韓藥作誌(Korean J. Medicinal Crop Sci.) 34(5) : 376 – 386 (2026)
ISSN(Print) 1225-9306
ISSN(Online) 2288-0186
http://www.medicinalcrop.org
http://dx.doi.org/10.7783/KJMCS.2026.34.5.376

인삼 다수성 조기 선발을 위한 선발지수 개발 및 예비 적용

김정호[1†] · 이기욱[2] · 송윤호[3] · 최다혜[4] · 이광재[5] · 고병대[6]

Development and Preliminary Application of a Selection Index for Early Selection of Ginseng (*Panax ginseng*) with High Root Weight

Jeong Ho Kim[1†], Gi Wook Lee[2], Yoon Ho Song[3], Da Hye Choi[4], Kwang Jae Lee[5], and Byeong Dae Goh[6]

Received: 2026 September 09
1st Revised: 2026 September 23
2nd Revised: 2026 October 13
3rd Revised: 2026 October 20
Accepted: 2026 October 20
Published: 2026 October 30

This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

ABSTRACT

Background: Evaluating root traits at six years of age delays selection in ginseng (*Panax ginseng* C. A. Meyer) breeding. This study developed a candidate empirical index based on aerial traits for the early selection of lines with high root fresh weight.

Methods and Results: Aerial traits and root fresh weight were measured in 86 six-year-old lines in 2022 and 57 in 2023. Leaf length and width were used to calculate leaflet size proxy (LSP), whereas the product of LSP and the number of stems was used to derive a stem-weighted leaf area proxy (SLAP). Standardized regression assigned normalized weights of approximately 40% to stem diameter and 60% to SLAP in both years (R^2 = 0.618–0.708), yielding the index 0.4·Z (stem diameter) + 0.6·Z (SLAP). Applying the weights across years retained correlations of 0.786–0.841 with root fresh weight, and internal cross-validation showed that the two-trait model outperformed the single-trait models. In a preliminary application to 37 four-year-old lines, SLAP was replaced with a petiole-weighted proxy (LSP × number of petioles). The lines were classified as promising (3), retained (16), and early elimination candidates (18).

Conclusions: Stem diameter and SLAP were positively associated with root fresh weight in six-year-old ginseng lines. The proposed index may serve as a preliminary screening tool; however, its ability to predict 6-year-old root fresh weight from traits measured at 4 years of age remains untested.

Key Words: *Panax ginseng*, Early Selection, Leaf Area Proxy, Root Fresh Weight, Selection Index

서 언

국내 인삼 (*Panax ginseng* C. A. Meyer)의 육성 품종 보급률은 2018년 기준 14.6%에 머물러 재배 현장에서는 여전히 재래종의 비중이 높다 (Bang *et al.*, 2020). 또한 최근 기후변화에 따른 재배환경의 변화는 인삼의 안정적인 생산에 어려움을 초래하고 있다. 특히 고온 조건은 인삼의 생리적 스트레스를 증가시키고 생육과 수량에 영향을 줄 수 있으며 (Jang *et al.*, 2024), 최근에는 내고온성과 다수성을 함께 고려한 인삼 신품종 개발도 보고되고 있다 (Kim *et al.*, 2024). 이러한 여건에서 환경 적응성과 수량성이 우수한 품종의 개발이 중요해지고 있으며, 이를 위한 육종 과정에서는 다수성 유망 계통을 효율적으로 선발하는 기술이 요구된다.

그러나 인삼은 최종 근중 및 수량성 평가가 주로 6년생 단계에서 이루어지기 때문에, 육종 과정에서 우수 계통을 조기에 선발하기 어렵고, 평가 대상 계통을 6년생까지 유지하는 데 상당한 포장 면적과 연구 자원이 소요된다. 한편 인삼에서는 경직경과 근중 간의 양의 상관관계가 보고되었으며 (Bang *et al.*, 2012), 소엽 횡단면 형태와 단풍색 등 지상부 질적 형질과 근중 간의 관계도 연구되었다 (Kim *et al.*, 2023). 이러한 선행연구는 최종 근중을 확인하기 전에 지상부 형질을 이용하여 우량 계통을 조기에 선별할 가능성을 시사한다. 다만 이러한 관

†Corresponding author: (Phone) +82-33-248-6059 (E-mail) dbalsdms@korea.kr
[1]강원특별자치도농업기술원 작물연구과 농업연구사 / Researcher, Crop Research Division, Gangwon State Agricultural Research and Extension Services, Chuncheon 24203, Korea
[2]강원특별자치도농업기술원 작물연구과 농업연구사 / Researcher, Crop Research Division, Gangwon State Agricultural Research and Extension Services, Chuncheon 24203, Korea
[3]강원특별자치도농업기술원 작물연구과 농업연구사 / Researcher, Crop Research Division, Gangwon State Agricultural Research and Extension Services, Chuncheon 24203, Korea
[4]강원특별자치도농업기술원 작물연구과 농업연구사 / Researcher, Crop Research Division, Gangwon State Agricultural Research and Extension Services, Chuncheon 24203, Korea
[5]강원특별자치도농업기술원 작물연구과 농업연구관 / Senior Researcher, Crop Research Division, Gangwon State Agricultural Research and Extension Services, Chuncheon 24203, Korea
[6]강원특별자치도농업기술원 작물연구과 농업연구관 / Senior Researcher, Crop Research Division, Gangwon State Agricultural Research and Extension Services, Chuncheon 24203, Korea

계는 주로 동일 연생 내에서 확인된 것으로, 4년생의 지상부 형질이 6년생의 근중을 어느 정도 반영하는지에 대한 검증은 제한적이다. 따라서 6년생 자료에서 근중과 관련성이 높은 지상부 형질을 구명하고, 이를 4년생 단계의 예비 선발에 적용한 후 향후 추적조사를 통해 검증하는 단계적 접근이 필요하다.

여러 형질의 측정값을 단일 지표로 통합하는 선발지수(selection index)는 작물육종에서 여러 형질을 동시에 고려하기 위한 방법으로 활용되고 있다. 고전적인 선형 선발지수는 유전분산·공분산과 경제적 가중치를 이용하여 순육종가를 예측하며 (Cerón-Rojas and Crossa, 2022; Rahimi and Debnath, 2023), MGIDI 등 다형질 평가법도 제시되어 있다 (Olivoto and Nardino, 2021; Olivoto *et al.*, 2022). 그러나 인삼 육종의 초기 단계에서는 유전모수 추정에 필요한 반복 자료를 확보하기 어렵다. 이에 본 연구는 유전모수 대신 표현형 근중에 대한 표준화 회귀계수를 가중치로 사용하는 경험적 선발지수를 6년생의 지상부 생육 형질과 근중 자료를 이용하여 구축하였다. 이를 4년생 계통의 예비 선발에 적용하여 계통을 분류하고, 엽면적 대리지표 변경에 따른 분류 결과의 차이를 검토하고자 하였다.

재료 및 방법

1. 식물재료 및 재배환경

본 연구는 2022년과 2023년에 강원특별자치도농업기술원 철원 시험포장에서 수행하였으며, 시험재료는 자체 육성한 6년생 인삼 계통 (2022년 86계통, 2023년 57계통)을 이용하였다. 두 연도 간 7계통이 공통으로 포함되었으나, 서로 다른 채종 시기에 유래한 개체군으로 동일 개체에 대한 반복조사는 아니었다. 연도별 분석은 각 연도의 계통 평균값을 이용하여 독립적으로 수행하였으며, 공통 계통을 제외한 민감도 분석도 추가로 수행하였다. 시험포장은 육종계통 평가를 목적으로 조성하였으며, 계통별 증식 종자량의 차이로 재식 개체수가 달라 동일한 시험구 면적을 설정하지 못하였다. 다만 재식거리는 모든 계통에서 13 × 20 cm로 동일하게 적용하였다. 시험구는 계통번호 순으로 배치하였으며, 독립적인 포장 반복은 두지 않았다.

