

박사학위논문

제주도 토양의 공간분석 연구

제주대학교 대학원

농화학과

문경환

2009 년 12 월

제주도 토양의 공간분석 연구

지도교수 현 해 남

문 경 환

이 논문을 농학 박사학위 논문으로 제출함

2009 년 월

문경환의 농학 박사학위 논문을 인준함

심사위원장

전 응철

위 원

현 해남

위 원

임 한철

위 원

송 반환

위 원

손 연규

제주대학교 대학원

2009 년 월

Spatial analysis of soils in Jeju Island

Kyung Hwan Moon

(Supervised by professor Dr. Hae-Nam Hyun)

A thesis submitted in partial fulfillment of the
requirement for the degree of Doctor of Agricultural
Science

2009.

Department of Agricultural Chemistry
GRADUATE SCHOOL
JEJU NATIONAL UNIVERSITY

목 차

ABSTRACT	i
List of Figures	iii
List of Tables	vi
Abbreviation	viii
서 론	1
I. 토양특성의 예측 및 분포	4
1. 서 론	4
1) 제주도의 토양 생성조건	4
2) 제주도 토양의 분류	7
3) 제주도 주요 토양특성의 예측 및 분포	13
2. 재료 및 방법	15
1) 토양시료의 채취 및 분석	15
2) 환경요인의 추출	15
3) 토양특성과 요인들 간 통계분석	18
4) 토양특성지도의 작성	18
3. 결과 및 고찰	19
1) 조사지점의 토양특성	19
2) 조사지점의 환경요인	20
3) 설명변수의 축소를 위한 주성분의 선택	24
4) 중회귀분석에 의한 토양유기물과 $Al_0 + \frac{1}{2}Fe_0$ 함량의 추정 ...	31
II. 토양통의 분포와 지역구분	40
1. 서 론	40
1) 토양특성지도의 제작 방법	40
2) 지리통계에 의한 내삽	41
3) 토양특성지도에 의한 토양통 지역 구분	42
2. 재료 및 방법	45
3. 결과 및 고찰	46
1) 조사지점 유기물함량과 토양도의 활용	46
2) 공간통계에 의한 토양유기물 지도	48
3) $Al_0 + \frac{1}{2}Fe_0$, 토양유기물, 토양온도지도와 토양통 분포	53
4) 제주도 토양의 구분	59

Ⅲ. 환경요인과 토양분포	64
1. 서론	64
2. 재료 및 방법	67
1) 제주도 토양통의 특징 및 범위	67
2) 공간자료의 작성	69
(1) 해발고도	69
(2) 기후요인	70
(3) 지형요인	73
(4) 지표지질요인	77
(5) 토지이용요인	77
3) 토양통 분포 분석 및 해석	78
3. 결과 및 고찰	79
1) 자료 분석결과	79
(1) 토양통의 해발고도별 분포	79
(2) 기후요인과 토양통	81
(3) 지형요인과 토양통 분포	85
(4) 지표지질과 토지이용	88
2) 토양통의 분포예측 알고리즘	91
3) 알고리즘에 의한 제주도 토양통 분포 특징	97
종합 고찰	101
적요	105
참고 문헌	107

ABSTRACT

Spatial analysis of soils in Jeju Island

Kyung Hwan Moon

Department of Agricultural Chemistry
Graduate School, Jeju National University,
Jeju, 690-756, Korea
(Supervised by professor Dr. Hae-Nam Hyun)

In Jeju Island, they have many different soil types mainly Andisols because of various environmental situation like parent material, time, climate, organism and topography. The diversity of Jeju soils makes difficult to understand and manage properly. This study was conducted to elucidate to understand the relationship of soils and environmental factors and to understand the distribution characteristics of Jeju soils by quantitative methods.

In first chapter, we make multiple regression models for soil organic matter and $Al_0 + \frac{1}{2}Fe_0$ contents using 3 principal components which were selected by PCA with 11 different environmental variables. Three principal components can explain 55.8% of total variance by 11 variables. The combined effect of Halla Mt.(principal component 1) and vegetation(principal component 2) are important for soil organic matter and $Al_0 + \frac{1}{2}Fe_0$ contents variations. We can also make maps of soil organic matter and $Al_0 + \frac{1}{2}Fe_0$ content in Jeju Island using models.

In second chapter, we elucidate the distribution characteristics of soil series in Jeju Island by soil properties, like $Al_0 + \frac{1}{2}Fe_0$, soil organic matter and soil temperature, which are important for soil classification in

Soil Taxonomy System. We made maps of SOM and $Al_0 + \frac{1}{2}Fe_0$ using ordinary kriging, which method was best among tested interpolation methods. We also made soil temperature map from temperature–soil temperature relationship. With $Al_0 + \frac{1}{2}Fe_0$ category, Non–Andisols are located in northern and western areas in the island. With SOM category in Andisols region, Non–Fulvudands/Melanudands are located in mid–mountainous part of northern and western areas in the island. With soil temperature regime, mesic soils are located in center–mountainous part in the island. Using overlay analysis with maps of soil property and soil, we can find that some soil series should be reclassified and remapped because the area is shared the different soil property regions.

In third chapter, we made the algorithm for prediction of soil series in Jeju Island using 11 environmental factors including elevation, temperature, precipitation, slope, aspect, topographic wetness index, distance from the shore and peak, elevation difference within 1km² neighborhood, surface geology and land use. We clarified representative values of each soil series and use them for making probability equation of existence for each soil series at every environmental conditions. The algorithm shows in accuracy of 33% at first chance, 62% within third chances, 74% within fifth chances with random environmental variables. With the algorithm, we can make prediction soil map in Jeju Island. Possible soil catena in each direction were elucidated. We can also clarified possible Entisols, Alfisols, Ultisols, and Andisols areas in Jeju Island using the algorithm. Additional studies are requested to understand the genesis of Non–andisols and detailed classification of Andisols in Jeju Islands.

**Key words : Spatial analysis, Soil classification, Soil property map,
Andisols, Jeju Isand**

List of Figures

Figure	1. Sampling locations of soils for analysis.	16
Figure	2. Scatter plot of correlation coefficients between 11 variables and principals on principal component 1 and principal component 2 axis.	27
Figure	3. Scatter plot of correlation coefficients between 11 variables and principals on principal component 1 and principal component 3 axis.	28
Figure	4. Maps of principal component 1(A), principal component 2(B) and principal component 3(C) from environmental factors.	30
Figure	5. Relationship between principal component 1 and soil organic matter.	31
Figure	6. Relationship between principal component 2 and soil organic matter.	32
Figure	7. Relationship between principal component 3 and soil organic matter.	32
Figure	8. Measured and estimated soil organic matter contents with 3 principal components in surface layer.	34
Figure	9. Relationship between principal component 1 and $Al_0 + \frac{1}{2}Fe_0$ contents.	34
Figure	10. Relationship between principal component 2 and $Al_0 + \frac{1}{2}Fe_0$ contents.	35
Figure	11. Measured and estimated $Al_0 + \frac{1}{2}Fe_0$ contents with 2 principal components in surface layer.	37
Figure	12. Soil organic matter map(A) and estimated soil organic matter map(B) using multiple regression equations.	38
Figure	13. Map of estimated $Al_0 + \frac{1}{2}Fe_0$ content using multiple regression equations.	39
Figure	14. Distributions of soil organic matter at sampled points for surface soil(A) and subsurface soil(B).	46
Figure	15. Distributions of $Al_0 + \frac{1}{2}Fe_0$ at sampled points for surface soil(A) and subsurface soil(B).	47
Figure	16. Maps of soil organic matter for surface soil(A) and subsurface soil(B) made from soil map in Jeju Island.	48
Figure	17. Maps of soil organic matter for surface(A) and subsurface(B) layers made by inverse distance weighting method.	49

Figure 18.	Maps of soil organic matter for surface(A) and subsurface(B) layers made by Spline method.	50
Figure 19.	Maps of soil organic matter for surface(A) and subsurface(B) layers made by local polynomial interpolation method.	50
Figure 20.	Maps of soil organic matter for surface(A) and subsurface(B) layers made by simple Kriging method with trend removal.	51
Figure 21.	Maps of soil organic matter for surface(A) and subsurface(B) layers made by ordinary Kriging method with trend removal.	52
Figure 22.	Prediction standard error maps for simple Kriging(A) and ordinary Kriging(B).	52
Figure 23.	Maps of $Al_o + \frac{1}{2}Fe_o$ contents by IDW(A) and ordinary Kriging method(B).	54
Figure 24.	Overlay map of soil series and 2% $Al_o + \frac{1}{2}Fe_o$ contents.	55
Figure 25.	Distribution of Gujwa soil series and $Al_o + \frac{1}{2}Fe_o$ contents Jeju Island.	56
Figure 26.	Overlay map of soil series and 10% soil organic matter contents.	57
Figure 27.	Relationship mean annual temperature and under ground temperature at 50cm depth in Jeju Island.	58
Figure 28.	Map of mean annual under ground temperature at 50cm depth in Jeju Island. Solid line represents 15°C contour.	58
Figure 29.	Overlay map of soil series and 15°C of under ground temperature at 50cm depth.	59
Figure 30.	Jeju soils can classified with 5 classes by andic soil property, soil organic matter, soil temperature.	60
Figure 31.	Soils was classified by great group in detailed soil map.	67
Figure 32.	Annual mean temperature is decreased by higher Elevation.	70
Figure 33.	Temperature map was drawn from the relationship of Elevation and temperature.	71
Figure 34.	Comparison of measured and estimated temperature.	71
Figure 35.	Annual precipitation is increased by higher Elevation.	72
Figure 36.	Precipitation map was drawn from the relationship of Elevation and precipitation.	72

Figure 37. Comparison of measured and estimated rainfall.	73
Figure 38. Slope map was drawn from calculation with digital elevation model (DEM).	74
Figure 39. Aspect map was drawn from calculation with digital elevation model (DEM).	74
Figure 40. Elevation difference map within 1 km area was drawn from calculation with digital elevation model (DEM).	75
Figure 41. Map of distance from the shore was drawn from calculation with digital elevation model (DEM).	76
Figure 42. Map of topographic wetness index.	76
Figure 43. Theoretical curves show discovered opportunities for each soil series.	80
Figure 44. Distribution expectations of several soil series analyzed with areal ratios within every 100m elevation contours.	81
Figure 45. Areal distribution of several soil series analyzed with areal ratios within every 1°C ground temperature ranges.	83
Figure 46. Areal distribution of several soil series analyzed with areal ratios by annual precipitation ranges.	84
Figure 47. Areal distribution of several soil series analyzed with areal ratios by slope ranges.	86
Figure 48. Areal distribution of several soil series analyzed with areal ratios by elevation difference ranges.	87
Figure 49. Areal distribution of several soil series analyzed with areal ratios by aspects.	87
Figure 50. Predicted points for soil series and regions divided by direction and elevation.	94
Figure 51. Estimated soil order drawn by results of soil estimation algorithm from inputs of environmental factors at every 270m × 270m grid point on Jeju Island.	98
Figure 52. Estimated soil types drawn by results of soil estimation algorithm from inputs of environmental factors at every 270m × 270m grid point on Jeju Island.	100
Figure 53. Estimated soil series drawn by results of soil estimation algorithm from inputs of environmental factors at every 270m × 270m grid point on Jeju Island.	100

List of Tables

Table	1. Statistics of soil organic matter and contents of $Al_0 + \frac{1}{2}Fe_0$ at sampled 321 locations in Jeju Island.	19
Table	2. Statistics of temperature and precipitation at sampled 321 locations.	20
Table	3. Statistics of net primary product, radiation and potential evapotranspiration at sampled 321 locations.	21
Table	4. Statistics of elevation, topographic wetness index, elevation difference, soil forming energy, distance from coast, and distance from the peak at sampled 321 locations.	23
Table	5. Correlation matrix between environmental factors collected at sampled 321 locations.	24
Table	6. Eigenvalues and cumulative variance of the correlation matrix of environmental variables.	25
Table	7. Eigenvectors for each principal component with 11 environmental variables.	26
Table	8. Correlation coefficients and probabilities between principal components and environmental variables.	26
Table	9. Analysis of variance with soil organic matter and 3 principal components by multiple regression analysis.	33
Table	10. Parameter estimates of each variable for estimation of soil organic matter contents by multiple regression analysis.	33
Table	11. Analysis of variance with $Al_0 + \frac{1}{2}Fe_0$ contents and 3 principal components by multi regression analysis.	35
Table	12. Analysis of variance with $Al_0 + \frac{1}{2}Fe_0$ contents and 2 principal components by multi regression analysis.	36
Table	13. Parameter estimates of each variable for estimation of $Al_0 + \frac{1}{2}Fe_0$ contents by multi regression analysis.	36
Table	14. Prediction error statistics for various interpolation methods for soil organic matter contents in Jeju Island. Number of compared data was 321.	53

Table 15.	Soil series overlay on $Al_0 + \frac{1}{2}Fe_0$ contents criteria for Andisols in Jeju Island.	55
Table 16.	Soil series overlay on SOM contents criteria for Melanudands/Fulvudands and Hapludands in Jeju Island.	57
Table 17.	Soil series overlay on soil temperature criteria for thermic and mesic in Jeju Island.	59
Table 18.	Areas(ha) of soil series located in each regions.	61
Table 19.	The area and areal ratio of each soil series in Jeju Island.	68
Table 20.	Areas and ratios of geological rocks on Jeju Island.	77
Table 21.	Mean Elevations and standard deviations of each soil series.	80
Table 22.	Mean temperatures and standard deviations of each soil series.	82
Table 23.	Areal percentages of soil series divided by 15°C ground temperature.	83
Table 24.	Mean precipitation and standard deviations of each soil series.	84
Table 25.	Mean slopes and standard deviations of each soil series.	85
Table 26.	Mean elevation differences and standard deviations of each soil series.	86
Table 27.	Mean distances from shore and standard deviations of each soil series.	88
Table 28.	Areal distribution ratio of each soil series by different surface geology.	89
Table 29.	Areal distribution ratio of each soil series by different land uses.	90
Table 30.	Representative values of each factors for every soil series.	92
Table 31.	Probabilities of correct prediction for soil series using environmental factors in Jeju Island.	93
Table 32.	Expected soil series with direction and Elevation using algorithm with environmental factors of each points.	95

Abbreviation

Al _o	Al contents extracted by ammonium oxalate(%)
Fe _o	Fe contents extracted by ammonium oxalate(%)
SOM	Soil organic matter (%)
CEC	Cation exchange capacity (cmol ⁺ kg ⁻¹)
EC	Electrical conductivity (dS m ⁻¹)
TWI	Topographic wetness index
NPP	Net primary production (g m ⁻² yr ⁻¹)
Rs	Mean daily solar radiation (MJ m ⁻² d ⁻¹)
Z	Elevation (m)
EleDiff	Elevation difference within 1km ² neighbor (m)
EEMT	Effective energy and mass transfer (MJ m ⁻² yr ⁻¹) or Soil forming energy
Codi	Euclidean distance from the coast (m)
Distfpeak	Euclidean distance from the peak of Halla Mt. (m)
DEM	Digital elevation model (m)
SD	Standard deviation
min	Minimum
max	Maximum
Temp	Temperature (°C)
Rain	Precipitation (mm yr ⁻¹)
ET	Potential evapotranspiration (mm yr ⁻¹)
Prin 1	Principal component 1
RMSE	Root mean square error
Adj R-sq	Adjusted R-square
DF	Degree of freedom
γ	Empirical semivariance (in spatial statistics)
IDW	Inversed distance weighting
LPI	Local polynomial interpolation
SK	Simple Kriging
OK	Ordinary Kriging
GIS	Geographic information system
RS	Remote sensing
NORMDIST	NORMDIST function in Excel program
NIAST	National Institute of Agricultural Science & Technology

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
SGF	Seoguipo formation



서 론

제주도는 우리나라의 면적의 1.8%에 불과하지만 분포하고 있는 토양의 종류는 63개로 우리나라 토양통 390종류 중에 16%가 있어 좁은 면적에 매우 다양한 토양이 분포하고 있다(Song *et al.*, 2005). 이것은 한라산의 화산폭발이 수차례에 걸쳐 이루어져 화산회토 퇴적양상 및 생성 연대가 각각 다르고, 해발고도가 높은 한라산의 영향으로 기온, 강우, 식생 등이 매우 달라 화산회토나 현무암에서 유래된 토양일지라도 토양 특성이 매우 다양하게 나타나고 있다(Song, 1989).

1970년대 Soil Taxonomy에서는 화산회토를 Inceptisols의 아목인 Andepts로 분류했고 제주도 정밀토양조사에서도 이를 적용하여 제주도 토양을 5개 목, 11개 아목, 13개 대군 및 60개의 토양통으로 분류하였다(Um *et al.*, 1978). 그러나 70년대 말부터 80년대에 화산회토에 대한 연구가 집중적으로 이루어지고, 그 결과 1990년에는 Andisols이라는 새로운 목으로 설정됨으로써 화산회토에 대한 분류체계가 전적으로 바뀌게 되었다(Soil Survey Staff, 1990).

1999년에 Soil Taxonomy 개정판 발간(Soil Survey Staff, 1999)으로 토양 분류단위와 분류기준이 대폭적으로 수정됨에 따라 이에 대응하여 우리나라에서는 2000년에 Taxonomical classification of Korean soils을 발간하였다(NIAST, 2000). 이 때 우리나라에 분포하는 화산회토를 Andisols 목으로 분류하였으나, Andisols 분류기준에 대한 분석 없이 우선적으로 분류명을 변경하였기 때문에 분류기준 충족 여부 판정에 많은 문제를 가지고 있다. 1990년에 새로 신설된 Andisols에 속하거나 그와 유사한 토양인 중문, 아라, 오라, 제주통 등의 경우 구분류체계를 적용하여 토양통을 설정하였고, 새로운 분류기준에 대한 자료가 부족하기 때문에 현재의 분류상에서 토양 목이 다르거나 아목, 대군, 아군 등의 고차 분류단위에서 다른 토양을 동일한 토양통으로 분류하는 심각한 문제를 지니고 있다. 이들 토양 뿐만 아니라 제주도의 많은 토양에서 Soil Taxonomy의 분류기준 충족여부를 판정할 수 있는 자료가 매우 부족한 실정이기 때문에 앞으

로 이 문제를 시급하게 해결해야 할 것이다(Song et al., 2005a, 2008b).

화산회토양은 우리나라에서 1970년대 초 여러 연구자에 의해 다량의 비료가 요구되는 토양으로 인식된 이래 제주도에서는 다량의 시비를 투입하는 농업기술이 광범위하게 행해져 왔다. 이에 따라 Andisols이 아닌 지역에 화산회토 기준의 비료를 사용하는 등 과다시비의 가능성이 있고, 토양환경이 악화되고 있다는 우려가 지속적으로 제기되어 왔다(Lim et al., 2001; Hyun et al., 1997). 최근에는 농경지에서의 과다 시비가 제주도의 지하수를 오염시키는 주원인 중의 하나라고 보고되고 있기도 하다(Ko et al., 2005; Han, 2009). 따라서 많은 종류의 제주도 토양을 정확하게 분류하고 중요한 특성을 중심으로 집단화하여 구분하는 것은 합리적인 농경지와 환경의 관리를 위해서 필요한 일이다.

최근 컴퓨터 기술은 다양한 분야에 적용되고 있으며, 토양학 분야에도 지리정보시스템, 원격탐사, 지리통계, 신경망기술 등이 도입되어, pedometrics라는 새로운 연구 분야가 대두되었다(Carr et al., 2007; McBratney et al., 2002). 또 기후변화, 생태계, 작물모형 등 타 학문분야에서도 환경구성요소로 중요한 토양에 대하여 토양도보다 정밀하고 그 분야에 적용하기 적합한 형태의 정보를 요구하고 있다(Heuvelink and Webster, 2001). 컴퓨터 기술을 이용하여 토양의 특성들을 개별적으로 나타낸 토양특성지도는 사용자의 이용성을 증대시킬 뿐만 아니라 지도의 정밀성을 크게 향상시킬 수 있기 때문에 그러한 요구에 부응하는 것 중의 하나가 된다(Carr et al., 2007). 또한 토양 분류의 기준이 될 수 있는 토양특성지도는 토양도의 개선이나 토양특성에 미치는 환경요인의 영향 등을 분석하는데도 용이하게 쓰일 수 있다.

본 연구에서는 정량적인 방법을 이용하여 토양특성과 환경요인과의 관련성을 구명하며, 제주도에 분포하는 토양의 분포와 생성에 대하여 이해하고, 합리적으로 토양을 구분하여 관리하는데 도움을 주기 위하여 크게 3개의 분야로 나누어 수행되었다. 제1장에서는 토양의 분류에 중요한 토양특성지도를 작성하기 위하여 환경요인과 토양특성과의 관련성을 통계적인 방법으로 비교, 분석하여 타당성 여부를 검토하고 토양도와 비교하였다. 제2장에서는 공간통계방법을 이용하여 토양특성지도를 작성하고 이를 바탕으로 분류에 중요한 지표가 되는 $Al_0 + \frac{1}{2}Fe_0$, 유기물함량 및 토양온도 분포도를 이용하여 현재 토양도 상의 토양

통 분포와 비교하고 분류에서의 문제점과 개선할 방향을 제시하였으며, 제3장에서는 각각의 토양통에 대하여 여러 가지 환경요인속성들의 분포형태를 분석하고 이로부터 존재 가능한 토양통을 추정할 수 있는 예측모형을 제시하고 이를 이용하여 제주도에 분포하는 토양의 분포특성을 구명하고자 하였다.



I. 토양특성의 예측 및 분포

1. 서론

1) 제주도의 토양 생성조건

모든 자연 현상은 주위의 환경조건에서 가장 안정한 형태로 존재하려고 하며, 하나의 자연체인 토양도 주위 환경조건에 대응하여 가장 안정된 형태를 향하여 끊임없이 변화하게 된다. 토양의 생성 및 발달은 암석의 풍화에서 시작되어 토양 모재로 되고 모재가 풍화작용과 토양생성작용을 받아 토양으로 된다. 암석의 풍화작용에 의하여 생성된 풍화물은 주어진 환경조건에서 가장 안정된 형태를 향하여 끊임없이 변해가면서 토양의 생성작용을 받아 토양이 되고, 시간이 경과하면서 층위가 분화된 토양으로 더욱 발달하게 된다. 이러한 토양생성과정에는 여러 인자들이 작용하는데, 특히 기후, 생물, 모재, 지형 및 시간이 토양 생성 과정에 관여하는 주된 인자이다. 이렇게 암석의 풍화작용과 토양의 생성작용은 주어진 환경조건에 대응하여 가장 안정된 형태로 존재하기 위하여 끊임없이 변해가는 과정이다(Song *et al.*, 2005).

기후인자는 토양생성에 가장 영향이 큰 인자이며, 기후인자 중에서도 특히 강수량과 기온의 영향이 크다. 그 중에서도 토양 중 물의 이동방향과 양은 토양 생성에서 중요하다. 강수량이 증발산량보다 많은 습윤지대에서는 물이 주로 하향 이동하며, 물을 따라서 점토와 유기물 등의 토양교질물도 하향 이동하므로 용탈층과 집적층의 층위분화가 잘 되어 토양발달이 빠르고, 강수량이 많을수록 토양 중 염기의 용탈이 심하게 일어나 산성 토양으로 발달된다. 강수량이 적은 건조지대에서는 토양교질물의 하향 이동이 거의 일어나지 않으며, 토양 층위의 분화 발달이 미약하다. 또 상향 이동된 물은 대기로 날아가나 염기는 토양 표층에 남아 있게 되므로 알칼리성 토양으로 되고, 생물의 활동이 제약되고 토양에서의 화학

적 반응이 미약하며, 토양의 유기물 함량이 낮다. 이렇게 강우량과 온도는 화학적 및 물리적 반응속도에 큰 영향을 줌으로써 토양단면의 발달에 직접적인 영향을 주고, 또한 기후는 자연식생의 종류를 결정하게 되고 이 식생이 토양생성인자로 작용하게 됨으로써 토양생성에 간접적인 영향을 끼치기도 한다(Song *et al.*, 2005). Parfitt(1990)도 뉴질랜드에서 생성연대가 비슷한 화산쇄설물에서 강우량과 용탈되는 양이 증가함에 따라서 Andic Dystric Eutrochrept - Typic Hapludand - Acric Hapludand로 서로 다른 토양이 발달되고, 주성분인 토양 교질도 Halloysite - Allophane과 Halloysite - Allophane의 순으로 달랐다고 하였다(Shoji *et al.*, 1993). 제주도의 기후조건을 보면 해안지방에서의 연평균 강우량이 973 ~ 2,050mm이고, 연평균 기온이 15.5 ~ 16.4 °C로 온난 습윤 기후조건이다. 동부 해안 지역의 강우량이 서부 해안 지역에 비하여 1,077mm나 많아 지역 간에 강우량 차이가 대단히 크다. 표고별 기후 변화를 보면 지대가 100m 높아짐에 따라 연평균 기온은 0.62 °C씩 낮아지고, 강우량은 218mm 많아지는 경향이다. 중산간 지역에서도 동부와 서부지역 간에 온도 차이는 크지 않으나, 강우량은 해안지방과 마찬가지로 동부지역이 서부지역보다 900mm 많다. 따라서 제주도는 토양생성인자 중에서 가장 중요한 요인인 기후인자가 면적이 비교적 좁은데도 불구하고 다양한 종류의 토양이 분포하는 데 큰 영향을 주고 있다. 예로 강우량이 비교적 적은 서북부 해안지역에 분포하는 토양들은 전형적인 화산회토의 성질을 가지고 있지 않다(Song *et al.*, 2005).

생물인자 중에서 특히 중요한 자연식생은 기후의 영향을 가장 직접적으로 받아 기후 조건에 따라 식생의 종류가 결정된다. 매우 건조한 기후에서 습윤기후 조건으로 변화함에 따라 식생은 사막-건조초지-초지-삼림의 형태로 변하게 된다. 식생의 종류에 따라 토양에 공급되는 유기물의 양이 다르며, 토양의 침식 방지에 기여하는 정도가 다르다. 자연식생에 함유된 무기성분의 종류와 함량 또한 토양생성에 영향을 끼친다. 침엽수에는 칼슘, 마그네슘, 칼륨 등과 같은 염기함량이 낮기 때문에 침엽수림에서 생성된 토양은 활엽수림에 비하여 산성으로 된다. 제주도 해안지대의 자연식생은 초지이나 해발 500-700m 지점에서부터 삼림으로 변한다. 고도가 높아질수록 강우량이 많고, 온도가 낮으며 증발산량이 적어 토양수분이 풍부하기 때문이다. 한라산 남사면에서는 700m 지점에서, 북사면에

서는 500-600m 지점에서부터 삼림으로 변하는 것은 강우량과 증발산량의 차에 의한 기후의 영향이 큰 것으로 보인다(Song *et al.*, 2005).

모재인자는 토양의 단면특성을 결정하는 기본적인 인자인 동시에 토양생성에 대한 기후인자의 특성을 촉진시키거나 지연시키는 역할을 한다. 토양생성작용을 받은 시간이 짧은 토양일수록 모재의 성질을 나타내고, 오래된 토양일수록 기후인자의 영향을 많이 받는 토양으로 변한다. 습윤지대에서는 토층분화가 쉽게 일어나고 산성 토양으로 발달하는데, 염기성암에서 유래된 토양은 산성암에서 유래된 토양에 비하여 풍화가 빨리 일어나기 때문에 토층분화가 더욱 쉽게 일어나고, 산성토양으로 발달하는데 더욱 많은 시간이 걸린다. 화산회는 다른 암석에 비하여 풍화속도가 빠르기 때문에 습윤지역의 배수가 양호한 토양 조건하에서 화산회 퇴적물이 급속히 풍화되는 과정에 유기물이 공급되면, 풍화산물인 다른 양이온은 용탈되거나 알루미늄과 철은 부식과 매우 안정된 알루미늄-, 철-유기물 복합체를 형성한다. 알루미늄-유기물 복합체를 형성하게 되면 알루미늄의 독성 때문에 미생물에 의한 분해가 잘 일어나지 않아 유기물 함량이 매우 높은 화산회토로 된다. 그러나 pH가 5.0 이상으로 높아지면 알루미늄-유기물 복합체 생성이 둔화되고, allophane이나 ferrihydrite와 같이 결정성이 약한 점토광물이 생성된다. 제주도 토양의 주 모재는 현무암이고 일부 조면암 및 조면암질 안산암에서 유래되었다. 제주도가 화산 폭발에 의한 수차례의 용기 작용으로 형성되었으며, 한라산의 화산 폭발이 여러 번 이루어졌을 뿐만 아니라 수많은 기생화산의 폭발시기가 다르기 때문에 토양에 따라 화산회의 퇴적 양상 및 생성연대가 각각 다르다. 제주도 토양의 주요 모재인 화산회가 만들어진 시기가 각각 다르고, 지층에 쌓인 깊이도 각각 다르기 때문에 다양한 종류의 토양이 분포한다(Song *et al.*, 2005).

지형은 기후인자의 영향을 완화시키거나 심화시키는 역할을 한다. 경사지에서는 강우의 일부가 유거되기 때문에 토양 중에서 하향 이동하는 물량이 적어지고 점토의 하향 이동이 감소하여 토층분화가 지연된다. 반면에 경사지에 인접한 평탄지에서는 강우량뿐만 아니라 경사면을 따라 흘러온 물까지도 토양 속에서 하향 이동하게 된다. 경사가 심할수록 유거되는 물량이 많고 토양까지도 유실되기 때문에 토심이 깊지 못하고, 토층분화가 지연되며, 유기물 함량이 낮다. 제주

도는 면적이 좁은 데도 한라산이 중앙에 위치하고 있으며, 폭발시기가 각각 다른 360여개의 기생화산이 제주도의 곳곳에 분포하고 있어서 다양한 지형을 보여주고 있다. 그러나 산악지를 중심으로 기복이 매우 심할 뿐만 아니라 강과 하천이 많지만 대부분 물이 흐르지 않는 건천이기 때문에 충적토가 거의 없어 충적토가 많이 생성되는 우리나라 지형조건과 비교하면 단순한 지형특성을 보유하고 있다. 제주도는 동서 방향으로 기다란 타원형의 모양으로, 중앙의 산악지에서도 남북으로는 경사가 심하고, 동서로는 완만하며, 중산간지 및 해안지대에는 분석구를 제외한 대부분의 지역이 용암류 대지를 형성하고 있어, 모재가 형성되면 이동하지 않고 그 자리에서 풍화가 진행되어 토양이 발달하는 경우가 많다.

모재의 풍화작용과 토양생성작용을 얼마나 오래 동안 받았는가 하는 시간인자는 제주에서 용암류 대지의 면적을 고려할 때 중요하다고 할 수 있다. 토양생성인자로서의 시간은 절대적인 시간보다 토양생성작용을 받는 상대적인 시간이 더욱 중요하며, 토층분화가 뚜렷한 토양단면이 발달하는데 소요되는 시간은 기후, 식생, 모재, 지형 등 다른 생성인자의 강도에 따라 좌우된다. 토양생성작용을 받은 시간이 짧을수록 모재의 특성을 반영하는 토양의 성질을 나타내고 시간이 오래될수록 다른 환경인자에 평형이 되는 토양의 성질을 나타낸다. 제주도의 지질은 지질학적으로 가장 늦게 형성된 신생대 제4기층이다. 그러나 화산회와 현무암의 풍화속도가 빠르고, 강우량이 많은 습윤기후 조건이기에 토양생성작용의 강도가 비교적 강한 편이다(Song *et al.*, 2005).

모재, 기후, 식생, 지형, 시간 등의 토양생성인자는 각각 독립적으로 토양생성 과정에 작용하는 것이 아니라 여러 인자들이 복합적으로 작용한다. 토양생성이 이러한 환경인자에 평형을 이루는 방향으로 이루어지므로 토양생성 조건을 파악하게 되면 토양성질의 많은 부분을 알 수 있다.

2) 제주도 토양의 분류

우리나라에서는 Soil Taxonomy를 공식적인 분류체계로 채택하여 사용하고 있다. Soil Taxonomy에서는 목-아목-대군-아군-속-통 순으로 토양을 계통적으로 분류하고 있다. 우선 Keys to Soil Orders에 의해 12개 목 단위를 분류

하고, 다음으로 Keys to Suborders에 의해 아목단위를, Keys to Great Groups에 의해 대군단위를, Keys to Subgroups에 의해 아군단위를 순차적으로 분류하도록 체계화 되어 있다. 아군단위가 결정된 후에 여러 가지의 특징을 공유할 수 있는 속 단위를 결정하게 되며, 최종적으로 토양통을 결정하게 된다 (Soil Survey Staff, 2006).

목 단위의 분류에서는 분류기준의 충족 여부에 따라 Gelisols, Histosols, Spodosols, Andisols, Oxisols, Vertisols, Aridisols, Ultisols, Mollisols, Alfisols, Inceptisols, Entisols의 순으로 차례차례 분류하도록 되어 있다.

우선 토양표면 100cm 이내가 영구동결층이 있거나 200cm 이내에 영구동결층이 있고, 100cm 이내에 gelic 물질이 있을 경우에 Gelisols로 분류하지만 우리나라에서는 보고된 바가 없다.

토양이 Gelisols 조건을 충족하지 못하면 다음으로 Histosols 여부를 검토하게 된다. 토양표면에서 60cm 이내 깊이에서 60% 이상이 andic 토양특성을 나타내지 않으면서, 토양 상부 80cm 중 반 이상이 유기질토양일 때 Histosols로 분류한다. Histosols은 보통 물이 포화된 지역이나 늪지대에서 산소공급이 부족하여 유기물이 쉽게 분해되지 못하고 집적될 때 형성되며, 제주도에서는 이호통이 이에 해당된다. 다음으로 기준 깊이 이상의 spodic층을 보유하는 토양을 Spodosols로 분류하고 있다. Spodosols은 보통 한랭하고 습윤 또는 과습한 기후조건에서 주로 형성되는데 우리나라에서는 보고된 바가 없다.

Spodosols 조건이 충족되지 못하고 무기질 토양표면이나 andic 토양특성을 가지는 유기질 토층의 표면에서 60cm 이상에서 또는 그보다 얕을 경우에는 전 토층의 60% 이상에서 andic 토양특성을 나타낼 경우에 Andisols로 구분된다. Andisols은 우리나라에서 제주도에서는 50% 이상의 지역에서 다량 분포하고 있으며, 울릉도에도 분포하고 있다. Andisols의 중심개념은 교질물이 short-range-order 광물이거나 $Al(Fe)$ -유기물 복합체가 주가 되는 토양이라는 것으로, 이러한 물질의 함량을 추정할 수 있는 $Al_0 + \frac{1}{2}Fe_0$ 의 함량이나, 유기물에 의한 낮은 용적밀도, 인산흡착력, 화산성 유리질의 함량 등이 andic 토양특성의 주가 되며, 특히, 화산쇄설물 등이 풍화가 진전된 지역에서 $Al_0 + \frac{1}{2}Fe_0$ 의 함량은 Andisols 여부를 판단할 수 있는 중요한 지표가 된다.

다음으로 토양이 Andisols이 아닐 경우에 Oxisols인지를 판단하게 된다. 기준 깊이 이상의 oxic 층위를 보유하는 토양을 Oxisols로 분류하며, 다음으로 연중 일정 기간 깊고 넓은 균열을 보유하고, 무기질 토양표면에서 100cm 이내 깊이에 마찰경면을 보유하는 식질 토양을 Vertisols로 분류하고, aridic 수분상을 보유한 토양으로 장기간에 걸쳐 식물이 자라기에 수분이 부족한 토양을 Aridisols로 분류하나, Oxisols, Vertisols, Aridisols 등은 우리나라 분포된다고 보고되지 않고 있다.

Aridisols이 아닐 경우 점토집적층인 argillic 이나 kandic 층을 보유하고 염기포화도가 낮은 토양인 Ultisols로 분류한다. Ultisols은 온난 습윤하고 계절적으로 강우량의 변동이 있는 지역에서 안정적으로 오랫동안 풍화되었을 때 발달하게 된다. 우리나라의 홍적대지와 잔적지 등에 많이 분포하고 있으며, 제주도에 서도 강우량이 적은 일부 지역에 분포하고 있다. 다음의 Mollisols은 mollic 감식표층이 있거나, 모든 토층에서 염기포화도가 50% 이상인 토양이다. 이 토양은 대개 반습윤 또는 반건조 초지에서 생성된 암색의 염기가 풍부한 무기질 토양을 말한다. 우리나라에서는 석회암지대와 해안지역에 적게 분포하는 것으로 알려져 있으며, 제주도에서는 보고된 바가 없다. Alfisols은 argillic, kandic 또는 natric 층을 보유하거나, 1mm 이상의 점토피막이 있는 fragipan이 있는 토양이다. 염기포화도가 보통 내지 높으며, 온난 습윤한 우리나라에서 생성될 수 있는 조건으로 제주도에도 서부지역에 일부 분포하고 있다고 보고되고 있다.

다음의 Inceptisols은 한랭에서 매우 온난한 기후에 걸쳐, 습윤 및 반습윤 지역에 분포하며 주로 cambic 층위와 ochric 감식표층을 보유하는 토양이다. Inceptisols은 최소한으로 발달한 토양이나, 반면에 다른 토양 목의 분류기준을 간신히 충족시키지 못하는 감식층위를 보유하는 토양으로 매우 다양한 토양을 포함한다. 우리나라는 지형이 복잡하여 Inceptisols이 가장 많이 분포하는 것으로 보고되고 있고, 제주도에서도 서부나 북부지역에 분포하는 것으로 알려져 있다. 마지막으로 Entisols은 위의 11개 토양목에 속하지 않는 토양으로 생성층위의 발달 근거가 없거나 미약한 토양을 나타낸다. 이러한 토양은 침식이 매우 심한 급경사지나 하해범람지 등에 분포하고 있다. 우리나라는 지형적인 특징으로 Entisols이 Inceptisols 다음으로 많이 분포하는 것으로 보고되고 있으며, 제주

도에서는 해안에 일부 분포하고 있다(Song et al., 2005; Soil Survey Staff, 2006).

화산분출에 의하여 생성된 제주도 토양의 경우 전형적인 화산회토인 Andisols이 주로 생성 발달되고 있다. Andisols의 중심 개념은 화산화, 부식, 분 석, 용암과 같은 화산분출물이나 화산쇄설물 위에서 발달되고, 교질 부분이 allophane, imogolite, ferrihydrite 등과 같은 short-order-range 광물이거나 Al-유기복합체가 주가 되는 토양이다 (USDA, 1999).

무기질 토양표면이나 andic 토양특성을 보유하는 유기질 층의 상부 경계 중 열은 깊이에서 60 cm 이내 깊이에서, 또는 그 깊이 이내에 암석질, 준암석질 접 촉면 등이 있으면 무기질 토양표면이나 andic 토양특성을 보유하는 유기질 층의 상부 경계와 중 암석질, 준암석질 접촉면 등의 사이 깊이에서 andic 토양특성을 60% 이상 보유하는 토양을 Andisols로 분류한다(USDA, 1999). Andisols 여 부를 구분하는 기준인 andic 토양 특성은 일반적으로 화산성 유리질, 쇄설물 또 는 다른 모재들이 풍화되는 과정에서 생기지만, 시원하고 습한 환경에서 토양유 기탄소가 많을 경우에는 화산성 유리질이 없더라도 형성될 수 있다. 대개 화산쇄 설물들이 풍화가 어느 정도 진행되어 allophane, imogolite, ferrihydrite와 같은 short-range-order 광물이나 Al,Fe-유기물복합체가 풍부해 지거나, 풍화가 덜 진전되었지만 화산성 유리질이 풍부할 때의 토양에서 이러한 특성이 나타난다.

