

## 광릉숲 인공림의 식생 구조와 자연성 회복 평가

이주선<sup>1</sup> · 구본열<sup>2</sup> · 이현빈<sup>1</sup> · 김정민<sup>1</sup> · 안종빈<sup>1</sup> · 정성희<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>국립수목원 산림생물보전연구과, <sup>2</sup>주식회사 다온생태연구소

## Assessment of Vegetation Structure and Naturalness Recovery in Plantation Forests of Gwangneung Forest

Juseon Lee<sup>1</sup>, Bon Yeol Koo<sup>2</sup>, Hyun-Been Lee<sup>1</sup>, Jeong-Min Kim<sup>1</sup>,  
Jongbin An<sup>1</sup> and Songhie Jung<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Forest Biodiversity Conservation Research Division, Korea National Arboretum, Pocheon 11186, Korea

<sup>2</sup>Daon Ecology Research Institute Co. 70, Goyang 10594, Korea

**요약:** 본 연구는 광릉숲 내 인공림을 대상으로 식생 구조와 종조성을 조사하고, 구조·종다양성·종조성 지표를 활용하여 자연성 회복 수준을 정량적으로 평가하고자 하였다. 광릉숲 인공림 내 122개 조사구에 각각 20 m × 20 m 크기의 방형구를 설치하여 식생 자료를 수집하였다. TWINSpan으로 군락을 분류하고 DCA로 타당성을 검토하였으며, Bray-Curtis 지수를 통해 군락 간 유사도를 분석하였다. 자연성 회복 평가는 구조(4), 종다양성(4), 종조성(3)의 총 11개의 지표를 적용하고, Jenks Natural Breaks 방법으로 등급 구간을 산정하여 상·중·하로 구분하였다. 광릉숲 인공림은 5개 군락으로 구분되었으며, 이 중 4개 군락은 자생 수종 중심의 구조 전환이 상당 부분 진행된 상태로 나타났다. 반면 1개 군락은 천이 초기 단계의 특성을 나타내었는데, 이는 임도와 밀접하여 지속적인 교란의 영향을 받은 결과로 해석된다. 자연성 회복 등급은 전체 조사구의 50.0%가 ‘상’, 32.8%가 ‘중’, 17.2%가 ‘하’로 분류되었다. 본 연구는 광릉숲 인공림의 구조 발달과 자연성 회복 수준을 정량적으로 제시함으로써, 향후 인공림 복원 관리 및 지속 가능한 산림 보전을 위한 기초 자료를 제공한다.

**Abstract:** This study examined the vegetation structure and species composition of plantation forests in Gwangneung Forest, South Korea, and quantitatively evaluated the recovery of naturalness using indices of stand structure, species diversity, and species composition. Vegetation data were collected from 122 plots in these plantation forests, with each plot containing a 20 m × 20 m quadrat established for sampling. Plant communities were classified using TWINSpan, and the classifications were validated via detrended correspondence analysis. Community similarity was evaluated using the Bray-Curtis index. Naturalness recovery was assessed using 11 indicators, encompassing stand structure (4), species diversity (4), and species composition (3). Class thresholds for these indicators were determined using the Jenks Natural Breaks method. Plots were then categorized into good, fair, or poor. The plantation forests were classified into five communities. Four communities exhibited major structural shifts toward native species dominance, whereas one community displayed characteristics of an early successional stage, likely due to ongoing disturbance associated with its proximity to forest roads. Overall, 50% of the plots were classified as “Good,” 32.8% as “Fair,” and 17.2% as “Poor.” By quantitatively illustrating the progression of structural development and naturalness recovery, this study establishes baseline information to guide restoration management and support sustainable forest conservation in the plantation forests of Gwangneung Forest.

**Key words:** gwangneung forest, plantation forest, jenks natural breaks, naturalness recovery, succession

\* Corresponding author  
E-mail: jungsonghie@korea.kr

ORCID  
Songhie Jung  https://orcid.org/0000-0003-1726-9607

## 서론

인공림(plantation forest)은 목재 생산, 황폐지 복원, 적응성 시험, 조림기술 개발 등 여러 목적에서 조성되어 왔으며, 조성 이후에는 자생종의 유입과 자연갱신을 통해 점차 종조성이 다양해지고, 식생구조가 복잡해지는 천이 과정을 겪는다(Brockerhoff et al., 2008). 이러한 천이의 진행 양상은 초기 조성 목적과 이후의 관리 정도에 따라 크게 달라지며, 그 결과 생물다양성 및 생태계 기능 측면에서 천연림과는 다른 발달 궤적을 보일 수 있다(Hartley et al., 2002). 따라서 인공림을 대체 산림으로 간주하기보다는 해당 산림의 구조적 특성과 종조성을 진단하고 자연성 수준을 정량적으로 평가하는 접근이 중요하다(Winter, 2012).

자연성(naturalness)은 현재 생태계 상태가 인간 영향 이전의 자연 상태, 혹은 잠재 자연식생과 얼마나 유사한지를 나타내는 개념이다(Bončina et al., 2017). 이는 생태계의 종조성, 구조, 기능이 참조 상태(reference condition)에 얼마나 근접해 있는지를 평가하는 참조 기반(reference-based) 개념으로 이해되며, 생태계의 연속성과 인위적 교란 수준을 반영하는 지표로 활용될 수 있다(Anderson, 1991; Winter, 2012).

인공림에서 장기적 변화 과정을 평가함에 있어 자연성은 참조하는 자연림과의 유사성을 판단하는 기준으로 활용될 수 있다(Barrette et al., 2014). 즉, 수직·수평적 구조 복잡성, 종다양성, 층위 별 종조성과 같은 생태적 특성이 자연림에 얼마나 근접해 있는지를 분석함으로써 인공림의 자연성 회복 수준을 정량적으로 평가할 수 있다(Barrette et al., 2014; Brumelis, 2011; Liira and Sepp, 2009). 이러한 접근은 인공림의 천이 진행 정도를 해석하고 자연적 구조 발달 경로를 규명하는 데 중요한 참조 기준(reference framework)을 제공한다.

이에 따라 인공림을 대상으로 생물다양성 보전 가능성과 관리·설계의 개선 효과를 평가하고, 훼손지 복원 과정에서의 천이 경로와 성공 요인을 규명하려는 연구가 다양한 지역에서 수행되어 왔다. 국내에서는 국립공원을 대상으로 식생 구조를 조사하여 인공림의 천이를 촉진하는 복원 관리 기준을 제시한 연구가 보고되었고(Lee et al., 2009), 해외에서는 열대지역을 중심으로 복원 성공 여부와 천이 경로를 규명한 연구들이 축적되어 왔다(Lamb et al., 2005; Chazdon, 2008). 이처럼 인공림의 천이 및 복원에 관한 연구는 증가해 왔음에도, 현존 상태를 객관적으로 진단하고 자연성 회복 수준을 정량화하는 접근은 여전히 제한적이다(Winter, 2012).

광릉숲은 조선 세조 대에 능림으로 지정된 이후 보호되어 온 산림 보전지역으로, 일제강점기인 1912년 이후에는 시험 묘포와 시험지가 설치되어 본격적인 임업 시험 연구가 수행

되었다(Cho et al., 2025). 그 결과 현재 인공림이 전체면적의 45.3%를 차지할 정도로 비중이 높고, 장기적으로 외부의 개입 없이 보호되어 왔다는 점에서 인공림의 구조 발달과 종조성 변화 및 관리 이력의 효과를 비교·진단하기에 적합한 연구대상지이다(Cho et al., 2007). 다만 조성 수종과 관리 이력, 입지 조건 등이 구역별로 상이하여 구조발달 수준과 종조성, 천이 진행 정도가 서로 다르게 나타날 가능성이 크며, 이러한 차이는 인공림의 상태를 판단하고 관리 방향을 설정하는 데 제약이 될 수 있다. 이에 본 연구는 광릉숲의 인공림을 대상으로 군락을 구분하고, 구조적 특성과 종다양성 및 종조성을 반영하는 지표를 기반으로 자연성 회복 수준을 정량화한 뒤 Jenks Natural Breaks 방법으로 등급화하여 향후 보전·관리 논의에 활용 가능한 기초 자료를 제공하고자 한다.

