

경운작업에 의한 토양 역학적 특성의 변이 분석

박준걸 이규승 조성찬 노광모 정선옥 장영창

Analysis of Variations in Mechanical Properties of Soil by Tillage Operations

J. G. Park K. S. Lee S. C. Cho K. M. Noh S. O. Chung Y. C. Chang

Abstract

In the study, the cone index, the cohesion and the internal friction angle of soil were measured before and after tillage in order to suggest relative improvement in soil properties by comparing the two measured values before and after tillage. The tillage methods tested in the study were five combinations of plowing and rotovating; one plow tillage operation, one plow followed by one rotary, one plow followed by two rotary, one rotary without plow and two rotary without plow. The experiments were performed in a soil bin in Sunggyunkwan Univ. and in four selected test fields in Yeosu, Seodun-Dong, Suwon (especially, two different fields) and Chungju. In general, the internal friction angle and cohesion of soil increased with the increase of soil compaction. After applying the tillage operations, the internal friction angle reduced by 14 degree and the cohesion decreased up to about 2.2 N/cm² on the soil bin in comparison with those before tillage. The two values, however, reduced by 9 degree and up to about 1.0 N/cm² on the tested fields. The CIs for all the tillage operations on the soil bin and on 4 different test fields were decreased by 800 kPa in comparison with those before tillage. The best combination of tillage operations for decreasing the CIs of soil was one plow operation followed by one rotary. The CIs for one plow operation followed by two rotary were slightly higher than that for one plow operation followed by one rotary because one plow operation followed by two rotary crushed down the soil excessively, so that the porosity of soil decreased.

Keywords : Tillage operation, Soil compaction, Cone index, Cohesion, Internal friction angle

1. 서론

경운은 토양의 파쇄를 통하여 뿌리의 활착과 성장의 기본이 되는 묘상을 조성하며 작물 생육의 근간이 되는 토양 조건을 조절하는 것을 그 목적으로 한다. 따라서 경운작업은 토양에 보다 나은 통기성, 배수성, 흡습성 그리고 침투성을 제공한다 (Canarache, 1991).

거시적으로 고찰할 때 뿌리의 적합한 생육상태는 토양의 영양 상태와 더불어 물리적 다짐 정도와 밀접한 영향이 있다 는 연구 결과가 있었다. 그러나 어느 정도의 토양다짐이 적절

한가에 대한 기준도 설정된 바 없으며, 나아가 경운작업이 토양의 다짐에 어떠한 영향을 갖는지에 대한 연구도 미흡한 실정이다.

토양 원추관입기는 깊이에 다른 토양 강도를 양적으로 표시하는데 사용된다. 원추관입기로 측정하는 CI(cone index)는 관입기가 관통하는 토양의 단위 면적당 힘으로 정의된다. Whiteley와 Dexter(1981)는 경운 토양층에서 관입저항은 점토의 비율, 토양의 점착 및 저항특성, 토양의 수분함량과 비체적의 함수로 보았다. 또한 경운작업으로 인해 토양의 강도가 감소하는 것은 토양특성을 나타내는 다양한 측도로서 표

This study was conducted by the research fund supported by Agricultural R&D Promotion Center (ARPC). The article was submitted for publication in June 2007, reviewed and approved for publication by the editorial board of KSAM in August 2007. The authors are Jun Gul Park, Kwang Mo Noh, Young Chang Chang, Professor, KSAM members, Konkuk University, Kyou Seung Lee, Professor, KSAM member, Sungkyunkwan National University, Seung Chan Cho, Professor, KSAM member, Chungbuk National University, and Sun-Ok Chung, Full Time Instructor, KSAM member, Chungnam National University. Corresponding author: Y. C. Chang, Professor, Dept. of Biosystems Engineering, Konkuk University, Chungju, Chungbuk, 380-701, Korea; Tel: 82-43-840-3557; E-mail: <ycchang@kku.ac.kr>.

현되어질 수 있다고 하였다.

조인상 등(1985)은 미세토 하천의 논토양에서 벼 수확에 영향을 미치는 조건은 CI값을 기준으로 1 MPa라고 제안한 바 있다. Taylor와 Gardner(1963)는 목화 뿌리의 토양 관통성은 페니트로미터를 기준으로 할 때 실험 대조군 중 대략 2.06 MPa에서 30% 정도, 1.03 MPa에서 70%정도인 것으로 보고하였다. 나아가 Horn 등(1995)은 토양의 결보기 밀도와 관통저항이 증가하면 작물 뿌리의 성장과 생육이 제한되며, 경운을 통해서 작물뿌리가 영양소와 수분에 있는 장소에 보다 쉽게 접근할 수 있다고 하였다. Koolen과 Kuipers(1983)는 토양다짐은 중요한 토양 물리적 특성의 하나이며 그 크기에 따라 토양구조, 점착력, 부착력, 수분 함량 및 이동성, 유기물과 토양온도가 변화되어 작물생육에 큰 영향을 미친다고 보고하였다.

