

## 우분퇴비 처리에 따른 토양내 음이온의 용출특성과 투수특성 변화

정덕영<sup>1)</sup>, \*김필주<sup>1)</sup>, 박무안<sup>2)</sup>, 이병렬<sup>2)</sup>, 김건엽<sup>1)</sup>  
<sup>1)</sup> 충남대학교 농화학과, <sup>2)</sup> 농업과학연구원 농업생태과

### Effects of cow manure compost on anion elution patterns and hydraulic conductivity

D. Y. Chung<sup>1)</sup>, \*P. J. Kim<sup>1)</sup>, M. E. Park<sup>2)</sup>, B. R. Lee<sup>2)</sup>, and K. Y. Kim<sup>2)</sup>

1) Dept. Agr. Chem. Chungnam National Uni., 2) Dept. Systems Agr. Eco., NIST

#### ABSTRACT

To quantitatively investigate the effects of manure compost on the soil and water environment including ground water the elution patterns of anions and hydraulic conductivity were estimated with four different depth(15, 30, 45 60cm) and four variable ratio of compost treatment(0, 2, 4, 6%) through soil column test.

1. There were over 95% of elution of chloride and nitrate within 0.1 pore volume(PV), and sulfate within 0.2 PV. With 2 ton/10a of cow manure compost treatment recommended total 40 kg/10a of anions added was recovered as effluent at the amount of 17kg chloride, 5.4kg nitrate, and 13.2kg sulfate, respectively. However, phosphate rarely recovered in the effluent due to the strong affinity for sorption sites in soils.

2. In multi-layered soil column the maximum peaks of each anion eluted were retarded with increasing soil depth and the amount of organic matter(OM) treatment.

3. With increasing OM up to 2% the saturated hydraulic conductivity(SHC) was greatly decreased, but the slight decrease in SHC was found by addition of OM greater than 4%. In multi-layered soil column SHC was more affected by the lower SHV layer than by that of the higher.

#### 1. 서론

농지내 사용된 축산분뇨퇴비는 작물의 영양원으로 생육을 도모하고 토양의 물리성을 개선하기 때문에 사용량이 지속적으로 증대되고 있다. 반면에 사용량의 증가로 인해 농지내 투여된 축분퇴비의 용존물질이 하천과 호수로 유입되어 부영양화를 유발시키며, 표층내로 용탈되어 지하수 오염을 유발시키고 있다.

현재 농지내 축산분뇨퇴비의 추천량은 년 1~2톤/10a이며, 일반 시설재배 농가에서는 관행적인 사용량은 3~4 톤/10a에 이르며, 많이 사용하고 있는 농가에서는 6~8 톤/10a에 이르고 있다. 따라서 농지내 과량 투입된 축산퇴비로 부터 각종 양이온과 음이온 및 용존 유기물(Dissolved organic matters)이 세탈(Washing)과 용탈(Leaching)을 통해 하천 및 지하수 오염을 가속화시키고 있다. 토양내 존재하는 음이온은 Chloride(Cl<sup>-</sup>), Nitrate(NO<sub>3</sub><sup>-</sup>), Sulfate(SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>)와 Phosphate(PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>)가 대부분을 차지하며, 일부가 유기산의 형태로 존재한다. 이들 음이온의 대부분

은 3요소(N, P, K) 화학비료의 구성성분으로 토양내 가해지며, 일부가 유기물 분해에 의해 발생된다. 이들 음이온중 Chloride(Cl<sup>-</sup>), Nitrate(NO<sub>3</sub><sup>-</sup>)와 Sulfate(SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>)는 토양 교질과의 결합력이 미약하고 이동성이 커서 지하수 및 하천오염에 관여하게 된다. 최근 축산분뇨퇴비의 사용량이 증가하면서 축분 퇴비중의 과량의 Nitrate(NO<sub>3</sub><sup>-</sup>) 및 용존유기물(Dissolved organic matters)이 지하수 및 하천내 유입에 의한 오염유발 가능성에 대한 관심이 증대되고 있다.

유기물 처리에 따른 토양 및 수계내 미시환경에 미치는 직·간접적인 영향에 대한 다양한 연구가 그간 진행되어 왔으나, 農土내 축분퇴비 처리비율에 따른 각종 음이온과 용존 유기물의 이동에 관한 정량적인 연구자료는 매우 미약한 상태에 있다. 따라서 본 연구에서는 토양의 층(Horizon)변화와 축산분뇨퇴비 처리량 변화에 따른 음이온 및 용존 유기물의 이동특성(Elution pattern)과 투수특성 변화의 구명을 통한 주요 음이온과 용존 유기물의 토양내 이동에 의한 토양 및 지하수의 오염가능성 정량적으로 알아보하고자 하였다.

