

지상부 바이오매스 탄소저장량의 추정에 위치 오차가 미치는 영향

Effect of Location Error on the Estimation of Aboveground Biomass Carbon Stock

김상필¹⁾ · 허준²⁾ · 정재훈³⁾ · 유수홍⁴⁾ · 김경민⁵⁾

Kim, Sang Pil · Heo, Joon · Jung, Jae Hoon · Yoo, Su Hong · Kim, Kyoung Min

Abstract

Estimation of biomass carbon stock is an important research for estimation of public benefit of forest. Previous studies about biomass carbon stock estimation have limitations, which come from the used deterministic models. The most serious problem of deterministic models is that deterministic models do not provide any explanation about the relevant effects of errors. In this study, the effects of location errors were analyzed in order to estimation of biomass carbon stock of Danyang area using Monte Carlo simulation method. More specifically, the k-Nearest Neighbor(kNN) algorithm was used for basic estimation. In this procedure, random and systematic errors were added on the location of sample plot, and effects on estimation error were analyzed by checking the changes of RMSE. As a result of random error simulation, mean RMSE of estimation was increased from 24.8 tonC/ha to 26 tonC/ha when 0.5~1 pixel location errors were added. However, mean RMSE was converged after the location errors were added 0.8 pixel, because of characteristic of study site. In case of the systematic error simulation, any significant trends of RMSE were not detected in the test data.

Keywords : Carbon Stock, Monte Carlo Simulation, Estimation Error, Location Error, kNN

초 록

산림의 바이오매스 탄소저장량을 추정하는 것은 산림의 공익적인 가치를 평가하기 위해 선행되어야 하는 연구이다. 하지만 기존의 바이오매스 탄소저장량 추정에 관한 연구는 대부분 결정론적 모델이 사용되어 오차에 의한 영향을 알 수 없다는 한계를 가진다. 본 연구에서는 단양군의 지상부 바이오매스 탄소저장량 추정 경우를 대상으로 몬테카를로 시뮬레이션을 통해 위치 오차에 의한 추정오차의 영향을 분석하고자 하였다. 기본적인 추정 방법으로는 kNN 알고리즘이 사용되었으며, 표본점의 위치에 우연오차 및 계통오차를 추가하여 RMSE의 변화를 통해 추정오차에 미치는 영향을 분석하였다. 분석결과 일반적인 위성영상에서 발생할 수 있는 0.5~1 영상소의 위치오차에 의해 추정의 평균 RMSE가 24.8 tonC/ha에서 26 tonC/ha로 증가하는 것으로 확인되었으며, 추정 오차의 범위는 23.8 tonC/ha에서 28.1 tonC/ha로 나타났다. 하지만, 대상지역의 특성에 의해 0.8 영상소 이상의 우연오차에 대해서는 더 이상의 RMSE 증가가 없이 수렴하는 것으로 확인되었다. 방향을 고려한 계통오차에 대한 분석의 경우 실험자료에서 특정한 경향은 발견되지 않았다.

핵심어 : 탄소저장량, 몬테카를로 시뮬레이션, 추정오차, 위치오차, kNN

1) 정희원 · 연세대학교 토목환경공학과 박사과정(E-mail: spkim09@yonsei.ac.kr)
2) 교신저자 · 정희원 · 연세대학교 토목환경공학과 부교수(E-mail: jheo@yonsei.ac.kr)
3) 연세대학교 토목환경공학과 박사과정(E-mail: lionheart_kr@yonsei.ac.kr)
4) 연세대학교 토목환경공학과 석사과정(E-mail: swennoir@yonsei.ac.kr)
5) 국립산림과학원 연구사(E-mail: greenann@forest.go.kr)

1. 서론

1.1 연구 배경

산림이 제공하는 가치는 목재를 통해 시장에서 실현되는 가치와 함께 시장에서 거래되지 않는 다양한 공익적 가치를 포함하고 있다. 산림청에서 이루어진 산림의 공익기능 가치 평가에 따르면 2005년을 기준으로 한국 산림의 공익적 가치는 수원함양기능, 대기정화기능, 토사유출방지, 산림휴양에 대한 가치 등을 포함하여 총 66조원에 달하는 것으로 평가되었다. 이는 2005년 국내총생산(GDP) 865조원의 7.6%에 달한다(김중호 등, 2006). 그러나 이 평가에는 전 세계적으로 새로운 이슈로 떠오르고 있는 생물다양성 보전에 대한 가치 및 탄소저장기능에 대한 가치는 포함되어 있지 않아 추가적인 연구가 필요한 상황이다.

