(n,c5n,low5,dia5,up5,fc5);
    for (i=0; i<n; i++) {
        c2o[i] = c2n[i];
        c3o[i] = c3n[i];
        c4o[i] = c4n[i];
        c5o[i] = c5n[i];
    }
    /* here the gas flux of N2O was modified so that it is */
    /* proportional to gaseous N2O only, not total as before */
    /* like rt[0] but 1/keq[0]. modified on 02.27.96 */
    c4flux = 2.0*air[0]*k5*c4n[0]; /* October 7, 1996.: not N2O but N2O-N */
    c5flux = 2.0*air[0]*k6*c5n[0]; /* It is gas flux from air porosity */
    c4fsum += c4flux;
    c5fsum += c5flux;
    t += dt;
    count += dt;
    if (((int)t % N)==0) {
        if (c5flux >= 0.00001)
            fratio = c4flux/c5flux;
        else
            fratio = 0.0;
        gfsum = c4fsum + c5fsum;
        outfile3(file4,t,c4flux,c4fsum,c5flux,c5fsum,fratio,gfsum);
    }
    if (((int)t % MM) == 0) {
        for (i=0; i<n; i++)
            temp1[i] = moist[i]*c2n[i];
        sumc2 = simpson(n,temp1); /* quantity of NO3 in solution */
        for (i=0; i<n; i++)
            temp1[i] = moist[i]*c3n[i];
        sumc3 = simpson(n,temp1); /* quantity of NO2 in solution */
        for (i=0; i<n; i++)

```

```

    air_q[i] = air[i]*c4n[i];
    sumc4g = simpson(n,air_q); /* quantity of N2O in gas */
    for (i=0; i<n; i++) {
        temp1[i] = rt[i]*c4n[i]; /* moist[] taken out */
        liq_q[i] = temp1[i] - air_q[i];
    }
    sumc4 = simpson(n,temp1); /* quantity of total N2O, gas+liquid */
    sumc4l = sumc4 - sumc4g; /* quantity in liquid phase */
    for (i=0; i<n; i++)
        temp1[i] = air[i]*c5n[i];
    sumc5 = simpson(n,temp1); /* Sum based on gas basis */
    sum = sumc2 + sumc3 + 2.0*sumc4 + 2.0*sumc5;
    total = c4fsum + c5fsum + sum;
    outfile2(file3,t,sumc2,sumc3,sumc4l,sumc4g,sumc5,sum,total,oldval);
    oldval = sumc2;
}
if ((int)count == print) {
    output(n,t);
    outfile(file1,n,t);
    count = 0.0;
}
}
outfile1(file2,name2,name5,choice,lno3,rno3,lno2,rno2,ln2o,rn2o,c2i,c3i,c4i,
        dx,max,dl,dg,ko,k1,k2,k3,k4,k5,k6,print,time);
}

```

```

void initial(n)
int n;
{
    int i,j;
    for (i=0; i<n; i++) {
        c5o[i] = 0.0;
        c5n[i] = 0.0;
        phi1[i] = 0.0;
        phi2[i] = 0.0;
        phi3[i] = 0.0;
        phi4[i] = 0.0;
        phi5[i] = 0.0;
        fc2[i] = 0.0;
        fc3[i] = 0.0;
        fc4[i] = 0.0;
        fc5[i] = 0.0;
    }
}

```

```

moist[i] = 0.0;
air[i] = 0.0;
d4[i] = 0.0;
d5[i] = 0.0;
bulkd[i] = 0.0;
mratio[i] = 0.0;
aratio[i] = 0.0;
low23[i] = 0.0;
diag23[i] = 0.0;
upper23[i] = 0.0;
low4[i] = 0.0;
dia4[i] = 0.0;
up4[i] = 0.0;
low5[i] = 0.0;
dia5[i] = 0.0;
up5[i] = 0.0;
pi[i] = 0.0;
amount[i] = 0.0;
temp1[i] = 0.0;
temp[i] = 0.0;
keq[i] = 0.0;
air_q[i] = 0.0;
liq_q[i] = 0.0;
}
for (j=0; j<NN; j++) {
    quantity[j] = 0.0;
    conc_sum[j] = 0.0;
}
return;
}

```

```

void n_initial(n,number,choice,ln,rn,ci,cio,cin)
int n,number,*choice,*ln,*rn;
double *ci,*cio,*cin;
{
    int i;
    void n_box(),n_linear(),from_file();
    char *pp;

    blue();
    if (number == 1)
        pp = "NO3";

```

```

if (number == 2)
    pp = "NO2";
if (number == 3)
    pp = "N2O";
printf ("\nYou may wish to define initial conditions of %s : ",pp);
printf ("\nbased on O2 distribution.");
printf ("\n*****");
printf ("\nThere are 3 different initial conditions : ");
printf ("\n 1. One is box function of any magnitude at any location.");
printf ("\n 2. The other is linear function from surface to a depth.");
printf ("\n 3. The third one is from a file with data. ");
printf ("\n*****");
printf ("\n\nChoose 1 or 3 only.   Your Choice   : ");
scanf ("%d",&choice);
if ((*choice < 1) || (*choice > 3)) {
    printf ("\nToo bad you have to repeat again.");
    exit(1);
}
switch (*choice) {
    case 1 : printf ("\nInit. conc. of %s, left and right grid No. : ",pp);
             scanf ("%lf%ld%ld",&ci,&ln,&rn);
             if (*rn > n-1) {
                 printf ("\nRight side grid No. can not exceed %d",n-1);
                 printf ("\nsince dx = %3.1f cm. Repeat.",dx);
                 exit(1);
             }
             n_box(n,ln,rn,ci,cio,cin);
             break;
    case 2 : printf ("\nInput surface conc. %s, lower depth (xd) : ");
             scanf ("%lf%lf",&ci,&xd2);
             n_linear(n,ci,xd2,cio,cin);
             break;
    case 3 : from_file(n,cio,cin);
             break;
}
return;
}

void n_box(n,ln,rn,ci,cio,cin)
int n,*ln,*rn;
double *ci,*cio,*cin;
{

```

```

int i;
for (i=0; i<n; i++) {
    if ((i < *ln)||i > *rn) {
        cio[i] = 0.0;
        cin[i] = 0.0;
    }
    else {
        cio[i] = *ci;
        cin[i] = *ci;
    }
}
return;
}

```

```

void n_linear(n,ci,xd,cio,cin)

```

```

int n;
double *ci,xd,*cio,*cin;
{
    int ij;
    double dist,delt,slope;

    dist = xd;
    if ((int)(dist/dx) > n) {
        printf ("\nFor the purpose of calculation, make the depth < %d cm.",(n-1)*(int)dx);
        printf ("\nToo bad. Repeat again.");
        exit(1);
    }
    j = (int)(dist/dx) + 1;
    delt = *ci - 0.0; /* it is assumed that conc. at xd = 0.0 */
    if (xd < 1.0) {
        xd = 1.0;
        slope = 0.0;
        for (i=0; i<n; i++) {
            cio[i] = 0.0;
            cin[i] = 0.0;
        }
    }
    else {
        slope = delt/dist;
        for (i=0; i<j; i++) {
            cio[i] = *ci - (double)i*dx*slope;
            cin[i] = *ci - (double)i*dx*slope;
        }
    }
}

```

```

    }
    for (i=j; i<n; i++) {
        cio[i] = 0.0;
        cin[i] = 0.0;
    }
}
return;
}

```

