

2019 하계 환경연수프로그램

연구결과 보고서

The ways to apply mangroves in climate model as one of the plant functional types.



포항공과대학교 기후시스템연구실

지도 교수: 국 종 성

고려대학교 환경생태공학부

조 규 리

1. Introduction

Mangroves (이하 맹그로브)는 열대 혹은 아열대 지역의 염생 습지에 서식하는 유일한 관목 혹은 교목의 일종이다. 그림 1 에서 보이는 것과 같이 맹그로브는 동남아시아, 남태평양, 호주, 인도 근해, 아프리카, 아메리카에 분포한다. 대서양-동태평양 지역보다 인도-서태평양 지역에 서식하는 맹그로브 종이 훨씬 다양하다. 전자에 서식하는 맹그로브는 12 종, 후자에 서식하는 맹그로브는 56 종이다. 맹그로브 숲은 서식지에 따라 canopy (캐노피) 높이가 매우 다양하다. 아열대 상부에서는 불과 2m 정도이지만, 열대지방에서는 30m 에 이르는 높은 숲이 형성된다.

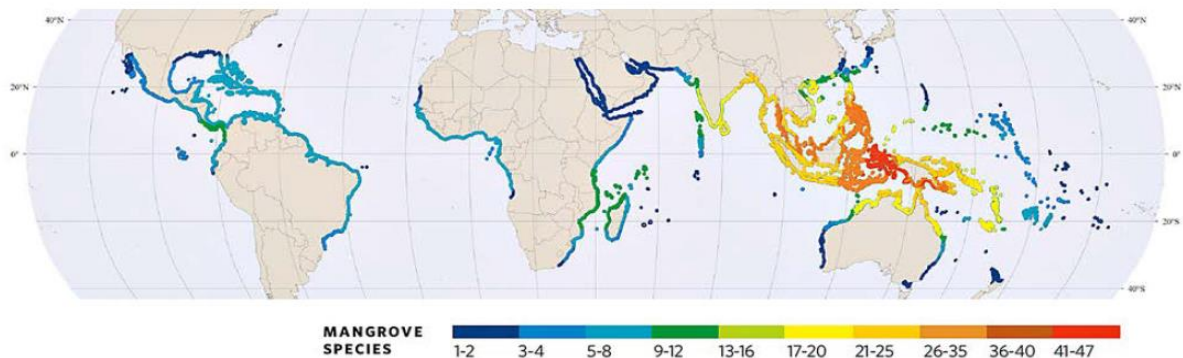


그림1 World map of the mangrove distribution zones and the number of mangrove species along each region (Deltares, 2014).

맹그로브 뿌리는 매우 독특한데, 일반적으로 알려진 뿌리의 모습과는 달리 중심 뿌리들이 넓게 퍼져있다. 이러한 뿌리 덕분에 강물에 실려온 퇴적물이 바다로 빠져나가는 것을 방지하며, 파도의 침식작용을 약화시킨다. 심지어는 태풍과 해일과 같은 자연재해를 막아주는 역할을 한다. 넓게 퍼져있는 중심뿌리에 수직방향으로 돌아난 뿌리들은 pneumatophore (호흡근)라고 한다. 이는 대기 중의 산소를 흡수하는 역할을 하기 때문에 맹그로브가 산소가 부족한 바닷물이나 조간대에서 살 수 있게 도와준다.

맹그로브는 생태계에 많은 영향을 준다. 맹그로브 숲은 사람들에게 아름다운 경관을 제공할 뿐만 아니라 뿌리에서 오염물질을 걸러주고 생물들에게 서식지를 제공한다. 광합성을 통해 대기 중 거대한 양의 이산화탄소를 흡수하고 맹그로브 가지와 줄기는 파도의 침식작용을 약화시키는 방파제 역할을 하여 해일의 힘을 약화시킨다.

최근 맹그로브의 탄소 저장 능력에 많은 관심이 모이고 있다. 연안에 서식하는 식물과 퇴적물이 저장하고 있는 탄소를 blue carbon (블루카본)이라고 한다. 연안생태계는 육상산림보다 면적은 좁지만 흡수하는 탄소 총량은 비슷하고 흡수 속도는 최대 50 배 빠르다. 최근 블루카본은 기후변화 대응을 위한 핵심 의제로 떠오르고 있다. 아직 정식 탄소흡수원으로 인정받지는 못했지만 제 16 차 유엔기후변화협약 당사국회의에서 국제 연구기관과 단체들이 블루카본 사업화 방안을 제시하는 등 국제사회에서 필요성과 타당성을 인정받고 있는 추세에 있다.

