

토양 물리성 측정을 위한 디지털 장치 개발(I) - 디지털 전단저항 측정장치 -

박준걸 이규승 조성찬 이동훈 장영창 노광모

Development of a Digital Device for Measuring Soil Physical Properties (I) - Digital Shear Stress Sensor -

J. G. Park K. S. Lee S. C. Cho D. H. Lee Y. C. Chang K. M. Noh

Abstract

This study was performed to design and construct a digital soil shear stress sensor in order to replace the conventional devices for measuring soil shear property. The developed digital shear stress measuring device can store measured data with GPS position information as a vector format into a computer. Based on the experiments at various field conditions, the measuring characteristic of the device was quite similar to that of a conventional device, SR-2 that has been a major tool to measure the soil shear property. It was concluded that the digital shear stress measuring device was an effective and comprehensive sensor for measuring soil shear property.

Keywords : Soil physical properties, Shear stress, Digital shear stress sensor, Cohesion, Internal friction angle

1. 서론

토양의 물리적 특성은 작물의 생장에 필요한 제반 여건을 결정하는 가장 중요한 요소이다. 따라서 물리적 특성을 측정하는 장치는 농업의 현대화, 정보화를 통한 농업기계의 효율적 사용, 토양 다짐 방지, 경운 정지의 적절한 처방을 위한 연구와 병행하여 지속적으로 연구되고 있다(Chung, 2004; Chong et al., 2005).

토양의 물리적 특성은 농업기계 이용 및 평가에 유용하게 사용되는 물리성 지수로 정의할 수 있으며, 이는 토양의 공학적 특성과 차량의 상호작용에 의한 농작업의 성능을 결정짓는 요소가 될 뿐만 아니라 농작업시 적정 농기계의 선정 및 운용에도 활용할 수 있다. 이러한 지표는 토양의 조성, 내부 마찰각, 점착력 등에 의해 결정되는데, 현재 연구자들의 연구

방향에 따라 원추지수(Cone Index, CI), 전단저항(shearing stress)지수 등과 같은 측정변수 또는 이들의 결합에 의한 무차원 변수들로 각기 다양한 형태로 표현되고 있다(Chung, 2004).

토양경도는 크게 토양강도와 토양전단강도로 분류된다. 토양강도는 가해지는 힘에 대해 저항하거나 견디기 위한 특별한 조건에서의 토양의 능력이거나 수용력이다. 포장 내 토양강도는 통례적으로 원추관입시험기(cone penetrometer)를 사용하여 결정되어 왔다. 또한 토양 전단강도는 SR-2형 원추관입시험기에 원추를 제거하고 대신 전단링(shear ring)을 부착하여 측정하여 왔다.

특히 전단시험은 토양의 전단강도와 전단응력-전단변위 관계를 측정하고, 이로부터 차량의 최대견인력(maximum drawbar pull)과 견인력-슬립(drawbar pull-slip)특성을 평가할 수 있게 한다. 또한, 슬립에 의한 추가적인 차량의 짐하와 차량주행

This work was conducted by the research fund supported by Rural Development Administration of Korea. The article was submitted for publication on 2008-11-13, reviewed on 2008-11-25, and approved for publication by editorial board of KSAM on 2008-12-03. The authors are Jungul Park, Youngchang Chang, Kwangmo Noh, Professors, KSAM members, Konkuk University, Chungju, Kyou Seung Lee, Professor, Donghoon Lee, Research Associate, KSAM members, Sungkyunkwan University, and Seung Chan Cho, Professor, KSAM member, Chungbuk National University. Corresponding author: K. M. Noh, Professor, Dept. of Bio-systems Engineering, Konkuk University, Chungju, Chungbuk, 380-701, Korea; Tel: +82-43-840-3554; E-mail: <kmnoh@kku.ac.kr>.

장치의 반복통과 성능을 예측하기 위한 반복하중에 대한 토양의 반응 특성을 측정할 수 있다(1992, Hong).

