스펙트럼 분석을 통한 증발산 역학의 이해

강민석[1, 2], 김준[2*]

[1]연세대학교 대기과학과/지구환경연구소, [2]서울대학교 조경•지역시스템공학부 복잡계과학연구실

Understanding of Evapotranspiration Dynamics through Spectral Analysis

M. Kang[1, 2], J. Kim[2*]

[1]Global Environment Laboratory & Department of Atmospheric Sciences, Yonsei University,

[2]Complex Systems Science Lab., Department of Landscape Architecture and Rural Systems Engineering, Seoul National University

(Correspondence: joon@snu.ac.kr)

1. 서 언

생태 수문 시스템은 열린 비평형 복잡계로 다양한 변수들과 이들을 연결하는 수많은 결합 과정들로 구성되어 있으며, 각 결합은 시스템의 상태와 환경의 변화 및 시공간 규모에 따라 변화한다 (Ruddle and Kumar, 2009). 생태 수문 시스템의 중심에 위치한 증발산 (Evapotranspiration, ET) 은 기상학적, 수문학적, 생물학적 과정들이 얽혀져서 나타나며, 관측된 증발산은 다양한 시간규모를 갖는 이러한 역학 과정들이 합쳐져서 만들어진 결과물이다. 따라서 증발산 역학을 이해하기 위해 관측 시계열 자체를 분석하는 것도 중요하지만, 어떤 시간 규모의 변동이 증발산의 전체 변동에 얼마만큼 기여하는지 확인할 필요가 있다. 스펙트럼 분석은 시계열 자료를 주파수 영역으로 옮겨서 각 주파수별 (혹은 주기별) 에너지 분포를 정량화함으로써 이러한 작업을 가능케 한다. 예를 들어 Baldocchi *et al*. (2001) 은 참나무 숲에서 관측한 증발산과 이산화탄소 플럭스의 푸리에 (Fourier) 분석을 통하여, 한 달 주기에 스펙트럼 공백이 있는 것을 확인하고, 그 주기에는 플럭스에 영향을 주는 의미 있는 생물학적, 기상학적 변화가 없다고 판단, 결측 자료를 메울 때 한 달 단위로 처리하도록 그 알고리즘을 개선해야 된다고 주장했다. Hong and Kim (2010) 은 광릉 활엽수림을 대상으로 수증기와 이산화탄소 플럭스의 모델링 결과를 파엽 (Wavelet) 분석하여, 현재 사용하고 있는 식생 역학 모형이 장마에 의한 엽면적지수의 감소를 제대로 모사하지 못하고, 이로 인해 플럭스 산측에 오차가 생김을 보였다. 본 연구에서는 푸리에 변환과 파엽 변환 방법을 사용하여, 광릉 활엽수림 플럭스 타워에서 2006년부터 2010년 까지 관측된 증발산을 스펙트럼 분석을 통해 각 시간 규모의 변동을 정량적으로 이해하고자 했다.

2. 재료 및 방법

2.1 관측지

KoFlux 광릉 활엽수림 플럭스 타워 관측지는 국립 수목원내 광릉 소유역에 위치한다. 활엽수림은 복잡 지형에 위치한 다양한 식생이 혼재 되어 있는 자연림으로 주 식생은 졸참나무 (*Quercus serrata*) 와 서어나무 (*Carpinus laxiflora*) 이고, 평균 군락 높이

는 약 18m, 최대 식생면적지수 (plant area index, PAI) 는 여름에 약 6 이다. 관측기간인 2006년부터 2010년까지 평균 기온은 11.3±0.4°C, 평균 연강수량은 1482±156mm, 평균 연적산 일사량은 4651±168 MJ m^{-2} 이다.

2.2 플럭스 관측 및 자료 처리

증발산은 2006년부터 2010년까지 광릉 활엽수림 40 m 플럭스 타워에서 3차원 초음파 풍향 풍속계 (Model CSAT3, Campbell Scientific Inc., Logan, UT, USA) 적외선 기체 분석기 (Model LI-7500, Li-Cor Inc., Lincoln, NE, USA) 에디공분산 시스템으로 관측된 자료를 사용하였다. 관측된 증발산은 KoFlux 표준화 프로그램을 사용하여 처리하였다 (Hong *et al*., 2009).