```

void from_file (n,cio,cin)
int n;
double *cio,*cin;
{
    FILE *file3,*fopen();
    char name3[20],head1[20],head2[20];
    int i,j,total;

    printf ("\n\nThe data file should have xob[i] and yob[i] in 2 columns.");
    printf ("\nThe xob[i] is the depth and yob[i] is other measurements.");
    printf ("\nThe first line should have titles such as depth, conc etc.");
    printf ("\n\nInput the name of file with data : ");
    scanf ("%s",name3);
    if ((file3 = fopen(name3,"r")) == NULL) {
        printf ("The file : %s can not be opened. Repeat. ",name3);
        exit(1);
    }
    fscanf (file3,"%s%s\n",head1,head2);
    i=0;
    while ((fscanf (file3,"%lf%lf\n",&x[i],&cio[i])) != EOF) {
        cin[i] = cio[i];
        i++;
    }
    return;
}

```

```

void air_ratio (n)
int n;
{
    int i;

    for (i=0; i<n; i++)
        air[i] = 1.0 - bulkd[i]/2.65 - moist[i];
}

```



```

for (i=0; i<n-1; i++) {
    mratio[i] = moist[i]/moist[i+1];
    aratio[i] = air[i]/air[i+1];
}
mratio[i] = 1.0;
aratio[i] = 1.0;
return;
}

void constphil(n,max,ko)
int n;
double max,ko;
{
    int i;
    double rtemp,slope;

    slope = max/19.0; /* max is value at 20 C while 1.0 C is threshold */
    for (i=0; i<n; i++) {
        rtemp = temp[i] - 1.0;
        if (rtemp < 1.0)
            rtemp = 0.0;
        phil[i] = slope*rtemp*exp(-ko*x[i]);
    }
    return;
}

void constphi(n,k1,k2,k3,k4)
int n;
double k1,k2,k3,k4;
{
    /* both nitrate and nitrite had division by moist[] because phi2 or */
    /* phi3 was based on unit volume of soil rather than solution. */
    /* This is the difference between FVDENIT2 and DENIT. Nov.9.95 */
    /* 100 times for activity in order to boost the activity was deleted */
    /* and it will be called DENIT1M.C April 2, 1996 */
    int i;
    double denom,factor;

    factor = 2.1; /* ratio between aerobic and anaerobic act., not 3.67 */
    for (i=0; i<n; i++) {
        denom = (1.0+4*k1*c1o[i]+2*k2*c2o[i]+4.0*k3*c3o[i]*c3of[i]+2*k4*keq[i]*c4o[i])*factor;
        phi2[i] = phil[i]*k2*c2o[i]/(denom*moist[i]);
    }
}

```

```

    phi3[i] = phi1[i]*(k2*c2o[i] - 2.0*k3*c3o[i]*c3o[i])/(denom*moist[i]);
    phi4[i] = phi1[i]*(k3*c3o[i]*c3o[i] - k4*keq[i]*c4o[i])/denom;
    phi5[i] = phi1[i]*k4*keq[i]*c4o[i]/denom;
}
return;
}

```

```

void const_coeff23(n,p1,dl)          /* for NO3, NO2 only */
int n;                             /* p1 = 2*dx*dx/dt */
double p1,dl;
{
    int i;
    double t1;
    t1 = p1/dl;
    low23[0] = 1.0;                /** It is fictitious value **/
    diag23[0] = mratio[0] + 1.0 + t1;
    upper23[0] = mratio[0] + 1.0;
    for (i=1; i<n-1; i++) {
        low23[i] = mratio[i-1];
        diag23[i] = low23[i] + 1.0 + t1;
        upper23[i] = 1.0;
    }
    low23[i] = mratio[i-1] + 1.0;
    diag23[i] = low23[i] + t1;
    upper23[i] = 1.0;              /** It is fictitious value **/
    return;
}

```

```

void constfc23(n,p1,dl)
int n;                             /* p1 = 2*dx*dx/dt */
double p1,dl;
{
    int i;
    double t1,t2,t3;
    t1 = p1/dl;
    t2 = t1*dt;
    fc2[0] = (mratio[0] + 1 - t1)*c2o[0] - (mratio[0] + 1)*c2o[1] + t2*phi2[0];
    fc3[0] = (mratio[0] + 1 - t1)*c3o[0] - (mratio[0] + 1)*c3o[1] - t2*phi3[0];
    for (i=1; i<n-1; i++) {
        t3 = mratio[i-1] + 1.0 - t1;
        fc2[i] = -mratio[i-1]*c2o[i-1] + t3*c2o[i] - c2o[i+1] + t2*phi2[i];
    }
}

```

```

    fc3[i] = -mratio[i-1]*c3o[i-1] + t3*c3o[i] - c3o[i+1] - t2*phi3[i];
}
t3 = mratio[i-1] + 1.0 - t1;
fc2[i] = -(mratio[i-1] + 1.0)*c2o[i-1] + t3*c2o[i] + t2*phi2[i];
fc3[i] = -(mratio[i-1] + 1.0)*c3o[i-1] + t3*c3o[i] - t2*phi3[i];
return;
}

void const_coeff4(n,pi)          /* for N2O only */
int n;
double *pi;
{
    int i;
                                /* d4[-1] = d4[0], ratio[-1] = ratio[0] */
    low4[0] = 1.0;              /** It is fictitious value **/
    dia4[0] = 2.0*d4[0] + pi[0];
    up4[0] = 2.0*d4[0];
    for (i=1; i<n-1; i++) {
        low4[i] = d4[i-1];
        dia4[i] = d4[i-1] + d4[i] + pi[i];
        up4[i] = d4[i];
    }
    low4[i] = d4[i-1] + d4[i];
    dia4[i] = low4[i] + pi[i];
    up4[i] = 1.0;              /** It is fictitious value **/
    return;
}

void constfc4(n,k5)
int n;
double k5;
{
    int i;
    double t1,t2,t3;
    /*****
t1 = 4.0*k5*dx*air[0];          /* air[i] was left October 7, 1996 */
t2 = 2.0*d4[0] - pi[0] + t1;
t3 = 2.0*dx*dx;                /* moist[] was taken out. Nov.9.95 */
fc4[0] = t2*c4o[0] - 2.0*d4[0]*c4o[1] - t3*phi4[0];
for (i=1; i<n-1; i++)
    fc4[i] = -d4[i-1]*c4o[i-1]+(d4[i-1]+d4[i]-pi[i])*c4o[i]-d4[i]*c4o[i+1]-t3*phi4[i];
    fc4[i] = -(d4[i-1]+d4[i])*c4o[i-1]+(d4[i-1]+d4[i]-pi[i])*c4o[i] - t3*phi4[i];

```

