



Article

## 토양특성을 이용한 우리나라 토양에 적합한 토양발달지수 개발

이단비<sup>1\*</sup>, 이은진<sup>1</sup>, 이태구<sup>1</sup>, 정하일<sup>1</sup>, 김명숙<sup>1</sup>, 손연규<sup>1</sup>, 김계훈<sup>2</sup>

<sup>1</sup>농촌진흥청 국립농업과학원 농업환경부 토양비료과

<sup>2</sup>서울시립대학교 환경원예학과

### Establishment of soil development index suitable for Korean soils using soil properties

Dan Bi Lee<sup>1\*</sup>, Eun-jin Lee<sup>1</sup>, Tae Gu Lee<sup>1</sup>, Ha Il Jung<sup>1</sup>, Myung-sook Kim<sup>1</sup>, Yeon-Kyu Sonn<sup>1</sup>, Kye-Hoon Kim<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Soil & Fertilizer Management Division, Department of Agricultural Environment, National Institute of Agricultural Science, Rural Development Administration, Wanju 55365, Republic of Korea

<sup>2</sup>Department of Environmental Horticulture, University of Seoul, Seoul 02504, Republic of Korea

Received: November 8, 2024 / Revised: January 7, 2025 / Accepted: February 19, 2025

\*Corresponding author: +82-63-238-2465 / E-mail: [dblee91@korea.kr](mailto:dblee91@korea.kr)

**요약:** 토양은 모재, 기후, 생물, 시간, 지형 등의 다양한 요인의 영향을 받아 끊임없이 변화하는 동적인 자연체이다. 인간 활동에 의해 기후 변화가 가속화됨에 따라 토양 발달 패턴도 변화하고 있으며, 이러한 변화를 이해하는 것은 효과적인 토양 관리 및 활용을 위해 필수적이다. 하지만 현재 토양 발달은 정성적으로 평가되고 있으므로 토양 특성을 이용한 토양 발달 정량화 연구가 요구된다. 이에 본 연구는 문헌을 통해 토양 발달 요인을 파악하고, 토양 발달 지수를 개발하고자 하였다. 문헌 조사를 통해 우리나라 토양에 적합한 토양 발달 요인으로서 토색(적색도), 점토 함량, 양이온 교환 용량, 교환성 양이온, 유효 토심, 토양 구조(등급), pH를 선정하였다. 토양 발달 지수를 개발하기 위해 토양 층위별 데이터를 수집하여 용탈층과 집적층을 비교하여 하나의 토양 단면 값을 계산하였다. 토양의 생성을 일반화 할 수 없는 인위토양, 화산회토, 유기질 토양 등을 제외한 총 301개의 토양통을 분석에 활용하였다. 토양 발달 지수는 정규화된 인자 값의 합을 인자의 개수로 나누어 계산하였다. 우리나라 토양의 발달 지수 값은 최소 0.009에서 최대 0.673의 범위를 나타냈다. 지수를 검증하기 위해 토양 분류 체계를 바탕으로 분산 분석과 판별 분석을 수행한 결과, Alfisols와 Ultisols 간에 유의미한 차이가 없었지만, Inceptisols와 Entisols와는 유의미한 차이를 나타내 토양발달지수의 적합성을 확인하였다. 또한, 판별 분석 결과 Alfisols/Ultisols는 83.3%, Inceptisols는 78.9%, Entisols는 72.1%의 정확도를 나타냈으며, 감식 차표층은 Argillic horizon이 93.0%, Cambic horizon이 72.6%, 전체적으로 80.4%의 정확도를 보였다. 본 연구에서 개발된 토양 발달 지수는 소수의 특성만으로 토양 발달을 용이하게 평가할 수 있어 효과적인 것으로 판단된다. 또한 이 지수는 토양 특성 예측 및 토양 분류에 활용이 기대된다.

**주요어:** 토양 발달, 토양 단면, 토양 층위, 토양 특성, 토양 분류

**ABSTRACT:** Soil is a dynamic natural body that changes continuously under the influence of various factors, including parent material, climate, biological factors, time, and topography. As climate change accelerates due to human activities, soil development patterns are also shifting, making it essential to understand these changes for effective soil management and utilization. However, since soil development is not a quantifiable property, it must be quantified through characteristic analysis to facilitate prediction and management. This study aimed to (1) identify soil development factors through literature, (2) develop a soil development index, and (3) use this index to evaluate soil development in Korea. Through data surveys, soil color (redness), clay content, cation exchange capacity, exchangeable cations, effective soil depth, soil structure (grade), and pH were selected as suitable soil development factors for Korean soils. To develop the soil development index, data from each soil layer related to each factor were compiled, and values were calculated by comparing eluvial and illuvial horizons. The properties of the B horizon were predominant, and layers with properties of both A and B horizons, such as the BA layer, were classified as B horizon for calculation. A total of 301 soil containers were analyzed, excluding volcanic ash soils, organic soils, anthropogenic soils, and others that could not be compared due to differing properties or analysis methods. In developing the index, each factor's effect was normalized to the same scale using scaling techniques to account for variations across factors. The soil development index was calculated by summing all normalized factor values for each soil container and dividing by the number of factors. The resulting values for Korean soil development ranged from a minimum of 0.009 to a maximum of 0.673. To verify the effectiveness of the index, distribution analysis and

discriminant analysis were conducted based on soil taxonomy, revealing greater variance between soil order groups than within them. Post hoc analysis indicated no significant difference between Alfisols and Ultisols, but other group comparisons showed significant differences. Discriminant analysis results showed accuracy rates of 83.3% for Alfisols/Ultisols, 78.9% for Inceptisols, and 72.1% for Entisols. Analysis by diagnostic horizon yielded 93.0% accuracy for Argillic horizons, 72.6% for Cambic horizons, and an overall accuracy rate of 80.4%. The soil development index developed in this study was found to be effective, allowing easy assessment of soil development using only a few properties. Furthermore, this index is expected to be valuable in predicting soil properties and potential applications.

