

정규 토양효소 지수를 이용한 송이산 관리 필요성 진단

박 현¹ · 홍순천¹ · 권유진¹ · 허태철² · 강규석¹ · 배은경^{1,3*}

¹서울대학교 농림생물자원학부, ²한국산지보전협회 산림생태복원센터, ³국립산림과학원 산림미생물이용연구과

Necessity Assessment for Pine Mushroom (*Tricholoma matsutake*) Habitat Management Using the Normalized Difference Soil Enzyme Index

Hyun Park¹, Suncheon Hong¹, Yoojin Kweon¹, Taechul Hur²,
Kyu-Suk Kang¹ and Eun-Kyung Bae^{1,3*}

¹Department of Agriculture, Forestry & Bioresources, Seoul National University, Seoul 08826, Korea

²Forest Ecology & Restoration Center, Korea Forest Conservation Association, Daejeon 34611, Korea

³Forest Microbiology & Application Division, National Institute of Forest Science, Suwon 16631, Korea

요약: 우리나라에서 송이 생산성이 가장 높은 시기는 4영급~6영급으로 알려져 있다. 그런데 우리나라 숲의 평균 임령은 5영급에 이르러 송이 생산성은 줄어들 수밖에 없는 시점이다. 산림청의 「송이산 가꾸기사업 실시요령」에서는 55년생을 초과하는 숲은 송이산 가꾸기 대상지에 포함하지 않는데, 이는 6영급 이상의 노령림을 송이 발생림으로 유지하기 위한 사업은 효과성이 낮다고 추론하기 때문이다. 조만간 6영급 이상의 숲이 대부분을 차지하는 상황임을 감안할 때 기존 지침은 송이 생산성 증진을 포기하는 기준이라고 할 수 있다. 본 연구에서는 송이가 생산되는 노령림 관리를 위한 투자 여부를 결정하는 기준을 다시 검토하였다. 토양효소 동태를 지표로 송이 발생림이 송이 미발생림의 토양 여건과 비슷한 상황으로 전개되는 시점을 파악하였다. 송이는 균근성 버섯임을 고려하여, 균근 활성의 지표인 인산 가수분해효소와 유기물 분해의 지표인 탈수소효소의 조합을 통해 ‘정규 토양효소 지수(NDEI)’를 만들었다. 두 가지 토양효소의 활성 비교를 위한 측정 시기는 초여름이 적합한 것으로 판단되었다. 송이 균환부의 토양효소 분석을 통해 송이 생산성이 높은 곳은 NDEI가 0.75 이상을 유지하지만, 0.5에 이르면 쇠퇴하여 송이 생산성이 떨어지는 것으로 평가되었다. 송이 발생림 토양의 NDEI가 0.5 이하로 떨어지면 적극적으로 송이산 관리를 하는 것이 바람직한 것으로 추론되었다.

Abstract: In Korea, the period of highest pine-mushroom (*Tricholoma matsutake*) productivity is generally associated with forest age classes 4 to 6. However, because the national average forest age has now reached class 5, a decline in productivity is increasingly likely. According to the Korea Forest Service (KFS) Guidelines for the Management of Pine-Mushroom Forests, stands older than 55 years are excluded from management projects. This exclusion is based on the assumption that interventions in older forests (class 6 or higher) do not effectively sustain *T. matsutake* production. As forests beyond class 6 are expected to become predominant, the current guidelines risk abandoning the objective of maintaining or enhancing pine-mushroom yields. In this study, we evaluated criteria for determining whether management investments remain beneficial in aging pine-mushroom forests. Using soil enzyme dynamics as an indicator, we identified when soil conditions in productive stands begin to resemble those in non-productive stands. Because pine-mushroom is an ectomycorrhizal fungus, we developed a Normalized Difference Enzyme Index (NDEI) that integrates phosphatase activity (representing mycorrhizal functioning) and dehydrogenase activity (representing saprophytic processes). Early summer was identified as the optimal period for measuring these enzymes. Analyses of *T. matsutake* mycelial zones showed that highly productive areas consistently maintained an NDEI of 0.75 or higher, whereas an NDEI approaching 0.5 signaled declining production. When soil NDEI values in pine-mushroom forests fell below 0.5, proactive habitat management was considered necessary to sustain future productivity.

