

Challenges in Application of Remote Sensing Techniques for Estimating Forest Carbon Stock

Joowon Park*

Department of Forestry, Kyungpook National University, Daegu 702-701, Republic of Korea

원격탐사 기술의 산림탄소 축적량 추정적용에 있어서의 도전

박주원*

경북대학교임학과

Abstract

The carbon-offset mechanism based on forest management has been recognized as a meaningful tool to sequester carbons already existing in the atmosphere. Thus, with an emphasis on the forest-originated carbon-offset mechanism, the accurate measurement of the carbon stock in forests has become important, as carbon credits should be issued proportionally with forest carbon stocks. Various remote sensing techniques have already been developed for measuring forest carbon stocks. Yet, despite the efficiency of remote sensing techniques, the final accuracy of their carbon stock estimations is disputable. Therefore, minimizing the uncertainty embedded in the application of remote sensing techniques is important to prevent questions over the carbon stock evaluation for issuing carbon credits. Accordingly, this study reviews the overall procedures of carbon stock evaluation-related remote sensing techniques and identifies the problematic technical issues when measuring the carbon stock. The procedures are sub-divided into four stages: the characteristics of the remote sensing sensor, data preparation, data analysis, and evaluation. Depending on the choice of technique, there are many disputable issues in each stage, resulting in quite different results for the final carbon stock evaluation. Thus, the establishment of detailed standards for each stage is urgently needed. From a policy-making perspective, the top priority should be given to establishing a standard sampling technique and enhancing the statistical analysis tools.

Keywords : AR-CDM, forest carbon-offset, REDD, remote sensing, standard, uncertainty.

서 론

1992년 지구정상회담(Earth Summit)에서 지구적 차원의 기후변화가 미칠 심대한 영향에 대한 인류의 자각을 공식화한 이후 기후변화에 대응하기 위한 국제적 노력이 강화되고 있다. 이러한 국제적 노력은 UNFCCC(United Nations Framework Convention on Climate Change, 유엔 기후변화 기본협약)의 체결로 이어졌으며, UNFCCC는 산림 면적과 재적을 증가시켜 대기 중 탄소를 추가적으로 고정시킴으로써 기후변화에 대응하는데 관심을 돌리고 있다. 이에 따라 산림을 통한 탄소배출량 감축 사업인 AR-CDM(Afforestation & Reforestation-Clean Development Mechanism)이 교토 프로토콜(Kyoto Protocol)에서 합의된 청정개발체제(Clean Development Mechanism)의 일부로 편입되어 있으며, 이 사업을 통해 발생한 탄소 크레딧(Carbon Credit) 역시 탄소배출권 거래 대상으로 인정받고 있다. 또한 AR-CDM

보다 시행의 난이도가 개선된 REDD 혹은 REDD+(Policy approaches and positive incentives on issues relating to Reducing Emissions from Deforestation and forest Degradation in developing countries; and the role of conservation, sustainable management of forests and enhancement of forest carbon stocks in developing countries. COP16 agreement)가 UN 차원에서뿐만 아니라, 지역적 및 국가적 차원에서 추진되고 있다(Korea Forest Service, 2012).

AR-CDM이나 REDD/REDD+는 산림의 전용을 막고 적극적인 관리를 함으로써 산림 바이오매스 축적을 증대시켜 대기 중 탄소량이 저감된만큼 시장에서 거래할 수 있는 크레딧을 인센티브로 제공하는 메카니즘이다. 따라서 AR-CDM이나 REDD+를 통해 발행 가능한 산림 크레딧은 시장거래가 가능하기 때문에 산림 관리를 통해 축적된 탄소량을 정확히 측정하고 보고하며 검증하는 MRV

Received: March 15, 2013 / Revised: May 25, 2013 / Accept: June 25, 2013

*Corresponding Author: Joo-Won Park, Tel. 82-53-950-5747, Fax. 82-53-950-6708, Email. joowon@knu.ac.kr

©2012 College of Agricultural and Life Science, Kyungpook National University

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, Provided the Original work is Properly cited.

(Measurement, Reporting and Verification)과정은 AR-CDM이나 REDD+체제의 성공을 위한 핵심적인 부분이 되었다(OECD, 2013). 그런데 산림 관리를 통해 탄소를 축적하는 과정이 일반 농작물과 다르게 보통 수 십 년 이상의 장기간에 걸쳐 발생하며, 사업이 주로 대면적에 걸친 접근이 곤란한 산림 지역에 적용되기 때문에 재적 변화량 측정을 위해 원격탐사방법을 응용하는 것이 각광을 받고 있다(Jensen, 2000). 원격탐사를 이용하는 방법은 주로 위성영상 혹은 항공사진을 통해 수집된 영상자료를 분석하여 시행하는데 대면적에 대하여 주기적으로 저렴한 비용으로 측정할 수 있는 장점을 가지고 있다. 반면 현장에서 직접 개별 입목에 대한 재적 성장량의 정확한 측정 자체도 어려운 상황에서 원격탐사자료를 이용해 추정된 대면적 산림의 재적 증가량의 정확한 측정에는 불확실성과 오차가 발생한다. 이러한 불확실성과 오차는 다양한 원격탐사자료 및 분석기법들에 따라 상이하며, 유사한 자료와 분석기법이라고 할지라도 개발자에서 차이가 있을 수 있다(Malenovsky, et al., 2009). 이러한 불확실성과 오차는 산림의 탄소 고정에 따른 탄소크레딧을 발행하는 제도를 시행하는데 있어서 중대한 장애가 되고 있다. 즉, AR-CDM 혹은 REDD+가 되었던 산림 탄소 축적에 기반한 탄소 배출권 거래제를 시행하는데 있어서 서로 다른 원격탐사방법을 채택함에 따른 탄소축적량 추정 결과의 차이로 인한 분쟁 가능성이 있다는 것이다. 따라서 원격탐사방법을 이용한 탄소축적량에 대한 분쟁을 방지하거나 최소화시키기 위해서는 원격탐사방법의 응용에 있어서 잠재된 불확실성에 대한 이해를 높이고 불확실성을 최소화시킬 기준과 지침을 설정할 필요가 있다.

이를 위해서 IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change)에서 주관한 GOF-C-GOLD (Global Observation of Forest and Land Cover Dynamics)의 '모니터링, 측정 및 보고를 위한 방법과 절차에 관한 자료집(A Sourcebook of Methods and Procedures for Monitoring, Measuring and Reporting, 이하 GOF-C-GOLD 자료집)'이 만들어졌다. 이는 REDD 시행을 통한 탄소 저장과 감축 효과를 계량하는 것과 관련된 방법론적 사안들을 둘러싼 관련 전문가들의 컨센서스(consensus)에 기반한 견해를 제공하고 있다. 컨센서스 기반한 견해는 결국 논쟁요소를 회피한 보수적이며 일반적인 수준의 기준과 지침이 GOF-C-GOLD 자료집의 내용을 이루도록 하였다(UNFCCC, 2013). 일반 정책 입안자들의 입장에서는 보수적인 GOF-C-GOLD 자료집이 충분히 보일 수 있는 반면 실무 기술적인 측면에서는 새로운 논쟁들을 야기시킬 수 있다. 논쟁을 야기할 수 있는 가장 큰 원인은 원격탐사방법을 적용함에 있어서 발생하는 불확실성에 있다. 원격탐사방법에서의 불확실성은 원격탐사자료의 취득에서부터 자료 분석 및 통계기법에 이르는 전체 과정 속의 개별 단계마다 내재되어 있으며 새로운

기술의 지속적인 소개에 따른 새로운 변동성이 유입되면서 더욱 복잡해지고 있다. 따라서 기존 GOF-C-GOLD의 단순화되고 과거 기술에 기반한 지침과 현실 사이에는 불확실성의 통제를 둘러싸고 괴리가 존재할 수 있다.

