

## 브루나이 열대우림의 산림 유형별 지상부 바이오매스 추정

장민주, 노유진<sup>1</sup>, 김형섭, 이정민, 손요환\*

고려대학교 대학원 환경생태공학과, <sup>1</sup>국립생태원 보전평가연구본부 기후생태연구실

## Aboveground biomass of tropical rain forests by forest type in Brunei Darussalam

Minju Jang, Yujin Roh<sup>1</sup>, Hyung-sub Kim, Jeongmin Lee and Yowhan Son\*

Department of Environmental Science and Ecological Engineering, Graduate School, Korea University, Seoul 02841, Republic of Korea

<sup>1</sup>Division of Climate & Ecology, Bureau of Conservation & Assessment Research, National Institute of Ecology, Seocheon 33657, Republic of Korea

### \*Corresponding author

Yowhan Son

Tel. 02-3290-3015

E-mail. yson@korea.ac.kr

Received: 19 July 2021

Revised: 2 August 2021

Revision accepted: 4 August 2021

**Abstract:** The aboveground biomass (AGB) was estimated in mixed dipterocarp forests (MDF), peat swamp forests (PSF), and heath forests (HF) in Brunei Darussalam. A total of 81 (20 m × 20 m) plots were established for MDF, PSF, and HF in three regions. The diameter at breast height (DBH) of all live trees (DBH ≥ 10 cm) was measured within the plots. The AGB was calculated using an allometric equation with the measured DBH. The AGB (Mg ha<sup>-1</sup>) for MDF, PSF, and HF was 603.3 ± 159.9, 305.9 ± 23.4, and 284.3 ± 19.3, respectively, and was significantly different among the forest types ( $p < 0.05$ ). The greater AGB in MDF than those in PSF and HF was due to the presence of emergent trees in MDF. The results showed that the number of emergent trees varied by forest type. Consequently, the appearance of the emergent trees could be one of the main factors affecting AGB in Southeast Asia's tropical rain forests.

**Keywords:** mixed dipterocarp forests, peat swamp forests, heath forests, emergent trees

## 서 론

전 지구적으로 열대우림에 저장된 탄소량은 약 272 Pg C이며, 이는 육상생태계 전체에 저장된 탄소의 약 32%에 해당한다(Pan *et al.* 2011). 열대우림에서는 주로 탄소가 지상부 바이오매스에 저장되어 있는데, 특히 동남아시아 열대우림은 아마존을 비롯한 다른 지역의 열대우림보다 단위면적당 지상부 바이오매스가 더 크다(Paoli *et al.* 2008). 그러나 동남아시아 열대우림에서의 산림 전용(연

간 0.91%)이 전 지구적 산림전용(연간 0.40%)보다 높은 비율로 일어나고 있어(Achard *et al.* 2002), 이 지역의 탄소 저장량을 보전할 수 있는 연구에 대한 관심이 필요하다. 그러나, 열대우림에 대한 관련 연구는 주로 아마존 지역에 집중되어 있다(Malhi *et al.* 2009; Jucker *et al.* 2018).

동남아시아 열대우림의 주요 산림 유형은 이엽시과혼효림(Mixed dipterocarp forests; MDF), 이탄습지림(Peat swamp forests; PSF) 그리고 히스림(Heath forests; HF) 등이다. MDF는 동남아시아 열대우림에서만 천이과정의 후

기에 나타나는 산림으로 Dipterocarpaceae과가 우점하는 것이 특징이다(Appanah 1998). MDF와 마찬가지로 PSF와 HF도 Dipterocarpaceae과가 우점하나, PSF는 유기물이 다량 축적된 이탄층이 나타나고(Andriess 1988), HF는 수분과 양분이 열악한 사질토가 나타난다는 점에서 MDF와는 구분된다(Bruenig 1996; Miyamoto *et al.* 2003).

보르네오의 MDF, PSF 그리고 HF를 대상으로 지상부 바이오매스를 추정하기 위한 연구가 이전에 수행되었는데, 지상부 바이오매스는 브루나이와 람비르 지역의 MDF에서 497~545 Mg ha<sup>-1</sup> (Chave *et al.* 2008; Katayama *et al.* 2013; Lee *et al.* 2015)로 가장 많고, 브루나이와 사라왁 지역의 PSF에서 263~397 Mg ha<sup>-1</sup> (Verwer and van der Meer 2010) 그리고 칼리만탄 지역의 HF에서 207~250 Mg ha<sup>-1</sup> 등으로 나타났다(Miyamoto *et al.* 2016).

