

최 중
연구보고서

토양특성에 따른 최적 경운작업시스템 개발
Development of Optimal Tillage System
Based on Soil Physical Properties

연구기관
건국대학교

농림부

제 출 문

농림부 장관 귀하

본 보고서를 “토양특성에 따른 최적 경운작업시스템 개발” 과제의 최종보고서로 제출합니다.

2006 년 9 월 14 일

주관연구기관명 : 건국대학교
총괄연구책임자 : 박 준 결
세부연구책임자 : 박 준 결
연 구 원 : 노 광 모
연 구 원 : 장 영 창
연 구 원 : 여 운 영
협동연구기관명 : 성균관대학교
협동연구책임자 : 이 규 승
연 구 원 : 김 영 길
연 구 원 : 김 용
연 구 원 : Truong Quang
연 구 원 : 석 승 록
위탁연구기관명 : 충북대학교
위탁연구책임자 : 조 성 찬
연 구 원 : 리 혁
연 구 원 : 나 의 석

요 약 문

I. 제 목

토양특성에 따른 최적 경운작업시스템 개발

II. 연구개발의 목적 및 필요성

1. 연구개발의 목적

본 연구는 친환경농업을 위한 시스템 농업의 필수적인 연구로서 토양의 물리적 특성에 따른 최적 경운작업시스템을 개발하는 것을 그 목표로 하였다. 따라서 단계적으로 경운·정지의 측면에서 포장의 물리적 특성을 계측·분석하여 기초 자료를 구성하고, 계측자료의 체계적이고 효율적인 저장·이용을 위한 데이터베이스를 구축하며, 이를 바탕으로 최적의 경운작업을 처방하는 의사결정시스템을 개발하고 검증하는 것을 그 구체적 목적으로 하였다.

2. 연구개발의 필요성

시스템 농업은 생산성 향상과 환경보전이라는 상반 문제를 해결하고 농업을 지속시키기 위해 현재 활발히 연구되는 개념으로, 최근에 전 세계적으로 생물생산 분야에서 표준농업으로 부각되고 있다. 시스템 농업에서는 첨단공학 기술과 과학적인 방법에 의해 포장내의 토양 특성, 생육상황, 작물수확량 등을 체계적으로 조사하여 잠재적 작물수확량에 따라 에너지 및 농산 자재의 투입량을 최적화하고 생산량과 농산물 품질을 제고하며, 궁극적으로 환경오염 피해를 줄이고자 하는 개념의 농업을 수행한다.

시스템 농업의 적용범위는 작물 생산의 전 단계에서 수확 후 처리 단계를 포함하는 생물생산시스템 전체라고 보아야 한다. 이러한 전 과정 중에서 생물생산에서 그 준비과정에 해당하며 작물의 생육에 적합한 포장상태를 만들어 주는 경운작업은 그 역할이 매우 중요하다. 나아가 경운작업의 정도는 토양유실과 유기물의 적절한 보존 등에 관여하여 환경 친화적 농업을 위해 최적화해야 할 문제이다.

그러나 관행의 경운작업은 생물생산에 직접 관여해 온 생산자의 경험을 바탕으로 이루어져 왔으며, 보다 총체적이고 객관적인 접근법을 이용하여 경운작업방법 및 정도를 결정하려는 연구는 수행된 바 없어 시스템 농업의 발전을 위해 이에 대한 연구가 매우 시급한 실정이다.

III. 연구개발 내용 및 범위

본 연구에서 제시된 연구개발의 구체적인 내용과 그 범위는 다음과 같다.

- 경운작업의 주요 물리적 요인의 분석
- 토양특성에 따른 관행 경운작업의 조사 분석
- 논토양 작토층에 대한 토질 종류, 깊이와 토양 경도 및 밀도, 수분 분포 등 물리적 특성의 측정 및 분석
- 토양 경반의 물리적 특성의 측정 및 분석
- 단위 경운작업에 따른 토양의 물리성 변화의 측정 및 분석
- 토양 물리성 정보지도의 보간법 결정과 최적화
- 토양 물리성 정보 DB를 위한 데이터 저장모델 설계와 DB 구축
- 토양 물리적 특성에 따른 최적 경운작업시스템을 결정하는 의사결정시스템의 개발 및 검증

IV. 연구개발 결과 및 활용에 대한 건의

1. 연구개발의 결과

토양의 물리적 특성에 따른 최적 경운작업시스템을 개발하는 것을 그 목표로 수행된 본 연구의 구체적 결과는 연구개발의 내용과 범위와 연관하여 다음과 같이 요약할 수 있다.

- 경운작업의 성능에 영향을 미치는 주요 물리적 요인은 토양점착력과 내부마찰력, 토양-금속마찰력, 토양-금속부착력, 토양 비중과 토양수분함량으로 분석되었다.
- 수도재배의 대표적 지역에 대하여 전체 70개 조사 농가 중 96%는 쟁기작업을 하였으며, 대부분 농가의 경운작업시스템은 쟁기작업 1회, 로타리작업 1-2회, 씨레작업을 1회 수행하는 것으로 조사되었다.
- 논토양 작토층에 대해 토양의 물리적 특성을 측정된 결과, 점착력은 5~15 kPa, 내부마찰각은 30~60도, 토양-금속 마찰계수는 0.3~0.8, 토양-금속 부착력은 0.6~3.0 kPa, 토양수분함량은 주로 20~40%, 겉보기밀도는 1500~1700 kg/m³로 나타났다.
- 국내 논토양의 경반 형태는 크게 6가지형태로 분류가 가능하였으며 경반의 두께는 6cm~41cm, 평균 토양경도는 1MPa~3.2MPa로 분석되었다.
- 여러 경운작업조합에 대해 CI는 경운 후 5-9 kg_t/cm² 정도의 개선이 보였으며, 내부마찰각은 35-39°부터 25%(7-8°)정도가 줄었으며, 점착력은 약 50%인 1N/cm² 정도가 개선되었다.
- 의사결정시스템에 장착 가능한 역거리 가중치법, 크리깅법, TIN법을 분석하였으며 그 중 가장 우수한 보간 예측력을 나타내는 TIN 보간법을 의사결정시스템에 탑재하였다.
- 토양 물리성 정보 DB는 최적화된 E-R 모델로 하여 포장소유주, 포장, 샘플링 포인트, 내부마찰각, 토양경도, 전단력, 경반 두께, 수분함량 등의 8가지 정보를 기본으로 구축되었다.

- 본 연구에서 개발된 의사결정시스템은 계층분석적 의사결정론(AHP)을 바탕으로 혼합형 인공지능망에 휴리스틱 유전알고리즘이 장착된 형태로 구현되었고 토양강도 목적함수와 최소 경운비용 목적함수를 기반으로 최적 경운시스템을 선정한다.
- 본 연구에서는 토양 물리성 정보 DB와 의사결정시스템을 데이터 분석용 플랫폼에 장착하였으며, 서로 연동하여 자료입력, 자료보간, 최적경운시스템결정, 자료출력, 사용자 연결 등 총 5개의 모듈로 이루어진 토양특성에 따른 최적경운시스템(Optill)이라는 윈도우즈기반 프로그램을 개발하였다.
- 본 연구에서는 개발된 의사결정시스템은 인터넷을 통하여 포장 단위의 최적 경운시스템의 문의에도 대처할 수 있으며, 변량형 경운작업체계에 필수적인 연속적인 자료의 입출력에도 실시간으로 적용할 수 있는 시스템으로 판단되었다.

2. 연구 결과의 활용에 대한 건의

- 토양특성에 따른 최적 경운작업체계의 농가의 적용 및 보급 건의
- 연구 결과의 국내외 특허출원 및 국제학술발표
- 경운작업의 관점에서 필요한 정도의 경운을 함으로써 지력의 보호와 유실을 방지하는 친환경 시스템 농업 실현을 위한 정책적 지원 제안
- 관련기술의 지속적 연구를 통한 친환경 시스템 농업 실현의 조기화 지원
- 효율적인 경운작업시스템에 대한 시스템 연구의 기초로서 연구방향을 제시

SUMMARY

I. The Title of Research

Development of Optimal Tillage System Based on Soil Physical Properties

II. The Objective and Necessity of Research Development

1. The objective of research development

This study was performed to develop an optimal tillage system based on soil physical properties as one of necessary researches for environment-friendly system agriculture. The specific objectives of the study were to measure and analyse soil physical properties in fields for effective tillage operation, to construct a database for systematic storage and use of the measured data, and to develop a decision making system prescribing an optimal tillage system based on the soil properties.

2. The necessity of research development

System agriculture, becoming a standard farming method in agricultural production area at present, is an emerging concept as a solution to overcome the directly opposed problem between the improvement of production and the protection of environment for sustainable agriculture. Under the concept of system agriculture soil properties, plant growth and yield, etc are monitored

by high technology and scientific methodology. Based on the monitored information, then, the system agriculture optimizes the input of energy and agricultural resources, increases the amount and quality of agricultural production, and eventually reduces the bad impact on the environment.

The concept could be applied to the whole area of agricultural production including post-harvesting process. Tillage operation preparing a proper condition for plant root growing is more important as a starting point of agricultural production in system agriculture. In addition, the degree of tillage should be optimized to reduce the loss of soil and to conserve organic matters in fields. However, the conventional tillage operation was performed only by farmers' experience.

There have been no researches that select the method and degree of tillage operation based on comprehensive and objective basis of farming. Therefore, the study for optimizing tillage operation is highly necessary as a basis for developing system agriculture.

III. The Content and Scope of Research Development

- Analysis of major physical factors affecting on tillage operation
- Survey of conventional tillage systems based on soil physical properties
- Measurement and analysis of various physical properties of rice root growing layer
- Measurement and analysis of physical properties of hardpan in selected rice fields
- Measurement and analysis of variation of soil physical properties with various tillage methods
- Determination and optimization of an interpolation method on soil phys-

ical property map

- Design of data storage model and construction of DB for soil properties
- Development and verification of a decision making system determining an optimal tillage operation system based on soil physical properties

IV. The Results of Research Development and Proposition to their Application

1. The results of research development

- Major physical factors affecting on tillage operation were analyzed to be cohesion, internal resistance angle, soil-metal friction, soil-metal adhesion, specific gravity and moisture content of soil.
- About 67 farmers(96% out of 70 surveyed farms) performed janggi operation, and the conventional tillage system was consisted of 1 janggi, and 1-2 rotary and 1 balancing operation.
- The measurement of physical properties of soil in rice root growing layer showed that cohesion was 5~15 kPa, internal resistance angle 30~60°, soil-metal friction coefficient 0.3~0.8, soil-metal adhesion 0.6~3.0 kPa, moisture content of soil mainly 20~40%, bulk density 1500~1700 kg/m³.
- The analysis of physical properties of hardpan in selected rice fields showed that the type of hardpan could be classified into 6 categories. The thickness of hardpan was 6cm~41cm, and the average soil hardness was analyzed to be 1MPa~3.2MPa.
- Various tillage methods improved the CI by 5-9 kg_t/cm² in comparison with that before tillage, internal resistance angle of soil from 35-39° by 7-8°(about 25%) and cohesion by 1N/cm², respectively.
- Three interpolation methods of IDW, Kriging, TIN were tested to select

a proper interpolation tool for the decision making system developed in the study. As a result of the analysis, TIN was implemented in the system because of its excellent interpolation ability.

- The database on soil physical properties was constructed according to a refined E-R model for relational database. The major attributes of the DB were the owner and number of field, the sampling location(eventually from GPS), the internal resistance angle, cone index, shear stress and moisture content of soil, and hardpan thickness,
- The decision making system developed in the study was established on the theory of analytic hierarchy process(AHP), implemented by using a composite neural network with heuristic genetic algorithm. The system determines an optimal tillage system based on soil physical properties using soil hardness and minimum tillage cost objective function.
- The DB on soil physical properties and the decision making system were installed on data analyzing computer platform and a windows program called 'Optill' was developed to link the two units together. 'Optill' has 5 function modules of data input, data interpolation, decision making, data output and user connection module, eventually to generate an optimal tillage system based on soil physical properties.
- The decision making system developed in the study was designed to have a capability of treating the query about an optimal tillage system through the internet. In addition, the system could be applied to precision farming technology requiring the consecutive realtime data processing.

2. The proposition to application of research development

- The proposition to application of an optimal tillage system based on soil physical properties to actual farms
- Presentation of the results of the study on international conferences and

application for a patent

- The proposition to policy making for realizing environment-friendly system agriculture to prevent loss of soil and to protect fertility by performing a necessary amount of tillage from a standpoint of tillage operation.
- Suggestion of the direction that related future researches are going toward as an effective systematic study for tillage operation

CONTENTS

CHAPTER 1. INTRODUCTION	17
Section 1. The Importance of Research	17
Section 2. The Objective and Content of Research	19
CHAPTER 2. REVIEWS OF INTERNAL AND EXTERNAL RESEARCH ..	20
Section 1. Reviews of Internal Research	20
Section 2. Reviews of External Research	21
CHAPTER 3. MEASUREMENT AND ANALYSIS OF PHYSICAL PROPER- TY OF RICE ROOT GROWING LAYER	23
Section 1. Analysis of Soil-implement Models and Soil Data for Selecting Major Factors of Soil Affecting on the Effect of Tillage Opera- tion	23
Section 2. Survey of Conventional Tillage Systems Based on Soil Physical Properties	30
Section 3. Measurement and Analysis of Physical Properties of Rice Root Growing Layer	33
1. Measurement of soil properties of various regional fields	33
2. Analysis of soil properties of various regional fields	34
3. Precise measurement and analysis of soil hardness	37
Section 4. Physical Properties of Hardpan of Selected Rice Fields	42
Section 5. Tillage Resistance Characteristics of Janggi	47
Section 6. Measurement and Analysis of Soil Break Characteristics on Lab- oratory Scale	53

CHAPTER 4. CONSTRUCTION OF SOIL PHYSICAL PROPERTY DATABASE AND DEVELOPMENT OF DECISION MAKING SYSTEM FOR SELECTING AN OPTIMAL TILLAGE SYSTEM BASED ON SOIL PROPERTIES	61
Section 1. Measurement and Analysis of Variation of Soil Physical Properties with Various Tillage Methods	61
1. Significance and method of measurement of variation in soil physical properties	61
2. Variation of soil physical properties with various tillage methods	63
Section 2. Determination of an Interpolation Method on Soil Physical Property Map	70
1. Definition of surface in interpolation	70
2. Surface generating models	71
3. Determination of an interpolation method on soil property map	73
Section 3. Design of Data Storage Model and Schema of Soil Physical Property DB	76
1. Representation of data in DB	76
2. Combination of position with attribute information in fields	77
3. Design of data storage model and schema of soil property DB	77
Section 4. Analysis and Design of Decision Making System	81
1. Theoretical analysis of structure of decision making system	82
가. Genetic algorithm	82
나. Artificial neural network	83
1) Back-propagation network(BPN)	84
2) Hopfield net	85
2. Design of decision making system for an optimal tillage system	86
가. Concept of decision making system	86
나. Structure and scope of decision making system	87

다. Determination of objective functions of decision making system	90
1) Soil hardness objective function	90
2) Minimum tillage cost objective function	92
Section 5. An Optimal Tillage System Based on Soil Physical Properties U- sing Soil Property DB and Decision Making System	93
1. Construction of soil physical property database and decision making system device	93
2. Combination of soil physical property DB and its management program with decision making system	95
3. Determination of an optimal tillage system based on soil physical properties	98
 CHAPTER 5. CONTRIBUTION AND APPLICATION PLAN OF RESEARCH RESULTS TO RELATED AREA	103
Section 1. Contribution of Research Results to Related Area	103
1. Technology	103
2. Economy and industry	104
Section 2. Application Plan of Research Results	104
 CHAPTER 6. REFERENCES	105
 Appendix	109

목 차

제 1 장 서 론	17
제 1 절 연구의 필요성	17
제 2 절 연구의 목표 및 내용	19
제 2 장 국내·외 관련기술 연구	20
제 1 절 국내 관련기술 연구	20
제 2 절 국외 관련기술 연구	21
제 3 장 작토층의 물리적 특성의 측정 및 분석	23
제 1 절 경운정지 작업에 영향을 미치는 토양의 주요 물리적 요인 조사를 위한 토양-작업기 모델 및 자료 분석	23
제 2 절 토양특성에 따른 관행 경운작업 시스템의 조사 분석	30
제 3 절 논토양 작토층의 물리적 특성의 측정 및 분석	33
1. 지역별 토양물리성 측정	33
2. 지역별 토양자료의 분석	34
3. 토양경도의 정밀측정 및 분석	37
제 4 절 국내 주요 논토양 경반의 물리적 특성	42
제 5 절 쟁기의 경운저항 특성	47
제 6 절 인공토조에서 토양파쇄 특성 측정 및 분석	53
제 4 장 토양특성에 따른 최적 경운작업시스템을 위한 토양정보 DB의 구축 및 의사결정시스템 개발	61
제 1 절 단위 경운작업에 따른 토양의 물리성 변화의 측정 및 분석	61
1. 토양 물리성 변화의 측정의의 및 실험방법	61

2. 단위 경운작업에 따른 토양의 물리성 변화	63
제 2 절 토양물리성 정보지도의 보간법 결정	70
1. 보간법에서 표면(surface)의 정의	70
2. 표면 생성모델	71
3. 토양 물리성 정보지도의 보간법 결정	73
제 3 절 토양 물리성 정보 DB의 자료저장 모델 및 스키마 설계	76
1. DB의 자료표현법	76
2. 포장 위치정보와 속성정보의 결합	77
3. 토양 물리성 정보 DB의 자료저장 모델 및 스키마 설계	77
제 4 절 의사결정시스템의 구조 분석 및 설계	81
1. 의사결정시스템의 구조에 대한 이론 분석	82
가. 유전알고리즘(genetic algorithm)	82
나. 인공신경망	83
1) Back-propagation network(BPN)	84
2) Hopfield net	85
2. 최적 경운시스템을 위한 의사결정시스템의 설계	86
가. 의사 결정시스템의 개요	86
나. 의사결정시스템의 구조와 범위	87
다. 의사결정시스템의 목적함수 설정	90
1) 토양강도 목적함수	90
2) 최소 경운비용 목적함수	92
제 5 절 토양정보 DB와 의사결정시스템을 이용한 토양의 물리적 특성에 따른 최적 경운시스템	93
1. 토양 물리성 DB 및 의사결정시스템 장치 구성	93
2. 토양 물리성정보 DB의 응용질의 프로그램과 의사결정시스템의 통합	95
3. 토양특성에 따른 최적 경운시스템 결정	98
제 5 장 연구개발결과의 관련분야의 기여도 및 활용계획	103

제 1 절	연구개발결과의 관련분야의 기여도	103
1.	기술적 측면	103
2.	경제·산업적 측면	104
제 2 절	연구개발결과의 활용계획	104
제 6 장	참고문헌	105
부 록	109

제 1 장 서 론

제 1 절 연구의 필요성

시스템 농업은 생산성 향상과 환경보전이라는 상반 문제를 해결하고 농업을 지속시키기 위해 현재 활발히 연구되는 개념으로, 최근에 전 세계적으로 생물생산 분야에서 표준농업으로 부각되고 있다. 시스템 농업에서는 첨단공학 기술과 과학적인 방법에 의해 포장내의 토양 특성, 생육상황, 작물수확량 등을 체계적으로 조사하여 잠재적 작물수확량에 따라 에너지 및 농산 자재의 투입량을 최적화하고 생산량과 농산물 품질을 제고하며, 궁극적으로 환경오염 피해를 줄이고자 하는 개념의 농업을 수행한다.

시스템 농업은 과학적 자료와 이의 분석을 바탕으로 하는 농업의 시스템화를 의미하므로 그 적용범위는 작물 생산의 전 단계에서 수확 후 처리 단계를 포함하는 농업시스템 전체라고 보아야 한다. 농업을 하나의 시스템으로 보면 지속가능한 과학적 농업을 실현하기 위해서는 기본적으로 생물생산의 출발점으로서 작업 대상이 되는 포장의 특성, 작물의 생육상태 등, 농작물이 성장하는 주변 환경 정보의 지역 및 위치별 획득, GIS와 데이터베이스를 이용한 농자재 투입 처방의 결정, 정밀제어가 가능한 농업기계의 투입으로 필요한 농자재를 투입하는 기술이 필요하게 된다. 따라서 시스템농업을 응용할 수 있는 분야는 경운 및 정지 작업, 시비 및 병해충 방제작업, 수확작업 등 전체 농업생산 분야를 포괄한다.

국내에서도 시스템 농업의 필요성을 인식하여 현재 부분적으로 관련연구가 수행되고 있다. 그러나 연구 상황은 가시적 연구 성과가 드러날 수 있는 병해충 방제 및 시비 분야에 국한되며, 과학적 농업의 기초기술에 해당하는 센싱 기술 및 관련 센서의 개발에 주안점을 두고 있는 실정이다.

생물생산에서 그 준비과정에 해당하며 작물의 생육에 적합한 포장상태를 만들어 주는 경운 및 정지작업은 그 역할이 매우 중요하다. 나아가 경운 및 정지의 정도는 토양유실과 유기물의 적절한 보존 등에 관여하여 환경 친화적 농업을 위

해 최적화해야할 문제이다. 그림 1은 시스템 농업의 구성도를 보여주고 있다.

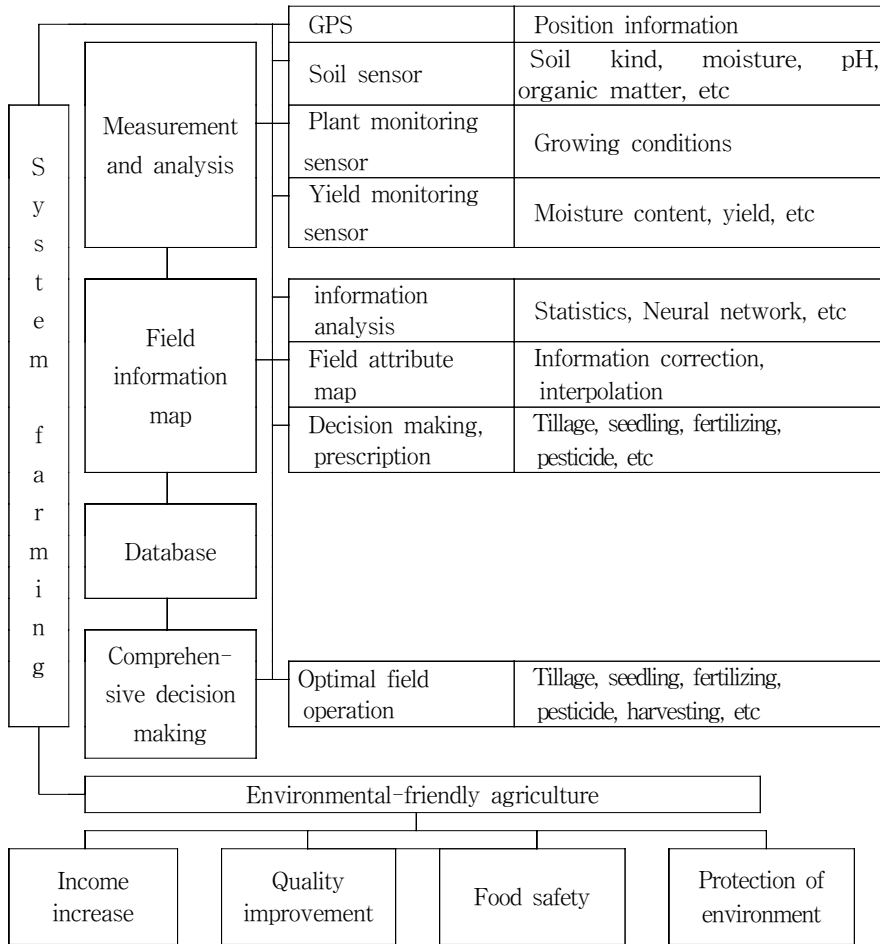


Fig. 1 Schematic structure of sustainable system farming.

지속가능한 친환경 시스템 농업을 구현하기 위해서는 계측, 자료관리 및 의사결정, 그리고 제어 및 적절한 농작업 기술이 순차적으로 순환 적용되게 된다. 나아가 이러한 시스템 농업에서 경운 및 정지작업은 매우 중요한 요소이다. 그러나 지금까지의 연구 성과는 경운 및 정지 작업의 정도를 높일 수 있는 작업기의 개발과 토양의 특성을 자동으로 검출할 수 있는 센서 개발, 그리고 농작업이 토양

다짐에 미치는 영향의 분석 등 부분적으로 기초기술의 연구에 제한되었다. 토양의 물리적 정보의 체계적 분석 및 집적, 이에 기초한 경운 및 정지작업의 최적화를 위한 의사결정시스템과 이에 연관된 시스템적 연구는 수행된 바 없다.

제 2 절 연구의 목표 및 내용

본 연구의 목표는 친환경농업을 위한 시스템 농업의 필수적인 연구로서 토양특성에 따른 최적 경운작업시스템을 개발하는 것이다. 따라서 경운·정지의 측면에서 포장의 물리적 특성을 계측·분석하여 기초 자료를 구성하고, 계측자료의 체계적이고 효율적인 저장·이용을 위한 데이터베이스를 구축하며, 이를 바탕으로 최적의 경운작업을 처방하는 의사결정시스템을 개발하고 검증하는 실험을 그 내용으로 한다. 아울러 시스템 농업의 한 주요 분야인 경운작업에 대한 포장정보의 획득, 의사결정 및 농작업의 수행 및 결과 분석의 체계적인 피드백을 통하여 향후 시스템적인 연구방향을 제시하고자 한다.

따라서 본 연구에서는 시스템 농업에 필수적인 토양특성에 따른 최적 경운작업시스템의 개발에 초점을 맞추어 그 구체적인 목표와 내용은 다음과 같이 요약할 수 있다.

- 논토양 작토층에 대한 토질 종류, 깊이와 토양 경도 및 밀도 등 물리적 특성의 측정 및 분석
- 토양 경반의 물리적 특성의 측정 및 분석
- 경운작업의 주요 물리적 요인의 분석
- 단위 경운작업에 따른 토양 물리성 변화의 측정 및 분석
- 토양정보지도의 보간법 결정과 최적화
- DB 및 의사결정시스템 장치 설정 및 제작
- 토양 정보에 대한 데이터 저장 알고리즘의 설계와 데이터베이스의 구축
- 토양 특성에 따른 최적 경운작업을 결정하는 의사결정시스템의 개발
- 토양 물리적 특성 DB 및 의사결정시스템의 종합적 연동체계 개발

제 2 장 국내·외 관련기술 연구

제 1 절 국내 관련기술 연구

현재까지 이루어진 시스템 농업에 대한 연구와 경운 및 정지의 관련 연구는 다음과 같다.

농촌진흥청 농업공학연구소 정밀농업연구실에서는 경기도 수원시 입북동 지역의 시험포장에 대하여 다양한 토양 변이 및 생산량 변이를 측정하여 지도를 작성하였다. 또한 토양 상태와 관련하여 잎의 엽록소 함량을 실시간으로 측정할 수 있는 엽록소 측정 센서를 미국의 미조리(Missouri) 대학과 공동으로 개발하였으며 실증 실험을 수행 중이다.

국내 여러 대학에서 토양특성 측정 장치 개발과 관련하여 유기물, 질소, 인산, 규소, pH 등의 토양 특성을 파악하기 위해 실시간으로 토양 특성을 파악할 수 있는 센서 및 장치의 개발이 진행되고 있으며, 이 연구는 근적외선 분광을 이용해 토양 유기물을 측정할 수 있는 센서 및 장치를 포함한다.

성균관대학교에서는 트랙터의 대형화에 따른 여러 가지 문제점을 해결하기 위한 하나의 기초연구로서 트랙터의 타이어 공기압에 따른 트랙터의 견인성능과 토양다짐에 관한 연구를 수행하였다. 이러한 토양 다짐은 토양의 저항력을 증가시켜 뿌리성장을 방해하며 작물의 수확량을 최대 30-50%까지 감소시키는 것으로 보고되었다.

충남대학교에서는 토양의 경도를 측정하는 수동형 원추형 관입기를 보완하여 트랙터 부착형 자동 경도 측정시스템을 개발하였고 성능 실험을 통하여 개발된 자동 측정시스템의 신뢰도가 높은 것으로 분석하였다.

포장정보 입력을 위한 하나의 저장장치로서 농업공학연구소에서는 GPS 수신기를 장착하고 포장 내 위치별로 속성정보와 영상정보를 동시에 저장·관리할 수 있는 시스템을 개발하였다. GPS를 기반으로 하는 정밀농업형 작업기는 미리 작성된 처방 지도에 기반한 데이터베이스 의사결정시스템의 처방에 따라 작업하는

방식과 실시간으로 국지적인 변이를 측정하여 처방하고 작업하는 두 가지 방식이 있다. 그러나 이러한 작업기 개발에 관련하여 국내에서 아직은 연구결과가 보고된 바 없다.

제 2 절 국외 관련기술 연구

경운 및 정지에 관계하여 토양 특성에 대한 연구는 외국에서 다수 보고되었다. Havlin 등(1990)은 작물의 수확량은 토양이 저장하는 수분과 직접적으로 연관되어 있기 때문에 뿌리 뽑음의 중간매체로서 토양의 중요성을 강조하였다. 나아가 최대의 생산성을 위해 토양 요인들은 조절이 가능하다고 주장하였다. 일반적으로 토양의 특성은 토양을 수집한 후 일련의 실내 분석절차를 통해 계량화할 수 있는데 토양의 계량에는 양분상태, 수분함량, 구조, 밀도 및 공극률, pH, 양이온 교환 능력, 유기물질을 포함한다고 하였다.

토양의 전기전도도(EC)는 물질이 전류를 통할 수 있는 능력을 나타내는 척도로서 토양수분함량, 토양의 미세 크기와 분포, 점토의 함량 등과 연관되어진다. 나아가 Koolen 등(1983)은 토양다짐이 토양특성을 규정짓는 중요한 요인 중의 하나라고 제안했다. 그러나 그들은 토양다짐은 토양구조와 토양 내의 수분함량, 유기물질의 함량, 온도 등에 영향을 받는 복잡한 요인으로 보고하였다. 토양다짐이 증가하면 토양구조, 점착력과 부착력, 공극의 크기, 밀도 등이 영향을 받게 되어 작물의 성장과 크기에 지대한 영향을 주게 된다.

Horn 등(1995)은 토양의 bulk density와 관통저항이 증가하면 작물뿌리의 성장과 생육과 전개가 제한되는 것을 보였다. 따라서 경운은 토양의 강도를 줄여서 작물뿌리가 토양 내에서 수분과 영양분이 있는 곳으로 나아갈 수 있게 도와준다. Varsa 등(1997)은 심경운이 토양의 물리적 특성과 옥수수 뿌리 성장과 생산량에 미치는 영향을 연구하였다. 그들은 심경운이 토양의 bulk density와 관통저항을 감소시켜 궁극적으로 옥수수의 수확량을 증가시켰다고 보고하였다.

깊이에 따른 토양의 강도를 측정할 때 주로 토양원추관입기가 사용된다. 원추

관입기에 의해 측정되는 토양강도의 척도로서 CI(cone index)는 단위기저면적당 힘으로 정의된다. Hummel 등(2004)은 원추관입기와 몇몇 다른 센서를 조합하여 토양의 EC, 수분함량, 관통저항을 동시에 측정하였다. Raper 등(1999)은 작물의 조를 가로질러 토양강도의 종단면도를 측정할 수 있는 다중 탐침 원추관입기를 개발한 바 있다. Whiteley(1981)는 경운 층에서 원추관입저항을 점토함유비, 점착 및 마찰계수, 토양의 수분함량, 토양의 비중량의 함수로 표시하였다. 이러한 연구는 작물뿌리의 성장과 전개에 깊이 관계된 관입저항을 보다 확실한 측정량에 의해 묘사하려는 시도로 볼 수 있다.

현재까지 진행된 국내외 연구들은 경운 정지와 관련하여 시스템적 특성을 반영하지 못하며, 지속가능한 친환경 시스템 농업으로서 경운작업의 관련 연구는 전무한 실정이다. 나아가 현재 부분 연구가 진행 중인 것으로 알려졌으나 포장의 다양한 물리적 상태를 기반으로 농작업을 수행할 경우, 필수적인 토양속성 정보를 지속적으로 추출할 수 있는 데이터 저장소(데이터베이스)가 필요하지만, 아직까지 이의 설계 및 구축에 대한 연구는 전무한 실정이며 신뢰할 만한 의사결정시스템의 구축에 관계된 연구는 보고되지 않고 있다.

제 3 장 작토층의 물리적 특성의 측정 및 분석

제 1 절 경운정지 작업에 영향을 미치는 토양의 주요 물리적 요인 조사를 위한 토양-작업기 모델 및 자료 분석

경운작업에 영향을 미치는 주요 물리적 변수들은 국내외에 보고 된 기존 연구 결과를 수집하고 관련 모델들을 분석함으로써 조사, 분석하였다. 특히 이번 연구에서는 토양특성을 위주로 개발된 대표적인 모델들을 기준으로 조사 분석하였으며 이는 본 연구의 토양 물리성 측정 자료의 수집에 직접 이용되었다.

W. Soehne는 토양-금속 마찰력, 전단파괴력, 전단 파괴되고 있는 토양블록의 가속력, 그리고 토양 절단저항력 등을 이용하여 토양-작업기 역학 모델을 개발하였으며, Rowe와 Barnes는 여기에 부착력을 첨가하여 새로운 모델을 제시하였다.