원격탐사방법에 잠재된 불확실성을 통제하기 위해서는 원격탐사 자료의 속성 선택에서부터 자료 분석 기법과 최종 통계기법에 이르기까지 단계별로 잠재된 불확실성과 오차를 발생시킬 요소에 대한 포괄적이며 전반적인 이해가 필요하다(Schowengerdt, 1997). 그러나 현재까지 산림 축적량 측정과 관련된 원격탐사방법의 응용에 있어서 불확실성에 대한 고찰은 최종 결과물에 대한 연구들이 대부분이며 과정 전반에 관한 불확실성 요인을 파악하여 고찰한 연구는 미흡하다고 할 수 있다.

종합하면, AR-CDM이나 REDD+ 제도의 성공적인 정착을 위해서는 원격탐사기법을 이용한 산림 탄소축적량 추정 방법에서의 불확실성을 제거하거나 최소화하기 위한 기준 혹은 지침을 마련해야 한다. 추정 방법의 불확실성이 제거 혹은 최소화된 지침을 만들기 위해서는 어느 과정에서 어떠한 형태의 불확실성이 유입되며, 이를 해소하기 위한 노력을 투자하는데 있어서 정책적 우선순위를 어디에 두어야 할 지 등에 대한 판단이 필요하다.

연구의 목적 및 방법

이 연구의 목적은 REDD+ 혹은 AR-CDM 과 같은 UNFCCC 틀에서 행해지는 산림 탄소 배출권 거래제에 관한 정책적 의사결정자들을 대상으로, 그들이 원격탐사 기술을 적용한 산림 내 탄소량을 추정하는데 있어서 GOF-C-GOLD 자료집과 같은 현행 지침이 갖는 제한과 불확실성을 이해하도록 하는데 목적을 두고 있다. 또한 원격탐사 기술을 산림 탄소 축적량 추정에 적용할 때 갖는 제한과 불확실성에 대한 이해를 바탕으로 잠재된 불확실성을 최소화시키거나 개선하기 위해 필요한 구체적이고 실제적인 지침의 수준을 판단하거나 어떤 과정에 더 많은 노력을 두어야 하는지 여부에 대한 우선순위 설정 등의 정책적 방향을 제언하는데 목적을 두고 있다. 더 나아가 불확실성으로 인한 산림탄소계정 평가를 둘러싼 논쟁을 최소화하는데 이 연구가 기여할 수 있도록 하고자 한다.

이를 위하여 원격탐사를 이용한 산림 탄소량 추정에 관한 전반적 과정을 원격탐사 자료의 속성, 취득 및 전처리, 분석과 평가로 나누어 각 부문별로 불확실성에 대한 문헌 고찰과 비판적 평가를 실시하고자 한다.

본 론

산림내 탄소축적량을 추정하기 위한 원격탐사방법의 응용에 내재된 불확실성 요소들을 살펴봄에 있어서, 전체 공정 순서를 다음의 세부 단계별로 구분하여 고찰하고자 한다. 첫 단계는 원격탐사 자료별 속성, 둘째는 원격탐사

자료의 취득 및 처리이며 그 다음으로는 분석기법이며, 마지막으로 통계적 평가에 관련하여 논의하고자 한다.

1) 원격탐사 자료의 속성에서의 불확실성

원격탐사 자료의 속성별 차이에 따라서 최종 탄소량 추정 값의 차이가 발생할 수 있다. 원격탐사 자료의 속성은 기본적으로 원격탐사에 사용된 센서와 센서운반체의 성능 및 특징에 따라 결정되며, 주로 세 가지 해상도(resolution)를 참고하여 개별 자료의 속성에 대한 규정을 할 수 있다. 개별 자료의 속성을 규정짓는 세 가지 해상도는 공간적 (spatial), 분광적 (spectral) 및 시간적 (temporal) 해상도들이다.

가) 공간적 해상도 (Spatial Resolution)

공간적 해상도는 지표면상의 표본 거리 혹은 원격탐사 영상을 구성하는 한 개의 픽셀(pixel)의 공간거리에 대응하는 지표상의 공간거리를 의미한다. 다시 말해, 위성 등에서 촬영한 지표면 영상 이미지를 구성하는 최소 단위인 픽셀의 크기가 실제 나타내고 있는 지표면의 공간 크기를 말한다. 픽셀 당 지표 공간의 크기가 작을수록 공간적 해상도가 높다고 할 수 있는데 센서별로 다양하며 주요 센서들의 해상도는 Table 1에 나타나 있다.

Table1. The nationalities and spatial resolutions of satellites

Satellite : Sensor	Nation	Spatial resolution (m)
IKONOS: IKONOS	USA	0.8 to 4
SPOT 5: HRVIR	France	2.5 to 10
CBERS-2: HRCCD	China/Brazil	20 to 260
Landsat 7 : ETM+	USA	15 to 60
NOAA 9-17 : AVHRR	USA	1100
Terra MODIS	USA	250 to 1000

각 픽셀은 해당되는 지표상 공간에 위치한 물체에서 반사된 스펙트럼 정보를 담고 있는데, 지표상의 공간에 다양한 물체가 존재하더라도 그 공간에 해당되는 각 픽셀에는 균일한 하나의 스펙트럼 정보만을 담게 된다. 이렇게 지표상의 다양한 물체의 정보가 섞여서 하나의 정보로 통합되는 과정에서 픽셀 크기보다 작은 물체들에 대한 ‘픽셀 수준 이하 분류 (Sub-pixel classification)’가 곤란하게 되며, 이러한 정보의 혼합은 각각의 픽셀이 갖는 정보값에 의존하는 모든 분류기법에 불확실성을 제공하게 된다. 아울러 픽셀의 공간적 해상도에 따라 각 픽셀에 대응하는 지표상 공간의 크기가 변하기 때문에 하나의 픽셀 안에 혼합되는 정보의 복잡성이나 이질성 등에서 차이가 발생할 수 있고 이는 최종 결과물의 정확도에 영향을 미칠 수 있다.

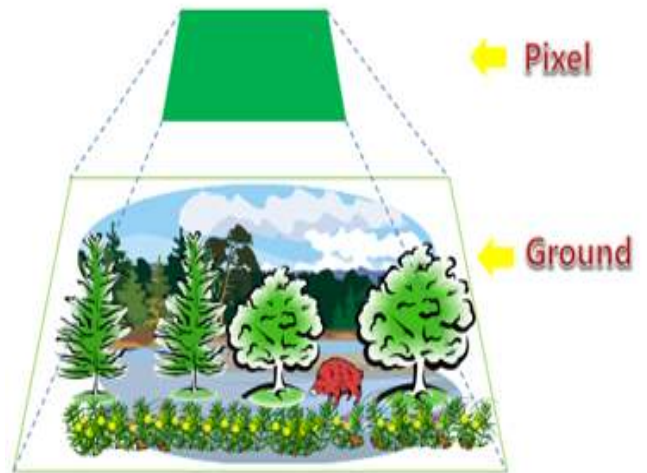


Figure 1. A Concept of the uncertainty about the surface composed of heterogeneous properties at the sub-pixel level.

이제까지 공간적 해상도가 산림 성장 및 축적 관련 특성들에 대한 분석 결과물들의 정확도에 미치는 영향에 관하여는 산림특성들마다 개별적인 연구들로 진행되어 왔다. Kimball, et al.(1999)은 활엽수와 침엽수가 혼효된 지역에서 공간적 해상도가 순생장량(NPP)추정에 매우 강하게 영향을 미치는 것을 보여줬으며, Buheasier, et al.(2003)은 산림 성장의 주요한 지표로서 인식되는 NDVI 값과 공간적 해상도와의 연관성을 보고하였다. Zhao, et al.(2010)은 지표 식생 피복 분류 및 탄소 밀도 측정을 통한 탄소 축적 규모 및 패턴의 추정과 관련된 연구에서 공간적 해상도 1km를 경계로 오류가 발생하는 정도가 크게 달라짐을 보고 하였다. 그러나 특정 자료의 공간적 해상도와 특정 연구 대상지역 산림 특성을 분석한 결과 값들이 일정한 관계성을 갖는다는 점은 나타났으나, 얼마나 어떻게 영향을 미치는지에 대한 일반화는 아직 시기상조며 추가적인 노력이 필요하다 (Zhao, et al., 2010). 일반화에 대한 검증이 없이는 자료의 공간적 해상도가 결과 값에 미치는 영향은 계속 불확실성을 갖고 있다고 할 수 있다.

