

국가산림자원조사 고정표본점의 토지이용 자료와 이동평균법을 활용한 토지이용변화 매트릭스 구축

유재섭*† · 신창섭** · 김래현*** · 임종수****

*충북대학교 대학원 산림학과 박사과정, **충북대학교 농업생명환경대학 산림학과 교수,
국립산림과학원 산림탄소연구센터 센터장, *국립산림과학원 산림탄소연구센터 임업연구관

Construction of land-use change matrix using National Forest Inventory data and a moving average method

Yoo, Jae Seop*† · Shin, Chang Seop** · Kim, Rae Hyun*** and Yim, Jong Su****

*Ph.D Student, Department of Forest Science, ChungBuk National University, Cheongju, Korea

**Professor, Department of Forest Science, ChungBuk National University, Cheongju, Korea

***Director, Forest Carbon Center on Climate Change, National Institute of Forest Science, Seoul, Korea

****Research Scientist, Forest Carbon Center on Climate Change, National Institute of Forest Science, Seoul, Korea

ABSTRACT

Emission factor and activity data are necessary to calculate the removal and emission of greenhouse gases following the scheme of land use, land-use change, and forestry (LULUCF). The land-use change matrix comprises basic data for calculating greenhouse gas statistics in the LULUCF sector. In this study, the applicability of the point-sampling method suggested in the IPCC guidelines was analyzed using fixed points of the National Forest Inventory (NFI). A moving average method was applied to cluster plots to develop a land-use change matrix, using data from the 5th (2006 ~ 2010) and 7th (2016 ~ 2020) NFIs to analyze land-use change. When analyzing the matrix based on the number of cluster plots used in Finland, which assigns high weight to the latest year, we found significant decrease in the number of cluster plots and areas corresponding to forest and cropland. The moving average method showed low uncertainty in forest land, cropland, and settlements and high uncertainty in grassland, wetlands, and land use change area. The relative standard error for land-use change among land-use categories ranged widely from 3.7-100%. Comparing forest land from 2010 to 2020 with various statistics through the calculated areas, the area of forest was about 1.0% lower. Applying the area calculation method of this study to recent data could enable detailed, annual predictions of future land-use change. As in the United States and Japan, it could also help with the preparation of the NIR and other statistical reports.

Key words : Land Use, Land-Use Change, LULUCF, Land-Use Change Matrix, National Forest Inventory, Cluster-Plot, Moving Average Method

1. 서론

산림은 기후변화협약에서 탄소흡수원으로 인정받고 있으며, 기후변화에 관한 정부 간 협의체(IPCC, Intergovernmental

Panel on Climate Change, 이하 'IPCC')의 지침에서는 토지분야의 탄소저장고를 지상·지하부 바이오매스, 고사유기물, 토양과 수확된 목재제품으로 정의하고 있다(IPCC, 2006). 2015년 UN 기후변화협약 당사국 총회에서 채택된 파리협정에서 국가 온실가스 감축 이행에 관한 투명성이 강화되었으

†Corresponding author : lu2005@naver.com (1, Chungdae-ro, Seowon-gu, Cheongju, 28644, Korea. Tel. +82-43-261-2532)

ORCID 유재섭 0009-0004-1823-7636
신창섭 0000-0002-6298-1487

김래현 0000-0001-7269-7378
임종수 0000-0001-7316-6093

며, 이에 국가별 온실가스 통계의 투명성, 정확성, 완전성, 일관성, 비교 가능성 등 5대 원칙에 부합하기 위한 보고체계를 마련해야 한다. 또한, 국가 온실가스 인벤토리의 측정(Measurement), 보고(Reporting), 검증(Verification)이 가능한 체계를 갖추기 위한 노력이 필요하다.

우리나라는 산림자원의 현황파악 및 정책수립을 위해 1972년부터 ‘전국산림자원조사’가 수행되었으며, 최근 기후변화협약 및 FAO (Food and Agriculture Organization), UNFF (United Nations Forum on Forests), OECD (Organisation for Economic Co-operation and Development) 등 여러 국제기구에서 요구하는 자료에 적극적으로 대응하기 위해 2006년 제5차 국가산림자원조사(National Forest Inventory; NFI)부터 조사체계를 전면 개편하여 산림통계 구축은 물론 온실가스 인벤토리를 산정하기 위한 활동자료 및 배출계수 구축 기반을 마련하였다(KFS, 2006). 이러한 체계는 입목 바이오매스는 물론 과거에 조사하지 못했던 고사 유기물과 토양에 관한 기초자료를 수집하도록 하였다(GIR, 2014).

토지이용, 토지이용변화 및 임업(LULUCF, Land-Use, Land-Use Change and Forestry, 이하 ‘LULUCF’)과 관련된 탄소축적량 변화와 온실가스 흡수량 및 배출량을 산정하기 위해서는 IPCC 지침에서 제시된 토지이용구분에 따른 토지이용변화에 대한 정보가 필요하다. 또한, IPCC 지침에서 토지 전환에 따른 토양 탄소가 평형에 도달하기 위해 최소 20년이 소요되므로 해당 토지에 대해 최소 20년 전의 토지이용 정보가 요구된다(IPCC, 2006). 따라서 이러한 토지이용변화에 따른 정보를 취득하기 위해서 토지이용변화 매트릭스 구축에 관한 연구가 필수적이다.