해가림시설은 묘삼 이식 후 철재 후주연결식 A형 구조로 설치하였으며, 차광자재는 청색 차광지를 적용하였다. 또한 기온이 상승하는 6월 상순부터 고온 피해 완화를 위해 흑색 2중직 폴리에틸렌 (Polyethylene) 차광망을 청색 차광지 상부에서 약 20 cm 이격하여 추가로 피복하였다. 기타 재배관리는 농촌진흥청 표준인삼경작방법에 준하였다.

2. 주요 형질 특성조사

형질 특성은 경수, 경장, 경직경, 엽병장, 엽장, 엽폭, SPAD 값 및 근중 등 총 8개 형질을 조사하였다. 지상부 형질은 생육이 안정적으로 발현되는 7월에, 근중은 11월 수확기에 조사하였다. 모든 조사는 농촌진흥청 농업과학기술 연구조사분석기준 (RDA, 2012)에 준하여 계통별 9개체를 대상으로 실시하였으며, 시험구 내 결주 및 병해 또는 물리적 손상이 있는 개체를 제외한 정상 생육 개체를 조사 대상으로 선정하였다. 지상부 형질과 근중은 서로 다른 개체에서 조사하였으므로, 두 형질 간의 관계는 개체 수준이 아닌 계통 평균값을 기준으로 분석하였다.

엽장과 엽폭은 개체별 중앙소엽에서 측정하였으며, 경직경은 지면에서 약 2–3 cm 높이의 줄기에서 가장 굵은 부위를 측정하였다. 다경 개체의 경우 줄기별로 경직경과 중앙소엽 1개의 엽장 및 엽폭을 측정한 후, 줄기별 측정값의 평균을 개체의 값으로 사용하였다.

상대 엽록소 지표인 SPAD 값은 엽록소계 (SPAD-502, Minolta, Japan)를 이용하여 측정하였다. 엽장과 엽폭을 조사한 중앙소엽의 주맥을 피한 잎몸 중앙부에서 잎당 3회 측정하여 평균값을 산출하였다. 다경 개체는 줄기별 중앙소엽 1개를 동일한 방법으로 측정한 후, 줄기별 평균값의 평균을 개체의 SPAD 값으로 사용하였다. SPAD 값은 적색광 (650 nm)과 근적외광 (940 nm)의 투과 특성을 이용하여 엽록소 수준을 상대적으로 나타내는 무차원 지표로, 절대 엽록소 함량으로 환산하지 않았다.

근중은 수확 직후 흙을 제거한 뒤 뇌두와 세근을 포함한 전근의 생체중을 개체당 g 단위 (g plant^{-1})로 측정하였다. 본 연구에서 사용한 근중은 계통별 평균 개체 근중으로, 생존율과 재식밀도가 반영되는 면적당 수량과는 구별된다. 따라서 본 연구에서의 다수성은 계통별 평균 개체 근중이 큰 특성으로 한정하여 해석하였다.

엽장과 엽폭은 상호 높은 상관관계를 나타내므로 두 형질을 회귀모형에 동시에 투입할 경우 각 변수의 독립적인 효과를 안정적으로 추정하기 어려울 수 있다. 이에 두 형질을 하나의 소엽 크기 지표로 통합하고, 경수에 따른 개체 간 지상부 크기 차이를 추가로 반영하기 위한 파생지표를 설정하였다. 소엽의 형태를 타원으로 근사하여 소엽 크기 대리지표 (leaflet size proxy, LSP)를 산출하였으며, 여기에 경수를 곱하여 경수 반영 엽면적 대리지표 (stem-weighted leaf area proxy, SLAP)를 산출하였다. 인삼은 줄기 끝에 복엽이 돌려나므로 경수가 많을수록 개체의 복엽 수가 증가하는 점을 고려하여, 경수를 개체의 복엽 수 (엽병수)를 대신하는 엽량의 대리값으로 사용하였다. 두 지표는 개체별 측정값으로 계산하지 않고 계통별 엽장, 엽폭 및 경수의 평균값을 이용하여 산출하였다.

$$LSP = (\pi/4) \times \text{Leaf length} \times \text{Leaf width}$$
$$SLAP = LSP \times \text{Number of stems}$$

LSP는 중앙소엽을 타원으로 가정하여 엽장과 엽폭의 곱에

π/4를 곱한 값으로, 실제 엽면적을 측정하거나 검증하여 얻은 추정치가 아니라 계통 간 상대적인 소엽 크기를 비교하기 위한 대리지표 (leaflet size proxy)이다. π/4는 모든 계통에 동일하게 곱해지는 상수이므로 Z-score, 순위 및 상관계수에는 영향을 주지 않는다. Lee *et al.* (1985)은 인삼에서 중앙소엽의 엽장과 엽폭의 곱으로 소엽 면적을 추정하고, 이를 장엽 면적과 개체당 전체 엽면적으로 환산하는 실험식을 제시하였다. 그러나 본 연구의 6년생 자료에는 개체별 엽병수 (장엽 수)가 조사되지 않아 이 방법을 그대로 적용할 수 없었다. 이에 중앙소엽의 크기에 경수를 곱한 SLAP를 개체의 상대적인 지상부 엽량 규모 (canopy size)를 나타내는 대리지표로 사용하였다. 두 지표는 단위 지면적당 엽면적을 의미하는 엽면적지수 (leaf area index, LAI)와는 구별된다.

3. 통계 분석

모든 통계분석은 계통별 평균값을 분석 단위로 수행하였으며 (2022년 n = 86, 2023년 n = 57), 계통 내 조사 개체는 독립적인 반복이 아닌 부표본 (subsample)으로 취급하였다. 분석에 사용한 자료에는 결측값이 없었다. 연도별로 주요 형질의 평균, 표준편차 및 범위를 산출하였으며, 지상부 생육 형질과 근중 간의 관계는 Pearson 상관분석을 이용하여 평가하였다. LSP와 SLAP의 근중에 대한 상관계수 차이는 두 상관계수가 동일한 근중 변수를 공유한다는 점을 고려하여 종속 상관계수 비교 검정 (Meng *et al.*, 1992)을 이용하여 검정하였다.

독립변수 간 다중공선성을 평가하기 위해 2022년과 2023년 자료를 각각 연도 내에서 Z-score로 표준화한 후 통합하여 총 143개의 계통·연도 관측치에 대해 분산팽창요인 (variance inflation factor, VIF)과 허용도 (tolerance, Tol.)를 산출하였다. VIF는 값이 클수록 독립변수 간 정보 중복에 따른 회귀계수 분산의 증가 가능성이 큰 것으로 해석하였으며, 특정 절단값만을 기준으로 판단하지 않고 변수 간 상대적인 VIF와 허용도를 함께 검토하였다.

근중에 대한 회귀모형은 연도별로 경직경과 SLAP를 독립변수로 하는 표준화 다중선형회귀 (standardized multiple linear regression)를 이용하여 구축하였다. 독립변수는 두 연도에서 근중과 일관된 양의 상관관계를 나타내고 ($p < 0.01$), 변수 간 상관이 상대적으로 낮으며, 포장에서 비파괴적으로 신속하게 측정할 수 있다는 기준을 종합하여 선정하였다. 각 형질은 다음식에 따라 연도 또는 평가집단 내에서 Z-score로 표준화하였다.

$$Z_{ijt} = \frac{X_{ijt} - X_{jt}}{SD_{it}}$$

X_{ijt}: mean of trait j for line i in evaluation set t; X_{jt} and SDjt: mean and standard deviation, respectively, of trait j among lines in evaluation set t. Six-year-old lines were standardized within each year, whereas four-year-old lines were standardized using the 39 entries in the 2025 evaluation set.

회귀계수는 표준오차와 95% 신뢰구간을 함께 제시하였으며, 이분산성에 대한 강건성을 확인하기 위해 HC3 이분산성-강건 표준오차 (heteroskedasticity-consistent standard error)를 추가로 산출하였다. 회귀모형의 가정을 검토하기 위해 잔차의 정규성은 Shapiro-Wilk 검정, 등분산성은 Breusch-Pagan 검정으로 평가하였고, 선형성은 각 독립변수의 제곱항을 추가한 모형과 기본모형 간 F검정을 통해 검토하였다. 영향력이 큰 관측치는 Cook's distance를 이용하여 확인하였으며, 4/n을 참고 기준으로 사용하였다.

