북한 지역 UN-REDD 등록 타당성 분석을 위한 위성영상 활용 : 금강산을 사례로

Application of Satellite Image to Evaluate UN-REDD Registration Potential of North Korea : a Case Study of Mt.Geumgang

최진호* · 엄정섭**

Choi, Jin Ho · Um, Jung Sup

要 旨

북한의 산림 파괴를 막는 동시에 남한의 탄소배출권 확보라는 측면에서 북한 지역을 UN-REDD 사업 대상지로 등록하고자 하는 논의가 지속되고 있다. 그러나 북한이라는 정치적 폐쇄성으로 인해 REDD 등록 과정에서 필요한 정보를 취득하기 어려운 것이 현실이다. 본 연구는 북한 지역을 REDD에 등록하는 과정에서 객관적 자료 확보에 대한 문제점을 극복하고자 위성영상을 활용하여 금강산에 대해 기초자료를 제시하였다. 그 결과 금강산 지역은 20년 동안 산림의 20% 이상이 훼손되었고, 산림 훼손의 원인이 대부분 농지 전용에 기인하고 있어 향후에도 지속적인 파괴가 이루어질 것으로 나타났다. 금강산 지역의 잠재적 탄소 배출 감축량은 519,000 tCO₂/year-663,000 tCO₂/year에 이를 것으로 나타나, 남한의 입장에서 향후 온실가스 배출감축 의무를 부담하게 될 경우, 매력적인 REDD 대상지로 확인되었으며, 정치적, 사회적 공편익을 고려할 경우 이에 대한 가치는 더 클 것으로 추정된다.

핵심용어 : UN-REDD, 북한, 위성영상, 금강산

Abstract

Discussion on North Korea as UN-REDD (Reduced Emissions from Deforestation and Degradation in developing countries) project target continues with a view to preventing deforestation and to securing CER(certified emission reduction) for South Korea. However, due to North Korea's political shutdown, it is hard to acquire information required for the REDD project registration. This research intends to acquire objective data using satellite images in the Mt. Geumgang. More than 20% of entire forested area were disappeared during the past two decades mainly due to conversion into agricultural farming land. Further, it is expected that persistent deforestation will go on. The reduction potential of the carbon emission is estimated as approximately 617,000 tCO₂/year-663,000 tCO₂/year. Thus, Mt. Geumgang is considered as realistic REDD target, which is attractive to South Korea, given that the obligation to reduce greenhouse gas emission is likely to be imposed upon the country. Further, political and social benefits due to reduced military conflict make Mt. Geumgang as UN-REDD project target invaluable.

Keywords : UN-REDD, North Korea, Satellite Image, Mt. Geumgang

1. 서 론

UN-REDD는 2012년 이후 ‘포스트 교토체제’에 대비하여 부각되고 있는 시스템으로, 전 세계 온실가스 배출량의 17% 이상이 산림전용과 산림황폐화로 인해 발생하고 있다는 보고(UN-REDD program, 2011)에 따라 개도국 등 산림자원이 풍부한 지역의 산림을 전용

하거나 훼손하지 않고 그대로 보전하는 경우, 이에 상응하는 기회비용(opportunity costs)을 지원하는 프로젝트이다. 이는 생태계의 다양성 증진, 원주민 지원 등 환경·사회적인 공편익을 동반할 수 있는 동시에 기후변화에 대한 적응과 지속가능한 발전을 함께 달성할 수 있는 효과적인 온실가스 감축 대응 방안으로 주목받고 있다(UNFCCC, 2001; IPCC, 2007; UNFP-WCMC,

2012년 10월 18일 접수, 2012년 11월 5일 수정, 2012년 12월 3일 채택

* 정희원 · 경북대학교 공간정보학과 박사과정(Member, Department of Spatial Information, Kyungpook National University, metalsea@knu.ac.kr)

** 교신저자 · 경북대학교 지리학과 교수(Corresponding author, Department of Geography, Kyungpook National University, jsaeum@knu.ac.kr)

2007).

북한에 대한 REDD 프로젝트의 시행은 산림 보전과 홍수 등 자연재해의 대치방안을 마련함과 동시에 향후 탄소배출권을 확보해야 할 필요성이 있는 남한의 입장에서 서로의 Win-Win 전략이 될 수 있다. 특히 REDD를 통한 북한 지역의 산림 훼손방지는 단순한 대북지원 이상의 것으로 그동안 북한 지역의 산림훼손, 농지황폐화, 식량부족의 악순환을 끊고 에너지난과 경제난을 해결하는 기반을 마련해 줄 수 있는 기회로 작용할 수 있다.

산림청은 2012년도 산림자원분야 사업계획에서 북한의 산림복구를 탄소배출권과 연계 방안을 제시하면서 북한 지역에 대한 REDD 워크숍 개최 등 REDD 사업의 필요성을 역설하고 있다. Jo *et al*(2011)은 북한 전역을 대상으로 REDD 사업의 잠재량과 비용을 분석한 결과 북한 지역의 REDD 사업은 정치·사회적 측면의 공편익을 고려할 때 충분한 사업 타당성을 확보할 수 있을 것으로 보고하고 있다. Um *et al*(2011)은 Landsat TM과 IKONOS 위성영상이 북한 지역을 REDD 사업으로 등록하는 과정에서 법적 구속력을 가진 증빙자료로 활용될 수 있다는 연구결과를 제시하고 있다.

현재 북한지역에 대한 산림 현황 및 토지 이용 변화에 대한 자료는 대부분을 국제기구의 통계자료에 의존하고 있어 북한의 실제 산림 전용 및 황폐화 현황 등의 토지이용현황을 정확히 반영하지 못해 객관적인 REDD 잠재량(보전될 수 있는 탄소배출량 등)을 추정하지 못하고 있다. 과거 일정 기간 동안의 토지 이용 변화에 대한 자료는 탄소 배출량과 흡수량을 추정하는데 필수적인 자료이다. 새로 조성된 산림과 산림 훼손에 의한 산림면적 변화에 대한 객관적 자료의 결여는 REDD 사업의 참조수준(reference level)¹⁾ 설정에 영향을 미쳐 사업의 효과성 검증이 어렵게 된다. 아울러 기회비용산정을 통한 경제적 보상 과정에서 문제가 발생하게 된다.

