

## 위성영상자료 및 국가 산림자원조사 자료를 이용한 산림 바이오매스 추정

임종수\* · 한원성\* · 황주호\* · 정상영\* · 조현국\*\* · 신만용\*†

\*국민대학교 산림자원학과, \*\*국립산림과학원 산림정보과

### Estimation of Forest Biomass based upon Satellite Data and National Forest Inventory Data

Jong Su Yim\*, Won Sung Han\*, Joo Ho Hwang\*, Sang Young Chung\*,  
Hyun Kook Cho\*\*, and Man Yong Shin\*†

\*Department of Forest Resources, College of Forest Science, Kookmin University, Seoul 136-702, Korea

\*\*Division of Forest Resource Information, Korea Forest Research Institute, Seoul 130-712, Korea

**Abstract :** This study was carried out to estimate forest biomass and to produce forest biomass thematic map for Muju county by combining field data from the 5<sup>th</sup> National Forest Inventory (2006-2007) and satellite data. For estimating forest biomass, two methods were examined using a Landsat TM-5(taken on April 28th, 2005) and field data: multi-variant regression modeling and *k*-Nearest Neighbor (*k*-NN) technique. Estimates of forest biomass by the two methods were compared by a cross-validation technique. The results showed that the two methods provide comparatively accurate estimation with similar RMSE (63.75~67.26ton/ha) and mean bias ( $\pm 1$ ton/ha). However, it is concluded that the *k*-NN method for estimating forest biomass is superior in terms of estimation efficiency to the regression model. The total forest biomass of the study site is estimated 8.4 million ton, or 149 ton/ha by the *k*-NN technique.

**Key Words :** Forest biomass estimation, *k*-Nearest Neighbor, Regression model, Landsat TM, National Forest Inventory.

**요약 :** 본 연구는 전라북도 무주군을 대상으로 제5차 국가산림자원조사 자료와 위성영상(Landsat TM-5)자료를 이용하여 산림 바이오매스를 추정하고 이를 토대로 바이오매스 주제도를 작성하고자 하였다. 먼저 국가산림자원조사의 야외 표본점 자료를 이용하여 조사표본점의 단위면적 당 축적을 산출하고, 바이오매스 변환계수를 적용하여 산림 바이오매스를 추정하였다. 본 연구에서는 위성영상 자료를 이용한 산림 바이오매스 추정을 위해 회귀모형을 이용하는 방법과 최근린 기법(*k*-Nearest Neighbor)을 이용하는 두 가지 방법을 사용하였는데, 이 두 가지 방법에 의해 추정된 산림 바이오매스를 국가산림자원조사 자료에 의한 추정치와 비교하여 최적의 방법을 선정하였다. 추정된 바이오매스 통계량의 비교를 위해 교차대조법을 이용하여 RMSE(Root Mean Square Error)와 평균편의(Mean Bias)를 산출하였는데, 그 결과 두 방법 모두 유사한 추정오차(RMSE: 63.75~67.26ton/ha)와 편차( $\pm 1$  ton/ha)를 보여 정확성 면에서는 큰 차이가 없는 것

로 나타났다. 하지만 최근린 기법을 이용하여 산림 바이오매스를 추정하는 것이 효율성 측면에서 보다 유리할 것으로 평가되었다. 최근린 기법에 의해 추정된 무주군의 산림 바이오매스는 약 839만 톤으로 나타났으며 단위면적당 평균은 149톤/ha인 것으로 분석되었다.

## 1. 서론

지구환경문제의 해결 및 친환경 에너지자원의 확보와 관련하여 산림 바이오매스에 대한 관심이 증대되고 있다. 특히 기후변화협약 및 교토의정서의 발효에 따라 지구환경문제의 국제적 관심이 증대되면서 화석연료를 대체할 수 있는 에너지로서 친환경적이며 재생 가능한 산림 바이오에너지가 주목 받고 있는 실정이다(산림청, 2003; 이경학 외, 2005). 또한 산림 바이오매스는 기후변화와 산림 생산성에 영향을 미치는 중요한 인자로 탄소 저장량과 탄소 순환에 대한 산림의 기여도를 평가하는데 필요하다. 국가단위의 산림 바이오매스는 국가산림자원조사(National Forest Inventory)에서 측정되는 입목 축적을 기반으로 추정되며, 산림의 탄소저장량은 산림 바이오매스에 탄소전환 계수를 적용하여 추정할 수 있다(Tomppo, 2000; 손영모 외, 2007). 산림이 탄소 순환과 지구온난화에 중요한 역할을 하고 있기 때문에 산림 바이오매스의 추정은 산림의 탄소순환과 지구온난화 메카니즘의 변화를 파악하는 중요한 지표라 할 수 있다(Fehrmann *et al.*, 2008).

제5차 국가산림자원조사에서는 전국을 4km 단위의 격자로 구분한 후 교차점에 표본점을 배치하여 다양한 산림정보를 수집하고 있다. 따라서 이 자료를 활용하면 전국 규모의 산림 바이오매스와 탄소저장량을 산출할 수 있다(국립산림과학원, 2008). 그러나, 상대적으로 소면적인 시군구의 경우 해당 지역에 대한 국가산림자원 조사의 표본비율이 낮기 때문에 국가산림자원조사 자료만으로 정확한 산림 바이오매스와 탄소저장량에 관한 통계를 확보하는 것은 현실적으로 한계가 있다.

