

## 실시간 포장에서 측정된 토양 경도 및 전자장 유도 전기전도도와 작물수량과의 관계

정원교\* · Newell R. Kitchen<sup>1</sup> · Kenneth A. Sudduth<sup>1</sup>

농업과학기술원, <sup>1</sup>Columbia

### Relationship of soil profile strength and apparent soil electrical conductivity to crop yield

Won-Kyo Jung\*, Newell R. Kitchen<sup>1</sup> and Kenneth A. Sudduth<sup>1</sup>

National Institute of Agricultural Science and Technology, 249 Sudun-dong, Suwon, Kyunggi, Korea, 441-707

<sup>1</sup>United States Department of Agriculture-Agricultural Research Services, Columbia, MO 65203 USA

Understanding characteristics of claypan soils has long been an issue for researchers and farmers because the high-clay subsoil has a pronounced effect on grain crop productivity. The claypan restricts water infiltration and storage within the crop root zone, but these effects are not uniform within fields. Conventional techniques of identifying claypan soil characteristics require manual probing and analysis which can be quite expensive; an expense most farmers are unwilling to pay. On the other hand, farmers would be very interested if this information could be obtained with easy-to-use field sensors. Two examples of sensors that show promise for helping in claypan soil characterization are soil profile strength sensing and bulk soil apparent electrical conductivity (ECa). Little has been reported on claypan soils relating the combined information from these two sensors with grain crop yield. The objective of this research was to identify the relationships of sensed profile soil strength and soil EC with nine years of crop yield (maize and soybean) from a claypan soil field in central Missouri. A multiple-probe (five probes on 19-cm spacing) cone penetrometer was used to measure soil strength and an electromagnetic induction sensor was used to measure soil EC at 55 grid site locations within a 4-ha research field. Crop yields were obtained using a combine equipped with a yield monitoring system. Soil strength at the 15 to 45 cm soil depth were significantly correlated to crop yield and ECa. Estimated crop yields from apparent electrical conductivity and soil strength were validated with an independent data set. Using measurements from these two sensors, standard error rates for estimating yield ranged from 9 to 16%. In conclusion, these results showed that the sensed profile soil strength and soil EC could be used as a measure of the soil productivity for grain crop production.

**Key words :** Soil strength, Apparent electrical conductivity, Claypan soil

## 서 언

점토 경반층 토양 (claypan soils)은 미국 중서부지방에 약 400만 ha정도 분포되어 있으며 (Soil Survey Staff, 1981), 풍적으로 생성된 토양으로부터 점토입자의 이동으로 argillic 층위가 발달되었으며 점토함량은 30-70%로 보고되고 있다 (Kitchen et al., 1998; Nikiforoff and Drosdoff, 1943). Argillic 층위가 발견되는 깊이는 지형에 따라 매우 다르게 나타난다. 토양유실이 많이 진행된 summit 이나 shoulder 위치에서는

표토와 매우 가깝게 나타나기도 하나 foot-slope나 bottom 위치에서는 지표로부터 수m 까지 깊은 곳에서 관측되기도 한다 (Kitchen et al., 1998). 점토경반층 토양의 생산성은 argillic 층위의 공간적 분포와 많은 관련이 있다 (Kitchen et al., 1999). 공간적 토양 특성들을 조사하고 분석하기 위해서 전통적인 토양분석기법은 많은 노력과 시간이 소요되는 단점이 있다. 토양의 층위별 토양시료의 채취 분석을 위해서 전통적인 방법으로 구덩이를 파고 시료를 채취한다면 시료를 얻기 위해서 투입하는 시간과 노력이 과도하게 소요되게 된다. 이러한 어려움과 불편함을 해소하기 위해 신속하고 간편한 토양센서 등을 이용한 방법들이 고안되고 사용되고 있는데 대표적인 것들이 전기

접 수 : 2006. 1. 4 수 리 : 2006. 2. 27  
\*연락처 : Phone: +82312900276,  
E-mail: wonkyo@rda.go.kr

전도도, 토양경도, 수확량 모니터링, 토양산성도 등이다 (Christy et al., 2004; Chung et al., 2002; Chung et al., 2004; Sudduth et al., 2003). 이들 센서는 토양에 최소한의 접촉을 하거나 토양시료를 자동으로 채취하는 방법 등을 사용하고 있다. 트랙터에 장착된 센서는 작물이 생육 중에는 사용이 어렵다는 단점도 있지만 GPS를 장착해서 포장의 공간적인 정보를 동시에 측정할 수 있는 장점도 있다.

