

소나무재선충병 방제성과의 정량적 분석방법 개선 연구

김 참¹ · 박범진^{2*}

¹산림기술연구원, ²충남대학교 산림환경자원학과

A Study on Improving the Quantitative Analysis Method for the Control Performance of Pine Wilt Disease

Cham Kim¹ and Bum-Jin Park^{2*}

¹Korea Forest Engineer Institute, Daejeon 35209, Korea

²Department of Forest Environment & Resources, Chungnam National University, Daejeon 34134, Korea


요약: 우리나라는 2013년부터 소나무재선충병 확산 저지와 피해감소를 위해 전국적으로 많은 예산과 인력을 투입하여 방제를 시행하였으며, 그 결과 피해본수가 2014년 218만 본에서 2021년 31만 본까지 감소하였으나 이후 피해가 다시 증가하였다. 전반적인 피해본수 감소에도 불구하고 매년 피해면적이 증가됨에 따라, 선행연구에서는 방제성과의 판단을 위해 점적요소인 본수 변화, 면적요소인 피해면적 변화 두 요소를 고려한 정량적 방제성과 분석방법을 개발하였으며 이는 피해본수량에 따른 피해등급변화만을 제시하던 방제지침보다 객관적으로 성과를 가늠할 수 있게 하였다. 그러나 방제성과 분석에는 피해범위의 확장 여부도 중요한 요소이며 선행연구는 이를 반영하지 못하는 문제가 있어 본 연구에서는 연도별 피해범위의 변화 관찰이 용이한 경상북도를 대상으로 선단지 변화거리를 산출하고 적용기준과 계수를 만들어 기존의 방제성과지수 산출식에 적용하도록 식을 개량하였다. 그 결과 피해범위의 변화까지 고려한 방제성과의 정량분석 산출이 가능해졌으며, 경상북도 26개 시·군·구를 대상으로 개선식을 적용한 바, 기존의 산출식을 이용한 방제성과지수보다 소폭 감소하거나 증가하였다. 이러한 결과로 인해 방제성과지수가 피해증가를 의미하는 양의 값(+)에서 피해감소를 의미하는 음의 값(-)으로 변하게 될 수도 있음을 확인하였다.


Abstract: Since 2013, Korea has allocated significant budgets and manpower nationwide to prevent the spread of pine wilt disease and to reduce damage. As a result, the number of damaged trees decreased from 2.18 million in 2014 to 310,000 in 2021. However, the damage has increased again since then. Despite the overall decrease in the number of damaged trees, the scope of the damage continues to expand every year. Previous studies have developed a quantitative control performance analysis method to objectively evaluate control performance. This method takes into consideration two factors-quantity change and the change in the damage area, which is an area factor. This approach provides a more comprehensive assessment than the control guidelines that only suggest changes in damage grade based on the volume of damaged trees. The expansion of the damage range is also an important factor in analyzing control performance, but previous studies have not reflected this. Therefore, this study calculates the change in the distance of the pine wilt disease boundary area for Gyeongsangbuk-do, where changes in the damage range can easily be observed from year to year. The study then creates application criteria and coefficients and uses them to improve control performance index calculation formula. As a result, it was possible to calculate a quantitative analysis of the control performance, taking into account the changes in the damage range. When the improved formula was applied to 26 cities, counties, and districts in Gyeongsangbuk-do, it slightly decreased or increased compared to the existing calculation formula. This confirmed that the control performance index can change from a positive value (+), indicating increased damage, to a negative value (-), indicating reduced damage.

Key words: pine wilt disease, control performance, scope of damage, quantitative analysis

* Corresponding author
E-mail: bjpark@cnu.ac.kr

ORCID

Cham Kim  <https://orcid.org/0009-0009-9932-506X>

Bum-Jin Park  <https://orcid.org/0000-0002-5214-5688>

서론

우리나라에서 소나무는 전국에 분포하고 있어 친숙한 동시에 역사·문화적으로도 가치와 의미가 높은 수종이다. Lee(2002)는 소나무가 우리의 삶과 역사를 함께 하는 민족수임에도 불구하고 1960~1970년대에는 송충이, 1980~1990년대에는 솔잎혹파리로 극심한 피해를 입었으며 이제는 소나무 에이즈라고 불리는 소나무재선충병이 확산일로에 있어 이를 막지 못하면 장차 소나무의 멸종을 우려할 정도로 심각한 지경에 처해 있다고 하였다. Lee(2002)의 연구가 발표될 당시에도 이러한 점을 우려하였으나 그로부터 20년도 더 지난 현 시점에서 소나무재선충병은 전국적으로 확산되어 막대한 피해를 입었으며 각종 포럼과 심포지움 등을 통해 전문가들 사이에서는 재해에 준하여 관리가 필요한 것으로 언급되고 있다. 우리나라와 가까운 중국은 1982년 강소성 남경에서 256본이 발견된 이후 2010년까지 고사본수가 5천만 본에 달할 정도로 많은 피해가 발생하였으며(Shin, 2010), 일본은 1905년 나가사키에서 최초 발생한 이후 1915년 대발생에 이어 급진적인 확산으로 막대한 피해가 초래되었다(Han, 2016).

우리나라의 소나무재선충병은 1988년 10월 부산 금정산 일원에서 첫 피해가 보고된 이후 전국적으로 피해가 급증함에 따라 2005년에 「소나무재선충병 방제특별법」을 제정하여 집중적인 방제와 관리를 시작하였다. 2004년의 제거 피해본수는 15만 본이었으나 2007년은 1차 대확산 시기로 137만 본을 방제하였으며, 감소세 이후 2010년대에 들어 다시 피해가 급증하면서 범정부적인 차원에서 대대적인 예산과 인력을 투입하여 방제를 시행한 결과, 2차 대확산 시기인 2014년의 218만 본에서 2021년의 31만 본까지 꾸준히 피해가 감소하였다. 그러나 2022년 4월 기준 38만 본으로 다시 피해가 증가하여 2023년부터는 3차 대확산을 우려하며 방제전략의 수립과 정확한 예찰, 제대로 된 방제의 중요성이 재조명 되었다(Korea Forest Service, 2022).

우리나라의 소나무재선충병은 1988년 10월 부산 금정산 일원에서 첫 피해가 보고된 이후 전국적으로 피해가 급증함에 따라 2005년에 「소나무재선충병 방제특별법」을 제정하여 집중적인 방제와 관리를 시작하였다. 2004년의 제거 피해본수는 15만 본이었으나 2007년은 1차 대확산 시기로 137만 본을 방제하였으며, 감소세 이후 2010년대에 들어 다시 피해가 급증하면서 범정부적인 차원에서 대대적인 예산과 인력을 투입하여 방제를 시행한 결과, 2차 대확산 시기인 2014년의 218만 본에서 2021년의 31만 본까지 꾸준히 피해가 감소하였다. 그러나 2022년 4월 기준

38만 본으로 다시 피해가 증가하여 2023년부터는 3차 대확산을 우려하며 방제전략의 수립과 정확한 예찰, 제대로 된 방제의 중요성이 재조명 되었다(Korea Forest Service, 2022).