2.3 푸리에 (Fourier) 변환

본 연구에서는 이산 푸리에 변환 알고리즘을 사용하여 푸리에 변환을 수행하였다 (Wilks, 2006). 계산량이 월등히 적어 푸리에 변환에 많이 쓰이는 고속 푸리에 변환 (fast fourier transform, FFT) 알고리즘 대신 이산 푸리에 변환 알고리즘을 사용한 이유는 본 연구에서 다루는 시계열 자료의 총 개수가 2의 제곱승수가 아니기 ($2^{16}<87684<2^{17}$) 때문이다. 예를 들어 본 연구에서 고속 푸리에 변환을 사용할 경우, 1년 주기 (30분 자료 17520개에 해당하는 주기) 와 그 주기가 갖는 에너지 스펙트럼이 정확히 계산되지 않고, 341일 주기 (30분 자료 2^{14}(=16384)개에 해당하는 주기) 와 그 주변 주기들로 에너지 스펙트럼이 분산되어 나타나는데, 이러한 현상은 정량적인 스펙트럼 분석을 어렵게 만든다.

2.4 파엽 변환 (Wavelet transform)

본 연구에서는 Grinsted *et al*. (2004) 이 개발한 파엽 분석 도구를 사용하여 파엽 변환을 수행하였다. 모 파엽 기저 함수 (mother wavelet basis function) 로는 Morlet 파엽을 선택하였다. 푸리에 변환과는 달리 변환 후에도 시간에 대한 정보가 사라지지 않아 각 주기의 에너지 스펙트럼이 시간의 흐름에 따라 어떻게 발달해 나가는지 파악할 수 있다.

3. 결 과

Fig. 1은 2006년부터 2010년까지 관측된 잠열플럭스의 시계열과 그 시계열을 푸리에 변환한 결과를 보여준다. 연구기간 동안 잠열플럭스는 최대 631 W m^{-2}, 최소 −100 W m^{-2}, 그리고 평균 29 W m^{-2} 이었다. 주파수 영역에서 스펙트럼이 최대가 되는 주기와 그 때의 변동 진폭을 저주파수 (장주기) 영역부터 살펴보면, 1년 주기의 진폭이 34 W m^{-2}, 반년 주기의 진폭이 7 W m^{-2}, 4개월 주기의 진폭이 5 W m^{-2}, 3개월 주기의 진폭이 4 W m^{-2}, 24시간 주기의 진폭이 37 W m^{-2}, 12 시간 주기의 진폭이 17 W m^{-2}, 6 시간 주기의 진폭이 3 W m^{-2} 이었다. 여기서 하루 이하의 스펙트럼 정점들을 보면 그 주위

의 주파수들이 정점보다는 약간 작은 진폭을 가짐을 확인할 수 있으며, 이들을 고려하면 24시간과 12시간 주기의 변동이 전체 증발산 변동의 상당부분을 차지함을 알 수 있다. 스펙트럼 정점이 나타나는 각 주기들과 증발산 변동을 연결시켜 생각해보면, 먼저 1년 주기 증발산 변동 경우, 지구 공전에 의한 태양 고도 변화에 따라 여름에 최고, 겨울에 최저를 보이는 일사 및 기온 변동과 관련 있고, 반년 주기 변동의 경우 생장기 (4월 중순 ~ 9월 중순) 와 비생장기로 나뉘는 식물 계절학과, 4개월 주기의 경우 몬순 기후에 의해 비가 빈번히 내리는 풍수기 (6월 ~ 9월) 와 (몬순 전, 몬순 기간, 몬순 후의 3 주기로 나뉨), 3개월 주기의 경우 봄, 여름, 가을, 겨울 계절별로 구분되어 나타나는 증발산의 특징과, 24시간과 12시간 주기 변동의 경우 태양의 뜨고 짐과 관계가 깊다. 이런 결과는 증발산과 우리가 관심 있는 조절 인자 간의 관계를 볼 때, 어떤 시간 규모에서 시스템을 바라봐야 하는지 제안해준다. 예를 들면, 몬순과 증발산의 관계를 보고 싶으면 4개월 적산 증발산과 강수의 관계를 살펴보는 것이 효과적인 접근방법일 것이다. 그러나 푸리에 변환의 경우, 변환과정에서 시간에 대한 정보가 사라지기 때문에 각 주기의 변동이 언제 우세하게 나타나는지 확인할 수 없다. 이런 단점을 극복하기 위한 방법이 파엽 분석이며, 파엽 변환을 통해 에너지 스펙트럼이 시간과 주파수 영역에서 어떤 분포를 갖는지 확인할 수 있다.

