

환경요인을 이용한 제주도 토양예측의 정량적 연구

문경환* · 서형호 · 송관철¹ · 손연규¹ · 현해남²

농촌진흥청 국립원예특작과학원 온난화대응농업연구센터, ¹농촌진흥청 국립농업과학원, ²제주대학교 생물자원산업학부

Quantitative Approach of Soil Prediction using Environment Factors in Jeju Island

Kyung Hwan Moon*, Hyeong-Ho Seo, Yeon Kyu Sonn¹, Kwan Chul Song¹, and Hae-Nam Hyun²

Agriculture Research Center for Climate Change, NIHHS, RDA, Jeju 690-150

¹National Academy of Agricultural Science, RDA, 441-707

²Faculty of Bioscience and Industry, Jeju National University, Jeju 690-150

Parent material, climate, topography, biological factors, and time are considered five soil forming factors. This study was conducted to elucidate the effects of several environment factors on soil distribution using quantitative analysis method, called soil series estimation algorithm in the soils of Jeju Island. We selected environment factors including mean temperature, annual precipitation, surface geology, altitude, slope, aspect, altitude difference within 1 km² area, topographic wetness index, distance from the shore, distance from the mountain peak, and landuse for a quantitative analysis. We analyzed the ranges of environment factors for each soil series and calculated probabilities of possible-soil series for certain locations using estimation algorithm. The algorithm can predicted exact soil series on the soil map with correctness of 33% on 1st ranking, 62% within 2nd ranking, 74% within 5th ranking after estimating using randomly extracted environment factors. In predicted soil map, soil sequences of Entisols-Alfisols-Andisols on northern area and Alfisols-Ultisols-Andisols on western area can be suggested along increasing altitude. More modeling studies will be needed for the genesis process of soils in Jeju Island.

Key words: Soil genesis, Soil series estimation, Volcanic ash soils

서 언

1941년 Jenny가 토양의 생성요인으로 기후 (climate), 생물 (organism), 지형 (relief), 모재 (parent material), 시간 (time)의 5가지를 제시한 이후 토양과 생성요인의 관계를 밝히려는 노력이 진행되어 왔다. 그러나 여러 가지 요인들이 복합적으로 작용하는 것을 함께 분석하기 어려웠기 때문에 각각의 요인들이 토양에 미치는 영향에 관하여 climo-function (Dahlgren, 1997), organo-function (Shoji et al., 1993), topo-function (Song and Yoo, 1994), litho-function, chrono-function 등으로 불리는 관계들이 연구되어 왔다.

최근에 토양조사 및 분류에 확률과 통계를 이용하는 정량적인 개념이 도입된 pedometrics라는 새로운 분야가 제시되었고, 지리정보시스템 (GIS, geographic information system)

등 기술의 발달은 토양 생성의 정량적 연구를 가능하게 하고 있으나 (Carr et al., 2007), 국내에는 이러한 기술을 도입하여 토양을 해석하고자 하는 노력이 미흡한 실정이다.

제주도는 1964년 개략토양조사사업으로 8개의 대토양군으로 분류된 이후 1974년에는 5목 11아목 13대군 63통으로 구분하고 있고, 최근 이러한 분류체계를 수정 보완하려는 노력이 진행되고 있다 (Moon et al., 2007). 제주도에는 특히 Andisols 토양이 많이 분포하고 있으며, 이 토양의 생성에 관한 연구는 여러 연구자에 의해 수행되었으나 (Chae and Lee, 1972; Song and Yoo, 1994), 여러 가지 환경요인을 복합적으로 고려하여 정량적으로 분석된 바는 많지 않다. 최근 Moon et al. (2007)은 공간분석기술을 이용하여 해발고도 및 토양통 간 인접성을 정량화하여 제주도 토양을 군집화를 시도하였고, 또 기후요인으로 제주도 지역을 구분하고자 한 바 있다. 또 Hyun et al. (2009)은 해발고도를 기준으로 제주도 용암류 대지 지형을 세분화하여 분포되는 토양통들의 특성을 구분하고자 시도하기도 하였으나, 토양관리를 용이하게 하고자 하는 목적이 더욱 강조된 측면이 있다. 토양 생성에 관한

연구는 현재 토양의 상태를 생성 요인을 이용하여 해석하고, 이를 바탕으로 토양특성의 출현과 발달과정을 이해하고, 나아가 앞으로 어떻게 변해갈 것인지를 설명할 수 있는 것까지 포함되어야 할 것이다.

이 연구는 제주도에 분포하는 토양을 대상으로 공간분석 기술을 이용하여 생성에 영향을 주는 여러 가지 환경요인들과 토양분포가 어떠한 관계가 있는지를 정량적으로 구명하고, 이로부터 분포될 수 있는 토양통을 확률적으로 예측하는 알고리즘을 개발하여, 제주도 토양의 생성과 앞으로의 변화를 이해하고자 수행되었다.

재료 및 방법

토양생성요인으로 알려진 기후, 모재, 지형, 식생 (생물요인), 시간요인을 정량적으로 표현하기 위해서는 각 요인에 해당하는 항목들을 구체화해야 한다. 이 연구에서는 기후요인으로는 연평균기온, 강수량, 모재요인으로는 지표지질, 지형요인으로는 해발고도, 경사도, 경사향, 주변 지역과의 고도 차이, 지형습윤지수, 해안으로부터의 거리, 한라산 정상으로부터의 거리, 식생요인으로는 토지이용형태 등을 이용하였으며, 시간요인은 지표지질에 반영이 되어있다고 가정하여 구체화시키지 않았다.