Kwon(2009)은 모두베기를 통한 피해확산저지의 가능성을 확인하였으며, National Institute of Forest Science(2011)은 소나무림의 숲가꾸기 종류가 소나무재선충병의 제어에 미치는 영향을 확인하는 등 많은 연구자들이 방제기술에 대한 효과를 검증하고 더 나은 방법을 제시하며 소나무재선충병의 방제는 다양한 기술과 전략으로 발전해왔다. National Institute of Forest Science(2020)는 다년간에 걸친 소나무재선충병의 확산패턴, 방제전략, 생리·생태연구를 통해 방제기술의 개선방안을 제시하였으며, 이 밖에도 여러 기관에서 관할지의 방제전략을 수립하여 피해저감과 확산 방지를 위해 많은 노력을 하고 있다.

이러한 노력의 결과인 방제성과를 평가하기 위해 과거에는 피해본수의 증감을 기준으로 삼았지만 피해가 감소함에도 불구하고 그 발생범위가 꾸준히 확산되는 것에 문제가 있다고 판단한 방제 일선의 전문가들은 심포지움과 세미나, 학술대회 등을 통해 피해본수만이 아니라 피해면적까지도 방제성과 분석의 요소로 삼아야 한다고 목소리를 높였다. 이에 산림청은 2019년 연구를 통해 피해면적을 분석 요소로 삼아 소나무재선충병 방제성과를 정량적으로 판단할 수 있는 방법을 최초로 개발하였으며(Korea Forest Service, 2019) 이듬해인 2020년에 해당 방법의 미흡한 부분을 보완하여 개선함으로써 전국의 피해 시·군·구를 대상으로 정량적 방제성과를 분석하였다(Korea Forest Service, 2020). 이밖에 Park(2021)은 산림병해충 방제와 관련한 성과 분석을 하였으나 이는 10년간 ‘방제 정책’의 방향과 결과에 대한 분석으로 본 연구와는 결이 다르며, 이외에 소나무재선충병 방제성과를 분석한 연구는 전무한 실정이다. 또한, 소나무재선충병 피해를 입은 여러 외국에서도 소나무재선충병 발생 분석, 민감도 분석을 통한 방제방법, 예찰방법 등의 연구는 다양하게 이루어졌지만(Ozair et al., 2016; Ye, 2021; Hussain et al., 2021) 방제성과를 측정하거나 분석한 사례는 찾아볼 수 없을 정도로 미흡한 수준이다.

산림청은 공식적으로 2019년에 개발된 방법으로 방제성과를 분석하고 평가하지는 않고 있으며 대외적으로는 여전히 피해본수의 증감만이 정량적 평가의 척도가 되고 있다. Korea Forest Service(2019)은 GIS프로그램을 이용하여 점적 요소인 방제좌표를 면적 요소로 치환하고 카운팅함으로써 전국의 피해 지자체에 대해 동일한 기준으로 가장 정확하게 피해면적을 산출할 수 있는 방법을 개발하였으나 GIS프로그램을 이용하여야 하고 분석을 위해 기

초데이터가 공유되어야 하는 번거로움의 문제가 있다. 이에 지금도 여전히 각 피해 지자체에서 방제사업 실시설계와 기본계획 수립 시 파악된 개략면적을 산림청이 취합하여 합산하고 있으며, 이는 작성자마다 면적산정 기준과 방법이 달라 그대로 방제성과의 정량적 분석에 적용하는 것은 부적합하다.

방제성과의 분석은 해당 피해지역에 대한 방제 노력의 결과를 수치화함으로써 보다 객관적으로 판단할 수 있게 하고 현황을 진단하여 향후의 방제목표와 계획 수립을 위한 기준을 제시하게 된다. 이러한 점에서 정확한 피해본수, 피해면적의 산출은 매우 중요하며 더 나아가 피해범위의 변화를 고려한 방제성과 분석을 통해 피해 지자체가 현실적인 목표를 세워 점진적으로 피해를 감소시킬 수 있도록 할 필요가 있다. 동일 피해본수, 피해면적일지라도 피해가 좁은 범위 안에서 밀집하여 발생한 것과 넓은 범위로 흩어져 발생하는 것은 그 방제방식을 달리 적용하여야 한다. 그래서 방제계획, 방제전략의 수립에 있어 피해범위의 분석도 반드시 수행되어야 하지만 아직 피해범위의 변화를 정량화하는 방법은 제시된 바가 없다.

이에 본 연구에서는 피해 지자체를 대상으로 다년간 선단지선의 변화거리를 확인하여 피해범위인 선단지의 확장여부를 정량적으로 판단할 수 있는 기준과 분석방법의 마련을 통해 점, 선, 면 세 가지 인자를 고려한 정량적 성과 분석 방법을 제시하고자 하였다.

재료 및 방법

1. 연구의 범위

본 연구 목적인 피해범위 확장 여부의 판단이 수월하도록 다년간 피해가 지속적으로 발생하면서 피해면적과 선단지 변화 관찰이 용이한 경상북도의 26개 시·군·구를 분석 대상으로 하였다(Figure 1). 경상남도과 제주도의 경우 대부분 시·군·구에서 오랜 기간 피해가 누적 발생함에 따라 행정경계 내 거의 전역이 피해발생지역이 되어 선단지 변화를 관측하기가 어려운 문제가 있으며, 강원도와 전라도의 경우 피해발생 시·군·구가 적어 선단지 변화 관측과 본수 및 피해면적 변화의 비교를 위한 충분한 데이터 분석이 어려운 문제가 있고, 경기도는 시·군·구의 면적이 작고 타 도에 비해 상대적으로 산림면적이 작아 선단지 변화 관찰이 어려워 연구 대상에서는 제외하였다.

2. 분석 기초데이터 구축

1) 방제본수 및 피해본수 산출

한국임업진흥원은 매년 집중방제기간이 종료하는 4월



Figure 1. Classification chart of the areas to be analyzed (26 cities, counties, districts in Gyeongbuk).

이후 전국의 방제시행기관으로부터 방제좌표표를 수신하여 취합하고 있으며 본 연구는 이렇게 취합된 연도별 전국 방제좌표 csv파일을 수집하였다. 이 중 2020년 이전의 데이터는 정보가 누락되거나 중복된 지자체가 있어 정확한 분석이 될 수 없기 때문에 2020년('19.5.~'20.4.)과 2021년('20.5.~'21.4.), 2022년('21.5.~'22.4.)의 방제좌표표를 분석을 위한 기초데이터로 선정하였다. 선정된 자료는 QGIS 3.6.1ver 프로그램을 이용하여 2019년 5월부터 2022년 4월까지 3년간의 연도별 csv파일을 공간데이터인 shp파일로 변환 후 시·군·구별 방제본수와 피해본수를 확인하였다. 그러나 한국임업진흥원으로부터 받은 방제좌표 데이터는 비병징감염목에 대한 좌표정보가 없고 피해고사목과 기타고사목만 구분되어 산림청으로부터 공유받은 전국 방제통계자료와 불일치한 것이 확인됨에 따라 본 연구에서는 행정구역 경계 내 방제좌표 데이터상의 방제본수(피해고사목+기타고사목)와 피해본수(피해고사목)를 확인하여 분석을 진행하였다(Figure 2).