REDD 사업의 논의과정에서는 반드시 산림면적 및 토지이용 변화가 추정되어야 한다(GOFC-GOLD, 2008). 이러한 자료는 크게 원격탐사자료, 현지조사, 통계자료 등으로 구분되는데 이중 현지조사와 통계자료는 많은 시간과 비용이 소모되며, REDD 모니터링에서 요구되는 시계열적 요건을 충족시키기 어려워 신뢰성, 투명성, 반복성에 대한 한계가 존재한다(Archard *et al*, 2007). 북한의 경우는 폐쇄적인 정치체제로 인해 현지

조사와 통계조사 자료의 취득 가능 여부가 의문시되며 설사 자료가 취득되더라도 자료의 객관성과 정확성이 보장되기 어려운 실정이다. 그러므로 원격탐사만이 북한 지역에 대한 유일한 REDD 참조자료로 판단된다. UNFCCC (UN Framework Convention on Climate Change)에서는 REDD 사업에 대한 적격성을 판단하는 자료로 원격탐사자료를 최우선시하고 있다는 점을 고려한다면 원격탐사자료의 활용이 잠재량과 그 효과성을 입증하는 유일한 방법론으로 판단된다(Holmegre *et al*, 2008).

원격탐사자료를 활용하여 산림전용 및 황폐화 면적을 산출하고 REDD 사업의 잠재량과 사업비용을 추정하는 많은 연구가 보고되고 있다(Gibbs *et al*, 2007; Naidoo and Iwamura, 2007; Harris *et al*, 2008; Valerio *et al*, 2011). 하지만 북한 지역에 대한 REDD의 필요성과 잠재량을 객관적인 증거자료를 바탕으로 논의한 선행연구는 확인되지 않는다.

따라서 본 연구는 북한 지역의 REDD의 여건과 필요성에 대한 구체적인 근거를 확보하기 위하여 위성영상을 활용하여 산림 및 토지이용 현황을 지도화하고, 이를 바탕으로 REDD의 잠재량 분석과 등록을 위한 객관적 기초자료를 제시하고자 출발하였다.

2. 연구 지역 및 데이터 전처리

북한 지역은 국토면적 대비 산림 비율이 높지만, 단위면적 당 탄소저장량이 많은 열대지역과 달리 상대적으로 소규모로 산림이 분산되어 있기 때문에 북한 전역에 대한 REDD 사업은 북한의 수용 여부와외의 현실적 괴리가 존재한다. 북한 내에서 REDD를 추진하는 것은 정치·외교적인 문제를 제외하더라도 REDD를 이해하는 국제 환경협상 전문 인력의 부족, 원격탐사 등 첨단 기술에 대한 정보나 경험 부족 등 많은 어려움이 있을 것으로 판단된다. 따라서 사업에 관련된 행정의 효율성을 높이기 위해서는 특정 지역을 REDD 구역으로 설정하여 사업을 실시하는 방안이 실현가능한 대안일 것으로 판단된다. 이 특별구역 안에 관리 기구를 세워 REDD 사업에 대한 모든 투자 관련 행위들을 담당하게 되면 남한 사람은 물론 채류와 행정적 관리가 크게 수월해질 것이다. 또한, 북한의 현재 산림 관리체제는 지역 정부에 전적으로 의존하고 있기 때문에 지역 정부와의 긴밀한 협력도 매우 중요하다. 이런 점에서 금강산 지역

1) 탄소 배출 감축량을 추정하고 잠재적으로 보상될 수 있는 예상 시나리오로 REDD 사업을 통해 얼마만큼의 배출감축이 이루어질 수 있는지를 결정하는 참조 자료이다.

은 이미 금강산 관광을 위해 지역 커뮤니티와의 협력이 이루어지고 있어 큰 장애요인이 상당부분 해소되어 있으며, 금강산 주변은 과거 각종 개발 사업으로 산림 전용이 확산되어 REDD 투자 잠재력이 높은 지역이다. 금강산 지역은 이미 관광단지 개발과정에서 정보 공개의 폐쇄성, 제도적 불안정성과 시장의 불투명성, 열악한 인프라 등 북한의 여타지역에서 직면하는 REDD 투자 제약 요인들이 상당부분 해소된 지역이다. 따라서 금강산지역에 REDD를 도입하는 것은 이미 금강산 지역에 구축된 시스템에 의거하여 실행될 수 있기 때문에 북한의 입장에서 협상에 유연성을 보일 수 있을 것으로 판단된다. 남한 측에서도 금강산에 현대 아산을 비롯한 기업들이 진출하고 있어 REDD 투자로 인한 리스크가 적고 사업 추진 시 발생하는 추가적인 시간 및 비용이 북한 내 타 지역보다 훨씬 적어 REDD 도입에 대한 비즈니스적인 당위성을 확보할 수 있을 것으로 판단된다. 금강산에 대한 REDD 사업 시행은 북한의 산림 황폐화를 저지하는 동시에 탄소 배출권을 확보해야 할 필요가 있는 남한의 입장에서 REDD 사업을 시행하기 위한 최적지로 판단된다.

대상지의 경계 설정은 금강산이 속해 있는 행정구역(통천군, 금강군, 고성군)으로 설정할 수 있으나, 기본적으로 REDD의 경계 설정 과정에서는 누출(leakage) 효과를 반드시 고려해야 한다(American Carbon Registry, 2010). REDD 프로젝트를 통해 산림 개발이 불가능하게 되면 REDD 대상지역 밖으로 현재까지 산림 훼손을 발생시킨 다양한 활동(벌채, 화전 등)이 누출되는 것을 의미한다. 금강산일대는 북쪽에 대도시인 원산시에 접해 있어 이미 상당 부분 도시화가 진행되어 있고, 동쪽으로는 동해안과 남쪽으로는 휴전선일대와 접경지대를 이루고 있어 추가적인 누출효과로 인한 산림훼손은 고려되지 않을 것으로 판단된다. 그러나 서쪽의 경우 특정한 요인으로 누출효과가 차단될 수 있는 여건이 구성되어 있지 않아 서쪽 경계에 대한 누출효과를 막을 수 있는 방안이 요구된다. 예부터 우리나라 배산임수(背山臨水)이라는 유역 개념(watershed)에 의거하여 취락과 생활 권역이 형성되어 왔으며 이에 따라 동·식물 등 생태계의 분포가 달리 나타나 환경보호의 다양한 전략 및 정책이 유역에 의거 시행되고 있다. 유역은 누출 효과를 막는 주민 참여를 이끌어 내는데 용이할 수 있으며, 특히 유역을 형성하는 분수계(농선)는 누출효과의 확장을 막는 지리적 경계로서의 효과를 클 것으로 사료된다.