경운작업이 수행되어 결과적으로 발생하는 토양 다짐 혹은 강도의 변화는 환경 친화적 경운이라는 측면에서 분석되고 제시되어야한다. 토양강도는 수분함량, 결보기 밀도, 유공성 등에 연관되어있기 때문에 직접적인 토양 다짐의 상태를 평가하기 위해 토양강도를 측정하는 것이 바람직하다고 볼 수 있다.

대부분의 토양특성 측정은 토양 샘플링에 이은 까다로운 실험실 분석 작업을 요구한다. 따라서 본 연구에서는 다양한 경운작업이 토양의 다짐 정도에 미치는 영향을 다양하게 분석하기 위하여 토양의 여러 가지 역학적 특성이 복합적으로 내재되고 비교적 측정이 용이한 원추지수(cone index), 점착력(cohesion)과 내부마찰각(internal resistance angle)을 토양의 역학적 특성을 나타내는 일반적 지표로서 선정하였다. 토양경도 및 점착력, 내부마찰각은 수분 함량, 토양종류, 공극률, 입자 크기 등 다양한 토양의 상태에 따라 값이 결정되며 거시적 지표로서 여러 가지 요인의 영향을 포괄한다.

본 연구에서는 먼저 경운 전 토양경도, 점착력과 내부마찰각을 측정하고 경운작업 후 해당 특성의 상대적 변이를 분석하여 경운작업이 토양의 역학적 특성에 미치는 영향을 분석하고자 하였다. 나아가 본 연구는 다양한 경운 작업의 조합에 따른 상대적 토양 특성의 개선을 제시하는 지표로써 응용될 수 있다. 즉, 경운작업에 따른 토양의 물리성 변화로써 상기의 세 가지 특성에 대한 상대 변화는 경운작업에 따른 토양 물리성 개선의 지표로 이용될 수 있다.

2. 재료 및 방법

가. 인공토조 경운실험

경운에 의한 토양 파쇄가 토양의 특성에 미치는 영향을 분석하기 위하여 성균관대학교의 인공토조에서 실내 경운작업 실험

를 수행하였다. 경운 전 토양의 함수율은 13%(d.b.)로 일정하게 유지하였으며, 토양은 모래 54.4%, 진흙 8.9%로 조성되었다. 경운 전 토양 다짐 롤러를 각각 2회와 4회 통과시켜 토양 상태를 2수준으로 정리하였다. 또한, 경운작업 속력은 실제 저속작업과 유사하게 0.49 m/s, 로터리 작업은 0.147 m/s로 설정하였다.

토양의 CI는 soil compaction meter(SC900, Spectrum Technology, E Plainfield, USA)에 의해 측정되었다. 이 원추관입저항기는 최대 8 MPa까지 측정할 수 있고, 80 cm 깊이까지 CI의 측정이 가능하다.

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

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

where,

τ : Shear resistance of soil

C : Soil cohesion

$\tan \phi$: Internal friction coefficient

σ : Normal stress on shear-surface

ϕ : Internal friction angle of soil

토양의 점착력과 내부마찰각은 베인 테스터(Vane tester: SR-2, Daiki, Saitama, Japan)를 이용하여 구하였다. 그림 1의 예에서 보인 것처럼 베인 테스터를 이용하여 토양의 수직하중을 달리하며 전단강도를 측정 한 후, 두 변수 사이의 선형 회귀식을 구한다.

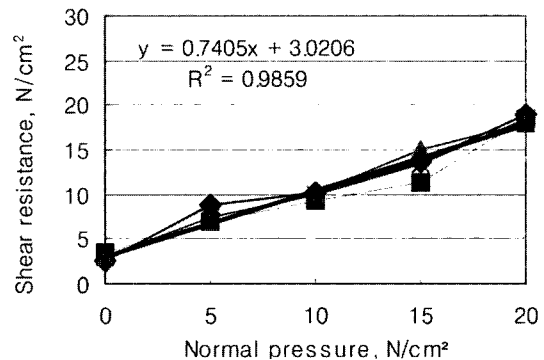


Fig. 1 An example of estimating the relationship between normal pressure and shear resistance.

예측된 선형 회귀식($y = mx + n$)의 기울기와 y 절편으로부터 토양의 점착력과 내부마찰각을 구할 수 있다. 이 때, 점착력 C 는 절편 n 에 해당되며, 내부마찰각 ϕ 는 기울기의 역함수, $\phi = \tan^{-1}(m)$ 로 구할 수 있다.