2) 피해면적 산출

농업, 산불피해 등 타 분야의 피해면적산출은 드론, 위성영상을 기반으로 피해지역의 경계를 구분하고 공간분석을 통해 면적을 산출하지만 소나무재선충병의 피해면적은 감염고사목을 중심으로 점적 요소를 면으로 치환하여 지자체 단위로 산출하므로 그 규모나 정밀성 요구도를 감안하면 전자의 방식을 적용하는 것은 부적합하다. 또한, 매년 산림청으로 보고되는 지자체의 피해면적은 작성자

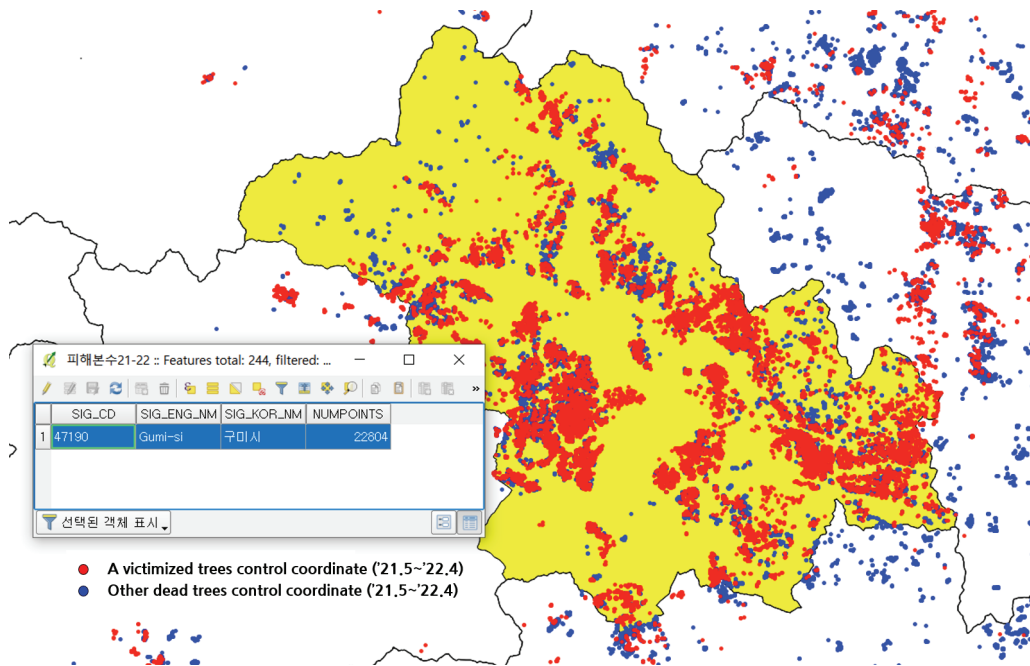


Figure 2. Quantity calculation using QGIS.

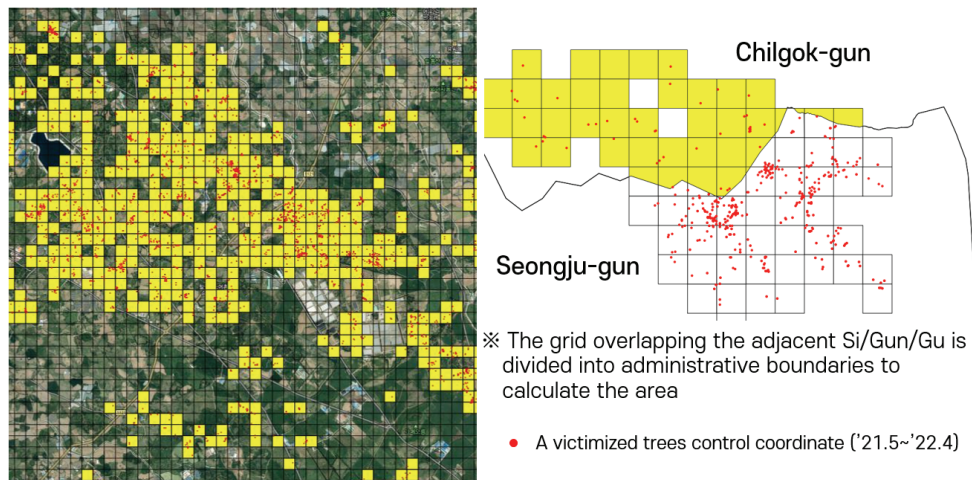


Figure 3. Method of calculation of damage area.

마다 다른 기준과 방법으로 산정되기 때문에 일관성이 없어 정량적 성과분석의 적용 인자로는 부적합하다. 이에 Korea Forest Service(2019)는 QGIS 3.6.1ver 프로그램(이하 “QGIS”라 한다)을 이용하여 1ha 단위의 격자를 전국 범위로 만들고 1ha 크기의 격자에 방제좌표를 1개라도 포함하는 모든 격자의 합을 전체 피해면적으로 산정하였다. 다만 방제좌표를 포함하는 격자가 인접 시·군·구로 경계를 넘어가는 경우 시·군·구의 행정경계를 따라 격자면적을 나누어 산출함으로써 면적이 중복되거나 누락되지 않도록 하였다(Figure 3). 이 방법은 산림이 아닌 지역을 포함하거나 1 ha 내 단 1분의 좌표만 있어도 면적에 포함되

므로 피해면적이 과대추정된다고 볼 수 있으나, 현재의 기술력으로는 GIS프로그램을 이용하여 피해면적을 산정함에 있어 여러 시·군·구의 행정구역별로 산림과 비산림지를 구분하여 피해고사목이 있는 산림지역만 면적을 산출하는 것이 매우 어렵다. 면적산출이 가능하더라도 피해반경에 대한 기준설정, 설정의 근거마련이 선행되어야 하며, 무엇보다 GIS프로그램 도구를 이용하여 손쉽게 산출할 방법이 없어 1개 행정구역의 면적산출에도 많은 시간이 소요되기 때문이다. 이는 전국을 범위로 하는 피해면적 산출에는 매우 비효율적이므로 다수의 행정지역을 대상으로 할 경우 Korea Forest Service(2019)에서 제시된 방법이

가장 일관적인 기준으로 빠르게 면적을 구할 수 있는 최선이라고 볼 수 있으므로 해당 방법을 적용하였다.

