

리기다소나무림의 줄기밀도와 바이오매스 확장계수에 대한 불확실성 평가

서연옥¹ · 이영진^{1*} · 표정기² · 김래현² · 손영모² · 이경학²

¹공주대학교 산림자원학과, ²국립산림과학원 탄소경영연구과

Uncertainty Analysis of Stem Density and Biomass Expansion Factor for *Pinus rigida* in Korea

Yeon Ok Seo¹, Young Jin Lee^{1*}, Jung Kee Pyo², Rae Hyun Kim²,
Yeong Mo Son² and Kyeong Hak Lee²

¹Department of Forest Resources, Kongju National University, Yesan 340-802, Korea
²Division of Forest Management, Korea Forest Research Institute, Seoul 130-712, Korea

요 약: 본 연구는 리기다소나무림의 줄기밀도와 바이오매스 확장계수에 대한 불확실성을 평가하고자 하였다. 총 57본의 표본목을 벌채하였으며, 리기다소나무 20년생 이하의 유령임분과 21년생 이상의 성숙임분을 구분하여 t-검정을 실시한 결과, 줄기밀도는 영급별 차이가 나타나지 않는 반면(p=0.8070), 바이오매스 확장계수는 영급별 차이가 나타났다(p=0.0001). IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change)에서 제시한 불확실성 평가 방법을 이용하여 줄기밀도에 대한 불확실성을 평가한 결과, 20년생 이하에서 30.92%, 21년생 이상에서 25.12%으로 나타났으며, 바이오매스 확장계수에 대한 불확실성은 20년생 이하에서 60.32%, 21년생 이상에서 22.42%으로 나타났다. 줄기밀도의 불확실성은 영급별로 약 5.8%의 차이를 나타낸 반면, 바이오매스 확장계수의 불확실성은 20년생 이하가 21년생 이상 보다 약 37.9%로 매우 높은 것으로 나타났다. 즉, 성숙임분은 불확실성이 상대적으로 작게 나타났으며, 반면에 유령임분은 높게 나타났다. 따라서 줄기밀도와 바이오매스 확장계수를 사용할 경우, 20년생 이하의 영급과 21년생 이상의 영급을 구분하여 줄기밀도와 바이오매스 확장계수를 적용하여야 할 것으로 사료된다.

Abstract: This study was conducted to examine the uncertainty analysis of the stem density and biomass expansion factor for *Pinus rigida* in Korea. A total of 57 representative sample trees were harvested. The age class in *Pinus rigida* forests was divided into two, which were stands with less than 20 years and more than 21 years. The influence of stand ages on biomass expansion factor showed that it was statistically significant (p=0.0001), but it was not significant on stem density (p=0.8070). The results of this study based on the uncertainty evaluation method which were suggested by IPCC guide line indicated that stem density of the stand with less than 20 years were 30.92%, while were 25.12% the stands with more than 21years. The uncertainty in biomass expansion factor of less than 20 years and more than 21 years were 60.32% and 22.42%, respectively. The uncertainty of less than 20 years was higher compared to those stands with more than 21 years. In the case of old stand, it showed the lowest uncertainty results but younger stands showed the highest uncertainty results. This study could be applied to our country's emission factor by using stem density and biomass expansion factors which were less than 20 years and more than 21 years for *Pinus rigida* in Korea.

Key words : *Pinus rigida*, stem density, biomass expansion factor, uncertainty

서 론

대기 중 온실가스의 증가는 지구온난화가 그 원인 중 하나라고 할 수 있으며 온실가스의 양을 줄이기 위한 활동 중에 하나로 2005년 2월 16일 교토의정서가 발표되었다

(Takeshi *et al.*, 2007). 우리나라는 의무부담국은 아니지만 제 2차 공약기간 중의 의무부담국 선정, 온실가스 배출 기준연도, 탄소배출권 거래 등 협상에 대한 압력이 점점 커지고 있는 것이 현실이라고 할 수 있다.

