

우분퇴비 처리가 다층구조 토양의 수리전도도에 미치는 영향

김필주 · 이병렬* · 김건엽*

충남대학교 농과대학 농화학과
*농업과학기술원 농업생태과

Hydraulic Conductivity in Multi-layered Soil amended with Cow Manure Compost

P. J. Kim, D. Y. Chung, B. L. Lee*, and K. Y. Kim*

Dept. Agri. Chem., Chungnam National University., Taejon, Korea.

** Dept. Agro-Environment, ASTI, RDA, Suwon, Korea.*

ABSTRACT

To investigate the effects of organic matter and soil depth on soil water flow in a multi-layered soil, the saturated hydraulic conductivities(Ksat) were measured from the single- and multi-layered soil columns, that the soils were mixed with the oven-dried cow manure compost(CMC) at 4 different ratios such as 0, 2, 4, and 6% on a weight basis. The measured hydraulic conductivities(Ksat) were compared with theoretical hydraulic conductivity (Keff) calculated by Jury's equation of effective hydraulic conductivity.

In the single layered soil column saturated hydraulic conductivities(Ksat) were significantly decreased with increasing the application rate of compost. In the multi-layered the soil columns Ksat was also decreased with increasing rate of compost and soil depth. Calculated Keff showed the similar results of Ksat as obtained from the measured Ksat, whereas steadily increased with increasing soil depth. Therefore, modification of Jury's equation should be required to adapt theoretical Keff for field application.

※ Key word : Hydraulic conductivity, Infiltration, Multi-layer, Organic Matter

요 약 문

다층토양구조에서 유기물과 토양의 깊이가 토양수 이동에 미치는 영향을 조사하기 위하여 풍건한 유기퇴비를 토양에 0, 2, 4, 6%로 처리한 단층과 다층 토양구조를 가진 토양칼럼을 이용하여 포화수리전도도를 측정하였다. 한편 측정된 수리전도도는 현장에서 실제 측정없이 적용하기 위하여 Jury가 제시한 효율적 수리전도도공식을 이용하여 환산한 후 이 수치를 실제값과 비교하여 보았다. 단층과 다층 토양구조의 수리전도도는 토양에 가해진 유기물 함량이 증가함에 따라 수리전도도는 급격히 감소하였으나 다층구조의 경우 토양칼럼의 길이가 길어짐에 따라 길이가 증가된 만큼의 점진적으로 수리전도도가 증가되는 것이 조사되었다. 그러므로 다층구조의 토양에서 실제의 수리전도도값을 얻기 위해서는 Jury의 효율적 수리전도도공식의 변형이 필요하다.

주제어 : 수리전도도, 침투, 다층, 유기물

緒 言

농지에서 유기질 비료는 작물의 영양원으로 생육을 도모 할뿐 아니라 토양내 통기성과 보수력 등의 물리성을 개선(조백현 등, 1990)하는 등의 농업에서는 다기능비료로 간주되고 있다. 특히 화학비료의 장기 과다사용으로 인해 토양이 상당부분 산성화가 진행되어 있으며, 또한 빠른 속도로 가속화되고 있어 농업환경을 악화시킬 뿐만 아니라 토양내 과량의 염류 집적의 발생과 이들에 의한 주변 소수계 및 지하수의 오염이 가속화되고 있다.

이러한 소수계 및 지하수오염을 방지하기 위하여 토양내 무기이온과 기타의 오염물질의 거동을 예측하기 위하여 이들의 이동에 관여하는 다양한 요인의 수학적 해석을 통해 현장에서의 일어나는 현상을 묘사하는 Modeling기법이 크게 발전하고 있다. 여기에 관여하는 요인 중 물질의 거동특성 구명에 가장 중요한 요소중 하나는 수리전도도인데 전체 대상지역 토양의 수리특성을 부분적인 측면에서 측정된 수리전도도를 이용하여 전체 토양내 투수특성 및 용존물질의 이동특성의 해석하기 위한 방법이 그간 꾸준히 연구되어왔다.