미국 중서부지역에 분포하는 점토경반층 토양은 점토의 함량, 유기물 함량, 토양 입단화율, 표토의 깊이 등이 토양의 생산성과 많은 관련이 있는 것으로 보고되고 있으며 점토경반층의 공간적 변이도 지역적으로 매우 많은 차이를 나타내고 있다 (Kitchen et al., 1998). Chung et al., (2004)은 점토경반층 토양에서 토양의 경도가 argillic 층위에서 가장 높게 나타나며 깊이가 증가함에 따라 서서히 감소하다가 70 cm 이상의 깊이에서 다시 높아지는 것으로 보고하고 있다.

전기전도도 (EC: electrical conductivity)는 전류의 흐름에 대한 공간 내 물질의 저항에 대한 역수로 나타내며 일반적으로 토양의 전기전도도는 토양용액에서 염류의 농도를 나타내는 특성으로 사용되고 있다 (Geonics Limited, 1997; Rhoades et al., 1976). 토양의 시료를 채취하여 증류수를 혼합하여 EC 측정기로 측정하는 염류분석 방법과 달리 전자 유도법 (electromagnetic induction method)은 현장에서 직접 신속하게 토양의 전기전도도 (ECa: apparent electrical conductivity)를 측정할 수 있는 방법이다 (Geonics Limited, 1997; Rhoades et al., 1976; Sudduth et al., 2003). 현장에서 측정된 ECa는 토양 중 점토의 함량, 모래함량, 표토의 깊이, 수량등과 유의한 상관성이 있는 것으로 보고되고 있다 (Johnson et al., 2003; Kitchen et al., 1999).

점토경반층 토양에서 콩이나 옥수수를 재배할 경우에 높은 점토함량으로 인하여 토양 중 물의 이동과 양분의 이동 등에 많은 제약을 받고 있으며 특별히 고온 건조기인 지역에서는 6월부터 8월까지의 토양건조로 인한 토양표면 균열 등이 나타나고 있다. 이에 따라 관개시설이 구비되지 않은 농장에서는 수량의 공간적, 년차 간 변이가 매우 높게 나타나고 있다. 따라서 본 연구는 점토경반층 토양에서 수량 변이의 특성을 파악하기 위하여 센서를 통하여 관측된 층위별 토양경도 및 ECa와 작물의 수량과의 관련성을 분석하는데 목적이 있다.

## 재료 및 방법

**시험포장의 개요** 시험포장은 미국 미조리주 센트랄리아 북쪽 3 km 지점의 35 ha 면적의 포장 내에서

4 ha의 구역을 선정하였으며 (위도: 39°13'48"; 경도: 92°07'00"), 1991년부터 미농무성 농업연구청의 정밀농업연구 시험포장으로 최소경운을 통한 옥수수와 콩의 윤작이 시행되고 있다 (Kitchen et al., 1998). 콩과 옥수수의 목표수량은 각각 2,508 kg ha<sup>-1</sup>과 10,079 kg ha<sup>-1</sup>이며 이에 따라 옥수수 재배의 경우 질소 190 kg ha<sup>-1</sup>을 시비하며 석회, 인산 및 칼리는 검정시비를 하고 있다. 연구지역의 년 평균 기온은 12°C이며 년간 평균 강수량은 1,004 mm 이다(USDA-NRCS, 1995). 공시토양은 Adco통 (fine, smectitic mesic Vertic Albaqualfs)과 Mexico통 (fine, smectitic mesic Aeric Vertic Epiaqualfs)이다. 이 토양은 일부 배수가 불량하며 토양 중 물 침투가 느린 풍화토 및 풍화잔적토로 이루어져 있다 (Nikiforoff and Drosdoff, 1943). 경사는 0-5%이며 표토의 토성은 미사질식양토, 미사질식토, 또는 식토이다. 점토경반층의 점토함량은 50-65% 범위이다.

**토양층위별 토양 경도의 측정** 2004년 작물 수확 후 토양의 층위별 경도를 측정하기 위해 Raper et al. (1999)이 고안한 장치와 같은 형태의 GPS (Global positioning system)가 장착된 트랙터에 부착한 다중 cone penetrometer 센서를 사용하였다. 유압으로 작동되는 센서는 15 cm의 간격으로 5개의 센서를 횡으로 (19 cm 간격) 트랙터 후면에 부착하여 이동 중 정지하여 동시에 5개의 센서를 토양 중에 수직으로 삽입하였으며 최대 1 m까지 0.5 cm 단위로 토양의 경도를 측정하였다. 시험포장내에서 330×150 m의 구역에서 30 m 격자 지점을 RTK-GPS (Real-time kinematic global positioning system)를 이용하여 표시하고 55개 지점을 측정하였다. 측정된 자료 중 특이한 값을 보이는 자료는 토양중 이물질에 의한 간섭 영향으로 판단하고 현장에서 재 측정 한 후 자료로 사용하였다. 다중 센서를 이용하여 측정할 경우에 측정지점에서 특이 값으로 인한 오차를 손쉽게 보정할 수 있는 장점이 있다. 본 시험을 위해 측정된 자료를 경운의 범위 내에 드는 15 cm 이하의 깊이에서는 0-7 cm와 7-15 cm 간격으로, 15 cm 이상의 깊이에서는 15 cm를 간격으로 90 cm 까지의 각각 범위의 평균한 자료를 사용하였다.