```

    return;
}

void const_coeff5(n,p1)      /* for N2, only */
int n;
double p1;
{
    int i;
                                /* d5[-1] = d5[0], ratio[-1] = ratio[0] */
    low5[0] = 1.0;              /* It is fictitious value */
    dia5[0] = 2.0*d5[0] + p1;
    up5[0] = 2.0*d5[0];
    for (i=1; i<n-1; i++) {
        low5[i] = aratio[i-1]*d5[i-1];
        dia5[i] = low5[i] + d5[i] + p1;
        up5[i] = d5[i];
    }
    low5[i] = aratio[i-1]*d5[i-1] + d5[i];
    dia5[i] = low5[i] + p1;
    up5[i] = 1.0;              /* It is fictitious value */
    return;
}

void constfc5(n,p1,k6)
int n;
double p1,k6;
{
    int i;
    double t1,t2,t3,t4;

    t1 = 4.0*k6*dx;           /* air[0] was taken out October 7, 1996 */
    t2 = 2.0*d5[0] -p1 + t1;
    t3 = 2.0*dx*dx;
    t4 = t3/air[0];           /* moist[] was taken out here. Nov.9.95 */
    fc5[0] = t2*c5o[0] - 2.0*d5[0]*c5o[1] - t4*phi5[0];
    for (i=1; i<n-1; i++) {
        t1 = d5[i-1]*aratio[i-1];
        t2 = t1 + d5[i] - p1;
        t4 = t3/air[i];       /* moist[] was taken out . Nov.9.95 */
        fc5[i] = -t1*c5o[i-1] + t2*c5o[i] - d5[i]*c5o[i+1] - t4*phi5[i];
    }
    t1 = d5[i-1]*aratio[i-1] + d5[i];
}

```

```

t2 = t1 - p1;
t4 = t3/air[i];          /* moist[] was taken out . Nov.9.95 */
fc5[i] = -t1*c5o[i-1] + t2*c5o[i] - t4*phi5[i];
return;
)

```

```

void tridiagon (n,nconc,aa,bb,cc,fa)
int n;
double *nconc,*aa,*bb,*cc,*fa;
{
LIST1 alpha,beta,yy;
int k;
alpha[0] = - bb[0];
beta[0] = cc[0]/alpha[0];
yy[0] = fa[0]/alpha[0];
for (k=1; k<n; k++) {
alpha[k] = - bb[k] - aa[k]*beta[k-1];
beta[k] = cc[k]/alpha[k];
yy[k] = (fa[k] - aa[k]*yy[k-1])/alpha[k];
if (yy[k] < 0.0) /* This was added to check - value */
yy[k] = 0.0;
}
k--;
nconc[k] = yy[k];
while ( --k >= 0)
nconc[k] = yy[k] - beta[k]*nconc[k+1];
return;
}

```

```

double simpson(n,yy)
int n;
double *yy;
{
double z,oddsun,evensum;
int j;

oddsun = 0.0;
evensum = 0.0;
for (j=2; j<n; j++) {
if ((j%2) == 1)
oddsun += yy[j-1];
else

```

```

        evensum += yy[j-1];
    }
    z = (yy[0] + yy[j-1] + 4*evensum + 2*oddsun)*dx/3;
    return (z);
}

```

```

void output (n,t)
int n;
double t;
{
    int i;

    printf ("Time = %7.1f\n",t);
    for (i=0; i<n; i++) {
        printf ("%7.1f%7.2f%7.2f%7.2f%7.2f",x[i],moist[i],temp[i],c1o[i],c2n[i]);
        printf ("%7.2f%7.2f%7.2f%7.2f%7.2f\n",c3n[i],c4n[i],liq_q[i],air_q[i],c5n[i]);
    }
    printf ("\n");
}

```

```

void outfile (file1,n,t)
FILE *file1;
int n;
double t;
{
    int i;
    double tt1,tt2;

    fprintf (file1,"Time = %7.1f\n",t);
    fprintf (file1," Depth   Theta  Temp    C1      C2      C3      C4      ");
    fprintf (file1,"  liq_q   air_q   C5\n");
    for (i=0; i<n; i++) {
        tt1 = 1000.0*liq_q[i]; /* Be careful, it is 1000 times */
        tt2 = 1000.0*air_q[i]; /* February 14, 1997 It is temporaty */
        fprintf (file1,"%7.1f%7.2f%7.2f%7.2f%7.2f",x[i],moist[i],temp[i],c1o[i],c2n[i]);
        fprintf (file1,"%7.2f%9.5f%11.7f%11.7f%10.5f\n",c3n[i],c4n[i],tt1,tt2,c5n[i]);
    }
    fprintf (file1,"\n\n");
}

```

```

void outfile1(file2,name2,name5,choice,lno3,rno3,lno2,rno2,ln2o,rn2o,c2i,c3i,c4i,

```

```

dx,max,dl,dg,ko,k1,k2,k3,k4,k5,k6,print,time)
FILE *file2;
char *name2,*name5;
int choice,lno3,rno3,lno2,rno2,lno2,rno2,print;
double c2i,c3i,c4i,dx,max,dl,dg,ko,k1,k2,k3,k4,k5,k6,time;
{
    fprintf (file2,"File = %s :   O2 file = %s\n",name2,name5);
    fprintf (file2,"Print = %-5d           Time = %-7.1f           ",print,time);
    fprintf (file2,"dx = %-4.1f \n",dx);
    if (choice == 1) {
        fprintf (file2,"Square conc. distribution model : \n");
        fprintf (file2,"NO3 = %-6.2f           ",c2i);
        fprintf (file2,"left dx = %d           right dx = %d\n",lno3,rno3);
        fprintf (file2,"NO2 = %-6.2f           ",c3i);
        fprintf (file2,"left dx = %d           right dx = %d\n",lno2,rno2);
        fprintf (file2,"N2O = %-6.2f           ",c4i);
        fprintf (file2,"left dx = %d           right dx = %d\n",lno2,rno2);
    }
    if (choice == 2) {
        fprintf (file2,"Linear conc. distribution model : \n");
        fprintf (file2,"NO3 = %-6.2f           ",c2i);
        fprintf (file2,"Xd = %-6.1f\n",xd2);
        fprintf (file2,"NO2 = %-6.2f           ",c3i);
        fprintf (file2,"Xd = %-6.1f\n",xd3);
        fprintf (file2,"N2O = %-6.2f           ",c4i);
        fprintf (file2,"Xd = %-6.1f\n",xd4);
    }
    fprintf (file2,"k1 = %-8.2f           k2 = %-8.4f           ",k1,k2);
    fprintf (file2,"k3 = %-8.4f\n",k3);
    fprintf (file2,"k4 = %-8.4f           k5 = %-8.2f\n",k4,k5);
    fprintf (file2,"Dl = %-8.4f           Dg = %-8.4f\n",dl,dg);
    fprintf (file2,"OCR = %-8.5f           ko = %-8.4f\n",max,ko);
}

```

```

void outfile2(file3,t,sumc2,sumc3,sumc4l,sumc4g,sumc5,sum,total,oldval)
FILE *file3;
double t,sumc2,sumc3,sumc4l,sumc4g,sumc5,sum,total,oldval;
{
    double deltt;

    deltt = oldval - sumc2;
    if (deltt < 0.0)

```

```

    delt = 0.0;
    fprintf(file3,"%-7.1f%9.2f%9.2f%9.2f",t,sumc2,sumc3,sumc4l);
    fprintf(file3,"%9.2f%9.2f%9.2f%9.2f%8.3f\n",sumc4g,sumc5,sum,total,delt);
}

```

```

void outfile3(file4,t,c4flux,c4fsum,c5flux,c5fsum,fratio,gfsum)
FILE *file4;
double t,c4flux,c4fsum,c5flux,c5fsum,fratio,gfsum;
{
    c4flux = 1000.0*c4flux; /* Be careful that it is 1000 times */
    c5flux = 1000.0*c5flux; /* February 14, 1997 temporary */
    fprintf(file4,"%-6.0f%9.6f%10.6f",t,c4flux,c4fsum);
    fprintf(file4,"%9.6f%10.6f%9.2f%11.6f\n",c5flux,c5fsum,fratio,gfsum);
}

```