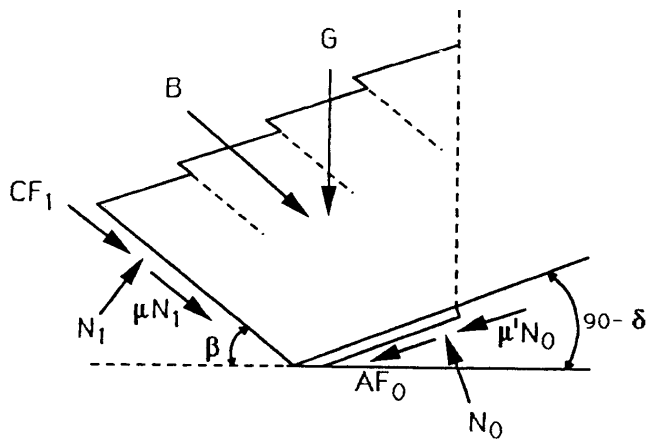


Fig. 2 Forces on a soil segment acting on an inclined plane of a tillage tool.

다음의 2차원 토양-작업기역학 모델은 Gill과 Vandenberg(1967)에 의해 개발된 것으로, 그림 2는 경운날이 전진함에 따라 전단 파괴되고 있는 토양 블록에 작용하고 있는 힘들을 보여주고 있다.

힘 CF_1 과 μN_1 은 각각 토양점착력과 내부마찰력으로, CF_1 은 토양의 전단파괴면이 형성될 때에만 존재한다. 힘 $\mu'N_0$ 는 토양과 경운날 사이의 마찰력이고, 힘 AF_0 는 부착력이다. 힘 G 는 토양블록의 중량이며, 힘 B 는 토양블록이 경운날면위를 상승 가속할 때 발생하는 힘이다. 토양의 순수 전단저항은 경운날의 선단에서 발생하나, Soehne에 의하면 이 힘은 매우 작고 경운날의 선단이 무디거나 토양에 돌이나 유기물이 존재할 때에만 중요성을 갖는다.

토양의 전단력은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\tau = C + \sigma \tan \phi \quad \dots\dots\dots (1)$$

여기서, τ = 토양의 전단강도

C = 토양점착력

$\tan \phi$ = 토양 내부마찰계수

σ = 전단면에서의 수직응력

ϕ = 토양의 내부마찰각

토양과 경운날 접촉면에서 전단응력은 토양전단응력과 같은 방법으로 다음에 나타내었다.

$$\tau = A + \mu' \sigma \quad \dots\dots\dots (2)$$

여기서, τ : 토양-경운날 접촉면에서의 전단응력

A : 경운날면의 토양 부착력

μ' : 토양-경운날 마찰계수

σ : 토양-경운날 접촉면에서의 수직응력

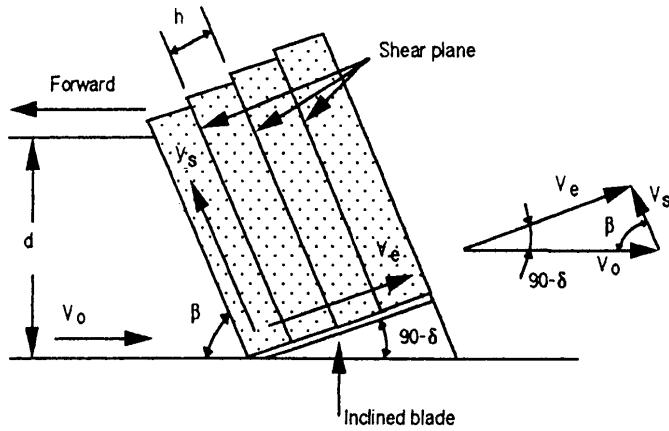


Fig. 3 Formation of soil blocks by repeated shear failure.

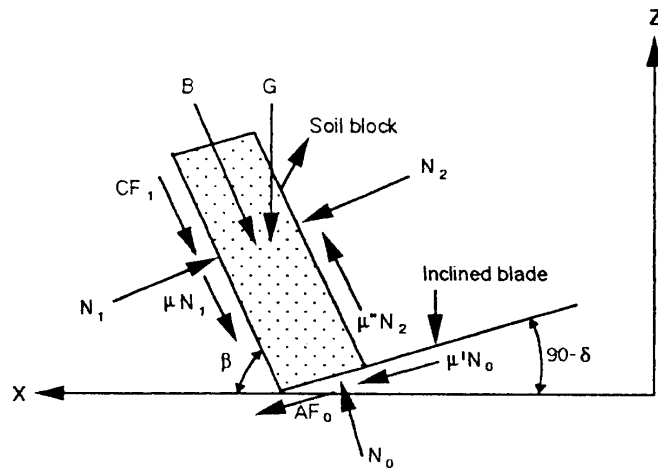


Fig. 4 Freebody diagram of a soil slice on 2-D model.

경운날의 전진에 따른 토양의 파괴는 그림 3에서와 같이 연속적인 전단에 의한 작은 토양블럭군으로의 파괴로 볼 수 있다. 경운날 선단의 토양블럭이 경운날 위로 상승함에 따라 후단의 토양블럭은 지면으로 떨어진다. 경운날에서 토양블럭군에 작용하는 합력을 구함으로써 경운날 전진에 소요되는 견인저항을 구할 수 있

다.

그림 4에 표기된 기호들을 사용해서 토양블럭에 작용하는 힘의 평균식을 구하면 다음과 같다.

$$(B + CF_1 + \mu N_1 - \mu N_2) \cos(\delta - \beta) + (N_2 - N_1) \sin(\delta - \beta) + G \sin \delta - N_0 = 0 \dots\dots\dots(3)$$

여기서, B : 토양 가속력

C : 토양 점착력

F_1 : 토양 전단면의 면적

μ : 토양 내부마찰계수

N_1 : 토양블럭 선단의 전단면에 작용하는 수직력

N_2 : 토양블럭 후단의 전단면에 작용하는 수직력

G : 토양블럭의 중량

N_0 : 경운날에 대한 토양반력

δ : 경기각

β : 수평면과 토양 전단면 사이의 각

토양블럭 자중의 법선방향 성분이 무시될 수 있도록 블럭을 작게 한다면 두 수직력 N_1 과 N_2 는 같다고 가정할 수 있으며 식 (3)은 다음과 같이 간단하게 나타낼 수 있다.

$$N_0 = (B + CF_1) \cos(\delta - \beta) + G \sin \delta \dots\dots\dots(4)$$

식 (4)에서 B , F_1 그리고 G 를 구하면 수직력 N_0 를 구할 수 있다.

토양블럭의 자중은 다음과 같이 계산되어질 수 있다.

$$G = \frac{\gamma b h d}{\sin \beta} \dots\dots\dots (5)$$

여기서, γ : 토양의 비중

b : 경폭

h : 토양블럭의 두께

d : 경심

β : 수평면과 토양블럭 전단면의 사이각

전단면의 면적은 그림에서 다음과 같이 계산될 수 있다.

$$F_1 = \frac{b d}{\sin \beta} \dots\dots\dots (6)$$

토양 가속력은 뉴튼의 제 2 법칙으로부터 다음과 같이 계산된다.

$$B = m \frac{dv}{dt} \dots\dots\dots (7)$$

여기서, m : 가속 토양의 질량

v : 가속 토양의 속도

t : 시간

토양의 전단파쇄는 주기적으로 발생하는 간헐적 현상이나 본 모델에서와 같이 연속적으로 발생한다고 가정하여도 전단면을 따라 토양을 가속시키기 위하여 공급된 총 일은 크게 변화되지 않는다. 따라서 수평력이 계산되어질 수 있고, 정지

$$B = \left(\frac{\gamma}{g}\right) b d v_0^2 \frac{\cos \delta}{\cos(\delta - \beta)} \dots\dots\dots (13)$$

따라서 식 (4)에서 경운날 면에서의 토양반력 N_0 가 계산되어진다.

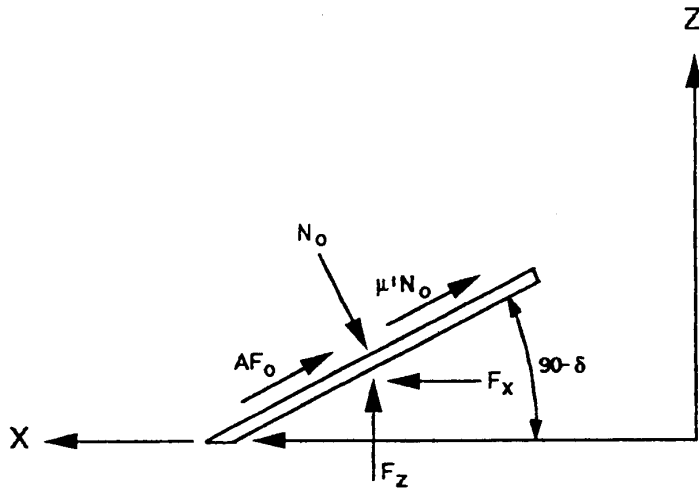


Fig. 5 Freebody diagram of an inclined blade.

그림 5의 경운날면의 자유체선도(自由體線圖)에서 견인력 F_x 와 수직력 F_z 가 각각 결정된다.

$$F_x = (AF_0 + \mu'N_0) \cos \delta \dots\dots\dots (14)$$

$$F_z = (AF_0 + \mu'N_0) \sin \delta + N_0 \cos \delta \dots\dots\dots (15)$$

식 (14)과 (15)에서의 힘들은 하나의 토양블럭에 작용하므로 전체 경운날면에 작용하는 힘은 각각의 토양블럭에 작용하는 합력으로 나타내어질 수 있다. 경운

날면에서 최전단의 토양블럭은 토양점착력이 작용하여 전단면이 형성되며 다른 토양블럭에는 토양 내부마찰력만이 작용한다.

상기 모델에서와 같이 경운작업기의 성능에 영향을 미치는 주요 토양변수로는 토양전단력 변수인 토양점착력과 내부마찰력, 토양-금속마찰력, 토양-금속부착력 그리고 토양 비중이다. 상기 토양변수는 다른 문헌에서도 대부분 경운작업기에 성능에 영향을 미치는 주요 변수로 보고되고 있다. 이외에 점토함량을 경운작업기의 성능에 영향을 미치는 주요 변수로 보는 학자들이 일부 보고 되고 있는데 이는 토성과 관련된다고 볼 수 있으며, 토양수분함량이 주요 변수로 제기되고 있기도 하다.

이외에 토양의 경도 특성을 점착력과 내부 마찰력으로 나누지 않고 단지 토양 관입저항(Cone Index)하나만을 이용하는 경우도 상당히 많이 보고 되고 있다. 토양관입저항은 토성, 밀도, 수분함량, 토양 전단저항특성을 종합적으로 하나의 지수로서 나타냄으로서 경운작업기 뿐 아니라 토양-기계시스템 성능예측과 관련된 모든 분야에서 폭 넓게 사용되고 있다. 이는 상기의 장점 뿐 아니라 토양관입저항기가 간편하게 제작되어 있어 논 밭 등 야외포장에서 손쉽게 사용할 수 있다는 장점이 있기 때문이다.

제 2 절 토양특성에 따른 관행 경운작업 시스템의 조사 분석

토양특성에 따른 관행 경운작업 시스템 분석하기 위해 국내 주요 수도재배지역을 현장 방문하여 농민들이 관행적으로 수행해오던 경운작업 체계를 조사 분석하였다. 대상지역은 우리나라 수도재배의 대표적인 지역 중에서 경기, 경남, 경북, 전북 충북의 일부 지역을 선정하여 조사하였다. 경기도에서는 평택, 김포, 강화, 화성, 안성지역을, 전북지역에서는 익산을, 충북지역에서는 진천과 충주지역을, 강원도에서는 철원지역을, 경북에서는 상주, 안동지역을 그리고 경남에서는 밀양과

김해 지역을 선정하였다. 조사대상 농가는 비교적 영농규모가 큰 농가를 대상으로 하였다(표 1).

Table 1. Details of surveyed farms

Province	No. of city /county	No. of total sample	No. of sample for each city/county
Kyonggi	5	25	Hwasong 5, Pyongtaek 5, Ansong 5, Ggangwha 5, Kimpo 5
Kangwon	1	5	Cholwon 5
Chungbuk	2	10	Chinchon 5, Chungju 5
Chungnam	1	5	Seosan 5,
Chonbuk	1	5	Iksan 5
Kyongbuk	2	10	Andong 5, Sangju 5
Kyongnam	2	10	Miryang 5, Kimhae 5
Total	14	70	

Table 2. Age, farming year and farm size distribution of surveyed farmers

Age	Ratio (%)	Farming year (yr)	Ratio (%)	Farm size (x 10 ⁴ pyung)	Ratio (%)
More than 60	24	More than 40	4	More than 5	13
50 ≤ Age < 60	32	30 ≤ Fy < 40	31	4 ≤ Fs < 5	6
40 ≤ Age < 50	28	20 ≤ Fy < 30	36	3 ≤ Fs < 4	12
30 ≤ Age < 40	13	10 ≤ Fy < 20	25	2 ≤ Fs < 3	35
20 ≤ Age < 30	3	Less than 10	4	1 ≤ Fs < 2	27
Les than 20	0			0.5 ≤ Fs < 1	7
				Less than 0.5	

조사항목은 일반현황으로서 연령, 영농경력, 벼농사 규모 그리고 경운정지용 농기계 보유현황을 조사하였으며 다음으로 경운정지 방법 또는 체계였다. 경운정지 방법항목에는 쟁기작업시기(춘경, 또는 추경), 추경일 경우에는 이유, 로타리 및 씨레 작업시기, 로타리 및 씨레 작업회수 그리고 경운깊이가 조사되었다.

표 2는 조사지역 농민들의 연령, 영농경력 그리고 영농규모 분포를 보여 주고 있다. 농민들의 연령 분포를 보면 50이상60미만이 32%로 가장 많으며, 그 다음은 40이상50미만이 28%였으며, 60세 이상도 24%나 되었다. 대부분 농민들의 연령은 40세 이상으로 조사되었다. 영농경력은 대부분 20년- 30년이었으며 40년이상 농사를 지어온 농민들도 4%나 되었다. 영농규모를 살펴보면 1만평 이상 3만평 미만의 영농규모가 가장 많았으며 5만평이상의 영농규모도 13%나 되는 것으로 나타나 영농규모가 대형화 하고 있음을 알 수 있었다.

또한 조사지역 농가의 98%이상인 69농가가 경운정지 작업을 트랙터에 의해 수행하고 있었으며 경지규모가 가장 작은 한 농가만이 경운작업을 경운기에 의해 수행하고 있었다. 이로부터 우리나라 농가의 대부분은 경운작업을 트랙터에 의해 수행하고 있음을 알 수 있었다.

조사지역의 경운정지 방법을 살펴보면 전체 70개 조사 농가 중 96%에 해당하는 67개 농가는 본인소유의 경작지의 거의 전부에 대해 쟁기 작업을 하고 있었으며, 나머지 3농가도 대부분의 경작지에 대해 쟁기 작업을 하며 경작지의 일부분만을 형편에 따라 로타리 작업만하고 있는 것으로 조사되었다. 대부분 농가의 경운작업시스템은 쟁기작업 1회, 로타리 작업 1-2회 씨레작업을 1회 수행하는 것으로 조사되었으나, 유독 평택 지역에서만 많은 농가들이 로타리 작업을 씨레와 동시에 1회 작업하는 것으로 나타났다.

기타 지역들은 거의 비슷한 경운 작업시스템을 갖고 있는 것으로 조사되었다. 조사지역 대부분은 춘경과 추경을 동시에 수행하고 있었으며 가을에 쟁기 작업을 할 수 있게 일기가 좋은 경우에는 추경을 그렇지 않은 경우에는 3-5월에 걸쳐 춘경을 실시하고 있었다. 추경의 비율은 대개의 경우 본인 소유 경작지의 20-30%로 30%를 넘는 경우는 거의 없었다.

조사지역의 토성은 미사질양토(SiL)가 41곳으로 제일 많았으며 그다음은 양토

(SL)가 10곳 미사질식양토(SiCL)가 7곳, 사질양토(SL)가 각각 6곳, 양토가 4곳 그리고 식토가 2곳이었다. 따라서 우리나라 논토양은 대부분 양토 계통임을 알 수 있었으나 상기 경운작업시스템에서 언급했듯이 지역에 차이 없이 경운작업시스템은 거의 비슷하여 토양에 따른 경운 작업시스템의 차이는 크게 발견되지 않고 있다.

제 3 절 논토양 작토층의 물리적 특성의 측정 및 분석

1. 지역별 토양물리성 측정

우리나라 수도재배의 대표적인 지역 중에서 경기, 경남, 경북, 전북의 일부 지역을 선정하여 우선 작토층의 물리적 특성을 측정 분석하였다. 이렇게 일부 지역만을 선정한 것은 1년 중 논토양의 물리성을 측정할 수 있는 경운정지 기간이 3월 초순에서 4월 중순까지 1개월 반, 10월말에서 11월말의 1개월 도합 2개월 반에 지나지 않기 때문이다. 이에 따라 경기도에서는 평택, 김포, 강화, 화성지역을, 전북지역에서는 익산을, 그리고 경북에서는 상주지역을 그리고 경남에서는 밀양과 김해 지역을 선정하였다.

선정된 지역에서 측정된 토양물리성은 문헌 검토 등을 통해 경운작업기의 성능에 영향을 미치는 또는 경운작업기의 설계에 필요한 변수들인 토양점착력, 내부마찰각, 토양-금속 마찰계수, 토양-금속 부착력, 걸보기밀도, 수분함량, 원추지수 그리고 토성 등을 측정하였다. 여기서 토양전단력변수, 토양-금속 마찰계수, 걸보기밀도 등은 일반적으로 모듈드보드 플라우의 성능예측관련 수학적 모델에 많이 이용되는 토양물리성 변수이며, 원추지수는 논토양의 경도특성을 알기위해 측정되었다. 토성은 지역에 따라 차이가 있으나 일반적으로 반경 2km이내에서는 크게 차이가 나지 않는 것으로 보고되고 있어 본 연구에서는 같은 지역으로 설정된 지역 내에서는 토양을 석어서 하나의 표본으로 만들었으며 이를 그 지역의 토성으로 하였다.

토양 측정지역은 상기 측정 지역에서 농민 또는 지역 농업기술센터와 상의하여 선정하였다. 측정지점은 면단위를 기본으로 하여 반경 5km이상인 지점들을 선정하고 그 다음 3-4개의 구역을 선정하고 1구역에서 3곳을 선정하고 3반복 측정하여 평균값을 취하였다.

토양물리성의 측정방법은 다음과 같다.

(가) 겉보기 밀도

토양의 겉보기밀도는 용량 100cc의 토양 채취관을 이용하여 측정하였다. 토양의 겉보기밀도는 표면의 토양을 걷어낸 후 약 8cm 와 16cm의 두 깊이에서 수도포장의 임의의 세 곳을 선정하여 3반복으로 측정하였다.

(나) 토양전단저항계수

토양의 점착력과 내부마찰각은 SR-2 모델의 토양 전단저항 측정 장치를 사용하여 수도포장의 임의의 세 곳을 선정하여 3반복으로 측정하였다.

(다) 토양-금속 마찰계수

토양의 부착력과 외부마찰각은 SR-2 모델의 토양-작업기 마찰계수 측정장치를 사용하여 수도포장의 임의의 세 곳을 선정하여 3반복으로 측정하였다.

(라) 원추지수

원추지수는 SR-2 모델의 토양경도 측정장치를 이용하여 수도포장의 임의의 세 곳을 선정하여 0, 5, 10, 15 cm에서 3반복으로 측정하였다.

(마) 토양수분함량

토양수분함량은 상기 측정변수의 측정지점에서 토양을 채취하여 오븐건조법에 의해 측정되었다.

2. 지역별 토양자료의 분석

표 3 (부록 표 A1 참조)은 측정된 토양의 토양점착력, 내부마찰각, 토양-금속 마찰계수, 토양-금속 부착력, 겉보기밀도, 수분함량 등 토양 물리성을 보여주고 있다. 이들 표에 의하면 33개 조사지역의 토성은 미사질양토(SiL)가 26곳으로

제일 많았으며 그다음은 양토(SL)가 2곳 미사질식양토(SiCL)가 4곳, 사질양토(SL)가 각각 2 그리고 양토가 한 곳 있었다. 이 지역에서 경운정지 시기의 토양 수분함량은 주로 20~40%의 범위이었으며, 드물게 20%가 안되는 지역과 50%가 넘는 지역이 한두 곳 있었다. 겉보기밀도는 대부분 1500~1700 kg/m³의 범위이었다.

점착력은 대부분 지역에서 5~15 kPa이었으며, 밀양 등 일부지역에서만 5 kPa 미만인 곳이 3-4군데 있었다. 내부마찰각은 지역과 토성에 따라 차이는 있으나 30~60도의 범위이었으나 드물게 60도가 넘는 지역도 몇 군데 있었다. 토양-금속 마찰계수는 0.3에서 0.8까지 그 범위가 큰 편이었으며, 토양-금속 부착력은 0.6 kPa에서 3.0 kPa의 범위이었다.

Table 3. Soil physical properties which affect the soil-tillage tool performance

Region		Moisture Content (%)	Bulk Density (wet) (kg/m ³)	Cohesion (kPa)	Internal frictional angle (deg.)	Soil-metal frictional coeff.	Soil-metal adhesion (kPa)	Composition			Texture
								Sand (%)	Silt (%)	Clay (%)	
Gangwha	1-1	26.5	1574.3	6.10	52.853	0.453	2.544	5.2	73.3	21.5	SiL
	1-2	29.4	1567.3	12.40	45.847	0.313	4.233				
	1-3	33.2	1676.4	11.70	40.365	0.290	3.811				
	1-4	31.9	1578.5	6.20	48.991	0.330	3.344				
	1-5	37.3	1622.8	9.00	46.668	0.397	3.289				
Kimpo	1-1	35.4	1677.1	13.650	50.889	0.470	2.544	15.2	57.6	27.2	SiCL
	1-2	32.4	1633.4	13.800	45.285	0.502	2.356				
	1-3	32.9	1603.3	10.900	49.720	0.468	3.411				
	1-4	33/4	1598.4	7.900	49.720	0.492	2.889				
	1-5	29.5	1578.2	12.150	49.720	0.478	2.378				
Pyongtaek	1-1	31.4	1678.3	11.667	56.310	0.525	1.911	53.4	31.6	15.0	SL
	1-2	32.2	1665.8	10.583	60.255	0.554	2.268				
	1-3	34.3	11678.4	9.917	57.171	0.529	1.929				
	1-4	28.9	1598.2	9.917	58.782	0.539	2.625				
Hwasung	1-1	25.7	1703.3	12.800	50.428	0.504	1.518	13.3	69.3	17.4	SiL
	1-2	25.8	1698.4	16.800	40.696	0.475	2.518				
	1-3	28.4	1704.9	15.200	47.466	0.554	2.768				
	1-4	29.3	1688.3	15.300	45.285	0.482	1.911				
Kimhae	1-1	34.5	1578.9	4.583	60.255	0.51+	0.917	9.7	72.8	17.5	SiL
	1-2	33.8	1567.2	6.700	54.268	0.676	0.417				
	1-3	29.4	1554.5	8.883	59.534	0.604	1.750				
	1-4	26.8	1578.9	7.250	65.056	0.646	1.375				
	1-5	32.9	1598.1	4.667	62.241	0.612	1.167				
Milyang	1-1	36.2	1445.2	2.083	60.255	0.340	2.367	7.1	67.9	25.0	SiL
	1-2	38.9	1455.5	3.250	67.797	0.558	-1.060				
	1-3	46.6	1508.9	2.700	50.659	0.533	1.778				
	1-4	29.9	1423.6	5.583	55.408	0.545	0.767				
	1-5	40.1	1398.5	1.083	60.255	0.597	0.789				
Sangju	1-1	24.4	1567.2	11.917	63.997	0.408	2.292	27.1	55.7	17.1	SiL
	1-2	28.2	1543.5	12.917	48.991	0.536	3.250				
	1-3	21.3	1571.2	12.667	60.945	0.583	2.042				
	1-4	30.4	1512.9	-	-	0.514	3.750				
	1-5	33.5	1523.3	-	-	0.463	3.208				
Iksan	1-1	39.8	1639.3	12.450	48.743	0.543	2.381	13.3	65.9	20.8	SiL
	1-2	38.7	1623.3	11.050	49.236	0.491	2.690				
	1-3	42.3	1611.9	11.600	50.659	0.491	2.524				

Table 4. Soil hardness measured as cone-index

Region		Depth (cm)	CI (kg/cm ²)	Region		Depth (cm)	CI (kg/cm ²)
Ganghwa	1-1	0	3.0	Milyang	1-1	0	8.9
		5	3.9			5	13.9
		10	10.9			10	24.1
		15	15.5			15	초과
		20	14.9			20	-
		25	14.5			25	-
		30	16.3			30	-
Kimpo	1-1	0	5.9	Sangju	1-1	0	5.0
		5	7.2			5	6.0
		10	6.2			10	19.6
		15	20.5			15	21.8
		20	초과			20	22.6
		25				25	초과
		30				30	-
Hwasung	1-1	0	1.067(3.2)	Iksan	1-1	0	3.0
		5	4.167(12.5)			5	5.4
		10	2.733(8.2)			10	7.1
		15	2.267(6.8)			15	15.8
		20	-			20	13.0
		25	-			25	11.8
Kimhae	1-1	0	8.1			30	11.5
		5	14.7				
		10	24.1				
		15	22.5				
		20	14.5				
		25	-				

표 4 (부록 표 A2 참조)는 원추관입시험기에 의해 측정된 토양 경도를 보여 주고 있다. 측정 지역과 장소에 그리고 깊이에 큰 차이가 있음을 알 수 있다.

3. 토양경도의 정밀측정 및 분석

일반적으로 한 포장의 토양경도 측정 방법은 임의의 3지점 또는 5지점의 토양 경도를 측정하여 평균을 취함으로써 대표적인 토양경도의 특성자료로 삼았지만, 본 과제에서는 ‘최적 경운’ 제시를 위한 정밀한 방법의 토양경도 측정 및 그 분석을 시도하였으며, 토양 경도의 정밀측정을 위하여 시험포장 2곳을 선정하여 가로

5m, 세로 5m단위로 토양경도를 측정하였다.

그림 6은 시험 포장에서 취득한 토양경도를 깊이별(2.5cm)로 도시한 것이다. 그림과 같이 포장의 전 영역의 토양 경도를 측정한 자료를 바탕으로 ‘최적 경운’과 관련한 토양 특성 분석 및 의사 결정을 수행하기 위해서는 포장의 토양 경도 수치를 특성화하여 포장의 토양 경도 특성을 대표할 만한 지수를 획득해야 한다. 본 과제에서는 우선 관행적으로 수행되어온 방법인 깊이별 평균을 구하는 방법으로 대표 지수를 획득하였다.

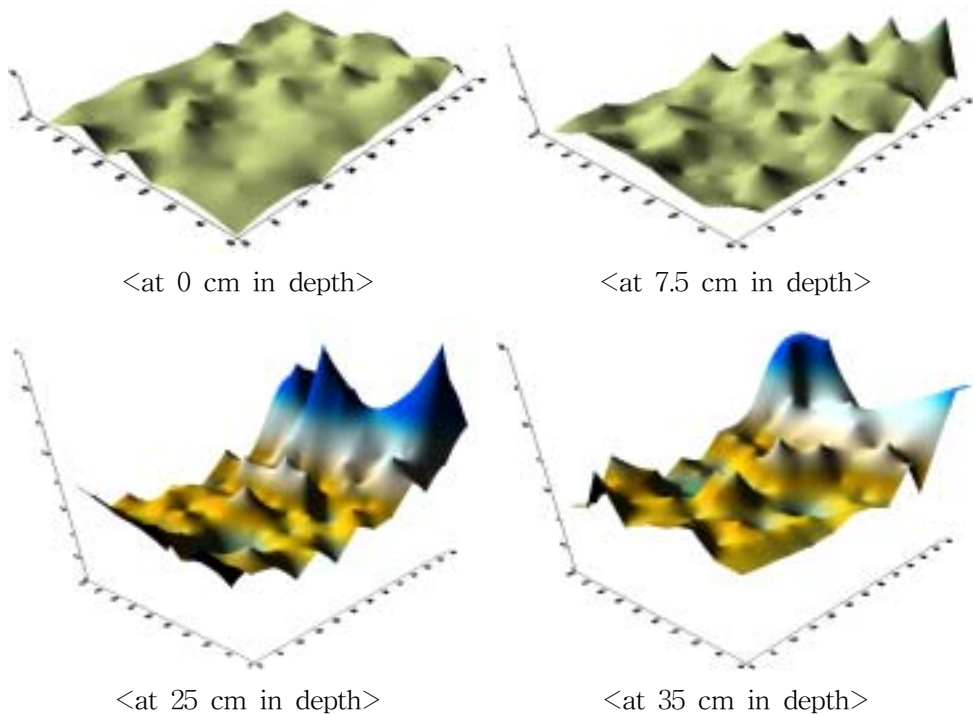


Fig. 6 Textured distribution maps of CIs with the depth of field.

그러나 이러한 대표지수를 결정함에 있어 평균값을 사용하는 방법은 토양경도 측정 시 발생할 수 있는 다양한 오차 및 토양 자체가 가지는 불균일성으로부터 발생하는 오류 정보를 그대로 담고 있으므로 이러한 오류 정보를 최소화 하고자

다음과 같은 보정 알고리즘을 사용하였다.

- (가) 깊이별 토양 경도의 평균 및 표준편차를 구한다.
- (나) 오차 감소를 위한 오류 정보 제거를 위하여 각 토양 경도값과 평균값의 거리(차)를 구한다.
- (다) 나 번 과정에서 구한 거리의 값이 최대인 깊이의 값을 제거한다.
- (라) 제거된 후의 새로운 표준편차를 구한다.
- (마) 라 번 과정에서 구한 표준편차와 1. 과정에서 구한 표준편차의 차가 임계값 보다 클 경우에 가 번 과정부터 다시 동일한 과정을 수행한다. 만약 임계값보다 작거나 더 이상 변화가 없을 경우 다음 과정으로 넘어간다.
- (바) 남아 있는 정보로부터 평균을 취하여 대표 지수를 획득한다.

이러한 과정을 순서도로 정리하면 다음의 그림 7과 같다.

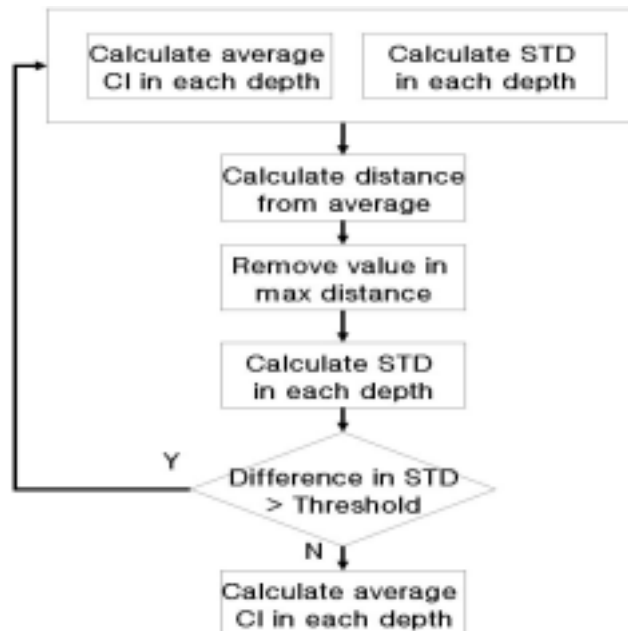


Fig. 7 Flowchart of calibrating cone index with random errors.

보정 알고리즘의 적용을 통하여 재귀적인 알고리즘을 수행한 결과 표준편차의 변화가 임계값(0.001) 이하로 작아지는 보정 시점을 다음 그림 8과 같이 확인할 수 있다. 그림 9는 CI값의 교정 전후의 포장 내 CI 분포를 보여주고 있다.

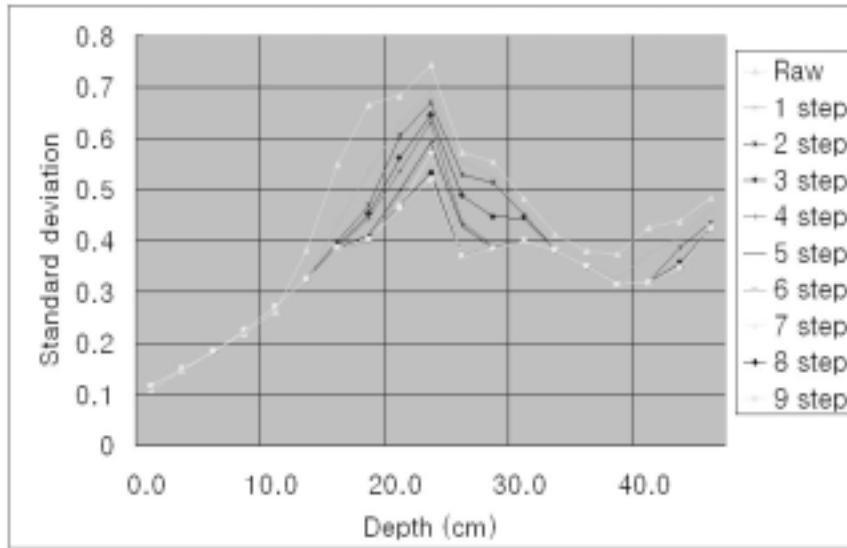
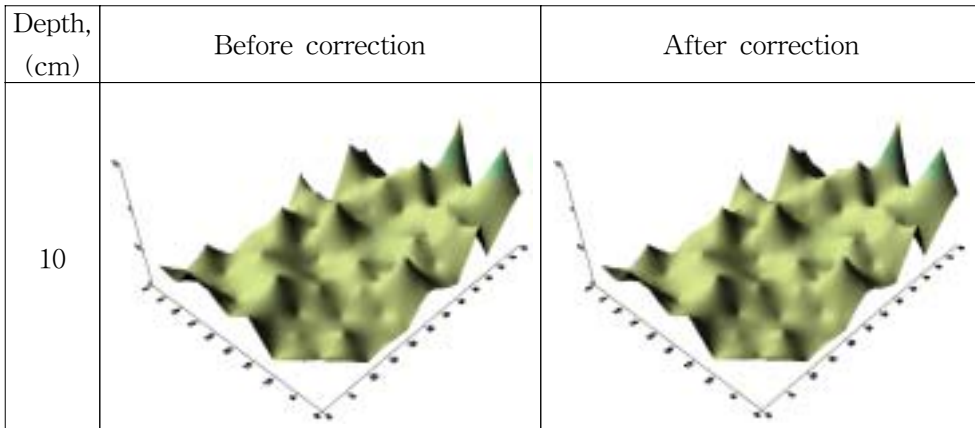


Fig. 8 Changes in standard deviation of CIs when calibrating cone index with random errors.