**Key words:** soil development, soil pedon, soil properties, pedogenesis, soil classification

## 1. 서언

토양은 생태계 유지와 농업 생산성을 지원하는 데 핵심적인 역할을 하는 자연 자원이다. 토양의 물리적, 화학적, 생물학적 특성은 토양이 발달한 정도에 따라 달라지며, 이는 지속가능한 자원 관리와 환경 보전을 위해 중요하게 고려되어야 한다. 그러나 현재 토양의 발달 상태를 객관적으로 평가하고 이를 수치화할 수 있는 체계적이고 종합적인 연구가 부족한 실정이다.

토양 발달은 기후, 지형, 모재, 식생 및 시간 등 다양한 요인의 상호작용을 포함하는 복잡한 과정으로 이루어진다. 토양이 발달함에 따라 유기물이 축적되고 광물이 풍화되어 용탈 및 집적의 과정을 거치면서 토양의 층위가 발달하게 된다(Wilkinson and Humphreys, 2005).

Augusto *et al.* (2002)는 토양 발달과 식생 간의 관계 조사를 통해 토양 발달이 초목의 유형과 밀접한 관련이 있음을 발견하였으며, 침엽수림에 비해 활엽수림이 식재된 토양의 발달 속도가 더 빠른 것을 확인하였다. 또한 토양의 발달이 생태계 천이에 있어 중요한 역할을 하며 토양 생물, 유기물 및 광물의 풍화 간의 상호 작용이 토양 발달의 핵심이 요인이라고 보고하였다.

Harden (1982)은 모암과 층위별로 비교함으로써 처음으로 토양의 발달을 정량화하는 토양발달지수를 개발하였다. 토양발달지수는 토양의 형성과정에서 발달 정도를 평가하는 지표로 토양이 발달함에 따라 변하는 토양의 물리학적, 화학적, 형태적 특성 등을 종합적으로 고려하여 계산된다. 이러한 토양발달지수는 토양의 형성 과정 및 발달을 이해하는데 기여하였으며, 개발된 발달 지수가 토양과 관련된 다양한 분야에 활용될 수 있는 가능성을 제시하였다.

Turnbaugh and Evans (1994)는 모재와 층위의 형태적, 미세 형태적 특성의 비교를 통하여 토양의 발달을 정량화하여 Harden (1982)의 토양발달지수와 비교한 결과 지역에 따라 상관성이 다르게 나타났다. Alonso *et al.* (1994)는 토양의 발달을 morphological indices와 analytical indices로 나누어 토양 깊이별 수치를 비교하고, 생성 연대를 아는 토양을 대상으로 발달 지수를 비교하였다. 토양발달지수는 토양 연대, 지형, 기후 등 토양 생성에 영향을 주는 인자와의 상관성 연구에 활용되었다. García-García *et al.* (2016)

은 토양발달지수를 층적 모재 토양을 대상으로 토양 연대 추정 및 지형 연구에 활용하였다.

Harden (1982)에 의해 개발된 토양발달지수는 지역적으로 동일한 모재를 대상으로 연구를 수행하였기 때문에 광범위한 적용에 한계가 있었으며, 층위별 특성을 모암의 비교를 통해 발달을 계산하므로 모암층을 확인할 수 없는 토양에 적용이 어려움이 있으므로(Turnbaugh and Evan, 1994; Koop *et al.*, 2020), 이러한 문제점을 극복하기 위해 Schaetzl and Mokma (1988)는 모암에 의존하지 않고 E층과 B층간의 색상 차이를 이용하여 podsolization 지수를 개발하였으며, Turnbaugh and Evan (1994)는 모암과 비교를 하지 않고 형태적 및 미세 형태적 특성을 사용하는 지표를 개발하여 토양과 퇴적물을 구별하기 위한 연구를 수행하였다. 이러한 연구는 모암에 의존하지 않고 생성된 토양으로 일반화 가능한 지수에 대한 개발 가능성을 나타내었다. 이에 Koop *et al.* (2020)는 일부 지역에 한정되는 것이 아닌 다양한 토양에 적용시킬 수 있는 일반화된 토양발달지수를 개발하였다. Koop *et al.* (2020)의 토양발달지수는 입경분포, 탄산칼슘당량(calcium carbonate equivalent), 토색, 점토 피막을 토양 발달 인자로 사용하였으며 용탈층(Eluvial horizon)과 집적층(Illuvial horizon)을 이용하여 개발하였다. 또한 발달지수를 검증하기 위해 Soil Taxonomy의 토양목(soil order)와 진단차표층(diagnostic horizon)을 이용하였다.