**ECa의 측정** 토양경도 측정지점과 같은 위치의 지표면에서 EM38 (Geonics)을 사용하여 수직 (shallow mode)과 수평 (deep mode)으로 측정하였다. 전자기장의 간섭을 최소화하기 위하여 금속물체와 근접을 피하였고 센서의 방향을 남북으로 평행하게 향하게 하여 측정하였다. 자료의 측정은 2004년 작

물 수확 후 포장의 수분상태가 포장용수량에 가까운 상태에서 측정하였다.

**작물 수량의 측정** 작물의 수량은 GPS가 장착된 콤바인 수량 모니터링 시스템에 의하여 측정되었으며 데이터 수집 후 데이터 에러 제거 과정을 거쳐 10 m 격자형 자료로 변환 (Kitchen et al., 2003) 한 후 ECa와 토양경도를 측정한 위치와 같은 지점의 수량 값을 선택하여 자료로 사용하였다.

## 결과 및 고찰

**층위별 토양 경도의 특성** 토양의 깊이별 토양경도 측정기로 측정한 시험포장의 토양경도는 깊이가 증가 할수록 증가하여 지표로부터 15-30 cm 깊이에 이르러 평균 토양의 경도 값이 1.57 MPa로 높게 나타났다. 토양의 깊이가 증가할수록 감소하다가 토양의 깊이가 45-60 cm 지점에서 가장 낮았으며 토양의 깊이가 증가할수록 토양 경도 값 또한 증가하는 경향을 나타내고 있다 (Table 1). 토양의 경도 값이 15-30 cm 깊이에서 높게 나타나는 것은 점토경반층 토양의 특징인 argillic 층위로 인한 점토의 집적으로 인한 토양경도의 증가가 원인으로 분석된다. 또한 토양의 깊이가 45-60 cm에서 토양경도가 낮아지는 것은 집적된 argillic 층 아래에 상대적으로 점토집적이 낮은 층이 있는 때문인 것으로 추정된다. 60 cm 이상의 토양 깊이에서는 지하수에 의한 토양수분의 증가 또는 센서의 관입저항이 커지는 것이 원인으로 분석할 수 있다.

지표로부터 45 cm 이내의 토양의 깊이에서는 토양경도의 변이계수가 23% 이상임에 반하여 45 cm 이상의 깊이에서는 변이계수가 20% 이하로 나타나 표토에서 상대적으로 토양경도에 변이가 많고 심토에서는 토양경도의 변이가 적은 것으로 나타났다.

**토양의 ECa 특성** 토양의 지표면에서 ECa 센서 EM38을 각각 수평 (shallow mode)과 수직 (deep mode) 으로 측정한 값을 Table 2 에 나타내고 있다. ECa 값의 평균은 shallow mode와 deep mode 각각 31 mS m<sup>-1</sup>와 43 mS m<sup>-1</sup> 이고 범위는 각각 20-44 mS m<sup>-1</sup> 와 31-56 mS m<sup>-1</sup> 로 나타나 deep mode 값이 shallow mode 값보다 높게 나타났다. Shallow mode와 deep mode ECa 의 변이계수는 각각 18%와 14%로 나타나 shallow mode의 측정값이 상대적으로 deep mode에서의 측정값보다 큰 변이를 가지는 것으로 나타났다 (Table 2). 이러한 결과는 Sudduth et al., (2003) 이 측정한 결과와 같은 경향을 나타내고 있다.

**작물 수량과 강우량 특성** 사탕수수를 재배한 1995년을 제외한 1994년부터 2002년까지 수확량 모니터링 시스템을 이용하여 조사한 연구지역의 콩과 옥수수의 수량과 작물생육기간중의 강우량을 Table 3 에서 나타내고 있다. 옥수수의 평균수량은 7월과 8월의 강우량에 따라 많은 차이를 나타내고 있다. 7월과 8월의 강우량이 43 mm 인 1999년에 옥수수의 수량이 2,325 kg ha<sup>-1</sup> 였으며 같은 기간에 강우량이 131 mm 인 1997년에는 옥수수의 평균수량은 6,359 kg ha<sup>-1</sup>로 나