```

#define BLUE 16
#define FWHITE 15
void blue()
{
    int color;
    void cls_c(int);
    color = FWHITE | BLUE;
    cls_c(color);
}

```

```

void cls_c (int color)
{
    void c_scroll(int,int,int,int,int,int,int);
    void locate(int,int);
    int row,col,wide,deep,num,f;
    row = 0;
    col = 0;
    wide = 80;
    deep = 24;
    num = 0; /* No. of lines to scroll */
    f = 0x07; /* function number */
    c_scroll(row,col,wide,deep,num,f,color);
    locate(row,col);
}

```

```

#include <dos.h>

```



```
#define VIDEO 0x10
void c_scroll(int row, int col, int wide, int deep, int num, int f, int color)
{
    union REGS ireg;
    ireg.h.ah = f;
    ireg.h.al = num;
    ireg.h.ch = row;
    ireg.h.cl = col;
    ireg.h.dh = deep;
    ireg.h.dl = wide;
    ireg.h.bh = color;
    int86(VIDEO,&ireg,&ireg);
}

void locate (int row,int col)
{
    union REGS r;
    r.h.ah = 2;
    r.h.bh = 0;
    r.h.dh = row;
    r.h.dl = col;
    int86 (VIDEO,&r,&r);
}
```

**부록 5. R-C 충전전 주기측정에 의한 수분측정장치**  
**구동 프로그램 Source Code(어셈블리어)**

; 본 프로그램에서 2 바이트의 모든 데이터는 Little Endian 형식으로 저  
; 장되어 있다.  
; 즉, 하위 바이트가 낮은 어드레스에, 상위 바이트가 높은 어드레스에 저  
; 장된다.

; ===== 레지스터 R0 ~ R7 사용 =====  
; R0, R1 : 내부 RAM 데이터 영역에 대한 간접변지 지정 포인터로 사용  
; R2, R3 : Delay 루틴의 루프 카운터로 사용  
; R4, R5 : 디스플레이 루틴의 루프 카운터로 사용  
; R6, R7 : 범용 루프 카운터로 사용

; ===== 상수 정의 =====  
ZeroLimitEQU 30 ; 영점 값으로 인정될 수 있는 상한  
DiffLimit EQU 30 ; 상하단 측정치 차이의 유용성 상한  
BitCount EQU 16 ; BCD로 변환할 2진수 비트 수  
BCDCnt EQU 3 ; BCD로 변환된 후의 BCD 바이트 수  
DigitCnt EQU 3 ; 디스플레이 버퍼 크기  
Delay20Cnt EQU 80 ; 20mS 대기를 위한 Delay 상수  
Delay1Cnt EQU 4 ; 1mS 대기를 위한 Delay 상수  
DelayCnt EQU 0FFH ; Delay 루틴의 내부 루프 카운트 수  
IdleCnt EQU 1 ; 키 해제후 디스플레이 활성화시간(초)  
RelayDelay EQU 200 ; 릴레이 점접 안정을 위한 대기 카운트  
MeasCnt EQU 128 ; 상하단 각각에서의 측정 회수  
; 측정회수는 반드시 2회 이상이어야 함.

; ===== 내부 RAM에서의 변수 어드레스 정의 =====  
; 20H ~ 4FH : 변수영역  
; 50H ~ 7FH : 스택영역

Base EQU 30H ; 변수 메모리 시작번지  
ZeroCnt1 EQU Base ; 하단 커패시터의 영점 오프셋  
ZeroCnt2 EQU Base+2 ; 상단 커패시터의 영점 오프셋  
Count1 EQU Base+4 ; 하단 용량 측정치 저장변수  
Count2 EQU Base+6 ; 상단 용량 측정치 저장변수  
TimSum EQU Base+8 ; 측정루틴에서 사용되는 측정치 저장변수  
Temp EQU Base+10 ; 측정루틴에서 사용되는 임시변수  
ByteBCD EQU Base+12 ; BCD 변환된 데이터의 저장장소

```

BCDIndex EQU Base+15 ; 0000BCD 형태로 변환된 BCD 저장장소
DispBuff EQU Base+18 ; LED 디스플레이용 데이터 저장장소
DivideBy EQU Base+21 ; 측정 평균치를 취하는 분모
Stack EQU 50H - 1
; RESET시 프로그램 시작지점
ORG 0
JMP Start
; 인터럽트 1에 대한 벡터 설정
ORG 0013H
JMP Main

; ===== 프로그램 시작 =====
ORG 100H
Start: MOV P1, #11111111B ; 모든 LED를 소거시킨다.
MOV P2, #10000000B ; 555 Trigger = 1
SETB EX1 ; 외부 인터럽트 1만 가능
MOV TMOD, #00001001B ; 타이머0 타이머 모드,
; GATE 신호사용
MOV TCON, #00010000B ; 외부 인터럽트 1을
; 레벨 모드로 설정
MOV SP, #Stack ; 스택 포인터 초기화
; 측정회수로 평균을 취하기 위한 분모를 구함
MOV A, #1
MOV R7, #0
FindN: INC R7
RL A
CJNE A, #MeasCnt, FindN
FindOffset: MOV DivideBy, R7
SETB P2.3 ; 릴레이를 구동하여
; 하단 커패시터 1 선택
MOV R2, #RelayDelay
CALL Delay ; 점점 안정을 위한 20mS 대기
CALL Measure ; 무시료 상태의 오프셋 용량 측정
MOV ZeroCnt1, TimSum ; 오프셋 #1 값을
; ZeroCnt1 변수에 저장
MOV ZeroCnt1+1, TimSum+1 ;
CLR P2.3 ; 릴레이를 해제하여
; 상단 커패시터 2 선택
MOV R2, #RelayDelay

```

```

CALL Delay          ; 점점 안정을 위한 20mS 대기
CALL Measure       ;
MOV ZeroCnt2, TimSum ; 오프셋 #2 값을
                   ; ZeroCnt2 변수에 저장

MOV ZeroCnt2+1, TimSum+1
MOV A, #11111111B  ; ' - ' 문자표시 데이터를
                   ; 디스플레이

MOV DispBuff, A    ; 버퍼에 저장
MOV DispBuff+1, A
MOV A, #10111111B
MOV DispBuff+2, A
SETB EA           ; 인터럽트 활성화
Ready: CALL Display ; LED에 대기신호를 출력하고
                   ; 측정스위치나
                   ; 영점조정 스위치 입력을 대기
JMP Ready

```

; ===== 용량측정 서브루틴 =====

```

;
; 상단, 하단 커패시터에 대한 측정을 실시한다. 각 커패시터에 대해 4회
; 측정하여 평균을 취한 후 최종적으로 상하단 커패시터의 측정평균치를
; 다시 평균하여 TimSumH:TimSumL의 16 비트 변수에 저장한다.

```

```

Measure: MOV R6, #MeasCnt ; R6 레지스터를 측정회수
                   ; 카운터로 사용

MOV TimSum, #0
MOV TimSum+1, #0
Meas1: MOV TH0, #0 ; 타이머 0을 리셋
MOV TL0, #0
CLR P2.7 ; 555에 트리거 펄스 인가
NOP
SETB P2.7
Wait: JB P3.2, Wait ; 555 One-Shot이 종료될
                   ; 때까지 대기

MOV A, TimSum ; 타이머 값을 읽어서 합산
ADD A, TL0
MOV TimSum, A
MOV A, TimSum+1
ADDC A, TH0
MOV TimSum+1, A
DJNZ R6, Meas1

```

```

MOV    R6, DivideBy
Meas2: CLR    C                ; 측정치의 평균치 계산
MOV    A, TimSum+1
RRC    A
MOV    TimSum+1, A
MOV    A, TimSum
RRC    A
MOV    TimSum, A
DJNZ  R6, Meas2
RET

```

; ===== 릴레이, 스위치의 점접안정을 위한 대기 서브루틴 =====

```

Delay:  MOV    R3, #DelayCnt
Delay1: DJNZ  R3, Delay1
        DJNZ  R2, Delay
        RET

```

; ===== LED 디스플레이 서브루틴 =====

; 서브루틴 호출을 위해서는 DispBuff ~ DispBuff+2 번지에 걸친 3 바이트  
; 에 디스플레이용 데이터가 저장되어 있어야 한다.

