

온대활엽수림 생태수문계의 과정망: 복잡계 관점

윤주열¹ · 김세희² · 강민석³ · 조천호⁴ · 천정화⁵ · 김 준^{1,2,3*}
¹서울대학교 생태조경 · 지역시스템공학부, ²서울대학교 협동과정 농림기상학전공
³국가농림기상센터, ⁴국립기상연구소, ⁵산림과학원 산림보전부
(2014년 9월 27일 접수; 2014년 9월 29일 수정; 2014년 9월 29일 수락)

Process Networks of Ecohydrological Systems in a Temperate Deciduous Forest: A Complex Systems Perspective

Juyeol Yun¹, Sehee Kim², Minseok Kang³, Chun-Ho Cho⁴,
Jung-Hwa Chun⁵ and Joon Kim^{1,2,3*}

¹Department of Landscape Architecture and Rural Systems Engineering, Seoul National University,
1, Gwanak-ro, Gwanak-gu, Seoul 151-921, Korea

²Interdisciplinary Program in Agricultural & Forest Meteorology, Seoul National University,
1, Gwanak-ro, Gwanak-gu, Seoul 151-744, Korea

³National Center for AgroMeteorology, 1, Gwanak-ro, Gwanak-gu, Seoul 151-744, Korea

⁴National Institute of Meteorological Research, Korea Meteorological Administration, Jeju 697-845, Korea

⁵Department of Forest Conservation, Korea Forest Research Institute, 57, Hoegi-ro,
Dongdaemun-gu, Seoul 130-712, Korea

(Received September 27, 2014; Revised September 29, 2014; Accepted September 29, 2014)

ABSTRACT

From a complex systems perspective, ecohydrological systems in forests may be characterized with (1) large networks of components which give rise to complex collective behaviors, (2) sophisticated information processing, and (3) adaptation through self-organization and learning processes. In order to demonstrate such characteristics, we applied the recently proposed 'process networks' approach to a temperate deciduous forest in Gwangneung National Arboretum in Korea. The process network analysis clearly delineated the forest ecohydrological systems as the hierarchical networks of information flows and feedback loops with various time scales among different variables. Several subsystems were identified such as synoptic subsystem (SS), atmospheric boundary layer subsystem (ABLS), biophysical subsystem (BPS), and biophysicochemical subsystem (BPCS). These subsystems were assembled/disassembled through the couplings/decouplings of feedback loops to form/deform newly aggregated subsystems (e.g., regional subsystem) - an evidence for self-organizing processes of a complex system. Our results imply that, despite natural and human disturbances, ecosystems grow and develop through self-organization while maintaining dynamic equilibrium, thereby continuously adapting to environmental changes. Ecosystem integrity is preserved when the system's self-organizing processes are preserved, something that happens naturally if we maintain the context for self-organization. From this perspective, the process networks approach makes sense.

Key words: Process network, Complex system, Information theory, Ecohydrological system, Feedback loop, Self-organization



* Corresponding Author : Joon Kim
(joon@snu.ac.kr)

I. 서 론

생태계를 새로운 시각으로 바라보려는 여러가지 노력들이 주목을 받고 있다. 그 중의 하나가 생태계를 복잡계(complex systems)의 관점에서 바라 보는 것이다. 복잡계란 시스템을 구성하고 있는 요소들이 상호 작용을 통해 네트워크를 형성하여 집단적인 반응을 하며, 복잡정교한 정보 처리를 수행하고, 자기-조직화(self-organizing) 과정을 통해 변화에 적응해 가는 시스템을 말한다(Mitchell, 2009). 다양한 생물리 및 생지화학 과정들이 계층적(hierarchical) 구조를 이루어 역동적으로 환경 변화에 반응하며 또 적응하는 산림의 생태수문계는 복잡한, 열린 소산계(dissipative system)로 볼 수 있다(Kumar, 2007; Ruddell and Kumar, 2009). 따라서, 고립되거나 닫힌 계와는 달리, 주변 환경과 에너지와 물질의 교환이 일어날 뿐만 아니라 정보의 교환이 함께 일어난다(e.g., Jorgensen *et al.*, 2007). 즉, 생태수문계를 구성하는 여러 요소들이 상호 작용을 통해 다양한 과정들(processes)에 관여하고, 이들이 서로 연결되어 망(network) 구조를 이루며, 정보의 교환을 통해 망의 내부 구조를 조직화함으로써 생태수문계의 거시적인 상태(macroscopic state)를 결정하게 된다는 것이다.

최근에 들어서, 과정망(process networks)이 복잡계의 상태를 이상적으로 잘 나타낼 수 있음이 제안되었다. 과정망이란 서로 다른 요소들 간의 물질, 에너지 및 정보의 흐름의 크기와 방향을 나타내는 되먹임 고리들(feedback loops)과 이와 관련된 시간 규모들의 망을 뜻한다(Ruddell and Kumar, 2009). 다시 말해서, 이 과정망 접근법의 특징은 강제(forcing)와 되먹임의 상호결합으로 인해 발생하는 계의 창발적(emergent) 특성을 그려내기 때문에, 상황에 따라 계의 구조와 상태가 어떻게 반응하고 적응하는지를 보여 줄 수 있다는 점이다. 실례로, Ruddell and Kumar (2009)는 미국 중서부 지역의 옥수수-콩밭의 미기상학적 관측 자료를 이용하여 각 기간의 생태수문계의 상태와 자기-조직화 과정을 그림으로 나타내어 과정망 분석의 유효성을 보여주었다. Yun *et al.* (2014)은 과정망 접근법을 온대 활엽수림의 생태수문계에 적용하여, 여름 몬순 기간동안 장마 발생에 따라 생태수문계의 상태가 변화할 뿐 아니라, 자기-조직화 과정을 통해 정보 흐름의 결합 형태, 방향과 크기, 그리고 관련

시간 규모가 달라짐을 보였다. 또한, 이러한 자기-조직화 과정이 유지되어야만 생태계의 건전성이 유지되고 지속가능한 관리가 가능해질 수 있음을 지적하였다.

이 총설의 목적은 복잡계의 관점에서 접근한 ‘과정망’ 연구방법을 소개하는데 있다. 그리고 이 방법의 적용성을 사례분석을 통해 제시함으로써, 환경에 따라 변화하고 적응하는 산림의 생태수문계의 상태가 다양한 과정망으로 표현될 수 있음을 보이고자 하였다. 광릉수목원에 위치한 활엽수림을 대상으로, 생태수문계를 나타내는 주요 변수로 CO₂ 플럭스, 에너지 플럭스, 증발산, 기상변수 등 9개의 요소들을 고려하였다. 이들의 시계열은 Korea Flux Monitoring Network (KoFlux)의 하나인 광릉 활엽수림 타워(GDK)에서 관측된 2008년 한 해의 자료를 사용하였다. 총설의 구조는 다음과 같이 구성하였다. 서론에서는 범칙보다는 과정을 더 중시하는 복잡계 관점의 패러다임 전환과 과정망 연구 방법론을 제시하게 된 배경 및 연구 목적을 소개하였다. ‘방법 및 재료’에서는 과정망 연구방법의 기본 원리, 계산 절차 및 과정망 묘사 방법을 요약하여 설명하였다. 또한 관측지에 대한 소개와 에디공분산 자료의 처리 방법 등을 간략히 설명하였다. ‘결과 및 토의’에서는 실제 사례를 들어, 네트워크 행렬 결과를 바탕으로 제시된 순서에 따라서 과정망을 체계적으로 그려보고, 결과 및 관련된 질문들을 통해 함축적인 의미를 살펴보았다. 더불어, 다양한 환경 조건의 10개 기간을 선정하여 각 기간의 상태와 과정망의 하부계 특징 및 자기-조직화 관련 정보를 요약하여 표로 제시하였다.