대부분의 토양은 토양생성과 발달 배경, 경운의 깊이, 각 작물의 근권 깊이 등에 의해 각기 다른 다층토양구조를 이루고 있어 토양내 토양수와 용존물질의 이동속도는 각 층간의 토양의 물리화학적 특성 차이에 따라 큰 차이가 나타난다. 따라서 토양내 토양수와 용존물질의 이동특성을 정확히 구명하기 위해서 대표조건을 선정하여 각각의 수리전도도 특성을 일일이 측정해서 이용해야만 하는 번거로움이 있다. 이러한 번거로움을 줄이고 일의 효율성을 높이기 위해 July 등(1991)과 Hillel 등(1982)은 다층토양구조 내에서 각각의 대표 층의 수리전도도를 구해 전체 토양층 내에서의 수리전도도를 예측하는 Effective Hydraulic Conductivity(Keff)기법을 제안하였다.

따라서 본 연구는 유기물 처리량 변화에 따른 수리전도도 특성 변화를 파악하고, 다층 토양구조 내에서 깊이 변화에 따른 수리전도도 변화를 파악하여, 이론치 Effective hydraulic conductivity(Keff) 값과 비교하여 이론 값의 현장 적용가능성을 알아보려고 하였다.

理論的背景

Keff는 Fig 1과 같이 각각의 다른 수리전도특

성을 보이는 다층구조토양내에서 토양수의 지속적흐름(Steady state flow) 조건에서 인접하는 토층의 Flux는 같아야 한다(Hillel,1980).

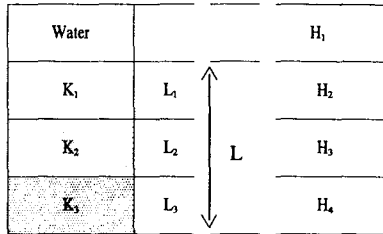


Fig. 1. Schematic diagram of a multi-layered soils.

$$q = \frac{K_1(H_1 - H_2)}{L_1} = \frac{K_2(H_2 - H_3)}{L_2} = \frac{K_3(H_3 - H_4)}{L_3} \quad \text{--- (식1)}$$

여기서,

- L : 전체 토양의 깊이 (cm)
- L₁, L₂, L₃ : 층의 토양 깊이 (cm)
- H₁, H₂, H₃ : 층의 물의 높이 (cm)
- K₁, K₂, K₃ : 수리전도도 (cm/sec)

여기서 이들 층위 간에 있을 수 있는 접촉점을 무시하면,

$$H_2 = H_1 - \frac{qL_1}{K_1} \quad \text{과} \quad \frac{qL_2}{K_2} = H_2 - H_3,$$

$$\frac{qL_3}{K_3} = H_3 - H_4$$

따라서,

$$\frac{qL_2}{K_2} = H_1 - \frac{qL_1}{K_1} - H_3 = H_1 - \frac{qL_1}{K_1} - H_4 - \frac{qL_3}{K_3}$$

$$q = \frac{(H_1 - H_4)}{(L_1/K_1 + L_2/K_2 + L_3/K_3)} \quad \text{(공식 2)}$$

식 2에서 분모는 토주의 각 층에 형성되는 수리저항(Rs=L/K)을 나타내며, 전체의 수리저항은 각층의 수리저항의 합과 같다(Jury and Gardner, 1991).

$$\frac{L}{K_{eff}} = \frac{L_1}{K_1} + \frac{L_2}{K_2} + \frac{L_3}{K_3} \quad \text{(공식 3)}$$

여기서,

K_{eff} : Effective hydraulic conductivity(cm/sec)

즉, K_{eff}는 다층구조의 대상토양의 전체 대표 수리전도도를 의미한다.

材料 및 方法

1. 토양 시료채취와 분석

토양은 충남 예산군 오가면의 시설재배지의 Ap층과 B층 토양을 취하여, 풍건후 2mm체로 사분하여 토양분석 및 칼럼실험에 이용하였다. 본 토양은 10년 이상 시설재배가 진행되어 왔으며, 1년 평균 4모작(알타리무우-수박-배추(파)-상추)을 하고 있으며, 다년간 화학비료 및 유기질 비료가 과량 사용되고 있는 지역으로, 각종 염류 및 유기질이 표층토내 과량 축적되어 작물에 대해 각종 염류장해 발생과 지표면 가까이에 위치하는 지하수 수질이 농업용수로 사용하기에 부적당한 수준이다.

