

# kNN 알고리즘과 계절별 Landsat TM 위성영상을 이용한 단양군 지역의 지상부 바이오매스 탄소저장량 추정

## Estimation of Aboveground Biomass Carbon Stock in Danyang Area using kNN Algorithm and Landsat TM Seasonal Satellite Images

정재훈\* · 허 준\*\* · 유수홍\*\*\* · 김경민\*\*\*\* · 이정빈\*\*\*\*\*

Jung, Jae Hoon · Heo, Joon · Yoo, Su Hong · Kim, Kyung Min · Lee, Jung Bin

### 要 旨

원격탐사 자료와 현장 자료를 이용한 산림 바이오매스 탄소량 추정은 전 세계적으로 각광을 받고 있으며, 국내의 경우 2010년 국립산림과학원에서 개발한 수종별 탄소배출계수를 통해 보다 정확한 탄소량 추정이 가능하게 되었다. 본 연구에서는 2006년부터 2009년까지 구축된 제5차 국가산림자원조사(National Forest Inventory, NFI) 자료를 기반으로 k-Nearest Neighbor(kNN) 알고리즘을 이용하여 충청북도 단양군의 지상부 바이오매스 탄소량을 추정하였다. 원격탐사 자료로는 계절 변화가 뚜렷한 한반도의 기후가 산림 지역의 분광 특성 및 이에 따른 탄소량 추정에 미치는 영향을 조사하기 위해 2004년부터 2005년까지 계절별로 취득된 Landsat TM 위성영상을 이용하였다. 분석결과 단양군 지역의 지상부 바이오매스 총 탄소량은 최대 3542768.49tonC에서 최소 3329037.51tonC 사이로 추정되었으나, 계절에 따른 특정 경향은 발견되지 않았다.

핵심용어 : Landsat TM, NFI, kNN, 탄소량, 탄소분포지도

### Abstract

The joint use of remotely sensed data and field measurements has been widely used to estimate aboveground carbon stock in many countries. Recently, Korea Forest Research Institute has developed new carbon emission factors for kind of tree, thus more accurate estimate is possible. In this study, the aboveground carbon stock of Danyang area in South Korea was estimated using k-Nearest Neighbor(kNN) algorithm with the 5th National Forest Inventory(NFI) data. Considering the spectral response of forested area under the climate condition in Korea peninsular which has 4 distinct seasons, Landsat TM seasonal satellite images were collected. As a result, the estimated total carbon stock of Danyang area was ranged from 3542768.49tonC to 3329037.51tonC but seasonal trends were not found.

Keywords : Landsat TM, NFI, kNN, Carbon stock, Carbon map

### 1. 서 론

온실가스의 대기 중 농도 증가로 인해 지구온난화가 가속화되면서 지구 표면의 온도 역시 지속적으로 상승 추세에 있다. 지구온난화는 1972년 로마클럽 보고서에서 처음으로 거론되기 시작했으며, 1985년 유엔환경계획(UN Environmental Plan, UNEP)과 세계기상기구

(World Meteorological Organization, WMO)는 지구 온난화의 주요인이 이산화탄소임을 공식 선언하였다. 이산화탄소는 주로 화석 연료의 사용과 같은 인위적인 요인에 의해 발생하고 있으며, 전 세계적으로 대기 중 이산화탄소량은 산업화 이전인 1750년 280 ppm에서 2005년에는 379 ppm으로 증가하였고, 특히 지난 10년간 이산화탄소는 매년 2 ppm 씩 증가한 것으로 조사되

2010년 11월 12일 접수, 2010년 12월 14일 채택

- \* 정희원 · 연세대학교 토목환경공학과 박사과정(lionheart\_kr@yonsei.ac.kr)
- \*\* 교신저자 · 정희원 · 연세대학교 토목환경공학과 부교수(jheo@yonsei.ac.kr)
- \*\*\* 정희원 · 연세대학교 토목환경공학과 석사과정(swennoir@yonsei.co.kr)
- \*\*\*\* 국립산림과학원 연구사(greenann@forest.go.kr)
- \*\*\*\*\* 국립산림과학원 연구인턴(ortolan@yonsei.ac.kr)

었다. 이산화탄소량의 증가로 인한 지구온난화는 전 세계적으로 해수면 상승, 생물종의 손실, 태풍과 같은 기상이변을 일으키고 있으며, 이로 인해 2100년까지 세계 GDP의 5~20%에 달하는 경제적 피해가 예상되고 있다(조현진, 2010).

산림 바이오매스는 이러한 이산화탄소의 주요 흡수원으로 지상 탄소량의 대부분을 저장하고 있고, 대기와 이산화탄소를 교환함으로써 전 지구적인 탄소 순환에 큰 영향을 미치고 있다(Fuchs 등, 2009). 따라서 산림 바이오매스로부터 추정되는 산림 탄소저장량을 주기적으로 모니터링하는 것은 탄소순환량을 파악함과 더불어 지구 온난화방지 및 미래의 기후변화를 예측하는 데 있어 중요한 요소로 작용한다.

이러한 산림 탄소저장량을 주기적으로 모니터링하기 위한 방법으로 최근 위성영상을 활용한 원격탐측이 각광을 받고 있다. 위성영상을 이용한 방법은 기존 현장측량 방법에 비해 시간과 인력의 소모를 효과적으로 줄일 수 있을 뿐만 아니라 표본점 이외의 탄소분포량도 추정할 수 있다는 장점이 있다. 탄소량 추정에는 Regression model, Direct Radiometric Relationship (DRR), BIOMass from Cluster Labeling Using Structure and Type (BioCLUST), *k*-Nearest Neighbor (*k*NN)와 같은 다양한 방법이 사용되고 있으며, 특히 *k*NN 알고리즘은 최근 탄소량 추정에 있어 전 세계적으로 각광을 받고 있다. 대표적인 연구로 스웨덴에서는 *k*NN 알고리즘과 국가산림자원조사(National Forest Inventory, NFI) 자료 및 Landsat TM 위성영상을 이용한 산림 파라미터 추정연구를 실시하였으며(Reese 등 2002; 2003), Gjertsen 등(2007)은 Landsat TM 자료와 *k*NN 방법을 기초로 노르웨이의 남동쪽 지역 산림 지도화의 정확도 평가를 수행하였다. 그 외에도 *k*NN을 이용한 임목 밀도, 재적, 식생분류의 지도화 및 추정(Franco-Lopez 등, 2001), *k*NN을 적용한 다중시간대 Landsat ETM+ 영상의 지중해 산림바이오매스 파라미터 추정(Maselli 등, 2005), *k*NN 알고리즘과 산림조사 자료, 인공위성 자료를 이용한 산림 지역의 계층별 분류(McRoberts 등, 2002), 동시간대 Landsat TM과 IRS-1C WiFS 취득 자료를 이용한 지상부 바이오매스 추정(Tomppo 등, 2002) 등의 연구를 들 수 있으며, 최근에는 아시아 지역에서도 *k*NN을 활용한 산림바이오매스 추정 연구가 보고되고 있다(Huiyan 등, 2006; Kajisa 등, 2008). 한편, Haapanen 등(2001)은 매년 지속적으로 변화하는 산림지역을 대상으로 산림 바이오매스의 지도화 및 각종 파라미터 추정을 위한 *k*NN 알고리즘의 현황과 발전 방향을 연구하기도 하였다.