IPCC (2006)는 토지이용변화 매트릭스를 구축하기 위해 토지이용 기본 자료, 토지이용 및 토지이용변화에 대한 조사, 지리적으로 분명한 토지이용 자료 사용 등 3가지 방법을 제시한다. 지리적으로 명확한 토지이용 자료를 사용하기 위해 항공사진이나 원격탐사 등의 영상자료를 활용하는 공간정보 분석은 토지이용변화의 공간적 분포를 쉽게 파악할 수 있는 장점이 있다. 일반적으로 두 개 시점의 위성영상 자료를 활용하여 두 시점의 토지이용구분도를 작성한 후 시점에 따른 토지이용 변화를 분석하여 토지이용변화 매트릭스를 작성한다(IPCC, 2006). 하지만 위성영상 자료의 활용을 위해 자료 취득 과정이 복잡하고 대용량 자료 처리 등의 비용 문제, 그리고 사용될 자료로 편집하는 전처리 과정을 위한 전문성 등의 노력이 요구된다. 반면에 point sampling 기법은 토지면적 추정 및 토지

이용변화 분석이 원격탐사 방법과 비교하여 시간·경제적으로 효율적인 방법으로 제시하였다(Achard et al., 2008; Lund, 1982; Vesterby and Heimlich, 1991). 이러한 장점으로 인하여 핀란드, 스웨덴 등의 국가에서는 국가산림자원조사 기반의 point sampling 방법론을 적용하고 있다(Statistics Finland, 2023; Swedish Environmental Protection Agency, 2019).

지금까지의 국내 토지이용변화 매트릭스 구축을 위한 연구는 국가산림자원조사의 표본점 자료를 기반으로 point sampling 방법론을 적용한 연구가 주를 이루고 있다. Park et al. (2018)은 수도권을 대상으로 point sampling 방법론과 wall-to-wall 방법론을 활용하여 2000년대에서 2010년대까지의 토지이용변화 면적 결과를 비교하였으며, 그 결과 Achard et al. (2008) 등의 연구와 유사한 결론을 얻었다. Yim et al. (2020)은 표본강도에 따라 토지이용 면적 산정 및 불확실성을 평가하였으며, 그 결과 표본점 간 간격의 길이가 짧고 표본개소수가 증가함에 따라 불확도가 낮게 나타났다. You (2015)는 핀란드의 토지이용변화 매트릭스 산정방식 중 일부 연차 자료만 활용하는 방식을 바탕으로 표본점이 부족한 토지이용 범주인 초지, 습지, 토지이용변화(전용) 등에 해당하는 면적을 산정하고 토지이용 면적의 매년 산정을 위한 가중치 적용 방안을 연구하였다. Park et al. (2017)은 딥러닝 모델을 이용한 토지이용변화 매트릭스를 구축하여 과거 자료를 바탕으로 토지이용변화를 파악 및 예측하였다.

우리나라와 비슷한 국가산림자원조사 체계를 갖춘 핀란드는 국가 온실가스 인벤토리의 토지이용변화 매트릭스를 작성하기 위해 산정연도의 2년 전 분과 2년 후 분의 표본점 토지이용 자료로 총 5년의 표본점 자료를 활용한 이동평균법을 적용한다. 핀란드의 국가산림자원조사는 2004년(제10차)부터 우리나라와 동일한 5년 조사체계로 진행되며, 만약 온실가스 인벤토리 보고 연도 기준 국가산림자원조사의 한 주기가 종료되지 못한 상태면 조사 완료된 최근 연도의 일부를 2~3회 중복으로 활용하여 토지이용변화 매트릭스를 산정하여 활용하고 있다(Statistics Finland, 2023).

Statistics Finland (2023)에서 제시하는 이동평균법을 적용하는 이유는 1) 특정 연도에 토지이용변화가 발생한 소수의 표본 조사구로 인해 발생하는 표본 오차를 줄이고, 2) 배치된 표본점에 발생한 토지이용의 전용이 배치된 연도에 발생하지 않을 수 있기 때문이다. 그리고 산림이나 농경지 등으로 편입되거나 타토지로 전용될 시 그 변

화 기간이 단기간만으로는 이루어지지 않고, 각 연차에 배치된 표본점은 5년 뒤에 재조사하므로 그 간격을 줄일 수 있으며, 이러한 차이를 줄이기 위해 핀란드는 이동평균법을 적용하였다.

본 연구는 우리나라 국가산림자원조사에서 수집된 고정표본점의 토지이용/피복 자료를 활용하여 핀란드에서 적용하고 있는 토지이용변화 면적 산정 방법의 국내 적용성을 검토하여 국가 온실가스 인벤토리를 위한 고정표본점 기반의 토지이용변화 매트릭스 작성방안을 검토하고 활용 가능성을 제시하고자 한다.

2. 재료 및 방법

2.1. 연구 대상지

본 연구의 대상지는 행정구역상 경기도에 설치된 국가산림자원조사의 모든 고정표본점을 대상으로 한다(Fig. 1). 경기도의 2020년 기준 국토면적은 1,019,527 ha로 전국에서 5번째로 넓은 면적을 가지고 있으며, 산림 면적은 512,105 ha로 매년 산림의 타용도 전용 허가 현황 면적이 제일 많은 지역이다(KFS, 2021). 경기도는 수도 서울을 둘러싸고 있는 지리적 위치로 인해 다양한 도시화와 산업화가 이루어지고 있어 우리나라 국토계획의 가장 중요한 비중을 차지하고 있다.

1960년대 이후 경기도의 토지이용 변화의 특성은 크게 다음 세 가지로 요약할 수 있다. 첫째는 급속한 도시화와 산업화에 따른 도시적 토지이용의 증가이다. 둘째, 급속한 도시화에도 불구하고 경기도 전체 면적의 50% 이상을 차지하는 산림의 유지이다. 셋째, 경기도가 서울, 인천과 함께 대도시 권역으로 확대되면서 우리나라 국토의 중심부의 역할을 하고 있다(Ku, 2005).