Andic 토양 특성의 구체적인 조건은 유기탄소함량이 25% 이하로서(충족조 건 1), 토양수분함량 33kPa에서 용적밀도가 0.90 Mg/ 이하, 인산 보유능이 85% 이상, $Al_0 + \frac{1}{2}Fe_0$ 의 함량이 2% 이상을 모두 만족할 경우(충족조건 2)나, 0.02mm에서 2mm까지의 고운 토양입자가 30% 이상, 인산보유능이 25% 이상, $Al_0 + \frac{1}{2}Fe_0$ 의 함량이 0.4% 이상, 화산성 유리질이 5% 이상, $[Al_0 + \frac{1}{2}Fe_0] * 15.625 + [화산성유리질]$ 의 값이 36.25 이상일 경우(충족조건 3)에 한 하고 있다(Soil Survey Staff, 2006). 우리나라와 같이 풍화가 많이 진전된 경 우에는 대개 충족조건 1에 의해 결정되는데, 용적밀도, 인산흡착력, $Al_0 + \frac{1}{2}Fe_0$ 의 함량의 세 가지 기준이 동시에 만족되어야 하며, 어느 한 가지 기준이라도 부 족한 경우에는 Andisols 요건을 갖추고 있다고 말할 수가 없다.

Acid oxalate 용액이 allophane, imogolite, Al-유기복합체 형태의 Al을 추

출하고, ferrihydrite와 Fe-유기복합체 형태의 Fe를 추출하기 때문에 acid oxalate 침출성($Al + \frac{1}{2}Fe$) 값을 가장 중요한 Andisols 분류기준의 하나로 이용하고 있다. 또한 allophane이나 ferrihydrite와 같이 결정성이 약한 광물이나 Al(Fe)-유기복합체가 주가 되는 토양의 가장 대표적인 특징은 용적밀도가 낮고 인산고정력이 큰 것이다. 따라서 토양수분함량 33kPa에서 용적밀도 0.90 Mg/m^3 이하, 그리고 인산 보유능이 85% 이상을 Andisols 분류기준으로 정하고 있다.

Andisols에는 Aquands, Gelyands, Cryands, Torrands, Xerands, Vitrandis, Ustands, Udands의 8개 아목이 있는데, 모재 특성에 의하여 분류되는 Vitrandis를 제외한 7개 아목은 기후인자에 의하여 분류된다(Soil Survey Staff, 2006). 제주도의 기후조건이 Udic 토양 수분권에 속하므로 제주도 화산회토는 Andisols의 8개 아목 중 Cryands, Gelyands, Torrands, Xerands, Ustands를 제외하여 Aquands, Vitrandis, Udands의 3개 아목 중 하나로 분류할 수 있다. 제주도 토양에서 Aquands는 보고되고 있지 않으며, 토양수분 보유력이 낮은 조립질 토양인 Vitrandis는 분석구 토양인 산방동 1개만 분류되고 있고, 그 외의 토양은 전부 Udands로 분류되고 있다. Udands에는 Placudands, Durudands, Melanudands, Hydrudands, Fulvudands, Hapludands의 6개 대군이 분류되고 있다. Placudands는 무기질 토양표면이나 andic 토양특성을 보유하는 유기질 층의 상부 경계 중 열린 깊이에서 100 cm 이내 깊이에 placic층을 보유하고, Hydrudands는 andic 특성을 보유하는 토층에서 1,500kPa 수분장력 하에서의 비풍건 토양의 수분함량이 100% 이상 되는 토양이나 이들 토양은 제주도 분포하는 것으로 보고되지 않고 있다. Durudands는 무기질 토양표면이나 andic 토양특성을 보유하는 유기질 층의 상부 경계 중 열린 깊이에서 100 cm 이내 깊이에 경화 층위를 보유하는 토양으로 하모통과 인성통 2개의 토양통이 보고되어 있다. 그러나 하모와 인성통 하부에 duripan이 존재하는 것이 아니라 암석층이 존재하므로 이들 토양을 Durudands로 분류할 수 없다. 하모통은 Melanudands로 분류할 수 있으며, 인성통은 Hapludands로 분류할 수 있을 것이다(Song *et al.*, 2008).

Melanudands는 melanic 감식표층을 보유하는 토양이다. melanic 감식표층은 무기질 토양표면이나 andic 토양특성을 나타내는 유기물 층의 상부경계 중

얕은 깊이에서 30cm 이내 깊이에 상부경계를 보유하고, 전체 40cm의 두께 중 30cm 이상의 누적두께를 갖는 전토층에서 andic 토양특성을 나타내고, 습윤 시 명도와 채도가 2 이하이며, melanic index 가 1.7 이하, 유기탄소함량이 중량으로 6%(토양유기물 10%) 이상이고, 모든 토층에서 유기탄소함량이 4% 이상이라는 조건을 충족시켜야 한다. Fulvudands는 melanic 감식표층의 요건 중 토색 기준을 만족시키지 못하는 토층을 보유하는 토양이며, 그 외의 토양은 Hapludands로 분류된다(Soil Survey Staff, 2006). 제주도에 분포하는 대부분의 Andisols이 Udands로 분류되고 있으며, Udands는 Melanudands, Fulvudands 및 Hapludands의 3개 대군으로 분류되고 있다. 따라서 제주도에 분포하는 Andisols에서 토양 중 유기물 함량은 대군을 분류하는 중요한 분류기준이 된다.

제주도 토양 중 Andisols이 아닌 토양에서 점토집적층인 argillic이나 kandic 층위를 보유하면 기준 깊이에서의 염기포화도(양이온 함)에 따라서 Ultisols, 또는 Alfisols로 분류할 수 있다. 즉 기준 깊이에서 양이온함으로서 염기포화도가 35% 미만이면 Ultisols, 35% 이상이면 Alfisols로 분류된다.

토양온도상은 토양의 속을 구분하는 기준으로 이용되는데, 제주도에는 해발 고도에 따라 thermic과 mesic 2개의 토양수분상을 보유하고 있다. 토층 50cm 깊이에서 연평균지온을 기준으로 8℃이상 15℃ 이하이고 여름철과 겨울철 온도차가 6℃ 이상일 때는 mesic, 15℃이상 22℃ 이하이고 여름철과 겨울철 온도차가 6℃ 이상일 때는 thermic으로 구분된다 (Soil Survey Staff, 2006).

제주도에 분포하는 Histosols, Andisols, Ultisols, Alfisols, Inceptisols, Entisols의 6개 토양 목의 개수와 분포면적을 고려하여 4~6개의 토양군으로 분류하고자 할 때 몇 가지의 토양특성으로 구분할 수 있다. 우선 $Al_0 + \frac{1}{2}Fe_0$ 함량 2%의 경계선으로 Andisols이 분포할 수 없는 지역을 구분해 낼 수 있으며, 유기탄소함량 6% (유기물함량 10%) 경계선은 Andisols 중에서 Melanudands /Fulvudands가 아닌 대군이 분포하는 지역을 분리하는 기준이 되고, 또 토양온도 15℃의 경계선은 토양속을 mesic인지 thermic인지 구분하는 기준이 된다.

3) 제주도 주요 토양특성의 예측 및 분포

Andisols은 교질 부분이 allophane, imogolite, ferrihydrite 등과 같은 short-order-range 광물이거나 Al-유기복합체가 주가 되는 토양으로서 (Soil Survey Staff, 1999), 풍화속도가 빠른 화산분출쇄설물을 주 모재로 하여 생성 발달된다(Buol et al., 2003).

화산회, 화산사, 부석, 분석, 용암과 같은 화산분출쇄설물은 풍화속도가 빠르기 때문에 용해도가 매우 낮은 Al과 Fe의 풍화속도도 빠르다. 유기물 급원이 많은 온난 습윤 기후 조건하에서 화산분출쇄설물의 급속한 풍화의 결과로 생성되는 Al 또는 Fe과 유기물이 결합하여 Al(Fe)-유기복합체 생성이 촉진된다. Al-유기복합체는 미생물 분해에 대한 저항성이 크기 때문에 다량의 유기물 집적을 유발시킨다. 유기물이 다량으로 집적되면 유기산의 해리에 의하여 pH는 더욱 낮아지며, pH가 낮고 유기산의 활성이 증대될수록 Al-유기복합체의 생성이 촉진된다(Dahlgren et al., 1991; Shoji et al., 1993). 그러나 pH가 5.0 이상으로 높아지거나 유기물 공급이 제한되면 Al-유기복합체 생성이 둔화되고, Al이 Si와 공침되어 allophane 또는 imogolite를 형성하고, Fe은 ferrihydrite로 침전된다(Mizota and van Reeuwijk, 1989; Buol et al., 2003).

Andisols과 비 Andisols을 구분하는 대표적인 토양 특성인 $Al_0 + \frac{1}{2}Fe_0$ 함량, 그리고 Andisols 대군을 구분하는데 중요한 요소인 유기탄소함량은 기후, 식생, 지형, 모재, 시간으로 나타낼 수 있는 여러 가지의 토양생성요인에 의하여 추정할 수 있을 것이다. 이러한 Andisols 특유의 특징과 환경요인을 정량적으로 비교하기 위해서는 각 요인에 대한 세부요인을 정량화할 필요가 있다.

우선 기후요인으로는 연평균기온과 강수량으로 표현할 수 있으며, 해발고도와 서로 연관되어 있다. 또 식생과 미생물의 활성은 증발산, 순일차생산량, 일사등과 밀접하게 관련이 있으므로, 이로부터 식생의 활성도를 간접적으로 추정할 수 있다. 또 토양생성은 에너지와 물질의 관여되는 과정으로 토양에너지에 의해 각 토양목의 생성조건을 밝힐 수 있다고 하고(Rasmussen and Tabor, 2007), 이러한 에너지 상태는 토양의 특성을 결정하는 요인이 된다고 하였다. 우리나라 토양의 생성과 발달에는 모재와 지형요인이 크게 영향을 준다는 보고가 있다

(Yun *et al.*, 2009). 이러한 지형의 영향은 주로 강우 시 산악지의 정상이나 능선에서는 침식이 발생하고, 물의 이동에 따라서 침식된 입자들이 하천 하류에 축적되는 것에 영향을 받으므로 이것을 지형습윤지수(Topographic Wetness Index)로 표현하여 분석한 연구도 있다(Gritzner *et al.*, 2001; McBratney *et al.*, 2003; Sørensen *et al.*, 2006). 하지만 제주도의 경우에는 중앙의 높은 한라산 때문에 넓은 하천이 발달하지 못하고 중산간지의 대지에 기생화산인 오름이 많이 분포하고 있어 독특한 지형을 나타내고 있으므로, 이를 나타낼 수 있는 요소의 개발이 필요하다. 주변 1km²범위에서의 평균 표고차는 제주도 오름 지형과 평탄지인지 표고가 급변하는 산악지인지를 잘 표현할 수 있다.

모재요인은 지표지질도를 이용하여 나타낼 수 있으나, 전체 제주도 면적의 약 93%가 현무암이고, 조면암 또는 조면암질 안산암이 6,600 ha로 3.6%, 사구나 성산층 등이 5,200ha로 약 2.8%를 점유하고 있어, 대부분의 지역에서 현무암 또는 scoria가 분포하고 있다. 시간요인은 화산쇄설물이 분출된 이후 지표상에 노출이 되어 풍화가 진전되고 토양이 발달된 정도를 나타내는 중요한 인자이지만, 약 1,000년이 경과되면 andic 토양특성이 나타난다는 보고가 있고(Shoji *et al.*, 1993), 제주도의 경우에는 약 1,000년 전에 마지막의 화산활동이 있었다는 기록이 있으나, 한라산에 대한 지질의 연구나 중산간지의 오름의 분포로 보아 수차례에 걸친 화산활동이 있는 것으로 추정되고 있다.

제1장에서는 우선 제주도 토양의 분류에 중요한 기준이 되는 $Al_0 + \frac{1}{2}Fe_0$ 과 토양유기물의 함량과 기후, 식생, 지형, 모재, 시간요인 등에 대하여 정량화가 가능한 세부요인들을, 기후요인에서는 연평균기온과 강수량, 식생요인에서는 순일차생산량, 증발산량, 일사량, 지형요인에서는 해발고도, 지형습윤지수, 주위와의 고도차, 토양형성에너지, 해안으로부터의 거리, 정상으로부터의 거리 등으로 구분하여, 비교해 보고 이러한 요인들이 어떻게 토양특성에 영향을 끼치는 지 분석하고, 이들로부터 함량을 예측할 수 있는 다중회귀모형을 개발하여 분포지도를 작성하고 현 토양도와 비교, 분석해 보고자 하였다.

2. 재료 및 방법

1) 토양시료의 채취 및 분석

다중회귀분석 및 공간통계방법을 이용하기 위해서 공간적으로 비교적 고르게 위치를 정하고 토양시료를 채취하여 분석 자료를 좌표정보와 연결시켜 분석을 수행하였다. 이를 위하여 제주도에서 321지점에서 좌표정보, 해발고도 정보와 함께 표토, 심토를 구분하여 토양시료를 채취하였다. 지점의 선정은 가급적 주관을 배제하고자 이동되는 거리를 고려하여 되도록 고르게 선정하고자 하였으며, 표토와 심토의 구분은 30cm 깊이를 기준으로 채취하였고, 토층이 얇을 경우에는 표토만 채취하거나 토색 등으로 명확히 구분이 될 경우에 이를 구별하여 채취하였다. 제주도 면적을 고려하면 평균적으로 5.8 km² 당 1지점의 토양시료를 채취하였다.

채취한 토양시료는 풍건하여 2mm 체로 친 후 분석에 이용하였다. 1N NaF pH와 ammonium oxalate 추출 알루미늄과 철 함량의 분석은 미국 농무성의 자연자원보존국에서 발간한 Soil Survey Laboratory Methods의 방법이 이용되 추출방법을 진탕기에서 암조건에서 추출하는 방법을 이용하였고(NRCS, 2004), 토양유기물함량은 국립농업과학원에서 발간한 토양 및 식물체 분석법에 있는 Tyurin법으로 분석하였다(NIAST, 2000).

토양 특성값으로는 토양분석에서 나온 값을 $Al_0 + \frac{1}{2}Fe_0$ 함량으로 계산하거나 직접 토양유기물의 함량으로부터 % 단위로 나타내어 분석에 이용하였다.

2) 환경요인의 추출

분석된 지점의 토양특성과 환경요인간과 비교분석을 하기 위하여 비교할 환경요인을 조사하거나, 조사가 어려울 경우에는 환경요인 지도를 작성하여 조사지점의 환경요인들을 추출하여 분석에 이용하였다.

기후요인으로는 연평균기온과 강수량을 세부요인으로 고려하였다. 조사지점



Figure 1. Sampling locations of soils for analysis.

의 연평균기온은 제주의 4개의 종관기상관측지점 평년기상자료에 해발고도에 따른 기온감율을 곱한 다음 거리역산가중법에 의해 연평균기온도를 작성한 후 조사지점의 값을 추출하였다. 강수량은 4개 기상관측지점 및 16개 자동기상관측장치의 10년 이상의 연강수량자료를 이용하여 해발고도와의 상관을 구한 후 이를 반영하여 연강수량도를 작성한 후 조사지점의 값을 추출하였다. 이 때 해발고도차를 반영하기 위해서 국토지리정보원에서 발간하는 1/5000 지형도에서 등고선과 표고점을 추출하여 30m × 30m 해상도의 격자형 지도파일로 전자표고모델(DEM, Digital Elevation Model)을 작성하여 이용하였다.

식생요인으로는 순일차생산량(NPP), 일사량(Rs), 증발산량(PMET)을 고려하였다. 순일차생산량은 연평균기온 및 강수량으로부터 추정하는 Leith 방법을 이용하였고(Grace *et al.*, 2006), 일사량은 Hargreaves방법에 해발고도효과를 반영한 방법으로 산정하였고(Bandyopadhyay *et al.*, 2008), 잠재증발산도는 Hargreaves 방법을 FAO Penman-Monteith 증발산량으로 환산하여 계산하였다(Allen *et al.*, 1998; Bandyopadhyay *et al.*, 2008).

지형요인에서는 해발고도(Z), 지형습윤지수(TWI), 1 km² 주위와의 고도차(EleDiff), 토양형성에너지(EEMT), 해안으로부터의 거리(Codi), 정상으로부터의 거리(Distfpeak) 등을 고려하였다.

$$R_s = (1 + 2.7 \cdot 10^{-5} \cdot Z) \cdot K_r \cdot (T_{\max} - T_{\min})^{0.5} \cdot R_a \quad (1)$$

R_s : mean daily solar radiation ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$)

T_{\max} , T_{\min} : maximum and minimum temperatures ($^{\circ}\text{C}$)

K_r : empirical coefficient (0.16)

R_a : extraterrestrial radiation ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$)

$$\text{NPP} = \min(\text{NPPT}, \text{NPPP}) \quad (2)$$

$\text{NPPT} = 3000 / (1 + \exp(1.315 - 0.0119 \cdot T))$

$\text{NPPP} = 3000 \cdot (1 + \exp(-0.00664 \cdot P))$

NPP : net primary production ($\text{g m}^{-2} \text{yr}^{-1}$)

T : mean annual temperature ($^{\circ}\text{C}$)

P : mean annual precipitation (mm yr^{-1})

해발고도는 토양시료 채취 시에 측정하였고, 지형습윤지수는 Moore (1993)가 제안한 방법에 의해서 계산하였고, 주위와의 고도차는 DEM을 이용하여 주변 1 km² 원 내의 평균해발고도와 중심 격자와의 해발고도차를 빼서 절대값을 이용하여 구했고, 토양형성에너지는 Rasmussen이 제시한 effective energy and mass transfer (EEMT)로 나타내었으며 (Minasny *et al.*, 2008; Rasmussen and Tabor, 2007), 해안으로부터의 거리는 해안과 중심 격자와의 최소 직선거리를, 정산으로부터의 거리는 중심 격자와 정산까지의 최소 직선거리를 구하였다.

$$\text{TWI} = \ln(a / \tan \beta) \quad (3)$$

TWI : topographic wetness index

a : local up slope contributing area ($\text{m}^2 \text{m}^{-1}$)

β : slope (degrees)

$$EEMT = 347.134 * (-0.5 * (((T - 21.5) / -10.1)^2) + (((P - 4412) / 1704)^2)) \quad (4)$$

EEMT : effective energy and mass transfer ($\text{MJ m}^{-2} \text{yr}^{-1}$)

T : mean annual temperature ($^{\circ}\text{C}$)

P : mean annual precipitation (mm yr^{-1})

3) 토양특성과 요인들 간 통계분석

지점별 $\text{Al}_0 + \frac{1}{2}\text{Fe}_0$ 와 토양유기물 함량으로 나타낸 토양특성과 환경요인들 간의 관계를 중회귀방법으로 분석하였다. 먼저 독립변수인 환경요인들을 살펴보았을 때 몇 요인들은 서로 상관계수가 매우 높게 나타나 서로 독립이라는 가정을 충족시키지 못하고 있었다. 이는 해발고도가 높아질수록 기온은 낮아지고, 강수량은 많아지는 등 여러 가지 환경요인이 매우 밀접한 관계가 있다는 점에서 피할 수 없는 문제이기도 하다. 이 문제를 해결하기 위하여 우선 독립변수인 환경요인들을 이용하여 주성분분석을 실시하여 변수를 축소하였다. 변수의 축소기준은 고유값이 1 이상이거나 누적 분산비율이 80% 이상까지로 하였다. 변수를 축소한 후에는 토양특성과 선택된 주성분간의 관계를 중회귀분석으로 나타내었고, 주성분과 환경요인 간의 관계는 각각의 주성분들을 생성하기 위한 환경요인의 변동을 고려하여 해석하였다. 주성분분석과 다중회귀분석은 SAS Enterprise (v.4.0)를 이용하여 수행하였다.

4) 토양특성지도의 작성

주성분분석에 의해 선정된 주성분을 각 환경요인 지도와 Eigenvalues를 이용하여 계산하여 주성분지도를 작성하였고, 이렇게 작성한 주성분지도와 중회귀분석을 통하여 구해진 모형에 따라 계산하여 토양유기물 및 $\text{Al}_0 + \frac{1}{2}\text{Fe}_0$ 함량 지도를 작성하였다. 지도데이터의 계산과 작성은 ESRI사에서 개발한 ArcGIS (v. 9.2)와 Spatial Analyst (v. 9.1)를 이용하였다.

3. 결과 및 고찰

1) 조사지점의 토양특성

표 1에는 조사, 분석된 시료의 유기물과 $Al_0 + \frac{1}{2}Fe_0$ 함량을 나타내었다. 조사지점 표토의 유기물함량은 평균 94.3 g kg^{-1} 이고 표준편차는 65.0 g kg^{-1} 이었고, 심토에서는 평균 82.6 g kg^{-1} 이고, 표준편차는 59.6 g kg^{-1} 로 평균적으로 표토가 심토보다는 유기물함량이 약간 높았으며, 표준편차는 유사하여 변이가 크지는 않았다. 조사 지점의 토양유기물 함량의 범위는 매우 넓어 표토에서는 최소 0 g kg^{-1} 에서부터 240 g kg^{-1} 까지, 심토에서는 최소 0 g kg^{-1} 에서부터 230 g kg^{-1} 까지 분포하고 있었다.

$Al_0 + \frac{1}{2}Fe_0$ 함량에서는 표토에서는 평균 3.29%이고 심토에서는 3.67%로 심토가 표토보다 약간 높은 경향이었고, 표준편차에서도 표토의 1.96%에 비하여 심토에서 2.18%로 높은 경향이였다. $Al_0 + \frac{1}{2}Fe_0$ 함량의 범위도 표토에서 0.05% ~ 9.22% 이었고, 심토에서는 0.0% ~ 9.3%로 표토와 심토가 비슷한 범위를 보였지만, 조사지점 간에도 범위가 매우 넓게 분포하고 있어, 제주도에 Andisols이 아닌 토양과 Andisols인 토양이 공존하고 있음을 나타내고 있었다.

Table 1. Statistics of soil organic matter and contents of $Al_0 + \frac{1}{2}Fe_0$ at sampled 321 locations in Jeju Island.

soil layer	Values	Soil organic matter (g kg^{-1})	$Al_0 + \frac{1}{2}Fe_0$ (%)
surface soil	mean	94.3	3.29
	SD	65.0	1.96
	min	0.1	0.05
	max	240	9.22
subsoil	mean	82.6	3.67
	SD	59.6	2.18
	min	0.0	0.0
	max	230	9.3

2) 조사지점의 환경요인

조사지점의 환경요인에 대하여 기후, 식생, 지형에 관련된 세부요인들로 구분하고 각 지점의 평균, 표준편차, 최소, 최대값을 조사 추출하여 나타내었다.

기후와 관련된 기온과 강수량 분포를 보면, 조사지점들의 연평균기온은 15℃이고 최소 8.6℃에서 최대 16.3℃의 범위를 나타내고 있었다. 제주지방기상청의 자료에 의하면 제주도는 기후학적으로 아열대기후대에서 온대기후대로의 전이지대에 위치하고 있다. 따라서 부분적으로 아열대성 기후를 나타내기도 하며, 조사지점의 연평균기온의 범위도 7.7℃로 제주도의 면적이 1,848km²인 것을 고려하면 매우 큰 편이다. 일반적으로 50cm 깊이의 지중온도는 기온보다 높기 때문에 지온 15℃를 기준으로 하여 토양의 온도상이 다른 토양들이 분포될 것으로 예상되었다. 조사지점의 연평균강수량은 1,748mm이었지만 강수량의 범위는 3,100mm에 달할 정도로 조사지점 간 강수량의 차이가 컸다. 제주지방기상청에서 주로 측정하는 해안지방의 연평균강수량도 서부지역이 1,095mm에서 남부지역의 1,850mm로 800mm 이상의 차이를 보인다고 보고되어 있다. 또 중앙의 산악지역에서는 산악효과 때문에 연강수량이 해안지방의 몇 배에 달할 정도로 많다고 알려져 있으므로 이러한 산악효과에 의해 제주도 중앙의 산악지에는 강수량이 매우 많았다. 전체적으로 제주도는 기후요인에서 중앙의 한라산을 중심으로 하여 해발고도의 차가 크에 따라 지역간에 온도의 차이가 심하고, 또한 해양성 기후에 산악효과가 더하여 지역 간의 강수량 차이도 심하게 나타나고 있었으며, 이러한 기후조건의 차이가 다양한 토양들의 생성과 발달에 큰 영향을 주고 있다고 예상된다(Moon *et al.*, 2009).

Table 2. Statistics of temperature and precipitation at sampled 321 locations.

	Temperature(°C)	Precipitation(mm yr ⁻¹)
mean	14.6	1,748
SD	1.3	530
min	8.6	1,012
max	16.3	4,111

식생요인과 관련된 세부요인으로 조사지점의 순일차생산량(NPP), 일사량(Radiation), 잠재증발산량(ET) 등이 고려되었다. 순일차생산량은 식생의 생장과 관련된 요인으로 조사지점에서는 평균 $1,736 \text{ g m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ 이고, 최소 $1,250 \text{ g m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ 에서 $1,948 \text{ g m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ 이었다. 제주도 전 지역에서는 중산간지역과 동남부 지역에서 높은 반면 중앙의 기온이 낮은 산악지역이나 서부의 강우량이 부족한 지역에서는 낮게 나타나는 경향이였다. 순일차생산은 기후요소인 온도, 강수량과 관련이 있으며, 대체로 온도가 높고 강우량이 많은 곳에서 높게 나타난다. 일사량은 평균 $12.6 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ 이었고, 최소 $10.9 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ 에서 최대 $15.0 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ 로 $4.1 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ 의 범위를 나타내었다. 연간 잠재증발산량은 평균 $1,026 \text{ mm}$ 이었고 최소 968 mm 에서 최대 $1,076 \text{ mm}$ 까지 범위는 110 mm 이었다. 이렇게 잠재증발산량은 대개 $1,000 \text{ mm}$ 내외이었으나, 강우량은 지역에 따라 $1,000 \text{ mm}$ 에서 $4,000 \text{ mm}$ 이상까지 폭 넓게 나타나고 있으므로, 식물이 이용하는 수분수지 측면에서는 지역별로 또는 계절별로 차이가 심하게 나타났으며, 이것 또한 토양의 생성, 발달에도 큰 영향을 미치는 요인으로 예상되었다(Moon *et al.*, 2009).

Table 3. Statistics of net primary product, radiation and potential evapotranspiration at sampled 321 locations.

	Net primary product ($\text{g m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$)	Radiation ($\text{MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$)	Potential evapotranspiration (mm yr^{-1})
mean	1,736	12.6	1,026
SD	126	0.9	24
min	1,250	10.9	968
max	1,948	15.0	1,076

지형요인과 관련된 세부요인으로는 해발고도(Elevation), 지형습윤지수(TWI, Topographic wetness index), 주변 1 km^2 지역 내의 고도차, 토양생성에너지(EEMT), 해안으로부터의 거리, 정상으로부터의 거리 등의 자료를 작성하였다. 조사지점의 해발고도는 평균 180 m 이었고, 가장 낮은 곳은 해안 부근의 해발고도가 5 m 인 지점이었고 가장 높은 곳은 한라산 지역의 해발고도가 $1,175 \text{ m}$ 가

되는 지점이었다. 지형습윤지수는 유역 내에서 수계를 따라 정상부근에서는 낮고 하천의 하류에서는 높게 계산되도록 고안된 지수로(Moore, 1993; Sørensen *et al.*, 2006), 제주도 전체에서는 한라산이나 오름의 정상부에서는 최소 6.7의 값을 보여주고 있었고, 해안가 하천의 하류에서 최대 22.6의 값을 나타내고 있었다. 추출된 조사지점의 지형습윤지수는 최소 8.3에서 최대 15.5의 값을 보여주고 있었으며, 평균은 12.6이었다. 주변 지역 내의 해발고도차는 가까운 지역 범위에서 해당지역의 지형이 얼마나 복잡한 지를 나타내 주는 지표로 주변지형이 평탄할수록 0에 가까워지고 산악지 등 복잡해질수록 높은 값을 가지게 되므로 제주도와 같이 평탄지 가운데 오름이 있는 지형을 잘 표현하게 된다. 제주도 전역에서는 해발고도차가 최저 0m에서부터 최대 174m까지 분포하고 있었고, 조사지점에서는 최저 2.7m에서 최대 71m의 범위를 보이며 평균은 17m 정도이었다. 토양생성에너지는 Rasmussen and Tabor(2007)가 기후여건 상 풍화가 잘 진전되어 토양을 생성하는 조건을 표현하기 위해 제안한 개념으로 온도나 강수량이 일정한 값에 수렴할수록 토양생성에너지는 높아지게 된다. 제주도 전역에서는 최저 $37\text{MJ m}^{-2} \text{yr}^{-1}$ 에서 $205\text{MJ m}^{-2} \text{yr}^{-1}$ 까지의 범위를 나타내고 있었고, 강우량이 많고 온도도 너무 낮지 않은 동부 중산간지역이 가장 높았고 온도가 낮은 한라산 정상부나 온도도 높지 않고 강우량이 적은 북부 해안지역에서 낮게 나타났다. 조사지점은 평균이 $82\text{MJ m}^{-2} \text{yr}^{-1}$ 이었고, 최소 $41\text{MJ m}^{-2} \text{yr}^{-1}$ 에서 최대 $195\text{MJ m}^{-2} \text{yr}^{-1}$ 까지의 범위를 보였다. 해안으로부터의 직선거리는 조사지점의 평균이 4.7km이었고, 최소 0.1 km에서 최대 14km까지의 범위를 보이고 있었다. 한라산 정상으로부터의 거리는 조사지점의 평균이 22km이었고, 최소 3.5km에서 최대 37km의 범위를 나타내고 있었다.

제주도의 형태가 중심부에 한라산 정상이 있고 해안으로 갈수록 해발고도가 낮아지는 타원형이기 때문에, 해발고도는 해안으로부터의 거리, 정상으로부터의 거리와 상당한 관련이 있으며, 주변지역과의 표고차도 해발고도가 높아질수록 커지는 경향이 나타나는 등 전체적으로 지형요인으로 고려된 여러 가지의 세부요인들도 서로 밀접하게 상관을 가질 것으로 예상되었다.

Table 4. Statistics of elevation, topographic wetness index, elevation difference, soil forming energy, distance from coast, and distance from the peak at sampled 321 locations.

	Elevation (m)	TWI	Elevation difference (m)	Soil forming energy ($\text{MJ m}^{-2} \text{yr}^{-1}$)	Distance from coast (m)	Distance from peak (m)
mean	180	12.6	16.9	81.9	4,696	21,774
SD	197	1.1	11.0	30.8	3,515	7,835
min	5	8.3	2.7	40.6	100	3,494
max	1175	15.5	71.1	195.1	14,019	37,209

조사지점의 기후, 식생, 지형의 각 세부요인에 대하여 상관계수를 구해본 결과 해발고도는 다른 10개의 세부요인 중 증발산량과 순일차생산량을 제외한 8종류와 0.5이상이나 -0.5이하의 정 또는 부의 상관을 보이고 있었고, 온도와 정상으로부터의 거리와는 부의 상관, 강수량, 일사량, 토양생성에너지, 해안으로부터의 거리와는 정의 상관을 보이고 있었다. 온도와 강수량도 7종류의 다른 세부요인과 상관이 높았다. 일사량, 토양생성에너지, 해안으로부터의 거리, 정상으로부터의 거리, 주위와의 해발고도차 등의 요인도 다른 요인들과 정 또는 부의 높은 상관을 보이고 있었다. 이것은 여러 가지 환경요인의 추정에 해발고도, 온도, 강수량 등의 요소가 반영되었기 때문이기도 하지만, 제주도 지역이 중심부의 한라산으로부터 타원형의 해안지대로 경사를 이루고 있어 전체적으로 고려된 환경요인의 형성에 한라산이 미치는 효과가 크게 작용하기 때문인 것으로 판단된다.

이렇게 여러 가지 요인의 상관계수가 높게 나타나고 있으므로 환경요인들 간에 서로 독립적이라는 가정이 성립되지 않고 통계에서 변수로 이용할 때 다중공선성이 나타나게 된다. 이러한 다중공선성이 있는 요인들을 이용하여 토양유기물 함량이나 $\text{Al}_0 + \frac{1}{2}\text{Fe}_0$ 함량 등 토양특성을 종속변수로 보고 분석할 경우에 요인들의 다중공선성을 적절하게 제거해 주어야 한다.

Table 5. Correlation matrix between environmental factors collected at sampled 321 locations.

	Elevation	*TWI	Temp	Rain	ET	NPP	Radiation	EEMT	Codi	DistfPeak
TWI	-0.362									
Temp	-0.983	0.360								
Rain	0.811	-0.362	-0.820							
ET	0.052	-0.010	0.064	-0.340						
npp	-0.433	0.019	0.394	-0.041	-0.377					
Radiation	0.610	-0.313	-0.683	0.836	-0.560	0.252				
EEMT	0.685	-0.341	-0.688	0.971	-0.371	0.078	0.805			
Codi	0.837	-0.261	-0.840	0.696	-0.029	-0.320	0.521	0.623		
DistfPeak	-0.728	0.358	0.655	-0.656	-0.373	0.080	-0.443	-0.622	-0.564	
Elediff	0.767	-0.457	-0.724	0.622	0.177	-0.241	0.475	0.543	0.517	-0.733

* TWI, topographic wetness index; Temp, temperature; Rain, precipitation; ET, potential evapotranspiration; NPP, net primary production; EEMT, soil forming energy; Codi, distance from coast; DistfPeak, distance from peak. All abbreviations are summarized at front pages.

3) 설명변수의 축소를 위한 주성분의 선택

조사지점의 환경요인들 간의 상관관계가 높게 나타나고 있기 때문에 발생하는 다중공선성을 치유하고자, 세부 환경요인들에 대하여 주성분분석을 수행하여 환경요인 변수의 차원을 축소하고, 새로운 변수를 이용하여 환경요인과 토양특성 간의 관계를 알아보하고자 하였다. 321개소의 조사지점에 해당하는 연평균기온, 연강우량, 순일차생산량, 일사량, 잠재증발산량, 해발고도, 지형습윤지수, 주위 1 km² 지역 내의 고도차, 토양형성에너지, 해안으로부터의 거리, 정상으로부터의 거리 등 총 11종의 환경요인을 변수로 놓고 주성분 분석을 실시하였다. 주성분분석에서 주성분의 수는 고유치가 1이상이거나 설명 가능한 누적 분산이 80% 이상이 되도록 선택하였다. 주성분분석의 결과 Prin 1, Prin 2, Prin 3로 표현된 3종의 주성분으로 전체 분산의 84%를 설명할 수 있으므로 주성분의 수를 3개로 선택하였다.

Table 6. Eigenvalues and cumulative variance of the correlation matrix of environmental variables.

Principal components	Eigenvalue	Proportion	Cumulative
1	6.142	0.558	0.558
2	2.085	0.190	0.748
3	1.058	0.096	0.844
4	0.746	0.068	0.912
5	0.384	0.035	0.947
6	0.300	0.027	0.974
7	0.166	0.015	0.989
8	0.059	0.005	0.995
9	0.050	0.005	0.999
10	0.006	0.001	1.000
11	0.005	0.001	1.000

상위 4개의 주성분에 대하여 11개의 환경요인의 Eigenvector 값은 표 7과 같고, 각각의 환경요인과 주성분과의 상관계수는 표 8과 같다. 주성분 1은 해발고도, 강우량, 일사량, 토양생성에너지, 해안으로부터의 거리, 주위와의 고도차와 모두 0.5%의 신뢰수준 이상에서 정의 상관을 가지고 있었고, 지형습윤지수, 온도, 순일차생산량, 정상으로부터의 거리와 0.5% 신뢰수준 이상에서 부의 상관을 가지고 있었다. 주성분 2는 강우, 순일차생산량, 일사량, 토양생성에너지, 정상으로부터의 거리와 정의 상관을, 해발고도, 증발산량, 주위와의 고도차와 부의 상관을 가지고 있었다. 주성분 3은 해발고도, 지형습윤지수, 해안으로부터 거리, 정상으로부터 거리와는 정의 상관을, 온도, 증발산량, 순일차생산량, 주위와의 고도차와 부의 상관을 나타내었다.

Table 7. Eigenvectors for each principal component with 11 environmental variables.

Variables	Prin 1	Prin 2	Prin 3	Prin 4
Elevation	0.380	-0.168	0.159	-0.007
Topographic wetness index	-0.189	0.026	0.527	0.786
Temperature	-0.379	0.099	-0.214	0.066
Precipitation	0.377	0.184	0.047	0.074
Evapotranspiration	-0.047	-0.615	-0.312	0.275
Net primary product	-0.081	0.503	-0.512	0.331
Radiation	0.313	0.382	-0.002	0.029
Soil forming energy	0.347	0.248	-0.027	0.132
Distance from coast	0.330	-0.098	0.284	0.028
Distance from peak	-0.312	0.202	0.380	-0.410
Elevation difference	0.318	-0.194	-0.254	-0.013

Table 8. Correlation coefficients and probabilities between principal components and environmental variables.

Variables	Prin 1	Prin 2	Prin 3	Prin 4
Elevation	0.942 <.0001	-0.243 <.0001	0.163 0.003	-0.006 0.914
Topographic wetness index	-0.468 <.0001	0.038 0.502	0.542 <.0001	0.679 <.0001
Temperature	-0.939 <.0001	0.142 0.011	-0.220 <.0001	0.057 0.310
Precipitation	0.934 <.0001	0.266 <.0001	0.048 0.391	0.064 0.252
Evapotranspiration	-0.116 0.037	-0.888 <.0001	-0.321 <.0001	0.237 <.0001
Net primary product	-0.201 0.000	0.727 <.0001	-0.526 <.0001	0.286 <.0001
Radiation	0.776 <.0001	0.551 <.0001	-0.002 0.968	0.025 0.650
Soil forming energy	0.861 <.0001	0.358 <.0001	-0.028 0.621	0.114 0.042
Distance from coast	0.817 <.0001	-0.141 0.012	0.292 <.0001	0.025 0.661
Distance from peak	-0.772 <.0001	0.292 <.0001	0.391 <.0001	-0.354 <.0001
Elevation difference	0.787 <.0001	-0.281 <.0001	-0.261 <.0001	-0.012 0.835

주성분과 환경요인간의 관계를 보다 명확하게 나타내기 위하여 주성분 1과 주성분 2의 좌표 위에 각 환경요인과의 상관계수를 나타내었다. 주성분 1의 축에는 해발고도, 강수량, 해안으로부터의 거리, 일사량, 토양생성에너지, 주위와의 표고차 등이 양의 방향으로 밀집해 있고, 온도, 정상으로부터의 거리, 지형습윤지수 등이 음의 방향으로 밀집해 있는 것으로 보아 제주도 중심부의 한라산 정상으로 갈수록 높아지고, 해안 주변으로 갈수록 낮아지는 효과로 판단되었다(산악효과). 주성분 2의 축에는 순일차생산량, 일사량 등이 양의 방향에 있고, 증발산량은 음의 방향에 있어 식물생산과 관련이 있는 효과로 추정되었다(식생효과). 주성분 3의 축에는 지형습윤지수, 정상으로부터 거리 등이 약하게 양의 방향에 있었고, 순일차생산량, 증발산량 등이 약하게 음의 방향에 위치하고 있어 해석이 어려웠다(복잡효과).

