

연구논문

탄소 저장량 감시에서 배수구역과 행정구역의 비교 평가 - 금강산에 대한 UN-REDD 대응 차원에서 -

김준우 · 엄정섭

경북대학교 지리학과

(2013년 7월 18일 접수, 2013년 9월 6일 승인)

Comparative Evaluation between Administrative and Watershed Boundary in Carbon Sequestration Monitoring - Towards UN-REDD for Mt. Geum-gang of North Korea -

Jun-Woo Kim · Jung-Sup Um

Department of Geography, Kyungpook National University

(Manuscript received 18 July 2013; accepted 6 September 2013)

Abstract

UN-REDD (United Nations programme on Reducing Emissions from Deforestation and forest Degradation) is currently being emerged as one of important mechanism to reduce carbon dioxide in relation to the deforestation. Although administrative boundary has already gained world-wide recognition as a typical method of monitoring unit in the process of GHG (Greenhouse Gas) reduction project, this approach did not provide a realistic evidence in the carbon sequestering monitoring in terms of UN-REDD; the meaningful comparison of land use patterns among watershed boundaries, interpretation for distribution trends of carbon density, calculation of opportunity cost, leakage management, etc. This research proposes a comparative evaluation framework in a more objective and quantitative way for carbon sequestering monitoring between administrative and watershed boundary approaches. Mt. Geumgang of North Korea was selected as a survey objective and an exhaustive and realistic comparison of carbon sequestration between the two approaches was conducted, based on change detection using TM satellite images. It was possible for drainage boundary approach to identify more detailed area-wide patterns of carbon distribution than traditional administrative one, such as estimations of state and trends, including historical trends, of land use / land cover and carbon density in the Mt. Geumgang. The distinctive changing trends in terms of carbon sequestration were specifically identified over the watershed boundary from 4.0% to 34.8% while less than 1% difference was observed in the administrative boundaries, which were resulting in almost 21-22%. It is anticipated that this research output could

be used as a valuable reference to support more scientific and objective decision-making in introducing watershed boundary as carbon sequestering monitoring unit.

Keywords : Comparative Evaluation, Carbon Sequestration, Administrative and Watershed Boundary, UN-REDD, Mt. Geum-gang

I. 서론

산림의 전용을 방지하여 대기 중 온실가스를 감축하기 위해 수행되고 있는 UN-REDD(United Nations programme on Reducing Emissions from Deforestation and forest Degradation) 도입에 가장 주요한 과제는 탄소배출 저감량 산정을 위해 REDD 대상지역의 경계를 설정하여 산림 탄소저장량 변화를 추적하는 것이다. 대상지역별로 다양하게 분포하는 탄소저장량의 차이는 사업실행에 의해 발생하는 탄소배출권 발행의 양을 결정하므로 사업의 성공여부를 결정하는 REDD에서 가장 핵심적인 고려 사항이다. 하지만 REDD 사업 대상지의 산림에서 탄소저장량의 변화는 한 가지 요인에 의해 발생하는 문제가 아니라 대상지역내 자연, 인문 현상의 상호작용에 의한 복합적인 현상이어서 원격탐사 자료로부터 추출된 주제도와 자연환경, 생활환경, 사회경제환경 등 여러 가지 주제도 및 속성을 동시에 고려하여 탄소저장량을 산정하여야 한다(Gibbs *et al.*, 2007; Naidoo and Iwamura, 2007). 산림전용과 황폐화에 직접적인 영향을 미치는 관리지역내의 자연환경과 인문환경이 사업 대상지의 경계설정 방법에 따라 동질성을 가지거나 큰 이질성을 보일 수 있으며, 이러한 자연환경과 인문환경의 차이는 산림의 보존 및 관리에도 큰 영향을 미치기 때문에 REDD 사업에서 적정한 규모의 관리지역 설정은 효과적인 REDD 사업을 위한 가장 중요한 변수중의 하나이다.

배수구역(watershed)이 환경보호를 위한 다양한 전략 및 정책을 시행하기 위한 최적의 단위지역이라는 것이 다양한 선행연구에서 이미 제시되었다(Schueler, 1995; 엄정섭, 2005). 배수구역 경계에 따라 구획을 설정하는 것이 인문환경이 산림에 미치는 영향과 생태계의 동질성을 종합적으로 고려한 탄소저장량 산정 방법이라 판단된다. 하지만 현재까지

이루어진 위성영상을 이용한 탄소저장량 산정에 관한 연구들은 기초자료 구축에 많은 시간이 소요되는 임상도나 국가산림자원조사 자료에 의존하여 행정구역(박현주 등, 2012; 박진우 · 이정수, 2011; 정재훈 등, 2010; 유수홍 등, 2010)이나 소유지(김현섭 등, 2010; 임종환 등, 2003)에 따라 대상지를 구획하여 탄소저장량을 산정하는 경우가 대부분이었다. 한반도는 국토면적 대비 산림 비율이 높지만, 단위면적당 탄소저장량이 많은 열대지역과 달리 상대적으로 소규모로 산림이 분산되어 있기 때문에 다양한 행정구역에 걸쳐 분포하는 산림을 각 행정구역별로 조사된 통계에 기초하여 탄소저장량을 산정하는 것은 상세한 산림 탄소저장량의 지속적 측정에는 한계가 있다(이정수 등, 2012). 또한 산지를 지역별, 소유지별로 세분화하여 탄소저장량을 산정할 경우 조사된 탄소저장량의 시간단위에서 차이가 발생할 수 있어 중복계산되거나 누락될 수 있다(이상진 등, 2012). 국가 전체의 온실가스 배출량을 산정하는 온실가스 인벤토리와는 달리 사업 대상지의 경계 설정을 통해 산림전용과 산림의 황폐화 여부를 추적하는 REDD 사업의 특성상 기존의 행정구역별 탄소저장량 산정은 생태계의 특성을 반영하는 다양한 산림 패치(patch)에 대한 국지적 변화를 나타내기에 적절하지 않다. 따라서 지역의 토지이용특성에 따라 토지를 점유하고 있는 산림의 탄소저장량 변화를 미시적 차원에서 파악하기 위해서는 탄소저장량의 규모나 특성을 배수구역단위로 파악하는 것이 필수적이라 사료된다.

최근 기후변화의 원인으로 지목되고 있는 온실가스를 흡수하는 산림의 기능에 주목하면서 REDD 사업의 전략 설정과 이를 위한 탄소저장량 산정 방법에 대해 다양한 연구가 이루어지고 있다(박미선 · 윤여창, 2012; 최진호 · 엄정섭, 2012; 위광재 등, 2011; 권순덕 등, 2005; Rosenqvist *et al.*, 2003; Nicolas, 2004; Lasco *et al.*, 2007). 하지만 REDD 사업시행

을 위해 동일한 지역에서 나타나는 탄소저장량의 변화를 행정구역과 배수구역 범위에서 비교하여 평가를 시도한 연구는 확인되지 않는다. 이에 본 연구에서는 최근 심각한 산림파괴가 진행되고 있는 북한의 금강산 지역을 적정 규모의 배수구역으로 세분화하여 유역별 탄소저장량 변화를 추적하고 이를 행정구역별로 산출된 탄소저장량과 비교하였다. 토지이용 변화로 인해 나타나는 탄소저장량의 공간적 분포와 변화양상을 행정구역과 배수구역 차원에서 평가하고 대상지의 경계설정 방법이 REDD 사업 시행에 미치는 영향을 규명하였다.

II. 데이터 취득

1. 연구지역 및 배수구역 위계 설정

금강산은 최고봉인 비로봉을 포함하는 중앙연봉을 중심으로 동쪽은 내금강, 서쪽은 외금강으로 나누어지며 동서길이 약 40km, 남북길이 약 60km, 면적은 약 530km²이다(차중환, 2000). 금강산 일대에서 발원하는 대표적인 하천은 동해로 흘러드는 남강과 서해로 흘러가는 서금강천, 동금강천 등이 있으며, 서금강천(78km)은 온정령 산비탈면에서 시작하여 동금강천과 합류한 후 화천강의 상류를 형성한다(전영률 등, 1998).

배수구역은 유역면적을 기준으로 대유역(basin, 2600 km² 이상), 중유역(subbasin, 261~2600 km²), 소유역(watershed, 27~260 km²), 세유역(subwatershed, 1.4~26 km²), 집수구역(catchment, 0.13~1.3 km²)으로 분류되며(Schueler, 1995), UN-REDD 사업의 관리 대상지 설정을 위해 이러한 배수구역의 공간적 위계(spatial hierarchy)에 따라 금강산 지역에 적용 가능한 적정규모를 선정하여야 한다. 금강산 지역은 북한강의 발원지이지만, 대표 하천인 금강천과 남강 등은 유역면적을 기준으로 중유역 이하의 수준이며, 동해로 흘러드는 온정천·천불천·선창천과 서해로 흘러드는 서금강천·동금강천 등은 소유역이나 그 이하 규모의 하천에 속한다. 본 연구에서는 REDD 사업 시행 사례, 생태계 특성 반영, 금강산 지역의 적

용 가능 면적 등을 고려하여 금강산 지역을 소유역 단위를 기준으로 세분화하여 탄소저장량을 산정하였다(Hoanga *et al.*, 2013; ICIMOD, 2011).