국내의 경우 임종수 등(2007)은 제3차 NFI 현지조사 자료와 Landsat-7 ETM+ 영상, 그리고 *k*NN 알고리즘을 이용하여 강원도 평창군 산림의 ha당 재적, 흉고단면적, 그리고 본수에 대한 주제도를 작성하였다. 또한 2009년 연구에서 임종수 등은 제5차 NFI 자료를 이용하여 전라북도 무주군을 대상으로 산림바이오매스 추정 연구를 수행한 바 있다. 이 연구에서 그는 회귀분석과 *k*NN 두 가지 알고리즘을 비교하였고, 결과적으로 효율성 면에서 *k*NN이 보다 효율성이 높은 것으로 분석하였다.

하지만 기존 국내 연구의 경우 임상별로 개발된 탄소배출계수를 적용하였고, 산림 바이오매스로부터 보다 정확한 탄소량을 추정하기 위해서는 수종별 탄소배출계수가 적용되어야 한다. 국립산림과학원에서는 2010년 수종별 탄소배출계수를 개발하였고, 이로부터 보다 정확한 탄소량 추정이 가능하게 되었다. 본 연구에서는 이러한 수종별 탄소배출계수를 적용하여 2006~2009년 사이에 구축된 제5차 NFI 자료를 기반으로 표본점별 탄소량을 추정하였고, *k*NN 알고리즘을 통해 충청북도 단양군 지역의 전체 탄소저장량을 추정하고자 하였다. 비산림 지역의 제거에는 2007~2009년 사이에 단양군에서 구축한 1:5000 정밀임상도가 사용되었으며, 위성영상으로는 2004~2005년 사이에 계절별로 취득된 Landsat TM 영상을 이용하여 계절 변화가 뚜렷한 한반도의 기후 특성이 탄소량 추정에 미치는 영향을 분석하고자 하였다.

## 2. 탄소량 추정

### 2.1 연구 대상 지역

본 연구의 대상지역인 단양군은 충청북도 북동부 위도 36° 47' 41"N에서 37° 09' 33"N 사이, 경도 128° 13' 19"E에서 128° 38' 51"E 사이에 위치해 있다. 북쪽으로 강원도 영월군, 동쪽으로 경상북도 영주시, 남쪽으로 경상북도 예천군과 문경시, 서쪽으로 충청북도 제천시와 접한다. 강원도 영월군으로부터 흘러들어온 남한강 지류가 군내를 동서로 관류하며, 일부 집단취락과 도시지역을 제외하고 대부분의 지역이 산악지대로 이루어져 있다. 기후는 내륙산간지역의 특성상 일교차가 심한 대륙성 기후를 나타내며, 연평균기온 11.6°C 내외, 1월 평균기온 -4.7°C 내외, 8월 평균기온 26.1°C 내외이고, 연평균 강수량은 1,702mm이다(두산대백과사전, 2010). 산림청에서 구축한 지역별산림기분통계(2009)에 따르면 단양군 전체 면적 78,010ha 중 산림이 차지하는 면적은 총 62,745ha로 약 80%에 해당하며, 임상

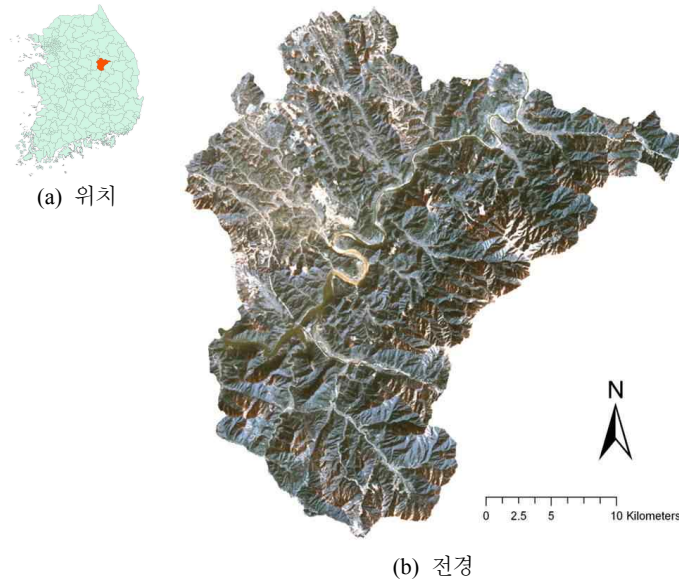


그림 1. 연구 대상 지역

별로는 침엽수가 가장 많은 51.93%를 차지하고 있고, 그 뒤를 이어 활엽수(31.03%), 혼효림(12.70%) 순으로 조사되었다.

2.2 연구 자료

2.2.1 위성 영상 자료

지표상의 모든 물질은 각각의 구성원자나 분자구조에 따라 태양에너지를 흡수 또는 반사하거나 특정량의 내부에너지를 방사하는 특성을 가지고 있다. 위성 원격 탐측은 이런 에너지를 위성에 탑재된 센서에서 감지하여 대상 지역에 대한 정보를 얻고 있다. 이렇게 위성으로부터 취득된 디지털 영상은 지상 지역과 공간적으로 일치하는 영상소들로 정렬되어 있으며, 영상소에 나타난 수치는 지상 자료를 전자기 스펙트럼에서의 분광특성으로 나타낸다(김태근 외, 1996). kNN 알고리즘에 기반한 본 연구에서 미조사지점에 대한 지상부 탄소량 추정은 이러한 센서에 탐지되는 산림지역의 분광특성에 의존하고 있다.

한편, 한반도는 계절적 변화가 뚜렷한 몬순 기후에 속해 있으며, 각 계절별로 온도 및 강수량 변화가 크다. 이러한 계절적 특성에 따라 산림의 분광 특성 역시 변화하며, 탄소량 추정에 영향을 미칠 수 있을 것으로 판단된다. 따라서 본 연구에서는 단양군을 대상으로 계절별 위성 자료(봄, 여름, 가을, 겨울)를 취득하고 계절 변화에 따른 산림탄소저장량 추정에 있어 총 탄소량과 오차 양상을 분석하고자 하였다.