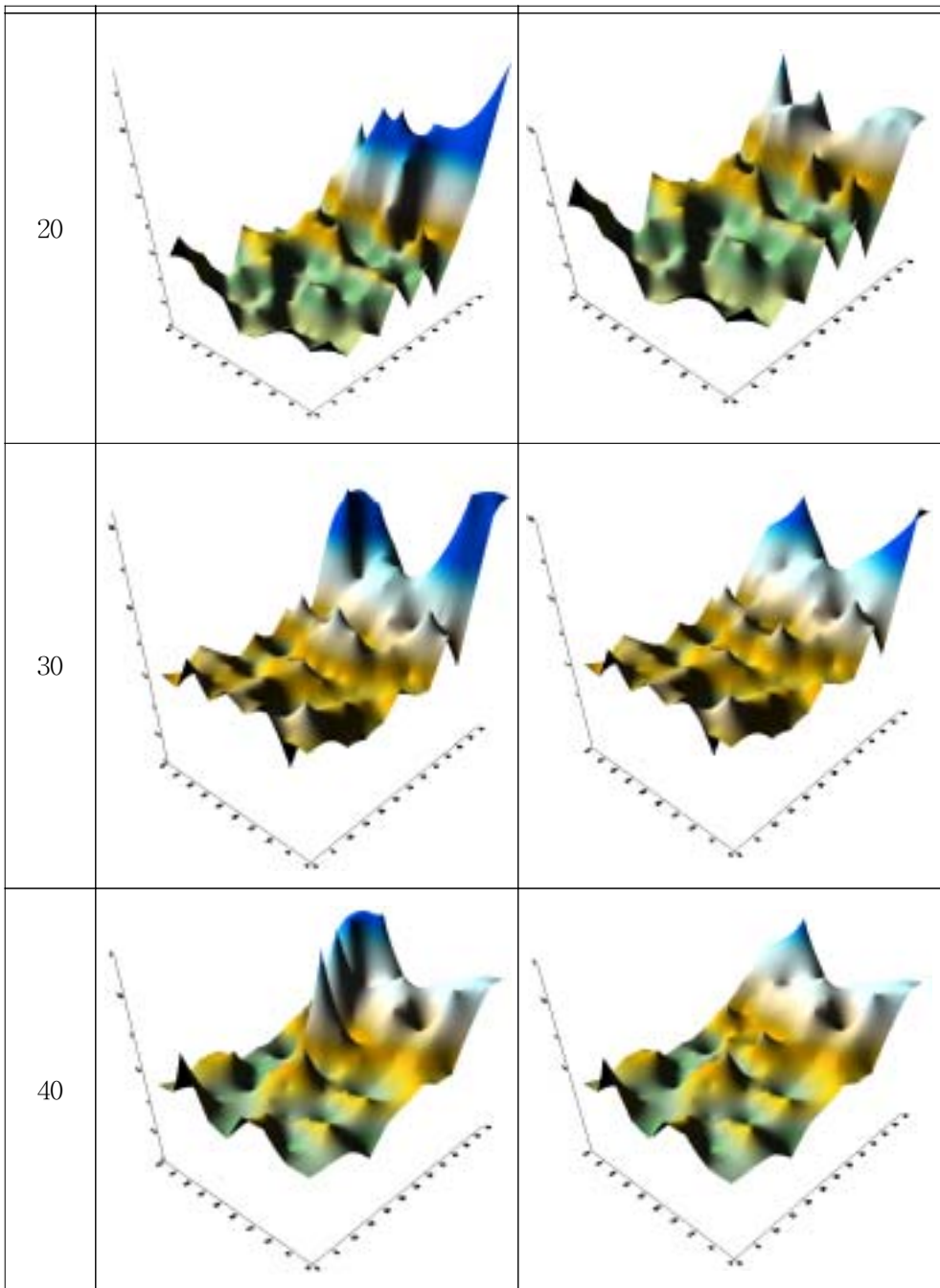


Fig. 9 Textured distribution maps of CIs with the depth of field before and after error correction.

이러한 보정 알고리즘을 통하여 토양의 대표 경도 지수특성을 다음 그림 10과 같이 획득할 수 있다.

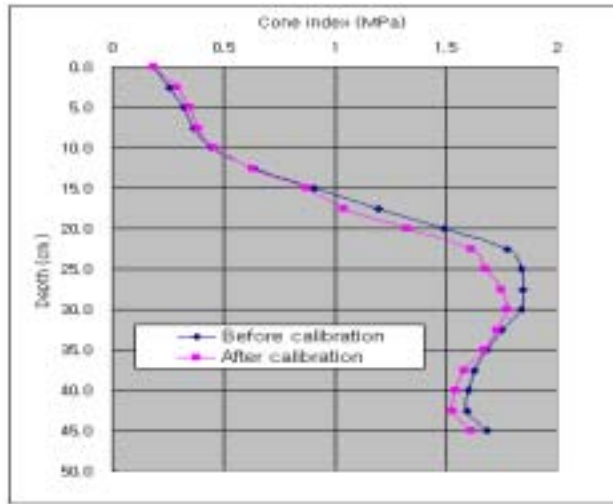


Fig. 10 The CI profiles with depth before and after calibration of CIs.

토양의 경도 특성에 따른 최적 경운을 제시하기 위하여 필수적인 경반층 (hardpan)의 분석을 위해서는 토양의 경도 특성에 대한 정확한 측정 및 분석이 수반되어야 한다. 본 과제에서는 관행적으로 수행되어온 토양 경도 측정의 방법 및 분석법을 발전시켜 다양한 형태로 존재하는 토양 속성의 오류정보로부터 강인한 토양 경도 분석 방법을 수행하였으며, 이를 토대로 경반층의 시작지점 및 경반층의 두께, 경반층의 평균 강도를 분석하는데 활용하였다.

제 4 절 국내 주요 논토양 경반의 물리적 특성

보고에 의하면 벼의 뿌리가 토양경도에 의해서 영향을 받아 생육에 지장을 받기 시작하는 토양경도는 1MPa인 것으로 보고되고 있다. 따라서 본 연구에서는

경반의 시작점을 토양경도 1MPa 이상인 지역으로서 경도가 지속적으로 증가하는 지점으로 정의하였으며, 경반의 끝점은 토양경도가 정점에 이른 뒤 지속적으로 감소하여 하나의 봉우리를 완성하고 기울기가 증가하거나 또는 더 이상 증가하지 않는 지점으로 정의하였다.

본 연구에서 원추지수는 Spectrum Technology사의 SC 900 모델의 soil compaction meter에 의해 측정되었다. 이 원추관입저항기는 SR-2 모델과는 달리 원추지수를 8MPa 까지 측정할 수 있고, 80cm 깊이 까지 측정이 가능하여 논토양 경반의 경도특성을 측정하기에 적합한 것으로 판단되었다.

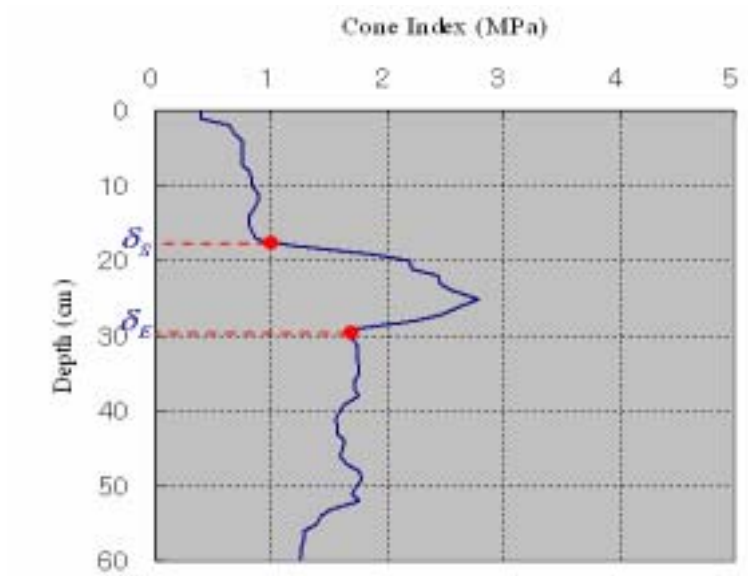


Fig. 11 Typical cone index-depth curve for determining the hardpan width.

그림 11은 수도포장의 경반의 경도 특성을 분석하기 위해 그려진 전형적인 원추지수-토양깊이 그래프를 보여 주고 있다. 이 그래프는 한 지역에서 측정된 3반복의 원추지수를 평균하여 작성한 것이다. 그림에서 δ_S 는 경반 시작점, δ_E 는 경반 끝점을 표시하며, 따라서 경반 폭 W 는 $W = \delta_E - \delta_S$ 로 나타낼 수 있다.

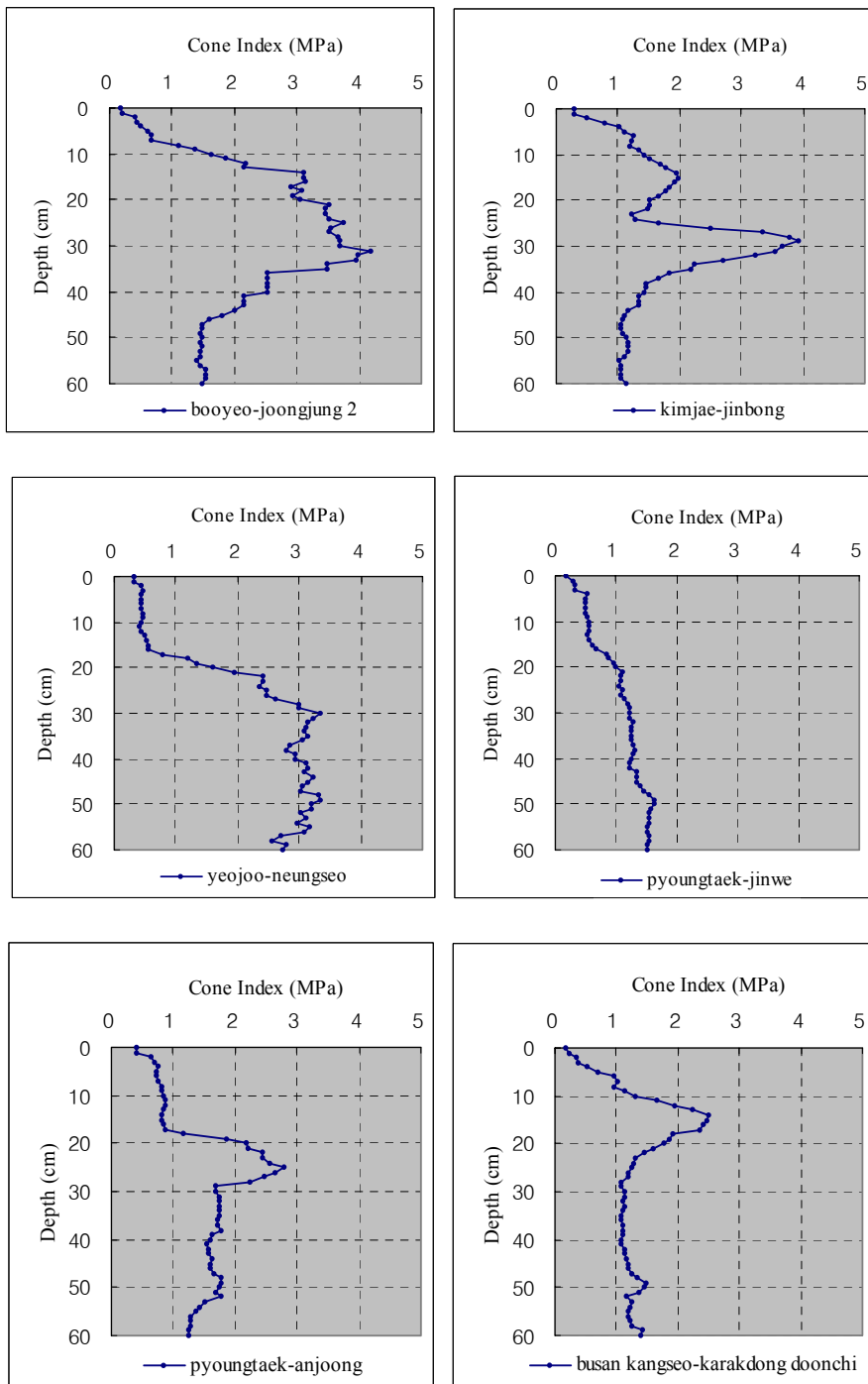


Fig. 12 Typical cone index vs. depth curves.

본 연구에서는 우리나라 논토양의 경반 특성을 분석하기 위해 대표적 수도 재배 지역 33개를 선정하여 상기에서 설명한 원추관입저항기를 이용하여 원추지수를 측정하였으며, 이 원추지수를 토양깊이에 따라 정리하여 논토양 경반의 특성을 분석하였다.

이들 그래프들을 몇 개의 전형적인 형태에 따라 분류하여 정리한 것이 그림 12이다. 이들 그래프에 의하면 우리나라 논토양의 경반의 형태 또는 토양경도-깊이의 형태는 몇 개의 뚜렷한 형태로 분류가 가능함을 알 수 있었다.

이들의 형태를 정리하여 보면 다음과 같다.

- (가) 경반의 깊이가 낮고 두께가 40cm 이상이며 경반의 피크 경도 크기가 4MPa 이상인 지역, 하나의 혹으로서 경반지역을 확실히 나타내고 있는 지역
- (나) 경반이 이중으로 나타나며 경반의 깊이가 낮으며 경반의 두께는 크지 않은 지역, 비교적 경반의 위치를 확실히 알 수 있는 지역
- (다) 경반의 깊이가 20cm 이상으로서 작토 층의 두께는 큰 편이나 심층부의 경도가 지속적으로 커서 경반의 두께가 50cm 이상으로서 경반의 형태가 확실하지 않은 지역
- (라) 경반의 경도가 깊이에 따라 아주 천천히 증가를 하나 경도가 크지 않으며 경반의 형태가 뚜렷하지 않은 지역
- (마) 경반의 깊이가 크며, 경반의 형태가 하나의 피크 형태를 하고 있으며 경반의 두께가 크지 않은 지역, 경반 피크 경도의 크기도 3MPa 이하인 경우
- (바) 마의 형태와 비슷하나 경반의 깊이가 낮은 경우

상기의 경반특성을 경반의 평균 토양경도, 토성 그리고 토양 전단력 지수와 함께 정리한 것을 표 5 (부록 표 A3 참조)에 나타내었다.

Table 5. Hardpan characteristics of selected fields

Region \ Item	Composition(%)			Texture	Hardpan starting point (cm)	Hardpan ending point (cm)	Hardpan width (cm)	Average cone index of hardpan (MPa)	Cohesion (kPa)	Internal friction angle (deg)
	Sand	Silt	Clay							
seocheon-seocheon	46.8	35	18.2	CL	16	34	19	1.75	19.17	32.14
booyeo-joongjung	29.9	52.9	17.2	SiCL	10	27	18	2.37	11.67	34.65
kimjae-jinbong	16.3	68.7	15	SiCL	4	24	21	1.51	8.33	34.65
yeojoo-heungchun	48.2	40.6	11.2	SL	18	48	31	2.98	15.83	23.74
pyoungtaek-seotan	26	54.2	19.8	SiCL	14	30	17	1.28	5.00	26.69
pyoungtaek-jinwe	18.1	58.1	23.8	SiCL	19	51	33	1.25	5.83	26.69
pyoungtaek-anjoong	13.6	56.8	29.6	CL	18	29	12	2.23	6.67	39.24
pajoo-juksung	15.4	50.8	33.8	C	23	56	34	1.68	2.50	43.30
chilgok-dongmyoung-namwon1	47.1	34.5	18.4	SL	9	16	8	1.48	0.00	45.15
chilgok-dongmyoung-namwon1	49	33	18	CL	3	31	29	2.22	3.33	39.24
daekoo-dansung hwawon	15.1	56.9	28	C	2	31	30	2.27	33.33	32.14
busan kangseokarak dongmoon suamnam	10.9	63.5	25.6	SiCL	12	30	19	1.65	21.67	32.14
busan kangseokarakdong doonchi	7.4	70.2	22.4	SiCL	7	28	22	1.63	15.00	29.49

이 표에 의하면 지역, 토성 그리고 토양통에 따라 경반은 다양한 특성을 나타내고 있다. 경반의 시작점은 최하 2cm에서부터 38cm까지 다양하다. 경반의 시작점은 작토층의 두께를 의미한다. 즉 작물이 토양의 경도에 의해 저항 받지 않고 뿌리를 내릴 수 있는 층의 두께를 의미하며 작물이 양분을 흡수할 수 있는 토양의 두께이며 작물학적으로 아주 중요한 의미를 지닌다고 볼 수 있다. 경반의 끝

점은 16cm에서부터 59cm까지로 조사되었다. 그리고 경반의 두께는 최하 6cm에서부터 41cm까지로 조사되었다. 경반의 평균 토양경도는 최하 1MPa에서부터 3.2MPa로 조사되었다.

경북 칠곡군 동명면 남원 1리의 작토층은 10cm 미만이다. 이는 작물이 뿌리를 내릴 수 있는 토양깊이가 10cm도 되지 않는다는 것을 의미하며 이러한 포장은 최하 15cm이상의 경운작업을 실시하여 경반의 깊이를 증가시키는 것이 필요하다. 이와 같이 경반의 깊이가 낮아 경반을 파괴해 줄 필요성이 있는 지역으로는 충남 부여 중정리와 군수리 지역, 대구 달성 화원읍 지역 그리고 부산시 강서구 가락동 지역으로 판단되었다.

경반의 깊이가 깊어 무경운이 가능한 지역으로는 전북 김제 청하면 지역, 여주 북내 흥천 능서면 지역 그리고 경기 파주지역으로 조사되었다. 33개 조사지역의 토성은 미사질 식양토가 11곳, 사양토가 10곳, 식양토가 9곳 그리고 식토가 3곳으로 대부분이 양토 계통으로 조사 되었다.

제 5 절 쟁기의 경운저항 특성

작업기와 토양간의 상호작용을 정확히 이해하기 위해서는 측정 장치로부터 정확하고 신뢰성 있는 자료를 얻을 수 있어야 한다. 그러나 일반 포장에서의 실험은 토양상태의 불균일성과 조절의 불가능으로 같은 상태 하에서 동일 실험의 재현이 불가능하며, 기상조건에 의한 수분함량 조절의 어려움과 실험시기의 제한 및 기타 실험 외적인 요인에 의하여 영향을 받으므로 신뢰성 있는 자료를 얻기가 어렵다. 이러한 야외 포장실험의 문제점을 보완하고, 작업기-토양간의 상호관계로부터 신뢰성 있는 자료를 얻기 위해서는 인공토조시스템에서의 실험이 바람직하다고 판단되어 이 시스템을 이용하여 쟁기의 경운저항 특성을 측정기로 하였다.

본 실험실에서 소지하고 있는 인공토조시스템은 1987년에 제작되어 다양한 실험을 수행하여 왔다. 최근 10여 년간은 주로 타이어의 견인 및 조향성능 그리고

타이어에 의한 토양다짐 등과 관련된 실험이 주종을 이루어 왔으며, 이에 따라 인공토조시스템의 모든 장치들은 주행장치와 관련된 실험에 적합하도록 지속적으로 개조되어 왔다. 따라서 본 연구와 관련하여 경운작업기의 실험을 수행할 수 있도록 인공토조시스템을 재구성 할 필요성이 있어 모든 시스템을 경운작업기의 실험에 적합하도록 시스템을 수정 보완하여 재구성하였다.



Fig. 13 Janggi with three point hitch and draft measuring system.

이번에 재구성된 측정시스템은 토양경도, 경운깊이, 경운속도 등에 따른 1차 경운작업기의 경운저항을 측정할 수 있는 경운저항 측정시스템으로 구성하고, 각각의 요인에 따른 경운작업기의 경운저항 특성의 측정, 분석이 용이하도록 구성하였다. 또한 2차 경운작업기(로타리틸러)의 경운특성을 측정할 수 있도록 시스템을 재구성하여 로타리틸러 경운작업시의 토양 파쇄 특성의 조사, 분석이 가능하도록 하였다. 그림 13는 측정대차와 견인동력계를 보여주고 있다.

인공토조시스템은 토양조 및 레일시스템, 대차구동시스템, 측정대차, 토양가공대차 및 자료모집시스템으로 구성되어 있다. 토양조는 길이 12m, 폭 1m, 높이 0.7m, 벽두께 0.2m의 철근 콘크리트 구조물로서 필요에 따라 토양의 수분 함량을 조절할 수 있도록 배수시설이 되어 있다. 측정대차는 유압장치에 의해 구동되는

3점링크 히치와 기계적으로 상하 좌우 이동이 가능한 히치를 앞뒤 면에 장착하여 작업기의 연결부위 형태에 따라 선택하여 이용할 수 있게 제작하였다.

작업기의 작업깊이는 측정대차에 구성되어 있는 측정프레임과 작업기 부착프레임이 연결되는 직사각형관에는 수직방향으로 2개의 연마봉과 4개의 직선운동 베어링이 부착되어 있어 측정프레임에 부착되어 있는 상하운동 조절핸들에 의해 작업 깊이를 조절할 수 있다.

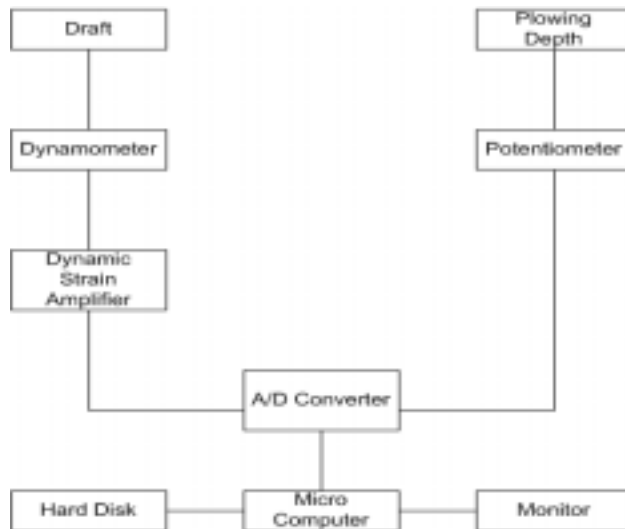


Fig. 14 Schematic Diagram of Data Acquisition System.

인공토조시스템의 자료수집 장치는 자동화 되어있으며, 그림 14은 인공토조시스템에서의 자료수집 장치의 블록선도를 보여주고 있다.

토양가공대차는 토양의 물리적 상태가 실험목적에 적합하도록 실험과 실험 사이에 토양을 가공하는 대차로서 케이블 견인식으로 제작되었으며, 본 연구를 좀더 효율적으로 수행하기기 위 토양가공대차도 전반적으로 수정 보완하였다. 토양가공대차는 토양가공에 필요한 로타리 킬러, 표면다짐롤러, 표층다짐롤러, 균평기, 살수장치등을 포함하고 있다.

표 6은 본 실험에 이용된 토양의 토양특성을 나타내었고, 표 7은 본 실험에 사용된 쟁기의 특성을 보여주고 있다.

Table 6. Physical properties of tested soil

Moisture Content (%)	Bulk Density (kg/m ³)	Cohesion (kPa)	Internal frictional angle (deg.)	Soil-metal frictional coeff.	Soil-metal adhesion (kPa)	Composition			Texture
						Sand (%)	Silt (%)	Clay (%)	
15.0	1490	0.32	34	15	0.09	54.4	36.9	8.9	SL

Table 7. Specification of tested implements (Janggi)

Max. share lift angle (degree)	Setting angle		Width of share (cm)	Weight (kg)	Moldboard Type
	shear (degree)	wing (degree)			
51.3	40.9	63.0	23.4	17.5	5-fork

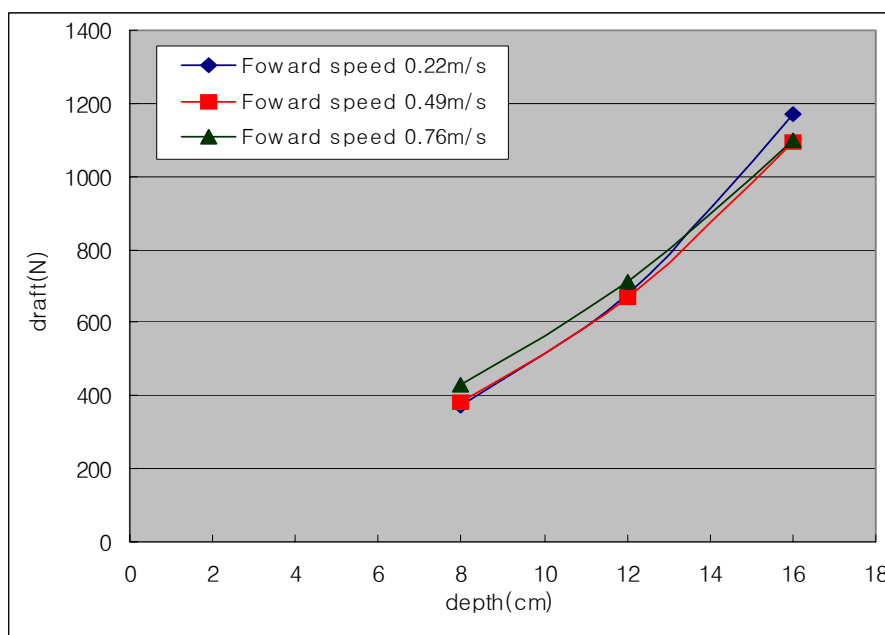


Fig. 15 Relationship between draft and tillage depth of Janggi at the speed of 022, 049 and 076 m/s.

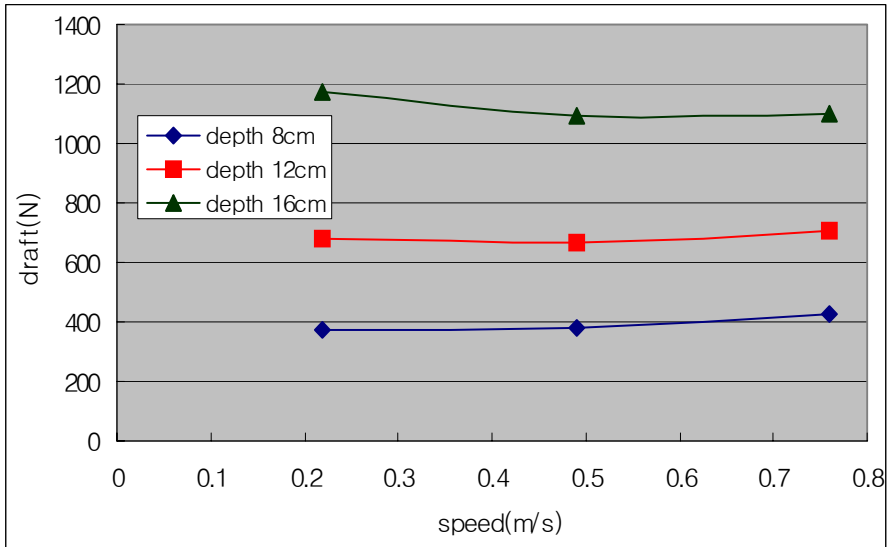


Fig. 16 Relationship between draft and tillage speed of Janggi at the tillage depth of 8, 12 and 16cm.

그림 15는 경심에 따른 견인저항(draft)의 변화를 보여주고 있다. 세 수준의 경운속도 모두에서 경심이 증가 할수록 견인저항은 급속히 증가함을 알 수 있다. 그 증가율은 제일 낮은 경속인 0.22m/s에서 특히 커서 경심 8cm일 때는 견인 저항이 제일 작았으나 경심 12cm에서는 중간 속도인 0.49m/s보다 커졌으며, 경심 16cm에서는 제일 빠른 속도인 0.76m/s보다도 높은 견인저항을 보여주고 있다.

그러나 경속에 따른 차이는 그리 크지 않음을 알 수 있다. 경심이 증가하면 견인저항이 증가한다는 것은 당연한 결과로서 경심에 따른 견인 비저항의 변화를 비교 분석할 필요가 있다고 판단된다. 본 실험에서 경속이 0.76 m/s 인 경우 경심 8cm에서 430N, 경심 12cm에서는 710N 그리고 경심 16cm에서는 1100N이었다.

그림 16는 쟁기의 경심이 8, 12, 16 cm로 일정하게 유지된 상태에서 경속의 변화에 따른 경운저항의 변화를 보여주고 있다. 경심이 8, 12cm인 경우는 경속의 증가에 따라 수평력의 증가율이 증가하며 변화하는 것을 알 수 있지만, 경심이 16cm로 커진 상태의 경우는 경속이 0.22m/s에서 0.49m/s로 증가할 때 경운저항이 약 7%정도 감소한 후 다시 경속이 0.76m/s로 증가할 때 경운저항은 미세하나

마 증가하는 경향을 보여 주고 있다. 그러나 이 경우에도 경운저항 값은 제일 작은 경속인 0.22m/s 일 때 보다 더 작은 값을 보여주고 있다.

일반적으로 수평력은 전단저항이 높은 토양에서 1.3m/s 이상의 빠른 경속으로 경운 작업시 경속의 제곱에 비례하여 급격히 증가하고, 경속이 감소하여 0에 가까워질수록 토양의 정적 저항 값에 수렴하는 것으로 보고되고 있다. 그러나 본 실험은 전단저항이 낮은 사질토에서 그리고 낮은 경속에서 수행되어진 관계로 상기의 일반적인 결과와는 정확히 부합하지는 않음을 알 수 있다.

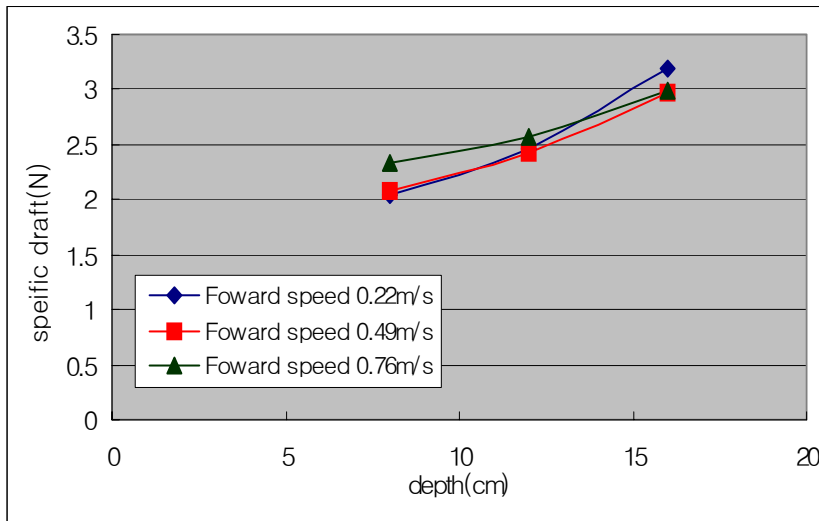


Fig. 17 Relationship between specific draft and tillage depth of Janggi at the speed of 0.22, 0.49 and 0.76m/s.

그림 17은 경심에 따른 경운 비저항(specific draft)의 변화를 보여주고 있다. 이 그래프에 의하면 약간의 차이는 있으나 세 경속의 범위에서 경심이 증가할수록 경운 비저항 값도 증가하고 있음을 알 수 있다. 그 증가율은 경속에 따라 약간의 차이가 있으나 경심이 증가할수록 기울기가 커져 경심이 증가할수록 경운비저항의 증가 폭이 커짐을 알 수 있다.

경속에 따른 경운 비저항의 차이는 경심에 따라 약간 서로 다른 경향을 보여줄 수 있다. 이 점에 대한 실험의 결과는 그림 18로부터 더욱 명확히 알 수 있다. 경

심 8cm와 12cm에서는 속도에 따른 경운 비저항 값의 변화 경향은 비슷하여 경속의 증가에 따라 경운 비저항도 증가하고 있다. 그러나 경심 16cm에서는 경속이 0.22m/s에서 0.49m/s로 증가함에 따라 경운비저항은 약간 감소하는 경향을 보이고 있으며, 경속이 0.49m/s에서 0.76m/s로 증가 할 때는 별 변화가 없음을 알 수 있다. 이와 같이 경속에 따른 경운저항이 경심에 따라 일정한 경향을 보이고 있지 않는 것은 좀 더 많은 실험을 수행하여 분석할 필요성이 있다고 판단된다.