이러한 한계를 극복하기 위해 국가산림자원조사의 산림정보와 상관관계가 있으며 소면적 시군구의 특성을 표현할 수 있는 부가정보(위성영상, 항공사진, 수치고도모텔 등)를 이용하여 조사가 이루어지지 않은 지점에 대한 산림통계를 추정할 수 있는 방법들이 개발되고 있으며, 보다 정확한 추정치를 도출하기 위한 다양한 연구가 수행되고 있다(Ahern *et al.*, 1991; Katila and Tomppo,

2002). 일반적으로 위성영상을 이용하여 산림 바이오매스를 추정하는 방법은 회귀모형이나 최근린( $k$ -NN:  $k$ -Nearest Neighbor)기법 등이 이용되고 있다. 회귀모형 기법은 위성영상의 각 분광해상도별 분광값 및 다양한 식생 지수들을 독립변수로 하여 종속변수인 산림 바이오매스와의 회귀추정식을 도출한 후, 미조사지점의 독립변수를 이용하여 산림 바이오매스를 추정하는 방법이다(Ahern *et al.*, 1991; 이승호 외, 2004). 반면에 최근린 기법은 비모수 추정방법의 하나로, 조사지점과 미조사지점에서의 분광값들의 유사성을 이용하여 미조사지점의 산림 바이오매스를 추정하는 방법이다(Katila and Tomppo, 2001; 임중수 외, 2007).

본 연구는 위성영상과 국가산림자원조사 자료를 이용하여 산림 바이오매스를 추정할 수 있는 두 가지 기법을 적용한 후, 통계적 검증을 통해 최적 방법을 선정하고 최종적으로 연구 대상지인 무주군의 산림 바이오매 추정 및 주제도 작성을 위해 수행되었다.

## 2. 재료 및 방법

### 1) 연구 대상지

본 연구의 대상지는 소면적에 해당되는 시군구 중에서 전라북도 무주군을 선정하였다. 무주군은 전라북도 최동북단의 소백산맥 서사면에 위치하며 충청남·북도

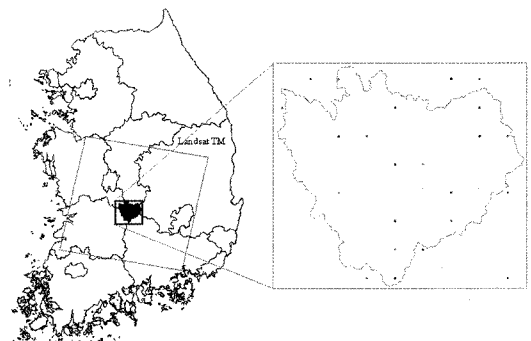


Fig. 1. Location of the study site.

와 경상남·북도와 인접하여 5도의 경계를 이루고 있다. 지리적 좌표는 동경 127° 31'~127° 54', 북위 35° 47'~36° 04'에 위치하여 우리나라 내륙지방 중에 가장 중심부를 점유한 산악지대이다(Fig. 1). 무주군의 연 평균기온은 11.4℃이며 연 평균 강수량은 1,397.3mm, 평균 해발고도는 290m이다. 2006년 현재 무주군의 총 면적은 63,173ha이며, 이 중 산림면적은 51,940ha을 차지하고 있으며 ha당 평균 축적은 109,82m<sup>3</sup>/ha이다(무주군, 2007).

2) 위성영상

본 연구에서 사용한 위성영상은 공간해상도가 대면적 산림자원조사의 야외표본점 크기와 유사한 Landsat TM-5(촬영일시: 2005년 4월 28일)로, 연구 대상지인 무주군을 포함하는 영상(path 115, row 35)을 사용하였다. 위성영상은 수치지형도를 이용하여 RMSE가 1 pixel(25m) 이내가 되도록 ERDAS 프로그램으로 기하보정을 하였으며 최근린 기법에 의해 재배열하였다.

본 연구에서는 위성영상의 7개 밴드 중에서 공간해상도 120m를 갖는 6번 밴드를 제외한 나머지 6개 밴드의 분광값을 이용하였다. 보정된 위성영상으로부터 각각 현지 야외조사 표본점의 위치정보를 이용하여 표본점의 픽셀별 분광값을 추출하였으며, 다양한 식생지수와 밴드울을 산출하였다. 또한 우리나라와 같이 복잡한 지형과 임분구조 조건에서는 위치정보에 대한 오차가 발생할 수 있기 때문에 이러한 오차를 줄이기 위하여 각 표본점을 중심으로 주변의 3×3 window의 평균값을 이용하여 산림 바이오매스를 추정하고 비교하였다(Franco-Lopez *et al.*, 2001).

3) 야외 표본점

연구 대상지인 무주군의 산림 바이오매스 추정과 주제도 작성을 위해 본 연구에서는 제5차 국가산림자원조사에서 수집된 2006년과 2007년의 2년 동안의 야외 표본점 조사 자료를 이용하였다. 국가산림자원조사를 통해 2년간 전국적으로 조사된 총 5,797개 표본점 중에서 본 연구에서 사용된 위성영상 내에 포함되는 1,825개의 표본점을 대상으로 표본점별 산림축적을 산출하였다. 표본점별 산림축적에 목재기본밀도와 바이오매스 전환계수 및 뿌리 비율을 적용하여 각 표본점에 해당하는 산림 바이오매스를 임상별로 구분하여 추정하였다(손영모 외, 2007; IPCC, 2003).

4) 위성영상을 이용한 산림 바이오매스 추정

미조사 지점을 포함한 무주군의 산림 바이오매스를 추정하기 위해 본 연구에서는 위성영상의 분광값을 이용하는 회귀모형 추정방법과 최근린 기법(*k*-NN technique)을 적용하였다. 두 방법에 의한 야외 표본점 조사지점의 산림 바이오매스 추정치와 실측치를 비교하여 최적 기법을 선정한 후, 연구대상지인 무주군의 산림 바이오매스를 추정하고 바이오매스 주제도를 작성하였다.