토양발달지수를 적용한 국내 연구는 Harden (1982)의 지수를 이용하여 역암지대 잔적토양의 토양발달지수를 비교하는 것이 유일하다(Kim *et al.*, 1986). 이들은 역암 유래 토양은 지형적 조건이 토양 발달에 큰 영향을 미치는 것을 확인하였으며, 토양의 적절한 관리 및 보전을 위하여 지형학적 특성이 주요한 요인인 것으로 보고하였다. 선행 연구를 통해 개발된 토양발달지수는 유럽지역에 한정되어 있으므로, 모재 및 기후에 따라 토양의 생성 및 발달이 상이하여 우리나라 토양에 직접적인 적용이 어려운 실정이다. 따라서 우리나라 토양의 발달을 평가하기 위해 우리나라 환경에 맞는 토양발달지수의 개발이 요구된다. 이에 본 연구는 선행 문헌을 통해 토양의 발달을 평가할 수 있는 토양 특성을 선정할 후 우리나라 토양에 적합한 토양발달지수를 개발하고자 하였다. 또한 개발된 토양발달지수를 검증하기

**Table 1.** Soil Development Factors Used in Previous Literature.

| Authors              | Year | Properties  |
|----------------------|------|---|
| Harden               | 1982 | Texture, Structure, Color (rubification, melanization), Consistence, Clay film      |
| Turnbaugh and Evans  | 1994 | Structure, Color (rubification, melanization), Consistence, Clay film               |
| Alonso <i>et al.</i> | 1994 | Texture, Structure, Color (rubification), Clay film, clay, Water retention, CEC, pH |
| Vidic and Lobnik     | 1997 | Texture, Structure, Color (rubification, melanization), Consistence, Clay film, pH  |
| Birkeland            | 1999 | Color (rubification, melanization)  |
| Botha and Porat      | 2007 | Texture, Color (rubification), Consistence, pH                                      |
| Koop <i>et al.</i>   | 2020 | Texture, Color (rubification, melanization), Pedogenic carbonate                    |
| Sion <i>et al.</i>   | 2022 | Consistence, Clay film, Pedogenic carbonate   |

위해 선행 문헌을 참고하여 세계적으로 통용되는 토양분류 체계인 Soil Taxonomy의 목(Orders)과 진단 차표층(Dignostic horizon)을 활용하였다(Koop *et al.*, 2020).

## 2. 재료 및 방법

### 2.1. 토양 특성 정보

본 연구에 사용된 토양 특성에 관한 데이터는 농촌진흥청에서 발간한 NAAS (2014)에 수록된 토양 물리, 화학, 형태적 정보를 활용하였다. 우리나라의 405개 토양통 중 물리, 화학적 특성이 상이하여 일반 토양과 분석방법의 차이가 있어 데이터의 직접 비교가 불가능한 화산회토양(75) 및 유기질토양(9), 사람의 영향으로 인위적으로 층위가 형성된 인위토양(11), 토층이 생성되지 않아 층위 별 비교를 할 수 없는 토양(9)을 제외하여 총 301개의 토양통을 사용하였다.

### 2.2. 토양발달인자(Soil Development Factors)

선행 연구를 통해 조사된 토양발달인자는 총 10개로 soil color (melanization, rubification), clay film, clay 함량, texture, structure, CEC, Soil consistence (dry, wet), Water retention (1/3, 15 bar), pH 그리고 pedogenic carbonate이다 (표 1)(Harden, 1982; Alonso *et al.*, 1994; Turnbaugh and Evans, 1994; Vidic and Lobnik, 1997; Birkeland, 1999; Botha and Porat, 2007; Koop *et al.*, 2020; Sion *et al.*, 2022). 그 중 우리나라의 토양 발달과 관련이 없는 pedogenic carbonate와 분석된 자료가 적어 인자로 사용할 수 없는 consistence, water retention을 제외하였으며 문헌고찰을 통해 토양의 발달에 따라 변하는 특성으로 판단되는 effective soil depth, exchangeable cation을 추가하여 최종적으로 토색(rubification), clay (%), soil structure, CEC, pH, exchangeable cation, effective soil depth를 토양발달인자로 선정하였다.

본 연구에 사용된 토양통 정보는 층위별 데이터로 존재하기 때문에 선정된 인자들의 층위별 데이터를 하나의 통 데이터 계산하기 위해 용탈층(eluvial horizon)과 집적층(Illuvial horizon)의 비교를 통해 각각 특성의 토양발달인

자 값을 계산하였다. 토양통의 층위별 데이터 중 집적층(B층)으로 발달되고 있는 전이층(BA층 또는 BC층)은 B층의 특성이 우세하기 때문에 B층으로 판단하였다. 각 특성별 층위별 데이터를 하나의 토양통 데이터로 계산한 후 Scaling technique를 통해 데이터의 scale을 조절하였다(표 2).

#### 2.2.1. 토색(redness rating)

토양의 색은 유기물이 집적되거나, 이온의 산화환원에 의해 변할 수 있다. 토양에서 나타나는 붉은색은 1차 광물에서 방출된 철이 산화되면서 나타낸다. 토양이 발달함에 따라 하층부로 점토 및 이온이 이동하여 집적되며, 이때 이동된 철이 산화되면서 붉은 색을 나타내기 때문에 토양의 붉은 정도를 비교함으로써 발달을 평가하고자 하였다(Harden, 1982).

