

# 원추 지수를 이용한 트랙터의 작업성 예측

## Prediction of Tractor Workability by Cone Index

최석원\*

S.W.Choi

김경욱\*

정희원

K.U.Kim

### I. 서 론

포장에 비가 내린 후, 농민이 포장의 토양상태가 작업을 수행하기에 적합한지, 아닌지를 판단하는 일은 매우 중요한 일이다. 일반적으로, 경험이 많은 농민은 자신의 포장에 대하여 작업이 가능한 토양의 상태를 축적된 경험을 통하여 판단하고 있으나, 새로운 농기계의 도입, 새로운 포장, 새로운 배수시설 등 농작업 환경이 변화되면 경험이 많은 농민에게도 작업에 적합한 토양상태를 정확하게 판단하는 것은 어려운 일이다. 더구나, 경험이 적은 농민이 작업에 적합한 포장의 토양상태를 정확히 판단한다는 것은 더욱 어려운 일이 될 것이다. '농업기계가 포장에서 특정 작업을 수행할 수 있는 정도'를 농업기계의 작업성(作業性)이라고 본 연구에서는 정의하였다. 이러한 농업기계의 작업성에 영향을 미치는 요인으로는 농업기계, 토양, 기상 등이 있다. 작업성에 영향을 미치는 요인 중에서 농업기계는 대부분 고정적인 상수인 반면, 토양은 주위 환경에 의해서 변화되는 변수가 대부분이다. 특히, 강우 후 토양강도, 점착력, 마찰력 등 토양 상태는 급격한 변화를 일으킨다. 이러한 토양상태의 변화로 인하여 트랙터와 같은 농기계가 포장에서 적절하게 작업을 수행할 수 없는 경우가 종종 발생한다. 따라서, 토양의 상태를 정확히 판단하여 효율적인 작업이 가능할 때, 작업을 수행하여야 한다. 또한, 경운 작업, 로터리 작업, 퇴비·비료 살포작업 등의 작업은 특정한 시기에 이루어져야 하는 적기성을 가지고 있다. 만약, 작업을 수행해야 할 시기에 비가 내린다면, 언제쯤 농기계를 작업포장에 투입할 것인지를 판단하는 일은 매우 중요하다. 농업 선진국에서는 작업성을 예측하기 위한 연구가 이미 이루어지고 있다. 그들은 경험이 많은 농민들의 전문적 지식을 충분히 활용하여 작업성을 예측할 수 있는 객관적인 기준을 제시하고, 이러한 객관적 기준을 바탕으로 다양하게 그 응용분야를 넓혀가고 있다. 국내에서도 경험에 의존하여 농업을 경영하는 시대는 지나가고 있으며, 과학적이고 합리적인 농업경영의 시대로 접어들고 있다. 기존의 경험에 의하여 축적된 지식들을 이제는 과학적이고 객관적 정보로 바꾸어야 할 시점인 것이다. 작업성 예측문제는 토양과 농기계사이의 상호관계를 정확히 이해하고, 경험이 많은 농민의 전문적 지식을 활용하여 해결하여야 한다. 즉, 정확하게 정의된 토양변수와 기계변수에 전문적 지식을 활용하여 작업성을 예측할 수 있는 연구가 필요하다. 본 연구에서는 쟁기, 로터리 작업에 대한 트랙터의 작업성을 예측하기 위한 있는 객관적 자료를 제시하고, 이를 응용할 수 있는 분야에 대하여 연구하였다.

\* 서울대학교 농업생명과학대학 농공(기계)학과

## II. 연구 내용 및 방법

본 연구의 대상이 되는 경운 작업의 특징은 “작물이 잘 자랄 수 있는 상태로 耕土를 준비하는 것”이다. 즉, 종자를 파종하거나 묘종을 이식할 때는 파종과 이식에 적합한 상태로 토양을 경기(耕起), 파쇄(破碎), 정지(整地)하여야 한다. 이와 같은 경운 작업의 특징을 고려할 때, 경운 작업의 작업성을 평가할 때, 경운 작업을 수행한 후 토양의 상태가 파종이나 이식에 적합한 상태인가를 판단하는 것이 가장 중요할 것이다. 본 연구는 A포장에서 B트랙터(고정 상수)를 가지고 C작업을 수행할 때, C작업의 수행여부를 어떻게 판단할 것인가? 라는 물음에 대하여 기존의 경험적 방식을 이용하여 객관적인 자료를 제공하고자 하는 것이다. 일반적으로 농민은 다음과 같이 작업성을 결정하였다.