```

Display: MOV    R4, #DigitCnt
        MOV    R0, #DispBuff
        MOV    A, #10000100B
Disp1:  PUSH  A
        MOV    A, @R0
        MOV    P1, A
        POP   A
        MOV    P2, A
        MOV    R2, #Delay1Cnt
        CALL  Delay
        INC   R0                ; 다음 디스플레이 데이터로 이동
        SETB  C                ; LED 이동 중 555 트리거상태 불변
        RRC   A                ; 다음 LED 선택
        ANL   A, #10000111B
        DJNZ  R4, Disp1
        RET

```

; ===== 측정 및 영점조정을 위한 주 프로그램 =====

; 측정 스위치와 영점조정 스위치에 의한 인터럽트로 구동된다.

```

Main:   CLR    EA                ; 더 이상의 인터럽트 금지
        MOV    A, #10000000B
        MOV    P2, A          ; 모든 LED를 OFF
        MOV    R2, #Delay20Cnt
        CALL   Delay         ; 점점 안정을 위한 20mS 대기
        MOV    A, P0
        ANL    A, #00000011B ; 어떤 키가 눌러졌는지를 조사
        JZ     Error         ; 2 개의 키가 동시에 눌러진 경우
        XRL    A, #00000011B ; 'Err'을 디스플레이
        JNZ    Valid
        JMP    NoKey         ; 아무런 키도 눌러지지 않은 경우
                                ; 그냥 복귀

```

```

Valid:  CJNE   A, #00000001B, Measuring ; 측정키가 눌러진 경우

```

```

; ----- 영점조정 키가 눌러진 경우 -----
; 이때 측정치가 ZeroCnt1이나 ZeroCnt2의 저장치보다 어느 정도
; (ZeroLimit) 이상 크면 무시로 상태가 아닌 걸로 간주하여 'Err'을 디스
; 플레이 하고 이전에 측정된 ZeroCnt1, 2는 그대로 보존된다.
; 측정치가 ZeroCnt1이나 ZeroCnt2보다 적으면 측정치를 새로운 오프셋으
; 로 보고 ZeroCnt1, 2 변수에 저장한다.

```

```

ZeroAdjust: SETB   P2.3
            MOV    R2, #RelayDelay
            CALL   Delay         ; 점점 안정을 위한 20mS 대기
            CALL   Measure       ; 하단 커패시터에 대한 오프셋 1 측정
            MOV    A, TimSum
            CLR    C
            SUBB   A, ZeroCnt1   ; 기존 오프셋과의 차이 계산
            MOV    Temp, A
            MOV    A, TimSum+1
            SUBB   A, ZeroCnt1+1
            JC     NewZero1     ; 기존 오프셋보다 적은 경우
                                ; NewCnt1으로
            JNZ    Error         ; 기존 오프셋보다 훨씬 큰
                                ; 경우 Error로

            MOV    A, Temp
            CLR    C
            SUBB   A, #ZeroLimit ; 기존 오프셋보다 ZeroLimit
                                ; 값 이상으로

```

```

JNC      Error          ; 큰 경우 Error로

NewZero1: MOV      ZeroCnt1, TimSum    ; 기존 오프셋보다 적거나,
                                   ; 크더라도 어느 정도 이하이면
MOV      ZeroCnt1+1, TimSum+1; 현재 측정치를 새로운 무시료
                                   ; 오프셋 1로 설정한다.

CLR      P2.3
MOV      R2, #RelayDelay
CALL     Delay          ; 점점 안정을 위한 20mS 대기
CALL     Measure       ; 상단 커패시터에 대한
                                   ; 오프셋 2 측정

MOV      A, TimSum
CLR      C
SUBB    A, ZeroCnt2    ; 기존 오프셋과의 차이 계산
MOV      Temp, A
MOV      A, TimSum+1
SUBB    A, ZeroCnt2+1
JC      NewZero2      ; 기존 오프셋보다 적은
                                   ; 경우 NewCnt2로
JNZ     Error        ; 기존 오프셋보다 훨씬 큰
                                   ; 경우 Error로

MOV      A, Temp
CLR      C
SUBB    A, #ZeroLimit ; 기존 오프셋보다 ZeroLmit
                                   ; 값 이상으로
JNC     Error        ; 큰 경우 Error로

NewZero2: MOV      ZeroCnt2, TimSum    ; 기존 오프셋보다 적거나,
                                   ; 크더라도 어느 정도 이하이면
MOV      ZeroCnt2+1, TimSum+1; 현재 측정치를 새로운
                                   ; 무시료 오프셋 2로 설정한다.

```

; 성공적인 영점조정인 경우 LED에 ' 0.0'을 디스플레이 한다.  
; 디스플레이는 영점조정 스위치가 눌러져 있는 동안만 활성화되며 스위치가  
; 해제되면 일정 시간 후 자동적으로 LED 들을 OFF시켜 절전 상태로 한다.

```

MOV      A, #11111111B    ; 공백문자 디스플레이 데이터
MOV      DispBuff, A
MOV      A, #01000000B    ; '0.' 문자 디스플레이 데이터

```

```

MOV    DispBuff+1, A
MOV    A, #11000000B    ; '0' 문자 디스플레이 데이터
MOV    DispBuff+2, A
JMP    DispLoop

```

; 오류상황 발생시 'Err'라고 오류상황임을 표시한다.

```

Error: MOV    A, #10000110B    ; 'E' 문자 디스플레이 데이터
        MOV    DispBuff, A
        MOV    A, #10101111B    ; 'r' 문자 데이터
        MOV    DispBuff+1, A
        MOV    A, #10101111B    ; 'r' 문자 데이터
        MOV    DispBuff+2, A
        JMP    DispLoop

```

; ----- 시료가 있는 상태의 용량측정 루틴 -----

; 상하단 커패시터에 대해 각각 4회씩 카운터 값을 측정하여 평균치를 구  
; 한 후 다시 상하단의 평균치를 구하여 최종적인 측정치로 한다.  
; 상하단 각각의 카운터 측정치로부터 각단의 오프셋을 감하여 평균치를  
; 구하며 무시료 상태에서 측정 키를 눌렀을 때와 같이 카운터 값이 영점  
; 오프셋 값보다 적은 경우에는 현재 측정된 카운터 값을 새로운 오프셋  
; 값으로 설정한다.

