

표본강도에 따른 토지이용변화 매트릭스의 불확도 비교

임종수^{**} · 문가현^{**} · 박정묵^{***} · 신만용^{****}

^{*}국립산림과학원 산림산업연구과 임업연구사, ^{**}국립산림과학원 산림산업연구과 박사후 연구원
^{***}강원대학교 산림과학대학 산림경영전공 연구교수, ^{****}국민대학교 산림환경시스템학과 교수

Comparison of Uncertainty in the Land-Use Change Matrix by Sampling Intensity

Yim, Jong Su^{*†} · Moon, Ga Hyun^{**} · Park, Jeong Mook^{***} and Shin, Man Yong^{****}

^{*}Research Scientist, Division of Forest Industry, National Institute of Forest Science, Seoul, Korea

^{**}Postdoctoral Fellow, Division of Forest Industry, National Institute of Forest Science, Seoul, Korea

^{***}Research Professor, Department of Forest Management, College of Forest and Environmental Science, Kangwon National University, Chuncheon, Korea

^{****}Professor, Department of Forest, Environment, and System, Kookmin University, Seoul, Korea

ABSTRACT

In order to address the enhanced transparency framework in the Paris Agreement, the completeness of the National GHG Inventory should be ensured. Up-to-date information on changes in both land-use categories and area by land-use conversion must be included in the Land-Use Change Matrix (LUCM), which contains critical activity data for the LULUCF (Land Use, Land-Use Change and Forestry) sector. This study was conducted to determine the optimal sampling intensity and develop the LUCM through a comparison of different sampling intensities. In this study, an empirical analysis was based on relative standard error and relative efficiency in uncertainty assessment for seven sampling intensities from 2 to 8 km. The findings indicate no clear difference in the uncertainty by sampling intensity concerning forest land and cropland, which account for large areas of Gangwon-do and Jeollanam-do. In contrast, the uncertainties for grassland and wetlands, each of which covers less than 10% of the total area, were decreased with increasing sampling intensity, but no statistical significance was found. To improve the LUCM at the national level, it is therefore necessary to select an efficient sampling intensity because there are trade-offs between statistical accuracy and cost regarding the application of different sampling approaches.

Key words: LULUCF, Land-Use Change Matrix, Point Sampling, Sampling Intensity, Uncertainty

1. 서 론

파리협정에서 국가별 온실가스 배출 및 흡수량에 관한 투명성이 강화됨에 따라 2006 IPCC 지침 (IPCC, 2006) 및 2019 IPCC 개선보고서 (IPCC, 2019)에 따른 온실가스 인벤토리의 측정·보고·검증 (Measurement, Reporting and Verification; MRV)이 가능한 체계를 갖추기 위한 노력이 필요하다. 특히, 토지이용, 토지이용변화 및 임업 (Land-Use, Land-Use Change and Forestry; LULUCF) 분야는 전체 국토

를 대상으로 산림지, 농경지, 초지, 습지, 정주지, 그리고 기타 토지의 6개 토지이용으로 구분하여 시간경과에 따른 각 토지 이용구분별 유지되는 면적과 전환된 면적을 산출하고 토양 내 탄소저장량 등을 비교하여 온실가스 배출량과 흡수량을 산정하여야 한다 (IPCC, 2006; 2019).

산림부문은 기후변화협약에서 요구되는 탄소저장고 (지상부·지하부 바이오매스, 고사 유기물, 토양 및 수확된 목재제품)의 온실가스 배출 및 흡수량을 평가하기 위하여 국가산림자원조사 (National Forest Inventory; NFI)를 5년 주기의 연년

[†] Corresponding author: yimjs@korea.kr, 57 Hoegiro, Dongdaemun-gu, Seoul 02455, Republic of Korea, Tel. +82-2-961-2832

ORCID 임종수 0000-0001-7316-6093 문가현 0000-0002-2250-6884
박정묵 0000-0001-8089-0856 신만용 0000-0002-9279-8421

조사체계로 개편하였으며, 표본의 대표성을 확보하고 효율적인 자료 수집을 위하여 일정 간격으로 표본을 배치하는 계통추출법 (Systematic sampling)을 적용하고 있다 (KFRI, 2011). 또한, 제5차 국가산림자원조사에서 배치된 표본점은 고정표본점 (Permanent plot)으로 5년마다 동일지점을 재조사하는 체계를 적용하여 시간경과에 따른 산림자원의 변화뿐만 아니라 탄소저장고별 탄소저장량의 변화를 탐지할 수 있도록 수행하고 있다 (KFS · KOPFI, 2017).

국가산림자원조사에서 수집되고 있는 고사 유기물 (고사목 및 낙엽층)과 산림토양의 온실가스 배출 및 흡수량은 아직 산정되지 않고 있다 (GIR, 2020). IPCC 지침 (2006)에 의하면 산림토양과 낙엽층은 탄소의 안정화 기간을 최소 20년으로 제시함에 따라 20년간 유지되는 산림에 관한 정보를 포함하는 시계열 토지이용변화 매트릭스가 필수적으로 제시되어야 한다. 또한, 입목바이오매스의 경우에도 ‘산림으로 유지된 산림’과 ‘타 토지에서 전용된 산림’을 구분하여 온실가스 통계를 산정하여야 하지만 토지이용변화 매트릭스에 관한 활동자료의 부재로 ‘타 토지에서 전용된 산림’과 ‘산림으로 유지된 산림’을 구분하지 않고 ‘산림으로 유지된 산림’에 포함하여 산정하고 있다 (GIR, 2020). 따라서 LULUCF분야에서 기후변화협약에서 요구되는 투명성의 원칙 (투명성, 정확성, 완전성, 일관성, 비교가능성)에 따른 온실가스 통계를 산출하기 위해서는 전 국토를 대상으로 일관된 기준 및 방법에 따른 토지이용구분과 토지이용변화 매트릭스의 작성이 요구된다 (IPCC, 2006; 2019).

