

몬테 카를로 시뮬레이션을 이용한 소나무 탄소배출계수의 불확도 평가

표정기¹ · 손영모^{1*} · 장광민² · 이영진³

¹국립산림과학원 기후변화연구센터, ²한국임업진흥원 산림탄소인증센터, ³공주대학교 산림자원학과

Uncertainty Assessment of Emission Factors for *Pinus densiflora* using Monte Carlo Simulation Technique

Jung Kee Pyo¹, Yeong Mo Son^{1*}, Gwang Min Jang² and Young Jin Lee³

¹Center of Forest and Climate Change, Korea Forest Research Institute, Seoul 130-712, Korea

²Center of Forest Carbon Certification, Korea Forestry Promotion Institute, Seoul 121-914, Korea

³Department of Forest Resources, Kongju National University, Yesan 340-802, Korea

요약: 본 연구의 목적은 몬테 카를로 시뮬레이션을 이용하여 소나무 탄소배출계수 자료의 확률밀도를 추정하고 불확도를 제시하는데 있다. 이용된 탄소배출계수는 목재기본밀도, 바이오매스확장계수, 뿌리함량비이고 4개의 확률밀도 함수(정규분포, 로그정규분포, 감마분포, 와이불 분포)를 고려하였다. 2-표본 콜모고로프-스미르노프 검정통계량과 누적밀도곡선을 비교하여 최적의 확률밀도함수를 선정하고 상한과 하한의 불확도를 제시하였다. 본 연구의 결과에 의하면, 각 탄소배출계수에서 추정된 확률밀도함수는 강원지방소나무에서 목재기본밀도는 감마분포, 바이오매스확장계수는 로그정규분포, 뿌리함량비는 정규분포이고 중부지방소나무에서 목재기본밀도는 정규분포, 바이오매스확장계수는 감마분포, 뿌리함량비는 감마분포를 나타내었다. 강원지방소나무 탄소배출계수의 불확도는 상한에서 62.1%, 하한에서 -52.6%이고 중부지방소나무는 상한에서 43.9%, 하한에서 -34.5%를 나타내었다.

Abstract: The purpose of this study was to calculate uncertainty of emission factor collected data and to evaluate the applicability of Monte Carlo simulation technique. To estimate the distribution of emission factors (Such as Basic wood density, Biomass expansion factor, and Root-to-shoot ratio), four probability density functions (Normal, Lognormal, Gamma, and Weibull) were used. The two sample Kolmogorov-Smirnov test and cumulative density figure were used to compare the optimal probability density function. It was observed that the basic wood density showed the gamma distribution, the biomass expansion factor results the log-normal distribution, and root-shoot ratio showed the normal distribution for *Pinus densiflora* in the Gangwon region; the basic wood density was the normal distribution, the biomass expansion factor was the gamma distribution, and root-shoot ratio was the gamma distribution for *Pinus densiflora* in the central region, respectively. The uncertainty assessment of emission factor were upper 62.1%, lower -52.6% for *Pinus densiflora* in the Gangwon region and upper 43.9%, lower -34.5% for *Pinus densiflora* in the central region, respectively.

Key words : biomass/carbon database, emission factor, monte carlo simulation, uncertainty, IPCC guideline

서론

불확도는 알고자하는 미지의 값과 적용되는 값의 차이를 나타내는 수치이고 신뢰성 있는 연구 결과의 제시를 위하여 불확도를 최소화해야 한다(Dieck, 2007; Ramirez et al., 2008). IPCC(2003; 2006a)는 불확도를 계산하는 방법으로 두 가지를 제시하고 상황에 따라 유연한 계산이 가능하도록 하였다. 접근 1(approach 1)은 오차전달법(error

propagation)으로 다양한 부분에서 발생하는 불확도를 합성하여 추정하고, 적용되는 인자의 불확도가 상대적으로 작은 경우와 변수 간의 상관관계가 적은 경우, 사용이 가능하다. 접근 2(approach 2)는 추정된 수치의 불확도가 크거나 변수 간의 상관관계가 존재하는 경우, 몬테 카를로 시뮬레이션(monte carlo simulation)을 이용하도록 권장한다(IPCC, 2006a; Yanai et al., 2010). 산림에 저장된 탄소량을 추정하기 위하여 개발되는 탄소배출계수는 환경과 지형적 차이에 따라 동일 수종에서도 상이하여 탄소저장량의 추정에서 불확도를 높이는 주요한 원인이 된다(Monte

*Corresponding author
E-mail: treelove@forest.go.kr

et al., 1996; Kangas and Kangas, 2004). 그러므로, 반복적인 실험을 통하여 자료의 변이와 측정 과정에서 발생하는 오류를 줄여야 한다(Gertner, 1987; Refsgaard et al., 2007). 반복적인 실험에서 수집된 자료는 특정한 확률밀도함수(probability density function, PDF)를 나타내고 정확한 확률밀도함수의 추정치는 IPCC에서 제시하는 접근 2의 불확도 산정방법인 몬테 카를로 시뮬레이션의 적용에서 중요한 부분이다(Monni et al., 2004; 2007; Dagpunar, 2007; Kalos and Whitlock, 2008).