선발지수 (selection index, SI)의 가중치는 표준화 다중회귀에서 추정된 두 회귀계수를 이용하여 산출하였다. 각 표준화 회귀계수를 두 계수의 합으로 나눈 값을 정규화 회귀 가중치 (normalized regression weight)로 정의하였으며, 이는 선발지수의 상대적 가중치를 설정하기 위한 경험적 기준으로 사용하였다. 이 가중치는 각 독립변수가 근중의 분산을 독립적으로 설명하는 비율을 의미하지 않는다. 두 연도에서 나타난 회귀 가중치의 일관성을 고려하여 실용적으로 단순화한 가중치를 적용해 최종 선발지수를 구성하였다.

$$SI = 0.4 \times Z_{i,\ Diam,t} + 0.6 \times Z_{i,\ SLAP,\ t}$$

SI: selection index; Diam: stem diameter; SLAP: stem-weighted leaf area proxy. For the preliminary application to four-year-old lines, a modified version of the index was used by replacing SLAP with PLAP (petiole-weighted leaf area proxy).

두 연도에서 표준화 회귀계수가 다른지 검토하기 위하여, 경직경, SLAP 및 근중을 각 연도 내에서 표준화한 후 통합한 143개 계통·연도 관측치에 대해 근중을 종속변수로 하고 경직경, SLAP, 연도 및 연도와 각 독립변수의 상호작용항을 포함한 회귀모형을 적합하고, 상호작용항의 유의성을 t 검정으로 평가하였다.

가중치의 안정성과 선정된 후보모형의 내부 예측성은 두 가지 방법으로 평가하였다. 첫째, 한 연도에서 추정한 회귀 가중치를 고정하여 다른 연도의 자료에 적용하고, 이때의 지수와 근중 간 Pearson 상관계수와 Spearman 순위상관계수를 산출하였다. 둘째, 연도별로 계통 단위의 5-fold 교차검증을 50회 반복하였다. 각 반복에서 독립변수와 근중의 표준화 및 회귀계수 추정은 학습자료 (training set)만을 이용하였고, 검증자료 (validation set)의 예측값은 학습자료의 근중 평균과 표준편차

를 이용하여 원 단위 (g plant^{-1})로 환산하였다. 예측성능은 반복마다 전체 계통의 검증 예측값과 관측값 간 Pearson 상관계수와 평균제곱근오차 (root mean square error, RMSE)로 계산한 뒤 50회의 평균으로 나타내었다. 경직경과 SLAP의 결합모형은 일부 단일 형질 모형 및 다른 형질 조합 모형과 비교하였다. 다만 비교한 변수 조합은 전체 자료의 탐색적 분석 (상관 및 회귀분석) 결과를 참고하여 교차검증 전에 고정하였으므로, 본 교차검증은 변수 선정 과정 전체를 포함한 독립적 검증이 아니라 선정된 후보모형 간의 내부 예측성 (internal predictive performance)을 비교하기 위한 분석으로 해석하였다.

모든 통계분석은 Python의 SciPy, statsmodels 및 scikit-learn 패키지를 이용하여 수행하였다.

4. 선발지수의 예비 적용

구축된 선발지수를 4년생 계통의 예비 선발에 적용하기 위하여, 2025년 강원특별자치도농업기술원 춘천 시험포장에서 재배 중인 4년생 인삼 중 자체 육성 37계통, 대조품종 금풍 및 지역적응시험 계통 강원2호를 포함한 총 39개 평가재료 (entry)를 대상으로 평가재료당 9개체의 경직경, 엽장, 엽폭, 경수 및 엽병수를 조사하였다. 4년생 개체는 대부분 단경이었으므로 (37계통의 평균 경수 1.1), 경수 대신 엽병수를 이용한 엽병수 반영 엽면적 대리지표 (petiole-weighted leaf area proxy, PLAP)를 적용하였다. PLAP는 LSP 및 SLAP와 동일하게 평가재료별 엽장, 엽폭 및 엽병수의 평균값으로 산출하였다. 모든 평가재료는 같은 수의 개체를 조사하였으며, 독립적인 포장 반복은 두지 않았다. 8계통은 6년생 시험재료와 계통명이 같으나, 별도로 양성된 집단으로 6년생 조사 개체와 중복되지 않는다.

$$\mathrm{PLAP} = \mathrm{LSP} \times \mathrm{Number\ of\ petioles}$$

SLAP와 PLAP는 모두 LSP에 개체의 엽량을 간접적으로 반영하는 형질인 경수 또는 엽병수를 결합한 대리지표이다. 각 형질의 Z-score는 39개 평가재료의 평균과 표본표준편차를 이용하여 산출하였으며, 6년생 자료에서 구축한 가중치를 적용하여 선발지수를 산출하였다.

대조품종 금풍의 경직경은 6.80 mm (Z = 1.38), PLAP는 434.7 cm² (Z = 1.25)였으며, 이에 따른 선발지수는 1.30이었다. 계통의 분류에는 두 가지 기준을 적용하였다. 첫째, 같은 평가집단에서 함께 조사한 대조품종 금풍의 선발지수 (1.30)를 유망 후보 계통의 기준으로 하여, 선발지수가 이 값 이상인 계통은 지상부 생육 수준이 대조품종과 같거나 그보다 우수한 계통으로 보았다. 둘째, 본 지수는 평가집단 내에서 표준화한 두 형질의 가중합이어서 평가집단의 평균이 0이 되므로, 0을 평가집단 평균 이상과 미만을 구분하는 기준으로 하였다. 이에 따라 선발지수가 1.3 이상인 계통은 유망 후보 계통, 0 이상 1.3 미만으로 평가집단 평균 이상이나 대조품종에는 미치지 못한 계통은 유지 계통, 0 미만으로 평가집단 평균에 미치지 못한 계통은 조기 도태 후보 계통으로 분류하였다. 이 분류는 근중 자료 없이 4년생의 지상부 형질만으로 이루어진 것으로, 계통의 다수성이 확인되었음을 의미하지 않는다. 또한 이 기준은 확정적인 도태 기준이 아니라 계통 평가의 우선순위를 정하기 위한 탐색적·운영적 기준이며, 병해 및 생리장해 발생 정도는 본 분류에 포함하지 않고 계통 평가의 참고자료로 활용하였다.

Z-score는 평가집단의 평균과 표준편차에 따라 달라지는 상대적 지표이므로, 두 임계값은 본 평가집단에 한정하여 적용하였다. 다른 평가집단에 적용할 경우에는 동일한 대조품종을 포함하여 해당 집단 내에서 Z-score와 대조품종의 선발지수를 다시 산출하도록 하였다.

또한 가중치 산출에 사용한 SLAP를 4년생 평가에서 PLAP로 대체한 것이 계통의 순위와 분류에 미치는 영향을 확인하기 위하여, 동일한 4년생 자료에서 SLAP를 추가로 산출하고 같은 39개 평가재료를 기준으로 표준화한 선발지수를 비교하였다. 이 비교에서는 PLAP 기반 지수에서 설정한 절단값 (1.3 및 0)을 그대로 고정하고 지표만 SLAP로 바꾸었을 때의 분류 변화를 살펴보는 고정 절단값 민감도 분석 (fixed-cutoff sensitivity analysis)을 수행하였다. SLAP 기반 지수에서는 금풍 자체의 선발지수가 달라지므로 이 분석은 SLAP에 대한 새로운 선발 기준을 설정하기 위한 것이 아니다.

결과 및 고찰

1. 지상부 생육 형질과 근중 간의 상관관계

연도별 주요 형질의 기초통계는 Table 1과 같다. 평균 개체 근중은 2022년 평가집단 134.0 g, 2023년 평가집단 78.5 g이었으며, SPAD 값은 각각 36.6과 26.2였다. 두 연도의 평가집단은 계통 구성이 대부분 달랐으므로, 이러한 측정값 수준의 차이에는 재배 연도의 환경과 계통 구성의 차이가 함께 반영되어 있으며 본 연구의 설계로는 이를 분리할 수 없다. 이에 두 연도의 원자료를 직접 비교하거나 통합하지 않고, 각 평가집단 내에서 형질의 상대적 위치를 나타내도록 표준화하여 분석하였다.