**Table 1. Descriptive statistics of profile soil strength data.**

Soil depth	Avg.	Min.	Max.	CV <sup>†</sup>
	-----MPa-----			%
0 to 7cm	0.25	0.04	0.64	54
7 to 15cm	0.98	0.50	1.59	23
15 to 30cm	1.57	0.80	2.56	25
30 to 45cm	1.42	0.92	2.84	27
45 to 60cm	1.36	0.98	1.92	13
60 to 75cm	1.82	1.23	2.24	14
75 to 90cm	3.00	1.77	5.04	20

<sup>†</sup> Coefficient of variation

**Table 2. Descriptive statistics of apparent electrical conductivity.**

Mode	Avg.	Min.	Max.	CV <sup>†</sup>
	-----mS m <sup>-1</sup> -----			%
Shallow	31	20	44	18
Deep	43	31	56	14

<sup>†</sup> Coefficient of variation

타나 수량의 차이가 7-8월의 강우량에 따라 많은 차이를 보이고 있다. 콩의 경우에도 옥수수와 비슷한 경향을 보이고 있다. Jung et al., (2004)은 비관개 지역의 점토경반층 토양에서 7-8월의 강우량과 최근 10년의 수량과의 관계분석을 통하여 강우량의 합계가 150 mm 미만일 경우에 작물이 수분 부족의 영향을 받을 수 있으며 7-8월의 강우량의 합계가 150 mm 미만인 경우를 “dry year”로 같은 기간의 강우량의 합계가 150 mm 이상인 경우를 “wet year”로 정하고 7-8월의 강우량 150 mm를 기준으로 “drought boundary”를 정의하고 있다. 1994년을 제외한 콩 수량의 변이계수가 옥수수 수량의 변이 계수보다 현저히 낮게 나타나 포장 내에서 콩의 수량변이가 옥수수의 수량변이보다 낮은 것으로 분석 된다.

**토양의 깊이별 경도와 수량 및 ECa의 상관** 옥수수의 수량은 토양의 깊이가 15-30 cm 와 30-45 cm 인 지점에서 토양의 경도와 유의한 양의 상관관계를 나타내고 있으며, 토양의 깊이가 60-75 cm와 75-90 cm 인 지점에서는 유의한 음의 상관관계를 나타내고 있다 (Table 4). 1994년의 콩 수량은 토양의 깊이가 15-30 cm 와 30-45 cm 인 지점에서 토양의 경도와

유의한 음의 상관관계를 나타내고 있으며, 토양의 깊이가 60-75 cm와 75-90 cm 인 지점에서는 유의한 양의 상관관계를 나타내고 있다. 1996년, 1998년, 및 2000년의 콩 수량은 토양의 깊이가 15-30 cm와 30-45 cm 지점의 토양의 경도와 유의한 음의 상관을 보이고 있다. 위에서 살펴본 바와 같이 7-8월의 강우량이 Jung et al., (2004)이 제안한 “drought boundary” 미만인 때에는 15-45 cm 토양 깊이에서는 콩 수량과 토양 경도와 양의 상관관계를 보이는 반면 7-8월의 강우량이 “drought boundary” 이상인 때에는 같은 토양 깊이에서 콩 수량과 토양경도와 유의한 음의 상관관계를 나타내고 있다. 이러한 현상은 건조기에 토양의 깊이가 얇은 곳에서는 토양의 경도와 수량이 음의 상관을 보이는 것으로 보아 표토에서는 상당부분 수분 부족의 영향을 받고 있는 것으로 추정할 수 있다. 또한, 토양의 깊이가 깊은 60-90 cm의 지점에서는 토양의 경도와 수량과 음의 상관관계를 보이고 있으며 이는 7-8월의 강우량이 “drought boundary” 이상인 해와 비교해 볼 때 반대의 상관을 나타내고 있다. 이는 건조기의 경우 심토에 대한 센서의 관입저항이 높아지고 이에 따라 토양의 경도가 높아진 것과 상관이 있는 것으로 추정된다. 또한, 7-8월의 강우량이

**Table 3. Descriptive statistics of yield data measured by combine monitoring system and monthly precipitation during growing season in the research site.**

Crop	year	Yield				Precipitation						
		Avg.	Min.	Max.	CV	April	May	June	July	August	September	July-August
		kg ha <sup>-1</sup>				mm						
Corn	1997	6,359	4,203	8,997	21	82	126	99	40	91	56	131
	1999	2,325	1,375	3,979	25	175	86	140	9	34	31	43
	2001	5,911	4,704	7,286	11	115	185	154	89	21	50	110
Soybean	1994	1,492	1,028	2,452	21	264	26	89	10	39	60	49
	1996	3,053	2,795	3,185	3	62	174	88	70	122	86	192
	1998	2,019	1,599	2,235	7	103	55	240	149	42	142	191
	2000	2,524	1,915	2,871	8	22	86	171	71	223	47	294
	2002	1,967	1,527	2,374	9	139	233	53	54	86	15	140
58 years avg. <sup>†</sup>						89	108	108	90	89	92	179

<sup>†</sup> Monthly precipitation average since 1944.