몬테 카를로 시뮬레이션을 이용한 불확도 산정 연구에서 Winiwarter와 Rypdal (2001)은 오스트리아 온실가스 인벤토리의 불확도를 산정하는 과정에서 1990년을 기준으로 몬테 카를로 시뮬레이션을 이용하여 10.5%에서 12%의 불확도 범위를 제시하였다. Mommi 등(2007)은 핀란드의 산림을 대상으로 IPCC의 방법론과 국가산림자원조사 자료를 이용하여 산림 내 축적되어 있는 탄소량을 산정하고 몬테 카를로 시뮬레이션을 이용하여 19%의 불확도를 제시하였다. Jung(2011)은 우리나라의 산림을 대상으로 제 5차 국가산림자원조사 자료와 1993년도부터 2009년까지의 임상별 자료를 이용하여 산림 내 탄소량을 산정하였으며 몬테 카를로 시뮬레이션 기법을 이용하여 불확도를 제시하였다. 일본의 국가 인벤토리 국가보고서는 산림 내 탄소량을 산정하고 2%의 불확도를 제시하였다(Center for global environmental research, 2011). 이전의 연구는 산림 내 탄소량을 산정하고 탄소배출계수 중 하나의 계수에 대한 불확도 연구가 대부분이며 산림부분 탄소배출계수의 적합한 확률밀도를 제시하고 불확도를 평가하는 연구는 드문 실정이다. 그러므로, 본 연구의 목적은 IPCC에서 권장하는 몬테 카를로 시뮬레이션의 적용성을 판단한 후, 소나무 탄소배출계수의 적정 확률밀도함수를 제시하고 불확도를 산정하는데 있다.

재료 및 방법

1. 분석자료

본 연구는 우리나라에 분포하는 소나무 임분을 대상으로 45개의 표준지를 선정하였다. 표준지별 5본의 표준목을 벌채하고 2에서 3본은 뿌리까지 굴취 하였다. 수집된 자료는 산림 바이오매스/탄소 DB관리 프로그램(<http://forestcarbon.kfri.go.kr>)에서 관리되고 수종별 탄소배출계수와 바이오매스 정보를 제공한다. 본 연구는 산림 바이오매스/탄소 DB관리 프로그램에 구축되어 있는 소나무의 탄소배출계수 자료를 이용하고 기존의 연구를 참고하여 강원지방소나무와 중부지방소나무로 나누어 분석하였다. Table 1에서 몬테 카를로 시뮬레이션 분석에 이용된 강원, 중부지방소나무의 임령, 흉고직경, 수고와 탄소배출계수

Table 1. The summary of observed statistics for emission factors in forest biomass and carbon database.

	Gangwon region (Num. of data = 75)			The central region (Num. of data = 150)		
	Mean	Min.	Max.	Mean	Min.	Max.
Age	35.0	9.0	80.0	37.0	9.0	70.0
DBH	23.0	3.7	59.0	17.0	3.6	34.2
Height	15.2	3.5	24.9	11.8	3.0	20.8
D	0.428	0.268	0.563	0.475	0.240	0.664
BEF	1.548	1.088	3.924	1.367	1.070	3.029
R	0.273	0.129	0.413	0.253	0.113	0.519

Note : Num.(the number of data), Min.(minimum value), Max.(maximum value), D(the basic wood density), BEF(the biomass expansion factor), R(the root-to-shoot ratio).

의 범위와 평균을 제시하였다.

2. 탄소배출계수별 확률밀도함수의 선정

산림에 저장된 탄소량은 활동자료와 탄소배출계수의 곱으로 산정되고 목재기본밀도(basic wood density, D), 바이오매스 확장계수(biomass expansion factor, BEF), 뿌리함량비(root-to-shoot ratio, R)가 있다(IPCC, 2006b). 3개의 탄소배출계수는 $D \times BEF \times (1+R)$ 의 계산식으로 산정된다. 그러므로 탄소배출계수의 불확도 산정을 위하여 적합한 확률밀도함수를 선정하고 난수를 생성해야 한다. 현재, 다양한 확률밀도함수가 존재하지만 탄소배출계수의 일반적인 특징을 고려하여 4개(normal, lognormal, gamma, weibull)의 확률밀도함수를 비교하였다. 확률밀도함수의 모수를 추정하기 위하여 최우도법(maximum likelihood method)을 이용하였다. 최우도법은 확률밀도함수 별 모수의 추정 확률을 최대로 하는 방법으로 Getner(1987)는 산림 부분 모형의 모수를 추정하는 과정에서 최소제곱법과 최우도법을 비교하고 모형의 모수 추정과정에서 최우도법이 최소제곱법에 비해 적합한 것으로 보고하였다. 본 연구는 선행 연구결과를 참고하여 확률밀도함수의 모수 추정과정에서 최우도법을 이용하였다.

