

Effect of Structural Type of Clay Minerals on Physical Properties of Mountainous Grassland Soils

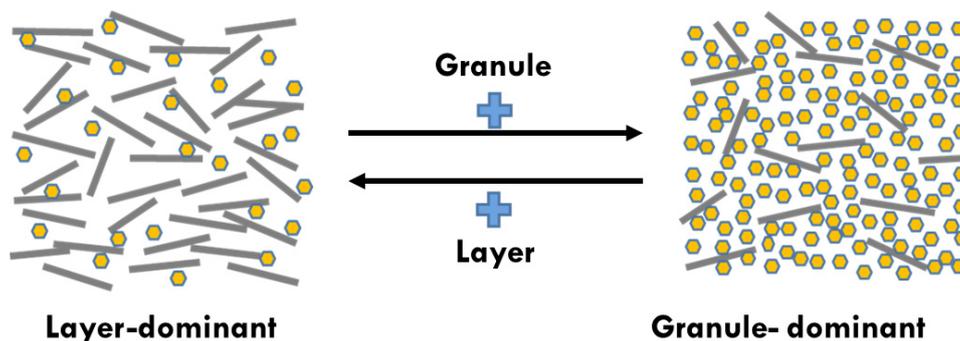
Seyeong Choi* and Man Park

Kyungpook National University, Daegu, 41566, Korea

(Received: November 23 2016, Revised: November 28 2016, Accepted: November 29 2016)

Soil amendment, especially addition of clay minerals, has been widely conducted to improve the physical and chemical properties of cultivated soils. However, there are no systematic studies on the effects of the structural type of clay minerals added. This study was conducted to investigate the effects of structural type of clay minerals on physical properties of soils. Two experimental soils, layer-dominant and granule-dominant ones, were mixed with either a layer-type smectite or a granule-type zeolite at a level of 2.0 wt%. It was observed that water permeability of soils was decreased by smectite whereas not significantly changed by zeolite. This effect was much greater in layered clay-dominant soil than in granular clay-dominant soil. Our results clearly indicated that the relationship of structural type between a soil and an amendment plays a decisive role in the soil properties. Therefore, it is highly recommended that the structural types of both soil and amendment be taken into consideration for soil amendment by clay minerals.

Key words: Clay minerals, Layer-type structure, Granule-type structure, Soil amendment, Water permeability rate



Simplified model of soil pores depending on structural type of clay minerals.

*Corresponding author: Phone: +82539505717, Fax: +82539537233, E-mail: 130csy@korea.kr

§Acknowledgement: This work was carried out with the support of Cooperative Research Program (PJ01051902) for Agriculture Science & Technology Development of Rural Development Administration, Republic of Korea.

Introduction

우리나라 국토의 64%를 차지하는 산지지역은 최근 농업, 관광, 자원 개발 등의 측면에서 활용성이 급격히 증가되고 있으며, 특히 산지생태축산 활성화를 위한 산지초지 개발 사업이 활발하게 추진되고 있다 (Kang et al., 2016; Hur and David, 1997). 산지초지 개발의 대상지인 미개간 산지는 일반 경작지에 비해서 경사가 심하고 토양의 물리화학적 특성들이 매우 불량하다 (Kang et al., 2016). 따라서 산지초지의 효율적 활용을 위한 합리적 토양개량은 매우 시급한 실정이다.

국내 토양개량은 농지법 제21조 (토양의 개량·보전)에 근거하여 행하여 졌으며, 특히 유효규산 함량이 낮은 농경지 및 산성토양에 토양개량제 (규산·석회)를 공급함으로써 토양을 개량하고 지력을 유지 보전하는 친환경농업의 실천기반이 조성되어 왔다 (MAFRA, 2016). 그러나 농지개량의 범위에서 객토, 성토 및 절토의 기준이 제시되고 있지만 각각의 기준들은 정성적 및 정량적으로 명확하지 않기 때문에 다수의 한계성을 나타내고 있다 (MAFRA, 2016; Hyun et al., 2014).