II. 방법 및 재료

2.1. 과정망(Process network) 방법론

생태수문계를 네트워크로 표현할 수 있다고 가정하면, 계(system)를 구성하고 있는 다양한 구성 요소들 각각을 네트워크를 구성하는 노드(node)로 볼 수 있다. 이러한 노드들이 서로 연결되어 하나의 과정(process)을 이루고, 링크(link)들에 의해 연결된 다양한 과정들의 결합과 되먹임 고리들(feedback loops)의 집합을 ‘과정망(process network)’ 이라고 정의한다(Barabasi, 2002; Ruddell and Kumar, 2009). 노드들과 이들이 링크를 통해 형성하는 하부계(subsystem)들과 과정들 사이의 정보 흐름은 시간에 따라 스스로 변화할 뿐 아니라,

환경의 변화에 적응하면서 독특한 링크들을 생성/차단하는 자기-조직화(self-organization) 과정을 통해 생태수문계 내부의 다양한 결합과 되먹임 과정을 끊임없이 변화시킨다(Ruddell *et al.*, 2013; Yun *et al.*, 2014).

이러한 정보 흐름을 그려내기 위해서, Ruddell and Kumar (2009)는 Shannon의 정보이론을 바탕으로 (Shannon, 1948). ‘상호 정보(mutual information, I)’와 ‘이전 엔트로피(transfer entropy, T)’의 두 가지 확률 개념을 도입하였다. 상호정보는 두 변수 간의 정보가 불확실성을 감소시키는 정도를 의미한다. 따라서, 두 변수 간의 관계성이 높을수록 상호 정보가 많아지

며, 상관관계가 없는 경우에는 상호 정보가 0이 된다. 그러나 상호 정보는 두 변수 간의 정보 흐름의 방향을 알려주지는 못한다. 두 변수가 교환하는 정보의 양뿐 아니라 방향과 시간 지연까지 고려하려면, Schreiber (2000)가 제시한 이전 엔트로피를 사용할 수 있다. 이전 엔트로피는 변수 간의 비선형적 관계뿐만 아니라 인과 관계를 파악하는데 있어서 기존의 상관분석 방법들보다 우수하다. 여기서는 상호 정보와 이전 엔트로피를 계산하는 과정과 이들을 사용하여 과정망을 그려내는 방법을 단계별로 제시하였으며, 이해를 돕기 위해서 전 과정을 Fig. 1에 모식도로 나타내었다.

2.1.1. 시계열 자료 및 기간 선정

활엽수림의 생태수문계를 나타내는 주요 변수들을 먼저 선정한 후, 이들의 1년간 시계열자료를 확보하였다. 주요 변수로는 총일차생산(GPP), 생태계 호흡(RE), 현열플럭스(H), 잠열플럭스(LE), 전천일사(R_g), 강수(Precip), 대기압력(P_a), 포차(VPD), 대기온도(T_a)의 9개 요소들을 고려하였다. 이들의 시계열은 KoFlux 관측망의 하나인 광릉 활엽수림 타워(GDK)에서 관측된 2008년 한 해의 자료를 사용하였다. 생태수문시스템의 상태 변화를 다양하게 그려내기 위하여, 일 년의 기간을 식물계절학적 변화(생장기간, 엽면적 등)와 수문학적 변화(강수량, 강수일수 및 강도 등)를 고려하여 총 10개의 기간으로 나누어 과정망 분석을 수행하였다. 각 기간의 특징은 결과 및 고찰에 정리하였다. 이전 엔트로피를 계산하기 위해서는 연속적인 시계열 자료가 필요하기 때문에 모든 자료는 결측 자료의 보안을 위해 빈 자료 메우기를 수행하였다(Kang *et al.* 2014).

2.1.2. 시간 규모와 자료의 선처리(Pre-processing)

시계열의 변동은 밤과 낮, 일, 계절 및 연 주기 등의 다양한 시간 규모의 변동들이 합쳐져서 나타난다. 변동을 초래하는 지배적인 시간 규모는 스펙트럼 분석을 통해 분리해낼 수 있는데, CO₂ 플럭스의 경우, 1년, 6개월, 3개월 등을 포함한 하루 이상의 주기들이 대체로 전체 변동의 70% 정도를 설명할 수 있다(e.g., Baldocchi *et al.*, 2001). 반면에, 특정한 주기를 보이지 않는 24시간 이내의 시간 규모에 해당하는 나머지 30%는 복잡성으로 인해 그 변화를 설명하기가 어렵다. 따라서, Ruddell and Kumar(2009)와 마찬가지로

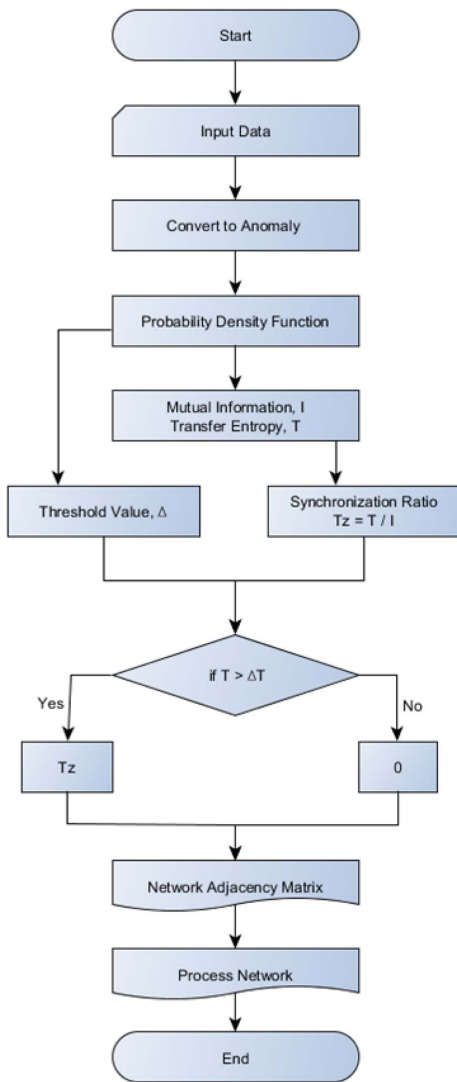


Fig. 1. Flow chart for constructing process networks.

지로, 하루 이내의 시간규모를 대상으로 생태수문시스템을 분석하기 위해 30분 간격의 자료를 사용하였다. 시계열자료로부터 24시간 이상의 주기들을 제거하기 위해 아노말리(anomaly) 방법을 사용하여 시계열자료를 필터링하는 선처리(pre-processing) 작업을 수행하였다. 아노말리 시계열은 대상 변수의 특정 시점이 포함된 날과 이전 4일을 포함한 총 5일의 이동 평균과 해당 시점의 값의 차이를 계산하여 생성하였다.