## 2. 재료 및 방법

### 1. 토양 시료채취 및 분석

연구 대상토양은 충남 예산군 오가면의 시설재배지 토양을 선택하였다. 본 토양은 10년 이상 시설재배가 진행되어 왔으며, 다년간 화학비료 및 유기질 비료가 과량 사용 되어 각종 염류 및 유기질이 과량 축적되어 주변 지하수를 오염시키고, 작물에 대해 각종 염류장해가 유발되어 수량이 크게 감소되고 있는 지역적 특징을 가지고 있다.

토양 단면을 절단하여 토양구조(Soil Profile)를 조사하고, 각층별 토양을 채취해 풍건후 2mm 사분하여 분석 및 실험에 이용하였다. 토성(Soil Texture) 분석과 유기물 분석은 Sodium hexametaphosphate법과 Tyurin법을 각각 이용하였다. 공극률(%) 측정은  $\{(1 - \text{진비중 } \rho_v / \text{가비중 } \rho_b) \times 100\}$  식을 이용하였다.

### 2. 용출특성과 투수계수 변화 조사

#### 1) 토양컬럼제작

##### ① A층 토양컬럼

2mm 체를 통과한 건조우분퇴비를 시설재배지(충남 예산군 오가면)의 A층 토양에 0, 2, 4, 6%(w/w) 비율로 각각 혼합 처리후 Acryl Column(5cm ID×25cm L)에 15cm 깊이로 충전하였다. 이때 가밀도(Bulk density)는 1.3g/cm<sup>3</sup>으로 조정하였다.

##### ② B층 토양컬럼

동일지역의 B층의 2mm 사분토양을 15, 30, 45cm 깊이로 동일 내경, 15, 30, 45cm 길이의 Column에 각각 충전하였으며, 이때 가밀도는 1.3g/cm<sup>3</sup>으로 조정하였다.

##### ③ 다층 토양컬럼(Multi-layered soil column)

Fig. 1에서와 같이 각비율로 우분퇴비가 처리된 ①의 A층 Column에 ②의 15, 30, 45cm의 B층 Column을 각각 서로 연결하여 농지내 실제 토양구조 비슷한 다층토양컬럼을 제작하였다.

#### 2) 용출특성 조사

최초 불포화 상태에서 증류수를 이용하여 일정수두(Constant hydraulic head)를 유지하면서 용출량 변화에 따른 음이온과 용존유기물의 용출량 변화를 조사하였다. Column내 토양이 완전 포화된 시점에서부터 포화투수계수(Saturated Hydraulic Conductivity) 변화를 동시에 측정하였으며, 투수계수는 Darcy's law에 의해 계산하였다.

### 3. 이온분석과 용존물질의 분석

일정 간격으로 수기된 용출액중 음이온은 AS4A Column이 설치된 Ion Chromatography (Dionex 2000I)를 이용하여 분석하였으며, 용존유기물 함량은 TOC Analyser를 이용하여 분석하였다.

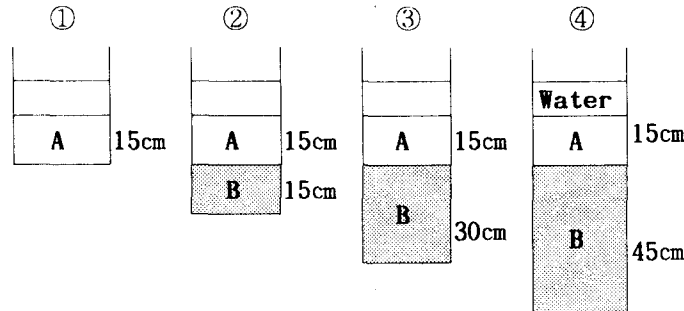


Fig. 1. Schematic diagram of soil column used for the observation of anion elution patterns and hydraulic conductivity. (A:A Horizon soil, B:B Horizon soil)

