

## 토지부문 온실가스 통계 산정을 위한 토지이용변화 평가방법 비교

박진우\* · 나현섭\*\* · 임종수\*\*

\*국립산림과학원 산림산업연구과, \*\*한국임업진흥원 자원정보실

### Comparison of Land-use Change Assessment Methods for Greenhouse Gas Inventory in Land Sector

Park, Jin-Woo\*, Na, Hyun-Sup\*\* and Yim, Jong-Su\*

\*Div. of Forest Industry Research, National Institute of Forest Science, Seoul 02455, Korea

\*\*Div. of Forest Resources Information, Korea Forestry Promotion Institute, Seoul 07570, Korea

#### ABSTRACT

In this study, land-use changes from 1990 to 2010 in Jeju Island by different approaches were produced and compared to suggest a more efficient approach. In a sample-based method, land-use changes were analyzed with different sampling intensities of 2 km and 4 km grids, which were distributed by the fifth National Forest Inventory (NFI5), and their uncertainty was assessed. When comparing the uncertainty for different sampling intensities, the one with the grid of 2 km provided more precise information; ranged from 6.6 to 31.3% of the relative standard error for remaining land-use categories for 20 years. On the other hand, land-cover maps by a wall-to-wall approach were produced by using time-series Landsat imageries. Forest land increased from 34,194 ha to 44,154 ha for 20 years, where about 69% of total forest land were remained as forest land and 19% and 8% within forest lands were converted to grassland and cropland, respectively. In the case of grassland, only about 40% of which were remained as grassland and most of the area were converted to forest land and cropland. When comparing land-cover area by land-use categories with land-use statistics, forest areas were underestimated while areas of cropland and grassland were overestimated. In order to analyze land use change, it is necessary to establish a clear and consistent definition on the six land use classification.

**Key words:** Land-Use Change, Greenhouse Gas Inventory, Sampling, Wall to Wall, Land Cover Map

#### 1. 서 론

1988년 유엔환경계획(United Nations Environment Programme; UNEP)과 세계기상기구(World Meteorological Organization; WMO)는 과학자 그룹인 IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change)를 설립하여 범 지구차원에서 온난화현상에 대한 대책의 필요성을 인식하기 시작하였다. 이에 1992년 브라질 리우데자네이루에서는 기후변화에 관한 UN협약(UNFCCC)이 채택되었으며, 1995년 제1차 유엔기후변화협약 당사국 총회(Conference of the Parties; COP)를 시작으로 2016년 모로코에서 제22차 COP가 개최되어 기후변화에 대한 지속적인 논의가 이루어지고 있다(KFS, 2009; Yim and Song, 2017). 한편, 1997년 제3차 COP에서는 온실가스 감축의 의무를 명시하는

교토의정서를 채택하였다. 교토의정서 제3조 3항은 신규조림(afforestation), 재조림(reforestation), 산림전용(deforestation), 제3조 4항은 ‘토지이용, 토지이용변화 및 임업(Land-use, Land-use change and Forestry; LULUCF)’ 부문에 대한 온실가스 배출량과 흡수량에 대한 규정을 명시하여 산림 경영활동을 통한 온실가스 흡수량 산정을 가능하도록 하는 등 탄소흡수원으로 산림의 중요성이 명시되었다(Kim *et al.*, 2013).

국가간 온실가스 배출량에 대한 평가를 위한 국가 온실가스 인벤토리 보고서는 1990년도를 기준년도로 매년 온실가스 흡수·배출량을 보고토록 하고 있으며, LULUCF 부문의 경우에는 고사유기물 및 토양의 탄소안정화 기간을 고려하여 과거 20년간의 체계적인 토지이용 정보를 구축하여 제시하도록 요구하고 있다(IPCC, 2006). 이를 위하여 IPCC 지침에서는 토지이

† Corresponding author: yimjs@korea.kr

Received October 19, 2017 / Revised November 6, 2017 / Accepted November 20, 2017

용변화 통계 작성을 위하여 세가지 접근방법을 제시하였다(IPCC, 2006). 특히, 접근방법 3은 공간적으로 명백한 정보를 포함하는 것으로 표본방법(point sampling)과 주제도(wall-to-wall mapping)을 활용하는 방법이다(IPCC, 2006; Yu *et al.*, 2015). 유럽국가들의 경우에는 국가산림자원조사(National Forest Inventory; NFI)의 고정 표본점을 활용하여 표본점 기반의 토지이용변화 통계를 제공하고 있다(SEPA, 2014; Statistics Finland, 2014). 독일의 경우에도 전국에 배치된 NFI의 고정 표본점 정보와 다양한 토지이용 및 토지피복관련 공간자료를 융합하여 토지이용변화 매트릭스 정보를 생산하고 활용하고 있다(FAO, 2014). 주제도에 의한 제작방법은 원격탐사 기술이 발전함에 따라 활발히 연구가 진행되었으며, 뉴질랜드 및 호주 등의 국가에서는 위성영상을 활용한 토지이용변화 정보를 구축하고 있다(Angel *et al.*, 2011). 우리나라의 경우에도 Lee *et al.*(2011)이 SPOT/Vegetation 영상을 활용하여 2000년과 2008년의 토지피복 변화탐지에 관한 연구를 수행한 바 있으며, Sunwoo *et al.*(2016)은 KOMPSAT-2 영상을 활용한 2010년부터 2014년까지의 토지이용 및 토지피복변화 모니터링을 실시하였다. 또한, 환경부에서는 2010년 이후 우리나라 전체 지역에 대한 토지피복 지도를 구축하고, 이를 갱신 및 배포하고 있다(Ministry of Environment, 2016). 하지만, 위성영상을 활용한 방법은 공간적으로 명확한 변화 위치가 나타나는 장점이 있는 반면, 자료의 취득 및 처리에서 발생하는 비용 및 시간, 위성영상의 전처리에 대한 한계의 문제점을 내포하고 있으므로 일부 국가에서는 표본기반 토지이용변화 정보를 활용하고 있다(Yim *et al.*, 2015).

