

REDD+ 모니터링 시스템 구축을 위한 원격탐사기술의 활용방안

박태진 · 이우균* · 정래선 · 김문일 · 권태협
고려대학교 환경생태공학부

Application of Remote Sensing Technology for Developing REDD+ Monitoring Systems

Taejin, Park, Woo-Kyun, Lee*, Raesun, Jung and Moon-II, Kim and Tae-Hyub, Kwon

Department of Environmental Science and Ecological Engineering,
Korea University, Seoul 136-713, Korea

요 약: 최근 기후변화와 관련하여 국내를 비롯한 국제적인 관심이 증폭되고 있으며, 이러한 시대적인 흐름 속에 탄소흡수원으로서의 산림의 중요성이 부각되고 있다. 특히, 산림전용 및 황폐화 방지를 통한 온실가스감축(Reduced Emissions from Deforestation and Degradation, REDD) 및 산림탄소축적보존 및 증진, 지속가능한 산림경영을 포함하는 REDD+가 post-2012에 이행될 신규 메커니즘으로 활용될 전망이다. 메커니즘의 이행을 위해서는 기본적으로 MRV(Measuring, Reporting and Verification) 시스템을 통해 메커니즘 적용 효과를 인증 받아야 한다. 본 연구에서는 가장 효율적인 모니터링 방법 중 하나로 인정받고 있는 다양한 원격탐사기술의 토지피복변화 탐지 및 탄소축적량 추정하는 방법 및 효과를 비용 및 기술(불확실성)측면에서 분석하였다. 그 결과 토지피복변화탐지를 위해서는 중해상도 광학영상 및 위성 탑재 SAR(Synthetic Aperture Radar)가 가장 적합한 원격탐사자료로 도출되었다. 그리고 탄소축적량 추정에는, 항공기 탑재 LiDAR(Light Detection and Ranging), SAR와 같이 불확실성이 낮은 기술과 비용효율적인 기술인 중해상도 광학영상, 위성 탑재 SAR 간의 통합을 통해 효율적인 결과를 도출할 수 있음을 확인할 수 있었다. 하지만, 아직까지 본 메커니즘에 대한 명확한 인증기관, 가이드라인 및 불확실성에 대한 기준이 결정되지 않고 있으므로, 추후 지속적인 관심을 통해 국제적인 흐름을 파악하고, 적합한 방법론을 구축해야 한다. 뿐만 아니라 개발된 메커니즘을 대상 개도국에 활용하기 위해서는 긴밀한 국제협력관계 구축 및 대상국에 적합한 모니터링 방법 또한 고려해야 할 필요성이 있다.

Abstract: In recent years, domestic and international interests focus on climate change, and importance of forest as carbon sink have been also increased. Particularly REDD+ mechanism expanded from REDD (Reduced Emissions from Deforestation and Degradation) is expected to perform a new mechanism for reducing greenhouse gas in post 2012. To conduct this mechanism, countries which try to get a carbon credit have to certify effectiveness of their activities by MRV (Measuring, Reporting and Verification) system. This study analyzed the approaches for detecting land cover change and estimating carbon stock by remote sensing technology which is considered as the effective method to develop MRV system. The most appropriate remote sensing for detection of land cover change is optical medium resolution sensors and satellite SAR (Synthetic Aperture Radar) according to cost efficiency and uncertainty assessment. In case of estimating carbon stock, integration of low uncertainty techniques, airborne LiDAR (Light Detection and Ranging), SAR, and cost efficient techniques, optical medium resolution sensors and satellite SAR, could be more appropriate. However, due to absence of certificate authority, guideline, and standard of uncertainty, we should pay continuously our attention on international information flow and establish appropriate methods. Moreover, to apply monitoring system to developing countries, close collaboration and monitoring method reflected characteristics of each countries should be considered.

Key words : REDD, REDD+, remote sensing, MRV system, land cover, carbon stock

*Corresponding author
E-mail: leewk@korea.ac.kr

서 론

지난 2010년 11월 29일부터 멕시코 칸쿤에서 개최된 제 16차 기후변화당사국 총회(Conference of the Parties, COP)와 더불어 최근 기후변화 책임 및 공동해결에 대한 국내를 비롯한 국제적인 관심이 높아지고 있다. 이는 Worldwatch의 자체보고와 기후변화정부간패널 (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)의 제4차 기후변화평가보고에 따라 온실가스 배출량 감축의무에 대한 전 지구적인 책임의식에 기인한다(Hare, 2009; IPCC, 2007).

이러한 시대적인 흐름 속에 산림의 중요성이 부각된 것은 1997년 UNFCCC(United Nations Framework Convention on Climate Change) COP-3에서 교토의정서를 채택한 이후로 기후변화협약에서 산림이 탄소흡수원으로 인정되기 시작하면서부터이다. 이후, COP-7에서는 마라케쉬 합의문을 채택하고, 토지이용, 토지이용의 변화 및 임업(Land Use, Land-Use Change and Forestry, LULUCF) 및 교토의정서에서 채택한 교토 메커니즘의 이행을 위한 세부규칙 및 절차가 구체적으로 논의되고 완성되었다. 2004년 아르헨티나에서 개최된 COP-10에서는 연간 8천 탄소톤 이하 흡수원으로 소규모 조림 및 재조림 분야 탄소배출권 획득을 위한 산림사업(Afforestation and Reforestation Clean Development Mechanism, A/R CDM)의 추진과 이를 촉진하기 위한 간소화된 절차를 채택하였으며, 2005년 COP-11에서는 A/R CDM사업 활동을 위한 간략한 기준선 및 모니터링 방법론이 마련되어 적용되어 왔다.

근래에 들어서는 IPCC 3차 평가보고서와 스텐보고서의 내용을 통해 산림전용과 황폐화가 대기 중 온실가스 농도 증가의 주원인으로 인식되고 있다. IPCC 3차 평가보고서(IPCC, 2001)에서는 개도국의 산림전용으로 인하여 배출되는 온실가스가 전 세계 온실가스 배출량의 약 20%를 차지한다는 연구결과가 제시되어 있으며, 스텐보고서(Stern, 2006)에서는 REDD가 비용적인 측면에서 효율적이라는 결론을 내린 바 있다. 이를 시작으로, 2007년 COP-13에서는 발리 로드맵을 공표하고, 대기 중 온실가스 증가에 큰 비중을 차지하는 산림전용과 황폐화 방지를 위한 구체적인 협의를 시작하였다(Cléménçon, 2008).

이 후 COP-14에서는 REDD의 범위가 산림전용과 산림 황폐화로부터의 탄소배출 감축의 의미에서 산림탄소축적 보존 및 증진, 지속가능한 산림경영을 포함하는 REDD+로 확장되었다(석현덕 등, 2010). REDD+는 기존 REDD 메커니즘의 확장된 메커니즘이기 때문에 모니터링 시스템 역시 REDD 메커니즘의 모니터링에 기인한다. 따라서 본 논문에서는 REDD 및 REDD+를 REDD+로 통합하여 표기하도록 한다. 또한, 2009년 덴마크에서 개최된 COP-

15에서는 REDD+를 통한 긍정적인 유인책의 필요성에 동의하였으나, REDD에서 REDD+로의 범위확대를 위한 방법론 개발과 개도국간의 의견의 불일치로 구체적인 합의안은 도출하지 못하였다. 이러한 기후변화협약 내에서의 정책적인 흐름과 더불어 Post-2012 기후변화체제 하 REDD+ 메커니즘의 도입과 관련한 안건이 COP-16의 가장 핵심적인 논의대상이었다. COP-16이 종료된 시점에 명확하고, 구체적인 REDD+ 메커니즘의 도입에 대한 결론은 도출되지 못했지만, 이번 칸쿤합의를 통해 COP-15에서 극명하게 드러났던 선진국과 개도국 사이의 입장 차이를 어느 정도 해소했다는 평가를 받았다(신현숙, 2010). 하지만, REDD+를 포함하는 칸쿤합의가 이행이 담보되는 법적인 합의가 아니기 때문에, 2011년에 남아프리카공화국 더반에서 개최되는 COP-17의 역할이 증대되고 있다.