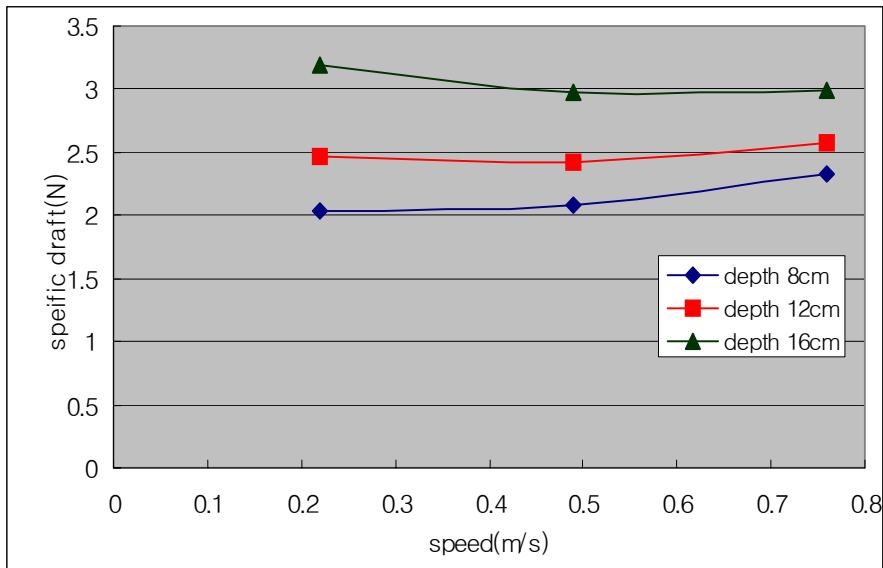


Fig. 18 Relationship between specific draft and tillage speed of Janggi at the tillage depth of 8, 12 and 16cm.

제 6 절 인공토조에서 토양과쇄 특성 측정 및 분석

경운에 의한 토양 과쇄가 토양의 특성에 미치는 영향을 살펴보기 위하여 성균관대학교의 인공토조에서 경운 시험을 수행하였다. 경운 전 토양의 함수율은 12.98%(d.b.)로 일정하게 유지하였으며, 토양 다짐 롤러를 각각 2회와 4회 통과시

켜 토양 다짐 정도를 2수준으로 준비하였다. 또한, 쟁기 작업 속력은 0.488m/s, 로터리 작업은 0.137m/s로 수행하였다.

토양의 점착력과 내부마찰각은 다음과 같이 토양의 수직응력과 전단강도와의 관계에 의해 결정된다.

$$\tau = C + \sigma \tan \phi$$

여기서, τ : Shear resistance of soil

C : Soil cohesion

$\tan \phi$: Internal friction coefficient of soil

σ : Normal stress on shearing surface

ϕ : Internal friction angel of soil

베인 테스트(Vane tester)를 이용하여 토양의 수직하중을 달리하며 전단강도를 측정 한 후 두 변수 사이의 관계식을 구하면 다음과 같다.(그림 19)

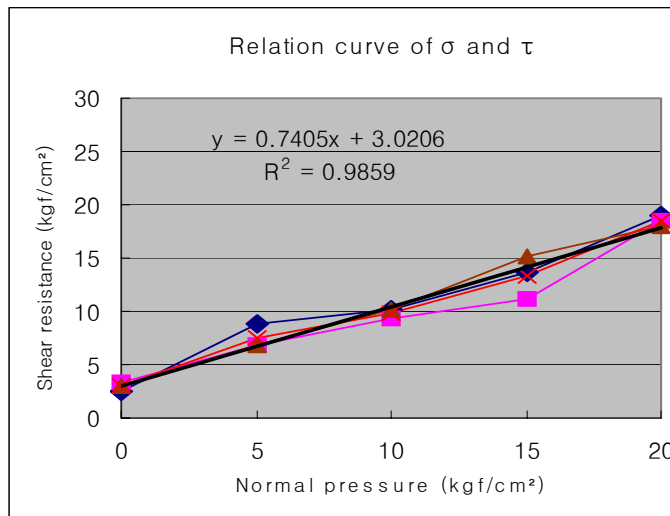


Fig. 19 Relation curve of normal pressure and shear strength.

이 측정 결과로부터 선형 회귀식($y = mx + n$)을 구한 후 기울기와 y 절편으로부터 토양의 점착력과 내부마찰각을 구할 수 있다. 이 때, 점착력 C 는 $C = n$, 내부마찰각이며 ϕ 는 $\phi = \tan^{-1}(m)$ 와 같다.

Table 8. Cohesions and internal friction angles for 2 time compaction by roller before tillage operation

Operation type	Cohesion (kgf/cm ²)	Internal friction angle (°)
Before tillage	7.048	38.513
Preparation at 10cm	2.079	31.546
Plow only	2.533	29.895
Plow + rotary 1	2.371	31.679
Plow + rotary 2	2.046	31.815
Rotary 1	2.111	40.504
Rotary 2	2.598	38.851

Table 9. Cohesions and internal friction angles for 4 time compaction by roller before tillage operation

Operation type	Cohesion (kgf/cm ²)	Internal friction angle (°)
Before tillage	6.464	48.336
Preparation at 10cm	5.424	44.532
Plow only	3.475	40.071
Plow + rotary 1	3.021	36.520
Plow + rotary 2	3.670	35.302
Rotary 1	2.111	40.504
Rotary 2	3.378	33.913

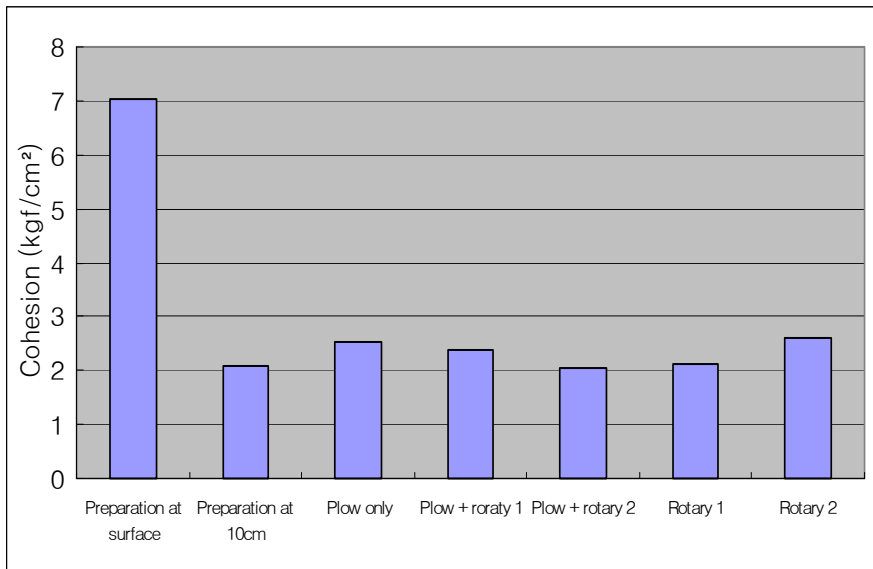


Fig. 20 Cohesions for 2 time compaction by roller before tillage operation.

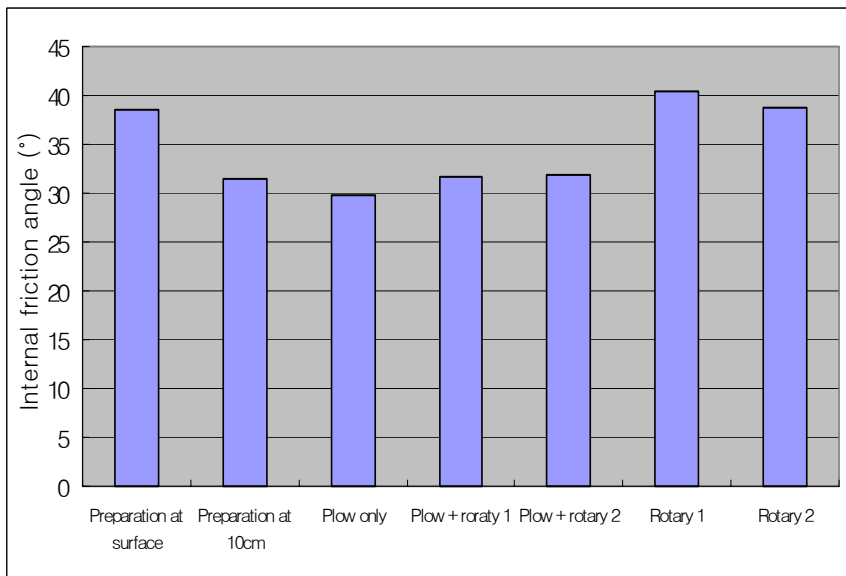


Fig. 21 Internal friction angles for 2 time compaction by roller before tillage operation.

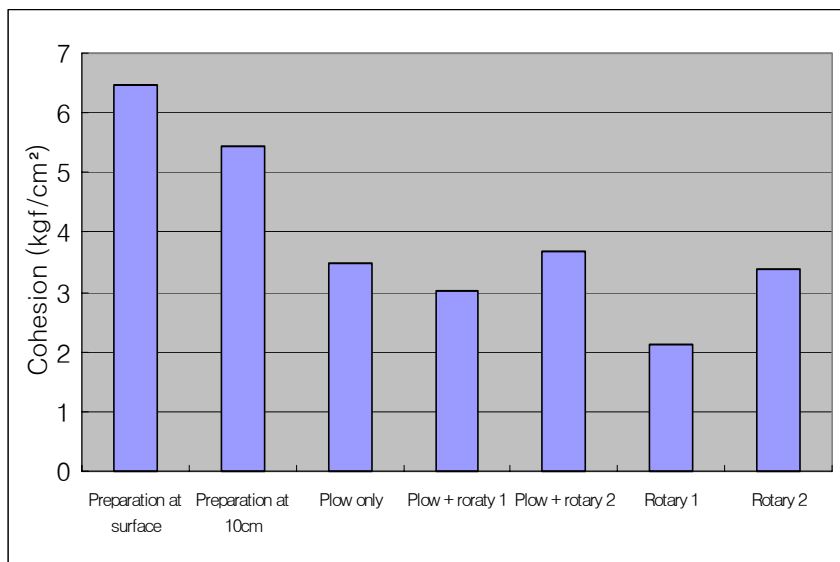


Fig. 22 Cohesions for 4 time compaction by roller before tillage operation.

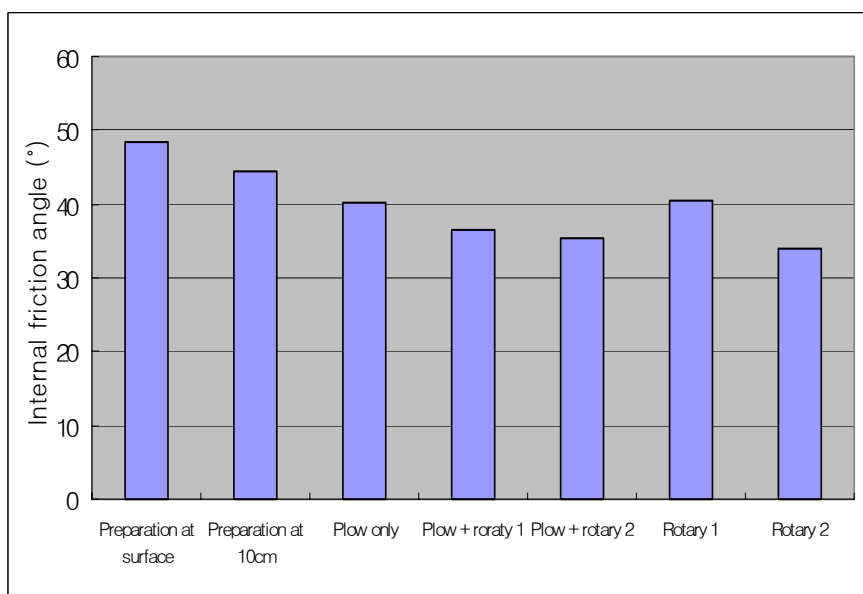


Fig. 23 Internal friction angles for 4 time compaction by roller before tillage operation.

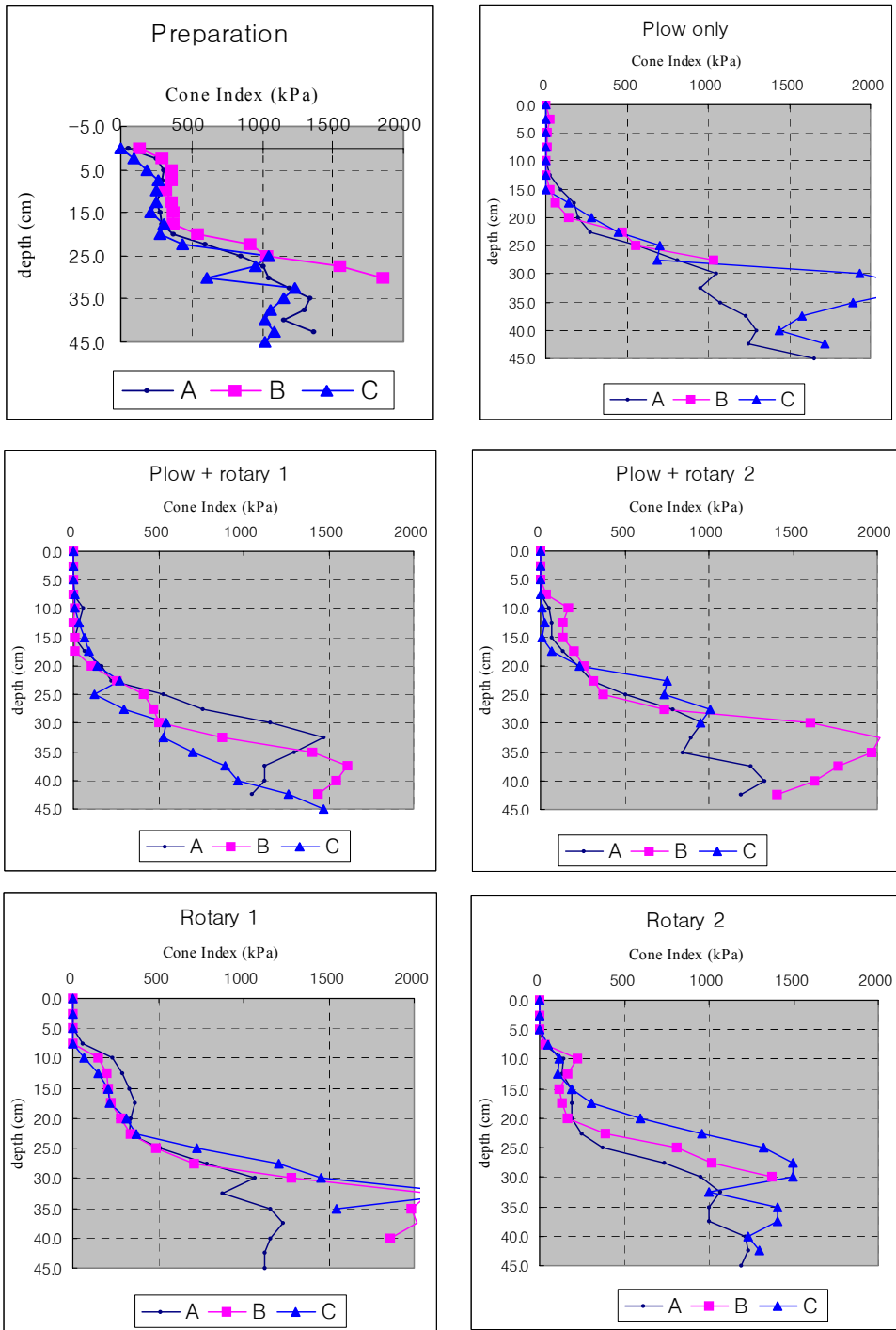


Fig. 24 CI profiles for 2 time compaction by roller before tillage operation.

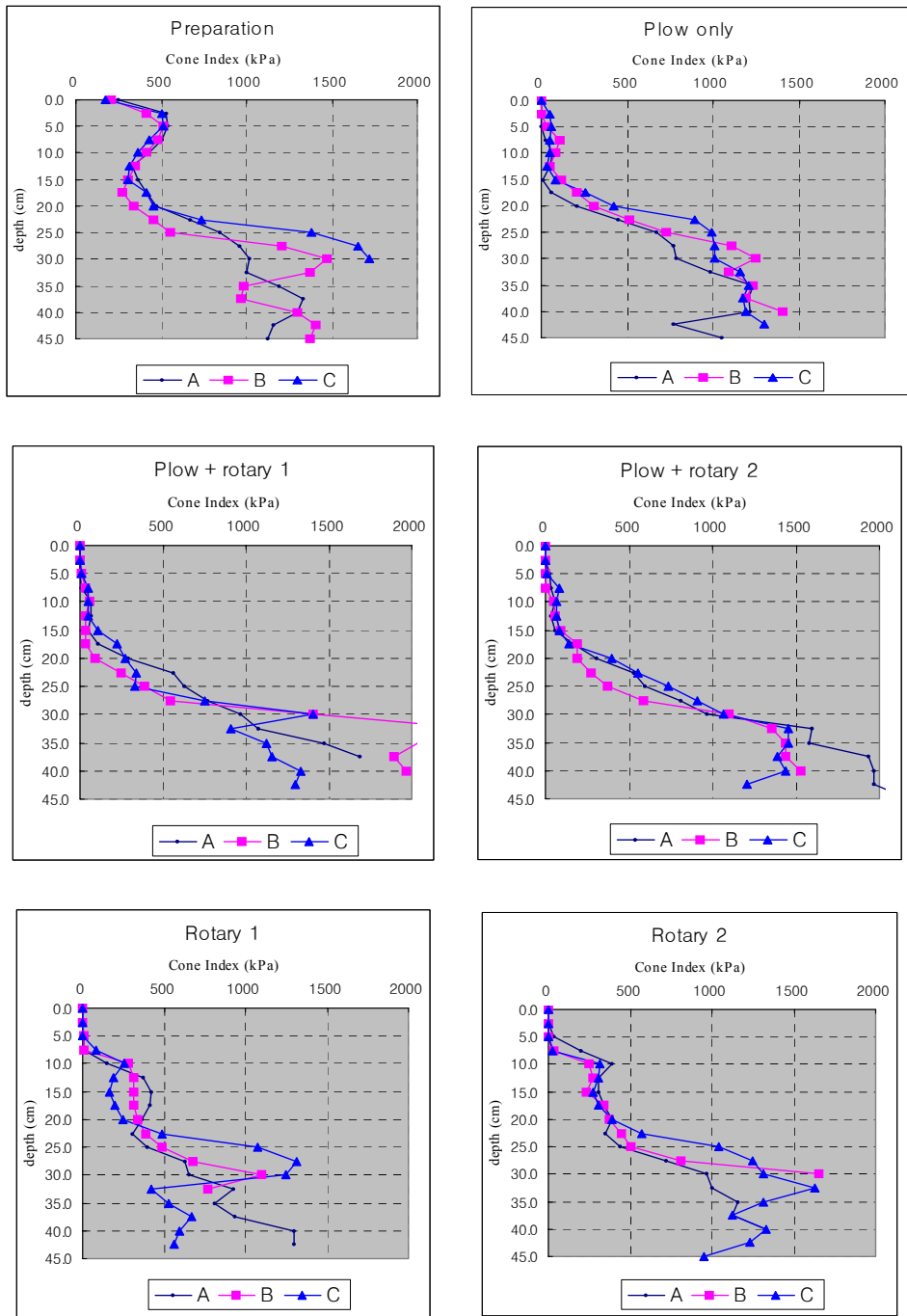


Fig. 25 CI profiles for 4 time compaction by roller before tillage operation.

표 8은 토양을 롤러로 2회 다진 후 각 작업을 수행한 후의 점착력과 내부 마찰각을 나타낸 것이며, 이것을 그래프로 나타내면 그림 20, 21과 같다. 또한 표 9는 토양을 롤러로 4회 다진 후 각 작업을 수행한 후의 점착력과 내부 마찰각을 나타낸 것이며, 이것을 그래프로 나타내면 그림 22, 23과 같다.

토양의 점착력은 토양이 다져진 상태에 영향을 받는 것으로 판단된다. 일반적으로 토양 다짐 정도가 클수록 점착력이 증가하며, 쟁기 작업과 로터리 작업에 의한 경우를 통해 토양 다짐이 감소하면 점착력의 크기는 최대 약 3.5배까지 감소하였다. 지표면과 지표면으로부터 10cm 아래의 토양에서의 점착력의 크기를 비교하기 위한 측정은 토양을 교란이 되지 않은 상태를 유지하면서 지표면에서 10cm까지의 토양을 제거하기가 쉽지 않으므로 그 특성을 정확히 구명하기는 쉽지 않았다. 그러나 초기 토양 다짐이 큰 경우 표토 제거 시 토양 교란이 상대적으로 작으므로 경운 작업 후의 점착력보다 큰 것을 확인할 수 있었다.

토양의 내부마찰각은 점착력과는 달리 토양 다짐에 영향을 받지 않는 것으로 나타났다. 즉, 토양의 내부마찰각은 35° 정도의 수준으로 나타났으며 경운에 의한 영향을 찾아 볼 수는 없었다.

그림 24와 그림 25에 토양을 롤러로 2회 다진 후와 4회 다진 후 여러 경운작업 조합에 대해 원추지수의 변화를 보여주고 있다. 경운 전의 원추지수는 지표면으로부터 5cm에서 가장 크게 나타났으며 그 크기는 토양 다짐이 클수록 증가하였다. 경운 작업 후의 원추지수는 지표면에서 경운 깊이인 10~15cm의 범위까지 그 값이 거의 0에 가까운 즉, 아주 얇은 토양에서의 값을 나타냈다. 이는 경운 작업이 원추지수는 경운 깊이까지의 토양에서만 그 크기가 변화하며, 그보다 더 깊은 토양은 영향을 변화가 없음을 의미한다.

제 4 장 토양특성에 따른 최적 경운작업시스템 을 위한 토양정보 DB의 구축 및 의사 결정시스템 개발

제 1 절 단위 경운작업에 따른 토양의 물리성 변화의 측 정 및 분석

1. 토양 물리성 변화의 측정의의 및 실험방법

일반적으로 작물 생육을 위한 토양의 적절한 상태는 크게 뿌리 공극률에 따른 수분의 이동성, 양분을 많이 포함된 지점으로의 뿌리 운동성, 지상의 줄기 및 작물을 지탱하기 위한 활착성 등이 내재된다. 상기의 요인들은 서로 상호 연관되어 단일 지표를 제시하기 어려웠다. 현재 토양이 뿌리의 적합한 생육상태를 가지고 있는가에 대한 절대적 지표는 개발된 바 없다. 그러나 거시적으로 고찰할 때 뿌리의 적합한 생육상태는 토양의 다짐 정도와 밀접한 영향이 있다는 연구 결과가 있었다.

본 연구에서 제시하고자 하는 최적 경운작업이란 작물이 정상적으로 자라면서 수확량이 증가 내지는 최소한 같은 경우에 최소의 노동력과 에너지를 투입하고 최단시간에 경운작업을 수행하는 것을 의미한다. 따라서 그러한 경운작업체계를 뒷받침하는 의사결정시스템은 토양 종류 및 경도 등, 여러 가지의 다양한 입력 조합에 대하여 작물의 뿌리가 안전하게 자리를 잡으면서도 최소의 입력비용을 요구하는 쟁기와 로타리 작업의 횟수와 깊이 등 적절한 경운작업의 조합을 출력하여야한다.

기존의 연구결과에 따르면 쟁기 및 로타리 작업에 걸리는 부하에 대한 이론적 해석은 연구되어있고 이에 따른 경운작업의 비용과 시간은 산출할 수 있다. 아울

러 현재 뿌리 활착과 성장에 관계된 가장 기본적인 물리적 요인은 토양의 부드러움(softness)로 알려져 있다. 그러나 쟁기 및 로타리 작업이 행해질 때마다 개선되는 토양의 물리적 변화에 대한 연구는 시행된 바 없다. 작물 생육에 미치는 경운작업의 주요한 역할이 뿌리의 활착과 성장을 돕는 것이라는 관점에서 볼 때 최적 경운이란 뿌리의 성장과 활착에 도움이 되는 최소 수준의 경운을 의미하며 그 이상의 경운은 바람직하지 않다.

따라서 본 연구에서는 단위 경운작업에 따라 작토층의 물리적 변화의 정도를 측정하고, 다양한 의사결정시스템의 입력에 대하여 적절한 경운작업의 조합을 출력할 수 있는 하나의 기준 요인으로 그 물리적 변화를 이용하고자 하였다. 단위 경운작업에 대한 물리적 변화는 토양의 종류와 그 외의 요인에 의해 많이 달라질 수 있을 것이나, 먼저 변화의 백분율로 기준화하고자 하였다. 실험에서 측정하여야 하는 주요 인자는 경운작업 전후에 대한 작토층의 깊이에 따른 경도 변화와 토양 전단저항, 비중 및 밀도 등을 포함하는 것이 바람직하다.

그러나 앞선 제 3장 6절에서 나타낸 바와 같이 토양특성 실험의 복잡성과 실험의 신뢰성을 감안하여 단위 경운작업당 토양파쇄특성은 깊이에 따른 CI와 내부 마찰각, 점착력을 기준으로 측정하였다. 따라서 실내 실험과 대응하여 단위 경운작업에 따른 포장에서의 토양 물리성 변화는 마찬가지로 깊이에 따른 CI와 내부 마찰각, 점착력을 기준으로 측정하였다. 이 결과는 인공토조 실내 실험과 더불어 쟁기 및 로타리 작업이 행해질 때마다 개선되는 토양의 물리적 변화에 대한 기준 요인으로서 다양한 의사결정시스템의 입력에 대하여 이론적으로 산출 가능한 최적 경운 조합을 찾는 데 이용된다.

나아가 본 실험은 다양한 경운작업의 조합에 따른 상대적 토양 특성의 개선을 비교 제시하는 타당성 검증실험으로 응용될 수 있다. 즉 의사결정시스템은 경운작업에 의한 토양 물리성 개선정도에 대한 기초자료를 이용하여 최적의 경운작업 시스템을 제시한다. 제시된 경운작업시스템에 대한 깊이별 CI의 변화와 점착력과 내부 마찰각의 상대 변화는 그 경운작업에 따른 토양 물리성 개선의 지표로 이용될 수 있다.

본 실험은 제 3장 6절에 제시된 실험방법을 따르며 포장실험에서 내재하는 열

마간의 오차를 인정하는 범위에서 실시간으로 해당 특성을 측정하고자 하였다. 원추관입기를 이용하여 토양 경도(CI)를 측정하며 베인 테스터(SR2)를 이용하여 점착력 및 내부 마찰각 추정에 필요한 압력과 전단력의 관계직선을 구하였다.

단위 경운작업에 의한 토양 물리성 개선정도를 측정하기 위해 경운 전 포장의 물리적 특성을 기록하고 해당 포장에 대하여, 쟁기+써레, 쟁기+로타리 1회, 쟁기+로타리 2회, 로타리 1회, 로타리 2회 등의 작업 조합에 대해 토양특성의 변화를 측정하였다. 이때 한 종류의 실험측정치를 최소 3곳 이상의 지점에서 측정한 후, 각 작업별 평균적인 실험특성치의 개선 정도를 비교하였다.

여러 번의 예비실험을 통하여 인공토조 실내 실험과 달리 실험조건의 조절이 어려운 포장실험에서는 주의가 요구되었으며 그 점을 요약하면 다음과 같았다.

- (가) 기본자료로서 토양 수분함량을 측정하고 깊이에 따른 토양 경도, 마찰계수 및 점착력을 분석할 때 토양 수분함량에 대한 교정이 필요할 수 있다.
- (나) 내부마찰력 및 토양 전단력 측정과 관련하여 포장을 2m×2m로 구획하고, 격자의 중심부를 샘플링 포인트로 하는 것이 바람직하다.
- (다) 점착력 및 내부 마찰각 추정에 필요한 압력과 전단력의 관계직선을 구할 때, 추세선 획득의 오차 크기를 감소시키기 위하여 최소 5개 이상의 압력과 전단력의 관계 데이터를 획득하여야 한다.
- (라) 현재 시판되는 계측장치의 경우, 실험자와 데이터 기록자가 2인 1조가 되어서 실험을 하게 된다. 이때 계기판에 기록된 눈금의 정밀도가 작아 실험자의 숙련도와 기록자의 읽는 위치에 따라 기록되는 값의 크기가 상당히 달라지는 오차가 발생하므로 실험 전 장비 사용에 대한 충분한 숙지가 필요하다.
- (마) 경운작업 전 토양에서 지푸라기 등 오물이 있는 경우, 이를 제거하고 실험조건을 일정하게 유지시키면서 해당 특성을 기록하여야 한다.

2. 단위 경운작업에 따른 토양의 물리성 변화

상기에서 제안된 단위 경운작업에 따른 토양의 물리성 변화의 측정방법에 따라

2004년 수원 입북동 추경포장, 2005년 여주, 농촌진흥청 시험포장 2곳, 충주 건국대 시험포장 등 총 5곳에서 실험이 수행되었다. 아울러 각각의 실험 장소에서 6곳 이상에 대해 토양을 채취하여 실험실에서 보다 자세한 토양의 특성을 분석하고 각 토양특성의 연관성을 찾고자하였다. 그림 26와 27은 각각 실험포장의 상태와 실험방법(EC 측정)을 보여주고 있다.



Fig. 26 The experiment field.



Fig. 27 The measurement of EC values in actual field.

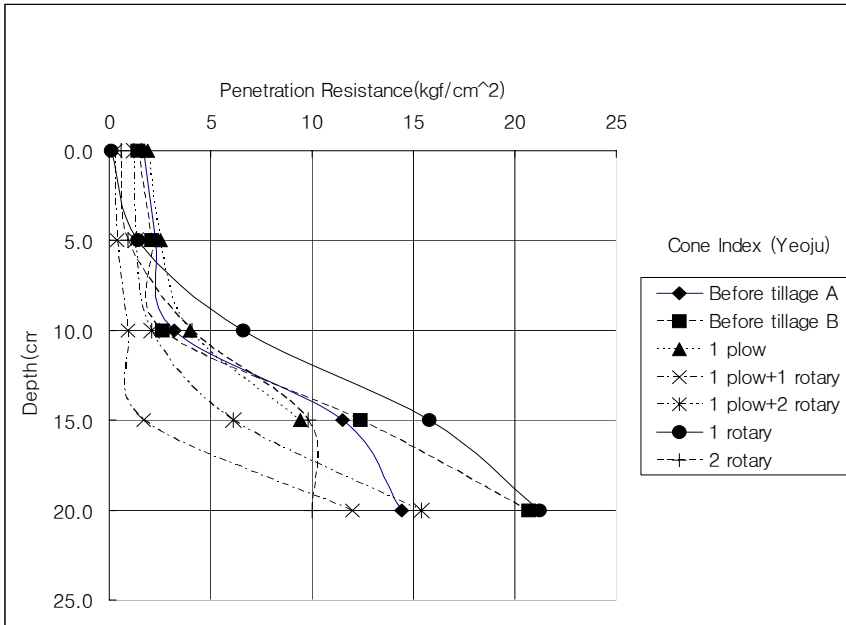


Fig. 28 The profiles of CI with depth(Yeojū).

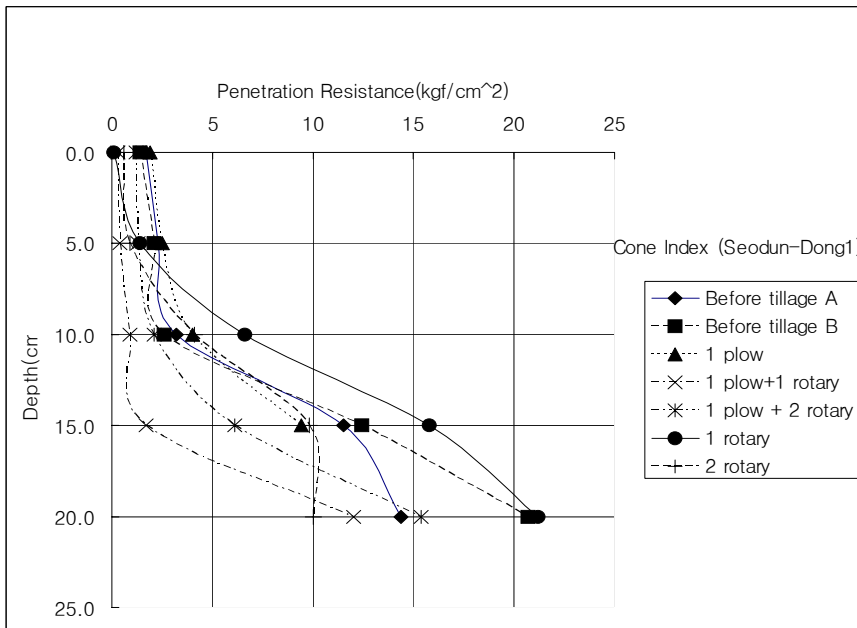


Fig. 29 The profiles of CI with depth(Suwon, field I).

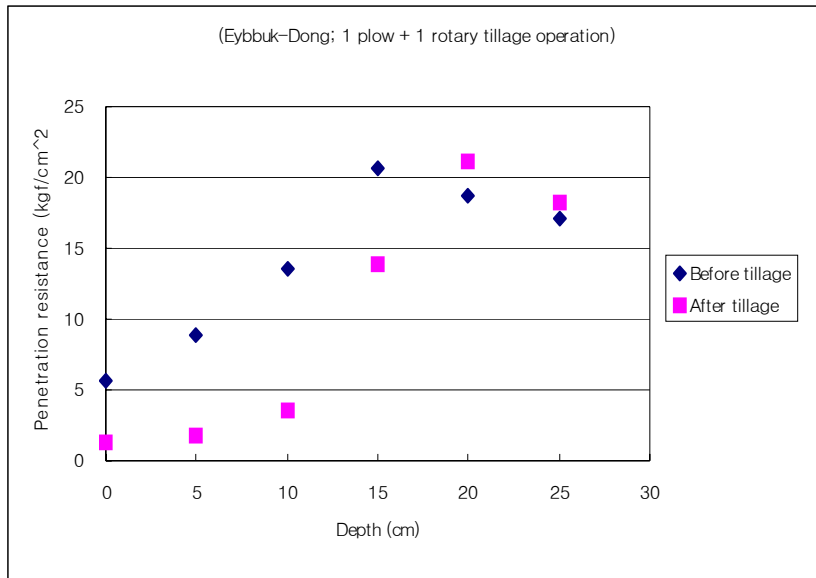


Fig. 30 The comparison of CIs with depth between before and after tillage operations.