또 다른 문제로는 공간적 해상도가 산림 특성 분석에 의미 있는 영향을 주며, 고해상도일수록 지표면의 물체를 보다 세밀하게 인식할 수 있기 때문에 정확도를 향상시킨다는 일반적인 결론에 반하는 증거들도 있다는 점이다. Jung et al. (2007)은 공간적 해상도가 산림의 총1차 생산성을 모델링하는데 있어서 유의미한 영향을 주지 않는다고 발표하였다. 또한 Hsieh, et al. (2001)은 공간적 해상도가 높아짐에 따라 ‘경계 효과 (boundary effect)’와 ‘계급 내 변산도 (Within-Class Variability)’에 의해 정확도변동 경향이 일정하지 않게 움직인다고 밝혔다. 다시 말해, 분류를 위한 계급들의 경계가 모호하여 발생하는 경계효과가 감소하고, 한 픽셀 내에 두 개 이상의 계급들의 공분산의 증가로

인해 계급간의 구분이 모호해지는 계급 내 변산도가 증가하는 효과가 서로 상충하여 공간적 해상도의 결과 값들에 대한 영향의 불확실성이 존재한다는 점을 이론적으로 보여줬다.

이상으로 살펴본 바와 같이 공간적 해상도와 관련해서는 크게 두 가지 측면에서의 불확실성을 내포하고 있다. 우선 자료의 정확도에 대한 ‘경계효과’와 ‘계급 내 변산도’와의 상호작용에 대한 규명의 불충분성에서 출발한 불확실성이며, 다른 하나는 해당 자료의 공간적 해상도와 특정 연구지역에 국한된 상관관계의 규모와 패턴을 다른 자료와 연구지역 외에 적용함으로써 발생하는 ‘과도한 일반화의 오류’로 인한 불확실성이다.

나) 스펙트럼 해상도 (Spectral Resolution).

원격탐사의 광학센서들은 탐지된 지표상의 물체에서 반사된 빛의 스펙트럼 범주별 강도 등의 특징을 바탕으로 물체의 성질을 분석하게 된다. 그런데 빛의 스펙트럼의 범주는 파장이 10⁻¹²m의 감마나 X-선으로부터 파장 10m 이상에 이르는 마이크로파나 라디오파에 이르기까지 매우 넓다 (Jensen, 2000). 따라서 원격탐사의 광학센서들, 특히 인공위성에 탑재된 광학센서들은 모든 범주의 스펙트럼 정보를 다 수집할 수 없고 필터 종류에 따라 제한된 범주의 스펙트럼 정보들만 수집할 수 있으며 제한된 범주들 사이에 간격이 벌어져 있을 수 있다. 이렇게 각각의

센서가 탐지할 수 있는 제한된 범주의 스펙트럼 구간은 일반적으로 밴드(band)라고 불리고 각 밴드별로 수집된 스펙트럼 정보는 하나의 값으로 지정되어 각 픽셀에 저장된다.

문제는 센서들마다 수집할 수 있는 밴드들의 수, 밴드의 전자기파장대 (electromagnetic spectrum)상에서의 중심 파장의 위치나 밴드 폭 등이 각각 다르고 이러한 차이를 스펙트럼 해상도의 차이라고 한다 (Figure 2). 이러한 스펙트럼 해상도의 차이는 결국 센서의 성능과 센서들을 통해 수집된 자료들의 특성에 차이를 야기하고 더 나아가 같은 대상이라도 스펙트럼 특성상의 차이가 있는 자료에 의존한 각각의 분석 결과 또한 다르게 나타날 수 있다.

스펙트럼 밴드별 차이로 인한 영향에 대하여 Teillet & Ren (2008)가 분석하였다. 이 연구에서는 CBERS-2 HRCC, IRS-P6, SPOT-5, 및 Landsat에 장착된 센서들별 스펙트럼 밴드 해상도 차이가 식생지수에 미치는 영향에 대하여 고찰하였다. 그 결과 각 위성별 센서들로부터 수집된 영상 자료를 이용하여 생성된 식생지수들은 계산에 사용된 추가보정이 불가능한 스펙트럼 원자료 값들의 차이만큼 결과 값에서 차이를 보이고 있다는 점이 밝혀졌다. 아울러 스펙트럼 밴드의 차이가 식생지수값에 영향을 주는 이유는 대기 투과성(transmittance)이 스펙트럼의 파장에 따라 좌우되는 점이 가장 큰 요인이라고 추론하였다. 이 연구 결과는 다양한 위성 탑재 센서들의 스펙트럼 해상도의

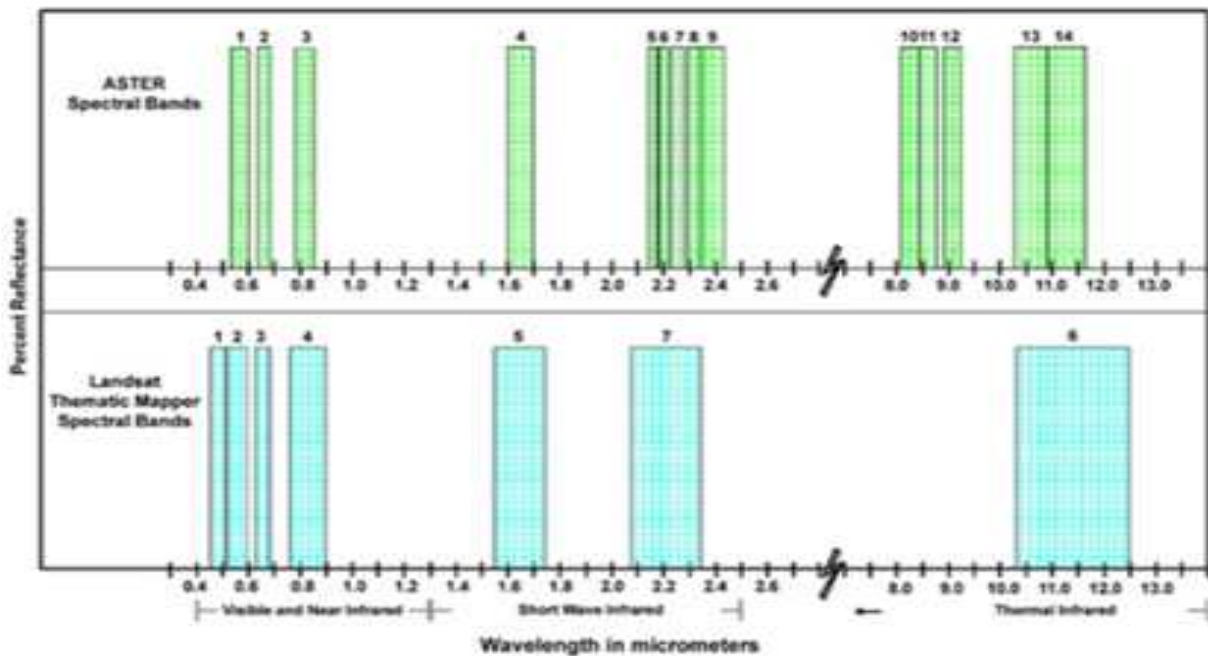


Figure 2. Spectral resolution differences between two satellite sensors; ASTER vs.

Landsat (Image courtesy; Satellite imaging corporation)

차이가 식생지수를 포함한 원격탐사 영상자료를 활용한 다양한 분석결과들에 영향을 줄 수 있다는 점을 의미한다.