위성영상의 계절별 분석에는 2004년부터 2005년 사이에 취득된 Landsat TM 영상을 사용하였다. Landsat TM 센서시스템은 Landsat 4호와 5호에 탑재되어 1982년 6월 16일과 1984년 3월 1일에 각각 발사되었다. TM 센서는 가시광선, 근적외선, 중적외선 및 열적외선 영역에서의 에너지를 기록하는 휘스크부름 방식의 광학센서 시스템이다. 밴드 1에서 5까지와 밴드 7의 경우 30m×30m의 공간해상도를 가지며, 열적외선 영역의 자료를 수집하는 밴드 6은 120m×120m의 공간해상도를 가지고 있다(임정호 외, 2005). Landsat 5 TM은 현재까지도 운영 중에 있으며, 탄소량 추정을 위해 전 세계적으로 가장 많이 사용되고 있는 영상이기도 하다. 다음의 표 1은 계절별 분석을 위해 사용된 Landsat TM 위성영상의 취득 시기를 나타내고 있다. 모든 영상은 RMSE가 한 영상소(30m)내로 기하보정 및 방사보정을 수행하였으며, 태양 고도 및 위치에 따른 지형오차를 제거하기 위해 Civco(1989)가 고안한 2-stage normalization 경사보정을 적용하였다. 한편, 밴드 6의 경우 해상도 차이와 더불어 산림의 분광특성과 관련이 없는 열적외선 영역이므로 탄소량 추정에서 제외되었다.

표 1. Landsat TM 위성영상자료 취득 현황

계절	취득 시기
봄	2004 / 04 / 09
여름	2004 / 08 / 31
가을	2005 / 11 / 22
겨울	2004 / 01 / 20

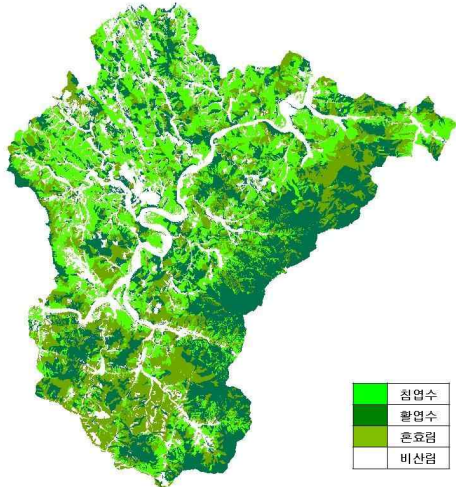


그림 2. 단양군 지역의 임상 분포 현황

한편, 대상 지역인 단양군의 경우 산림 이외에도 도심이나 농지, 수계와 같은 비산림지역을 포함하고 있다. 비산림지역이 포함될 경우 탄소량 추정에 있어 오차를 유발할 가능성이 높으므로 본 연구에서는 이러한 비산림지역을 제거하기 위해 1:5000 정밀임상도를 사용하였다. 정밀임상도는 단양군 내 산림의 정확한 분포현황을 파악하기 위해 2007~2009년 사이 구축되었고 토지이용, 산림, 임종, 임상, 수종, 영급, 경급, 수관밀도에 관한 정보를 포함하고 있다. 그림 2는 비산림지역을 제거한 후 단양군 지역의 임상에 따른 분류현황을 나타내고 있다.

2.2.2 국가산림자원조사 자료

2.2.2.1 국가산림자원조사

국가산림자원조사는 전국 산림을 과학적인 방법으로 조사·평가하여 국가산림자원기본통계를 확보하고, 산림 자원의 변화 동태를 주기적으로 파악함으로써 지속가능한 산림경영 실천을 위한 산림기본계획 및 산림정책 수립의 기본 자료 제공을 목적으로 시행되었다. 국가산림자원조사는 전국의 산림 약 640만 ha를 대상으로 실시하되, 계통추출법(Systematic sampling)에 의해 추출된 약 4,000개의 고정표본점(PSP, Permanent Sample Plot)을 통해 조사된다. 국가산림자원조사 자료는 임목 자원, 산림환경, 산림생태 등에 대한 다양한 정보를 포함하고 있으며, 구체적인 조사 내용은 임분 현황, 임목, 벌근고사목피해목, 산림식생(치수, 초본식생), 토양 탄소량 등이다(국립산림과학원, 2009).

표 2. 부표본점(Subplot)의 명칭

구 분	위 치	명 칭
Subplot 1	원점	S1표본점(또는 중앙표본점)
Subplot 2	정북(0°)	S2표본점
Subplot 3	방위 120°	S3표본점
Subplot 4	방위 240°	S4표본점

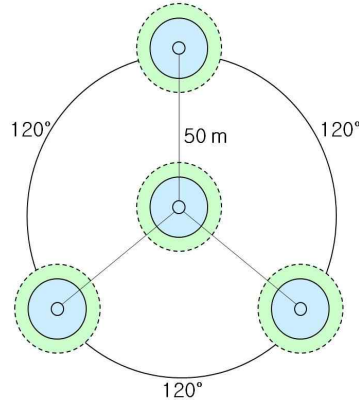


그림 3. 집락표본점의 구조

우리나라의 국가산림자원조사 자료는 1차 1972년~1975년, 2차 1978년~1980년, 3차 1986년~1992년, 4차 1996년~2005년, 5차 2006년~2010년 등, 총 5회에 걸쳐 취득되었으며, 본 연구는 2009년 까지 구축된 5차년도 국가산림자원조사 자료를 기반으로 수행되었다.

2.2.2.2 고정표본점 구조

고정표본점의 구조는 집락표본점(Cluster plot)으로서 4개의 부표본점(Subplot)으로 구성된다. 원점을 중심으로 정북(0°), 120°, 240°의 세 방향에 각각 부표본점이 설치되며, 원점에서 세 방향에 위치하는 부표본점까지의 거리는 50m이다. 각 부표본점의 번호(1, 2, 3, 4)는 고정표본점의 끝 번호로 추가 된다. 다음의 표 2는 각 부표본점의 위치와 명칭을 나타내며, 샘플의 형태는 그림 3과 같은 방식으로 네 점에서 추출되었다(국립산림과학원, 2009).

2.2.2.3 표본 설계

표본 설계에는 우리나라에서 채택하고 있는 세계측지좌표계를 횡단 메르카토르 도법(Transverse Mercator)으로 투영한 지도의 중부원점을 기준으로 한 단일 평면직각좌표를 사용하였다. 미리 정한 임의의 한 점에서 계통추출법에 따라 4km 간격으로 전국에 배치한 격자점을 표본점의 중심으로 삼으며, 이 중에서 산림지에

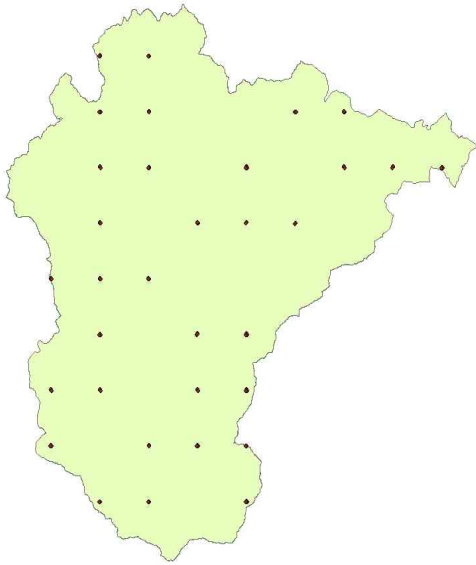


그림 4. 단양군 집락표본점 분포 현황

위치한 격자점을 고정표본점으로 지정하고 현지 조사가 실시되었다(국립산림과학원, 2009).