3. 확률밀도함수의 적합도 평가

최적의 확률밀도함수를 선정하기 위하여 2 표본 콜모고로프-스미르노프(kolmogorov-smirnov, K-S) 검정통계량과 누적밀도그림을 비교하였다(Fan et al., 2001). K-S 검정은 주어진 표본과 확률밀도함수의 가장 큰 편차(D)를 이용하여 확률밀도함수의 적합성을 판단한다(식 1). K-S 검정의 결과에 대하여 순위를 부여하고 누적밀도그림을 비교하여 최종적인 확률밀도함수를 선택하였다. 본 연구에서 나타내는 확률밀도함수는 표본자료를 기반으로 추정된 것으로 모집단의 분포적 특징을 정확하게 나타내다고 할 수 없다. 하지만, 분포의 검정 통계량과 연구자의 판

단을 고려하여 탄소배출계수 별 확률밀도함수의 선정은 타당하다(IPCC, 2000; 2006a).

$$D = \sup|F_1(x) - F_2(x)| \quad (1)$$

여기서, F_1 은 비교 대상이 되는 4개의 확률밀도함수이다. F_2 는 경험적 확률분포이다. Sup는 두 개 확률분포 간 차이의 최대값을 의미한다.

4. 몬테 카를로 시뮬레이션의 적용

몬테 카를로 시뮬레이션은 여러 개의 확률 분포를 근거로 무작위 변수를 추출하여 계산되는 결과의 발생 확률을 예측하는 방법이다(Dagpunar, 2007; Kalos and Whitlock, 2008). 본 연구에서 몬테 카를로 시뮬레이션의 적용 절차는 다음과 같다. 1) 탄소배출계수의 특징을 고려하여 확률 밀도함수를 선정하였다. 2) 선정된 변수별 확률밀도함수에서 난수를 생성하여 무작위로 표본을 추출(random sampling)하였다. 3) 10,000번 반복하여 탄소배출계수의 확률밀도를 판단하고 평균 및 95% 신뢰구간을 계산하였다. IPCC(2006b)는 몬테 카를로 표본의 반복추출횟수를 10,000번과 같이 사전에 설정하여 안정된 통계량을 구하도록 권장하고 있다. 본 연구는 시행횟수별 표본오차를 참고하여 확률밀도함수가 안정되는 시행횟수(10,000번)를 설정하였다. 몬테 카를로 시뮬레이션을 실행하기 위한 다양한 프로그램이 있지만 본 연구는 SAS 9.3(2012)을 이용하였다.

5. 탄소배출계수의 불확도 평가

IPCC에서 제시하는 불확도는 평균을 중심으로 실제값(real estimates)이 존재하는 범위를 나타낸다(IPCC, 2006a). 그러므로, 탄소배출계수의 불확도를 산정하기 위하여 평균, 2.5%, 97.5% 분위수를 계산하였다. 그리고 몬테 카를로 시뮬레이션을 이용하여 추정된 확률밀도함수의 상한과 하한의 불확도를 제시하였다(IPCC, 2000). 상한과 하한의 불확도 값을 제시하는 것은 탄소배출계수 비대칭적인 분포를 나타내는 경우, 정도 높은 불확도의 범위 정보를 나타내기 때문이다.

$$\text{Lower uncertainty} = \frac{2.5\text{percentile}}{\mu} \times 100 \quad (2)$$

$$\text{Upper uncertainty} = \frac{97.5\text{percentile} - \mu}{\mu} \times 100 \quad (3)$$

여기서, μ 는 탄소배출계수 별 평균이다.