### 3.결과 및 고찰

#### 1. 대상지역 토양의 특성

토양단면을 조사한 결과 A층은 지표면에서 20cm 깊이, B층은 20cm 이하에서 형성 되어있음을 확인 할 수 있었다. 지표면 10cm중 점토의 함량과 유기물 함량은 10cm 이하층에 비해 높음을 볼 수 있었으며, 이는 지속적인 객토와 유기질 비료의 투입 때문으로 해석된다. 표층토 10cm의 가밀도와 공극률은 각각 1.22와 53.23%을 나타냈으며, 깊이가 깊어질수록 가밀도는 1.52 g/cm<sup>3</sup> 까지 상승함을 볼 수 있었다. 이는 경종과정중 농기계 등에 의한 다져짐(Compaction) 때문에 Hard Pan이 형성된 것으로 해석된다. 30cm 이후부터 가밀도는 다시 낮아짐을 보였다. 가밀도와 공극률의 변화를 통해, 지하 20~30cm 부근에 형성된 Hard Pan에 의한 토양내 물 흐름의 방해와 염류의 집적을 유발시킬 것으로 간접 해석되었다.

Table 1. Soil profile and physico-chemical properties of the reclaimed green house soil in Yesan, Chungnam.

Profile	Depth (cm)	Particle Distribution (%)			OM* (%)	BD* (g/cm <sup>3</sup> )	Porosity (%)
		Clay	Silt	Sand			
Ap Horizon	0~10	19.4	58.2	22.4	5.3	1.22	53.23
	11~20	17.5	58.5	24.0	4.4	1.49	42.69
B Horizon	21~30	17.3	60.8	21.9	4.3	1.52	41.50
	31~40	17.4	56.4	26.3	4.1	1.44	44.46
	41~50	17.2	55.1	27.7	3.5	1.49	42.81

Note) \* OM : Organic matter content, BD : Bulk density

## 2. 이온의 용출특성

조사대상의 시료중의 수용성 음이온의 함량은 아래의 Table 1과 같았으며, 유기물 처리에 따른 음이온의 용출특성은 Chloride(Cl<sup>-</sup>), Nitrate(NO<sub>3</sub><sup>-</sup>), Sulfate(SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>)와 Phosphate(PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>)를 대상으로 조사하여 다음과 같은 결과를 얻었다. 이들 이온은 화학비료의 시비를 통해 토양내 가해지거나, 유기질이 토양미생물에 의해 분해되면서 유리태로 토양내 존재하게 된다.

Table 2.에서와 같이 A층 토양은 경작이 직접 행해지는 표층 20cm 내외의 토양으로 상당량의 이온이 축적되어 있음을 볼 수 있으며, 20cm 이하의 심토에는 비교적 적은 량의 이온이 존재함을 볼 수 있었다. 이는 점토(Clay)함량과 유기물 함량이 각각 19.4%와 5.3%로 B층의 점토(17.3%) 및 유기물(4.3%)에 비해 높기 때문에 오는 강한 이온흡착력, 지하 20~30cm부근에 형성된 Hard Pan에 의한 토양수 이동의 방해와 그로 인한 이온의 B층 전달이 어려웠기 때문으로 해석된다.

Table 2. The contents of water soluble anions in A and B horizon soils and cow manure compost (Unit : me/100g)

	Cl <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>
A Horizon	0.97	1.06	0.86	-
B Horizon	0.39	0.31	0.27	-
Compost	20.24	4.40	8.74	2.69

우분퇴비중의 수용성 Chloride는 약 20 me/100g으로 과량 존재함을 알 수 있으며, 이로 인한 토양내 새로운 오염유발 가능성을 예측 할 수 있을 것으로 판단된다. 그리고 Chloride를 포함한 다른 음이온의 양을 합한 총 음이온량은 36 me/100g에 이르렀다. 이는 농과원의 추천 퇴비사용량 2톤/10a를 처리시 10a당 약 40kg의 음이온이 토양내 공급되게 되며, 일반 농가에서 관행적으로 사용하고 있는 4톤/10a를 투입시 유기물 투입때 마다 약 80kg의 음이온 토양내 공급되게 된다. 공급된 음이온의 일부는 작물에 이용되고, 일부는 토양과 유기질에 흡착되거나 미생물에 의해 이용되게 된다. 그밖의 잉여의 음이온은 세탈(Washing)과 용탈(Leaching)을 통해 지하수 및 하천, 호수 등으로 유입되어 오염으로 작용하게 된다.