연평균기온과 강수량은 제주도 4개 기상관측관서의 1971~2000년 30년 간의 평년 자료를 이용하여 해발고도에 따른 기온이나 강수량 편차를 조정하여 30 m × 30 m 해상도의 도면을 제작하였다 (Moon et al., 2010). 지표지질은 한국농촌공사에서 제작한 지표지질도를 수집하여 이용하였다. 해발고도, 경사도, 경사향, 지형습윤거리, 주변 지역과의 고도 차이, 해안으로부터의 거리, 한라산 정상으로부터의 거리 등 여러 가지 요인들을 나타내는 지도는 국토지리정보원에서 발간한 1/5000 지형도를 이용하여 제작하였다. 경사도, 경사향, 해안으로부터의 거리, 한라산 정상으로부터의 거리를 나타내는 지도는 지형도로부터 추출한 등고선으로부터 30 m x 30 m 격자 해발고도 (DEM, digital elevation model) 지도를 제작하고, 이를 기본 지도로 삼아 공간분석 프로그램인 ArcView (ver. 9.1)를 이용하여 변환시켜 제작하였다 (Moon et al., 2010). 지형이 급격하게 변하는 정도를 나타내기 위하여 주변 지역과의 고도차이를 나타내는 지도를 제작하였는데 이는 사방으로 1 km 내의 지역 내에서 가장 저지대이면 0이고 고지대일수록 값이 커지도록 계산하여 격자형태의 지도로 제작되었다. 물의 흐름과 계곡의 형성 등의 지형 특성을 나타내기 위한 지형습윤지수 (TWI, topographic wetness index) 지도는 Peterson et al. (1993)가 제안한 방식에 의해 계산하여 지도로 나타내었다. 토지이용형태는 환경부에서 제공하는 지표피복도를 이용하여, 시가지, 농업지역, 초지, 산림지역, 나지 등으로 구분하였다. 마지막으로 환경요인들과 비교 분석

하기 위한 토양도는 국립농업과학원이 2000년에 작성한 수치세부정밀토양도를 이용하였다 (Hong et al., 2009).

벡터형태로 제작된 토양도는 270 m × 270 m의 격자형태로 분리하여 그 중심점을 분석의 기본점으로 하였고, 이 토양도와 해발고도, 기온, 강수량, 경사도, 주변 지역과의 고도 차이, 해안으로부터의 거리, 한라산 정상으로부터의 거리 등 환경요인 지도를 중첩하여, 각 토양통에 해당하는 지역의 환경요인 값들을 추출하여 전체의 평균과 표준편차를 구하였고, 이를 각 토양통의 분포를 나타내는 대표적인 특성값으로 간주하였다.

이 평균과 표준편차는 반대로 어떤 환경요인의 값이 주어졌을 때 각각의 토양통이 분포할 수 있는 확률을 계산하는 토양통 예측 알고리즘을 만드는데 이용하였다. 예를 들어 오라동 분포지역의 해발고도 평균값이 202 m 이고 표준편차가 130 m일 경우 제주도의 해발고도 202 m가 되는 주변 지역에는 오라동이 분포할 확률이 높게 나타날 것으로 유추하는 방식이다. 다만 대부분의 환경요인에서 표준편차의 값이 평균 값에 비하여 매우 크게 나타나므로 토양통이 분포될 확률을 단순히 정규분포에 따른다고 가정하기보다는, 계산된 확률 값의 4제곱근을 구하여 기대확률을 계산하였다. 각 환경요인 i 의 평균 (μ)과 표준편차 (σ)가 주어지고, 그 지점의 환경요인의 값이 x_i 일 때 기대확률 R 는 다음의 식으로 계산하였다.

$$R = \sqrt[4]{\int_{-\infty}^{x_i} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\left(\frac{\mu - X_i}{\sigma}\right)^2} dx} \quad (1)$$

한편 경사향, 지표지질, 토지이용형태 등 양적인 수치로 나타내기 어려운 환경 요인들은 각 요인 별로 그에 속하는 토양통의 전체 면적을 구하여 전체 면적에 대한 요소별 면적 비율을 이용하여 기대확률을 계산하였다.

출현이 기대되는 토양통은 여러 가지 환경 요인들의 범위와 기대확률에 따라 결정된다고 볼 수 있다. 따라서 전체적인 토양통 예측 알고리즘에서는 각각의 환경요인에 따른 기대되는 토양통의 확률들은 동일하다고 가정하여, 각각의 환경 요인별 기대확률을 모두 곱하여 이 중 가장 값이 높은 순으로 토양통의 출현가능성이 크다고 간주하였다.

결과 및 고찰

환경요인별 분포 Table 1에는 제주도에 분포하는 주요 토양통의 해발고도, 연평균기온, 강수량, 경사도, 주변지형과의 고도 차이 등에 관한 평균과 표준편차를 나타내었다. 군산, 흑악, 토산, 적악, 논고, 노로동 등 갈색삼림토로 알려져 있는 토양은 해발고도 700 m 이상의 산악지에 분포하고 있는 반면, 가파, 하모, 조천, 강정, 무릉동 등은 해발고도가 100 m 이하의 해안가에 주로 분포하고 있었다.

Table 1. Means and standard deviations of elevation, mean temperature, precipitation, slope and elevation difference in every soil series.