이에 따라 본 연구에서는 금강산 지역의 DEM (ASTER Global DEM)을 이용하여 대유역(Basin)을 산출하고 이중 금강산 지역을 포함하고 있는 유역을

Figure 1과 같이 산출하여 동(유역경계), 서(해안경계), 남(휴전선), 북(원산시)를 임계지역으로 설정, 대상지의 경계를 활용 하였다.

REDD 프로젝트에서 제시하고 있는 산림 변화에 대한 관측 및 추세 분석을 위해서는 최소 10년 이상 산림 변화 데이터를 관찰할 필요가 있다(American Carbon Registry, 2010). 따라서 본 연구에서는 최근 영상을 기준으로 10년 이상을 기간을 두고 영상자료를 취득하고자 하였다. 위성영상은 MODIS와 같은 저해상도의 활용부터 Landsat, SPOT 등의 중해상도 위성 영상, IKONOS, Quickbird 등 고해상도 영상을 활용하여 모니터링 할 수 있다(Hansen, 2008). 그러나 저해상도 영상의 경우 국가단위와 같은 거시적 권역에만 사용될 수 있으며, 고해상도 영상은 높은 공간해상도에 따른 화소기반분류기법 적용의 한계와 비용적 측면에 문제가 나타난다. 고해상도 영상의 경우 취득 가능한 영상의 시기가 10년 이하로 짧기 때문에 시계열적 정보를 취득하기 어렵다. Landsat TM 영상은 현지조사에 비해 세부적인 자료를 얻을 수 없으나 넓은 지역에 대한 자료의 수집이 가능하고, 과거의 산림현황을 평가할 수 있는 자료가 구축되어 있어 금강산 지역의 산림 및 토지이용 변화추세 평가를 통해 REDD의 잠재량을 평가하는데 최적의 영상으로 판단된다. 따라서 본 연구에서는 분류과정의 정확성과 지역 도출의 정확성을 높일 필요에 따라 Landsat TM을 활용하였다. 사용된 영상의 취득시기는 낙엽림과 교란된 산림지 사이의 분광학적 혼동을 미연에 방지할 수 있도록 식물 발육시기의 영상을 활용하였다.

Figure 1. Study area

Table 1. Specification of Landsat TM images

Path/ Row	Acquisition Date	Cloud Cover(%)
115/33	1991. 08. 12	10
115/33	2010. 06. 05	10

Figure 2. Landsat TM images of study area
(a) 1991.08.12 (b) 2010.06.05

일반적으로 위성영상을 활용한 식생 분류에는 계절에 따른 식생의 변이(단풍, 낙엽 등)가 적어 중 고위도 지역에 6월과 9월 사이에 취득된 영상을 활용하고 있다(Huang *et al.*, 2009). 따라서 영상은 6월과 9월 사이를 중심으로 취득된 활용하였다. 또한 분류 과정에서 구름에 의한 오차를 줄이고자 10%이하의 자료만을 활용하였다.

Table 1과 Figure 2는 분석에 사용된 Landsat TM의 데이터 리스트와 트루 컬러 영상을 나타낸다. 연구과정에서 영상분류와 분할 영상 생성에서는 Erdas Imagine 9.2를 활용하였으며, 격자 생성 등 공간데이터의 구축에는 ESRI ArcGIS 9.3.1이 이용되었다. 영상의 분류결과와 정확도 검증에 사용된 통계 프로그램은 SPSS 12.0을 이용하였다.

Table 2. Thematic classes modified from the IPCC guideline and land cover mapping classes of South Korea

IPCC	Land cover map of South Korea	thematic classes used in this research
Settlements	Settlements	Settlements
Cropland	Cropland	Cropland
Forest land	Forest land	Forest land
Grassland	Grassland	Grassland (Open space included)
Wetlands	Wetlands	
Other land	Open space	Waters(wetlands included)
	Waters	

영상분류방법은 방법론의 표준화를 위해 기존의 북한지역 산림변화 연구에 활용된 분류방법을 참조하였다(Lee *et al.*, 2007; Yoo *et al.*, 2011). 북한지역의 경우 지상참조자료의 획득이 불가능하기 때문에 ISODATA Clustering 방법에 의해 무감독분류를 실시하고, 이를 바탕으로 각 항목에 대해서 동질성(homogeneity)와 대표성(representative)을 가진 지역에 대하여 생성된 3~6개의 군집(cluster)을 훈련 지역(training sample)으로 설정하고 최종적으로 최대우도법(maximum likelihood classifier)에 근거한 감독분류를 진행하였다.

위성영상을 통한 산림 훼손 면적 및 토지 이용 변화를 추정하는 과정에서 분류 객체는 토지이용활동과 연관된 온실가스 배출량과 흡수량을 산정하는 기준이 되기 때문에 중복 없이 상호 배타적이고, 누락되는 내용 없이 전체가 망라되어야 한다(Jenson, 2005). 현재 이러한 토지 분류 객체를 IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change) 국가온실가스 인벤토리 우수 실행 지침(GPG : Good Practice Guideline)에서는 토지이용 형태(산림, 농경지, 초지, 습지, 주거지, 기타 등)를 구분하고 이를 기반으로 탄소축적량의 평가와 온실가스 배출량 및 흡수량을 추정하도록 권고하고 있다(IPCC, 2003). 그러나 IPCC에서 제시하고 있는 전 세계를 기준으로 토지이용 카테고리들을 구분하고 있어 특정 지역에 기후나 생태 지역이 적용될 경우 지역성을 대표하기 어렵기 때문에, 연구 대상지역인 금강산일대를 대표할 수 있는 별도의 분류객체 선정이 요구된다. 그러나 북한 지역의 경우는 별도 토지 분류 체계가 존재하고 있지 않아 지역의 대표성을 감안할 수 있는 분류 체계를 정하는 것은 매우 어려운 것이 현실이다. 이에 따라 북한 지역과 기후와 생태 지역이 유사한 남한 지역의 토지 분류 객체를 활용하는 것이 효과적일 것으로 판단되었다.