### (1) Chloride 용출특성

Chloride(Cl<sup>-</sup>)는 가리질 비료인 KCl의 시비와 유기질비료중의 무기태 Chloride에 의해 주로 토양내 가해진다. 특히 우분퇴비중에는 사료중 일정량 함유되는 NaCl에 의해 상당량의 Chloride(Cl<sup>-</sup>) ion이 포함되어 있어, 토양에 다량 처리될 때 토양중의 Chloride(Cl<sup>-</sup>)함량을 크게 높게 된다.

A층과 B층의 수용성 Chloride의 함량은 0.97 me/100g, 0.39 me/100g를 각각 보였으며, Soil Column 내에 용출특성 변화는 아래의 Fig. 2.와 같다.

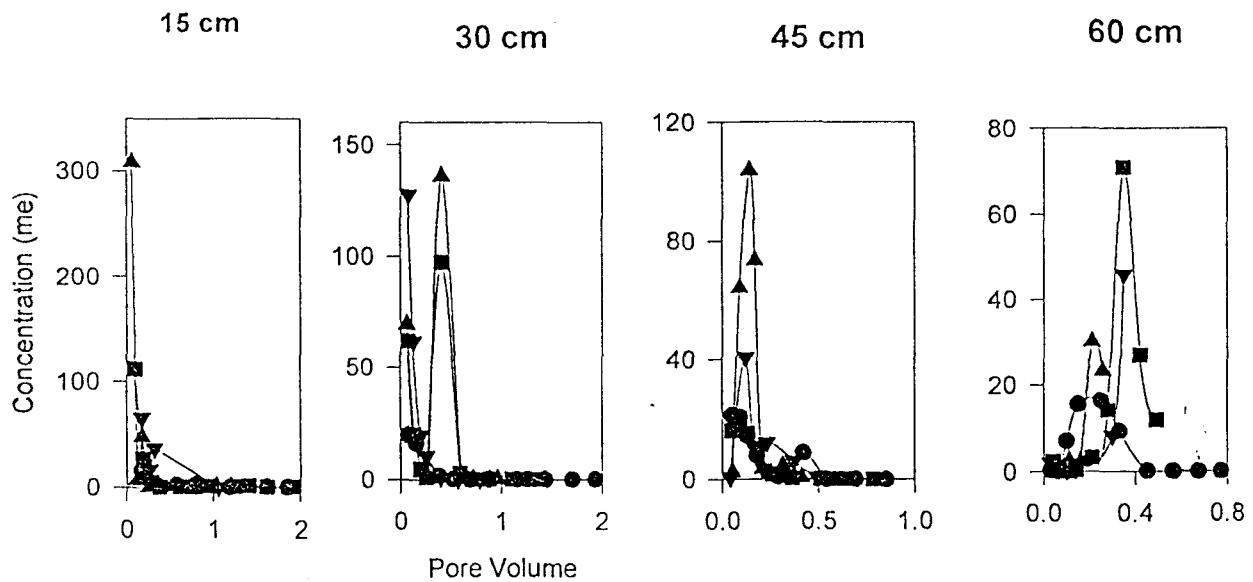


Fig. 2. The elution patterns of chloride in different depth of soil columns treated with variable amount of the cow manure compost(● 0%, ■ 2%, ▲ 4%, ▼ 6%).

B층과A층, 그리고 각 비율에 따라 유기물이 처리된 15cm Soil Column내에서의 Chloride는 초기 0.1 Pore Volume안에 95%이상의 용출이 이루어 졌으며, 동일 조건으로 처리된 15cm A층 Soil Column에 15cm, 30cm, 45cm B층 Soil Column을 연결하여 만들어진 30, 45, 60cm의 다층토양컬럼(Multi-layered soil column)에서의 Chloride의 용출은 초반 B층내의 Chloride ion의 용출이 완료후 재차 용출량이 다시 크게 증가하는 경향을 볼 수 있었다. 이는 2차적으로 A층내 Chloride ion이 B층 토양의 흡착력에 의한 용출속도 저감에 의한 결과로 해석된다. 유기물 처리량이 증가할수록 Chloride의 용출량은 크게 증가하였으며, Chloride의 용출 최대점(Elution maximum peak)이 뒤로 밀려남을 볼 수 있었다. 이는 유기물 처리량 증가에 따른 토양내 수분보유력(Water holding capacity)의 증가에 의한 영향으로 해석된다.