그림 28과 29는 각각 여주 포장과 수원 포장에서 경운작업 전과 대비하여 작업 방법에 따른 CI의 깊이별 변화를 보여주고 있다. 실험깊이는 작토층의 일반적 깊이인 20cm로 결정하였다. 그림같이 작업 전에 비해 작업 후 CI는 개선되었으나 단지 로타리 1회로 작업한 경우 CI 개선도가 가장 낮게 나타났다. 로타리 작업에 비해 쟁기 후 로타리를 적용했을 때 CI의 개선도는 나은 것으로 분석되었다.

대체적으로 실험 포장 전체를 통틀어 CI 개선도는 경운 전에 비해 경운 후 5-9 kg_t/cm² 정도의 개선이 보였다. 그림 30과 같이 입북동 포장의 깊이 10cm에서는 14 kg_t/cm²에서 4 kg_t/cm²로 경운 작업 후 약 70%의 CI값 개선도를 보이는 곳도 있었다. 쟁기+로타리 1회에서 가장 좋은 것으로 나타났으며 로타리만으로 작업한 경우가 작업 전보다 CI가 더 나빠진 것을 분석되었다. 특이한 것은 쟁기 후 로타리를 2회 적용한 것이 1회 적용보다 CI 개선도 더 나쁜 것으로 나타났는데 이는 토양이 더 잘게 부서져서 토양 내 공극이 줄어들어 따른 내부 마찰각의 증가에 기인한 것으로 판단되었다.

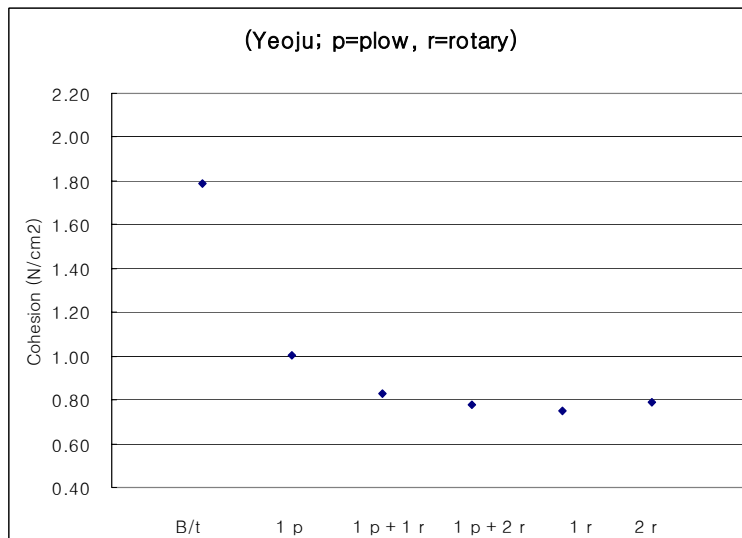
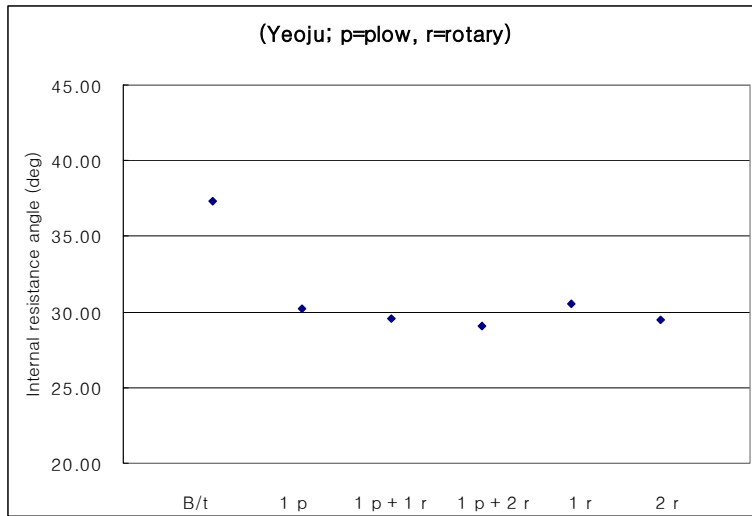


Fig. 31 The variations in the internal resistance angle and the cohesion for various tillage operations(Yeoju).

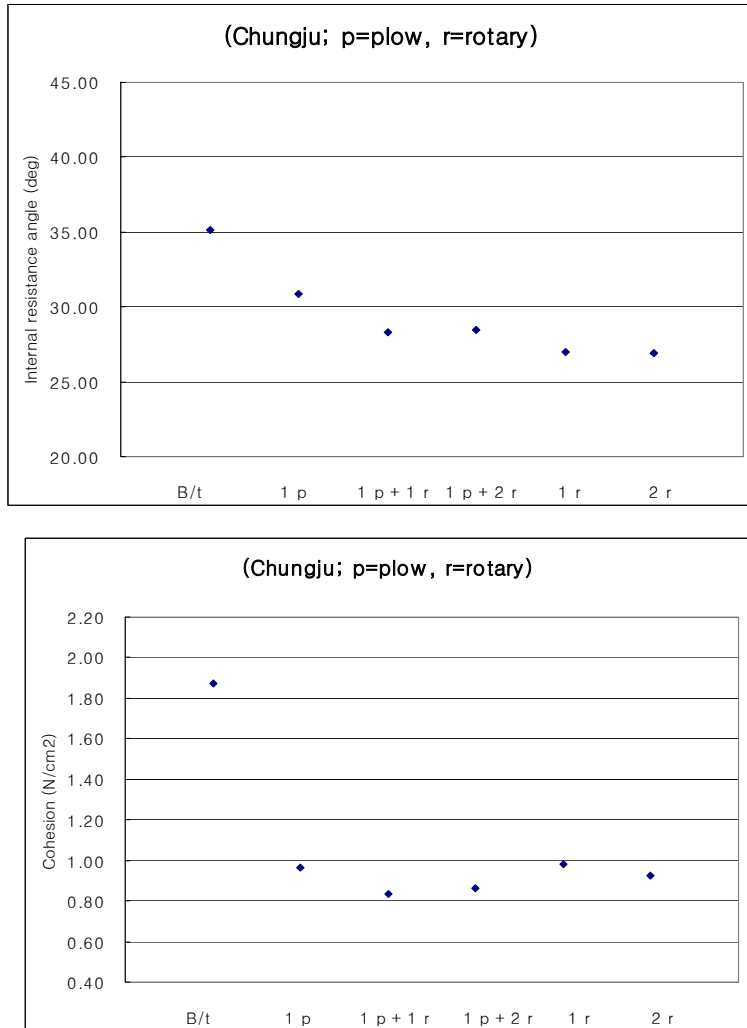


Fig. 32 The variations in the internal resistance angle and the cohesion for various tillage operations(Chungju).

그림 31과 32는 각각 여주 포장과 충주 건국대 포장에서 경운작업 전과 여러 다양한 작업방법에 따른 내부마찰각과 점착력의 변화를 보여주고 있다. 경운작업 전에 비해 두 포장 모두 내부마찰각은 35-39°에서 대략 25%(7-8°) 정도가 줄었으며, 점착력은 2N/cm²에서 1N/cm² 정도로 약 50%의 개선을 나타내고 있다. 두 포장에 대해 로타리를 2번 적용했을 때 내부마찰각은 가장 적은 것으로 나타났는

데 앞서 분석한 CI와의 변화와 비교할 때 약간 상반되는 결과로 분석되었다.

모든 포장에 대해 작업 전에 비해 작업 후에는 점착력의 개선도가 큰 것으로 나타났다. 특히 쟁기 후 로타리 작업을 수행할 경우 다른 작업에 비해서 점착력이 작아지는 것으로 분석되었는데 단지 점착력이 작은 것이 뿌리 활착에 유리한 것인지는 고찰되어야 할 것으로 판단되었다. 관행적으로 볼 때 쟁기+써레 작업은 경우에는 매우 거치른 작업으로 여겨지지만 생각보다 내부마찰각과 점착력의 개선도는 양호한 것으로 분석되었다. 나아가 사양토로 분류되는 수원작물 시험장 제2포장에서는 쟁기+써레작업으로 나타난 특성의 변화가 다른 작업에 비해 크게 나쁘지 않은 것으로 분석되었다.

Table 10. Soil physical properties of test field (Yeoju)

Row/ Rep. No.	Wet soil density (g/cm ³)	Dry soil density (g/cm ³)	Solid ratio of soil (%)	Liquid ratio of soil (%)	Air ratio of soil (%)	porosity (%)
A1	1.67	1.30	0.49	0.37	0.13	50.95
A2	1.73	1.33	0.50	0.40	0.09	49.75
A3	1.64	1.25	0.47	0.39	0.14	52.86
A4	1.88	1.47	0.55	0.42	0.03	44.62
A5	1.64	1.26	0.48	0.38	0.15	52.43
B1	1.73	1.35	0.51	0.38	0.11	49.01
B2	1.65	1.25	0.47	0.40	0.12	52.83
B3	1.66	1.24	0.47	0.42	0.11	53.33
B4	1.74	1.31	0.50	0.43	0.08	50.40
B5	1.72	1.32	0.50	0.40	0.10	50.31

표 10은 여주 실험포장에 대한 공극률과 밀도 등 토성 자료의 일부를 보여주고 있다. 실험데이터 분석을 보다 용이하게 하기 위해서 쟁기작업을 수행한 곳은 A 지역, 로타리만으로 작업한 곳은 B지역으로 나누어 5곳의 토양을 채취하였다. 실험포장의 공극률은 대개 48-55%사이로 나타났으며 공극률과 내부마찰각 점착력과는 뚜렷한 관계를 보여주지 못했다.

제 2 절 토양물리성 정보지도의 보간법 결정

최적 경운작업을 설정하기 위해서는 포장에 대한 여러 정보를 필요로 한다. 이러한 정보는 위치별 획득을 전제로 하며 전산화된 지리정보시스템 지도와 연계하여 공간정보 데이터베이스로 저장된다. 이러한 공간정보는 연속적일 수 없으며 일정 격자 간격의 점 샘플링에 의하여 얻어진 자료이다. 특히 토양특성을 측정하는 방법들의 기술적 한계와 복잡성은 고밀도 격자의 공간 샘플링을 제한한다. 따라서 저밀도 공간 샘플링에 의해서 샘플링 되지 않은 미지의 위치에서의 값의 예측과 공간정보지도 작성을 위해 보간법은 필수적이다.

현재 포장 정보지도 작성에 가장 널리 사용되고 있는 보간법은 주로 광업부분에서 사용되기 시작하여 지표 용수 모델링과 토양 맵핑 부분으로 영역을 넓히고 있는 크리깅(Kriging) 기법이다. 그러나 지금까지의 연구는 크리깅 기법을 이용한 적합 모델의 생성이나 토양지도 작성을 통한 포장내 공간적 변이의 존재를 보여주는 수준으로, 생성된 토양지도의 정확성 검증을 위한 연구는 미흡한 실정이다. 따라서 본 연구는 크리깅 기법의 성능 평가를 위해 기본적인 통계 기법을 이용한 크리깅 오차를 분석하고 선호도가 높은 다른 두 종류의 보간법과 비교를 통해 좀 더 성능이 우수한 보간법을 선택하고자 하였다.

1. 보간법에서 표면(surface)의 정의

표면이란 무한한 수의 점으로 표현되며 위치에 걸쳐 변화하는 값의 연속적 영역을 나타낸다. 포장 내의 한 점에 있어 토양 물리적 특성은 연속적으로 변화하며, 이러한 값들은 XYZ 3차원 좌표계의 Z축(z값)으로 표현된다. 표면은 무한한 점을 가지기 때문에 모든 점에서 z값을 측정하고 기록하는 것은 불가능하다. 따라서 표면상의 특정 점에서의 샘플링 값을 획득한 후, 점과 점 사이의 값을 보간(interpolation)하여 표면을 근사시키게 된다. 그림 33은 표면의 3차원 형상의 예를 보여주고 있다. 그림에서 격자망의 교점은 일반적으로 자료의 샘플링 점을 의미한다.

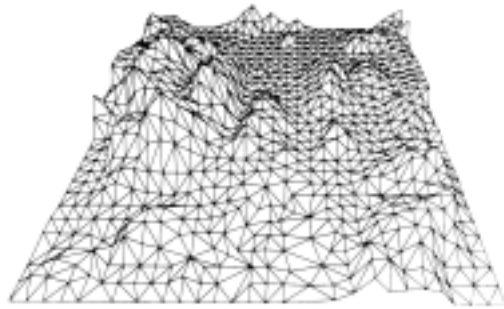


Fig. 33 A surface model for interpolation.

2. 표면 생성모델

표면을 생성하는 위한 다양한 모델들이 존재하나, 본 연구에서는 신호도가 높은 역거리 가중치법, 크리깅과 TIN 모델을 이용해 표면을 생성하였고 예측정확도를 평가하였다.

역거리 가중치법(inverse distance weighted, IDW)은 거리가 멀어짐에 따라 지역적인 영향력이 적어짐을 가정한다. 이것은 셀로 표현되는 처리중인 위치에 좀더 가까운 샘플링 점에 대해 그렇지 않은 점보다 가중치를 크게 부여한다. 미지점의 값을 결정하기 위해 특정 수 혹은 일정 반지름내의 모든 점이 사용될 수 있다. 이 방법은 표시되는 변수가 샘플링된 위치로부터의 거리 증가에 따라 영향이 감소할 때 적절하게 사용될 수 있다.

크리깅(kriging)은 샘플링된 점간의 거리 혹은 방향이 표면 내의 변이를 설명하는데 사용될 수 있는 공간상관을 나타낸다고 가정한다. 이는 특정 수 혹은 일정한 반지름 내에 위치하는 모든 점에 수학적 함수를 적용함으로써, 미지의 위치에서의 값을 예측하게 된다. 크리깅은 자동상관(auto-correlation)을 포함하는 통계적 모델에 기반하는 기법으로, 미지의 위치에서의 값을 예측하기 위해 주변의 측정치를 가중한다는 점에서 IDW와 유사한 특성을 보인다. 일반적인 공식은 데이터에 대한 가중합의 형태를 포함하며 다음과 같다.

$$Z^*(s_0) = \sum_{i=1}^N \lambda_i Z(s_i)$$

$Z(s_i)$: measured value at i th position

λ_i : Unknown weight for measured value
at i th position

s_0 : position to be predicted

N : number of values measured

그러나 IDW는 가중치 λ_i 가 단지 예측 위치에 대한 거리에 의존하지만, 크리깅 경우 샘플링된 점과 예측 지점간의 거리와 샘플링된 점간의 전반적인 공간적 배치에도 의존한다는 점이 다르다. 가중치에 대한 공간 자동상관을 적용하기 위해서는 공간 자동상관이 정량화되어야 하며, 정규 크리깅(ordinary kriging)의 경우 가중치는 샘플링된 위치와 예측 위치까지의 거리, 그리고 예측하고자 하는 위치 주변의 측정된 값 사이의 공간적 관계에 대한 적합모델(fitting model)에 의존하게 된다.

TIN(triangulated irregular networks)은 불규칙 삼각망으로서 ‘삼각’은 샘플링된 공간정보의 집합에서 최적화된 삼각형들의 집합을 형성함을 의미한다. 삼각형은 표면을 구성하는 국부적인 부분을 잘 표현할 수 있는데, 이는 z (공간정보)값을 가지는 세 점들이 3차원 공간상에서 하나의 평면을 정의하기 때문이다. 또한 ‘불규칙’은 다른 표면 모델들에 대해 TIN 모델이 가지는 가장 큰 장점으로, 급격한 특성변화가 있는 지역을 모델링함에 있어 다양한 샘플링 밀도로 샘플링이 가능하게 한다. ‘망’은 TIN에 내재하는 위상구조(topological structure)를 의미한다. 이 구조는 표면의 간략한 표현 및 복잡한 표면 분석을 가능하게 해 준다.

TIN은 다양한 자료원으로부터 수집된 고도값(z 값)을 가지는 점들로부터 구성된다. 실측 조사된 데이터나 파일이나 데이터베이스 형태의 점 및 다른 TIN에 대한 연산 등이 자료원이 될 수 있다. 이러한 자료원에서 입력된 점들의 집합에 대해 삼각형 분할이 수행된다. TIN에서 구성된 삼각형은 면(face)이라 불리며, 점들에 면에 대한 노드(node), 그리고 면의 노드와 노드를 연결하는 선분을 에지(edge)라 부른다.

주어진 샘플링된 점에 대해 다양한 삼각분할 기법이 존재하지만, 본 연구에서는 면을 표면으로 모델링하는데 최적화된 기법으로 알려진 Delaunay 삼각분할 알고리즘을 사용하였다. 이 알고리즘의 기본 개념은 가능하면 등변형태의 삼각형을 구성함으로써, 미지의 점에 대한 z 값의 보간을 기지점에 대해 좀 더 가까운 값으로 근사시키게 된다. 그림 34는 Delaunay 삼각분할의 알고리즘의 예를 보여주고 있다. 적절한 조건에 따라 삼각형은 가장 합리적인 조건으로 쪼개진다. TIN에 있어 각 면은 3차원 공간상의 하나의 평면이며, 모든 면은 각 노드와 에지를 따라 인접한 면과 정확하게 만나게 된다.

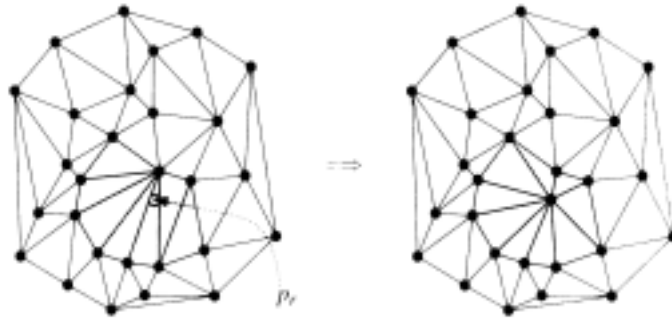


Fig. 34 Delaunay's triangulation algorithm.

3. 토양 물리성 정보지도의 보간법 결정

본 연구에서는 토양의 물리적 특성에 관계된 토양정보를 이용하여 최적의 보간법을 결정하여야 하지만 동시에 진행되는 연구특성으로 해당시기 토양자료를 입수하지 못하였다. 따라서 보간법 결정의 기초자료는 경기도 수원시 권선구 입북동에 위치한 논에서 1999년도부터 2001년까지 포장면의 고저차 및 토양의 이화학적 특성 등에 대한 포장정보를 이용하였다. 해당 자료는 포장면적, $30 \times 100\text{m}$ 에 대하여 구획을 $5 \times 5\text{m}$ 의 나누어 총 120구획의 샘플링 점에 대한 실측자료이다.

연구에 사용된 자료는 다양한 토양특성 중 포장 내 pH, OM, Mg 분포에 대한 자료로서 각 보간 알고리즘을 적용하고 그 성능을 평가하였다. 연구에 사용된 분

석용 소프트웨어는 다양한 보간 알고리즘을 모듈로서 지원하는 GIS 전문 소프트웨어인 ArcGIS 8(ESRI)을 사용하였다. 각 보간법의 적합성 여부는 모델에서 예측하는 값과 실제 값에 대한 일치여부를 기준으로 하였으며 총 120개 샘플링 위치에 대한 예측모형에 대한 성능을 검증하였다. 표 11은 샘플링 연도에 토양 속 성별로 적용된 각 보간법에 대한 r^2 값을 나타내며, 그림 35와 36은 2001년에 OM 값 자료에 대한 예측모델을 나타낸다.

Table 11. Determination coefficients of prediction model for three interpolation methods

year	size	pH			OM			Mg		
		Kriging	IDW	TIN	Kriging	IDW	TIN	Kriging	IDW	TIN
1999	5×10	0.407	0.345	0.430	0.462	0.392	0.583	0.415	0.399	0.465
	5×15	0.087	0.114	0.059	0.100	0.209	0.168	0.186	0.203	0.171
	5×20	0.030	0.048	0.024	0.001	0.001	0.046	0.022	0.030	0.005
	10×10	0.179	0.180	0.178	0.225	0.224	0.235	0.428	0.460	0.493
	10×15	0.064	0.083	0.043	0.137	0.181	0.181	0.337	0.358	0.327
	10×20	0.001	0.004	0.004	0.001	0.013	0.003	0.043	0.049	0.003
2000	5×10	0.932	0.913	0.935	0.324	0.321	0.486	0.800	0.775	0.801
	5×15	0.926	0.891	0.913	0.132	0.168	0.254	0.838	0.815	0.853
	5×20	0.852	0.813	0.831	0.146	0.240	0.256	0.527	0.622	0.497
	10×10	0.902	0.905	0.902	0.096	0.093	0.097	0.918	0.920	0.917
	10×15	0.904	0.876	0.890	0.020	0.033	0.038	0.901	0.892	0.909
	10×20	0.821	0.776	0.830	0.068	0.057	0.003	0.827	0.787	0.829
2001	5×10	0.724	0.717	0.689	0.244	0.217	0.224	0.872	0.891	0.846
	5×15	0.619	0.593	0.630	0.104	0.055	0.164	0.880	0.840	0.849
	5×20	0.537	0.430	0.423	0.044	0.100	0.084	0.854	0.853	0.823
	10×10	0.434	0.481	0.433	0.173	0.170	0.168	0.823	0.833	0.824
	10×15	0.519	0.557	0.523	0.050	0.054	0.060	0.833	0.812	0.843
	10×20	0.231	0.316	0.205	0.031	0.046	0.050	0.779	0.754	0.807

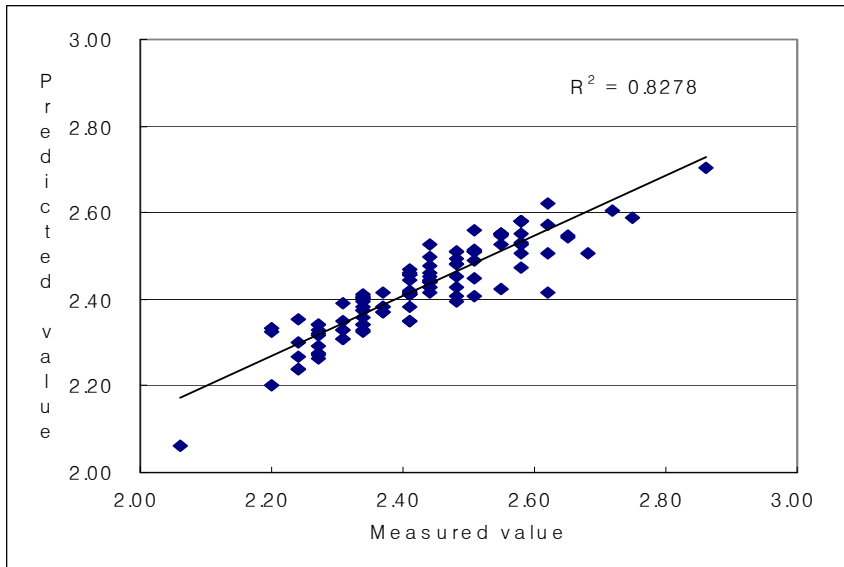


Fig. 35 The prediction model based on Kriging method.

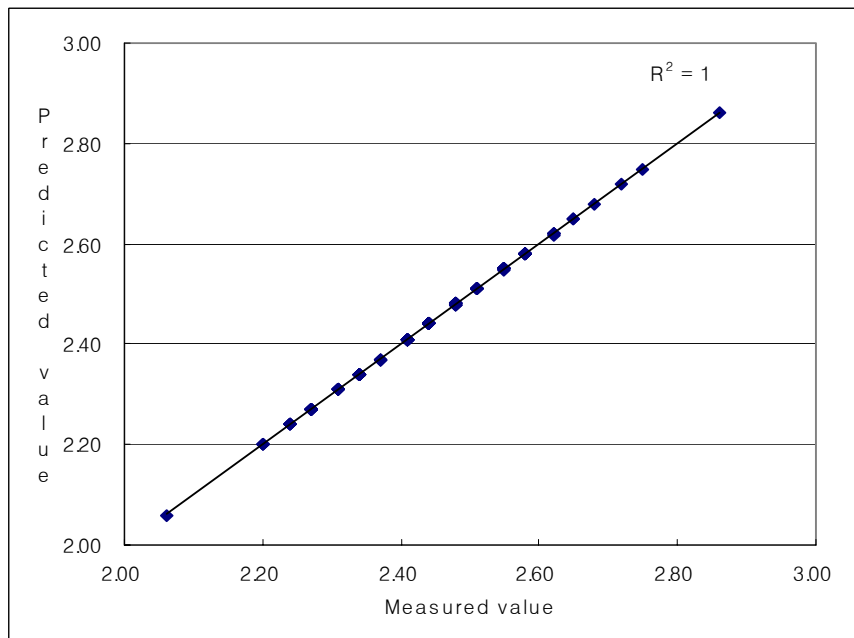


Fig. 36 The prediction model based on TIN method.

그림 35과 36에서는 샘플링 값을 이용하여 포장정보를 모델링하고 다시 기준점을 찾아가는 절차를 통하여 모델을 검증했으므로 각 모델에서의 결정계수는 1이어야 한다. 그러나 그림 35에서와 같이 Kriging 보간을 통해서도 실제 샘플링 위치에서의 속성값 추정이 정확하게 일치하지 않음을 보여주는데 이는 측정오차에 따른 너겟 효과(nugget effects)에 기인한 것으로 판단된다. 그림 36은 TIN을 이용한 실제 샘플링 위치에서의 속성값 추정이 정확함을 보여주고 있다.

표 11은 세 가지의 보간법 중에서 TIN이 비교적 정확한 예측값을 추정하는 것을 보여주고 있다. 이 실험은 총 60-80개의 샘플링 포인트를 이용하여 모델링하고 나머지 40-60개의 미지 점에 대한 예측오차를 측정하는 방식으로 이루어졌다. 검증결과 TIN 방법은 IDW에 대해 약간 개선된 결정계수를 나타내면서(대략 0.5-0.9의 범위에 있음) 세 가지 방법 중 가장 우수한 예측력을 보이고 있어 의사결정시스템에는 TIN 보간법을 탑재하고자 하였다.

제 3 절 토양 물리성 정보 DB의 자료저장 모델 및 스키마 설계

1. DB의 자료표현법

공간 데이터베이스(spatial database, SDB)는 위치정보를 기반으로 지리정보시스템을 구현함에 있어 공간 데이터(spatial data)를 포함하는 데이터베이스를 의미한다. 응용분야의 요구사항에 따라 다양한 공간 데이터 표현방법이 존재하지만, 본 연구에서는 벡터모델(vector model)을 이용하여 공간 데이터를 표현하였다.

벡터모델은 데카르트 좌표계를 이용하여 공간 객체가 위치하고 있는 지점의 좌표 값으로 공간 객체를 표현하며 저장용량이 작아지는 장점을 갖는다. 벡터모델로 표현되는 공간 객체는 주로 점, 선, 다각형과 같이 단순하고 기본적인 도형들이다. 즉, 공간 객체의 절점(vertex)을 좌표로 표현하고, 이들을 조합하여 표현하

고자 하는 다양한 형태의 공간 객체를 표현하게 된다.

2. 포장 위치정보와 속성정보의 결합

포장의 위치정보는 포장의 어느 한 위치에서의 작토층의 경도, 점착력과 마찰각 등과 같은 비공간 속성 정보와 결합(join)되어진다. 이 두 정보는 각기 독립적으로 존재하는 것이 아니라 서로 결합되어 필요한 경우 참조될 수 있어야 한다. 따라서 본 연구에서는 위치데이터와 비공간 속성 데이터를 각기 독립적인 테이블로 구축한 후, 두 테이블을 결합하였다. 이 방식은 현재 관계형 데이터베이스에서 가장 많이 사용되고 있는 방식으로 두 개의 분리된 테이블을 구축한 후, 외부 참조키(foreign key, FK)를 이용하여 이들 각각의 테이블을 필요에 따라 결합하거나 참조하는 것을 의미한다.

3. 토양 물리성 정보 DB의 자료저장 모델 및 스키마 설계

포장의 위치정보를 포함하고 있는 공간 데이터(속성정보)를 효율적으로 저장하기 위해 관계형 DB에서 스키마 설계의 전형으로 알려진 E-R 모델(entity relational model)을 이용하였다. E-R 모델은 개체와 속성간의 관계를 이용하여 현실세계의 정보를 개념적으로 표현하는 방법이다.

본 연구에서는 포장의 속성 정보를 저장하기 위해 DB 내에 구축하고자 하는 속성에 따라 테이블을 따로 구성하였다. 또한 각 속성이 나타내는 값의 범위를 인덱스 형태의 테이블로 따로 설계하였다. 하나의 속성에 대하여 속성 테이블과 별도의 인덱스 테이블을 구성함으로써 데이터베이스의 크기를 줄여 부하를 감소시킬 수 있다.

본 연구에서 설계된 관계형 DB의 테이블 스키마는 다수의 공간 데이터를 연결할 수 있도록 integer 유형의 주 ID 필드(primary key)와 공간 데이터의 실제 좌표 값을 가지는 polygon 유형의 포장정보 필드, 그리고 차후의 확장된 연구를 위한 integer 유형의 map_no 필드(한 소유주가 다수의 포장이 있을 때)를 포함하도록

록 구성하였다. 포장에서의 각 속성은 샘플링 포인트에 대한 직접적 측정에 의해 획득한다.

그림 37은 최적화된 E-R 모델의 다이어그램을 보여주고 있다. 이 모델에서는 기본적으로 포장소유주, 포장, 샘플링 포인트, 내부마찰각, 토양경도, 전단력, 경반 두께, 수분함량 등의 8가지 정보를 개체(직사각형 모양의 테이블)로 포함하고 있다. 그러나 이 기본정보에 더하여 향후 필요에 따라 토양종류, 공극률, 토양밀도 등과 같은 추가적 정보 개체를 업그레이드 할 수 있으며, 이러한 추가정보는 독립적으로 보관 운영하도록 설계함으로써 기존 정보의 수정 및 변경에 영향을 주지 않도록 하였다. 표 4는 각각의 기본정보에 대한 테이블의 모양과 속성을 보여주고 있다.

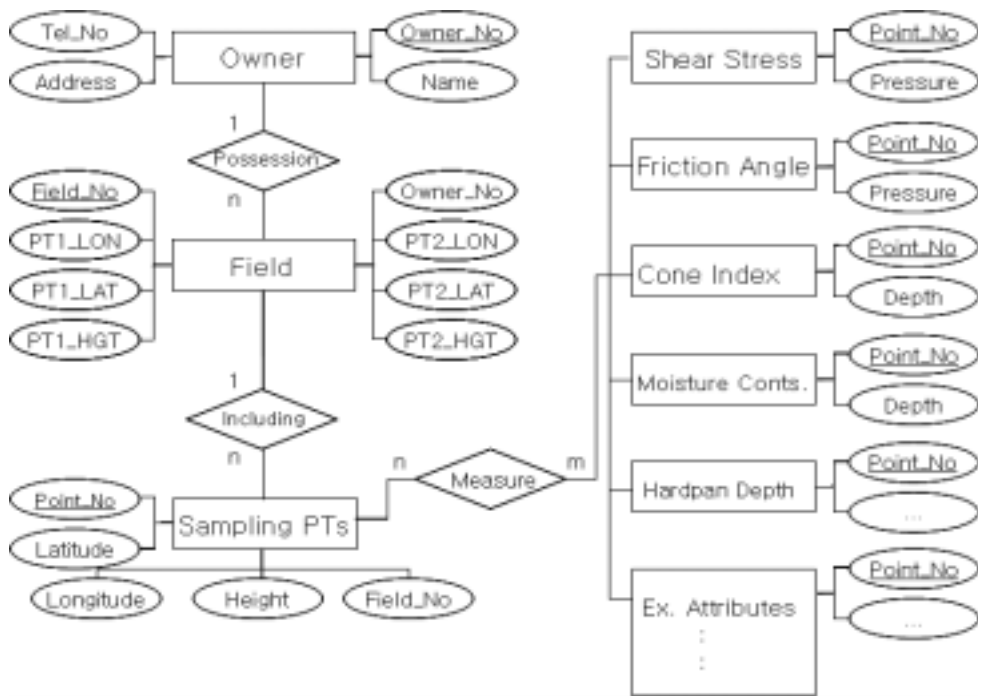


Fig. 37 The schematic diagram of E-R model developed in the study.

그림에서 개체 옆의 타원형 모양은 개체가 가지는 속성을 의미하며, 속성 중 주키(primary key) 역할을 하는 것들은 밑줄로 표시되어 있다. 개체와 개체를 연

결하는 다이아몬드 모양은 개체간의 관계를 의미하며, 숫자는 대응관계가 어떻게 이루어지는가를 나타낸다. 예를 들어, 소유주라는 개체는 4개의 속성(소유주No., 이름, 주소, 연락처)을 가진 데이터 테이블로 구성하였고, 실제 DB에 저장될 테이블의 모양은 표 12-1의 소유주 개체 테이블과 같다.

Table 12-1. Owner entity table

Owner_No.	Name	Address	Tel_No.
1			
2			
3			
...			

Table 12-2. Field information entity table

Field_No.	PT1 _LON	PT1 _LAT	PT1 _HGT	PT4 _LON	PT4 _LAT	PT4 _HGT	Owner _No
1									
2									
3									
...									

Table 12-3. Sampling point(position information) entity table

Point_No.	Latitude	Longitude	Height	Field_No.
1				
2				
3				
...				

Table 12-4. Shear stress entity table

Point_No.	P05	P10	P15	P20	P25	P30	P35	P40
1								
2								
3								
...								

Table 12-5. Internal friction angle entity table

Point_No.	P05	P10	P15	P20	P25	P30	P35	P40
1								
2								
3								
...								

Table 12-6. Soil hardness entity table

Point_No.	D05	D10	D15	D20	D25	D30	D35	D40
1								
2								
3								
...								

Table 12-7. Moisture contents entity table

Point_No.	D05	D10	D15	D20	D25	D30	D35	D40
1								
2								
3								
...								