현재 환경부는 1998년부터 한반도 전체를 대상으로 지표의 물리 특성을 분류하여 토지피복도를 제작하고 있으며, 이중 대분류에 토지피복도는 남한뿐만 아니라 북한 지역에 대한 토지 이용을 7가지(시가화권조지역, 농업지역, 산림지역, 초지, 습지, 나지, 수역)로 분류하여 제시하고 있다. 이러한 토지피복분류(대분류)는 활용은 IPCC에서 권고하고 있는 토지이용표현의 유사할 뿐만 아니라 지역의 토지이용을 대표할 수 있을 것으로 판단되며, 특히 중해상도 위성영상을 통해서도 데이터를 습득할 수 있고 표현 가능한 정보가 주기성을 가지고 있어 토지이용에 대한 자료를 구축하는데 유용한 분류 체계로 사용될 수 있다. 따라서 본 연구에서 환경부 토지피복도(대분류)를 토지 이용 분류를 위한 기준으로

정하고, 이중 취득 영상의 계절적 차이로 오분류가 발생할 수 있는 초지와 나지, 수역과 습지를 하나의 분류 객체로 설정하였다(Table 2).

일반적으로 영상 분류의 정확도 평가는 충분한 수의 지상자료의 수집을 통해 영상의 분류 결과와의 오차 여부를 판별하고, 그 결과를 오차행렬표(error matrix)를 통해 계산하게 된다. 그러나 현재 금강산 지역에 대한 현지조사 기반의 지상보조자료 수집은 현실적으로 불가능하다.

이에 따라 본 연구에서는 각 객체 마다 30개씩의 비교 지점을 확인하여 Figure 3과 같이 총 150개의 지점을 산출, 이를 Google Earth에서 제공하고 있는 IKONOS, GeoEye-1, SPOT 등의 고해상도 영상을 통해 육안으로 검증 기준점을 설정하여 이를 분류결과와의 대조를 통해 정확도를 평가하고 이를 전체 정확도(overall accuracy)와는 kappa 계수로 환산하였다(Cha and Park, 2007; World Bank Group, 2011). 영상의 분류와 정확도 검증은 분류 전체 정확도 80%이

상, kappa 계수 0.8 이상일 때 분류에 대한 정확도가 검증된 것으로 설정하고(Kim, 2005; Ladis and Koch, 1997) 반복 시행하여 Table 3과 같은 결과가 도출되었다.

이에 따라 나타난 금강산 지역에 대한 전체정확도는 약 84.67%로 나타났으며, 우연의 일치에 의한 효과를 제거한 결과 Kappa 계수는 약 0.81로 나타났다. 따라서 해당 분류 결과는 매우 높은 신뢰도를 매우 높은 신뢰도(0.80~1.00)가 나타나고 있음을 알 수 있었다.

3. 산림 및 토지 이용 변화 추적

대상지의 REDD 사업 잠재량과 타당성은 축소된 산림의 전용 상태를 근거로 제시하게 된다. 줄어든 산림이 어떠한 토지 이용형태로 활용되고 있는지에 대한 정보를 조사하여 산림이 보유하고 있던 탄소를 얼마나 배출하고 흡수하는지에 대한 근거가 반드시 제시되어야 한다. 이는 Table 2에서 정의된 토지이용 분류 체계를 바탕으로 과거와 현재의 토지이용 변화추세 분석을 통해 제시될 수 있다.

1991년 금강산의 산림면적은 약 368,415 ha인 반면, 2010년 약 303,924 ha로 줄어 약 64,490 ha가 훼손된 것으로 나타났다(Table 4 참조). 이는 1991년 산림면적에 대비하여 약 20%의 산림 감소가 발생한 것이며, 지난 20년간 연 평균 3224.5 ha의 산림이 줄어들고 있다는 의미가 된다.

반면 비산림지역은 124,227 ha에서 175,930 ha로 크게 확장되어 금강산 지역의 산림훼손이 심각하게 진행되고 있음을 확인된다. 이러한 금강산 지역의 산림 훼손 추세는 산림의 양적·질적 감소가 일어나고 있음을 나타내는 지표로서 대상지역이 산림 감소의 위협하에 놓여 있다는 증명하는 기준선 자료가 될 수 있다.

또한 2010년 영상을 기준으로 REDD 사업을 통해 보전될 수 있는 산림자원이 충분히 보유하고 있어 금강산 지역의 산림 훼손이 심각하지만 산림의 훼손을 방지하는 REDD 사업의 필요성을 역설적으로 표현할 수 있다. 금강산 지역의 1991~2010년의 산림과 비산림 지역의 변화는 Figure 4~5와 같다.

그러나 산림과 비산림으로 구분된 결과는 참조기간(1991년~2010년) 동안의 산림의 전체적 변화를 추정할 수 있으나, 산림이 어떠한 토지형태로 전용되었는지에 대한 정보와 다른 용도의 토지 이용 형태에서 산림의 회복된 경우에 대한 정보를 구체적으로 추정할 수 없다. 그러므로 이에 대한 정보를 보다 구체적으로 알아보기 위해 각 시기별 토지이용 분류결과를 중첩하여 변화유형에 따라 분석한 결과를 제시하였다(Table 5참

Table 3. The accuracy assessment through error matrix

Google TM \	Settle ments	Cropla nd	Forest land	Grassl and	Waters	Total
Settlements	25	1		1		25
Cropland	1	24	2	7	1	36
Forest land	1	2	27			30
Grassland	3	3	1	22		30
Waters					29	29
Total	30	30	30	30	30	150
Percentage	0.83	0.8	0.9	0.73	0.97

Figure 3. Accuracy assessment points

Figure 4. Forest and non-forest area(1991)

Figure 5. Forest and non-forest area(2010)

Table 4. Deforestation trends in Mt.Geumgang

(ha)	1991 year	2010 year	Variation
Forest	368,415.18	303,924.33	-64,490.85
Non-forest	124,227.61	175,930.72	51,703.11
Waters	5,099.67	17,887.41	12,787.74
Total	497,742.46	497,742.46	

조). Figure 6은 1991년과 2010년의 토지 이용 현황을 나타낸다.