Key words: enzyme, maturity, mycorrhizae, normalized index, saprophyte

* Corresponding author
E-mail: baek@korea.kr

ORCID
Eun-Kyung Bae  <https://orcid.org/0000-0002-9169-716x>

서론

우리나라에서 송이(*Tricholoma matsutake*)는 3영급~8영급의 소나무림에서 주로 생산되며 생산성이 가장 높은 시기는 4영급~6영급으로 알려져 있다(Park et al., 2024). 그런데, 2020 임상별·영급별 산림면적 자료에 따르면, 우리나라 침엽수림의 43%가 4영급이며 39%가 5영급 이상이다(KFS, 2025). 이 통계자료는 5년 전을 기준으로 하고 있으므로, 현 시점에는 침엽수림의 대부분이 5영급 이상이라고 할 수 있다. 모든 침엽수림이 송이 발생림은 아니지만, 대부분의 침엽수림이 5영급 이상이라는 것은 우리나라 송이 생산량이 줄어들 수밖에 없음을 시사한다.

산림청의 「송이산 가꾸기사업 실시요령」에서는 55년생을 초과하는 숲은 송이산 가꾸기 사업 대상지로 부적합한 것으로 판정한다. 6영급 이상의 노령림을 송이 발생림으로 유지하기 위한 사업은 효과성이 낮다고 추론하기 때문이다. 하지만, 7영급 이상의 소나무림도 송이 균환이 여전히 발달하며 생산성이 유지될 수 있음을 감안할 때(Ka et al., 2002), 우리나라 숲의 대부분이 조만간 6영급 이상이 되는 시점에서 기존의 판단 기준이 타당한지 재검토가 요구된다.

숲이 성숙하면 송이와 같은 균근성 버섯이 줄어들고 부후균이 많아지는 현상을 고려할 때(Park et al., 1998), 송이 생산성 쇠퇴는 토양 미생물상 변화가 판단 기준이 될 수 있다. 그런데 토양 미생물상의 정량적 변화를 파악하기 위한 연구는 배양 과정이 필요하므로 토양 취급에서 주의를 요구하고 많은 시간을 요구한다. 반면, 미생물의 활동 결과에 따라 토양 내에 잔존하는 세포외효소 정량 방식은 상대적으로 용이하다. 토양의 성숙도나 오염물질에 의한 토양 미생물상 변화를 평가하기 위하여 토양효소 동태를 평가한 사례도 많이 있다(Jha et al., 1992; Lee and Kim, 1994; Lee et al., 1998; Park, 1998). 부후균의 활력은 유기물 분해과정에서 분비되는 탈수소효소(dehydrogenase)를 통해 정량하며, 균근 활력의 지표로는 인산 가수분해효소(phosphatase)의 활성을 사용할 수 있다(Hur and Park, 2001).

미숙한 산림토양에서는 균근균(mycorrhizal fungi)의 활성이 높지만, 유기물이 많은 성숙한 토양에서는 균근균의 활성이 낮아지고 부후균(saprophyte)의 활성이 높아진다. 균근균과 부후균은 숲의 서식지(habitat) 경쟁에서 길항관계에 있다고 할 수 있다(Hur and Park, 2001). 미생물의 활동 결과로 나타나는 토양 내 세포외효소(extracellular enzyme)도 이와 같은 결과를 반영한다(Burns, 1982). 성숙한 토양은 부후에 관계되는 탈수소효소(dehydrogenase)의 활성이 높게 나타나고 균근의 활력이 높은 곳에서는 인산 가수분해효소(phosphatase)의 활성이 높다. 송이도 균환 활성부에서 균환

이 없는 부위에 비해 인산 가수분해효소의 활성이 높게 나타나는 경향이 있었으므로(Hur and Park, 2001; Vaario et al., 2011) 인산 가수분해효소는 송이 발생림에서 송이의 활력을 나타내는 지표로 활용 가능하다고 할 수 있다.

탈수소효소는 전반적인 미생물의 활성을 측정하는 적절한 지표로 알려져 있는데(Lee and Kim, 1994; Lee et al., 1998), 유기물의 분해와 밀접한 관계가 있으며 토양의 비옥도를 반영하는 지표로 활용되기도 한다(García-Saucedo et al., 2024; Hur et al., 1998; Park, 1998). 특히, Hur and Park(2001)은 유기물 분해균이 많은 환경에서 송이균의 활력이 감소하는 경향을 관찰하여 탈수소효소 활성을 송이 쇠퇴의 지표로 활용될 수 있다고 추론하였다.

하지만, 식생구조를 비롯한 임분 특성에 따라 각 효소의 활성은 변이 폭이 매우 넓으므로 특정한 효소만으로 임분 성숙도를 평가하는 것은 무리이다. 이에 따라 기존 연구는 송이 생산성이 떨어지는 시점의 토양 효소 수치를 명확히 제시하지 못하였다. 계절이나 임분 특성에 따라 송이 발생지의 토양효소 활성 변이가 커서 정확한 기준을 제시하지 못하였다. 본 연구에서는 이러한 한계를 극복하는 방안을 모색하였는데, 정규 식생 지수(Normalized Difference Vegetation Index; NDVI)의 계산식을 모방하여 정규 토양효소 지수(Normalized Difference soil Enzyme Index; NDEI)를 생산, 적용을 시도하였다.