그러나, 이러한 일부 연구에도 불구하고 MDF, PSF 그리고 HF 등 주요 산림 유형에 대한 지상부 바이오매스 추정 연구에는 한계가 존재한다. 특히 MDF의 지상부 바이오매스 추정에서 공간적 변이가 매우 크게 나타나 불확실성이 크다(Laumonier *et al.* 2010). 이는 MDF에서 주로 나타나는 Dipterocarpaceae과의 *Dipterocarpus*속과 *Shorea*속에서 거대목(emergent tree)이 출현하는 빈도가 높아서, 조사구 내 거대목의 출현 유무에 따라 단위면적당 지상부 바이오매스의 변이가 크게 나타나기 때문이다(Slik *et al.* 2013). 또한 PSF와 HF의 지상부 바이오매스는 이탄층의 깊이와 사질토의 양분 함량에 따라 크게 차이가 나타나에도 불구하고, 공간에 따른 이들의 차이를 충분히 반영할 수 있을 만큼 많은 연구가 수행되지 않았다. 더욱이 PSF와 HF는 1990년대 이후 산불과 농경지로의 전용에 의해 그 면적이 빠르게 줄고 있기 때문에(Ishizuka *et al.* 2000; Evers *et al.* 2017; Wijedasa *et al.* 2018) 지상부 바이오매스와 관련된 연구가 시급히 이루어질 필요가 있다.

본 연구의 목적은 동남아시아 열대우림 지역인 브루나이에서 MDF, PSF 그리고 HF를 대상으로 1) 임분구조를 파악하기 위하여 임분밀도, 흉고단면적 등을 분석하고, 2) 지상부 바이오매스를 추정하는 것이다.

## 재료 및 방법

본 연구는 보르네오 북서쪽에 위치한 브루나이에서

수행되었다. 브루나이의 위도와 경도 범위는 각각 4°35'~4°56'N, 114°13'~115°4'E이고, 전체 국토 면적은 약 576,500 ha이다. 최고의 해발고도는 동남부에 위치한 Bukit Pagon의 1,850 m이나, 대부분의 국토는 고도가 낮은 해안 저지대에 속한다(UNFCCC 2016). 1981년부터 2010년까지의 연평균 강수량과 일평균기온은 3,000 mm와 28°C로 보고되었다(UNFCCC 2016). 비교적 좁은 위도와 경도 범위 그리고 국토 면적으로 인해 브루나이 내에서 공간에 따른 기후 차이는 크게 나타나지 않는다. 한편, 토양은 Ultisol과 Inceptisol이 주로 분포한다(Ashton and Hall 1992).

브루나이의 전체 산림 면적은 448,118 ha이며, MDF, PSF 그리고 HF가 각각 전체 산림 면적의 약 41.0% (183,728 ha), 19.0% (85,142 ha) 그리고, 1.5% (6,721 ha)를 차지한다(FAO 2020). 본 연구는 브루나이의 MDF, PSF 그리고 HF 등 3개 산림 유형별로 각각 3개 지역을 선정하고 각 지역마다 20 m×20 m 크기의 정방형 조사구를 9개씩 설치하여 총 81개의 조사구를 대상으로 연구를 수행하였다(Fig. 1; Table 1).

조사구 내에서 흉고직경 10 cm 이상인 모든 임목을 대상으로 Center for Tropical Forest Science의 지침서에 따라 흉고직경을 측정하였다(Condit 1998). 특히 판근이 드러난 임목의 경우, 판근의 가장 위쪽으로부터 50 cm 떨어진 높이에서 직경을 측정하였다. 임분밀도는 단위면적당 임목 본수로, 단위면적당 흉고단면적은 Eq. 1을 사용하여 계산하였다. 단위면적당 지상부 바이오매스는 아시아지역 열대우림을 기반으로 개발된 상대생장식에 실제로 측정된 임목의 흉고직경을 대입하여 산출하였다(Basuki *et al.* 2009; Eq. 2).

Basal area (m<sup>2</sup> ha<sup>-1</sup>)

$$= \sum_{k=1}^n \left( 3.14 \times \left[ \frac{DBH_k}{2} \right]^2 \right) \times \frac{0.0001 \text{ m}^2}{1 \text{ cm}^2} \times \frac{10,000 \text{ m}^2}{1 \text{ ha}} \times \frac{1}{400 \text{ m}^2} \quad (\text{Eq. 1})$$

Aboveground biomass (Mg ha<sup>-1</sup>)

$$= \sum_{k=1}^n (\exp(-1.201 + 2.196 \ln(DBH_k))) \times \frac{0.001 \text{ Mg}}{1 \text{ kg}} \times \frac{10,000 \text{ m}^2}{1 \text{ ha}} \times \frac{1}{400 \text{ m}^2} \quad (\text{Eq. 2})$$

Eq. (1)과 Eq. (2)에서 DBH<sub>k</sub>는 흉고직경, k는 조사구 내 개별 임목, n은 조사구 내 모든 임목의 수를 의미한다.