## (2) Nitrate 용출특성

Nitrate( $\text{NO}_3$ )는 대부분 요소(Urea)나 유안(Ammonium sulfate)의 Ammonia태 질소나, 유기물의 단백질 구성성분으로 amine형태로 토양에 가해진다. 이들은 질산화균의 작용에 의해 Nitrate( $\text{NO}_3$ )로 전환되어 토양내 존재하게 된다.

A층과 B층의 수용성 Nitrate 함량은 1.06 me/100g, 0.31 me/100g를 각각 보였으며, 토양 컬럼(Soil Column)내에 용출특성 변화는 아래의 Fig. 3과 같다. Nitrate의 용출특성 변화는 Chloride 에서와 비슷한 경향을 보였다. 즉 A층과 B층 토양에서의 Nitrate는 초기에 거의 용출이 완료되었으며, A층 Column에 B층 Column을 연결한 다층토양컬럼(Multi-layered soil column) 처리구에서는 유기물 처리량이 증대 될수록 용출량이 증가하였으며, 용출 최대점(Elution maximum peak)이 뒤로 밀려남을 볼 수 있었다.

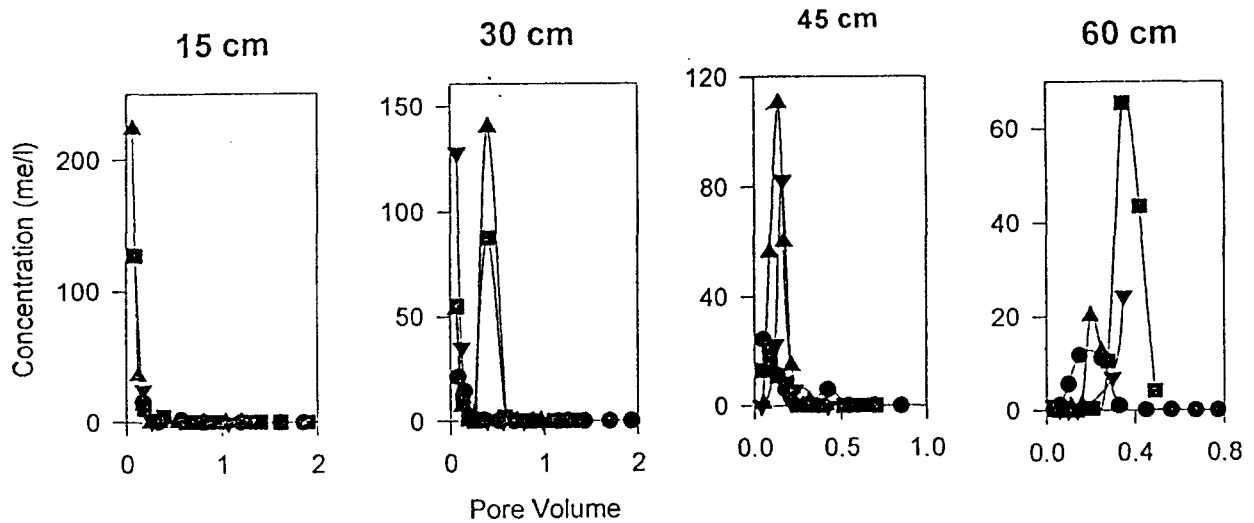


Fig. 3. The elution patterns of nitrate in different depth of soil columns treated with variable amount of the cow manure compost(● 0%, ■ 2%, ▲ 4%, ▼ 6%).

### (3) Sulfate 용출특성

Sulfate( $\text{SO}_4^{2-}$ )는 질소질 비료인 유안(Ammonium sulfate)으로 토양내 공급되거나, 식물의 다량 요구원소로서 황분말(Sulfur powder) 토양내 가해진다. 그리고 유기물내의 단백질 구성성분으로 토양내 공급된다. 그리고 일부는 산성비중  $\text{SO}_x$ 의 형태로 토양에 가해져 토양을 산성화를 가속화시킨다.