지상부 생육 형질과 근중 간의 상관분석 결과 (Table 2), 엽폭 (r = 0.641–0.648), 엽장 (r = 0.533–0.603), 경직경 (r = 0.519–0.625) 및 엽병장 (r = 0.442–0.502)은 두 연도 모두 근중과 유의한 양의 상관관계를 나타냈다 ($p < 0.01$). 반면 경수, 경장 및 SPAD 값은 연도에 따라 근중과의 상관관계가 일관되지 않았다. 경수는 2022년에 유의한 양의 상관을 보였으나 (r = 0.471, $p < 0.01$) 2023년에는 유의하지 않았으며 (r = 0.139),

Table 1. Descriptive statistics of aerial growth traits, leaf area proxies and root fresh weight of six-year-old ginseng lines in 2022 and 2023.

Trait (unit)	2022 (n = 86)		2023 (n = 57)	
	Mean ± SD	Range	Mean ± SD	Range
Number of stems	1.4 ± 0.6	1.0–5.0	1.2 ± 0.4	1.0–2.3
Stem length (cm)	40.8 ± 5.1	25.0–51.5	32.9 ± 6.5	7.0–43.5
Stem diameter (mm)	10.1 ± 1.7	6.4–15.7	7.9 ± 1.4	3.8–10.8
Petiole length (cm)	11.6 ± 1.3	9.0–14.8	8.3 ± 1.4	4.6–11.6
Leaf length (cm)	18.7 ± 2.2	12.7–24.0	15.7 ± 2.6	8.6–21.2
Leaf width (cm)	8.0 ± 0.9	5.4–10.4	6.5 ± 1.1	3.0–8.8
SPAD value	36.6 ± 3.3	25.2–44.2	26.2 ± 3.1	20.4–33.6
LSP (cm^2)	118.7 ± 26.0	53.9–192.0	82.1 ± 24.7	20.3–146.9
SLAP (cm^2)	165.9 ± 78.6	53.9–563.6	99.9 ± 34.8	35.1–177.8
Root fresh weight (g $plant^{-1}$)	134.0 ± 35.2	58.7–251.1	78.5 ± 30.7	19.3–155.8

Values are line means; n = 86 (2022) and 57 (2023) lines. SD, standard deviation among line means; LSP, leaflet size proxy; SLAP, stem-weighted leaf area proxy.

Table 2. Correlation coefficients (*r*) between aerial growth traits and root fresh weight of six-year-old ginseng lines in 2022 and 2023.

Trait	2022 (n = 86)	2023 (n = 57)
Number of stems	0.471^{**}	0.139^{ns}
Stem length	0.187^{ns}	0.393^{**}
Stem diameter	0.519^{**}	0.625^{**}
Petiole length	0.502^{**}	0.442^{**}
Leaf length	0.533^{**}	0.603^{**}
Leaf width	0.641^{**}	0.648^{**}
SPAD value	-0.191^{ns}	0.418^{**}

n, number of lines (line means were analyzed). ** Significant at $p < 0.01$; ns, not significant.

경장은 2022년에는 유의하지 않았으나 ($r = 0.187$) 2023년에는 유의한 양의 상관을 나타냈다 ($r = 0.393$, $p < 0.01$). SPAD 값 역시 2022년에는 유의한 상관이 없었으나 ($r = -0.191$), 2023년에는 유의한 양의 상관을 나타냈다 ($r = 0.418$, $p < 0.01$).

엽병장은 두 연도 모두 근중과 유의한 상관관계를 나타냈으나, 엽장 및 엽폭에 비해 상관 정도가 낮았으며 엽장과도 비교적 높은 상관관계를 나타냈다 ($r = 0.631 – 0.739$). 또한 엽장과 엽폭 간 상관계수는 두 연도에서 모두 높게 나타나 ($r = 0.822 – 0.839$), 두 형질이 상당 부분 중복된 정보를 포함하는 것으로 판단되었다. 따라서 엽장과 엽폭을 회귀모형에 동시에 독립변수로 투입할 경우 다중공선성에 의해 각 회귀계수의 안정성이 저하될 가능성이 있었다.

본 연구에서 확인된 경직경과 평균 개체 근중 간의 양의 상관관계는 인삼 품종 및 육성계통에서 두 형질 간의 관련성을 보고한 Bang *et al.* (2012)의 결과와 전반적으로 일치하였다. 반면 Kim *et al.* (2023)은 소엽 횡단면 형태와 단풍색 등 지상부의 질적 형질과 근중 간의 관계를 분석한 연구로, 본 연구에서 다룬 엽장, 엽폭 및 경직경과 같은 양적 형질과 근중 간의 관계를 직접적으로 뒷받침하는 근거와는 구분할 필요가 있다.

Lee *et al.* (2025)은 평창, 서산 및 거창에서 조사한 2, 5 및 8년생 산양삼 자료를 통합하여 분석한 결과, 뿌리 생중량과 줄기 근원경 및 줄기 길이 간에 양의 상관관계 ($r = 0.79$)를 보고하였다. 이는 지상부 생육 형질이 지하부 생장과 관련될 가능성을 보여준다는 점에서 본 연구 결과와 유사한 경향을 나타낸다. 다만 해당 연구는 서로 다른 재배지와 연생의 자료를 통합하여 분석하였으므로, 동일 연생 내 육성계통 간 차이를 이용한 본 연구와는 자료 구조가 다르다. 따라서 그 결과를 어린 연생의 지상부 형질을 이용한 수확기 근중의 직접적인 예측 근거로 해석하기에는 한계가 있다.

2. 다중공선성 진단 및 엽면적 대리지표 도입

근중 예측 후보 형질에 대한 분산팽창요인 (VIF)과 허용도 (Tol.)를 분석한 결과 (Table 3), 경수 (VIF = 1.132)와 SPAD 값 (VIF = 1.196)은 낮은 VIF를 나타냈으며, 경직경 (VIF = 2.512, Tol. = 0.398)도 상대적으로 낮은 수준이었다. 반면 엽장 (VIF = 4.677, Tol. = 0.214)과 엽폭 (VIF = 3.525, Tol. = 0.284)은 다른 형질에 비해 상대적으로 높은 VIF와 낮은 허용도를 나타냈다. 이는 엽장과 엽폭이 상당 부분 중복된 정보를 포함하고 있어, 두 형질을 회귀모형에 동시에 투입할 경우 회귀계수의 안정성이 저하될 가능성이 있음을 시사한다.

이에 엽장과 엽폭을 개별 독립변수로 사용하는 대신 두 형질을 하나의 소엽 크기 대리지표 (LSP)로 통합하여 변수 수를 줄이고 모형의 해석을 단순화하였다. 다만 이러한 통합 자체가 다중공선성을 해소하는 것을 의미하지는 않으므로, 최종 모

Table 3. Variance inflation factor (VIF) and tolerance (Tol.) of aerial growth traits standardized within year and pooled across 2022–2023.

Trait	VIF	Tol.
Number of stems	1.132	0.884
Stem length	1.638	0.610
Stem diameter	2.512	0.398
Petiole length	2.027	0.493
Leaf length	4.677	0.214
Leaf width	3.525	0.284
SPAD value	1.196	0.836

n = 143 line–year observations. Tol., tolerance (1/VIF).

형에 포함된 독립변수 간의 중복성은 별도로 평가하였다.

3. 엽면적 대리지표와 근중 간의 관계

LSP와 근중 간의 상관계수는 2022년 0.613, 2023년 0.649였으며, SLAP와 근중 간의 상관계수는 각각 0.718과 0.713으로 두 연도 모두 SLAP에서 수치상 높은 값을 나타냈다 (Table 4). 그러나 LSP와 SLAP가 동일한 근중 변수와 갖는 상관계수를 종속 상관계수 비교 검정으로 분석한 결과, 두 지표 간 차이는 통계적으로 유의하지 않았다 (2022년 $p = 0.19$, 2023년 $p = 0.40$). 따라서 단순 상관관계만으로 SLAP가 LSP보다 근중과 더 밀접한 관련성을 갖는다고 단정하기는 어려웠다.