산림 유형에 따른 임분밀도, 흉고단면적 그리고 지상부 바이오매스의 차이를 알아보기 위하여 일원분산분석을 이용하였으며, 사후검정은 Tukey 분석을 이용하였다. 모든

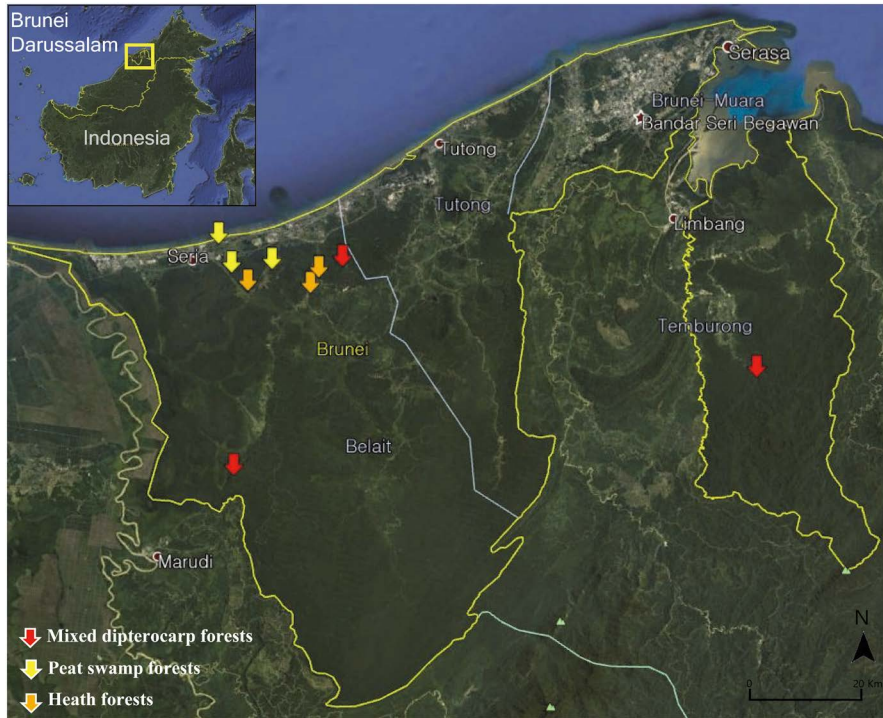


Fig. 1. The location of the study sites in Brunei Darussalam.

Table 1. Location of the study sites and major family and genus of the surveyed trees

Forest type	Province	Site	Location	Elevation (m)	Major family	Major genus
MDF	Belait district	Andulau	4°39'19"N, 114°31'10"E	56-80	Dipterocarpaceae	<i>Shorea</i>
	Belait district	Teraja	4°19'15"N, 114°26'39"E	298-353	Dipterocarpaceae	<i>Shorea</i>
	Temburong district	Kuala Belalng	4°32'50"N, 115°9'28"E	102-244	Euphorbiaceae	<i>Shorea</i>
PSF	Belait district	Lumut	4°36'36"N, 114°26'24"E	0-47	Sapotaceae	<i>Madhuca</i>
	Belait district	Badas	4°34'10"N, 114°24'40"E	9-53	Dipterocarpaceae	<i>Madhuca</i>
	Belait district	Anduki	4°37'34"N, 114°22'00"E	16-28	Dipterocarpaceae	<i>Dryobalanops</i>
HF	Belait district	Bukit Sawat	4°34'32"N, 114°30'24"E	29-49	Dipterocarpaceae	<i>Dipterocarpus</i>
	Belait district	Empangan Kargu	4°35'59"N, 114°30'59"E	43-56	Dipterocarpaceae	<i>Hopea</i>
	Belait district	Badas	4°34'11"N, 114°25'4"E	14-43	n.a.	n.a.

\*MDF: Mixed dipterocarp forests, PSF: Peat swamp forests, HF: Heath forests.

\*\*n.a.: Information is not available due to identification failure.

통계분석에는 SAS 9.4 소프트웨어(SAS Institute Inc., USA)를 사용하였다.