다) 시간적 해상도 (Temporal resolution)

인공위성은 위성의 궤도 공전주기와 지구의 자전주기가 일치하여 고정된 지점에 위치한 정지위성도 있으나 대개의 위성은 지구 주변을 자기 궤도를 따라 일정한 주기로 돌고 있다. 이로 인해 인공위성이 지표상 대상을 측정한 후 동일한 대상을 다시 방문하는 시간이 위성마다 다르며, 동일한 기간 동안 수집할 수 있는 위성영상자료의 수가 달라진다 (Table 2). 이러한 방문주기 혹은 단위 시간 당 수집 가능한 자료 면의 수에 따라 시간적 해상도가 달라진다. 아울러 인공위성 수명 차이에 따른 수집된 자료의 기간 범주 역시 또 다른 측면의 시간적 해상도를 의미한다 (Jensen, 2000).

Table 2. Temporal resolutions of the Landsatseries

Landsat	Data collectionPeriod	Orbital period	Note
1 MSS	1972. 7. 23. ~ 1978. 1. 6.	18 days	
2 MSS	1975. 1. 22. ~ 1983. 7. 27.	18 days	
3 MSS	1978. 3. 5. ~ 1983. 9. 7.	18 days	
4 TM MSS	1982. 7. 16. ~ 1993. 12. 14.	16 days	
5 TM MSS	1984. 3. 1. ~ current	16 days	Severe problems since 2011.
6 ETM	1993. 10. 5.		Launch failure.
7 ETM +	1999. 4. 15. ~ current	16 days	Faulty SLC

시간적 해상도의 차이는 위성영상 촬영 시간을 결정하게 된다. 촬영 시간의 차이가 발생한다면 같은 대상일지라도 빛의 입사각의 차이에 따라 반사되어지는 빛의 스펙트럼 속성이 달라진다는 사실에 따라 자료의 속성 값에 영향을 줄 수 있다는 점을 고려를 해야 할 필요가 있다. 실제로 시간적 해상도가 낮은 (18일) 자료로 주로 구성된 Landsat circa 1990 자료와 시간적 해상도가 상대적으로 높은 (16일) 자료로 구성된 Landsat circa 2000의 NDVI 평균값과 분산 값을 비교하였을 때 낮은 시간적 해상도의 circa 1990 자료가 시간적 해상도가 높은 circa 2000 자료에 비하여 유의미하게 높은 분산 값을 보였다 (Tatem et al., 2006).

반면 자료수집기간에 따른 차이에 대해서는 US NASA (미국 국가항공우주연구소)에서 Landsat ETM 7+ 이후 임무 수행할 인공위성 자료와 이전 자료들에 대하여 시간적 연속성을 확보하기 위한 기준을 제시하였으나 여전히 높은 불확실성을 나타내고 있다고 보고하고 있다 (Irons, 2000).

라) 세 가지 해상도들의 상호 작용

이 세 가지 해상도들은 상호 간에 상쇄작용을 하기도 한다. Pierce (1997)은 공간적 해상도가 높아지면 스펙트럼 해상도와 시간적 해상도가 낮아지는 경향이 있다고 밝혔다. 이러한 상쇄관계가 발생하는 것은 공간적 해상도가 높아지면 각 픽셀별로 배정되는 지표면에서 반사된 반사율 (reflectance) 에너지의 크기가 상대적으로 작아지기 때문에 스펙트럼 해상도도 상대적으로 작아지면서 발생하는 것이 주요한 이유 중 하나이다. 또 공간적 해상도를 높이기 위해서는 일반적으로 좁은 영상 촬영 폭 (swath-width)의 대상에 대해 상대적으로 장기간의 렌즈 노출 시간이 필요함에 따라 공전주기가 길어짐으로 시간적 해상도도 낮아진다고 할 수 있다 (Aardt, et al., 2010; Price, 1997). 이러한 원격탐사 자료의 속성, 특히 세 가지 해상도의 선택에 따른 불확실성이 개입될 여지가 큰 반면 GOFC-GOLD는 '정확도 80~95% 사이를 갖는 중해상도 영상이미지

(mid-resolution imagery)' 그리고 '1-6ha사이의 지도제작 단위 (mapping unit)'의 사용을 권장하는 정도로 매우 단순한 지침을 제시하고 있다. 따라서 이에 대한 보다 세부적이고 자세한 기준을 포함하는 보완책이 필요하다고 할 수 있다.

2) 원격탐사 자료 취득과정 및 전처리에서의 불확실성

가) 원격탐사센서의 임의동작이나 오류로 인한 불확실성

서로 다른 원격탐사센서들의 기기적 특성상 차이에 따른 자료의 불확실성 외에도 동일한 원격탐사센서 기기를 사용하더라도 측정 시점 등의 측정 조건상의 차이에 따라 의도하지 않은 오류와 변동성이 개입될 수 있다. 의도하지 않은 오류나 변동성의 요인은 크게 두 가지로 나눌 수 있는데 하나는 센서를 탑재한 플랫폼이 바람 혹은 난기류로 인한 임의동작과 센서의 기계적 오류발생이다 (Toutin, 2004). 임의동작은 대개 항공측량에서 발생하며, 기계적 오류발생은 주로 인공위성 기반 원격탐사에서 문제가 되고 있다.

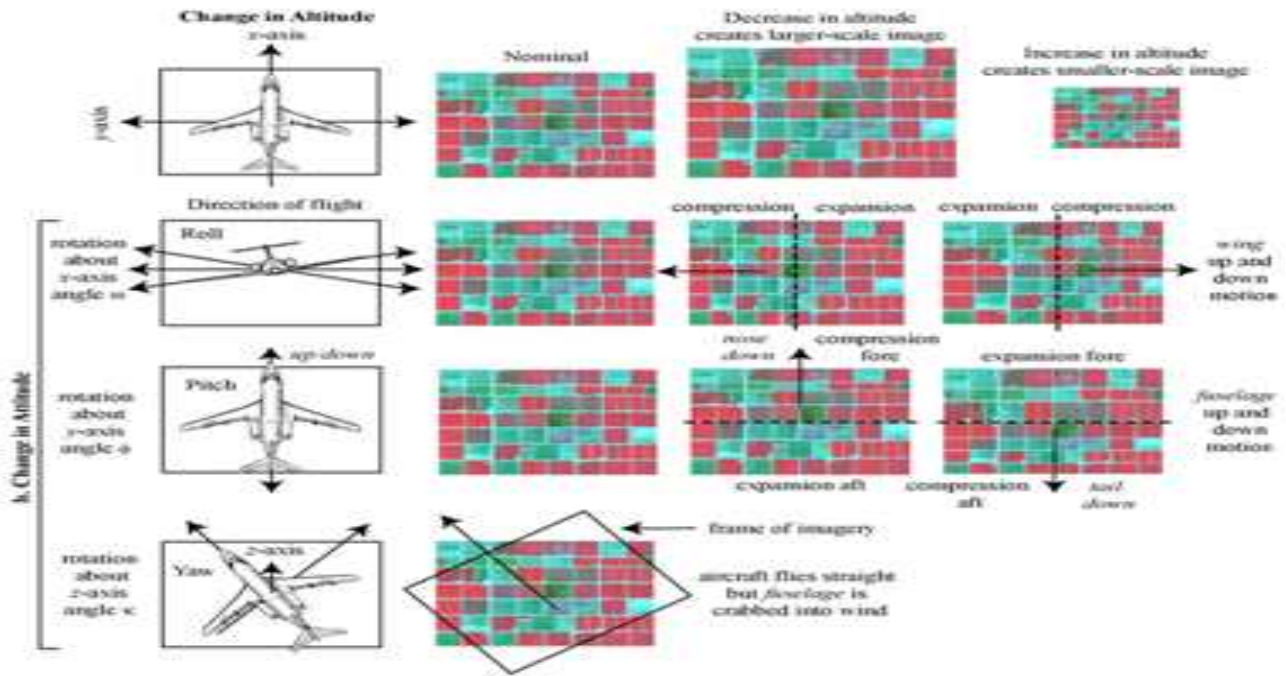


Figure 3. Geometric modification of Remotely sensed data caused by changes in platform altitude and attitude (Image courtesy; Toutin, 2004).