토양 무기물의 주체는 조암광물인 1차 점토광물과 이들의 풍화산물로 파생된 2차 점토광물로 구성되어 있다. 점토광물은 비료성분의 공급, 토양반응에 대한 완충능, 토양의 통기 및 투수성에 영향을 주어 토양의 물리화학적 성질을 지배하기 때문에 작물의 생육과 밀접한 관계가 있다 (Zhang et al., 2006). 이러한 영향은 점토광물의 구조화학적 특징에 기인하는 것으로 알려져 있다 (Dixon and Schulze, 2002). 따라서, 국내외적으로 점토광물을 이용한 토양개량 연구가 활발히 이루어지고 있다 (Choi, 1986; Abdullah et al., 1999; Durukan et al., 2014; Razmi and Sepaskhah, 2012). 대표적인 판상형 광물로서 smectite는 2:1형 팽창성 광물로서 높은 양이온교환용량을 갖고 있으며 보수보비력이 높아서 사질 토양에 혼합시 누수를 방지하여 물의 이용 효과를 극대화할 수 있을 뿐만 아니라 양분의 손실을 막는데 기여한다. 반면, 과립 결정상을 갖는 zeolite는 3차원적으로 균일한 결정성 망상구조를 형성하고 있기 때문에 내부 세공 부피에 해당하는 물을 흡수하여 장마철에 물이 더 많이 가해지더라도 흡수되지 않고 그대로 흘러가 토양의 배수를 돕고 가뭄에는 zeolite 공극 내에 들어 있는 물의 증기압으로 인하여 식물이 가뭄을 이기는데 도움을 줄 수 있는 수분조절의 기능이 있다 (Moon, 1995; Seo, 2005).

국내 토양의 주요 점토광물은 판상형으로 운모, chlorite, kaolinite 등이 알려져 있으며, 과립상으로 석영과 장석이 주로 존재한다. 토양 내에는 점토광물 상들의 상대적 분포 및 조성이 지역과 필지별로 상이하며, 동일 지역 내에서도 지형, 생태, 토층 등에 따라 차이가 있는 것으로 보고 (Jeong et al., 2003; Kang et al., 2016; Tak et al., 2013)되어 있어, 토양 점토광물의 골격구조에 따른 토양의 물리화학적 특성

(Zhang et al., 2010)과 토양개량 효과에 대한 다양한 연구가 필요할 것으로 판단된다. 따라서 본 연구는 국내 대표적 토양개량제로 판상형인 smectite와 과립상인 zeolite가 산지초지의 투수속도에 미치는 영향을 구명하여 점토광물의 구조에 따른 토양개량의 물리적 효과를 평가하고자 행하여 졌다.

Materials and Methods

토양시료 채취 및 제조 토양시료는 판상형 점토광물이 우점하는 충청남도 금산군 이담산양목장과 입상형 점토광물이 우점인 울산광역시 울주군 신우목장에서 채취하였다. 토양시료는 지점별로 표층 (A) 5~15 cm에서 채취한 후 비닐 백에 넣은 다음 실험실로 운반하여 풍건한 후 4 mm 체를 통과시켜 칼럼시료로 사용하였으며, 풍건토양의 일부는 2 mm 체를 통과한 토양은 비닐 백에 보관하여 이화학적 분석에 사용되었다.

토성분석 토성은 비중계법으로 분석하였고, 점토와 미사의 함량은 미국농무성법을 기준으로 토성을 결정하였다 (NIAST, 2000).

토양 및 광물개량제 화학성 분석 토양 및 광물개량제의 화학성 분석은 표준분석법 (NIAST, 2000)에 따라 분석하였다. pH와 EC는 풍건토양과 증류수를 1:5 비율로 섞어서 교반한 다음 pH meter와 EC meter로 측정하였으며, 토양 중 C, N, S 등은 원소분석기 (Variomax CNS, Elementar, German)로 분석하였고, 유효인산은 Lancaster 법에 따라 추출 후 ammonium paramolybdate로 처리하여 30°C 항온기에서 30분 동안 발색 후 720 nm파장에서 Hitachi사 U-3010 Spectrophotometer로 흡광도를 측정하여 분석하였다. 치환성양이온 (K, Ca, Mg, Na)은 유도결합 플라즈마 발광광도계 (Integra XL, GBC)를 사용하여 정량하였다.