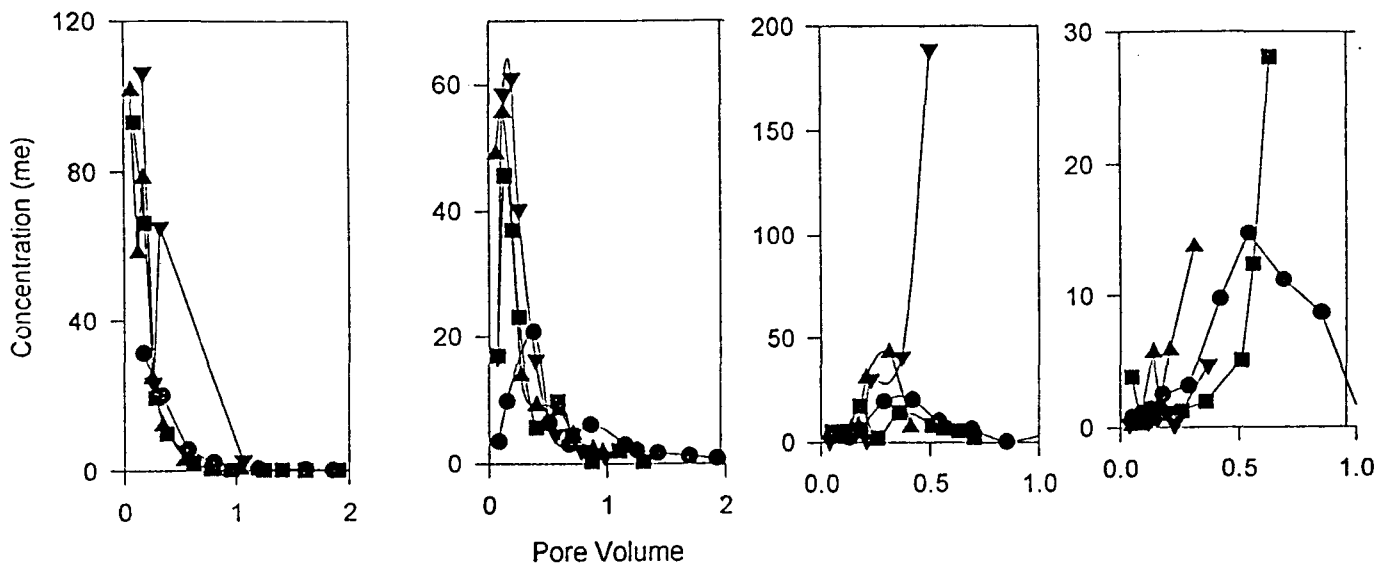


Fig. 4. The elution patterns of sulfate in different depth of soil columns treated with variable amount of the cow manure compost(● 0%, ■ 2%, ▲ 4%, ▼ 6%).

A층과 B층의 수용성 Sulfate의 함량은 0.86 me/100 g, 0.27 me/100g 각각 보였으며, 토양 컬럼내에 용출특성 변화는 아래의 Fig. 4와 같다. Sulfate의 용출은 Chloride와 Nitrate에 비해 약간 지연됨을 볼 수 있었으며, 이는 Sulfate의 토양교질과의 흡착력이 Chloride와 Nitrate ion에 비해 강하기 때문에 지연된 것으로 보인다. 특히 B층의 깊이가 깊어질수록 유기물 함량이 많아질수록

A층과 B층의 수용성 Sulfate의 함량은 0.86 me/100 g, 0.27 me/100g 각각 보였으며, 토양 컬럼내에 용출특성 변화는 아래의 Fig. 4와 같다. Sulfate의 용출은 Chloride와 Nitrate에 비해 약간 지연됨을 볼 수 있었으며, 이는 Sulfate의 토양교질과의 흡착력이 Chloride와 Nitrate ion에 비해 강하기 때문에 지연된 것으로 보인다. 특히 B층의 깊이가 깊어질수록 유기물 함량이 많아질수록 용출이 지연되고, 용출량은 유기물 처리량이 증가할수록 증가됨을 볼 수 있었다.

(4) Phosphate 용출특성

Phosphate는 인산질 비료인 과인산석회나 계분 등의 공급에 의해 주로 토양내 공급된다. Phosphate는 다른 음이온과 달리 토양내 강한 흡착특성을 가지고 있으며, 토양수에 의해 거의 이동되지 않는 특징을 가지고 있다. 토양내 인산의 축적은 다른 영양원소의 흡수저해를 가져오며, 염류집적에 의한 작물생육 저해를 유발시키게 된다.

본 시설재배지의 A층과 B층의 수용성 Phosphate는 검출되지 않았으며, 우분에서 2.69 me/100g가 검출되었다. 용출 시험결과 전 처리구에서 Phosphate용출에 대한 특별한 경향은 확인할 수 없었으며, 대부분의 처리구에서 용출이 거의 되지 않았다. 이를 통해 Phosphate는 토양내에서 물에 의해 이동이 거의 되지 않음을 알 수 있었다.