경운실험에 채택된 경운작업의 조합은 총 여섯 종류로서, 무경운(경운 전 토양상태), 쟁기+써래(쟁기 후 토양 고름을 포

함), 쟁기+로타리 1회, 쟁기+로타리 2회, 로타리 1회, 로타리 2회 설정하였다. 이러한 조합은 관행 경운작업 방법과 토양의 역학적 상태에 따라 수행할 수 있는 적용 가능한 경운조합을 고려하여 결정하였다. 경운작업에 의한 토양 물리성의 변이 측정은 무경운 상태의 토양경도(CI), 내부마찰각과 점착력을 기준으로 각 경운작업에 의한 해당 요인의 변이를 비교함으로써 수행하였다. 이때 각 경운 작업의 실험측정치는 최소 20 m 내에서 3반복 측정하였고 해당 작업에서의 변이와 각 작업 간의 변이를 평균으로 비교하였다.

나. 경작포장 경운실험

인공토조의 실내 경운실험과 더불어 여러 경작포장에서 경운에 의한 토양 파쇄가 토양의 특성에 미치는 영향을 분석하기 위해 실외 경운작업 실험을 수행하였다. 토양의 CI와 점착력, 내부마찰각의 측정은 실내의 방법과 동일하였으며 경운작업의 조합은 실내 실험과 같이 총 6종류로 수행되었다.

실외 실험에는 여주와 농촌진흥청 시험포장 2곳, 충주 건국대 시험포장 등 임의로 총 4곳으로 선정하였다. 작업 속력은 실내실험과 달리 정확히 제어할 수는 없으나 대략 0.5 m/s, 로타리 작업은 0.2 m/s로 하였다. 본 연구는 해당 상태의 역학적 특성에 관심을 두었기 때문에 포장의 토성은 측정하지 않았다. 포장에서 각 경운방법에 대해 3곳 지점에서 역학적 특성을 측정하고 평균적인 변이정도를 비교하였다. 각 실험 장소에서 6곳 이상에서 토양을 채취하고 실험실로 운반한 후, 본 실험의 3가지 주요 특성 이외의 함수율, 공극률 등을 분석하여 경운작업 실험 결과와 연관성을 찾고자 하였다.

그림 2와 그림 3은 각각 한 실험 포장의 경운실험 전과 후의 포장 상태를 보여주고 있다. 본 실험 전에 수행된 예비 실험을 통하여 실외포장 경운실험의 몇 가지 유의사항이 도출되었으며 요약하면 다음과 같다.

(가) 토양 역학적 특성을 구하기 위해 포장을 2 m×2 m로



Fig. 2 A view of an experiment field before tillage.

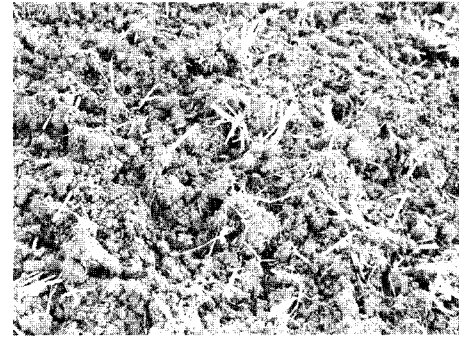


Fig. 3 A view of an experiment field after a tillage operation.

구획하고, 격자의 중심부를 샘플링 포인트로 하는 것이 좋다. 이것은 포장상태에 이끌리지 않고 측정지점을 고정함으로써 특성치의 임의 측정에 도움이 된다.

- (나) 베인 테스트를 이용하여 점착력과 내부마찰각을 구할 때(Fig. 1), 최소 5개 이상의 수직응력과 전단저항에 대한 자료를 획득함으로써 회귀식의 오차를 감소시킬 수 있다.
- (다) 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 변하는 오차가 발생하므로 실험 전 장비 사용에 대한 충분한 숙지가 필요하다.
- (라) 원추관입기나 베인 테스트에 지푸라기 등이 오물이 있는 경우 이를 제거하고 측정해야 측정오차를 줄일 수 있다.

3. 결과 및 고찰

가. 인공토조에서 토양 역학적 특성의 변화 분석

표 1과 2는 경운 전에 토양을 다짐롤러로 토양을 각각 2회와 4회를 다지고 각 경운작업을 수행한 후의 점착력과 내부마찰각을 측정된 값을 보여주고 있다. 이때 두 토양특성을 추정하는 회귀식의 결정계수(R^2)는 최소 0.957 이상으로 나타났다.

표 1과 2의 대비는 토양 다짐에 대한 점착력과 내부마찰각의 영향을 보여주고 있다. 경운 전과 여러 가지 경운작업을 수행한 결과를 참조하면 일반적으로 토양 다짐 정도가 클수록 동일 작업에 대해 점착력과 내부마찰각이 큰 것으로 판단되었다.