하지만 근 십여년 동안 맹그로브 서식지는 급속도로 감소하고 있다. 맹그로브 서식지를 위협하는 가장 큰 요인은 인간활동이다. 토지 변경, 필요 이상의 수확, 남획, 오염, 물 흐름의 퇴적과 변화

등이 주요 요인이다. 인간활동보다는 미치는 영향은 적지만 기후변화도 서식지 감소에 영향을 줄 수 있다. 기후변화로 인한 해수면 상승, 해수면 온도 상승, 강수량 감소, 그리고 산호초 감소가 그 예시이다.

이 보고서에서는 맹그로브를 land model 중 하나인 CLM (Community Land Model)에 포함시킬 수 있는 지표를 조사하였다.

2. Plants in Land Model

CLM 은 지구의 생지물리학적, 생지화학적 과정을 담고 있는 land model 로 NCAR Land Surface Model (NCAR LSM)에 탄소 순환, 식생 모형, 그리고 하천 유수 모형을 포함한 것이다. CLM3.0 부터는 Dynamic Global Vegetation Model (DGVM)와 결합되어 자연 식생 분포와 구조를 나타낸다. CLM-DGVM 에는 크게 Plant Geography, Plant Physiology, Biochemistry, Vegetation Dynamics 그리고 Biophysics 가 포함되어 있다. Plant Geography 에는 기후의 계절적 영향까지 고려한 생물권의 분포가 포함되어 있다. Plant Physiology 의 주된 목표는 Net Primary Production (NPP)를 고려하는 것이다. Vegetation Dynamics 은 식생 변화를 관찰하는 것으로 아직은 지표를 이용하여 단일 종 관찰에 기반한 좁은 지역 분석에만 적용된다는 한계가 있다. Biophysics 는 대기와 지표 사이의 에너지, 수증기, 그리고 운동량 교환을 고려한 것이다.

최근 들어 기후와 식생 사이의 피드백 과정이 중요하게 여겨진다. 기후 피드백이란 기후변화를 증폭시키거나 축소시키는 상호작용을 이르는 말이다. 그 중에서도 식생에 의한 과정을 기후-식생 피드백이라고 한다. 한 연구에 따르면 대기와 식물 특히 육상 생물권 사이의 반응이 매우 강하기 때문에 이를 통해 강수량과 지표 복사의 변동성을 최대 30%까지 설명할 수 있다고 한다. 따라서 식생과 관련된 지표를 기후 모형에 잘 적용하는 것이 중요하다. 특히 맹그로브는 탄소 저장 측면과 해일 경감 등 재난 관리에 중요한 역할을 하기 때문에 이를 기후모형에 고려해야 한다. 이는 온실가스 배출을 줄이는 '완화 (mitigation)'와 피해를 예방하고 줄이는 '적응 (adaptation)' 두 가지를 동시에 할 수 있는 대표적인 기후변화 대책이라고 할 수 있다.

하지만 아직은 기후변화에 대한 식생의 변화만 고려할 수 있어 기후변화와 식생의 단기적인 상호작용은 모델에서 고려하지 못한다는 한계가 있다. 또한, 식생과정과 육상-대기 교환 과정이 분리되어 있어 정확한 현상을 반영하지 못한다.

가장 최신 버전인 CLM5.0 에는 식생을 15 개의 plant functional types (이하 PFTs)로 분류한다. 이 중에서 맹그로브의 특성을 정확히 반영하는 PFT 는 존재하지 않는다. 표 1 을 확인해보면 15 개의 PFTs 중 맹그로브와 가장 비슷한 특성을 지닌 것은 Broadleaf evergreen tree - tropical (이하 BET Tropical)이다. 하지만 여러 연구 결과에 따르면 맹그로브는 열대우림보다 2~5 배 더 많은 탄소를 저장할 수 있는 등 열대우림과는 다른 특성을 지닌다. 따라서 맹그로브에 대한 지표를 연구하여 CLM 에 반영하여야 한다.

CLM에서 식생과 관련된 지표에는 Vegetation Composition, Vegetation Structure, Phenology and Vegetation buried by snow, Plant Hydraulics, CN pools, Plant Respiration, Carbon and Nitrogen Allocation, 그리고 Vegetation Phenology and Turnover 등이 있다.