Soil color는 토양의 층위별 데이터를 취합하여 하나의 통 데이터로 계산하였다. 계산에 사용된 토양 색 데이터는 Munsell color chart의 색상, 명도, 채도를 이용하였다. 층위별 redness rating은 Lucke and Sprafke (2015)의 방법을 이용하여 계산하였다.

$$HRr(\text{Horizon Redness rating}) = H * C \quad (1)$$

여기서 H는 색상이고, C는 채도로 다음과 같은 기준으로 점수를 부여하였다(10R = 7, 2.5YR = 6, 5YR = 5, 7.5YR = 4, 10YR = 3, 2.5Y = 2, 5Y = 1).

계산한 층위별 데이터를 용탈층과 집적층으로 나누어 붉어진 정도의 비교를 통해 하나의 통 값으로 계산하였다.

$$\text{Series Data} = \frac{HRr \text{ of B horizon}}{HRr \text{ of A horizon}} \quad (2)$$

#### 2.2.2. 점토

토양은 토양생성인자의 영향을 받아 모재층(C층)이 형성되고 유기물이 지속적으로 유입되면서 용탈층(A층)이 발달한다. 유기물 및 점토가 물을 따라 토양 내부에서 공극

**Table 2.** Calculation Method of Soil Development Factors and Soil Development Index Suitable for Korean Soils.

| Factor                 | Calculation formula   |
|------------------------|---|
| Soil color             | HRr(Horizon Redness rating) = H*C<br>C = chroma of soil, H = color of soil (10R = 7, 2.5YR = 6, 5YR = 5, 7.5YR = 4, 10YR = 3, 2.5Y = 2, 5Y = 1).<br>$\frac{\text{HRr of B horizon}}{\text{HRr of A horizon}}$ |
| Clay                   | $\frac{\text{Clay (\% of B horizon)}}{\text{Clay (\% of A horizon)}}$   |
| Exchangeable cation    | $\frac{\text{Sum of Cation (Ca, Mg, Na, K) of B horizon}}{\text{Sun of Cation (Ca, Mg, Na, K) of A horizon}}$   |
| CEC                    | $\frac{\text{CEC of B horizon}}{\text{CEC of A horizon}}$   |
| Structure              | $\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i$  |
| Effective soil depth   | Depth of B horizon  |
| pH                     | $\frac{\text{pH of A horizon}}{\text{pH of B horizon}}$   |
| Normalization          | Min-Max Scaling $x' = \frac{x - \min(x)}{\max(x) - \min(x)}$  |
| Soil Development Index | $\frac{\text{Xcolor} + \text{Xclay} + \text{Xcation} + \text{Xcec} + \text{Xavail.d} + \text{Xstructur} + \text{XpH}}{7}$   |

을 통해 하층부로 이동하여 집적되어 집적층(B층)이 형성된다. 따라서 토양발달요인으로 용탈층과 집적층의 점토 함량을 비교하여 층위별 clay(%)를 하나의 통 값으로 부여하였다.

$$\text{Series Data} = \frac{\text{Clay of B horizon(\%)}}{\text{Clay of A horizon(\%)}} \quad (3)$$

### 2.2.3. 교환성 양이온(Exchangeable cation)

교환성 양이온은 토양입자의 표면에 존재하는 이온으로 토양 내부에서 물과 함께 이동하여 집적한다. 따라서 상층부와 하층부의 이온 함량을 비교하여 토양의 발달을 수치화하기 위해 층위별 값을 하나의 통 값으로 나타냈다.

$$\text{Series Data} = \frac{\text{Sum of Cation (Ca, Mg, Na, K) of B horizon}}{\text{Sun of Cation (Ca, Mg, Na, K) of A horizon}} \quad (4)$$

### 2.2.4. 양이온교환용량(Cation Exchange Capacity: CEC)

양이온교환용량이란 토양이 보유할 수 있는 교환 가능한 양이온의 총량을 의미하며, 점토 또는 유기물이 많은 토양에서 높아진다. 토양이 발달함에 따라 점토 및 유기물의 이동/집적되므로 CEC를 토양발달인자로 선정하였다.

층위별 CEC값을 아래의 식을 이용하여 하나의 통 값으로 나타냈다.

$$\text{Series Data} = \frac{\text{CEC of B horizon}}{\text{CEC of A horizon}} \quad (5)$$

### 2.2.5. 유효토심(B horizon depth)

토양이 발달함에 따라 토심이 깊어지기 때문에 B층의 두께가 두꺼울 수록 토양이 발달되었다고 판단할 수 있다. 따라서 각 토양통의 B층 두께를 토양발달인자로 사용하였다.

### 2.2.6. Soil structure (grade)

토양 구조는 층위 내에서 생기는 형태적인 특성으로 토양의 발달에 따라 형상과 등급이 달라지게 된다. 본 연구에서는 토양의 등급을 활용하여 토양의 발달을 평가하고자 하였다.

토양 구조는 질적인 변수이므로 구조의 등급을 무구조, 약함, 보통, 강함을 0, 1, 2, 3으로 등급을 나타내어 분석에 사용하였다. 층위별 구조의 등급을 아래의 식을 이용하여 하나의 통의 값으로 나타내었다.

$$\text{Series Data} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i \quad (6)$$

### 2.2.7. pH

토양의 pH는 수소이온농도를 측정한 값으로 토양의 산도를 나타내는 척도이다. 풍화 생성물이 물에 의해 토양의 하층부로 용탈됨에 따라 토양이 산성화된다. 이에 층위별 pH를 비교를 통해 토양의 발달을 평가하고자 하였다.