토양분석은 농업기술연구소(1988)의 토양화학 분석법에 준하여 실험을 실시하였다. 이때 토성은 Sodium hexametaphosphate용액으로 시료를 분산후 Hydrometer를 이용하여 측정하였으며, 전기전도도(EC) 및 pH 분석은 물에 의한 1:5 용출법, CEC는 Ammonium acetate법, 유기물함량(OM)은 Wakley black법에 의해 각각을 분석하였다.

2. 포화수리전도도 및 이온의 용출특성 조사

1) 토양 칼럼제작

Ap층 토양칼럼은 2mm체를 통과한 Ap층 건조 토양에 우분퇴비를 건물비로 0, 2, 4, 6%를 각각 혼합한 후 Acryl Column(5cm ID×25cm L)에 용적밀도를 1.3g/cm³으로 조정하여 15cm 깊이로 충진하여 실제 포장과 비슷한 조건을 만들었다. B층 토양칼럼은 2mm를 통과한 B층의 건조토양을 용적밀도를 1.3g/cm³으로 조정하여 15, 30, 45cm 깊이로 충진하였다.

이와같이 제작된 각각의 칼럼을 그림 2에서와 같이 상부에 ①의 Ap층 Column을 하부에 ②의 15, 30, 45cm의 B층 Column을 각각 서로 연결하여 총 길이 30, 45, 60cm의 다층토양칼럼을 제작하였다.

2) 수리전도도 측정

각 처리조건에 의해 제작된 칼럼을 증류수를 이용하여 48시간동안 상향 포화시킨 후 증류수로 칼럼상부 표면에 주에 일정수두를 10cm 높이로 유지하면서 투수변화를 측정후 Darcy의 공식에 의하여 포화투수계수를 계산하였다. 이때 투수계수 측정은 법(Constant head method)을 이용하였으며, 수두는 토양표면에서 약 하였다.

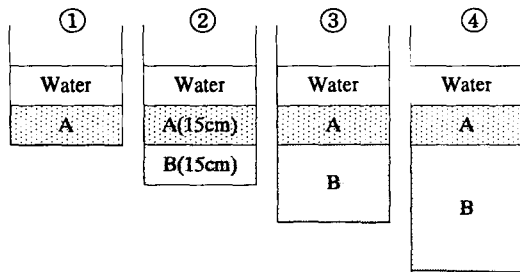


Fig. 2. Schematic diagrams of soil columns used for the measurement of saturated hydraulic conductivity. A:A Horizon soil; B:B Horizon soil). ①: a single-layered column, ②~③: a multi-layered column.

結果 및 考察

1. 토양의 이화학적 특성

본 실험에 이용한 토양은 미사질양토(Silt Loam)로써, 이화학적 특성은 Table 2와 같다.

Table 2. Characteristics of physical and chemical properties of soil used for the experiment.

Horizon	Depth (cm)	pH	EC (dS/m)	OM (%)	CEC (me/100g)
Ap	0 - 20	6.4	4.8	5.1	12.9
B	21 -	4.7	0.8	4.1	13.0

ESP* (%)	Particle Distribution(%)			Texture
	Clay	Silt	Sand	
6.0	18.4	58.3	23.3	SiL
2.8	17.4	56.4	26.2	SiL

* ESP: Exchangeable sodium percentage

Ap층 토양은 pH 6.4, EC 4.8 dS/cm, ESP 9.0%로 U. S.. Salinity Laboratory Staff(1954)의 염류 토양 분류기준에 의해 Saline soil로 분류되는 염류집적토로서 과다 염류 집적으로 인한 삼투압 현상 발생과 그로 인한 작물의 토양수 이용률 저하(Bernstein, 1975)에 따른 이온흡수의 불균형과 토양내 수용성 특정이온의 과다로 인한 이온독성 발현과 타 유효이온의 흡수를 저해(Chang and Dregne, 1955) 등을 유발함으로써 식물생육 장애를 가져 올 수 있는 토양(Naidu and Rengasamy, 1993)으로 조사되었다. 이에 반해 B층 토양은 pH 4.7과 EC 0.80 dS/cm의 산성토양으로 염류집적은 관찰되지 않았다.