- (1) 표면 토양의 상태를 눈으로 확인한다 --- wet , dry
- (2) 작업포장을 걸어서 다닐 때의 토양의 침하 정도 --- 침하
- (3) 막대기로 토양을 찢러본다 --- 토양 부착력과 마찰력
- (4) 손으로 토양을 파괴하여 본다. --- 토양의 파괴

다양한 변수들 중에서 본 연구의 목적에 적합한 변수들을 선택하고, 큰 영향을 미치지 않는 변수들을 소거함으로써 주요 변수들 사이에 일어나는 현상을 간단히 예측할 수 있도록 하였다.

### 1. 토양 변수 - 원추 지수

트랙터가 포장에서 작업할 때, 토양의 하중지지 능력인 토양 강도가 트랙터의 작업성에 큰 영향을 미치게 된다. 전통적으로 토양의 전단 파괴에 적용되는 이론은 물-콜롬(Mohr-Columb)이론이며, 토양의 침하는 평판의 압력-침하식(Bekker,1960)으로 표현된다. 이러한 모형에 사용되고 있는 토양 변수는 실제로 측정하기가 간단하지 않다. 그리고, 각 변수와 모형에 대한 타당성 여부는 아직도

Table 1 Soil variables

Soil variables	Symbol	Dimension
Soil:		
Texture	T	---
Fricton angle	$\phi$	---
Cohesion	c	$ML^{-1}T^2$
Moisture content	MC	---
Density	$\rho$	$ML^{-3}$
water suction	W. S	L
Cone Index	CI	$ML^{-1}T^{-2}$

끊임없이 논의되고 있으며, 이를 개선하기 위한 많은 연구가 이루어지고 있다. 이처럼 토양 강도와 관련된 토양의 변수는 표1에서와 같이 토성, 토양 밀도, 함수비, 내부 마찰각, 점착력, 수분 흡입력, 원추 지수 등이다. 이 토양 변수 중에서 토양강도를 평가하기 위한 하나의 지표로써 원추 지수가 가장 널리 사용되고 있다. 원추 지수는 함수비, 내부 마찰각, 토양 밀도, 점착력, 수분 흡입력의 영향을 받는 것으로 알려지고 있

다.(Janosi, 1959 ; Ayers, 1982)가 보고되었다. 또한, 재노시( Janosi' equation)식은 원추 지수를 내부 마찰각, 점착력, 침하의 함수로 표현하고 있다. Ayers(1982)는 함수비, 토양 밀도와 침하와 원추 지수의 관계를 설명하고, 모델을 제시하였다. 이상과 같이 원추 지수는 토양의 마찰각, 점착력, 함수비, 토양 밀도, 토성의 영향을 받는다. 따라서, 원추지수는 식(3)에서와 같은 함수 관계로 표현할 수 있다.

$$\text{원추 지수} = f(\text{마찰력, 점착력, 함수비, 토양밀도, 토성}) \text{ --- (3)}$$

토양의 상태를 나타내는 각종 변수 중에서 원추 지수가 토양의 강도를 대표할 수 있는 변수인가에 대해서는 아직 논란의 여지가 있으나(Wong ,1989), 많은 연구와 시험을 통해서 그 유효성이 인정되고 있다. 일반적으로 토양의 강도를 측정하는 방법은 ① 전단링( Shear ring ), ②전단판( Shear plate), ③ 전단 그래프(Shear-graph), ④ 전단 베인(Shear vane), ⑤원추관입기(Penetrometer) ⑥ 포켓 원추관입 시험기 (Pocket penetrometer) 등을 이용하는 방법이 있다. 이 중에서 원추관입기를 이용하는 원추 지수가 토양강도를 나타내는 대표적인 변수로 널리 사용되고 있는 것은 다음과 같은 특징을 가지고 있기 때문이다. 1) 원추 관입기를 이용하여 용이하게 구할 수 있다, 2) 실제 작업포장 실험을 위하여 구해진 변수이다, 3) 하나의 토양변수으로써 토양 강도를 나타낼 수 있다, 4) 많은 연구 논문에서 원추 지수의 유효성이 인정되고 있다. 이상의 고찰을 통하여 본 연구에서는 연구 목적에 적합한 토양 변수로서 원추 지수를 선택하는 것이 바람직하고 사료된다.