## 재료 및 방법

### 1. 조사지 개황

본 연구의 수행 장소인 광릉숲은 한반도 중부에 위치하며 천연림 648.9 ha(58.1%), 인공림 419.7 ha(37.6%), 전시원 및 기타 지역 48.1 ha(4.3%)로 구성되어 있다. 그 중 전시원과 인접하여 접근성이 좋은 임반을 대상으로 인공림 전체 면적의 약 26.2%에 해당하는 110.1 ha를 조사 대상지로 선정하였다. 조사는 천연림 및 기타 지역을 제외한 총 122개의 임분(89.6 ha)에서 수행되었으며(Figure 1), 이들은 주로 해발고도 100-250 m 범위 내에 분포하였다. 해당 인공림은 임반별로 조림 시기에 다소 차이가 있으나, 대부분 1900년대에 조성된 지역이다. 대상지는 침엽수와 활엽수림의 비율이 8:2 수준이었으며, 대부분의 임분은 4~5 등급에 속하였다. 조사 대상지와 가장 가까운 기후관측소 세 곳(동두천, 서울, 철원)의 1998-2023년 자료를 분석한 결과, 연평균 기온은 12.7 °C, 연평균 강수량은 1,439 mm인 것으로 나타났다(Figure 2).

### 2. 식생 조사

광릉숲의 산림 식생 구조적 특성과 종조성을 파악하기 위해 대상 지역을 122개의 임분으로 분류하고, 각 임분에 20 m × 20 m 크기의 방형구를 설치하여 2024년 9월 식생조사를 수행하였다. 조사는 Z-M학파의 식물사회학적 방법(Ellenberg, 1956; Braun-Blanquet, 1964)에 의거하여 교목층(Canopy, C), 아교목층(Subcanopy, Su), 관목층(Shrub, S), 초본층(Herb, H)의 피도를 기록하였다. 또한, 식생조사 결과 외에도 방형구간 이동경로에서 관찰된 관속식물을 기록하여 해당 지역의 식물상 목록을 작성하였다. 현장에서 동정하지 못한 개체는 사진 촬영 및 채집을 통해 표본을 확보하였으며, 이후 원색한국식물도감(Lee, 2003)을 이용하여 동정하였다.

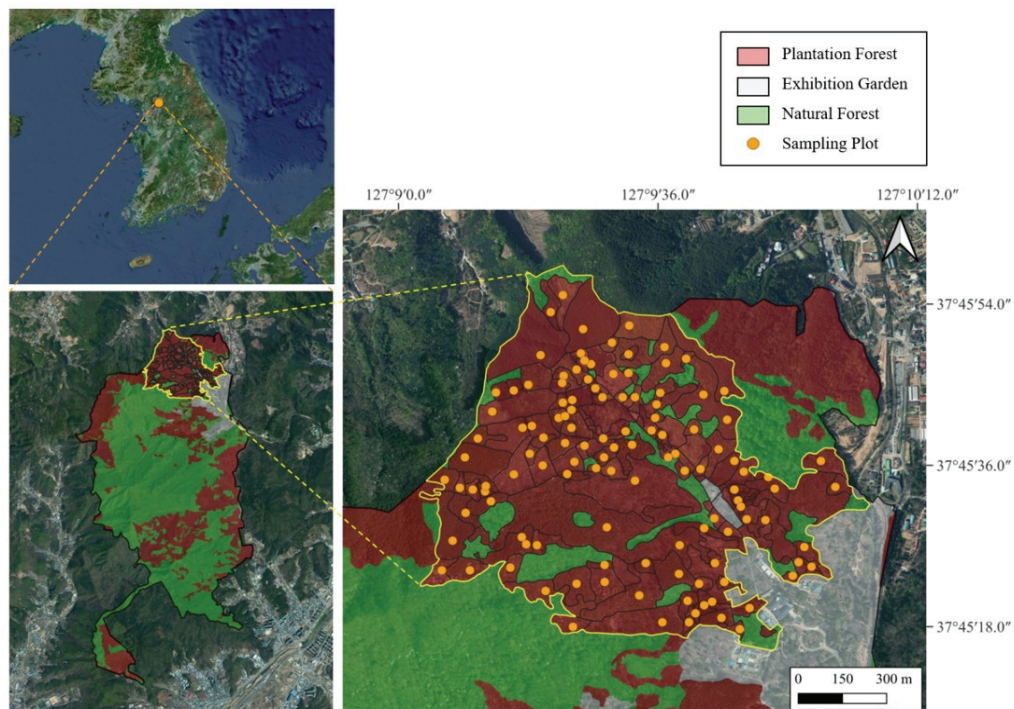


Figure 1. Location of study plots in Gwangneung Forest, Republic of Korea.

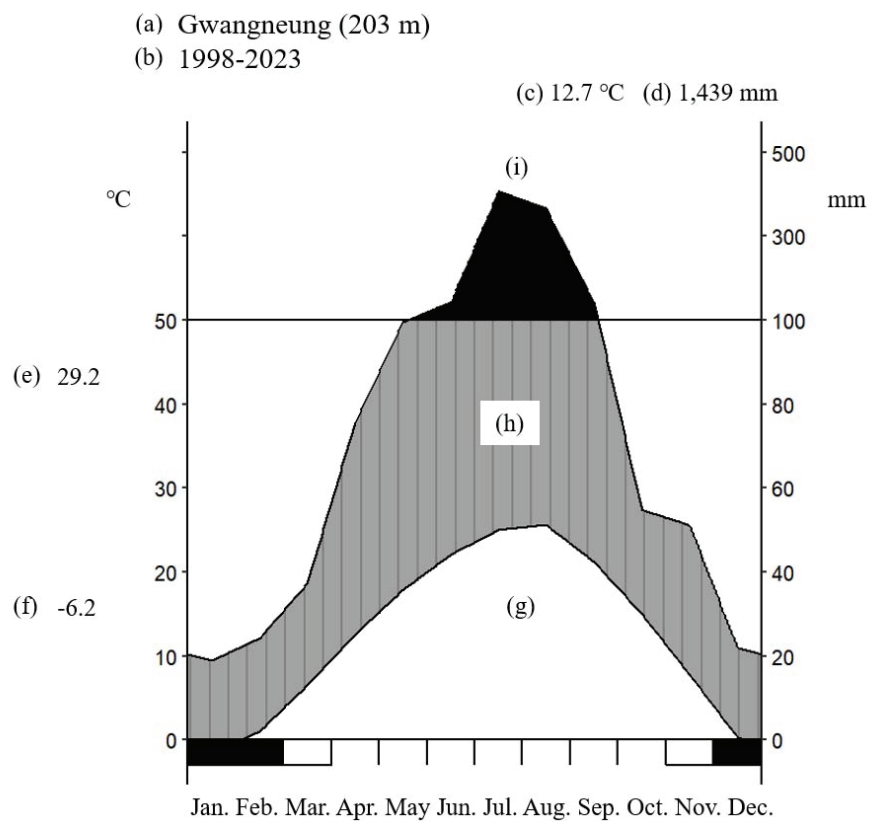


Figure 2. Climate diagram of Gwangneung Forest. (a) Location and elevation; (b) observation period; (c) mean temperature; (d) mean annual precipitation; (e) maximum temperature of the warmest month; (f) minimum temperature of the coldest month; (g) mean monthly daily temperature; (h) mean monthly daily precipitation; (i) humid period.

출현식물의 학명은 국가표준식물목록(KNA, 2025)을 기준으로 정리하였다.

### 3. 분석 방법

야외 조사를 통해 얻은 122개 조사구의 식생 자료를 바탕으로 군락 분류 및 군락 간 유사성을 분석하였다. 조사된 Braun-Blanquet 우점도 계급은 우점도 범위의 중앙치로 환산하여 사용하였으며, 이를 바탕으로 층위별 상대피도와 상대빈도를 산정하여 중요치(Important value, IV)를 산출하였다. 이때 개체 크기 차이를 반영하기 위해 교목층은 3, 아교목층은 2, 관목층은 1의 가중치를 부여하여 평균상대우점치(Mean Importance Percentage, MIP)를 산출하였다(Park, 1985).