2. 유기물 처리에 따른 토양의 수리전도도 변화

토양내 수리전도도는 토양의 기포주머니(Air

pocket) (Bouwer, 1961; Christiansen, 1944), 미생물의 활동(Allison, 1947), 토양수내 용존물질의 종류와 농도(McNeal and Cokman, 1966; Pupisky and Shainberg, 1979), 토양의 팽창(Lagerwerff, et al., 1969)과 배열형태, 토양의 공극 분포(박무언 등, 1981), 토성, 토양의 물리적 구조(김필주, 1997b) 등의 요인들에 의해 영향을 받는 것으로 알려져 있다.

본 실험에서는 용존물질의 한 종류로서 유기물을 처리하지 않은 A층과 B층의 포화 수리전도도를 측정된 결과 Fig. 3과 같은 결과를 얻었다. A층의 초기 포화 수리전도도는 $6.8 \times 10^{-4} \text{ cm/sec}$ 이었으며, 약 2 Pore volume (PV) 이후에 안정된 수리전도도 $3 \times 10^{-4} \text{ cm/sec}$ 에 도달하였다. B층의 포화수리전도도는 $2.9 \times 10^{-3} \text{ cm/sec}$ 로 시작하여 약 1.7 PV 이후 안정된 $1.6 \times 10^{-3} \text{ cm/sec}$ 에 도달하였다.

이와 같이 토양칼럼을 통과하는 공극수량에 따른 투수계수의 안정화는 초기의 불균일한 토양 구조와 공극이 지속적인 토양수의 흐름에 의해 토양입자와 조직이 재배열되어 토양구조가 안정되어 공극을 통해 이동하는 토양수의 연속성이 진행되어 수리전도도가 안정된 것으로 추정된다. B층에서도 A층과 같은 양상을 보였으나 B층의 수리전도도는 A층에 비해 약 6배의 높은 값을 보였다. 이는 A층이 B층보다 유기물 함량이 높아 유기물이 가지는 수분보유력과 친화성뿐만 아니라 약 3%정도 낮은 모래의 함량 때문에 B층의 수리전도도가 A층에 비하여 높은 것으로 판단된다. 그리고 ESP값을 기준으로 하여 볼 때, A층내 높은 농도의 Na 이온이 토양입자를 분산 시킴으로서 A층 토양에 미세공극의 발달이 B층보다 높아 수리전도도에 영향을 미친 것으로 판단된다(Chang, et al., 1987, Gal, et al., 1984, Frenkel, et al., 1978, McNeal, 1968, Quirk and Schofield, 1955).

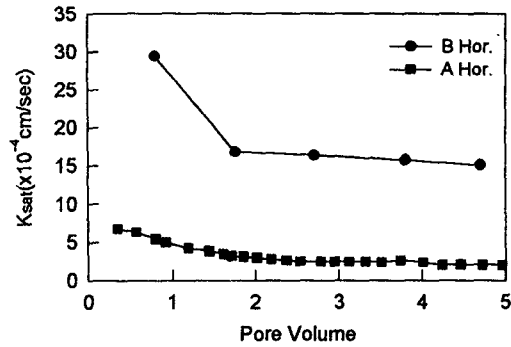


Fig. 3. The changes of saturated hydraulic conductivities (Ksat) in A and B horizon soils.

따라서 이러한 토양내 유기물이 수리전도도에 영향을 미친다고 가정되어 유기물함량에 따른 수리전도도 변화를 조사하였다.

Ap층 토양에 건조한 우분퇴비를 중량비로 0, 2, 4, 6% 비율로 균일하게 혼합처리된 토양칼럼내 포화수리전도도 변화를 조사한 결과 Fig. 4와 같은 결과를 얻었다.

