

나이테와 그 동위원소 조성이 프로세스 기반 지면모델 (ORCHIDEE-DOFOCO)의 검증에 이용될 가능성에 대한 연구

정지나^{1*}, Sebastiaan Luyssaert², Philippe Peylin², Jonathan Barichivich³, Valerie Deaux²

¹서울대학교, ²프랑스 환경과학연구소, ³영국 리즈대학교

Potential of Tree-Ring with and 13-C Compsotion of Tree-Ring for Examining a Process based Land Surface Model (ORCHIDEE-DOFOCO)

J. Jeong^{1*}, Sebastiaan Luyssaert², Philippe Peylin², Jonathan Barichivich³, and Valerie Deaux²

¹*Interdisciplinary Program in Agricultural and Forest Meteorology, Seoul National University*

²*Le Laboratoire des Sciences du Climat et l'Environnement, Gif-Sur-Yvette, France*

³*School of Geography, Woodhouse Lane, University of Leeds, United Kingdom*

I. 서 언

기후변화를 불러일으키는 대기 중 이산화탄소 증가는 전 지구 육지 생태계 모델을 이용한 탄소순환 추적 및 추정에 대한 연구와 그 필요성을 증가시키고 있으며(Sitch *et al.*, 2003) 그 정확도에 대한 요구 또한 증가되고 있다(Running *et al.*, 1999).

전 세계적으로 축적된 나이테 데이터는 전 지구 지면 모델을 지속적으로 발전시키는데 있어서 잠재력을 가지고 있다. 하나의 나이테는 그 나이테가 생성될 때의 기후 정보와 그에 대한 나무에 반응 그리고 탄소 축적량에 대한 기록이라고 볼 수 있다(Deslauriers *et al.*, 2003). 이 때문에 나이테는 탄소 고정량, 기후변화 그리고 그에 대한 나무의 반응에 대한 지표를 나무 크기에 따라 짧게는 수년부터 길게는 수백 년까지 재구축이 가능하다(Cook and Kairiukstis, 1990). 위에 언급한 지표들에 입각하여 봤을 때, 나이테 모델링은 모델링 그 자체로 우리의 이해를 증진시킬 수 있고, 또한 프로세스 기반 모델을 평가하고 제한하는데 사용될 수 있다.

하지만 위와 같은 모델 유효성 검증에의 우수성에도 불구하고 나이테 데이터는 전 지구 식생 모델의 검증에 잘 쓰이지 않고 있다. 몇몇 나이테 모델이 있으나 나이테 chronology를 목적으로 간단한 기후정보를 이용한 지역적 모델이 대부분이며(Hebda and Alfaro, 2000), 전 지구 수순환/탄소순환 모델의 하나로써 시뮬레이션 되는 경우는 드물다. 이에 본 연구는 프로세스 기반 전 지구 모델, ORCHIDEE-DOFOCO를 검증하는데 주안점을 두고 세 가지 목적을 가지고 진행되었다.

1. 나이테와 그 동위원소 모듈을 ORCHIDEE-DOFOCO에 적용시킨다.; 2. ORCHIDEE-DOFOCO가 Fontainebleau 오크 나무의 나이테 폭과 그 동위원소 변동을 시뮬레이션 할 수 있는지 테스트 한다.; 3. 모델 내의 파라미터들을 조정하여 Fontainebleau 오크 나무 관측치를 기준으로 최적화 가능한지 그 효용성을 살핀다.

* Correspondence to : vandefanel@naver.com

II. 재료 및 방법

2.1. 나이테 데이터

모델 최적화를 위한 관측 값은 프랑스의 Fontainebleau 숲에서 오크 나무 55 그루를 대상으로 관측된 값을 사용하였다. 나이테 코어는 수목 아랫부분에서 채취되었으며 채취된 코어들은 COFECHA software package를 이용하여 cross-dating 및 기타 유효성 검증이 이루어졌다 (Grissino-Mayer and Fritts, 1997). 채취된 중 큰 샘플에서 동위원소 분석을 위한 코어가 4 개 선택되었다. 각각의 링으로 나뉜 샘플은 갈아서 α -셀룰로오스 추출이 이루어졌고 추출된 셀룰로오스는 연소되어 분리된 이산화탄소로 탄소 동위원소 조성이 측정되었다. 동위원소 조성 결과는 전통적인 delta notation을 사용하여 표현하였다.