각 표의 2-3번 행의 결과는 경운 전 지표면과 지표면으로부터 깊이 10 cm에서의 점착력과 내부마찰각을 보여준다. 토양

Table 1. Cohesions and internal friction angles for various tillage operations with 2 compactions by a roller before tillage

Operation type	Cohesion (N/cm ²)	Internal friction angle (°)
Before tillage at surface	3.52	38.5
Before tillage at 10cm depth	1.04	31.6
Plow only	1.25	29.9
Plow + rotary 1	1.19	31.7
Plow + rotary 2	1.03	31.8
Rotary 1	1.05	40.5
Rotary 2	1.30	38.9

Table 2. Cohesions and internal friction angles for various tillage operations with 4 compactions by a roller before tillage

Operation type	Cohesion (N/cm ²)	Internal friction angle (°)
Before tillage at surface	3.23	48.3
Before tillage at 10cm depth	2.71	44.5
Plow only	1.74	40.1
Plow + rotary 1	1.51	36.5
Plow + rotary 2	1.83	35.3
Rotary 1	1.05	40.5
Rotary 2	1.69	33.9

상태가 교란이 되지 않도록 유지하면서 지표면에서 10 cm까지의 토양을 제거하고 점착력과 내부마찰각의 특성을 정확히 구명하기는 쉽지 않았다. 그러나 토양 다짐의 효과는 지표면에서 뚜렷하며, 토양 교란이 상대적으로 작은 지표면 아래에서 내부마찰각과 점착력은 다소 감소하는 것으로 생각되었다.

여러 가지의 경운작업을 수행한 경우 점착력은 최대 2.2 N/cm², 그리고 내부마찰각은 최대 14° 정도까지 작아졌으나 경운작업의 종류별로 점착력과 내부마찰각의 변이는 뚜렷하지 않은 것으로 나타났다.

또한 로타리 작업만으로 이루어진 각 표 7-8행의 결과를 비교해보면 로타리 작업을 많이 할수록 내부마찰각은 감소하지만 점착력은 증가하는 것으로 분석되었다. 이는 여러 번의 로타리 작업을 통해 토양의 파쇄가 더욱 미세해지고 따라서 토양의 달라붙는 성질인 점착력은 증가되나, 그 반면 부드러움 때문에 저항은 감소되는 역학적 특성에 기인하는 것으로 판단되었다.

그림 4와 그림 5는 표 1과 2와 마찬가지로 토양을 다짐 롤러로 2회와 4회 다진 후 여러 경운작업 조합에 대해 토양의

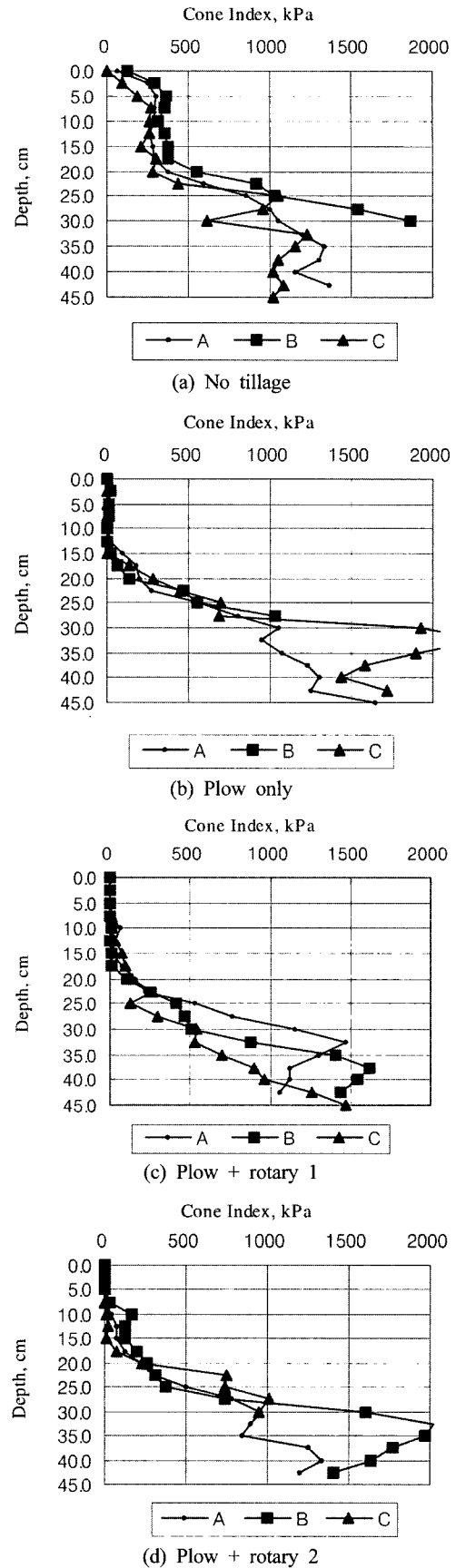


Fig. 4 CI profiles for various tillage operations with 2 times of soil compaction by a roller before tillage (3 replications).

