

KOMPSAT-2 영상을 이용한 산림의 이산화탄소 흡수량 추정

김소라 · 이우균* · 곽한빈 · 최성호
고려대학교 생명과학대학 환경생태공학부

Estimating Carbon Sequestration in Forest using KOMPSAT-2 Imagery

So-ra Kim, Woo-kyun Lee*, Han-bin Kwak and Sung-ho Choi

Department of Environmental Science & Ecological Engineering,
Korea University, Seoul 136-701, Korea

KOMPSAT-2 영상을 이용한 산림의 이산화탄소 흡수량 추정

김소라 · 이우균* · 곽한빈 · 최성호
고려대학교 생명과학대학 환경생태공학부

Estimating Carbon Sequestration in Forest using KOMPSAT-2 Imagery

So-ra Kim, Woo-kyun Lee*, Han-bin Kwak and Sung-ho Choi

Department of Environmental Science & Ecological Engineering,
Korea University, Seoul 136-701, Korea

요약: 본 연구의 목적은 KOMPSAT-2 영상을 이용하여 대상지 내 주요 수종의 이산화탄소 흡수량을 추정하는 것이다. 우선, KOMPSAT-2 영상을 분할영상분류방법으로 산림내 수종을 임상단위로 분류하였다. 분류된 임상의 평균 수관직경을 추정한 후, 이를 각 수종의 면적에 대비시켜 수종별 본수를 추정하였다. 평균 흉고직경은 지상조사를 통해 유도된 수관직경과 흉고직경의 관계식을 이용하여 추정하였다. 이와 같이 추정된 수종별 흉고직경과 본수를 기존의 바이오매스 추정식에 대입하여 수종별 바이오매스를 추정하였다. 바이오매스에 '기후변화에 관한 정부간 패널(IPCC)'의 가이드라인에 따른 계수를 적용하여 임상단위의 이산화탄소 흡수량을 추정했다. 본 연구의 임상단위 수종별 이산화탄소 흡수량 추정 접근방식은 향후, 표본점 단위의 이산화탄소 흡수량을 임상단위 이산화탄소 흡수량으로 확장시키는데 활용될 수 있다.

Abstract: The objective of this study is to estimate the carbon sequestration in forest stands using KOMPSAT-2 imagery. For estimating the amount of carbon sequestration, the stand biomass of forest was estimated with the total weight, which was the sum of individual tree weight. Individual tree volumes could be estimated by the crown width extracted from KOMPSAT-2 imagery. In particular, the carbon conversion index and the ratio of the CO₂ molecular weight to the C atomic weight, reported in the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) guideline, was used to convert the stand biomass into the amount of carbon sequestration. Thereafter, the KOMPSAT-2 imagery was classified with the segment based classification (SBC) method in order to quantify carbon sequestration by tree species. This approach, estimating the amount of carbon sequestration for certain species in stand, can be available to extend plot-based carbon sequestration to stand-based carbon sequestration.

Key words : carbon sequestration, segment based classification, KOMPSAT-2 imagery, biomass

서론

교토의정서에서 온실가스 감축을 위한 추가, 보조적인 수단으로 탄소흡수원(carbon sink)의 추정이 제시되고 있다. 산림은 대표적인 탄소흡수원으로서 식물의 광합성과정에서 이산화탄소가 탄소로 전환되어 바이오매스나 토양에 저장된다(김태민 등, 2007). 산림에서 흡수, 저장한 탄소량을 온전히 인정받기 위해서는 IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change) 가이드라인에 따른 온실가스통계를 구축해야 한다. 이를 위해 국내에서는 국립산림과학원을 중심으로 관련연구 및 통계구축사업이 이

루어지고 있으며(이경학과 임재규, 2004; 서정호 등, 2006; 이경학, 2007), 산림청에서는 '탄소흡수원 10년 계획(2005)'을 수립하고 있는 등 탄소흡수원 확충을 위한 사업이 추진되고 있다.