soil series	elevation		mean temperature		precipitation		slope		elevation difference	
	mean	std. dev.	mean	std. dev.	mean	std. dev.	mean	std. dev.	mean	std. dev.
	m		°C		mm yr ⁻¹		degree		m	
Ara	160	109	14.8	0.8	1,643	374	2.9	1.5	2.9	1.5
Donggui	78	57	15.0	1.9	1,432	272	2.2	1.1	16.0	7.7
Donghong	96	95	15.1	0.7	1,474	296	2.1	1.4	15.0	7.9
Euigui	127	110	15.0	1.4	1,894	270	2.7	2.2	17.3	10.3
Gamsan	200	146	14.2	2.7	1,826	467	4.3	2.8	30.6	13.9
Gangjeong	35	33	14.2	4.3	1,078	-	1.1	1.1	1.1	1.1
Gapa	25	19	14.5	3.7	1,358	394	1.2	0.5	1.2	0.5
Geumag	220	143	14.1	1.6	1,997	414	5.1	3.0	32.4	16.0
Gimyeong	144	106	14.5	1.0	1,900	227	1.8	1.0	13.3	6.6
Gueom	54	52	14.9	2.8	1,310	308	1.7	1.1	11.4	5.6
Gujwa	93	91	14.9	1.6	1,600	326	1.7	1.1	11.8	7.0
Gunsan	1,055	489	8.8	3.3	3,428	1,060	11.9	5.5	83.7	33.7
Gyoraе	201	139	14.3	1.7	1,781	457	4.3	2.6	29.2	13.9
Haengweon	212	112	14.3	0.9	2,048	266	2.8	1.5	-	-
Hamo	27	15	15.1	3.2	1,130	214	1.2	1.3	1.2	1.3
Hangyeong	546	236	12.3	1.6	2,114	177	5.3	2.3	39.2	20.9
Hanrim	244	150	14.5	1.1	2,091	297	4.3	2.5	29.4	14.1
Haweon	54	45	15.2	2.2	1,193	230	1.2	0.8	1.2	0.8
Heugag	902	310	10.2	2.0	3,354	565	8.8	3.9	55.9	23.4
Ido	72	50	14.8	2.2	1,550	274	2.1	1.2	17.0	11.0
Jeju	328	131	13.7	1.0	2,010	360	4.1	1.7	27.0	10.2
Jeogag	854	283	10.4	1.7	3,306	691	8.5	4.3	57.6	24.0
Jeongbang	105	67	15.3	1.5	1,813	297	2.7	1.5	17.8	7.9
Jocheon	29	34	14.7	3.6	1,204	314	1.2	0.9	10.9	6.1
Jungeom	100	95	14.9	2.1	1,697	344	2.1	1.4	14.1	7.7
Jungmun	270	146	14.2	1.0	1,810	442	3.8	2.0	-	-
Miag	357	134	13.4	0.8	2,165	238	5.0	2.8	34.1	14.8
Minag	274	131	14.1	0.7	2,131	370	3.1	1.8	3.1	1.8
Mureung	46	37	15.0	2.9	1,167	219	1.1	0.7	1.1	0.7
Namweon	158	113	14.4	1.9	1,952	302	2.1	1.7	16.5	11.6
Nogsan	304	123	13.6	1.6	2,253	420	4.8	2.5	30.8	13.9
Nongo	815	266	10.7	1.7	3,178	646	6.1	2.5	42.6	15.8
Noro	755	245	11.0	1.5	3,211	586	6.1	2.9	41.0	18.0
Ora	202	130	14.5	1.3	1,736	302	3.3	1.7	3.3	1.7
Pyeongdae	378	125	13.3	0.8	2,384	281	3.0	1.9	3.0	1.9
Pyoseon	235	107	14.0	0.6	1,982	174	3.8	2.7	29.3	19.2
Sara	56	45	15.2	1.7	1,235	207	1.9	0.9	12.9	5.0
Sineom	112	87	14.7	1.1	1,843	226	1.8	1.3	12.7	7.2
Songag	234	160	14.2	1.7	1,855	435	4.8	2.8	32.9	17.7
Songdang	328	184	13.5	1.4	1,998	295	3.5	2.1	26.9	14.8
Topyeong	138	104	14.6	0.7	1,885	234	1.8	1.3	15.9	9.0
Tosan	874	345	10.3	2.3	3,532	665	8.9	3.2	56.6	20.9
Wuimi	179	129	14.4	1.5	1,917	314	2.4	1.4	17.7	8.8
Yongheung	64	45	15.0	3.0	1,373	349	2.1	1.3	15.8	9.1

연평균기온은 지온과 관련이 있고, 지온은 토양을 분류하는 기준으로도 활용되기도 한다 (Soil Survey Staff, 2006). 토양통 분포를 분석한 결과 갈색삼림토로 알려진 노로, 논고, 적악, 토산, 흑악, 군산통은 연평균기온이 11°C 이하인 고산 지대에 주로 분포하고 있었다. 제주지역에서 평년에 측정된 지층 50 cm 지온은 기온보다 약 4°C 정도 높았는데, 이 결과는 갈색삼림토가 온도상이 mesic으로 분류되는 토양이라는 점에서 일치하는 결과로 해석된다. 한편 Table 2에 나타난 바와 같이 군산, 토산, 한경통은 지온이 15°C 이상인 지역에도 일부 분포하는 것으로 나타나 이러한 토양통은 토양통의 재분류가 필요할 것으로 판단되었다.

제주도의 연강수량은 산악지로 갈수록 또 동남부지역으로 갈수록 높아지는 경향을 나타내고 있다. 갈색삼림토인 토산, 군산, 흑악, 적악, 노로, 논고통은 연강수량이 3,000 mm 이상의 다우지역에 분포하였고, 강정, 하모, 무릉, 하원통의 연강수량은 1,200 mm 이하인 서북부 해안지역에 많이 분포하였다. 제주도의 온도분포는 주로 해발고도의 영향이 크다는 점

을 고려하면 Andisols로 분류되는 토양들은 주로 강수량이 많은 중부와 동남부지역으로 치우쳐서 분포하고 있어, 강수량이 많고 적음이 Andisols의 생성에 영향이 클 것으로 추정되었다.

토양통별 경사도 평균값은 최고 11.9도인 군산통으로부터 1.1도로 거의 평탄한 무릉통까지 다양하게 분포하고 있었다. 주변 1 km² 지역 내 고도차이는 산악지에 분포하는 군산통이 최고 83.7 m로 높았고, 저지대 평탄지에 분포하는 무릉, 강정, 가파통은 1.1~1.2 m의 낮은 값을 나타내었다. 제주도의 기생화산인 분석구에 분포하는 미악, 송악, 녹산통은 비교적 높은 경사도 및 높은 주변과의 고도차이를 보이고 있어, 이러한 환경요소는 분석구에 분포하는 토양을 다른 토양과 구분할 수 있는 기준이 될 수 있었다.

Table 3에는 해안으로부터의 거리와 한라산 정상으로부터의 거리, 지형습윤지수, 대표적인 지질, 경사향, 토지이용을 나타내었다.