우리나라의 경우, 2006년부터 시행된 제5차 NFI에서 토지이용에 관한 항목을 추가하여 표본점의 토지이용 정보를 취득하고 있지만, IPCC에서 요구하는 기준년도를 고려할 때 과거 시점에 대한 토지이용변화 매트릭스 정보를 생산하기 위한 방법개발이 필요하다(Yim *et al.*, 2015). 따라서, 본 연구에서는 LULUCF 부문 토지이용변화 통계를 작성하기 위하여 표본점 기반 방법의 표본강도에 따른 토지이용구분 및 불확실성 평가를 실시하였으며, 위성영상을 활용한 토지피복 주제도를 제작하여 시간경과에 따른 토지이용변화를 탐지하는 방법을 비교하여 효율적이며 정확한 방법을 제시하고자 수행하였다.

## 2. 연구 자료 및 방법

### 2.1 연구 대상지

제주도는 NFI 표본설계와 관련하여 4 km 간격의 표본점과

2 km 간격의 보조표본점이 설치되어 있어 표본강도에 따른 비교가 가능하며, 최근 도시개발로 인한 토지이용 변화가 높다. 제주도는 지리적으로 동경 126도 08분에서 126도 58분, 북위 33도 06분에서 34도 00분으로 우리나라 최남단에 위치하고 있다(Fig. 1). 제주도의 총 면적은 약 184천 ha로 우리나라 전체 면적의 약 1.8%를 차지하고 있으며, 임야와 농경지의 면적 비율이 각각 약 47%, 약 29%로 전국의 임야와 농경지의 비율 대비 임야는 약 0.7배 낮았고, 농경지는 약 1.4배 높다(Statistics Korea, 2015). 한편, 1985년 ‘제주도 종합개발계획’이 발표되면서 제주도 전 지역에 대한 국제 관광지로써의 개발이 급속히 이루어졌으며, 2003년에는 국제자유도시로 선정되면서 첨단과학기술단지과 제주공항자유무역지역이 조성되어 토지이용의 변화가 급격하게 발생되고 있다(Lee *et al.*, 2004).

### 2.2 연구자료

본 연구에서는 1990년부터 2010년까지 20년간의 토지이용 변화 정보를 파악하기 위하여 제3차 전국산림실태조사에서 촬영된 제주지역의 산림항공사진(1992년 촬영)과 제5차 국가산림자원조사(NFI)에서 배치된 고정표본점의 위치정보 및 토지이용구분 정보 그리고 행정구역도 자료 등의 공간정보를 활용하였다(NIFOS, 2015). NFI 고정표본점은 세계측지좌표계를 TM으로 투영한 지도의 중부원점을 기준으로 하며, 계통추출법에 따라 4 km 간격으로 전국에 배치하였다. 특히 제주도와 같이 산림면적이 상대적으로 적은 특·광역시에는 통계자료의 정확성을 확보하기 위하여 4 km 간격의 고정표본점을 포함하여 2 km 간격의 보조표본점을 추가로 배치하였다(NIFOS, 2011). 본 연구에서는 표본점의 중심에 위치하는 중앙 부표본점(S1)의 토지이용정보를 활용하였으며, 결과적으로 4 km 간격의 총 123개와 2 km 간격의 총 476개 표본점의 토지이용정보를 기초자료로 활용하였다(Fig. 2).

위성영상 자료는 미국지질조사국 USGS(United States Geological Survey)에서 제공하는 Landsat-5 TM(Thematic Mapper, 1990년 5월 21일 촬영)과 Landsat-8 OLI(Operational Land Imager, 2014년 5월 7일에 촬영) 영상을 사용하였다. Landsat 영상은 촬영면적이 넓고 다양한 Band를 탑재하고 있어 토지이용 및 식생연구, 지도제작에 유용하게 활용되고 있다. Landsat-5 TM은 1984년 3월 1일에 발사되어 30 m의 공간해상도와 7개의 밴드를 가지고 있으며, Landsat-8 OLI는 2013년 2월 22일 발사되어 30 m의 공간해상도와 11개의 밴드로 이루어져 있다(<http://landsat.usgs.gov/>, 2016). 참조자료는 Google earth 영상과 항공사진을 사용하였다.