아래의 식을 이용하여 층위별 pH 값을 하나의 통 값으로 계산하였다.

$$\text{Series Data} = \frac{\text{pH of A horizon}}{\text{pH of B horizon}} \quad (7)$$

### 2.2.8. 정규화

정규화는 데이터의 스케일(scale)을 조정하여 데이터간의 크기 차이를 줄이는 과정으로 모든 변수가 동일한 스케일을 가질 수 있도록 데이터의 분포를 조정하는 것이다. 본 연구에 이용된 normalization 방법은 Min-Max Scaling으로 데이터를 특정 범위로 조정하는 방법이다. 최소값은 0, 최대값은 1로 조정되며 정규화 식은 다음과 같다.

$$x' = \frac{x - \min(x)}{\max(x) - \min(x)} \quad (8)$$

여기서 x와 x'는 각각 series data와 정규화된 series data를 나타낸다.

### 2.2.9. Soil Development Index

Scaling technique를 통해 scale을 조절한 토양발달인자 값을 식 (9)로 계산하였으며, 그 결과는 그림 1과 같다.

$$\text{Soil Development Index} = \frac{X_{\text{color}} + X_{\text{clay}} + X_{\text{cation}} + X_{\text{cec}} + X_{\text{avail.d}} + X_{\text{structur}} + X_{\text{pH}}}{7} \quad (9)$$

## 2.3. 검증

### 2.3.1. 토양 목(Soil orders)

Soil Taxonomy는 미국에서 개발된 토양분류체계로 토양의 물리학적, 화학적, 형태적 특성 등을 고려하여 12개의 목(Orders)으로 분류한다. 이중 우리나라에 분포하는 토양 목(Order)은 Alfisols, Andisols, Entisols, Histosols, Inceptisols, Mollisols 그리고 Ultisols로 총 7개이다.

본 연구에서는 토양의 생성 및 발달이 상이한 Andisols과, 데이터 수가 현저히 적어 분석에 사용할 수 없는 Histosols과 Mollisols를 제외하였다.

Entisols는 발달이 되지 않아 특징적인 특성이 없는 토양

이고, Inceptisols는 약한 발달, Alfisols과 Ultisols는 발달이 진행되어 점토 및 이온의 용탈 및 집적이 일어난 토양으로 분류할 수 있으며, 토양 간의 발달은 Entisols < Inceptisols < Alfisols = Ultisols로 구분할 수 있다(Soil Survey Staff, 2014).

### 2.3.2. 진단 차표층(Diagnostic horizons)

토양발달지수의 타당성을 평가하기 위해 Soil Taxonomy에서 정의하고 있는 진단 차표층의 특성을 활용하였다. 토양 분류에 활용되고 있는 진단 차표층은 총 19개이며 그중 토양의 발달을 판단할 수 있는 Cambic horizon과 Argillic horizon의 비교를 통해 토양발달지수의 타당성을 판단하였다. Cambic horizon은 점토, 유기물, Fe 및 Al 등의 집적이 없이 토양생성작용에 의한 토양 발달의 흔적이 있는 토양을 분류하며, Argillic horizon은 토양의 풍화작용에 의해 점토가 집적되어 점토 피막을 형성하고, Fe 및 Al이 집적된 토양을 분류한다(Soil Survey Staff, 2014).

따라서 토양발달지수의 타당성을 평가하기 위해 상대적으로 낮은 토양발달지수에 해당되는 Cambic horizon과 반대로 토양이 발달되어 더 높은 값에 해당되는 Argillic horizon을 비교하였다. 총 186개의 Cambic horizon과 115개의 Argillic horizon을 이용하여 비교하였다.

### 2.3.3. 통계분석

개발된 토양발달지수의 적합성을 검증하기 위해 토양통을 토양 목(Entisols, Inceptisols, Alfisols, Ultisols)으로 분류하여 one-way ANOVA를 통해 그룹의 차이를 확인한 후 그룹간 차이를 확인하기 위해 LSD사후분석을 수행하였고, 진단 차표층(cambic horizon, argillic horizon)은 t-test를 통해 그룹간의 차이를 확인하였다. 토양발달지수에 사용된 토양발달인자를 이용하여 토양 목과 진단 차표층을 판별하기 위해 discriminant analysis를 수행하였다. 통계는 Minitab 16 software (Minitab Inc., University, Pennsylvania, USA)로 수행하였다.