피해고사목만이 아닌 전체 방제좌표를 면적산출 인자로 적용하는 이유는 모든 고사목에 대해 시료채취를 통한 감염여부 검정을 할 수 없으므로 방제설계 시 선목자가 목측으로 판단하는 경우 기타고사목으로 판단했더라도 피해 감염목인 경우를 배제할 수 없기 때문이다. 이러한 이유로 피해고사목 좌표만이 아닌 기타고사목을 포함하는 전체 방제좌표를 피해면적 산출을 위한 인자로 적용하였다. 이렇게 각 시·군·구별 피해면적을 산출하여 정량적 방제성과 분석을 위한 인자로 적용하였다.

3) 본수 변화율 및 면적 변화율 산출

방제성과지수의 주요 인자인 본수 변화율은 방제본수의 변화율과 피해본수 변화율의 합을 2로 나누어 산출하며, 면적 변화율은 피해면적의 변화율을 그대로 적용한다. 직접적인 피해발생의 정량적 수치인 피해본수 변화율 외에 방제본수의 변화율을 구하고 이 합계의 평균을 본수 변화율로 적용하는 이유는 방제예산이 전체 방제본수에 보다 밀접한 영향을 받기 때문으로, 2019년 최초로 방제성과지수 산출식을 개발할 당시 산림청과의 논의를 통해 결정된 바 있다.

4) 선단지 변화 거리 산출

소나무재선충병 피해범위의 산정을 위해 시·군·구별 최선단 피해고사목 좌표를 연결하여 연도별 선단지선을 작성하고 최선단 좌표의 평균 변화 거리를 산출하였다. 이는 2020년을 기준년도로 하여 2022년의 최선단 피해고사목 좌표와의 변화 거리를 0.1 km 단위로 측정하여 산출하였다. 다만 선단지선은 최선단 좌표끼리 연결하더라도 작성자의 주관적 판단이 개입되어 어느 점을 먼저 연결하는지에 따라 달라지므로 선단지선을 참고하되 거리변화가 두드러지게 보이는 연도별 피해고사목 좌표 사이의 최단거리를 측정하였다.

그리고 시·군·구마다 피해정도를 비롯하여 선단지 변화 지점이 다각적이므로 피해정도와 범위에 따라 최소 4개 이상, 최대 20개 지점의 최선단 좌표간 변화 거리를 측정하여 평균거리를 산출하였으며 이를 해당 시·군·구의 기준년도 대비 선단지 변화 거리로 반영하였다(Figure 4).

3. 선단지 변화 거리 기준설정 및 적용계수 마련

방제성과 분석의 선적 인자인 선단지 변화 거리를 정량적 방제성과 분석 산출식에 반영하기 위해 경상북도의 26개 피해발생 시·군·구의 선단지 변화 거리에 따라 기준을

만들어 구분하였다. 선단지 변화 거리는 선단지가 축소된 경우 음의 값(-)을 적용하였으며, 반대로 선단지가 확대된 경우 양의 값(+)을 적용하였는데 선단지 변화 거리에 따른 계수를 만들기 위해 산출된 26개 시·군·구별 변화 거리의 평균을 산출하고 각 변화 거리의 범위와 비교하여 보편적으로 구분이 용이한 0.5 km의 단위로 적정 기준거리를 -1.5 km 미만에서 +1.5 km 이상까지 7단계로 설정하였다. 그리고 정량적 방제성과지수 산출 인자인 면적 변화율의 적용 가중치(이하 “면적가중치”라 한다)에 계수를 적용할 시 그 값이 과다 또는 과소 산출되지 않도록 적정 기준거리별로 0.1단위와 0.2단위로 계수를 가감하는 경우 해당 가중치가 어느 정도 변화되는지를 비교함으로써 과도한 변화가 생기지 않도록 적정 계수를 마련하였다.

결과 및 고찰

1. 기존 정량적 방제성과 산출식의 문제점 도출

Korea Forest Service(2019)는 새로운 기준에 의한 피해면적의 산출을 통해 본수와 면적을 모두 방제성과의 정량적 분석인자로 삼았으며 그 적용 가중치를 5대5로 반영하였으나, Korea Forest Service(2020)는 피해가 경미한 지역에서 면적의 가중치를 5로 가져가는 것이 정량화된 방제성과지수를 과대산출되게 만드는 것을 확인하고 산림청의 의견을 수렴하여 피해 지자체의 피해본수량에 따라 정해지는 극심, 심, 중, 경, 경미 등급으로 본수와 면적 가중치를 차등 반영함으로써 방제성과지수의 과대산출을 최소화하였다. 그러나 이 방법은 최외곽 피해목을 연결하여 선단지선으로 나타내는 피해범위의 변경사항을 반영하지는 못하였으며 피해본수와 피해면적의 감소에도 불구하고 그 피해범위가 확장되는 등의 경우를 정량화 분석하기 위해 이러한 선적 인자의 반영이 필요하다(Figure 5).

2. 분석 기초데이터 산출

QGIS를 통해 한국임업진흥원으로부터 제공받은 방제좌표 데이터를 이용하여 경상북도 26개 시·군·구의 2020년과 2022년 방제본수(피해고사목+기타고사목) 및 피해본수(피해고사목), 피해면적을 산출한 결과는 Table 1과 같고, 주로 피해가 경미한 지역일수록 피해본수 대비 방제본수의 비율이 매우 높게 나타났다. 해당 데이터로 2020년 대비 2022년의 본수 변화율, 면적 변화율, 선단지 변화 거리와 이에 따른 선단지 계수, 피해등급을 산출한 결과는 Table 2와 같다. 본수의 증가율이 가장 큰 지역은 예천군과 영주시이며 감소율이 가장 큰 지역은 경주시이고, 면적의 증가율이 가장 큰 지역은 경산시, 감소율이 가장 큰