탄소저장량은 산림의 임분별 바이오매스에 의해 결정된다. 기존의 바이오매스 측정은 직접적인 산림조사를 통하여 개체목의 수고, 흉고직경 및 수관폭 등을 측정하기 때문에 매우 노동집약적이고 다량의 시간이 소비되는 문제점이 있었다. 또한, 접근이 어려운 대상지의 경우 측정이 어려운 문제도 있다. 그러나 위성영상, 항공사진 및 LiDAR(Light Detection And Ranging) 등의 원격탐사기법은 장소 및 시간에 구애받지 않고, 원하는 시기의 자료를 획득할 수 있으며, 현장조사를 통해 취득

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

된 산림생장요소의 측정이 가능하기 때문에 매우 경제적이고 효율적인 측정방법이라 할 수 있다(Kim, 2007). 위성영상을 이용한 기존 연구에서는 MODIS나 SPOT-VEGETATION, NOAA-AVHRR과 같은 저해상도 영상을 사용하여 광범위한 지역을 식생과 토양으로 구분해 바이오매스와 탄소흡수원을 추정하는 연구(Federico 등, 2006; Ranson 등, 2007)가 많이 이루어지고 있다. 하지만 저해상도 위성영상을 사용하였을 경우 정밀한 정보의 취득이 어려워 고해상도 자료를 활용하여 취득된 추정치보다 신뢰성이 낮다. 최근, 고해상도 위성영상인 IKONOS나 Quickbird를 이용하여 단일 식생에 대한 바이오매스나 탄소저장량을 추정하는 연구(Thenkabail 등, 2004; 김태민 등, 2007)가 활발히 이루어지고 있지만, 좀더 정밀한 자료를 얻기 위해서는 다양한 수종에 대한 탄소저장량의 추정 연구가 필요하다. 이를 위해서는 정밀한 식생분포도가 필요하다. 정밀한 식생분포도를 제작하기 위해 현재 위성영상이나 디지털 항공사진을 이용하여 임상을 수종까지 분류하는 기술 연구(Chung 등, 2001; Lee 등, 2001; Cho, 2002; Cho 등, 2002; Kim 등, 2007)가 활발히 진행되고 있다. 영상을 이용하여 식생을 분류하기 위한 방법은 화소기반분류(Pixel Based Classification, PBC)와 분할영상기반분류(Segment Based Classification, SBC) 등이 있다. PBC는 전통적인 영상분류방법으로 고해상도 영상을 이용하여 분류할 경우 'salt-and-pepper' 효과가 나타나 식생분포도를 제작하기에 적합하지 않다(Chung 등, 2001; Lee 등, 2001; Cho 등, 2002; Kim 등, 2007). SBC는 분할영상을 생성하여 PBC의 문제점을 해결할 수 있는 분류방법으로 인정되고 있다(Mallinis 등, 2007).

본 연구에서는 고해상도 위성영상인 KOMPSAT-2 영상을 이용하여 SBC방법으로 산림지역 내의 수종을 임상단위로 분류하여 각 수종에 대한 이산화탄소 흡수량을 추정하는 방법을 제시하고자 한다.

재료 및 방법

1. 연구대상지 및 재료

본 연구는 figure 1과 같이 경기도 양평에 위치한 좌상단(127° 39' 3" E, 37° 30' 36" N), 우하단(127° 40' 54" E, 37° 29' 41" N)에 해당하는 지역을 대상으로 선정하였다. 연구대상지는 486 ha이며, 대부분의 산림 지역과 약간의 농지 및 주거지로 이루어져 있다. 산림 지역은 소나무, 잣나무, 낙엽송, 참나무류가 임상의 주를 이루었다.

연구 재료로 사용하는 고해상도 KOMPSAT-2 영상은 4 m 공간해상도를 갖는 4개의 다중분광영상과 1 m 공간해상도를 갖는 전정색영상을 융합한 것으로, 1 m 공간해상도와 4개 밴드의 분광해상도를 갖는 고분해능 영상이다. 이 영상은 2007년 11월 7일에 촬영된 것이다.

2. 연구방법

본 연구는 Figure 2와 같은 흐름으로 진행되었다. 우선 위성영상으로부터 분할영상분류 기법으로 영상을 임상단위로 구획하고, 구획된 임상의 흉고직경 및 본수를 위성영상을 통한 수관면적 정보로부터 지상조사의 관계식을 통해 간접적으로 추정하였다. 이와 같이 추정된 임상별 흉고직경과 본수로 부터 이산화탄소 흡수량 산정 관계식을 통해 최종적으로 임상별 이산화탄소 흡수량을 추정하였다.