Whalley et al.(2005)은 불포화된 농경지의 저항을 예측하는 강도계의 효과적인 응력을 측정하기 위하여 토양의 장력 강도를 측정하고 인장력 테스트를 하였다. Suna et al.(2006)은 수평강도계를 설계하였는데 이 강도계를 이용하여 토양 수분함량과 기계적인 저항을 on-line으로 측정하였다. 그리고 실험을 통해 토양 수분 함량과 기계적인 저항의 측정은 설계한 결합한 수평강도계로 측정함이 더 유용함을 보여주었다. Zimbone et al.(1996)은 전단저항을 측정하는 4가지 측정장치(Torvane CL-600A, SOILTEST Inc., USA. Torvane T-175/A, CONTROLS, Italy. Hand Vane Tester, ELE International, UK. Geotester ST-308, CONTROLS, Italy)를 사용하여 전단시험을 하고, 그 결과 대부분의 경우 Hand Vane Tester가 항상 큰 저항 값을 가졌고 2가지의 Torvane은 저항 값이 항상 낮았다. Zhang et al.(2000)은 용적밀도와 수분함량이 토양표면의 전단저항에 미치는 영향을 실험하였으며, 수분함량이 동일시 용적밀도가 높은 경우 관입 저항 및 전단 저항의 값이 높다고 보고되었다.

농작업시 토양은 농용차량의 주행부 및 경운작업기의 전단에 의해 파괴된다. 따라서 차량의 견인력 및 경운작업기의 경운저항은 토양의 전단강도(shear strength)에 의해 결정되기 때문에 토양의 전단특성은 매우 중요하지만 이의 측정은 측정자의 숙련도에 따라 오차가 발생한다. 나아가 일정한 하중을 유지한채 토크렌치로 전단링을 돌리는 복잡한 측정을 요구하므로, 앞에 언급한 복잡한 측정과정에 따라 측정자, 관찰자, 보조자로 구성된 3명 이상의 인원으로 구성된 팀으로 움직이게 되므로 측정시간이 길다는 문제점을 가지고 있기 때문에 보다 효율적이고 객관적인 전단강도 측정을 위한 계측 장치가 필요한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 토양 전단강도 측정을 위한 디지털 전단저항 측정 장치를 설계 제작하여 실내의 인공토조에서 기존의 수동측정기의 측정 데이터를 비교, 분석하고 실외 포장에서의 적용도를 측정하여 개발된 전단저항 측정 장치의 신뢰도를 검증하고자 하였다.

2. 재료 및 방법

가. 디지털 전단저항 측정 장치의 설계 및 제작

토양의 전단특성을 나타내는 변수로는 토양의 점착력(cohesion, c), 내부마찰각(angle of internal friction, ϕ), 부착력(adhesion, a), 외부마찰각(angle of external friction, ϕ_e) 등이 있으며

Mohr-Coulomb의 공식에 의해 유도된다.

$$\tau_s = c + p \cdot \tan \phi \quad (1)$$

where, τ_s : 전단응력(shear stress), kPa

c : 점착력(cohesion), kPa

ϕ : 내부마찰각(angle of internal friction)

p : 수직응력(normal stress), kPa

일반적으로 점토성분이 많이 포함된 토양일수록 점착력(c)의 비중이 커지고 모래성분이 많이 포함된 토양일수록 내부마찰각(ϕ)이 커진다.

기존의 전단저항 측정 장비인 SR-2(DIK-5502, Daiki, Japan)는 전단강도를 측정하기 위해 원추를 그라우저로 교체하여 렌치를 돌리면서 토양이 파쇄되는 순간의 최대 토크를 순간적으로 측정자가 읽어내야 하기 때문에 정확한 토크를 측정하기 어렵고 측정자의 숙련도에 따라 측정값의 차이가 크며 반복계측을 통하여 평균값을 산출해야 하는 문제점이 있었다.

따라서 본 연구에서는 전단저항을 측정하기 위해 토크렌치를 돌리는 순간부터 멈추는 순간까지 시간에 따른 토크를 연속적으로 계측, 저장까지 할 수 있도록 하여 자료수집의 신속성과 정확성을 이룰 수 있도록 설계하였다. 나아가 GPS(Global Positioning System) 수신기와 연동하여 전단저항 측정값과 자료 수집의 위치 정보가 결합되도록 하여 향후 수집된 자료가 NMEA(The National Marine Electronics Association) 포맷으로 GIS(Geographical Information System)에 구축될 수 있도록 하였다.