산림의 탄소저장량 혹은 바이오매스를 추정하는 것은 탄소저장기능에 대한 산림의 가치를 평가하기 위해 우선적으로 수행되어야 하는 연구이다. 장안진 등(2008)은 항공사진과 LiDAR 데이터를 이용해 산림지역의 바이오매스를 추정하였다. 임종수 등(2009)은 5차 국가산림조사 자료와 Landsat TM 위성영상 자료를 이용하여 산림 바이오매스를 추정하고 이를 토대로 바이오매스 주제도를 작성하였으며, 정상영 등(2009)과 정재훈 등(2010) 역시 Landsat TM 위성영상을 이용하여 산림 바이오매스를 추정한 바 있다.

1.2 연구목적

이러한 연구들은 모두 독립변수에 따라 종속변수가 일정한 분석적 해(analytical solution)를 산출하는 결정론적 모델(deterministic model)이 사용되어 오차에 의한 영향을 알 수 없다는 한계를 가진다. 모델링 과정에서 발생할 수 있는 오차는 크게 1) 시스템을 잘못 이해하거나 불완전하게 묘사하기 때문에 생기는 오차, 2) 모델을 수학적으로 단순화하는 과정에서 발생하는 오차, 3) 모델링을 위한 변수선택에 의한 오차, 4) 무작위성에 의한 우연오차로 구분할 수 있다. 결정론적 모델은 1)~3)까지의 오차에 대해서는 극복이 가능하나 4)의 무작위성 오차에 대해서는 표현이 불가능하다(박석순 등, 1993). 원격탐사 자료를 이용한 바이오매스 추정은 공간분석을 기반으로 하고 있으며 이로 인해 필연적으로 위치에 대한 오차를 포함하게 된다. 따라서 결정론적 모델이 가지는 한계를 극복하기 위한 추가적인 연구가 필요한 상황이다.

1.3 연구방법

불확실성 분석은 이러한 결정론적 모델이 가지는 한계를 극복하기 위해 발달하였다. 몬테카를로 시뮬레이션, 일차함수 오차분석 기법 등의 불확실성 분석은 오차 범위를 정량화하여 나타냄으로써 모델의 불확실성에 관한 정보를 제공하여 준다. 특히, 몬테카를로 시뮬레이션은 Metropolis(1949)에 의해 제안된 방법으로 수치적(numerical)으로 임의의 확률 분포를 따르는 일련의 난수를 반복적으로 발생시켜 시뮬레이션 하는 방법이다. 몬테카를로 시뮬레이션은 반도체/유체/역학 등의 공학분야와 각종의 사결정이 필요한 금융공학, 정량적 위험관리 등의 분야에서도 널리 쓰이고 있는 방법이다. Greenland(2001)는 몬테카를로 방법과 베이지안(Bayesian) 방법을 이용하여 위험관리에서의 불확실성을 분석한 바 있으며, Kuczera 등(1998)은 집수역 모델(catchment model)의 불확실성을 분석하기 위해 몬테카를로 방법을 사용한 바 있다. 국내에서도 전과정목록 자료의 불확실성 문제를 해결하기 위해 몬테카를로 시뮬레이션을 이용하거나(박지형 등, 2004), 오염이동의 불확실성을 분석하는(정찬호 등, 2006) 등 몬테카를로 시뮬레이션은 불확실성 분석을 위해 널리 쓰이는 방법이다. 본 연구는 공간분석을 통한 바이오매스 추정 과정에서 필연적으로 발생하게 되는 자료 위치의 오차에 따른 추정치의 불확실성을 몬테카를로 시뮬레이션을 이용하여 분석하는데 목적이 있다.