본 연구는 숲의 성숙과정에서 균근성 버섯인 송이의 활력이 잘 유지되는가에 대한 평가 기준을 토양효소 측면에서 검토하였다. 안정적인 식물 성장을 위해 영구 위조점(permanent wilting point)에 이르지 않도록 토양수분을 관리하는 것처럼, 토양유기물 관리를 통해 균근성 버섯이 부후균에 의해 멸절되는 사태를 막는 방안을 모색하였다. 우리나라 일반적인 산림토양의 토양효소와 송이 발생림의 토양효소 동태를 비교하고, 송이 발생림이 일반적인 산림토양 수준으로 변화하지 않도록 관리하는 기준을 설정하였다. 이를 통해 우리나라 송이 발생림의 관리 필요성을 평가하는 정밀 지침을 제시하고자 한다.

재료 및 방법

1. 송이 균환 부위별 토양효소 활성 분석

10년 이상 송이를 채취하여 송이 균근의 분포를 정확히 인지하고 있는 곳에서 송이 균환부 표토(2~10 cm)를 채취하여 풍건한 시료를 대상으로 탈수소효소와 인산 가수분해효소를 측정하였다. 시료를 채취한 곳은 강원도 홍천군 영귀미면 노천리 소재의 5영급 소나무림이었다.

송이 균환을 중심으로 균환 통과부, 자실체 발생부, 활성

균근부(선단부), 균환 전진 예정부로 구분하여 채취하였다. 채취한 토양 시료는 실험실로 이동하여 풍건한 후 2 mm 체를 통과한 시료만 비닐봉투에 담아 보관하며 사용하였다.

탈수소효소(dehydrogenase)는 2, 3, 5-triphenyl tetrazolium chloride(TTC)의 첨가에 의해 생성된 triphenyl formazan(TPF)를 측정하는 방법을 사용하였다(Hur and Park, 2001). 2 mm 토양 시료 10 g에 CaCO₃ 0.1 g을 혼합한 뒤, 혼합된 시료를 각각 3 g씩 칭량하여 각 토양 당 3회 반복으로 측정하였다. 시험관에 혼합 시료 3 g과 3% TTC 용액 0.5 ml, 증류수 1.25 ml를 첨가한 후, 파라핀 필름으로 밀봉하여 잘 섞었다. 이 혼합물을 37°C의 항온기에서 2시간 동안 배양한 후, 배양된 토양에 5 ml의 메탄올을 넣고 2~3분간 흔들어서 잘 섞은 다음 거름종이를 통해 걸러 추출액을 얻었다. 추출된 용액을 메스플라스크에 옮긴 후 메탄올을 첨가하여 총 부피가 50 ml가 되도록 조정하였다. 최종 추출액과 TPF 표준용액(농도 범위 0~100 µg/ml, 10 µg/ml 간격)을 함께 흡광도 측정기로 485 nm에서 흡광도를 측정하였다.

인산 가수분해효소(acid-phosphatase)는 p-nitrophenyl phosphate(p-NPP)를 기질로 사용하여, 효소의 작용에 의해 생성된 p-nitrophenol을 정량하는 방법으로 수행하였다(Hur and Park, 2001). 시험관에 2 mm 토양 시료 1 g과 톨루엔(toluene) 0.2 ml를 넣은 뒤, 1 ml의 0.025 M p-NPP 용액과 4 ml의 modified universal buffer(pH 6.5)를 첨가하여 파라핀 필름으로 밀봉했다. 혼합 시료를 37°C의 항온기에서 1시간 동안 배양한 후, 배양한 시료에 4 ml의 0.5 M NaOH와 1 ml의 0.5 M CaCl₂를 넣고 잘 섞은 후, 거름종이로 걸러 최종 추출액을 완성했다. 완성한 추출액과 p-nitrophenol 표준용액(농도 범위 0~100 µg/ml, 10 µg/ml 간격)을 함께 흡광도 측정기로 400 nm에서 흡광도를 측정하였다.

2. 균근 활력 평가를 위한 「정규 토양효소 지수」 개발

균근 활력 평가를 위해서는 인산 가수분해효소와 탈수소효소 활성 평가치를 조합하여 지수를 만들고 이를 비교하였다.