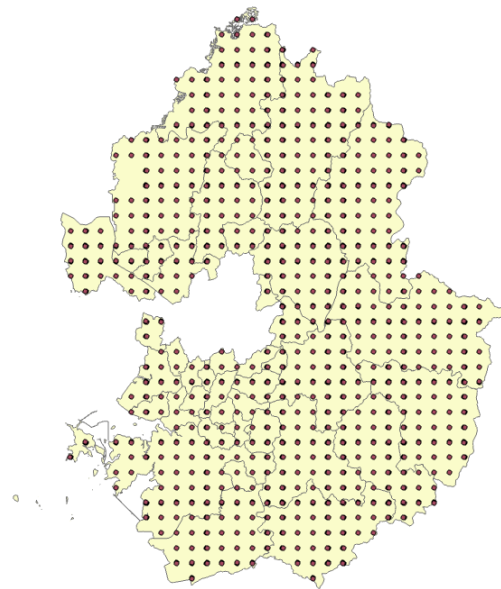


Fig. 1. NFI sample points distribution in Gyeonggi Province

2.2. 표본점의 토지이용 파악

국가산림자원조사의 고정표본점은 임목측적 등 산림자원량의 현황을 파악하기 위한 목적으로 계통추출법에 의해 배치되며, 고정표본점 중 산림에 위치한 표본점에 대해서는 산림자원에 관한 현지조사가 수행되고 있다(KFS, 2006). 항공사진과 위성영상을 판독하고 현지 방문 후 비산림으로 파악된 표본점(Fig. 1에서 산림에 해당하지 않아 각 연차에 배정되지 못한 표본점)은 IPCC 2006 GL(Guideline)에서 제시한 6가지 토지이용 범주 중 산림을 제외한 5가지 토지이용으로 파악해야 한다. 각 토지이용 범주에 대한 정의는 Table 1과 같다.

국가산림자원조사의 표본점은 국내 중부원점을 기준으

Table 1. Land use categories suggested by the IPCC 2006 guidelines (IPCC, 2006)

| Category | Definition |
|-------------|--|
| Forest land | Minimum forest area 0.05 ~ 1 ha, minimum height 2 ~ 5 m, minimum crown congestion 10 ~ 30% (Minimum width is set for each country) |
| Cropland | Arable land, tillage, mixed farming system |
| Grassland | Grazing and pasture that are not considered agricultural land |
| Wetlands | Land that is flooded or saturated with water all year round or in part |
| Settlements | All developed land, including transport infrastructure and human dwellings of all sizes |
| Other land | Not managed land that is not included in the above 5 land use categories |

Table 2. Weighing method used in Finland

| Year | Number of years to be used in the calculation (n is the calculation year) | | | | |
|---|--|-------|-----|-------|-------|
| | $n-2$ | $n-1$ | n | $n+1$ | $n+2$ |
| 1990 | - | - | ×2 | ×2 | ×1 |
| 1991 | - | ×2 | ×1 | ×1 | ×1 |
| ... Year of 2002 is the middle year ... | | | | | |
| 2019 | ×1 | ×1 | ×1 | ×2 | - |
| 2020 | ×1 | ×2 | ×2 | - | - |
| 2021 | ×2 | ×3 | - | - | - |

로 4km 격자에 배치되며(Fig. 1), 모든 표본점의 토지이용/피복을 항공사진 및 현지조사를 통하여 산림과 비산림으로 구분하고, 산림에 포함되는 표본점을 대상으로 매년 전체 표본점의 20%씩 수행하는 5년 주기의 연년조사체계를 적용하고 있다(KFS, 2006). 또한, 제5차 NFI에서 배치된 표본점은 고정표본점으로 매 5년 주기로 재조사가 수행되고 있다. 즉, 2006년에 배치된 고정표본점에 대해서는 2011년, 2016년 및 2021년도에 재조사가 수행되었으며, 2010년에 배치된 고정표본점의 재조사는 2015년, 2020년 및 2025년도에 수행되었다.

2.3. 토지이용 및 토지이용변화 분석

토지이용의 파악을 위해 LULUCF에서 제시하는 ‘토지이용변화 매트릭스’ 구축을 통해 한 지역의 토지이용이 초기 시점에서 최종 시점까지 토지이용이 그대로 유지되었거나 타 토지로 전용되었는지, 아니면 타 토지에서 전환된 것인지에 대해 한눈에 알아볼 수 있다. IPCC 지침에 따라 국가 온실가스 인벤토리는 1990년부터 산정한다. 하지만 이때와 최근 기간은 이동평균법을 활용한 토지이용변화 면적 산정을 위한 자료가 부족하여 핀란드에서는 1990~2021년의 온실가스 인벤토리 산정 및 보고 기준에 대해 Table 2와 같은 방법을 적용한다(Statistics Finland, 2023).

핀란드는 토지이용변화 면적 산정을 위해 산정 연도를 중앙값으로 두고 전·후 2년으로 총 5년의 자료를 활용한 이동평균법을 적용한다. 예를 들어 2013년의 토지이용변화 면적을 산정하기 위해 2011년부터 2015년까지의 토지이용변화 면적 자료를 활용한다. 이동평균을 적용하는 이유는 5년 주기 조사체제로 5년간 자료가 수집되어야 전체 국토에 관한 토지이용에 관한 정보가 수집되어 연차별 자

료의 갱신이 가능하기 때문이다. 다만 인벤토리 보고 시작 연도인 1990~1991년과 최종 보고 연도인 2019~2021년의 산정 방법은 조금씩 다르다. 1990년은 1988~1992년까지, 1991년은 1989~1993년까지, 2019년은 2017~2021년까지, 2020년은 2018~2022년까지, 2021년은 2019~2023년까지의 자료를 활용해야 한다. 하지만 1988년에서 1989년까지의 자료와 2021년에서 2023년까지의 자료는 보고 연도인 1990~2021년에 해당하지 않고, 핀란드의 과거 NFI 조사 주기가 현재와 다르므로 계산에 포함되지 않는다. 특히 최종 보고 연도인 2021년 시점에서 사진 자료의 전처리 등 이유로 2020년까지만 구축되었다.