본 연구에서 제작한 디지털 전단저항 측정 장치는 $0 \text{ N}\cdot\text{m} \sim 15 \text{ N}\cdot\text{m}$ 의 범위에 해당하는 전단저항과 $0 \sim 10000 \text{ kPa}$ 에 해당하는 수직하중을 1초에 4회 측정할 수 있는 성능을 목표로 설계되었다.

본 연구에서 개발된 디지털 토양 전단저항 측정 장치는 주요 구성부로서 본체, 손잡이, 인디케이터(DN-120, DACELL, Korea), 볼스크류, 토크 센서(TCN15, DACELL, Korea), on/off 스위치 등으로 구성되어 있으며, 설계, 제작된 디지털 전단저항 측정 장치는 그림 1과 같다.

디지털 전단력 측정 장치는 높이(인디케이터 및 전단링 포함) 1020.2 mm , 본체의 너비(손잡이 제외) 반지름 65 mm 으로 구성되어 있으며, 산화를 방지하고자 본체 표면은 열처리 과정을 거쳤으며, 나머지 부분은 경질크롬으로 구성되어 있다. 기본 구동은 로드셀(최대측정용량: 980 N , CMM2, DACELL, Korea)을 이용하여 토양의 전단저항을 측정할 때의 하중을 측정하고, 토크 센서(최대측정용량: $49 \text{ N}\cdot\text{m}$)를 이용하여 토

양을 파쇄될 때까지 토크를 연속적으로 측정 하였다. 이때 최대 토크 값과 측정 시 하중은 두 개의 인디케이터 내에 자동으로 표시하도록 하였다.

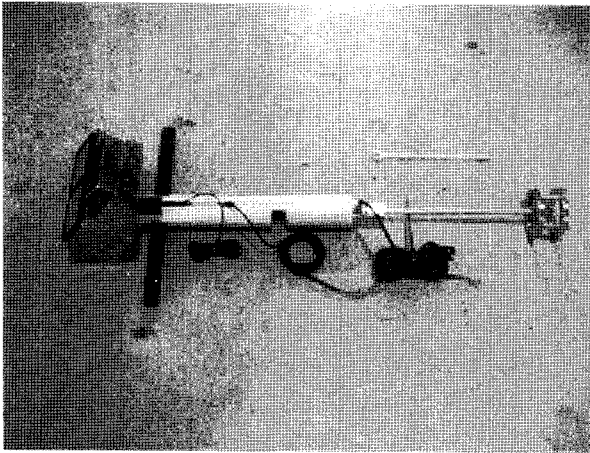


Fig. 1 The digital soil shear stress sensor developed in the study.

나. 디지털 전단저항 측정 장치의 회로 및 측정 자료 분석 도구

그림 2는 디지털 전단저항 측정 장치의 회로구성도이다. 로드셀 및 토크센서로부터 출력되는 신호는 입력장치를 통하여 받은 후 MCU(AVR128, ATMEGA, USA)를 거쳐 DAC(Digital to Analog converter: 12 bit)를 거쳐 증폭되어 인디케이터에 표시된다. 또한 시리얼포트로 출력되어 컴퓨터의 컴퓨터로 전송이 가능하도록 하였다.

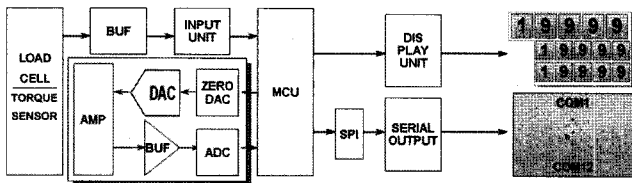


Fig. 2 The circuit block diagram of soil shear stress measuring device.

디지털 전단저항 측정 장치로부터 취득한 데이터를 종합적으로 분석하기 하여 수직하중과 토크의 도시, 파쇄 지점 입력을 통한 최대 전단력 획득, 전단 파괴 그래프를 통한 점착력(c)과 ϕ 값의 계산을 수행할 수 있는 분석도구를 개발하였다. 분석도구는 Visual Studio C++(Ver. 6.0)(Visual Studio Pro 6.0, Microsoft, USA)로 제작하였으며 로드셀 정보와 토크 정보, 그리고 GPS신호가 실시간으로 표시되고, 측정이 끝나면 Text 파일로 변환되어 저장된다. 그림 3은 본 연구에서 개발된 측정 데이터 분석 도구의 윈도우즈 화면을 보여준다.

