



점 표본점(Point sampling) 방법을 이용한 국가수준 토지이용변화 매트릭스 개발

임종수^{*†} · 문가현^{**} · 신만용^{***}

^{*}국립산림과학원 산림산업연구과 임업연구사, ^{**}국립산림과학원 산림산업연구과 박사후 연구원, ^{***}국민대학교 산림환경시스템학과 교수

Development of a Land-Use Change Matrix at the National Level using the Point Sampling Method

Yim, Jong Su^{*†} · Moon, Ga Hyun^{**} 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

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

ABSTRACT

Land-Use Change Matrix (LUCM) is critical activity data in the Land-Use, Land-Use Change and Forestry (LULUCF) sector for reporting National Greenhouse Gas Inventory. To produce a LUCM, it is necessary to clearly define six land-use categories and apply a consistent methodology according to the IPCC guideline. This study was conducted to develop a LUCM at national level in South Korea using the point sampling approach. In this study, 5,600 mapped sample points systematically distributed across the country were used to detect land-use categories with interpretation of ortho-photos and national spatial information including satellite images. With a produced LUCM based on classified sampling points in 1992 and 2005, simple and modified ratio estimators were used to estimate the areas and uncertainties for each land-use category and converted land-use category in 2005. The uncertainties from both estimators were acceptable according to the National GHG report. However, the total areas for each land-use category estimated by the simple estimator were different from the official national statistics. As a result, the modified estimator, which employed the official national statistics of total area by land-use category in 2005, can be used for the consistency and uncertainty assessment. To apply point sampling, an optimal sampling intensity should be determined considering economic efficiency and statistical accuracy.

Key words: LULUCF, Land-Use Change Matrix, Point Sampling, Ratio Estimator

1. 서 론

파리협정에서는 국가 온실가스 인벤토리 보고서의 투명성이 강화됨에 따라 국가별 온실가스 통계에 대하여 투명성, 정확성, 완전성, 일관성 및 비교가능성의 투명성의 5대 원칙에 부합하기 위한 온실가스 인벤토리 보고체계를 마련할 필요가 있다. 이와 관련하여 토지이용, 토지이용변화 및 임업(Land-Use, Land-Use Change and Forestry; LULUCF) 부문은 전체 국토를 산림지, 농경지, 초지, 습지, 정주지, 그리고 기타 토지 등의 6개 토지이용으로 구분하여 시간경과에 따른 각 토지이용구분별 면적변화 정보와 탄소저장고에 관한 온실가

스 배출량과 흡수량을 산정하여야 한다 (IPCC, 2006).

기후변화협약에서 요구되는 탄소저장고에 관한 온실가스 배출 및 흡수량을 모니터링하기 위하여 산림부문에서는 국가 산림자원조사 (National Forest Inventory; NFI) 체계를 5년 주기의 연년조사체제로 개편하고, 계통적으로 표본을 배치하는 계통추출법을 적용하였다. 또한, 일정한 간격으로 배치된 표본을 대상으로 고정표본점을 설치하고 입목바이오매스, 고사 유기물 및 토양의 탄소저장량에 대한 평가가 가능하도록 조사항목을 확대하였다 (KFRI, 2011).

국가산림자원조사에서 수집되고 있는 고사유기물과 산림 토양의 탄소저장량은 아직 탄소저장고로 평가가 이루어지지

[†] Corresponding author: yimjs@korea.kr (02455, 57, Hoegi-ro, Dongdaemun-gu, Seoul, Republic of Korea, Tel. +82-2-961-2832)
Received August 27, 2019 / Revised September 29, 2019 / Accepted October 11, 2019

못하고 있다 (GIR, 2018a). IPCC 가이드라인 (2006)에 의하면 산림토양과 낙엽층은 탄소가 평행이 이루어지는 시점 (최소 20년)을 고려하여 현재의 산림이 과거 20년 전부터 산림으로 유지되고 있는 지에 대한 정보를 포함하는 시계열 토지이용변화 정보가 필수적으로 요구된다. 또한, 입목바이오매스의 경우에도 보다 정확한 탄소흡수량을 산정하기 위해서는 토지이용구분에 따른 토지이용변화 매트릭스 정보가 필수적으로 요구된다 (IPCC, 2006; 2019). 하지만, 우리나라는 IPCC 가이드라인에서 제시된 6개 토지이용구분에 관하여 일관되고 통일된 정의가 부재하여, 토지를 담당하는 부처별 토지이용구분 정의에 따른 각각의 면적 정보를 활용함에 따라 (GIR, 2018a) 시간경과에 따른 토지이용구분간의 토지이용변화 매트릭스 정보를 제공하지 못하고 있다.