식생 군락 분류를 위해 조사구별 상대피도 자료에 TWINSpan(Two-Way Indicator Species Analysis; Hill, 1979)을 적용하였다. TWINSpan으로 도출된 군락 구분의 타당성을 평가하고자 DCA(Detrended Correspondence Analysis; Hill and Gauch, 1980)를 함께 수행하여 동일 군락에 속한 조사구들이 DCA 축상에서 유사한 위치에 배열되는지 확인하였다. 이러한 TWINSpan과 DCA를 통한 접근법

은 국내·외 식생 연구에서 널리 사용되어 왔으며(Kang and Kang, 2023; Yang et al., 2021), 두 분석은 모두 PC-ORD (v.7.10) 프로그램을 사용하였다.

군락 간 종조성 유사성은 모든 층위에서 기록한 종별 피도를 층위 간 가중치 없이 합산하여 조사구별 종 상대피도(0-100%)를 산출한 후, 군락별 평균 상대피도 행렬을 구성하였다. 이어 추가 변환 없이 Bray-Curtis 유사도 지수를 계산하였다.

인공림의 생태적 자연성 회복 수준을 평가하기 위해 구조, 종 다양성, 종조성 측면에서 총 11개의 평가항목을 설정하였다(Table 1). 구조 항목에는 식재종의 상대피도, 교목층 식피율, 울폐율, 층위구조의 4가지 지표로 포함하였으며, 종 다양성 항목은 종 풍부도(Species richness), 종 균등도(Pielou's evenness), Shannon 다양도 지수, Simpson 다양도 지수로 구성하였다. 종조성 항목은 특정과(벼과, 콩과, 국화과)의 출현 비율, 일년생 초본 수, 귀화식물 출현 수로 구성하였다(Table 1).

특정 과의 그룹 간 출현한 종 수에 차이 여부를 확인하기 위해, Shapiro-Wilk 검정을 통해 정규성을 확인한 후, 정규성

**Table 1. Criteria and indicators for evaluating the naturalness recovery in plantation forests of Gwangneung Forest. Indicators are categorized into structure, species diversity, and species composition. Threshold values for Good, Fair, and Poor were determined using the Jenks Natural Breaks method**

| Category            | Indicator                           | Description                                                                                                                                                                                                 | Evaluation Score |               |                  |
|---------------------|-------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------|---------------|------------------|
|                     |                                     |                                                                                                                                                                                                             | Good (3)         | Fair (2)      | Poor (1)         |
| Structure           | Importance Value of Planted Species | The relative importance value of planted species was calculated by applying weighted dominance weighted value: Tree (3), Subtree (2), Shrub (1), and Herbaceous (0.5), normalized by the total weight (6.5) | 1-39%            | 39-68%        | 68-95%           |
|                     | Canopy Cover of Tree Layer          | Total canopy cover of the tree layer                                                                                                                                                                        | 70-95%           | 40-70%        | 0-40%            |
|                     | Crown density                       | Weighted dominance was assigned by vegetation layer (excluding herbaceous species)                                                                                                                          | 55-73%           | 35-55%        | 22-35%           |
|                     | Vertical Stratification             | Vegetation was considered established when the canopy cover reached or exceeded 15%                                                                                                                         | 4 layers         | 3 layers      | 2 layers or less |
| Species Diversity   | Species Richness                    | Species richness within the quadrat                                                                                                                                                                         | 37-58 species    | 21-37 species | 5-21 species     |
|                     | Species Evenness                    | $H/\ln(S)$                                                                                                                                                                                                  | 0.48-0.72        | 0.3-0.48      | 0.09-0.3         |
|                     | Shannon Diversity Index             | $-\sum_{i=1}^s p_i \ln p_i$                                                                                                                                                                                 | 1.69-2.75        | 1.04-1.69     | 0.23-1.04        |
|                     | Simpson Diversity Index             | $1 - \sum_{i=1}^s p_i^2$                                                                                                                                                                                    | 0.62-0.89        | 0.35-0.62     | 0.09-0.35        |
| Species Composition | Proportion of Indicator Families    | Importance value of Asteraceae, Poaceae, and Fabaceae                                                                                                                                                       | 0-3.3            | 3.3-17        | 17-37.1          |
|                     | Number of Annual Herbaceous Species | Number of annual herbaceous species observed                                                                                                                                                                | 0-1 species      | 1-5 species   | 5-11 species     |
|                     | Number of Naturalized Species       | Number of naturalized plant species observed                                                                                                                                                                | Not observed     | 1-2 species   | 2-5 species      |

이 만족되지 않는 경우 Kruskal-Wallis 검정을 실시하였다. Kruskal-Wallis 검정에서 유의한 차이가 나타난 경우 Dunn 사후 검정과 Holm 보정을 적용하여 쌍대 비교를 실시하였으며, 유의수준은  $\alpha = 0.05$ 로 설정하였다. 해당 통계분석은 R software(ver. 4.5.1)를 이용하였다.

각 지표의 점수 구간은 QGIS(v.3.44.2)에 내장된 Jenks Natural Breaks 방법을 적용하여 구분하였다. 이 알고리즘은 전체 분포에서 등급 내 분산을 최소화하고 등급 간 분산을 최대로 하여 자료를 효율적으로 분류한다(Jenks, 1967). 이후, 각 항목의 점수를 합산하여 총점을 산출하였으며, 총점 또한 동일한 방법으로 세 구간(상, 중, 하)으로 재분류해 인공림의 자연성 회복 수준을 정량적으로 평가하였다(Table 1). 최종 자연성 회복 등급 비율의 95% 신뢰구간은 Clopper-Pearson 방법으로 계산하였다.

## 결 과

### 1. 인공림 군락 분류 및 서열화

122개의 조사구에 대해 조사한 상대피도 자료를 TWINSpan으로 분석한 결과, Level 1에서는 당단풍나무(-)가 지표종인 그룹과 주름조개풀(+), 산박하(+), 줄딸기(+)를 지표종으로 하는 그룹으로 구분되었다(Figure 3). Level 2에서 Division 2가 리기다소나무(-), 신갈나무(-), 굴참나무(-), 잔털벗나무(-)를 지표종으로 하는 그룹과 주름조개풀(+)을 지표종으로 하

는 그룹으로 분리되었으며, Division 3에서는 별도로 지표종이 확인되지 않은 그룹(N/O)과 큰기름새(+), 광대싸리(+)가 지표종인 그룹으로 분리되었다. Level 3의 Division 4에서는 서어나무(-), 쪽동백나무(-)가 지표종인 그룹과 별도로 지표종이 확인되지 않은 그룹(N/O)으로 구분되었다(Figure 3).

TWINSpan으로 구분된 각 그룹의 평균상대우점치를 계산한 뒤, 해당 값에 기반하여 군락명을 부여하였다(Table 3). 군락 I(리기다소나무-신갈나무 군락, 14개 조사구)은 평균 해발 239.57 m, 평균 경사 23.14°의 비교적 급경사 지역에 위치했으며, 5개의 군락 중 낙엽 깊이가 가장 깊고 초본층 피도와 출현 종 수는 가장 낮았다(Table 2). 군락 II(신갈나무-서어나무 군락, 33개 조사구)는 평균 해발 183.06 m, 평균 경사 21.09°에 주로 위치했고, 군락 III(당단풍나무-잔털벗나무 군락, 34개 조사구)는 평균 해발 230.82 m, 평균 경사 18.71°에 위치하였다. 군락 IV(전나무-가래나무 군락, 35개 조사구)는 평균 해발 176.92 m, 평균 경사 12.49°에 위치했으며, 다른 군락들에 비해 암석의 노출도와 교목층의 피도가 높았다. 군락 V(가래나무-이팝나무 군락, 6개 조사구)는 평균 해발 138.55 m, 평균 경사 11.00°인 비교적 낮고 완만한 지역에 위치했고 암석 노출이 적고 낙엽층 깊이가 가장 얇았으며, 교목·야교목층의 피도가 낮았다. 반면 관목층과 초본층의 피도는 높고 출현 종 수는 가장 많아 상대적으로 하층식생이 우세한 특징을 보였다(Table 2).