```

Measuring: SETB   P2.3
          MOV     R2, #RelayDelay
          CALL    Delay    ; 점점 안정을 위한 20mS 대기
          CALL    Measure  ; 하단 용량 측정
          MOV     A, TimSum
          CLR     C
          SUBB   A, ZeroCnt1    ; 영점 오프셋 제거
          MOV     Count1, A
          MOV     A, TimSum+1
          SUBB   A, ZeroCnt1+1
          MOV     Count1+1, A
          JNC    Count1OK      ;
          MOV     ZeroCnt1, TimSum    ; 현재 측정치가 영점
          ; 오프셋보다 적은 경우
          MOV     ZeroCnt1+1, TimSum+1 ; 현재 측정치를 새로운 영점
          MOV     Count1, #0    ; 오프셋으로 설정

```



```

MOV     Count1+1, #0

Count1OK: CLR     P2.3
MOV     R2, #RelayDelay
CALL    Delay           ; 점점 안정을 위한 20mS 대기
CALL    Measure         ; 상단 용량 측정
MOV     A, TimSum
CLR     C
SUBB   A, ZeroCnt2
MOV     Count2, A
MOV     A, TimSum+1
SUBB   A, ZeroCnt2+1
MOV     Count2+1, A
JNC    Count2OK
MOV     ZeroCnt2, TimSum      ; 현재 측정치가 영점
                                ; 오프셋보다 적을 경우
MOV     ZeroCnt2+1, TimSum+1 ; 현재 측정치를 새로운 영점
MOV     Count2, #0           ; 오프셋으로 설정
MOV     Count2+1, #0

```

; 상하단 용량을 비교하여 두 용량에 큰 차이가 있을 때는 상단 측정치를  
; 무시하고 하단 측정치만 유용한 데이터로 간주한다.

```

Count2OK: MOV     A, Count1
CLR     C
SUBB   A, Count2           ; 상하단 측정치끼리를 비교
MOV     Temp, A
MOV     A, Count1+1
SUBB   A, Count2+1
MOV     Temp+1, A
JNC    Check              ;
MOV     A, Temp            ; 비교결과가 음수인 경우
                                ; 절대치를 취함

CPL    A
ADD    A, #1
MOV    Temp, A
MOV    A, Temp+1
CPL    A
ADDC   A, #0

```

```

MOV    Temp+1, A
Check: JNZ    MakeBCD          ; 상하단 측정치 차이가 아주
                                   ; 큰 경우 상단 측정치는 무시

MOV    A, Temp
CLR    C
SUBB   A, #DiffLimit        ; 상하단 측정치 차이가 아주
                                   ; 크지는 않더라도 어느 정도

JNC    MakeBCD              ; 이상이면 상단 측정치는 무시

```

; 상하단 측정평균치의 평균을 취하여 Count1L, Count1H의 16 비트 변수에  
; 저장

```

MOV    A, Count1
ADD    A, Count2
MOV    Count1, A
MOV    A, Count1+1
ADDC   A, Count2+1
CLR    C
RRC    A
MOV    Count1+1, A
MOV    A, Count1
RRC    A
MOV    Count1, A

```

; 이 시점에서 최종적인 측정치가 결정되었으며 이제 이 값을 BCD 데이터  
; 로 변환하여 LED에 디스플레이 하고 대기 루틴으로 복귀하면 된다.

```

MakeBCD: MOV    R6, #BitCount      ; 변환하고자 하는 2진수
                                   ; 비트 수(16비트)

MOV    R7, #BCDCount             ; 변환 결과 저장될 BCD
                                   ; 바이트 수(3 바이트)

MOV    R0, #ByteBCD              ; BCD 데이터의 시작번지
ClearBCD: MOV    @R0, #0           ; 결과가 저장될 BCD 데이터
                                   ; 장소 클리어

INC    R0
DJNZ   R7, ClearBCD

```

```

BCD2:  MOV    A, Count1            ; 2진수를 왼쪽으로 1 비트 이동
RLC    A                          ; 최상위 비트는 캐리 비트로
                                   ; 들어 간다.

```

```

MOV     Count1, A
MOV     A, Count1+1
RLC     A
MOV     Count1+1, A

MOV     R7, #BCDCount
MOV     R0, #ByteBCD
BCD1:  MOV     A, @R0           ; BCD 데이터를 2배 한 다음
                                ; 캐리비트로 이동된 2진수의
                                ; 비트를 더 한다.
ADDC    A, A
DA      A                     ; 나중 이 BCD 데이터는 다시
                                ; 2배가 됨으로써 2의 멱승을
MOV     @R0, A                 ; 더하는 것과 같다.
INC     R0
DJNZ    R7, BCD1
DJNZ    R6, BCD2

MOV     R0, #BCDIndex
MOV     A, ByteBCD+BCDCount-2
ANL     A, #0FH
MOV     @R0, A
MOV     A, ByteBCD+BCDCount-3
PUSH    A
SWAP    A
ANL     A, #0FH
INC     R0
MOV     @R0, A
POP     A
ANL     A, #0FH
INC     R0
MOV     @R0, A

MOV     R0, #DispBuff
MOV     R1, #BCDIndex
MOV     R6, #DigitCnt
MOV     DPTR, #CharTable
L1:    MOV     A, @R1
MOVVC   A, @A+DPTR           ; 표시하고자 하는 수치에 해당
                                ; 하는 디스플레이 데이터를

```

```

MOV    @R0, A           ; 취하여 디스플레이 버퍼에 저장
INC    R0
INC    R1
DJNZ   R6, L1
MOV    A, DispBuff+1
ANL    A, #7FH          ; 소숫점 디스플레이
MOV    DispBuff+1, A
MOV    A, BCDIndex
JNZ    DispLoop
CPL    A                ; Leading Zero Blanking
MOV    DispBuff, A

```

; 키가 눌러져 있는 동안 LED를 계속 디스플레이 하며 키가 해제되고 난  
; 후 얼마간의 시간이 경과되면 LED를 끄고 대기루틴으로 복귀하여 '-'를  
; 디스플레이

```

DispLoop: CALL    Display
          MOV     A, P0           ; 키 상태 입력
          ANL    A, #0000011B
          CJNE   A, #3, DispLoop ; 키 해제 때까지
          ; 디스플레이 계속
          MOV    R7, #IdleCnt    ; 키 해제 후 잠시동안
          ; 디스플레이 계속

DispLoop2: MOV    R6, #OFFH
DispLoop1: CALL    Display
          DJNZ   R6, DispLoop1
          DJNZ   R7, DispLoop2

          MOV    A, #11111111B   ; ' - ' 문자표시 데이터를
          ; 디스플레이
          MOV    DispBuff, A     ; 버퍼에 저장
          MOV    DispBuff+1, A
          MOV    A, #10111111B
          MOV    DispBuff+2, A

NoKey:   SETB   EA              ; 인터럽트 활성화
          RETI

```

; 0 ~ 9까지의 수치에 대한 LED 디스플레이 데이터 테이블

```
CharTable: DB    11000000B    ; 숫자 0의 디스플레이 패턴
            DB    11111001B    ;    1
            DB    10100100B    ;    2
            DB    10110000B    ;    3
            DB    10011001B    ;    4
            DB    10010010B    ;    5
            DB    10000010B    ;    6
            DB    11011000B    ;    7
            DB    10000000B    ;    8
            DB    10010000B    ;    9
```

END

부록 6. 위상편이 측정기법에 의한 수분측정장치 구동 프로그램  
(C 언어 소스)

```

#include <io51.h>
#include <stdio.h>
#include <math.h>
#include <string.h>
#include <float.h>
#include <stdlib.h>