이에 SLAP의 채택 여부는 단일 상관계수의 크기가 아니라 경직경과 결합하였을 때의 예측성과 연도 간 일관성을 기준으로 판단하였으며, 그 비교 결과는 다음 항의 교차검증에서 제시하였다.

경직경과 SLAP를 포함한 기본모형에 다른 후보 형질을 각각 추가하여 설명력의 증가 여부를 검토한 결과, 엽병장 ($\Delta R^2 \leq 0.003$)과 경장 ($\Delta R^2 \leq 0.004$)은 두 연도 모두 추가적인 설명력이 거의 없었다. SPAD 값은 2023년에만 유의하였고 ($p = 0.04$), 엽폭은 2022년에만 유의하여 ($p = 0.005$) 연도 간 일관성이 확인되지 않았다 (Table 5). 이에 따라 이들 형질은 최종 모형에서 제외하였다.

Table 4. Correlation coefficients (*r*) of root fresh weight with the leaflet size proxy (LSP) and the stem-weighted leaf area proxy (SLAP).

Year	n	*r* (LSP)	*r* (SLAP)	*p* for difference
2022	86	0.613**	0.718**	0.19
2023	57	0.649**	0.713**	0.40

n, number of lines. *p* for difference, Meng–Rosenthal–Rubin test for dependent correlations (*r* between LSP and SLAP: 0.311 in 2022 and 0.660 in 2023). **Significant at $p < 0.01$

Table 5. Additional explanatory power of candidate traits added to the model with stem diameter and SLAP.

Added trait	2022 (n = 86)		2023 (n = 57)	
	β	ΔR^2	β	ΔR^2
Petiole length	0.082^{ns}	0.003	0.042^{ns}	0.001
Stem length	−0.033^{ns}	0.001	−0.085^{ns}	0.004
SPAD value	0.000^{ns}	0.000	0.190*	0.029
Leaf width	0.244**	0.027	0.106^{ns}	0.005

4. 다중회귀분석 및 선발지수 산출

경직경과 SLAP를 독립변수로 하는 표준화 다중회귀분석 결과 (Table 6), 두 연도 모두 경직경과 SLAP의 회귀계수는 95% 신뢰구간이 0을 포함하지 않았으며, SLAP의 표준화 회귀계수가 경직경보다 크게 나타났다. 2022년에는 경직경의 표준화 회귀계수가 β = 0.441 (95% 신뢰구간, 0.323–0.560), SLAP가 β = 0.667 (0.549–0.786)로 정규화 가중치는 39.8 : 60.2였으며, 모형의 설명력은 $R^2 = 0.708$ (Adj. $R^2 = 0.701$)이었다. 2023년에는 경직경이 β = 0.374 (0.183–0.565), SLAP가 β = 0.539 (0.348 – 0.729)로 정규화 가중치는 41.0 : 59.0이었으며, $R^2 = 0.618$ (Adj. $R^2 = 0.604$)이었다. 최종 모형에서 경직경과 SLAP의 VIF는 2022년 1.014, 2023년 1.278로 낮았으며, 두 변수 간 상관계수도 각각 $r = 0.116$과 0.467이었다. 또한 연도 내 표준화 자료를 통합한 모형에서 연도와 각 독립변수 간 상호작용은 유의하지 않아 (경직경 $p = 0.53$, SLAP $p = 0.24$), 표준화 회귀계수가 두 연도에서 달랐다는 근거는 확인되지 않았다.

회귀모형의 진단 결과, 잔차의 정규성과 선형성은 두 연도 모두 통계적으로 기각되지 않았다 (Table 7). 2023년에는 Breusch-Pagan 검정에서 등분산성 가정이 기각되었으나 ($p = 0.017$), HC3 이분산성-강건 표준오차를 적용한 경우에도 경직경과 SLAP의 95% 신뢰구간은 모두 0을 포함하지 않았다. 영향력이 큰 관측치를 제외한 민감도 분석에서 정규화 가중치는 2022년 40.5 : 59.5, 2023년 49.7 : 50.3으로 나타났다. 2023년에 영향력이 가장 컸던 계통 (13-GW601, Cook's D = 0.81)은 경장 (7.0 cm)과 경직경 (3.8 mm)이 조사 계통 중 가장 작았으나 근중 (99.2 g)은 평균 이상이었으며, 실제 조사값으로 확인되어 분석에 포함하였다. 또한 0.5 : 0.5의 동일 가중치를 적용한 경우에도 지수와 근중 간 상관은 2022년 $r = 0.828$, 2023년 $r = 0.782$였으며, 0.4 : 0.6 지수와의 계통 순위상관은 두 연도 모두 0.973 이상으로 높게 유지되었다. 이러한 결과는 두 형질의 세부 가중치 변화에 따라 계통의 상대적 평가가 크게 달라지지 않음을 보여준다.

이에 전체 자료에서 두 연도에 공통적으로 나타난 정규화 가중치 약 40 : 60을 현장 적용이 용이하도록 단순화하여 최종 선발지수를 구성하였다. 본 지수는 지상부 형질을 이용하여 표현형 근중과의 관계를 설명하고 선발에 활용하기 위한 경험적 지수로, 유전적 개량량이나 육종가 (breeding value)를 직접 추정하는 지수는 아니다.

Table 6. Standardized multiple regression of root fresh weight on stem diameter and the stem-weighted leaf area proxy (SLAP) in 2022 and 2023.

Year (n)	Predictor	β	95% CI	95% CI (HC3)	Normalized weight (%)	R^2 (Adj. R^2)
2022 (86)	Stem diameter	0.441	0.323–0.560	0.308–0.574	39.8	0.708 (0.701)
	SLAP	0.667	0.549–0.786	0.550–0.785	60.2	
2023 (57)	Stem diameter	0.374	0.183–0.565	0.049–0.699	41.0	0.618 (0.604)
	SLAP	0.539	0.348–0.729	0.214–0.863	59.0	

n, number of lines. β, standardized regression coefficient (standard error: 0.060 for both predictors in 2022 and 0.095 in 2023); CI, confidence interval; HC3, heteroscedasticity-consistent standard error; normalized weight, each β divided by the sum of the two β (an empirical weight, not a partition of explained variance). VIF between predictors: 1.014 (2022) and 1.278 (2023).

Table 7. Residual diagnostics and sensitivity of the regression of root fresh weight on stem diameter and SLAP.

Diagnostic	2022	2023
Normality (Shapiro-Wilk *p*)	0.20	0.23
Homoscedasticity (Breusch-Pagan *p*)	0.051	0.017
Linearity (quadratic-term F test *p*)	0.92	0.24
Lines with Cook's D > 4/n	4 (max 0.19)	3 (max 0.81)
Normalized weight without those lines (%)	40.5 : 59.5	49.7 : 50.3
r of index with weights 0.5 : 0.5	0.828	0.782
Rank correlation, 0.4 : 0.6 vs. 0.5 : 0.5	0.973	0.994
Lines analyzed without the seven common lines	79	50
Normalized weight without common lines (%)	41.5 : 58.5	42.2 : 57.8
Cross-year r without common lines	0.866 (2023 weights)	0.781 (2022 weights)

n, number of line means (86 in 2022 and 57 in 2023, unless lines were excluded as indicated). Normalized weights are for stem diameter : SLAP. The seven lines sharing names between years (11-4Y004, 11-6B012, 12-6C102, 12-6S009, 12-6S022, 12-6S105, 12-6S122) were excluded in the last three rows.