LULUCF분야의 토지이용변화 매트릭스 작성을 위하여 IPCC 지침 (2006; 2019)에서는 행정자료를 활용한 방법과 위성영상 등의 공간정보를 활용하는 방법을 제시하고 있으며, 대부분의 국가는 국가별 토지이용구분 체계와 보유하고 있는 기초자료를 활용하여 토지이용변화 매트릭스를 생산하여 온실가스 인벤토리 보고에 활용하고 있다. 일본은 행정자료 자료를 활용하는 방법을 적용하여 토지이용변화 매트릭스를 생산하고 있으며 (NIES, 2018), 스웨덴과 핀란드는 전국에 배치된 국가산림자원조사 고정표본점을 활용한 점 표본점 (point sampling) 기법을 적용하고 있다 (SEPA, 2018; Statistics Finland, 2018). 독일의 경우에는 국가산림자원조사의 고정표본점 위치정보와 다양한 국가공간정보를 활용한 표본기반 토지이용구분 결정체계를 개발하여 적용하고 있다 (Henders et al., 2017; FEA, 2018). 일반적으로 점 표본점 방법은 전수 조사가 불가능한 대면적을 대상으로 점단위의 표본을 배치하여 표본점에서 추출된 정보를 활용하여 전체 모집단의 특성을 파악하는 방법으로 (Lund, 1982) 국가산림자원조사 및 위성영상을 활용한 토지피복분류의 정확도 검증을 위한 방법으로 널리 이용되고 있다. 일본에서는 교토의정서의 산림경영 활동에 관한 산림경영률을 추정하기 위하여 500m 격자의 표본점을 배치하여 표본점의 산림경영활동 여부를 모니터링하고 있다 (Hayashi et al., 2008; NIES, 2018).

한편, 뉴질랜드는 위성영상 자료를 활용하여 주기적으로 토지피복 주제도를 제작하여 토지이용변화 매트릭스 작성에 활용하고 있으며 (ME, 2013), REDD+ 사업의 효과를 평가하기 위한 산림참조배출기준선 (Forest Reference Emission Level; FREL) 및 산림참조기준선 (Forest Reference Level; FRL) 설정을 위해 위성영상을 활용한 방법이 많이 이용되고 있다 (Reimer et al., 2015). 그러나 Achard et al. (2008)는 국

가단위 토지이용변화 매트릭스 구축에 있어서 위성영상 자료를 활용한 주제도 (wall-to-wall)를 이용한 방법은 토지이용변화의 공간적 분포를 나타내는 장점이 있는 반면, 자료취득 및 대용량 자료 처리를 위한 추가 비용의 발생과 위성영상의 분석을 위한 전처리 등의 문제를 제기하면서, 표본 (Sampling)에 의한 방법을 대안으로 제시하였다. 특히, 대면적 조사를 위한 점 표본점 방법은 토지면적 추정 및 토지이용변화의 탐지능력이 원격탐사 자료를 활용한 wall-to-wall 방법과 비교하여 비용효율적인 방법으로 제시된 바 있다 (Lund, 1982; Vesterby and Heimlich, 1991).

우리나라에서도 최근 토지이용변화 매트릭스를 제작하기 위하여 국가산림자원조사의 고정표본점 자료를 활용한 점 표본점 방법의 적용방안에 관하여 연구가 수행된 바 있으며 (Yim et al., 2015; Park et al., 2017a; 2017b), 박한빈 등 (2018)은 점 표본점 방법과 위성영상을 활용한 wall-to-wall 방법의 장단점을 비교하였다. 하지만, 기존의 연구는 전체 국토 중 일부 행정구역 (도단위 또는 시군단위)을 대상으로 수행하여 표본개수의 한계 및 연구대상지의 특성으로 제한된 정보를 제공하여 국가단위의 온실가스 인벤토리에 적용하는데 한계가 있다. 따라서 본 연구는 계통적으로 배치된 제5차 국가산림자원조사의 고정표본점 자료를 활용한 점 표본점 (point sampling) 방법을 적용하여 토지이용구분 및 국가수준의 토지이용변화 매트릭스를 작성하기 위한 방법을 제시하고자 수행하였다.

2. 재료 및 방법

2.1 연구대상지

본 연구는 우리나라의 일부 도서지역을 제외한 전체 국토를 대상으로 하였다. 우리나라의 국토면적은 간척사업 및 지적복구 등에 의해 매년 증가하여 1990년도에는 9,873천 ha이었으나, 2015년도에는 10,030천 ha로 지난 25년간 157천 ha가 증가하였다 (Fig. 1). 기후변화협약에 따른 국가 온실가스 인벤토리의 시작년도는 1990년도부터의 통계가 요구되지만, 토지이용변화 매트릭스의 경우에는 최종년도의 면적을 기준으로 작성되어야 한다 (IPCC, 2006). 우리나라와 같이 매년 국토면적이 변화하는 경우에는 최종년도 기준의 면적자료로 매년 재계산을 수행되어야 하므로 통계작성을 위한 기준년도가 필요하다. 본 연구에서는 제4차 산림항공사진 촬영의 완료시점을 고려하여 2005년도를 최종년도로 결정하였으며, 2005년도의 총 국토면적 (9,965천 ha)을 기준으로 토지이용

변화 매트릭스를 작성하였다.