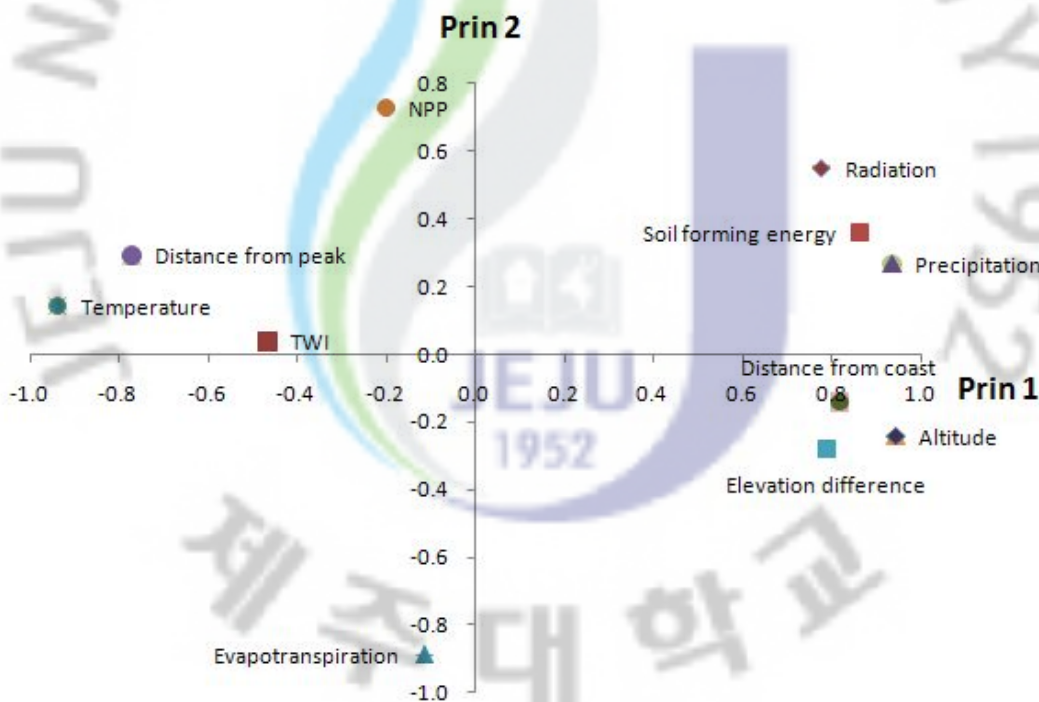


Figure 2. Scatter plot of correlation coefficients between 11 variables and principal components on principal component1 and principal component 2 axis.

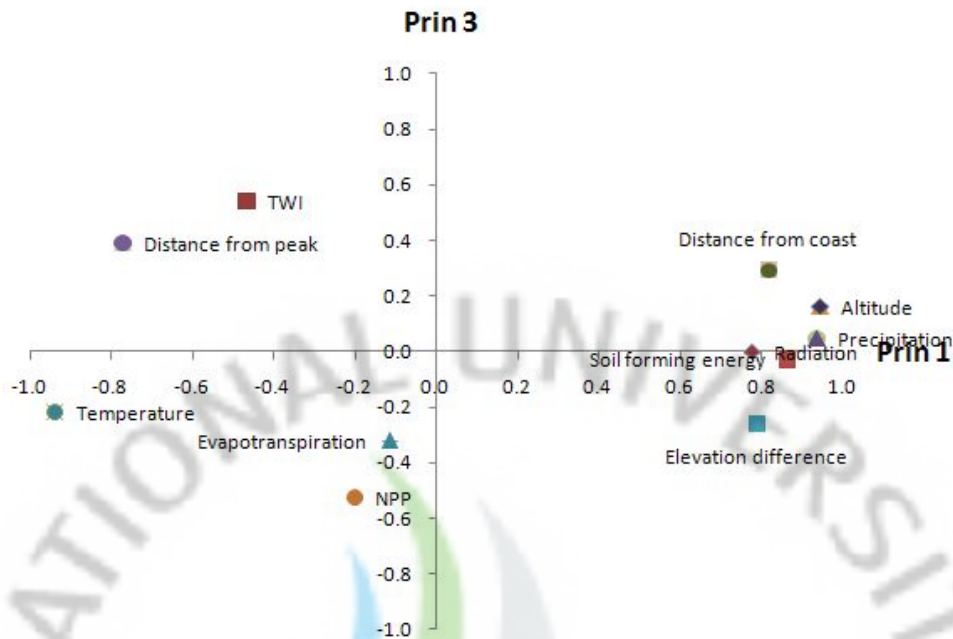


Figure 3. Scatter plot of correlation coefficients between 11 variables and principal components on principal component 1 and principal component 3 axis.

주성분분석에 의하여 다중공선성이 있던 변수들은 서로 독립적인 몇 개의 주성분으로 축소되었으며, 각 주성분의 값은 11개의 환경요인에 대한 Eigenvectors와 각 환경요인의 표준화된 값으로부터 아래의 식을 이용하여 구할 수 있다. 주성분분석의 결과를 보면 총 분산의 84.4%가 주성분 1, 2, 3의 세 종에 의하여 설명이 가능하고, 특히 주성분 1 하나가 전체 분산의 55.8%를 설명할 수 있었다. 이는 제주도 중심부에 해발고도가 높은 한라산이 있는 산악효과가 기후(온도, 강수량), 식생(순일차생산량, 일사량, 잠재증발산량), 지형(해발고도, 지형습윤지수, 주변 1 km² 지역 내의 고도차, 토양생성에너지, 해안으로부터의 거리, 정상으로부터의 거리)요인들에 의해 형성되는 변이의 50% 이상의 많은 부분을 설명할 수 있음을 나타내고 있다. 다음으로 식생의 생육과 관련이 있다고 추정되는 주성분 2에 의하여 환경요인에 의한 총 변이의 19%에 대한 설명이 가능하고, 주성분 3에 의하여 총 변이의 약 10%에 대한 설명이 가능하여 처음에 고려된 환경요인들이 11가지나 되어도 서로 깊은 상호관련성을 가진 요인들인 것으로 판단되었다.

$$\begin{aligned} \text{Prin 1} = & \text{Elevation} * 0.380 + \text{TWI} * (-0.189) + \text{Temperature} * (-0.379) + \\ & \text{Precipitation} * 0.377 + \text{Evapotranspiration} * (-0.047) + \text{NPP} * (-0.081) + \\ & \text{Radiation} * 0.313 + (\text{Soil forming energy}) * 0.347 + \\ & (\text{Distance from coast}) * 0.330 + (\text{Distance from peak}) * (-0.312) + \\ & (\text{Elevation difference}) * 0.318 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Prin 2} = & \text{Elevation} * (-0.168) + \text{TWI} * (0.026) + \text{Temperature} * (0.099) + \\ & \text{Precipitation} * 0.184 + \text{Evapotranspiration} * (-0.615) + \text{NPP} * (0.503) + \\ & \text{Radiation} * 0.382 + (\text{Soil forming energy}) * 0.248 + \\ & (\text{Distance from coast}) * (-0.098) + (\text{Distance from peak}) * (0.202) + \\ & (\text{Elevation difference}) * (-0.194) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Prin 3} = & \text{Elevation} * 0.159 + \text{TWI} * (0.527) + \text{Temperature} * (-0.214) + \\ & \text{Precipitation} * 0.047 + \text{Evapotranspiration} * (-0.312) + \text{NPP} * (-0.512) + \\ & \text{Radiation} * (-0.002) + (\text{Soil forming energy}) * (-0.027) + \\ & (\text{Distance from coast}) * 0.284 + (\text{Distance from peak}) * (0.380) + \\ & (\text{Elevation difference}) * (-0.254) \end{aligned}$$

표준화된 환경요인 값으로부터 서로 독립적이 주성분을 계산할 수 있는 식을 구하여, 이 주성분 계산식을 바탕으로 각각의 주성분에 대한 분포도를 작성하였다. 산악효과로 명명한 주성분 1의 분포도를 보면 한라산이 있는 중심지역이 높고 저지대로 갈수록 또 북부지역으로 갈수록 값이 낮아지는 형태를 나타내는 변수였으며, 식생효과로 명명한 주성분 2를 나타낸 분포도는 동부와 동남부지역이 높고 서북부지역으로 갈수록 낮아지는 변수였고, 복잡효과로 명명한 주성분 3은 한라산 정상부에서 동서방향으로 크고 북부와 남부의 해안가에서 가장 작은 값을 나타내는 변수였다.

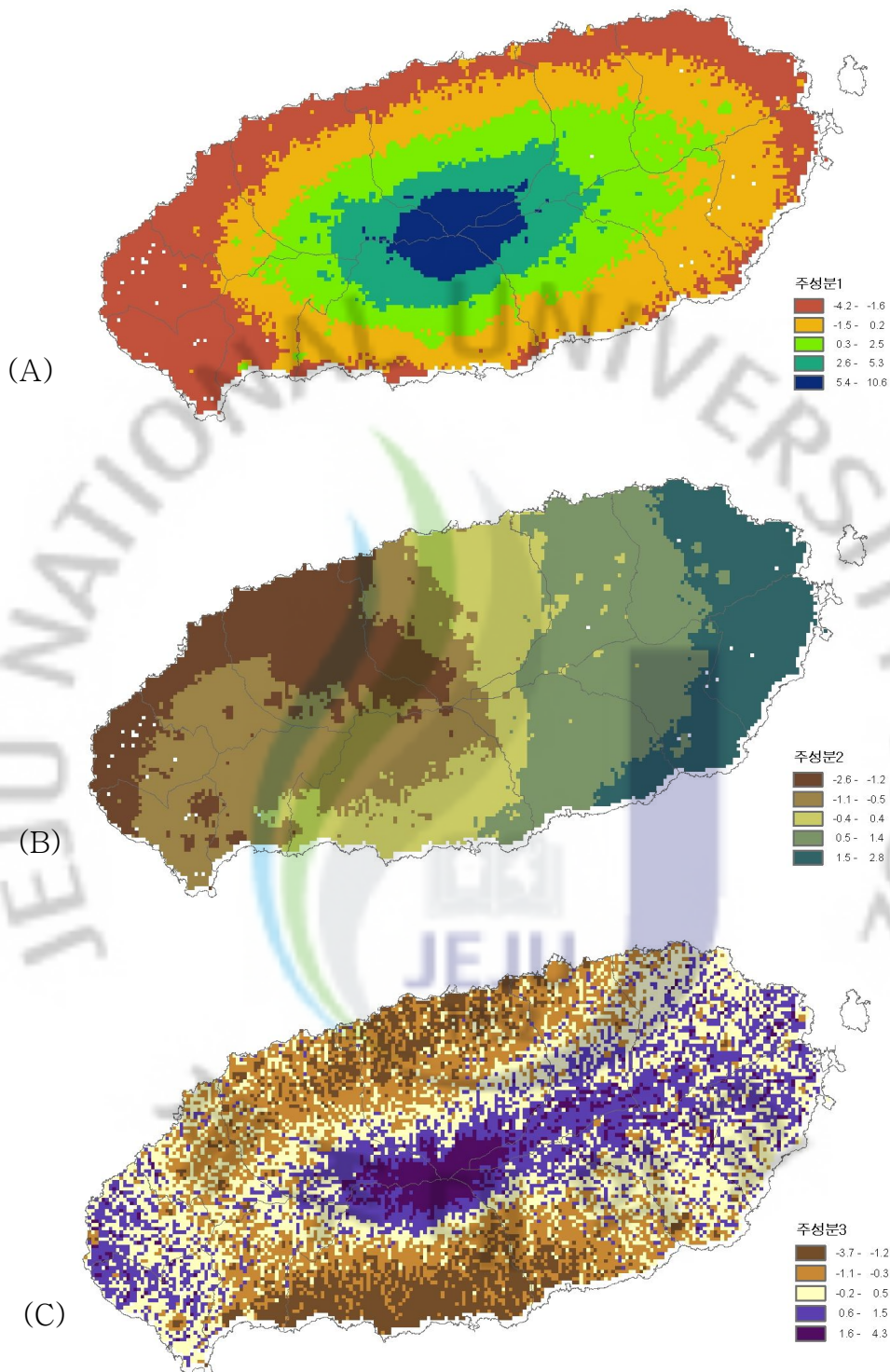


Figure 4. Maps of principal component 1(A), principal component 2(B) and principal component 3(C) from environmental factors.

4) 중회귀분석에 의한 토양유기물과 $Al_0 + \frac{1}{2}Fe_0$ 함량의 추정

주성분분석을 통하여 다중공선성을 가지는 환경요인들을 3개의 주성분으로 축소한 다음, 이를 이용하여 토양유기물과 $Al_0 + \frac{1}{2}Fe_0$ 함량 등 토양특성을 다중회귀분석을 통하여 추정할 수 있는 모형을 작성하였다.

먼저 환경요인으로부터 축소된 주성분 1, 2, 3과 토양유기물함량의 관계를 산점도와 1차 회귀직선을 이용하여 상호관계를 알아보았다. 토양유기물의 함량은 주성분 1, 2, 3과 양의 상관관계를 가지고 있었으며, 특히 주성분 1과의 관계가 분명하게 나타나고 있었고, 주성분 2, 주성분 3의 순으로 양의 관계가 나타나고 있었다. 따라서 토양유기물 함량의 변이에는 3개의 주성분 중에서 주성분 1의 효과가 가장 큰 것으로 판단되었다.

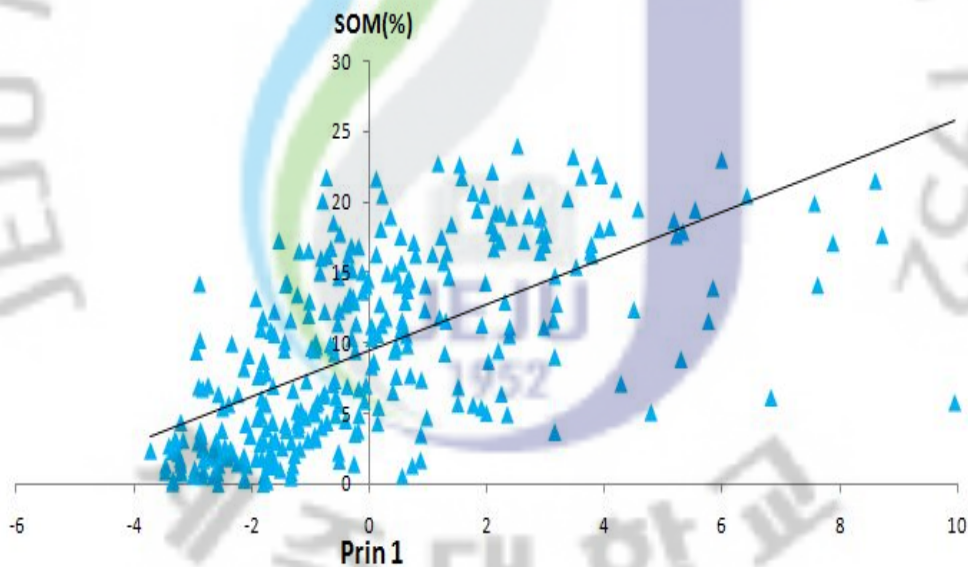


Figure 5. Relationship between principal component 1 and soil organic matter.

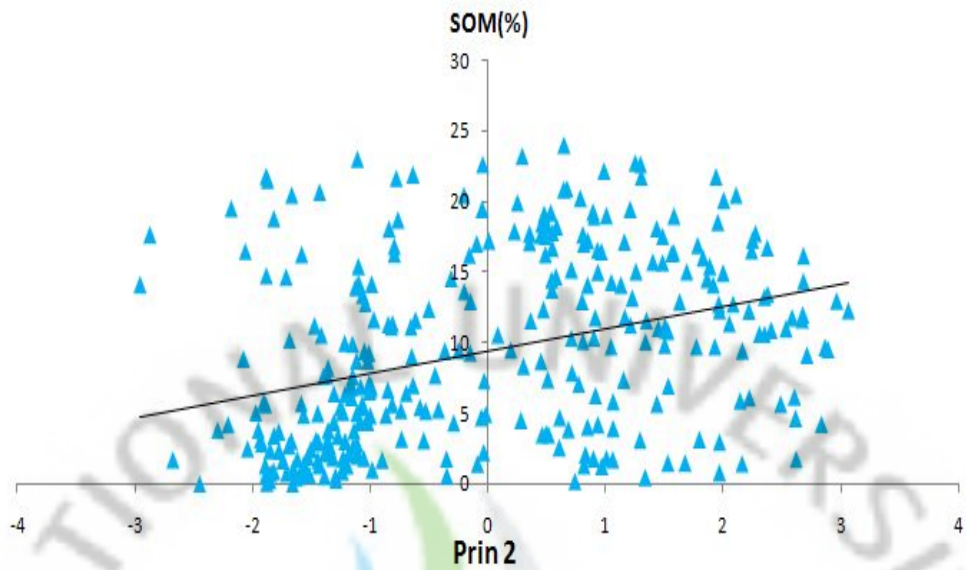


Figure 6. Relationship between principal component 2 and soil organic matter.

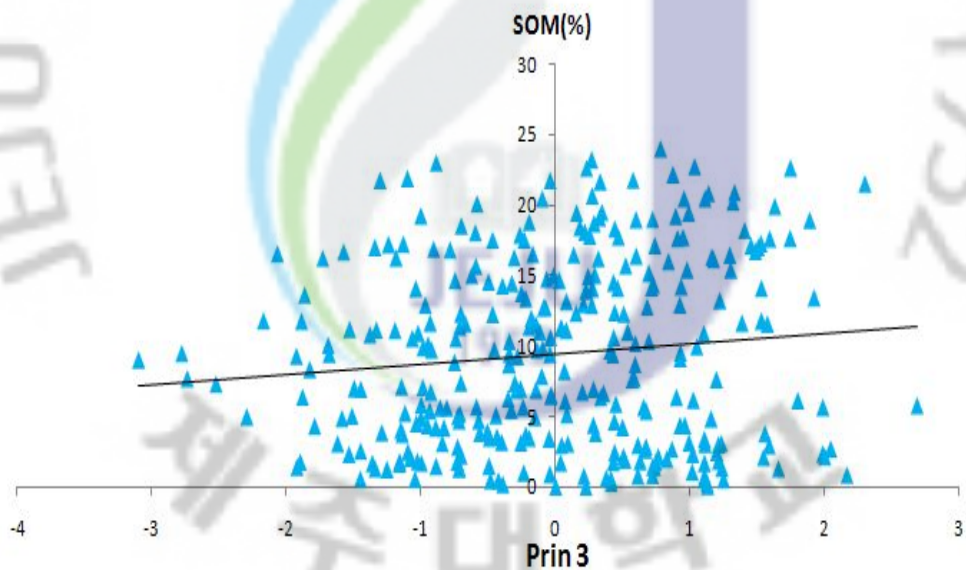


Figure 7. Relationship between principal component 3 and soil organic matter.

주성분 1, 2, 3과 토양유기물함량의 관계를 알아보기 위하여 다중회귀분석을 실시한 결과를 표 9에 나타내었다. 세 개의 변수로부터 유기물함량을 추정할 수

있는 회귀모형은 유의수준 0.05에서 타당하였다(p값이 0.0001 이하). 또 조정된 R² 값으로부터 판단하면 전체 유기물함량 변동의 52.4% 정도 이 회귀모형에 의하여 설명될 수 있었다.

Table 9. Analysis of variance with soil organic matter and 3 principal components by multiple regression analysis.

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Pr > F
Model	3	7145	2382	118.3	<.0001
Error	317	6382	20		
Root MSE	4.49	R-Square	0.528		
Dependent Mean	9.43	Adj R-Sq	0.524		

Table 10. Parameter estimates of each variable for estimation of soil organic matter contents by multiple regression analysis.

Variable	DF	Parameter Estimate	Standard Error	t Value	Pr > t	Variance Inflation
Intercept	1	9.428	0.250	37.7	<.0001	0
Prin 1	1	1.642	0.101	16.2	<.0001	1
Prin 2	1	1.584	0.174	9.1	<.0001	1
Prin 3	1	0.716	0.244	2.9	0.0036	1

표 10에서 토양유기물함량을 추정하기 위한 상수와 회귀계수가 제시되었고 각 회귀계수들은 0.05 유의수준에서 유의하였다. 다음의 회귀식은 세 개의 주성분 1, 2, 3을 이용하여 토양유기물의 함량을 추정하는 모형으로, 이를 이용하여 추정된 토양유기물 함량과 측정된 값을 그림 8에 비교하였다.

$$\text{SOM}(\%) = 9.428 + 1.642 * (\text{Prin } 1) + 1.584 * (\text{Prin } 2) + 0.716 * (\text{Prin } 3) + \varepsilon$$

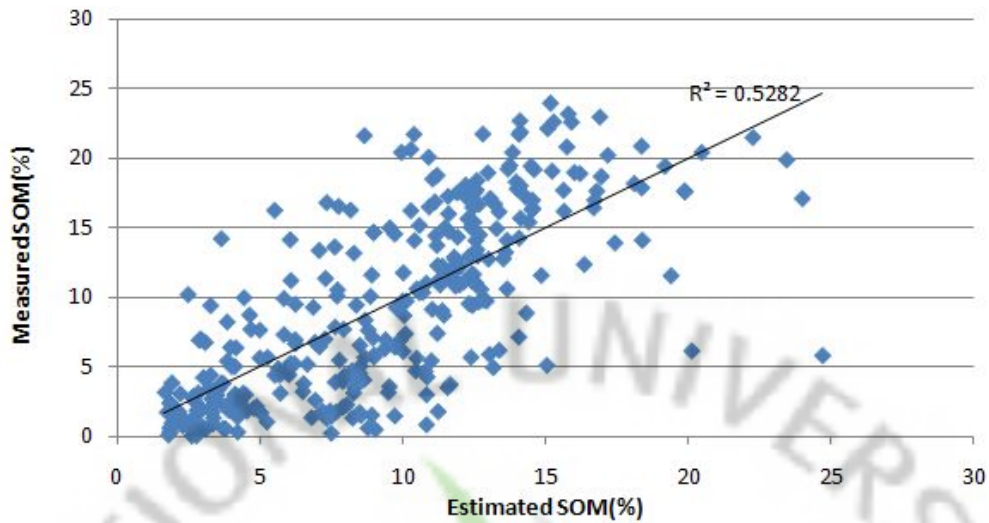


Figure 8. Measured and estimated soil organic matter contents with 3 principal components in surface layer.

다음으로 $Al_0 + \frac{1}{2}Fe_0$ 함량을 추정할 수 있는 회귀모형을 작성하기 위하여 주 성분 1, 2, 3을 설명변수로 하여 후진제거 방식에 의한 중회귀분석을 실시하였다. 먼저 주 성분 1, 2와 $Al_0 + \frac{1}{2}Fe_0$ 함량의 관계를 산점도로 표현한 결과를 그림 9와 그림 10에 나타내었다. $Al_0 + \frac{1}{2}Fe_0$ 함량은 토양유기물과 다르게 주 성분 1, 2와는 양의 상관관계를 가지고 있었으나, 주 성분 3과는 통계적으로 유의한 결과를 얻을 수가 없었다. 또 주 성분 1보다는 주 성분 2에서 더 기울기가 크게 나타났다.

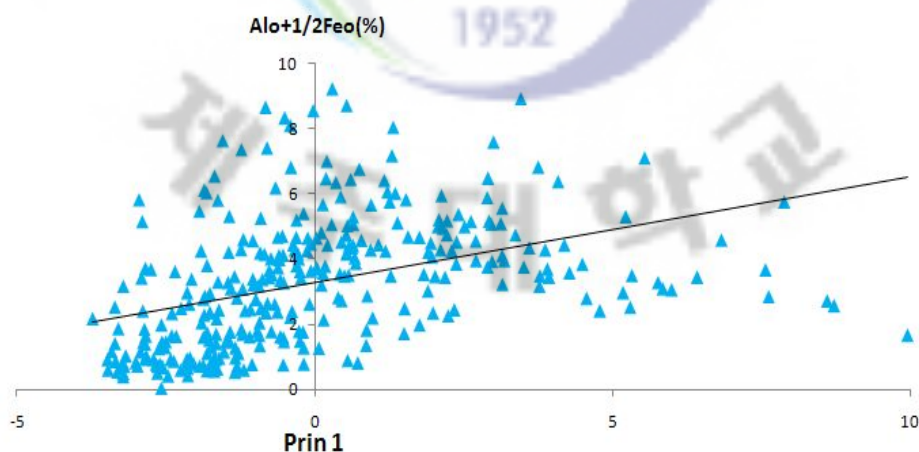


Figure 9. Relationship between principal component 1 and $Al_0 + \frac{1}{2}Fe_0$ contents.

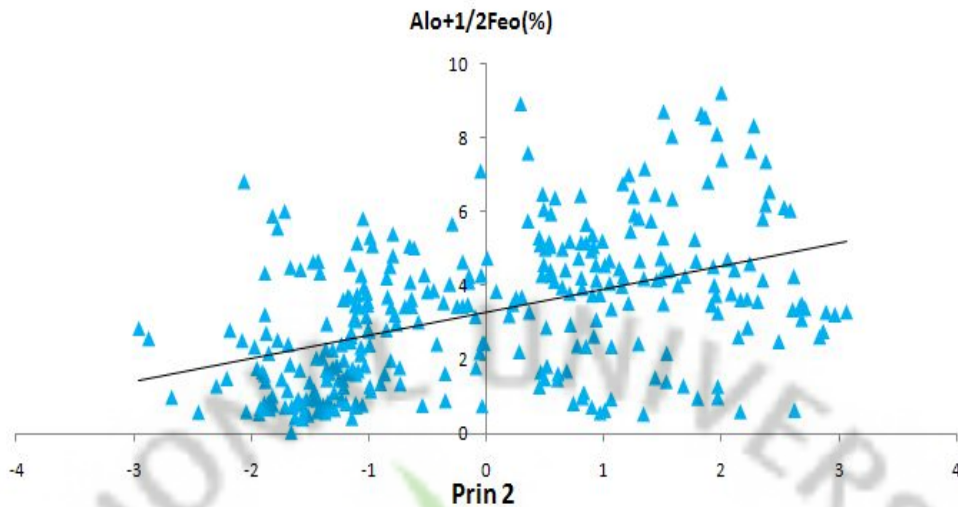


Figure 10. Relationship between principal component 2 and $Al_2O_3 + \frac{1}{2}Fe_2O_3$ contents.

후진제거 방식에 따른 중회귀분석에 의한 결과를 보면 주성분 1, 2, 3의 세 개의 변수로 설명할 때보다 주성분 1, 2의 두 개의 변수로 설명할 때의 F 값이 더 높아 두 개의 변수를 이용하여 회귀분석을 실시하는 것이 더 타당하였다. 주성분 1과 2의 두 개의 설명변수에 의해서 유의수준 0.05에서 유의한 회귀모형을 나타낼 수 있었고, 이러한 회귀모형에 의해서 전체 $Al_2O_3 + \frac{1}{2}Fe_2O_3$ 변이의 37%를 설명할 수 있었다.

Table 11. Analysis of variance with $Al_2O_3 + \frac{1}{2}Fe_2O_3$ contents and 3 principal components by multiple regression analysis.

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Pr > F
Model	3	472	157	65.5	<.0001
Error	317	762	2		

Table 12. Analysis of variance with $Al_0 + \frac{1}{2}Fe_0$ contents and 2 principal components by multiple regression analysis.

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Pr > F
Model	2	466	233	96.3	<.0001
Error	318	769	2		
Root MSE	1.56	R-Square	0.38		
Dependent Mean	3.29	Adj R-Sq	0.37		

Table 13. Parameter estimates of each variable for estimation of $Al_0 + \frac{1}{2}Fe_0$ contents by multiple regression analysis.

Variable	DF	Parameter Estimate	Standard Error	t Value	Pr > t	Variance Inflation
Intercept	1	3.289	0.087	37.9	<.0001	0
Prin 1	1	0.324	0.035	9.2	<.0001	1
Prin 2	1	0.624	0.060	10.4	<.0001	1

$Al_0 + \frac{1}{2}Fe_0$ 함량을 추정하기 위한 상수와 주성분 1, 2에 대한 회귀계수는 모두 유의 수준 0.05에서 유의하였다. 회귀분석에 의하여 $Al_0 + \frac{1}{2}Fe_0$ 함량을 추정하기 위한 모형은 다음의 식과 같았다.

$$Al_0 + \frac{1}{2}Fe_0 (\%) = 3.289 + 0.324 * (\text{Prin 1}) + 0.624 * (\text{Prin 2}) + \epsilon$$

회귀식에 의해 추정된 $Al_0 + \frac{1}{2}Fe_0$ 함량과 조사지점에서 측정된 $Al_0 + \frac{1}{2}Fe_0$ 함량을 그림 16에 비교하였다. 두 값 간의 결정계수는 0.38로 약 38%의 변이가 회귀식에 의해 설명될 수 있었다.

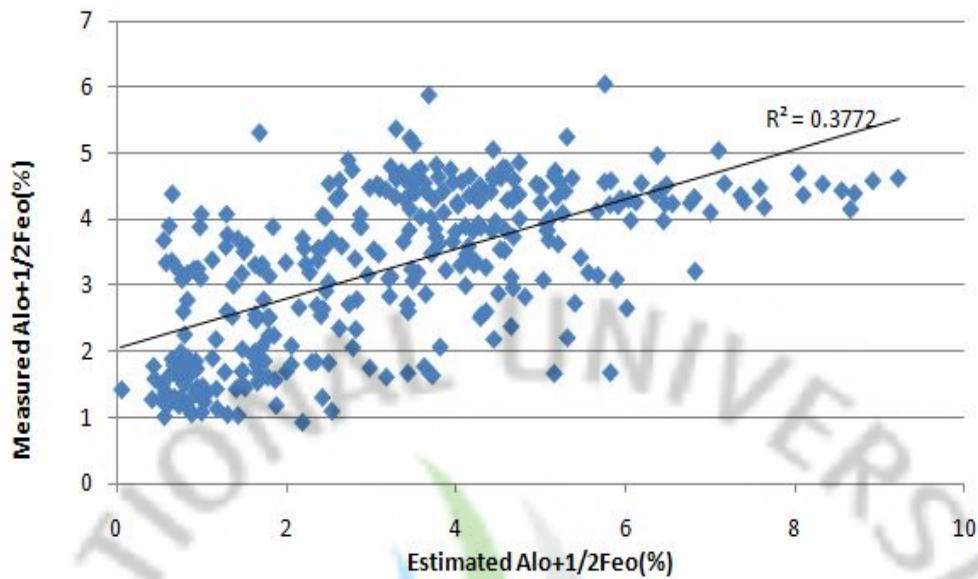


Figure 11. Measured and estimated $Al_o + \frac{1}{2}Fe_o$ contents with 2 principal components in surface layer.

토양유기물과 $Al_o + \frac{1}{2}Fe_o$ 함량 등 토양특성을 주성분 1, 2, 3에 의하여 회귀식으로 예측 모형을 작성한 결과, 토양유기물함량의 변이는 주성분 1, 2, 3의 세 가지에 의하여 약 52% 정도를 설명할 수 있었으며, $Al_o + 1/Fe_o$ 함량은 주성분 1과 2만으로 변이의 약 38%를 설명할 수 있었다.

앞에서 구한 중회귀식을 이용하여 제주도의 토양유기물함량 분포도를 작성하고 토양도와 비교하였다. 전체적으로는 제주도 중앙이나 동부지역에 유기물함량이 높았고 서북지역에는 낮은 경향은 일치하였다. 그러나 회귀식에 의한 분포도는 한라산의 정상부에서 서쪽이나 북쪽으로 갈수록 토양유기물 함량이 낮아지는 연속성이 있었지만 토양도에서는 토양통에 의하여 유기물함량이 결정되므로 지역에 따라 불연속적으로 유기물함량이 다르게 나타났다.

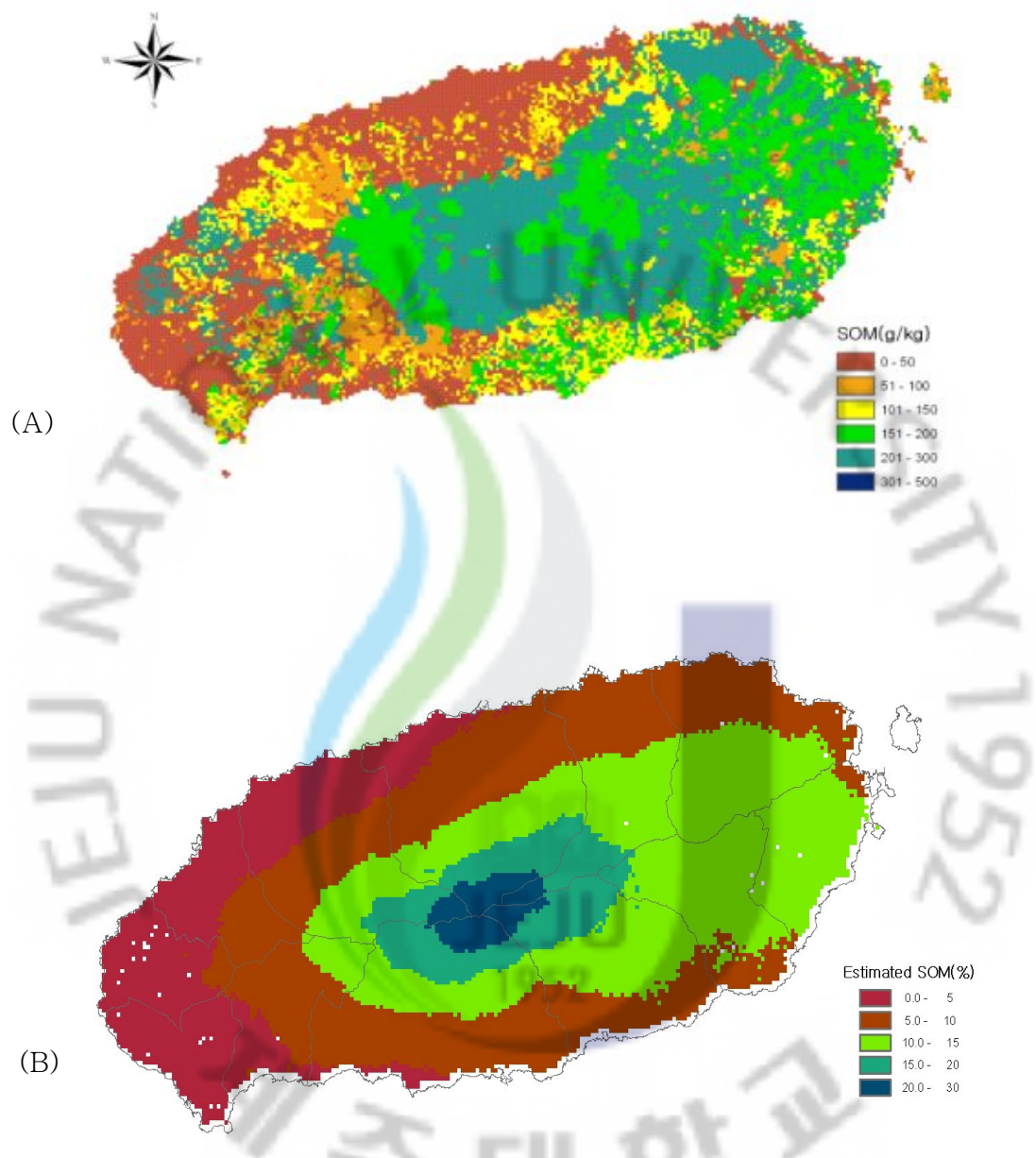


Figure 12. Soil organic matter map(A) using soil map and estimated soil organic matter map(B) using multiple regression equations.

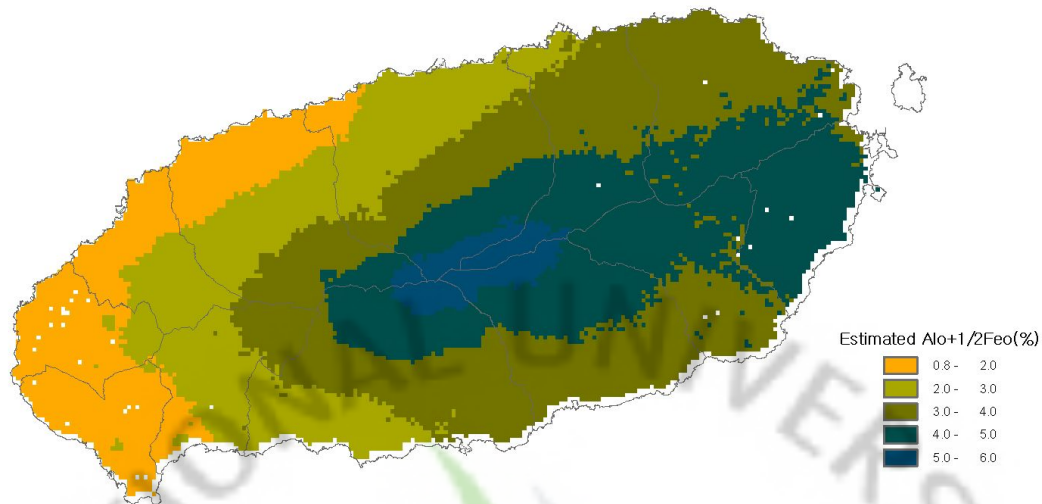


Figure 13. Map of estimated $Al_o + \frac{1}{2}Fe_o$ content using multiple regression equations.

다음으로 andic 토양특성 중의 하나인 $Al_o + \frac{1}{2}Fe_o$ 함량의 분포지도를 중회귀식에 의하여 작성하였다. 앞에서 언급했듯이 $Al_o + \frac{1}{2}Fe_o$ 함량이 2%가 되지 못할 경우에는 Andisols의 조건을 충족시키지 못하므로 Andisols이 아닌 토양으로 분류되어야 한다. $Al_o + \frac{1}{2}Fe_o$ 분포지도에 2%를 기준으로 지역을 구분하여 나타내었다. 작성된 지도는 대체로 서부와 북부지역에는 Andisols이 분포하지 않는다는 사실에 잘 부합되는 경향이었고 Andisols과 Andisols이 아닌 토양의 경계선과 유사하였다. 그러나 서남부 지역에서는 하모통, 인성통 등 Andisols로 분류되는 토양통이 분포하고 있음에도 $Al_o + \frac{1}{2}Fe_o$ 함량에서 Andisols에서 제외되는 지역으로 나타났다. 이러한 결과는 $Al_o + \frac{1}{2}Fe_o$ 분포지도를 작성하기 위한 회귀식이 서남부 지역에 분포하는 Andisols의 환경요인을 충분하게 반영하고 있지 못하기 때문으로 판단되며, 주성분 1과 2의 두 가지 요인에 의한 andic 토양특성 추정의 한계를 보여주고 있다고 하겠다. 이러한 문제점은 토양의 생성과 발달에 영향을 미칠 수 있는 보다 독립적인 새로운 변수를 도입한 후에 회귀분석을 실시하면 해결이 될 수 있다고 예상된다.

II. 토양통의 분포와 지역구분

1. 서론

1) 토양특성지도의 제작 방법

토양유기물함량이나 $Al_0 + \frac{1}{2}Fe_0$ 함량분포 등을 나타내는 토양특성지도는 여러 가지 방법으로 제작할 수 있다. 우선 대표토양통의 토양특성을 직접 토양도에 연결하여 작성할 수 있으며, 이 방법은 토양도가 일정한 특징을 공유하는 토양을 같은 토양통으로 작도되었다는 점에서 신뢰성이 있으나, 같은 토양통일지라도 공간적인 변이가 있으므로 실제로는 토양특성들의 값이 범위로 나타나게 되고, 토양통의 최소작도단위나 설정된 토양통의 개수에 의해 해상도가 제한되어 있는 등의 단점이 있으며(Juli *et al.*, 2004; Kvn *et al.*, 2007; Wóten *et al.*, 2001), 현재와 같이 제주도 토양의 분류가 문제가 될 경우에는 적합하지 않다.

제1장에서 이용하였던 방법과 같이 일반 통계적인 추정방법이 이용될 수 있다. 토양유기물 함량 등 토양특성은 기온, 강우, 지형특성, 식생 등 여러 가지 요소들과 관계가 있으며, 토양특성을 종속변수로 보고, 이를 설명할 수 있는 여러 가지의 설명변수들을 이용하여 다중회귀분석 등 통계적인 모델을 개발한 다음, 이를 이용하여 주어진 요인들로부터 토양특성을 추정할 수 있다. 이 방법은 다양하고 신뢰성 있는 설명변수를 포함하고 있는 정보들이 확보될 때 이용될 수 있으며, 이용되는 공간정보의 품질에 따라 해상도에 제한이 없다는 장점이 있으나, 이용된 변수의 독립성이 전제되어야 하고 토양특성을 충분히 설명할 수 있는 변수들이어야 한다는 점이 중요하다(Bishop and McBratney, 2001; Odeha *et al.*, 1994).