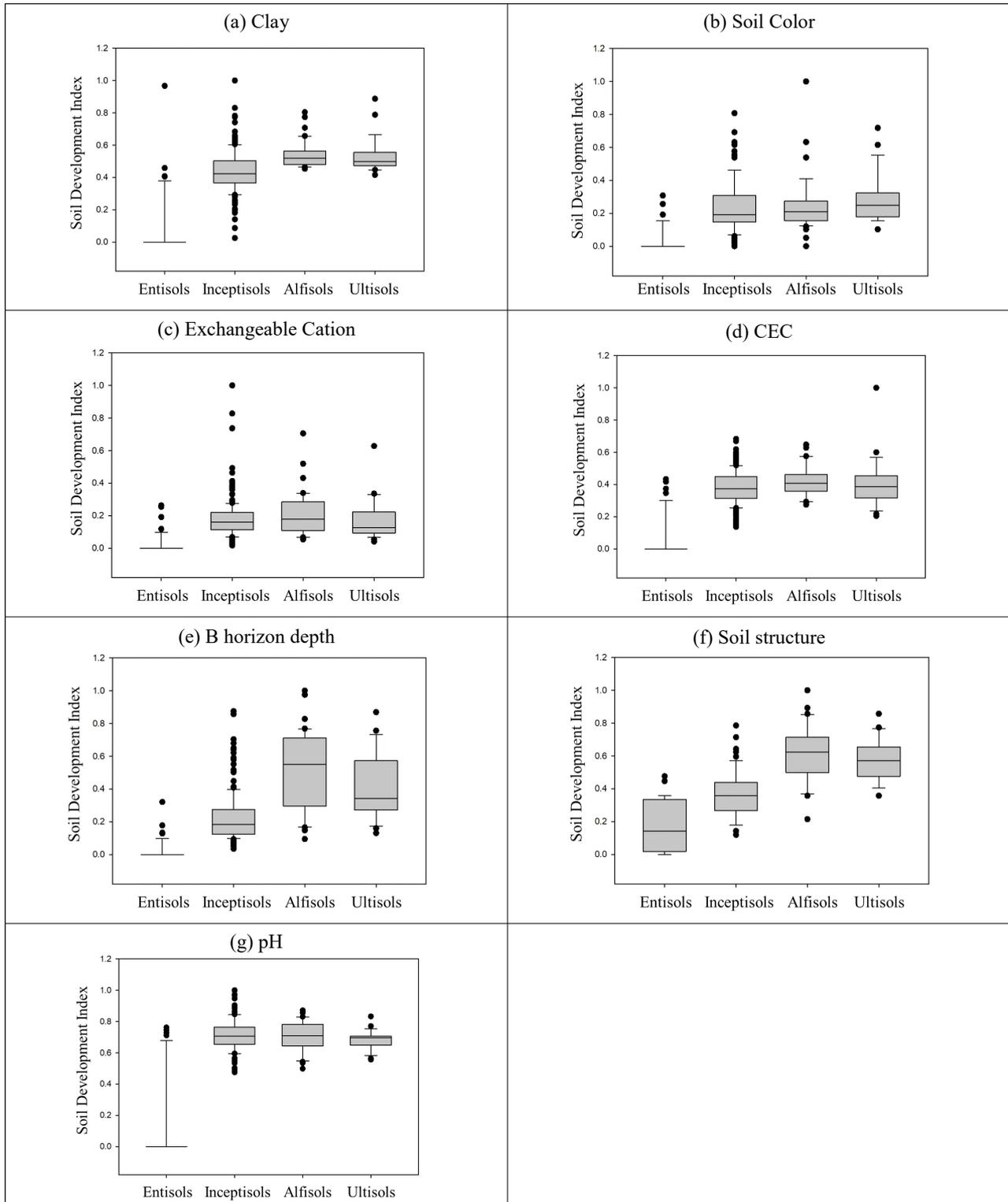
## 3. 결과 및 고찰

### 3.1. 토양발달지수(Soil Development Index)

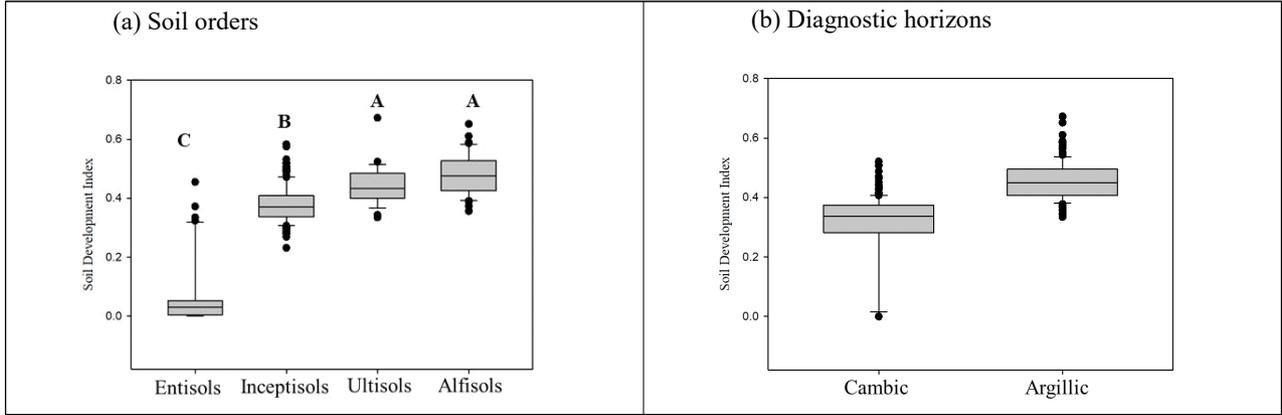
본 연구를 통해 개발된 토양발달지수의 적합성을 검증하기 위해 301개의 토양통을 Soil Taxonomy의 분류 중 토양 목과 진단 차표층을 이용하여 토양발달을 비교하고자 하였다. 토양 목은 Entisols, Inceptisols, Alfisols, Ultisols로 분류하였으며 그룹 간의 차이를 분석한 결과 Entisols, Inceptisols, Alfisols/Ultisols로 유의한 상관성을 나타내었다. 토양발달지수를 토양 목로 그룹화하여 비교한 결과 Entisols의 중앙값은 0.030으로 가장 낮았으며, 약한 발달을 나타내는

Inceptisols는 0.370로 다음으로 낮았으며 Alfisols는 0.480, Ultisols는 0.407로, Entisols<Inceptisols<Alfisols ≈ Ultisols 순으로 발달지수가 증가하였다(그림 2).