(1) 회귀모형 기법

회귀모형 기법은 야외 표본점 자료에 의한 산림 바이오매스와 위성영상의 분광값들의 관계를 이용하여 회귀모형을 도출한 후, 미조사지점의 분광값들을 이용하여 미조사 지점의 산림 바이오매스를 추정하는 방법이다. 본 연구에서는 6개 밴드와 식생의 활력도를 나타내는 정규식생지수를 비롯하여 7개의 밴드울 지수, 3개의 Tasseled-cap 지수 등 총 16개의 값을 바이오매스 추

Table 1. Remote sensing data used in regression models for estimating forest biomass

No.	Bands	Vegetation Index	Band Ratio	Tasseled cap transformation
1	TM1	NDVI:(TM4-TM3)/(TM4+TM3)	BR1: TM4/TM3	Brightness (TCB)
2	TM2	NDMI:(TM4-TM5)/(TM4+TM5)	BR2: TM5/TM4	Greenness (TCG)
3	TM3		BR3: TM7/TM4	Wetness (TCW)
4	TM4		MI1:(TM7-TM3)/(TM7+TM3)	
5	TM5		MI2:(TM5-TM3)/(TM5+TM3)	
6	TM7			

TCB = 0.0243TM1 + 0.4158TM2 + 0.5524TM3 + 0.5741TM4 + 0.3124TM5 + 0.2303TM7  
 TCG = -0.1603TM1 - 0.2819TM2 - 0.4939TM3 + 0.794TM4 - 0.0002TM5 - 0.1446TM7  
 TCW = 0.0315TM1 + 0.2021TM2 + 0.3102TM3 + 0.1594TM4 - 0.6806TM5 - 0.6109TM7

정을 위한 독립변수로 이용하였다(Table 1). Table 1의 6가지 분광값 및 10가지 지수와 현지 조사로부터 산출된 표본점의 산림 바이오매스와의 회귀분석을 실시하여, 최적 조합의 바이오매스 추정 회귀모형을 도출하였다(Labrecque *et al.*, 2006).

(2) 최근린 기법

최근린 기법에서  $k$ 번째 이웃 참조 표본점의 선정은 목표 표본점과 참조 표본점에서의 분광값들의 유사성(또는 거리)에 의해 결정되어진다(Katila and Tomppo, 2001). 본 연구에서는 식 (1)과 같은 유클리디안 거리식을 이용하여 표본점간의 거리를 산출하였다.

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

여기서,  $d_{i,r}$ 은 목표 표본점( $i$ )과 훈련데이터셋 내의 참조 표본점( $r$ )간의 거리를 나타내며,  $x_{i,i}$ 와  $x_{i,r}$ 은 각각 영상 밴드  $i$ 에서의 목표 표본점과 참조 표본점의 분광값들이며, 그리고  $m$ 은 위성영상내의 밴드 개수를 나타낸다. 목표 표본점과 참조 표본점들 간의 밴드별 분광값 차이에 의한 거리를 산출한 후 목표 표본점과 참조 표본점이 거리가 가까울수록, 즉 두 표본점의 분광값들이 유사할수록 보다 큰 가중치를 부여하는 방법을 사용하였다. 이를 위해 본 연구에서는 거리 역산에 의해 가중치( $w_{i,r}$ )를 부여하는 아래의 식 (2)를 이용하여 참조 표본점별 가중치를 부여하였다.

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

목표 표본점에서의 산림 바이오매스의 추정치( $\hat{y}_i$ )는 앞에서 선정된 야의 표본점, 즉 참조표본점의 산림 바이오매스의 측정치( $y_r$ )와 각 참조 표본점별 산출된 가중치( $w_{i,r}$ )를 이용하여 다음과 같은 식 (3)에 의해 추정되어진다.

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

여기서  $k$ 는 참조 표본점의 개수이며, 추정오차를 최소화하는 개수는 통계적 검증을 통해 선정되어진다.

한편 최근린 기법을 적용하기 위해서는 참조표본점의 범위를 설정하는 것이 중요하다. 산림은 지형, 토양

그리고 기후 조건에 따라 임분 구조가 상이하다. 따라서 참조 표본점의 범위를 동일한 특성을 갖는 조건으로 구분한 후, 참조표본점의 범위를 미조사지점과 동일한 조건 내에서 선정하는 것이 보다 정확한 추정치를 산출할 수 있다(Katila and Tomppo, 2002).

산림자원조사에서 야의 조사를 실시한 면적이 증가할수록 임목축적 및 바이오매스 등과 같은 산림정보와 영상의 분광값들과의 관계는 매우 다양하게 나타난다(Katila and Tomppo, 2001). 또한 참조 수평거리가 증가하면 참조 표본점의 개수가 증가하게 되며 추정치는 오차가 발생할 소지가 많다. 참조 수평거리가 작을 경우 참조 표본점의 개수가 감소하기 때문에 이 경우에는 표본의 모든 변이를 포함하는 최소 수평거리의 선정이 요구된다. 본 연구에서 사용한 위성영상은 온대와 난대 산림을 함께 포함하고 있다(Fig. 1). 따라서 본 연구에서는 수평거리의 범위를 반경 50km, 100km, 150km, 200km 그리고 250km의 5가지로 구분하였다.

이 경우 반경 250km는 위성영상에 포함된 거의 모든 표본점을 참조 표본점으로 이용하게 된다. 또한 회귀 모형 방법과 같이 야의 표본점을 임상으로 구분하여 참조 표본점의 범위를 목표 표본점과 동일한 임상으로 한정하여 참조 표본점을 선정하는 방법도 적용하였다. 즉, 표본점 자료를 임상으로 구분하여 참조표본점의 범위를 동일한 임상으로 한정하는 방법이다. 표본점의 임상은 표본점 내 임목들의 흉고단면적을 계산한 후, 침엽수와 활엽수의 흉고단면적 비율을 이용하여 구분하였다.