/* LCD Instruction Register에 대한 쓰기 */
#define LCD_IW (*(char *)0x18000)
/* LCD Data RAM에 대한 쓰기 */
#define LCD_DW (*(char *)0x18001)
/* LCD Instruction Register로부터 읽기 */
#define LCD_IR (*(char *)0x18002)
/* LCD Data RAM으로부터 읽기(Status) */
#define LCD_DR (*(char *)0x18003)
/* AD Converter A R/W(  $V_S * V_L$  측정)*/
#define ADC_A (*(char *)0x10000)
/* AD Converter B R/W(  $V_L * V_L$  측정)*/
#define ADC_B (*(char *)0x10001)

#define EOL 0 /* End Of Line Code */

#define FREQ 20.0e6 /* 전원 신호의 주파수(20MHz) */
#define PI 3.14159265
#define SCALE_XY 1060.0 /*  $V_S * V_L$  측정치 스케일링 치수 */
#define SCALE_XX 1060.0 /*  $V_L * V_L$  측정치 스케일링 치수 */
#define OFFSET_XX 23.0 /* DC 바이어스 성분 제거 */
#define OFFSET_XY 23.0
#define VS 1.0 /* Amplitude of the Source Signal */
#define RS 75.0 /* Source Resistance */

/* LCD Control and Display Related Functions */

void busy() { /* LCD 드라이버가 동작 중인지 조사 */
    while(LCD_IR & 0x80);
}

```

```
}
```

```
void allclr() { /* LCD 화면을 소거하고 커서를 Home 위치로 */  
    busy();  
    LCD_IW = 0x01;  
}
```

```
void entmode() {  
    busy();  
    LCD_IW = 0x06;  
}
```

```
void funset() {  
    busy();  
    LCD_IW = 0x38;  
}
```

```
void disp_OFF() { /* LCD 화면 디스에이블 */  
    busy();  
    LCD_IW = 0x08;  
}
```

```
void disp_ON() { /* LCD 화면 이네이블 */  
    busy();  
    LCD_IW = 0x0C;  
}
```

```
void ln11() { /* 커서를 첫 번째 줄의 맨 앞으로 위치 */  
    busy();  
    LCD_IW = 0x02;  
}
```

```
void ln21() { /* 커서를 첫 번째 줄의 맨 앞으로 위치 */  
    busy();  
    LCD_IW = 0xC0;  
}
```

```
/* 문자 디스플레이 사이 지연 시간 */
```

```
void delay(unsigned int length) {  
    int i;
```

```

    for(i=0;i<length;i++);
}

void putch(char ch) {          /* LCD의 현재 커서 위치에 한 문자 출력 */
    busy();
    LCD_DW = ch;
}

void_putstr(char *s) {       /* LCD 상에 NULL 코드로 끝나는 문자열 출력 */
    for(>(*s)!=EOL;) {
        putch(*s);
        delay(400);
        s++;
    }
}

void init_LCD() {           /* LCD 드라이버 초기화 */
int i;
    LCD_IW = 0x30;
    for(i=0;i<400;i++);
    LCD_IW = 0x30;
    for(i=0;i<400;i++);
    LCD_IW = 0x30;
}

/* 실수 데이터를 XXX.X의 형태로 포맷하기 위한 변환 함수 */
void make(int decimal, char *tst) {
unsigned char chh[3];
int length;

    sprintf(tst, "%d", decimal);
    length = strlen(tst);
    chh[0] = tst[length-1]; chh[1] = '.'; chh[2] = '\0';
    if (abs(decimal)<10) {
        tst[length-1] = '0'; tst[length] = '.';
        tst[length+1] = '\0'; }
    else { tst[length-1] = '.'; }
    strcat(tst,chh);
}

```



```

/* 주 프로그램 시작 */
main(void) {
unsigned char val, ch1[17], ch2[17];
unsigned char space[17] = {"          "}, tmp[10];
unsigned char ch3[4]={"Ohm"}, ch4[5]={"KOhm"};
unsigned char ch5[5]={"MOhm"}, *chstr;
unsigned char ch6[3] = {"pF"};
float xx, xy, vl, theta, A, B, R, X, C, RX, CX;
int RRR, CCC, i;

/* Initialize LCD */
init_LCD();
funset();
disp_ON();
allclr();
entmode();
while(1) {
    chstr = ch3;
    RX = 0.0; CX = 0.0;
    for(i=0;i<1000;i++) {
        ADC_A = 0x00;          /* ADC A 구동*/
        ADC_B = 0x00;          /* ADC B 구동*/
        while(P3 & 0x04);      /* End Of Conversion 신호 대기 */
        val = ADC_A;           /* ADC A(  $V_L * V_L$  값)를 읽는다. */
        RX = RX + (float)val;   /* 1000 번의 측정치를 합한다. */
        val = ADC_B;           /* ADC B(  $V_S * V_L$  값)를 읽는다. */
        CX = CX + (float)val;
    }
    /* LCD 화면 소거 */
    ln11(); putstr(space); ln21(); putstr(space);
    xx = (RX/1000.0 - OFFSET_XX)/SCALE_XX; /* 측정치 평균 */
    xy = (CX/1000.0 - OFFSET_XY)/SCALE_XY;
    vl = sqrt(2.0*xx);          /*  $V_L$  값 계산 */
    theta = -acos(2.0*xy/(vl*VS)); /* 위상편이  $\theta$  값계산 */
    A = vl*cos(theta);
    B = vl*sin(theta);

    /* 측정단자가 개방되어 있는지를 조사 */

```

```

if (fabs(A-VS)<1.0e-4) {
    sprintf(ch1, "No Load"); sprintf(ch2, "Connected !");
    ln11(); putstr(ch1);
    ln21(); putstr(ch2);
    delay(20000);
    continue;
}

/* 미지의 부하 임피던스  $R + jX$ 의  $R$ ,  $X$  값 계산 */
R = -(B*B*RS+RS*VS*(A-VS)+(A-VS)*(A-VS)*RS)/(B*B+(A-VS)*(A
-VS));
X = (B*(R*(R+RS)-(R+RS)*(R+RS)))/(RS*(A-VS));

/* 임피던스  $R + jX$ 를 구성하는 병렬 저항, 커패시터의  $R_X$ ,  $C_X$  값 계산 */
RX = (R*R+X*X)/R;
CX = -1.0e12*X/(2.0*PI*FREQ*(R*R+X*X)); /* C의 단위를 pF로 */

/* 저항치를  $\Omega$ ,  $k\Omega$ ,  $M\Omega$ 으로 표시하기 위한 스케일링 */
if ((RX>=1000.0)&&(RX<1000000.0)) {
    RX = RX/1000.0; chstr = ch4;
}
if (RX>=1000000.0) { RX = RX/1000000.0; chstr = ch5; }

/* 실수 데이터 형으로 변환 후 LCD에 표시 */
RRR = (int)(10.0*RX+0.5);
make(RRR, tmp);
sprintf(ch1, "R = "); strcat(ch1, tmp); strcat(ch1, chstr);
CCC = (int)(10.0*CX+0.5);
make(CCC, tmp);
sprintf(ch2, "C = "); strcat(ch2, tmp); strcat(ch2, ch6);
ln11();
putstr(ch1);
ln21();
putstr(ch2);
}
}

```

## 부록 7. 정전용량형 센서를 이용한 점적관비 자동제어프로그램 Source Code

```
DECLARE SUB READDATA (HP4285&, A!())
DECLARE SUB WRITEHPIB (CODE$$, HP4285&)
DECLARE SUB INITIALIZE (ISC&, HP4285&)
DECLARE SUB CORRECTION (HP4285&)
DECLARE SUB MEASUREMENT (ISC&, HP4285&, Test.freq())
DECLARE SUB DELAY ()