다음으로 임의의 여러 지점에서 조사한 자료를 바탕으로 지리통계학적 내삽방법이 이용되고 있다. 이 방법에는 거리역산가중법, Kriging, Spline 등 여러 종류의 유사한 방법이 있다. 일반통계에서는 수집된 자료가 서로 독립적이라는

가정을 전제로 하고 분석하는 것과 다르게, 지리통계는 오히려 토양특성 자료 등 공간 내에서의 변이는 본질적으로 위치한 공간적인 상태에 따라 서로 자기상관성을 가진다는 점을 인정하고 있는 것이 크게 다르다. 즉 두 관측지점이 가까운 거리에 있을수록 서로의 값에 크게 영향을 끼치게 되고 멀리 위치할수록 서로 독립적인 값을 가질 것이라는 경험을 전제로 하여 미관측 지점의 값을 내삽하여 추정하게 된다(Ciollaro and Romano, 1995; Wu *et al.*, 2009). 이 방법은 관측지점의 값에 의존하여 미관측지점의 값을 내삽으로 추정하는 것이므로 그 정밀도는 관측지점의 수에 크게 의존하게 되고, 내삽 방법에 대한 방법론이 제대로 정리가 되지 않은 경우에는 추정값의 검증 등의 보완이 필요하다고 하겠다.

우리나라에서 토양특성의 공간분포에 관한 연구는 박 등(1985)이 Andisols의 양이온치환용량에 미치는 유기물과 점토의 기여도, 토양의 입경분포에 대한 공간변이성 분석(Park *et al.*, 1984a, b), 대규모 논에서 토양특성에 대한 공간변이 분석(Sonn *et al.*, 2002) 연구 등이 수행된 바 있으나 화산회토 지역에 대하여 이에 대한 연구를 수행하고 토양특성지도가 작성된 바는 아직 없다. 외국에서는 pedometrics라는 연구 분야가 태동하여 여러 가지 지리통계적인 방법들을 이용하여 토양특성지도를 작성한 사례가 늘고 있다(McBratney, 2003).

2) 지리통계에 의한 내삽

공간에서 수집된 자료들은 각 위치에 따른 공간상의 자기상관성을 갖게 된다. 즉, 가까이 있는 특성일수록 그 영향력이 크고 서로 멀수록 그 유사성이 낮아지게 되는 자기상관관계는 우리가 있는 현실세계에서 흔히 보는 현상이다. 공간자료의 자기상관성은 공간 내에서 채취된 표본들은 서로 독립적이라는 토양학 연구자들의 암묵적인 가정에 위배되고 있는 것이다(Ettema and Wardle, 2002; Legendre, 1993). 측정지점들 사이에 있는 미관측 지점의 값들은 측정지점의 값들과 일정한 관계를 갖고 있는데 이를 가장 단순한 형태로 추정하는 방법이 거리역산가중법이다. 이 방법에서는 미관측 지점의 값은 그 점에서부터 관측점들까지 떨어져있는 거리에 반비례해서 영향을 받는다고 가정하고 그에 따른 가중치를 부여하여 값을 추정하는 것이다. 이 방법에 의해 추정된 미관측 지점의 값

은 항상 관측지점의 값을 초과할 수는 없다는 단점이 있다. 또 사전결정적인 추정방법 중에서 거리역산가중법에 비하여 좀 더 자연스러운 내삽법으로 spline법이 있는데, 이 방법은 미관측 지점의 값을 추정할 때 여러 종류의 radial base 함수로 분할하여, 이를 조합하여 마치 고무판이 움직이는 것과 같이 미관측 지점의 값을 추정하여 전체적인 형태를 부드럽게 해 준다.

Kriging법은 각각의 관측점에 대한 가중치를 semivariogram이라는 함수관계로부터 구하게 된다. 먼저 한 쌍의 관측값의 semivariance γ 를 그 두 개의 관측지점 간의 거리의 함수로 나타내면 서로 가까운 관측점 쌍에서는 변이가 낮게 나타나고 먼 관측점 쌍에서는 변이가 높아질 것으로 기대된다. 이 관계를 나타내는 적합한 수식을 설정하고, 이로부터 각 관측점에 대한 가중치를 구하고, 이에 각 관측값을 이용해 미관측 지점의 값으로 예측하게 된다(Johnston *et al.*, 2001).

3) 토양특성지도에 의한 토양통 지역 구분

제주도는 70% 이상이 Andisols로 분류될 수 있을 정도로 우리나라의 대표적인 Andisols지역이다. 하지만 토양도의 작성이 Andisols 목이 설정되기 이전의 분류방식으로 이루어졌으므로 토양통의 분류뿐만 아니라 토양도의 형태까지도 Andisols 분류체계로 다시 검토되어야 할 필요가 있다(Song *et al.*, 2005). 토양통의 기준뿐만 아니라 토양통의 분포에 대하여 분류의 타당성을 검토하는 것은 쉽지 않은 일이며, 많은 노력이 필요한 일이다. 적합한 공간통계 방법으로 andic 토양특성이나 유기물함량 특성, 지온특성의 공간분포를 지도로 작성할 수 있으면, 각각의 토양통 분포와 비교하여 어떤 토양통들이 새로운 분류기준과 비교하여 문제가 많은 토양통인지를 파악할 수 있는 단서를 제시할 수 있다.

제1장에서는 중회귀법으로 환경요인에 의한 토양유기물함량과 $Al_0 + \frac{1}{2}Fe_0$ 함량 분포지도를 작성하여 토양도와 비교하여 보았다. 이 방법에 의해 작성된 지도는 대체적인 경향이 지금까지 알려진 것과 유사하였지만 제주도 서남부의 Andisols 분포지역이 비Andisols 지역으로 구분되는 등 제주도 전체에 대한 지대구분을 하기 위한 기준으로는 부족한 면이 있었다. 이는 통계적인 모델이 여러

가지 요인들에 의한 결과물로서 토양특성을 추정하게 되므로 원인에 해당되는 서로 독립적인 환경 요인들이 결과물인 토양특성을 설명하기에 부족한 경우에는 오차가 발생할 가능성이 큰 것이다.

반면, 조사 자료의 수가 충분히 많을 경우에는 지리통계적인 방법을 이용하는 것이 더욱 합리적일 수 있다. 조사지점이 많으므로 전 지역에서 측정값이 분포 경향을 쉽게 파악할 수 있고, 토양특성이 공간 내에서 서로 떨어진 거리에 따라 점진적으로 변하는 경우가 많으므로(자기상관성), 미세한 토양특성의 변화보다 지대 구분 등 거시적인 경향이 중요한 경우에는, 조사 지점의 측정값이 결과에 직접적으로 반영이 되는 지리통계방법이 유리한 것이다. 지리통계방법 중에서도 Kriging 등 일부 통계적 예측함수를 이용하는 방법으로는 예측지도에 대한 오차지도까지 작성할 수 있으므로, 제작된 토양특성지도의 지역별 적합성 여부를 판단하는 근거를 제시해 줄 수 있는 장점도 있다.

토양특성에 의해 지역구분을 할 경우에는 단순히 토양특성기준 한 가지를 가지고 구분할 것이 아니라 지역을 구분하고자 하는 목적에 따라 여러 가지 기준을 가지고 구분해야 한다. 예를 들면 토양특성으로 제주도에 분포하는 Histosols은 다른 토양들과 목단위에서 매우 다른 특성을 가진 토양으로 구분할 수 있지만, 실질적으로는 Histosols로 분류되는 면적이 전체에 비하여 극히 작은 면적이므로 이러한 토양특성기준을 이용하여 지역을 구분하는 것은 무리가 있다. 토양특성에 의하여 지역을 구분할 경우에는 목-아목-대군-아군-속-통의 순으로 토양을 분류하되 특정 분류 기준에 의해 일정 이상의 면적이 분포되어 지역으로 구분할 필요가 현실적으로 중요하다고 판단되는 기준이 될 수 있는 토양특성을 선택하는 것이 합리적이라고 판단된다.

이런 관점에서 제주도에는 우선 Andisols 토양특징이 Andisols이 아닌 토양과 매우 다르고, 분포면적이 절대적으로 많기 때문에 Andisols 여부를 판단할 수 있는 기준($Al_0 + \frac{1}{2}Fe_0$ 함량 > 2%, 용적밀도 $\leq 0.90 \text{ g/cm}^3$, 인산 보유력 $\geq 85\%$)이 중요할 것이다. 다음으로는 전체 면적의 70%가 넘게 분포하고 있는 Andisols을 세분할 수 있는 대군단위의 기준(유기탄소함량 > 6%, melanic index ≥ 1.7)이 중요하다. 보다 더 상위인 아목단위의 기준은 제주지역에서는 대부분 동일한 수분상이므로 지역구분에는 큰 의미가 없게 된다. 다음으로

Fulvudands/Melanudands 지역을 더 구분하기 위해서는 속단위의 기준(50cm 연평균지중온도 $\leq 15^{\circ}\text{C}$)이 중요하다고 할 수 있다. 제주도에 Andisols이 아닌 토양목으로는 Histosols, Ultisols, Alfisols, Inceptisols, Entisols 등이 있는데, Histosols(이호통)과 Entisols(가과통, 온평통, 낙천통, 월령통, 조천통)은 소면적이거나 토양특성이 분명하므로, 면적과 토양관리라는 측면을 고려할 때 Ultisols, Alfisols, Inceptisols을 구분하는 데 점토집적층인 argillic 층의 존재 여부와 기준깊이에서의 염기포화도(양이온 합)가 지역을 구분하는 중요한 기준이 될 수 있을 것이다.

제2장에서는 $\text{Al}_0 + \frac{1}{2}\text{Fe}_0$ 함량분포, 토양유기물 함량분포, 토양온도 지도를 작성하여, $\text{Al}_0 + \frac{1}{2}\text{Fe}_0 < 2\%$, 토양유기물 $< 10\%$, 토양온도 $\geq 15^{\circ}\text{C}$ 를 기준으로 하여 Andisols이 분포할 수 없는 지역(지역 I), Melanudands/Fulvudands가 분포할 수 없는 지역(지역 II), Melanudands/Fulvudands가 분포할 수 있으면서 thermic 온도상인 지역(지역 III)과 Melanudands /Fulvudands가 분포할 수 있으면서 mesic 온도상인 지역(지역 IV), Melanudands /Fulvudands가 분포할 수 없으면서 mesic 온도상인 지역(지역 V)으로 지역을 구분하여 토양통의 분포를 살펴보고자 하였다.

2. 재료 및 방법

제1장에서와 달리 제2장에서는 분석결과에 조사지점의 측정값의 반영이 비교적 잘되는 지리통계방법을 이용하여 $Al_0 + \frac{1}{2}Fe_0$, 토양유기물 등의 토양특성지도를 제작하였다. 조사지점에서 채취된 토양시료로부터 분석된 $Al_0 + \frac{1}{2}Fe_0$ 의 함량은 시료채취지점의 좌표와 연결하여 분석을 실시하였다.

여러 가지 지리통계방법 중 사전결정적인 방식에 속하는 거리역산가중법, spline, local polynomial interpolation(LPI)방법과, 통계적이 기법이 도입되는 Kriging 방법으로는 simple Kriging(SK), ordinary Kriging(OK)으로 토양특성지도를 작성하였다. Kriging으로 작성된 지도에 대한 오차지도를 별도로 작성하여 지역별 오차의 분포를 비교하였다. $Al_0 + \frac{1}{2}Fe_0$, 토양유기물 분포도 등의 토양특성지도는 오차평균과 RMSE를 이용하여 적합한 것을 선정하였다. 50cm 깊이의 지중온도분포지도는 제주도 4개 기상관서에서 지난 30년간 측정된 평년의 기온과 50cm 깊이의 지중온도로부터 관계식을 도출하고 이를 이용하여 평년기온분포도로부터 작성하였다.

선정된 $Al_0 + \frac{1}{2}Fe_0$, 토양유기물, 토양온도 등 토양특성지도에서 분류기준이 되는 $Al_0 + \frac{1}{2}Fe_0$ 함량 2%, 토양유기물 함량 10%, 지중온도 15℃를 기준선으로 하여 기준값 이상과 이하의 2개의 지역으로 구분하고, 이 지도를 토양도와 중첩하여 각 지역에 포함되는 토양통과 그 면적을 산출하고, 분석하였다.

지리통계방법의 적용 및 토양특성지도의 작성을 위하여 ArcGIS(v.9.2), geostatistical analyst(v.9.1), spatial analyst(v.9.1) 등의 프로그램을 이용하였다.

3. 결과 및 고찰

1) 조사지점 유기물함량과 토양도의 활용

제1장의 표 1에서 제시된 바와 같이 321개 조사지점 표토의 유기물함량은 평균 94.3 g kg^{-1} 이고 표준편차는 65.0 g kg^{-1} 이었고, 심토에서는 평균 82.6 g kg^{-1} 이고, 표준편차는 59.6 g kg^{-1} 로 평균적으로 표토가 심토보다는 유기물함량이 약간 높았으나, 표준편차는 유사하여 변이에 큰 차이가 없었다. $\text{Al}_0 + \frac{1}{2}\text{Fe}_0$ 함량은 심토가 표토보다 약간 높은 경향이었으나 지역 간 차는 크지 않았다.

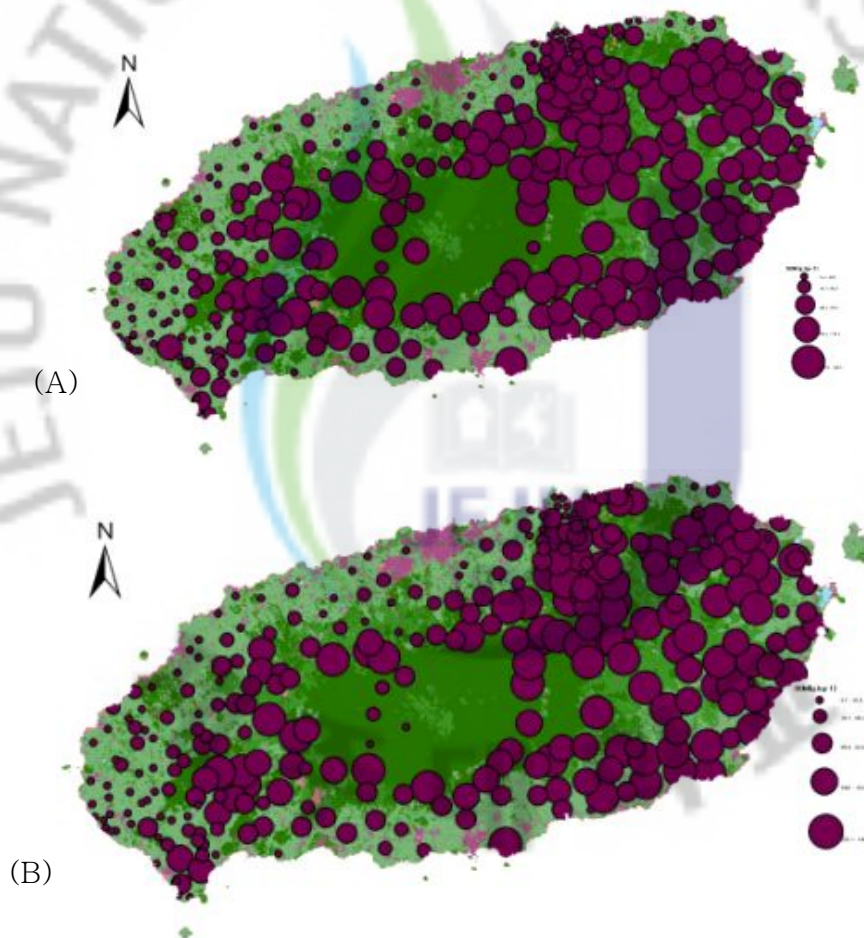


Figure 14. Distributions of soil organic matter at sampled points for surface soil(A) and subsurface soil(B).

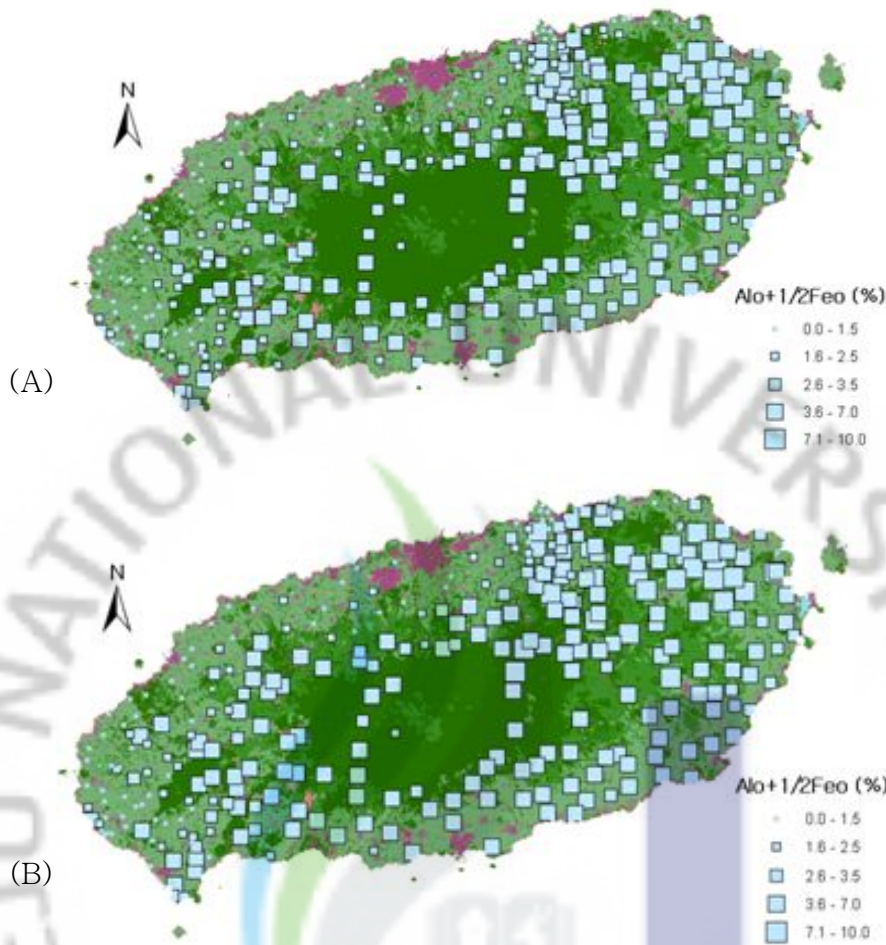


Figure 15. Distributions of $AlO+1/2FeO$ at sampled points for surface soil(A) and subsurface soil(B).

그림 14과 그림 15에는 표토와 심토의 토양유기물 함량과 $AlO+1/2FeO$ 함량 분포를 나타내었다. 중심에 있는 한라산으로부터 동부나 남부로 갈수록 표토 및 심토의 유기물 함량과 $AlO+1/2FeO$ 함량은 높고 북부나 서부로 갈수록 낮아지는 경향이였다. 이는 북부와 서부에는 유기물 함량이 낮은 Andisols이 아닌 토양들이 다량 분포하고 있고, 동부나 남부에는 유기물 함량이 높은 농암갈색, 흑색 Andisols들이 많이 분포하고 있다는 기존의 보고와 일치하고 결과이였다. 표토에서는 동남부 중산간지에서 유기물함량이 높은 것으로 나타났지만, 심토에서는 오히려 동남부 해안가가 유기물함량이 더 높았다.

그림 16에는 토양도에 의한 유기물지도이다. 표토의 유기물함량 지도는 조사

된 지점의 유기물함량의 분포와 상당히 일치하는 결과를 나타내주고 있었다. 토양도를 이용하여 유기물지도를 작성할 때 토양도가 충분히 세밀할 경우에는 보다 정확하게 나타낼 수 있지만, 산악지 토양과 같이 1개 통의 면적이 매우 클 경우에는 예측이 매우 부정확할 수 있다.

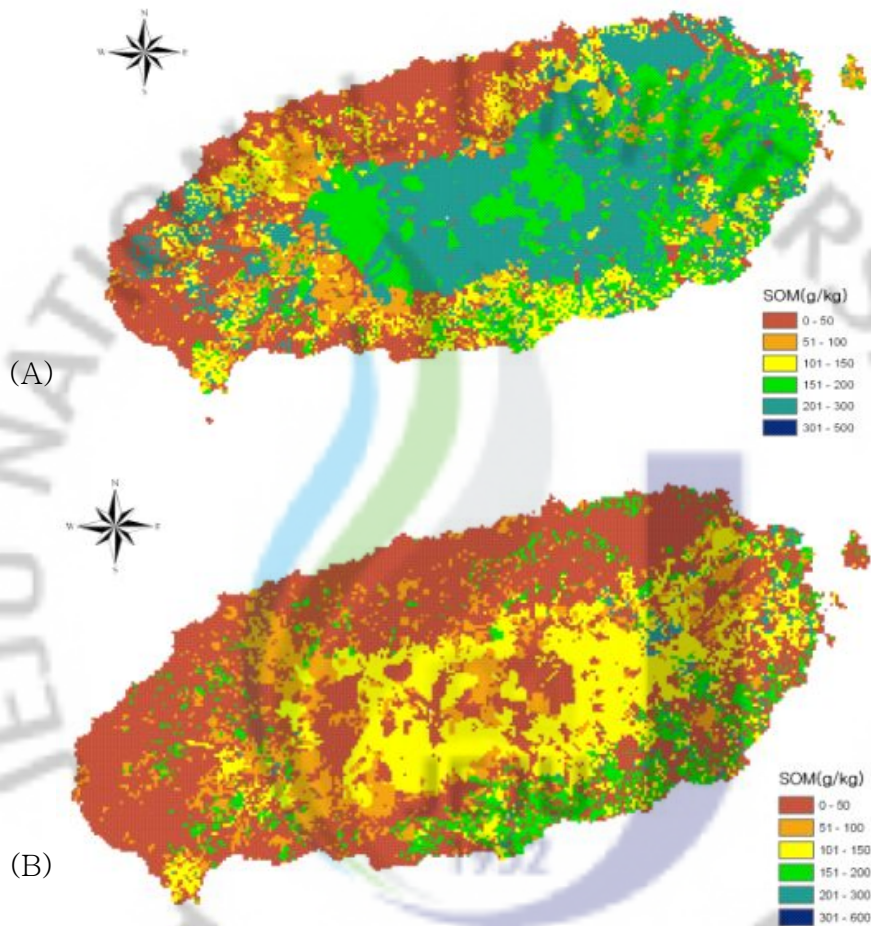


Figure 16. Maps of soil organic matter for surface soil(A) and subsurface soil(B) made from soil map in Jeju Island.

2) 공간통계에 의한 토양유기물 지도

여러 가지 공간통계방법에 의해 표토와 심토의 토양유기물 함량 지도를 작성하였다. 표토에서는 대체로 동부, 남부, 산악지역에서 유기물함량이 높고 북부 및 서부에서는 낮은 것으로 나타났으며, 심토에서도 유사한 경향으로 토양도에서 나

타난 것과 유사한 경향이였다.

그림 17에서 그림 19까지는 사전결정적인 내삽방법에 속하는 거리역산가중법, Spline법, 지역다중함수내삽법을 나타내었다. 내삽방법간 비교에서는 거리역산가중법(IDW)은 조사지점의 측정값이 온전하게 유지되므로 한 조사지점이 값이 주위보다 클 경우에는 원형의 모습을 보이는 형태가 많이 발견되었다. 이러한 현상은 거리역산가중법과 지역다중함수내삽법(LPI)에는 측정된 값이 모두 보존되기 때문에 발생하는 현상이다. Spline방법은 측정지점을 고무판처럼 부드럽게 지나가도록 함수를 조절한 것으로 거리역산가중법에 비하여 전체적으로 매우 부드러운 형태의 분포형태를 보이고 있다. 지역다중함수내삽법(LPI) 측정값이 모두 포함되도록 다중함수를 취해 내삽하는 방법으로 공간 내 전체적인 경향을 보기위해서도 이용되며, 여기에서는 Spline방법보다도 더 완만한 경계선을 나타내고 있다.

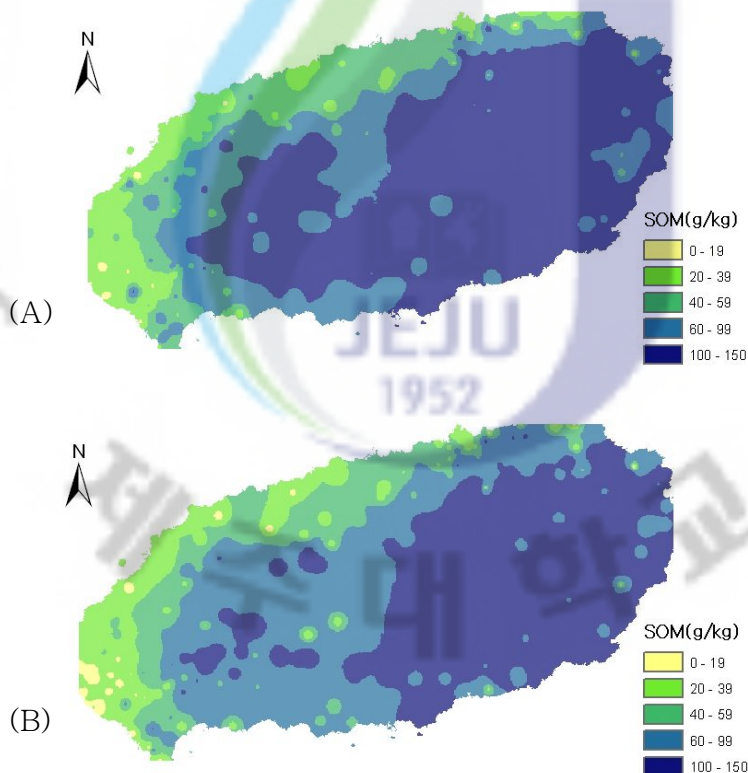


Figure 17. Maps of soil organic matter for surface(A) and subsurface(B) layers made by inverse distance weighting method.

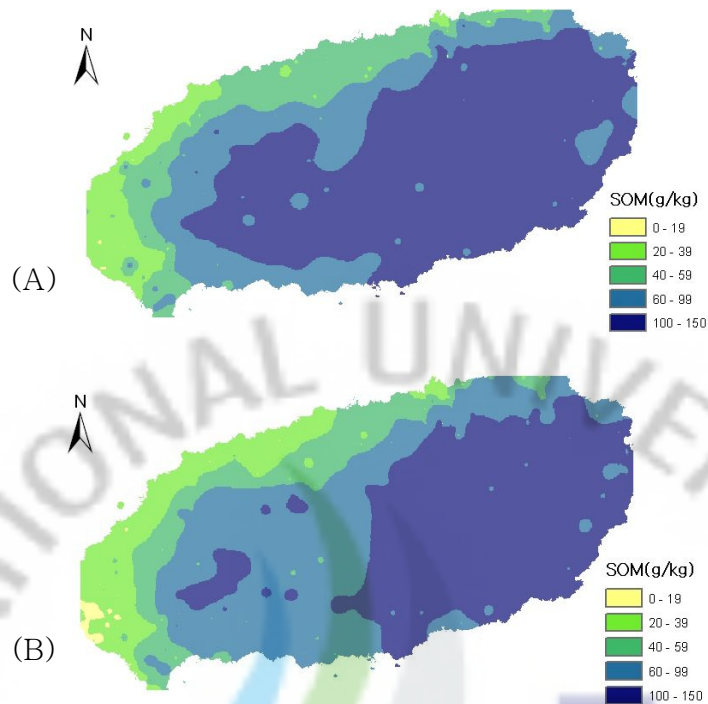


Figure 18. Maps of soil organic matter for surface(A) and subsurface(B) layers made by Spline method.

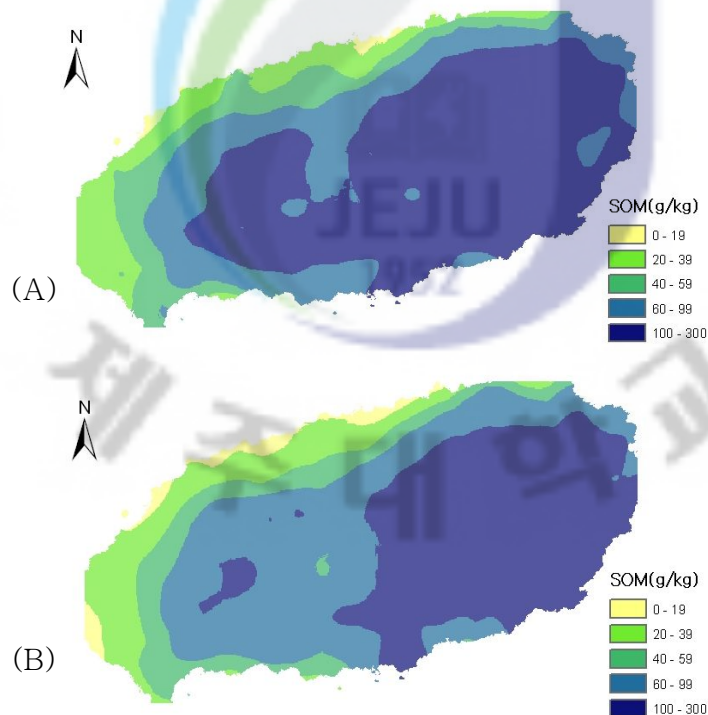


Figure 19. Maps of soil organic matter for surface(A) and subsurface(B) layers made by local polynomial interpolation method.

그림 20에서 그림 21에는 공간통계적인 Kriging방법에 의해 내삽한 지도를 나타내었다. 일반적으로 simple Kriging은 모집단의 평균과 오차의 범위를 정확히 알고 있다고 가정하고 내삽하는 방법이고, ordinary Kriging은 그러한 값들을 모르기 때문에 통계적으로 처리한다고 가정하고 내삽하는 방법이다. 이 두 가지 방법에 의한 유기물함량 지도는 유사한 형태를 띠고 있지만, 그림 22에서 두 방법에 따른 예측표준오차지도를 보면 전 지역에 걸쳐 simple Kriging이 ordinary Kriging보다 오차가 크게 나타났다. 또 지역적으로도 ordinary Kriging은 제주도 중앙부 및 일부 해안지방을 빼고는 전 지역에 걸쳐 오차가 작을 것으로 예측되어 simple Kriging보다 안정적인 결과를 나타내었다.

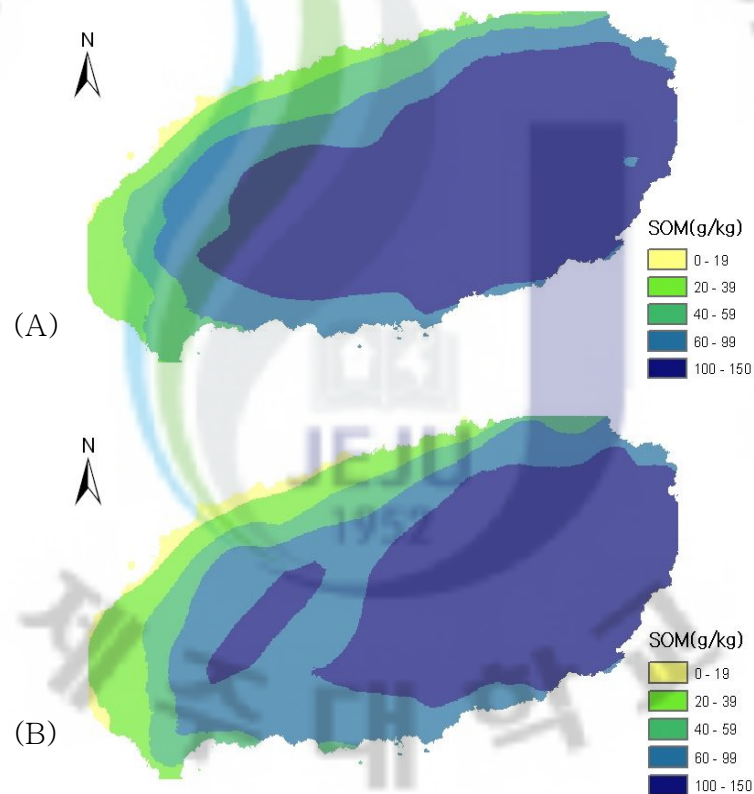


Figure 20. Maps of soil organic matter for surface(A) and subsurface(B) layers made by simple Kriging method with trend removal.

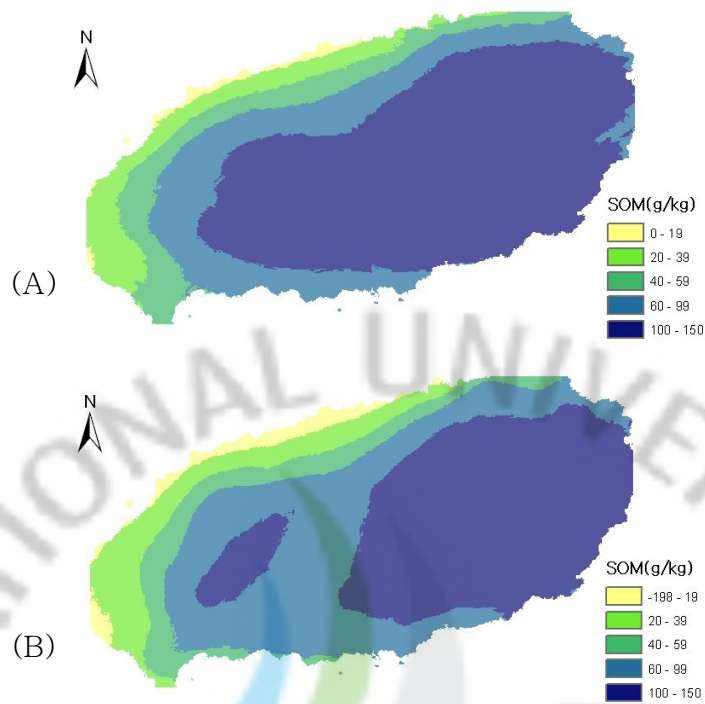


Figure 21. Maps of soil organic matter for surface(A) and subsurface(B) layers made by ordinary Kriging method with trend removal.

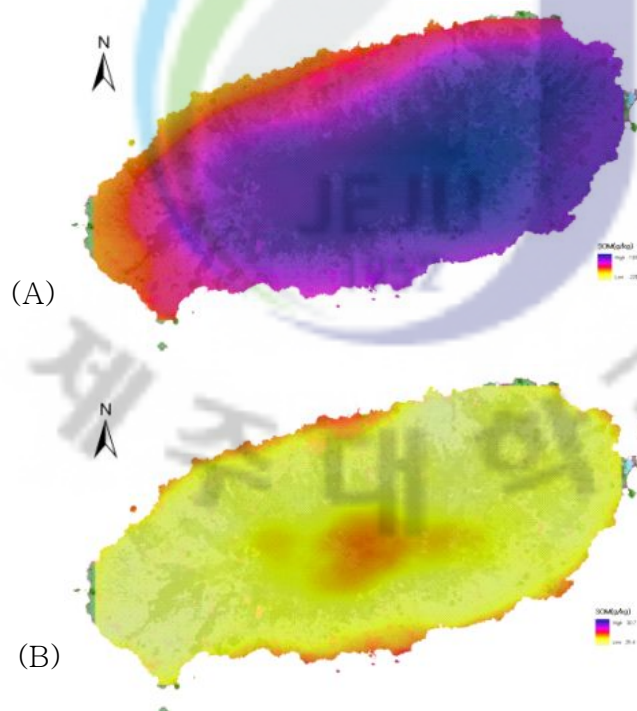


Figure 22. Prediction standard error maps for simple Kriging(A) and ordinary Kriging(B).

여러 가지 지리통계방법을 비교하기 위하여 예측오차에 대한 통계자료를 표 14에 제시하였다. RMSE는 Spline방법에서 가장 낮은 것으로 나타났지만, 오차 평균에서는 ordinary Kriging이 가장 우수한 것으로 나타났다. 또한 ordinary Kriging 법은 Spline법에 비하여 경계선을 보다 완만하게 나타내 주는 장점이 있어, 토양의 지역구분을 위한 기준으로 이용하기에 적합하다고 판단하였다.

Table 14. Prediction error statistics for various interpolation methods for soil organic matter contents in Jeju Island. Number of compared data was 321.

Prediction errors	IDW*	LPI	Spline	SK	OK
Mean of error	0.36	-1.62	0.3	0.22	0.02
Root mean square of error	26	25.5	25.3	25.4	25.4

* IDW, inverse distance weighting; LPI, local polynomial interpolation; SK, simple Kriging; OK, ordinary Kriging

3) $Al_0 + \frac{1}{2}Fe_0$, 토양유기물, 토양온도지도와 토양통 분포

여러 가지 공간통계방법 중 거리역산가중법과 ordinary Kriging을 이용한 $Al_0 + \frac{1}{2}Fe_0$ 함량 지도를 그림 23에 나타내었다. 거리역산가중법은 조사지점의 분석 자료가 보존되기 때문에 한라산 정상부나 서남쪽의 일부지역에 대하여 $Al_0 + \frac{1}{2}Fe_0$ 함량이 낮게 나타났으나, ordinary Kriging법은 전체적으로 $Al_0 + \frac{1}{2}Fe_0$ 함량을 매우 단순화시키면서 보여주고 있다. $Al_0 + \frac{1}{2}Fe_0$ 함량 2%를 기준으로 할 때 ordinary Kriging법에 의하면 대체로 제주도의 중앙과 동남부 방향으로 andic 토양특성이 강하게 나타나고 있는 반면, 서북부 지역으로는 andic 토양특성이 잘 나타나고 있지 않았다.

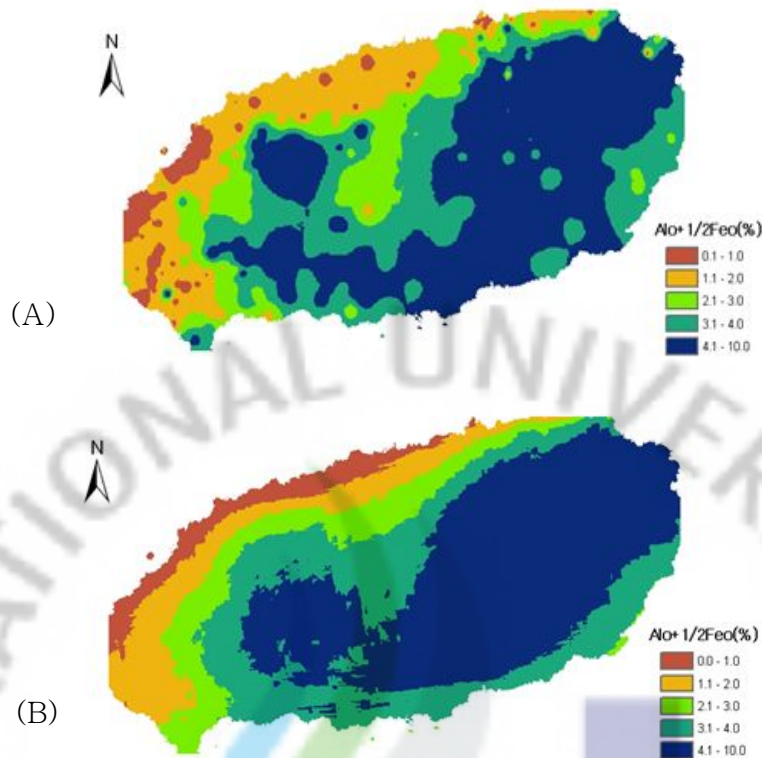


Figure 23. Maps of $Al_o + \frac{1}{2}Fe_o$ contents by IDW(A) and ordinary Kriging method(B).