1991년~2010년 기간 동안의 산림에서 타용도로 전용된 토지 이용 형태를 살펴보면 산림 → 농업지역 (75,720.69 ha), 산림 → 수역(2,253.15 ha), 산림 → 시

Figure 6. Land use map in Mt.Geumgang

(a) 1991.08.12 (b) 2010.06.05

Figure 7. Spatial extent of deforestation

(a) Deforestation trends according to elevation

(b) Deforestation trends according to slope

가화 건조지역(437.31 ha), 산림 → 초지 및 나지(19.17 ha)의 순으로 나타났다. 이중 가장 높은 전용을 보인 농업지로의 전용은 Figure 7과 같이 산림 훼손 지역이 대부분 고도 500m 이하, 경사도 20° 이하인 지역에서 나타나고 있는 것으로 볼 때 식량 생산을 위해 산림을 개간하고 이뤄지는 비탈밭 및 다락밭 농업의 과정 (Figure 8)으로 추정된다.

Figure 8. Typical scenes of cross slope farming in North Korea

북한 지역의 산림 훼손의 약 72.43%가 다락밭 등의 농경지 조성으로 인한 결과로 밝힌 바 있는 선행연구 (Lee *et al.*, 2008)와 산림 훼손이 인구가 밀집되어 있는 금강군 금강읍 일대와 동부 해안지대(원산 금강산 고속도로 인근)에 나타나고 있는 것을 종합해 볼 때 금강산 지역의 산림 훼손은 다락밭 조성과 같은 인위적 농업지 조성의 결과와 무관하지 않을 것으로 판단된다.

금강산 지역의 주요 산림 전용 요인 중 하나인 산림 → 수역으로의 변화는 상대적으로 면적 변화는 작지만 전체면적 변화 비율은 현저하게 높은 수치여서 금강산 지역의 주목할 만한 변화 추세로 사료된다. 특히 2010년 영상이 연중 강수량이 비교적 많은 8월임을 감안하더라도 이러한 급격한 증가는 인간의 인위적 활동과 무관하지 않을 것으로 판단된다.

Figure 9는 2010년 영상에서 확인된 대상지역의 대규모 수역을 나타내는 것으로, 이는 대상지역에 1986년 건설을 시작해 2003년 완공된 금강산댐(임남댐)의 저수지로 추정된다. 1991년 영상에서의 대규모 산림지역이 파괴되고 대규모 담수호가 들어서 있는 것이 가시적으로 확인된다.

북한은 2000년경부터 도시경영상과 국토 환경 보호성 주관 하에 ‘산림조성 10개년 계획’을 수립하고 매년 15만ha의 산림 조성 사업을 통해 그 동안의 황폐화된 산림을 복구하고자 노력하고 있다. 금강산지역의 경우 Figure 10과 같이 농경지에 인공적인 식재사업을 벌인 결과 등이 관찰되고 있어 일부지역에서 관찰되고 있는 산림복원 현상은 이러한 재조림 사업의 결과로 판단된다. 산림 회복 현상은 탄소 흡수량 증대를 의미하고 향후 REDD 사업 과정에서 보전될 수 있는 탄소잠재량에 추가되기 때문에 매우 주목할 만한 결과로 판단된다. 그러나 금강산 지역의 산림 회복정도가 산림 훼손에 비해 약 15% 정도에 불과하기 때문에 향후 산림 보호를 위한 노력이 반드시 필요할 것으로 사료된다. 금강산 지역의 산림 전용을 통한 토지 이용 변화 양상은 UN 등에서 지적하고 있는 산림 전용 및 황폐화의 직접적인 원인(농업의 확대, 수목 벌채, 기반시설 확충)

Figure 9. Extent of forested area before and after Mt. Geumgang dam construction

(a) 1991.08.12 (b) 2010.06.05

과 매우 유사하게 나타나고 있다(Markku, K *et al.*, 2007). 특히 상당히 많은 지역이 산림이 농경지로 전용되고 있음은 금강산 지역의 REDD 사업을 다락밭 등의 농경지 전용 방지를 위한 메커니즘으로 활용할 필요가 있음을 시사하게 된다. 농경지의 증가는 지역의 인구 증가와 관련하여 지속적으로 확대될 가능성이 있어 금강산 지역에 대한 산림 훼손 방지와 복구는 농업 지역에 대한 초점이 주를 이루어야 할 것이다.

Figure 10. Reforestation in Mt. Geumgang

(a) Reforestation area(1991~2010)

(b) IKONOS (2002.04.26)

(c) IKONOS (2009.08.15)

Table 5. Land use change matrix

(Unit : ha)

1991 \ 2010	Settlements	Cropland	Forest land	Grassland	Waters	Total (1991)
Settlements	783.45	2,788.92	121.50	111.60	659.70	4,465.17
Cropland	796.41	89,253.25	13,073.22	313.11	8,158.23	111,594.22
Forest land	437.31	75,720.69	289,984.86	19.17	2,253.15	368,415.18
Grassland	322.74	5,144.40	638.28	65.88	1,996.92	8,168.22
Waters	16.20	151.65	106.47	5.94	4,819.41	5,099.67
Total(2010)	2,356.11	173,058.91	303,924.33	515.7	17,887.41	

4. 토론 및 고찰

REDD를 통해 예상되는 이산화탄소 감축량 산출은 과거의 산림 전용 면적에 대한 변화를 파악하고 이를 산림의 탄소 축적량에 적용하여 구해진다. 축적량 계수는 조사의 위계 수준(Tier 1-3)²⁾에 따라 대상국가에 가장 적합한 수준을 선택할 수 있다 (KREI, 2010).

북한의 경우 산림을 구성하는 수종별 탄소의 축적계수에 대한 직접적인 자료가 없기 때문에 금강산 지역에 대한 잠재량은 IPCC 가이드라인에서 제시한 기본값(default) 또는 생태형이 유사한 인접 국가의 값을 이용하는 Tier 1 수준의 배출계수의 적용이 불가피하다.