우리나라는 이번 COP-16에서 개도국 지위를 유지하게 됨과 동시에, 기후변화협약 내에서 REDD+가 주요한 정책의 하나로 국제사회에 자리매김함으로써, REDD+의 구체적인 수행과 더불어 기타 개도국들에 대한 기술이전 및 지원활동이 요구되고 있다. 하지만 아직까지 REDD+ 정책의 효과를 입증하기 위한 MRV 시스템 구축에 대한 체계적인 방법론 정립은 선진국들의 연구동향에 비취볼 때 완벽하지 않은 것이 사실이며, 특히 원격탐사자료를 활용한 산림 모니터링 체계 구축과 산림탄소 축적증진 모니터링 방법론에 대한 선행연구가 필요한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 REDD+ 메커니즘 중 산림전용과 황폐화 모니터링 시스템에 한해 구축 체계를 살펴보고, 이를 위해 활용되는 원격탐사자료가 가지는 특징 및 적용가능성을 비용 및 기술 측면에서 분석하고자 한다. 나아가 전술한 내용을 바탕으로 REDD+ 정책수행에 적합한 원격탐사자료 활용방안을 제안하고자 한다.

REDD+의 MRV 시스템

1. MRV 시스템 개요

REDD+ 메커니즘의 수행결과를 평가하기 위해서는 온실가스 배출감축을 위해 행해진 활동들을 통해 감축된 온실가스 배출량을 측정(Measuring)해야 하고, 측정된 감축량이 정책이행에 의한 실제 감축량이라는 것을 보고(Reporting) 및 검증(Verification)해야 한다. REDD+의 MRV 시스템은 기본적으로 산림전용, 산림황폐화, 탄소축적량의 변화를 모니터링 하는 것을 포함해야 하며, 세부적인 모니터링을 위해 산출되어야 하는 내용은 국가수준에서의 산림전용 및 황폐화 면적, 기준년도 및 기준기간의 탄소축적량, 산림전용 및 황폐화로 인해 변화된 탄소축적량, 그리고 정책수행을 통해 기준년도 및 기준기간에 대해 감축된 탄소배출량 등이 반드시 보고되고 검증되어

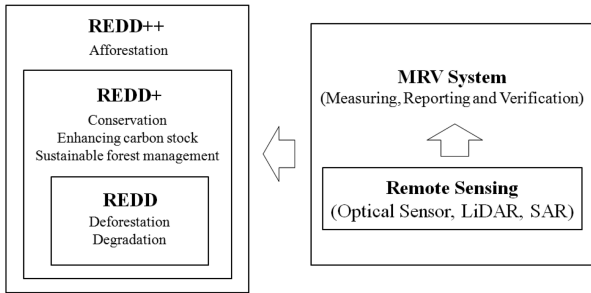


Figure 1. Scope and relationship between each mechanism and MRV system.

야 한다(Figure 1).

현재 REDD+의 수행에 있어 적용할 수 있는 방법론으로는 IPCC에서 제시한 GPG-LULUCF(Good Practice Guidance for Land Use, Land-Use Change and Forestry) (2003), AFOLU(Agriculture, Forestry and Other Land Use) (2006)가 있으며, GOFC-GOLD(Global Observation of Forest and Land Cover Dynamics)에서 제시한 Sourcebook (2008, 2009) 등의 방법론이 개발되어 있다. 특히, GOFC-GOLD에서는 낮은 불확실성과 산림 벌채 및 악화 지역의 탄소축적량과 변화량을 측정할 수 있는 방법을 선행적으로 제시하고 있다. 제시된 방법론은 GPG-LULUCF와 AFOLU를 보완하여 주요 자료를 분석하고 획득하기 위하여 보다 확실하고 강화된 방법론으로써 포괄성(Comprehensiveness), 일관성(Consistency), 효율성(Efficiency), 견고성(Robustness), 투명성(Transparency)과 같은 기본 원칙을 고려하여 산림면적 변화 및 토지이용 변화를 측정하고 있다(GOFC-GOLD, 2008).

2. REDD+의 주요 정의

REDD+ 모니터링 시스템은 산림정의, 대상지역 설정,

원격탐사자료 취득, 분석, 그리고 정확도 평가의 순서로 실행된다(GOFC-GOLD, 2009). 이 중, 산림정의의 단계는 산림전용과 황폐화에 따른 면적 및 탄소축적량 변화를 추적하기 위해서 우선적으로 수행되어야 하며, 이후 기준을 벗어나는 전용지역과 황폐화지역을 산출하여 최종적으로 정책수행에 따른 탄소저감량을 추정해야한다. Giri 등(2005)은 산림정의에 따라 산림전용 및 황폐화 지역에 대한 상이한 결과를 가져올 수 있기 때문에 산림정의의 중요성을 언급한 바 있다.

산림정의에 대해 FAO(Food and Agricultural Organization, 2005)는 울폐도 10% 이상, 최소수고 5 m 이상, 최소 면적 0.5 ha 이상인 지역을 산림으로 정의하였으며, UNFCCC(2001)에서는 각 국가는 최소 산림면적, 상층목 최소수고, 최소 울폐도를 각 0.05 ha-1 ha, 2-5 m, 10-30%의 범위에서 선택하여 국가별로 이행하도록 하였다(Table 1).

국내에서 수행되는 국가산림조사에서는 최소산림면적 0.5 ha, 최소울폐도 10%, 최소수고 5 m로 규정되어 적용하고 있다. 산림전용에 대한 대부분의 정의는 장기적으로, 혹은 영구적으로 산림으로 사용되던 지역이 다른 비산림 용도로 사용되는 것을 뜻하며, 산림황폐화는 산림전용이 아닌 수준에서 일정기간 동안 온실가스의 배출량이 저감량 보다 큰 지역을 의미한다. 산림전용은 산림지역에서 비산림 지역으로 변하기 때문에 급격한 감소가 나타나며, 산림황폐화는 택벌, 산불, 화목을 위한 과도한 벌채, 채굴 등과 같이 산림전용의 탄소축적량의 급격한 변화는 발생하지 않지만, 황폐화 이전보다는 탄소축적량이 감소하는 경우를 말한다(Figure 2).

3. 원격탐사기술을 통한 모니터링의 필요성

기존의 국가산림조사(National Forest Inventory)를 비롯

Table 1. Relevant land use change and forestry reporting activities definitions (UNFCCC, 2001; FAO, 2005; Korea Forest Service, 2009).

Term	Definition		
	IPCC	FAO	Korea
Forest	Minimum area	0.05-1.0 ha	0.5 ha
	Tree crown cover	10-30%	10 %
	Minimum height	2-5 m	5 m
Afforestation	Direct human-induced conversion of land that has not been forested for a period of a least 50 years to forested land through planting, seeding and/or the human-induced promotion of natural seed sources		
Reforestation	Direct human-induced conversion of non-forested land to forested land through planting, seeding and/or the human-induced promotion of natural seed sources, on land that was forested but that has been converted to non-forested land (baseline : 1989. 12.31)		
Deforestation	Direct human-induced conversion of forested land to non-forested land; implies a change in land use		
Revegetation	Direct human-induced activity to increase carbon stocks on sites through the establishment of vegetation that covers a minimum area of 0.05 ha and does not meet the definitions of afforestation and reforestation defined above		
Forest management	System of practices for stewardship and use of forest land aimed at fulfilling relevant ecological (including biological diversity), economic and social functions of the forest in a sustainable manner		

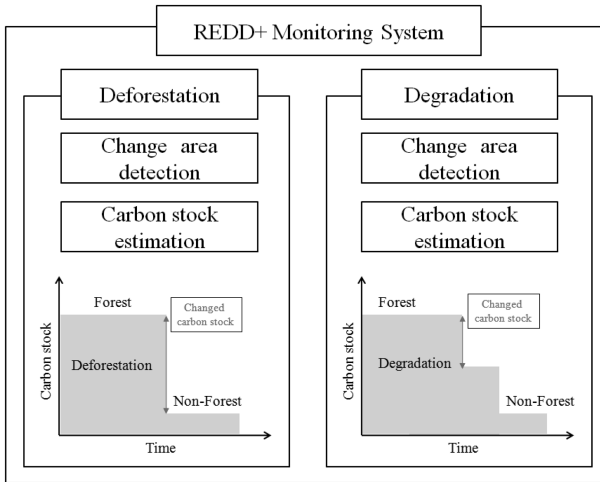


Figure 2. Fundamental structure of REDD+ monitoring system and difference between deforestation and degradation in carbon stock change.