**Table 4. Relationship of profile soil strength to crop yield and apparent soil electrical conductivity.**

Soil depth	Corn yield				Soybean yield				ECa	
	1997	1999	2001	1994	1996	1998	2000	2002	Shallow	Deep
0 to 7cm	-0.11	-0.17	-0.17	-0.15	0.07	0.03	0.01	-0.10	0.20	0.04
7 to 15cm	-0.08	-0.13	-0.22	-0.17	0.11	-0.12	0.07	-0.06	0.03	0.02
15 to 30cm	0.51**	0.57**	0.43**	0.47**	-0.32*	-0.40**	-0.41**	0.20	-0.47**	-0.52**
30 to 45cm	0.37**	0.59**	0.39**	0.56**	-0.38**	-0.54**	-0.44**	0.09	-0.60**	-0.55**
45 to 60cm	0.12	0.12	-0.03	0.01	0.17	-0.17	-0.30	0.11	-0.12	-0.15**
60 to 75cm	-0.38**	-0.44**	-0.48**	-0.54**	0.34*	0.23	0.22	-0.11	0.50**	0.44**
75 to 90cm	-0.60**	-0.60**	-0.64**	-0.60**	0.24	0.29	0.41**	-0.29*	0.56**	0.53**

\*, \*\* Significant at the 0.05 and 0.01 probability level respectively.

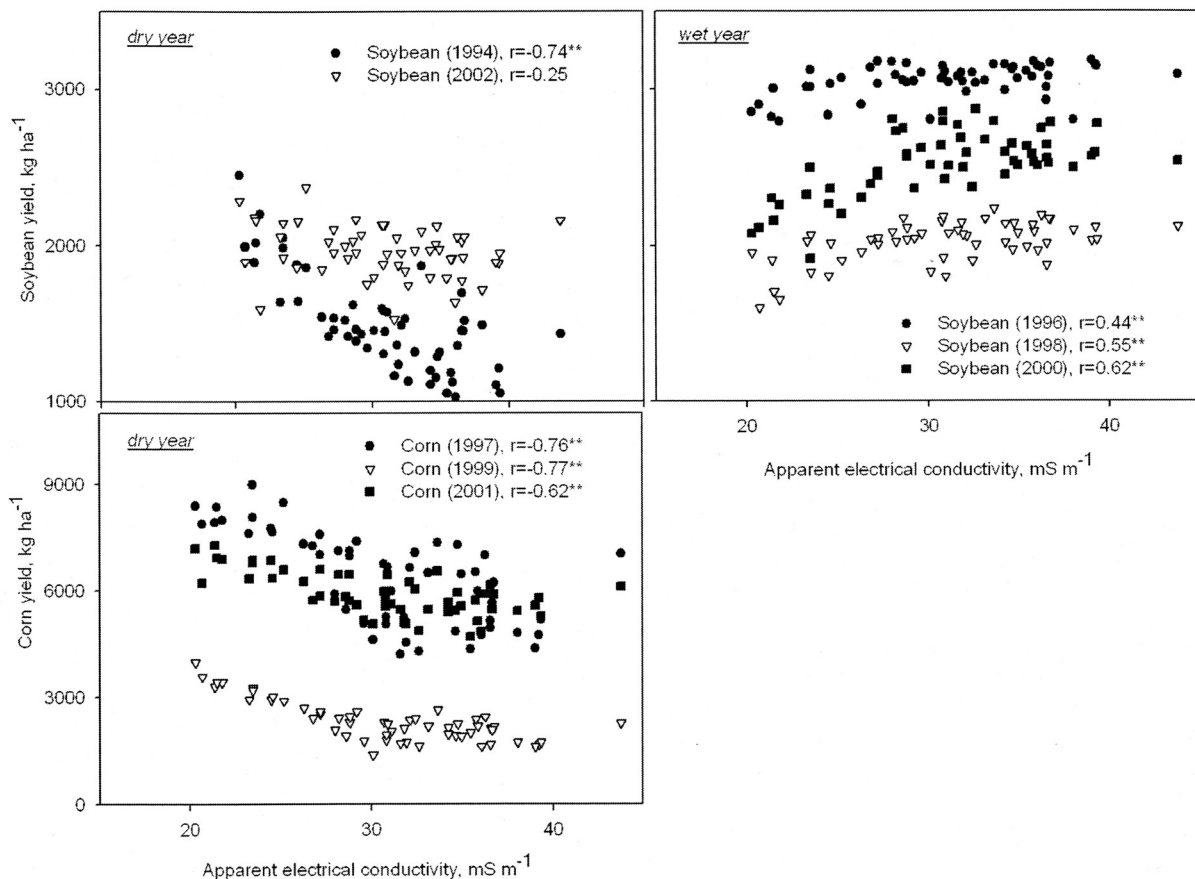
“drought boundary” 이상인 해에는 토양의 경도와 수량과 15-30 cm 및 30-45 cm 토양깊이의 토양경도와 수량과 음의 상관관계를 나타내고 있다. 이런 현상은 표토의 수분이 충분한 상태에서는 심토의 과습으로 인한 뿌리의 호흡저하 등에 따른 영향인 것으로 추정된다. 토양의 깊이가 15-30 cm 및 30-45 cm 인 지점에서의 토양의 경도는 토양의 ECa 와 유의한 음의 상관관을 보이고 있으며 토양의 깊이가 60-90 cm 인 지점에서는 유의한 양의 상관관을 나타내고 있다.