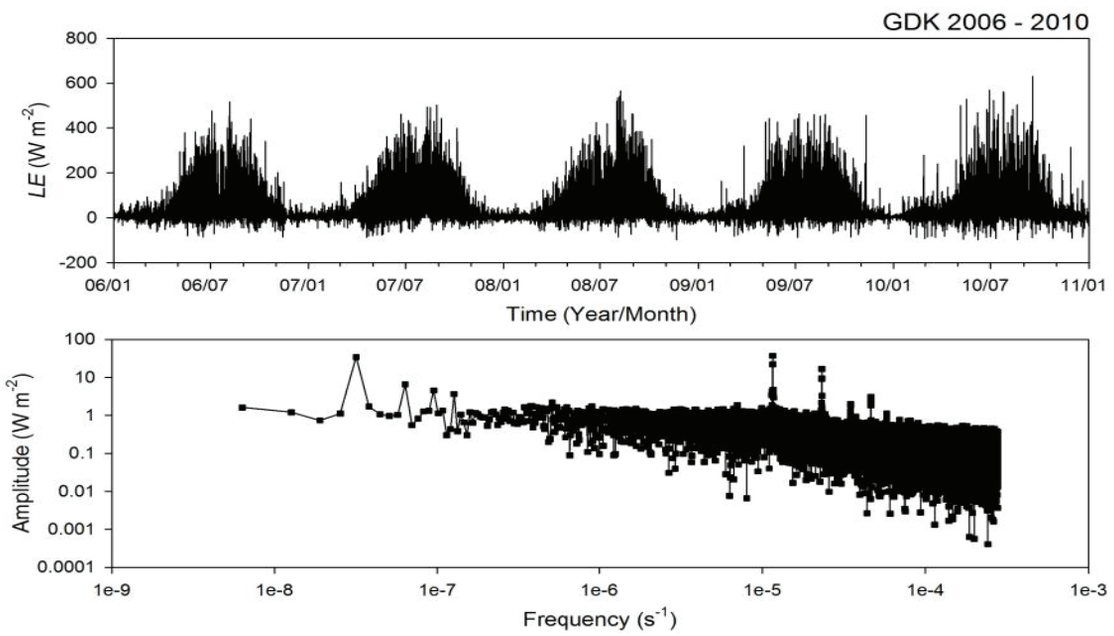

Fig. 1. Time series of the observed latent heat flux (*LE*, top) and its spectrum (bottom).

Fig. 2는 2006년부터 2010년까지 관측된 잠열플럭스의 시계열을 파엽 분석한 결과를 나타낸다. 반년 이상의 주기들은 거의 대부분의 시기에 비슷한 에너지 분포를 가지고 있는 반면에 3개월 미만 주기들은 생장기에 비생장기보다 더 큰 에너지 분포를 보였다. 우리가 기대할 수 있듯이, 3개월 미만 주기들의 변동은 생장기에 더 크게 발달함을 파엽 분석을 통해 확인할 수 있다. 이처럼 파엽 변환은 푸리에 변환이 제공하지 못하

는 시간의 변화에 따른 주기별 에너지 스펙트럼의 변화에 대한 정보를 제공해준다.