한 지상관측기반의 산림조사 시스템은 노동집약적이며, 시간과 비용이 많이 소모되는 단점을 가지고 있으며, REDD+ 모니터링 시스템에서 요구하는 신뢰성, 투명성, 반복성 그리고 시계열적 모니터링 측면의 요건을 충족시키는데 한계가 있다(Achard 등, 2007; Houghton, 2005). 이러한 단점을 극복하기 위해, Landsat 위성영상을 시작으로 다양한 분광영역과 공간해상도를 가진 원격탐사자료를 산림에 직접적으로 적용해 오고 있다. 최근에는, 원격탐사기술이 REDD+ 메커니즘을 수행하기 위한 적절한 도구의 하나로써 인정받고 있으며, CIFOR(Center for International Forestry Research)는 산림전용과 산림악화에 의한 탄소배출을 추정하기 위해 필요한 변화면적과 탄소축적량은 원격탐사기술과 현장조사의 결합을 통해 가능함을 언급한 바 있다(CIFOR, 2008). 이처럼 원격탐사기술은 REDD+ 정책을 시행함에 있어, 기준선을 설정하고 감축되는 온실가스 배출량을 모니터링하기 위해 유일하게 활용될 수 핵심기술로 인정되고 있다(DeFries 등, 2006).

REDD+ 모니터링 시스템을 위한 원격탐사기술

1. REDD+ 모니터링 시스템

1) 산림전용

산림전용에 대한 모니터링 수행의 주요 대상은 산림전용면적을 추적하는 것과 이에 따라 기준선과 해당년도의 탄소축적량을 추정하는 것이다. GOFC-GOLD(2009)에서는 국가단위에서의 산림전용면적을 산출할 때, 기술적 능력과 자료의 비용, 산림전용의 규모와 패턴, 산림의 계절성, 국토의 면적과 산림면적에 따라 적용할 수 있는 방법이 다양함을 설명하였다. 또한, 대상지역 전체를 모니터링

하는 방법인 wall-to-wall mapping 방법과 일부지역을 통해 국가단위의 산림전용을 분석하는 표본조사 방법이 국가단위의 모니터링 방법으로 적용될 수 있음을 언급한 바 있다. wall-to-wall mapping 방법은 브라질과 인도에서 수행되고 있는 방법으로써, 대상지역이 광범위하여 자료취득 및 분석에 제한이 있기 때문에 실용적인 방법으로 평가받지는 못하지만, 전체지역을 모니터링 한다는 점에서 이상적인 모니터링방법으로 평가받는다. 비용과 시간적인 측면에서 wall-to-wall mapping 방법보다 효율적인 표본조사 방법은 산림전용이 특정지역이나 국가에 집중될 때 활용될 수 있다. 그렇기 때문에, 최근에는 두 가지방법을 동시에 고려하는 방법이 활용되고 있다. 이 방법은 국가단위 이상의 규모에서는 MODIS와 같은 저해상도의 원격탐사자료를 활용하여 집중적인 모니터링이 요구되는 취약지역을 선별하고, 이 지역에 대한 Landsat, SPOT, SAR와 같은 중·고해상도의 원격탐사자료를 취득하여 모니터링 하는 방법이다(Hansen 등, 2008).

2. 산림황폐화

산림황폐화는 산림전용과 같이 산림이 아닌 지역만을 추출하는 방법만으로는 정의되지 않기 때문에 면적을 산출하는데 어려움이 존재하며, 그 방법론에 대한 국제적인 논의가 계속되고 있다. 일반적으로 산림황폐화의 요인으로는 태벌, 산불, 화목을 위한 과도한 벌채, 채굴 등을 들 수 있다(GOFC-GOLD, 2008). Archard 등(2008)은 원격탐사기술을 활용하여 산림황폐화 면적을 분석하기 위한 직접적인 방법과 간접적인 방법을 제안하였다. 직접적인 방법은 태벌 및 산불에 의한 산림황폐화를 모니터링 할 수 있는 방법으로써, 현저하게 산림이 황폐화된 경우 사용될 수 있다. 직접적인 방법으로는 Asner 등(2005)이 Landsat 영상을 이용하여 벌채활동을 탐지하는 알고리즘을 개발한 바 있으며, Roy 등(2005)은 MODIS 영상을 활용하여 산불로 인해 황폐화된 산림을 모니터링 한 사례가 있다. 또한, Achard 등(2008)은 태벌과 산불피해면적을 86-95% 정확도 수준으로 판별해낼 수 있음을 보여준 바 있으며, 국내에서는 Kwak 등(2010)이 LiDAR를 이용하여 산림의 물리적 및 생물적 피해면적을 산출한바 있다. 간접적인 방법은 원격탐사기술을 활용하여 손상되지 않은 산림과 손상된 산림으로 분류하는 방법이다. 이는 국가별 정책 및 제도상의 조건 하에 식생분포와 더불어 인간 활동에 대한 정보를 이용하여 간접적으로 손상된 산림을 분류해 내는 방법이다(Mollicone 등, 2007; Achard 등, 2008).

3. 산림탄소축적량

일반적으로 산림의 탄소축적량 추정은 산출된 산림전

Table 2. Characteristics and applicability in REDD+ of various remote sensing instruments (modified from Bottcher *et al.*, 2009).

Satellite and Sensor	Spatial Resolution	Applicability in national level	Temporal Resolution	Applicability in annual level
Optical, medium resolution sensors				
Landsat-5, TM	30 m	Suitable	16day	Suitable
Landsat-7, ETM+	30 m	Suitable	16day	Suitable
SPOT 4	20 m	Suitable	26day	Suitable
Terra ASTER	15 m	Suitable	16day	Suitable
CBERS-2, HRCCD	20 m	Suitable	26day	Suitable
DMC	32 m	Suitable		Suitable
IRS-P6-LISS III	23.5 m	Suitable	5 day	Suitable
Optical, high resolution sensors				
Quickbird	3 m	Too fine	1-5 day	Suitable
Ikonos	1 m	Too fine	<3 day	Suitable
RapidEye	5 m	Too fine	1-5.5 day	Suitable
SPOT-5, HRVIR	5 m	Too fine	26day	Suitable
Optical, very high resolution sensors				
Quickbird	0.6 m	Too fine	1-5 day	Suitable
WorldView-1	0.5 m	Too fine	1.7-4.6day	Suitable
Radar, SAR				
ALOS PALSAR	10-15 m	Suitable	Available	Suitable
Satellite or shuttle SAR	5-100 m	Suitable to too fine	Available	Suitable
Airborne SAR	5-100 m	Suitable to too fine	Available	Suitable
LiDAR, Airborne				
	1 m	Too fine	Available	Suitable

용면적 및 산림황폐화 면적과 함께 현장조사를 통해 얻어진 정보를 바탕으로 수행된다. IPCC(2006)에서는 REDD+에서 활용될 수 있는 탄소축적 변화량을 추정하는 방법으로, 탄소축적량 변화 접근법(Stock-difference approach)과 탄소흡수 및 배출 접근법(Gain-loss approach)을 제안하였다. 탄소축적량 변화 접근법은 두 시기의 탄소축적량의 변화량을 산출함으로써 REDD+ 정책에 따른 탄소배출 저감량을 추정한다. 반면, 탄소흡수 및 배출 접근법은 일정 기간 동안 대상지역의 산림이 흡수하는 전체 탄소량에서 배출하는 전체 탄소량의 차이를 통해 탄소축적량의 변화량을 추정한다(Figure 3). 한 시기의 탄소축적량을 추정하는 방법에 대해, Gibbs 등(2007)은 산림 생물대가 가지는

평균적인 탄소축적량을 통해 추정하는 평균 생물대 탄소축적량 추정방법(Biome Average), 산림조사를 통한 탄소축적량 추정방법(Forest Inventory), 원격탐사기술을 활용한 탄소축적량 추정방법(Remote Sensing) 등을 제시한 바 있다.