LULUCF분야의 6개 토지이용에 따른 토지이용구분 및 토지이용변화 매트릭스 작성을 위하여 IPCC 지침 (2006)에서는 행정자료를 활용하여 토지이용변화에 관한 정보가 없이 토지이용구분 정보만 제시하는 방법 (접근법 1), 행정정보를 이용하며 토지이용변화 정보를 산출하는 방법 (접근법 2) 그리고 공간적 명확성의 확보가 가능한 공간정보를 활용하는 방법 (접근법 3)을 제시하고 있다. 일본은 행정통계 자료를 활용하여 토지이용변화 정보를 추정하는 방법 (접근법 2)을 적용하여 토지이용변화 매트릭스를 작성하고 있으며 (NIES, 2018), 스웨덴과 핀란드는 전체 국토를 대상으로 일정간격으로 배치된 국가산림자원조사 고정표본점의 토지이용구분 정보를 활용한 점 표본점 (Point sampling) 기반의 토지이용변화 매트릭스를 작성 (접근법 3)하고 있다 (SEPA, 2018; Statistics Finland, 2018). 독일은 국가산림자원조사의 고정표본점과 토지피복도 등의 다양한 국가공간정보를 중첩하여 토지이용구분을 결정하는 방법을 적용하고 있다 (VTI, 2011; FEA, 2018). 한편, 뉴질랜드의 경우에는 위성영상 기반의 토

지피복 주제도를 생산하고 이를 활용하여 토지이용변화 매트릭스를 도출할 수 있는 LUCAS (Land Use Carbon Analysis System)을 개발하여 적용하고 있다 (MFE, 2010; 2019).

점 표본점과 같이 표본방법을 적용할 경우에는 모집단의 특성을 고려하여 정확하고 비용효율적인 정보를 취득하기 위한 최적의 표본강도를 선정하여야 한다 (Cochran, 1977). 대면적의 산림자원정보를 효율적으로 수집하기 위한 산림자원조사에서는 다양한 표본조사 방법이 개발되었으며, 비용효율적인 표본설계를 위한 연구가 진행되어 왔다 (Yim et al., 2009; Strium, 2014; FAO, 2015). 독일의 경우에는 토지이용구분을 위한 최적의 표본강도를 도출하기 위하여 국가산림자원조사의 기본 4 km 격자 자료를 활용하여 8 km × 8 km 격자부터 16 km × 16 km 격자까지 4가지의 표본강도에 따른 표본오차를 비교하였다 (VTI, 2011). 핀란드는 국가산림자원조사에서 배치된 표본점의 토지이용구분 자료를 활용하여 토지이용구분별 면적, 토지이용변화 매트릭스 및 불확도를 산출하여 활용하고 있다 (Statistics Finland, 2018).

우리나라에서도 국가산림자원조사 고정표본점 (4 km 격자)을 활용한 토지이용구분 및 토지이용변화 매트릭스 작성에 관한 연구는 수행되었으나 (Yim et al., 2015; Park et al., 2018; Yim et al., 2019), 최적 표본강도 선정을 위한 다양한 표본강도에 관한 연구는 미비하다 (Park et al., 2017). 따라서 본 연구는 점 표본점 (Point sampling) 방법의 적용에 있어서 최적의 표본강도를 선정하기 위하여 다양한 표본강도에 따른 불확도와 통계적 효율성을 비교하고자 수행하였다.

2. 재료 및 방법

2.1 국가산림자원조사의 표본설계 및 표본강도별 표본배치

우리나라의 국가산림자원조사 (NFI)는 전국의 산림을 과학적인 방법으로 조사 및 평가하여 산림기본통계를 확보하고 산림자원의 변화 동태를 주기적으로 파악하여 위하여 1972년부터 수행하고 있다. 과거 국가산림자원조사는 항공사진 촬영 및 판독을 실시하여 임상도를 제작한 후, 임상구분에 따라 표본을 배치하는 층화추출법 (Stratified sampling)을 적용하였다. 한편, 제5차 (‘06~‘10) NFI부터는 중부원점을 기준으로 4 km 간격으로 일정하게 표본을 배치하는 계통추출법 (Systematic sampling)을 적용하고 있다 (Fig. 1). 또한, 전체 표본점의 20% (약 800개 집락표본점)를 5년 동안 조사하는 연년조사체계를 적용하고 있으며, 산림자원에 정보뿐만 아니

라 각 표본점의 토지이용구분에 관한 정보를 취득하고 있다 (KFRI, 2011).

본 연구는 우리나라의 국토이용특성을 고려한 최적의 표본강도를 도출하는 것으로 국가산림자원조사에서 기본적으로 배치되는 4 km 격자뿐만 아니라 2 km 격자점에 관한 토지이용구분 정보를 취득하여 다양한 표본강도 분석을 위한 기초자료로 활용하였다. 따라서 7개의 표본강도 (2 km × 2 km, 2 km × 4 km, 4 km × 4 km, 4 km × 6 km, 6 km × 6 km, 6 km × 8 km, 8 km × 8 km)에 따른 토지이용구분을 실시하여 토지이용구분별 추정치의 정확도를 비교한 후, 최적 표본강도에 따른 토지이용변화 매트릭스를 작성하였다.