핀란드는 이러한 문제를 해결하기 위해 산정(보고)연도 기준 3년 자료를 사용할 때 n 년도 자료는 두 번 활용, $n-1$ 년도 자료는 두 번 활용, $n-2$ 년도 자료는 한 번 활용하고, 4년의 자료를 사용할 때 $n+1$ 년도 자료는 두 번 활용, n 년도 자료는 한 번 활용, $n-1$ 년도 자료는 한 번 활용, $n-2$ 년도 자료는 한 번 활용하여 총 5년분이 되도록 한다. 다만 2년분만 사용하여 산정하는 경우는 온실가스 인벤토리 발표연도의 자료가 완전히 구축되어있지 않기 때문에 $n-1$ 년도 자료는 세 번 활용, $n-2$ 년도 자료는 두 번 활용한다. 이러한 방식을 적절히 활용하면 핀란드와 같이 5년 조사체제인 우리나라의 NFI 자료를 활용하여 매년 토지이용 및 토지이용변화 면적을 산정할 수 있을 것이다.

본 연구는 다음과 같은 식을 적용하여 국가산림자원조사 5년 주기를 완성하여 매트릭스를 구축하였다. 다만 4년의 자료를 활용하여 면적을 산정하는 경우는 $n+1$ 년(2020년 기준 2021년)의 자료를 활용하기 때문에 본 연구에서는 제외하였다.

$$L_{2010, 2020} = A_{2020} \times [(x_{2008, 2018}) + 2(x_{2009, 2019}) + 2(x_{2010, 2020})]$$

$$L_{2010, 2020} = A_{2020} \times [2(x_{2008, 2018}) + 3(x_{2009, 2019})]$$

$L_{2010, 2020}$: Land use and land use change area in 2010, 2020

A : Gyeonggi Province land area

x_n : Cluster-plots for each land use in n year

2.4. 불확도 및 적용 가능성 분석

불확도란 측정값의 불확실성 정도로 인벤토리 정확도 향상을 위해 우선순위를 정하는데 도움을 준다(IPCC, 2006). 표준오차는 추정량의 정도를 나타내는 측도로 추정량에 관한 표준분포의 표준편차를 말하며, 한 토지이용 범주의 산정된 면적 기준 표준오차의 면적에 해당 토지이용 범주의 면적을 나누면 불확도를 산정할 수 있다. 불확도 산정 기준은 5년분 자료를 온전히 사용했을 때의 토지이용변화 매트릭스를 기준으로 한다. 2~3년분의 자료만을 활용한다 하더라도 중복으로 활용하여 총합 5년의 한 주기를 완성하기 때문에 총 표본점 개수는 크게 차이가 나지 않는다. 불확도 산정을 위해 IPCC (2006)에서 제시하는 면적 산정 기준 수식을 활용했다.

$$s(A_h) = A \times \sqrt{\frac{p_h(1-p_h)}{n-1}}$$

$$(Uncertainty(\%)) = \frac{s(A_h)}{A_h} \times 100$$

n : Total number of cluster-plots

n_h : Number of cluster-plots in the land use h category

p_h : Land use ratio in the land-use h category

A : Land area of Gyeonggi Province in the year of calculation

A_h : Area of land use h category for calculation year

$s(A_h)$: Standard error for the area of land use h category

본 연구에서 토지이용구분에 따른 산정한 면적에 관한 적합성을 비교하기 위하여 지적통계의 범주별 면적과 비교하였다. 본 연구에서 참조자료로 산림 면적은 지적통계의 ‘임야’ 면적을 적용하여 비교하였다. 원래는 ‘산림

기본통계’ 등의 산림 면적 자료를 사용해야 하나 일부 연도의 산림 면적이 발표되지 않아 시계열 파악이 어렵기 때문이다.

농경지 면적은 지적통계의 ‘논’과 ‘밭’, ‘과수원’ 면적 자료를 합산하여 사용하였다. 농업 면적조사는 2012년부터 조사체계가 원격탐사 체계로 바뀌어 면적 산정 기준이 달라졌다(Statistics Korea, 2013). 초지 면적은 지적통계 상 ‘목장용지’ 면적을 사용하였으며, 습지 면적은 지적통계 상의 ‘하천’, ‘구거’, ‘유지’, ‘양어장’ 면적을 합산한 자료를 사용하였다. 정주지는 지적통계 상 ‘광천지’, ‘염전’, ‘대’, ‘공장용지’, ‘학교용지’, ‘주차장’, ‘주유소용지’, ‘창고용지’, ‘도로’, ‘철도용지’, ‘제방’, ‘수도용지’, ‘공원’, ‘체육용지’, ‘유원지’, ‘종교용지’, ‘사적지’, ‘묘지’ 면적을 합산한 자료를 사용하였다. 마지막으로 기타 토지 면적은 전국 면적에서 산림, 농경지, 초지, 습지, 정주지 면적을 합산한 후 지적통계의 경기도 면적에서 제외한 면적이나 ‘나지’와 ‘암석지’ 등의 면적을 사용해야 하지만, 기타 토지의 불명확한 정의 등 정주지와 구별이 모호함에 따라 정주지 면적과 합산하여 사용하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 토지이용 및 토지이용변화 매트릭스

경기도에 배치된 집락표본점은 비산림에 배치된 표본점을 포함하여 총 625개이지만, 이 중에서 접근이 어려워 조사에 어려움이 있는 8개의 표본점은 본 연구에서 제외하였다. 면적 기준 제5차 국가산림자원조사와 제7차 국가산림자원조사 간 토지이용변화 매트릭스는 Table 3과 같다. 결과는 전체적으로 산림과 농경지 면적은 감소함을 보이고, 정주지 면적은 증가하였으며, 초지와 습지 면적은 큰 변화가 없었다. 이는 산림 또는 농경지의 신도시 개발, 도로 건설 또는 골프장 조성 등 타토지 전용에 의한 것이다.

산정 및 보고 연도인 2020년의 토지이용 면적을 산정하기 위해 국가산림자원조사의 3~4차년도(2008~2009년, 2018~2019년) 2개 연도를 활용하는 경우와 3~5차년도(2008~2010년, 2018~2020) 3개 연도를 활용하는 경우의 면적 기준 토지이용 및 토지이용변화 매트릭스는 Table 4, Table 5와 같다.