2. 원격탐사기술의 적용사례 및 적용성

REDD+ 메커니즘에서는 산림지역에서의 면적변화를 모니터링하고 탄소축적량변화 산출하고 기준선 대비 탄소축적량을 추정하는 모니터링 하는 것에 초점이 맞추어져 있다(CIFOR, 2008). 위성영상 및 항공사진을 포함한 광학영상을 활용한 사례가 대부분이지만, 최근에는 LiDAR 및 SAR를 이용한 모니터링 방법이 개발되고 연구되고 있다 (Table 2).

1) 광학영상

광학영상은 원격탐사기술이 시작되면서 부터 산림피복 변화에 대한 지역적 규모에서부터 전지구적인 모니터링에 이용되고 있다. 특히, MODIS와 같은 저해상도 영상에서부터, Landsat, ASTER, SPOT-4, CBERS와 같은 중해상도, Quickbird, Ikonos, RapidEye, SPOT-5와 같은 고해상도, Quickbird와 WorldView-1과 같은 초고해상도의 위성영상들이 REDD+의 산림전용 및 황폐화 지역을 탐지하는데 활용되고 있다.

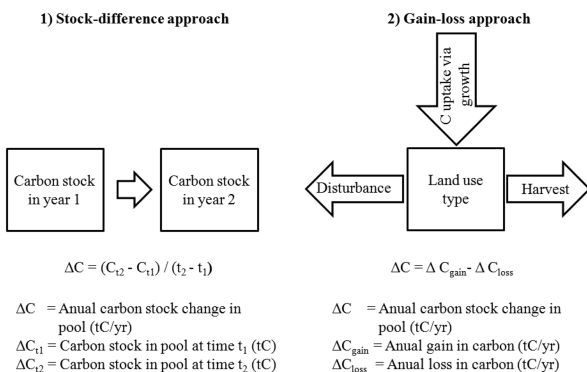


Figure 3. Approaches for estimating carbon stock change (Brown and Braatz, 2008).

REDD+ 모니터링 시스템에서 광학영상은 국가단위의 대면적 산림을 지속적으로 모니터링할 수 있다. 대표적으로 MODIS와 같은 저해상도 영상의 경우 FAO, IGBP (International Geosphere-Biosphere Programme), ESA (European Space Agency) 등의 기관을 통해 전지구 단위의 산림피복변화에 대한 모니터링의 수행에 활용되고 있으며, 중·고해상도의 영상은 국가단위 및 지역단위의 산림피복변화분석에 활용되고 있다(DeFries 등, 2006). 특히, Landsat TM과 ETM+ 자료는 자료의 접근이 용이하고, 시계열적인 자료를 취득할 수 있다는 점에서 토지피복변화 분석에 활용되고 있으며(Baker와 Williamson, 2006), 분석 방법에 따라 상이하지만 높은 정확도를 가진 결과를 도출할 수 있다(Fuller 등, 1994; Woodcock 등, 2001). Bird 등(2000)은 Spot PAN과 Spot XS를 활용하여 토지피복변화를 관측한 바 있으며, Quickbird, Ikonos, RapidEye, WorldView-1와 같은 고해상도의 영상 역시 토지피복변화를 탐지하기 위해 적용되었지만 높은 공간해상도에 따른 화소기반분류의 한계와 비용적인 측면의 한계가 존재함을 언급한바 있다(Limp, 2002; Hofmann, 2001).

광학영상은 산림전용 및 황폐화로 인한 산림면적 변화 탐지뿐만 아니라, 변화된 산림 바이오매스를 추정함으로써 최종적인 탄소축적량을 도출할 수 있다. 일반적으로 광학영상을 통한 바이오매스의 추정은 분광값과 다중회귀, K-nearest neighbour, Neural network, 현장조사 등을 통해 산출된 바이오매스 간의 관계를 직접적으로 규명하거나(Kim 등, 2010), 엽면적지수(Leaf Area Index, LAI), 산림구조, 그림자 비율과 같은 인자들 간의 관계를 통한 간접적인 방법으로 규명된다(GOFC-GOLD, 2008). Wulder(1998)는 광학영상을 통한 바이오매스 추정의 잠재성을 설명하였으며, 이후 Brockhaus와 Khorrani(1992), Trotter 등(1997), Coops 등(1998), Fazakas 등(1999)에 의해 적용된 바 있다. 적용되는 방법론은 정확도 및 조사구 자료의 가용성의 요구의 정도에 따라 결정되며, MODIS, SPOT-VEGETATION, 그리고 AVHRR과 같이 해상도가 낮은 영상을 포함한 다양한 원격탐사자료원은 지속적으로 바이오매스 지도화를 위해 적용되고 있다(Patenaude 등, 2005). 이러한 저해상도 영상은 현장조사 자료와 보다 고해상도 영상과의 결합을 통해 보다 효율적이고 정확하게 결론을 도출하기 위해 사용되어 오고 있다(Rosenqvist 등, 2003).

산림피복변화 탐지 및 바이오매스 추정에 관한 많은 연구들이 선행되어왔지만, IPCC에서는 원격탐사기술은 산림피복변화 탐지에만 이용할 것을 제안했다(Böttcher 등, 2009). 이는 개발된 방법론이 반복성 측면에서 일관성을 보이지 않으며 결과에 대한 검증이 현장조사 및 초고해상도의 원격탐사자료를 요구하기 때문에 개도국을 상대로 이행되는 REDD+에는 적합하지 않기 때문이다(DeFries

등, 2006). 구름, 파장영역, 일사각 등에 의해 시계열적인 영상을 취득하기 힘들다는 한계와 식생의 표면현상과 생리학적인 변화에 민감하다는 광학영상자료의 원초적인 한계 역시 단점으로 존재한다(Grainger와 Obersteiner, 2009).

2) LiDAR

LiDAR 시스템은 수고측정을 통해 직접적이고 신속한 산림피복변화를 탐지하는 정도의 검증도구로 활용될 수 있지만, REDD+ 모니터링 시스템에는 부적합하다(Patenaude 등, 2005). 하지만, 다른 원격탐사자료 및 현장조사 자료를 활용하여 산림전용 및 산림황폐화를 평가할 때 보조 자료로 활용될 수 있다.

REDD+ 모니터링 시스템에서 LiDAR 기술이 유용한 것은 수고 및 지하고를 포함한 산림구조에 대한 3차원적인 정보를 직접적으로 측정할 때 사용할 수 있으며(Boudreau 등, 2008), 다른 원격탐사기술 보다 높은 해상도를 바탕으로 바이오매스의 비점근적인 관계에 대한 측정을 제공할 수 있는 유일한 원격탐사기술이기 때문이다(Drake 등, 2003). 최근에 연구와 개발활동들은 LiDAR 자료를 활용하여 개체목 및 임분 단위의 수고, 재적, 바이오매스, 그리고 탄소축적량의 추정을 위한 산림의 수직적 구조의 특징을 파악하는 것에 초점을 맞추고 있다(Kwak 등, 2010; Kim 등, 2010). LiDAR 자료를 활용하여 추정된 수고는 현장조사를 통해 얻어진 자료와 비슷하거나 더 나은 정확도를 보이며, 발생된 개체목 수고의 오차는 0.5-1.0 m 과소 추정됨이 밝혀졌다(Nilsson, 1996; Næsset, 1997). 뿐만 아니라 재적, 바이오매스, 수관경계에 대한 분석 역시 높은 정확도를 보인다(Bortolot과 Wynne 2005; Lim 등, 2003; Lim과 Treitz, 2004; Næsset 2004; Nelson 등, 2005; Popescu, 2007; Kwak 등, 2010). 이러한 연구를 진행하기 위해서는 기본적으로 산림자원에 대한 조사 및 모니터링이 선행되어야 한다. 조사 및 모니터링을 통해 얻은 지상 관측은 LiDAR 자료의 3차원적 특성과 연구대상의 생·물리학적인 특성간의 관계를 확립하는데 반드시 필요하다. 일단 확립된 관계를 바탕으로 대상의 생·물리학적인 특성은 LiDAR 자료를 이용하여 높은 정확도를 가지고 예측될 수 있다.