5) 통계적 검증

본 연구에서 사용된 회귀모형 기법과 최근린 기법 중에서 산림 바이오매스 추정에 적합한 방법을 선정하기 위해 통계적 검증을 실시하였다. 본 연구에서 사용한 통계적 검증통계량은 교차 대조법(leave-one-out cross-validation)에 의한 추정치의 오차(RMSE)와 평균편의(Mean Bias)이다(Katila and Tomppo, 2001). 즉, 각 통계적 기법의 바이오매스 추정 능력을 평가하기 위해 야의 표본점의 바이오매스 측정치와 통계적 기법에 의한 바이오매스 추정치를 이용하는 교차 대조법을 이용하였다. 본 연구에서 사용한 교차대조법에 의한 추정치의 오차와 평균편의( $\bar{e}$ )는 다음과 같은 식 (4)와 (5)에 의해 산출하였다.

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

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

여기서  $y_i$ 는 야의 표본점  $i$ 에서의 측정치,  $\hat{y}_i$ 는 통계적 기법에 의해 추정된 추정치, 그리고  $n$ 은 야의 표본점의 개수이다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 1) 야의 표본점의 산림 바이오매스 산출

위성영상에 포함된 1,825개의 표본점에 대한 임상별 산림 바이오매스를 국가산림자원조사 자료에 근거하여 산출한 결과는 Table 2와 같다. 본 연구에서 산출한 임상별 산림 바이오매스는 표본점별로 측정된 임목자원정보에 근거하여 임상별 임목측적을 추정한 후, 바이오매스 변환계수를 적용하여 얻은 것이다.

야의 표본점의 임상 구분은 표본점 조사에서 측정된 임목들의 흉고단면적을 계산한 후, 침엽수 및 활엽수의 흉고단면적 비율에 따라 침엽수림, 활엽수림, 그리고 혼효림으로 분류하였다. 침엽수 또는 활엽수의 흉고단면적 합계가 표본점 전체 흉고단면적의 75% 이상인 경우 각각 침엽수림과 활엽수림으로 분류하였으며, 해당 표본점에 생육하는 침엽수의 흉고단면적 합계가 전체의 24~74%이면 혼효림으로 분류하였다. 이러한 방법으로 표본점별 임상을 분류한 결과 전체 1,825개 표본점 중에서 침엽수림이 623개(34%), 활엽수림이 648개(36%), 그리고 혼효림이 554개(30%)로 임상별로 고른 분포를 보이는 것으로 나타났다.

야의 표본점 1,825개에 대한 ha당 평균 바이오매스

는 131.4ton으로 추정되었으며 표준편차는 66.2ton/ha로 분석되었다. 임상별 ha당 바이오매스 추정치를 보면 활엽수가 142.1ton으로 가장 크고 침엽수가 120.9ton으로 가장 적은 것으로 추정되었다. 활엽수림의 경우 ha당 바이오매스량이 크지만 표본점별 변이가 상대적으로 커서 표준편차가 72.7ton인 것으로 나타났다. 활엽수림의 경우 표본점의 최소 및 최대 바이오매스량도 다른 임상에 비해 큰 것으로 보아 상대적으로 영급이 큰 것으로 판단된다. 혼효림의 바이오매스 추정치를 보면 침엽수림과 활엽수림의 중간 정도를 나타내고 있다.

본 연구에서는 야의 표본점조사 자료에서 도출된 바이오매스량을 실측치로 간주하였다. 한편 이 실측치는 동일한 표본점을 대상으로 회귀모형과 최근린 기법을 적용할 경우 위성영상 자료와 함께 사용될 뿐만 아니라 회귀모형과 최근린 기법의 산림 바이오매스 추정능력을 검증하기 위한 모집단으로 이용하였다.

#### 2) 통계적 기법에 의한 산림 바이오매스의 추정

##### (1) 회귀모형을 이용한 추정

야의 표본점의 산림 바이오매스와 위성영상으로부터 생산된 해당 표본점의 6개 밴드의 분광값 및 정규식생 지수를 비롯한 10개의 지수들을 적용하여 바이오매스 추정 회귀모형을 개발하였는데 그 결과는 Table 3과 같다. 회귀모형의 독립변수로 사용되는 위성영상의 16개 분광값 및 지수는 해당 표본점의 위치에 해당되는 픽셀 단위와 주변 픽셀의 집합인 3×3 window 단위의 2가지로 도출하여 2가지 형태의 filtering method에 의해 바이오매스 추정 회귀식을 도출하였다. 또한 산림 바이오매스 추정 회귀식은 임상의 구분이 없이 전체 표본점 자료를 이용한 추정식과 임상으로 분류한 후 침엽수림, 활엽수림, 그리고 혼효림에 대한 회귀추정식을 각각 작성하는 추정방법을 이용하였다.

회귀모형의 설명력을 나타내는 결정계수( $R^2$ )는 모든 회귀 추정식에서 0.1 미만으로 상당히 낮은 것으로 나타났다(Table 3). 이러한 결과는 Labrecque 외(2006)의 연구 결과와 유사한 것으로 대면적의 야의 표본점 자료는 많은 편차를 나타내기 때문에 회귀 모형의 결정계수는 낮은 값을 나타내는 것으로 판단된다. 그러나 3×3 window의 평균 분광값을 이용한 회귀모형의 결정계수는 픽셀별 분광값을 이용하여 만들어진 회귀모형보다

Table 2. Forest biomass statistics based on the 5th National Forest Inventory data

Forest Cover Type	n	Forest Biomass Statistics(ton/ha)			
		Mean	Min.	Max.	S.D.
Conifers	623	120.9	15.9	371.0	61.3
Deciduous	648	142.1	27.7	474.2	72.7
Mixed	554	130.7	23.9	342.1	61.7
Total	1,825	131.4	15.9	474.2	66.2

Table 3. Estimates of regression coefficients for forest biomass estimation equations using remote sensing data by filtering method and forest cover type