제주도는 중심부에 해발 1,950 m의 한라산 주봉을 중심으로 동서방향은 완만하나 남북방향으로 급한 경사의 장타원형의 형태로 지형이 형성되어 있다. 해안으로부터의 평균거리는 적악통이 최고 11.7 km이고, 가파통이 최저 0.7 km이었고, 산 정상으로부터의 평균거리는 반대로 가파통이 최고 30.7 km, 군산통이 최저 5.2 km을 나타냈다. 지형습윤지수는 지형을 하천의 흐름을 정량화 할 수 있는 지표로 하천을 따라 상류지역 및 하류지역에 분포하는 토양을 구별하는데 유용하며, 제주도 전 지역에서는 가장 높은 값은 22.6이고, 가장 낮은 값은 6.7이었으나, 대부분의 토양통 평균값은 10~13의 범위에 있어, 제주도 토양의 발달에는 하천이 흐름에 의한 차이가 크지 않을 것으로 예상되었다. 실제로 제주지역에 분포하는 대부분의 하천은 평시에는 물 흐름이 없다가 강우 시에만 홍수가 발생하는 건천이 많이 분포하고 있어, 토양의 발달에는 영향은 크지 않을 것으로 예측된다.

제주도의 지질은 반상장석현무암, 반상휘석현무암, 조면암 등 크게 12종의 암석이 분포하고 있으며, 그 중 조면암계 3.6%, 사구와 성산층 2.8%, 신터어른 7.8%를 제외하면 대부분이 현무암 및 조면암질 현무암계의 암석이 주를 이루고 있고, 제주도 전 지역에 걸쳐 고르게 분포하고 있다 (Won et al., 2005). 사질토양인 가파통은 사구에, 분석구토양인 미악, 적악, 금악, 녹산, 송악통은 신터어른에 많이 분포하고 있어, 이들 토양인 지표지질과 큰 관계가 있었다. Table 4에는 각 토양통별 지표지질의 면적비율을 나타내었다.

Table 5에서와 같이 각 토양통에 분포하는 토지이용형태의 면적비를 분석한 결과, 하모, 하원, 정방, 무릉통 등은 주로 해안가의 밭농사가 이루어지는 농경지에 분포하였고, 평대, 표선, 김녕통 등 중산간의 초지로 많이 이용되고 있었으며, 군산, 흑악, 논고, 노로통은 산악지의 삼림지역에 분포하고 있었다. 경사향은 주 경사향을 북동, 동, 남동, 남, 남서,

Table 2. Areal percentages of soil series divided by 15°C ground temperature.

Soil series	Area below 15°C	Area over 15°C
	of ground temperature	of ground temperature
	----- % -----	
Gamsan	8.2	91.8
Geumag	6.4	93.6
Gunsan	87.6	12.4
Gyoraе	4.3	95.7
Haengweon	3	97
Hangyeong	71.2	28.8
Hanrim	9.2	90.8
Heugag	90.5	9.5
Jeju	12.7	87.3
Jeogag	96.3	3.7
Jungmun	8.1	91.9
Miag	23.2	76.8
Minag	7.2	92.8
Nogsan	8.4	91.6
Nongo	91.5	8.5
Noro	96.4	3.6
Ora	5.1	94.9
Pyeongdae	26.7	73.3
Pyoseon	6.5	93.5
Songag	9.9	90.1
Songdang	29.5	70.5
Tosan	87.5	12.5
Wuimi	6.1	93.9

Table 3. Representative values of each environment factors in every soil series.

soil series	distance from shore (m)	distance from peak (m)	TWI [†]	Geology [‡]	Aspect [§]	landuse [¶]
Ara	4,156	18,568	12.6	APB	NW	Ag
Donggui	2,303	16,521	12.7	PAB	NW	Ag
Donghong	3,026	19,809	12.6	PAB	NW	Ag
Euigui	3,236	18,955	12.7	FB	SE	Ag
Gamsan	4,175	17,420	11.2	FB	S	Ag
Gangjeong	1,860	27,120	13.4	FOB	SW	Ag
Gapa	1,016	30,677	13.2	SD	NW	Ag
Geumag	5,422	23,579	10.9	C	NW	F
Gimyeong	5,109	27,546	12.5	FOB	E	P
Gueom	2,185	22,889	12.7	FOB	NW	Ag
Gujwa	3,237	26,143	12.7	FOB	NW	Ag
Gunsan	11,208	5,240	10.4	FB	NW	F
Gyorae	5,247	19,928	11.4	C	NW	Ag
Haengweon	5,924	20,422	12.5	APB	NW	Ag
Hamo	1,093	28,522	13.3	SSF	SE	Ag
Hangyeong	9,040	10,136	11.8	FB	NW	F
Hanrim	4,645	11,901	11.7	FB	SE	Ag
Haweon	3,123	27,704	12.9	FOB	W	Ag
Heugag	10,597	6,211	11.6	FB	S	F
Ido	2,057	17,242	12.6	PAB	NW	Ag
Jeju	6,744	13,674	12.3	FB	NW	Ag
Jeogag	11,702	8,370	10.4	C	NW	F
Jeongbang	2,369	16,684	12.7	FB	S	Ag
Jocheon	1,181	25,499	12.9	FOB	NW	Ag
Jungeom	2,800	22,352	12.6	FOB	SE	Ag
Jungmun	5,631	16,337	12.2	PAB	S	Ag
Miag	9,324	20,891	10.7	C	NW	F
Minag	6,946	19,110	12.2	APB	SE	F
Mureung	2,743	28,617	13.0	FOB	SW	Ag
Namweon	5,941	23,671	12.5	FOB	SE	Ag
Nogsan	8,799	20,106	11.1	C	NW	F
Nongo	11,119	8,486	11.2	FB	S	F
Noro	11,505	9,293	11.7	FB	E	F
Ora	4,723	16,802	12.2	FB	NW	Ag
Pyeongdae	10,484	16,211	12.4	PFB	E	P
Pyoseon	8,087	25,998	11.5	APB	NE	P
Sara	1,762	19,392	12.7	PAB	NW	Ag
Sineom	3,927	27,120	12.7	FOB	SE	Ag
Songag	5,248	19,108	11.2	C	NW	F
Songdang	8,180	21,133	12.2	APB	NE	P
Topyeong	5,645	26,368	12.6	FOB	E	Ag
Tosan	11,214	6,097	11.4	FB	SE	F
Wuimi	4,998	21,354	12.5	APB	SE	Ag
Yongheung	1,893	20,696	12.5	FOB	S	Ag

[†]topographic wetness index.

