



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)



碩士學位論文

표선수계 토양의 규산 침출 특성

Characteristics of Silicate Extraction in Pyosun Watershed Soils

濟州大學校 大學院

農學科

柳 忠 勳

2012年 2月



표선수계 토양의 규산 침출 특성

指導教授 玄 海 男

柳 忠 勳

이 論文을 農學 碩士學位 論文으로 提出함

2011年 12月

柳忠勳의 農學 碩士學位 論文을 認准함

審査委員長 _____ (印)

委 員 _____ (印)

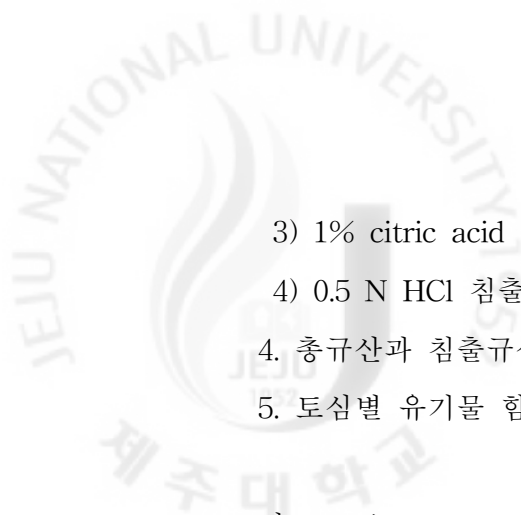
委 員 _____ (印)

濟州大學校 大學院

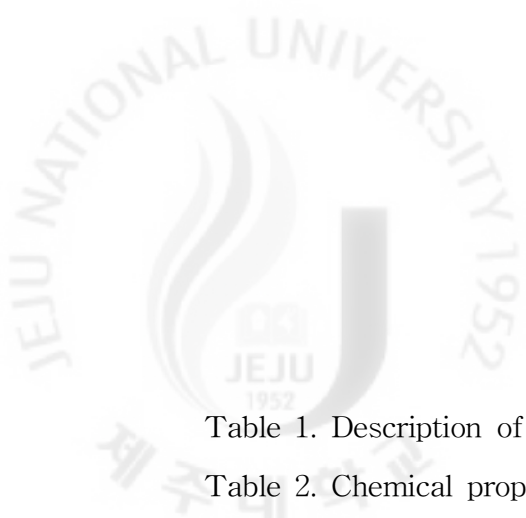
2011年 12月

목 차

List of Tables	iii
List of Figures	iv
ABSTRACT	1
I. 서 론	3
II. 재료 및 방법	6
1. 토양시료의 선정 및 채취	6
2. 토양 이화학성 분석	9
3. 총규산 분석	9
4. 침출성 규산 분석	10
1) Water extraction procedure	10
2) 1 N sodium acetate buffer method	10
3) Citric acid 1% method	10
4) 0.5 N HCl method	10
III. 결과 및 고찰	11
1. 시험토양의 화학성	11
2. 총규산	14
1) 표선수계토양과 육지부토양의 총규산 특성	14
2) 표선수계토양과 육지부토양의 상층토 / 하층토 총규산 비율 특성	18
3. 침출성 규산	20
1) 수용성 침출규산의 특성	20
2) 1 N sodium acetate buffer (pH 4.0) 침출규산의 특성	22



3) 1% citric acid 침출규산의 특성	24
4) 0.5 N HCl 침출규산의 특성	26
4. 총규산과 침출규산의 특성 비교	28
5. 토심별 유기물 함량과 침출성 규산함량의 관계 특성	34
IV. 적 요	38
V. 인 용 문 헌	40



List of Tables

Table 1. Description of the sampling soils	7
Table 2. Chemical properties of soils used	13
Table 3. Sum of extractable SiO ₂ and ratio of sum of extractable SiO ₂ /total SiO ₂ in Pyosun watershed soils	32
Table 4. Sum of extractable SiO ₂ and ratio of sum of extractable SiO ₂ /total SiO ₂ in mainland soils	33



List of Figures

- Fig. 1. Sampling locations for soils of Pyosun watershed. A, B, C, D, and E mean soil series of Pyeongdae, Nogsan, Namweon, Ora, Ido series, respectively 8
- Fig. 2. Sampling locations for soils of main land. F, G, H, I, and J mean soil series of Samgag, Songsan, Deogsan, Mudeung, Osan series, respectively 8
- Fig. 3. Total SiO₂ in Pyosun watershed soils at different depths. A, B, C, D, and E mean soil series of Pyeongdae, Nogsan, Namweon, Ora, Ido series, respectively 16
- Fig. 4. Total SiO₂ in main land soils at different depths. F, G, H, I, and J mean soil series of Samgag, Songsan, Deogsan, Mudeung, Osan series, respectively 17
- Fig. 5. The ratio of top soil/lowest soil of total SiO₂ in Pyosun watershed soils and main land soils 19
- Fig. 6. Comparisons of water extractable SiO₂ in Pyosun watershed soils (Pyeongdae series, Nogsan series, Namweon series, Ora series and Ido series) and main land soils (Samgag series, Songsan series, Deogsan series, Mudeung series and Osan series) at different soil depths 21
- Fig. 7. Comparisons of 1 N sodium acetate buffer (pH 4.0) extractable SiO₂ in Pyosun watershed soils (Pyeongdae series, Nogsan series, Namweon series, Ora series and Ido series) and main land soils (Samgag series, Songsan series, Deogsan series, Mudeung series and Osan series) at different soil depths 23
- Fig. 8. Comparisons of 1% citric acid extractable SiO₂ in Pyosun watershed soils (Pyeongdae series, Nogsan series, Namweon series, Ora series

and Ido series) and main land soils (Samgag series, Songsan series, Deogsan series, Mudeung series and Osan series) at different soil depths	25
Fig. 9. Comparisons of 0.5 N HCl extractable SiO ₂ in Pyosun watershed soils (Pyeongdae series, Nogsan series, Namweon series, Ora series and Ido series) and main land soils (Samgag series, Songsan series, Deogsan series, Mudeung series and Osan series) at different soil depths	27
Fig. 10. Comparisons of ratios of four extractable SiO ₂ and total SiO ₂ for soils of Pyosun watershed at different soil depths. A, B, C, D, and E mean soil series of Pyeongdae, Nogsan, Namweon, Ora, Ido series, respectively	30
Fig. 11. Comparisons of ratios of four extractable SiO ₂ and total SiO ₂ for soils of main land soils at different soil depths. F, G, H, I, and J mean soil series of Samgag, Songsan, Deogsan, Mudeung, Osan series, respectively	31
Fig. 12. Conceptual diagram of a possible silicate leaching mechanism in genesis of Jeju island volcanic ash soil	35
Fig. 13. Comparisons between sum of extractable SiO ₂ (□) and Organic matter (●) in Pyosun watershed soils at different soil depths. A, B, C, D, and E mean soil series of Pyeongdae, Nogsan, Namweon, Ora, Ido series, respectively	36
Fig. 14. Comparisons between sum of extractable SiO ₂ (□) and Organic matter (●) in main land soils at different soil depths. F, G, H, I, and J mean soil series of Samgag, Songsan, Deogsan, Mudeung, Osan series, respectively	37



A B S T R A C T

This study was carried out to find out the cause of high silicate (SiO_2) content which is contained in bottled Jeju volcanic groundwater. The soils used in this experiment were collected from 4 series of volcanic ash soil, 1 series of non-volcanic ash soil in Pyosun watershed and 5 series of forest soil in mainland of Korea. The whole soils collected were analyzed for chemical properties and silicate content by soil depth.

The average contents of organic matter were largest as 24.20% in Pyeongdeea series, and Pyosun watershed soils were 2~10 times higher than mainland soils. In addition, the average available phosphorus content was low as 11.31 mg kg^{-1} for the Pyosun watershed soils, compared to 32.12 mg kg^{-1} for the mainland soils. In the whole series, soil pH had tendency to increase with soil depth and the average exchangeable cation contents were in the order of $\text{Ca} > \text{Mg} > \text{K} > \text{Na}$.

The stronger the characteristics of volcanic ash soil, the lower the total SiO_2 content in the soil. The average total SiO_2 content in Pyeongdeea, Nogsan, and Namweon series of black volcanic ash soil was 33.2%, and Ora and the total SiO_2 content of Ido series was 45.2% on average. On the contrary, the total SiO_2 content of mainland soils was 64.03% on average which was larger than Pyosun watershed soils. In Pyeongdeea, Nogsan and Ora series, the total SiO_2 content of lowestsoil was larger than topsoil.

The extractable SiO_2 content was analyzed using 4 different methods such as water, 1 N sodium acetate buffer (pH 4.0), citric acid 1% and 0.5 N HCl extraction. Extractable SiO_2 content was lowest using the water extraction but the result was similar regardless of soil series. In 1 N NaOAc extraction the contents of Pyosun watershed soils were 2~11 times higher than

mainland soils. The contents of Pyosun watershed soils were also higher than mainland soils by 1% citric acid and 0.5N HCl extraction. Nogsan series was largest, 0.5 N HCl extractable SiO₂ content as 23,414.4 mg kg⁻¹. By soil depth black volcanic ash soils tended to increase extractable SiO₂ content with soil depth except water extraction.

The content of soil extractable SiO₂ in 4 different extractions was in the order of 0.5 N HCl > 1% citric acid > 1 N NaOAc > water. Pyosun watershed soils had low content of total SiO₂, but large content of extractable SiO₂. However, mainland soils had large content of total SiO₂, but low content of extractable SiO₂. The sum of extractable SiO₂ content in Pyosun watershed soils was 15,435.0 mg kg⁻¹ on average, which was 7.9 times larger than mainland soils.

By soil depth the content of organic matters decreased when extractable SiO₂ content increased in black volcanic ash soils. In the volcanic ash soil of Jeju island, most of the active Al complex with humus (organic matter), forming stabilized Al-humus complexes by rapid weathering. Allophane is formed by combination of dissolved Si and uncomplexed Al available in soil solution. The residual Si which is unable to form allophane remains in the volcanic ash soil, moves downward. Therefore, the content of organic matters content and extractable SiO₂ content are inversely related by soil depth.

In conclusion, the cause of larger silicate content in Jeju volcanic groundwater is to be derived from extractable silicate weakly bound to soil by genesis of volcanic ash soil, not parent material and rock.

I. 서 론

먹는샘물의 시판이 보편화됨에 따라 점차 물에 대한 관심이 커지고 있다. 먹는샘물은 단순히 마시는 물이 아닌 기능성이 강조되고 있는데 그 중에 SiO_2 는 대표적인 기능성 물질이다. SiO_2 는 혈관 벽 특히 대동맥 벽과 같은 탄력이 필요한 조직에 필요한 성분으로 콜라겐, 엘라스틴, 다당류와 연계하여 탄력성이 큰 섬유조직을 형성하여 신축성을 높이는 역할을 함으로써 항동맥 경화작용을 한다. SiO_2 는 콜레스테롤 대사 및 이화작용에 관여하여 콜레스테롤의 생성에 대한 억제나 축진을 통해 콜레스테롤의 조절기능을 갖고 있으며, 뼈, 연골조직, 결합조직의 형성과 태아성장, 상처회복 등에 기여하고 콜라겐과 엘라스틴의 형성과 보존에도 관여하는 것으로 알려져 있다(박, 2008). 일본 하시모토가 주장한 맛있는 물에 대한 미네랄 밸런스 지표인 O Index를 먹는샘물에 적용시켜 SiO_2 를 건강하고 맛있는 물을 나누는 기준들 중 하나로 사용하고 있다(두, 1997). 또한 세계적인 먹는샘물 브랜드인 피지워터는 SiO_2 의 유용적 특성을 부각시키고 있으며(Kaplan, 2007), 다수의 연구자에 의해 SiO_2 는 알루미늄의 체내흡수를 억제함으로써 알츠하이머병을 예방할 수 있는 가능성이 있는 것으로 보고되고 있어서(Edwardson, 1993; Gillette-Guoyonnet, 2007) 제주 화산암반수의 SiO_2 가 높은 원인을 밝히는 것은 중요하다.

먹는샘물의 SiO_2 는 주로 암석으로부터 유래되는 것으로 보고 있다. 그러나 제주섬을 구성하고 있는 현무암 계열은 규산함량이 46.8~52.5%로 대표적인 육지부의 화강암의 70.2~73.8%에 비해서 규산함량이 매우 적는데(한국지구과학학회, 2005; 이, 1985; 박 & 권, 1996), 이에 반해 제주지역 화산암반수의 규산함량은 표선수계 지하수가 33.6 mg kg^{-1} 로 국내 먹는샘물 평균함량 19.2 mg kg^{-1} 에 비해 1.8배 정도 높다(강, 2010; 김 & 하, 1992).

제주지역의 강우량은 육지부에 비하여 많은데 강우중의 규산농도가 0.12 mg kg^{-1} 로 매우 낮고 농도변화폭도 작아서 화산암반수의 높은 SiO_2 함량이 빗물에 의한 요인으로 보기는 어렵다(강, 2010). 토양 생성과정 또한 육지부와 제주도의

화산회토가 차이가 크다. 육지부의 대표적인 토양은 우리나라 토양의 2/3이상을 점유하고 있는 화강암과 화강편마암을 모재로 하는데 이들 토양 생성과정에서는 풍화산물인 용해성 Si와 Al이 결합하여 kaolinite 점토광물을 주로 형성한다(엄 등, 1992). 따라서 결정형 광물을 형성하므로 용해성 Si가 많을 수 없는 조건이다.

제주도는 약 90%가 화산회토로 구성되어 있기 때문에 화산회 모재 특성은 제주도 토양의 생성 및 발달에 중요한 인자가 된다(Shin & Stoops, 1988). Soil Taxonomy에서는 화산회토를 Inceptisols의 아목인 Andepts로 분류했었으나 1990년에는 Andisols이라는 새로운 목으로 설정되었다. Andisols의 중심개념은 교질부분이 allophane과 같은 short-range-order 광물이거나 Al-유기복합체가 주가 되는 토양이라는 것이다(USDA, 1990).

제주도 토양의 주요 모재인 화산회가 만들어진 시기가 각각 다르고, 지층에 쌓인 깊이도 각각 다르기 때문에 다양한 종류의 토양이 분포한다(Song *et al.*, 2005). 제주도 화산회토의 토양 생성과정은 화산회 퇴적물의 입도, 구조 및 조직 등의 특이성 때문에 화학적 풍화가 급속도로 진행되어 다량의 염기가 유리됨에 따라 산성이 강해지고 탈규산작용이 진행되어 비결정형 점토광물인 allophane이 형성된다(유 & 송, 1984b). 하지만 화산회 퇴적물이 급속히 풍화하는 과정에 유기물이 공급되면 풍화산물인 다른 양이온은 용탈되나 Al과 Fe은 부식과 매우 안정된 복합체를 형성한다. Al-humus complex를 형성하게 되면 알루미늄의 독성 때문에 미생물에 의한 분해가 잘 일어나지 않아 유기물 함량이 매우 높은 화산회토로 된다(문, 2009).