2.1.3. 확률 밀도 추정

상호 정보 (I)와 이전 엔트로피 (T)는 주변 확률 분포(marginal probability distributions)와 결합 확률 분포(joint probability distributions)로부터 계산한다. 실제 관측 자료로부터 정확하게 확률 밀도를 추정하기 위해, Ruddell and Kumar(2009)는 자료의 전체 범위를 고정된 간격으로 분할하여 자료의 분포를 파악하였다. 이 고정 간격의 웨(bin) 방법을 사용하면 연속적인 시계열자료를 쉽고 빠르게 확률 밀도 함수로 변환할 수 있는데, 자료의 수와 분포에 알맞은 웨의 수를 정하는 것이 중요하다. 예를 들어, 웨의 수를 너무 적게 정할 경우 정보량이 작아지게 되고, 웨의 수를 너무 많이 정할 경우 각각의 웨에 들어가는 자료의 수가 적어져 정확도가 떨어지게 된다. 고정 간격의 웨 방법을 사용할 때 자료수는 최소 500-1000개가 필요하며, 이때 웨의 수는 10-20개 정도가 적합하다. 따라서, 30분 단위의 관측 자료를 사용할 경우, 최소 21일의 자료가 필요하다. 본 연구에서 설정한 10개의 기간의 경우, 최소 1,056개(22일)에서 최대 1,536개(32일)의 자료를 사용하였다.

2.1.4. 상호 정보와 이전 엔트로피의 계산

확률밀도로 변환된 시계열 자료들로부터 상호 정보와 이전 엔트로피를 계산하기 위해, 불확실성의 척도를 나타내는 섀넌(Shannon) 엔트로피를 사용한다. 확률밀도함수 $p(x_i)$ 의 이산 시계열 X_i 의 섀넌 엔트로피는 다음과 같이 쓸 수 있다(Shannon, 1948).

$$H(X_i) = -\sum p(x_i) \log p(x_i) \quad (1)$$

만약 시계열 X_i 가 X_i 개의 m 이산 구역으로 배분될 수 있다면, $H(X_i)$ 는 $0 \leq H(X_i) \leq \log(m)$ 의 범위를 갖는다. 이제, 두 개의 시계열 X_i 와 Y_i 를 고려하면, 상호 정보는 다음과 같이 정의된다:

$$I(X_i, Y_i) = \sum_{x_i, y_i} p(x_i, y_i) \log \frac{p(x_i, y_i)}{p(x_i)p(y_i)} \quad (2)$$

식 (2)와 식 (1)을 사용하여 다음과 같이 쓸 수 있다(Schreiber, 2000).

$$I(X_i, Y_i) = H(X_i) + H(Y_i) - H(X_i, Y_i) \quad (3)$$

상호 정보는 $0 \leq I(X_i, Y_i) \leq \min[H(X_i), H(Y_i)]$ 의 범위에서 두 시계열이 대칭이기 때문에, 정보 흐름의 방향을 알 수가 없다. 또한, 한 시계열의 과거 정보가 다른 시계열의 현재 상태에 미치는 영향을 고려하지 못한다. Schreiber(2000)는 방향성과 과거 정보의 흐름을 포함할 수 있는 이전 엔트로피를 다음과 같이 정의하였다.

$$T(X_i > Y_i, \tau) = \sum_{y_i, y_{i-\Delta}, x_{i-\tau\Delta}} p(y_i, y_{i-\Delta}, x_{i-\tau\Delta}) \log \frac{p(y_i | y_{i-\Delta}, x_{i-\tau\Delta})}{p(y_i | y_{i-\Delta})} \quad (4)$$

여기서 τ 는 시간 지연(time lag)을 나타낸다. 이전 엔트로피, T 는 현재 정보 Y_i 가 시간 지연 τ 만큼 떨어진 과거 X_i 로부터 받는 정보량을 의미한다. 이때 Y_i 는 자신의 과거 X_i 로부터도 정보를 받으므로 직전 과거 $Y_{i-\Delta}$ 의 정보량을 고려한다. Ruddell and Kumar (2009)는 식 (4)를 Knuth *et al.*(2005)의 방법을 사용하여 성분 섀넌 엔트로피로부터 다음과 같이 계산하였다:

$$T(x_i > y_i, \tau) = H(X_{i-\tau\Delta}, Y_{i-\tau\Delta}) + H(X_i, Y_{i-\Delta}) - H(Y_{i-\Delta}) - H(X_{i-\tau\Delta}, Y_{i-\tau\Delta}) \quad (5)$$

2.1.5. 유의성 문턱값(Significance threshold)

수치화된 변수들 간의 정보 흐름이 의미가 있기 위해서는 그 값의 통계적 유의성이 확보되어야만 우연에 의한 연관성을 배제할 수 있다. 따라서, 각 변수 간의 정보 흐름에 대해 유의성 문턱값(significance threshold, Δ)을 정하고, 이 값을 넘지 않는 경우에는 무의미한 값으로 판단하였다. 문턱값을 정하기 위해서 아래와 같이 몬테 칼로(Monte Carlo) 시뮬레이션 방법을 사용하였다. 우선 각 변수의 시계열 자료를 시간에 대해 임의로 재배열하여 새로운 시계열 자료를 만들고, 시간적 연관성이 파괴된 새로운 시계열 자료들로부터 대리(surrogate) 이전 엔트로피를 계산하였다. 이렇게 반복적으로 임의로 재배열된 시계열 자료들로부터 계산된 대리 이전 엔트로피 결과가 그 횟수를 증가시킬수록 가우시안 분포에 접근하였다. 이 가우시안 분포에

편측검정(one-tailed hypothesis)을 적용하여 95%나 99% 신뢰도로 정해진 문턱값 이전 엔트로피의 값을 넘는 경우만을 유의성이 있는 것으로 판단하였다. 본 연구에서는 문턱값이 보다 안정화되게 하기 위해서 10,000번의 몬테 칼로 시뮬레이션을 수행하였다.

2.1.6. 동기화비(Synchronization ratio)

상호 정보와 이전 엔트로피를 동시에 고려하여 그 상대적인 역할을 비로 나타낸 동기화비(synchronization ratio, T_z)는 정보 흐름의 결합 형태를 결정하는데 사용된다(Ruddell and Kumar, 2009):

$$T_z(X_t > Y_t, \tau) = \frac{T(x_t > Y_t, \tau)}{I(x_t, Y_t)} \quad (6)$$

여기서 T_z 는 비대칭 구조로서, 상호간의 정보 흐름의 시간 지연과 강도를 나타낸다. 두 시계열 자료간의 동기화비(T_z)를 이용하여 두 시계열 자료의 정보 흐름의 상태를 정의할 수 있다. Ruddell and Kumar(2009)는 문턱값과 T_z 를 통해 결합 형태의 기준을 Table 1와 같이 제시하였다. 결합 형태는 총 4가지로 Type 1(동기화 지배적, synchroniation dominated), Type 2(되먹임 지배적, feedback dominated), Type 3(강제 지배적, Forcing dominated), Type 4(분리됨, decoupled)으로 분류된다. 4가지 타입의 결합 형태는 총 16가지 (4x4)가 있을 수 있으나, 대칭구조이기 때문에 이를 제외하면 총 10개의 결합 형태를 가진다. 그러나 상호 정보는 대칭적인 양이기 때문에 Types 1과 2의 경우에는 분리됨을 나타내는 Type 4와는 논리적으로 결합할 수 없다. 따라서 이 두 경우를 제외하고 나면, 총 8가지의 정규 결합(canonical coupling)을 예상할 수 있다. 광릉 활엽수림의 경우, Type 4-4의 결합을 제외한 나머지 7가지의 정규 결합이 확인되었다.