2.2. ORCHIDEE-DOFOCO

우리는 Krinner(2005)에 기술되어 있는, 전지구 생지화학 ORCHIDEE 모델을 사용하였다. 이 모델은 토양-식생-대기의 에너지, 물, 그리고 탄소의 순환을 30 분 간격으로 시뮬레이션 한다. ORCHIDEE-DOFOCO는 trunk version인 ORCHIDEE의 branch version으로 기존의 ORCHIDEE보다 여러 부분에서 향상되어 있다. 주요 향상점을 정리하면 다음과 같다.

- 1) 수목 및 수관 구조의 변화 : Trunk version에서는 단순한 직사각형으로 두 층의 목관과 수관으로 구분되었으나, DOFOCO에서는 이를 나무 하나하나가 현실에 가까운 수관과 목관 모양을 지니도록 시뮬레이션 되며, 또한 그 개개의 수목이 다양한 size class를 가지도록 모델 숲을 구성한다. 이 때 모델 숲 내의 수목 size class의 개수는 모델 전에 명시되도록 한다.
- 2) 수관의 다층화: 10개의 층
- 3) 토양층의 다층화: Two-bucket model -> 11층

2.3. 탄소 동위원소 모델링

동위원소 조성을 위한 모듈은 discrimination 계산을 위해 쓰이는 Farquhar *et al.*(1989)의 간단한 식을 이용하여 삽입되었다.

$$^{13}\Delta = a + (b - a)C_i/C_a \quad (1)$$

(a : 이산화탄소 확산 시에 발생하는 분별효과를 위한 상수 = 4.4 %; b : 탄소 고정 시에 RuBisCO에서 발생하는 분별효과를 위한 상수 = 27 %; C_i : 잎 내부 이산화탄소 농도; C_a : 대기 중 이산화탄소 농도)

2.4. 최적화를 위한 parameter 선택

총 네 가지 parameter가 pre-parameterization을 위해 선택되었다.

1) 각 ncirc (number of circumference)의 수목 수 분포(Initial distribution of size classes): ncirc를 명시할 때 그 분포 또한 명시하도록 되어있다. 본 연구에서는 수목의 크기가 커질수록 기하급수적으로 감소하는 패턴을 따르도록 설계하였으며 최적화 시에는 지수 곡선의 밑 값만 변화시켰다.

2) 각 size class에 탄소 할당을 위한 수목 크기의 역치 값(Sigma): ORCHIDEE는 이전 버전인 ORCHIDEE-FM 부터 모델 임목 전체의 NPP를 할당하는데 있어서 큰 나무일수록 더 많은 탄소를 할당하는 전략을 취하고 있다. 이 때 할당하는 식은 Deleuze 와 Dhote에 의해 성립된 식을 사용하며 그 식은 다음과 같다(Deleuze *et al.*, 2004).

$$\delta ba_i = \gamma/2 \times (\text{circ}_i - m\sigma + \sqrt{(m\sigma + \text{circ}_i)^2 - 4\sigma \times \text{circ}_i}) \quad (2)$$

(: 매년 기저면적 성장량; : i번째 나무의 지름; : 각각 기울기, 역치, smoothing 파라미터들)

이 때 탄소 할당량은 Fig. 1에서 표현한 바와 같으며 할당곡선 아랫부분의 면적은 NPP와 같다. 이 때, $\text{sigma} = \text{deleuze_a} + \text{deleuze_b} \times \text{median_circumference}$ 로 표현되며 deleuze_a와 deleuze_b는 Deleuze *et al.*(2004)에 의해 성립된 상수이다. 간단히 말해 sigma 값 보다 큰 circ class에 탄소를 주로 할당한다고 할 수 있다. 본 연구에서는 deleuze_a를 조정함으로 sigma값을 변형시켜 최적화를 시도하였다.