연구 대상지인 단양군에는 2006~2009년 사이에 조사된 총 33개의 집락표본점이 포함되어 있으며, 이는 다시 120개의 부표본점으로 구성되어 있다. 한편, 본 연구에서 사용한 Landsat TM 위성영상은 30m×30m의 공간해상도를 가지고 있으므로 50m의 반경을 가진 집락표본점을 참조점으로 사용하기에는 무리가 따른다. 따라서 실제 탄소량은 집락단위가 아닌 16m의 반경을 가진 부표본점을 독립적으로 사용하여 추정하였으며, 만약 부표본점의 반경이 2개 이상의 영상소에 중복될 경우엔 중심점을 기준으로 배치하였다. 임상별 부표본점의 분포현황은 전체 120개의 부표본점 중 활엽수가 78개로 가장 많았으며, 그 뒤를 이어 침엽수 24개, 혼효림 18개의 순으로 나타났다. 다음 그림 4는 단양군 지역의 집락표본점 분포 현황을 나타내고 있다.

### 2.2.3 kNN 알고리즘

본 연구에서는 탄소저장량을 추정하기 위해 kNN 알고리즘을 사용하였다. kNN 알고리즘은 거리 역산에 의해 가중치를 부여하는 IDW(inverse distance weighting)에 기반한 방법으로, 목표점을 추정하기 위한 k 번째 참조점의 선정은 목표점과 참조점의 분광유사성에 의해 결정된다. 이러한 거리는 식 (1)과 같은 유클리드 거리식이 이용된다.

$$d_{t,r} = \sqrt{\sum_{i=1}^m (x_{i,t} - x_{i,r})^2} \quad (1)$$

여기서  $d_{t,r}$ 은 목표점(t)과 참조점(r)간의 분광차이를 나타내며,  $x_{i,t}$ 와  $x_{i,r}$ 은 각각 영상 밴드 i에서의 목표점과 참조점들의 분광값을 나타낸다. m은 위성영상내의 밴드 개수를 나타낸다. 각 밴드별 분광값의 차이는 모두 합산되어 최종 분광값 차이를 계산하게 되고, 두 지점의 분광값이 유사할 수록 보다 큰 가중치를 부여한다. 거리 역산에 의해 가중치( $w_{i,t}$ )를 부여하는 공식은 식 (2)와 같다.

$$w_{i,t} = \frac{1}{d_{t,r}} \sum_{i=1}^m \frac{1}{d_{t,r}} \quad (2)$$

목표점에서의 탄소 추정치( $\hat{y}_t$ )는 식 (3)을 통해 NFI로부터 추정된 참조점의 탄소량( $y_r$ )과 각 참조점 별로 계산된 가중치( $w_{t,r}$ )를 곱하여 계산된다.

$$\hat{y}_t = \sum_{r=1}^k (w_{t,r} \times y_r) \quad (3)$$

여기서 k는 참조점의 개수를 나타낸다(임종수 외, 2007).

kNN 알고리즘을 적용하는 데 있어 우선 참조점의 범위를 설정해야 한다. 산림은 지형, 토양, 그리고 기후 조건에 따라 임분 구조가 상이하다. 또한 야외 조사를 실시한 면적이 증가 할수록 영상의 분광값들이 매우 다양하게 나타나게 된다. 따라서 수평참조점의 범위를 동일한 특성을 갖는 구역으로 구분하여 목표점과 동일한 조건 내에서 선정하는 것이 보다 정확한 추정치를 계산할 수 있다(임종수 외, 2009). 본 연구에서는 이러한 참조점의 범위를 목표점 반경 20km, 30km, 그리고 대상 지역을 전부 포함하는 40km 세 가지로 설정하고, 수평 참조범위에 따른 정확도를 분석하여 단양군 지역에서의 최적 수평참조범위를 찾고자 하였다.

한편, kNN 알고리즘은 표본점의 개수인 k 값에 따라서도 최종 추정값이 큰 영향을 받는다. 일반적으로 k 값이 늘어날수록 RMSE는 줄어드는 경향을 보이지만, 변동계수 및 편차를 고려할 때 최적 k 값은 지역에 따라 달라질 수 있으며(임종수 외, 2007, Fuchs 등,

2009), Reese 등(2003)의 연구에서도 최적  $k$  값은 연구에 따라 상이할 수 있다는 점을 강조하였다. 따라서 본 연구에서는 참조점의 수평 반경에 따라  $k$  값을 1에서 10까지 변화시켜 가며 정확도를 조사하였고, 단양군에 적합한 최적  $k$  값을 구하였다. 최대  $k$  값을 10으로 제한한 것은 대상면적이 좁고, 포함된 참조점의 개수가 많지 않기 때문이다.

최적 수평참조범위와  $k$  값을 찾기 위한 정확도 분석에는 leave-one-out 기반의 교차 검증법(cross validation)을 사용하였다. 이 방법은  $n$ 개의 샘플 자료에서 임의로 한 개를 제거한 후, 나머지  $(n-1)$ 개의 자료를 가지고 제거한 지점의 값을 추정하는 과정을  $n$ 번 반복한다. 이 과정을 통해  $n$ 개 지점에서의 추정값을 얻게 되고, 이를 원 참값과 비교하여 추정 오차를 계산한다. 이러한 추정오차를 정량화하기 위해 본 연구에서는 다음과 같은 식 (4)와 (5)가 이용되었다(Reese, 2002; 박노옥, 2009)

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)^2} \quad (4)$$

$$\text{Mean Bias} = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)}{n} \quad (5)$$

두 식에서  $y_i$ 는 NFI를 기반으로 취득된 탄소량이며,  $\hat{y}_i$ 는 kNN을 통해 추정된 탄소량을 나타낸다.

### 3. 연구결과

#### 3.1 최적 수평참조범위 및 $k$ 값 선정

단양군 지역의 계절별 탄소량을 추정하기 전, 최적 수평참조범위와  $k$  값을 선정하기 위한 선행 연구를 수행하였다. 자료로는 단양군을 대상으로 봄(2004/04/09), 여름(2004/08/31), 가을(2005/11/22), 겨울(2004/01/20)에 취득된 Landsat TM 위성영상을 이용하였으며, 전처리 과정으로 모든 영상에 대해 기하보정, 방사보정 및 경사보정을 수행하였다. 비산림지역의 제거에는 1:5000 정밀입상도가 이용되었으며, 정확도 분석을 위해 120개 표본점을 대상으로 leave-one-out 기반의 교차 검증법을 수행하였다. 다음 그림 5는 각각 수평참조범위 20km, 30km, 40km와 1부터 10까지의  $k$  값 변화에 따른 단양군 지역의 계절별 RMSE와 평균 편의(mean bias)의 변화를 나타낸다.