광물동정 X-선 회절 분석은 Rigaku사 D/Max 2500으로 Ni-filter와 Cu K α X-radiation [$\lambda(K\alpha_1) = 1.5406 \text{ \AA}$, $\lambda(K\alpha_2) = 1.5433 \text{ \AA}$]을 사용하여 powder법으로 40 KV, 100 mA, scanning speed 5° min⁻¹의 조건으로 3~60°의 범위를 측정하였다. 화학적 조성은 시료와 Li₁₂B₄O₇을 1:99의 비율로 혼합한 다음 micro processing system으로 용융하여 plate를 만든 후 X-선 형광분석기 (PW 2000, Philips)로 측정하였다. 표면특성분석은 시료의 표면을 금으로 도금한 다음 전자주사 현미경 (S-4200, Hitachi, Japan)으로 2,500~20,000 배율에서 조사하였다.

Column 실험 칼럼 실험장치는 Fig. 1과 같은 구조로 제작되었다. 칼럼 재질은 아크릴이며, 내경이 10.0 cm, 높이가

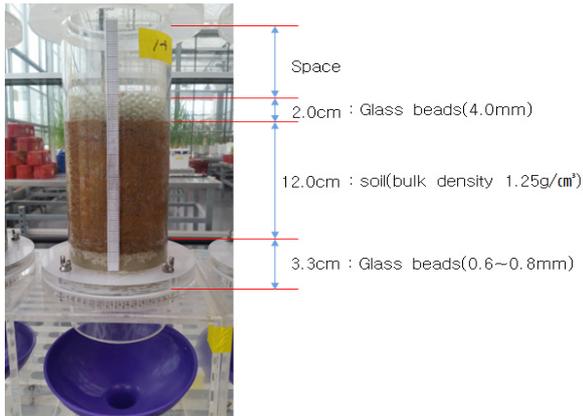


Fig. 1. Column experiment device.

25.0 cm이다.

시료는 토양 942 g과 토양중량의 2.0 wt% (23.6 g)에 해당하는 광물개량제를 충전 전에 골고루 혼합하였다. 칼럼의 충전은 하단에 토양입자 유실을 방지하기 위해 glass beads (입경 0.4~0.6 mm)를 3.3 cm 채우고, 그 위에 시료를 용적밀도 1.25 cm³로 3 cm씩 4회로 나누어 12.0 cm 높이로 충전한 후 상단에는 토양표면의 교란을 막기 위해 glass beads (입경 4.0 mm)를 채웠다 (Han et al., 2008; Jeong and Ju, 2009). 충전한 칼럼은 토양 하단부가 수면에 오도록 하여 증류수로 완전히 포화시킨 후 실온에 정지하여 7일간 건조 후 투수실험을 하였다. 투수실험은 1회 투수에 강우량 63.7 mm에 해당하는 증류수 500 ml를 상부로 공급하였다. 처리구별 칼럼이 모두 투수되면 7~10일 정도 건조 후 3~4회 반복 투수실험을 하였다. 투수용액은 1시간 간격으로 측정하였고 투수속도가 일정하게 유지되면 투수속도에 맞추어 측정 간격을 조절하였다. 실험 처리구는 2개의 토양에 대해 무처리 3반복, smectite 처리 3반복, zeolite 처리를 3반복하여 18개의 칼럼을 설치하고 실험을 수행하였다.

Results and Discussion

공시토양 및 광물개량제 물리화학적 특성 공시토양 및 광물개량제에 대한 물리화학적 특성을 분석한 결과 (Table 1), 토성은 금산 이탄산양목장의 경우 점토함량이 20%인 양토였으며, 울산 신우목장은 점토함량이 23%인 미사질양토였다. 금

산토양은 pH 5.4, 유기물 28.8 g kg⁻¹, 유효인산 60 mg kg⁻¹, 치환성 칼슘 7.29 cmol_c kg⁻¹이었으며, 울산토양은 pH 6.5, 유기물 43.4 g kg⁻¹, 유효인산 444 mg kg⁻¹, 치환성 칼슘 2.43 cmol_c kg⁻¹으로 울산토양이 금산토양에 비하여 pH, 유기물과 유효인산의 함량이 높았으나, 치환성 칼슘의 함량이 낮았다. Jeong et al. (2003)은 한국 산림토양의 화성암 모재 토양의 pH가 5.5, 유효인산 28.7 mg kg⁻¹, 유기물 함량이 45.5 g kg⁻¹라고 보고하였다. 따라서, 초지가 조성되지 않은 산림토양에 비해서는 울산토양은 pH와 유기물 함량이 높게 나타났다. 산지토양의 개량제로 사용한 smectite와 zeolite의 입자 크기는 각각 0.075 mm 이하와 0.50 mm 이하를 사용하였다. smectite는 zeolite에 비하여 pH, 전기전도도 및 치환성 Mg의 함량이 높았으며, 치환성 K, 치환성 Na함량이 낮았다. 치환성양이온용량은 smectite가 59 cmol_c kg⁻¹, zeolite가 107 cmol_c kg⁻¹로 나타났다.