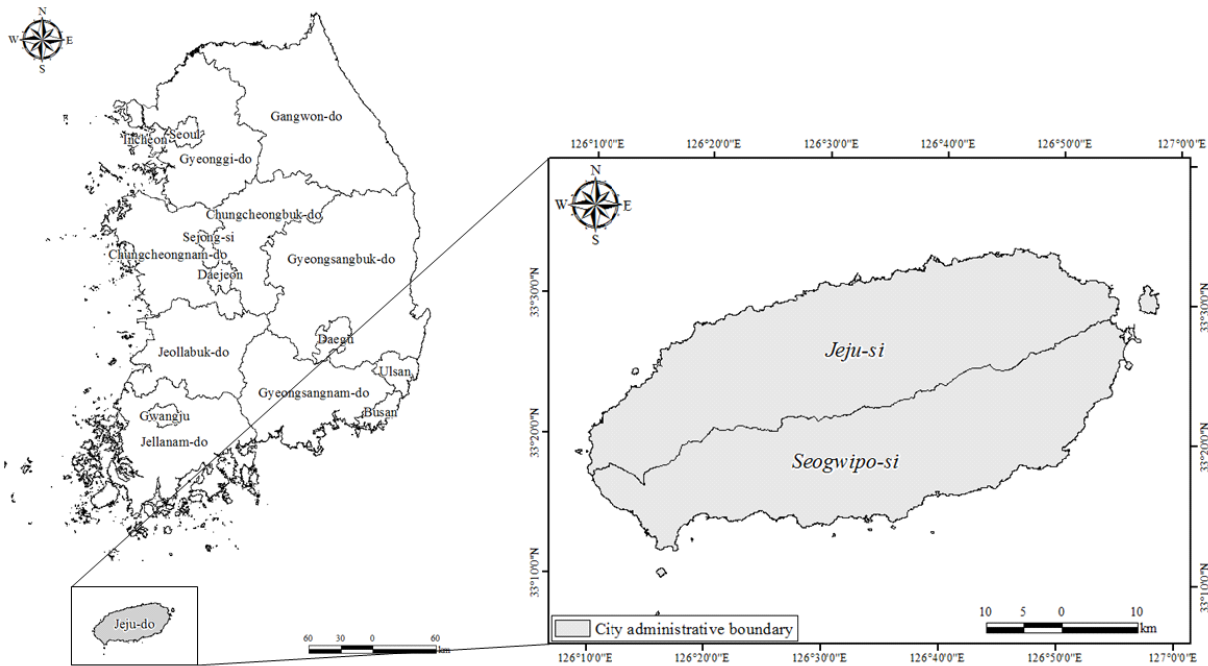


Fig. 1. Study area.

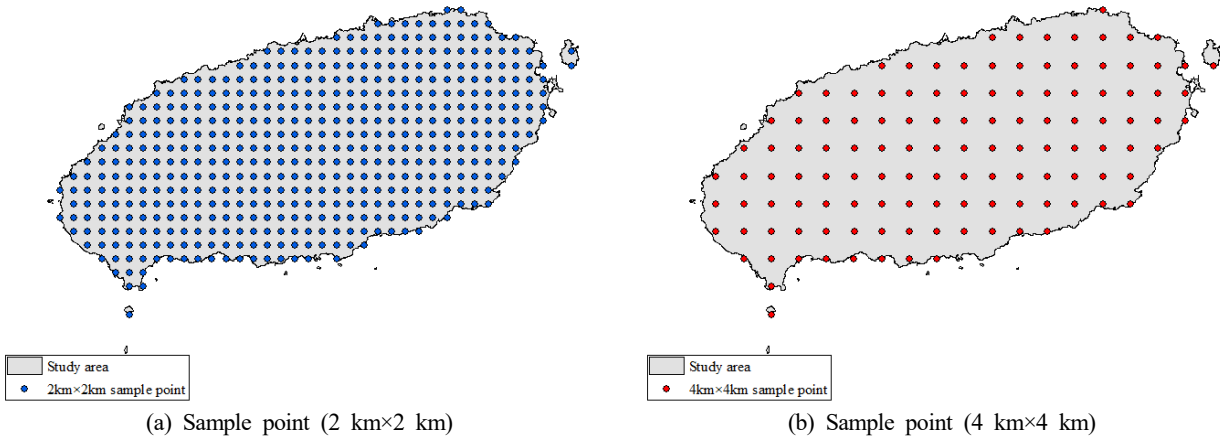


Fig. 2. Sample point location by sampling intensity.

2.3 연구방법

본 연구는 표본점 기반과 주제도 기반의 두 가지 방법에 의해 1990년부터 2010년까지의 토지이용변화 매트릭스를 작성하여 정확도 및 효율성을 비교하여 적용가능성을 분석하였다. Fig. 3은 본 연구의 연구추진체계를 나타낸 모식도이다.

2.3.1 표본점 기반 토지이용변화 탐지

표본점 기반의 토지이용변화 매트릭스는 제5차 국가산림

자원조사에서 수집된 2 km 간격의 고정표본점에서 수집된 토지이용정보와 1992년에 촬영된 항공사진을 활용하였다. 토지이용구분은 IPCC(2006)에서 제시하는 6개(산림지·농경지·초지·습지·정주지·기타 토지)의 토지이용항목으로 실시하였다. 1990년도의 토지이용정보는 1992년도에 촬영된 정사항공사진과 고정표본점의 위치정보를 중첩하여 고정표본점이 위치한 지점을 대상으로 항공사진 상의 토지이용에 관한 육안판독을 실시하였으며, 보조 자료는 제3차 수치임상도와 Google earth영상을 활용하였다. 한편, 2010년도의 토지이용

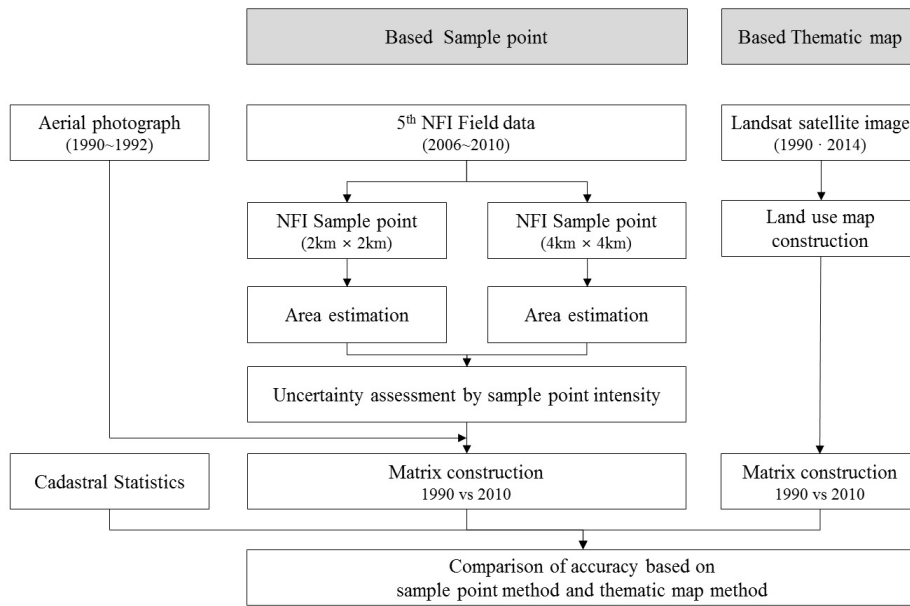


Fig. 3. Study flow chart for this study.