분석결과 RMSE의 경우 모든 계절에 있어서  $k$  값이 증가할수록 점차 감소하는 경향이 발견되었고, 선행 연

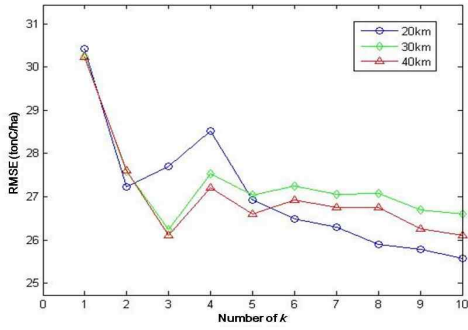
구 사례(임중수 외, 2007, Fuchs 등, 2009)의 결과를 충실히 반영하는 것으로 나타났다. 다만, 2004/04/09 결과만이  $k=5$  까지 RMSE가 증가, 혹은 감소하는 변동을 보였는데(그림 5-(a)), 이는 변동이 없는 다른 계절의 경향(그림 5-(c), (e), (g))을 고려하였을 때 우연 오차에 의한 가능성이 큰 것으로 판단된다.

한편, 모든 계절에서 RMSE 감소폭은  $k$  값이 1에서 2로 변화할 때 가장 컸으며, 그 뒤로 변화폭이 점점 작아지면서 25~27tonC/ha 사이로 수렴하는 경향을 나타내었다. 최소 RMSE는 대부분  $k=10$ 에서 발견되었지만, 2004/04/09 결과에서 30km 및 40km 반경의 경우는  $k=3$ , 2004/08/31 결과에서 20km 반경의 경우는  $k=8$ 에서 각각 최소 RMSE가 발견되었다(그림 5-(a), (c)). 하지만 세  $k$  값 모두 평균 편의가 -2에서 -5tonC/ha의 비교적 큰 편차를 나타내었으므로, 최적값으로 선정하기에는 무리가 있을 것으로 판단된다.

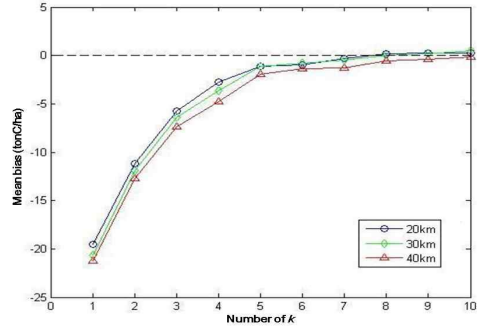
수평참조범위 별로 RMSE를 비교해 보았을 때, 2004/04/09와 2004/08/31 결과에서  $k$  값이 5 미만인 경우를 제외하고(그림 5-(a), (c)), 반경 20km가 전 구간에서 최소 RMSE를 나타내었다. 이는 비록 단양군이 소면적일지라도 연구대상지역 내에 산지와 같은 다양한 지형적 변화를 포함하고 있으므로 수평참조범위를 작게 설정하는 것이 지형적 변화에 따른 오차를 줄였기 때문으로 판단된다.

한편, 평균 편의의 경우 계절별로 큰 변동 폭 없이  $k$  값이 증가할수록 안정적으로 감소하는 경향을 나타내었다. 계절별로는 2004/04/09 및 2004/08/31 자료가 가장 0에 가깝게 수렴하는 것으로 나타났으며(그림 5-(b), (d)), 최적  $k$  값은 반경 20km를 제외한 모든 수평참조범위에서 10으로 나타났다. 반경 20km의 경우  $k=8$  이후로 조금씩 과대 추정되는 경향을 나타냈지만, 이때의 변동 폭은 0.1tonC/ha 미만에 불과했다. 한편, 수평참조범위별 비교에 있어서는 계절에 상관없이 모든 구간에서 반경 20km일 때 최소 평균 편의가 발견되었다(그림 5-(a), (b), (c), (d)).

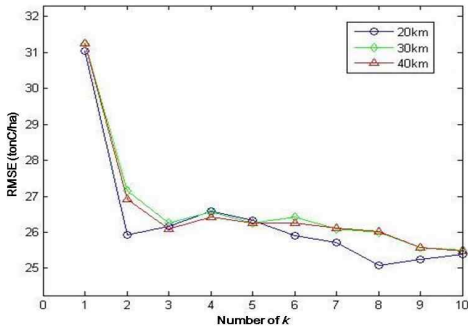
수평참조범위와  $k$  값에 따른 RMSE 및 평균 편의의 결과를 종합해 보았을 때, 둘 다 계절적 차이 없이  $k$  값이 증가할수록 감소하는 것으로 나타났다. RMSE의 경우 대부분의 구간에서 수평참조범위 20km일 때 최소값이 나타났으며, 최적  $k$  값은 2004/08/31 결과만을 제외하고 전부  $k=10$ 일 때 나타났다. 한편, 평균 편의의 경우는 모든 결과에서 수평참조범위 20km일 때 최소값이 나타났으며, 이때의 최적  $k$  값은 10으로 나타났다. 따라서 본 연구에서는 단양군지역의 탄소량 추정을 위해 각각 최적 수평참조범위를 20km, 최적  $k$  값을 10으로



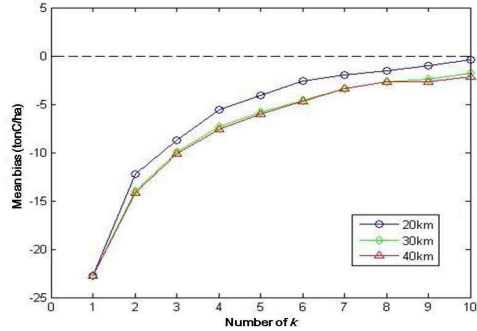
(a) RMSE (2004/04/09)



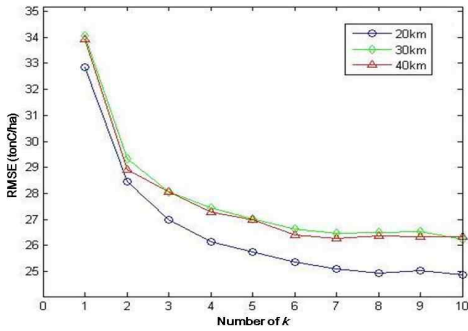
(b) 평균 편의 (2004/04/09)



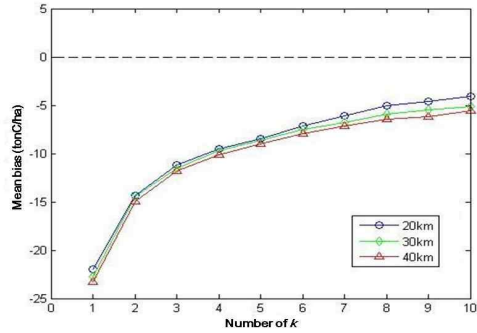
(c) RMSE (2004/08/31)



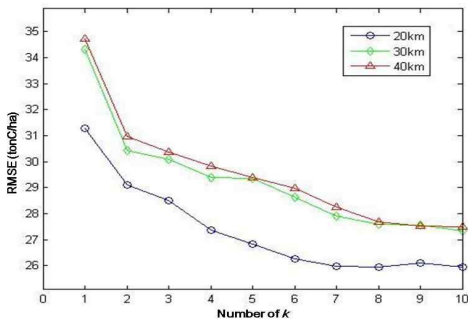
(d) 평균 편의 (2004/08/31)



