

## 소나무 용적밀도의 적용성 및 불확도 평가

표정기<sup>1</sup> · 손영모<sup>1\*</sup> · 이경학<sup>1</sup> · 김래현<sup>1</sup> · 김영환<sup>1</sup> · 이영진<sup>2</sup>

<sup>1</sup>국립산림과학원 탄소경영연구, <sup>2</sup>공주대학교 산림자원학과

## Estimating the Uncertainty and Validation of Basic Wood Density for *Pinus densiflora* in Korea

Jung Kee Pyo<sup>1</sup>, Yeong Mo Son<sup>1\*</sup>, Kyeong Hak Lee<sup>1</sup>, Rae Hyun Kim<sup>1</sup>,  
Yeong Hwan Kim<sup>1</sup> and Young Jin Lee<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Division of Forest management, Korea Forest Research Institute, Seoul 130-712, Korea

<sup>2</sup>Department of Forest Resources, Kongju National University, Yesan 340-802, Korea

**요약:** 본 연구의 목적은 우리나라 대표 수종인 소나무(*Pinus densiflora*)의 정확한 용적밀도(Basic wood density)를 산출하고, 용적밀도의 불확도(Uncertainty)를 평가하는데 있다. 소나무림의 지역적인 분포 차이를 고려하여 강원지방 소나무와 중부지방소나무로 구분하였으며, 전국적으로 총 33개소의 조사구를 선정한 후, 각 조사구를 대표하는 표본목을 채취하여 분석하였다. 용적밀도의 경우, IPCC 기준임령에 따른 20년생 이전의 유평림과 21년생 이후의 성숙림 간에 통계적인 유의성이 나타나지 않은 반면, 강원지방소나무와 중부지방소나무간의 지역적인 차이에서는 통계적인 유의성(p-value=0.0017)이 나타났다. 강원지방소나무의 용적밀도와 불확도는 0.396(g/cm<sup>3</sup>)과 12.9(%)로 산출된 반면에, 중부지방소나무는 각각 0.470(g/cm<sup>3</sup>)과 3.8(%)로 나타났다. 따라서 본 연구에서 제시된 소나무의 용적밀도에 대한 불확도는 IPCC(2006)가 권장하는 불확도의 범위보다 훨씬 더 정밀한 값을 나타내었다.

**Abstract:** According to the IPCC guideline (2006), uncertainty assessment is very important in terms of the greenhouse gas inventory. Therefore, the purpose of this study is to estimate the basic wood density (BWD) and its uncertainty for *Pinus densiflora* in Korea. In this study, *Pinus densiflora* forests were divided into two eco-types which were Gangwon and Jungbu regions. A total of 33 representative sampling plots was selected to collect sample trees after considering the tree ages and DBH distributions. The BWD showed statistically no difference between age classes based on IPCC's classification. While, it showed statistically difference(p-value=0.0017) between eco-types. The BWD and uncertainty was 0.396(g/cm<sup>3</sup>) and 12.9(%) for *Pinus densiflora* in Gangwon, while it was 0.470(g/cm<sup>3</sup>) and 3.8(%) for *Pinus densiflora* in Jungbu. The values of the BWD uncertainty for *Pinus densiflora* were more precised than the values given by the IPCC guideline.

**Key words :** *Pinus densiflora*, basic wood density, uncertainty, biomass, inventory

### 서론

기후변화에 따른 지구온난화에 대응하기 위한 국제적인 노력이 진행되고 있으며, 국내에서도 각 산업별, 기관별 온실가스 저감을 위한 활동이 수행 중이다. 온실가스의 감축을 위해 배출되는 가스의 종류와 구체적인 배출량의 파악이 필요하며, 이를 위해 산림부분에서는 다양한 배출계수(Emission factor)를 통하여 산림에서 배출되는 탄소량을 추정하고 현존량을 계산하고자한다. 용적밀도(Basic wood density)는 IPCC(Intergovernmental Panel on Climate

Change)가 정하는 배출계수 중의 하나이며, 개체목 혹은 임분에 축적되어 있는 탄소의 양을 측정하기 위한 중요한 인자이다. 하지만 용적밀도는 동일 수종에서도 지역별, 임령별로 다양한 범위의 수치를 나타내는 것으로 보고되었다(Lehtonen *et al.*, 2003; IPCC GL, 2006). 이에 따라 IPCC는 동일수종에서도 임령별, 지역별 용적밀도의 차이가 있을 경우 분리하여 사용하는 것을 권장하고 있다. 그리고 추정된 계수의 정확성을 평가하고 해당국가들의 자발적이고 지속적인 노력으로 보고되는 모든 배출계수에 대하여 불확도(Uncertainty)를 산출하도록 권장하고 있다(IPCC GL, 2006).