제주도 토양에서 allophane과 유기탄소 함량사이에 고도로 유의성 있는 역상관계가 있었는데, 유기물 함량이 높은 토양일수록 allophane보다는 Al-유기복합체가 주가 되고 있다(송 & 유, 1994). Allophane은 토양용액에서 용해성 Si와 복합체를 형성하지 않은 가용성 Al의 결합에 의해 형성되는데(Opfergelt *et al.*, 2011), 화산회토의 풍화과정 중 대부분의 Al이 부식과 결합해 매우 안정된 복합체를 형성하고, Si와 결합해서 비결정형 allophane 점토광물을 형성할 Al 줄어들게 된다. 따라서 Al이 부족하여 allophane을 만들지 못한 용해성 Si는 토양용액 중에 농도가 상대적으로 높아지는데, 이 높아진 용해성 Si는 토양에 잔존하였다

가 빗물에 의해 서서히 지하수로 이동하는 것으로 생각된다.

토양의 용해성 규산은 수용성 침출법, 1 N NaOAc 침출법, 1% citric acid 침출법 및 0.5 N HCl 침출법 등 4가지 침출방법 등을 사용하여 분석할 수 있다. 수용성 침출규산은 토양용액의 규산을 침출할 수 있고, 1 N NaOAc 침출규산은 우리나라 벼 재배 토양에서 사용하는 방법으로 뿌리의 유기산에 의해 용해되는 정도의 규산을 침출할 수 있는 것으로 보고 있다. 1% citric acid 침출법은 1 N NaOAc 침출규산 보다 강하게 결합된 규산을 침출하며 밭 토양에서 유효규산 측정에 사용한 방법이고, 0.5 N HCl은 토양을 약한산으로 용해시킨 규산을 분석할 수 있다(이, 2001; 조, 2003). 이들 4가지 침출방법 사이의 함량의 차이로부터 토양과 Si가 결합된 힘의 정도를 예측할 수 있다.

본 연구는 제주지역 화산 암반수의 규산함량이 다른 지역 지하수에 비해 높은 이유를 육지부 일반토양의 생성과정과는 다른 제주도 화산회토 생성과정의 차이에서 오는 것으로 보았다. 이를 위하여 제주지역 화산암반수의 대표적인 먹는샘물 삼다수가 위치한 표선수계 화산회토양인 평대통, 녹산통, 남원통, 오라통 및 비화산회토양인 이도통과 육지부 일반토양 중 강원지역 산림토양인 삼각통, 송산통 및 덕산통과 전남지역 산림토양인 무등통과 오산통에 대해 깊이별로 이화학적 4개의 침출방법으로 침출한 규산함량을 비교하여 표선수계 화산암반수의 SiO₂ 유래 원인을 밝히고자 하였다.

II. 재료 및 방법

1. 토양시료의 선정 및 채취

시험에 사용된 토양은 삼다수 충전지역으로 구분되는 표선수계토양, 강원지역 산림토양, 전남지역 산림토양을 사용하였다. 채취된 토양시료의 토양통, 분류, 위치 등에 대한 정보는 Table 1과 같다.

본 실험에 사용된 토양은 삼다수 충전지역으로 구분되는 표선수계에 분포하는 36개의 토양통 중에서 면적이 넓고 특성이 다른 5개 토양통을 대상으로 선정하였다. 5개 토양통은 화산회토 성질이 강한 흑색 화산회토로 분류되는 평대통, 녹산통 및 남원통, 화산회토 성질이 비교적 약한 농암갈색 화산회토로 분류되는 오라통과 암황갈색 비화산회토로 분류되는 이도통을 선정하였다. 선정된 토양통이 표선수계에서 차지하는 면적은 평대통 (6,811.6 ha) > 오라통 (2,220.9 ha) > 녹산통 (1,400.7 ha) > 남원통 (960.9 ha) > 이도통 (128.9 ha) 순이었다(농촌진흥청, 1976).

또한 대조토양은 육지부 대표적인 산림토양으로 분포면적이 넓고 산악지에 분포하는 강원지역 산림토양 삼각통, 송산통 및 덕산통과 전남지역 산림토양 무등통과 오산통을 대상으로 선정하였다. 선정된 육지부 토양통 중 강원지역 산림토양의 전국 면적은 삼각통 1,012,210 ha, 송산통 821,801 ha, 덕산통 475,086 ha 이었고, 전남지역 산림토양의 면적은 무등통 436,918 ha, 오산통 322,325 ha 이었다. 이들 육지부 5개 토양통의 총면적은 우리나라 농경지 총면적의 1.5배 정도에 해당한다(농촌진흥청, 1992). 선정된 전체토양은 모두 임야 및 산림지역으로 인위적인 물질이 첨가되지 않은 토양이었다.

토양시료는 20 cm간격으로 100 cm까지 채취하였고 표선수계토양과 육지부 토양의 채취위치는 각각 Fig. 1과 Fig. 2 같다.

Table 1. Description of the sampling soils.

Soil series	Sub group*	Land use	Cord. X	Cord. Y
Pyeongdega	Typic Melanudands	Forest land	169,232	42,148
Nogsan	Typic Hapludands	Forest land	174,168	39,829
Namweon	Typic Melanudands	Forest land	178,171	41,957
Ora	Andic Utrudepts	Forest land	178,013	30,816
Ido	fluventic Eutrudepts	Forest land	178,129	31,254
Samgag	Typic Distrudepts	Forest land	308,388	565,539
Songsan	Typic Dystrudepts	Forest land	304,436	562,250
Deogsan	Lithic Udorthents	Forest land	306,122	563,263
Mudeung	Lithic Dystrudepts	Forest land	204,577	224,846
Osan	Typic Dystrudepts	Forest land	201,978	208,935

* 흙토람 토양환경정보시스템 (<http://www.soil.rda.go.kr/soil/>)

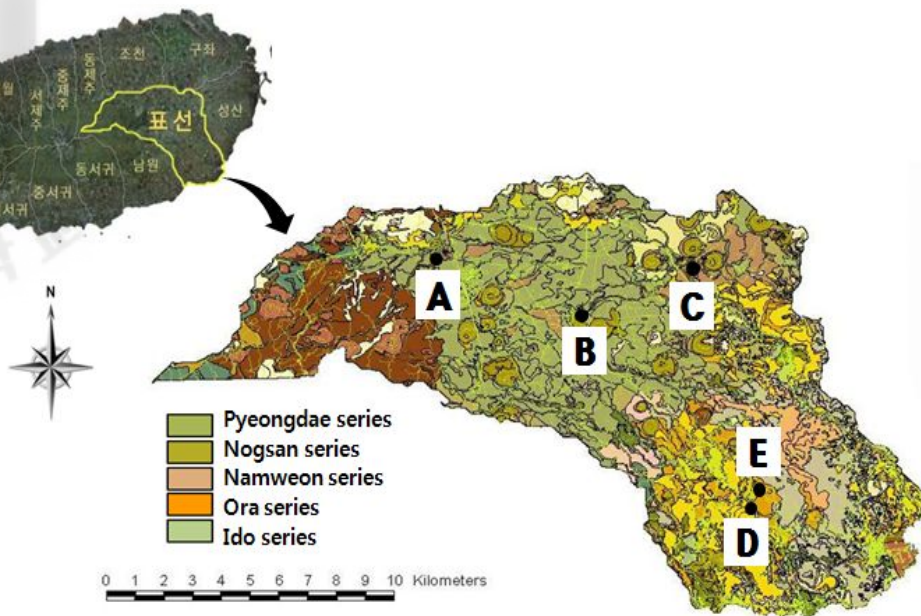


Fig. 1. Sampling locations for soils of Pyosun watershed. A, B, C, D, and E mean soil series of Pyeongdae, Nogsan, Namweon, Ora, Ido series, respectively.

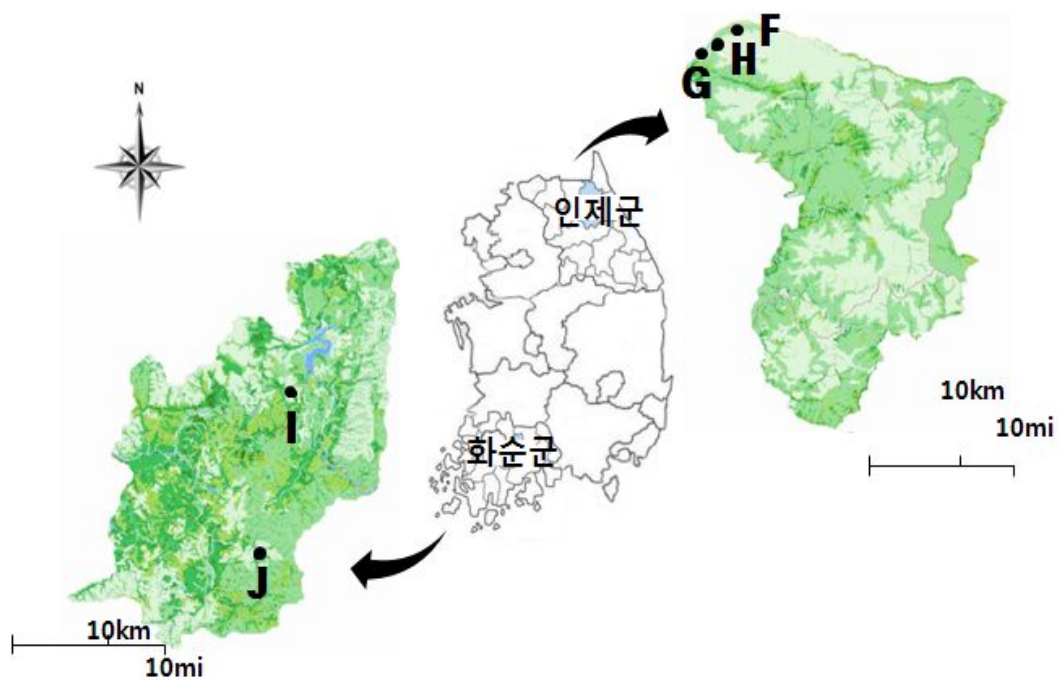


Fig. 2. Sampling locations for soils of main land. F, G, H, I, and J mean soil series of Samgag, Songsan, Deogsan, Mudeung, Osan series, respectively.

2. 토양 이화학성 분석

토양 이화학성을 측정하기 위한 분석시료는 풍건시킨 후 2 mm체를 통과한 것을 농촌진흥청 토양 화학 분석법과 토양 및 식물체 분석법에 준하여 분석하였다(농촌진흥청, 1988; 농촌진흥청, 2000). 토양 pH는 토양과 증류수의 비율을 1 : 5로 희석하여 pH meter (inoLab pH 730, Germany)를 이용하여 측정하였다. 전기전도도는 pH를 측정하고 남은 여액을 EC meter (CM-11PTOA Electronics Ltd., Japan)를 이용하여 측정하였다. 유기물 함량은 Walkley and Black법을 이용하였다. 유효인산은 Lancaster법으로 측정하였고, 교환성양이온 K, Ca, Mg 및 Na는 1N ammonium acetate (pH 7.0)용액 50 mL를 가하여 30분간 진탕한 다음 여과하여 얻어진 여액을 원자흡광분광광도계 (SpectraA 220 FS, Varian, Australia)를 이용하여 분석하였다.

3. 총규산 분석

총규산 분석을 위한 토양시료는 풍건시킨 후 200 mesh체를 통과한 것을 Soil Taxonomy 표준 분석방법인 Soil Survey Laboratory Method Manual (USDA, 2004)에 준하여 분석하였다. 토양 0.25 g을 회화로에서 유기물 분해 (250°C 15분, 450°C 15분, 550°C 1시간)를 시킨 후 Teflon 용기에 토양과 질산 9 mL, 염산 3 mL, 불산 4 mL를 넣고 100°C에서 1시간 분해 후 냉각시키고 4.5% boric acid 20 mL를 첨가하였다. 첨가 후 150°C에서 5시간 분해시키고 냉각하여 분해액을 1.9% boric acid를 100 mL nalgene vol. flask에 mess up을 하여 cap을 막고 잘 섞은 후 12시간 방치 후 ICP (Integra XL dual GBC, Australia)로 251.612 nm에서 측정하였다.

4. 침출성 규산 분석

1) Water extraction procedure

수용성 침출규산은 Cho *et al.*(2004)와 Morel *et al.*(2001)이 실험한 침출방법을 따랐다. 토양 5 g에 증류수 50 mL을 첨가하여 상온 (25℃)에서 1시간 동안 진탕하였으며, 진탕 후 Whatman No. 42로 여과시켰다. 여과시킨 침출액의 규산 함량은 ICP (Integra XL dual GBC, Australia)로 측정하였다. 모든 침출성 규산 분석은 토양시료를 풍건시킨 후 2 mm체를 통과시킨 것을 사용하였고, 분석은 polyethylene과 polypropylene bottle용기를 사용하였다.

2) 1 N sodium acetate buffer method

1 N NaOAc 침출규산은 농촌진흥청(2000) 토양 및 식물체 분석법에 준하여 분석하였다. 토양 5 g에 1 N sodium acetate buffer solution (pH4.0) 용액 50 mL을 첨가하여 항온 수평 진탕기 (60℃, 125 rpm)로 90분 반응시킨 후 5분 동안 차가운 물로 식힌 후 Whatman No. 42로 여과하였다. 여과 후 침출액을 ICP (Integra XL dual GBC, Australia)로 측정하였다.

3) Citric acid 1% method

1% citric acid 침출규산 분석은 토양 5 g에 1% citric acid 용액 50 mL을 첨가하여 항온 수평 진탕기 (30℃, 125 rpm)로 2시간 반응시킨 후 12시간동안 방치하고, 다시 수평 진탕기 (30℃, 125 rpm)로 1시간 반응시킨 후 Whatman No. 42로 여과하였다(Cho *et al.*, 2004; Morel *et al.*, 2001). 여과 후 침출액은 ICP (Integra XL dual GBC, Australia)로 측정하였다.

4) 0.5 N HCl method

0.5 N HCl 침출규산은 농촌진흥청(1988) 토양 화학 분석법에 준하여 분석하였다. 토양 5 g에 0.5 N HCl 용액 75 mL을 첨가하여 항온 수평 진탕기 (30℃, 125 rpm)로 1시간 동안 반응시킨 후 Whatman No. 42로 여과하였다. 여과 후 침출액을 ICP (Integra XL dual GBC, Australia)로 측정하였다.

Ⅲ. 결과 및 고찰

1. 시험토양의 화학성

제주도 토양은 토양색에 따른 분류와 신토양분류법을 병행하여 사용하고 있는데, 토양분류 명칭은 흑색 화산회토, 농암갈색 화산회토, 암갈색 비화산회토 및 암황갈색 비화산회토 등으로 나타내며, 화산재의 영향을 많이 받을수록 검은색이 짙어진다(제주도민속자연사박물관, 2000). 이는 화산재에서 유래된 알루미늄과 유기물의 결합에 의해 유기물의 집적으로 나타나는 색이며 토양의 물리화학적 성질을 예측하는데 중요한 지표로 이용된다(유 & 송, 1984a).