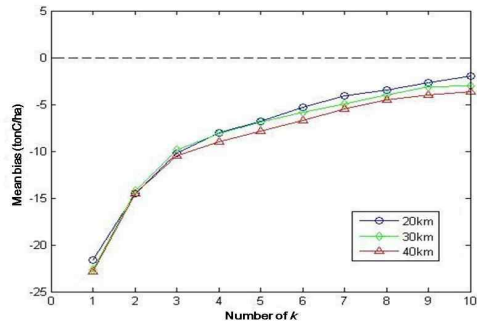
(e) RMSE (2005/11/22)



(f) 평균 편의 (2005/11/22)



(g) RMSE (2004/01/20)

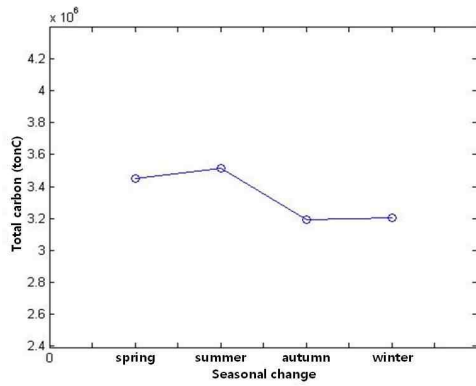


(h) 평균 편의 (2004/01/20)

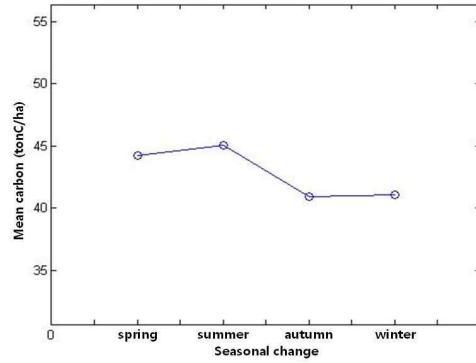
그림 5. 수평참조범위와 k 값에 따른 단양군 지역의 계절별 RMSE 및 평균 편의의 변화

표 3. 계절 변화에 따른 단양군 탄소추정량

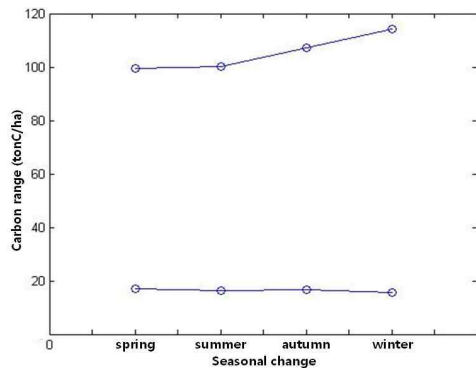
Date	Total carbon (tonC)	Max (tonC/ha)	Min (tonC/ha)	Mean (tonC/ha)	Std. (tonC/ha)	RMSE (tonC/ha)	Mean Bias (tonC/ha)
2004/04/09	3451815.86	99.53	17.02	44.25	13.58	25.58	0.26
2004/08/31	3517382.20	100.29	16.49	45.09	14.86	25.40	-0.40
2005/11/22	3189977.27	107.04	16.70	40.89	14.44	24.87	-4.09
2004/01/20	3204603.65	114.13	15.52	41.08	14.13	25.94	-1.98



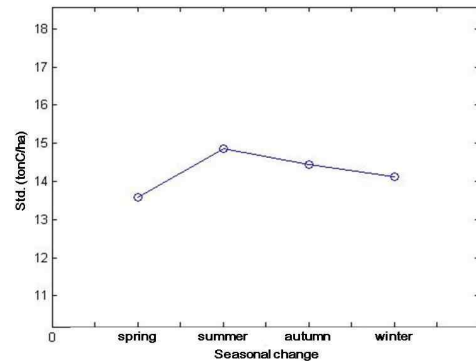
(a) 총 탄소량 (tonC)



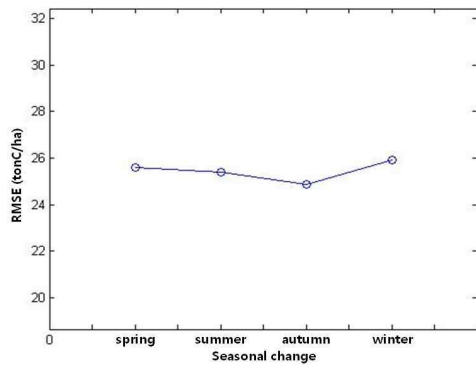
(b) 평균 탄소량 (tonC/ha)



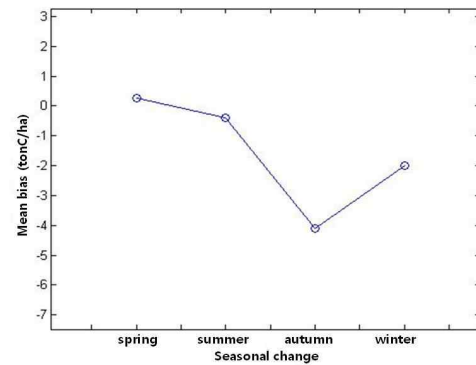
(c) 탄소 범위 (tonC/ha)



(d) 표준편차 (tonC/ha)



(e) RMSE (tonC/ha)



(f) 평균 편의 (tonC/ha)

그림 6. 계절 변화에 따른 단양군 탄소추정량



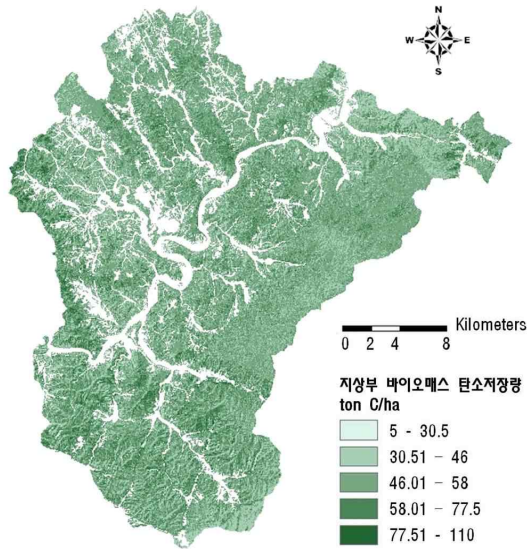
선택하고 연구를 진행하였다.

### 3.2 단양군 지역의 탄소량 추정

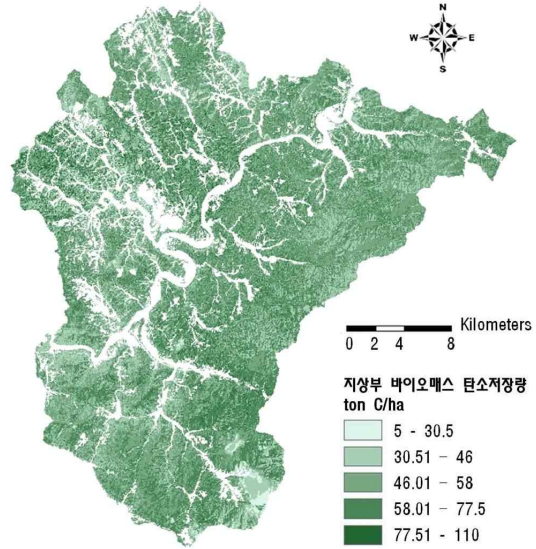
표 3은 kNN 알고리즘을 통해 추정된 단양군 지역의 계절별 탄소량을 나타내고 있으며, 그림 6은 표 3을 그래프로 도시한 것이다. 추정 항목은 대상 지역의 총 탄소량과 단위 면적당 최대, 최소, 평균 탄소량 및 표준편

차이며, 정확도 비교를 위해 각 영상별 RMSE와 평균편의를 분석하였다.