불확도 평가의 목적은 추정된 계수가 모델의 결과에 미

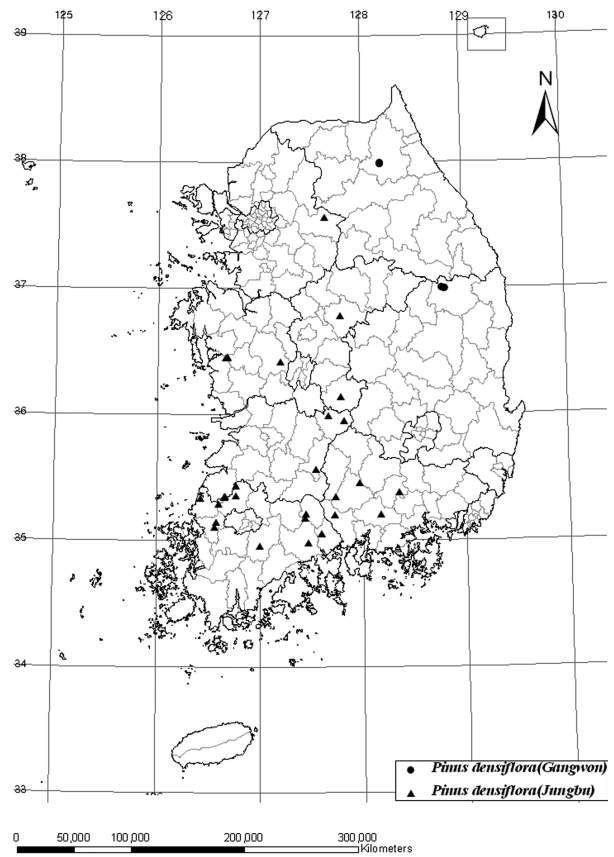
\*Corresponding author  
E-mail: treelove@forest.go.kr

치는 영향을 평가하고, 국가 고유 계수의 정확성을 높이는 데 있다(Monte *et al.*, 1996; Kangas *et al.*, 2004). 불확도는 다양한 원인에 의해 발생하며, 모델의 정확성에서 발생하는 잠재적인 불확도의 평가는 더욱 어려운 문제이다(IPCC GL, 2006; Peltoniemi *et al.*, 2006; Refsgaard *et al.*, 2007). 그러므로 불확도를 평가하기 전에 표본자료의 대표성과 편의의 잠재성, 측정의 정밀도와 정확도, 시간적인 차이 등이 충분히 고려되어야 한다. IPCC는 불확도를 평가하는 방법으로 수준(Tier)별 모형을 제시하고, 이를 통해 추정된 계수를 관리하고 개량하도록 권장하고 있다. 수준 1(Tier 1)에서는 엑셀(MS Excel)을 통한 스프레드시트 형태의 추정을 하며, 수준 2(Tier 2)에서는 다양한 시간, 공간적인 자료를 바탕으로 몬테카를로 모형(Monte Carlo simulation)을 이용하도록 권장한다(IPCC GL, 2006; Winiwater *et al.*, 2001). 기존의 용적밀도의 불확도와 관련된 연구에 따르면, FAO는 용적밀도의 불확도 범위를 40% 이하로 제시하였으며, 핀란드에서는 소나무, 가문비나무, 자작나무 용적밀도의 불확도는 20% 이하로 추정되었다(IPCC, 2006). 우리나라의 경우, 수종별, 지역별 임목의 용적밀도와 바이오매스확장계수(Biomass expansion factor)에 관한 연구는 활발히 이루어지고 있으나, 계수의 불확도에 관한 연구는 미흡한 실정이다. 따라서 본 연구의 목적은 우리나라 소나무의 용적밀도를 산출하고, 그 불확도를 평가하고자 하였으며, 특히 IPCC(2006)가 권장하는 영급별, 지역별 구분에 의한 용적밀도의 적용성을 검토하는 데 있다.