2.1.7. 네트워크 행렬(Network matrix)

과정망을 그리기 위해 필요한 변수들 간의 상관관계,

정보 흐름의 크기와 방향, 결합 형태, 되먹임 고리 및 시간 지연의 규모 등을 계산하여 네 가지 형태의 네트워크 행렬로 나타낸다. 첫번째 행렬은 상호 정보의 행렬로서, 각 변수간의 상관관계를 나타낸다. 두번째 행렬은 상대 상호 정보의 행렬로서, 변수 자체와의 상호 정보량을 기준으로 다른 변수와의 상호 정보량의 크기를 상대적으로 나타낸 행렬이다. 이를 통해 한 변수의 불확실성이 다른 변수의 정보에 의해 얼마나 감소되는지를 살펴 볼 수 있다. 세번째 행렬은 상호 정보와 이전 엔트로피를 이용한 동기화비의 행렬(AT_z)을 나타낸다. 몬테 칼로 시뮬레이션으로부터 구해진 문턱값과 T_z 를 이용하여 다음과 같이 계산한다.

$$AT_z(i, j) = \begin{cases} T_z(X_t^{(i)} > X_t^{(j)}, \tau) & \text{if } T > \Delta T \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (7)$$

네번째 행렬은 중요한 정보 흐름의 시간 규모를 나타낸다. 이 행렬에 주어진 값들의 상대적 크기를 고려하여 같은 결합 형태(i.e., Type 1 또는 2)를 보이면서 동시에 비슷한 규모의 시간 지연을 갖는 변수들을 서로 묶어서 하나의 하부계로 분류하게 된다.

Table 2a-d는 19개 기간 중에서 5번째 기간인 몬순 초기 기간에 대한 실제 행렬의 예이다. Table 2a는 상호 정보를 나타내는 첫 번째 네트워크 행렬로서 대칭 구조를 이룬다. 이를 바탕으로 계산된 상대적인 상호 정보를 보여주는 Table 2b의 행렬은 변수들간의 동기화 정도를 나타내며, 이를 통해 어떤 변수들이 서로 동기화 형태로 연결되어 하나의 하부계를 형성하는지를 알 수 있다. Ruddell and Kumar(2009)는 Table 2b에서 동기화를 판단하는 첫 번째 기준값으로 ‘10’을 제시하였다. 이 기준을 만족하는 변수들의 쌍(pair)들 중에서, Table 2c에서 문턱값을 넘지 못하는 변수들의 쌍들이 최종적으로 동기화 지배적인 Type 1로 구분된다. Table 2c는 상호 정보와 이전 엔트로피의 비를 나타내는 동기화비를 보여주며, 그 값이 1이상인 경우는 되먹임 지배적인 Type 2로 구분되며, 1

Table 1. Logical criterion for coupling type classification T, I, Δ(T), Δ(I) indicate transfer entropy, mutual information and their significance threshold, respectively (Ruddell and Kumar, 2009)

	T>Δ(T)	I>Δ(I)	T>I	Description
Type 1, Synchronization dominated	F	T	F	Significant shared information, no significant information flow
Type 2, Feedback dominated	T	T	F	Significant shared information greater than significant information flow
Type 3, Forcing dominated	T	-	T	Significant information flow greater than significant shared information
Type 4, decoupled	F	F	-	No significant information flow or shared information; decoupled

Table 2a. Mutual information of fifth period in Gwangneung deciduous forest. Source variable index X is in rows; sink variable index Y is in columns. Description of variable symbols are shown in chapter 2.1.1

AI	GPP	H	LE	R _g	Precip	RE	P _a	T _a	VPD
GPP	58.8	8.8	8.5	11.6	1.7	x	4.5	x	4.2
H		60.3	7.4	20.5	x	4.1	7.6	3.8	6.6
LE			63.9	16	1.2	4.7	5.3	3	8.6
R _g				56.6	x	5.8	7.4	3.8	10.9
Precip					17	2	3.1	1.5	2.1
RE						85.2	12.9	41.3	16.1
P _a							90.5	12.3	14.3
T _a								85.9	9.9
VPD									83.7

Table 2b. Relative mutual information of fifth period in Gwangneung deciduous forest. The percentage of uncertainty of each sink explained by source. Source variable index X is in rows; sink variable index Y is in columns

AIR	GPP	H	LE	R _g	Precip	RE	P _a	T _a	VPD
GPP	100	14.6	13.3	20.5	9.9	x	4.9	x	5
H	14.9	100	11.7	36.3	x	4.8	8.4	4.4	7.9
LE	14.4	12.3	100	28.2	7.2	5.5	5.9	3.5	10.3
R _g	19.8	34.1	25	100	x	6.8	8.2	4.4	13
Precip	2.9	x	1.9	x	100	2.4	3.4	1.8	2.5
RE	x	6.8	7.4	10.2	11.9	100	14.2	48.1	19.2
P _a	7.6	12.6	8.4	13.1	18.2	15.1	100	14.3	17.1
T _a	x	6.2	4.8	6.7	9	48.5	13.6	100	11.8
VPD	7.1	11	13.5	19.2	12.5	18.8	15.8	11.5	100

Table 2c. The ratio of the maximum lag T to mutual information for all significant couplings of fifth period in Gwangneung deciduous forest. Source variable index X is in rows; sink variable index Y is in columns

Tz	GPP	H	LE	R _g	Precip	RE	P _a	T _a	VPD
GPP	0.16	0.76	1.22	0.6	1.43	x	x	x	x
H	0.97	0.13	1.27	0.33	2.21	x	x	x	x
LE	1.19	1.14	0.16	0.46	1.58	x	x	x	x
R _g	0.83	0.36	0.72	x	2.83	x	x	x	x
Precip	1.77	2.7	2.49	3.12	0.11	x	x	x	x
RE	3.77	x	x	x	1.18	x	x	x	x
P _a	2.34	x	x	x	0.99	x	x	x	x
T _a	4.24	x	x	x	1.45	x	x	x	x
VPD	2.31	x	x	x	1.12	x	x	x	x

Table 2d. The time lags of significant information flow in the interval. Significant lags times are [first-last, (number), max] of fifth period in Gwangneung deciduous forest. Source variable index X is in rows; sink variable index Y is in columns