### 결과 및 고찰

임분밀도는 산림 유형에 따라 유의한 차이가 있는 것

으로 나타났다 ( $p < 0.05$ ; Table 2). MDF의 임분밀도가  $674.1 \pm 33.0$  trees ha<sup>-1</sup>로 가장 높고, PSF가  $599.1 \pm 24.4$  trees ha<sup>-1</sup> 그리고 HF가  $542.6 \pm 39.2$  trees ha<sup>-1</sup>로 가장 낮았다. MDF의 임분밀도는 Paoli *et al.* (2008)과 Lee *et al.* (2015)이 보르네오의 MDF를 대상으로 한 연구 결과인 521.0~604.0 trees ha<sup>-1</sup>보다 다소 높은 값이다. PSF의 임분밀도는 Verwer and van der Meer (2010)가 보르네오에서

**Table 2.** Mean stand density, basal area, and aboveground biomass (AGB) by forest type in Brunei Darussalam (mean  $\pm$  standard error)

Forest type*	Stand density (trees ha <sup>-1</sup> )	Basal area (m <sup>2</sup> ha <sup>-1</sup> )	AGB (Mg ha <sup>-1</sup> )
MDF	674.1 $\pm$ 33.0 <sup>a</sup>	64.5 $\pm$ 14.0 <sup>a</sup>	603.3 $\pm$ 159.9 <sup>a</sup>
PSF	542.6 $\pm$ 39.2 <sup>b</sup>	38.4 $\pm$ 2.9 <sup>ab</sup>	305.9 $\pm$ 23.4 <sup>ab</sup>
HF	599.1 $\pm$ 24.4 <sup>ab</sup>	30.1 $\pm$ 2.2 <sup>b</sup>	234.3 $\pm$ 19.3 <sup>b</sup>

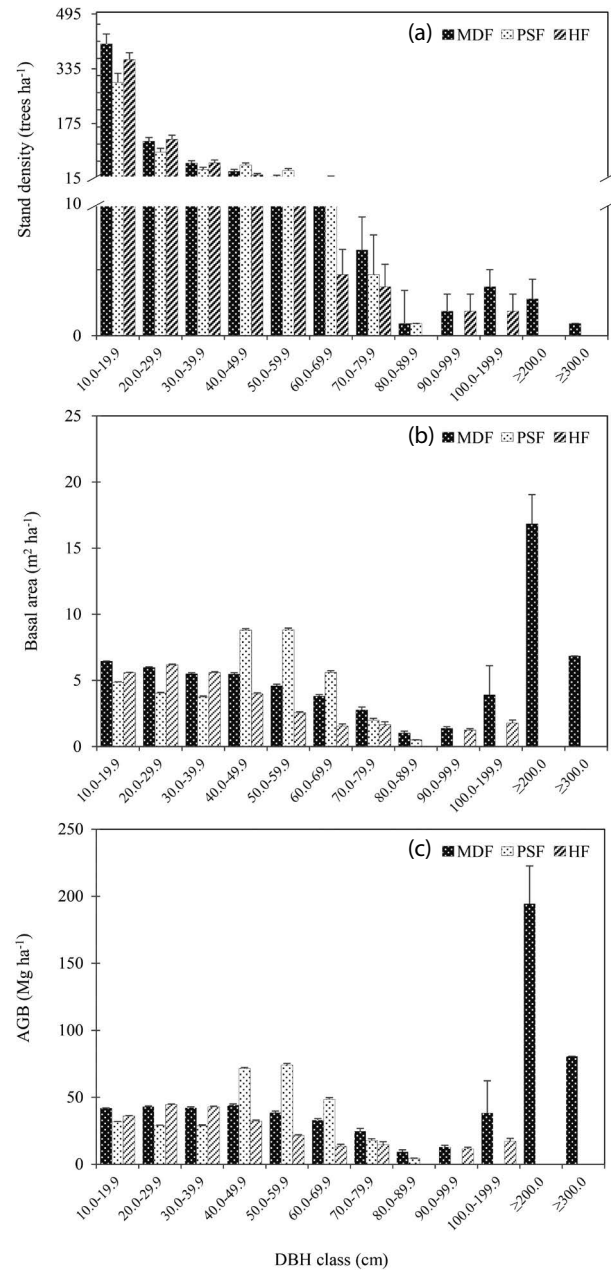
Different letters indicate significant differences among the forest types.

\*MDF: Mixed dipterocarp forests, PSF: Peat swamp forests, HF: Heath forests.

조사한 범위 (506.0~711.0 trees ha<sup>-1</sup>) 내에 해당한다. 그리고 HF의 임분밀도는 Miyamoto *et al.* (2007)이 보고한 범위 (677.0~747.0 trees ha<sup>-1</sup>)보다 낮았다. 모든 산림 유형에서 전체 임목 본수에 대한 10.0~40.0 cm 흉고직경급의 본수 비율이 약 80% 이상 차지하였고, MDF와 HF에서는 90.0 cm 흉고직경급 이상인 임목이 출현하였다(Fig. 2).