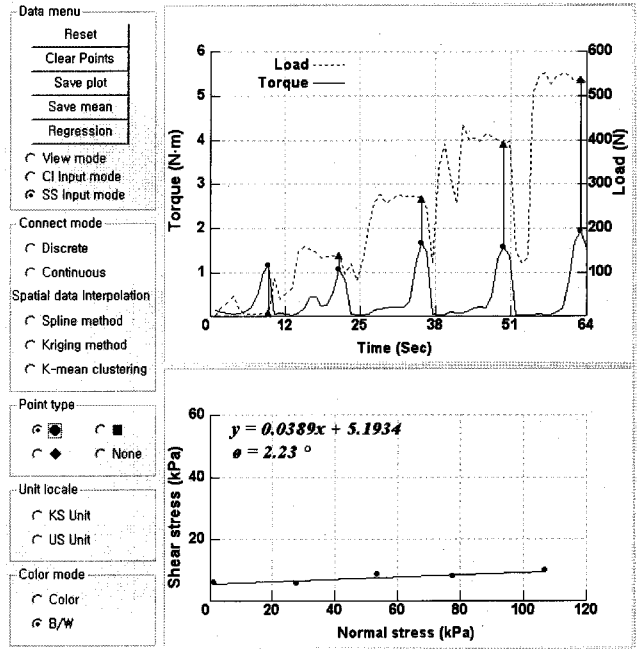


Fig. 3 Data analysis tool developed by using Visual Studio C++ 6.0 for the digital shear stress measuring device.

다. 디지털 전단저항 측정 장치 검증실험

본 연구에서 개발된 디지털 전단저항 측정 장치의 데이터와 기존 장비의 측정데이터를 비교하고 분석하여 디지털 장비의 신뢰성을 획득하고자 실내 및 실외 실험을 수행하였다. 기존장비는 SR-2형 원추관입시험기(DIK-5502, Daiki, Japan)를 사용하였다.

실내 실험으로 먼저 인공토조에서 SR-2형 원추관입시험기에 그라우저를 부착한 후 토크렌치를 돌려 전단저항을 측정하였다. 하중 범위는 0-40 kg까지 10 kg단위로 하였고 각 하중에서의 전단저항을 측정하였다. 같은 방법으로 개발된 디지털 전단저항 측정 장치를 이용하여 데이터를 구하였다.

본 연구를 통하여 제작된 측정 장치의 유효성 및 정확성 검증을 위하여 관행적으로 채택되어온 작업자에 의한 수동 측정 장치를 통한 계측 결과와 비교를 수행하였다. 측정결과와의 비교를 위하여 RMSE(root mean square of error)와 두 측정값 사이의 회귀계수(regression coefficient)를 구하였으며 RMSE를 구하는 수식은 다음과 같다.

$$RMSE = \sqrt{\frac{(y - \hat{y})^2}{N}} \quad (2)$$

where, y = measured value by a conventional device
 \hat{y} = measured value by the developed device
 N = number of experiment

실내 인공토조 실험과 더불어 실외의 실제 포장에서 디지털 측정 장치의 검증 실험을 수행하였다. 실외 포장실험 지역에서 SR-2 장비와 본 연구에서 개발한 디지털 측정 장치를 이용하여 각 지역(표 1)에서 총 15~20회의 전단저항 측정 실험을 수행하였다. 기존 장비의 경우 관찰자가 육안을 통하여 최대 토크를 측정하였고 디지털 계측 장비에 의한 측정은 데이터 로그를 통해 산출된 파일의 계측 기록을 통하여 분석하였다. 5회의 실험 결과를 랜덤으로 선택하여 일정한 수직하중에 대한 토크의 평균을 구하였으며, 식 1과 선형 회귀를 통하여 c (cohesion)와 ϕ (internal resistance angle)을 도출하였다.

특히 개발된 장치에 의한 측정 결과의 분석에 있어 초당 50개의 방대한 데이터가 발생하므로 이를 분석하기 위한 전처

리 프로그램을 수행하여 수직하중과 연동된 최대 토크를 구하였다. 수직하중과 토크를 동시에 도시한 후 최대 지점의 값을 지정하여 그 순간의 정확한 수직하중과 토크를 구한 다음 (Fig. 4), 이를 전단력/수직하중 그래프에 도시(Fig. 5)하여 c 와 ϕ 값을 구하였다.