2.2 표본기반 토지이용구분 결정체계

우리나라 LULUCF분야의 6개 토지이용구분에 관한 정의는 Table 1과 같다 (GIR, 2020). 산림지 (Forest land)은 FAO의 토지피복 (land-cover)에 근거한 정의를 준용하고 있으며, 최소 면적 등의 공간적 기준에 따른 정의를 적용하고 있다 (KFRI, 2011). 농경지는 위성영상 자료의 판독에 의한 토지피복과 토지이용 정보를 혼용한 농업면적조사 자료를 활용하고 있으며 (Statistics Korea, 2019), 초지, 습지 및 정주지는 국토교통부에서 제공하는 토지이용 (land-use)에 따른 정의를 준용하고 있다. 결과적으로 토지이용 (land-use) 또는 토지피복 (land cover)을 관장하는 부처별 활용목적에 따른 정의를 준용함에 따라 온실가스 인벤토리를 위한 일관된 토지이용구

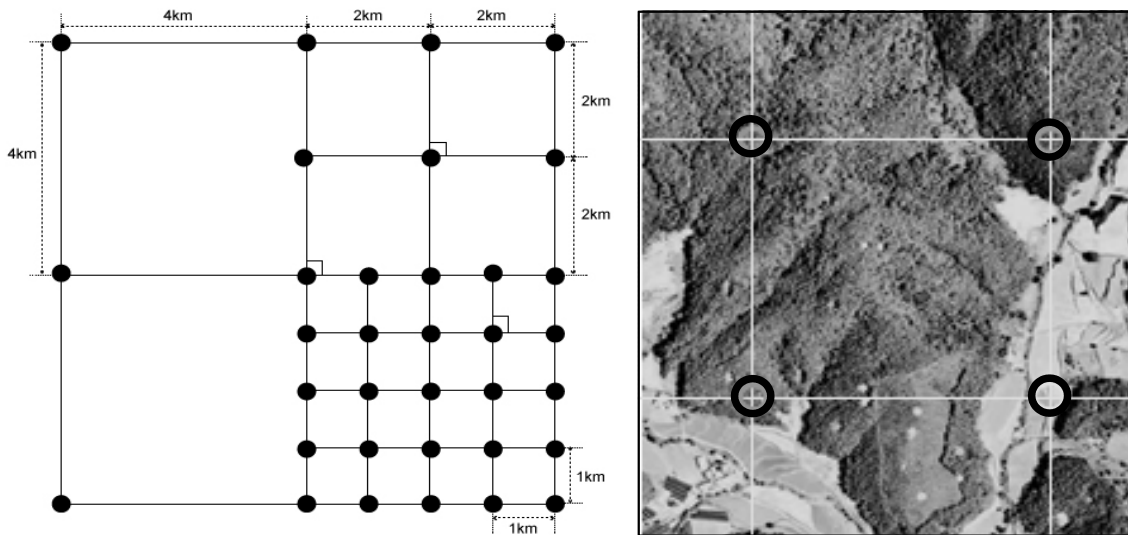


Fig. 1. Sampling and plot designs for the National Forest Inventory(KFRI, 2011).

Table 1. Definition and land area by land-use categories (modified from IPCC, 2019)

Land-use category	Definition
Forest land (F)	(Stocked forest) Land spanning more than 0.5ha with trees higher than 5m and a canopy cover of more than 10% and minimum width of more than 30m
	(Un-stocked forest) Land with a canopy cover of less than 10%, temporary removed forest by harvest and natural disturbance and the land for forestry management including forest road, etc.
Cropland (C)	Cropped land including rice field, and agro-forestry systems
Grassland (G)	Rangelands and pasture land that are not considered cropland
Wetlands (W)	Areas of peat extractions and land that is covered or saturated by water for all or part of the year
Settlements (S)	All developed land, including transportation infrastructure and human settlements of any size
Other land (O)	Ice and all land area that do not fall into any of the other categories

분의 정의가 부재하고 토지이용간의 전환에 관한 정보를 제공하지 못하고 있다.

본 연구에서는 Table 1에 제시된 토지이용구분 정의에 따른 고정표본점의 토지이용구분을 수행하였다. 즉 과거에 촬영된 수치 산림항공사진 위에 국가산림자원조사의 고정표본점의 위치정보를 중첩하여 표본점의 토지이용정보를 판독하였으며, 동일시점의 수치 임상도 (산림청), 토지피복지도 (환경부), 위성영상 (Google earth), 연속지적도 (국토교통부) 등의 국가공간정보를 중첩하여 토지이용구분을 위한 참고자료로 활용하였다. 즉, 산림지와 비산림지는 임상도의 임경지 경계정보를 활용하였으며, 비산림지의 표본점은 토지피복지도 및 지적도 정보를 확인하여 토지이용을 구분하였다. 한편, 우리나라는 빙하지 등의 관리되지 않은 토지는 없으며, 황폐지와 암석지는 산림내 무림목지 (제지)에 포함되므로 기타 토지는 없는 것으로 가정하였다.

Table 2는 표본기반 토지이용변화 매트릭스 산출방법을 나타낸 것으로 시간이 경과함에도 불구하고 동일한 토지이용으로 유지되는 표본점은 토지이용구분의 동일한 기호를 사용하며, 토지이용간의 변화가 있는 표본점은 서로 다른 토지이용구분의 기호를 부여하였다. 즉 n_{ff} 는 산림으로 유지된 산림의 표본개수를 의미하며, n_{cf} 는 농경지에서 산림으로 전용된 표본점의 개소수이다 (Yim et al., 2019).

2.3 토지이용변화의 상대표준오차 추정

고정표본점의 시간경과에 따른 토지이용구분 및 토지이용변화 매트릭스에 의한 추정치의 불확도는 IPCC 지침 (IPCC, 2006)에서 제시된 상대표준오차 (Relative Standard Error; RSE)를 산출하여 평가하였다.

$$A_{ff} = A \times p_{ff}, \text{ (where } p_{ff} = \frac{n_{ff}}{n} \text{)} \quad \text{Eq. (1)}$$

$$s(A_{ff}) = A \times \sqrt{\frac{p_{ff}(1-p_{ff})}{n-1}} \quad \text{Eq. (2)}$$

$$\text{Relative standard error (\%)} = \frac{s(A_{ff})}{A_{ff}} \times 100 \quad \text{Eq. (3)}$$

- A : total land area at final year
- A_{ff} : estimated area of remaining forest,
- n : total number of samples,
- n_{ff} : number of samples in remaining forest land,
- p_{ff} : the proportion of samples in remaining forest land, and
- $s(A_{ff})$: standard error of an area estimate for remaining forest land

2.4 표본강도에 따른 상대효율 비교

상대효율 (Relative efficiency)은 일반적으로 표본추출방법 또는 표본강도에 따른 두 가지이상의 표본조사 방법에 관한 통계적 정밀도 (Precision)를 비교하는 통계적 방법으로 표본조사 방법에 의한 표본자료들의 분산을 산출하여 분산이 작은 추정치를 더 효율적인 방법으로 간주하게 된다 (Köhl et al., 2006; Yim et al., 2009; Rätty and Kangas, 2019). 본 연구에서는 표본강도가 가장 높은 2 km × 2 km 격자를 기준으로 다른 표본강도의 따른 상대효율을 비교하였다. 따라서 상대효율이 1보다 크면 2 km 격자보다 정밀도는 낮으며, 1보다 작으면 2 km × 2 km 격자보다 정밀도가 높은 표본강도로 간주하게 된다.