시험토양의 화학적 특성 중 토양통별로 가장 뚜렷한 차이를 보이는 성분은 유기물 함량과 유효인산 함량이었다(Table 2). 유기물 함량은 표선수계토양이 육지부토양에 비해서 2~10배 정도 높았다. 표선수계 토양통 중에서 흑색화산회토로 분류된 토양통에서 높은 함량을 보였는데, 평균함량은 평대통 24.20%, 남원통 14.84%, 녹산통 6.39% 순으로 높았다. 토심별로는 0~20 cm에서 함량이 높았고, 평대통이 34.77% 로서 특이하게 높았다. 토심이 깊어짐에 따라 표선수계토양은 유기물 함량이 줄어들었고, 육지부 토양은 토심과는 무관한 경향을 보였다. 제주도 화산회토양의 유기물 함량은 평균 8.3%로 육지토양의 2.5%에 비하여 대단히 높다고 보고된 바가 있다(이 등, 1983; 유 & 송, 1984a; 허 등, 2006).

유효인산 함량은 유기물 함량과 반대의 양상을 보였다. 표선수계토양의 함량이 육지부토양 평균값에 비해 함량이 적었는데, 육지부토양에 비해 평대통, 녹산통 및 오라통은 1/3, 남원통은 2/7, 이도통은 1/2배 낮았다. 전남지역 산림토양인 무등통이 가장 높은 함량을 나타냈고, 60~80cm 에서 62.5 mg kg^{-1} 이었다. 이와 같은 경향은 제주도 화산회토양에서 인산 고정력이 강하여 유효인산 함량이 낮게 나타난 것으로 보인다(이 등, 1983).

토양 pH는 4.3~6.5 범위로서 토양통에 따라 토심별 변화양상이 달랐지만, 전

체적으로는 토심이 깊어짐에 따라 높아지는 경향이였다. 제주도 토양은 염기가 용탈되기 쉬워서 pH가 토심이 깊어질수록 높아진다고 보고되고 있다(송 & 유, 1991a; 송 & 유, 1991b).

시험토양 중 교환성 양이온의 평균함량은 $Ca > Mg > K > Na$ 순이었다. 토양통 중에서 표선수계토양의 오라통이 높은 함량을 보였고, 토심별로는 일관성을 찾을 수 없었다. 같은 흑색 화산회토인 평대통과 녹산통의 경우에도 교환성 양이온의 농도는 토심과 양이온 종류별로 유사성을 찾기 어려웠다. 이는 토양시료의 물리화학적 특성의 차이 이외에도 토양특성이 불균일하고 토양이력이 상이하기 때문으로 생각된다.

본 실험에서 사용한 표선수계토양의 성질은 이 등(1983)이 제주도 화산회토, 비화산회토 및 임지토양 등 6개 토양통을 조사한 결과에 비해 pH와 유기물 함량에서는 남원통과 오라통은 비슷한 경향이었고, 이도통은 낮았다. 유효인산 함량은 차이가 거의 없었고 치환성 양이온은 오라통을 제외한 나머지 토양통에서 차이가 없었다. 강 등(1997)도 제주도 화산회토, 비화산회토 및 논토양 등 8개 토양통을 조사하였는데, 이에 비해 pH와 치환성 양이온은 낮았고, 유효인산 함량은 거의 차이가 없었다. 육지부 토양의 성질은 정 등(1994)이 우리나라 대표적인 조면질 화강암 토양 특성에 대해 조사한 결과와 비교해서 유기물 함량이 낮은 점이 비슷했고, 유효인산 함량은 더 높았다. 전체적으로 비슷한 경향을 보였다.

Table 2. Chemical properties of soils used.

Soil series	Depth (cm)	pH (1:5)	EC (ds m ⁻¹)	OM (%)	Avail P ₂ O ₅ (mg kg ⁻¹)	Exch. cation (cmol ⁺ kg ⁻¹)			
						K	Ca	Mg	Na
Pyeongdega	0-20	4.3	0.33	34.77	23.0	0.25	0.36	0.44	0.17
	20-40	4.4	0.79	28.01	9.5	0.14	0.36	0.42	0.11
	40-60	4.8	0.47	25.05	6.9	0.17	0.43	0.40	0.16
	60-80	5.0	0.24	26.49	5.1	0.11	0.42	0.32	0.18
	80-100	4.7	0.22	6.67	5.9	0.10	0.27	0.25	0.13
Nogsan	0-20	5.7	0.21	11.77	18.1	0.11	0.29	0.37	0.13
	20-40	5.6	0.21	8.42	17.0	0.14	0.44	0.63	0.17
	40-60	5.9	0.14	5.02	8.2	0.08	0.56	0.98	0.16
	60-80	6.0	0.15	3.57	3.6	0.12	0.77	1.26	0.19
	80-100	6.3	0.16	3.17	5.0	0.12	0.83	1.35	0.19
Namweon	0-20	5.2	0.29	17.89	17.8	0.23	0.44	0.39	0.12
	20-40	5.3	0.27	18.26	11.8	0.31	0.41	0.42	0.11
	40-60	5.4	0.23	16.51	8.1	0.28	0.46	0.49	0.12
	60-80	5.7	0.21	6.72	9.5	0.43	0.52	0.50	0.14
Ora	0-20	6.4	0.32	6.55	13.1	0.36	5.30	3.00	0.21
	20-40	6.5	0.21	7.16	6.3	0.29	2.88	2.65	0.17
	40-60	6.3	0.15	2.07	10.9	0.33	2.37	2.65	0.16
	60-80	6.2	0.16	2.09	23.1	0.32	2.52	2.46	0.16
Ido	0-20	5.0	0.23	6.02	14.5	0.16	0.37	0.41	0.11
	20-40	5.0	0.19	4.79	24.2	0.17	0.41	0.38	0.09
	40-60	5.3	0.20	4.85	21.3	0.17	0.50	0.63	0.11
	60-80	5.5	0.19	3.44	19.7	0.29	1.15	1.23	0.30
Samgag	0-20	5.7	0.15	4.94	20.6	0.17	2.79	1.12	0.08
	20-40	5.7	0.09	3.63	17.5	0.10	2.24	0.67	0.10
	40-60	5.7	0.07	2.28	31.8	0.06	2.19	0.80	0.10
	60-80	5.9	0.08	2.32	21.0	0.09	2.94	0.93	0.10
	80-100	5.8	0.07	2.05	35.6	0.09	2.69	0.82	0.11
Songsan	0-20	5.3	0.32	3.74	21.7	0.13	3.28	1.62	0.09
	20-40	5.7	0.10	2.82	27.7	0.14	2.96	1.60	0.08
	40-60	5.7	0.07	2.56	10.3	0.13	2.54	1.47	0.13
	60-80	5.8	0.08	2.72	12.2	0.09	2.53	1.47	0.10
	80-100	5.7	0.10	3.29	14.9	0.09	3.39	2.06	0.12
Deogsan	0-20	5.4	0.10	3.83	38.4	0.11	1.53	0.72	0.09
	20-40	5.3	0.09	3.26	33.7	0.10	0.18	0.44	0.08
	40-60	5.5	0.08	2.64	50.3	0.11	0.17	0.44	0.08
	60-80	5.7	0.08	2.80	47.5	0.13	0.15	0.45	0.09
	80-100	5.4	0.16	1.95	48.8	0.12	0.15	0.44	0.12
Mudeung	0-20	5.5	0.08	1.02	48.1	0.08	2.85	3.75	0.22
	20-40	5.6	0.06	0.74	46.8	0.10	3.01	4.33	0.23
	40-60	5.7	0.06	1.02	53.4	0.06	3.07	3.64	0.23
	60-80	5.8	0.05	1.27	62.5	0.07	2.83	3.96	0.23
	80-100	5.8	0.06	0.87	49.3	0.06	3.59	4.05	0.23
Osan	0-20	5.1	0.18	3.25	25.6	0.17	0.61	0.39	0.09
	20-40	5.1	0.14	1.63	24.8	0.15	0.46	0.60	0.09
	40-60	5.2	0.12	1.88	22.9	0.11	0.56	0.78	0.10
	60-80	5.3	0.10	1.63	37.6	0.09	0.39	1.05	0.10

2. 총규산

규산은 광물을 형성하는 주요 원소로서 일반적으로 토양 중에 50~70% 정도 함유되어 있는 것으로 보고되고 있다(조, 2003; 이, 2001). 표선수계토양은 화산회나 현무암을 모재로 하는 토양이며, 육지부토양은 화강암이나 화강편마암을 모재로 하는 토양이다(농촌진흥청, 1992). 이를 규산함량에 따라 구분하면 표선수계토양은 규산함량이 낮기 때문에 염기성암으로 분류하고 육지부토양은 높은 규산함량으로 산성암에 속한다.

1) 표선수계토양과 육지부토양의 총규산 특성

표선수계토양의 총규산함량은 화산회토 성질이 강할수록 함량이 낮았다. 흑색화산회토로 화산회토의 성질이 강한 평대통, 녹산통, 남원통이 평균 33.2% 이었고, 화산회토의 성질이 약한 오라통과 이도통의 평균은 45.2%이었다(Fig. 3). 반면에 육지부토양의 총규산함량 평균값은 64.03%으로 표선수계토양보다 매우 높았다(Fig. 4). 표선수계토양의 함량이 육지부토양 총규산함량의 평균값에서 차지하는 비율은 평대통과 남원통이 49%, 녹산통과 이도통이 61%, 오라통이 77% 정도이었다.

토양 중의 총규산함량에 대한 자료는 여러 연구자가 보고하였다. 표선수계토양의 총규산함량은 강 등(1997)이 제주도 화산회토양에서 총규산함량이 29.80~55.38% 범위라는 보고와 비슷하였고, 김(1985)이 보고한 37.0% 와도 비슷한 함량이었다. 육지부 토양의 총규산함량은 남(1975)이 보고한 전주와 낭산지역의 화강암 67.12~71.11% 에 비해서는 약간 낮은 편이었으나 강과 신(2006)의 점판암 규산함량 58.80~64.95% 에 비해서는 무등통을 제외한 4개 토양통은 높았다.

깊이별 총규산함량은 표선수계토양에서 평대통, 녹산통 및 오라통은 토심이 깊어짐에 따라 총규산함량도 증가하는 경향을 보였지만, 남원통과 이도통에서는 토심과 함량사이에 관계가 없었다. 육지부 토양은 오산통은 줄어드는 경향을 보였고, 나머지 4개 토양통에서는 관계가 없었다.

엄 & 김(1991)과 엄 등(1991)이 한국의 주요 모암에서 발달된 토양점토광물

의 특성을 조사한 연구에서 화강암, 화강편마암, 석회석, 이판암 및 현무암의 깊이별 총규산함량을 보면 모암이 같은 토양통 사이에서도 일관성을 찾을 수 없었고, 강과 신(2006)의 연구에서도 토심과 총규산함량 사이에 관계가 없었다. 반면에 Egli *et al.*(2008)이 조면 현무암에 대해 연구한 자료에서 토심이 깊어짐에 따라 규산함량은 증가하고 있었는데, 이는 표선수계토양의 평대통, 녹산통 및 오라통과 비슷한 경향이였다.

제주지역 표선수계토양은 육지부토양보다 총규산함량이 낮은 것을 볼 때 제주지역 화산암반수의 높은 규산함량이 암석이나 지질 외에 다른 요인이 영향을 주었을 것으로 생각된다.

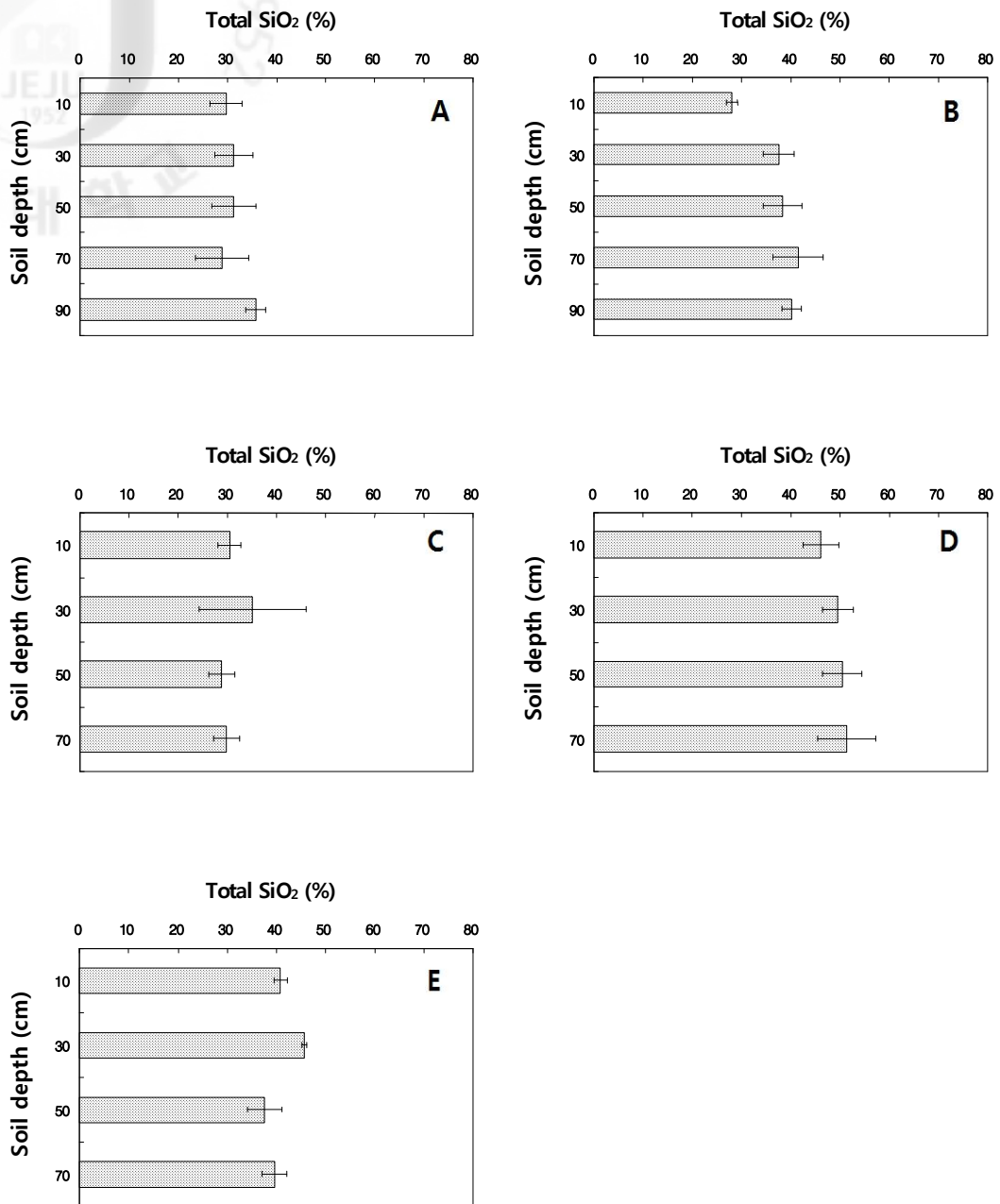


Fig. 3. Total SiO₂ in Pyosun watershed soils at different depths. A, B, C, D, and E mean soil series of Pyeongdae, Nogsan, Namweon, Ora, Ido series, respectively.