**토양의 ECa와 작물 수량의 상관** ECa는 1994년도 콩 수량과 유의한 음의 상관관계를 나타내는 반면 1996년, 1998년, 및 2000년도의 콩 수량와는 유의한 양의 상관관계를 나타내고 있다. 1997년, 1999년 및 2001년도의 옥수수 수량은 ECa에 대하여 유의한 음의 상관관을 나타내고 있다 (Fig. 1). 이러한 현상은 Jung et al. (2005) 이 제안한 7-8월의 강우량을 기준으로 한 “drought boundary”를 이용하여 설명할 수 있는데, 7-8월의 강우량이 “drought boundary” 이하인 년도의 곡물 수량은 ECa에 대하여 유의한 음의 상관관을 나타내고 있으나 같은 시기의 강우량이 “drought boundary” 이상인 습윤한 해에는 작물의 수량과 양의

상관을 나타내고 있다.

**토양 깊이별 토양 경도와 ECa의 작물 수량추정** 표준화된 토양 깊이별 토양 경도와 ECa를 독립변수로 하고 년도 별 작물의 수량을 종속변수로 하여 수량을 추정하는 유효변수를 찾기 위해 stepwise regression을 이용하여 1% 유의수준에서 결정계수의 값을 최대로 하는 변수를 선택하였다. 선택된 변수의 측정값과 작물 수량간의 회귀식을 추정하였으며 (Table 5) 추정된 회귀식의 결정계수는 0.15에서 0.66의 범위이며 다중변수가 선택된 옥수수 수량 추정식에서 결정계수가 단일 변수로 추정된 콩의 수량 추정식에서 보다 높게 나타났다.

**작물 수량 추정식의 검증** 추정된 회귀식의 검증을 위하여 추정에 사용된 데이터와 독립적으로 검증 데이터 (n=30) 를 사용하였다. 추정된 식을 이용하여 추정된 년도 별 작물의 평균 수량과 수확량 모니터링 시스템에 의해서 측정된 평균 수량을 나타내고 있다 (Table 5). 년도 별 측정된 수량에 대한 추정 수량이 표준 오차와 이들 비율의 백분율을 비교해 볼 때 1996년, 1998년 및 2000년의 표준오차와 비율이 상대



**Fig. 1.** Relationships between apparent electrical conductivity and crop yield. Dry years had July and August precipitation was less than 150 mm. Wet years had July and August precipitation was greater than 150 mm.

**Table 5. Comparison of crop yield estimation equation of ECa, which were selected from stepwise regression analysis of soil profile strength and apparent soil electrical conductivity data. ECa<sub>s</sub>, ECa<sub>d</sub>, and SSd stand for shallow and deep mode of apparent electrical conductivity measured by EM38 and soil strength at the soil depth of 75 to 90cm measured by multiple cone penetrometer respectively. For validation, independent data set (n=30) was used to compare measured and estimated yield.**

Crop	year	Estimation equation, (R <sup>2</sup> or r <sup>2</sup> )	Validation			
			Measured avg. (A)	Estimated avg.	SE <sup>†</sup> (B)	(A/B)*100
----- kg ha <sup>-1</sup> -----						
Corn	1997	= 13,645-124ECa <sub>s</sub> -634SSd, (0.60**)	6,594	8,259	937	14
	1999	= 5,480-47ECa <sub>s</sub> -39ECa <sub>d</sub> , (0.66**)	2,457	2,411	358	15
	2001	= 8,948-39ECa <sub>s</sub> -455SSd, (0.52**)	6,052	6,561	550	9
Soybean	1994	= 2,784-42ECa <sub>s</sub> , (0.54**)	1,648	1,542	267	16
	1996	= 2,789+9ECa <sub>s</sub> , (0.19**)	3,016	3,055	122	4
	1998	= 1,598+14ECa <sub>s</sub> , (0.30**)	2,027	2,012	163	8
	2000	= 1,604+21ECa <sub>d</sub> , (0.39**)	2,540	2,498	151	6
	2002	= 2,435-11ECa <sub>d</sub> , (0.15**)	1,981	1,967	177	9