2.5. Self thinning

Self thinning은 모델 내에서 상수를 시뮬레이션 전에 명시하도록 되어 있다. 하지만 본 연구에서는 간단히 on/off 모드만을 적용하여 보았다.

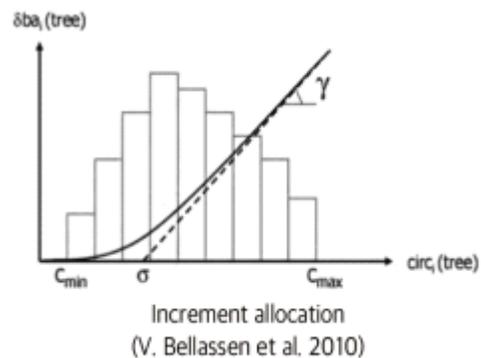


Fig. 1. 탄소 할당곡선(Bellassen *et al.*, 2010).

III. 결 과

3.1. 나이테 모델링 결과

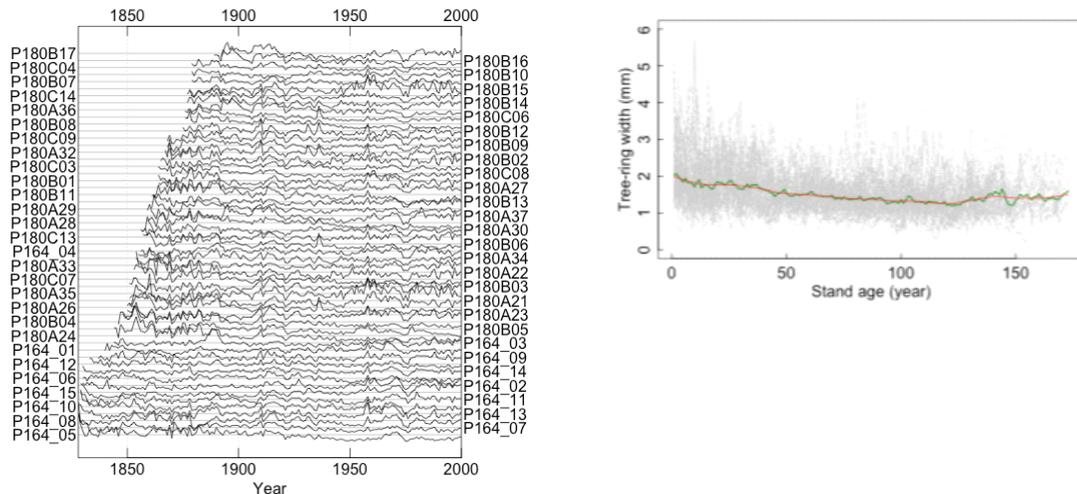


Fig. 2. (a) 연도별로 정리된 55개 수목 각각의 나이테 폭 관측값 (b) 좌측의 그래프를 나이 나이 순으로 정렬한 값과 그 평균값.

3.1.1. 관측자료 정리 및 디폴트 값을 이용한 초기 시뮬레이션

Fontainebleau 오크 나무는 100년에서 180년 정도의 나이를 가졌으며, 기후 변화에 대한 척도가 될 수 있는, 특정 년도에 나이테 폭이 커지고 작아지는 신호가 있었음을 알 수 있다. Age pattern 은 나무마다 차이가 있겠지만 임목 나이가 증가하며 나이테 폭이 얇아지는 패턴(Fritts, 2012)을 전체적으로 따르고 있다. 이론적으로는 보통 수목이 초반에 나이테 폭이 가파르게 증가한 뒤 천천히 감소하는 패턴을 보이지만 이 자료는 pith offset(나이테 core가 pith를 거치지 않았을 때를 대비한 보정작업)을 거치지 않았기 때문에 초반의 성장기가 보이지 않았으리라 예상된다.