결과 및 고찰

1. 탄소배출계수의 분석 결과

산림 바이오매스/탄소 DB 시스템에 수집된 소나무의 탄

소배출계수를 Figure 1에 나타내었다. 목재기본밀도의 평균값은 0.459이고 표본오차는 0.005이다. 목재기본밀도의 경우, 낮은 왜도를 나타내며 평균을 중심으로 분포하였다. 바이오매스확장계수의 평균값은 1.428이고 표본오차는 0.024이다. 바이오매스확장계수는 평균을 중심으로 우측 편향을 나타내고 높은 첨도를 나타낸다(Figure 1). 이것은 임령의 증가에 따라 가지와 잎의 비율이 적어지는 기존의 연구와 유사하다(Lehtonen et al., 2004). 뿌리함량비의 평균은 0.260이고 표본오차는 0.085이다. 뿌리의 표본오차는 자료의 수집과정에서 발생하는 표준편차가 다른 자료에 비해 큰 것으로 조사되었다. 이것은 뿌리의 채취과정에서 발생하는 불확도가 높기 때문이다. 그러므로, 지속적인 뿌리 자료의 수집을 통하여 표본에서 발생하는 오차를 줄여야 하는 것으로 판단된다. 뿌리 수집과정에서 발생하는 오차를 줄이기 위하여 Levy et al.(2004)는 지속적인 자료 수집과 함께 흉고직경과 뿌리함량비의 상대생장식을 제시하였다. 바이오매스확장계수와 뿌리함량비의 정규성 검정에서 p-value는 0.05이하로 정규분포를 가정한 평균과 불확도의 계산은 부적합한 것으로 판단되며 다양한 분포의 고려가 필요하다.

2. 탄소배출계수 별 확률밀도함수의 추정 결과

강원지방소나무와 중부지방소나무의 불확도를 제시하기 위하여 탄소배출계수별 확률밀도함수를 선정하고 자료의 연속적인 형태를 가정하였다. 최우도법을 이용하여 추정된 확률밀도함수 별 모수와 K-S 통계량은 Table 2와 3과 같다. 강원지방소나무의 목재기본밀도에서 선정된 확률밀도함수는 감마분포이며 K-S 통계량은 4.625이다(Table 2). 바이오매스확장계수에서 선정된 확률밀도함수는 로그 정규분포이고 K-S 통계량은 5.481이며 뿌리함량비에서 선정된 확률밀도함수는 정규분포이고 K-S 통계량은 7.811이다. 바이오매스확장계수에 적합한 확률밀도함수는 감마

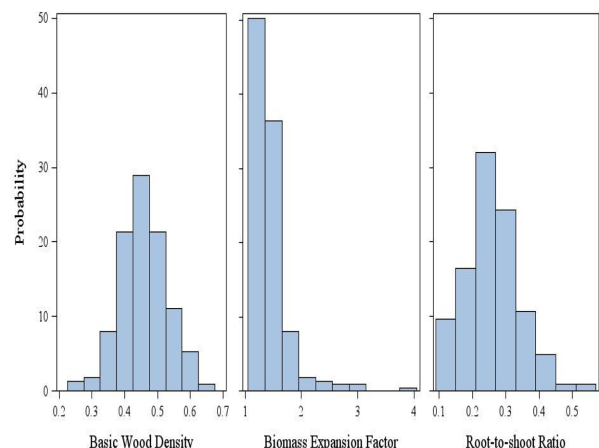


Figure 1. The probability histogram of emission factors.

Table 2. Maximum likelihood estimators and the two-sample kolmogorov-smirnov test results in each probability density function of emission factors in Gangwon region.

Emission factor	Distribution	Parameter			K-S	Rank
		Location	Scale	Shape		
D	Normal		0.055		7.005	3
	Lognormal	0.427	-1.512	0.274	5.511	2
	Weibull		0.249	4.628	8.620	4
	Gamma		0.015	15.069	4.625	1
Normal			0.480		8.372	4
BEF	Lognormal	1.548	-0.871	0.725	5.481	1
	Weibull		0.603	1.337	6.312	3
	Gamma		0.274	1.997	5.515	2
	Normal			0.080		7.811
R	Lognormal	0.273	-1.901	0.620	10.195	4
	Weibull		0.195	2.327	8.075	2
	Gamma		0.049	3.527	8.664	3

Note : D(the basic wood density), BEF(the biomass expansion factor). R(the root-to-shoot ratio), K-S(the kolmogrov-smirnov statistics).

Table 3. Maximum likelihood estimators and the two-sample kolmogorov-smirnov test results in each probability density function of emission factors in the central region.

Emission factor	Distribution	Parameter			K-S	Rank
		Location	Scale	Shape		
D	Normal		0.076		6.218	1
	Lognormal	0.475	-1.337	0.340	7.753	4
	Weibull		0.302	4.035	7.482	3
	Gamma		0.025	10.607	6.471	2
Normal			0.250		6.199	4
BEF	Lognormal	1.367	-1.191	0.626	4.456	2
	Weibull		0.413	1.623	5.085	3
	Gamma		0.132	2.779	4.161	1
	Normal			0.078		5.710
R	Lognormal	0.253	-2.029	0.618	5.639	3
	Weibull		0.173	2.058	3.460	2
	Gamma		0.045	3.392	3.197	1

Note : D(the basic wood density), BEF(the biomass expansion factor). R(the root-to-shoot ratio), K-S(the kolmogrov-smirnov statistics).