흉고단면적은 산림 유형에 따라 유의한 차이가 있었다( $p < 0.05$ ; Table 2). MDF, PSF 그리고 HF의 흉고단면적은 각각 64.5  $\pm$  14.0, 38.4  $\pm$  2.9 그리고 30.1  $\pm$  2.2 m<sup>2</sup> ha<sup>-1</sup> 등이었으며, 특히 MDF의 흉고단면적은 HF보다 약 2배 이상 크게 나타났다. 한편 MDF 및 HF의 흉고단면적은 Paoli *et al.* (2008)과 Lee *et al.* (2015)이 보고한 MDF의 범위 (38.8~39.6 m<sup>2</sup> ha<sup>-1</sup>)와 Miyamoto *et al.* (2007)이 보고한 HF의 범위 (21.8~23.1 m<sup>2</sup> ha<sup>-1</sup>)보다 크게 나타났다. 특히 MDF에서 200.0 cm 이상과 300.0 cm 이상인 흉고직경급에서 흉고단면적은 각각 16.8 m<sup>2</sup> ha<sup>-1</sup>과 6.8 m<sup>2</sup> ha<sup>-1</sup>로 나타났으며, 이로 인하여 산림 유형별로 흉고단면적에서 차이를 보인 것으로 판단된다(Fig. 2).

한편, 지상부 바이오매스에서 산림 유형에 따라 유의한 차이가 있었다( $p < 0.05$ ; Table 2). 지상부 바이오매스는 MDF, PSF 그리고 HF에서 603.3  $\pm$  159.9, 305.9  $\pm$  23.4 그리고 234.3  $\pm$  19.3 Mg ha<sup>-1</sup> 등이었으며, MDF에서 가장 크고 HF에서 가장 작은 것으로 나타났다. 또한 본 연구의 MDF 지상부 바이오매스는 보르네오에서 수행된 기존 연구의 결과 범위인 256.0~518.0 Mg ha<sup>-1</sup>보다도 큰 것으로 나타났다(Paoli *et al.* 2008; Saner *et al.* 2012; Basuki *et al.* 2013; Lee *et al.* 2015). 반면 PSF와 HF의 지상부 바이오매스는 각각 기존 연구에서 보고된 PSF의 범위인 211.2~397.4 Mg ha<sup>-1</sup>와 HF의 범위인 208.4~254.2 Mg ha<sup>-1</sup>에 포함된다(Miyamoto *et al.* 2007; Verwer and van der Meer 2010;



**Fig. 2.** Stand density (a), basal area (b), and aboveground biomass (AGB; c) distribution by diameter breast height (DBH) class for three forest types (MDF: mixed dipterocarp forests, PSF: peat swamp forests, and HF: heath forests).

Magdon *et al.* 2018).

본 연구에서 MDF의 지상부 바이오매스가 PSF 및 HF의 지상부 바이오매스보다 크고, 보르네오의 다른 MDF에서 선행된 연구 결과보다 크게 나타난 것은 조사지 내 흉고직경이 매우 큰 거대목의 출현 빈도가 높은 것에서 기인

한다(Fig. 2). Slik *et al.* (2013)은 거대목의 기준을 흉고직경이 70 cm 이상인 임목으로 구분하였는데, 본 연구의 MDF에서는 이러한 거대목이 17.6 trees ha<sup>-1</sup>으로 출현하여, PSF의 5.6 trees ha<sup>-1</sup>와 HF의 7.4 trees ha<sup>-1</sup>보다 큰 것으로 나타났다. 또한 MDF에서 전체 임목 본수에 대한 거대목의 출현 비율은 2.6%에 불과하였으나, 지상부 바이오매스에서 59.7%를 차지하는 것으로 나타났다(Fig. 2).

브루나이의 MDF에서 선행된 연구인 Lee *et al.* (2015)에서는 거대목의 임분밀도가 15.7 trees ha<sup>-1</sup>이고, 지상부 바이오매스에서 차지하는 비율이 31.3%로 본 연구 결과보다 낮았다. 특히 본 연구에서는 Teraja 지역의 MDF 조사구들에서 흉고직경이 200 cm 이상인 초거대목이 8.3 trees ha<sup>-1</sup> 그리고 300 cm 이상인 초거대목이 2.7 trees ha<sup>-1</sup>으로 나타났다. 일반적으로 흉고직경이 증가함에 따라 지상부 바이오매스가 지수함수적으로 증가하므로, 본 연구에서 MDF의 지상부 바이오매스가 선행된 연구 결과들보다 큰 이유는 흉고직경이 200~300 cm 이상인 초거대목이 다수 출현했기 때문으로 볼 수 있다.