2. 투수계수(Hydraulic conductivity)의 변화

1) 유기물 처리량에 따른 포화투수계수(Saturated hydraulic conductivity)의 변화

① A층과 B층의 단일 Column에서 포화투수계수 변화

유기물 무처리 A층의 투수계수는 최초 0.04 cm/min.이었으며, 용출량이 증가할수록 구조의 다져짐 (Compaction)과 안정화에 의해 서서히 감소하여 약 2 Pore volume 용출후 0.015 cm/min.까지 감소하여 안정된 투수계수를 보였다. B의 투수계수는 최초 0.18 cm/min.이었으며, 약 1.6 Pore volume 용출후 0.10 cm/min.까지 감소하여 안정된 투수계수값을 보였다. A층의 투수계수는 B층의 투수계수에 비해 약 9배 정도 적은 값으로 보였다. 이는 A층내에 각종 염류의 집적으로 토양입자의 분산에 의한 영향과 유기물의 집적에 의한 수분보유력(Water holding capacity)의 증가에 의한 것으로 판단된다.

유기물 처리량에 따라 투수계수는 무처리구에 비해 크게 감소하는 경향을 보였다. 이는 유기물이 갖는 큰 수분보유력으로 인한 결과로 해석되며, 유기물처리량이 2%까지 증가할수록 K값은 크게 감소됨을 볼 수 있었다. 2% 이상의 유기물 처리로 K값의 커다란 감소는 볼 수 없었다

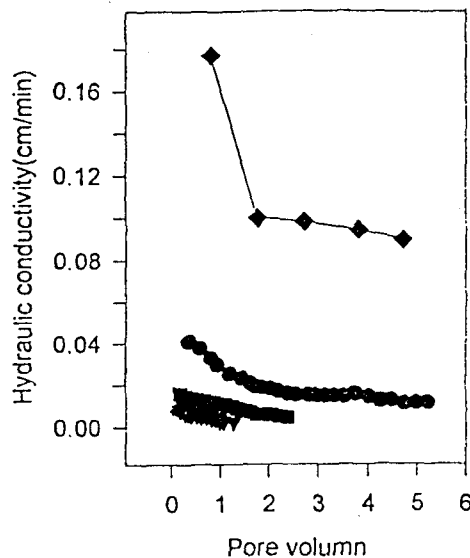


Fig. 5. The changes of saturated hydraulic conductivity in 15cm soil columns with different compost treatment ratio( A Horizon. : ● 0%, ■ 2%, ▲ 4%, ▼ 6%, B Horizon : ◆).

② 다중 Column에서 포화투수계수 변화

각비율로 유기물이 처리된 A층 Column에 15cm, 30cm, 45cm의 B층 Column이 각각 연결된 다중토양컬럼(Multi-layered soil column)에서 투수계수 변화는 아래의 Fig. 6과 같다. 그림에서 보는 바와 같이 다중토양컬럼에 의해 투수계수가 단일토양컬럼에 비해 다소 감소됨을 볼 수 있었으며, 전체적으로 약 1 Pore volume 이후에 안정된 투수계수를 보였다. 위의 단일토양컬럼에서와 같이 2%의 유기물 처리에 의해 K값이 다소 크게 감소하였으며, 2% 이후 유기물 처리량의 증가에 따라 K값은 아주 미세하게 감소함을 볼 수 있었다.