Timelag	GPP	H	LE	R _g	Precip	RE	P _a	T _a	VPD
GPP	1-17(16),1	1-2.5(4),2	0.5-4.5(9),0.5	0.5-2(4),1.5	10-18(12),14.5	x	x	x	x
H	0.5-5.5(11),1	1-3.5(5),1.5	0.5-5(10),0.5	1.5-1.5(1),1.5	4-17.5(17),10.5	x	x	x	x
LE	0.5-18(11),0.5	0.5-2.5(5),0.5	1-3.5(6),1	1-1(1),1	8.5-16.5(16),8.5	x	x	x	x
R _g	0.5-5.5(11),1	1-2.5(4),1	0.5-4(8),0.5	x	7-16.5(20),12.5	x	x	x	x
Precip	7-15(10),13	6.5-11.5(5),11.5	10.5-14(4),14	9-14(5),9	1-17.5(10),2.5	x	x	x	x
RE	2.5-18(10),2.5	x	x	x	3.5-17(16),7	x	x	x	x
P _a	0.5-18(27),12	x	x	x	0.5-18(36),4	x	x	x	x
T _a	3.5-17(10),12.5	x	x	x	0.5-18(13),7.5	x	x	x	x
VPD	0.5-18(12),18	x	x	x	0.5-13(21),8	x	x	x	x

미만인 경우에는 강제 지배적인 Type 3으로 구분된다. 그 값이 문턱값을 넘지 못할 경우에는 Type 4로서, 분리됨으로 구분된다(Table 1 참조). Table 2d는 하루 이내(정확히 말하면, 30분에서 18시간까지)의 범위 내에서 유의성있는 정보 흐름의 시간 지연을 보여주며, 각각 최초의 유의미한 시간 지연, 마지막 유의미한 시간 지연, 팔호 안의 숫자는 유의미한 시간 지연의 총 개수, 그리고 이전 엔트로피가 최대일 때의 시간 지연을 나타낸다.

2.1.8. 과정망 그리기

앞서 구해진 네트워크 행렬에 제공된 정보를 바탕으로, (1) 하부계의 유무를 확인하고, (2) 확인된 각 하부계 단위로 구성 변수들을 그룹으로 모은 후, (3) 결합 형태를 구분하여 링크를 표시하되, 먼저 그룹 내의 구성 변수들을 연결하고, (4) 그룹과 다른 그룹, 또는 다른 그룹 내의 변수들, 또는 그룹에 속하지 않은 변수들과의 링크를 표시하고, (5) 되먹임 고리로 연결되어 서로 합쳐질 수 있는 하부계들을 찾아서 다시 하나의 그룹으로 묶은 후, (6) 모든 링크에 시간 규모를 표시하고, 마지막으로 (7) 각 하부계의 구성 변수들의 특성, 결합 형태, 시간 지연의 규모 등을 고려하여 각 하부계를 대표하는 명칭을 부여함으로써, 과정망 그리기를 완성하게 된다.

첫 번째 단계인 하부계의 유무 확인이란, 먼저 결합 형태와 시간 지연의 규모가 같거나 유사한 변수들을 하나의 그룹으로 묶음으로써 생태수문계를 구성하고 있는 하부계들의 존재를 확인하는 과정을 말한다. 여기서, 하부계란 시스템 속의 시스템들을 말하는 것으로, 서로 연결된 요소(또는 변수)들이 상호작용을 통해 일관되게 조직화되어 무언가를 성취해내는 집합체를 의미한다(Meadows, 2008; Ruddell and Kumar, 2009). 하부계는, 정보 흐름의 결합 형태에 따라, Type 1 또는 Type 2로 연결되는 두 가지 종류를 생각할 수 있다. 이때 정보 흐름의 시간 지연의 규모도 크게 다르지 않아야 한다. 하부계들 사이에 Type 2 또는 3의 정보 흐름이 양방향으로 존재하여 되먹임 고리를 형성하는 하는 경우, 두 하부시스템은 합쳐진 하나의 하부계로 볼 수 있다. 이렇게 그려지는 과정망을 다양한 환경조건에서 분석함으로써, 어떠한 변수들이 서로 연결되어 하부계를 구성하며, 어떠한 하부계들이 생태수문계를 구성하며, 하부계들이 어떻게 서로 정보 흐름을 통해 되먹임 고리를 생성하며, 이러한 자기조직화 과정을 통해 생태수문계의 상태가 어떻게 역동적으로

변화하는지를 이해할 수 있을 것이다. 단계적인 과정망 그리기의 실제 예는 결과 및 고찰에 제시하였다.

2.2. 관측지 및 자료 처리

본 연구에서는 경기도 포천시 소흘읍에 위치한 광릉 국립수목원내의 활엽수림 타워 관측지(GDK, 37°45'25.37"N, 127°09'11.62"E, 340 m.s.l.)에서 2008년 1월 1일부터 12월 31일까지 1년간 관측된 에디 공분산 플럭스 및 미기상 자료를 사용하였다. 해당 활엽수림은 복잡 지형에 위치한 다양한 식생이 혼재되어 있는 자연림으로 주 식생은 졸참나무(*Quercus serrata*)와 서어나무(*Carpinus laxiflora*)이고, 평균군락 높이는 약 18m, 최대 식생면적지수(plant area index, PAI)는 여름에 평균 5.5정도이다. 광릉 소유역의 평년 기온은 9.9°C이며, 연평균 강수량은 1,370mm이다(Kwon *et al.*, 2009).

플럭스 타워의 지상 40m 높이에 위치한 에디 공분산 시스템은 3차원 초음파 풍향-풍속-온도계(Model CSAT3, Campbell Scientific Inc., USA)와 개회로 적외선 기체 분석기(Model LI-7500, LI-COR Biosciences Inc., USA)로 구성되어 있다. 에디 공분산 시스템의 샘플링 속도는 10Hz, 플럭스 평균시간은 30분이며, 10Hz 관측 및 30분 평균 자료는 자료 집록기(Model CR5000, Campbell Scientific Inc., USA)에 저장하였다. 야간 *NEE* 자료의 보정과 잠열 및 현열 플럭스의 빈 자료 메우기를 제외한 나머지 자료 처리 방법은 KoFlux 표준화 방법에 따라 처리하였다(Hong *et al.*, 2009). 연구 기간 전체의 품질 관리 후 플럭스 자료 수득률은 이산화탄소 플럭스가 74%, 잠열 플럭스가 75%, 현열 플럭스가 89%였다. 처리된 *NEE* 자료는 수정된 반 고셀 방법(modified van Gorsel method)과 마찰속도 방법(u^* correction)를 사용하여 야간 자료를 보정하고 *GPP*와 *RE*로 나누었으며(Kang *et al.*, 2014), 본 연구에서는 두 방법에서 나온 결과의 평균을 사용하였다. 잠열 및 현열 플럭스는 군락에 의해 차단된 강수량의 재증발을 고려한 모형-통계 혼성 방법(Model-Stats hybrid method)을 사용하여 빈 자료를 메웠다(Kang *et al.* 2014).

III. 결과 및 고찰

3.1. 생태수문계의 과정망

Fig. 2는 2.1.8에서 제안한 과정망 그리기의 일곱

단계를 따라서 도출된 실제 과정망의 결과이다. 각 단계별로 Table 2a-d에 제시된 네트워크 행렬의 정보를 사용하여 6-7월 장마 기간 중의 생태수문계의 과정망 도출과정과 결과를 아래에 단계적으로 제시하였다.