Ordinary Kriging법을 기준으로 Andisols 분포지역과 그렇지 않은 지역을 구분하기 위하여 토양도와 중첩하여 나타내었다. 그림 24에 나타난 바와 같이 몇 종류의 토양통들이 Andisols 분포지역과 그렇지 않은 지역에 걸쳐 분포하고 있었다. 이러한 토양통들은 Andisols 분류체계에 의하면 목단위에서 구분이 되어야 하므로 경계지역을 기준으로 크게 나누어 따로 분류를 하여야 할 것이다. 이 토양통에 해당되는 것들 중에서 면적이 크게 경계지역의 양 쪽에 걸쳐 있는 토양통들을 표 15에 나타내었다. 이 중 용흥, 동귀, 구엄, 가파, 교래통 등 비 Andisols로 분류되고 있는 토양들은 기준깊이에서의 용적밀도와 인산보유능과 같은 다른 분류기준에의 충족 여부를 검토해야 할 것이다. 구좌, 아라, 중문, 중엄통 등 Andisols로 분류되고 있는 토양들은 $Al_o + \frac{1}{2}Fe_o < 2.0\%$ 인 지역을 중심으로 하여 분포하는 토양들이 다른 토양으로 분류되어야 한다. 오라통의 경우

Inceptisols로 분류되고 있는데도 대부분 $Al_0 + \frac{1}{2}Fe_0$ 함량이 2.0% 이상인 지역에 분포하는 것으로 보아 오라통 중 일부는 Andisols로 분류되어야 할 것이다.

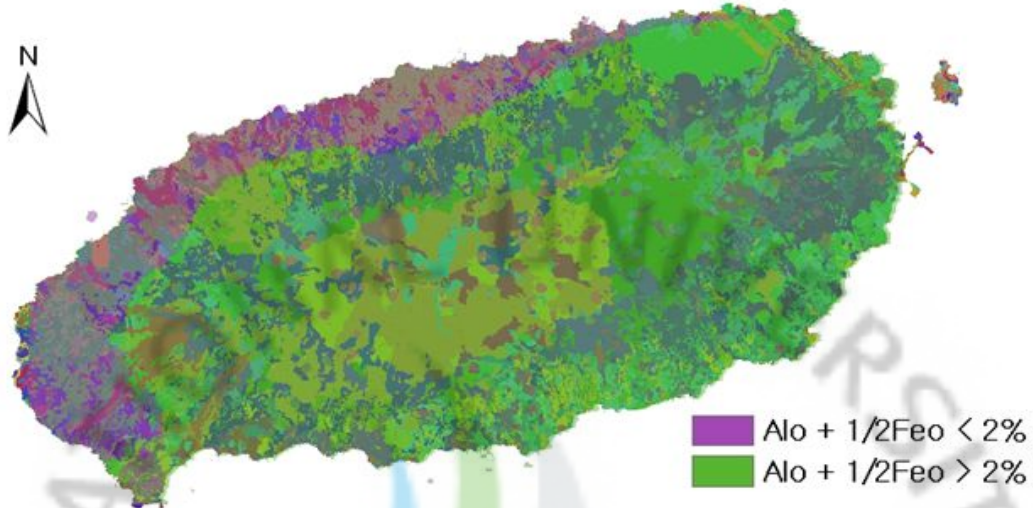


Figure 24. Overlay map of soil series and 2% $Al_0 + \frac{1}{2}Fe_0$ contents.

Table 15. Soil series overlay on $Al_0 + \frac{1}{2}Fe_0$ contents criteria for Andisols in Jeju Island.

Soil series	Area ratio of $Al_0 + \frac{1}{2}Fe_0 > 2\%$ (%)	Mismatched area (ha)
Gujwa	76	3,390
Ara	74	2,310
Yongheung	43	1,658
Jungmun	88	1,424
Donggui	24	1,241
Jungeom	86	955
Ora	89	930
Gueom	24	710
Songag	72	620
Gapa	51	612
Gyora	67	463
Haweon	15	341
Ido	24	246
Donghong	22	209
Sanbang	66	190
Inseong	75	117

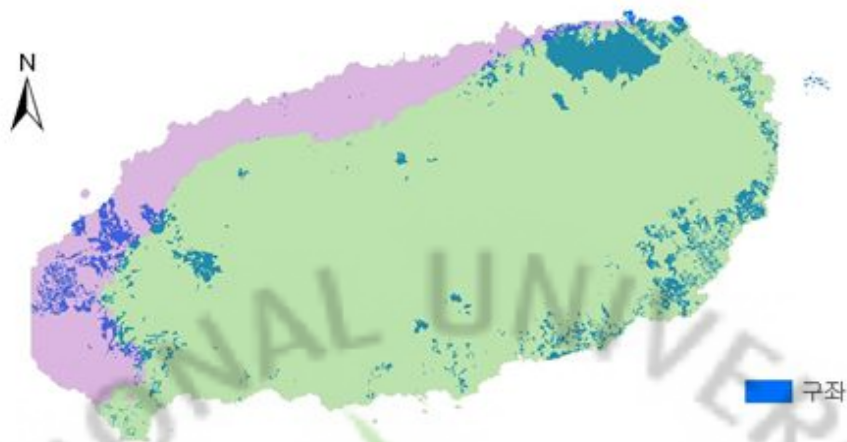


Figure 25. Distribution of Gujwa soil series and $Al_o + \frac{1}{2}Fe_o$ contents Jeju Island.

기준 토층에서의 토양유기탄소 6%, 즉 토양유기물로 10%를 기준으로 하여 Fulvudands, 또는 Melanudands와 Hapludands가 구분된다. 그림 26에는 토양유기물지도와 토양도를 중첩하여 나타내었다. 이러한 중첩지도로부터 중문통, 구좌통, 아라통, 중엄통, 제주통, 오라통 등의 경우 많은 면적이 토양유기물 10%의 기준지역의 양 쪽에 분포되고 있었다. Hapludands로 분류되고 있는 중문통의 경우 Fulvudands, 또는 Melanudands 토양으로 분류되어야 할 토양이 많을 것으로 생각된다. 구좌, 아라, 중엄, 정방통 등 Fulvudands, 또는 Melanudands로 분류되고 있는 토양들 중 유기물 함량이 10% 미만인 토양들은 Hapludands인 다른 토양으로 재분류되어야 한다. 제주와 오라통은 비Andisols 토양이면서도 유기물함량이 10% 이상인 지역에도 많이 분포하고 있는 것으로 보아 Andisols 중 Hapludands 뿐만 아니라 Fulvudands, 또는 Melanudands 토양으로 구분하여 재분류해야 할 것이다.

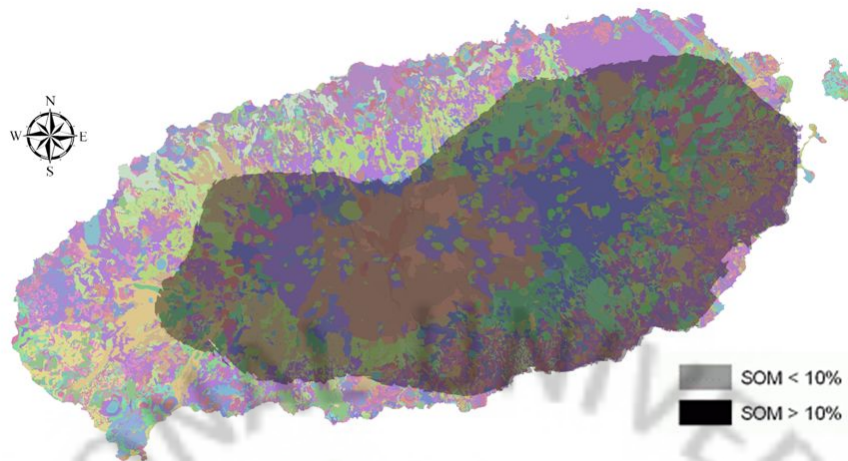


Figure 26. Overlay map of soil series and 10% soil organic matter contents.

Table 16. Soil series overlay on SOM contents criteria for Melanudands/Fulvudands and Hapludands in Jeju Island.

Soil series	Area ratio of SOM \geq 10% (%)	Mismatched area (ha)
Jungmun	44	5,489
Gujwa	32	4,600
Ara	34	3,068
Jungeom	44	3,000
Jeju	41	2,837
Ora	22	1,949
Jeongbang	63	974
Gyora	38	841
Songag	37	823
Minag	88	791
Hanrim	55	560
Gimyeong	91	519
Namweon	83	503
Gamsan	46	404
Topyeong	83	372
Gunsan	90	183

토양온도에 의해서는 mesic상과 thermic상을 구분할 수 있다. 50cm 깊이의 토양 중의 온도와 기온의 관계는 제주도에서 제주, 서귀포, 고산, 성산의 평년의 지온과 기온 측정 자료로부터 그림 27과 같이 구하였으며, 이를 이용하여 평균

지온지도를 작성하였다. 평대, 송당통 등이 mesic과 thermic 두 지역에 넓은 면적이 걸쳐 있는 것으로 분석되었다. 토양속이 토양통보다 상위 분류단위이기 때문에, 이러한 토양통은 구분하여 재분류되어야 한다.

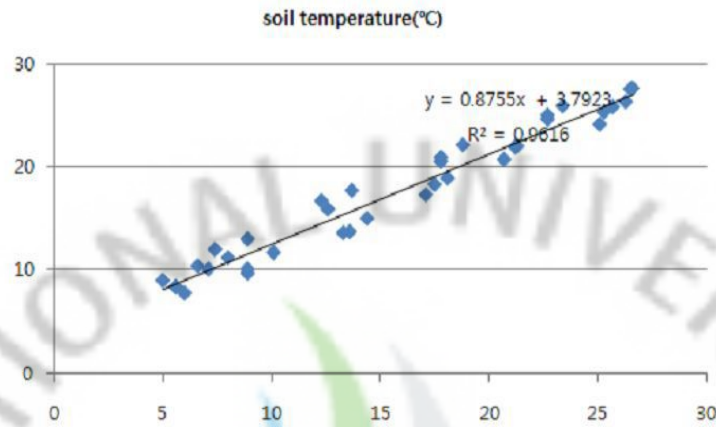


Figure 27. Relationship mean annual temperature and under ground temperature at 50cm depth in Jeju Island.

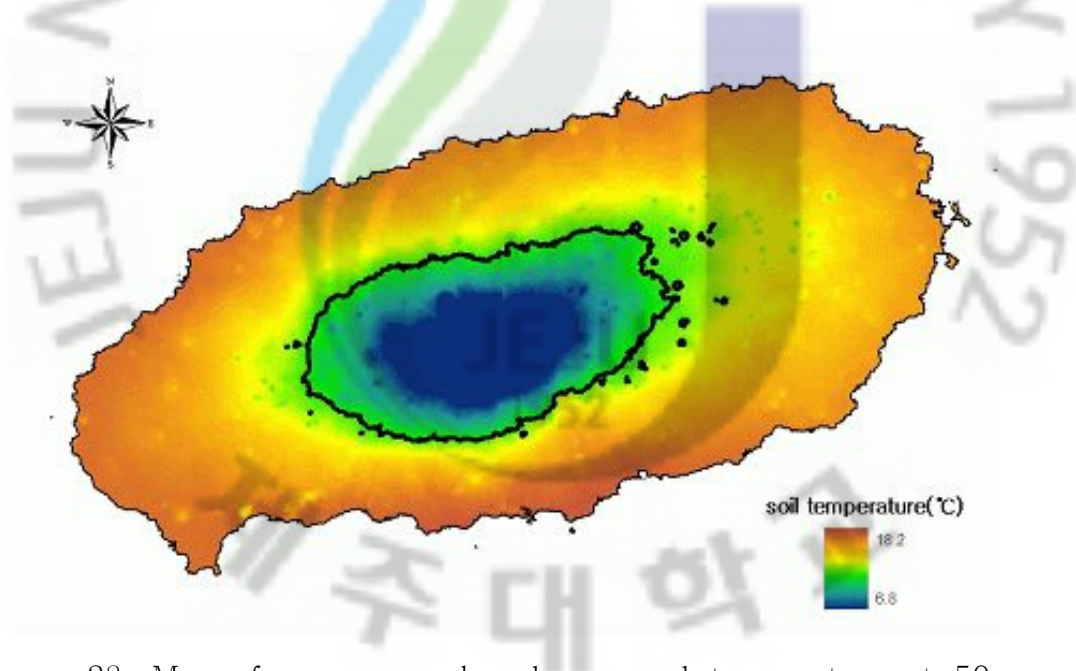


Figure 28. Map of mean annual under ground temperature at 50cm depth in Jeju Island. Solid line represents 15°C contour.

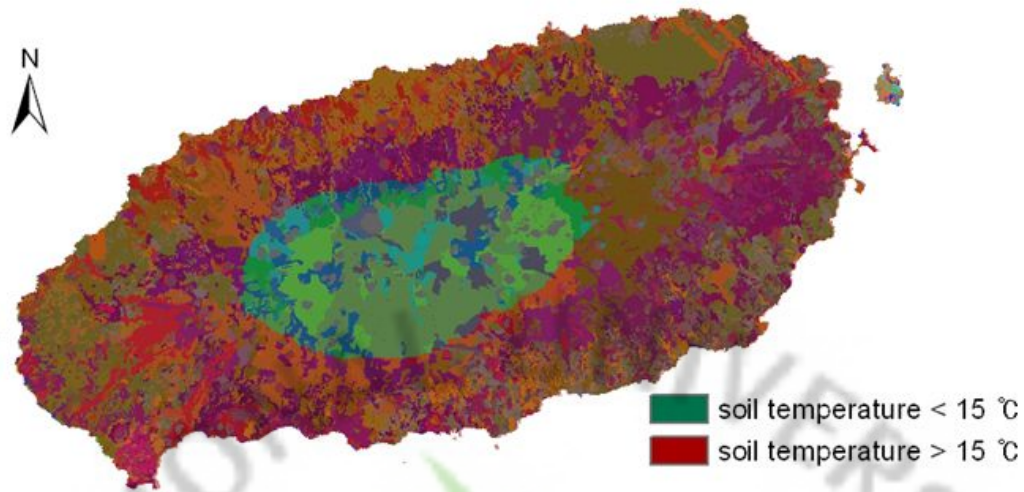


Figure 29. Overlay map of soil series and 15°C of under ground temperature at 50cm depth.

Table 17. Soil series overlay on soil temperature criteria for thermic and mesic in Jeju Island.

Soil series	Area ratio of soil temp. $\geq 15^{\circ}\text{C}$ (%)	mismatched area (ha)
Pyeongdae	74	2,762
Songdang	71	1,007
Jeju	87	890
Miag	78	356
Gunsan	14	252
Hangyeong	26	197

4) 제주도 토양의 구분

제주도의 전체 토양을 $\text{Al}_0 + \frac{1}{2}\text{Fe}_0$ 함량을 기준으로 하여 Andisols일 수 있는 지역과 Andisols이 아닌 지역으로 목단위에서 크게 구분할 수 있다. Andisols 분포면적이 넓으므로 토양유기물함량을 기준으로 하여 Fulvduands/Melanudands일 수 있는 지역과 Hapludands일 수 있는 지역으로 대군 단위에서 세분할 수 있다. 또한 토양 온도상을 기준으로 thermic과 mesic

토양온도상 지역으로 구분할 수 있다. 이들 구분을 종합하면 그림 30과 같이 총 5개의 지역으로 나눌 수 있다.

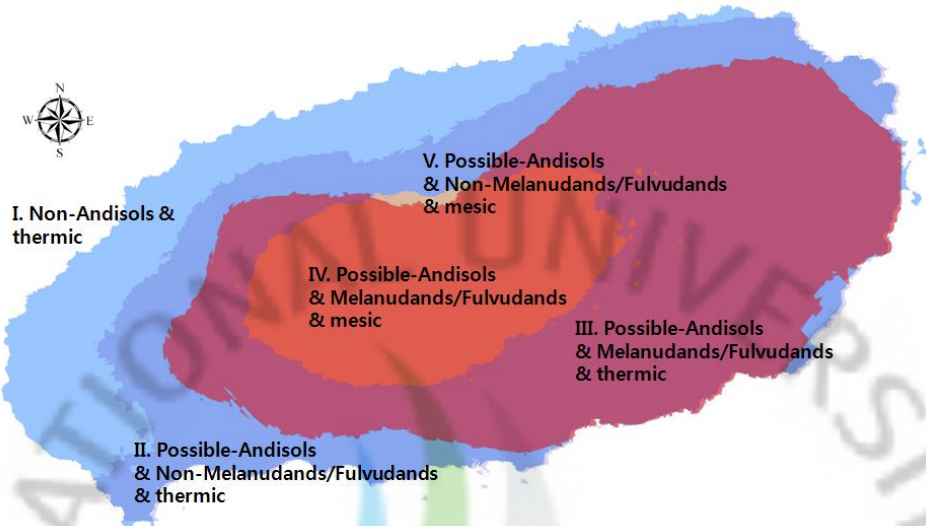


Figure 30. Jeju soils can be classified with 5 classes by andic soil property, soil organic matter, soil temperature.

분석대상인 전체 면적 176,280ha 중 Andisols이 아니고 thermic 토양온도상을 보유하는 I지역에는 16.4%인 28,900ha, Andisols이 분포할 수 있고 thermic 토양온도상이지만 토양유기물함량이 10%를 넘지 않아 Hapludands나 비Andisols이 분포하는 II지역이 24.1%인 42,400ha이었다. Andisols이고 토양유기물함량이 10%를 넘어 Melanudands나 Fulvudands로 분류될 수 있으며 thermic 토양온도상을 보유하는 III지역이 39.6%인 68,700ha이었다. 이 지역에는 초지에서 유래된 유기물을 주로 보유하고 있기 때문에 Fulvudands보다는 Melanudands가 많이 분포한다. Andisols이고 토양유기물함량이 10%를 넘어 Melanudands나 Fulvudands로 분류될 수 있으며 mesic 토양온도상을 보유하는 IV지역이 18.8%인 33,200ha이었다. 이 지역에는 삼림 식생하에서 생성된 유기물을 주로 보유하고 있기 때문에 Melanudands는 별로 분포하지 않고, 대부분 Fulvudands가 분포한다. Andisols이 분포할 수 있으나 Melanudands나 Fulvudands가 분포하지 않으며 mesic 토양온도상을 보유하는 V지역이 1%인 1,700ha, 기타 120ha이었다.

Table 18. Areas(ha) of soil series located in each regions.

soil series	region I	region II	region III	region IV	region V	Etc
Aeweol	199	23	0	0	0	0
Ara	2,295	3,620	3,055	7	11	1
Byeongag	67	107	68	3	2	0
Daeheul	55	234	34	0	0	4
Daejeong	149	82	1	0	0	1
Daepyeong	0	369	0	0	0	6
Donggui	3,727	1,166	75	0	0	2
Donghong	715	208	1	0	0	14
Euigui	39	301	1,882	0	0	18
Gamsan	25	321	338	21	53	12
Gangjeong	703	31	0	0	0	86
Gapa	400	550	88	0	0	112
Geumag	48	68	537	8	59	15
Gimyeong	5	510	5,514	42	0	29
Gueom	2,100	613	96	0	0	68
Gujwa	3,129	6,135	4,576	22	40	129
Gunsan	12	153	87	1,525	10	1
Gyoraе	440	388	502	31	11	14
Haeан	107	35	0	0	0	41
Haengweon	5	303	5,825	144	42	0
Hamo	19	729	0	0	0	6
Hangyeong	0	0	197	493	70	0
Hanrim	1	520	623	57	36	1
Haweon	1,864	341	0	0	0	38
Heugag	0	7	1,171	11,441	55	0
Ido	760	198	47	0	0	0
Iho	0	35	15	0	0	0
Inseong	4	351	1	0	0	85
Jeju	181	3,659	2,209	627	263	4
Jeogag	0	9	90	2,506	13	0
Jeongbang	127	847	1,649	0	0	0
Jocheon	1,374	144	29	0	0	109
Jungeom	802	2,824	2,993	0	28	42
Jungmun	1,392	5,309	4,628	861	124	9
Miag	0	79	1,151	356	0	0
Minag	3	782	5,193	479	7	0
Mureung	2,029	214	0	0	0	12
Nagcheon	0	40	45	0	0	20
Namweon	0	494	2,653	12	7	21
Nogsan	0	111	1,635	136	0	0
Nongo	0	4	178	2,061	0	0

Table 18. Continued.

soil series	region I	region II	region III	region IV	region V	Etc
Noro	0	0	212	6,163	0	0
Onpyeong	34	92	51	0	0	58
Ora	902	5,487	1,907	41	375	3
Pyeongdae	0	53	7,609	2,297	465	0
Pyoseon	0	42	671	50	0	0
Sanbang	42	350	24	0	0	68
Sara	2,097	140	0	0	0	1
Sineom	0	428	3,295	34	4	1
Songag	596	724	650	173	28	15
Songdang	4	233	2,247	994	14	0
Topyeong	0	370	1,872	3	0	5
Tosan	0	0	270	2,381	0	0
Udo	13	316	13	0	0	0
Weolpyeong	59	88	6	0	0	8
Weolryeong	67	48	0	0	0	34
Wuimi	5	598	2,741	188	47	2
Yeongrag	326	14	0	0	0	1
Yongdang	288	81	0	0	0	97
Yonggang	90	37	0	0	0	42
Yongheung	1,588	1,262	7	0	0	6
Yongsu	48	148	0	0	0	2

비Andisols로 분류되는 토양들은 무릉통, 강정통, 애월통, 영락통 등처럼 대부분 I지역에 분포하고 있거나, 용흥통과 동귀통처럼 I지역과 II지역에 분산하여 분포하고 있다. II지역에 분포하더라도 용적밀도 $\leq 0.90 \text{ Mg/m}^3$, 또는 인산보유능 $> 85\%$ 라는 분류기준을 충족시키지 못할 경우 Andisols로 분류되지 않기 때문에 분류상 커다란 문제가 되지 않을 것이다. 감산통, 금악통, 병악통, 송악통 등과 같이 분석구에 분포하는 토양들은 여러 지역에 걸쳐 분포하고 있는데, 이는 지형, 모재, 시간 등 다른 토양들과는 다른 독특한 환경에서 생성 발달한 결과라고 생각된다. 흑악통, 토산통, 군산통, 노로통 적악통 등 산악지에 분포하는 토양들은 대부분 IV지역에 분포하고 있다. Hapludands로 분류되고 있는 노로통, 적악통 및 논고통이 IV지역에 분포하는 것은 토양 깊이별 유기물 함량을 적용하지 못한 결과라 생각된다. 남원통, 토평통, 위미통, 김영통 등 Melanudands로 분류되고 있는 토양들은 대부분 III지역에 분포하고 있으나, 일부는 II지역에도 분포

하고 있다.

Hapludands로 분류되고 있는 중문통과 Fulvudands로 분류되고 있는 구좌통, 아라통, 중엄통 등은 I지역, II지역 및 III지역에 널리 분포하고 있다. 이러한 토양들은 Andisols과 비Andisols, Andisols 중에서도 Hapludands, Fulvudands, Melanudands로 각각 구분하여 재분류해야 할 것이다. Inceptisols로 분류되고 있는 오라통과 Ultisols로 분류되고 있는 제주통의 경우 I지역에 분포하는 비율이 적은 반면에 I지역에서 V지역까지 전 지역에 걸쳐 분포하고 있다. 이들 토양도 Andisols과 비Andisols, Andisols 중에서도 Hapludands, Fulvudands, Melanudands로 각각 구분하여 재분류해야 할 것이다. 한경통과 평대통은 III지역과 IV지역에 널리 분포하고 있다. 이들 토양은 thermic과 mesic 토양온도상을 각각 구분하여 재분류해야 할 것이다.

Ⅲ. 환경요인과 토양분포

1. 서론

컴퓨터 기술이 발달함에 따라 토양통의 분포 등 2차원적인 공간자료들을 보다 정량적으로 다룰 수 있게 되었다. 이에 따라 2차원 공간위에서 적합한 모델을 개발하고 이를 또 2차원 공간위에 표출해봄으로써 조사가 안 된 지역의 토양도를 작성할 수 있을 뿐만 아니라 토양의 생성, 발달에 대한 이해와 예측을 보다 효율적으로 연구할 수 있다.

1941년 Jenny가 토양의 생성요인인 기후(climate), 생물(organism), 지형(relief), 모재(parent material), 시간(time)의 5가지를 이용하여 이러한 요인들의 작용에 의해서 토양의 생성을 함수와 같이 정량적으로 나타낼 수 있다고 제안하였고, 그 이후 많은 토양학자들에 의해 토양과 생성요인과의 관계를 정량적으로 밝히려는 노력이 진행되어 왔다(McBratney *et al.*, 2003; Minasny *et al.*, 2008). 그러나 여러 가지 요인들이 복합적으로 작용하는 것을 함께 고려하기 어려웠기 때문에 각각의 요인들이 토양에 미치는 영향에 관하여 climo-function(Dahlgren *et al.*, 1997), organo-function(Shoji *et al.*, 1993), topo-function(Song and Yoo, 1994), litho-function, chrono-function 등으로 불리는 관계들이 연구되어 왔다.

최근에 Webster(1994)에 의해 토양조사 및 분류에 확률과 통계를 이용하는 개념이 도입된 Pedometrics라는 새로운 분야가 제시되었고, 지리정보시스템(GIS, geographic information system), 원격탐사(RS, remote sensing) 등 기술의 발달은 토양조사자료의 이용성을 증가시키고, 토양의 정량적 연구 및 생태계 내에서의 토양의 기능에 대한 이해를 돕고 있다(Carre *et al.*, 2007).

Andisols의 생성에 관한 연구로는 화산퇴적물, 해발고도, 온도, 토양수분보유 정도, 시간 등의 영향에 관한 연구결과들이 많이 보고되고 있다(Shoji *et al.*, 1993). 이탈리아 남중부지방의 Roman지방에서는 해발고도 700m이상에서는 화

산화성 토양이 생성되었으나, 그 이하에서는 결정형 점토광물이 우세하였다고 하였고(Vacca *et al.*, 2003), Parfitt *et al.*(1983)은 뉴질랜드에서 강우량이 적을수록 halloysite가, 많을수록 allophane의 토양 중 점유비율이 많았다고 하였으며, Takahashi *et al.*(1993)은 xeric 상태에서 halloysite생성이 촉진되고 gibbsite나 Al-유기물 복합체의 형성이 억제되었다고 하였다. 제주도 토양의 생성에 관한 연구로는 Chae and Lee(1972)가 제주도 토양은 화산재가 온난습윤한 기후 하에서 풍화된 것으로 해석하여 모재의 영향이 가장 중요한 간대성토양으로 해석한 이후, Shin(1978)은 제주도 토양광물의 생성에는 시간인자의 영향이 가장 크다는 연구결과를 발표하였고, Song and Yoo(1994)는 한라산 남사면의 토양통의 조사에서 allophane의 생성은 기후인자의 영향이 강한 climosequence를 이루고 있다고 하였다.

제주도 토양에 대한 체계적인 분류는 1964년 개락토양조사사업으로 8개의 대토양군으로 분류된 이후, Um *et al.*(1977)이 1974년 신분류 기준으로 5목 11아목 13대군 63통(추자군도 포함)으로, 별도로 토색기준으로 6개군으로 구분하였다. 그러나 정밀토양도(NIAST, 1976)에서는 토색, 화학적 특성, 해발고도 등 복합적인 기준으로 흑색토, 농암갈색토, 암갈색토, 갈색산림토의 4개 군으로 구분하였다. 이후 Soil Taxonomy의 분류체계가 변화함에 따라 우리나라에서도 Taxonomical Classification of Korean Soils를 발간하여(NIAST, 2000) 토양분류를 수정, 보완하였으며, 제주도 토양인 대평통, 안덕통, 정방통의 3개 토양통도 새로이 추가되었다(NIAST, 2000).

이 연구에서는 현재의 환경요인들이 현재의 토양의 분포와 일정한 관계를 가지고 있을 수 있을 것이기에 제주도 토양통들을 대상으로 이러한 환경요인을 이용하여 분포를 정량적으로 나타내고자 하였다.

토양의 생성에 영향을 주는 기후, 모재, 지형, 식생, 시간요인을 정량적으로 표현하기 위해서는 요인들을 구체화시킬 필요가 있다. 이 연구에서는 기후요인과 관련되어 연평균온도, 강우량을, 모재요인과 관련되어 지표지질을, 지형요인과 관련되어 경사도, 경사향, 지형습윤지수, 해안으로부터의 거리, 정상으로부터의 거리 등을, 식생요인과 관련지어 토지이용형태 등을 포함시켰다. 이렇게 구체화된 요인들은 공간분석 프로그램을 이용하여 분포지도로 나타내었고, 이를 바탕으로

토양통의 분포와 정량적인 비교를 하였다. 제주도의 각각의 토양통 분포지역을 대상으로 다양한 환경요인지도를 작성하고 이들과 토양도를 중첩 분석하여, 각 토양통에 대한 환경요인들의 대푯값과 변이를 구하고, 이로부터 환경요인에 의한 토양통 분포확률을 알 수 있는 알고리즘을 개발하여, Andisols 분포와 환경요인의 관계와 더 나아가 Andisols 생성환경에 대해서도 이해를 하고자 하였다.



2. 자료 및 방법

1) 제주도 토양통의 특징 및 범위

토양분포의 특징을 공간적으로 분석하기 위하여 지형자료는 국토지리정보원에서 발간한 1/5000 지형도를 이용하였고, 토양도는 국립농업과학원이 2000년에 작성한 세부정밀토양도를 이용하였다. 제주도 세부정밀토양도에 의하면 제주도 본도 주위에는 약 178,343ha의 면적에 대하여 63개 토양통이 설정되어 있다. 이에 따르면 평균적으로 1개 토양통당 2,876ha의 면적을 차지하고 있고, 구좌통이 14,165ha, 이호통이 49ha로 최대, 최소 면적을 기록하고 있다. 그 중 우도, 산방, 용당, 용수, 해안, 이호 등 19개 토양통은 통면적이 700ha 이하로 전체에서 차지하는 비율이 0.4%가 되지 않았으며, 용강, 낙천 등 인위적인 토양관리에 의해 통의 구분이 된 것과, 또 안덕통은 토양통 설정만 되어 있고 차지하는 면적이 없으므로 알고리즘을 개발하기 위한 분석에는 이들을 제외하고 분석하였다.



Figure 31. Soils was classified by great group in detailed soil map.

Table 19. The area and areal ratio of each soil series in Jeju Island.

Soil series	Abbreviation	Classification (Great Group)	*Classification (Recommended)	Area (ha)	Area ratio
Aeweol	Aw	Eutrudepts	<i>Alfisols</i>	236	0.13
Andeog	Ad	Hapludands	Hapludands	–	–
Ara	Aa	Fulvudands	Fulvudands	9,004	5.05
Byeongag	Bw	Hapludands	Hapludands	246	0.14
Daeheul	Dl	Udifulvents	Udifulvents	364	0.20
Daejeong	Dn	Hapludands	<i>Alfisols</i>	259	0.15
Daepyeong	DP	Eutrudepts	<i>Alfisols</i>	389	0.22
Donggui	Dw	Eutrudepts	<i>Alfisols</i>	5,070	2.84
Donghong	Do	HapludalFs	HapludalFs	939	0.53
Euigui	Ek	Melanudands	Melanudands	2,248	1.26
Gamsan	Kn	Hapludands	Hapludands	783	0.44
Gangjeong	Kh	HapludalFs	HapludalFs	871	0.49
Gapa	Gv	Udipsamments	Udipsamments	1,251	0.70
Geumag	Kr	Melanudands	Melanudands	742	0.42
Gimyeong	Ka	Melanudands	Melanudands	6,112	3.43
Gueom	Km	Eutrudepts	<i>Alfisols</i>	3,015	1.69
Gujwa	Kj	Fulvudands	Fulvudands	14,165	7.94
Gunsan	Ks	Fulvudands	Fulvudands	1,797	1.01
Gyora	Ko	Dystrudepts	<i>Alfisols</i>	1,395	0.78
Haean	Ht	EndoaqualFs	EndoaqualFs	189	0.11
Haengweon	Hx	Melanudands	Melanudands	6,319	3.54
Hamo	Hm	Durudands	Melanudands	781	0.44
Hangyeong	HR	Melanudands	Melanudands	760	0.43
Hanrim	Hi	Hapludands	Hapludands	1,240	0.70
Haweon	Hv	HapludulFs	HapludulFs	2,286	1.28
Heugag	HA	Fulvudands	Fulvudands	12,673	7.11
Ido	Ia	Eutrudepts	Eutrudepts	1,025	0.57
Iho	Io	Haplosaprists	Haplosaprists	49	0.03
Inseong	In	Durudands	Hapludands	469	0.26
Jeju	Je	Hapludands	<i>Humults</i>	6,965	3.91
Jeogag	Ja	Hapludands	Hapludands	2,618	1.47
Jeongbang	JG	Melanudands	Melanudands	2,626	1.47
Jocheon	Jq	Udorthents	Udorthents	1,799	1.01
Jungeom	Jm	Fulvudands	Fulvudands	6,804	3.82
Jungmun	Jl	Hapludands	Hapludands	12,348	6.92
Miag	Mi	Hapludands	Hapludands	1,587	0.89
Minag	Mb	Melanudands	Melanudands	6,463	3.62
Mureung	Mn	HapludalFs	HapludalFs	2,336	1.31
Nagcheon	Nc	Psammaquents	Psammaquents	105	0.06
Namweon	Nw	Melanudands	Melanudands	3,231	1.81

* Classification were recommended by Dr. Song in soil survey staff at NIAST because current classification were based on old classification system.

Table 19. Continued.

Name	Abbreviation	Classification (Great Group)	*Classification (Recommended)	Area (ha)	Area ratio
Nogsan	Rs	Hapludands	Hapludands	1,912	1.07
Nongo	Ng	Hapludands	Hapludands	2,243	1.26
Noro	Nr	Hapludands	Hapludands	6,375	3.57
Onpyeong	Og	Udipsammments	Udipsammments	289	0.16
Ora	Or	Eutrudepts	Eutrudepts	8,742	4.90
Pyeongdae	Pd	Melanudands	Melanudands	10,423	5.84
Pyoseon	Ps	Melanudands	Melanudands	763	0.43
Sanbang	SM	Udivitrands	Udivitrands	565	0.32
Sara	SZ	Udifuvents	Udifuvents	2,311	1.30
Sineom	SL	Melanudands	Melanudands	3,767	2.11
Songag	Sw	Hapludands	Hapludands	2,195	1.23
Songdang	SD	Melanudands	Melanudands	3,495	1.96
Topyeong	Tp	Melanudands	Melanudands	2,251	1.26
Tosan	Tn	Fulvudands	Fulvudands	2,650	1.49
Udo	Ud	Hapludands	Hapludands	688	0.39
Weolpyeong	Wx	Endoaquepts	Endoaquepts	178	0.10
Weolryeong	Wr	Udifuvents	Udifuvents	170	0.10
Wuimi	Wm	Melanudands	Melanudands	3,589	2.01
Yeongrag	Yr	Hapludalfs	Hapludalfs	362	0.20
Yongdang	Yo	Eutrudepts	<i>Alfisols</i>	507	0.28
Yonggang	Yq	Eutrudepts	<i>Alfisols</i>	171	0.10
Yongheung	Yn	Hapludalfs	<i>Ultisols</i>	2,931	1.64
Yongsu	Yk	Hapludalfs	Hapludalfs	206	0.12

* Classification were recommended by Dr. Song in soil survey staff at NIAST because current classification were based on old classification system.

2) 공간자료의 작성

(1) 해발고도

토양통에 포함되는 환경요인 값은 벡터형태의 수치토양도를 270m×270m의 격자형 파일로 전환하고 그 중심점의 좌표를 구한 다음 그 지점의 요인 값을 추출하여 분석에 이용하였다. 해발고도별 토양 분포는 1/5000 지형도에서 등고선과 표고점만을 추출하여 30m × 30m의 격자형 수치표고모델(DEM, digital elevation model)을 작성하고 토양도를 중첩하여 한 다음 앞에서 구한 격자형 토양도의 중심점의 값을 추출하여 분석하였다.

(2) 기후요인(기온, 강수량)

기후요인 분석을 위한 기본적인 수치표고모델(DEM)은 30m × 30m의 격자크기 파일을 이용하였으나, 토양통 분포 분석에는 데이터의 용량을 감안하여 270m × 270m의 격자형 자료를 이용하였다. 월별 온도 및 강수량분포도의 제작은 제주에서 측정되는 4지점의 중관기상관측지점의 평년자료와 함께 제주지방 기상청에서 운영하는 16개 지점의 자동기상관측장치의 자료를 이용하였다. 그림 33과 그림 36에는 이러한 자료를 이용하여 작성한 제주도 평년기온분포도 및 연강수량분포도를 나타내었다. 한라산 정상으로 기온이 낮아지고 강우량이 많아지는 형태를 나타내고 있었다.

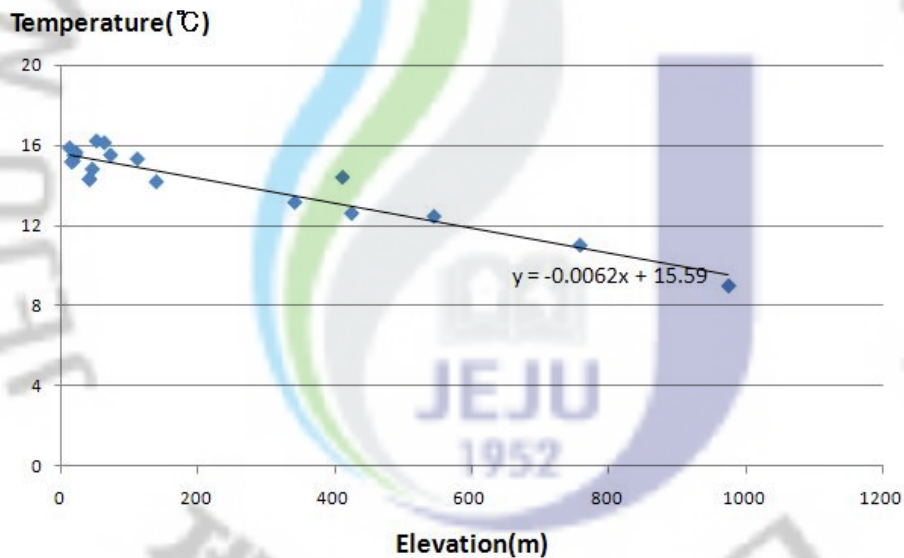


Figure 32. Annual mean temperature is decreased by higher Elevation.

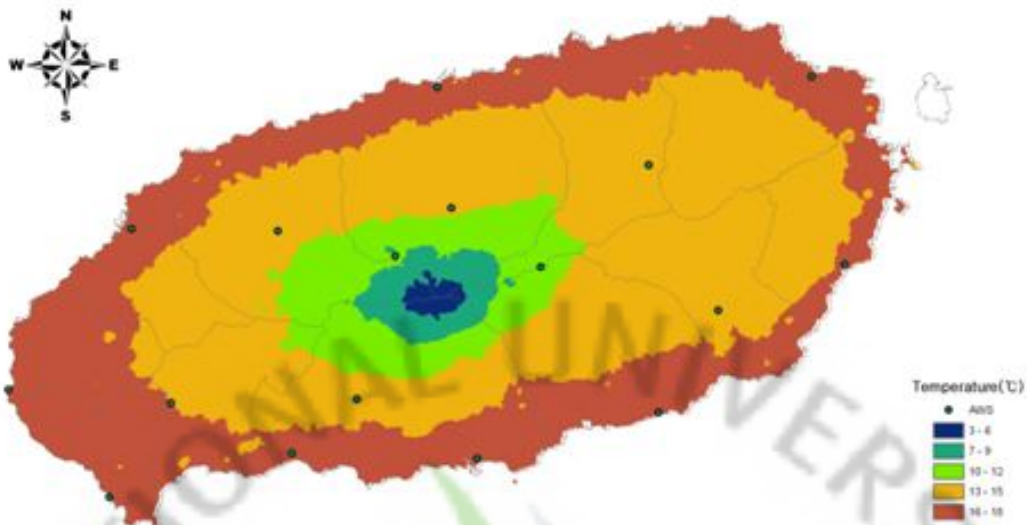


Figure 33. Temperature map was drawn from the relationship of Elevation and temperature.