금강산이 포함된 행정구역은 금강군, 창도군, 고성군인데 내금강을 중심으로 금강산 지역의 가장 넓은 면적을 포함하는 금강군을 중심으로 동편에는 고성군, 서편에는 창도군이 위치한다. 창도군은 화천강 유역을 비롯하여 금강산 지역에서 발원하여 서해로 유입되는 하천들의 주된 배수구역이며, 고성군은 외금강과 해금강을 중심으로 금강산 관광의 주된 통행로이자 동해로 유입되는 금강산 지역의 가장 큰 하천인 남강을 포함한다.

금강산의 각 권역별 대표하천(서금강천, 동금강천, 화천강 상류, 남강)을 중심으로 4개의 소유역으로 분류하였다. 서금강천과 동금강천은 북한강의 지류로서 서해로 유입되며, 동해로 유입되는 남강(85km)은 금강산에서 규모가 가장 큰 하천이다. 소유역 a는 서금강천, 소유역 b는 화천강 상류, 소유역 c는 동금강천, 소유역 d는 남강의 상류에 속한다. 소유역 a(서금강천 소유역)는 비로봉을 중심으로 북쪽과 서쪽에 위치하여 외금강과, 내금강의 일부를 포함하고 있으며, 소유역 c(동금강천 소유역)는 비로봉의 남서쪽에 위치하는데, 동금강천의 배수구역은 내금강 지역을 중심으로 형성되어 있다. 이 두 소유역(서금강천, 동금강천 소유역)은 다른 소유역에 비해 비교적 많은 명승고적지와 취락이 분포한다. 소유역 d(남강의 상류)는 신금강의 대부분에 걸쳐 있어 깊은 협곡을 포함하고 있는 지형적 특색을 가진 지역이며, 소유역 b는 한강으로 이어지는 비교적 큰 규모의 하천인 화천강의 상류지역으로서 1986년 공사를 시작하여 2003년 완공된 임남댐이 건설되어 넓은 면적의 수계를 포함하고 있다. 소유역 a-d는 북강원도에 속하는 금강군, 창도군, 고성군에 포함되며, 각 소유역마다 토지이용에서 차별화된 특성을 가지고 있다(Table 1, Figure 1).

2. 영상의 전처리 및 판독

산림 탄소저장량 산정에서 대상지의 특성에 따라

Table 1. Overview of watershed and administrative boundary in Mt. Geum-gang

		characteristics of individual study sites	area (km ²)
Administrative	Geum-gang	Many scenic spots are available, located in Inner geum-gang as the center of Mt. Geum-gang	922.8
	Chang-do	Main drainage source, flowing into The Yellow Sea, originated from Mt. Gem-gang	863.6
	Go-sung	Major tourism route for Mt. Geum-gang which includes Seashore geum-gang and Outdoor geum-gang	866.6
	entire area of administrative district		2653.1
Watershed	a: Western geum-gang	Drainage zone of Western geum-gang originated from northern side of Bi-ro ridge	182.1
	b: Hwa-chun	As a upper Buk-han river, watershed boundary is extended by Im-nam dam.	118.0
	c: Eastern geum-gang	Many settlements are observed, compared with other watershed.	228.5
	d: Nam River	Nearby the Military Demarcation Line(MDL), located in Sin geum-gang region, deep ravines are observed.	156.0
	Entire area of watershed		684.6

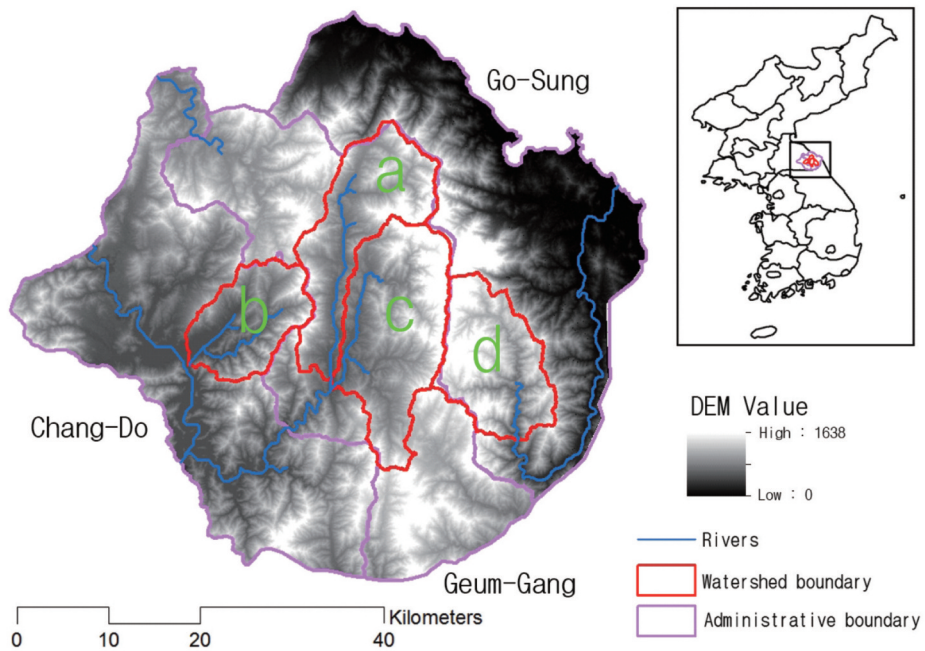


Figure 1. Watershed(a-d) and administrative (Geum-gang, Chang-do, Go-sung) boundary of Mt. Geum-gang overlaid on the DEM(Digital Elevation Model).

- Location of study site: marked as rectangle in upper right Korea map
- Eastern boundary of watershed a, c is overlaid with administrative boundary of Geum-gang and Go-sung, Eastern boundary of watershed b is overlaid with administrative boundary of Geum-gang and Chang-do, Western boundary of watershed d is overlapped with administrative boundary of Geum-gang and Go-sung.

다양한 위성영상을 활용을 고려할 수 있지만, 본 연구에서는 다양한 파장대를 가지고 있어 녹지관련 공간객체를 탐지하는데 구간 다양한 분야에서 사용되고 있는 LANDSAT TM(Thematic Mapper) 영상을

사용하였다(윤성탁 등, 2001). 북한은 매년 상당 면적의 녹지가 농경지, 거주지 등으로 전용되고 있는데 인공적인 변형은 일정한 형태적 특성을 갖고 있기 때문에 30m 공간해상도의 TM 영상으로도 탄소저장량

산정과정에 필요한 정보를 추출할 수 있을 것으로 판단되었다.

북한의 산림훼손은 경제상황이 극도로 악화된 1990년대에 급격하게 진행되어 왔으므로 1990년대를 포함하는 영상이 산림의 훼손 과정을 확연히 나타내어 금강산 지역의 탄소배출저감 잠재력을 파악하기 용이할 것이라 사료되었다. 또한 REDD 사업에서 탄소배출권 발행을 위한 산림 모니터링 근거자료 제시 기간과 계절에 따른 식생의 분광학적 혼동 최소화 등을 고려하여 1991년 8월 12일과 2010년 6월 5일에 촬영된 영상을 사용하였다(American Carbon Registry, 2010; Huang *et al.*, 2009).

원격탐사 데이터는 취득 당시에 구름, 대기상태, 토양 습윤도 등 환경 조건이 다르므로 두 영상의 밝기값 분포를 최대한 유사하게 조작하기 위해 분류결과 판독이 비교적 용이한 2010년 영상을 기준(master

or reference)으로 설정하고 1990년 영상을 종속(slave)하여 히스토그램을 매칭(histogram matching)시키는 방식을 적용하였다(Levin *et al.* 2004; Rigina, 1999).

분석에 필요한 금강산 지역 행정구역 경계설정에는 북강원도의 1:25000 수치지도를 이용하였으며, 수치지도의 등고선 레이어에서 생성된 DEM(Digital Elevation Model; 수치 표고 모델)을 바탕으로 ArcGIS의 수문분석 프로그램을 사용하여 소유역(watershed) 경계를 생성하였다. 이러한 방법으로 생성된 소유역들 중 금강산 지역의 대표 하천인 남강, 금강천, 동금강천, 화천강을 포함하고 있는 권역을 추출하여 위성영상과 중첩하여 연구지역을 추출하였다(Figure 2).