3.1.1. 하부계의 유무 확인

먼저 동기화(Type 1)로 연결되는 제 1 하부계의 유무를 확인하기 위해 Table 2a에서 문턱값을 넘는 변수들의 쌍을 선택한다. 고려 대상 변수가 9개이므로 총 81개의 쌍이 주어진다. 그 중에서 대각선 상에 있는 자신과의 쌍 9개를 제외한 72개의 쌍에서, 대칭이기 때문에 그 반 쪽인 36쌍을 대상으로 문턱값을 넘는 변수들의 쌍을 선택한다. 총 32 쌍이 이에 해당되고, Table 2b에서 기준값 ‘10’을 넘는 조건을 적용하고 나면 12쌍이 남게 된다. 이제 남은 12쌍중에서, Table 2c에서 문턱값을 넘지 못하는 쌍들, 즉 x로 표시된 쌍들만을 선별하여 함께 묶으면 T_a , P_a , VPD ,

그리고 RE 가 제 1 하부계를 구성함을 알 수 있다.

또다른 결합 형태인 되먹임 지배적(Type 2)으로 연결되는 제 2하부계를 확인하기 위해서는, 먼저 Table 2c에서 문턱값을 넘어가는 변수들의 쌍들을 선택한다. 선택된 총 28쌍 중에서 값이 1 미만일때의 변수들만을 선택하면, 총 4쌍이 이에 해당됨을 알 수 있다. 이 중에서 GPP , H 그리고 R_g 가 한 하부계(2a)를 구성하고, LE 와 R_g 가 또 하나의 하부계(2b)를 이루고 있음을 알 수 있다.

3.1.2. 하부계 구성 변수들의 그룹핑

앞서 확인된 각 하부계 단위로 구성 변수들을 그룹으로 모아서 그림에 나타낸다. Fig. 2에서 X축은 시간 규모를, Y축은 공간 규모를 나타내며 모두 로그 스케일로 주어져있다. 변수와 그룹들은 시간과 공간 규모를 고려하여 그래프 상에서의 위치를 정한다. T_a , P_a , VPD , 그리고 RE 로 구성되는 제 1 하부계는 구성 변수들의 시간규모를 고려하여 Fig. 2의 오른쪽 위

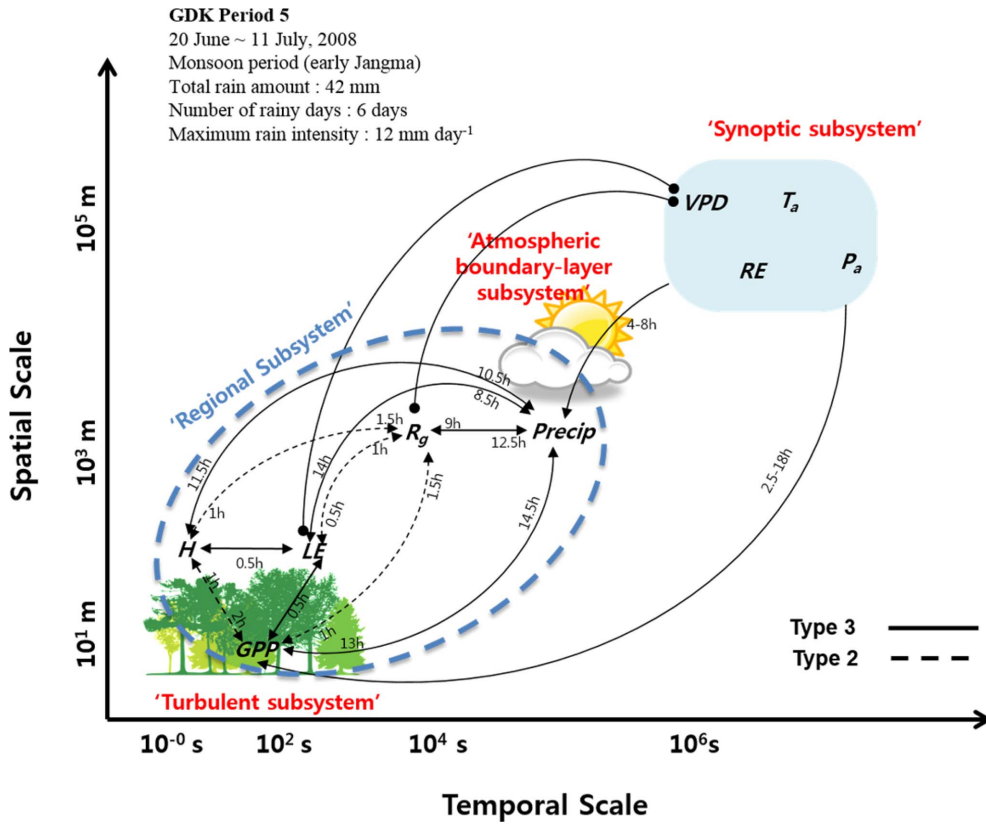


Fig. 2. The process network for period 5, monsoon (early Jangma) in 2008 in GDK. Dots represent type 1 coupling, dotted lines type 2 couplings, and solid lines type 3 couplings.

에 나타낸다. *GPP*, *H*, *LE*, 그리고 R_g 로 구성되는 제 2a 및 2b 하부계는 그 시간규모(0.5-2h)를 고려하여 Fig. 2의 왼쪽 아래에 표기한다. 여기서 R_g 의 경우, *Precip*과의 링크 및 긴 시간 규모(9-12.5h)를 고려하여 Fig. 2의 중심부 쪽에 표기를 한다.

3.1.3. 하부계 내의 구성 변수간 링크 표시

먼저, 확인된 제 1, 2a 및 2b 하부계 내의 각 구성 변수들간의 결합 형태를 구분하여 링크를 표시한다. 제 1 하부계는 정보의 흐름이 관측 자료의 샘플링 간격인 30분보다 짧은 시간 규모 내에서 발생하여 그 방향을 알 수 없으므로 구체적인 링크 표시 없이 그 래프 상에서 원 안에 모여있는 모습으로 표현하였다. 반면에, 제 2a 및 2b 하부계는 *GPP*, *H*, R_g 그리고 *LE*와 R_g 간의 Type 2의 정보 흐름을 점선으로 이루어진 화살표로 나타내었고, 양 방향으로 표현하여 되먹임 과정을 나타내었다.

3.1.4. 하부계 간 링크 및 기타 링크 표시

이제 제 1 하부계와 제 2a 및 2b 하부계 간의 링크를 표시하고, 두 하부계에 속하지 않는 변수들과의 모든 링크를 표시한다. 정보 흐름의 연결 형태와 방향은 앞서 표시한 방법을 따랐다. 먼저, 제 1 하부계에서 *GPP*로의 Type 3 정보 흐름을 실선으로 표시하였고, 제 1 하부계의 *VPD*가 각각 제 2 하부계의 *LE*와 R_g 와 Type 1으로 링크되어 있음을 실선으로 연결하되 양 끝을 점으로 표시하였다. 또한 *H*와 *LE*, 그리고 *GPP*와 *LE*가 각각 쌍방향으로 Type 3의 정보교환이 있음을 표시하였다. 세 하부계 간 링크가 모두 표시되었으므로, 다음 단계인 기타 링크를 표시한다. 제 1 하부계에서 아무 곳에도 속하지 않은 *Precip*으로의 Type 3 정보 흐름을 표시하였고, 제 2 하부계의 *H*, *LE* 및 *GPP*가 각각 *Precip*과 쌍방향으로 Type 3의 정보교환이 있음을 표시하였다. 마지막으로, 제 2 하부계의 R_g 가 *Precip*과 쌍방향으로 Type 3의 정보교환이 있음을 표시함으로써 모든 링크 표시를 마무리 하였다 (Fig. 2).