2.2 고정표본점 배치

국가산림자원조사 (National Forest Inventory; NFI)는 전국의 산림을 과학적인 방법으로 조사 및 평가하여 산림기본통계를 확보하고 산림자원의 변화 동태를 주기적으로 파악하여 지속 가능한 산림경영 실천을 위한 산림기본계획 및 산림정책수립의 기초자료 제공을 목적으로 1972년부터 수행하고 있다. 제1차 ('72~'74)부터 제4차 ('96~'05) NFI에서는 항공

사진 촬영 및 판독에 의한 층화추출법 (Stratified sampling)을 적용하였으며, 제5차 ('06~'10)부터는 계통추출법 (Systematic sampling)에 의한 표본을 배치하여 적용하고 있다 (KFRI, 2011).

제5차 국가산림자원조사의 고정표본점은 중부원점을 중심으로 4 km × 4 km의 격자크기로 계통추출법에 의해 표본점을 배치한 후 (Fig 2), 매년 전체 표본점의 20%에 해당하는 표본점을 조사하는 5년 주기 연년조사체계에 의해 수행되었다. 전체국토를 대상으로 4 km 격자로 배치된 6,264개소를

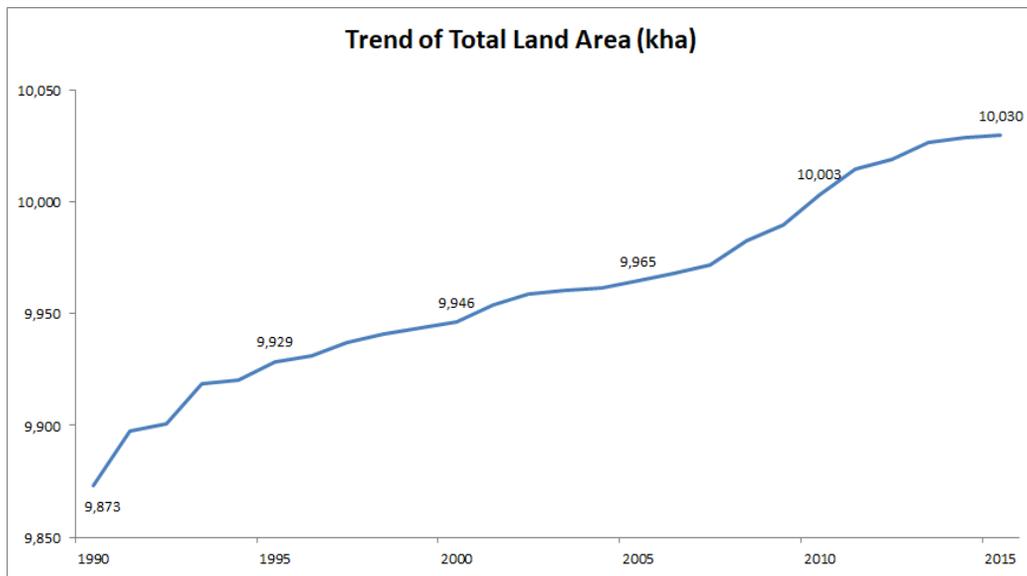


Fig. 1. Trend of total land area from 1990 to 2015 (MOLIT, 2019).

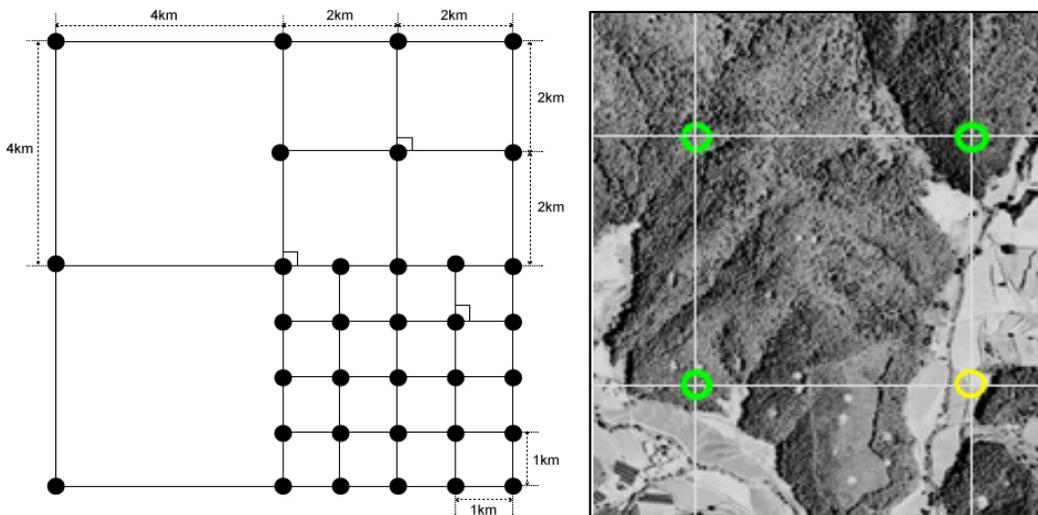


Fig. 2. Sampling and plot designs for the National Forest Inventory (KFRI, 2011).