1) 분할영상의 생성

분할영상은 일정 값을 기준으로 유사한 화소들을 하나의 폴리곤으로 묶어서 같은 속성을 지닌 개체로 만드는 것을 말한다(Definiens, 2006b). 분할영상을 생성하기 위해 Definiens사의 Definiens Professional 5.0을 사용하였다. 이 프로그램은 영역확장(region-growing)방법으로 분할영상을 생성하며, 하나의 분할영상이 더 이상 커지지 않고 멈추는 기준인 scale parameter를 설정하여 영상개체에 대한 이질성을 정의한다(Definiens, 2006a). 본 연구에서는

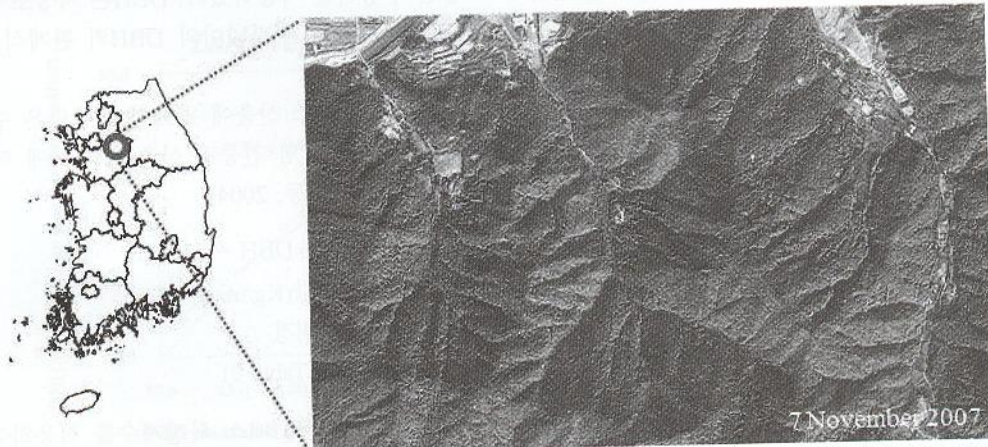


Figure 1. Study area with the pan-sharpened KOMPSAT-2 imagery.

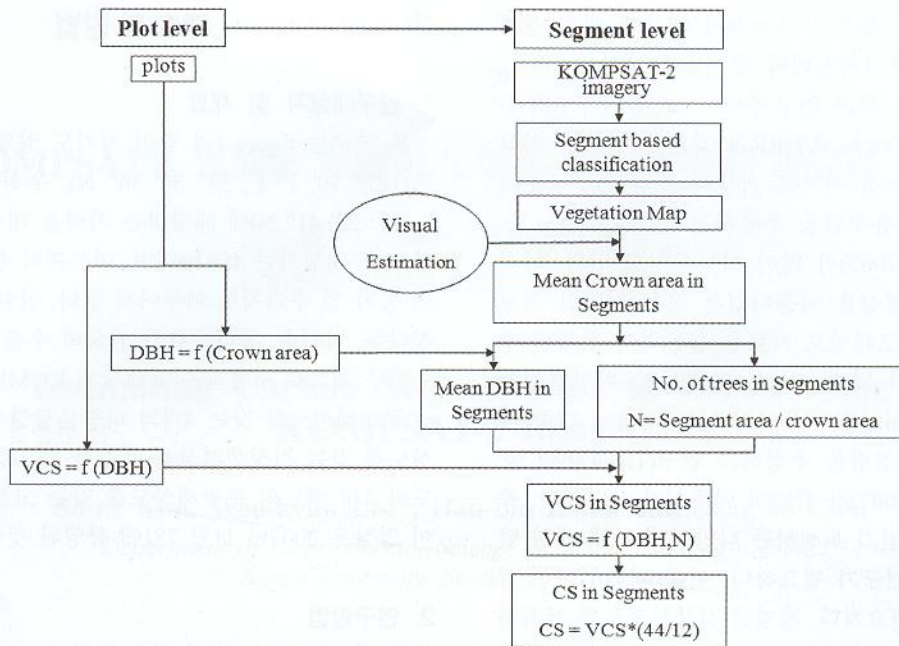


Figure 2. Study process for estimating carbon sequestration (VCS : vegetation carbon storage, CS : carbon sequestration).