분포이고 좌측 편향된 분포를 나타내어, 바이오매스확장계수는 임령의 영향을 받는다는 기존 연구(Lehtonen et al., 2004)와 비교하였을 때, 사용이 타당한 것으로 판단된다. Table 3에서 증부지방소나무 탄소배출계수의 분포별 적합도를 나타내었다. 목재기본밀도는 정규분포이고 K-S 통계량은 6.218, 바이오매스확장계수는 감마분포이고 K-S 통계량은 4.161이며 뿌리함량비는 감마분포이고 K-S 통계량은 3.197이다. 최우도법을 이용하여 추정된 모수의 범위는 -1.512에서 15.069를 나타내었다. 최우도법을 이용한 확률밀도함수별 모수의 p-값은 0.05 이상이고 표본오차는 0.014 내에서 분포하여 최우도법을 이용하여 개발된 확률밀도함수 별 모수는 사용이 적합한 것으로 판단된다.

Table 2와 3에서 선정된 탄소배출계수 별 확률밀도함수

를 누적밀도함수 그림으로 표시하여 선정된 확률밀도함수와 자료의 누적밀도를 비교하였다(Figure 2). 점선은 추정된 확률밀도함수를 이용하여 표시된 함수이고 계단선은 실제 자료를 누적하여 표시한 그림이다. Fang et al., (2007)의 연구에서 누적밀도그림은 확률밀도함수 선정의 두 가지 근거를 보고하였다. 처음으로 자료의 누적밀도와 확률밀도함수의 차이는 추정된 값과 관측된 값의 차이를 나타내며 이것이 적을수록 높은 적합도를 나타낸다. 그리고 누적밀도(Y축)의 임의점을 반복 추출하여 대응되는 값(X축)은 관측된 자료의 확률밀도함수로 표시가 가능하다. 그러므로 두 선은 유사한 경향을 나타내고 임의의 누적밀도값에서 탄소배출계수의 값이 확인되어, 본 연구에서 제시된 탄소배출계수별 확률밀도함수의 사용은 적합한 것으로 판단된다.