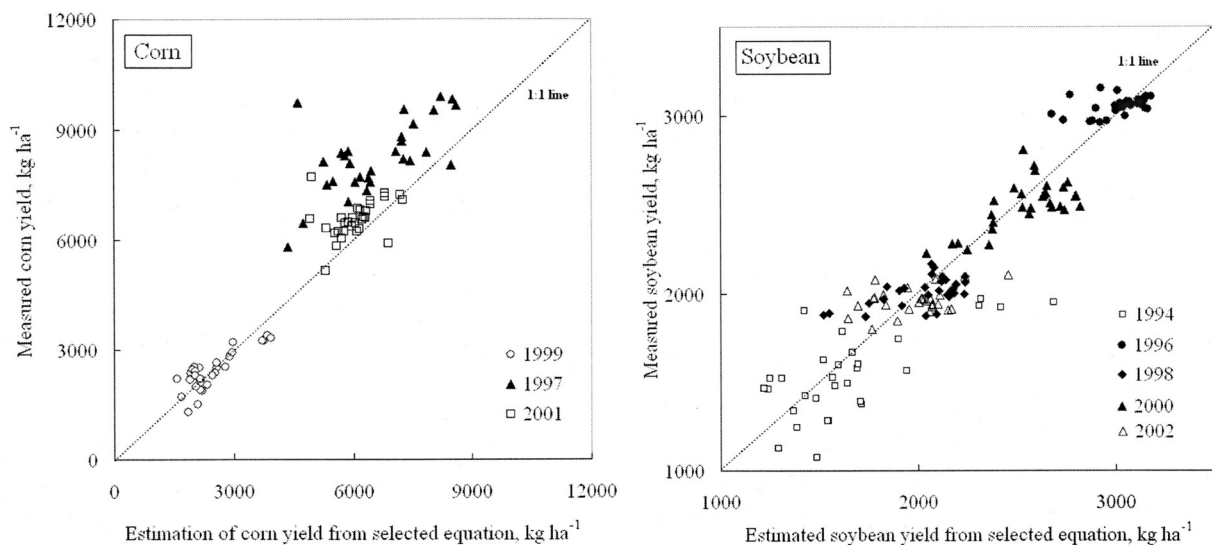
\*\* Significant at the 0.01 probability level

† Standard error of the estimated yield to the measured yield

적으로 낮게 나타나 7-8월의 강우량이 150 mm 이상으로 작물생육에 충분한 수분이 공급된 때에 추정된 식으로부터 예측된 수량의 오차가 적은 것으로 나타났다. 이와 반대로 7-8월의 강우량이 “drought boundary” 이하로 건조한 때에는 추정된 수량의 오차가 큰 것으로 나타났다. Fig. 2 에서는 옥수수와 콩의 추정수량과 측정수량과의 관계를 나타내고 있다. 옥수수는 1997년과 2001년의 측정된 수량이 추정된 수량보다 높게 나타나고 있다. 7-8월의 강우량이 “drought boundary” 보다 많은 년도 (1996년, 1998년 및 2000년) 에서 같은 시기의 강우량이 “drought boundary” 보다 적은 년도(1994년, 1997년, 1999년, 2001년 및 2002년) 에 비하여 측정된 수량과 추정된 수량 간에 1:1 선에 가까운 분포를 나타내고 있다.

### 요 약

점토경반층 토양에서 수량 변이의 특성을 파악하기 위하여 센서를 통하여 관측된 깊이별 토양경도 및 ECa와 작물의 수량과의 관련성을 분석한 결과, 깊이별 토양의 경도는 점토가 집적된 지표면으로부터 15-30 cm 지점의 점토경반층 (argillic horizon)에서 높게 나타나고 있으며 토양의 깊이가 깊은 지점에서 토양경도의 변이가 작게 나타났다. 1994년부터 2002년까지 콩과 옥수수 수량과 작물생육기의 강우량을 분석한 결과 7-8월의 강우량이 작물의 수량과 매우 밀접한 관계를 가지고 있으며 이 기간의 강우량이 150 mm 이하이면 작물이 수분 부족으로 수량이 낮아지는 것으로 나타났다. 지표로부터 15-45 cm 지점에서 토양