Table 1. Parameters used for image segmentation.

Level	Scale parameter	Heterogeneity	
		color	shape
1	90	0.9	0.1
2	120	0.9	0.1
3	160	0.9	0.1

분할영상을 생성하기 위한 각 기준(scale, color, shape)의 값을 선행연구(Kim, 2007) 결과를 참조하였다(Table 1).

2) 분류

영상분류를 성공적으로 수행하기 위해 분류항목을 적절히 선정하여 분류해야 한다. 본 연구에서는 영상의 육안분류 및 지상조사를 통해 연구대상지에 출현하는 임상 및 현상들을 파악하고 이를 근거로 하여, 네 항목의 산림지역(리기다소나무, 잣나무, 낙엽송, 참나무류)과 한 항목의 비산림지역을 분류항목으로 선정하였다.

영상분류는 각 분류항목의 분광값 차이로 분류하는 것을 기본 원리로 한다. 본 연구에서는 선행연구 결과(Kim, 2007)를 참조하여 SBC방법을 사용하였다. SBC는 PBC결과를 일정기준에 의해 생성된 분할영상과 중첩하여 분할영상 내 화소의 분류항목 중에서 가장 많은 수를 차지하는 값을 분할영상의 분류항목으로 정하는 다수원칙을 사용하여 임상을 분류하는 방법이다(Cho 등, 2003).

3) 이산화탄소 흡수량 추정

산림의 임상별 이산화탄소 흡수량을 산출하는 식에는

Table 2. Coefficients for calculating dry weight(W) from DBH by tree species.

Species	coefficient for			FI
	W=a + b · DBH + c · DBH ²			
	a	b	c	
<i>Pinus rigida</i>	12.17400	-3.28612	0.36354	0.869
<i>Pinus koraiensis</i>	31.60970	-5.44588	0.42022	0.964
<i>Larix leptolepis</i>	1.42534	-1.98035	0.40005	0.935
<i>Quercus acutissima</i>	-3.66166	-0.51529	0.35117	0.942

*Source : Korea Forest Research Institute

바이오매스와 탄소전환계수가 변수로 적용된다. 바이오매스의 추정식에는 흉고직경(Diameter at Breast Height, DBH)만을 적용한 식과 DBH와 수고를 적용한 식이 있으나(임업연구원, 1998), 위성영상에서는 수고 자료를 얻기 어렵기 때문에 수관넓이와 수관관계가 있는 DBH만을 적용한 추정식을 사용하였다. DBH는 지상조사 자료로부터 도출한 수종별 수관넓이와 DBH의 관계식을 통해 추정하였다.

총 바이오매스 산출에 필요한 건중량은 수종별 계수와 DBH를 개체목 당 건중량 산출식(식 1)에 적용하여 계산하였다(손영모 등, 2004).

$$W = a + b \cdot DBH + c \cdot DBH^2 \tag{1}$$

W = 건중량(Kg/tree)

DDH = 흉고직경

a, b, c = 계수(Table 2)

건중량에 바이오매스 확장계수를 적용하여 수종별 바이오매스량을 산출했다(식 2).

$$B = W \times BEF \quad (2)$$

B = 총 바이오매스(kg/tree)

BEF = 바이오매스 확장계수

(침엽수 : 1.6512, 활엽수 : 1.7202)

수종별 총 바이오매스량을 탄소저장량으로 전환하기 위해 IPCC에서 권고한 탄소전환계수 0.5를 적용하여 식생탄소저장량을 산출했다(식 3).

$$VCS = B \times 0.5 \quad (3)$$

VCS = 식생탄소저장량(kgC/tree)

0.5 = 탄소전환계수(IPCC)

식생탄소저장량을 전환비를 적용하여 이산화탄소 흡수

량(Carbon Sequestration : CS)으로 전환하였다(식 4).