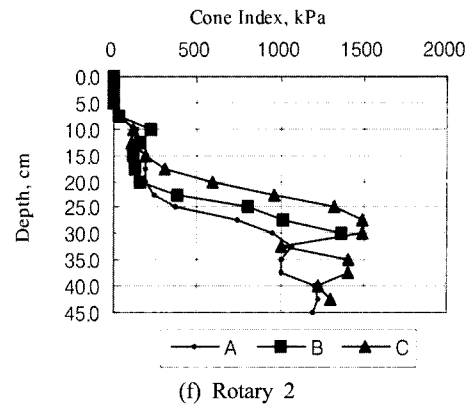
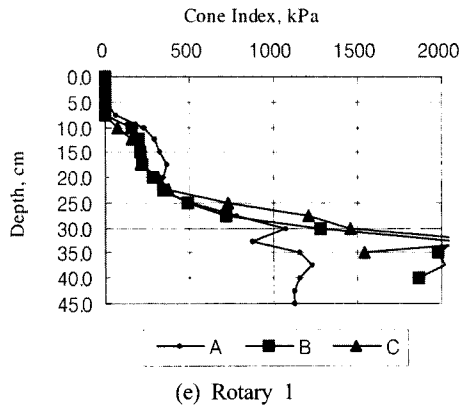


Fig. 4 CI profiles for various tillage operations with 2 times of soil compaction by a roller before tillage (3 replications) (continued).

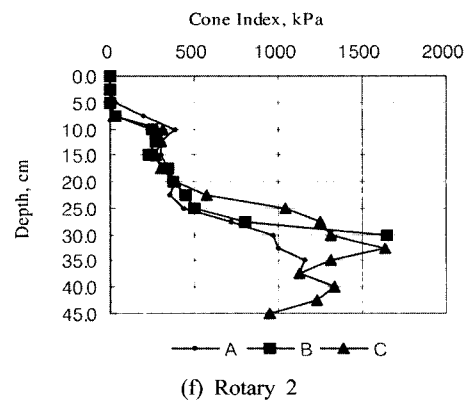
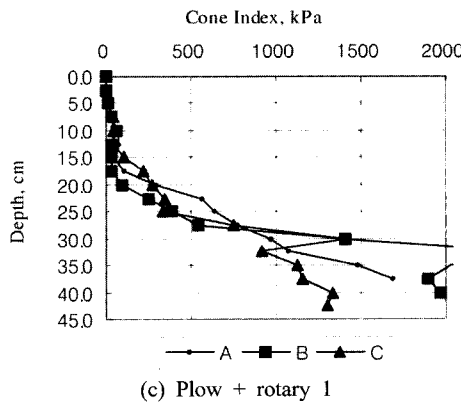
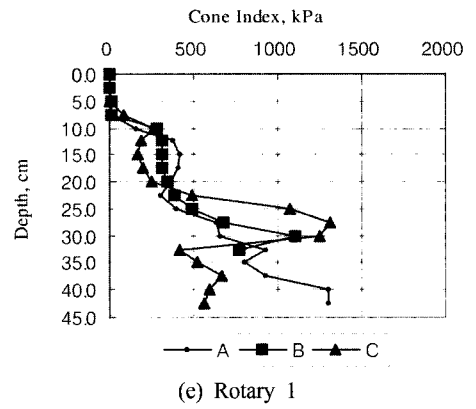
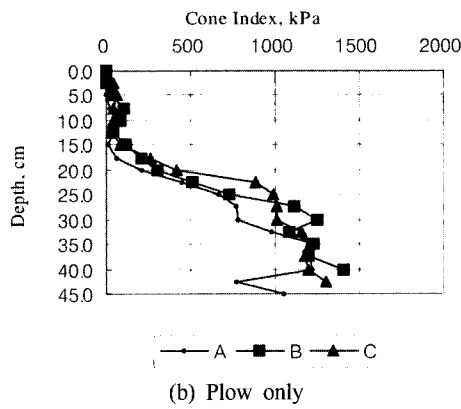
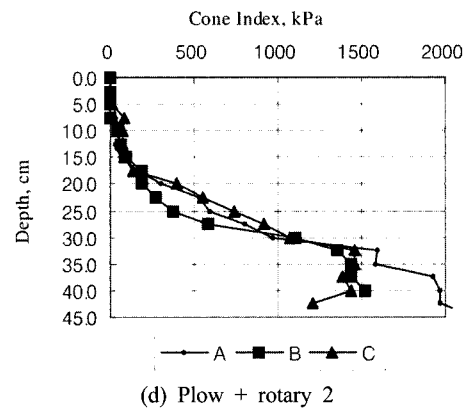
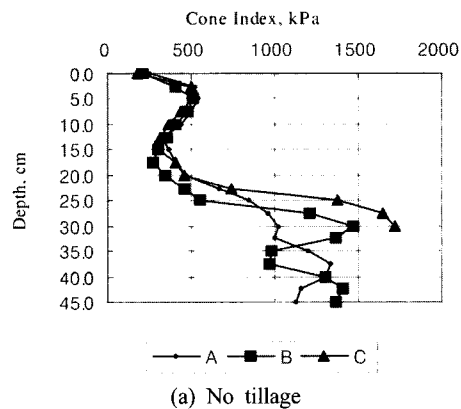


Fig. 5 CI profiles for various tillage operations with 4 times of soil compaction by a roller before tillage (3 replications).