Filtering Method	Classification	No. of Plots	Biomass Estimation Equation	R <sup>2</sup>	
Pixel	All	1825	50.97-2.84(TM1)+3.47(TM4)-2.44(TM7)+93.489(BR1)+43.59(BR2)+107.18(MI1)-7.49(TCG)	0.042	
	Forest Cover Type	Conifers	623	211.09-2.87(TM1)+1.94(TM3)+95(BR1)-344.24(NDVI)	0.049
		Deciduous	648	334.38-2.39(TM1)-83.41(NDMI)	0.059
		Mixed	554	107.21+67.65(MI2)	0.005
3×3 Window	All	1825	52.23+9.47(TM3)-8.18(TM4)+209.49(BR1)+313.95(BR2)-446.57(BR3)+586.06(MI1)-708.1(MI2)+5.22(TCG)	0.072	
	Forest Cover Type	Conifers	623	180.02-2.49(TM1)+1.25(TM7)+130.07(BR1)-462.2(NDVI)	0.065
		Deciduous	648	22.86-0.78(TM3)-2.87(TM7)+228.81(BR1)-741.77(NDVI)-478.42(NDMI)	0.102
		Mixed	554	-	-

다소 높은 것으로 나타났다. 특히 임상별로 구분된 회귀 모형의 경우 혼효림을 제외한 침엽수림과 활엽수림의 결정계수는 어느 정도 향상된 것으로 확인되었다. 이는 우리나라 산림의 임분구조가 대부분 IV영급 미만으로 구성되어 있어 산림 바이오매스의 변이가 크기 때문인 것으로 해석된다. 특히 혼효림의 경우 다른 임상에 비해 보다 복잡한 임분구조를 나타내고 있어 픽셀 단위의 회귀 모형의 결정계수는 0.005로 상당히 작은 값을 나타내고 있다. 또한 3×3 window 평균 분광값을 이용한 회귀 모형 도출의 경우에도 다른 임상은 결정계수가 향상된 반면(Table 3), 혼효림은 회귀모형을 도출할 수가 없었다.

이승호 외(2004)에 의하면 Landsat TM 영상의 분광값 조합에 의한 수종별 산림축적을 추정하기 위한 회귀모형을 산출한 결과 비교적 높은 결정계수(0.32~0.46)를 갖는 것으로 보고하였다. 이는 산림바이오매스 추정을 위한 회귀모형의 설명력을 높이기 위해서는 세분화된 임상 구분이 요구됨을 의미한다. 본 연구에서는 임상을 구분할 때 혼효림은 표본점별로 침엽수 또는 활엽수의 흉고단면적 합계가 25-75%의 범위에 해당하는 임분으로 정의를 하였으나, 앞으로의 연구에서는 좀 더 세분화된 혼효림의 구분을 통해 이러한 문제를 해결할 필요가 있다. 결과적으로 본 연구에서는 회귀모형을 이용한 방법 중에서 전체 표본점 및 임상별 추정식이 도출된 픽셀 단위의 filtering 방법을 이용한 회귀식을 산림 바이오매스 추정식으로 채택하였다.

(2) 최근린 기법에 의한 추정

Fig. 2는 다양한 참조 수평거리와 임상에 의한 층화,

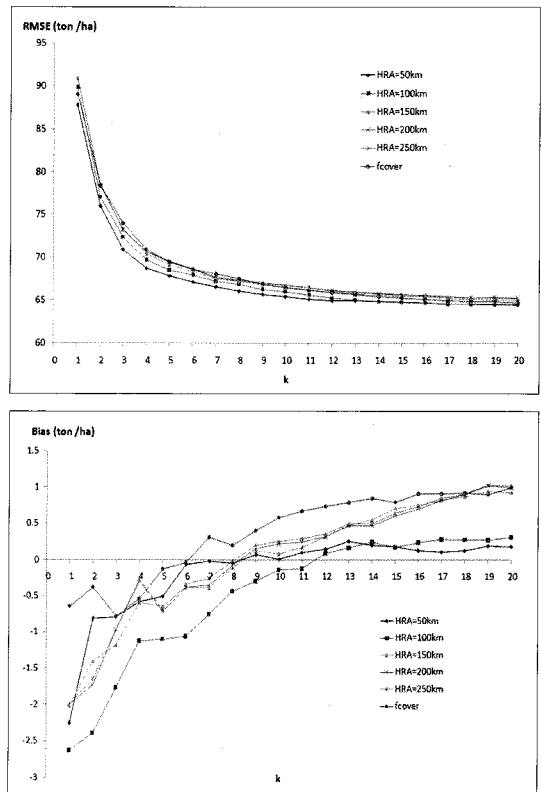


Fig. 2. RMSE and mean bias of total biomass estimates for different geographical HRAs and different numbers of k.

그리고 다양한 참조 표본점의 개수인 k에 따른 추정치의 RMSE와 평균편의를 보여준다. RMSE는 임상의 층화 방법에 관계없이 동일한 경향을 나타내고 있으며, k=10을 기준으로 RMSE는 160ton/ha에서 120ton/ha 미만으로 감소하였으며, k가 10이상으로 증가할 경우 완만한 형태를 보이고 있다. 특히 최소 참조 수평반경 50km

를 이용할 경우 RMSE는 최소값을 나타내고 있으며, 임상별 층화를 할 경우 RMSE가 가장 큰 것으로 나타났다. 오차의 경우에도  $k=10$ 을 중심으로  $k$ 가 10보다 작을 경우  $k$ 가 증가할수록 감소하였지만,  $k$ 가 10 이상일 경우  $k$ 가 증가할수록 증가하는 경향을 보이고 있다. 결과적으로 최근린 기법에서는 참조 수평거리 50km를 이용하여,  $k$ 의 개수가 10일 때가 최적의 추정능력을 보이는 것으로 나타났다.