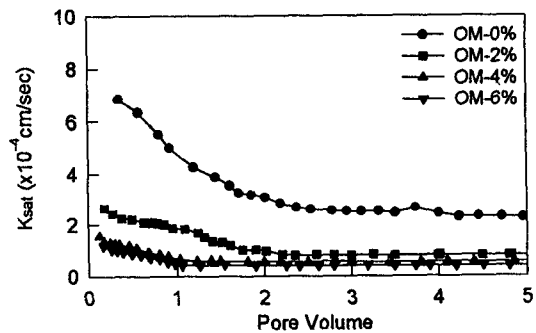


Fig. 4. Saturated hydraulic conductivities (Ksat) of A horizon soil columns mixed with cow manure compost at different ratios of 0, 2, 4, 6% on a weight basis.

우분퇴비를 2% 처리시 초기 수리전도도는 $2.7 \times 10^{-4} \text{ cm/sec}$ 이었으며, 약 1.7 PV 이후 약 $0.8 \times 10^{-4} \text{ cm/sec}$ 의 안정된 수리전도도 값을 보였다. 한

편 4%와 6%의 유기물 처리시 약 1 PV이후 안정된 약 $5 \times 10^{-5} \text{cm/sec}$ 와 $4 \times 10^{-5} \text{cm/sec}$ 의 낮은 수리전도도를 각각 보였다. 이는 무처리구에 비해 1/2 이상 감소된 값이며, 유기물 함량이 증대되면서 상대적 수리전도도값은 급격히 감소하는 경향을 보이고 있으며 또한 안정된 수리전도도에 이르기까지 소요되는 공극수량 또한 감소한 것을 알 수 있었다. 그러므로 Gupta, et al., (1977)이 보고한 것처럼 유기물에 의한 수분보유능이 수리전도도에 직접적인 영향을 미치고 있다는 것을 알 수 있고 또한 토양공극과 구조의 안정화가 유기물의 함량이 증가됨에 따라 가속된다는 것을 증명한다. Fig. 5에서 보는 바와 같이 유기물 함량이 0에서 6%로 증가함에 따라 변화되는 최종수리전도도 값을 log를 취하여 비교한 결과, 무처리구의 경우 약 -3.7에서 6%의 경우 약 -4.3으로 유기물함량이 증가됨에 따라 무처리구에 비해 큰 폭으로 감소함을 볼 수 있었으며, 조사된 범위내에서의 각각의 log(Ksat)의 상관 관계는 $Y = -0.116X - 3.77$ ($r = 0.904$)의 부의 직선회귀식으로 표시됨을 알 수 있었다. 그러나 6% 이상의 유기물이 토양에 가해질 경우 수리전도도

의 감소는 6% 이하의 유기물이 가해질 때보다 훨씬 작으므로 이의 상관관계는 exponential의 회귀식으로 나타날 것으로 추정된다.

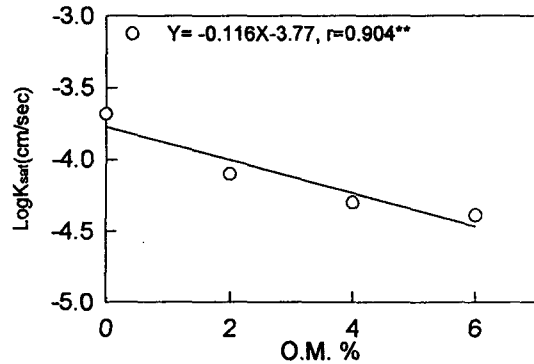


Fig. 5. The changes of saturated hydraulic conductivities in single-layered soil columns mixed with cow manure compost at 4 different ratios of 0, 2, 4, and 6% on a weight basis.

일반적인 실제 토양의 토층분화상태에 따른 수리전도도변화를 알아보기 위하여 A와 B층이 연결된 다층토양에서의 수리전도도 변화를 조사하여 보았다.