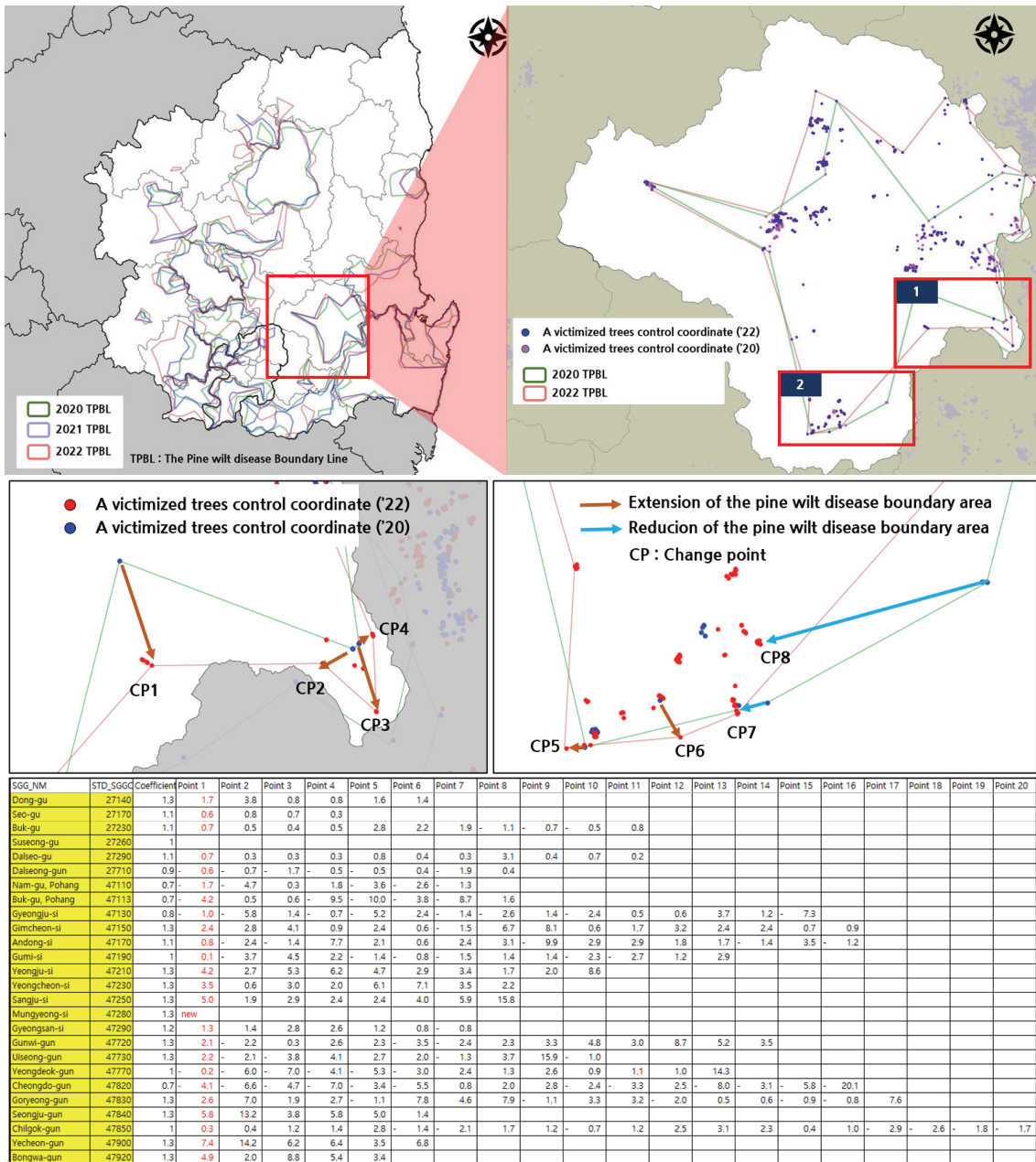


Figure 4. A method for calculating the change distance of the pine wilt disease boundary area.

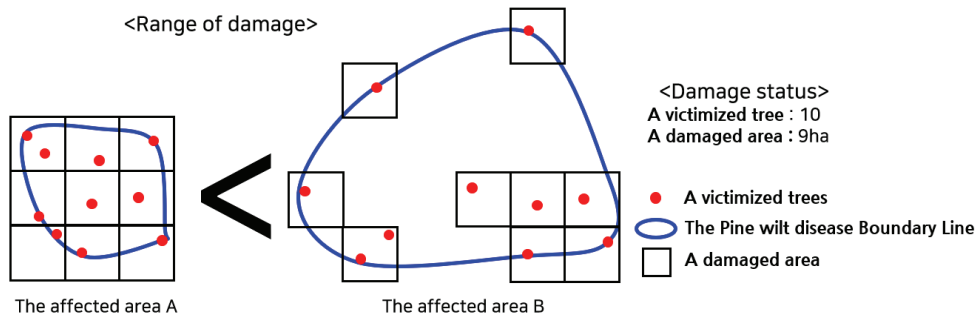


Figure 5. Problems of the existing calculation formula - Damage range not reflected despite the same damage status.

Table 1. Total control quantity, damaged control quantity, damaged area of Pine wilt disease by Si/Gun/Gu.

(Unit : tree, ha)

si/gun/gu	total control quantity		damaged control quantity		damaged area (ha)	
	2020	2022	2020	2022	2020	2022
Dong-gu, Daegu	1,140	822	31	641	160.0	161.7
Seo-gu, Daegu	56	39	2	28	27.5	9.8
Buk-gu, Daegu	11,690	8,306	1,189	3,374	1,033.2	1,196.6
Suseong-gu, Daegu	247	-	-	-	28.0	-
Dalseo-gu, Daegu	773	1,532	29	266	107.0	183.7
Dalseong-gun, Daegu	47,234	25,986	2,007	7,387	4,182.2	3,014.1
Nam-gu, Pohang	26,642	15,993	9,883	8,721	4,385.8	2,418.1
Buk-gu, Pohang	54,058	44,575	19,251	15,856	10,335.7	8,008.7
Gyeongju-si	85,770	55,653	32,924	21,838	11,192.4	7,277.8
Gimcheon-si	2,572	2,729	724	1,311	366.3	446.6
Andong-si	135,852	70,437	28,486	24,986	15,938.6	12,050.8
Gumi-si	52,784	40,340	29,701	22,804	8,027.1	7,231.9
Yeongju-si	15,331	9,206	17	784	1,127.5	1,896.4
Yeongcheon-si	22,231	6,283	261	776	2,151.8	1,189.6
Sangju-si	5,256	4,800	468	1,216	995.8	1,096.6
Mungyeong-si	-	694	-	13	-	127.7
Gyeongsan-si	144	161	16	29	53.0	140.7
Gunwi-gun	18,144	7,588	581	1,483	1,327.6	1,495.1
Uiseong-gun	14,072	4,892	607	814	1,855.2	1,139.9
Yeongdeok-gun	9,320	15,732	427	2,129	1,665.8	2,668.0
Cheongdo-gun	8,555	9,230	4,915	2,204	1,610.6	1,464.0
Goryeong-gun	15,521	15,876	7,016	10,329	1,946.3	1,916.8
Seongju-gun	16,218	9,222	3,069	4,977	2,047.0	1,632.3
Chilgok-gun	16,881	8,272	2,083	2,532	1,649.5	1,542.0
Yecheon-gun	4,173	856	1	58	154.8	108.6
Bongwa-gun	1,020	1,247	2	6	485.1	95.3

지역은 봉화군으로 나타났다. 피해등급은 2022년 피해본 수 통계에 따라 ‘경미’지역 11개, ‘경’지역 10개, ‘중’지역 5개 시·군·구로 확인되었다.