대상으로 항공사진, 위성영상 판독, 그리고 현지확인을 통하여 산림과 비산림으로 구분한 후, 산림으로 확인된 4,065개소를 대상으로 부표본점단위 (Sub-plot)의 토지이용 및 산림자원량 파악을 위한 현지조사를 수행하였다 (KFRI, 2011). 본 연구에서는 촬영된 항공사진이 없는 접경지역 등에 위치한 표본점은 판독이 불가하여 판독이 가능한 5,600개 표본점을 대상으로 두 개 시점의 토지이용구분을 수행하였다.

2.3 토지이용구분 및 토지이용변화 매트릭스 작성

우리나라의 LULUCF 부문에서 각 토지이용범주별 정의는 Table 1과 같다 (GIR, 2018b). 산림은 FAO에서 정의한 토지피복 (land-cover)에 의한 정의에 의하여 최소 면적 등의 공간적 기준에 따른 정의를 이용하고 있다 (KFRI, 2011). 농경지는 위성영상 자료의 판독에 의한 토지피복과 토지이용 정보를 혼용하여 정의하고 있다 (Statistics Korea, 2019). 한편, 초지, 습지 및 정주지는 토지이용에 따른 정의를 적용하고 있어 IPCC 가이드라인에서 제시된 6개 토지이용구분을 위한 일관된 정의가 없는 문제점을 가지고 있다 (Table 1).

Table 1에 제시된 초지면적은 관리되는 목장용지만 대상으로 제시된 면적정보로 자연적으로 생성된 초지는 누락되어 있으며, 습지면적은 지적통계연보의 하천과 구거, 유지, 양어장의 면적을 적용하였다. 기타토지의 경우, 나지, 암석지, 빙하지 등으로 상위 5개 토지이용으로 구분되지 않은 토지로 정의하고 있으나 (IPCC, 2006), 우리나라의 경우에는 대부분의 나지는 택지개발을 위해 조성된 지역으로 정주지에 포함될 수 있으며, 암석지는 산림내 소지역으로 (0.5 ha 미만) 분포하여 산림내 무림목지에 포함되므로 본 연구에서는 기타토지의 면적을 “0”으로 가정하였다. 따라서 정주지면적은 전체 국토면적에서 위의 4개 토지이용구분별 면적을 제외한 면적으로 가정하였다 (Table 1).

우리나라의 토지이용변화 매트릭스를 작성하기 위해서는 시작년도와 기말년도의 토지이용구분 정보가 요구된다. 본 연구에서는 점 표본점 방법을 적용하기 위하여 제3차 ('86~'92) 및 제4차 ('96~'05) 국가산림자원조사에서 촬영된 수치 산림항공사진 위에 제5차 국가산림자원조사에서 배치된 고정표본점의 위치정보를 중첩하여 표본점의 토지이용정보를 판독하였으며, 동일시점에서의 수치 임상도 (산림지/비산림지) 및 토지피복지도 등의 국가공간정보를 항공사진과 중첩하여 토지이용구분을 위한 참고자료로 활용하였다 (Park, 2019).

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 표본점을 의미한다.

2.4 표본기반 토지이용변화 매트릭스를 활용한 면적 추정

표본기반 토지이용변화 매트릭스 자료와 2005년 기준 국토면적을 활용하여 각 토지이용구분의 면적 및 시간경과에 따른 토지이용변화 면적을 추정하기 위하여 본 연구에서는 두가지 방법을 비교하였다. 먼저 일반적으로 적용되는 식 (1)의 비 추정법을 이용하여 모든 행렬의 면적을 추정한 후, 각 행렬의 면적을 합산하여 토지이용구분별 추정된 총 면적 ($A'_f \sim A'_s$)을 국가통계와 비교하였다.