구분 정보는 5차 NFI에서 취득한 토지이용정보를 이용하였다. NFI 조사에서는 최신 항공사진을 이용하여 고정표본점을 대상으로 산림/비산림로 사전층화를 실시하며, 항공사진 판독과 현장조사에 의하여 정보를 수집하고 있다(NIFOS, 2011). 표본점 자료의 분석에 있어서 표본강도에 따른 정확도를 비교하기 위하여 2 km 및 4 km 간격의 표본점 자료에 따른 토지이용구분의 정확도를 비교하였다.

2.3.2 주제도 기반 토지이용변화 탐지

주제도 기반의 토지이용변화 매트릭스는 Landsat-5 TM(1990년 촬영)과 Landsat-8 OLI(2014년 촬영) 위성영상을 활용하여 6개의 토지이용구분에 대하여 토지피복 주제도를 작성하여 실시하였다. 위성영상의 경우, 2010년도 연구대상지의 자료 분석을 위한 정보 수집이 불가능하여 2014년도 촬영된 영상에서 수집된 자료를 2010년 기준으로 가정하였다. 토지피복 주제도 작성을 위한 분류기법은 감독분류방법의 최대우도법을 실시하였다. 최대우도법은 토지피복 지도 작성에 가장 널리 이용되는 확률통계방법으로 분석자가 참조자료를 활용하여 선정한 훈련지역의 분광특성에 대하여 통계값을 계산하고 포함될 확률이 가장 높은 분류 항목으로 토지피복을 자동적으로 분류하는 방법이다(Jeon and Kim, 2003). 본 연구에서는 Google earth와 항공사진을 참조자료로 사용하여 최대우도 분류방법을 실시하였다. 토지이용분류 항목은 토지의 물리적 표면 상태를 고려하여 9개의 항목(산림·논·밭·비닐하우스·

초지·습지·정주지·도로·나지)로 분류한 후, IPCC에서 제시하는 6개의 항목(산림지·농경지·초지·습지·정주지·기타 토지)으로 재구분을 실시하였다. 산림지·초지·습지는 토지이용분류 항목을 그대로 사용하였으며, 농경지는 논·밭·비닐하우스, 정주지는 정주지와 도로, 기타 토지는 나지의 정보를 이용하여 재구분을 실시하였다. 분류 정확도는 연구 대상지에 200개의 Random point를 구축하여 위성영상 및 항공사진을 판독하여 분류결과에 대한 전체 분류정확도(Overall accuracy)와 Kappa 분석을 실시하였다.

2.3.3 불확실성 평가

불확실성 평가는 자료의 수집 과정에서 발생하는 측정오차를 실측값과 추정값 사이의 차이 정도를 나타내는 방법으로서 IPCC에서는 불확실성 평가의 개념을 정확성(Accuracy) 및 정밀성(Precision)의 개념으로 설명하고 있다(Chun et al., 2016). 또한, 정확성(Accuracy)과 정밀성(Precision)에 대한 정해진 수준은 없으며, 정확도 개선을 위한 우선순위의 설정과 방법론 선정에 대한 결정을 위하여 평가된다(IPCC, 2006). 본 연구에서는 표본강도에 따른 토지이용 분류항목별 불확실성 비교 및 평가를 통하여 최적의 표본강도를 선정하였다. 불확실성 평가를 위하여 5차 NFI의 토지이용구분 자료를 이용하였으며, 2 km 간격과 4 km 간격으로 구분하여 불확실성을 평가하였다. 불확실성 평가를 위한 토지이용항목별 면적은 점 표본점의 분포비율을 이용하여 비 추정법(ratio estimator)을 이용

하였으며(식 1), 각 토지이용구분의 추정면적에 대한 불확실성을 평가하였다(식 2, 식 3)(Cochran, 1977; IPCC 2006).

$$A_h = A \times P_h \tag{1}$$

$$\text{Standard error(SE)} = s(A_h) = A \times \sqrt{\frac{P_h(1-P_h)}{n-1}} \tag{2}$$