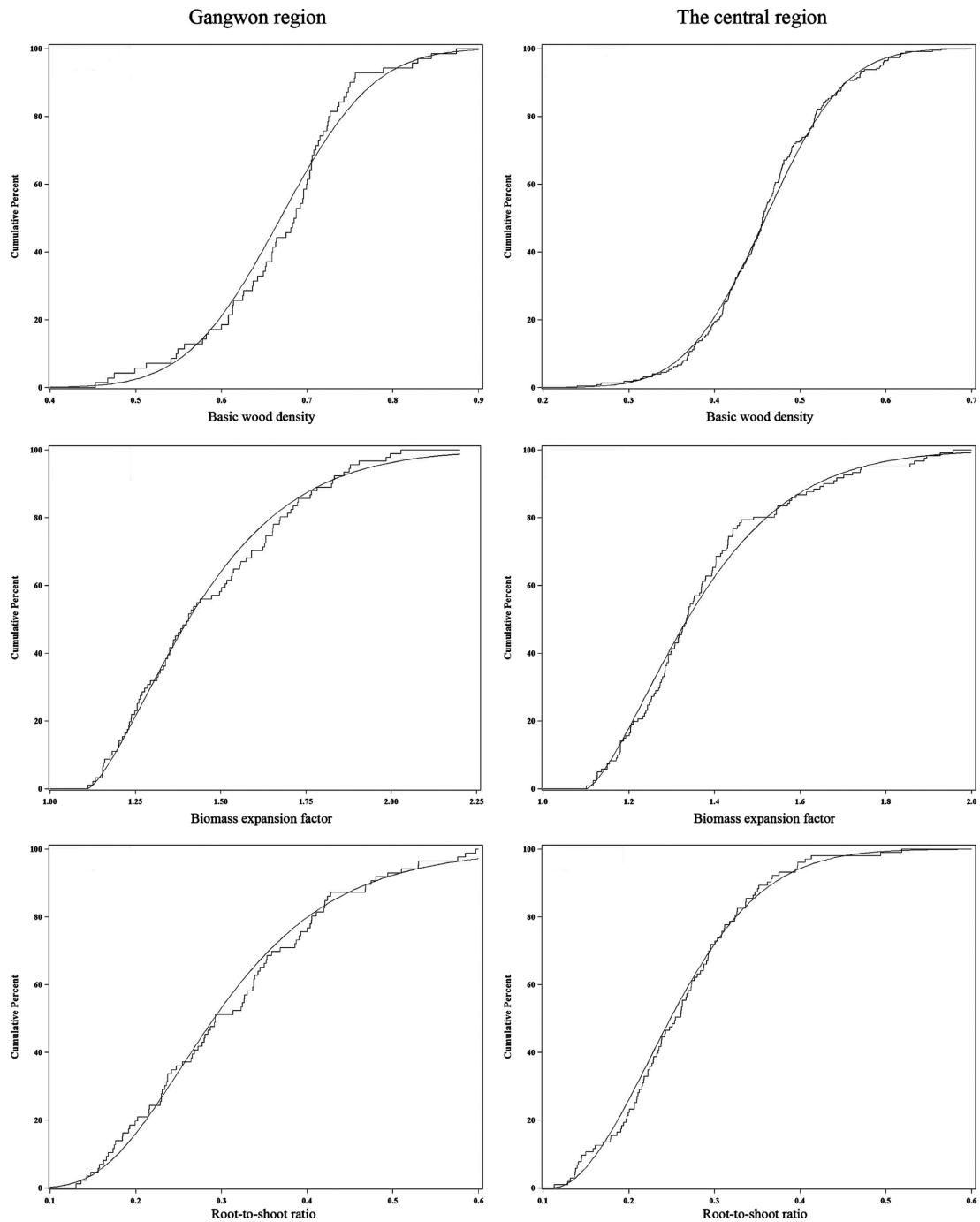


Figure 2. Cumulative density for each emission factor. The discrete step line represents a cumulative density. The smooth dash line represents a suitable probability density function.

3. 몬테 카를로 시뮬레이션을 이용한 탄소배출계수의 불확도 산정 결과

확률밀도함수별 난수를 생성하고 $D \times BEF \times (1+R)$ 의 식을 이용하여 탄소배출계수의 상한, 하한 불확도를 제시하였다. 강원지방소나무에서 탄소배출계수는 0.836의 평균을 나타내고 상한 불확도는 62.1%, 하한 불확도는 -52.5%이다. 중부지방소나무에서 탄소배출계수는 0.815의 평균을 나타내고 상한 불확도는 43.0%, 하한 불확도는 -34.5%

이다(Table 4). 수종별 탄소배출계수를 개발하고 불확도를 산정한 이전의 연구(Korea Forest Research Institute, 2010)에서 추정된 소나무의 목재기본밀도와 불확도는 강원지방소나무에서 0.40, 12.99%이고, 중부지방소나무에서 0.47, 3.80%이다. 본 연구의 결과는 3개 탄소배출계수의 불확도를 산정한 연구이며 단일 탄소배출계수의 불확도 연구와 비교가 어렵다. 하지만 이전의 연구에 Korea Forest Research Institute(2010)는 목재기본밀도에서 Floating

Table 4. Uncertainty assessment of emission factor with Monte Carlo simulation by eco-type.

Eco-type	Mean	Lower uncertainty (%)	Upper uncertainty (%)
Gangwon	0.836	-52.6	62.1
The central	0.815	-34.5	43.0

Note : PDF(the probability density function).

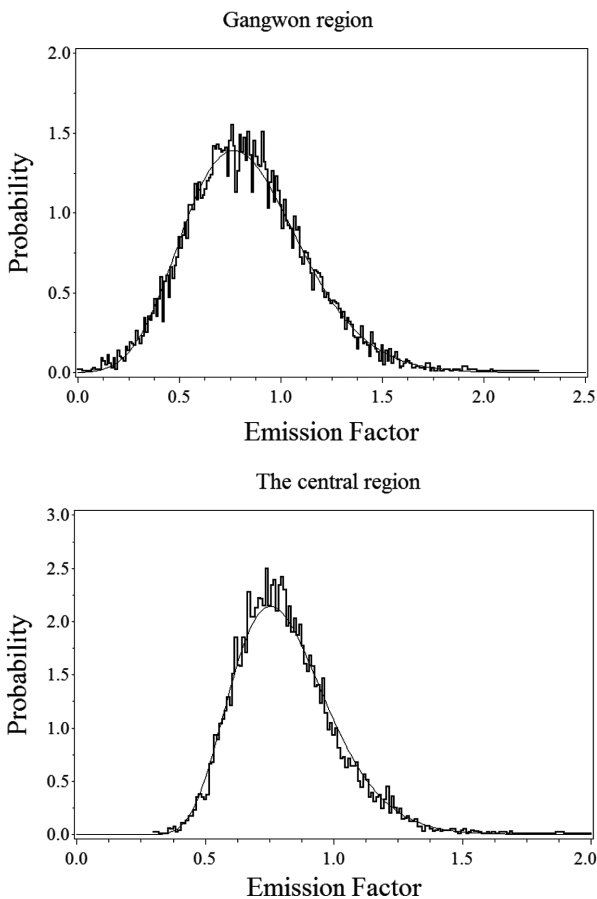


Figure 3 Randomly generated distribution of emission factors by using the Monte Carlo simulation. The successive line is an estimation of each emission factor for *Pinus densiflora*. The bold line is a result of Monte Carlo simulation.