Table 1. Definition and land area by land-use categories at 2005 year

Land-use category	Definition	Area (ha)
Forest land (F)	Land spanning more than 0.5 ha with trees higher than 5 m and a canopy cover of more than 10% and minimum width of more than 30 m	6,393,949
Cropland (C)	Cropped land including rice field, and agro-forestry systems	1,824,039
Grassland (G)	Rangelands and pasture land that don't be considered cropland	57,200
Wetlands (W)	Areas of peat extractions and land that is covered or saturated by water for all or part of the year	572,808
Settlements (S)	All developed land, including transportation infrastructure and human settlements of any size	1,689,428
Other land (O)	Bare soil, rock, ice, and all land area that do not fall into any of the other categories	0

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

n : total number of samples,
 n_{ff} : number of samples in remaining forest land,
 p'_{ff} : the proportion of points in remaining forest land,
 A'_{ff} : estimated area of remaining forest,
 and A : total land area at final year

하지만 단순 비 추정법을 적용할 경우, 각 토지이용구분별 면적자료는 국가통계와 차이가 발생할 수 있으므로 기말면적의 토지이용구분별 총 면적 ($A_f \sim A_s$)은 국가통계 자료를 적용하고, 토지이용구분간의 변화면적은 변형된 비 추정법 (식 2)을 적용하여 추정하였다. 이 방법에서는 전체 표본개수 (n)의 각 행렬의 표본개수를 이용하는 것이 아니라 해당 열의 표본개수 합 (n_f)에 대한 비율 (p_{ff})을 적용하는 방법이다. 아래의 수식은 산림으로 유지된 산림지의 면적을 추정하는 방법을 나타낸 것으로 여기서 A_f 는 2005년 기준의 산림면적을 의미한다.

$$A_{ff} = A_f \times p_{ff}, \text{ (where } p_{ff} = \frac{n_{ff}}{n_f} \text{)} \quad \text{Eq. (2)}$$

2.5 토지이용변화의 불확실성 평가

표본점 자료를 바탕으로 추정된 토지이용범주별 면적을 지적통계와 비교하기 위하여 온실가스 인벤토리의 면적결정 방법에 의해 토지이용범주로 재분류된 면적 (Table 1)과의 차

이를 비교하여 적용가능성을 평가하였다. 또한, 토지이용변화 매트릭스에 의한 각 토지이용구분별 추정면적의 불확도 (Uncertainty)는 식 (3) 및 식 (4)에 의해 산출하였다 (IPCC, 2006).

$$s(A_{ff}) = A_f \times \sqrt{\frac{p_{ff}(1-p_{ff})}{n_f-1}} \quad \text{Eq. (3)}$$

$$\text{Relative standard error (\%)} = \frac{s(A_{ff})}{A_{ff}} \times 100 \quad \text{Eq. (4)}$$

$s(A_{ff})$: standard error of an area estimate for remaining forest land

3. 결과 및 고찰

3.1 토지이용구분 및 토지이용변화 매트릭스 작성

본 연구는 산림항공사진이 촬영되지 않은 접경지역을 제외한 5,600개 고정표본점의 위치정보를 활용하여 과거 산림항공사진의 토지이용구분을 수행하였다. 두 개 시점의 토지이용구분 자료를 활용하여 시간경과에 따른 토지이용변화 매트릭스를 분석한 결과는 Table 3과 같다. 전체 표본점 중에서 산림지의 비율이 63%로 가장 많았으며, 농경지 (26%), 정주지 (7%), 습지 (3%), 그리고 초지 (1%) 순으로 나타났다.

고정표본점 자료를 활용하여 13년간의 토지이용변화를 분석한 결과, 산림지는 총 7개 표본점이 감소하였으나, 토지이용변화 매트릭스에서는 54개 표본점이 타토지 (정주지와 농경지)로 전환되었으며, 47개 표본점은 타 토지에서 전환된 것

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

을 확인할 수 있다. 농경지의 경우에는 1,590개 표본점 중에서 158개의 농경지 표본점이 타토지로 전환되어 가장 큰 변화가 있는 것으로 나타났다. 정주지는 248개 표본점 중에서 산림지와 농경지로 각각 하나의 표본점이 전환되었으나, 148개 표본점이 타 토지에서 전환되어 2005년에는 394개 표본점으로 증가하였다. 결과적으로 농경지와 산림지 면적은 감소하고 있으나, 정주지 면적은 증가하는 추세를 나타내고 있어 우리나라의 지목통계자료와 비교하여 유사한 토지이용변화 특성을 보이고 있다 (MOLIT, 2019).

고정표본점의 토지이용구분에 있어 목장용지를 제외한 자연초지는 산림내 미립목지 및 벌채지를 자연초지로 구분할 수 있으며, 정주지내 도시공원의 잔디밭도 초지로 구분할 수 있으므로 (IPCC, 2019) 명확한 공간적 크기 및 정의를 정립할 필요가 있다. 또한, 상대적으로 면적이 적고 토지이용구분간의 변화가 적은 토지이용구분은 상대적으로 표본이 작아 높은 불확도를 나타낼 수 있다.