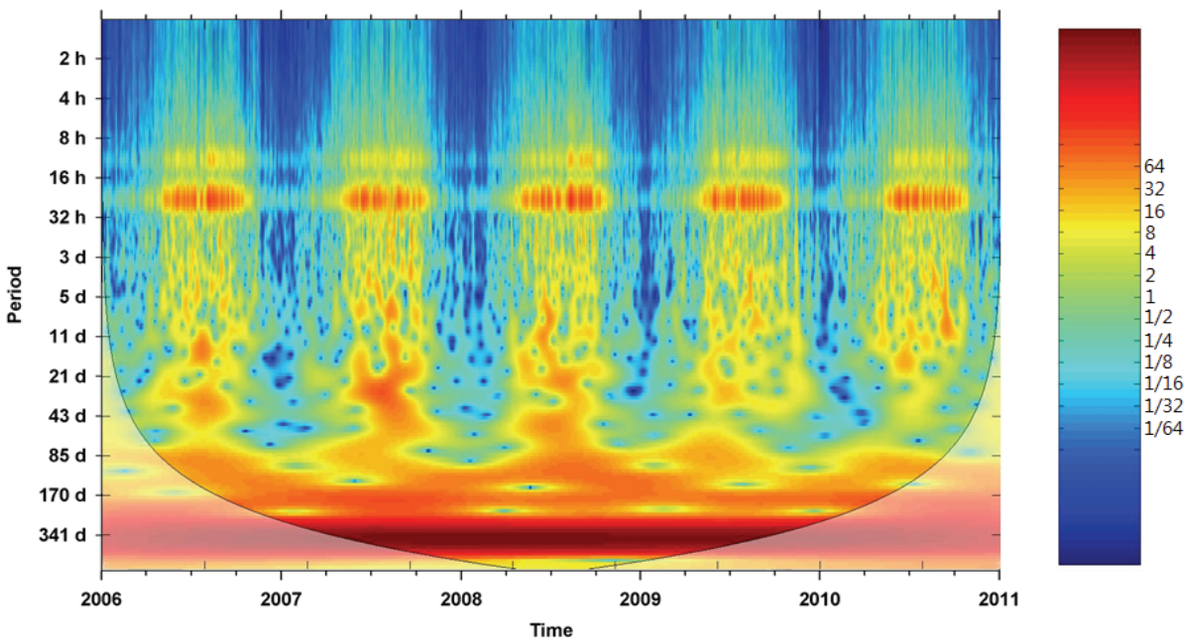

Fig. 2. Wavelet power spectrum of evapotarnspiration (ET). The shaded area indicates the cone of influence where edge effects might distort the results.

사 사

본 연구는 기상청 기상지진기술개발사업단 (과제명: 3차원 입체 온실가스 감시기술 개발) 의 지원으로 수행되었으며, 관측자료는 한국연구재단의 지원을 받아 구축된 CarboEastAsia - A3 Foresight Program 및 KoFlux 의 데이터베이스를 사용하였다.

인용문헌

Baldocchi, D. D., E. Falge, and K. Wilson, 2001: A spectral analysis of biosphere–atmosphere trace gas flux densities and meteorological variables across hour to multi-year time scales. *Agricultural and Forest Meteorology*, **107**, 1–27.

Grinsted A, J. C. Moore, and S. Jevrejeva, 2004: Application of the cross wavelet transform and wavelet coherence to geophysical time series. *Nonlinear Processes in Geophysics,* **11**, 561–566.

Hong, J., and J. Kim, 2010: Impact of the Asian monsoon climate on ecosystem carbon

and water exchanges: a wavelet analysis and its ecosystem modeling implications. *Global Change Biology*, doi: 10.1111/j.1365-2486.2010.02337.x

Kwon, H., J. Lim, Y. Byun, J. Lee, and J. Kim, 2009: Standardization of KoFlux eddy covariance data processing. *Korean Journal of Agricultural Forest Meteorology*, **11**, 19–26. (in Korean with English abstract)

Ruddell, B. L., and P. Kumar, 2009: Ecohydrologic process networks: 1. Identification, *Water Resource Research*, **45**, W03419, doi:10.1029/2008WR007279.

Wilks, D. S., 2006: S*tatistical Methods in the Atmospheric Sciences* (2nd ed.). Academic Press, 627pp.