공시토양의 점토광물 구성 조사된 XRD pattern을 토대로 이미 규명된 광물의 XRD pattern과 비교하여 결정성을 확인한 결과 (Fig. 2) 주 조암광물은 3.35 Å에 주회절선을 갖는 석영이었으며, 주요 2차광물로는 14.0 Å에 주회절선을 갖는 chlorite, 7.1과 3.50 Å에 주회절선을 갖는 kaolinite가 주로 발견되었다. 그리고 소량의 운모가 동정되었다. 무기성분 조성을 분석한 결과 규산의 함량은 울산토양이 57.4%로서 금산토양의 44.6%보다 높았으며, 금산토양에서는 고토 및 철의 함량이 울산토양에 비하여 상대적으로 높게 나타났는데, 이는 운모의 형태가 biotite type에 기인된 것으로 판단된다. 따라서, 원소조성 분석결과 울산토양은 입상형의 석영이 우세하고, 금산토양은 판상형의 chlorite 및 kaolinite가 우세한 것으로 판단되었다.

광물개량제 동정 광물개량제로 사용된 천연 smectite와 zeolite를 동정하기 위하여 X선 회절분석한 결과 천연 smectite는 일부 석영이 혼재되어 있었으며, 천연 zeolite는 clinoptilolite가 주 점토광물이었다 (Fig. 3).

천연 smectite와 zeolite의 표면특성분석을 위하여 전자주사 현미경 (SEM, S-4200, Hitachi, Japan)으로 2,500~20,000 배율에서 조사한 결과 smectite는 얇은 판상형 결정들이 다양한 모양과 크기로 뭉쳐져 있는 것으로 나타났으며, zeolite 시

Table 1. Physicochemical properties of soil and clay minerals used in this experiment.

Term	pH (1:5)	EC (dS/m)	O.M (g/kg)	Av.P ₂ O ₅ (mg/kg)	Exch. cation (cmol _c /kg)				CEC (cmol _c /kg)	Texture	Particle size (mm)
					K	Ca	Mg	Na			
Geumsan	5.4	0.25	28.8	60	1.09	7.29	2.30	0.10	16	L	-
Ulsan	6.5	0.58	43.4	444	0.14	2.43	0.74	0.11	14	SiL	-
Smectite	8.7	1.69	-	-	0.98	44.63	6.12	3.34	59	-	< 0.075
Zeolite	6.7	0.35	-	-	8.35	30.97	3.11	22.90	107	-	< 0.500

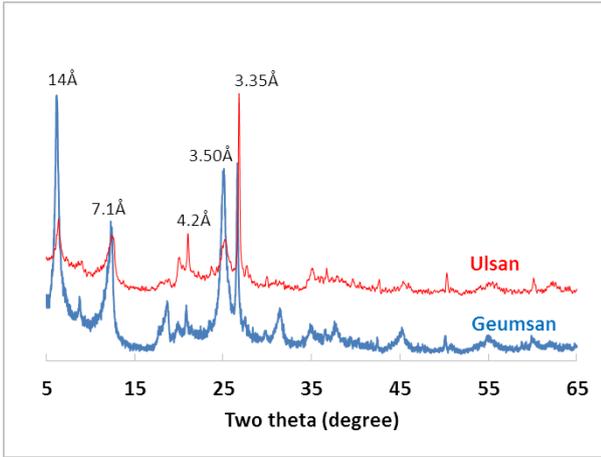


Fig. 2. X-ray diffraction patterns of the clay fractions in the soils.

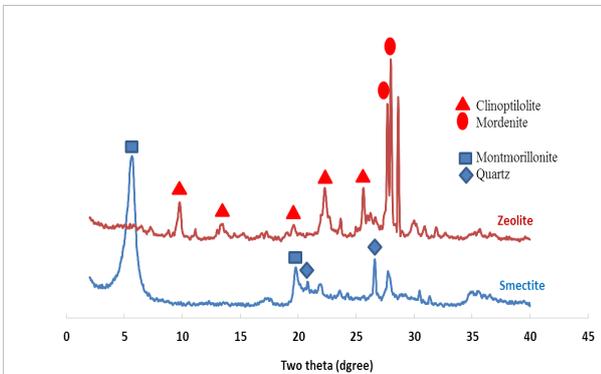


Fig. 3. XRD patterns of smectite and zeolite.