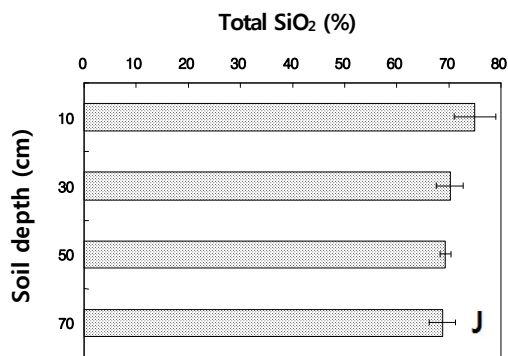
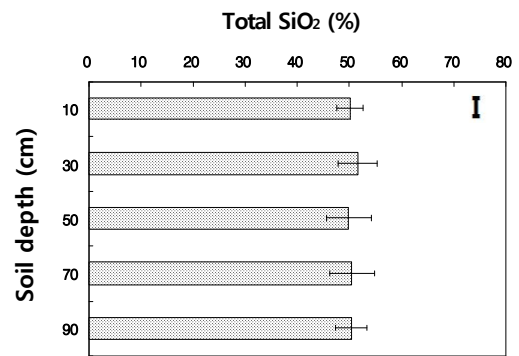
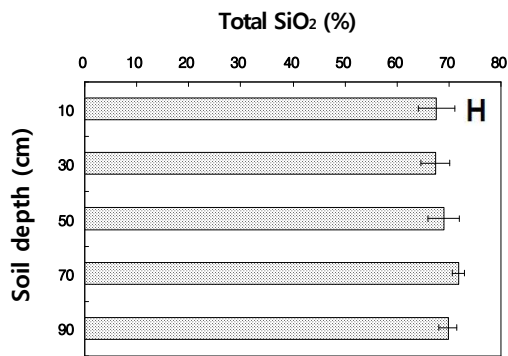
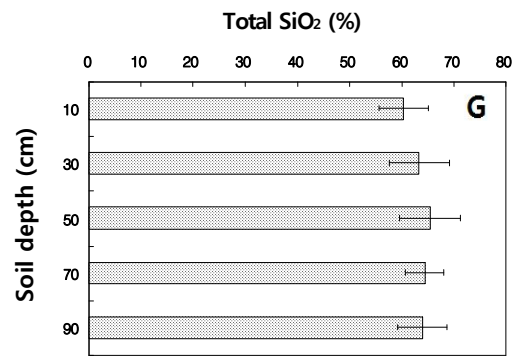
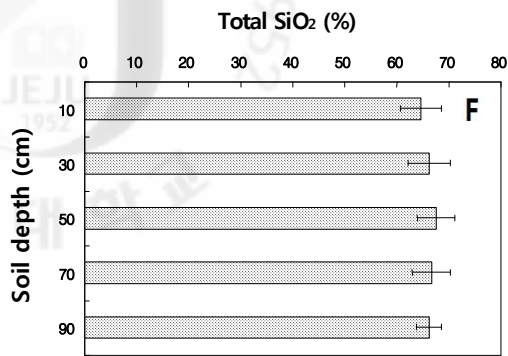


Fig. 4. Total SiO₂ in main land soils at different depths. F, G, H, I, and J mean soil series of Samgag, Songsan, Deogsan, Mudeung, Osan series, respectively.

2) 표선수계토양과 육지부토양의 상층토/하층토 총규산 비율 특성

토양에서 유래되는 지하수의 규산은 토양 속에서 빗물에 의해 이동하는데, 상층토/하층토의 총규산 비율이 일정하지 않고 차이가 있었다(Fig. 5). 상층토/하층토 비율이 낮을수록 토양에서 생성된 규산이 하향이동 했다고 볼 수 있다.

표선수계토양과 육지부토양의 하층토에 대한 상층토의 비율은 육지부토양에 비해 표선수계토양이 낮았다. 그 중 녹산통, 평대통 및 오라통이 0.70, 0.83, 0.90으로 가장 낮았고, 남원통과 이도통은 상층토의 함량이 하층토에 비해 높았다. 육지부토양에서는 오산통을 제외한 삼각통, 송산통, 덕산통, 무등통에서 하층토의 총규산함량이 상층토에 비해 높았지만 함량의 차이가 거의 없었다.

제주도 토양에서 일반적으로 하부층위에서 Si의 함량이 증가하는 경향을 보여주었는데, 이는 표토의 풍화과정에서 용탈된 Si가 상대적으로 하부에 집적되는 것으로 여겨지며(전 등, 2006; 안 등, 2006), 표선수계토양의 녹산통, 평대통 및 오라통이 이에 해당하는 것으로 생각된다.

제주도는 우리나라에서 비가 가장 많이 내리는 지역에 속한다. 해안 저지대에 위치한 기상청 관할 4개 기상대 및 기상관측소 (제주, 서귀포, 고산, 성산포)에서 측정된 30년 평균 강우량은 1,567 mm이지만, 중산간 지역을 포함한 도 전역의 10년 평균 (1993~2002) 강우량은 1,975 mm로서 전국 평균 1,283 mm 보다 무려 692 mm가 더 많다(박, 2008). 따라서 제주 지역은 육지부에 비해서 용탈되는 규산의 양도 많을 것으로 생각된다.

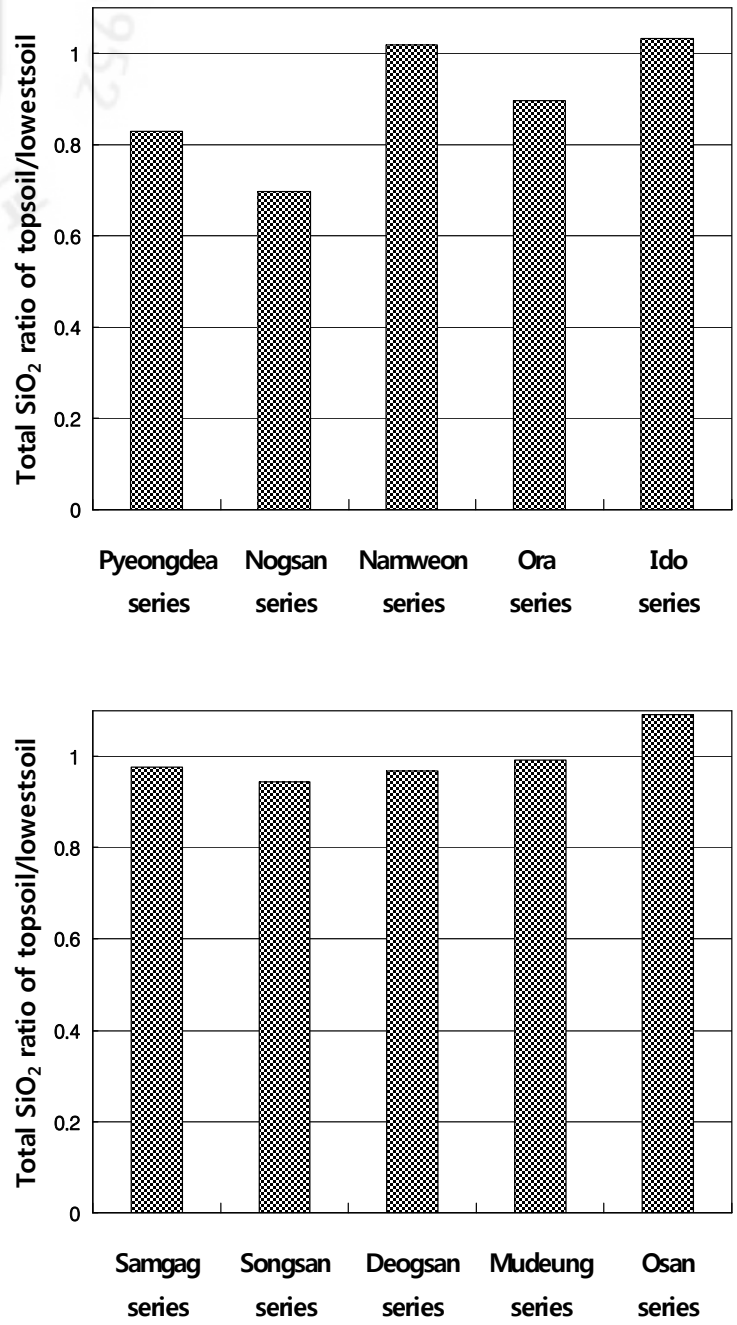


Fig. 5. The ratio of topsoil/lowestsoil of total SiO₂ in Pyosun watershed soils and main land soils.

3. 침출성 규산

침출성 규산은 수용성 침출법, 1 N NaOAc 침출법, 1% citric acid 침출법 및 0.5 N HCl 침출법 등 4가지 침출 방법을 사용하였다. 수용성 침출규산은 토양용액의 규산을 침출 할 수 있고, 1 N NaOAc 침출규산은 우리나라 벼 재배 토양에서 사용하는 방법으로 뿌리의 유기산에 의해 용해되는 정도의 규산을 침출할 수 있다. 1% citric acid 침출법은 1 N NaOAc 침출규산 보다 강하게 결합된 규산을 침출하며 밭 토양에서 유효규산 측정에 사용된 방법이고, 0.5 N HCl은 토양을 약한산으로 용해시킨 규산을 분석 할 수 있다. 우리나라에서는 1968년 이전까지 식물이 흡수하는 규산을 주로 0.5 N HCl 침출용액에 의한 규산을 유효규산 함량으로 사용해 오다가 1968년 이후부터는 일본의 今泉 등이 개발한 1 N NaOAc (pH 4.0) 완충용액으로 침출하는 방법을 개량하여 유효규산 분석법으로 사용하고 있다(이, 2001; 조, 2003).

1) 수용성 침출규산의 특성

표선수계토양과 육지부토양의 토심별 수용성 침출규산의 함량은 Fig. 6에 나타났다. 전체 토양통에서 수용성 침출규산 함량은 17.4~87.8 mg kg⁻¹의 범위로써, 오라통에서 가장 높은 함량을 보였고, 오산통에서 가장 낮은 함량을 보였다. 윤 & 황(1984)이 조사한 고평통과 덕평통의 수용성 SiO₂ 함량 17.1, 8.9 mg kg⁻¹에 비해서 전체적으로 높은 경향을 보였다.

토심별로는 일관성을 찾을 수 없었는데, 수용성 침출규산에서는 제주지역 표선수계토양과 육지부토양의 규산 함량이 별다른 차이가 없었고, 비슷한 양상을 보였다. Louisiana 토양의 깊이별 수용성 SiO₂ 함량에서도 토심과 수용성 규산함량 사이에 일관성을 찾을 수 없었다(Wang *et al.*, 2004). 따라서 제주 화산암반수의 높은 규산함량을 수용성 침출규산으로 설명하는 것은 어려울 것으로 생각된다.

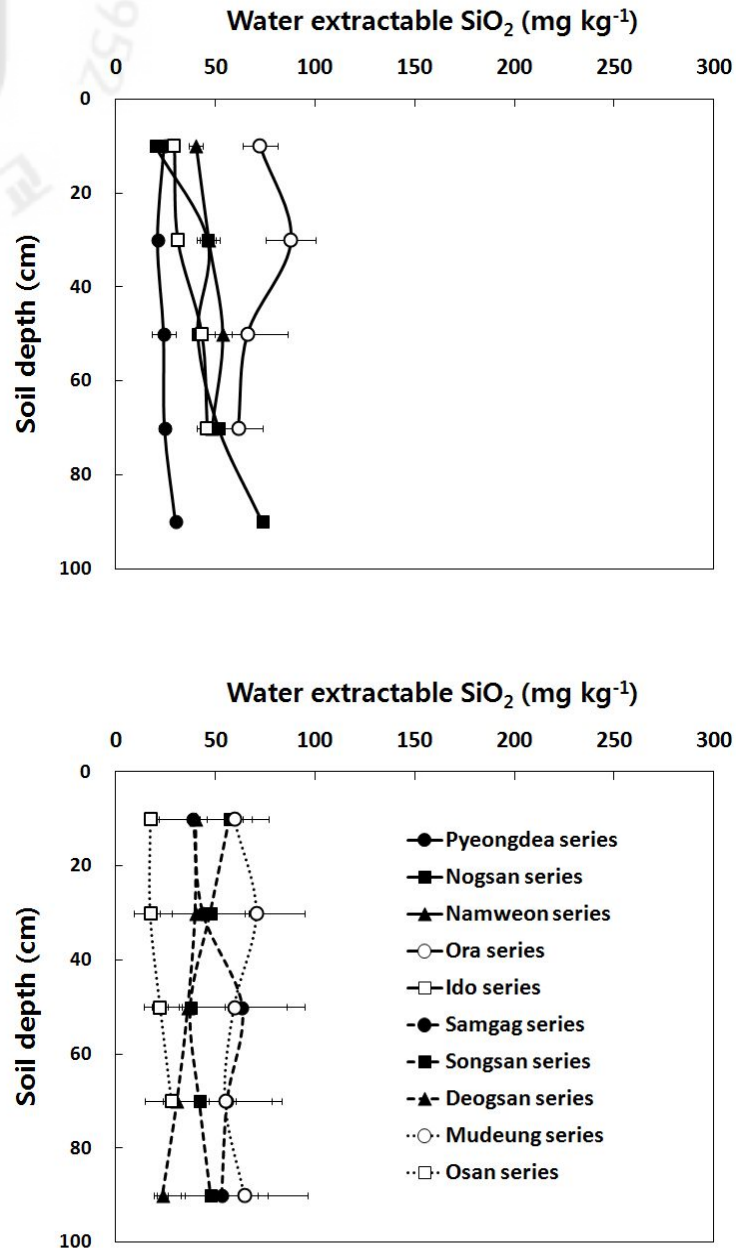


Fig. 6. Comparisons of water extractable SiO₂ in Pyosun watershed soils (Pyeongdaea series, Nogsan series, Namweon series, Ora series and Ido series) and mainland soils (Samgag series, Songsan series, Deogsan series, Mudeung series and Osan series) at different soil depths.

2) 1 N sodium acetate buffer (pH 4.0) 침출규산의 특성

1 N NaOAc 침출규산에서는 표선수계토양과 육지부토양의 함량의 차이가 컸다(Fig. 7). 표선수계토양은 218.0~1,674.0 mg kg⁻¹ 범위를 나타냈고, 육지부토양은 58.7~248.8 mg kg⁻¹ 범위에 있었다. 표선수계토양이 육지부토양의 규산함량 평균값에 비해 2~11배 정도 높았고, 그 중 흑색 화산회토인 녹산통이 가장 높았다.

제주도의 토양통들을 조사한 연구들과 비교 했을 때 남원통, 오라통, 이도통 등은 유효규산 평균함량이 거의 일치하였다(이 등, 1983; 임 등, 1996). 농촌진흥청(2009)의 농업환경 변동조사에 따르면 우리나라 논토양의 유효규산 함량은 87~187 mg kg⁻¹ 범위로서 평균값은 126 mg kg⁻¹ 이었고, 지역별로 비교 했을 때 제주도 논토양의 유효규산 평균값이 187 mg kg⁻¹ 으로 전국 평균함량에 비해 1.5배 정도로 가장 높았다. 육지부 토양통들의 1 N NaOAc 가용성 규산함량은 55.0~169.5 mg kg⁻¹ 범위에 있었는데(노 & 하, 1999; 이 & Neue, 1992; 송 등, 2007; 정 & 류, 2007; 서 등, 2002; 김 & 최, 2002; 양 등, 2007), 이에 비해서는 강원과 전남지역 산림토양은 높은 편이었다. 이것은 화산암반수의 높은 규산함량을 해석하는데 중요 기초자료로 이용될 수 있다.