거대목의 출현과 지상부 바이오매스의 관련성에 대한 결과는 기존 연구에서도 확인할 수 있다. Lutz *et al.* (2018)은 열대우림에서 거대목이 출현하는 현상이 전지구 지상부 바이오매스 추정에서의 변이를 증가시키는 요인이라고 하였으며 열대우림의 전체 임목 중에서 흉고직경이 60 cm 이상인 임목이 차지하는 비율은 1%에 불과하나, 이러한 임목의 지상부 바이오매스는 전체 지상부 바이오매스의 50%에 달한다고 보고하였다. Paoli *et al.* (2008)은 동남아시아 열대우림의 지상부 바이오매스(478 Mg ha<sup>-1</sup>)가 아마존 열대우림의 지상부 바이오매스(300 Mg ha<sup>-1</sup>)보다 크게 나타나는 것은 동남아시아에서의 거대목 출현 빈도가 아마존보다 높기 때문이라고 설명하였다.

이러한 맥락에서 Dewalt and Chave (2004)은 거대목의 출현이 지상부 바이오매스 추정에 큰 영향을 주므로 이들의 출현과 환경 요인의 관계를 파악할 필요가 있다고 하였고, 여러 환경 요인 중에서도 특히 토양의 물리화학적 특성이 거대목의 출현에 유의한 영향을 미친다고 한 바 있다. Zani *et al.* (2018)의 말레이시아 열대우림에서 수행된 연구 결과는 높은 고도에서 거대목의 출현 빈도가 상대적으로 높게 나타난다고 보고하였는데, 거대목으로 성장하는 임목의 비율이 Dipterocarpaceae과가 다른 과보다 높고, Dipterocarpaceae과의 임목은 높은 고도의 MDF에서 더 자

주 나타나기 때문에 고도가 높을수록 거대목이 출현하는 빈도가 높아진다고 설명하였다. 본 연구에서도 흉고직경이 200 cm 이상인 초거대목들은 다른 지역들보다 고도가 높은 Teraja 지역의 MDF에서만 나타났다. 그러나 본 연구에서 토양 환경과 거대목 출현과의 명확한 관련성을 확인하지는 못하였다. 따라서 추후 거대목 출현에 영향을 미칠 수 있는 환경 요인과 거대목 출현 및 지상부 바이오매스와의 관련성을 연구할 필요가 있다.

한편, 지상부 바이오매스 추정에서의 변이는 환경 요인뿐 아니라 실험설계에서 기인할 수도 있다. Chave *et al.* (2003)은 조사구의 크기가 작아질수록 지상부 바이오매스 추정의 불확실성이 커진다고 보고하였다. 동남아시아 열대우림의 경우 조사구 크기에 따라 거대목의 출현 유무가 달라질 수 있고, 결국 지상부 바이오매스에 영향을 미치므로 조사구 크기에 따라 지상부 바이오매스 추정의 불확실성이 생길 수 있다. 따라서 조사구 크기별 거대목의 출현 빈도 및 지상부 바이오매스와의 관계를 파악할 필요가 있다.

## 결 론

본 연구는 동남아시아 열대우림 지역인 브루나이에서 가장 일반적으로 출현하는 산림 유형인 MDF, PSF 그리고 HF를 대상으로 지상부 바이오매스를 추정하였다. MDF, PSF 그리고 HF의 지상부 바이오매스는 각각 603.3 ± 159.9, 305.9 ± 23.4 그리고 234.3 ± 23.4 Mg ha<sup>-1</sup> 순이었으며, 산림 유형에 따라 유의한 차이가 나타났다. 지상부 바이오매스는 MDF에서 PSF와 HF보다 크게 나타났으며, 기존 연구에서 보고된 지상부 바이오매스 범위보다도 컸다. 이는 MDF에서 흉고직경이 70 cm 이상인 거대목의 출현 빈도가 PSF와 HF보다 높았던 것에서 기인한다. 또한 MDF에서 거대목의 지상부 바이오매스가 전체 지상부 바이오매스에서 차지하는 비율이 59.7%로 나타났는데, 이는 본 연구에서 다른 기존 연구들과 달리 흉고직경이 200 cm 또는 300 cm 이상인 초거대목이 다수 출현했기 때문이다. 이와 같은 거대목의 출현은 환경 요인의 영향을 받는 것으로 알려져 있으나 본 연구에서는 이러한 관계에 대한 명확한 결과를 제시하지 못하였다. 아울러 환경 요인뿐만 아니라 조사구의 크기에 따라 거대목의 출현 유무가 달라져서 지상부 바이오매스 추정에 영향을 줄 것으로 판단된

다. 따라서 추후 연구에서는 환경 요인, 실험 설계 등이 거대목의 출현과 지상부 바이오매스 추정의 변이에 미치는 영향도 분석할 필요가 있다. 본 연구는 아마존 열대우림에 비하여 비교적 연구가 부족한 동남아시아 열대우림을 대상으로 주요 산림 유형인 MDF, PSF 그리고 HF의 지상부 바이오매스를 추정하였다는 점에서 의의가 있다.