아래의 식처럼, 두 효소의 합을 분모로 두 효소의 차를 분자로 하여 정규 토양효소 지수(Normalized Difference soil Enzyme Index; NDEI)를 만들었다. 단, 각 효소의 활성을 평가하는 단위가 다르므로 이를 표준화하기 위하여 측정치를 측정 지표 물질의 분자량으로 나누어 몰(mol) 값으로 계산하였다. 탈수소효소 정량에 사용하는 triphenyl formazan(TPF)의 분자량은 300.36이며, p-nitrophenol의 분자량은 139.11이다.

$$\text{정규 토양효소 지수(NDEI)} = \frac{\text{인산 가수분해효소 활성 평가치} - \text{탈수소효소 활성 평가치}}{\text{인산 가수분해효소 활성 평가치} + \text{탈수소효소 활성 평가치}}$$

즉, 각 효소 활성을 측정한 값에 인산 가수분해효소는 139.11, 탈수소효소는 300.36으로 나누어 준 값을 각 효소의 활성 평가치로 환산하여 NDEI를 계산하였다. 균근의 활력이 훨씬 높은 범주와 상대적으로 높은 범위, 그리고 약간 높기는 하지만 엇비슷한 수준에 이르는 수준 등으로 구간을 나누었는데 그 의미와 예시는 Table 1에 표시된 바와 같다. 탈수소효소 지표의 분자량이 인산 가수분해효소 지표의 분자량 2.16배 수준이므로 인산 가수분해효소에 비하여 탈수소효소의 활성이 약 2배를 나타내는 경우가 몰 값으로 계산한 두 효소의 활성이 비슷한 상황으로 NDEI 값은 0에 근접하게 된다.

3. 토양 시료 채취 시기 및 송이 균환 부위별 각 효소 및 정규 토양효소 지수 검토

토양효소 지수 평가를 위한 시료 채취의 적정 시기를 파악하기 위하여 송이 발생 이전(초여름, 5월 말)과 송이 채취 후(늦가을, 10월 말)에 각각 토양 시료를 채취하였다. 매회 송이 균환 부위별로 5반복의 시료를 채취하였으며, 1항에서 설명한 방식으로 분석된 각 송이 균환 부위별 토양효소를 기준으로 계절별 송이 균환부 토양의 NDEI 값을 계산하였다.

Table 1. Categories of NDEI (normalized difference soil enzyme index) calculated from phosphatase activity (PA) and dehydrogenase activity (DHA)

Range	Feature	Example (PA : DHA)
NDEI = 1	No dehydrogenase activity	100 : 0
0.75 ≤ NDEI < 1	Much higher phosphatase activity	100 : 0~31
0.5 ≤ NDEI < 0.75	Higher phosphatase activity	100 : 31~72
0.25 ≤ NDEI < 0.5	A little higher phosphatase activity	100 : 72~130
0 ≤ NDEI < 0.25	A little higher dehydrogenase activity	100 : 130~215
-0.5 ≤ NDEI < 0	Higher dehydrogenase activity	100 : 215~650
NDEI < -0.5	Much higher dehydrogenase activity	100 : more than 650

4. 다른 논문의 결과를 활용한 정규 토양효소 지수 적용성 검토

본 연구를 위해 직접 분석한 결과와 더불어 Hur and Park(2001)이 송이 발생림의 균환 부위별 토양효소 분석한 결과를 계산하여 NDEI 값을 도출하며 비교하였다. 아울러, 송이가 발생하지 않는 일반적인 숲을 대상으로 토양효소를 측정할 사례도 검토하였는데, Lee et al.(1998)이 남산의 7~8영급의 소나무림과 3~4영급의 신갈나무림에서 조사한 결과와 Kang et al.(2009)이 점봉산의 5~6영급의 활엽수림에서 조사한 결과를 기준으로 NDEI 값을 계산, 분석하였다.

결과 및 고찰

1. 송이 균환 부위별 토양효소 비교

초여름(5월 말)에 채취한 토양시료의 탈수소효소 활성은 10 µg TPF/g soil에도 미치지 못하는 매우 낮은 값을 나타내었으며 송이 균환 부위 간에도 통계적으로 유의한 차이가 나타나지 않았다(Figure 1). 이 수치는 Lee et al.(1998)의 남산 숲에서 보여준 150 µg TPF/g soil을 초과하는 수치에 비하여 현저히 낮은 값이었다. 즉, 송이 발생림의 전반적인 탈수소효소 활성은 매우 낮은 편임을 시사한다.

반면, 인산 가수분해효소의 활성은 Lee et al.(1998)의 남산 숲에서 보여준 값에 비하여 훨씬 높게 나타났으며, 균환 전진 예정부가 균환 통과부나 자실체 발생부에 비하여 높게 나타났다. 인산 가수분해효소의 활성은 균근의 활력이 높은 곳에서 나타나므로 송이 균근의 특성을 고려할 때 활성 균근부나 균환 전진 예정부에서 상대적으로 높은 수치를 나타낸 것으로 판단된다.