깊이에 따른 CI의 변화를 보여주고 있다. 그림에서 A, B, C는 3반복을 나타낸다. 경운 전(no tillage) 지표면으로부터 깊이 10 cm까지의 CI를 비교해 보면 상기의 점착력과 내부마찰각의 경향과 같이 토양다짐이 증가함에 따라 원추지수는 증가하지만 다짐의 효과는 대략 지표면에서 10 cm의 깊이에서 사라지며 그 이상의 깊이에서 CI의 뚜렷한 차이는 없었다.

경운 전에 비교하여 경운작업이 수행된 후, CI는 거의 0에 가까운, 즉 아주 연한 토양에서의 값을 나타내고 있다. 그러나 쟁기작업이 수행된 경우는 경운 깊이인 지표면 아래 20 cm까지, 단지 로타리로 작업을 했을 경우는 지표면 아래 10 cm까지 CI가 줄어든다는 것을 알 수 있다. 특히 쟁기작업을 수행하고 로타리 작업을 한 경우, 혹은 로타리 작업만을 수행한 경우에 공회 로타리 작업의 횟수가 증가하면 경운 깊이인 10 cm 이후에는 CI의 값이 다시 증가하는 것으로 나타났는데 이는 로타리의 회전에 의한 토양다짐 효과에 기인한 것으로 생각되었다.

나. 경작포장에서 토양 역학적 특성의 변화 분석

표 3부터 6까지는 4곳의 실험포장에서 여러 가지의 경운작업을 수행한 후 작업 전과 대비하여 점착력과 내부마찰각의 변화를 보여주고 있다. 또한 표 7은 실험포장에 대한 토양의 몇 가지 역학적 특성을 나타내고 있다. 각 포장간의 토양 종류, 함수율 등 그 특성이 다르므로 직접적인 비교는 불가능하다. 그러나 여러 가지 경운작업의 결과 점착력은 최대 1.0 N/cm² 정도, 내부마찰각은 최대 9° 정도로 작아지는 것으로

나타났다.

토양의 함수율은 토양의 역학적 특성에 많은 영향을 미친다. 표 7에서 서둔동 실험 포장의 함수율이 가장 높은 36.7%, 그 다음은 충주 포장 32.3%, 그리고 여주 포장 30.2%로서 실내 실험과 대비하여 매우 높게 나타났다. 표에 나타난 실험치와 비교하면 함수율이 높을수록 내부마찰각은 커짐을 알 수 있

Table 4. Cohesions and internal friction angles for various tillage operations at a test field I of Seodun-Dong, Suwon

Operation type	Cohesion (N/cm ²)	Internal friction angle (°)
Before tillage	1.46	31.4
Plow only	0.89	27.3
Plow + rotary 1	0.84	27.7
Plow + rotary 2	0.83	27.2
Rotary 1	0.57	26.7
Rotary 2	0.70	27.6

Table 5. Cohesions and internal friction angles for various tillage operations at a test field II of Seodun-Dong, Suwon

Operation type	Cohesion (N/cm ²)	Internal friction angle (°)
Before tillage	1.36	33.3
Plow only	1.03	28.5
Plow + rotary 1	0.63	28.6
Plow + rotary 2	0.63	29.4
Rotary 1	0.71	29.7
Rotary 2	0.85	28.3

Table 3. Cohesions and internal friction angles for various tillage operations at a test field of Yeaju

Operation type	Cohesion (N/cm ²)	Internal friction angle (°)
Before tillage	1.57	37.2
Plow only	1.00	30.2
Plow + rotary 1	0.83	29.6
Plow + rotary 2	0.78	29.1
Rotary 1	0.75	30.6
Rotary 2	0.78	29.5

Table 6. Cohesions and internal friction angles for various tillage operations at a test field of Konkuk Univ., Chungju

Operation type	Cohesion (N/cm ²)	Internal friction angle (°)
Before tillage	1.95	34.9
Plow only	0.96	30.9
Plow + rotary 1	0.83	28.3
Plow + rotary 2	0.86	28.5
Rotary 1	0.92	27.0
Rotary 2	0.97	26.7

Table 7. Selected physical properties of soil for various test fields

Test field	Moisture Content (db, %)	Wet soil density (g/cm ³)	Solid ratio of soil (%)	Liquid ratio of soil (%)	Air ratio of soil (%)	porosity (%)
Yeaju	30.2	1.71	50	39	11	50.5
Seodun-Dong, Suwon	36.7	1.49	41	40	19	58.8
Chungju	32.3	1.84	53	45	3	47.5

었으나 점착력은 뚜렷한 경향이 없었는데 점착력은 토양 종류에 보다 많은 영향을 받기 때문인 것으로 판단되었다.