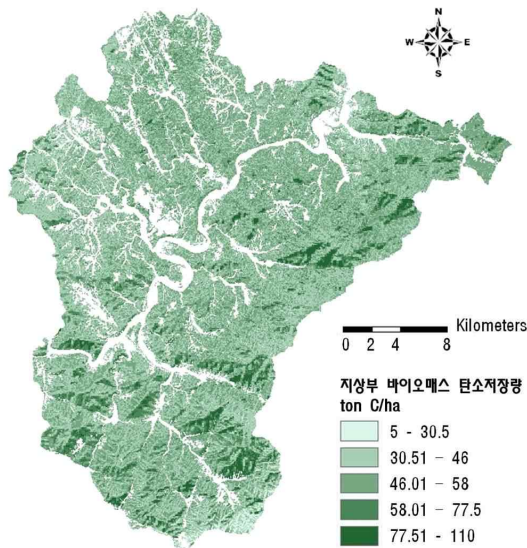
분석결과 단양군의 지상부 바이오매스 탄소량은 여름인 2004/08/31 결과에서 최대 3517382.20tonC, 가을인 2005/11/22 결과에서 최소 3189977.27tonC로 추정되었으며, 이 때 단위면적(ha)당 평균탄소량은 각각 최대 45.09tonC/ha에서 최소 40.89tonC/ha 로 추정되



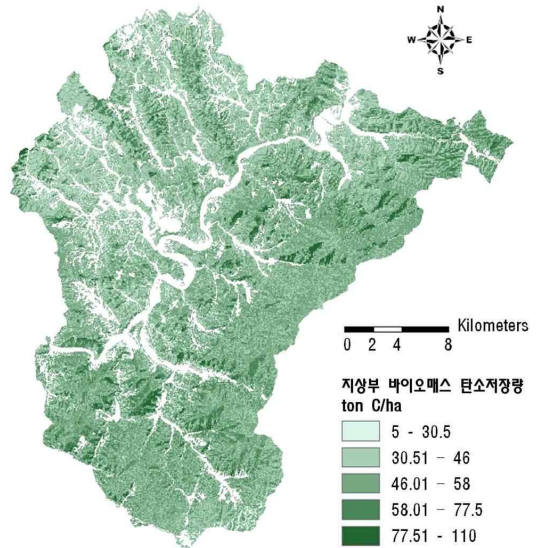
(a) 2004/04/09



(b) 2004/08/31



(c) 2005/11/22



(d) 2004/01/20

그림 7. 계절 변화에 따른 단양군 지역의 지상부 바이오매스 탄소분포지도

었다(그림 6-(a), (b)). 반면, 단위면적당 탄소량 차이의 경우 겨울인 2004/01/20 결과에서 가장 큰 최대 114.13tonC/ha에서 최소 15.52tonC/ha 사이를, 봄인 2004/04/09 결과에서 가장 작은 최대 99.53tonC/ha에서 최소 17.02tonC/ha를 나타내어 탄소 총량과의 직접적인 상관성은 발견되지 않았다(그림 6-(c)).

한편, 추정치의 변이를 나타내는 표준편차의 경우 결과별 최대 및 최소값의 차이가 1.5tonC/ha 내로 미미하였고, 추정 탄소총량에 따른 상관관계 역시 발견되지 않았다(그림 6-(d)). 특히 계절별 차이를 검증할 수 있는 중요 지표중 하나인 RMSE의 경우도 모든 결과가 24~26tonC/ha 사이로 비슷한 값을 나타내어 특정 경향은 발견되지 않았다.

평균 편이는 2004/04/09 결과를 제외하고는 과소 추정된 것으로 나타났으며, 최대 편차는 2005/11/22 결과에서 -4.09tonC/ha로 나타났다. 이러한 단위면적당 편차량을 보정한 단양군 지역의 총 바이오매스 탄소추정량은 최대 3542768.49tonC에서 최소 3329037.51tonC 사이로 전체 추정총량은 증가하였으나, 계절에 따른 차이는 오히려 줄어든 것으로 나타났다.

### 3.3 단양군 지역의 탄소분포지도 제작

그림 7은 단양군 지역의 지상부 바이오매스 탄소분포지도를 나타낸다. 그림에서 (a), (b), (c), (d)는 각각 봄, 여름, 가을, 겨울을 나타내며, 탄소의 밀집 정도를 다섯 단계로 구분하여 나타내었다.

우선, 봄(2004/04/09)과 여름(2004/08/31) 탄소 지도의 경우 총 탄소량과 비례하여 가을(2005/11/22)과 겨울(2004/01/20)에 비해 전체적으로 높은 밀도의 분포현황을 나타냈다(그림 7-(a), (b)). 하지만 국지적으로 탄소가 밀집된 분포 양상은 두 지도에서 발견되지 않았으며, 특히 2004/08/31 지도의 경우 서쪽 및 남쪽 지역을 중심으로 영상취득당시 발생한 연무 및 구름의 영향이 발견되었고, 이로 인한 추정오차가 예상되었다(그림 7-(b)).

한편, 가을인 2005/11/22과 겨울인 2004/01/20 탄소 분포지도의 경우 주로 동쪽 및 남쪽 산지를 중심으로 58tonC/ha 이상의 고밀도 탄소 지역이 분포하고 있는 것으로 나타났다(그림 7-(c), (d)). 하지만, 가을인 2005/11/22 탄소분포지도의 경우 북서쪽 방향의 사면을 중심으로 곳곳에 탄소량이 밀집되어 있는 모습을 확인할 수 있는데(그림 7-(c)), 이는 실제 탄소가 집중적으로 분포되어 있기 보다는 경사보정이 효과적으로 적용되지 않은 데서 기인한 것으로 판단된다.

## 4. 결론 및 향후연구과제

본 연구에서는 충청북도 단양군을 대상으로 제5차 NFI 자료 및 계절별 Landsat TM 위성영상자료를 활용하여 지상부 바이오매스 탄소량을 추정하고, 이를 지도화하는 연구를 수행하였다. 탄소량 추정에는 kNN 알고리즘을 이용하였으며, leave-one-out 교차 검증법을 통해 정확도 분석을 수행하였다. 분석결과, 단양군 지역의 탄소량 추정에 적합한 최적 수평참조범위는 20km, 최적 k 값은 10으로 선택되었으며, 편차 보정된 지상부 바이오매스 총 탄소량은 최대 3542768.49tonC에서 최소 3329037.51tonC 사이로 추정되었다.