소유주 한 사람(1)은 여러 개(n)의 포장을 소유(관계)할 수 있으므로 대응성은 1:n이 된다. 포장 개체는 포장No.를 주키로 설정하고 직사각형 형태로 가정하여 각 모서리의 좌표(경도, 위도, 고도)를 속성으로 테이블을 구성하였다. 소유주와의

연결은 소유주No.를 외래키(Foreign Key)로 하여 연결하였다(표 12-2).

하나의 포장은 여러 개의 샘플링 포인트를 가지므로 1:n의 대응관계를 가진다. 샘플링 포인트 개체의 경우 포인트NO.를 주키로 하여 각 점에 대한 경도, 위도, 고도를 속성으로 설정하였다. 또한 각 샘플링 포인트가 속한 포장과의 연결을 위해 포장No.를 외래키로 설정하였다(표 12-3). 각 샘플링 포인트에서 여러 개의 토양 물리적 특성을 측정해야 하고, 그 포인트의 개수가 여러 개이므로 샘플링 포인트와 측정해야 할 토양 특성과의 관계는 n:m으로 설정하였다.

본 연구에서는 토양의 물리적 특성 DB에 필요한 최소의 정보는 토양경도(CI)를 중심으로 내부마찰각과 점착력, 경반두께, 토양수분함량 등을 제시하였으며 이 기준에 따라 각 샘플링 포인트에서 압력별, 깊이별로 측정, 저장할 수 있도록 테이블을 구성하였다(표 12-1~표 12-7). 그러나 제시된 모델을 기준으로 향후 토양의 물리적 특성은 필요에 따라 확장 가능하며 기존의 자료와는 독립적으로 추가되어질 수 있다. 설계된 모델을 기준으로 자료가 입력되어질 것이기 때문에 토양 특성을 측정하는 계측자는 상기의 모델을 숙지해야 할 것으로 판단된다.

제 4 절 의사결정시스템의 구조 분석 및 설계

본 연구에서 목표로 하는 의사결정시스템은 포장 내에서 위치정보와 결합하여, 토양의 종류, 작토층의 경도, 입자밀도 및 관입저항 등 다양한 토양 물리성 정보를 받아들여 최적의 경운작업의 조합을 제시하는 시스템을 의미한다. 따라서 이 시스템은 의사결정 엔진에 다양한 알고리즘을 채택할 수 있다.

그러나 본 연구에서 추구하는 의사결정시스템은 궁극적으로 실시간 결정을 목표로 하였기 때문에 보다 빠른 시간 내에 주어진 조건에서 최적의 경운작업 조합을 계산할 수 있는 알고리즘이 필요하다. 나아가 최단시간에 계산하면서 경제적인 경운작업 조합을 찾아내는 잠재 능력을 가진 알고리즘을 선택하여야 한다. 의사결정시스템의 내부구조에 채택 가능한 알고리즘을 분석하였다.

1. 의사결정시스템의 구조에 대한 이론 분석

가. 유전알고리즘(genetic algorithm)

유전알고리즘(GA)은 자연세계의 진화과정을 여러 전산학 난제에 응용하여 문제를 해결하는 연구의 한 방법론이다. 유전알고리즘은 먼저 해결하고자 하는 문제에 대한 해(solution)를 염색체(chromosome)로 표현한 후, 염색체의 초기 배열을 통해 일군의 해집단(population)을 만들고 이들을 진화, 변형시킴으로써 더 좋은 해(individual)들을 찾아나간다. 이 알고리즘은 생물계에서와 같이 새로운 해의 생성과 대체를 한 세대의 진화로 간주하며, 세대가 지날수록 품질이 좋은 해를 찾기 위해 교차(crossover)와 변이(mutation)를 적절히 이용한다.

유전알고리즘은 문제 공간을 넓게 탐색할 수 있으며 부모해의 특성이 자식해에 전달되게 함으로써 이미 생성된 해의 특성을 활용할 수 있는 장점이 있다. 그러나 교차와 변이를 이용한 세대 간 진화는 자식해의 품질을 항상 개선한다고 보장하지 않으며 부모해의 장점이 사라져 버릴 수도 있다. 이럴 경우, 자식해는 부모해의 장점을 잃어버리고 단지 문제 공간을 막연히 헤매는 경우가 발생하게 된다. 따라서 생성된 자식해에 지역 최적화 알고리즘(local optimization)을 적용함으로써 지역 최적점 혹은 문제 공간 최적점에 보다 쉽게 접근할 수 있게 된다.

```
Generation of p-initial solutions in fixed size;
do {
    selection of two parents from intial solutions;
    offspring = crossover(parent1, parent2);
    mutation(offspring);
    repair(mutated offspring);
    local optimization(repaired offspring);
    replacement(optimized offspring);
} until (stop condition);
output the optimized solution;
```

Fig. 38 The general structure of genetic algorithm.

지역 최적화 알고리즘과 혼합된 유전알고리즘의 전형적인 구조는 그림 38에서 보여주고 있다. 유전알고리즘은 함수 최적화, 시스템 최적화, 신경망 최적화, 엘리베이터 그룹 스케줄링순회 세일즈맨 문제, 차량 라우팅, 그래프 분할, VLSI회로 배치, 영상 압축을 위한 벡터 양자화 등 매우 폭넓은 분야에 응용될 수 있으며, 결정론적인 방법으로 좋은 해를 구할 수 없는 NP-Hard 문제의 해결에 좋은 대안이 된다.

현재까지 유전알고리즘은 중간 정도의 상위도(epistasis) 문제 해결에 가장 적합한 것으로 인식되고 있다. 유전 알고리즘은 문제공간을 효율적으로 탐색하는 것이 최우선 목표로서 문제 공간상에서 지역 최적해를 찾는 것이 중요하다. 따라서 문제 공간이 넓을 경우에 유전 알고리즘 자체는 지역 최적해로 접근하는데 어려움이 따르게 되므로 지역 최적화 알고리즘을 혼합한 상태로 구현되는 것이 비용 측면에서 효율적인 것으로 인식되고 있다.

본 연구에서 제시되는 최적경운 시스템은 문제공간이 크지 않은 NP-Hard 문제로 분류되어지므로 결정론적일 수 없는 의사결정 엔진에서 좋은 성능을 발휘할 것으로 판단되었다. 따라서 최적 경운작업시스템의 결정에 유전알고리즘을 도입할 경우 그 설계 절차는 염색체의 표현, 적합도 함수의 선택, 초기해의 발생, 부모해의 선택, 다점교차와 변형 시뮬레이티드 어닐링을 결합한 하이브리드 다점교차의 수행, 변이 및 지역최적화가 포함되어야한다. 특히 적합도 함수의 선택은 보다 중요한 요인으로 분석되었으며 적합도 함수의 적절한 변형으로 실행시간을 단축시킬 수 있을 것으로 생각되었다.

나. 인공신경망

인간의 신경세포는 일종의 네트워크로 연결되어 한 세포에 대해 여러 가지 다른 세포의 입력이 어떤 기준을 넘으면 반응을 나타내는 특성을 가지고 있다. 따라서 인공신경망은 이를 모방하여 기본적으로 입력으로부터 출력 사이에 단일 혹은 다중 망을 배치하고, 망과 망 (노드와 노드)연결에 자극 정도를 가중치로 부과함으로써 다양한 입력에 대해 최종적으로 적절한 출력을 가지도록 설계, 구현된다.

이러한 가중치는 여러 가지 다양한 방법으로 결정되며 인공지능망에서는 이를 학습훈련이라고 정의하였다. 현재까지 개발된 대표적인 학습규칙은 Error-correction, Boltzman, Hebbian, Competitive method들이 있다. 또한 이러한 학습규칙을 기본으로 다양한 학습방법이 개발되었는데, 현재 응용되고 있는 대표적인 학습방법은 Back-propagation, Adaline and Madaline, Linear discriminant analysis, Learning vector quantization ARTMap, Sammon's projection, Principal component analysis, Associative memory learning, Kohonen's SOM, RBF learning 등이 응용되고 있으며 새로운 학습규칙과 방법에 대한 연구가 진행되고 있다.

인공지능망이 응용할 수 있는 분야는 매우 많으나, 현재 가장 많이 적용되는 분야는 패턴인식, 군집화 및 분류, 함수 추정 및 예측, 비선형 최적화 문제, 각종 장치의 비선형제어 등이 대표적이라 할 수 있다. 보통 이러한 분야에 응용되는 신경망은 입력단과 출력단을 제외하고는 내부로 숨겨지게 되어 망 내부의 상태는 외부에서 볼 수 없으며 이를 hidden layer라고 정의하고 각 가중치들은 숨겨진 망 속에 분포한다. 인공지능망의 입력 x 와 출력 y 의 기본적인 수학적 모델은 다음 식으로 나타난다.

$$y = U\{\sum_i w_i x_i - T\}$$

where, U : Unit step function,

w_i : weight,

T : threshold value

본 연구에서는 최적 경운작업 조합을 결정하는 결정시스템의 엔진으로 인공지능망을 고려하였다. 따라서 인공지능망에서 대표적으로 채택되는 Back-propagation network(BPN)과 Hopfield net를 분석하였다.

1) Back-propagation network(BPN)

BPN은 back-propagation algorithm을 학습방법으로 사용하여 가중치를 결정하

는 인공신경망이다. 이 방법은 입력패턴과 학습패턴의 차이에 대한 자승합을 최소화 하는 기울기 감소법(gradient-descent method)을 바탕으로 한다. 널리 알려진 오차 자승합 비용함수는 다음과 같이 정의되며 숨겨진 층에서 각 가중치는 입력 패턴을 하나의 초평면으로 나누는 기준 값으로 작용한다.

$$E = 1/2 \sum_i \|y^{(i)} - d^{(i)}\|^2$$

Back-propagation을 수행하기 위한 일반적 알고리즘은 다음과 같다.

- (가) 네트워크의 가중치를 임의의 작은 수로 초기화한다.
- (나) 입력 패턴을 임의로 선택한다.
- (다) 각 층에 입력을 전달한다.
- (라) 각 층에서 출력패턴과 입력패턴의 차이를 구한다.
- (마) 각층에서 차이의 일차 미분값을 구한다.
- (바) 각층에서 오차의 차이를 기준으로 가중치를 변경한다.
- (사) 이런 작업을 반복하여 수렴될 때까지 가중치를 조정한다.
- (아) 수렴이 되면 그때의 가중치가 입력에 대한 출력의 최적 가중치를 갖는 네트워크이다.

2) Hopfield net

Hopfield net는 네트워크의 전체 에너지에 대한 에너지 함수를 바탕으로 하며 네트워크의 동적 움직임을 감지할 수 있는 특징을 갖는다. 또한 이 네트워크는 각 상태가 연속적인 값과 +1 혹은 -1의 이중치를 갖는 네트워크로 구분되며 상태는 입력과 출력에 대한 피드백을 통해 결정된다. 이중치를 갖는 네트워크에서 상태는 다음으로 나타난다.

$$v_i = \text{Sgn}(\sum_j w_{ij}v_j - \theta_i)$$

이중치 Hopfield net의 에너지 함수는 만약 한 상태가 $\mathbf{v}=(v_1, \dots, v_n)$ 라면

$$E = -1/2 \sum_i \sum_j w_{ij} v_i v_j$$

로 표현된다. 이는 네트워크의 상태는 항상 에너지가 감소하는 방향으로 작용하며 궁극적으로 국소 최소점으로 수렴된다는 가정을 바탕으로 하고 있다.

인공신경망은 일반적으로 학습시간을 제외하면 비교적 다양한 입력에 대해 빠른 출력을 보이는 것으로 알려져 있다. 본 연구에서 목표로 하는 최적 경운체계의 결정이라는 명제에 대하여 인공신경망은 상대적으로 유전 알고리즘에 비해 실시간 의사결정이라는 측면에는 장점이 있다. 그러나 많은 변이를 갖는 포장의 특성에 능동적으로 대처하지 못한다는 단점이 분석되었다.

따라서 현재 본 연구에서는 기본적으로 인공신경망을 이용한 의사결정시스템을 기본으로 하여 유전알고리즘이 최적 경운시스템의 타당성을 검증하는 혼합형 의사결정시스템을 구현하고자 하였다.

2. 최적 경운시스템을 위한 의사결정시스템의 설계

가. 의사 결정시스템의 개요

일반적으로 의사결정문제는 서로 상반된 기준과 불완전한 정보 및 제한된 자원 하에서 최적의 대안을 선택해야하는 문제를 내포하고 있다. 현재까지 의사결정이론은 여러 가지 경영과학기법의 일환으로 연구되어져 왔으며 의사결정의 특성에 따라 다양한 기법을 적용할 수 있다.

현재 일반적으로 응용되고 있는 의사결정이론은 미래예측을 합리적으로 하기 위한 델파이법(Delphi method), 의사결정과정에서 기술 간에 존재하는 상호존속성을 적극적으로 반영하는 상호영향분석법(Cross impact analysis), 다수의 대안에 대해 다면적인 평가기준을 반영하는 계층분석법(Analytic hierarchy process, AHP) 등이 있다.

본 연구에서는 여러 가지 토양 물리성 정보를 바탕으로 경제적인 최적의 경운

시스템을 결정해야하므로 다차원적 성격을 내포한다. 나아가 토양정보의 DB 설계에서 나타났던 계층적 구성의 특징은 여러 가지 의사결정 기법 중에서 AHP가 구조적으로 본 연구에 매우 합리적임을 제시하였다.

AHP는 여러 분야에서 의사결정이 요구되는 문제에 적용 가능한 범용적 모델이라고 할 수 있다. 이 방법은 복잡한 의사결정의 문제를 계층적으로 나누어주며 정성적과 정량적 측면을 모두 고려한다. 나아가 AHP는 상황과 여건의 변화에 따라 계속적으로 수정 가능한 모델로서 주요 의사결정 요인들의 추가 및 삭제가 용이하고 각 요인들의 중요도에 대한 판단도 변경할 수 있다.

AHP를 적용함에 있어서 크게 네 가지의 의사결정 단계를 거치게 되며 그를 요약하면 다음과 같다.

- (가) 상호 관련된 의사결정사항을 계층으로 분류하여 의사결정계층(decision hierarchy)을 설정한다.
- (나) 의사결정 요인들 간의 상대비교 판단자료를 작성한다.
- (다) 의사결정요소들의 상대적인 가중치를 추정한다.
- (라) 의사결정요소들의 상대적인 가중치를 통합하여 여러 결정들에 대한 종합 순위를 부여한다.

앞 절에서 제시한 의사결정시스템의 구조에 대한 이론 분석과 더불어 본 연구에서 제시된 의사결정시스템은 AHP 의사결정이론을 바탕으로 혼합형 인공지능망에 휴리스틱 유전알고리즘이 장착된 형태가 되도록 설계하였다.

나. 의사결정시스템의 구조와 범위

그림 39는 본 연구에서 개발된 의사결정시스템의 구조를 보여주고 있다. 이 의사결정시스템은 한 개의 입력노드와 하나의 입력층, 세 개의 경운작업 결정층 및 한 개의 의사결정 출력노드로 구성되었다. 경운작업 결정층이 세 개인 것은 관행 경운작업의 특성이 반영된 것으로서 여러 번의 경운작업은 실제적으로 의미가 없기 때문에 작업 결정층을 제한한 결과이다.

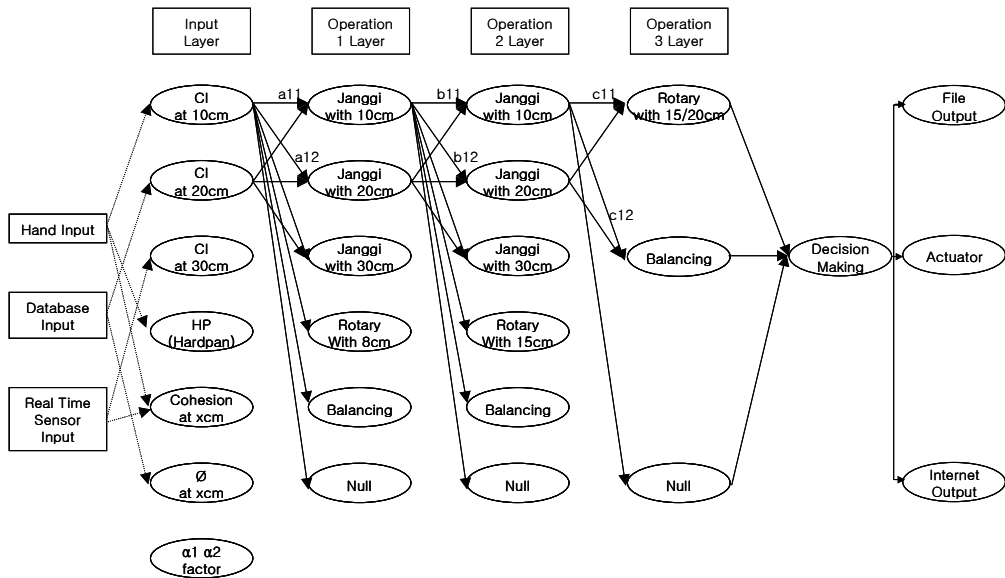


Fig. 39 The structure of decision making system developed in the study.

입력노드는 여러 경우의 의사결정 상황에서 유연히 대처할 수 있도록 단일 사용자의 키보드나 인터넷 접속에 의한 단일정보 입력모드(Hand input), 토양 물리성 정보 DB로부터의 연속적 입력모드(DB input), 향후 연결을 목표로 하는 실시간 토양 물리성 센서와의 접속모드(Real-time sensor input)를 포함하도록 구성하였다.

토양정보 입력층은 필요한 최적경운시스템의 의사결정에 필요한 토양정보를 추출 저장하고 시스템에 내장된 휴리스틱(heuristic) 유전알고리즘의 입력단에 정보를 전달한다. 유전알고리즘은 입력을 바탕으로 경운작업 결정층의 조합을 결정하고 목적함수와의 비교를 통해 최적 경운시스템을 결정한 후 그 결과를 출력노드에 전달한다. 의사결정 출력노드는 사용자의 여부에 따라 파일 출력모드(File output), 인터넷 출력모드(Internet output), 향후 연결을 목표로 하는 경운작업 제어모드(Actuator output)를 포함하도록 설계하였다.

그림으로부터 최적경운시스템을 결정하기 위하여 휴리스틱 유전알고리즘에 입력되는 경운시스템 함수 TIL_FUNC는 다음으로 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} \text{TIL_FUNC} = & \{a_{11} \cdot \text{JG}_{10} + a_{12} \cdot \text{JG}_{20} + a_{13} \cdot \text{JG}_{30} + a_{14} \cdot \text{RT} \\ & + a_{15} \cdot \text{BAL} + a_{16} \cdot \text{NT}\} + \{b_{11} \cdot \text{JG}_{10} + b_{12} \cdot \text{JG}_{20} \\ & + b_{13} \cdot \text{JG}_{30} + b_{14} \cdot \text{RT} + b_{15} \cdot \text{BAL} + b_{16} \cdot \text{NT}\} \\ & + \{c_{11} \cdot \text{RT} + c_{12} \cdot \text{BAL} + c_{13} \cdot \text{NT}\} \end{aligned}$$

where JGx0 : Janggi operation with the tillage depth of x0cm

RT : Rotary operation

BAL : Balancing by rotary or balancer

NT : No tillage

따라서 휴리스틱 유전알고리즘의 염색체는 $\{(a_{11}, a_{12}, a_{13}, a_{14}, a_{15}, a_{16}), (b_{11}, b_{12}, b_{13}, b_{14}, b_{15}, b_{16}), (c_{11}, c_{12}, c_{13})\}$ 로 표시되는 제한된 일차원 벡터가 된다. 이러한 일차원 염색체는 초기해의 임의 선택과와 더불어 교차, 변이, 염색체 수선 및 해의 교체를 반복 수행하면서 각 해의 특성이 목적함수에 의거하여 검증되고 보다 나은 해로 수렴되어진다.

이때 입력층에서 제 3작업 결정층까지 각각의 층을 연결하는 연결다리(connection bridge)는 연결 상태에 따라 1 혹은 0의 상태값을 가지게 되는데 각 층 사이의 연결다리는 오직 하나만 허용된다. 즉 그림 39에서 입력층에서 1작업 결정층의 다리를 의미하는 $(a_{11}, a_{12}, \dots, a_{16})$ 의 다리그룹과, 1작업에서 2작업 결정층의 다리를 의미하는 $(b_{11}, b_{12}, \dots, b_{16})$ 의 다리그룹, 그리고 2작업에서 3작업 결정층의 다리를 의미하는 (c_{11}, c_{12}, c_{13}) 의 다리그룹을 고려할 때 각 그룹에서는 단지 하나의 다리가 연결되어진다(제한된 일차원벡터).

상기의 경운작업에서 로타리 경운작업은 선행 경운작업 없이 최초로 로타리 작업이 이루어질 경우 경심이 8cm가 되며, 선행으로 쟁기작업이나 로타리 작업이 수행된 후 로타리작업이 이루어지면 경심이 15cm인 것으로 가정하였다. 이는 대개 로타리날의 길이가 8-10cm 정도이고, 선행작업이 수행될 경우에는 미리 파쇄된 토양 속으로 로타리날의 침투가 보다 용이하여 경심이 증가한다는 예비 실험 결과를 반영한 것이다.

현재까지 토양 물리성을 측정하는 방법과 그 신뢰성, 실험 연구결과와 분석에

따르면 토양특성이 내재하는 복잡한 상호 메커니즘으로 인하여 의사결정시스템에 다양한 토양정보를 사용할 수 없었다. 현재의 실험결과를 토대로 하여, 본 연구에서 개발된 의사결정시스템은 토양입력 정보로서 CI와 경반까지의 깊이(작토층의 깊이)를 기본으로 하며 점착력과 내부마찰각을 참조하는 범위로 제한되었다.

그러나 그림 39에 나타난 바와 같이 개발된 의사결정시스템의 구조는 필요에 따라 토양정보 입력층에 추가적인 토양정보가 추가되더라도 쉽게 확장이 가능하며 기존에 구성된 구조를 변경할 필요가 없는 장점을 가지고 있다. 나아가 세 개의 경운작업 결정층도 새로운 경운법이 개발, 도입될 경우에 기존의 구조에서 단순 확장을 통하여 네 개 이상의 작업층을 가지는 의사결정시스템으로 변경될 수 있다.

다. 의사결정시스템의 목적함수 설정

앞서 설명한 의사결정시스템 내에 장착된 유전알고리즘은 주어진 토양정보라는 문제 공간을 탐색하면서 다양한 조합의 경운작업체계를 제시하게 된다. 이때 해당 경운작업시스템이 최적이 되기 위해서는 적절한 목적함수와 비교되어야 한다. 본 연구에서는 크게 작물생육에 적합한 토양강도와 보다 경제적인 경운작업시스템의 제시라는 두 가지의 측면의 목적함수를 고려하였다.

1) 토양강도 목적함수

작물생육에 적합한 토양의 물리적 특성에 관한 정확하고 구체적인 기준은 제시된 바 없다. 그러나 부분적으로 수행된 기존의 연구에 따르면 미세토 하천 농토양에서 벼 수확에 영향을 미치는 조건은 CI값을 기준으로 1MPa로 제안한 바 있다(조인성 등, 1983). 이 CI값은 작물생육기간 중 관수를 하였을 경우에 제시된 기준으로서 본 연구에서 개발하고자 하는 경운작업 시점에서의 기준 토양강도로 직접적으로 사용할 수는 없다.

제 3장 제 4절에서 제시된 국내 주요 농토양 경반의 물리적 특성을 참조하면 우리나라의 경반은 대략 6가지의 형태를 구분되며 경반의 시작깊이가 대략 40cm 이내로 나타났다. 따라서 지표면으로부터 경반시작점까지의 깊이를 작토층으로

간주할 수 있다. 이때 가상의 적정 작물생육 조건을 1MPa의 CI값으로 가정하면 1MPa 이상의 CI값을 갖는 부분은 경운작업이 필요한 부분이 된다.

깊이에 따른 연속적인 CI 프로파일에서 깊이 10cm, 20cm, 30cm에서의 값을 기준으로 다음과 같은 논리적 목적함수를 개발하였다.

$$LOF1 = \{(0, 1) : \text{set 1 if } RT_{10} \times CI \text{ at } 10\text{cm} \leq \lambda \cdot 1\text{MPa}\}$$

$$LOF2 = \{(0, 1) : \text{set 1 if } RT_{20} \times CI \text{ at } 20\text{cm} \leq \lambda \cdot 1\text{MPa}\}$$

$$LOF3 = \{(0, 1) : \text{set 1 if } RT_{30} \times CI \text{ at } 30\text{cm} \leq \lambda \cdot 1\text{MPa}\}$$

$$LOF = \{(0, 1) : \text{set 1 if } (LOF1 + LOF2 + LOF3) = 3 \}$$

where LOF : Comprehensive logical object function,

LOF_x : Logical object function at the depth of x0 cm,

RT_{xx} : Ratio of CI improved by the specific tillage operation at the depth of xx cm

λ : Calibration coefficient for adjusting to a proper CI

목적함수식에서 λ 는 작물생육에 적합한 토양강도로 CI를 조절하기 위한 1MPa 기준의 조절상수이며, 향후 토양별로 결정되어야 할 요인으로 판단된다. 특히 유전 알고리즘은 최적의 경운시스템을 찾기 위해 문제공간을 탐색하기 전에 입력층에서 작토층의 깊이를 점검하며 작토층의 깊이에 따라 LOF2과 LOF3는 작토층의 깊이를 기준으로 논리값 1로 미리 설정한다.

예를 들면 토양 깊이 20cm와 30cm에서 CI값이 $\lambda \cdot 1\text{MPa}$ 보다 크다 하더라도 작토층의 깊이가 15cm라면 LOF2와 LOF3이 어떤 논리값을 갖는다 하더라도 의미가 없다. 따라서 목적함수 LOF의 논리값에 대한 영향을 없애기 위해 논리값 1로 설정하는 것이다. 결국 LOF가 1의 논리값을 가지면 해당 경운시스템은 작토층 전 깊이에 대해서 작물생육에 적절한 토양강도를 가지는 것으로 판단한다.

상기의 논리적 목적함수는 향후 관련 연구가 다양하게 진행되면 $LOF = \{(0, 1) : \text{set 1 if } (LOF1 + LOF2 + LOF3 + \dots + LOFn = n) \}$ 까지 확장이 가능하다. 다시 말하면 본 연구에서는 점착력과 내부마찰각의 적정 범위를 찾을 수 없는 관

계로 두 요인을 참조하는 수준이지만 그 적정범위와 각 단위 경운작업이 두 요인에 미치는 영향이 구명되어지면 상기의 논리목적함수 LOF는 $\{(0, 1) : \text{set } 1 \text{ if } (LOF1 + LOF2 + LOF3 + LOF4 + LOF5) = 5\}$ 로 쉽게 확장할 수 있다.

2) 최소 경운비용 목적함수

의사결정시스템에 내장된 휴리스틱 유전알고리즘이 토양강도 목적함수를 만족하는 임의 m개의 최적경운시스템 후보를 제시하면 다음의 경운비용 논리함수를 기준으로 최소의 경운비용을 필요로 하는 경운시스템을 최적의 경운시스템으로 선정하게 된다.

$$\begin{aligned} \text{CST_TIL}_i = & \{a_{11i} \cdot \text{CST_JG}_{10} + a_{12i} \cdot \text{CST_JG}_{20} + a_{13i} \cdot \text{CST_JG}_{30} \\ & + a_{14i} \cdot \text{CST_RT} + a_{15i} \cdot \text{CST_BAL} + a_{16i} \cdot \text{CST_NT}\} \\ & + \{b_{11i} \cdot \text{CST_JG}_{10} + b_{12i} \cdot \text{CST_JG}_{20} + b_{13i} \cdot \text{CST_JG}_{30} \\ & + b_{14i} \cdot \text{CST_RT} + b_{15i} \cdot \text{CST_BAL} + b_{16i} \cdot \text{CST_NT}\} \\ & + \{c_{11i} \cdot \text{CST_RT} + c_{12i} \cdot \text{CST_BAL} + c_{13i} \cdot \text{CST_NT}\} \end{aligned}$$

where $i = 1 \dots m$

CST_TIL_i : Total cost of ith candidate for an optimal tillage operation system

CST_JG_{x0} : Cost of janggi operation with the tillage depth of x0cm

CST_RT : Cost of rotary operation

CST_BAL : Cost of balancing by rotary or balancer

CST_NT : Cost of no tillage (normally 0 won)

그러므로, 최적 경운시스템은 다음으로 결정된다.

$$\text{OTSys} = \{\text{TIL_FUNC}_i \text{ if } \text{CST_TIL}_i \leq \text{CST_TIL}_j \text{ at } i \neq j\}$$

where i and $j = 1, \dots, m$

OTSys : Optimal tillage operation system

TIL_FUNC_i : Ith candidate for an optimal tillage operation system

앞 절에서 설명한 바와 같이 경운비용 논리함수도 입력층에서 1작업 결정층까지 (a11, a12, ... , a16)의 다리그룹과, 1작업에서 2작업 결정층까지 (b11, b12, ... , b16)의 다리그룹, 그리고 2작업에서 3작업 결정층까지 (c11, c12, c13)의 다리그룹을 고려할 때 각 그룹에서는 단지 하나의 다리가 연결되어진다. 또한 논리함수에서 각각의 해당 경운작업의 경운비용, CST_JGx0, CST_RT, CST_BAL은 기초자료로 입력되어져야한다.

제 5 절 토양정보 DB와 의사결정시스템을 이용한 토양의 물리적 특성에 따른 최적 경운시스템

1. 토양 물리성 DB 및 의사결정시스템 장치 구성

토양 물리성정보 DB 및 의사결정시스템은 기본적으로 포장에서 획득한 공간 및 속성데이터를 저장하고 출력하는 입출력 인터페이스와 자료를 체계적으로 저장하는 DB 플랫폼, 공간데이터를 분석하고 관리하기 위한 데이터 분석용 플랫폼과 다중 사용자의 관련 프로그램 사용을 위한 프로그램 서버로 구성되어 있다.

본 연구에서 개발하려는 의사결정시스템에 연계하여 사용할 프로그램 서버는 데이터를 저장, 관리, 가공, 처리, 분석하기 위한 데이터베이스관리시스템(DBMS)으로 MS SQL을 탑재하였으며, 사용자의 요구에 부응하는 인터페이스 개발을 위한 MS VS.net과 데이터베이스 모델링과 분석을 위한 MS VISIO, 그리고 공간 및 속성데이터의 분석과 디스플레이를 위해 윈도우용 3D 지형도 제작 프로그램인 Surfer를 탑재하였다.

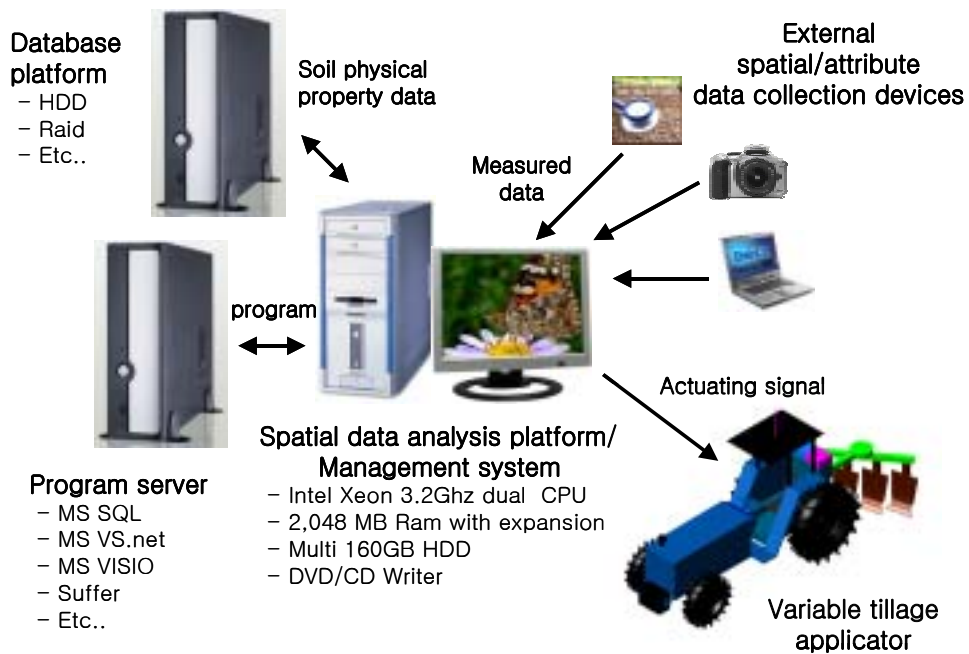


Fig. 40 The schematic diagram of decision making system with DB developed in the study.

그림 40은 본 연구에서 구성된 토양정보 DB와 의사결정시스템의 구성도를 보여주고 있다. 의사결정시스템이 탑재되어 있는 공간데이터 분석용 플랫폼/관리자 시스템에는 서버로서의 속도와 안정성이 보장된 Dual 3.2 GHz Xeon CPU를 탑재하고 데이터 처리능력 향상을 위해 2GB의 램을 장착하여 프로그램의 실행시간과 접근 편리성을 제고하였다. HDD 용량은 160GB를 바탕으로 향후 방대한 양의 공간 및 속성데이터를 저장하기에 충분하도록 확장이 용이하게 구성하였으며 외부 저장장치로의 변환을 위해 DVD/CD R/W를 장착하였다.

의사결정시스템의 핵심이 되는 의사결정 엔진은 Visual C++를 기반으로 하며 부분적으로 Visual Basic 및 JAVA 프로그램으로 구현되어 공간데이터 분석용 플랫폼에 탑재하였다. 향후 연구의 결과에 따른 추가 확장이 용이하도록 구현하였다.