본 연구에서는 단양지역의 Landsat TM 영상을 사용한 탄소저장량 추정의 경우를 대상으로 시뮬레이션을 통해 위치 오차가 추정값에 미치는 영향을 분석해보고자 하였다. 시뮬레이션은 우선 기본적인 추정을 실시하고, 기본 추정량과 관측값의 위치에 오차를 추가한 후 추정을 다시 실시하여 얻은 추정량을 비교, 분석하여 오차의 정도 및 경향을 파악하는 방법으로 일반적인 불확실성 분석의 과정과 동일하게 진행되었다. 시뮬레이션을 위한 오차는 우연오차와 계통오차를 추가하여 각각의 오차를 통해 위치 오차에 대한 추정값의 불확실성을 분석하고 방향을 고려한 계통오차의 영향 존재 여부를 파악해 보고자 하였다.

2. 연구 재료 및 방법

2.1 연구대상지역

본 연구의 대상지역인 단양군(丹陽郡)은 대한민국 충청북도 북동부에 있는 군이다. 서쪽으로는 제천시와, 북쪽으로는 강원도 영월군과, 남쪽으로는 경상북도 영주시와

접하고 있다. 총 면적은 780.67km²로 집단취락 및 도시지역 만 일부의 분지와 구릉으로 형성되었을 뿐 대부분 산악으로 이루어져 있다. 임업통계연보(2010) 및 농림수산식품 통계연보(2009)에 따르면, 전체 면적의 80.4%가 산악지대이고 경지면적은 7.7%에 불과하다. 단양군은 침엽수, 활엽수 및 혼효림이 골고루 분포하고 있고, Landsat 자료의 확보가 용이하여 연구대상지역으로 선정하였다.

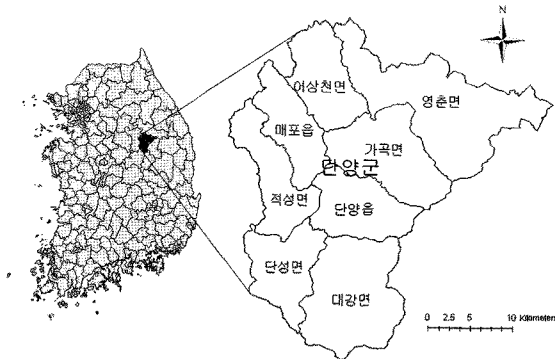


그림 1. 연구대상지역(단양군)

2.2 영상 및 국가산림자원조사 자료

본 연구에서는 분석을 위해 2004년 1월 4일에 대상지역을 촬영한 Landsat TM 영상을 사용하며, 해상도의 차이로 인해 Landsat TM의 8개 밴드 영상중 열적외선 영역과 전정색(panchromatic) 영역의 영상은 사용하지 않았다. 보다 정확한 추정을 위한 자료의 전처리로 방사 및 반사보정과 경사보정을 수행하였으며, 대상지역의 1:5,000 정밀임상도를 이용하여 비산림지역을 제거하였다.

탄소저장량은 국립산림과학원에 의해 제5차 국가산림자원조사에서 수집된 2006년에서 2009년 야의 표본점 조사 자료를 사용하였다. 본 연구 대상지인 단양군에는 49개의 고정표본점이 포함되어 있다. 하나의 고정표본점은 4개의 부표본점으로 이루어져 단양군에는 196개의 부표본점이 포함된다. 196개의 부표본점 가운데 탄소량추정에는 실제 탄소정보가 포함된 120개의 부표본점만이 사용되었다.

2.3 kNN 알고리즘

일반적으로 위성영상을 이용하여 산림 바이오 매스 탄소저장량을 추정하는 방법에는 회귀모형이나 kNN 알고리즘이 사용된다. 임종수 등(2009)의 연구에서 무주군을 대상으로 두 방법을 비교하여 kNN 알고리즘이 보다 효율

성이 높은 것을 확인하였으며, 본 연구에서는 임종수 등의 연구결과를 따라 추정 방법으로 kNN 알고리즘을 사용하였다.