또한, 우리나라는 국가 간 또는 세계적으로 바이오매스의 기본 통계 자료 제출에 대한 요구를 받고 있으며(국립산림과학원, 2007), 이를 뒷받침 할 수 있는 정확한 통계

*Corresponding author
E-mail: leeyj@kongju.ac.kr

구축 및 정책에 관한 기반 구축이 필요하다. 이에 산림분야에서는 온실가스 통계와 관련하여 다양한 보고서를 발표하고 있으며, 산림부문의 온실가스를 줄이기 위한 대책과 온실가스의 흡수·배출 계수에 대한 개발 및 품질 향상을 위한 연구가 더욱 중요시 되고 있다(국립산림과학원, 2008).

탄소의 평가와 관리에서 중요한 부분 중에 하나로 배출계수 검증방법을 들 수 있으며, 배출계수의 산출은 불확실성에 의한 평가방법을 사용하도록 권장하고 있다(Refsgaard *et al.*, 2007; 국립산림과학원, 2008). 불확실성 평가의 목적은 계수들의 불확실성이 모델 결과에 미치는 영향을 평가 할 수 있으며(Monte *et al.*, 1996), 그 원인은 매우 다양하게 발생하였고 특히, 잠재적인 불확실성의 범위 내에서 평가하는 경우가 존재 하였다(Rypdal and Winivarter, 2001; IPCC, 2006).

국외에서의 불확실성에 관한 연구는 환경적인 모델들의 타당성과 불확실성을 분석한 경우(Monte *et al.*, 1996), 환경적인 모델링 과정의 불확실성을 분석한 경우(Refsgaard *et al.*, 2007), 산림 과정 모델 계수들의 불확실성을 통합한 경우(Macfarlane *et al.*, 2000), 국가적인 온실가스 방출의 불확실성을 평가한 경우(Rypdal and Winivarter, 2001), 이산화탄소 흡수, 저장의 불확실성 계수에 관한 연구(Peltoniemi *et al.*, 2006), 불확실성 분석에 이용되는 연간 임목 줄기 생산 추정(Woolley *et al.*, 2007) 등 다양한 연구가 진행되고 있다.

반면에 국내에서는 주요 수종의 탄소배출계수 불확도 평가 및 계수 도출에 대한 연구가 진행 중에 있으며(산림청, 2010), 전반적으로 불확실성에 대한 연구가 매우 미미한 실정이라고 할 수 있다.

따라서, 본 연구는 리기다소나무림의 줄기밀도와 바이오매스 확장계수에 대해 20년생 이하와 21년생 이상의 영급을 구분하여 불확실성을 평가하였으며 이를 비교 분석하고자 하였다.

재료 및 방법

1. 조사지 개황

조사 대상지는 산림청 통계자료(산림청, 2010)에 의해 전국적으로 리기다소나무림의 분포가 넓은 충청남도 예

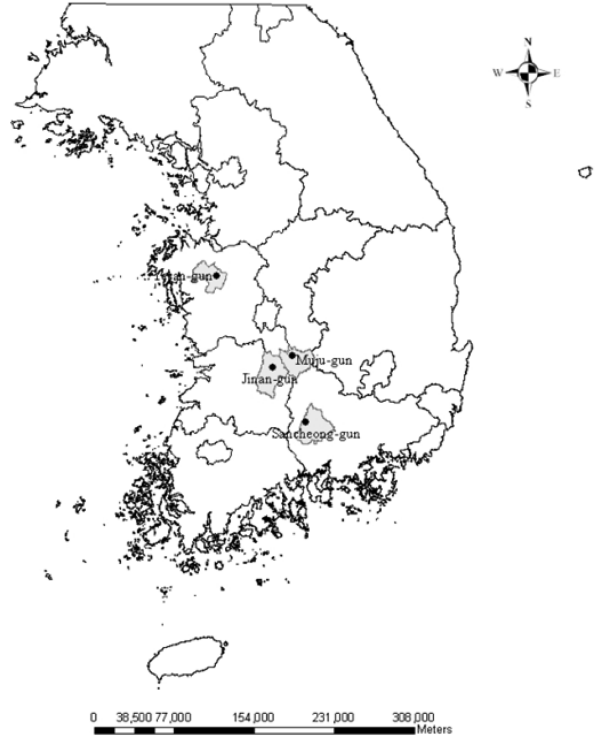


Figure 1. Location of the study site.