초기 모델 구동 결과, ORCHIDEE- DOFOCO는 시간이 지날수록 증가하는 나이테 폭을 시뮬레이션 했다. 초반에 증가하다 15년 후 쯤까지는 감소하는 것으로 보였으나 그 이후로는 점점 증가하며 관측값과는 점점 멀어지는 패턴을 보였다. 원인으로 지적된 사항은 1) $ncirc$ 가 적어서 각각의 size class가 많은 NPP를 할당 받았기 때문; 2) $ncirc$ 가 적어서 큰 수목의 비율이 상대적으로 크고 때문에, ORCHIDEE- DOFOCO의 전략 상, 큰 size class에 너무 많은 탄소가 할당되어서; 3) σ value가 커서 큰 수목에의 탄소 집중 현상이 심화되었기 때문에; 4) Self thinning 때문에 너무 적은 수의 나무가 살아남아서 탄소를 할당받았기 때문에; 등으로 요약되었다. 이에 우리는 앞서 언급한 네가지 파라미터들을 조정함으로 실제치에 가까운 값을 얻을 수 있을지 테스트해보기 위해 manual simple parameterization을 시행, parameterization의 효용성을 검증해보았다.

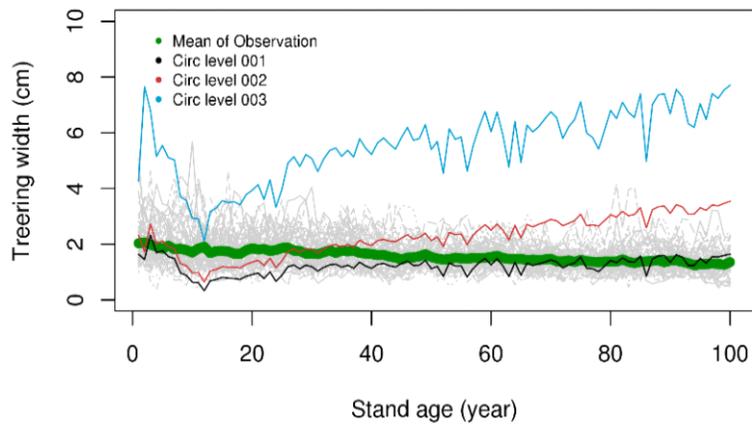


Fig. 3. ORCHIDEE-DOFOCO fontainebleau 100 년 동안의 나이테 시뮬레이션 결과 (최적화 전).

3.1.2. Simple parameterization 결과

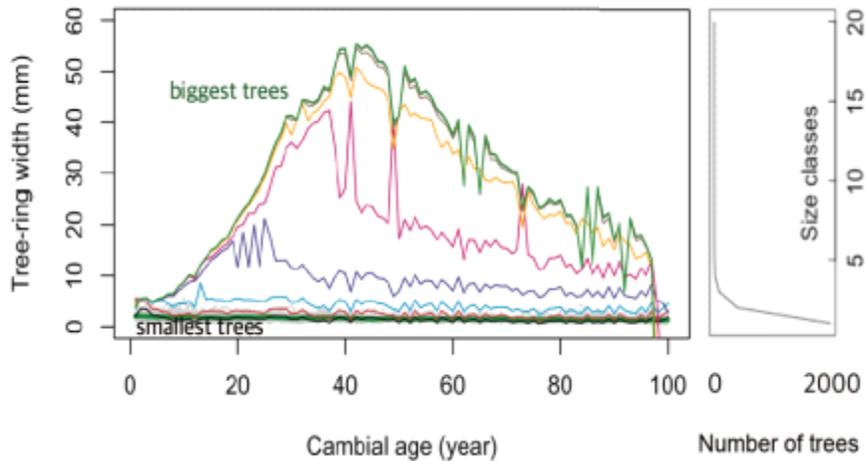


Fig. 4. ORCHIDEE-DOFOCO fontainebleau 100 년 동안의 나이테 시뮬레이션 결과 (최적화 후).

간단한 parameterization 결과 선택된 파라미터들로 수행된 시뮬레이션의 결과를 볼 수 있다. 나이테 폭 시뮬레이션 결과가 전체적으로 증가 후 감소를 보이는 패턴으로 우리가 구하고자 했던 패턴을 구동해내는데 성공할 수 있었다. 하지만 큰 size class들의 경우 실제 관측치가 1~2mm 인 것과 달리 1년에 최대 6cm나 자라는 이상 현상을 보이고 있다. 이에 대한 이해를 돕기 위해 Fig. 4의 그래프 오른쪽에 각 size class의 수목 개수의 분포에 대한 그래프를 함께 첨부하였다.