Fig. 3은 픽셀별 분광값과  $3 \times 3$  window의 평균 분

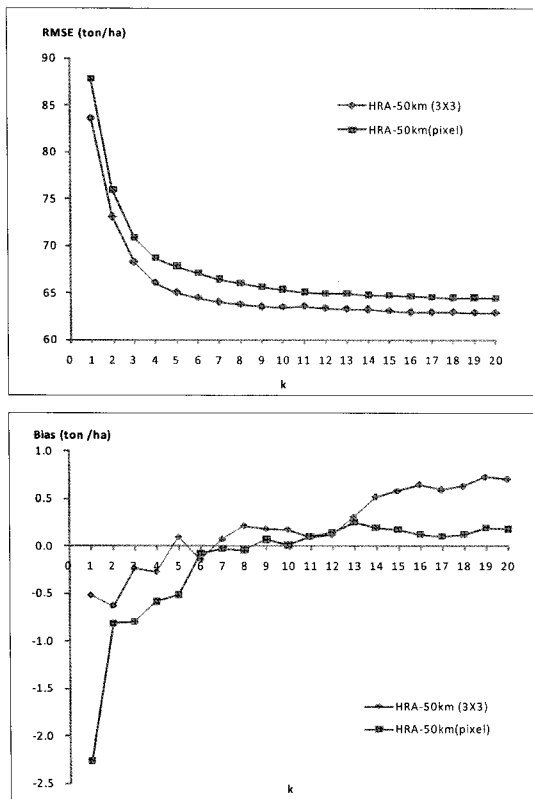


Fig. 3. RMSE and bias of forest biomass estimates by pixel and  $3 \times 3$  windows.

광값을 이용한 추정치의 RMSE와 오차를 나타낸 결과이다.  $3 \times 3$  window의 평균 분광값을 이용한 경우  $k$ 의 개수에 관계없이 RMSE가 증가하였으며, 편차는  $k$ 가 10 미만일 경우에는 작지만  $k$ 가 10 이상부터는 큰 오차를 보이고 있다. 결과적으로  $3 \times 3$  window의 평균 분광값을 이용한 방법은 최근린 기법에 의한 추정치의 오차를 감소시키지 못하는 것으로 나타났다.

### 3) 산림 바이오매스 추정기법의 선정

두 가지 추정방법과 각 방법에 따른 추정치의 오차 및 평균편의를 분석한 결과는 Table 4와 같다. 전체적으로 회귀모형과 최근린 기법에 의한 추정치의 오차와 평균편의는 유사한 것으로 나타났다.

야외 표본점의 임상별 층화 또는 참조 표본점의 범위를 이용한 방법이 추정치의 오차를 감소시킬 수 있으며, 이 경우 각 임상별로 충분한 실측 자료가 요구된다. 임상을 층화한 경우 RMSE는 감소하였지만 전체 자료를 이용한 추정치보다 큰 편차를 나타내고 있다. 한편 본 연구에서는 표본점의 위치 정보의 정확성을 향상시키기 위해  $3 \times 3$  window의 평균 분광값을 이용하였다. 이 방법은 해당 표본점의 픽셀별 분광값만을 이용하는 방법보다 다소 개선된 추정치를 얻을 수 있었지만 그 차이는 크지 않는 것으로 나타났다.

회귀모형을 이용한 산림 바이오매스 추정치의 오차는 64.8ton/ha(pixel)과 63.8ton/ha( $3 \times 3$  window)를 나타냈다. 최근린 기법의 경우에는 참조 표본점의 범위를 50km로 제한한 방법의 RMSE의 값이 65.4ton/ha(pixel)과 63.5ton/ha( $3 \times 3$ )인 것으로 분석되었다. 또한 임상별로 층화를 하여 바이오매스를 추정한 경우에는 추정오차가 각각 66.4ton/ha(pixel)과 65.3ton/ha( $3 \times 3$  window)로 나타났다. 두 추정방법의 평균편의를

Table 4. Comparison of validation statistics for two forest biomass estimation methods

Method	Classification	Filtering Method	RMSE (ton/ha)	Mean Bias (ton/ha)
Regression Model	All	pixel	64.8	-0.6
		$3 \times 3$	63.8	0.4
	Forest Cover type	pixel	64.2	0.2
$k$ -NN ( $k=10$ )	HRA-50km	pixel	65.4	0.01
		$3 \times 3$	63.5	0.2
	Forest Cover type	pixel	66.4	0.6
		$3 \times 3$	65.3	1.5

비교하면(Table 4), 회귀모형에 의한 방법이나 최근린 기법의 경우  $\pm 1\text{ton/ha}$ 로 대체적으로 표본점 자료에 의한 실측치와의 차이가 적은 것으로 나타났다. 회귀모형과 최근린 기법의 두 추정방법에 의한 평가통계량의 차이는 크게 나타나지 않았으나, 회귀분석에 비해 야외 표본점 자료를 참조표본점으로 사용하여 작업의 효율성이 상대적으로 우수한 최근린 기법을 최적 산림 바이오매스 추정 방법으로 선정하였다. 그중에서도 참조표본점의 수평거리를 50km로 제한하는 방법과  $k=10$ 을 최종 바이오매스 추정 기법으로 채택하였다.