2020년 경기도 지적통계 기준 농경지 면적은 212,261 ha로 산정 면적과 비교했을 때 3만6천 ha(집락표본점 기

Table 3. Land-use change matrix between the 5th and 7th NFI

(Unit: ha)

| Land-use Category | 5 th NFI (2006 ~ 2010) | | | | | Total |
|-----------------------------------|-----------------------------------|----------|-----------|----------|-------------|-----------|
| | Forest land | Cropland | Grassland | Wetlands | Settlements | |
| 7 th NFI (2016 ~ 2020) | Forest land | 535,376 | | | | 535,376 |
| | Cropland | 3,305 | 214,811 | | | 218,116 |
| | Grassland | | | 4,957 | | 4,957 |
| | Wetlands | | 1,653 | | 39,658 | 41,310 |
| | Settlements | 13,219 | 29,743 | | 176,806 | 219,768 |
| | Total | 551,900 | 246,207 | 4,957 | 39,657 | 1,019,527 |

Table 4. Land-use change matrix between the 5th and 7th NFI using 2 years data

(Unit: ha)

| Land-use Category | 5 th NFI (2008 ~ 2009) | | | | | Total |
|-----------------------------------|-----------------------------------|----------|-----------|----------|-------------|-----------|
| | Forest land | Cropland | Grassland | Wetlands | Settlements | |
| 7 th NFI (2018 ~ 2019) | Forest land | 513,106 | | | | 513,106 |
| | Cropland | | 222,290 | | | 222,290 |
| | Grassland | | | 6,685 | | 6,685 |
| | Wetlands | | | | 41,784 | 41,784 |
| | Settlements | 11,699 | 31,756 | | 192,206 | 235,661 |
| | Total | 524,806 | 254,046 | 6,685 | 41,784 | 1,019,527 |

Table 5. Land-use change matrix between the 5th and 7th NFI using 3 years data

(Unit: ha)

| Land-use Category | 5 th NFI (2008 ~ 2010) | | | | | Total |
|-----------------------------------|-----------------------------------|----------|-----------|----------|-------------|-----------|
| | Forest land | Cropland | Grassland | Wetlands | Settlements | |
| 7 th NFI (2018 ~ 2020) | Forest land | 528,148 | | | | 528,148 |
| | Cropland | | 218,948 | | | 218,948 |
| | Grassland | | | 3,343 | | 3,343 |
| | Wetlands | | 3,343 | | 41,784 | 45,127 |
| | Settlements | 10,028 | 21,728 | | 192,206 | 223,962 |
| | Total | 538,177 | 244,018 | 3,343 | 41,784 | 1,019,527 |

준 약 22개) 이상의 차이가 나타난다. 이러한 결과는 지목은 임야이지만 토지피복 상 농경지에 분류되었으며, 표본점 토지이용 조사 시 농경지 내 건축물 존재에 따른 토지이용 판단의 어려움, 초지와 농경지 또는 산림(무입목지) 판독의 어려움, 지목은 임야이지만 토지피복 판독은 농경지인 경우 등 토지피복(Land-cover)과 토지이용(Land-use)의 정의에 따른 차이와 구분과정의 오분류로 판단된다. 이러한 혼선의 해결을 위해 미국과 일본의 사례와 같이 NFI 자료와 토지피복도, 지적도 등 다양한 공간자료를 조

합하여 우선순위를 설정하는 등의 방법이 필요하다(Choi et al., 2024).

초지 면적은 5개 연도 중 해당 표본점이 없는 년도(2·4·5년차)가 있으므로 해당 표본점이 있는 해의 자료를 복수로 활용하여 산정되었으며, Table 4와 같이 지적통계 기준(2010년 기준 6,629 ha)과 차이가 나타나지 않는 것은 적은 표본점 수에 따른 단순 계산에 의한 결과의 일치로 판단된다. 습지는 산림 내 습지 존재 등의 이유로 지적통계 기준과 대비하여 표본점 수 부족에 따라 낮은 면적이 산정

된 것으로 보인다. 그리고 Table 4에 비해 Table 5에서 농경지에서 습지로 전용된 표본점이 존재하는데, 이는 산정연도인 2010년과 2020년에 해당 표본점이 배치되었기 때문이다. 이러한 차이를 줄이기 위해서 초지와 습지에 대한 토지이용 범주의 경계를 명확히 설정하고 You (2015)의 연구와 같이 가중치 부여 방안 등을 고려해야 한다.

3.2. 토지이용 및 토지이용변화의 불확도

오전한 5년분의 자료를 활용하여 산정한 매트릭스에서 측정값의 불확실 정도인 표준오차와 불확도를 산정한 결과를 살펴보면(Table 6), 전체적으로 한 토지이용 범주에 대해 그대로 유지되는 토지가 다른 토지이용 범주로 전용된 토지보다 표준오차 및 불확도가 훨씬 낮았다. 이는 산림과 농경지, 정주지에 충분한 표본점이 배치되었고, 전용된 토지에 해당하는 표본점 수는 적게 배치된 결과로 보인다.

전체적으로 10년간 불확도가 5% 미만으로 나타난 항목은 산림으로 유지되는 산림이다. 불확도가 10% 미만으로 나타난 항목은 농경지와 정주지로 유지되는 농경지와 정주지이다. 초지와 관련된 토지이용의 표본점 수는 3개로 불확도 57.6%, 습지와 관련된 표본점 수는 24~25개로 불확도가 20% 내외로 나타났다.

토지이용이 아닌 토지이용변화와 관련된 항목은 불확도가 높게 나타났다. 산림에서 농경지로 전용된 토지이용변화에 해당하는 표본점 수는 2개로 불확도 70.7%, 농경지에서 습지로 전용된 토지이용변화에 해당하는 표본점은 1개로 불확도가 100%로 산정되었다. 산림에서 정주지로 전용된 토지이용변화에 해당하는 표본점 수는 8개로 불확도 35.2%, 농경지에서 정주지로 전용된 토지이용변화에 해당하는 표본점 수는 18개로 불확도 23.2%로 산정되었다. 이는 토지이용변화에 해당하는 표본점 수가 산림, 농경지, 정주지로 유지되는 토지이용에 해당하는 표본점 수에 비해 상대적으로 적기 때문이다.