산군, 전라북도 무주군, 진안군, 경상남도 산청군 지역을 대상으로 조사를 실시하였다(Figure 1). 총 조사된 임시 표준지는 15 plot이며, 조사 대상지 임분 내에서 임령을 고려하여 2개의 영급단위로 분류하였으며, 예산지역에서는 각 영급단위별로 10 m×10 m 정방형으로 8개소의 표준지를 설치하였고, 무주, 진안, 산청지역은 20 m×20 m 방형구로 7개소의 표준지를 선정하였다. 조사지별 영급과 직경을 고려하여 표준목을 선정하였으며, 표준목 선정시 피압목이나 정상적인 임목이 아닌 경우는 제외하였다. 표준목의 평균 임령과 흉고직경은 20년생 이하에서 13년과 5 cm로 나타났고, 21년생 이상에서는 36년과 20 cm로 나타났다(Table 1).

2. 조사방법

1) 표본목 선정 및 측정

조사 대상 임분은 임령과 흉고직경을 고려하여 20년생 이하와 21년생 이상으로 구분하였으며, 선정된 표준목의 줄기는 Huber식에 의해 지상 0.2 m 높이에서 2 m 간격으

Table 1. The summary of observed statistics for the *Pinus rigida* stands.

| Age (years) | No. of trees (Total Discs) | Age (years) | Diameter (cm) | Height (m) | Density (tree/ha) | BA (m ² /ha) |
|-------------|----------------------------|-------------|---------------|------------|-------------------|-------------------------|
| ≤ 20 | 18 | 13.4 | 5.4 | 4.1 | 3,500 | 5 |
| | (66) | 8.0–20.2 | 1.3–11.8 | 1.7–8.8 | 2600–5,200 | 2.0–6.0 |
| > 21 | 39 | 35.7 | 19.5 | 14.8 | 625 | 23.6 |
| | (315) | 21.0–44.0 | 9.7–39.5 | 7.1–19.0 | 1,162–2,300 | 13.9–34.7 |

로 절단하되 처음과 끝은 1 m 단위로 맞추어 주었다. 원판의 두께는 건중량 측정을 위하여 5 cm 단위로 통일하였으며, 원판과 통나무의 생중량을 측정하였다. 채취한 시료는 건조기에서 85°C로 향량에 도달 할 때까지 건조시킨 후 건중량을 측정하여 각 원판의 건중량 대 생중량 비를 산정하였다. 또한 Huber식에 의하여 줄기의 목질부재적, Smalian식에 의하여 근주재적, 원추체식에 의하여 초두부재적을 산정하였다. 잎, 가지, 뿌리는 생중량 측정 후 최소 350 g 이상의 시료들을 채취하여 건조기에서 85°C로 향량에 도달될 때까지 건조 시킨 후 잎, 가지, 뿌리 시료에 대하여 건중량을 측정 후 건중량 대 생중량 비를 산출하였다. 측정된 자료를 바탕으로 리기다소나무의 줄기밀도와 바이오매스 확장계수를 산출하였다(IPCC 우수실행지침, 2003).

2) 줄기밀도와 바이오매스 확장계수

줄기밀도는 수간석해 한 자료를 이용하였으며, 줄기의 건중량 대 재적 값(g/)을 환산하여 사용하였다. 바이오매스 확장계수는 부위별 건중량과 줄기 건중량 비율로 산출하였고 재적의 값은 수피를 포함한 재적을 사용하였다. 자료의 통계분석은 SAS 9.1(2004)에 의하여 5% 유의수준에서 통계적 유의성이 있는지 t-검정을 실시하여 비교하였다.