토심이 깊어짐에 따라 평대통, 녹산통, 남원통 및 이도통은 함량이 증가하는 경향을 보였고, 오라통과 육지부토양의 5개 토양통에서는 토심과는 관계가 없었다. 화산재의 성질을 많이 받은 평대통, 녹산통, 남원통 등에서 토심과 침출성 규산함량이 일정하게 높아지는 것은 규산이 용탈로 인해 하향이동이 되고 있다고 생각된다.

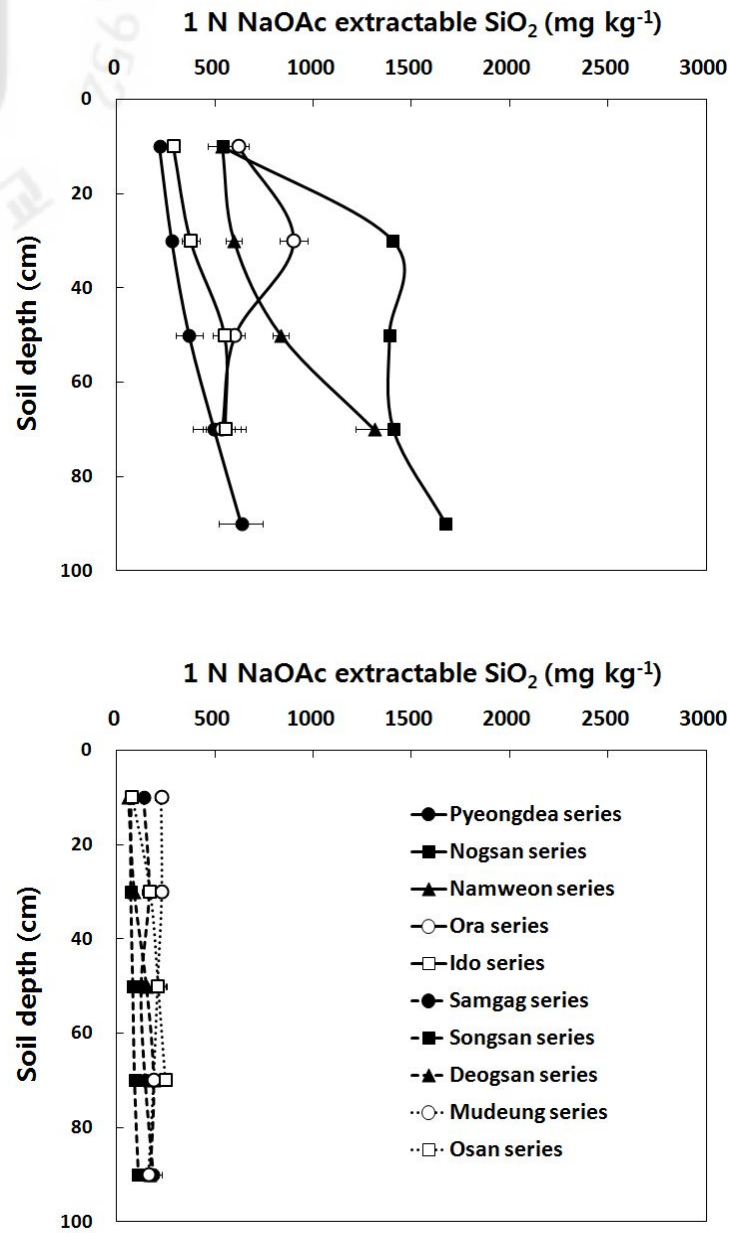


Fig. 7. Comparisons of 1 N sodium acetate buffer (pH 4.0) extractable SiO₂ in Pyosun watershed soils (Pyeongdaea series, Nogsan series, Namweon series, Ora series and Ido series) and mainland soils (Samgag series, Songsan series, Deogsan series, Mudeung series and Osan series) at different soil depths.

3) 1% citric acid 침출규산의 특성

1% citric acid 침출규산에서도 육지부토양에 비해 표선수계토양이 함량이 높았고, 1 N NaOAc 침출규산과 비슷한 경향을 보였다(Fig. 8). 하지만 수용성 침출규산과 1 N NaOAc 침출규산에 비해서는 함량이 매우 높았고, 표선수계토양은 1,053.5~5,073.7 mg kg⁻¹ 범위로서, 녹산통 > 남원통 > 오라통 > 평대통 > 이도통의 순이었다. 육지부토양의 규산함량 평균값은 685.7 mg kg⁻¹이었다. 녹산통은 육지부토양에 비해 6~7배, 남원통은 3~6배, 평대통은 2~5배 정도 높았다. Cho *et al.*(2004)이 보고한 밭 토양에서 1% citric acid 침출규산의 함량은 338~609 mg kg⁻¹ 범위로서, 이에 비해서 육지부토양의 함량은 비슷하거나 약간 높은 편이었고, 표선수계토양은 매우 높았다.

표선수계토양의 녹산통과 남원통은 토심이 깊어짐에 따라 함량도 증가했고, 나머지 토양통에서는 토심과 규산함량 사이에 관계성을 찾을 수 없었다. 따라서 1% citric acid 침출규산에서도 제주 표선수계토양의 침출규산 함량이 지하수의 규산함량에 영향을 미치고 있으며, 토심과의 관계로 봤을 때 화산회토의 성질이 강한 흑색화산회토가 매우 깊은 관계가 있을 것으로 생각된다.

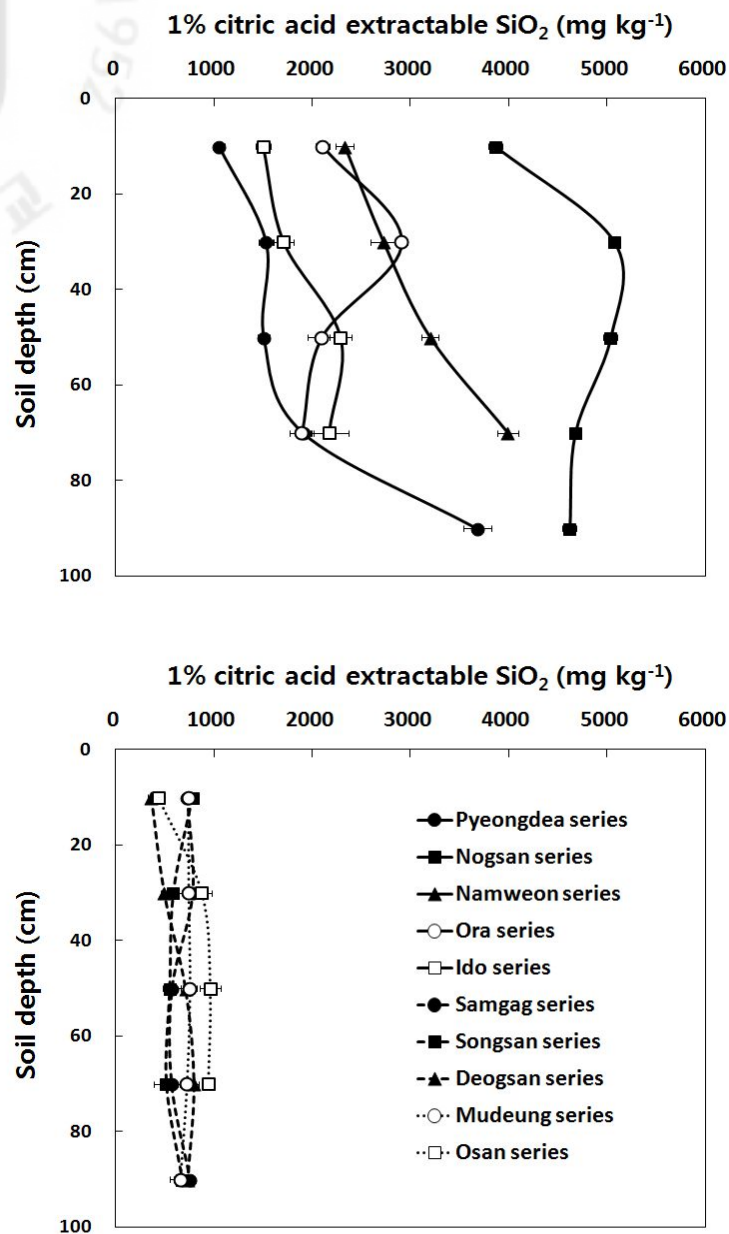


Fig. 8. Comparisons of 1% citric acid extractable SiO₂ in Pyosun watershed soils (Pyeongdae series, Nogsan series, Namweon series, Ora series and Ido series) and mainland soils (Samgag series, Songsan series, Deogsan series, Mudeung series and Osan series) at different soil depths.

4) 0.5 N HCl 침출규산의 특성

0.5 N HCl 침출규산은 4가지 침출성 규산 분석법 중에서 가장 높은 함량을 나타냈다. 0.5 N HCl 침출규산 평균함량은 수용성 침출규산, 1 N NaOAc 침출규산, 1% citric acid 침출규산 등에 비해서 각각 141배, 15배, 4배 정도 높았다.

표선수계토양이 육지부토양에 비해 규산함량이 높았는데(Fig. 9), 표선수계토양은 2,328.1~26,089.1 mg kg⁻¹ 범위로서, 흑색 화산회토인 녹산통, 남원통 및 평대통의 순으로 함량이 매우 높았으며, 오라통과 이도통의 함량이 낮게 나타났다. 육지부토양의 규산함량 평균값은 1,075.7 mg kg⁻¹ 이고, 오산통 함량이 가장 낮았다. 표선수계토양이 육지부토양에 비해 2~24배 정도 높았고, 우리나라 논토양과 밭토양에서 0.5N HCl 침출규산 함량은 300~998 mg kg⁻¹ 범위에 있었는데(박 등, 1968; Cho *et al.*, 2004), 이와 비교하여 육지부토양은 약간 높은 정도이었지만 표선수계토양은 8~26배 정도로 매우 높은 편이었다.

화산회토의 성질이 강한 평대통, 녹산통 및 남원통은 토심과 침출성 규산함량이 함께 높아지고 있었다. 반면에 화산회토의 성질이 약한 오라통, 이도통 및 육지부 5개 토양통에서는 함량과 토심 사이에 뚜렷한 관계가 없었다. 이는 지하수의 규산함량이 화산회토 토양에서 높은 침출성 규산함량에서 유래된다고 판단되며, 화산회토 토양에서 용해성 규산이 밑으로 용탈된다고 생각된다.

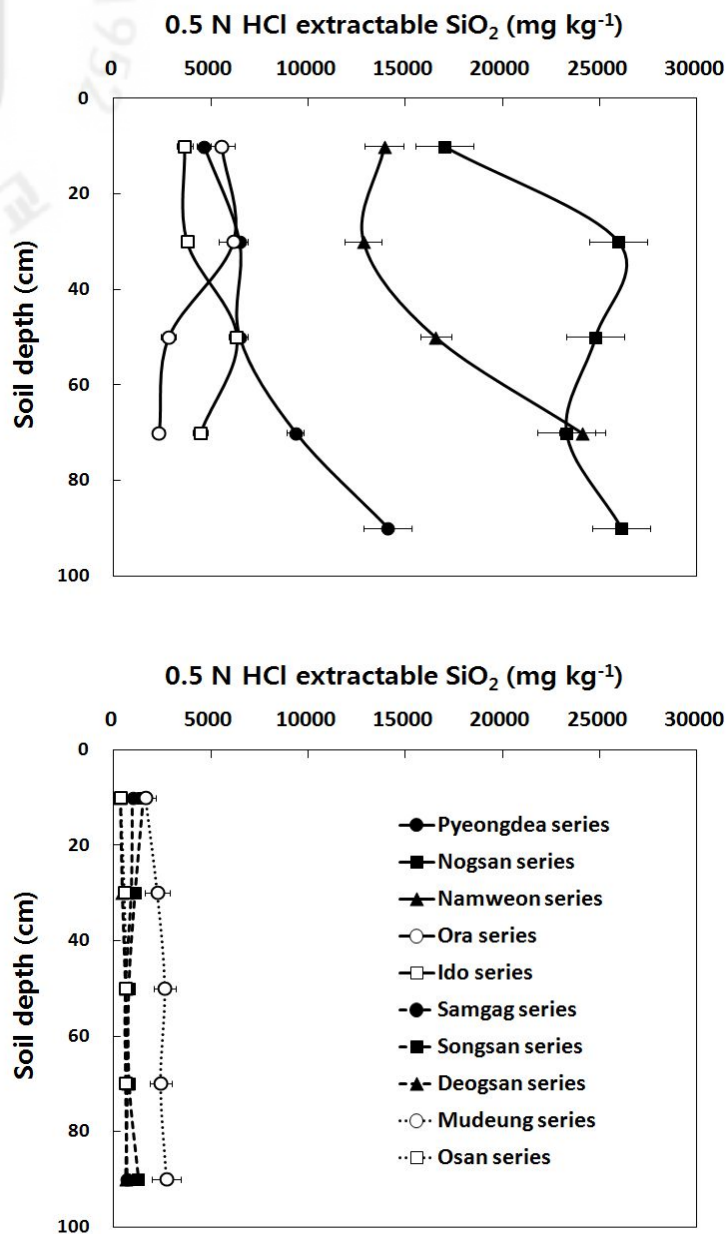


Fig. 9. Comparisons of 0.5 N HCl extractable SiO₂ in Pyosun watershed soils (Pyeongdaea series, Nogsan series, Namweon series, Ora series and Ido series) and mainland soils (Samgag series, Songsan series, Deogsan series, Mudeung series and Osan series) at different soil depths.

4. 총규산과 침출규산의 특성 비교

유효규산은 토양 내 총규산의 일부가 용해된다(이, 2001). 따라서 분석된 총규산함량과 침출규산 함량을 토대로 두 함량사이의 관계를 비교해 보았다. 비교는 깊이별 총규산 함량 내 4개의 침출방법에 따른 침출규산 함량이 차지하는 비율, 4개의 침출방법에 따른 침출규산함량의 합 (sum of extractable SiO₂) 및 총규산 내 침출성 규산함량합의 비율 (sum of extractable SiO₂/total SiO₂)로 이루어졌다. 이는 암석의 규산함량과 용해성 규산의 관계를 알아보고 토양과 약하게 결합되어 용탈될 수 있는 잠재성 규산의 양을 비교해 보기위해 수행되었다.

총규산함량에서 차지하는 침출성 규산함량의 비율은 제주지역 표선수계의 녹산통, 남원통, 평대통 순으로 높았고, 오라통과 이도통은 낮았다(Fig. 10). 육지부토양에서는 전체적으로 침출성 규산함량이 차지하는 비율이 낮았고, 무등통이 가장 높았다(Fig. 11).