늦가을(10월 말)에 채취한 토양의 탈수소효소 활성은 초여름의 수치와 비슷하였으나 활성 균근부(선단부)에서 특히 낮은 수치를 보였다(Figure 2). 선단부와 균환 통과부는 1% 유의수준, 선단부와 자실체 발생부는 5% 유의수준으로 차이를 나타내었다. 즉, 균환 선단부만 다른 곳에 비하여 낮은 수치를 보여서 균근이 활성화된 곳은 부후균과의 길항관계에 따라 상대적으로 부후균의 활력은 낮음을 추론할 수 있었다. 인산 가수분해효소는 선단부와 균환 전진 예정부가 균환 통과부나 자실체 발생부에 비하여 높은 값을 나타내었다. 즉, 균근이 활성화되어 있거나 균근이 전진하고 있는 부분은 균근이 지나간 곳에 비하여 인산 가수분해효소의 활성이 높음을 확인할 수 있었다.

한편, 늦가을에 채취한 시료는 초여름에 채취한 시료에 비하여 인산 가수분해효소의 활성이 낮게 나타난 점은 특기할 사

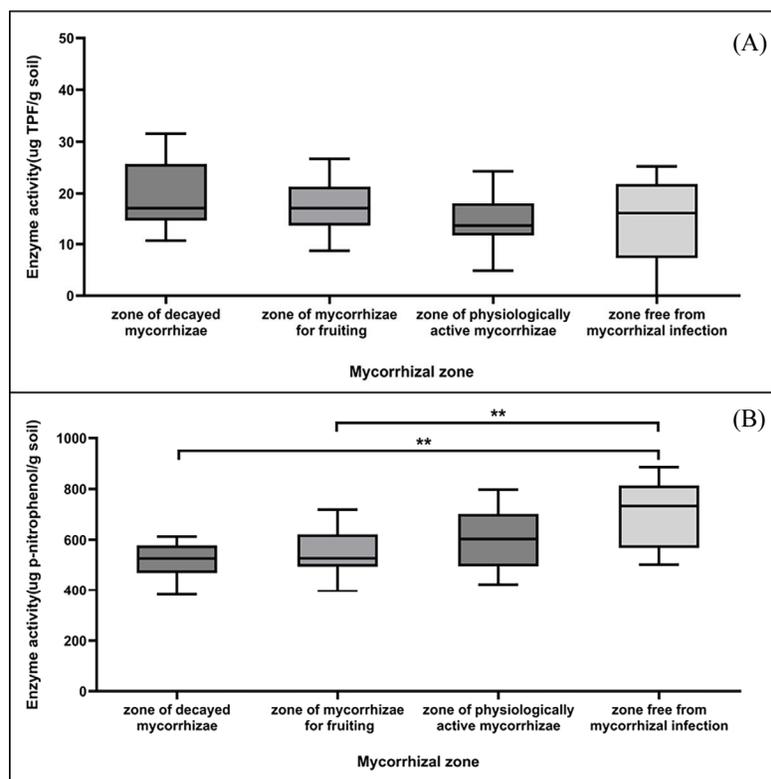


Figure 1. Dehydrogenase activity (A) and phosphatase activity (B) by mycorrhizal zone in early summer. ** indicates statistically significant differences between two observations at the 1% level.

항이었다. 1년 중 균근으로서 양분을 뿌리에게 공급하는 역할이 마무리되는 시점에 인산 가수분해효소의 활성이 낮아졌음을 시사하는 것으로 균근의 효소의 활성을 비교하려면 수치의 차이가 뚜렷하게 나타나는 시점이 더 유리하다는 점을 고려하고, 송이 수확기에 토양을 채취하는 것에 대한 송이 생산자의 부정적인 인식도 고려하면 늦가을보다는 초여름에 토양을 채취하여 비교하는 것이 바람직한 것으로 판단되었다.

2. 정규 토양효소 지수에 의한 균환 부위별 차이점 평가

송이 균환 부위별 NDEI 값을 계산한 결과는 모든 부위에서 계절과 상관없이 0.9를 넘는 값(0.91~0.98)을 나타내었다(Table 2). 이는 Table 1에서 구분한 NDEI 0.75를 넘는 모습으로서 인산 가수분해효소의 활성이 탈수소효소의 활성에 비하여 훨씬 높은 값을 나타낸 까닭이다. 본 연구 대상지는 송이 생산이 활발히 이루어지고 있는 숲이므로 특별한 송이산 관리가 필요하지 않은 상태라고 할 수 있었기에 NDEI는 0.75를 넘는 매우 높은 수치를 나타낸 것으로 평가되었다.