산정된 결과로 봤을 때 표본점 수가 18~25개 정도이면 불확도가 20% 내외로 산정되는 것으로 나타났다. 표본점 수가 3개부터는 불확도가 70% 수준을 시작으로 급격하게 낮아졌으며, 8개부터는 35% 내외인 반절 수준으로 줄어들었다. 정주지와 관련된 토지이용의 표본점 개수로 보아 전체 표본점 수의 1/6 정도가 불확도가 10% 내외 수준으로 나타남을 짐작할 수 있다. 결국 표본조사에 의한 방법에서 면적이 상대적으로 넓은 토지이용의 경우에는 정확도가 높지만, 면적이 적은 토지이용(습지 등)에서 불확도가 높은 것으로 나타났다. Saikku et al. (2022)와 Holmberg et al. (2023)의 연구 또한 핀란드 지자체에서

Table 6. Matrix by standard error, uncertainty and plots

| Land-use Category | NFI5 | | | | | Total |
|-------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| | Forest land | Cropland | Grassland | Wetlands | Settlements | |
| Forest land | 20,513 ha (3.8%) | | | | | 20,513 ha (3.8%) |
| | 324 plots | | | | | 324 plots |
| Cropland | 2,335 ha (70.7%) | 16,752 ha (7.8%) | | | | 16,845 ha (7.7%) |
| | 2 plots | 130 plots | | | | 132 plots |
| Grassland | | | 2,857 ha (57.6%) | | | 2,857 ha (57.6%) |
| | | | 3 plots | | | 3 plots |
| Wetlands | | 1,652 ha (100%) | | 7,942 ha (20.0%) | | 8,099 ha (19.6%) |
| | | 1 plot | | 24 plots | | 25 plots |
| Settlements | 4,647 ha (35.2%) | 6,913 ha (23.2%) | | | 15,552 ha (8.8%) | 16,892 ha (7.7%) |
| | 8 plots | 18 plots | | | 107 plots | 133 plots |
| Total | 20,469 ha (3.7%) | 17,581 ha (7.1%) | 2,857 ha (57.6%) | 7,942 ha (20.0%) | 15,552 ha (8.8%) | 617 plots |
| | 334 plots | 149 plots | 3 plots | 24 plots | 107 plots | |

활용할 수 있는 결과를 산정했지만, 더 작은 공간 단위에 대해 불확실성이 증가함에 따라 적용에 어려움이 있다고 하였다. 우리나라는 NFI의 표본점 간격 기준인 4 km에 따라 임목축적을 산정할 때 국가 단위에 활용할 경우 허용 오차율은 5%, 시도 단위에 활용할 경우 10%를 적용하며 (Kim and Kim, 2015), 오차를 내로 결과가 도출되도록 산림에 해당하는 표본 개소수가 결정된다. 이처럼 NFI의 표본점 좌표를 활용하여 토지이용에 따른 면적 산정 또한 국가 또는 지자체 단위에 활용될 적절한 불확도 기준을 설정하고 이에 따른 표본점 추가 설치를 고려할 필요가 있다.

초지와 습지, 그리고 토지이용변화의 불확도 결과와 같이 높은 불확도 수준을 낮추기 위해서는 결국 표본점의 추가 배치를 고려해야 한다. 예를 들면 NFI의 임목축적 산정 시 서울, 부산, 세종 등과 같은 특광역시나 울릉도 같은 경우 배치된 고정표본점이 적어 그대로 산정 시 불확도 수준이 훨씬 높아 1~2 km 간격으로 표본점을 설치하였으며, Moon et al. (2021)의 연구에서는 토지이용 면적 산정 시 표본점 간격을 2 km로 설정할 때 불확실성은 표본점 간격이 4.6 km일 때와 비교하여 감소하는 것으로 보고하였다.

3.3. 지적통계 기준과 비교

산정한 토지이용 면적을 지적통계 기준과 비교한 결과 (Table 7), 전체적으로 산림, 농경지, 정주지 면적이 연차분의 조합 정도에 따라 지적통계 기준과의 차이가 줄어들 수 있었다. 다만 5년분 모두의 자료를 온전히 활용한 제7차 국가산림자원조사에서의 산림과 농경지 면적은 지적통계 기준과 큰 차이가 나타났는데, 이는 2년도분 활용방식과 3년도분 활용방식의 차이인 보고 연도 (2020년)분의 자료를 활용하지 않았고, 산림자원 조사 시 5차년도에 배치된 비산림 표본점 중 피복 기준 산림과 농경지로 판별된 표본점이 많이 배치되었으며, 전용이 나타난 표본점이 적은 수 배치되었기 때문으로 보인다.

경기도에 분포하는 집락표본점 하나당 약 1,600 ha를 담당하므로 산림의 농경지 전용, 농경지의 습지 전용 등 해당 표본점 면적 내에 다양한 토지이용의 탐지는 제한된다. 따라서 산림청에서 발표한 2010년에서 2020년까지의 경기도 산지 전용 총면적은 파악할 수 있지만, 토지이용 범주별 산지 전용 면적은 발표하지 않아 세부적인 비교가 어렵다.