kNN 알고리즘은 참조점들 중 가장 가까운 k개의 개체를 참고하여 새로운 개체를 분류(classification)하거나 그 속성값을 추정하는 알고리즘이다. kNN 알고리즘은 매우 간단하여 이해하기 쉽다. 선행된 연구 결과에서도 훌륭한 성능을 나타내는 것으로 확인되었으며, 가장 뛰어난 10개의 data mining 알고리즘 중 하나로 알려져있다(Wu 등, 2007). kNN 알고리즘은 IDW(inverse distance weighting)에 기반한 방법으로 목표점은 자신과 가장 가까운 k개의 참조점을 이용해 값을 추정한다. 참조점의 선정은 일반적으로 목표점과 참조점의 분광 공간(spectral space)에서의 유사성에 의해 결정된다. 추정값에 큰 영향을 미치는 k값은 단양군 지역의 경우 정재훈 등(2010)의 연구결과를 바탕으로 10으로 설정하였다.

2.4 시뮬레이션을 통한 불확실성 분석

결정론적 모델이 한 번의 시뮬레이션으로 종속변수의 확정적인 하나의 분석적 해만을 제공하는 반면, 불확실성 분석을 위해 필요한 확률적 모델(probabilistic model)은 확률 변수가 포함된 독립변수들로부터 종속변수의 확률적 특성을 알아내기 위해 다수의 시뮬레이션 결과 값들을 이용하여 분석한다. 본 연구에서 탄소저장량의 추정은 식 (1)과 같이 추정하고자 하는 목표점(t)과 참조점(r)의 분광값 및 참조점의 탄소저장량을 독립변수로하고, 목표점의 탄소저장량을 종속변수로 하여 시뮬레이션을 수행하였다.

$$\hat{c}_t = f(c_r, p_t, p_r) \quad (1)$$

여기서 \hat{c}_t , c_r 은 각각 목표점과 참조점의 탄소저장량, p_t , p_r 은 각각 목표점과 참조점의 분광값을 나타낸다. p_t , p_r 은 목표점과 참조점의 위치로부터 영상에서 구해지는 값으로 식 (1)에서, 을 위치에 대한 함수로 나타내면 다음과 같다.

$$\hat{c}_t = f(c_r, p_t(x_t, y_t), p_r(x_r, y_r)) \quad (2)$$

여기서 x_t , y_t 은 목표점의 위치 x_r , y_r 은 참조점의 위치를 각각 나타낸다. 본 연구에서는 탄소저장량을 추정할 때 위치오차에 의한 추정값의 불확실성을 분석하고자 참

조점의 위치를 오차를 포함하고 있는 확률변수로 가정하고 오차에 대해 시뮬레이션을 수행하여 탄소저장량 추정값의 불확실성을 분석하고자 하였다.

2.5 몬테카를로 방법을 이용한 우연오차에 대한 시뮬레이션

몬테카를로 시뮬레이션은 불확실성 분석을 위한 대표적인 방법 중 하나로 종속변수의 확률적 특성, 독립변수의 오차에 의한 영향의 민감성, 모델 시스템의 안정성 등을 평가하는 것을 목적으로 한다(Paste 등, 2010). 몬테카를로 시뮬레이션은 일정한 확률적 특성을 따르는 무작위한 독립변수로부터 종속변수를 반복적으로 계산하여 종속변수의 확률적 특성을 알아내는 방법으로 일반적으로 다음과 같은 단계를 거쳐 이루어진다. 1) 독립변수와 종속변수를 결정하고 모델을 생성한다. 2) 확률분포를 따르는 임의의 변수들을 독립변수로 생성한다. 3) 모델링을 수행하고 결과를 저장한다. 4) 2)~3)의 과정을 충분한 수까지 반복하여 수행한다. 5) 히스토그램, 요약통계, 신뢰구간 등을 이용하여 결과를 분석한다. 몬테카를로 시뮬레이션은 2)에서 독립변수를 확률분포로부터 임의로 생성해 내기 때문에 독립변수의 확률 분포를 미리 알고 있어야 적용할 수 있는 방법이다(Frenkel, 2004).