3. 선단지 변화 거리 기준설정 및 적용계수 마련

선단지 변화거리는 기준을 설정하기 위해 1년간의 변화를 확인하였으며, 2020년 대비 2021년, 2021년 대비 2022년의 시·군·구별 선단지 변화 거리를 산정하여 적정 기준 거리를 설정하였다. 2020년 대비 2021년의 선단지 변화 거리는 대구 달서구가 -0.3 km 축소되어 가장 변화가 적었으며 대구 동구가 8.2 km 확대되어 가장 많은 변화가 나타났다. 2020년 대비 2021년의 시·군·구의 선단지 변화 거리 평균은 0.4 km 확대된 것으로 분석되었으며 전체 26

개 시·군·구중 7개 시·군·구는 선단지가 축소, 15개 시·군·구는 선단지가 확대되었다. 나머지 4개 시·군·구는 전 지역이 피해범위이거나 신규발생하여 선단지 변화 분석이 불가능하였다. 2021년 대비 2022년의 선단지 변화 거리 평균은 1.4 km 확대된 것으로 분석되었으며 전체 26개 시·군·구중 6개 시·군·구는 선단지가 축소, 18개 시·군·구는 선단지가 확대되었고 나머지 2개 구 중 하나는 신규발생, 다른 하나는 피해 미발생으로 선단지 변화 분석이 불가능하였다.

연간 선단지 변화 거리 평균을 감안하여 계수 적용을 위한 단계는 구분이 용이하도록 0.5 km 단위로 구분하였으며, 단계는 -1.5 km 미만, -1.5~1.0km 미만, -1.0~0.5 km 미만, -0.5~0.5 km 미만, 0.5~1.0 km 미만, 1.0~1.5 km

Table 2. Analysis results by factors that apply the control performance index in 2022 compared to 2020.

(Unit : %, km)

si/gun/gu	the rate of change in the number of trees (%)	the rate of change in the area (%)	distance of change in pine wilt disease boundary area (km)	coefficient of change distance in pine wilt disease boundary area	Damage rating (2022)
Dong-gu, Daegu	969.9	1.1	1.7	1.3	slight
Seo-gu, Daegu	634.8	-64.4	0.6	1.1	slight
Buk-gu, Daegu	77.4	15.8	0.7	1.1	mild
Suseong-gu, Daegu	-	-	-	-	slight
Dalseo-gu, Daegu	457.7	71.6	0.7	1.1	slight
Dalseong-gun, Daegu	111.5	-27.9	-0.6	0.9	mild
Nam-gu, Pohang	-25.9	-44.9	-1.7	0.7	moderate
Buk-gu, Pohang	-17.6	-22.5	-4.2	0.7	moderate
Gyeongju-si	-34.4	-35.0	-1.0	0.8	moderate
Gimcheon-si	43.6	21.9	2.4	1.3	mild
Andong-si	-30.2	-24.4	0.8	1.1	moderate
Gumi-si	-23.4	-9.9	0.1	1.0	moderate
Yeongju-si	2235.9	68.2	4.2	1.3	slight
Yeongcheon-si	62.8	-44.7	3.5	1.3	slight
Sangju-si	75.6	10.1	5.0	1.3	mild
Mungyeong-si	-	-	신규	1.3	slight
Gyeongsan-si	46.5	165.4	1.3	1.2	slight
Gunwi-gun	48.5	12.6	2.1	1.3	mild
Uiseong-gun	-15.6	-38.6	2.2	1.3	slight
Yeongdeok-gun	233.7	60.2	-0.2	1.0	mild
Cheongdo-gun	-23.6	-9.1	-4.1	0.7	mild
Goryeong-gun	24.8	-1.5	2.6	1.3	mild
Seongju-gun	9.5	-20.3	5.8	1.3	mild
Chilgok-gun	-14.7	-6.5	0.3	1.0	mild
Yecheon-gun	2810.3	-29.8	7.4	1.3	slight
Bongwa-gun	111.1	-80.4	4.9	1.3	slight

미만, 1.5 km 이상의 7단계로 구분하였다. 각 단계에 따라 0.7~1.3으로 적용계수를 설정하였는데 -0.5~0.5 km 미만은 그 변화가 미미하므로 '변화없음'으로 간주하여 적용계수를 1.0으로 설정하였다(Table 3). 각 단계별 적용계수는 '변화없음'인 1.0에서부터 단계별로 0.1과 0.2씩 가감하여 적용해본 결과 피해등급 '극심' 지역에서 면적가중치가 각각 6.5, 8.0으로 산출되었으며, 이는 방제성과지수 산출식에 의해 본수 변화를 적용가중치(이하 "본수가중치"라 한다)가 각각 최소 3.5, 2.0까지 감소됨을 의미한다(Table 4). 그러나 현재 산림청에서 방제예산을 산정하고 방제성과를 인지함에 있어서 피해본수가 절대적인 기준이 되고 있다. 따라서 본수가중치가 과도하게 감소되는 것은 당초

방제성과지수 산출식이 개발된 취지에 적합하지 않으므로 계수를 단계별로 0.1씩 가감하는 것으로 설정하였다. 이는 선단지가 축소된 경우 방제성과가 나타난 것이므로 면적가중치를 축소하여 반영하고 반대로 확대된 경우 방제성과가 미흡한 것으로 볼 수 있으므로 면적가중치를 증가하여 반영하도록 하기 위함이다.

「소나무재선충병 방제지침」 'IV. 방제의 시행 - 마. 발생 지역 피해정도 구분'에 의거하여 시·군·구의 피해고사목 발생본수에 따라 '극심', '심', '중', '경', '경미' 5단계로 피해등급이 구분되는데, 선단지 변화 거리 적용계수는 '극심' 등급에서 선단지가 축소된 경우 면적가중치를 최대 0.35까지 감소시키고 '경미' 등급도 0.07까지 면적가중치

Table 3. Coefficient of change distance in pine wilt disease boundary.

	average change distance	application coefficients	note
Reduction of the pine wilt disease boundary area	less than -1.5 km	0.7	
	less than -1.5 to -1.0 km	0.8	
	less than -1.0 to -0.5 km	0.9	
Extension of the pine wilt disease boundary area	less than -0.5 to 0.5 km	1.0	this scope is considered unchanged
	less than +0.5 ~ 1.0 km	1.1	
	less than +1.0 ~ 1.5 km	1.2	
	+1.5 km or more	1.3	

Table 4. Application simulation results of coefficient of change distance in pine wilt disease boundary area.

damage rating	weighting with area change rate (Criteria)	less than -1.5 km	less than -1.5 to -1.0 km	less than -1.0 to -0.5 km	less than -0.5 to 0.5 km	less than +0.5 ~ 1.0 km	less than +1.0 ~ 1.5 km	+1.5 km or more
application coefficients (0.1 unit)		0.7	0.8	0.9	1.0	1.1	1.2	1.3
slight	1	0.7	0.8	0.9	1.0	1.1	1.2	1.3
mild	2	1.4	1.6	1.8	2.0	2.2	2.4	2.6
moderate	3	2.1	2.4	2.7	3.0	3.3	3.6	3.9
severe	4	2.8	3.2	3.6	4.0	4.4	4.8	5.2
extreme	5	3.5	4.0	4.5	5.0	5.5	6.0	6.5
application coefficients (0.2 unit)		0.4	0.6	0.8	1.0	1.2	1.4	1.6
slight	1	0.4	0.6	0.8	1.0	1.2	1.4	1.6
mild	2	0.8	1.2	1.6	2.0	2.4	2.8	3.2
moderate	3	1.2	1.8	2.4	3.0	3.6	4.2	4.8
severe	4	1.6	2.4	3.2	4.0	4.8	5.6	6.4
extreme	5	2.0	3.0	4.0	5.0	6.0	7.0	8.0

를 감소 적용할 수 있으며, 반대로 ‘극심’등급에서 선단지가 확대된 경우 면적가중치를 최대 0.65까지 증가시키고 ‘경미’등급도 0.13까지 면적가중치를 증가시켜 적용할 수 있다.