## 적 요

본 연구의 목적은 동남아시아 열대우림의 대표 산림 유형인 MDF, PSF 그리고 HF에서 지상부 바이오매스를 추정하는 것이다. 브루나이에서 MDF, PSF 그리고 HF를 대상으로 각각 3개 지역을 선정하여 20 m × 20 m 조사구를 지역마다 9개씩 설치하고 흉고직경 10 cm 이상인 임목의 흉고직경을 측정하였다. 지상부 바이오매스는 측정된 흉고직경과 바이오매스 상대생장식을 활용하여 추정되었다. 지상부 바이오매스는 MDF, PSF 그리고 HF에서 각각  $603.3 \pm 159.9$ ,  $305.9 \pm 23.4$  그리고  $284.3 \pm 19.3 \text{ Mg ha}^{-1}$  순으로 나타났다. 산림 유형에 따라 지상부 바이오매스는 유의하게 차이가 있었으며, MDF에서 가장 높게 나타났다. 이는 흉고직경이 70 cm 이상인 거대목이 MDF에서 집중되어 출현했기 때문이다. 이러한 연구 결과는 산림 유형에 따라 거대목의 출현빈도가 다르며, 나아가 거대목의 출현이 지상부 바이오매스 추정에 영향을 주는 요인 중 하나라는 의미를 가진다.

## 사 사

본 논문은 산림청 한국임업진흥원의 ‘열대림 탄소흡수량 MRV 및 관리체계 구축 방안 연구(2018110C10-2020-BB01)’, 국토교통부/국토교통과학기술진흥원의 ‘온실가스 저감을 위한 국토도시공간 계획 및 관리기술 개발(21UMRG-B158194-02)’ 과제의 지원을 받아 수행되었습니다.

## REFERENCES

Achard F, HD Eva, HJ Stibig, P Mayaux, J Gallego, T Richards and JP Malingreau. 2002. Determination of deforestation rates of

the world's humid tropical forests. *Science* 297:999–1002.

Andriessse JP. 1988. Nature and Management of Tropical Peat Soils. *FAO Soils Bulletin* 59. Food and Agriculture Organization. Rome, Italy.

Appanah S. 1998. A Review of Dipterocarps: Taxonomy, Ecology and Silviculture. Center for International Forestry Research. Bogor, Indonesia.

Ashton PS and P Hall. 1992 Comparisons of structure among mixed dipterocarp forests of north-western Borneo. *J. Ecol.* 90:459–481.

Basuki TM, AK Skidmore, YA Hussin and I van Duren. 2013. Estimating tropical forest biomass more accurately by integrating ALOS PALSAR and Landsat-7 ETM+ data. *Int. J. Remote Sens.* 34:4871–4888.

Basuki TM, PE van Laake, AK Skidmore and YA Hussin. 2009. Allometric equations for estimating the above-ground biomass in tropical lowland Dipterocarp forests. *For. Ecol. Manage.* 257:1684–1694.

Bruenig EF. 1996. Conservation and Management of Tropical Rainforests. CAB International. Wallingford, UK.

Chave J, R Condit, HC Muller-Landau, SC Thomas, PS Ashton and EC Losos. 2008. Assessing evidence for a pervasive alteration in tropical tree communities. *PLoS Biol.* 6:e45.

Chave J, R Condit, S Lao, JP Caspersen, RB Foster and SP Hubbell. 2003. Spatial and temporal variation of biomass in a tropical forest: results from a large census plot in Panama. *J. Ecol.* 91:240–252.

Condit R. 1998. Tropical Forest Census Plots. Springer. Berlin, Germany.

Dewalt SJ and J Chave. 2004. Structure and biomass of four lowland neotropical forests. *Biotropica* 36:7–19.

Evers S, CM Yule, R Padfield, P O'Reilly and H Varkkey. 2017. Keep wetlands wet: the myth of sustainable development of tropical peatlands - implications for policies and management. *Glob. Change Biol.* 23:534–549.

FAO. 2020. Global Forest Resources Assessments. Food and Agriculture Organization. Rome, Italy.

Ishizuka S, K Sakurai, J Sabang, JJ Kendawang and HS Lee. 2000. Soil characteristics of an abandoned shifting cultivation land in Sarawak, Malaysia. *Tropics* 10:251–263.

Jucker T, GP Asner, M Dalponte, ... , M Svátek, EC Turner and DA Coomes. 2018. Estimating aboveground carbon density and its uncertainty in Borneo's structurally complex tropical forests using airborne laser scanning. *Biogeosciences* 15:3811–3830.