2. 토양 물리성정보 DB의 응용질의 프로그램과 의사결정시스템의 통합

본 연구에서는 DB 응용질의 프로그램과 의사결정시스템과의 연동하여 토양특성에 따른 최적경운시스템(Optimum Tillage Management System based on Soil Physical Properties)이라는 윈도우즈기반 프로그램을 개발하였다. 프로그램에 사용된 언어는 Visual C++ 6.0을 기반으로 하였고, 데이터를 저장, 관리, 가공, 처리, 분석하기 위한 데이터베이스관리시스템(DBMS)으로 MS SQL을 이용하였다. 프로그램의 실행 파일의 이름은 최적경운의 의미로서 “Optill”로 결정하였다. 그림 41은 Optill 프로그램의 실행 초기화면을 보여주고 있다.

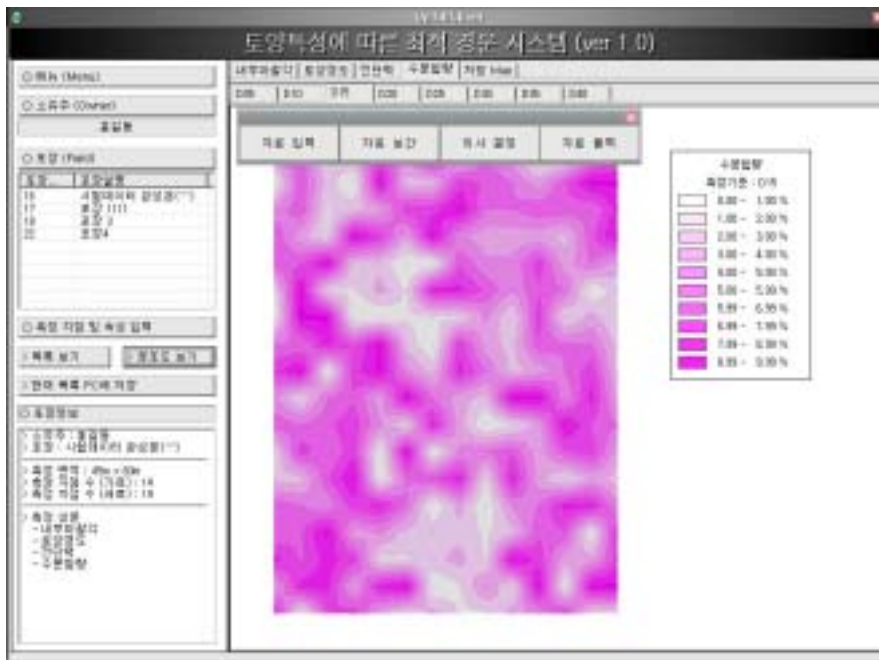


Fig. 41 Initial execution page of Optill program developed in the study.

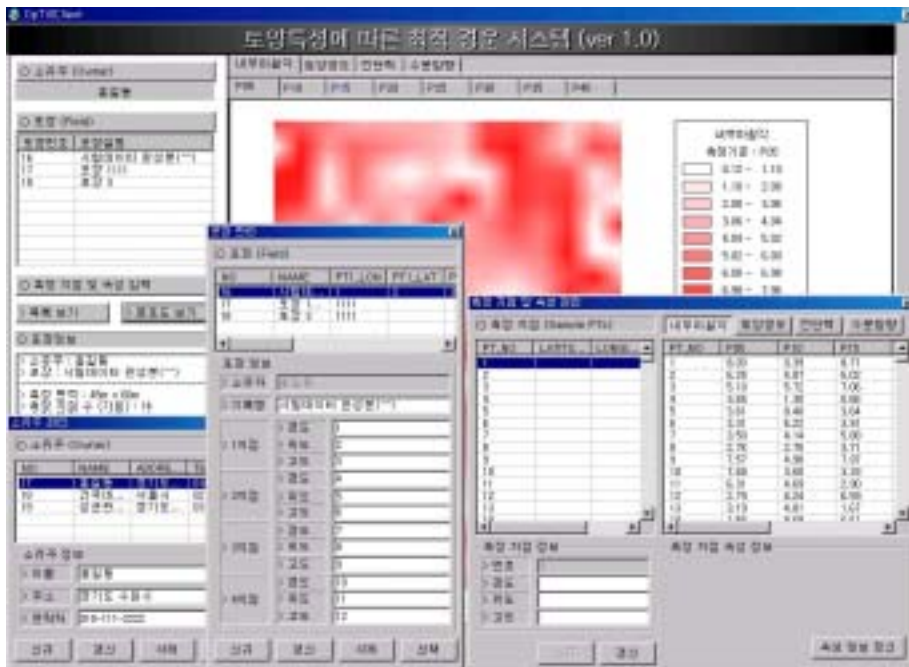


Fig. 42 Layout of sub-menu, data input and output in 'Optill' program.



Fig. 43 An example of an attribute map interpolated by TIN method in 'Optill' program.

그림 41의 팝업(pop-up)메뉴에서 보는 바와 같이 앞 절에서 개발된 의사결정 시스템은 Optill 프로그램에 구현되었으며 크게 5가지의 모듈로 구성하였다. 그 모듈들은 Optill 프로그램에 프로세스로서 내장되어 메뉴로 나타나며 다음과 같다.

- (가) 자료입력모듈 : 다양한 형태로 표현된 공간자료나 토양특성 자료의 용이한 입력을 담당하며 사용자의 직접 입력과 파일로의 입력을 포함한다.
- (나) 자료보간모듈 : 현재 토양특성 계측장치의 운용상태 및 샘플링의 불연속적 특성과 DB에 규칙적 규격으로 자료를 보관해야하는 필요성 때문에 입력 자료의 보간은 필수적이다. TIN을 사용하였다.
- (다) 최적경운시스템 결정모듈 : 외부 입력이나 DB로부터 필요한 토양 물리성 자료를 인출하고 의사결정시스템을 운용하여 최적경운시스템을 찾아내는 작업을 담당한다.
- (라) 자료출력모듈 : 사용자의 요청에 따라 해당 자료를 보여주거나 선정된 최적경운시스템을 출력하는 작업을 담당한다. 이 출력작업은 토양물리성 자료 테이블과 지도 출력을 모두 포함한다.
- (마) 사용자 연결모듈 : 의사결정시스템에 인터넷을 통한 원격 및 근거리 접속 및 연결과 사용자 검증의 절차를 담당하는 작업이다. 향후 정밀농업과 연계하여 변량형 작업기의 제어 신호를 연결하고 출력할 수 있도록 구성하였다.

그림 42는 'Optill' 프로그램의 부메뉴를 통해서 토양 물리성 DB로부터 토양 물리성 정보를 추출하여 해당 자료와 토양특성 정보의 지도를 출력하는 방법을 보여주고 있다. 그림 43은 5m x 5m 격자크기로 측정된 토양 물리성 정보가 내장된 TIN 알고리즘에 의해 2m x 2m 격자크기로 보간된 결과를 정보지도로 보여주고 있다. 상기의 그림들에서 보는 바와 같이 토양자료의 입력과 출력은 유기적으로 한 화면 내에서 처리하도록 'Optill' 프로그램을 구현하였으며, 해당 자료는 필요에 따라 내재된 의사결정시스템과 연계된다.

3. 토양특성에 따른 최적 경운시스템 결정

본 연구에서 목표로 하는 의사결정시스템은 포장 내에서 위치정보와 결합하여, 토양의 종류, 작토층의 깊이에 따른 경도, 내부마찰각 및 점착력 혹은 필요에 따라 입자밀도 및 공극률 등 다양한 토양의 물리적 속성정보를 바탕으로 최적의 경운작업시스템(체계)을 제시하는 시스템을 의미한다.

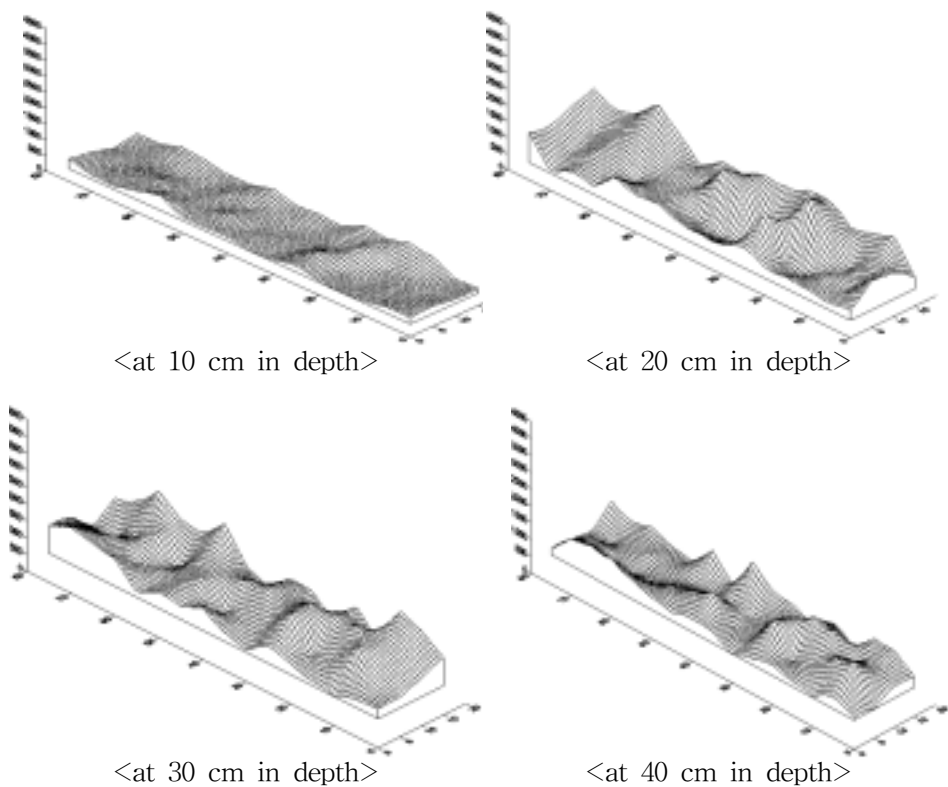


Fig. 44 Distribution maps of CIs at the every 10cm depth in an 80×20m test field.

본 연구에서 연구 개발된 토양 물리성 DB와 의사결정시스템을 이용하여 특정한 토양조건에서 최적의 경운시스템을 결정하는 프로세스를 검증하였다. 실험에

사용된 토양의 물리성 정보는 앞 절에서 지적한 바와 같이 현재 자료수집에 대한 신뢰성을 기준으로 경반에 기초한 작토층의 깊이와 10cm, 20cm, 30cm에서의 CI 값을 이용하였다.

그림 44는 토양특성에 따른 최적 경운시스템의 결정에 사용된 임의 포장의 10cm, 20cm, 30cm, 40cm에서의 CI값의 분포를 보여준다.

또한 토양강도 목적함수에 필요한 조절상수 λ 를 1로 선정하였는데, 이는 작물 생육에 적합한 CI값을 1MPa로 가정하는 것과 같으나 의사결정시스템을 검증하는 데는 영향이 없다.

Table 13-1. CI improvement for various tillage operations(10cm depth)

Operation Type	CI (kpa)	CI Difference	CI Improvement	Re
Before tillage ①	401.56	-	-	
Plow only ②	66.11	-335.45	-83.5%	②-①
Plow + Rotary 1 ③	58.33	- 7.78	-11.8%	③-②
Plow + Rotary 2 ④	58.33	0.00	0%	④-③
Rotary 1 ⑤	230.11	-171.45	-42.7%	⑤-①
Rotary 2 ⑥	316.00	85.89	37.3%	⑥-⑤

Table 13-2. CI improvement for various tillage operations(20cm depth)

Operation Type	CI (kpa)	CI Difference	CI Improvement	Re
Before tillage ①	421.11	-	-	
Plow only ②	312.11	-109.00	-25.9%	②-①
Plow + Rotary 1 ③	218.22	- 93.89	-30.1%	③-②
Plow + Rotary 2 ④	296.33	78.11	35.8%	④-③
Rotary 1 ⑤	315.89	-105.22	-25.0%	⑤-①
Rotary 2 ⑥	382.11	66.22	21.0%	⑥-⑤

Table 13-3. CI improvement for various tillage operations(30cm depth)

Operation Type	CI (kpa)	CI Difference	CI Improvement	Re
Before tillage ①	1403.22	-	-	
Plow only ②	1011.61	-391.61	-27.9%	②-①
Plow + Rotary 1 ③	1257.50	245.89	24.3%	③-②
Plow + Rotary 2 ④	1044.89	-212.61	-16.9%	④-③
Rotary 1 ⑤	1000.06	-403.16	-28.7%	⑤-①
Rotary 2 ⑥	1308.00	307.94	30.8%	⑥-⑤

토양강도 목적함수에서 필요한 또 하나의 요인은 단위 경운작업을 통하여 개선되는 깊이별 CI의 개선정도이다. 이를 결정하기 위하여 3장에서 실시된 토양과쇄 특성측정의 결과와 4장에서 수행된 단위 경운작업의 따른 토양의 물리성 변화 측정의 분석하였으며 표 13에 나타내었다.

표 13에서 다섯 번째 열에 있는 비고를 통하여 상대적으로 경운방법에 따라 단위 경운작업이 미치는 CI값의 개선비율이 달라짐을 보여주고 있다. 즉 작토층 깊이가 20cm를 기준으로 쟁기작업 후 로타리작업을 할 경우(작업조합 ③-②의 경우)와 로타리작업 후 로타리작업을 할 경우(작업조합 ⑥-⑤)의 CI값의 변화는 각각 -30 %와 21% 정도로서 로타리 작업을 연속적으로 두 번 수행할 경우 오히려 CI가 증가함을 보여주고 있다.

향후 보다 많은 실험을 통하여 해당하는 CI의 개선 비율을 평균화시킬 필요는 있으며 해당 자료는 매우 일반적 의사결정시스템의 기초자료가 될 것이다. 그러나 본 연구에서는 표에서 나타난 CI의 변화비율을 토양강도 목적함수의 기초자료로 입력하였다.

경운비용 목적함수에는 단위 경운작업에 필요로 하는 비용이 산정되어야 한다. 선행 연구결과에 따르면 10ha의 경지를 기준으로 쟁기작업과 로타리작업의 시간당 경제비용은 제시되어있다.

10ha를 기준으로 하여 경운작업에 트랙터 55마력을 사용하고 트랙터의 내구연

한을 10년, 연간 총 128시간의 트랙터 사용시간 중에서 경운작업 이용비율을 64%(92시간), 트랙터 가격을 2585만원, 쟁기 가격을 150만원, 로타리 가격을 250만원으로 선정할 때, 연간고정비는 대략 트랙터 232만원, 쟁기 25만원, 로타리 41만원으로 산출된다. 이때 경운작업 92시간 중에는 22시간의 쟁기작업과 70시간의 로타리작업을 산정하였다.

고정비와 더불어 인건비, 연료비, 운할비 등을 포함하여 유동비를 고려하면 총 경운작업시간에 대해 쟁기작업은 시간당 48,400원, 로타리작업은 시간당 41,900원의 경제비용이 필요한 것으로 보고되었다. 이 경우 각 작업의 시간당 경제비용 대비 유동비의 비율은 쟁기작업 33%, 로타리작업 35%로 분석되었다.

본 연구에서는 상기에 분석된 경제비용을 기준으로 의사결정시스템에 포함된 각 경운작업에 소요되는 경제비용을 산출하였다. 보통의 농민은 썩래작업을 위해 별도의 균평기를 구입하지 않고 로타리를 이용하는데, 이 경우 실제적으로 썩래작업의 부하율은 로타리작업 대비 약 70%로 산출할 수 있다. 이 부하율은 고정비에는 적용할 수 없고 단지 유동비에만 적용되어진다. 따라서 이 점을 감안하면 로타리를 이용한 썩래작업의 경제비용은 대략 시간당 37,500원 정도이다.

또한 쟁기작업의 경제비용은 일반적으로 경심 20cm에서 산정하므로 경심 10cm에서는 경심 20cm 대비 부하율 50%, 경심 30cm에서는 부하율 150%로 산정할 수 있다. 이러한 부하율도 고정비를 제외한 유동비에 적용할 수 있으므로 쟁기의 경제비용 내 유동비의 비율을 33%로 하면 경심 10cm의 쟁기작업은 대략 시간당 40,400원, 경심 30cm의 쟁기작업은 시간당 56,300원의 경제비용이 필요하게 된다.

상기에서 분석했던 여러 기초자료를 본 연구에서 개발된 의사결정시스템에 장착하고 해당 포장의 CI값과 작토층의 깊이를 입력하였다. 나아가 휴리스틱 유전 알고리즘을 구동하고 토양강도 및 경제비용 목적함수를 수렴한 결과 실시간으로 결정된 해당 포장의 토양 물리성 특성에 최적인 경운시스템은 <경심 20cm의 쟁기작업과 썩래작업>의 경운작업 조합으로 출력되었다. 이때 이 조합에서는 10ha 기준으로 시간당 85,900의 경운비용이 산출되었다.

그림 45에는 같은 포장의 CI값과 작토층의 깊이에 대하여 의사결정시스템이

최적 경운작업체계의 하나의 후보자로 제시되었던 경운작업 조합을 의사결정시스템의 구조에 도식적으로 대입한 결과를 보여준다. 이 경운조합은 <경심 20cm의 쟁기작업과 썬레작업> 경운조합에 대비하여 최소의 경제비용 목적함수에 의해 도태되었다. 그림에서 보는 바와 같이, 실선으로 나타난 이 경운조합은 두 번의 쟁기작업을 추천하고 썬레작업을 함으로써 질적으로 비합리적임을 쉽게 알 수 있다.

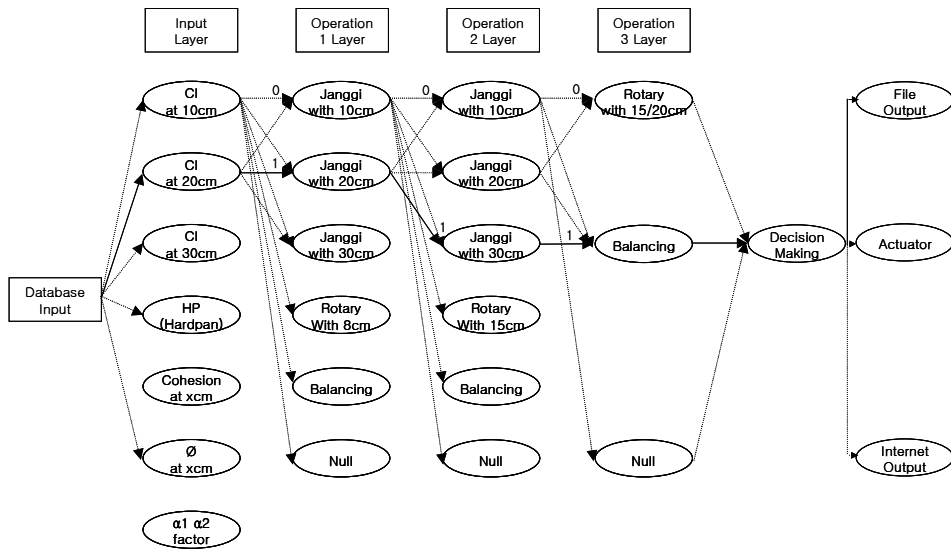


Fig. 45 An example of a tillage operation combination generated by decision-making system.

본 연구에서는 토양특성에 따른 최적 경운시스템을 제시하는데 유용한 토양 물리성 정보 DB를 구축하고 해당 정보로부터 최적의 경운시스템을 결정하는 의사결정시스템을 개발하는 것이 목적이었다.

따라서 토양 물리적 특성 DB에서 필요 자료를 추출하는 것을 기본으로 하였으나 개발된 의사결정시스템은 인터넷을 통하여 한 단위 포장에 같은 토양 특성을 지닌다는 포장 단위의 최적 경운시스템의 문의에도 대처할 수 있다. 나아가 연속적인 자료의 입출력에도 실시간으로 대처하면서 변량형 경운작업체계에도 능동적

으로 적용할 수 있는 바람직한 의사결정시스템으로 판단되었다.

제 5 장 연구개발결과의 관련분야의 기여도 및 활용계획

제 1 절 연구개발결과의 관련분야의 기여도

본 연구는 경운작업의 효율성과 경제성을 향상시키며 나아가 환경친화적인 농업기술의 바탕이 될 것으로 기대된다. 아울러 포장정보의 획득, 의사결정 및 최적화된 농작업의 수행 및 결과 분석의 피드백 구조를 형성하여 향후 지속가능한 친환경농업의 시스템적인 연구방향을 제시할 것으로 기대된다.

1. 기술적 측면

- 본 연구는 장기간에 수행되는 최적 경운작업체계에 대한 최초의 시스템적 연구이므로 국내외에서 관련 연구에 대한 표본이 될 것으로 판단된다.
- 본 연구는 세계적으로 최소경운 혹은 무경운 이론과 친환경 시스템 농업의 개념을 조합한 것으로서 경운 및 정지에 대한 연구 분야에서 국제적인 선두주자의 위치를 선점할 것으로 기대된다.
- 현재 국내에서 진행되고 있는 토양 특성 측정을 위한 실시간 센서개발이 완료될 경우, 개발된 센서와 본 연구의 결과가 융합되어 시스템적 농업기계의 다양화에 기여할 것이다.
- 최소경운 및 무경운 원리는 이미 농업선진국에서 농업생산비 절감과 환경보호의 실제적 이득이 있는 것으로 보고되어 친환경 농기계기술의 확보에 기여할 것으로 생각된다.
- 본 연구는 시스템 농업의 중요한 요소기술인 의사결정시스템의 발전을 이룰

것이며, 연구의 접근 방법은 유사한 유형의 연구에 기본 방향을 제시하여 농장관리시스템(FMIS)의 연구에도 적용될 수 있을 것으로 판단된다.

2. 경제·산업적 측면

- 현재 초기단계에 머무르고 있는 친환경 농작업기 연구와 관련하여 조기에 시스템적 농기계기술의 바탕을 제공함으로써 아시아에서는 선두 주자로 수출산업으로 발전할 가능성을 제시할 것으로 판단된다.
- 본 연구에서 제시된 최적 경운작업체계를 이용함으로써 농산물 생산단가가 낮춰지게 되어 농산물의 가격경쟁력을 제고할 것이다.
- 작토층의 토양유실을 최소화하고 지력을 보호함으로써 환경오염을 최대한 억제시킬 수 있으며, 이에 따른 잠재적 경제효과는 클 것으로 추정된다.
- 학문적 측면으로 학제 간 연구수준 제고 및 연구 잠재력의 융합을 통한 시너지 효과 창출이 매우 클 것으로 판단된다.
- 현재 침체된 농업에 컴퓨터를 이용한 시스템적 연구를 도입함으로써 새로운 인력자원의 유입과 농업의 전반적인 인식 변화를 기대할 수 있을 것으로 판단된다.

제 2 절 연구개발결과의 활용계획

- 토양특성에 따른 최적 경운작업체계의 농가의 적용을 통한 최적 농작업체계의 기술지도 및 기술지원
- 연구 결과의 국내외 특허출원 및 국제학술발표
- 친환경 시스템 농업 실현을 위한 정책적 지원 제안
- 경운작업의 관점에서 요구 장소에 필요한 정도의 경운을 함으로써 지력의 보호와 유실을 방지하는 시스템 농업기술로 보급
- 관련기술의 지속적 연구를 통한 친환경 시스템 농업 실현의 조기화 지원
- 효율적인 경운작업시스템 시스템 연구의기초로서 향후 연구방향을 제공

제 6 장 참고문헌

1. 강인성. 2000. 지리정보시스템을 이용한 소구획 경작지내의 토양 유기물 및 pH의 변이분석. 석사학위 논문. 서울대학교 대학원.
2. 공간데이터베이스. 2000. 한국정보통신대학원대학교 부설 정보통신교육원.
3. 농림부 과제 보고서. 2005. 쌀 산업의 농기계 비용 절감을 통한 농가소득 증대 방안. 성균관대학교.
4. 농림수산기술정보협회. 1988. 경운작업의 변천과 기술개발 방향.
5. 농업경영자료 제 113호. 2005. 농업연구결과 경제성분석 방법 및 사례. 농촌진흥청 농업경영정보관실.
6. 농촌진흥청 대형과제 보고서. 1998. 전자과 표면조사에 의한 토양 유기물, 수분, 및 전질소의 비파괴 측정기 개발. 농촌진흥청.
7. 윤진하, 이영렬, 오성근, 장유섭. 1983. 경운정지용 기계에 관한 연구. 농진청 연구보고서. 120-135.
8. 조근태, 조용근, 강현수. 2003. 계층분석적 의사결정. 동현출판사.
9. 조인성, 김이열, 민경범, 조영길, 유관식, 엄기태. 1989. 우리나라 주요 토양의 가소성에 대하여. 농사시험연구논문집(토양비료편). 31(3):17-21.
10. 조인성, 김이열, 조영길, 임정남, 엄기태. 1984. 논토양의 물리성이 농기계 작업능률에 미치는 영향. 한국토양비료학회지. 17(2):155-160.
11. 조인성, 민경범, 김이열, 임정남, 엄기태. 1985. 경운방법의 차이가 토양의 물리성과 수답생육에 미치는 영향. 한국토양비료학회지. 18(2):189-193.
12. Adams, M. L. and S. E. Cook. 1997. Methods of on-farm experimentation using precision agriculture technology. ASAE Paper NO. 973020, Minneapolis, MN, USA.
13. Anil K. J., J. Mao and K. M. Mohiuddin. 1996, Artificial Neural Networks: A Tutorial. IEEE Computer 0018-9162, pp31-44.
14. Behme, J. A., J. L. Schinstock, L. L. Bashford and L. I. Leviticus. 1997.

- Site-specific yield for forages. ASAE Paper NO. 971054, Minneapolis, MN, USA.
15. Berg, M.D. et. al. 2000. Computational Geometry –Algorithms and Application-. 2nd Springer.
 16. Carter, M. R. Relative Measure of Soil Bulk Density to Characterize Compaction in Tillage Studies on Fine Sandy Loams.
 17. Chickering, D. M.. 1994. Learning Bayesian Networks is NP-Hard., Redmond, WA, Microsoft Research.
 18. Cho, I. S., J. N. Im, J. D. So, S. Y. Lee and D. U. Choi. 1983. Journal of Korean Society of Soil Science and Fertilizer Vol. 16, p. 92.
 19. Elbanna, E. B. and B. D. Witney. 1987. Journal of Terramechanics, Vol. 24, p. 41.
 20. Ess, D. R., M. T. Morgan, 1997. Development of a course in precision agriculture, ASAE Paper No. 975036, Minneapolis, MN, USA.
 21. Freeman, J. A. and D. M. Skapura. 1992. Neural Networks Algorithms, Applications, and Programming Techniques. Addison-Wesley Pub. Company.
 22. Gill, W. R. and G. E. Vanden. 1968. Soil Dynamics in Tillage and Traction, U.S. Government Printing Office, Washington DC.
 23. Gorucu, S., A, Khalilian, Y. J. Han, R. B. Dodd and B. R. Smith. 2003. ASAE Paper 03-1074, ASAE, St. Joseph, MI.
 24. Havlin, J. L., J. D. Beaton, S. L. Tisdale and W. L. Nelson. 1990. Soil Fertility and Fertilizers: An Introduction to Nutrient Management, 6th ed. Upper Saddle River, N.J., Prentice-Hall, Inc.
 25. Hayes, A. O. and J. W. Price. 1994. Feasibility of site-specific nutrient and pesticide applications. Environmental Sound Agriculture, Proceedings of the Second Conference, 62-68.
 26. Horn, R., H. Donzal, A. Slowinska-Jurkiewicz and C. Van Ouwerkerk.

1995. Soil Compaction Processes and Their Effects on the Structure of Arable Soils and the Environment. *Soil and Tillage Research* 35:23-36.
27. Howard M. Taylor et al.. Penetration of Cotton Seedling Taproots as Influenced by Bulk Density, Moisture Content, and Strength of Soil.
28. Hummel, J. W., I. S. Ahmad, S. C. Newman, K. A. Sudduth and S. T. Drummond. 2004. Simultaneous Soil Moisture and Cone Index Measurement. *Transactions of the ASAE*(in press).
29. Khalilian, A., Y. J. Han, R. B. Dodd, M. J. Sullivan, S. Gorucu and M. Keskin. 2002. ASAE Paper 02-1209, ASAE, St. Joseph, MI.
30. Koolen A. J. and H. Kuiper. 1983. *Agricultural Soil Mechanics*, Springer-Verlag, Berlin, Germany.
31. Leick, A.. 1995. *GPS satellite surveying*, 2nd edition. John Wiley & Sons, Inc.
32. Musto, I. P.. 1994. GIS in natural-resource management : the move from map database to quantitative analysis. *Proceedings of Resource Technology '94*, New Opportunities, Best Practice, Melbourne, 25-36.
33. Pearce, D., Barbier, E. and Markanda,A. 1988. Sustainable development and cost-benefit analysis. London Environmental Economics Centre, UK. Paper 88-01.
34. Raper, R. L., B. H. Washington and J. D. Jarrell. 1999. A Tractor-mounted Multiple-probe Soil Cone Penetrometer. *Applied Engineering in Agriculture* 15(4): 287-290.
35. Shearer, S. A., S. G. Higgins, S. G. Mcneill, G. A. Watkins and R. I. Barnhisel. 1997. Data filtering and correction techniques for generating yield maps from multiple combine harvesting systems. ASAE Paper NO. 971034, Minneapolis, MN, USA.
36. Soane B. D. and C. Van Ouwerkerk. 1995. *Soil and Tillage Research* Vol. 35, p. 5.
37. Taylor, H. M and H. R. Gardner. 1963. *Soil Science* Vol. 96, p. 153.

38. Thomas L. Saaty. 1995. Decision Making for Leaders. RWS Publications.
39. Usery, E. Lynn., Stuart Pocknee, and Broughton Boybell. 1995. Precision Farming Data Management Using Geographic Information Systems. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, Vol. 61(11), pp1383-1391.
40. Varsa, E. C., S. K. Chong, J. O. Abolaji, D. A. Farquhar and F. J. Olsen. 1997. Effect of Deep Tillage on Soil Physical Characteristics and Corn (*Zea mays* L.) Root Growth and Production. Soil and Tillage Research 43:219-228.
41. Voorhees, W. B., D. A. Farrell and W. E. Larson. 1975. Proceedings - Soil Science Society of America Vol. 39, p. 948.
42. Whiteley, G. M. and A. R. Dexter. 1981. The Dependence of Soil Penetrometer Pressure on Penetrometer Size. Journal of Agricultural Engineering Research 26: 467-476.