본 연구에서는 독립변수중 목표점 및 참조점의 위치가 우연오차를 포함하고 있다는 가정 하에 위치의 우연오차를 확률변수로 가정하여 몬테카를로 시뮬레이션을 적용하였으며, 위치의 우연오차는 정규분포를 따른다고 가정하였다. 일반적으로 영상에서 한두 영상소 정도의 위치

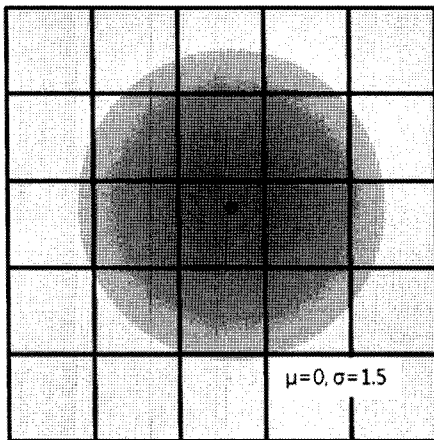


그림 2. 우연오차에 대한 시뮬레이션

오차가 존재하므로 본 연구에서는 그림2와 같이 정규분포를 따르는 오차를 무작위하게 발생시켜 시뮬레이션을 수행하였다. 우연오차가 정규분포를 따르므로 중심점에 가까울수록 오차의 발생 빈도가 높으며 중심에서 멀어질수록 발생 빈도가 낮아진다. 오차의 분포는 0.1영상소부터 1.4영상소까지로 가정하고 오차의 범위를 표준편차로 하여 $X \sim N(0, 1.4)$, $Y \sim N(0, 1.4)$, 와 같은 정규분포를 따르는 오차를 생성하여 시뮬레이션을 수행하였다.

2.6 방향을 고려한 계통오차에 대한 시뮬레이션

우연오차에 대한 시뮬레이션과 함께 자료의 계통오차 포함 여부를 확인하기 위해 계통오차를 추가하여 시뮬레이션을 수행하였다. 계통오차는 어떤 오차의 원인에 의해 모든 측정값과 참값 사이에 같은 크기의 편위(bias)가 발생하는 것을 말한다. 본 연구에서는 위치에 계통오차가 존재할 경우 이는 추정오차로 전파되어 추정의 정확도를 낮추는 역할을 할 것으로 가정하였다.

모든 표본점의 위치에 계통오차를 추가하였을 때, 자료가 가지고 있는 본래의 계통오차를 상쇄하는 경우 추정오차가 감소하는 효과가 있을 것으로 기대하였다. 따라서 특정한 방향으로 추정오차가 감소하는 경향을 확인함으로써 계통오차의 포함 여부를 확인할 수 있을 것으로 예상할 수 있다. 계통오차는 그림 3과 같이 전체 방위를 100 방향으로 나누고 우연오차에 대한 시뮬레이션과 동일하게 0.1~1.4 영상소의 범위에서 생성하였다.

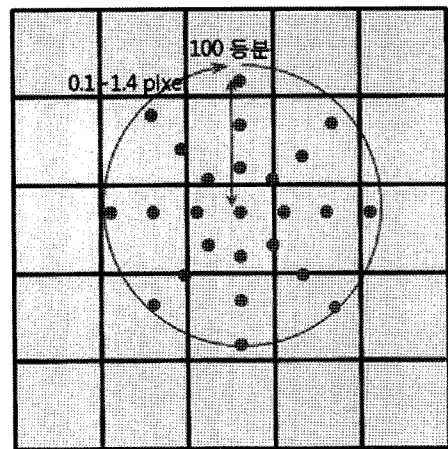


그림 3. 계통오차에 대한 시뮬레이션

3. 실험 및 결과

3.3 실험 결과

3.3.1 우연오차에 대한 시뮬레이션

표본점의 위치에 정규분포를 따르는 우연오차를 추가하고 동일한 과정을 300회씩 수행하여 우연오차가 탄소 저장량 추정결과에 미치는 영향을 분석하였다. 우연오차는 각각 0.1, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0, 1.2, 1.4 영상소를 표준편차로 하는 정규분포를 따르도록 생성하여 위치의 우연오차가 가지는 범위 변화에 따른 추정의 정확도의 변화를 확인하고자 하였다. 추정의 정확도는 leave-one-out 기반의 교차 검증법(cross validation)을 통해 계산된 RMSE를 통해 판단하였다.