## 2. 작업포장의 선택과 설계

선택된 포장은 국내에서 농작업에 이용되고 있는 일반 밭 토양의 약 40% 정도를 차지하고 있는 사양토와 같은 토성을 가진 포장을 선택하였다. 실제 포장의 토성은 人工土壤槽에서와 같이 일정하게 분포하지 않는다. 즉, 같은 포장 내에서도 토성에 차이가 있다. 시험 포장에서 표토와 심토의 토성을 분석하였다. 그림 2에서처럼 시험 포장의 A, B, C, D구역에 Table 2 The soil under investigation

Topsoil(0~5cm) characteristics	Subsoil(5~15cm) characteristics	Decline
Sand - 18%	Sand - 25%	almost even
Clay - 82%	Clay - 75%	

서 각각 두 곳에서 토양을 채취하여 토성을 분석하였다. 각각 분석된 토성의 평균값은 표 4-2에서와 같다. 위치는 서울대학교 농공학관 앞에 위치한 밭 토양이다.

## 3. 원추 지수의 측정

같은 토성에서도 원추 지수는 작업 형태와 위치에 따라서 변화된다. 따라서, 쟁기, 로터리 작업의 특징을 정확히 규정하고, 작업의 종류에 따라 원추 지수를 측정 깊이와 대표값을 합리적으로 결정하여야 한다. 기존 논문에서는 원추 지수를 수분 함량이 많은 포장에서 측정하여 주행성( Go, No-go )을 판단하기 위하여 사용하였다.(Wong, 1989) 그러나, 농작업

은 수분 함량이 비교적 적은 포장에서 수행되므로, 원추 지수의 측정도 주행성만을 판단하는 경우와는 상당한 차이가 있을 것이다. 경운 작업의 깊이는 일반적으로 10~15cm 정도이며, 토양의 반전·파쇄는 특정 깊이의 토양 강도보다는 작업 깊이 전체(0~15cm) 토양의 상호관계에 영향을 받는 것으로 보는 것이 타당하다. 본 연구에서 토양 강도는 SR-2기로 0~15cm에서 측정한 원추 지수의 평균값으로 결정하였다. 또한, 농작업이 가능한 수분 함량이 적은 상태의 토양에서 원추 지수를 집중적으로 측정하였다.

원추 지수는 정각이 30° 이고 밑면적이  $2cm^2$  인 원추를 지면과 수직 방향으로 토양 내

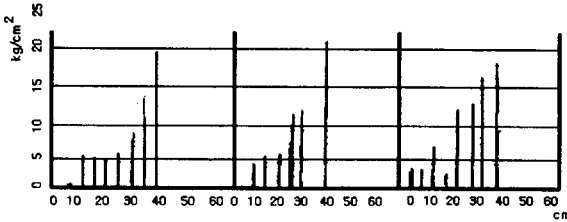


Fig.2 Example of measured cone index

부에 貫入시킬 때 저항하는 힘으로서 SR-2기를 이용하여 원추 지수를 측정하였다. 측정 방법은 貫入 속도를 1cm/s로 하여, 최초의 저항력은 원추의 底面과 地面이 일치할 때 측정하고, 각 깊이 별로 측정하였다. 그림2는 SR-2기를 이용한 원추 지수를 측정한 기록지이다.

#### 4. 작업성 예측

##### 가. 쟁기·로터리 작업

작업성을 예측하기 위하여 일정량의 비가 내린 후 시험 포장에서 A 지역부터 쟁기, 로터리 작업을 수행한 후, 원추지수의 변화가 발생할 수 있도록 약 24시간의 시간 간격을 두고 B지역에서 쟁기, 로터리 작업을 수행하였다. C, D 지역에서도 이와 같은 방법으로 쟁기, 로터리 작업을 수행하였다. 쟁기, 로터리 작업은 농민과 함께 연구에 적합하도록 설계된 시험포장에서 실시하였다. 쟁기 작업은 40마력급 대동트랙터(D4351)와 대동 유압 다련 쟁기(D165)를 사용하여 작업을 수행하였다. 작업 속도는 일반 농가에서 주로 작업하는 저속\_3단, 기관은 정격속도를 유지하였다. 로터리 작업은 40마력급 대동트랙터(D4251)와 동양 로터리(R165)\_L자형을 이용하였다. 작업속도는 일반 농가에서 주로 작업하는 저속\_3단, PTO\_3단으로 고정하였으며, 기관은 정격 속도를 유지하도록 하였다.