**자료 및 방법**

**1. 분석자료**

본 연구에서는 우리나라 대표 수종 중 하나이며, 전체 산림면적의 약 23%를 차지하고 있는 소나무림을 대상으로 하였다(Korea Forest Service, 2010). 전국 소나무림을 지역의 구분에 따라 강원지방소나무와 중부지방소나무로 나누었으며, 분포면적을 고려하여 총 33개 조사지를 선정한 후, 각 조사지로부터 1분씩 총 33본의 표본목에서 단편을 채취하였다(Figure 1). 표본목은 조사된 임분의 직경급을 고려하여 선정하였으며, 피압목, 폭목, 정단부 피해목 등은 표본목의 선정에서 제외하였다(국립산림과학원, 2007). 선정된 표본목은 지상부 1.3 m에서 용적밀도를 측정하기 위하여 단편을 채취하였다. 강원지방소나무는 강원도와 경상북도 일부지역에 분포하며 수형이 곧고 수관고의 길이가 높은 것이 특징이며, 수집된 단편의 개수는 총 5개이다. 중부지방소나무는 전라도와 경상도에 주로 분포하며 수간이 불규칙적이고 수관고의 길이가 짧고 넓은 것이 특징으로 수집된 단편의 개수는 총 28개이다.



**Figure 1. Geographical location of study site for *Pinus densiflora*.**

**2. 용적밀도(Basic wood density)의 산출**

용적밀도는 수피를 제외한 생체적(Green volume)에 대한 목질부 건중량(Dry weight)의 비율이다(IPCC GL, 2006; 국립산림과학원, 2007). 용적밀도의 정의에 따라 현장에서 채취된 단편을 이용하여 측정하는 방법도 있지만, 측정단계의 불확도를 줄이고 정밀한 용적밀도의 계산을 위하여 다양한 방법들을 사용하고 있다. 일본의 경우 수집된 단편을 변재와 심재의 비율을 고려하여 썰기형태로 재료를 가공하고 용적밀도를 측정하며, 핀란드의 경우 개체목의 수고를 고려하여 다수의 단편을 채취하여 용적밀도를 측정하고 있다. 우리나라의 경우 현장에서 수집된 단편은 심재와 변재의 비율을 고려하여 일정한 모양과 크기로 재료를 준비한 후, 증류수가 담긴 용기에 준비된 재료를 가라앉히며 넘친 증류수의 양을 통해 정밀한 재적을 측정한다. 그리고 건중량 측정을 위하여 건조기의 온도는 85°C로 하여 수분이 완전히 제거되어 항량이 도달할 때까지 건조시킨다. 본 연구에서는 용적밀도를 IPCC(2006)에서 제시한 바와 같이, 20년의 임령을 기준으로 20년생 이하의 임목과 21년생 이상의 임목으로 영급에 대한 차이의 비교 분석과 지역적인 차이에 대한 비교 분석을 위하여 t-검정을 실시하였다.

### 3. 불확도(Uncertainty)의 검증

배출계수의 불확도를 검증하는 것은 인벤토리를 구축하는데 있어서 매우 중요하게 고려되어야 할 인자이다 (Lauenroth *et al.*, 2006; Macfarlane *et al.*, 2000; Woodley *et al.*, 2007). 용적밀도의 불확도는 확률밀도함수(Probability density function)의 95% 구간과 평균값의 비율로 계산되며, 계산방법은 식 (1)과 같다(Fujiwara, 2007). 95% 구간의 1/2값을 하는 것은 IPCC가 정하는 수준 1(Tier 1)의 불확도 산정 방법인 오차의 전달과 결합 과정에서 불확도 입력의 편의성 때문이다.

$$\text{Uncertainty} = \frac{1/2 \times (95\% \text{C.I. width})}{\mu} \times 100 \quad (1)$$

where, C.I. is confidence interval,  $\mu$  is average of emission factor.

## 결과 및 고찰

### 1. 임령과 지역에 따른 용적밀도 비교

우리나라에 분포하는 소나무림의 영급분포는 III~IV영급이 가장 많이 차지하고 있다. 본 연구에서 조사된 강원지방소나무의 평균 임령은 약 26년(III영급)으로, 총 5본의 표본목을 조사하였으며, 중부지방소나무는 평균 임령이 약 37년(IV영급)으로, 총 28본의 표본목을 조사하였다. 강원지방소나무의 평균임령은 III영급이지만, 평균직경과 평균수고의 경우 중부지방소나무에 비해 상대적으로 높은 값을 나타내었다(Table 1). IPCC(2006)가 권장하는 임령 기준에 따른 용적밀도의 적용성을 검토하기 위해 20년생 이하의 유령임목과 21년생 이상의 성숙임목으로 두 영급으로 구분하였다. 영급의 차이에 대한 용적밀도의 적용성을 검토하기 위하여 SAS(2004)를 이용하여 t-검정을 실시한 결과, 두 영급간에는 통계적인 유의성을 나타내지 않았다( $p\text{-value} > 0.05$ ). 이와 같은 결과는 상대적으로 임령이 20년생 이하의 표본의 개수가 상대적으로 적기 때문인 것으로 사료된다. 향후 강원지방소나무와 중부지방소나무의 유령림에 대한 표본의 개수를 증가하여 영급에 따른 용적밀도의 적용성에 대한 검증이 필요할 것으로 사료된다.