위성영상을 이용하여 산림전용과 토지이용변화를 추적하는 과정에서 탄소저장량 산정의 기준은 토지

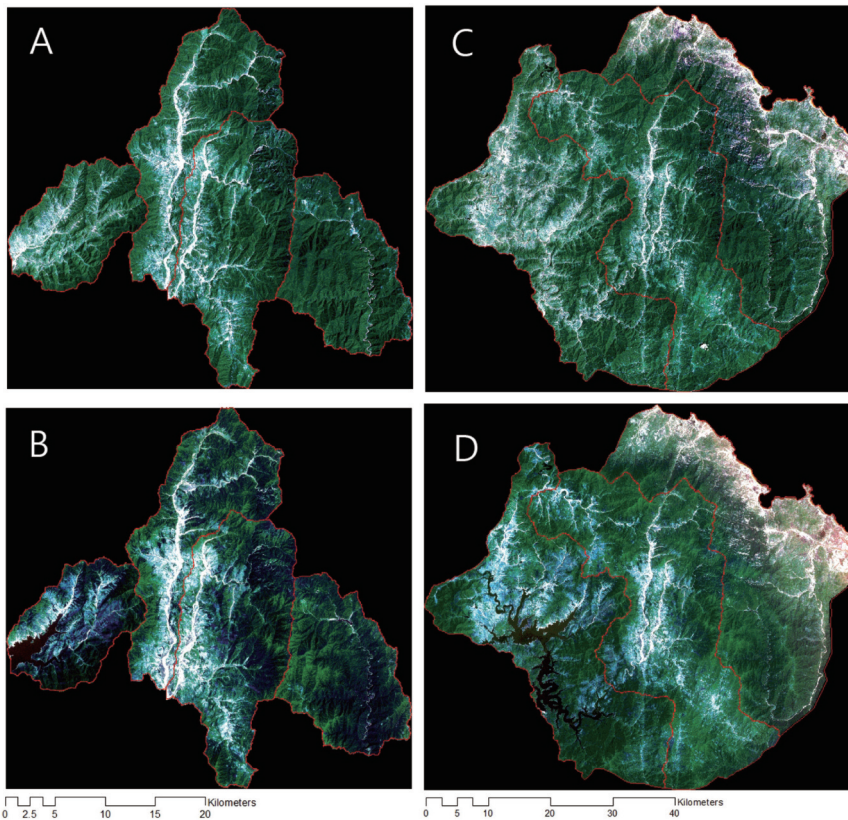


Figure 2. Landsat TM images of Administrative district and watershed in Mt. geum-gang between 1990 and 2010.

■ A: watershed 1991, B: watershed 2010, C: administrative district 1991, D: administrative district 2010

이용 분류객체이다. 따라서 REDD 사업 대상지에 대한 탄소저장량 산정시 대상지에 적합한 토지이용 분류체계를 선정하고, 토지이용 변화 분석을 통해 나타나는 산림면적의 시계열 변화를 추적하여야 한다. 본 연구에서는 IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change) 토지피복분류체계를 토지이용분류를 위한 기준으로 정하였으며, 이 정도의 공간 객체가 TM 영상의 육안판독과정에서도 확연하게 구분되어 신속하게 자동계측이 가능할 것으로 판단되어 정확한 판독결과를 확보할 수 있을 것으로 사료되었다. IPCC는 토지이용 형태를 산림, 농경지, 초지, 습지, 주거지, 기타 등으로 구분하고 이를 기반으로 탄소저장량의 평가와 온실가스 배출량 및 흡수량을 추정하는 것을 우수실행지침(GPG : Good Practice Guideline)에서 권고하고 있다(IPCC, 2003).

본 연구는 분단 상황에 놓여 있는 접근불가능 지역인 북한이 연구지역이라는 특수성으로 인해 자료 획득이나 분석결과의 신뢰도 평가과정에서 현지조사가 불가능하다는 한계를 감안하고 수행되었다. 일반적으로 TM 영상을 사용할 경우 자동판독에 주안점을 두고 육안판독은 자동판독결과의 신뢰도를 평가하는

과정에서 수행되고 있다. 그러나 본 연구는 수치지도와 고해상도 영상이 포함하고 있는 정보를 그대로 반영하기 위해 자동판독과 육안판독을 거의 동일한 비중을 두고 자동판독의 결과를 고해상도 영상과 수치지도와 비교하면서 육안판독으로 보완하였다. TM 영상에서 공간객체에 대한 명확한 경계를 정의하기 어려울 경우 1:25000 축척의 수치지도가 포함하고 있는 정보를 육안판독과정에서 반영하거나 GeoEye-1(41cm 공간 해상도), KOMPSAT-2 (1m 공간해상도) 영상에서 직접 벡터라이징을 수행하여 그 결과에 의거 TM 영상의 분류를 수정하였다(Figure 3). 따라서 판독결과는 TM 영상이 지니고 있는 정보라기보다는 고해상도 영상과 수치지도가 가지고 있는 정보를 TM 영상에 반영하였다는 표현이 적절할 것으로 판단된다.

토지피복분류 후 영상 분류의 신뢰도 검증은 지상 자료 수집을 통해 영상의 분류 결과와 오차 여부를 판별하여 정확도를 평가해야하지만, 본 연구의 대상 지역인 금강산 지역에 대한 현지조사를 통한 지상보조자료 수집이 불가능하다. 일반적으로 비접근 지역에 대한 TM 영상의 판독결과는 검증 기준점을 무작

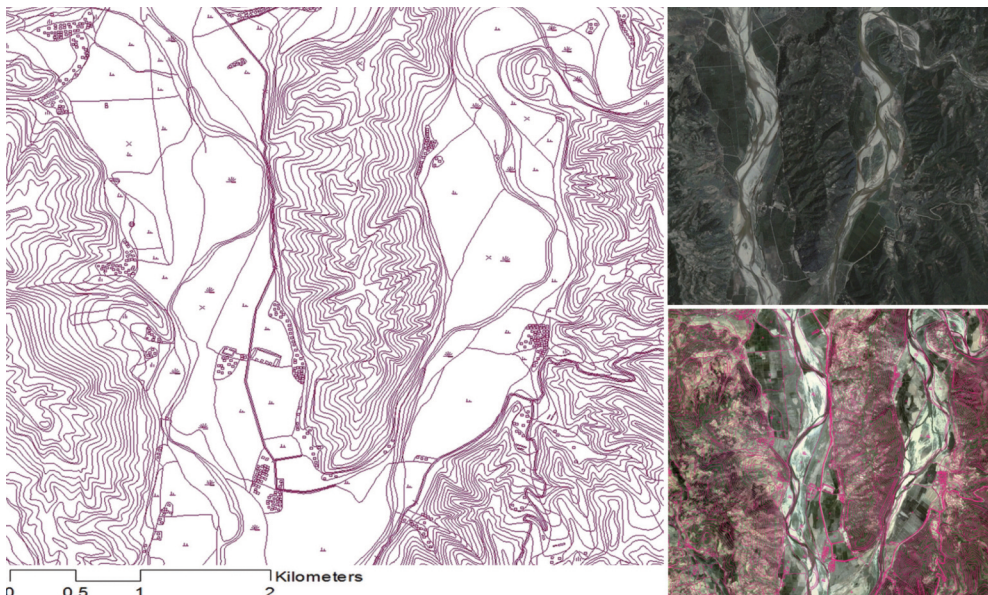


Figure 3. Digital map and high resolution satellite image used in the process of visual interpretation. (examples)

1:25000 digital map of Dong geum-gang watershed(left), KOMPSAT-2 image provided by V-World(upper right), Overlay of the digital map with GeoEye-1 provided from Google Earth(lower right)

위로 선정하여 항공사진이나 고해상도 영상과 비교를 통해 작성된 오차행렬표(error matrix)를 계산하여 정확도 평가를 수행해 왔지만 본 연구는 육안판독 과정에서 고해상도 영상과 수치지도를 이용하였으므로, 이들을 이용하여 정확도 평가를 수행한다는 것은 방법론 차원에서 한계를 가지고 있다. 본 연구와 유사한 공간객체를 대상으로 수행된 많은 선행연구가 80% 이상의 정확도를 확보하였다는 점을 감안한다면(김갑덕 등, 1991; 박병욱, 1996; 환경부, 2002), 고해상도 영상이 가지고 있는 정보를 수치지도와의 비교를 통해 피복분류과정에 반영하고 있는 본 연구의 결과는 이보다 훨씬 높은 정확도를 가지고 있을 것으로 판단된다. 연구과정에서 데이터의 가공을 위해 사용된 소프트웨어는 AutoCAD MAP 2000i, ArcGIS 10.1이며, 영상처리는 연구전반에 걸쳐 ERDAS Imagine 9.2 소프트웨어가 사용되었다.