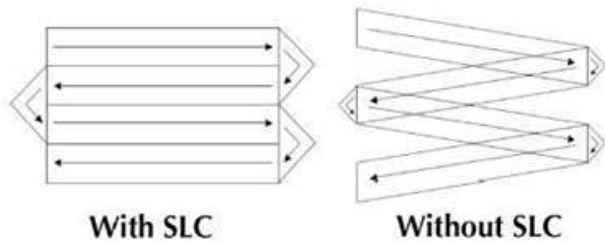


Figure 4. Landsat SLC (scan line corrector)-off case.

In optical mirror line scanners at Landsat TM, the mirror motion may have nonlinear characteristic without SLC.

Figure 3은 난기류나 바람으로 인한 흔들림으로 인해 항공기 플랫폼에 장착된 원격탐사 센서가 횡축, 종축 및 직교축으로 임의적으로 움직였을 때 발생할 수 있는 영상자료의 왜곡현상들에 대하여 나타내고 있다. 임의동작으로 인해 영상 이미지 픽셀이 정상보다 더 압축되어지거나 확장되어져서 수집되어지며, 경우에 따라서는 원래 위치에서 이탈하여 촬영하게 된다. 이러한 임의동작은 발생순간과 임의동작의 강도에 대한 파악이 힘들지만, 일단 파악되면 어느 정도의 보정이 가능하다. 반면 기기 오류, 특히 인공위성에 탑재된 센서에서 발생한 오류는 수리가 매우 곤란하다. 기기오류로 인한 오차에 대한 보정은 일부 가능하나 최초 설계된 성능에 따라 수집된 자료와의 불일치를 완전

히 제거하는 것은 곤란한 것으로 알려졌다. Figure 4는 Landsat ETM 7+에서 발생한 SLC 오류로 인한 문제를 개념화시켜 보여주고 있다. SLC는 센서가 지표면을 스캔할 때 렌즈 움직임이 일정하게 하는 기능을 갖는데, 이 기능이 오류가 일으킴에 따라 스캔 대상이 되는 지표가 중첩 혹은 이격되어 자료의 정확도 등에 많은 오류가 발생하고 있다.

나) 정합(Registration) 과정에서의 오류로 인한 불확실성

정합과정은 원격탐사자료를 분석을 실시하기 전에 원격탐사 영상자료들 간혹은 원격탐사 영상자료와 지표면 대상 간 공간적 위치를 정렬시키는 전처리 과정을 의미한다 (Schowengerdt, 1997). 정합과정은 자료 분석을 위한 준비 단계로서 매우 중요하다. 만일 정합이 잘 이루어지지 않으면 자료의 정렬이 흐트러지게 되고 서로 다른 공간좌표상의 픽셀 혹은 지표면 물체들을 같은 공간상 존재로 간주하고 분석하게 됨에 따라 분석의 정확성이 낮아지게 된다. 특히 원격탐사 자료와 지표면에서의 위치 기준점 (Ground Control Point)를 일렬로 배치시키는 과정이 자료와 지표면 실제 대상과의 일치성을 확보하는데 핵심적인 과정임과 동시에 불일치함이 발생할 가능성이 높은 과정이다. Patterson & Williams (2002)에 따르면 원격탐사 영상자료 대 지표면 대상간 정합오차를 픽셀 1개와 2개, 오차 발생확

를을 5~50%로 주어진 경우에 대해 각각 시뮬레이션한 결과 산림면적 추정 값들의 무정합오차 대비 분산비율이 4%에서 434% 사이로 나타나는 것을 보고하였다. 현실적으로 정합오차는 완전히 제거하기가 힘들다. 일반적으로 1% 수준의 오차는 인정하고 있는데, 이로 인한 자료분석 결과에 대한 영향은 파악하기가 힘든 상황이다. 반면 GOFC-GOLD 자료집에서는 '1 개 픽셀 미만의 정합 오차 수준이면 받아들일 수 있는 수준'으로만 단순히 제시하고 있다. 즉, 정합오차 수준에 따라 보정해야 할 산림면적 혹은 탄소량에 대한 기준이나 지침은 제시하지 않고 있다. 실제로는 오차가 있음에도 불구하고 그에 대한 보정을 하지 않는다는 점은 추후에 논쟁의 여지가 있다고 할 수 있다.

다) 보정 (Correction) 알고리즘에 따른 불확실성

보정은 센서가 정상으로 작동하더라도 탐사시 환경조건에 따라 변이가 발생하는 것을 수정해 주는 작업을 말한다. 어떠한 원격탐사 센서들도 보정 없이는 지표면 정보에 대한 참값을 제공할 수가 없다 (Binnenkade, 1993). 보정에는 여러 종류가 있으나 이 연구에서는 대기보정 및 지형보정에 한정하여 기술하고자 한다.

i) 대기보정 (Atmospheric correction)

대기보정은 빛이 대기 중을 진행함에 따라 발생할 수 있는 빛의 산란 (scattering), 반사 (reflection), 흡수 (absorption) 및 복사 (radiance) 현상들로 인해 센서에 탐지된 빛의 특성이 왜곡되는 것을 대기가 없는 공간을 진행했을 경우의 탐지될 값으로 수정해 주는 작업이다.

문제는 대기 진행 중의 빛의 왜곡을 야기하는 경우의 수가 너무 많고, 이에 따라 이를 보정해 주는 알고리즘들의 수도 많다는 점이다. 다시 말해, 대기 중의 습도, 구름의 량, 입사각 및 반사각과 지표면의 상태에 따른 상이한 복사 등 많은 요인들이 센서가 탐지하는 빛의 값에 영향을 주고 이를 보정할 수 있는 전일적인 알고리즘이 아직 존재하고 있지 않다.

그로 인해, 각기 다른 대기보정 알고리즘들이 사용되고 있으며 각 알고리즘별로 생성된 결과물에 차이가 발생하고 있다. 동일한 Landsat ETM 7+ 자료를 활용하여 산림 재적을 추정하는데 있어서 세 개의 다른 대기보정 기법 -6S, SMAC, DOS- 을 사용하여 그 결과값들을 비교하였다. 그 결과 R^2 값은 0.46에서 0.62 사이로 나타나며, 표본오차의 범주는 57에서 77 m^3/ha 로 나타났다 (Norjamäkl and Tokola, 2007). 이 결과에서 보듯이 대기 보정에 사용되는 알고리즘 종류에 따라 산림면적의 추정이나 탄소량 추정 값이 크게 달라질 수 있다.

ii) 지형보정 (Topographic correction)

지형보정은 동일한 태양광이 지표면에 투사되더라도 비균질적 지표면 형태로 인하여 태양조도(illumination)의 차이가 발생하고 결국 위성에서 측정되는 반사율 값 (reflectance value)에 영향을 주게 되는 것을 보완하는 전처리 과정이다 (Figure 5). 지형보정이 없는 경우 Figure 5의 A면과 같이 그늘진 경우는 시간에 따라 정해진 평면으로의 태양광 입·반사각을 기준으로 계산된 값보다 낮은 반사율 값을 나타내는 반면 태양광을 향한 경사면인 Figure 5의 B면은 입·반사각이 커짐에 따라 반사율 값이 기대치보다 높게 나타난다. 따라서 이러한 지형에 따른 반사율 값의 왜곡을 교정하기 위한 전처리 과정이 자료분석 이전에 필요하다. 이러한 지형보정을 위해서 다수의 연구가 진행되었다.

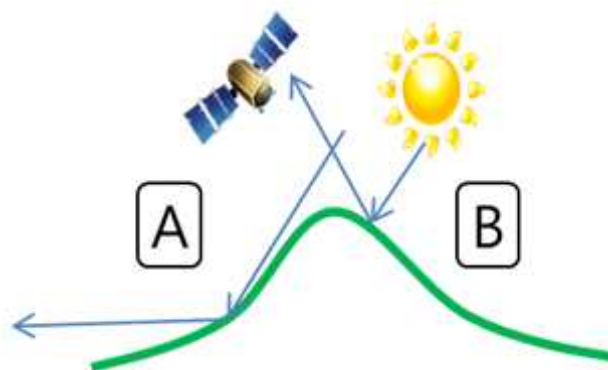


Figure 5. Topographic effects on reflectance values.