지역적인 차이에 따른 용적밀도의 적용성을 검토하기 위하여, 강원지방소나무와 중부지방소나무의 용적밀도의

**Table 2. Regional comparison of basic wood density for *Pinus densiflora*.**

Variable	Variance	t	p-value
Eco-type	Equal	-5.15	0.0017

차이를 분석한 결과, 두 지역간에서는 통계적인 유의성( $p\text{-value} = 0.0017$ )이 나타났다(Table 2). 이러한 결과는 기존의 연구에서도 유사한 결과를 나타냈다 (Park *et al.*, 2005). 하지만, 본 연구는 기존의 용적밀도를 측정하는 방법과 달리 국제적인 수준의 측정 방법을 적용하였다. 따라서, 본 연구의 결과에 의하면, 우리나라의 소나무는 현재 IPCC(2006)가 정하는 임령에 따른 구분은 필요 없는 것으로 나타났으며, 다만 지역적인 차이에 따라 강원지방소나무와 중부지방소나무로 구분하여 용적밀도를 적용하는 것이 타당할 것으로 사료된다.

### 2. 용적밀도(Basic wood density)의 불확도 평가

본 연구에서 산출된 표본목들의 평균 용적밀도는 강원지방소나무의 경우에는  $0.396(\text{g}/\text{cm}^3)$ 으로, 중부지방소나무는  $0.470(\text{g}/\text{cm}^3)$ 로 나타났다. 우리나라와 인접한 일본의 경우 소나무의 용적밀도는  $0.451(\text{g}/\text{cm}^3)$ 로 보고되었으며, 본 연구의 결과와 유사한 값이 보고되었다(Fujiwara *et al.*, 2007). 용적밀도에 대한 불확도를 산출한 결과에 의하면, 강원지방소나무의 경우에는 12.9(%)로, 중부지방소나무에서는 3.8(%)로 나타났다. 이와 같이 강원지방소나무에서 중부지방소나무보다 낮은 용적밀도와 높은 불확도를 나타내는 주요 원인들은 상대적으로 채취한 표본의 갯수가 적으며, 또한 임령과 지위의 차이로 인하여 확률밀도함수의 분산과 95% 신뢰구간에서 차이가 나타나는 것으로 사료된다(Table 3). FAO(Food Agriculture Organization)는 용적밀도의 불확도를 40(%)이하로 제시하고 있으며(FAO, 2006), 일본의 경우 소나무 용적밀도의 불확도를 7.2(%)로 보고했으며, 핀란드의 경우 소나무를 포함한 주요 수종에 대한 용적밀도의 불확도를 20(%)이하로 보고했다. 따라서, 본 연구의 결과로 제시된 우리나라 소나무 용적밀도의 불확도는 다른 나라의 용적밀도에 대한 불확도와 비교하였을 때, 용적밀도 계수의 사용 및 적용이 가능한 것으로 사료된다. 하지만, 불확도는 국가 간의 비교대상이 아니며

**Table 1. The summary of statistics for sampled trees.**

Eco-type	No. of observations	Age (years)	Diameter (cm)	Height (m)
<i>Pinus densiflora</i> in Gangwon	5	$\frac{26.4}{13.0-36.0}$	$\frac{19.8}{9.3-26.9}$	$\frac{14.5}{3.5-20.3}$
<i>Pinus densiflora</i> in Jungbu	28	$\frac{37.4}{11.0-57.0}$	$\frac{16.6}{5.1-32.7}$	$\frac{11.8}{3.0-20.8}$

**Table 3. The statistics and uncertainty of basic wood density for *Pinus densiflora*.**

Eco-type	BWD (g/cm <sup>3</sup> )	S <sup>2</sup>	95% C.I. width		Uncertainty (%)
			2.5 percentile	97.5 percentile	
<i>Pinus densiflora</i> in Gangwon	0.396	0.051	0.327	0.520	12.9
<i>Pinus densiflora</i> in Jungbu	0.470	0.072	0.309	0.611	3.8

절대적인 수치에 따라 배출계수의 사용여부를 결정하는 지표는 아니다. 다만, 온실가스의 감축을 위한 국가의 자발적인 노력과 인벤토리 시스템의 지속적인 개선을 위한 지표이다. 그러므로 국제적인 수준의 보고를 위하여 정도 (precision) 높은 방법을 통해 측정된 용적밀도 자료의 지속적인 확충과 IPCC가 권장하는 다양한 기준과 방법의 적용이 필요하다.