지상 조사구 정보는 REDD+를 포함한 모니터링 계획의 중요한 구성요소이다. LiDAR를 활용한 측정은 지상기반 조사와 통합된 형태로 활용될 수 있다. 지상기반조사는 LiDAR 자료를 보정하고 검증하는데 활용되며, 지상기반 조사를 확대하고 본뜨는 것을 LiDAR 자료가 수행해줄 수 있다(GOFC-GOLD, 2008). 즉, LiDAR는 현장조사에서 얻은 자료와 대체할 수 있을 정도로 높은 수직적, 수평적 해상도를 가지고 있으며, 현장 측정의 대안적인 방법으로 활용될 수 있음을 의미한다.

3) SAR

SAR는 1970년대부터 활용되어 레이더와 같은 원리를 통해 개발되어, 지난 40년 간 SAR를 활용한 원격탐사는 비약적인 발전을 하였다. 이 시스템은 센서를 탑재한 위성이나 비행기가 여러 번 각도를 바꾸어 같은 지역에 극초단파(3-70cm)를 대상체로 발사함으로써 수집된 여러 전파를 합성함으로써 높은 해상도의 영상을 취득하는 능동형 원격탐사기술이다(Patenaude 등, 2005). 현재 SAR기술은 열대림의 지역적인 규모에서부터 전지구적인 규모에서의 활용도 가능할 정도로 발달해 있다(DeFries 등, 2007). 이는 광학영상이 가지는 한계점인 기상조건에 대한 제약을 받지 않아 열대림이 분포한 개도국에서는 높은 습도로 인해 발생하는 구름에 의해 자료취득에 한계를 극복할 수 있다(DeFries 등, 2007; Hansen 등, 2008). 또한, Sgrenzaroli 등(2000)과 Walker 등(2010)은 SAR 영상의 해상도 및 취득정보를 고려할 때, 고해상도 광학영상을 대체할 수 있음을 확인한 바 있다. 일반적으로 SAR시스템은 식생을 투과하는 레이더 파장의 특성을 활용하여 식생 구조 및 바이오매스 등을 관측한다. 특히 C, L 그리고 P 밴드가 식생의 부분별 특성을 차별화하는데 이용되고 있다. 짧은 파장대의 C밴드(-5 cm)는 잎과 잔가지와 같은 식생의 미세한 부분에 민감하며, L밴드(-24 cm)와 P밴드(-70 cm)는 식생의 큰 가지와 수간에 민감하게 반응하는 특성을 분석에 적용한다.

Balzter(2001)는 SAR시스템의 산림피복분석 및 모니터링에의 적용에 대한 가능성과 한계를 언급한 바 있으며, 전세계적으로 다양한 지역에서 활용된 바 있다. Kasischke 등(1997)은 토지피복분류를 높은 정확도를 가지고 Michigan 지역을 4가지 산림피복을 포함한 6종류로 분석하였으며, Ranson 등(1995)는 8가지의 산림피복의 분포를 분석하였다. Lee 등(2003)과 Woodhouse 등(2002)은 PolInSAR(Plarimetric SAR interferometry)을 활용하여 분석을 수행하기도 하였다. 또한, Hoekman과 Quinones (2000)은 P밴드와 C밴드를 결합한 자료를 기반으로 결과를 도출했다. 이는 토지피복분류, 특히 산림에서 비산림으로의 변화에 있어서 다중주파수(Multi-frequency)와 다중편광(Multi-polarimetric) SAR 자료에 대한 잠재성을 보여

준다(Dobson 등, 1995). 그리고 증가하는 SAR 센서들은 최근의 진보한 SAR 자료 기록과 컴퓨터 프로세싱을 통해 고해상도의 영상을 제공하고 있다. 최초 민간위성 SAR 센서(TerraSAR-X, Cosmo SkyMed 등)는 5 m 보다 더 세밀한 공간해상도를 가지고 있으며, 이는 벌채를 통한 도로 개설, 산림전용경향 등을 분석하는 것에 높은 잠재력을 가지고 있다(Saatchi 등, 1997; Walker 등, 2007).

SAR 시스템을 이용하여 산림의 바이오매스를 추정하는 연구는 1990년대부터 현재까지 지속적으로 진행되어 오고 있다. 이는 다른 원격탐사자료와 동일하게 취득된 SAR자료와 현장조사자료 간의 관계식을 통해 최종적으로 바이오매스를 추정하는 방법이다. Patenaude 등(2005)은 11개의 관련연구들을 통해, 개발된 여러 모형의 정확도가 최대 0.96, 최소 0.64, 그리고 평균 0.83정도 됨을 설명하였다. SAR 시스템 기반의 바이오매스 추정에 관한 연구는 다양한 지역에 적용되고 있으며, 특히, REDD+가 국제적으로 이슈화되면서 최근에는 열대림이 분포하고 있는 아마존 지역에 대한 연구가 집중적으로 수행되고 있다. Saatchi 등(2007b)은 20%정도의 불확실성을 가지고 아마존 지역의 바이오매스를 추정한 바 있다.

국내 REDD+ 모니터링 시스템 구축을 위한 원격탐사기술의 비용 및 기술분석

1. 비용적 측면

각 원격탐사기술은 Böttcher 등(2009)과 Patenaude 등(2005)이 제시한 자료취득 및 분석을 포함한 모니터링에 소요되는 비용표에 근거하여 분석하였으며, 현장조사, 중, 고, 초고해상도 광학영상, 항공기 탑재 SAR, 위성 탑재 SAR 그리고 항공기 탑재 LiDAR로 분류하여 도출하였다. 또한, 국내의 자료취득비용에 대한 특성을 고려하기 위해, 국내 원격탐사자료 판매업체의 가격산정표를 고려하였고, 센서에 따라 미미한 차이를 보이는 비용은 일괄적으로 평균값을 활용하여 새로운 비용표를 제안하였다(Table 3).

각 원격탐사기술 별 단위면적(km²)당 소요되는 비용은 중해상도 광학영상이 2,064원으로 가장 낮게 산출되었으며, 고해상도 광학영상, 위성탑재 SAR 순으로 낮은 비용

Table 3. Cost of data acquisition and analysis for REDD and plus monitoring system (Modified from Böttcher et al., 2009; Patenaude et al., 2005). Unit: 1,000(₩)

	Inventory	Medium Resolution Optical Imagery	High Resolution Optical Imagery	Very High Resolution Optical Imagery	Airborne SAR	Satellite SAR	Airborne LiDAR
Data acquisition (cost/km ²)		0.81	17.86	88.40	370.40	62.92	420.20
Data analysis (cost/km ²)		1.25	9.30	192.50	9.46	9.46	92.40
Total cost (cost/km ²)	135.85	2.064	27.16	280.9	379.86	72.38	512.60
Total cost for national forest area (63703.04 km ²)	8,654,057.98	131,483.07	1,729,856.05	17,894,183.94	24,198,236.77	4,610,826.04	32,654,178.30

Table 4. Uncertainty of each method for estimating carbon stock (Modified from Gibbs *et al.*, 2007).

Method	Description	Uncertainty
Inventory	Relates ground-based measurements of tree diameters or volume to forest carbon stocks using allometric relationships	Low
Medium Resolution Optical Imagery	Uses visible and infrared wavelengths to measure spectral indices and correlate to ground based forest carbon measurements	High
High Resolution Optical Imagery	Uses high resolution (3-20 m) images to measure tree height and crown area and allometry to estimate carbon stocks	Low to Medium
Very High Resolution Optical Imagery	Uses very high resolution (1-0.5 m) images to measure tree height and crown area and allometry to estimate carbon stocks	Low to Medium
Airborne SAR	Uses microwave or radar signal to measure forest vertical structure	Medium
Satellite SAR	Uses microwave or radar signal to measure forest vertical structure	Medium
Airborne LiDAR	LiDAR uses laser light to estimates forest height/vertical structure	Low to Medium

으로 대상 산림을 모니터링할 수 있는 것으로 나타났다. 가장 높은 비용이 소요되는 기술은 항공기 탑재 LiDAR와 항공기 탑재 SAR로써, 각각 현장조사에 소요되는 비용의 약 4배와 3배정도가 필요한 것으로 나타났다. 이는 자료취득에 있어 탑재체가 위성인 다른 원격탐사기술과는 달리 항공기를 직접 운용해야 하기 때문에 추가적으로 필요한 비용이 더 높기 때문이다. 우리나라의 전체 산림 면적(63703.04 km²)에 대해 평가된 내용을 적용한 결과, 중해상도 광학영상의 경우 약 1억 3천만원정도가 소요되어 가장 적은 비용을 통해 모니터링할 수 있음을 알 수 있었다. 하지만 항공기 탑재 LiDAR의 경우, 약 461억원 정도의 비용이 필요하여 지속적인 모니터링을 하는 것에 한계가 있음을 파악할 수 있었다. 그러므로, 비용적인 측면만을 고려하였을 때, 중해상도 광학영상을 선택하여 REDD+ 모니터링 시스템에 적용하는 것이 바람직하다. 그러나, MRV 시스템의 보고 시, 일정기준 이상의 신뢰도가 과학적으로 검증되어야 하기 때문에, 각 기술의 탄소축적량 추정의 불확실성 및 대상국가의 이행여건 등을 고려하여 자료를 선택해야 한다.