$$CS = VCS \times (44/12) \quad (4)$$

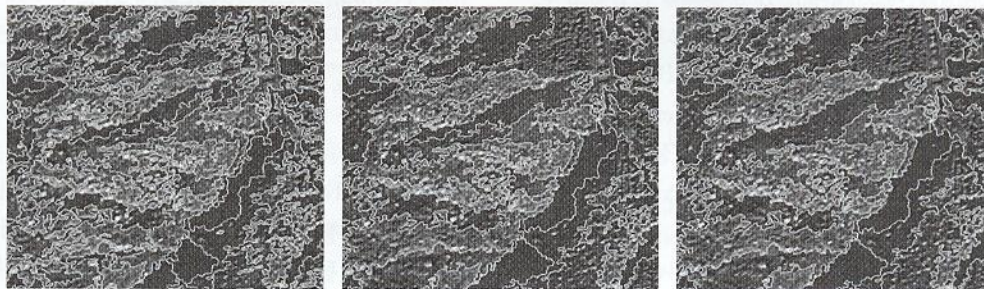
CS = 이산화탄소 흡수량(kgCO₂/tree)

44/12 = 전환비

DBH로부터 CS를 산출하기 위해 식 1에서 식 4로부터 도출한 관계식은 식 5와 같다.

$$CS = BEF(a + bD + cD^2) \times 55/30 \quad (5)$$

DBH추정 과정 중 측정된 수종별 평균 수관폭을 임상별로 적용하여 임상별 개체목 수를 산출한 후 CS에 적용하여 임상단위 CS를 추정하였다.



<Level 1>

<Level 2>

<Level 3>

Figure 3. Segmentation process of KOMPSAT-2 imagery.

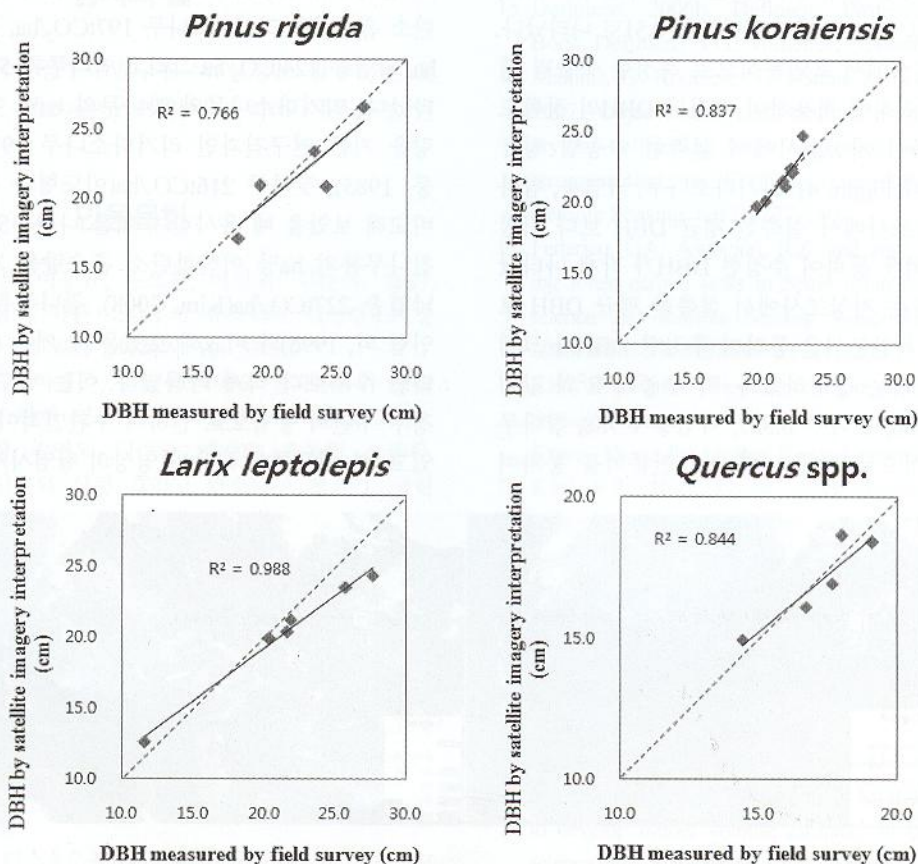


Figure 4. Comparing the visual interpretation of satellite imagery with field survey data.