3) 불확실성

불확실성은 산림부문의 온실가스 흡수·배출계수 관리에 있어서 중요한 부분 중에 하나이며, 산림의 다양한 구조, 임령, 수종 등의 복잡성과 지역적인 생육 환경 차이 등에 의하여 불확실성이 나타날 수 있다. 불확실성의 평가는 조사된 자료의 품질검증, 정확성 평가와 가능한 불확실성의 감소를 유도하기 위함이라고 할 수 있다(국립산림과학원, 2008). 불확실성의 산정은 IPCC 가이드라인에서 알려지지 않은 참값이 포함될 확률이 95%로, 95% 신뢰구간을 이용할 것을 제안하고 있다. 신뢰구간을 불확실성 크기의 추정치로 나눈 결과의 절반이라고 정의한 불확실성을 백분율로 나타낼 수 있으며 다음과 같다(국립산림과학원, 2004).

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

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

결과 및 고찰

1. 줄기밀도와 바이오매스 확장계수

리기다소나무림의 줄기밀도(g/cm³) 평균은 20년생 이하에서 0.460으로 나타났고, 21년생 이상에서 0.456으로

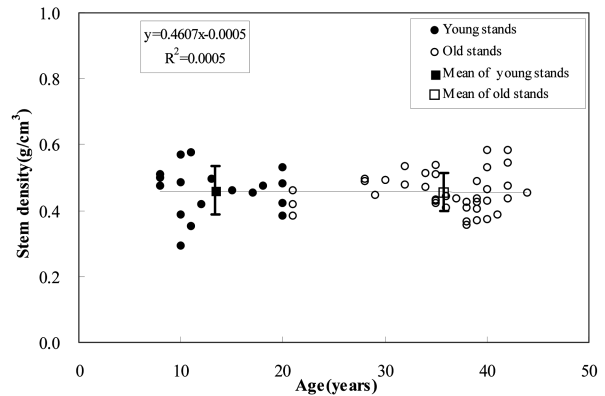


Figure 2. Relationships between tree age and stem density in *Pinus rigida* (Vertical bars represent ± S.D. of the means).

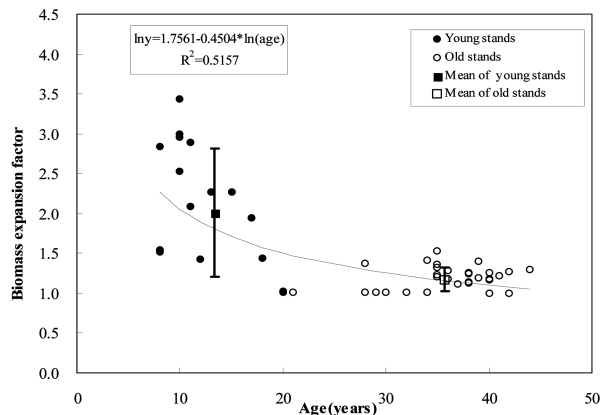


Figure 3. Relationships between tree age and biomass expansion factor in *Pinus rigida* (Vertical bars represent ± S.D. of the means).

로 나타났다(Figure 2). 5% 유의수준에서 영급간의 통계적인 차이를 보이지 않았으며(p=0.8070), 임령이 증가함에 따라 다소 감소하는 경향을 나타냈다. 이는 일본 침엽수림의 평균치 0.37(Forestry Experiment Station, 1982)의 값과 비교하면 다소 높은 값을 나타냈으며, 독일의 주요 수종별 목재기본밀도는 0.37~0.56으로 본 연구도 이 범위 안에 속하는 것으로 나타났다(국립산림과학원, 2008).

바이오매스 확장계수는 20년생 이하에서 2.013으로 나타났고, 21년생 이상에서는 1.171의 수치로 나타났고(Figure 3). 5% 유의수준에서 영급간의 통계적인 차이를 나타냈으며(p=0.0001), 이러한 결과는 온대지방 침엽수가 임령이 증가함에 따라 바이오매스 확장계수가 감소하는 경향과 유사하게 나타났다(IPCC, 2003). IPCC (2003)에서 제시한 온대지방 소나무속 지상부 바이오매스 확장계수 1.3과 비교하면 21년생 이상의 임분에서 상대적으로 작은 값이 나타났으며, 독일의 주요 수종별 바이오매스 확장계수는 1.339~1.511의 범위 내에서 나타났다(국립산림과학원, 2008).