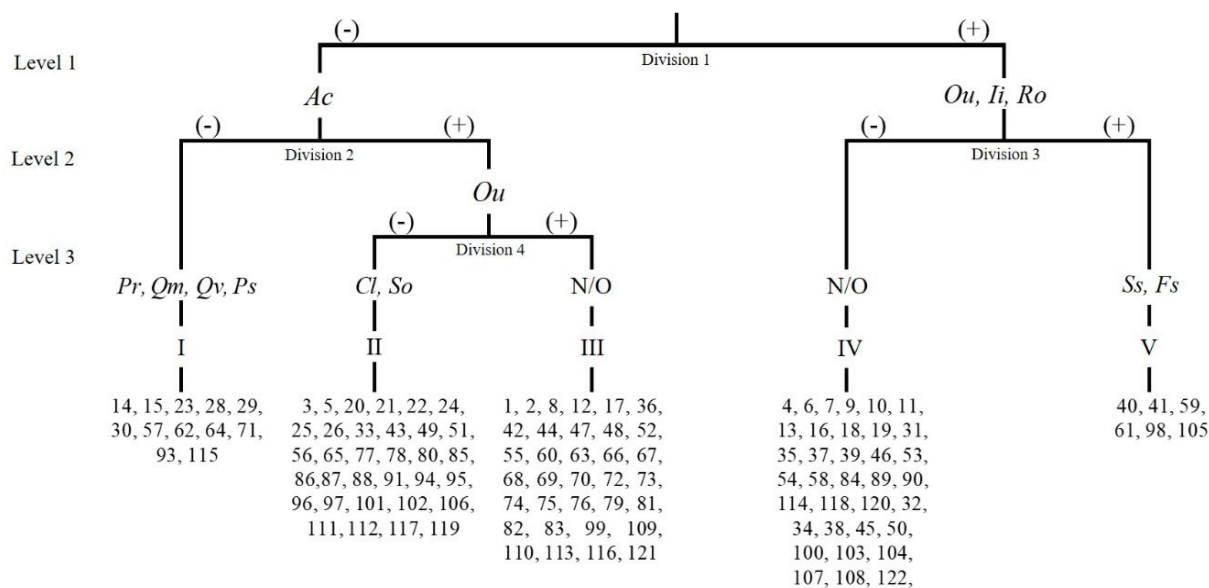


Figure 3. Dendrogram of five communities derived from TWINSpan classification of relative vegetation cover data in the plantation forests within Gwangneung Forest. Numbers indicate plot IDs. (Ac: *Acer pseudosieboldianum*, Ou: *Optismenus undulatifolius*, Ii: *Isodon inflexus*, Ro: *Rubus oldhamii*, Pr: *Pinus rigida*, Qm: *Quercus mongolica*, Qv: *Quercus variabilis*, Ps: *Prunus serrulata*, Cl: *Carpinus laxiflora*, So: *Styrax obassia*, Ss: *Spodiopogon sibiricus*, Fs: *Flueggea suffruticosa*, N/O: Not otherwise assigned).

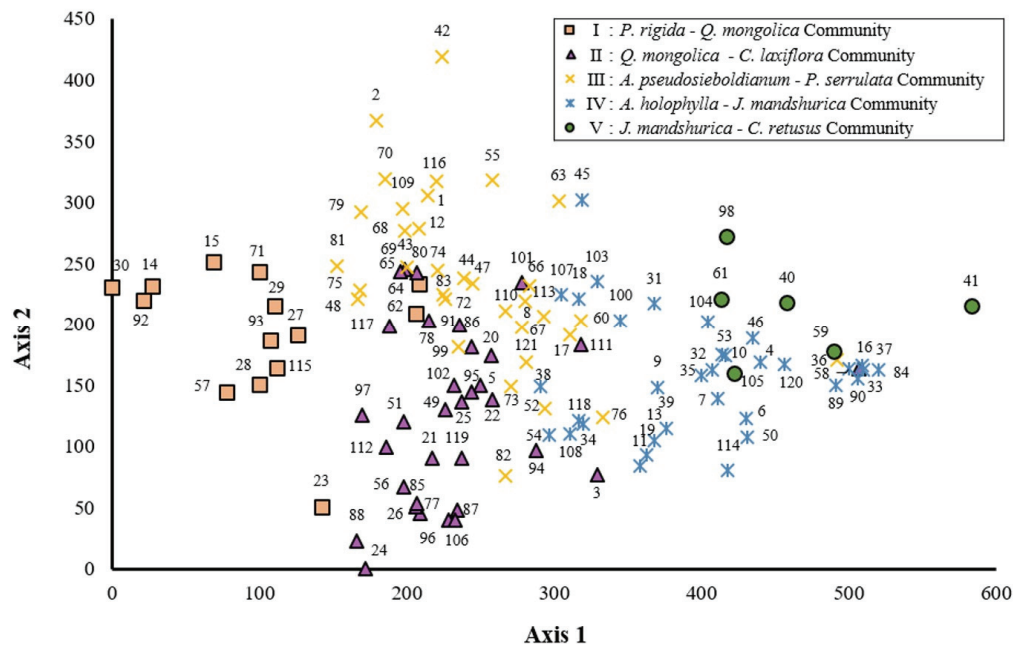


**Table 2. Physical environment and vegetation-structural characteristics of the five plantation communities of Gwangneung Forest. Values are means  $\pm$  standard deviations**

| Community                     | I                  | II                 | III                | IV                 | V                  |
|-------------------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| Number of plots               | 14                 | 33                 | 34                 | 35                 | 6                  |
| Altitude (m)                  | 239.57 $\pm$ 50.40 | 183.06 $\pm$ 51.03 | 230.82 $\pm$ 56.34 | 176.92 $\pm$ 56.01 | 138.55 $\pm$ 47.05 |
| Slope (°)                     | 23.14 $\pm$ 9.50   | 21.09 $\pm$ 8.57   | 18.71 $\pm$ 9.7    | 12.49 $\pm$ 7.97   | 11.00 $\pm$ 5.54   |
| Bare rock (%)                 | 2.07 $\pm$ 3.73    | 3.32 $\pm$ 7.32    | 3.01 $\pm$ 4.52    | 4.14 $\pm$ 9.15    | 0.50               |
| litter layer (cm)             | 4.57 $\pm$ 3.09    | 2.14 $\pm$ 1.27    | 2.71 $\pm$ 2.16    | 2.47 $\pm$ 3.56    | 1                  |
| Canopy layer (%)              | 60 $\pm$ 19.64     | 61.82 $\pm$ 21.63  | 68.82 $\pm$ 21.56  | 70.29 $\pm$ 20.6   | 55.83 $\pm$ 26.05  |
| Subcanopy layer (%)           | 60.71 $\pm$ 25.49  | 47.12 $\pm$ 26.52  | 38.09 $\pm$ 28.77  | 18.43 $\pm$ 26.77  | 13.33 $\pm$ 17.24  |
| Shrub layer (%)               | 26.07 $\pm$ 10.72  | 45.61 $\pm$ 22.42  | 41.91 $\pm$ 20.93  | 40.71 $\pm$ 27.00  | 52.5 $\pm$ 19.74   |
| Herb layer (%)                | 3.29 $\pm$ 2.74    | 14.12 $\pm$ 13.52  | 11.94 $\pm$ 9.97   | 50.6 $\pm$ 28.53   | 74.17 $\pm$ 24.90  |
| The number of present species | 15.79 $\pm$ 5.05   | 21.79 $\pm$ 7.13   | 23.21 $\pm$ 9.59   | 27.23 $\pm$ 11.16  | 31.00 $\pm$ 9.35   |

TWINSpan으로 분류한 5개의 군락을 대상으로 DCA를 적용하여 조사구를 배치하였다(Figure 4). 제1축과 2축의 축 길이(gradient length)는 각각 5.832와 4.197로, 종조성이 한번 이상 완전히 교체될 수 있을 정도로 충분히 길며(Hill and Gauch, 1980), 이는 종-환경 관계를 단봉형(unimodal)로 가정하는 서열법인 DCA의 적용이 적합함을 뒷받침한다(Van den Brink et al., 2003). 또한, 제1축과 2축의 eigenvalue는 각각 0.693과 0.481로, 두 축이 종조성 변이의 상당 부분을 설명하는 주요 구배임을 보여준다. 군락 I(리기다소나무-신갈나무 군락)은 제1축의 좌측에 분포하여 다른 군락들과 공간적 분

리를 보였다. 군락 II(신갈나무-서어나무 군락)와 군락 III(당단풍나무-잔털벚나무 군락)은 제1축을 기준으로 중앙부에 위치하였으며, 일부 겹치면서도 군락별로 독립된 집단을 형성하였다. 군락 IV(전나무-가래나무 군락)와 군락 V(가래나무-이팝나무 군락)는 모두 그래프의 우측에 분포하였으며, 특히 군락 V는 가장 우측에 분포하여 다른 군락들과 구분되었다(Figure 4). 군락 II, III, IV는 그래프의 중앙에서 영역을 공유하는 양상을 보였는데, 이는 초본층에서 주름조개풀이 우점하여 종조성이 유사하게 나타났기 때문으로 해석된다(Table 3).