침출법 간의 규산 침출량은 0.5 N HCl > 1% citric acid > 1 N NaOAc > 수용성 순으로 측정되었다. 수용성 침출규산은 0.005~0.015% 범위로서 총규산 내 차지하는 비율이 매우 낮았고, 토양통별 상관성을 찾을 수 없었다. 1 N NaOAc 침출규산은 0.013~0.337%, 1% citric acid는 0.089~1.264%, 0.5 N HCl 은 0.077~6.307% 범위로서 육지부토양에 비해 표선수계토양의 비율이 높았다. 전체적으로 제주 삼다수토양은 총규산함량이 낮은 것에 비해 침출성 규산함량은 높았고, 육지부토양에서는 총규산함량이 높은 것에 비해서 침출성 규산함량은 낮았다. 이는 침출규산의 함량이 암석이나 지질에 의해 결정되는 것이 아니며, 제주도 화산회토는 총규산함량에 비해 쉽게 용탈될 수 있는 규산의 함량은 높은 것으로 판단된다.

4개의 침출방법에 따른 침출성 규산함량의 합과 총규산 내 침출규산의 합의 비율에서 모두 표선수계토양이 육지부토양에 비해 높았다. 침출성 규산함량의 합과 총규산 내 침출규산의 합의 비율은 표선수계토양을 Table 3, 육지부토양을 Table 4에 나타냈다. 제주지역 표선수계토양의 침출성 규산함량의 합의 평균값은 15,435.0 mg kg⁻¹으로 육지부토양의 평균값 1,953.7 mg kg⁻¹ 보다 7.9배 높았다.

토양통별로는 녹산통이 가장 높았고, 남원통과 평대통이 다음으로 높았으며, 오라통과 이도통은 앞의 3개 토양통에 비해 낮았다.

육지부토양의 총규산 내 침출성 규산의 비율의 평균값은 0.33% 이었는데, 이는 표선수계토양의 평균값 4.37% 보다 13.4배 낮았다. 토양통별로 비율의 평균값은 녹산통이 가장 높았지만, 토심별로는 남원통의 60~80 cm에서 9.87%로 총규산함량에 비해 침출성 규산함량이 가장 높았다. 따라서 제주도 화산회토는 토양과 약하게 결합되어 지하수로 유입될 수 있는 잠재성 규산의 양이 많을 것으로 판단된다.

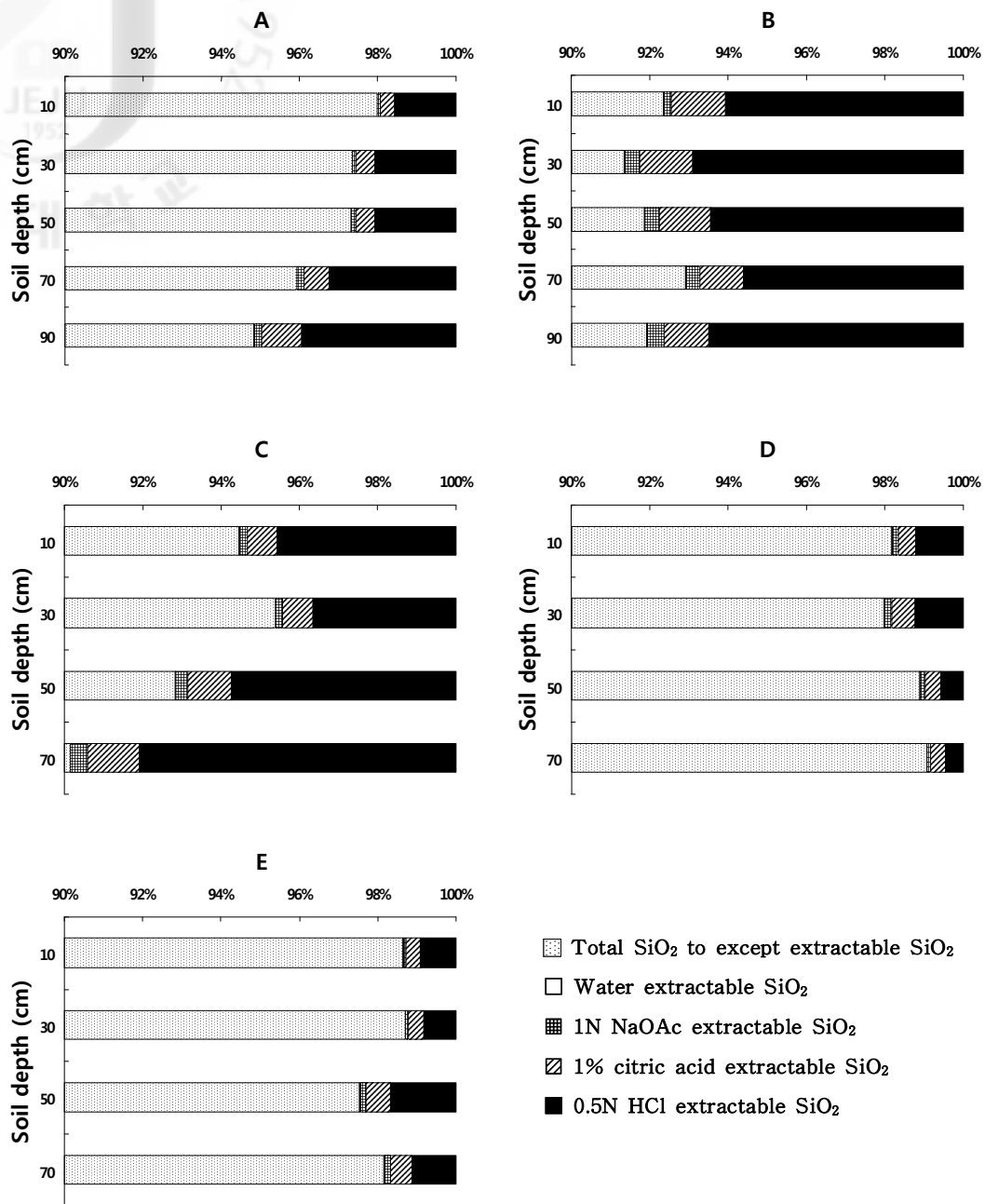


Fig. 10. Comparisons of ratios of four extractable SiO₂ and total SiO₂ for soils of Pyosun watershed at different soil depths. A, B, C, D, and E mean soil series of Pyeongdae, Nogsan, Namweon, Ora, Ido series, respectively.

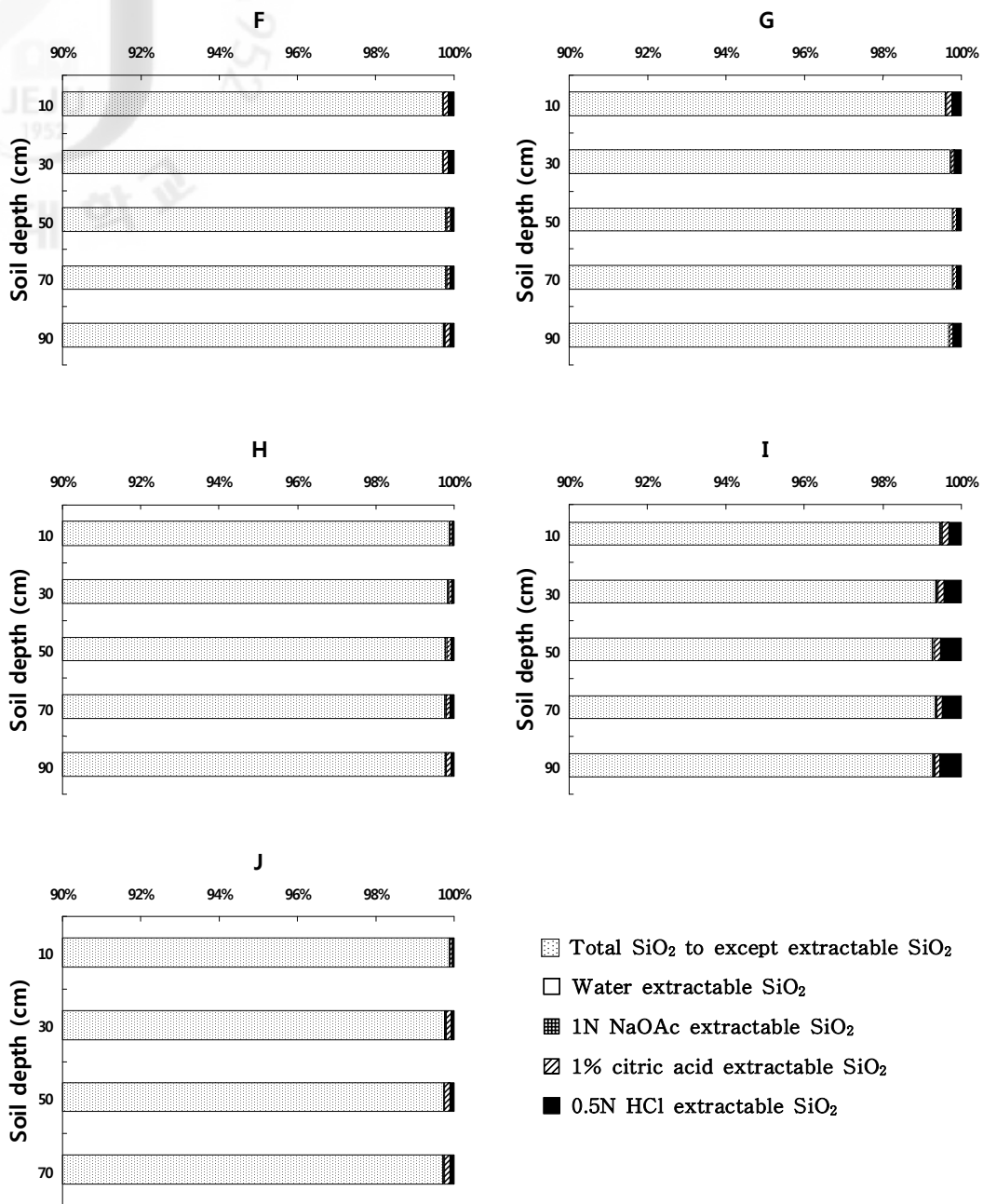


Fig. 11. Comparisons of ratios of four extractable SiO₂ and total SiO₂ for soils of main land soils at different soil depths. F, G, H, I, and J mean soil series of Samgag, Songsan, Deogsan, Mudeung, Osan series, respectively.

Table 3. Sum of extractable SiO₂ and ratio of sum of extractable SiO₂/total SiO₂ in Pyosun watershed soils.

Soil series	Depth (cm)	Sum of ext. SiO ₂ (mg kg ⁻¹)	Sum of ext. SiO ₂ /total SiO ₂ (%)
Pyeongdea	0-20	5,939.9	1.999
	20-40	8,287.5	2.650
	40-60	8,370.5	2.675
	60-80	11,772.7	4.071
	80-100	18,438.2	5.153
Nogsan	0-20	21,427.5	7.647
	20-40	32,460.7	8.647
	40-60	31,231.6	8.138
	60-80	29,411.9	7.088
	80-100	32,455.9	8.078
Namweon	0-20	16,820.0	5.527
	20-40	16,202.6	4.612
	40-60	20,645.2	7.163
	60-80	29,442.4	9.865
Ora	0-20	8,349.8	1.809
	20-40	10,050.8	2.026
	40-60	5,577.6	1.104
	60-80	4,820.6	0.938
Ido	0-20	5,494.6	1.345
	20-40	5,915.5	1.293
	40-60	9,208.7	2.450
	60-80	7,245.4	1.830
Mean		15,435.0	4.369

Table 4. Sum of extractable SiO₂ and ratio of sum of extractable SiO₂/total SiO₂ in mainland soils.

Soil series	Depth (cm)	Sum of ext. SiO ₂ (mg kg ⁻¹)	Sum of ext. SiO ₂ /total SiO ₂ (%)
Samgag	0-20	1,873.0	0.290
	20-40	1,903.6	0.287
	40-60	1,366.2	0.202
	60-80	1,387.2	0.208
	80-100	1,689.7	0.255
Songsan	0-20	2,428.3	0.402
	20-40	1,793.0	0.283
	40-60	1,429.4	0.218
	60-80	1,424.1	0.221
	80-100	2,100.5	0.328
Deogsan	0-20	796.4	0.118
	20-40	1,055.2	0.157
	40-60	1,503.7	0.218
	60-80	1,721.1	0.240
	80-100	1,538.6	0.220
Mudeung	0-20	2,671.6	0.534
	20-40	3,295.2	0.639
	40-60	3,665.0	0.735
	60-80	3,392.8	0.671
	80-100	3,608.4	0.716
Osan	0-20	906.2	0.121
	20-40	1,626.3	0.232
	40-60	1,846.9	0.267
	60-80	1,866.5	0.272
Mean		1,953.7	0.326

5. 토심별 유기물 함량과 침출성 규산함량의 관계 특성

분석 결과 제주 표선수계토양과 육지부토양을 비교하는 가장 뚜렷한 차이는 유기물 함량과 침출성 규산함량이었다. 특히 흑색 화산회토로 분류되는 평대통, 녹산통 및 남원통에서 유기물함량이 높은 것은 화산회의 급속한 풍화과정에서 Al이 유기물과 안정된 복합체를 형성해서 알루미늄의 독성으로 인해 미생물에 의한 분해가 잘 일어나지 않기 때문이며(문, 2009), 이 때 Al과 결합되어 있던 Si가 탈규산작용이 진행되어 유리될 수 있는 형태로 남게 된다(유 & 송, 1984b).

이와 관련된 연구자료를 이용하여 Fig. 12와 같은 가설에 제시하였다(현, 2011). 제주도 화산회토의 생성과정 중에서 대표적인 점토광물인 allophane은 토양용액에서 용해성 Si와 복합체를 형성하지 않은 가용성 Al의 결합에 의해 형성된다(Opfergelt *et al.*, 2011). 화산회토의 풍화과정 중 대부분의 Al이 유기물과 결합해 매우 안정된 복합체를 형성하고, Si와 결합해서 비결정형 allophane 점토광물을 형성할 Al이 줄어들게 된다. Al이 부족하여 allophane을 만들지 못한 용해성 Si는 토양에 잔존하게 되는데 토양과 약한 결합으로 존재하거나 유리된 Si는 오랜 기간 빗물의 하향이동에 의해 이동할 수 있는 여건을 갖게 되며, 토양과 약한 결합 또는 유리된 Si는 앞에서 시험한 4개의 침출방법으로 침출되어질 것이다.

따라서 표토에 유기물 함량이 많은 흑색 화산회토양은 4개의 침출방법으로 침출한 규산함량이 높을 뿐만 아니라, 유기물 함량은 토심이 깊어질수록 낮아지게 되므로 용탈에 의해 하부로 집적되는 심토로 갈수록 높아지는 규산함량과 반대의 경향을 보일 것으로 예측된다.

이를 확인하기 위하여 토심별 유기물 함량과 4개 침출방법으로 침출한 규산함량의 합과의 관계를 표선수계토양(Fig. 13)과 육지부토양(Fig. 14)으로 나누어 비교해 보았다. 제주지역의 표선수계토양의 화산회토의 성질이 강한 흑색 화산회토로 분류되는 평대통, 녹산통, 남원통에서 유기물 함량은 토심이 깊어짐에 따라 낮아졌고, 침출성 규산함량은 높아지는 반대의 경향을 보였다. 반면에 화산회토의 성질이 약한 오라통과 비화산회토인 이도통 및 육지부 5개 토양통에서는 유

기물 함량과 침출성 규산함량과의 관계가 뚜렷하지 않았다.