Shade areas show less than expected reflectance, whereas in sunny area the effect is the opposite.

Riaño et al. (2003)은 세 가지 지형보정 기법들인 Lambertian 방법을 기반으로 조도 조건을 모델링한 IL 기법, non-Lambertian 방법 기반의 Minnaert 기법과 C-correction 기법을 대상으로 Landsat 위성자료를 이용한 식생유형 분류 결과에서의 차이를 비교하였다. 그 결과 C-correction이 가장 우수한 결과를 나타내는 반면 Minnaert 기법이 가장 낮은 보정 효과를 나타낸 것으로 보고하였다.

그러나 Zhang et al., (2011)은 6개의 지형보정 기법들(Cosine correction, Minnaert correction, C-correction, Sun-canopy-sensor correction, two-stage topographic normalization, and slope matching technique)을 대상으로 산악지형 산림식생 분류 결과물의 정확도를 비교하였는데 유의미하게 그늘 효과 (shadow-effect.)를 보정한 기법이 없다고 밝혔다. 이러한 기법들 간의 정확도 차이와 그 보정 결과에 대한 상충되는 평가는 지형보정기법 선택에서 결과물의 정확도에 불확실성이 존재함을 의미하고 있다고 할 수 있다.

3) 자료 분석에서의 불확실성

원격탐사 자료의 취득과 전처리 과정에서 불확실성을 완

전히 제거하였다고 가정하더라도 그 자료를 활용하여 산림의 면적과 재적을 추정하는 분석과정에서 새로운 불확실성이 개입할 수가 있다. 그럼에도 분석과정에 대하여 GOF-GOLD는 ‘감독분류 (supervised classification)을 무감독분류 (unsupervised classification) 방법에 비해 우선순위를 준다’라는 권고안(recommendations) 정도의 가이드라인을 제시하고 있다. 감독과 무감독 분류를 간단히 비교하면, 감독분류는 분류 등급을 설정하는데 있어서 현장 관측 정보에 대한 입력이 있는 반면 무감독분류는 영상이미지의 반사 값의 특성만을 의존하여 자동적으로 분류하는 체계이다 (Cantry, 2010).

따라서 이 권고안은 다양하고 광범위한 영상이미지 분류 방법 체계에 비해 너무 단순하며 개략적이고, 높은 정도의 모호성을 가지고 있다. 이는 원격탐사 자료 분석에서 제기되는 수많은 기술적 선택과 그로 인한 차이에 대한 고려가 미흡하다(Tso and Mather, 2001).

여러 가지 고려가 필요하겠지만, 여기서는 토양 피복 분류를 통해 탄소량을 추정하는 방법들 가운데 기법 선택에 따른 불확실성에 대해서만 기술하고자 한다. 그 동안 원격탐사를 이용하여 토지이용 및 토지피복(Land Use Land Cover, 이하 LULC)분류를 실시함으로써 산림면적을 추정하거나 산림내 총 목재 재적을 추정하여 탄소량을 파악하고자 하는 지속적인 관심과 노력이 있었으며, 다수의 분석 알고리즘들이 개발되어져 왔다. 그런데 분석 알고리즘별로 서로 다른 결과 값들이 나타나고 있는 것이 산림 탄소량을 추정하는데 불확실성을 조성하고 있다(Tchuente et al., 2011).

Quaife et al. (2010)은 동일한 MODIS 자료를 사용한 서로

다른 LULC 분류 방법들을 통해 추정된 GPP 값을 비교하였다. 그 결과 GPP 추정치들 사이에 -15.8% ~ 8.8% 차이를 나타내고 있었다. 이 연구는 또한 부정확 혹은 불확실한 토지 피복 분류 등급을 배정하거나 위성영상자료를 통해서 구분하기 힘든 식생유형들로 인해 탄소 계정 계산시 불확실성이 내포된다고 밝히고 있다.

Ruelland et al. (2011)은 3 종류의 LULC 분류 접근법들, 즉 픽셀 기반 감독 분류 방법 (pixel-based supervised classification method), 수작업에 의한 분류 방법 (vector grid-based on screen interpretation) 및 객체 지향 분류 방법 (object-oriented classification method)의 분류 수행 능력을 비교하였다. 비교결과 수작업에 의한 분류의 Kappa 값은 2003년 SPOT 원자료를 이용하였을 때 99.0으로 가장 높았다. 픽셀 기반 감독 분류방법은 SPOT 자료를 기반으로 한 Principal Components Analysis, Normalized Difference Vegetation Index 및 Brightness Index와 같은 복합밴드를 사용하여 분류하였을 때 97.3의 최고 값을 보였으며, 객체지향 분류방법도 마찬가지로 복합밴드를 사용하여 Kappa 최고값 97.6을 얻었다.

이상으로 알 수 있는 것은 동일한 자료를 사용하여도 분석 기법에 차이가 있거나 동일한 분석기법 임에도 입력 패러미터가 달라질 경우 결과 값에 차이가 나타난다는 점이다. 따라서 추후 탄소량 추정에 관한 분석기법에 지침을 작성할 때는 어떠한 분석기법을 사용할 것인가 뿐만 아니라 그 분석기법을 어떤 조건 하에서 혹은 어떤 패러미터를 입력할 것인가에 대해서도 고려해야 할 필요가 있다.

4) 정확도 평가 기법 (Accuracy assessment scheme)

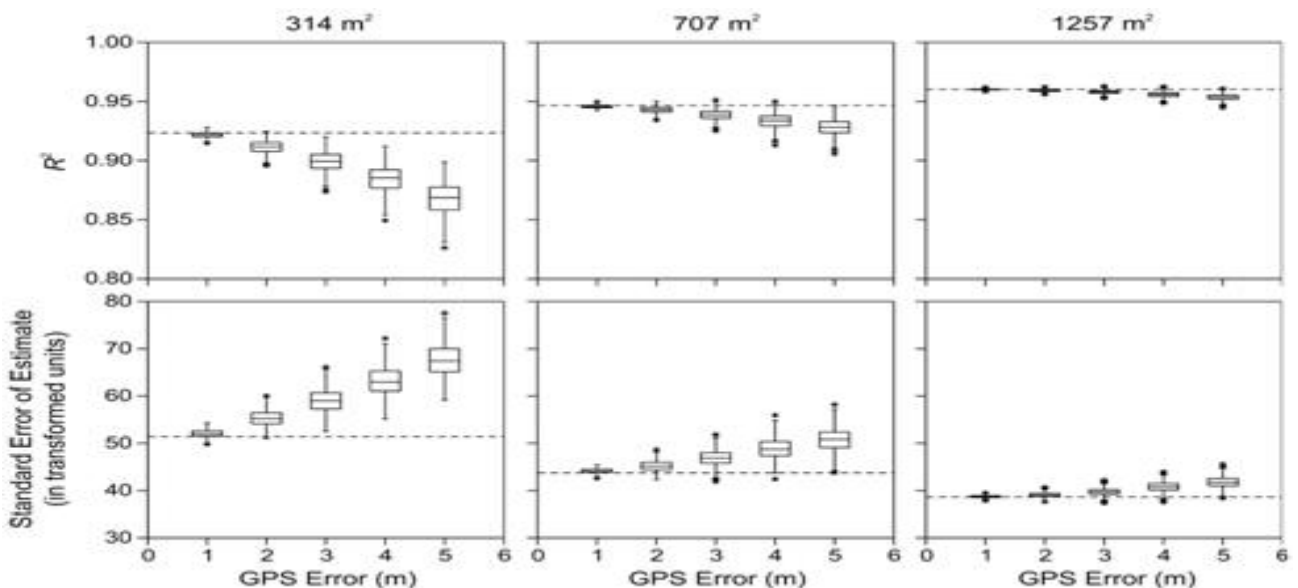


Figure 6. Sample plot size and GPS-error effects on the uncertainty in forest stand volume estimation (Frazer et al., 2011).