3. 다른 논문의 연구 결과를 포함한 정규 토양효소 지수 적용성 검토

Table 3에는 국내 다양한 숲에서 조사된 정규 토양효소 지

수를 분석한 결과를 표시하였다. 인접한 곳에서 조사된 7영급의 송이 발생림 토양효소 연구 결과(Hur and Park, 2001)에서는 본 연구에서 얻은 탈수소효소 활성의 2~5배, 인산 가수분해효소는 약 1/10 수준으로 조사되었다. 하지만, NDEI는 0.51~0.99의 범주를 나타내었다. 해당 연구는 쇠퇴기에 들어서서 송이 발생림으로 일부 지점은 NDEI가 0.5 수준까지 떨어졌으나 전반적으로 인산 가수분해 효소의 활성이 탈수소 효소에 비하여 높은 상황이었기 때문이다. 동일한 시험지에서 진행된 Park et al.(1998)의 연구에 따르면 송이 균환이 지나간 곳에 균근성 버섯인 마귀광대버섯이나 자주줄각버섯 등이 출현하고, 이후에 부후균이 많아지게 된다. 즉, 송이는 균근성 버섯 중에서도 천이 초기 단계에 속한다고 할 수 있는데, 송이가 발생하던 숲이 더 성숙하면 또 다른 균근성 버섯인 능이가 발생하는 것으로 알려져 있다. 이는 NDEI가 0.5 이상으로 유지되는 곳은 송이 생산성이 여전히 높은 상황이지만, 점차 다른 균근성 버섯이나 부후균이 우점하는 형태로 변화한다고 판단할 수 있는 근거가 된다.

남산의 소나무림과 신갈나무림의 토양을 조사한 Lee et al.(1998)의 결과는 송이가 발생하지 않는 일반적인 숲의 상태를 보여주는 것이라 할 수 있는데, 7~8영급의 송이 발생 미상의 소나무림은 0.38~0.70 범위의 NDEI 값을 나타내었고

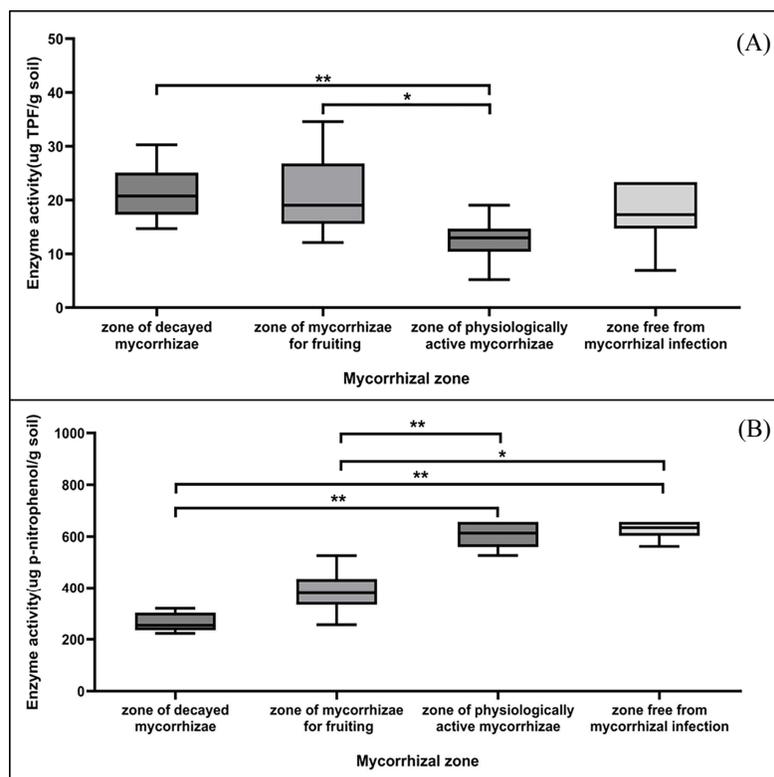


Figure 2. Dehydrogenase activity (A) and phosphatase activity (B) by mycorrhizal zone in late autumn. * and ** indicate statistically significant differences between two observations at the 5% and 1% levels, respectively.

Table 2. Normalized difference soil enzyme indices (NDEI) of soils collected from pine-mushroom productive site at Hongcheon, Korea (mean \pm standard error)

Region of <i>Tricholoma matsutake</i>	Normalized difference soil enzyme index	
	Early summer	Late autumn
Zone of decayed mycorrhizae	0.959 \pm 0.009	0.910 \pm 0.021
Zone of mycorrhizae for fruiting	0.971 \pm 0.002	0.943 \pm 0.007
Zone of physiologically active mycorrhizae	0.976 \pm 0.002	0.979 \pm 0.003
Zone free from mycorrhizal infection	0.974 \pm 0.007	0.954 \pm 0.013

Table 3. Normalized difference soil enzyme indices (NDEI) of soils collected from various forest stands in Korea.