3.1.5. 되먹임 고리로 연결되는 하부계들의 그룹핑

이제는 세 하부계와 *Precip*간에 Type 2 나 3의 형태로 되먹임 고리를 형성함으로써 또 다른 제 3의 하부계를 구성하고 있는지를 확인해야 한다. 일반적으

로 Type 3의 정보 흐름은 두 변수가 같은 하부계에 속해있지 않다는 것을 의미한다. 그러나 Type 3의 정보 흐름이 변수나 하부계 간에 되먹임 고리를 형성하는 경우 서로 링크되어 또 하나의 하부계를 조직하는 것으로 볼 수 있다(Ruddell and Kumar, 2009). Fig. 2에서 제 1 하부계는 그러한 되먹임 고리를 형성하지 않지만, 제 2a 및 2b 하부계와 *Precip*이 Type 3의 되먹임 고리를 형성하고 있음을 볼 수 있다. 두 하부계가 합쳐진 제 3 하부계를 굵은 점선으로 그룹핑하여 나타내었다.

3.1.6. 각 링크에 시간 지연 표시

이제 모든 링크에 Table 2d에 주어진 시간 지연 정보를 표시한다. 변수간의 링크인 경우, 이산 엔트로피가 최대일 때의 시간 지연을 입력한다. 되먹임 고리를 형성할 때는 정보 흐름의 방향의 화살표 부근에 시간 지연을 표기한다. 만약 시간 지연이 동일할 경우 선 가운데 표기를 한다. 하부계와 하부계 또는 하부계와 변수와의 링크의 경우, 하부계에 속한 변수들의 시간 지연의 최소값과 최대값을 표기한다. 예를 들어서, 제 1 하부계에서 *GPP*로 가는 정보 흐름의 시간 지연은 최소 2.5시간에서 최대 18시간으로 '2.5-18h'로 표시하였다.

3.1.7. 하부계의 명칭 부여

각 하부계의 구성 변수들의 특성, 결합 형태, 시간 지연의 규모 등을 고려하여 각 하부계를 대표하는 명칭을 부여한다. 먼저 제 1 하부계의 경우, Ruddell and Kumar(2009)는 종관기상 변수들로 구성된 이 그룹을 '종관 하부계(synoptic subsystem)'로 명명하였는데, 본 연구에서도 같은 명칭을 사용하는 것이 적절하다. 여기서 주목해야 할 점은, *RE*는 생태계호흡을 나타내는 생물학적 변수로서 종관기상과는 관련이 없어 보이나, 직접 관측된 값이 아니라 실측에 기반을 둔 기온의 지수함수로 계산된 값이라는 점이다. 그 결과, 온도자료와 동기화되어 종관 하부계에 속하게 된 다소 인위적인 효과가 포함된 결과로 해석된다.

제 2 하부계의 경우는 Ruddell and Kumar(2009)의 옥수수-콩밭 생태수문시스템의 과정망 결과를 살펴 볼 필요가 있다. 이 경우, Type 2로 연결된 광합성 및 에너지 수지 관련 변수들의 그룹(예, *GPP*, *H*, *LE*)을 '난류 하부계(turbulent subsystem)'로 명명하였다. 또

한, Type 2와 Type 3이 혼재되어 결합된 R_g , $Precip$, 그리고 운량 등의 복사-구름-강수관련 과정의 변수들의 하부계를 '대기경계층 하부계(atmospheric boundary layer subsystem, ABLs)'로 명명하였다. Ruddell and Kumar(2009)는 30분 단위의 타워 자료가 가지는 공간 규모의 한계를 고려하여, ABLs가 Type 3으로 결합됨에도 불구하고 기본 하부계로 분류하였다. 위성자료와 같은 공간규모의 자료를 사용하면 Type 2로 결합된 명확한 ABLs가 나올 수도 있을 것이다. Fig. 2에 나타난 산림 생태수문계의 과정망에는 대기경계층 하부계가 뚜렷하게 나타나지 않고, 이에 속하는 R_g 가 난류 하부계를 구성하고 있음을 알 수 있다. 본 연구에서는 이 제 2a 하부계인 $GPP-H-R_g$ 는 '생물리화학적 하부계(biophysicochemical subsystem)'라 하고, 제 2b 하부계인 $LE-R_g$ 는 '생물리 하부계(biophysical subsystem)'로 명명한다.

마지막으로, 제 3 하부계와 관련하여, Ruddell and Kumar(2009)는 난류 하부계와 대기경계층 하부계가 되먹임 고리로 결합되어 형성된 하부계를 지역 하부계(Regional subsystem)라 명명하였다. 본 연구의 제 3 하부계의 구성 변수들이 Ruddell and Kumar(2009)의 지역 하부계의 구성 변수와 거의 동일하기 때문에, 제 3 하부계는 지역 하부계로 명명하는 것이 적절하다.

3.2. 과정망의 함축적 의미

그렇다면, 과연 이러한 과정망의 자기-조직화 과정을 주도하는 메커니즘은 무엇일까? 왜 그리고 언제 생태수문계는 되먹임의 고리를 형성하여 자기-조직화된 과정과 구조를 만들어 내는 것일까? 네트워크의 조직화에 계절변화와 같은 특정한 패턴이 나타나는가? 어떠한 노드(변수)들이 정보의 발원 또는 흡원으로 작용하는 것일까? 본 연구에서 고려하지 않은 생태수문계에 관여하는 추가적인 생태학적 또는 사회학적 주요 변수는 무엇일까? 변수가 추가되었을 경우 과정망은 어떻게 달라질까? 이렇게 다양한 과정망의 변화 속에서 GDK의 생태수문계는 과연 어떤 상태에 있다고 말할 수 있을까? 새로운 시각의 과정망 방법론은 통찰력과 해답을 제시하기도 하지만, 오히려 더 많은 질문을 자아내게 한다.