료는 clinoptilolite에서 발견되는 침상형 결정 다발들이 명확히 관찰되었다 (Fig. 4).

판상형 점토가 우점인 토양 (금산)에서 무처리, smectite 처리 및 zeolite의 각각 처리구에서 입자의 공간 배열이 가장 안정화된 것으로 판단되는 4회차 투수속도를 평균한 값은 Fig. 5와 같다.

무처리구의 초기 (Fig. 5의 I 영역) 평균투수속도는 시간당 15 ml (1.91 mm/hr) 정도였고, 최종투수 시간은 39시간 정도였다. 판상형인 smectite 처리구의 초기 평균투수속도는 시간당 9 ml (1.15 mm/hr) 정도로서 무처리구에 비하여 낮은 결과를 보였으며 최종투수 시간은 80 시간 이상 지속되었다. 입상형인 zeolite 처리구의 초기 평균투수속도는 시간당 17 ml (2.17 mm/hr) 정도로서 무처리구에 비하여 증가되었으며 최종 투수시간은 80 시간 정도로 나타나 smectite 처리구보다는 짧았지만 무처리구 보다는 현저히 연장되는 양상을 보였다. 초기 (Fig. 5의 I 영역)의 투수는 대공극을 통한 흐름으로 판단되며, 판상형 점토가 우점하는 토양에 판상형인 smectite를 처리한 경우 초기 투수속도가 느려진 것은 혼합된 판상형 광물개량제가 대공극의 크기를 감소시킨 결과로 판단된다. 반면 입상형인 zeolite을 처리한 경우 초기투수속도가 무리

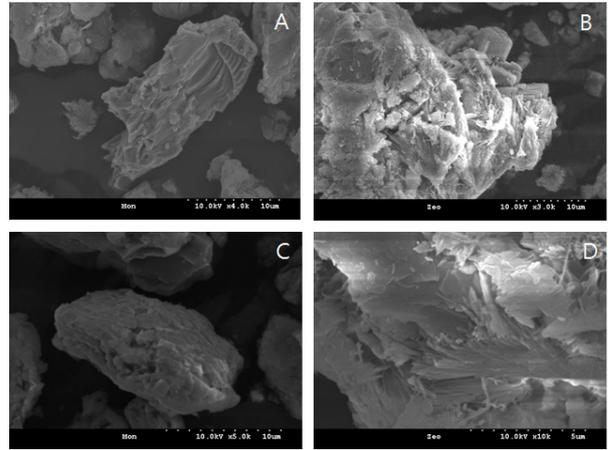


Fig. 4. SEM images of smectite (A & C) and zeolite (B & D). A and B at lower and C and D at higher magnification, respectively.

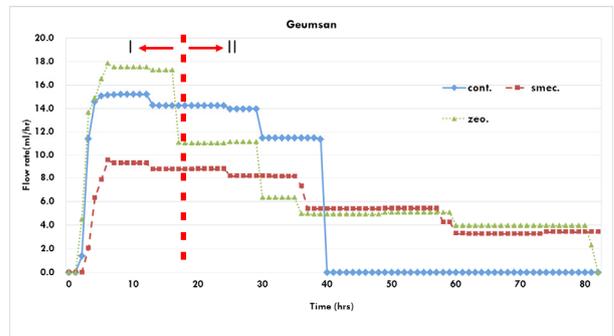


Fig. 5. Effects of addition of clay mineral on average water permeability of layer-dominant soil (Geumsan).

처리구 보다 빨라진 것은 혼합된 입상형 광물개량제가 토양의 우점 광물형인 판상형 입자 사이에 위치하면서 대공극을 증가시킨 결과로 판단된다. 따라서 판상형 점토가 우점하는 토양에 입상형 광물개량제를 혼합하는 것은 투수성 증대에 효과가 있는 것으로 판단된다. 반면 판상형 광물개량제를 혼합하는 것은 투수성을 더욱 낮게 하는 것으로 판단된다.