$$\text{Relative standard error(RSE)} = \frac{s(A_h)}{A_h} \times 100 \tag{3}$$

$n$ : Total number of points

$n_h$ : Number of points in land-use category  $h$

$P_h$ : The proportion of points in land-use category  $h$

$A$ : The total land area

$A_h$ : Estimated area of land-use category  $h$

$s(A_h)$ : Standard error of an area estimate for land-use category  $h$

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 표본강도에 따른 토지이용변화의 불확도 비교

제5차 NFI 고정표본점 자료를 활용하여 2010년도 기준의

표본강도에 따른 토지이용구분 불확실성 평가를 실시한 결과, 기타 토지를 제외한 모든 토지이용 항목에서 2 km 간격의 표본점에서 불확실성이 낮은 것으로 평가되었다. 2 km 간격의 RSE는 산림지와 농경지가 약 5.9%로 가장 낮았으며, 정주지(약 13.4%), 초지(약 13.5%), 습지(약 23.8%)의 순이었다. 4 km 간격의 경우, 농경지가 약 10.9%로 가장 낮았으며, 산림지(약 12.3%), 초지(약 27.5%), 정주지(약 28.9%), 습지(약 36.9%)의 순으로 4 km 간격은 2 km 간격의 토지이용보다 RSE가 약 2 배 높았다(Fig. 4). 토지이용별 SE와 RSE는 표본강도와 상관 없이 유사한 경향을 보였지만, 표본의 간격이 감소함에 따라 감소하였다. 일반적으로 표본강도가 증가할수록 불확도는 감소하는 경향이 나타나고 있으나, 적정 수준 이상에서는 표본강도가 증가하여도 불확도는 크게 개선되지 않는다(FEA, 2014). 따라서 국가별 여건을 고려하여 비용효율적인 표본강도의 설정이 필요하므로 다양한 표본강도를 비교하여 최적의 표본강도를 설정할 필요가 있다.

#### 3.2 표본점 기반 토지이용변화 분석

불확실성이 낮은 2 km 간격의 표본점을 활용하여 1990년도와 2010년도의 분류항목별 토지이용면적을 추정하고, 토지이용변화 매트릭스를 작성한 결과는 Table 1과 같다. 1990년도는 농경지의 면적비율이 약 42.0%로 가장 높았으며, 산림지(약 35.5%), 초지(약 16.2%)의 순으로 분포하였다. 2010년

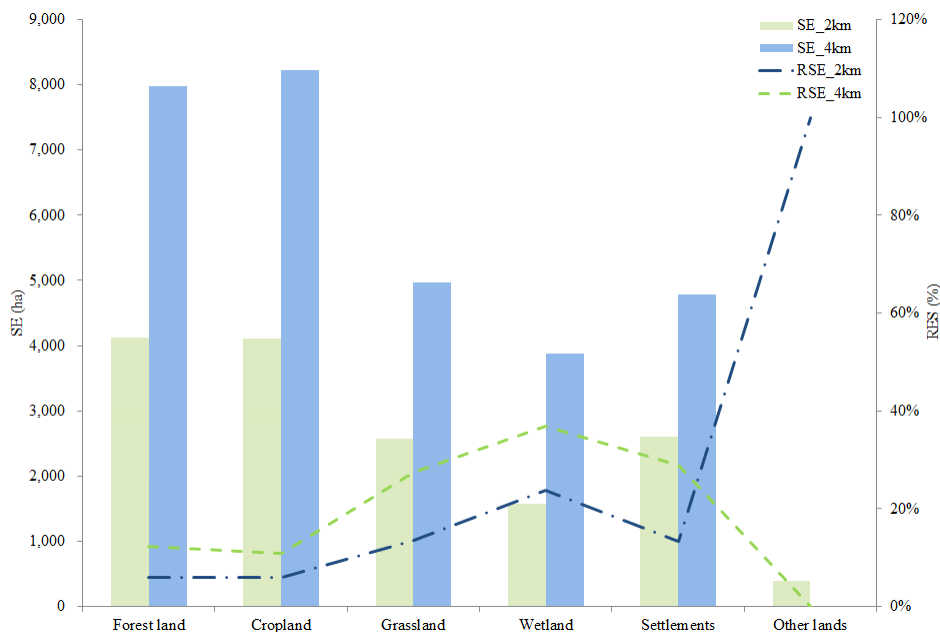


Fig. 4. Uncertainty assessment by sample point intensity at 2010 year.

Table 1. Land-use area and uncertainty by 2 km × 2 km sample point

(Unit: ha)

		1990						
		Forest land	Cropland	Grassland	Wetlands	Settlements	Other lands	Total
	Forest land	55,543( 7.0)	3,496( 33.1)	11,264(18.0)	-	-	-	70,302( 5.9)
	Cropland	3,107(35.1)	60,592( 6.6)	4,661(28.5)	388(100.0)	388(100.0)	-	69,137( 5.9)
	Grassland	1,554(49.8)	7,768( 21.9)	9,710(19.5)	-	-	-	19,032( 13.5)
2010	Wetlands	-	388(100.0)	-	6,215( 24.6)	-	-	6,603( 23.8)
	Settlements	5,438(26.4)	5,438( 26.4)	4,273(29.8)	-	3,884( 31.3)	388(100.0)	19,420( 13.4)
	Other lands	-	-	-	-	388(100.0)	-	388(100.0)
Total		65,641( 6.2)	77,682( 5.4)	29,908(10.4)	6,603( 23.8)	4,661( 28.5)	388(100.0)	184,883

The values in parentheses are the relative standard errors (%) as uncertainty.

도는 산림지가 약 38.0%로 가장 높은 비율을 차지하고 있으며, 농경지(약 37.4%), 정주지(약 10.5%), 초지(약 10.3%)의 순으로 분포하는 것으로 분석되었다. 결과적으로 20년동안 산림지와 정주지의 면적은 증가한 반면, 농경지와 초지의 면적은 감소하였다. 토지이용변화를 분석한 결과, 20년간 산림지로 유지되는 면적은 55,543 ha(1990년도 면적 대비 약 85%)이며, 타토지로 전용된 면적은 약 10,099 ha로 나타났다. 그 중 정주지와 농경지로의 변화가 각각 약 5,438 ha, 약 3,107 ha가 발생하여 가장 높았다. 또한, 농경지는 타토지로의 변화가 약 17,090 ha가 발생하였으며, 그 중 초지와 정주지로의 변화가 각각 7,768 ha와 5,438 ha가 발생하여 가장 높았다. 한편, 초지는 타토지로 전용된 면적이 약 20,198 ha로, 산림지로의 변화가 약 11,264 ha로 가장 많이 발생하였으며, 산림지 면적의 증가에 큰 원인이 되었다. 정주지는 타토지로의 변화가 약 776 ha 발생하였으나, 타토지에서 정주지로의 변화가 약 15,537 ha 발생하여 1990년 대비 정주지면적이 약 4.2배 증가하였다 (Table 1). Kim *et al.*(2013)은 1975년과 2002년 제주도의 산림경관변화에 관한 연구에서 산림의 총 면적은 크게 변화하지 않았지만, 제주도 남쪽과 서쪽의 해안지역에서 관광산업 개발로 인하여 산림이 타토지로 전용된 반면에 표고 400~600m의 목장과 초지였던 지역에서 산림으로 회복되었다고 하여 본 연구의 결과와 유사하였다.