계절적 차이로 오분류가 발생할 수 있는 거주지와 경작지, 초지를 포함하는 비산림 지역으로 재분류를 실시하였다. 본 연구는 하계망을 중심으로 산 능선을 따라 형성되는 소유역을 경계로 산림전용에 따른 금강산 지역의 탄소저장량을 산출하므로 경작지, 초지와 주거지를 하나의 분류객체로 하여 산림과 수역, 비산림 지역으로 재분류를 실시하는 것이 연구에 목적에 따른 토지이용 변화의 가시화에도 용이할 것이라 판단되었다 (Figure 4-5).

산림과 수역, 비산림으로 재분류된 20년간의 토지 이용 변화에서 금강산 소유역들은 전체적으로 산림의 면적은 감소하고 수역과 거주지, 경작지, 초지를 포함하는 비산림의 면적은 증가한 것으로 나타났다. 세부적으로 금강군은 산림의 면적이 78144.0ha에서 60327.2ha로 감소하였고 비산림은 13828.3ha에서 31052.5 ha로 증가한 것으로 나타났으며, 고성군은 산림의 면적이 67974.7ha에서 53591.4 ha로 감소하였다. 창도군은 수역의 면적이 175.6ha에서 8633.3ha로 변해 금강군과 고성군에 비해 수역의 급격한 면적 증가가 눈에 띄며, 내금강을 중심으로 가장 넓은 면적의 산림을 보유하고 있던 금강군이 비산

III. 탄소저장량 비교평가

1. 토지이용변화 비교

영상 분류 후에는 산림과 수계 그리고 취득 영상의

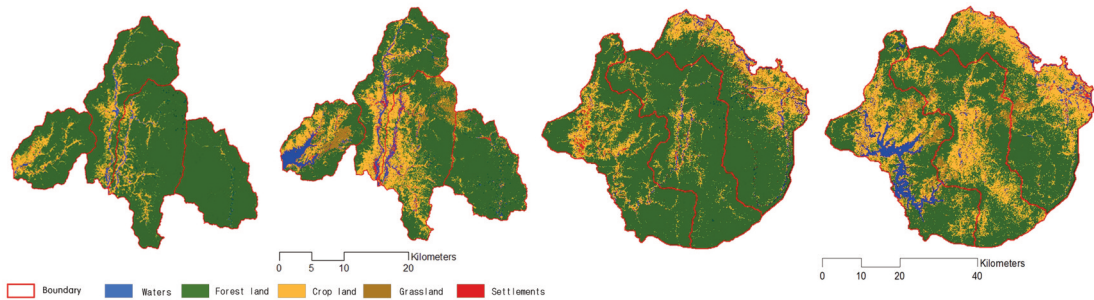


Figure 4. Land use changing trends between 1991 and 2010

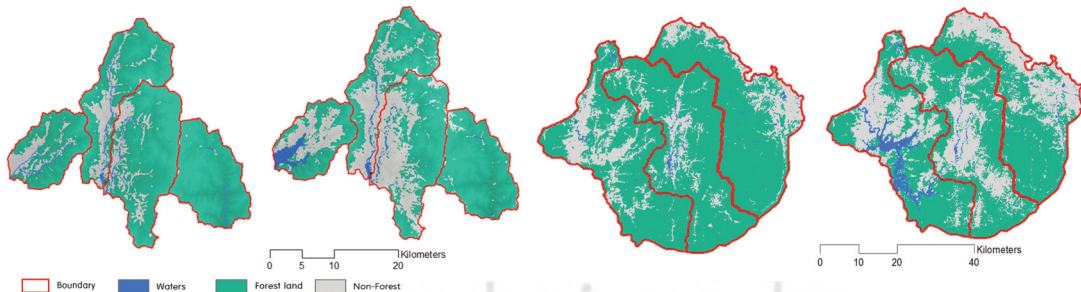


Figure 5. Reclassification of land use changing trends (forest, water, non-forest)

Table 2. Comparison between administrative district and watershed in land use change

(1991 to 2010). (Unit: ha)

	Western geum-gang		Hwa-chun		Eastern geum-gang		Nam River		Watershed Total			
	1991	2010	1991	2010	1991	2010	1991	2010	1991	2010	areal change	decreasing rate (%)
Forest	13818.2	9978	8959.6	6293.9	18826.9	12275.2	15039.8	14419.8	56644.5	42966.9	-13677.6	31.8
Water	64.8	456.5	47.1	1192.3	150.3	96.6	129	243.3	391.2	1988.7	1597.5	-408.4
Non-Forest	4328.4	7776.9	2792.7	4313.2	3871.8	10477.2	426.4	932.1	11419.3	23499.4	12080.1	-105.8
Entire area	18211.4		11799.4		22849.0		15595.2		68455.0			

	Geum-gang		Chang-do		Go-sung		Administrative Total			
	1991	2010	1991	2010	1991	2010	1991	2010	areal change	decreasing rate (%)
Forest	78144.0	60327.2	63536.1	49322.1	67974.7	53591.4	209654.8	163240.7	-46414.1	22.1
Water	312.6	905.2	175.6	8633.3	563.0	1281.2	1051.2	10819.7	9768.5	-929.3
Non-Forest	13828.3	31052.5	22647.8	28404.1	18126.4	31791.5	54602.5	91248.1	36645.6	-67.1
Entire area	92284.9		86359.5		86664.1		265308.5			

림의 면적이 차지하는 비중이 높았던 고성군에 필적할 정도로 비산림의 면적이 증가한 것으로 나타났다.

소유역별 분류에서 서금강천 소유역은 산림의 면적이 13818.2ha에서 10978ha로 감소하였고 비산림은 4328.5ha에서 7776.9ha로 증가한 것으로 나타났으며, 화천강 소유역은 산림이 8959.6ha에서 6293.9ha로 감소하였으나 수역은 47.1ha에서 1192.5ha로 급격한 증가를 나타내었다. 화천강 소유역은 1990년대에 공사를 진행하여 2003년 완공된 임남댐(금강산댐) 건설의 영향으로 수역의 면적이 급격하게 증가한 것으로 판단된다. 동금강천 소유역은 산림이 18826.9ha에서 12844ha로 감소해 금강산 소유역들 중 가장 많이 산림의 비율이 감소한 것으로 나타났으며, 비산림의 면적은 3971.8ha에서 9758.2ha로 증가하여 비산림 면적의 높은 증가를 나타내었다. 남강 소유역은 네 개의 소유역중 산림면적의 감소가 가장 적었으며, 산림 훼손이 소유역의 북쪽에 치우쳐 있는 것으로 나타났다. 이것은 소유역의 남쪽은 휴전선에 면해 있지만 북쪽은 금강산 관광에 따른 각종 개발사업의 시행과 관광개시 이후 사람들의 빈번한 통행으로 인한 자연훼손에 기인하는 것으로 판단된다.

금강산 소유역들은 20년에 걸쳐 넓은 면적의 산림이 훼손된 것으로 나타났으며, 서금강천과 화천강, 남강 소유역은 2010년의 토지이용에서 1991년에 비해 수역의 면적이 비교적 증가하였고, 비산림의 면적은 모든 소유역의 토지이용에서 고르게 증가한 것

로 나타났다. 이것은 북한의 경제사정 악화가 심화된 1990년대 이후부터 다락밭과 비탈밭 등 산지를 개간한 경작지의 면적이 꾸준히 증가하여 나타나는 결과로 사료된다.

UN-REDD에서 요구하는 참조기간인 20년 동안 북강원도에 속한 금강산 지역 네 소유역에서 총 산림 면적이 31.8% 감소하였고, 수역과 비산림은 각각 408.4%, 105.8% 증가한 것으로 나타났다. 금강산이 속한 행정구역인 금강군, 창도군, 고성군의 총 산림 면적은 22.1% 감소하였으며, 수역과 비산림의 면적은 929.3%와 67.1% 증가한 것으로 나타났다 (Table 2).

2. 탄소저장계수의 도출

탄소저장량의 산정 대상인 바이오매스는 토지면적에 따른 임목축적의 양과 질에 따라 결정되므로 위성영상으로 분류된 토지피복에 따라 배수구역별로 탄소저장량을 산정하기 위해서 임분의 종류를 비롯한 생태적 특성을 고려하여 연구대상 지역에 적절한 탄소저장계수를 선택하는 절차가 선행되어야 한다. 원격탐사에 손쉽게 적용 가능한 면적에 기초한 탄소저장계수는 도출과정의 자료수집 방법이나 계수 산출 대상지역의 범위에 따라 큰 차이를 나타낼 수 있으므로 탄소저장계수 도출 당시 지역의 식생구조와 토지이용 현황이 다른 지역에 적용하면 탄소저장량 산정의 결과값에 큰 오차가 발생할 수 있다. 국내·외 다수의 연구에서 국제적, 국가적, 지역적 범위에서 산

림의 면적에 따라 적용 가능한 다양한 탄소저장계수를 제시하고 있지만, 제시된 계수 값은 큰 차이를 보이고 있다.