**Figure 4.** DCA (Detrended Correspondence Analysis) ordination of relative vegetation cover data in the plantation forests within Gwangneung Forest. Five communities classified by TWINSpan are indicated by different colors and symbols. Numbers indicate plot IDs.

**Table 3. Relative importance of major plant species by groups (I–V) classified by TWINSpan in plantation forests of Gwangneung Forest. Left: MIP based on the canopy, subcanopy, and shrub layers; right: importance in the herb layer only**

| Community* | Species                        | Layer | C**   | Su    | S     | MIP   | Species                            | Layer | H     |
|------------|--------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|------------------------------------|-------|-------|
| I          | <i>Pinus rigida</i>            |       | -     | 58.40 | 0.61  | 19.57 | <i>Acer pseudosieboldianum</i>     |       | 8.90  |
|            | <i>Quercus mongolica</i>       |       | 21.84 | 8.25  | 3.63  | 14.27 | <i>Oplismenus undulatifolius</i>   |       | 6.36  |
|            | <i>Carpinus laxiflora</i>      |       | 17.45 | 3.83  | 7.86  | 11.31 | <i>Lindera obtusiloba</i>          |       | 6.32  |
|            | <i>Quercus variabilis</i>      |       | 13.72 | 5.86  | 1.41  | 9.05  | <i>Disporum smilacinum</i>         |       | 5.84  |
|            | <i>Prunus serrulata</i>        |       | 10.51 | -     | 3.23  | 5.79  | <i>Sorbus alnifolia</i>            |       | 5.26  |
|            | Others (38 species)            |       | 36.48 | 23.66 | 83.25 | 40.00 | Others (35 species)                |       | 67.32 |
|            | Total                          |       | 100   | 100   | 100   | 100   | Total                              |       | 100   |
| II         | <i>Quercus mongolica</i>       |       | 21.84 | -     | -     | 10.92 | <i>Oplismenus undulatifolius</i>   |       | 21.26 |
|            | <i>Carpinus laxiflora</i>      |       | 17.45 | 2.72  | 6.56  | 10.72 | <i>Parthenocissus tricuspidata</i> |       | 6.67  |
|            | <i>Larix kaempferi</i>         |       | -     | 28.96 | -     | 9.65  | <i>Acer pseudosieboldianum</i>     |       | 6.25  |
|            | <i>Pinus koraiensis</i>        |       | -     | 27.60 | -     | 9.20  | <i>Clerodendrum trichotomum</i>    |       | 2.97  |
|            | <i>Quercus variabilis</i>      |       | 13.72 | 2.72  | 0.22  | 7.80  | <i>Smilax sieboldii</i>            |       | 2.85  |
|            | Others (61 species)            |       | 46.99 | 38.00 | 93.22 | 51.70 | Others (95 species)                |       | 59.99 |
|            | Total                          |       | 100   | 100   | 100   | 100   | Total                              |       | 100   |
| III        | <i>Acer pseudosieboldianum</i> |       | 8.74  | -     | 17.90 | 7.35  | <i>Oplismenus undulatifolius</i>   |       | 15.70 |
|            | <i>Prunus serrulata</i>        |       | 7.16  | 0.99  | 0.98  | 4.07  | <i>Acer pseudosieboldianum</i>     |       | 5.51  |
|            | <i>Quercus aliena</i>          |       | 6.38  | 0.98  | 2.90  | 4.00  | <i>Osmunda japonica</i>            |       | 4.21  |
|            | <i>Quercus mongolica</i>       |       | 6.86  | 1.00  | 1.19  | 3.96  | <i>Parthenocissus tricuspidata</i> |       | 3.72  |
|            | <i>Zelkova serrata</i>         |       | 2.63  | 7.20  | 1.04  | 3.89  | <i>Polystichum tripterum</i>       |       | 2.92  |
|            | Others (75 species)            |       | 68.24 | 89.83 | 75.99 | 76.73 | Others (120 species)               |       | 67.94 |
|            | Total                          |       | 100   | 100   | 100   | 100   | Total                              |       | 100   |
| IV         | <i>Abies holophylla</i>        |       | 8.94  | 21.20 | 3.65  | 12.14 | <i>Oplismenus undulatifolius</i>   |       | 27.56 |
|            | <i>Juglans mandshurica</i>     |       | 12.39 | 5.24  | 2.13  | 8.30  | <i>Parthenocissus tricuspidata</i> |       | 3.28  |
|            | <i>Pinus koraiensis</i>        |       | -     | 18.98 | -     | 6.33  | <i>Carex siderosticta</i>          |       | 2.95  |
|            | <i>Quercus serrata</i>         |       | 8.99  | -     | 1.06  | 4.67  | <i>Akebia quinata</i>              |       | 2.91  |
|            | <i>Carpinus cordata</i>        |       | 7.99  | -     | 3.02  | 4.50  | <i>Clerodendrum trichotomum</i>    |       | 2.67  |
|            | Others (83 species)            |       | 61.69 | 54.59 | 90.15 | 64.07 | Others (163 species)               |       | 60.64 |
|            | Total                          |       | 100   | 100   | 100   | 100   | Total                              |       | 100   |
| V          | <i>Juglans mandshurica</i>     |       | 33.33 | 5.36  | 11.32 | 20.34 | <i>Oplismenus undulatifolius</i>   |       | 12.60 |
|            | <i>Chionanthus retusus</i>     |       | 22.22 | -     | 8.26  | 12.49 | <i>Matteuccia struthiopteris</i>   |       | 8.47  |
|            | <i>Quercus aliena</i>          |       | 15.56 | 5.36  | 3.41  | 10.13 | <i>Akebia quinata</i>              |       | 7.07  |
|            | <i>Abies koreana</i>           |       | -     | 17.77 | 3.49  | 6.50  | <i>Clematis terniflora</i>         |       | 6.17  |
|            | <i>Abies holophylla</i>        |       | -     | 15.00 | 8.35  | 6.39  | <i>Setaria viridis</i>             |       | 6.13  |
|            | Others (25 species)            |       | 28.89 | 56.52 | 65.17 | 44.15 | Others (68 species)                |       | 59.55 |
|            | Total                          |       | 100   | 100   | 100   | 100   | Total                              |       | 100   |

\* I: *P. rigida* - *Q. mongolica* Community, II: *Q. mongolica* - *C. laxiflora* Community, III: *A. pseudosieboldianum* - *P. serrulata* Community, IV: *A. holophylla* - *J. mandshurica* Community, V: *J. mandshurica* - *C. retusus* Community

\*\*C, Su, S: Importance (%) in canopy, subcanopy, and shrub layers; MIP: mean importance percentage; H: Herb layer importance (%)

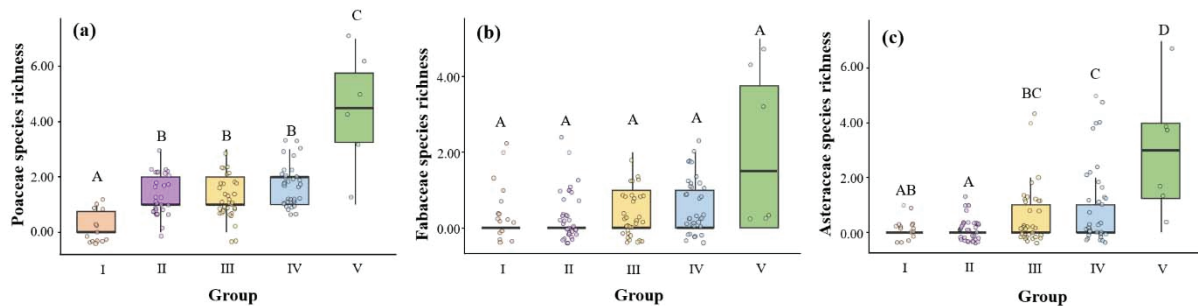
## 2. 군락 간 종조성 유사도 및 종 풍부도

5개 군락에 대해 유사도 지수를 분석한 결과, 군락 II와 군락 III 간 유사도 지수가 45.29%로 가장 높았다(Table 4). 두 군락은 Division 4에서 각각의 그룹으로 구분되었으나, 종조성에서 기본적으로 유사한 종 집합을 공유하고 있기 때문으로 판단된다.