Table 2. Land-use change matrix by point sampling (Unit: number of points)

Classification		Initial year					Total
		Forest land	Cropland	Grassland	Wetlands	Settlements	
Final year	Forest land	n_{ff}	n_{cf}	n_{gf}	n_{wf}	n_{sf}	n_f
	Cropland	n_{fc}	n_{cc}	n_{gc}	n_{wc}	n_{sc}	n_c
	Grassland	n_{fc}	:	n_{gg}	:	:	n_g
	Wetlands	:	:	:	n_{ww}	:	n_w
	Settlements	:	:	:	:	n_{ss}	n_s
Total		$\sum n_{f.}$	$\sum n_{c.}$	$\sum n_{g.}$	$\sum n_{w.}$	$\sum n_{s.}$	n

$$RE = \frac{Var(SI_k)}{Var(SI_i)}, \tag{Eq. (4)}$$

$$Var(SI_i) = \frac{n_i}{n_i - 1} \times p_{ij} \times (1 - p_{ij})$$

n_i : number of samples for sampling intensity i ,
 p_{ij} : the proportion of samples in land-use category j for sampling intensity i .
 SI_i and SI_k : sampling intensity i and k .

2.5 시범분석 대상지

우리나라는 전체 국토를 토지이용별로 살펴보면 임야가 63.5%로 가장 넓게 분포하며, 전·답·과수원을 포함하는 농경지는 19.4%로 타 토지이용보다 상대적으로 넓은 면적을 차지하고 있다 (MOLIT, 2019). 따라서 본 연구에서는 우리나라의 국토이용 특성을 고려하여 전체 토지면적 대비 산림의 면적이 약 80% 이상 (1,372천 ha)을 차지하는 강원도와 농경지면적이 가장 넓게 분포하는 전라남도 (291천 ha)를 대상으로 수행하였다 (KFS, 2019; Statistics Korea, 2019). 본 연구의 기말년도는 2005년이므로 2005년말 기준 강원도와 전라남도의 산림 및 농경지 (논과 밭)별 면적은 Table 3과 같다. 강원도는 전체 국토면적의 83%를 산림이 차지하고 있으며, 농경지는 7%에 불과하다. 반면 전라남도는 산림이 차지하는 면적 비율은 58%로 가장 넓지만 농경지가 전체 면적의 약 27%를 차지하고 있어 강원도와 다른 토지이용형태를 나타내고 있다. 강원도와 전라남도에서 초지의 면적은 약 7천 ha이며 전체 면적의 각각 0.6% 및 0.4%로 상대적으로 적은 면적을 차지하고 있다 (MOI, 2006).

3. 결과 및 고찰

3.1 토지이용구분 및 토지이용변화 매트릭스 작성

Table 4는 연구대상지 및 표본강도에 따른 토지이용구분이 가능한 표본 개소수를 나타낸 것이다. 강원도 (GW)가 전라남도 (JN)보다 국토면적이 넓기 때문에 상대적으로 표본 개소수가 많이 배치되었다. 하지만, 강원도의 경우에는 민북지역 등은 항공사진 촬영이 불가능한 지역이 포함되어 토지이용구분이 불가능한 표본점은 제외하였으며, 전라남도는 상대적으로 많은 도서를 포함하고 있어 항공사진이 촬영되지 않은 일부 도서에 배치된 표본은 분석에서 제외하였다.

연구대상지에 관계없이 2 km 격자와 2 km × 4 km 격자는 4 km 격자보다 각각 4배 및 2배의 표본 개소수가 필요하며, 6 km 및 8 km 격자는 4 km 격자보다 각각 약 30% 및 25%의 표본 개소수가 필요한 것으로 나타났다. 즉, 2 km 격자를 적용할 경우 현재 국가산림자원조사의 표본 개소수보다 약 4배의 인력 및 예산이 추가적으로 요구되는 반면 8 km 격자의 경우에는 추가적인 토지이용구분의 판독없이 기존의 4 km 격자를 활용하여 분석이 가능하다.

3.2 표본강도에 따른 상대표준오차 비교

표본강도에 따른 동일한 토지로 유지되는 토지를 대상으로 상대표준오차를 분석한 결과는 Fig. 2와 같다. 연구대상지와 관계없이 상대표준오차는 표본 개소수가 증가할수록 상대표준오차는 감소하는 추세를 나타내고 있다. 토지이용구분별 상대표준오차는 표본강도에 관계없이 산림지, 농경지, 습지, 정주지, 그리고 초지 순으로 상대표준오차가 작은 것으로 나타났다는데 이러한 결과는 Table 3과 같이 토지이용구분별 면

Table 3. Land area by study area and land-use categories at the 2005 year (Unit: kha)

Classification	Total area ¹⁾	Forest land ²⁾	Cropland ³⁾	Wetlands ¹⁾	Other lands ⁴⁾
Gangwon-do	1,661	1,371 (83%)	117 (7%)	64 (4%)	109 (6%)
Jeollanam-do	1,207	696 (58%)	324 (27%)	67 (5%)	120 (10%)

¹⁾ MOI (2006), ²⁾ KFS (2006), ³⁾ NAQS (2006) excluding orchard, ⁴⁾ Other lands = Total - (Forest land + Cropland + Wetlands)