3.2 비추정법에 따른 토지이용구분 면적 비교

고정표본점의 토지이용변화 정보 (Table 3)와 기말년도의 총 국토면적 (단순 비추정법) 또는 토지이용구분별 총 면적자료 (변형된 비추정법)를 활용하여 두 가지 추정방법에 의해 시간경과에 따른 토지이용변화 면적을 추정하고, 추정된 결과를 비교하여 국가 온실가스 인벤토리의 적용방안을 분석하였다.

Table 4는 기말년도의 총 국토면적과 단순 비추정법에 의해 추정된 토지이용변화 매트릭스를 나타낸 것이다. 이 방법은 Table 3의 표본비율을 적용한 것으로 비록 시간경과에 따른 토지이용구분간의 변화 정보를 추정할 수 있으나, 기말년도의 토지이용구분별 총 면적은 국가통계 (Table 1)와 차이가 있다. 정주지 추정면적은 약 70만 ha로 국가통계자료와 비교하여 약 60% 과소추정된 것으로 나타났으며, 농경지의 경우에 약 42% 과대 추정되었다. 반면 상대적으로 면적이 넓은 산림지의 경우에는 약 2% 과소추정된 것으로 나타났다.

한편, 초지의 경우에는 비추정법에 의한 추정된 초지면적은 약 93천 ha로 분석되었다. 국가통계가 지적통계의 목장용

Table 3. Number of points in Land-use change matrix from 1992 to 2005 year

(Unit: N. of points)

Classification		1992 year					Total
		Forest land	Cropland	Grassland	Wetlands	Settlements	
2005 year	Forest land	3,474	41	5	0	1	3,521 (63%)
	Cropland	16	1,432	1	5	1	1,455 (26%)
	Grassland	2	6	42	2	0	52 (1%)
	Wetlands	0	9	1	168	0	178 (3%)
	Settlements	36	102	3	7	246	394 (7%)
	Total	3,528	1,590	52	182	248	5,600

Table 4. Estimated area by simple ratio estimator in Land-use change matrix

(Unit: ha)

Classification		1992 year					Total
		Forest land	Cropland	Grassland	Wetlands	Settlements	
2005 year	Forest land	6,181,621	72,954	8,898	0	1,780	6,265,253
	Cropland	28,467	2,548,095	1,780	8,897	1,780	2,589,019
	Grassland	3,559	10,677	74,735	3,558	0	92,529
	Wetlands	0	16,014	1,780	298,939	0	316,733
	Settlements	64,059	181,499	5,336	12,456	437,732	701,082
Total		6,277,706	2,829,239	92,529	323,850	441,292	9,964,616

지로 한정하고 있어 자연적으로 생성된 초지면적이 누락되어 직접적인 비교가 불가능하지만, 자연초지가 존재하는 특성을 고려하면 국가통계에서 제시된 면적 (57천 ha)보다 많이 추정되는 것이 타당한 것으로 판단된다.

Table 5는 기말년도의 토지이용구분별 면적과 각 토지이용구분별 표본개수의 비율을 적용하여 토지이용변화 매트릭스를 추정된 결과이다. 초지의 경우 자연초지를 포함한 참값이 부재함에 따라 단순 비추정법에 의해 추정된 면적을 실제 면적으로 적용하였으며, 결과적으로 정주지 면적은 전체 국토면적에서 타토지 면적의 합계를 제외한 면적 (1,081천 ha)을 적용하였다. 이에 따라 정주지 면적은 국가통계로 제시된 면적 (1,689천 ha)보다 610천 ha가 작다. 이 방법을 적용하면 비록 초지 및 정주지 면적은 추정된 자료를 활용하지만, 산림지, 농경지, 그리고 습지의 3개 토지이용구분별 면적은 국가통계와 일관된 정보를 제공할 수 있으며, 시간경과에 따른 토지이용구분간의 변화 정보를 제공할 수 있는 장점이 있다.

3.3 토지이용변화 면적의 불확도 평가

두 가지 비추정법에 의한 토지이용변화 매트릭스의 불확도를 평가한 결과는 각각 Table 6 및 Table 7과 같다. 단순 비추정법을 적용할 경우에는 각 토지이용구분별 총 면적이 표본에 의해 추정되므로 추정된 총 면적의 불확도 평가가 가능하다. 추정된 면적의 불확도는 면적과 밀접한 관계가 있으며, 상대적으로 면적이 넓은 산림지와 농경지의 불확도는 2% 이내로 분석되었다. 한편 면적이 상대적으로 적은 초지의 불확도는 13%로 가장 큰 것으로 나타났다. 이러한 결과는 충청 북도를 대상으로 한 연구 (Yim et al., 2015)와 비교하여 상대적으로 많은 표본 자료를 활용함에 따라 불확도는 크게 낮아졌으며, 국가단위 통계 산출에는 문제가 없는 것으로 판단된다.