표 3-6에서 나타난 바와 같이 로타리 작업의 횟수가 늘어나면 내부마찰각은 감소하지만 점착력은 커지는 경향은 실내 실험과 같이 나타났다. 경운작업 전과 비교하여 각 경운작업이 수행된 후에는 내부마찰각과 점착력이 작아지는 것으로 나타났으나 경운방법 간의 차이는 뚜렷하지 않았다.

또한 표 7에서 서둔동 실험포장의 공극률이 58.8%로 가장 크고 다음으로 여주 포장 50.5%, 충주 포장 47.5%로 나타났다. 공극률과 관련하여 점착력은 공극률이 작아질수록 커지는 경향을 보였으며 그 변이의 크기는 뚜렷하지 않았지만 경운작업 후에도 그 경향은 유지되는 것으로 나타났다.

그림 6은 4곳의 실험포장에서 경운작업 전과 대비하여 각 경운방법에 따른 CI의 깊이별 변화를 보여주고 있다. 실험깊이는 작토층의 일반적 깊이인 20 cm로 결정하였으며 경운작

업별로 최소 4곳 이상을 샘플링하고 해당 값의 평균을 구한 후 경운전과 각 경운방법을 비교하였다.

대체적으로 실험 포장 전체를 통틀어 CI는 경운작업 후에 깊이별로 200-800 kPa 정도가 줄어드는 것으로 나타났다. CI의 변화를 기준으로 4곳의 실험포장에서 공히 쟁기+로타리 1회에서 CI의 감소가 가장 큰 것으로 나타났다.

실내실험과 마찬가지로 단지 로타리로 작업한 경우는 경운 깊이가 7-8 cm로서 이 깊이를 넘어서면 토양다짐 효과에 기인하여 작업 후 CI가 더욱 커지는 경향을 보였다. 이러한 경향은 쟁기작업 후 로타리 작업의 횟수가 증가할 때도 뚜렷하였다. 따라서 조인상 등(1985)이 제안한 벼 수확에 영향을 미치는 CI값을 1 MPa라고 할 경우 로타리만의 작업은 이 기준에 부합되지 않았으며, 로타리 작업은 매우 부드러운 토양 이외에는 독립적인 경운방법으로 적당하지 않은 것으로 분석되었다.