진단 차표층을 이용하여 Soil Development Index를 비교하면, 약한발달을 나타내는 cambic horizon의 중앙값이 0.338이었으며, 발달을 나타내는 Argillic horizon은 0.450



**Fig. 1.** Comparison of Calculated Soil Development Factors by Soil Orders (a) Clay, (b) Soil Color, (c) Exchangeable cation, (d) CEC, (e) B horizon depth, (f) Soil structure (g) pH.



**Fig. 2.** Comparison of Soil Development Index according to (a) Soil orders (Entisols, Inceptisols, Ultisols, Alfisols) and (b) soil diagnostic horizon (cambic, argillic).

이었다. 이러한 결과는 미국 토양을 대상으로 개발된 토양 발달지수를 Cambic horizon과 Argillic horizon으로 분류하여 검증한 결과와 일치하였다(Koop *et al.*, 2020). 따라서 본 연구를 통해 개발된 토양발달지수는 토양의 발달을 평가하기에 적합한 것으로 판단된다.

**3.2. 판별분석**

토양발달지수에 사용된 토양발달인자를 이용하여 새로운 토양에 대해 토양 목을 판별하기 위해 301개 토양통의 토양발달인자(color, clay, structure, CEC, exchangeable cation, pH, effective soil depth)를 독립변수로, 토양 목(Entisols, Inceptisols, Alfisols/Ultisols)를 종속변수로 판별분석을 수행하였다. 그 결과, Entisols, Inceptisols, Alfisols/Ultisols를 판별하는 선형판별함수는 식 (10), (11), (12)이다.

$$\begin{aligned} \text{Entisols} = & -1.19 + 0.38 * \text{color} + 0.24 * \text{clay} \\ & - 2.53 * \text{Ex.cation} + 2.13 * \text{CEC} - 1.18 * \text{Avail.depth} \quad (10) \\ & + 8.37 * \text{structure} + 4.80 * \text{pH} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Inceptisols} = & -18.93 + 3.27 * \text{color} + 1.69 * \text{clay} \\ & - 15.01 * \text{Ex.cation} + 16.80 * \text{CEC} + 1.24 \quad (11) \\ & * \text{Avail.depth} + 18.88 * \text{structure} + 35.92 * \text{pH} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Alfisols/Ultisols} = & 23.88 + 3.82 * \text{color} + 7.20 \\ & * \text{clay} - 12.83 * \text{Ex.cation} + 13.79 * \text{CEC} + 9.47 \quad (12) \\ & * \text{Avail.depth} + 20.41 * \text{structure} + 30.54 * \text{pH} \end{aligned}$$

판별함수의 정확도는 각각 83%, 86%, 77%로 미발달된 토양에서 가장 높았으며 상대적으로 발달된 토양일수록 낮았다(표 3). 최종적으로 토양 목 판별의 정확도는 83.4%로, 토양발달인자(color, clay, structure, CEC, exchangeable cation, pH, effective soil depth)를 이용하여 토양 목을 판별하는 것이 적합한 것으로 판단된다.

토양발달지수에 사용된 토양발달인자를 이용하여 새로운 토양에 대해 진단 차표층을 판별하기위해 301개 토양통의 토양발달인자(color, clay, structure, CEC, exchangeable cation, pH, effective soil depth)를 독립변수로, 진단 차표층을 종속변수로 판별분석을 수행하였다. 그 결과, cambic horizon, argillic horizon을 판별하는 선형판별함수는 식 (13), (14)이다.

$$\begin{aligned} \text{Cambic} = & -3.47 + 0.62 * \text{color} + 0.65 * \text{clay} \\ & - 2.74 * \text{Ex.cation} - 2.77 * \text{CEC} - 1.01 * \text{Avail.depth} \quad (13) \\ & + 8.00 * \text{structure} + 5.57 * \text{pH} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Argillic} = & -8.78 + 2.75 * \text{color} + 10.48 * \text{clay} \\ & - 0.78 * \text{Ex.cation} - 1.61 * \text{CEC} - 9.83 * \text{Avail.depth} \quad (14) \\ & + 10.96 * \text{structure} + 0.10 * \text{pH} \end{aligned}$$

토양발달인자를 이용하여 301개 토양통을 cambic horizon과 argillic horizon으로 분류하여 판별분석을 수행한 결과 발달된 토양을 의미하는 argillic의 정확도는 81%, 약한 발달을 의미하는 cambic horizon은 92%의 정확도를 나타냈다(표 4). 최종적으로 토양발달인자를 이용하여 진단 차표층으로 판별분석을 수행하였을 때 판별 정확도는 87.7%로 본 연구를 통해 개발된 토양발달인자를 이용하여 새로운 토양이 발견되었을 때 토양의 발달을 평가할 수 있을 것으로 판단된다.