그림 4는 오차를 추가하지 않았을 때의 기본 RMSE와 비교하여 우연오차의 범위가 증가함에 따른 추정오차의 최저, 최대 및 평균 RMSE의 변화를 나타낸 것이다. 추정오차의 평균 RMSE는 기본추정의 RMSE인 24.8 tonC/ha에서 우연오차가 0.4 영상소까지 증가함에 따라 25.8 tonC/ha까지 급격히 증가하였다. 그러나 점차 변화폭이 작아져 0.8 영상소에서 약 26 tonC/ha로 수렴하여 0.8 영상소 이후로는 우연오차의 증가에 크게 영향을 받지 않는 것으로 나타났다. RMSE의 최소값은 우연오차의 범위에 크게 영향을 받지 않는 것으로 나타나는 반면, 최대 RMSE는 평균 RMSE의 경우와 마찬가지로 0.4 영상소까지는 급격히 증가하고, 그 이후에는 수렴하는 것으로 나타났다. 일반적으로 위성영상의 기하보정 후에도 존재하는 0.5~1영상소의 오차를 감안할 경우, 본 연구에 사용된 바이오매스 탄소량 추정 결과의 RMSE는 최소 약 23.8 tonC/ha에서 최대 약 28.1 tonC/ha까지 약 4.3 tonC/ha의 범위를 가지는 것으로 나타났다.

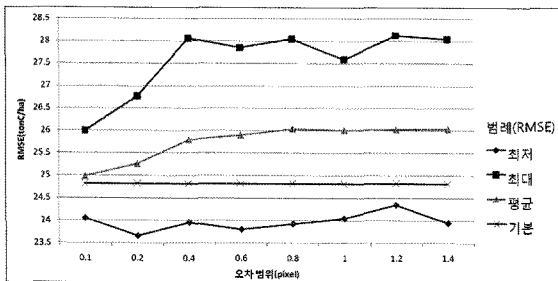


그림 4. 우연오차에 의한 추정오차의 변화

그림 5는 추정오차의 분포를 히스토그램으로 확인해본 것으로 추정오차가 정규분포에 가까운 형태를 띠는 것을

확인할 수 있었다. 우연오차의 범위가 증가함에 따라 0.4 영상소까지는 추정오차의 평균이 증가함과 동시에 오차의 분포가 넓어지는 결과를 확인할 수 있었으나, 0.4 영상소 이후로는 비슷한 분포를 보이는 것으로 확인되었다.

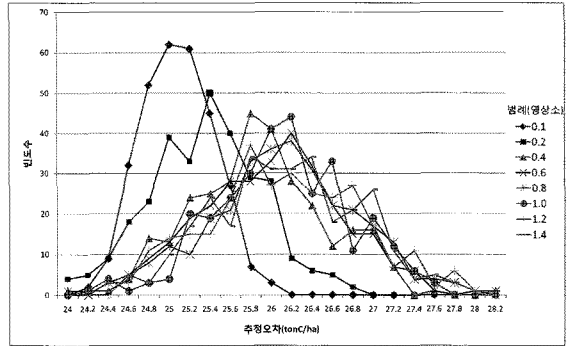


그림 5. 우연오차에 의한 추정오차의 분포

3.3.2 방향을 고려한 계통오차에 대한 시뮬레이션

지도 전체에 동일한 계통오차가 존재한다고 가정하고 계통오차에 의한 추정오차의 영향을 확인하기 위해 모든 표본점의 위치에 계통오차를 추가하여 분석을 수행하였다.

다음의 그림 6은 기본 RMSE와 비교하여 계통오차에 의한 추정오차의 최대, 최소 및 평균 RMSE의 변화를 나타낸 것이다. 우연오차의 경우와 마찬가지로 계통오차의 범위가 증가함에 따라 추정오차의 평균 및 최대 RMSE 값은 0.4 영상소까지 급격히 증가하는 경향을 보이다 점차 수렴하는 것으로 나타났다. 반면 최소 RMSE 값은 0.6 영상소까지 감소하다 그 이후 다시 증가하는 경향을 나타내었다.