분석방법에 관계없이 동일한 토지로 유지되는 면적의 불확도는 초지를 제외하고는 모두 10% 이내로 낮은 것으로 나타났다. 이러한 특성은 점 표본점 방법을 적용하는 국가에서 나타내는 일반적인 표본강도가 미치는 효과로 판단된다 (Statistic Finland, 2018). 초지의 경우에는 상대적으로 면적이 적고 토지이용구분의 정의가 명확하지 않아 판독오차가 상대

Table 5. Estimated area by modified ratio estimator in Land-use change matrix

(Unit: ha)

Classification		1992 year					Total
		Forest land	Cropland	Grassland	Wetlands	Settlements	
2005 year	Forest land	6,308,600	74,454	9,079	-	1,816	6,393,949
	Cropland	20,059	1,795,206	1,254	6,266	1,254	1,824,039
	Grassland	3,558	10,677	74,735	3,559	-	92,529
	Wetlands	-	28,963	3,217	540,628	-	572,808
	Settlements	98,799	279,929	8,231	19,211	675,121	1,081,291
Total		6,431,016	2,189,229	96,516	569,664	678,191	9,964,616

Table 6. Uncertainty assessment in land-use change matrix by SRE

(Unit: %)

Classification		1992 year					Total
		Forest land	Cropland	Grassland	Wetlands	Settlements	
2005 year	Forest land	1	15	43	-	97	1
	Cropland	24	2	97	43	97	2
	Grassland	68	39	15	68	-	13
	Wetlands	-	32	97	7	-	7
	Settlements	16	9	56	36	6	5
Total		1	2	13	7	6	-

Table 7. Uncertainty assessment in land-use change matrix by MRE

(Unit: %)

Classification		1992 year				
		Forest land	Cropland	Grassland	Wetlands	Settlements
2005 year	Forest land	0.2	15	45	-	100
	Cropland	25	0.3	100	45	100
	Grassland	70	39	7	70	-
	Wetlands	-	33	100	2	-
	Settlements	16	8	58	37	4

적으로 큰 것으로 판단된다. 토지이용구분간의 변화된 면적의 불확도는 유지되는 토지보다 높은 것으로 나타났는데, 이는 변화된 면적이 상대적으로 작은 것에 기인하며, 핀란드의 경우에도 정주지에서 습지로 전환된 면적의 불확도는 200%로 보고하고 있으므로 (Statistic Finland, 2018) 점 표본점 자료를 활용한 토지이용변화 매트릭스 자료는 국가 통계로 활용이 가능한 것으로 판단된다.

4. 결론

파리협정의 향상된 투명성 (Enhanced Transparency) 체계에 대응하기 위하여 국가 온실가스 인벤토리 통계의 MRV 체계를 확립하고 국가보고서의 투명성 (Transparency), 정확성 (Accuracy), 완전성 (Completeness), 비교가능성 (Comparability) 그리고 일관성 (Consistency)을 확보하기 위한 노력이 필요하다. 토지이용, 토지이용변화 및 임업 (LULUCF)부문에서 토지이용변화 매트릭스는 중요한 활동 자료로 이용되고 있으며, 토지이용변화 매트릭스 자료를 기반으로 유지되는 토지와 타 토지에서 전환된 토지로 구분하여 각 토지이용구분에 따른 탄소저장고에 대한 온실가스 배출 및 흡수량을 산정하여 보고하여야 한다. 하지만, 우리나라의 경우에는 IPCC 지침에서 제시된 6개 토지이용구분의 정의에 따른 일관된 정의가 부재하여 각 산정기관에서 담당하는 토지이용구분만을 대상으로 온실가스 배출 및 흡수량을 산정하고 있으므로 LULUCF부문의 완전성 및 비교가능성을 확보하기 위해서는 일관된 토지이용구분 정의에 따른 토지이용변화 매트릭스 정보가 필수적으로 요구된다.

본 연구는 IPCC 지침에서 제시된 점 표본점 (Point sampling) 방법을 이용하여 국가단위의 토지이용변화 매트릭스를 작성하기 위한 방법을 개발하기 위하여 수행하였다. 점 표본점 방법을 적용하기 위하여 국가산림자원조사에서 계통

적으로 배치된 약 5,600개의 고정표본점을 대상으로 산림항공사진과 국가공간정보를 활용하여 기타토지를 제외한 5개 토지이용구분으로 일관된 정의에 의해 토지이용/피복을 구분하였으며, 2가지의 비추정법을 의하여 토지이용변화 매트릭스에 따른 면적정보를 추정하였다.