### 결론

본 연구는 우리나라의 대표 수종인 소나무의 용적밀도를 산출하고, 불확도를 평가하고자 하였다. 용적밀도의 경우 IPCC 기준임령에 따른 20년생 이하의 유령림과 21년생 이상의 성숙림간에는 통계적인 유의성이 나타나지 않은 반면에, 강원지방과 중부지방간의 지역적인 차이에서는 통계적인 유의성이 나타났다. 강원지방소나무의 용적밀도와 불확도는 0.396(g/cm<sup>3</sup>)과 12.9(%)로 계산된 반면에, 중부지방소나무는 각각 0.470(g/cm<sup>3</sup>)과 3.8(%)로 나타났다.

따라서, 본 연구에서 제시된 소나무의 용적밀도에 대한 불확도는 IPCC(2006)가 권장하는 불확도의 범위보다 정밀한 값을 나타내었다. 그러나, 불확도는 용적밀도의 사용에 대한 절대적인 기준은 아니며 인벤토리 시스템의 개선을 위한 자발적인 노력의 지표이다. 그러므로 국제적인 수준에 따라 수종별, 지역별, 임령별 용적밀도에 대한 지속적인 연구와 유령림을 포함한 다양한 자료의 수집이 필요할 것으로 사료된다. 또한, 다양한 원인에서 발생하는 불확도를 줄이기 위한 방안과 정도 (precision) 높은 측정 방법이 개발되어야 한다. 본 연구의 결과는 국내외적으로 우리나라 소나무림에서 배출되는 탄소량의 추정에 기초적인 자료를 제공해 줄 것으로 사료된다.

### 감사의 글

본 연구는 산림청 「산림탄소계정 기반 구축 연구」 연구 결과의 일부임.

### 인용문헌

1. 국립산림과학원. 2007. 산림 바이오매스 및 토양탄소 조

사·분석 표준. 국립산림과학원. pp. 74.  
 2. 박인협, 박민수, 이경학, 손영모, 서정호, 손요한, 이영진. 2005. 소나무의 생태형과 임령에 따른 물질 현존량 확장계수. 한국임학회 94: 441-445.  
 3. Food and Agriculture Organization(FAO). 2006. Global forest resources assessment 2005. FAO, Rome, Italy.  
 4. IPCC. 2006. 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.  
 5. IPCC. 2006. 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.  
 6. 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.  
 7. Lauenroth, W.K., Wade, A.A., Williamson, M.A., Ross, B.E., Kumar, S. and Cariveau, D.P. 2006. Uncertainty in calculations of net primary production for grasslands. Ecosystems 9: 843-851.  
 8. Lehtonen, A., Mäkipää, R., Heikkinen, J., Sievänen, R. and Liski, J. 2004. Biomass Expansion factor(BEF<sub>j</sub>) for Scot's pine, Norway spruce and birch according to stand age for boreal forests. Forest Ecology and Management 188: 211-224.  
 9. Macfarlane, D.W., Edwin, J.G. and Harry, T.V. 2000. Incorporating uncertainty into the parameters of a forest process model. Ecological Modelling 134: 27-40.  
 10. 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.  
 11. 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.  
 12. Peltoniemi, M., Palosuo, T., Monni, S. and Mäkipää, R. 2006. Factors affecting the uncertainty of sinks and stocks of carbon in Finnish forests soil and vegetation. Forest Ecology and Management 232: 75-85.  
 13. SAS Institute, Inc., 2004. SAS/STAT 9.1 User's Guide. SAS Institute Inc. Cary, NC.

14. 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. 森林綜合研究所報告 6(4): 215-226.
  15. Winiwarter, W., and Kristin, R. 2001. Assessing the uncertainty associated with national greenhouse gas emission inventories : A case study for Austria. Atmospheric Environment 35: 5425-5440.
  16. Woodlley, T.J., Harmon, M.E. and O'connell, K.B. 2007. Estimating annual bole biomass production using uncertainty analysis. Forest Ecology and Management 253: 202-210.
- 

(2010년 9월 20일 접수; 2010년 11월 11일 채택)