Method를 이용하여 자료의 수집과 측정과정에서 발생하는 불확도를 제거하였다. 그리고 바이오매스확장계수와 뿌리함량비는 임분 단위 적용을 위하여 개체목의 탄소배출계수를 임분 단위로 전환하는 알고리즘을 적용하였다. 그러므로 일부의 개체목에서 발생하는 이상치가 제거된 것으로 판단된다.

Figure 3에서 확률밀도함수와 몬테 카를로 시뮬레이션의 결과를 비교하였다. 연속형 선은 확률밀도함수의 추정 곡선을 나타내며 불규칙 계단선은 탄소배출계수의 난수를 생성한 결과이다. 두 선이 겹쳐지는 것은 몬테 카를로 시뮬레이션 사용의 적합도를 나타내고 불확도가 낮을수록 계단선은 완만한 형태를 나타낸다. 산림의 탄소저장량

을 제시하고 불확도를 평가하는 이전의 연구에서 24% 이하의 불확도를 제시하였다(Winiwarter and Rypdal, 2001; Mommi et al., 2007; Jung, 2011; Center for global environmental research, 2011). 수집된 자료와 계산방법의 차이로 직접적인 비교는 불가능하지만 이전의 연구와 비교하여 높은 불확도는 나타내는 원인은 다음과 같다. 첫째, 몬테 카를로 시뮬레이션에서 고려되는 확률밀도함수의 차이이다. 이전의 불확도 연구는 수집된 표본은 평균을 중심으로 좌우대칭을 나타내는 정규 혹은 t -분포를 가정하였다. 이것은 탄소배출계수의 불확도를 낮추는 것으로 판단된다. 본 연구와 동일한 실험 방법으로 정규분포를 가정하여 탄소배출계수의 상한과 하한의 불확도를 산정하는 경우, 강원지방소나무와 중부지방소나무에서 본 연구의 결과보다 좁은 범위의 불확도를 나타내었다. 두 번째, IPCC가 제시하는 기준 임령(20년)에 따른 바이오매스 확장계수의 차이이다. Lehtonen et al.(2004)의 연구에서 바이오매스 확장계수는 임령에 따른 영향을 받는 것으로 보고되었고 본 연구는 강원지방소나무의 20년 이하 표본 부족으로 소나무의 지역적인 구분 없이 실험한 결과, 불확도가 낮아지는 것으로 조사되었다. 그러므로, 낮은 불확도와 정도 높은 탄소배출계수를 제시하기 위하여 20년 이하의 자료를 지속적으로 수집하고 다양한 분포를 고려해야 한다.

결론

본 연구는 소나무 탄소배출계수의 적정 확률밀도함수를 추정하고 불확도의 산정과정에서 몬테 카를로 시뮬레이션 기법의 적용성을 검토하였다. 산림 바이오매스/탄소 DB에 저장되어 있는 강원지방소나무의 탄소배출계수와 최적의 확률밀도함수는 목재기본밀도에서 감마분포이고, 바이오매스 확장계수는 로그정규분포이며 뿌리함량비는 정규분포이고 불확도는 상한에서 62.1%, 하한에서 -52.6%이다. 중부지방소나무에서 목재기본밀도는 정규분포이고, 바이오매스 확장계수는 감마분포이며 뿌리함량비는 감마분포이고 불확도는 상한에서 43.9%, 하한에서 -34.5%를 나타내었다. 추정된 확률밀도함수와 불확도의 관계를 알아보기 위하여 시뮬레이션 결과와 비교하였을 때, 불확도가 낮을수록 추정된 확률밀도함수는 높은 적합도를 나타내는 것으로 조사되었다. 탄소배출계수는 환경적, 지형적 원인과 계수의 개발과정에 발생하는 불확도의 원인으로 정확한 수치를 산정하기 어렵다. 그러므로 탄소배출계수별 불확도 분석의 결과를 고려하여 지속적인 자료의 수집과 효과적인 분석방법이 개발된다면 정도 높은 모집단의 확률밀도함수 추정과 낮은 불확도의 산정이 가능하다.

IPCC가 권장하는 불확도 접근방법에서 접근 2(Approach

2)인 몬테 카를로 시뮬레이션을 이용하여 탄소배출계수의 불확도를 분석하였다. 본 연구에서 적용된 몬테 카를로 시뮬레이션은 신뢰성 있는 탄소배출계수별 확률밀도함수 정보의 제공과 불확도 산정에 도움이 되는 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 2013년도 국립산림과학원 리서치 펠로우십의 지원에 의해 이루어진 것임.