경기도의 연도별 산지 전용 총면적은 2010년에서 2020

Table 7. Comparison with cadastral statistics

| Classification | | Land-Use Category | | | | |
|-----------------------|------------|-------------------|----------|-----------|----------|-------------|
| | | Forest land | Cropland | Grassland | Wetlands | Settlements |
| Year Book in 2010 (%) | | 54.3 | 23.1 | 0.7 | 6.5 | 15.5 |
| 2 years | NFI (%) | 51.5 | 24.9 | 0.7 | 4.1 | 18.9 |
| | Difference | -2.8 | 1.8 | 0.0 | -2.4 | 3.4 |
| 3 years | NFI (%) | 52.8 | 23.9 | 0.3 | 4.1 | 18.9 |
| | Difference | -1.5 | 0.9 | -0.3 | -2.4 | 3.4 |
| 5 years | NFI (%) | 54.1 | 24.1 | 0.5 | 3.9 | 17.3 |
| | Difference | -0.1 | 1.1 | -0.2 | -2.6 | 1.9 |
| Year Book in 2020 (%) | | 52.0 | 20.8 | 0.6 | 6.6 | 20.0 |
| 2 years | NFI (%) | 50.3 | 21.8 | 0.7 | 4.1 | 23.1 |
| | Difference | -1.6 | 1.0 | 0.1 | -2.5 | 3.1 |
| 3 years | NFI (%) | 51.8 | 21.5 | 0.3 | 4.4 | 22.0 |
| | Difference | -0.2 | 0.7 | -0.3 | -2.2 | 2.0 |
| 5 years | NFI (%) | 52.5 | 21.4 | 0.5 | 4.1 | 21.6 |
| | Difference | 0.5 | 0.6 | -0.1 | -2.6 | 1.6 |

년까지 총 23,634 ha(2020년 경기도 국토면적 기준 약 2.3%)로, 본 연구에서 산정한 3가지 경우의 매트릭스 기준의 2020년 산림 면적과 2010년 면적 차이보다 평균 약 1.0% 정도 높게 나타난다. 지적통계 기준 2010년 산림 면적과 2020년 면적 차이 비율은 2.3%로, 이 또한 매트릭스 기준 차이보다 1.0% 정도 높게 나타난다. 그리고 2020년 지적통계 기준 경기도 임야 면적과 비교하여 산림기본통계 기준 산림 면적이 17,700 ha 정도 낮으므로, Table 7의 산정 산림 면적 값과 비교 시 차이는 더욱더 줄어들 것이다. 이러한 차이의 이유는 기존 우리나라의 산림 토지이용 면적 산정 시 FAO의 정의(토지피복)에 따른 정의를 준용하여 임상도를 활용하고 있으나, 지적통계는 토지이용에 관한 정의로 준용하기 때문이다(Yim et al., 2015).

Table 7과 같은 결과는 LULUCF 중 ‘토지이용(Land Use)’에 대한 결과이고, 2010년에서 2020년까지의 토지이용 면적 차이를 산정한 것은 ‘토지이용변화(Land Use Change)’를 파악한 것이다. 이러한 면적 차이 값을 줄이기 위해서는 비산림에 해당하는 각 고정표본점을 적절한 표본추출법(NFI의 계통추출법과 같이)에 의해 1~5년차에 고르게 배분해야 할 것이다(You, 2015). 또한, 현재까지는 산림청에서 제공하는 ‘산지의 타용도 전용 현황’ 보고서에서 산지 전용 면적은 전국 기준 각 토지이용 범주별로 전용된 면적 파악이 가능하나 지자체별로는 전체 전용 면적만 파악할 수 있으므로, 추후 이러한 부분이 개선된 통계 및 보고서가 발표되면 세부적인 비교가 가능할 것이다.

4. 결론

본 연구는 토지이용에 따른 온실가스 인벤토리를 구축하기 위해 지금까지 축적된 제5차 국가산림자원조사 자료와 제7차 국가산림자원조사 자료 중 일부 연도의 자료를 활용하여 산림, 농경지, 초지, 습지, 정주지 등 토지이용 범주에 따른 면적 산정하여 국가 온실가스 인벤토리 보고서에서의 활용 가능성을 분석하였다.

집락표본점 기준으로 산정한 토지이용별 면적 산정은 지적통계와 동일하게 산림과 농경지는 연도가 지날수록 면적이 감소하고, 정주지는 면적이 점점 증가하는 추세를 보였다. 하지만 본 연구에서는 정주지와 기타토지의 명확한 정의가 불분명하여 같이 합산하여 산정하였다. 향후에는 정주지와 기타토지 간 토지이용 경계를 국가 차원에서 분명하게 해야 한다.

경기도의 국가산림자원조사 1차연도에 조사할 고정표

본점 수는 제5차 NFI 기준 69개로 총 5년 조사 기간에 가장 많은 표본점이 배치되어 있으며, 3차연도에 조사할 고정표본점은 64개로 가장 적은 표본점이 배치되어 있다. 추후 각 연차에 배치한 산림의 고정표본점과 같이 비산림에 해당하는 표본점을 과학적인 배치방법에 따른 재분배가 필요하다.

본 연구는 제5차 국가산림자원조사와 제7차 국가산림자원조사 간 토지이용 변화를 분석할 때 일부 연도분만의 자료를 통한 외삽을 위해 핀란드에서 활용하는 방법을 적용하였다. 향후에는 고정(집락)표본점 간격인 4 km 내에서 간과될 수 있는 토지이용변화와 추후 타 토지에서 산림으로 전환(편입)되는 토지이용변화를 최대한 적용할 수 있도록 부표본점을 기준으로 산정하는 방안 관련 연구가 필요하다. S2~4 표본점의 토지이용이 예를 들어 산림인데 S1 표본점의 토지이용이 농경지여서 농경지로 판독한 본 연구는 집락표본점만을 대상으로 하였으며, S1 표본점에서 S2~4 표본점 간의 거리가 50 m 밖에 되지 않아 각 부표본점 간의 독립성과 이질성에 대한 논의가 필요하다. 그리고 매년 편입 또는 새로 개발되는 산림 표본점이 조금씩 추가되고 있는데, 핀란드의 사례와 같이 면적 산정을 위한 표본점 자료의 활용 기준 연도 설정 및 비산림 표본점의 활용성을 고려해야 한다.