원격탐사를 이용한 산림탄소계정을 추정하는 공정에서 가장 마지막 단계는 원격탐사자료를 분석하여 생성한 결과물 혹은 산림 탄소량의 공간적 분포지도의 정확도를 평가하는 것이다. 일반적으로 정확도 평가는 대면적 산림 속성에 관한 분석인 관계로 표본추출법을 통한 통계적 분석에 의존하고 있다. 그런데 원격탐사 연구에서 주로 사용되는 대표적인 두 표본추출기법인 계통추출법(systematic sampling)과 층화추출법(stratified sampling) 가운데 어느 방법을 사용하는 것이 더 정확한 것인가에 대한 논쟁이 있다. Cochran(1946)은 상관도표(correlogram)가 위로 오목하면계통추출법이 층화추출법보다 일반적으로 선호된다고 하였다. 반면, Broich, et al. (2009)은 산림황폐화 면적 추정량에 관한 연구에서 층화추출법, 계통추출법 및 단순임의추출법의 순으로 선호된다고 평가하였다. 통계 기법들 사이의 정확도 불일치뿐만 아니라 동일 기법을 사용하여도 표본지의 크기 및 GPS 측정 오차 효과가 산림 임분 재적 추정결과 값에 불확실성을 인입시킨다(Figure 6).

정확도 평가에 대하여 GOFC-GOLD 가이드라인은전면적 조사(wall-to-wall) 기법과 표본조사 기법(sampling scheme) 모두를 인정하고 임의로 선택할 수 있도록 하고 있다(GOFC-GOLD). 그러나 이 두 평가기법 사이에 차이점을 두고 논란이 있다. Tucker and Townshend (2000)은 FAO의 10% 층화표본추출법의 신뢰성에 대한 문제제기와 함께 전면적 조사 기법을 통한 결과물에 대한 품질평가를 실시해야 한다고 주장하였다. 반대로 Czaplewski, R. L. (2003)는 대규모 표본을 수집한다면 표본조사 기법도 신뢰할 수 있다고 논증하였다. 반면 Stehman, S. V. (2005 a, b)은 현지 측정에서의 오차가 토지피복 변화를 분류하는데 오차를 일으킬 수 있으며, 이는 표본추출이나 전면적 조사 기법에서 모두 발생 가능하다고 언급하였다.

표본추출 문제 외에도 결과물인 주제 지도(thematic map)의 정확도를 평가하는 통계적 방법에도 제한이 있다. 일반적으로 원격탐사 부문에서 사용하는 주제지도가 지표면을 올바르게 반영하는지 평가하는 통계기법은 오차행렬 기반 Kappa(Error matrix-based Kappa)를 이용하는 것이다. 이 오차행렬 기반 Kappa는 각 행과 열의 주변합(marginal sum)에 의해 영향을 받는다(Feinstein & Cicchatti, 1990; Sargeant & Martin, 1998). 따라서 관측 값이 큰 주제 등급(thematic class)의 지도와 현장 관측 값들 사이의 일치 정도에 의해 전체 주제 지도의 정확도가 좌우되는 단점을 가지고 있다. 보다 근본적인 제한점으로는 Kappa의 크기는 개별 주제 지도와 현장 사이의 일치 정도를 평가하는데 국한하여만 해석가능하며 서로 다른 지도들 사이의 비교에는 적합하지 않다.

표본추출 방법의 편향 문제와 서로 다른 지도들 사이의 통계적 비교의 제약은 원격탐사자료를 이용한 산림 탄소

축적량을 추정에서의 불확실성을 통제하는데 가장 핵심적인 장애가 되고 있다. 만일 표본추출과 통계적 기법을 포함한 최종 결과물들의 정확도 평가의 방법론에 대한 합의를 도출하고 불확실성을 통제할 수 있다면, 다른 과정에서 발생하는 방법론 선택에서의 불확실성들에 대해서도 평가할 수 있는 절대적 기준과 지침을 설정하는데 기여할 수 있다. 하지만 현재는 결과물들의 정확도 평가 방법 자체가 불확실성을 내포함으로써 모든 결과물들의 정확도는 상대적으로만 평가받을 수 있고 이는 순환적인 불확실성의 생성으로 이어지고 있다.

토론 및 결론

이 연구를 통해서 원격탐사 기술을 산림 탄소량 추정에 적용하는데 있어서 원격탐사 자료의 속성선택과 원격탐사 자료의 전처리, 분석 및 평가라는 추정을 위한 처리 과정들을 거쳐야 하며, 그 과정들마다 기술적 사항들이 복잡다양하게 존재하고 있음을 보였다. 또한 원격탐사자료와 처리 과정들마다 기술적 선택에 따라 산림 탄소량 추정 값에 영향을 미칠 수 있는 불확실성이 개입하게 됨을 확인할 수 있었다.

원격탐사자료 속성의 선택은 원격탐사 센서의 기계적 성능에 의해 결정되는 것으로서 센서의 공간적, 스펙트럼 및 시간적 해상도에 종합적 비교를 통해 어떠한 자료를 선택할 것인가에 대한 연구가 요구된다. 특히 센서는 그 비교 대상이 제한적이며, 현황 파악이 비교적 명료하여 비교가 상대적으로 용이하다. 자료의 전처리에 대한 선택은 공학적이거나 어느 정도 주어진 기술적 지침이 작성되어져 있다고 할 수 있다. 그러함에도 불구하고 전처리 기법에 따른 불확실성에 대한 계량과 지침에 대한 보완이 요구된다. 반면 원격탐사 자료를 이용한 산림탄소축적량 분석 과정에는 기술적 접근법에는 현황을 파악하기 힘들 정도로 많은 다양성이 존재하며 어떠한 기법을 사용할 것인지에 대한 뚜렷한 방향성이나 합의가 제시되어있지 않다. 따라서 분석 기법의 선택에 따른 산림탄소량 추정의 변이성이 가장 높다고 할 수 있다. 마지막으로 정확도 평가에도 표본추출방법, 통계기법 등의 선택으로 인한 불확실성과 주제지도의 분류 정확도를 평가하는데 일반적으로 사용되는 오차행렬 기반 Kappa가 갖는 문제점으로 인해 나타날 수 있는 편향 등에 대한 고려가 필요하다.

이상으로 언급한 바와 같이 기술적 선택과 조건에 따라 불확실성이 개입될 여지가 다양한 반면 현행 IPCC 지침인 GOFC-GOLD 자료집은 상당히 보수적인 수준에서 지침들이 작성되어져서 세부적이고 자세한 기술적 선택과 관련된 지침을 주지 못하고 있다. 따라서 GOFC-GOLD 자료집은 원격탐사 기술 적용을 통한 산림 탄소량 추정 과정에 내포된 불확실성을 통제하는데 충분한 지침을 주고 있지 못하며, 과정마다 적용해야할 구체적 지침 내용이 심각하

게 결여되어져 있다고 할 수 있다.

결론적으로 GOF-C-GOLD 지침과 기준이 갖는 불확실성을 제거 혹은 완화시키기 위해서는 원격탐사를 이용한 산림 탄소축적을 추정하는 작업공정마다 세부적이고 자세한 지침과 기준을 제시하는 노력이 필요하다. 이를 위해서는 원격탐사자료의 속성으로부터 시작해서 최종 정확도 평가 방법에 이르기까지 각 과정에 대해 불확실성을 줄이기 위한 지침 제공 노력을 집중할 세부 작업 혹은 기술 대상을 확인하고, 확정하여 목록화 하는 것이 필수적이다. 또한 제한된 자원을 합리적으로 배정하기 위하여서 목록화를 실시한 후 필요성을 바탕으로 우선순위를 부여할 필요가 있다. 우선순위 결정시 정확도 평가, 특히 표본추출 및 오차행렬 기반 통계기법을 개선하는 추가적 연구에 가장 시급성을 두어야 한다고 판단된다. 아울러 불확실성 개선 대상 과정에 대한 목록화와 더불어 실제 불확실성이 어느 정도인지 계량평가 하는 연구가 필요하다고 판단된다. 이러한 연구를 추진함과 동시에 불확실성을 감축한 기술적으로 보다 세부적인 원격탐사 기반 모니터링 및 평가 기법들을 도출하기 위한 새로운 시도를 정책적으로 추진해야 한다고 사료된다.