4. 정량적 방제성과 분석방법 개선안 제시

선행 연구인 Korea Forest Service(2019)에서는 방제성과 지수를 산출하는 식을 제시하였으며 인자로는 본수 변화율, 면적 변화율의 가중치를 각 5대 5로 적용하였다. 본수 변화율은 기준년도 대비 연도별 방제본수 변화율과 피해본수 변화율 합계의 평균이며, 면적 변화율은 기준년도 대비 연도별 피해면적 변화율로 하였다.

그러나 Korea Forest Service(2020)은 특히 피해등급 ‘경미’지역의 경우 피해면적이 적기 때문에 면적 변화율의 가중치를 50%로 적용하는 것은 불합리하다고 판단하였

다. 이에 피해등급별로 본수 변화율과 면적 변화율의 가중치를 차등 적용하였으며, 본수 변화율과 면적 변화율의 적용 가중치에 대해 ‘극심’지역은 5대 5, ‘심’지역은 6대 4, ‘중’지역은 7대 3, ‘경’지역은 8대 2, ‘경미’지역은 9대 1로 설정하였다.

본 연구에서는 Korea Forest Service(2020)의 본수 변화율과 면적 변화율의 피해등급별 차등 가중치에 선단지 변화 거리 계수를 적용하여 방제성과 지수를 산출하였는데 그 산출식은 Table 5)와 같다. 산출된 방제성과 지수는 양(+)과 음(-)의 부호를 통해 피해의 증감을 직관적으로 판단할 수 있다.

1) ACP : Analysis on the Control performance of Pine wilt disease

Table 5. Improvement formula for method of calculation of control performance index(a calculation formula of ACP).

control performance index = (① × ③) + (② × ④)
 [(percentage increase/decrease in control quantity) × weighting with control quantity rate] + [(percentage increase/decrease in area) × weighting with area change rate]
 ① percentage increase/decrease in control quantity : (rate of change in total control quantity + rate of change in victimized trees) ÷ 2
 ② percentage increase/decrease in area : rate of change in damage area
 ③ weighting with control quantity rate : 1 - weighting with area change rate
 ④ weighting with area change rate : area weighting by damage grade × Coefficient of change distance in pine wilt disease boundary(0.7~1.3)
 ※ Damage reduction if the control performance index is negative (-), and damage increase if positive (+)

Table 6. Control performance index for 2022 compared to 2020.
 (Unit : %)

si/gun/gu	control performance Index	note
Dong-gu, Daegu	8.44	▲increased damage
Seo-gu, Daegu	5.58	▲increased damage
Buk-gu, Daegu	0.64	▲increased damage
Suseong-gu, Daegu	-	excluding analysis (not occurred after new occurrence)
Dalseo-gu, Daegu	4.15	▲increased damage
Dalseong-gun, Daegu	0.86	▲increased damage
Nam-gu, Pohang	-0.30	▼Damage reduction
Buk-gu, Pohang	-0.19	▼Damage reduction
Gyeongju-si	-0.35	▼Damage reduction
Gimcheon-si	0.38	▲increased damage
Andong-si	-0.28	▼Damage reduction
Gumi-si	-0.19	▼Damage reduction
Yeongju-si	19.54	▲increased damage
Yeongcheon-si	0.49	▲increased damage
Sangju-si	0.59	▲increased damage
Mungyeong-si	-	excluding analysis (new occurrence)
Gyeongsan-si	0.61	▲increased damage
Gunwi-gun	0.39	▲increased damage
Uiseong-gun	-0.19	▼Damage reduction
Yeongdeok-gun	1.99	▲increased damage
Cheongdo-gun	-0.22	▼Damage reduction
Goryeong-gun	0.18	▲increased damage
Seongju-gun	0.02	▲increased damage
Chilgok-gun	-0.13	▼Damage reduction
Yecheon-gun	24.41	▲increased damage
Bongwa-gun	0.86	▲increased damage

5. 정량적 방제성과지수 산출

본 연구에서 개선한 정량적 방제성과 분석방법을 통해 경상북도에서 소나무재선충병 방제를 실시한 26개 시·군·구의 방제성과지수를 산출한 결과, 8개 시·군·구(3개 시, 3개 군, 2개 구)는 피해가 감소하였으며, 16개 시·군·구(5개 시, 7개 군, 4개 구)는 피해가 증가한 것으로 나타났다. 대구 수성구의 경우 2022년에는 피해가 발생하지 않아 선단지가 소멸되었으며 문경시는 2022년에 신규 발생하였다(Table 6).

6. 선행연구의 산출식과 비교

Korea Forest Service(2019)와 Korea Forest Service (2020)에서 제시된 방법으로 산출된 방제성과지수와 본 연구의 개선식으로 산출된 방제성과지수는 정도의 차이만 있을 뿐 피해의 증가와 감소에 대해서 변동되는 것은 없었지만 미미한 변화로 인해 피해의 증감에 대한 결과가 바뀔 수 있음을 확인하였다(Table 7). 이는 발생한 피해본수만으로 정해지는 피해등급으로 인해 대부분이 피해등급 ‘경’, ‘경미’지역으로, 면적가중치 자체가 낮아 큰 변화가 없는 것으로 파악되었고, 면적가중치가 높은 피해등급 ‘극심’, ‘심’지역에서 피해면적 감소율이 크게 나타날 경우 방제성과지수의 변화가 보다 크게 나타날 것으로 판단된다. 예를 들어 피해등급 ‘극심’지역인 A시에서 2020년 방제본수 9만본, 피해본수 6만본, 피해면적 5,000 ha, 2022년 방제본수 8만본, 피해본수 5만본, 피해면적 5,500 ha로 변화했다고 가정할 경우 기존의 식에서 방제성과지수는 -0.02로 피해가 감소한 결과로 산출되지만, 선단지 변화거리가 2 km 증가했다고 가정할 경우 개선식에서는 0.16으로 산출되어 피해가 증가한 것으로 값이 변화될 수 있다. 이 경우 피해증가에 대한 원인분석, 방제전략의 수립, 방제예산의 확보 등 차기방제를 철저히 대비할 수 있는 정량적 근거로 제시될 수 있으므로 개선식의 적용이 소나무재선충병 방제에 의미를 가질 수 있다고 사료된다.

Table 7. Comparison with the control performance index calculated value of previous studies.