Table 4. Number of samples by sampling intensity and province

Classification	2 km × 2 km	2 km × 4 km	4 km × 4 km	4 km × 6 km	6 km × 6 km	6 km × 8 km	8 km × 8 km
Gangwon-do	4,033	2,038	1,054	691	458	342	259
Jeollanam-do	2,496	1,326	717	461	283	226	180

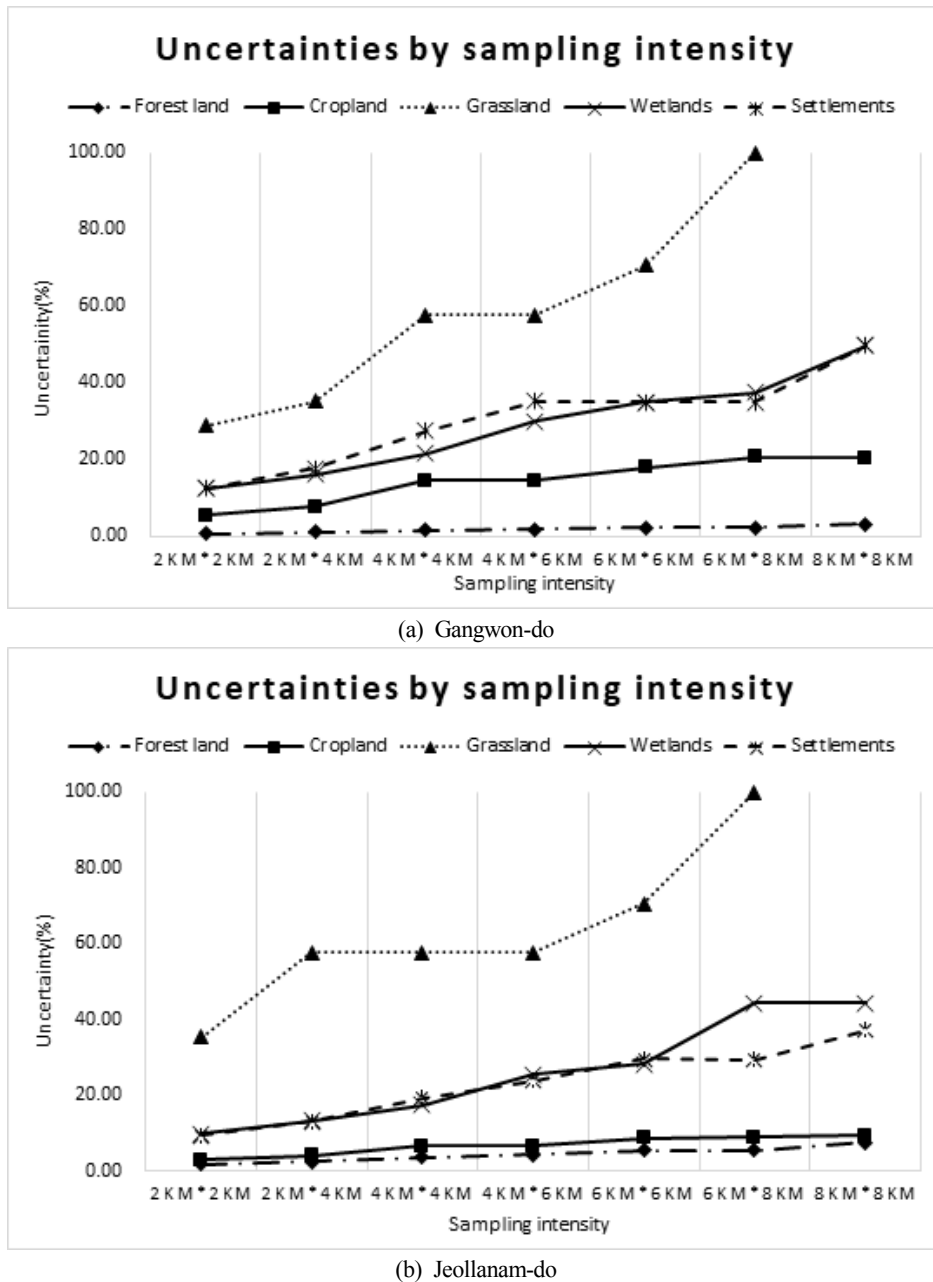


Fig. 2. Uncertainty by sampling intensity and province.

적과 연관된 것으로 상대적으로 면적이 넓은 토지이용구분에서 상대표준오차가 작은 것으로 분석되었으며 이러한 결과는 독일 (VTI, 2011) 및 핀란드 (Statistics Finland, 2018)의 분석 결과와 유사하다.

산림지는 다른 토지이용구분보다 상대적으로 넓은 면적을 차지하고 있으므로 강원도와 전라남도의 상대표준오차는 각각 0.77~3.08%와 1.76~7.45%로 낮게 분석되었다. 전라남도

의 농경지 면적은 324천 ha (27%)를 차지하고 있으며, 이러한 면적비율에 의해 상대표준오차는 2.94~9.24%로 낮게 평가되었다. 반면 농경지가 차지하는 면적의 비율이 약 7% (117천 ha)에 불과한 강원도의 상대표준오차는 5.53~20.43%로 상대적으로 높은 것으로 분석되었다. 한편, 차지하는 면적 (약 7천 ha)이 가장 작은 초지의 경우에는 타 토지이용과 비교하여 큰 상대추정오차를 나타내고 있으며, 표본강도가 가