표1 Plant functional types

Plant functional type	Acronym
Needleleaf evergreen tree – temperate	NET Temperate
Needleleaf evergreen tree - boreal	NET Boreal
Needleleaf deciduous tree – boreal	NDT Boreal
Broadleaf evergreen tree – tropical	BET Tropical
Broadleaf evergreen tree – temperate	BET Temperate
Broadleaf deciduous tree – tropical	BDT Tropical
Broadleaf deciduous tree – temperate	BDT Temperate
Broadleaf deciduous tree – boreal	BDT Boreal
Broadleaf evergreen shrub - temperate	BES Temperate
Broadleaf deciduous shrub – temperate	BDS Temperate
Broadleaf deciduous shrub – boreal	BDS Boreal
C ₃ arctic grass	•
C ₃ grass	•
C ₄ grass	•
C ₃ Unmanaged Rainfed Crop	UCrop UIrr
¹ C ₃ Unmanaged Irrigated Crop	UCrop Irr
² Managed Rainfed Unirrigated Crops	Crop UIrr
² Managed Irrigated Crops	Crop Irr

¹Only used if irrigation is active (Chapter 26). ²Only used if crop model is active (see Chapter 26 for list of represented crops).

3. Mangrove Characteristics

맹그로브는 대부분의 탄소를 대기로부터 얻어 유기탄소로 합성한다. 그 이외에도 땅 위 뿌리에 서식하거나 숲 기저부에 서식하는 미세조류로부터 탄소를 얻기도 한다. 상류나 주변 연안 지역의 물질 순환 과정 중에서도 일부 얻는다. 맹그로브는 염이 많고 산소가 부족한 환경에 살기 때문에 물과 증발산을 효율적으로 이용함으로써 수분 손실을 최소화하고 탄소를 최대로 얻는데 탁월한 능력을 가지고 있다.

맹그로브 잎의 평균 광합성 속도는 $12 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 로 일반적인 열대우림의 평균 광합성 속도 $7 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 보다 빠르다. 암호흡에 대한 연구는 많이 없지만, 암호흡은 맹그로브가 $0.6 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$, 열대우림이 $0.4 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 로 비슷하다고 볼 수 있다. 호흡에 대한 Gross Primary Production (GPP) 비율은 맹그로브 숲이 17.4, 열대우림이 14.3 이다. 맹그로브와 열대우림의 뿌리 호흡을 비교하면 맹그로브가 $0.5\sim 10 \text{ nmol CO}_2 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$, 열대우림이 $3\sim 55 \text{ nmol CO}_2 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 로 맹그로브의 뿌리 호흡 속도가 훨씬 느리다.

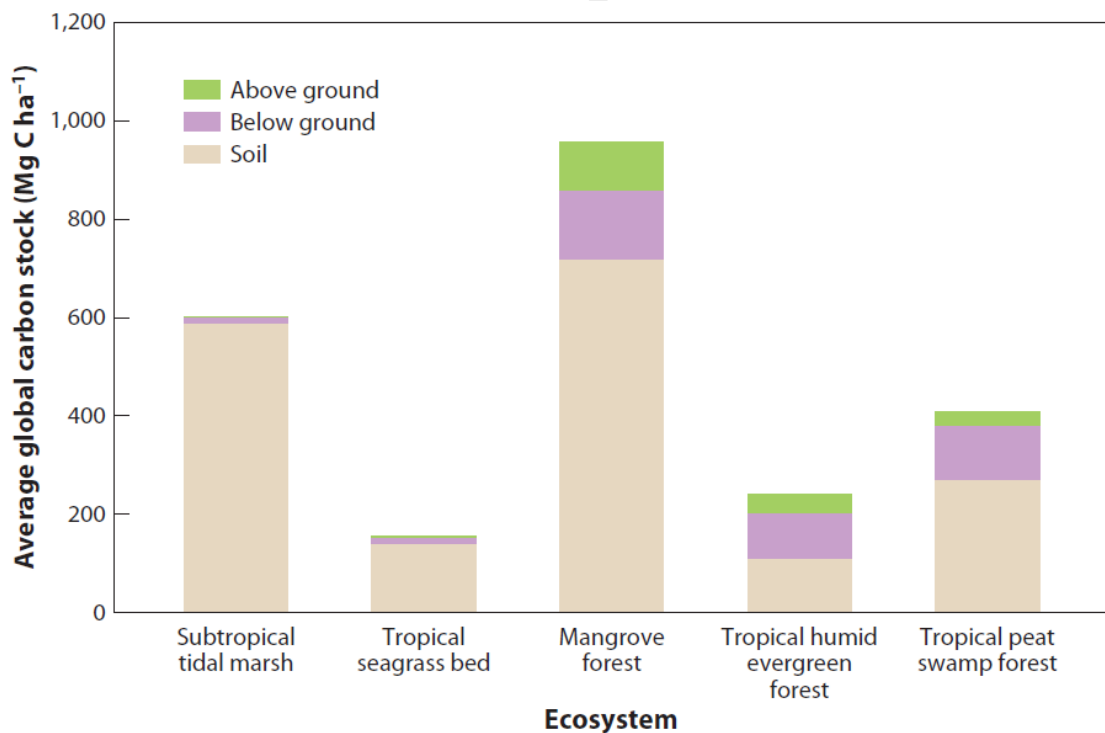
맹그로브는 다른 연안서식지에 비해서도 많은 탄소를 광합성을 통해 유기탄소로 합성한다. 맹그로브의 지상부 평균 NPP는 $11.1 \text{ Mg C ha}^{-1} \text{ y}^{-1}$ 인 반면, 해수 소택지는 $8.34 \text{ Mg C ha}^{-1} \text{ y}^{-1}$, 해초는 $1.04 \text{ Mg C ha}^{-1} \text{ y}^{-1}$, 거대조류는 $3.8 \text{ Mg C ha}^{-1} \text{ y}^{-1}$, 그리고 해양 식물성 플랑크톤은 $1.7 \text{ Mg C ha}^{-1} \text{ y}^{-1}$ 이