4) 무주군의 산림 바이오매스 추정과 주제도의 작성

Table 5는 연구 대상지인 무주군의 산림 바이오매스를 추정한 결과이다. 국가산림자원조사에서 2006년과 2007년에 조사된 무주군의 야외 표본점은 58개인데, 표본점의 평균 산림 바이오매스는 166.4ton/ha이며, 표준편차는 91.0ton/ha로 추정되었다. 반면에 본 연구를 통해 최적 바이오매스 추정기법으로 선정된 최근린 기법을 적용할 경우 무주군의 ha당 산림 바이오매스는 149.3ton인 것으로 분석되었으며, 표준편차는 야외 표본점 통계량에 비해 훨씬 적은 29.5ton/ha인 것으로 추정되었다. 최근린 기법은 수평거리 50km와  $k=10$ 을 적

Table 5. Comparison of forest biomass estimates for Muju county by NFI data and k-NN method

Classification	No. of Plots	Forest Biomass Estimates (ton/ha)				
		Mean	Min.	Max.	S.D.	Total
NFI data	58	166.4	27.5	478.2	91.0	9,349,348
k-NN Method	624,141 (56,173ha)	149.3	16.2	474.2	29.5	8,386,021

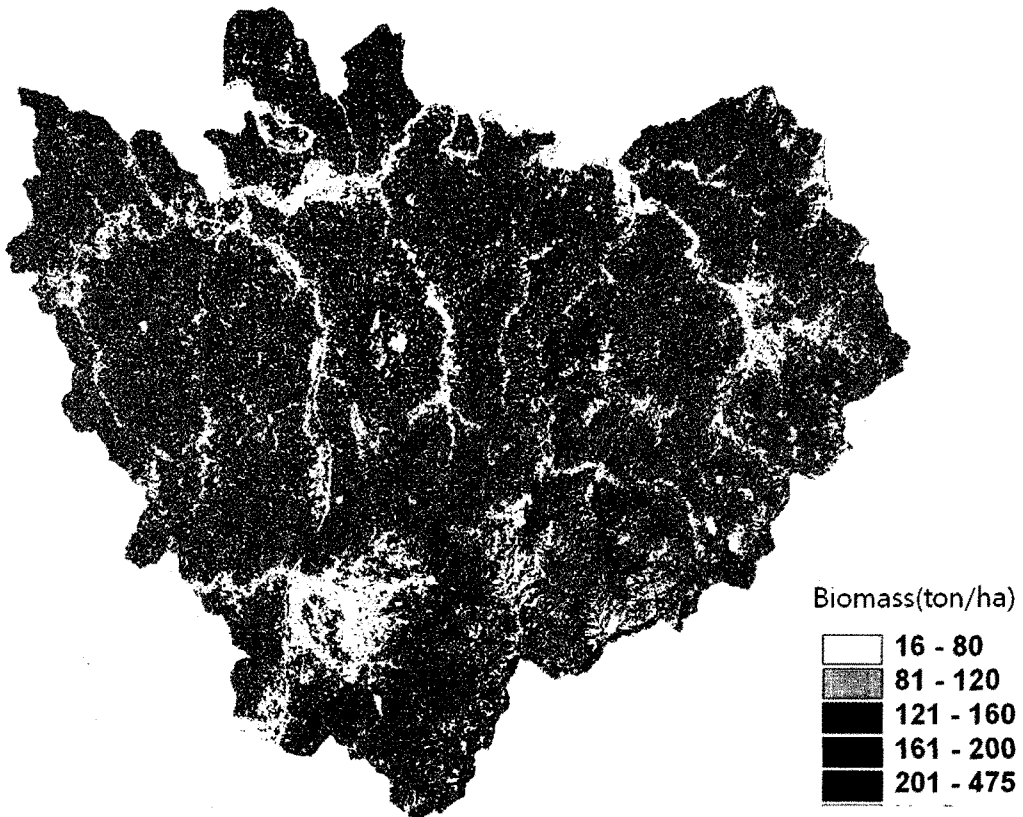


Fig. 4. Thematic map of forest biomass for Muju County.



용하여 식생지역의 바이오매스를 추출한 것이다. 한편 연구 대상지인 무주군의 전체 산림면적 56,174ha에 대한 총 산림 바이오매스량은 야외 표본점 자료와 최근린 기법을 적용하여 추정할 경우 각각 약 935만ton과 839만ton으로 계산되어, 두 방법 간에는 약 96만ton의 차이가 있는 것으로 추정되었다. 이를 ha 단위로 환산하면 야외 표본점 자료가 최근린 기법에 비해 17ton 정도 많은 것이다.

야외 조사 표본점 자료만을 이용할 경우 무주군의 전체 바이오매스와 평균값과 같은 통계량만을 산출할 수 있지만, 표본점 조사지역이 아닌 곳의 산림 바이오매스에 대한 정보를 얻을 수 없는 한계를 가진다. 하지만 위성영상 정보와 야외 표본점 조사 자료를 함께 이용하는 최근린 기법을 적용할 경우 pixel 단위로 미조사지역을 포함하여 세밀하게 산림 바이오매스 통계량뿐만 아니라 무주군 전체의 바이오매스 분포도를 작성할 수 있다.

Fig. 4는 연구 대상지인 무주군에 대해 최근린 기법을 적용하여 산림 바이오매스 분포를 도시한 결과이다. 연구 대상지인 무주군의 식생지수를 k-means clustering 기법에 의해 무감독 분류하여 4개의 그룹으로 식생도를 작성한 후, 식생분포(물, 비식생, 저밀도 식생, 고밀도 식생)에 대한 주제도를 작성하였다. 하지만 저밀도와 고밀도 식생등급만을 이용할 경우 분류의 정확도가 낮기 때문에 본 연구에서는 분명히 비식생이 아닌 지역은 모두 식생지역으로 분류하여 연구 대상지를 단순히 식생과 비식생으로 2가지로 구분하였다. 보다 정확한 식생구분을 위해서는 개화가 끝난 이후의 영상을 이용하는 것이 정확도를 향상시킬 수 있을 것으로 판단된다.

식생/비식생 주제도에서 식생지역에 위치하는 픽셀의 개수는 624,141개(약 56,173ha)로 나타났는데, 이는 무주군의 전체 산림(51,732 ha)보다 과대 추정된 결과이다(무주군, 2007). 이는 위성영상을 이용하여 연구 대상지의 산림뿐만 아니라 논, 밭, 그리고 공원 등을 식생으로 분류하여 포함시킨 결과로 판단된다.