REM $INCLUDE: 'QBSETUP.BAS'

DIM Test.freq(5) AS SINGLE
DIM A(2) ' dimension of testfreq must be the same as the # of data
                                                ' points in sub measurement

'***** Test frequency settings *****

FOR i = 1 TO 5
    READ Test.freq(i)
NEXT i

INPUT "Output file name = "; FILE1$
OPEN FILE1$ FOR OUTPUT AS #11                'FILE OPEN

CALL INITIALIZE(ISC&, HP4285&)
'CALL CORRECTION(HP4285&)

DO WHILE (1)
    CALL MEASUREMENT(ISC&, HP4285&, Test.freq())

    OUT 784, 1
    CALL DELAY
LOOP

END
DATA 1,2,3,4,5

SUB CORRECTION (HP4285&)
```

SHARED PCIB.ERR, PCIB.BASERR, NOERR

INPUT "Do you want to run correction procedure? [Y/N]", ans\$  
IF (ans\$ = "N") OR (ans\$ = "n") THEN GOTO Skip.cal

'  
' \*\*\*\*\* SET HP4285 CORRECTION PAGE \*\*\*\*\*  
'

CODES\$ = "DIST:PAGE CSET"  
CALL WRITEHPPIB(CODES\$, HP4285&)

'  
' \*\*\*\*\* OPEN STD. MEASUREMENT \*\*\*\*\*  
'

INPUT "Make OPEN state test fixture and then press ENTER!", DUMMY  
CODES\$ = "CORR:OPEN"  
CALL WRITEHPPIB(CODES\$, HP4285&)

'  
' \*\*\*\*\* SHORT STD. MEASUREMENT \*\*\*\*\*  
'

PRINT "Make SHORT state test fixture and then press ENTER!", DUMMY  
CODES\$ = "VOLT 0.5V" 'Set the oscillator level 0.5volts for SHORT correction.  
CALL WRITEHPPIB(CODES\$, HP4285&)  
CODES\$ = "CORR:SHOR"  
CALL WRITEHPPIB(CODES\$, HP4285&)  
CODES\$ = "VOLT 1V" 'Set the oscillator level back to original setting.  
CALL WRITEHPPIB(CODES\$, HP4285&)

' \*\*\*\*\* CABLE LENGTH CORRECTION \*\*\*\*\*  
'

PRINT "See the manual to proceed CABLE LENGTH CORRECTION!"  
PRINT "If you finish all the steps needed and then press ENTER."  
INPUT DUMMY

'  
' \*\*\*\*\* CORRECTION STATUS ON \*\*\*\*\*  
'

CODES\$ = "CORR:OPEN:STAT ON"

```
CALL WRITEHPIB(CODE$$, HP4285&)
CODE$$ = "CORR:SHOR:STAT ON"
CALL WRITEHPIB(CODE$$, HP4285&)
CODE$$ = "CORR:LENG 1"
CALL WRITEHPIB(CODE$$, HP4285&)
CODE$$ = "DISP:PAGE MEAS"
CALL WRITEHPIB(CODE$$, HP4285&)
```

Skip.cal:

```
INPUT "Connect DUT at fixture, then press [RETURN]", DUMMY
```

END SUB

SUB DELAY

```
TM = TIMER
CT = TIMER
DO WHILE (ABS(CT - TM) < 1)
    CT = TIMER
```

LOOP

END SUB

```
SUB INITIALIZE (ISC&, HP4285&)
SHARED PCIB.ERR, PCIB.BASERR, NOERR
```

```
ISC& = 7
HP4285& = 717
```

```
' ***** INITIALIZE HPIB INTERFACE *****
```

```
CALL IORESET(ISC&)
IF PCIB.ERR <> NOERR THEN ERROR PCIB.BASERR
TIMEOUT! = 5!
CALL IOTIMEOUT(ISC&, TIMEOUT!)
IF PCIB.ERR <> NOERR THEN ERROR PCIB.BASERR
CALL IOCLEAR(ISC&)
IF PCIB.ERR <> NOERR THEN ERROR PCIB.BASERR
```

'  
' \*\*\*\*\* SET MEASUREMENT PARAMETER \*\*\*\*\*  
'

```
CODES$ = "*RST;*CLS"  
CALL WRITEHPIB(CODES$, HP4285&)  
CODES$ = "DISP:PAGE MSET"  
CALL WRITEHPIB(CODES$, HP4285&)  
CODES$ = "FUNC:IMP CPRP"  
CALL WRITEHPIB(CODES$, HP4285&)  
CODES$ = "FUNC:IMP:RANG:AUTO ON"  
CALL WRITEHPIB(CODES$, HP4285&)  
CODES$ = "TRIG:SOUR BUS"  
CALL WRITEHPIB(CODES$, HP4285&)  
CODES$ = "TRIG:DEL 0"  
CALL WRITEHPIB(CODES$, HP4285&)  
CODES$ = "AMPL:ALC OFF"  
CALL WRITEHPIB(CODES$, HP4285&)  
CODES$ = "APER SHOR,5"  
CALL WRITEHPIB(CODES$, HP4285&)  
CODES$ = "VOLT 1V"  
CALL WRITEHPIB(CODES$, HP4285&)  
CODES$ = "FORM:DATA ASCII"  
CALL WRITEHPIB(CODES$, HP4285&)  
CODES$ = "DISP:PAGE MEAS"  
CALL WRITEHPIB(CODES$, HP4285&)  
CODES$ = "INIT:CONT ON"  
CALL WRITEHPIB(CODES$, HP4285&)  
' CALL READSTATUS(HP4285&)
```

END SUB

SUB MEASUREMENT (ISC&, HP4285&, Test.freq())  
SHARED PCIB.ERR, PCIB.BASERR, NOERR

DIM A(2)

'  
' \*\*\*\*\* MEASUREMENT \*\*\*\*\*  
'

FOR i = 1 TO 5

```

CODESS$ = "FREQ " + STR$(Test.freq(i)) + "MHZ"
CALL WRITEHPIB(CODESS$, HP4285&)
CODESS$ = "*TRG;*WAI"
CALL WRITEHPIB(CODESS$, HP4285&)
CALL READDATA(HP4285&, A())
frequency = Test.freq(i) * 1000000!
PRINT frequency, A(1), A(2)
PRINT #11, frequency, A(1), A(2)

```

```

NEXT i

```

```

END SUB

```

```

SUB READDATA (HP4285&, A())
SHARED PCIB.ERR, PCIB.BASERR, NOERR

```

```

LENGTH% = 50: ACTUAL% = 0
DATAS$ = SPACES$(100)
CALL IOENTERS(HP4285&, DATAS$, LENGTH%, ACTUAL%)
COMMA = INSTR(DATAS$, ",")
A(1) = VAL(LEFT$(DATAS$, (COMMA - 1)))
A(2) = VAL(MID$(DATAS$, (COMMA + 1), 50))
IF PCIB.ERR <> NOERR THEN ERROR PCIB.BASERR

```

```

END SUB

```

```

SUB WRITEHPIB (CODESS$, HP4285&)
LENGTH% = LEN(CODESS$)
CALL IOOUTPUTS(HP4285&, CODESS$, LENGTH%)
IF PCIB.ERR <> NOERR THEN ERROR PCIB.BASERR

```

```

END SUB

```