[‡]FOB, acicular feldspar-bearing olivine basalt; FB, feldspar basalt; PAB, porphyritic augite basalt; APB, aphanitic basalt; PFB, porphyritic feldspar basalt; AB, augite basalt; T, trachyte; TA, trachyte andesite; C, cindercone; SSF, Sungsan formation; SD, sand dune; SGF, Seoguiipo formation.

[§]NW, Northwest; SE, Southeast; S, South; SW, Southwest; E, East; W, West; NE, Northeast.

[¶]Ag, Agriculture; F, Forest; P, Pasture.

Table 4. Areal ratio of each soil series by different surface geology.

soil series	FOB [†]	APB	FB	PFB	PAB	AB	T	TA	SSF	SD	C	SYF	Br
Ara	0.15	0.33	0.11	0.05	0.27	-	0.06	0.02	-	-	0.02	-	-
Donggui	0.1	0.02	0.26	-	0.54	-	0.03	0.02	0.01	-	0.01	-	-
Donghong	0.3	0.01	0.25	-	0.35	-	-	0.01	0.04	-	0.05	-	-
Euigui	0.21	0.11	0.22	0.19	0.19	-	-	0.01	0.01	0.01	0.05	-	-
Gamsan	0.05	0.08	0.42	0.02	0.07	-	0.1	0.04	0.01	-	0.22	-	-
Gangjeong	0.5	0.01	0.1	-	0.19	-	-	0.02	0.18	-	0.01	-	-
Gapa	0.33	0.04	-	-	-	-	-	-	-	0.63	-	-	-
Geumag	0.04	0.23	0.13	-	0.04	-	0.02	-	0.03	-	0.49	0.02	-
Gimyeong	0.53	0.28	0.01	0.06	0.04	-	-	-	0.01	-	0.08	-	-
Gueom	0.62	0.02	0.13	-	0.18	-	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	-	-
Gujwa	0.75	0.11	0.05	0.02	0.02	-	-	-	0.01	0.02	0.02	-	-
Gunsan	-	-	0.64	0.02	0.03	-	0.04	0.22	0.01	-	0.04	-	0.01
Gyora	0.17	0.1	0.11	0.03	0.17	0.01	0.02	-	0.04	-	0.36	-	-
Haengweon	0.11	0.37	0.06	0.06	0.36	-	0.01	-	-	-	0.03	-	-
Hamo	0.34	-	-	-	-	-	-	-	0.64	-	0.02	-	-
Hangyeong	-	0.03	0.74	0.09	0.09	-	-	0.01	-	-	0.04	-	-
Hanrim	0.01	0.1	0.52	0.02	0.2	-	0.07	-	0.01	-	0.06	-	-
Haweon	0.88	0.02	0.01	-	0.02	-	-	-	0.05	-	0.02	-	-
Heugag	-	-	0.73	0.06	0.11	-	0.01	0.03	-	-	0.05	-	0.01
Ido	0.14	0.03	0.27	0.02	0.41	-	0.01	0.01	0.02	0.04	0.07	-	-
Jeju	0.19	0.07	0.3	0.05	0.27	-	0.07	0.01	-	-	0.05	-	-
Jeogag	-	0.01	0.3	0.05	0.07	-	-	0.01	-	-	0.56	-	-
Jeongbang	0.1	0.11	0.38	0.18	0.16	-	0.03	0.01	-	-	0.03	-	-
Jocheon	0.66	0.02	0.08	-	0.17	-	-	-	0.04	-	0.01	-	-
Jungeom	0.55	0.08	0.19	0.05	0.09	-	-	-	-	0.01	0.02	-	-
Jungmun	0.16	0.2	0.24	0.01	0.29	-	0.06	-	-	-	0.03	-	-
Miag	0.08	0.2	-	-	0.06	-	-	-	-	-	0.66	-	-
Minag	0.08	0.38	0.08	0.08	0.26	-	0.01	-	-	-	0.1	-	-
Mureung	0.82	0.02	0.05	-	0.04	-	-	-	0.05	-	0.01	-	-
Namweon	0.34	0.27	0.15	0.09	0.03	-	-	-	0.01	0.01	0.1	-	-
Nogsan	0.03	0.16	0.04	0.09	0.09	-	-	-	0.02	-	0.57	-	-
Nongo	-	0.01	0.54	0.01	0.12	-	0.08	0.02	-	-	0.22	-	-
Noro	-	-	0.53	0.16	0.17	-	0.01	-	-	-	0.13	-	-
Ora	0.14	0.17	0.33	0.01	0.21	-	0.04	-	0.02	-	0.06	-	-
Pyeongdae	0.13	0.1	0.15	0.33	0.24	-	-	-	-	-	0.06	-	-
Pyoseon	0.09	0.57	0.03	-	0.05	-	-	-	-	-	0.26	-	-
Sara	0.2	0.02	0.07	-	0.67	-	-	0.03	-	-	-	-	-
Sineom	0.38	0.3	0.09	0.08	0.08	-	-	-	-	-	0.07	-	-
Songag	0.12	0.11	0.08	0.01	0.11	0.01	0.05	-	0.03	-	0.47	-	-
Songdang	0.15	0.46	0.17	-	0.06	-	-	-	-	-	0.17	-	-
Topyeong	0.37	0.34	0.06	0.04	0.07	-	-	-	0.01	0.03	0.08	-	-
Tosan	-	-	0.75	0.14	0.03	-	0.02	0.02	-	-	0.03	-	-
Wuimi	0.16	0.32	0.13	0.13	0.19	-	-	-	-	-	0.05	-	-
Yongheung	0.31	0.01	0.14	-	0.15	-	0.24	0.04	0.08	-	0.03	-	-

[†]FOB, acicular feldspar-bearing olivine basalt; FB, feldspar basalt; PAB, porphyritic augite basalt; APB, aphanitic basalt; PFB, porphyritic feldspar basalt; AB, augite basalt; T, trachyte; TA, trachyte andesite; C, cinder cone; SSF, Sungsan formation; SD, sand dune.