결과 및 고찰

1. 분할영상의 생성

KOMPSAT-2영상을 Level 1, 2, 3의 기준값으로 분할영상을 생성해 본 결과 Level 2(scale parameter 120, color 0.9, shape 0.1)가 가장 적합하다고 판단되었다(Figure 3). Level 1은 과도하게 분할되었으며, Level 3은 너무 크게 분할되었다. 이에 본 연구에서는 SBC와 CS 추정시 기반이 되는 분할영상을 Level 2의 기준값으로 적용하여 생성하였다.

2. 영상분류

KOMPSAT-2영상을 다섯 개의 분류항목으로 분할영상 분류한 수종별 공간분포는 Figure 5a와 같으며, 'salt-and-pepper' 효과가 없는 공간분포를 보여주고 있다. 분류결과 수종별 생산자 및 사용자 정확도(producer's and user's accuracy)는 Table 3과 같으며, 영상분류 전체정확도(overall accuracy)는 86%, Kappa value는 0.82로 나타났다.

3. 이산화탄소 흡수량 추정

KOMPSAT-2 영상에서 DBH를 추정하기 위해 지상조사를 통하여 DBH와 수관면적의 관계식을 수종별로 도출하였다(Table 4). 수종별 결정계수(R^2)는 리기다소나무 0.70, 잣나무 0.65, 낙엽송 0.77 그리고 참나무류 0.51로 나타났다.

KOMPSAT-2 영상에서 육안분석으로 측정한 수종별 평균 수관면적을 회귀식에 적용하여 추정된 DBH의 정확도를 검증하기 위하여 지상조사에서 실측한 수종별 평균 DBH와 비교하였다(Figure 4). 리기다소나무, 낙엽송, 참나무류의 경우 지상조사에서 실측한 평균 DBH 보다 위성영상에서 육안분석을 통하여 추정된 DBH가 작게 나타났으며, 잣나무의 경우 지상조사에서 실측한 평균 DBH 보다 위성영상에서 육안분석을 통하여 추정된 DBH가 크게 나타났으나 그 차이는 경미하였다. 각 수종의 R^2 의 값이 리기다소나무 0.766, 잣나무 0.837, 낙엽송 0.988, 참나무류 0.844로 전체적으로 높게 나타나 육안분석을 통하여

Table 3. Error matrix of SBC using KOMPSAT-2 imagery.

Class	Producer's Accuracy (%)	User's Accuracy (%)
<i>Pinus rigida</i>	89	84
<i>Pinus koraiensis</i>	60	100
<i>Larix leptolepis</i>	81	100
<i>Quercus acutissima</i>	100	65
non-forest area	99	100

Table 4. Regression functions for estimating DBH(y) from crown area(x).

Tree species	Regression function	Coefficient of determination (R^2)
<i>Pinus rigida</i>	$y=6.897\ln(x)+1.824$	0.70
<i>Pinus koraiensis</i>	$y=8.382\ln(x)-3.843$	0.65
<i>Larix leptolepis</i>	$y=11.42\ln(x)-14.54$	0.77
<i>Quercus spp</i>	$y=6.049\ln(x)+0.073$	0.51

*y : DBH(cm), x : crown area(m²)

추정된 DBH는 신뢰성이 있다고 판단되었다.