Table 2. The summary of statistics for stem density (g/cm³) and uncertainty in *Pinus rigida*.

| Age (years) | Mean | Std.Dev. | Min. | Max. | C.V. (%) | Uncertainty (%) |
|-------------|------|----------|------|------|----------|-----------------|
| ≤20 | 0.46 | 0.07 | 0.29 | 0.59 | 15.87 | 30.92 |
| >21 | 0.46 | 0.06 | 0.36 | 0.59 | 12.72 | 25.12 |

Table 3. The summary of statistics for biomass expansion factor and uncertainty in *Pinus rigida*.

| Age (years) | Mean | Std.Dev. | Min. | Max. | C.V. (%) | Uncertainty (%) |
|-------------|------|----------|------|------|----------|-----------------|
| ≤20 | 2.01 | 0.80 | 1.01 | 3.44 | 39.74 | 60.32 |
| >21 | 1.17 | 0.15 | 1.00 | 1.53 | 12.72 | 22.43 |

2. 줄기밀도와 바이오매스 확장계수에 대한 불확실성 평가

리기다소나무림의 줄기밀도에 대한 불확실성을 평가한 결과, 20년생 이하에서 30.92%, 21년생 이상에서 25.12%로 나타났으며, 변이계수(C.V.)는 20년생 이하에서 15.87%, 21년생 이상에서 12.72%로 나타났고, 21년생 이상에서 20년생 이하보다 작은 변이가 나타났다(Table 2). 줄기밀도의 영급별 불확실성은 모두 30% 이내로 나타났고, IPCC가 권장하는 30% 범위 안에 속하는 것으로서 이는 FAO가 제공하는 수치 10~40% 범위 안에 있으며 계수 적용이 타당한 것으로 사료된다. 일본에서 연구된 소나무의 경우 목재기본밀도의 불확실성은 7.2%로 나타났고 해송에서는 4.2%를 나타냈으며, 본 연구와 차이를 나타내는 주요 원인은 대면적의 균일한 임분을 대상으로 표본의 개수가 많아 오차가 작은 것으로 사료된다(Takeshi *et al.*, 2007).

바이오매스 확장계수에 대한 불확실성을 평가한 결과, 20년생 이하에서 60.32%, 21년생 이상에서 22.43%로 나타났으며, 20년생 이하가 이상보다 2배 가량 높은 변이를 나타냈다. 20년생 이하에서 영급별 변이가 크게 나타난 원인은 환경적인 요인과 상대적으로 표본의 수가 적기 때문인 것으로 사료된다(Table 3). 핀란드에서 연구된 소나무, 가문비나무, 자작나무의 경우 불확실성이 약 10% 내외로 나타났으며(Lehtonen *et al.*, 2003), 일본 소나무의 경우 20년생 이하에서는 6.3%를 나타냈고 21년생 이상에서는 2.2%를 나타냈다(국립산림과학원, 2008). 핀란드와 일본의 경우 본 연구보다 불확실성이 작은 수치로 나타났고, 영급별 비교는 20년생 이하가 21년생 이상보다 불확실성이 높은 것으로 나타났다. 이는 지형적 환경인자에 의한 리기다소나무림의 생장 변이가 매우 심하여 생기는 것으로 추정되며, 불확실성을 줄이기 위해서는 국가적 또는 지역적 고유 계수 개발을 장려해야 하며(Takeshi *et al.*, 2007), 영급에 따른 계수 구분이 필요할 것으로 사료된다.