북한 지역의 산림과 관련하여 참조될 수 있는 탄소축적계수는 Table 6과 같다. 먼저 IPCC 기본값의 경우 온대 대륙성 숲(temperate continental forest)의 생태 공간(ecological zone)에 속하는 북한과 남한에 대하여 약 121 tCO₂/ha를 제시하고 있으며, FAO(Food and Agricultural Organization)에서는 북한 지역의 산림 탄소 축적량을 약 157.34tCO₂/ha로 제시하고 있다. 금강산과 유사한 생태계를 구성하고 있는 강원도의 경우 132.48tCO₂/ha로 보고한 사례가 있으며, 서울 소재의 북한산 국립공원은 149tCO₂/ha로 탄소 축적량을 계상한 사례가 있다. 북한 전역을 169.16tCO₂/ha로 계산한 사례가 있으나 금강산에 적용할 수 있는 가장 적절한 탄소축적량의 선택이 요구된다. IPCC의 경우 이용이 간편하다는 장점은 있으나 정확성이 결여되는 동시에 국제적 신뢰도의 확보가 낮을 수 있다. 또한 북한산의 경우 금강산과 같이 산지의 산림을 고려할 수 있다는 장점이 있으나 지리적 거리상의 이유로 일괄적인 적용에 다소 한계가 있을 것으로 판단된다. 이에 따라 생태형이 가장 유사한 강원도의 사례와 북한지역에 대한 탄소축적량 계수가 금강산 지역에 대한 탄소 흡·배출량을 추정하는 것은 가장 타당한 것으로 판단된다.

Table 6. Reference to estimate C-Stock in Mt.

Geumgang (Unit : tCO ₂ /ha)		
	Reference Site	C-stock
IPCC (2003)	Asia (temperate continental forest)	121
FAO (2005)	North Korea	157.34
Park and Lee (2011)	Gangwon-Do	132.48
Lee (2011)	Mt. Bukhan in Seoul	149
Jo et al (2011)	North Korea	169.16

따라서 이러한 3가지의 탄소축적량 계수를 참조하여 금강산 지역의 산림 및 토지이용 변화에 따른 탄소변화량을 추정할 경우 Table 6과 같다.

이를 살펴보면 1991~2010년 사이에 산림 지역의 타 용 용도로의 전용으로 인해 금강산 지역의 탄소의 배출량은 최소 약 10,389,000 tCO₂(= 78,430ha[총 산림 전용 면적] * 132.48 tCO₂[강원도 참조 북한 지역 단위 단위 1ha 당 탄소 축적량])이며, 최대 13,267,000 tCO₂(=78,430ha[총 산림 전용 면적] * 169.16 tCO₂[Jo et al(2011) 제시 단위 1ha 당 탄소 축적량] 탄소가 배출된 것으로 나타난다. 이러한 금강산 지역의 탄소 배출량을 역사적 기저선 접근법(Baseline approach) 시나리오를 적용하여 금강산 지역의 REDD 사업을 시행에 대한 효과를 추정할 경우 연평균 최소 519,000 tCO₂/year에서 최대 663,000 tCO₂/year의 이산화탄소를 감축할 수 있을 것으로 예상되며, 현재 금강산지역의 전체 탄소 축적량은 최소 38,417,000 tCO₂ ~ 49,053 tCO₂에 달하는 것으로 추정되어 금강산 지역에 대한 REDD의 잠재적 가치성이 분명히 존재함을 알 수 있었다.

산림 및 토지 변화 추세를 평가하는 과정에서 제작된 자료는 현지조사 등의 실제자료와 비교 검증이 필수적이다. 위성영상의 활용은 분명 비용 및 효과성 측면에서 REDD 사업의 타당성과 잠재력을 판단하는 중요한 자료가 되고 있다. 그러나 위성영상을 바탕으로 한 분석은 추정의 과학이기 때문에 부분적인 오차가 발생할 수 있다. 그러므로 대상지 일부에 표본지점을 선정하고 이를 바탕으로 위성영상 분석 자료와의 대조하는 등의 방법을 통해 추가적으로 발생할 수 있는 문제점의 보완이 필요하다. 그러나 북한 지역은 현지조사의 가능성이 매우 적으며 이를 대체할 수 있는 자료(토지피복도, 임상도 등)의 구축여부도 미지수이다. 이러한 문제점은 비단 북한뿐만 아니라 REDD를 시행하려는 다수의 개발도상국에서도 공통적으로 지적되고 있는 것이 현실이다. 따라서 REDD 관련 다양한 이해관계자들이 장기간에 걸쳐 분석 결과의 객관성을 만족시킬 수 있는 방안에 대한 연구가 필요하다.

본 연구에서 활용한 30m 공간해상도의 Landsat TM 영상은 과거 20년 이상의 시계열 자료가 이미 구축되어 있어 REDD를 위한 분석과정에서 시계열적 자료의 한계점을 충분히 극복할 수 있으며 광역적인 지역에 대한 대략값을 추출하는 과정을 만족시킬 수 있다. 그러나 30m 이하의 공간객체는 이를 분류하는 과정에서 제대로 인식할 수 없는 문제점이 발생할 수 있다. 특히 토

2) IPCC 가이드라인에 있는 기본 값 사용시 Tier 1, 국가 고유의 계수 사용시 Tier 2, 국가산림조사 모델 사용시 Tier 3로 구분

Table 7. Carbon stock change between 1991 and 2010 in Mt.Geumgang

(Unit : 1000 tCO₂)

	Carbon Emission (forest → deforestation)				Carbon Storage (forest → forest)
	Settle- ments	Cropland	Grassland	Waters	Forest
area (ha) (a)	437.31	75,720.69	19.17	2,253.15	289,984.86
157.34 tCO ₂ (b) (FAO, 2005)	69	11,914	3	354	45,626
169.16 tCO ₂ (c) (Jo et al, 2011)	73	12,808	3	381	49,053
132.48 tCO ₂ (d) (Park and Lee, 2011)	58	10,031	2	298	38,417
Total	Max : 13,265 (= a * b) Min : 10,389 (= a * d)				Max : 49,053 (= a * b) Min : 38,417 (= a * d)

지 이용 형태와 산림 훼손을 바탕으로 탄소 배출량과 흡수량을 추정하는 과정에서 보다 정량적인 수치로 추정하기 위해서는 토지 이용 형태를 보다 세분화하고 산림이 수종별로 제시되어야 하는 문제점을 해결할 수 없다. 그러므로 향후 이러한 조건을 만족시킬 수 있는 공간 분광 해상도를 가진 고해상도 영상의 활용이 필수적이라 판단된다. Park *et al*(2011)은 이와 관련하여 위성 탑재 SAR와 항공사진 등의 광학영상의 활용을 제시하고 있으며, Lee and Ru(2012)는 LiDAR 자료와 KOMPSAT-2 영상을 활용한 산림바이오매스 산정방법을 제시한 바 있다. 그러나 북한 지역은 이와 같은 자료의 활용이 북한 당국과의 협의가 되지 않고는 현실적으로 불가능하다. 향후에는 다양한 위성 영상의 취득 및 분석 비용, 활용 범위를 고려하여 북한 지역의 여건에 맞는 시스템을 개발하고 이를 활용하는 방안이 연구되어야 할 것이다.