**Fig. 2. Relationship of estimated yield and measured yield. Independent data set (n=30) was used for validation of estimated yield from regression equation with selected variables of soil strength by soil depth and soil apparent electrical conductivity.**

의 경도와 ECa 가 작물의 수량과 매우 유의한 상관 관계를 갖는 것으로 나타났으며 “drought boundary” 인 7-8월의 강우량이 150 mm를 기점으로 각기 반대의 상관관을 보이는 것으로 나타났다. 측정된 토양의 깊이 별 경도 값과 ECa 를 이용하여 수량 추정식을 계산하였으며 추정식의 검증에 위하여 별도의 독립적인 자료를 이용하여 추정된 수량과 측정된 수량의 표준 오차를 비교한 결과 측정된 수량에 대한 표준오차의 비율이 4-16% 로 나타났으며 7-8월의 강우량이 150 mm 이하로 건조한 경우에 표준오차가 같은 시기에 강우량이 150 mm 이상으로 습윤한 경우보다 현저하게 표준오차가 크게 나타났다.

결론적으로 신속하고 경제적으로 이용할 수 있는 센서 측정자료와 작물수량과의 관련성을 분석한 결과, 연구에 이용된 점토경반층 토양에서 센서를 이용하여 측정된 ECa 및 깊이별 토양경도와 작물 수량 간에 통계적으로 유의한 상관관이 있음을 알 수 있었다.

## 인 용 문 헌

- Christy, C., K. Collings, P. Drummond, E. Lund. 2004. A Mobile Sensor Platform for Measurement of Soil pH and Buffering. ASAE Annual Meeting. Paper number 041042.
- Chung, S.O., K.A. Sudduth, S.T. Drummond. 2002. Determining yield monitoring system delay time with geostatistical and data segmentation approaches. Transactions of the ASAE. 45(4): 915-926.
- Chung, S.O., K.A. Sudduth, Carol Plouffe, Newell R. Kitchen. 2004. Evaluation of an On-the-go Soil Strength Profile Sensor Using Soil Bin and Field Data. ASAE Annual Meeting Paper number 041039.
- Geonics Limited. 1997. Applications of electromagnetic methods: Soils Salinity. Jan. Mississauga, Ontario, Canada.
- Johnson, C.K., K.M. Eskridge, B.J. Wienhold, J.W. Doran, G.A. Peterson, and G.W. Buchleiter. 2003. Using electrical conductivity classification and withinfield variability to design fieldscale research. Agron. J. 95:602-613.
- Jung, W.K., N.R. Kitchen, K.A. Sudduth, R.J. Kremer, and P.P. Motavalli. 2005. Relationship of apparent soil electrical conductivity to claypan soil properties. Soil. Sci. Soc. Am. J. 69:883-892.
- Kitchen, N.R., S.T. Drummond, E.D. Lund, K.A. Sudduth, and G.W. Buchleiter. 2003. Soil electrical conductivity and topography related to yield for three contrasting soil-crop systems. Agron. J. 95:438-449.
- Kitchen, N.R., D.F. Hughes, W.W. Donald, and E.E. Alberts. 1998. Agrichemical movement in the root zone of claypan soils: Ridge and mulchtillage systems compared. Soil Tillage Res. 48:179-193.
- Kitchen, N.R., K.A. Sudduth, and S.T. Drummond. 1999. Soil electrical conductivity as a crop productivity measure for claypan soils. J. Prod. Agric. 12:607-617.
- Nikiforoff, C.C., and M. Drosdoff. 1943. Genesis of claypan soil. Soil Sci. 53:459-482.
- Raper, R.L., B.H. Washington, J.D. Jarrell. 1999. A tractor-mounted multiple probe soil cone penetrometer. Applied Engineering in Agriculture. VOL. 15(4): 287-290.
- Rhoades, J.D., P.A.C. Raats, and R.J. Prather. 1976. Effects of liquid-phase electrical conductivity, water content, and surface conductivity on bulk soil electrical conductivity. Soil Sci. Soc. Am. J. 40:651-655.
- Soil Survey Staff. 1981. Land resource region and major land resource areas of the United States. USDA-SCS Agric. Handb. 296, U.S. Gov. Print. Office, Washington, DC.
- Sudduth, K.A., N.R. Kitchen, G.A. Bollero, D.G. Bullock, and W.J. Wiebold. 2003. Comparison of electromagnetic induction and direct sensing of soil electrical conductivity. Agron. J. 95:472-482.
- USDA-NRCS. 1995. Soil survey of Audrain County, Missouri (1995387974/00537/SCS). U.S. Gov. Print. Office, Washington, DC.