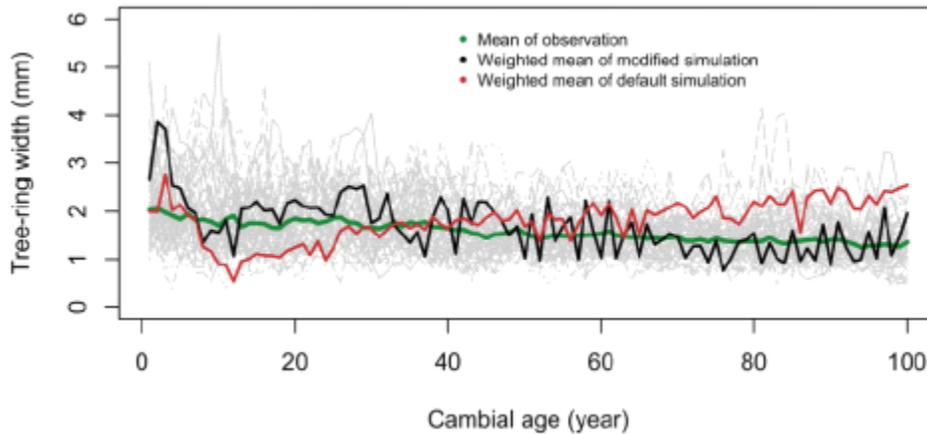


Fig. 5. 각 size class의 수목 개수로 가중 평균화 시킨 나이테 모델 값 (최적화 전/후)과 관측치의 비교.

초기 size class 분포를 기하 급수적 분포로 기술하였기 때문에 20 μm 의 경우 모델 숲에서 제일 작은 수목들이 75%를 넘게 구성하고 있으며 두 번째 작은 수목들이 20% 넘게 모델 숲을 구성하고 있다. 즉, circ level이 10만 넘어가도 모델 세계에서 확률 상 거의 존재하지 않는 수목이라고 할 수 있다. 이에 우리는 전체 size class를 다 가시화하기 보다는 각 size class의 수목 개수에 따라 가중 평균을 계산하여 관측값과 비교해 보았다. 그 결과 아직 다른 부분이 있었으나, 관측치와 많이 가까워진 것을 알 수 있었다. 초기 시뮬레이션의 가중 평균과 비교해보면 그 변화를 확실히 비교할 수 있다.

아직 현실에 맞지 않게 큰 나무들이 결과값으로 있고 시뮬레이션된 나이테 폭 값의 변동이 크다는 점에서 더욱 개선된 최적화 작업이 필요하다. 하지만 적어도 간단한 parameterization을 통해 상기의 파라미터들을 조정 함으로써 모델 값을 관측 값에 가깝도록 최적화가 가능하다는 점을 검증한 셈이다.

3.2. 나이테의 동위원소 조성 값 모델 구동 결과

동위원소 모듈을 ORCHIDEE-DOFOCO에 적용시켜 구동시켜 본 결과 수용 가능한 결과를 볼 수 있었다($r = 0.51$; Fig. 6). 전체적인 패턴은 관측 값과 모델 값이 비슷했지만 세세한 값까지 일치하진 않았다. 전체적인 패턴이 맞았다는 점에서 ORCHIDEE-DOFOCO는 기후에 따른 수목 잎의 stomatal response를 전반적으로 잘 계산해내고 있다는 평가를 내릴 수 있으나 좀 더 관측 값에 가까운 모델 값을 얻기 위해 최적화 작업이 필요하다. 특히 토양이 11개의 층으로 다층화 되면서 아직 토양 수분 분포에 대한 검증이 다각도로 이루어지지 않아, 나이테의 탄소 동위원소 조성을 이용한 최적화 작업은 11개 층의 토양 수분 값을 안정화 시키는 데 큰 역할을 할 것으로 기대하고 있다.