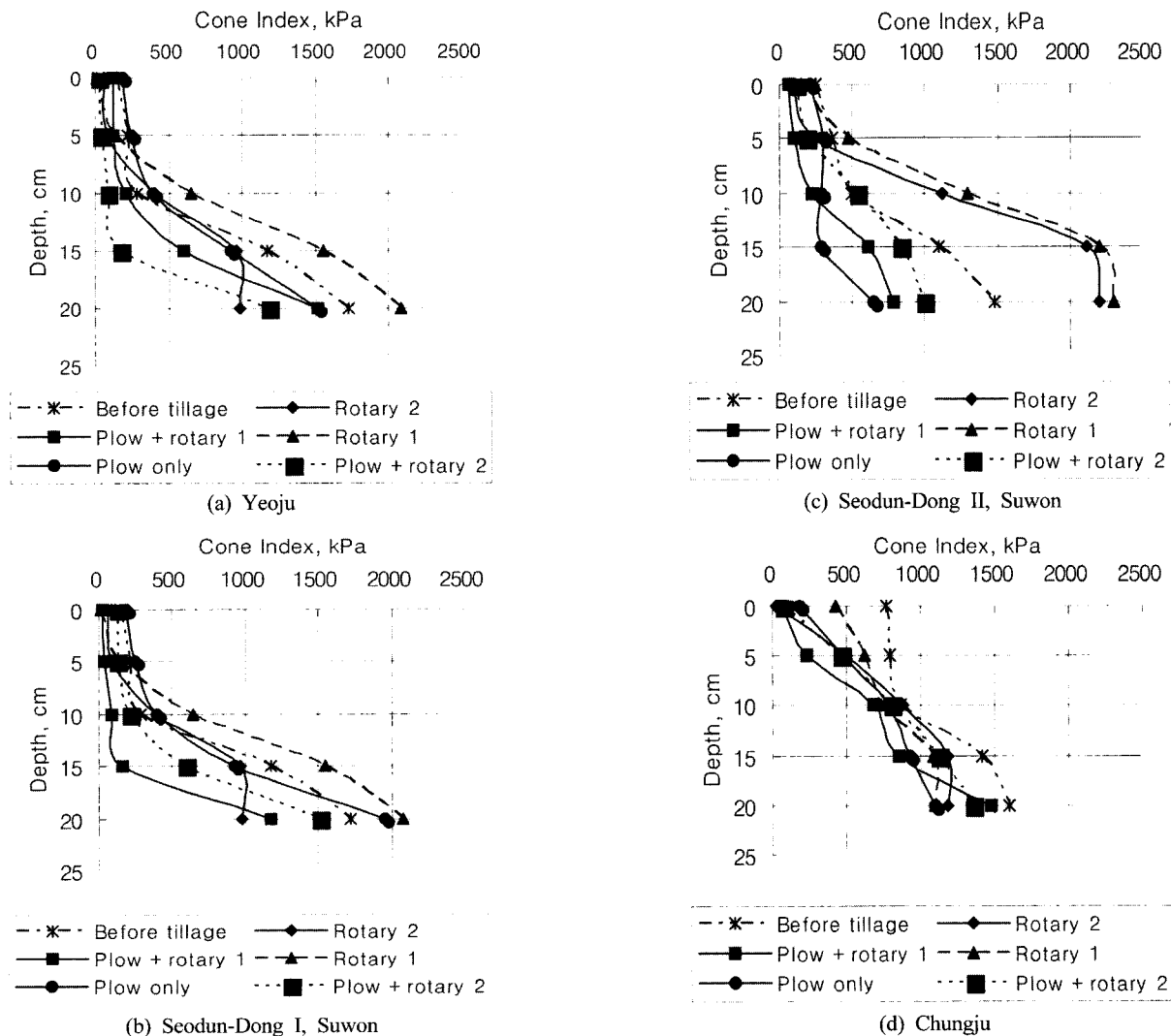


Fig. 6 CI profiles for various tillage operations at selected test fields.

CI의 프로파일을 보면 지표면에서는 경운작업 전과 각 작업방법별로 CI의 감소는 불분명하지만 깊이 15 cm에서는 각 작업별로 CI의 감소가 뚜렷하게 나타남을 알 수 있다. 관행적으로 볼 때 쟁기+씨레 작업은 경운에서는 매우 거치른 작업으로 여겨지지만 생각보다 CI값과 내부마찰각, 점착력의 개선도는 양호하였다. 나아가 사양토로 분류되는 서둔동 작물시험장 제2포장에서는 쟁기+씨레작업으로 나타난 CI의 변화가 다른 작업에 비해 크게 나쁘지 않은 것으로 분석되었다.

4. 요약 및 결론

경운은 토양의 파쇄를 통하여 뿌리의 활착과 성장의 기본이 되는 묘상을 조성하며 작물 생육의 근간이 되는 토양 조건을 조절한다. 따라서 최적의 농작물 관리를 위해서는 경운에 따른 토양의 역학적 특성의 변화가 분석되어야 한다.

본 연구에서는 경운작업이 토양의 다짐 정도에 미치는 영향을 분석하기 위하여 경운 전후의 토양강도, 점착력과 내부마찰각을 측정하고 해당 특성의 상대적 변이를 분석하여 경운작업이 토양의 역학적 특성에 미치는 영향을 분석하고자 하였다.

주요 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 일반적으로 토양 다짐 정도가 클수록 점착력과 내부마찰각이 증가하는 것으로 판단되었다.
- (2) 인공토조에서 경운작업을 수행한 경우 점착력은 최대 2.2 N/cm², 그리고 내부마찰각은 최대 14° 정도 작아졌다. 또한 로타리 작업을 많이 할수록 내부마찰각은 감소하지만 점착력은 증가하는 것으로 분석되었다.
- (3) 실내 인공토조, 실외 포장실험을 망라하여 로타리 작업의 횟수가 증가하면 로타리 경운 깊이인 10 cm 이후에는 CI의 값이 다시 증가하는 것으로 나타났는데 이는 로타리의 회전에 의한 토양다짐 효과에 기인한 것으로 판

단되었다.

- (4) 실험포장에서 여러 가지 경운작업의 수행한 결과 점착력은 최대 1.0 N/cm² 정도, 내부마찰각은 최대 9° 정도로 작아지는 것으로 나타났다. 나아가 함수율이 높을수록 내부마찰각은 커짐을 알 수 있었으며 반면 토양의 공극률이 작아질수록 점착력은 커지는 경향을 보였다.
- (5) 실험 포장 통틀어 CI는 경운작업 후에 깊이별로 200-800 kPa 정도가 줄어드는 것으로 나타났다. 나아가 쟁기+로타리 1회에서 CI의 개선도가 가장 좋은 것으로 나타났다.
- (6) 지표면에서는 경운작업 전과 각 작업방법별로 CI의 개선도가 불분명하지만 깊이 15 cm에서는 각 경운작업별로 CI의 개선도가 뚜렷하게 나타남을 알 수 있었다.

참고 문헌

1. Canarache, A. 1991. Factors and indices regarding excessive compactness of agricultural soils. *Soil and Tillage Research* 19:145-164.
2. 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.
3. Koolen, A. J. and H. Kuipers. 1983. *Agricultural Soil Mechanics*. Berlin, Germany, Springer-Verlag.
4. Taylor, H. M. and H. R. Gardner. 1963. Penetration of cotton seedling taproots as influenced by bulk density, moisture content, and strength of soil. *Soil Science* 96(3):153-156.
5. 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.
6. 조인상, 민경범, 김이열, 임정남, 엄기태. 1985. 경운방법의 차이가 토양의 물리성과 수답생육에 미치는 영향. *한국토양비료학회지* 18(2):189-193.