Table 5. Areal ratio of each soil series by different landuses.

soil series	resident	farmland	forest	pasture	etc.
Ara	0.03	0.70	0.16	0.10	0.01
Donggui	0.26	0.60	0.06	0.06	0.03
Donghong	0.14	0.64	0.14	0.06	0.02
Euigui	0.07	0.70	0.10	0.12	0.02
Gamsan	0.08	0.45	0.31	0.15	0.01
Gangjeong	0.12	0.78	0.05	0.01	0.03
Gapa	0.13	0.51	0.23	0.07	0.05
Geumag	0.02	0.27	0.35	0.34	0.01
Gimyeong	0.02	0.38	0.14	0.46	0.00
Gueom	0.16	0.72	0.07	0.03	0.03
Gujwa	0.04	0.52	0.27	0.16	0.01
Gunsan	0.01	0.05	0.81	0.12	0.00
Gyoraе	0.06	0.38	0.32	0.23	0.01
Haengweon	0.02	0.42	0.24	0.32	0.00
Hamo	0.09	0.84	0.02	0.03	0.03
Hangyeong	0.01	0.14	0.57	0.26	0.01
Hanrim	0.12	0.47	0.27	0.13	0.01
Haweon	0.06	0.83	0.07	0.04	0.01
Heugag	0.00	0.00	0.95	0.04	0.00
Ido	0.28	0.52	0.09	0.08	0.02
Jeju	0.03	0.36	0.29	0.31	0.01
Jeogag	0.00	0.01	0.94	0.06	0.00
Jeongbang	0.07	0.83	0.06	0.04	0.01
Jocheon	0.18	0.70	0.05	0.03	0.03
Jungeom	0.08	0.74	0.08	0.10	0.01
Jungmun	0.03	0.38	0.31	0.26	0.02
Miag	0.01	0.14	0.50	0.34	0.01
Minag	0.01	0.19	0.42	0.37	0.01
Mureung	0.09	0.82	0.04	0.02	0.02
Nagcheon	0.21	0.67	0.06	0.04	0.01
Namweon	0.07	0.55	0.10	0.28	0.01
Nogsan	0.01	0.16	0.45	0.38	0.00
Nongo	0.00	0.01	0.93	0.05	0.00
Noro	0.00	0.01	0.96	0.03	0.00
Ora	0.06	0.59	0.16	0.18	0.01
Pyeongdae	0.01	0.10	0.36	0.52	0.01
Pyoseon	0.00	0.21	0.16	0.62	0.00
Sara	0.16	0.77	0.03	0.02	0.02
Sineom	0.03	0.61	0.09	0.27	0.00
Songag	0.03	0.32	0.42	0.22	0.01
Songdang	0.02	0.34	0.26	0.36	0.01
Topyeong	0.04	0.56	0.12	0.28	0.01
Tosan	0.00	0.03	0.93	0.03	0.00
Wuimi	0.03	0.61	0.14	0.21	0.00
Yongheung	0.13	0.73	0.06	0.06	0.02

서, 북서, 북, 평면의 9가지로 구분하고 각 경사향에 대응하는 토양통의 면적비율을 구하였다.

알고리즘에 의한 토양통 예측 및 분포 특성 앞서 제시된 토양통 예측 알고리즘에 따라 제주도 지형도에서 각 토양통별로 임의의 지점을 10개씩 추출한 후 해당되는 환경요인 값을 입력하여 토양통 예측의 정확도를 검증한 결과 Table 6에 나타난 바와 같이 1순위에서 정확하게 예측할 확

률은 33.7%, 3순위 이내에서 맞출 확률은 62%이었고, 10순위 이내에는 90 % 이상의 예측 정확도를 나타내었다. 특히 환경요인의 특성이 복잡하지 않은 산악지에 위치한 토양통은 정확하게 예측하였으나, 해안가 등 유사한 환경요인이 분포한 지역의 토양통 예측확률은 낮은 경향이였다.

예측을 통한 제주도 토양분포를 이해하기 위하여 제주도 전 지역을 270 m x 270 m 단위의 격자로 세분하여 각 격자에 해당하는 환경요인의 값을 추출하였다. Fig. 1은 환경요인

Table 6. Percentages of prediction accuracy of soil series using estimation algorithm by environment factors in Jeju Island.

Soil series	1st	In 3rd	In 5th	In 10th	Soil series	1st	In 3rd	In 5th	In 10th
Ara	15	20	50	90	Jeongbang	38	72	85	90
Donggui	45	80	85	85	Jocheon	40	60	60	80
Donghong	5	45	60	75	Jungeom	15	20	50	90
Euigui	38	72	85	90	Jungmun	38	66	71	100
Gamsan	46	79	86	108	Miag	38	66	71	100
Gangjeong	45	80	85	85	Minag	30	62	76	92
Gapa	60	70	80	90	Mureung	5	45	60	75
Geumag	28	70	88	95	Namweon	38	72	85	90
Gimyeong	30	50	70	80	Nogsan	38	66	71	100
Gueom	30	62	76	92	Nongo	10	70	100	100
Gujwa	45	60	70	90	Noro	38	66	71	100
Gunsan	45	60	70	90	Ora	10	20	20	70
Gyoraec	30	62	76	92	Pyeongdae	30	62	76	92
Haengweon	28	70	88	95	Pyoseon	38	72	85	90
Hamo	50	70	80	90	Sara	22	33	44	67
Hangyeong	70	80	80	100	Sineom	28	70	88	95
Hanrim	38	66	71	100	Songag	38	66	71	100
Haweon	40	70	80	90	Songdang	38	72	85	90
Heugag	35	75	90	95	Topyeong	38	72	85	90
Ido	30	62	76	92	Tosan	35	75	90	95
Jeju	38	66	71	100	Wuimi	28	70	88	95
Jeogag	38	66	71	100	Yongheung	20	20	30	60