또한 본 연구에서 제시한 금강산 지역의 잠재적 탄소 배출권량은 Tier-1 수준의 방법론을 활용하여 제시한 것이다. Tier-1 수준의 경우 Tier-3 수준의 탄소 인벤토리를 구축하기 어려울 경우 대상지역의 여건을 고려하여 제시할 수 있는 방법이나(Hardcastle and Barid, 2008; Köhl *et al*, 2009), 향후 탄소 인벤토리의 불확실성을 감소시키기 위해서는 Tier-3 수준에 근접한 방법론이 제시되어야 할 것이다. 그러나 아직까지 국내의 경우도 대부분 통계자료에 기초한 Tier-2 수준에 머물고 있는 만큼 금강산 지역에 대해서 Tier-3 수준의 데이터를 구축하는 것은 많은 어려움이 있을 것으로 판단된다. 특히 북한의 NFI(National Forest Inventory)의 구축이 의문시 되고 설사 이미 구축이 되어 있더라도 대외적으로 공개하기 어렵기 때문에 Tier-3 수준 탄소 인벤토리를 구축하는 것에는 상당한 한계가 있을 수 있

다. 그러므로 금강산 지역의 탄소 인벤토리 작성 과정과 이를 바탕으로 향후 금강산 지역을 REDD 사업 대상지로 등록하기 위해서는 무엇보다도 북한 지역의 고유의 NFI 자료의 구성이 선행되어 보다 높은 수준에서의 잠재량 평가과정이 필요할 것이다.

REDD 사업의 시행은 탄소 배출권 확보와 함께 대상 지역에 대한 산림 방지에 따른 경제적 보상이 함께 이루어진다. 이러한 경제적 보상비용은 대상지역 원주민의 이해와 공조를 이끌어 내고 사업의 성패를 좌우하는 중요한 요소로 작용될 뿐만 아니라 REDD 사업의 경제적 타당성을 분석하는데 반드시 필요한 정보로, 일반적으로 REDD 메커니즘 상의 보상비용은 산림이 전용된 현재 토지이용에서 발생하는 탄소 배출량과 수익을 바탕으로 이루어진다. 현재 우리나라를 비롯한 전 세계 주요국에서는 기후변화협약에 의거 국가 온실가스 배출량을 산정 보고하기 위해 IPCC 가이드라인에 따라 에너지, 도로 및 철도 운송, 산업공정 및 제품사용, 산림, 농업, 축산, 기타토지이용, 폐기물 등의 카테고리에 따라 온실가스 배출 인벤토리를 구축 중에 있다. 그러나 북한의 경우 구체적으로 각 카테고리별 온실가스 배출 인벤토리가 구축되어 있지 않고 있어 직접적인 REDD의 기회비용을 추정하는데 어려움이 있다. 이에 따라 지리적으로 인접한 남한의 온실가스 인벤토리를 바탕으로 기회비용을 추정하는 방안이 제시될 수 있으나, 직접적인 범위로 가정하는 것은 많은 한계점이 노출됨으로 이를 보완할 수 있도록 국제 수준의 통합 또는 변환과정을 통해 간접 수준의 정보라도 우선 구축되어야 할 것이다.

5. 결론

본 연구는 금강산 지역을 REDD에 등록하는 과정에

서 객관적 자료 확보에 대한 문제점을 극복하고자 위성 영상을 활용하여 금강산에 대해 REDD 사업 가능성을 평가하는 기초자료를 제시하였다는데 의의가 있다.

과거 1991년~2010년까지의 금강산 지역에 대한 산림 전용 결과를 생태형이 유사한 이에 따른 탄소배출량을 고려한 결과 금강산 지역의 REDD 사업 시행시 최소 519,000 tCO₂/year에서 최대 663,000 tCO₂/year의 이산화탄소를 감축할 수 있을 것으로 추정되어 금강산 지역에 대한 REDD 이행은 그 구체적 논의를 시작하기에 충분할 것으로 판단되었다. 더불어 금강산 지역의 REDD 이행은 탄소배출권에 확보라는 측면과 남북한과의 유연한 정치적 교류의 확대도 고려될 수 있어 이에 대한 논의에 대한 가치는 더욱 클 것으로 판단되었다.

그러나 현재 위성영상만을 활용하여 자료 해석 및 정확도 검증 등 REDD에 개입되는 다양한 요소들에 정확한 추정이 불가하다. 이러한 문제는 근본적으로 북한에 대한 폐쇄성과 남북관계의 경색에 기인하므로 구체적인 북한 지역의 REDD의 논의는 남북한 간의 정치적 협력과 화해 무드 조성이 무엇보다 중요할 것이며, 이를 바탕으로 남북한이 서로 이득이 될 수 있는 기반 조성이 반드시 선행되어야 할 것이다. 또한 북한 지역에 대한 잠재성 평가과정에서 필요한 다양한 활동자료(산림축적통계, 임목축적통계, 국가 고유 계수) 부재하여 그 결과가 사실상 단순 추정 수준에 불과하기 때문에 향후 이를 보완하여 보다 정량적이고 객관적인 수준의 연구가 요구된다.