##### 나. 작업 후 토양 상태

토양의 상태를 다음과 같이 3단계로 구분하였다.

Table 3 Workability

	로터리 작업	쟁기 작업
좋음	균등하게 부서러짐	균등하게 파쇄되면서 반전됨
보통	부분적으로 뭉친 상태	제대로 파쇄되지 않고 뭉친 상태로 반전
나쁨	대부분 뭉친상태	제대로 반전되지 않고, 파쇄되지도 않음

다. 작업상태별 원추지수

시험 포장의 A, B, C, D지역에서 각각 6회 작업을 실시하였으며, 각 지역에서 1회 시험할 때 원추지수를 3번 측정하였다. 원추지수를 측정할 때, 돌이 있거나 토양 강도가 갑자기 낮아지거나 또는 높아지는 경우에는 측정된 값을 제외시켰다.

**로타리 작업의 경우:** ‘ 좋음(Good)’ 상태일 때 표토에서 원추지수가 약 500kPa, ‘ 보통(Fair)’ 상태 일 때는 약 400kPa, ‘ 나쁨(Poor)’ 상태 일 때는 약 300kPa 이하로 분포하고 있다.

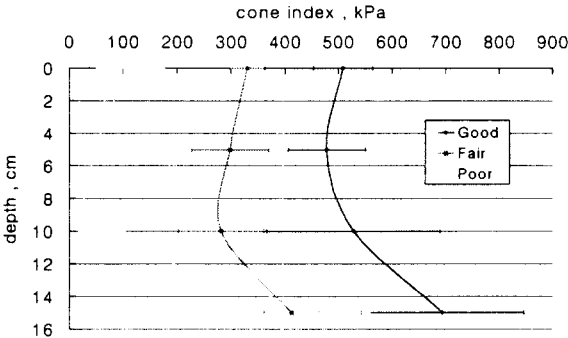


Fig. 3 Average cone index vs soil depth to 0~15cm

흡수로 인하여 함수비가 낮아져 원추지수가 증가하고, 5~10cm깊이의 토양에서는 오히려 높은 함수비를 유지하여 원추지수가 表土에서보다 낮게 나타나는 것으로 판단된다. 그림3에서 원추지수는 평균값을 나타낸 것이고, 각 평균값에 표시된 짧은 가로선은 각 작업성에 대한 원추지수의 95% 신뢰 구간을 나타낸 것이다.

**쟁기작업의 경우:** ‘ 좋음(Good)’ 상태일 때는 표토에서 원추지수가 약 600kPa, ‘ 보통(Fair)’ 상태 일 때는 약 400kPa, ‘ 나쁨(Poor)’ 상태 일 때는 약 200kPa 이하로 분포하고 있음을 알 수 있다.

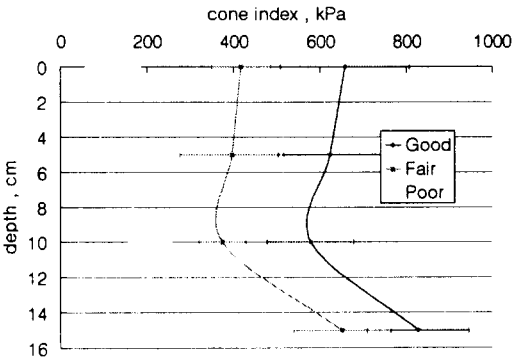


Fig. 4 Average cone index vs soil depth to 15cm

라. 작업성 예측표

각 작업성에 대한 토양 깊이별 원추지수의 평균값은 원추지수의 변화 경향을 나타내는

데는 유용하나 작업성을 평가하는 데는 다소 복잡한 형태이다. 따라서, 0~15cm 까지의 평균 원추 지수를 다시 평균하여 작업성을 나타내도록 하였다. 이와 같은 방법으로 결정한 쟁기, 로터리 작업의 작업성을 나타내기 위한 원추지수는 표4에서와 같다.