다. 산호초의 평균 NPP는 $10 \text{ Mg C ha}^{-1} \text{ y}^{-1}$, 열대우림은 $10.8 \text{ Mg C ha}^{-1} \text{ y}^{-1}$, 그리고 이탄 숲 습지는 $11.1 \text{ Mg C ha}^{-1} \text{ y}^{-1}$ 로 맹그로브와 비슷하거나 약간 적다.

맹그로브 숲은 다른 생태계보다 훨씬 많은 탄소를 저장하고 있다. 토양에 특히 많은 탄소를 저장하고 있다. 맹그로브의 경우 956 t C ha^{-1} 를 저장하고 있는 반면 열대우림은 241 t C ha^{-1} , 이탄 습지는 408 t C ha^{-1} , 해수 소택지는 593 t C ha^{-1} , 해초는 $142.2 \text{ t C ha}^{-1}$ 를 저장하고 있다.

표 2 를 보면 토양이 탄소를 저장하는데 가장 주요한 역할을 한다. 열대우림에서는 토양이 44%의 탄소를 저장하고 있지만, 이탄 습지에서는 70%, 맹그로브에서는 75%, 해수 소택지와 해초는 90%의 탄소가 토양에 저장되어 있다.

표2



열대우림의 경우 고정된 탄소의 70%가 호흡으로 대기 중으로 다시 방출되지만 맹그로브의 경우 뿌리가 탄소 저장에 상당한 기여를 하고 있다. 지하부의 뿌리들은 조류나 수면 아래의 이류에 의한 부식물의 손실을 효과적으로 상쇄시키는 역할을 한다. 열대우림은 상대적으로 얇은 부식질 층에서 부식물을 빠르게 분해하여 재활용하지만, 맹그로브는 깊은 층까지 숲 기저에 공존하는 뿌리와 미생물 사이의 강한 결합을 통해 부식물을 재활용하여 손실을 줄이고 에너지 비용을 최소화한다. 아래 그림 2 는 맹그로브에서 일어나는 탄소 순환을 도식화한 것이다.

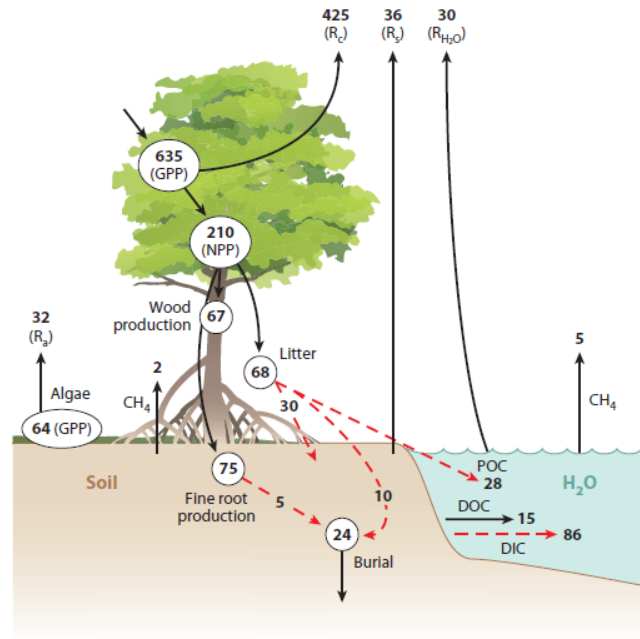


그림2

Budget of the major pathways of carbon flow through the world's mangrove ecosystems. Solid black arrows represent mean values based on numerous empirical data. Dashed red arrows represent either mean values estimated indirectly (by difference) or pathways suggested from the most recent literature. All values are in Tg C y^{-1} . The budget assumes a global mangrove area of $138,000 \text{ km}^2$ (Giri et al. 2010). Abbreviations: DIC, dissolved inorganic carbon; DOC, dissolved organic carbon; GPP, gross primary production; NPP, net primary production; POC, particulate organic carbon; R_a , algal respiration; R_c , canopy respiration; R_s , soil respiration; R_{H_2O} , waterway respiration.