2. 기술적 측면(불확실성)

REDD+ 정책을 수행하는 가장 큰 목적은 산림전용 및 황폐화 그리고 산림탄소 축적증진을 통해 탄소배출권을 발급받기 위함이다. MRV 시스템은 탄소배출권을 발급해 주기 위한 하나의 과학적인 근거자료를 요구하는 과정으로써 모니터링 결과를 바탕으로 보고 및 검증과정이 인정될 때 성공적인 정책수행을 했다고 볼 수 있다. 현재 REDD+ 관련 국제적인 규정이나 방법론, 인증절차 및 기관 등이 정립되어 있지 않기 때문에 모든 사업은 시범적으로 운영되고 있다. 이는 실제적으로 REDD+가 국제적 인정단계에 돌입할 때 효과적인 사업추진을 준비하는 것으로 볼 수 있다. 이러한 상황에서 모니터링 시스템 구축에서 중요한 부분은 인정단계에 돌입될 시점에 인증받을 수 있는 수준에서의 불확실성을 가진 모니터링 시스템을

구축해야한다. 따라서 본 연구에서는 Gibbs 등(2007)이 탄소축적량 추정방법 별 불확실성 평가를 참고하고, 다양한 연구결과들을 비교 및 평가하여 다양한 원격탐사기술의 기술적 측면을 평가하였다(Table 4).

평가결과에 따르면 고해상도, 초고해상도 광학영상 및 항공기 탑재 LiDAR의 불확실성이 원격탐사기술 중에서 가장 낮은 것으로 나타났다. 반면, 중해상도 광학영상의 경우 가장 높은 불확실성을 보였다. 불확실성 측면만을 고려할 때, 현장조사를 통한 탄소축적량 추정방법이 가장 정확한 방법임을 확인할 수 있지만, REDD+의 이행의 성격상 국가단위의 대면적의 대상지에 대해 적용되기 때문에 본 방법을 적용하는 것에는 한계가 있다. 이에 원격탐사기술 중에서 선택될 수 있는 방법은 고해상도, 초고해상도 광학영상, 항공기 탑재 LiDAR, 그리고 SAR 시스템을 통한 탄소축적량 추정방법이다. 하지만, 비용적 측면을 포함한 대상국가의 모니터링 시스템 구축 능력을 고려한 원격탐사기술의 선택이 필요하다.

국내 모니터링 시스템 구축을 위한 원격탐사 기술 활용방안

앞에서 국내 REDD+ 모니터링 시스템 구축 시 필요한 원격탐사기술을 선택하기 위해, 각 원격탐사기술을 이용한 산림피복변화 및 탄소축적량 추정방법에 대해 살펴보았다. 또한, 각 원격탐사기술 비용적 측면과 기술적 측면을 분석하였다. 비용적 측면에서는 중해상도 광학영상, 고해상도 광학영상, 그리고 위성탑재 SAR의 순으로 낮은 비용을 통해 분석이 가능함을 확인할 수 있었다. 기술적 측면에서는 고해상도, 초고해상도 광학영상, 항공기 탑재 LiDAR, 그리고 SAR 시스템을 통한 탄소축적량 추정방법이 낮은 불확실성을 가진 원격탐사기술로 평가되었다. 이러한 결과를 REDD+ 모니터링 시스템의 구축을 위한 원격탐사기술을 토지피복변화 측면과 탄소축적량추정 측면으로 구분하여 살펴보았다. 원격탐사기술을 활용한 토지

피복변화 모니터링은 중해상도 광학영상 및 위성탑재 SAR를 통한 분석이 가장 효율적인 기술로 평가되었다. 이러한 평가결과는 인도 및 브라질에서 REDD+ 시범사업 시 활용하고 있는 Landsat과 같은 중해상도 광학영상과 일치한다. 반면, 탄소축적량 추정함에 있어서는 지역적 규모에서의 모니터링 방법론은 이미 실용적으로 활용되고 있지만, 국가규모의 모니터링 방법론에서는 아직까지 많은 한계가 존재하기 때문에 평가결과와 더불어 새로운 접근방법이 요구된다. 이는 대규모 대상지의 이질적인 산림구성 및 환경으로 인한 한계뿐만 아니라 분석방법 및 센서의 한계가 국가단위의 탄소축적량 모니터링에서는 제약으로 작용하기 때문이다. 이러한 한계를 극복하기 위해 최근에는 수직적 산림구조 분석이 가능하고, 낮은 불확실성을 가진 SAR, LiDAR 원격탐사기술과 낮은 소요비용의 이점뿐만 아니라 대면적에 대한 분석이 가능한 저·중해상도 광학영상을 통합한 탄소축적량 추정연구들이 진행되고 있다. 즉, SAR와 LiDAR 자료를 표본조사 기법을 활용하여 규모 확대를 적용하는 것이다. 따라서 국내에서 REDD+ 모니터링 시스템을 구축 시, 이상적인 방법은 중해상도 광학영상 및 위성 탑재 SAR를 통해 토지피복변화를 모니터링하고, LiDAR 및 SAR 표본조사 기법을 활용한 탄소축적량 추정기법을 통해 접근하는 것으로 판단된다.

지금까지 설명한 REDD+ 모니터링 시스템의 요점은 아직까지 본 메커니즘은 법적인 구속력이 존재하지 않을 뿐 아니라, 인증된 절차 및 방법론도 명확하게 명시되어 있지 않다. 이는 현재 진행 중인 REDD+와 관련한 모든 사업과 연구들은 기후변화와 관련한 국제적인 흐름 상 메커니즘의 이행이 현실화 될 것을 대비하기 위함이다. 즉, 아직까지 모니터링 시스템의 보고 및 검증에 있어서 얼마만큼의 불확실성이 인정될 수 있는지에 대한 정보 또한 존재하지 않음을 의미한다. 따라서 우리나라는 본 연구에서 설명한 다양한 원격탐사기술을 통한 각 기법의 장단점을 파악하고, REDD+의 공식적인 이행이 인정될 때 지속적인 연구를 통해 도출한 효율적인 모니터링 기법을 선택하여 사업을 진행할 수 있어야 한다.

온실가스 감축을 위한 REDD+는 post-2012 기간에 이행될 수 있는 신규 메커니즘으로서 크게 기여할 수 있을 것으로 보인다. 하지만, MRV 시스템 구축을 위해 제시된 기존의 방법론 자체가 기술적인 한계로 인해 대상 개도국들에게 적용이 어렵다는 한계가 존재한다. 이를 해결하기 위해 기술이전, 능력배양 및 재정지원 등의 주요 3가지 대책을 내세우고 있지만, 그 실효성에 대해서는 아직까지 평가되지 못하고 있다. 실제적으로 기술적인 한계는 대부분의 모니터링 시스템이 현장조사 자료와 결합된 원격탐사 자료를 통해 수행되고 있기 때문에, 기본 인프라 및 재정적인 지원이 열악한 개도국들은 정책계획 및 실행에 한계

가 있는 것은 자명하다. 때문에 개도국에서 활용 가능한 원격탐사자료를 선별하고 분석방법을 제시하는 것이 필요하며, 우리나라에서도 REDD+ 정책을 적용하기 위해서는 대상국가의 여건에 맞는 모니터링 시스템 개발이 필요하다.