Site	NDEI	References
Pine-mushroom productive <i>Pinus densiflora</i> stand	0.51~0.99	Hur and Park(2001)
Pine-mushroom unproductive <i>P. densiflora</i> stand	0.38~0.70	Lee et al.(1998)
<i>Quercus mongolica</i> stand with some pines	0.35~0.37	Lee et al.(1998)
Mixed stand with deciduous tree species	-0.73~0.36	Kang et al.(2009)

3~4영급의 신갈나무림은 0.35~0.37 범위의 NDEI 값을 나타내었다. 또한, 천이가 많이 진행되어 성숙한 숲이라 할 수 있는 점봉산의 5~6영급의 활엽수림을 대상으로 조사한 Kang et al.(2009)의 결과에서도 NDEI 값은 -0.73~0.36 범위를 나타내었다. 즉, 숲의 천이 과정을 통해 NDEI 값이 -1을 향해 변화하는 것을 확인할 수 있는데, 송이 발생림은 아직 천이가 많이 진행되지 않은 상태에서 0.5 이상의 NDEI 값을 나타내지만, NDEI가 0.4 미만으로 떨어지게 되면 송이 발생이 되지 않을 확률이 높음을 시사하였다.

결론

우리나라의 소나무림은 숲이 안정화되면서 혼효림을 거쳐 활엽수림으로 천이하고 있다. 송이를 생산하는 소나무림도 마찬가지로 경로에 있기에 점차 혼효림으로 변화되고 있으며, 이는 천이 초기 단계의 균근성 버섯인 송이의 생산성 쇠퇴라는 결과를 낳고 있다. 우리나라 숲의 대부분이 6영급 이상으로 노화되고 천이되는 상황을 고려하면 조만간 우리나라에서 송이 발생림을 찾는 것이 쉽지 않을 것으로 여겨진다.

우리나라에서 송이 생산성 유지를 위해서는 자연적인 천이 과정을 지연시키는 작업이 필요하다고 할 수 있다. 물론, 이러한 작업의 당위성에 대하여는 다양한 의견이 있을 수 있지만, 경제적인 가치 창출을 목적으로 숲을 경영한다면 투자 효율을 고려한 접근이 필요하다. 본 연구는 송이 생산성을 유지하기 위하여 어느 시점에 적극적인 개입을 할 것인가에 대한 고찰을 한 것이다.

Park et al.(1998)의 연구결과에 따르면 송이는 균근성 버섯

중에서도 천이 초기 단계에 속한다. 송이가 지나간 곳에 균근성 버섯인 마귀광대버섯이나 자주줄각버섯 등이 출현하고, 더 성숙한 숲에서 능이가 발생하는 것을 확인할 수 있기 때문이다. 이처럼 천이 초기 단계 균근성 버섯인 송이의 특성과 부후균의 확장으로 균근성 버섯의 쇠퇴가 일어날 수 있음을 가정하며 관리 시점을 판단하는 방식을 접근하였다. 토양 미생물상의 정량적 변화 파악이 쉽지 않음을 해결하기 위하여 미생물에 의해 분비된 세포외효소의 정량 방법을 선택하였고, 이의 변이를 고려하여 균근성 균류와 부후균의 관계에 따른 판단 기준으로 '정규 토양효소 지수(NDEI)'를 개발하여 관리 시점 판단 기준으로 활용할 것을 제안하였다.

한편, 송이만이 아니라 다른 균근성 버섯도 이와 비슷한 모습을 나타낼 수 있으므로 송이산 관리지침으로 사용하기 어렵다고 생각할 수도 있다. 하지만, 앞 단락에서 언급한 것처럼 송이는 균근성 버섯 중에서도 초기 단계의 출현종임을 고려할 때 기존에 송이가 생산되던 숲에서 송이 균근의 활력이 부후균에게 밀려나는 것을 판단하는 시점을 파악하는 기준으로 본 기준을 활용할 수 있다고 제안하는 것이다.