현재 IPCC를 비롯한 UN 산하의 국제기구에서는 산림면적에 기초하여 해당 국가나 지역의 기후나 생태에 따라 전 세계적으로 적용 가능한 기본값(Tier 1)을 제시하고 있으나(IPCC, 2006; FAO, 2010), 탄소저장계수는 특정지역에 적용하기 적합한 규모의 지역에서 산정되어야 하며 산출방법의 신뢰도 또한 제시할 수 있어야하므로(World Bank Group, 2011, IPCC, 2006) 생태적 특성에서 많은 차이를 보일 수 있는 국내의 지역적 규모나 유역단위에 적용하기에는 적합하지 않다. 외국의 특정지역을 사례로 도출된 계수는 수종, 임분 밀도, 경급, 영급 등의 산림 생태계 구조가 기후, 주변 환경에 따라 많은 차이를 보일 수 있으므로 국내 적용에는 한계가 있다.

금강산에 적용 가능한 탄소저장계수 선정시 금강산과 산림구조가 유사하며, 적용 가능한 임분 범위를 대상으로 국내에서 산출된 계수를 선정하는 것이 타당한 것으로 사료된다. 국내에서 탄소저장량을 산정한 다양한 사례들이 있지만 국내지역들 간에도 산림의 공간적 패턴 차이를 보일 수 있으므로, 공간적 이질성(spatial heterogeneity)으로 인한 입지적 특성의 차이가 적어 산림식생 분포가 유사하게 나타나는 지역에서 산출된 계수를 적용하는 것이 탄소저장량 산정의 신뢰도를 높일 수 있는 방법일 것으로 판단된다.

국내에서도 북한의 ha당 이산화탄소 배출량(조장환 등, 2011)과 남한의 북한산, 지리산에 대해 탄소저장량을 추정된 사례가 존재하며(국립공원관리공단, 2010; 국립공원관리공단, 2011), 금강산이 속한 행정구역인 강원도 산림의 탄소저장계수를 도출한 사례도 다수 발견된다(박진우 · 이정수, 2011; 산림청, 2010; 임종환, 2003). 하지만 이러한 연구들은 금강산과 지리적으로 인접하지 않아 연구지역과의 산림 생태계 유사 여부를 확신할 수 없거나 탄소저장계수 산출 방법의 신뢰도를 보장하기 어렵다. 또한 넓은 면적 범위에서 산정된 계수 값은 연구지역과 같은 특정 배수구역 범위에 대해 적용하기에 적절치 않다.

설악산은 연구대상지역인 금강산 지역과 거리상으

로도 약 20km 내외로 매우 인접해 있어 생태적 환경이 매우 유사하다고 보아도 무방할 것이다. 설악산을 대상으로 도출된 계수(이나연, 2012)는 산정과정의 신뢰도가 높으며 금강산 지역과의 산림구조 또한 국내에서 이루어진 연구 중 가장 유사할 것으로 판단되지만, 낙엽활엽수만을 대상으로 산정하였다는 한계가 존재한다. 임분별로 탄소저장량에서 뚜렷한 차이를 보이며, 혼효임분의 경우 경쟁 수종간의 상호작용으로 순림 생태계를 구성하는 수종들의 비율별 탄소량보다 낮은 저장량 분포를 보여(Kelty, 2006) 단일 임분을 대상으로 산정한 계수를 적용하여 산정한 탄소저장량은 과대 산정의 가능성이 있기 때문이다.

우리나라 전체 산림면적의 약 78%가 소나무, 참나무, 혼효림으로 구성되어 있으며(산림청, 2011), 금강산이 속해있는 북강원도는 온대남부 식물분포구와 온대중부 식물분포구가 바뀌는 접이지역으로 한반도 중부지방의 산악 식물대를 대표하고 있어 지리적으로는 설악산이 금강산에 가장 인접하지만 강원도 횡성을 대상으로 산출된 계수를 적용하여도 무방할 듯하다. 이수경 등(2009)은 강원도 횡성의 소나무림과 참나무림, 혼효임분에 대하여 단위면적당 탄소저장량을 산출하였다. 임분 식생조사를 통해 흉고직경별 분포를 고려하고, 수종별 시료 채취를 바탕으로 식생권과 낙엽층, 고사목을 포함한 토양탄소로 구분하여 탄소저장량을 산정하였다. 금강산의 식생분포는 군락에 따라 큰 차이를 보이지만 해발 300~400m 아래는 소나무 단순림, 해발 300~800m는 소나무와 참나무류의 혼성림, 그 위로는 활엽수림을 이루어 전체적으로 소나무와 참나무가 기본이므로(유홍준, 1998), 국내에서 제시된 계수 중 강원도 횡성의 순림을 대상으로 현지조사를 통해 산출된 계수가 배수구역 적용의 타당성과 임분구조의 유사성 등에서 금강산에 적용하기에 가장 적합할 것으로 판단된다. 따라서 본 연구에서는 강원도 횡성의 소나무 순림, 참나무 순림, 혼효림을 대상으로 제시한 계수값에 북한의 침엽수, 활엽수, 혼효림의 비율 24.8% 22.97% 14.51%를 임분 비율(박종화 · 유재심, 2009)로 고려한 단위면적당 탄소저장량 값인 137.8 tC/ha를 금강산 지역 탄소저장량 산정 과정에 적용하였다 (Table

Table 3. Comparative evaluation of carbon sequestration factors applicable for TM classification in Mt. Geumgang.

		amount of carbon (tC/ha)	type of forest or biomass to estimate carbon storage	similarity of the forest ecosystem in comparison to Mt. Geumgang	watershed Application Potential	Reliability of the estimation method
이수경 등 (2009)	참나무림	147.6	○: pine tree, oak, mixed forest	○: Hwaengsung, Gwangwon province	○	○: field survey
	소나무림	141.4				
	혼효림	115.8				
이나연 (2012)	147	△: deciduous broad-leaved tree	○: Mt. Seoraksan	○	○: field survey	
산림청 (2010)	146.9	△: pine tree in Gwangwon province	○: Inje, Gwangwon province	△	○: field survey	
박진우·이정수 (2011)	36.1	○: coniferous forest broad-leaved tree mixed forest	○: Wonju, Gwangwon province	△	△: national statistics	
국립공원관리공단 (2011)	93	△: deciduous broad-leaved tree	△: Mt. Bukhan	○	○: field survey	
국립공원관리공단 (2010)	112	△: deciduous broad-leaved tree	△: Mt. Jiri	○	○: field survey	
임종환 등 (2003)	136	△: natural broad-leaved tree	△: Gwangryong Kyunggi province	○	○: field survey	
조장환 등 (2011)	30	×: above ground biomass	○: North Korea	×	×: prior research	
FAO (2010)	30	×: above ground biomass	○: North Korea	×	×: international statistics	
IPCC (2006)	60	×: above ground biomass	×: Temperate continental forest	×	×: international statistics	

×: international statistics

○: detailed criteria suitable to estimate carbon storage, based on watershed in Mt. Geumgang.

△: details limited to estimate carbon storage, based on watershed in Mt. Geumgang.

×: world-wide criteria to estimate carbon storage for target far away from Mt. Geumgang.

3). 위성영상을 이용한 탄소저장량 산정시 5개의 탄소저장고(지상부 바이오매스, 지하부 바이오매스, 토양탄소, 고사목, 낙엽층)를 대상으로 토지이용 변화에 따라 탄소저장계수 적용이 가능하지만, 토양탄소와 고사유기물 탄소의 분해가 토지이용 전환 후 완전히 진행되는데 약 20년 정도가 소요되며(정경화 등, 2008), 위성영상만으로는 전용의 시기를 정확히 판단하기 어려워 지상부 바이오매스에 대해서만 탄소저장량을 산정하는 것이 신뢰성 있는 탄소저장량을 산정할 수 있는 방법이라 판단하고 금강산 산림 탄소저장량을 산정하였다.