이는 흑색 화산회토에서 유기물 함량과 침출성 규산함량이 반대의 경향을 나타냄으로써 먼저 제시한 가설과 일치하는 결과임을 알 수 있고, 용해성 Si가 토양 내에서 하향이동 하여 화산회토의 높은 지하수의 규산함량과 밀접한 관계가 있을 것으로 생각된다.

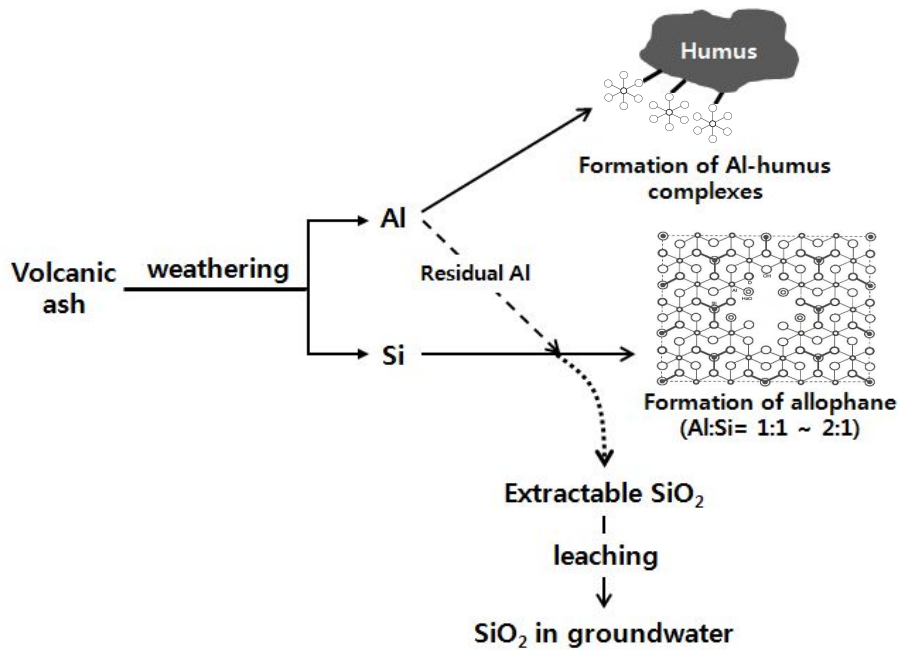


Fig. 12. Conceptual diagram of a possible silicate leaching mechanism in genesis of Jeju island volcanic ash soil.

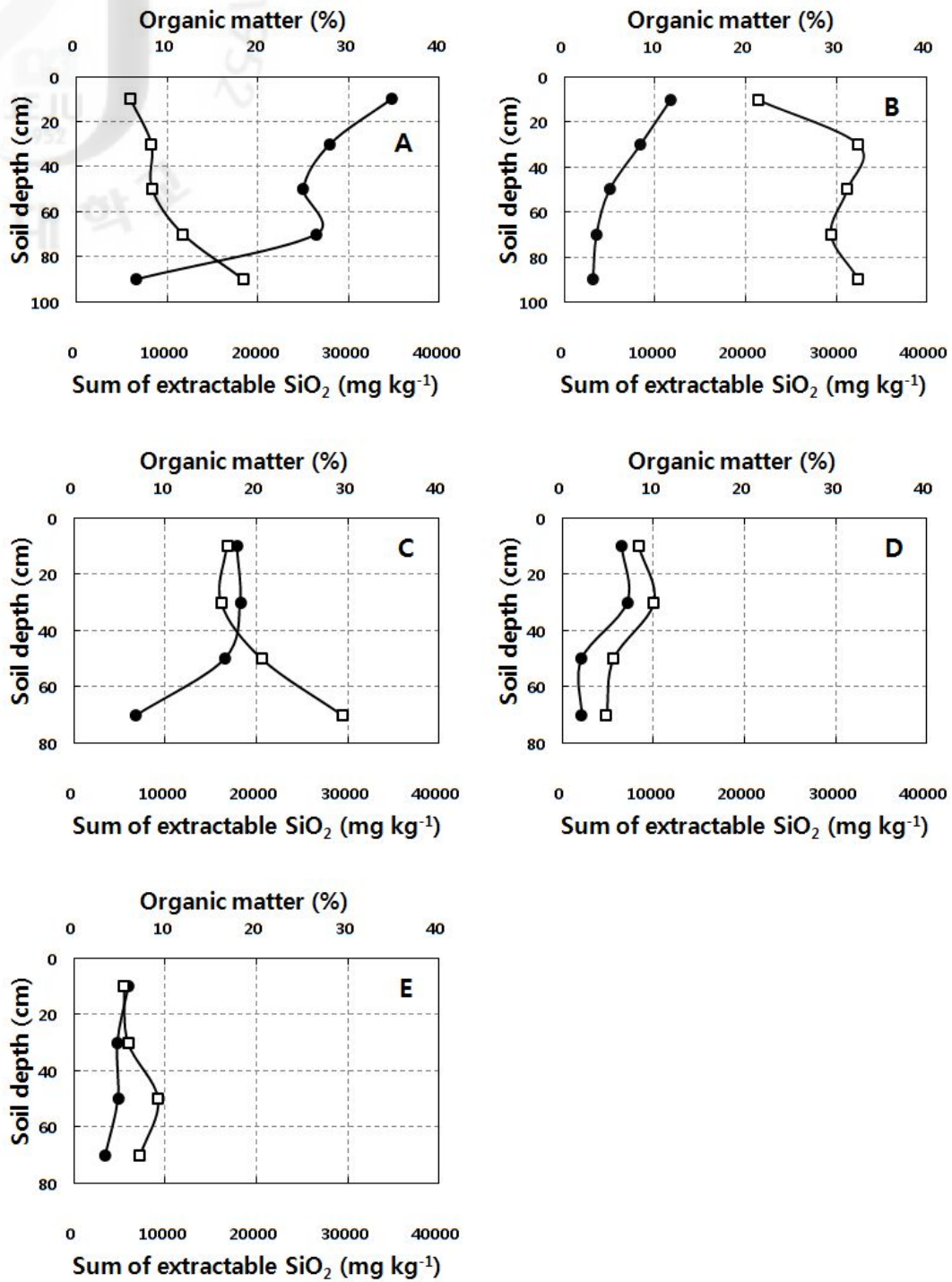


Fig. 13. Comparisons between sum of extractable SiO₂ (□) and Organic matter (●) in Pyosun watershed soils at different soil depths. A, B, C, D, and E mean soil series of Pyeongdae, Nogsan, Namweon, Ora, Ido series, respectively.

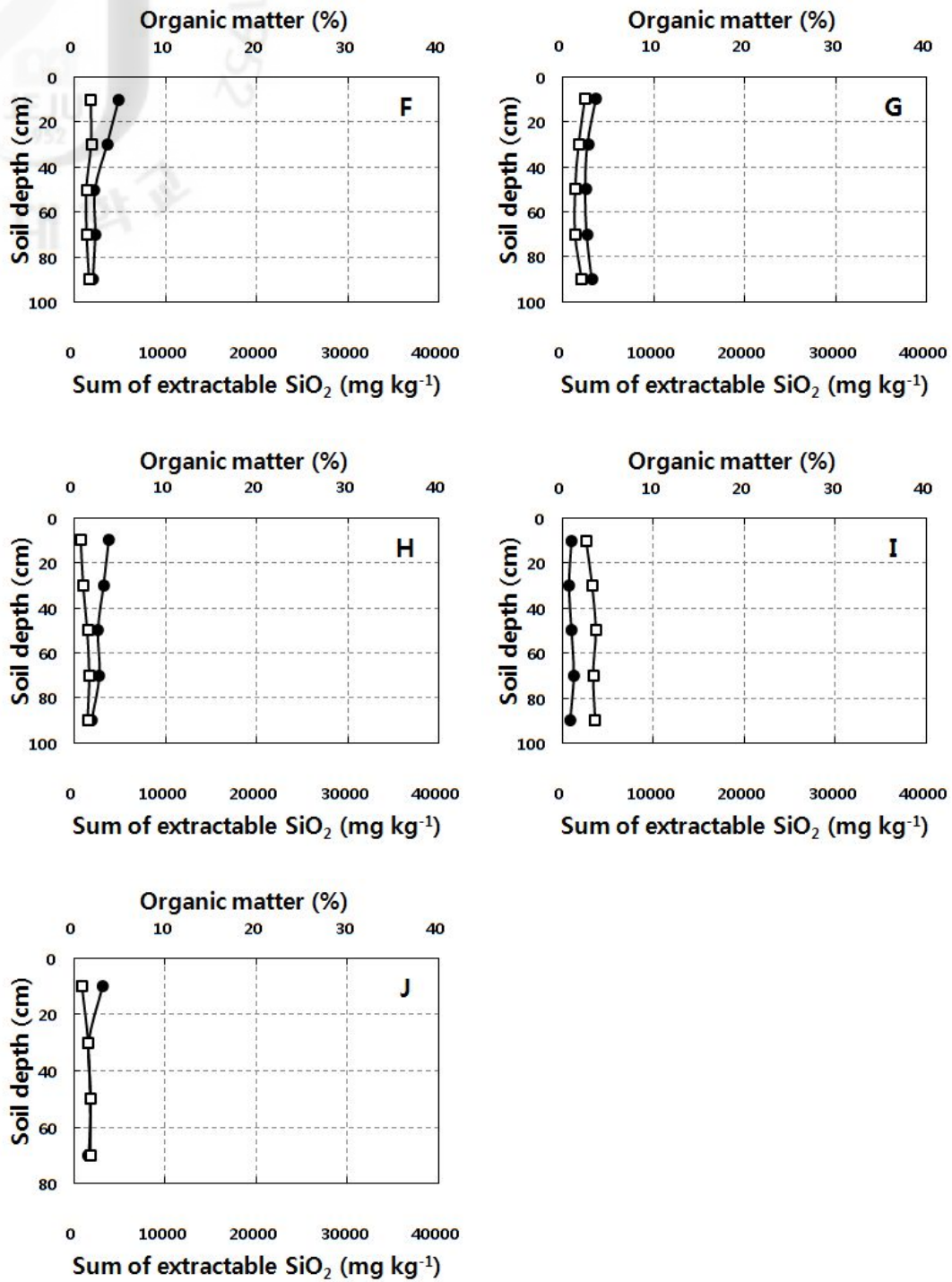


Fig. 14. Comparisons between sum of extractable SiO₂ (□) and Organic matter (●) in main land soils at different soil depths. F, G, H, I, and J mean soil series of Samgag, Songsan, Deogsan, Mudeung, Osan series, respectively.

IV. 적 요

본 연구는 제주지역 화산암반수에서 먹는샘물의 대표적 기능성 물질인 SiO_2 가 높은 이유를 밝히고자 수행하였다. 제주지역은 삼다수가 위치한 표선수계토양의 5개 토양통을 선정하였고, 대조토양으로 육지부 주요토양 중 강원지역 3개 산림토양과 전남지역 2개 산림토양을 선정하여 깊이별로 이화학성과 규산함량을 비교하였다.

토양통별 유기물 평균함량은 제주지역 평대통에서 24.20%로 가장 높았으며, 표선수계토양이 육지부토양에 비해서 2~10배 정도 높았다. 유효인산 함량은 표선수계토양이 평균 11.31 mg kg^{-1} 으로 육지부 평균값 32.12 mg kg^{-1} 의 1/3 수준이었다. 토양 pH는 전체적으로 토심이 깊어짐에 따라 높아지는 경향이었고 교환성 양이온의 평균함량은 $\text{Ca} > \text{Mg} > \text{K} > \text{Na}$ 순이었다.

토양 중 총규산함량은 화산회토 성질이 강할수록 함량이 낮았다. 흑색화산회토로 화산회토의 성질이 강한 평대통, 녹산통, 남원통이 평균 33.2%이었고, 화산회토의 성질이 약한 오라통과 이도통의 평균은 45.2%이었다. 반면, 육지부토양의 총규산함량 평균값은 64.03%으로 표선수계 토양보다 매우 높았다. 녹산통, 평대통 및 오라통에서 총규산함량의 상층토/하층토 비는 0.7~0.9로 심토가 표토에 비해 많았다.

침출성 규산은 수용성 침출법, 1 N NaOAc 침출법, 1% citric acid 침출법 및 0.5 N HCl 침출법 등 4가지 침출방법을 사용하였다. 수용성 침출법은 규산함량이 가장 낮았고 시험토양 사이에 차이가 거의 없었다. 1 N NaOAc 침출규산 함량은 표선수계토양이 육지부토양보다 약 2~11배 높았고 녹산통이 평균 $1282.5 \text{ mg kg}^{-1}$ 으로 가장 높았다. 1% citric acid와 0.5 N HCl 침출규산에서도 육지부토양에 비해 표선수계토양이 함량이 높았으며, 그 중에 녹산통이 평균 $4,654.1 \text{ mg kg}^{-1}$ 과 $23,414.4 \text{ mg kg}^{-1}$ 으로 각각 가장 높았다. 토심별로는 수용성 침출법을 제외한 나머지 3가지 침출법에서 흑색 화산회토인 평대통, 녹산통 및 남원통에서 토심이 깊어짐에 따라 함량이 증가하는 경향이였다. 반면에 화산회토의 성

질이 약한 오라통, 이도통 및 육지부 5개 토양통에서는 함량과 토심 사이에 뚜렷한 관계가 없었다.

총규산함량에서 차지하는 4가지 침출성 규산함량의 비율은 0.5 N HCl > 1% citric acid > 1 N NaOAc > 수용성 순으로 측정되었다. 제주 표선수계토양은 총규산함량이 낮은 것에 비해 침출성 규산함량은 높았고, 육지부토양에서는 총규산함량이 높았지만 침출성 규산함량은 낮았다. 침출성 규산함량의 합은 표선수계토양이 평균 15,435.0 mg kg⁻¹으로 육지부토양보다 7.9배 높았고 총규산 내 차지하는 비율은 4.37%로 육지부토양보다 13.4배 높았다.

제주도 화산회토의 풍화과정 중 대부분의 Al이 유기물과 결합해서 매우 안정된 복합체를 형성하고, Si와 결합해서 비결정형 allophane 점토광물을 형성할 Al 줄어들게 된다. Al이 부족하여 allophane을 만들지 못한 용해성 Si는 토양에 잔존하게 되는데 토양과 약한 결합으로 존재하거나 유리된 Si는 오랜 기간 빗물의 하향이동에 의해 이동할 수 있는 여건을 갖게 된다. 따라서 표토에 유기물함량이 많은 흑색 화산회토양은 4개의 침출방법으로 침출한 규산함량이 높을 뿐만 아니라, 유기물 함량은 토심이 깊어질수록 낮아지게 되므로 용탈에 의해 하부로 집적되어 심토로 갈수록 높아지는 규산함량과 반대의 경향을 보일 것으로 예측된다. 시험토양 사이에서 가장 뚜렷한 차이는 유기물 함량과 침출성 규산함량이었는데 흑색 화산회토 토양에서 특히 높았다. 또한 이들 3개 토양통에서는 유기물 함량과 침출성 규산함량의 합이 토심에 따라 반대의 경향을 보였다.