경직경과 SLAP가 근중과 각각 독립적인 관련성을 나타낸 것은 두 형질이 지상부 생육의 서로 다른 측면을 반영하기 때문으로 해석된다. 최종 모형에서 두 변수 간 상관은 낮았으므로 ($r = 0.116$ 및 0.467), 경직경은 줄기의 굵기로 나타나는 개체의 생육 세력을, SLAP는 소엽 크기와 경수로 나타나는 엽량의 규모를 주로 반영한 것으로 볼 수 있다. 인삼에서 뿌리는 지상부에서 생산된 동화산물이 해마다 축적되는 저장기관이므로, 엽량이 클수록 근중이 커지는 관계가 나타날 수 있다. 다만 본 연구에서는 광합성량이나 동화산물의 분배를 측정하지 않았으므로 이러한 해석은 가설 수준이며, 실측 엽면적 및 광합성 특성과 근 생장의 관계를 함께 조사하여 확인할 필요가 있다.

또한 본 지수는 유전분산·공분산 대신 표현형 근중에 대한 표준화 회귀계수로 가중치를 정하였다는 점에서, 유전모수를 추정하지 않고 미리 정한 가중치를 지수 계수로 사용하는 기본지수 (base index)와 성격이 유사하다 (Cerón-Rojas and Crossa, 2022; Rahimi and Debnath, 2023). 다만 기본지수는 육종목표 형질의 경제적 가중치를 지수 계수로 사용하여 유전적 개량을 목적으로 하는 지수인 반면, 본 지수의 가중치는 표현형 근중에 대한 회귀계수를 단순화한 경험적 값이므로 두 지수를 같은 것으로 볼 수는 없다. 따라서 본 지수는 표현형 수준에서 근중과 관련된 계통 간 차이를 비교하기 위한 도구로 해석하여야 하며, 이 지수에 따른 선발의 유전적 개량 효과는 유전모수를 추정할 수 있는 반복 시험을 통해 별도로 검증할 필요가 있다.

가중치 산출에 사용한 자료에서 선발지수와 표준화 근중 간의 상관계수는 2022년 $r = 0.842$ ($R^2 = 0.708$), 2023년 $r = 0.786$ ($R^2 = 0.618$)이었다. (Fig. 1; $p < 0.001$). 다만 이 결과는 선발지수의 가중치를 산출한 동일 자료에서 얻은 모형 적합도를 나타내므로, 독립적인 예측성 검증 결과로 해석하지 않았다.

가중치의 연도 간 안정성을 평가하기 위해 한 연도에서 추정한 회귀 가중치를 고정하여 다른 연도에 적용하였다. 2023년 가중치를 2022년 자료에 적용하였을 때 지수와 근중 간 상관은 $r = 0.841$ (Spearman's $\rho = 0.752$)이었으며, 2022년 가중치를 2023년 자료에 적용하였을 때는 $r = 0.786$ ($\rho = 0.762$)이었다 (Fig. 2). 또한 두 연도에 공통으로 포함된 7계통을 제외한 민감도 분석에서도 정규화 가중치는 2022년 41.5 : 58.5, 2023년 42.2 : 57.8이었으며, 연도 간 적용 시 상관계수도 각각 0.866과 0.781로 유사하게 유지되었다 (Table 7). 따라서 연도 간 공통 계통의 포함이 가중치 산출과 연도 간 적

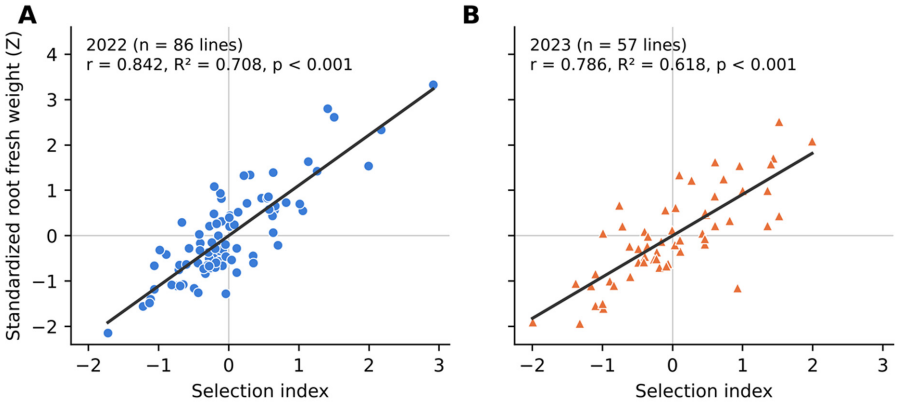


Fig. 1. Relationship between the selection index [0.4·Z (stem diameter) + 0.6·Z (SLAP)] and standardized root fresh weight in the data used to derive the index weights. (A) 2022 (n = 86 lines); (B) 2023 (n = 57 lines). Solid lines indicate fitted linear regressions. SLAP, stem-weighted leaf area proxy.

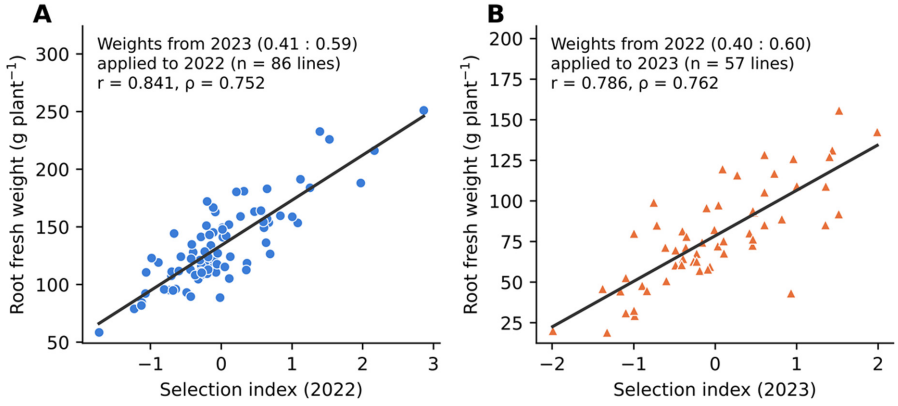


Fig. 2. Cross-year application of the index weights. (A) Weights derived from 2023 data applied to 2022 lines; (B) weights derived from 2022 data applied to 2023 lines. Solid lines indicate fitted linear regressions; ρ, Spearman's rank correlation coefficient. Z-scores were calculated within the year to which the weights were applied.

용 결과에 미친 영향은 크지 않은 것으로 판단되었다. 다만 두 연도의 가중치가 거의 같고 Z-score를 적용 연도 내에서 산출하였으므로, 이 결과는 가중치의 연도 간 유사성을 보여주는 것이며 독립적인 예측성 검증에 해당하지는 않는다.

계통 단위 내부 교차검증 결과 (Table 8), 경직경과 SLAP를 결합한 모형의 예측 상관은 2022년 0.825, 2023년 0.737이었으며, RMSE는 각각 19.8 및 20.7 g이었다. 이는 Table 8에서 평가한 단일 형질 모형 (r = 0.480–0.702 및 0.562–0.675)과 경직경 + LSP 모형 (r = 0.582 및 0.624)에 비해 두 연도 모두 높은 예측 상관과 낮은 RMSE를 나타냈다. 경직경, 엽장, 엽폭 및 경수를 모두 포함한 4개 형질 모형은 2022년에는 경직경 + SLAP 모형과 거의 동일한 예측성능을 나타냈으나 (r = 0.829 vs. 0.825; RMSE = 19.6 vs. 19.8 g), 2023년에는 경직경+SLAP 모형보다 예측 상관이 낮고 RMSE가 높았다 (r = 0.712 vs. 0.737; RMSE = 21.6 vs. 20.7 g). 따라서 예측성의 연도 간 일관성, 변수 수 및 현장 측정의 간편성을 종합적으로 고려하여 경직경과 SLAP의 두 형질 조합을 최종 선발지수에 적용하였다.

다만 본 연구에서 비교한 변수 조합은 2022년과 2023년 전체 자료의 상관관계와 회귀분석 결과를 검토한 후 설정하였고, SLAP의 채택 여부도 교차검증 결과를 참고하여 판단하였다. 따라서 교차검증에서 얻은 예측성능은 변수 선정 과정의 불확실성을 반영하지 못하며 다소 낙관적으로 추정되었을 가능성이 있다. 연도 간 가중치 적용과 내부 교차검증 결과는 선정된 변수 조합과 가중치의 안정성 및 후보모형 간 상대적 예측성을 보여주는 근거로 해석하였으며, 독립된 자료를 이용한 외부 검증 (external validation)은 향후 과제로 남아 있다.