3. 배수구역 및 행정구역의 비교평가

서금강천 소유역은 20년간 529179.6 tC의 산림탄소량이 감소하였으며, 화천강 소유역은 367333.5 tC의 탄소저장량이 감소하였다. 동금강천 소유역은 902824.3 tC의 저장량이 감소하여 20년간 소유역중 가장 많은 탄소를 배출한 것으로 나타났다. 남강 소

유역은 1991년 탄소저장량이 2072484.4 tC이었지만 2010년에는 1987048.4 tC 으로 85436.0 tC 감소하여, 소유역 중에서는 가장 적은 양의 탄소를 배출한 것으로 나타났다. 행정구역별 탄소저장량의 변화에서 금강군은 20년간 2455155.0 tC의 산림탄소량이 감소하였으며, 창도군은 1958689.2 tC의 탄소저장량이 감소하였다. 고성군은 1982018.7 tC의 저장량이 감소한 것으로 나타나 분석기간 20년 동안 세 행정구역 중 금강군이 가장 많은 양의 탄소를 배출하였으며, 대규모 댐의 건설로 수계 면적의 급격한 증가를 보인 창도군이 가장 적은 양의 탄소를 배출한 것으로 나타났다.

전체면적이 68455 ha인 금강산의 4개 소유역은 총 탄소저장량에서 1991년 탄소저장량이 7805612.1 tC이었지만, 2010년에는 6058638.8 tC으로 나타나 20년의 기간 동안 총 1746973.3 tC의 탄소저장량이 감소한 것으로 나타났다. 이것은 소유역 전체에서 20년 동안 단위면적당(ha) 25.5 tC이 배출되었음을 의

Table 4. Comparison between administrative district and watershed in carbon stock change (Unit : tC)

		1990	2010	amount of change	decreasing rate (%)
Watershed	western geum-gang	1904148.0	1374968.4	529179.6	27.8
	Hwa-chun	1234632.9	867299.4	367333.5	29.8
	eastern geum-gang	2594346.8	1691522.6	902824.3	34.8
	Nam River	2072484.4	1987048.4	85436.0	4.0
	Total	7805612.1	6058638.8	1746973.3	22.4
Administrative	Geum-gang	10768243.2	8313088.2	2455155.0	22.8
	Chang-do	8755274.6	6796585.4	1958689.2	22.4
	Go-sung	9366913.7	7384894.9	1982018.7	21.2
	Total	28890431.4	22494568.5	6395863.0	22.1

미하며, 단위면적당(ha) 93.5 t의 이산화탄소가 배출된 것으로 환산할 수 있다.

전체면적이 265308.5 ha인 금강산의 3개 행정구역은 총 탄소저장량에서 1991년 탄소저장량이 28890431.4 tC이었지만, 2010년에는 22494568.5 tC으로 나타나 20년의 동안 총 6395863.0 tC의 탄소저장량이 감소한 것으로 나타났다. 20년 동안 단위면적당(ha) 24.1 tC의 탄소가 행정구역 전체에서 배출되었으며, 단위면적당(ha) 88.4 t의 이산화탄소가 배출된 것으로 나타났다. 본 연구에서 설정한 분석기간인 1991년과 2010년의 20년간 금강산 행정구역은 매년 단위면적당(ha) 4.42 t의 이산화탄소를 배출하였으며, 금강산 소유역은 매년 단위면적당(ha) 4.68 t의 이산화탄소를 배출하였다 (Table 4).

배수구역과 행정구역은 면적이 상이하어 1990년과 2010년의 20년에 걸친 산림 면적에 의해 파악되는 탄소저장량 변화의 직접적인 비교는 불가능하다. 하지만 금강산 지역의 경계를 설정하는 방법에 따라 산림 전용에 따른 탄소저장량의 변화율은 비교가 가능하며 이를 통해 배수구역과 행정구역으로 경계를 설정함에 따라 나타나는 특성을 파악할 수 있다. 1991년 탄소저장량에 대한 20년간의 감소량을 백분율로 나타낸 금강산 소유역들의 탄소저장량 평균 감소율은 22.4%이며, 금강군과 창도군, 고성군의 감소율은 22.1%인 것으로 나타나 소유역 평균 감소율이 행정구역별 평균 탄소저장량 산정에 비해 감소율이 약간 높은 값을 보였다.

서금강천 소유역은 29.8%의 탄소저장량이 감소하

였으며, 화천강 소유역은 29.8%, 동금강천 소유역은 34.8%, 남강 소유역은 4.0%의 탄소저장량 감소율을 나타내었다. 동금강천 소유역이 가장 높은 탄소저장량 감소율을 나타내었으며, 남강 소유역이 가장 낮은 탄소저장량 감소율을 나타내었다. 행정구역별로는 금강군이 22.8%, 창도군이 22.4%, 고성군이 21.2%의 탄소저장량 감소율을 보였으며 금강군이 가장 많은 탄소를 배출한 것으로 나타났다. 1991년에서 2010년까지 20년간 소유역들의 탄소저장량 감소율은 4%~34.8%로 나타났으며, 금강산 지역 행정구역인 금강, 창도, 고성의 탄소저장량 감소율은 21.2%~22.8%의 분포를 나타내었다. 탄소저장량 감소율은 각 소유역별로 높은 편차를 나타냈지만, 행정구역별 분류에서는 21.2%~24.8%의 편차를 보여 탄소저장량 감소율에서 큰 차이를 보이지 않았다.

소유역별 분류에서 동금강천을 중심으로 하는 소유역이 가장 높은 탄소저장량 감소율을 나타내었는데, 동금강천 소유역은 금강산에서도 가장 많은 명승지를 포함하고 있는 내금강 지역으로 보호구역으로 지정되어 있으나 이미 심각한 산림 훼손이 진행되었다는 것을 확인할 수 있다. 반면 신금강을 포함하는 남강 소유역은 4.0%의 산림 탄소저장량 감소율을 보여, 소유역 중 산림 탄소를 가장 잘 보존하고 있는 것으로 나타났다. 이것은 오래전부터 전나무와 소나무로 구성된 원시림을 이루었지만 휴전선에 면해 있어 사람들의 통행이 적으며 깊은 협곡이 발달한 남강 유역의 지형적 특색을 반영하는 것으로 사료된다. 화천강 소유역은 유역 하류에 건설된 임남댐의 영향으로

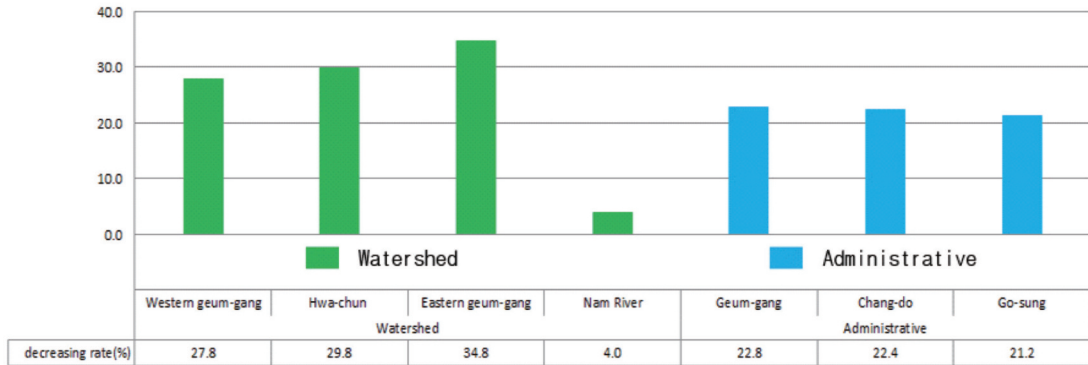


Figure 6. Comparison between administrative district and watershed in carbon stock decreasing rate.

서금강천 소유역에 비해 높은 산림 탄소저장량 감소율을 나타내었으나 동금강천 소유역 보다는 낮은 탄소저장량 감소율을 나타내었다. 이것은 대규모 댐 건설로 인한 수계 면적 증가를 상쇄할 만한 산림의 전용이 동금강천 소유역에서 발생하고 있음을 의미한다. 이러한 사실들은 행정구역별 산림 탄소저장량 감소율에서도 확인할 수 있는데, 임남댐이 건설된 창도군은 탄소저장량 변화에서 세 행정구역중 가장 높은 감소율을 보였지만, 가장 낮은 감소율을 보인 고성군과의 차이는 미미한 것으로 나타나 대규모댐 건설로 인해 침수된 면적에 버금가는 산림전용이 각 행정구역에서 나타나고 있는 것으로 판단된다 (Figure 6).

REDD 사업 대상지의 선정은 탄소를 저장할 식생이 풍부한 지역을 우선으로 하지만, 적절한 규모의 사업 관리지의 설정은 사업 시행에 따른 탄소배출량 감축 효과에서 중요한 변수로 작용한다. 대상지의 경제설정에 따라 산림비율과 산림의 전용이 큰 차이를 보일 수 있으므로, 대상지의 구획에 따라 탄소배출권 발행이 유리하거나 불리할 수 있다(박홍철 · 오충현, 2012). 행정구역별로 관리 지역을 구획하여 산정한 탄소저장량에서 금강군, 창도군, 고성군은 21.2%~22.4%의 감소율을 보여 행정구역 평균인 22.1%와 큰 차이가 나타나지 않았다. 소유역들의 평균 탄소저장량 감소율은 22.4%였으나, 산림 탄소저장량의 감소율이 가장 낮은 남강 소유역을 제외하면 31.4%의 산림 탄소저장량 감소율을 보였다. REDD 사업은 과거 기저선 대비 산림전용 비율에 따라 탄소배출권의 획득

여부와 발행량을 결정하므로 만약 금강산 지역에 REDD 사업을 시행하게 된다면 남강 소유역을 제외한 구역에서 사업을 시행하는 것이 사업 시행에 따른 탄소배출권 확보에 유리하게 작용할 것으로 판단된다.