결론적으로 제주도 화산암반수의 높은 SiO₂함량은 암석이나 지질에 의해 유래되는 것이 아니라 육지부토양과 다른 제주 화산회토의 생성과정의 차이에서 기인하며 토양과 약하게 결합되어 쉽게 용탈될 수 있는 잠재성 규산의 하향이동에 의한 것으로 조사되었다. 따라서 제주 화산암반수의 SiO₂함량의 유래를 토양학 측면에서 구명하는 중요한 자료로 이용될 수 있을 것이다.

V. 인 용 문 헌

- 강경구. 2010. 제주도 표선유역 지하수의 수리지구화학 특성과 수질 형성과정 해석 연구. 제주대학교 대학원 박사논문.
- 강동우, 김두철, 고정대, 홍성악, 송관철. 1997. Mossbauer 분광법과 선택적 추출 방법에 의한 제주도 토양에서의 산화철의 특성 규명. 한국토양비료학회지. 30(1):3-15.
- 강영복, 신광식. 2006. 경안천 유역 하성면에 발달한 토양 특성. 한국지구과학회지. 27(5):548-556.
- 김용관, 하봉석. 1992. 부산 지역 약수 및 지하수의 규산성 규소. 한국환경위생학회지. 18(1):34-38.
- 김창배, 최정. 2002. 규산질비료의 매년연용이 벼수량, 양분흡수 특성 및 토양화학성 변화에 관한 연구. 한국토양비료학회지. 35(5):280-289.
- 김태순. 1985. 현무암토양의 점토광물에 관한 연구. 한국토양비료학회지. 18(3):233-239.
- 남기상. 1975. 전북 전주지역 화강암 및 낭산지역 풍화에 따른 화학조성의 변화와 주요원소의 상대적 이동. 광산지질. 8(4):211-222.
- 노기안, 하호성. 1999. 사질논에서 벼 재배기간 중 시비방법별 양분수지. 한국토양비료학회지. 32(2):155-163.
- 농촌진흥청. 1976. 토양조사보고서.
- 농촌진흥청 농업기술연구소. 1988. 토양화학분석법.
- 농촌진흥청 농업기술연구소. 1992. 한국토양총설. 토양조사자료. 13.
- 농촌진흥청 농업과학기술원. 2000. 토양 및 식물체 분석법.
- 농촌진흥청 국립농업과학원. 2009. 농업환경변동조사사업 보고서. pp. 16-22.
- 두용균. 1997. 먹는물 종류별 수질특성 비교. 건국대학교 산업대학원 석사논문.
- 문경환. 2009. 제주도 토양의 공간분석 연구. 제주대학교 대학원 박사논문.
- 박영선, 오왕근, 박내정. 1968. 침수처리 및 유기물 첨가가 답토양의 Fe, Mn 및

- SiO₂의 용출량에 미치는 영향에 관한 연구. 한국토양비료학회. 1(1):1-5.
- 박준범, 권성택. 1996. 제주도의 슬리아이트 화산활동. 암석학회지. 5(1):66-83.
- 박현주. 2008. 서귀포 지역 수자원의 보전, 오염관리 및 효율적 이용에 관한 연구. 동아대학교 대학원 박사논문.
- 서영진, 김종수, 김창배, 박만, 이동훈, 최충렬, 최정. 2002. 벼 재배과정 중 사질답에서 규소의 유,출입량 평가. 한국토양비료학회지. 35(3):162-168.
- 송관철, 유순호. 1991a. 제주섬 대표토양의 Andic 특성에 관한 연구. I. 선택적 추출방법에 의한 화산회토의 특성 구명. 한국비료학회지. 24(2):86-94.
- 송관철, 유순호. 1991b. 제주섬 대표토양의 Andic 특성에 관한 연구. II. 전하특성. 한국비료학회지. 24(4):241-247.
- 송관철, 유순호. 1994. 제주섬 대표토양의 Andic 특성에 관한 연구. III. Allophane 생성조건. 한국비료학회지. 27(3):149-157.
- 송요성, 전희중, 정병간, 박우균, 이기상, 곽한강, 윤정희, 이춘수, 연병열, 김필주, 윤영상. 2007. 벼에 대한 규산질비료의 시용량 및 시용주기 결정. 한국토양비료학회지. 40(5):354-363.
- 안주성, 전철민, 김구영, 고경석, 박기화. 2006. 제주도 일부 화산회토양의 지화학적 특성 및 중금속원소 분포. 한국지구시스템공학회지. 43(6):602-614.
- 양창휴, 김병수, 류철현, 박우균, 유영석, 김재덕, 정광용. 2007. 하해혼성 평야지 논토양의 부산물퇴비 시용효과. 한국토양비료학회지. 40(3):181-188.
- 엄명호, 임형식, 김영호, 엄기태. 1991. 한국의 주요 모암에서 발달된 토양점토광물의 특성과 생성학적 연구. I. 조암광물과 광물학적 특성. 한국토양비료학회지. 24(1):1-9.
- 엄명호, 김태순. 1991. 한국의 주요 모암에서 발달된 토양점토광물의 특성과 생성학적 연구. II. 토양의 이화학적 특성. 한국토양비료학회지. 24(2):79-85.
- 엄명호, 임형식, 김태순. 1992. 한국의 주요 모암에서 발달된 토양점토광물의 특성과 생성학적 연구. IV. 토양점토광물의 분포 및 생성. 한국토양비료학회지. 25(3):202-212.
- 유순호, 송관철. 1984a. 제주도 토양의 화학적 특성 조사연구. I. 지대별 화학적 특성 변화. 한국토양비료학회지. 17(1):1-6.

- 유순호, 송관철. 1984b. 제주도 토양의 화학적 특성 조사연구. III. 감귤원 토양에서의 알루미늄 특성. 한국토양비료학회지. 17(2):167-172.
- 윤정희, 황기성. 1984. 석회 및 전분첨가에 따른 담수 토양의 규산흡착량 및 흡착 특성 변화. 한국토양비료학회지. 17(1):35-38.
- 이기상. 2001. 벼에 대한 규산질비료의 시용효과와 비효 평가. 한국토양비료학회지. pp. 10-22.
- 이문원. 1985. 제주 화산도. 한국지구과학회지. 6(1):49-53.
- 이상규, 차규석, 김인택. 1983. 제주도 화산회토양의 이화학적 특성 및 유기물 성상에 관한 연구. 한국토양비료학회지. 16(1):20-27.
- 이상은. 2001. 규산질 비료의 원료별 형태별 특성과 효과의 평가. 한국토양비료학회지. pp. 36-43.
- 이상은, Heins Ulitz Neue. 1992. 침수조건에서 토양산도와 산화환원 전위가 토양의 규산흡착에 미치는 영향. 한국토양비료학회지. 25(2):111-126.
- 임동규, 김석철, 송인관, 문재현, 최두희, 강항원, 정연태. 1996. 대두에 대한 입상용성인비 제품간 비효 비교. 한국토양비료학회. 29(3):255-263.
- 제주도민속자연사박물관. 2000. 제주토양원색도감.
- 전철민, 안주성, 김구영, 박기화. 2006. 제주도 대표토양의 이화학 및 광물학적 특성과 중금속원소의 분포. 한국지하수토양환경학회지. pp. 194-197.
- 정석재, 현근수, 문용택, 조영길. 1994. 조면질 화강암 토양의 특성과 생성·분류. 한국토양비료학회지. 27(1):3-9.
- 정영상, 류철현. 2007. 한국의 간척지에서 토양 문제와 농업 용수 관리. 한국토양비료학회지. 40(4):330-348.
- 조현중. 2003. 밭토양에서 규산질 비료의 유효화와 pH 및 유효인산에 미치는 영향. 대구대학교 대학원 석사논문.
- 한국지구과학학회. 2005. 지구과학개론. 교학연구사.
- 허승오, 문경환, 정강호, 하상건, 송관철, 임한철, 김정규. 2006. 난지권 화산회토양의 토색별 토양수분 특성곡선 및 단일화 추정모형. 한국토양비료학회지. 39(6):329-333.
- 현해남. 2011. 제주 화산회토양이 제주지하수자원의 청정성 및 천연 여과력에 미

치는 인자 발굴. pp. 115-153. 제주위터 병입수 뉴브랜드 상품화. 제주광역시
경제권선도산업지원단.

흙토람 토양환경 정보시스템. <http://www.soil.rda.go.kr/soil/>

Cho, H.J., H.Y. Choi, Y.W. Lee, and J.B. Chung. 2004. Evaluation of available soil silicon extraction procedures for oriental melon. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 37(4):251-258.

Edwardson, J.A., P.B. Moore, I.N. Ferrier, J.S. Lilley, G.W.A. Newton, J. Baker, J. Templar, and J.P. Day. 1993. Effect of silicon on gastrointestinal absorption of aluminium. *Lancet.* 342:211-212.

Egli, M., M. Nater, A. Mirabella, S. Raimondi, M. Plotze, and L. Alioth. 2008. Clay minerals, oxyhydroxide formation, element leaching and humus development in volcanic soils. *Geoderma.* 143:101-114.

Gillette-Guoyonnet, S. 2007. The Potential Influence of Silica Present in Drinking Water on Alzheimer's Disease and Associated Disorders. *Journal of Nutrition Health and Aging.* 11 : 119-124.

Kaplan, M. 2007. FIJIAN WATER IN FIJI AND NEW YORK: Local Politics and a Global Commodity. *Cultural Anthropology.* 22:685-706.

Morel, P.B-F., H.S. George, L.E. Curtis, and E.D. Lawrence. 2001. Evaluation of soil test procedures for determining rice-available silicon. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 32(11&12):1779-1792.

Opfergelt, S., R.B. George, K.W. Burton, R. Guicharnaud, C. Siebert, S.R. Gislason, and A.N. Halliday. 2011. Silicon isotopes in allophane as a proxy for mineral formation in volcanic soils. *Applied Geochemistry.* 26:115-118.

Shin, J.S. and G. Stoops. 1988. Composition and genesis of volcanic ash soils Jeju island. I. Physico-chemical and macro-micromorphological properties. *J. Miner. Soc. Korea.* 1:32-39.

Song, K.C., S.J. Jung, B.K. Hyun, Y.K. Sonn, and H.K. Kwak. 2005. Characteristic and classification system of Korean soils. pp.35-107. in

Achievement and development plan for soil survey program in Korea.
RDA, Suwon, Korea.

USDA, Soil Survey Staff. 1990. Keys to soil taxonomy. SMSS Technical
Monograph No.19, 4th ed. USDA-SMSS, Blacksburg, Virginia.

USDA. 2004. Soil survey laboratory method manual. pp. 341-347.

Wang, J.J., S.K. Dodla and R.E. Henderson. 2004. Soil silicon extractability
with seven selected extractants in relation to colorimetric and ICP
determination. Soil Science. 169(12):861-870.

감사의 글

꿈을 좇아 실험실 문을 두드린 지 벌써 6년이 흘렀습니다. 사랑스런 한 여자를 만나 두 아이의 아버지가 되었고 훌륭한 교수님들과 멋진 선후배들이 함께 했습니다. 저의 이십대 추억들이 묻어있는 실험실을 떠나려니 시원함보다는 아쉬움과 섭섭함이 머리를 맴돕니다.

항상 고민했고 두려움이 일었습니다. 그때마다 현해남 교수님께서 마음에 안정과 방향을 제시해 주셨습니다. 교수님과 지내면서 참된 습관과 표현의 중요성을 알게 되었고 가장 유능한 사람은 가장 배움에 힘쓰는 사람이라는 것을 교수님의 열정과 가르침으로 확인할 수 있었습니다. 비단 논문뿐 아니라 세상을 바라보는 다양한 시각을 알아가는 시간이었습니다. 언제나 감사하고 되새기며 살아가겠습니다.

본 연구가 완성되기까지 논문 심사뿐 아니라 조언과 비평을 아끼지 않으셨던 송창길 교수님, 김동순 교수님께 진심으로 감사드립니다. 학부시절부터 배움의 길로 이끌어 주셨던 강영길 교수님과 새내기 시절부터 저를 걱정해주시던 전용철 교수님, 따끔한 충고로 저를 일깨워주신 김주성 교수님, 지하수 연구를 같이 진행하면서 논문의 방향을 잘 이끌어 주신 고려대학교 윤성택 교수님께도 감사드립니다.

본 논문은 “제주광역경제권 선도산업 기술개발”의 “제주 화산회토양이 제주 지하수 자원의 청정성 및 천연 여과력에 미치는 인자 발굴”의 연구의 일부로 수행되었습니다. 연구의 지원과 조언을 아끼지 않았던 제주개발공사 강경구 박사님, 논문에 도움과 부탁을 마다하지 않은 장공만 선생님과 고석형 박사님, 송진영 선생님, 바쁜 와중에도 분석은 물론 관심을 아끼지 않은 경환이형에게도 감사의 마음을 전해 드립니다. 무엇보다도 논문의 처음부터 끝까지 물심양면으로 도와주신 원표형님과 시료채취를 위해 제주도뿐만 아니라 강원도, 전라남도까지 동행은 물론 실험실에서 동거동락하며 밤샘을 마다하지 않고 논문을 도와준 건희, 연구의 분석과 부탁은 물론 싫은 기색 한번 없이 저를 따라와 준 승범, 봉준, 경아, 강해에게 진심으로 감사의 인사를 드리며 기쁨을 함께 하겠습니다.

고등학교를 졸업한지 10년이 지났지만 지금도 저의 앞날을 걱정해주시고 축

복해주시는 김종대 선생님, 멀리서 항상 응원을 아끼지 않은 우리 식구들, 언제나 제 마음속에 함께하는 고향 형님들, 기쁨과 슬픔을 함께 나뉘운 모든 친구들에게도 감사를 전합니다.

항상 저에게 믿음과 신뢰를 가져주신 장인어른과 못난 사위를 최고로 생각해주시며 사랑을 주신 장모님, 조카들을 자신들보다 아끼는 처형과 처남께는 앞으로의 보답으로 갚아나가겠습니다. 어렸을 때부터 형을 믿고 따르며 지금은 오히려 마음의 안식처가 되어주는 내 동생 충산이와 제 인생의 보물 수이, 수연을 키우며 힘든 내색 한번 안하고 남편의 불평, 불만에도 격려와 사랑으로 감싸준 사랑하는 아내 안지혜, 저를 낳아주시고 언제나 부족한 큰아들을 걱정해주시고 사랑과 희생으로 키워주신 사랑하는 어머니와 제 인생의 든든한 버팀목이자 기둥이며 세상 누구보다 존경하고 본받고 싶은 아버지께 이 논문을 드립니다.

마지막으로 항상 제 마음 한구석을 차지하는 저의 근원이자 이 논문을 누구보다 기다리셨고 기뻐하셨을 柳雨烈 祖父님의 영전에도 이 소고를 바칩니다.