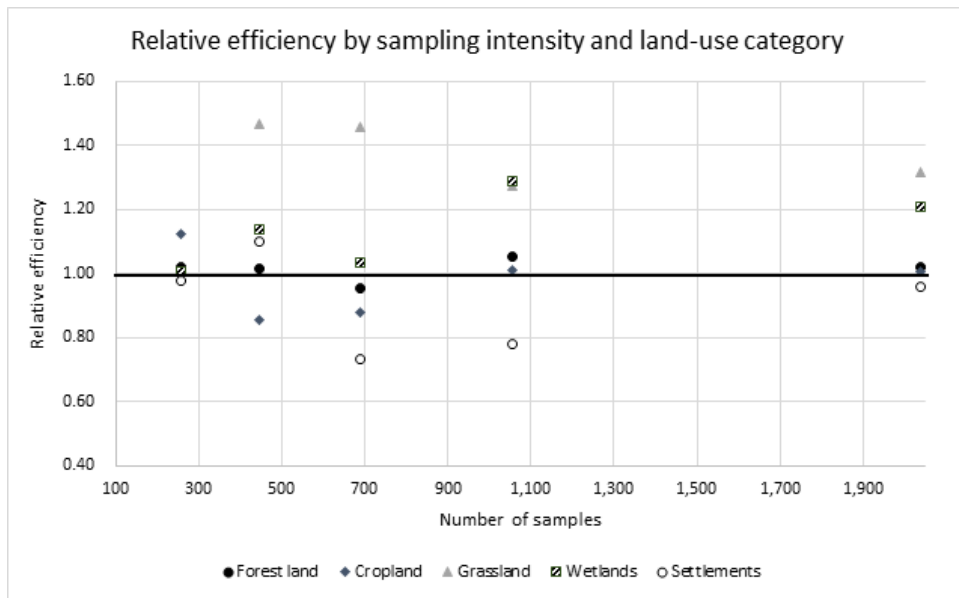
장 많은 2 km × 2 km의 경우에도 상대표준오차는 30%를 상회하는 것으로 분석되었다.

3.3 표본강도에 따른 상대효율 비교

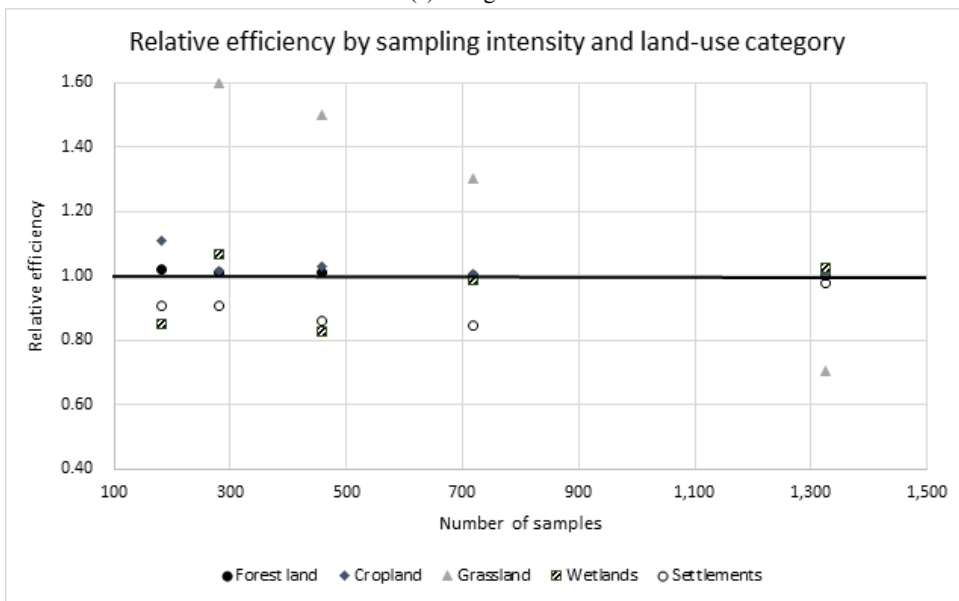
표본강도에 따른 통계적 효율성을 비교하기 위하여 표본강도가 가장 많은 2 km × 2 km의 표본강도를 기준 (RE=1)으로 동일한 토지로 유지되는 토지에 관한 상대효율을 분석한

결과는 Fig. 3과 같다.

일반적으로 표본강도가 증가함에 따라 상대효율은 증진되지만 (Yim et al., 2009), 본 연구에서는 표본강도보다 토지이용구분별 면적에 따라 차이가 있는 것으로 분석되었다. 상대적으로 넓은 면적을 차지하는 산림지의 상대효율은 지역에 관계없이 0.95~1.02의 범위로 안정적인 값으로 분석되어, 2 km × 2 km의 표본강도와 비교하여 통계적 효율성은 크지 않



(a) Gangwon-do



(b) Jeollanam-do

Fig. 3. Comparison of relative efficiency by sampling intensity.

은 것으로 나타났다. 농경지의 상대효율은 0.86~1.12로 산림지보다 상대효율의 범위가 크며, 전라남도의 경우에는 낮은 표본강도에서 상대효율이 1보다 작은 것으로 나타났다. 한편, 면적이 가장 작은 초지는 타 토지와 비교하여 상대효율이 낮으며 표본강도에 따른 변동이 상대적으로 큰 것으로 나타났다. 결과적으로 두 개의 서로 다른 모집단을 대상으로 비교를 실시하여 모집단별 토지이용구분의 크기 및 토지이용형태에 따라 다른 경향을 확인할 수 있다.

Yim et al. (2009)은 최적의 표본설계를 도출하기 위하여 인위적 모집단을 생성한 후, 몬테카를로 시뮬레이션에 의해 1,000회 반복하여 값들의 평균을 이용하여 상대효율을 산출한 후 표본설계 및 표본강도의 효과를 비교하였다. 하지만 본 연구는 표본 추출이 국가산림자원조사의 표본설계에 의한 표본자료만 활용하여 반복적인 자료취득이 수행되지 않아 최적 표본강도를 선정하는 데에는 한계가 있다. 한편 독일의 경우에도 최적의 표본강도를 도출하기 위하여 제한된 표본자료를 활용한 분석을 수행하여 8 km 격자를 최적 표본강도로 선정하였으며 이를 활용한 토지이용구분 매트릭스를 작성하여 온실가스 인벤토리에 활용하고 있다 (VTI, 2011). 본 연구에서 다른 토지이용형태를 갖는 두 개의 행정구역을 분석한 결과, 면적이 상대적으로 작은 토지이용구분 (정주지, 습지 및 초지)에서는 표본강도가 증가할수록 상대효율이 향상되는 것을 확인할 수 있었다.