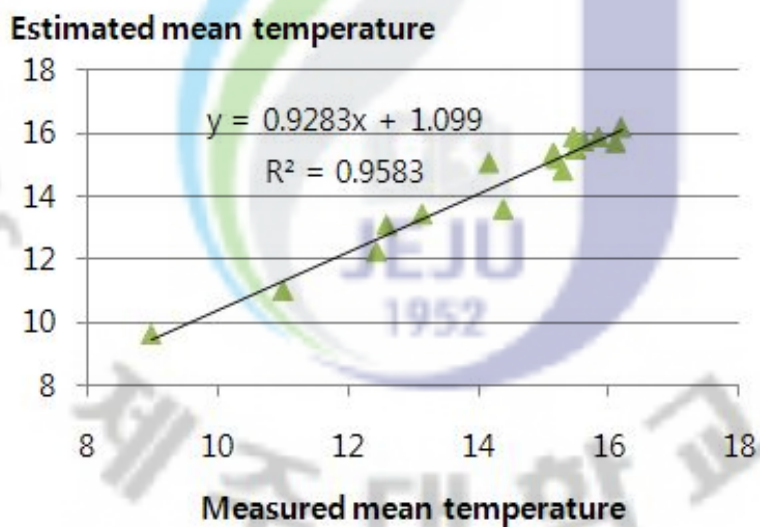


Figure 34. Comparison of measured and estimated temperature.

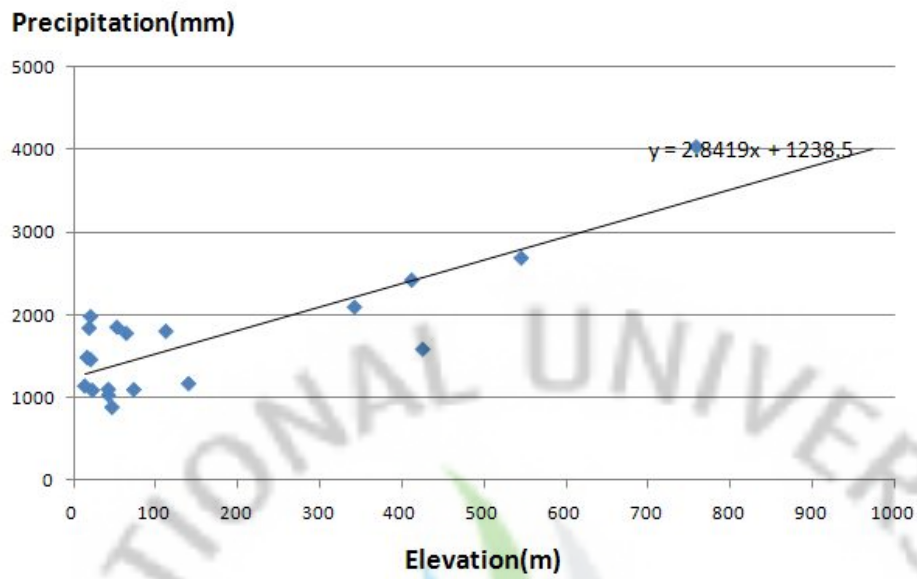


Figure 35. Annual precipitation is increased by higher Elevation.

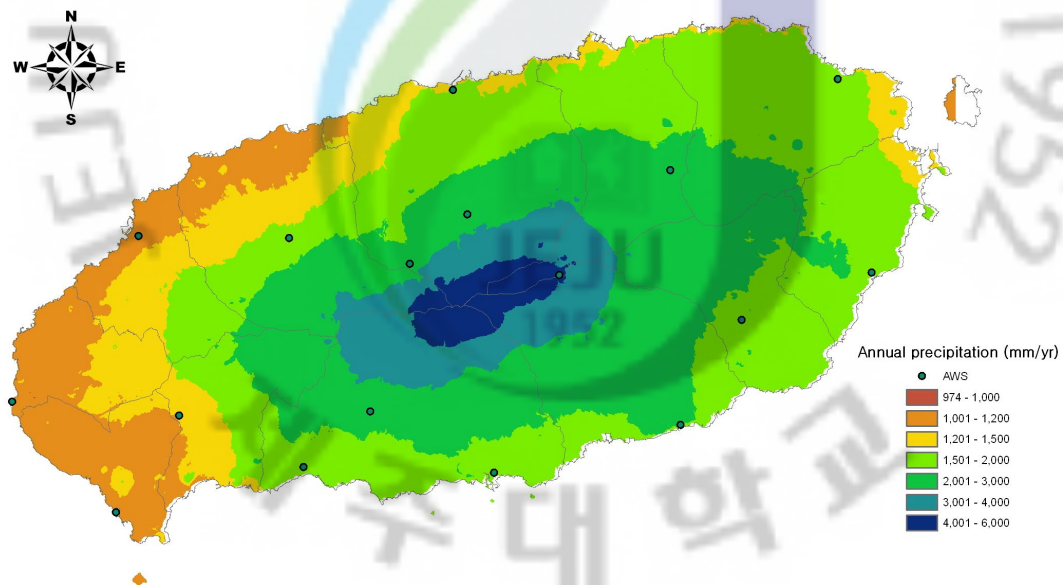


Figure 36. Precipitation map was drawn from the relationship of Elevation and precipitation.

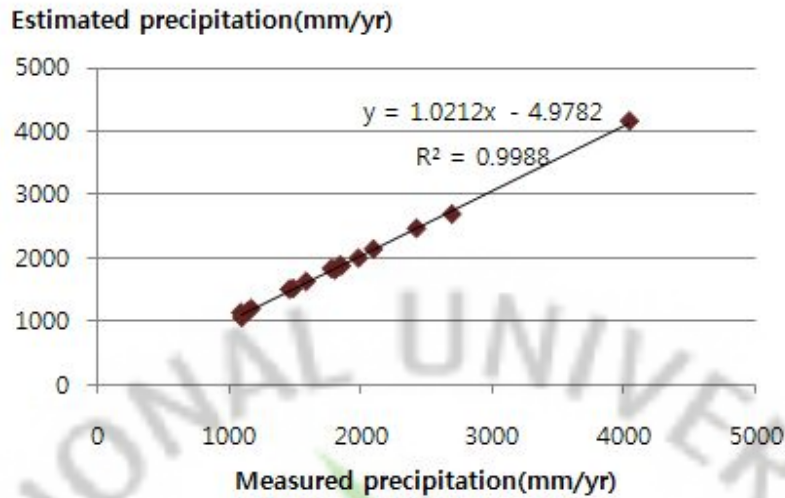


Figure 37. Comparison of measured and estimated rainfall.

(3) 지형요인(경사도, 경사향, 고도차, 해안거리, 지형습윤지수)

경사도와 경사향은 30m × 30m의 격자크기로 작성된 DEM을 기본으로 하여 작성되었다. 기준격자 [i, j]의 평균경사도는 남북방향의 해발고도차와 동서방향의 해발고도차의 평균으로 나타낼 수 있으며, 아래의 식은 해당 격자의 경사도를 계산하는 식이다.

$$\text{Slope}[i, j] = ((Z[i+250, j] - Z[i-250, j])^2 + (Z[i, j+250] - Z[i, j-250])^2)^{0.5} / 2 * 250 * 10$$

여기서, Z는 [i, j] 위치의 해발고도이다. 경사향은 기준격자의 인접격자와의 경사도를 구한 후 가장 큰 경사방향을 북동, 동, 남동, 남, 남서, 서, 북서, 북, 평면을 각각 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 0으로 표현하였다. 다만 경사향은 기준되는 방향에 따라 각각의 수치가 변할 수 있으므로 수치를 가지고 통계를 계산하지 않고 전 토양통 면적에 대한 각 방향에 속하는 토양통별 면적의 비율로서 토양통이 분포될 확률을 구하였다.

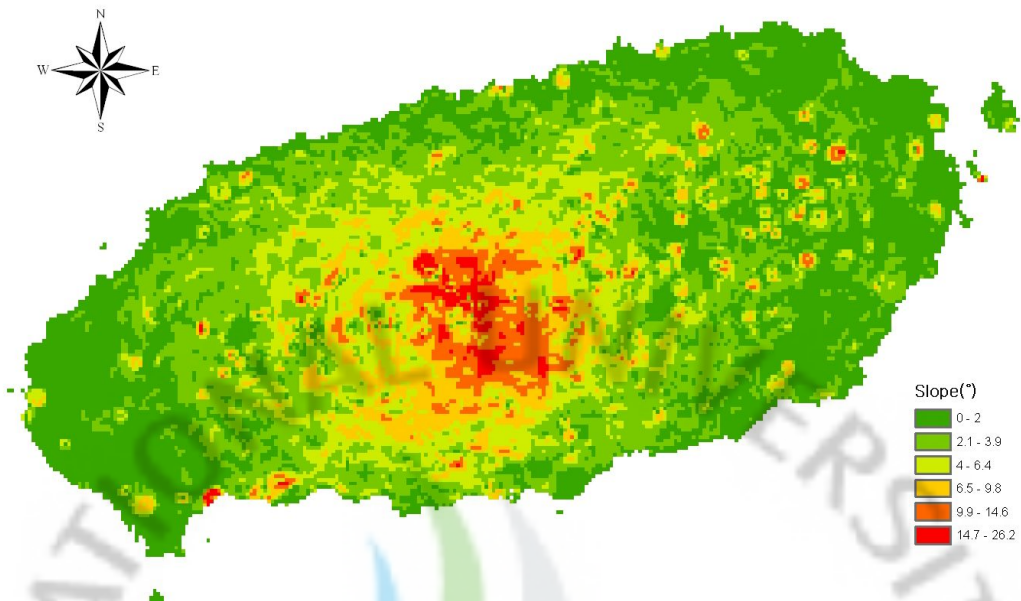


Figure 38. Slope map was drawn from calculation with digital elevation model (DEM).

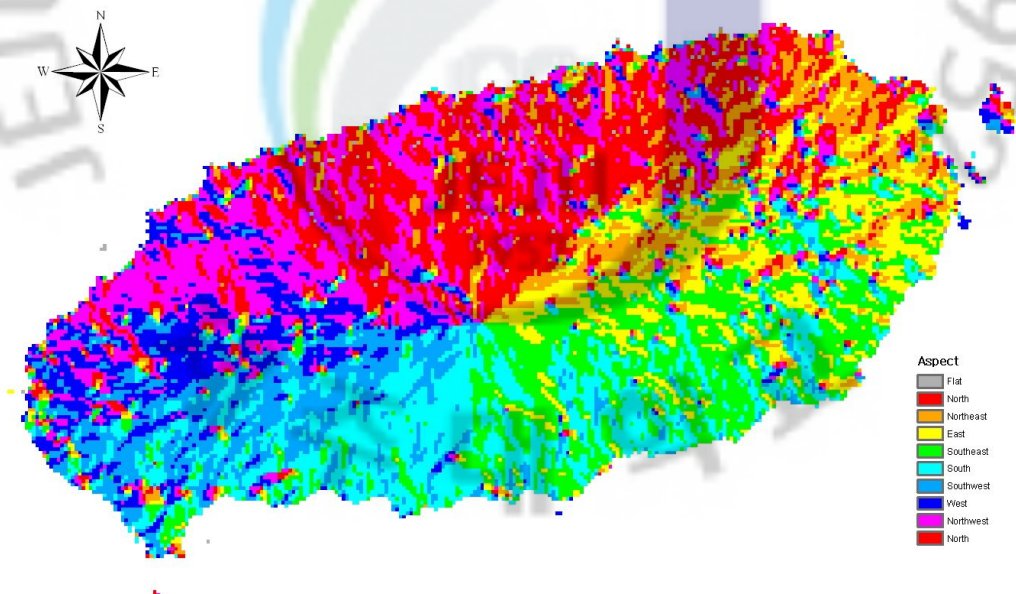


Figure 39. Aspect map was drawn from calculation with digital elevation model (DEM).

어떤 지역에 주변의 가까운 지역과 지형적으로 어떤 관계가 있는가를 나타내기 위하여 1km 주위의 주변지역내의 평균해발고도와의 편차를 구하여 해발고도차를 나타내었다. 즉, 기준격자지점이 사방 1km내에서 가장 저지대이면 0이고 고지대일수록 양으로 커지는 값을 가질 수 있게 나타내어 이를 평활하였다. 그림 40은 주위와의 고도차를 나타낸 지도로 오름이 있거나 중앙의 한라산 산악지는 값이 크게 나타나고, 평탄지형에 가까울수록 값이 작아지는 것을 알 수 있다.

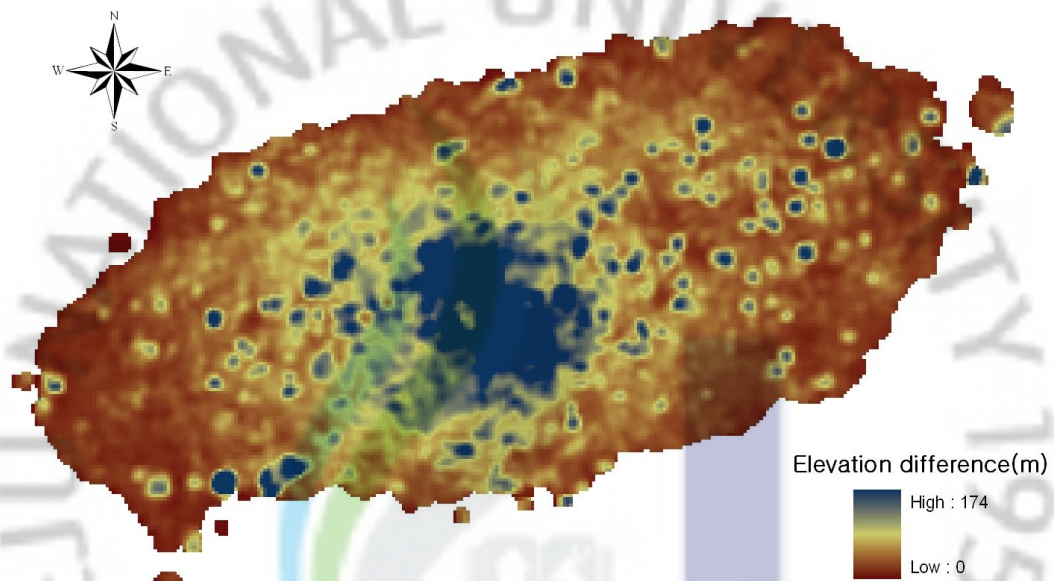


Figure 40. Elevation difference map within 1 km area was drawn from calculation with digital elevation model (DEM).

해안으로부터의 거리는 해안선으로부터 내부로 최단 직선거리를 구하여 해안 거리지도를 작성하였고, 정상으로부터의 거리는 한라산 정상으로부터 직선거리를 구하였다.

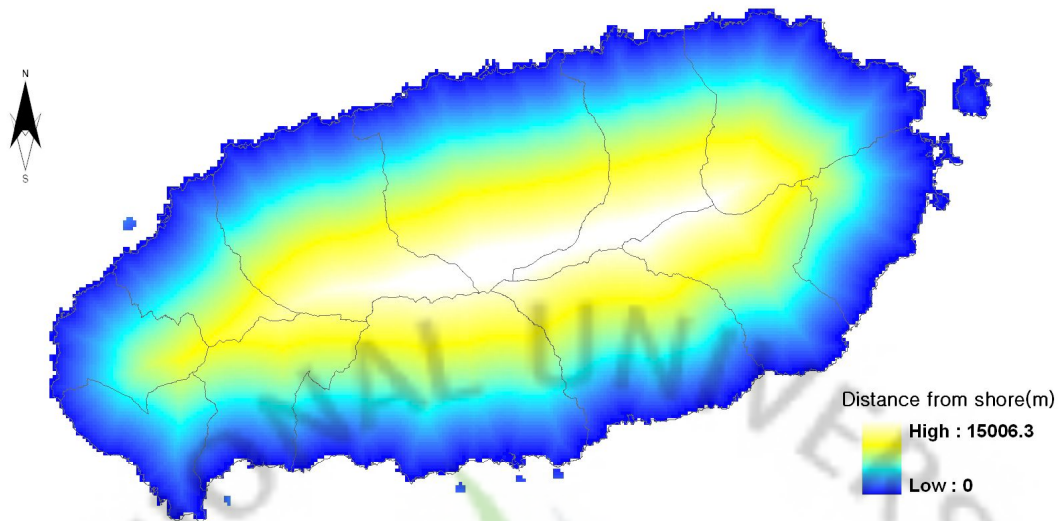


Figure 41. Map of distance from the shore was drawn from calculation with digital elevation model (DEM).

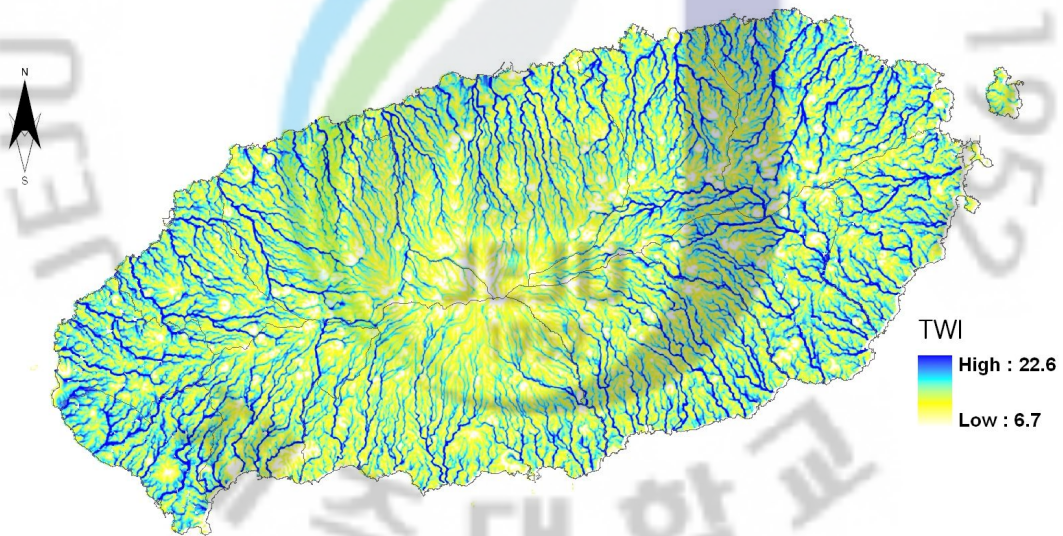


Figure 42. Map of topographic wetness index.

지형은 강우에 따른 물의 흐름에 의해 계곡이 형성되는 등의 영향을 받게 되고 또 이러한 계곡과 하천의 형성은 평시에도 수분의 보유가 다르게 된다. 이러한 효과는 지형습윤지수(TWI)로 나타낼 수 있는데 이 지수가 높을수록 지표면이 포화되거나 지형적으로 토양수분함량이 높을 가능성이 크게 되며 아래식과

같이 계산하였다(Moore, 1993). 그림 42에는 제주도 지역의 지형습윤지수 (TWI) 분포도를 나타낸 것으로 중앙의 산악지에서 해안선으로 물이 흐름을 따라 지형습윤지수가 증가함을 나타내고 있다.

(4) 지표지질요인(지표지질도)

지표지질은 한국농촌공사에서 작성한 지표지질도를 이용하여 토양도와 중첩하여 분석하였다. 이에 따르면 제주도에는 반상장석현무암, 반상휘석현무암, 조면암 등 크게 12종의 암석이 분포되어 있다. 그 중 조면암계 3.6%, 사구와 성산층 2.8%, 신더어콘 7.8%를 제외하면 대부분이 현무암계인 지질을 나타내고 있다. 토양통과 지질의 관계도 양적으로 표현하기 어려우므로 각 지질에 속하는 토양통의 면적비율을 이용하여 분포확률을 구하였다.

(5) 토지이용요인

토지이용도는 환경부에서 제공하는 자료를 이용하여 토지종류를 시가지, 농업지역, 초지, 산림지역, 나지 등으로 구분하였다. 토지이용과 토양의 분포도 각 토지 이용 종류별로 속하는 토양통 면적의 비율로 그 확률을 나타내었다.

Table 20. Areas and ratios of geological rocks on Jeju Island

Rock Types	Abbreviation	area(ha)	area ratio(%)
acicular feldspar-bearing olivine basalt	FOB	45,715	24.7
feldspar basalt	FB	41,059	22.2
porphyritic augite basalt	PAB	31,361	17.0
aphanitic basalt	APB	28,554	15.4
porphyritic feldspar basalt	PFB	11,244	6.1
augite basalt	AB	32	0.0
trachyte	T	4,940	2.7
trachyte andesite	TA	1,729	0.9
cinder cone	C	14,451	7.8
Sungsan formation	SSF	3,472	1.9
sand dune	SD	1,746	0.9
Seoguipo formation	SGF	15	0.0

3) 토양통 분포 분석 및 해석(정규화 및 확률화)

해발고도, 기온, 강수량, 경사도, 경사향, 고도차, 해안거리 등의 요인별 지도는 토양통지도와 중첩하여 각각의 토양통에 분포하는 각 격자값을 추출하였다. 각 격자 내에는 각 요인에 대한 값이 있으므로 토양통 지역에 해당되는 값의 분포도에서 평균과 표준편차를 구하였다. 어떠한 값이 정규분포를 이룰 경우 평균과 표준편차를 이용하여 표준정규분포를 구할 수 있다. 여기에서는 분석하고자 하는 토양통 내에는 각 요인별 값들이 정규분포를 이룬다고 가정하였다. 각 요인별 값에 대한 표준정규분포표를 구하면 각 값에 해당되는 표준확률을 구할 수 있으므로 이를 이용하여 각 값에 해당되는 토양통이 해당될 가능성을 확률로 나타내고 이를 확률별로 순차적으로 나타내었다.

대부분의 비율변수와는 달리 경사향, 지표지질, 토지이용 등은 계량화하여 분포특성을 나타내기 어려운 변수들이므로 이들에 대해서는 각 요인에 속하는 토양통 면적비율을 해당 토양통의 분포확률을 나타내었다.

2. 결과 및 고찰

1) 자료 분석결과

(1) 토양통의 해발고도별 분포

표 21에는 분석대상 토양통들의 평균 해발고도와 표준편차를 나타내었다. 가장 높은 곳에 위치하는 군산통에서부터 해안가에 위치하는 가파통에 이르기까지 각 토양통들의 특징을 나타낼 수 있는 대표 해발고도범위를 설정할 수 있었다. 구좌통은 해안가에 군산통은 1000m의 해발고도를 중심으로 광범위하게 발견될 수 있음을 알 수 있다. 그림 11에는 해발고도를 50m 단위로 분할한 수 해당고도에 분포하고 있는 토양통의 면적을 추출하여 분포를 살펴보았다. 분포형태는 이론적으로 가정한 것과 달리 불규칙하게 분포하고 있음을 알 수 있다. 특히, 군산, 한경통은 해발고도 상으로 전혀 다른 지역에도 분포하고 있는 것으로 되어 있고, 제주도에서 대체로 해발고도 600m 정도의 지역은 토양온도상으로 mesic 과 thermic으로 구분되는 고도이므로, 이것은 토양도 작성 상의 오류로 파악되고 이에 대한 수정, 보완이 필요하다 하겠다. 이것은 지온과 토양통의 분포 분석에서도 유사한 결과를 나타내었다. 이 자료로부터 특정 해발고도에 각각의 토양통이 위치할 수 있는 기회를 계산할 수 있으며, 그림 43에는 몇 가지 토양통들에 대하여 발견될 해발고도의 기회를 그래프로 나타내었다.

Table 21. Mean Elevations(m) and standard deviations of each soil series.

Soil series	Mean	SD	Soil series	Mean	SD
Gunsan	1,055	489	Wuimi	179	129
Heugag	902	310	Ara	160	109
Tosan	874	345	Namweon	158	113
Jeogag	854	283	Gimyeong	144	106
Nongo	815	266	Topyeong	138	104
Noro	755	245	Euigui	127	110
Hangyeong	546	236	Sineom	112	87
Pyeongdae	378	125	Jeongbang	105	67
Miag	357	134	Jungeom	100	95
Songdang	328	184	Donghong	96	95
Jeju	328	131	Gujwa	93	91
Nogsan	304	123	Donggui	78	57
Minag	274	131	Ido	72	50
Jungmun	270	146	Yongheung	64	45
Hanrim	244	150	Sara	56	45
Pyoseon	235	107	Gueom	54	52
Songag	234	160	Haweon	54	45
Geumag	220	143	Mureung	46	37
Haengweon	212	112	Gangjeong	35	33
Ora	202	130	Jocheon	29	34
Gyora	201	139	Hamo	27	15
Gamsan	200	146	Gapa	25	19

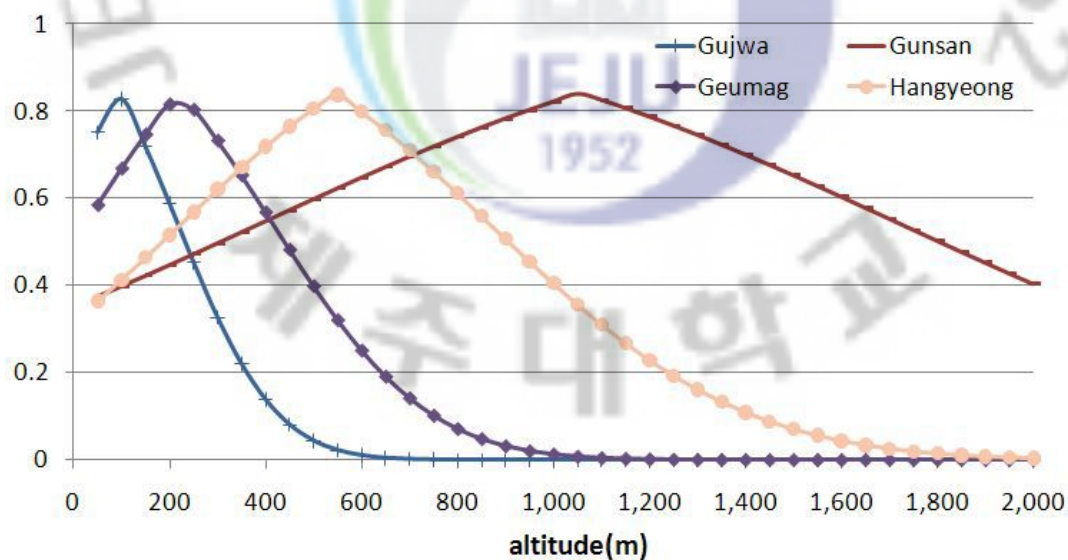


Figure 43. Theoretical curves show discovered opportunities for each soil series.

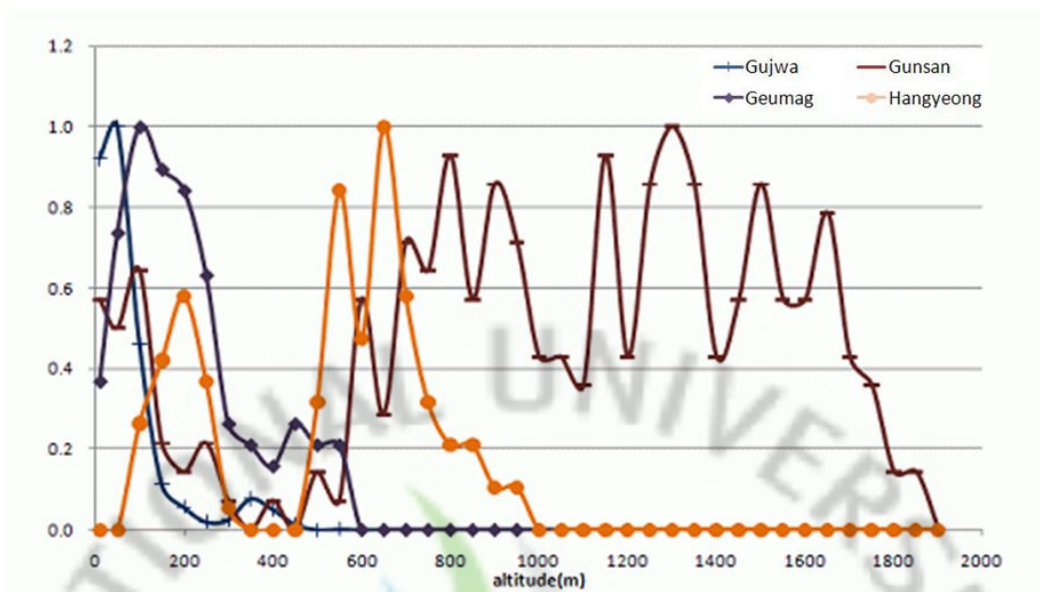


Figure 44. Distribution expectations of several soil series analyzed with areal ratios within every 100m elevation contours.

(2) 기후요인과 토양통

토양도와 연평균온도 지도를 중첩하여 각 토양통에 해당하는 온도의 평균과 표준편차를 표 22에 나타내었다. 노로, 논고, 적악, 토산, 흑악, 군산통 등 산악지에 분포하는 토양통들은 평균기온이 11°C 이상인 지역에 분포하고 있었다. 제주지역에서 평년에 측정된 기온과 지중 50cm 지온의 관계와 평균기온지도를 이용하여 지중온도지도를 구할 수 있다. 이러한 식으로부터 약 4°C 정도 지온이 기온보다 높았는데 이는 토양과 기온도의 중첩 분석한 결과와 대체로 일치하는 경향이였다. 지중온도지도와 토양도를 중첩하여 각각의 지온범위에 해당되는 토양통의 면적비를 이용하여 몇 가지 토양통에 대한 분포기대율을 표 23에 나타내었다. 이 표에서 보면 군산통과 한경통의 일부는 지온이 15°C 이상인 thermic 지역에 분포하고 있는 것을 알 수 있으며, 또한 금악통의 일부도 mesic인 지역에 분포하고 있었다.

토양도와 강수량 자료를 중첩하여 각 토양통에 해당되는 평균과 표준편차를 표 24에 나타내었다. 강수량은 산악지에 분포하는 토양통 지역에서 많았고 해안

으로 내려올수록 적은 경향이였다. 강수량별로 각 토양통이 분포하는 면적비로부터 분포기대율을 나타내었을 때 군산통은 대부분 2,700mm 이상의 지역에 많이 분포하였으나 일부는 그 이하 지역에도 분포되는 것으로 나타났고, 금악통은 1400mm를 기준으로 두 개의 peak가 분리되어 나타났다.

Table 22. Mean temperatures(°C) and standard deviations of each soil series.

Soil series	Mean	SD	Soil series	Mean	SD
Jeongbang	15.3	1.5	Namweon	14.4	1.9
Sara	15.2	1.7	Haengweon	14.3	0.9
Haweon	15.2	2.2	Gyora	14.3	1.7
Hamo	15.1	3.2	Gangjeong	14.2	4.3
Donghong	15.1	0.7	Jungmun	14.2	1.0
Mureung	15.0	2.9	Gamsan	14.2	2.7
Donggui	15.0	1.9	Songag	14.2	1.7
Yongheung	15.0	3.0	Geumag	14.1	1.6
Euigui	15.0	1.4	Minag	14.1	0.7
Gujwa	14.9	1.6	Pyoseon	14.0	0.6
Jungeom	14.9	2.1	Jeju	13.7	1.0
Gueom	14.9	2.8	Nogsan	13.6	1.6
Ido	14.8	2.2	Songdang	13.5	1.4
Ara	14.8	0.8	Miag	13.4	0.8
Sineom	14.7	1.1	Pyeongdae	13.3	0.8
Jocheon	14.7	3.6	Hangyeong	12.3	1.6
Topyeong	14.6	0.7	Noro	11.0	1.5
Gapa	14.5	3.7	Nongo	10.7	1.7
Hanrim	14.5	1.1	Jeogag	10.4	1.7
Ora	14.5	1.3	Tosan	10.3	2.3
Gimyeong	14.5	1.0	Heugag	10.2	2.0
Wuimi	14.4	1.5	Gunsan	8.8	3.3

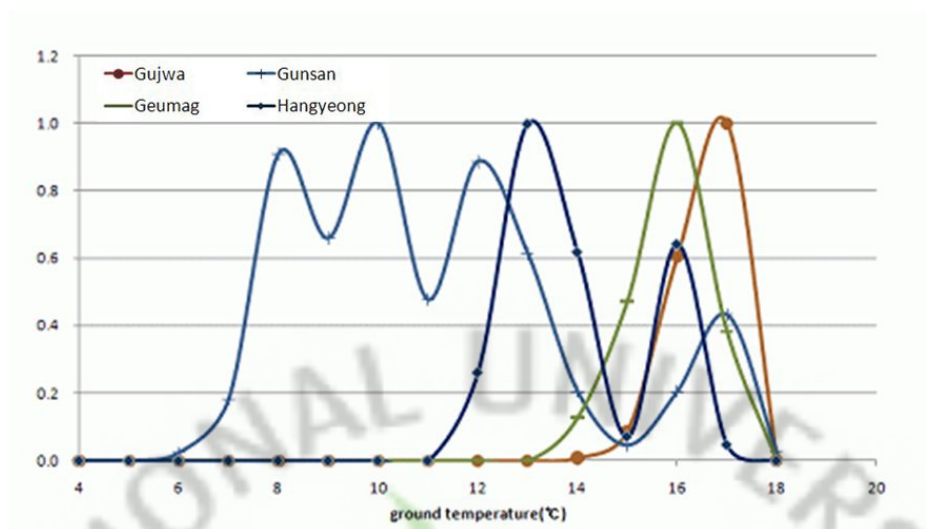


Figure 45. Areal distribution of several soil series analyzed with areal ratios within every 1°C ground temperature ranges.

Table 23. Areal percentages of soil series divided by 15°C ground temperature.

Soil series	Percentage below 15°C of ground temperature	Percentage over 15°C 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
Hangeong	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 24. Mean precipitation(mm) and standard deviations of each soil series.

Soil series	Mean	SD	Soil series	Mean	SD
Tosan	3,532	665	Songag	1,855	435
Gunsan	3,428	1,060	Sineom	1,843	226
Heugag	3,354	565	Gamsan	1,826	467
Jeogag	3,306	691	Jeongbang	1,813	297
Noro	3,211	586	Jungmun	1,810	442
Nongo	3,178	646	Gyora	1,781	457
Pyeongdae	2,384	281	Ora	1,736	302
Nogsan	2,253	420	Jungeom	1,697	344
Miag	2,165	238	Ara	1,643	374
Minag	2,131	370	Gujwa	1,600	326
Hangyeong	2,114	177	Ido	1,550	274
Hanrim	2,091	297	Donghong	1,474	296
Haengweon	2,048	266	Donggui	1,432	272
Jeju	2,010	360	Yongheung	1,373	349
Songdang	1,998	295	Gapa	1,358	394
Geumag	1,997	414	Gueom	1,310	308
Pyoseon	1,982	174	Sara	1,235	207
Namweon	1,952	302	Jocheon	1,204	314
Wuimi	1,917	314	Haweon	1,193	230
Gimyeong	1,900	227	Mureung	1,167	219
Euigui	1,894	270	Hamo	1,130	214
Topyeong	1,885	234	Gangjeong	1,078	-

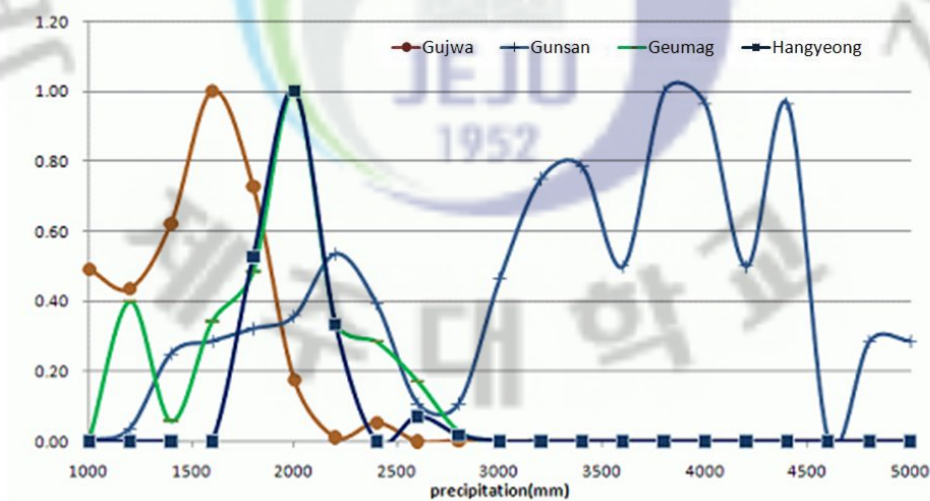


Figure 46. Areal distribution of several soil series analyzed with areal ratios by annual precipitation ranges.

(3) 지형요인과 토양통 분포

지형요인으로는 경사도, 경사향, 고도차, 해안으로부터의 거리, 정상으로부터의 거리, 지형습윤지수 등을 이용하였다. 경사도, 고도차, 해안으로부터의 거리, 정상으로부터의 거리, 지형습윤지수는 비율변수로서 정량화할 수 있으므로 각 토양통에 대하여 대표적인 값과 표준편차를 구할 수 있지만, 경사향은 단지 방향에 대한 변수이므로 대표값을 크기로 구분할 수가 없다. 따라서 각 토양통이 주로 분포되는 경사향을 판단하기 위해서는 각 경사향에 위치한 토양통의 면적비율을 이용하여 해당 경사향에 토양통이 분포될 확률을 구하였다.

토양통별로 경사도와 주변과의 고도차에서는 산악지에 분포하는 토양통일 수록 경사도가 높고, 주변과의 고도차가 큰 경향이였다. 금악통은 한경통과 경사도에서 유사한 지역에 분포하였으나, 주변과의 고도차에서는 한경통보다 낮았다. 구좌통은 경사도도 낮고 주변과의 고도차도 크지 않은 평지에 많이 분포하고 있었다.

Table 25. Mean slopes(degree) and standard deviations of each soil series.