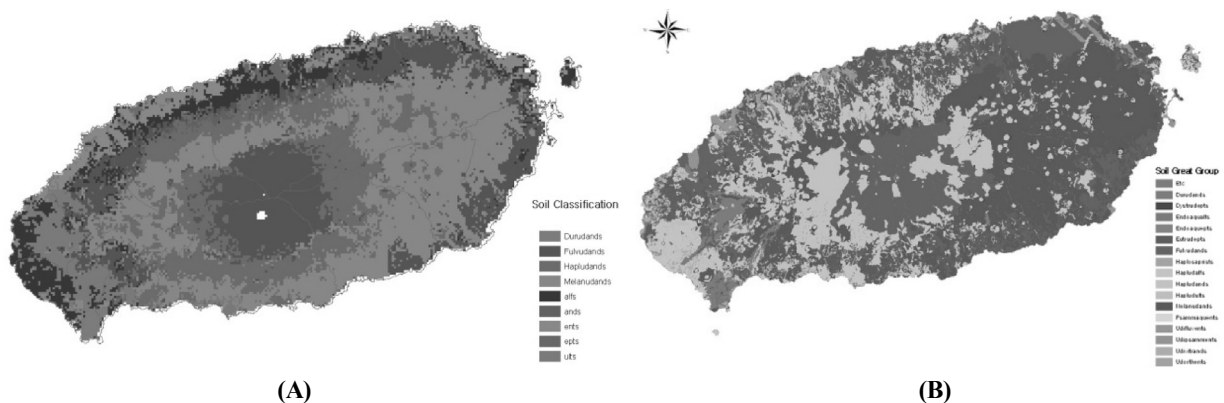


Fig. 1. Estimated soil map (A) and surveyed soil map (B) aggregated by soil great group unit in Jeju Island.

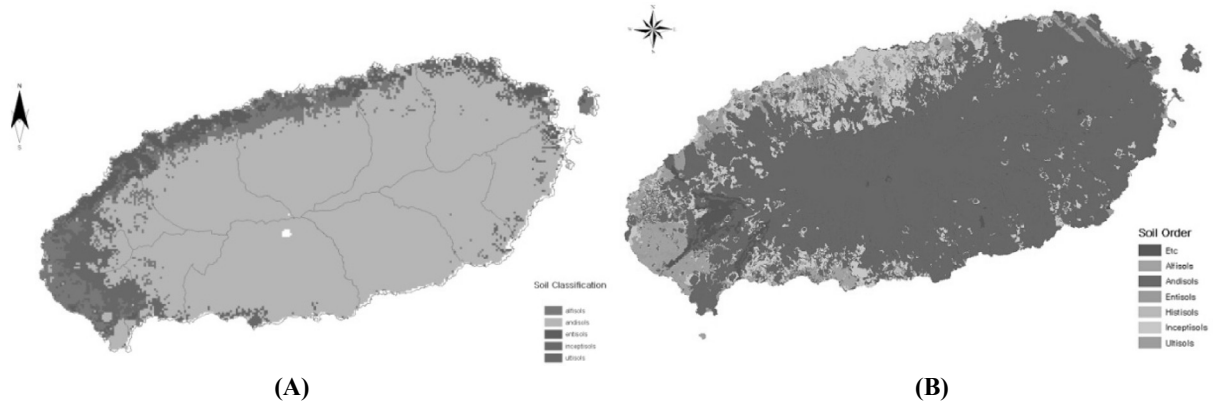


Fig. 2. Estimated soil map (A) and surveyed soil map (B) aggregated by soil order unit in Jeju Island.

을 예측 알고리즘에 대입하여 토양통을 예측하고, 각 토양통의 분류에 따라 대군 (great group)까지 구분하고 기존의 토양도와 비교한 것이다.

기존토양도에서 제주도 중부와 동남부 지방에 광범위하게 분포하는 Melanudands, Fulvudands, Hapludands 등은 예측모형과 대체로 유사한 형태를 나타내고 있으나, 북부해안가 및 서부지역에서 Hapludalfs, Hapludults 등의 Alfisols, Ultisols의 분포는 예측모형의 결과와 달리 토양도에서는 Hapludults가 군데군데 분포하는 등 다른 형태를 나타내고 있었다. 대군단위 예측지도에서는 Andisols은 북부 해안과 서부 지역을 제외하면 제주도 전역에 걸쳐 폭넓게 분포하는 것으로 예상되었고 토양도에서도 이와 유사하게 분포하였다. Durudands는 대정지역 해안가에 분포가 예상되었는데 토양도의 하모통으로 판단되었다. Melanudands는 제주 중산간지 상부와 동부 중산간지에 폭넓게 분포하고 있었다. 동부지역의 해발고도가 낮은 지역은 신업통, 토평통 등이 보다 위에는 남원통, 표선통 등이 더 높은 지역은 평대통 등이 분포하고 있었고, 북부지역은 한경통이, 서부지역은 하부에는 남원통, 상부에는 송당통이 분포되며, 남부지역에서는 주로 정방통이 Melanudands 지역에 분포될 것으로 예상되었다. Fulvudands는 주로 서부와 동부에서 Melanudands의 하부에 해안쪽과 한라산 정상에 있는 중심 산악지역에 분포될 것으로 예상되었는데, 동북부 지역에는 주로 구좌통, 서북부 지역에는 아라통, 동남부 지역에는 중업통이 많이 분포될 것으로 예상되었다. 한라산 정상 주위로 넓은 지역에 분포하는 Fulvudands는 군산통으로서 알고리즘에 군산통의 평균 해발고도가 가장 높게 폭넓게 분포하고 있기 때문에 판단된다. Hapludands는 한라산 정상부 군산통의 주위에 주위와 북쪽으로는 중산간지 Melanudands 지역의 하부에 분포되는 것으로 예상되었다. 중심 지역의 군산통의 동쪽과 서쪽에 인접한 Hapludands는 주로 노로통, 적악통이었고, 남쪽에 접한 토양은 한림통이었으며, 북쪽 중산간지에 분포된 것은 제주통이었다.