REDD 사업의 성공적인 실행을 위해서는 사업의 시작 단계에서부터 탄소배출권 발행으로 인한 이익 분배에 대해 협의하여 지역사회의 다양한 이해관계자들 간의 마찰을 줄여야 한다(박미선 · 윤여창, 2012). 산림의 보존정도에 따른 탄소저장량 확보 여부를 고려하지 않고 사업실행으로 인한 이익을 분배한다면 사업 참여자들 간의 갈등 또는 분쟁을 유발할 수 있다. 하지만 사업시행 이전부터 탄소저장량의 차이에 따른 합리적인 구획 설정을 통해 관리대상지역을 설정하고 향후 산림의 보존정도에 따라 차별화된 혜택을 보장한다면 REDD 사업으로 발생하는 편익을 산림 보존정도에 따른 차등분배(형평배분)가 가능할 것으로 판단된다. REDD 시범사업을 시행하고 있는 네팔은 소유역 네트워크를 형성하여 산림의 탄소저장량을 관리하고 산림의 보존정도에 따라 탄소배출권 발행으로 발생하는 이익을 분배하여 지역주민들이 사업에 자발적으로 참여할 수 있도록 유도하고 이익분배로 인해 발생할 수 있는 문제들을 방지하고 있다(ANSAB, 2011). 본 연구를 통해 행정구역과 소유역 간의 탄소저장량의 변화가 사업시행 전 단계에서부터 구획방법에 따라 확연한 차이를 나타내고 있다는 사실을 확인할 수 있는데, 탄소저장량의 확보정도에 따른 공평한 이익의 분배를 위해서는 탄소저장

량의 분포특성이 확연히 나타내는 소유역에 따른 구획설정이 사업의 실행에 따른 이익분배에 유리하게 작용할 것으로 판단된다.

산림의 전용과 황폐화를 측정하는 기초자료로 활용된 토지이용변화에서 금강군과 창도군, 고성군은 모두 산림의 면적은 감소하고 수역과 비산림의 면적은 증가하였지만 소유역에서는 산림의 면적은 전체적으로는 감소하였으나 동금강천 소유역의 수계 면적이 소폭 감소한 것으로 나타났다. 또한 남강 소유역은 비산림 면적에서 큰 변화를 나타내지 않는 등 소유역으로 구획을 설정하였을 경우 각 관리지역의 평균적인 변화 추세에 비하여 토지이용 변화의 특성이 확연히 드러나 보다 미시적인 차원에서 산림면적 변화에 따른 탄소저장량 변화 추적이 가능하였다. REDD 사업전략 수립시 산림보존의 비용효율성(단위비용 대비 가능한 최대 배출량 감소)을 고려하여야 하는데(NORAD, 2011), 토지이용에 기반하는 산림의 전용과 황폐화는 불규칙하게 이루어지만 자연환경과 생활환경의 복합적인 영향에 의해 유발되는 경우가 대부분이다. 북한은 1990년대 이후 식량난으로 인해 산지개간에 의해 산림의 전용과 황폐화가 급속하게 이루어지고 있으므로, 취락의 분포와 관련한 토지이용 변화에 따라 구획별로 탄소저장량 감소율의 차이가 확연히 드러난다면 산림전용과 황폐화의 근본적 요인을 분석하여 최소의 비용투자로 실질적인 탄소배출 감축이 가능할 것이다. 사업실행을 통한 산림의 지속적인 관리와 보존에서도 산림은 소유역 단위로 생태계 분포의 차이를 보이므로(ICIMOD, 2011) 탄소저장량의 변화량이 명확히 드러나는 소유역이 산림전용 및 황폐화 요인에 따른 산림보존과 지역민의 산림 관리 노하우(know-how)를 활용하는데 용이할 것으로 판단된다.

REDD의 경계 설정 과정에서는 REDD 프로젝트가 시행되는 영역에서 행해지던 다양한 개발활동이 사업 시행으로 인해 대상지역 밖으로 전이되어 온실가스를 방출할 가능성이 있는 누출(leakage)에 대한 처리방안을 고려하여야 한다(American Carbon Registry, 2010). 금강산 지역의 개간을 위한 벌채나 화전 등 현재까지 산림을 훼손시킨 다양한 활동은 북

한의 경제 악화로 인한 식량난에 기인하는 경우가 대부분이다. 우리나라는 과거부터 생활 권역과 취락이 유역 개념(watershed)에 의거하여 형성되어 왔으므로, 이러한 현상들은 배수구역의 범위 내에서 발생할 가능성이 크므로 소유역 연계를 통해 사업의 경계(범위)를 설정한다면 사업 실행에 따라 REDD 대상지역 밖으로 온실가스를 방출할 가능성이 있는 산림 개발 활동이 유출되는 것을 미연에 방지할 수 있다. 탄소저장량의 분포는 산림패치의 크기, 산림의 질, 지역적 특성 등 다양한 변수에 따라서 달라질 수 있지만(IPCC, 2003; 박태진 등, 2011; 한국환경정책·평가연구원, 2010) 배수구역별 탄소저장량 평가 자료는 행정구역별 산정에 비해 확연한 차이를 보이므로 녹피울 훼손 실태에 대해 지역간 비교가 용이하다. 따라서 배수구역별 탄소저장량 평가 자료는 사업시행 과정에서 개별 공간객체별 누출 범위와 면적에 대한 명확한 근거자료로서 탄소배출량 저감의 감시자 역할을 할 수 있을 것이다.

IV. 결론

UN-REDD 사업은 대상지의 경계설정에 따라 산림율과 산림의 전용이 큰 차이를 보일 수 있어 대상지의 구획에 따라 탄소배출권 발행이 유리하거나 불리할 수 있지만, 현재까지 이루어진 탄소저장량 산정에 관한 연구들은 대상지의 특성을 고려하지 않고 행정구역이나 소유지 등을 경계로 대상지를 구획하여 탄소저장량을 산정하였다. 이러한 사실에 착안하여 REDD 수행을 위한 관리대상지 구획 설정 방향을 제시하기 위해 금강산 지역의 탄소저장량을 행정구역과 배수구역 경계로 구분하여 비교를 시도하였다. 본 연구에서는 Landsat TM 영상을 활용하여 REDD 투자 잠재력이 높을 것으로 사료되는 금강산 지역을 금강천, 화천강, 동금강천, 남강 소유역으로 세분화하여 탄소저장량 변화를 추적하였는데 행정구역과 배수구역 범위에서 두드러진 차이가 확인되었다. 1990년에서 2010년까지 20년 동안 탄소저장량에서 금강천 소유역은 27.8%, 화천강 소유역 29.8%, 동금강천 소유역 34.8%, 남강 소유역 4.0% 그리고 금강군

22.8%, 고성군 21.2%, 창도군 22.4%의 감소율을 나타내었으며, 배수구역을 경계로 한 토지피복분류에서 행정구역에 따른 분류에 비해 보다 미세한 토지이용변화가 감지되었다. 배수구역별로 산정된 탄소저장량이 행정구역별 산정에 비해 UN-REDD 사업 시행 사업 대상지의 특성을 더 잘 반영하는 것으로 나타나 금강산 지역은 누출효과의 관리, 기회비용의 분배, 산림의 지속적인 향후 모니터링과 관리, 사업실행에 대한 비용편익, 산림 생태계의 특성 반영 등을 고려할 때 배수구역 규모의 산림 보존과 관리가 행정구역별 구획설정에 비해 REDD 사업을 성공적으로 시행하기에 더욱 유리할 것으로 판단된다. 본 연구는 금강산지역에 적용하기에 적합할 것이라고 판단되는 탄소저장계수를 선정하여 토지이용변화에 따른 탄소저장량을 산정하였지만, 지상부 바이오매스만을 대상으로 탄소저장량을 산정하였으며 수목의 생장에 따라 나타나는 탄소저장량의 변화를 고려하지 않았다. 하지만 이러한 오차를 감안하더라도 행정구역과 배수구역은 탄소저장량 감소율에서 확연한 차이를 드러내었으며, 금강산 지역을 대상으로 REDD 사업을 실시한다면 배수구역별로 관리대상지를 구획하는 것이 사업의 성공적인 수행에 보다 유리할 것으로 판단된다.