3.4 토지이용변화 매트릭스 비교

시간경과에 따른 토지이용구분 자료의 궁극적인 목적은 시간경과에 따른 토지이용변화 매트릭스를 작성하는 것이며, 토지이용, 토지이용변화 및 임업 (LULUCF)분야는 토지이용변화 매트릭스 자료를 활용하여 각 토지이용구분별 탄소저장고에 관한 온실가스 배출 및 흡수량을 산정하게 된다. Table 5는 4 km × 4 km 격자의 표본강도 자료에 따른 토지이용변화 매트릭스와 각 토지이용변화 매트릭스에 따른 불확도를 분석한 결과이다.

강원도의 경우, 산림은 1,392천 ha에서 1,352천 ha로 감소하였으며 주로 농경지와 정주지로 전환되었으며, 약 34천 ha는 타 토지에서 산림으로 전환된 것으로 나타났다. 또한, 농경지와 초지는 감소하였으나 정주지의 면적은 증가하였다. 정주지는 주로 산림지와 농경지, 그리고 초지로부터 전환되었으며, 약 7천 ha의 정주지는 산림지, 농경지, 그리고 습지로 전환되었는데 정주지가 타 토지로 전환되는 경우에는 극히 낮은 경우이므로 높은 상대표준오차를 나타나게 된다. 전라

남도의 경우에도 산림지와 농경지는 감소하고 정주지가 증가하는 경향을 나타내고 있는데 인구증가 및 산업발달에 의한 도시화에 의한 원인에 기인한 것으로 판단된다. 한편 습지에서 초지로 전환되는 특이한 경우에는 높은 불확도를 나타내고 있는데 이러한 결과는 핀란드에서도 토지이용변화 매트릭스에서도 관측되고 있다 (Statistics Finland, 2018).

4. 결 론

파리협정에서 국가별 온실가스 배출량 및 흡수량에 관한 투명성 (Transparency)이 강화됨에 따라 국가별로 제출한 국가감축목표 (Nationally Determined Contributions; NDC)에 따른 이행실적을 평가하기 위해서는 국가 온실가스 인벤토리 보고서의 완전성을 확보하기 위한 노력이 필요하다. 토지이용, 토지이용변화 및 임업 (LULUCF)분야는 전체 국토를 IPCC 지침에서 제시된 6개 토지이용으로 구분하여 각 토지이용구분에 따른 온실가스 배출·흡수량뿐만 아니라 토지이용 전환에 따른 탄소저장고별 온실가스 배출·흡수량을 평가하여 보고하여야 한다. 따라서 LULUCF분야에서는 각 토지이용구분별 면적정보와 시간경과에 따른 토지이용 전환에 관한 정보를 나타내는 토지이용변화 매트릭스가 필수적으로 제시되어야 한다. 우리나라는 아직 온실가스 인벤토리를 위한 토지이용변화 매트릭스 정보가 부재하므로 본 연구에서는 IPCC 지침에서 제시된 표본기반 토지이용변화 매트릭스 작성방법을 적용하여 토지이용변화 매트릭스를 작성하고자 하였으며, 표본강도에 따른 토지이용변화 매트릭스의 불확도를 평가하여 효율적이며 정확한 정보를 제공할 수 있는 방법을 도출하고자 수행하였다.

본 연구에서는 국가산림자원조사의 표본설계 방법을 준용하여 중부원점을 중심으로 배치된 격자지점을 표본으로 활용하여, 산림지와 농경지의 면적비율이 가장 큰 강원도와 전라남도를 대상으로 2 km × 2 km 격자부터 8 km × 8 km 격자까지 7개의 표본강도에 따른 불확도 (상대표준오차와 상대효율)을 비교하였다. 본 연구는 표본 추출을 위하여 국가산림자원조사의 표본설계 방법을 적용함에 따라 연구대상지별 표본 자료는 표본의 대표성 문제를 내포하고 있으며, 이러한 문제로 인하여 표본강도보다는 토지이용구분별 면적의 크기에 의해 불확도가 결정되는 것으로 분석되었다. 결과적으로 상대적으로 넓은 면적을 차지하는 산림지와 농경지의 불확도는 낮은 반면 초지와 습지는 높은 불확도를 갖는 것으로 나타났다. 초지와 습지에서는 표본강도가 클수록 불확도는 낮아지는 효과가 있는 것으로 분석되었다.

Table 5. Estimated area by Land-use categories from 1992 to 2005 year

(Unit: kha)

Classification			1992 year					Total
			Forest land	Cropland	Grassland	Wetlands	Settlements	
2005 year	Gangwon-do	Forest land	1,319 (1.6)	13 (35.2)	16 (31.5)	2 (100)	3 (70.7)	1,352 (1.5)
		Cropland	39 (19.8)	129 (10.8)	3 (70.7)	3 (70.7)	2 (100)	142 (9.0)
		Grassland	0 -	2 (100)	6 (49.9)	0 -	0 -	8 (44.6)
		Wetlands	3 (70.7)	3 (70.7)	0 -	33 (21.6)	2 (100)	41 (19.4)
		Settlements	30 (22.7)	20 (27.6)	13 (35.2)	3 (70.7)	20 (27.6)	87 (13.1)
		Total	1,392 (1.4)	164 (9.3)	38 (20.2)	41 (19.4)	27 (24.1)	1,661
	Jeollanam-do	Forest land	645 (3.5)	8 (44.3)	0 -	0 -	2 (99.4)	655 (9.4)
		Cropland	5 (57.3)	419 (5.1)	0 -	2 (99.4)	0 -	426 (5.0)
		Grassland	0 -	0 -	5 (57.3)	0 -	0 -	5 (57.3)
		Wetlands	0 -	3 (70.3)	0 -	47 (19.7)	0 -	51 (18.9)
		Settlements	3 (70.3)	22 (27.4)	0 -	2 (99.4)	44 (19.2)	71 (14.9)
		Total	653 (3.4)	453 (4.8)	5 (57.3)	51 (18.9)	45 (18.8)	1,207