5. 선발지수의 예비 적용 결과

재료 및 방법 4에서 제시한 절차에 따라 2025년 4년생 자

Table 8. Predictive performance of selected single-trait and combined models for root fresh weight in line-level internal cross-validation.

Model	2022 (n = 86)		2023 (n = 57)	
	r	RMSE (g)	*r*	RMSE (g)
Stem diameter	0.480	30.7	0.562	25.3
Leaf width	0.619	27.5	0.617	24.0
LSP	0.588	28.3	0.618	24.0
SLAP	0.702	24.9	0.675	22.5
Stem diameter + LSP	0.582	28.5	0.624	24.0
Stem diameter + SLAP	0.825	19.8	0.737	20.7
Stem diameter + leaf length + leaf width + number of stems	0.829	19.6	0.712	21.6

Values are means of 50 repetitions of five-fold cross-validation within each year (n = 86 and 57 lines). Standardization and coefficient estimation were performed within training folds only; the candidate models were fixed before cross-validation on the basis of exploratory analysis of the full data. Predictions were back-transformed to g plant^{-1} using the training-fold mean and standard deviation. *r*, Pearson's correlation between out-of-fold predicted and observed values; RMSE, root mean square error. Standard deviations of r across the 50 repetitions ranged from 0.006 to 0.022; those of RMSE ranged from 0.3 to 0.8 g plant^{-1}.

체 육성 37계통에 선발지수를 예비 적용한 결과 (Table 9), 유망 후보 계통 3계통 (21-G030, 21-G008 및 21-G021), 유지 계통 16계통, 조기 도태 후보 계통 18계통으로 분류되었다. 즉 3계통은 선발지수가 대조품종 금풍보다 높았고, 16계통은 평가집단 평균 이상이었으나 금풍에는 미치지 못하였으며, 18계통은 평가집단 평균에 미치지 못하였다. 계통별 선발지수, 순위 및 분류 결과는 Table 9에 제시하였다.

4년생 자료에서 SLAP를 이용하여 다시 산출한 선발지수는 PLAP 기반 지수와 높은 순위상관을 나타냈다 (37계통, Spearman's ρ = 0.950). PLAP 기반 지수에서 설정한 절단값 (1.3 및 0)을 그대로 적용하였을 때 37계통 중 33계통 (89%)의 분류가 일치하였다 (Table 9). 분류가 달라진 4계통 중 3계통 (21AC04, 21-G014, 18-S018)은 유지와 조기 도태 후보의 경계에서, 1계통 (21-G021)은 유망 후보와 유지의 경계에서 달라졌으며, 21-G021의 선발지수는 PLAP 기반 1.37에서 SLAP 기반 0.97로 낮아졌다. 한편 SLAP로 산출한 금풍의 선발지수는 0.92로 PLAP 기반 값 (1.30)보다 낮았다.

이와 같이 전체 계통 수준에서는 두 지표에 따른 순위와 분류의 일치도가 높았으나, 상위 선발군에서는 유망 후보 3계통 중 1계통의 분류가 달라졌다. 본 지수의 엽면적 대리지표는 소엽 크기에 개체의 복엽 수를 반영하도록 의도한 것으로, 6년생 조사에서는 엽병수를 조사하지 않아 경수를 복엽 수의 대리값으로 사용하였다. 다만 동일한 경수에서도 줄기당 엽병수가 달라질 수 있으므로, 경수만으로는 개체 간 복엽 수의 차이를 충분히 반영하기 어렵다. 특히 4년생은 대부분 단경이어서 경수로는 계통 간 엽량 차이를 구분하기 어려웠고 SLAP가 사실상 소엽 크기만을 반영하였으므로, 복엽 수를 직접 나타내는 엽병수를 적용하였다. PLAP는 엽병수의 차이를 함께 반영하므로 엽병수가 많은 평가재료일수록 두 지수의 차이가 커진다. 따라서 PLAP로의 대체는 전체적인 계통 순위에는 큰 영향을 주지 않았으나 상위 선발 계통의 구성에는 영향을 줄 수 있다. 또한 선발지수의 가중치는 6년생 자료의 SLAP를 이용하여 산출하였으므로, PLAP를 대입한 지수는 같은 계열의 대리지표를 사용한 변형 지수로 보아야 하며 두 지수가 동등하다는 것은 검증되지 않았다. 엽병수는 경수보다 개체의 복엽 수를 직접 반영하는 형질이므로 엽량의 대리지표로서 더 적합할 가능성이 있으나, 이를 뒷받침할 6년생 자료는 아직 없다. 따라서 향후 6년생 조사에 엽병수를 포함하여 SLAP와 PLAP 기반 지수의 근중 관련성을 직접 비교하고, PLAP에 맞는 가중치를 별도로 추정하며, 엽병수를 이용한 지표와 실제 엽면적 간의 관계를 검증하는 것을 후속 과제로 남긴다.

본 적용 결과는 4년생 시점의 지상부 형질을 이용한 선발지수 기반의 예비 분류이며, 해당 37계통의 6년생 최종 근중 추적조사가 아직 완료되지 않았으므로 조기 선발의 정확도나 효과가 검증된 결과는 아니다.

본 연구에서 제시한 선발지수는 재배기간이 길고 최종 근중 평가까지 장기간이 소요되는 인삼에서, 육종 초기 단계의 많은 계통을 경직경과 엽면적 대리지표의 두 형질로 비교하여 6년생까지 유지할 계통의 우선순위를 정하는 데 활용할 수 있다. 본 평가집단에서는 37계통 중 18계통이 평가집단 평균에 미치지 못한 조기 도태 후보로 분류되었다. 추적조사에서 분류 기준의 타당성이 확인되면 이러한 분류를 이후 평가 대상 계통의 우선순위 결정에 이용할 수 있을 것이나, 이에 따른 포장 면적, 조사 노력 및 연구 자원의 절감 효과는 본 연구에서 측정하지 않았다. 본 지수는 근중과 관련된 상대적 생육 수준만을 평가하며, 조사 대상도 정상 생육 개체로 한정하였다. 따라서 실제 계통의 유지 또는 도태 결정에서는 병해, 생존율, 근형 및 기타 육종목표 형질과 함께 종합적으로 활용할 필요가 있다.

본 연구는 단일 시험포장의 2개 연도 자료를 기반으로 하였

Table 9. Selection index, rank and classification of the 39 four-year-old entries evaluated in 2025.