다층토양칼럼은 유기물이 각각 0, 2, 4, 6%로

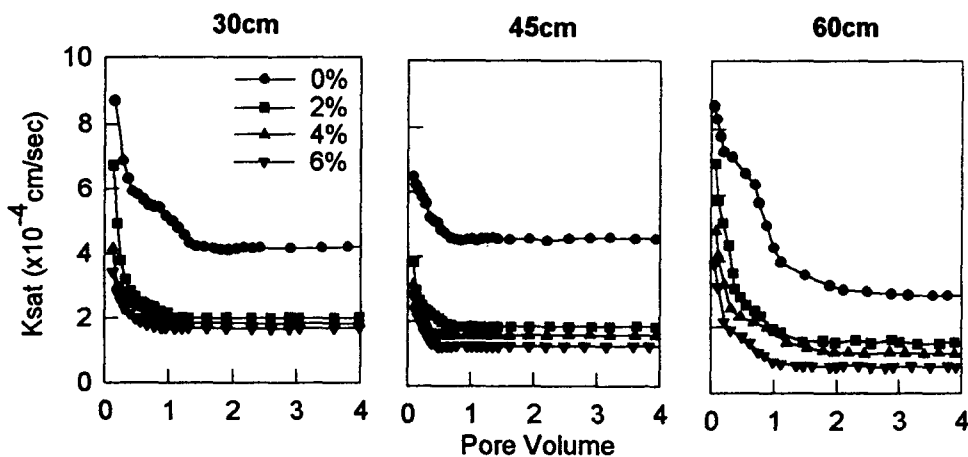


Fig. 6. Saturated hydraulic conductivities (Ksat) of 30, 45, and 60cm lengths of a multi-layered soil columns that consisted of A and B soil columns.

처리된 15cm의 A층 토양 칼럼을 길이가 각각 15cm, 30cm, 45cm의 B층 토양칼럼을 연결하여 총 길이가 30cm, 45cm, 60cm의 다층토양칼럼(Fig. 2)으로 제작하여, 첫째로, 유기물 처리량에 따른 수리전도도 변화와, 둘째로 토양수가 통과하는 깊이별 수리전도도를 측정하여 그림 6과 7과 같은 결과를 얻었다.

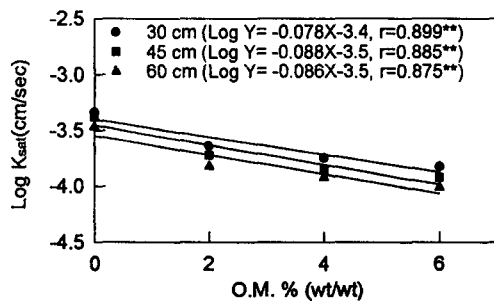


Fig. 7. The changes of saturated hydraulic conductivities (Ksat) in the different depths of the multi-layered soil columns treated with cow manure compost at 4 different ratios.

그림 6과 7에서 보여 주는 바와 같이 무처리 다층토양 칼럼 내에서 수리전도도의 안정된 값은 30, 45, 60cm 칼럼에서 각각 4.6×10^{-4} , 4.2×10^{-4} , 3.4×10^{-4} cm/sec 이었으며, 2% 유기물 처리 시 세 가지 조건 모두에서 무처리구에 비해 큰 폭으로 감소하여 각각 2.3×10^{-4} , 1.9×10^{-4} , 1.5×10^{-4} cm/sec의 수리전도도 값을 보였다. 그리고 4% 유기물처리구에 수리전도도는 각각 1.8×10^{-4} , 1.4×10^{-4} , 1.2×10^{-4} cm/sec로 조사되었으며, 그리고 6% 유기물 처리 구에서는 각각 1.5×10^{-4} , 1.2×10^{-4} , 0.98×10^{-4} cm/sec의 포화 수리전도도 값을 보였다. 이상의 결과를 비교하여볼 때 동일한 유기물함량에서의 수리전도도는 토양수분이 통과하는 토양의 깊이가 증가하면 증가할수록 수리전도도가 감소하였으며 동일한 깊이에서의 수리전도도는 유기물 함량이 증가할수록 수리전도도는 감소하는 경향을 보이고 있음을 알 수 있

다. 한편 최종 안정된 수리전도도에 이르기까지 소요되는 총 공극수량은 유기물함량의 증가뿐만 아니라 토양의 깊이가 깊어짐에 따라 상대적 공극수량은 감소함을 알 수 있었다. 따라서 이상의 결과를 종합하여 보면 다층구조 토양에서도 단일층 토양구조에서의와 마찬가지로 포화수리전도도는 유기물 함량뿐만 아니라 유기물이 포함된 층 이하의 토층의 깊이에 따라 수리전도도가 크게 영향을 받는다고 결론을 내릴 수 있다.