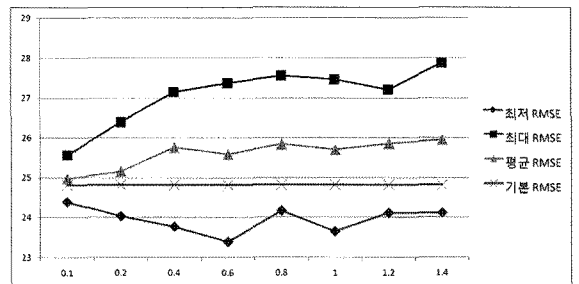


그림 6. 계통오차에 의한 추정오차의 변화

그림 7은 계통오차에 대한 시뮬레이션 결과를 각 방향 및 오차의 범위에 따라 개별적으로 도시한 것이다. 분석 결과 계통오차 시뮬레이션의 결과에서도 오차의 범위가

증가함에 따라 추정오차의 범위가 증가하는 것이 확인되었다.

데이터 자체에 계통오차가 존재하였을 경우 추가된 오차가 계통오차를 상쇄하여 특정한 방향으로 오차가 감소하는 경향이 발견될 것으로 예상하였으나 방향에 따른 분석결과 0.6 영상소까지 감소한 최저 RMSE의 방향에 일관된 경향이 존재하지 않았다. 따라서, 본 실험 결과에서는 실험 자료의 방향에 따른 계통오차는 존재하지 않는 것으로 확인되었다.

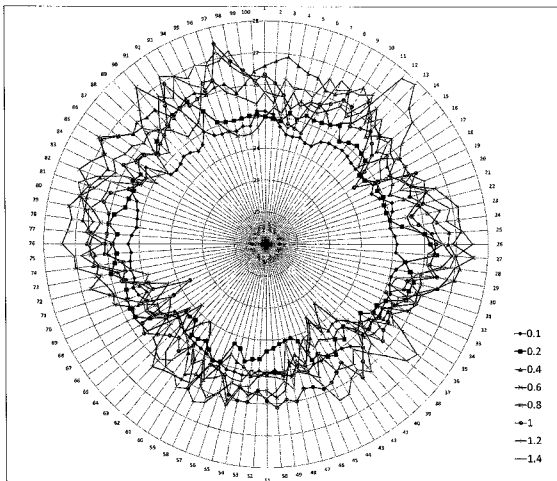


그림 7. 계통 오차에 대한 시뮬레이션 결과

4. 결론

본 연구에서는 단양군의 탄소저장량 추정의 경우를 대상으로 불확실성 분석을 통해 위치오차가 추정오차에 미치는 영향을 분석하여 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

첫째, 우연오차에 대한 시뮬레이션을 통해 추정오차의 불확실성을 판단할 수 있었다. 위치의 우연 오차가 0.8 영상소까지 증가함에 따라 추정오차의 평균 값이 기본 추정의 결과인 24.8 tonC/ha에서 26 tonC/ha로 증가하는 것으로 나타났다. 그러나 0.4 영상소까지 급격히 증가하던 추정 오차는 0.8 영상소 이후로는 추정 오차가 더 이상 증가하지 않고 수렴하는 것으로 나타났으며, 이는 지역의 특성이 유사함에 따른 것으로 예상된다. 또한, 일반적으로 위성 영상에 존재하는 0.5~1영상소의 위치 오차를 감안할 경우 단양군 지역의 위치오차에 따른 총 탄소저장량의 RMSE는 약 23.8~28.1 tonC/ha의 범위를 갖는 것으로 확인되었다.

둘째, 위치의 우연 오차에 의한 추정오차의 분포를 확인할 수 있었다. 추정오차의 분포를 히스토그램으로 도시해본 결과 추정오차의 분포가 우연오차와 마찬가지로 정규분포의 형태를 띠는 것으로 나타났다. 또한, 우연오차의 범위가 0.4 영상소까지 증가함에 따라 오차의 평균값이 증가하고 분산이 커지는 것을 확인할 수 있었다.

셋째, 계통오차에 대한 시뮬레이션 결과에서는 우연오차의 경우와 마찬가지로 계통오차의 범위가 증가함에 따라 추정오차가 증가함이 확인되었다. 또한, 영상 전체에 계통오차가 존재할 경우 방향에 따른 경향이 존재할 것으로 예상되었으나 방향에 따른 경향이 발생되지 않아 계통오차는 존재하지 않음을 확인할 수 있었다.