결론

본 연구에서는 기후변화 공동해결을 위한 국제적 요구에 발맞춰 REDD+ MRV 시스템 구축에 필요한 다양한 원격탐사기술의 활용방안에 대해 살펴보았으며, 특히 토지피복변화와 탄소축적량 분석을 위해 적합한 원격탐사기술을 제안하였다. 국내 REDD+ 모니터링 시스템을 구축 시, 이상적인 방법은 중해상도 광학영상 및 위성 탑재 SAR를 통해 토지피복변화를 모니터링하고, LiDAR 및 SAR 표본조사 기법을 활용한 탄소축적량 추정기법을 통해 접근하는 것으로 판단되었다. 평가과정에서 비용적인 측면과 기술적인 측면만을 고려했기 때문에 다양한 영향요소들을 반영하지 못한 한계가 존재하지만, 원격탐사기술 선택 시 가장 중요한 두 가지 요소에 대한 평가를 했다는 점에서 의미를 찾을 수 있다.

우리나라에서도 MRV 시스템 구축과 관련한 연구들이 진행되고 있지만, 구체적으로 REDD+ 메커니즘 수행에 목적을 두고 수행되는 연구는 아직까지 미미한 상황이다. 따라서 본 연구에서 제안한 원격탐사기술 및 자료들을 기반으로 한 국가차원의 연구계획의 수립이 절실하며, 2011년에 개최될 COP-16에서 현실화 될 가능성이 많은 REDD+에 대한 정책적인 대비도 필요하다. 뿐만 아니라, 우리나라와 국제협력관계를 가지고 있는 대상 개도국과의 긴밀한 협조 및 REDD+ 메커니즘을 성공적으로 적용한 사례에 대한 세밀한 연구와 시행국가와의 협력관계 구축이 필요할 것으로 사료된다.

감사의 글

본 논문은 산림청의 지원으로 이루어진 ‘산림과학기술 개발사업(과제번호:S120909L010130)’의 일환으로 수행된 연구 결과의 일부임.

인용문헌

1. 산림청. 2009. 기후변화와 산림. 산림청
2. 석현덕, 윤범석. 2010. 기후변화협약 REDD+ 메커니즘의 이해와 향후 협상전망. 한국농촌경제연구원.
3. 장현숙. 2010. 칸쿤 기후변화회의의 결과 및 시사점. Trade Focus 9(63): 1-13.
4. Achard, F., Defries, R., Eva, H., Hansen, M., Mayaux, P.

- and Stibig, H.J. 2007 Pan-tropical monitoring of deforestation. *Environmental Research Letters*. 2.
5. Achard, F., DeFries, R., Herold, M., Mollicone, D., Pan-dey, D. and Souza, C. 2008. Guidance on monitoring of gross changes in forest area'. Chapter 3 in GOF-C-GOLD Reducing greenhouse gas emissions from deforestation and degradation in developing countries: a sourcebook of methods and procedures for monitoring, measuring and reporting. GOF-C-GOLD Report version COP13-2. GOF-C-GOLD Project Office, Natural Resources Canada, Alberta, Canada.
 6. Asner, G.P., Knapp, D.E., Broadbent, E., Oliveira, P., Keller, M. and Silva, J. 2005. Selective logging in the Brazilian Amazon. *Science* 310: 480-482.
 7. Baker, J.C. and Williamson, R.A. 2006. Satellite imagery activism: Sharpening the focus on tropical deforestation 27: 4-14
 8. Balzter, H. 2001. Forest mapping and monitoring with interferometric synthetic aperture radar(InSAR). *Progress in Physical Geography* 25: 159-177.
 9. Böttcher, H., Eisbrenner, K., Fritz, S., Kindermann, G., Kraxner, F., McCallum, I. and Obersteiner, M. 2009. An assessment of monitoring requirements and costs of Reduced Emissions from Deforestation and Degradation. *Carbon Balance and Management*. 1-14.
 10. Bird, A.C., Taylor, J.C. and Brewer, T.R. 2000. Mapping national park landscape from ground, air and space. *International Journal of Remote Sensing* 21: 2719-2736.
 11. Bortolot, Z.J. and Wynne, R.H. 2005. Estimating forest biomass using small footprint lidar data: An individual tree-based approach that incorporates training data. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 59(6): 342-360.
 12. Brockhaus, J.A. and Khorram, S. 1992. A comparison of Spot and Landsat-TM data for use in conducting inventories of forest resources. *International Journal of Remote Sensing* 13: 3035-3043.
 13. Brown, S. and Braatz, B. 2008. Methods for estimating CO₂ emissions from deforestation and forest degradation. Chapter 5 In: GOF-C-GOLD. Reducing greenhouse gas emissions from deforestation and degradation in developing countries: a sourcebook of methods and procedures for monitoring, measuring and reporting. GOF-C-GOLD Report version COP 13-2. GOF-C-GOLD Project Office, Natural Resources Canada, Alberta, Canada.
 14. Center for International Forestry Research(CIFOR). 2008. Moving Ahead with REDD Issues, Options and Implications.
 15. Clémençon, R. 2008. The Bali Road Map. *The Journal of Environment & Development* 17(1): 1-70.
 16. Coops, N.C., Waring, R.H. and Landsberg, J.J. 1998. Assessing forest productivity in Australia and New Zealand using a physiologically-based model driven with averaged monthly weather data and satellite-derived estimates of canopy photosynthetic capacity. *Forest Ecology and Management* 104: 113-127.
 17. De Fries, R., Achard, F., Brown, S., Herold, M., Murdi-yarso, D., Schlamadinger, B. and Souza, C.D. 2006. Reducing Greenhouse Gas Emissions from Deforestation in Developing Countries: Considerations for Monitoring and Measuring, Report of the Global Terrestrial Observing System(GTOS) number 46, GOF-C-GOLD report 26, available: www.fao.org/gtos/pubs.html, 23.
 18. DeFries, R., Achard, F., Brown, S., Herold, M., Murdi-yarso, D., Schlamadinger, B. and Souza, C. 2007. Earth observations for estimating greenhouse gas emissions from deforestation in developing countries. *Environmental Science and Policy* 10: 385-394.
 19. Dobson, M.C., Ulaby, F.T. and Pierce, L.E. 1995. Land-cover classification and estimation of terrain attributes using synthetic-aperture radar. *Remote Sensing of Environment* 51: 199-214.
 20. Drake, J.B., Knox, R.G., Dubnayaah, R.O., Clark, D.B., Condit, R., Blair, J.B. and Hofton, M. 2003. Above-ground biomass estimation in closed canopy neotropical forests using lidar remote sensing: factors affecting the generality of relationships. *Global Ecology and Biogeography* 12(2): 147-159.
 21. Food and Agricultural Organization(FAO). 2005. Global Forest Resources Assessment 2005: Progress Towards Sustainable Forest Management. FAO Forestry Paper 147. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome.
 22. Fazakas, Z., Nilsson, M. and Olsson, H. 1999. Regional forest biomass and wood volume estimation using satellite data and ancillary data. *Agriculture and Forest Meteorology* 98: 417-425.
 23. Fuller, R.M., Groom, G.B. and Jones, A.R. 1994. The land-cover map of Great-Britain-ian automated classification of Landsat Thematic Mapper data. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* 60: 553-562.
 24. Gibbs, H.K., Brown, S., Niles, J.O. and Foley, J.A. 2007. Monitoring and estimating forest carbon stocks : making REDD a reality. *Environmental Resource Letters* 2. IOP Publishing Ltd., UK. Available online at: http://www.iop.org/EJ/article/1748-9326/2/4/045023/erl7_4_045023.html.
 25. Global Observation of Forest and Land Cover Dynamics(GOF-C-GOLD), 2008, Reducing greenhouse gas emissions from deforestation and degradation in developing countries: a sourcebook of methods and procedures for monitoring, measuring and reporting, GOF-C-GOLD Report version COP13-2, (GOF-C-GOLD Project Office, Natural Resources Canada, Alberta, Canada.
 26. Global Observation of Forest and Land Cover Dynamics (GOF-C-GOLD), 2009. A sourcebook of methods and