토양효소의 활성 비교를 위한 측정 시기는 송이 균환에 피해도 적으며 활성 차이도 뚜렷한 초여름이 적합한 것으로 판단되었다. 각 효소 활성은 송이 균환부에 따라 차이가 나타나지만, NDEI는 대체로 일정한 수준을 나타내었다. 즉, 송이 균환부의 정확한 지점에서 토양시료를 채취하는 것도 곤란한 점을 고려하면, 송이 발생림의 전반적인 NDEI를 파악하여 평가할 수 있음을 시사한다. 송이 생산성이 높은 곳은 NDEI가 0.75 이상을 유지하지만, 0.5에 이르면 쇠퇴하여 송이 생산성이 떨어지는 것으로 평가되었다. 반면, 송이가 생산되지

않는 송이 발생림 토양의 NDEI는 0.5 이하 수준으로 평가되었다. 따라서 송이 발생림의 경우 임령에 상관없이 NDEI가 0.5 범주에 이르면 적극적으로 송이산 관리 작업을 하고 0.4 아래에 이르면 작업을 하지 않는 것이 바람직하다고 할 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 국립산림과학원 산림과학연구 FG0603-2021-01-2025 (홀로바이옴 정보 기반 송이 및 천마의 기능성 미생물 소재 개발 연구)의 위탁과제로 수행되었습니다.

References

- Burns, R.G. 1982. Enzyme activity in soil: Location and a possible role in microbial ecology. *Soil Biology and Biochemistry* 14(5): 423-427.
- García-Saucedo, F., García-Morote, F.A., Picazo, M., Wic, C., Rubio, E., López-Serrano, F.R. and Andrés-Abellán, M. 2024. Responses of Enzymatic and Microbiological Soil Properties to the Site Index and Age Gradients in Spanish Black Pine (*Pinus nigra* Arn ssp. *salzmannii*) Mediterranean Forests. *Forests* 15(1): 113-131.
- Hur, T.-C. and Park, H. 2001. Dynamics of soil microflora and soil enzymes around the fairy-rings of *Tricholoma matsutake*. *Journal of Korean Forest Society* 90(6): 767-773.
- Hur, T.-C., Park, H. and Joo, S.-H. 1998. Changes in soil physicochemical properties and dehydrogenase activity by the formation of fairy ring of *Tricholoma matsutake*. *Journal of Korean Forest Society* 87(2): 270-275.
- Jha, D.K., Sharma, G. D. and Mjshra, R. R. 1992. Soil microbial population numbers and enzyme activities in relation to altitude and forest degradation. *Soil Biology and Biochemistry* 24(8): 761-767.
- Ka, K.-H., Park, H., Hur, T.-C., Yoon, K.-H., Bak, W.-C., Yeo, W.-H. and Lee, M.-W. 2002. Fairy ring growth of *Tricholoma matsutake* in 65-year-old pine (*Pinus densiflora*) forest stand. *Korean Journal of Mycology* 30(2): 95-98.
- Kang, H., Kang, S. and Lee, D. 2009. Variations of soil enzyme activities in a temperate forest soil. *Ecological Research* 24: 1137-1143.
- KFS (Korea Forest Service). 2025. Statistical Yearbook of Forestry 2024 (54th edition). Korea Forest Service. <https://kfss.forest.go.kr/stat/ptl/fyb/frstyYrBookList.do?curMenu=12453>.
- Lee, I. S. and Kim, O. K. 1994. Dehydrogenase activity and physico-chemical characteristics of golf course soils in Kyonggi province. *Korean Journal of Ecology* 17(2): 143-148.
- Lee, I. S., Kim, O. K., Cho, K. S. and Park, J. S. 1998. Studies on the enzyme activities and heavy metals of forest soil in Mt. Nam, Seoul. *Korean Journal of Ecology* 21(5-3): 695-702.
- Park, H. 1998. Investigation of forest soil dynamics at Onsan industrial estate and Mt. Mani by the assay of dehydrogenase activity, denitrifying and sulfur-reducing bacteria. *Journal of Korean Forest Society* 87(1): 106-112.
- Park, H., Ka, K.-H., Ryoo, C. I., Kim, K.-S. and Kim, H.-J. 1998. Ectomycorrhizal mushroom occurrence around the fairy ring of *Tricholoma matsutake* at a pine-mushroom forest. *The Korean Journal of Mycology* 26(3): 306-313.
- Park, H., Han, H., Kang, K.-S. and Hong, S. 2024. Changes and Prospects for Pine-mushroom Productivity in the Republic of Korea. *Journal of Korean Society of Forest Science* 113(3): 282-291.
- Vaario, L.M., Fritze, H., Spetz, P., Heinonsalo, J., Hanajik, P. and Pennanen, T. 2011. *Tricholoma matsutake* dominates diverse microbial communities in different forest soils. *Applied Environmental Microbiology* 77: 8523-8531.

Manuscript Received : August 14, 2025

First Revision : October 17, 2025

Second Revision : November 25, 2025

Accepted : November 26, 2025