Katayama A, T Kume, H Komatsu, TM Saitoh, M Ohashi, M Nakagawa, M Suzuki, K Otsuki and TO Kumagai. 2013. Carbon allocation in a Bornean tropical rainforest without dry seasons. *J. Plant Res.* 126:505–515.

- Lee S, D Lee, TK Yoon, KA Salim, S Han, HMYun, MYoon, E Kim, W-K Lee, SJ Davies and Y Son. 2015. Carbon stocks and its variations with topography in an intact lowland mixed dipterocarp forest in Brunei. *J. Ecol. Environ.* 38:75–84.
- Laumonier Y, A Edin, M Kanninen and AW Munandar. 2010. Landscape-scale variation in the structure and biomass of the hill dipterocarp forest of Sumatra: implications for carbon stock assessments. *For. Ecol. Manage.* 259:505–513.
- Lutz JA, TJ Furniss, DJ Johnson, ... , S Yap, JK Zimmerman and A Kerkhoff. 2018. Global importance of large-diameter trees. *Glob. Ecol. Biogeogr.* 27:849–864.
- Magdon P, E González-Ferreiro, C Pérez-Cruzado, ES Purnama, D Sarodja and C Kleinn. 2018. Evaluating the potential of ALS data to increase the efficiency of aboveground biomass estimates in tropical peat-swamp forests. *Remote Sens.* 10:1344.
- Malhi Y, LEOC Aragão, DB Metcalfe, R Paiva, CA Quesada, S Almeida, L Anderson, P Brando, JQ Chambers, ACL Da Costa, LR Hutyrá, P Oliveira, S Patiño, EH Pyle, AL Robertson and LM Teixeira. 2009. Comprehensive assessment of carbon productivity, allocation and storage in three Amazonian forests. *Glob. Change Biol.* 15:1255–1274.
- Miyamoto K, E Suzuki, T Kohyama, T Seino, E Mirmanto and H Simbolon. 2003. Habitat differentiation among tree species with small-scale variation of humus depth and topography in a tropical heath forest of central Kalimantan, Indonesia. *J. Trop. Ecol.* 19:43–54.
- Miyamoto K, JS Rahajoe, T Kohyama and E Mirmanto. 2007. Forest structure and primary productivity in a Bornean heath forest. *Biotropica* 39:35–42.
- Miyamoto K, TS Kohyama, JS Rahajoe, E Mirmanto and H Simbolon. 2016. Forest structure and productivity of tropical heath and peatland forests. pp. 151–166. In: *Tropical Peatland Ecosystems* (Osaki M and NTsuji, eds.). Springer. Tokyo.
- Pan Y, RA Birdsey, J Fang, R Houghton, PE Kauppi, WA Kurz, OL Phillips, A Shvidenko, SL Lewis, JG Canadell, P Ciais, RB Jackson, SW Pacala, AD McGuire, S Piao, A Rautiainen, S Sitch and D Hayes. 2011. A large and persistent carbon sink in the world's forests. *Science* 333:988–993.
- Paoli GD, LM Curran and JWF Slik. 2008. Soil nutrients affect spatial patterns of aboveground biomass and emergent tree density in southwestern Borneo. *Oecologia* 155:287–299.
- Saner P, YY Loh, RC Ong and A Hector. 2012. Carbon stocks and fluxes in tropical lowland dipterocarp rainforests in Sabah, Malaysian Borneo. *PLoS ONE* 7:e29642.
- Slik JWF, GD Paoli, K McGuire, ... , R Zang, MG Zhang and N Zweifel. 2013. Large trees drive forest aboveground biomass variation in moist lowland forests across the tropics. *Glob. Ecol. Biogeogr.* 22:1261–1271.
- UNFCCC. 2016. Brunei Darussalam's Initial National Communication. United Nations Framework Convention on Climate Change. Bonn, Germany.
- Verwer CC and PJ van der Meer. 2010. Carbon Pools in Tropical Peat Forests - Towards a Reference Value for Forest Biomass in Relatively Undisturbed Peat Swamp Forests in Southeast Asia. *Alterra Report 2108*. Wageningen, Netherlands. pp. 1–64.
- Wijedasa LS, S Sloan, SE Page, GR Clements, M Lupascu and TA Evans. 2018. Carbon emissions from South-East Asian peatlands will increase despite emission-reduction schemes. *Glob. Change Biol.* 24:4598–4613.
- Zani NF, MN Suratman, A Yaacob and N Asari. 2018. Biomass and carbon stocks estimation of lowland dipterocarp, riparian and hill dipterocarp forests in Pahang national park, Malaysia. pp. 123–140. In: *National Parks: Management and Conservation*. IntechOpen. London, UK.