### 3.3 주제도 기반 토지피복구분 및 토지피복변화 분석

위성영상 자료를 기반으로 최대우도법에 의해 6개의 토지 피복으로 구분한 결과는 Fig. 5와 같다. 1990년도 토지피복의 분류정확도는 약 82.5%, Kappa 계수는 약 0.74이며, 2010년도 토지피복의 분류정확도는 약 82.0%, Kappa 계수는 약 0.76

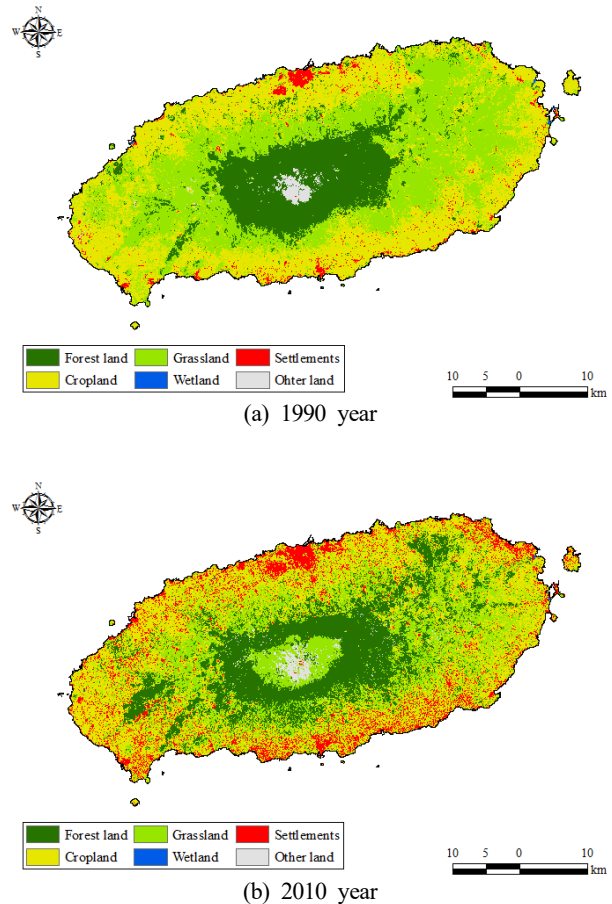


Fig. 5. Land use map at 1990 and 2010 years.

으로 산출되었다. 주제도 기반의 토지피복별 면적은 1990년도에 농경지가 약 39.1%로 가장 높았으며, 초지(약 38.5%), 산

림지(약 18.5%), 정주지(약 2.6%)의 순으로 분포하였다. 2010년도의 경우에도 농경지가 약 37.2%로 가장 넓은 면적을 차지하고 있었으며, 1990년도의 토지피복별 면적 분포와 유사하였다. 또한, 산림지와 정주지의 면적은 증가한 반면, 농경지와 초지, 습지(수역), 기타 토지의 면적은 감소하여 표본점 기반의 토지이용변화와 유사하였다.

시간경과에 따른 토지피복변화의 분석결과, 산림지는 20년간 23,653 ha(1990년도 면적 대비 약 69%)가 유지되었으며, 타토지로의 변화가 약 10,541 ha가 발생하였다. 그 중 초지와 농경지로의 변화가 각각 6,452 ha와 2,812 ha의 면적이 발생하여 가장 높았다. 농경지는 타토지로의 변화가 약 3만 ha가 발생하였으며, 그 중 정주지와 초지로의 변화가 각각 약 15천 ha와 11천 ha가 발생하여 가장 높았다. 한편, 초지는 타토지로의 변화가 약 42,789 ha가 발생하였으며, 그 중 산림지로의 변화가 약 17,950 ha가 발생하여 산림지면적 증가에 대부분이 초지에서 발생하였으며, 표본점 기반 토지이용변화와 유사한 경향을 보였다. 정주지는 타토지로의 변화가 약 1,520 ha 발생하였으나, 타토지에서 정주지로의 변화가 약 19,026 ha 발생하여 1990년도 정주지 면적 대비 약 4.7배로 크게 증가하였다(Table 2) (Fig. 5). 제주도는 2000년대 이후에 도심지뿐만 아니라, 촌락지역까지 인구증가가 꾸준히 이루어지고 있으며, 농업 분야 종사자의 감소와 숙박·음식·서비스업의 종사자가 증가하는 것으로 보아 이에 따라 토지이용변화가 발생한 것으로 판단된다(Bu, 2015). 주제도 기반 토지피복변화는 표본점 기반 토지이용변화와 비교하여 유사한 경향을 보였으나, 농경지와 정주지를 제외한 나머지 항목에서 면적차이가 발생하였다.