다층구조토양내에서 실측된 포화수리전도도 (Ksat)와 Jury(1991)가 제시한 이론적 다층수리전도도(Keff) 공식을 이용하여 얻어진 수리전도도값을 비교한 결과는 Table 2와 같다.

Table 2. Measured(Ksat) and calculated(Keff) hydraulic conductivities from the different depths of the multi-layered soil columns connected with A and B horizon soils.

OM* (%, wt/wt)	CD** (cm)	SHC*** ($\times 10^{-4}$ cm/sec)	
		Ksat	Keff
0	30	4.6	3.8
	45	4.2	5.0
	60	3.4	6.0
2	30	2.3	1.5
	45	1.9	2.2
	60	1.5	2.7
4	30	1.8	1.0
	45	1.4	1.5
	60	1.2	1.9
6	30	1.5	0.77
	45	1.2	1.1
	60	0.98	1.5

* Organic matter content mixed into soils

** Depth of soil column

*** Saturated hydraulic conductivity

위 표에서와 같이 각각의 유기물함량조건과 각각의 유기물 처리 조건별 깊이에서 조사된 실측

수리전도도(K_{sat})는 계산된 수리전도도(K_{eff}) 보다 30cm 이하의 깊이에서는 작은 값을 보이고 있다. 한편 실측 수리전도도는 토양의 깊이가 깊어질수록 모든 처리구에서 감소하는 경향을 보였으나, 계산된 K_{eff} 는 깊이가 깊어짐에 따라 증가하는 반대 경향이 나타났다. 또한 실측치(K_{sat})와 계산치(K_{eff})의 변이는 토양의 깊이가 깊어질수록 차이가 커짐을 알 수 있었다. 따라서 각각의 조사된 별개의 수리전도도를 이용하여 현장에서 수리전도도를 추정하는데에는 많은 오차가 발생할 것으로 판단된다. 토심이 깊게 발달된 토층 내에서 Jury의 K_{eff} 공식을 적용하는데는 다소 문제가 있을 것으로 판단된다. 이러한 결과의 원인을 추정하여 보면 첫째, 토양의 물리적 특성 변화 요인을 감안하지 않았고, 둘째, 공식 3에 의해 계산된 수리전도도는 대상 토양의 깊이, 즉 L값이 증가할수록 K_{eff} 값이 증가하도록 되어 있기 때문인 것으로 추정된다.

摘 要

다층구조 토양내 유기물 처리량과 토양의 깊이 변화가 토양수 이동에 미치는 영향을 실측 수리전도도와 이론적 수리전도도로 비교하여 조사하였다.

Ap층 토양의 단일층 칼럼의 수리전도도를 유기물 처리량에 따라 조사하여 본 결과 유기물 함량이 증가할수록 수리전도도는 큰 폭으로 감소하였다. 그리고 Ap층과 B층 토양이 연결된 다층 토양칼럼의 경우도 수리전도도는 유기물 처리량이 증가할수록 감소하였을 뿐만 아니라 토양의 깊이가 깊어질수록 또한 감소하는 경향을 보였다. 한편 최종 안정된 수리전도도에 이르기까지 소요되는 총 공극수량은 유기물함량의 증가뿐만 아니라 토양의 깊이가 깊어짐에 따라 상대적 공극수량은 감소함을 알 수 있었다.

따라서 이상의 결과를 종합하여 보면 다층구조 토양에서도 단일층 토양구조에서와 마찬가지로 포화수리전도도는 유기물 함량뿐만 아니라 유기물이 포함된 층 이하의 토층의 깊이에 따라 수리전도도가 크게 영향을 받고 결론을 내릴 수 있다.

실측과 계산된 수리전도도값을 비교하여 본 결과 실측 수리전도도와 계산된 수리전도도는 반대 경향을 보이고 있다. 따라서 각각의 조사된 별개의 수리전도도를 이용하여 현장에서 수리전도도를 추정하는데에는 많은 오차가 발생할 것으로 판단된다

감사의 글

본 연구는 한국학술진흥재단 신진교수과제(1996)의 지원금에 의해 수행되었으며, 연구에 도움을 주신 예산 시설재배지 현척규 농민후계자께 함께 감사드립니다.