한편, 군락별 특정 과(벼과·콩과·국화과)의 종 풍부도를 비교한 결과, 3개 과 모두에서 군락 V가 가장 높은 경향을 보였다[Figure 5(a)-(c)]. 특히 군락 V의 벼과( $4.33 \pm 1.97$ 종)와 국화과( $3.00 \pm 2.31$ 종)는 군락 간 유의한 차이가 확인되었으며 [Figure 5(a-c),  $p < 0.05$ ], 콩과( $2.00 \pm 2.08$ 종) 역시 다른 군락에 비해 높은 경향을 보였으나 통계적으로는 유의하지 않

**Table 4.** Community similarity matrix based on Bray–Curtis similarity index for vegetation communities in the plantation forests within Gwangneung Forest. Higher values indicate greater similarity in species composition between communities

| Community | I     | II    | III   | IV    |
|-----------|-------|-------|-------|-------|
| II        | 41.22 |       |       |       |
| III       | 30.69 | 45.29 |       |       |
| IV        | 13.44 | 37.45 | 31.66 |       |
| V         | 5.93  | 12.03 | 11.42 | 34.65 |



**Figure 5.** Species richness of (a) Poaceae, (b) Fabaceae and (c) Asteraceae recorded across groups in the plantation forests within Gwangneung Forest. Bars represent the mean species richness for each group, and vertical lines indicate standard deviations. Different letters above the bars denote statistically significant differences in species richness among groups ( $p < 0.05$ ).

**Table 5.** Evaluation results of the naturalness recovery of plantation forests within Gwangneung Forest. The numbers indicate the number of plots classified into each naturalness recovery level. Numbers in parentheses are 95% Clopper–Pearson confidence intervals (%)

| Category            | Indicator                           | Evaluation Score     |                      |                      |
|---------------------|-------------------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
|                     |                                     | Good                 | Fair                 | Poor                 |
| Structure           | Importance Value of Planted Species | 28                   | 54                   | 40                   |
|                     | Canopy Cover of Tree Layer          | 55                   | 48                   | 19                   |
|                     | Crown density                       | 42                   | 71                   | 9                    |
|                     | Vertical Stratification             | 27                   | 75                   | 20                   |
| Species Diversity   | Species Richness                    | 8                    | 57                   | 57                   |
|                     | Species Evenness                    | 52                   | 43                   | 27                   |
|                     | Shannon Diversity Index             | 36                   | 48                   | 38                   |
|                     | Simpson Diversity Index             | 61                   | 41                   | 20                   |
| Species Composition | Proportion of Indicator Families    | 96                   | 22                   | 4                    |
|                     | Number of Annual Herbaceous Species | 94                   | 26                   | 2                    |
|                     | Number of Naturalized Species       | 108                  | 13                   | 1                    |
| Total               |                                     | 61<br>(40.81-59.19%) | 40<br>(24.56-41.87%) | 21<br>(10.98-25.10%) |



았다[Figure 5(b),  $p > 0.05$ ]. 벼과, 콩과, 국화과에는 식생천이 초기 단계에 빈번하게 등장하는 선구종(pioneer species)이 포함된다(Lee et al., 2022). 군락 V에서 관찰된 특정 과의 높은 종 풍부도는 조사구들이 임도 인접 지역에 위치한 점을 고려할 때, 교란의 영향이 식생 구성에 반영된 것으로 해석된다. 반면 군락 I에서는 3개 과 모두 평균 1종 미만이 출현하여(벼과:  $0.29 \pm 0.45$ , 콩과:  $0.29 \pm 0.59$ , 국화과:  $0.07 \pm 0.26$ ) 특정과 식물의 종 풍부도가 상대적으로 낮았다. 이러한 차이는 군락 간 종조성 차이를 확대시키는 요인으로 작용했을 가능성이 있으며, 실제로 군락 I과 군락 V간 유사도 지수는 5.93%로 가장 낮았다. 기타 군락 간 유사도는 11.42-41.22%의 범위로 나타나, 군락별 종조성 특성이 상이함을 보여주었다(Table 4).

### 3. 인공림의 자연성 회복 평가

전체 조사구 122개 중 61개[50.00% (95% Clopper-Pearson: 40.81-59.19%)]가 ‘상’(Good), 40개[32.79% (24.56-41.87%)]가 ‘중’(Fair), 21개[17.21% (10.98-25.10%)]가 ‘하’(Poor)수준으로 분류되었다(Table 5).

구조 지표에서는 교목층 식파율이 ‘상’으로 평가된 조사구가 절반에 가까웠으나, 식재종 중요치, 울폐율, 층위구조는 모두 ‘중’등급에 집중되는 경향을 보였다. 종 다양성 지표에서는 종 균등도와 Simpson 다양성 지수가 ‘상’의 비율이 높았고, 종 풍부도의 경우 ‘중’과 ‘하’에서 동일한 조사구 수를 보였다. 한편, Shannon 다양성 지수는 ‘중’등급의 비율이 다소 높았다.

종조성 관련 지표에서는 국화과, 벼과, 콩과의 출현 비율, 일년생 초본의 수, 귀화식물의 출현 수가 적을수록 ‘상’등급으로 평가하였으며, 세 지표 모두 ‘상’등급의 비중이 높았다(Table 5).

## 고 찰

본 연구는 광릉숲 인공림을 대상으로 식생 구조와 종조성을 분석하고, 이를 바탕으로 천연림으로의 자연성 회복 수준을 평가하였다. 광릉숲 인공림은 총 5개 군락으로 구분되었으며, 평균상대우점치(MIP), DCA 및 유사도 분석을 통해 군락 간 구조적 특성과 종조성 차이를 검토하였다. 도출된 군락 유형은 인공림 내 발달 단계와 교란 조건에 따른 구조적 이질성을 반영한다(Table 3).

### 1. 식생 구조와 발달 특성

군락 I-III는 자생 활엽수종의 기여도가 높고 상·하층에 걸쳐 혼효 구조가 형성되어 있어, 식재 수종 중심의 조림 단계에서 벗어나 자생 활엽수 중심으로 구조적 전환이 상당 부

분 진행된 것으로 해석된다. 특히 침엽수 인공림 하층에서 참나무류의 중요치가 높게 나타난 점은 이러한 전환이 유도 갱신 단계에서부터 뚜렷하게 나타나고 있음을 시사한다. 이러한 종조성은 광릉숲이 식물사회학적으로 신갈나무-생강나무아군단에 속한다는 기존 연구를 지지하며(Cho et al., 2020), 현재의 참나무류 우점 경향은 인공림이 지역 고유의 냉온대 낙엽활엽수림 체계로 점진적으로 수렴하고 있음을 보여준다.

군락 IV는 전나무, 가래나무 등 식재 수종이 상층에서 우점하는 구조를 유지하고 있었으며, 하층에서는 졸참나무, 까치박달 등의 자생 활엽수종이 일정 수준 나타났다. 일반적으로 천연림과 인접한 장소는 자생수종의 이입이 더 원활하며(Cubiña and Aide, 2001), 이러한 환경조건에 따라 군락 IV에서는 자연성 회복이 비교적 안정적으로 진행될 가능성이 있다.