Soil series	Mean	SD	Soil series	Mean	SD
Gunsan	11.9	5.5	Haengweon	2.8	1.5
Tosan	8.9	3.2	Jeongbang	2.7	1.5
Heugag	8.8	3.9	Euigui	2.7	2.2
Jeogag	8.5	4.3	Wuimi	2.4	1.4
Nongo	6.1	2.5	Donggui	2.2	1.1
Noro	6.1	2.9	Namweon	2.1	1.7
Hangyeong	5.3	2.3	Donghong	2.1	1.4
Geumag	5.1	3.0	Ido	2.1	1.2
Miag	5.0	2.8	Yongheung	2.1	1.3
Nogsan	4.8	2.5	Jungeom	2.1	1.4
Songag	4.8	2.8	Sara	1.9	0.9
Gamsan	4.3	2.8	Sineom	1.8	1.3
Gyora	4.3	2.6	Topyeong	1.8	1.3
Hanrim	4.3	2.5	Gimyeong	1.8	1.0
Jeju	4.1	1.7	Gujwa	1.7	1.1
Jungmun	3.8	2.0	Gueom	1.7	1.1
Pyoseon	3.8	2.7	Jocheon	1.2	0.9
Songdang	3.5	2.1	Hamo	1.2	1.3
Ora	3.3	1.7	Haweon	1.2	0.8
Minag	3.1	1.8	Gapa	1.2	0.5
Pyeongdae	3.0	1.9	Gangjeong	1.1	1.1
Ara	2.9	1.5	Mureung	1.1	0.7

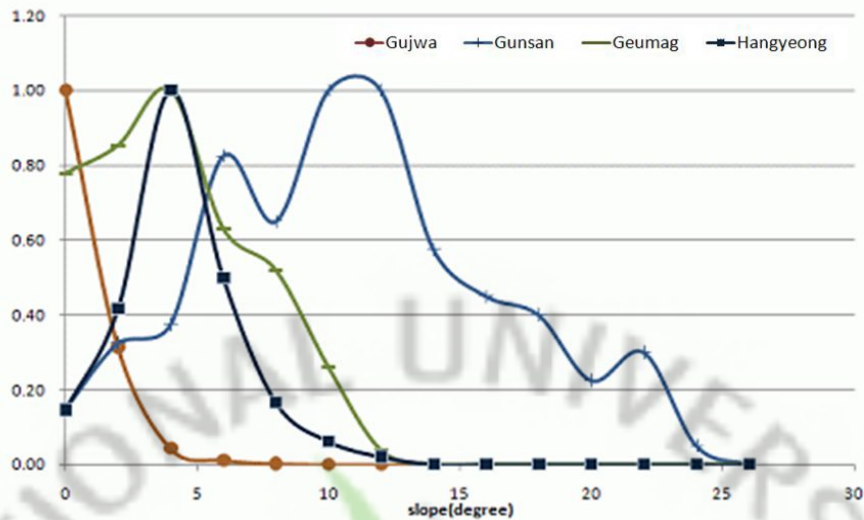


Figure 47. Areal distribution of several soil series analyzed with areal ratios by slope ranges.

Table 26. Mean elevation differences(m) and standard deviations of each soil series.

Soil series	Mean	SD	Soil series	Mean	SD
Gunsan	83.7	33.7	Ara	18.5	7.8
Jeogag	57.6	24.0	Jeongbang	17.8	7.9
Tosan	56.6	20.9	Wuimi	17.7	8.8
Heugag	55.9	23.4	Euigui	17.3	10.3
Nongo	42.6	15.8	Ido	17	11.0
Noro	41.0	18.0	Namweon	16.5	11.6
Hangeyong	39.2	20.9	Donggui	16	7.7
Miag	34.1	14.8	Topyeong	15.9	9.0
Songag	32.9	17.7	Yongheung	15.8	9.1
Geumag	32.4	16.0	Donghong	15	7.9
Nogsan	30.8	13.9	Jungeom	14.1	7.7
Gamsan	30.6	13.9	Gimyeong	13.3	6.6
Hanrim	29.4	14.1	Sara	12.9	5.0
Pyoseon	29.3	19.2	Sineom	12.7	7.2
Gyora	29.2	13.9	Gujwa	11.8	7.0
Jeju	27.0	10.2	Gueom	11.4	5.6
Songdang	26.9	14.8	Jocheon	10.9	6.1
Songdang	3.5	2.1	Hamo	1.2	1.3
Ora	3.3	1.7	Haweon	1.2	0.8
Minag	3.1	1.8	Gapa	1.2	0.5
Pyeongdae	3.0	1.9	Gangjeong	1.1	1.1
Ara	2.9	1.5	Mureung	1.1	0.7

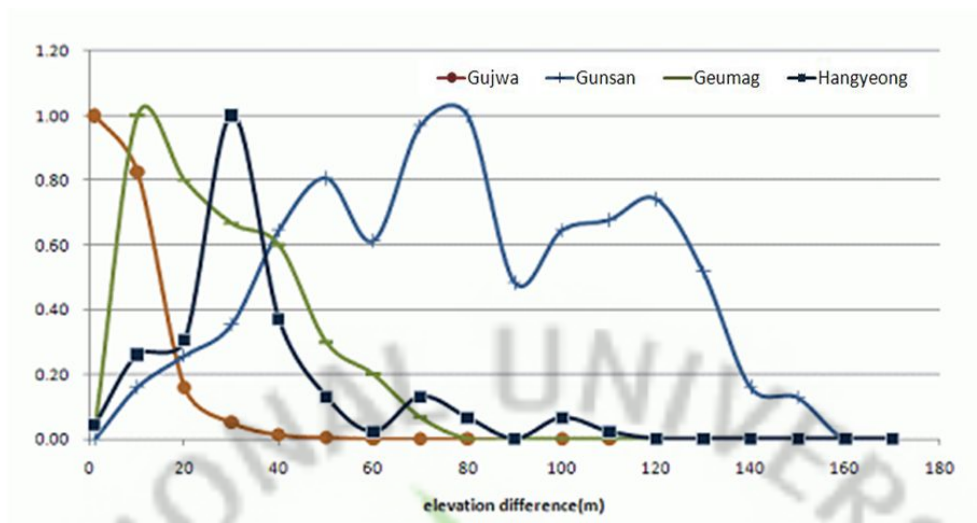


Figure 48. Areal distribution of several soil series analyzed with areal ratios by elevation difference ranges.

경사향은 토양통이 한라산의 어느 사면에 많이 위치하는가에 따라 결정되었으며, 구좌통, 군산통, 한경통, 금악통 들은 북이나 서북사면에 많이 분포하고 있었다. 해안으로부터의 거리나 정상으로부터의 거리는 제주도 중심부에 한라산이 위치하고 있는 점을 고려하면 토양통이 산악지, 중산간지, 해안지의 어느 지역에 위치하는가에 따라 주로 분포하는 지역이 결정되었다.

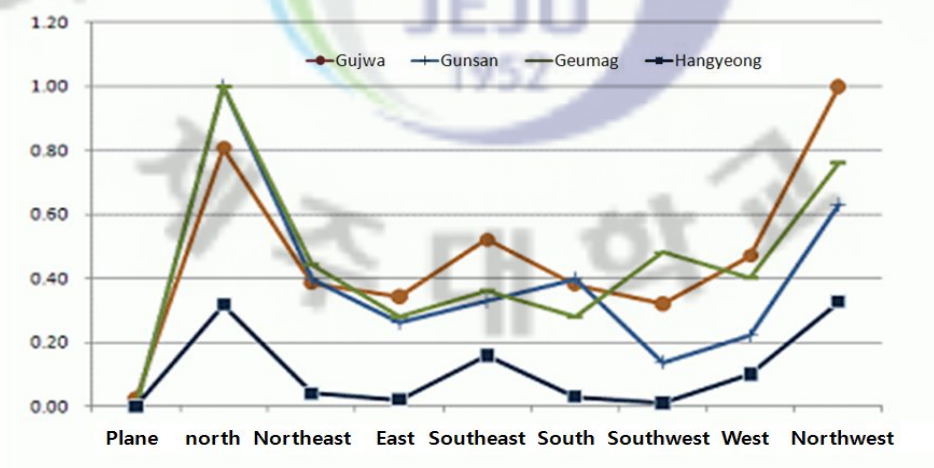


Figure 49. Areal distribution of several soil series analyzed with areal ratios by aspects.

Table 27. Mean distances(m) from shore and standard deviations of each soil series.

Soil series	Mean	SD	Soil series	Mean	SD
Gapa	1,016	738	Gimyeong	5,109	2,596
Hamo	1,093	668	Gyoraе	5,247	3,533
Jocheon	1,181	1,072	Songag	5,248	3,342
Sara	1,762	1,089	Geumag	5,422	3,191
Gangjeong	1,860	1,319	Jungmun	5,631	2,392
Yongheung	1,893	1,550	Topyeong	5,645	4,411
Ido	2,057	1,500	Haengweon	5,924	1,941
Gueom	2,185	1,891	Namweon	5,941	4,395
Donggui	2,303	1,580	Jeju	6,744	2,282
Jeongbang	2,369	1,664	Minag	6,946	2,311
Mureung	2,743	1,650	Pyoseon	8,087	2,571
Jungeom	2,800	2,534	Songdang	8,180	2,714
Donghong	3,026	2,267	Nogsan	8,799	3,534
Haweon	3,123	1,923	Hangyeong	9,040	2,677
Euigui	3,236	2,531	Miag	9,324	2,396
Gujwa	3,237	2,420	Pyeongdae	10,484	2,391
Sineom	3,927	2,671	Heugag	10,597	2,226
Ara	4,156	2,069	Nongo	11,119	2,641
Gamsan	4,175	3,274	Gunsan	11,208	4,178
Hanrim	4,645	2,917	Tosan	11,214	2,383
Ora	4,723	2,624	Noro	11,505	1,820
Wuimi	4,998	3,057	Jeogag	11,702	-

(4) 지표지질과 토지이용

정성적 자료인 지표지질은 각 토양통과 지질도를 중첩 분석하여 각 지질에 분포하는 토양통의 면적으로부터 토양통이 분포될 확률을 구하였다. 대부분의 토양통들이 현무암지대에 널리 분포되고 있었으나, 군산통은 안산암지대에, 금악통은 분석구지대에도 많이 분포하고 있었다.

토지이용도 같은 방법으로 분석하였다. 갈색산림토로 분류되었던 군산통, 노로통, 논고통, 적악통, 토산통, 흑악통 등은 산림지역에 분포하고 있었고, 평대통과 표선통은 초지에 많이 분포하고 있었으며, 대부분이 토양통들이 농업지대에 분포하고 있었다.

Table 28. Areal distribution ratio of each soil series by different surface geology.

soil series	*FOB	APB	FB	PFB	PAB	AB	T	TA	SSF	SGF	SD	C	SYF	Br
Ara	0.15	0.33	0.11	0.05	0.27	0	0.06	0.02	0	0	0	0.02	0	0
Donggui	0.1	0.02	0.26	0	0.54	0	0.03	0.02	0.01	0	0	0.01	0	0
Donghong	0.3	0.01	0.25	0	0.35	0	0	0.01	0.04	0	0	0.05	0	0
Euigui	0.21	0.11	0.22	0.19	0.19	0	0	0.01	0.01	0	0.01	0.05	0	0
Gamsan	0.05	0.08	0.42	0.02	0.07	0	0.1	0.04	0.01	0	0	0.22	0	0
Gangjeong	0.5	0.01	0.1	0	0.19	0	0	0.02	0.18	0	0	0.01	0	0
Gapa	0.33	0.04	0	0	0	0	0	0	0	0	0.63	0	0	0
Geumag	0.04	0.23	0.13	0	0.04	0	0.02	0	0.03	0	0	0.49	0.02	0
Gimyeong	0.53	0.28	0.01	0.06	0.04	0	0	0	0.01	0	0	0.08	0	0
Gueom	0.62	0.02	0.13	0	0.18	0	0.02	0.01	0.01	0	0.01	0.01	0	0
Gujwa	0.75	0.11	0.05	0.02	0.02	0	0	0	0.01	0	0.02	0.02	0	0
Gunsan	0	0	0.64	0.02	0.03	0	0.04	0.22	0.01	0	0	0.04	0	0.01
Gyora	0.17	0.1	0.11	0.03	0.17	0.01	0.02	0	0.04	0	0	0.36	0	0
Haengweon	0.11	0.37	0.06	0.06	0.36	0	0.01	0	0	0	0	0.03	0	0
Hamo	0.34	0	0	0	0	0	0	0	0.64	0	0	0.02	0	0
Hangyeong	0	0.03	0.74	0.09	0.09	0	0	0.01	0	0	0	0.04	0	0
Hanrim	0.01	0.1	0.52	0.02	0.2	0	0.07	0	0.01	0	0	0.06	0	0
Haweon	0.88	0.02	0.01	0	0.02	0	0	0	0.05	0	0	0.02	0	0
Heugag	0	0	0.73	0.06	0.11	0	0.01	0.03	0	0	0	0.05	0	0.01
Ido	0.14	0.03	0.27	0.02	0.41	0	0.01	0.01	0.02	0	0.04	0.07	0	0
Jeju	0.19	0.07	0.3	0.05	0.27	0	0.07	0.01	0	0	0	0.05	0	0
Jeogag	0	0.01	0.3	0.05	0.07	0	0	0.01	0	0	0	0.56	0	0
Jeongbang	0.1	0.11	0.38	0.18	0.16	0	0.03	0.01	0	0	0	0.03	0	0
Jocheon	0.66	0.02	0.08	0	0.17	0	0	0	0.04	0	0	0.01	0	0
Jungeom	0.55	0.08	0.19	0.05	0.09	0	0	0	0	0	0.01	0.02	0	0
Jungmun	0.16	0.2	0.24	0.01	0.29	0	0.06	0	0	0	0	0.03	0	0
Miag	0.08	0.2	0	0	0.06	0	0	0	0	0	0	0.66	0	0
Minag	0.08	0.38	0.08	0.08	0.26	0	0.01	0	0	0	0	0.1	0	0
Mureung	0.82	0.02	0.05	0	0.04	0	0	0	0.05	0	0	0.01	0	0
Namweon	0.34	0.27	0.15	0.09	0.03	0	0	0	0.01	0	0.01	0.1	0	0
Nogsan	0.03	0.16	0.04	0.09	0.09	0	0	0	0.02	0	0	0.57	0	0
Nongo	0	0.01	0.54	0.01	0.12	0	0.08	0.02	0	0	0	0.22	0	0
Noro	0	0	0.53	0.16	0.17	0	0.01	0	0	0	0	0.13	0	0
Ora	0.14	0.17	0.33	0.01	0.21	0	0.04	0	0.02	0	0	0.06	0	0
Pyeongdae	0.13	0.1	0.15	0.33	0.24	0	0	0	0	0	0	0.06	0	0
Pyoseon	0.09	0.57	0.03	0	0.05	0	0	0	0	0	0	0.26	0	0
Sara	0.2	0.02	0.07	0	0.67	0	0	0.03	0	0	0	0	0	0
Sineom	0.38	0.3	0.09	0.08	0.08	0	0	0	0	0	0	0.07	0	0
Songag	0.12	0.11	0.08	0.01	0.11	0.01	0.05	0	0.03	0	0	0.47	0	0
Songdang	0.15	0.46	0.17	0	0.06	0	0	0	0	0	0	0.17	0	0
Topyeong	0.37	0.34	0.06	0.04	0.07	0	0	0	0.01	0	0.03	0.08	0	0
Tosan	0	0	0.75	0.14	0.03	0	0.02	0.02	0	0	0	0.03	0	0
Wuimi	0.16	0.32	0.13	0.13	0.19	0	0	0	0	0	0	0.05	0	0
Yongheung	0.31	0.01	0.14	0	0.15	0	0.24	0.04	0.08	0	0	0.03	0	0

* Abbreviations represent same in Table 20.

Table 29. Areal distribution ratio of each soil series by different land uses.

soil series	resident	farmland	forest	pasture	wetland	Etc
Ara	0.03	0.7	0.16	0.1	0	0.01
Donggui	0.26	0.6	0.06	0.06	0	0.03
Donghong	0.14	0.64	0.14	0.06	0	0.02
Euigui	0.07	0.7	0.1	0.12	0	0.02
Gamsan	0.08	0.45	0.31	0.15	0	0.01
Gangjeong	0.12	0.78	0.05	0.01	0	0.03
Gapa	0.13	0.51	0.23	0.07	0	0.05
Geumag	0.02	0.27	0.35	0.34	0	0.01
Gimyeong	0.02	0.38	0.14	0.46	0	0
Gueom	0.16	0.72	0.07	0.03	0	0.03
Gujwa	0.04	0.52	0.27	0.16	0	0.01
Gunsan	0.01	0.05	0.81	0.12	0	0
Gyora	0.06	0.38	0.32	0.23	0	0.01
Haengweon	0.02	0.42	0.24	0.32	0	0
Hamo	0.09	0.84	0.02	0.03	0	0.03
Hangyeong	0.01	0.14	0.57	0.26	0	0.01
Hanrim	0.12	0.47	0.27	0.13	0	0.01
Haweon	0.06	0.83	0.07	0.04	0	0.01
Heugag	0	0	0.95	0.04	0	0
Ido	0.28	0.52	0.09	0.08	0	0.02
Jeju	0.03	0.36	0.29	0.31	0	0.01
Jeogag	0	0.01	0.94	0.06	0	0
Jeongbang	0.07	0.83	0.06	0.04	0	0.01
Jocheon	0.18	0.7	0.05	0.03	0	0.03
Jungeom	0.08	0.74	0.08	0.1	0	0.01
Jungmun	0.03	0.38	0.31	0.26	0	0.02
Miag	0.01	0.14	0.5	0.34	0	0.01
Minag	0.01	0.19	0.42	0.37	0	0.01
Mureung	0.09	0.82	0.04	0.02	0	0.02
Nagcheon	0.21	0.67	0.06	0.04	0	0.01
Namweon	0.07	0.55	0.1	0.28	0	0.01
Nogsan	0.01	0.16	0.45	0.38	0	0
Nongo	0	0.01	0.93	0.05	0	0
Noro	0	0.01	0.96	0.03	0	0
Ora	0.06	0.59	0.16	0.18	0	0.01
Pyeongdae	0.01	0.1	0.36	0.52	0	0.01
Pyoseon	0	0.21	0.16	0.62	0	0
Sara	0.16	0.77	0.03	0.02	0	0.02
Sineom	0.03	0.61	0.09	0.27	0	0
Songag	0.03	0.32	0.42	0.22	0	0.01
Songdang	0.02	0.34	0.26	0.36	0	0.01
Topyeong	0.04	0.56	0.12	0.28	0	0.01
Tosan	0	0.03	0.93	0.03	0	0
Wuimi	0.03	0.61	0.14	0.21	0	0
Yongheung	0.13	0.73	0.06	0.06	0	0.02

2) 토양통의 분포예측 알고리즘

토양통의 분포를 현재의 환경요인들과 일정한 관계가 있다고 가정하여 토양통들의 출현가능성을 예측하고자 하였다. 즉, 각각의 토양통들은 여러 종류의 환경요인에 대하여 대표되는 값(평균)을 중심으로 일정한 변이(표준편차)를 나타내고 있으며, 각각의 환경요인들에 의한 기대분포는 각 요인에 의한 기대분포들의 곱으로 나타낼 수 있다고 가정하였다. 이로부터 각각의 환경요인에 의한 기대분포가 각각의 토양통에 대하여 계산되고, 이 값이 큰 순서대로 분포될 것으로 기대되는 토양통의 순서를 나타낼 수 있었다.

각 환경요인 i 의 평균(μ)과 표준편차(σ)가 주어지고, 그 지점의 환경요인의 값이 X_i 일 때 기대확률 P_i 는 다음의 식으로 계산하였다.

$$P_i = \sqrt{\sqrt{(1 - \text{NORMDIST}(|(\mu - X_i)/\sigma|, 0, 1, 1))}}$$

예를 들어 해발고도가 200m이면 각각의 토양통에 대하여 200m 해발고도에 분포될 수 있는 기대분포가 위 식에 의하여 계산되고, 다음 조건인 온도, 강우량 등으로 각각의 기대분포가 계산된다. 지표지질이나 경사향, 토지이용 등도 각 항목이 정해지면 그에 해당되는 토양통의 기대분포가 면적비로부터 계산된다. 토양통의 위치는 여러 가지 환경조건이 복합적으로 작용하여 결정되므로 여기에서는 단순하게 각각의 환경요인에 대한 기대분포를 모두 곱하여 값이 큰 순서대로 나열하였다. 따라서 이 과정에서는 각각의 환경요인이 주어지면 해당 환경요인에 위치할 수 있는 토양통의 기대순서를 결과물로 산출하도록 되어 있다.

표 30에는 각 토양통별로 알고리즘에 이용된 환경요인들에 대한 대푯값을 나타낸 것이다. 이 대푯값들을 이용하여 엑셀 프로그램으로 토양통 예측 알고리즘을 만들었다. 이 대푯값을 입력자료로 알고리즘으로 예측하였을 때 강정통을 무릉통으로 1순위에 예측한 것을 제외하면(2순위에는 강정통으로 예측), 분석된 모든 토양통을 1순위에 예측할 수 있었다. 강정통과 무릉통은 인접하여 분포하는 경우가 많고 토양특성이 비슷한 점을 감안하면 예측 알고리즘은 대체로 잘 맞는다고 판단되었다.

Table 30. Representative values of each factors for every soil series.

soil series	Elevation (m)	Codi (m)	Temp. (°C)	Rain (mm)	Slope (°)	EleDiff (m)	distpeak (m)	TWI	geo- logy	aspect	landuse
Ara	160	4,156	14.8	1,643	2.9	18.5	18,568	12.6	APB	Northwest	Agriculture
Donggui	78	2,303	15	1,432	2.2	16	16,521	12.7	PAB	Northwest	Agriculture
Donghong	96	3,026	15.1	1,474	2.1	15	19,809	12.6	PAB	Northwest	Agriculture
Euigui	127	3,236	15	1,894	2.7	17.3	18,955	12.7	FB	Southeast	Agriculture
Gamsan	200	4,175	14.2	1,826	4.3	30.6	17,420	11.2	FB	South	Agriculture
Gangjeong	35	1,860	14.2	1,078	1.1	9.8	27,120	13.4	FOB	Southwest	Agriculture
Gapa	25	1,016	14.5	1,358	1.2	8.6	30,677	13.2	SD	Northwest	Agriculture
Geumag	220	5,422	14.1	1,997	5.1	32.4	23,579	10.9	C	Northwest	Forest
Gimyong	144	5,109	14.5	1,900	1.8	13.3	27,546	12.5	FOB	East	Pasture
Gueom	54	2,185	14.9	1,310	1.7	11.4	22,889	12.7	FOB	Northwest	Agriculture
Gujwa	93	3,237	14.9	1,600	1.7	11.8	26,143	12.7	FOB	Northwest	Agriculture
Gunsan	1,055	11,208	8.8	3,428	11.9	83.7	5,240	10.4	FB	Northwest	Forest
Gyora	201	5,247	14.3	1,781	4.3	29.2	19,928	11.4	C	Northwest	Agriculture
Haengweon	212	5,924	14.3	2,048	2.8	19.5	20,422	12.5	APB	Northwest	Agriculture
Hamo	27	1,093	15.1	1,130	1.2	5.3	28,522	13.3	SSF	Southeast	Agriculture
Hangyeong	546	9,040	12.3	2,114	5.3	39.2	10,136	11.8	FB	Northwest	Forest
Hanrim	244	4,645	14.5	2,091	4.3	29.4	11,901	11.7	FB	Southeast	Agriculture
Haweon	54	3,123	15.2	1,193	1.2	8.7	27,704	12.9	FOB	West	Agriculture
Heugag	902	10,597	10.2	3,354	8.8	55.9	6,211	11.6	FB	South	Forest
Ido	72	2,057	14.8	1,550	2.1	17	17,242	12.6	PAB	Northwest	Agriculture
Jeju	328	6,744	13.7	2,010	4.1	27	13,674	12.3	FB	Northwest	Agriculture
Jeogag	854	11,702	10.4	3,306	8.5	57.6	8,370	10.4	C	Northwest	Forest
Jeongbang	105	2,369	15.3	1,813	2.7	17.8	16,684	12.7	FB	South	Agriculture
Jocheon	29	1,181	14.7	1,204	1.2	10.9	25,499	12.9	FOB	Northwest	Agriculture
Jungeom	100	2,800	14.9	1,697	2.1	14.1	22,352	12.6	FOB	Southeast	Agriculture
Jungmun	270	5,631	14.2	1,810	3.8	23.8	16,337	12.2	PAB	South	Agriculture
Miag	357	9,324	13.4	2,165	5	34.1	20,891	10.7	C	Northwest	Forest
Minag	274	6,946	14.1	2,131	3.1	20.7	19,110	12.2	APB	Southeast	Forest
Mureung	46	2,743	15	1,167	1.1	8.2	28,617	13	FOB	Southwest	Agriculture
Namweon	158	5,941	14.4	1,952	2.1	16.5	23,671	12.5	FOB	Southeast	Agriculture
Nogsan	304	8,799	13.6	2,253	4.8	30.8	20,106	11.1	C	Northwest	Forest
Nongo	815	11,119	10.7	3,178	6.1	42.6	8,486	11.2	FB	South	Forest
Noro	755	11,505	11	3,211	6.1	41	9,293	11.7	FB	East	Forest
Ora	202	4,723	14.5	1,736	3.3	22.5	16,802	12.2	FB	Northwest	Agriculture
Pyeongdae	378	10,484	13.3	2,384	3	21.7	16,211	12.4	PFB	East	Pasture
Pyoseon	235	8,087	14	1,982	3.8	29.3	25,998	11.5	APB	Northeast	Pasture
Sara	56	1,762	15.2	1,235	1.9	12.9	19,392	12.7	PAB	Northwest	Agriculture
Sineom	112	3,927	14.7	1,843	1.8	12.7	27,120	12.7	FOB	Southeast	Agriculture
Songag	234	5,248	14.2	1,855	4.8	32.9	19,108	11.2	C	Northwest	Forest
Songdang	328	8,180	13.5	1,998	3.5	26.9	21,133	12.2	APB	Northeast	Pasture
Topyeong	138	5,645	14.6	1,885	1.8	15.9	26,368	12.6	FOB	East	Agriculture
Tosan	874	11,214	10.3	3,532	8.9	56.6	6,097	11.4	FB	Southeast	Forest
Wuimi	179	4,998	14.4	1,917	2.4	17.7	21,354	12.5	APB	Southeast	Agriculture
Yongheung	64	1,893	15	1,373	2.1	15.8	20,696	12.5	FOB	South	Agriculture

표 31은 제주도 지형도에서 각 토양통별로 임의의 점 10개씩을 추출하여 해당되는 환경요인 값들을 입력하였을 때 예측하는 토양통의 정확도를 나타낸 것이다. 1순위에 맞출 확률은 33.7%이고, 3순위 내에 있을 확률은 62%, 5순위

이내에는 73% 정도이었다. 이 확률은 10번 중의 3번 정도는 정확한 토양통을 1순위에 맞추는 결과를 나타내었다. 예측 검증 결과를 보면 군산, 평대, 토산통 등 산악지에 위치한 토양에 대해서는 정확히 예측할 가능성이 높았으나, 해안가에 위치하여 여러 가지 환경요인들이 유사하게 분포하고 있는 토양통들에 대해서는 예측확률이 떨어져 있었다. 추후 해안가에 있는 토양통을 보다 분명하게 구분할 수 있는 환경요인을 개발하여 입력요소로 이용할 경우 보다 예측확률이 높아질 것으로 기대된다.

Table 31. Probabilities of correct prediction for soil series using environmental 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
Gyora	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
					Mean	33.7	62	73.9	90.6

환경요인이 변동되었을 때 토양이 어떻게 변할 지 조사하기 위하여 그림

50과 같이 제주지역의 임의의 점을 선정하여 환경요인으로부터 토양통을 순위별로 예측한 다음 동, 서, 남, 북의 4 방향과 0~100m, 100~200m, 200~400m, 400~800m, 800~1,200m, 1,200~2,000m의 6개 지역으로 구분하여 각 지역에 어떻게 토양통들이 분포할 수 있는지를 알아보았다. 동부지역에서는 해안지대에 여러 가지 토양통이 출현하다가 해발고도가 높아지면서 행원통, 남원통, 표선통, 평대통, 노로통, 군산통의 순으로 예상되었으며, 서부지역에서는 해안지대에 강정통, 무릉통 등 Andisols이 아닌 토양에서 교래통, 평대통, 적악통, 군산통 등 Andisols이 출현될 것으로 예상되었다. 남부지역은 해안지역부터 감산통, 의귀통, 한림통, 정방통, 군산통 순으로 출현되었으며, 북부지역은 동홍통, 용홍통, 제주통, 한경통, 군산통의 순으로 출현될 것으로 예상되었다. 이러한 결과는 제2장에서 북서부 지역이 Andisols이 아닌 토양통들이 분포하며 동남부 지역에는 Andisols이 분포된다는 결과와 유사하였다.

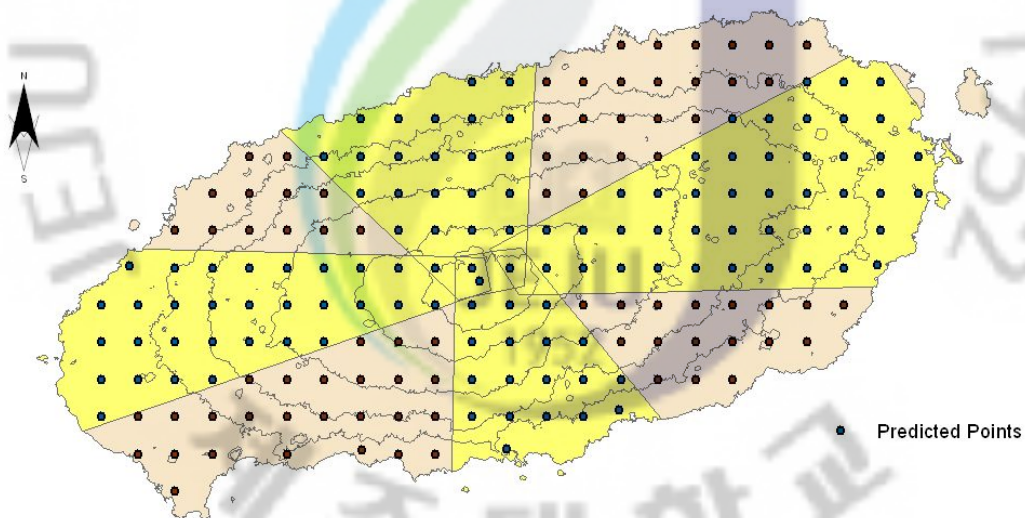


Figure 50. Predicted points for soil series and regions divided by direction and elevation.

Table 32. Expected soil series with direction and Elevation using algorithm with environmental factors of each points.

direction	Elevation	1st	2nd	3rd	4th	5th
East	0~100m	Sineom	Euigui	Namweon	Jungeom	Gimyeong
East	0~100m	Euigui	Namweon	Gamsan	Jeongbang	Jungeom
East	0~100m	Euigui	Jungeom	Gamsan	Namweon	Jeongbang
East	0~100m	Sineom	Gujwa	Topyeong	Jungeom	Namweon
East	0~100m	Jungeom	Geumag	Gujwa	Euigui	Sineom
East	0~100m	Geumag	Songag	Gyora	Gamsan	Nogsan
East	0~100m	Donghong	Jungeom	Gujwa	Gamsan	Yongheung
East	0~100m	Sineom	Gujwa	Topyeong	Jungeom	Gimyeong
East	0~100m	Gujwa	Jungeom	Donghong	Yongheung	Ido
East	0~100m	Gamsan	Jungeom	Donghong	Euigui	Gyora
East	0~100m	Gujwa	Donghong	Jungeom	Gamsan	Yongheung
East	0~100m	Donghong	Jungeom	Yongheung	Gueom	Gangjeong
East	100~200m	Haengweon	Minag	Wuimi	Songdang	Namweon
East	100~200m	Namweon	Gimyeong	Topyeong	Sineom	Wuimi
East	100~200m	Geumag	Nogsan	Miag	Songag	Gyora
East	100~200m	Namweon	Topyeong	Wuimi	Gimyeong	Haengweon
East	100~200m	Geumag	Songag	Gyora	Gamsan	Namweon
East	100~200m	Geumag	Namweon	Gimyeong	Topyeong	Songag
East	100~200m	Namweon	Topyeong	Gimyeong	Gamsan	Geumag
East	100~200m	Pyoseon	Topyeong	Namweon	Gimyeong	Wuimi
East	100~200m	Namweon	Topyeong	Wuimi	Gimyeong	Gamsan
East	200~400m	Songdang	Minag	Nogsan	Pyeongdae	Gamsan
East	200~400m	Pyoseon	Minag	Songdang	Haengweon	Namweon
East	200~400m	Pyeongdae	Songdang	Namweon	Nogsan	Wuimi
East	200~400m	Nogsan	Pyeongdae	Miag	Songdang	Minag
East	200~400m	Pyeongdae	Namweon	Songdang	Wuimi	Jungeom
East	200~400m	Namweon	Songdang	Wuimi	Jungeom	Topyeong
East	200~400m	Namweon	Topyeong	Wuimi	Jungeom	Euigui
East	200~400m	Nogsan	Miag	Geumag	Pyoseon	Songag
East	200~400m	Miag	Songdang	Nogsan	Minag	Songag
East	200~400m	Songdang	Minag	Pyoseon	Namweon	Wuimi
East	200~400m	Pyoseon	Namweon	Songdang	Wuimi	Haengweon
East	200~400m	Pyoseon	Songdang	Namweon	Minag	Topyeong
East	200~400m	Pyoseon	Songdang	Namweon	Wuimi	Haengweon
East	400~800m	Noro	Nongo	Tosan	Jeogag	Heugag
East	400~800m	Noro	Hangyeong	Nongo	Pyeongdae	Jeogag
East	400~800m	Pyeongdae	Songdang	Nogsan	Minag	Namweon
East	400~800m	Gunsan	Tosan	Heugag	Jeogag	Noro
East	400~800m	Noro	Nongo	Jeogag	Gunsan	Heugag
East	400~800m	Nogsan	Pyeongdae	Jeogag	Miag	Noro
East	400~800m	Pyeongdae	Songdang	Namweon	Wuimi	Minag
East	400~800m	Pyeongdae	Namweon	Songdang	Wuimi	Jungeom
East	800~1,200m	Gunsan	Tosan	Heugag	Nongo	Jeogag
East	800~1,200m	Tosan	Jeogag	Gunsan	Nongo	Heugag
East	1200m 이상	Gunsan	Tosan	Heugag	Jeogag	Nongo

Table 32. Continued.

direction	Elevation	1st	2nd	3rd	4th	5th
West	0~100m	Gangjeong	Mureung	Haweon	Jocheon	Gueom
West	0~100m	Gangjeong	Mureung	Haweon	Jocheon	Gueom
West	0~100m	Gujwa	Haweon	Donghong	Gueom	Mureung
West	0~100m	Songag	Geumag	Gyora	Nogsan	Gamsan
West	0~100m	Mureung	Haweon	Gangjeong	Gueom	Gujwa
West	0~100m	Haweon	Mureung	Gujwa	Gueom	Songag
West	0~100m	Gangjeong	Jocheon	Gueom	Mureung	Yongheung
West	0~100m	Haweon	Mureung	Gujwa	Gueom	Gangjeong
West	0~100m	Gamsan	Donghong	Gyora	Songag	Ora
West	0~100m	Jocheon	Gangjeong	Gueom	Gujwa	Gapa
West	100~200m	Namweon	Topyeong	Gimyeong	Gujwa	Wuimi
West	100~200m	Gyora	Euigui	Namweon	Donghong	Songag
West	100~200m	Donghong	Gujwa	Gamsan	Jungeom	Songag
West	200~400m	Gyora	Gamsan	Ora	Namweon	Songdang
West	200~400m	Nogsan	Songag	Miag	Gyora	Geumag
West	200~400m	Gyora	Songag	Jungmun	Minag	Haengweon
West	200~400m	Nogsan	Songag	Miag	Gyora	Songdang
West	200~400m	Gamsan	Songag	Gyora	Geumag	Ora
West	200~400m	Songag	Gyora	Nogsan	Geumag	Minag
West	200~400m	Nogsan	Miag	Songag	Hangyeong	Pyeongdae
West	400~800m	Pyeongdae	Songdang	Miag	Namweon	Minag
West	400~800m	Hangyeong	Nogsan	Gunsan	Songdang	Miag
West	400~800m	Pyeongdae	Songdang	Nogsan	Miag	Hangyeong
West	400~800m	Hangyeong	Jeogag	Pyeongdae	Nogsan	Noro
West	400~800m	Gunsan	Jeogag	Noro	Nongo	Hangyeong
West	400~800m	Noro	Nongo	Jeogag	Hangyeong	Gunsan
West	800~1,200m	Jeogag	Gunsan	Heugag	Noro	Tosan
West	800~1,200m	Jeogag	Gunsan	Nongo	Heugag	Noro
West	800~1,200m	Tosan	Gunsan	Heugag	Jeogag	Noro
West	800~1,200m	Gunsan	Tosan	Heugag	Jeogag	Nongo
West	1,200m 이상	Gunsan	Heugag	Jeogag	Tosan	Nongo
West	1,200m 이상	Gunsan	Tosan	Jeogag	Heugag	Nongo
West	1,200m 이상	Gunsan	Tosan	Jeogag	Heugag	Nongo
South	0~100m	Gamsan	Songag	Geumag	Gyora	Hanrim
South	0~100m	Euigui	Jungeom	Jeongbang	Namweon	Gujwa
South	0~100m	Euigui	Jungeom	Jeongbang	Gamsan	Namweon
South	100~200m	Euigui	Gamsan	Jeongbang	Jungeom	Hanrim
South	100~200m	Euigui	Jeongbang	Wuimi	Jungeom	Namweon
South	100~200m	Euigui	Hanrim	Wuimi	Haengweon	Namweon
South	100~200m	Jeongbang	Euigui	Jungeom	Hanrim	Wuimi
South	200~400m	Hanrim	Gamsan	Euigui	Songag	Gyora
South	200~400m	Hanrim	Jungmun	Jeju	Minag	Haengweon
South	200~400m	Hanrim	Songag	Gamsan	Geumag	Jeju
South	400~800m	Nongo	Heugag	Hangyeong	Gunsan	Noro
South	400~800m	Hanrim	Songag	Gamsan	Geumag	Jeju
South	400~800m	Gunsan	Heugag	Tosan	Nongo	Jeogag
South	400~800m	Gunsan	Hangyeong	Heugag	Tosan	Jeogag

Table 32. Continued.

direction	Elevation	1st	2nd	3rd	4th	5th
South	800~1,200m	Gunsan	Heugag	Tosan	Jeogag	Nongo
South	800~1,200m	Gunsan	Tosan	Heugag	Jeogag	Nongo
South	1,200m 이상	Gunsan	Heugag	Tosan	Jeogag	Nongo
South	1,200m 이상	Gunsan	Tosan	Heugag	Jeogag	Nongo
South	1,200m 이상	Gunsan	Tosan	Jeogag	Heugag	Nongo
South	1,200m 이상	Gunsan	Tosan	Jeogag	Heugag	Nongo
South	1,200m 이상	Gunsan	Tosan	Heugag	Jeogag	Nongo
North	0~100m	Donggui	Donghong	Jeongbang	Ido	Gamsan
North	0~100m	Ido	Donggui	Donghong	Sara	Yongheung
North	0~100m	Sara	Donggui	Donghong	Ido	Yongheung
North	0~100m	Donghong	Donggui	Jeongbang	Ido	Jungeom
North	0~100m	Donghong	Jeongbang	Euigui	Ora	Gamsan
North	0~100m	Yongheung	Jungeom	Gueom	Jocheon	Donghong
North	0~100m	Yongheung	Ido	Jeongbang	Jungeom	Donggui
North	100~200m	Donghong	Ara	Ora	Donggui	Jeongbang
North	100~200m	Ara	Ora	Gamsan	Gyoraе	Songag
North	100~200m	Jungeom	Jeongbang	Euigui	Donghong	Ara
North	200~400m	Jeju	Songag	Jungmun	Gyoraе	Geumag
North	200~400m	Jeju	Songdang	Hangyeong	Pyeongdae	Jungmun
North	200~400m	Ora	Jungmun	Hanrim	Gyoraе	Gamsan
North	200~400m	Songag	Geumag	Gyoraе	Gamsan	Nogsan
North	200~400m	Jeju	Jungmun	Songag	Songdang	Gyoraе
North	400~800m	Hangyeong	Nongo	Noro	Nogsan	Jeogag
North	400~800m	Hangyeong	Jeju	Songdang	Hanrim	Songag
North	400~800m	Hangyeong	Jeju	Songdang	Miag	Hanrim
North	400~800m	Hangyeong	Nogsan	Songdang	Jeogag	Miag
North	800~1,200m	Gunsan	Tosan	Heugag	Jeogag	Nongo
North	800~1,200m	Gunsan	Tosan	Heugag	Jeogag	Nongo
North	800~1,200m	Gunsan	Tosan	Jeogag	Heugag	Nongo
North	800~1,200m	Gunsan	Tosan	Heugag	Jeogag	Nongo
North	1,200m 이상	Gunsan	Tosan	Jeogag	Heugag	Nongo
North	1,200m 이상	Gunsan	Tosan	Jeogag	Heugag	Nongo
North	1,200m 이상	Gunsan	Tosan	Heugag	Jeogag	Nongo

3) 토양통의 예측 알고리즘에 의한 제주도 토양통 분포 특징

그림 51는 제주도 전 지역을 270m × 270m 격자로 분할하고, 각 격자의 중심점에서의 환경요인 값들을 추출한 후 토양통 예측 알고리즘에 대입하여 얻은 결과를 토양의 목단위로 표현한 것이다. 각 토양통의 대군이나 목은 앞의 그림 19에 제시된 바와 같이 현재 제주도 토양을 대상으로 재분류를 진행하고 있

는 농업과학원 토양조사팀의 조언을 얻어 재설정된 분류기준을 적용하였다.