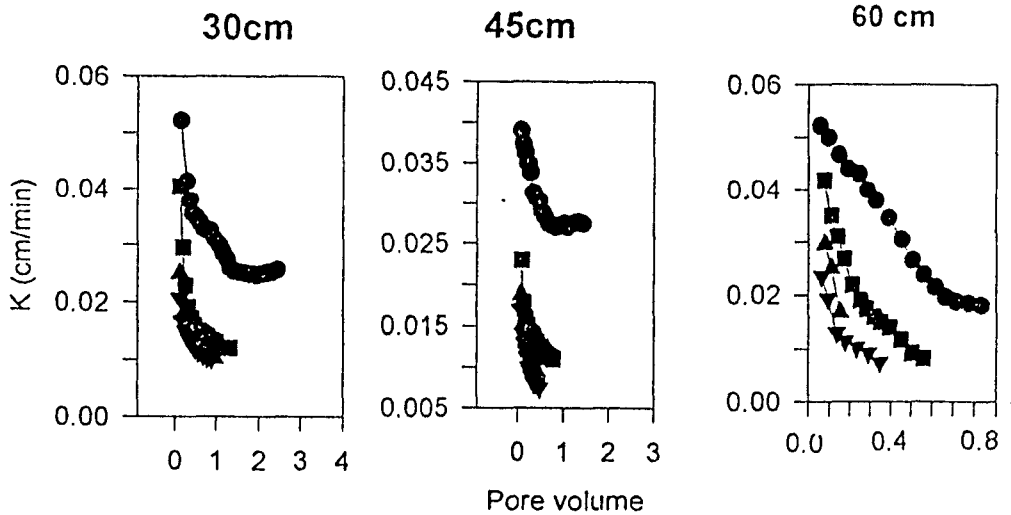


Fig. 6. The changes of saturated hydraulic conductivity in soil multi-columns with different column composition and compost treatment ratio(● 0%, ■ 2%, ▲ 4%, ▼ 6%).

4.결 론

축산퇴비에 의한 토양 및 하천 지하수 오염에 미치는 영향을 정량적으로 알아보기 위해, 토양컬럼을 이용하여 음이온과 용존유기물의 용출특성과 투수특성변화를 조사하여, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. Chloride(Cl)와 Nitrate(NO<sub>3</sub>)의 용출은 0.1 Pore Volume, Sulfate(SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>)는 약 0.2 Pore volume내에 95%까지 용출 되었다. 따라서 우분퇴비 2톤/10a 처리시 Chloride(Cl)가 약 17kg, Nitrate(NO<sub>3</sub>)는 약 5.4 kg, Sulfate(SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>)는 약 13.2 kg 토양내로 유입되어 토양수와 함께 이동됨을 알 수 있었다. 반면 토양수 이동에 의한 Phosphate(PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>)의 이동은 거의 없었다.
2. 다중토양컬럼(Multi-layered soil column)내에서 음이온의 용출특성 유기물 처리량이 증가할수록, 토양컬럼 깊이가 깊어질수록 각이온의 용출 최대점이 약간씩 지연되었다.
3. 유기물 처리량이 2%까지 증가할수록 투수계수는 크게 감소함을 볼 수 있었으며, 4%이상의 유기물 처리에 의한 큰 투수계수 변화는 없었다. 투수계수가 서로 다른 두 토양층이 연결된 다중토양컬럼에서 투수계수는 적은 투수계수층의 값에 의해 좌우되었다.



## 참 고 문 헌

1. Blake, G. R., and K. H. Hartge. (1986). Bulk density. in Methods of soil analysis edited by A. Klute. Part 1. Agron. 13, p 363-375.
2. Bouma, J., and J. L. Anderson. (1973). Relationships between soil structure characteristics and hydraulic conductivity. in Field soil water regime edited by R. R. Bruce. Soil Sci. Soc. Am., p 77-105.
3. Clapp, R. B., and G. M. Hornberger. (1978). Empirical equations for some soil hydraulic properties. Water Resour. Res., 14 : 601-604.
4. Dirksen, C., and A. Klute. (1986). Hydraulic conductivity and diffusivity : Laboratory Methods. in Methods of soil analysis edited by A. Klute. Part 1. Agron. 28, p 687-732
5. Gee, G. W., and J. W. Bauder. (1986). Particle size analysis. in Methods of soil analysis edited by A. Klute. Part 1. Agron. 15, p 383-409.
6. Hillel, D., (1982). Flow of water in saturated soil in Introduction to soil physics. Academic press. p90-106.
7. Ravina, I., and J. Magier. (1984). Hydraulic conductivity and water retention of clay soils continuity course fragments. Soil Sci. Soc. Am. J., 48:736-740.
8. Jury, W., and W. Gardner. (1991). Soil physics. Jhon & Wiley Son Press. P 23-26.
9. Rose, C. W., W. R. Stern, and J. E. Drummond. (1965). Determination of hydraulic conductivity as a function of depth and water content for soil in situ. Aust. J. Soil Res. 3, 1-9.
10. Schuh, W. M., and J. W. Bauder. (1986). Effect of soil properties on hydraulic conductivity moisture conductivity moisture relationships. Soil Sci. Soc. Am. J. 50, 848-854.