3. 결과 및 고찰

가. 디지털 전단저항 측정 장치의 실내 검증 실험

디지털 전단저항 측정 장치의 실내 검증 실험 결과를 그림 6과 7에 나타내었다. 기존 장비는 전단저항을 측정할 때 최대 값을 기록하는 방식이고, 디지털 측정 장치는 전단 토크를 연

Table 1 Description of field experiments on the digital shear stress measuring device

Serial number	Category of field	Location	Replication
1	Paddy field	Kyeongkee suwon yeemok	15
2	Paddy field	Kyeongkee suwon youngtong	15
3	Paddy field	Kyeongkee yiecheon sindun	20
4	Dry field	Kyeongkee suwon youngtong	15
5	Dry field	Kyeongkee yiecheon sindun	15
6	Orchard	Kyeongkee suwon keumkok	15
7	Orchard	Kyeongkee suwon youngtong	15

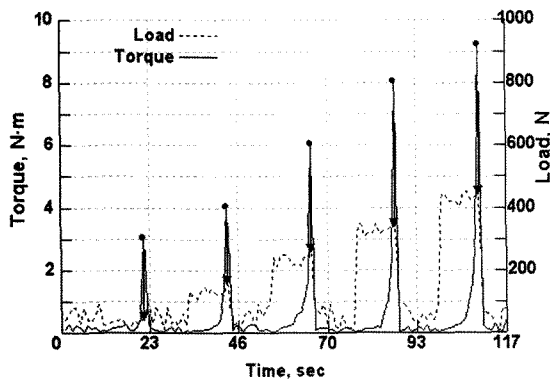


Fig. 4 Plotting of shear torque and load with time.

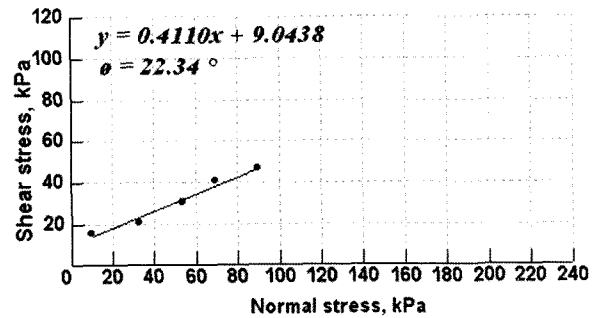


Fig. 5 Plotting of shear torque and load with time.

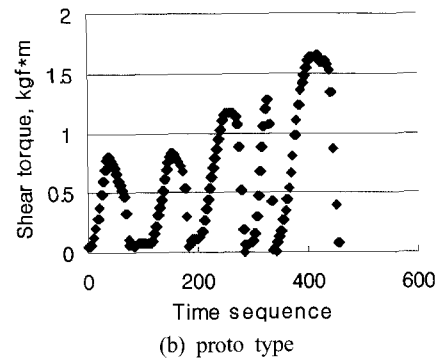
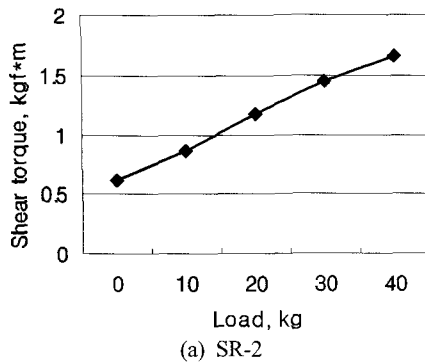


Fig. 6 Plotting of shear torques measured by SR-2 and the digital shear stress measuring device.