목단위에서는 제주도 북부와 서부 해안지역을 제외하면 전 지역에 걸쳐 Andisols이 넓게 분포하고 있었으며, 북부의 해안가에는 길게 Entisols이 분포하는 것으로 예측되었다. Entisols에서는 동북부 해안지역에서는 가과통, 서북부 해안지역에서는 사라통, 조천통이 주 분포 토양통이었다. 다음으로 Alfisols이 북부 중산간 하부지역 및 서부 해안지역에 넓게 분포하고 있는 것으로 추정되었다. 지역별로는 북부지역에서는 주로 동귀통이나 구엄통이, 서부 해안지역에서는 강정통이나 무릉통이 Alfisols로서 주로 분포되고 있었다. Ultisols은 서부에서 해안을 지나 약간 산으로 올라간 넓은 지역과 남부 일부지역에 분포하는 것으로 예상되었다. 알고리즘에 이용된 Ultisols에 속하는 토양통은 용흥통과 하원통 2개만 속해 있었다. 남부 해안가에는 용흥통이 서부지역에는 주로 하원통이 분포될 것으로 예측되었다. Inceptisols은 제주시 북부에 일부 분포되는 것으로 예상되었는데 알고리즘에 의하면 주로 이도통에 해당되었다.

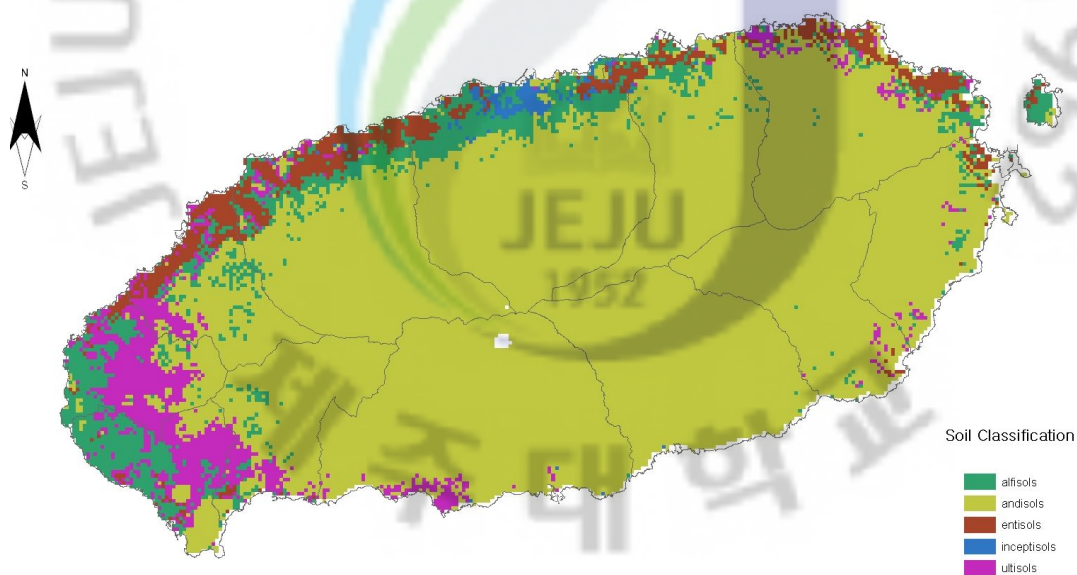


Figure 51. Estimated soil order drawn by results of soil estimation algorithm from inputs of environmental factors at every 270m × 270m grid point on Jeju Island.

토양예측 알고리즘에 의해 그림 52은 대군단위, 그림 53는 통단위까지 나타내었다. 제1장과 제2장의 결과에서 본 바와 같이 Andisols은 북부 해안과 서부 지역을 제외하면 제주도 전역에 걸쳐 폭넓게 분포하는 것으로 예상되었다. Melanudands는 제주 중산간지 상부와 동부 중산간지에 폭넓게 분포하고 있었다. 동부지역의 해발고도가 낮은 지역은 신엄통, 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, 동북부지역에는 주로 구좌통, 서북부 지역에는 아라통, 동남부 지역에는 증엄통이 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.

토양통 분포예측 알고리즘은 작성 단계에서 이호통, 월령통 등 소면적의 특수한 상황에서 형성되는 토양과 낙천통 등 인위적인 요인이 들어간 토양통을 제외하고 작성하였으므로, 제주도에 모든 토양통을 정확하게 예측할 수는 없었다. 그러나 Andisols이 분포되는 지역과 비Andisols 분포지역, 비Andisols 토양에서도 Alfisols와 Ultisols이 분포되는 지역이 구분되었다는 점은 이러한 토양이 생성될 조건에 대한 좀 더 깊은 연구가 필요하다는 점을 시사해 주고 있다고 할 것이다. 반면, 알고리즘에 의해서 예상된 토양군 들 중에서 제주통은 다른 Hapludands와 지역적으로 떨어져 있었던 점, 한라산 정상 중심지역은 군산통만 넓게 분포가 예상된다는 점, 북쪽 해안가에 길게 Entisols이 분포되고 있다는 점 등은 현실과 맞지 않은 측면이 있어, 개발된 알고리즘의 한계라고 여겨진다.

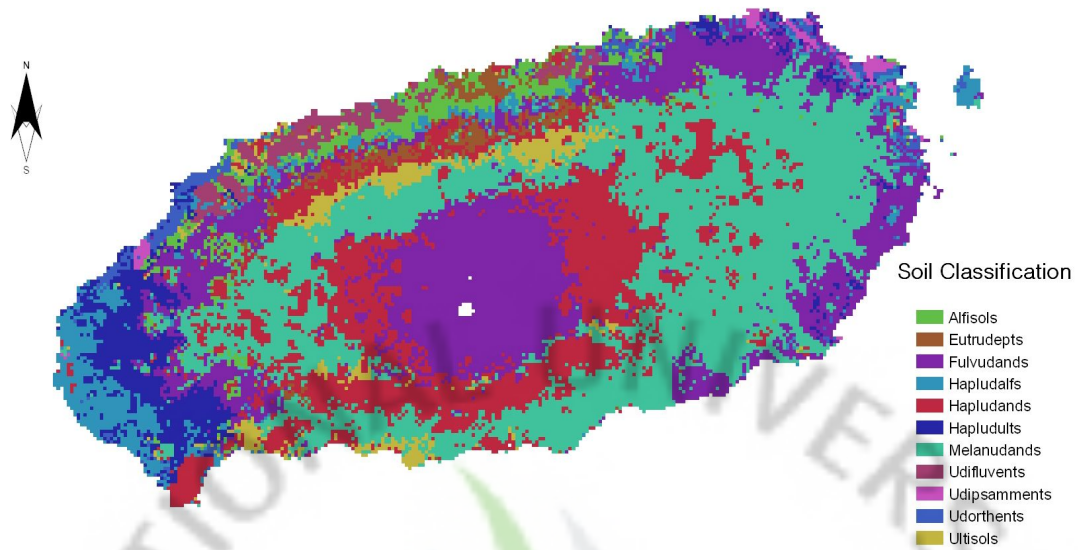


Figure 52. Estimated soil types drawn by results of soil estimation algorithm from inputs of environmental factors at every 270m × 270m grid point on Jeju Island.

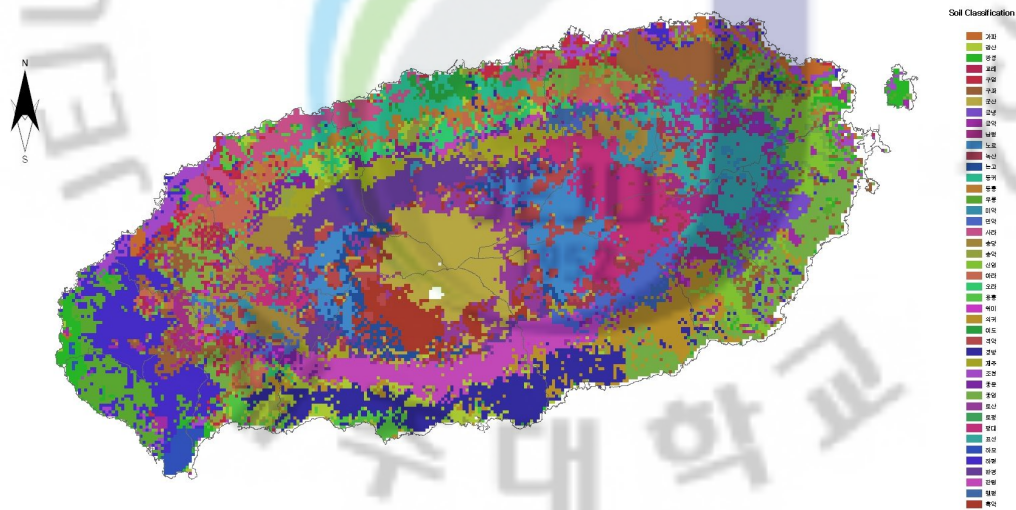


Figure 53. Estimated soil series drawn by results of soil estimation algorithm from inputs of environmental factors at every 270m × 270m grid point on Jeju Island.

종합 고찰

제주도에는 분포하는 토양의 다양성과 지역적 분포특성을 환경요인을 고려하는 정량적인 방법으로 알아보았다. 제주도에는 Histosols, Andisols, Ultisols, Alfisols, Inceptisols, Entisols의 6개 토양 목에 63개의 토양통이 분포하고 있으며, 이러한 토양통과 토양특성의 공간적인 분포는 환경요인, 특히 기후, 식생요인의 분포에 의해서 설명될 수 있다. 이를 통계적인 방법, 지리통계적인 방법, 토양통 예측 알고리즘 등을 이용하여 확인하고자 하였다.

우선 제주도 전역에서 걸쳐 321 지점에서 좌표 정보와 함께 토심 30cm를 기준으로 토양시료를 채취하였다. 채취된 토양시료는 풍건하여 제주도에 분포하는 토양통 분류에 중요한 토양 특징인 토양유기물과 $Al_0 + \frac{1}{2}Fe_0$ 함량을 분석하여 제주도 지도 정보와 결합시켰다. 토양유기물 함량은 표토나 심토에서 모두 북부나 서부지역의 해안지역은 낮았고, 동부, 남부 및 중앙의 산악지역은 높게 나타나는 지역적으로 다른 경향을 나타내었고, 토양도와 비교하면 표토에서는 유사한 경향이었으나, 심토에서는 이번 조사에서 유기물함량이 더욱 높은 경향이 있었다. $Al_0 + \frac{1}{2}Fe_0$ 함량도 유기물의 분포와 유사하게 표토와 심토 모두에서 북부와 서부 지역은 낮고, 동부, 남부, 중앙 지역은 높은 경향을 나타내었다. Andisols의 기본 개념이 allophane, imogolite, ferrihydrite와 같은 short-range-order 광물이나 Al,Fe - 유기물복합체 등이 주가 되는 토양이라는 것이므로, $Al_0 + \frac{1}{2}Fe_0$ 과 토양유기물의 함량이 높다는 것은 그 간 북부와 서부를 제외한 대부분의 제주도 지역 토양이 Andisols이라는 것을 다시 확인하였다.

어떠한 요인이 비슷한 조건에서 Andisols로 발달하도록 작용한 것인지를 알아보기 위하여 정량적으로 분석할 수 있는 조사지점의 환경요인들을 수집하였다. 기후요인으로는 온도와 강수량, 식생요인으로는 이의 활성과 관련이 있는 증발산, 순일차생산량, 일사량, 지형요인으로 해발고도, 지형습윤지수, 주위와의 고도차, 토양형성에너지, 해안으로부터의 거리, 정상으로부터의 거리 등의 자료를 수집 또는 작성하여 조사지점에서의 각 요인의 값들을 추출하였다. 각 요인 간에는 서로 상관관계가 매우 높았기 때문에 다중공선성이 발생하므로, 이로 인한 원인

에 대한 해석의 오류를 방지하고자 먼저 주성분분석을 수행하여 총 분산의 84.4%를 설명할 수 있는 3개의 주성분으로 요인을 축소하였다. 축소된 3개의 주성분요인에 의하면 중앙부의 한라산의 높은 해발고도와 연관되어 있는 요인(주성분 1)에 의해서 전체 환경요인 분산의 55.8%, 식생의 성장과 연관이 있는 요인(주성분 2)가 전체의 19%, 기타 복잡한 요인이 전체의 10%를 설명할 수 있었다. 조사된 지점에 대하여 토양유기물의 함량을 3개의 주성분에 의하여 회귀분석을 실시한 결과, 전체 유기물함량 변이의 53%를 설명할 수 있는 회귀식을 작성할 수 있었고, 토양유기물의 함량 변화는 주성분 1(한라산효과)에 의한 회귀계수는 1.64, 주성분 2(식생효과)에 의한 회귀계수는 1.58로 두 요인이 비슷한 정도로 영향을 주고 있었으나, 주성분 3(복잡효과)의 회귀계수는 0.72로 다른 요인에 비하여 영향이 크지 않았다. $Al_0 + \frac{1}{2}Fe_0$ 함량에 대한 회귀분석에서는 전체 변이의 38%를 설명할 수 있는 회귀식을 작성할 수 있었고, 각 요인의 효과에서는 토양유기물과 달리 주성분 2의 회귀계수가 0.62이고 주성분 1의 회귀계수가 0.32로 주성분 2(식생효과)가 주성분 1(한라산효과)보다 좀더 큰 영향을 끼치고 있었다. 따라서 제주도의 Andisols의 발달과 관련되어 토양유기물 함량 증가에는 해발고도가 높은 한라산에 의해 발생하는 효과(기온감소, 강우량 증가, 지형습윤지수 감소 등), 동부지역에서 크고 서부지역에서 낮아지는 식생효과(강우증가, 순일차생산량 증가, 일사량 증가)의 비슷한 크기로 영향을 주었지만, $Al_0 + \frac{1}{2}Fe_0$ 함량에 관련되어서는 한라산의 해발고도 효과보다 식생효과가 더 영향이 큰 것으로 판단되었다.

토양특성으로 제주도에 분포하는 토양들을 구분하기 위하여 지리통계방법으로 지역을 구분하였다. 토양유기물함량 분포도를 이용하여 여러 가지 지리통계방법을 비교한 결과 ordinary Kriging이 지역을 구분하기에 가장 적합하였다. 먼저 Andisols로 분류되기 위하여 중요한 $Al_0 + \frac{1}{2}Fe_0$ 의 함량기준 2%의 경계선을 작성하고 토양도와 중첩 분석한 결과, 현재 토양도에는 Andisols로 분류되고 있는 구좌통, 아라통, 중문통의 많은 면적이 Andisols로 분류될 수 없는 지역에도 분포되고 있다고 되어 있어, 이에 대한 토양도의 수정이 필요하였다. Andisols 중에서도 Fulvudands/Melanudands와 다른 Andisols 대군을 분류하는데 중요한 기준인 토양유기탄소 6%(토양유기물 10%)의 경계선으로 토양도와 비교한

결과, 중문통, 구좌통, 아라통, 중엄통, 제주통, 오라통 등이 양 지역에 걸쳐있어 이에 대한 수정도 필요하였다. 다음으로 토양의 속을 결정하는 50cm 지온 15°C의 경계선과 토양도를 중첩분석한 결과 평대통, 송당통의 넓은 면적이 양 지역에 걸쳐 있었다. 전체적으로 제주도에 분포하는 토양을 토양특성과 면적을 감안하여, 비Andisols이면서 thermic인 지역(지역 1), Fulvudands 나 Melanudands가 아닌 Andisols이 분포할 수 있으면서 thermic인 지역(지역 2), Fulvudands, Melanudands이 분포할 수 있으면서 thermic인 지역(지역 3), Fulvudands, Melanudands이 분포할 수 있으면서 mesic인 지역(지역 4), Fulvudands, Melanudands가 아닌 Andisols이 분포할 수 있으면서 mesic인 지역(지역 5) 등 5개 지역으로 구분할 수 있었으나, 지역 5의 면적이 작으므로 실질적으로는 토양특성을 고려하면 4개의 지역으로 구분하여 토양을 이해하는 것이 합리적이라고 판단되었다.

환경요인과 토양의 형성과 일정한 관계가 있으므로, 제주도 세부정밀토양도를 바탕으로 환경요인만으로 토양통을 예측하는 알고리즘을 작성하여, 환경요인과 토양분포의 관계를 알아보고자 하였다. 정량화를 위하여 환경요인으로는 기후요인으로 온도, 강수량을, 모재요인으로 지표지질을, 지형요인으로 해발고도, 경사도, 경사향, 주변과의 고도차, 지형습윤지수, 해안으로부터의 거리 등을, 식생요인으로 토지 이용을 세부요인으로 선택하였다. 이를 각 세부요인 지도로부터 토양도의 270m × 270m의 격자 중심점의 값을 추출하고, 이를 토양통별로 평균과 표준편차 또는 면적비를 구하고, 이 값을 바탕으로 각 토양통이 분포할 수 있는 세부요인의 범위와 확률을 구하였다. 요인별 확률을 결합시켜 분포 가능한 토양통의 순위를 제시하는 알고리즘을 작성하여 시험한 결과 임의의 환경요인들로부터 33%가 정확하게, 62%가 3순위 이내, 74%가 5순위 이내에 기존의 토양도와 일치되도록 예측할 수 있었다. 알고리즘을 이용하여 지역별로 가능한 토양통을 보면 중앙지역 한라산 고지대의 군산통으로부터 동쪽으로는 토산, 노로(평대), 표선(남원, 송당), 남원(금악), 신엄(의귀, 구좌)의 순으로, 서쪽으로는 적악(토산), 평대(한경), 남원(교래), 무릉(하원, 강정)의 순으로, 남쪽으로는 흑악, 한림(중문), 의귀(정방)의 순으로, 북쪽으로는 토산, 한경(제주), 동홍(사라)의 순으로 해안가로 가면서 많이 분포하고 있었다. 이를 토양목, 대군 등으로 나타

낸 결과 비Andisols 지역에서는 북부 해안가로 Entisols이 분포하고 해발고도가 높아지면서 Alfisols이 나타난 반면, 서부지역에서는 해안가의 Alfisols에서 해발고도가 높아지면서 Ultisols, Andisols의 순으로 나타나고 있어, 토양의 형성과 관련되어 추가적인 연구가 필요하였다.

제주도 토양의 다양성과 지역적 분포는 앞에서 본 바와 같이 환경요인과 밀접한 관계를 가지고 있다. 비록 현재의 환경요인에 의해 토양의 특징을 설명하였지만, 제주도에서는 오래전에 형성된 해발고도가 높은 한라산이 있음으로 인해서 발생하는 지역적인 환경변이가 제주도 토양의 생성과 발달에 큰 영향을 미쳤음을 알 수 있다. 또 토양특성으로 구분하였을 때 제주도 토양도의 일부분은 신분류체계에 따라 재분류가 되어야 할 것이다. 앞으로 이 연구에서 제기된 제주도에서 비Andisols 토양의 생성과 발달, Fulvudands와 Melanudands의 지대구분 등은 더 연구가 필요한 부분이라고 여겨진다.

적 요

제주도에는 모재, 시간, 기후, 식생, 지형 등 토양이 생성되고 발달되는 환경이 다양함에 따라 토양도 다양하게 분포하고 있으며 Andisols로 분류되는 토양도 많이 분포하고 있다. 이러한 토양의 다양성은 토양현황을 전체적으로 파악하는 데도 곤란함을 주고 있을 뿐만 아니라 토양의 적절한 관리를 어렵게 하고 있다. 이 연구에서는 제주도 토양을 대상으로 공간통계 등 정량적인 방법으로 토양통의 분포 및 환경과의 관련성을 이해하고자 하였다.

제1장에서는 일반적인 통계방법을 이용하여 분류에 중요한 토양특성의 분포를 기후, 식생, 지형과 관련된 환경요인들을 변수로 하여 주성분분석 및 중회귀법에 의하여 예측할 수 있는 모형을 작성하였다. 환경요인이라는 설명변수 간 다중공선성이 존재하고 있었고, 이를 치유하여 세 개의 주성분으로 토양유기물 변이의 52%와 $Al_0 + \frac{1}{2}Fe_0$ 변이의 37%를 설명할 수 있었으며, 한라산의 효과가 가장 컸다. 이 모형을 바탕으로 토양유기물과 $Al_0 + \frac{1}{2}Fe_0$ 분포지도를 작성할 수 있었고, 이는 토양도를 바탕으로 한 지도와 대략적인 측면에서 유사성을 나타내었다.

제2장에서는 현재의 토양도가 최근 개정된 토양분류체계에 적합한 지 여부를 공간통계방법으로 알아보려고 하였다. 토양유기물의 분포를 토양도, 다중회귀분석, 공간통계방법 등을 이용하여 지도를 작성하고 비교한 결과 토양유기물 추정의 공간통계방법 간의 비교에서는 전체적으로 ordinary Kriging방법이 조사된 여러 방법에 비하여 효과적으로 추정하였다. 이 방법을 이용하여 $Al_0 + \frac{1}{2}Fe_0$ 함량 분포도, 토양유기물지도, 지중온도 지도를 작성하고, 신분류체계에 의한 제주도 토양통들의 분포를 알아본 결과 구좌통, 아라통, 중문통 등이 Andisols과 Andisols이 아닌 지역 모두에 분포하고 재분류할 필요가 있었고, 중문통, 구좌통, 아라통, 중엄통, 제주통, 오라통 등이 Hapludands와 Melanudands /Fulvudands 양 지역에 모두 분포되고 있었으며, 평대통, 송당통 등은 mesic과 thermic 토양온도상 모두에 분포하고 있었다. 이러한 토양통들은 신분류체계에

따라 재분류할 필요가 있었다. 또 세 가지의 기준을 이용하여 제주도 전체 지역을 토양특성이 다른 5개나 4개의 지역으로 크게 구분할 수 있었다.

제3장에서는 토양통의 분포와 환경요인 간의 관계를 이용하여, 각 토양통이 위치할 수 있는 환경요인에 대한 대푯값을 구하고 이를 이용하여 제주도에 분포하는 토양통의 예측알고리즘을 개발하였다. 예측알고리즘으로 제주도 동, 서, 남, 북부의 토양통 분포를 예측한 결과 서북부의 Andisols이 아닌 지역과 동남부와 중앙부의 Andisols인 지역에 대하여 해안으로부터 중앙부 산악지로 순차적으로 토양통의 변이를 알아볼 수 있었다. 또 토양의 목단위, 대군단위의 예측지도를 작성한 결과 Andisols 및 Andisols이 아닌 지역을 구분할 수 있었고, Andisols이 아닌 지역에서도 Ultisols과 Alfisols이 분포하는 지역이 구분되어 이에 대한 추가적인 연구가 필요하였다.

제주도 토양을 대상으로 보다 정량적인 방법으로 이해하기 위하여 환경요인에 의한 회귀분석으로 토양특성지도를 작성할 수 있었고, 공간통계방법에 의한 $Al_0 + \frac{1}{2}Fe_0$, 토양유기물, 지중온도 등 분류에 중요한 기준이 되는 토양특성지도를 이용하여 기존의 토양도의 문제점 및 개선방향을 제시할 수 있었으며, 환경요인에 의한 토양통 추정 알고리즘을 개발하여 제주도에 분포하는 토양통들의 분포특성을 알아볼 수 있었다. 이 연구 결과는 제주도 토양의 생성조건에 대한 설명이 부족한 면 등 여러 가지 한계점이 있지만, 환경요인에 의한 토양특성지도의 제작방법의 제시, 토양특성에 의한 재분류의 근거 제시, 예측 알고리즘에 의한 가능한 토양분포의 예측 등 이전의 연구에서 시도되지 않았던 방법으로 제주도 토양분포 특징을 해석하였다는 데 의의가 있다고 할 것이다.

주요어 : 공간분석, 토양분류, 토양특성지도, Andisols, 제주도 토양

참고 문헌

- Allen, R., L. Pereira, D. Raes, and M. Smith. 1998. Crop evapotranspiration. Guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper (FAO).
- Bandyopadhyay, A., A. Bhadra, N.S. Raghuwanshi, and R. Singh. 2008. Estimation of monthly solar radiation from measured air temperature extremes. *Agricultural and Forest Meteorology* 148:1707-1718.
- Bishop, T.F.A., and A.B. McBratney. 2001. A comparison of prediction methods for the creation of field-extent soil property maps. *Geoderma* 103:149-160.
- Boul, S.W., R.J. Southard, R.C. Graham, and P.A. McDaniel. 2003. Soil genesis and classification. 5th ed. Iowa State Press.
- Carr, 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.
- Ciollaro, G., and N. Romano. 1995. Spatial variability of the hydraulic properties of a volcanic soil. *Geoderma* 65:263-282.
- Cox, P.G. 1996. Some issues in the design of agricultural decision support systems. *Agricultural Systems* 52:355-381.
- Dahlgren, R.A., J.L. Boettinger, G.L. Huntington, and R.G. Amundson. 1997. Soil development along an elevational transect in the western Sierra Nevada, California. *Geoderma* 78:207-236.
- Ettema, C., and D. Wardle. 2002. Spatial soil ecology. *Trends in Ecology & Evolution* 17:177-183.

- Ferrer Juli, M., T. Estrela Monreal, A. Schez del Corral Jimez, and E.Garc Meldez. 2004. Constructing a saturated hydraulic conductivity map of Spain using pedotransfer functions and spatial prediction. *Geoderma* 123:257–277.
- Grace, P., J. Ladd, G. Robertson, and S. Gage. 2006. SOCRATES a simple model for predicting long-term changes in soil organic carbon in terrestrial ecosystems. *Soil Biology and Biochemistry* 38:1172–1176.
- Gritzner, M., W. Marcus, R. Aspinall, and S. Custer. 2001. Assessing landslide potential using GIS, soil wetness modeling and topographic attributes, Payette River, Idaho. *Geomorphology* 37:149–165.
- Han, G.H. 2009. Contamination source assessment of groundwater nitrate in a complex terrain. *Korean Journal of Soil Science and Fertilizers* 42:14–20.
- Heuvelink, G.B.M., and R. Webster. 2001. Modelling soil variation: past, present, and future. *Geoderma* 100:269–301.
- Hong, S.D., C.S. Lee, and S.W. Hwang. 2009. Soil fertility. *Korean Journal of Soil Science and Fertilizer* 42:178–194.
- Hupet, F., and M. Vanclooster. 2004. Sampling strategies to estimate field areal evapotranspiration fluxes with a soil water balance approach. *Journal of Hydrology* 292:262–280.
- Hyun H.N., S.W. Hyun, and H.C. Lim. 1997. Fertilization status and issues on Cheju Province.
- Inoue, K. 1986. Chemical properties. in Ando soil in Japan. Kyushu University Press. pp 69–98
- JARES. 2000. Colligative report of movements for revitalizing soils. pp 65–72.
- Johnston, K., J. Ver Hoef, K. Krivoruchko, and N. Lucas. 2001. Using ArcGIS geostatistical analyst Esri New York.

- Ko D.C., Y.J. Kim, and K.H. Park. 2005. Characteristics of pollution and mixing of underground water using environmental tracer in Jeju Island. in Jeju water and its property:45–81.
- Kvn, S.H., L.E. Haugen, and T. Bresen. 2007. Variability in topsoil texture and carbon content within soil map units and its implications in predicting soil water content for optimum workability. *Soil and Tillage Research* 95:332–347.
- Legendre, P. 1993. Spatial autocorrelation: trouble or new paradigm *Ecology* 74:1659–1673.
- Lim H.C., H.N. Hyun, and J.H. Kim. 2001. Research for improvement of soil environment and factors of abnormal leaf falling on citrus orchards. pp 10–55.
- McBratney, A.B., B. Minasny, S.R. Cattle, and R.W. Vervoort. 2002. From pedotransfer functions to soil inference systems. *Geoderma* 109:41–73.
- McBratney, A.B., M.L. Mendon Santos, and B. Minasny. 2003. On digital soil mapping. *Geoderma* 117:3–52.
- McKenzie, N.J., and P.J. Ryan. 1999. Spatial prediction of soil properties using environmental correlation. *Geoderma* 89:67–94.
- Minasny, B., A.B. McBratney, and S.a. Salvador–Blanes. 2008. Quantitative models for pedogenesis – A review. *Geoderma* 144:140–157.
- Moon, K.H., H.C. Lim, and H.N. Hyun. 2008. Distribution of soil series in Jeju Island by proximity and altitude. *Korean Journal of Soil Science and Fertilizer* 40(3):221–228.
- Moon, K.H., H.C. Lim, and H.N. Hyun. 2008. Regional soil distribution in Jeju Island by climatic factors. *Korean Journal of Soil Science and Fertilizer* 42(5):347–353.
- Moore I.D., P.E. Gessler, G.A.Nielsen, and G.A. Peterson. Soil attribute

- prediction using terrain analysis. *Soil Sci Soc Am J* 57:443–452.
- NIAST, RDA. 1976. Detailed soil map.
- NIAST, RDA. 1983. Soils in Korea. soil survey report no. 1.
- NIAST, RDA. 1992. Soils in Korea(revised). soil survey report no. 13.
- NIAST, RDA. 2000. Analysis methods for soil and plant material. pp104–107.
- NIAST, RDA. 2000. Taxonomical classification of Korean soils. pp 800–809.
- NRCS, USDA. 2003. Soil survey laboratory methods manual. soil survey investigation report no. 42 ver. 4.0.
- Odeha, I.O.A., A.B. McBratney, and D.J. Chittleborough. 1994. Spatial prediction of soil properties from landform attributes derived from a digital elevation model. *Geoderma* 63:197–214.
- Parfitt, R.L., M. Russell, and G.E. Orbell. 1983. Weathering sequence of soils from volcanic ash involving allophane and halloysite, New Zealand. *Geoderma* 29:41–57.
- Park C.S., K.T. Eom, and J.Y. Kim. 1984a. Variance analysis of Jeju soils by soil color classification. *Korean Journal of Soil Science and Fertilizer* 17:141–146.
- Park C.S., K.T. Eom, and K.B. Min. 1984b. Variance analysis of soil characteristics on lava plane. *Korean Journal of Soil Science and Fertilizer* 17:343–348.
- Park C.S., K.T. Eom, S.J. Jeong, and S.J. Jo. 1985. Variance analysis of soil characteristics on mountainous area. *Korean Journal of Soil Science and Fertilizer* 18:128–133.
- Park, C.S., J.J. Kim, and S.J. Cho. 1984a. Analysis of spatial variability for particle size distribution fo field soils 1. variogram. *Korean Journal of Soil Science and Fertilizer* 17:212–217.
- Park, C.S., J.J. Kim, and S.J. Cho. 1984b. Analysis of spatial variability

- for particle size distribution fo field soils 2. fitting variogram models and Kriging. Korean Journal of Soil Science and Fertilizer 17:319–324.
- Park, C.S., L.Y. Kim, and S.J. Cho. 1985. Classification of volcanic ash soils and contribution of organic matter and clay to cation exchange capacity. Korean Journal of Soil Science and Fertilizer 18:161–168.
- Rasmussen, C., and N.J. Tabor. 2007. Applying a Quantitative Pedogenic Energy Model across a Range of Environmental Gradients. Soil Sci Soc Am J 71:1719–1729.
- Saigusa, M., and N. Matsuyama. 1998. Distribution of allophanic andosols and non-allophanic andosols in Japan. Tohoku Journal of Agricultural Research. 48(3–4):75–83.
- Shin, J.S. 1978. Composition and genesis of volcanic ash soils derived from basaltic materials in Jeju Island(Korea). Ph.D. Thesis. State Univ. of Ghent. Belgium.
- Shoji, S., M. Nanzyo, and R. Dahlgren. 1993. Volcanic ash soils: genesis, properties, and utilization Elsevier Science.
- Sóik, A.K., and P. Aagard. 2003. Spatial variability of a solid porous framework with regard to chemical and physical properties. Geoderma 113:47–76.
- Soil Survey Staff, USDA. 2006. Keys to soil taxonomy.
- Song K.C. 1989. Andic properties in major soils in Cheju Island. in Ph.D thesis. Seoul National University.
- Song K.C. 1997. Distribution and forming condition of allophane in Jeju Island soils. Mineral and Industry. 10(2):14–23. .
- Song K.C., B.K. Hyun, K.H. Moon, S.J. Jeon, and H.C. Lim. 2009. Taxonomical classification of Yongdang series. Korean Journal of Soil Science and Fertilizer 42(5):392–397.
- Song K.C., B.K. Hyun, Y.K. Sonn, H.C. Lim, and S.C. Lee. 2009.

- Taxonomical classification of Namweon series, black volcanic ash soil. *Korean Journal of Soil Science and Fertilizer* 42(5):384–391.
- Song K.C., S.J. Jeong, B.K. Hyun, Y.K. Sonn, and H.K. Kwak. 2005. Characteristics and classification system in Korean soils. in *Achievement and development plan of soil survey in Korea*. pp 35–107.
- Song K.C., S.J. Jung, B.K. Hyun, Y.K. Sonn, Y.S. Jang, C.W. Park, S.Y. Hong, Y.H. Kim, and E.Y. Choi. 2008. Characteristics and classification of Andisols in Jeju Island. pp 1–44.
- Song Y.S., H.K. Kwak, B.Y. Yeon, C.S. Lee, J.H. Yun, D.Y. Moon, and S.C. Lee. 2002. Recommendation of optimum amount of fertilizer nitrogen based on soil organic matter for Chinese cabbage and cabbages in volcanic ash soils in Cheju Island. *Korean Journal of Soil Science and Fertilizer* 35:105–111.
- Song, K.C., and S.H. Yoo. 1994. Andic properties of major soils in Cheju island III. Conditions for formations of allophane. *Korean Journal of Soil Science and Fertilizer* 27:149–157.
- Sonn, Y.K., B.Y. Yeon, and C.K. Lee. 2002. Spatial Analysis of Soil Characteristics in Rice Paddy Field. Research Report of NIAST.
- Sørensen, R., U. Zinko, and J. Seibert. 2006. On the calculation of the topographic wetness index: evaluation of different methods based on field observations. *Hydrology and Earth System Sciences* 10:101–112.
- Takahashi, T., R. Dahlgren, and P. van Susteren. 1993. Clay mineralogy and chemistry of soils formed in volcanic materials in the xeric moisture regime of northern California. *Geoderma* 59:131–150.
- Ugolini, F., and R. Dahlgren. 2002. Soil development in volcanic ash. *Global Environmental Research* 6:69–82.
- Um K.T., Y.H. Joo, K.S. Lee, and Y.H. Shin. 1978. Research of soil

- characteristics for development plans of Cheju Province. Research Report of Official Rural Development 19:1-18.
- Vacca, A., P. Adamo, M. Pigna, and P. Violante. 2003. Genesis of Tephra-derived Soils from the Roccamonfina Volcano, South Central Italy. *Soil Sci Soc Am J* 67:198-207.
- Volobuyev, V.R. 1974. Main concepts of soil ecology. *Geoderma* 12:27-33.
- Wada, K. 1986. Ando soils in Japan. Kyushu University Press. pp3-68.
- Webster, R. 1994. The development of pedometrics. *Geoderma* 62:1-15.
- White, R. 1997. Soil science: raising the profile. *Australian Journal of Soil Research* 35:961-978.
- Wöten, J.H.M., Y.A. Pachepsky, and W.J. Rawls. 2001. Pedotransfer functions: bridging the gap between available basic soil data and missing soil hydraulic characteristics. *Journal of Hydrology* 251:123-150.
- WSO. 2001. Data of geologic columnar section on Jeju(1970 ~ 2000).
- Wu, C., J. Wu, Y. Luo, L. Zhang, and S.D. DeGloria. 2009. Spatial Prediction of Soil Organic Matter Content Using Cokriging with Remotely Sensed Data. *Soil Sci Soc Am J* 73:1202-1208.
- Yoon, E.S., Y.T. Jung, Y.K. Sonn, S.Y. Hong, B.K. Hyun, G.S. Hyun, C.H. Yoo, and K.Y. Jung. 2009. Soil survey, classification and interpretation of Korea. *Korean Journal of Soil Science and Fertilizer* 42:5-27.

감사의 글

본 논문이 완성될 수 있도록 시종 지도와 격려를 아끼지 않으셨고 연구자로서 필요한 것에 대하여 많은 것을 가르쳐 주신 현해남 지도교수님께 진심으로 감사를 드립니다. 논문 작성 과정에서 많은 지도편달을 하여주신 전용철 교수님, 임한철 소장님, 송관철 연구관님, 손연규 박사님께도 감사를 드립니다. 특히, 제주도 토양에 대하여 특별한 애정을 가지고 논문의 상세한 내용까지 검토하고 지적해 주신 송관철 연구관님과 손연규 박사님께는 특별한 감사의 뜻을 포함합니다.

제가 근무하는 온난화대응농업연구센터에서 항상 든든한 기반이 되어주신 임한철 소장님, 전승중 연구관님, 성기철 연구관님께도 감사를 드립니다. 그 동안 환경 분야에서 같이 일하면서 항상 도움을 주신 좌재호 연구사님, 문두경 박사님께도 감사를 드립니다. 서형호 연구관님을 비롯한 노재승 박사님, 권영순 연구사님, 김성은님, 오길남님, 임유정님, 강정자님, 저와 이름이 같은 분석실의 문경환님, 고영주님 등 환경평가연구실의 식구들 모두의 도움에도 감사드립니다. 지금까지 현장지원팀의 김두섭 선생님, 이남현 선생님의 도움은 잊을 수가 없습니다. 그 동안 박원표, 장공만, 고석형, 강경구 학형 등 제주대학교 토양실 동료들의 도움에도 진심으로 감사를 드립니다.

전공자가 많지 않은 토양학 분야에서 멀리 수원에서 지속적으로 관심과 응원을 보내 주시는 농업과학원 토양관리과의 하상건 박사님, 장용선 박사님, 김유학 박사님, 홍석영 박사님, 허승오 연구사님께도 감사를 드립니다. 제주에 내려와서 토양을 조사할 때마다 같이 다니며 가르쳐주셨던 현병근 박사님, 정석재 선배님, 노대철 선배님 등 그 동안 수많은 토양학 분야의 선배, 동료, 후배님들께 도움을 받았습니다. 대학 졸업 후 제가 토양학연구의 길로 인도해 주신 임선욱 교수님과 홍종운 박사님, 윤정희 박사님께 존경을 포함합니다.

그 동안 어려운 여건에서도 학업을 지속할 수 있도록 뒷바라지 해 왔던 어머니님과 누나, 동생들께 감사의 마음을 포함합니다. 지금의 제가 살아오는 동안 언제나 저를 지원해 주셨고 든든한 힘이 되 주셨지만, 2년 전 작고하신 아버지 영전에 이 논문을 바칩니다. 어려운 장남의 집에 들어와 가정을 잘 꾸려가 주는 아내 강영희, 자랑스럽게 잘 자라주는 석범, 지연, 준범이와 같이 사랑의 마음과 더불어 이 영광을 함께 하고 싶습니다.