한편, 임도 인접 지역에 분포하는 군락 V는 선구종의 비중과 하층 피도가 높게 나타났다. 임도는 광 환경과 토양 조건을 변화시키고 종자 유입 경로로 작용하는 요인으로 알려져 있으며(Watkins et al., 2003; Zamani et al., 2020), 이 군락은 반복 교란이 구조 발달에 미치는 영향을 보여준다. 이러한 결과는 인공림의 천이 경로가 단일하지 않으며, 교란 강도와 공간적 맥락에 따라 상이한 발달 경로를 보일 수 있음을 의미한다.

### 2. 자연성 회복 평가 및 복원·관리 시사점

본 연구의 자연성 회복 평가지표는 인공림의 상태를 구조적 안정성, 종다양성 및 종조성의 측면에서 통합적으로 고려함으로써 자연성 회복 수준을 진단하고자 하였다. 특히 교목층의 중요도와 층위 발달은 천이 과정에서 나타나는 구조적 안정성과 군집의 입체적 복잡성을 반영하며, 직경 구조와 유묘·치수의 재생 양상은 향후 군집 구조 변화를 예측하는 근거가 된다(Deb and Sundriyal, 2008). 또한 1년생 초본 및 귀화식물의 출현은 교란 강도와 초기 천이 특성을 간접적으로 보여주는 지표가 될 수 있어, 이를 평가 항목에 포함하였다.

한편, 본 연구의 자연성 평가는 내부 상대 비교(Jenks Natural Breaks; Rey et al., 2017)에 기반하고 있어 조사구 간 상대적 수준을 구분하는 데에는 유효하나, 절대적 복원 기준을 제시하는 데에는 한계가 있다. 지표 구간 설정은 조사구 분포 특성에 의존하므로 다른 지역이나 산림 유형에 직접 적용하기 어렵다. 또한 본 평가 체계는 군집 구조와 종조성에 초점을 두고 있어, 생태계 기능의 회복이나 장기적 동태와 같은 과정적 측면을 직접적으로 반영하지 못한다는 점에서도 해석상의 주의가 필요하다.

그럼에도 조사구의 절반 이상이 ‘상’ 등급으로 분류된 결과

는 조림지에서 자연재생을 통해 자생 수종 중심의 종조성과 안정된 층위 구조가 상당 부분 형성되었음을 보여준다. 자연재생은 인공조림과 비교하여 비용 대비 자연성 회복 속도와 생물다양성 측면에서 동등하거나 우수한 효과를 보일 수 있다는 메타분석 결과가 보고된 바 있으며(Crouzeilles et al., 2017; Meli et al., 2017), 국내 조림지 연구에서도 초기 식재 이후 추가적인 인위적 개입 없이 자생 수종 중심으로 식생 구조가 전환될 수 있음이 확인되었다(Lee et al., 2004; Park et al., 2011; Choung et al., 2020). 본 연구에서도 군락 I-III 지역을 중심으로 조림 수종의 재생은 제한적인 반면 자생 활엽수종의 재생은 활발하게 이루어지고 있어, 자연천이에 의한 구조적 전환이 실질적으로 진행되고 있음을 확인하였다(Appendix 1). 이러한 결과는 광릉숲 인공림의 현 구조와 자연재생 과정을 유지하는 자발적 복원(passive restoration) 전략이 타당함을 뒷받침한다.

반면 ‘하’ 등급 조사구는 임도 인접 지역에 집중되어 있어, 자연성 회복이 공간 구조와 교란 체계의 영향을 받을 수도 있음을 시사한다. 군락 IV-V에 속한 자연성 ‘중’ 및 ‘하’ 등급 지역은 교란에 상대적으로 취약한 관리 우선 구역으로 볼 수 있으며, 지속적인 모니터링과 함께 임도 주변 완충대 조성(Watkins et al., 2003; Zamani et al., 2020), 선구종·귀화식물이 우점한 소규모 패치의 단계적 제거 및 자생종 대체 등 보완적 관리가 요구된다(Han, 2019; Weidlich et al., 2020).

광릉숲 인공림은 국내에서 비교적 이른 시기에 조림된 이후 장기간 추가적 인위 간섭 없이 자연천이가 진행되어 온 사례로서, 자연재생과 구조적 전환 경로를 교란 요인의 영향을 최소화한 상태에서 관찰할 수 있는 연구적 가치를 지닌다. 따라서 국내 조림지의 중·장기 식생 발달과 자연성 회복 경로를 이해하기 위한 비교 기준(reference site)으로 활용될 수 있다. 본 연구는 인공림의 자연성 회복 수준을 제시함으로써 국내 조림지의 장기적 관리 전략 수립에 실증적 근거를 제공한다.

## 감사의 글

본 연구는 국립수목원 연구사업(KNA1-2-26-16-4, KNA1-2-32-18-3)의 지원으로 수행되었습니다.

## References

- Anderson, J.E. 1991. A conceptual-framework for evaluating and quantifying naturalness. *Conservation biology*. 5(3): 347-352.
- Barrette, M. et al. 2014. Issues and solutions for intensive plantation silviculture in a context of ecosystem management. *The Forestry Chronicle* 90(6): 748-762.
- Bončina, A., Klopčič, M., Simončič, T., Dakskobler, I., Ficko, A. and Rozman, A. 2017. A general framework to describe the alteration of natural tree species composition as an indicator of forest naturalness. *Ecological Indicators*. 77: 194-204.
- Braun-Blanquet, J. 1964. *Pflanzensoziologie Grundzüge der Vegetation* (3rd Edition). Springer-Verlag. Wien. New York. pp. 865.
- Brockhoff, E.G., Jactel, H., Parrotta, J.A., Quine, C.P. and Sayer, J. 2008. Plantation forests and biodiversity: oxymoron or opportunity? *Biodiversity and Conservation* 17(5): 925-951.
- Brumelis, G. 2011. Forest naturalness in northern Europe: perspectives on processes, structures and species diversity. *Silva Fennica*.
- Chazdon, R.L. 2008. Beyond deforestation: restoring forests and ecosystem services on degraded lands. *Science* 320(5882): 1458-1460.
- Cho, Y.C., Cho, H.J., Kim, J.S., Cho, J.H., Jung, S.H., Kim, H.G., Sim, H.S., Lee, D.H., and Kim, H.C., 2020. Forest of Korea (V) Gwangneung Forest Biosphere Reserve. Korea National Arboretum, Pocheon.
- Cho, Y.C., Kim, H.Y., Kim, J.S., Cho, J.H., Bae, K.H., Son, S.W., An, J.B., Kwon, H.J. and Shin, H.T. 2025. Annual report on Gwangneung Forest and experimental forests 2024. Korea National Arboretum, Pocheon.
- Cho, Y.-C., Shin, H.-C., Kim, S.-S. and Lee, C.-S. 2007. Dynamics and conservation of the Gwangneung National Forest in Central Korea: a national model for forest restoration. *Journal of Plant Biology* 50(6): 615-625.
- Choung, Y., Lee, J., Cho, S. and Noh, J. 2020. Review on the succession process of *Pinus densiflora* forests in South Korea: progressive and disturbance-driven succession. *Journal of Ecology and Environment* 44(1): 16
- Crouzeilles, R. et al. (2017). Ecological restoration success is higher for natural regeneration than for active restoration in tropical forests. *Science Advances* 3(11): e1701345.
- Cubiña, A. and Aide, T.M. 2001. The effect of distance from forest edge on seed rain and soil seed bank in a tropical pasture 1. *Biotropica* 33(2): 260-267.
- Deb, P. and Sundriyal, R., 2008, Tree regeneration and seedling survival patterns in old-growth lowland tropical rainforest in Namdapha National Park, north-east India. *Forest Ecology and Management* 255(12): 3995-4006.
- Ellenberg, H. 1956. *Aufgaben und methoden der vegetationskunde. Einführung in die Phytologie*, 4.
- Han S.W. 2019. Effects of Forest Road Construction on Biological Community and Distribution in Forests: A