#### 4. 결론

본 연구는 전라북도 무주군을 대상으로 제5차 국가산

림자원조사 자료와 위성영상(Landsat TM-5) 자료를 이용하여 두 가지 추정방법(회귀모형을 이용한 방법과 최근린 기법)에 의한 소면적의 산림 바이오매스를 추정 및 비교하여 최적의 방법을 도출한 후, 해당 지역에 대한 산림 바이오매스 주제도를 작성하고 통계량을 산출하고자 하였다. 야외 표본점에서의 산림 바이오매스 실측치와 통계적 기법에 의한 추정치를 비교하기 위해서 교차대조법을 이용하여 추정치의 오차(RMSE)와 평균편의를 검증통계량으로 사용하였는데 회귀모형과 최근린 기법 간에는 산림 바이오매스 추정에서 유사한 정도(精度)를 보이는 것으로 분석되었다.

하지만 회귀모형을 이용할 경우 영상별로 모형을 개발하여야 할 뿐만 아니라 분광값에 의존한 추정치는 현실 산림 바이오매스를 제대로 표현하지 못하는 문제점을 가지고 있다. 반면에 비모수 추정방법인 최근린 기법은 야외 표본점의 실측자료를 바이오매스 추정에 이용하기 때문에 보다 현실적인 산림 바이오매스를 추정할 수 있다. 결과적으로 작업의 효율성 면에서 최근린 기법이 회귀추정 기법에 비해 효율성이 높은 것으로 평가되어 최근린 기법에 의해 무주군의 산림 바이오매스를 추정한 후 주제도를 작성하였다.

본 연구에서 위성영상의 전처리과정 중 지형보정이 수행되지 않아 그림자에 의한 분광값의 오차에 대한 보정이 이루어지지 않았다. 이러한 오차를 감소시키기 위해서 추후 지형 및 대기보정이 이루어진 위성영상을 이용한 연구가 필요하다. 본 연구에서는 산림 바이오매스의 추정방법을 회귀모형 기법과 최근린 기법의 두 가지 방법으로 제한하여 적용하였으나, 최근에 새롭게 개발되고 있는 다양한 바이오매스 추정방법을 적용하여 우리나라 소면적 지역뿐만 아니라 국가 차원의 산림 바이오매스도 추정할 수 있도록 확대하여야 할 것이다. 특히 산림은 계절에 따라 위성영상의 분광값이 변하기 때문에 추정치의 정도를 향상시키기 위하여 다중시기 영상을 이용한 연구가 필요하다. 또한 고해상도의 위성영상을 이용할 경우 임상별 산림 바이오매스가 아닌 수종별 산림 바이오매스를 추정할 수 있기 때문에 좀 더 정확한 지역별 산림 바이오매스와 탄소 저장량 추정치를 얻을 수 있을 것으로 기대된다.

## 사 사

이 연구는 2007년 정부(교육인적자원부)의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구결과의 일부입니다(과제번호: KRF-2007-313-F00037). 연구비 지원에 감사드립니다.

## 참고문헌

- 국립산림과학원, 2008. 제5차 국가산림자원조사 -현지 조사 매뉴얼-.
- 무주군, 2007. 무주군 통계연보. <http://www.muju.org/statistics/index.html>.
- 산림청, 2003. 숲가꾸기 산물의 경제적 활용방안에 관한 연구.
- 손영모, 이경학, 김래현, 2007. 우리나라 산림 바이오매스 추정, *한국임학회지*, 96(4): 477-482.
- 이경학, 손영모, 김영수, 2001. 임업 및 토지이용부문의 온실가스 흡수 및 배출 현황, *임산에너지*, 20(1): 53-61.
- 이승호, 김철민, 원현규, 김경민, 조현국, 2004. Landsat TM 위성영상을 이용한 산림자원량 산정, *한국임학회 학술연구발표논문집*, 250-252.
- 임종수, 공지수, 김성호, 신만용, 2007. k-NN기법을 이용한 강원도 평창군의 산림 주제도 작성과 산림통계량 추정, *한국임학회지*, 96(3): 259-268.
- Ahern, F. J., T. Erdle, D. A. Maclean, and I. D. Knepeck, 1991. A quantitative relationship between forest growth rates and Thematic Mapper reflectance measurements, *International Journal of Remote Sensing*, 12: 387-400.
- Franco-Lopez, H., A. R. Ek, and M. E. Bauer, 2001. Estimation and mapping of forest stand density, volume and cover type using the k-Nearest Neighbors method, *Remote Sensing of Environment*, 77(3): 251-274.
- Fehrmann, L., A. Lehtonen, C. Kleinn, and E. Tomppo, 2008. Comparison of linear and mixed-effect regression models and k-nearest neighbor approach for estimation of single-tree biomass, *Canadian Journal of forest research*, 38(1): 1-9.
- IPCC, 2003. Good Practice guidance for land use, land-use change and forestry, Institute for Global Environment Strategies.
- Katila, M. and E. Tomppo, 2001. Selecting estimation attributes for the Finnish multisource national forest inventory, *Remote Sensing of Environment*, 76: 16-32.
- Katila, M. and E. Tomppo, 2002. Stratification by ancillary data in multisource forest inventories employing k-nearest neighbor estimation, *Canadian Journal of forest research*, 32(9): 1548-1561.
- Labrecque, S., R. A. Fourier, J. E. Luther, and D. Piercey, 2006. A comparison of four methods to map biomass from Landsat-TM and inventory data in western Newfoundland, *Forest Ecology and Management*, 226: 129-144.
- Tomppo, E., 2000. National forest inventory of Finland and its role estimating the carbon balance of forests, *Biotechnology, Agronomy, Society and Environment*, 4(4): 281-284.