고정표본점의 1992년과 2005년 기준의 토지이용구분 자료를 활용하여 토지이용변화 매트릭스를 분석한 결과, 우리나라의 토지이용변화 특성과 유사한 경향을 나타내고 있는 것으로 나타났다. 단순 비추정법을 적용한 결과, 상대적으로 넓은 면적을 차지하는 산림지의 총 면적은 국가통계보다 약 2% 과소 추정되었지만, 정주지는 약 60% 정도 과소 추정되었으며 농경지는 약 42% 과대 추정되는 것으로 나타났다. 따라서 점 표본점 방법을 적용하기 위해서는 정확성과 효율성을 고려하여 우리나라 국토 특성을 대표할 수 있는 적합한 표본강도 선정에 관한 연구가 필요하다.

우리나라의 국토면적은 간척 등의 사업으로 매년 증가하고 있으므로 IPCC에서 제시된 기말년도 기준의 토지이용변화 매트릭스를 작성하기 위해서는 매년 또는 주기적으로 과거 자료의 재계산이 요구되므로 이러한 특성을 고려하여 특정시점을 기준년도로 지정하여 적용하는 것이 효율적이며 일관된 정보를 제공할 수 있다.

점 표본점 방법은 토지이용/피복 주제도와 비교하여 전체 국토의 토지이용 및 피복변화에 관한 정보를 제공하지 못하는 한계를 가지고 있지만, 공간적으로 배치된 표본점을 활용하여 시간경과에 따른 변화를 효율적으로 모니터링 할 수 있는 장점이 있으므로 우리나라 특성을 고려하여 일관된 토지이용구분의 정의를 정립하고, 주기적으로 표본점의 토지이용구분 자료를 취득하면 국가 온실가스 인벤토리를 위한 활동 자료 작성이 가능할 것으로 판단된다.

사 사

본 연구는 “국립산림과학원 일반과제 (국가산림자원조사 자료의 융복합 활용기술 개발)” 및 “산림청 (한국임업진흥원) 산림과학기술 연구개발사업 (신기후체제 대응 국가수준 토지 이용변화 매트릭스 구축 및 검증기술 개발 : 2017045C10-1919-BB01)”의 지원으로 수행되었습니다.

REFERENCES

- Achard F, Eva H, Mayaux P. 2001. Tropical forest mapping from coarse spatial resolution satellite data : production and accuracy assessment issues. *International Journal of Remote Sensing* 22: 2741-2762.
- Achard F, Grassi G, Herold M, Teobaldelli M, Mollicone D. 2008. Use of satellite remote sensing in LULUCF sector. *GOFC-GOLD Report* 33.
- 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). 2018a. 2018 National Greenhouse Gas Inventory Report of Korea. (in Korean)
- GIR (Greenhouse Gas Inventory & Researches Center). 2018b. National Greenhouse Gas Inventory - Guideline for Measurement, Reporting, Verification -. (in Korean)
- Hayashi M, Hori S, Awaya Y, Matsumoto M, Iehara T. 2008. Evaluation of ARD monitoring method under Article 3.3 of the Kyoto Protocol. *J Japan Soc Photo & Remote sensing* 47 (3): 48-58. (In Japanese with English abstract)
- Henders S, Stümer W, Gensiors A, Laggner A, Dunger K, Rüter S. 2017. Germany's LULUCF inventory 2017. Braunschweig: Johann Heinrich von Thünen-Institut.
- 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.
- KFRI (Korea Forest Research Institute). 2011. The 5th National forest Inventory Report. Seoul: National Institute of Forest Science. (in Korean)
- Lund HG. 1982. Point sampling - the role in-place resources inventories. pp 79-84 In Brann TB, House LO, Lund H. (eds.). *In-place resources inventories; principles and practices*. Proceedings of a national workshop. 9-14 August. 1981. Society of American Forest.
- ME (Ministry for the Environment). 2013. LULUCF GHG emission projections for the first commitment period of the Kyoto Protocol from LULUCF activities under article 3.3: results, data and methodology.
- MOLIT (Ministry Of Land, Infrastructure and Transport). 2019. Cadastral statistic 2018.
- National Institute of Forest Science (NloFS). 2016. The major provision under the Paris Agreement related to Forest sector. (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.
- Park JM. 2019. Construction of scale-up LULUCF matrix based on Deep-learning model. Dissertation. Kangwon National University.
- Park JW, Na HS, Yim JS. 2017a. Comparison of Land-use Change Assessment Methods for Greenhouse Gas Inventory in Land Sector. *Journal of Climate Change Research* 8 (4): 329-337.
- Park JW, Yim JS, Lee JS. 2017b. Evaluation of a Land Use Change Matrix in the IPCC's Land Use, Land Use Change, and Forestry Sector Using National Spatial Information. *Journal of Forest and Environmental Science* 33 (4): 295-304.
- Reimer F, Asner GP, Joseph S. 2015. Advancing reference emission levels in subnational and national REDD+ initiatives: a CLASlite approach. *Carbon balance and management* 10:5.
- 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)
- Vesterby M, Heimlich RE. 1991. Land use and demographic change : results from fast-growth counties. *Land Economics* 67 (3): 279-291.
- 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.