본 연구는 소면적인 단양지역만을 대상으로 이루어져 연구결과의 일반화에는 한계를 지닌다. 따라서 보다 넓은 지역을 대상으로 다양한 자료를 이용한 추가 연구가 이루어져야 할 것이다. 특히, 임상분포가 고르고, 산림이 지형의 대부분을 차지하는 단양군과 다른 특성을 지니는 지역을 대상으로 연구를 수행함으로써 지형과 임분구조의 차이에 따른 영향을 고려해 볼 필요가 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

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

참고문헌

김중호, 이경학, 박찬우, 서정원, 손영모, 김경하, 윤호중, 박찬열, 이승우, 오정수 (2006), 산림의 공익기능 평가, 한국산림휴양학회지, 제10권, 제2호, pp. 7-15.
 농림수산식품부 (2009), 농림수산물통계연보, pp. 53.
 박석순, 최은주 (1993), 하천 불확실성 분석을 위한 몬테카를로 시뮬레이션과 일차함수 오차분석 비교, 수질보전, 제9권, 제3호, pp. 153-158.
 박지형, 서광규 (2004), 몬테카를로 시뮬레이션을 이용한 LCI data 불확실성 처리방법론, 한국정밀공학학회지, 제21권, 제12호, pp. 109-118.
 산림청 (2010), 임업통계연보, pp. 52.
 임종수, 한원성, 황주호, 정상영, 조현국, 신만용 (2009), 위성영상자료 및 국가 산림자원조사 자료를 이용한 산림 바이오매스 추정, 원격탐사학회지, 제25권, 제4호, pp.

- 311-320.
- 장안진, 김형태 (2008), 항공사진과 LiDAR 데이터를 이용한 산림지역의 바이오매스 추정에 관한 연구, *한국지리정보학회지*, 제11권, 제3호, pp. 166-173.
- 정상영, 임종수, 조현국, 정진현, 김성호, 신만용 (2009), 산림 바이오매스 변환표와 위성영상을 이용한 무주군의 산림 바이오매스 추정, *한국임학회지*, 제98권, 제4호, pp. 409-416.
- 정재훈, 허준, 유수홍, 김경민, 이정빈 (2010), kNN 알고리즘과 계절별 Landsat TM 위성영상을 이용한 단양군 지역의 지상부 바이오매스 탄소저장량 추정, *한국지형공간정보학회지*, 제18권, 제4호, pp. 119-129.
- 정찬호, 구민호, 서병민 (2006), 오염원 이동의 불확실성 해석을 위한 몬테카를로 시뮬레이션기법, *대한지질공학회 2006년도 학술발표회논문집*, pp. 89-95.
- Frenkel, D. (2004), Introduction to Monte Carlo methods, *John von Neumann Institute for Computing*, Vol. 23, pp. 29-59.
- Greenland S. (2001), Sensitivity Analysis, Monte Carlo risk analysis, and Bayesian uncertainty assessment, *Risk Analysis*, Vol.21, No.4, pp. 579-583.
- Kuczera, G. and Parent, G. (1998), Monte Carlo assesment of parameter uncertainty in conceptual catchment models: the Metropolis algorithm, *Journal of Hydrology*, Vol. 211, pp. 69-85.
- Metropolis, N. and Ulam, S. (1949), The Monte Carlo method, *Journal of the American Statistical Association*, Vol. 44, No. 247, pp. 335-341.
- Paste, R., Morio, J. and Gland, F. (2010), An overview of importance splitting for rare event simulation, *European Journal of Physics*, vol. 31, pp. 1295-303.
- Wu, X., Kumar, V., Quinlan, J.R., Ghosh, J., Yang, Q., Motoda, H., McLachlan, G.J., Ng, A.F.M., Liu, B., Yu, P.S., Zhou, Z.-H., Steinbach, M., Hand, D.J., and Steinberg, D. (2008), Top 10 Algorithms in Data Mining, *Knowledge and Information Systems*, vol. 14, No. 1, pp. 1-37

(접수일 2011. 02. 11, 심사일 2011. 03. 18, 심사완료일 2011. 03. 22)