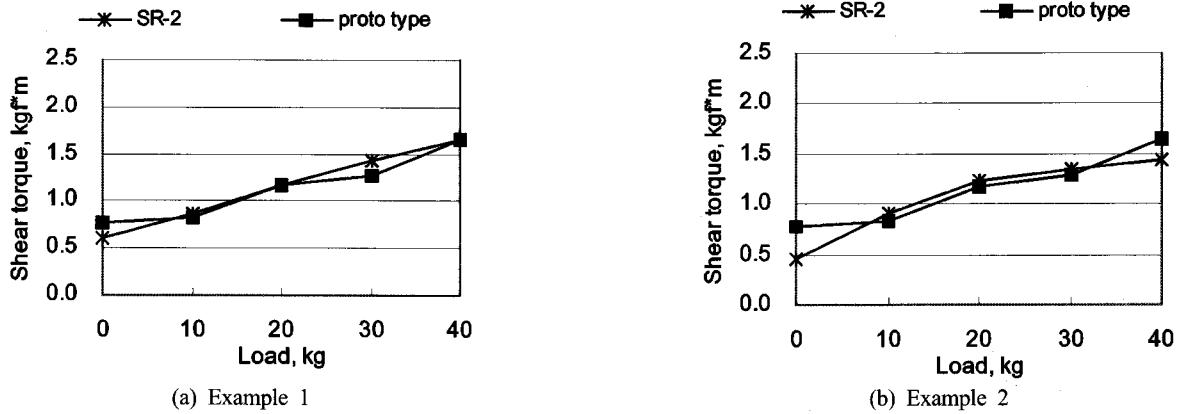


Fig. 7 Similarity of shear stresses measured by SR-2 and the digital shear stress measuring device.

속적으로 계측, 저장하는 방식이다. 따라서 그림 6의 왼쪽 그래프는 하중 대비 전단토크 그래프에서 SR-2의 최대 토크 측정점을 보여주고 있다. 그림 6의 오른쪽 그래프는 디지털 측정 장치의 연속적 토크 측정점을 보여주고 있는 것으로서 x 축은 시간 시퀀스를 나타내고 있다. 그러나 기존 장비와 디지털 측정 장치의 두 데이터간의 최대값의 증가 경향은 유사함을 알 수 있다. 또한 각각의 하중별로 최대 토크 값을 비교 도시한 그림 7의 두 가지 예에서 보는 바와 같이 두 데이터간의 오차의 범위는 0.005 kPa ~ 0.863 kPa로 나타나 개발된 디지털 전단저항 측정 장치는 기존장비와 비슷한 성능을 가지고 있다고 판단되었다.

표 2는 인공토조 실험에서 SR-2와 디지털 측정 장치에 대해 6반복으로 측정한 두 장치의 최대 전단저항의 상관관계를 보여주고 있다. 인공토조에서 실험 토양의 조성은 표 3에 나타났다. 표 2에 나타난 바와 같이, R²은 비교적 높은 값을 나타내고 있어 본 연구에서 개발된 장치는 그 편리성과 더불어 신뢰성 있는 장치로 판단하였다.

Table 2 Relationship between maximum shear stresses measured by SR-2 and the digital shear stress measuring device

Replication	RMSE, N·m	R ²
1	2.62	0.94376
2	5.27	0.79404
3	3.78	0.78102
4	9.53	0.92537
5	8.46	0.89954
6	5.00	0.96539

Table 3 Test soil properties based on USDA classification

Composition			Texture
Sand (%)	Silt (%)	Clay (%)	
53.5	37.1	9.4	Sandy Loam

나. 디지털 전단저항 측정 장치의 농경지 검증 실험

본 연구에서 개발된 디지털 전단저항 측정 장치는 실내 실험에 이어 SR-2와 더불어 7군데의 포장에서 검증 실험이 수행되었다. 실험 포장은 디지털 전단저항 측정 장치의 응용 다양성을 보기 위하여 논, 밭과 과수원 포장을 포함하였다. 그림 4와 5에서 제시한 실험방법을 이용해서 측정 자료를 분석하였고, 그림 8에 동일한 지역에서 계측한 수직하중과 전단저항력 간의 관계 그래프를 이용하여 c와 φ값을 추정한 예를 나타내었다.

그림 8의 그래프의 개략적인 경향을 볼 때 논 포장에서 점착력(직선의 기울기)의 과도한 차이를 제외하면 SR-2 장비와 개발된 디지털 측정 장치의 전단저항 측정 특성은 매우 유사해 보임을 알 수 있다.

표 4는 실외 시험지역 7개소에서 기존의 장비와 개발된 장비를 이용하여 측정한 최대 전단저항력과 수직하중 간의 상관관계를 바탕으로 구해진 c와 φ값을 보여주고 있다. 표에서 보는 바와 같이 내부마찰각 φ는 비교적 두 장비 간에 일치함을 보이고 있다. 그러나 직선의 절편으로 나타나는 점착력 c는 다소 값이 차이가 나는 것으로 나타났는데 이는 비교적 작은 수의 데이터 측정점을 이용한 선형회귀의 문제점이 반영된 것으로 보이며 측정점의 증가로 상쇄될 것으로 생각되었다. 두 장비간의 점착력 및 내부마찰각 측정에 대한 R² 값도 0.54와 0.72로 분석되어 서로의 장비는 내부마찰각 측정에 보다 유사성이 있는 것으로 나타났다.