Rank	Line	Stem diameter (mm)	PLAP (cm^2)	Z (stem diameter)	Z (PLAP)	SI	Class	SI (SLAP)
1	21-G030	6.27	551.8	0.77	2.56	1.84	Promising candidate	1.98
2	21-G008	6.68	459.2	1.24	1.52	1.41	Promising candidate	1.44
3	21-G021	6.72	450.1	1.29	1.42	1.37	Promising candidate	0.97
4	17-S004	7.11	371.6	1.73	0.54	1.02	Retained	0.92
5	21-G028	7.04	368.4	1.65	0.51	0.96	Retained	0.62
6	21-G029	5.38	454.3	−0.23	1.47	0.79	Retained	0.92
7	21-G023	6.64	366.4	1.20	0.48	0.77	Retained	0.59
8	18-AC03-1	4.73	468.8	−0.97	1.63	0.59	Retained	0.33
9	21AC05	6.91	314.0	1.50	−0.10	0.54	Retained	0.11
10	21-G027	7.19	292.5	1.82	−0.34	0.52	Retained	0.67
11	21-G017	5.12	429.8	−0.53	1.19	0.50	Retained	0.58
12	21AC03	6.70	314.3	1.26	−0.10	0.44	Retained	0.27
13	21-G007	6.39	330.5	0.91	0.08	0.41	Retained	0.60
14	17-S007	6.29	320.4	0.80	−0.03	0.30	Retained	0.12
15	21AC04	6.54	300.4	1.08	−0.26	0.28	Retained	−0.02
16	21-G034	5.85	335.1	0.30	0.13	0.20	Retained	0.39
17	21-G009	4.77	400.9	−0.93	0.87	0.15	Retained	0.12
18	21-G024	5.23	362.3	−0.40	0.44	0.10	Retained	0.31
19	15-G020	4.26	421.5	−1.51	1.10	0.05	Retained	0.32
20	21-G014	5.22	326.2	−0.42	0.03	−0.15	Early elimination candidate	0.03
21	21-G016	5.63	294.1	0.05	−0.33	−0.18	Early elimination candidate	−0.35
22	18-S018	5.15	323.8	−0.50	0.01	−0.20	Early elimination candidate	0.15
23	17-S020	4.88	329.7	−0.80	0.07	−0.28	Early elimination candidate	−0.37
24	17-S025	5.29	281.8	−0.33	−0.46	−0.41	Early elimination candidate	−0.44
25	21-G018	5.19	280.2	−0.46	−0.48	−0.47	Early elimination candidate	−0.33
26	16-G016	4.90	288.0	−0.78	−0.39	−0.55	Early elimination candidate	−0.20
27	15-6S032	5.16	268.7	−0.49	−0.61	−0.56	Early elimination candidate	−0.30
28	12-6S122	5.14	259.0	−0.51	−0.72	−0.63	Early elimination candidate	−0.52
29	21-G013	5.09	246.4	−0.57	−0.86	−0.74	Early elimination candidate	−0.91
30	16-4S016-5	5.00	244.0	−0.66	−0.89	−0.80	Early elimination candidate	−0.53
31	18-S010	5.07	233.2	−0.59	−1.01	−0.84	Early elimination candidate	−0.75
32	16-G010	5.07	223.7	−0.59	−1.11	−0.90	Early elimination candidate	−0.95
33	17-S042	5.21	210.4	−0.43	−1.26	−0.93	Early elimination candidate	−0.86
34	21-G012	4.71	230.5	−0.99	−1.04	−1.02	Early elimination candidate	−0.93
35	21-G005	5.22	183.2	−0.42	−1.57	−1.11	Early elimination candidate	−1.06
36	15-G007	4.53	229.1	−1.20	−1.05	−1.11	Early elimination candidate	−1.27
37	16-4S016-7	4.08	141.6	−1.72	−2.03	−1.91	Early elimination candidate	−1.80
–	Geumpung (check)	6.80	434.7	1.38	1.25	1.30	–	0.92
–	Gangwon 2	4.74	265.5	−0.96	−0.65	−0.77	–	−0.77

Values are means of nine plants per entry. PLAP, petiole-weighted leaf area proxy [$(\pi/4) \times$ leaf length $\times$ leaf width $\times$ number of petioles, calculated from entry means]; SI, selection index = 0.4·Z (stem diameter) + 0.6·Z (PLAP), with Z calculated among the 39 entries listed (37 in-house breeding lines, the check cultivar Geumpung and Gangwon 2, a line under regional adaptation trials). Class: promising candidate, SI ≥ 1.3 (SI of Geumpung; 3 lines); retained, 0 ≤ SI < 1.3 (16 lines); early elimination candidate, SI < 0, below the mean of the evaluation set (18 lines). The classes are exploratory and are not final selection or culling decisions; six-year-old root weight of these lines has not yet been evaluated. SI (SLAP), index recalculated with the stem-weighted leaf area proxy (Z among the same 39 entries) as a sensitivity analysis; with SLAP the SI of Geumpung is 0.92, so applying the cutoff 1.3 to SI (SLAP) is a fixed-cutoff comparison. Spearman's rank correlation between SI and SI (SLAP) among the 37 lines = 0.950. Geumpung and Gangwon 2 were included in the standardization but excluded from ranking and classification.

고, 계통별 독립적인 포장 반복 없이 계통번호 순으로 시험구를 배치하였으므로, 관찰된 계통 간 차이에는 포장 위치에 따른 환경변이가 포함되었을 가능성이 있다. 따라서 본 연구에서 확인된 관계는 유전적 효과를 분리하여 추정한 결과가 아니라 표현형 수준의 관계이며, 지수에 따른 선발의 유전적 효과는 반복을 포함한 다환경 시험과 후대평가를 통해 검증할 필요가 있다. 무엇보다 지수의 가중치는 철원 포장의 6년생에서 지상부 형질과 같은 해 근중의 관계로부터 얻은 것으로, 재배지가 다른 춘천 포장의 4년생에 적용하였으며, 4년생의 지상부 형질이 같은 계통의 6년생 근중을 예측하는지는 본 연구에서 검증하지 못하였다. 향후 2025년 평가 계통의 6년생 근중을 추적조사하여 4년생 선발지수와의 관계 및 유망 후보·유지·조기 도태 후보 분류 기준 (1.3 및 0)의 타당성을 검증할 필요가 있다. 요약하면, 본 연구는 비파괴적으로 조사할 수 있는 경직경과 SLAP의 두 형질로 6년생 계통의 근중 변이를 연도별로 61.8–70.8% 설명하는 경험적 선발지수를 구축하고, 이를 채종 전 단계인 4년생 37계통의 예비 분류에 적용하여 유망 후보 3계통, 유지 16계통 및 조기 도태 후보 18계통으로 구분하였다.

REFERENCES

Bang KH, Seo AY, Kim YC, Jo IH, Kim JU, Kim DH, Cha SW, Cho YG and Kim HS. (2012). Variations of agronomic characteristics of cultivars and breeding lines in Korean ginseng (*Panax ginseng* C. A. Mey.). Korean Journal of Medicinal Crop Science. 20:231-237.

Bang KH, Kim YC, Lee JW, Cho IH, Hong CE, Hyun DY and Kim JU. (2020). Major achievement and prospect of ginseng breeding in Korea. Korean Journal of Breeding Science. 52:170-178.

Cerón-Rojas JJ and Crossa J. (2022). The statistical theory of linear selection indices from phenotypic to genomic selection. Crop Science. 62:537-563.

Jang IB, Lee BK, Kim JU, Hwang HA, Cho HW, Ryu HJ and Chun CH. (2024). Thermophysiological responses of ginseng to abnormal season-long high temperature. Horticulture, Environment, and Biotechnology. 65:761-770.

Kim JU, Kim YC, Kim DH, Bang KH, Kwon NY, Jung SM, Lee SW, Lee JW and Kim KM. (2024). New Korean ginseng variety 'Jinwon' with high-yielding and high-temperature stress tolerance. Korean Journal of Medicinal Crop Science. 32:73-79.

Kim YC, Lee JW, Kwon NY, Jung SM, Bang KH, Kim DH and Kim JU. (2023). Correlation between qualitative characteristics of aerial parts and root yield in ginseng(*Panax ginseng* C.A. Meyer). Korean Journal of Medicinal Crop Science. 31: 57-64.

Lee D, Go B, Lee CB, Kim Y and Kang KS. (2025). Correlation between morphological characteristics of *Panax ginseng* and environmental factors at the major cultivation sites. Journal of Korean Society of Forest Science. 114:30-42.

Lee JC, Ahn SB and Choi CY. (1985). Estimating leaf area from length and width for *Panax ginseng*. Korean Journal of Crop Science. 30:15-19.

Meng XL, Rosenthal R and Rubin DB. (1992). Comparing correlated correlation coefficients. Psychological Bulletin. 111:172-175.

Olivoto T and Nardino M. (2021). MGIDI: Toward an effective multivariate selection in biological experiments. Bioinformatics. 37:1383-1389.

Olivoto T, Diel MI, Schmidt D and Lúcio AD. (2022). MGIDI: A powerful tool to analyze plant multivariate data. Plant Methods. 18:121. https://doi.org/10.1186/s13007-022-00952-5 (cited by 2026 October 14).

Rahimi M and Debnath S. (2023). Estimating optimum and base selection indices in plant and animal breeding programs by development new and simple SAS and R codes. Scientific Reports. 13:18977. https://doi.org/10.1038/s41598-023-46368-6 (cited by 2026 October 14).

Rural Development Administration(RDA). (2012). Research criteria for agricultural science and technology. Rural Development Administration. Suwon, Korea. p.759-770.