Table 4 Prediction Table of Workability

		Measured cone index	Average cone index	95% Confidence probability	
Good	Rotary	444~870	552	475.4~628.6	Rotary: 470~630kPa
	Plow	517~971	671	603.6~738.4	Plow : 600~730kPa
Fair	Rotary	277~468	331	298.7~363.3	Rotary: 300~470kPa
	Plow	238~584	459	400.9~517.1	Plow : 400~600kPa
Poor	Rotaty	59~267	171	141.1~200.9	Rotary: < 200kPa
	Plow	53.9~277	149	95.2~202.8	Plow : < 200kPa

결론적으로 로터리 작업은 원추 지수가 475kPa 이상일 때 가장 바람직한 작업결과를 얻을 수 있다고 판단된다. 그리고 200kPa이하 일 때는 작업을 하지 않는 것이 타당할 것으로 판단된다. 그리고, 쟁기 작업은 원추 지수가 600kPa 이상일 때 가장 바람직한 작업결과를 얻을 수 있다고 판단된다. 그리고, 200kPa이하 일 때는 작업을 하지 않는 것이 타당할 것으로 판단된다.

5. 강우량에 따른 원추지수의 변화 고찰

가. 원추지수 측정과 기상정보수집

시험 포장의 대표값은 20개의 셀에서 원추지수를 각각 3번씩 측정하여 평균값을 구한 다음, 각 셀의 평균값을 평균하여 구하였다. 원추 지수를 측정하는 시기는 약 24시간을 주기로 오전에 주로 측정하였으며, 발작물의 파종이나 이식시기가 집중적으로 분포되어 있는 4-5월에 걸쳐 측정하였다. 이 시기의 기상 정보는 시험 포장과 거의 동일한 기상현상을 유지하고 있는, 시험 포장에서 동북쪽으로 약 500m 정도 떨어진 수원기상대에서 수집하였다.

나. 측정 데이터 분석

기상정보를 수집하고 원추지수를 측정한 데이터를 분석하여 보면 다음과 같은 강우형태를 얻을 수 있었다.

- 1) 보슬비 형태, 2) 10~20mm, 3) 20~30mm, 4) 30~40mm 사이의 강우
- 이상과 같은 4가지 형태의 강우에 대한 원추지수의 변화를 그래프를 이용하여 나타내었다.

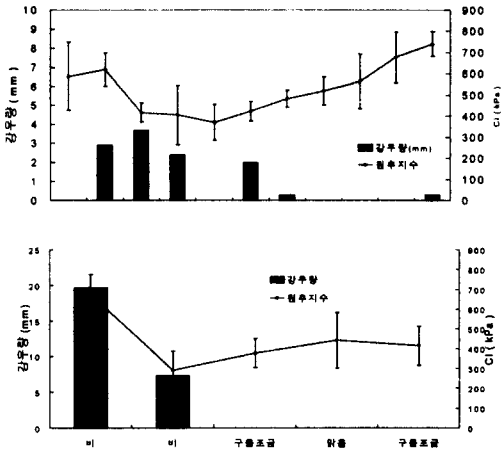


Fig. 7 Cone index's variation in 20~30mm rainfall

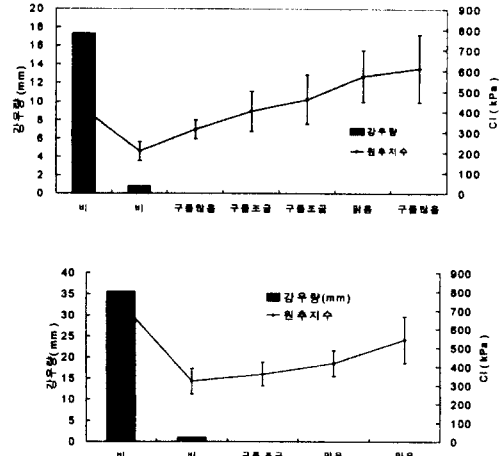


Fig. 8 Cone index's variation in 30~40mm rainfall

5-4. 강우량에 따른 원추지수 변화의 결과 및 고찰

Table 5 Relation of rainfall\_type & cone index's variation

Rainfall type	drizzling rain (3~4 days)	10~20mm ( 1 day )	20~30mm ( 2 days )	30~40mm ( 1 day )
cone index variation	270kPa	200kPa	400kPa	400kPa