**4. 결론**

토양의 발달은 모재, 기후, 생물, 시간, 지형 등과 같은 다양한 요인의 상호작용의 결과로, 발달 조건에 따라 토양 특성이 달라질 수 있다. 따라서 본 연구를 통해 우리나라에 적합한 토양발달지수(Soil Development Index)를 개발하기 위해 우리나라 토양에 적용 가능한 토양발달인자로 soil color

**Table 3.** The results of classification of discriminant analysis of Soil Development Index using soil order.

| Group  | True group |             |                   |
|--|------------|-------------|-------------------|
|  | Entisols   | Inceptisols | Alfisols/Ultisols |
| Entisols   | 40         | 0           | 0                 |
| Inceptisols  | 7          | 159         | 16                |
| Alfisols/Ultisols  | 1          | 26          | 52                |
| Total N  | 48         | 185         | 68                |
| N correct  | 40         | 159         | 52                |
| Proportion   | 0.83       | 0.86        | 0.77              |
| Total = 301, N correct = 251, Proportion correct = 0.834 |            |             |                   |

**Table 4.** The results of classification of discriminant analysis of Soil Development Index using diagnostic horizon.

| Group  | True group |          |
|--|------------|----------|
|  | Cambic     | Argillic |
| Cambic   | 171        | 22       |
| Argillic   | 15         | 93       |
| Total N  | 186        | 115      |
| N correct  | 171        | 93       |
| Proportion   | 0.919      | 0.809    |
| Total = 301, N correct = 264, Proportion correct = 0.877 |            |          |

(rubification), clay (%), structure, CEC, pH, exchangeable cation, effective soil depth를 선정하여 토양발달지수를 개발하였다. 개발된 토양발달지수의 적합성을 판단하기 위해 세계적으로 통용되고 있는 토양분류체계인 Soil Taxonomy의 토양 목과 진단 차표층을 이용한 검증을 통해 토양발달 지수가 토양 발달을 평가하기에 적합한 것으로 판단된다.

이에 개발된 토양발달지수를 이용하여 몇 개의 특성만으로 간편하게 토양 목 및 발달 정도를 판단할 수 있을 것으로 기대되며 나아가 토양의 활용 및 특성 예측에 토양발달 지수의 활용이 기대된다. 또한 토양의 발달은 기후와 밀접한 관계가 있으므로, 기후에 따른 토양의 발달 평가에 대한 추가적인 연구가 필요하다.

## 감사의 글

본 연구는 농촌진흥청의 “일반 농경지 토양화학성 변동 평가(6차) 및 농업환경자원 평가 통합 플랫폼 구축(과제번호: RS-2021-RD009667)” 사업의 지원을 받아 수행되었음.

## REFERENCES

Alonso, P., Sierra, C., Ortega, E. and Dorronsoro, C., 1994, Soil development indices of soils developed on fluvial terraces. *Catena*, 23, 295-308.

Augusto, L., Ranger, J., Binkley, D. and Rothe, A., 2002, Impact of several common tree species of European temperate forests

on soil fertility. *Annals of Forest Science*, 59, 233-253.

Birkeland, P.W., 1999, *Soils and Geomorphology* (3rd ed.). Oxford University Press New York, USA.

Botha, G.A. and Porat, N., 2007, Soil chronosequence development in dunes on the southeast African coastal plain, Maputaland, South Africa. *Quaternary International*, 162-163, 111-132.

García-García, F., Calero, J. and Perez-Valera, F., 2016, Morphological, pedological, and sedimentary evolution on the fringe of the southwestern European drylands during the Late Pleistocene and Holocene: Evidence of climate and land use changes. *Catena*, 143, 128-139.

Harden, J.W., 1982, A quantitative index of soil development from field descriptions: examples from a chronosequence in central California. *Geoderma*, 28, 1-28.

Kim, J.K., Jung, Y.T., Son, I.S., Yoon, E.S. and Um, K.T., 1986, Comparison of Soil Profile Development Index of the residuum Soil Derived from Conglomerate. *Korean Journal of Soil Science and Fertilizer*, 19, 99-105 (in Korean with English abstract).

Koop, A.N., Hirmas, D.R., Sullivan, P.L. and Mohammed, A.K., 2020, A generalizable index of soil development. *Geoderma*, 360, 113898.

Lucke, B. and Sprafke, T., 2015, Correlation of soil color, redness ratings, and weathering indices of Terraes Calcis along a precipitation gradient in northern Jordan. *Franconian Geographical Society*, 55-68.

NAAS (National Academy of Agricultural Science), 2014, Taxonomical classification of Korean soil. RDA, Suwon, Korea.

Schaetzl, R.J. and Mokma, D.L., 1988, A numerical index for assessing podzolization and its application to soils in northwest-

- ern Michigan. Soil Science Society of America Journal, 52, 1697-1701.
- Sion, B., Harrison, B., McDonald, E.V. and Axen, G., 2022, Chronofunctions for New Mexico, USA soils show relationships among climate, dust input, and soil development. Quaternary International, 618, 35-51.
- Soil Survey Staff, 2014, Keys to Soil Taxonomy Twelfth Edition. USDA-NRCS. Washington DC, USA.
- Tumbaugh, S.J.L. and Evans, C.V., 1994, A determinative soil development index for pedo-stratigraphic studies. Geoderma, 61, 39-59.
- Vidic, N.J. and Lobnic, F., 1997, Rate of soil development of the chronosequence in the Ljubljana Basin, Slovenia. Geoderma, 76, 35-64.
- Wilkinson, M.T. and Humphreys, G.S., 2005, Exploring pedogenesis via nuclide-based soil production rates and OSL-based bioturbation rates. Australian Journal of Soil Research, 43, 767-779.