參 考 文 獻

- Allison, L.E.. 1947. Effect of micro-organisms on permeability of soil under prolonged submergence. *Soil Sci.* 63:439-450.
- Baver, L.D.. 1966. *Soil Physics*. John Wiley & Sons Co. Ltd.
- Bernstein, L.. 1975. Effects of salinity and sodicity on plant growth. *Ann. Rev. Phytopathology.* B. 295-312.
- Bohn, Hinrich, Brian McNeal, and George O'Connor. 1979. *Soil Chemistry*. A Wiley-Interscience Publication. pp 149-151, 162 - 181, 223-225, 284-286.
- Bouwer, H.. 1961. A double tube method for measuring hydraulic conductivity of soil in sites above water table. *Soil Sci. Soc. Am.*

- Proc. 25:334-342.
- Chang, C. W. and H. E. Dregne. 1955. The effect of exchangeable sodium on soil properties on growth and cation content of alfalfa and cotton. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 19:29-35.
- Chiang, S.C., D.E. Radcliff, W.P. Miller, and K. D.Newman. 1987. Hydraulic conductivity of three southern soils as affected by sodium, electrolyte concentration, and pH. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 51:1293-1299.
- Christiansen, J. E.. 1944. Effect of entrapped air upon the permeability of soils. *Soil Sci.* 58: 355-365.
- Frenkel, H., J. O. Goertzen, and J.D. Rhoades. 1978. Effects of clay type and content, exchangeable sodium percentage, electrolyte concentration on clay dispersion and soil hydraulic conductivity. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 42:32-39.
- Gal, M., L. Arcan, L. Sainberg, and R. Keren. 1984. Effect of exchangeable sodium and phosphogypsum on crust structure-scanning electron microscope observations. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 48:872-878.
- Gupta, S.C., R.H. Dowdy, and W.E. Carson. 1977. Hydraulic and thermal properties of a sandy soil as influenced by incorporation of sewage sludge. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 41:601-605.
- Hillel, Daniel. 1982. *Fundamentals of Soil Physics.* Academic Press. pp 1376.
- July, W.A., and W.R. Gardner. 1991. *Soil Physics.* 5th ed.. John Wiley & Sons. New York.
- Langerwerff, J. V., F. S. Nakayama, and M. H. Frere. 1969. Hydraulic conductivity related to porosity and swelling of soil. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 33:3-11.
- McNeal, B.L., and N. T. Cokman. 1966. Effect of solution composition on soil hydraulic conductivity. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 30:308-317.
- McNeal, J.D.. 1968. Prediction of the effect of mixed-salt solutions on soil hydraulic conductivity. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 32:190-193.
- Naidu, R. and P. Rengasamy. 1993. Ion interaction and constraints to plant nutrition in Australia sodic soils. *Aust. J. Soil Res.*, 31:801-819.
- Pupisky, H., and I. Shainberg. 1979. Salt effects on the hydraulic conductivity of a sandy soil. *Soil Sci. Soc. Amer. J.* 43:429-433.
- Quirk, J.P., and R.K. Schofield. 1955. The effect of electrolyte concentration on soil permeability. *J. Soil Sci.* 6:163-178.
- U. S. Salinity Laboratory Staff. 1954. *Diagnosis and improvement of saline and alkali soil.* U. S. Government Printing Office Washington, D. C. *USDA Handbook* 60, pp160.
- 김필주, 이도경, 정덕영. 1997a. 토양구조변화에 따른 시설재배지 토양내 염류집적. *한국토양비료학회지.* 제 30권 3호 226-233.
- 김필주, 이도경, 정덕영. 1997b. 토양의 가비중 변화에 따른 수리전도도 및 이온의 용출특성 변화. *한국토양비료 학회지.* 제 30권 3호 234-241.
- 농업기술연구소. 1988. *토양화학분석법.* 농업기술연구소.
- 박무언, 유순호. 1981. 가시 생물공극이 토양의 투수계수에 미치는 영향. *한국토양비료학회지.* 조백현 외 14人. 1996. *삼정 토양학.* 향문사. pp 178-179.