결론

본 연구에서는 리기다소나무 20년생 이하의 유령임분과 21년생 이상의 성숙임분을 대상으로 t-검정을 실시한 후 줄기밀도와 바이오매스 확장계수의 불확실성을 평가하였다. 줄기밀도는 20년생 이하에서 0.460으로 나타났고, 21년생 이상에서 0.456으로 영급별 차이가 나타나지 않는 반면(p=0.8070), 바이오매스 확장계수는 20년생 이하에서 2.013으로 나타났고, 21년생 이상에서는 1.171의 수치로 나타나 영급별 차이를 나타냈다(p=0.0001). 줄기밀도의 불확실성은 20년생 이하에서 30.92%, 21년생 이상에서 25.12%로 나타났으며, 바이오매스 확장계수의 불확실성은 20년생 이하에서 60.32%, 21년생 이상에서 22.42%로 나타났다. 줄기밀도의 불확실성은 영급별 큰 차이를 나타내지 않았으며, 바이오매스 확장계수의 불확실성은 영급별 큰 차이를 나타냈다. 즉, 성숙임분은 불확실성이 상대적으로 작게 나타났으며, 반면에 유령임분은 높게 나타났다. 따라서, 리기다소나무림의 줄기밀도와 바이오매스 확장계수의 불확실성을 줄이기 위해 국가적 또는 지역적 고유 계수 개발을 장려해야 하며, 20년생 이하의 영급과 21년생 이상의 영급을 구분하여야 할 것으로 사료된다.

감사의 글

본 논문은 한국연구재단의 지역대학우수과학지원사업(20110014677)연구결과의 일부임.

인용문헌

1. 국립산림과학원. 2004. IPCC 우수실행지침 -토지이용, 토지이용변화 및 임업-. pp. 423.
2. 국립산림과학원. 2007. 우리나라 산림 바이오매스 자원 평가. pp. 105.
3. 국립산림과학원. 2008. 산림부분 온실가스 흡수·배출 계수 관리 방안. pp. 94.
4. 산림청. 2010. 교토의정서 대응 산림탄소계정 기반 구축 연구. pp. 463.
5. 산림청. 2010. 임업통계연보. <http://www.forest.go.kr/>
6. FAO. 2004. Global Forest Resources Assessment Update 2005-Specification of National Reporting Table for FRA 2005. FRAP Working Paper No. 81.
7. IPCC. 2003. Good Practice Guidance for Land Use, Land-use Change and Forestry Institute for Global Environmental Strategies. Kanagawa, Japan. pp. 576.
8. 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. Chapter 3.6-3.7.

9. Lehtonen, A., Makipaa, R., Heikkinen, J., Sievanen, R. and Liski, J. 2003. Biomass expansion factors(BEFs) for Scots pine, Norway spruce and birch according to stand age for boreal forests. *Forest Ecology and Management* 188: 211-224.
 10. Macfarlane, D.W., Green, E.J. and Valentine, H.V. 2000. Incorporating uncertainty into the parameters of a forest process model. *Ecological Modelling* 134: 27-40.
 11. 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.
 12. Peltoniemi, M., Palosuo, T., Monni, S. and Makipaa, R. 2006. Factors affecting the uncertainty of sinks and stocks of carbon in Finnish forests soils and vegetation. *Forest Ecology and Management*. 75-85.
 13. Refsgaard, J.C., van der Sluijs, J.P., Hojberg A.L and Vanrolleghem, P.A. 2007. Uncertainty in the environmental modelling process-A framework and guidance. *Environmental Modelling & Software* 22: 1543-1556.
 14. SAS Institute, Inc., 2004. SAS/STAT 9.1 User's Guide. SAS Institute, Inc. Cary. NC.
 15. Takeshi, F., 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 FFPRI* 6(4): 215-226.
 16. Rypday, K. and Winiwarer, W. 2001. Assessing the uncertainty associated with national greenhouse gas emission inventories : A case study for Austria. *Atmospheric Environment* 35: 5425-5440.
 17. Woolley, T.J., Harmon, M.E. and O'Connell K.B. 2007. Estimating annual bole biomass production using uncertainty analysis. *Forest Ecology and Management*. pp. 202-210.
-
- (2011년 1월 5일 접수; 2011년 1월 17일 채택)