하지만 아직도 탄소 순환 과정에서 뿌리 생산에 쓰이는 탄소의 비율에 대한 연구는 부족하다. 뿌리 성장을 실험한 일부 연구(*in situ*)에서는 1년에 뿌리가 18에서 1145 g DW m^{-2} 라고 하였다. 대부분의 연구들은 뿌리가 1년에 300에서 380 g DW m^{-2} 자라는 것으로 추정하고 있다.

맹그로브는 탄소를 지상부보다 지하에 더 많이 저장한다고 한다. 표를 보면 대부분의 맹그로브 숲이 지상부보다 지하에 많은 탄소를 저장하고 있음을 알 수 있다.

Table 1. Whole-ecosystem inventories of above- and below-ground carbon biomass and soil carbon for natural and replanted mangrove forests.

Location	Dominant species	Age (years)	Total (tC ha^{-1})	AGB (tC ha^{-1})	BGB and soil (tC ha^{-1})	Roots/AGB (tC ha^{-1})	Roots (tC ha^{-1})	Soil (tC ha^{-1})	Soil depth (cm)
Peninsular Malaysia	<i>Rhizophora apiculata</i>	80	2205	312	1893	NA	NA	NA	3800
	<i>R. apiculata</i>	18	1117	193	924	NA	NA	NA	4000
	<i>R. apiculata</i>	5	479	87	392	NA	NA	NA	2800
Southern Vietnam	<i>R. apiculata</i>	6	1179	54	1125	NA	NA	NA	3400
	<i>R. apiculata</i>	20	979	72	907	NA	NA	NA	2750
	<i>R. apiculata</i>	35	1904	153	1752	NA	NA	NA	3600
Southern China	<i>Kandelia candel</i>	NA	619	64	555	2.0	130	425	1850
	<i>K. candel</i>	NA	391	43	348	2.2	94	254	1900
	<i>K. candel</i>	NA	332	7	325	1.1	8	317	1175
Indonesia	<i>Avicennia marina</i>	NA	437	24	413	NA	NA	NA	80
	<i>Rhizophora stylosa</i>	NA	703	19	684	NA	NA	NA	62
	<i>Sonneratia caseolaris</i>	NA	654	28	626	NA	NA	NA	1450
Southern Thailand	<i>R. apiculata</i>	25	808	138	670	1.0	142	528	1900
	<i>R. apiculata</i>	5	579	20	559	2.9	57	502	800
	<i>Ceriops decandra</i>	3	600	29	571	4.4	127	444	1000
Western Australia	<i>R. stylosa</i>	NA	863	115	621	1.1	127	621	1500
	<i>A. marina</i>	NA	662	55	515	1.7	92	515	775
Queensland, Australia	<i>R. stylosa</i>	NA	2139	297	1842	1.1	312	1530	3500

AGB: Aboveground biomass; BGB: Belowground biomass; NA: Not available.
Data from [48,50–54,101].

맹그로브의 연간 탄소 매장 비율은 장소에 따라 다르지만 평균 연간 탄소 매장 비율은 $174 \text{ g C m}^{-2} \text{ y}^{-1}$ 로 추산된다. 한 연구에서는 2010년 맹그로브 서식지가 $138,000 \text{ km}^2$ 라고 하였는데, 이를 이용하면 연간 탄소 매장 속도가 24 Tg C y^{-1} 라는 것을 알 수 있다.

따라서 맹그로브 숲의 전지구적 규모의 유기탄소 토양 매장량과 분포를 아는 것이 중요하다. 그림3에 따르면, 1m 깊이의 평균 유기 탄소 저장량은 $361 \pm 136 \text{ Mg C ha}^{-1}$ (범위 $86\text{--}729 \text{ Mg C ha}^{-1}$)이다. 가장 탄소 저장량이 적은 지역인 방글라데시는 평균 127 Mg C ha^{-1} 이다. 그 다음으로 적은 지역은 중국 그리고 페르시아만과 홍해 근처 지역의 탄소 저장량은 각각 214와 233 Mg C ha^{-1} 이다. 가장 탄소 저장량이 많은 지역은 태평양 섬국가들로 평균 505 Mg C ha^{-1} 이다.