인용문헌

- Aardt JAN, Lck-Vogel M, Lck W, Althausen JD (2010) Remote sensing systems for operational and research use. In: Manual of Geospatial Science and Technology 2nd ed, eds Bossler JD (CRC Press, Boca Raton, FL.), pp.319-362.
- Binnenkade P(1993) Fundamental of Remote Sensing and Airphoto Interpretation, 5th ed. Maxwell Macmillan Canada Inc., Don Mills, Ontario.
- Broich M, Hansen M, Stolle F, Potapov P, Margono BA, Adusei B (2011) Remotely sensed forest cover loss shows high spatial and temporal variation across Sumatera and Kalimantan, Indonesia 2000-2008. Environmental Research Letters 6: doi:10.1088/1748-9326/6/1/014010
- Buheaosier K, Tsuchiya M, Kaneko S, Sung J (2003) Comparison of image data acquired with AVHRR, MODIS, ETM+, and ASTER over Hokkaido, Japan. Advances in Space Research, 32: 2211-2216.
- Canty MJ (2010) Image Analysis, Classification, and Change Detection in Remote Sensing: With Algorithms for ENVI/IDL, 2nd ed. CRC Press, Boca Raton, FL.
- Cochran WG (1946) Relative accuracy of systematic and stratified random samples for a certain class of populations. Annals of Mathematical Statistics 17: 164-177.
- Czaplewski RL (2003) Can a sample of Landsat sensor scenes reliably estimate the global extent of tropical deforestation? International Journal of Remote Sensing, 24: 1409-1412.
- Feinstein AR, Cicchatti DV (1990) High agreement but low Kappa: I. The problems of two paradoxes. Journal of Clinical Epidemiology, 43: 543-549.
- Frazer GW, Magnussen S, Wulder MA, Niemann KO (2011) Simulated impact of sample plot size and co-registration error on the accuracy and uncertainty of LiDAR-derived estimates of forest stand biomass, Remote Sensing of Environment 115: 636-649.
- Hsieh P, Lee LC, Chen N (2001) Effects of spatial resolution on classification errors of pure and mixed pixels in remote sensing. IEEE Transactions of Geoscience and Remote Sensing, 39: 2657-2663.
- Irons JR (2000) Landsat Data Continuity Mission (LDCM) Data Specification Version 1. US NASA Report.
- Jensen JR (2000) Remote Sensing of the Environment: An Earth Resources Perspective, 2nd ed. Prentice-Hall, Inc., Upper Saddle River, NJ.
- Jung M, Vetter M, Herold M (2007) Uncertainties of modeling gross primary productivity over Europe: A systematic study on the effects of using different drivers and terrestrial biosphere models. Global Biogeochemical Cycles, 21, doi:10.1029/2006GB002915.
- Kimball JS, Running SW, Saatchi SS (1999) Sensitivity of boreal forest regional water flux and net primary production simulations to sub-grid-scale land cover complexity. Journal of Geophysical Research-Atmospheres, 104: 27789-27801.
- Korea Forest Service (2012) Annual Reports on the Trends of Forests and Forestry. 11-1400000-00196-10.
- Malenovsky Z, Mishra KB, Zemek F, Rascher U, Nedbal L (2009) Scientific and technical challenges in remote sensing of plant canopy reflectance and fluorescence. Journal of Experimental Botany, 60: 2987-3004.
- Norjamäki I, Tokola T (2007) Comparison of atmospheric correction methods in mapping timber volume with multitemporal Landsat images in Kainuu, Finland. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 73: 155-163.
- OECD (2013) <http://www.oecd.org/env/cc/measurementreportingandverificationofghgmitigation.htm>
- Patterson PL, Williams MS (2002) Effects of registration errors between remotely sensed and ground data on estimators of forest area. Forest Science 49: 110-118.
- Pierce FJ, Anderson NW, Colvin TS, Schueller JK, Humburg DS, McLaughlin NB (1997). Yield mapping. In: The State of Site-Specific Management for Agriculture, eds Pierce FJ, Sadler EJ (American Society of Agronomy, Inc., Madison, WI) pp. 211-244.

- Price JC (1997) Spectral band selection for visible-near infrared remote sensing: Spectral-spatial resolution tradeoffs. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 35: 1277-1285.
- Quaife T, Lewis P (2010) Temporal constraints on linear BRDF model parameters. *IEEE Transactions on Geoscience and remote sensing*, 48: 2445-2450.
- Riaño D, Chuvieco E, Salas J, and Aguado I (2003) Assessment of different topographic corrections in Landsat-TM data for mapping vegetation types. *IEEE Transactions on Geoscience And Remote Sensing* 41(5):1056-1061.
- Ruelland D, Tribotte A, Puech C, Dieulin C (2011) Comparison of methods for LUCC monitoring over 50 years from aerial photographs and satellite images in a Sahelian catchment. *International Journal of Remote Sensing*, 32: 1747-1777.
- Satellite Imaging Corporation <http://www.satimagingcorp.com/characterization-of-satellite-remote-sensing-systems.html>
- Sargeant JM, Martin SW (1998) The dependence of kappa on attribute prevalence when assessing the repeatability of questionnaire data. *Preventive Veterinary Medicine* 34: 115-123.
- Schowengerdt RA (1997) *Remote Sensing; Models and Methods for Image Processing*, 2nd ed. Academic Press, San Diego, CA.
- Stehman SV (2005 a) An evaluation of sampling strategies to improve precision of estimates of gross change in land use and land cover. *International Journal of Remote Sensing* 26:4941-4957.
- Stehman SV (2005 b) Comparing estimators of gross change derived from complete coverage mapping versus statistical sampling of remotely sensed data. *Remote Sensing of Environment*, 96: 466-474.
- Tatem AJ, Nayar A, Hay SI (2006) Scene selection and the use of NASA's global orthorectified Landsat dataset for land cover and land use change monitoring. *International Journal of Remote Sensing*, 27: 3073-3078.
- Tchuente ATK, Roujean J, Jong SMD (2011) Comparison and relative quality assessment of the GLC 2000, GLOBCOVER, MODIS and ECOCLIMAP land cover data sets at the African continental scale. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 13: 207-219.
- Teillet PM, Ren X (2008) Spectral band difference effects on vegetation indices derived from multiple satellite sensor data. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 34: 159-173.
- Toutin T (2004) Review article: Geometric processing of remote sensing images: models, algorithms and methods. *International Journal of Remote Sensing*, 25: 1893-1924.
- Tso B, Mather PM (2001) *Classification Methods for Remotely Sensed Data*. Taylor & Francis, London.
- Tucker CJ, Townshend JRG (2000) Strategies for monitoring tropical deforestation using satellite data. *International Journal of Remote Sensing*, 21: 1461-1471.
- UNFCCC (2013) *GOFCC-GOLD Sourcebook*, http://unfccc.int/methods_science/redd/methodologies/other/items/4542.php#gofccgold_sourcebook.
- Zao, S. Q., S. Liu, Z. Li, and T. L. Sohi. 2010. A spatial resolution threshold of land cover in estimating terrestrial carbon sequestration in four counties in Georgia and Alabama, USA. *Biogeosciences*, 7:71-80
- Zhang Z, Wulf RR, Van Coillie FMB, Verbeke LPC, Clereq EMD, Ou X (2011) Influence of different topographic correction strategies on mountain vegetation classification accuracy in the Lancang Watershed, China. *Journal of Applied Remote Sensing*, Vol 5.
- Zhao SQ, Liu S, Li Z, Sohl TL (2010) A spatial resolution threshold of land cover in estimating terrestrial carbon sequestration in four counties in Georgia and Alabama, USA. *Biogeosciences*, 7: 71-80.