초기 이후 (Fig. 5의 II 영역)의 투수는 모세관 및 소공극들을 통한 흐름으로 기울기 혹은 감소 단계가 많을수록 공극의 크기 및 모양의 다양성에 밀접한 연관이 있다. 판상형 점토가 우점하는 토양에 판상형 광물개량를 처리한 경우 처리구에 비하여 최종 투수속도가 증가되었을 뿐만 아니라 투수시간이 연장된 것은 모세관 및 소공극의 증가에 기인된 것으로 판단되며, 투수속도의 감소 단계가 다소 증가된 것으로 나타나 공극의 모양이 다양화 된 것으로 판단된다. 반면 입상형 광물개량제를 혼합한 경우는 소공극의 상대적 발달로 인하여 최종 투수 속도 및 시간이 증대된 것으로 판단되며, 공극 모양의 다양성도 향상되는 것으로 나타났다.

입상형 점토가 우점인 토양 (울산)에서 무처리, smectite 처리 및 zeolite의 각각 처리구에서 3회차 투수속도를 평균한 값은 Fig. 6과 같다.

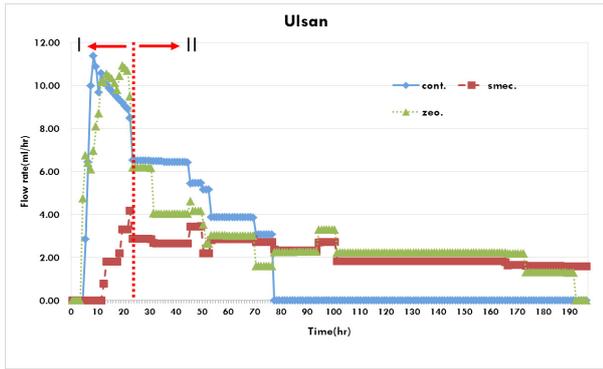


Fig. 6. Effects of addition of clay mineral on average water permeability of granule-dominant soil (Ulsan).

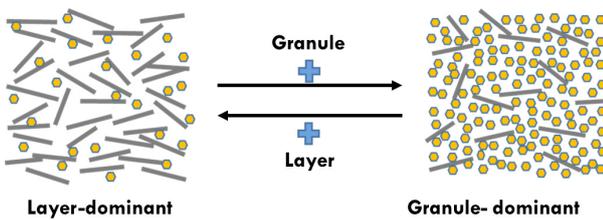


Fig. 7. Simplified model of soil pores depending on structural type of clay minerals.

무처리구의 초기 투수속도는 급격히 낮아지는 경향을 보였으며, 최종투수 시간은 75시간 정도였다. 판상형인 smectite 처리구의 초기 평균투수속도는 시간당 3~4 ml (0.38~0.51 mm/hr) 정도였으며, 무처리구에 비해 현저히 투수속도가 감소되었으며 투수시간도 연장되어 최종투수 시간은 190시간 이상으로 나타났다. 입상형인 zeolite 처리구의 초기 평균투수속도는 무처리구와 비슷한 경향이었으나 투수시간은 190시간으로 연장되었다. 한편, 투수속도의 변화 단계는 무처리구 및 처리구에서 비슷한 양상을 나타내는 것으로 판단되었다.

Fig. 5 및 Fig. 6의 무처리구의 투수성을 비교한 결과, 입상형 입자가 우점하는 토양에서의 공극 크기 및 형태는 판상형 입자의 우점토양과 비교시 보다 다양한 것으로 나타났다. 판상형 광물개량제를 혼합할 경우 혼합된 판상형 광물개량제가 대공극의 크기를 매우 감소시킴과 동시에 모세관 및 소공극을 크게 발달 시키는 것으로 나타났으나 공극의 다양성은 오히려 감소되는 것으로 판단된다. 반면, 입상형 광물개량제를 처리한 경우 공극의 다양성에는 큰 영향을 미치지 않았으나 모세관 및 소공극을 크게 발달 시키는 것으로 나타났다. 이와 같은 결과는 입상형 점토가 우점하는 토양에 입상형 광물개량제를 혼합할 경우 공극특성의 개량효과가 미미할 수 있는 가능성이 있는 것으로 판단된다.

이상의 결과는 토양광물들의 배열이 광물의 구조에 크게 영향을 받는 것을 나타내는 것으로, 판상형과 입상형의 상대적 비율에 따른 토양 공극의 특성 변화를 모식화한 모형은 Fig. 7과 같다.