그러나 맹그로브 서식지는 시간이 흐를수록 계속 감소하고 있다. 여러 연구들에 의하면 1980년 맹그로브 서식지는 $188,000 \text{ km}^2$, 2005년은 $152,000 \text{ km}^2$, 2010년은 $138,000 \text{ km}^2$ 로 줄어들었다. 2000년부터 2015년까지 서식지 파괴로 인해 $30.4\text{--}122 \text{ Tg C}$ ($111\text{--}447 \text{ Tg CO}_2$)가 대기 중으로 방출되었다. 지역에 따라 진행되는 서식지의 감소 속도는 다르다. 예를 들어, 표3을 참고하면 2000년에서 2015년까지 인도네시아 지역의 맹그로브 서식지 감소는 전체 서식지 감소의 52%를 차지한다. 말레이시아와 미얀마 지역 역시 전체 서식지 감소의 25%를 차지한다. 과테말라 지역의 맹그로브 서식지 파괴가 가장 천천히 일어나고 있다 (감소 비율 0.9%–6.8%). 카리브해 섬들과 미국에서의 서식지 감소도 비교적 뚜렷하게 나타나고 있다.

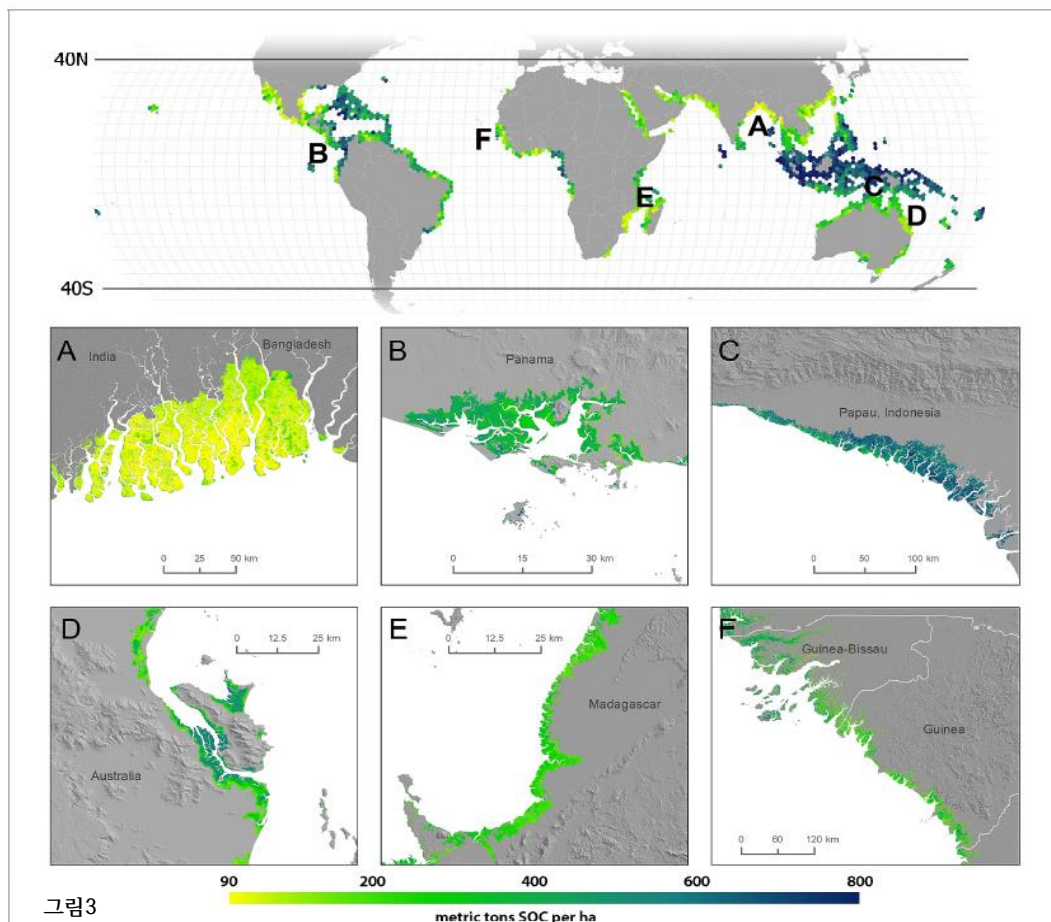
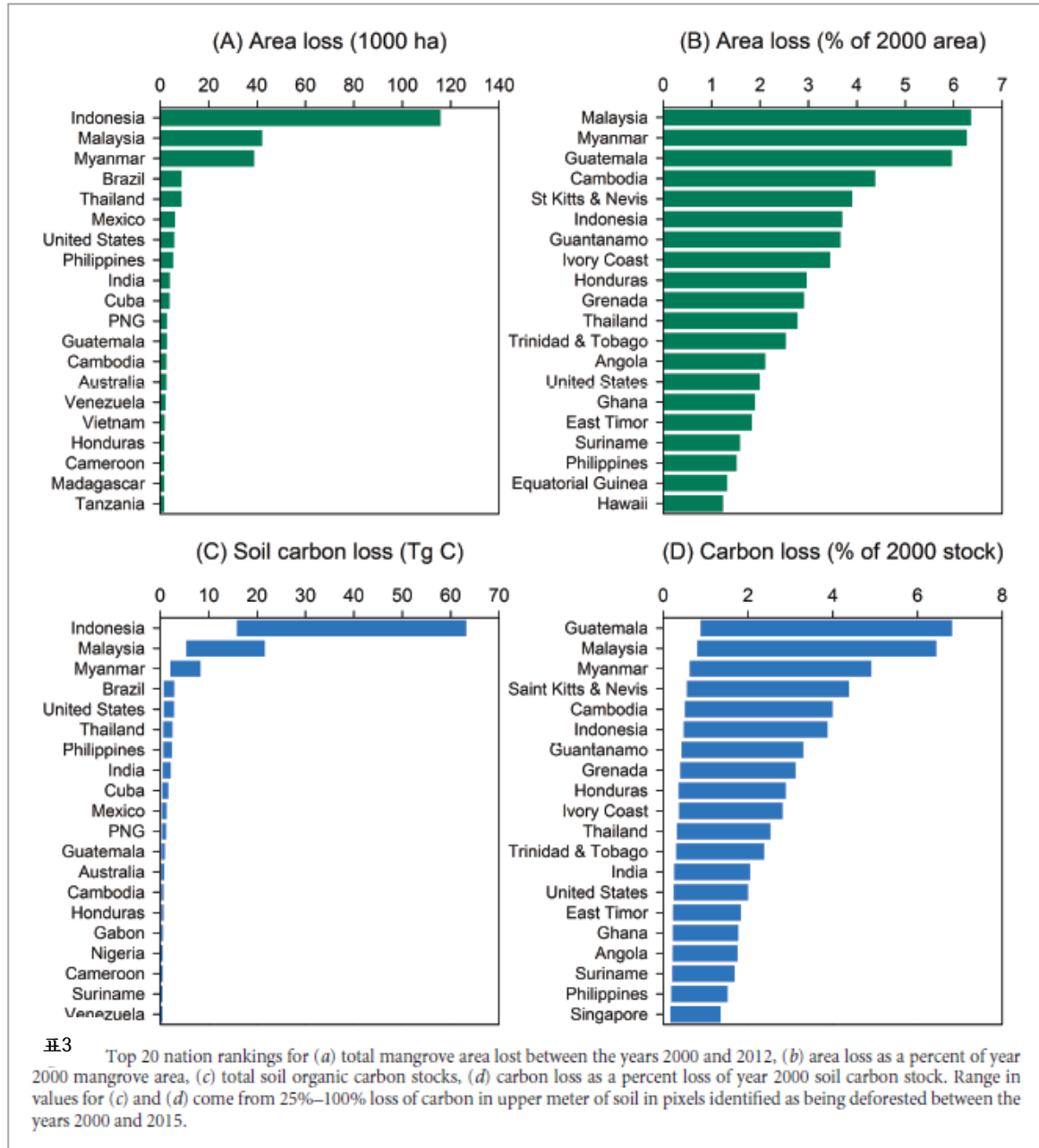


Figure 2. Global distribution of mangrove soil carbon stocks for the top meter of soil (hex bin area $\sim 19,000 \text{ km}^2$) and detailed maps (30 m resolution) for selected mangrove regions of the world: (1) Sundarbans along the India/Bangladesh border, (2) Bahía de los Muertos, Pacific coast of Panama, (3) southwest coast of Papua, Indonesia, (4) Hinchinbrook Island, Queensland, Australia, (5) Ambaro Bay, Madagascar, and (6) Guinea-Bissau and Guinea along the West African coast. In top panel, data presented as mean stock (Mg C ha^{-1}) for mangrove forest area only within each hex bin.

즉 2000~2015 년 동안 $2.0\sim 8.1 \text{ Tg C yr}^{-1}$ 의 탄소가 토양에서 방출된 것으로 보인다. 특히 인도네시아, 말레이시아, 그리고 미얀마 지역의 맹그로브 숲 토양에서 전체 맹그로브 토양 탄소 배출의 77%를 차지했다.