### 3.4 접근방법에 따른 토지이용면적 비교 및 평가

표본점 및 주제도 기반의 토지이용구분별 면적을 1990년과

2010년도 지목별 통계자료와 비교하여 국가 통계와의 차이를 분석하였다. 제주도의 지목통계에 따른 산림면적 비율은 1990년도와 2010년도에 각각 약 51%, 약 48%로 분포하였지만, 표본점 기반과 주제도 기반의 경우에는 각각 약 36%와 약 38%, 약 18%와 약 24%로 과소추정되었다. 반면, 농경지는 지목통계에서 1990년도와 2010년도에 모두 약 29%로 분포하였지만, 표본점 기반은 약 42%, 약 37%, 주제도 기반은 약 39%, 약 37%로 과대추정된 것으로 나타났다. 이는 한라산 정상에 위치한 지역의 경우 지목통계에는 임야로 구분되어 있지만, 3차 임상도 및 1:5,000 수치 임상도를 확인하였을 때, 제지(초지)로 분류된 지역으로써 실제 산림지는 분포하지 않은 지역이다. 이러한 결과는 토지피복(land-cover)과 토지이용(land-use)에 대한 정의 차이로 발생된 것으로 판단된다. 산림지의 경우 FAO의 정의에 따른 토지피복에 의한 정의를 적용하는 반면, 타토지의 경우에는 토지이용에 따른 정의를 적용하고 있다(GIR, 2015). 한편, 표본점 및 주제도 기반에 따른 토지이용항목별 면적은 분포 비율이 높은 산림지와 농경지, 초지는 표본점 기반을 이용하였을 때 지목통계와 차이가 작았으며, 습지와 정주지, 기타 토지는 주제도 기반을 이용하였을 때 지목통계와 차이가 작았다(Table 3).

## 4. 결 론

우리나라는 온실가스 감축 목표를 2030년까지 BAU 대비 37%로 설정하여 UNFCCC에 제출하였으며, 위의 목표를 달성하기 위하여 다양한 정책을 개발하고 있다. 또한, 파리협정에서는 국가별 온실가스 인벤토리의 투명성이 강조되어 국제 수준에 부합하는 온실가스 인벤토리의 산정이 시급한 실정이다. LULUCF 부문에서 온실가스 통계의 완전성을 확보하기

Table 2. Land use change matrix by thematic map

(Unit: ha)

	1990						
	Forest land	Cropland	Grassland	Wetlands	Settlements	Other lands	Total
Forest land	23,653	2,500	17,950	-	15	36	44,154
Cropland	2,812	43,048	21,468	10	1,285	211	68,834
Grassland	6,452	11,353	28,461	-	215	519	47,001
2010 Wetlands	5	23	9	92	3	-	132
Settlements	388	15,180	3,020	367	3,250	71	22,275
Other lands	884	96	342	-	2	1,163	2,487
Total	34,194	72,199	71,250	469	4,771	2,000	184,883

Table 3. Comparison of estimated area by the different data sources

[Unit: ha (%)]

	1990			2010		
	Sample-based	Thematic map	Cadastral statistics	Sample-based	Thematic map	Cadastral statistics
Forest land	65,641(36)	34,194(18)	93,143(51)	70,302(38)	44,154(24)	88,753(48)
Cropland	77,682(42)	72,199(39)	53,235(29)	69,137(37)	68,834(37)	54,057(29)
Grassland	29,908(16)	71,250(39)	19,066(10)	19,032(10)	47,001(25)	18,038(10)
Wetlands	6,603(4)	469(0.3)	2,777(2)	6,603(4)	132(0.1)	3,189(2)
Settlements	4,661(3)	4,771(3)	12,387(7)	19,420(11)	22,275(12)	18,354(10)
Other lands	388(0.2)	2,000(1)	2,053(1)	388(0.2)	2,487(1)	2,492(1)
Total	184,883(100)	184,883(100)	182,661(100)	184,883(100)	184,883(100)	184,883(100)

위해서는 시간경과에 따른 토지이용구분별 면적 정보가 필수적으로 요구되지만, 우리나라는 아직 토지이용변화와 관련하여 일관된 정보의 부재로 통계를 제시하지 못하고 있다. 따라서 본 연구는 LULUCF 부문 토지이용변화 매트릭스 구축을 위하여 최근 토지이용변화가 많이 발생한 제주도를 대상으로 IPCC 지침에서 제시된 두 가지 방법에 의한 토지이용변화 매트릭스를 작성하여 비교함으로써 효율적인 제작방안을 제시하고자 수행하였다.

표본기반 접근방법에서는 표본강도가 증가할수록 토지이용별 면적의 불확실성이 감소되는 것으로 나타났다. 구분항목별 불확실성은 분포면적이 상대적으로 넓은 농경지, 산림지, 초지가 낮았던 반면, 상대적으로 분포면적이 적은 정주지와 습지, 기타 토지에서는 불확실성이 높은 것으로 분석되었다. 표본점 기반의 토지이용변화를 분석한 결과, 산림지는 정주지와 농경지로 변화가 많은 것으로 나타났으며, 농경지는 초지와 정주지, 초지는 산림지와 농경지로 변화하였다. 주제도 기반의 토지피복변화를 분석한 결과, 초지는 약 13% 감소한 반면, 산림지와 정주지는 각각 약 5% 및 10%가 증가하였다. 1990년도와 2010년도의 토지이용변화를 보면, 산림지는 초지와 농경지로, 농경지는 정주지와 초지로 변화하였으며, 특히 1990년도에 농경지와 초지였던 지역에서 정주지로 많은 면적이 변화하였다. 표본점 및 주제도 기반의 분류항목별 면적을 제주도의 지목통계와 비교하였을 때, 면적분포가 많은 산림지, 농경지, 초지는 표본점 기반의 방법을 이용하는 것이 지목통계와 차이가 작았으며, 면적분포가 작은 습지, 정주지, 기타 토지는 주제도 기반의 방법을 이용할 때 지목통계와 차이가 작았다. 특히, 한라산 정상주변에 위치한 산림(임야)는 실제 위성영상 및 항공사진에서는 초지 및 기타 토지의 분포를 구분되므로, 향후 토지이용구분의 명확한 정의의 정립이 필요한