Conclusions

판상형의 점토광물은 토양의 대공극을 감소시키는 것으로 판단되며, 입상형 점토광물은 토양의 대공극은 향상시킬 수 있는 것으로 판단된다. 구체적으로 판상형 우점 토양에 판상형 광물개량제를 혼합하는 것은 소공극의 증가를 초래할 것으로 판단되며, 입상형 광물개량제를 혼합하는 것은 대공극의 증가와 공극의 다양화를 향상시키는 것으로 판단된다. 반면, 입상형 우점 토양에 입상형의 혼합은 공극성의 변화에 미미한 영향을 미치는 것으로 판단된다. 따라서 객토 및 성토를 통한 토양 개량 시 개량 대상 토양과 투입되는 광물개량제 (혹은 토양)의 광물 구조적 상관 관계가 우선적으로 고려되어야 할 것으로 판단되며, 향후 점토광물 상에 따른 다양한 토양 물리성의 다양한 변화 양상과 토양 화학성의 변화에 대한 연구가 수행되어야 할 것으로 사료된다.

References

Abdullah, W.S., K.A. Alshibli, and M.S. Al-Zou'bi. 1999. Influence of pore water chemistry on the swelling behavior of compacted clays. *Appl Clay Sci* 15(5):447-452.

Choi, J. 1986. The surface properties of major clayminerals produced in Korea. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 19(3): 195-203.

Dixon, J.B. and D.G. Schulze. 2002. *Soil mineralogy with environmental applications*. SSSA Book Ser. 7. SSSA, Madison, WI.

Durukan, S., H.F. Pulat, and Y. Yukselen-Aksoy. 2014. Suction characteristics of compacted zeolite-bentonite and sand-bentonite mixtures. *Waste Manage Res* 32(2):149-156.

Han, K.H., H.M. Ro, H.J. Cho, L.Y. Kim, S.W. Hwang, H.R. Cho, and K.C. Song. 2008. Mobility of nitrate and phosphate through small lysimeter with three physico-chemically different soils. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 41(4):260-266.

Hur, S. N. and L. David. 1997. Studies on the improvement and management of hill pasture. *J. Korea Grassl. Sci* 17(4):329-344.

Hyun, B.K., Y.K. Sonn, C.W. Park, H.C. Chun, H.J. Cho, K.C. Song, Y.S. Zhang, and D.B. Lee. 2014. The study on property criteria of soil dressing, mounding and earth cutting for farmland preservation. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 47(1):36-40.

Jeong, J.H., C.S. Kim, K.S. Goo, C.H. Lee, H.G. Won, and J.G. Byun. 2003. Physico-chemical properties of Korean forest soils by parent rocks. *J. Korean For. Soc* 92(3):254-262.

Jeong, S.W. and B.K. Ju. 2009. Effects of column boundary flow and surfactant contents on soil hydraulic conductivity. *J. Korean Org. Resour. Assoc.* 17(1): 73-79.

Kang, S.J., J.H. Jang, N.Y. Park, J.H. Park, S.Y. Choi, M. Park, C.H. Lee, D.H. Lee, and Y.S. Zhang. 2016. Characterization of clay minerals in ranch pasture. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 49(1): 53-59.

Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs (MAFRA). 2016.

- Law of farmland.
- Moon, H.S. 1996. Clay mineralogy. Min-um-sa.
- NIAST. 2000. Methods of soil and plant analysis. National Institute of Agricultural science and Technology, RDA, Suwon, Korea.
- Razmi, Z. and A.R. Sepaskhah. 2012. Effect of zeolite on saturated hydraulic conductivity and crack behavior of silty clay paddled soil. *Arch. Agron. Soil Sci.* 58(7):805-816.
- Seo, G. 2005. The first step for zeolites. Korea Zeolite Society.
- Tak, H.M., S.H. Kim, and I. Son. 2013. A study on distributions and spatial properties of geomorphological mountain area. *J. Korean Geog. Soc* 48(1):1-18.
- Zhang, Y.S., Y.K. Sonn, C.W. Park, B.K. Hyun, Y.H. Moon, and K.C. Song. 2010. Clay activity and physico-chemical properties of Korean soils with different clay minerals. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 43(6):837-843.
- Zhang, Y.S., Y.K. Sonn, S.J. Jung, G.J. Lee, M.S. Kim, S.K. Kim, J.Y. Lee, and I.H. Pyun. 2006. Clay mineral composition of the soils derived from residuum and colluvium. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 39(5):247-254.