감사의 글

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

참고문헌

- Achard F., Defries R., Eva H., Hansen M., Mayaux P and Stibig H.J, 2007, Pan-tropical monitoring of deforestation, Environmental Research Letter, 2.
- American Carbon Registry, 2010, Methodology for REDD - avoiding planned deforestation,
- Cha, S.Y., and Park, C.H., 2007, The utilization of google earth images as reference data for the multitemporal land cover classification with MODIS data of North Korea, Korean Journal of Remote Sensing, Vol.23, No. 5, pp. 483-491.
- FAO, 2005, Global forest resource assessment 2005, Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, p. 350.
- 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, Vol. 2, No. 4, pp. 23-45
- GOFC-GOLD, 2009, A source book of methods and procedures for monitoring and reporting anthropogenic greenhouse gas emissions and removals caused by deforestation, gains and losses of carbons stocks in forests remaining forests, and forestation, GOFC-GOLS Project Office, Natural Resources Canada, Canada.
- Hansen, M.C., Roy, D.P., Lindquist, E., Adusei, B., Justice, C.O., and Altstatt, A., 2008, A method for integrating MODIS and Landsat data for systematic monitoring of forest cover and change in the Congo Basin, Remote Sensing of Environment, Vol. 112, No.5, pp. 2495-2513.
- Hardcastle, P.D. and Baird, D, 2008, Capability and cost assessment of the major forest nations to measure and monitor their forest carbon, Report prepared for the Office of Climate Change, Penicuik, UK 2008.
- Harris, N.L., Petrova, S., Stolle, F. and Brown, S., 2008, Identifying optimal areas for REDD intervention: East Kalimantan, Indonesia as a case study, Environmental Research Letter, Vol. 3, No. 3, pp. 035006
- Holmegre, P., Clairs, T and Kasten, T., 2008, Role of satellite remote sensing in REDD, UN-REDD Programme.
- 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, Vol. 113, No. 2, pp. 1430-1442.
- IPCC, 2003, Good practice guidance for land use, land-use change and forestry, Institute for Global Environmental Strategies(IGES) for the IPCC.
- IPCC, 2007, IPCC fourth assessment report, IPCC
- Jenson, J.R., 2005, Introductory digital image processing : a remote sensing perspective, Pearson Prentice Hall, 3rd edition, NJ, p. 526.
- Jo, J.H., Koo, J.C. and Youn, Y.C., 2011, Economic feasibility of REDD project for preventing defor-

- estation in North Korea, *Journal of Korean Forest Society*, Vol.100, No.4, pp. 630-638.
16. Kim, E.S., 2005, A study on improvement of classification accuracy using texture information of high resolution panchromatic image, Master's thesis, Inha University, p. 17.
 17. Köhl, M., Baldauf, T., Plugge, D and Krug, J., 2009, Reduced emissions from deforestation and forest degradation (REDD): a climate change mitigation strategy on a critical track, *Carbon Balance and Management*, Vol. 4, No. 10, pp. 4-10.
 18. KREI, 2010, Understanding of the UNFCCC REDD+ mechanism and prospect of REDD+ negotiations, pp. 9-15.
 19. Ladis, J. R. and Koch G. G, 1997, The measurement of observer agreement for categorical data, *Biometrics*, Vol. 33, No. 1, pp. 159-174
 20. Lee, D.K., Oh, Y.C. and Kim, J.U., 2007, A study on forest changes for A/R CDM in North Korea, *Journal of the Korea Society of Environmental Restoration Technology*, Vol.10, No.10, pp. 97-104.
 21. Lee, H.J. and Ru, J.H., 2012, Application of LiDAR data & high-resolution satellite image for calculate forest biomass, *Journal of the Korea Society for Geospatial Information System*, Vol.20, No.1, pp. 53-63.
 22. Lee, M.B. and Jin, Shinzhu, S.Z., 2008, A study on characteristics of the spatial distribution of the cropland and forest by the cultivation expansion in North Korea, *Journal of the Korean Geomorphological Association*, Vol.15, No.4, pp. 29-37.
 23. Lee, N.Y., 2011, Estimation of carbon storage in three cool-temperate broad-leaved deciduous forests at Bukhansan national park, Korea, *Journal of National Park Research*, Vol. 2, No. 2, pp. 53-57.
 24. Markku, K., Daniel, M., Frances, S., Arild, A., Steven, W and Laura, G., 2007, Do trees grow on money? the implications of deforestation research for policies to promote REDD, Bogor, Indonesia : Center for International Forestry Research(CIFOR).
 25. Naidoo, R. and Iwamura, T. 2007, Global-scale mapping of economics benefits from agricultural lands: Implications for conservation priorities, *Biological Conservation*, Vol. 140, pp. 40-49.
 26. Park, J.W. and Lee, J.S., 2011, Analysis of spatial distribution and estimation of carbon emissions in deforestation using gis and administrative Data, *Journal of Korean Forest Society*, Vol. 100, No. 3, pp. 466-475.
 27. Park, T.J., Lee, W.K., Jung, R.S., Kim, M.I. and Kwon, T.H., 2011, Application of remote sensing technology for developing REDD+ monitoring systems, *Journal of Korean Forest Society*, Vol.100, No.3, pp. 315-326.
 28. Um, D.B. and Um, J.S., 2011, Exploring registration potential to UN-REDD in terms of MRV : A case study of Gaesung city, *Journal of Korean Environmental Law Association*, Vol.33, No.3, pp. 30-63.
 29. UNFCCC, 2001, Report of the conference of the parties on its seventh session, Held at Marrakesh from 20 October to 10 November 2001, FCCC/CP/200/13
 30. UNFP-WCMC, 2007, Reducing emissions from deforestation, a key opportunity for attaining multiple benefits, *UNEP World Conservation Monitoring Centre*, Cambridge, p. 15.
 31. UN-REDD PROGRAMME, 2011, The UN-REDD programme strategy 2011~2015.
 32. Valerio A, Martin H, Matieu H and Christiane S, 2011, Mapping biomass with remote sensing: a comparison of methods for the case study of Uganda, *Carbon Balance and Management*, Vol. 6, No. 1, pp. 1-14.
 33. World bank Group, 2011, Estimating the opportunity costs of REDD+ : A training manual, version 1.3, Washington D.C.
 34. Yoo, S.J., Lee, W.K., Lee, S.H., Kim, E.S. and Lee, J.Y., 2011, Approach for suitable site selection and analysis for reforestation CDM using satellite image and spatial data in North Korea, *Journal of the Korea Society for Geospatial Information System*, Vol.19, No.3, pp. 3-11.