- Case Study of Forest Road in Minjujisan, Doctoral Dissertation, Chungnam National University, Daejeon, Korea.
- Hartley, M.J. 2002. Rationale and methods for conserving biodiversity in plantation forests. *Forest Ecology and Management* 155(1-3): 81-95.
- Hill, M.O. 1979. A FORTRAN program for arranging multivariate data in ordered two-way table by classification of the individuals and attributes. *Ecology and Systematics*, Cornell Univ., Ithaca, New York.
- Hill, M.O. and Gauch Jr, H.G. 1980. Detrended correspondence analysis: an improved ordination technique. *Vegetatio* 42(1): 47-58.
- Jenks, G.F. 1967. The Data Model Concept in Statistical Mapping. *International Yearbook of Cartography* 7: 186-190.
- Kang, J.W. and Kang H.M. 2023. Vegetation Characteristics in Cheongwansan Provincial Park. *Korean Journal of Environment and Ecology* 37(2): 163-178.
- KNA (Korea National Arboretum). 2025. Korea Biodiversity Information System. <http://www.nature.go.kr>.
- Lamb, D., Erskine, P.D. and Parrotta, J.A. 2005. Restoration of degraded tropical forest landscapes. *Science* 310(5754): 1628-1632.
- Lee, B.R., Lee, H.S., Kim, J.S., Cho, J.H., Oh, S.H. and Cho, H.J. 2022. Classification and Spatial Distribution of Forest Vegetation Types in Yokjido Island, Korea. *Journal of Korean Society of Forest Science* 111(3): 345-356.
- Lee, C.B. 2003. Coloured Flora of Korea. Hyangmunsa. Seoul. pp. 999 (in Korean)
- Lee, D.K., Kang, H.S. and Park, Y.D. 2004. Natural restoration of deforested woodlots in South Korea. *Forest Ecology and Management* 201(1): 23-32.
- Lee, K.J., Ki, K.S. and Choi, J.W. 2009. Vegetation Succession and Vegetation Management of the *Pinus densiflora* S. et Z. Forest in the Beopjusa Area, Songnisan National Park. *Korean Journal of Environment and Ecology* 23(2): 208-219.
- Liira, J. and Sepp, T. 2009. Indicators of structural and habitat natural quality in boreo-nemoral forests along the management gradient. In *Annales Botanici Fennici*. Finnish Zoological and Botanical Publishing Board 46(4): 308-325.
- Meli, P., Holl, K.D., Rey Benayas, J.M., Jones, H.P., Jones, P.C., Montoya, D. and Moreno Mateos, D. 2017. A global review of past land use, climate, and active vs. passive restoration effects on forest recovery. *Plos one* 12(2): e0171368.
- Park, I.H. 1985. A study on forest structure and biomass in Baegwoonsan natural ecosystem. Seoul, School of Seoul National University.
- Park, Y.D., Lee D.K., Choi S.D. and Kwon S.D. 2011. Natural Regeneration in the Plantations of *Pinus koraiensis* and *Larix kaempferi* in Yangyang-Gun, South Korea. *Journal of Agriculture & Life Science* 45(4): 47-58.
- Pham, D.H. and Wu, C.A. 2023. Seed longevity and germination of the emerging invasive species wavyleaf basketgrass (*Oplismenus undulatifolius*) under varied light regimes. *Invasive Plant Science and Management* 16(4): 225-232.
- Rey, S.J., Stephens, P. and Laura, J. 2017. An evaluation of sampling and full enumeration strategies for Fisher Jenks classification in big data settings. *Transactions in GIS* 21(4): 796-810.
- Van den Brink, P.J., Van den Brink, N.W. and Ter Braak, C.J.F. 2003. Multivariate analysis of ecotoxicological data using ordination: demonstrations of utility on the basis of various examples. *Australasian Journal of Ecotoxicology* 9(2): 141-156.
- Watkins, R.Z., Chen, J., Pickens, J. and Brosfiske, K.D. 2003. Effects of forest roads on understory plants in a managed hardwood landscape. *Conservation Biology* 17(2): 411-419.
- Weidlich, E.W., Flórido, F.G., Sorriani, T.B. and Brancalion, P.H. 2020. Controlling invasive plant species in ecological restoration: A global review. *Journal of Applied Ecology* 57(9): 1806-1817.
- Winter, S. 2012. Forest naturalness assessment as a component of biodiversity monitoring and conservation management. *Forestry* 85(2): 293-304.
- Yang, Q., Zhang, H., Wang, L., Ling, F., Wang, Z., Li, T., and Huang, J. 2021. Topography and soil content contribute to plant community composition and structure in subtropical evergreen-deciduous broadleaved mixed forests. *Plant Diversity* 43(4): 264-274.
- Zamani, M., Nikooy, M., and Tavankar, F. 2020. Effects of forest roads on species composition of trees regeneration in selection cutting management of high forests. *Forestist* 70(2): 151-159.

---

Manuscript Received : October 10, 2025

First Revision : December 15, 2025

Second Revision : February 24, 2026

Accepted : February 25, 2026

## Appendix

**Appendix 1. Ecological health evaluation results of plantation forest types (I–V) within Gwangneung Forest. The numbers indicate the number of plots classified into each ecological health level (Good, Fair, Poor) for each indicator (Structure, Species Diversity, and Species Composition)**

| Category                   | Indicator                           | I        |          |          | II        |          |          | III       |           |          | IV        |           |          | V        |          |          |
|----------------------------|-------------------------------------|----------|----------|----------|-----------|----------|----------|-----------|-----------|----------|-----------|-----------|----------|----------|----------|----------|
|                            |                                     | Good     | Fair     | Poor     | Good      | Fair     | Poor     | Good      | Fair      | Poor     | Good      | Fair      | Poor     | Good     | Fair     | Poor     |
| <b>Structure</b>           | Importance Value of Planted Species | 3        | 7        | 4        | 14        | 12       | 7        | 8         | 16        | 10       | 2         | 14        | 19       | 1        | 4        | 1        |
|                            | Canopy Cover of Tree Layer          | 2        | 10       | 2        | 7         | 15       | 11       | 6         | 9         | 19       | 3         | 10        | 22       | 1        | 4        | 1        |
|                            | Crown density                       | 0        | 12       | 2        | 12        | 17       | 4        | 8         | 19        | 7        | 7         | 21        | 7        | 1        | 5        | 0        |
|                            | Vertical Stratification             | 6        | 6        | 2        | 14        | 16       | 3        | 14        | 19        | 1        | 8         | 25        | 2        | 1        | 4        | 1        |
| <b>Species Diversity</b>   | Species Richness                    | 0        | 1        | 13       | 0         | 17       | 16       | 3         | 15        | 16       | 4         | 20        | 11       | 1        | 4        | 1        |
|                            | Species Evenness                    | 9        | 3        | 2        | 21        | 8        | 4        | 16        | 10        | 8        | 6         | 17        | 12       | 1        | 5        | 0        |
|                            | Shannon Diversity Index             | 5        | 4        | 5        | 14        | 12       | 7        | 11        | 12        | 11       | 4         | 17        | 14       | 1        | 4        | 1        |
|                            | Simpson Diversity Index             | 9        | 3        | 2        | 22        | 8        | 3        | 18        | 8         | 8        | 10        | 17        | 8        | 3        | 3        | 0        |
| <b>Species Composition</b> | Proportion of Indicator Families    | 14       | 0        | 0        | 31        | 1        | 1        | 32        | 1         | 1        | 17        | 17        | 1        | 2        | 3        | 1        |
|                            | Number of Annual Herbaceous Species | 14       | 0        | 0        | 30        | 3        | 0        | 28        | 6         | 0        | 22        | 13        | 0        | 0        | 3        | 2        |
|                            | Number of Naturalized Species       | 14       | 0        | 0        | 29        | 3        | 1        | 32        | 2         | 0        | 28        | 6         | 1        | 3        | 2        | 1        |
| <b>Total</b>               |                                     | <b>8</b> | <b>5</b> | <b>1</b> | <b>22</b> | <b>8</b> | <b>3</b> | <b>20</b> | <b>10</b> | <b>4</b> | <b>11</b> | <b>15</b> | <b>9</b> | <b>1</b> | <b>4</b> | <b>1</b> |