것으로 판단된다. 현재의 IPCC 지침에서는 토지이용(Land use)에 따른 구분을 정의하고 있으나, 위성영상 등의 원격탐사 자료를 활용할 경우에는 토지피복(Land cover)의 정의를 활용하고 있다. 따라서 토지이용과 토지피복간의 관계에 따른 오류가 발생되고 있다. IPCC에서도 이러한 문제에 대한 해결을 위하여 새로운 지침을 작성하고 있으므로 향후 새로운 지침에 따른 토지이용/피복 구분에 관한 연구가 필요하다. 또한 본 연구에서는 1990년도와 2010년도와 일치하는 자료가 부재하여 항공사진의 경우에는 1992년에 촬영된 자료를 활용하였으며, 위성영상의 경우에는 2014년도에 촬영된 영상을 기준 자료로 가정하여 활용하였다. 따라서 이러한 측정년도가 부재할 경우의 시계열 차이 문제를 해결할 수 있는 방안에 관한 연구가 필요한 것으로 판단된다.

## REFERENCES

- Angel S, Parent J, Civco DL, Blei A, Potere D. 2011. The dimensions of global urban expansion: Estimates and projection for al. countries, 2000-2050. *Progress in Planning* 75:53-107.
- Bu HJ. 2015. Rural change by increase in urban-to-rural migrants in Jeju island. *Journal of The Korean Association of Regional Geographers*. 21(2):226-241 (In Korean with English abstract).
- Chun BG, Lee KH, Jang HM, Kim SK. 2016. Estimating uncertainty of greenhouse gas emissions in energy sectors using the combined tier method. *Korean Energy Economic Review* 15(1):179-205 (In Korean).
- Cochran WG. 1977. *Sampling techniques*, 3<sup>rd</sup> edition. John



- Wiley & Sons, New Jersey.
- FEA (Federal Environment Agency). 2014. Land-use, land-use change and forestry. In: National Inventory Report, Germany 2014, pp 484-517.
- GIR (Greenhouse Gas Inventory & Researches Center). 2015. National greenhouse gas inventory - Guideline for measurement, reporting, verification -. (in Korean).
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2006. Chapter 3. Consistent representation of lands. IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. pp 1-42.
- Jeon YJ, Kim JI. 2003. Supervised classification system for high resolution satellite images. KTCP 9(3):301-310 (In Korean with English abstract).
- KFS (Korea Forest Service). 2009. Climate change and forest. pp 70-79.
- Kim EM, Kwon JO, Kang CW, Chun JW. 2013. Causes of the difference of inhabited altitudes above sea level of fairy pittal(*Pitta nympha*) on Jeju island followed by forest landscape through the comparison of landsat images and the literature review. Journal of the KAGIS 16(4): 79-90 (In Korean with English abstract).
- Kim HH, Kang HD, Kim RH, Kim CM, Koh KC, Lee KH. 2013. Estimation of forest management ratio under article 3.4 of the Kyoto protocol: A case study on the Chungcheongbuk-do. Jour Korean For Soc 102(4):608-616 (In Korean with English abstract).
- Lee JH, Kim SI, Han KS, Lee YW. 2011. Hotspot detection for land cover changes using spatial statistical methods. Korean Journal of Remote Sensing 27(5):601-611 (In Korean with English abstract).
- Lee KS, Oh MH, Hong JY. 2004. The changes in the land use patterns of Jeju island. The Journal of Applied geography 25:67-88 (In Korean with English abstract).
- Ministry of Environment. 2016. Building subdivided land cover map (7th) and improving national environmental guidance system functions. p 18-20.
- NIFOS (National Institute of Forest Science). 2011. The 6<sup>th</sup> National Forest Inventory and Forest Health Monitoring - Field Manual -. Korea Forest Service.
- NIFOS (National Institute Of Forest Science). 2015. Changes in Korea's National Forest Inventory System. pp 23-40.
- SEPA(Sweden Environmental Protection Agency). 2014. Land-use, land-use change and forestry. National Inventory Report Sweden 2014. pp 326-361.
- Statistics Finland. 2014. Land-use, land-use change and forestry. Greenhouse Gas Emissions in Finland 1990-2012. pp 265-343.
- Statistics Korea. 2015. Statistics Annual Report.
- Sunwoo WY, Kim DE, Kang SK, Choi MH. 2016. Application of KOMPSAT-2 imageries for change detection of land use and land cover in the west coasts of the Korean peninsula. Korean Journal of Remote Sensing 32(2):141-153 (In Korean with English abstract).
- USGS (United States Geological Survey). 2016. Landsat Collection. <http://landsat.usgs.gov> 2017. 01. 14.
- Yim JS, Kim RH, Lee SJ, Son YM. 2015. Land-use change assessment by permanent sample plots in national forest inventory. J Climate Change Res 6(1):33-40 (In Korean with English abstract).
- Yim JS, Song MK. 2017. Key issues and implication on forest sector in the COP 22. NIFOS 43.
- Yu SC, Ahn JW, Ok JA. 2015. A study on constriction plan of the statistics for national green house gas inventories (LULUCF sector). Journal of Korea Spatial Information Society 23(3):67-77 (In Korean with English abstract).