인용문헌

- Center for Global Environmental Research. 2011. National greenhouse gas inventory report of JAPAN. Ministry of the Environmental, Japan. pp. 41.
- Dagpunar, J.S. 2007. Simulation and monte carlo. John Wiley and Sons. pp. 75.
- Dieck, R.H. 2007. Measurement uncertainty methods and application. The instrumentation, systems, and automation society. pp. 39-62.
- Fan, X., Felsövályi, Á., Sivo, S.A., and Keenan, S.C. 2001. SAS for monte carlo studies: A guide for quantitative researchers. Cary, North Carolina: SAS Institute Incorporation. pp. 26-41.
- Fujiwara, T., Yamashita, K., and Kuroda, K. 2007. Basic densities as a parameter for estimating the amount of carbon removal by forests and their variation. Bulletin of the Forestry and Forest Products Research Institute 6(4): 215-226.
- Gertner, G. 1987. Approximating precision in simulation projections: An efficient alternative to monte carlo methods. Forest Science 33(1): 230-239.
- Intergovernmental panel on climate change. 2000. Good practice guidance and uncertainty management in national greenhouse gas inventories. IPCC National Greenhouse Gas Inventory Programme. Institute for Global Environmental Strategies. pp. 6.1-6.23.
- Intergovernmental panel on climate change. 2003. Good practice guidance for land use, land-use change and forestry. IPCC National Greenhouse Gas Inventory Programme. Institute for Global Environmental Strategies. pp. 5.8-5.9.
- Intergovernmental panel on climate change. 2006a. 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Volume 1. General Guidance and Reporting. IPCC National Greenhouse Gas Inventory Programme. Institute for Global Environmental Strategies. pp. 3.6-3.78.
- Intergovernmental panel on climate change. 2006b. 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Volume 4. Agriculture, Forestry and Other Land Use. IPCC National Greenhouse Gas Inventory Programme. Institute for Global Environmental Strategies. pp. 4.73.
- Jung, H.J. 2011. Sensitivity and uncertainty analysis of forest carbon stock changes in Korea. M.D. thesis, Graduate School of Public Health, Seoul National University. pp. 59.
- Kalos, M.H. and Whitlock, P.A. 2008. Monte carlo methods, second, revised and enlarged edition. WILEY-VCH Verlag GmbH and Corporation, KGaA, Weinheim. pp. 9.
- Kangas, A.S. and Kangas, J. 2004. Probability, possibility and evidence : approaches to consider risk and uncertainty in forestry decision analysis. Forest Policy and Economics 6: 169-188.
- Korea Forest Research Institute. 2010. The carbon emission factor of major species for national inventory by forestry in Korea. Korea Forest Research Institute. pp. 7.
- Levy, P.E., Hale, S.E., and Nicoll, B.C. 2004. Biomass expansion factors and root:shoot ratios for coniferous tree species in Great Britain. Forestry 77(5): 421-430.
- Lehtonen, A., R. Mäkipää, J. Heikkinen, R. Sievänen, and J. Liski. 2004. Biomass Expansion factor (BEF_c) for Scot's pine, Norway spruce and birch according to stand age for boreal forests. Forest Ecology and Management 188: 211-224.
- Monte, L., Lars, H., Ulla, B., John, B., and Rudie, H. 1996. Uncertainty analysis and validation of environmental models : The empirically based uncertainty analysis. Ecological Modelling 91: 139-152.
- Monni, S., Peltoniemi, M., Palosuo, T., Lehtonen, A., Mäkipää, R., and Savolainen, I. 2007. Uncertainty of forest carbon stock changes-implications to the total uncertainty of GHG inventory of Finland. Climate Change 81: 391-413.
- Monni, S., Syri, S., and Savolainen, I. 2004. Uncertainties in the Finnish greenhouse gas emission inventory. Environmental Science and Policy 7: 87-98.
- Ramírez, A., Keizer, C., Sluijs, J.P., and Olivier, J. 2008. Monte carlo analysis of uncertainties in the Netherlands greenhouse gas emission inventory for 1990-2004. Atmospheric Environment 42: 8263-8272.
- Refsgaard, J.C., Jeroen, P.V.D.S., Anker, L.H., and Peter, A.V. 2007. Uncertainty in the environmental modelling process-A framework and guidance. Environmental Modelling and Software 22: 1543-1556.
- SAS Institute, Incorporation. 2012. SAS/STAT 9.3 User's Guide. SAS Institute, Incorporation. Cary. North Carolina. pp. 439.
- Winiwarter, W. and Rypdal, K. 2001. Assessing the uncertainty associated with national greenhouse gas emission inventories: a case study for Austria. Atmospheric Environment 35: 5425-5440.
- Yanai, R.D., John, J.B., Andrew, D.R., Corrie, A.B., Dustin, M.W., and Edward, B.R. 2010. Estimating uncertainty in ecosystem stock calculations. Ecosystem 13: 239-248.