- procedures for monitoring and reporting anthropogenic greenhouse gas emissions and removals caused by deforestation, gains and losses of carbon stocks in forests remaining forests, and forestation. GOF-C-GOLD Project Office, Natural Resources Canada, Alberta, Canada.
27. Grainger, A., Boucher, D.H., Frumhoff, P.C., Laurance, W. F., Lovejoy, T., McNeely, J., Niekisch, M., Raven, P., Sodhi, N.S., Ventner, O. and Pimm, S.L. 2009. Biodiversity and REDD at Copenhagen. *Current Biology* 19: 974-976.
 28. 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* 112: 2495-2513.
 29. Hare, W.L. 2009. A safe landing for the Climate. State of the World - Into a Warming World. Chapter 2. Worldwatch Institute. www.worldwatch.org/files/pdf/SOW09_chap2.pdf.
 30. Hoekman, D.H. and Quinones, M.J. 2000. Land cover type and biomass classification using AirSAR data for evaluation of monitoring scenarios in the Colombian Amazon. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 38: 685-696.
 31. Hofmann, P. 2001. Detecting Buildings and Roads from IKONOS-2 Data Using Additional Elevation Information. *GeoBIT/GIS: Journal of Spatial Information. Decision Making* 6: 28-33.
 32. Houghton, R.A. 2005. Tropical deforestation as a source of greenhouse gas emissions Tropical Deforestation and Climate Changeed Mutinho and Schwartzman.
 33. Intergovernmental Panel on Climate Change(IPCC). 2001. *Climate Change 2001: The Scientific Basis*, Cambridge University Press, Cambridge, U.K.
 34. Intergovernmental Panel on Climate Change(IPCC). 2007. *Climate Change 2007: Synthesis Report*. Intergovernmental Panel on Climate Change Fourth Assessment Report. Cambridge University Press, Cambridge, U.K.
 35. Kasischke, E.S., Melack, J.M. and Dobson, M.C. 1997. The use of imaging radars for ecological applications-a review. *Remote Sensing of Environment* 59: 141-156.
 36. Kim, S.R., Kwak, D.A., Lee, W.K., Son, Y., Bae, S.W., Kim, C. and Yoo, S. 2010. Estimation of carbon storage based on individual tree detection in Pinus densiflora stands using a fusion of aerial photography and LiDAR data. *Science China* 53(7): 885-897.
 37. Kwak, D.A., Lee, W.K., Cho, H.K., Lee, S.H., Son, Y., Kafatos, M. and Kim, S.R. 2010. Estimating stem volume and biomass of Pinus koraiensis using LiDAR data. *Journal of Plant Reserch*.
 38. Lee, J.S., Cloude, S.R., Papathanassiou, K.P., Grunes, M.R. and Woodhouse, I.H. 2003. Speckle filtering and coherence estimation of polarimetric SAR interferometry data for forest applications. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 41(10): 2254-2263.
 39. Lim, K., Treitz, P., Baldwin, K., Morrison, I. and Green, J. 2003. Lidar remote sensing of biophysical properties of tolerant northern hardwood forests. *Canadian Journal of Remote Sensing* 29(5): 658-678.
 40. Lim, K. and Treitz, P. 2004. Estimation of above ground forest biomass from airborne discrete return laser scanner data using canopy-based quantile estimators. *Scandinavian Journal of Forest Research*. 19(6): 558-570.
 41. Limp, W.F. 2002. Quick-Take Review of eCognition. *Geoworld* 0204: 53-54.
 42. Luckman, A., Baker, J., Honzak, M. and Lucas, R. 1998. Tropical forest biomass density estimation using JERS-1 SAR: seasonal variation, confidence limit, and application to image mosaics. *Remote Sensing of Environment* 63: 126-139.
 43. Næsset, E. 1997. Determination of mean tree height of forest stands using airborne laser scanner data. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 52: 49-56.
 44. Næsset, E. 2004. Estimation of above- and below-ground carbon in boreal forest ecosystems. *Proceedings of the ISPRS working group VIII/2International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. XXXVI, Part 8/W2. 145-148.
 45. Nelson, R., Short, A. and Valenti, M. 2005. Measuring biomass and carbon in delaware using an airborne profiling lidar. *Scandinavian Journal of Forest Research* 19(6): 500-511.
 46. Nilsson, M. 1996. Estimation of tree heights and stand volume using an airborne lidar system. *Remote Sensing of Environment* 56: 1-7.
 47. Patenaude, G, Milne, R. and Dawson. T.P. 2005. Synthesis of remote sensing approaches for forest carbon estimation : reporting to the Kyoto Protocol. *Environmental Science & Policy* 8: 161-178.
 48. Popescu, S.C. and Wynne, R.H. 2003. Seeing the trees in the forest: using lidar and multispectral data fusion with local filtering and variable window size for estimating tree height. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* 589-604.
 49. Popescu, S.C. 2007. Estimating biomass of individual pine trees using airborne lidar. *Biomass & Bioenergy* 31(9): 646-655.
 50. Ranson, K.J., Saatchi, S. and Sun, G.Q. 1995. Boreal forest ecosystem characterization with SIR-C/X-SAR. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 33: 867-876.
 51. Rosenqvist, A., Milne, A., Lucas, R., Imhoff, M. and Dobsone, C. 2003. A review of remote sensing technology in support of the Kyoto Protocol. *Environmental Science & Policy* 6: 441-455.
 52. Saatchi, S.S., Soares, J.V. and Alves, D.S. 1997. Map-

- ping Amazon Deforestation and Land Use in Amazon Rainforest by Using SIR-C Imagery. *Remote Sensing of Environment* 59: 191-202.
53. Saatchi, S.S., Alvala, R.C., Nelson, B. and Yifan, Y. 2007a. Spatial variation in forest structure and above-ground biomass in the southwestern Brazilian Amazon. *Forest Ecology and Management*.
 54. Saatchi, S.S., Houghton, R.A., Alvala, R.C., Soares, A. and Yu, Y. 2007b. Distribution of aboveground live biomass in the Amazon basin. *Global Change Biology* 13: 816-837.
 55. Sgrenzaroli, M., Eva, H. and Achard, F. 2000. Assessment of 100 m resolution L-band radar mosaics for regional forest change detection on lowland tropical forests of South America. *Remote Sensing and Forest Monitoring*. 208-215.
 56. Stern, N. 2006. *The Economics of Climate Change*. Cambridge University Press. 712.
 57. Trotter, C.M., Dymond, J.R. and Goulding, C.J. 1997. Estimation of timber volume in a coniferous plantation forest using Landsat TM. *International Journal of Remote Sensing* 18: 2209-2223.
 58. United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC): 2001, Report of the Conference of the Parties on its Seventh Session, Held at Marrakesh from 29 October to 10 November 2001, FCCC/CP/2001/13/Add. 2, (The Marrakech Accords), <http://unfccc.int/resource/docs/cop7/13a02.pdf>.
 59. Walker, W.S., Kelndorfer, J.M., LaPoint, E., Hoppus, M. and Westfall, J. 2007. An empirical InSAR-optical fusion approach to mapping vegetation canopy height. *Remote Sensing of Environment* 109: 482-499.
 60. Walker, W.S., Stickler, C.M., Kelndorfer, J.M., Kirsch, K.M. and Nepstad, D.C. 2010. Large-Area Classification and Mapping of Forest and Land Cover in the Brazilian Amazon: A Comparative Analysis of ALOS/PALSAR and Landsat Data Sources. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing* 3(4): 594-604.
 61. Woodcock, C.E., Macomber, S.A., Pax-Lenney, M. and Cohen, W.B. 2001. Monitoring large areas for forest change using Landsat: generalization across space, time and Landsat sensors. *Remote Sensing of Environment* 78: 194-203.
 62. Woodhouse, I.H., Cloude, S., Papathanassiou, K., Hope, J., Suarez, J., Osborne, P. and Wright, G. 2002. Polarimetric interferometry in the Glen Affric project: Results and conclusions. In *Proceedings of the IGARSS*, Toronto, ON, Canada, June 2002.
 63. Wulder, M. 1998. Optical remote-sensing techniques for the assessment of forest inventory and biophysical parameters. *Progress in Physical Geography* 22: 447-449.

(2011년 2월 28일 접수; 2011년 7월 6일 채택)