임분별 개체목수와 Table 4의 식에서 추정되는 DBH를 통하여 추정된 수종별 이산화탄소 흡수량의 공간분포는 Figure 5b와 같게 나타났다. 수종별로는 리기다소나무 10,425tCO₂, 잣나무 2,579tCO₂, 낙엽송 21,549tCO₂ 그리고 참나무류 10,256tCO₂로 나타났다. 수종별 ha당 이산화탄소 흡수량은 리기다소나무 197tCO₂/ha, 잣나무 156tCO₂/ha, 낙엽송 124tCO₂/ha 그리고 참나무류 53tCO₂/ha으로 나타났다. 리기다소나무와 잣나무의 ha당 이산화탄소 흡수량을 기존 연구결과인 리기다소나무 197tCO₂/ha(이경재 등, 1985), 잣나무 216tCO₂/ha(이도형과 황재우, 2000)와 비교해 보았을 때 유사한 수치를 나타내었으나, 낙엽송과 참나무류의 ha당 이산화탄소 흡수량을 기존 연구결과인 낙엽송 227tCO₂/ha(Kim, 2008), 참나무류 132tCO₂/ha(박인협 외, 1996)와 비교해 보았을 때 기존 연구결과에서 나타난 수치보다 적게 나타났다. 이는 밀도가 높은 임분의 경우 수관의 중첩으로 인하여 수관면적이 작게 추정될 수 있고, 본 연구에서 사용된 영상의 촬영시기가 겨울철인 점

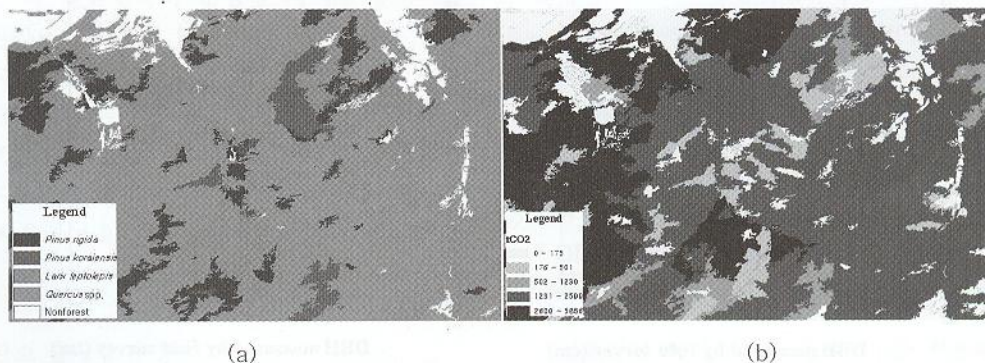


Figure 5. Vegetation distribution map (left) and CO₂ distribution map (right).

을 고려하였을 때 낙엽수인 낙엽송과 참나무류의 수관폭이 실제보다 작게 관측되는데 그 원인이 있는 것으로 판단된다. 따라서 낙엽수인 낙엽송과 참나무류림에서 상록수인 리기다소나무와 잣나무림에서보다 이산화탄소 흡수량이 기존 연구보다 낮게 추정되는 것으로 판단된다.

결론

본 연구에서는 고해상도 위성영상인 KOMPSAT-2 영상을 이용하여 산림지역의 이산화탄소 흡수량을 임분단위로 추정하기 위해 수행되었다.

CO₂ 흡수량 추정에는 바이오매스가 추정되어야 한다. 이때 바이오매스 추정식에 필요한 DBH를 위성영상에서는 직접적으로 구할 수 없기 때문에 지상조사를 통하여 수관면적과 DBH의 관계식을 통해 수관면적으로부터 추정해야 하는 한계가 있다. 또한, 개체목 산출시 수종별 수관면적을 평균수치로 적용하여 계산하기 때문에 임분의 소밀도가 고려가 되지 않는 한계가 있다.

이러한 한계점을 개선하기 위해 위성영상에서 직접적으로 개체목을 분할하는 기법연구와 위성영상에서 직접적으로 바이오매스량을 추정하는 기법연구가 필요하다.

감사의 글

본 연구는 한국항공우주연구원 '위성정보 활용지원 운영사업(과제번호 FR09622)' 지원에 의하여 이루어진 연구의 일부분임.