토양구분을 목 (order)단위로 하여 예측모형의 결과와 토양도를 비교한 결과는 Fig. 2에 나타내었다.

제주도 북부와 서부 해안지역을 제외하면 전 지역에 걸쳐 Andisols이 넓게 분포하고 있었으며, 북부의 해안가에는 길게 Entisols이 분포하는 것으로 예측되었다. 목단위 예측지도에서 특이한 점은 제주도 북부지역은 해안으로부터 한라산 방향으로 Entisols, Alfisols, Andisols 순으로, 서부지역에서는 Alfisols, Ultisols, Andisols 순으로 토양이 형성되는 것으로 예측되었으나, 실제 토양도에서는 각 토양목이 혼재되어 분포되는 것으로 나타났다. 이러한 환경요인에 의한 토양의 분포에 대해서는 토양생성과 관련된 것으로 예측되며 이에 대해서는 앞으로 추가적인 연구가 필요할 것이다. 또 예측 알고리즘에 의한 결과는 환경요인만으로도 토양의 분포특성을 보다 간결하게 나타내고 있어, 앞으로 환경에 따른 토양의 생성, 발달, 연쇄를 이해하는데 도움이 될 것으로 판단되었다.

적 요

토양의 생성에는 모재, 기후, 지형, 생물요인, 시간 등의 5가지 요인이 작용하고 있다고 알려져 왔다. 이 연구는 제주도 토양을 대상으로 환경요인만으로 토양통을 예측하는 알고리즘을 이용하여, 정량적인 분석 방법을 이용해 환경요인과 토양분포의 관계를 알아보고자 하였다. 분석을 위한 환경요인으로는 온도, 강수량, 지표지질, 해발고도, 경사도, 경사향, 주변과의 고도차, 지형습윤지수, 해안으로부터의 거리, 산 정상으로부터의 거리, 토지이용현황을 선택하였다. 토양통별로 각각의 환경요인의 평균과 표준편차 또는 면적비를 구하고, 이를 이용하여 토양통이 분포할 수 있는 환경요인의 범위와 확률을 구하였다. 환경요인별 확률을 결합시켜 분포 가능한 토양통의 순위를 제시하는 알고리즘을 작성하였고, 이를 이용하여 토양통을 예측한 결과 1순위 내에 33%, 2순위 내에 62%, 5순위 내에 74%를 정확하게 기존의 토양도와 일치시킬 수 있었다. 알고리즘을 이용하여 제주 전 지역의 환경요인을 이용하여 예측되는 토양도를 토양목, 대군 등으로 분류하여 나타낸 결과 북부 해안가에 Entisols이 분포하고 해발고도

가 높아지면서 Alfisols, Andisols이 나타난 반면, 서부지역에서는 해안가의 Alfisols에서 해발고도가 높아지면서 Ultisols, Andisols의 순으로 나타나고 있어, 토양의 생성과 관련되어 모형을 이용한 추가적인 연구가 필요하였다.

색인어 : 토양생성, 토양통 예측, 화산회 토양

감사의 글

이 연구는 농촌진흥청 연구사업 (과제번호 PJ007493)의 지원에 의해 수행되었습니다.

인용 문헌

- Carré, F., A.B. McBratney, T. Mayr, and L. Montanarella. 2007. Digital soil assessments: Beyond DSM. *Geoderma* 142:69-79.
- Chae, S.S. and D.T. Lee. 1972. Studies on the genesis and classification of volcanic black soil in Chejudo. *Res. Rep. Office Rural Devel.* 14:27-38.
- Dahlgren, R.A. 1997. Soil development along an elevational transect in the western Sierra Nevada, California. *Geoderma* 78:207.
- Hong, S.Y., Y.S. Zhang, B.K. Hyun, Y.K. Sonn, Y.H. Kim, S.J. Jung, C.W. Park, K. C. Song, B.C. Jang, and E.Y. Choe. 2009. An introduction of Korean soil information system. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 42(1):21-28.
- Hyun, B.K, Y.T. Jung, G.S. Hyun, K.H. Moon, K.C. Song, Y.K. Sonn, Y.S. Zhang, C.W. Park, S.Y. Hong, and L.H. Kim. 2009. A study on the lava terraces with different elevation in Jeju. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 42(2):88-97.
- Moon, K.H., H.C. Lim, and H.N. Hyun. 2007. Distribution of soil series in Jeju Island by proximity and altitude. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 40(3):221-228.
- Moon, K.H., H.C. Lim, and H.N. Hyun. 2010. Distribution of organic matter and $A_{10}+1/2Fe_0$ contents in soils using principal component and multiple regression analysis in Jeju Island. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 43(5):626-632.
- Peterson, G.A., I.D. Moore, G.A. Nielsen, and P.E. Gessler. 1993. Soil attribute prediction using terrain analysis. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 57:443-452.
- Shoji, S., M. Nanzyo, and R. Dahlgren. 1993. *Volcanic ash soils: genesis, properties, and utilization.* Elsevier Science.
- Soil Survey Staff, USA. 2006. *Keys to soil taxonomy.*
- Song, K.C. and S.H. Yoo. 1994. Andic properties of major soils in Cheju island (3). Conditions for formation of allophane. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 27(3):149-157.
- Won, J.H., J.W. Kim, G.W. Koh, and J.Y. Lee. 2005. Evaluation of hydrogeological characteristics in Jeju Island, Korea. *Geo. J.* 9:33-46.