토지이용변화 매트릭스를 구축할 때 표본점 수가 많은 산림, 농경지, 정주지 토지이용의 불확도와 표준오차가 낮고, 산림이나 농경지에서 타 토지로 전용되는 토지이용변화의 불확도 및 표준오차는 높았다. 핀란드의 경우에도 토지이용 및 토지이용변화 면적이 작을 때 불확도는 높은 것으로 제시되고 있다. 불확도가 10% 이내에 들지 못한 토지이용 및 토지이용변화의 불확도 개선 이슈를 위해 면적이 적은 토지이용을 정확히 파악할 수 있는 표본개소수가 요구되므로 비용 효율적인 측면을 고려할 필요가 있다. 본 연구에 사용된 point sampling 기법을 이용하여 Yim et al. (2020)의 연구와 같이 적절한 표본 강도의 표본점 배치 및 통계 산출 기법에 관한 연구 또한 필요하다.

추후 본 연구를 확장하여 최근 파리협정에서 신규조림, 재조림, 산지 전용 등 요구되는 산림경영 활동 보고, 국내에서는 산림기본통계 등의 적용을 위해 산림을 임목지와 무임목지로 세분화, 그리고 임상별 또는 수종에 따른 수종변화 매트릭스 또한 구축 등 활용목적에 부합하는 매트릭스를 산정할 필요가 있다. 본 연구의 면적 계산 방식을 최근의 자료에 적용하면 더욱 상세하게 앞으로의 매년 토지이용변화 면적을 예측해볼 수 있을 것이며, 끝으로 미

국과 일본 등의 국가와 같이 국가산림자원조사 표본점 자료와 토지 피복 지도, 토지이용 기준인 지적도 등 다양한 공간자료를 조합하여 적절한 토지이용변화 매트릭스 작성 방법을 고려해야 할 것이다(EPA, 2022).

Reference

- Achard F, Grassi G, Herold M, Teobaldelli M, Mollicone D. 2008. Use of satellite remote sensing in LULUCF sector. GOF-C-GOLD Report 33.
- Choi SE, Song CH, Kim Wj, Lee SJ, Yim JS, Lee WK. 2024. Spatial data overlap analysis for constructing a land-use and land-use-change matrix: A focus on Gyeonggi-do. *J Clim Change Res* 15(1): 15-34. doi: 10.15531/KSCCR.2024.15.1.015
- EPA (United States Environmental Protection Agency). 2022. Inventory of U.S. greenhouse gas emissions and sinks: 1990-2020.
- GIR (Greenhouse Gas Inventory & Researches Center). 2014. National greenhouse gas inventory - Guideline for measurement, reporting, verification -. (in Korean).
- Holmberg M, Junttila V, Schulz T, Grönroos J, Paunu VV, Savolahti M, Minunno F, Ojanen P, Akujärvi A, Karvosenoja N, Kortelainen P, Mäkelä A, Peltoniemi M, Petäjä J, Vanhala P, Forsius M. 2023. Role of land cover in Finland's greenhouse gas emissions. *Ambio* 52(11): 1697-1715. doi: 10.1007/s13280-023-01910-8
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2006. Chapter 3. Consistent representation of lands. In: IPCC Guidelines for national Greenhouse gas inventories. p. 3.1-3.42.
- KFS (Korea Forest Service). 2006. The 5th national forest inventory - Field manual -. (in Korean).
- KFS (Korea Forest Service). 2021. Statistical yearbook of forest. Daejeon: Korea Forest Service. (in Korean).
- Kim ES, Kim CM. 2015. Estimations of forest growing stocks in small-area level considering local forest characteristics. *J Korean For Soc* 104(1): 117-126. doi: 10.14578/jkfs.2015.104.1.117
- Ku CY. 2005. Analysis of landuse/landcover change for Kyunggi province using GIS. *J Soc Sci* 21: 1-15.
- Lund HG. 1982. Point sampling - The role in in-place resources inventories. In: Brann TB, House LO, Lund H (eds). In-place resources inventories: Principles and practices. Proceedings of a national workshop; 1981 Aug 9~Aug 14; Society of American Foresters. p. 79-84.
- Moon GH, Yim JS, Moon NH. 2021. Optimal sampling intensity in South Korea for a land-use change matrix using point sampling. *Land* 10(7): 677. doi: 10.3390/land10070677
- Park EB, Song CH, Ham BY, Kim JW, Lee JY, Choi SE, Lee WK. 2018. Comparison of sampling and wall-to-wall methodologies for reporting the GHG inventory of the LULUCF sector in Korea. *J Clim Change Res* 9(4): 385-398. doi: 10.15531/kscrcr.2018.9.4.385
- Park JW, Na HS, Yim JS. 2017. Comparison of land-use change assessment methods for greenhouse gas inventory in land sector. *J Clim Change Res* 8: 329-337. doi: 10.15531/KSCCR.2017.8.4.329
- Saikka L, Ahonen S, Auvinen K, Helonheimo T, Liimatainen H, Lilja S, Linjama J, Lång K, Karhinen S, Mäkinen J, Peltoniemi M, Sarkkola S, Tikkakoski P. 2022. The role of regions and impactful climate actions in achieving a carbon-neutral Finland. Reports of the Finnish Environment Institute 11en.
- Statistics Finland. 2023. Land-use, land-use change and forestry. In: Greenhouse gas emissions in Finland 1990-2021.
- Statistics Korea. 2013. Agricultural area survey. Daejeon: Statistics Korea Service. (in Korean).
- Swedish Environmental Protection Agency. 2019. National inventory report Sweden 2019.
- Vesterby M, Heimlich RE. 1991. Land use and demographic change: Results from fast-growth counties. *Land Eco* 67(3): 279-291. doi: 10.2307/3146423
- Yim JS, Kim ES, Kim CM, Son YM. 2015. Assessment on forest resources change using permanent plot data in National Forest Inventory. *J Korean For Soc*

104(2): 239-247. doi: 10.14578/jkfs.2015.104.2.239

Yim JS, Moon GH, Park JM, Shin MY. 2020. Comparison of uncertainty in the land-use change matrix by sampling intensity. *J Clim Change Res* 11: 203-213. doi: 10.15531/kscer.2020.11.3.203

You JS. 2015. Analysis of annual land-use and land-use change based on National Forest Inventory in Gyeonggi-do. Chungbuk National University.