원추지수의 변화는 표5와 같이 요약할 수 있다. 즉 원추지수는 다양한 기상 정보 중에서 강우량과 강우 일수에 특히 영향을 많이 받고 있음을 알 수 있다. 3~4일간 보슬비 형태의 강우 때, 1일간 17mm 강우 때 보다 원추지수의 변화가 70kPa 크게 나타나고 있다. 그리고, 2일간 25mm의 강우와 1일간 35mm의 강우에서 원추지수의 변화 폭은 약 400kPa로 나타나고 있다. 이러한 결과는 강우 일수가 원추 지수의 변화에 많은 영향을 미치고 있음을 보여 준다. 또한, 원추 지수의 변화는 같은 토성을 가진 포장에서도 배수시설, 경사 등의 포장 환경에 영향을 받는다.

$$\text{원추 지수의 변화} = f(\text{강우량, 강우일수, 초기 원추 지수})$$

4-5월에 특정 포장을 대상으로 이루어진 한 해의 정보이므로 이를 농민이 직접적으로 신뢰성을 가지고 이용할 수는 없을 것이다. 그러나, 대규모로 농업경영을 수행하는 농민들이 다년간 다양한 기상정보에 대한 포장의 원추지수 변화 상태를 알 수 있다면, 이는 트랙터 등과 같은 농기계의 효율적 이용과 농업경영의 전반적인 계획 수립에도 상당히 기여할 수 있을 것이다.

### III. 연구 결과 및 고찰

급변하는 농업환경 속에서 이러한 경험적 지식만을 이용하여 작업시기를 결정하는 것은 미래의 농업환경에 제대로 적용하지 못할 것으로 사료된다. 따라서, 작업시기를 결정할 수 있는 객관적인 데이터를 제시하기 위하여 농민의 경험적 지식을 토양-기계시스템에서 명확히 정의된 변수로 나타내는 것은 대단히 중요한 일이다. 토양의 강도를 원추지수로 표현하여 작업을 수행하기에 적합한 원추지수를 농민의 경험적 지식과 토양상태 등을 이용하여 표4와 같이 도출하였다. 이상과 같은 작업성 예측표는 경험이 적은 농민뿐 아니라, 트랙터의 효율적 이용과 농업경영계획수립 등 다양한 분야에 이용될 수 있을 것이다. 또한 강우량 등과 같은 다양한 기상정보를 이용한다면 그 응용범위는 상당히 많아질 것이다. 예를 들어 본 연구에서 실험한 것처럼 강우량과 원추지수의 변화뿐 아니라, 오랜 기간동안 다양한 기상정보와 원추지수의 변화를 측정한다면 미래의 농업경영과 기계화에 필요한 중요한 정보가 될 것이다. 본 연구에 있어서 충분히 넓고 다양한 토성을 가진 시험포장을 확보하지 못하였고, 트랙터와 작업기를 고정상수로 고려한 것과 같은 연구 조건의 제약이 있었다. 또한, 충분한 자료를 얻기 위해서는 2~3년 정도의 오랜 기간이 필요하나, 본 연구에서는 연구 기간과 기상조건의 제약 때문에 충분한 데이터를 확보하지 못하였다. 그러나, 급변하는 농업환경과 미래 농업을 대비하기 위해서, 농민의 경험을 이용하여 작업성 판단에 대한 객관적 자료를 제시하는 연구가 절실하기 때문에, 여러 가지 부족함에도 불구하고 본 연구를 수행하였다.

### IV. 참 고 문 헌

1. 김경욱, 정창주. 농작업 기계학 원론. 서울대학교 출판부.
2. 김재정. 1989. 土壤物理學. 대한교과서주식회사.
3. McKyes. E. 1989. Agricultural Engineering Soil Mechanics. Elsevier.
4. Bekker.M.G.1969.Introduction to Terrain-Vehicle Systems. The University of Michigan
5. Earl. R. 1996. Prediction of Trafficability and Workability using Tensiometers. Journal of agricultural Engineering Research 63: 27-34.
6. P. D. Ayers, J. V. Perumpral. 1982. Moisture and Density Effect on Cone Index. Trans. of the ASAE 25(4): 1169-1172.
7. Manor, G., R. L. Clark, D. E. Radcliffe, G. W. Langdale. 1991. Soil Cone Index Variability Under Fixed Traffic Tillage Systems. Tran. of the ASAE 34(5):1952-1956.
8. Schmid, I. C. 1995. Interaction Of Vehicle and Terrain Results from 10 years reseach at IKK. Journal of Terramechanics 32: 3-26.
9. National Institute of Agricultural Mechanization. 1990. Trafficability of the tractor.