사 사

이 논문은 2011년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2011000042)

참고문헌

- 국립공원관리공단, 2010, 북한산국립공원 자연자원 조사 보고서, 56p.
- 국립공원관리공단, 2011, 지리산국립공원 자연자원 조사 보고서, 77p.
- 권순덕, 서정호, 손영모, 박영규, 2005, 산지전용에 따른 우리나라의 임목바이오매스 탄소배출량, 산림바이오에너지, 24 (2), 10-15.
- 김갑덕, 김호민, 1991, Landsat TM 데이터와 지형 정보를 이용한 산림의 잠재 식생분석에 관한 연구, 임산 에너지, 11(1), 45-63.
- 김현섭, 배상원, 이상태, 황재홍, 2010, 광릉시협림 내 느티나무(*Zelkova serrata*) 인공림의 생장특성 및 지상부 탄소저장량 분석, 한국임학회지, 99(1), 144-152.
- 박미선, 윤여창, 2012, 산림 탄소배출권 확보를 위한 REDD+ 사업 전략 개발, 환경정책, 20(2), 19-48.
- 박병욱, 1996, 수치위성자료를 이용한 광역의 토지 피복분류 기법, 한국측지학회지, 14(1), 39-47.
- 박종화, 유재심, 2009, 원격탐사를 이용한 북한의 산림황폐화 현황 조사, 환경논총, 48, 3-24.
- 박진우, 이정수, 2011, GIS와 행정 자료를 이용한 산림전용지의 공간분포 및 탄소배출량 분석 -강원도 원주시를 대상으로, 한국임학회지, 100(3), 466-475.
- 박태진, 이우균, 정래선, 김문일, 권태협, 2011, REDD+ 모니터링 시스템 구축을 위한 원격탐사기술의 활용방안, 한국 임학회지, 100(3), 315-326.
- 박현주, 신휴석, 노영희, 김경민, 박기호, 2012, 크리깅 기법을 이용한 단양군의 산림 탄소저장량 추정 -지상부 바이오매스를 대상으로, 한국지리정보학회지, 15(1), 16-33.
- 박홍철, 오충현, 2012, 한국의 산림전용 및 산림황폐화 방지를 통한 탄소배출감축 프로그램 이행의 기저선 접근법 연구, 한국환경생태학회지, 26(4), 484-497.
- 산림청, 2010, 교토의정서 대응 산림탄소계정 기반 구축 연구, 1-436.
- 산림청, 2011, 산림과 임업 동향에 관한 연차보고서, 1-730.
- 엄정섭, 2005, 도로밀도에 대한 소하천 유역 기반의 총량규제 기초자료 확보 방안, 환경영향평가, 14(5), 317-335.
- 위광재, 이현, 이동하, 조재명, 서용철, 2011, 항공라이다 데이터를 이용한 산림의 탄소 흡수량 측정, 한국측량학회지, 29(1), 55-62.

- 유홍준, 1998, 금강산, 학교재, 344p.
- 윤성탁, 김선오, 임상규, 2001, Landsat TM 영상 자료를 이용한 평택지역의 토지피복 현황 및 분류정확도 평가, 한국농림기상학회지, 3(3), 163-170.
- 이나연, 2012, 설악산국립공원 낙엽활엽수림의 탄소저장량 평가, Journal of National Park Research, 3(1), 9-13.
- 이상진, 최윤수, 윤하수, 2012, 항공 LiDAR 데이터를 이용한 산림의 이산화탄소 고정량 추정, 한국측량학회지, 30(3), 259-268.
- 이수경, 최현아, 손요환, 이우균, 2010, 산림전용 및 황폐화 방지를 통한 온실가스 감축방안 (REDD 및 plus) 논의동향 및 도입 전망, 에너지기후변화학회지 5(2), 85-98.
- 이정수, 신만용, 이우균, 조현국, 2012, 원격탐사 자료를 이용한 온실가스 통계 모니터링 및 검증기술 개발, 산림청, 1-227.
- 임종환, 신준환, 진광제, 전정화, 오정수, 2003, 광릉 활엽수천연림의 산림식생구조, 입지환경 및 탄소저장량, 한국농림기상학회지, 5(2), 101-109.
- 전영률, 1998, 금강산 : 북한사람이 쓴 금강산의 모든 것, 실천문화사, 394p.
- 정경화, 조준행, 김찬규, 이경학, 윤여창, 노기안, 박규현, 왕광익, 진병복, 2008, 기후변화협약 대응 국가온실가스 IPCC 신규 가이드라인 적용을 위한 기획연구: 총괄보고서, 에너지경제연구원.
- 조장환, 구자춘, 윤여창, 2011, 북한의 산림전용 방식수단으로의 REDD 사업의 경제적 타당성 분석, 한국임학회지, 100(4), 630-638.
- 차종환, 2000, 금강산 식물생태 현지답사여행, 예문당, 462p.
- 최진호, 엄정섭, 2012, 북한 지역 UN-REDD 등록 타당성 분석을 위한 위성영상 활용, 한국지형공간정보학회지, 20(4)
- 환경부, 2002, 인공위성 영상 자료를 이용한 토지피복지도 구축 (용역보고서), 한국환경정책·평가연구원, 268p.
- 한국환경정책·평가연구원, 2010, 식생과 토양의 역할을 고려한 저탄소 토지이용계획 수립방안(II), 268p.
- American Carbon Registry, 2010, Methodology for REDD-avoiding planned deforestation
- ANSAB(Asia Network for Sustainable Agriculture and Bioresources), 2011, Forest Carbon Stock in Community Forests in three watersheds (Ludikhola, Kayarkhola and Charnawati), 1-41.
- FAO(Food and Agriculture Organization), 2010, Global forest resources assessment 2010, 376p.
- Gibbs, H.K., Brown S., Niles, J.O and Foley, J.A., 2007, Monitoring and estimating tropical forest carbon stocks: Making REDD a reality, Environmental Research Letter, 2(4), 23-45.
- Hoanga, M., Do, T., Pham, M., Noordwijk, M., Minang, P., 2013. Benefit distribution across scales to reduce emissions from deforestation and forest degradation (REDD+) in Vietnam, Land Use Policy, 31, 48-60.
- Huang, C., Goward, S., Schleeweis, K., Thomas, N., Masek, J., and Zhu, Z, 2009, Dynamics of national forest assessed using the Landsat record: Case studies in eastern Unites States, Remote sensing of Environment, 113(2), 1430-1442.
- ICIMOD(International Centre for Integrated Mountain Development), 2011, A Monitoring Report on Forest Carbon Stocks Changes in REDD Project Sites (Ludikhola, Kayarkhola and Charnawati), 1-35.
- IPCC, 2003, Good practice guidance for land use, land-use change and forestry, Institute for Global Environmental Strategies

- (IGES) for the IPCC.
- IPCC, 2006, Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories (IPCC 2006).
- Kelty, M.J, 2006, The role of species mixtures in plantation forestry, *Forest Ecology and Management*, 233(2), 195-204.
- Lasco, R., Pulhin, F., Sales, R., 2007, Analysis of Leakage in Carbon Sequestration Projects in Forestry: A Case Study of Upper Magat Watershed, Philippines, *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 12(6), 1189-1211.
- Levin N., Ben-Dor E. and Karnieli, A., 2004, Topographic information of sand dunes as extracted from shading effects using Landsat images, *Remote Sensing of Environment*, 90(2), 190-209.
- Naidoo, R., Iwamura, T., 2007, Global-scale mapping of economics benefits from agricultural lands: Implications for conservation priorities, *Biological Conservation*, 140, 40-49.
- Peter, N., 2004, The use of remote sensing to support the application of multilateral environmental agreements, *Space Policy*, 20(3), 189-195.
- NORAD(Norwegian Agency for Development Cooperation), 2011, Real-Time Evaluation of Norway's International Climate and Forest Initiative: Contributions to National REDD+ Processes 2007-2010, Country Report: Indonesia, Evaluation Report 16/2010 Oslo, 144p.
- Rigina, O., Baklanov, A., Hagner, O., Olsson. H., 1999, Monitoring of forest damage in the Kola Peninsula, Northern Russia due to smelting industry, *The Science of The Total Environment*, 229(3), 147-163.
- Rosenqvist, A., Milne, A., Lucas, R., Imhoff, M., Dobson, C., 2003, A review of remote sensing technology in support of the Kyoto Protocol, *Environmental Science & Policy*, 6(5), 441-456.
- Schueler, T., 1995, Environmental Land Planning Series: Site Planning for Urban Stream Protection. Metropolitan Washington Council of Governments, Metropolitan Washington Council of Governments, 232p.
- World bank Group, 2011, Estimating the opportunity costs of REDD+: A training manual, version 1.3, Washington D.C, 262p.