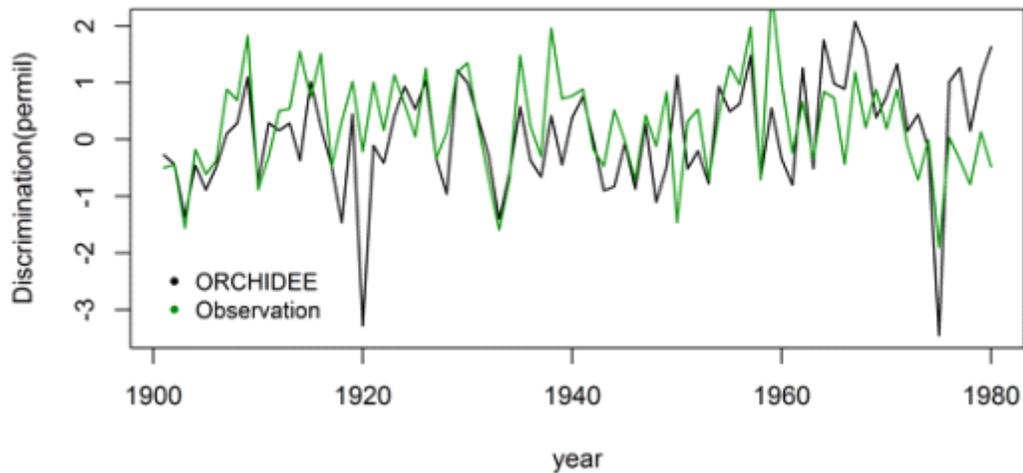


Fig. 6. 나이트 동위원소 모델 값과 관측 값 비교.

인용문헌

- Bellassen, V., G. Le Maire, J. Dhôte, P. Ciais, and N. Viovy, 2010: Modelling forest management within a global vegetation model—Part 1: Model structure and general behaviour. *Ecological Modelling* **221**(20), 2458-2474.
- Cook, E. R., and L. A. Kairiukstis, 1990: *Methods of dendrochronology: applications in the environmental sciences*, Springer Science & Business Media.
- Deleuze, C., O. Pain, J.-F. Dhôte, and J.-C. Hervé, 2004: A flexible radial increment model for individual trees in pure even-aged stands. *Annals of Forest Science* **61**(4), 327-335.
- Deslauriers, A., H. Morin, and Y. Begin, 2003: Cellular phenology of annual ring formation of *Abies balsamea* in the Quebec boreal forest (Canada). *Canadian Journal of Forest Research* **33**(2), 190-200.
- Farquhar, G. D., J. R. Ehleringer, and K. T. Hubick, 1989: CARBON ISOTOPE DISCRIMINATION AND PHOTOSYNTHESIS. *Annu. Rev. Plant Physiol. Plant Molec. Biol.* **40**, 503-537.
- Fritts, H. (2012), *Tree rings and climate*, Elsevier.
- Grissino-Mayer, H. D., and H. C. Fritts, 1997: The International Tree-Ring Data Bank: an enhanced global database serving the global scientific community. *The Holocene* **7**(2), 235-238.
- Hebda, J., and I. Alfaro, 2000: Modeling tree-ring growth responses to climatic variables using artificial neural networks. *Forest Science* **46**(2), 229-239.
- Krinner, G., N. Viovy, N. de Noblet-Ducoudré, J. Ogée, J. Polcher, P. Friedlingstein, P. Ciais, S. Sitch, and I. C. Prentice, 2005: A dynamic global vegetation model for studies of the coupled atmosphere biosphere system. *Global Biogeochem Cy* **19**(1).

- Running, S., D. Baldocchi, D. Turner, S. Gower, P. Bakwin, and K. Hibbard, 1999: A global terrestrial monitoring network integrating tower fluxes, flask sampling, ecosystem modeling and EOS satellite data. *Remote Sens Environ* **70**(1), 108-127.
- Sitch, S., B. Smith, I. C. Prentice, A. Arneth, A. Bondeau, W. Cramer, J. Kaplan, S. Levis, W. Lucht, and M. T. Sykes, 2003: Evaluation of ecosystem dynamics, plant geography and terrestrial carbon cycling in the LPJ dynamic global vegetation model. *Glob Change Biol.* **9**(2), 161-185.