(Unit : %)

si/gun/gu	2019 calculation formula	2020 calculation formula	Improvement calculation formula	note
Dong-gu, Daegu	4.85	8.73	8.44	
Seo-gu, Daegu	2.85	5.65	5.58	
Buk-gu, Daegu	0.47	0.65	0.64	
Suseong-gu, Daegu	-	-	-	excluding analysis (not occurred after new occurrence)
Dalseo-gu, Daegu	2.65	4.19	4.15	
Dalseong-gun, Daegu	0.42	0.84	0.86	
Nam-gu, Pohang	-0.35	-0.32	-0.30	
Buk-gu, Pohang	-0.20	-0.19	-0.19	
Gyeongju-si	-0.35	-0.35	-0.35	
Gimcheon-si	0.33	0.39	0.38	
Andong-si	-0.27	-0.29	-0.28	
Gumi-si	-0.17	-0.19	-0.19	
Yeongju-si	11.52	20.19	19.54	
Yeongcheon-si	0.09	0.52	0.49	
Sangju-si	0.43	0.63	0.59	
Mungyeong-si	-	-	-	excluding analysis (new occurrence)
Gyeongsan-si	1.06	0.58	0.61	
Gunwi-gun	0.31	0.41	0.39	
Uiseong-gun	-0.27	-0.18	-0.19	
Yeongdeok-gun	1.47	1.99	1.99	
Cheongdo-gun	-0.16	-0.21	-0.22	
Goryeong-gun	0.12	0.20	0.18	
Seongju-gun	-0.05	0.04	0.02	
Chilgok-gun	-0.11	-0.13	-0.13	
Yecheon-gun	13.90	25.26	24.41	
Bongwa-gun	0.15	0.92	0.86	

결론

선행연구를 통해 본수와 면적 두 요소를 고려한 정량적 방제성과 분석방법으로 방제성과지수의 산출식이 개발되어 있었으나 선단지와 같은 피해범위의 변화를 고려하지 못하는 문제점을 가졌다. 본 연구는 이를 보완하기 위하여 2020년부터 2022년 사이에 피해발생이력이 있고 선단지 변화 관찰이 용이한 경상북도 26개 시·군·구를 대상으로 선단지 변화거리를 분석하여 이를 방제성과지수 산출식에 적용할 수 있는 거리 기준과 계수를 설정하고 방제성과지수 산출식을 개량하였다. 이를 위해 신빙성과 정확성이 높은 2020년부터 2022년까지 3년간의 방제좌표를 취합하여 위치데이터를 기반으로 정확한 본수와 피해면적을 산

출하고 연도별 선단지 작성 후 그 변화거리 산출을 통해 2020년을 기준으로 2022년의 방제성과를 분석하였다. 개선 산출식을 이용한 방제성과지수는 기존 산출식을 이용한 방제성과지수에 비해 소폭 감소하거나 증가하는 경향을 보였으며 이로써 미미한 변화이지만 개선 산출식을 이용할 경우 피해증가를 의미하는 양의 값(+)에서 피해감소를 의미하는 음의 값(-)으로, 또는 그 반대의 경우로도 변화될 수 있음을 확인하였다.

개선 산출식을 기존의 산출식과 비교했을 때 방제성과지수의 차이는 미미한 수준이었으나 이는 분석대상지가 면적변화를 가중치가 낮은 피해등급 ‘경’, ‘경미’지역이 대다수이기 때문인 것으로 사료되며, 면적변화를 가중치가 높은 피해등급 ‘극심’, ‘심’지역에서 피해범위 변화가 클

경우에는 상대적으로 방제성과지수의 차이가 크게 나타날 것으로 사료된다. 이처럼 해당 결과로는 눈에 띄는 차이를 보이지 않았지만 본 연구의 개선 산출식은 기존의 산출식에서 반영하지 못한 피해범위의 변화를 정량적으로 분석할 수 있다는 것에 의미가 있다.

정량적 방제성과 분석방법은 기준년도에 따라 특정 연도의 방제성과를 산출할 수 있다는 장점을 가지고 있으나 반대로 기준년도를 언제로 설정하느냐에 따라 방제성과를 분석하고자 하는 측정연도의 방제성과지수 산출값이 달라지므로 이를 신중하게 결정하여야 한다. 다만 해당 방법은 철저하게 공간데이터를 기반으로 분석이 이루어지므로 시·군·구의 현황이 데이터에 반영되지 않은 경우 실제 피해가 증가했음에도 결과는 피해가 감소한 것으로 나타나거나 그 반대의 경우로 나타날 수 있어 데이터의 정확성이 절대적으로 요구된다. 2022년부터 전국의 소나무재선충병 피해가 다시 증가하고 있는데, 향후에는 전국을 대상으로 방제성과를 분석하여 방제성공지의 요인을 파악하고 방제방법을 개선한다면 앞으로의 피해확산방지와 감소에 기여할 수 있을 것으로 사료된다.

References

- Han, H.R. 2016. Ecological characteristics of pine wilt disease. *Forests and Culture* 25(2): 16-25.
- Hussain, T., Ozair, M., Faizan, M., Jameel, S. and Nisar, K.S. 2021. Optimal control approach based on sensitivity analysis to retrench the pine wilt disease. *The European Physical Journal Plus* 136: 741.
- Korea Forest Service. 2019. Establishment of the 1st National Control Strategy for pine wilt disease. pp. 139-154.
- Korea Forest Service. 2020. The control performance of pine wilt disease. pp. 73-91.
- Korea Forest Service. 2022. Strengthen control of pine wilt disease in 2021 due to the results of pine wilt disease control and increased damage. <https://www.korea.kr/news/policyNewsView.do?newsId=156507873>.
- Kwon, T.S. 2009. The possibility of eradicating damage from pine wilt disease caused by Clear cutting. *Forests and Culture* 18: 54-58.
- Kwon, S.J., Kim, C.S., Park, N.C., Hur, T.C., Hong, S.C. 2011. Effects on Control of Pine Wilt Disease (*Bursaphelenchus xylophilus*) by Thinning Methods in Red Pine(*Pinus densiflora*) Forest. *Journal of Korean Forest Society* 100: 165-171.
- Lee, H.B. 2002. Korean people and pine trees. *Kim, J.S. Forests and Culture* 10: 94-105.
- National Institute of Forest Science. 2020. A Study on Preemptive Customized Control Strategy and Technology for Pine wilt Disease. pp. 397-424.
- Ozair, M., Shi, X. and Hussain, T. 2016. Control measures of pine wilt disease. *Computational and Applied Mathematics* 35: 519-531.
- Park, J.Y. 2021. A performance analysis of management policies for forest insects and diseases in Korea. pp. 135-137.
- Shin, S.C. 2010. Damage, research and control status of pine wilt disease in China. *Protection of Trees* 15: 52-62.
- Ye, J.r. 2021. Epidemic status of pine wilt disease in China and its prevention and control techniques and counter measures. *Scientia Silvae Sinicae* 55(9): 1-10.

Manuscript Received : February 22, 2024

First Revision : May 12, 2024

Second Revision : June 4, 2024

Accepted : June 5, 2024