4. 요약 및 결론

농용차량의 견인력 및 경운작업기의 경운저항은 토양의 전단강도에 의해 결정되기 때문에 토양의 전단특성은 매우 중요하지만 이의 측정은 측정자의 숙련도에 따라 오차가 발생한다. 따라서 본 연구에서는 토양 전단강도 측정을 디지털 전

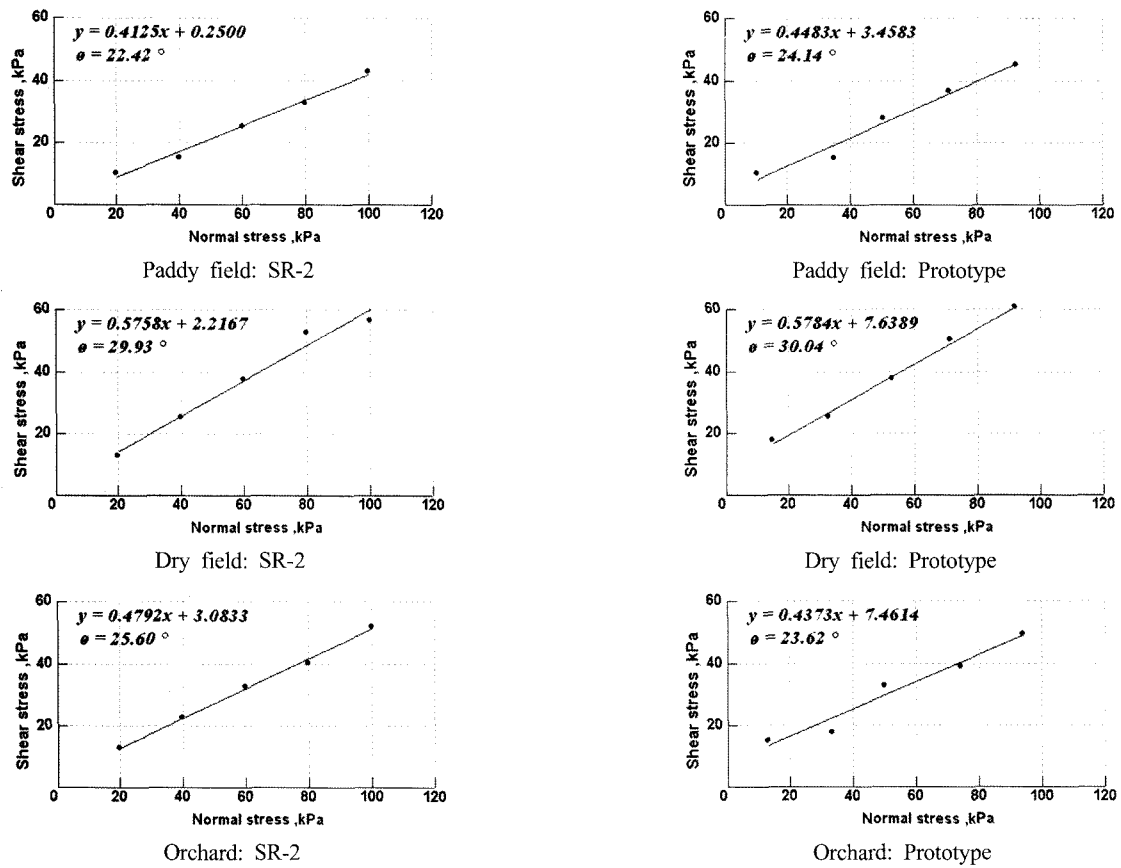


Fig. 8 Comparison of maximum shear stress versus normal stress measured by SR-2 and the digital shear stress measuring device at various field conditions.