Table 3은 위의 질문들과 관련하여 다양한 사고 실험과 추가적인 분석을 할 수 있도록 하기 위해, 2008년 한 해 동안 다양한 식물계절학적, 수문학적 환경에

서 GDK의 생태수문계가 어떻게 하부계를 이루고 있고, 또 자기-조직화를 통해 하부계들의 집합체를 형성 또는 분리하는지를 10개의 사례 기간을 통해 요약한 것이다. Period 1은 개엽시기 이전의 비생장 기간으로 상대적으로 다양한 하부계와 하부계의 집합체가 형성되어 보이나, 물질과 에너지의 흐름이 적어서 정보 흐름도 크지 않을 것으로 분석된다. Period 2는 생장기간 초기인 개엽 직후의 23일 동안의 기간으로서, 유일하게 대기경계층(ABL) 하부계가 간접적으로 나타나는 기간이다. Periods 3과 4는 몬순 이전의 기간으로서, 두 기간이 일부 중첩되어 있는데, 생장기간 중 연면적 지수가 빠르게 최대에 도달하는 시기이다. 비슷한 생장기간에 생태수문계의 상태가 강수 특성에 따라 어떻게 달라지는지를 살펴 보기 위해서, 집중 강수의 양과 시기와 빈도를 고려하여 기간을 다소 다르게 설정하였는데 기본 하부계가 잘 조직화되지 않는 것으로 보인다. Periods 5, 6, 그리고 7은 몬순 초기, 말기, 및 후기의 기간으로서 장마가 하부계의 자기-조직화에 어떻게 영향을 주는지를 살펴보고자 중첩되지 않게 나는 세 개의 기간들로서 하부계와 하부계의 집합체가 가장 다양하게 나타나는 것을 볼 수 있다. Periods 8과 9는 각각 단풍이 들고, 낙엽이 지는 기간들이다. 기본 하부계가 줄어들면서 하부계의 집합체로 나타나는 것을 볼 수 있다. Period 10은 낙엽이 모두 진 뒤의 평균 기온이 0°C인 비생장 기간으로서 하부계의 집합체가 서로 분리되어 나타나고 있다. Table 3에 요약된 10 기간에 대한 네트워크 행렬과 과정망 그림에 대한 자료는 국가농림기상센터의 홈페이지를 통해 받아 볼 수 있다(<http://www.ncam.kr/page/koflux/database/>).

적 요

본 총설에서는 산림생태계의 생태수문시스템을 복잡계의 관점에서 바라 보았을 때, (1) 생태수문계의 구성 요소들이 상호작용을 통해 망을 형성하고 집단적인 반응을 하며, (2) 복잡정교한 정보 처리를 수행하고, (3) 자기-조직화 과정을 통해 적응해 가는 복잡계의 특징들을 볼 수 있을 것이라고 가정하였다. 제시된 과정망 그리기의 결과는 생태수문계에 관여하는 다양한 시공간 규모의 과정들이 실제로 관련 변수들 간의 되먹임과 정보 흐름의 망을 형성하고 있음을 명확히 보여준다. 또한 구성 변수들이 독특한 형태(즉, 차별화된

결합 형태, 방향성 및 시간 지연 규모)로 정보를 교환함으로써, 망 안에 또 다른 망을 형성하며 일관되게 조직화되어 특정한 하부계들을 구성하는 계층적(hierarchical) 구조를 잘 나타낸다. 이러한 하부계들이 종관 하부계(SS), 대기경계층 하부계(ABLS), 생물리 하부계(BPS), 생물리화학 하부계(BPCS) 등으로 다양하게 나타남을 보여준다. 주목할 점은, 이러한 하부계들이 서로 되먹임 고리들을 맺거나 끊음으로써 지역 하부계(RS)와 같은 새로운 하부계의 집합체를 생성하거나, 또는 분리시킨다는 것이다. 이러한 과정은 바로 복잡계의 특성인 자기-조직화 과정의 증거로서, 생태계가 계층적으로 조직화되어 성장하고 발전하면서, 자연적/인위적 교란 속에서도 자기-조직화를 통해 동적 평형을 유지하며, 환경 변화에 적응하고 진화해 나감을 함축적으로 의미한다. 생태계의 건전성은 시스템의 자기-조직화 과정들이 유지될 때에 비로소 보존되는 것이기에 때문에, 이러한 관점에서 과정망 연구방법은 의미있고 이치에 닿는다.

감사의 글

이 연구는 기상청 기후변화 감시/예측 및 국가정책 지원강화사업(CATER 2013-3030)과 산림청 온대북부 산림의 시계열 특성분석 및 기후변화 적응관리 기법연구(S111214L020100)의 지원을 받아 수행되었습니다.

REFERENCES

- Baldocchi, D., E. Falge, L. Gu, R. Olson, D. Hollinger, S. Running, P. Anthoni, C. Bernhofer, K. Davis, R. Evans, J. Fuentes, A. Goldstein, G. Katul, B. Law, X. Lee, Y. Malhi, T. Meyers, W. Munger, W. Oechel, K. T. Paw, K. Pilegaard, H. P. Schmid, R. Valentini, S. Verma, T. Vesala, K. Wilson, and S. Wofsy, 2001: FLUXNET: A new tool to study the temporal and spatial variability of ecosystem-scale carbon dioxide, water vapor, and energy flux densities. *Bulletin of the American Meteorological Society* **82**, 2415-2434. doi:10.1175/1520-0477(2001)082<2415:FANTTS>2.3.CO;2
- Barabasi, A. L., 2002: *Linked: How everything is connected to everything else and what it means*. Plume Editors.
- Hong, J., H. Kwon, J. Lim, Y. Byun, J. Lee and J. Kim, 2009: Standardization of KoFlux eddy-covariance data processing, *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **11**(1), 19-26. (in Korean with English abstract)
- Jorgensen, S. E., B. D. Fath, S. Bastianoni, J. C. Marques, F. Muller, S. N. Nielsen, B. C. Patten, E. Tiezzi, and R. E. Ulanowicz, 2007: *A New Ecology: Systems Perspective*, Elsevier, Amsterdam
- Kang, M., J. Kim, J. H. Chun, and Y. H. Kim, 2014: Improvement and expansion of standardized KoFlux eddy covariance data processing. in preparation.
- Knuth, K. H., 2005: Lattice duality: The origin of probability and entropy. *Neurocomputing* **67**, 245-274. doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.neucom.2004.11.039
- Kumar, P., 2007: Variability, feedback, and cooperative process dynamics: Elements of a unifying hydrologic theory. *Geography Compass* **1**, 1338-1360. doi:10.1111/j.1749-8198.2007.00068.x
- Meadows, D. H., 2008. *Thinking in systems: A primer*. Chelsea Green Publishing
- Ruddell, B. L., N. A. Brunsell, and P. Stoy, 2013: Applying information theory in the Geosciences to quantify process uncertainty, feedback, scale. *Eos, Transactions American Geophysical Union* **94**, 56-56. doi:10.1002/2013EO050007
- Ruddell, B. L., and P. Kumar, 2009. Ecohydrologic process networks: 1. Identification. *Water Resources Research* **45**, W03419. doi:10.1029/2008WR007279
- Schreiber, T., 2000: Measuring information transfer. *Physical Review Letters* **85**, 461-464. doi:10.1103/PhysRevLett.85.461
- Shannon, C. E., 1948: A Mathematical Theory of Communication. *Bell System Technical Journal* **27**, 379-423. doi: 10.1002/j.1538-7305.1948.tb01338.x
- Yun, J., M. Kang, S. Kim, J. H. Chun, C. H. Cho, and J. Kim, 2014. How is the process network organized and when does it show emergent properties in a forest ecosystem?. *Emergence, Complexity and Computation*. Springer, Heidelberg, pp. 307-317. doi:10.1007/978-3-642-45438-7_31