4. Discussion

2008~2016 년까지의 인간 활동 (화석연료와 토지 사용 등)에 의한 연간 평균 온실가스 배출량만 산출해보면 $10.9\pm 1.2 \text{ Tg C yr}^{-1}$ 이다. 2017년에는 온실가스 배출량이 약간 증가하여 인간 활동에 의한 온실가스 배출량은 $11.3\pm 1.2 \text{ Tg C yr}^{-1}$ 이다. 맹그로브 서식지 파괴로 인한 탄소 배출량은

2017 년 인위적인 탄소 배출량의 최소 17.5%, 최대 74.3%이다. 이는 맹그로브가 생태계에서 얼마나 중요한 탄소 저장고 역할을 하는지 보여준다.

지금까지는 열대우림과의 차이점에 초점을 맞추어 맹그로브의 광합성 속도, 호흡 속도, 탄소 매장 비율에 관하여 조사하였다. 뿐만 아니라, 인간 활동과 기후변화에 따른 서식지 감소 추세와 분포를 조사하였다.

하지만 모수화를 하기 위해서는 다음과 같은 조건들이 더 필요하다. 정확한 광합성 양을 측정하기 위해 캐노피 윗부분과 아랫부분의 길이를 알아야 한다. 맹그로브 캐노피의 높이가 높을수록 많은 탄소를 저장하고 있다. 이를 통해, 맹그로브 토양에 저장되어 있는 유기탄소 뿐만 아니라 목질부에 저장되어 있는 유기탄소 양도 비교적 정확하게 측정할 수 있을 것이다.

물순환을 고려하기 위해서는 맹그로브 뿌리 분포, 비중 등에 관한 지표를 분석, 개발하여야 한다. PHS (Plant Hydraulic Stress) routine은 Plant Hydraulic 지표에 필수적이다. 이는 다공성 매체를 흐르는 물에 운동에 관한 Darcy의 법칙에 향을 받은 식물의 물순환을 나타내는 지표이다. 물의 공급, 물의 소비 그리고 맹그로브의 water potential을 통해 PHS를 계산하기 때문에 맹그로브 뿌리에 대한 조사가 우선되어야 한다.

기후모델에 육상생태계(식생) 뿐만 아니라 연안, 습지 생태계도 고려되어야 한다. 연안, 습지 생태계가 탄소 저장 측면 등 기후변화에 많은 영향을 주지만 기후변화에 대한 연구는 대체로 해수면 상승에만 집중되어 있기 때문이다.

References

- Alongi, D.M., 2014. Carbon cycling and storage in mangrove forests, *Annual Review of Marine Science*, 6, pp.195-219.
- Alongi, D.M., 2012. Carbon sequestration in mangrove forests, *Carbon Management*, 3(3), pp.313-322.
- FAO, 2007. *The world's mangroves 1980-2005*. [pdf] Rome. Available at: <<http://www.fao.org/3/a1427e/a1427e00.pdf>> [Accessed 23 July, 2019].
- Gabler, C.A. et al, 2017. Macroclimatic change expected to transform coastal wetland ecosystems this century, *Nature Climate Change*, 7(3), pp.227-227.
- Green, J.K. et al, 2017. Regionally strong feedbacks between the atmosphere and terrestrial biosphere, *Nature Geoscience*, 10(6), pp.410-414.
- Giri, C. et al, 2011. Status and distribution of mangrove forests of the world using earth observation satellite data, *Global Ecology and Biogeography*, 20(1), pp.154-159.
- Lawrence, D. et al., 2018. *Technical Description of version 5.0 of the Community Land Model (CLM)*. [pdf] National Center for Atmospheric Research (NCAR). Available at: <www.cesm.ucar.edu/models/cesm2/land/CLM50_Tech_Note.pdf> [Accessed 23 July 2019].
- Omar et al, 2018. Carbon Balance and Management, *Carbon Balance and Management*, 13(21), pp.1-19.
- Sanderman, J. et al, 2018. A global map of mangrove forest soil carbon at 30m spatial resolution, *Environment Research Letters*, [pdf] Available at: <<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/aabe1c/pdf>> [Accessed 23 July 2019].
- Quéré, C.L. et al, 2017. Global Carbon Budget 2017, *Earth System Science Data*, 10, pp.405-448.
- 박희정, 2017. 블루카본, 새로운 탄소흡수원으로 주목. *월간 퓨처 에코*, [온라인] 11 월 15 일. <<http://www.ecofuturenetwork.co.kr/news/articleView.html?idxno=14650>> [2019 년 7 월 23 일 접속]