Table 4 Cohesion and internal friction angle estimated by SR-2 and the digital shear stress measuring device at various field conditions

Field Index	c		ϕ	
	SR-2	Prototype	SR-2	Prototype
1	8.04	13.82	27.23	23.01
	7.13	9.04	17.68	22.34
	21.92	26.04	22.82	21.56
2	11.96	9.68	19.82	21.49
	3.13	6.75	29.63	29.46
	13.46	18.79	27.04	28.53
3	18.46	3.46	25.89	24.14
	19.29	25.04	31.05	32.58
	0.25	18.25	22.42	30.92
4	6.25	8.13	19.93	21.56
	10.96	7.63	28.17	30.04
	11.00	22.15	19.29	17.21
5	2.22	3.09	29.93	32.77
	10.11	14.27	19.18	18.93
	15.67	20.80	32.35	30.21
6	36.21	41.71	27.61	30.40
	14.08	13.30	30.08	29.75
	6.54	8.96	31.57	36.52
7	6.17	17.61	31.31	32.06
	16.58	20.81	28.99	30.57
	3.08	7.46	25.60	23.62
	11.00	8.70	30.96	32.54
RMSE	6.99		2.92	
R^2	0.54		0.72	

단저항 측정 장치를 설계 제작하고 실내의 인공토조와 선택된 실외의 실제 포장에서 기존의 SR-2 수동 전단저항 측정기와 측정 데이터를 비교, 분석하여 개발된 디지털 전단저항 측정 장치의 신뢰도를 검증하고자 하였다.

연구결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 기존의 장비와 비교할 때 디지털 전단저항 측정 장치의 전단토크 측정의 RMSE 범위는 실내 인공토조에서는 $2.62 \text{ N}\cdot\text{m} \sim 9.53 \text{ N}\cdot\text{m}$ (측정 한계 $0 \text{ N}\cdot\text{m} \sim 245 \text{ N}\cdot\text{m}$)이며, R^2 의 범위는 0.78~0.97로 나타났다. 이는 인공토조의 표면의 상태는 토양 내부의 상태에 비하여 변이가 거의 없는 균일한 상태로 실험 조건이 형성되었기 때문이라 사료된다.
- (2) 그래프의 개략적인 경향을 볼 때 논 포장에서 점착력(직선의 기울기)의 차이를 제외하면 SR-2 장비와 개발된 디지털 측정 장치의 전단저항 측정에 대한 특성은 매우 유사하였다.
- (3) 본 연구에서 개발된 디지털 전단저항 측정 장치는 GPS 위치정보와 결합되어 자동적으로 전단저항을 측정할 수 있는 효율적인 장비로서 실험에서 보인 데이터의 신뢰성으로 볼 때 보정작업을 통하여 충분히 기존의 수동 측정장비를 대체할 수 있을 것으로 판단되었다.

참 고 문 헌

1. Chong, B. H., Y. J. Park, H. K. Park, S. B. Park and K. U. Kim. 2005. Mapping of cone index for precision tillage. *Journal of Biosystems Engineering* 30(2):127-133.
2. Chung, S. O. 2004. On-the-go soil strength profile sensor. Thesis of Ph.D., University of Missouri-Columbia, MO, USA.
3. Hong, W. P.. 1992. Soil behavior of shear stress test. Korean Science Foundation, Research Report.
4. Ibarra, S. Y., E. McKyes and R. S. Broughton. 2005. Measurement of tensile strength of unsaturated sandy loam soil. *Soil and Tillage Research* 81(1):15-23.
5. Suna, Y., D. Ma, P. S. Lammersb, O. Schmittmannb and M. Roseb. 2006. On-the-go measurement of soil water content and mechanical resistance by a combined horizontal penetrometer. *Soil and Tillage Research* 86(2):209-217.
6. Whalleya, W. R., P. B. Leeds-Harrisonb, L. J. Clarka and D. J. G. Gowingc. 2005. Use of effective stress to predict the penetrometer resistance of unsaturated agricultural soils. *Soil and Tillage Research* 84(1):18-27.
7. Zhang, B., Q. G. Zhao, R. Horn and T. Baumgartl. 2000. Shear strength of surface soil as affected by soil bulk density and soil water content. *Soil and Tillage Research* 59(3/4):97-106.
8. Zimbone, S. M., A. Vickers, R. P. C. Morgan and P. Vella, 1996. Field investigation of different techniques for measuring surface soil shear strength. *Soil Technology* 9(1/2):101-111.