Parentheses() is Relative Standard Error (unit: %)

통계적으로 정확한 토지이용변화 매트릭스를 생산하기 위해서는 표본강도를 증가시킴으로서 정확도 문제를 해결할 수 있지만, 표본강도의 증가를 위해서는 추가적인 예산이 수반되어야 하므로 정확성과 비용-효율성을 확보할 수 있는 표본강도의 선정이 필요하다. 본 연구는 토지이용특성에 차이가 있는 강원도와 전라남도를 대상으로 불확도를 비교하였을 때 상대적으로 넓은 면적을 차지하는 산림지와 농경지의 불확도는 10%내외로 낮은 반면, 면적이 적거나 토지변화의 확률이 적은 토지전환은 상대적으로 높은 불확도를 나타내고 있다. 하지만, 토지이용구분 자료를 전국으로 확대할 경우 모집단이 상대적으로 크기 때문에 토지이용구분별 면적의 정확도를 향상시킬 수 있을 것으로 기대된다.

점 표본점 방법을 이용한 토지이용변화 매트릭스는 국토 전체를 대상으로 하는 주제도 기반 매트릭스에 비하여 공간적 명확성이 낮아지는 단점이 있으나, 비용효율적인 방법으로 단시간에 토지이용변화 매트릭스를 작성하고 각각의 토지이용변화에 관한 불확실성을 평가할 수 있으며, 토지이용변화 특성에 관한 추세를 파악할 수 있으므로 국가 온실가스 인벤토리 보고서 작성을 위한 활동자료 산출에 적용할 수 있다.

사 사

본 연구는 “국립산림과학원 일반과제 (국가 온실가스 저감 목표 달성을 위한 산림부문 대응방안 연구)” 및 “산림청 (한

국임업진흥원) 산림과학기술 연구개발사업 (신기후체제 대응 국가수준 토지이용변화 매트릭스 구축 및 검증기술 개발 : 2017045C10-1919-BB01)”의 지원으로 수행되었습니다.

REFERENCES

- Cochran WG. 1977. Sampling techniques. 3rd ed. John Wiley & Sons.
- FAO 2015. Knowledge reference for national forest assessments.
- FEA (Federal Environment Agency). 2018. Land-use, Land-use change and forestry. In: National Inventory Report, Germany 2018. p.514-664.
- GIR (Greenhouse Gas Inventory & Researches Center). 2020. National Greenhouse Gas Inventory -Guideline for Measurement, Reporting, Verification -. (in Korean)
- 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.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2019. Chapter 3. Consistent representation of lands. 2019 refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. p.3.1-3.68.
- KFS (Korea Forest Service) & KOFPI (Korea Forestry Promotion Institute). 2017. Forest Resources of Korea.
- KFS (Korea Forest Service). 2006. Statistical Yearbook of Forestry. (in Korean)
- KFS (Korea Forest Service). 2019. Statistical Yearbook of Forestry. (in Korean)
- KFRI (Korea Forest Research Institute). 2011. The 5th National forest Inventory Report. Seoul: National Institute of Forest Science. (in Korean)
- Köhl M, Magnussen S and Marchetti M. 2006. Sampling methods, remote sensing and GIS Multi-resource Forest Inventory. Springer.
- MFE (Ministry For the Environment). 2010. Measuring carbon emissions from land-use change and forestry - The New Zealand land-use and carbon analysis system -.
- MFE (Ministry For the Environment). 2019. New Zealand's Greenhouse Gas Inventory 1990-2017.
- MOI (Ministry Of Interior). 2006. Cadastral statistic 2005. (in Korean)
- MOLIT (Ministry Of Land, Infrastructure and Transport). 2019. Cadastral statistic 2018.
- NAQS (National Agricultural products Quality Management Service). 2006. Statistics of Agricultural Area. (in Korean)
- NIES (National Institute for Environmental Studies). 2018. National Greenhouse Gas Inventory Report of Japan (2018). p.6.1.~6.98. / 11.1.~11.62.
- 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. Journal of Climate Change Research 9 (4): 385-398. (in Korean with English abstract)
- Park JW, Na HS, Yim JS. 2017. Comparison of Land-use Change Assessment Methods for Greenhouse Gas Inventory in Land Sector. Journal of Climate Change Research 8 (4): 329-337. (in Korean with English abstract)
- Räty M. and Kangas AS. 2019. Effect of permanent plots on the relative efficiency of spatially balanced sampling in a national forest inventory. Annals of Forest Science 76: 20.
- SEPA (Sweden Environmental Protection Agency). 2018. Land-use, land-use change and forestry. In: National Inventory report Sweden 2018. p.361-401.
- Statistics Finland. 2018. Land-use, land-use change and forestry. In: Greenhouse Gas Emissions in Finland 1990-2016. p.277-372.
- Statistics Korea. 2019. Statistics of Agricultural area. (in Korean)
- Stimbu BM. 2014. Comparing the efficiency of intensity-based forest inventories with sampling-error-based forest inventories. Forestry 87: 249-255.
- VTI (Johann Heinrich von Thünen-Institute). 2011. Inventurstudie 2008 und Treibhausgasinventar Wald. Sonderheft 343. (in German)
- Yim JS, Kleinn C, Kim SH, Jeong JH, Shin MY. 2009. A comparison of systematic sampling designs for forest inventory. Journal of Korean Forest Society 98 (2): 133-141. (in Korean with English abstract)
- Yim JS, Kim RH, Lee SJ, Son, YM. 2015. Land-use Change Assessment by Permanent Sample Plots in National Forest Inventory. Journal of Climate Change Research. 6 (1): 33-40. (in Korean with English abstract)

Yim JS, Moon GH, Shin MY. 2019. Development of a Land-Use Change Matrix at the National level using the Point Sampling Method. Journal of Climate Change

Research 10 (4): 299-308. (in Korean with English abstract)