부록

Table A1-1. Soil physical properties which affect soil-tillage tool performance

Region		Moisture Content (%)	Bulk Density (wet) (kg/m ³)	Cohesion (kPa)	Internal frictional angle (deg.)	Soil-metal frictional coeff.	Soil-metal adhesion (kPa)	Composition			Texture
								Sand (%)	Silt (%)	Clay (%)	
Gangwha-1	1-1	26.5	1574.3	6.10	52.853	0.453	2.544	5.2	73.3	21.5	SiL
	1-2	29.4	1567.3	12.40	45.847	0.313	4.233				
	1-3	33.2	1676.4	11.70	40.365	0.290	3.811				
	1-4	31.9	1578.5	6.20	48.991	0.330	3.344				
	1-5	37.3	1622.8	9.00	46.668	0.397	3.289				
Gangwha-2	2-1	36.3	1605.6	7.25	54.462	0.485	4.467	3.8	74.5	21.9	SiL
	2-2	38.1	1587.5	5.20	48.240	0.560	0.967				
	2-3	32.4	1598.6	6.30	56.485	0.407	5.533				
	2-4	29.4	1604.7	9.15	41.348	0.562	2.822				
	2-5	27.4	1611.4	6.90	53.061	0.503	1.267				
Gangwha-3	3-1	29.6	1624.5	8.167	59.534	0.503	1.878	4.1	79.4	16.5	SiL
	3-2	32.4	1595.4	7.583	55.408	0.590	-0.470				
	3-3	33.9	1586.6	9.700	51.116	0.467	2.722				
	3-4	41.3	1623.4	8.417	63.997	0.555	0.622				
	3-5	40.2	1588.3	7.600	55.774	0.400	2.500				
Gangwha-4	4-1	29.6	1597.3	6.667	67.380	0.582	0.311	6.5	77.4	16.1	SiL
	4-2	38.3	1634.1	5.750	66.038	0.525	3.056				
	4-3	32.1	1622.8	6.333	66.501	0.558	-0.170				
	4-4	36.9	1587.3	5.083	66.038	0.448	1.367				
	4-5	29.7	1590.3	6.833	65.556	0.523	2.033				
Gangwha-5	5-1	40.4	1600.4	6.950	57.002	0.455	1.900	11.4	68.4	20.2	SiL
	5-2	33.6	1572.1	10.300	43.831	0.403	3.933				
	5-3	37.8	1554.8	7.167	52.431	0.425	3.333				
	5-4	31.8	1576.4	7.250	63.997	0.490	2.033				
	5-5	26.9	1569.3	12.500	43.531	0.448	3.033				
Kimpo-1	1-1	35.4	1677.1	13.650	50.889	0.470	2.544	15.2	57.6	27.2	SiCL
	1-2	32.4	1633.4	13.800	45.285	0.502	2.356				
	1-3	32.9	1603.3	10.900	49.720	0.468	3.411				
	1-4	33/4	1598.4	7.900	49.720	0.492	2.889				
	1-5	29.5	1578.2	12.150	49.720	0.478	2.378				
Kimpo-2	2-1	26.6	1606.7	10.330	50.194	0.492	3.000	7.3	75.6	17.1	SiL
	2-2	31.3	1644.3	13.150	39.693	0.497	1.844				
	2-3	32.9	1588.4	11.300	42.302	0.490	2.033				
	2-4	35.9	1677.9	11.900	41.669	0.423	2.367				
	2-5	30.2	1598.4	11.000	63.435	0.552	2.300				
Kimpo-3	3-1	30.4	1567.3	8.650	49.720	0.477	2.411	23.5	68.1	8.4	SiL
	3-2	33.6	1622.8	6.400	53.061	0.535	2.356				
	3-3	29.7	1674.3	5.450	54.268	0.565	0.644				
	3-4	32.1	1559.3	12.550	47.984	0.527	2.967				
	3-5	32.9	1589.4	8.050	56.485	0.545	1.544				
Kimpo-4	4-1	42.4	1602.3	9.050	52.643	0.480	2.011	22.6	69.5	7.9	SiL
	4-2	39.4	1567.3	9.200	52.217	0.472	2.289				
	4-3	32.4	1588.3	5.750	52.431	0.538	1.622				
	4-4	33.8	1578.3	5.450	55.222	0.582	1.533				
	4-5	31.2	1590.3	9.200	48.743	0.510	2.133				

Table A1-2. Soil physical properties which affect soil-tillage tool performance

Region		Moisture Content (%)	Bulk Density (wet) (kg/m ³)	Cohesion (kPa)	Internal frictional angle (deg.)	Soil-metal frictional coeff.	Soil-metal adhesion (kPa)	Composition			Texture
								Sand (%)	Silt (%)	Clay (%)	
Pyongtaek-1	1-1	31.4	1678.3	11.667	56.310	0.525	1.911	53.4	31.6	15.0	SL
	1-2	32.2	1665.8	10.583	60.255	0.554	2.268				
	1-3	34.3	11678.4	9.917	57.171	0.529	1.929				
	1-4	28.9	1598.2	9.917	58.782	0.539	2.625				
Pyongtaek-2	2-1	38.9	1690.3	10.667	56.310	0.571	2.000	56.2	32.1	11.7	SL
	2-2	36.8	1605.4	10.167	56.310	0.550	2.393				
	2-3	33.5	1613.4	11.750	60.255	0.575	2.446				
	2-4	32.8	1634.7	9.917	57.171	0.518	2.304				
Pyongtaek-3	3-1	39.7	1593.6	11.833	57.995	0.504	2.089	17.5	71.5	11.0	SiL
	3-2	37.9	1603.9	12.583	58.782	0.489	2.161				
	3-3	35.4	1622.6	12.750	58.782	0.454	2.411				
	3-4	30.3	1645.8	11.083	57.782	0.507	2.179				
Pyongtaek-4	4-1	38.9	1635.5	11.917	58.782	0.557	1.929	6.7	78.6	14.7	SiL
	4-2	39.5	1596.8	11.250	61.607	0.539	2.268				
	4-3	40.2	1588.5	10.167	62.241	0.554	2.268				
	4-4	35.7	1590.3	11.250	61.607	0.529	2.714				
Hwasung-1	1-1	25.7	1703.3	12.800	50.428	0.504	1.518	13.3	69.3	17.4	SiL
	1-2	25.8	1698.4	16.800	40.696	0.475	2.518				
	1-3	28.4	1704.9	15.200	47.466	0.554	2.768				
	1-4	29.3	1688.3	15.300	45.285	0.482	1.911				
Hwasung-2	2-1	30.5	1766.3	13.600	38.309	0.443	2.393	9.3	76.5	14.2	SiL
	2-2	33.8	1734.0	15.000	37.235	0.486	2.500				
	2-3	34.3	1723.5	14.100	36.129	0.457	2.929				
	2-4	32.7	1699.4	11.700	38.309	0.411	2.982				
Hwasung-3	3-1	24.8	1576.5	14.500	52.431	0.846	2.804	8.3	70.2	21.5	SiL
	3-2	23.9	1568.3	10.800	52.643	0.779	1.607				
	3-3	26.2	1577.3	11.580	53.471	0.850	1.036				
	3-4	22.7	1566.4	12.900	48.493	0.718	2.446				
Hwasung-4	4-1	32.7	1585.4	14.150	41.348	0.486	3.143	3.6	74.6	21.8	SiL
	4-2	34.5	1600.3	15.100	29.249	0.464	3.464				
	4-3	31.6	1645.7	13.750	45.000	0.461	3.589				
	4-4	30.8	1598.2	12.950	49.958	0.529	2.786				
Kimhae-1	1-1	34.5	1578.9	4.583	60.255	0.51+	0.917	9.7	72.8	17.5	SiL
	1-2	33.8	1567.2	6.700	54.268	0.676	0.417				
	1-3	29.4	1554.5	8.883	59.534	0.604	1.750				
	1-4	26.8	1578.9	7.250	65.056	0.646	1.375				
	1-5	32.9	1598.1	4.667	62.241	0.612	1.167				
Kimhae-2	2-1	31.9	1523.5	3.750	53.471	0.504	2.125	5.8	63.4	30.8	SiCL
	2-2	35.5	1535.8	7.700	52.217	0.538	1.958				
	2-3	29.5	1578.9	7.350	57.505	0.531	2.333				
	2-4	34.6	1532.8	7.450	46.123	0.483	1.667				
	2-5	31.9	1534.9	6.600	55.774	0.482	2.375				
Kimhae-3	3-1	37.8	1512.4	6.250	66.038	0.486	3.375	12.3	58.4	29.3	SiCL
	3-2	34.5	1523.3	10.300	56.485	0.532	3.375				
	3-3	28.4	1500.7	4.833	67.380	0.442	4.083				
	3-4	28.1	1512.2	13.080	36.870	0.458	4.042				
	3-5	34.7	1556.3	8.083	57.171	0.543	3.375				
Kimhae-4	4-1	22.9	1534.4	8.750	60.255	0.571	2.500	7.1	69.8	23.1	SiL
	4-2	21.7	1548.4	7.667	60.945	0.646	3.250				
	4-3	29.4	1556.4	16.750	48.991	0.518	3.500				
	4-4	31.8	1502.4	7.667	63.435	0.569	2.917				
	4-5	26.8	1509.5	8.417	61.607	0.560	3.083				

Table A1-3. Soil physical properties which affect soil-tillage tool performance

Region		Moisture Content (%)	Bulk Density (wet) (kg/m ³)	Cohesion (kPa)	Internal frictional angle (deg.)	Soil-metal frictional coeff.	Soil-metal adhesion (kPa)	Composition			Texture
								Sand (%)	Silt (%)	Clay (%)	
Milyang-1	1-1	36.2	1445.2	2.083	60.255	0.340	2.367	7.1	67.9	25.0	SiL
	1-2	38.9	1455.5	3.250	67.797	0.558	-1.060				
	1-3	46.6	1508.9	2.700	50.659	0.533	1.778				
	1-4	29.9	1423.6	5.583	55.408	0.545	0.767				
	1-5	40.1	1398.5	1.083	60.255	0.597	0.789				
Milyang-2	2-1	23.8	1389.3	6.350	54.846	0.646	1.500	9.4	70.3	20.3	SiL
	2-2	29.6	1345.1	7.250	56.310	0.618	2.625				
	2-3	30.3	1459.0	11.350	20.660	0.565	1.167				
	2-4	28.3	1329.9	5.583	57.171	0.490	1.292				
	2-5	32.4	1348.1	7.917	60.255	0.694	1.917				
Milyang-3	3-1	33.3	1456.2	11.830	56.310	0.523	2.417	14.8	57.4	27.8	SiCL
	3-2	41.8	1498.2	6.667	63.435	0.501	2.292				
	3-3	43.9	1398.4	6.600	49.235	0.579	1.000				
	3-4	28.7	1500.3	11.650	48.493	0.511	2.750				
	3-5	33.6	1545.6	6.100	41.987	0.512	2.542				
Milyang-4	4-1	21.9	1569.2	3.700	56.133	0.518	13.000	13.6	67.9	18.5	SiL
	4-2	29.3	1544.8	10.670	47.726	0.475	2.625				
	4-3	33.2	1528.3	10.170	56.310	0.607	2.750				
	4-4	37.8	1604.9	8.833	54.462	0.515	3.792				
	4-5	50.4	1612.7	6.450	54.268	0.476	3.292				
Milyang-5	5-1	40.3	1432.3	10.550	52.643	0.513	2.458	7.8	58.9	33.3	SiCL
	5-2	33.4	1376.3	8.150	57.670	0.639	2.625				
	5-3	32.3	1412.6	10.750	53.471	0.570	2.333				
	5-4	30.9	1445.2	10.300	52.643	0.426	3.167				
	5-5	29.4	1398.1	10.080	53.471	0.536	2.250				
Sangju-1	1-1	24.4	1567.2	11.917	63.997	0.408	2.292	27.1	55.7	17.1	SiL
	1-2	28.2	1543.5	12.917	48.991	0.536	3.250				
	1-3	21.3	1571.2	12.667	60.945	0.583	2.042				
	1-4	30.4	1512.9	-	-	0.514	3.750				
	1-5	33.5	1523.3	-	-	0.463	3.208				
Sangju-2	2-1	39.6	1544.3	15.080	580782	0.593	2.375	21.9	59.8	18.3	SiL
	2-2	40.9	1533.5	17.000	45.000	0.576	3.792				
	2-3	38.4	1562.1	12.950	48.743	0.505	3.042				
	2-4	34.4	1529.4	-	-	0.510	2.458				
	2-5	42.4	1534.7	10.500	59.534	0.539	3.125				
Sangju-3	3-1	30.6	1566.4	10.580	58.782	0.404	3.250	19.3	60.2	20.5	SiL
	3-2	34.3	1498.3	12.250	61.607	0.446	3.875				
	3-3	29.7	1590.3	-	-	0.549	2.333				
	3-4	36.8	1600.3	-	-	0.469	4.042				
	3-5	38.3	1645.2	-	-	0.460	3.833				
Sangju-4	4-1	20.5	1587.3	5.833	65.556	0.552	3.708	41.4	42.5	16.1	L
	4-2	22.4	1544.3	9.083	63.997	0.502	4.083				
	4-3	19.4	1539.3	7.500	64.537	0.404	4.500				
	4-4	22.8	1495.3	7.667	57.995	0.467	2.708				
	4-5	24.4	1506.1	8.917	61.607	0.561	3.000				
Iksan-1	1-1	39.8	1639.3	12.450	48.743	0.543	2.381	13.3	65.9	20.8	SiL
	1-2	38.7	1623.3	11.050	49.236	0.491	2.690				
	1-3	42.3	1611.9	11.600	50.659	0.491	2.524				
Iksan-2	2-1	41.9	1599.3	11.800	35.754	0.363	2.381	10.7	70.3	19.0	SiL
	2-2	50.5	1566.3	12.800	26.565	0.309	2.643				
	2-3	45.5	1586.3	13.500	26.565	0.323	2.881				
Iksan-3	3-1	47.3	1470.2	12.300	45.285	0.436	3.012	9.8	71.5	18.7	SiL
	3-2	46.1	1488.6	14.050	40.696	0.351	2.524				
	3-3	51.4	1561.2	13.900	34.216	0.486	2.262				

Table A2-1. Soil hardness measured as cone-index

Region		Depth (cm)	CI (kg/cm ²)	Region		Depth (cm)	CI (kg/cm ²)			
Ganghwa-1	1-1	0	3.0	Ganghwa-2	2-5	0	4.8			
		5	3.9			5	8.4			
		10	10.9			10	20.8			
		15	15.5			15	≥ 24			
		20	14.9			20				
		25	14.5			25				
	1-2	0	3.4	Ganghwa-3	3-1	0	9.0			
		5	4.0			5	8.6			
		10	10.5			10	8.4			
		15	15.7		15	≥ 24				
		20	15.5		3-2	0	6.8			
		25	14.1			5	6.5			
	30	20.7	10	8.8						
	1-3	0	2.5	Ganghwa-3	3-3	15	≥ 24			
		5	3.2			0	8.6			
		10	3.0			5	11.0			
		15	6.3		10	12.0				
		20	8.5		3-4	15	≥ 24			
		25	8.0			0	7.2			
	30	8.7	5	8.0						
	1-4	0	2.5	Ganghwa-3	3-5	10	11.5			
		5	3.5			15	≥ 24			
		10	4.5			0	5.5			
		15	10.3		5	7.2				
		20	12.5		10	7.4				
		25	10.3		15	≥ 24				
	1-5	30	9.9	Ganghwa-4	4-1	0	6.4			
		0	2.7			5	7.2			
		5	5.5			10	9.6			
		10	6.7		15	≥ 24				
15		9.5	4-2		0	8.8				
20		13.9			5	7.8				
25	22.5	10		8.6						
Ganghwa-2	2-1	25	≥ 24	Ganghwa-4	4-3	15	19.5			
		0	6.6			20	≥ 24			
		5	5.8			0	10.8			
		10	19.5			5	10.5			
		15	≥ 24			10	9.8			
		20				15	15.8			
	25		20	≥ 24						
	2-2	0	2.6	Ganghwa-4	4-4	0	4.8			
		5	3.4			5	6.6			
		10	11.0			10	14.2			
		15	13.6			15	15.8			
		20	17.0			20	≥ 24			
		25	≥ 24			4-5	0	6.6		
	0	2.8	5	8.0						
	5	2.8	10	12.6						
	2-3	10	14.5	Ganghwa-4	4-5	15	≥ 24			
		15	12.5			20				
		20	13.4			0	4.0			
		25	17.4			5	4.2			
		2-4	0			2.8	Ganghwa-5	5-1	10	3.8
			5			3.4			15	8.8
	10		9.0	20	≥ 24					
	15		13.6	25						
	20		≥ 24							
	25									

Table A2-2. Soil hardness measured as cone-index

Region		Depth (cm)	CI (kg/cm ²)	Region		Depth (cm)	CI (kg/cm ²)
Ganghwa-5	5-2	0	2.5	Kimpo-2	2-1	0	4.3
		5	3.4			5	6.2
		10	3.6			10	6.3
		15	4.4			15	17.7
		20	15.2			20	3.2†
	25	3.2†	25				
	30		30				
	5-3	0	2.2		2-2	0	2.0
		5	3.0			5	2.5
		10	5.8			10	3.5
		15	6.8			15	11.0
		20	15.8			20	16.0
	25	16	25		14.1		
	5-4	0	5.8		2-3	30	15.0
		5	6.4			0	2.7
		10	7.6			5	3.5
		15	8.0			10	3.3
		20	3.2†			15	9.9
	25		20		23.1		
	5-5	0	2.6		25	20.0	
5		3.8	30	16.3			
10		5.8	0	2.9			
15		9.8	5	3.1			
20		3.2†	10	4.8			
25		15	23.7				
Kimpo-1	1-1	0	5.9	2-4	20	24.3	
		5	7.2		25	3.2†	
		10	6.2		30		
		15	20.5		0	6.5	
		20	3.2†		5	4.9	
	25		10	6.5			
	30		15	23.9			
	1-2	0	6.0	2-5	20	3.2†	
		5	9.6		25		
		10	10.6		30		
		15	3.2†		0	3.6	
		20			5	4.8	
	25		10	6.0			
	30		15	8.2			
	1-3	0	7.4	3-1	20	3.2†	
		5	8.0		25		
		10	7.2		30		
		15	21.1		0	4.8	
		20	24.0		5	5.2	
	25	23.2	10	4.0			
30	3.2†	15	18.6				
1-4	0	7.4	3-2	20	3.2†		
	5	8.6		25			
	10	9.5		30			
	15	3.2†		0	5.2		
	20			5	6.2		
25		10	5.6				
30		15	13.0				
1-5	0	7.2	3-3	20	22.0		
	5	7.4		25	3.2†		
	10	10.0		30			
	15	3.2†					
	20						
25							
30							

Table A2-3. Soil hardness measured as cone-index

Region		Depth (cm)	CI (kg/cm ²)	Region		Depth (cm)	CI (kg/cm ²)					
Kimpo-3	3-4	0	3.2	Hwasung-1	1-2	0	0.4 (1.2)					
		5	6.0			5	2.933 (8.8)					
		10	5.5			10	4.267 (12.8)					
		15	5.4			15	4.4 (13.2)					
		20	ㄹ ㄹ			20	3.6 (10.8)					
		25				25	2.733 (8.2)					
	3-5	0	4.4		1-3	0	2.667 (8.0)					
		5	4.3			5	4.6 (13.8)					
		10	5.0			10	4.0 (12.0)					
		15	19.8			15	4.867 (14.6)					
		20	21.0			20	3.067 (9.2)					
		25	20.5			25	2.6 (7.8)					
	Kimpo-4	4-1	0		5.5	Hwasung-2	1-4	0	1.0 (3.0)			
			5		6.5			5	2.0 (6.0)			
10			12.3	10	4.2 (12.6)							
15			16.0	15	ㄹ ㄹ							
20			25.0	20	-							
25			ㄹ ㄹ	25	-							
4-2		0	5.5	2-1	0		0.267 (0.8)					
		5	7.7		5		0.733 (2.2)					
		10	11.7		10		3.467 (10.4)					
		15	16.3		15		2.067 (6.2)					
		20	20.0		20		2.2 (6.6)					
		25	22.3		25		3.0 (9)					
Kimpo-4		4-3	0	21.9	Hwasung-2		2-2	0	0.267 (0.8)			
			5	6.5				5	0.333 (1.0)			
	10		6.7	10		0.8 (2.4)						
	15		18.5	15		2.0 (6.0)						
	20		20.3	20		1.733 (5.2)						
	25		20.3	25		2.0 (6.0)						
	4-4	0	8.5	Hwasung-2		2-3	0	0.133 (0.4)				
		5	8.3				5	0.5 (1.5)				
		10	7.5				10	1.0 (3.0)				
		15	16.7				15	3.667 (11.0)				
		20	18.9				20	2.267 (6.8)				
		25	21.5				25	2.733 (8.2)				
	4-5	0	8.0			Hwasung-2	2-4	0	0.0			
		5	8.0					5	0.4 (1.2)			
10		7.5	10		2.467 (7.4)							
15		19.1	15		3.4 (10.2)							
20		24.5	20		2.167 (6.5)							
25		23.4	25		1.833 (5.5)							
Hwasung-1	1-1	0	1.067 (3.2)		Hwasung-3		3-1	0	0.867 (2.6)			
		5	4.167 (12.5)					5	2.0 (6.0)			
		10	2.733 (8.2)	10				6.467 (16.4)				
		15	2.267 (6.8)	15				ㄹ ㄹ				
		20	-	0				0.933 (2.8)				
		25	-	5				1.5 (4.5)				
	Hwasung-1	1-1	0	1.067 (3.2)			Hwasung-3	3-2	10	5.4 (16.2)		
			5	4.167 (12.5)					15	ㄹ ㄹ		
			10	2.733 (8.2)		0			1.267 (3.8)			
			15	2.267 (6.8)		5			2.2 (6.6)			
			Hwasung-1	1-1		20		-	Hwasung-3	3-3	10	5.6 (16.8)
						25		-			15	ㄹ ㄹ
						0		2.267 (6.8)			0	2.267 (6.8)
						5		2.5 (7.5)			5	6.5 (19.5)
Hwasung-1	1-1	10	6.5 (19.5)	Hwasung-3	3-4	10	6.5 (19.5)					
		15	2.267 (6.8)			15	ㄹ ㄹ					
		20	-									
		25	-									

Table A2-4. Soil hardness measured as cone-index

Region		Depth (cm)	CI (kg/cm ²)	Region		Depth (cm)	CI (kg/cm ²)
Hwasung-4	4-1	0	0.2(0.6)	Kimhae-2	2-1	0	7.7
		5	0.667(2.0)			5	13.7
		10	1.433(4.3)			10	14.5
		15	3.333(10.0)			15	7.5
		20	3.467(10.4)			20	-
		25	2.4(7.2)			0	11.3
	4-2	30	1.867(5.6)		2-2	5	14.3
		0	0.6(1.8)			10	12.9
		5	0.6(1.8)			15	9.5
		10	3.267(9.8)			20	-
		15	2.667(8.0)			0	8.3
		20	2.6(7.8)			5	10.7
	4-3	25	2.4(7.2)		2-3	10	11.1
		30	-			15	10.3
		0	0.133(0.4)			20	-
		5	0.367(1.1)			0	13.5
		10	1.2(3.6)			5	10.1
		15	3.333(10.0)			10	15.4
	4-4	20	3.533(10.6)		2-4	15	15.5
		25	2.667(8.0)			20	16.0
30		-	0	8.9			
0		0.467(1.4)	5	9.0			
5		0.467(1.4)	10	21.1			
10		0.8(2.4)	15	9.7			
Kimhae-1	1-1	15	22.5	2-5	20	9.7	
		20	14.5		0	5.0	
		25	-		5	6.4	
		0	7.1		10	10.1	
		5	11.3		15	8.6	
		10	14.9		20	8.2	
	1-2	15	21.7	3-1	25	7.1	
		20	17.1		30	-	
		25	13.7		0	4.0	
		0	7.1		5	5.4	
		5	11.3		10	7.5	
		10	14.9		15	8.2	
	1-3	15	19.1	3-2	20	5.6	
		20	16.9		25	4.5	
		25	10.0		30	5.0	
		0	6.5		0	7.4	
		5	9.7		5	7.8	
		10	19.5		10	10.6	
	1-4	15	23.7	3-3	15	9.4	
		20	20.4		20	7.6	
25		-	25		5.5		
0		4.7	30		-		
5		8.5	0		6.5		
10		21.1	5		8.5		
1-5	15	19.7	3-4	10	9.0		
	20	18.9		15	8.5		
	25	-		20	7.1		
	0	3.5		25	4.5		
	5	6.0		30	-		
	10	19.7		0	6.5		
Kimhae-3	3-5	15	18.9	5	4.6		
		20	18.9	10	10.7		
		25	-	15	7.2		
		0	8.1	20	5.3		
		5	14.7	25	5.5		
		10	24.1	30	6.5		

Table A2-5. Soil hardness measured as cone-index

Region		Depth (cm)	CI (kg/cm ²)	Region		Depth (cm)	CI (kg/cm ²)	
Kimhae-4	4-1	0	10.9	Milyang-2	2-1	0	5.4	
		5	10.4			5	8.2	
		10	12.4			10	16.6	
		15	7.6			15	ㄹ ㄹ	
		20	4.4			0	8.6	
	25	-	5		10.6			
	4-2	0	12.6		2-2	10	18.0	
		5	15.6			15	ㄹ ㄹ	
		10	16.8			2-3	0	4.8
		15	14.4				5	8.0
		20	10.5				10	20.6
	25	-	15		ㄹ ㄹ			
	0	7.8	2-4		0		8.4	
	5	9.6			5	9.0		
	10	11.5			10	19.4		
	15	15.6		15	ㄹ ㄹ			
	20	11.0		0	11.6			
	4-3	25	8.8	2-5	5	15.0		
		0	6.6		10	ㄹ ㄹ		
		5	10.0		15	ㄹ ㄹ		
10		14.4	3-1		0	4.4		
15		13.8			5	6.6		
20	10.6	10		15.5				
25	5.5	15		23.8				
0	11.4	20		ㄹ ㄹ				
4-4	5	12.0	3-2	25	-			
	10	14.6		30	-			
	15	10.5		3-3	0	7.8		
	20	5.5			5	8.6		
	25	-			10	11.0		
0	8.9	15	11.4					
5	13.9	20	21.1					
Milyang-1	1-1	10	24.1	25	19.0			
		15	ㄹ ㄹ	30	ㄹ ㄹ			
		20	-	3-4	0	5.5		
		25	-		5	8.2		
		0	8.5		10	11.0		
	5	18.3	15		ㄹ ㄹ			
	10	24.5	20		-			
	1-2	15	ㄹ ㄹ	25	-			
		20	-	30	-			
		25	-	3-5	0	8.0		
		0	8.0		5	11.0		
		5	12.5		10	17.0		
	10	14.0	15		ㄹ ㄹ			
	15	23.0	20		-			
	1-3	20	24.3	25	-			
		25	23.5	30	-			
		0	7.3	0	6.8			
		5	8.4	5	8.4			
		10	9.7	10	10.5			
	1-4	15	21.5	15	ㄹ ㄹ			
20		22.5	20	-				
25		19.1	25	-				
0		10.7	30	-				
5		12.7						
1-5	10	23.7						
	15	ㄹ ㄹ						
	20	-						
	25	-						

Table A2-6. Soil hardness measured as cone-index

Region		Depth (cm)	CI (kg/cm ²)	Region		Depth (cm)	CI (kg/cm ²)		
Milynag-4	4-1	0	21.5	Milynag-4	5-4	0	3.5		
		5	20.0			5	15.7		
		10	17.1			10	14.9		
		15	19.3			15	12.9		
		20	3.24			20	23.5		
		25	-			25	3.24		
	30	-	30		-				
	4-2	5-5	0		18.0	0	8.1		
			5		16.1	5	9.7		
			10		17.7	10	20.1		
			15		18.5	15	19.1		
			20		19.1	20	20.2		
25			19.5	25	20.6				
30	23.0	30	3.24						
Milynag-4	4-3	0	11.5	Sangju-1	1-1	0	5.0		
		5	10.3			5	6.0		
		10	13.5			10	19.6		
		15	16.9			15	21.8		
		20	24.0			20	22.6		
		25	20.0			25	3.24		
		30	-			30	-		
	4-4	1-2	0		11.5	0	11.6		
			5		12.3	5	9.5		
			10		15.6	10	21.0		
			15		21.3	15	3.24		
			20		16.1	20	-		
			25		21.5	25	-		
			30		-	30	-		
	4-5	1-3	0		21.3	0	7.8		
			5		17.5	5	4.6		
			10		24.3	10	13.2		
			15		3.24	15	20.6		
			20		-	20	22.4		
			25		-	25	20.2		
			30		-	30	20.2		
	Milyang-5	5-1	0		3.5	Milyang-5	1-4	0	4.6
			5		5.0			5	4.4
			10		4.8			10	9.5
15			9.1	15	17.0				
20			18.7	20	21.8				
25			3.24	25	22.2				
30		-	30	20.8					
5-2		1-5	0	8.0	0		7.4		
			5	10.5	5		5.8		
			10	13.9	10		15.6		
			15	13.9	15		24.2		
			20	22.0	20		3.24		
			25	3.24	25		-		
30		-	30	-					
5-3			0	5.3					
			5	14.9					
			10	16.6					
			15	18.3					
	20		3.24						
	25		-						
30	-								

Table A2-7. Soil hardness measured as cone-index

Region		Depth (cm)	CI (kg/cm ²)	Region		Depth (cm)	CI (kg/cm ²)
Snagju-2	2-1	0	8.1	Sangju-4	3-4	0	5.2
		5	7.1			5	4.4
		10	6.5			10	14.0
		15	18.5			15	18.5
		20	22.5			20	18.8
		25	23.5			25	23.6
	30	≥ 24	30		≥ 24		
	2-2	0	4.3		3-5	0	5.5
		5	7.0			5	6.8
		10	7.0			10	7.6
		15	11.5			15	19.0
		20	19.5			20	≥ 24
		25	21.5			25	-
	30	24.5	30		-		
	2-3	0	6.0		4-1	0	6.0
		5	10.0			5	9.0
		10	10.2			10	14.6
		15	16.5			15	≥ 24
20		19.2	20	-			
25		22.4	25	-			
30	24.0						
Snagju-2	2-4	0	7.5	Sangju-4	4-2	0	17.5
		5	8.0			5	13.6
		10	8.0			10	24.2
		15	14.7			15	≥ 24
		20	≥ 24			20	-
		25	-			25	-
	30	-					
	2-5	0	8.3		4-3	0	10.8
		5	4.1			5	11.6
		10	10.5			10	≥ 24
		15	10.5			15	-
		20	21.1			20	-
25		≥ 24	25	-			
30	-						
Sangju-3	3-1	0	10.4	4-4	0	10.6	
		5	10.4		5	12.6	
		10	11.2		10	13.6	
		15	20.8		15	≥ 24	
		20	21.6		20	-	
		25	≥ 24		25	-	
	30	-					
	3-2	0	7.2	4-5	0	13.5	
		5	4.8		5	16.0	
		10	6.1		10	16.5	
		15	13.0		15	≥ 24	
		20	18.4		20	-	
		25	17.8		25	-	
	30	20.0					
	3-3	0	9.5				
		5	7.8				
		10	7.8				
		15	13.5				
20		16.5					
25		≥ 24					
30	-						

Table A2-8. Soil hardness measured as cone-index

Region		Depth (cm)	CI (kg/cm ²)	Region		Depth (cm)	CI (kg/cm ²)	
Iksan-1	1-1	0	3.0	Iksan-2	2-2	0	0.2	
		5	5.4			5	1.0	
		10	7.1			10	7.0	
		15	15.8			15	10.0	
		20	13.0			20	12.2	
		25	11.8			25	8.5	
	30	11.5	30		5.8			
	1-2	0	0.8		2-3	0	0.2	
		5	3.1			5	1.2	
		10	4.4			10	5.0	
		15	12.2			15	12.2	
		20	10.5			20	14.2	
		25	9.8			25	11.2	
	30	-	30		10.0			
	1-3	0	2.8		Iksan-3	3-1	0	1.5
		5	4.5				5	3.2
		10	8.2				10	2.8
		15	15.8				15	14.8
20		15.2	20	14.8				
25		14.8	25	9.8				
30	-	0	1.8					
Iksan-2	2-1	0	1.0	3-2		5	5.2	
		5	1.4			10	12.0	
		10	7.6			15	14.2	
		15	15.0			20	10.2	
		20	17.5			25	11.4	
		25	12.8			0	0.8	
30	14.0	5	2.2					
				3-3		10	4.5	
						15	13.0	
						20	12.2	
						25	9.6	

Table A3-1. Hardpan characteristics of selected fields

Region \ Item	Composition(%)			Texture	Hardpan starting point (cm)	Hardpan ending point (cm)	Hardpan width (cm)	Average cone index of hardpan (MPa)	Cohesion (kPa)	Internal friction angle (deg)
	Sand	Silt	Clay							
seocheon-seocheon	46.8	35	18.2	CL	16	34	19	1.75	19.17	32.14
booyeo-joongjung 1	29.9	52.9	17.2	SiCL	10	27	18	2.37	11.67	34.65
booyeo-joongjung 2	29.2	53	17.8	SiCL	7	32	26	2.93	13.33	20.66
booyeo-koonsoo	29.8	51.2	19	SiCL	8	32	25	2.25	11.67	32.14
kimjae-chungaha	4.2	69.6	26.2	SiCL	24	41	18	2.71	5.00	26.69
kimjae-chungaha	13.1	64.5	22.4	SiCL	19	26	8	1.66	6.67	23.74
kimjae-jinbong	7.7	75.3	17	SiCL	20	28	9	1.16	13.33	26.69
kimjae-jinbong	16.3	68.7	15	SiCL	4	24	21	1.51	8.33	34.65
yeojoo-heungchun	48.2	40.6	11.2	SL	18	48	31	2.98	15.83	23.74
yeojoo-heungchun	44.3	42.7	13	SL	26	31	6	1.05	3.33	26.69
yeojoo-neungseo	56.2	34.6	9.2	SL	18	58	41	2.82	13.33	32.14
yeojoo-neungseo	44.7	40.7	14.6	SL	24	59	36	3.17	8.33	23.74
yeojoo-booknae	48	41	11	SL	17	53	37	2.29	22.50	20.66
yeojoo-booknae	51.1	38.5	10.4	SL	21	47	27	2.59	9.17	26.69
wonjoo-panboo kumdae	58.2	35.8	6	SL	12	21	10	1.58	10.00	37.02
wonjoo-sinrim seongnam	55	39	6	SL	18	30	13	2.56	10.00	37.02
pyoungtaek-seotan	26	54.2	19.8	SiCL	14	30	17	1.28	5.00	26.69
pyoungtaek-jinwe	18.1	58.1	23.8	SiCL	19	51	33	1.25	5.83	26.69
pyoungtaek-anjoong	13.6	56.8	29.6	CL	18	29	12	2.23	6.67	39.24

Table A3-2. Hardpan characteristics of selected fields

Item Region	Composition(%)			Texture	Hardpan starting point (cm)	Hardpan ending point (cm)	Hardpa n width (cm)	Average cone index of hardpan (MPa)	Cohesion (kPa)	Internal friction angle (deg)
	Sand	Silt	Clay							
pyoungtaek -anjoong	7.3	61.1	31.6	CL	24	30	7	1.16	8.33	37.02
pajoo -joonae	36.7	44.3	19	CL	18	32	15	1.32	3.33	23.74
pajoo -jori	23.1	54.9	22	CL	27	58	32	1.17	5.00	20.66
pajoo -joonae	39.5	40.3	20.2	CL	20	54	35	1.26	0.83	23.74
pajoo -joonae	44.4	37.2	18.4	CL	38	54	17	1.07	5.00	17.44
pajoo -papyoung	6.2	64	29.8	C	16	31	16	1.82	-5.00	48.52
pajoo -juksung	15.4	50.8	33.8	C	23	56	34	1.68	2.50	43.30
chilgok -dongmyoung -namwon	43.9	36.9	19.2	CL	18	32	15	1.26	4.17	34.65
chilgok -dongmyoung -namwon1	50.3	29.5	20.2	SL	5	18	14	1.56	-1.67	45.15
chilgok -dongmyoung -namwon1	47.1	34.5	18.4	SL	9	16	8	1.48	0.00	45.15
chilgok -dongmyoung -namwon1	49	33	18	CL	3	31	29	2.22	3.33	39.24
daekoo- dansung hwawon	15.1	56.9	28	C	2	31	30	2.27	33.33	32.14
busan kangseo- karak dongmoon suamnam	10.9	63.5	25.6	SiCL	12	30	19	1.65	21.67	32.14
busan kangseo- karakdong doonchi	7.4	70.2	22.4	SiCL	7	28	22	1.63	15.00	29.49

주 의

1. 이 보고서는 농림부에서 시행한 농림기술개발사업의 연구보고서입니다.
2. 이 보고서 내용을 발표할 때에는 반드시 농림부에서 시행한 농림기술개발사업의 연구결과임을 밝혀야 합니다.
3. 국가과학기술 기밀유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 아니됩니다.