추정된 탄소총량과 각 변수들 사이에서는 특정한 상관관계가 발견되지 않았으며, 특히 표준편차 및 RMSE의 경우는 계절에 상관없이 거의 비슷한 수치를 나타내었다. 따라서 본 연구의 결과를 기반으로 단양군 지역의 바이오매스 탄소량 추정 시 계절에 따른 경향은 없었던 것으로 사료된다. 다만, 소면적을 대상으로 한 본 연구의 결론을 일반화시키는 것은 무리가 있으며, 차후 보다 다양한 지역과 자료를 이용한 추가 연구가 필요할 것으로 판단된다.

단양군의 경우 1:5000 정밀임상도 현황을 살펴보면(그림 2), 주로 동쪽과 남쪽을 중심으로 활엽수가 많이 분포함을 알 수 있다. 국립산림과학원(2010)의 자료에 따르면 수종별 탄소배출계수 중 목재기본밀도의 평균은 각각 활엽수(굴참나무, 상수리나무, 신갈나무, 졸참나무):0.68, 침엽수(강원지방소나무, 중부지방소나무, 리기다소나무, 잣나무, 낙엽송, 해송, 편백, 삼나무):0.44이며, 이는 활엽수의 경우가 침엽수보다 많은 탄소량을 저장하고 있음을 의미한다. 이와 같은 상황에 비추어 제작된 바이오매스 탄소분포지도는 겨울인 2004/01/20 지도를 제외하고 단양군의 바이오매스 탄소분포현황을 정확히 반영하지는 못하고 있는 것으로 사료되며, 이는 분광특성을 파악하기 위해 단순 밴드만을 사용했기 때문으로 판단된다. 따라서 차후에는 식생 혹은 특정 수종에 특화된 ratio를 사용하여 연구를 진행할 계획이다.

한편, 본 연구에서 사용된 위성영상자료는 NFI 자료의 구축시기와 2년 정도의 차이가 있으며, 이에 따른 오차를 줄이기 위해서는 위성영상의 취득시기를 NFI 자료의 구축 시기인 2006년에서 2010년 사이로 제한할 필요가 있다. 아울러 정확한 탄소분포지도 제작을 위해서 국내 산악지형에 적합한 경사보정 기술의 개발 또한 반드시 고려해야 할 요소 중 하나로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 기후변화연구센터 산림자원정보과 “지상부 바이오매스의 탄소저장량 분포 추정을 위한 최적 공간모델 개발” 과제의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. 김태근, 김광은, 조기성, 김환기, 1996, Landsat TM 영상자료를 이용한 호수 수질 관측, 한국지형공간정보학회지, 제4권, 제2호, pp.23-33.
2. 두산대백과사전 EnCyber & EnCyber.com., 2010, <http://100.naver.com/100.nhn?docid=42675>
3. 박노옥, 2009, 현장 조사 자료를 이용한 GIS 기반 주제도 작성을 위한 단면량 크리깅 알고리즘의 비교, Korea Journal of Remote Sensing, Vol.25, No.4, pp. 321-338.
4. 산림청-국립산림과학원, 2009, 제 5차 국가산림자원조사-현지 조사 지침서 Version 1.3, pp.3-6.
5. 산림청-국립산림과학원, 2010, 교토의정서 대응 산림탄소계정 기반 구축 연구, 연구보고서, pp.109-122.
6. 산림청, 2010, 산림기본통계., pp.212.
7. 임종수, 공지수, 김성호, 신만용, 2007, kNN 알고리즘을 이용한 강원도 평창군의 산림 주제도 작성과 산림통계량 추정, 한국임학회지, 제96권, 제3호, pp. 259-268.
8. 임종수, 한원성, 황주호, 정상영, 조현국, 신만용, 2009, 위성영상자료 및 국가 산림자원조사 자료를 이용한 산림 바이오매스 추정, 원격탐사학회지, 제25권, 제4호, pp.311-320.
9. Jensen, R. J., 2005, 원격탐사와 디지털 영상처리, 시그마프레스, pp.59-65.
10. 조현진, 2010, 탄소배출권거래제도의 이해, 녹색성장과 법적 기반구축 학술대회 논문집, pp.1-27.
11. CIVCO., D. L., 1989, Topographic normalization of Landsat thematic mapper digital imagery, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing.*, Vol.55. pp.1303-1309.
12. Franco-Lopez, H., Ek., A. R., Bauer, M. B., 2001, Estimation and mapping of forest stand density, volume, and cover type using the k-nearest neighbors method. *Remote Sensing of Environmen*, Vol.77, pp.251-274.
13. Fuchs, H., Magdon, P., Kleinn, C., Flessa, H., 2009, Estimating aboveground carbon in a catchment of the Siberian forest tundra: Combining satellite imagery and field inventory, *Remote Sensing of Environment*, Vol.113, pp.518-531.
14. Gjertsen, A. K., 2007, Accuracy of forest mapping based on Landsat TM data and a kNN-based method, *Remote Sensing of Environiment*, Vol.110, pp.420-430.
15. Haapanen, R., Lehtinen, K., Miettinen, J., Bauer, M. E., and Ek, A. R., 2001, Progress in adapting k-NN methods for forest mapping and estimation using the new annual forest inventory and analysis data, *Proceedings of the third annual forest inventory and analysis symposium*, USDA, pp.87-95.
16. Huiyan, G., Limin, D., Gang, W., Dong, X., Shunzhong, W. and Hui, W., 2006, Estimation of forest volumes by integrating Landsat TM imagery and forest inventory data, *Science in China: Sereis E Technological Sciences*, Vol.49, pp.54-62.
17. Kajisa, T., Murakami, T., Mizoue, N., Kitahara, F., Yoshida, S., 2008, Estimation of stand volumes using the k-nearest neighbors method in kyushu, Japan, *Journal of forest research*, Vol.13. No.4. pp.249-254.
18. Maselli, F., Chirici, G., Bottai, L., Corona, P., and Marchetti, M., 2005, Estimation of Mediterranean forest attributes by the application of k-NN procedures to multitemporal Landsat ETM+ images., *International Journal of Remote Sensing*, Vol.26, No.17, pp.3781-3796.
19. Reese, H., Nilsson, M., Sandstrom, P., and Olsson, H., 2002, Applications using estimates of forest parameters derived from satellite and forest inventory data. *Computers and Electronics in Agriculture*, Vol.37, No.1, pp.37-55.
20. Reese, H., Nilsson, M., Pahlen, T. G., Hagner, O., Joyce, S., Tingelof, U., Egberth, M., and Olsson, H., 2003, Countrywide Estimates of Forest Variables Using Satellite Data and Field Data from the National Forest Inventory, *Royal Swedish Academy of Sciences*, Vol.32, No.8, pp.542-548.
21. Tomppo, E., Nilsson, M., Rosengren, M., Aalto, P., and Kennedy, P., 2002, Simultaneous use of Landsat-TM and IRS-1C WiFS data in estimating large area tree stem volume and aboveground biomass, *Remote Sensing of Environment*, Vol.82, pp.156-171.