인용문헌

- 김태민, 송철철, 이우균, 손요환, 배상원, 김춘식. 2007. Quickbird 영상에 의한 소나무의 유역단위 식생탄소저장 능력 추정. 한국산림측정학회지 10: 33-38.
- 박인협, 이돈구, 이경준, 문광선. 1996. 참나무류의 생장 및 물질생산에 관한 연구(1). 한국임학회지 85(1): 76-83.
- 서정호, 이경학, 손영모, 임종환, 배계수, 유동현, 노종환. 2006. 지구온난화와 산림 그리고 탄소나무 계산기. 국립산림과학원. pp. 96.
- 손영모, 이경학, 권순덕, 이우균. 2004. 주요 수종의 임목 자원 평가 및 예측시스템. 국립산림과학원. 125pp.
- 이경재, 김갑덕, 김재생, 박인협. 1985. 광주지방의 리기다소나무 및 리기다소나무 조림지의 물질생산량에 관한 연구. 한국임학회지 69: 28-35.
- 이경학, 임재규. 2004. 기후변화협약 제3차 국가보고서 작성을 위한 기반구축연구(제1차년도) 임업부문 온실가스 통계작성에서의 IPCC 우수실행지침 적용성 분석. 에너지경제연구원.
- 이경학. 2007. 탄소흡수원 기술 정책 및 인벤토리 연구, 국토의정서 발표 2주년 학술 심포지움 : 기후변화협약 협상동향 및 산림부문 대응방향.
- 이도형, 황재우. 2000. 회귀식에 의한 잣나무 물질 생산성 추정. Journal of Resource Development 19(1): 77-82.
- 임업연구원. 1998. 산림의 온실가스 저감방안. 임업연구원 연구자료 제143호. pp. 6-27.
- Cho, H.K. 2002. Untersuchungen über die Erfassung von Waldflächen und deren Veränderungen mit Hilfe der Satellitenfernerkundung und segmentbasierter Klassifikation. Am Beispiel des Untersuchungsgebietes "Pyeong-Chang" in Korea, Ph.D. dissertation, Georg-August-Universität Göttingen, Göttingen.
- Cho, H.K., Lee, W.K. and Lee, S.H. 2002. Mapping of vegetation cover using segment based classification of IKONOS imagery. Korean Journal Ecological Society 1(3): 165-169.
- Cho, H.K., Lee, W.K. and Lee, S.H. 2003. Mapping of vegetation cover using segment based classification of IKONOS imagery. Korean Journal Ecological 26(2): 75-81.
- Chung, K.H., Lee, W.K., Kim, K.H. and Lee, S.H. 2001. Classification of forest type using high resolution imagery of satellite IKONOS. Korean Journal of Remote Sensing 17(3): 275-284.
- Definiens, 2006a. Definiens Professional 5 User Guid, Definiens AG, Munchen, Germany pp15.
- Definiens. 2006b. Definiens Professional 5 Reference Book, Definiens A.G., München, Germany, pp. 10-12.
- Mallinis, G, Koutsias, N., T-Strati, M. and Karteris, Michael, 2007. Object-based classification using Quickbird imagery for delineating forest vegetation polygons in a Mediterranean test site. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 63(2): 237-250.
- Federico, G.A. Asunción, R.Z. and José, C.G. 2006. Assessing forest carbon sinks in Spain using satellite images. Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2006. IGARSS 2006. IEEE International: 1721-1723.
- Kim, D.H. 2008. Biomass, carbon and nitrogen storage in an age-sequence of Larix kaempferi stands in central Korea. Thesis for Master, Korea University, Seoul.
- Kim, S.R. 2007. Forest cover classification by optimal segmentation of IKONOS imagery. Thesis for Master, Korea University, Seoul.
- Lee, W.K., Lee, J.H., Chung, K.H. and Jun, E.J. 2001. Spatial characteristics of forest type distribution on the basis of geo-morphological factors and IKONOS satellite imagery. Korean Journal of Forest Measurements 4(1): 74-82.
- Ranson, K.J., Nelson, R., Kimes, D., Sun, G., Kharuk, V. and Montesano, P. 2007. Using MODIS and GLAS data to develop timber volume estimates in central Siberia. Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2007. IGARSS 2007. IEEE International : 2306-2309.

22. Thenkabail, P.S., Stucky, N., Grisscom, B.W., Ashton, M.S., Diels, J., van der Meer, B. and Enclona, E. 2004. Biomass estimations and carbon stock calculations in the oil palm plantations of African derived savannas using

IKONOS data. *International Journal of Remote Sensing* 25(23): 5447-5472.

(2009년 4월 16일 접수; 2009년 6월 19일 채택)